



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική εργασία με θέμα:

**Σχεδίαση και προσομοίωση συγκεντρωτικού ηλιακού  
συλλέκτη Fresnel στο Solidworks**

**ΠΟΥΛΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης**

**Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016**







**ΠΟΥΛΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**Σχεδίαση και προσομοίωση συγκεντρωτικού ηλιακού  
συλλέκτη Fresnel στο Solidworks**

**Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης  
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016**

**POULIOS KONSTANTINOS**

**Design and simulation of a Fresnel solar reflector on solidworks**

**Supervisor: Christos Tzivanidis**

**Assistant Professor n.t.u.a.**

**ATHENS, FEBRUARY 2016**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, ιδιαίτερα τον αδερφό μου, στον οποίο και αφιερώνω αυτήν την εργασία, για την υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής. Επιπλέον, θερμές ευχαριστίες εκφράζω και για τον υποψήφιο διδάκτορα στον τομέα θερμότητας Μπέλλο Ευάγγελο για την αμέριστη βοήθεια και την άψογη συνεργασία, η οποία ήταν καθοριστική για την περάτωση της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ και τον επιβλέπων καθηγητή μου, Τζιβανίδη Χρήστο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ υπό την επίβλεψή του και για το ιδιαίτερω ενδιαφέρον θέμα που μου ανάθεσε.

I would like to thank my family, especially my brother, to whom I dedicate this diploma thesis, for his support throughout the duration of my studies and especially during the making of this paper. Moreover, I would like to express my gratitude towards the PhD student, Bellos Evangelos for his continuous assistance and excellent cooperation. Finally, I would like to thank my supervisor, Dr. Christos Tzivanidis, for giving me the opportunity to work under his supervision and for the particularly interesting subject that he assigned to me.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρακάτω εργασία γίνεται εκτενής ανάλυση στο σχεδιασμό και στην προσομοίωση ενός συλλέκτη Fresnel μονού απορροφητή στο σχεδιαστικό πακέτο Solidworks. Έγινε χρήση της έκδοσης του 2015 του πακέτου Solidworks οπότε κάποιες ενέργειες που περιγράφονται μέσα στην εργασία αναφέρονται στην έκδοση του 2015. Αναλυτικότερα:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής ανάλυση στις αρχές της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς επίσης περιγράφονται οι βασικοί τύποι συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή των βασικών αρχών στο σχεδιασμό με το πακέτο solidworks (ιδιαίτερος στις εντολές που θα χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό του συλλέκτη) καθώς επίσης αναλύεται ο σχεδιασμός του συλλέκτη και η διαδικασία προσομοίωσης στο Solidworks.

Στο τρίτο κεφάλαιο εξάγονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, οι καμπύλες του συλλέκτη και τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που θα παρέχονταν αν ο συγκεκριμένος συλλέκτης κατασκευαζόταν για εμπορική χρήση.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν κατά τον σχεδιασμό και προσομοίωση του συλλέκτη καθώς επίσης παρατίθενται και μερικές δυνατές παραλλαγές του συλλέκτη.

## SUMMARY

This thesis conducts an extensive analysis of the design and simulation of a single absorber Fresnel reflector with the use of the Solidworks.

More in depth: The first chapter deals with an extensive analysis of the principle of solar radiation, as well as describing the basic types of concentrated solar collectors.

The second chapter deals with a detailed description of the basic principles in designing with solidworks (especially the commands used in designing the collector) and also the process of designing the collector and the simulation in Solidworks.

In the third chapter we have the extraction of the results of the simulation, the curves of the collector and the necessary characteristics that would be provides if this particular collector was ever produced for commercial use, as well as a showcase of some possible alterations of the collector..

Finally, in the fourth chapter we have the conclusions that came up during the design and simulation of the collector.



## Περιεχόμενα

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ**

A.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
A.2 Ηλιακή σταθερά .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
A.3 Κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο φάσμα της συχνότητας.....	2
A.4 Διακύμανση της ακτινοβολίας.....	3
A.5 Ηλιακός χρόνος .....	3
A.6 Ορισμοί και βασικές σχέσεις .....	4
A.7 Ολική, άμεση και διάχυτη ακτινοβολία.....	6
A.8 Απόσβεση της ηλιακής ακτινοβολίας .....	7
A.9 Εισαγωγή στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες .....	8
A.10 Γενικά χαρακτηριστικά συγκεντρωτικών συλλεκτών .....	8
A.11 Αρχή λειτουργία των συγκεντρωτικών συλλεκτών και τα είδη συλλεκτών .....	9
A.11.1 Ηλιακός πύργος.....	9
A.11.2 Παραβολικά ηλιακά κοίλα .....	12
A.11.3 Συλλέκτης τύπου CPC.....	14
A.11.4 Ηλιακός δίσκος (dish stirling).....	19
A.11.5 Ηλιακοί συλλέκτες Fresnel.....	22
A.12 Εγκατεστημένα MW ηλιακών θερμικών σταθμών .....	28

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β. ΟΔΗΓΟΣ SOLIDWORKS ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ**

B.1 Εισαγωγή .....	35
B.2 Περιβάλλον solidworks .....	35
B.3 Βασική αρχή σχεδίασης στο solidworks .....	36
B.4 Γραμμή εντολών .....	36
B.5 Συναρμολογήματα στο solidworks .....	38
B.6 Απόδοση μηχανολογικών σχεδίων .....	40
B.7 Σχεδιασμός του συλλέκτη .....	41
B.8 Στροφή κατόπτρων για αλλαγή θέσης ήλιου.....	46
B.9 Flow simulation στο solidworks .....	49

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ**

Γ.1 Εισαγωγή .....	62
Γ.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη-Διαστάσεις.....	62
Γ.3 Σωλήνας-Απορροφητής .....	63
Γ.4 Υλικά κατασκευής και οπτικά-θερμικά χαρακτηριστικά.....	64
Γ.5 Ιδιότητες νερού.....	65
Γ.6 Επιλογή μάζας.....	67

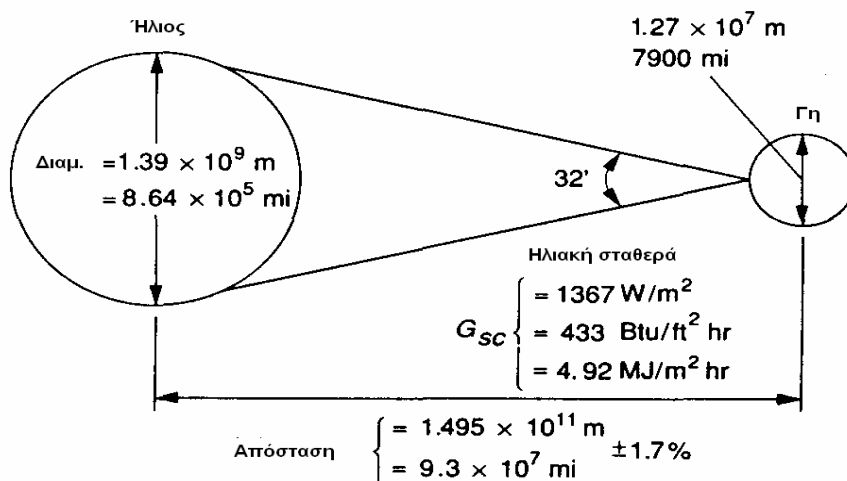
Γ.7 Διάταξη κατόπτρων .....	68
Γ.8 Βελτιστοποίηση διαμέτρου σωλήνα .....	69
Γ.9 Απώλειες συλλέκτη-οπτικός βαθμός απόδοσης-ολικός θερμικός βαθμός απόδοσης.	70
Γ.10 Αποτελέσματα προσομοίωσης για κατακόρυφη θέση ήλιου .....	71
Γ.11 Κατανομή μεγεθών (θερμοκρασιών, ταχυτήτων, θερμοτήτων) .....	76
Γ.12 Υπολογισμός συντελεστή μετάδοσης h και υπόλοιπων θερμοδυναμικών μεταβλητών .....	82
Γ.13 Συντελεστές γωνίας μεταβολής οπτικού βαθμού απόδοσης .....	84
Γ.14 Βαθμός σύλληψης $\gamma$ (intercept factor) .....	91
Γ.15 Ανεξαρτησία πλέγματος .....	92
Γ.16 Παραλλαγές συλλέκτη .....	97
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	
Δ.1 Βασικά συμπεράσματα .....	99
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>100</b>

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ****A.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία**

Ο ήλιος είναι μια σφαίρα αποτελούμενη από πυκνή και καυτή αέρια ύλη διαμέτρου  $1.39 \cdot 10^9$  (m) και είναι σε μια μέση απόσταση  $1.5 \cdot 10^{11}$  m από την γη. Όπως φαίνεται από την γη, ο ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του περίπου μία φορά κάθε τέσσερις εβδομάδες. Παρ' όλα αυτά, δεν περιστρέφεται σαν ένα συμπαγές στερεό σώμα,, αλλά ο ισημερινός περιστρέφεται σε 27 μέρες ενώ οι περιοχές κοντά στους πόλους σε 30 μέρες περίπου.

Ο ήλιος έχει μια ενεργή θερμοκρασία μέλανος σώματος στους 5777K. Η θερμοκρασία στο κεντρικό εσωτερικό του μέρος υπολογίζεται χονδρικά μεταξύ  $8 \cdot 10^6$  με  $40 \cdot 10^6$  K και η πυκνότητά του 100 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του νερού. Ο ήλιος είναι ένας αντιδραστήρας σύντηξης, με τα αέρια που τον απαρτίζουν να αποτελούν το "περιέχουν κέλυφος" το οποίο συντηρείται εξαιτίας των δυνάμεων της βαρύτητας. Πολλές αντιδράσεις σύντηξης έχουν προταθεί με επικρατέστερη αυτήν κατά την οποία δύο άτομα υδρογόνου (δηλ. τέσσερα πρωτόνια) ενώνονται σε ένα άτομο ηλίου, η μάζα του ηλίου που προκύπτει είναι λιγότερη από τα τέσσερα αρχικά πρωτόνια και έτσι η απώλεια αυτή της μάζας μετατρέπεται σε ενέργεια.

Η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό της ηλιακής σφαίρας σε θερμοκρασίες πολλών εκατομμυρίων βαθμών K πρέπει να μεταφερθεί στην επιφάνεια και εν συνεχεία να ακτινοβοληθεί στο διάστημα. Μια διαδοχική διαδικασία ακτινοβολίας και συναγωγής συμβαίνει με διαδοχική εκπομπή, απορρόφηση και επανακτινοβολία. Η ακτινοβολία στον πυρήνα του ήλιου είναι στο φάσμα των ακτινών X και Γάμμα, με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας να μεγαλώνει όσο η θερμοκρασία μειώνεται και η ακτίνα αυξάνει.

**A.2 Ηλιακή σταθερά**

Εικόνα Α.1: Σχέσεις μεταξύ Ήλιου-Γης

Η εκκεντρότητα της τροχιάς της γης είναι τέτοια ώστε η απόσταση μεταξύ ήλιου και γης να μεταβάλλεται κατά  $\pm 1.7\%$ . Σε απόσταση μίας αστρονομικής μονάδας,  $1.495 \cdot 10^{11}$  m (δηλ. την μέση απόσταση ήλιου – γης) ο ήλιος είναι απέναντι από ένα σημείο πάνω στην γη κατά

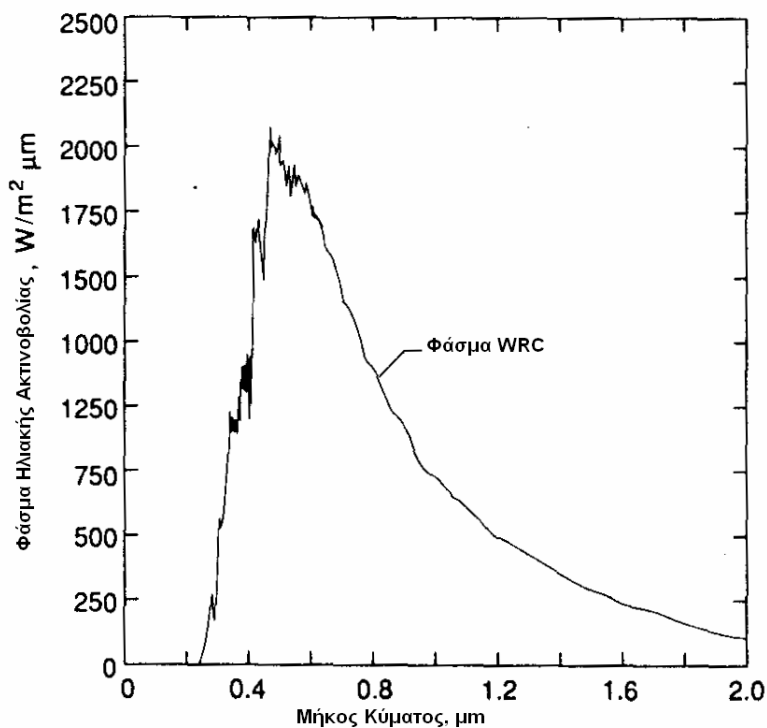
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

μία γωνία  $32'$ . Η εκπεμπόμενη από τον ήλιο ακτινοβολία και η χωρική της σχέση στην γη έχει ως αποτέλεσμα μια σχεδόν σταθερή τιμή έντασής της έξω από την ατμόσφαιρα της γης. Η ηλιακή σταθερά,  $G_{sc}$ , είναι η ενέργεια στη μονάδα του χρόνου που εκπέμπεται από τον ήλιο και λαμβάνεται από μια επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της πρόσπτωσής της σε μία μέση απόσταση έξω από την ατμόσφαιρα της γης.

Στο παρελθόν οι μετρήσεις για τον καθορισμό της ηλιακής σταθεράς, γίνονταν από όργανα τοποθετημένα στην επιφάνεια της γης, με αποτέλεσμα ένα ποσοστό της ακτινοβολίας να έχει ήδη απορροφηθεί και σκεδαστεί. Αργότερα πρόσθετες μελέτες έγιναν πάνω σε βουνά με μεγάλο υψόμετρο, προσπάθεια που βοήθησε στην καλύτερη εκτίμηση της σταθεράς. Αρχικά η τιμή που δόθηκε για την ηλιακή σταθερά από τον C.G. Abbot και τους συνεργάτες του ήταν  $1322 \text{ W/m}^2$ . Αργότερα ο Johnson (1954) αναθεώρησε αυτήν την τιμή στις  $1395 \text{ W/m}^2$ . Πολλές ερευνητικές προσπάθειες έγιναν για την εκτίμηση της τιμής της ηλιακής σταθεράς, ενώ παράλληλα υπάρχουν ακόμα και σήμερα διαφωνίες μεταξύ των ερευνητών για τον καθορισμό της τιμής αυτής. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς που έχει γίνει γενικώς αποδεκτή είναι  $1367 \text{ W/m}^2$ , σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (WMO 1978).

### A.3 Κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο φάσμα της συχνότητας

Εκτός από την ηλιακή σταθερά, είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο φάσμα της συχνότητας. Ένα πρότυπο διάγραμμα για αυτόν τον λόγο έχει συνταχθεί βασισμένο σε μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε μεγάλο υψόμετρο και στο διάστημα. Το πρότυπο διάγραμμα του Παγκοσμίου Κέντρου Ακτινοβολίας (World Radiation Center, WRC) φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα A.1: Φάσμα εξωγήινης ακτινοβολίας

**A.4 Διακύμανση της ακτινοβολίας**

Δύο πηγές διακύμανσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας εξωτερικά της ατμόσφαιρας πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η πρώτη είναι διακύμανση στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο και οφείλεται στην δραστηριότητα των ηλιακών κηλίδων (sunsports). Η οποία όμως για εφαρμογές μηχανικής μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Ενώ η δεύτερη η οποία έχει ως αποτέλεσμα μεταβολές της τάξης του  $\pm 3\%$  στην ακτινοβολία οφείλεται στην μεταβολή της απόστασης Ήλιου-Γης. Έτσι, η εξάρτηση της ακτινοβολίας από τον χρόνο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \quad (A.1)$$

όπου  $G_{on}$  η ακτινοβολία εξωτερικά της ατμόσφαιρας, η οποία μετράται σε ένα επίπεδο κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης την n-στή μέρα του χρόνου.

**A.5 Ηλιακός χρόνος**

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας απαιτεί τον υπολογισμό της ακριβούς θέσης του ήλιου ως προς τη θέση μίας επιφάνειας πάνω στην οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία. Ο προσδιορισμός της βασίζεται στον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων που προκύπτουν από την ηλιακή γεωμετρία.

Σε όλους του υπολογισμούς που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία, χρησιμοποιείται ο πραγματικός ηλιακός χρόνος ( $H_x$ ). Η Γη χωρίζεται σε 24 ζώνες. Κάθε μία από αυτές τις ζώνες έχει γεωγραφικό μήκος  $15^\circ$  (δηλαδή 1 ώρα, αφού η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της κατά  $15^\circ$  την ώρα). Για κάθε μία από αυτές τις ζώνες χρησιμοποιείται η ίδια τοπική ώρα. Ο ηλιακός χρόνος ( $H_x$ ) δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο ( $T_x$ ). Συνεπώς, χρειάζεται να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις σύμφωνα με την σχέση:

$$H_x = T_x \pm 4 * (L_{GT} - L_T) + E_T \quad (A.2)$$

(+) στο δυτικό ημισφαίριο και (-) στο ανατολικό ημισφαίριο, όπου  $L_{GT}$  είναι ο μεσημβρινός για τη ζώνη χρόνου της περιοχής,  $L_T$  είναι ο τοπικός μεσημβρινός. Επίσης, μπορεί να χρειαστεί και μία ακόμα διόρθωση του τοπικού χρόνου για τη θερινή ώρα.

Η παράμετρος  $E_T$  υπολογίζεται από την εξίσωση του χρόνου, με την οποία λαμβάνεται υπ' όψη η ελλειπτική τροχιά και η εκκεντρότητα της τροχιάς της Γης γύρω από τον ήλιο. Η εξίσωση του χρόνου (εξίσωση του Watt) υπολογίζεται σε λεπτά χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$E_T = 9.87 * \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B) \quad (A.3)$$

Όπου 
$$B = 360 \cdot \frac{(D-81)}{364} \quad (A.4)$$

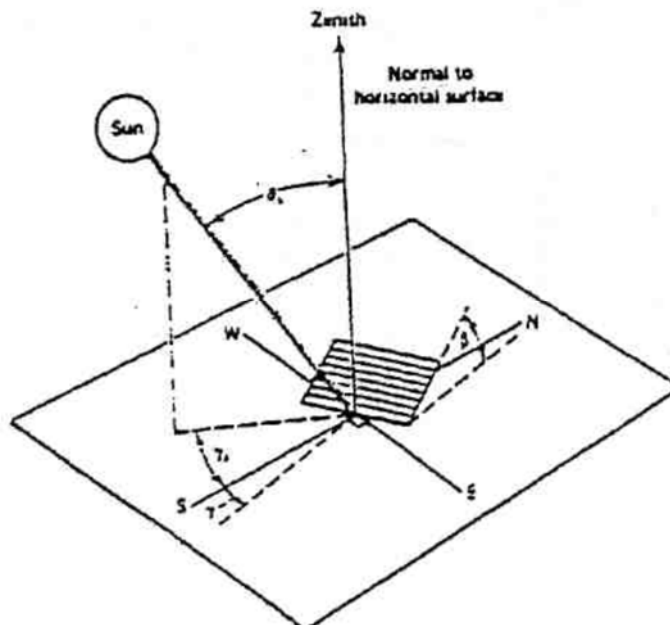
και D είναι η μέρα του χρόνου.

**A.6 Ορισμοί και βασικές σχέσεις**

Στην συνέχεια δίνονται οι ορισμοί και οι σχέσεις υπολογισμού βασικών μεγεθών που αφενός μεν χαρακτηρίζουν την ηλιακή ακτινοβολία και αφετέρου δε χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια υαλοστασίου. Τα βασικά αυτά μεγέθη είναι τα εξής:

- Γωνία ζενίθ,  $\theta_z$  : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου.
- Ηλιακό ύψος,  $90^\circ - \theta_z$ : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ήλιου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.
- Αζιμούθιο επιφανείας,  $\gamma$  : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Για όλα τα σημεία του ορίζοντα ισχύει ότι  $-180^\circ < \gamma < 180^\circ$  με  $\gamma = 0^\circ$  στο νότο,  $\gamma = 90^\circ$  στη δύση,  $\gamma = 180^\circ$  στο βορρά και  $\gamma = -90^\circ$  στην ανατολή.
- Αζιμούθιο ηλίου,  $\gamma_s$ : Είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.
- Κλίση επιπέδου,  $\beta$  : Είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Ισχύει ότι  $0^\circ < \beta < 180^\circ$ . Για το οριζόντιο επίπεδο είναι  $\beta = 0^\circ$ , ενώ για το κατακόρυφο  $\beta = 90^\circ$ .

Όλα τα παραπάνω μεγέθη φαίνονται στο σχήμα 1, το οποίο ακολουθεί:



Εικόνα Α.2: Γωνία ζενίθ  $\theta_z$ , ηλιακό ύψος  $90^\circ - \theta_z$ , αζιμούθιο επιφανείας  $\gamma$ , αζιμούθιο ηλίου  $\gamma_s$  και κλίση επιπέδου  $\beta$ .

- Ωριαία γωνία,  $\omega$  : Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό  $15^\circ / h$  το οποίο ισοδυναμεί με  $0.25 / \text{min}$ . Υπολογίζεται δε από την παρακάτω σχέση:

$$\omega = 0,25 \cdot (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (A.5)$$

Λαμβάνεται  $\omega > 0$  για τις ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι και  $\omega < 0$  για τις ώρες πριν το ηλιακό μεσημέρι.

- Ηλιακή απόκλιση,  $\delta$  : Είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Επειδή το επίπεδο αυτό είναι κεκλιμένο κατά  $23,45^\circ$  ως προς το επίπεδο της τροχιάς της γης περί τον ήλιο, η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ των ορίων  $-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$  με θετικές τιμές προς το βορρά. Υπολογίζεται δε από τη σχέση :

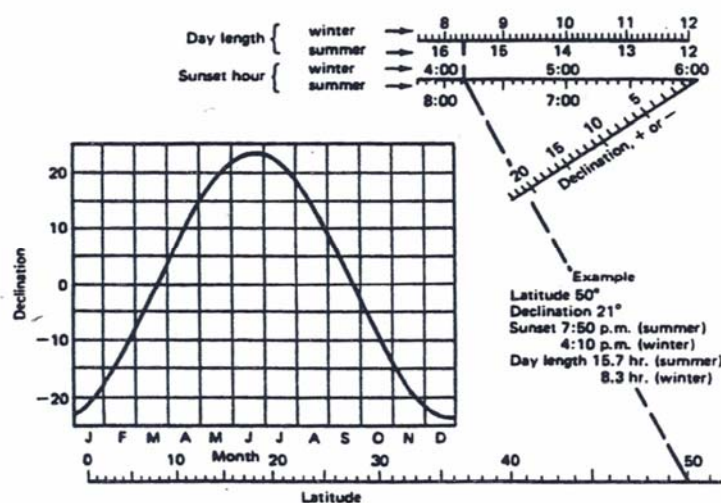
$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (A.6)$$

όπου ο  $n$  συμβολίζει τον αύξοντα αριθμό μιας οποιασδήποτε μέρας του έτους. Επομένως λοιπόν ο παράγοντας  $n$  δέχεται τιμές από 1 : 365.

Στον πίνακα 1 που ακολουθεί μπορούμε να δούμε τον αύξοντα αριθμό κάθε ημέρας του έτους, την μέση ημέρα κάθε μήνα και την αντίστοιχη τιμή της αντίστοιχης ηλιακής απόκλισης.

Μήνας	Μέρα του χρόνου	Ημερομηνία	n	Απόκλιση $\delta$
Ιανουάριος	1	17	17	-20.9
Φεβρουάριος	31+i	16	47	-13.0
Μάρτιος	59+i	16	75	-2.4
Απρίλιος	90+i	15	105	9.4
Μάιος	120+i	15	135	18.8
Ιούνιος	151+i	11	162	23.1
Ιούλιος	181+i	17	198	21.2
Αύγουστος	212+i	16	228	13.5
Σεπτέμβριος	243+i	15	258	2.2
Οκτώβριος	273+i	15	288	-9.6
Νοέμβριος	304+i	14	318	-18.9
Δεκέμβριος	334+i	10	344	-23.0

Η μεταβολή αυτή του  $\delta$  έχει σαν αποτέλεσμα την εναλλαγή των εποχών του έτους και την άνιση διάρκεια ημέρας και νύχτας. Στο σχήμα 2 φαίνεται η μεταβολή της ηλιακής απόκλισης κατά την διάρκεια του έτους:



Σχήμα Α.2:Νομογράφημα εύρεσης του χρόνου δύσης του ήλιου και της διάρκειας της ημέρας, καθώς και η μεταβολή της ηλιακής απόκλισης κατά την διάρκεια του έτους

- Γωνία πρόσπτωσης,  $\theta$  : Η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία που δημιουργείται από τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες και την κάθετη στην επιφάνεια. Υπολογίζεται δε από την εξής σχέση:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (A.7)$$

όπου  $\phi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το οποίο λαμβάνει τιμές μεταξύ  $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ . Για την Αθήνα ισχύει ότι  $\phi=37.58^\circ$ . Για οριζόντιες επιφάνειες ( $\beta=0^\circ$ ) η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με τη γωνία ζενίθ και άρα ισχύει ότι:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\phi + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\omega \quad (A.8)$$

### A.7 Ολική, άμεση και διάχυτη ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, χωρίζεται στην άμεση και στη διάχυτη ακτινοβολία. Η στιγμιαία ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μετριέται σε  $W/m^2$ . Χρησιμοποιείται συνήθως το σύμβολο “G”, με κατάλληλους δείκτες σε περίπτωση που αναφερόμαστε στη άμεση (b, beam) ή στη διάχυτη (d, diffuse) ακτινοβολία. Η προσπίπτουσα ενέργεια σε μία επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας, για μία χρονική περίοδο (π.χ. μία ώρα ή μία ημέρα), μετριέται σε  $J/m^2$ . Χρησιμοποιείται συνήθως το σύμβολο “I” για τις ωριαίες τιμές και το σύμβολο “H” για ημερήσιες τιμές με κατάλληλου δείκτες.

Άμεση ακτινοβολία (  $G_b$  ή  $I_b$  ή  $H_b$  ): Ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης με ελάχιστη ή χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια εξαρτάται από:

- την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα,
- το ύψος του ήλιου,
- το γεωγραφικό πλάτος του τόπου,
- το υψόμετρο του τόπου,
- την κλίση της επιφάνειας,
- την απόσταση ήλιου – Γης και
- την απόκλιση του ήλιου.

Διάχυτη ακτινοβολία (  $G_d$  ή  $I_d$  ή  $H_d$  ): Ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνσή της από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα, και από ανάκλαση στην επιφάνεια της Γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από:

- το ύψος του ήλιου,
- το υψόμετρο του τόπου,
- τη λευκαύγεια (δηλαδή το συντελεστή ανάκλασης της επιφάνειας) του εδάφους,
- το ποσό και το είδος των νεφών και
- το ποσό και το είδος των σωματιδίων και των αερίων της ατμόσφαιρας.



Ολική ακτινοβολία (G ή I ή H): Ορίζουμε το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Για μία οριζόντια επιφάνεια ισχύει, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας ωριαίες τιμές της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας :

$$I = I_b + I_d \quad (A.9)$$

Το ίδιο ισοζύγιο ισχύει χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές και για άλλες χρονικές περιόδους, δηλαδή στιγμιαίες εντάσεις ή ημερήσιες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας.

### **A.8 Απόσβεση της ηλιακής ακτινοβολίας**

Η ηλιακή ακτινοβολία όταν προσπίπτει κάθετα σε μία επιφάνεια πάνω στην επιφάνεια της γης, υπόκειται σε ίδιες αιτίες διακύμανσης με την ακτινοβολία που προσπίπτει εξωτερικά της ατμόσφαιρας, όπως αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.4, και σε δύο επί πρόσθετα και πιο σημαντικά φαινόμενα, αυτά (1) της ατμοσφαιρικής σκέδασης από μόρια του αέρα, του νερού και της σκόνης και (2) της ατμοσφαιρικής απορρόφησης από το O<sub>3</sub>, το H<sub>2</sub>O και το CO<sub>2</sub>.

Η σκέδαση της ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της μέσα από την ατμόσφαιρα οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις αυτής με μόρια του αέρα, του νερού (ατμού ή σταγονίδια), και της σκόνης. Ο βαθμός της σκέδασης είναι συνάρτηση του μήκους της διαδρομής μέσω της οποίας η ακτινοβολία περνάει και του μεγέθους των σωματιδίων σχετικά με το λ, το μήκος κύματος δηλαδή της ακτινοβολίας. Το μήκος της διαδρομής μέσω της οποίας η ακτινοβολία περνάει μετράται με την αέρια μάζα (m). Ο αριθμός των μορίων του νερού και της σκόνης που συναντά η ακτινοβολία κατά το πέρασμά της εξαρτάται λοιπόν τόσο από την αέρια μάζα όσο και από τις ποσότητες σκόνης και υγρασίας της ατμόσφαιρας οι οποίες είναι συνάρτηση της συγκεκριμένης περιοχής και της ώρας.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας στο φάσμα της ηλιακής ενέργεια οφείλεται κυρίως στο όζον για το φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας και στο νερό και το διοξείδιο του άνθρακα για το φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Υπάρχει σχεδόν απόλυτη απορρόφηση των χαμηλού-μήκους κύματος ακτινοβολιών από το όζον στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας σε μήκη κύματος μικρότερα από 0,29μm. Η απορρόφηση του όζοντος μειώνεται όσο αυξάνεται το λ σε τιμές μεγαλύτερες από 0,29μm, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές από 0,35μm είναι μηδενική. Υπάρχει επίσης μια ασθενής ζώνη απορρόφησης του όζοντος κοντά στα 0,6μm.

Οι υδρατμοί απορροφούν κυρίως στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας με ισχυρές απορροφητικές ζώνες με κέντρα στα 1.0, 1.4 και 1.8μm. Πέρα από τα 2.5μm, η περατότητα της ατμόσφαιρας είναι μικρή εξαιτίας της απορρόφησης από το H<sub>2</sub>O και το CO<sub>2</sub>. Εξάλλου, η ενέργεια στο φάσμα της ακτινοβολίας της εξωτερικά από την ατμόσφαιρα για λ μεγαλύτερα από 2,5μm είναι λιγότερη από 5% της ολικής ενέργειας, έτσι και η ενέργεια που λαμβάνεται από το έδαφος για αυτά τα μήκη κύματος είναι πολύ μικρή.

Έτσι, η κάθετη ακτινοβολία που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα της γης έχει φασματική κατανομή όπως αυτή παρουσιάστηκε στο σχήμα 1.2. Όμως το φάσμα των ακτινών X και των άλλων πολύ χαμηλού μήκους ακτινοβολιών απορροφάται σε μεγάλο υψόμετρο στην ιονόσφαιρα από το άζωτο, το οξυγόνο και τα άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας. Το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας απορροφάται από το όζον. Σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 2.5μm, ένα συνδυασμός μικρής εξωγήινης ακτινοβολίας και ισχυρής απορρόφησης από το CO<sub>2</sub> έχει ως αποτέλεσμα μικρά ποσά ενέργειας να φτάνουν στο έδαφος. Έτσι, από την σκοπιά των εφαρμογών στην επιφάνεια της γης, μόνο η ακτινοβολία σε μήκη κύματος μεταξύ 0,29 και 2,5 μm πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

### A.9 Εισαγωγή στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες

Οι συλλέκτες είναι εγκαταστάσεις, οι οποίες ουσιαστικά χρησιμοποιούνται για την συλλογή και την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε χρήσιμη θερμική ενέργεια (συνήθετα θερμική ενέργεια νερού). Χωρίς του συλλέκτες, η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας θα μας ήταν 'άχρηστη'. Τα 2 βασικά είδη ηλιακών συλλεκτών είναι οι επίπεδοι και οι συγκεντρωτικοί. Η κατασκευαστική τους διαφορά είναι ότι οι μεν επίπεδοι είναι επίπεδες επιφάνειες στην οποία γίνεται η αξιοποίηση της ακτινοβολίας, ενώ στους συγκεντρωτικούς υπάρχει συνήθως μια ανακλαστική επιφάνεια η οποία συγκεντρώνει την ακτινοβολία σε ένα σημείο/ή μια ευθεία. Η λειτουργική τους διαφορά είναι ότι οι επίπεδοι συλλέκτες κάνουν χρήση κυρίως της διάχυτης ακτινοβολίας ενώ οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες αξιοποιούν κυρίως την άμεση ακτινοβολία. Το βασικό πλεονέκτημα των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων έναντι των επίπεδων είναι ότι οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες επιτυγχάνουν μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης, λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και αποδίδουν μεγαλύτερες ισχύς. Από την άλλη μεριά όμως είναι πολύ πολυπλοκότερα συστήματα και πολύ πιο ακριβά.

### A.10 Γενικά χαρακτηριστικά συγκεντρωτικών συλλεκτών

Πρώτο βασικό χαρακτηριστικό μέγεθος ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι ο λόγος συγκέντρωσης. Ειδικότερα ο λόγος συγκέντρωσης είναι το πηλίκο της επιφάνειας "παραθύρου" ή "ανοίγματος" προς την επιφάνεια του δέκτη. Επιφάνεια παραθύρου ορίζεται η επιφάνεια από την οποία εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία,  $A_a$  ( $m^2$ ) και επιφάνεια του δέκτη είναι η επιφάνεια που απορροφά την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία  $A_r$  ( $m^2$ ).

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (A.10)$$

Ο λόγος συγκέντρωσης κυμαίνεται από 1.5 έως 10.000. Όσο αυξάνεται ο λόγος συγκέντρωσης αυξάνεται η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αλλά και η ακρίβεια κατασκευής και η ποιότητα του οπτικού συστήματος. Η υψηλότεροι συντελεστές συγκέντρωσης συναντώνται σε εργαστηριακές εφαρμογές στις οποίες αναπτύσσονται πολύ μεγάλες θερμοκρασίες. Στις πραγματικές εγκαταστάσεις συναντώνται μικροί ή μεσαίοι λόγοι συγκέντρωσης. Τα δύο βασικά μέρη ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι ο συγκεντρωτής και ο δέκτης. Ο συγκεντρωτής αποτελείται από τα κάτοπτρα τα οποία συγκεντρώνουν την ακτινοβολία στον δέκτη. Ο δέκτης περιλαμβάνει τον απορροφητή με το σύστημα μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας, συνήθως θερμική ενέργεια του ρευστού και μπορεί να είναι κυρτός, επίπεδος, κούλος, καλυμμένος ή ακάλυπτος.

Ο συγκεντρωτής μπορεί να είναι:

(α) Ανακλαστικός ή διαθλαστικός

(β) Επιμήκης (κυλινδρικός) ή κυκλικός. Ο επιμήκης συγκεντρωτής χαρακτηρίζεται ως δισδιάστατος και εστιάζει σε ευθεία γραμμή. Αν η κάθετος τομή του προς την ευθεία αυτή είναι παραβολή, τότε ονομάζεται παραβολικός συγκεντρωτής. Ο κυκλικός συγκεντρωτής είναι επιφάνεια εκ περιστροφής (π.χ. σφαίρα ή παραβολοειδής), εστιάζει σε σημείο και χαρακτηρίζεται ως τρισδιάστατος.

(γ) Συνεχής ή αποτελούμενος από τμήματα

(δ) Χωρίς είδωλο ή με είδωλο. Οι συγκεντρωτές χωρίς είδωλο δίδουν χαμηλό λόγο συγκέντρωσης ( $C < 10$ ) και δεν σχηματίζουν σαφώς καθορισμένο είδωλο του ηλίου πάνω στον απορροφητή. Οι συγκεντρωτές με είδωλο δίδουν είδωλο πάνω στον απορροφητήρα και οι επιτυγχανόμενοι λόγοι συγκέντρωσης μπορούν να φθάσουν σε πολύ υψηλές τιμές.

### **A.11 Αρχή λειτουργία των συγκεντρωτικών συλλεκτών και τα είδη συλλεκτών**

Η βασική αρχή των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι ότι αποτελούνται από μια ανακλαστική επιφάνεια (το σχήμα και η θέση της οποία χαρακτηρίζει και το είδος του συλλέκτη) και από ένα σημείο/ευθεία εστίασης-συγκέντρωσης της ακτινοβολίας που ανακλάται. Από αυτό το σημείο/ευθεία εστίασης διατρέχει συνήθως κάποιο ρευστό το οποίο προσλαμβάνει την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπει σε θερμική ενέργεια του ρευστού μέσω αύξησης της θερμοκρασίας του.

Τα βασικά είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι τα εξής:

- Παραβολικά ηλιακά κοίλα (parabolic trough)
- Ηλιακός πύργος ισχύος (solar power tower)
- Συλλέκτες Fresnel
- Ηλιακός δίσκος (dish Stirling)
- Συλλέκτες τύπου CPC

Τα διάφορα είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών διαφέρουν ως προς διάφορα κατασκευαστικά και λειτουργικά σημεία. Κάποια κύρια σημεία είναι:

- Σταθερότητα συγκεντρωτή
- Σταθερότητα σημείου εστίασης (δέκτη)
- Θερμοκρασία λειτουργίας
- Αποδιδόμενη ισχύς
- Βαθμός απόδοσης
- Μέγεθος, πολυπλοκότητα και κόστος συστήματος

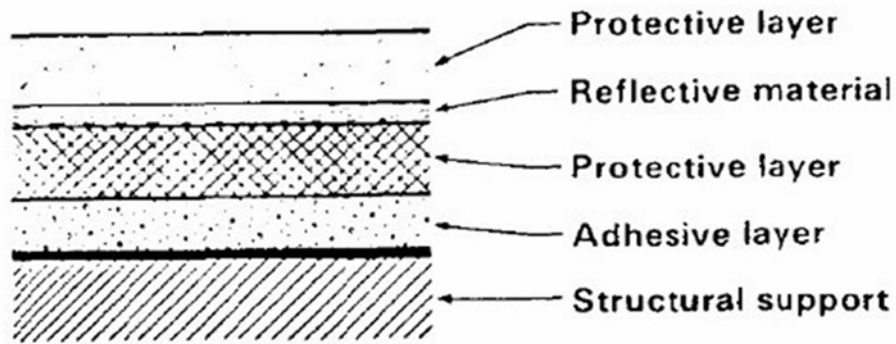
Έτσι λοιπόν ανάλογα με τις ανάγκες και τις δυνατότητες σε κάθε περίπτωση που αφορά την εγκατάσταση ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος, εκτιμώνται οι παραπάνω παράμετροι και γίνεται επιλογή του βέλτιστου συστήματος για την κάθε περίπτωση. Παρακάτω θα γίνει ανάλυση του κάθε συστήματος με την παρουσίαση των βασικών κατασκευαστικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών.

#### **A.11.1 Ηλιακός πύργος**

Ο ηλιακός πύργος ή και συλλέκτης με κεντρικό δέκτη (στα αγγλικά γνωστός ως solar power tower ή central tower ή heliostat) αποτελεί ένα τύπο συγκεντρωτικού συλλέκτη στον οποίο υπάρχει ένας κεντρικός πύργος ο οποίος φέρει το δέκτη(ή και στόχο όπως αναφέρεται συχνά) στον οποίο και συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία τα διάφορα κάτοπτρα (ανακλαστικοί

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

συγκεντρωτές ή και ηλιοστάτες ). Τα κάτοπτρα είναι επίπεδα και συνήθως κινούμενα. Στην συνέχεια η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία αποδίδεται για την θέρμανση νερού και την μετατροπή του σε ατμό ώστε έπειτα να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια συνήθως σε συμβατικό κύκλο Rankine. Νέα σχέδια που χρησιμοποιούν υγρό νάτριο έχουν επιδειχθεί και συστήματα που χρησιμοποιούν άλατα (40% νιτρικό άλας καλίου) ως το λειτουργικό υγρό βρίσκονται τώρα σε χρήση. Αυτά τα λειτουργικά υγρά έχουν υψηλή θερμοχωρητικότητα, ιδιότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση ενέργειας. Με την αποθήκευση ενέργειας ανοίγονται δυνατότητες για την παραγωγή ατμού ακόμα και σε στιγμές χωρίς ηλιοφάνεια. Γενικά τέτοιες κατασκευές στις οποίες ο ανακλαστήρας αποτελείται από τμήματα (επιμέρους επίπεδα κάτοπτρα) απαιτείται ο σωστός σχεδιασμός ώστε να μην σκιάζει το ένα κάτοπτρο το άλλο καθώς επίσης και να μην εμποδίζει κανένα κάτοπτρο την ανακλώμενη ακτινοβολία κάποιου γειτονικού του κατόπτρου. Σε κάποιες εγκαταστάσεις όπου υπάρχει περιθώριο μεγαλύτερης επένδυσης χρησιμοποιούνται αντί επίπεδων, κοίλοι συλλέκτες. Επίσης στην όλη εγκατάσταση τοποθετείται και κατάλληλο σύστημα παρακολούθησης της θέσης των κατόπτρων καθώς και σύστημα μετακίνησής τους σε κατάλληλη θέση για να παρακολουθούν τον ήλιο. Συνήθεις εγκαταστάσεις είναι ισχύος 10-400 [MWe]. Τέτοιες εγκαταστάσεις εκτείνονται σε 1.500.000-2.300.000 m<sup>2</sup> γεγονός που κάνει τους ηλιακούς πύργους συμφέροντες σε περιπτώσεις υψηλής ακτινοβολίας και χαμηλού κόστους γης, ώστε το επενδυτικό κόστος να παραμένει σε φυσιολογικά όρια. Τέλος να αναφέρουμε ότι τα κύρια υλικά ενός ηλιοστάτη είναι 87 % προϊόντα χάλυβα και καθρέπτες και η ανακλαστική επιφάνεια βρίσκεται πίσω από ένα διαφανές υπόστρωμα. Η δομή της κατασκευής αποτελείται από μια στήριξη από χάλυβα, ένα συγκολλητικό στρώμα, ένα προστατευτικό στρώμα από χαλκό, μια στρώση από ανακλαστικό ασήμι και ένα προστατευτικό στρώμα από χοντρό γυαλί όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα Α.3: Υλικά της ανακλαστικής επιφάνειας

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων:



Εικόνα Α.4: Ηλιακός πύργος από τον σταθμό PS10 (Ισπανία) [11 MW]

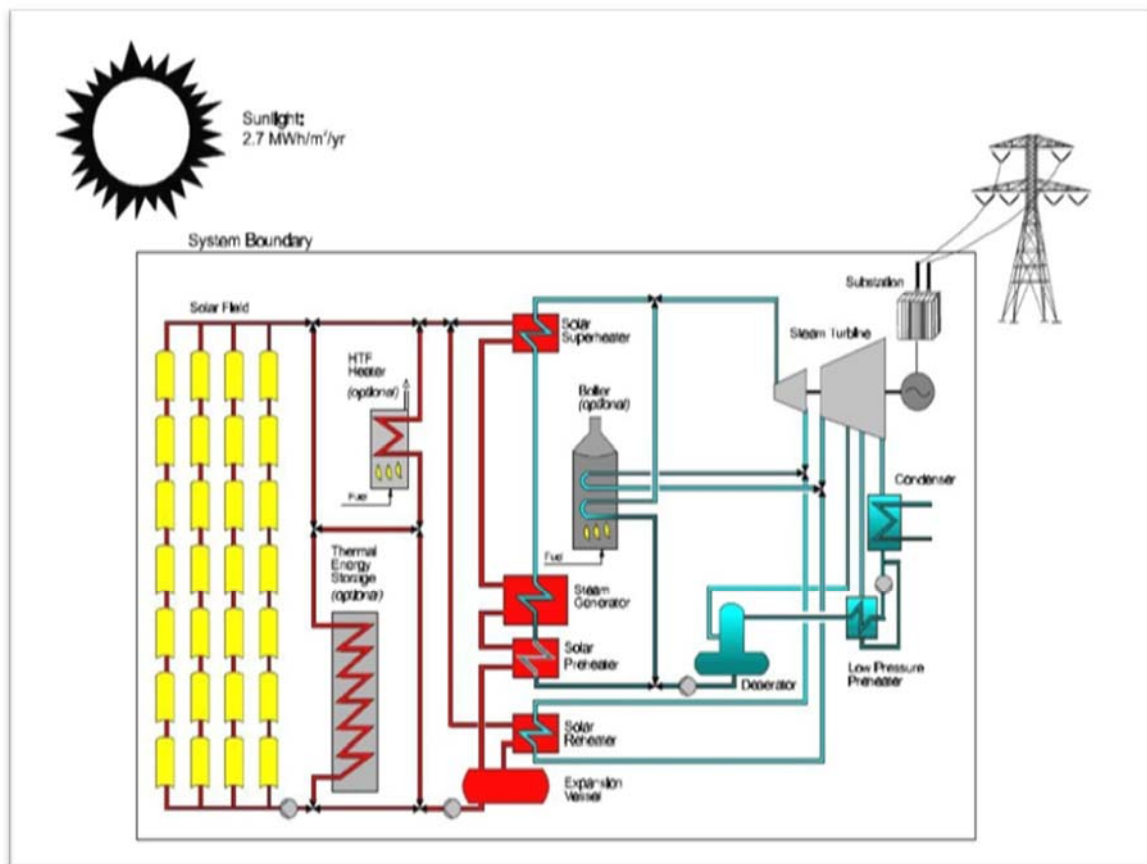


Εικόνα Α.5: Ηλιακός πύργος από τον σταθμό Crescent Dunes Solar Energy Project (Η.Π.Α.) [110 MW]

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρείται η εκτενής έκταση που λαμβάνει ένας τέτοιος σταθμός.

**A.11.2 Επιμήκης παραβολικοί συλλέκτες**

Οι εγκαταστάσεις παραβολικών συλλεκτών αποτελείται από παραβολικά κάτοπτρα τα οποία είναι γραμμικά κατά την 1 διάσταση ενώ η προβολή του στις άλλες 2 διαστάσεις αποτελεί παραβολή. Τα παραβολικά ηλιακά κοίλα συγκεντρώνουν την ακτινοβολία στην γραμμή εστίασης, στην οποία συνήθως τοποθετείται ο αγωγός στον οποίο ρέει το προς θέρμανση ρευστό. Τα ηλιακά κοίλα αποτελούν τα πλέον διαδεδομένα ηλιακά θερμικά συστήματα για την ηλεκτροπαραγωγή. Το ρευστό το οποίο θερμαίνεται σε θερμοκρασίες 150-350 °C, ατμοποιείται και στην συνέχεια εισέρχεται ως επί το πλείστο σε κύκλο Rankine. Τα κάτοπτρα συνήθως είναι ευθυγραμμισμένα στην ευθεία βορρά-νότου και έχουν την δυνατότητα περιστροφής για την καλύτερη 'παρακολούθηση' του ήλιου και την αποτελεσματικότερη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Εναλλακτικά ο συλλέκτης ευθυγραμμίζεται στην κατεύθυνση δύσης-ανατολής, με μικρότερη αποτελεσματικότητα στην συγκέντρωση της ακτινοβολίας λόγω απωλειών συνημίτονου αλλά δεν χρειάζεται σύστημα παρακολούθησης του ήλιου. οι περισσότεροι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με παραβολικά κάτοπτρα είναι υβριδικοί σταθμοί, καθώς χρησιμοποιούν και ορυκτά καύσιμα για τη παραγωγή ατμού σε περιπτώσεις νέφωσης ή κατά τη διάρκεια της νύχτας. Βέβαια υπάρχει ανώτατο όριο του ποσοστού κάλυψης της ισχύος του σταθμού από συμβατικά καύσιμα και αυτό για να αποτελεί ο σταθμός ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Το όριο αυτό ποικίλει από χώρα σε χώρα. Οι παραπάνω σταθμοί συναντώνται σε ισχύς έως και 350 MWe. Στην παρακάτω εικόνα παρατίθεται ένα βασικό σχέδιο ενός σταθμού με παραβολικά κάτοπτρα, τα οποία δημιουργούν ατμό, ο οποίος χρησιμοποιείται σε κύκλο Rankine:



Εικόνα Α.6: Σύστημα παραβολικών κατόπτρων και θερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής κύκλου Rankine

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από εγκαταστάσεις παραβολικών ηλιακών κοίλων:



Εικόνα Α.7: Παραβολικά κάτοπτρα από το σταθμό Solar Energy Generating Systems (SEGS) στην Καλιφόρνια (U.S.A.) [394 MW]



Εικόνα Α.8: Παραβολικά κάτοπτρα από το σταθμό Andasol solar power station στην Ισπανία [150 MW]

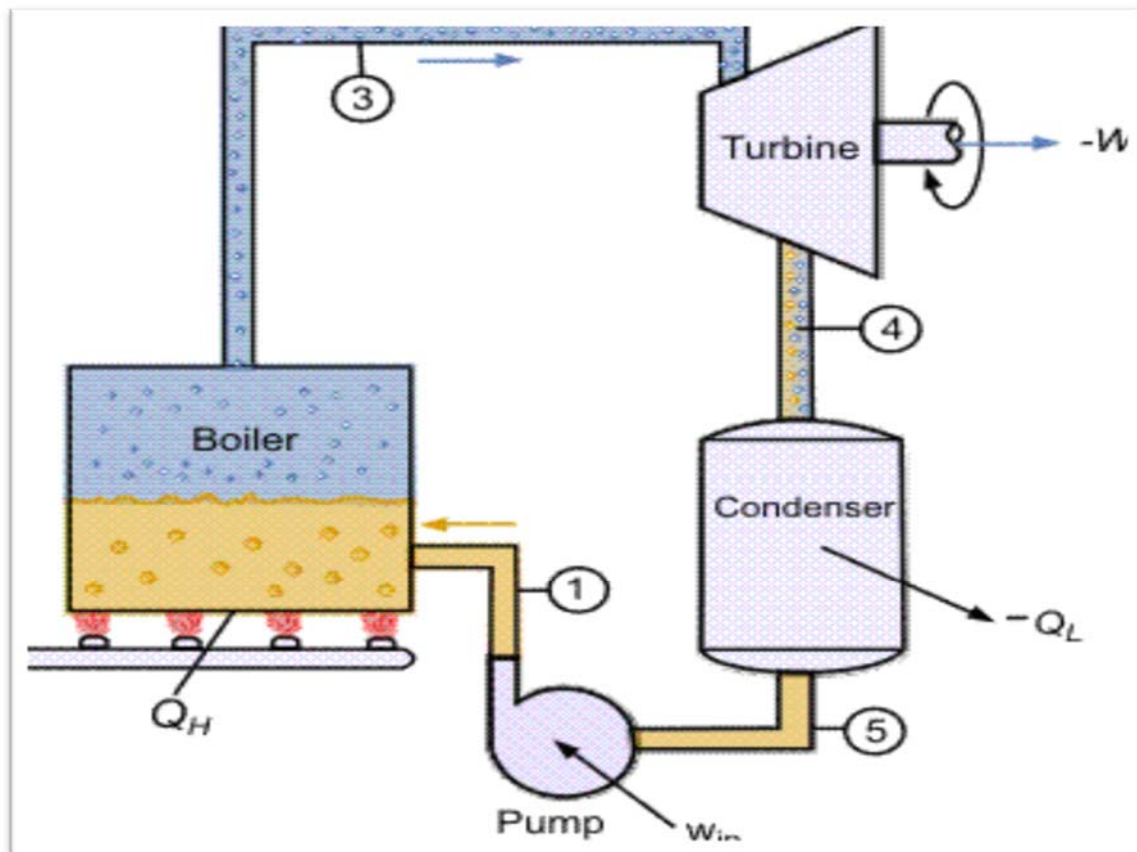
### Κύκλος Rankine

Εδώ είναι χρήσιμο να περιγράψουμε το κύκλο Rankine, καθώς είναι ο βασικός κύκλος ηλεκτροπαραγωγής με τον ατμό που δημιουργείται από τα κάτοπτρα. Αναλυτικότερα ο ατμός εισέρχεται σε μια τουρμπίνα, η οποία στρέφει μια γεννήτρια. Στη συνέχεια, από την έξοδο της τουρμπίνας, εξέρχεται σε κατάσταση συνήθως κορεσμένου ατμού και στην

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

συνέχεια συμπυκνώνεται στον ψύκτη, από τον οποίο εξέρχεται σε κατάσταση κορεσμένου νερού. Στην συνέχεια μέσω αντλιών επιτυγχάνεται πίεση στο νερό, ίση με την πίεση λειτουργίας της τουρμπίνας και διέρχεται από τους απορροφητές του δέκτη του συλλέκτη. Αυτός αποτελεί τυπική μορφή ενός κύκλου Rankine, στον οποίο ανάλογα την περίπτωση και με σκοπό την αύξηση του βαθμού απόδοσης, δύναται να υπάρξει αναθέρμανση ατμού χρησιμοποιώντας ορυκτό καύσιμο.

