



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική Εργασία με Θέμα:

**Βελτίωση της θερμικής απόδοσης παραβολικού ηλιακού
συλλέκτη με χρήση νανοϋλικών**

ΓΚΙΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ






Επιβλέπων: Τζιβανίδης Χρήστος

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2016

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Abstract	6
Κεφάλαιο 1 Ηλιακή Ενέργεια	7
1.1 Εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	7
1.2 Ηλιακή σταθερά	8
1.3 Κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο φάσμα της συχνότητας.....	8
1.4 Διακύμανση της ακτινοβολίας	9
1.5 Ηλιακός χρόνος	9
1.6 Ηλιακή γεωμετρία	10
1.7 Ολική, άμεση και διάχυτη ακτινοβολία.....	12
1.8 Ενεργειακό πρόβλημα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	13
1.9 Περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την ενέργεια	14
1.9.1 Όξινη βροχή	15
1.9.2 Τρύπα του όζοντος	15
1.9.3 Παγκόσμια κλιματική αλλαγή.....	16
1.10 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας.....	17
1.11 Σύντομη ιστορική αναδρομή της ηλιακής ενέργειας.....	18
Κεφάλαιο 2 Ηλιακοί συλλέκτες	22
2.1 Μη συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες	22
2.1.1 Επίπεδοι συλλέκτες (FPC).....	22
2.1.2 Σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες (CPC).....	24
2.1.3 Συλλέκτες με σωλήνα κενού (ETC)	26
2.2 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες.....	27
2.2.1 Ηλιοστάτες	27
2.2.2 Συλλέκτες Fresnel.....	29
2.2.3 Παραβολικοί δίσκοι (Parabolic dishes)	30
2.2.4 Κοίλοι παραβολικοί συλλέκτες (Parabolic trough collectros-PTC).....	31
2.2.4.1 Οπτική ανάλυση του συλλέκτη PTC.....	32
2.2.4.2 Θερμικές απώλειες στον συλλέκτη PTC	33
Κεφάλαιο 3 Νανοϋλικά	35
3.1 Εισαγωγή στα νανοϋλικά	35
3.2 Κατηγοριοποίηση των νανοϋλικών	35

3.3	Ιδιότητες νανοϋλικού	36
3.3	Ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση	37
3.4	Ανάλυση μεταφοράς θερμότητας.....	38
Κεφάλαιο 4	Σχεδιασμός του ηλιακού συλλέκτη με χρήση του λογισμικού Solidworks.....	41
4.1	Λογισμικό Solidworks.....	41
4.2	Έναρξη του προγράμματος.....	41
4.2.1	Αρχείο “Part”.....	42
4.2.2	Επίπεδα σχεδιασμού (planes)	42
4.3	Βασικά γεωμετρικά σχήματα και εντολές σχεδίασης.....	43
4.3.1	Εντολή Circle ().....	43
4.3.2	Εντολή Offset Entities ().....	44
4.3.3	Εντολή Smart Dimension ().....	46
4.3.4	Εντολή Parabola ().....	48
4.3.5	Εντολή Centerline ()	49
4.4	Τρισδιάστατος σχεδιασμός του συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη	55
4.5	Ορισμός είδους και χρώματος επιφανείας.....	58
4.6	Διάφορες όψεις και τομές του ηλιακού συλλέκτη τύπου PTC.....	60
Κεφάλαιο 5	Προσομοίωση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη τύπου PTC	62
5.1	Εισαγωγή.....	62
5.2	Δεδομένα του προβλήματος	64
5.3	Ιδιότητες των συνιστωσών του ηλιακού συλλέκτη	65
5.4	Ζητούμενα του προβλήματος	66
5.5	Προσομοίωση Μοντέλου	67
5.6	Εισαγωγή οριακών συνθηκών	74
5.7	Ορισμός των υλικών.....	77
5.8	Ορισμός ακτινοβολούμενων επιφανειών.....	78
5.9	Ορισμός του πλέγματος.....	81
5.10	Ορισμός στόχων	83
5.11	Έναρξη επίλυσης.....	88
Κεφάλαιο 6	Αποτελέσματα της προσομοίωσης	89
6.1	Διαγράμματα ιδιοτήτων λαδιού Thermal Oil	89
6.1.1	Πυκνότητα (ρ)	89
6.1.2	Ιξώδες (μ)	90

6.1.3	Θερμοχωρητικότητα (C_p)	90
6.1.4	Θερμική αγωγιμότητα (k).....	91
6.2	Διαγράμματα αποτελεσμάτων με εργαζόμενο μέσο το λάδι (Thermal oil).....	91
6.2.1	Βαθμός απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη με εργαζόμενο μέσο το Thermal Oil	91
6.2.2	Καμπύλη συντελεστή ολικών απωλειών (U_L).....	93
6.2.3	Καμπύλη απωλειών ακτινοβολίας απορροφητή (Q_{loss})	94
6.2.4	Καμπύλη ωφέλιμης ισχύος (Q_u).....	94
6.2.5	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (h).....	95
6.3	Διαγράμματα ιδιοτήτων νανοϋλικού Al_2O_3	96
6.3.1	Πυκνότητα (ρ)	96
6.3.2	Ιξώδες (μ)	97
6.3.3	Θερμοχωρητικότητα (C_p)	97
6.3.4	Θερμική αγωγιμότητα (k).....	98
6.4	Διαγράμματα ιδιοτήτων νανοϋλικού Al_2O_3 σε δεδομένη θερμοκρασία 100 °C.....	99
6.4.1	Πυκνότητα (ρ)	100
6.4.2	Ιξώδες (μ)	100
6.4.3	Θερμοχωρητικότητα (C_p)	101
6.4.4	Θερμική αγωγιμότητα (k).....	101
6.5	Διαγράμματα για τις διαφορετικές περιεκτικότητες.....	102
6.5.1	Θερμικός βαθμός απόδοσης (η_{th})	102
6.5.2	Εξεργειακός βαθμός απόδοσης (η_{ex}).....	103
6.5.3	Συντελεστής ολικών απωλειών (U_L)	103
6.5.4	Καμπύλη απωλειών ακτινοβολίας απορροφητή (Q_{loss})	104
6.6	Θερμοκρασιακά πεδία του ηλιακού συλλέκτη PTC.....	105
6.7	Οπτική βελτιστοποίηση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη PTC.....	108
6.7.1	Οπτική βελτιστοποίηση ελέγχοντας τις διαμέτρους $D_{r,in}$, $D_{r,out}$ του απορροφητή ...	108
6.7.2	Οπτική βελτιστοποίηση ελέγχοντας το άνοιγμα W του συλλέκτη.....	109
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα.....		112
Βιβλιογραφία.....		114

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016.

Την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας είχε ο Επίκουρος Καθηγητής, κύριος Τζιβανίδης Χρήστος, τον οποίο θα ήθελα εκ των προτέρων να ευχαριστήσω θερμά για την ανάθεση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος, την αμεσότητα της συνεργασίας μας, την άπογη καθοδήγησή του καθώς και τις πολύτιμες συμβουλές και οδηγίες του καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες προς τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Μπέλλο Ευάγγελο για την συνεχή επίβλεψη και την άριστη συνεργασία σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Η εργασία αυτή ως αποτέλεσμα εξαιρετικής συνεργασίας με τον κύριο Τζιβανίδη και τον κύριο Μπέλλο δημοσιεύθηκε στο περιοδικό Renewable Energy με τίτλο «Thermal enhancement of solar parabolic trough collectors by using nanofluids and converging-diverging absorber tube».

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, για όσα μου έχουν προσφέρει σε μορφωτικό και διαπροσωπικό επίπεδο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και για την συνεχή υποστήριξή τους.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη σχεδίαση και προσομοίωση ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη τύπου PTC, με τη βοήθεια του λογισμικού σχεδίασης και προσομοίωσης Solidworks.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται γενικά στοιχεία περί ηλιακής ενέργειας. Ακόμα, παρουσιάζονται τα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την ενέργεια που είναι η όξινη βροχή, η τρύπα του όζοντος και η παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Επίσης, παρατίθενται ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας. Τέλος, γίνεται μία μικρή ιστορική αναδρομή στη χρήση της ηλιακής ενέργειας από τον άνθρωπο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύονται η λειτουργία και οι ιδιότητες διάφορων ειδών ηλιακών συλλεκτών αρχικά χωρισμένοι σε δύο βασικές κατηγορίες, συγκεντρωτικούς και μη συγκεντρωτικούς. Οι μεν συγκεντρωτικοί χωρίζονται σε ηλιοστάτες, συλλέκτες Fresnel, παραβολικούς δίσκους και κοίλους παραβολικούς συλλέκτες και οι δε μη συγκεντρωτικοί χωρίζονται σε επίπεδους συλλέκτες, σύνθετους παραβολικούς συλλέκτες και συλλέκτες με σωλήνα κενού. Τέλος, δίνεται έμφαση στους συγκεντρωτικούς παραβολικούς συλλέκτες τύπου PTC που αποτελούν τη βάση της παρούσας εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται πληροφορίες για τα νανοϋλικά. Γίνεται κατηγοριοποίηση των νανοϋλικών και παρουσιάζονται οι εξισώσεις που ορίζουν τις ιδιότητές τους όπως πυκνότητα, θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα και ιξώδες. Επίσης, παρουσιάζονται τύποι για ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση καθώς και ανάλυση μεταφοράς θερμότητας του συλλέκτη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται μία εισαγωγή στο Solidworks. Ακολούθως, αναφέρονται αναλυτικά τα βήματα του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου σχεδιασμού του συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη τύπου PTC παραθέτοντας βήμα-βήμα τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη σχεδίαση κάθε μιας συνιστώσας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιλαμβάνεται το κομμάτι της προσομοίωσης. Χρησιμοποιούνται ως εργαζόμενο μέσο τα νανοϋλικά. Περιγράφεται η βασική ιδέα με την οποία προσεγγίζουμε το πρόβλημα και παράλληλα γίνονται οι απαραίτητες παραδοχές για την προσαρμογή του στο πρόγραμμα.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω πινάκων και διαγραμμάτων. Επίσης, παρουσιάζονται διάφορα θερμοκρασιακά πεδία του συλλέκτη. Τέλος, γίνεται οπτική βελτιστοποίηση του συλλέκτη.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Abstract

The current thesis focuses on the planning and the simulation of a solar parabolic through collector, PTC type, by using Solidworks software.

In the beginning, in chapter one, general data of solar energy are mentioned. Moreover, environmental problems that are related with energy are presented such as acid rain, greenhouse effect and global climate change. Some advantages and disadvantages are, also, listed. Finally, a chronology of the solar energy used by human is presented.

In chapter two, the operation and the properties of different solar collectors are analyzed, divided in two basic categories, concentrating and non-concentrating collectors. Concentrating collectors are divided in central receivers, Fresnel collectors, parabolic dishes, parabolic through collectors and non-concentrating collectors are divided in flat plate collectors, stationary compound parabolic collectors, and evacuated tube collectors. Finally, emphasis is given to parabolic through collectors, PTC, that are the basis of this thesis.

In chapter three, information about nanofluid is presented. A categorization takes place and the basic equations that define their properties such as density, heat capacity, thermal conductivity and mixture viscosity are presented. There are also presented some equations about energetic and exergetic analysis and about heat transfer analysis.

In chapter four, an introduction at Solidworks software is done. Subsequently, the steps of the 2-D and 3-D planning of the solar collector, PTC type, are mentioned analytically quoting step-by-step the methodology that has been followed for the scheduling of each component.

In chapter five, the simulation part is shown. Nanofluid is used as heat transfer fluid. The basic idea that we reach problem is described and, at the same time, the necessary assumptions of its adjustment to Solidworks program are done.

In chapter six, the results of the simulation are listed through tables and diagrams. Also, some temperature fields of the collector are presented. Finally, a visual optimization is done.

In chapter seven, the final chapter, the conclusions that came out are presented.

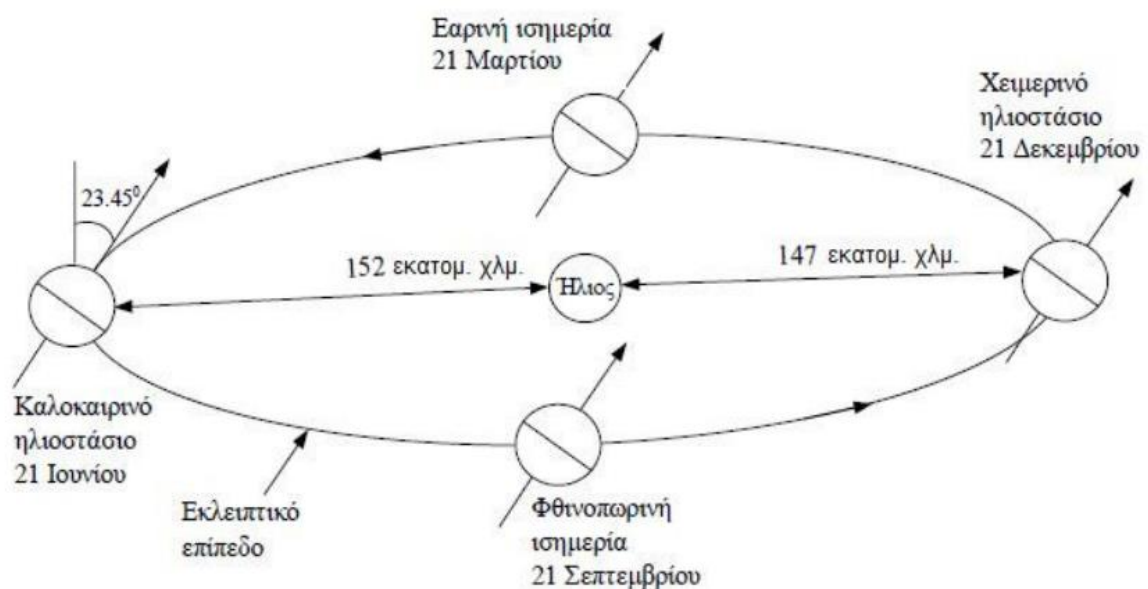
Κεφάλαιο 1 Ηλιακή Ενέργεια

1.1 Εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ο ήλιος είναι το μόνο αστέρι του ηλιακού μας συστήματος και βρίσκεται στο κέντρο του. Η γη και οι υπόλοιποι πλανήτες αποτελούν το ηλιακό μας σύστημα. Ενέργεια από τον ήλιο με τη μορφή της ηλιακής ακτινοβολίας υποστηρίζει τη ζωή στη γη μέσω της φωτοσύνθεσης και ορίζει το κλίμα και τα καιρικά φαινόμενα της γης.

Ο ήλιος αποτελείται κατά το 74% του όγκου του από υδρογόνο, 25% ήλιο και το υπόλοιπο είναι ίχνη βαρύτερων στοιχείων. Είναι μία σφαίρα διαμέτρου 1.39×10^9 m και είναι σε μία μέση απόσταση 1.5×10^{11} m από τη γη. Η επιφάνεια του ηλίου έχει θερμοκρασία 5500K, δίνοντας του λευκό χρώμα, το οποίο λόγω της ατμοσφαιρικής διασκόρπισης φαίνεται ως κίτρινο. Ο ήλιος παράγει την ενέργεια από πυρηνική αντίδραση πυρήνων υδρογόνου με ήλιο. Το φως του ηλίου είναι η μόνη πηγή ενέργειας στην επιφάνεια της γης η οποία απαντάται σε φυσικές και τεχνητές διαδικασίες. Η πιο σημαντική είναι η φωτοσύνθεση, η οποία γίνεται από τα φυτά τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε χημική, ώστε να αναπτυχθούν.

Βασικά, όλες οι μορφές ενέργειας που συναντάμε κατά την ιστορία έχουν την ηλιακή ως προέλευση. Το πετρέλαιο, ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το ξύλο είναι προϊόντα φωτοσυνθετικής διαδικασίας, ακολουθούμενης από σύνθετες χημικές αντιδράσεις. Ακόμα και η αιολική ενέργεια και τα κύματα έχουν ως προέλευση την ηλιακή αφού προκαλούνται από τις διάφορες θερμοκρασίες στις διάφορες περιοχές της γης.



Σχήμα 1.1 Ετήσια περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο [1]

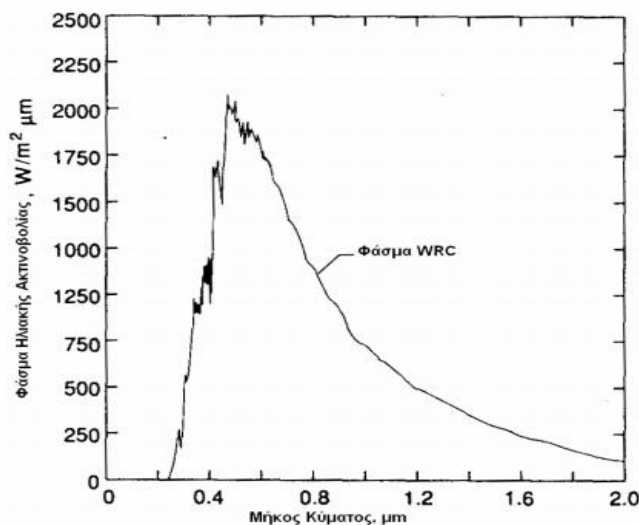
1.2 Ηλιακή σταθερά

Η εκκεντρότητα της τροχιάς της γης είναι τέτοια ώστε η απόσταση μεταξύ ηλίου και γης να μεταβάλλεται κατά $\pm 1.7\%$. Σε απόσταση μίας αστρονομικής μονάδας, $1.495 \times 10^{11} \text{ m}$ (δηλ. τη μέση απόσταση ηλίου-γης) ο ήλιος είναι απέναντι από ένα σημείο πάνω στη γη κατά 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 μία επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της πρόσπτωσης της σε μία μέση απόσταση έξω από την ατμόσφαιρα της γης [1].

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 W/m^2 . Αργότερα, ο Johnson (1954) αναθεώρησε αυτή την τιμή σε 1395 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 W/m^2 , σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (WMO 1978) [1,3].

1.3 Κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο φάσμα της συχνότητας

Είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο φάσμα της συχνότητας. Ένα πρότυπο διάγραμμα για αυτόν το 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 παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.2 Φάσμα εξωγήινης ακτινοβολίας [2]

1.4 Διακύμανση της ακτινοβολίας

Δύο πηγές διακύμανσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας εξωτερικά της ατμόσφαιρας πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η πρώτη είναι η διακύμανση στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο και οφείλεται στη δραστηριότητα των ηλιακών κηλίδων (sunspots). 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 ηλίου-γης. Έτσι, η εξάρτηση της ακτινοβολίας από τον χρόνο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot (1 + 0.033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365}) \quad (1.1)$$

Όπου G_{on} η ακτινοβολία εξωτερικά της ατμόσφαιρας, η οποία μετράται σε ένα επίπεδο κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης την n-οστή μέρα του χρόνου [1].

1.5 Ηλιακός χρόνος

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας απαιτεί τον υπολογισμό της ακριβούς θέσης του ηλίου 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 τους υπολογισμούς που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία, χρησιμοποιείται ο πραγματικός ηλιακός χρόνος (H_{χ}). Η γη χωρίζεται σε 24 ζώνες. Κάθε μία από αυτές έχει γεωγραφικό μήκος 15° (δηλαδή 1 ώρα. Αφού η γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της κατά 15° την ώρα). Για κάθε μία από αυτές τις ζώνες χρησιμοποιείται η ίδια τοπική ώρα. Ο ηλιακός χρόνος (H_{χ}) δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο (T_{χ}). Συνεπώς, χρειάζεται να γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις σύμφωνα με την σχέση:

$$H_{\chi} = T_{\chi} \pm 4 \cdot (L_{GT}L_T) + E_T \quad (1.2)$$

(+) 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 υπόψη 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:

$$E_T = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B) \quad (1.3)$$

$$\text{Όπου } B = 360 \cdot \frac{(D-81)}{364} \quad (1.4)$$

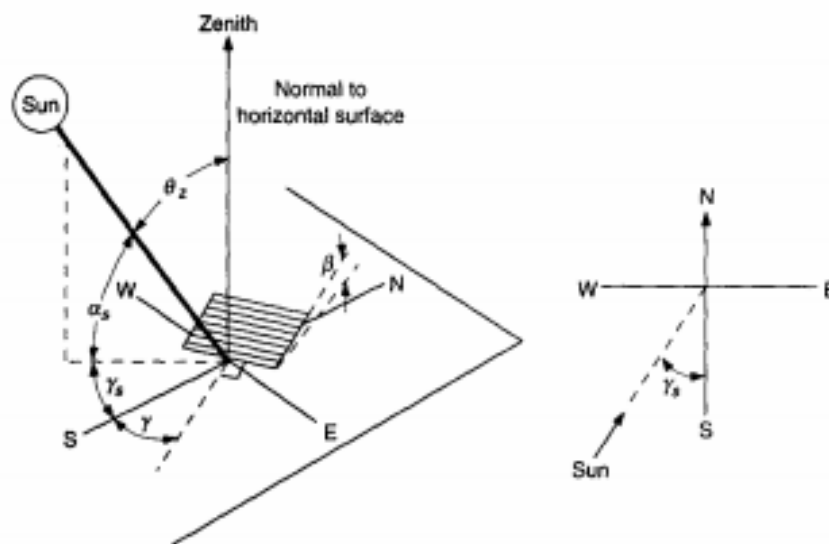
Και D είναι η μέρα του χρόνου [3].

1.6 Ηλιακή γεωμετρία

Στη 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, θ_z** : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ηλίου.
- **Ηλιακό ύψος, $90^\circ - \theta_z$** : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.
- **Αζιμούθιο επιφανείας, γ** : 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, γ_s** : Είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότια κατεύθυνσης.
- **Κλίση επιπέδου, β** : 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 1.3 που ακολουθεί:



Σχήμα 1.3 Γωνία ζενίθ θ_z , ηλιακό ύψος $90^\circ - \theta_z$, αζιμούθιο επιφανείας γ , αζιμούθιο ηλίου γ_s και κλίση επιπέδου β [1]

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

$$\omega = 0.25 \cdot (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (1.5)$$

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

- **Ηλιακή απόκλιση, δ** : 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° ως προς το επίπεδο τροχιάς της γης περί τον ήλιο, η ηλιακή απόκλιση δ μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ των ορίων $-23.45^\circ < \delta < 23.45^\circ$ με θετικές τιμές προς το βορρά. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (240+n)}{365}\right) \quad (1.6)$$

Όπου το n συμβολίζει τον αύξοντα αριθμό μιας οποιασδήποτε μέρας του έτους. Επομένως, ο παράγοντας n δέχεται τιμές από 1 έως 365.

Στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί μπορούμε να δούμε τον αύξοντα αριθμό κάθε ημέρας του έτους, την μέση ημέρα κάθε μήνα και την αντίστοιχη τιμή της ηλιακής απόκλισης.

<i>Μήνας</i>	<i>Μέρα του χρόνου</i>	<i>Ημερομηνία</i>	<i>N</i>	<i>Απόκλιση δ (°)</i>
Ιανουάριος	I	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

Πίνακας 1.1 Αύξοντας αριθμός ημέρας του έτους n , μέση ημέρα κάθε μήνα και αντίστοιχη τιμή της ηλιακής απόκλισης δ [1]

- **Γωνία πρόσπτωσης, θ** : 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 από την εξής σχέση:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (1.7)$$

Όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το οποίο λαμβάνει τιμές μεταξύ $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$. Για την Αθήνα ισχύει ότι $\varphi = 37.58^\circ$ [1,3]. Για οριζόντιες επιφάνειες ($\beta = 0^\circ$) η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με τη γωνία ζενίθ και άρα ισχύει ότι:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \quad (1.8)$$

1.7 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 στην 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 τις ημερήσιες τιμές με κατάλληλους 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 ηλίου
- το γεωγραφικό πλάτος του τόπου
- το υψόμετρο του τόπου
- την κλίση της επιφάνειας
- την απόσταση ήλιου-γης
- 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 ηλίου
- το υψόμετρο του τόπου

- τη λευκαύγεια (δηλαδή το συντελεστή ανάκλασης της επιφάνειας) του εδάφους
- το ποσό και το είδος των νεφών
- 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 της διάχυτης ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης. Για μία οριζόντια επιφάνεια ισχύει, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας ωριαίες τιμές της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας:

$$I = I_b + I_d \quad (1.9)$$

Το ίδιο ισοζύγιο ισχύει χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές και για άλλες χρονικές περιόδους, δηλαδή στιγμιαίες εντάσεις ή ημερήσιες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας [3,4,5].

1.8 Ενεργειακό πρόβλημα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Πολλές εναλλακτικές πηγές ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των ορυκτών καυσίμων. Η απόφαση για το ποια μορφή ενέργειας θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση πρέπει να παρθεί λαμβάνοντας υπόψη οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και παράγοντες ασφάλειας. Λόγω του ενδιαφέροντος για την προστασία του περιβάλλοντος, η ηλιακή ενέργεια θα πρέπει να χρησιμοποιείται περισσότερο διότι δεν βλάπτει το περιβάλλον.

Εάν η παγκόσμια οικονομία μεγαλώσει τόσο ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις των χωρών σε ενέργεια, οι απαιτήσεις ενέργειας πιθανώς θα αυξηθούν. Πιστεύεται ευρέως πως οι ανανεώσιμες τεχνολογίες μπορούν να καλύψουν αυτές τις απαιτήσεις με τιμές παρόμοιες ή χαμηλότερες από αυτές που προβλέπεται για τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Μέχρι τα μέσα του 21^{ου} αιώνα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα καλύπτουν τα τρία πέμπτα της αγοράς ηλεκτρισμού και τα δύο πέμπτα της αγοράς καυσίμων. Επιπλέον, η μεταστροφή σε μία οικονομία βασισμένη σε ανανεώσιμες πηγές θα επέφερε κέρδη όχι μόνο σε οικονομικά μεγέθη. Υπολογίζεται ότι έως το 2050 οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) θα έχουν μειωθεί στο 75% των επιπέδων του 1985, κάτι το οποίο δείχνει ότι τα ανανεώσιμα έχουν υιοθετηθεί πλήρως. Επιπρόσθετα, οι ΑΠΕ αναμένονται να είναι οικονομικά ανταγωνιστικές με τις συμβατές μορφές ενέργειας [6].

Επιπλέον, λόγω του μικρού μεγέθους του εξοπλισμού των ΑΠΕ, μπορούν να αναπτυχθούν με μεγαλύτερο ρυθμό. Ενώ η παραγωγή μεγάλων ποσών ενέργειας απαιτεί τεράστιες εδαφικές εγκαταστάσεις, ο εξοπλισμός των ΑΠΕ κατασκευάζεται σε εργοστάσια μειώνοντας έτσι το κόστος κατασκευής. Αυτή είναι μία καίρια παράμετρος που η βιομηχανία ΑΠΕ πρέπει να λάβει υπόψη της στην προσπάθεια μείωσης του κόστους και αύξησης της αξιοπιστίας.

Είναι ενθαρρυντικό το γεγονός πως οι πολιτικές που χρειάζονται για να επιτευχθούν οι στόχοι διεύρυνσης των ΑΠΕ υποστηρίζονται πλήρως με προγράμματα τα οποία

χρειάζονται ώστε να ενθαρρύνουν την καινοτομία και παραγωγικότητα μέσω της οικονομίας. Οι εταιρίες παραγωγής ηλεκτρισμού έχουν ήδη μετατραπεί από προστατευόμενα μονοπώλια σε ανταγωνιστικούς μάνατζερ που επενδύουν σε προγράμματα τα οποία συνδυάζουν τόσο τις συμβατές μορφές ενέργειας όσο και τις ΑΠΕ.

1.9 Περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την ενέργεια

Η ενέργεια θεωρείται ένας βασικός παράγοντας στην αύξηση του πλούτου και στην ανάπτυξη της οικονομίας. Η σημασία της ενέργειας στην οικονομική ανάπτυξη αναγνωρίζεται παγκοσμίως και τα ιστορικά δεδομένα επιβεβαιώνουν πως υπάρχει στενή σχέση μεταξύ της ενέργειας και της οικονομικής δραστηριότητας. Παρόλο που στις αρχές της δεκαετίας του 1970, μετά την κρίση για το πετρέλαιο, η ανησυχία ήταν για το κόστος της ενέργειας, τις τελευταίες δύο δεκαετίες η περιβαλλοντική υποβάθμιση έχει γίνει πιο εμφανής. Τα περιβαλλοντικά προβλήματα εμφανίστηκαν εξαιτίας της ραγδαίας αύξησης των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Για να επιτευχθούν λύσεις στα περιβαλλοντικά προβλήματα που η ανθρωπότητα αντιμετωπίζει σήμερα απαιτούνται μακροχρόνιες ενέργειες. Από αυτή τη σκοπιά, οι ΑΠΕ μοιάζουν να είναι μία από τις αποδοτικότερες λύσεις.

Μερικά χρόνια πριν, οι περισσότερες αναλύσεις συγκεντρώνονταν σε συμβατούς ρύπους όπως το διοξείδιο του θείου (SO₂), οξείδια του αζώτου (NO_x), σωματίδια και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Πρόσφατα, ωστόσο, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες έχουν επεκταθεί και στον έλεγχο των επιβλαβών μολυντών του αέρα, οι οποίοι είναι συνήθως τοξικές ουσίες επιβλαβείς ακόμα και σε μικρές δόσεις. Επιπλέον, οι εξελιγμένες βιομηχανικές διαδικασίες έχουν οδηγήσει σε νέα περιβαλλοντικά προβλήματα. Το διοξείδιο του άνθρακα παίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Ένα μεγάλο ποσό του CO₂ που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα προέρχεται από μηχανές που καίνε ορυκτά καύσιμα (EPA 2007).

Η διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (UNCED) που έγινε στο Ρίο ντε Τζανέιρο της Βραζιλίας το 1992 όρισε τους στόχους για μία βιώσιμη (ή αειφόρο) ανάπτυξη. Ο στόχος της βιώσιμης ανάπτυξης δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς ριζικές αλλαγές στο παγκόσμιο σύστημα ενέργειας. Πρόκειται για ένα σχέδιο δράσης που πρέπει να ληφθεί υπόψη παγκοσμίως, εθνικά και τοπικά από τον ΟΗΕ, τις κυβερνήσεις και τις τοπικές κοινωνίες. Για μία βιώσιμη ανάπτυξη σε μία κοινωνία, απαιτείται πως οι πηγές ενέργειας είναι ασφαλείς. Γι αυτό το λόγο υπάρχει στενή σύνδεση μεταξύ των ΑΠΕ και της βιώσιμης ανάπτυξης.

Η μόλυνση εξαρτάται από την κατανάλωση ενέργειας. Σήμερα, η παγκόσμια καθημερινή κατανάλωση πετρελαίου είναι 80 εκατομμύρια βαρέλια. Αν και είναι γνωστές οι συνέπειες της χρήσης μηχανών καύσης ορυκτών καυσίμων προς το περιβάλλον, το νούμερο αυτό αναμένεται να αυξηθεί στα 123 βαρέλια την ημέρα έως το 2025 [7]. Πολλοί είναι οι παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στα μελλοντικά ποσά ενέργειας που θα καταναλωθούν. Τέτοιοι παράγοντες είναι η αύξηση του

πληθυσμού, η οικονομία, οι καταναλωτικές συνήθειες και οι τεχνολογικές ανακαλύψεις.

Οι κύριοι τομείς που χρησιμοποιείται η ενέργεια είναι ο ηλεκτρισμός, οι μεταφορές, η θέρμανση και η βιομηχανία. Δεδομένα από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency, IEA) δείχνουν πως οι απαιτήσεις σε ηλεκτρισμό σχεδόν τριπλασιάστηκαν από το 1971 έως το 2002. Αυτό διότι ο ηλεκτρισμός είναι μία πολύ βολική μορφή ενέργειας. Σήμερα, το 95% της απαιτούμενης ενέργειας για τις μεταφορές προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα. Βέβαια, τα διαθέσιμα κοιτάσματα πετρελαίου και η περαιτέρω μείωσή τους οδηγούν σε μελλοντικές αλλαγές στις μεταφορές. Ένα προφανές υποκατάστατο του πετρελαίου θα ήταν η αιθανόλη, η μεθανόλη, το βιοντίζελ, ακόμα και το υδρογόνο.

Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται με ραγδαία αυξανόμενο ρυθμό ωστόσο, τα αποθέματά του δεν θα διαρκέσουν πολύ περισσότερο από του πετρελαίου. Ο άνθρακας είναι η μεγαλύτερη πηγή ορυκτού καυσίμου αλλά και η πιο προβληματική λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Όλες οι ενδείξεις δείχνουν πως η χρήση του άνθρακα για την παραγωγή ενέργειας θα συνεχιστεί κάτι το οποίο δε συμβαδίζει με τη βιώσιμη ανάπτυξη, εκτός και αν χρησιμοποιηθούν καθαρές τεχνολογίες με διαχωρισμό του άνθρακα.

Με τα παραπάνω δεδομένα, τρία περιβαλλοντικά προβλήματα είναι παγκοσμίως γνωστά: η όξινη βροχή, η τρύπα του όζοντος και η κλιματική αλλαγή.

1.9.1 Όξινη βροχή

Η όξινη βροχή είναι μία μορφή περιβαλλοντικής καταστροφής κατά την οποία SO_2 και NO_x που παράγονται από μηχανές καύσης ορυκτών καυσίμων διασκορπίζονται και διανύουν μεγάλες αποστάσεις μέσα στην ατμόσφαιρα και κατακρημνίζονται στο έδαφος προκαλώντας βλάβες στα οικοσυστήματα και αυξάνοντας υπερβολικά την τοξικότητα. Είναι προφανές ότι η λύση στο πρόβλημα της όξινης βροχής είναι ο σωστός έλεγχος των ρύπων SO_2 και NO_x .

1.9.2 Τρύπα του όζοντος

Το όζον που βρίσκεται στην στρατόσφαιρα, σε υψόμετρα μεταξύ 12 και 25χλμ λειτουργεί ως φυσικό φίλτρο που απορροφά την υπεριώδη (UV) ακτινοβολία (240-320nm) και την υπέρυθη ακτινοβολία [8]. Ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα είναι η εξάντληση την ζώνης όζοντος της στρατόσφαιρας, το οποία προκαλείται από τις εκπομπές χλωροφθορανθράκων (CFC), αλκανίων, και NO_x . Η καταστροφή του όζοντος μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένα επίπεδα ζημιογόνου υπεριώδους ακτινοβολίας, η οποία ευθύνεται για καρκίνους του δέρματος και βλάβες στα μάτια των ανθρώπων.

Το 1998, το μέγεθος της τρύπας του όζοντος πάνω από την Ανταρκτική ήταν 25 εκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα. Το 1993 ήταν σχεδόν 3 εκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα. Οι επιστήμονες εκτιμούν ότι η τρύπα του όζοντος θα παραμείνει σοβαρό πρόβλημα τα επόμενα 10-20 χρόνια και θα ακολουθήσει μία

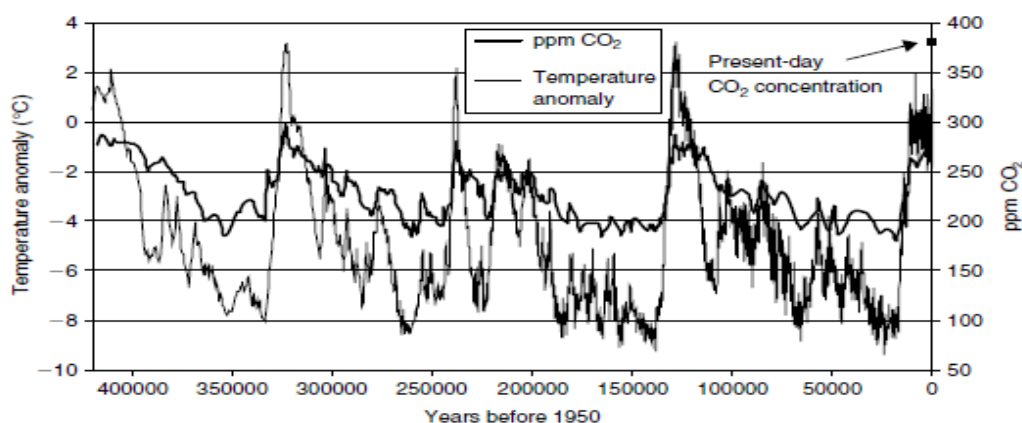
περίοδος αργής επαναφοράς. Η πλήρης επαναφορά προβλέπεται να συμβεί το 2050, ωστόσο ο ρυθμός επαναφοράς επηρεάζεται από την κλιματική αλλαγή [9].

1.9.3 Παγκόσμια κλιματική αλλαγή

Ο όρος *φαινόμενο του θερμοκηπίου* χρησιμοποιείται ευρέως για το ρόλο της ατμόσφαιρας (κυρίως υγρός ατμός και σύννεφα) και για το πώς αυτή διατηρεί την επιφάνεια της γης θερμή. Πρόσφατα, ωστόσο, παρατηρείται υψηλός συσχετισμός με τις εκπομπές CO₂ το οποίο προκαλεί το 50% του ανθρωπογενούς φαινομένου του θερμοκηπίου. Οι αυξημένες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου αυξάνουν τα ποσά της παγιδευμένης θερμότητας με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης. Η θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά 0.6°C τον τελευταίο αιώνα και ως συνέπεια αυτού υπολογίζεται πως η στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας έχει ανέβει κατά περίπου 20cm [10]. Αυτές οι αλλαγές θα έχουν τρομακτικές συνέπειες στις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Σύμφωνα με την Ε.Ε., η κλιματική αλλαγή συμβαίνει τώρα. Υπάρχει μία ομοφωνία από τους επιστήμονες που ερευνούν την κλιματική αλλαγή πως η παγκόσμια υπερθέρμανση οφείλεται κυρίως στο διοξείδιο του άνθρακα και στα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου τα οποία εκπέμπονται από τους ανθρώπους, κυρίως από τις μηχανές και από την αποψίλωση των δασών.

