



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**



**Αναλυτική μοντελοποίηση παραβολικού  
συγκεντρωτικού συλλέκτη για εφαρμογές παραγωγής  
ηλεκτρικής ενέργειας**

**Σφοντούρη Αθηνά**

Εξεταστική επιτροπή:

Καθ. Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (επιβλέπων)

Καθ. Σταυρακάκης Γεώργιος

Αναπλ. Καθ. Μπάλας Κωνσταντίνος

Χανιά 2010

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο για τη σημαντική συμβολή του στην επιστημονική μου κατάρτιση διδάσκοντάς με όχι μόνον ένα θησαυρό γνώσεων αλλά και το πώς να τις χρησιμοποιώ προς όφελος της κοινωνίας και του πλανήτη μας, καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα διπλωματική εργασία. Όπως επίσης τον Καθηγητή κ. Σταυρακάκη Γεώργιο και Αν.Καθηγητή κ. Μπάλα Κωνσταντίνο για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και τον χρόνο που αφιέρωσαν. Ιδιαίτερως ευχαριστώ τον μεταπτυχιακό φοιτητή κ. Μπακιρτζόγλου Βάιο για την πολύτιμη επιστημονική βιοήθεια που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την μητέρα μου που με στηρίζει υπομονετικά όλα αυτά τα χρόνια, δίνοντάς μου απλόχερα αγάπη και συμπαράσταση.

Αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία στον πατέρα μου, καθηγητή κ. Σφοντούρη Δημήτριο, ο οποίος έθεσε τα θεμέλια για την απόκτηση ενός τέτοιου πτυχίου αλλά δεν βρίσκεται πλέον στη ζωή. Ελπίζω να φανώ αντάξια των προσδοκιών του..

## Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>6</b>
<b>2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....</b>	<b>8</b>
2.1 Εισαγωγή .....	8
2.2 Ορισμοί .....	9
2.2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλιακής ακτινοβολίας .....	9
2.2.2 Φασματική κατανομή απευθείας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια .....	10
2.2.3 Σύσταση της προσπίπουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια.....	13
2.2.4 Γωνίες προσδιορισμού της θέσης μιας επιφάνειας σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία.....	14
2.3 Προσπίπουσα απευθείας ακτινοβολία σε οριζόντιο και σε κεκλιμένο επίπεδο	15
<b>3. ΗΛΙΑΚΟΙ ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ.....</b>	<b>19</b>
3.1 Εισαγωγή .....	19
3.2 Επίπεδοι συλλέκτες (Flat-plate collectors).....	19
3.3 Συλλέκτες χαμηλής συγκέντρωσης (Compound parabolic concentrators CPCs).....	20
3.4 Παραβολικοί συλλέκτες (Parabolic trough concentrators PTCs) .....	21
3.5 Επιλογή καταλληλότερου είδους συλλέκτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας .....	22
<b>4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ....</b>	<b>24</b>
4.1 Εισαγωγή .....	24
4.2 Συνεχής περιστροφή γύρω από οριζόντιο άξονα ανατολής - δύσης .....	24
4.3 Συνεχής περιστροφή γύρω από οριζόντιο άξονα βορρά - νότου.....	24
4.4 Συνεχής περιστροφή γύρω από άξονα βορρά - νότου παράλληλο με τον άξονα της γης .....	24
4.5 Θεωρητική σύγκριση των παραπάνω συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου .....	25
<b>5. ΟΠΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ.....</b>	<b>26</b>
5.1 Εισαγωγή .....	26
5.2 Ανακλαστικότητα.....	26
5.3 Απορροφητικότητα .....	27
5.4 Εκπομπή .....	28
5.5 Μετάδοση .....	31
5.6 Συντελεστής παρεμπόδισης ακτινών .....	33
5.7 Μετατροπέας γωνίας πρόσπτωσης.....	34
5.8 Συντελεστής συγκέντρωσης .....	34





## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας, είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες (όπως ο ήλιος και ο άνεμος). Ο όρος ‘ήπιες’ αναφέρεται σε δύο βασικά χαρακτηριστικά τους. Πρώτον, γίνεται εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση και δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση (όπως καύση και εξόρυξη), όπως απαιτείται για τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Δεύτερον, πρόκειται για μορφές ενέργειας πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, οι οποίες δεν αποδεσμεύουν τοξικά ή ραδιενεργά απόβλητα, υδρογονάνθρακες ή διοξείδιο του άνθρακα. Οι βασιζόμενες στην ηλιακή ακτινοβολία ήπιες μορφές ενέργειας είναι ανανεώσιμες, διότι δεν πρόκειται να εξαντληθούν όσο υπάρχει ο ήλιος, δηλαδή για μερικά δισεκατομμύρια χρόνια ακόμη. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (όπως ηλιακοί θερμοσίφωνες), ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, από το Ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Τη δεκαετία του '80, αναπτύχθηκαν τα συστήματα παραβολικών συλλεκτών, τα οποία εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία για παραγωγή θερμότητας και στη συνέχεια ηλεκτρικής ενέργειας, και μέχρι σήμερα εξελίσσονται τεχνολογικά οδηγώντας στην αύξηση της αποδοτικότητάς τους. Εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία ως εξής: η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο παραβολικό κάτοπτρο (parabolic reflector) και ανακλάται προς τον αποδέκτη (receiver), ο οποίος είναι τοποθετημένος στο σημείο εστίασης της παραβολής. Το μεγαλύτερο μέρος της ανακλώμενης ακτινοβολίας απορροφάται από τον απορροφητή (absorber), ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο εσωτερικό του αποδέκτη, με αποτέλεσμα την θέρμανσή του. Η θερμότητα αυτή μεταδίδεται στο θερμικό υγρό (συνθετικό έλαιο), που ρέει μέσα στον απορροφητή με συναγωγή (convection). Στη συνέχεια το θερμό υγρό κατευθύνεται στον εναλλάκτη θερμότητας, όπου ‘ανταλλάσει’ θερμότητα με νερό, με αποτέλεσμα να αλλάζει η φάση του νερού σε ατμό. Ο υπέρθερμος ατμός περιστρέφει έναν στρόβιλο ατμού συνδεδεμένο με ηλεκτρογεννήτρια, με αποτέλεσμα να παράγεται τελικώς ηλεκτρική ενέργεια. Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες, μερικές φορές συγχέονται λανθασμένα, τόσο με τους κοινούς ηλιακούς συλλέκτες για την παραγωγή θερμού νερού χρήσης, όσο με τα φωτοβολταϊκά πανέλα, στα οποία γίνεται απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Όταν δηλαδή, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα, που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο [4].

Στην παρούσα εργασία καταστρώνεται το αναλυτικό φυσικό μοντέλο για την απόδοση των παραβολικών συλλεκτών σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε με βάση τη θεωρία που αναπτύσσεται στο βιβλίο “Solar Engineering of Thermal Processes” των John Duffie και William Beckman [1], έχοντας όμως μία βασική διαφορά στη μέθοδο υπολογισμού της θερμοκρασίας των διαφόρων τμημάτων του παραβολικού συλλέκτη. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του βιβλίου [1], η θερμοκρασία του αποδέκτη του συλλέκτη θεωρείται δεδομένη, ενώ η θερμοκρασία του καλύμματος του αποδέκτη επιλέγεται υποθετικά, και με βάση τις θερμοκρασίες αυτές υπολογίζεται ο συντελεστής ολικών απωλειών ( $U_L$ , βλ. σχέση 6.20). Στη συνέχεια, υπολογίζεται με δοκιμή και σφάλμα η σωστή θερμοκρασία του καλύμματος, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές, καθώς και την εξίσωση του θερμικού ισοζυγίου του καλύμματος, και διορθώνεται η τιμή του συντελεστή ολικών απωλειών  $U_L$ . Η κυριότερη διαφορά του μοντέλου [1] σε σχέση με τη μεθοδολογία που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ότι η θερμοκρασία του αποδέκτη **δεν** θεωρείται δεδομένη και η θερμοκρασία του καλύμματος του αποδέκτη **δεν** επιλέγεται υποθετικά. Αυτό αποτελεί

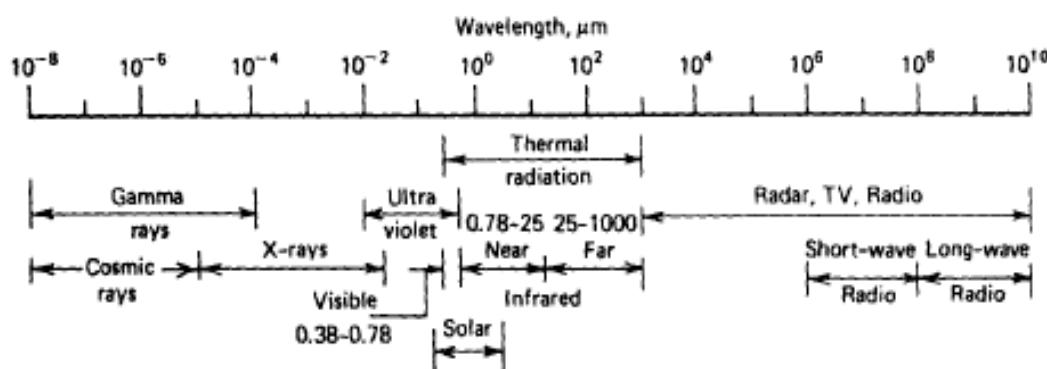
πρωτοτυπία της παρούσας εργασίας. Με δεδομένο ότι διατίθενται μετεωρολογικές μετρήσεις (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου κτλ) για κάθε λεπτό ενός ολόκληρου έτους, κατά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος θεωρείται ότι όλα τα τμήματα του συλλέκτη βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ για τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές υπολογίζονται οι θερμικές απώλειες και η ενέργεια που απορροφάται τελικά από τα διάφορα υλικά, μέσω των θερμικών ισοζυγίων του καλύμματος και του απορροφητή. Έχοντας υπολογίσει την εναπομείνασα ενέργεια στο κάλυμμα και στον απορροφητή, υπολογίζεται και η μεταβολή της θερμοκρασίας τους, καθώς και η μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού (βλ. σχέση 7.16 και 7.17). Αναλυτικά το μοντέλο προσομοίωσης του παραβολικού συλλέκτη παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7.

Το μοντέλο αυτό, προσομοιώθηκε για διαφορετικά συστήματα ιχνηλάτησης της τροχιάς του ήλιου, και για διαφορετικά υλικά του κατόπτρου. Έτσι, διαπιστώθηκε ότι το σύστημα ιχνηλάτησης με συνεχή περιστροφή γύρω από οριζόντιο άξονα βιορά-νότου, παράλληλο με τον άξονα της γης (βλ. Κεφάλαιο 4), είναι το πιο αποδοτικό. Επίσης, ο παραβολικός θερμικός συλλέκτης με αργυρό παραβολικό ανακλαστικό κάτοπτρο, παρουσιάζει οπτική απόδοση 64,69% και θερμική απόδοση 49,52%, ενώ με υλικό επίστρωσης του παραβολικού ανακλαστικού κατόπτρου τον χρυσό, παρουσιάζει οπτική απόδοση 62,87% και θερμική απόδοση 48,15% (βλ. Κεφάλαιο 8).

## 2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

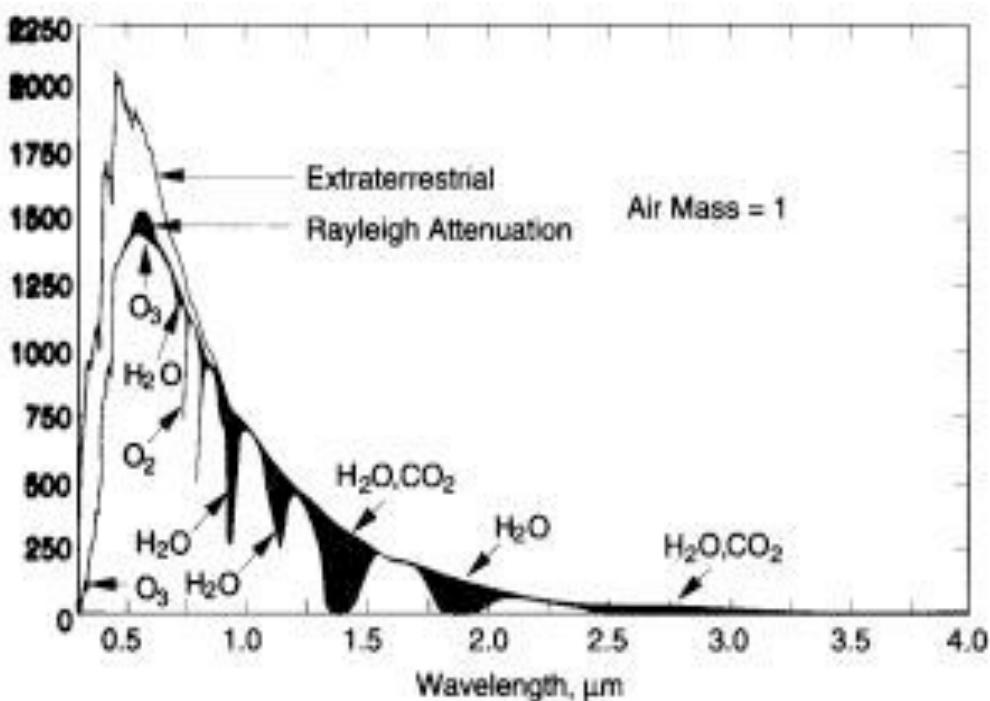
### 2.1 Εισαγωγή

Στην ιστορία της ανθρωπότητας, ο ήλιος ήταν το αντικείμενο της περισσότερης προσοχής και λατρείας. Κυρίως όμως, αποτελεί την συνεχόμενη πηγή ενέργειας του πλανήτη μας. Η ενέργεια αυτή, παράγεται εντός του ήλιου μέσω μίας διαδικασίας θερμοπυρηνικής σύντηξης, κατά την οποία το υδρογόνο ( $H$ ) μετατρέπεται σε ήλιο ( $He$ ), οι λεπτομέρειες της οποίας όμως δεν είναι γνωστές. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία παράγεται από τον ήλιο. Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας φαίνεται στο Σχήμα 2.1 [1].



Σχήμα 2.1 Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της από την ατμόσφαιρα της γης υπόκειται σε σημαντική μείωση, λόγω της σύστασης της ατμόσφαιρας. Η μείωση αυτή οφείλεται σε δύο φαινόμενα, στη σκέδαση (scattering) της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας από τα μόρια του αέρα, την σκόνη και τους υδρατμούς και στην απορρόφησή της από το οζόν (O<sub>3</sub>), το νερό (H<sub>2</sub>O) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Ο διασκορπισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στα μόρια της ατμόσφαιρας, γνωστός ως Rayleigh διασκορπισμός, παρατηρείται στα μικρά μήκη κύματος ( $\lambda < 0,6$ ), όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.1, όπου απεικονίζεται η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω του φαινομένου αυτού, όταν εισέρχεται στην γήινη ατμόσφαιρα. Αντίθετα η απορρόφησή της από τους υδρατμούς και το διοξείδιο του άνθρακα εμφανίζεται έντονα στο υπέρυθρο φάσμα και κυρίως στα μήκη κύματος 1 μμ, 1,4 μμ και 1,8 μμ, ενώ η απορρόφησή της από το οζόν εμφανίζεται κυρίως στα όρια του ηλιακού φάσματος με το κοντινό υπέρυθρο. Στην επιφάνεια της γης επομένως, φτάνει μόνο ένα μέρος της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ το υπόλοιπο είτε απορροφάται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας, είτε ανακλάται πάλι πίσω στο διάστημα [5].



Διάγραμμα 2.1 Παράδειγμα του Rayleigh διασκορπισμού και της ατμοσφαιρικής απορρόφησης του φάσματος της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας.

## 2.2 Ορισμοί

### 2.2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλιακής ακτινοβολίας

- Ισχύς ή ροή ακτινοβολίας (Radiant Power or Radiant Flux)

Ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολούμενης ενέργειας  $dE$ , σε χρόνο  $dt$ , μέσα σε στερεά γωνία  $d\Omega$ , δηλαδή [2]:

$$P = \frac{dE}{dt d\Omega} \quad (2.1)$$

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το 1 W.

- Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας (Irradiance)

Είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια που ακτινοβολείται, προσπίπτει σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Προσδιορίζεται από την σχέση [2]:

$$G = \frac{dP}{dS} \quad (2.2)$$

όπου:

$dP$  η στοιχειώδης ισχύς ακτινοβολίας

$dS$  η στοιχειώδης επιφάνεια μέσα από την οποία διέρχεται ή πάνω στην οποία προσπίπτει ή από την οποία εκπέμπεται η στοιχειώδης ισχύς ακτινοβολίας

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το  $1 \frac{W}{m^2}$ .

- Ένταση ακτινοβολίας (Radiation Intensity)

Ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος που διαπερνά κάθετα την μονάδα επιφάνειας, τοποθετημένη στη θέση προσδιορισμού, δηλαδή [2]:

$$G_{\perp} = \frac{dP}{dS_{\perp}} \quad (2.3)$$

όπου:

$dP$  η στοιχειώδης ισχύς ακτινοβολίας

$dS_{\perp}$  η στοιχειώδης επιφάνεια την οποία διαπερνά κάθετα η στοιχειώδης ισχύς ακτινοβολίας

Αποτελεί μερική περίπτωση εφαρμογής του ορισμού της πυκνότητας ισχύος  $G$ , στην περίπτωση παράλληλης δέσμης, η οποία διαπερνά κάθετα την επιφάνεια.

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το  $1 \frac{W}{m^2}$ .

- Πυκνότητα ενέργειας ακτινοβολίας (Irradiation)

Ορίζεται ως η προσπίπτουσα σε μία επιφάνεια ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και υπολογίζεται με την ολοκλήρωση της πυκνότητας ισχύος σε κάποιο χρονικό διάστημα  $dt$ , δηλαδή [4]:

$$I = \int G dt \quad (2.4)$$

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το  $1 \frac{J}{m^2}$ .

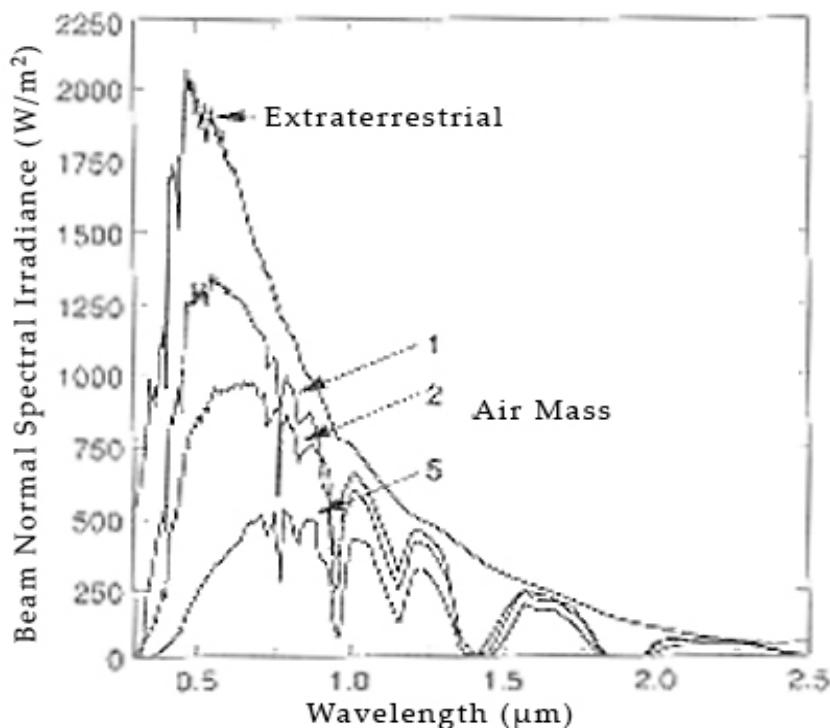
## 2.2.2 Φασματική κατανομή απευθείας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια

Η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης και έως ότου να φτάσει στο επίπεδο της θάλασσας, διαγράφει μία πορεία, το μήκος της οποίας χαρακτηρίζεται από μία κλίμακα μάζας αέρα (air mass  $AM$ ), η οποία υπολογίζεται με το αντίστροφο του συνημίτονου της ζενίθιας απόστασης ( $\zeta$ , η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατακόρυφου στην επιφάνεια και της ευθείας που ενώνει Ήλιο-Γη), δηλαδή  $AM = \frac{1}{\cos \zeta}$ . Η κλίμακα της μάζας αέρα επομένως,

εκφράζει το πόσες φορές είναι μεγαλύτερη η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, μέχρι να φτάσει σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια της γης, ως προς την κατακόρυφη διαδρομή της, η οποία είναι η ελάχιστη και συμβολίζεται με *AM1* [2].

Το 99% της ηλιακής ενέργειας εμφανίζεται σε μήκος κύματος από 0,25 έως 4 μμ. Πιο συγκεκριμένα το ορατό φάσμα ( $0,39 < \lambda < 0,77$  μμ) περιέχει το 46,41% της ενέργειας, το υπεριώδες φάσμα ( $\lambda > 0,4$  μμ) περιέχει το 8,03% της ενέργειας και το υπέρυθρο ( $\lambda > 0,77$  μμ) περιέχει το 46,4% της ενέργειας [4].

Στο Διάγραμμα 2.2 παρουσιάζεται η φασματική κατανομή της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας για *AM1* ( $\zeta=0^\circ$ ), *AM2* ( $\zeta=60^\circ$ ) και *AM5* ( $\zeta=78^\circ$ ). Όπως ήταν αναμενόμενο, η ηλιακή ακτινοβολία ελαττώνεται καθώς η μάζα αέρα αυξάνεται [5].



Διάγραμμα 2.2 Φασματική κατανομή απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της γήινης ατμόσφαιρας και προς την γήινη επιφάνεια με μάζα αέρα 1, 2 και 5.

Μία τυπική κατανομή τιμών της γήινης απευθείας ακτινοβολίας με *AM2*, παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-1 [7]. Το γήινο φάσμα διαιρείται σε 20 διαστήματα ποσοστιαίας ενέργειας 5 %, τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο μέσο μήκος κύματός, και σε εύρος μηκών κύματος. Με βάση τα δεδομένα αυτά υπολογίζεται, όπως θα εξηγηθεί σε ακόλουθο υποκεφάλαιο, η απορροφητικότητα των διαφόρων υλικών.