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες περιγραφής του κύκλου Rankine:



Εικόνα Α.9: Τυπικός κύκλος Rankine

Όπου στη θέση του boiler υπάρχει ένας εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος προσδίδει στο διακινούμενο ρευστό τη θερμότητα από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες.

### A.11.3 Συλλέκτης τύπου CPC

Οι σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές (Compound parabolic Concentrators) είναι συλλέκτες μέσης θερμοκρασίας και περιέχουν στοιχεία τόσο από συγκεντρωτικούς συλλέκτες όσο και από επίπεδους συλλέκτες. Αυτό γιατί δεν συγκεντρώνουν απλά την ηλιακή δέσμη στο δέκτη με ένα ανακλαστήρα αλλά αξιοποιούν και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία όπως οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες. Η αξιοποίηση γίνεται υπό ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης και έτσι υπάρχουν ελάχιστες απαιτήσεις για την παρακολούθηση του ήλιου. Ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτών χωρίς είδωλο και επιτυγχάνουν μικρούς λόγους συγκέντρωσης. Οι συγκεντρωτές με δύο άξονες μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερους λόγους



συγκέντρωσης αλλά η επιβάρυνση και τα προβλήματα της συντήρησης του εξοπλισμού τους κάνουν λιγότερο αποδοτικούς οικονομικά.

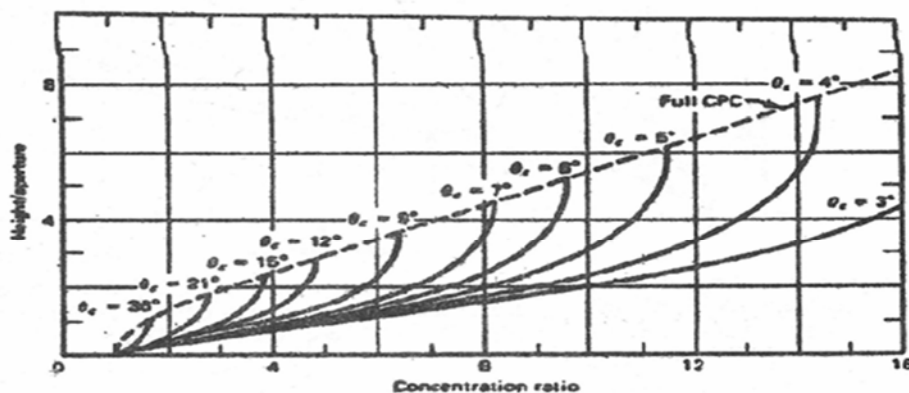
Η συνηθέστερη μορφή των συλλεκτών CPC είναι η διδιάστατη τύπου σκάφης. Και οι δύο παραβολικές επιφάνειες εκτείνονται μέχρι να γίνουν παράλληλες προς τον άξονα συμμετρίας του CPC. Η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα του CPC και την ευθεία που συνδέει την εστία της μιας παραβολής με το απέναντι άκρο του ανοίγματος, ονομάζεται ημιγωνία αποδοχής  $\theta_c$ . Αν οι παραβολικές ανακλαστικές επιφάνειες είναι (οπτικά) τέλειες, τότε η ακτινοβολία που εισέρχεται στο άνοιγμα υπό γωνία  $\theta$ , έτσι ώστε  $-\theta_c < \theta < \theta_c$ , ανακλάται προς το δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του CPC. Για  $\theta < -\theta_c$  ή  $\theta > \theta_c$  η ακτινοβολία δεν φτάνει στο δέκτη. Ο λόγος συγκέντρωσης για ένα (οπτικά) τέλειο επιμήκη CPC δίνεται από τη σχέση:

$$Ci = \frac{1}{\sin\theta_c} \quad (A.11)$$

Τα άνω άκρα των παραβολικών πλευρών του CPC συνεισφέρουν ελάχιστα στην ανάκλαση της ακτινοβολίας προς τον δέκτη και συνεπώς μπορούν να αποκοπούν. Έτσι, το ύψος του CPC μπορεί να μειωθεί με ελάχιστη μείωση στην απόδοση, αλλά σημαντική μείωση στο κόστος κατασκευής. Η αποκοπή των άνω άκρων:

1. δεν μεταβάλλει την ημιγωνία αποδοχής
2. μεταβάλλει το λόγο του ύψους προς το άνοιγμα
3. μεταβάλλει το λόγο συγκέντρωσης
4. μεταβάλλει το μέσο αριθμό ανακλάσεων που υφίσταται η ακτινοβολία μέχρι να φτάσει στον απορροφητήρα.

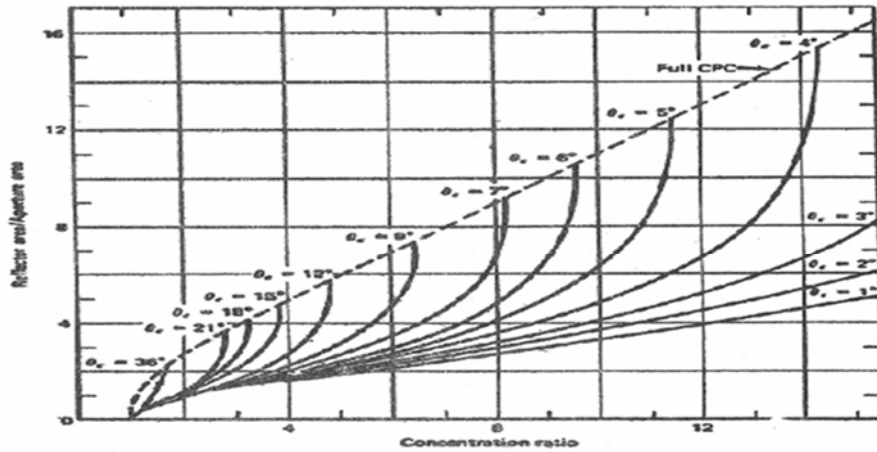
Ο λόγος του ύψους προς το άνοιγμα, ο λόγος της ανακλαστικής επιφάνειας προς την επιφάνεια του ανοίγματος και ο μέσος αριθμός ανακλάσεων δίδονται στα σχήματα A.3, A.4, A.5 αντίστοιχα συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και με παράμετρο την ημιγωνία αποδοχής  $\theta_c$ , για πλήρεις και αποκομμένους, τέλειους, CPC.



Λόγος του ύψους προς το άνοιγμα για πλήρεις και αποκομμένους CPC, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και της ημιγωνίας αποδοχής.

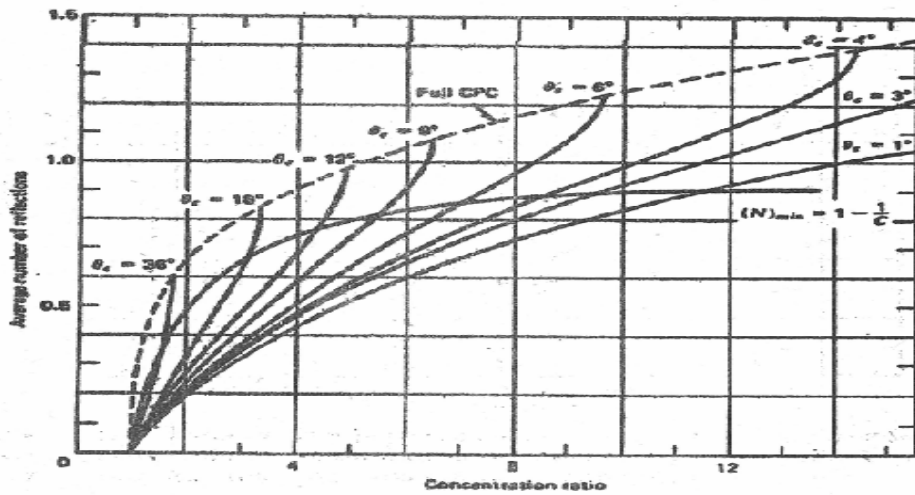
Σχήμα A.3

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL



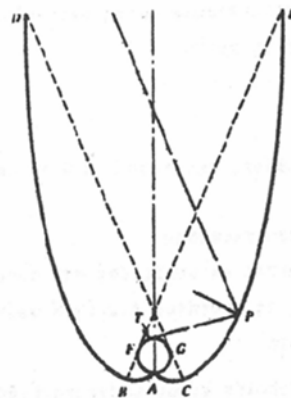
Λόγος της ανακλαστικής επιφάνειας προς την επιφάνεια του ανούγματος για κλήρεις και αποκομμένους CPC, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και της ημιγωνίας αποδοχής.

Σχήμα A.4



Μέσος αριθμός ανακλάσεων για κλήρεις και αποκομμένους CPC, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και της ημιγωνίας αποδοχής.

Σχήμα A.5



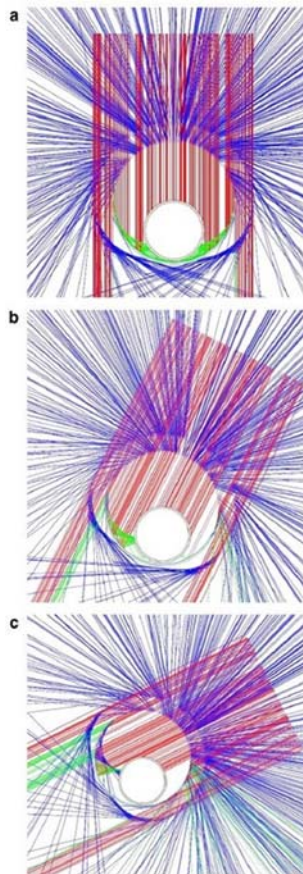
CPC με κυλινδρικό δέκτη (σάλινα)

Εικόνα A.10

Στην εικόνα A.10 φαίνεται ένας συλλέκτης τύπου CPC με κυλινδρικό δέκτη, στην οποία φαίνεται και ο τρόπος γένεσης του σχήματος της ανακλαστικής επιφάνειας που απαιτείται για τον δέκτη αυτό. Έτσι, στο τυχόν σημείο P της επιφάνειας CE πρέπει η κάθετος στο κάτοπτρο να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στον απορροφητήρα, PT, και η ευθεία που διέρχεται από το P και σχηματίζει γωνία  $\theta_c$  με τον άξονα του CPC. Η παραπάνω μέθοδος γένεσης της ανακλαστικής επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε σχήμα κυρτού δέκτη, δημιουργώντας έτσι συλλέκτες τύπου CPC, οι οποίοι δεν είναι κατ' ανάγκη παραβολικοί.

Ο CPC της παραπάνω εικόνας χρησιμοποιείται συνήθως αποκομμένος με σωληνοειδή δέκτη κενού και μάλιστα σε συστοιχία πολλών ομοίων CPC, η οποία φέρει επίπεδο υάλινο κάλυμμα.

Στην εικόνα A.10 βλέπουμε τα αποτελέσματα της ανίχνευσης των ακτίνων φωτός για γωνίες πρόσπτωσης (a)  $0^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $60^\circ$ . Με κόκκινο χρώμα είναι οι προσπίπτουσες ακτίνες, με πράσινο οι ανακλώμενες στον απορροφητήρα και με μπλε η διαθλώμενες και ανακλώμενες ακτίνες προς το περιβάλλον.



Εικόνα A.11: Οι ακτίνες φωτός σε έναν συλλέκτη CPC για γωνίες πρόσπτωσης a)  $\theta=0^\circ$ , b)  $\theta=30^\circ$ , c)  $\theta=60^\circ$

Απορροφούμενη ακτινοβολία

Οι συλλέκτες CPC τοποθετούνται συνήθως με τον διαμήκη άξονα οριζόντιο και προσανατολισμένο κατά την Ανατολή -Δύση. Το επίπεδο του ανοίγματος είναι στραμμένο προς τον ισημερινό, σχηματίζοντας γωνία  $\beta$  με το οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης (περιστροφής) περί τον επιμήκη άξονα, έτσι ώστε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει εντός των ορίων που επιβάλλει η γωνία αποδοχής  $2\theta_c$ . Αυξανόμενου του λόγου συγκέντρωσης μειώνεται η  $\theta_c$  με συνέπεια την απαίτηση συχνότερης ρύθμισης.

Ο υπολογισμός της ακτινοβολίας που απορροφά ο δέκτης του CPC, με προσανατολισμό όπως περιγράφεται παραπάνω, γίνεται ως εξής:

- i. Ελέγχεται αν η άμεσος ακτινοβολία προσπίπτει εντός των επιβαλλομένων ορίων. Αυτό συμβαίνει αν πληρείται η συνθήκη :

$$(\beta - \theta_c) \leq \tan^{-1}(\tan \theta_z \cos \gamma_s) \leq (\beta + \theta_c) \quad (A.12)$$

Όπου:  $\theta_z$  είναι η γωνία ζενίθ και  $\gamma_s$  είναι το αζιμούθιο του ήλιου που υπολογίζεται συναρτήσει της ηλιακής απόκλισης  $\delta$  του γεωγραφικού πλάτους  $\Phi$  και της ωριαίας γωνίας  $\omega$  από τη σχέση :

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \theta_z} \quad (A.13)$$

$$\tan \gamma_s = \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cos \omega - \cos \phi \tan \delta} \quad (A.14)$$

- ii. Υπολογίζεται η αξιοποιούμενη προσπίπτουσα άμεση ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανείας του ανοίγματος  $G_{b,CPC}$  από τη σχέση:

$$G_{b,CPC} = F G_{bn} \cos \theta \quad (A.15)$$

Όπου:  $F$  = συνάρτηση ελέγχου που λαμβάνει την τιμή 1 ή 0 αν ικανοποιείται ή όχι η συνθήκη

$G_{bn}$  = άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου

$\theta$  = η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας στο άνοιγμα

- iii. Υποθέτοντας ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ισότροπη υπολογίζεται η αξιοποιούμενη διάχυτη ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανείας του ανοίγματος  $G_{d,CPC}$  από τη σχέση :

$$G_b = \frac{G_d}{c} \quad \text{αν } \beta + \theta_c < 90^\circ \quad (A.16)$$

ή

$$G_{b,CPC} = G_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + G_p \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad \text{αν } \beta + \theta_c > 90^\circ \quad (A.17)$$

Όπου:  $c$  είναι ο λόγος συγκέντρωσης,  $G_d$  η ισότροπη διάχυτη ακτινοβολία,  $G$  η ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου και  $\rho$  ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση της εξίσωσης (A.16), επειδή  $\beta + \theta_c < 90^\circ$  εισέρχεται στο CPC μόνο η διάχυτη προερχόμενη από τον ουρανό, ενώ στην περίπτωση της εξίσωσης (A.17) λαμβάνεται υπόψη και η διάχυτη από τον ουρανό και η διάχυτη που προκύπτει από ανάκλαση της ολικής ακτινοβολίας στο έδαφος.

- iv. Τέλος, υπολογίζεται η συνολική ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του ανοίγματος,  $S$ , την οποία απορροφά ο απορροφητήρας του συλλέκτη, από τη σχέση:

$$S = (G_{b,CPC} \tau_{cb} a_b + G_{d,CPC} \tau_{cd} a_d) \tau_{CPC} \quad (A.18)$$

Όπου  $\tau_{cb} a_b$  = γινόμενο, για άμεση ακτινοβολία, της διαπερατότητας του καλύμματος που συνήθως τοποθετείται πάνω από την συστοιχία των CPC, επί την απορροφητικότητα του απορροφητήρα

$\tau_{cd} a_d$  = το αντίστοιχο γινόμενο για διάχυτη ακτινοβολία

$\tau_{CPC}$  = διαπερατότητα του συγκεντρωτή, η οποία λαμβάνει υπ'όψιν τις απώλειες ανάκλασης. Έτσι, αν  $\rho$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης του ανακλαστήρα και  $N$  ο μέσος αριθμός ανακλάσεων, ισχύει

$$\tau_{CPC} = \rho^N \quad (A.19)$$

#### **A.11.4 Ηλιακός δίσκος (dish stirling)**

Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου ηλιακού συλλέκτη διαφέρει από τους υπόλοιπους τύπους. Συνήθως, η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για να ατμοποιήσει το διακινούμενο ρευστό και στην συνέχεια αυτός ο ατμός να εκτονωθεί σε έναν κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, στους ηλιακούς δίσκους, η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για την πρόσδοση θερμότητας σε έναν κύκλο Stirling, ο οποίος παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης (έως και 31.25%) από τους κύκλους Rankine και Brayton, πλησιάζοντας περισσότερο τον βαθμό απόδοσης του αντίστοιχου κύκλου Carnot. Αυτό κάνει την παραγόμενη ενέργεια πιο φθηνή και κατά συνέπεια συμφέρουσα επιλογή στην ηλεκτροπαραγωγή με ηλιακά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει ένα μεγάλο παραβολικό κάτοπτρο, το οποίο εστιάζει την ηλιακή ακτινοβολία στον δέκτη και στην συνέχεια αυτή η θερμότητα προσδίδεται στην μηχανή Stirling ως ωφέλιμη ενέργεια. Εναλλακτικά, αντί της μηχανής Stirling, μπορεί να υπάρχει ατμομηχανή, η οποία μετατρέπει την ενέργεια σε περιστροφική ενέργεια και στην συνέχεια αυτή η ενέργεια τροφοδοτεί μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υπάρχοντες εγκαταστάσεις ηλιακών δίσκων δεν διαθέτουν δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και κατά συνέπεια οι συγκεκριμένοι συλλέκτες λειτουργούν μόνο σε περιόδους ηλιοφάνειας. Βέβαια γίνεται μεγάλη έρευνα γύρω από την ανάπτυξη μοντέλων, στα οποία θα υπάρχει και αποθήκευση θερμικής ενέργειας με διάφορες τεχνικές. Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες απαιτείται να λειτουργούν σε θερμοκρασίες γύρω στους 800 °C, ώστε να λειτουργήσει η μηχανή Stirling.

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

Επιπλέον, ο ηλιακός δίσκος δίνει την δυνατότητα για υβριδική λειτουργία, δηλαδή και την καύση κάποιου συμβατικού ορυκτού καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας σε περιόδους με ανεπαρκή ηλιοφάνεια. Ο δέκτης της μηχανής Stirling περιλαμβάνει δέσμη σωλήνων με διακινούμενο ρευστό, συνήθως υδρογόνο ή ήλιο, το οποίο απορροφά τη θερμότητα και την προσδίδει στη μηχανή Stirling. Η συγκεκριμένη μηχανή παρουσιάζει πολύ μικρή θερμική αδράνεια και άρα η μηχανή μπορεί πολύ γρήγορα να μεταβάλλει την ισχύ στην οποία λειτουργεί, όταν μεταβάλλεται η ακτινοβολία.



Εικόνα Α.12: Τυπική μορφή ηλιακού δίσκου



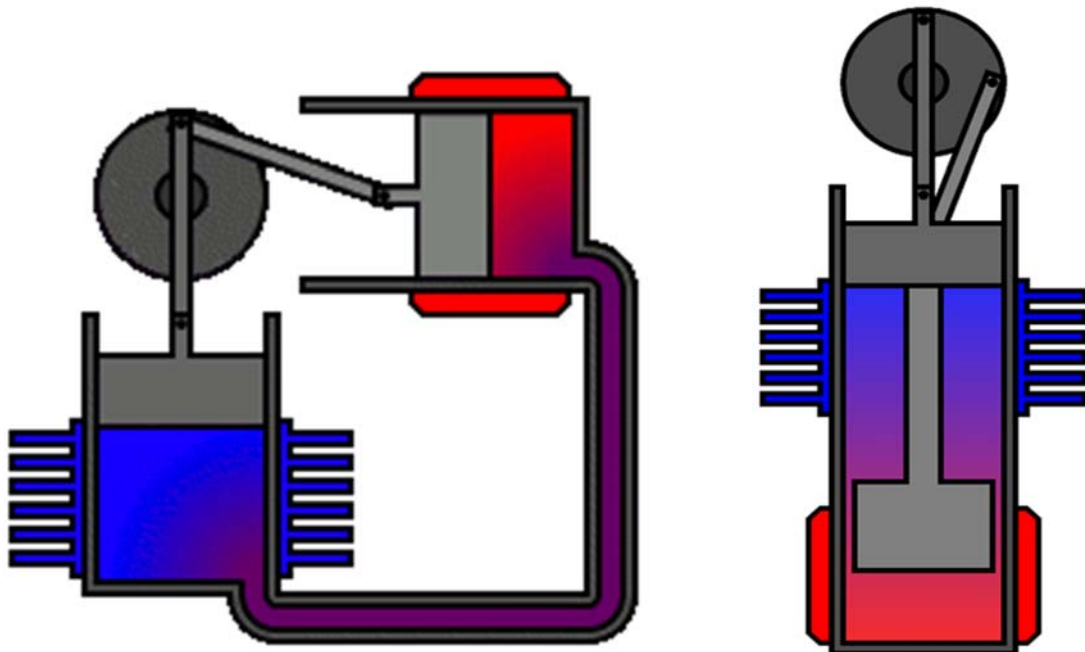
Εικόνα Α.13: Ηλιακός δίσκος

Κύκλος λειτουργίας μηχανής Stirling

Μια μηχανή Stirling είναι μια κλειστού κύκλου λειτουργίας θερμική μηχανή στην οποία λειτουργεί μόνιμα ένα εργαζόμενο ρευστό μεταξύ 2 θερμοκρασιών, μιας υψηλής και μίας χαμηλής. Πιο συγκεκριμένα το εργαζόμενο μέσο (συνήθως κάποιο αέριο) ακολουθεί κυκλική συμπίεση και εκτόνωση και έτσι υπάρχει καθαρή μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική. Η πηγή θερμότητας βρίσκεται εξωτερικά της μηχανής, σε αντίθεση με τις μηχανές στις οποίες η πηγή θερμότητας βρίσκεται εντός της μηχανής (κύκλος Otto/ Diesel) και αυτό κάνει εύχρηστη τη μηχανή σε διάφορες εγκαταστάσεις, στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιείται οποιαδήποτε πηγή θερμότητας. Βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε εγκαταστάσεις στις οποίες χρησιμοποιείται ανανεώσιμη πηγή θερμότητας (χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι μηχανές Stirling που χρησιμοποιούνται στους ηλιακούς συλλέκτες Dish-Stirling). Παρουσιάζουν αθόρυβη λειτουργία και ταυτόχρονα ο θερμικός κύκλος Stirling παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με τους υπόλοιπους θερμικούς κύκλους (κύκλος Rankine/Otto/Diesel/Joule-Brayton), έως και 50%, γεγονός που καθιστά τον βαθμό απόδοσης του κύκλου Stirling τον κοντινότερο στον ιδανικό κύκλο Carnot. Το βασικό μειονέκτημα της μηχανής Stirling είναι ο χαμηλός λόγος ισχύος προς βάρος και έκταση της μηχανής, γεγονός που τον καθιστά ανταγωνιστικό σε στατικές εγκαταστάσεις όπου η εξοικονόμηση χώρου δεν αποτελεί προτεραιότητα της εγκατάστασης. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μηχανών Stirling:

Τύπος Α δύο κυλίνδρων. Ο κύλινδρος εκτόνωσης (κόκκινο) διατηρείται σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ η συμπίεση του κυλίνδρου (μπλε) ψύχεται. Το πέρασμα μεταξύ των δύο κυλίνδρων περιέχει τον αναγεννητή.

Τύπος Β ενός κυλίνδρου, ο οποίος είναι ζεστός στο ένα άκρο και κρύος στο άλλο. Μια φαρδιά εκτόπισης μεταστρέφει τον αέρα ανάμεσα στο ζεστό και κρύο άκρο του κυλίνδρου. Ένα έμβολο στο άκρο του κυλίνδρου οδηγεί το σφόνδυλο.



Εικόνα Α.14: Stirling μηχανή

τύπου Α

τύπου Β

### A.11.5 Ηλιακοί συλλέκτες Fresnel

Μία ακόμα διαφορετική τεχνολογία ηλιακών είναι οι συλλέκτες Fresnel (Linear Fresnel Reflector ή και L.F.R.). Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες αποτελούνται όπως και όλα τα άλλα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, από τον συγκεντρωτή και το δέκτη. Αναλυτικότερα, ο συγκεντρωτής αποτελείται από μια συστοιχία επίπεδων ηλιακών ανακλαστήρων, σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, συγκεντρώνοντας έτσι την ηλιακή ακτινοβολία στον δέκτη, ο οποίος είναι ένας σταθερός σωλήνας σε αρκετό ύψος πάνω από το επίπεδο (εστιακό ύψος). Ο δέκτης ενδείκνυται να είναι σωλήνας κενού, και αυτό καθώς ο σωλήνας κενού, λόγω της πολύ χαμηλής πίεσης που επικρατεί, παρουσιάζει ελάχιστες θερμικές απώλειες συναγωγής. Επιπλέον, ο συλλέκτης εμφανίζεται κάποιες φορές να φέρει και δευτερεύων κάτοπτρο, το οποίο δεν τοποθετείται τόσο για αύξηση της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας αλλά για μόνωση. Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά την συγκέντρωση ακτινοβολίας, το δευτερεύων κάτοπτρο συγκεντρώνει κάποιες από τις ηλιακές ακτίνες οι οποίες διαφεύγουν και δεν προσπίπτουν κατά τις ανακλάσεις στο σωλήνα του απορροφητή, αλλά ταυτόχρονα σκιάζει (συνήθως 1-2 κάτοπτρα), είτε τα κάτοπτρα που βρίσκονται κατακόρυφα του σωλήνα για την κατακόρυφη θέση του ήλιου (ηλιακό μεσημέρι) είτε κάποια άλλα κάτοπτρα, ανάλογα με τη θέση του ήλιου. οπότε η χρησιμότητα του δευτερεύοντος κατόπτρου δεν είναι τόσο η αύξηση της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας αλλά η μόνωση του σωλήνα απορρόφησης. Ο ηλιακός Fresnel μπορεί να λειτουργήσει είτε με κάποιο διαθερμικό υγρό το οποίο να φτάνει σε υψηλές θερμοκρασίες και στη συνέχεια να αποδίδει με εναλλάκτη θερμότητας την θερμότητα σε νερό για την παραγωγή ατμού, είτε απευθείας με νερό το οποίο ατμοποιείται εντός του απορροφητή.

### Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η τεχνολογία των Fresnel αναπτύχθηκε εργαστηριακά από τον Giovanni Francia το 1961 στο πανεπιστήμιο της Γένοβα. Συγκεκριμένα, απέδειξε ότι ένα τέτοιο ηλιακό σύστημα είναι ικανό να φθάσει θερμοκρασίες ικανές για την παραγωγή ατμού και τη χρήση του σε κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία των Fresnel μελετήθηκε ακόμα περισσότερο κατά την διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης του 1973 αλλά παρόλα αυτά για πολλά χρόνια παρέμειναν αμέτοχα και δεν δημιουργήθηκαν ηλιακοί θερμικοί σταθμοί με ηλιακά Fresnel. Τελικά το 1993 δημιουργείται ο πρώτος ηλιακός Fresnel κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο του Σίδνεϋ και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1995.

### Συγκεντρωτής στον συλλέκτη Fresnel

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο συγκεντρωτής αποτελείται από μια συστοιχία επίπεδων ανακλαστήρων, με μικρά κενά μεταξύ τους. Συνήθως προσανατολίζονται από βορρά προς νότο και έχουν την δυνατότητα περιστροφής περί του άξονα τους για την καλύτερη παρακολούθηση του ήλιου. η μεγαλύτερη πρόκληση σε όλα τα συγκεντρωτικά συστήματα είναι η καλύτερη παρακολούθηση του ήλιου. Τα ηλιακά συστήματα σχεδιάζονται για το ηλιακό μεσημέρι, αλλά η σχετική θέση των ηλιακών ακτινών με τους ανακλαστήρες μετατοπίζεται συνεχώς οπότε και είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει ένας μηχανισμός περιστροφής των κατόπτρων για την αποδοτικότερη συγκέντρωση των ακτινών στον απορροφητή. Έτσι τοποθετείται ένας υπολογιστής ο οποίος ανάλογα με την χρονική στιγμή και την θέση του ήλιου μεταβάλλει-περιστρέφει τα κάτοπτρα γύρω από έναν άξονα, ώστε να

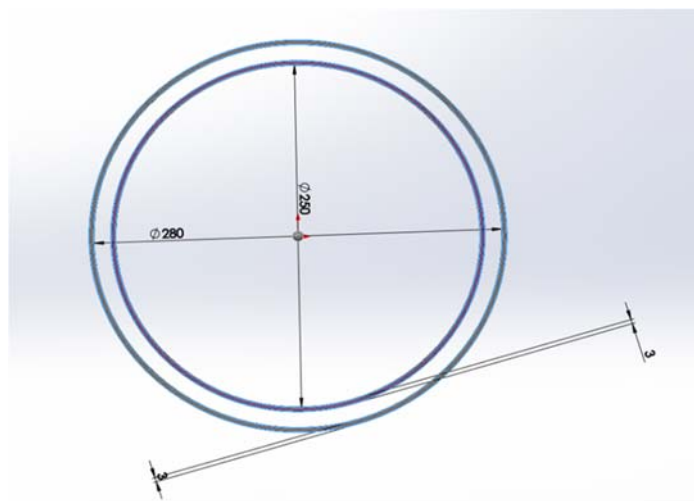


ρυθμίζεται η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών (γωνία πρόσπτωσης ορίζεται η γωνία που σχηματίζει η ηλιακή ακτίνα με το επίπεδο του κατόπτρου). Το κάθε κάτοπτρο στρέφεται κατά διαφορετική γωνία. Ταυτόχρονα, σημαντικό σημείο σχεδιασμού του συγκεντρωτή, είναι η τοποθέτηση των κατόπτρων σε κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ τους, ώστε όταν περιστρέφονται για να παρακολουθούν τον ήλιο, να μην σκιάζονται τα κάτοπτρα από άλλα γειτονικά τους.

#### Απορροφητής στον συλλέκτη Fresnel

Ο απορροφητής εκτείνεται κατά την εστιακή γραμμή και συγκεντρώνει τις ηλιακές ακτίνες από τους ανακλαστήρες. Η εστιακή γραμμή, είναι η ευθεία η οποία βρίσκεται στο εστιακό ύψος και εκτείνεται παράλληλα με την διεύθυνση προσανατολισμού του συλλέκτη (συνήθως διεύθυνση βορρά-νότου). Εμείς θα ασχοληθούμε με την περίπτωση όπου ο απορροφητής είναι σωλήνας κενού. Πιο συγκεκριμένα ο σωλήνας κενού αποτελείται από τον απορροφητή και το γυάλινο κάλυμμα, μεταξύ των οποίων υπάρχει κενό αέρα. Το κενό αέρα εξασφαλίζει τις αμελητέες θερμικές απώλειες συναγωγής μεταξύ απορροφητή και γυάλινου καλύμματος. Σημαντικό για την καλύτερη θέρμανση του διαρρέοντος μέσου, επιλέγεται επιλεκτικός απορροφητής συνήθως. Ο επιλεκτικός απορροφητής βελτιστοποιεί τη σχέση απορρόφησης-εκπομπής του απορροφητή και συγκεκριμένα επιλεκτικές επιφάνειες παρουσιάζουν συντελεστή εκπομπής  $\varepsilon=0,05-0,15$  και συντελεστή απορρόφησης  $\alpha=0,85-0,95$ . Επιπλέον βασικό στοιχείο στο σχεδιασμό του απορροφητή είναι να επιτυγχάνεται η ομοιόμορφη θέρμανση του απορροφητή σε όλο το μήκος του, και αυτό γιατί σε αντίθετη περίπτωση, όταν ο απορροφητής θερμαίνεται ανομοιόμορφα επιταχύνεται η αποικοδόμηση της επιφάνειας από την ανομοιόμορφη διαστολή που επικρατεί. Η επιφάνεια του απορροφητή σε έναν συλλέκτη Fresnel μπορεί να φθάσει τους 300 °C και για αυτό το λόγο επενδύεται ηλεκτροχημικά η επιφάνεια του απορροφητή με χρώμιο για την αντοχή του στις θερμοκρασίες αυτές. Παρακάτω παρατίθενται διάφοροι τύποι απορροφητών με σωλήνες κενού:

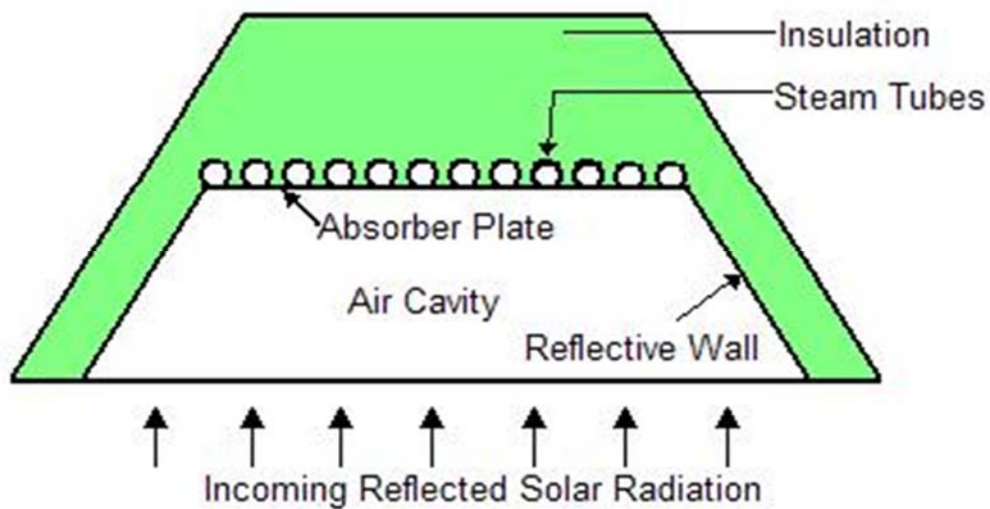
#### *Απορροφητής ενός σωλήνα κενού*



Εικόνα A.15: Απορροφητής ενός σωλήνα κενού

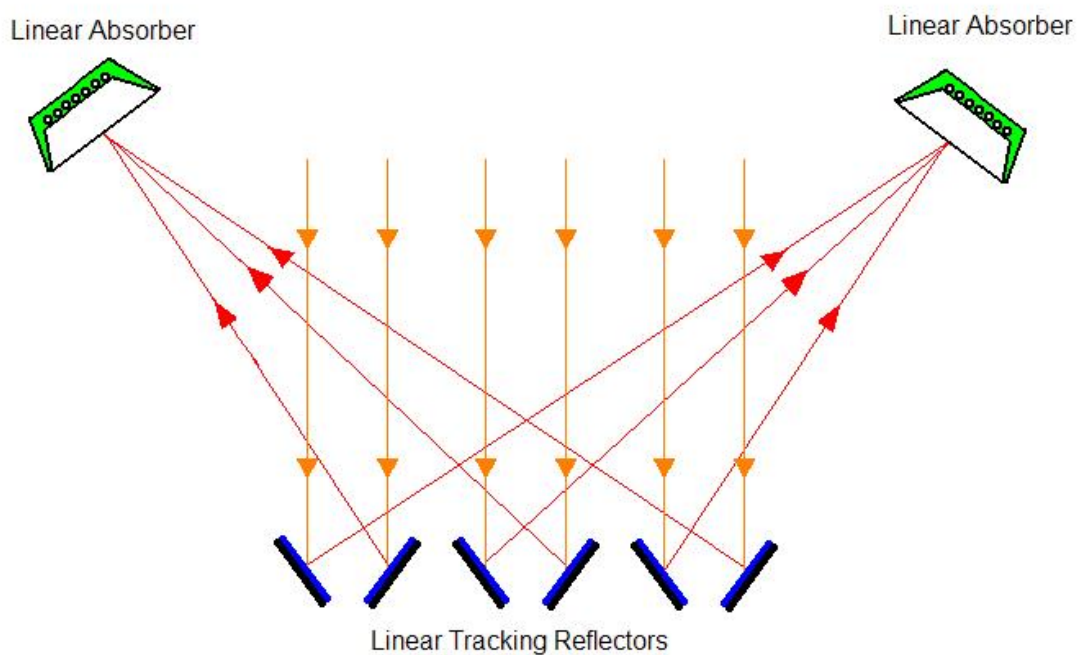
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

Απορροφητής πολλαπλών σωλήνων (τύπος 1)



Εικόνα Α.16: Απορροφητής πολλαπλών σωλήνων (τύπος 1)

Απορροφητής πολλαπλών σωλήνων (τύπος 2)



Εικόνα Α.17: Απορροφητής πολλαπλών σωλήνων (τύπος 2)

Τα μοντέλα συλλεκτών Fresnel με πολλούς απορροφητές ονομάζονται συμπαγής γραμμικός Fresnel (Compact Linear Fresnel Reflector ή C.L.F.R.). Ο συγκεκριμένος τρόπος διάταξης του απορροφητή παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την διάταξη του ενός απορροφητή. Πιο συγκεκριμένα, στους C.L.F.R. ο λόγος απορροφούμενης ακτινοβολίας προς

τα  $m^2$  συλλεκτικής επιφάνειας αυξάνεται σημαντικά καθώς αξιοποιείται καλύτερα η ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια απαιτείται μικρότερη συλλεκτική επιφάνεια και άρα λιγότερα κάτοπτρα. Επιπλέον, στην περίπτωση πολλαπλών απορροφητών, υπάρχει δυνατότητα για μεγαλύτερες αλλαγές στις κλίσεις των κατόπτρων, χωρίς να αλληλοσκοιάζονται γειτονικά κάτοπτρα μεταξύ τους. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να τοποθετούμε με μικρότερα κενά τα κάτοπτρα και κατά συνέπεια να μειώνεται το μήκος της εστιακής γραμμής, δηλαδή το μήκος των απορροφητών και κατά συνέπεια έχουμε μικρότερες θερμικές απώλειες στους απορροφητές λόγω του μικρότερου μήκους τους.

Συνοπτικά λοιπόν από την περιγραφή των συλλεκτών Fresnel προκύπτουν τα εξής πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (κυρίως έναντι των παραβολικών συλλεκτών, η οποία είναι η κύρια ανταγωνιστική τεχνολογία):

#### Πλεονεκτήματα

- Πολύ μικρότερο κόστος κατασκευής των κατόπτρων καθώς είναι επίπεδοι και δεν χρειάζεται πολύπλοκη επεξεργασία και κατεργασία για την διαμόρφωση καμπύλων επιφανειών
- Πολύ μικρότερα φορτία ανέμου για τα κάτοπτρα καθώς είναι επίπεδα
- Πολύ πιο μικρή και εύκολη κατασκευή και άρα φθηνή
- Σταθερός απορροφητής χωρίς μηχανισμό κίνησής του, ο οποίος συνήθως είναι πολύπλοκη και ακριβή κατασκευή
- Δυνατότητα χρήσης νερού και ατμοποίησής του κατευθείαν χωρίς χρήση διαθερμικού υγρού
- Μικρότερο κόστος επένδυσης για γη, καθώς οι συλλέκτες Fresnel καταλαμβάνουν μικρότερη έκταση και τοποθετούνται σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους

#### Μειονεκτήματα

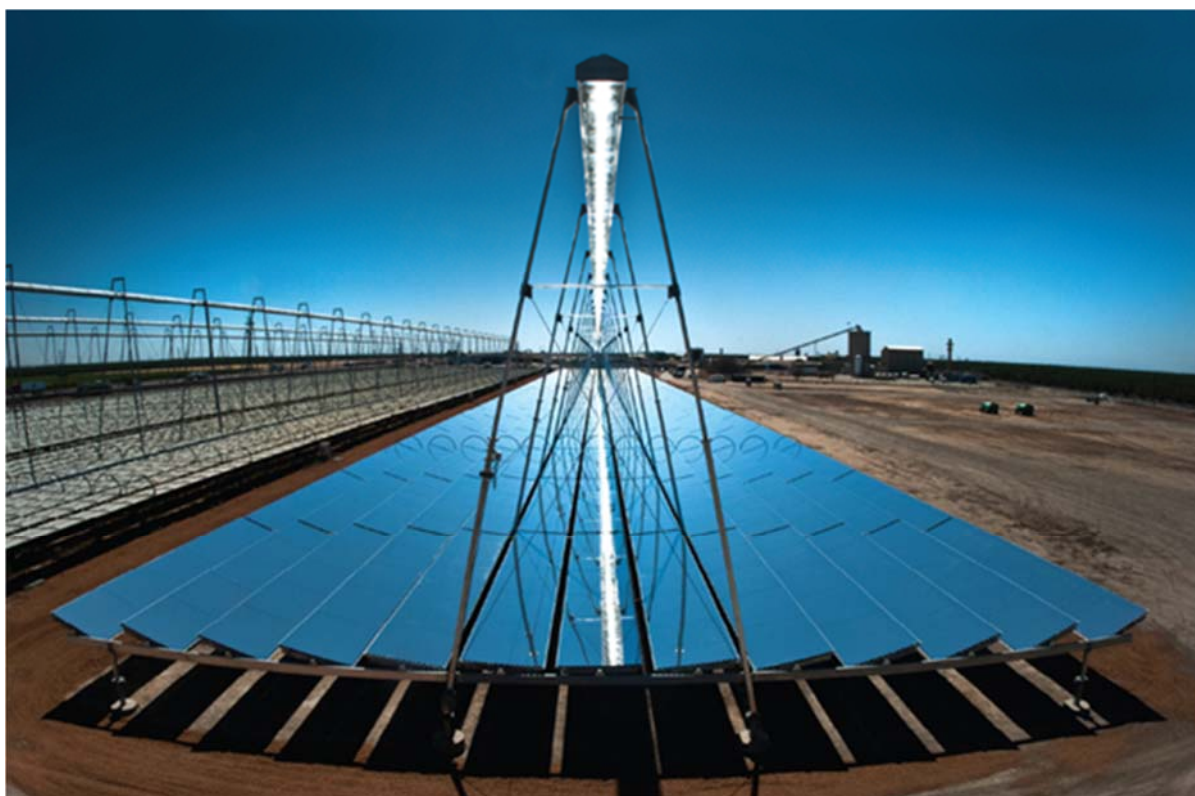
- Ο συλλέκτης Fresnel λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τους άλλους τύπους συγκεντρωτικών συλλεκτών
- Παρουσιάζει μικρότερο βαθμό απόδοσης
- Υπάρχει πολύ πιο ευρεία εφαρμογή των συγκεντρωτικών συλλεκτών και αυτό έχει δημιουργήσει ένα προβάδισμά τους έναντι των συλλεκτών Fresnel

Ειδικά για το τελευταίο σημείο να αναφέρουμε ότι τα τελευταία χρόνια έχει γίνει προσπάθεια στροφής της παγκόσμιας αγοράς στον χώρο της ενέργειας από ηλιακά για την προώθηση των Fresnel. Πολλοί ειδικοί επιστήμονες αναφέρουν ότι θα πρέπει να ξεκινήσει μια προσπάθεια με έργα μικρότερης έκτασης για την ενεργό ένταξη των Fresnel στην αγορά των ηλιακών. Σημαντικό να αναφέρουμε ότι για το 2013 από τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ από ηλιακά, τα παραβολικά καταλάμβαναν το 87,606% ενώ οι Fresnel καταλάμβαναν μόλις το 1,056% με μόλις 47.4 MW. Έως το 2018 θα έχουν προστεθεί 261 MW από ηλιακά Fresnel και 885 MW από παραβολικούς συλλέκτες, γεγονός το οποίο δείχνει ότι υπάρχει μια σαφής εισχώρηση των Fresnel στην αγορά των ηλιακών θερμικών σταθμών.

### Κύριοι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί με συλλέκτες Fresnel

#### Kimberlina Solar Thermal Energy Plant

Έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Areva Solar και βρίσκεται στην Καλιφόρνια. Ο συγκεκριμένος σταθμός είναι 5 MW ισχύος παράγοντας ατμό στους 400 °C και είναι τεχνολογίας C.L.F.R. Πιο συγκεκριμένα διαθέτει 11 απορροφητές, οι οποίοι παράγουν απευθείας ατμό και σε κάθε απορροφητή συγκεντρώνεται η ακτινοβολία από 13 λεπτά επίπεδα κάτοπτρα. Ο ατμός χρησιμοποιείται είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ατμοστρόβιλου είτε για βιομηχανική χρήση, όπως σε διεργασίες στο πετρέλαιο, αφαλάτωση και άλλες βιομηχανικές ανάγκες. Ο συγκεκριμένος σταθμός είναι ο πρώτος στην Καλιφόρνια που χρησιμοποιεί ηλιακούς συλλέκτες Fresnel και συνδέθηκε με το δίκτυο.



Εικόνα Α.18: Ηλιακός θερμικός σταθμός με συλλέκτες Fresnel, Kimberlina Solar Thermal Energy Plant

#### Χαρακτηριστικά σταθμού

Τοποθεσία: Καλιφόρνια (Η.Π.Α.)

Τύπος συλλεκτών: C.L.F.R. (Compact Linear Fresnel Reflector)

Έτος ολοκλήρωσης: 2008

Ισχύς: 5 MW

## Puerto Errado

Έχει κατασκευαστεί στη Μούρθια της Ισπανίας και αποτελείται από δύο επιμέρους σταθμούς. Τον Puerto Errado I και τον Puerto Errado II. Ο πρώτος σταθμός ολοκληρώθηκε το 2009, είναι 1,4 MW και είναι ο πρώτος ηλιακός θερμικός σταθμός με συλλέκτες Fresnel στην Ισπανία, ο οποίος συνδέθηκε στο δίκτυο. Η έκταση η οποία καλύπτει είναι 12 στρέμματα. Το Φεβρουάριο του 2012 ολοκληρώθηκε και ο δεύτερος σταθμός, Puerto Errado II, ο οποίος είναι ισχύος 30 MW και καλύπτει έκταση 173 στρεμμάτων. Αποτελείται από 28 σειρές ηλιακών συλλεκτών Fresnel και είναι ο μεγαλύτερος σταθμός στον κόσμο στον οποίο χρησιμοποιούνται συλλέκτες Fresnel.