Οι άνθρωποι, μέσω των οικονομικών τους δραστηριοτήτων, συμβάλλουν στην αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Οι προβλέψεις δείχνουν πως εάν οι συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου συνεχίσουν να αυξάνονται με τους σημερινούς ρυθμούς, η θερμοκρασία της επιφάνειας της γης ίσως αυξηθεί κατά 2-4°C τον επόμενο αιώνα. Εάν αυτή η πρόβλεψη πραγματοποιηθεί, η στάθμη της θάλασσας θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 30-60cm. Οι συνέπειες μίας τέτοιας αύξησης μπορούν εύκολα να γίνουν αντιληπτές και είναι η πλημμύρα των παραθαλάσσιων περιοχών, η μετατόπιση των εύφορων περιοχών σε μεγαλύτερο υψόμετρο και η μείωση του πόσιμου νερού. Οι συνέπειες αυτές, λοιπόν, μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την επιβίωση όλων των πληθυσμών.



Σχήμα 1.4 Θερμοκρασία και συγκέντρωση CO₂ από τον παγετό του Vostok [10]

1.10 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας

Από την περιβαλλοντική σκοπιά, η χρήση της ηλιακής ενέργειας έχει κάποια θετικά αντίκτυπα:

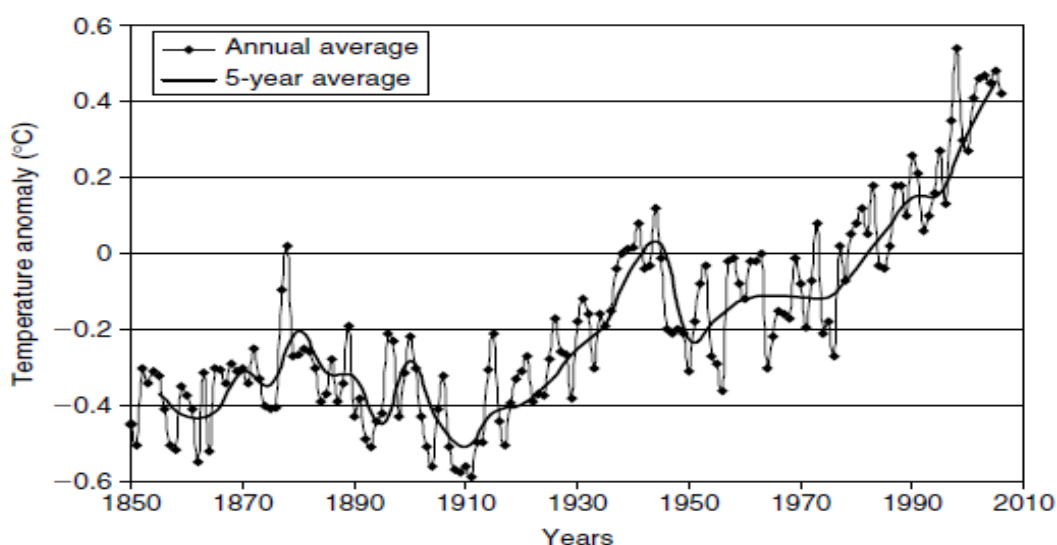
- Μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως CO₂, NO_x) και των τοξικών αερίων (SO₂).
- Αξιοποίηση των υποβαθμισμένων τμημάτων γης.
- Βελτίωση της ποιότητας των αποθεμάτων νερού.
- Μειωμένες απαιτήσεις των γραμμών μεταφοράς μέσα στο δίκτυο ηλεκτρισμού.

Τα κοινωνικο-οικονομικά οφέλη της ηλιακής τεχνολογίας περιλαμβάνουν:

- Αυξημένη ενεργειακή ανεξαρτησία κατά κράτη.
- Δημιουργία θέσεων εργασίας.
- Διαφοροποίηση και ασφάλεια (σταθερότητα) των ενεργειακών αποθεμάτων.
- Γρηγορότερη ηλεκτροδότηση των απομονωμένων αγροτικών περιοχών.

Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί πως δεν μπορούν να αποφευχθούν κάποιες συνέπειες προς το περιβάλλον. Οι αρνητικές συνέπειες των τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας είναι:

- Μόλυνση από την παραγωγή, εγκατάσταση, συντήρηση και κατεδάφιση των συστημάτων.
- Θόρυβος κατά την κατασκευή.
- Μετατόπιση εκτάσεων γης.
- Παρεμβολή στην καλαισθησία της φύσης.



Σχήμα 1.5 Παγκόσμια θερμοκρασία από το 1950 [10]

1.11 Σύντομη ιστορική αναδρομή της ηλιακής ενέργειας

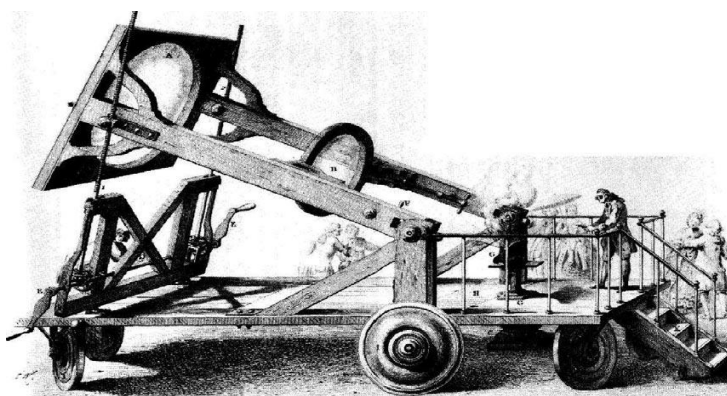
Η ηλιακή ενέργεια είναι η παλαιότερη μορφή ενέργειας. Ο ήλιος λατρευόταν από πολλούς αρχαίους πολιτισμούς ως θεός. Η πρώτη γνωστή πρακτική χρήση ήταν η αποξήρανση για τη διατήρηση της τροφής [6].

Πιθανότατα, η παλαιότερη μεγάλης κλίμακας εφαρμογή που γνωρίζουμε είναι το κάψιμο του ρωμαϊκού στρατού στη ακτή των Συρακουσών από τον Αρχιμήδη, Έλληνα μαθηματικό και φιλόσοφο (287-212 π.Χ.). Οι επιστήμονες συζητούσαν για αυτό το γεγονός για αιώνες. Από το 100 π.Χ. έως το 1100 μ.Χ. οι συγγραφείς έκαναν αναφορά σε αυτό το γεγονός, παρόλο που αργότερα είχε χαρακτηριστεί ως μύθος επειδή δεν υπήρχε τεχνολογία ώστε να κατασκευαστούν τέτοια κάτοπτρα [11]. Η βασική ερώτηση ήταν αν όντως ο Αρχιμήδης γνώριζε αρκετά για την επιστήμη της οπτικής ώστε να κατασκευάσει ένα κάτοπτρο που να συγκεντρώνει το φως του ηλίου σε ένα σημείο στο οποίο τα πλοία θα μπορούσαν να καούν από απόσταση.

Ο Έλληνας ιστορικός Πλούταρχος (46-120 π.Χ.) αναφέρεται στο περιστατικό λέγοντας πως οι Ρωμαίοι βλέποντας την αόριστη υπερθέρμανση των πλοίων τους χωρίς να βλέπουν κάποιο ορατό μέσο, άρχισαν να πιστεύουν ότι πολεμούν τους θεούς.

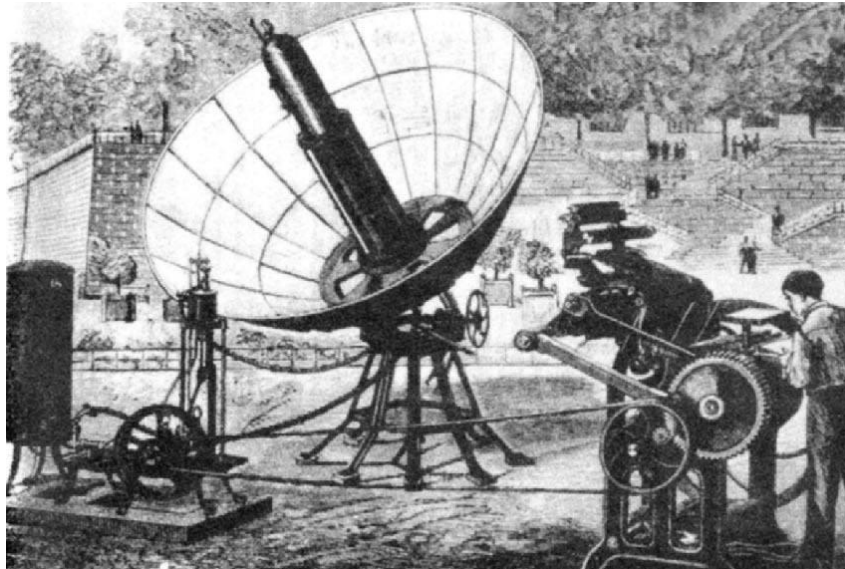
Ο Athanasius Kircher (1601-1680) 1800 χρόνια μετά τον Αρχιμήδη πραγματοποίησε κάποια πειράματα ώστε να ανάψει φωτιά σε ένα σωρό ξύλων από απόσταση έτσι ώστε να δει εάν η ιστορία του Αρχιμήδη έχει επιστημονική εγκυρότητα αλλά καμία αναφορά των ευρημάτων του δε διασώζεται [11].

Κατά τον 18^ο αιώνα, ηλιακοί φούρνοι ικανοί στο να λιώσουν σίδηρο, χαλκό και άλλα μέταλλα κατασκευάστηκαν. Οι φούρνοι κατασκευάστηκαν παντού στην Ευρώπη και τη Μέση Ανατολή. Μία από τις μεγάλες σε κλίμακα εφαρμογή ήταν ο ηλιακός φούρνος του Γάλλου χημικού Lavoisier ο οποίος γύρω στα 1774 κατασκεύασε ισχυρούς φακούς που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία. Μία ακόμα εφαρμογή τη χρήσης της ηλιακής ενέργειας εκείνο τον αιώνα πραγματοποιήθηκε από το Γάλλο φυσικό Bouffon (1747-1748) ο οποίος πειραματίστηκε με διάφορες συσκευές τις οποίες περιέγραψε ως «καυτοί καθρέπτες που καίνε σε μεγάλη απόσταση» [11].



Σχήμα 1.6 Ο ηλιακός φούρνος που χρησιμοποιήθηκε από τον Lavoisier το 1774 [11]

Κατά τον 18^ο αιώνα, έγιναν κάποιες προσπάθειες ώστε να μετατρέψουν την ηλιακή ενέργεια σε άλλες μορφές ενέργειας βασιζόμενοι κυρίως στην παραγωγή χαμηλής πίεσης ατμού ώστε να χειριστούν άλλες μηχανές. Ο August Mouchot πρωτοστάτησε σε αυτό τον τομέα κατασκευάζοντας διάφορες ηλεκτρικές ατμομηχανές (1864-1878) στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αφρική. Μία από αυτές παρουσιάστηκε στη Διεθνή Έκθεση στο Παρίσι. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιούνταν για να παράγει ατμό ώστε να καθοδηγεί μία μηχανή ζωγραφικής.



Σχήμα 1.7 Παραβολικός συλλέκτης που παρουσιάστηκε στην έκθεση των Παρισίων το 1878 [11]

Ο Abel Pifre, μεταγενέστερος του Mouchot, κατασκεύασε ηλιακές μηχανές [11,12]. Οι ηλιακές μηχανές του Pifre ήταν παραβολικοί ανακλαστήρες φτιαγμένοι από πολύ μικρούς καθρέπτες.

Οι προσπάθειες συνεχίστηκαν στις ΗΠΑ, όπου ο John Ericsson, ένας αμερικάνος μηχανικός, κατασκεύασε την πρώτη ατμομηχανή καθοδηγούμενη αποκλειστικά από ηλιακή ενέργεια. Ο Ericsson κατασκεύασε οχτώ συστήματα που είχαν παραβολικούς συλλέκτες χρησιμοποιώντας νερό ή αέρα ως εργαζόμενο μέσο [11].

Το 1901 ο A.G. Eneas εγκατέστησε ένα συγκεντρωτικό συλλέκτη διαμέτρου 10m ο οποίος τροφοδοτούσε μία αντλία νερού, σε μία φάρμα στην Καλιφόρνια. Η συσκευή αποτελούνταν από μία μεγάλη κατασκευή σε μορφή ομπρέλας και μπορούσε να περιστραφεί σε διάφορες γωνίες ώστε να λαμβάνει πλήρως τις ακτίνες του ηλίου. Οι ακτίνες του ηλίου συγκεντρώνονται σε ένα σημείο όπου βρισκόταν ο βραστήρας. Το νερό μέσα στο βραστήρα ζεσταινόταν και παρήγαγε ατμό, ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτούσε την αντλία νερού [11,12].

Το 1904, ένας Πορτογάλος ιερέας, ο πατέρας Himalaya, κατασκεύασε έναν μεγάλο ηλιακό φούρνο. Αυτός ο φούρνος φαινόταν αρκετά μοντέρνος σε σχήμα, ενώ ήταν ένας μεγάλος, ασύμμετρος, παραβολικός συλλέκτης [11].

Το 1912, ο Frank Shuman σε συνεργασία με τους C.V. Boys ανέλαβε να χτίσει την μεγαλύτερη εγκατάσταση άντλησης στον πλανήτη στο Meadi της Αιγύπτου. Το σύστημα μπήκε σε λειτουργία το 1913, χρησιμοποιώντας μακριούς παραβολικούς κυλίνδρους ώστε να εστιάζουν το φως του ηλίου σε ένα απορροφητικό σωλήνα. Ο κάθε κύλινδρος είχε μήκος 62m και η συνολική περιοχή που κάλυπταν οι κύλινδροι ήταν 1200m². Η ηλιακή μηχανή παρήγαγε από 37 έως 45 kW συνεχόμενα για διάρκεια 4-5 ωρών [11,12].

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 ετών, πολλές μηχανές σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας συγκεντρωτικούς συλλέκτες ώστε να θερμάνουν το εργαζόμενο μέσο. Οι δύο κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι κεντρικοί δέκτες και οι κατανεμημένοι δέκτες. Τα συστήματα με κεντρικούς δέκτες χρησιμοποιούν τμήματα ηλιοστάτη (περιστρεφόμενα κάτοπτρα) για να συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια σε ένα συλλέκτη. Η τεχνολογία κατανεμημένων δεκτών περιλαμβάνει παραβολικά πιάτα, φακούς Fresnel, παραβολικούς συλλέκτες.



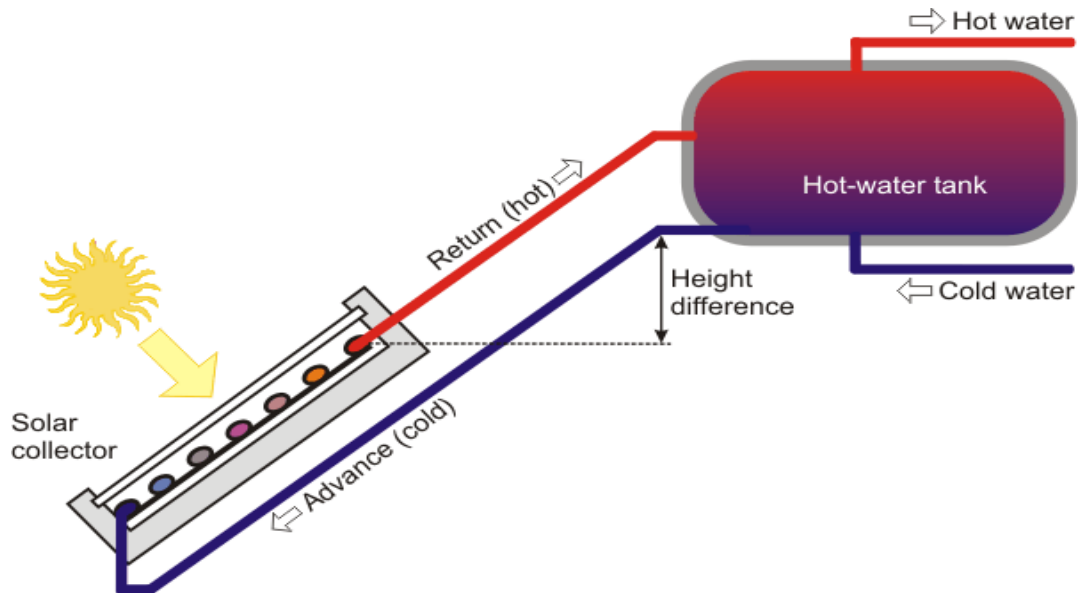
Σχήμα 1.8 Ηλιοστάτης [11]

Σήμερα, πολλές μεγάλες ηλιακές εγκαταστάσεις μπορούν να παράξουν πολλά MW ενέργειας. Η πρώτη εμπορική ηλιακή εγκατάσταση εγκαταστάθηκε το 1979 στο Albuquerque, στο New Mexico. Μπορούσε να παράγει 5 MW. Η δεύτερη εγκαταστάθηκε στην California και μπορούσε να παράγει 35 MW.

Ένας ακόμα ενδιαφέρον τομέας, το ζεστό νερό και η θέρμανση, εμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1930 αλλά έγινε ενδιαφέρον τη δεκαετία του 1940. Μέχρι τότε, εκατομμύρια σπίτια θερμαίνονταν από βραστήρες που λειτουργούσαν με κάρβουνο. Η ιδέα ήταν να ζεσταθεί το νερό και να τροφοδοτηθεί στο υδραυλικό σύστημα που ήταν ήδη εγκατεστημένο.

Η κατασκευή των ηλιακών θερμοσίφωνων ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η βιομηχανία της κατασκευής τους αναπτύχθηκε γρήγορα σε πολλές χώρες. Οι τυπικοί θερμοαντήρες νερού είναι της μορφής του θερμοσίφωνα και αποτελούνται από δύο επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, έχουν έναν απορροφητή ανάμεσά τους

επιφάνειας 3 ή 4m² και από το αποθηκευτικό δοχείο χωρητικότητας 150 έως 180 λίτρων νερού. Ένας δευτερεύον εναλλάκτης θερμότητας χρησιμοποιείται τις χειμερινές περιόδους, περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Ένας άλλος σημαντικός τύπος ηλιακά θερμαινόμενου νερού είναι ο τύπος ανακυκλοφορίας. Σε αυτό το σύστημα, μόνο τα ηλιακά πάνελ είναι ορατά στην οροφή, το δοχείο ζεστού νερού βρίσκεται εντός της οικίας και το σύστημα αποτελείται από αντλίες, σωληνώσεις και ένα θερμοστάτη [13].



Σχήμα 1.9 Θερμοσίφωνο[13]

Κεφάλαιο 2 Ηλιακοί συλλέκτες

Οι συλλέκτες ηλιακής ενέργειας είναι ένα ειδικό είδος εναλλάκτη θερμότητας που μετατρέπουν την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας σε ενέργεια προς αξιοποίηση. Πρόκειται για μία συσκευή η οποία απορροφά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, τη μετατρέπει σε θερμότητα κι μεταφέρει αυτή τη θερμότητα μέσω ενός ρευστού (συνήθως νερό, λάδι ή αέρα) το οποίο ρέει στον συλλέκτη. Έτσι, η ηλιακή ενέργεια μεταδίδεται μέσω του ρευστού είτε απευθείας για χρήση είτε αποθηκεύεται στο δοχείο για μελλοντική χρήση.

Υπάρχουν, βασικά, δύο τύποι ηλιακών συλλεκτών: μη συγκεντρωτικοί (ή στατικοί) και συγκεντρωτικοί. Ένας μη συγκεντρωτικός συλλέκτης έχει το ίδιο τμήμα για δέχεται και να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία ενώ συγκεντρωτικός συλλέκτης συνήθως έχει κοίλες, ανακλαστικές επιφάνειες για να συλλάβουν και να εστιάσουν τις ακτίνες σε μία μικρότερη συγκεντρωτική επιφάνεια, ως εκ τούτου αυξάνουν την ροή την ακτινοβολίας.

2.1 Μη συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες

Οι ηλιακοί συλλέκτες καθορίζονται κυρίως από την κίνησή τους: στατικοί, στρεφόμενοι σε ένα άξονα, στρεφόμενοι σε δύο άξονες και ρυθμιζόμενης θερμοκρασίας. Εξετάζονται οι στατικοί συλλέκτες. Αυτοί οι συλλέκτες είναι μονίμως πακτωμένοι σε μία συγκεκριμένη θέση και δεν περιστρέφονται ακολουθώντας τον ήλιο. Υπάρχουν τρεις τύποι ηλιακών συλλεκτών σε αυτή την κατηγορία:

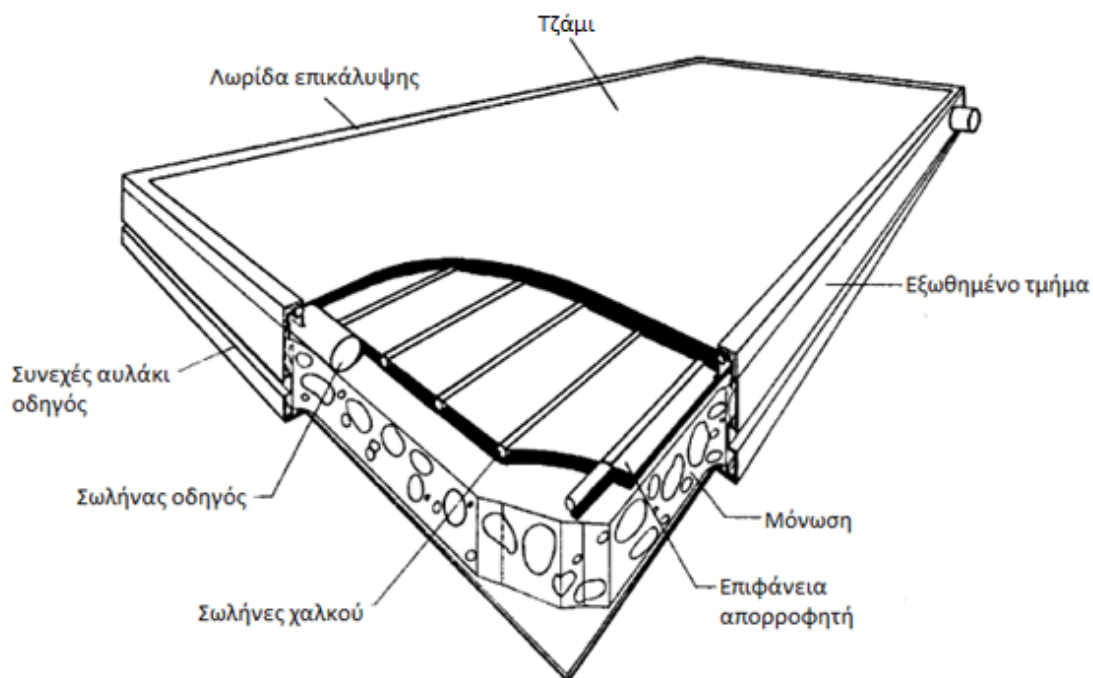
1. Επίπεδοι συλλέκτες (Flat plate collectors-FPC).
2. Σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες (Stationary compound parabolic collectors-CPC).
3. Συλλέκτες με σωλήνα κενού (Evacuated tube collectors-ETC).

2.1.1 Επίπεδοι συλλέκτες (FPC)

Ένας τυπικός ηλιακός συλλέκτης φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία περνάει μέσα από μία διάφανη επιφάνεια και προσπίπτει σε επιφάνεια απορροφητή με ιδιότητες μέλανος σώματος, ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας αυτής απορροφάται και μετά μεταφέρεται, μέσω του εργαζόμενου μέσου που ρέει στο σωλήνα, για χρήση ή αποθήκευση. Η κάτω πλευρά του απορροφητή είναι καλά μονωμένη για να μειωθούν οι απώλειες αγωγής. Οι σωλήνες ρευστού μπορούν να συγκολληθούν στον απορροφητή ή μπορούν να αποτελούν ξεχωριστό μέρος του απορροφητή. Οι σωλήνες ρευστού είναι συνδεδεμένες και στις δύο άκρες τους σε σωλήνα-οδηγό μεγάλης διαμέτρου.

Το διάφανο κάλυμμα χρησιμοποιείται ώστε να μειωθούν οι απώλειες λόγω συναγωγής μέσω του αέρα από τον απορροφητή έως το γυαλί. Επίσης, μειώνουν τις απώλειες ακτινοβολίας καθώς το γυαλί είναι διάφανο για την μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία του ηλίου αλλά είναι σχεδόν αδιάφανο για την μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον απορροφητή (φαινόμενο του θερμοκηπίου).

Οι επίπεδοι συλλέκτες είναι συνήθως μόνιμα πακτωμένοι σε μία θέση και δεν χρειάζονται περιστροφή. Οι συλλέκτες θα πρέπει να προσανατολίζονται προς τον ισημερινό, κοιτάζοντας προς το νότο για το βόρειο ημισφαίριο και κοιτάζοντας προς το βορρά για το νότιο ημισφαίριο.



Σχήμα 2.1 Τμηματική όψη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [14]

- Τζάμι: ένα ή περισσότερα φύλλα γυαλιού ή άλλου διαθερμικού υλικού.
- Σωλήνες: Για τη ροή του εργαζόμενου μέσου μετάδοσης της ενέργειας.
- Επιφάνεια απορροφητή: Επίπεδη, κυματοειδής ή με αυλακώσεις πάνω στην οποία είναι προσαρμοσμένοι οι σωλήνες.
- Σωλήνες οδηγοί: Για να παραλάβουν το ρευστό.
- Μόνωση: Για την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών στο κάτω και στο πλαϊνό μέρος του συλλέκτη.

Οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν κατασκευαστεί σε μεγάλη ποικιλία σχεδίων και από πολλά διαφορετικά υλικά. Ως εργαζόμενα μέσα έχουν χρησιμοποιηθεί νερό, νερό με προσθετικό ψυκτικό, λάδι ή αέρας. Ο βασικός τους σκοπός είναι να συλλέξουν όση δυνατόν περισσότερη ενέργεια στο χαμηλότερο κόστος. Ο συλλέκτης πρέπει να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής παρά τις επιβλαβείς συνέπειες της υπεριώδους ακτινοβολίας του ηλίου, της διάβρωσης, του βουλώματος εξαιτίας της τοξικότητας, της αλκαλικότητας, της έκθεσής του σε σκόνη και υγρασία, το σπάσιμο του τζαμιού, το βανδαλισμό ή και άλλων αιτιών. Αυτές οι αιτίες μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρήση ενισχυμένου γυαλιού.

Το γυαλί χρησιμοποιείται ευρέως σε ηλιακούς συλλέκτες διότι διαβιβάζει περίπου το 90% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (0.85-0.90 σε

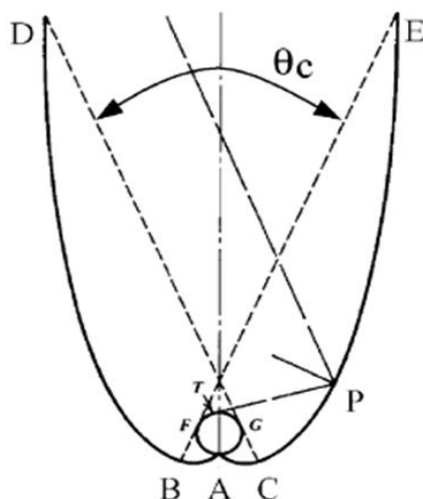
φυσιολογικές συνθήκες) ενώ παράλληλα απορρίπτει την ηλιακή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (5.0-50 μm) [14].

Η επιφάνεια του απορροφητή απορροφά όση ακτινοβολία περνά από το τζάμι, ενώ χάνει πολύ μικρό ποσό θερμότητας στο επάνω μέρος προς την ατμόσφαιρα και στο κάτω μέρος από τη βάση του συλλέκτη. Ο απορροφητής μεταφέρει την θερμότητα από την ηλιακή ενέργεια στους σωλήνες όπου ρέει το εργαζόμενο μέσο. Η απορροφητικότητα της επιφάνειας του απορροφητή για την ηλιακή ακτινοβολία (μικρού μήκους κύματος, αφού μόνο αυτή διαπερνά το τζάμι) εξαρτάται από τη φύση και το χρώμα του και από την προσπίπτουσα γωνία. Συνήθως, χρησιμοποιείται μαύρο χρώμα, ωστόσο έχουν προταθεί πολλά άλλα χρώματα [15].

Με διάφορες ηλεκτρολυτικές ή χημικές διαδικασίες, οι επιφάνειες μπορούν να φτιάχνονται με υψηλή απορροφητικότητα (α) ακτινοβολίας και χαμηλό συντελεστή εκπομπής (ε) για την ακτινοβολία υψηλού μήκους κύματος.

2.1.2 Σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες (CPC)

Οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες έχουν την ικανότητα του να ανακλούν στον απορροφητή όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η αναγκαιότητα της μετακίνησης της εστίας ώστε να διευκολύνεται ο προσανατολισμός μπορεί να μειωθεί με τη χρήση ενός κατόπτρου που αποτελείται από δύο τμήματα παραβολής το ένα απέναντι από το άλλο, Σχήμα 2.2.

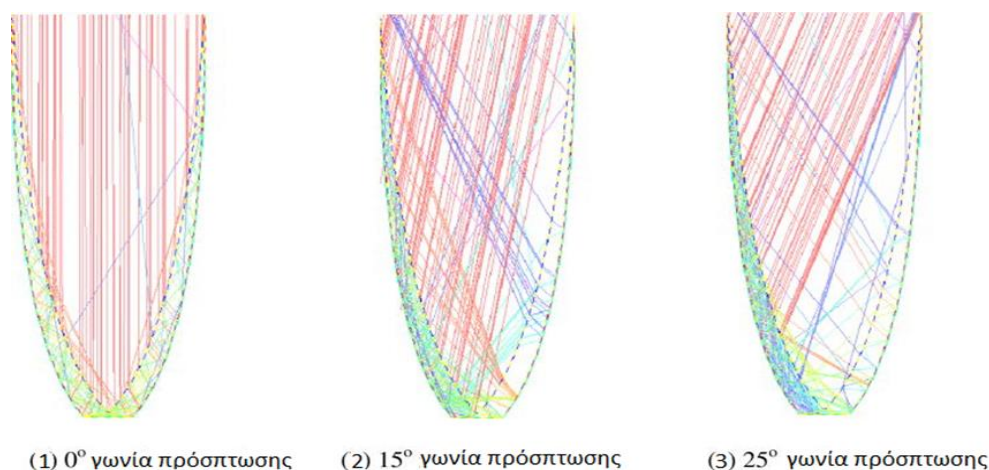


Σχήμα 2.2 Σχηματικό διάγραμμα ενός σύνθετου παραβολικού συλλέκτη [17]

Οι παραβολικοί συλλέκτες μπορούν να δεχθούν την ακτινοβολία σε ένα μεγάλο εύρος γωνιών. Μέσω των εσωτερικών ανακλάσεων, η ακτινοβολία που μπαίνει στο άνοιγμα, καθοδηγείται στην απορροφητική επιφάνεια η οποία βρίσκεται στο βυθό του συλλέκτη. Ο απορροφητής μπορεί να έχει διάφορες διαμορφώσεις. Μπορεί να είναι κυλινδρικός όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 ή επίπεδος. Στον παραβολικό συλλέκτη του Σχήματος 2.2, τα κατώτερα τμήματα του συλλέκτη (AB και AC) είναι κυκλικά, ενώ τα ανώτερα τμήματα (BD και CE) είναι παραβολικά. Καθώς τα ανώτερα

τμήματα του παραβολικού συλλέκτη συμβάλλουν λίγο στην καθοδήγηση της ακτινοβολίας προς τον απορροφητή, μπορούν να εξαλειφθούν, σχηματίζοντας μία μικρότερη μορφή παραβολικού συλλέκτη η οποία είναι φθηνότερη. Οι παραβολικοί συλλέκτες συνήθως καλύπτονται με γυαλί ώστε να αποφευχθεί η είσοδος σκόνης και άλλων υλικών στον συλλέκτη με αποτέλεσμα τη μείωση της ανακλαστικότητας των τοιχωμάτων [17].

Η γωνία αποδοχής ορίζεται ως η γωνία όπου μία πηγή φωτός μπορεί να μετακινηθεί και ακόμα να συγκλίνει προς τον απορροφητή. Ο προσανατολισμός ενός παραβολικού συλλέκτη σχετίζεται με τη γωνία αποδοχής (θ_c στο Σχήμα 2.2). Επίσης αναλόγως με τη γωνία αποδοχής, ο συλλέκτης μπορεί να είναι στατικός ή να περιστρέφεται. Ένας παραβολικός συλλέκτης πρέπει να προσανατολίζεται με τον μεγάλο σε μήκος άξονά του είτε προς βορρά-νότο είτε προς ανατολή-δύση και το άνοιγμά του να έχει κλίση προς τον ισημερινό σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος. Όταν προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση βορράς-νότος ο συλλέκτης πρέπει να ακολουθεί τον ήλιο στρέφοντας τον άξονά του ώστε να αντικρίζει συνεχώς τον ήλιο. Μπορεί, επίσης, να είναι στατικός αλλά θα λαμβάνει ακτινοβολία μόνο τις ώρες όπου ο ήλιος εντός της γωνίας αποδοχής. Όταν προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση ανατολή-δύση, ο συλλέκτης μπορεί να λαμβάνει συνεχώς ακτινοβολία λόγω της μεγάλης σε εύρος γωνίας αποδοχής του. Για τους στατικούς παραβολικούς συλλέκτες, η ελάχιστη γωνία αποδοχής είναι ίση με 47° . Αυτή η γωνία καλύπτει την απόκλιση του ήλιου από το θερινό στο χειμερινό ηλιοστάσιο ($2 \times 23.5^\circ$). Στην πράξη, χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες γωνίες που επιτρέπουν στο συλλέκτη να συλλέγει διάχυτη ακτινοβολία με κόστος μειωμένο συντελεστή συγκέντρωσης.



Σχήμα 2.3 Οι ακτίνες φωτός σε ένα συλλέκτη CPC για γωνίες πρόσπτωσης 1) 0° 2) 15° 3) 25° [17]

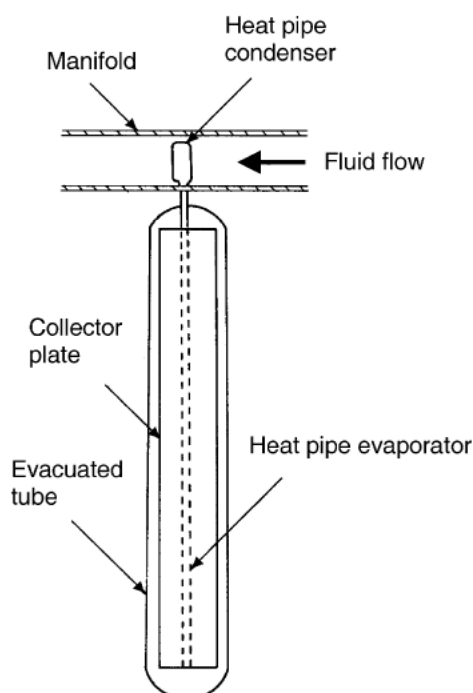
Δύο βασικοί τύποι παραβολικού συλλέκτη έχουν σχεδιαστεί, ο συμμετρικός και ο ασύμμετρος. Αυτοί, συνήθως, χρησιμοποιούν δύο κύρια είδη απορροφητών, τύπου πτερυγίου και σωληνωτού τύπου [16].

Για το σχεδιασμό αυτού του είδους συλλεκτών υπάρχουν πρακτικές θεωρήσεις όπως η επιλογή του τύπου του κατόπτρου, η βέλτιστη μέθοδος για την εισαγωγή ενός

κενού μεταξύ του απορροφητή και του κατόπτρου για την ελαχιστοποίηση των οπτικών και των θερμικών απωλειών.

2.1.3 Συλλέκτες με σωλήνα κενού (ETC)

Οι συμβατικοί επίπεδοι συλλέκτες φτιάχτηκαν για χρήση σε ηλιόλουστα και θερμά κλίματα. Η απόδοσή τους, ωστόσο, είναι μειωμένη σημαντικά όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς λόγω κρύου, συννεφιάς και αέρα. Επιπρόσθετα, η υγρασία και η σκόνη επηρεάζουν την απόδοση αυτών των συλλεκτών. Οι συλλέκτες με σωλήνα κενού λειτουργούν διαφορετικά από τους υπόλοιπους συλλέκτες. Αυτοί αποτελούνται από ένα σωλήνα θερμότητας μέσα σε ένα σφραγισμένο σωλήνα κενού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Σχηματικό διάγραμμα συλλέκτη με σωλήνα κενού [14]

Οι ETC έχουν δείξει πως ο συνδυασμός μίας επιλεκτικής επιφάνειας με συναγωγή μπορεί να οδηγήσει σε καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες [14]. Το περιβάλλον κενού μειώνει τις απώλειες συναγωγής και αγωγής κι έτσι ο συλλέκτης μπορεί να λειτουργήσει και σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τον επίπεδο. Όπως οι επίπεδοι, συλλέγουν τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία του ηλίου. Ωστόσο, η απόδοσή τους είναι υψηλότερη σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης.