**Πίνακας 2-1 Κατανομή τιμών γήινης απευθείας ακτινοβολίας με AM2**

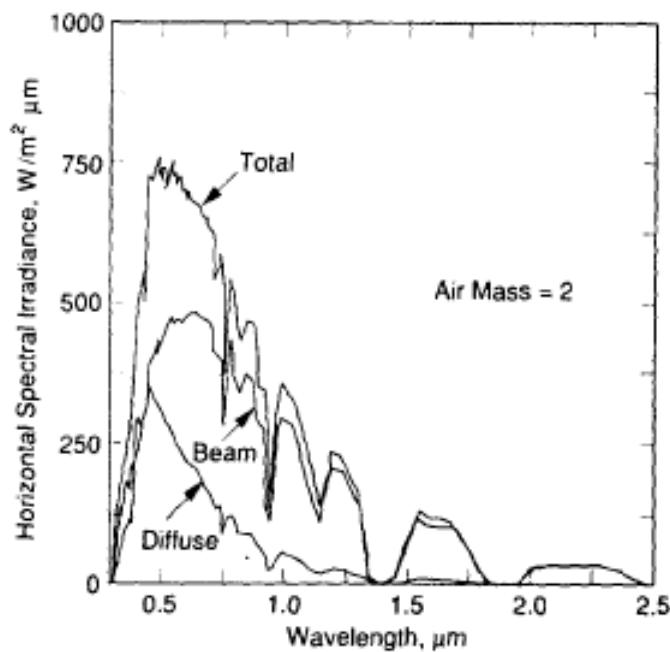
Ενεργειακό διάστημα $f_i-f_i+1$	Εύρος μήκους κύματος (μμ)	Μέσο μήκος κύματος (μμ)
0,00-0,05	0,300-0,434	0,402
0,05-0,10	0,434-0,479	0,458
0,10-0,15	0,479-0,517	0,498
0,15-0,20	0,517-0,557	0,537
0,20-0,25	0,557-0,595	0,576
0,25-0,30	0,595-0,633	0,614
0,30-0,35	0,633-0,670	0,652
0,35-0,40	0,670-0,710	0,690
0,40-0,45	0,710-0,752	0,730
0,45-0,50	0,752-0,799	0,775
0,50-0,55	0,799-0,845	0,820
0,55-0,60	0,845-0,894	0,869
0,60-0,65	0,894-0,975	0,923
0,65-0,70	0,975-1,035	1,003
0,70-0,75	1,035-1,101	1,064
0,75-0,80	1,101-1,212	1,170
0,80-0,85	1,212-1,310	1,258
0,85-0,90	1,310-1,603	1,532
0,90-0,95	1,603-2,049	1,689
0,95-1,00	2,049-5,000	2,292

### 2.2.3 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια

Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτινών από τη γήινη ατμόσφαιρα, η έντασή τους ελαττώνεται, καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται, αφενός στα μόρια της ατμόσφαιρας και στα πολύ μικρής διαμέτρου σωματίδια, αφετέρου στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματά της, δηλαδή τους υδρατμούς, την σκόνη και τον καπνό. Ένα άλλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας, όπως για παράδειγμα, η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα η ένταση των ακτινών αυτών στην επιφάνεια της γης να είναι εξαιρετικά μειωμένη και η καρκινογόνος δράση της αρκετά περιορισμένη. Τέλος, ένα μέρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Συνεπώς, στην επιφάνεια της γης, φτάνουν τρεις συνιστώσες του ηλιακού φωτός: (1) η απευθείας ή άμεση ακτινοβολία (beam or direct radiation), η οποία προέρχεται απευθείας από τον ήλιο, (2) η διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation), η οποία προέρχεται από τον ουράνιο θόλο, όχι όμως απευθείας από τον ήλιο, αλλά από ανακλάσεις των ακτινών στα διάφορα σωματίδια της ατμόσφαιρας και (3) η διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία (albedo radiation), η οποία προέρχεται από ανακλάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης και σε ό,τι την καλύπτει. Η συνολική ακτινοβολία η οποία αναφέρεται ως ολική ακτινοβολία (global radiation), είναι το άθροισμα των παραπάνω τριών συνιστωσών.

Στο Διάγραμμα 2.3 απεικονίζεται η συνολική, η απευθείας και η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης, για μία τυπικά καθαρή ατμόσφαιρα, και μάζα αέρα ίση με 2 (εξηγείται στην παράγραφο 2.3) [5].



Διάγραμμα 2.3 Συνολική, απευθείας και διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης.

## 2.2.4 Γωνίες προσδιορισμού της θέσης μιας επιφάνειας σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία

Για να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια, είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης της επιφάνειας αυτής ως προς τη γη αλλά και ως προς την ακτινοβολία του ήλιου. Σε αυτή την ενότητα ορίζονται οι γωνίες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό αυτό:

- Γεωγραφικό πλάτος,  $\varphi$  (latitude)

Το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εκφράζει τη γωνία που σχηματίζει η ακτίνα της γης που διέρχεται από τον εν λόγω τόπο με το επίπεδο του ισημερινού ( $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ , αρνητικό νότια).

- Γεωγραφικό μήκος,  $L$  (longitude)

Το γεωγραφικό μήκος του τόπου εκφράζει τη γωνιακή απόσταση μεταξύ του μεσημβρινού Greenwich και οποιουδήποτε σημείου στην επιφάνεια της γης ανατολικά ή δυτικά του ( $-180^\circ \leq L \leq 180^\circ$ , αρνητικό δυτικά).

- Απόκλιση του ήλιου,  $\delta$  (declination)

Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου και στο επίπεδο του ισημερινού ( $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ , αρνητική νότια).

- Ωριαία γωνία,  $\omega$  (hour angle)

Η γωνιακή αναπαράσταση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης γύρο από τον άξονά της κατά  $15^\circ$  ανά ώρα (αρνητικό το πρωί, θετικό το απόγευμα).

- Αζιμούθια γωνία επιφάνειας,  $\gamma$  (surface azimuth angle)

Η γωνιακή απόκλιση της προβολής σε οριζόντιο επίπεδο της καθέτου στην επιφάνεια από τον τοπικό μεσημβρινό ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ , μηδενική νότια, θετική δυτικά, αρνητική ανατολικά).

- Γωνία πρόσπτωσης,  $\theta$  (angle of incidence)

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της απευθείας (beam) ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια και της κάθετης προς την επιφάνεια αυτή.

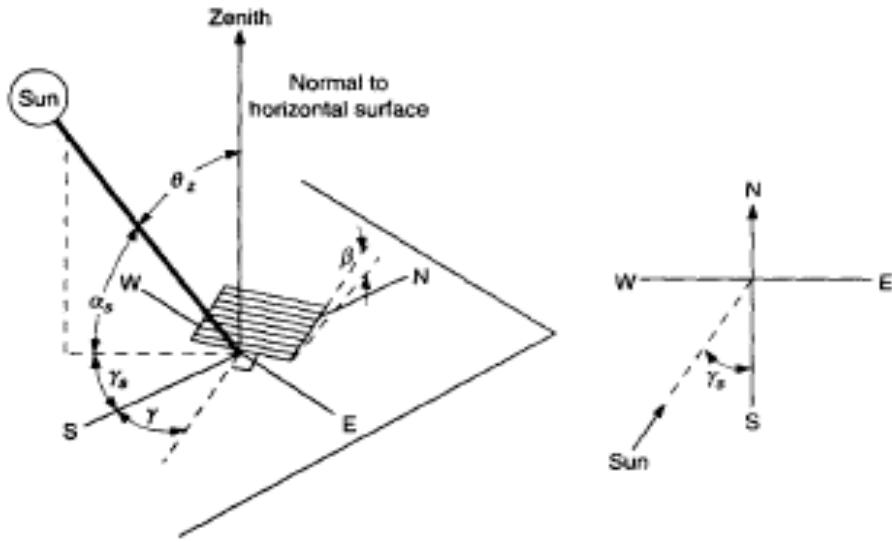
- Γωνία ζενίθ,  $\theta_z$  (zenith angle)

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της απευθείας (beam) ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια και της κάθετης προς το οριζόντιο επίπεδο του τόπου.

- Αζιμούθια γωνία ήλιου,  $\gamma_s$  (solar azimuth angle)

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του κατακόρυφου επιπέδου που περιέχει τον ήλιο και του γεωγραφικού μεσημβρινού ( $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$ , μηδενική νότια, θετική δυτικά από τον νότο, αρνητική ανατολικά από τον νότο).

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται μερικές από τις παραπάνω γωνίες [6]:



Σχήμα 2.2 Γωνίες προσδιορισμού της θέσης μίας επιφάνειας ως προς την ηλιακή ακτινοβολία.

### 2.3 Προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία σε οριζόντιο και σε κεκλιμένο επίπεδο

Ηλιακή ακτινοβολία για κάθε περιοχή καθώς και για κάθε ημέρα του έτους υπάρχει μόνο μεταξύ του χρονικού διαστήματος από την ανατολή του ήλιου έως την δύση του, για την συγκεκριμένη τοποθεσία και ημέρα. Επομένως, Η ώρα ανατολής και δύσης του ήλιου για κάθε περιοχή υπολογίζεται με βάση την ηλιακή ώρα ( $t_s$ ), και όχι την ωρολογιακή παγκόσμια ώρα (Universal time,  $ut$ ), οι οποίες συνδέονται με βάση την Εξίσωση (2.5). Η ηλιακή ώρα προκύπτει από τη γωνιακή κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο και γύρω από τον άξονά της (με ηλιακό μεσημέρι την στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στον μεσημβρινό του παρατηρητή), δεδομένου ότι η γη διαγράφει  $1^\circ$  γεωγραφικού μήκους κάθε 4 min, και υπολογίζεται για κάθε ημέρα η ηλιακή ώρα ανατολής ( $t_{sa}$ ) και δύσης ( $t_{ss}$ ) του ήλιου με βάση τις Εξίσωσεις (2.6) και (2.7) [9]:

$$t_s = ut - \left( \frac{40}{60} \cdot (30 - L) + \left( \frac{E}{60} \right) \right) \quad (2.5)$$

$$t_{sa} = 12 - \left( \frac{N}{2} \right) \quad (2.6)$$

$$t_{ss} = 12 + \left( \frac{N}{2} \right) \quad (2.7)$$

όπου:

$$229,2(0,0000750,001868\cos(B)-0,032072\sin(B)-0,014615\cos(2B)-0,04089\sin(2B)) \quad (2.8)$$

$$E = \frac{360}{365} \cdot (\# \text{ημ} \rho \alpha \varsigma - 1) \quad (2.9)$$

$N$  οι ώρες ηλιοφάνειας, υπολογίζεται από την σχέση:

$$N = \left( \frac{2}{15} \right) \cdot \omega_s \quad (2.10)$$

όπου:

$\omega_s$  η ωριαία γωνία δύσης (σε μοίρες), υπολογίζεται από την σχέση:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (2.11)$$

Για την εύρεση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, υπολογίζεται αρχικά η εξωγήινη ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο για κάθε χρονικό διάστημα ωριαίας γωνίας  $\omega_2 - \omega_1$ , επομένως προκύπτει η ηλιακή ενέργεια από την σχέση:

$$I_o = \left( \frac{(1803600 G_{sc})}{\pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)} \right) \cdot \left( 1 + 0,033 \cos \left( \frac{(2 \cdot \pi \cdot n)}{365} \right) \right) \cdot \left( \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)) + \left( \pi \cdot \left( \frac{\omega_2 - \omega_1}{180} \right) \right) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \right) \cdot (t_s) \quad (2.12)$$

(2.12)

όπου:

$G_{sc}$  η ηλιακή σταθερά, η οποία ορίζεται ως η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας και ισούται με  $1367 \frac{W}{m^2}$ .

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το  $1 \frac{J}{m^2}$ .

Η ωριαία γωνία (σε μοίρες) υπολογίζεται από την σχέση:

$$\omega = (t_s - 12) \cdot 15 \quad (2.13)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο δείκτης καθαρότητας (clearness index,  $k_T$ ) του κάθε χρονικού διαστήματος, που εκφράζει το κατά πόσο η ατμόσφαιρα της γης έχει σύννεφα ή όχι, από την παρακάτω εξίσωση [9]:

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (2.14)$$

όπου:

$I_d$  η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο, σε  $\frac{J}{m^2}$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διάχυτη προσπίπτουσα ακτινοβολία στο πυρανόμετρο, με την βοήθεια της σχέσης 2.11, η οποία προέκυψε από μελέτη των Erbs et al. [10], βασισμένη σε πειραματικά δεδομένα τριών σταθμών των Η.Π.Α. και ενός στην Αυστραλία:

- Εάν  $k_T \leq 0,22$ , τότε ο λόγος της διάχυτης προσπίπτουσας ακτινοβολίας προς την ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία, προκύπτει από την εξίσωση:

$$\frac{I_d}{I} = 1 - 0,09 k_T \quad (2.15a)$$

- Εάν  $0,22 < k_T \leq 0,8$ , τότε ο λόγος της διάχυτης προσπίπτουσας ακτινοβολίας προς την ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία, προκύπτει από την εξίσωση:

$$\frac{I_d}{I} = 0,9511 - 0,1604 k_T + 4,388 k_T^2 - 16,638 k_T^3 + 12,336 k_T^4 \quad (2.15b)$$

- Εάν  $k_T > 0,8$ , τότε ο λόγος της διάχυτης προσπίπτουσας ακτινοβολίας προς την ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία, ισούται με:

$$\frac{I_d}{I} = 0,16 \quad (2.15c)$$

Έχοντας βρει πλέον, την προσπίπτουσα διάχυτη ακτινοβολία  $I_d$ , υπολογίζεται και η απευθείας προσπίπτουσα στο πυρανόμετρο ακτινοβολία  $I_b$ , από την σχέση:

$$I_b = I - I_d \quad (2.16)$$

Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας απευθείας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο  $I_{b,T}$ , αρκεί να βρεθεί ο συντελεστής  $R_b$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος [12]:

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cdot \cos(\theta)}{G_{b,n} \cdot \cos(\theta_z)} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (2.17)$$

όπου:

$G_{b,T}$  η προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, σε  $\frac{W}{m^2}$

$G_b$  η προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, σε  $\frac{W}{m^2}$

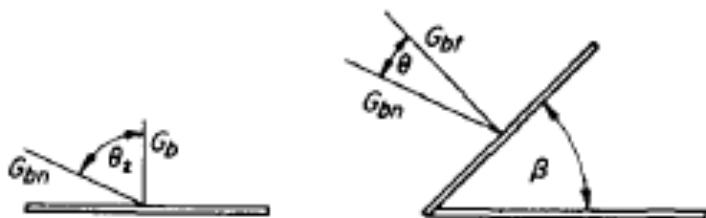
$G_{b,n}$  η προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία κάθετα σε οριζόντιο επίπεδο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, σε  $\frac{W}{m^2}$ .

Οι γωνίες  $\zeta$ ενίθ ( $\theta_z$ ) και οι γωνίες πρόσπτωσης ( $\theta$ ) υπολογίζονται με βάση το σύστημα προσανατολισμού που χρησιμοποιεί ο συλλέκτης και θα αναλυθούν στην ενότητα 7.2.2.

Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται οι παραπάνω γωνίες σε οριζόντιο και σε κεκλιμένο επίπεδο.

Πλέον υπολογίζεται η προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, μέσω της Εξίσωσης 2.18 [11]:

$$I_{b,T} = I_b \cdot R_b \quad (2.18)$$



Σχήμα 2.4 Γωνία πρόσπτωσης σε οριζόντιο και σε κεκλιμένο επίπεδο

### 3. ΗΛΙΑΚΟΙ ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

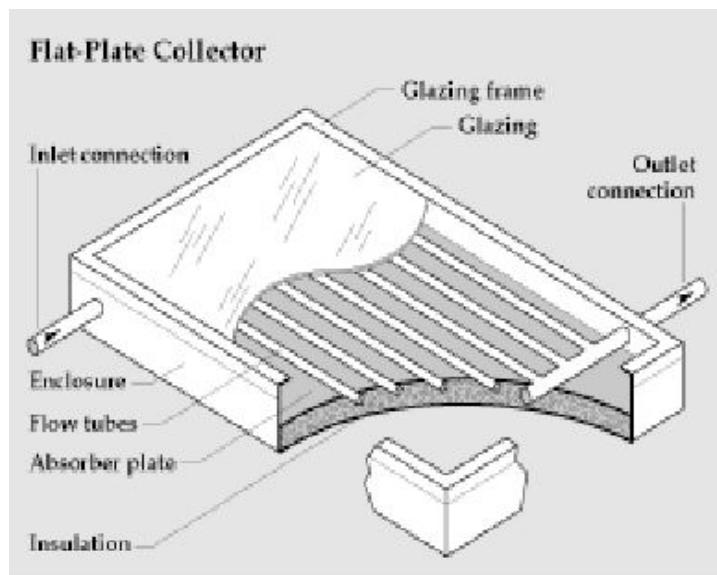
#### 3.1 Εισαγωγή

Ένας ηλιακός θερμικός συλλέκτης είναι ένα είδος εναλλάκτη θερμότητας που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα. Διαφέρει όμως σε πολλά σημεία με τους περισσότερους εναλλάκτες θερμότητας. Στους ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες η θερμότητα μεταφέρεται από μία μακρινή πηγή ακτινοβολούμενης ενέργειας σε ένα ρευστό. Αντίθετα στους εναλλάκτες θερμότητας η μεταφορά της γίνεται από ρευστό σε ρευστό, με υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς και η ακτινοβολία αποτελεί έναν ασήμαντο παράγοντα.

#### 3.2 Επίπεδοι συλλέκτες (Flat-plate collectors)

Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν μεταφερόμενη ενέργεια, η οποία προκαλεί μέτρια μεταβολή θερμοκρασίας (συνήθως 100 °C πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος). Αξιοποιούν, τόσο την απευθείας ακτινοβολία, όσο και τη διάχυτη. Δεν χρησιμοποιούν συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου και δεν απαιτούν ιδιαίτερη συντήρηση, καθώς επίσης τοποθετούνται σε στατική θέση με προσανατολισμό τέτοιον, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση για την χρονική περίοδο που χρησιμοποιείται. Από μηχανικής άποψης είναι απλούστεροι σε σχέση με τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Οι συλλέκτες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε ηλιακή θέρμανση νερού ή θέρμανση κτιρίων, σε κλιματιστικά μηχανήματα και σε βιομηχανικές διεργασίες προθέρμανσης. Τα σημαντικότερα μέλη που απαρτίζουν έναν επίπεδο συλλέκτη είναι η απορροφητική επιφάνεια της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία χρησιμοποιείται για να μεταφέρεται η απορροφώμενη ενέργεια στο ρευστό, ένα περίβλημα του απορροφητή, το οποίο είναι διαφανές στην ηλιακή ακτινοβολία, έτσι ώστε να μειώνονται οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, και μόνωση από το πίσω μέρος του για να μειώνονται οι απώλειες θερμότητας λόγω επαφής.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός επίπεδου συλλέκτη.

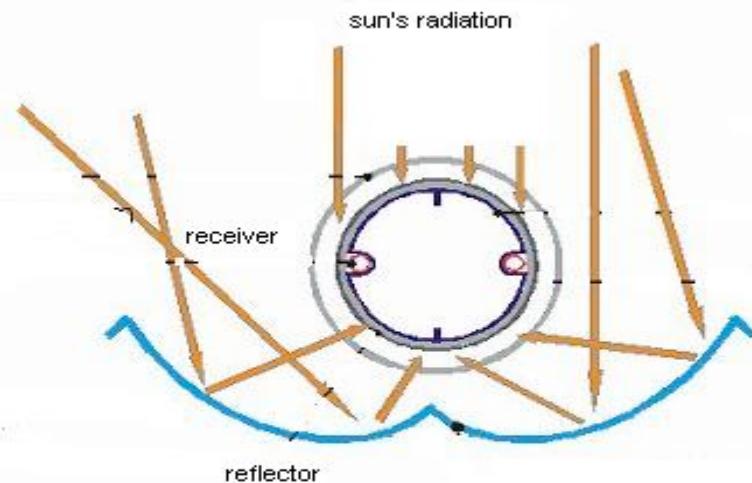


Σχήμα 3.1 Επίπεδος συλλέκτης.

### 3.3 Συλλέκτες χαμηλής συγκέντρωσης (Compound parabolic concentrators CPCs)

Οι συλλέκτες χαμηλής συγκέντρωσης έχουν την ικανότητα να ανακλούν στον αποδέκτη (receiver) την ακτινοβολία που προσπίπτει, μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος γωνιών, στο άνοιγμα (aperture) της παραβολής του κατόπτρου τους. Το εύρος αυτό καθορίζεται από την ‘γωνία αποδοχής’ (acceptance angle) και εφόσον μέσα σε αυτό το εύρος ανακλώνται όλες οι ακτινοβολίες, εκμεταλλεύονται και την διάχυτη ακτινοβολία. Κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι δεν χρειάζονται συνεχές σύστημα ιχνηλάτησης της τροχιάς του ήλιου, αρκεί να είναι σωστά προσανατολισμένοι ώστε να μεγιστοποιούν την απορροφώμενη ακτινοβολία. Η μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας που μπορούν να προκαλέσουν είναι γύρω στους 250 °C πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι συλλέκτες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε διατάξεις παραγωγής ατμού. Στην πιο συνήθης μορφή τους αποτελούνται από δύο ημιπαραβολικά κάτοπτρα, στην ένωση των οποίων τοποθετείται ο απορροφητής (κυλινδρικός ή επίπεδος), και περιβάλλονται από γυάλινο κάλυμμα, ώστε να προστατεύονται οι ανακλαστικές επιφάνειες από την σκόνη και έτσι να μην μειώνεται η οπτική τους απόδοση.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός συλλέκτη χαμηλής συγκέντρωσης.

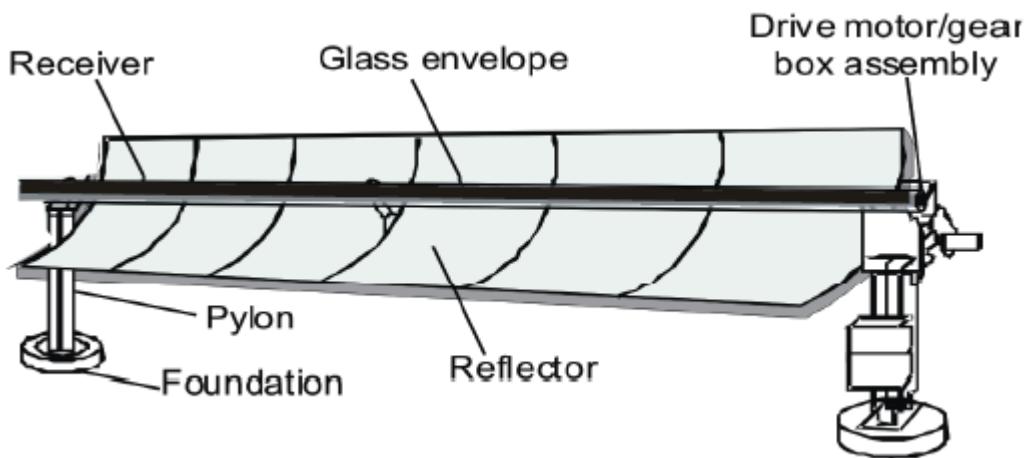


Σχήμα 3.2 Συλλέκτης χαμηλής συγκέντρωσης.

### 3.4 Παραβολικοί συλλέκτες (Parabolic trough concentrators PTCs)

Οι παραβολικοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας, όπως σε διατάξεις για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, διότι λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας που επιτυγχάνουν, προκαλούν μεταβολές θερμοκρασίας από 50 °C μέχρι και πάνω από 400 °C. Συνδυάζουν μεγάλη θερμική απόδοση και χαμηλό κόστος. Απαιτούν όμως σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου, οπότε και τοποθετούνται πάνω σε οριζόντιο άξονα προσαρμοσμένο είτε σε κατεύθυνση βορρά-νότου ακολουθώντας την τροχιά του ήλιου από την ανατολή προς την δύση, είτε σε κατεύθυνση ανατολής-δύσης ακολουθώντας αντίστοιχα τον ήλιο από το νότο προς το βορρά, έτσι ώστε να ο συλλέκτης να μετακινείται διαρκώς στην βέλτιστη γωνία προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω του. Ένας παραβολικός συλλέκτης αποτελείται από ένα παραβολικό κάτοπτρο, καθώς και από έναν κυλινδρικό αποδέκτη, ο οποίος αποτελείται από περίβλημα, ώστε να μειώνονται οι απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία, το οποίο περικλείει έναν επίσης κυλινδρικό απορροφητή. Ανάμεσα στο περίβλημα και τον απορροφητή μεσολαβεί κενό αέρος, ώστε να μην έχουμε απώλειες λόγω συναγωγής. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο ανακλαστικό κάτοπτρο και εν συνεχείᾳ ανακλάται προς το σημείο εστίασης (focal point), στο οποίο συγκεντρώνεται πολλαπλάσιες φορές (έως 80 φορές περισσότερο), όπου εκεί είναι τοποθετημένος ο αποδέκτης. Με αυτήν τη διαδικασία θερμαίνεται, επομένως, το θερμικό υγρό που ρέει στο εσωτερικό του απορροφητή. Με χρήση εναλλακτών θερμότητας, η ενέργεια αυτή μεταφέρεται στο νερό και το μετατρέπει σε ατμό. Από τον ατμό παράγεται ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός στροβίλου και μίας ηλεκτρογεννήτριας.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός παραβολικού συλλέκτη.