Εικόνα Α.19: Οι ανακλαστήρες του ηλιακού θερμικού σταθμού Puerto Errado



Εικόνα Α.20: Οι απορροφητές του ηλιακού θερμικού σταθμού Puerto Errado

Χαρακτηριστικά σταθμού

Τοποθεσία: Ισπανία

Τύπος συλλεκτών: Fresnel με συνολική ισχύ 31.4 MW

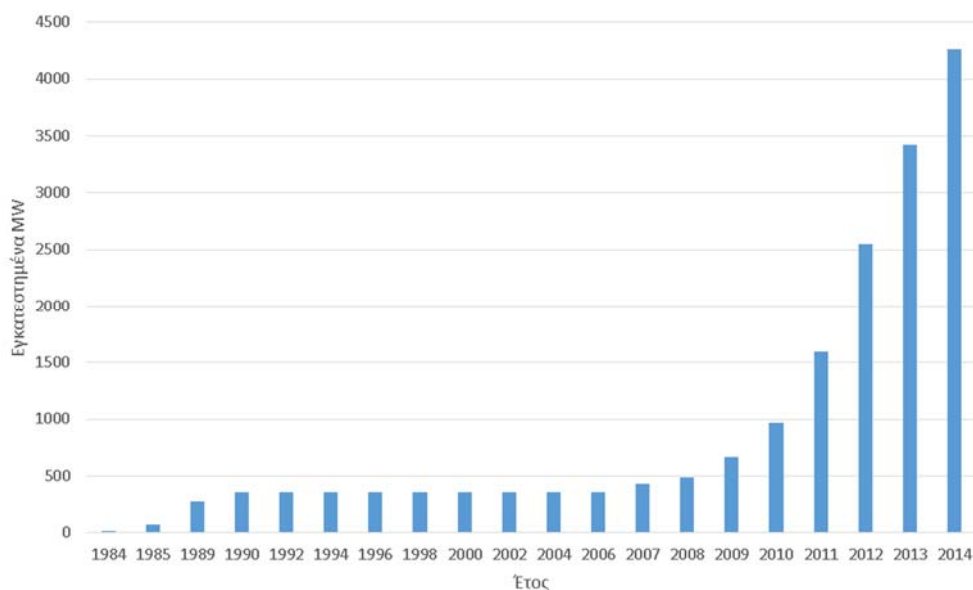
Έτος ολοκλήρωσης: 2009 (Puerto Errado I) και 2012 (Puerto Errado II)

**A.12 Εγκατεστημένα MW ηλιακών θερμικών σταθμών**

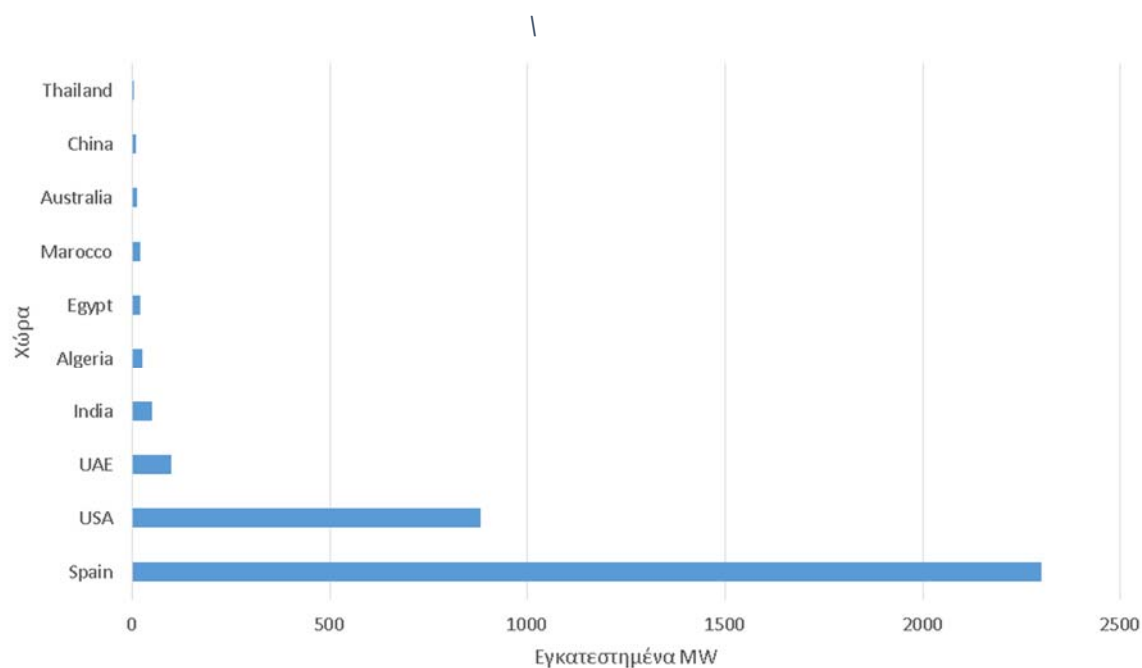
Εδώ και αρκετά χρόνια η παγκόσμια επιχειρηματικότητα στην ενέργεια έχει στραφεί στην κατασκευή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά (ηλιακούς θερμικούς σταθμούς). Αναλυτικότερα στους παρακάτω πίνακα παρατίθεται η χρονική εξέλιξη στα εγκατεστημένα MW ηλιακών σταθμών:

Έτος	1984	1985	1989	1990	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Νέα εγκατεστημένα [MW]	14	60	200	80	1	74	55	179	307	629	803	872	535
Συνολικά εγκατεστημένα MW	14	74	274	354	355	429	484	663	969	1598	2553	3425	4260

Παρατηρούμε ότι από το 2010 και έπειτα υπάρχει μια μεγάλη αύξηση έργων στα ηλιακά, με κυρίαρχη την Ισπανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Αναλυτικότερα, διαγραμματικά αυτή η αυξανόμενη ετήσια αύξηση εγκατεστημένων MW από ηλιακά φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

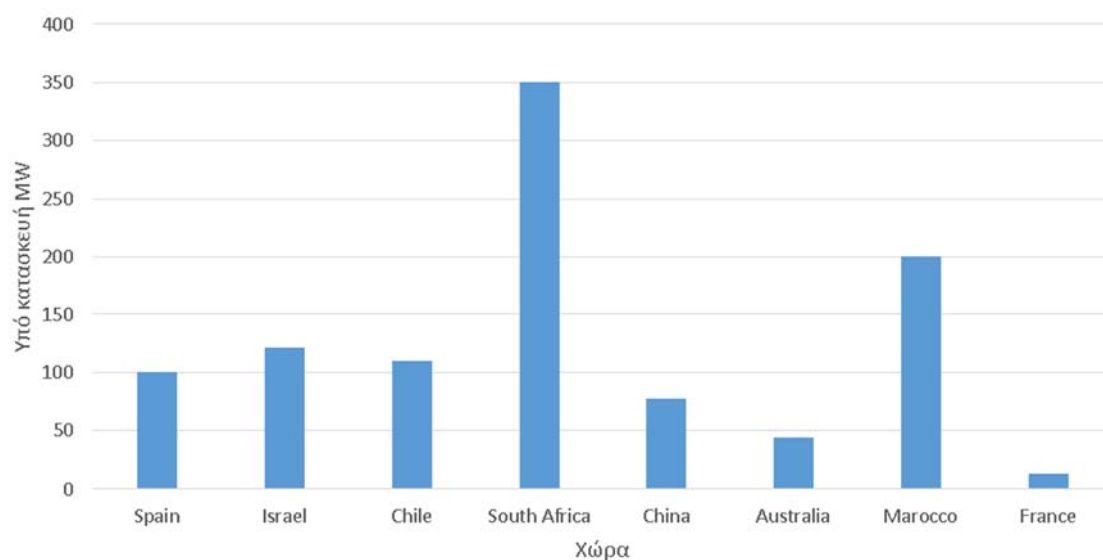


Σχήμα Α.6: Εγκατεστημένα MW στη περίοδο 1984-2014



Σχήμα Α.7: Εγκατεστημένα MW ανά χώρα

Στο κοντινό μέλλον υπάρχουν σχέδια για διάφορους ηλιακούς θερμικούς σταθμούς καθώς υπάρχουν και αρκετοί σταθμοί υπό κατασκευή. Αναλυτικότερα παρατίθεται διάγραμμα με τα υπό κατασκευή MW, τα οποία θα είναι έτοιμα έως το 2016:



Σχήμα Α.8: Υπό κατασκευή MW ανά χώρα

Ενδεικτικοί ολοκληρωμένοι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί

Ivanpah Solar Power Facility



*Εικόνα Α.21: Ηλιακός θερμικός σταθμός με ηλιακούς πύργους, Ivanpah Solar Power Facility*

Χαρακτηριστικά σταθμού

Τοποθεσία: Καλιφόρνια

Τύπος συλλεκτών: Ηλιακός πύργος

Κόστος: 2.200.000.000 \$

Έτος ολοκλήρωσης: 2014

Ισχύς: 392 MW



## Mojave Solar Project



*Εικόνα Α.22: Ηλιακός θερμικός σταθμός με παραβολικά κάτοπτρα, Mojave Solar Project*

### Χαρακτηριστικά σταθμού

Τοποθεσία: Καλιφόρνια

Τύπος συλλεκτών: Παραβολικά κοίλα (parabolic trough)

Έτος ολοκλήρωσης: 2014

Ισχύς: 280 MW

## Shams solar power station I



*Εικόνα Α.23: Ηλιακός θερμικός σταθμός με παραβολικά κάτοπτρα, Shams solar power station*

### Χαρακτηριστικά σταθμού

Τοποθεσία: Άμπου Ντάμπι (Η.Α.Ε.)

Τύπος συλλεκτών: Παραβολικά κοίλα (parabolic trough)

Κόστος: 600.000.000 \$

Έτος ολοκλήρωσης: 2013

Ισχύς: 100 MW

## Valle Solar Power Station



*Εικόνα Α.24: Ηλιακός θερμικός σταθμός με παραβολικά κάτοπτρα, Valle Solar Power Station*

### Χαρακτηριστικά σταθμού

Τοποθεσία: Ανδαλουσία, Ισπανία

Τύπος συλλεκτών: Παραβολικά κοίλα (parabolic trough)

Κόστος: 700.000.000 \$

Έτος ολοκλήρωσης: 2012

Ισχύς: 100 MW

## Stirling Solar Array-Tooele Army Depot



Εικόνα Α.25: Ηλιακός θερμικός σταθμός με ηλιακούς δίσκους στην Αμερική



Εικόνα Α.26: Η διάταξη των συλλεκτών στον ηλιακό θερμικό σταθμό Stirling Solar Array-Tooele Army Depot

### Χαρακτηριστικά σταθμού

Τοποθεσία: Πολιτεία της Γιούτα (Η.Π.Α.)

Τύπος συλλεκτών: Ηλιακός δίσκος (dish stirling)

Έτος ολοκλήρωσης: 2013

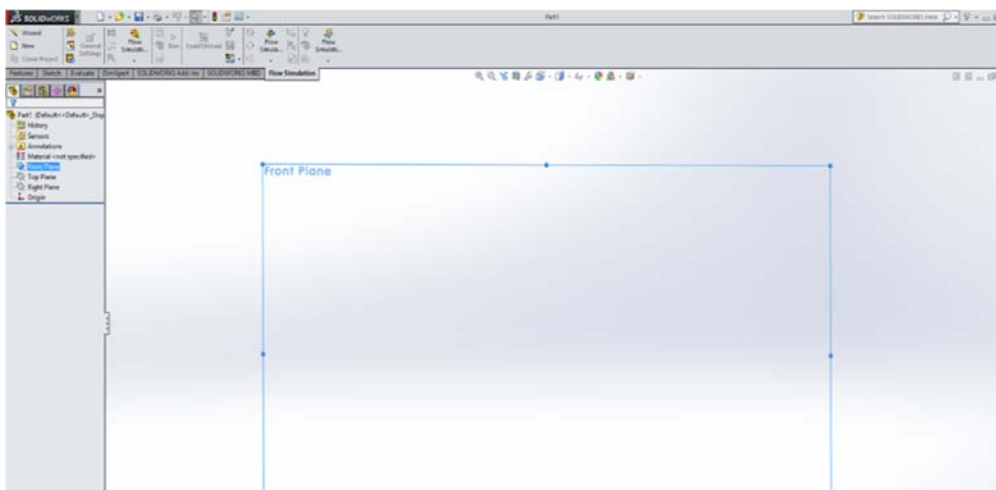
Ισχύς: 1.5 MW (μη διασυνδεδεμένο στο δίκτυο)

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β. ΟΔΗΓΟΣ SOLIDWORKS ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ****B.1 Εισαγωγή**

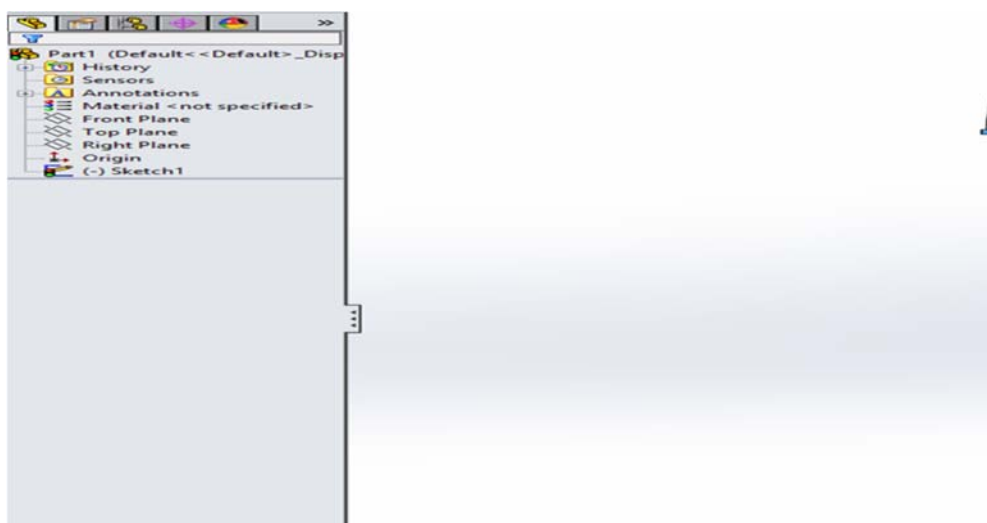
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια αναλυτική παρουσίαση του προγράμματος solidworks καθώς επίσης και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό και προσομοίωση του συλλέκτη που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα θα γίνει μια περιήγηση στο περιβάλλον του σχεδιαστικού πακέτου, στην συνέχεια θα γίνει παρουσίαση στα βήματα σχεδίασης του συλλέκτη εκ του μηδενός και τέλος θα γίνει εκτενής ανάλυση στη προσομοίωση του συλλέκτη.

**B.2 Περιβάλλον solidworks**

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες με το περιβάλλον του solidworks, το βασικό menu, τη γραμμή εντολών:



Εικόνα B.2: Το περιβάλλον εργασίας του solidworks



Εικόνα B.3: Το περιβάλλον εργασίας του solidworks

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

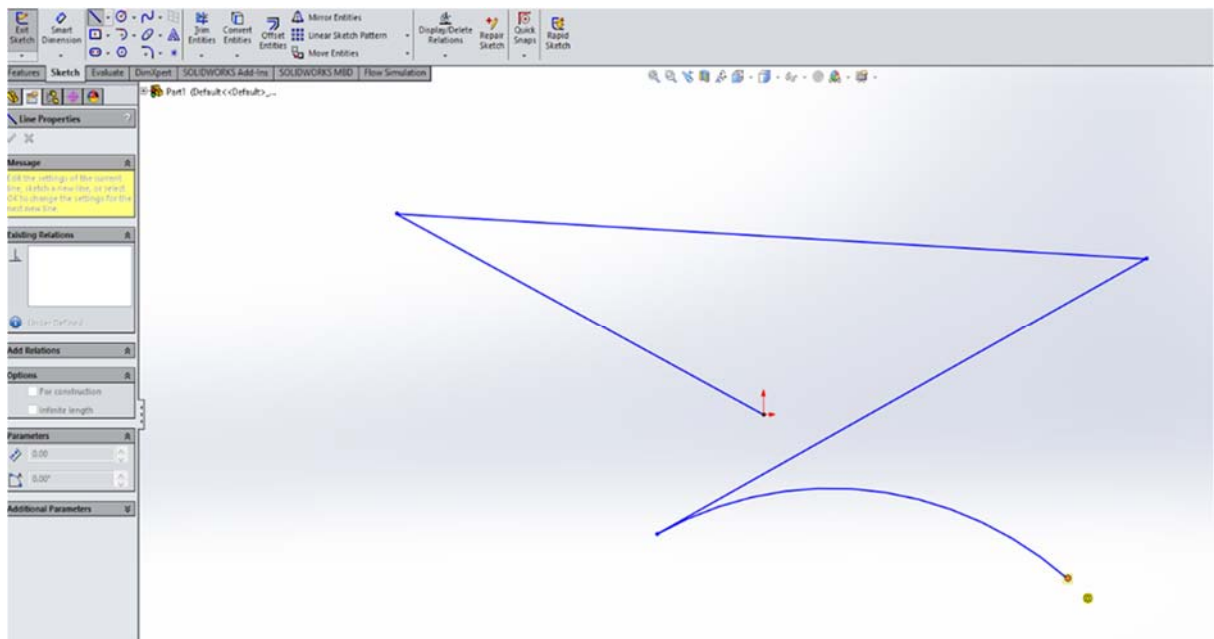
Στο βασικό menu υπάρχουν όλες οι πληροφορίες για το μοντέλο που έχει σχεδιασθεί, από την πρώτη γραμμή έως και την τελευταία λεπτομέρεια. Περιλαμβάνει όλα τα επιμέρους μέρη του μοντέλου, τυχόν διαστασιολογήσεις και όλες τις μεταβολές των σχημάτων στο χώρο.

### B.3 Βασική αρχή σχεδίασης στο solidworks

Η κύρια λογική του solidworks είναι ότι οποιαδήποτε μηχανολογικό εξάρτημα και γενικά οποιαδήποτε κατασκευή αποτελείται από επιμέρους μέρη, τα οποία δημιουργούνται από κάποιου σχήματος. Για παράδειγμα ένας κύλινδρος είναι ένας κύκλος με πάχος όσο αφορά το σχεδιασμό. Για πολυπλοκότερες κατασκευές χρειάζεται να γίνει συναρμολόγηση επιμέρους τεμαχίων, όπως για παράδειγμα ένας άξονας περιστρεφόμενος εντός εδράνου. Στην περίπτωση αυτή σχεδιάζουμε τον άξονα (ο οποίος ουσιαστικά είναι ένας κύλινδρος στην απλή του μορφή, στην συνέχεια σε άλλο αρχείο σχεδιάζουμε το έδρανο και στην συνέχεια κατασκευάζουμε το συναρμολόγημα μέσω της αντίστοιχης εντολής). Στην δική μας κατασκευή δεν θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε το συγκεκριμένο εργαλείο. Πιο συγκεκριμένα για την δική μας κατασκευή, ο συλλέκτης αποτελείται από κάτοπτρα και ένα σωλήνα κενού. Ο σωλήνας κενού ουσιαστικά πρόκειται για 4 κυλινδρικές επιφάνειες, οι οποίες τοποθετούνται σε κατάλληλες αποστάσεις ώστε να δώσουν έναν σωλήνα.

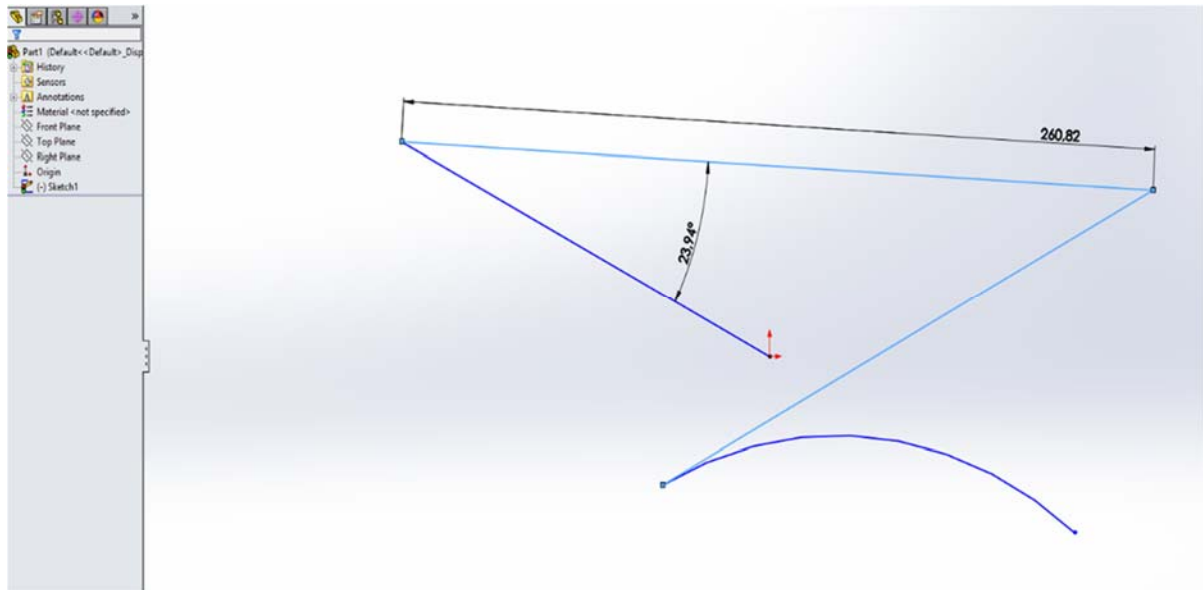
### B.4 Γραμμή εντολών

*Κατηγορία εντολών 1: sketch:* με την εντολή sketch σχεδιάζουμε γραμμές οποιασδήποτε γεωμετρίας και πιο συγκεκριμένα ευθείες, καμπύλες, κύκλους, παραβολές, ελλείψεις, ημικύκλια και οποιοδήποτε άλλο σχήμα.

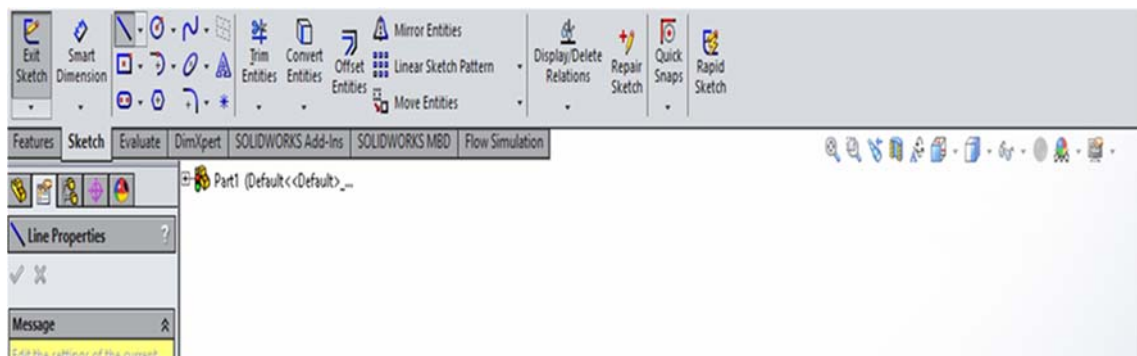


Εικόνα B.4: Παράδειγμα χρήσης εντολής sketch

Επίσης με το *smart dimension* καθορίζουμε οποιαδήποτε διάσταση, όπως μήκη, πάχη, πλάτη καθώς και γωνίες.



Εικόνα Β.5: Παράδειγμα χρήσης του smart dimension



Εικόνα Β.6: Η γραμμή εντολών sketch

Κάποιες ακόμα δυνατότητες της εντολής sketch είναι οι εξής:

1. *Offset entities*: δημιουργεί ακριβές αντίγραφο μιας καμπύλης.
2. *Mirror entities*: δημιουργεί αντίγραφο ενός σχήματος σε σχέση με μια καμπύλη.
3. *Convert entities*:

**Κατηγορία εντολών 2: features**: με αυτή τη γραμμή εντολών μπορούμε να περάσουμε από την διδιάστατη στη τρισδιάστατη σχεδίαση. Πιο συγκεκριμένα, με το σύνολο αυτών των εντολών μετατρέπω τα διδιάστατα σχήματα που έχουν κατασκευαστεί με την εντολή sketch σε τρισδιάστατα σχήματα πλέον.

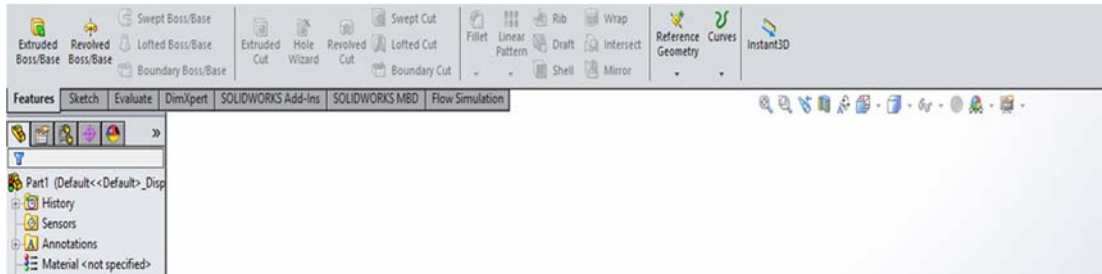
Πιο συγκεκριμένα οι βασικότερες εντολές στο σύνολο των εντολών features είναι:

1. *Extruded Boss/Base*:
2. *Revolved Boss/Base*: περιστρέφει ένα sketch γύρω από έναν άξονα.
3. *Extruded cut*: αφαιρεί υλικό από ένα τεμάχιο
4. *Lofted Boss/Base*:
5. *Mirror*: δημιουργεί αντίγραφα κάποιων στερεών σχημάτων στο χώρο
6. *Reference Geometry*:

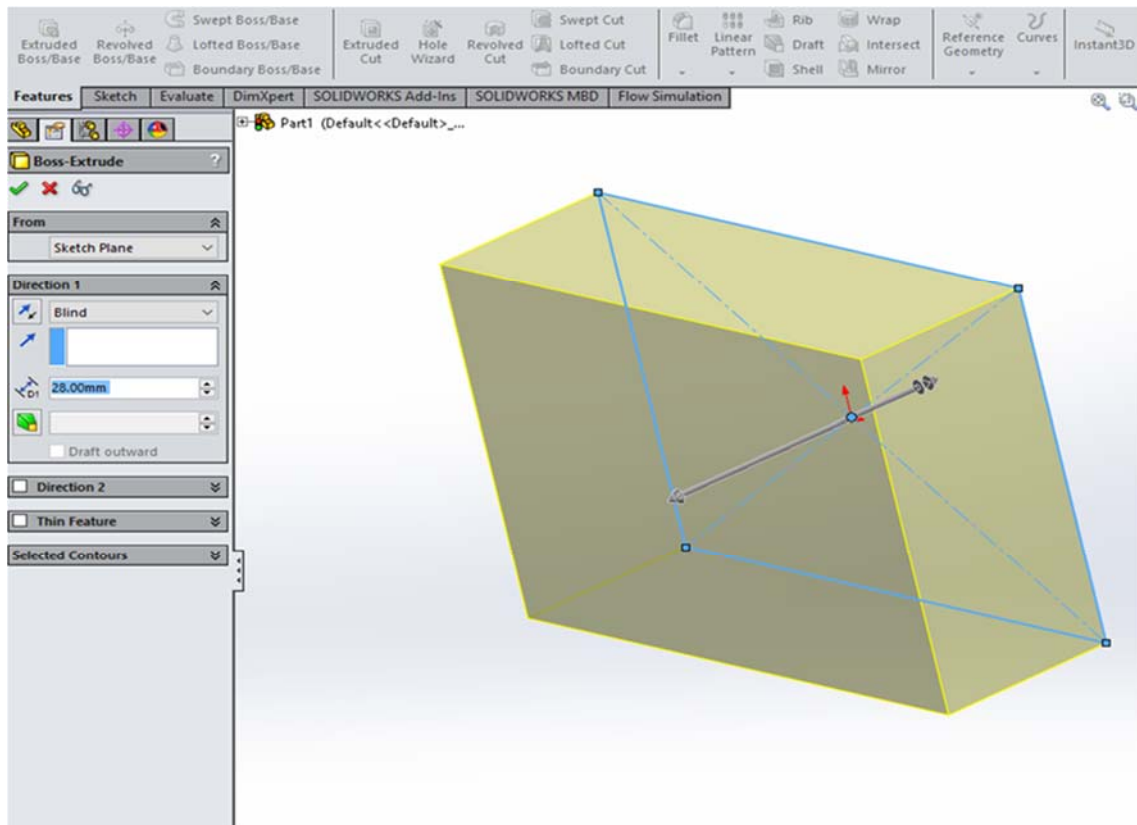
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

Να αναφέρουμε ότι στη γραμμή αυτών των εντολών υπάρχουν και πολλές ακόμα εντολές, οι οποίες είναι πιο σύνθετες και δεν θα χρειαστούν στην περίπτωσή μας.

Πιο συγκεκριμένα με την εντολή *extrude* μετατρέπουμε ένα σχήμα σε αντικείμενο στο χώρο. Η εντολή *extrude* εφαρμόζεται σε ένα κλειστό δισδιάστατο σχήμα και το 'ανοίγει' στο χώρο κατά μια διάσταση.



Εικόνα Β.7: Η γραμμή εντολών features



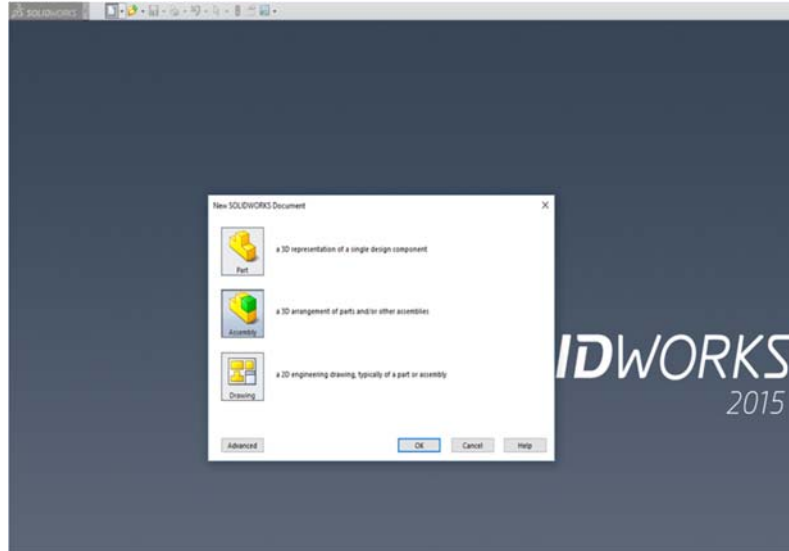
Εικόνα Β.8: Παράδειγμα χρήσης της εντολής *extrude*

### **B.5 Συναρμολογήματα στο solidworks**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το solidworks δίνει την δυνατότητα σχεδιασμού συναρμολογημάτων. Συναρμολόγημα αποτελεί μια κατασκευή η οποία αποτελείται από 2 τουλάχιστον επιμέρους τεμάχια. Μερικά συναρμολογήματα είναι ένα ζεύγος τρίμματος και άξονα, το σύστημα διωστήρα στροφάλου καθώς και πολλές ακόμα κατασκευές μηχανικού και μη ενδιαφέροντος. Ένα συναρμολόγημα κατασκευάζεται με τον επιμέρους σχεδιασμό



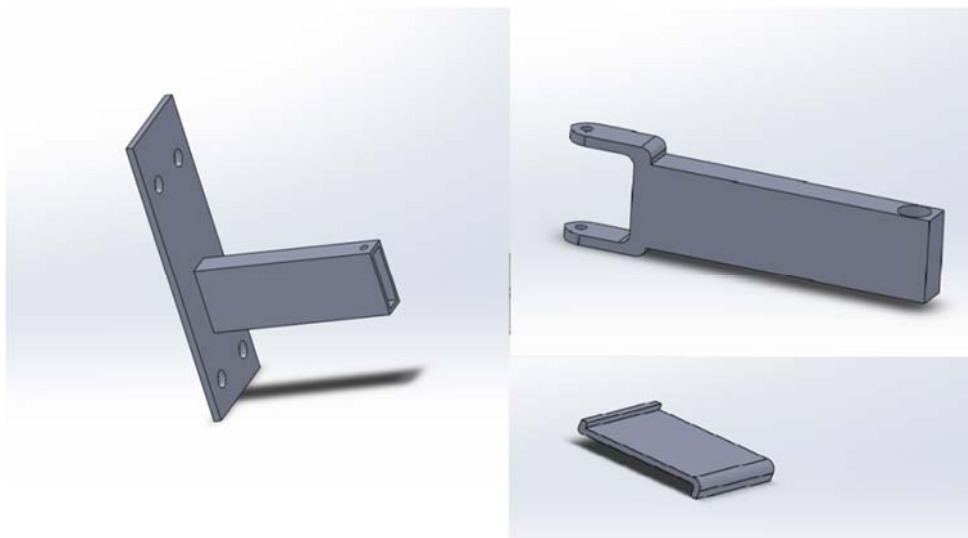
των συστατικών τεμαχίων του συναρμολογήματος και στην συνέχεια δημιουργία ενός αρχείου assembly(είναι το είδος του αρχείου στο οποίο γίνεται η συναρμολόγηση του τελικού σύνθετου τεμαχίου) στο οποίο συναρμολογούμε τα επιμέρους τεμάχια. Έτσι ανοίγοντας το πρόγραμμα επιλέγουμε την δημιουργία αρχείου assembly και στην συνέχεια εισάγουμε τα επιμέρους τεμάχια ως εξής:



Εικόνα Β.9: Επιλογή στο αρχικό menu για τη δημιουργία ενός assembly αρχείου

Στην συνέχεια έχοντας ανοίξει το αρχείο assembly εισάγουμε τα επιμέρους τεμάχια και τα συναρμολογούμε. Η συναρμολόγηση γίνεται ορίζοντας κάποιες συνθήκες μεταξύ των επιφανειών των τεμαχίων. Για παράδειγμα έστω ότι θέλουμε να κατασκευάσουμε μια βάση τηλεόρασης, τότε πρέπει να συνενώσουμε 3 τεμάχια: την στήριξη της βάση, η οποία θα τοποθετηθεί στο τοίχο, τον βραχίονα ο οποίος συνδέει την στήριξη με το τραπέζι της τηλεόρασης και τέλος το τραπέζι της τηλεόρασης.

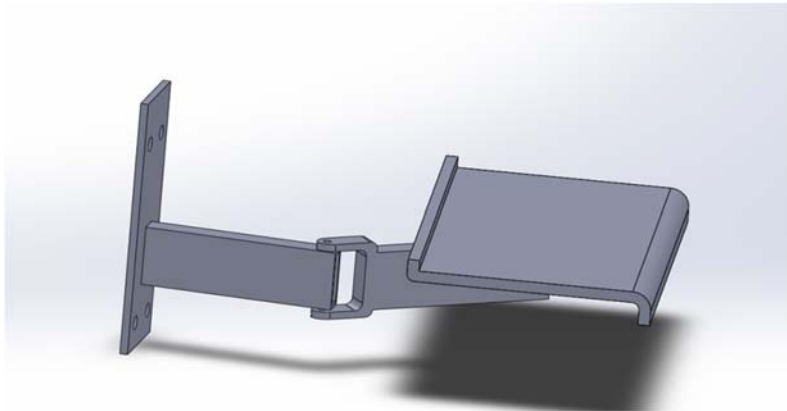
Τα 3 επιμέρους τεμάχια τα σχεδιάζουμε σε επιμέρους αρχεία όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:



Εικόνα Β.10: Τα 3 βασικά μέρη για το σχεδιασμό μιας βάσης τηλεόρασης

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

Στη συνέχεια δημιουργούμε ένα αρχείο assembly στο οποίο συνδέουμε τα 3 επιμέρους τεμάχια, ορίζοντας τις βασικές σχέσεις μεταξύ των επιφανειών των 3 επιμέρους τεμαχίων. Πιο συγκεκριμένα . Έτσι προκύπτει το τελικό συναρμολόγημα:

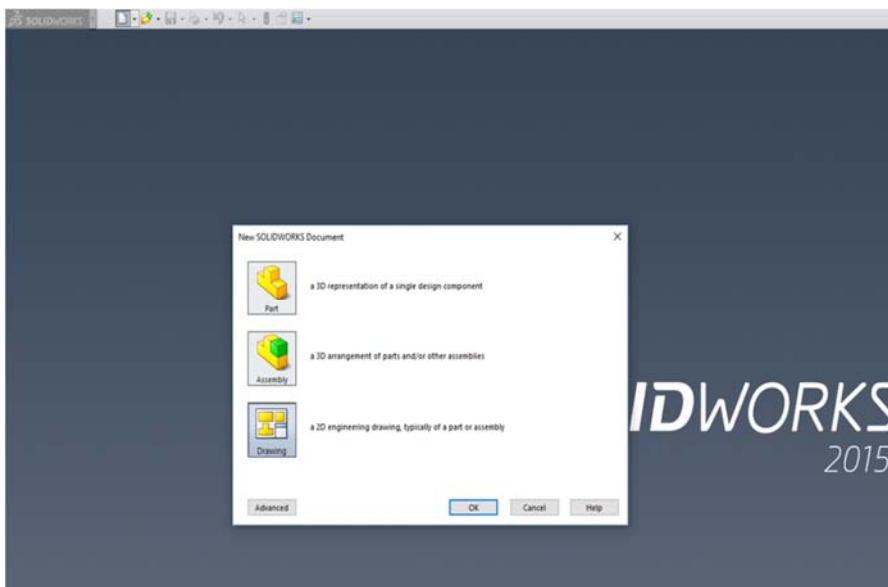


Εικόνα Β.11: Ολοκληρωμένο το assembly μιας βάσης τηλεόρασης

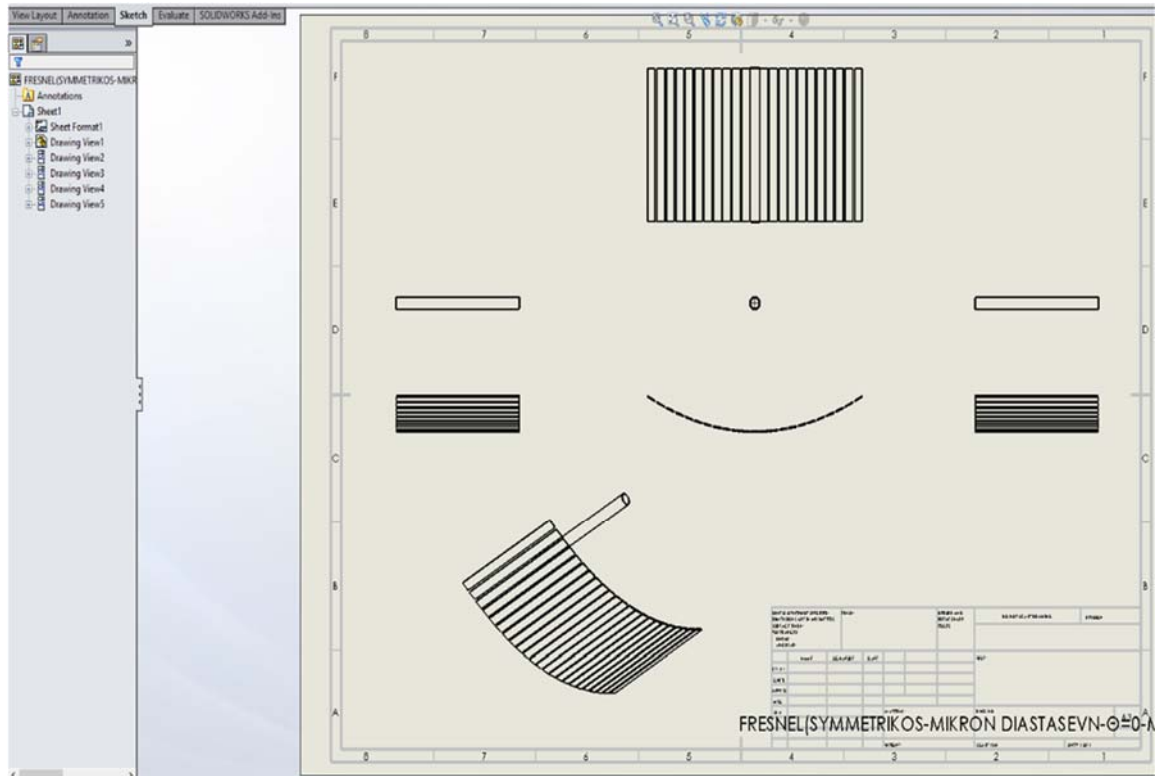
### **B.6 Απόδοση μηχανολογικών σχεδίων**

Το solidworks δίνει την δυνατότητα να αποδώσουμε και τα μηχανολογικά σχέδια του τεμαχίου ή του συναρμολογήματος, με την δημιουργία drawing αρχείων. Πιο συγκεκριμένα ανοίγουμε ένα αρχείο drawing(βλέπε εικόνα παρακάτω) και στην συνέχεια εισάγουμε το αρχείο του solidworks που περιέχει το τεμάχιο ή το συναρμολόγημα του οποίου θέλουμε να κατασκευάσουμε το μηχανολογικό σχέδιο, ορίζουμε την κύρια όψη και στην συνέχεια με πολύ απλό και γρήγορο τρόπο με τον κέρσορα, τον τοποθετούμε στα σημεία των χαρτιών που θέλουμε τις όψεις και αυτόματα το solidworks τις αποτυπώνει, τηρώντας όλους τους σχεδιαστικούς κανόνες του μηχανολογικού σχεδίου.

Παρακάτω παρουσιάζεται το μηχανολογικό σχέδιο του συλλέκτη Fresnel που περιγράφηκε στο κεφάλαιο Γ:



Εικόνα Β.12: Επιλογή στο αρχικό menu για δημιουργία ενός μηχανολογικού σχεδίου



Εικόνα Β.13: Το μηχανολογικό σχέδιο του συλλέκτη Fresnel που σχεδιάστηκε στο περιβάλλον solidworks (χωρίς τις κατασκευαστικές διαστάσεις)

### **B.7 Σχεδιασμός του συλλέκτη**

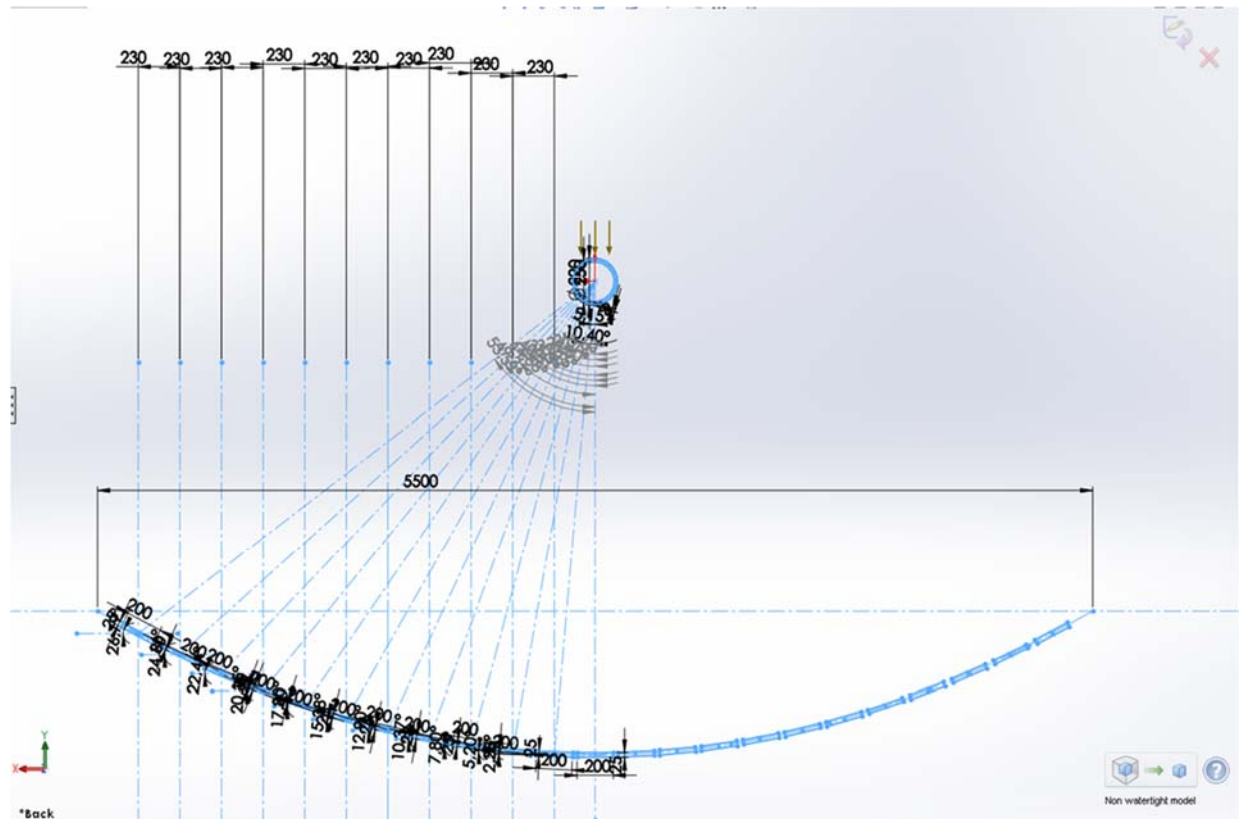
Έχοντας αναλύσει τις βασικές αρχές λειτουργίας και χρήσης του solidworks, θα γίνει εκτενής παρουσίαση στο σχεδιασμό του συλλέκτη Fresnel. Η γενική σκέψη είναι να κατασκευάσουμε 1 σωλήνα κενού και στη συνέχεια να κατασκευάσουμε τα κάτοπτρα. Όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο Β τα κάτοπτρα τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε τα κέντρα τους να βρίσκονται πάνω σε παραβολή και να σχηματίζουν με την οριζόντιο γωνία, ικανοποιώντας τη σχέση:

$$\psi i = \frac{\varphi i - \theta i}{2} \quad (B.1)$$

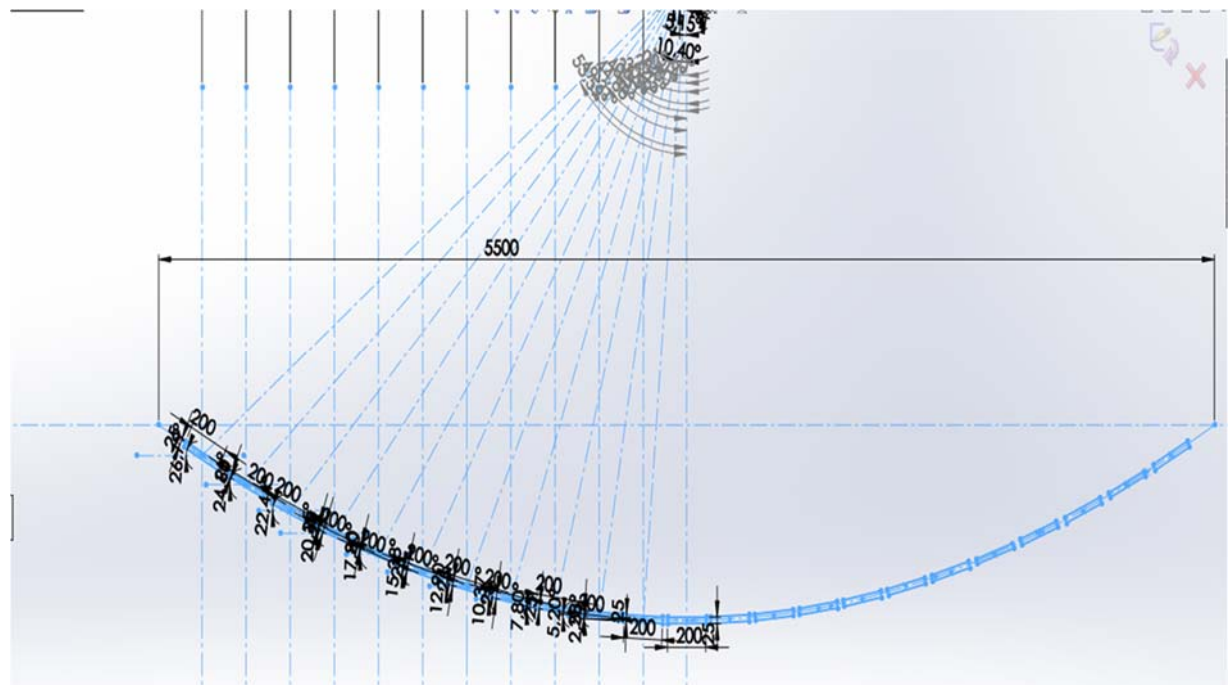
Η παραβολή έχει κέντρο το κέντρο του σωλήνα κενού και από το εστιακό ύψος (2.5m) καθορίζεται πλήρως η παραβολή. Στην συνέχεια την 'ανοίγουμε' τόσο, ώστε δύο αντιπαραβολικά σημεία να έχουν οριζόντια απόσταση 5,5 m. Έπειτα πάνω σε αυτό το παραβολικό τμήμα σχεδιάζουμε τα κέντρα των κατόπτρων, τηρώντας τους εξής κανόνες:

1. Διάσταση κατόπτρου 200\*3000\*25 (μήκος\*βάθος\*πλάτος, [mm\*mm\*mm])
2. Κενό μεταξύ κατόπτρων 30mm
3. Διαμόρφωση της γωνίας κάθε κατόπτρου για κατακόρυφη θέση ήλιου σύμφωνα με τη σχέση Β.1. και συμμετρική τοποθέτηση κατόπτρων γύρω από τη κατακόρυφη που διέρχεται από το κέντρο του σωλήνα
4. Σωλήνας κενού με διάμετρο απορροφητή 220mm , διάμετρο γυάλινου καλύμματος 250mm, και πάχος καλύμματος και απορροφητή 3mm.