Οι συλλέκτες με σωλήνα κενού χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο υγρό ατμό υλικών αλλαγής φάσης, για υψηλότερη αποδοτικότητα. Λόγω του ότι πάνω από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης δεν μπορεί να γίνει εξάτμιση ή συμπύκνωση, οι σωλήνες κενού προσφέρουν προστασία από το πάγωμα και την υπερθέρμανση. Αυτή η μορφή αυτό-ελέγχου είναι ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του συλλέκτη με σωλήνα κενού.

2.2 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες

Οι θερμοκρασίες που παρέχουν ενέργεια μπορούν να αυξηθούν με τη μείωση της περιοχής όπου υπάρχουν απώλειες θερμότητας. Οι θερμοκρασίες αυτές μπορούν να επιτευχθούν εάν ένα μεγάλο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας συγκεντρώνεται σε μία σχετικά μικρή συγκεντρωτική περιοχή. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα συγκρινόμενοι με τους συμβατικούς επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες [18].

- Το εργαζόμενο μέσο μπορεί να φτάσει υψηλότερες θερμοκρασίες σε ένα συγκεντρωτικό σύστημα. Αυτό σημαίνει υψηλότερη θερμοδυναμική αποδοτικότητα.
- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος λόγω των μειωμένων θερμικών απωλειών που σχετίζονται με τον απορροφητή.
- Τα κάτοπτρα που ανακλούν χρειάζονται λιγότερο υλικό και είναι δομικά απλούστερα από τους επίπεδους συλλέκτες.

Τα μειονεκτήματά τους είναι:

- Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες συλλέγουν λιγότερη διάχυτη ακτινοβολία.
- Απαιτούνται συστήματα παρακολούθησης του ηλίου (sun tracking system).
- Οι επιφάνειες ανάκλασης ίσως χάσουν την ανακλαστικότητα τους με την πάροδο του χρόνου και ίσως χρειαστούν καθάρισμα και ξεσκόνισμα.

Οι συλλέκτες που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι:

1. Ηλιοστάτες ή κεντρικοί συλλέκτες (Central receivers).
2. Συλλέκτες Fresnel.
3. Παραβολικοί δίσκοι (parabolic dishes).
4. Κοίλοι παραβολικοί συλλέκτες (Parabolic trough collectors- PTC).

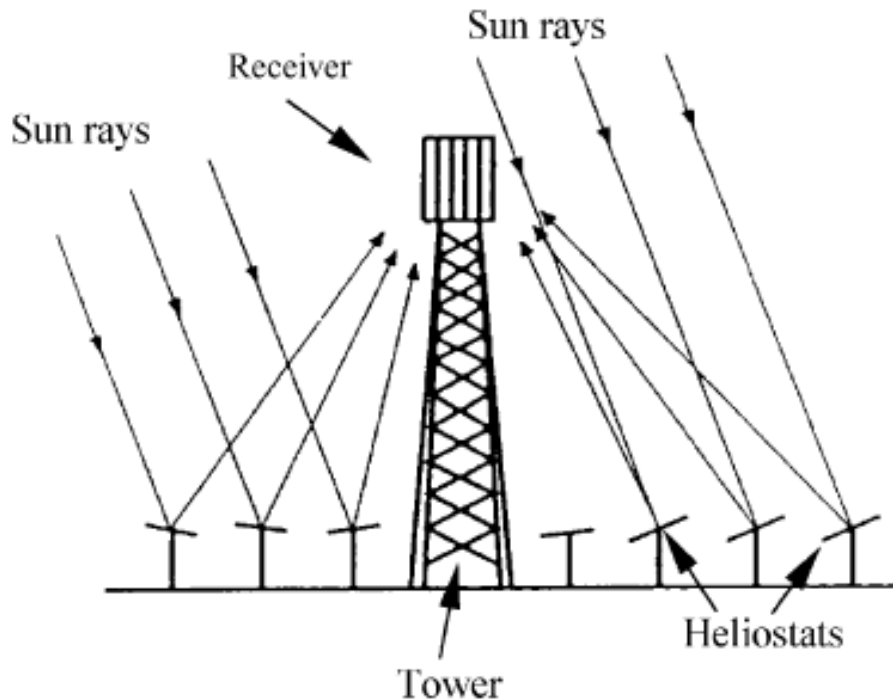
2.2.1 Ηλιοστάτες

Για υπερβολικά μεγάλα ποσά ηλιακής ενέργειας, μία ποικιλία επίπεδων κατόπτρων ή ηλιοστατών, χρησιμοποιώντας ποσά αλαζιμουθίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανακλάσουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία επάνω σε έναν κοινό στόχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Αυτό ονομάζεται το πεδίο ηλιοστατών ή κεντρικός συλλέκτης. Χρησιμοποιώντας ελαφρώς κοίλα τμήματα κατόπτρου στους ηλιοστάτες, μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας μπορούν να οδηγηθούν στην γεννήτρια ατμού ώστε να παραχθεί ατμός υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης.

Η θερμότητα που απορροφάται από τον απορροφητή μεταφέρεται σε ένα ρευστό το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί αργότερα. Οι κεντρικοί συλλέκτες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα:

- Συλλέγουν ηλιακή ενέργεια οπτικά και τη μεταφέρουν σε έναν δέκτη, έτσι ελαχιστοποιούν τις απαιτήσεις μεταφοράς σε θερμότητα.

- Τυπικά επιτυγχάνουν αναλογία συγκέντρωσης 300-1500 και είναι υψηλά αποδοτικοί τόσο στο να συλλέγουν ενέργεια όσο και στο να τη μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό.
- Μπορούν βολικά να αποθηκεύσουν θερμότητα.



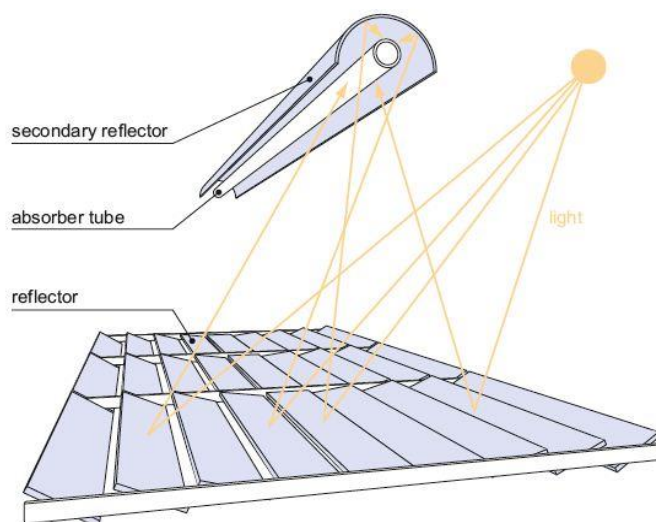
Σχήμα 2.5 Σχηματικό διάγραμμα ενός κεντρικού συστήματος με ηλιοστάτες [19]

Ο κάθε ηλιοστάτης σε μία εγκατάσταση με κεντρικό σύστημα έχει ανακλαστική επιφάνεια από 50 έως 150m². Οι ηλιοστάτες συλλέγουν και συγκεντρώνουν το φως του ηλίου στον δέκτη, ο οποίος το απορροφά, μεταφέροντας την ενέργειά του στο εργαζόμενο μέσο. Το σύστημα μεταφοράς του ρευστού το οποίο αποτελείται κυρίως από σωλήνες, αντλίες και βαλβίδες οδηγεί το εργαζόμενο ρευστό σε έναν κλειστό βρόχο ανάμεσα στο δέκτη, την αποθήκευση και τα συστήματα μετατροπής ενέργειας. Ένα θερμικό σύστημα αποθήκευσης συλλέγει και αποθηκεύει τη συγκεντρωμένη ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Το αποθηκευτικό σύστημα ξεχωρίζει τη συλλογή ηλιακής ενέργειας από την μετατροπή της σε ηλεκτρισμό. Το σύστημα μετατροπής της ενέργειας αποτελείται από μία γεννήτριας ατμού και βοηθητικό εξοπλισμό, το οποίο μετατρέπει τη θερμότητα σε ηλεκτρισμό [19].

Η μέση ηλιακή ροή που προσκρούει στον δέκτη είναι ανάμεσα σε 200 και 1000 kW/m². Αυτή η μεγάλη ροή επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, πάνω από 1500°C. Τα κεντρικά συστήματα μπορούν να ενσωματωθούν σε εγκαταστάσεις με ορυκτά καύσιμα για υβριδικές επιχειρήσεις.

2.2.2 Συλλέκτες Fresnel

Σε ένα συλλέκτη Fresnel μεγάλα πεδία ανακλαστήρων συγκεντρώνουν τη δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα στατικό δέκτη που βρίσκεται αρκετά μέτρα ψηλότερα από το έδαφος. Ο δέκτης περιέχει ένα δεύτερο ανακλαστήρα που συγκεντρώνει όλη την εισερχόμενη ακτινοβολία σε ένα σωληνωτό απορροφητήρα. Τα κάτοπτρα δεν είναι εντελώς επίπεδα αλλά έχουν μικρή καμύλη η οποία επιτυγχάνεται με μηχανική κάμψη. Ο δεύτερος συγκεντρωτής δεν μεγαλώνει απλά το στόχο για τους ανακλαστήρες Fresnel αλλά επιπλέον μονώνει τον απορροφητικό σωλήνα. Στο πίσω μέρος του είναι καλυμμένος με μια αδιάφανη μόνωση ενώ στο μπροστινό ένας υαλοπίνακας μειώνει τις απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής.



Σχήμα 2.6 Αρχή λειτουργίας συλλέκτη Fresnel [20]

Οι συλλέκτες Fresnel είναι σχεδιασμένοι για χρήση σε ένα μεγάλο εύρος βιομηχανικών εφαρμογών. Μπορούν να παράξουν θερμότητα σε θερμοκρασίες μέχρι και 400°C και πίεση μέχρι και 120 bar. Χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο νερό, λάδι ή γλυκόλη υψηλής θερμοκρασίας. Εναλλακτικά, το σύστημα μπορεί να παράξει ατμό απευθείας στον συλλέκτη. Λόγω της αρθρωτής σχεδίασής του, το σύστημα μπορεί να αναβαθμιστεί σε αρκετά MW.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του συλλέκτη Fresnel σε σύγκριση με τους παραβολικούς κοίλους συλλέκτες είναι:

- Ανέξοδα επίπεδα κάτοπτρα και απλό σύστημα παρακολούθησης.
- Καμία τεχνολογία κενού και χωρίς σφράγιση γυαλιού-μετάλλου.
- Σταθερός σωλήνας απορρόφησης χωρίς την ανάγκη για ευέλικτες συνδέσεις υψηλής πίεσης.
- Ένας μόνο σωλήνας απορρόφησης χωρίς την ανάγκη για θερμική διαστολή τόξου.

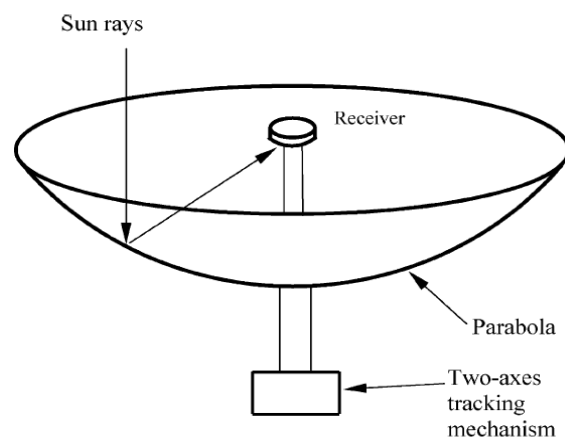
- Λόγω της επιπεδότητας του ανακλαστήρα, τα φορτία ανέμου μειώνονται σημαντικά, ώστε το πλάτος για έναν σωλήνα απορρόφησης του ανακλαστήρα μπορεί εύκολα να είναι τρεις φορές το πλάτος της γούρνας.
- Λόγω της άμεσης παραγωγής ατμού δεν είναι απαραίτητος ο εναλλάκτης θερμότητας.
- Αποδοτική χρήση της γης, δεδομένου ότι οι συλλέκτες μπορούν να τοποθετηθούν ο ένας δίπλα στον άλλο.

Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορούν να οδηγήσουν σε έως και 50% μείωση του κόστους όσον αφορά το ηλιακό πεδίο σε σχέση με τα παραβολικά κοίλα. Περαιτέρω μείωση του κόστους είναι εφικτή λόγω οικονομίας κλίμακας και βέλτιστου σχεδιασμού του συλλέκτη. Επιπλέον, εκτός από το μειωμένο κόστος του ηλιακού πεδίου υπάρχει και η εξοικονόμηση πόρων εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους λειτουργίας και συντήρησης [20,21].

2.2.3 Παραβολικοί δίσκοι (Parabolic dishes)

Ο παραβολικός δίσκος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 είναι ένας συλλέκτης με σημείο εστίασης ο οποίος παρακολουθεί τον ήλιο κατά δύο άξονες, συγκεντρώνοντας ηλιακή ενέργεια σε ένα δέκτη ο οποίος βρίσκεται στο σημείο εστίασης του δίσκου. Η κατασκευή του δίσκου πρέπει να ακολουθήσει πλήρως τον ήλιο για να ανακλάσει την ακτινοβολία στο δέκτη. Γι αυτό το λόγο μηχανισμοί παρακολούθησης (tracking mechanisms) χρησιμοποιούνται εις διπλούν σε δύο άξονες.

Ο δέκτης απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία μετατρέποντάς την σε θερμότητα στο εργαζόμενο ρευστό. Η θερμότητα μπορεί είτε να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό χρησιμοποιώντας μία γεννήτρια συνδεδεμένη απευθείας με το δέκτη, είτε μπορεί να μεταφερθεί μέσω σωληνώσεων σε ένα κεντρικό σύστημα μετατροπής ενέργειας. Τα συστήματα με παραβολικούς δίσκους μπορούν να φτάσουν θερμοκρασίες πάνω από 1500°C.



Σχήμα 2.7 Σχηματικό διάγραμμα παραβολικού δίσκου [22]

Οι παραβολικοί δίσκοι έχουν μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα:

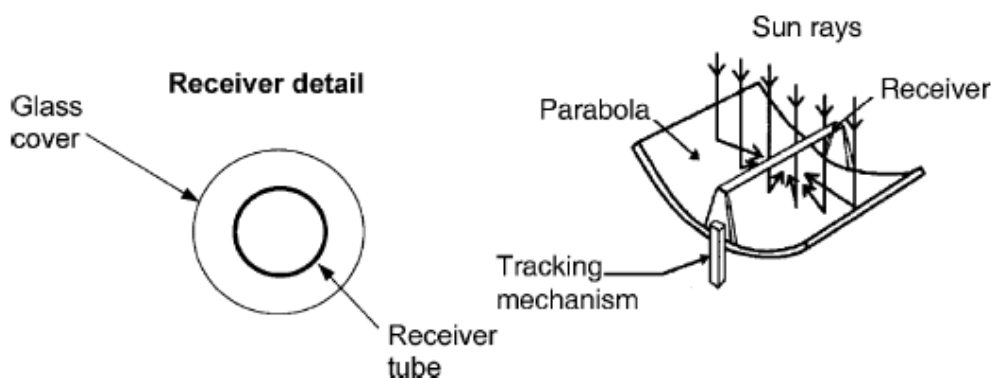
- Λόγω του ότι παρακολουθούν πάντα τον ήλιο είναι οι πιο αποδοτικοί ηλιακοί συλλέκτες.
- Έχουν αναλογία συγκέντρωσης 600-2000 κι έτσι είναι πολύ αποδοτικοί σε συστήματα μετατροπής ενέργειας.
- Έχουν αρθρωτό συλλέκτη και δέκτη που σημαίνει ότι λειτουργούν είτε αυτόνομα είτε ως μέλη ενός μεγαλύτερου συστήματος με παραβολικούς δίσκους.

Η κύρια χρήση αυτού του τύπου συλλεκτών είναι για μηχανές με παραβολικούς δίσκους. Ένα σύστημα με τέτοιες μηχανές είναι μία ηλεκτρική γεννήτρια που χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία αντί για ακατέργαστο πετρέλαιο ή κάρβουνο [22].

2.2.4 Κοίλοι παραβολικοί συλλέκτες (Parabolic trough collectors-PTC)

Για να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες με καλή αποδοτικότητα απαιτείται ένας ηλιακός συλλέκτης υψηλής απόδοσης. Τα συστήματα με ελαφριές κατασκευές και χαμηλό κόστος για διεργασίες έως και 400°C μπορούν να πραγματοποιηθούν με τους κοίλους παραβολικούς συλλέκτες (PTC). Οι κοίλοι παραβολικοί συλλέκτες λειτουργούν σε θερμοκρασίες ανάμεσα στους 50°C και τους 400°C.

Οι συλλέκτες αυτοί κατασκευάζονται στρέφοντας ένα λεπτό φύλλο αντανάκλαστικού μετάλλου σε παραβολικό σχήμα. Ένας μεταλλικός, μαύρος σωλήνας ο οποίος καλύπτεται από ένα σωλήνα γυαλιού, ώστε να μειώσει τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής, τοποθετείται στην εστιακή γραμμή του συλλέκτη, Σχήμα 2.8 [23]. Καθώς η παραβολή τοποθετείται απέναντι από τον ήλιο, οι ακτίνες αντανάκλονται από το συλλέκτη προς τον απορροφητή.



Σχήμα 2.8 Σχηματικό διάγραμμα κοίλου παραβολικού συλλέκτη (PTC) [23]

Είναι σημαντική η χρήση συστήματος παρακολούθησης του ήλιου, με ένα βαθμό ελευθερίας. Ο συλλέκτης προσανατολίζεται είτε στην κατεύθυνση ανατολή-δύση είτε στην κατεύθυνση βορράς-νότος. Τα πλεονεκτήματα του συστήματος παρακολούθησης του ήλιου είναι πως χρειάζεται μικρή ρύθμιση κατά τη διάρκεια της ημέρας και το πλήρες άνοιγμα αντικρίζει τον ήλιο τις απογευματινές ώρες. Ωστόσο, η απόδοση του

συλλέκτη κατά τις πρώτες και τις απογευματινές ώρες είναι μειωμένη λόγω της μεγάλης γωνίας πρόσπτωσης (απώλειες συνημίτονου).

Σε διάρκεια ενός έτους, ένας οριζόντιος συλλέκτης σε κατεύθυνση βορράς-νότος συνήθως συγκεντρώνει ελαφρώς περισσότερη ενέργεια από έναν συλλέκτη σε κατεύθυνση ανατολή-δύση. Ωστόσο, σε κατεύθυνση βορράς-νότος ο συλλέκτης συγκεντρώνει μεγάλα ποσά ενέργειας το καλοκαίρι και λιγότερα το χειμώνα.

2.2.4.1 Οπτική ανάλυση του συλλέκτη PTC

Ο όρος *οπτικός βαθμός απόδοσης* η_o ενός συλλέκτη είναι η αναλογία της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τον απορροφητή προς της προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Τα ακόλουθα κύρια οπτικά χαρακτηριστικά δίνουν τον οπτικό βαθμό απόδοσης η_o :

- Ανακλαστικότητα ρ του κατόπτρου. Τα τυπικά επαργυρωμένα κάτοπτρα γυαλιού που χρησιμοποιούνται στους PTC έχουν ανακλαστικότητα 0.93-0.94.
- Διαπερατότητα τ του γυαλιού. Μία τυπική τιμή διαπερατότητας είναι 0.93. Ωστόσο, μπορεί να αυξηθεί έως το 0.96 τοποθετώντας αντι-αντανακλαστικά καλύμματα και στις δύο άκρες του γυαλιού.
- Απορροφητικότητα α του απορροφητή. Τυπικές τιμές απορροφητικότητας για επιλεκτικούς συλλέκτες είναι 0.94-0.95.
- Παράγοντας σύλληψης γ ο οποίος ορίζεται ως το κλάσμα των ακτινών που ανακλώνται στο κάτοπτρο και φτάνουν στον απορροφητή. Ένα κλάσμα των ακτινών που ανακλώνται στο κάτοπτρο δεν φτάνουν στον απορροφητή εξαιτίας ατελειών του κατόπτρου, γεωμετρικά λάθη στο παραβολικό σχήμα, μηχανικές παραμορφώσεις στο σύστημα παρακολούθησης του ηλίου και σκίασης. Τυπικές τιμές του παράγοντα σύλληψης είναι 0.92-0.94 [23].

Επομένως, ο οπτικός βαθμός απόδοσης ενός κοίλου παραβολικού συλλέκτη, σε γωνία πρόσπτωσης θ° , δίνεται από τον τύπο:

$$\eta_{o,peak} = \gamma \cdot \rho \cdot (\tau \cdot \alpha) \quad (2.1)$$

Κατά τη λειτουργία, ο οπτικός βαθμός απόδοσης ενός PTC είναι αρκετά μικρότερος από τον *peak* λόγω της γωνίας πρόσπτωσης, των λεκέδων στα κάτοπτρα και του επικαλύμματος γυαλιού στον απορροφητή.

Η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας στο άνοιγμα του συλλέκτη επηρεάζει και τις τέσσερις παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένου του οπτικού βαθμού απόδοσης. Το φαινόμενο ποσοτικοποιείται από τον τροποποιητή της γωνίας πρόσπτωσης $K(\theta)$, για μία γωνία πρόσπτωσης ο οποίος ορίζεται ως:

$$K(\theta) = \frac{\eta_o(\theta)}{\eta_o(\theta=0)} \quad (2.2)$$

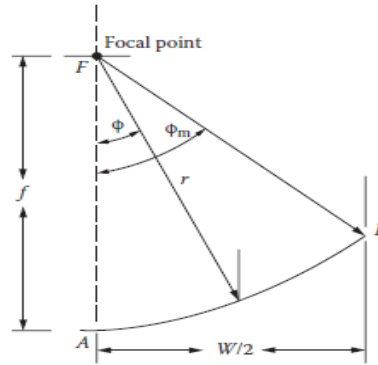
Συγκεκριμένα για τον συλλέκτη IST PTC στον οποίο επικεντρώνεται η εργασία, ο τροποποιητής της γωνίας πρόσπτωσης δίνεται από τον τύπο [24]:

$$K(\theta) = \cos\theta + 0.0003178 \cdot \theta - 0.00003985 \cdot \theta^2 \quad (2.3)$$

Ένας ακόμα γεωμετρικός παράγοντας είναι οι απώλειες άκρων που σχετίζονται με τη γωνία πρόσπτωσης. Οι γωνίες άκρων δίνονται από τον τύπο:

$$F_{el} = \frac{(L_c - z)}{L_c} = 1 - \frac{r}{L_c} \cdot \tan\theta \quad (2.4)$$

Όπου το r φαίνεται στο Σχήμα 2.9, συνήθως $r = f$



Σχήμα 2.9 Γεωμετρία της παραβολής [25]

Για έναν συλλέκτη PTC με άνοιγμα W , οι απώλειες άκρων γίνονται:

$$F_{el} = 1 - \frac{f}{L_c} \cdot \left(1 + \frac{W^2}{48 \cdot f^2}\right) \cdot \tan\theta \quad (2.5)$$

Τέλος, οι λεκέδες στο κάτοπτρο για χρονικό διάστημα προκαλούν απώλειες, οι οποίες ποσοτικοποιούνται από τον παράγοντα F_S . Ορίζεται ως η αναλογία της ανακλαστικότητας του κατόπτρου σε λειτουργία προς την ονομαστική ανακλαστικότητα όταν το κάτοπτρο είναι καθαρό [26].

Συνεπώς, ο οπτικός βαθμός απόδοσης ενός κοίλου παραβολικού συλλέκτη PTC γίνεται:

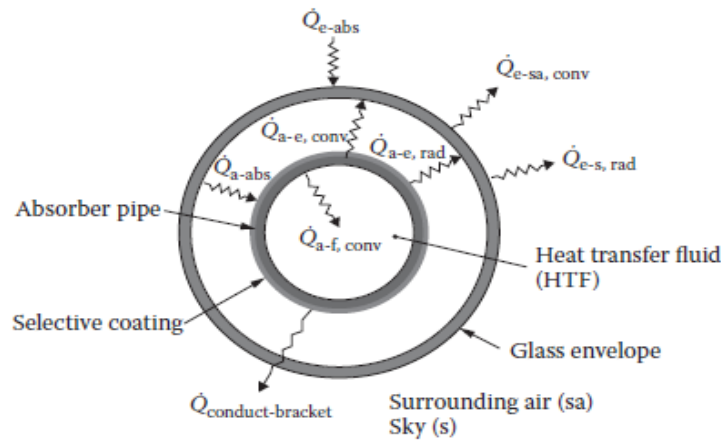
$$\eta_{opt} = \eta_{o,peak} \cdot F_{el} \cdot F_S \cdot K(\theta) = \gamma \cdot \rho \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot F_{el} \cdot F_S \cdot K(\theta) \quad (2.6)$$

2.2.4.2 Θερμικές απώλειες στον συλλέκτη PTC

Μία σημαντική διαφορά μεταξύ ενός επίπεδου συλλέκτη και ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη, όπως ο PTC, είναι ότι οι απώλειες ενός PTC συλλέκτη προέρχονται από την επιφάνεια του απορροφητή η οποία επιφάνεια είναι αρκετά μικρότερα από το άνοιγμα. Ωστόσο, οι απώλειες ακτινοβολίας είναι αρκετά υψηλότερες εφόσον η θερμοκρασία του απορροφητή T_r είναι μεγαλύτερη.

Ένα λεπτομερές μοντέλο μεταφοράς της θερμότητας (Σχήμα 2.10) παρουσιάζει τη μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια του απορροφητή (*absorber*) προς το ρευστό (*heat transfer fluid*) με συναγωγή ($Q_{a-f,conv}$), την απώλεια θερμότητας από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα (*glass envelope*) με συναγωγή ($Q_{a-e,conv}$) και

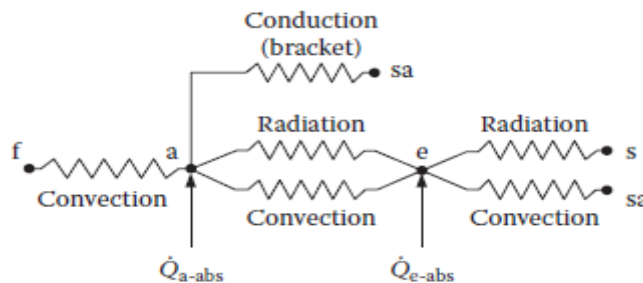
ακτινοβολία ($Q_{a-e,rad}$) και την απώλεια θερμότητας από το γυάλινο κάλυμμα προς το περιβάλλον (*ambient*) με συναγωγή ($Q_{e-sa,conv}$) και ακτινοβολία ($Q_{e-sa,rad}$).



Σχήμα 2.10 Μεταφορά θερμότητας σε ένα συλλέκτη PTC [24]

Για απλούστευση, θεωρούνται μηδενικές οι απώλειες συναγωγής από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα, λόγω της ύπαρξης του κενού ($Q_{a-e,conv} = 0$).

Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται με τη μορφή σύνθετων αντιστάσεων η μετάδοση θερμότητας στο συλλέκτη.



Σχήμα 2.11 Μοντέλο θερμικής αντίστασης [24]

Έτσι, προκύπτουν οι εξής τύποι για τις απώλειες θερμότητας:

- Απορροφητής \rightarrow Γυάλινο κάλυμμα (*absorber-envelope*):

$$Q_{loss} = Q_{a-e,conv} + Q_{a-e,rad} = \frac{\sigma \cdot (T_r^4 - T_e^4) \cdot A_{ro}}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1 - \varepsilon_e}{\varepsilon_e} \frac{D_{ro}}{D_{ei}}} \quad (2.7)$$

- Γυάλινο κάλυμμα \rightarrow Περιβάλλον (*envelope-ambient*):

$$Q_{loss} = Q_{e-amb,conv} + Q_{e-amb,rad} = A_{co} \cdot [h_{air} \cdot (T_e - T_{amb}) + \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot (T_e^4 - T_{amb}^4)] \quad (2.8)$$

Κεφάλαιο 3 Νανοϋλικά

3.1 Εισαγωγή στα νανοϋλικά

Τα νανοϋλικά είναι στερεία-υγρά μείγματα τα οποία κατασκευάζονται με τη διασπορά μικροσκοπικών μεταλλικών ή μη μεταλλικών στερεών νανο-σωματιδίων σε υγρά. Το μέγεθος των νανο-σωματιδίων (συνήθως μικρότερο από 100nm) στο υγρό τους δίνει τη δυνατότητα να αντιδρούν με άλλα υγρά σε μοριακό επίπεδο κι έτσι μεταδίδουν θερμότητα καλύτερα από τα συμβατικά ρευστά. Τα νανοϋλικά μπορούν να εμφανίσουν βελτιωμένη μετάδοση θερμότητας λόγω του συνδυασμού αγωγής και συναγωγής και επίσης μία επιπρόσθετη μετάδοση θερμότητας μέσω των συγκρούσεων και της δυναμικής των σωματιδίων γ. Τα μεταλλικά νανοϋλικά έχουν καλύτερες θερμοφυσικές ιδιότητες όπως θερμική αγωγιμότητα, θερμική διαχυτικότητα και ιξώδες σε σχέση με ρευστά όπως νερό ή λάδι. Σήμερα, τα νανοϋλικά χρησιμοποιούνται σε πολλά πεδία όπως στους ηλιακούς συλλέκτες και στην αποθήκευση ηλιακής ενέργειας [27].

3.2 Κατηγοριοποίηση των νανοϋλικών

Τα νανοϋλικά κατηγοριοποιούνται σε δύο κατηγορίες: τα μεταλλικά νανοϋλικά και τα μη μεταλλικά νανοϋλικά. Ερευνητές [28] μελέτησαν την ατομική συμπεριφορά των νανοϋλικών. Τα αποτελέσματα δείχνουν τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας και την αύξηση της θερμορροής. Τη δεδομένη χρονική στιγμή, κάποια διαφορετικά είδη σωματιδίων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία νανοϋλικών είναι [28]:

- Κεραμικά οξειδία (Al_2O_3, CuO)
- Μεταλλικά καρβίδια (SiC, ZnO, TiO_2)
- Νιτρίδια (AlN, SiN)
- Μέταλλα (Al, Cu)
- Αμέταλλα (γραφίτης)
- Πολυμερή ($Al+Al_2O_3, Cu+C$)
- PCM (S/S)

Ενώ υλικά που μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για τη δημιουργία νανοϋλικών είναι:

- Νερό
- Αιθυλενογλυκόλη και άλλα ψυκτικά
- Λάδι και άλλα λιπαντικά
- Βιο-υγρά
- Διαλύματα πολυμερών

Η μετάδοση θερμότητας μπορεί να επαυξηθεί, αυξάνοντας την θερμική αγωγιμότητα του ρευστού που χρησιμοποιείται. Η θερμική αγωγιμότητα των μεταλλικών σωματιδίων και των μεταλλικών οξειδίων είναι υψηλότερη από αυτή των συνηθισμένων ρευστών που χρησιμοποιούνται στους ηλιακούς συλλέκτες (νερό, λάδι). Η προσθήκη λεπτών σωματιδίων των παραπάνω υλικών μέσα στο ρευστό

μεταφοράς θερμότητας (δημιουργία νανοϋλικών) μπορεί να αυξήσει τη θερμική αγωγιμότητα σε σημαντικό βαθμό [29,30]. Είναι προφανές πως τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές και διαφορετικές μελέτες για τη χρήση των νανοϋλικών. Σε πρόσφατη μελέτη παρατηρήθηκε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας κατά 160% με την προσθήκη 1% κατ'όγκο σωματιδίων άνθρακα [31]. Η προσθήκη σωματιδίων έχει μεγάλη επιρροή στη μεταφερόμενη θερμότητα μέσω συναγωγής.

Σε συγκεκριμένη έρευνα [31] αποδείχθηκε πως παρατηρούνται μεταβολές στην μετάδοση θερμότητας αναλόγως με το μέγεθος και το ποσοστό των σωματιδίων που διαλύθηκαν στο ρευστό. Συμπέραναν αρτιότερη μετάδοση θερμότητας κατά τη χρήση μικρότερων σωματιδίων νανοϋλικών. Σε μία άλλη μελέτη [32] συμπέραναν πως η βελτίωση στη μετάδοση θερμότητας με τη χρήση Al_2O_3 /νερό είναι μεγαλύτερη από τη χρήση CuO /νερό.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η μοντελοποίηση ενός παραβολικού ηλιακού συλλέκτη και η μελέτη των αποτελεσμάτων που έχει η προσθήκη νανοϋλικών ως εργαζόμενο μέσο, στη μετάδοση θερμότητας και την αποδοτικότητα του συλλέκτη. Εξαιτίας του μη ομοιόμορφου χαρακτήρα της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του σωλήνα απορρόφησης, η διανομή της θερμοκρασίας του ρευστού είναι ασύμμετρη. Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία είναι το Al_2O_3 /συνθετικό λάδι.

3.3 Ιδιότητες νανοϋλικού

Τα σωματίδια και το ρευστό πρέπει να έχουν την ίδια θερμοκρασία. Το νανοϋλικό μοντελοποιείται ως ιστροπικό ρευστό μίας φάσης [33]. Υποθέτοντας πως ιδιότητες όπως η πυκνότητα, η θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα του νανοϋλικού εξαρτώνται τόσο από τις αντίστοιχες ιδιότητες του ρευστού όσο και από το κλάσμα όγκου φ , αλλά είναι ανεξάρτητες της θερμοκρασίας.

Η πυκνότητα ρ_{nf} του νανοϋλικού δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{nf} = \varphi \cdot \rho_{np} + (1 - \varphi) \cdot \rho_{bf} \quad (3.1)$$

όπου οι συντομογραφίες nf , np , bf υποδηλώνουν *nanofluid* (νανοϋλικό), *nanoparticle* (σωματίδια) και *base fluid* (ρευστό βάση).

Η θερμοχωρητικότητα $C_{p,nf}$ του νανοϋλικού μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$C_{p,nf} = \frac{\varphi \cdot \rho_{np} \cdot C_{p,np} + (1 - \varphi) \cdot \rho_{bf} \cdot C_{p,bf}}{\rho_{nf}} \quad (3.2)$$

Το ιξώδες μ_{nf} του νανοϋλικού δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \cdot (1 + 2.5 \cdot \varphi + 6.5 \cdot \varphi^2) \quad (3.3)$$

Η θερμική αγωγιμότητα k_{nf} του νανοϋλικού μπορεί να ορισθεί θεωρητικά όπως το ακόλουθο μοντέλο κατά Maxwell [33]:

$$k_{nf} = \frac{[k_{np} + 2 \cdot k_{bf} - 2 \cdot \varphi \cdot (k_{bf} - k_{np})]}{(k_{np}/k_{bf}) + 2 + \varphi \cdot [(k_{bf} - k_{np})/k_{bf}]} \quad (3.3)$$

Σε αυτή την εργασία, το νανοϋλικό είναι μείγμα λαδιού και Al_2O_3 , με την περιεκτικότητα φ να μεταβάλλεται από 1-4%. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των νανο-σωματιδίων, του λαδιού και του νανοϋλικού για τρεις ενδεικτικές θερμοκρασίες.

T (K)	Υλικό	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg*K)	k (W/m*K)	μ (Pa*s)
-	Al_2O_3	4000	773	40	-
300	Λάδι	1058	1570	0.13570	0.003570
	Νανοϋλικό	1117	1513	0.14392	0.003758
400	Λάδι	977	1850	0.12425	0.000739
	Νανοϋλικό	1037	1767	0.13179	0.000778
500	Λάδι	889	2120	0.10900	0.000331
	Νανοϋλικό	951	2007	0.11615	0.000348

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες νανο-σωματιδίων και νανοϋλικού σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (300-400-500K) [36]

3.3 Ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση

Αυτή η παράγραφος παρουσιάζει τις κυριότερες παραμέτρους της εργασίας. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και η ωφέλιμη ενέργεια είναι τα απαραίτητα στοιχεία για κάθε υπολογισμό ηλιακού συλλέκτη.

Η ωφέλιμη ενέργεια Q_u η οποία μεταφέρει το ρευστό υπολογίζεται από ενεργειακό ισολογισμό στον όγκο ελέγχου του, από τον τύπο:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (3.4)$$

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία Q_S στον συλλέκτη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_S = A_a \cdot G_b \quad (3.5)$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη είναι το κλάσμα των εξισώσεων (3.4) και (3.5):

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_S} \quad (3.6)$$

Ο συλλέκτης IST-PTC ο οποίος μελετάται σε αυτή την εργασία έχει βαθμό απόδοσης ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση [37]:

$$\eta_{th} = 0.762 - 0.2125 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{G_b} \right) - 0.001672 \cdot G_b \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{G_b} \right)^2 \quad (3.7)$$

Ο συντελεστής απωλειών θερμότητας U_L εκφράζει τις συγκεκριμένες απώλειες του απορροφητή και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$U_L = \frac{Q_{loss}}{A_{ro} \cdot (T_r - T_{am})} \quad (3.8)$$

Όπου A_{ro} είναι η εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή, υπολογισμένη ως εξής:

$$A_{ro} = \pi \cdot D_{ro} \cdot L \quad (3.9)$$

Η εξεργειακή απόδοση του συλλέκτη δίνεται από την εξίσωση [38,39]:

$$E_u = Q_u - \dot{m} \cdot C_p \cdot T_{am} \cdot \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) \quad (3.10)$$

Η διαθέσιμη ηλιακή εξέργεια υπολογίζεται από τον τύπο [40]:

$$E_S = A_C \cdot G_T \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{T_{am}}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_{am}}{T_{sun}} \right)^4 \right] \quad (3.11)$$

Η θερμοκρασία του ήλιου T_{sun} είναι 4350K. Αυτή η τιμή είναι τα 3/4 της πραγματικής θερμοκρασίας του ήλιου (5800K) στην εξωτερική του επιφάνεια [41]. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι το κλάσμα της χρήσιμης εξέργειας εξόδου προς την εξέργεια εισόδου [39,40]:

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_S} \quad (3.12)$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης σχετίζεται με το μέγιστο πιθανό παραγόμενο έργο και συνήθως χρησιμοποιείται σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού. Ο συλλέκτης PTC είναι ο πιο ταιριαστός για εγκαταστάσεις ηλιακής ενέργειας. Γι αυτό το λόγο, η εξεργειακή ανάλυση είναι πολύ σημαντική.