Σχήμα 3.3 Παραβολικός συλλέκτης.

### 3.5 Επιλογή καταλληλότερου είδους συλλέκτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες εμφανίζουν περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα ακόλουθα:

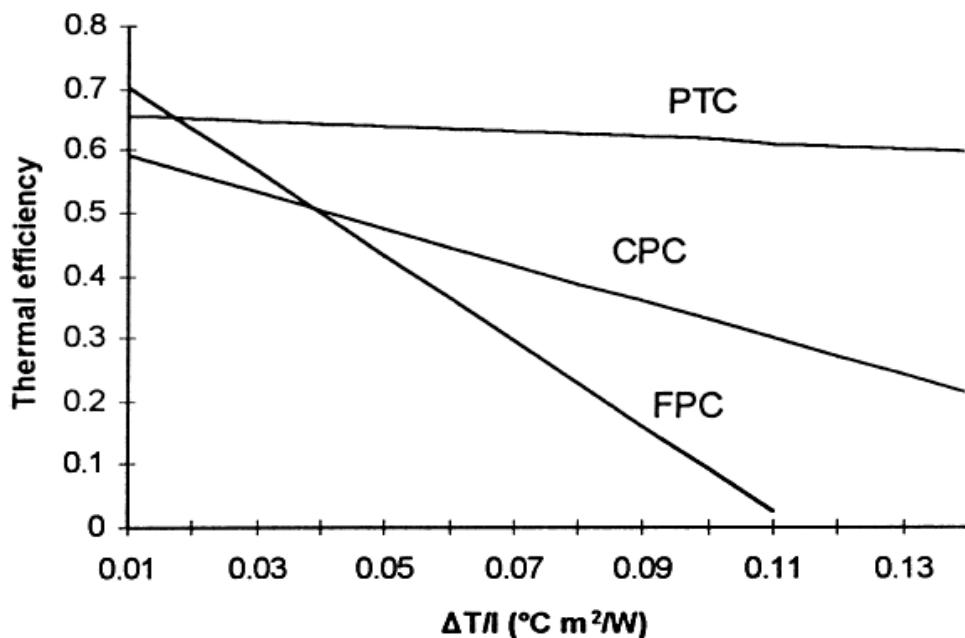
- Το θερμικό υγρό μπορεί να επιτύχει υψηλότερες θερμοκρασίες σε έναν συγκεντρωτικό συλλέκτη, σε σχέση με έναν επίπεδο με την ίδια επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ενέργειας. Οι υψηλές θερμοκρασίες είναι απαραίτητες, ώστε να παραχθεί υπέρθερμος ατμός. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη θερμοδυναμική απόδοση, ακόμη και για μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.1.
- Η θερμική απόδοση ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι μεγαλύτερη, εξαιτίας των μειωμένων απωλειών θερμότητας λόγω της συγκριτικά μικρότερης επιφάνειας του αποδέκτη του.

Εμφανίζουν, όμως, και τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούν μόνο την απευθείας ακτινοβολία του ήλιου.
- Οι ανακλαστικές επιφάνειες με το πέρασμα του χρόνου χάνουν κάποιο ποσοστό της ανακλαστικής τους ικανότητας και περιοδικά χρειάζονται καθαρισμό και συντήρηση.
- Απαιτούν την τοποθέτηση συστήματος ιχνηλάτησης της τροχιάς του ήλιου, γεγονός που συνεπάγεται αυξημένο κόστος αγοράς και συντήρησης, καθώς και επιπλέον σφάλματα λόγω της ακρίβειας σε περιπτώσεις αστοχίας των συστημάτων ιχνηλάτησης.

Στο διάγραμμα 3.1 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες θερμικής απόδοσης των τριών παραπάνω συλλεκτών [13] ως συνάρτηση των διαφορών θερμοκρασίας λειτουργίας τους. Όπως διαφαίνεται, ο παραβολικός συλλέκτης διατηρεί την απόδοσή του υψηλή ακόμη και σε μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας και αυτό οφείλεται στο ότι οι θερμικές του απώλειες είναι αντιστρόφως ανάλογες με τον βαθμό συγκέντρωσής (concentration ratio) του. Επομένως, ο καταλληλότερος ηλιακός θερμικός συλλέκτης για να την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο

παραβολικός συλλέκτης. Ο συλλέκτης αυτός αναλύεται εκτενέστερα και μοντελοποιείται στην συνέχεια της εργασίας.



Διάγραμμα 3.1 Θερμική απόδοση των ηλιακών συλλεκτών PTC, CPC και FPC

## 4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΉΛΙΟΥ

### 4.1 Εισαγωγή

Λόγω της κίνησης της γης γύρω από τον ήλιο, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες πρέπει διαρκώς να ακολουθούν την πορεία του, ώστε να ελαχιστοποιούν την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του ανακλαστικού παραβολικού κατόπτρου τους, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Οι παραβολικοί συλλέκτες τοποθετούνται κυρίως σε τρία είδη συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου, τα οποία αναλύονται ακολούθως.

### 4.2 Συνεχής περιστροφή γύρω από οριζόντιο άξονα ανατολής - δύσης

Στο σύστημα αυτό ο συλλέκτης τοποθετείται πάνω σε οριζόντιο άξονα προσαρμοσμένο στην κατεύθυνση ανατολής-δύσης, ακολουθώντας την τροχιά του ήλιου από το νότο προς το βορρά. Τα πλεονεκτήματα αυτής της περιστροφής είναι, αφενός ότι καθόλη τη διάρκεια της ημέρας απαιτείται ελάχιστη αναπροσαρμογή της θέσης του συλλέκτη, και αφετέρου ότι κατά τις μεσημβρινές ώρες το παραβολικό κάτοπτρο βρίσκεται στην ίδια νοητή ευθεία με τον ήλιο, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μηδενικές απώλειες της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, παρουσιάζει το μειονέκτημα, ότι κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες μειώνεται δραματικά η απόδοση του συλλέκτη, εξαιτίας των μεγάλων γωνιών πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

### 4.3 Συνεχής περιστροφή γύρω από οριζόντιο άξονα βορρά - νότου

Στο σύστημα αυτό, ο συλλέκτης τοποθετείται πάνω σε οριζόντιο άξονα προσαρμοσμένο στην κατεύθυνση βορρά-νότου, ακολουθώντας την τροχιά του ήλιου από την ανατολή προς τη δύση. Αυτή η μέθοδος περιστροφής παρουσιάζει τις μεγαλύτερες απώλειες της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις μεσημβρινές ώρες, ενώ κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες που ο ήλιος βρίσκεται στην ίδια νοητή ευθεία με το ανακλαστικό κάτοπτρο, σημειώνει μία άριστη συγκέντρωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

### 4.4 Συνεχής περιστροφή γύρω από άξονα βορρά - νότου παράλληλο με τον άξονα της γης

Στο σύστημα αυτό ο συλλέκτης τοποθετείται πάνω σε άξονα παράλληλο με τον άξονα της γης, με κατεύθυνση βορρά-νότο και ακολουθεί την τροχιά του ήλιου από την ανατολή προς τη δύση. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τη μέγιστη απόδοσή της κατά τις ισημερίες, όπου οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν κάθετα στον ισημερινό και τις παραλλήλους του, διότι η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) ισούται σε αυτό το σύστημα περιστροφής με τη γωνία απόκλισης του ήλιου ( $\delta$ ) και κατά τις ισημερίες ισχύει  $\delta = 0^\circ$ . Οι μεγαλύτερες απώλειες εμφανίζονται κατά το θερινό και

χειμερινό ηλιοστάσιο, διότι τότε ο ήλιος εμφανίζει την μεγαλύτερη γωνία απόκλισης ( $\delta = \pm 2345$ ).

#### 4.5 Θεωρητική σύγκριση των παραπάνω συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου

Σε χρονική περίοδο ενός έτους το σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου με συνεχή περιστροφή του συλλέκτη γύρω από οριζόντιο βορρά – νότου παράλληλο με τον άξονα της γης, παρουσιάζει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα, σε σύγκριση με τα άλλα δύο συστήματα. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς ο συλλέκτης σε αυτό το σύστημα εμφανίζει τις λιγότερες απώλειες ηλιακής ακτινοβολίας καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, λόγω του ότι η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) είναι ίση με τη γωνία απόκλισης του ήλιου ( $\delta$ ). Συγκρίνοντας τα υπόλοιπα δύο συστήματα μεταξύ τους, το σύστημα με συνεχή περιστροφή του συλλέκτη γύρω από οριζόντιο άξονα βορρά – νότου, συλλέγει ελάχιστα περισσότερη ηλιακή ενέργεια από το σύστημα με συνεχή περιστροφή του συλλέκτη γύρω από οριζόντιο άξονα ανατολής – δύσης. Παρόλα αυτά το πρώτο σύστημα συλλέγει περισσότερη ενέργεια κατά τους θερινούς μήνες από ότι κατά τους χειμερινούς, ενώ το δεύτερο σύστημα συλλέγει κατά τους θερινούς μήνες περισσότερη ηλιακή ενέργεια και λιγότερη κατά τους θερινούς, παρουσιάζοντας μία πιο σταθερή ετήσια απόδοση [19].

## 5. ΟΠΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

### 5.1 Εισαγωγή

Η οπτική απόδοση ορίζεται ως το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που καταλήγει στον απορροφητή προς της ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο κάτοπτρο. Ουσιαστικά είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από το κάτοπτρο ( $\rho$ ), διαπερνά το κάλυμμα ( $\tau$ ) και απορροφάται από τον απορροφητή ( $\alpha$ ). Οι οπικές ιδιότητες των συγκεντρωτικών συλλεκτών εξαρτώνται από την γεωμετρία τους και τα υλικά κατασκευής τους. Η βασική σχέση από την οποία προκύπτει η απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα μη σκιαζόμενης επιφάνειας του ανακλαστικού κατόπτρου είναι η εξής [1]:

$$S = I_b \cdot \rho \cdot (\gamma \cdot \tau \cdot \alpha)_n \cdot K_{\gamma\tau\alpha} \quad (5.1)$$

όπου:

$S$  η απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα μη σκιαζόμενης επιφάνειας του ανακλαστικού κατόπτρου

$I_b$  η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο παραβολικό κάτοπτρο

$\rho$  η ανακλαστικότητα (reflectance) του παραβολικού κατόπτρου

$\gamma_n$  ο συντελεστής αναχαίτισης (intercept factor)

$\tau_n$  η μετάδοση (transmittance) του καλύμματος του αποδέκτη

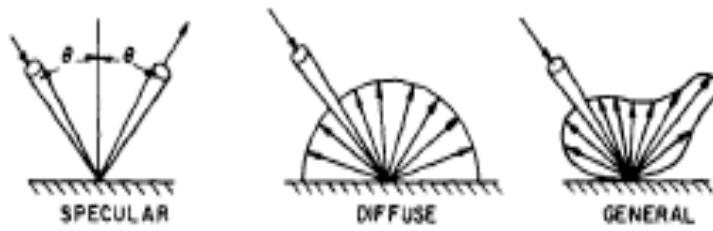
$\alpha_n$  η απορροφητικότητα (absorptance) του υλικού κατασκευής του απορροφητή

$K_{\gamma\tau\alpha}$  ο συντελεστής μετατροπής της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο παραβολικό κάτοπτρο

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το  $1 \frac{W}{m^2}$ .

### 5.2 Ανακλαστικότητα

Η ανακλαστικότητα χαρακτηρίζει ένα υλικό ως προς την ικανότητά του να ανακλά την ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω του. Έστω ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει την μορφή ‘μολυβιού’, δηλαδή περιέχεται μέσα σε μία μικρή στερεά γωνία  $\Delta\omega$ , τότε συναντώνται δύο μορφές ανακλώμενης ακτινοβολίας, η διάχυτη (diffuse) και η κατοπτρική (specular), Σχήμα 5.1. Η διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία διαδίδεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, ενώ η κατοπτρική προς την αντίθετη κατεύθυνση αλλά με την ίδια γωνία πρόπτωσης  $\theta$ . Το είδος της ανάκλασης εξαρτάται από την στιλπνότητα του υλικού. Στην πράξη όμως, καμία ανάκλαση δεν είναι αμιγώς κατοπτρική ή διάχυτη, αλλά ένας συνδυασμός και των δύο, που ονομάζεται γενική ανάκλαση. Στην γενική ανάκλαση, το μέγεθος της ανακλώμενης έντασης της ακτινοβολίας σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, και για μία δεδομένη επιφάνεια, είναι συνάρτηση του μήκους κύματος και της χωρικής κατανομής της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Σχήμα 5.1 Κατοπτρική, διάχυτη και γενική ανάκλαση ακτινοβολίας.

Η συνάρτηση ανάκλασης χρησιμοποιείται για να συσχετίσει την ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση με την ακόλουθη σχέση [1]:

$$\rho_\lambda(\mu_r, \varphi_r, \mu_i, \varphi_i) = \lim_{\Delta\omega_i \rightarrow 0} \left( \frac{\pi \cdot I_{\lambda,r}(\mu_r, \varphi_r)}{I_{\lambda,i} \cdot \mu_i \cdot \Delta\omega_i} \right) \quad (5.2)$$

όπου:

$r$  ο δείκτης που αναφέρεται στην ανακλώμενη ακτινοβολία

$i$  ο δείκτης που αναφέρεται στην προσπίπτουσα ακτινοβολία

$I_{\lambda,r}(\mu_r, \varphi_r)$  το ποσό της ανακλώμενης ακτινοβολίας μήκους κύματος  $\lambda$  από την κατεύθυνση

$\mu, \varphi$

$I_{\lambda,i}$  το ποσό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μήκους κύματος  $\lambda$

$\mu$  το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$

$\varphi$  η αζιμουθιακή γωνία.

### 5.3 Απορροφητικότητα

Η ηλιακή απορροφητικότητα, γενικά, χαρακτηρίζει ένα υλικό ως προς την ικανότητά του να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, η μονοχρωματική κατεύθυνση απορροφητικότητα  $\alpha_\lambda(\mu, \varphi)$ , είναι το ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας από την κατεύθυνση  $\mu, \varphi$  (όπου  $\mu$  είναι το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$  και  $\varphi$  είναι η αζιμούθια γωνία του ήλιου) με μήκος κύματος  $\lambda$ , που απορροφάται από κάποιο υλικό. Η κατεύθυνση απορροφητικότητα  $\alpha(\mu, \varphi)$ , περιλαμβάνει όλα τα μήκη κύματος, η μονοχρωματική ημισφαιρική απορροφητικότητα  $\alpha_\lambda$  περιλαμβάνει το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στο υλικό από όλες τις κατεύθυνσεις, αλλά απορροφάται ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, και τέλος η ημισφαιρική απορροφητικότητα  $\alpha$  περιλαμβάνει την ηλιακή ενέργεια από κάθε κατεύθυνση και όλων των μηκών κύματος. Η σχέση από την οποία υπολογίζεται η μονοχρωματική κατεύθυνση απορροφητικότητα είναι [1]:

$$\alpha_\lambda(\mu, \varphi) = \frac{I_{\lambda,\alpha}(\mu, \varphi)}{I_{\lambda,i}(\mu, \varphi)} \quad (5.3)$$

όπου:

- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| $I_{\lambda,a}(\mu, \varphi)$ | το ποσό της απορροφημένης ακτινοβολίας μήκους κύματος $\lambda$ που προσπίπτει στο υλικό από την κατεύθυνση $\mu, \varphi$ |
| $I_{\lambda,i}(\mu, \varphi)$ | το ποσό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μήκους κύματος $\lambda$ από την κατεύθυνση $\mu, \varphi$                          |

Με βάση την Εξίσωση 5.3 προκύπτουν εύκολα και οι αντίστοιχες σχέσεις υπολογισμού των υπόλοιπων μεγεθών.

Τα δεδομένα που είναι συνήθως διαθέσιμα είναι μετρήσεις της μονοχρωματικής ανακλαστικότητας  $\rho_\lambda$  των υλικών. Με αυτά τα δεδομένα, μπορεί να διαιρεθεί το προσπίπτων ηλιακό φάσμα (Πίνακας 2.1) σε υποδιαστήματα και με μαθηματική ολοκλήρωση να υπολογιστεί η απορροφητικότητα  $\alpha$ . Εάν τα διαστήματα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας είναι ίσα, τότε η συνολική απορροφητικότητα ενός υλικού υπολογίζεται από το άθροισμα:

$$\alpha = \left( \frac{1}{n} \right) \cdot \sum_{j=1}^n \alpha_{\lambda,j} = 1 - \left( \frac{1}{n} \right) \cdot \sum_{j=1}^n \rho_{\lambda,j} \quad (5.4)$$

όπου:

- |     |                              |
|-----|------------------------------|
| $n$ | το πλήθος των υποδιαστημάτων |
|-----|------------------------------|

Η δεύτερη ισότητα προκύπτει από τον δεύτερο νόμο του Kirchhoff, σύμφωνα με τον οποίο το άθροισμα της ανακλαστικότητας και της απορροφητικότητας ισούται με τη μονάδα, δηλαδή

$$\rho + \alpha = 1 \quad (5.5)$$

## 5.4 Εκπομπή

Η μονοχρωματική κατευθυνόμενη εκπομπή  $\varepsilon_\lambda(\mu, \varphi)$  ορίζεται ως ο λόγος της μονοχρωματικής κατευθυνόμενης έντασης, που εκπέμπεται από μία επιφάνεια, προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, προς την μονοχρωματική ένταση που θα μπορούσε να εκπέμψει ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία, δηλαδή:

$$\varepsilon_\lambda(\mu, \varphi) = \frac{I_\lambda(\mu, \varphi)}{I_{\lambda,b}} \quad (5.6)$$

Με την ίδια λογική που υπολογίστηκε η απορροφητικότητα, υπολογίζεται και η εκπομπή, διαιρώντας το φάσμα του μέλανος σώματος (Πίνακας 5.1) σε υποδιαστήματα, και λαμβάνοντας υπόψη την θερμοκρασία της επιφάνειας [14]. Εάν τα διαστήματα της ενέργειας του φάσματος του μέλανος σώματος είναι ίσα, τότε η συνολική εκπομπή ενός υλικού υπολογίζεται από το άθροισμα [1]:

$$\varepsilon = \frac{\mathbf{1}}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \varepsilon_{\lambda,j} = \mathbf{1} - \left( \frac{\mathbf{1}}{n} \right) \cdot \sum_{j=1}^n \rho_{\lambda j} \quad (5.7)$$

όπου:

$n$  το πλήθος των υποδιαστημάτων

Η δεύτερη ισότητα προκύπτει από τον δεύτερο νόμο του Kirchhoff, σύμφωνα με τον οποίο το άθροισμα της ανακλαστικότητας και της εκπομπής ισούται με τη μονάδα, δηλαδή

$$\rho + \varepsilon = \mathbf{1} \quad (5.8)$$

<b>Πίνακας 5.1 Φάσμα μέλανος σώματος</b>		
Ενεργειακό διάστημα $f_{0-\lambda T}$	Γινόμενο εύρους μήκους κύματος και θερμοκρασίας $\lambda \cdot T$ ( $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ )	Μέσο $\lambda \cdot T$ ( $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ )
0,05	1.880	1.660
0,10	2.200	2.050
0,15	2.450	2.320
0,20	2.680	2.560
0,25	2.900	2.790
0,30	3.120	3.010
0,35	3.350	3.220
0,40	3.580	3.460
0,45	3.830	3.710
0,50	4.110	3.970
0,55	4.410	4.250
0,60	4.740	4.570
0,65	5.130	4.930
0,70	5.590	5.350
0,75	6.150	5.850
0,80	6.860	6.480
0,85	7.850	7.310
0,90	9.380	8.510
0,95	12.500	10.600
1,00	$\infty$	16.300

## 5.5 Μετάδοση

Η μετάδοση χαρακτηρίζει ένα υλικό ως προς την ικανότητά του να το διαπερνάται στο ακέραιο ή κατά ένα μέρος από την προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία. Το γναλί, το οποίο είναι το υλικό κατασκευής των περισσότερων καλυμμάτων των ηλιακών θερμικών συλλεκτών, έχει αρκετά μεγάλο βαθμό μεταδοτικότητας (transmittance), ανεξάρτητα από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για λείες επιφάνειες, ο Fresnel είχε αναπτύξει εκφράσεις για την ανάκλαση μη πολωμένης ακτινοβολίας που διέρχεται από το υλικό 1 με δείκτη διάθλασης  $n_1$ , στο υλικό 2 με δείκτη διάθλασης  $n_2$  [1]:

$$r_{\perp} = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (5.9)$$

$$r_{||} = \frac{\tan(\theta_2 - \theta_1)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \quad (5.10)$$

$$r = \frac{r_{\perp} + r_{||}}{2} \quad (5.11)$$

όπου:

$\theta_1$  η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια, σε μοίρες

$\theta_2$  η γωνία διάθλασης της ακτινοβολίας, σε μοίρες

$r_{\perp}$  η κάθετη συνιστώσα της μη πολωμένης ακτινοβολίας, ως προς το επίπεδο που ορίζεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και την κάθετη στην επιφάνεια πρόσπτωσης

$r_{||}$  η παράλληλη συνιστώσα της μη πολωμένης ακτινοβολίας, ως προς το επίπεδο που ορίζεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και την κάθετη στην επιφάνεια πρόσπτωσης

Οι γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$  συνδέονται μεταξύ τους με τον νόμο του Snell:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} \quad (5.12)$$

Για ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα σε μία επιφάνεια, οι γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$  είναι μηδενικές, επομένως από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η ακόλουθη:

$$r(0) = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (5.13)$$

και εάν το ένα μέσο είναι ο αέρας, τότε η σχέση 5.13 γίνεται:

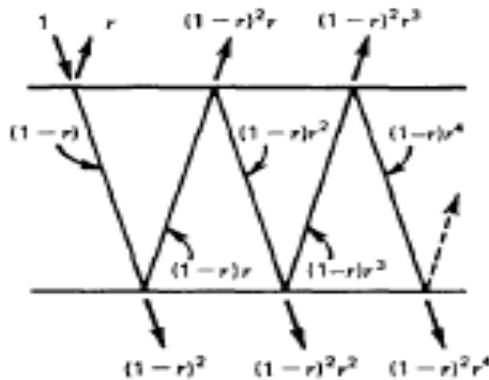
$$r(0) = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (5.14)$$

Θεωρώντας ότι το κάλυμμα έχει μηδενική απορροφητικότητα, η μετάδοση μίας επιφάνειας λαμβάνοντας υπόψη μόνο της απώλειες λόγω ανάκλασης, υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\tau_{\perp} = (1 - r_{\perp})^2 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} r_{\perp}^{2n} = \frac{(1 - r_{\perp})^2}{1 - r_{\perp}^2} = \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \quad (5.15)$$

$$\tau_{||} = (1 - r_{||})^2 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} r_{||}^{2n} = \frac{(1 - r_{||})^2}{1 - r_{||}^2} = \frac{1 - r_{||}}{1 + r_{||}} \quad (5.16)$$

$$\tau_r = \frac{\frac{1 - r_{||}}{1 + r_{||}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}}}{2} \quad (5.17)$$



*Σχήμα 5.3 Ανακλαστικότητα και μετάδοση ακτινοβολίας σε διάφανο οπτικό μέσο.*

Στην περίπτωση κάθετης ακτινοβολίας προς την επιφάνεια, οι συνιστώσες  $r_{\perp}$  και  $r_{||}$  είναι ίσες και η σχέση 5.17 γίνεται:

$$\tau_r = \frac{1 - r(0)}{1 + r(0)} \quad (5.18)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τώρα, μόνο τις απώλειες λόγω απορροφητικότητας του καλύμματος, η μετάδοση μίας επιφάνειας υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_a = \exp\left(-\frac{K \cdot L}{\cos(\theta_2)}\right) \quad (5.19)$$

όπου:

$K$  ο συντελεστής εξάλειψης (extinction coefficient), ο οποίος είναι σταθερός για κάθε υλικό

$L$  το πάχος της επιφάνειας

Επομένως η μετάδοση προκύπτει από τις σχέσεις 5.17 και 5.19 και ισούται με:

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a \quad (5.20)$$

## 5.6 Συντελεστής παρεμπόδισης ακτινών

Ο συντελεστής παρεμπόδισης ακτινών  $\gamma$  (intercept factor) ορίζεται ως το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας, που ανακλώμενο από το ανακλαστικό κάτοπτρο, προσπίπτει στον αποδέκτη. Για τον υπολογισμό του συντελεστής αναχαίτισης οι Guven και Bannerot ανέπτυξαν την ακόλουθη σχέση [15], [16]:

$$\begin{aligned} \gamma = & \left( \frac{1 + \cos \varphi_r}{2 \cdot \sin \varphi_r} \right) \cdot \int_0^{\varphi_r} \operatorname{Erf} \left( \frac{\sin \varphi_r \cdot (1 + \cos \varphi_r) \cdot ((1 - 2 \cdot d' \cdot \sin \varphi) - (\pi \cdot \beta' \cdot (1 + \cos \varphi_r)))}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma' \cdot (1 + \cos \varphi_r)} \right) - \\ & - \operatorname{Erf} \left( \frac{-\sin \varphi_r \cdot (1 + \cos \varphi) \cdot ((1 + 2 \cdot d' \cdot \sin \varphi) + (\pi \cdot \beta' \cdot (1 + \cos \varphi_r)))}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma' \cdot (1 + \cos \varphi_r)} \right) \cdot \left( \frac{d\varphi}{1 + \cos \varphi} \right) \end{aligned} \quad (5.21)$$

όπου:

$\varphi_r$  η γωνία παρυφή (rim angle), σε μοίρες

$d$  το καθολικό λάθος παραμέτρου, λόγω μη σωστής τοποθέτησης του αποδέκτη και λαθών στην κατασκευή του ανακλαστικού κατόπτρου,  $d = \frac{d_r}{D_{r,o}}$ , όπου  $d_r$  είναι η απόσταση της μη λανθασμένης θέσης του αποδέκτη (σε mm) και  $D_{r,o}$  είναι η εξωτερική διάμετρος του αποδέκτη (σε m)

$\beta'$  το καθολικό λάθος παραμέτρου, λόγω γωνιακών λαθών,  $\beta' = \beta \cdot C$ , όπου  $\beta$  είναι η λάθος γωνία ευθυγράμμισης του συλλέκτη με τον ήλιο και  $C$  είναι το ποσοστό συγκέντρωσης

$\sigma'$  το καθολικό τυχαίο λάθος παραμέτρου,  $\sigma' = \sigma \cdot C$

- $\sigma$  η συνολική απόκλιση της ανακλώμενης ακτινοβολίας σε κάθετη πρόσπτωση,
- $$\sigma = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + 4 \cdot \sigma_{slope}^2 + \sigma_{mirror}^2}$$
- , όπου το
- $\sigma_{sun}$
- είναι η απόκλιση της κατανομής της ηλιακής ενέργειας, το
- $\sigma_{slope}$
- είναι η λανθασμένη κλίση του συλλέκτη και το
- $\sigma_{mirror}$
- εκφράζει το λάθος της μη απόλυτα λείας επιφάνειας του ανακλαστικού κατόπτρου.