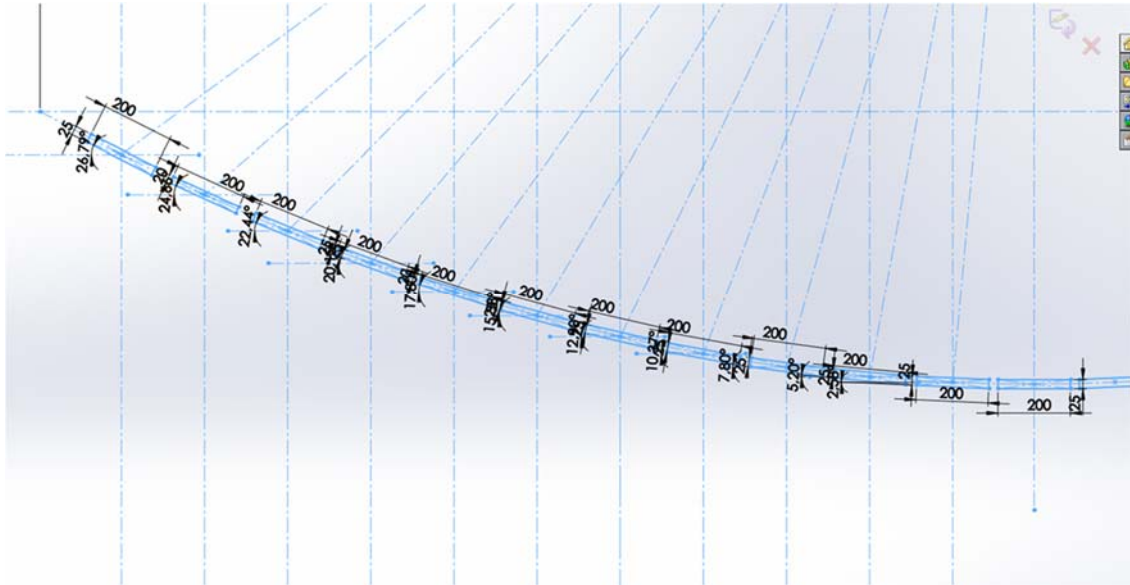
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL



Εικόνα Β.14: Διαδικασία σχεδιασμού του συλλέκτη στις 2 διαστάσεις (sketch)

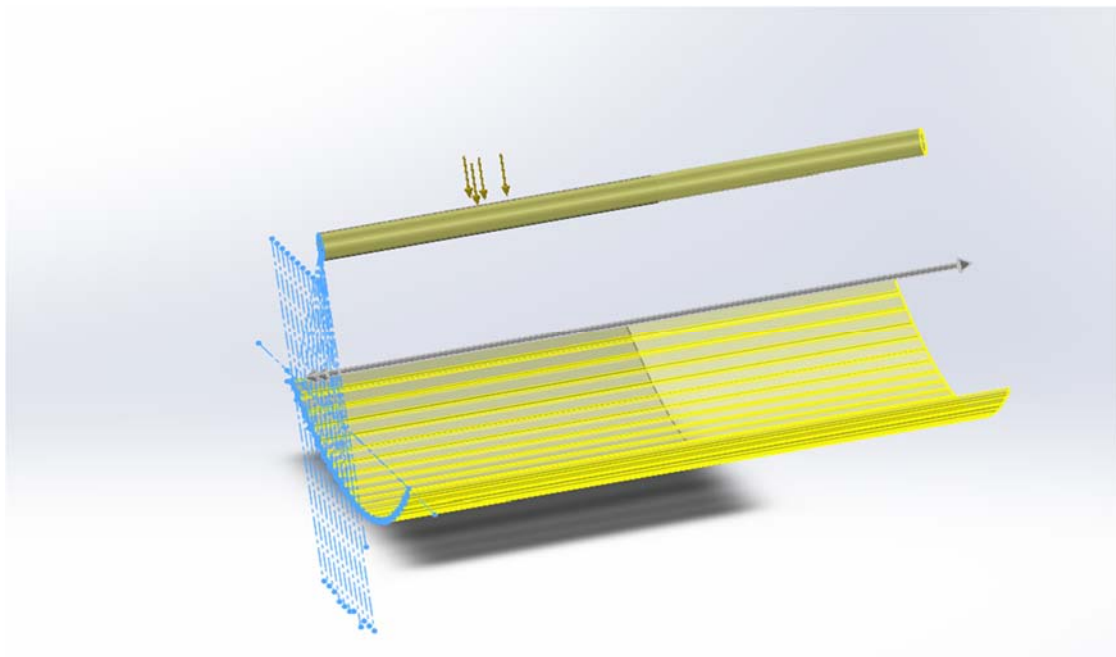


Εικόνα Β.15: Διαδικασία σχεδιασμού του συλλέκτη στις 2 διαστάσεις (sketch)



Εικόνα Β.16: Διαδικασία σχεδιασμού του συλλέκτη στις 2 διαστάσεις (sketch)

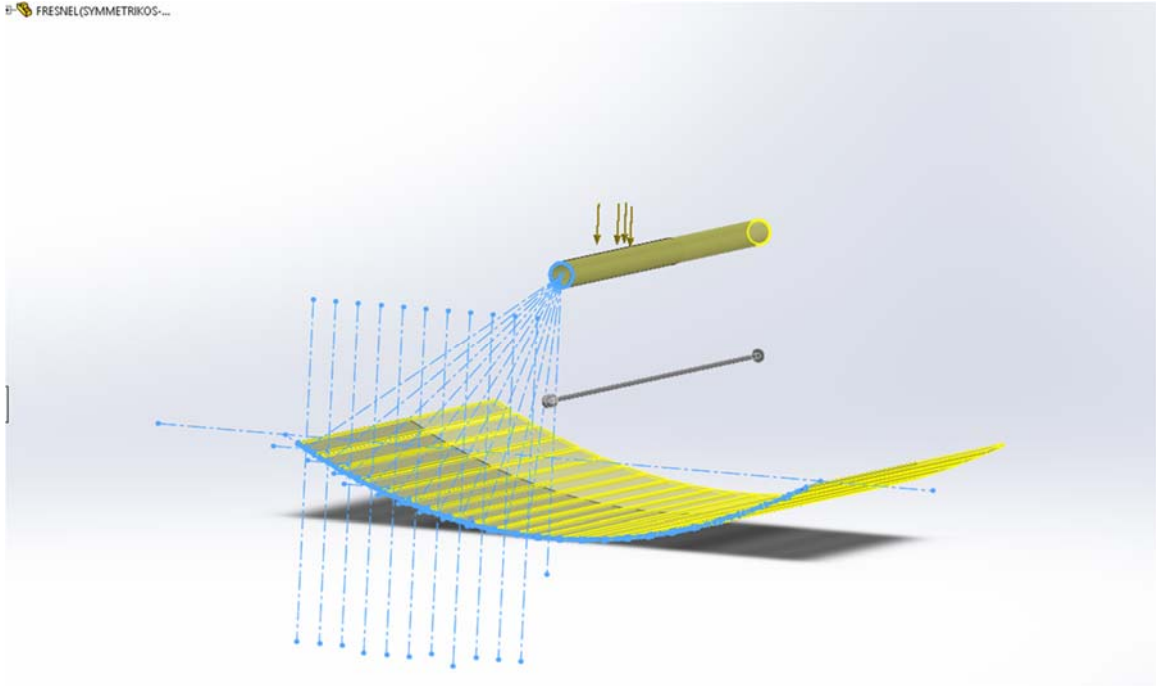
Έχοντας λοιπόν το sketch του συλλέκτη (δηλαδή το δισδιάστατο σχεδιασμό), περνάμε στο τρισδιάστατο μοντέλο με την εντολή extrude, εφαρμόζοντάς την κατά την τρίτη διάσταση και επιλέγοντας όλα τα κάτοπτρα και τους 2 σωλήνες όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:



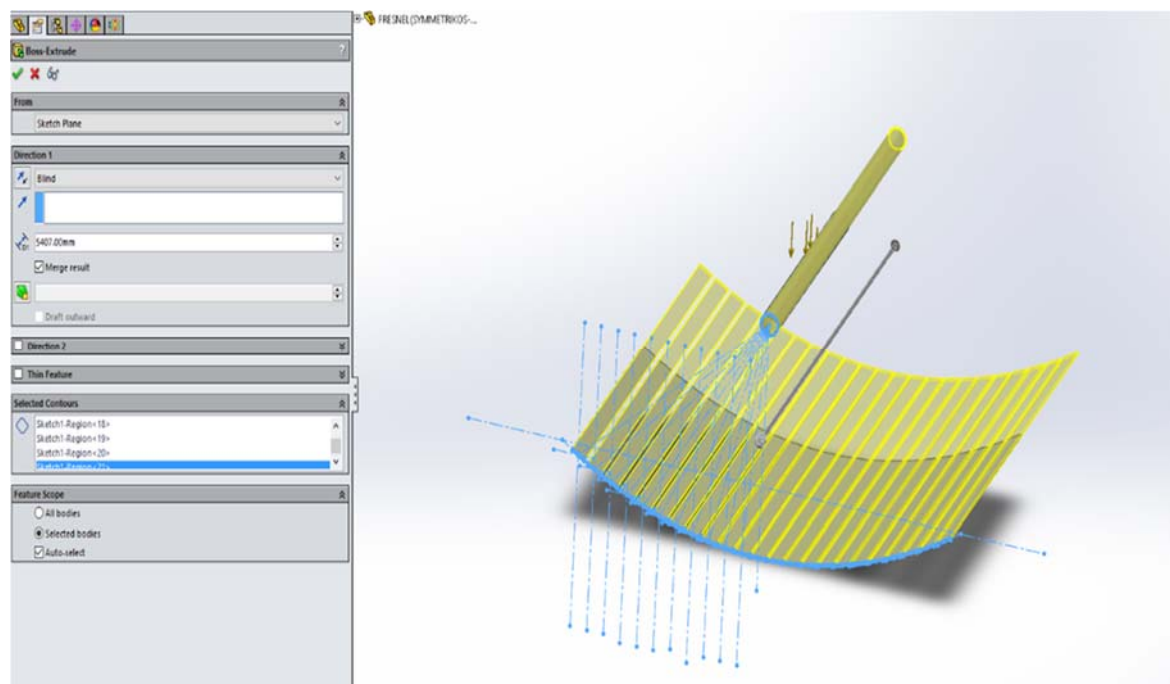
Εικόνα Β.17: Η εντολή extrude

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

FRESNEL (SYMMETRIKOS-...

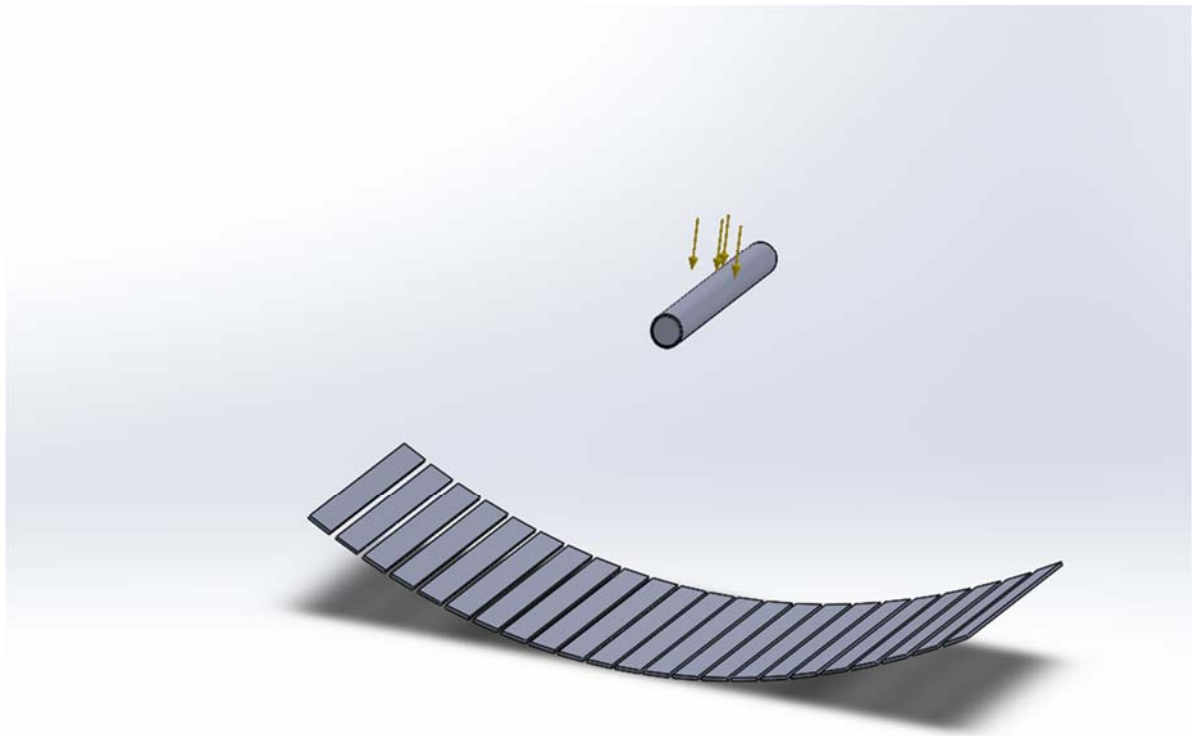


Εικόνα Β.187: Η εντολή extrude

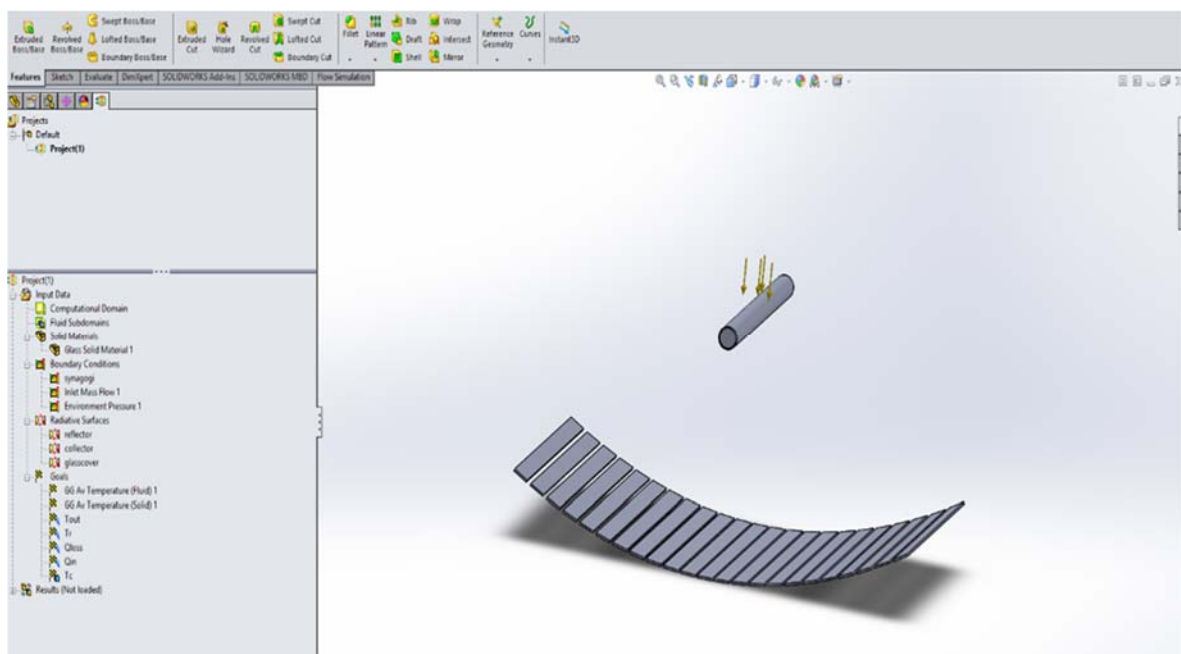


Εικόνα Β.198: Η εντολή extrude

Έτσι προέκυψε συλλέκτης με 23 κάτοπτρα. Παρουσιάζονται μερικές εικόνες παρακάτω:



Εικόνα Β.20: Ολοκληρωμένη εικόνα του συλλέκτη Fresnel



Εικόνα Β.21: Ολοκληρωμένη εικόνα του συλλέκτη Fresnel

**B.8 Στροφή κατόπτρων για αλλαγή θέσης ήλιου**

Κατά την μετακίνηση του ήλιου (ορθότερα του συλλέκτη) αλλάζει η γωνία που σχηματίζουν οι ακτίνες του ήλιου με την κατακόρυφο. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με το πώς αλλάζει η θέση μεταβάλλεται η γωνία των ακτινών του ήλιου κατά τον x-άξονα ή κατά τον z-άξονα (η κατακόρυφος όπως φαίνεται στην εικόνα B.13 είναι παράλληλος στον άξονα γ). Όταν η γωνία του ήλιου μεταβάλλεται κατά τον άξονα z δεν είναι εφικτό να στραφούν τα κάτοπτρα. Τα κάτοπτρα δίνονται να στρέφονται μόνο γύρω από τον z-άξονα. Όταν όμως η γωνία του ήλιου μεταβάλλεται κατά τον z-άξονα, για καλύτερη απόδοση του συλλέκτη θα έπρεπε να στρέφαμε τα κάτοπτρα γύρω από τον z-άξονα, αλλά αυτό δεν είναι εφικτό, οπότε απλά αλλάζουμε την γωνία του ήλιου (λεπτομέρειες υπάρχουν στην ενότητα flow simulation στο solidworks). Όταν όμως μεταβάλλεται η γωνία του ήλιου κατά τον x-άξονα, στρέφουμε τα κάτοπτρα γύρω από τον άξονα x κατά γωνία τέτοια ώστε να πληρείται η σχέση:

$$\psi_i = \frac{\varphi_i - \theta_{x,i}}{2}$$

Όπου  $\varphi_i$ : η γωνία που σχηματίζει το κέντρο του κατόπτρου με την κατακόρυφη

$\psi_i$ : η γωνία που σχηματίζει το κάτοπτρο με την οριζόντια

$\theta_x$ : η γωνία που σχηματίζει ο ήλιος με την κατακόρυφη

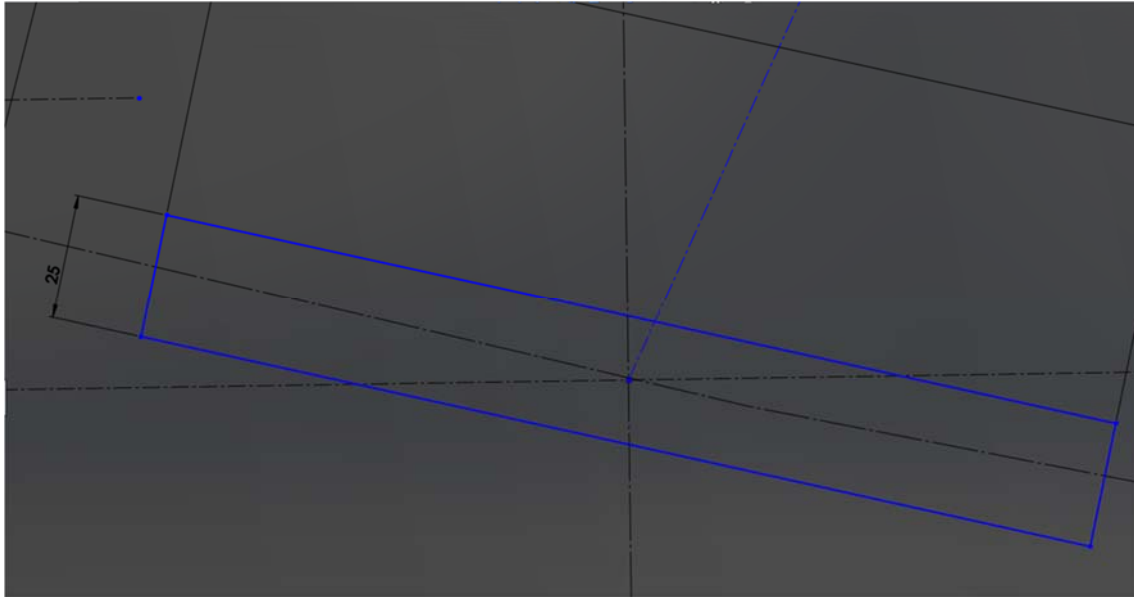
Η γωνία  $\varphi_i$  είναι η σταθερή γωνία κατόπτρου, δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η ευθεία που διέρχεται από το κέντρο του κατόπτρου και το κέντρο του σωλήνα με την κατακόρυφο που διέρχεται από το κέντρο του σωλήνα. Αυτή είναι η σταθερή γωνία σε όλη τη προσομοίωση και συγκεκριμένα δίνονται στον παρακάτω πίνακα για κάθε κάτοπτρο:

Κάτοπτρο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΣΤΑΘΕΡΗ ΓΩΝΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΟΥ $\varphi_i$ (μοίρες)	5,15	10,4	15,6	20,74	25,8	30,75	35,59	40,31	44,88	49,31	53,59

Έτσι λοιπόν προκύπτει η πλήρης σχέση με το ποια πρέπει να είναι η γωνία κάθε κατόπτρου αναλυτικά για κάθε γωνία του ήλιου γύρω από τον x-άξονα. Εδώ αξίζει να σημειωθεί και να αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο σχεδιαστικά γίνεται η μεταβολή της γωνίας των κατόπτρων γύρω από την οριζόντια. Θα επιδείξουμε πως μεταβάλλεται η γωνία ενός κατόπτρου σχεδιαστικά και στην συνέχεια πολύ απλά επαναλαμβάνεται αυτή η διαδικασία για όλα τα κάτοπτρα και για κάθε γωνία του ήλιου.

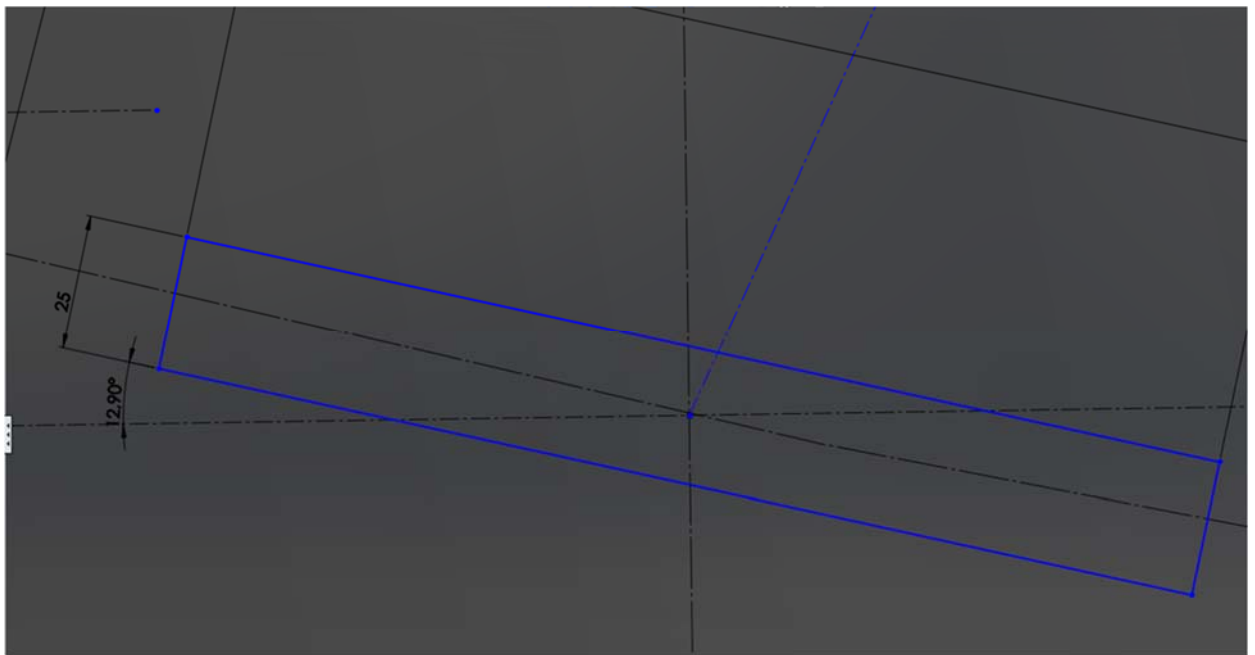
Αρχικά φέρνουμε την οριζόντια η οποία διέρχεται από το κέντρο του κατόπτρου όπως φαίνεται στην εικόνα:





Εικόνα Β.22: Διαδικασία αλλαγής γωνίας κατόπτρων

Στην συνέχεια ορίζουμε την γωνία του κατόπτρου με την οριζόντιο που σχεδιάσαμε στο παραπάνω βήμα με την εντολή smart dimension:



Εικόνα Β.23: Διαδικασία αλλαγής γωνίας κατόπτρων

Και έτσι έχουμε ορίσει την γωνία κάθε κατόπτρου με την οριζόντιο. Οπότε χειροκίνητα ρυθμίζουμε την γωνία κατόπτρου για κάθε κάτοπτρο και για κάθε γωνία του ήλιου κατά τον x-άξονα. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις τιμές της γωνίας κατόπτρου για κάθε κάτοπτρο και για τις γωνίες ήλιου κατά τον x-άξονα [0 15 30 40 45 50 60 70].

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL**

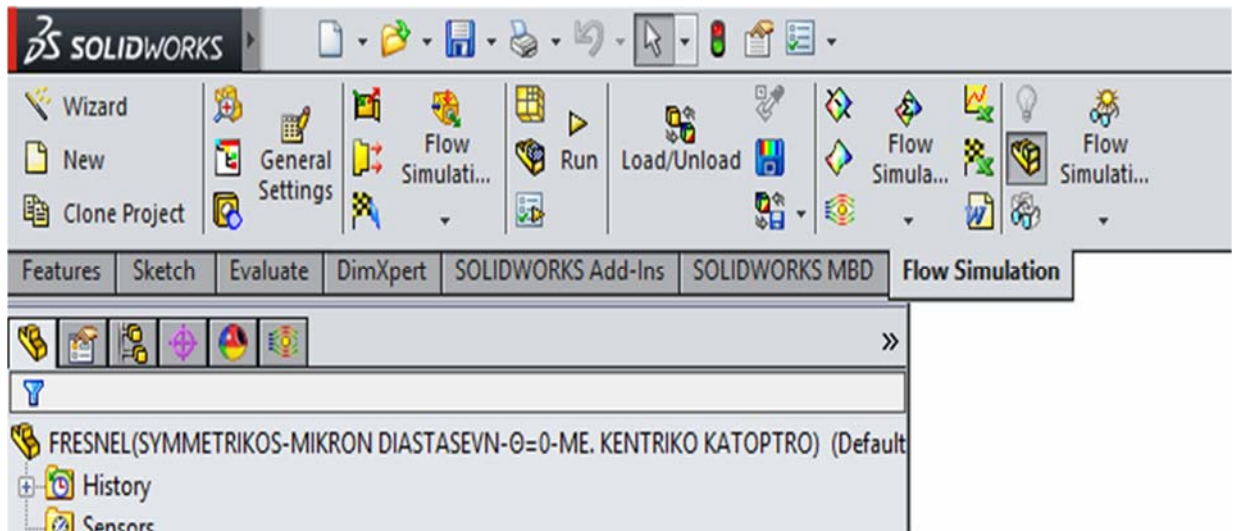
κάτοπτρο	ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=0$ ΚΑΤΑΚΟΥΡΥΦΗ ΘΕΣΗ		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=15$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=30$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=40$	
	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ
1	2,575	2,575	10,075	-4,925	17,575	-12,425	22,575	-17,425
2	5,2	5,2	12,7	-2,3	20,2	-9,8	25,2	-14,8
3	7,8	7,8	15,3	0,3	22,8	-7,2	27,8	-12,2
4	10,37	10,37	17,87	2,87	25,37	-4,63	30,37	-9,63
5	12,9	12,9	20,4	5,4	27,9	-2,1	32,9	-7,1
6	15,375	15,375	22,875	7,875	30,375	0,375	35,375	-4,625
7	17,795	17,795	25,295	10,295	32,795	2,795	37,795	-2,205
8	20,155	20,155	27,655	12,655	35,155	5,155	40,155	0,155
9	22,44	22,44	29,94	14,94	37,44	7,44	42,44	2,44
10	24,655	24,655	32,155	17,155	39,655	9,655	44,655	4,655
11	26,795	26,795	34,295	19,295	41,795	11,795	46,795	6,795

κάτοπτρο	ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=45$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=50$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=60$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=70$	
	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ
1	25,275	-19,925	27,575	-22,425	32,575	-27,425	37,575	-32,425
2	27,7	-17,3	30,2	-19,8	35,2	-24,8	40,2	-29,8
3	30,3	-14,7	32,8	-17,2	37,8	-22,2	42,8	-27,2
4	32,87	-12,13	35,37	-14,63	40,37	-19,63	45,37	-24,63
5	35,4	-9,6	37,9	-12,1	42,9	-17,1	47,9	-22,1
6	37,875	-7,125	40,375	-9,625	45,375	-14,625	50,375	-19,625
7	40,295	-4,705	42,795	-7,205	47,795	-12,205	52,795	-17,205
8	42,655	-2,345	45,155	-4,845	50,155	-9,845	55,155	-14,845
9	44,94	-0,06	47,44	-2,56	52,44	-7,56	57,44	-12,56
10	47,155	2,155	49,655	-0,345	54,655	-5,345	59,655	-10,345
11	49,295	4,295	51,795	1,795	56,795	-3,205	61,795	-8,205

### B.9 Flow simulation στο solidworks

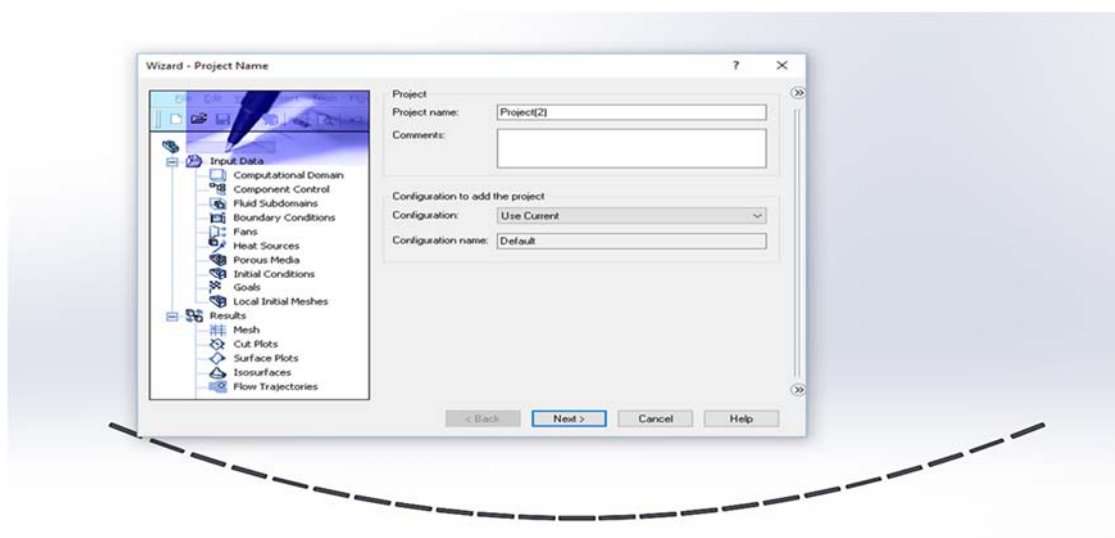
Η βασικότερη λειτουργία του solidworks είναι το Flow simulation. Με το flow simulation γίνεται προσομοίωση μιας κατασκευής και ειδικότερα στην περίπτωση μας θα γίνει θερμική προσομοίωση με σκοπό την απόδοση θερμοκρασιών νερού, απορροφητή, γυάλινου καλύμματος καθώς επίσης την θερμική ροή απορροφητή και τις θερμικές απώλειες απορροφητή. Η λογική της εντολής flow simulation είναι η κατασκευή ενός project, το οποίο θα εφαρμόζεται επί του συλλέκτη που έχει σχεδιασθεί.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται όλες οι επιμέρους εντολές του flow simulation:



Εικόνα B.24: Η γραμμή εντολών του flow simulation στο solidworks

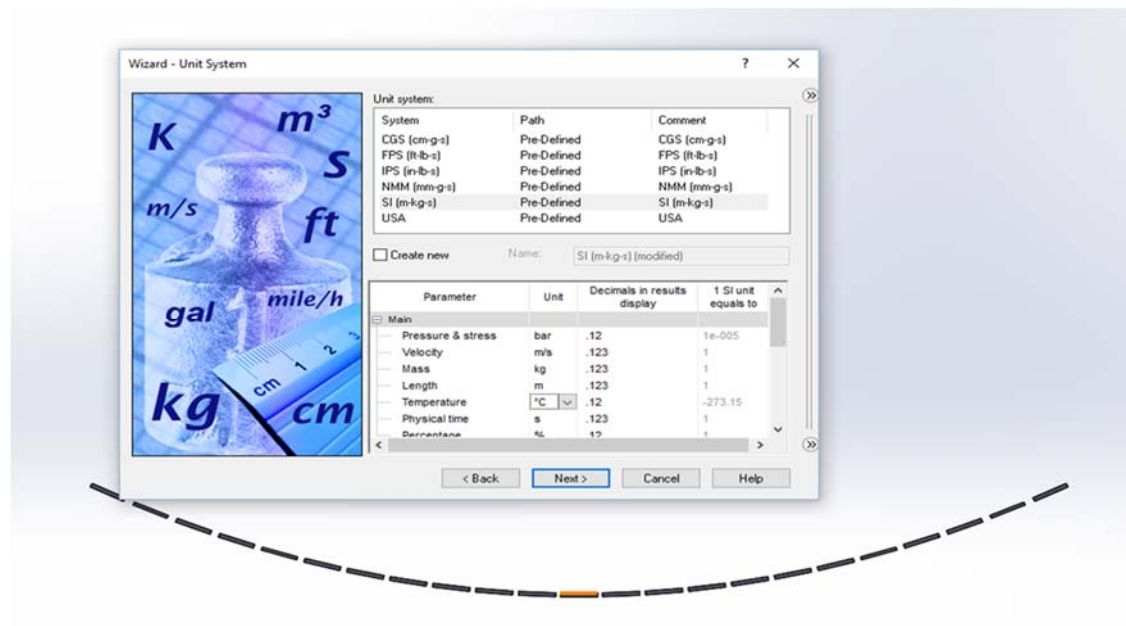
Παρακάτω θα εξηγηθεί αναλυτικά πως κατασκευάζεται ένα project στο flow simulation και πως γίνεται η εκτέλεσή του: αρχικά επιλέγουμε την εντολή wizard και ανοίγει το παράθυρο του νέου project.



Εικόνα B.25: Δημιουργία νέου project

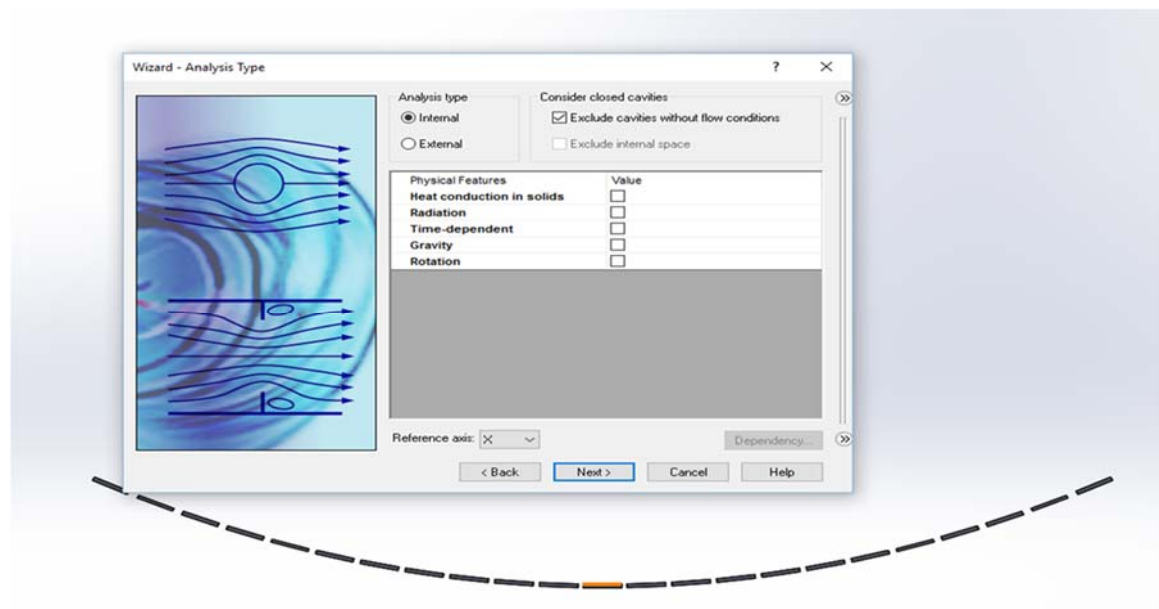
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

Στο δεύτερο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε τις μονάδες στις οποίες θέλουμε να δουλέψουμε και ορίζουμε για πίεση τη μονάδα bar και για θερμοκρασία τη μονάδα κελσίου (°C):



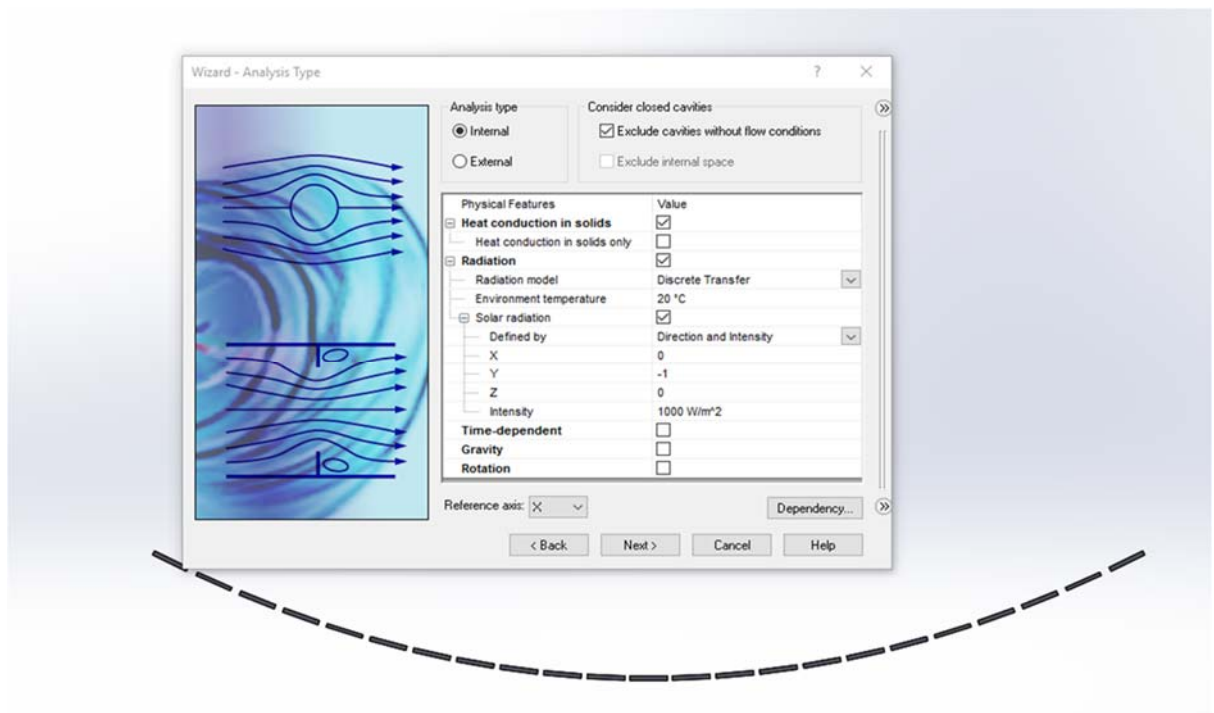
Εικόνα B.26: Επιλογή μονάδων

Στο τρίτο παράθυρο καθορίζουμε αν η ροή θα γίνεται εντός μιας επιφανείας ή γύρω από μία επιφάνεια:



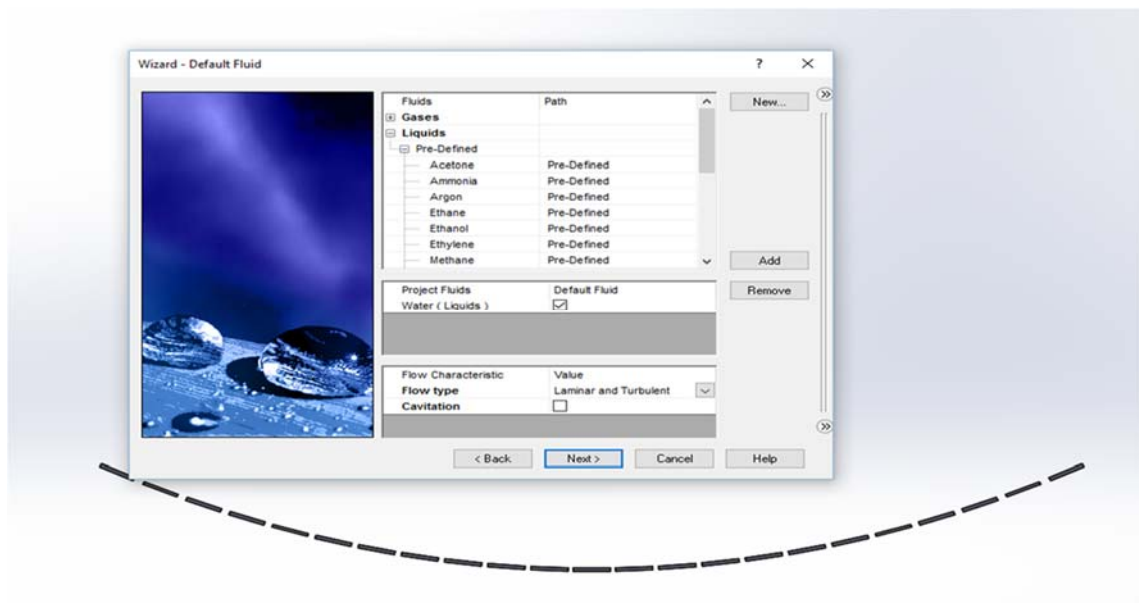
Εικόνα B.27: Επιλογή είδους ροής

Επιπλέον στο ίδιο παράθυρο ορίζεται ο τύπος φαινομένων μεταφοράς που θα έχω. Συγκεκριμένα εδώ ορίζω την ηλιακή ακτινοβολία καθώς επίσης και τι είδους μεταφορά έχω. Επιλέγω συντελεστή  $\gamma=-1$  για την κατακόρυφη ακτινοβολία:



Εικόνα Β.28: Επιλογή και καθορισμός των ακτινοβολιών και της μετάδοσης θερμότητας

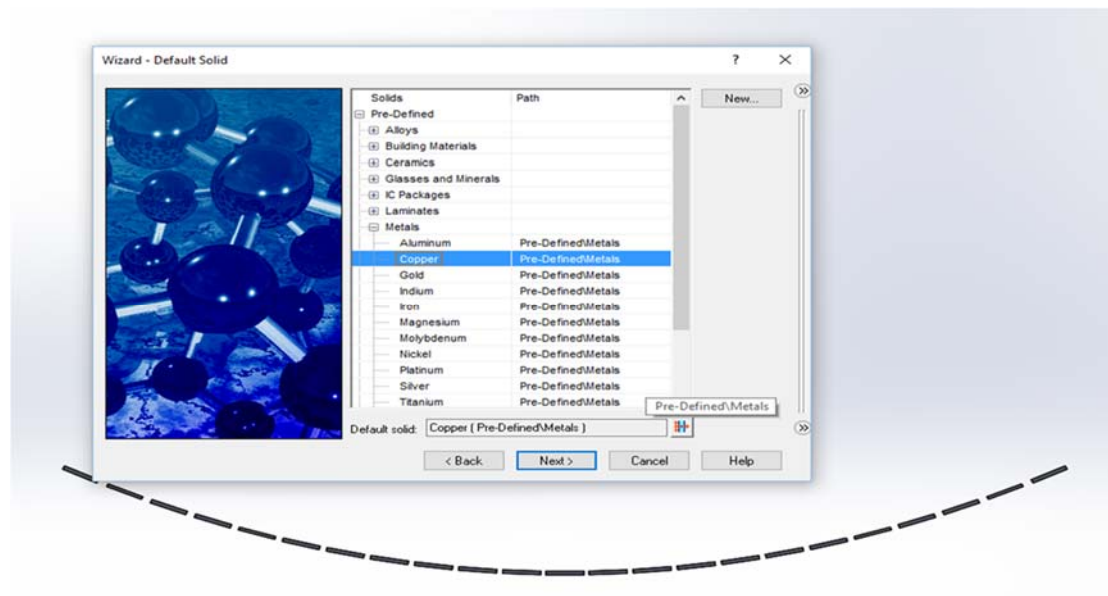
Στο τέταρτο παράθυρο γίνεται επιλογή του ρευστού και συγκεκριμένα:



Εικόνα Β.29: Επιλογή διακινούμενου ρευστού

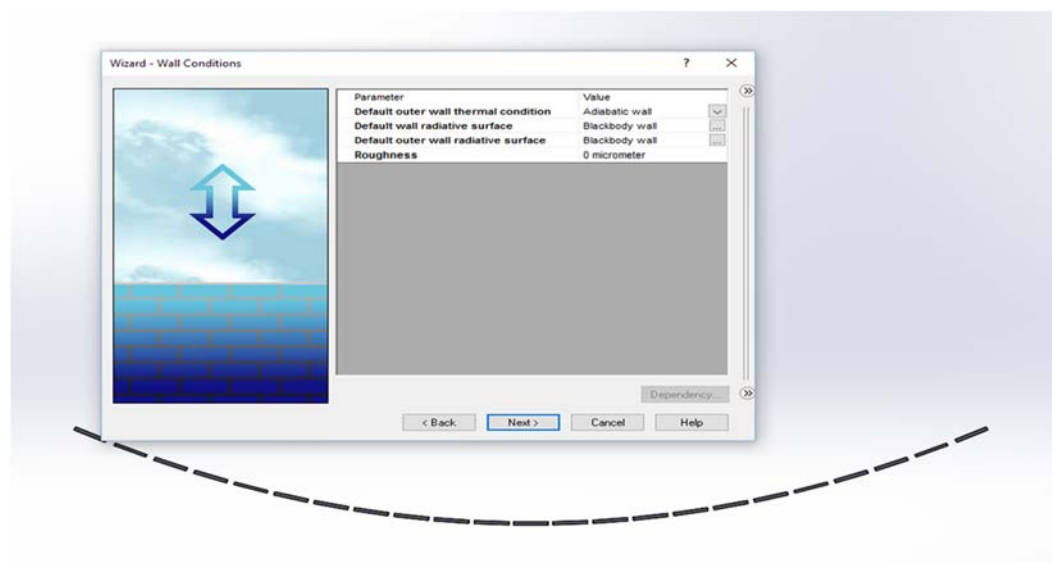
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

Στο πέμπτο παράθυρο επιλέγεται το βασικό υλικό στερεών:



Εικόνα Β.30: Επιλογή κύριου υλικού

Στο έκτο παράθυρο καθορίζουμε ότι όπου δεν υπάρχει κάποια οριακή συνθήκη, δεν θα γίνεται καμία μεταφορά θερμότητας:

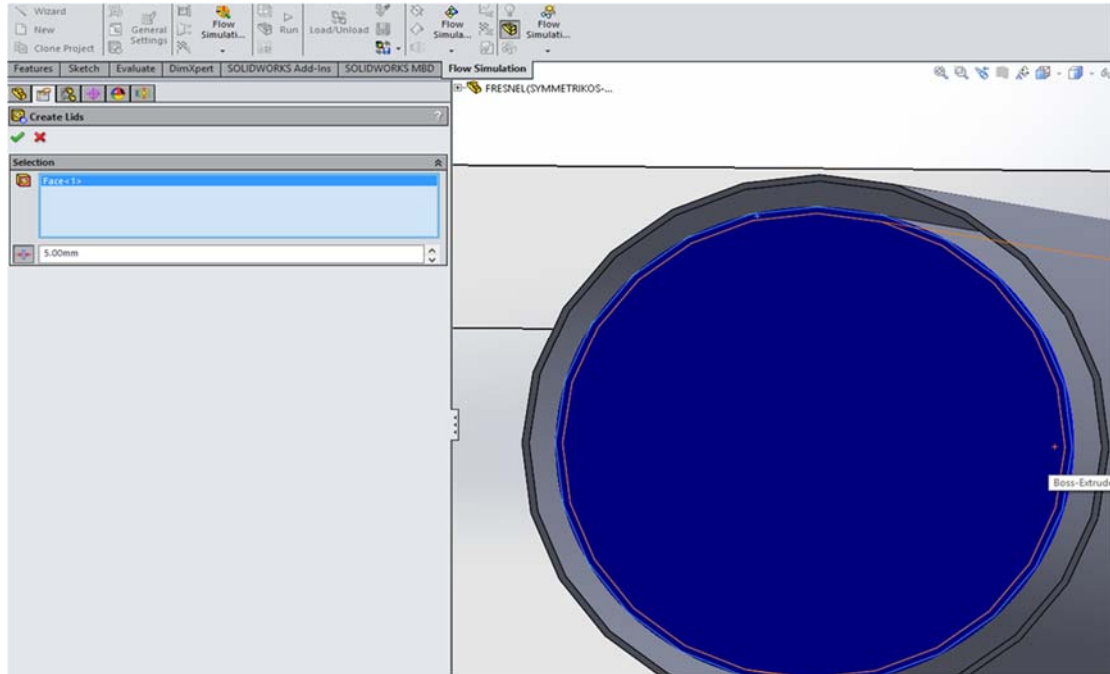


Εικόνα Β.31: Ορισμός για μηδενική μετάδοση θερμότητας σε σημεία που δεν ορίζεται από το χρήστη

Στο έβδομο παράθυρο και το όγδοο παράθυρο δεν μεταβάλλουμε τίποτε. Έτσι έχει κατασκευασθεί το αρχικό project, στο οποίο βέβαια έχουμε να προσθέσουμε τις οριακές συνθήκες, τις μεταβλητές σύγκλισης, τα υλικά των επιφανειών και άλλες παραμέτρους που είναι καθοριστικές για την προσομοίωση.