3.4 Ανάλυση μεταφοράς θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας από τον απορροφητή στο εργαζόμενο ρευστό είναι ο πυρήνας της ανάλυσης και εξαρτάται από τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή. Μεγαλύτερες τιμές αυτού του συντελεστή οδηγούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες απορροφητή, το οποίο σημαίνει λιγότερες θερμικές απώλειες, σύμφωνα με τον τύπο (3.8). Συγκεκριμένα, ο τύπος (3.13) δείχνει πως η ωφέλιμη ενέργεια εξαρτάται από το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή h , ο οποίος αναφέρεται σε πολλές περιπτώσεις ως συντελεστής μεταφοράς θερμότητας επειδή η συναγωγή στον απορροφητή μπορεί να παραμεληθεί.

$$Q_u = h \cdot A_{ri} \cdot (T_r - T_{fm}) \quad (3.13)$$

Όπου A_{ri} είναι η εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα και T_{fm} η μέση θερμοκρασία του εργαζόμενου ρευστού. Σε πολλές περιπτώσεις, η θερμοκρασία αυτή υπολογίζεται ως η μέση τιμή της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου.

Θεωρητικά, ο συντελεστής h υπολογίζεται από τον αριθμό *Nusselt* ο οποίος εξαρτάται από τις συνθήκες ροής και τη γεωμετρία του προβλήματος. Ο αριθμός *Reynolds* και ο αριθμός *Prandtl* συμπεριλαμβάνονται στην εξίσωση του αριθμού *Nusselt*. Στις εξισώσεις αυτές χρησιμοποιείται η υδραυλική διάμετρος D_h , οι οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$D_h = \frac{4 \cdot A_{cs}}{P_{cs}} \quad (3.14)$$

Όπου P_{cs} και A_{cs} συμβολίζουν την περίμετρο και την επιφάνεια της περιοχής.

Ο αριθμός *Nusselt* υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Nu = \frac{h \cdot D_{ri}}{k} \quad (3.15)$$

Ο αριθμός *Reynolds*:

$$Re = \frac{u \cdot D_h}{\nu} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{P_{cs} \cdot \mu} \quad (3.16)$$

Ο αριθμός *Prandtl*:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (3.17)$$

Σε τυρβώδεις ροές με *Reynolds* μεγαλύτερο από 2300, ο αριθμός *Nusselt* δίνεται από την εξίσωση [42]:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (3.18)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.14-3.18) ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή μπορεί να γραφτεί ως:

$$h = (0.1743 \cdot \dot{m}^{0.8}) \cdot \left(\frac{c_p^{0.4} \cdot k^{0.6}}{\mu^{0.4}} \right) \cdot \left(\frac{P_{cs}^{0.2}}{A_{sc}} \right) = C_{mass} \cdot C_{prop} \cdot C_{geom} \quad (3.19)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή εξαρτάται από το ρυθμό ροής μάζας (C_{mass}), τις ιδιότητες του εργαζόμενου ρευστού

(C_{prop}) και τη γεωμετρία του απορροφητή (C_{geom}). Η βελτιστοποίηση του συντελεστή εξαρτάται από τον κάθε παράγοντα ξεχωριστά, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.19).

Στη βιβλιογραφία [43], εντοπίστηκε η εξίσωση (3.20) για τον υπολογισμό του αριθμού *Nusselt* στο νανοϋλικό. Αυτή η συσχέτιση είναι πειραματική και λαμβάνει υπόψη το κλάσμα φ των νανο-σωματιδίων και είναι παρόμοια με τη εξίσωση (3.18).

$$Nu = 0.0059 \cdot (1 + 7.628 \cdot \varphi^{0.6886} \cdot Pe^{0.001}) \cdot Re^{0.9238} \cdot Pr^{0.4} \quad (3.20)$$


Αυτή η εξίσωση εφαρμόζεται για τυρβώδεις ροές, με αριθμό *Reynolds* από 2300 έως 25000 και για περιεκτικότητα φ από 0.3% έως 2%.

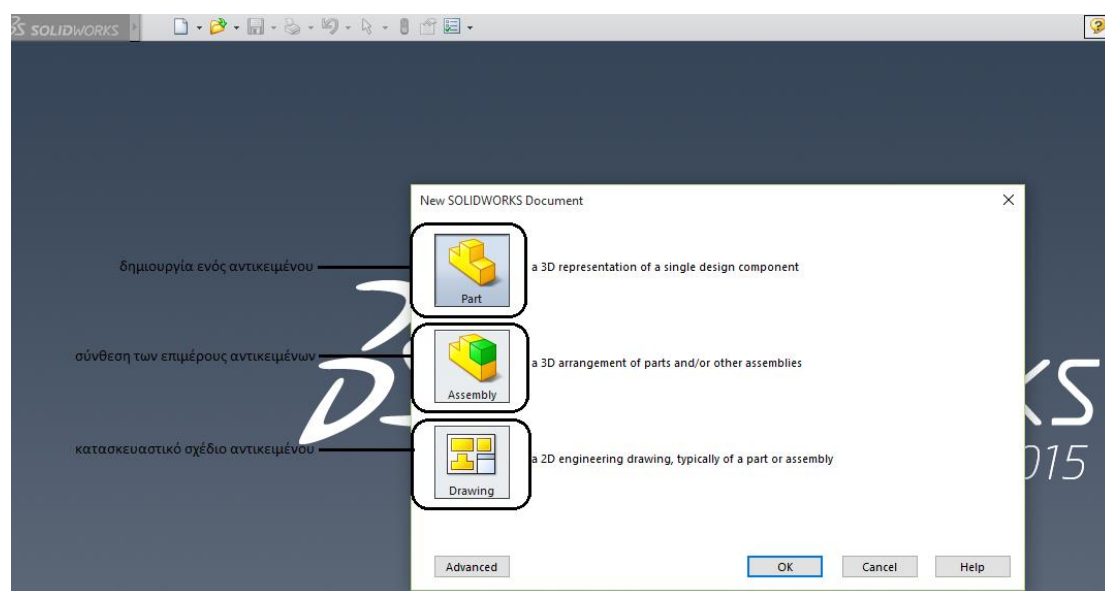
Κεφάλαιο 4 Σχεδιασμός του ηλιακού συλλέκτη με χρήση του λογισμικού Solidworks

4.1 Λογισμικό Solidworks

Πρόκειται για ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης που απευθύνεται σε μηχανικούς. Στο λογισμικό αυτό μπορούμε να σχεδιάσουμε και να προσομοιώσουμε με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Δημιουργήθηκε και αναπτύσσεται (από το 1997) από την εταιρία Dassault Systemes Solidworks και χρησιμοποιείται τόσο στον εκπαιδευτικό όσο και στο βιομηχανικό τομέα. Το συγκεκριμένο λογισμικό «τρέχει» σε Microsoft Windows περιβάλλον. Το Solidworks δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη του να σχεδιάσει σε δύο ή τρεις διαστάσεις σχήματα και αντικείμενα ποικίλης γεωμετρίας, από το πιο απλό έως το πιο σύνθετο, καθώς και να τα συνδέσει σε ένα κοινό αρχείο (assembly). Η λειτουργία του παρουσιάζει παραμετρικό χαρακτήρα ο οποίος επιτρέπει «σχέσεις εξάρτησης» μεταξύ των καμπυλών που απαρτίζουν ένα σχήμα και των διαστάσεών τους. Αυτό σημαίνει πως οποιεσδήποτε λογικές αλλαγές στις σχέσεις αυτές προκαλούν αυτόματη αλλαγή και στις διαστάσεις του στερεού που γίνεται η μελέτη. Με το συγκεκριμένο λογισμικό έχουμε, επίσης, τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε το φαινόμενο ώστε να πάρουμε αποτελέσματα που αφορούν τη μελέτη της μηχανικής αντοχής ή της θερμικής συμπεριφοράς απλών ή συναρμολογημένων αντικειμένων.

4.2 Έναρξη του προγράμματος

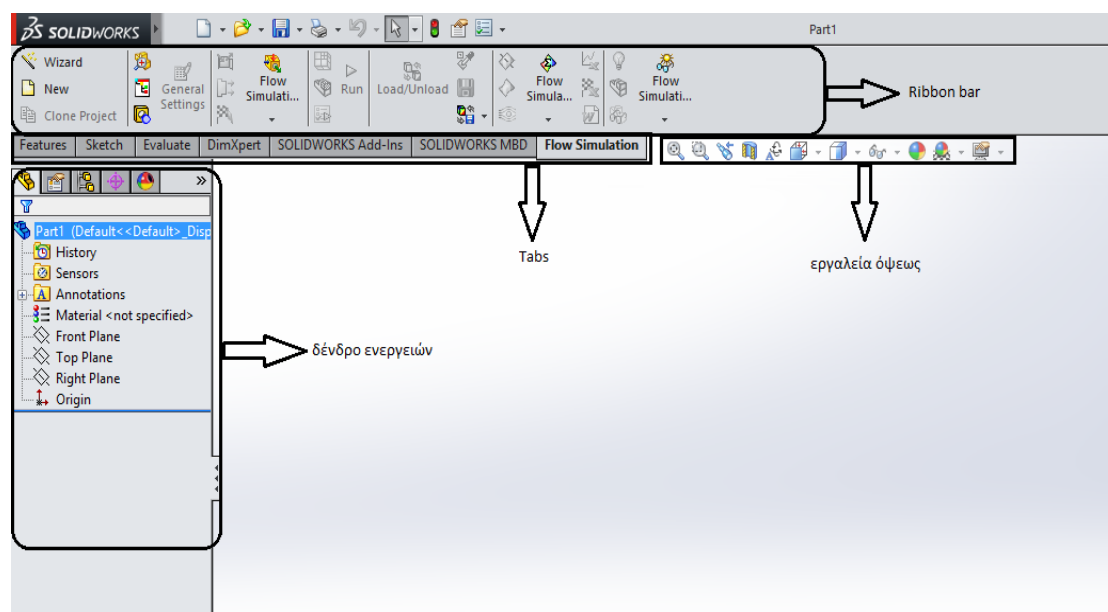
Κατά την έναρξη επιλέγεται το εικονίδιο **New** () που βρίσκεται στην βασική μπάρα, δεξιά από το λογότυπο του προγράμματος, οπότε και εμφανίζεται στη οθόνη μία καρτέλα που έχει τρεις επιλογές, που βλέπουμε παρακάτω.



Σχήμα 4.1 Δημιουργία νέου αρχείου

4.2.1 Αρχείο “Part”

Επιλέγοντας στην παραπάνω καρτέλα τη δημιουργία αρχείου part, στην οθόνη εμφανίζονται τα παρακάτω.

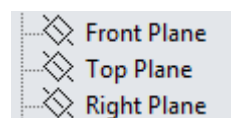


Σχήμα 4.2 Κύρια στοιχεία του περιβάλλοντος του Solidworks

Στην κορυφή υπάρχει το **Ribbon bar** που περιλαμβάνει διάφορες καρτέλες η καθεμία εκ των οποίων εξυπηρετεί μία συγκεκριμένη λειτουργία, παρέχοντας τα κατάλληλα εργαλεία. Πλάγια αριστερά και κάτω, από τις καρτέλες (**Tabs**) βρίσκεται το **δένδρο ενεργειών**, στο οποίο καταγράφεται κάθε βήμα που ακολουθούμε κατά τη σχεδίαση. Κάνοντας χρήση των **εργαλείων όψεως**, βλέπουμε το σχεδιασμένο αντικείμενο σε κάθε διαφορετική όψη, τομή, μεγέθυνση.

4.2.2 Επίπεδα σχεδιασμού (planes)

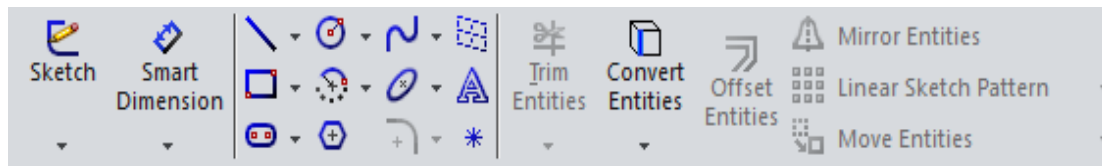
Για ευκολότερο σχεδιασμό ώστε να έχουμε ευρεία και λεπτομερή άποψη για το αντικείμενό μας, το Solidworks μας προσφέρει τρεις διαφορετικές επιλογές **επιπέδου (planes)** (Σχήμα 4.3). Μπορούμε, έτσι, να βλέπουμε το αντικείμενο που σχεδιάζουμε σε πρόοψη, κάτοψη ή σε πλάγια όψη από τα δεξιά.



Σχήμα 4.3 Επίπεδα Σχεδιασμού


4.3 Βασικά γεωμετρικά σχήματα και εντολές σχεδίασης


Το Solidworks παρέχει μια ευρεία βιβλιοθήκη εντολών που εξασφαλίζουν την λεπτομερέστερη και ευκολότερη σχεδίαση απλών ή σύνθετων γεωμετρικών σχημάτων. Ακολουθούν ορισμένες εντολές που χρησιμοποιούνται στην εργασία.





Σχήμα 4.4 Γεωμετρικά Σχήματα και Εντολές


 **Line:** γραμμή σχεδίασης ή αξονική γραμμή

 **Circle:** σχεδίαση κύκλου

 **Corner Rectangle:** σχεδίαση ορθογωνίου παραλληλογράμμου


 **Trim Entities:** περικοπή τμήματος καμπύλης

 **Smart Dimension:** εισαγωγή διαστάσεων

 **Offset Entities:** δημιουργία γεωμετρικά όμοιων σχημάτων

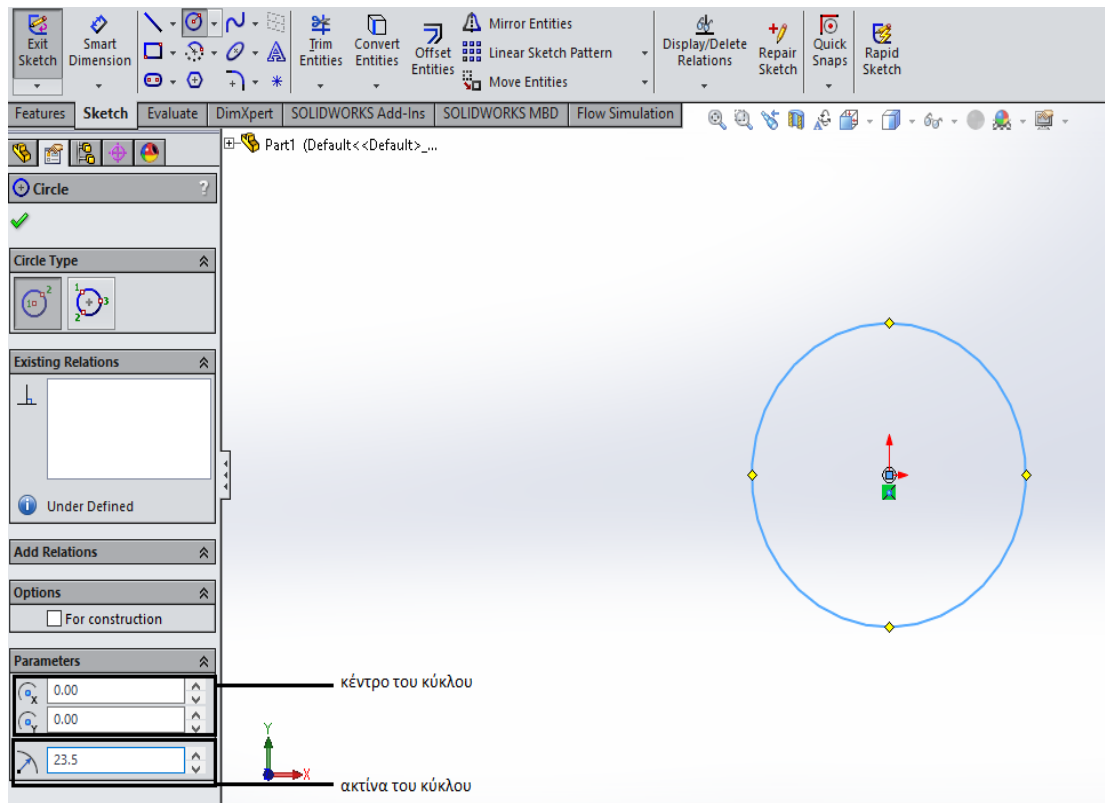
 **Move Entities:** μετακίνηση του σχεδίου

 **Mirror Entities:** αντιγραφή σχήματος ως προς άξονα συμμετρίας


 **Parabola:** σχεδίαση παραβολής

4.3.1 Εντολή Circle ()

Ξεκινώντας τον σχεδιασμό του συλλέκτη, επιλέγεται η πρόοψη του αντικειμένου (**front plane**). Στη συνέχεια επιλέγεται η καμπύλη του κύκλου. Η συγκεκριμένη εντολή επιτρέπει το σχεδιασμό ενός κύκλου με κέντρο το σημείο που θα δοθεί από το χρήστη επί του οριζώντιου άξονα X και κατακόρυφου άξονα Y. Η ακτίνα του κύκλου δίνεται και αυτή από το χρήστη.

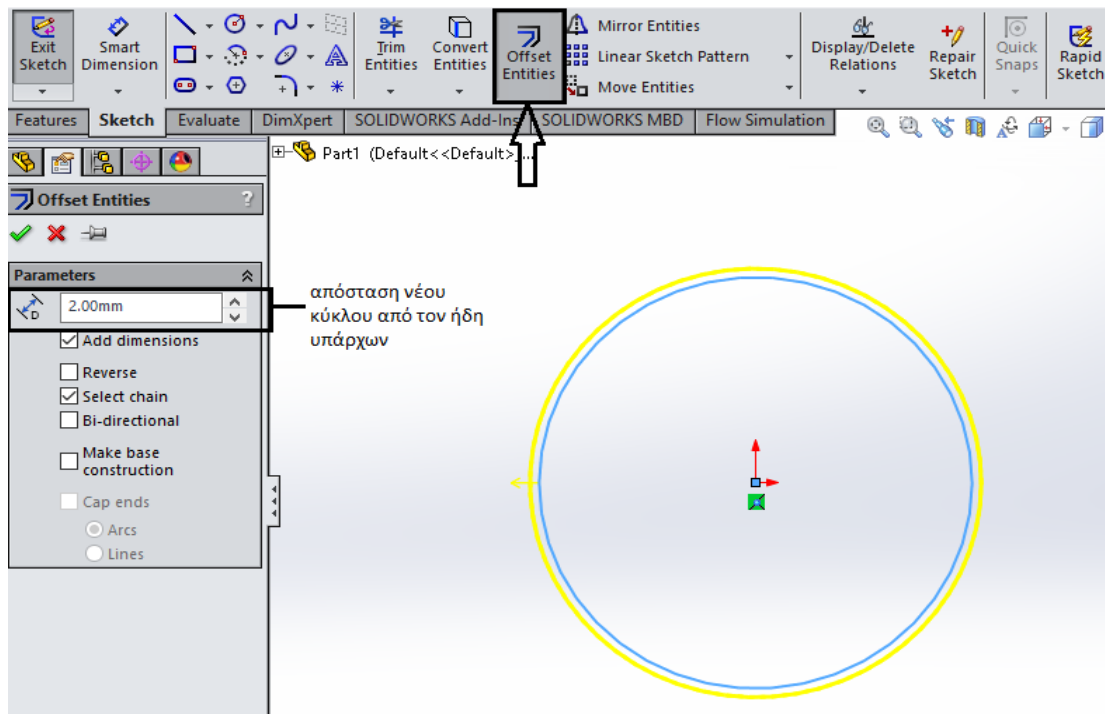


Σχήμα 4.5 Σχεδιασμός Κύκλου

Εδώ πρέπει να αναφερθεί πως αφού έχει σχεδιασθεί ο κύκλος, με την επιλογή του, δίνεται η δυνατότητα να θεωρηθεί η ακτίνα του ως σταθερό μέγεθος **Fix**, και όχι πλέον μεταβλητό. ()

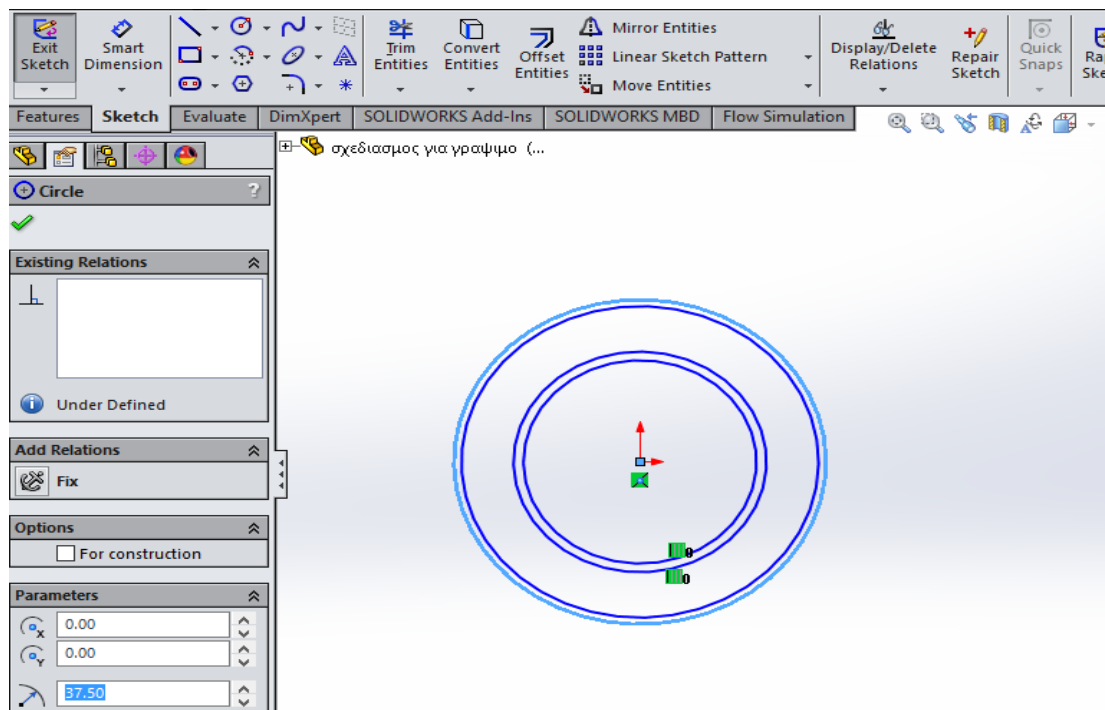
4.3.2 Εντολή **Offset Entities** ()

Για τον σχεδιασμό του εξωτερικού κύκλου, που είναι το πάχος της μόνωσης, επιλέγεται η εντολή **Offset Entities**. Η εντολή αυτή σχεδιάζει εξωτερικό κύκλο ομόκεντρο του ήδη υπάρχοντος. Η διαφορά των ακτινών των δύο σχεδιασμένων κύκλων δίδεται από το χρήστη με σχετική εντολή. Επιπροσθέτως, η εντολή αυτή βρίσκει χρήση και για τυχόν σχεδιασμό εσωτερικού κύκλου, ομόκεντρο του ήδη υπάρχοντος.



Σχήμα 4.6 Εντολή Offset Entities

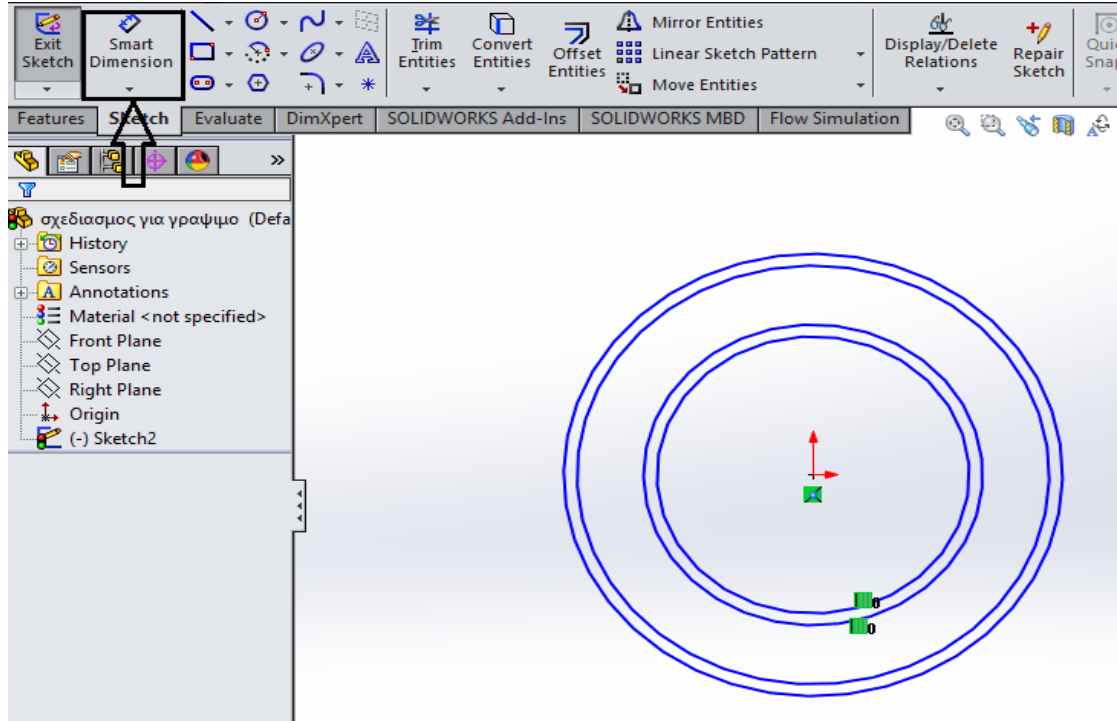
Η ίδια διαδικασία με την ανωτέρω ακολουθείται και για το σχεδιασμό του εξωτερικού σωλήνα, του σωλήνα κενού. Ο νέος κύκλος του σωλήνα κενού είναι ομόκεντρος με τον ήδη σχεδιασμένο κύκλο.



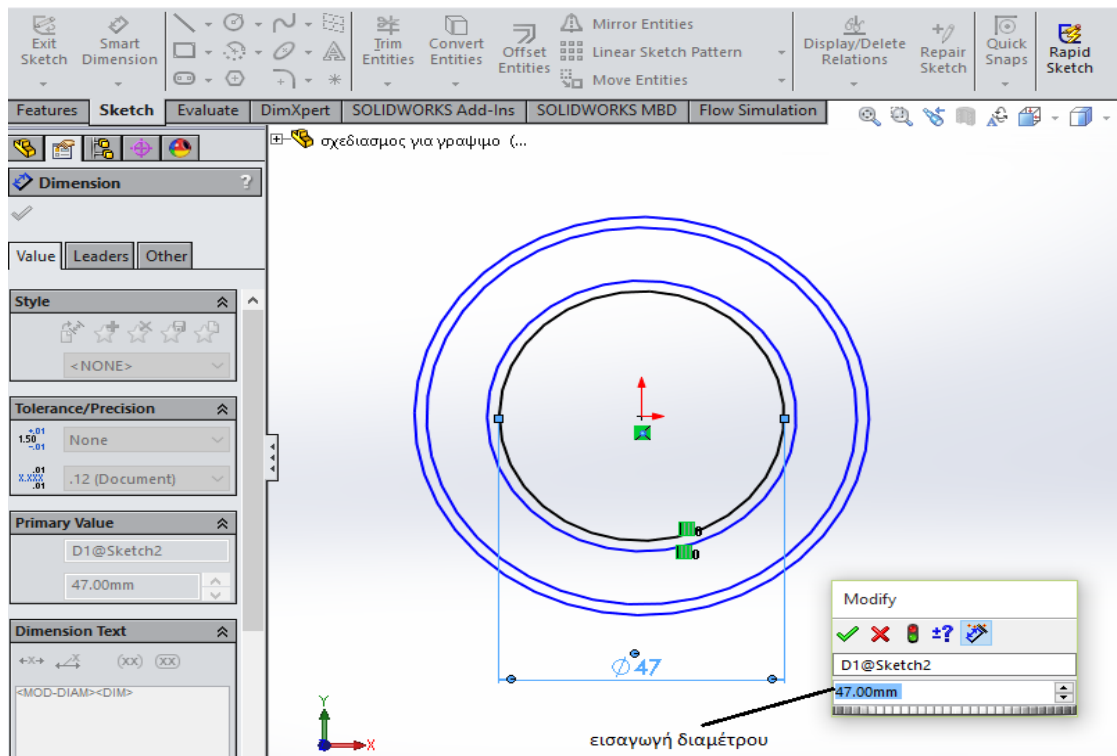
Σχήμα 4.7 Σχεδιασμός Σωλήνα Κενού

4.3.3 Εντολή Smart Dimension (Smart Dimension)

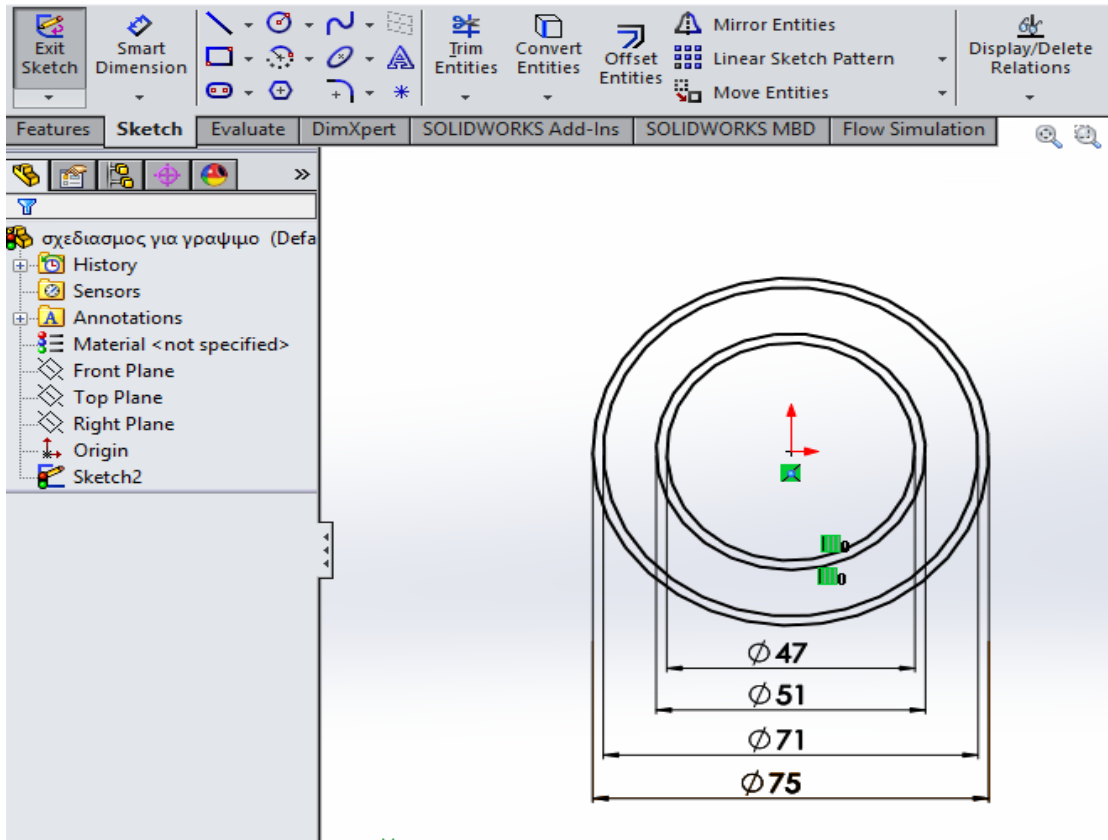
Μετά το σχεδιασμό του κύκλου ορίζεται η διάμετρος αυτού είτε χρησιμοποιώντας την εντολή **Smart Dimension** (Σχήματα 4.8α, 4.8β, 4.8γ) είτε επιλέγοντας τον κύκλο και πηγαίνοντας στις ιδιότητες του στην ενότητα **Parameters** (Σχήμα 4.9).



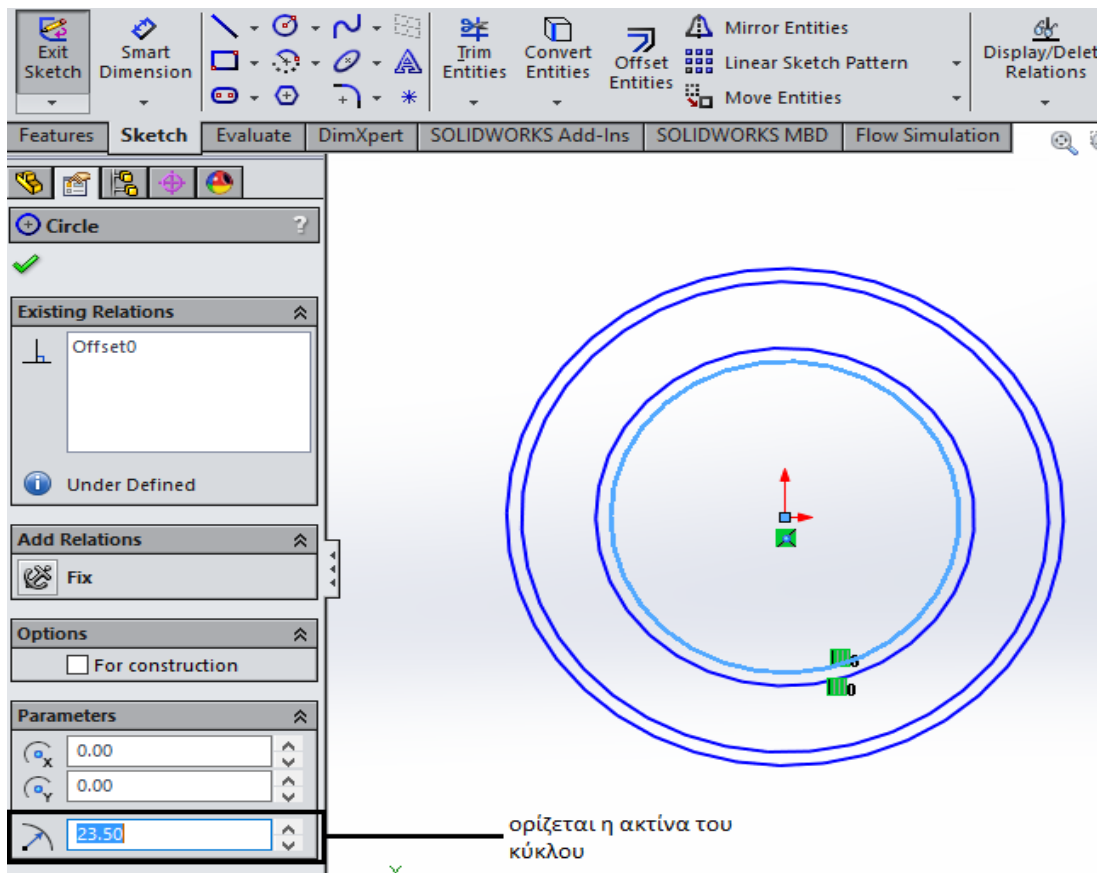
Σχήμα 4.8α Εντολή Smart Dimension στη Ribbon Bar



Σχήμα 4.8β Εισαγωγή Διαμέτρου με χρήση εντολής Smart Dimension



Σχήμα 4.8γ Εντολή Smart Dimension

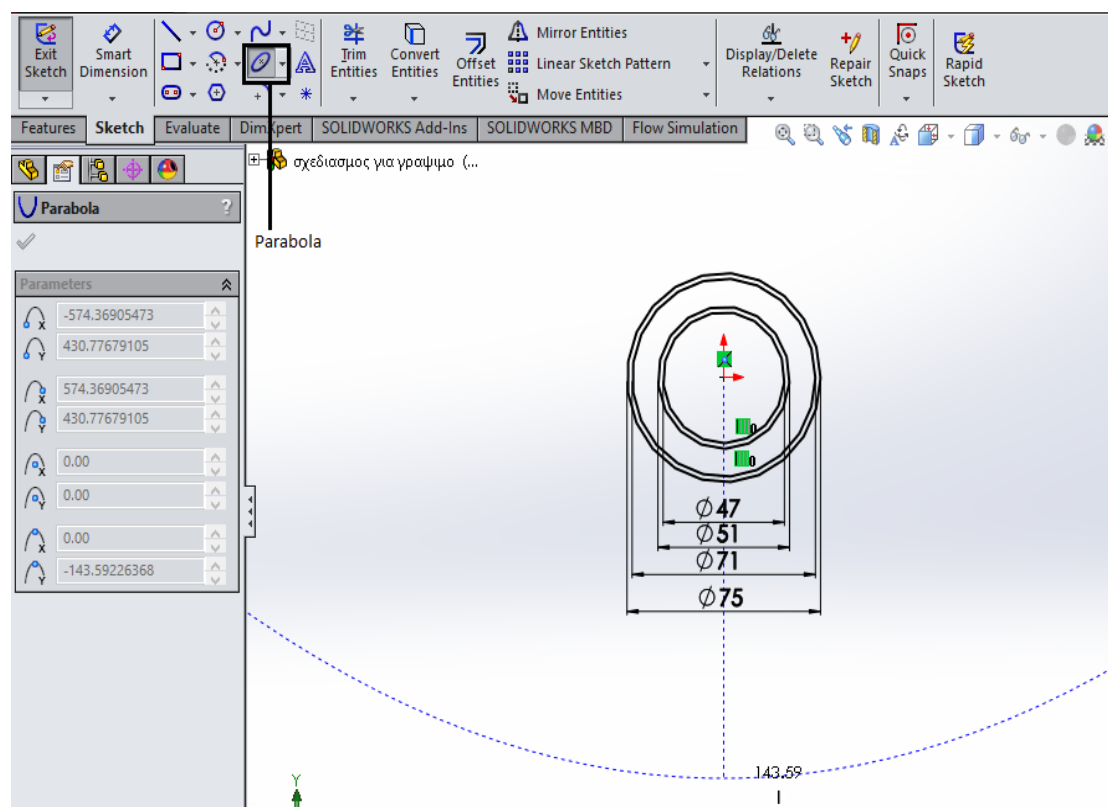


Σχήμα 4.9 Εισαγωγή Διαμέτρου σε Parameters

Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι προτιμότερο να οριστεί η διάμετρος του κύκλου μέσω της εντολής **Smart Dimension**, καθώς οποιαδήποτε αλλαγή και αν επέλθει στη θέση του κύκλου στο επίπεδο, η διάμετρος του θα μείνει αμετάβλητη.