- Erf* η συνάρτηση λάθους (error function), χρησιμοποιείται για αποτελέσματα μετρήσεων που περιγράφονται από μία κανονική κατανομή και εκφράζει την πιθανότητα το λάθος μίας μέτρησης να βρίσκεται μέσα σε ένα όριο.

## 5.7 Μετατροπέας γωνίας πρόσπτωσης

Ο μετατροπέας γωνίας πρόσπτωσης χρησιμοποιείται για να προσμετρήσει την απόκλιση από την κάθετη, της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο ανακλαστικό κάτοπτρο. Ο Rabl ανέπτυξε την παρακάτω σχέση, η οποία ισχύει για συλλέκτες που το μήκος του αποδέκτη τους είναι ίδιο με το μήκος του ανακλαστικού κατόπτρου [17]:

$$K(\theta) = 1 - \left( \frac{f}{1} \right) \cdot \left( 1 + \left( \frac{\alpha^2}{48 f^2} \right) \right) \cdot \tan(\theta) \quad (5.22)$$

όπου:

- $f$  η απόσταση μεταξύ του σημείου εστίασης και της αρχής των αξόνων όπου βρίσκεται η μία κορυφή του παραβολικού κατόπτρου (focal length), σε m
- $l$  το μήκος του αποδέκτη, σε m
- $\alpha$  το άνοιγμα του ανακλαστικού κατόπτρου (aperture), σε m

Μία εναλλακτική σχέση είναι η ακόλουθη [18]:

$$K(\theta) = 1 - 6,74 \cdot 10^5 \cdot \theta^2 + 1,64 \cdot 10^6 \cdot \theta^3 - 2,51 \cdot 10^8 \cdot \theta^4 \quad (5.23)$$

## 5.8 Συντελεστής συγκέντρωσης

Ο συντελεστής συγκέντρωσης (concentration ratio  $C$ ) ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού του ‘ανοίγματος’ της παραβολής ( $A_a$ ) προς το εμβαδόν του αποδέκτη ( $A_r$ ), όπως φαίνεται στην Εξίσωση 5.24, ή το ποσό της ενέργειας που φτάνει στον αποδέκτη προς την ενέργεια που προσπίπτει στο κάτοπτρο [1].

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (5.24)$$

## 6. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

### 6.1 Εισαγωγή

Η θερμική απόδοση προσδιορίζει έναν ηλιακό θερμικό συλλέκτη ως προς το ποσό της ηλιακής ενέργειας που τελικά μεταφέρεται στο θερμικό υγρό, το οποίο ρέει στο κέντρο του αποδέκτη, με τη μορφή θερμικής ενέργειας, και εξαρτάται από τις θερμικές απώλειες του συστήματος. Ο υπολογισμός των θερμικών απωλειών σε ένα σύστημα εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του συστήματος, αλλά και από τα υλικά κατασκευής του. Στην παρούσα εργασία, η αρχιτεκτονική του αποδέκτη είναι όμοια με αυτή του πειράματος “Heat Loss Testing of Schott’s 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver” του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory, NREL)

[3] το οποίο σήμερα ηγείται της έρευνας για παραβολικούς συλλέκτες στις ΗΠΑ και έχει αναπτύξει ένα μοντέλο προσομοίωσης παραβολικού συλλέκτη για την καθοδήγηση των προσπαθειών που γίνονται για την έρευνα τέτοιων συστημάτων, καθώς και του βιβλίου “Solar Engineering of Thermal Processes” των John Duffie και William Beckman [1], και θα αναλυθεί στα επόμενα υποκεφάλαια.

### 6.2 Τρόποι μεταφοράς θερμότητας

Η θερμότητα μεταφέρεται ως αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ επιφανειών ή μεταξύ μίας επιφάνειας και ενός ρευστού. Υπάρχουν τρείς τρόποι μεταφοράς θερμότητας:

- Μεταφορά θερμότητας με επαφή,
- Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, και
- Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή,

οι οποίοι αναλύονται ακολούθως.

#### 6.2.1 Επαφή (conduction)

Η μεταφορά θερμότητας με επαφή προκύπτει από μεταφορά θερμότητας στα υλικά, μέσω των μορίων τους. Το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται μέσω επαφής σε μία επιφάνεια  $A$  (σε  $m^2$ ) μπορεί να εκφραστεί από την σχέση του Fourier [20]:

$$Q = -k \cdot A \cdot \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (6.1)$$

όπου:

$$k \quad \text{η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, σε } \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

$$\frac{dT}{dx} \quad \text{η θερμοκρασία στην κατεύθυνση } x, \text{ σε } \frac{\circ C}{m}$$

- το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η θερμότητα της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το 1 W.

Η ροή θερμότητας με επαφή (conduction heat flux) μέσα σε ένα επίπεδο τοίχωμα προκύπτει ολοκληρώνοντας την σχέση 6.1:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{k \cdot (T_1 - T_2)}{L} \quad (6.2)$$

όπου:

$$k \quad \text{η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, σε } \frac{W}{m \cdot \circ C}$$

$L$  το πάχος του τοιχώματος

$T_1$  η θερμοκρασία του εξωτερικού μέρους του τοιχώματος (σε  $\circ C$ )

$T_2$  η θερμοκρασία του εξωτερικού μέρους του τοιχώματος (σε  $\circ C$ )

$$\text{Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το } 1 \frac{W}{m^2}.$$

Η θερμότητα που μεταφέρεται με επαφή σε δακτυλιοειδή αγωγό είναι [20] [20] [20] [10] [20]:

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (6.3)$$

όπου:

$L$  το μήκος του αγωγού, σε m

$T_1$  η θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος του αγωγού (σε  $\circ C$ )

$T_2$  η θερμοκρασία του εξωτερικού τοιχώματος του αγωγού (σε  $\circ C$ )

$r_1$  η ακτίνα του εσωτερικού τοιχώματος του αγωγού, σε m

$r_2$  η ακτίνα του εξωτερικού τοιχώματος του αγωγού, σε m

$$k \quad \text{η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, σε } \frac{W}{m \cdot \circ C}$$

### 6.2.2 Ακτινοβολία (radiation)

Η θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται από ένα θερμό σώμα προς το ψυχρότερο περιβάλλον του, με την μορφή φωτονίου, εμφανίζεται δηλαδή τόσο ως σωματίδιο, όσο και ως κύμα. Η ενέργεια ενός φωτονίου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$e = h \cdot v \quad (6.4)$$

όπου:

$h$  η σταθερά του Planck, **663 10<sup>-27</sup> erg s**

$v$  η συχνότητα του φωτονίου, σε Hz

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το 1 eV.

Καθώς τα φωτόνια ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, για την οποία ισχύει η σχέση:

$$c = v \cdot \lambda \quad (6.5)$$

όπου:

$\lambda$  το μήκος κύματος του φωτονίου

$c$  η ταχύτητα του φωτός είναι σταθερή και ίση με **3·10<sup>8</sup> m/s**

η σχέση 6.4 μπορεί να διατυπωθεί μέσω της 6.5 ως:

$$e = \frac{(h \cdot c)}{\lambda} \quad (6.6)$$

Τα μήκη κύματος της θερμικής ακτινοβολίας εκτείνονται από 0,1 έως 1.000 μμ. Στο υπεριώδες φάσμα ανήκει η περιοχή από 0,1 έως 0,4 μμ, στο ορατό η περιοχή από 0,4 έως 0,7 μμ και στο υπέρυθρο από 0,7 έως 1.000 μμ.

Το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας από μία επιφάνεια  $A_2$  σε μία επιφάνεια  $A_1$  υπολογίζεται από την σχέση [1]:

$$Q = A_1 \cdot h_r \cdot (T_2 - T_1) \quad (6.7)$$

όπου:

$h_r$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος ισούται με:

$$h_r = \frac{\sigma \cdot (T_2^2 + T_1^2) \cdot (T_2 + T_1)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \varepsilon_2) \cdot A_1}{\varepsilon_2 \cdot A_2}} \quad (6.8)$$

όπου:

$$\sigma \quad \text{η σταθερά Stefan-Boltzmann, που ισούται με } 5,669 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

$\varepsilon_1$  η εκπομπή της επιφάνειας 1

$\varepsilon_2$  η εκπομπή της επιφάνειας 2

$F_{12}$  ο οπτικός συντελεστής (view factor), ο οποίος εκφράζει την μη κατοπτρική ανάκλαση της ακτινοβολίας από τις δύο επιφάνειες, στην περίπτωση όμως παράλληλων επιφανειών ισούται με την μονάδα.

### 6.2.3 Συναγωγή (convection)

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή αναφέρεται στα ρευστά και οφείλεται στην κίνηση των μορίων τους. Η κίνηση αυτή δημιουργείται είτε λόγω της βαρύτητας που επιδρά στα ρευστά, είτε με χρήση κάποιας συσκευής που προκαλεί κίνηση στα μόρια των ρευστών, είτε λόγω του ανέμου (forced convection) ή κίνησής τους μέσα σε αγωγούς. Ο τρόπος αυτός μεταφοράς θερμότητας είναι ιδιαίτερα περίπλοκος και ο υπολογισμός του βασίζεται κυρίως σε εμπειρικές εξισώσεις. Το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται μέσω συναγωγής δίνεται από την σχέση [1]:

$$Q = A \cdot h \cdot (T_f - T_s) \quad (6.9)$$

όπου:

$T_s$  η θερμοκρασία της επιφάνειας A (σε °C)

$T_f$  η θερμοκρασία του ρευστού (σε °C)

$h$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος ισούται με:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{d} \quad (6.10)$$

όπου:

$d$  είτε η διάμετρος του αγωγού μέσα στον οποίο ρέει το ρευστό, είτε το μήκος της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με τον άνεμο

$k$  η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού, σε  $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

$Nu$  ο αριθμός Nusselt, ο οποίος επεξηγείται ακολούθως

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το 1 W.

Αρχικά, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η φύση της ροής του ρευστού, δηλαδή να διερευνηθεί εάν πρόκειται για στρωτή ροή (laminar flow) ή για τυρπώδη (turbulent flow). Για τον λόγο αυτό υπολογίζεται ο αριθμός Reynolds ( $Re$ ), που δίνεται από την σχέση:

$$\text{Re} = \frac{d \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (6.11)$$

όπου:

$V$  η ταχύτητα του ρευστού, σε m/sec

$\rho$  η πυκνότητα του ρευστού (density), σε  $\frac{kg}{m^3}$

$\mu$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού (viscosity), σε  $\frac{kg}{m \cdot s}$

Στην περίπτωση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταξύ ενός αγωγού και κάποιου ρευστού, το οποίο ρέει στο εσωτερικό του αγωγού, εάν πρόκειται για στρωτή ροή, δηλαδή για  $Re < 2.000$ , ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ( $h$ ), υπολογίζεται από την σχέση:

$$h = \frac{k}{d} \cdot \left( 3,65 + \frac{0,0668 \text{Re} \text{Pr} \frac{d}{L}}{1 + 0,04 \left( \text{Re} \text{Pr} \frac{d}{L} \right)^{\frac{2}{3}}} \right) \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (6.12)$$

όπου:

$L$  το μήκος του αγωγού, σε m

$\mu_w$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού που έρχεται σε επαφή με τα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού, σε  $\frac{kg}{m \cdot s}$

$Pr$  ο αριθμός Prandl, που υπολογίζεται από την σχέση:

$$\text{Pr} = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (6.13)$$

όπου:

$c_p$  η θερμοχωρητικότητα (specific heat) του ρευστού, σε  $\frac{kJ}{kg \cdot C}$

Εάν πρόκειται για τυρβώδη ροή, δηλαδή για  $Re > 10.000$ , ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ( $h$ ) υπολογίζεται από την Σχέση 6.14.

$$h = 0,023 \frac{k}{d} \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (6.14)$$

Στην περίπτωση ανέμου κατά μήκος του κυλινδρικού αποδέκτη και για  $10^3 < \text{Re} < 2 \cdot 10^5$ , ο αριθμός Nusselt ( $Nu$ ) υπολογίζεται από την σχέση [20]:

$$Nu = 0.25 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.38} \quad (6.15)$$

Η θερμοκρασία στην οποία υπολογίζονται όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη, προκύπτει από τον μέσο όρο των θερμοκρασιών του ρευστού και του αγωγού.

### 6.3 Χρήσιμο ενεργειακό κέρδος

Ος χρήσιμος ενεργειακός κέρδος (useful energy gain) ορίζεται η θερμότητα που μεταφέρεται τελικώς από τον συλλέκτη στο θερμικό υγρό και υπολογίζεται από την σχέση [1]:

$$Q_u = F_R \cdot A_a \cdot \left( S - \left( \frac{A_r}{A_a} \right) \cdot U_L \cdot (T_i - T_a) \right) \quad (6.16)$$

όπου:

$A_a$  το εμβαδόν του 'ανοίγματος' της παραβολής του συλλέκτη (σε m<sup>2</sup>)

$A_r$  το εμβαδόν του αποδέκτη του συλλέκτη (σε m<sup>2</sup>)

$F_R$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του συλλέκτη (collector heat removal factor), ο οποίος συσχετίζει το πραγματικό χρήσιμο κέρδος του συλλέκτη με το κέρδος που θα είχε εάν δεν υπήρχαν καθόλου απώλειες, δηλαδή εάν ο συλλέκτης είχε την ίδια θερμοκρασία με αυτή του εισερχόμενου υγρού, και υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_R = F' \cdot F'' \quad (6.17)$$

όπου:

$$F' = \left( \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{D_i \cdot h_{conv}} + \left( \frac{D_o}{2 \cdot k} \cdot \ln \left( \frac{D_o}{D_i} \right) \right)} \right) \quad (6.18)$$

$D_o$  η εξωτερική διάμετρος του απορροφητή (σε m)

$D_i$  η εσωτερική διάμετρος του απορροφητή (σε m)

$k$  η θερμική αγωγιμότητα του απορροφητή, σε  $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

και

$$F'' = \frac{\dot{m} C_p}{A_t \cdot U_L \cdot F'} \cdot \left( 1 - \exp \left( - \frac{A_t \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} C_p} \right) \right) \quad (6.19)$$

όπου:

$\dot{m}$  ο ρυθμός ροής του ρευστού (flow rate), σε  $\frac{kg}{sec}$

$C_p$  η θερμοχωρητικότητα του ρευστού (specific heat), σε  $\frac{kJ}{kg \cdot C}$

$S$  η απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα μη σκιαζόμενης επιφάνειας του ανακλαστικού κατόπτρου (σε  $\frac{W}{m^2}$ )

$U_L$  ο συντελεστής απωλειών (loss coefficient) λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής, προκύπτει από την σχέση:

$$U_L = \left( \frac{A_t}{(h_w + h_{r,c-a}) \cdot A_t} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right)^{-1} \quad (6.20)$$

$T_i$  η θερμοκρασία του εισερχόμενου ρευστού (σε °C)

$T_a$  η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (σε °C)

Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το 1 W.

## 6.4 Θερμικό ισοζύγιο αποδέκτη

Σε αυτή την παράγραφο αναλύεται το θερμικό ισοζύγιο του αποδέκτη του παραβολικού συλλέκτη, το οποίο διέπεται από την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας.

Πιο αναλυτικά ο αποδέκτης παρουσιάζει [1]:

- Απώλειες θερμότητας μεταξύ καλύμματος και περιβάλλοντος, λόγω του αέρα, μέσω συναγωγής ( $h_{wind}$ ) – θετικό όταν η θερμική ροή είναι από το κάλυμμα προς το περιβάλλον, δηλαδή η θερμοκρασία του καλύμματος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος.
- Απώλειες θερμότητας μεταξύ καλύμματος και περιβάλλοντος, μέσω ακτινοβολίας ( $h_{r,c-a}$ ) – θετικό όταν η θερμική ροή είναι από το κάλυμμα προς το περιβάλλον, δηλαδή η θερμοκρασία του καλύμματος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος..

- Μεταφορά θερμότητας με επαφή μέσα στο ίδιο το υλικό του καλύμματος, είτε από το εσωτερικό του τοίχωμα προς το εξωτερικό, είτε αντίστροφα, αναλόγως με το ποιο είναι θερμότερο ( $h_{cond,c}$ ).
- Μεταφορά θερμότητας με επαφή μέσα στο ίδιο το υλικό του απορροφητή, είτε από το εσωτερικό του τοίχωμα προς το εξωτερικό, είτε αντίστροφα, αναλόγως με το ποιο είναι θερμότερο ( $h_{cond,r}$ ).
- Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από την θερμότερη εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή, προς το ψυχρότερο κάλυμμα ( $h_{r,r-c}$ ).
- Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, από το ρευστό που έρχεται σε επαφή με το εσωτερικό τοίχωμα του απορροφητή προς την υπόλοιπη μάζα του ρευστού ( $h_{conv,f}$ ).

Η εξαγωγή των εξισώσεων του θερμικού ισοζυγίου τόσο για το κάλυμμα, όσο και για τον απορροφητή του παραβολικού συλλέκτη της παρούσας εργασίας, με βάση την παραπάνω θεωρητική ανάλυση, παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7.

## 7. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

### 7.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση ενός παραβολικού συλλέκτη, η οποία υποδιαιρείται σε δύο σκέλη, την οπτική και τη θερμική μοντελοποίηση. Σκοπός είναι ο υπολογισμός της ετήσιας θερμικής απόδοσης του παραβολικού συλλέκτη και η σύγκριση των αποδόσεων του συλλέκτη για επιστρώσεις του παραβολικού κατόπτρου με δύο διαφορετικά υλικά, τον άργυρο και τον χρυσό. Επιπλέον μοντελοποιούνται τρία διαφορετικά είδη συστημάτων ιχνηλάτησης της τροχιάς του ήλιου και διερευνάται το πιο αποδοτικό, αυτό δηλαδή που ακολουθεί την πορεία των ηλιακών ακτινών με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν εξηγείται αναλυτικά το μοντέλο της προσομοίωσης του συλλέκτη, καθώς και το σύστημα προσανατολισμού του.



### 7.2 Το μοντέλο του παραβολικού συλλέκτη

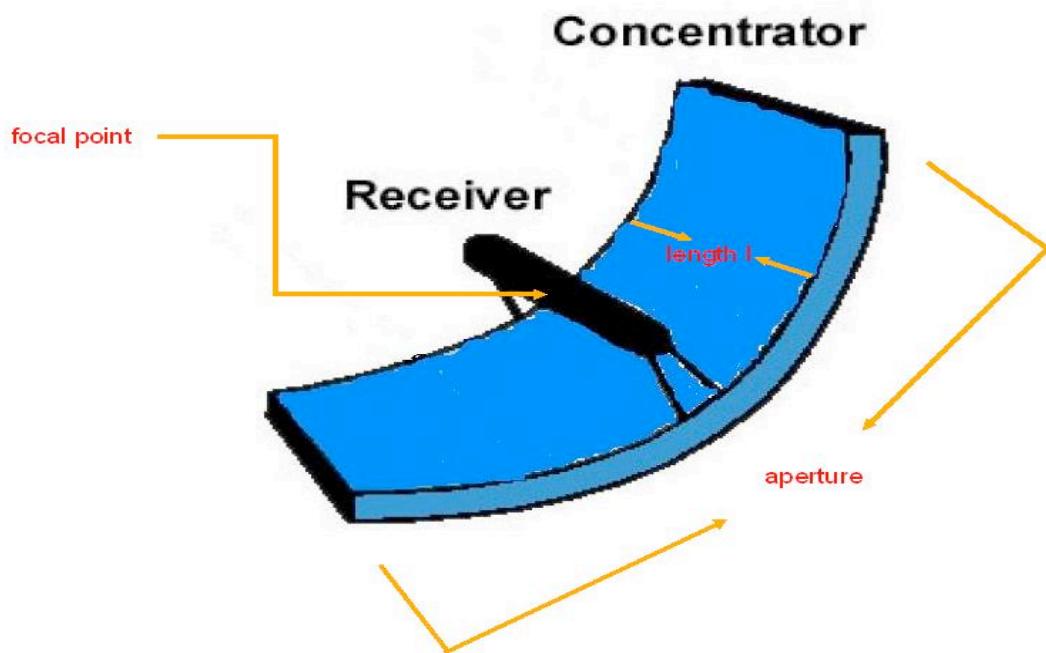
Το συγκεκριμένο μοντέλο του παραβολικού συλλέκτη αναπτύχθηκε με βάση το αντίστοιχο μοντέλο, το οποίο παρουσιάζεται στο βιβλίο “Solar Engineering of Thermal Processes” των John Duffie και William Beckman [1]. Επίσης, παρουσιάζει πολλές ομοιότητες, κυρίως ως προς την αρχιτεκτονική του αποδέκτη του, με το μοντέλο του πειράματος “Heat Loss Testing of Schott’s 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver” του National Renewable Energy Laboratory (NREL)

[3].