Πιο αναλυτικά θα είναι:

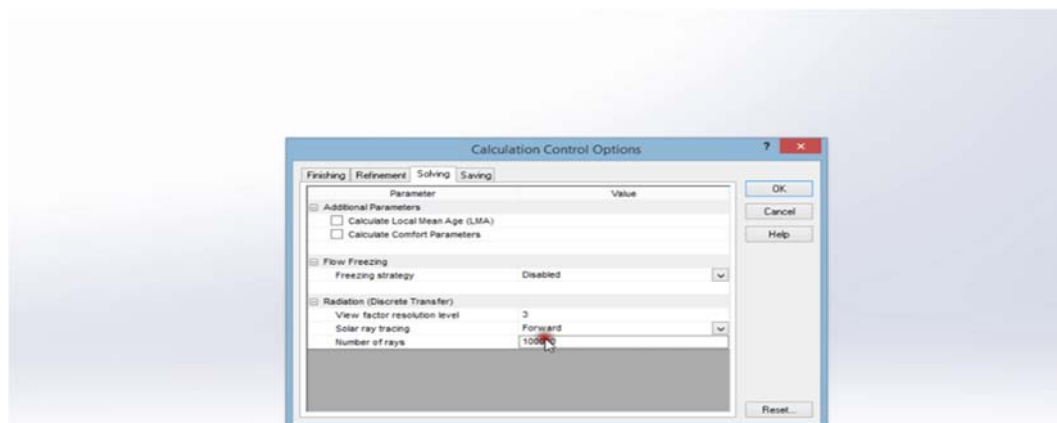
Αρχικά πρέπει να τοποθετήσω τάπες στις επιφάνειες από τις οποίες διέρχεται νερό. Οι τάπες τοποθετούνται μέσω της εντολής create lids, η οποία βρίσκεται στη γραμμή εντολών του flow simulation. Στην συνέχεια επιλέγω την περίμετρο στην οποία θέλω να τοποθετήσω την τάπα και η διαδικασία ολοκληρώνεται:



Εικόνα Β.32: Τοποθέτηση ταπών στα άκρα του σωλήνα

Στην συνέχεια θα ορίσουμε τις οριακές συνθήκες μας και τις υπόλοιπες λεπτομέρειες που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση. Αυτές είναι οι εξής

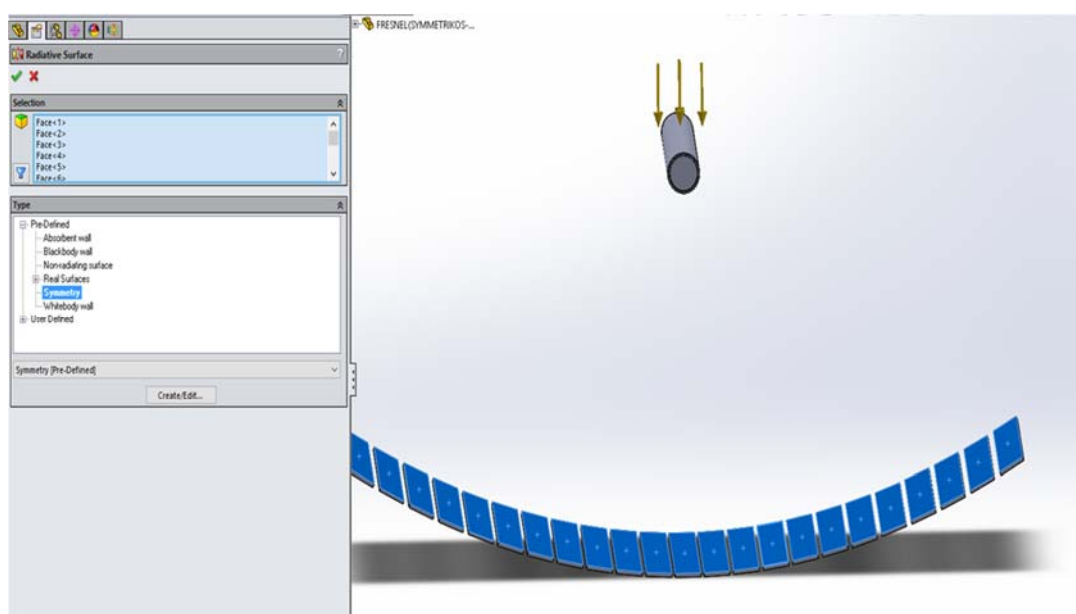
1. Τα κάτοπτρα κάνουν ανακλάσεις
2. Εντός του σωλήνα επικρατεί μόνο ακτινοβολία, καθώς λόγω του κενού (πρακτικά πολύ μικρή πίεση) δεν υπάρχει συναγωγή
3. Στην εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος επικρατεί και ακτινοβολία προς το περιβάλλον και συναγωγή με το περιβάλλον
4. Η διακινούμενη μάζα είναι 0.9 kg/s και η πίεση στην έξοδο είναι ατμοσφαιρική
5. Ορισμός συντελεστών ακτινοβολίας για το γυάλινο κάλυμμα  $\epsilon_c=0.88$  και για τον επιλεκτικό απορροφητή  $\epsilon_r=0.1$
6. Συντελεστής συναγωγής καλύμματος με περιβάλλον  $h=10 \text{ W}/(\text{mK})$



Εικόνα Β.33: Ορισμός ανακλάσεων κατόπτρων

Τις ανακλάσεις τις ορίζουμε από την εντολή calculation control options του flow simulation όπου στο πεδίο solar ray tracing επιλέγουμε forward και στον αριθμό που βρίσκεται στο ακριβώς από κάτω πεδίο προσθέτουμε ένα 0:

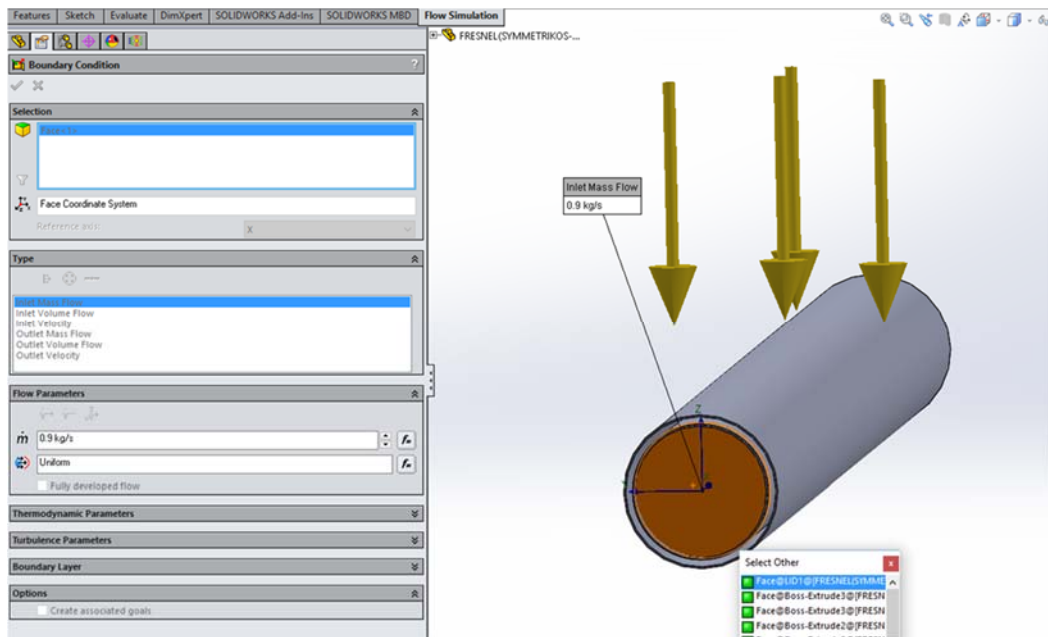
Στην συνέχεια ορίζουμε ότι κάθε ένα κάτοπτρο κάνει ανακλάσεις από τις ακτινοβολούσες επιφάνειες(radiative surfaces) όπου επιλέγω με δεξί κλικ και κάνω edit και στη συνέχεια ορίζω ως symmetry μια τις επιφάνειες των κατόπτρων:



Εικόνα Β.34: Ορισμός ανακλάσεων κατόπτρων

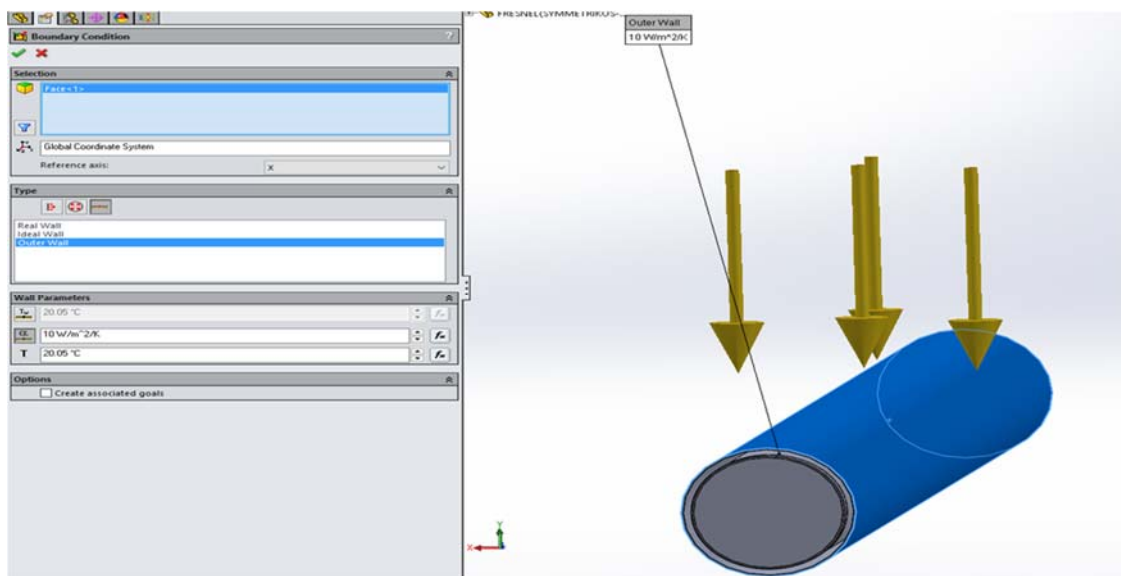
Έπειτα ορίζω ότι η διακινούμενη μάζα θα είναι 0.9 kg/s επιλέγοντας από τις οριακές συνθήκες(boundary conditions) με δεξί κλικ και edit την τάπα στην είσοδο.





Εικόνα Β.35: Ορισμός διακινούμενης ποσότητας ρευστού

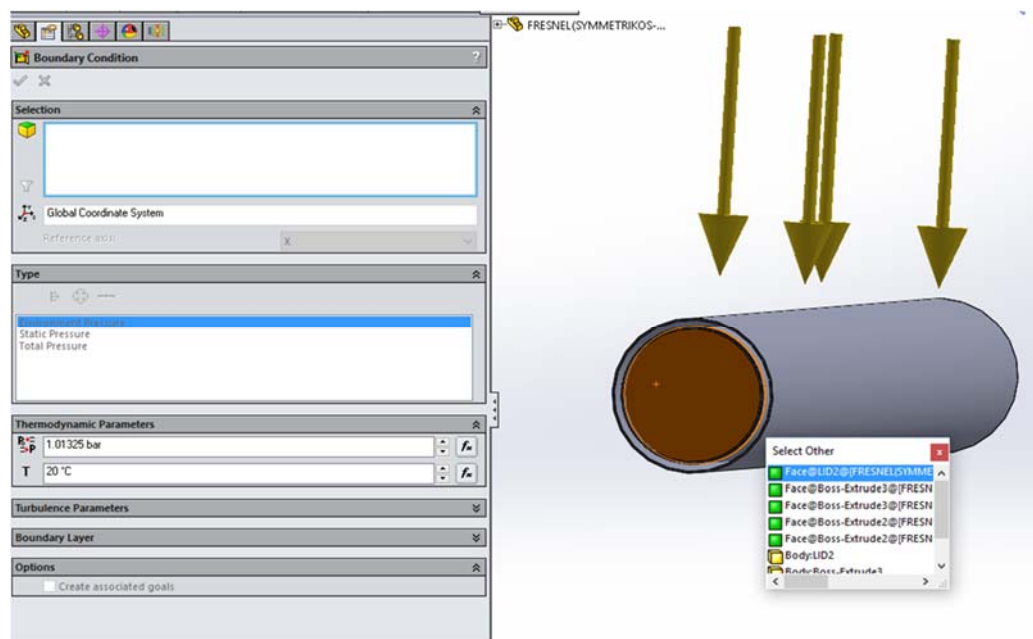
Στην συνέχεια ορίζω ότι στην εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος θα έχω συναγωγή με συντελεστή  $h=10 \text{ W}/(\text{mK})$ . Αυτό γίνεται με όμοιο τρόπο με την εισαγωγή της μάζας και συγκεκριμένα με δεξί κλικ και edit στις boundary conditions και στην συνέχεια επιλογή «Outer wall».



Εικόνα Β.36: Ορισμός εξωτερικής συναγωγής (γυάλινου καλύμματος-περιβάλλον)

Μετέπειτα πρέπει να ορίσουμε ότι στην έξοδο θα επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση και αυτό γίνεται και πάλι με όμοιο τρόπο με δεξί κλικ στις οριακές συνθήκες (boundary conditions) και edit. Στην συνέχεια επιλέγουμε την δεύτερη τάπα και ορίζουμε ατμοσφαιρική πίεση:

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL



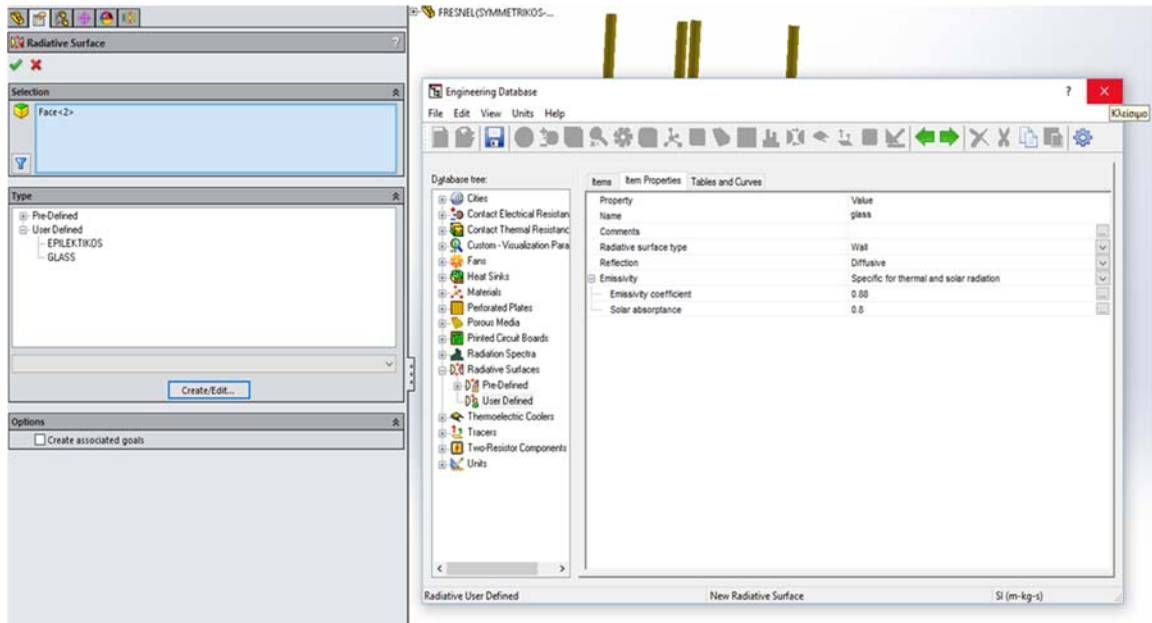
Εικόνα Β.37: Ορισμός ατμοσφαιρικής πίεσης στην έξοδο του σωλήνα

Με αυτόν τον τρόπο έχουμε ορίσει τις συνθήκες για τη μάζα, την πίεση στην έξοδο και την συναγωγή με το περιβάλλον καθώς επίσης έχουμε ορίσει και τη μία από τις επιφάνειες που ακτινοβολούν και συγκεκριμένα τα κάτωπτερα τα οποία αντανakλούν τις ακτίνες του ήλιου.

Στην συνέχεια απομένει να ορίσουμε την επιφάνεια του απορροφητή και του γυάλινου καλύμματος. Πιο συγκεκριμένα ορίζουμε το γυαλί για το κάλυμμα καθώς επίσης και το μέταλλο του απορροφητή. Για τη προσομοίωση δεν χρειάζεται να ορίσουμε απαραίτητα το ακριβές υλικό του απορροφητή ή το γυαλί του καλύμματος, αρκεί να καθορίσουμε τους συντελεστές ακτινοβολίας, οι οποίοι είναι 0,88 για το γυάλινο κάλυμμα και 0,1 για τον απορροφητή, ο οποίος επιλέγεται επιλεκτικός.

Τα παραπάνω ορίζονται από το ίδιο πεδίο στο simulation και συγκεκριμένα από την επιλογή των ακτινοβολουσών επιφανειών (radiative surfaces). Η βιβλιοθήκη του solidworks περιέχει μια μεγάλη γκάμα υλικών, αλλά όπως αναφέρθηκε δεν μας απασχολεί ιδιαίτερα ακριβώς το υλικό αλλά οι ιδιότητες του όσο αφορά την ακτινοβολία. Έτσι θα ορίσουμε δύο νέα υλικά στα οποία θα δώσουμε τους παραπάνω συντελεστές ακτινοβολίας, καθώς επίσης και το γινόμενο ( $\rho\tau$ )=0.8.

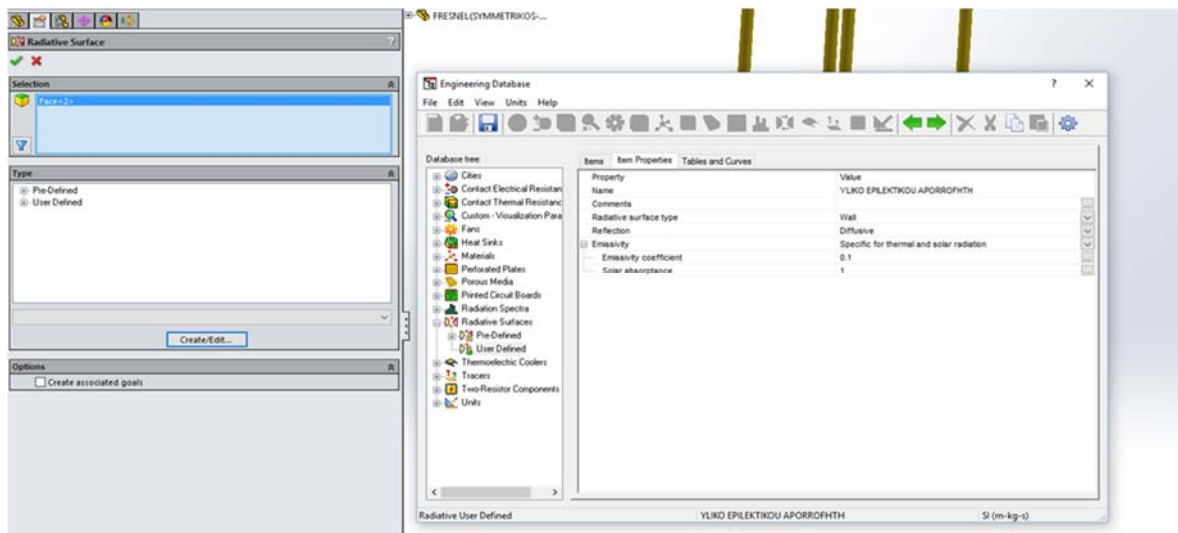
Πιο συγκεκριμένα θα είναι:



Εικόνα Β.38: Ορισμός υλικού του γυάλινου καλύμματος και των ιδιοτήτων του

Επιλέγουμε δεξί κλικ στο πεδίο radiative surfaces και έπειτα edit. Από εκεί επιλέγουμε αρχικά την επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος και ορίζουμε νέο υλικό με την επιλογή user defined (σε αντίθεση από την βιβλιοθήκη έτοιμων υλικών- pre-defined). Επιλέγω λοιπόν user defined και έπειτα την επιλογή create-edit και έτσι ανοίγει παράθυρο στο οποίο μπορώ να ονομάσω με δική μου επιλογή το όνομα του υλικού καθώς επίσης και τις βασικές θερμικές ιδιότητές του, όπως φαίνεται παρακάτω:

Με όμοιο τρόπο ορίζω και το υλικό του απορροφητή όπως φαίνεται παρακάτω:

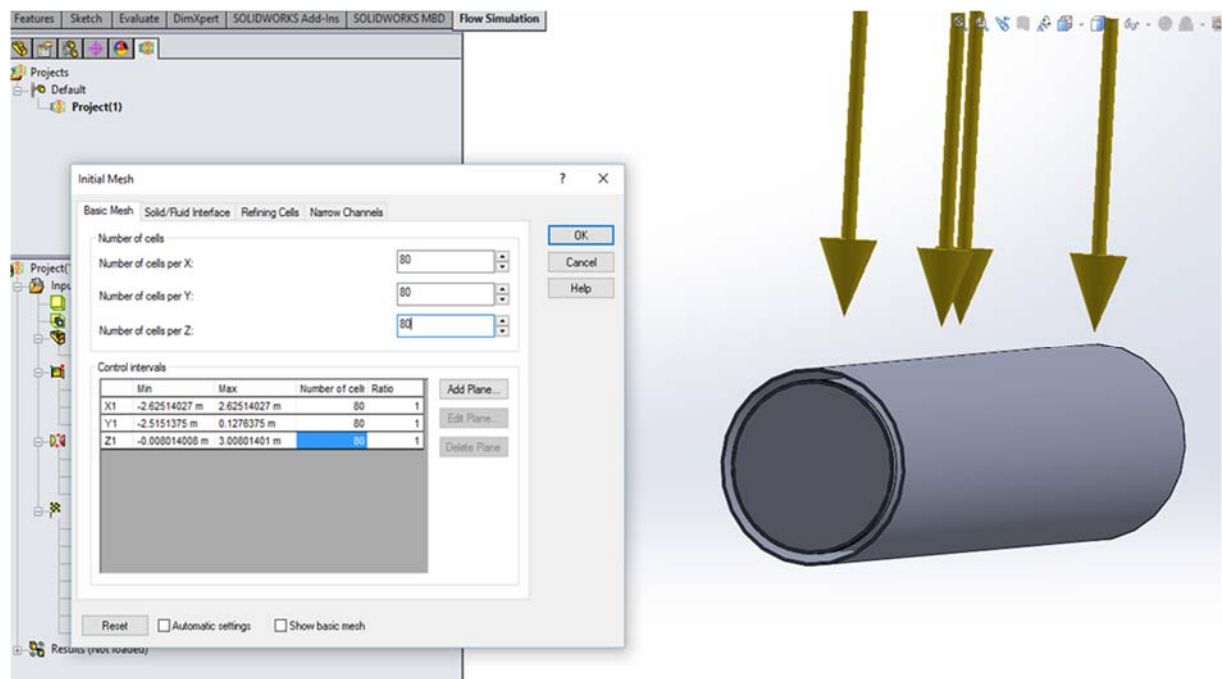


Εικόνα Β.39: Ορισμός υλικού επιλεκτικού απορροφητή και ιδιοτήτων του

Να παρατηρήσουμε ότι θα μπορούσαμε να εισάγουμε το (τα) και από το υλικό του απορροφητή. Εδώ επιλέξαμε δηλαδή να ορίσουμε solar absorptance 0.8 στο υλικό του γυαλιού, ενώ απόλυτα ισodύναμα θα μπορούσαμε να το ορίσουμε από το υλικό του απορροφητή.

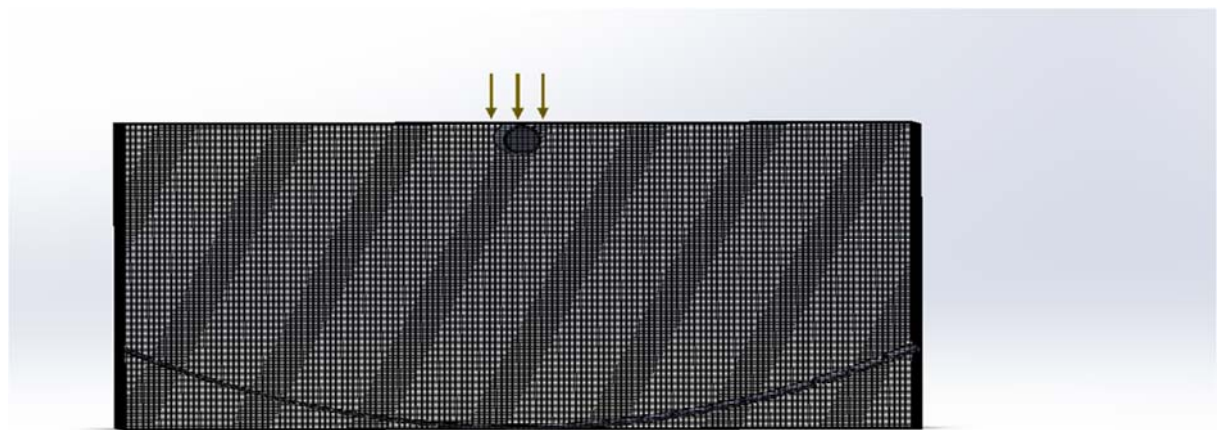
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

Μετά απομένει να ορίσουμε το πλέγμα μας και το μοντέλο θα είναι έτοιμο για την προσομοίωση. Το πλέγμα ορίζεται από την εντολή initial mesh όπως φαίνεται παρακάτω:



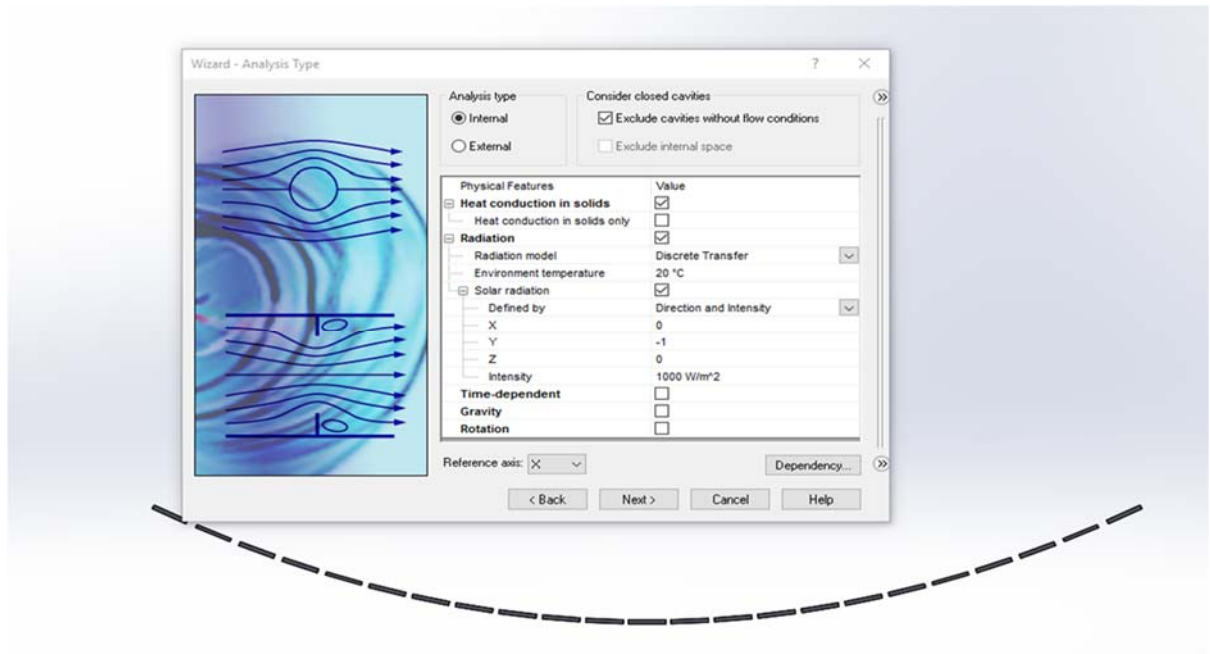
Εικόνα Β.40: Ορισμός πλέγματος

Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα να απεικονίσουμε το πλέγμα επιλέγοντας την εντολή show basic mesh ως εξής:



Εικόνα Β.41: Το πλέγμα εικονικά επί του υπολογιστικού όγκου

Βασική παράμετρος για την προσομοίωση είναι ο ορισμός της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως η ακτινοβολία ορίζεται από την εντολή wizard στην οποία διαμορφώνουμε ένα νέο project για την προσομοίωση:



Εικόνα Β.42:Ορισμός ακτινοβολίας και κατεύθυνσής της

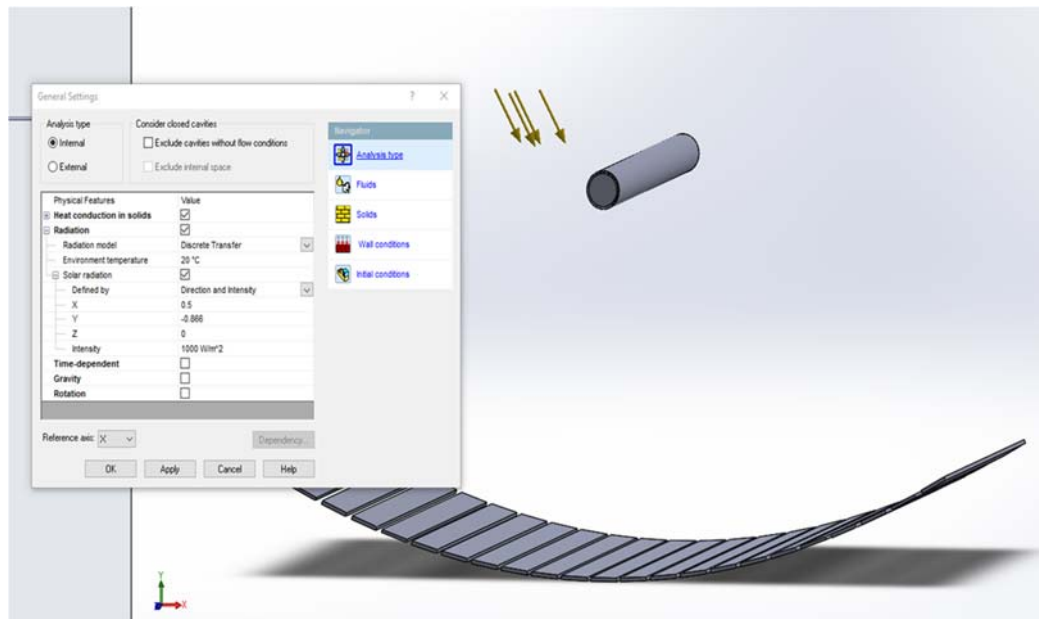
Βασικό είναι να προσδιορίσουμε την σχετική θέση αξόνων και συλλέκτη. Πιο συγκεκριμένα ο συλλέκτης έχει σχεδιαστεί στο επίπεδο που ορίζεται από τον x και γ-άξονα και η εντολή extrude εφαρμόστηκε στον z-άξονα. Οπότε για κατακόρυφη ακτινοβολία, οι ακτίνες θα είναι αντίθετης κατεύθυνσης του γ-άξονα (και για αυτό το λόγο ορίζεται συντελεστής -1 κατά τον γ-άξονα, ενώ 0 στις δύο άλλες κατευθύνσεις). Όταν ο ήλιος αλλάζει κατεύθυνση κατά z ή x-άξονα, τότε θα πρέπει να αλλάζουν και συντελεστές αυτοί σύμφωνα με τις σχέσεις:

$X=\sin(\theta_x)$ ,  $Z=\sin(\theta_z)$ , όπου  $\theta_x$  και  $\theta_z$  η γωνία του ήλιου κατά x και z-άξονα αντίστοιχα. Για κατακόρυφη ακτινοβολία ορίζεται  $\theta_x=\theta_z=0$ . Επιπλέον για τον συντελεστή Y ισχύει  $Y=\cos(\theta_x\theta_z)$ . Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις τιμές των συντελεστών Z,Y,X για διάφορες γωνίες  $\theta_x$  και  $\theta_z$ :

$\theta_x$	$\theta_z$	$Y=-\cos(\theta_z\theta_x)$	$Z=\sin(\theta_z)$	$X=\sin(\theta_x)$	$\theta_x$	$\theta_z$	$Z=\sin(\theta_z)$	$Y=-\cos(\theta)$	$X=\sin(\theta_x)$
0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0
0	10	-0,985	0,174	0	15	0	0	-0,9659	0,2588
0	20	-0,94	0,342	0	30	0	0	-0,866	0,5
0	30	-0,866	0,5	0	40	0	0	-0,766	0,6428
0	45	-0,707	0,707	0	50	0	0	-0,6428	0,766
0	75	-0,259	0,966	0	60	0	0	-0,5	0,866
0	90	0	1	0	70	0	0	-0,342	0,9397

Έτσι λοιπόν όταν θα θέλουμε να αλλάξουμε την κατεύθυνση του ήλιου στο ήδη υπάρχων project, επιλέγουμε την εντολή general settings από τη γραμμή εντολών του flow simulation και ορίζω στο παράθυρο radiation/solar radiation τους 3 συντελεστές κάθε φορά:

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

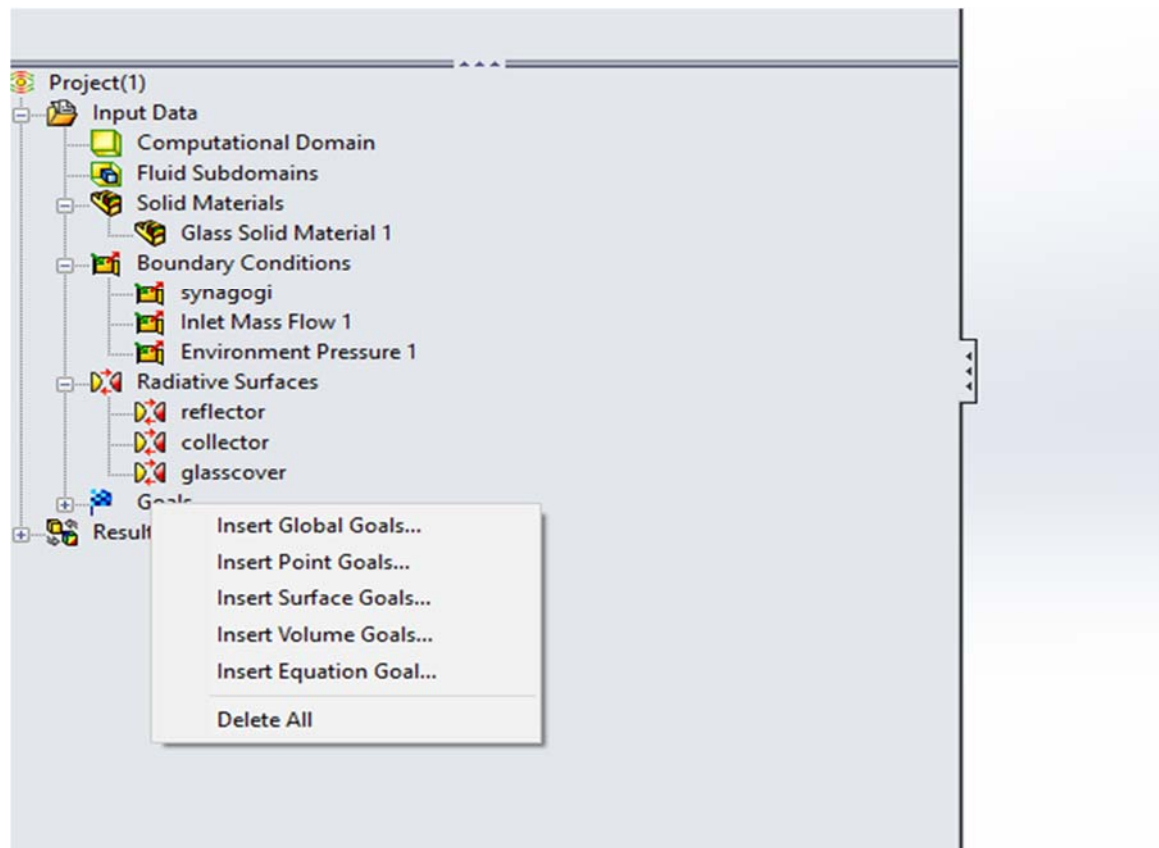


Εικόνα Β.43: Μεταβολή της γωνίας του ήλιου

Με όλη τη παραπάνω διαδικασία έχει γίνει πλήρης προσδιορισμός όλων των απαιτούμενων συνθηκών για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Έχει οριστεί το πλέγμα, η ακτινοβολία, οι συνθήκες μεταφοράς (ακτινοβολία και συναγωγή στο γυάλινο κάλυμμα-περιβάλλον και ακτινοβολία στο εσωτερικό του σωλήνα), ανακλάσεις κατόπτρων, η διαπερατότητα του γυάλινου καλύμματος, η απορροφητικότητα του απορροφητή και η ποσότητα του διακινούμενου ρευστού.

Τελευταίο στάδιο είναι ο ορισμός των αποτελεσμάτων των οποίων επιθυμεί ο χρήστης να απεικονίζονται μετά την προσομοίωση καθώς επίσης και τον προσδιορισμό των μεταβλητών, των οποίων απαιτούμε την σύγκλιση για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε αριθμητική επίλυση ενός προβλήματος, τα αποτελέσματα δεν ταυτίζονται με την αναλυτική-πραγματική λύση του προβλήματος, και για αυτό το λόγο ορίζουμε ποιες μεταβλητές πρέπει να συγκλίνουν ώστε να αποδεχτούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν δύο διαδοχικές λύσεις μιας μεταβλητής διαφέρουν κατά το αποδεκτό σφάλμα. Στο solidworks ορίζεται σαν ελάχιστο σφάλμα για τις θερμοκρασίες το 0.1 K.

Στην προσομοίωσή μας απαιτούμε την σύγκλιση 2 μεταβλητών για την αποδοχή της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα απαιτείται η σύγκλιση της θερμοκρασίας ρευστού και της θερμοκρασίας του διακινούμενου ρευστού. Αυτό ορίζεται μέσω των μεταβλητών global. Στην συνέχεια ορίζουμε τις μεταβλητές που θέλουμε να εμφανίζονται σαν αποτελέσματα κατά την προσομοίωση. Ο συγκεκριμένος ορισμός γίνεται κατά τον προσδιορισμό των στόχων της προσομοίωσης (goals). Πιο συγκεκριμένα με δεξί κλικ πάνω στην εντολή goals και επιλογή της αντίστοιχης μεταβλητής, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα Β.44: Ορισμός στόχων(goals)

Αναλυτικότερα global είναι οι μεταβλητές οι οποίες θα καθορίσουν την σύγκλιση της προσομοίωσης. Οι υπόλοιπες μεταβλητές εξόδου(goals) ορίζονται είτε ως σημειακές(point goal), επιφανειακές(surface goal), χωρικές(volume goal) ανάλογα με το αν θέλουμε να υπολογίζουμε την τιμή της συγκεκριμένης μεταβλητής σε ένα σημείο, σε μια επιφάνεια ή σε ολόκληρο όγκο αντίστοιχα.





**ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ**

**Γ.1 Εισαγωγή**

Στο σχεδιαστικό μέρος επιλέγεται να γίνει ο πλήρης σχεδιασμός ενός ηλιακού συλλέκτη Fresnel καθώς και η προσομοίωσή του σε πραγματικές συνθήκες με σκοπό την διαμόρφωση των καμπυλών απόδοσης και τον προσδιορισμό όλων των χαρακτηριστικών του μεγεθών. Το πρόγραμμα που επιλέγεται είναι το Solidworks για το επίπεδο του σχεδιασμού και της προσομοίωσης, καθώς επίσης το προγραμματιστικό πακέτο matlab για την εκτέλεση κάποιων μικρών προγραμμάτων, απαραίτητων για τον καλύτερο προσδιορισμό κάποιων μεγεθών.

**Γ.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη-Διαστάσεις**

Ένας συλλέκτης Fresnel μπορεί να έχει διάφορες κατασκευαστικές αρχές. Με τον όρο κατασκευαστική αρχή εννοούμε την διάταξη των κατόπτρων, το πλήθος των σωλήνων, τα κενά μεταξύ τους, και άλλα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται να διαμορφωθεί μια συμμετρική διάταξη κατόπτρων, γύρω από την κατακόρυφη που διέρχεται από το κέντρο του σωλήνα, των οποίων τα κέντρα τοποθετούνται πάνω σε μια παραβολή, το κέντρο της οποίας βρίσκεται στο κέντρο του σωλήνα. Οι βασικές διαστάσεις επιλέγονται με κριτήριο παρόμοιες κατασκευές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία.

Επιλέγονται:

Διαστάσεις κατόπτρου: 200·3000·25 (mm)

Κενά κατόπτρων σε κατακόρυφη διάταξη: τα κενά μεταξύ των κατόπτρων επιλέγονται και με κριτήριο την μη σκίαση του ενός με του άλλου, κατά την κίνηση του ήλιου, όπου τα κάτοπτρα θα πρέπει να 'ακολουθούν' τον ήλιο. Ένας βασικός κανόνας είναι ότι τα κενά πρέπει να είναι της τάξης του 10-15% του πλάτους του κατόπτρου. Εμείς επιλέξαμε κενά της τάξης του 15% για να διασφαλίζεται η ελάχιστη δυνατή σκίαση των κατόπτρων και οπότε προκύπτει κενά μεταξύ των κατόπτρων 30mm.

Εστιακό ύψος: 2,5m

Άνοιγμα παραβολής: 5,5m

Οπότε τα κάτοπτρα τοποθετούνται επάνω στην παραβολή, συμμετρικά γύρω από την κατακόρυφη που διέρχεται από το κέντρο του σωλήνα, και με κενό 30mm ανά κάτοπτρο στην οριζόντια διάταξη. Έτσι προκύπτει συλλέκτης με 22 κάτοπτρα, όπου κατά την οριζόντια διάταξη των κατόπτρων, καταλαμβάνουν μήκος 5,216m. Οπότε τις βασικές διαστάσεις και γεωμετρικά μεγέθη τα βλέπουμε στο παρακάτω πίνακα:

Διάταξη κατόπτρων	[m]	Συλλεκτική επιφάνεια	[m <sup>2</sup> ]
Μήκος	3	Συνολική	15.648
Βάθος	0.2	Καθαρή συλλεκτική επιφάνεια	13.8
Πλάτος	0.025	Επιφάνεια κενών	1.848

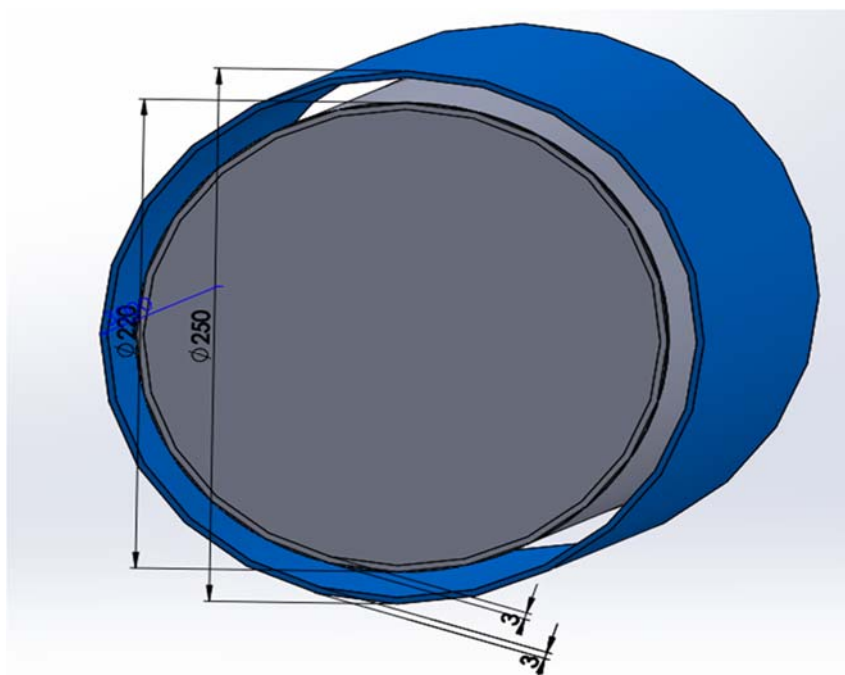
### Γ.3 Σωλήνας-Απορροφητής

Επιλέγεται σωλήνας κενού καθώς παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων λύσεων. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν δύο σωλήνες, μεταξύ των οποίων υπάρχει κενό αέρα, το οποίο λόγω της χαμηλής πίεσης που επικρατεί, απαλείφονται οι απώλειες συναγωγής και οπότε υπάρχουν μόνο απώλειες ακτινοβολίας.

Σχεδιαστικά, ο διπλός σωλήνας κενού, έχει ένα εξωτερικό γυάλινο κάλυμμα, πάχους  $S_2$ , και διαμέτρου  $D_2$ , και από τον απορροφητή (receiver) διαμέτρου  $D_1$  και πάχους  $S_1$ .

Επιλέγονται οι εξής διαστάσεις:

Μέγεθος	[m]
εξωτερική διάμετρος απορροφητή	0.22
πάχος απορροφητή	0.003
εξωτερική διάμετρος γυάλινου καλύμματος	0.25
πάχος γυάλινου καλύμματος	0.003



Εικόνα Γ.45: Σωλήνας κενού-απορροφητής-εξωτερικό γυάλινο κάλυμμα

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τον σωλήνα κενού, όπου το σκιασμένο με μπλε χρώμα μέρος αποτελεί το γυάλινο κάλυμμα, ενώ το εσωτερικός αγωγός αποτελεί τον απορροφητή. Το νερό που θερμαίνεται, διέρχεται από τον εσωτερικό όγκο που δημιουργείται από την επιφάνεια του απορροφητή, δηλαδή από την  $\text{διάμετρο } 220 - 2 \cdot 0,003 = 0,214 \text{ m}$  (η επιφάνεια αυτή καλύπτεται από τάπα για να διαχωρίζεται από την επιφάνεια κενού αέρος).

### Γ.4 Υλικά κατασκευής και οπτικά-θερμικά χαρακτηριστικά

Τα 3 βασικά μέρη του συλλέκτη είναι τα κάτοπτρα, ο απορροφητής και το κάλυμμα του σωλήνα κενού. Τα υλικά που επιλέγονται είναι τα εξής:

**Κάτοπτρα:** ειδικό ανακλαστικό τζάμι

**Απορροφητής:** ειδική μεταλλική επιφάνεια

**Κάλυμμα απορροφητή:** ειδικό γυαλί

Σημαντικό ρόλο στη προσομοίωση παίζουν και τα οπτικά-θερμικά χαρακτηριστικά των διάφορων μερών του συλλέκτη. Συγκεκριμένα μας ενδιαφέρουν οι συντελεστές εκπομπής για τον απορροφητή και το γυάλινο κάλυμμα ( $\epsilon_c, \epsilon_r$ ) καθώς επίσης και το γινόμενο ( $\tau_a$ ) της θερμικής διαπερατότητας του γυάλινου καλύμματος · θερμική απορροφητικότητα του απορροφητή. Πιο συγκεκριμένα ορίζουμε:

$$1. \epsilon_c = 0.88$$

$$2. \epsilon_r = 0.1$$

$$3. (\rho\tau_a) = 0.8$$

Όπως φαίνεται και από τις τιμές επιλέχθηκε επιλεκτικός απορροφητής, η τιμή του καλύμματος είναι τυπική για γυάλινο κάλυμμα όπως επίσης και το γινόμενο ( $\tau_a$ ).

Εδώ σημαντικό είναι να αναφέρουμε τη διαφορά μεταξύ επιλεκτικού και μη επιλεκτικού απορροφητή (συντελεστής εκπομπής μη επιλεκτικού απορροφητή είναι 0,9-0,95 ενώ του επιλεκτικού απορροφητή είναι 0,1).

Λειτουργικά ο επιλεκτικός απορροφητής έχει την ικανότητα να απορροφά σε όλο το φάσμα ακτινοβολίας ενώ ταυτόχρονα επιλεκτικά εκπέμπει μηδενική ακτινοβολία σε κάποιες συχνότητες. Έτσι προκύπτει σε όλο το φάσμα ακτινοβολίας, μεγάλη απορροφητικότητα για όλο το φάσμα και πολύ μικρότερη εκπομπή, και άρα συντελεστής εκπομπής  $\epsilon$ .

Έτσι προκύπτει ότι ο επιλεκτικός απορροφητής έχει πολύ μικρότερο συντελεστή εκπομπής, δηλαδή αποβάλλει πολύ μικρότερη θερμότητα όσο αυξάνει η θερμοκρασία του σε σύγκριση με τον μη επιλεκτικό και κατά συνέπεια έχουμε μείωση των θερμικών απωλειών και του συντελεστή θερμικών απωλειών  $u_L$ . Τυπική τιμή για τον συντελεστή απορρόφησης ενός επιλεκτικού απορροφητή είναι  $\epsilon = 0.1$  ενώ ενός μη επιλεκτικού απορροφητή είναι  $\epsilon = 0.95$ .