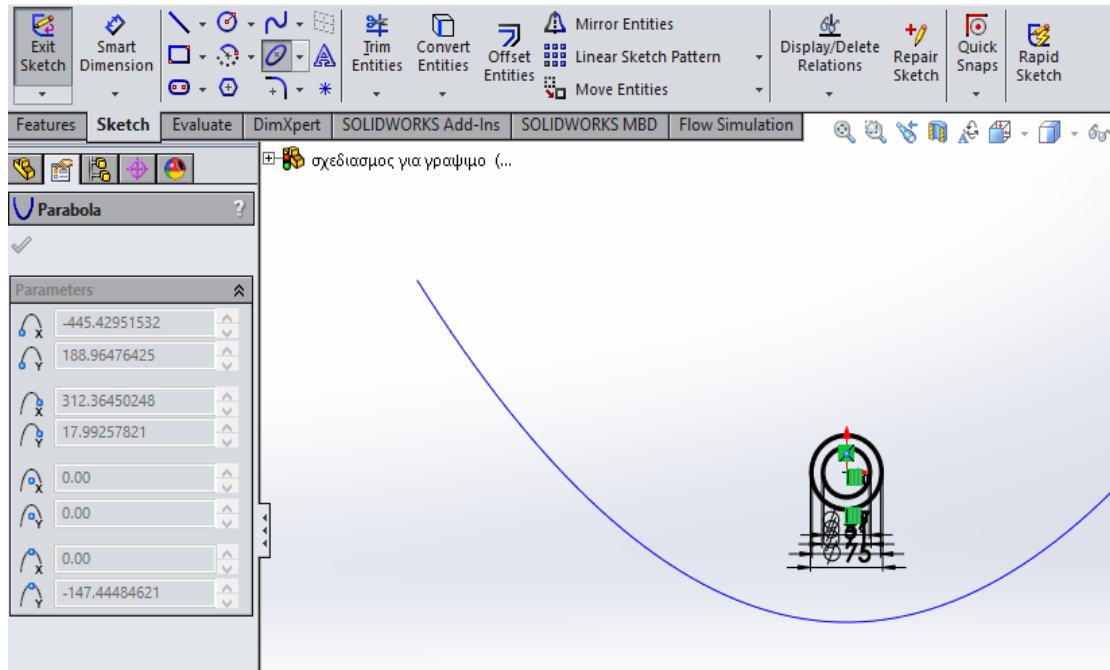
4.3.4 Εντολή Parabola (U)

Συνεχίζοντας το σχεδιασμό του συλλέκτη γίνεται χρήση της εντολής **Parabola** η οποία εισάγει μία παραβολή στη θέση που επιλεγθεί. Επιλέγεται να εισαχθεί η εστία της παραβολής στο κέντρο των ήδη σχεδιασμένων κύκλων.



Σχήμα 4.10 Εισαγωγή Παραβολής

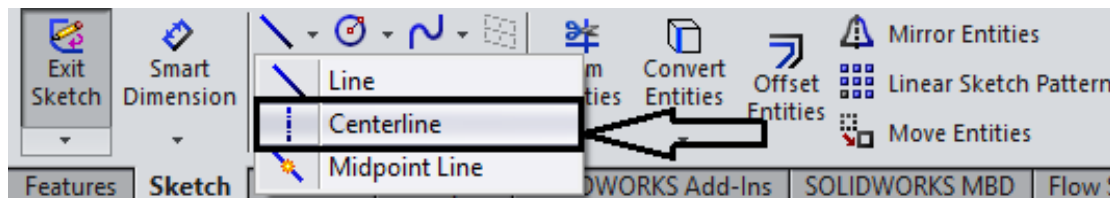
Ακολουθώντας, επιλέγοντας επάνω στην διακεκομμένη καμπύλη που φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (Σχήμα 4.10), εμφανίζεται η καμπύλη της παραβολής η οποία παίρνει το μήκος που ο χρήστης θα της δώσει (Σχήμα 4.11). Ειδικότερα, η διακεκομμένη καμπύλη λειτουργεί ως οδηγός για τον σχεδιασμό της παραβολής μιας και η παραβολή σχεδιάζεται επάνω της.




Σχήμα 4.11 Σχεδιασμός Παραβολής

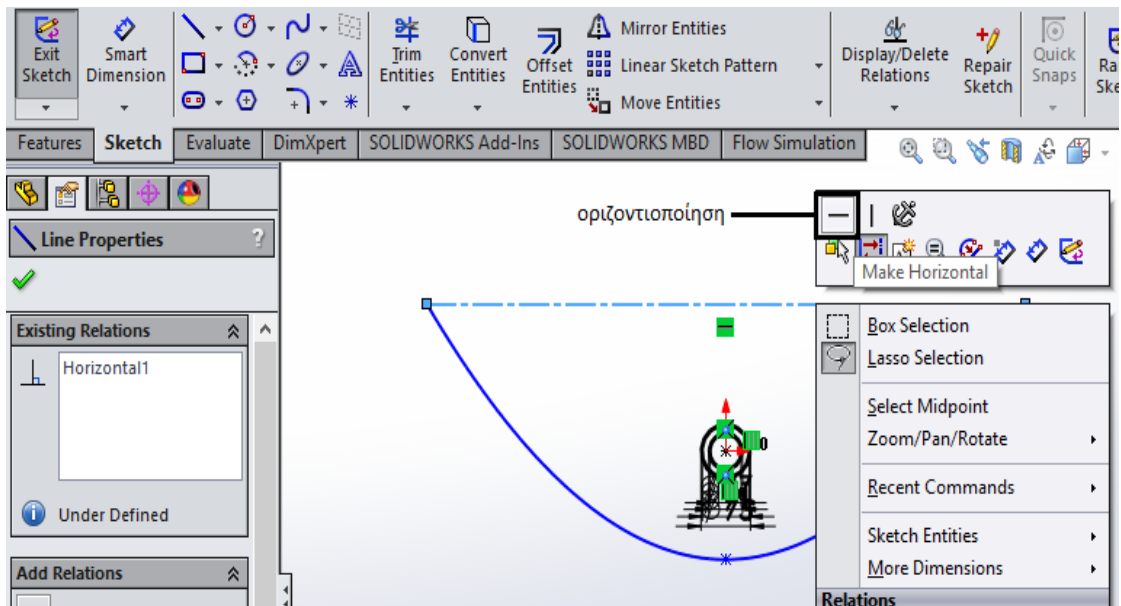
4.3.5 Εντολή Centerline ()

Έπειτα, για να τελειοποιηθεί η παραβολή χρησιμοποιείται η εντολή **Centerline**, που βρίσκεται στη **Ribbon Bar** . Η εντολή αυτή εισάγει μία διακεκομμένη ευθεία, η οποία χρησιμοποιείται μόνο για το σχεδιασμό και δεν θα εμφανίζεται στο τελικό μοντέλο.



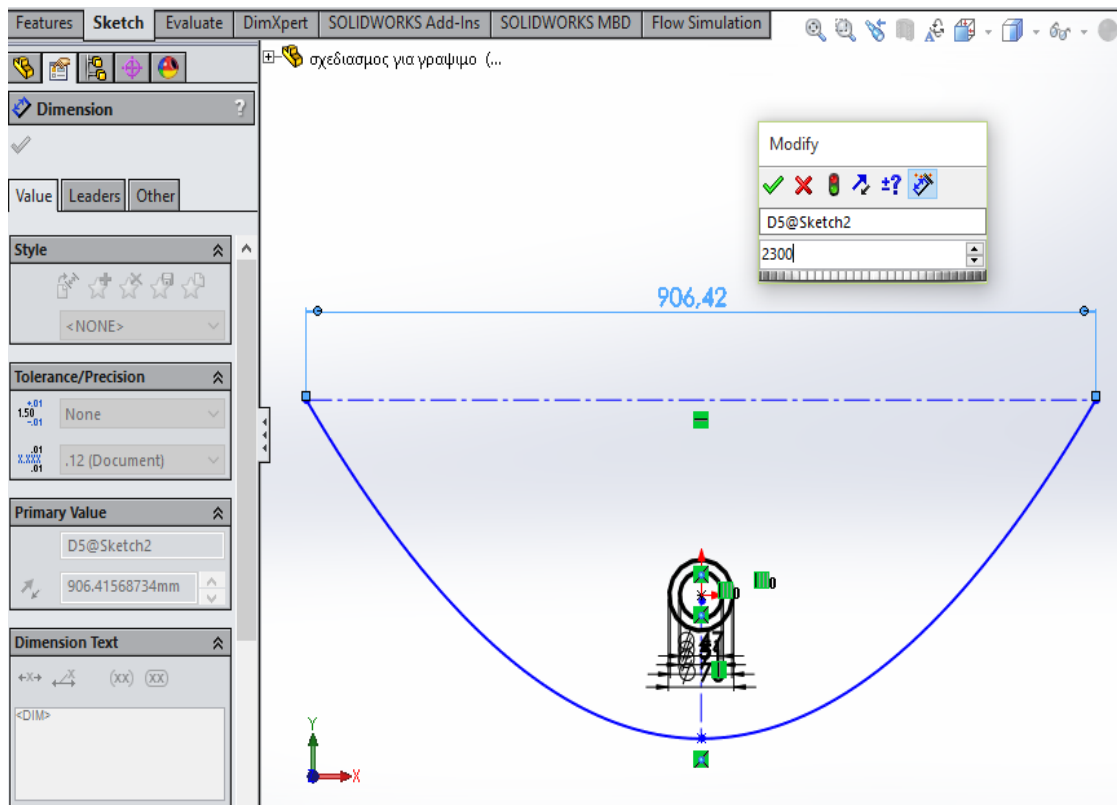
Σχήμα 4.12 Εισαγωγή Centerline

Ορίζεται ως αρχή της διακεκομμένης αυτής ευθείας η μία άκρη της παραβολής και ως πέρας της ευθείας η έταιρη άκρη της παραβολής. Αφού έχει σχεδιαστεί η ευθεία, επιλέγοντάς την και με δεξί κλικ δίνεται η δυνατότητα να οριζοντιοποιηθεί με την εντολή **Make Horizontal** ().

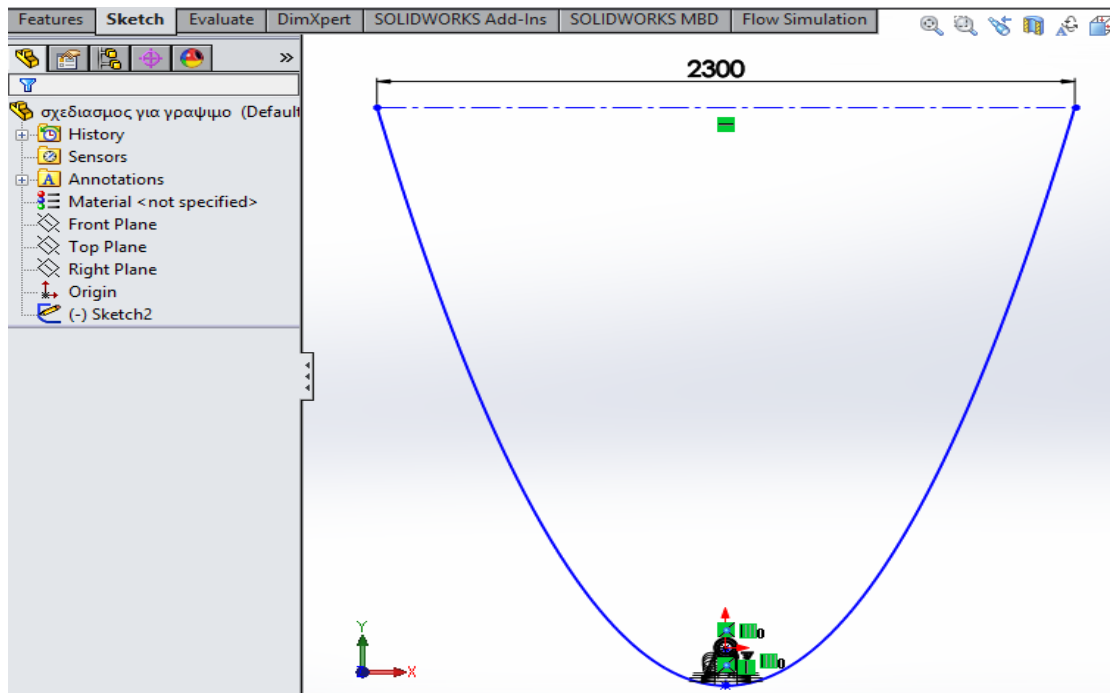


Σχήμα 4.13 Make Horizontal


Για να δοθεί το προβλεπόμενο άνοιγμα του συλλέκτη χρησιμοποιείται η εντολή **Smart Dimension**. Δίδεται, δηλαδή, το μήκος της διακεκομμένης οριζόντιας γραμμής.

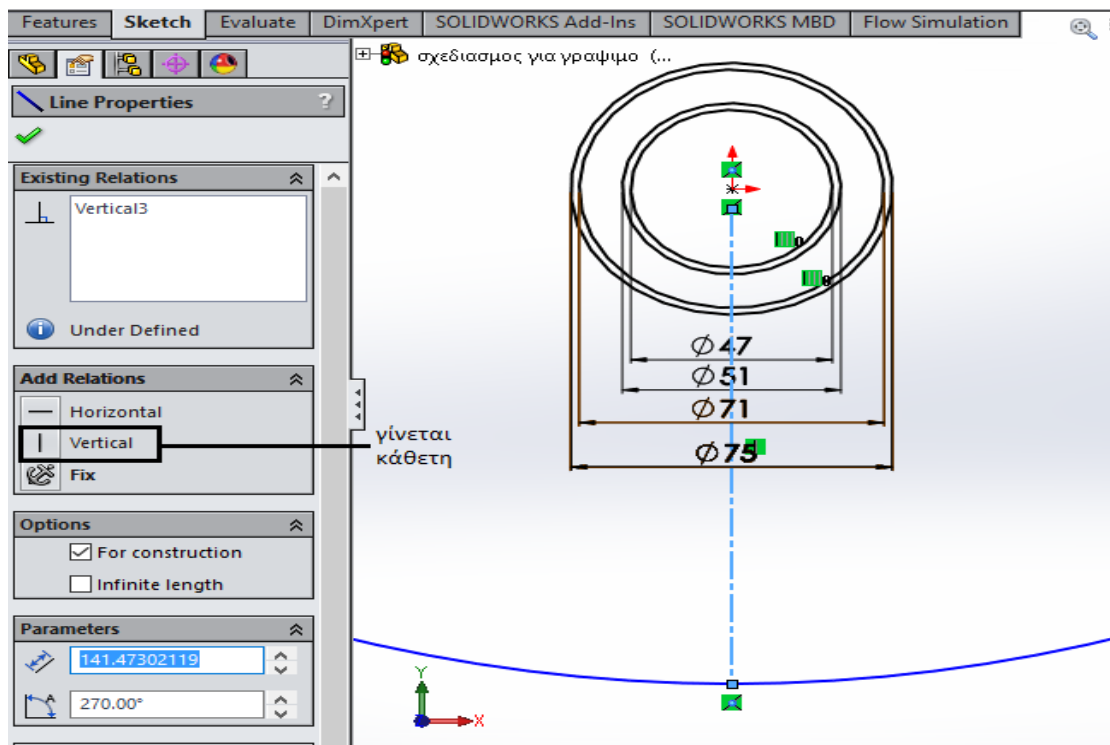


Σχήμα 4.14 Εισαγωγή Μήκους Ανοίγματος Συλλέκτη



Σχήμα 4.15 Μήκος Ανοίγματος Συλλέκτη

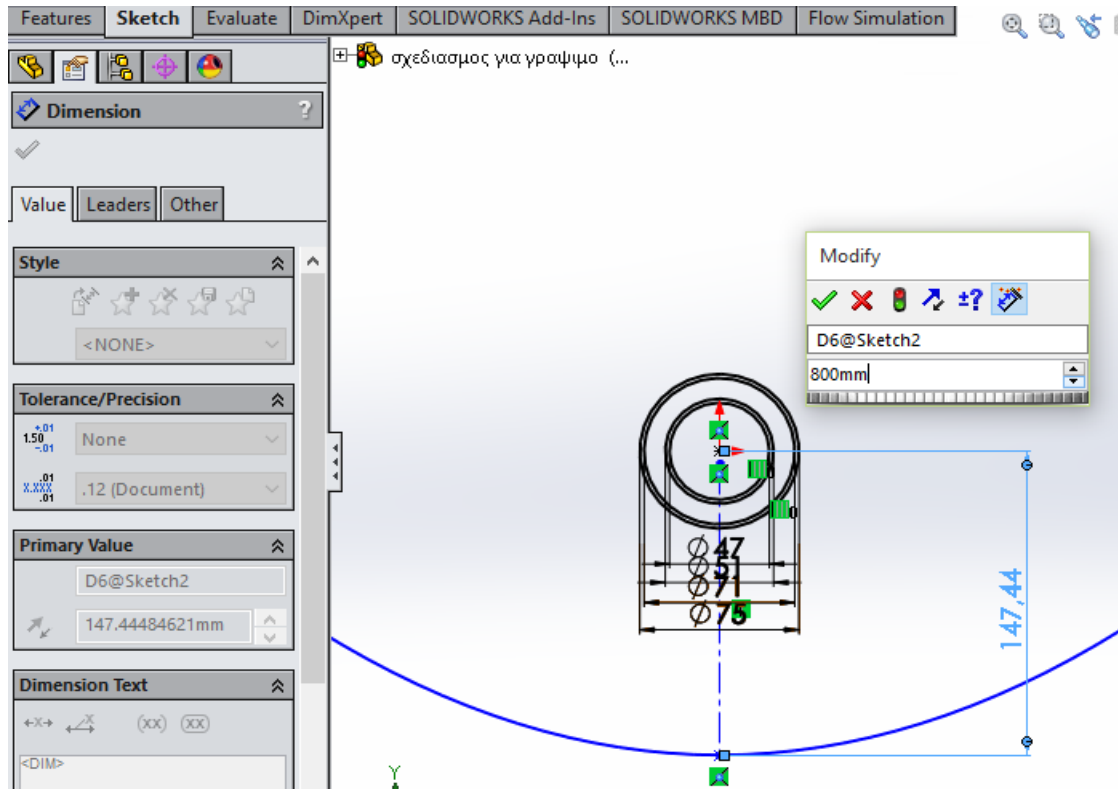
Εν συνεχεία, φέρεται κατακόρυφη διακεκομμένη (**Centerline**) της οποίας το ένα άκρο βρίσκεται στο κέντρο των κύκλων και το άλλο άκρο στην κορυφή της παραβολής. Με την εντολή **Vertical** () η γραμμή αυτή γίνεται κάθετη.



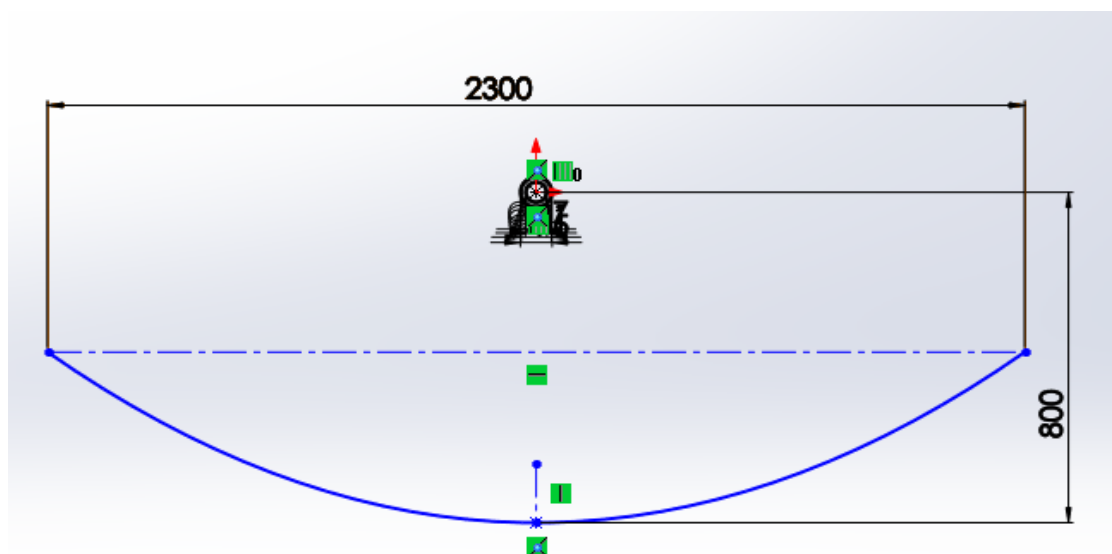
Σχήμα 4.16 Εισαγωγή Centerline - Εντολή Vertical

Με δεδομένη την καθετότητα της διακεκομμένης γραμμής **Centerline**, εισάγεται το μήκος της. Η εισαγωγή του μήκους της γραμμής επιτυγχάνεται με χρήση της εντολής **Smart Dimension**.

Συγκεκριμένα, πρόκειται για την εστιακή απόσταση της παραβολής του κατόπτρου και εισάγεται ίση με αυτή που δίνει ο κατασκευαστής.



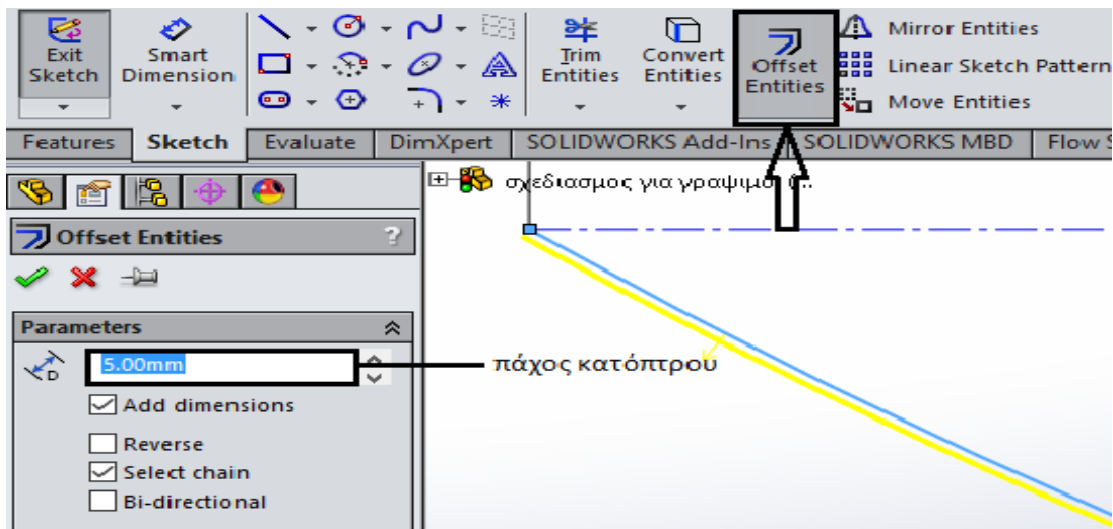
Σχήμα 4.17 Εισαγωγή Μήκους στην Centerline με Χρήση Εντολής Smart Dimension



Σχήμα 4.18 Εστιακή Απόσταση

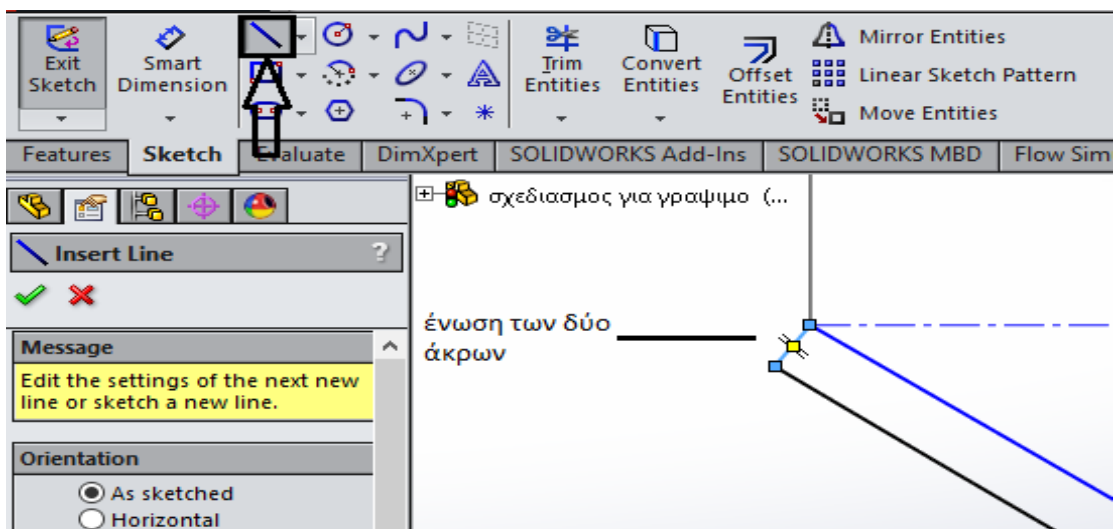
Οι διακεκομμένες γραμμές **Centerlines** που έχουν σχεδιαστεί και φαίνονται στην παραπάνω εικόνα (Σχήμα 4.18) εισήχθησαν μόνο για την απλοποίηση του σχεδιασμού (for construction only). Στο τελικό μοντέλο δεν θα φαίνονται. Επομένως, μένουν ως έχουν.

Το κύριο μέρος του συλλέκτη, λοιπόν, έχει σχεδιασθεί. Σε αυτό το σημείο πρέπει να δοθεί ένα πάχος στο κάτοπτρο του συλλέκτη. Αυτό γίνεται με την εντολή **Offset Entities**. Έτσι, επιλέγεται η προαναφερθείσα εντολή και ταυτόχρονα δίδεται και το προβλεπόμενο πάχος.



Σχήμα 4.19 Πάχος Κατόπτρου με την Εντολή Offset Entities

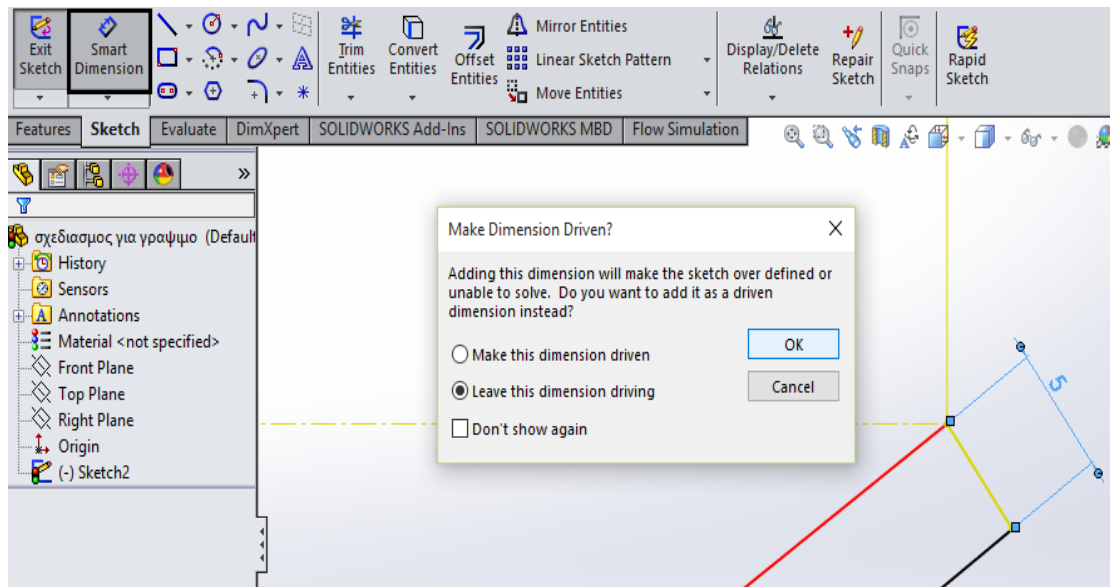
Τώρα πρέπει να ενωθούν και τα άκρα έτσι ώστε να υπάρχει κλειστή κατασκευή για να μπορέσει στη συνέχεια να γίνει τρισδιάστατο σχήμα. Αυτό επιτυγχάνεται με το σχεδιασμό δύο γραμμών **Lines** στα δύο άκρα της παραβολής.



Σχήμα 4.20 Ένωση των Άκρων με Line

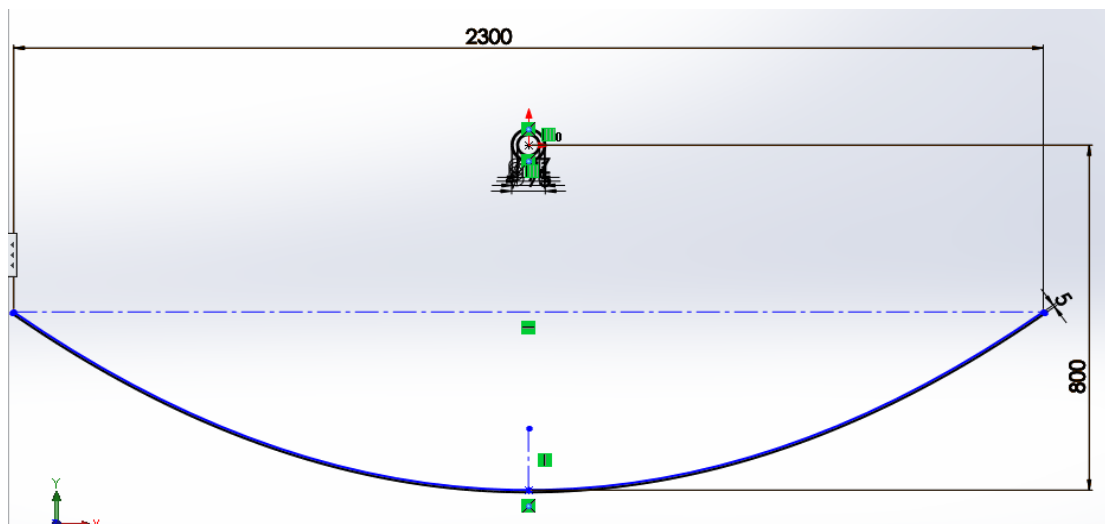
Ομοίως γίνεται και στο άλλο άκρο της παραβολής.

Τελειώνοντας, και αφού έχει γίνει κλειστή η κατασκευή, με χρήση της εντολής **Smart Dimension** δίδεται το ακριβές πάχος έτσι ώστε να μένει ανεπηρέαστο σε τυχόν μεταβολές.



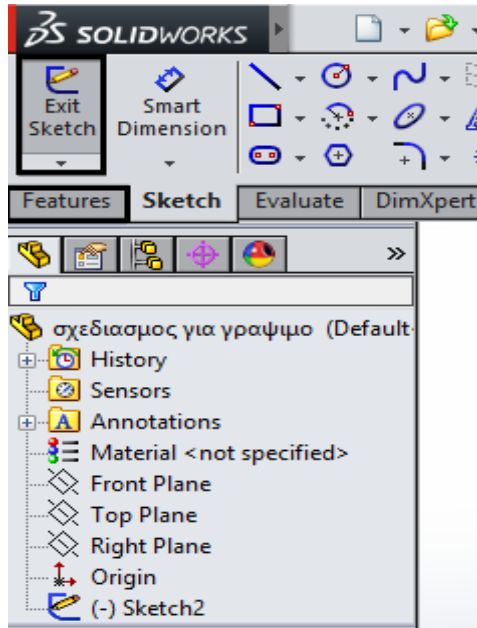
Σχήμα 4.21 Εισαγωγή Πάχους με Εντολή Smart Dimension

Κατά την εκτέλεση της εντολής **Smart Dimension** εμφανίζεται το μήνυμα της ανωτέρω εικόνας (Σχήμα 4.21). Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη χρήση της εντολής **Offset Entities** δόθηκε κι εκεί η εν λόγω απόσταση (Σχήμα 4.19). Επιλέγεται, επομένως, η επιλογή “**Leave this dimension driving**” η οποία και θέτει αυτή τη διάσταση ως οδηγό.



Σχήμα 4.22 Ολοκληρωμένο Δισδιάστατο Σχήμα

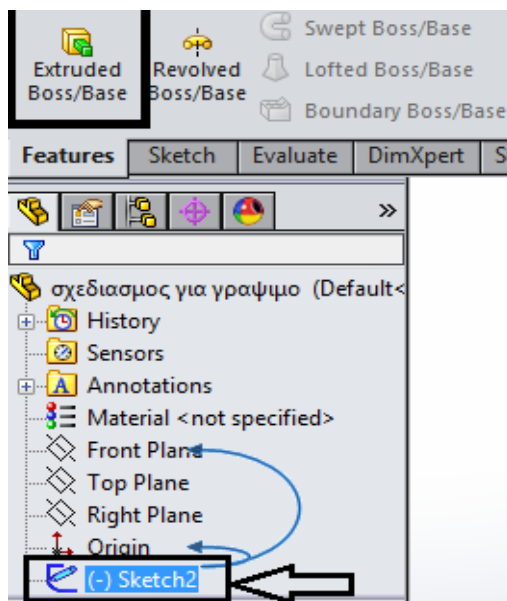
Το δισδιάστατο σχήμα, λοιπόν, είναι έτοιμο. Για να σχεδιασθεί το αντίστοιχο τρισδιάστατο πρέπει αρχικά από το **Ribbon Bar** να επιλεγεί το **Exit Sketch** και στη συνέχεια από τα **Tabs** να επιλεγεί το **Features**.



Σχήμα 4.23 Έξοδος από το δισδιάστατο και είσοδος στο τρισδιάστατο σχέδιο

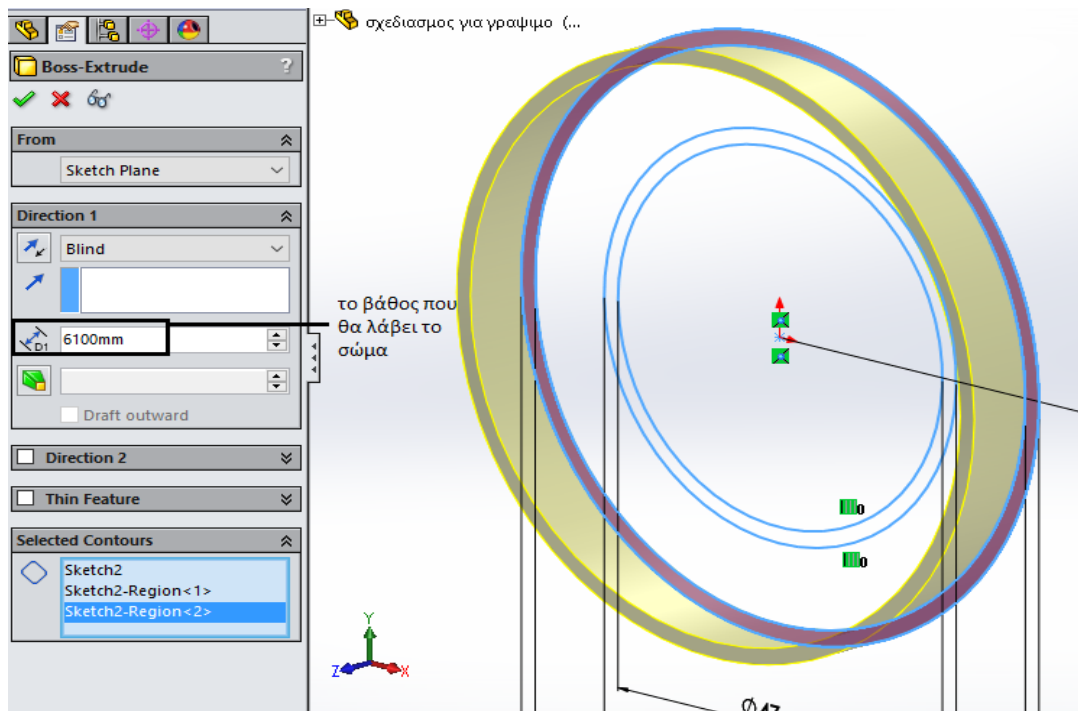
4.4 Τρισδιάστατος σχεδιασμός του συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη

Για τη δημιουργία του στερεού σώματος επιλέγεται αρχικά το σχέδιο **Sketch 2** και στη συνέχεια η εντολή **Extruded Boss / Base**. Στη συνέχεια ορίζεται το βάθος που θα λάβει το στερεό σώμα μέσω του **Direction 1**.