### 7.2.1 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά του παραβολικού συλλέκτη

Οι διαστάσεις του μοντέλου του παραβολικού συλλέκτη (Σχήμα 7.1) που αναπτύχθηκε και μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι οι ακόλουθες:

- Μήκος εστίασης (focal length):  $fl = 1,2 \text{ m}$
- Πλάτος ανοίγματος της παραβολής (aperture width):  $ap = 2,5 \text{ m}$
- Μήκος συλλέκτη:  $l = 10 \text{ m}$
- Μήκος αποδέκτη:  $l = 10 \text{ m}$
- Εξωτερική διάμετρος καλύμματος:  $d_c_{outer} = 0,09 \text{ m}$
- Εσωτερική διάμετρος καλύμματος:  $d_c_{inner} = 0,088 \text{ m}$
- Εξωτερική διάμετρος αποδέκτη:  $d_a_{outer} = 0,06 \text{ m}$
- Εσωτερική διάμετρος αποδέκτη:  $d_a_{inner} = 0,055 \text{ m}$
- Επιφάνεια του ανοίγματος της παραβολής:  $(ap - d_c_{outer}) \cdot l = 24,1 \text{ m}^2$
- Επιφάνεια του καλύμματος:  $(\pi \cdot d_c_{outer} l) = 2,826 \text{ m}^2$
- Επιφάνεια του αποδέκτη:  $(\pi \cdot d_a_{outer} l) = 1,884 \text{ m}^2$



Σχήμα 7.1 Διαστάσεις παραβολικού συλλέκτη.

- Πυκνότητα ‘λευκού’ γυαλιού  $\rho_{glass} = 2.400 \frac{kg}{m^3}$
- Πυκνότητα χαλκού  $\rho_{copper} = 8.954 \frac{kg}{m^3}$
- Μάζα καλύμματος,  $\left( m_{glass} \left( \pi \cdot \left( \left( \frac{d_{c\_outer}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{c\_inner}}{2} \right)^2 \right) \cdot I \right) \right) = 6,71 \text{ kg}$
- Μάζα απορροφητή,  $\left( m_{copper} \left( \pi \cdot \left( \left( \frac{d_{a\_outer}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{a\_inner}}{2} \right)^2 \right) \cdot I \right) \right) = 40,436 \text{ kg}$
- Ρυθμός ροής ψυκτικού υγρού,  $mass\_flow\_rate = 0,55 \frac{kg}{sec}$

### 7.2.2 Μοντελοποίηση και επιλογή του αποδοτικότερου συστήματος ιχνηλάτησης της τροχιάς του ήλιου

Ο παραβολικός συλλέκτης της παρούσας εργασίας κινείται από μοτέρ ακολουθώντας την πορεία του ήλιου, ώστε να ελαχιστοποιεί τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και επομένως να μεγιστοποιείται το ποσό της ακτινοβολίας που συλλέγει. Οι γωνίες ζενίθ ( $\theta_z$ ) και οι γωνίες πρόσπτωσης ( $\theta$ ) υπολογίζονται με βάση το σύστημα προσανατολισμού που χρησιμοποιεί ο συλλέκτης. Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός των  $\theta_z$  και  $\theta$ , για τα τρία είδη συστημάτων παρακολούθησης ιχνηλάτησης της τροχιάς του ήλιου, που παρουσιάστηκαν θεωρητικά στο κεφάλαιο 4 [22], [23].

- Σύστημα συνεχούς περιστροφής γύρω από οριζόντιο άξονα ανατολής-δύσης :

  1. Αρχικά υπολογίζεται η αζιμούθια γωνία ήλιου  $\gamma_s$ , ως εξής:

$$\gamma_s = C_1 \cdot C_2 \cdot \gamma_s + C_3 \cdot \left( \frac{1 - C_1 \cdot C_2}{2} \right) \cdot 180 \quad (7.1)$$

όπου:

$$\tan \gamma_s = \frac{\sin \omega}{(\sin \varphi \cdot \cos \omega) - (\cos \varphi \cdot \tan \delta)} \quad (7.2)$$

$$C_1 = 1, \text{ εάν } |\omega| < \omega_{ew} \quad (7.3a)$$

$$C_1 = -1, \text{ διαφορετικά} \quad (7.3b)$$

$$C_2 = 1, \phi \cdot (\phi - \delta) \geq 0 \quad (7.4a)$$

$$C_2 = -1, \text{διαφορετικά} \quad (7.4b)$$

$$C_3 = 1, \varepsilon \text{άν } \omega \geq 0 \quad (7.5a)$$

$$C_3 = -1, \text{διαφορετικά} \quad (7.5b)$$

$$\cos(\omega_{ew}) = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\phi)} \quad (7.6)$$

2. Μέσω της αζιμουθιακής γωνίας ήλιου, υπολογίζεται η αζιμούθια γωνία επιφάνειας  $\gamma$ , ως εξής :

$$\gamma = 0^\circ, \text{ εάν } |\gamma_s| < 90 \quad (7.7a)$$

$$\gamma = 180^\circ, \text{ εάν } |\gamma_s| > 90 \quad (7.7b)$$

3. Έπειτα υπολογίζεται η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  :

$$\cos(\theta) = (1 - \cos(\delta)^2 \cdot \sin(\omega)^2)^{0.5} \quad (7.8)$$

4. Στη συνέχεια η γωνία ζενίθ  $\theta_z$  :

$$\cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \quad (7.9)$$

5. Η κλίση της επιφάνειας δίνεται από την σχέση :

$$\tan(\beta) = \tan(\theta_z) \cdot |\cos(\gamma_s)| \quad (7.10)$$

6. Τέλος, μέσω των σχέσεων 2.17 και 2.18 υπολογίζεται η προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο του συλλέκτη και πολλαπλασιάζοντάς την (το αντίστοιχο της ολοκλήρωσης για συνεχές πεδίο) με κάθε χρονικό διάστημα ηλιακού χρόνου ( $ts_2 - ts_1$ ), προκύπτει η ενέργεια του αντίστοιχου χρονικού διαστήματος σε  $\frac{Wh}{m^2}$ .

- Σύστημα συνεχούς περιστροφής γύρω από οριζόντιο άξονα βορρά-νότου:

1. Αρχικά υπολογίζεται η αζιμούθια γωνία ήλιου  $\gamma_s$ , σύμφωνα με τις σχέσεις 7.1 έως 7.6.
2. Μέσω της αζιμουθιακής γωνίας ήλιου, υπολογίζεται η αζιμούθια γωνία επιφάνειας  $\gamma$ , ως εξής :

$$\gamma = 90^\circ, \text{ εάν } \gamma_s > 0 \quad (7.11a)$$

$$\gamma = -90^\circ, \text{ εάν } \gamma_s < 90 \quad (7.11b)$$

3. Έπειτα υπολογίζεται η γωνία ζενίθ  $\theta_z$ , από την σχέση 7.9.

4. Στη συνέχεια η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ :

$$\cos(\theta) = (\cos(\theta_z)^2 + \cos(\delta)^2 \cdot \sin(\omega)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7.12)$$

5. Η κλίση της επιφάνειας δίνεται από την σχέση :

$$\tan(\beta) = \tan(\theta_z) \cdot |\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (7.13)$$

6. Τέλος, μέσω των σχέσεων 2.17 και 2.18 υπολογίζεται η προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο του συλλέκτη και πολλαπλασιάζοντάς την (το αντίστοιχο της ολοκλήρωσης για συνεχές πεδίο) με κάθε χρονικό διάστημα ήλιακού χρόνου ( $ts_2-ts_1$ ), προκύπτει η ενέργεια του αντίστοιχου χρονικού

$$\frac{Wh}{m^2}.$$

- Σύστημα συνεχούς περιστροφής γύρω από οριζόντιο άξονα βιορρά-νότου, παράλληλο με τον άξονα της γης:
  1. Αρχικά υπολογίζεται η αζιμούθια γωνία ήλιου  $\gamma_s$ , σύμφωνα με τις σχέσεις 7.1 έως 7.6.
  2. Μέσω της αζιμουθιακής γωνίας ήλιου, υπολογίζεται η αζιμουθιακή γωνία επιφάνειας  $\gamma$ , ως εξής :

$$\cos(\theta) = \tan\left(\frac{\sin(\theta_z) \cdot \sin(\gamma_s)}{\cos(\theta') \cdot \sin(\phi)}\right)^{-1} + 180 C_1 \cdot C_2 \quad (7.14)$$

όπου:

$$\cos(\theta') = \cos(\theta_z) \cdot \cos(\phi) + \sin(\theta_z) \cdot \sin(\phi) \quad (7.15)$$

$$C_1 = 0, \text{ εάν } \tan\left(\frac{\sin(\theta_z) \cdot \sin(\gamma_s)}{\cos(\theta') \cdot \sin(\phi)}\right)^{-1} + \gamma_s = 0 \quad (7.16a)$$

$$C_1 = 1, \text{ διαφορετικά} \quad (7.16b)$$

$$C_2 = 1, \text{ εάν } \gamma_s \geq 0 \quad (7.17a)$$

$$C_2 = -1, \text{ εάν } \gamma_s < 0 \quad (7.17b)$$

3. Έπειτα υπολογίζεται η γωνία ζενίθ  $\theta_z$ , από την σχέση 7.9.

4. Στη συνέχεια η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ :

$$\cos(\theta) = \cos(\delta) \quad (7.18)$$

5. Η κλίση της επιφάνειας δίνεται από την σχέση :

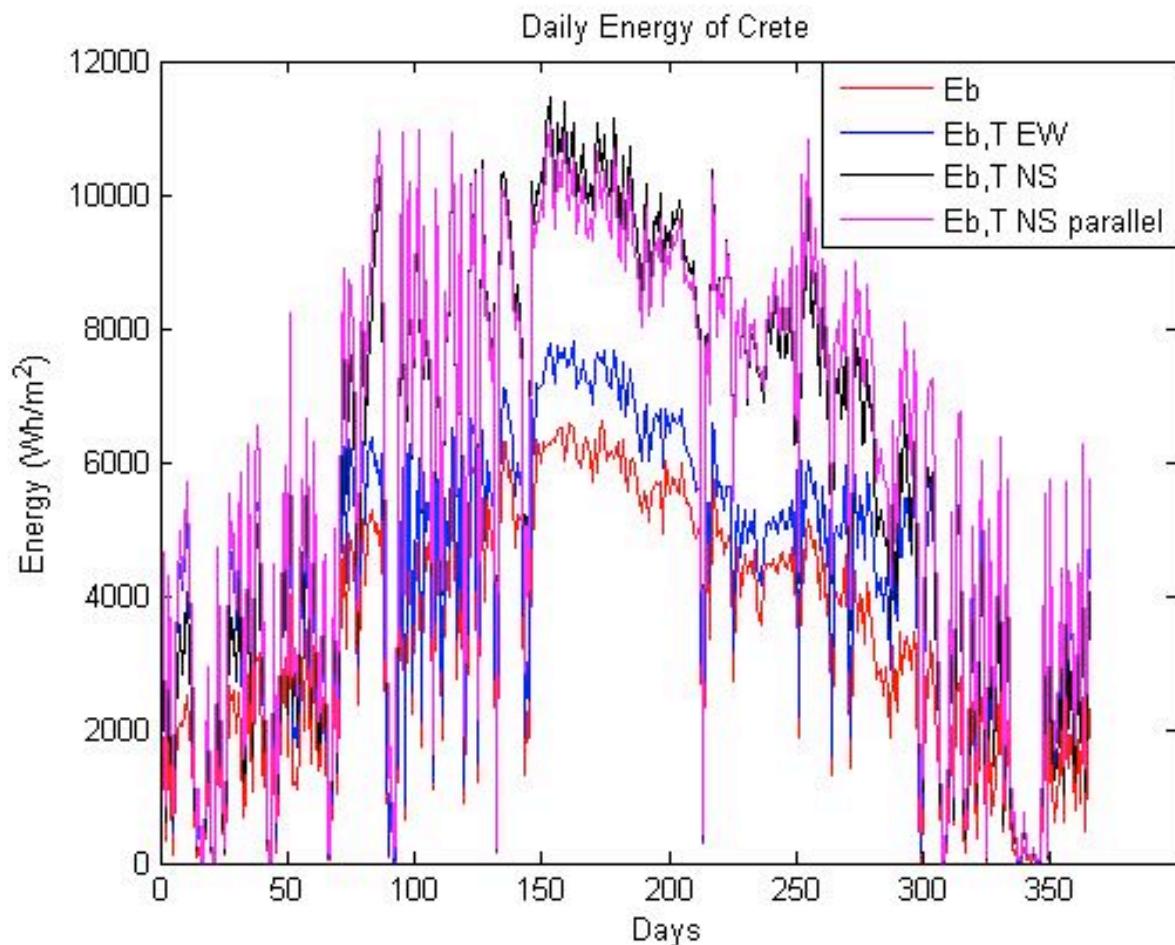
$$\tan(\beta) = \frac{\tan(\phi)}{\cos(\gamma)} \quad (7.13)$$

6. Τέλος, μέσω των σχέσεων 2.17 και 2.18 υπολογίζεται η προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο του συλλέκτη και πολλαπλασιάζοντάς την (το αντίστοιχο της ολοκλήρωσης για συνεχές πεδίο) με κάθε χρονικό διάστημα ηλιακού χρόνου ( $ts_2-ts_1$ ), προκύπτει η ενέργεια του αντίστοιχου χρονικού διαστήματος σε  $\frac{Wh}{m^2}$ .

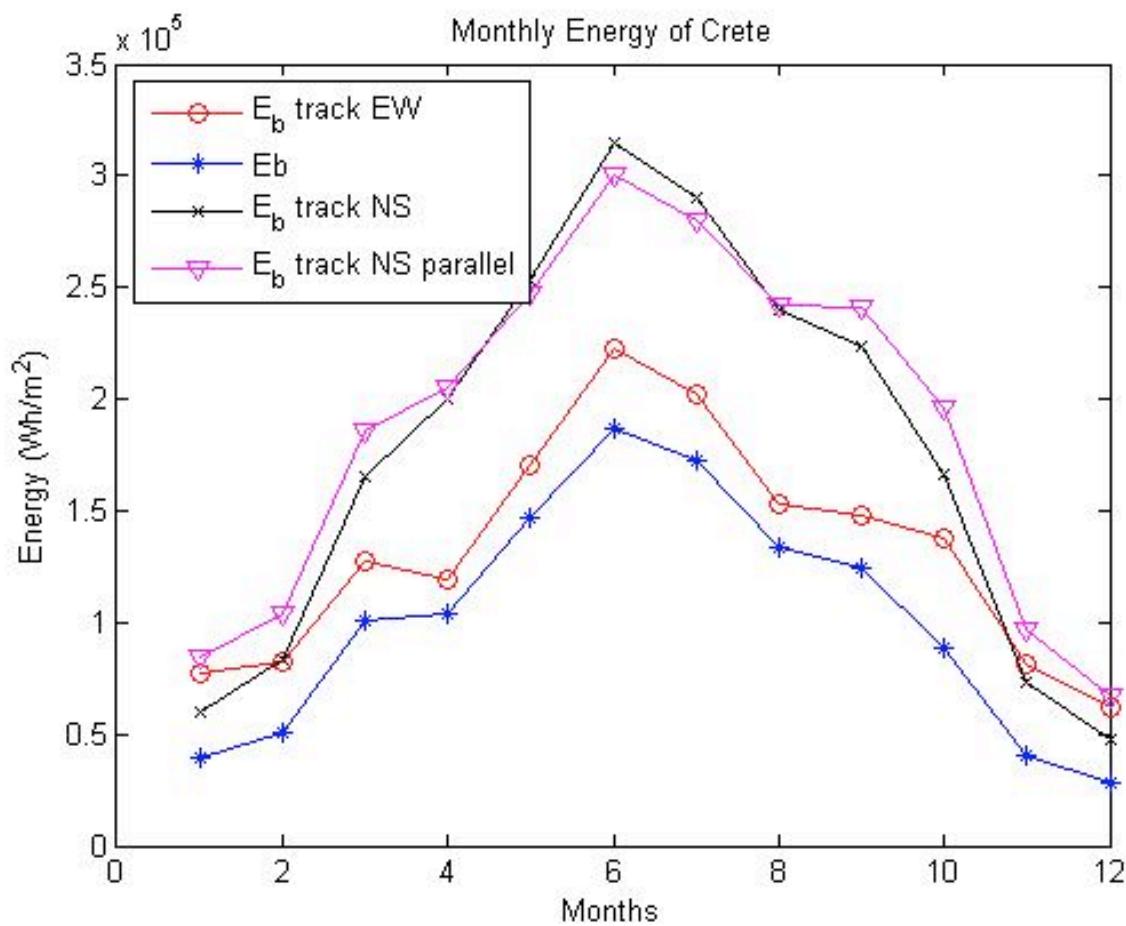
Αποδοτικότερο σύστημα προσανατολισμού, ως προς την ικανότητα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο παραβολικό κάτοπτρο, αποδεικνύεται από τα πειραματικά δεδομένα το σύστημα συνεχούς περιστροφής γύρω από οριζόντιο άξονα βορρά-νότου, παράλληλο με τον άξονα της γης, το οποίο συγκεντρώνει σε χρονικό διάστημα ενός έτους, ηλιακή ενέργεια ίση με  $2,2487 \frac{MWh}{m^2}$ . Ακολουθεί το σύστημα συνεχούς περιστροφής γύρω από οριζόντιο άξονα βορρά-νότου, με συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας ενός έτους ίση με  $2,1173 \frac{MWh}{m^2}$ , και τελευταίο σε απόδοση αποδεικνύεται ότι είναι το σύστημα συνεχούς περιστροφής γύρω από οριζόντιο άξονα ανατολής-δύσης, με συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας ενός έτους ίση με  $1,5842 \frac{MWh}{m^2}$ . Όλοι οι

υπολογισμοί ηλιακής ενέργειας της παρούσας εργασίας, προκύπτουν από επεξεργασία πειραματικών δεδομένων προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, για τον γεωγραφικό χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης (Ακρωτήρι Χανιά) για ολόκληρο το έτος 2001.

Στο Διάγραμμα 7.1, παρουσιάζεται η ηλιακή ενέργεια για όλες τις ημέρες ενός έτους, ενώ στο Διάγραμμα 7.2, η ηλιακή ενέργεια για κάθε μήνα ενός έτους, τόσο για τα τρία συστήματα προσανατολισμού που εξετάστηκαν, όσο και για το οριζόντιο επίπεδο.



Διάγραμμα 7.1 Ημερήσια ηλιακή ενέργεια σε οριζόντιο επίπεδο και σε επίπεδο που περιστρέφεται γύρω από οριζόντιο άξονα Α-Δ, Β-Ν και γύρω από άξονα Β-Ν παράλληλο με τον άξονα της γης.



Διάγραμμα 7.2 Μηνιαία ηλιακή ενέργεια σε οριζόντιο επίπεδο και σε επίπεδο που περιστρέφεται γύρω από οριζόντιο άξονα Α-Δ, Β-Ν και γύρω από άξονα Β-Ν παράλληλο με τον άξονα της γης.

### 7.3 Επιλογή υλικών

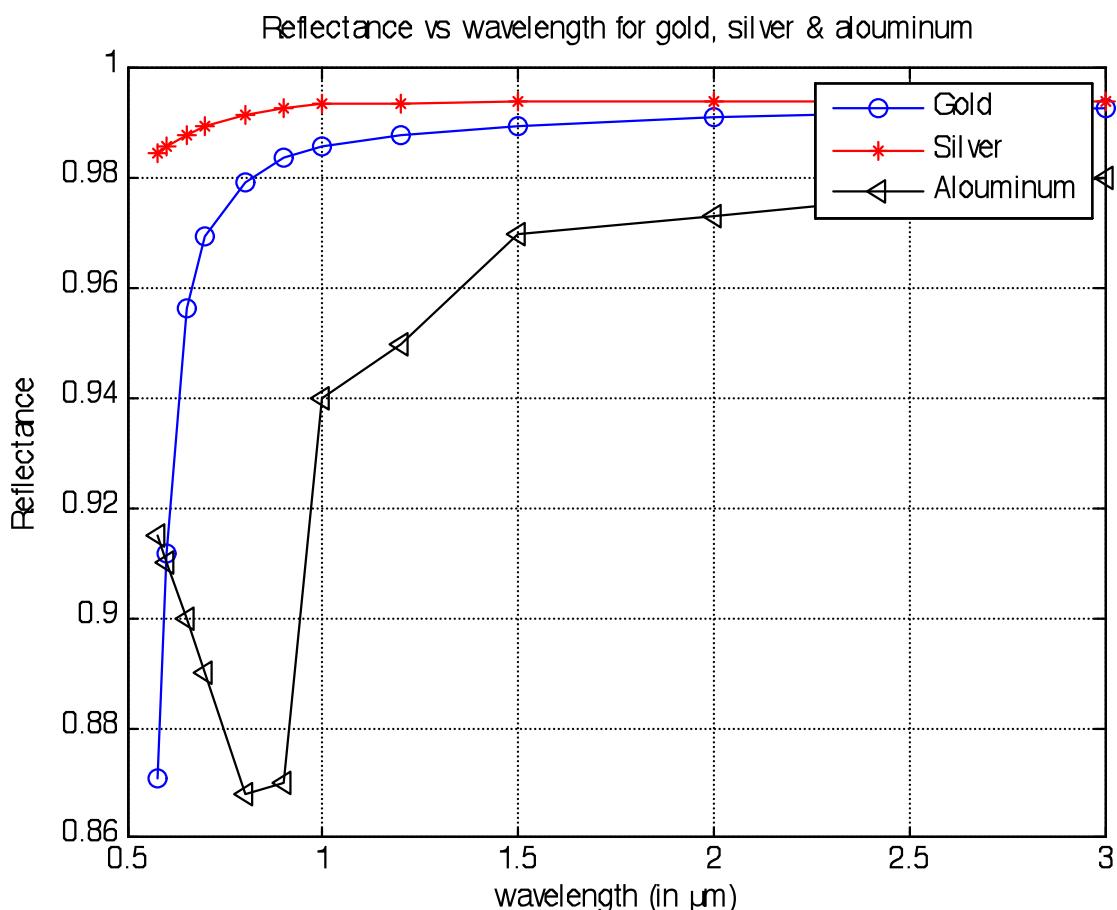
Η επιλογή των υλικών κατασκευής του παραβολικού συλλέκτη της παρούσας εργασίας, έγινε με κριτήρια την μέγιστη δυνατή απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί, σε συνδυασμό με τα υλικά που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια στην βιομηχανία και στα εργαστήρια σε παρόμοιες κατασκευές.

#### 7.3.1 Υλικά συγκεντρωτικού παραβολικού κατόπτρου

Σκοπός του παραβολικού κατόπτρου είναι να ανακλά προς τον αποδέκτη όσο τον δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει επάνω του. Τα πιο συνηθισμένα υλικά για την επίστρωση της ανακλαστικής επιφάνειας του συγκεντρωτικού παραβολικού κατόπτρου, σύμφωνα με έρευνα στο διαδίκτυο, είναι ο άργυρος (silver) και το αλουμίνιο (aluminum). Ο χρυσός χρησιμοποιείται ελάχιστα στο εμπόριο, παρόλα αυτά η απόδοσή του θα εξεταστεί στην εργασία αυτή, διότι παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο φάσμα.

Το αλουμίνιο παρουσιάζει τη χαμηλότερη ανακλαστικότητα μεταξύ όλων των παραπάνω υλικών (Διάγραμμα 7.4), είναι όμως το πιο οικονομικό και αρκετά ανθεκτικό στις περιβαλλοντικές συνθήκες και για αυτό επιλέγεται από πολλές εταιρείες κατασκευής παραβολικών συλλεκτών.

Όσον αφορά στον άργυρο και στον χρυσό, συγκρίνοντάς τα υλικά αυτά ως προς το ποσοστό ανακλαστικότητάς τους (Διάγραμμα 7.4), ο άργυρος παρουσιάζει ελάχιστα μεγαλύτερη ανακλαστικότητα από τον χρυσό [24]. Ο χρυσός όμως φαίνεται να είναι πιο υποσχόμενο υλικό σε σχέση με τον άργυρο, καθώς δεν αμαυρώνεται με το πέρασμα του χρόνου και έτσι διατηρεί την υψηλή του ανακλαστικότητα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επίσης ο χρυσός παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό ανακλαστικότητας στο υπέρυθρο φάσμα.