Επιπλέον αναφέρεται ότι ο συντελεστής συναγωγής  $h$  μεταξύ εξωτερικής επιφάνειας και περιβάλλοντος είναι  $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Σημαντικό είναι να αναφέρουμε και για το γινόμενο ( $\tau_a$ ) ότι αναφέρεται στην τιμή του γινομένου της διαπερατότητας επί της απορροφητικότητας της επιφάνειας και μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης. Αυτό επηρεάζει βέβαια τους επίπεδους συλλέκτες, όπου καθώς αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης αλλάζει το ( $\tau_a$ ), ενώ στους κυλινδρικούς απορροφητές (όπως στην περίπτωση μας) η γωνία παραμένει η ίδια και το γινόμενο ορίζεται για την επιφάνειά μας στην τιμή 0.8.

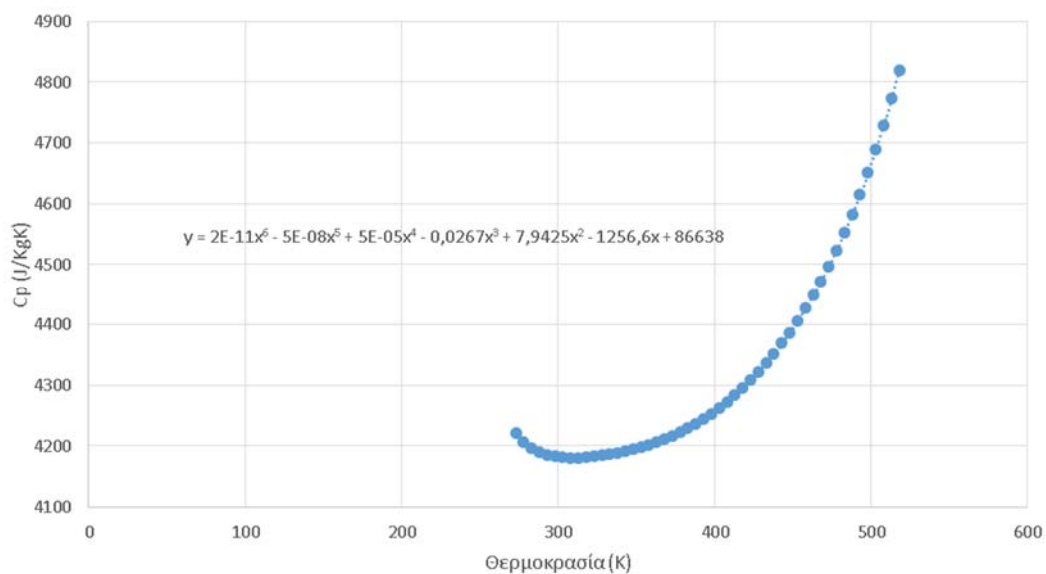
**Γ.5 Ιδιότητες νερού**

Χρήσιμο είναι σε αυτό το σημείο να παραθέσουμε τις ιδιότητες του νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού καθώς σε διάφορα σημεία της εργασίας γίνεται χρήση των βασικών ιδιοτήτων του νερού, δηλαδή της θερμοχωρητικότητας  $C_p$ , της δυναμικής συνεκτικότητας  $\mu$  και της θερμικής αγωγιμότητας  $K$ . Οι τιμές βρέθηκαν από τη βάση δεδομένων του solidworks και είναι οι εξής:

T (K)	$C_p$ (J/kgK)	$\mu$ (Pa·s)	$K$ (W/mK)	T (K)	$C_p$ (J/kgK)	$\mu$ (Pa·s)	$K$ (W/mK)
273,16	4219,9	0,001791	0,56104	398,16	4252,2	0,000222	0,68356
278,16	4205,4	0,001518	0,57054	403,16	4261,5	0,000213	0,6837
283,16	4195,5	0,001306	0,58002	408,16	4271,7	0,000204	0,68361
288,16	4188,8	0,001137	0,58935	413,16	4282,6	0,000197	0,6833
293,16	4184,4	0,001001	0,59843	418,16	4294,4	0,000189	0,68277
298,16	4181,6	0,00089	0,60717	423,16	4307,1	0,000182	0,68204
303,16	4180,1	0,000797	0,61547	428,16	4320,7	0,000176	0,6811
308,16	4179,5	0,000719	0,6233	433,16	4335,4	0,00017	0,67995
313,16	4179,6	0,000653	0,6306	438,16	4351,1	0,000165	0,6786
318,16	4180,4	0,000596	0,63736	443,16	4367,9	0,00016	0,67705
323,16	4181,6	0,000547	0,64356	448,16	4385,8	0,000155	0,67529
328,16	4183,2	0,000504	0,64923	453,16	4405	0,00015	0,67332
333,16	4185,1	0,000466	0,65436	458,16	4425,5	0,000146	0,67114
338,16	4187,5	0,000433	0,65897	463,16	4447,4	0,000142	0,66875
343,16	4190,2	0,000404	0,6631	468,16	4470,9	0,000138	0,66614
348,16	4193,3	0,000378	0,66676	473,16	4495,9	0,000134	0,66331
353,16	4196,9	0,000354	0,66999	478,16	4522,6	0,000131	0,66025
358,16	4200,8	0,000333	0,67282	483,16	4551,3	0,000128	0,65696
363,16	4205,3	0,000314	0,67526	488,16	4581,9	0,000124	0,65343
368,16	4210,2	0,000297	0,67734	493,16	4614,7	0,000122	0,64964
373,16	4215,7	0,000282	0,6791	498,16	4649,9	0,000119	0,6456
378,16	4221,7	0,000268	0,68054	503,16	4687,6	0,000116	0,6413
383,16	4228,3	0,000255	0,68169	508,16	4728,3	0,000113	0,63671
388,16	4235,6	0,000243	0,68257	513,16	4772	0,000111	0,63184
393,16	4243,5	0,000232	0,68319	518,16	4819,2	0,000108	0,62667

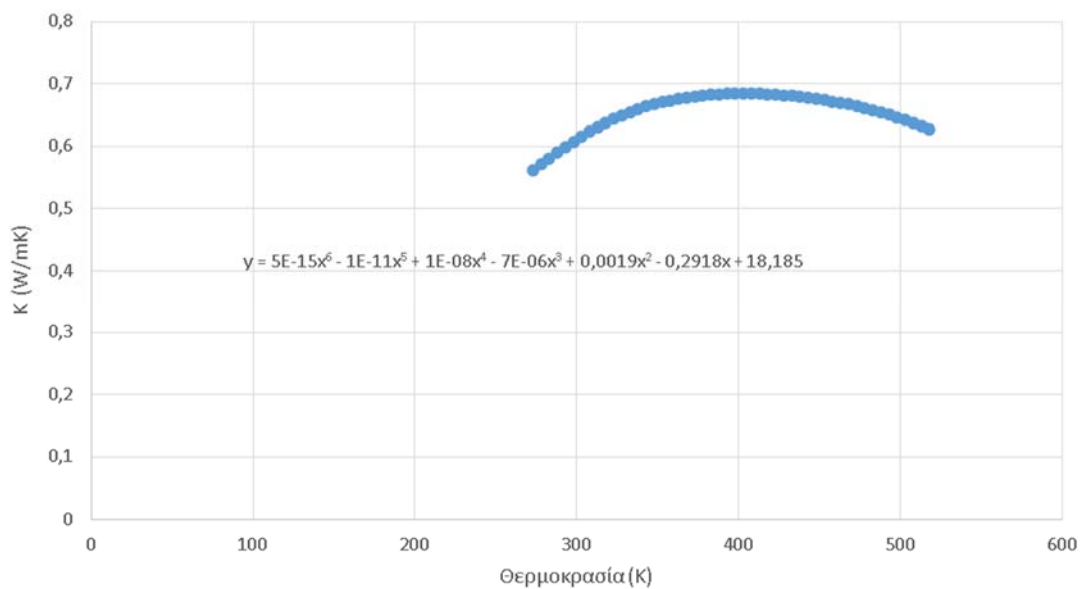
Τα 3 αυτά μεγέθη θα χρειασθεί να υπολογισθούν σε διάφορες φάσεις της προσομοίωσης του συλλέκτη και κυριότερα στον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης  $h$ . Ο γενικότερος τρόπος είναι να κατασκευάσουμε πρόγραμμα στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, στο οποίο θα έχουμε εισάγει τον παραπάνω πίνακα με τις τιμές των 3 ιδιοτήτων για τις διάφορες θερμοκρασίες και θα κάνει γραμμική παρεμβολή για να υπολογίζει τα  $C_p$ ,  $\mu$  και  $K$  για τις διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας του συλλέκτη. Η γραμμική παρεμβολή μπορεί να γίνεται με το να εντοπίζει το πρόγραμμα ανάμεσα σε ποιες 2 τιμές του πίνακα βρίσκεται η θερμοκρασία για την οποία κάθε φορά θέλω να υπολογίζω τις ιδιότητες και στην συνέχεια να υπολογίζει το ημίαθροισμα των δύο αυτών διαδοχικών τιμών. Στην περίπτωση μας, επειδή οι τιμές των 3 ιδιοτήτων δεν διαφέρουν ιδιαίτερα ανά διαδοχικές τιμές θερμοκρασίας, το ημίαθροισμα είναι επαρκές για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων. Ένας δεύτερος τρόπος είναι να υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων που προκύπτουν από τις καμπύλες προσέγγισης (βλ. σχήμα Γ.1, Γ.2, και Γ.3).

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

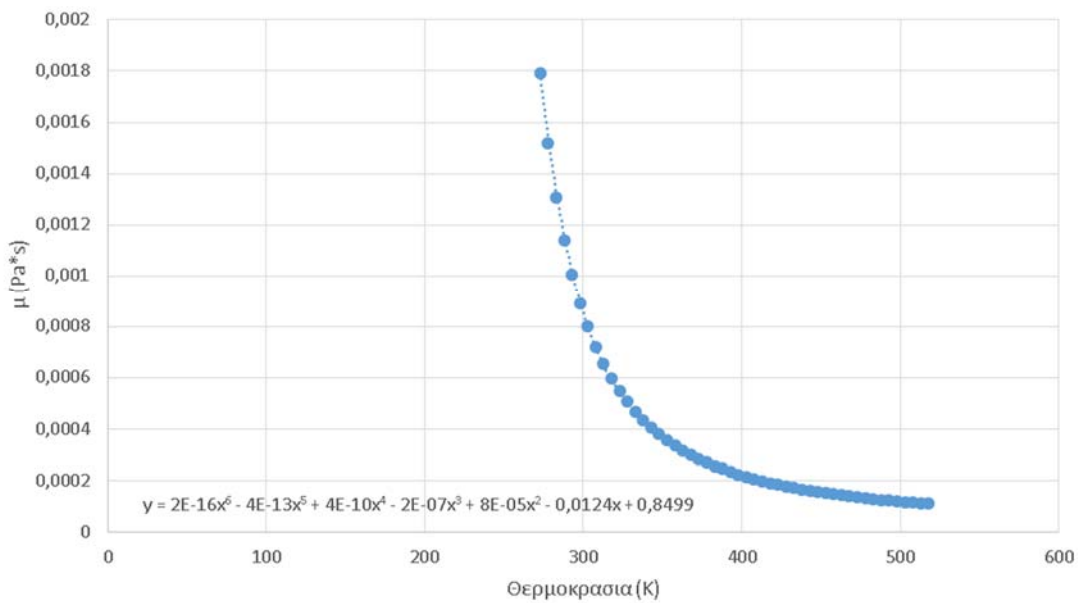


Σχήμα Γ.1: Θερμοχωρητικότητα νερού,  $C_p$ , συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού

Τα παραπάνω δεδομένα με τη μορφή διαγραμμάτων παρατίθενται παρακάτω:



Σχήμα Γ.2: Θερμική αγωγιμότητα νερού,  $\kappa$ , συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού



Σχήμα Γ.3: Δυναμική συνεκτικότητα νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού

### Γ.6 Επιλογή μάζας

Ένα πολύ σημαντικό στάδιο για τη λειτουργία του συλλέκτη είναι η επιλογή μάζας. Η μάζα πρέπει να είναι τέτοια, η οποία να εξασφαλίζει ανάπτυξη τυρβώδους ροής. Απαιτείται η ροή να είναι τυρβώδης, καθώς στη τυρβώδη ροή αναπτύσσεται πολύ καλύτερα η μετάδοση θερμότητας. Για ανάπτυξη τυρβώδους ροής απαιτείται ο αριθμός Reynolds να είναι  $Re > 5000$  ενώ πρακτικά πρέπει να είναι  $Re > 2300$ . Για λόγους ασφαλείας και βεβαιότητας επιλέξαμε να είναι  $Re_{cr} = 5000$ , όπου  $Re_{cr}$  είναι ο Reynolds κατά τον οποίο έχουμε μετάβαση από τη στρωτή στη τυρβώδη ροή. Ο Reynolds δίνεται από τη σχέση  $RE = \frac{4m}{\pi d \mu}$ , όπου  $m$  είναι η διακινούμενη μάζα,  $d$  η υδραυλική διάμετρος, όπου στη περίπτωση μας είναι η γεωμετρική εσωτερική διάμετρος του απορροφητή καθώς έχουμε κυκλική διατομή και  $\mu$  είναι η δυναμική συνεκτικότητα, η τιμή της οποίας υπολογίζεται από γραμμική παρεμβολή στην καμπύλη  $\mu = \mu(T)$ . Έτσι για βεβαιότητα επιλέγεται  $T_{in} = 20^\circ C$  καθώς η δυναμική συνεκτικότητα μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και άρα αυξάνει ο Reynolds. Άρα ο πλέον ασφαλής έλεγχος γίνεται για την ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία εισόδου του νερού, η οποία επιλέγεται στους  $20^\circ C$ . Οπότε για  $T_{in} = 20^\circ C$  και  $d = 0.22 - 2 \cdot 0.003 = 0.214 m$  προκύπτει ότι για  $RE > 5000$  πρέπει να είναι:

$$m > 0.45 \text{ kg/s. (α κριτήριο)}$$

Τελικά επιλέγεται διπλάσια μάζα ίση με  $m = 0,9 \text{ kg/s}$ .

**Γ.7 Διάταξη κατόπτρων**

Αποδεικνύεται ότι για την βέλτιστη οπτική απόδοση του συλλέκτη, τα κάτοπτρα θα πρέπει να ακολουθούν τον εξής κανόνα για την γωνία που σχηματίζουν με την οριζόντιο. Ο κανόνας αυτός είναι:

$$\psi_i = \frac{\varphi_i - \theta_i}{2} \tag{Γ.1}$$

όπου  $\varphi_i$ : η γωνία που σχηματίζει το κέντρο του κατόπτρου με την κατακόρυφη

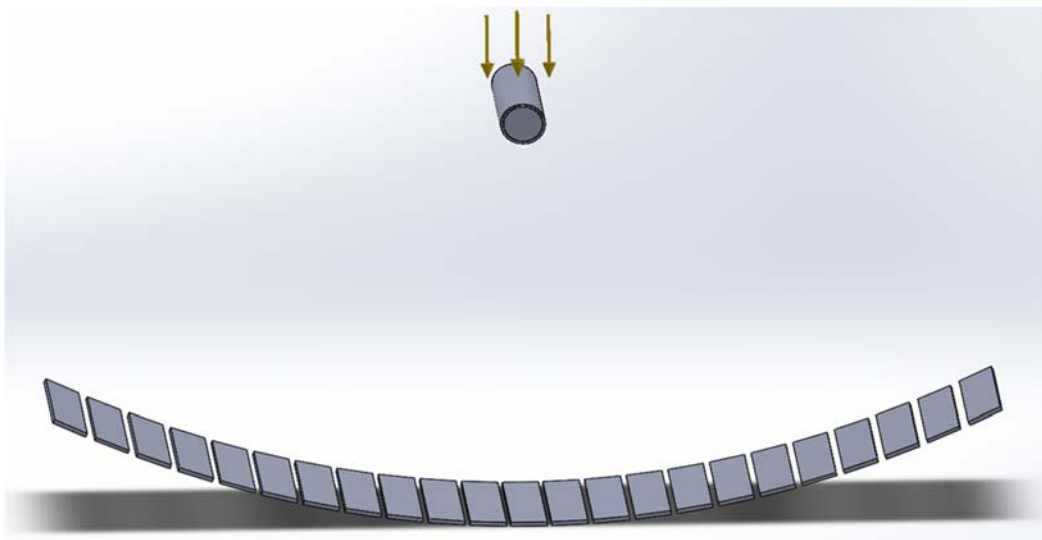
$\theta_i$ : η γωνία που σχηματίζει ο ήλιος με την κατακόρυφη

$\psi_i$ : η γωνία που σχηματίζει το κάτοπτρο με την οριζόντια

Αυτός ο κανόνας είναι και η σχέση που θα πρέπει να ακολουθούν τα κάτοπτρα και προφανώς η σχέση που καθορίζει την κίνηση των κατόπτρων ανά πάσα στιγμή, για να ακολουθούν τον ήλιο. Η γωνία  $\varphi_i$  είναι σταθερή και καθορισμένη για κάθε κάτοπτρο, η οποία προκύπτει από τη συνολική γεωμετρία του συλλέκτη. Για κάθε ένα από τα 22 κάτοπτρα παρατίθεται ο πίνακας με τις τιμές της σταθερής γωνίας  $\varphi_i$ :

Κάτοπτρο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΣΤΑΘΕΡΗ ΓΩΝΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΟΥ $\varphi_i$ (μοίρες)	5,15	10,4	15,6	20,74	25,8	30,75	35,59	40,31	44,88	49,31	53,59

Όπου τα κάτοπτρα αριθμούν από το κέντρο, δηλαδή το κάτοπτρο 1 είναι το πρώτο από το κεντρικό κ.ο.κ. Αναγράφονται οι γωνίες μόνο για τα 11 κάτοπτρα καθώς τα υπόλοιπα 11, λόγω της συμμετρίας έχουν τις ίδιες σταθερές γωνίες. Οπότε για την κατακόρυφη θέση του ήλιου, στην οποία ο συλλέκτης παρουσιάζει βέλτιστο οπτικό βαθμό απόδοσης, τα κάτοπτρα θα πρέπει να έχουν το μισό της σταθερής γωνίας, καθώς  $\theta=0$ , δηλαδή τα κάτοπτρα πρέπει να είναι εφαπτομενικά της παραβολής. Ενδεικτική εικόνα του συλλέκτη είναι η εξής:

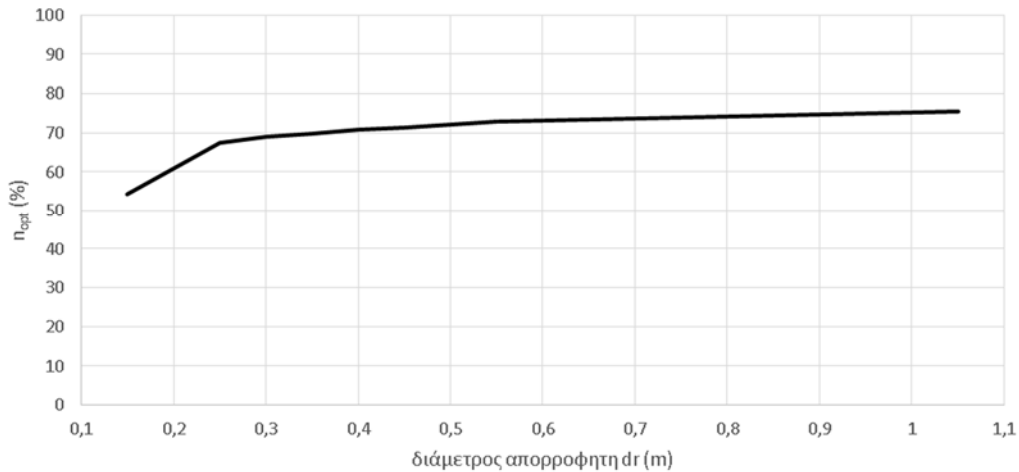


Εικόνα Γ.46: Κύρια όψη του συλλέκτη

**Γ.8 Βελτιστοποίηση διαμέτρου σωλήνα**

Όπως αναφέρθηκε συνήθως η διάμετρος του απορροφητή επιλέγεται περίπου ίση με το πλάτος ενός κατόπτρου. Αυτό βασίζεται στη λογική ότι το κάτοπτρο που βρίσκεται κάτω από το σωλήνα θα σκιάζεται, αλλά παράλληλα θα συγκεντρώνεται άμεσα η ακτινοβολία που θα αντανakλούσε το κάτοπτρο ακριβώς κάτω από το σωλήνα. Από τη μια μεριά, όσο αυξάνουμε τη διάμετρο του σωλήνα, προφανώς συγκεντρώνεται μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και άρα ο συλλέκτης θα έχει μεγαλύτερο οπτικό βαθμό απόδοσης, από την άλλη μεριά αυξάνεται περισσότερο το κόστος υλικού κατασκευής του σωλήνα. Έτσι συνήθίζεται η ο απορροφητής να έχει διάμετρο περίπου ίση με το πλάτος ενός κατόπτρου. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ο οπτικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται όλο και λιγότερο όσο αυξάνουμε τη διάμετρο περισσότερο από το πλάτος του κατόπτρου, ενώ το κόστος κατασκευής αυξάνεται σταθερά. Οπότε ιδανικά θα έπρεπε να μελετήσουμε την καμπύλη του οπτικού βαθμού απόδοσης του συλλέκτη συναρτήσει της διαμέτρου του απορροφητή, καθώς επίσης και την καμπύλη του κόστους του σωλήνα συναρτήσει της διαμέτρου του. Από το σημείο τομής, προκύπτει η βέλτιστη διάμετρος του απορροφητή, η οποία είναι περίπου ίση με το πλάτος του κατόπτρου.

Στην προσομοίωση μας, επιβεβαιώσαμε ότι αυξάνοντας τη διάμετρο του απορροφητή αυξάνεται και ο οπτικός βαθμός απόδοσης, καθώς εκτελέσαμε την προσομοίωση του συλλέκτη αλλάζοντας την διάμετρο απορροφητή διατηρώντας τις υπόλοιπες συνθήκες σταθερές. Έτσι πήραμε την καμπύλη του οπτικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της διαμέτρου του απορροφητή:



Σχήμα Γ.4: Οπτικός βαθμός απόδοσης συλλέκτη,  $n_{opt}$ , συναρτήσει της διαμέτρου του απορροφητή

Πιο συγκεκριμένα οι τιμές του οπτικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει διαφόρων τιμών της διαμέτρου είναι οι εξής:

διάμετρος απορροφητή (m)	0,15	0,2	0,22	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,55	1,05
οπτικός βαθμός απόδοσης $n_{opt}$ (%)	54,11	66,53	66,67	67,51	69,08	69,79	70,69	71,44	72,9	75,59



## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

Επιβεβαιώνεται λοιπόν ότι μέχρι τη διάμετρο που είναι ίση με το πλάτος του κατόπτρου, ο οπτικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με πολύ μεγαλύτερη κλίση, ενώ έπειτα αυξάνεται με πολύ μικρότερη κλίση, ενώ το κόστος του σωλήνα συνεχίζει να αυξάνει με την ίδια κλίση.

Έτσι για την κατασκευή του συλλέκτη μας επιλέχθηκαν οι διαστάσεις οι οποίες αναφέρθηκαν στην ενότητα Γ.2

Η προσομοίωση γίνεται για θερμοκρασία εισόδου νερού 70°C, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C, και επιλέγεται μάζα για την οποία πληρείται η προϋπόθεση τυρβώδους ροής. Για διαμέτρους έως και 0,55 m, μάζα νερού  $M=0,9$  kg/s ικανοποιεί την απαίτηση τυρβώδους ροής, ενώ για διάμετρο 1,05 m με μάζα 0,9 kg/s έχουμε στρωτή ροή. Έτσι για διάμετρο 1,05m επιλέγεται μάζα  $m=1.39$  kg/s για την ανάπτυξη τυρβώδους ροής.

### Γ.9 Απώλειες συλλέκτη-οπτικός βαθμός απόδοσης-ολικός θερμικός βαθμός απόδοσης

Η πορεία της ακτινοβολίας από τον ήλιο μέχρι το νερό είναι η εξής:

Οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν πάνω στα κάτοπτρα, στα οποία και ανακλώνται με σκοπό την εστίασή τους στον απορροφητή. Στη συνέχεια αυξάνεται η θερμοκρασία του απορροφητή, και ένα μέρος της ακτινοβολίας διαφεύγει μέσω του καλύμματος με την μορφή θερμικών απωλειών ακτινοβολίας και συναγωγής ( $Q_{loss}$ ) ενώ η υπόλοιπη θερμότητα μεταφέρεται στο νερό και αυξάνει την θερμοκρασία του. Κατά το πρώτο μέρος, δηλαδή κατά την εστίαση των ακτινών στον απορροφητή, έχουμε τις οπτικές απώλειες, οι οποίες καθορίζονται από τους εξής 3 παράγοντες:

1. Το βαθμό σύλληψης  $\gamma$  (intercept factor)
2. Την ανακλαστικότητα των κατόπτρων  $\rho$  (reflectance mirror factor)
3. Το γινόμενο ( $\tau_a$ ),

όπου ο βαθμός σύλληψης  $\gamma$  ορίζει το πόσο καλά εστιάζουν τα κάτοπτρα τις ακτίνες του ήλιου ενώ ο συντελεστής ανακλαστικότητας  $\rho$  καθορίζεται από την καθαρότητα και την ικανότητα ανάκλασης των κατόπτρων. Επηρεάζεται από τυχόν επικαθήσεις στα κάτοπτρα, φθορές ή άλλους παράγοντες ικανούς να επηρεάσουν την ικανότητα ανάκλασης των ακτινών ηλίου των κατόπτρων. Το γινόμενο ( $\tau_a$ ) αναφέρθηκε και προηγουμένως και είναι το γινόμενο της διαπερατότητας του γυάλινου καλύμματος\* της απορροφητικότητας του απορροφητή, και αφορά αφενός το ποσοστό της ακτινοβολίας που επιτρέπει το γυάλινο κάλυμμα να το διαπεράσει και αφετέρου την ακτινοβολία που δύναται ο απορροφητής να απορροφήσει.

Έτσι ορίζεται ο οπτικός βαθμός απόδοσης  $n_{opt} = \gamma\rho(\tau_a)$ , ο οποίος καθορίζεται το ποσοστό της ακτινοβολίας το οποίο τελικά φθάνει στον απορροφητή.

Στην συνέχεια, ο απορροφητής κατά ένα ποσοστό αποβάλλει θερμότητα μέσω ακτινοβολίας ενώ το υπόλοιπο ποσό γίνεται ωφέλιμο έργο για τη θέρμανση του νερού.

Το δεύτερο αυτό μέρος απωλειών αναφέρεται και ως θερμικές απώλειες του συλλέκτη. Ειδικότερα θα έχουμε ότι από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα έχουμε μόνο απώλειες ακτινοβολίας, καθώς υπάρχει κενό μεταξύ απορροφητή και γυάλινου καλύμματος, ενώ από το γυάλινο κάλυμμα προς το περιβάλλον θα έχουμε τόσο απώλειες ακτινοβολίας όσο και απώλειες συναγωγής.

Για τις απώλειες μεταξύ απορροφητή και γυάλινου καλύμματος θα ισχύει:

$$Q_{r-c} = Q_{\text{radiation}} = \frac{A_{r,\text{out}} \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_r} \cdot \left(\frac{A_{r,\text{out}}}{A_{c,\text{in}}}\right)} \quad (Γ.2)$$

όπου  $\sigma$  η σταθερά Στέφαν-Μπόλτσμαν,  $A_{r,\text{out}}$  το εμβαδόν της εξωτερικής επιφάνειας του απορροφητή,  $A_{c,\text{in}}$  το εμβαδόν της εσωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος,  $T_r$  η μέση θερμοκρασία του απορροφητή,  $T_c$  η μέση θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος.

Ενώ για τις απώλειες από το γυάλινο κάλυμμα προς το περιβάλλον θα ισχύει:

$$Q_c = Q_{\text{convection}} + Q_{\text{radiation}} = A_{c,\text{out}} [h(T_c - T_{\text{amb}}) + \sigma \cdot \varepsilon_c [T_c^4 - T_{\text{amb}}^4]] \quad (Γ.3)$$

όπου  $\sigma$  σταθερά Στέφαν-Μπόλτσμαν,  $T_{\text{amb}}$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $T_c$  η μέση θερμοκρασία γυάλινου καλύμματος και  $A_{c,\text{out}}$  το εμβαδόν της εξωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος.

Επιπλέον ισχύει από διατήρηση ενέργειας ότι:

$$Q_c = Q_{r-c} = Q_{\text{loss}} \quad (Γ.4)$$

Δηλαδή οι ολικές απώλειες είναι ίσες με τις απώλειες του απορροφητή και ίσες με τις απώλειες καλύμματος

Να παρατηρήσουμε εδώ ότι για το γυάλινο κάλυμμα ισχύει  $T_{c,\text{out}} = T_{c,\text{in}} = T_c$  καθώς το γυαλί παρουσιάζει άπειρη (πολύ μεγάλη) αγωγιμότητα.

Τέλος ορίζεται ο συντελεστής θερμικών απωλειών συλλέκτη  $u_L$  ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$u_L = \frac{Q_{\text{loss}}}{A_{r,\text{out}} \cdot (T_r - T_{\text{amb}})} \quad (Γ.5)$$

### Γ.10 Αποτελέσματα προσομοίωσης για κατακόρυφη θέση ήλιου

Εκτελέσαμε την προσομοίωση για την κατακόρυφη θέση του ήλιου υπό τις εξής συνθήκες:

1.  $\varepsilon_c = 0,88$        $\varepsilon_r = 0,1$        $(\tau\alpha) = 0,8$        $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$
2.  $m = 0.9 \text{ kg/s}$
3. ανακλαστικότητα κατόπτρων  $\rho = 100\%$  (reflectance factor)
4. υπολογιστικό πλέγμα 60·60·60
5. θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C
6. πίεση νερού στην έξοδο 1 atm = 1.015 bar
7. άμεση ακτινοβολία ήλιου ανά μονάδα επιφάνειας  $q_{b,\text{solar}} = 1000 \text{ W/m}^2$

Οι μεταβλητές συνθήκες ήταν η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη, και για την οποία πήραμε 17 τιμές στο διάστημα [20-130°C] και έτσι εκτελώντας την προσομοίωση 17 φορές για τις διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου του νερού πήραμε τις εξής τιμές για κάθε είσοδο του νερού, από τις οποίες και κατασκευάσαμε τις καμπύλες του συλλέκτη:

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

1. θερμοκρασία εξόδου νερού (Tout)
2. μέση θερμοκρασία απορροφητή (Tr)
3. μέση θερμοκρασία γυάλινου καλύμματος (Tc)
4. καθαρή θερμική ακτινοβολία απορροφητή (Qin)
5. θερμικές απώλειες συλλέκτη (Qloss)

Έτσι έχοντας τις παραπάνω τιμές για κάθε είσοδο νερού εργαστήκαμε ως εξής για να προκύψουν οι καμπύλες του συλλέκτη:

$$1. \text{ Ωφέλιμη θερμική ισχύς} = Q_u = Q_{in} - Q_{loss} \quad (\Gamma.6)$$

$$2. \text{ Θερμικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη} = \eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_{solar}} \quad (\Gamma.7)$$

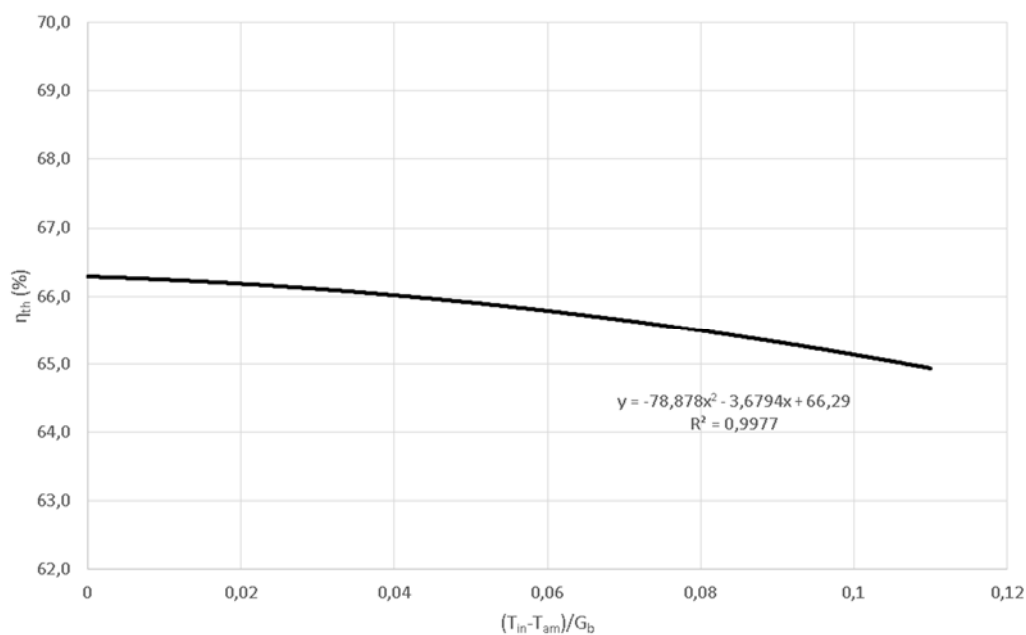
$$3. \text{ Το συντελεστή θερμικών απωλειών } u_L = \frac{Q_{loss}}{A_{r,out} * (T_r - T_{amb})} \quad (\text{βλ. σχέση } \Gamma.5)$$

όπου  $Q_{b,solar}$  ορίζεται η ολική ηλιακή ακτινοβολία της συλλεκτικής επιφάνειας =  $Aa * q_{b,solar} = 15.648 * 1000 = 15648 \text{ W/m}^2\text{K}$

Με αυτόν τον τρόπο πήραμε τα εξής αποτελέσματα:

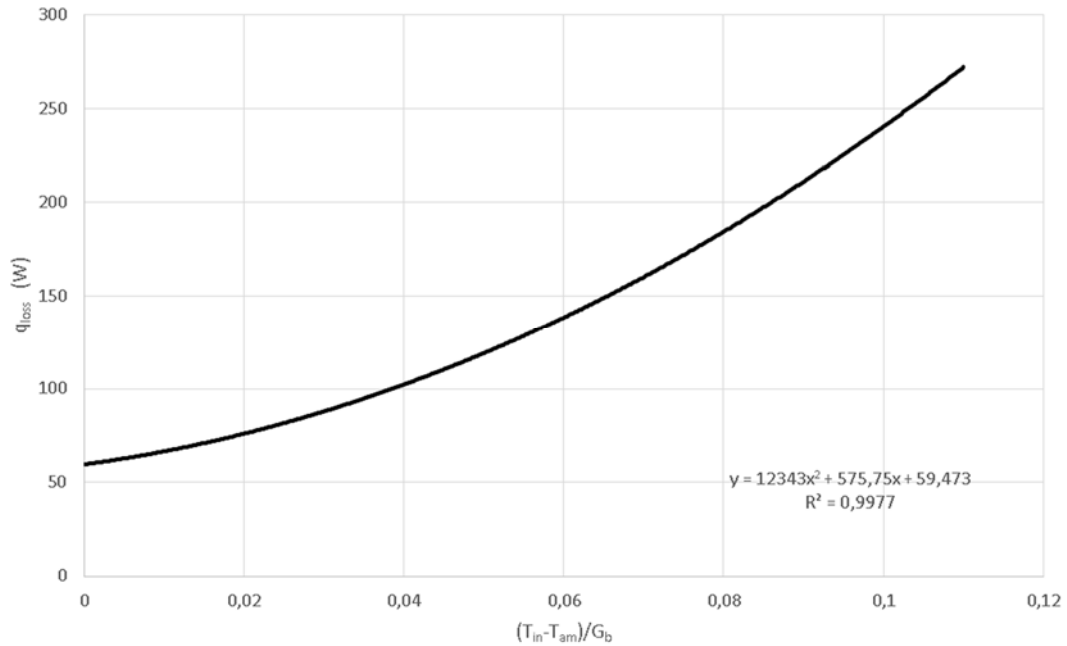
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	ΕΙΣΟΔΟΣ ΝΕΡΟΥ	ΕΞΟΔΟΣ ΝΕΡΟΥ	ΠΑΡΟΧΗ ΝΕΡΟΥ(kg/s)	Qloss (W)	Qin(W)	Qofelimo
20	20	22,8081	0,9	65,3018	10432,5	10367,2
20	25	27,8089	0,9	66,76	10432,5	10365,74
20	30	32,8108	0,9	63,6208	10432,5	10368,88
20	35	37,8101	0,9	65,8781	10432,5	10366,62
20	40	42,8073	0,9	71,9962	10432,5	10360,5
20	45	47,8039	0,9	78,9004	10432,5	10353,6
20	50	52,8001	0,9	86,2774	10432,5	10346,22
20	55	57,7957	0,9	94,1159	10432,5	10338,38
20	60	62,791	0,9	102,412	10432,5	10330,09
20	65	67,7857	0,9	111,201	10432,5	10321,3
20	70	72,7801	0,9	120,415	10432,5	10312,09
20	75	77,774	0,9	130,117	10432,5	10302,38
20	80	82,7675	0,9	140,289	10432,5	10292,21
20	90	92,7529	0,9	162,058	10432,5	10270,44
20	100	102,736	0,9	185,833	10432,5	10246,67
20	110	112,717	0,9	211,605	10432,5	10220,9
20	130	132,673	0,9	269,679	10432,5	10162,82

Είσοδος νερού	$(T_{in}-T_{amb})/G$	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ ( $T_r$ )	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΥΑΛΙΟΥ ( $T_c$ )	UL(W/m <sup>2</sup> K)	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ $\eta_{th}$ (%)
20	0	65,4581	22,0495	0,692819	66,25254
25	0,005	66,4628	22,0983	0,692974	66,24323
30	0,01	64,7082	22,0017	0,686307	66,26329
35	0,015	66,0328	22,0714	0,690208	66,24886
40	0,02	69,5739	22,2591	0,700427	66,20976
45	0,025	73,4359	22,4663	0,712118	66,16564
50	0,03	77,4216	22,6935	0,724649	66,1185
55	0,035	81,5116	22,9403	0,737925	66,06841
60	0,04	85,691	23,1874	0,751885	66,01539
65	0,045	89,9468	23,4565	0,766738	65,95922
70	0,05	94,271	23,7333	0,781929	65,90034
75	0,055	98,6594	24,0303	0,797792	65,83834
80	0,06	103,095	24,3408	0,814245	65,77333
90	0,07	112,095	25,003	0,848673	65,63422
100	0,08	121,24	25,7308	0,885272	65,48228
110	0,09	130,505	26,5078	0,923528	65,31758
130	0,11	149,286	28,252	1,006009	64,94645



Σχήμα Γ.5: Θερμικός βαθμός απόδοσης συλλέκτη,  $\eta_{th}$ , συναρτήσει της μεταβλητής  $(T_{in}-T_{amb})/G_b$

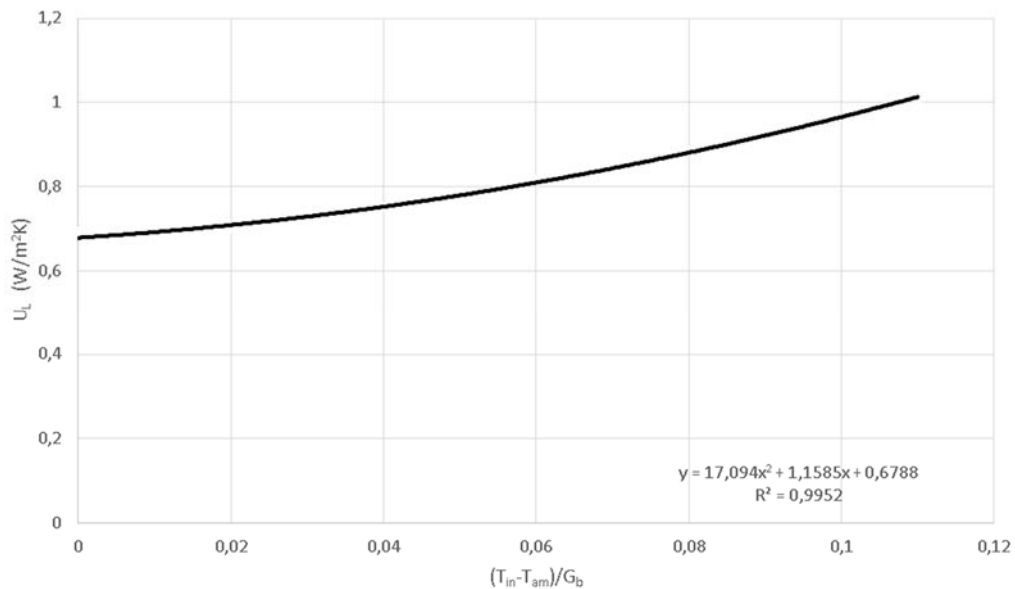
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL



Σχήμα Γ.6: Θερμικές απώλειες συλλέκτη συναρτήσει της μεταβλητής  $(T_{in}-T_{amb})/G_b$

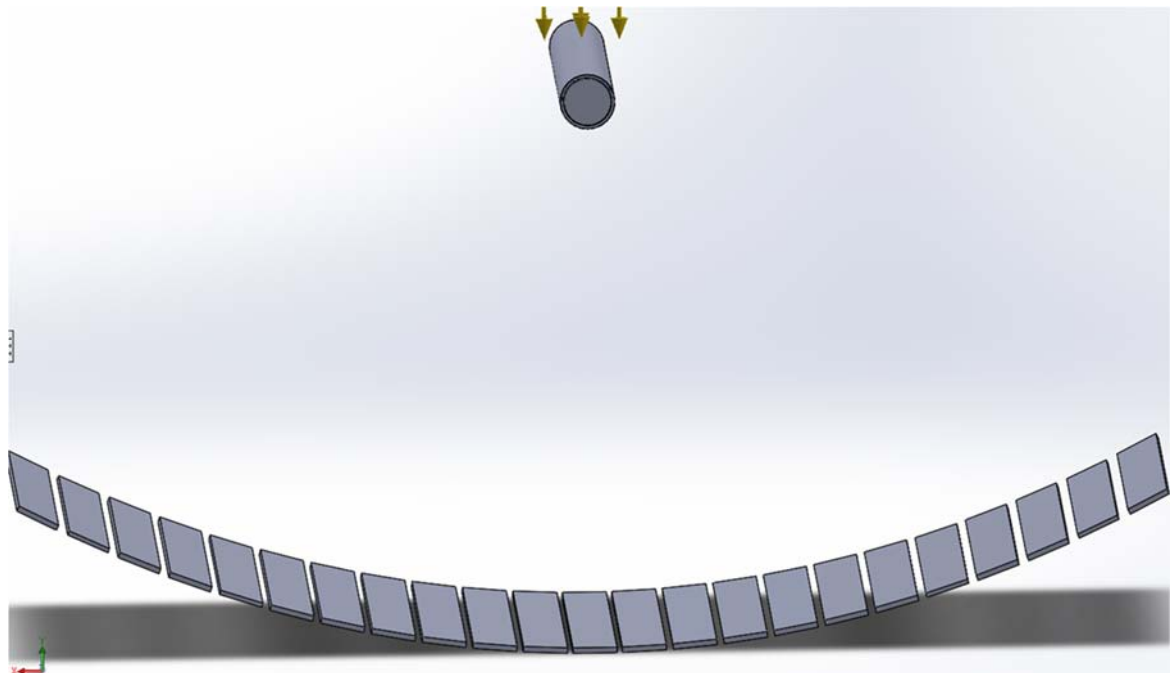
Από την προσομοίωση προέκυψε ότι ο οπτικός βαθμός απόδοσης είναι σταθερός και ανεξάρτητος από την θερμοκρασία του νερού, αλλά εξαρτάται μόνο από το σχεδιασμό του συλλέκτη και από τη θέση του ήλιου και των κατόπτρων. Η τιμή του για την κατακόρυφη θέση του ήλιου είναι:

$$n_{opt} = \frac{Q_{in}}{Q_{b,solar}} = 66.67\%$$

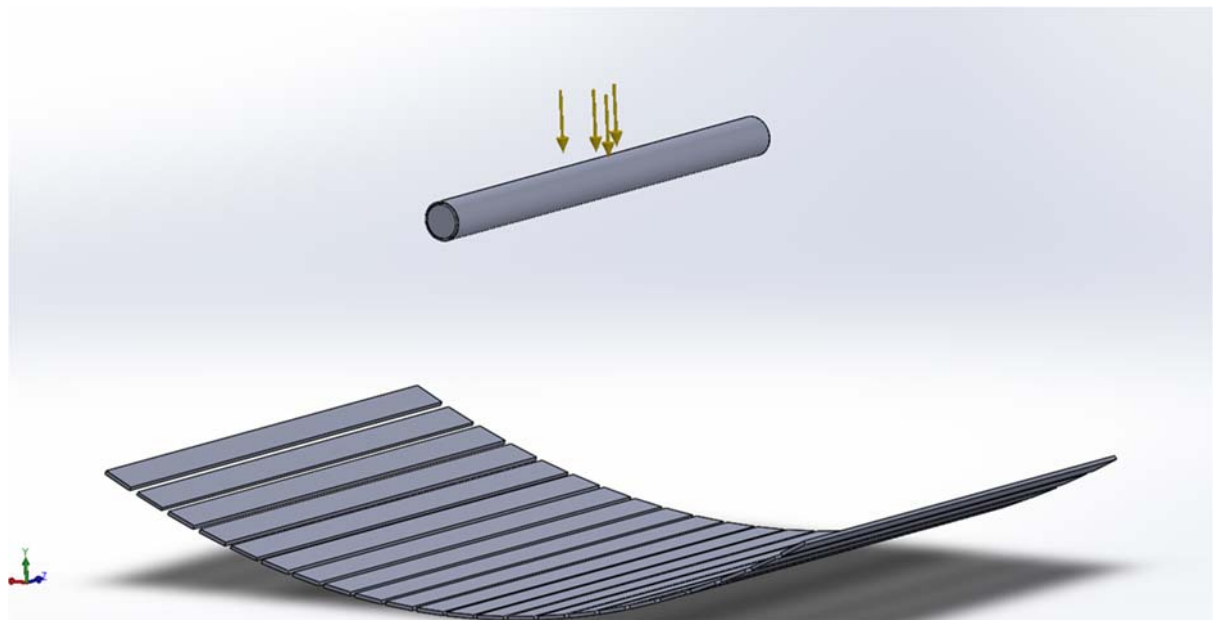


Σχήμα Γ.7: Συντελεστής θερμικών απωλειών,  $U_L$  συναρτήσει της μεταβλητής  $(T_{in}-T_{amb})/G_b$

Εικόνες του συλλέκτη με τα κάτοπτρα τοποθετημένα για κατακόρυφη θέση του ήλιου:



Εικόνα Γ.47:Κύρια όψη συλλέκτη



Εικόνα Γ.4:Πλάγια όψη συλλέκτη

### Γ.11 Κατανομή μεγεθών (θερμοκρασιών, ταχυτήτων, θερμοτήτων)

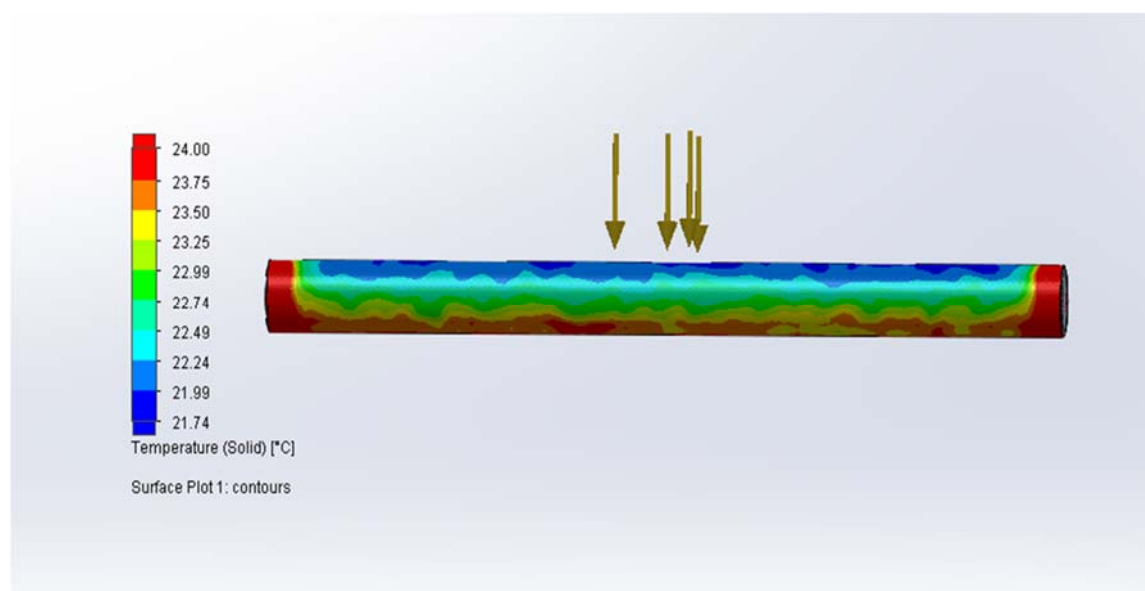
Το σχεδιαστικό πακέτο Solidworks μας δίνει την δυνατότητα απεικόνισης διαφόρων μεγεθών κατά μήκος της επιφάνειας του συλλέκτη. Πιο συγκεκριμένα ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εξής κατανομές:

- 1.κατανομή θερμοκρασίας απορροφητή
- 2.κατανομή θερμοκρασίας γυάλινου καλύμματος
- 3.κατανομή θερμοκρασίας νερού στην έξοδο του σωλήνα
- 4.κατανομή ταχύτητας νερού στην έξοδο
- 5.κατανομή καθαρής θερμικής ακτινοβολίας απορροφητή( $Q_{in}$ )
- 6.κατανομή θερμοκρασίας κατόπτρων