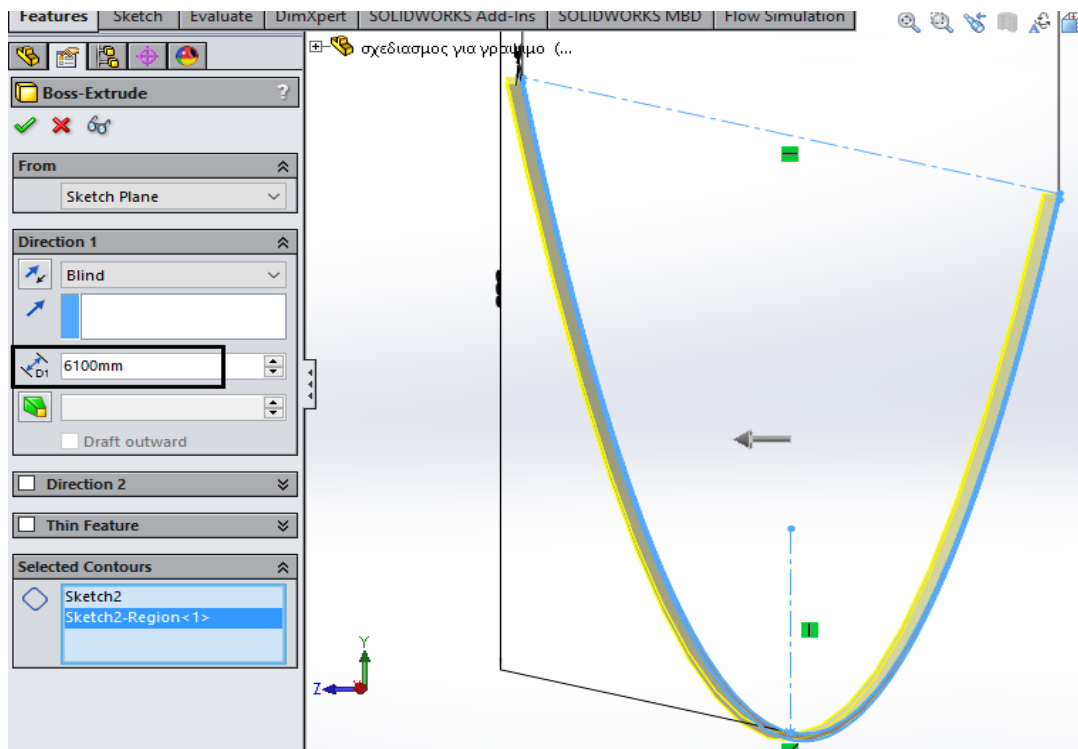


Σχήμα 4.24 Επιλογή του Sketch 2 και έπειτα του Extruded Base/ Base

Ξεκινώντας, επιλέγεται ο σωλήνας γυαλιού (Σχήμα 4.25) και το κάτοπτρο (Σχήμα 4.26) ώστε να μορφοποιηθούν.

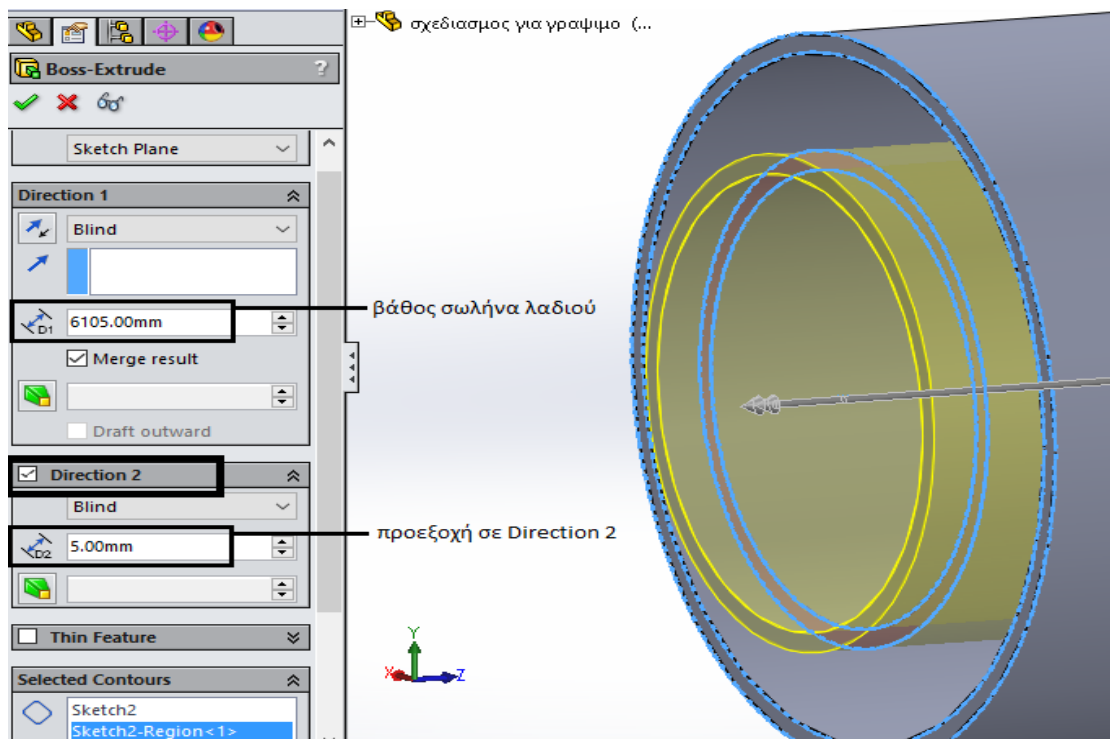


Σχήμα 4.25 Extruded Boss / Base στον σωλήνα γυαλιού



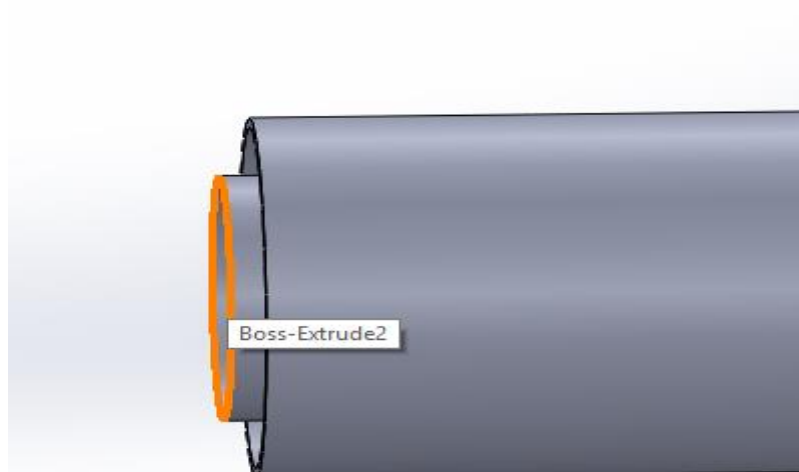
Σχήμα 4.26 Extruded Boss / Base στο κάτοπτρο

Με τον ίδιο τρόπο γίνεται η ανάπτυξη του σωλήνα λαδιού. Προσοχή όμως γιατί ο σωλήνας αυτός πρέπει να προεξέχει από τον συλλέκτη προς τα έξω έτσι ώστε στην πορεία να μπορέσουν να μπουν οι τάπες.

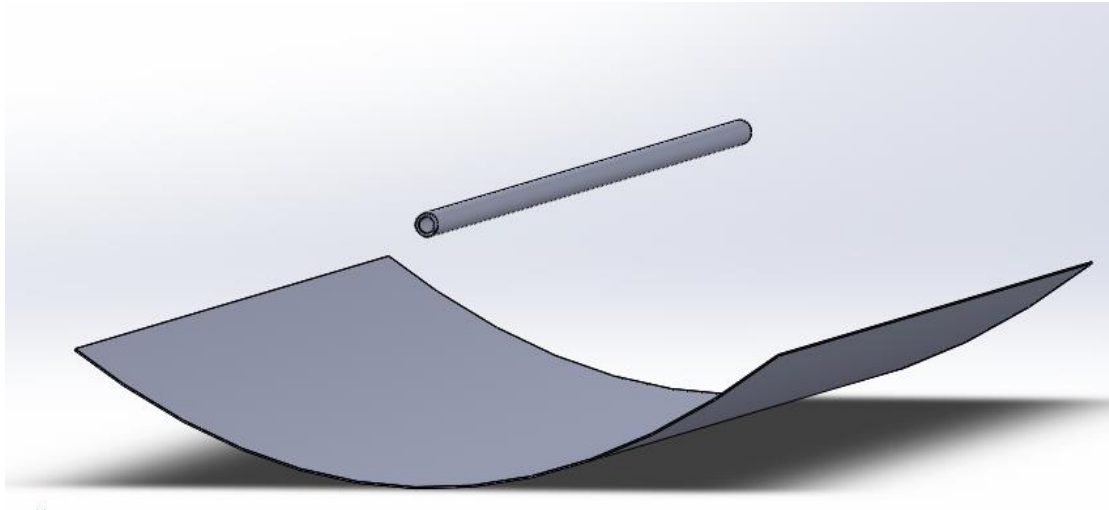


Σχήμα 4.27 Extruded Boss / Base στο σωλήνα λαδιού και Direction 2

Η ανάπτυξη του σωλήνα και από την άλλη πλευρά επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο με νωρίτερα. Ωστόσο αυτή τη φορά εκτός από το **Direction 1** επιλέγεται και το **Direction 2** η οποία διεύθυνση και θα δώσει την «προεξοχή του σωλήνα».



Σχήμα 4.28 Η ανάπτυξη του σωλήνα κενού και από την άλλη πλευρά

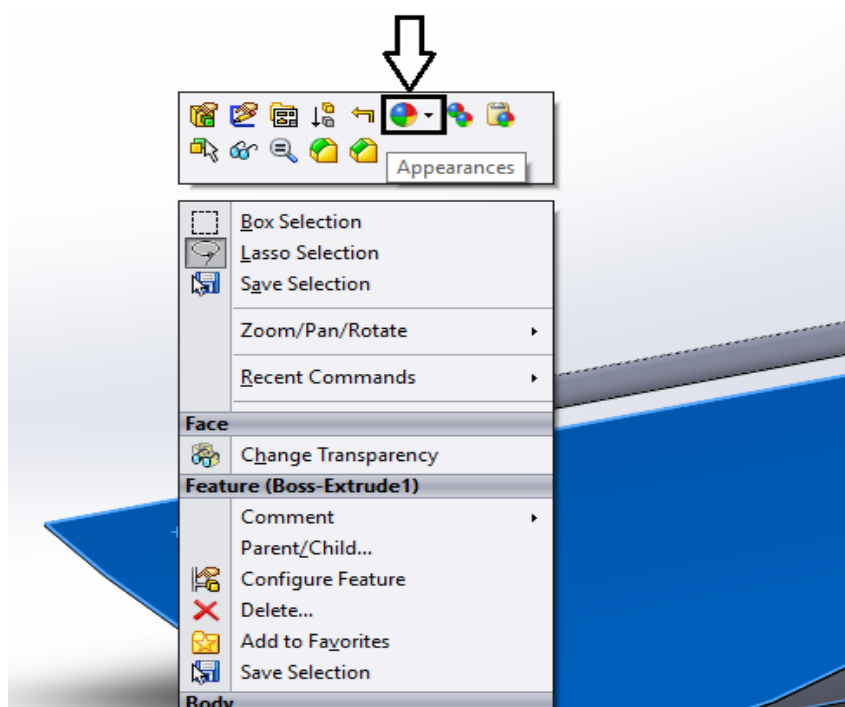


Σχήμα 4.29 Παραβολικός Συλλέκτης Πλήρως Σχεδιασμένος

Η τρισδιάστατη σχεδίαση του ηλιακού συλλέκτη είναι έτοιμη. (Σχήμα 4.29)

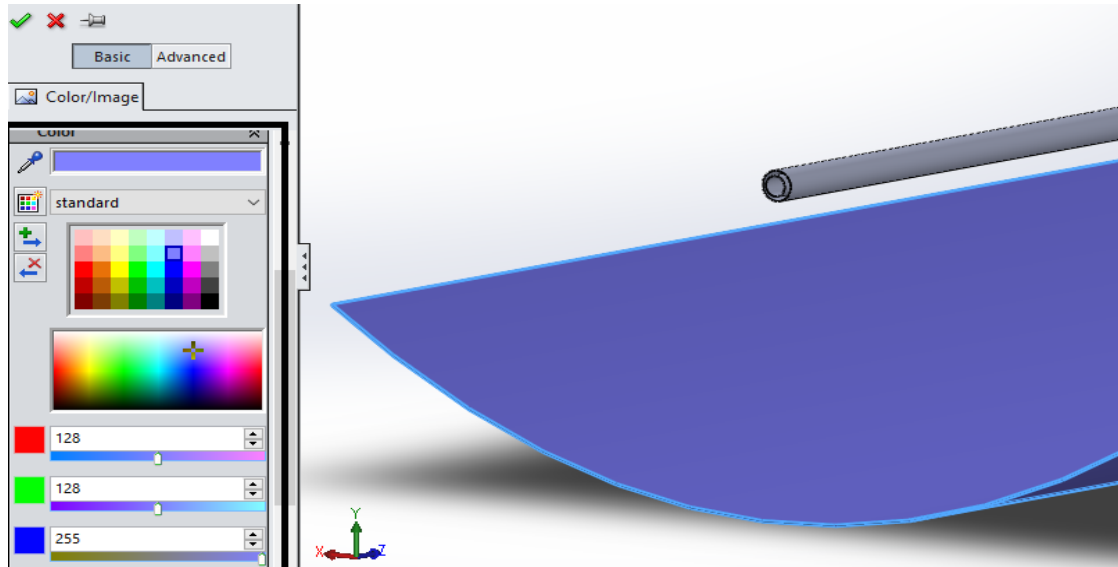
4.5 Ορισμός είδους και χρώματος επιφάνειας

Επιλέγεται με δεξί κλικ η προς τροποποίηση επιφάνεια, οπότε στην οθόνη εμφανίζεται ένα γκρουπ με ορισμένες εντολές. Επιλέγοντας την εντολή Appearances τροποποιείται η επιφάνεια σύμφωνα με τις διαθέσιμες επιλογές.



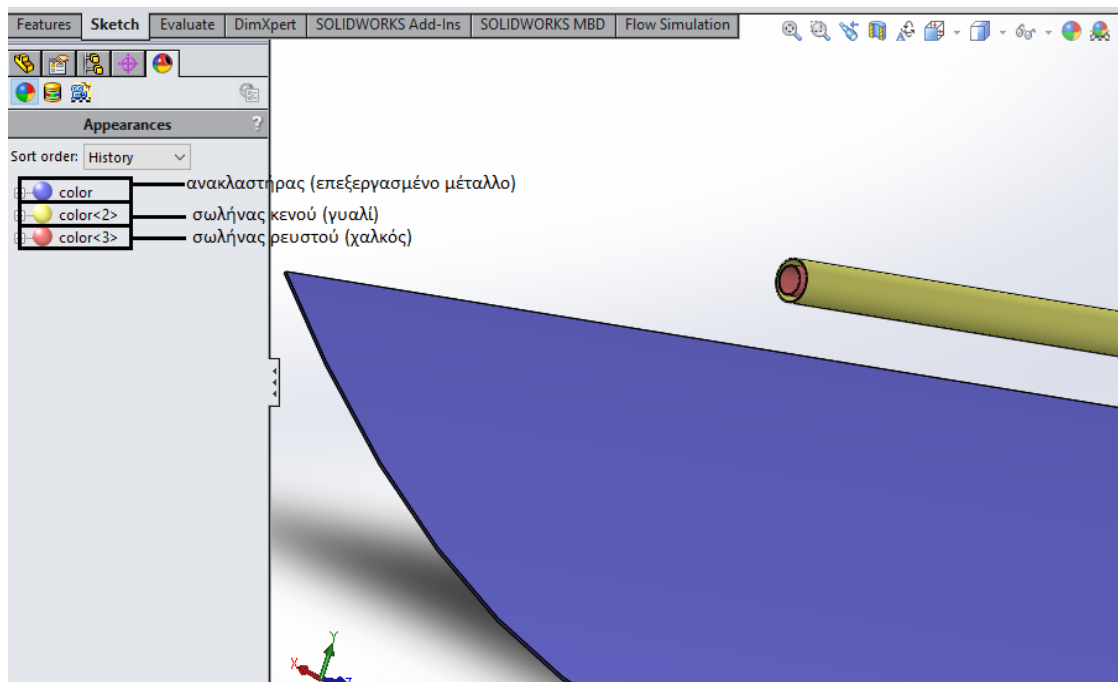
Σχήμα 4.30 Μπλοκ εντολών και εντολή Appearances

Εδώ, αξίζει να αναφερθεί πως το Solidworks παρέχει μία μεγάλη παλέτα χρωμάτων που διευκολύνει τη δουλειά και το σχεδιασμό. (Σχήμα 4.31)



Σχήμα 4.31 Ευρεία Επιλογή Χρωμάτων

Επιλέγονται διαφορετικά χρώματα για κάθε είδους επιφάνεια. Στο συγκεκριμένο ηλιακό συλλέκτη έχουν επιλεγθεί τρία χρώματα, καθένα από τα οποία αναπαριστούν ένα διαφορετικό σκέλος του.



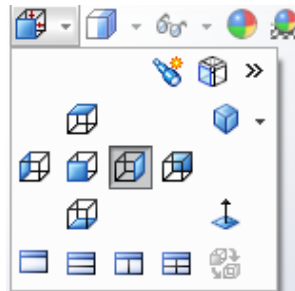
Σχήμα 4.32 Χρώματα του συλλέκτη και επεξηγήσή τους

4.6 Διάφορες όψεις και τομές του ηλιακού συλλέκτη τύπου PTC

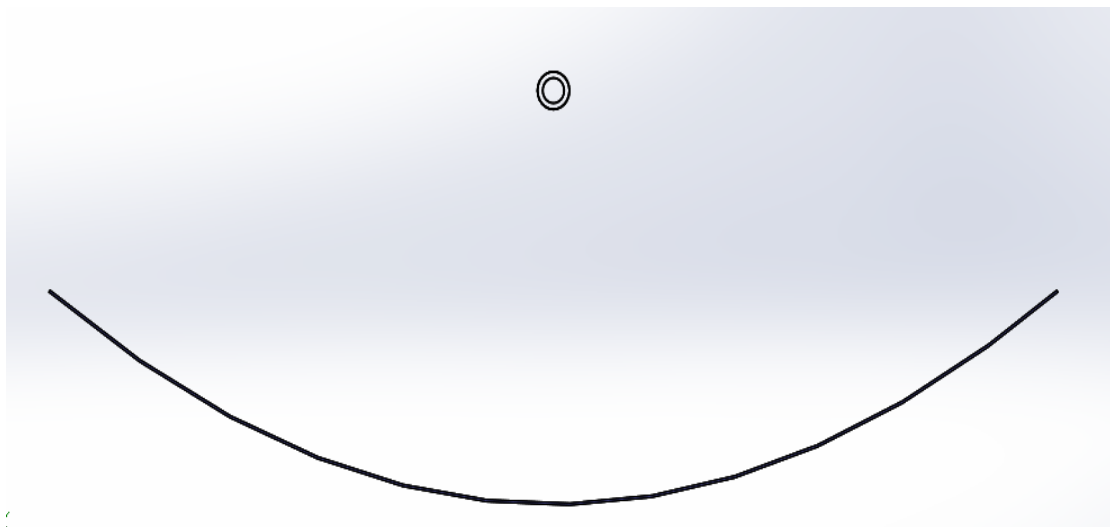
Για προβολή του συλλέκτη σε διαφορετικές όψεις χρησιμοποιούνται οι εντολές που βρίσκονται στην παρακάτω μπάρα.



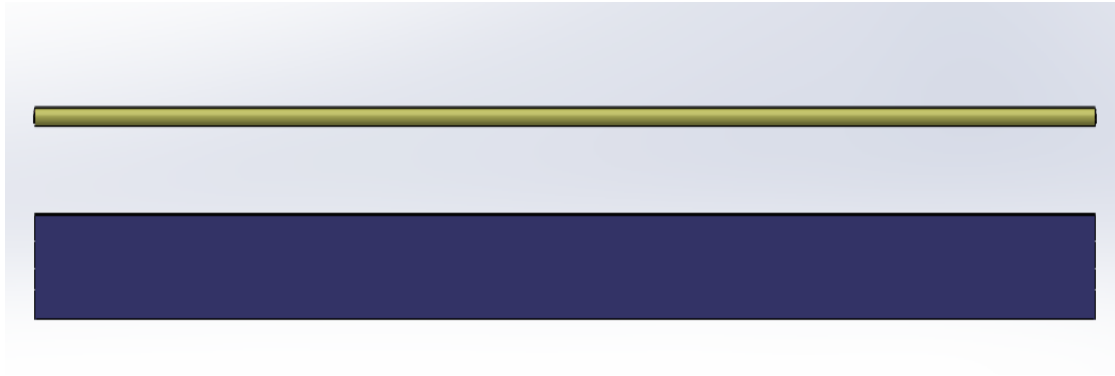
Σχήμα 4.33 Εργαλεία για διαφορετικές όψεις/ μορφοποίηση όψεως



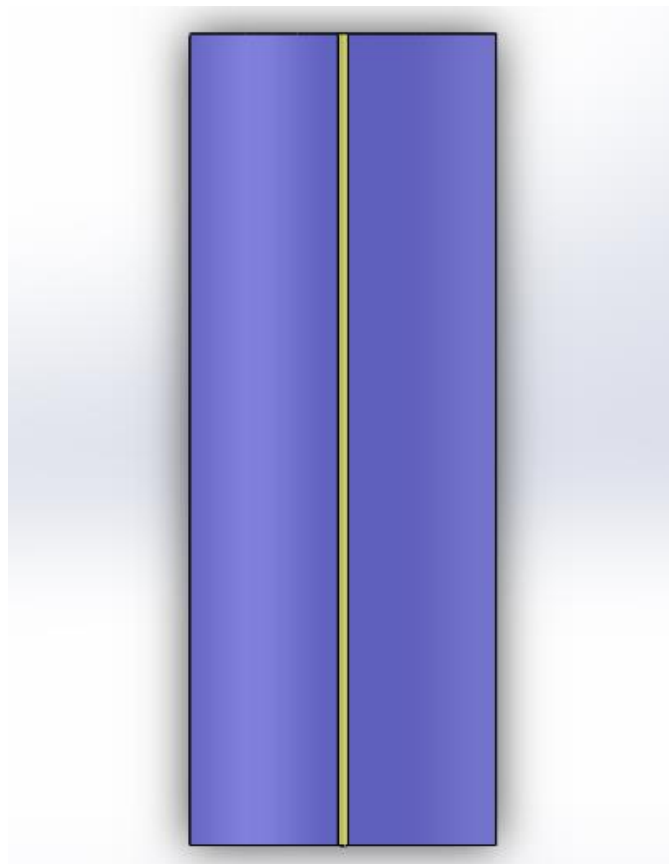
Σχήμα 4.34 Διαφορετικές όψεις



Σχήμα 4.35 Πρόοψη του συλλέκτη



Σχήμα 4.36 Πλάγια όψη συλλέκτη



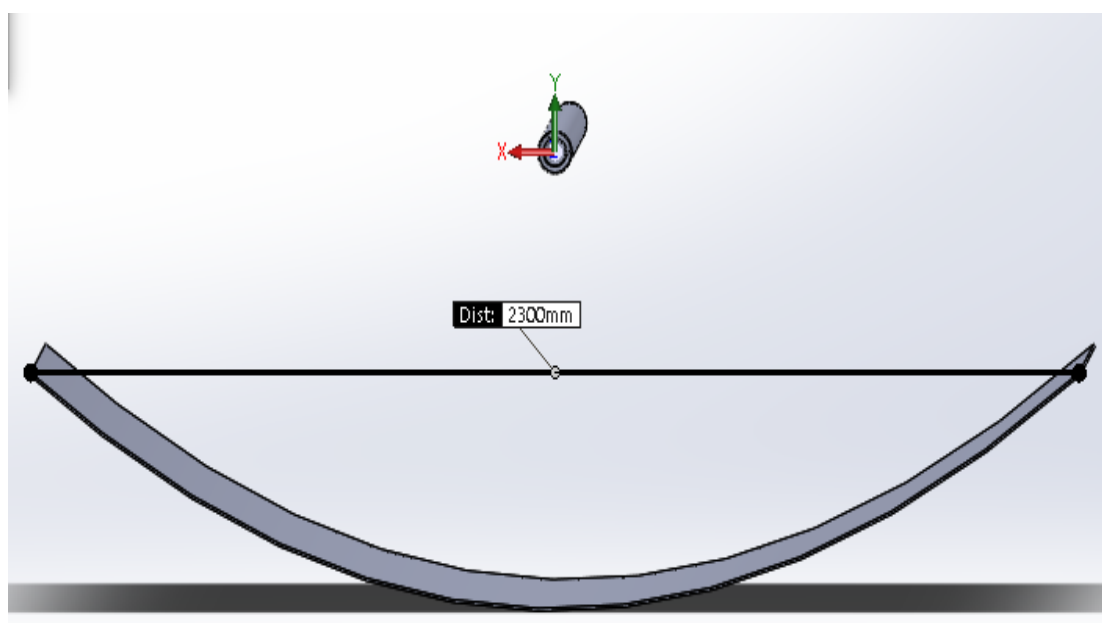
Σχήμα 4.37 Κάτοψη συλλέκτη

Κεφάλαιο 5 Προσομοίωση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη τύπου PTC

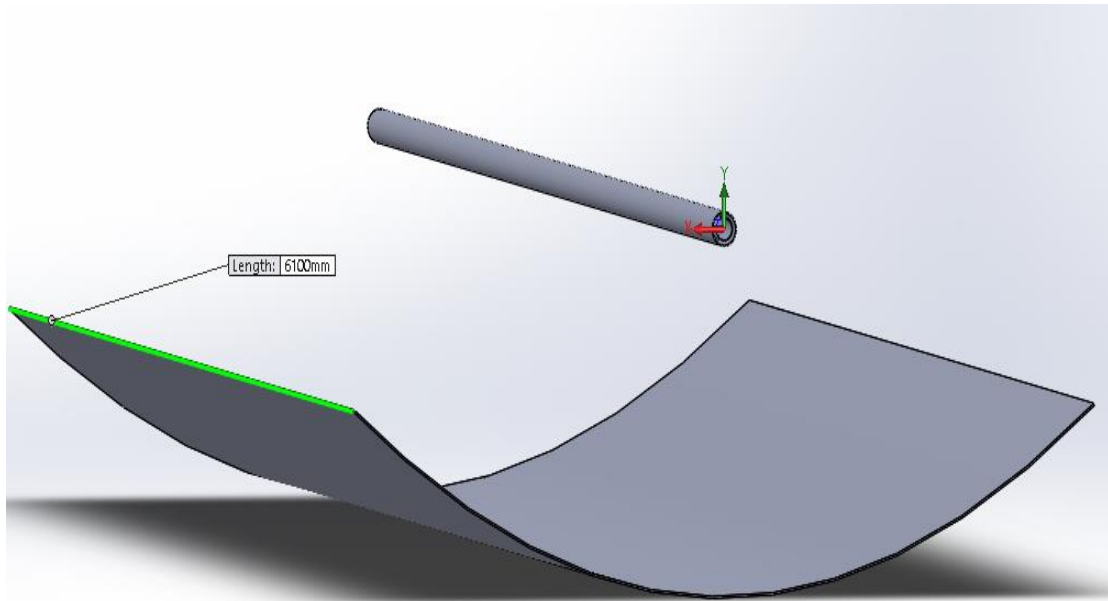
5.1 Εισαγωγή

Στην εν λόγω ενότητα γίνεται χρήση μίας νέας καρτέλας του περιβάλλοντος του προγράμματος. Πρόκειται για την καρτέλα **Flow Simulation**. Η καρτέλα αυτή δίνει τη δυνατότητα να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός εργαζόμενου μέσου, και πιο συγκεκριμένα ρευστού, εντός μίας κοιλότητας. Η μελέτη και η ανάλυση του ρευστού γίνεται τόσο σε ροϊκό όσο και σε θερμικό επίπεδο. Επιτρέπεται, επίσης, η μελέτη των στερεών ή των άλλων ρευστών που περιβάλλουν το εργαζόμενο μέσο. Η λειτουργία και οι δυνατότητες της συγκεκριμένης καρτέλας θα αναλυθούν μέσω του αντικειμένου που πρόκειται να προσομοιωθεί.

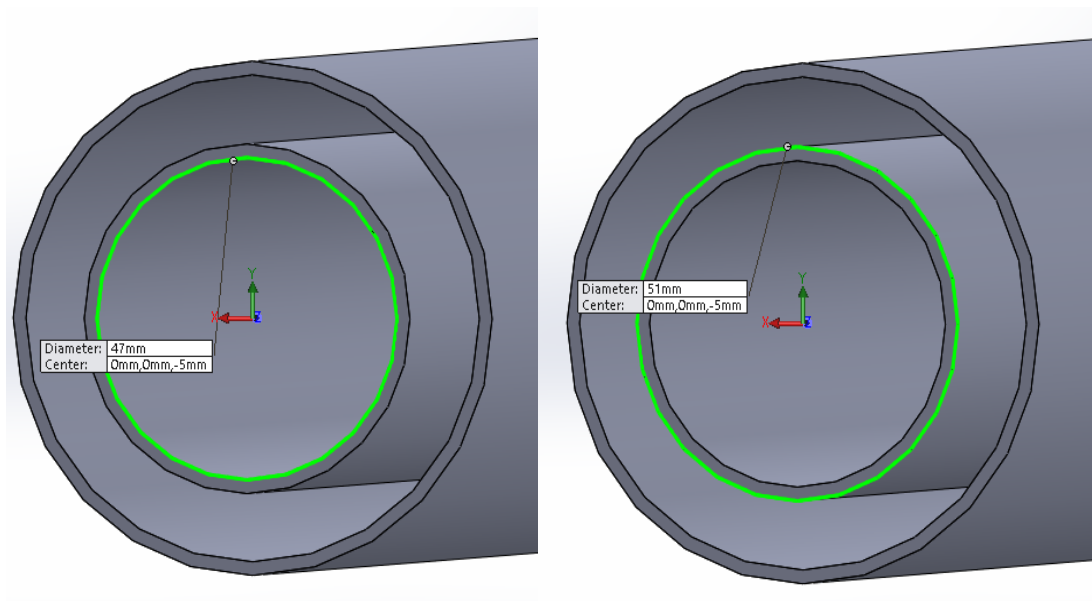
Συγκεκριμένα θα προσομοιωθεί ένας συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης τύπου **PTC**, ο οποίος παρουσιάζει άνοιγμα **W= 2300mm** και έχει μήκος **L= 6200mm**. Ο απορροφητής αποτελείται από ένα χάλκινο σωλήνα, που μέσα του ρέει λάδι, με εσωτερική διάμετρο **D_{r,in}= 47mm** και εξωτερική διάμετρο **D_{r,out}= 51mm**. Ο σωλήνας αυτός περικλείεται από ένα σωλήνα γυαλιού με εσωτερική διάμετρο **D_{c,in}= 71mm** και εξωτερική διάμετρο **D_{c,out} = 75mm**. Ανάμεσα στους δύο σωλήνες υπάρχει κενό. Η σχεδίαση των αναφερθέντων σωλήνων πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι διαστάσεις που προαναφέρθηκαν.



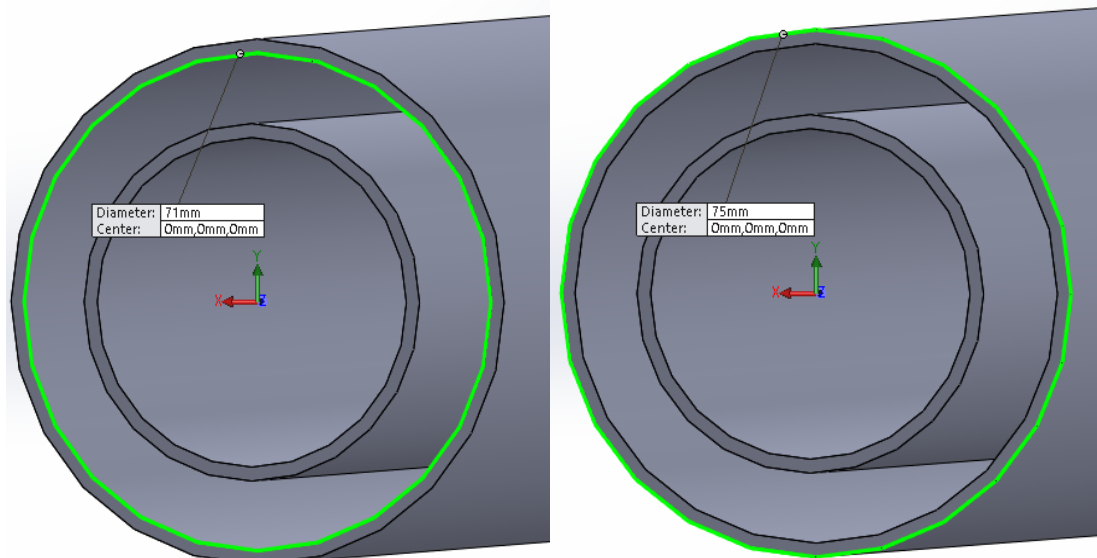
Σχήμα 5.1α Άνοιγμα W Συλλέκτη



Σχήμα 5.1β Μήκος L συλλέκτη



Σχήμα 5.2 Εσωτερική και Εξωτερική διάμετρος απορροφητή



Σχήμα 5.3 Εσωτερική και Εξωτερική διάμετρος σωλήνα γυαλιού

5.2 Δεδομένα του προβλήματος

Τα δεδομένα του προβλήματος, τα οποία κατά κύριο λόγο αποτελούν τις οριακές συνθήκες του, δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.1.

<i>Ονομασία</i>	<i>Σύμβολο</i>	<i>Τιμή</i>	<i>Μονάδες</i>
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{am}	10	$^{\circ}C$
Θερμοκρασία εισόδου του λαδιού	T_{in}	10-350	$^{\circ}C$
Παροχή μάζας νερού	\dot{m}	0.21	Kg/sec
Ολική στιγμιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία	G_b	1000	W/m^2
Πίεση	p	1.01325	Bar
Συντελεστής συναγωγής γυαλιού-περιβάλλοντος	h_{air}	10	W/m^2K

Πίνακας 5.1 Δεδομένα του προβλήματος

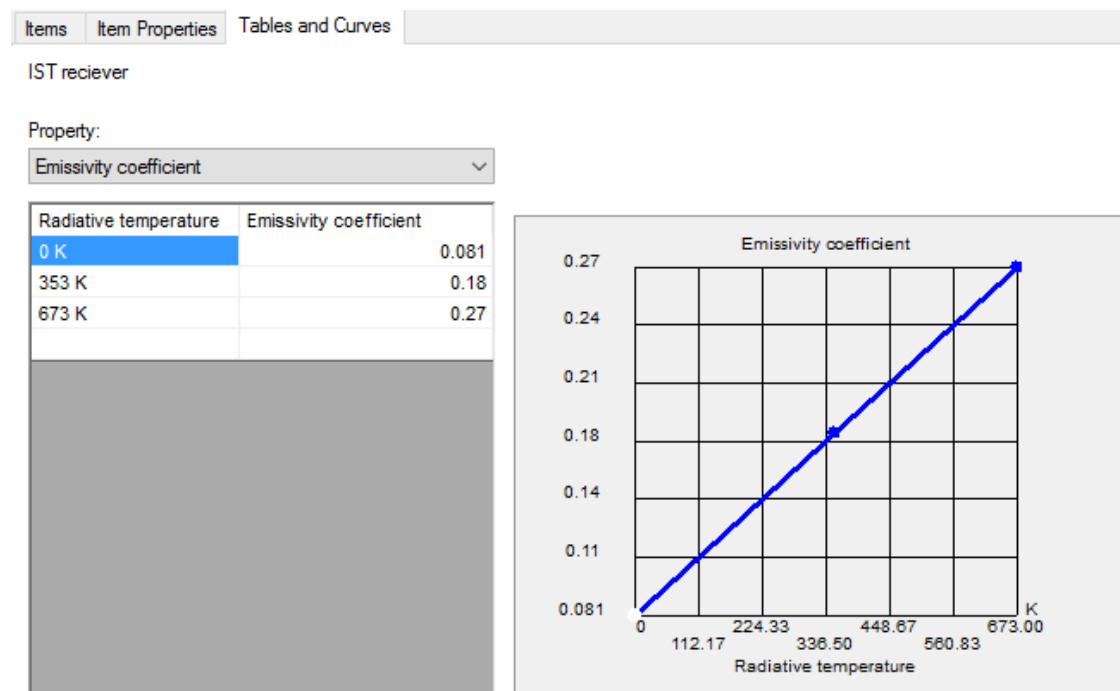
5.3 Ιδιότητες των συνιστωσών του ηλιακού συλλέκτη

Τα οπτικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη δόθηκαν ως εξής.