Διάγραμμα 7.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες ανακλαστικότητας-μήκους κύματος αργύρου, χρυσού και αλουμινίου [24].

Επομένως, στην εργασία αυτή μοντελοποιείται ο συγκεντρωτικός παραβολικός συλλέκτης τόσο με επίστρωση του παραβολικού κατόπτρου με άργυρο, όσο και με χρυσό και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 8 οι αντίστοιχες αποδόσεις.

### 7.3.2 Υλικά καλύμματος

Το κάλυμμα (cover ή glazing) βρίσκεται στο εξωτερικό μέρος του αποδέκτη, δηλαδή τον περικλείει, και χρησιμοποιείται για δύο βασικούς λόγους:

1. Για να μειώσει τις απώλειες θερμότητας του απορροφητή με συναγωγή.
2. Για να προστατεύσει τον απορροφητή από τις άσχημες καιρικές συνθήκες και από το μη καθαρό περιβάλλον (όπως η σκόνη).

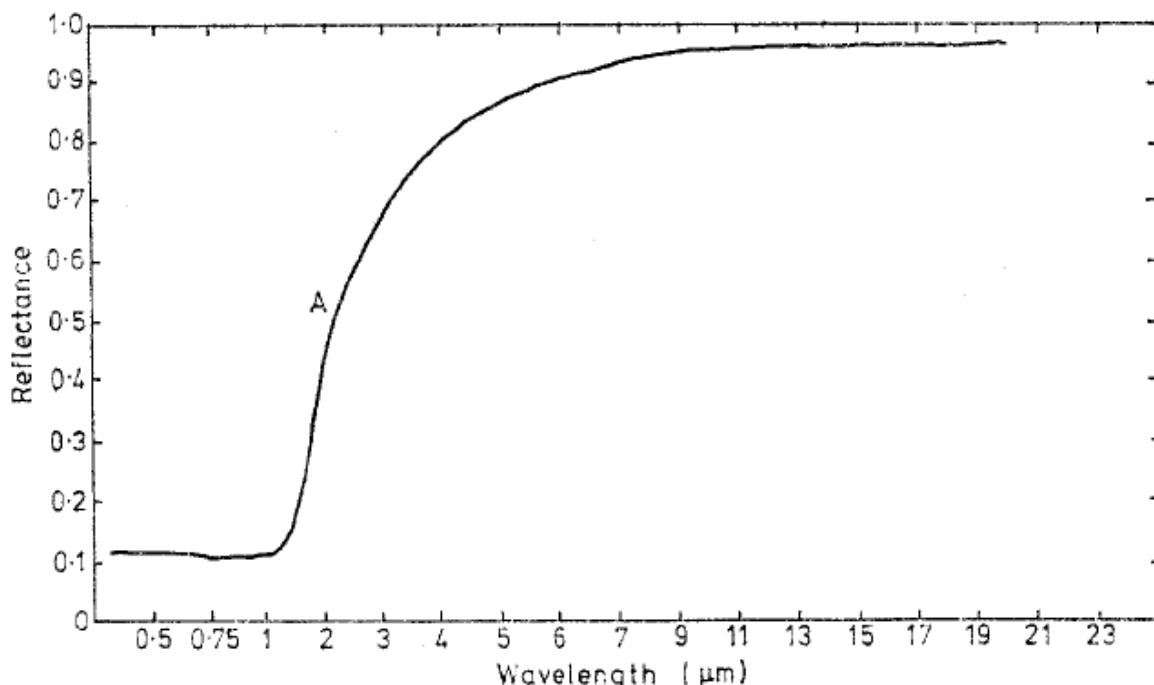
Το υλικό κατασκευής καλύμματος, που χρησιμοποιείται κατά κόρον από την βιομηχανία, είναι το γυαλί (glass) σε διάφορες ποιότητες, με καλύτερη αυτή του ‘λευκού γυαλιού’ (white glass), το οποίο εμφανίζει τη μεγαλύτερη μετάδοση της ακτινοβολίας, διότι έχει τη μικρότερη περιεκτικότητα σιδήρου. Για αυτούς τους λόγους, επιλέχθηκε ως υλικό του καλύμματος του αποδέκτη της εργασίας αυτής να είναι το λευκό γυαλί. Έχει όμως και τα μειονεκτήματά του, είναι εύθραυστο και όχι ιδιαίτερα οικονομικό. Για αυτό κατασκευάζονται καλύμματα και από πολυμερή υλικά, όπως πλαστικά υμένια, τα οποία είναι πιο σκληρά και οικονομικά από το γυαλί, συναντώνται όμως πολύ πιο σπάνια.

### 7.3.3 Υλικά απορροφητή

Ο απορροφητής αποτελεί μέρος του αποδέκτη και σκοπός του είναι να απορροφά όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ενέργειας, επομένως η επιλογή του υλικού κατασκευής του έχει ως κριτήριο τη μεγιστοποίηση της απορροφητικότητάς ( $\alpha$ ) του και την ελαχιστοποίηση των απωλειών του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον συνδυασμό μίας μεταλλικής βάσης χαμηλής εκπομπής ( $\epsilon$ ), επενδυμένη με ένα υμένιο υψηλής απορροφητικότητας στην ηλιακή ακτινοβολία.

Η πιο δημοφιλής προσέγγιση, σύμφωνα με την βιβλιογραφία αλλά και με την βιομηχανία κατασκευής απορροφητών, είναι η επιμετάλλωση μαύρου χρωμίου (black chromium Cr) πάνω σε χαλκό (copper Co) ή νικέλιο (nickel Ni), με το νικέλιο όμως να εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπής, άρα περισσότερες θερμικές απώλειες. Ένα ακόμη υλικό που χρησιμοποιείται συχνά είναι το ατσάλι (steel), το οποίο όμως παρουσιάζει 8 φορές μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από τον χαλκό.

Επομένως, ως υλικό κατασκευής του απορροφητή του παραβολικού συλλέκτη της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε ο χαλκός με επίστρωση μαύρου χρωμίου. Στο Διάγραμμα 7.5 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη της ανακλαστικότητας ως προς το μήκος κύματος, του χαλκού με επίστρωση μαύρου χρωμίου [25]. Όπως είναι προφανές από το διάγραμμα, αυτός ο συνδυασμός των υλικών παρουσιάζει πολύ χαμηλή ανακλαστικότητα στο ορατό φάσμα, άρα μεγάλη απορροφητικότητα σε αυτά τα μήκη κύματος, και όσο κινείται προς το υπέρυθρο φάσμα η ανακλαστικότητα προοδευτικά αυξάνεται, επομένως ελαττώνεται η απορροφητικότητα. Αξιοσημείωτο είναι ότι στο κοντινό-υπέρυθρο εμφανίζει ένα σημαντικό ποσοστό απορροφητικότητας.



Διάγραμμα 7.5 Χαρακτηριστική καμπύλη ανακλαστικότητας-μήκους κύματος χαλκού με επίστρωση μαύρου χρωμάτου [25].

### 7.3.4 Υλικό ψυκτικού υγρού

Το θερμικό υγρό (heat thermal fluid) βρίσκεται στο εσωτερικό του απορροφητή, θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον αποδέκτη και αποκτά σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το νερό, παραμένοντας σε υγρή φάση. Στη συνέχεια οδηγείται στους εναλλάκτες θερμότητας, όπου η αποθηκευμένη θερμότητα του μεταφέρεται στο νερό με σκοπό να αλλάξει τη φάση του νερού σε αέρια, να το μετατρέψει δηλαδή σε ατμό και μέσω της ατμογεννήτριας να παραχθεί τελικώς ηλεκτρική ενέργεια.

Για τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε ως υγρό μεταφοράς θερμότητας το “Therminol VP-1” της εταιρείας Solutia. Χρησιμοποιείται ευρέως σε ποικίλες θερμικές εφαρμογές στο εμπόριο, αλλά και στην έρευνα καθώς πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε από το National Renewable Energy Laboratory (NREL) για το μοντέλο παραβολικού συλλέκτη του πειράματος “Heat Loss Testing of Schott’s 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver”

[3]. Το συνθετικό αυτό υγρό, του οποίου η σύσταση είναι 73,5% οξείδιο διφαινυλίου (diphenyl oxide) και 26,5% διφαινύλιο (diphenyl), παρουσιάζει θερμική σταθερότητα και είναι κατάλληλο για διεργασίες μεγάλων χρονικών διαστημάτων σε εύρος θερμοκρασιών από -85 °C έως 400 °C (αναλόγως με την φάση του). Στην περίπτωση του παραβολικού συλλέκτη, όπου οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι αρκετά υψηλές, το Therminol VP-1 παρουσιάζει σημείο βρασμού πάνω από το διπλάσιο σε σχέση με το αντίστοιχο του νερού, και κυμαίνεται στους 257 °C.

## 7.4 Οπτικά και θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών

Τα υλικά κατασκευής του παραβολικού ηλιακού συλλέκτη, που αναλύθηκαν παραπάνω, έχουν κάποια οπτικά και θερμικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση του.

Τα οπτικά χαρακτηριστικά είναι η ανακλαστικότητα ( $\rho$ ), η απορροφητικότητα ( $\alpha$ ), η μετάδοση ( $\tau$ ) και η εκπομπή ( $\varepsilon$ ). Από τα υλικά επίστρωσης του παραβολικού κατόπιν ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανακλαστικότητά τους, η μέση τιμή της οποίας, για εύρος φάσματος από το ορατό έως και το πολύ κοντινό υπέρυθρο, ισούται με  $\rho_{Silver} = 0,9907$  και  $\rho_{Gold} = 0,9627$ . Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τον μέσο όρο ανακλαστικότητας των δύο υλικών του Διαγράμματος 7.4) [24].

Το λευκό γυαλί, το οποίο είναι το υλικό του καλύμματος του αποδέκτη, παρουσιάζει πολύ μικρή απορροφητικότητα  $\alpha_{whiteGlass} = 0,0769$  (υπολογίστηκε μέσω της σχέσης 5.19 και της ισότητας  $\alpha=1-\tau_\alpha$ ), πολύ μικρή εκπομπή  $\varepsilon_{whiteGlass}=0.04$  (δεδομένο) και πολύ μικρή ανακλαστικότητα  $\rho_{whiteGlass}=0,0831$  (υπολογίστηκε μέσω της σχέσης 5.18 και της ισότητας  $r=1-\tau_r$ ), ενώ έχει υψηλή μετάδοση  $\tau_{whiteGlass} = 0,8464$  (υπολογίστηκε μέσω της σχέσης 5.20). Ο χαλκός με επίστρωση μαύρου χρωμάτου, που είναι το υλικό κατασκευής του απορροφητή, εμφανίζει υψηλή απορροφητικότητα  $\alpha_{CuBICr}=0,854$  και χαμηλή ανακλαστικότητα  $\rho_{CuBICr}=0,146$ . Οι τιμές αυτές προέκυψαν από τα δεδομένα ανακλαστικότητας του διαγράμματος 7.5 και με την χρήση των σχέσεων 5.4 και 5.5, ο υπολογισμός τους φαίνεται στον Πίνακα 7.1.

**Πίνακας 7.1 Υπολογισμός απορροφητικότητας Co Black Cr**

$\Delta f_j$	$\lambda_{mid}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\rho_\lambda$	$\alpha_{CuBICr}$
0,0-0,1	0,434	0,120	0,854
0,1-0,2	0,517	0,120	
0,2-0,3	0,595	0,100	
0,3-0,4	0,670	0,100	
0,4-0,5	0,752	0,100	
0,5-0,6	0,845	0,100	
0,6-0,7	0,975	0,100	
0,7-0,8	1,000	0,150	
0,8-0,9	1,000	0,250	
0,9-1,0	2,000	0,320	
	AVG	0,146	

Οσον αφορά στην εκπομπή του υλικού  $\epsilon_{CuBiCr}$ , υπολογίστηκε με βάση τα δεδομένα ανακλαστικότητας του διαγράμματος 7.5 και με τη βοήθεια της σχέσης 5.7, για τις διαφορετικές θερμοκρασίες που αποκτά ο απορροφητής. Έτσι ανάλογα με τη θερμοκρασία που έχει κάθε χρονική στιγμή, του αποδίδεται και η αντίστοιχη τιμή εκπομπής (ενδεικτικά Πίνακας 7.2).

<b>Πίνακας 7.2 Υπολογισμός εκπομπής Co Black Cr</b>				
Θερμοκρασία υλικού 100 °C				
$\Delta f_j$	$\lambda_j * T_{mid}$ ( $\mu m^*K$ )	$\lambda_j$	$\rho_\lambda$	$\epsilon_{CuBiCr}$
0,0-0,1	1.880	5,040214	0,865	0,0575
0,1-0,2	2.450	6,568365	0,900	
0,2-0,3	2.900	7,774799	0,920	
0,3-0,4	3.350	8,981233	0,940	
0,4-0,5	3.830	10,26810	0,950	
0,5-0,6	4.410	11,82306	0,955	
0,6-0,7	5.130	13,75335	0,970	
0,7-0,8	6.150	16,48794	0,975	
0,8-0,9	7.850	21,04558	0,975	
0,9-1,0	12.500	33,51206	0,975	
		AVG	0,9425	
Θερμοκρασία υλικού 450 °C				
$\Delta f_j$	$\lambda_j * T_{mid}$ ( $\mu m^*K$ )	$\lambda_j$	$\rho_\lambda$	$\epsilon_{CuBiCr}$
0,0-0,1	1.880	2,600277	0,630	0,149
0,1-0,2	2.450	3,388658	0,725	
0,2-0,3	2.900	4,011065	0,800	
0,3-0,4	3.350	4,633472	0,840	
0,4-0,5	3.830	5,297372	0,870	
0,5-0,6	4.410	6,099585	0,885	
0,6-0,7	5.130	7,095436	0,915	

0,7-0,8	6.150	8,506224	0,930	
0,8-0,9	7.850	10,85754	0,940	
0,9-1,0	12.500	17,28907	0,975	
		AVG	0,851	

Ο υπολογισμός των τιμών της εκπομπής δεν συνεχίζεται για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 750 °C διότι όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 7.6 η ανακλαστικότητα, για μήκη κύματος μεγαλύτερα του  $\lambda=12,3$  μμ, παραμένει σταθερή και έτσι η εκπομπή για το υπόλοιπο φάσμα θεωρείται ίση με  $\varepsilon_{CuBICr}=0,26$ . Με βάση τη μεθοδολογία του Πίνακα 7.2 υπολογίστηκαν και οι υπόλοιπες τιμές εκπομπής, οι οποίες είναι οι εξής:

- $\varepsilon_{CuBICr} (25 °C) = 0,025$
- $\varepsilon_{CuBICr} (50 °C) = 0,045$
- $\varepsilon_{CuBICr} (150 °C) = 0,07$
- $\varepsilon_{CuBICr} (200 °C) = 0,075$
- $\varepsilon_{CuBICr} (250 °C) = 0,0935$
- $\varepsilon_{CuBICr} (300 °C) = 0,107$
- $\varepsilon_{CuBICr} (350 °C) = 0,116$
- $\varepsilon_{CuBICr} (400 °C) = 0,129$
- $\varepsilon_{CuBICr} (500 °C) = 0,166$
- $\varepsilon_{CuBICr} (550 °C) = 0,1805$
- $\varepsilon_{CuBICr} (600 °C) = 0,2015$
- $\varepsilon_{CuBICr} (650 °C) = 0,2085$
- $\varepsilon_{CuBICr} (700 °C) = 0,221$
- $\varepsilon_{CuBICr} (750 °C) = 0,2575$

Παρατηρείται σημαντική αύξηση της εκπομπής καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του απορροφητή, όπως ήταν αναμενόμενο.

Τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών είναι το σημείο τήξης για τα στερεά και το σημείο βρασμού για τα ρευστά, η θερμοχωρητικότητα (η ποσότητα θερμότητας που απορροφάται από ένα υλικό προκειμένου να αυξηθεί θερμοκρασία του κατά 1 K ή 1 °C) και η θερμική αγωγιμότητα (προσδιορίζει την ευκολία ή την δυσκολία διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού), και οι τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

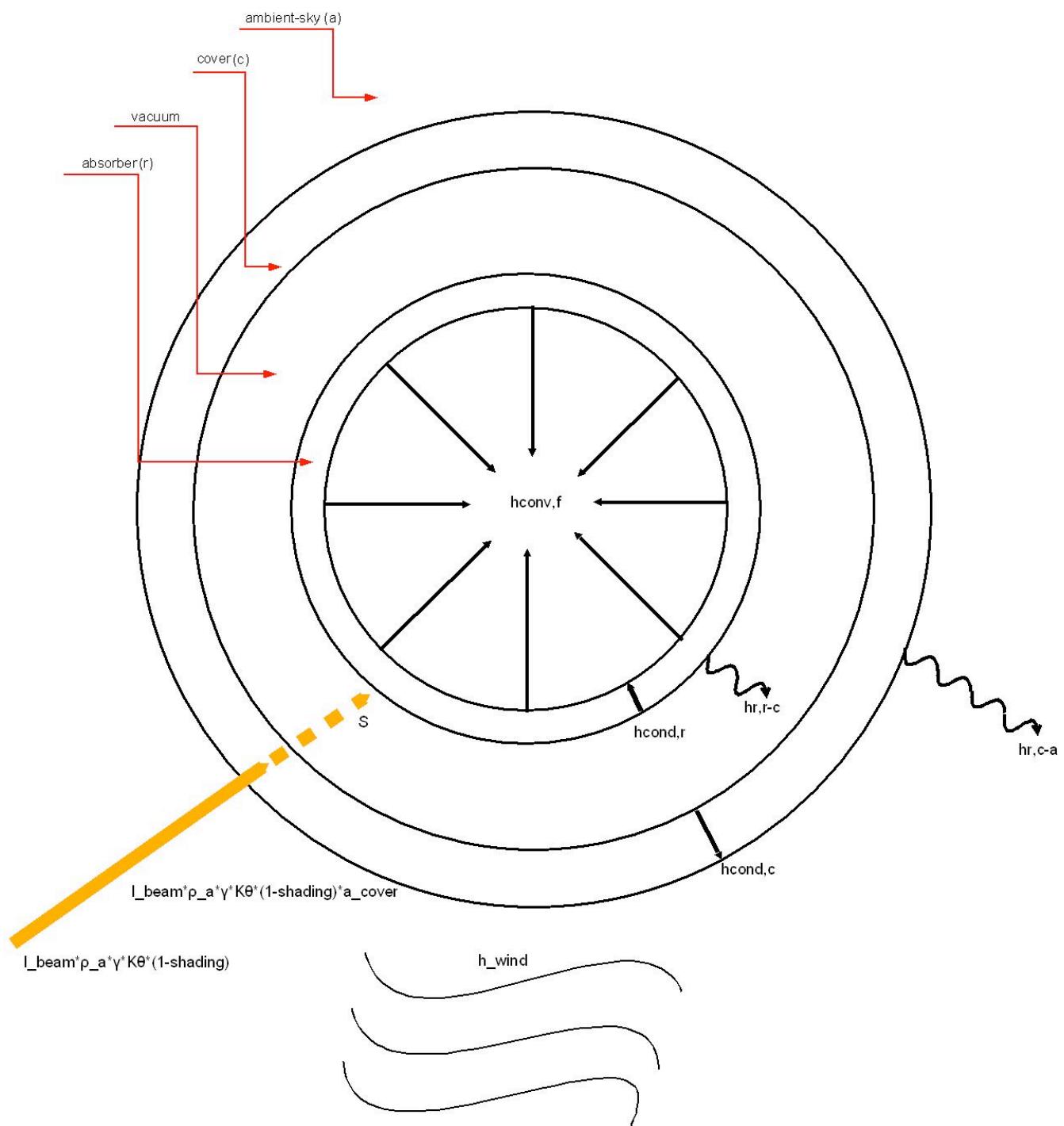
**Πίνακας 7.3 Τιμές των παραμέτρων των υλικών**

	Σημείο τήξης/βρασμού (K)	Θερμοχωρητικότητα $\left( \frac{kJ}{kg \cdot C} \right)$	Θερμική αγωγιμότητα $\left( \frac{W}{m \cdot C} \right)$
Χαλκός με επίστρωση μαύρου χρωμίου	1.357,770	0,385	401
Γυαλί 'λευκό'	1.755,372	0,820	1,050
Νερό (20°C)	373,150	4,190	0,596
Therminol VP1 (20°C)	530,150	1,546	0,136

Η θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα στα ρευστά δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται, διότι η μοριακή τους δομή είναι ασθενής και έτσι οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων τους μεταβάλλονται εύκολα.

## 7.5 Μοντελοποίηση Θερμικού ισοζυγίου αποδέκτη

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 7.2) απεικονίζεται η κάθετη τομή του αποδέκτη, που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, καθώς και οι συντελεστές μεταφερόμενης θερμότητας σε κάθε τον τμήμα.



Σχήμα 7.2 Θερμικό ισοζύγιο αποδέκτη.

Με βάση τη θεωρητική ανάλυση της παραγράφου 6.4 και έχοντας ως ‘είσοδο’ στο σύστημα του αποδέκτη την ανακλώμενη από το κάτοπτρο ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει το θερμικό ισοζύγιο του καλύμματος:

$$A_{ap} \cdot I_{beam} \rho_a \cdot \gamma \cdot K_\theta \cdot (1 - shading_{cover}) + A_r \cdot h_{r,r-c} \cdot (T_r - T_c) = A_t \cdot (h_{r,c-a} + h_{wind}) \cdot (T_c - T_a) + A_t \cdot h_{condc} \cdot (T_{ci} - T_{co}) + Q_{cover}$$

(7.14)

όπου:

$A_{ap} \cdot I_{beam} \rho_a \cdot \gamma \cdot K_\theta \cdot (1 - shading_{cover})$  το ποσό της ηλιακής ενέργειας που ανακλάται από το παραβολικό κάτοπτρο και προσπίπτει στο κάλυμμα του αποδέκτη

$ci$  ο δείκτης που δηλώνει το εσωτερικό τοίχωμα του καλύμματος

$co$  ο δείκτης που δηλώνει το εξωτερικό τοίχωμα του καλύμματος

$Q_{cover}$  η ισχύς που απομένει στο κάλυμμα και λόγω αυτής αυξάνεται η θερμοκρασία του και το θερμικό ισοζύγιο του απορροφητή:

$$A_{ap} \cdot S = A_r \cdot h_{r,r-c} \cdot (T_r - T_c) + A_r \cdot h_{condr} \cdot (T_{ri} - T_{ro}) + A_r \cdot h_{convf} \cdot (T_r - T_f) + Q_r \quad (7.15)$$

όπου:

$S$  η απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία, από τον απορροφητή, ανά μονάδα μη σκιαζόμενης επιφάνειας του ανακλαστικού κατόπτρου

$ri$  ο δείκτης που δηλώνει το εσωτερικό τοίχωμα του απορροφητή

$ro$  ο δείκτης που δηλώνει το εξωτερικό τοίχωμα του απορροφητή

$Q_r$  η ισχύς που απομένει στον απορροφητή και λόγω αυτής αυξάνεται η θερμοκρασία του

## 7.6 Υπολογισμός στιγμιαίας θερμοκρασίας αποδέκτη

Όπως προαναφέρθηκε, ο αποδέκτης αποτελείται από το κάλυμμα και τον απορροφητή, σε καθένα από τα οποία, ανάλογα με την απορροφητικότητά τους, αυξάνεται η θερμοκρασία τους κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς προσπίπτει επάνω τους η ηλιακή ακτινοβολία, και αντίστοιχα μειώνεται όταν δύει ο ήλιος. Η στιγμιαία θερμοκρασία που αποκτά το κάθε τμήμα υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_t = T_{t-1} + \frac{dT}{dt} = T_{t-1} + \frac{E_t}{p \cdot V \cdot Cp} \quad (7.16)$$

όπου:

$T_{i-1}$  η θερμοκρασία του τμήματος κατά την προηγούμενη χρονική στιγμή

$E_i$  η ενέργεια που απορροφάται από το υλικό του τμήματος, σε J

$C_p$  η θερμοχωρητικότητα του υλικού του τμήματος (specific heat), σε  $\frac{kJ}{kg \cdot C}$

$V$  ο όγκος του τμήματος, σε  $m^3$

$p$  η πυκνότητα του υλικού του τμήματος, σε  $kg/m^3$

Ενώ η στιγμιαία θερμοκρασία που αποκτά το ρευστό υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_i = T_{i-1} + \frac{E_i}{C_p \cdot m} \quad (7.17)$$

Η μονάδα μέτρησής της είναι ο  $1^\circ C$ .