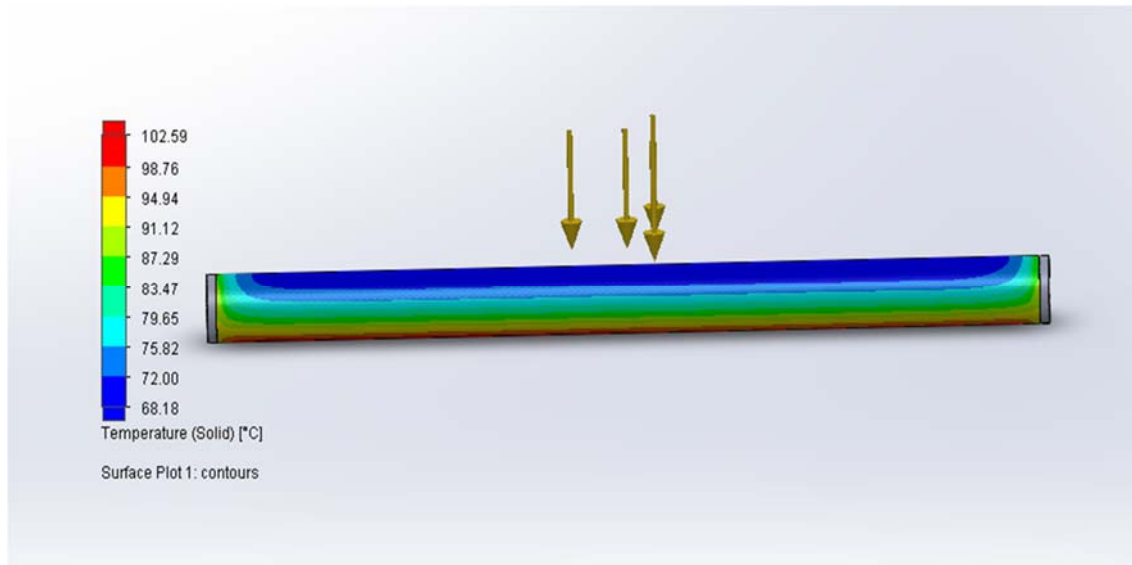
Παρατηρείται ότι η μορφή των κατανομών των παραπάνω μεγεθών είναι όμοια και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας εισόδου του νερού. Έτσι θα παραθέσουμε τις κατανομές των παραπάνω μεγεθών για 2 διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου του νερού (60 και 80°C) ώστε να επιβεβαιώσουμε την παραπάνω παρατήρηση

Οπότε θα είναι για:

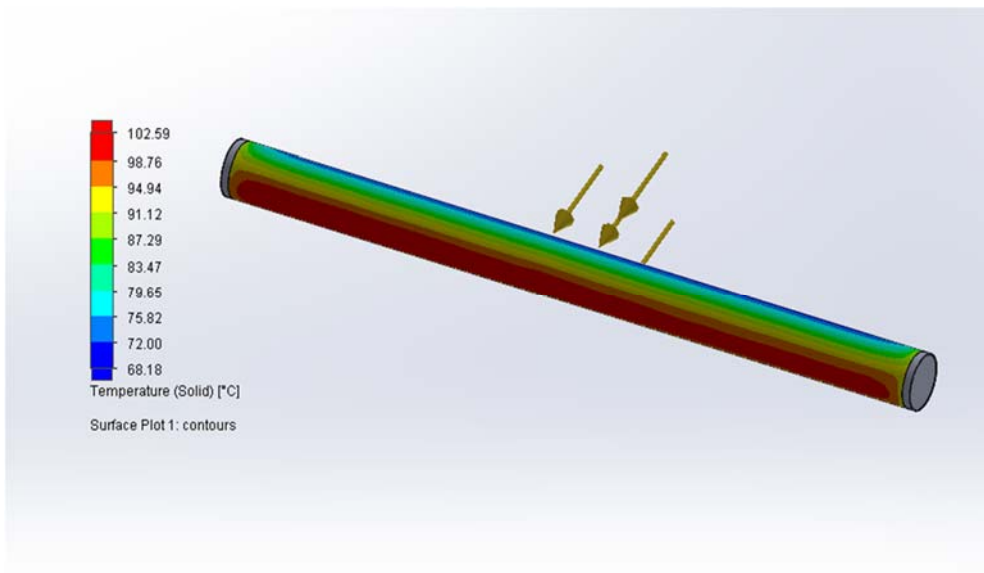
### **$T_{in}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$**



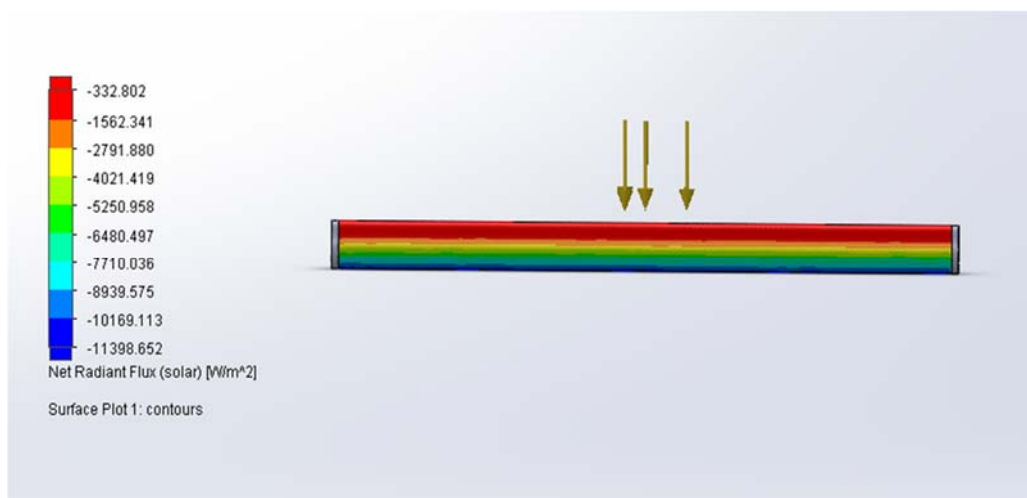
Εικόνα Γ.6:Κατανομή θερμοκρασίας γυάλινου καλύμματος για θερμοκρασία εισόδου νερού 60°C



Εικόνα Γ.7: Κατανομή θερμοκρασίας απορροφητή για θερμοκρασία εισόδου νερού 60°C



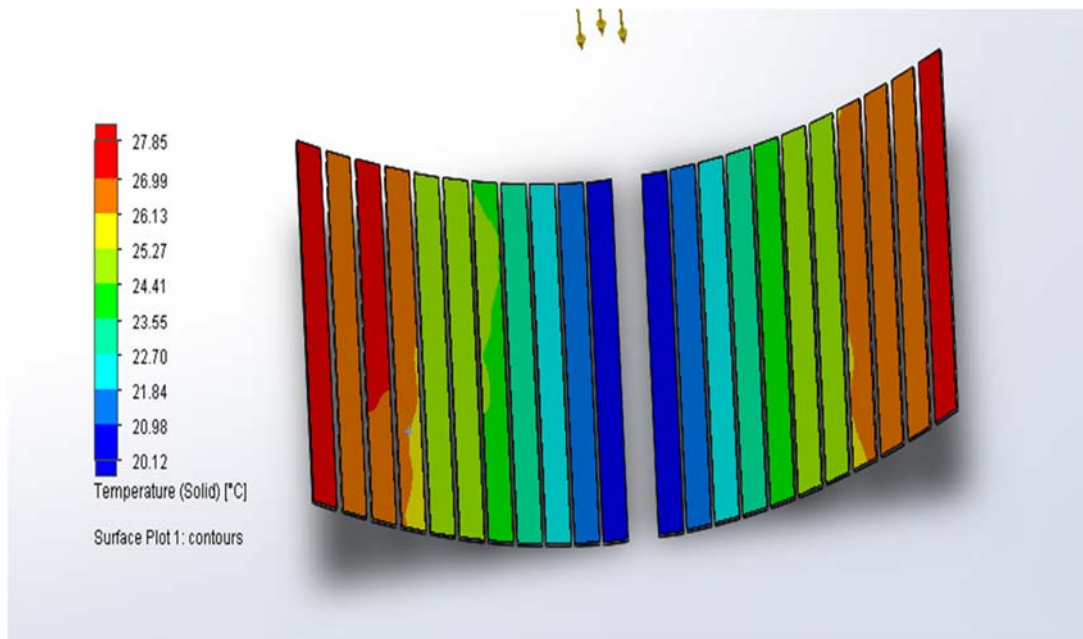
Εικόνα Γ.8: Κατανομή θερμοκρασίας απορροφητή για θερμοκρασία εισόδου νερού 60°C



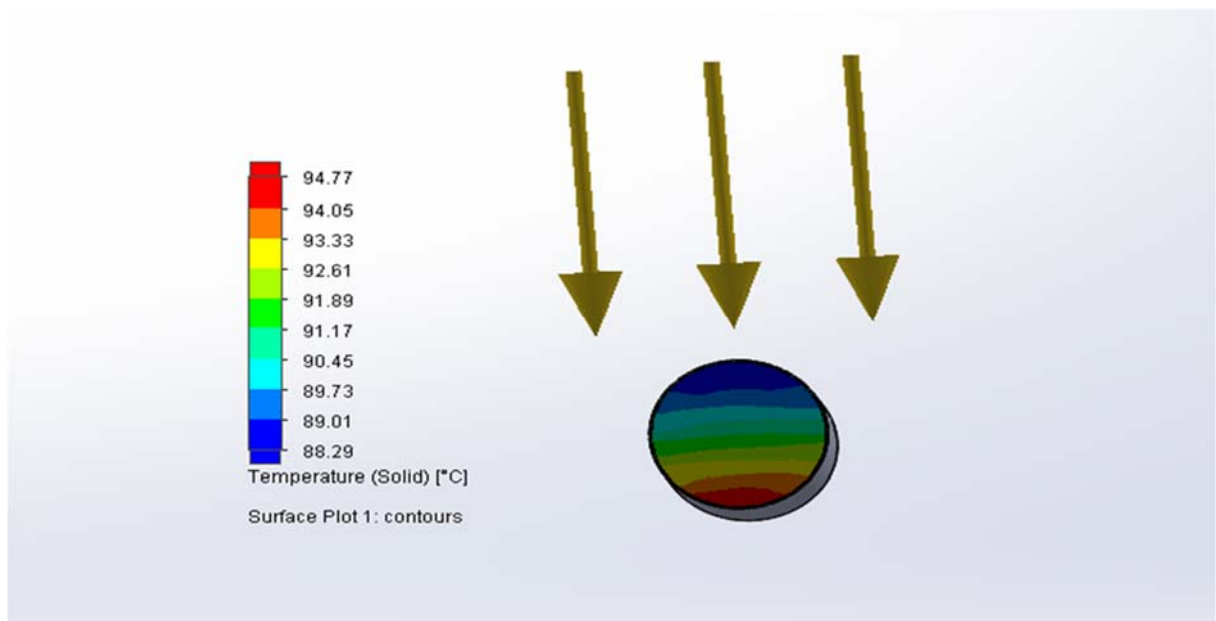
Εικόνα Γ.9: Κατανομή ακτινοβολίας απορροφητή για θερμοκρασία εισόδου νερού 60°C



## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

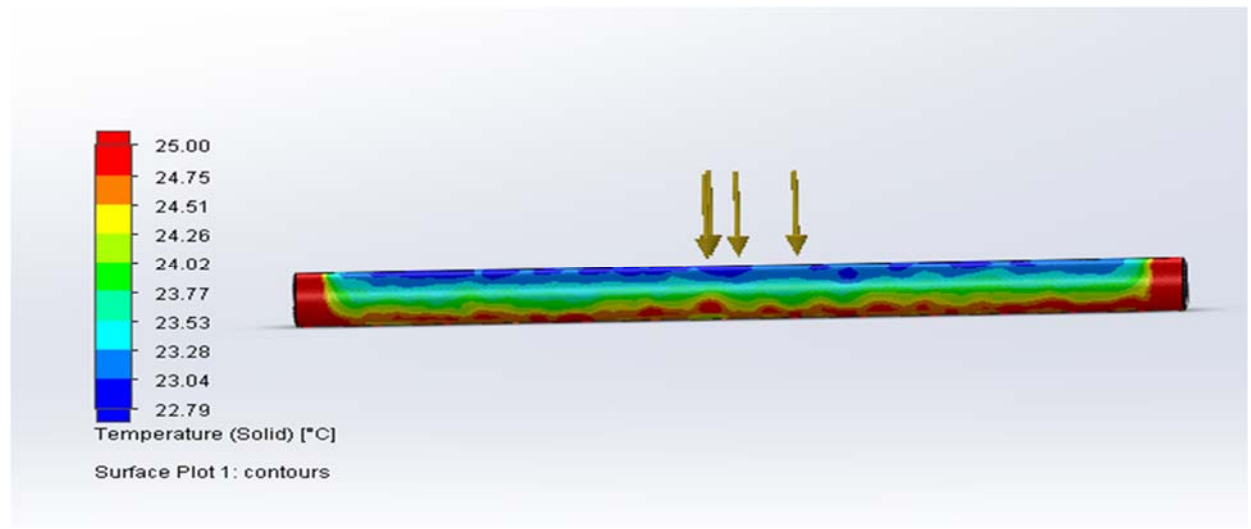


Εικόνα Γ.10: Κατανομή θερμοκρασίας κατόπτρων για θερμοκρασία εισόδου νερού 60°C

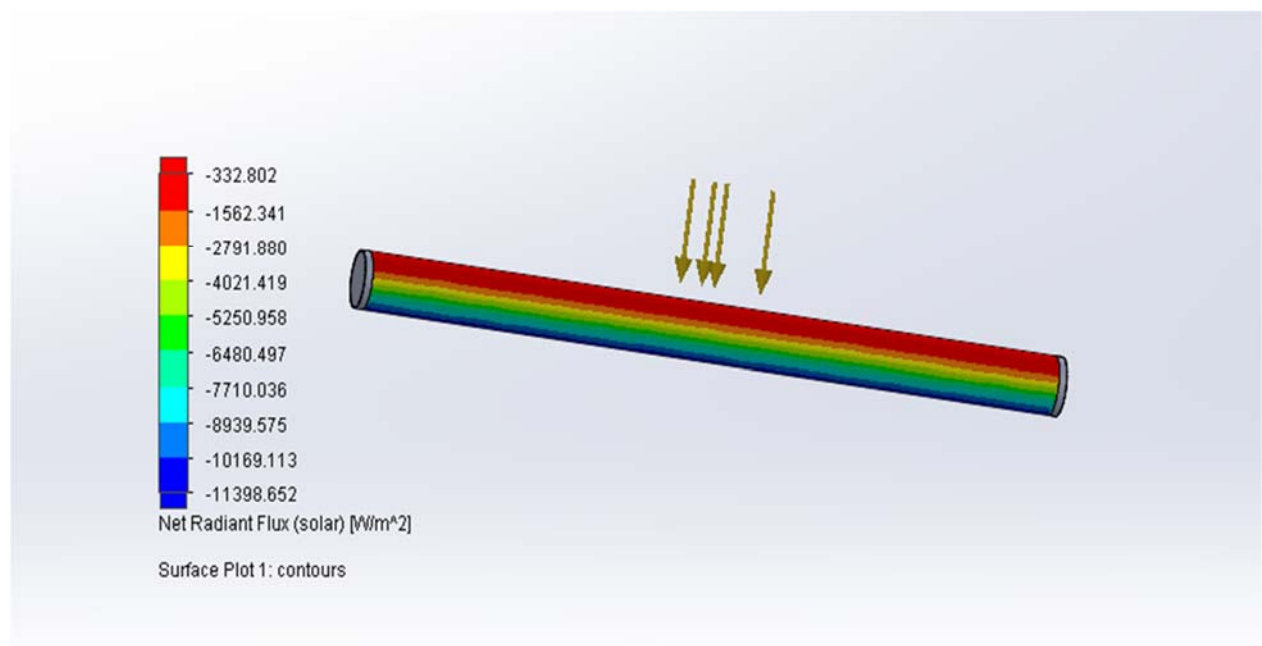


Εικόνα Γ.11: Κατανομή θερμοκρασίας εξόδου νερού για θερμοκρασία εισόδου νερού 60°C

$T_{in}=80^{\circ}\text{C}$

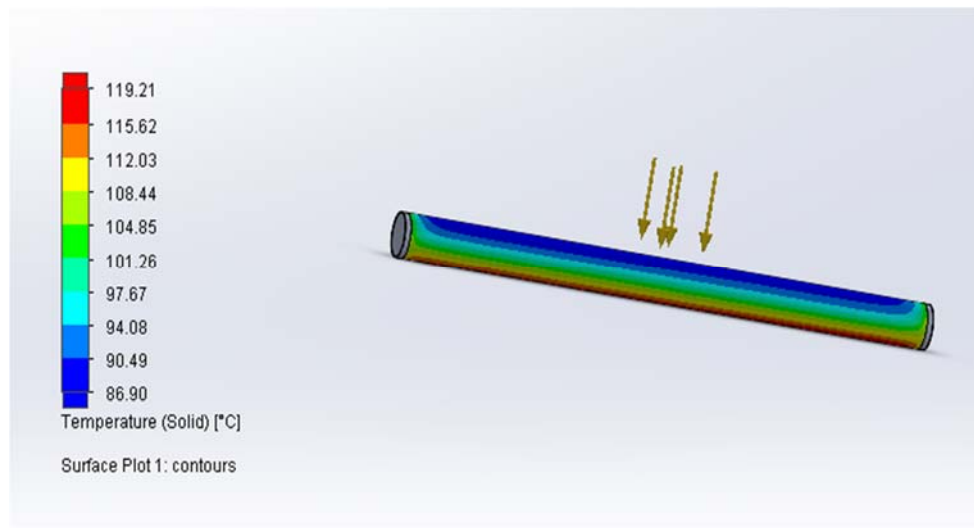


Εικόνα Γ.12: Κατανομή θερμοκρασίας γυάλινου καλύμματος για θερμοκρασία εισόδου νερού  $80^{\circ}\text{C}$

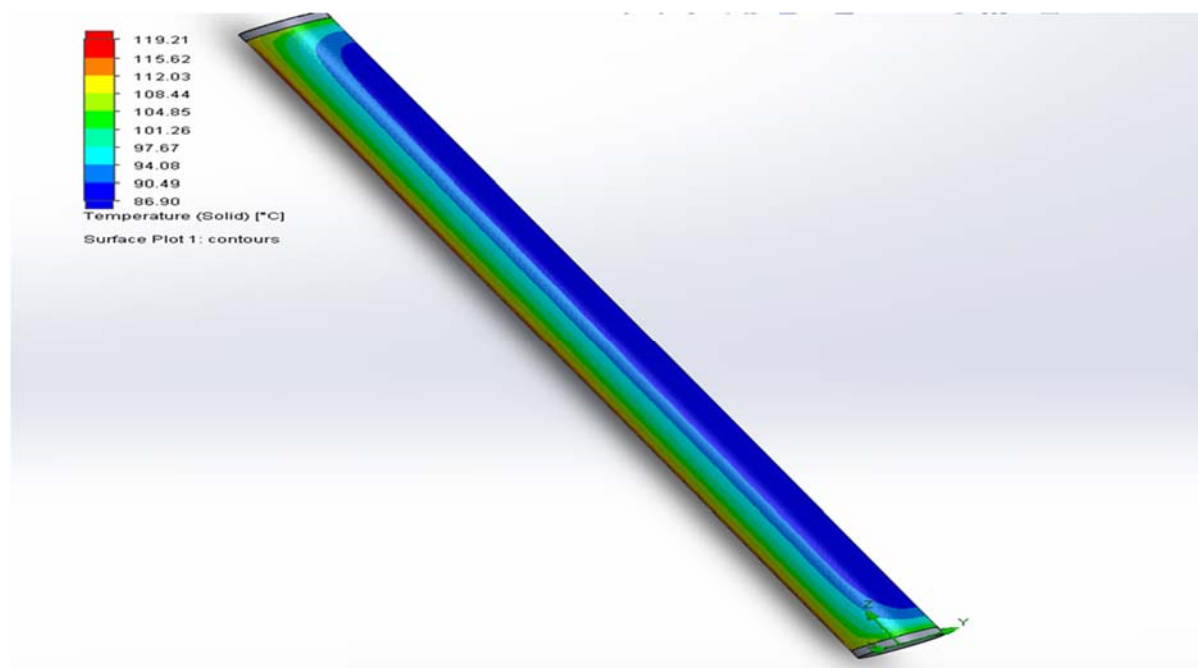


Εικόνα Γ.13: Κατανομή καθαρής ακτινοβολίας απορροφητή για θερμοκρασία εισόδου νερού  $80^{\circ}\text{C}$

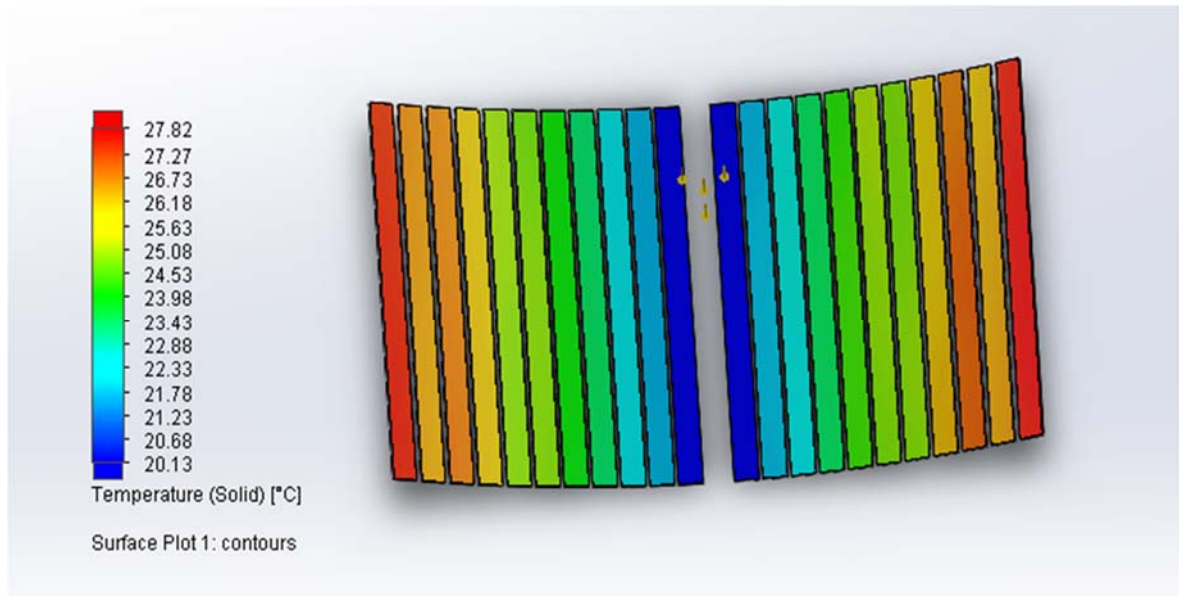
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL



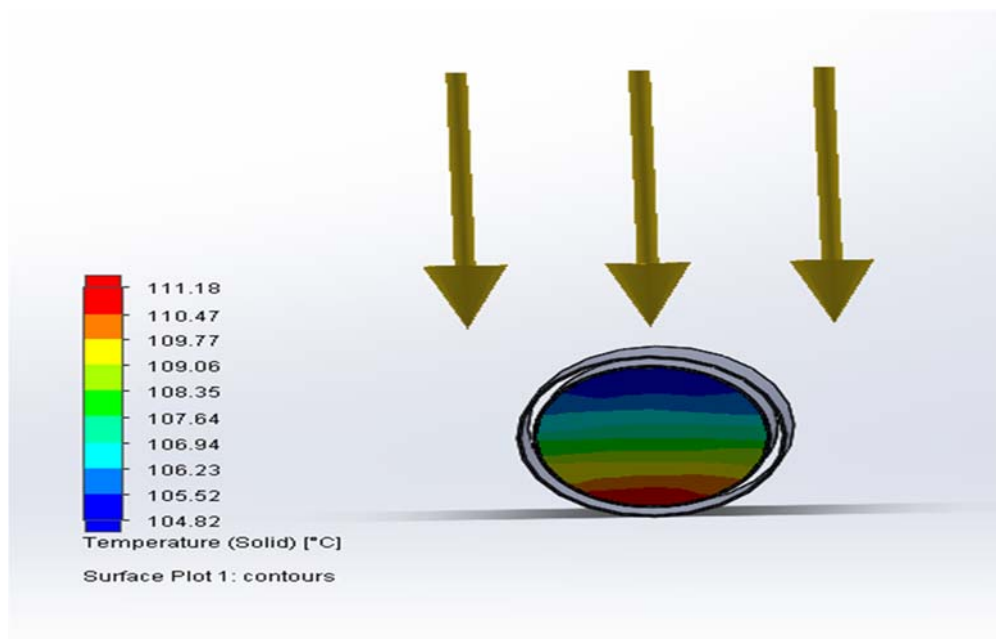
Εικόνα Γ.14: Κατανομή θερμοκρασίας απορροφητή για θερμοκρασία εισόδου νερού 80°C



Εικόνα Γ.15: Κατανομή θερμοκρασίας απορροφητή για θερμοκρασία εισόδου νερού 80°C



Εικόνα Γ.16: Κατανομή θερμοκρασίας κατόπτρων για θερμοκρασία εισόδου νερού 80°C



Εικόνα Γ.17: Κατανομή θερμοκρασίας εξόδου νερού για θερμοκρασία εισόδου νερού 80°C

**Γ.12 Υπολογισμός συντελεστή μετάδοσης h και υπόλοιπων θερμοδυναμικών μεταβλητών**

Ένα χρήσιμο μέγεθος που πρέπει να υπολογίσουμε τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του συλλέκτη h. Υπάρχουν 2 μέθοδοι να υπολογίσουμε τον συγκεκριμένο συντελεστή. Ο πρώτος είναι να υπολογίσουμε τον συντελεστή μέσω του τύπου:

$$h = \frac{m * [Cp(Tf,m)] * (T_{out} - T_{in})}{Ar, in * (Tr - Tf,m)} \quad (\Gamma.8)$$

όπου Tf,m η μέση θερμοκρασία νερού, δηλαδή  $T_{f,m} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$ , Cp ο συντελεστής θερμικής χωρητικότητας του νερού για την μέση θερμοκρασία νερού και Ar,in το εμβαδόν της εσωτερικής επιφάνειας του απορροφητή

Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω του ορισμού του συντελεστή, δηλαδή υπολογίζοντας τους συντελεστές Cr,μ,k για την μέση θερμοκρασία ρευστού για κάθε θερμοκρασία εισόδου ρευστού(από τις ιδιότητες του νερού που υπάρχουν στην ενότητα Γ.5) στη συνέχεια τους αριθμούς Reynolds και prandtl και τέλος τον αριθμό nusselt από τον οποίο προκύπτει ο συντελεστής h. Πιο συγκεκριμένα είναι η διαδικασία είναι:

A. Υπολογίζουμε  $Cp = Cp(Tf,m)$   $\mu = \mu(Tf,m)$   $k = k(Tf,m)$  με γραμμική παρεμβολή από τις καμπύλες που δίνονται στη σελίδα ή πιο απλά από τις εξισώσεις πολυωνύμων προσέγγισης που υπάρχουν στα διαγράμματα (ο τρόπος υπολογισμού αναλύεται στη ενότητα Γ.5)

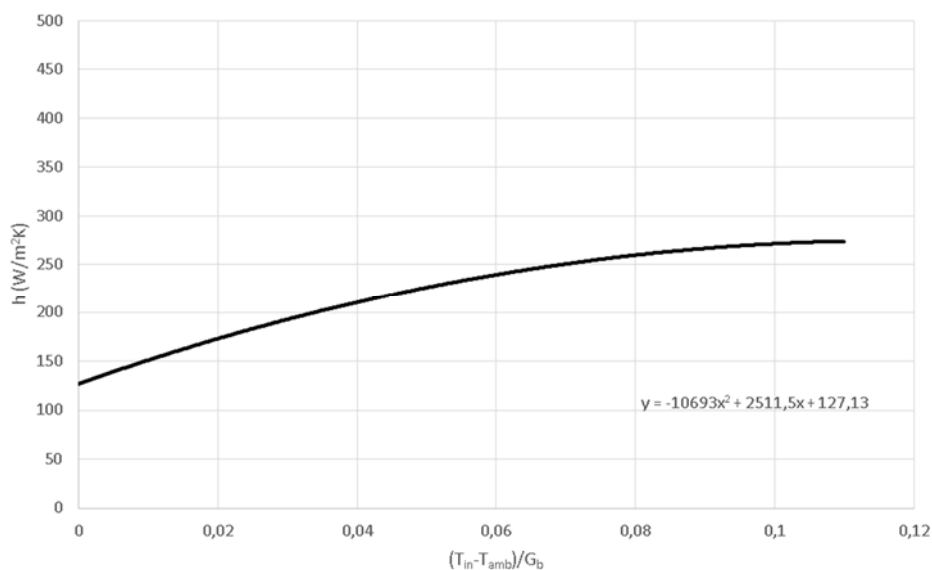
B. Από τις σχέσεις  $Re = \frac{4m}{\pi * dr, in * \mu}$  και  $Pr = \frac{Cp * \mu}{K}$  υπολογίζουμε τους αριθμούς Reynolds και Prandtl

Γ. Από την σχέση για τυρβώδη ροή  $Nu = 0,023 * Re^{0.8} * Pr^{1/3}$  υπολογίζουμε τον αριθμό nusselt

Δ. Και τέλος από την σχέση  $h = \frac{Nu * k}{dr, in}$ , υπολογίζουμε τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας h

Μέσω του πρώτου τρόπου προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

ΕΙΣΟΔΟΣ ΝΕΡΟΥ (°C)	ΕΞΟΔΟΣ ΝΕΡΟΥ (°C)	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ(Tr)/receiver	h(W/m²K)
20	22,8081	21,40405	65,4581	116,6785
25	27,8089	26,40445	66,4628	128,2987
30	32,8108	31,4054	64,7082	154,3712
35	37,8101	36,40505	66,0328	173,4817
40	42,8073	41,40365	69,5739	182,3498
45	47,8039	46,40195	73,4359	189,8878
50	52,8001	51,40005	77,4216	197,135
55	57,7957	56,39785	81,5116	204,1062
60	62,791	61,3955	85,691	210,811
65	67,7857	66,39285	89,9468	217,263
70	72,7801	71,39005	94,271	223,4537
75	77,774	76,387	98,6594	229,3431
80	82,7675	81,38375	103,095	235,0385
90	92,7529	91,37645	112,095	245,7791
100	102,736	101,368	121,24	255,6561
110	112,717	111,3585	130,505	264,676
130	132,673	131,3365	149,286	280,7224

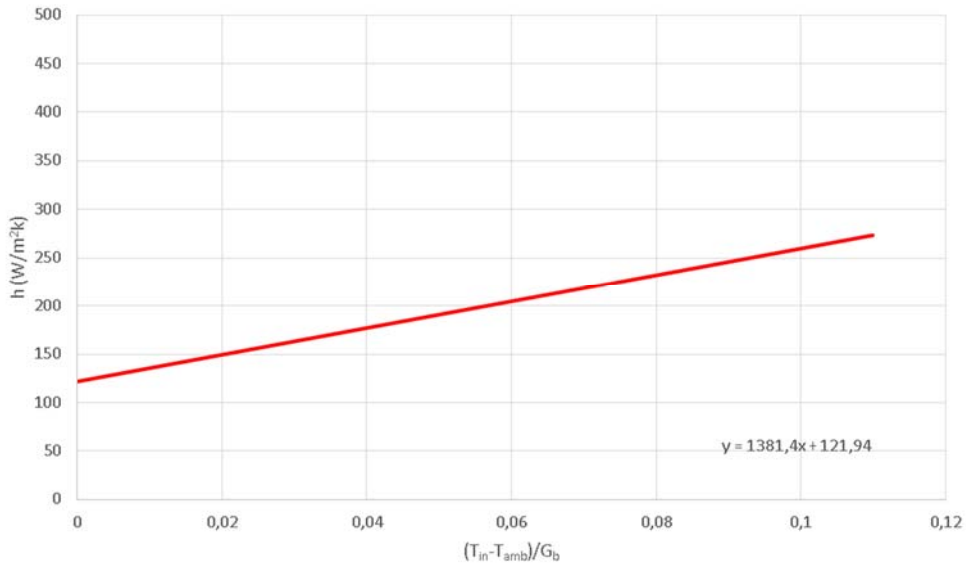


Σχήμα Γ.8: Συντελεστής μετάδοσης,  $h$ , συναρτήσει της μεταβλητής  $(T_{in} - T_{amb})/G_D$

Μέσω του δεύτερου τρόπου προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

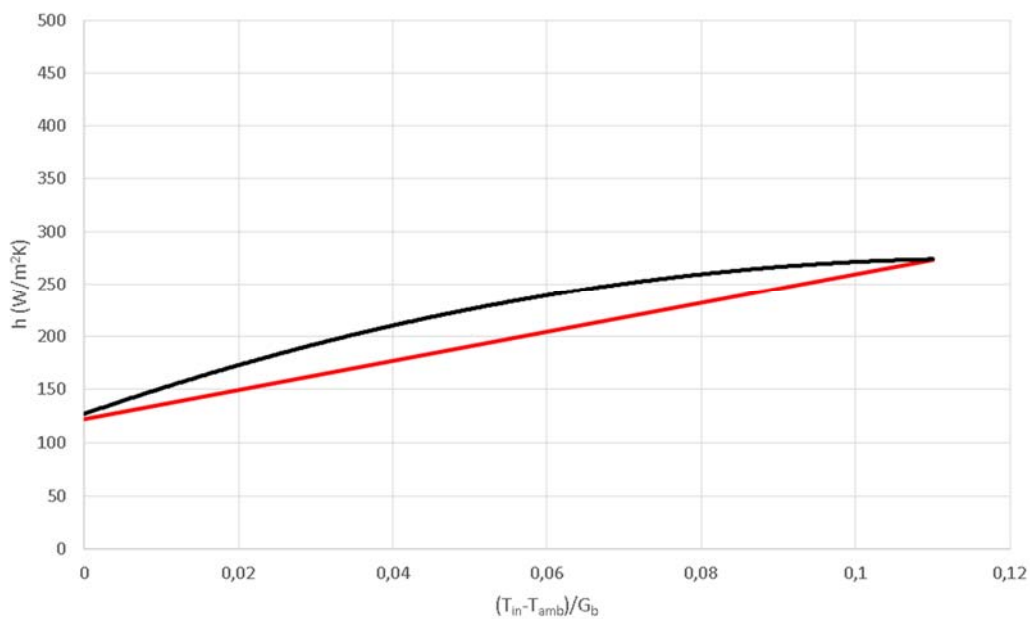
ΕΙΣΟΔΟΣ ΝΕΡΟΥ (C)	ΕΞΟΔΟΣ ΝΕΡΟΥ (C)	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (K)	Cp(J/kgK)	$\mu$ (Pa*s)	K(W/mK)	REYNOLDS	PRANDTL	NUSSELT	h(W/m <sup>2</sup> K)
20	22,8081	294,5541	4184,4	0,001001	0,59843	5347,26	7,002086	42,26446	118,18
25	27,8089	299,5545	4181,6	0,00089	0,60717	6017,244	6,128771	44,43281	126,06
30	32,8108	304,5554	4180,1	0,000797	0,61547	6717,026	5,414291	46,55682	133,89
35	37,8101	309,5551	4179,5	0,000719	0,6233	7445,73	4,82235	48,64146	141,67
40	42,8073	314,5537	4179,6	0,000653	0,6306	8202,107	4,327072	50,69124	149,37
45	47,8039	319,552	4180,4	0,000596	0,63736	8985,227	3,908795	52,71069	156,98
50	52,8001	324,5501	4181,6	0,000547	0,64356	9793,953	3,552502	54,70231	164,50
55	57,7957	329,5479	4183,2	0,000504	0,64923	10627,03	3,246663	56,66779	171,91
60	62,791	334,5455	4185,1	0,000466	0,65436	11483,23	2,982386	58,60937	179,21
65	67,7857	339,5429	4187,5	0,000433	0,65897	12361,48	2,752692	60,52991	186,38
70	72,7801	344,5401	4190,2	0,000404	0,6631	13260,23	2,551782	62,42854	193,44
75	77,774	349,537	4193,3	0,000378	0,66676	14178,37	2,375193	64,30754	200,36
80	82,7675	354,5338	4196,9	0,000354	0,66999	15114,02	2,219316	66,16651	207,15
90	92,7529	364,5265	4205,3	0,000314	0,67526	17033,8	1,957732	69,82777	220,33
100	102,736	374,518	4215,7	0,000282	0,6791	19008,01	1,748792	73,41585	232,97
110	112,717	384,5085	4228,3	0,000255	0,68169	21026,21	1,579635	76,9347	245,07
130	132,673	404,4865	4261,5	0,000213	0,6837	25153,82	1,32688	83,78282	267,67

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL



Σχήμα Γ.9: Συντελεστής μετάδοσης,  $h$ , συναρτήσει της μεταβλητής  $(T_{in}-T_{amb})/G_b$

### Σύγκριση των $h$



Σχήμα Γ.40: Σύγκριση των δύο μεθόδων υπολογισμού του συντελεστή μετάδοσης,  $h$ , συναρτήσει της μεταβλητής  $(T_{in}-T_{amb})/G_b$

### Γ.13 Συντελεστές γωνίας μεταβολής οπτικού βαθμού απόδοσης

Η παραπάνω ανάλυση και τα αποτελέσματα προκύπτουν για την κατακόρυφη θέση του ήλιου. Καθώς μετακινείται η γη γύρω από τον άξονά της και γύρω από τον ήλιο, η γωνία μεταξύ των ακτινών του ήλιου και της επιφάνειας του συλλέκτη μεταβάλλεται. Κατά τον σχεδιασμό θεωρήσαμε την κατακόρυφη θέση του ήλιου, την κατεύθυνση  $\gamma$ . Οπότε για την ανάλυση της οπτικής συμπεριφοράς του συλλέκτη για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, αρκεί να

προσδιορίσουμε την συμπεριφορά του συλλέκτη για μεταβολή της γωνίας του ήλιου κατά την κατεύθυνση z και x. Οπότε αυτό που κάναμε είναι να πάρουμε διάφορες γωνίες στο διάστημα [0-90] κατά τον άξονα z και κατά τον άξονα x και να προσδιορίσουμε την μεταβολή του οπτικού βαθμού απόδοσης. Προκύπτει ότι κατά την αλλαγή της γωνίας του ήλιου με την επιφάνεια του συλλέκτη, ο βέλτιστος οπτικός βαθμός απόδοσης προκύπτει για την κατακόρυφη θέση του ήλιου και επιπλέον ότι κατά την αλλαγή της κατεύθυνσης των ακτινών του ήλιου, μεταβάλλεται μόνο ο οπτικός βαθμός απόδοσης ενώ ο συντελεστής θερμικών απωλειών μεταβάλλεται αμελητέα. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι μπορούμε να ορίσουμε 2 συντελεστές γωνίας μεταβολής του οπτικού βαθμού απόδοσης. Ο πρώτος θα αφορά μεταβολές της γωνίας κατά τον z άξονα ενώ ο δεύτερος θα αναφέρεται σε μεταβολές της γωνίας κατά τον x άξονα.

#### Μεταβολές γωνίας κατά τον z άξονα:

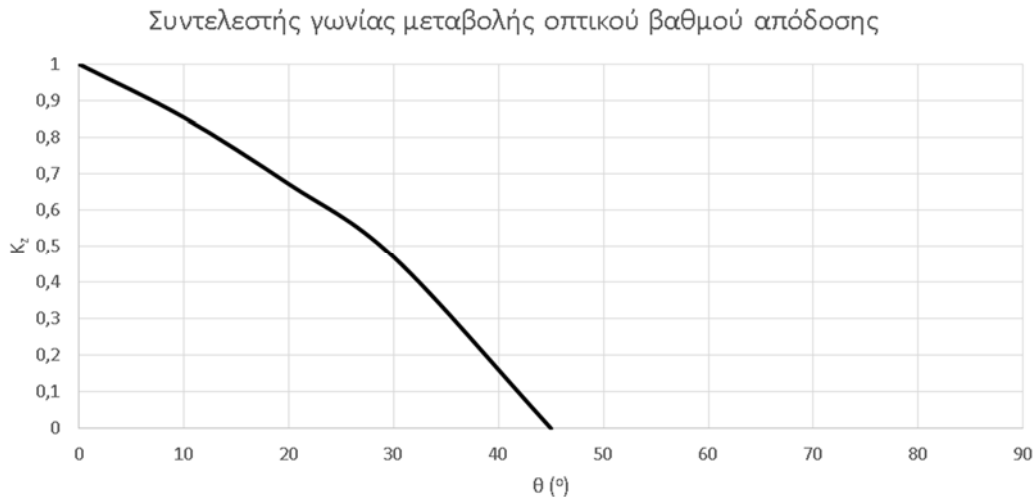
Όταν μεταβάλλεται η γωνία των ακτινών του ήλιου κατά τον z άξονα(δηλαδή κατά την μια κατεύθυνση) δεν χρειάζεται να περιστρέψουμε τα κάτοπτρα καθώς τα κάτοπτρα περιστρέφονται μόνο γύρω από τον γ άξονα. Οπότε για τον προσδιορισμό του οπτικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κατά τον z άξονα, αρκεί να εκτελέσουμε την προσομοίωση αλλάζοντας στο solidworks την τιμή της κατεύθυνσης κατά z. Εύκολα γίνεται κατανοητό ότι οι συντελεστές θα είναι: κατά την γ κατεύθυνση θα είναι  $Y = -\cos(\theta_z)$  και  $Z = \sin(\theta_z)$ , όπου  $\theta_z$  είναι η γωνία των ακτινών με τον z άξονα. Επιλέξαμε τις γωνίες  $\theta_z = [0, 10, 20, 30, 45, 75, 90]$  και από την προσομοίωση προέκυψε:

ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΤΑ Z (θ)	$Y = -\cos(\theta)$	$Z = \sin(\theta)$	$Q_{in}$ (W)	$n_{opt}$ (%)	$K_z(\theta)$
0	-1	0	10431,5	66,67	1
10	-0,985	0,174	8903,33	56,9	0,8535
20	-0,94	0,342	7006,55	44,78	0,6716
30	-0,866	0,5	4891,79	31,26	0,4689
45	-0,707	0,707	0	0	0
75	-0,259	0,966	0	0	0
90	0	1	0	0	0

$$\text{Όπου} \quad K_z(\theta) = \frac{n_{opt}(\theta_z)}{n_{opt} \text{ για κατακόρυθη θέση ήλιου}} \quad (Γ.9)$$

είναι ο συντελεστής γωνίας κατά την z διεύθυνση.





Σχήμα Γ.51: Συντελεστής γωνίας,  $K_z$ , συναρτήσει της γωνίας,  $\theta$ , του ήλιου κατά τον z-άξονα

Βασικό συμπέρασμα είναι ότι επειδή όταν μεταβάλλεται η γωνία των ακτινών ήλιου κατά τον z άξονα, επειδή δεν έχουμε την δυνατότητα να στρέψουμε τα κάτοπτρα, ο οπτικός βαθμός απόδοσης μεταβάλλεται ραγδαία, ενώ ήδη στις 45° έχει μηδενιστεί πρακτικά πλέον (η προσομοίωση έδωσε μια ελάχιστη απόδοση της τάξης του 7%, αλλά η απόδοσή του στο διάγραμμα δεν έχει κάποιο νόημα).

#### Μεταβολές γωνίας κατά τον x άξονα:

Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να στρέψουμε τα κάτοπτρα γύρω από τον άξονά τους κατά γωνία σύμφωνα με την σχέση:

$$\psi_i = \frac{\varphi_i - \theta_{x,i}}{2}$$

Όπου  $\varphi_i$ : η γωνία που σχηματίζει το κέντρο του κατόπτρου με την κατακόρυφη

$\psi_i$ : η γωνία που σχηματίζει το κάτοπτρο με την οριζόντια

$\theta_x$ : η γωνία που σχηματίζει ο ήλιος με την κατακόρυφη

Άρα για να προσδιορίσουμε τον συντελεστή γωνίας μεταβολής οπτικού βαθμού απόδοσης χρειάζεται η εξής διαδικασία:

1. επιλέγουμε κάποιες γωνίες  $\theta_x$  στο διάστημα [0-90] και συγκεκριμένα [0 15 30 40 45 50 60 70].
2. καθορίζουμε την  $\psi_i$  για κάθε γωνία  $\theta_x$  και ανάλογα στρέφουμε τα κάτοπτρα
3. εκτελούμε την προσομοίωση και από τα αποτελέσματα υπολογίζουμε τον οπτικό βαθμό απόδοσης για κάθε γωνία  $\theta_x$ .
4. από τις τιμές του οπτικού βαθμού απόδοσης προκύπτει η καμπύλη του συντελεστή γωνίας μεταβολής οπτικού βαθμού απόδοσης  $K_x$

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες με την γωνία του κάθε κατόπτρου για κάθε γωνία  $\theta_x$ .

## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

κάτοπτρο	ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=0$ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΘΕΣΗ		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=15$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=30$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=40$	
	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ
1	2,575	2,575	10,075	-4,925	17,575	-12,425	22,575	-17,425
2	5,2	5,2	12,7	-2,3	20,2	-9,8	25,2	-14,8
3	7,8	7,8	15,3	0,3	22,8	-7,2	27,8	-12,2
4	10,37	10,37	17,87	2,87	25,37	-4,63	30,37	-9,63
5	12,9	12,9	20,4	5,4	27,9	-2,1	32,9	-7,1
6	15,375	15,375	22,875	7,875	30,375	0,375	35,375	-4,625
7	17,795	17,795	25,295	10,295	32,795	2,795	37,795	-2,205
8	20,155	20,155	27,655	12,655	35,155	5,155	40,155	0,155
9	22,44	22,44	29,94	14,94	37,44	7,44	42,44	2,44
10	24,655	24,655	32,155	17,155	39,655	9,655	44,655	4,655
11	26,795	26,795	34,295	19,295	41,795	11,795	46,795	6,795

κάτοπτρο	ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=45$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=50$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=60$		ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ $\theta=70$	
	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ	ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ
1	25,275	-19,925	27,575	-22,425	32,575	-27,425	37,575	-32,425
2	27,7	-17,3	30,2	-19,8	35,2	-24,8	40,2	-29,8
3	30,3	-14,7	32,8	-17,2	37,8	-22,2	42,8	-27,2
4	32,87	-12,13	35,37	-14,63	40,37	-19,63	45,37	-24,63
5	35,4	-9,6	37,9	-12,1	42,9	-17,1	47,9	-22,1
6	37,875	-7,125	40,375	-9,625	45,375	-14,625	50,375	-19,625
7	40,295	-4,705	42,795	-7,205	47,795	-12,205	52,795	-17,205
8	42,655	-2,345	45,155	-4,845	50,155	-9,845	55,155	-14,845
9	44,94	-0,06	47,44	-2,56	52,44	-7,56	57,44	-12,56
10	47,155	2,155	49,655	-0,345	54,655	-5,345	59,655	-10,345
11	49,295	4,295	51,795	1,795	56,795	-3,205	61,795	-8,205

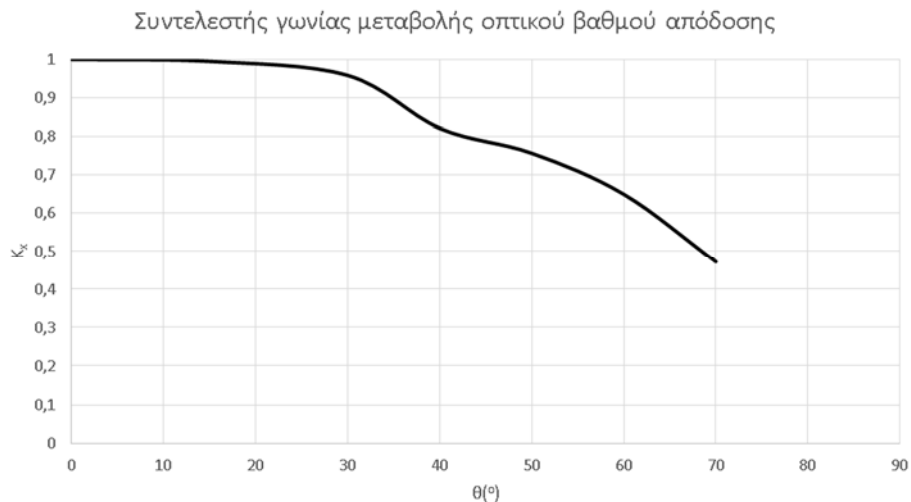
Κατά την προσομοίωση, έχοντας αλλάξει τις γωνίες των κατόπτρων, θα πρέπει να αλλάξουμε και την κατεύθυνση των ακτινών του ήλιου, όπως και προηγουμένως μέσω αλλαγής των συντελεστών και συγκεκριμένα: κατά την  $\gamma$  κατεύθυνση θα είναι  $\gamma = -\cos(\theta z)$  και  $x = \sin(\theta x)$ , όπου  $\theta x$  είναι η γωνία των ακτινών με τον  $x$  άξονα. Να παρατηρήσουμε ότι και για την μεταβολή της γωνίας κατά τον  $z$  άξονα αλλά και για την μεταβολή της γωνίας κατά τον  $x$  άξονα, η προσομοίωση γίνεται για θερμοκρασία εισόδου νερού στους  $70^\circ\text{C}$ . Έτσι προκύπτει ο εξής πίνακας με τις τιμές του συντελεστή  $K_x$ :

ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΤΑ $X(\theta)$	$\gamma = -\cos(\theta)$	$X = \sin(\theta)$	$Q_{in}$ (W)	$\eta_{opt}$ (%)	$K_x(\theta)$
0	-1	0	10431	66,67	1
15	-0,9659	0,2588	10376,2	66,31	0,9947
30	-0,866	0,5	9996,21	63,88	0,9582
40	-0,766	0,6428	8563,88	54,72	0,821
50	-0,6428	0,766	7890,32	50,42	0,7563
60	-0,5	0,866	6773	43,28	0,6492
70	-0,342	0,9397	4921,29	31,45	0,4717

Όπου 
$$K_x(\theta) = \frac{\eta_{opt}(\theta x)}{\eta_{opt} \text{ για κατακόρυθη θέση ήλιου}} \quad (Γ.10)$$

είναι ο συντελεστής γωνίας κατά την διεύθυνση  $z$ .