Property	Value
Name	IST reciever
Comments	
Radiative surface type	Wall
Reflection	Diffusive
Emissivity	Specific for thermal and solar radiation
Emissivity coefficient	(Table)
Solar absorptance	(Table)

Σχήμα 5.4 Καθορισμός ιδιοτήτων των συνιστωσών του συλλέκτη/ IST receiver

Για τον συντελεστή εκπομπής ϵ_p του απορροφητή εισήχθη στο λογισμικό του Solidworks πίνακας (Σχήμα 5.5), τα δεδομένα το οποίου πάρθηκαν από τη βιβλιογραφία [44].



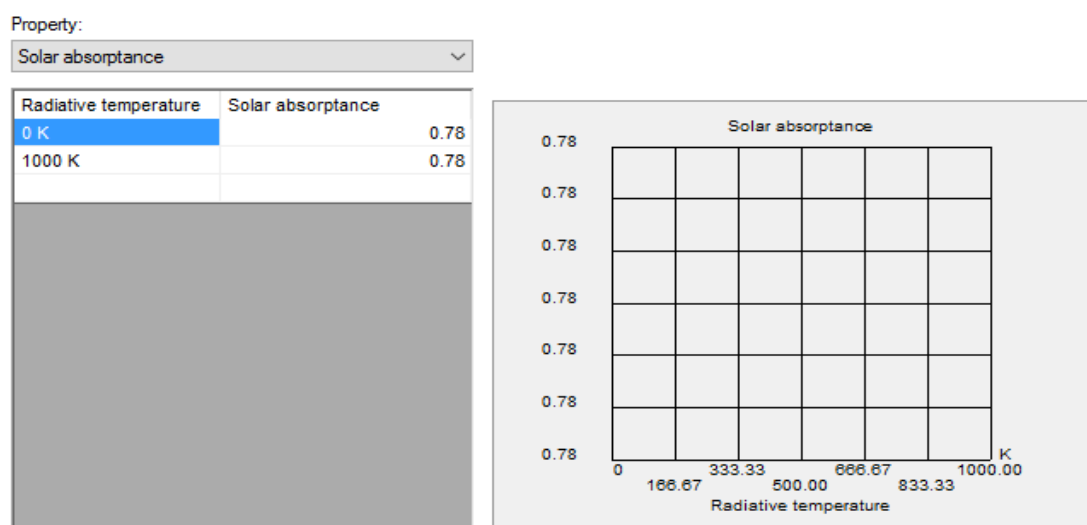
Σχήμα 5.5 Συντελεστής εκπομπής απορροφητή (emissivity coefficient)

Επίσης, καθώς το λογισμικό Solidworks λαμβάνει τα δεδομένα για τον συντελεστή εκπομπής ϵ_p από πίνακα, πρέπει να λάβει και τα δεδομένα για το γινόμενο $\rho(\tau a)$ από πίνακα. Δημιουργείται, έτσι, ο απλός πίνακας (Σχήμα 5.6) προκειμένου να αναγνωρίσει το Solidworks τα δεδομένα.

Στον πίνακα αυτό ορίστηκε το γινόμενο $\gamma\rho(\tau a)=0.78$ και όχι μόνο η απορροφητικότητα a (absorbance), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6, διότι δεν υπήρχε δυνατότητα να εισαχθούν τα υπόλοιπα δεδομένα με διαφορετικό τρόπο. Η τιμή του γινομένου $\rho(\tau a)$ προέκυψε τόση έπειτα από δοκιμές. Δίνεται από τον κατασκευαστή το γινόμενο αυτό ίσο με 0.824. Με μία λογική υπόθεση για το γ (παράγοντας

σύλληψης) και δίνοντάς του την τιμή 0.95 [1] το παραπάνω γινόμενο λαμβάνει την τελική του τιμή.

Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα μοντελοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία με ακτίνες αμελώντας το γεγονός ότι στη πραγματικότητα υπάρχει κώνος 16'. Γι αυτό το λόγο το γ επιλέχθηκε να έχει μία τυπική τιμή της τάξης του 95%. Αυτή η τιμή αφορά τη περίπτωση όπου η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα στο άνοιγμα του συλλέκτη. Σε περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης είναι διαφορετική, το πρόγραμμα θα υπολογίζει από μόνο του το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο δέκτη. Με άλλα λόγια, ο συντελεστής τροποποίησης του οπτικού βαθμού απόδοσης K , υπολογίζεται από το ίδιο το πρόγραμμα.



Σχήμα 5.6 Γινόμενο $\rho(\tau)$

5.4 Ζητούμενα του προβλήματος

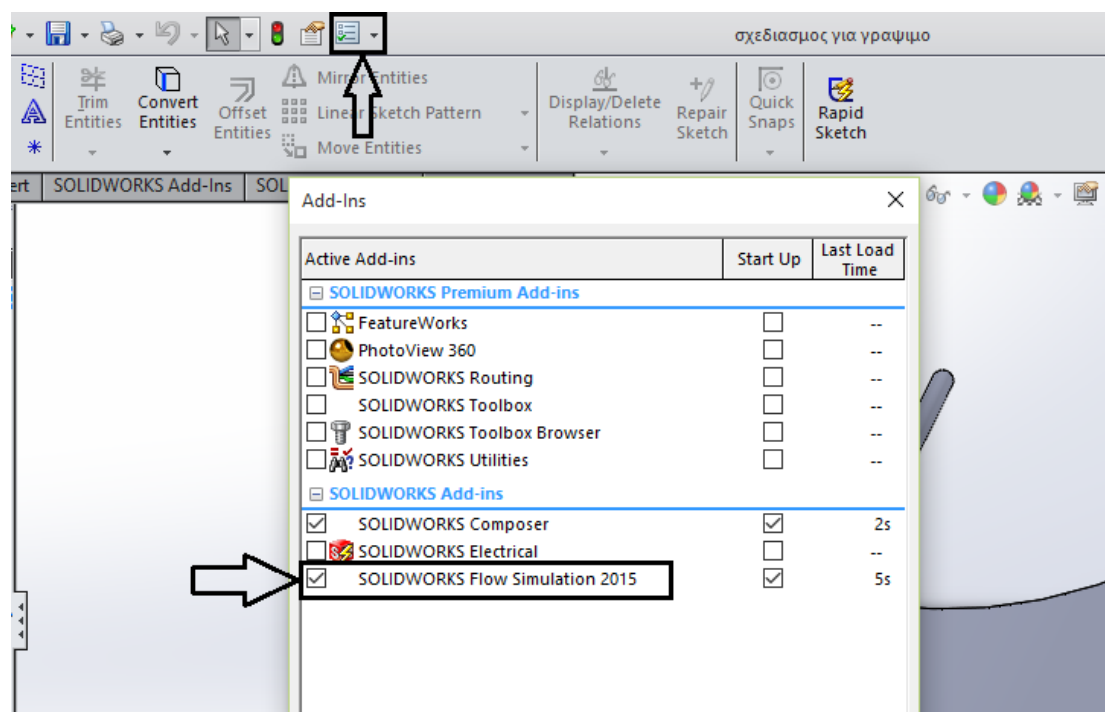
Τα ζητούμενα του προβλήματος, τα οποία πρόκειται να αποτελέσουν και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα.

Όνομασία	Σύμβολο
Θερμοκρασία εξόδου του νερού	T_{out}
Θερμοκρασία απορροφητή	T_r
Θερμοκρασία γυαλιού	T_g
Ωφέλιμη ισχύς	Q_u
Θερμικές απώλειες	Q_{loss}

Πίνακας 5.2 Ζητούμενα του προβλήματος

5.5 Προσομοίωση Μοντέλου

Αρχικά, ανοίγεται το αρχείο του μοντέλου που πρόκειται να προσομοιωθεί και ενεργοποιείται η καρτέλα **Flow Simulation** κάνοντας χρήση του εικονιδίου της **Ribbon Bar** (Σχήμα 5.7).

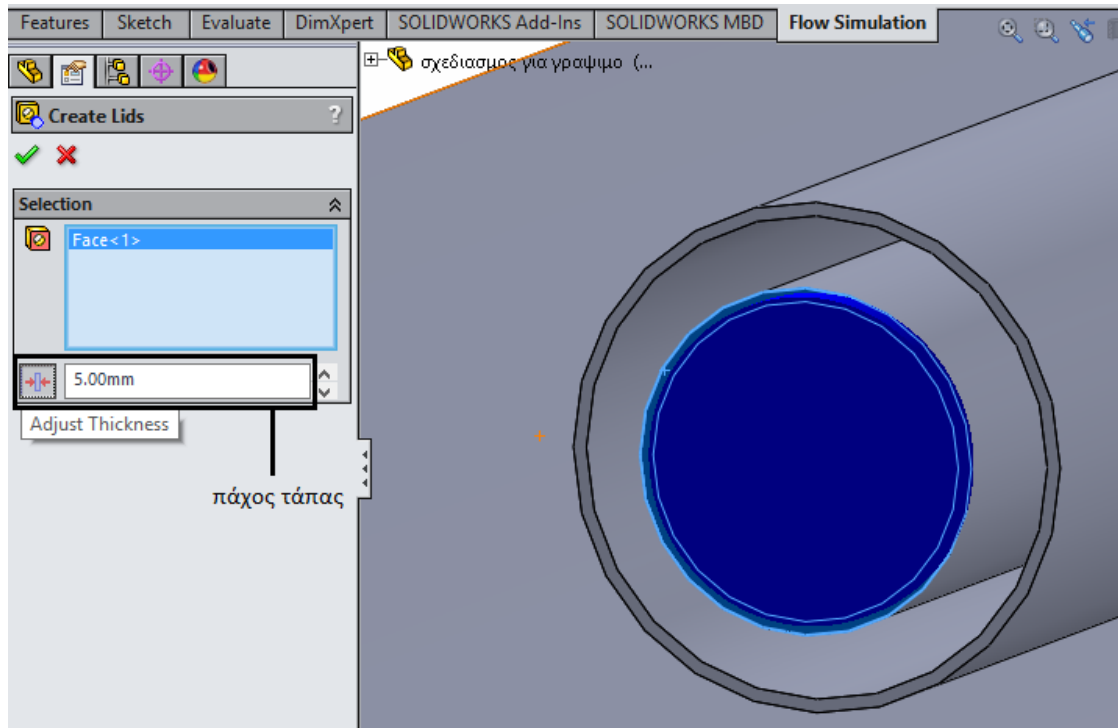


Σχήμα 5.7 Ενεργοποίηση της καρτέλας "Flow Simulation"

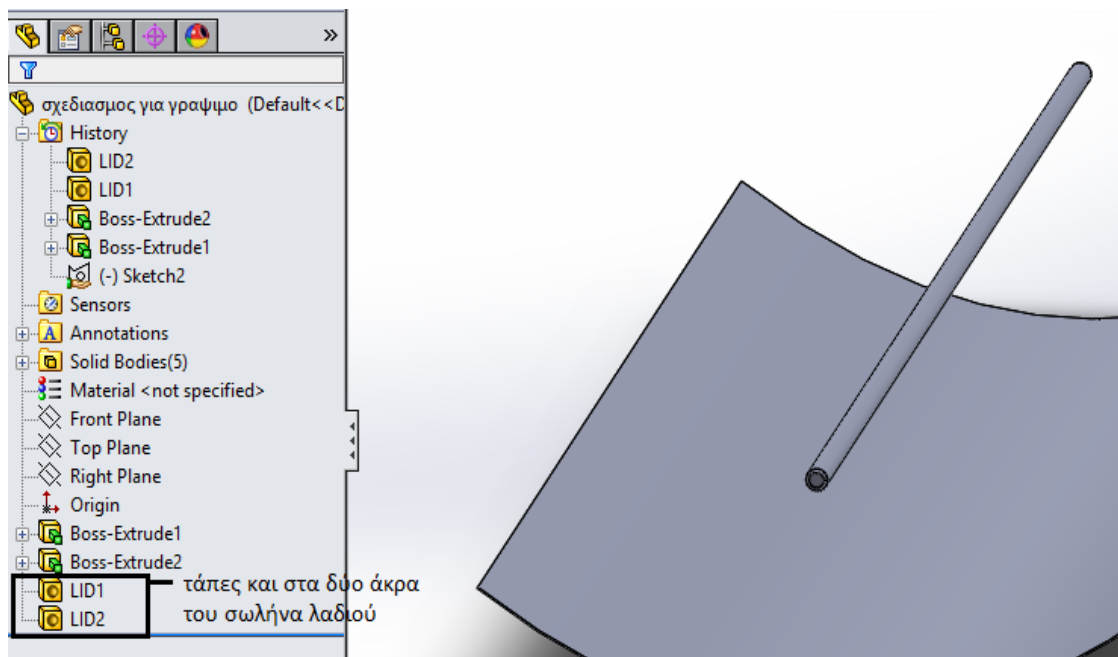
Ακολούθως, φράσσονται (στεγανοποιούνται) τα δύο άκρα του σωλήνα λαδιού με την είσοδο «ταπών» προκειμένου το ρευστό να εντοπίσει έναν χώρο στον οποίο θα εισαχθεί. Το Solidworks απαιτεί τη συγκεκριμένη κίνηση ώστε να μπορέσει να αντιληφθεί τον όγκο του ρευστού. Η συγκεκριμένη ενέργεια πραγματοποιείται με τη χρήση της εντολής **Create Lids** (🔧) η οποία βρίσκεται στην καρτέλα **Flow Simulation**.

Έχοντας επιλέξει την εν λόγω εντολή πρέπει να εισαχθούν τα χαρακτηριστικά της τάπας. Αρχικά, επιλέγεται η προς στεγανοποίηση επιφάνεια. Στη συνέχεια, επιλέγεται το πάχος της τάπας (Σχήμα 5.8). Το πάχος της τάπας θα είναι τόσο όση η προεξοχή που προβλεπόμενα έχει γίνει κατά το σχεδιασμό του σωλήνα, δηλαδή **5mm**.


Αφού στεγανοποιηθεί το ένα άκρο του σωλήνα, στεγανοποιείται ομοiotρόπως και το άλλο (Σχήμα 5.9).

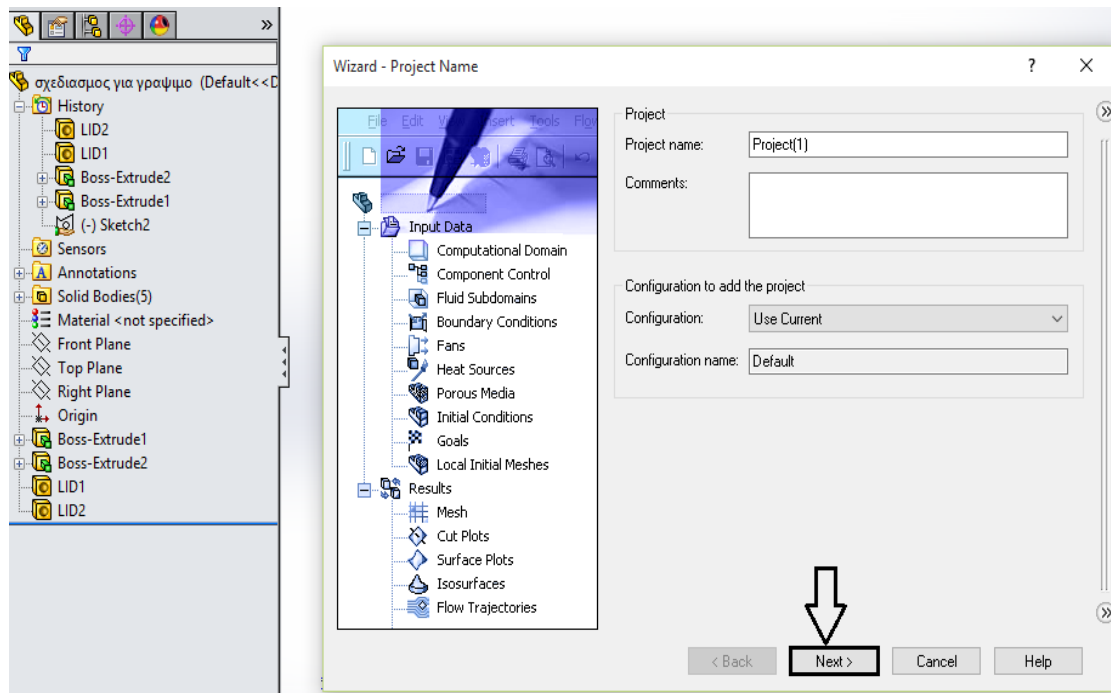


Σχήμα 5.8 Εισαγωγή τάπας στο ένα άκρο του σωλήνα



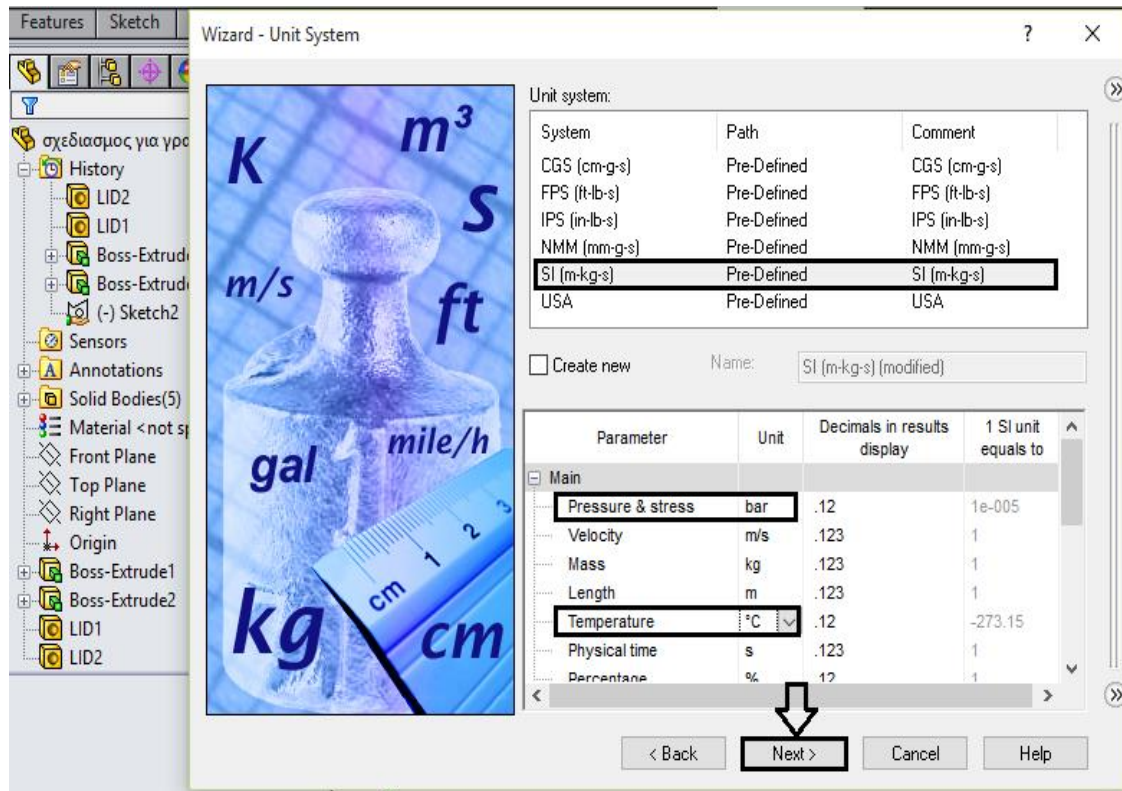
Σχήμα 5.9 Στεγανοποιούνται και τα δύο άκρα του σωλήνα λαδιού

Έπειτα, καταστρώνεται ένα **σχέδιο προσομοίωσης ροής (Flow Simulation Project)** με χρήση της εντολής **Wizard** (), η οποία βρίσκεται στην καρτέλα **Flow Simulation**.



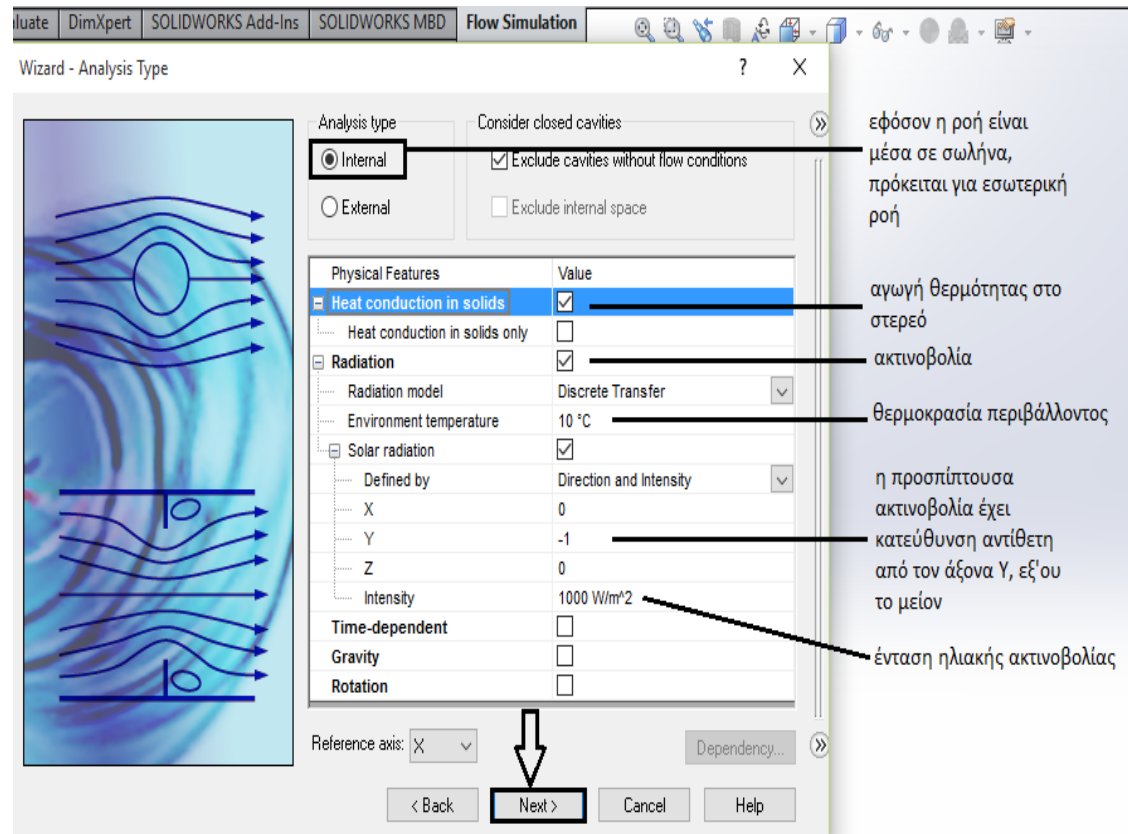
Σχήμα 5.10 Flow simulation project

Ακολουθεί ο ορισμός των μονάδων μέτρησης. Επιλέγεται η χρήση μονάδων στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων SI. Επίσης, επιλέγεται το bar ως μονάδα μέτρησης για την πίεση και οι βαθμοί Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$) ως μονάδα μέτρηση για τη θερμοκρασία.



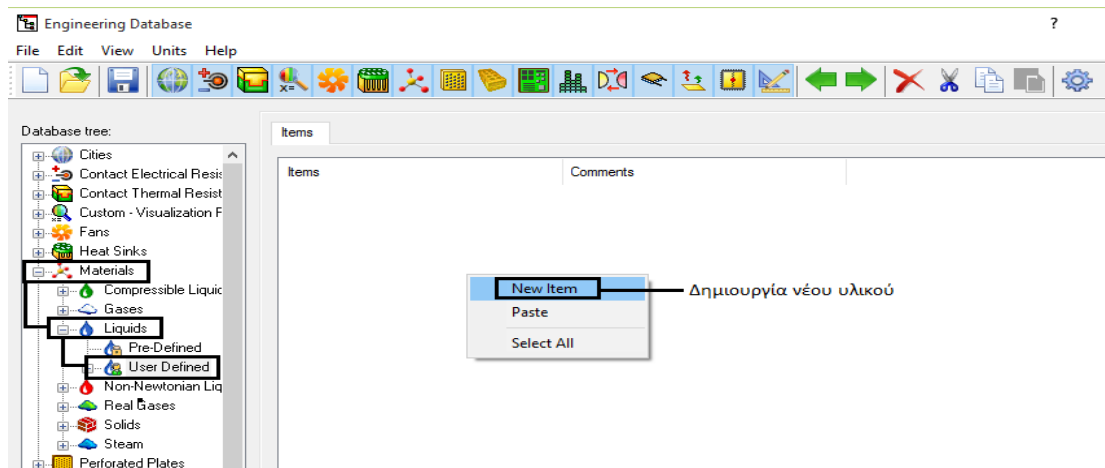
Σχήμα 5.11 Unit System

Έπειτα, ακολουθεί ο προσδιορισμός του φαινομένου ως προς τη συναλλαγή θερμότητας. Εδώ, επιλέγεται η αγωγή για την μετάδοση θερμότητας στο στερεό καθώς και η ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, για την ακτινοβολία, ορίζεται η διεύθυνση του ήλιου ως προς άξονες X, Y, Z καθώς και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι κατακόρυφη, επομένως η ακτινοβολία θα ορισθεί στον άξονα Y.



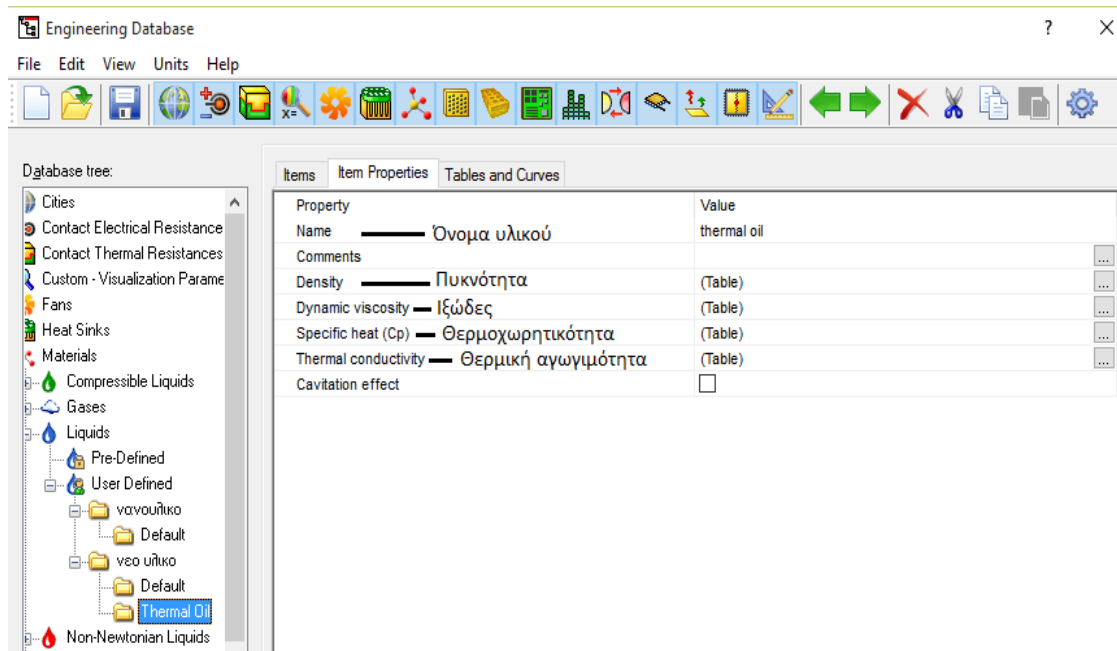
Σχήμα 5.12 Analysis Type

Στη συνέχεια, επιλέγεται το εργαζόμενο μέσο που θα εισαχθεί στο σωλήνα ρευστού. Εισάγεται λάδι (**Thermal Oil**), του οποίου οι ιδιότητες [45] καταχωρούνται στο Solidworks. Για την εισαγωγή νέου υλικού στη βάση δεδομένων του Solidworks (**Engineering Database**) ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, δημιουργείται νέο υλικό όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 5.13).



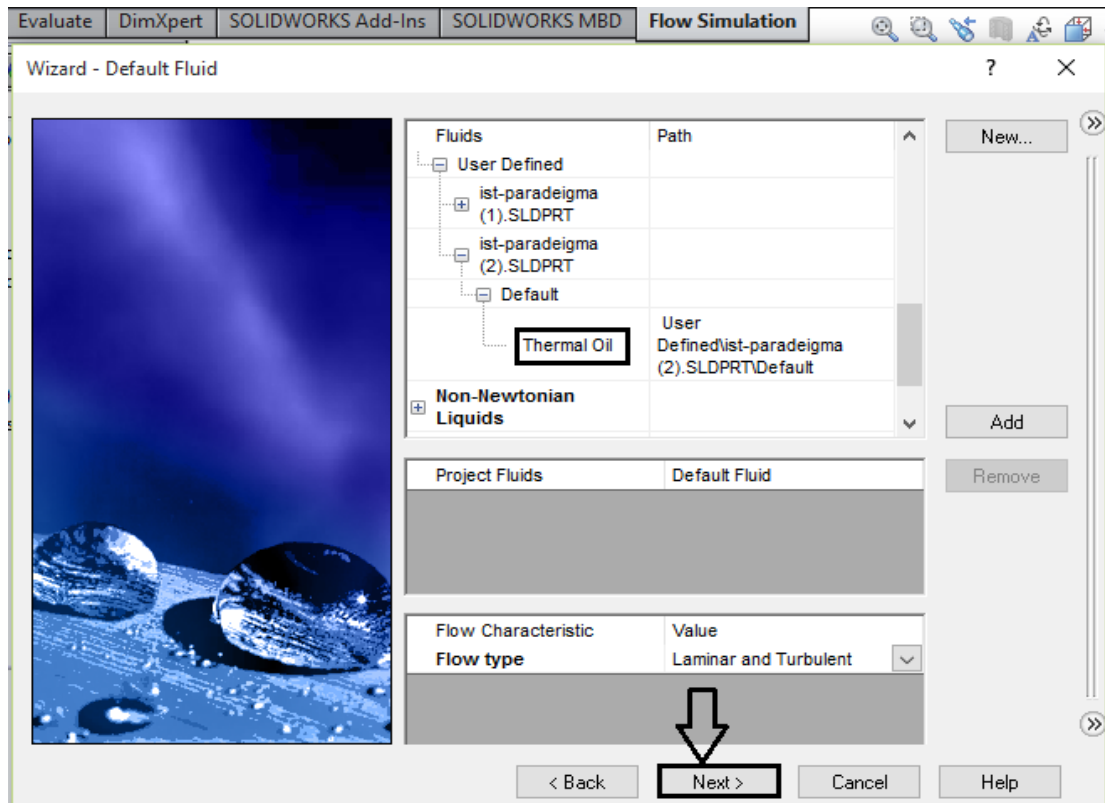
Σχήμα 5.13 Δημιουργία νέου υλικού

Αφού δημιουργηθεί το υλικό, εισάγονται οι ιδιότητές του (πυκνότητα, ιξώδες, θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα) σε μορφή πίνακα (Σχήμα 5.14). Δίνοντας, στο τέλος ένα όνομα, το υλικό είναι πλήρως ορισμένο.



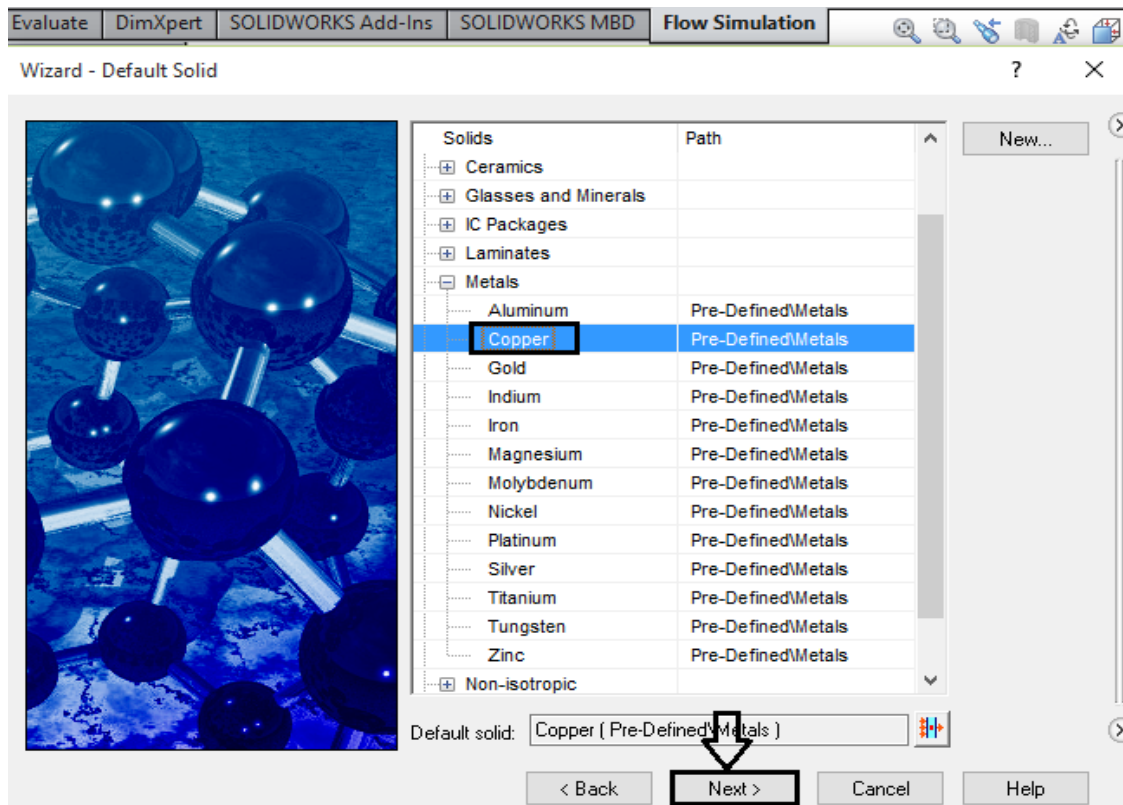
Σχήμα 5.14 Ορισμός ιδιοτήτων υλικού σε πίνακες

Η επιλογή **Laminar and Turbulent** εξασφαλίζει την μελέτη του φαινομένου τόσο σε στρωτή όσο και σε τυρβώδη ροή.



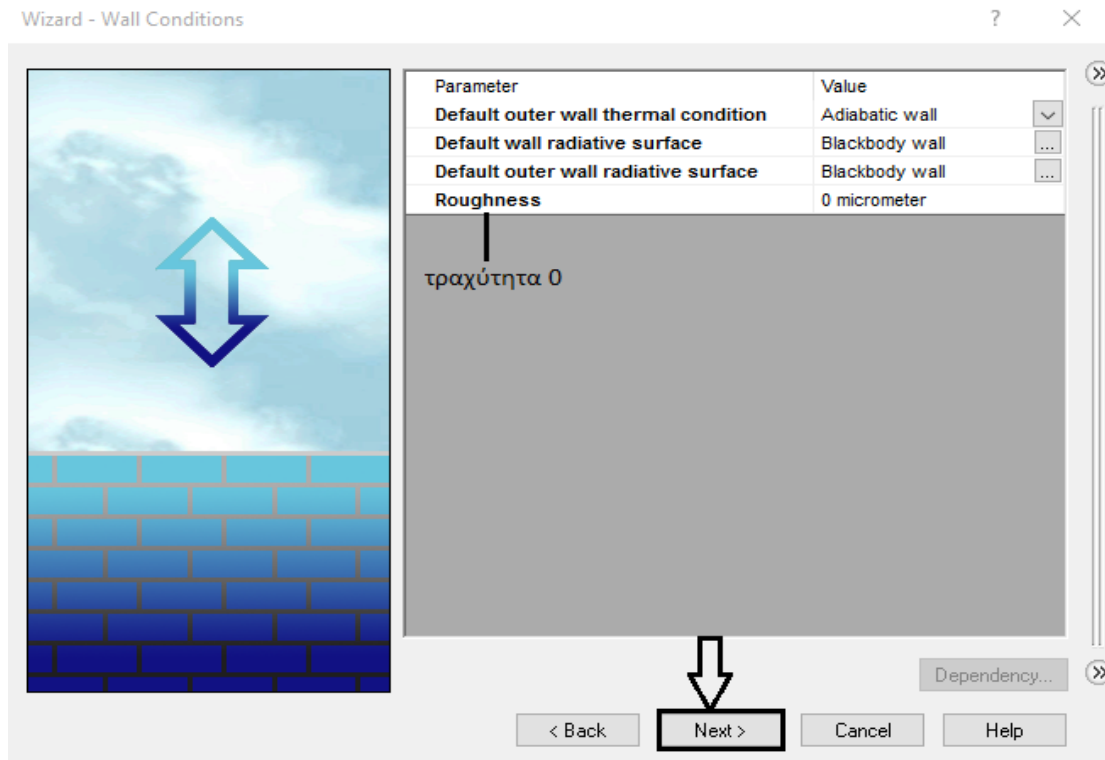
Σχήμα 5.15 Default Fluid

Ο σωλήνας λαδιού είναι χάλκινος.