## 7.7 Απλοποίηση του μοντέλου

- Κατά τη θερμική μοντελοποίηση του παραβολικού συλλέκτη της παρούσας εργασίας, η μετάδοση θερμότητας με επαφή στο εσωτερικό του καλύμματος του αποδέκτη ( $h_{cond,c}$ ) θεωρήθηκε αμελητέα, διότι το πάχος του είναι πολύ μικρό (της τάξης των 1,5-2mm). Επομένως η εξίσωση 7.14 του ισοζυγίου του καλύμματος τροποποιείται στην ακόλουθη:

$$A_{ap} \cdot I_{beam} \cdot \rho_a \cdot \gamma \cdot K_\theta \cdot (1 - shading) a_{cover} + A_r \cdot h_{r,r-c} \cdot (T_r - T_c) = A_c \cdot (h_{r,c-a} + h_{wind}) \cdot (T_c - T_a) + Q_{cover} \quad (7.18)$$

- Η κατασκευή στήριξης του παραβολικού συλλέκτη στο έδαφος, δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας, επομένως οι θερμικές απώλειες του αποδέκτη μέσω των δοκών στήριξης δεν συνυπολογίζονται στον υπολογισμό των συνολικών απωλειών θερμότητας.

## 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 8.1 Ήμερήσια, μηνιαία και ετήσια ηλιακή ενέργεια απορροφώμενη από τον αποδέκτη του συλλέκτη

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρατίθεται η ενέργεια που απορροφάται από τον αποδέκτη του ηλιακού συλλέκτη, αναλυτικά για κάθε ημέρα του έτους 2001 στη γεωγραφική περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης (Ακρωτήρι Χανιά), αλλά και πιο συγκεντρωτικά, για κάθε μήνα και για ολόκληρο το έτος.

Η οπτική απόδοση του παραβολικού ηλιακού συλλέκτη υπολογίζεται από την σχέση:

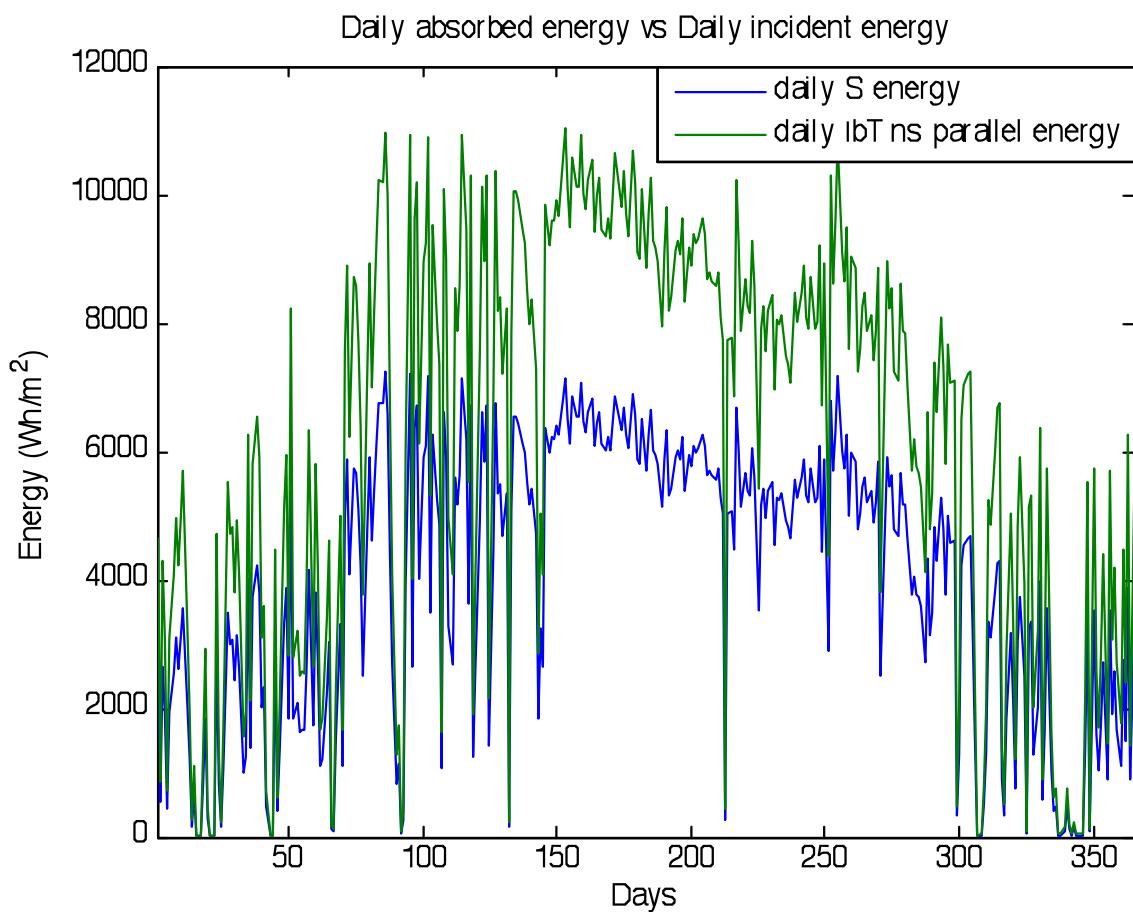
$$n_{optical} = \frac{S}{I_{b,n-s-parallel}} \quad (8.1)$$

όπου:

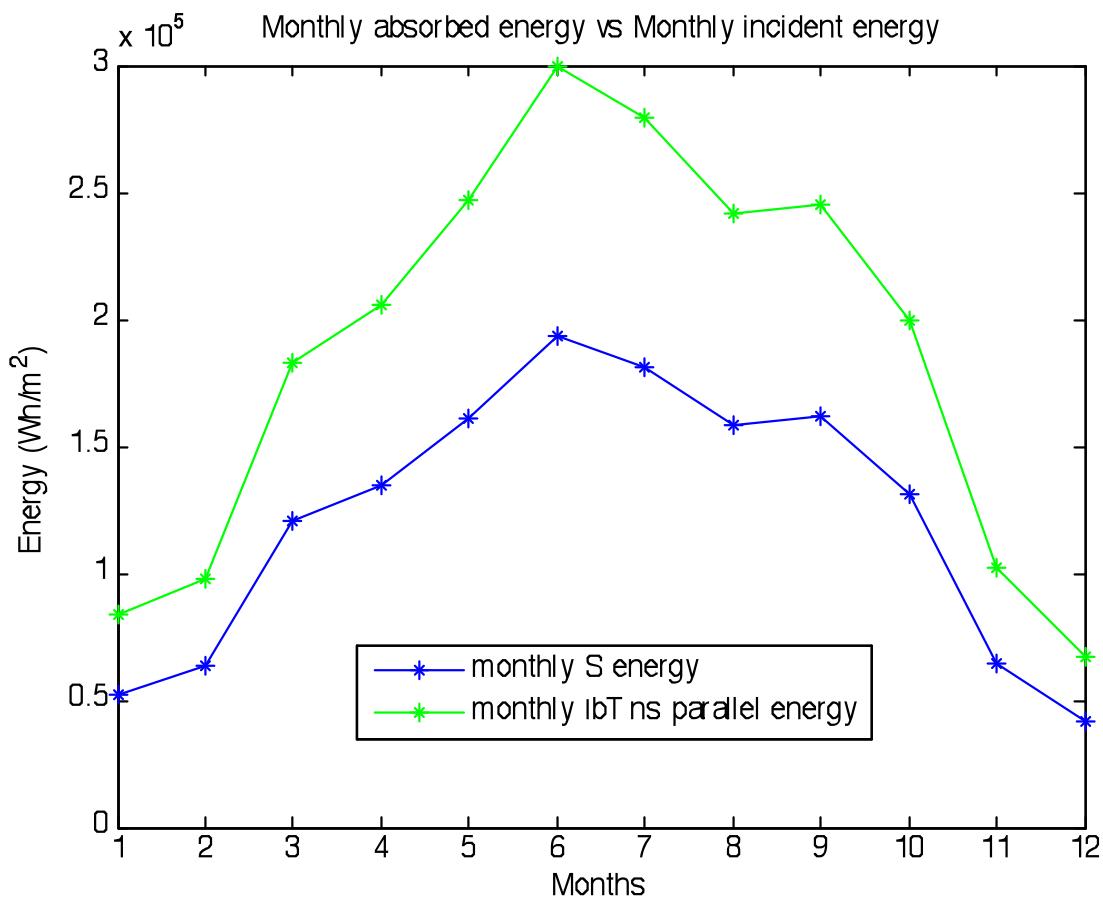
$I_{b,n-s-parallel}$  η προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία στο ‘άνοιγμα’ της παραβολής, με σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου το πιο αποδοτικό (περιστροφή γύρω από άξονα βορρά-νότου παράλληλο με τον άξονα της γης)

#### 8.1.1 Ανακλαστική επιφάνεια: χρυσός

Χρησιμοποιώντας ως υλικό επίστρωσης της παραβολής του ηλιακού συλλέκτη τον χρυσό, υπολογίστηκε η ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο που προσπίπτει στον αποδέκτη του συλλέκτη και παρουσιάζεται με τη μορφή γραφημάτων, για κάθε ημέρα του έτους (Διάγραμμα 8.1) και για κάθε μήνα (Διάγραμμα 8.2). Στα ίδια γραφήματα παρουσιάζεται, για λόγους σύγκρισης, και η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στο παραβολικό κάτοπτρο για τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους. Η ετήσια απορροφώμενη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο υπολογίστηκε ότι ανέρχεται στις 1,4643 MWh, ενώ η ετήσια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στο παραβολικό κάτοπτρο ανά τετραγωνικό μέτρο ανέρχεται στις 2,2521 MWh.



Διάγραμμα 8.1 Ημερήσια προσπίπτουσα και απορροφώμενη ηλιακή ενέργεια (επίστρωση χρυσού).

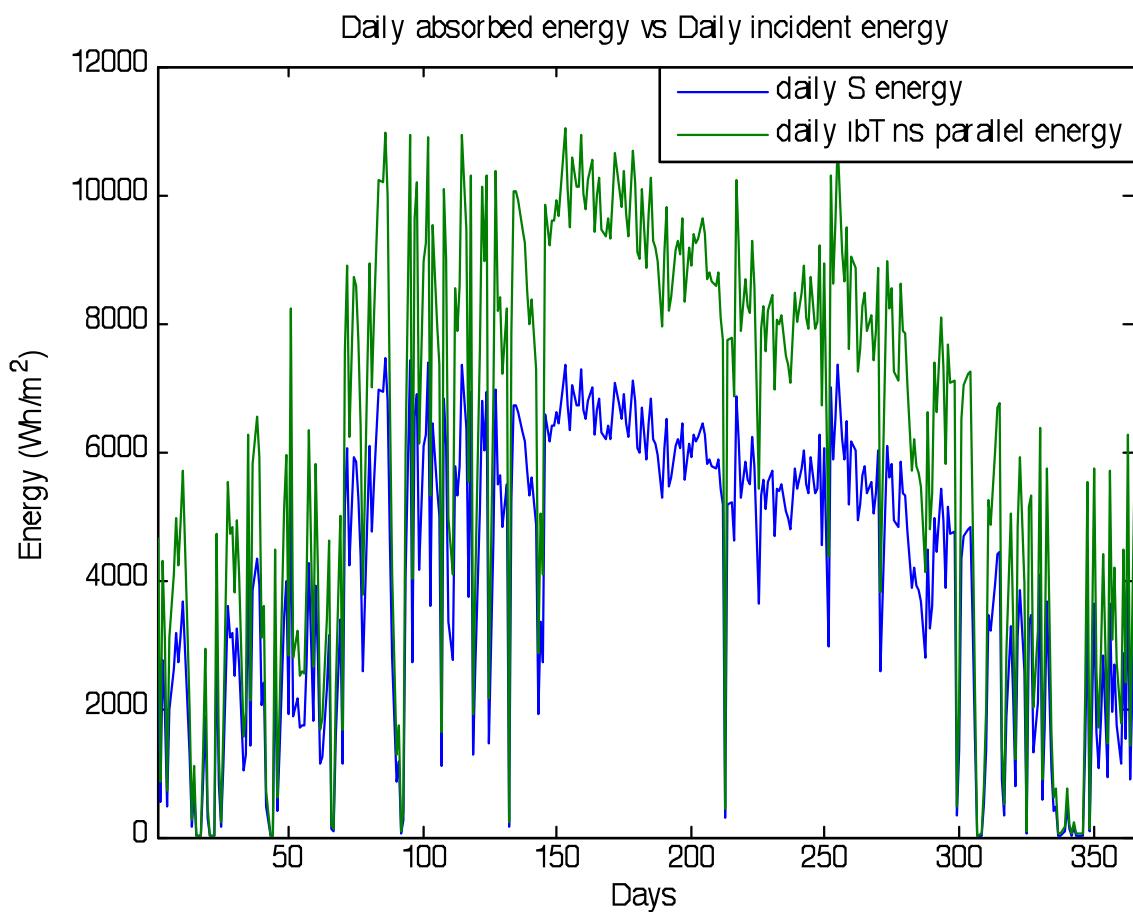


Διάγραμμα 8.2 Μηνιαία προσπίπτουσα και απορροφώμενη ηλιακή ενέργεια (επίστρωση χρυσού).

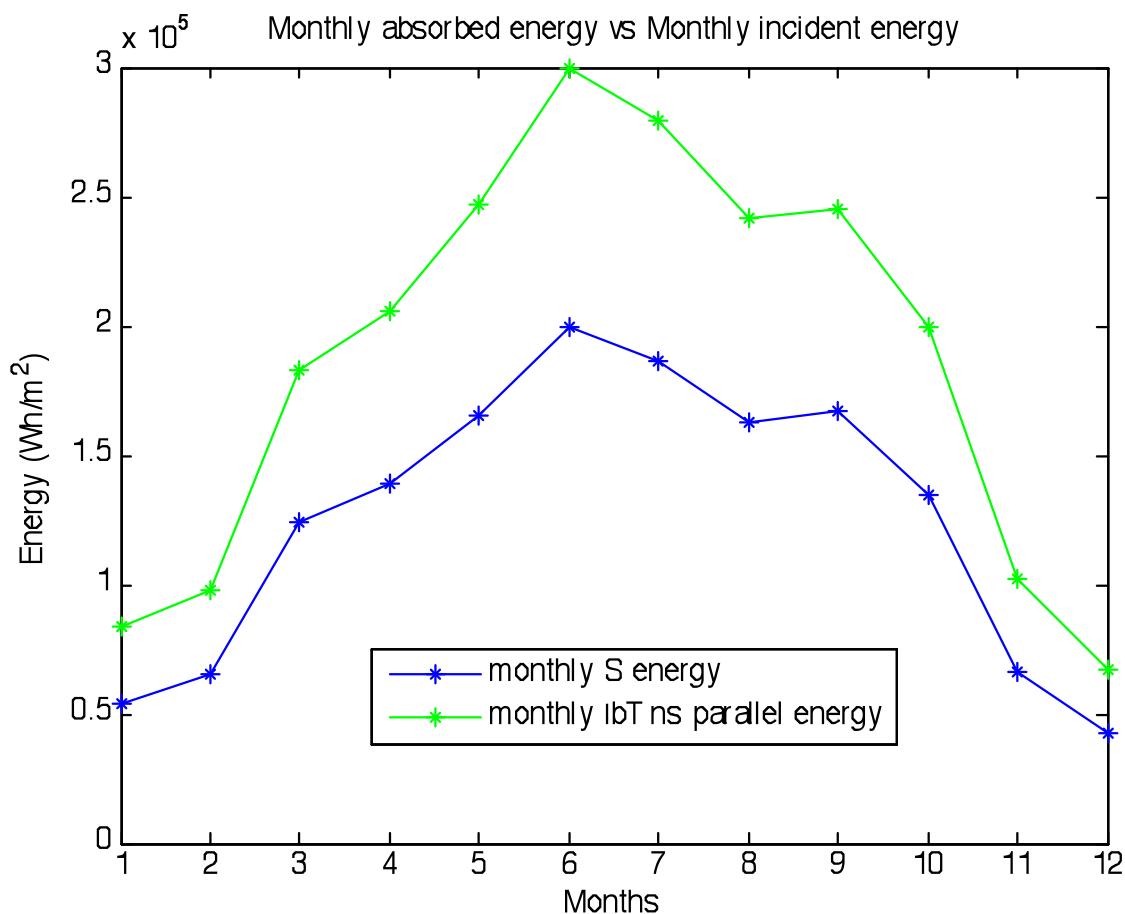
Η οπτική απόδοση του παραβολικού ηλιακού συλλέκτη, με τις παρούσες προδιαγραφές, ισούται με 62,87%.

### 8.1.2 Ανακλαστική επιφάνεια: άργυρος

Χρησιμοποιώντας ως υλικό επίστρωσης της παραβολής του ηλιακού συλλέκτη τον άργυρο, υπολογίστηκε η ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο που προσπίπτει στον αποδέκτη του συλλέκτη και παρουσιάζεται με τη μορφή γραφημάτων, για κάθε ημέρα του έτους (Διάγραμμα 8.3) και για κάθε μήνα (Διάγραμμα 8.4). Στα ίδια γραφήματα παρουσιάζεται, για λόγους σύγκρισης, και η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στο παραβολικό κάτοπτρο για τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους. Η ετήσια απορροφώμενη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο υπολογίστηκε ότι ανέρχεται στις 1,5069 MWh, ενώ η ετήσια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στο παραβολικό κάτοπτρο ανά τετραγωνικό μέτρο ανέρχεται στις 2,2521 MWh.



Διάγραμμα 8.3 Ημερήσια προσπίπτουσα και απορροφώμενη ηλιακή ενέργεια (επίστρωση αργύρου).



Διάγραμμα 8.4 Μηνιαία προσπίπτουσα και απορροφώμενη ηλιακή ενέργεια (επίστρωση αργύρου).

Η οπτική απόδοση του παραβολικού ηλιακού συλλέκτη με τις παρούσες προδιαγραφές προκύπτει ίση με 64,69%.

## 8.2 Ημερήσια, μηνιαία και ετήσια ενεργειακή απόδοση

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρατίθεται η χρήσιμη ενέργεια (useful energy), δηλαδή η ενέργεια που μεταδίδεται από τον απορροφητή του παραβολικού συλλέκτη στο θερμικό υγρό που ρέει στο εσωτερικό του, αναλυτικά για κάθε ημέρα του έτους 2001 και για την γεωγραφική περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης (Ακρωτήρι Χανιά), αλλά και πιο συγκεντρωτικά, για κάθε μήνα και για όλο το έτος.

Η θερμική απόδοση του παραβολικού ηλιακού συλλέκτη υπολογίζεται από την σχέση:

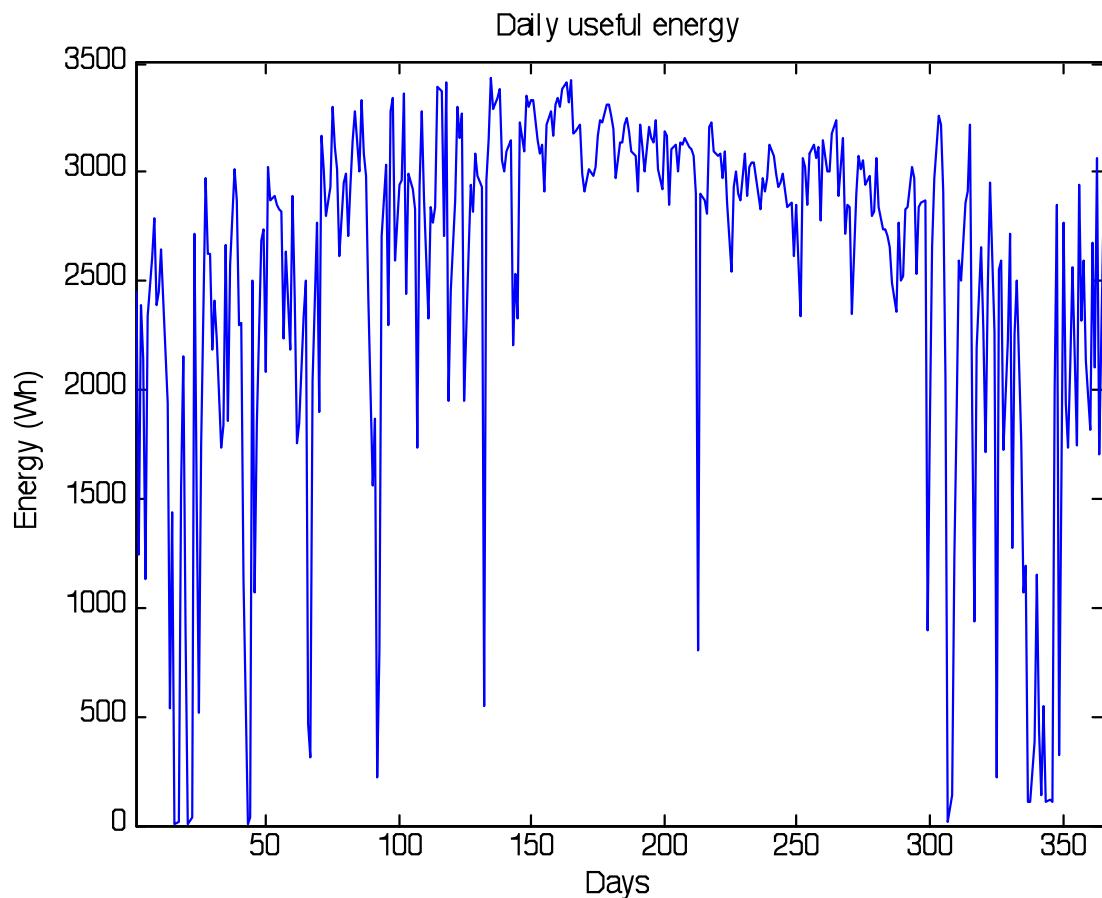
$$n_{thermal} n_{optical} \frac{U_L \cdot (T_{receiver} - T_{ambien})}{I_{b,n-s-parallel}} \quad (8.2)$$

όπου:

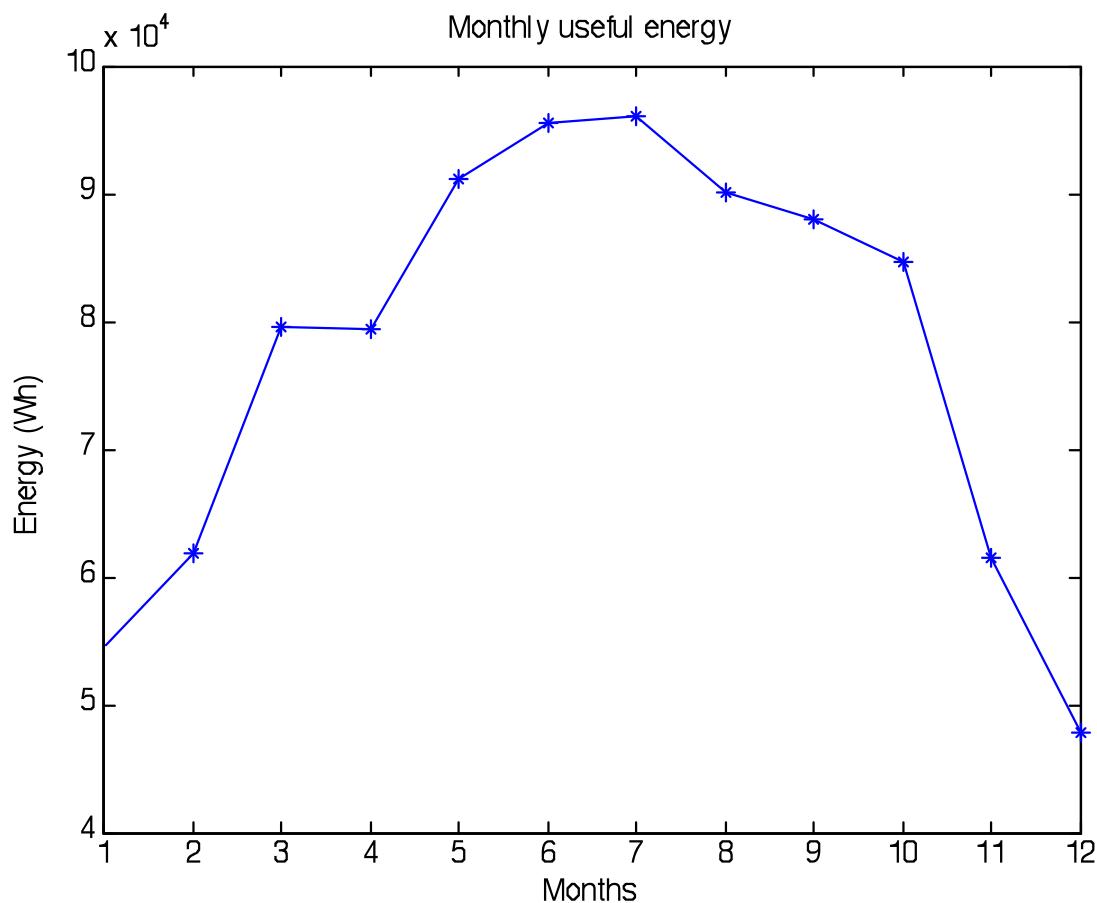
*I<sub>b,n-s-parallel</sub>* η προσπίπτουσα απευθείας ακτινοβολία στο ‘άνοιγμα’ της παραβολής, με σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου το πιο αποδοτικό (περιστροφή γύρω από άξονα βορρά-νότου παράλληλο με τον άξονα της γης)

### 8.2.1 Ανακλαστική επιφάνεια: χρυσός

Θεωρώντας ως υλικό επίστρωσης της παραβολής του ηλιακού συλλέκτη τον χρυσό, υπολογίστηκε η χρήσιμη ενέργεια του συλλέκτη και παρουσιάζεται για κάθε ημέρα του έτους στο Διάγραμμα 8.5 και για κάθε μήνα στο Διάγραμμα 8.6, ενώ η ετήσια χρήσιμη ενέργεια υπολογίστηκε ότι ανέρχεται στις 930,15 kWh.