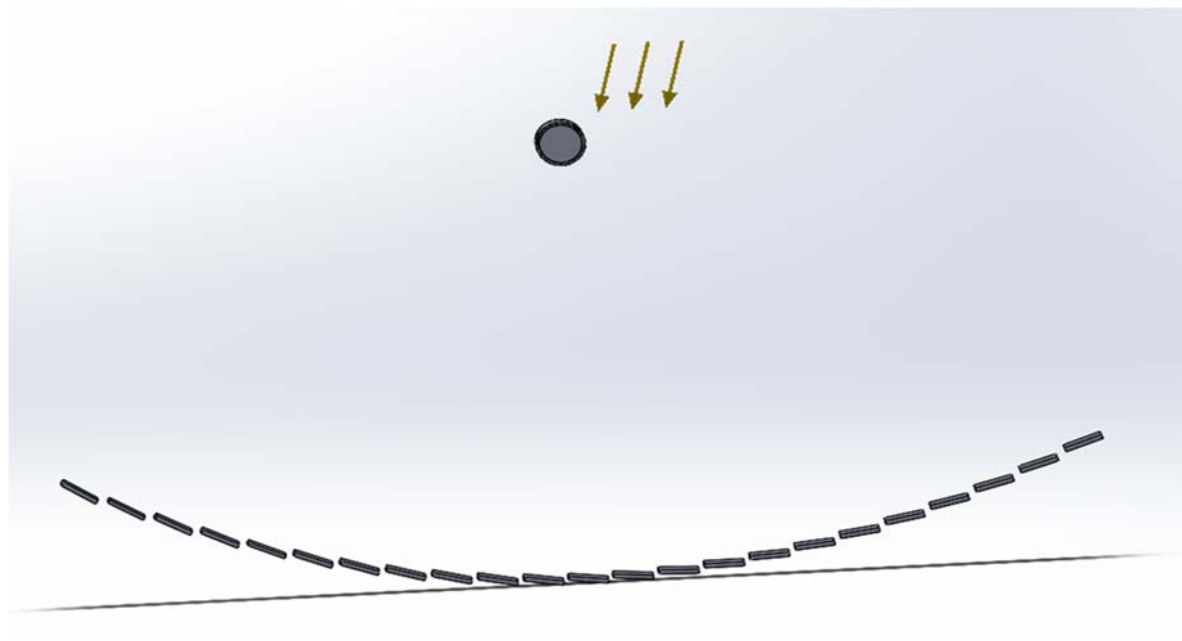
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL



Σχήμα Γ.62: Συντελεστής γωνίας,  $K_x$ , συναρτήσει της γωνίας,  $\theta$ , του ήλιου κατά τον  $x$ -άξονα

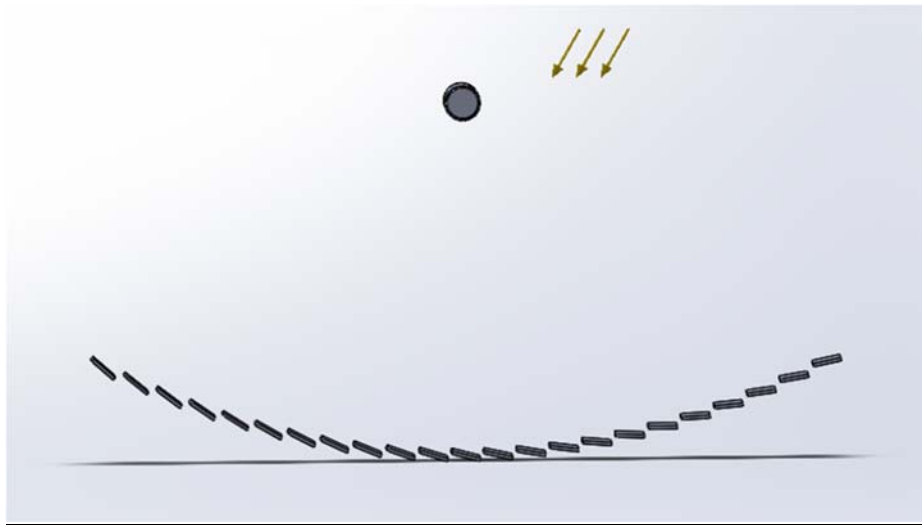
Παρατηρούμε ότι όταν η γωνία του ήλιου με την κατακόρυφο μεταβάλλεται κατά τον  $x$  άξονα, ο οπτικός βαθμός απόδοσης μειώνεται με πολύ μικρότερο ρυθμό, και αυτό γιατί μέσω της κίνησης των κατόπτρων, «παρακολουθούμε» τον ήλιο και αυτό εξασθενεί την επίδραση της μεταβολής της γωνίας στον οπτικό βαθμό απόδοσης. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες με την διάταξη των κατόπτρων για κάθε γωνία  $\theta_x$  του ήλιου.

$\theta_x=15^{\circ}$



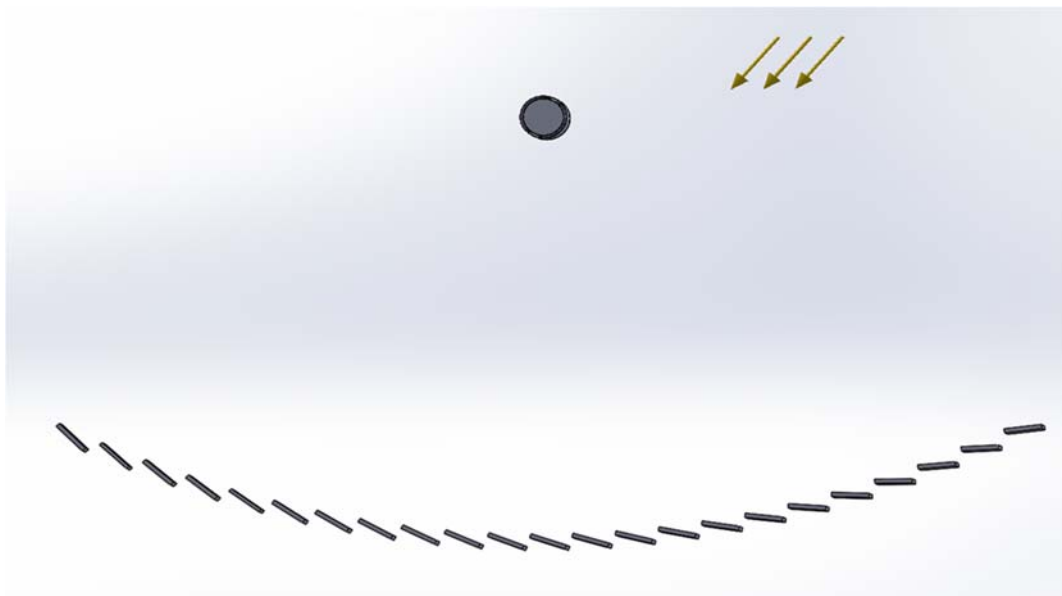
Εικόνα Γ.148: Διάταξη κατόπτρων για  $15^{\circ}$  γωνία ήλιου

$\theta_{\chi}=30^{\circ}$



Εικόνα Γ.149: Διάταξη κατόπτρων για 30ο γωνία ήλιου

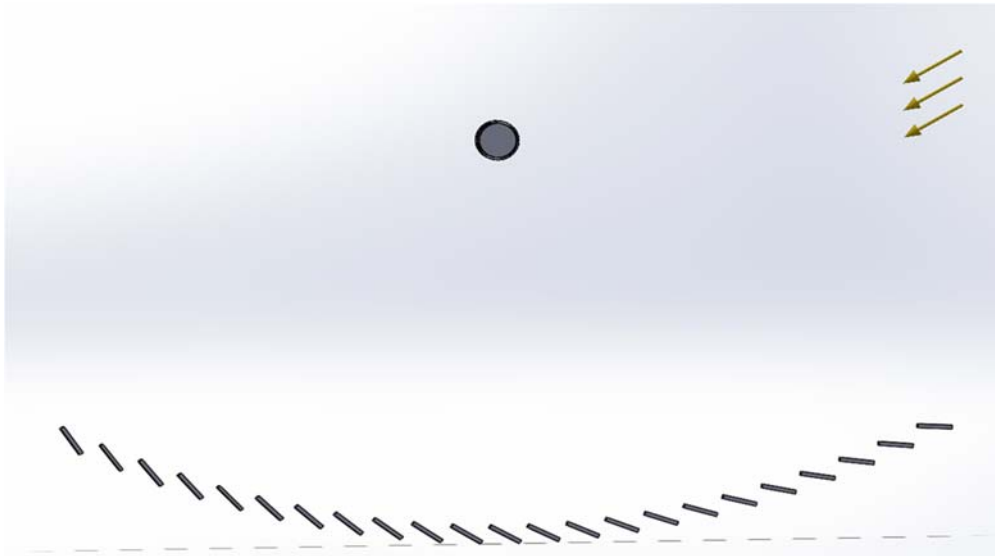
$\theta_{\chi}=40^{\circ}$



Εικόνα Γ.50: Διάταξη κατόπτρων για 40ο γωνία ήλιου

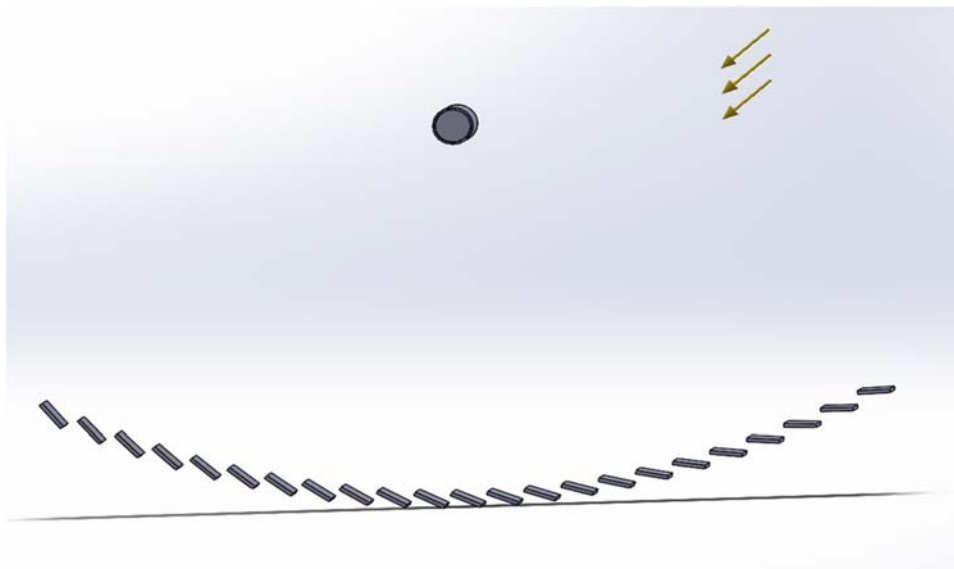
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

$\theta_x=50^\circ$

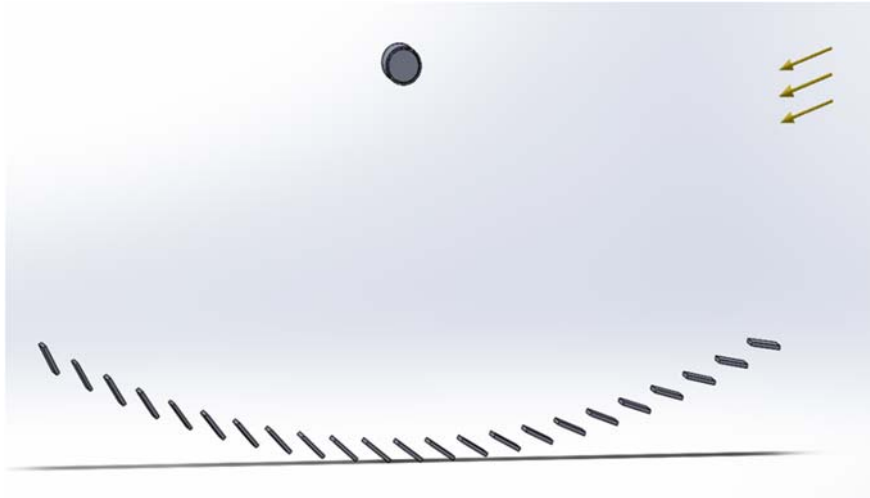


Εικόνα Γ.51: Διάταξη κατόπτρων για 50ο γωνία ήλιου

$\theta_x=60^\circ$



Εικόνα Γ.52: Διάταξη κατόπτρων για 60ο γωνία ήλιου

$\theta_x = 70^\circ$ Εικόνα Γ.53: Διάταξη κατόπτρων για  $70^\circ$  γωνία ήλιου**Γ.14 Βαθμός σύλληψης  $\gamma$  (intercept factor)**

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι καθώς μεταβάλλεται η σχετική γωνία ήλιου και συλλέκτη, αλλάζει ο βαθμός σύλληψης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον απορροφητή. Πιο συγκεκριμένα, βαθμός σύλληψης, ορίζεται το ποσοστό της ακτινοβολίας η οποία συγκεντρώνεται στον γυάλινο κάλυμμα του σωλήνα προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στα κάτοπτρα. Στην συνέχεια ένα ποσοστό της ακτινοβολίας διέρχεται του καλύμματος (καθορίζεται από το συντελεστή διάβασης  $\tau$ ) και ένα ποσοστό της τελικής ακτινοβολίας τελικά απορροφάται από τον απορροφητή (καθορίζεται από το συντελεστή απορροφητικότητας  $\alpha$ ). Έτσι ορίζεται ο συνολικός οπτικός βαθμός απόδοσης  $\rho_{opt}$  ως το γινόμενο  $\rho(\tau\alpha)$ . Το γινόμενο  $\rho(\tau\alpha)$  το έχουμε ορίσει 0,8 οπότε προκύπτει ότι για κάθε γωνία του ήλιου ο βαθμός σύλληψης είναι:

$$\rho_{opt} = \rho(\tau\alpha) \quad \longrightarrow \quad \gamma = \frac{\rho_{opt}(\theta_z, \theta_x)}{\rho(\tau\alpha)} = \frac{\rho_{opt}(\theta_z, \theta_x)}{0.8} \quad (\Gamma.11)$$

και έτσι προκύπτει ο εξής πίνακας με τις τιμές του βαθμού σύλληψης για τις διάφορες θέσεις ήλιου-συλλέκτη:

γωνία θz	γωνία θx	nopt(%)	βαθμός σύλληψης γ
0	0	66,67	<b>0,8334</b>
10	0	56,9	<b>0,7113</b>
20	0	44,78	<b>0,558</b>
30	0	31,26	<b>0,3908</b>
45	0	0	<b>0</b>
75	0	0	<b>0</b>
90	0	0	<b>0</b>
0	15	66,31	<b>0,8289</b>
0	30	63,88	<b>0,7985</b>
0	40	54,72	<b>0,684</b>
0	50	50,42	<b>0,6303</b>
0	60	43,28	<b>0,541</b>
0	70	31,45	<b>0,3931</b>

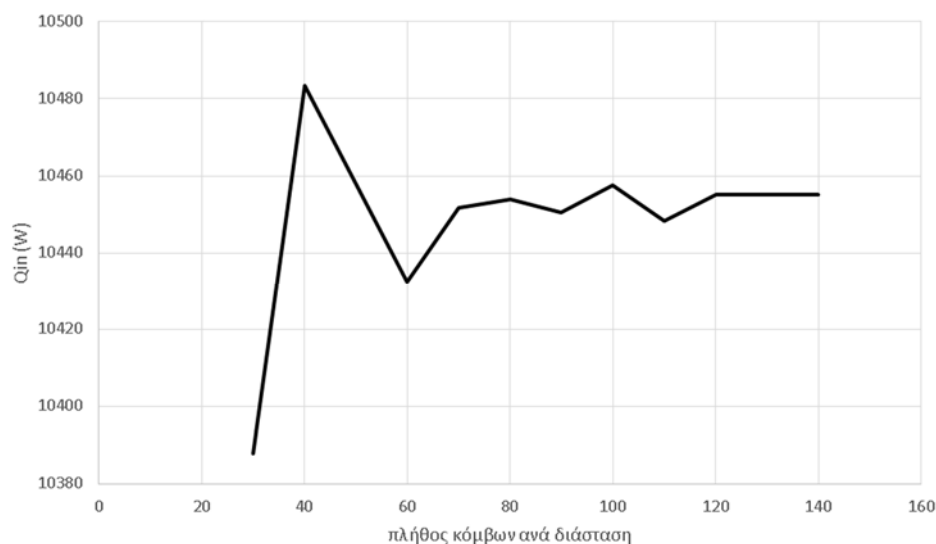
### **Γ.15 Ανεξαρτησία πλέγματος**

Σε κάθε αριθμητική επίλυση ενός προβλήματος είναι απαραίτητο να επαληθεύουμε το κατά πόσο το πλέγμα που επιλέχθηκε ήταν αξιόπιστο, δηλαδή αν η διακριτοποίηση που έγινε είναι επαρκής ώστε τα αποτελέσματα που δίνει να γίνουν αποδεκτά. Το πλέγμα το οποίο πληρεί την παραπάνω προϋπόθεση λέγεται ανεξάρτητο. Πρακτικά, αν επιλύσουμε την ίδια προσομοίωση με δυο διαφορετικά πλέγματα, από την μια μεριά και τα δύο πλέγματα θα συγκλίνουν, δηλαδή θα δώσουν αποτελέσματα, από την άλλη μεριά θα είναι διαφορετικά μεταξύ τους. Η διασφάλιση της ανεξαρτησίας του πλέγματος γίνεται με την εκτέλεση διαδοχικών προσομοιώσεων με διαφορετικά πλέγματα, ξεκινώντας από το μικρότερο δυνατό και αυξάνοντας σταδιακά το πλέγμα, έως τα αποτελέσματα δυο διαδοχικών πλεγμάτων να είναι ίδια. Ίδια κατά απόλυτα αποτελέσματα δεν μπορούν να υπάρξουν πάντα καθώς η προσομοίωση εξορισμού γίνεται αριθμητικά (και άρα υπάρχει σφάλμα στις εκτελέσεις), αλλά πρέπει να διαφέρουν το πολύ κατά το αριθμητικό σφάλμα που έχει οριστεί για την σύγκλιση. Πραγματοποιήσαμε την παραπάνω διαδικασία για αρχικό πλέγμα 30\*30\*30 και αυξάνοντάς το φτάσαμε σε πλέγμα 140\*140\*140 ώστε να εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία. Δηλαδή τα αποτελέσματα του πλέγματος 140\*140\*140 είναι ίδια με τα αποτελέσματα από το αμέσως μικρότερο προηγούμενο πλέγμα 120\*120\*120. Αυτό σημαίνει ότι το πλέγμα 120\*120\*120 είναι ανεξάρτητο και είναι ικανό να δώσει απολύτως αξιόπιστα αποτελέσματα. Ο έλεγχος της ανεξαρτησίας του πλέγματος έγινε για θερμοκρασία εισόδου νερού 50°C. Πιο αναλυτικά κατά την παραπάνω διαδικασία πήραμε τα εξής αποτελέσματα από την προσομοίωση με τα διαδοχικά πλέγματα:

ΠΛΕΓΜΑ	ΚΟΜΒΟΙ ΑΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΗ	Tout (°C)	Tr (°C)	Tc (°C)	Qin (W)	Qloss(W)
30*30*30	30	52,6661	81,3032	22,7167	10387,9	92,9553
40*40*40	40	52,6804	80,1719	22,7245	10483,4	91,9647
60*60*60	60	52,8001	77,4216	22,6935	10432,5	86,2774
70*70*70	70	52,8023	77,2454	22,759	10451,7	85,8
80*80*80	80	52,778	76,9738	22,7673	10454	85,4193
90*90*90	90	52,8039	77,1438	22,8005	10450,5	85,9223
100*100*100	100	52,8056	76,7401	22,7767	10457,6	85,059
110*110*110	110	52,8019	76,2907	22,7874	10448,3	84,1927
120*120*120	120	52,7991	76,2582	22,7854	10455,1	84,1617
140*140*140	140	52,8037	76,16	22,7854	10455,1	83,6487

Παρατηρούμε ότι μεταξύ των πλεγμάτων 120·120·120 και 140·140·140 έχει εξασφαλιστεί ανεξαρτησία για τις μεταβλητές Q<sub>in</sub> και T<sub>c</sub>, T<sub>r</sub> και T<sub>out</sub> δηλαδή την θερμοροή στον απορροφητή, την θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος, την θερμοκρασία του απορροφητή και την θερμοκρασία εξόδου του νερού. Στην εργασία μας εξασφαλίσαμε ανεξαρτησία πλέγματος για όλες τις μεταβλητές μας και όχι μόνο για μια, δηλαδή για όλες τις θερμοκρασίες και τις θερμικές ισχύς.

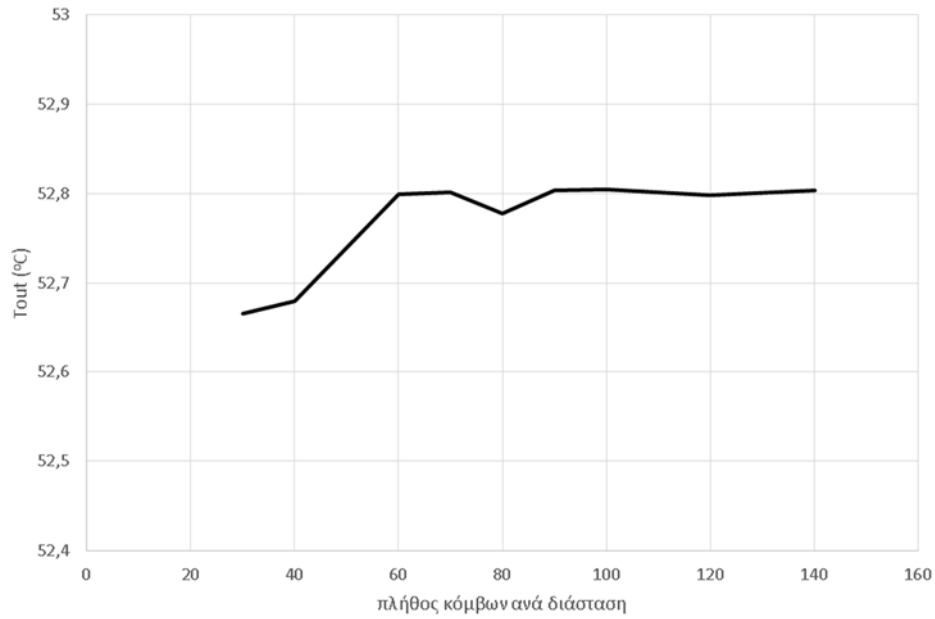
Τα διαγράμματα με τα παραπάνω αποτελέσματα είναι τα εξής:



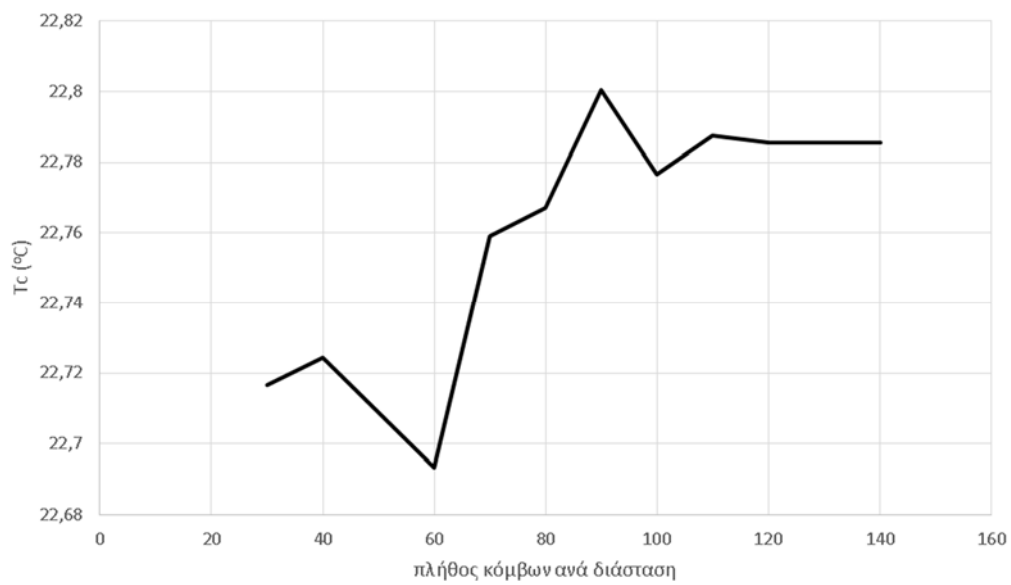
Σχήμα Γ.24: Μεταβολή της καθαρής θερμοροής απορροφητή συναρτήσει του πλήθους κόμβων ανά διάσταση



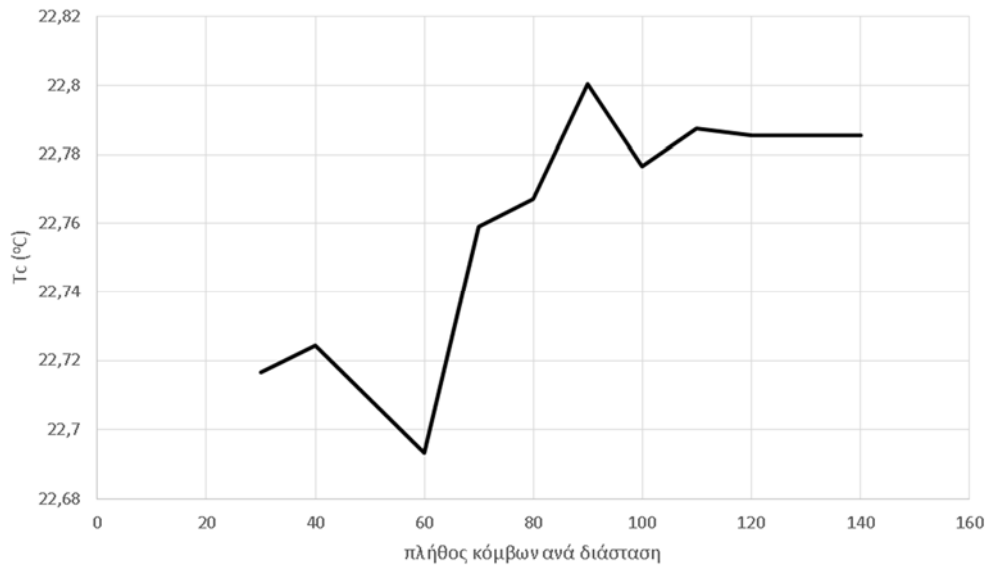
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL



Σχήμα Γ.24: Μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του νερού συναρτήσει του πλήθους κόμβων ανά διάσταση



Σχήμα Γ.25: Μεταβολή της θερμοκρασίας του απορροφητή συναρτήσει του πλήθους κόμβων ανά διάσταση



Σχήμα Γ.26: Μεταβολή της θερμοκρασίας του γυάλινου καλύμματος συναρτήσει του πλήθους κόμβων ανά διάσταση

Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, ανεξαρτησία πλέγματος επιτυγχάνεται όταν τα αποτελέσματα δύο διαδοχικών πλεγμάτων είναι 'ακριβώς ίδια'. Στην περίπτωσή μας για να είναι δύο διαδοχικά αποτελέσματα ακριβώς ίδια, πρέπει το κάθε αποτέλεσμα να διαφέρει το πολύ κατά το αριθμητικό σφάλμα που έχει οριστεί στην προσομοίωση στο solidworks για την σύγκλισή της, το οποίο για τις θερμοκρασίες είναι  $0,1 \text{ K}/^\circ\text{C}$  και για τις θερμικές ισχύς είναι  $0,5 \text{ W}$ . Οπότε για να διασφαλισθεί η ανεξαρτησία πλέγματος, πρέπει σε δύο διαδοχικά πλέγματα, οι μεταβλητές με μονάδα θερμοκρασίας να διαφέρουν μεταξύ τους το πολύ κατά  $0,1 \text{ K}$  ενώ οι μεταβλητές με μονάδα ισχύος πρέπει να διαφέρουν το πολύ κατά  $0,5 \text{ W}$ . Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι:

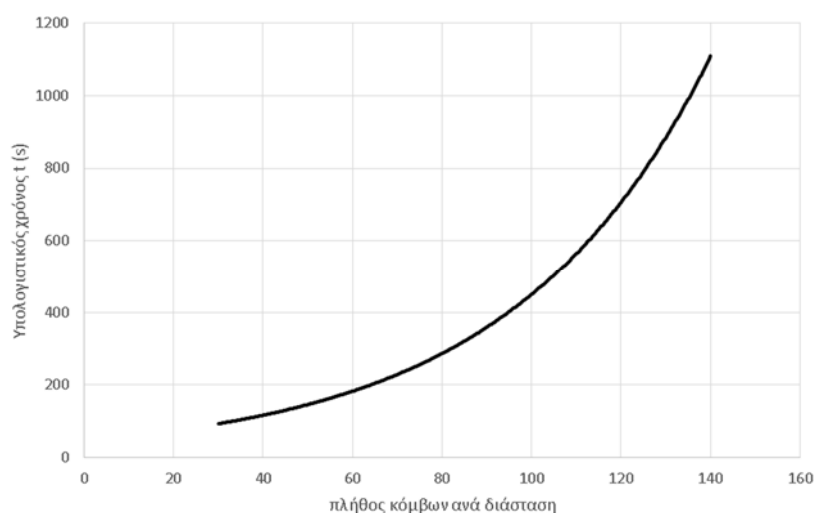
1. η θερμοροή του απορροφητή ( $Q_{in}$ ) μεταξύ των πλεγμάτων  $120 \cdot 120 \cdot 120$  και  $140 \cdot 140 \cdot 140$  είναι ακριβώς τα ίδια
2. η θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος ( $T_c$ ) μεταξύ των πλεγμάτων  $120 \cdot 120 \cdot 120$  και  $140 \cdot 140 \cdot 140$  είναι ακριβώς ίδια
3. η θερμοκρασία εξόδου του νερού ( $T_{out}$ ) μεταξύ των πλεγμάτων  $120 \cdot 120 \cdot 120$  και  $140 \cdot 140 \cdot 140$  διαφέρουν κατά  $0,0046 \text{ K}$ , διαφορά η οποία είναι μικρότερη από  $0,1 \text{ K}$
4. η θερμοκρασία του απορροφητή ( $T_r$ ) μεταξύ των πλεγμάτων  $120 \cdot 120 \cdot 120$  και  $140 \cdot 140 \cdot 140$  διαφέρουν κατά  $0,0982 \text{ K}$ , διαφορά η οποία είναι μικρότερη από  $0,1 \text{ K}$

Έτσι λοιπόν διασφαλίζεται η ανεξαρτησία του πλέγματος  $120 \cdot 120 \cdot 120$  ως προς όλες τις μεταβλητές. Βέβαια παρατηρούμε ότι ήδη από το πλέγμα  $60 \cdot 60 \cdot 60$  έχει εξασφαλιστεί ανεξαρτησία σε κάποιες από τις μεταβλητές και χρειάστηκε πολύ μικρότερος υπολογιστικός χρόνος. Η απλούστερη λύση θα ήταν να επιλέξουμε το μεγαλύτερο πλέγμα που μας δίνει ανεξαρτησία, ώστε να εξασφαλίσουμε την ανεξαρτησία και αξιοπιστία όλων των αποτελεσμάτων, αλλά το μέγεθος της διακριτοποίησης επηρεάζει κατά πολύ τον υπολογιστικό χρόνο της προσομοίωσης. Έτσι, στα παραπάνω πλέγματα για τα οποία μελετήσαμε την ανεξαρτησία, παράλληλα μετρούσαμε και τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτούν και τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ (sec)	ΠΛΕΓΜΑ
80	30·30·30
120	40·40·40
150	50·50·50
180	60·60·60
230	70·70·70
350	80·80·80
400	90·90·90
430	100·100·100
500	110·110·110
680	120·120·120
1100	140·140·140

Το διάγραμμα του υπολογιστικού χρόνου συναρτήσει του μεγέθους πλέγματος (κόμβοι ανά διάσταση) παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα Γ.27: Υπολογιστικός χρόνος προσομοίωσης συναρτήσει του πλήθους κόμβων ανά διάσταση

Η προσεγγιστική καμπύλη για τον υπολογισμό του υπολογιστικού χρόνου συναρτήσει του αριθμού κόμβων ανά διάσταση είναι:

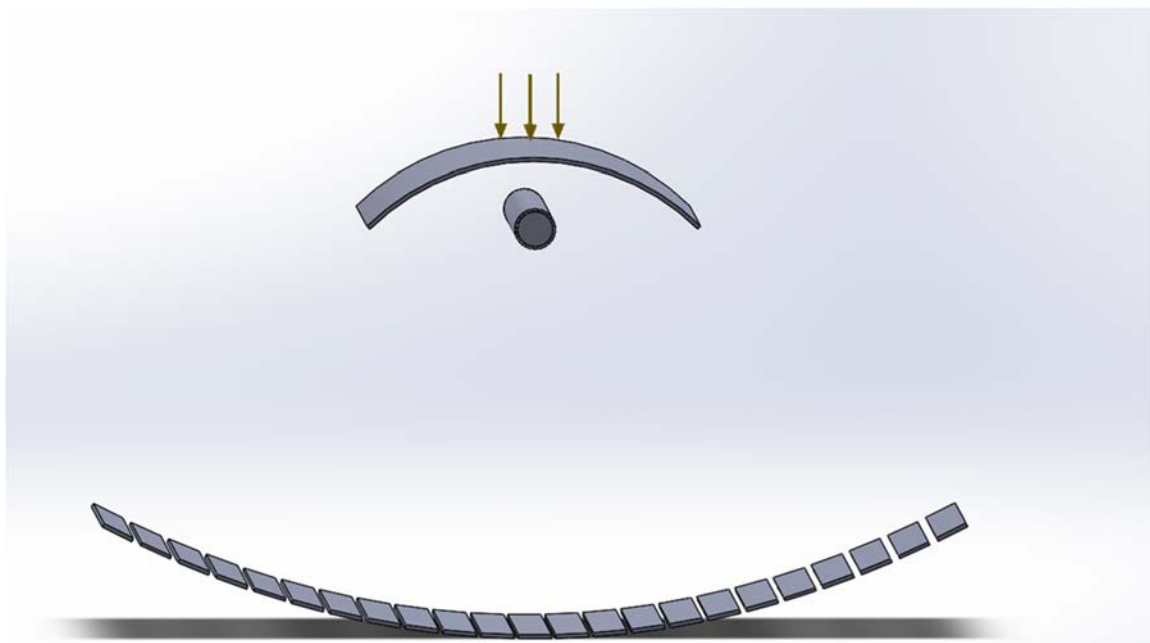
$$t = 47,152e^{0,0226 \cdot \text{κόμβοι}} \text{ (sec)} \quad (\Gamma.12)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο υπολογιστικός χρόνος για πλέγματα 80·80·80 και άνω απαιτούν από διπλό έως και δεκαπλό υπολογιστικό χρόνο, με τα αποτελέσματα των μεταβλητών να παρουσιάζουν μικρή απόκλιση από τα αποτελέσματα του ανεξάρτητου πλέγματος. Αυτό φαίνεται και από τους πίνακες τιμών των αποτελεσμάτων για τα διάφορα πλέγματα καθώς και οπτικά από τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων για διάφορα πλέγματα, στα οποία παρουσιάζεται μεγάλη μεταβολή των αποτελεσμάτων για πλέγματα έως 60·60·60. Έτσι επιλέξαμε να εκτελέσουμε την προσομοίωση χρησιμοποιώντας πλέγμα 60·60·60 το οποίο είναι ανεξάρτητο για κάποιες μεταβλητές και δίνει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα της τήξης του 95% των αποτελεσμάτων από το ανεξάρτητο πλέγμα των 120·120·120 κόμβων.

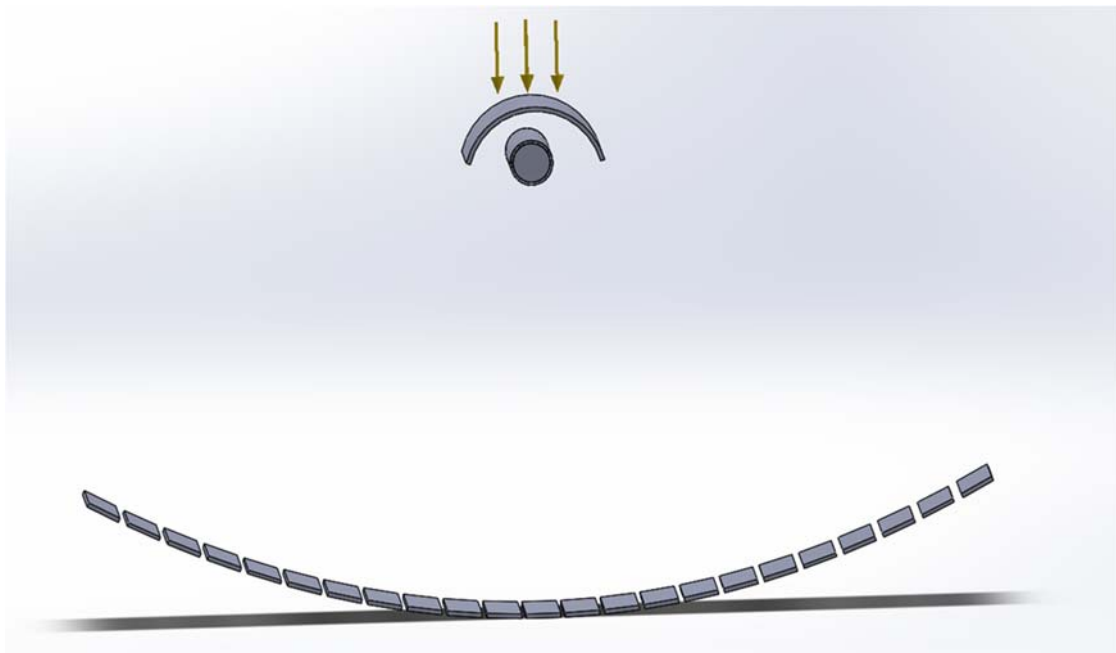
### Γ.15 Παραλλαγές συλλέκτη

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα Α.11.5, υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης του απορροφητή-των. Πιο συγκεκριμένα, ο απορροφητής μπορεί να είναι είτε απλού τύπου με ένα σωλήνα (συνήθως σωλήνας κενού) είτε πολλαπλού τύπου με περισσότερους των ενός σωλήνες απορρόφησης με διάφορους τρόπους διάταξής τους. Βασική παραλλαγή του απορροφητή είναι η τοποθέτηση δευτερεύοντος κατόπτρου, το οποίο ουσιαστικά εστιάζει εκ νέου τις ακτίνες οι οποίες διαφεύγουν της εστίασης στο σωλήνα (ή σωλήνες απορρόφησης). Αναλυτικότερα, το δευτερεύων κάτοπτρο παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εστίασης περισσότερων ακτινών στον απορροφητή, αλλά ταυτόχρονα σκιάζει τα κάτοπτρα τα οποία βρίσκονται κάτω από την προβολή του ειδώλου του δευτερεύοντος κατόπτρου κατά την πρόσπτωση των ακτινών και ταυτόχρονα αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης. Οπότε σημαντικό θα είναι να επιλεγθεί το καταλληλότερο σχήμα του δευτερεύοντος κατόπτρου, ώστε αυτή η σκίαση που θα προκαλεί σε κάποια κάτοπτρα να έχει μικρότερη αρνητική επίπτωση στην συγκέντρωση σε σύγκριση με την αύξηση της συγκέντρωσης των διαφευγόντων ακτινών μέσω του δευτερεύοντος κατόπτρου. Στην παρούσα εργασία, καθώς δεν έγινε κοστολόγηση του συλλέκτη, εξετάσαμε κατά πόσο μεταβάλλεται ο οπτικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη σε κάθε διαφορετικό δευτερεύων κάτοπτρο που δοκιμάσαμε σχεδιαστικά. Το συμπέρασμα το οποίο προέκυψε είναι ότι στα διάφορα δευτερεύοντα κάτοπτρα που σχεδιάσαμε, ο βαθμός απόδοσης δεν βελτιώθηκε αλλά αντιθέτως μειώθηκε, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι τα σχήματα του δευτερεύοντος κατόπτρου που σχεδιάστηκαν δεν εστίαζαν περισσότερη ακτινοβολία, η οποία διέφευγε, σε σύγκριση με την ακτινοβολία που δεν συγκεντρωνόταν εξαιτίας της ύπαρξής του. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό και στα παραδείγματα μερικών δευτερευόντων κατόπτρων που ακολουθούν, όσο πιο μεγάλο 'άνοιγμα' έχει το δευτερεύων κάτοπτρο τόσο περισσότερη ακτινοβολία επανεστιάζει στον απορροφητή, η οποία διέφευγε χωρίς αυτό, αλλά ταυτόχρονα σκιάζονται και περισσότερη ανακλαστική επιφάνεια για κάθε θέση του ήλιου.

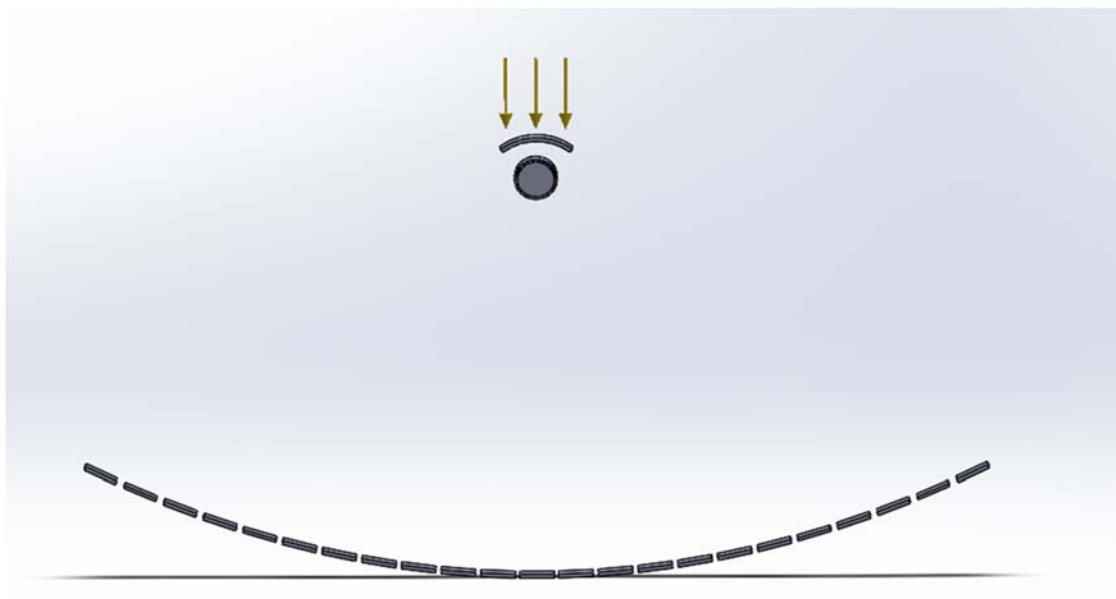
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται μερικοί ενδεικτικοί τύποι δευτερευόντων κατόπτρων οι οποίοι σχεδιάστηκαν:



Εικόνα Γ.28: Ενδεικτικό δευτερεύων κάτοπτρο I



Εικόνα Γ.29: Ενδεικτικό δευτερεύων κάτοπτρο II



Εικόνα Γ.30: Ενδεικτικό δευτερεύων κάτοπτρο III

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής προέκυψε ότι κανένα από τα 3 παραπάνω ενδεικτικά δευτερεύοντα κάτοπτρα αυξάνουν ελάχιστα έως και μειώνουν τον οπτικό βαθμό απόδοσης. Αυτό αποδεικνύει και πρακτικά ότι το δευτερεύων κάτοπτρο δεν είναι βέβαιο ότι θα αυξήσει το βαθμό απόδοσης επειδή συγκεντρώνει περισσότερη διαφεύγουσα ακτινοβολία, καθώς σκιάζει ταυτόχρονα κάποια κάτοπτρα (ανάλογα και με τη θέση του ήλιου). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην ενότητα αυτή απαιτείται μελέτη ώστε να επιλεγεί το καταλληλότερο σχήμα και μέγεθος του δευτερεύοντος ώστε να βελτιστοποιείται η συνεισφορά του.



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ****Δ.1 Βασικά συμπεράσματα**

Από την εργασία προέκυψε, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι ο συλλέκτης Fresnel λειτουργεί σε αισθητά χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τους υπόλοιπους συγκεντρωτικούς συλλέκτες αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζει αρκετά υψηλό οπτικό βαθμό απόδοσης, ειδικότερα αν συγκριθεί και η πολύ απλούστερη κατασκευή του σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους συγκεντρωτικών συλλεκτών. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ο οπτικός βαθμός απόδοσης μεταβάλλεται αισθητά όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία αλλάζει γωνία πρόσπτωσης κατά τον άξονα που είναι κάθετος στον άξονα του απορροφητή. Ο συλλέκτης Fresnel δεν έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί τον ήλιο κατά την μετακίνησή του κατά τον άξονα συμμετρίας του απορροφητή, για αυτό το λόγο παρουσιάζει τόσο μεγάλη πτώση του βαθμού απόδοσης και συγκεκριμένα στις 45° μηδενίζεται πλήρως η απορροφούμενη ακτινοβολία.

Τα βασικά νούμερα του συλλέκτη μας είναι:

1. Οπτικός βαθμός απόδοσης  $n_{opt}=66.67\%$
2. Βαθμός σύλληψης  $\gamma=0.8334$
3. Συντελεστής μετάδοσης  $h= 116-180 [W/(m^2K)]$  ανάλογα και με τη θερμοκρασία εισόδου του νερού στον απορροφητή

Και οι βασικές εξισώσεις που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι:

1. Καμπύλη υπολογιστικού χρόνου συναρτήσει των κόμβων ανά άξονα:

$$t = 47,152e^{0,0226 \cdot \text{κόμβοι}} \text{ (sec)}$$

2. Καμπύλη θερμικού βαθμού απόδοσης:

$$n_{th} = -78,878x^2 - 3,6794x + 66,29 \quad (\%)$$

3. Καμπύλη συντελεστή θερμικών απωλειών  $u_L$ :

$$u_L = 17,094x^2 + 1,1585x + 0,6788 \quad (W/m^2K)$$

4. Καμπύλη θερμικών απωλειών  $q_{loss}$ :

$$q_{loss} = 12343x^2 + 575,75x + 59,473 \quad (W)$$

5. Καμπύλη του συντελεστή μετάδοσης  $h$  (μέθοδος I):

$$h = 1381,4x + 121,94 \quad (W/m^2K)$$

6. Καμπύλη του συντελεστή μετάδοσης  $h$  (μέθοδος II):

$$h = -10693x^2 + 2511,5x + 127,13 \quad (W/m^2K)$$

όπου  $x$  είναι η μεταβλητή  $(T_{in}-T_{amb})/G_b$

### Πεδία μελλοντικής έρευνας

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα Γ.15, ένα πολύ σημαντικό πεδίο μελέτης και βελτίωσης του συλλέκτη αποτελεί ο σχεδιασμός δευτερεύοντος κατόπτρου το οποίο θα βασιστεί όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σε μία αφενός οικονομική μελέτη, δηλαδή κοστολόγηση του κατόπτρου και αφετέρου στα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το κάτοπτρο ώστε να επιβεβαιωθεί ότι βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσης.

Τέλος να αναφερθεί ότι για εμπορικές χρήσεις με μεγαλύτερη αποδιδόμενη ισχύ, μπορεί να τοποθετηθεί δεύτερη και τρίτη σειρά κατόπτρων με ταυτόχρονη επιμήκυνση του απορροφητή.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αντονόπουλος Κίμων, Ηλιακή ενέργεια, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2011
- [2] Χουντάλας Δημήτριος και Φούντη Μαρία, Μεταφορά θερμότητας II, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2003
- [3] Αντονόπουλος Κίμων, Υπολογιστικές μέθοδοι φαινομένων μεταφοράς, μέρος πρώτο, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- [4] Χουντάλας Δημήτριος, Φαινόμενα μεταφοράς, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1993

### ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5] Duffie John and Beckman William, Solar Engineering of thermal processes, second edition Madison 1980
- [6] Kalogirou Soteris, Solar Energy Engineering Processes and Systems, Cyprus University of Technology, 1990
- [7] Yogi Goswami, Principles of Solar Engineering, third edition, CRC Press, 2015

### ΑΡΘΡΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- [8] Jorge Facao, Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator, Elsevier, 2010
- [9] A.Heimsath and F.Cuevas, Linear Fresnel collector receiver: heat loss and temperatures, Elsevier, 2013
- [10] David Mills, Compact Linear Fresnel Reflector Solar Thermal Powerplants, Elsevier, 1999