Διάγραμμα 8.5 Ημερήσια χρήσιμη ενέργεια (επίστρωση χρυσού).

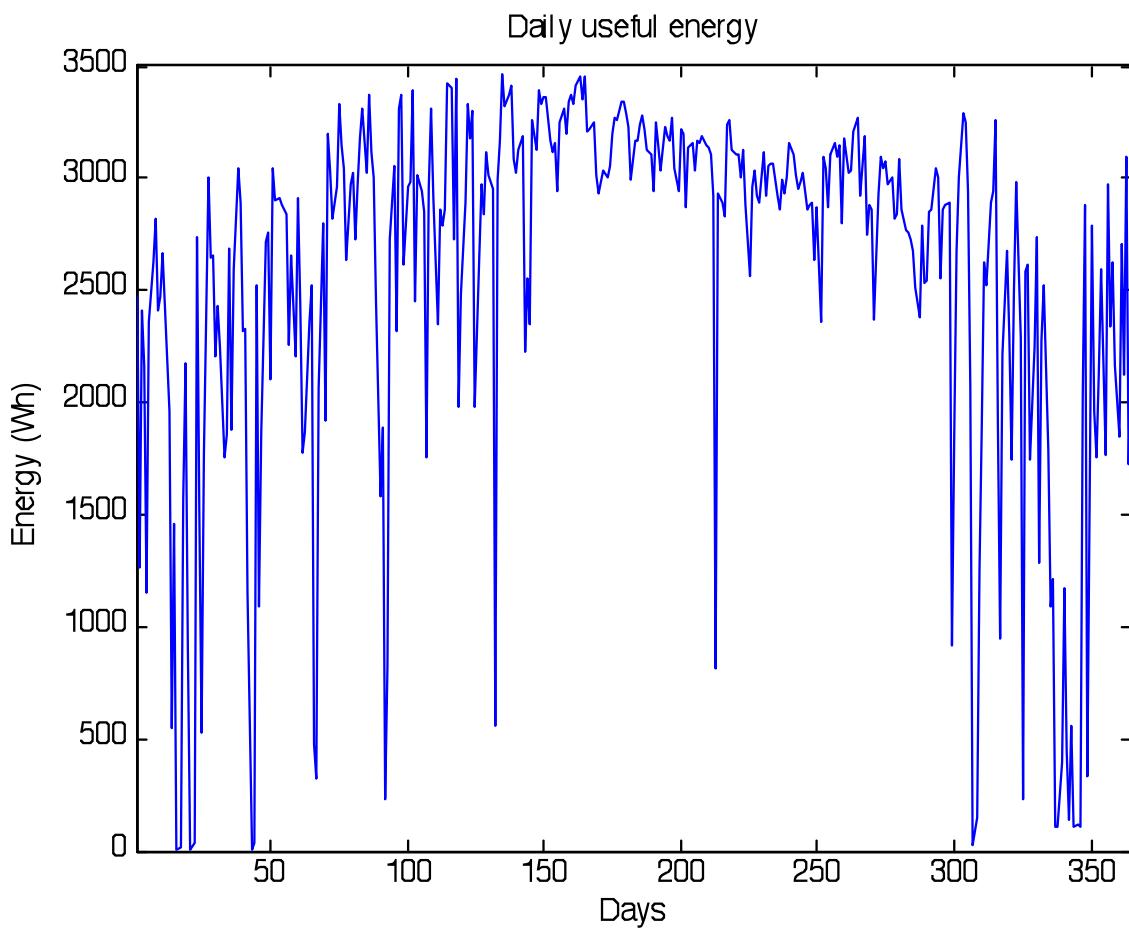


Διάγραμμα 8.6 Μηνιαία χρήσιμη ενέργεια (επίστρωση χρυσού).

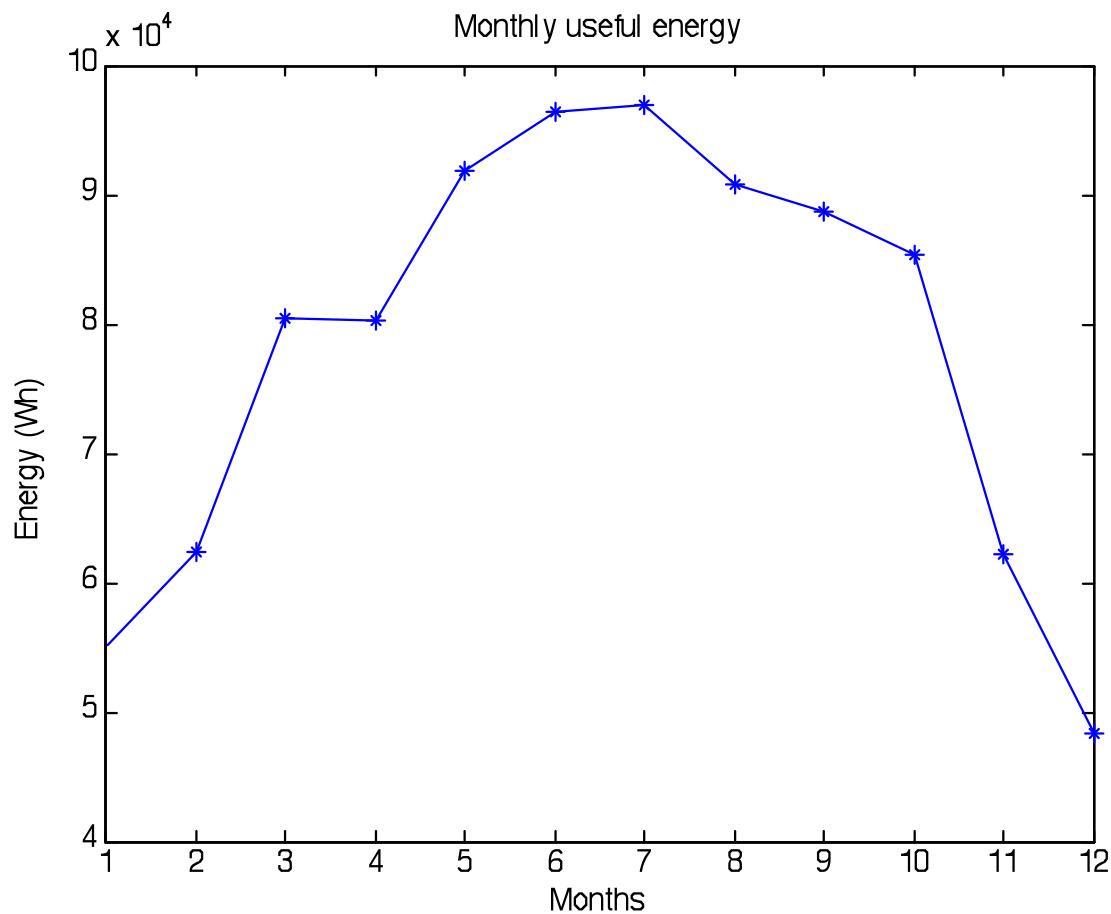
Η θερμική απόδοση του παραβολικού ηλιακού συλλέκτη με τις παρούσες προδιαγραφές προκύπτει ίση με 48,15%.

### 8.2.2 Ανακλαστική επιφάνεια: άργυρος

Θεωρώντας ως υλικό επίστρωσης της παραβολής του ηλιακού συλλέκτη τον άργυρο, υπολογίστηκε η χρήσιμη ενέργεια του συλλέκτη και παρουσιάζεται με τη μορφή γραφημάτων, για κάθε ημέρα του έτους στο Διάγραμμα 8.7 και για κάθε μήνα στο Διάγραμμα 8.8, ενώ η ετήσια χρήσιμη ενέργεια υπολογίστηκε ότι ανέρχεται στις 939 kWh.



Διάγραμμα 8.7 Ημερήσια χρήσιμη ενέργεια (επίστρωση αργύρου).

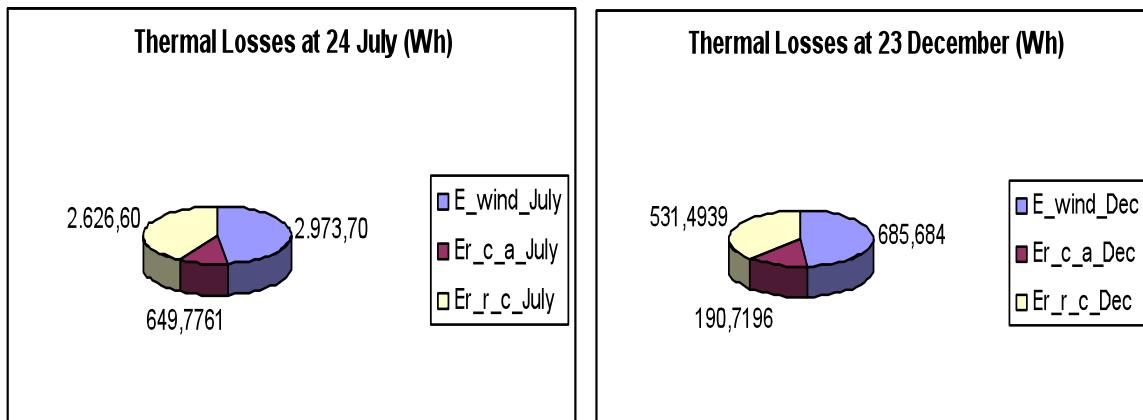


Διάγραμμα 8.8 Μηνιαία χρήσιμη ενέργεια (επίστρωση αργύρου).

Η θερμική απόδοση του παραβολικού ηλιακού συλλέκτη με τις παρούσες προδιαγραφές προκύπτει ίση με 49,52%.

### 8.3 Θερμικές απώλειες-Ενδεικτικά

Παρουσιάζονται, ενδεικτικά, οι θερμικές απώλειες (σε Wh) του αποδέκτη του παραβολικού συλλέκτη που εξετάζεται σε αυτή την εργασία, για μία ζεστή (Ιούλιος) ημέρα και για μία κρύα (Δεκέμβριος) ημέρα:



Σχήμα 8.1 Θερμικές απώλειες του αποδέκτη για μία τυχαία θερμή ημέρα και μία ψυχρή, σε Wh.

Συγκρίνοντας τις θερμικές απώλειες των δύο αυτών διαφορετικών ημερών, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Όσο θερμότερος είναι ο αποδέκτης, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες.
  - Διότι η διαφορά θερμοκρασίας απορροφητή-περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό θερμικών απωλειών προκύπτει από την επαφή του ανέμου με τον αποδέκτη.
  - Αυτό οφείλεται στο ότι έχουμε τυρβώδη ροή λόγω των ρευμάτων του αέρα (forced convection), και επομένως μεγάλο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας.

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

Η μείωση των συμβατικών ενέργειακών πόρων τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς και η μόλυνση του περιβάλλοντος από την επεξεργασία αυτών των πόρων, οδήγησε στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες αφορούν στην εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση και δεν αλλοιώνουν το περιβάλλον, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας, αποδεσμεύοντας ρυπογόνες και τοξικές ουσίες. Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί την πιο κύρια φυσική πηγή ενέργειας, η οποία γίνεται εκμεταλλεύσιμη μέσω των ηλιακών θερμικών συλλεκτών, με πιο αποδοτικό τύπο αυτό του παραβολικού συλλέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχόμενη έρευνα και ανάπτυξη της τεχνολογίας του.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα μοντέλο παραβολικού συλλέκτη, με μεσαίες διαστάσεις και με επιλογή υλικών κατασκευής των διαφόρων τμημάτων του που αποδεικνύονται από τα πιο αποδοτικά. Ως σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου ερευνήθηκαν τα τρία πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα σε τέτοιες εφαρμογές συστήματα και επιλέχθηκε το πιο αποδοτικό. Η συνολική απόδοσή του ερευνάται ως προς δύο διαφορετικά υλικά κατασκευής του συγκεντρωτικού παραβολικού κατόπτρου, τον άργυρο και τον χρυσό.

Η ιχνηλάτηση της πορείας των ηλιακών ακτινών διερευνήθηκε από τρία διαφορετικά συστήματα, το σύστημα με συνεχή περιστροφή του συλλέκτη γύρω από οριζόντιο άξονα βορρά-νότου, με συνεχή περιστροφή του συλλέκτη γύρω από οριζόντιο άξονα ανατολής - δύσης και με συνεχή περιστροφή γύρω από άξονα βορρά-νότου παράλληλο με τον άξονα της γης. Το τελευταίο αποδείχθηκε το πιο αποδοτικό. Αυτό οφείλεται στο ότι ο συλλέκτης σε αυτό το σύστημα εμφανίζει τις λιγότερες απώλειες ηλιακής ακτινοβολίας καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, λόγω του ότι η γωνία πρόσπτωσης (θ) είναι ίση με τη γωνία απόκλισης του ήλιου (δ). Αναλυτικά, τα παραπάνω, παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 7.

Η απόδοση του συγκεκριμένου μοντέλου παραβολικού συλλέκτη που αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 8. Συνοπτικά, για ένα ολόκληρο έτος (με δεδομένα ηλιακής ισχύος σε οριζόντιο επίπεδο, ταχύτητας ανέμου και θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το 2001 στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης), η οπτική απόδοση του συλλέκτη, χρησιμοποιώντας τον άργυρο ως υλικό κατασκευής του παραβολικού κατόπτρου, υπολογίστηκε ίση με 64,69%, ενώ χρησιμοποιώντας τον χρυσό υπολογίστηκε ίση με 62,87%. Η θερμική απόδοση προέκυψε ίση με 49,52% και 48,15% αντίστοιχα. Η διαφορά των δύο αυτών υλικών είναι πολύ μικρή και οφείλεται στο γεγονός ότι ο άργυρος παρουσιάζει ελάχιστα μεγαλύτερη ανακλαστικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας συγκριτικά με τον χρυσό. Ο χρυσός όμως εμφανίζεται ως πιο υποσχόμενο υλικό σε σχέση με τον άργυρο, καθώς δεν αμαυρώνεται με το πέρασμα του χρόνου και έτσι διατηρεί την υψηλή του ανακλαστικότητα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Στα γραφήματα ημερήσιας και μηνιαίας ενέργειας για ένα ολόκληρο έτος που παρουσιάστηκαν στο Κεφαλαίου 8, η μέγιστη τιμή μηνιαίας ενέργειας προκύπτει τον Ιούλιο, ενώ η ελάχιστη τον μήνα Δεκέμβριο, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω των καιρικών συνθηκών και κατά συνέπεια της ηλιοφάνειας που χαρακτηρίζει τον κάθε μήνα. Κατά τους μήνες Ιανουάριο και Δεκέμβριο εμφανίζονται αρκετές τιμές ημερήσιας ενέργειας ιδιαίτερα χαμηλές, οι οποίες οφείλονται στον συνδυασμό δύο αιτιών, της μικρής διάρκειας της ημέρας κατά τους μήνες αυτούς, καθώς και των άσχημων καιρικών συνθηκών, όπως σύννεφα που καλύπτουν τη νοητή ευθεία ήλιου-συλλέκτη. Η δεύτερη αιτία εξηγεί και κάποιες χαμηλές τιμές ημερήσιας ενέργειας που προκύπτουν κατά τους εαρινούς και θερινούς μήνες του έτους.

Θεωρώντας προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία  $I_b = 800 \text{ W/m}^2$ , το μοντέλο του πειράματος National Renewable Energy Laboratory (NREL), Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver [3] παρουσιάζει θερμική απόδοση  $\eta_{\text{thermal}} = 0,671$  και το μοντέλο της παρούσας εργασίας παρουσιάζει  $\eta_{\text{thermal}} = 0,6$ . Αυτό σημαίνει ότι η προσομοίωση μοντέλου παραβολικού συλλέκτη της παρούσας εργασίας προσεγγίζει ικανοποιητικά την απόδοση ενός παραβολικού συλλέκτη που έχει δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες.

## 10. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα εργασία μοντελοποιείται αναλυτικά ένας παραβολικός ηλιακός συλλέκτης και υπολογίζεται η απόδοσή του για συγκεκριμένα υλικά κατασκευής του και για διαφορετικά συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου. Επομένως, οι μελλοντικές της επεκτάσεις θα μπορούσαν να αφορούν τόσο στο ερευνητικό πεδίο, όσο και στο πεδίο βελτιώσεων του συγκεκριμένου μοντέλου παραβολικού συλλέκτη.

Πιο συγκεκριμένα, στο ερευνητικό πεδίο θα μπορούσαν να εξεταστούν επιπρόσθετα υλικά για την κατασκευή της ανακλαστικής επιφάνειας της παραβολής και να διερευνηθεί εκ νέου η οπτική απόδοση του συλλέκτη, όπως επίσης διαφορετικά υλικά κατασκευής του απορροφητή και του καλύμματός του και εκ νέου υπολογισμός της θερμικής απόδοσης του συλλέκτη. Θα μπορούσε να συνυπολογιστεί το κόστος των υλικών κατασκευής και έτσι να προκύψει μία ολοκληρωμένη τεχνοοικονομική μελέτη. Και η πιο κύρια μελλοντική επέκταση είναι η μελέτη και ανάλυση της αλλαγής φάσης του νερού σε ατμό και ο υπολογισμός της συνολικής ενέργειακής απόδοσης του συστήματος.

Στο πεδίο των βελτιώσεων θα μπορούσε να μελετηθεί η μεταλλική βάση επάνω στην οποία τοποθετείται ο παραβολικός συλλέκτης και να συνυπολογιστούν οι απώλειες θερμότητας από τον αποδέκτη προς τη βάση. Η θερμική απόδοση του συλλέκτη θα βελτιωθεί εάν αναπτυχθεί ένα σύστημα ελέγχου της ροής του ψυκτικού υγρού, το οποίο θα την μεταβάλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία που θα αποκτά το υγρό, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση και κατά τους χειμερινούς μήνες. Η οπτική απόδοση του συλλέκτη θα παρουσιάσει αύξηση εάν το σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου δεν κινείται μόνο ως προς ένα άξονα (βορρά-νότου παράλληλο με τον άξονα της γης), όπως στην παρούσα εργασία, αλλά ως προς δύο άξονες, που απαιτεί όμως περίπλοκο και ακριβό μηχανισμό.

## 10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] John Duffie, William Beckman, Solar Engineering of thermal Processes.
- [2] Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταικά συστήματα.
- [3] National Renewable Energy Laboratory (NREL), Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver.
- [4] Σταυρακάκης Γεώργιος, Διαλέξεις Μαθήματος «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2008.
- [5] Iqbal, M., An introduction to Solar Radiation, Academic Press, Toronto, 1983.
- [6] Benford, F. and J. E. Bock, Trans. of the American Illumination Engineering Soc., 34, 200, 1939, 'A Time Analysis of Sunshine'.
- [7] Wiebelt, J. A. and J. B. Henderson, Trans. ASME, J. Heat Transfer, 101, 1979, 'Selected Ordinates for Total Solar Radiation Property Evaluation from Spectral Data'.
- [8] Spencer, J., W., Search, 2 (5), 172 (1971). 'Fourier Series Representation of the Position of the Sun'.
- [9] Liu, B. Y. H. and R. C. Jordan, Solar Energy, 4 (3), 1 (1960). 'The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation'.
- [10] Erbs, D., G., S. A. Klein and J. A. Duffie, Solar Energy, 28, 293 (1982). 'Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly Average Global Radiation'.
- [11] Hay, J. E. and D. C. McKay, Intl. J. Solar Energy, 3, 203, (1985). 'Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces: A Review and Assessment of Methodologies'.
- [12] Hottel, H., C. And B. B. Woertz, Trans. ASME, 64, 91 (1942). 'Performance of Flat-Plate Solar Heat Collectors'.
- [13] Soteris Kalogirou, 'Use of Parabolic Solar Energy Collectors for sea-water Desalination', Cyprus, 1998
- [14] Sargent, S., L., Bull. of the Am. Meteorological Soc., 53, 360 (Apr. 1972). 'A Compact Table of Blackbody Radiation Function'.
- [15] Guven, H. M., Bannerot R. B., 1985. 'Derivation of universal error parameters for comprehensive optical analysis of parabolic troughs'.
- [16] Guven, H. M., Bannerot R. B., 1986. 'Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries. Solar Energy 36, 535-550.
- [17] Rabl, A., Active Solar Collectors and their Applications. Oxford University Press, New York and Oxford (1985).
- [18] Gaul, H., and A. Rabl, Trans. ASME, J. Solar Energy Engrg., 102, 16 (1980). 'Incidence-Angle Modifier and Average Optical Efficiency of Parabolic Trough Collectors'.
- [19] Soteris Kalogirou, 'Solar Thermal Collectors and Applications', Cyprus, 2004.
- [20] Howell John, Bannerot Richard, Vliet Gary, Solar Thermal Energy Systems.
- [22] Braun, J. E. and J. C. Mitchell, Solar Energy, 31, 439 (1983). 'Solar Geometry for Fixed and Tracking Surfaces'.
- [23] Eibling, J. A., R. E. Thomas and B. A. Landry, Report to the Office of Saline Water, U.S. Department of the Interior (1953). 'An Investigation of Multiple-Effect Evaporation of Saline Waters by Steam from Solar Radiation'.

- [24] Jean M. Bennett and E. J. Ashley, ‘Infrared Reflectance and Emittance of Silver and Gold Evaporated in Ultrahigh Vacuum’.
- [25] S. W. Hogg, G. B. Smith, The unusual and useful optical properties of electrodeposited chrome black films, Australia, 1977.