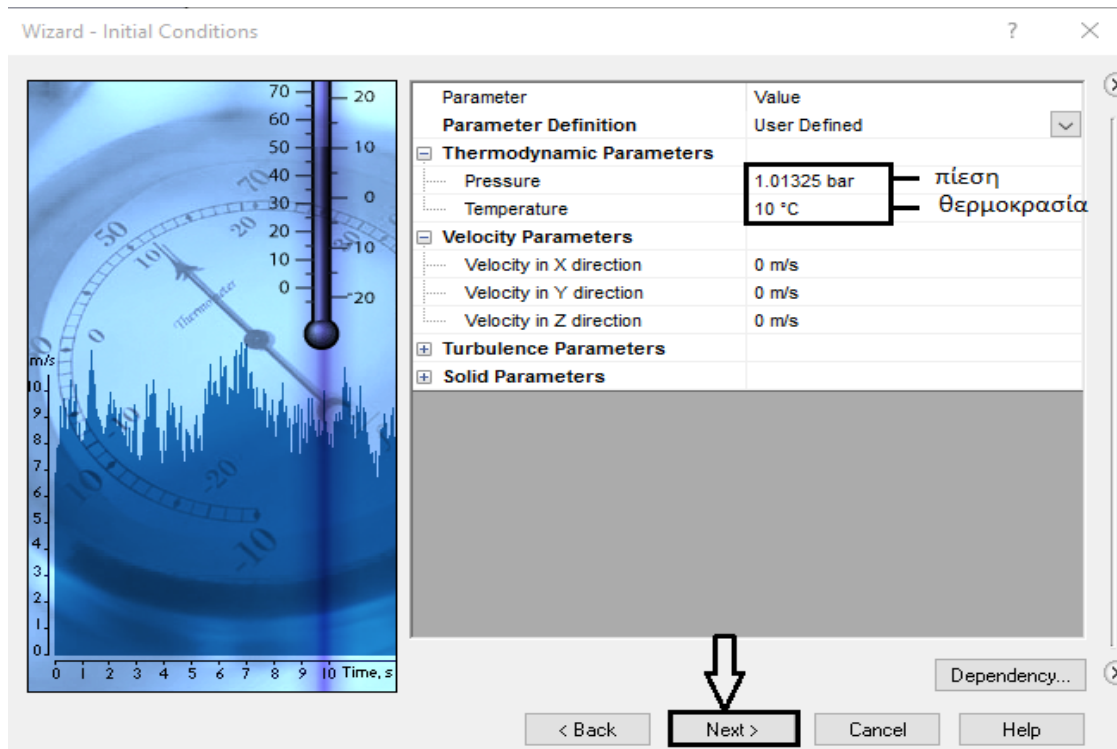
Σχήμα 5.16 Default Solid

Οι επιφάνειες θεωρούνται ως μέλαν σώμα (**blackbody**), δηλαδή απορροφούν και εκπέμπουν μονάδα σε όλο το φάσμα του μήκους κύματος.



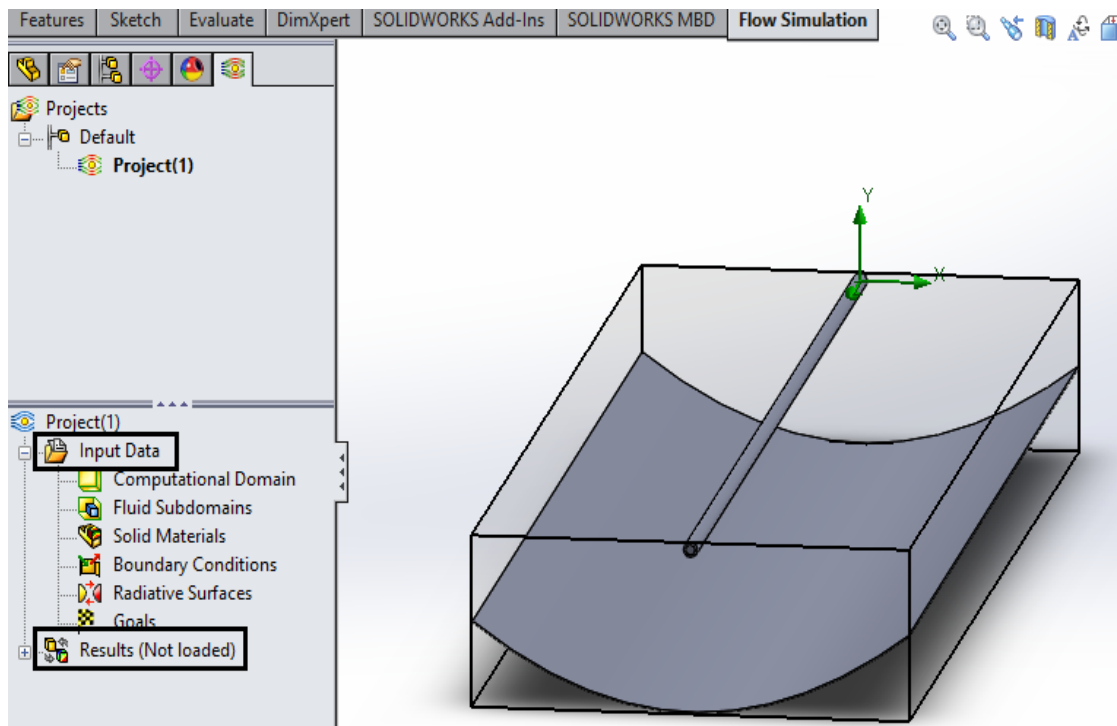
Σχήμα 5.17 Wall Conditions

Ως αρχικές συνθήκες, εισάγονται 10°C η θερμοκρασία και 1.01325 bar η πίεση.



Σχήμα 5.18 Initial Conditions

Και ως τελευταία επιλογή, στην οθόνη εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο όπου ορίζεται το αρχικό πλέγμα. Χωρίς καμία επιπλέον ρύθμιση, πατώντας το **Finish** εμφανίζεται το μοντέλο (Σχήμα 5.19).

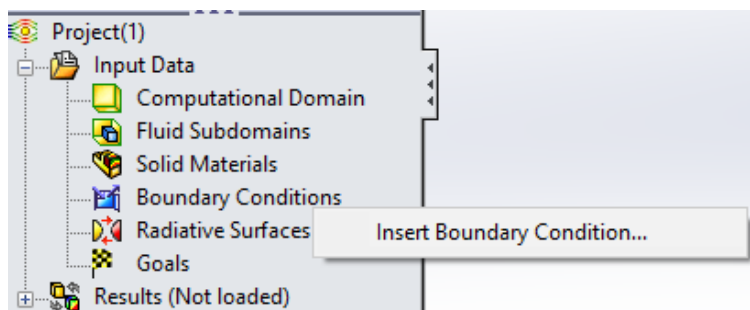


Σχήμα 5.19 Δένδρο ενεργειών αρχείου προσομοίωσης

Το δένδρο ενεργειών του σχεδίου προσομοίωσης που εμφανίζεται στα αριστερά της οθόνης περιλαμβάνει δύο βασικούς κλάδους, τον κλάδο **Input Data** και τον κλάδο **Results**. Στη συνέχεια, θα ορισθούν οι δύο αυτοί κλάδοι.

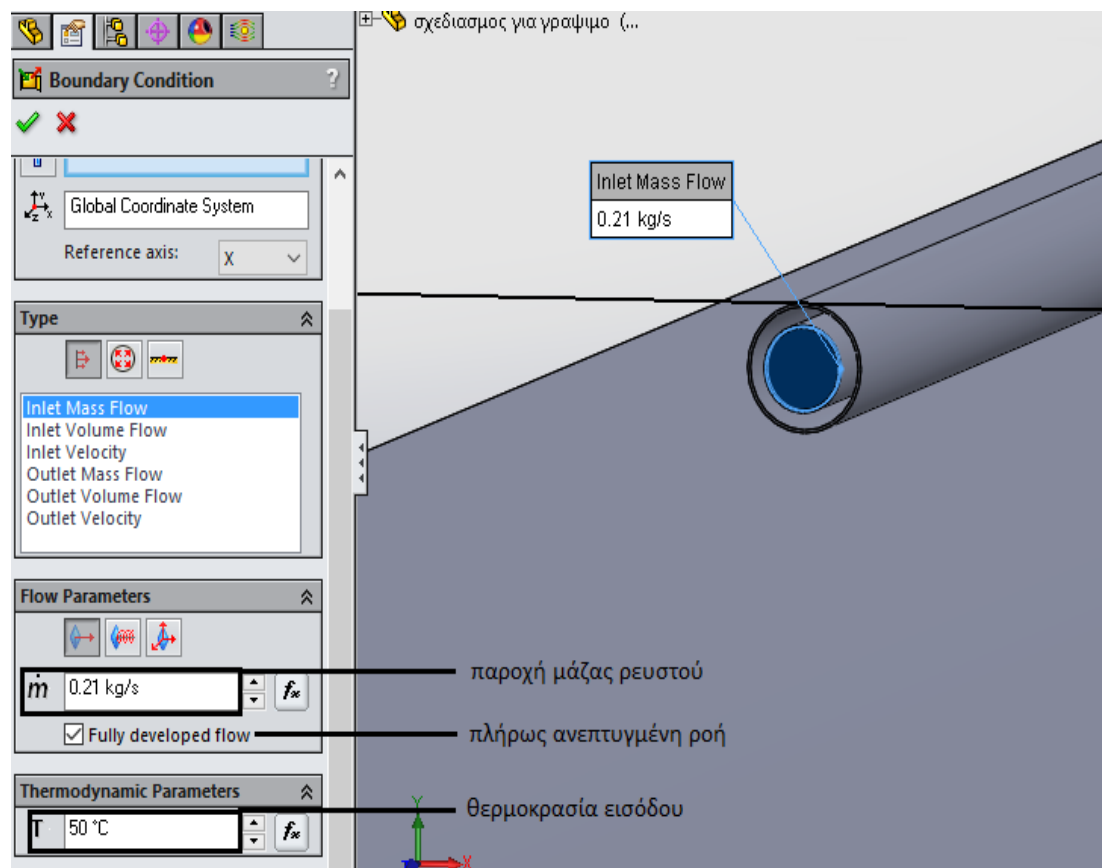
5.6 Εισαγωγή οριακών συνθηκών

Στο σημείο αυτό ορίζονται οι οριακές συνθήκες του προβλήματος (Σχήμα 5.20). Σε πρώτη φάση επιλέγεται από το δένδρο ενεργειών με δεξί κλικ το **Boundary Conditions** και στη συνέχεια επιλέγεται το **Insert Boundary Condition**.



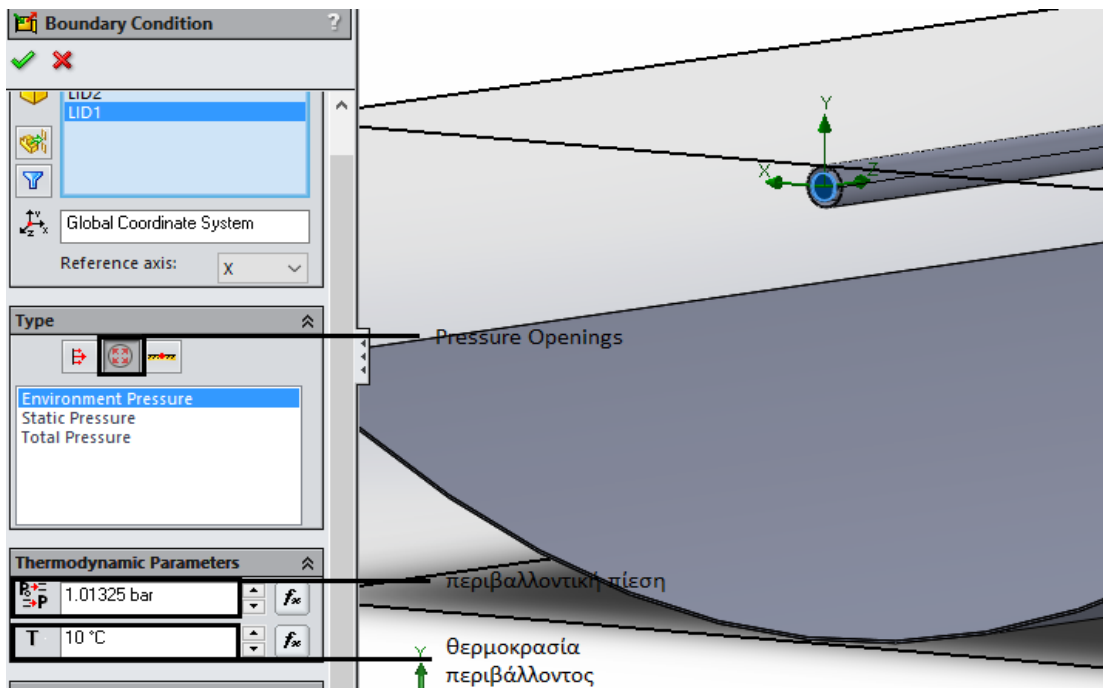
Σχήμα 5.20 Εισαγωγή οριακών συνθηκών

Ξεκινώντας τον ορισμό, ορίζονται η εισερχόμενη παροχή μάζας του λαδιού (\dot{m}) και η θερμοκρασία εισόδου του (T_{in}) (Σχήμα 5.21). Η παροχή μάζας δίνεται **0.021 kg/sec** σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Η θερμοκρασία εισόδου θα μεταβάλλεται κατά την πορεία του πειράματος, μιας και αυτή παίζει σημαντικό ρόλο. Τονίζεται πως οι δύο παραπάνω οριακές συνθήκες ορίστηκαν στο ένα άκρο του σωλήνα ρευστού, επιλέγοντας το εσωτερικό της τάπας LID2.



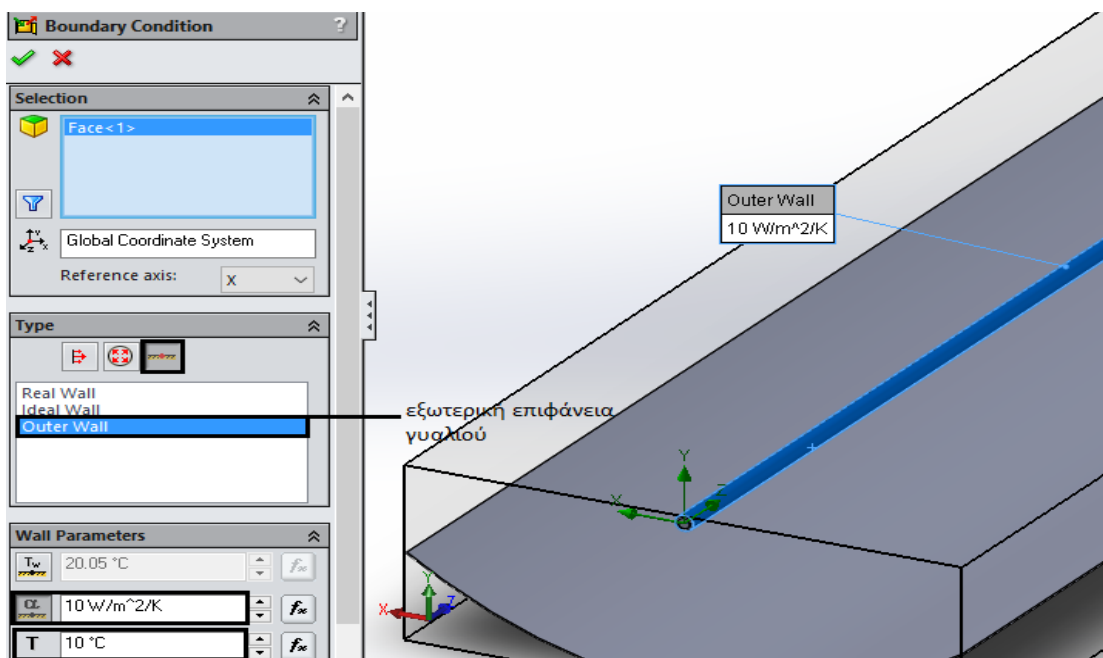
Σχήμα 5.21 Εισαγωγή παροχής μάζας και θερμοκρασίας εισόδου ρευστού

Συνεχίζοντας τον ορισμό των οριακών συνθηκών το Solidworks απαιτεί τον ορισμό της πίεσης στην έξοδο του σωλήνα. Θεωρείται, έτσι, πως αυτή είναι η ολική πίεση και λαμβάνεται ίση με την ατμοσφαιρική **1.01325 bar**. Επίσης, ορίζεται και μία θερμοκρασία αντιπροσωπευτική του περιβάλλοντος **10°C** στο οποίο καταλήγει το ρευστό ύστερα από την έξοδό του από τον σωλήνα, η οποία, ωστόσο, δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του πειράματος. Οι δύο οριακές συνθήκες ορίζονται στο εσωτερικό της τάπας LID1, στο άλλο άκρο του σωλήνα (και όχι στο ίδιο με νωρίτερα) (Σχήμα 5.22). Εδώ, επιλέγεται το εικονίδιο **Pressure Openings**.



Σχήμα 5.22 Ορισμός πίεσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην έξοδο του σωλήνα

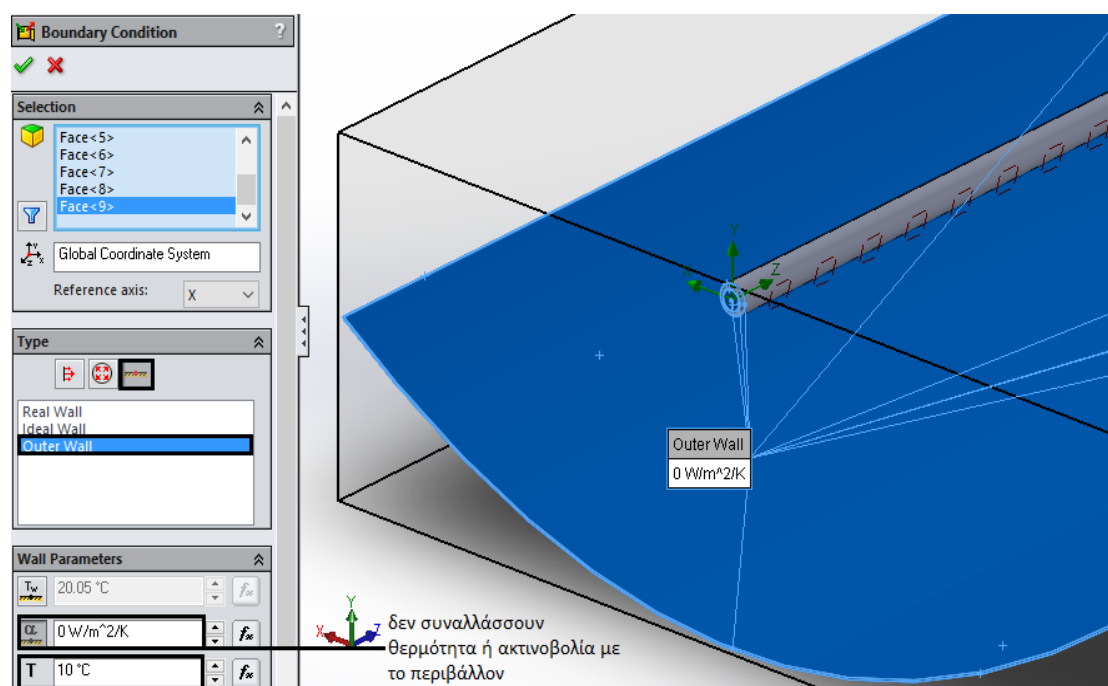
Αφού ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες για τον σωλήνα ρευστού, πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες για τον σωλήνα κενού. Ο σωλήνας κενού συναλλάσσει ακτινοβολία με το περιβάλλον. Συνεπώς, ορίζεται η συναλλαγή αυτή ως οριακή συνθήκη (Σχήμα 5.23). Η τιμή του συντελεστή συναγωγής με το περιβάλλον ορίζεται $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ενώ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ορίζεται 10°C .



Σχήμα 5.23 Ορισμός οριακών συνθηκών σωλήνα κενού

Έπειτα θα οριστεί οριακή συνθήκη η οποία θα περιέχει όλο τον ανακλαστήρα καθώς και τα παράπλευρα κομμάτια του σωλήνα και θα επιλέγει να μην συναλλάσσει

θερμότητα με το περιβάλλον. Τα κομμάτια αυτά θα είναι μονωμένα έτσι ώστε να μην υπάρξουν απώλειες. Αυτό επιτυγχάνεται βάζοντας το συντελεστή συναγωγής με το περιβάλλον ίσο με $0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

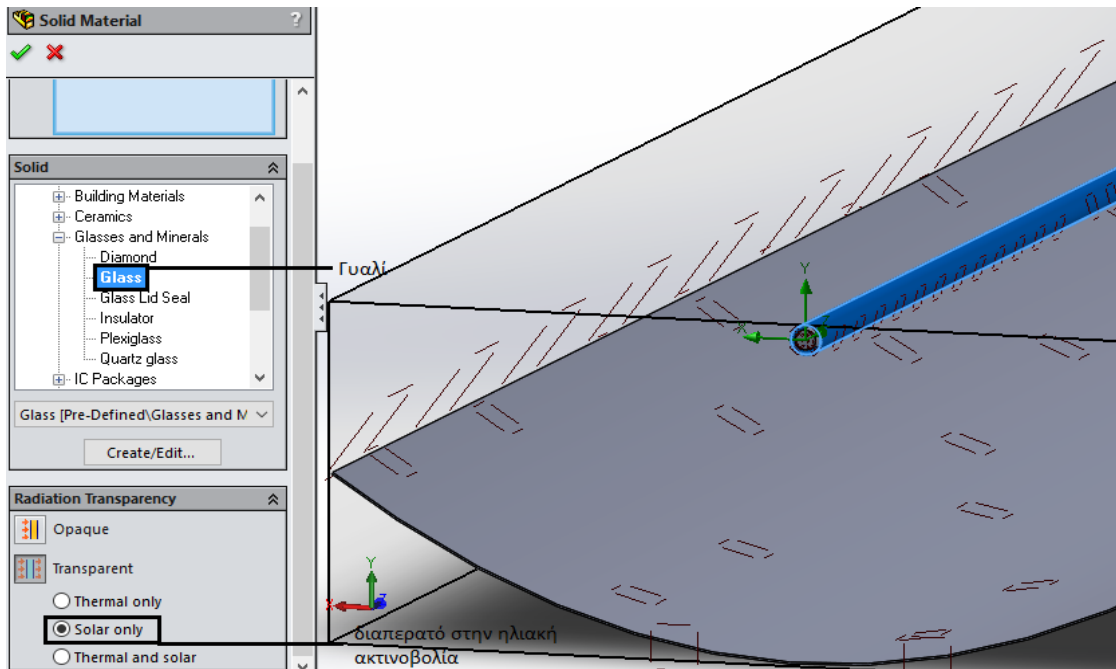


Σχήμα 5.24 Ορισμός οριακών συνθηκών στις υπόλοιπες επιφάνειες του συλλέκτη

Σε αυτό το σημείο τονίζεται πως για τον ορισμό των οριακών συνθηκών στο σωλήνα κενού καθώς και στις υπόλοιπες επιφάνειες επιλέχθηκε η εντολή **outer wall** όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.23, 5.24.

5.7 Ορισμός των υλικών

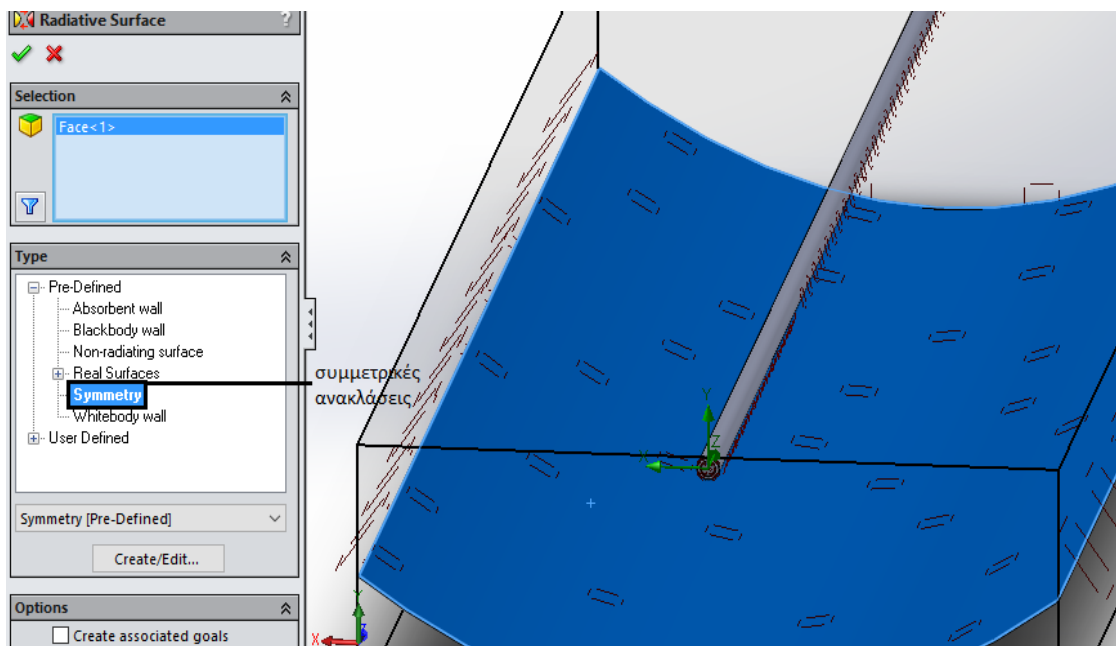
Σε προηγούμενη ενότητα στο **Default Solid** ορίστηκε το υλικό του σωλήνα ρευστού, ο χαλκός. Απομένει να ορισθεί το υλικό του σωλήνα κενού, το οποίο θα είναι γυαλί. Ακολουθείται, λοιπόν, η παρακάτω διαδικασία: Από το μενού **Input Data** επιλέγεται με δεξί κλικ το **Solid Materials** και στη συνέχεια το **Insert Solid Material**. Σε αυτό το σημείο επιλέγεται ο σωλήνας κενού. Το γυαλί ως υλικό θα βρεθεί στο **Pre-Defined**, μία λίστα που περιέχει προκαθορισμένα υλικά περασμένα στη βάση δεδομένων του Solidworks. Επίσης, προκειμένου να καθορισθεί το γυαλί ως διαπερατό υλικό επιλέγεται το **Transparent** και ακόμα πιο συγκεκριμένα επιλέγεται να είναι διαπερατό στον ήλιο με την επιλογή **solar only**. Σημειώνεται εδώ πως εάν επιλεγόταν να είναι διαπερατό το γυαλί και στη θερμότητα θα σήμαινε πως δεν συναλλάσσει ακτινοβολία με το περιβάλλον κάτι το οποίο είναι λάθος.



Σχήμα 5.25 Καθορισμός υλικού σωλήνα κενού

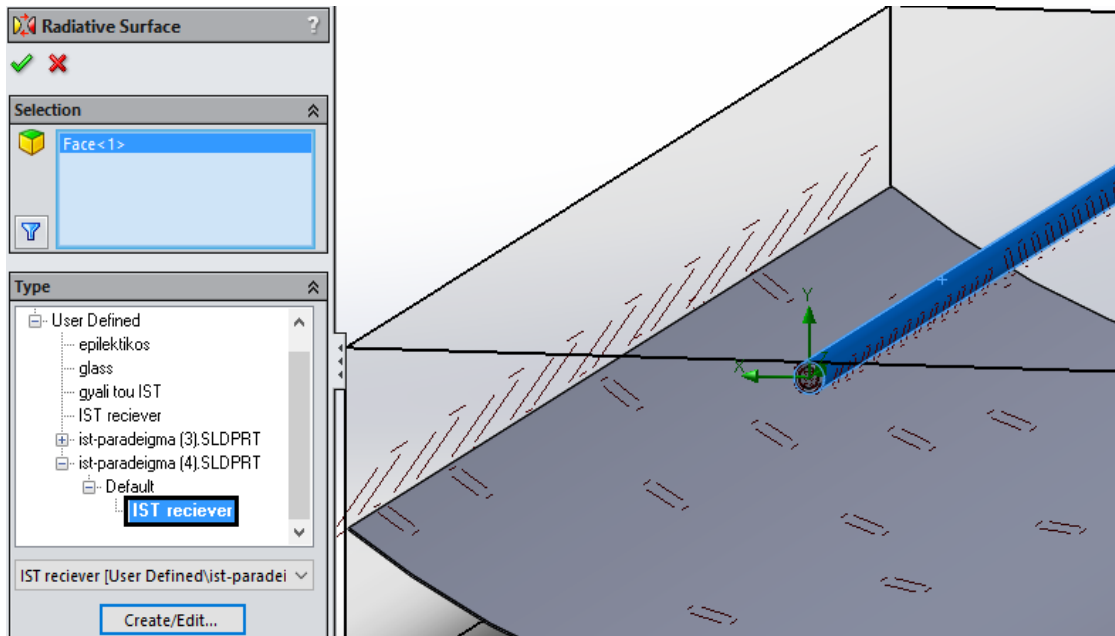
5.8 Ορισμός ακτινοβολούμενων επιφανειών

Σε αυτή την παράγραφο θα ορισθούν οι επιφάνειες οι οποίες ακτινοβολούν. Ξεκινώντας, από το μενού **Input Data**, γίνεται δεξί κλικ στο **Radiative Surfaces** και επιλέγεται το **Insert Radiative Surface**. Τώρα επιλέγεται η επιφάνεια του ανακλαστήρα και με την εντολή **Symmetry** δηλώνεται πως γίνονται συμμετρικές ανακλάσεις (Σχήμα 5.26).



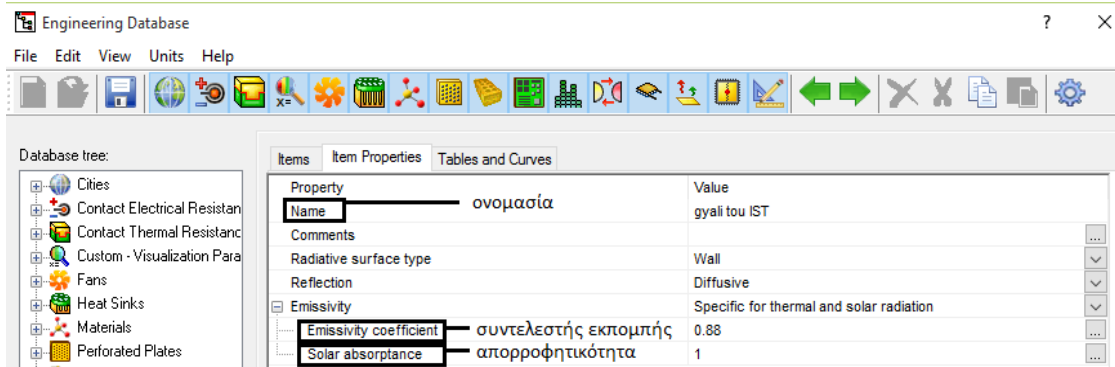
Σχήμα 5.26 Ο ανακλαστήρας ακτινοβολεί συμμετρικά

Στο σημείο αυτό είναι πολύ σημαντικό να ορισθεί η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας για τον απορροφητή και το γυαλί. Κι εδώ, στο μενού **Input Data/ Radiative Surfaces** γίνεται δεξί κλικ και επιλέγεται **Insert Radiative Surface** ενώ ταυτόχρονα επιλέγεται η επιφάνεια του σωλήνα κενού. Από το **User Defined** επιλέγεται το **IST receiver** το οποίο περιέχει δεδομένα τα οποία έχουν εισαχθεί στο Solidworks κι έχουν επεξηγηθεί πλήρως σε προηγούμενη ενότητα.



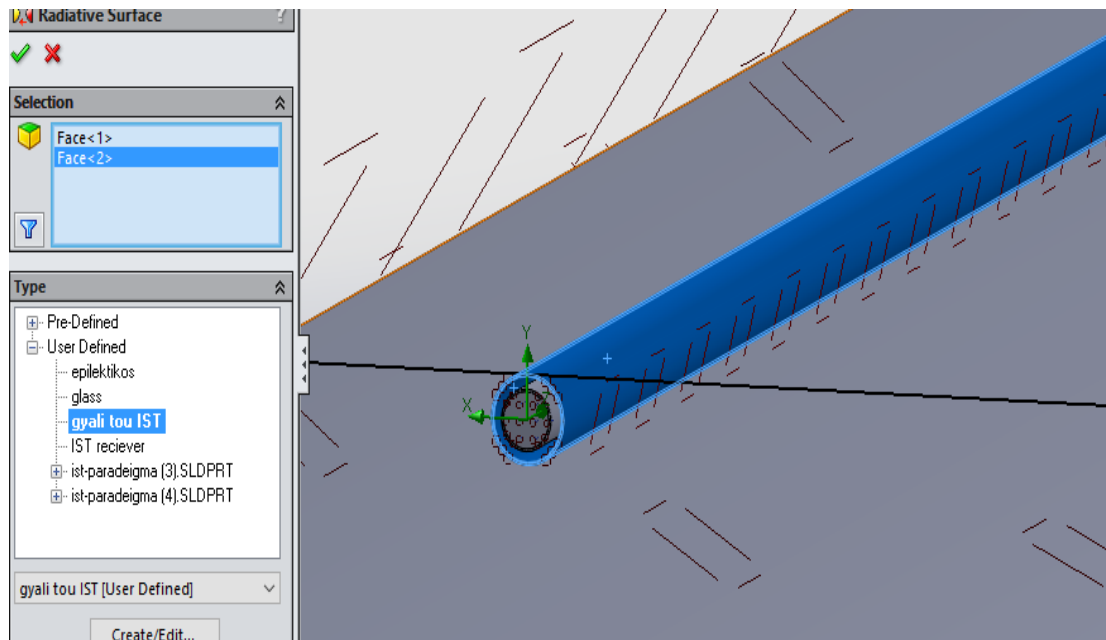
Σχήμα 5.27 Ορισμός ακτινοβολούμενης επιφάνειας απορροφητή

Ακολούθως, ορίζεται το γυαλί. Στο μενού **Radiative Surfaces / Insert Radiative Surface** γίνεται επιλογή του **Create / Edit** και μετά με δεξί κλικ επιλέγεται το **New Item**. Πλέον, δίνονται οι ιδιότητες του γυαλιού όπως φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 5.28 Εισαγωγή νέων στοιχείων στο User Defined

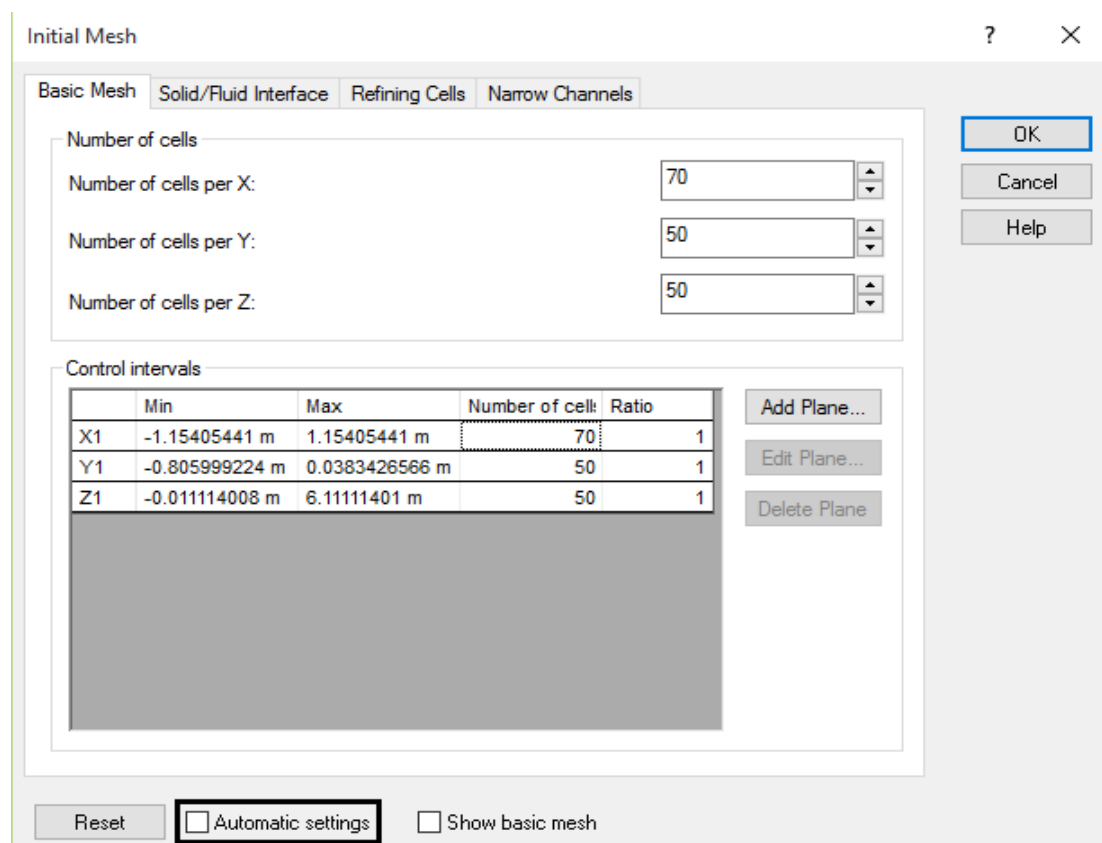
Αφού εισήχθησαν στο Solidworks τα δεδομένα για το γυαλί του απορροφητή, πρέπει τώρα να ενσωματωθούν στην επιφάνεια του απορροφητή (σωλήνα κενού). Αυτό γίνεται με δεξί κλικ στο **Radiative Surfaces/ Insert Radiative Surface** κι από το **User Defined** επιλέγεται το **gyali toy IST**.



Σχήμα 5.29 Ορισμός του γυαλιού

5.9 Ορισμός του πλέγματος

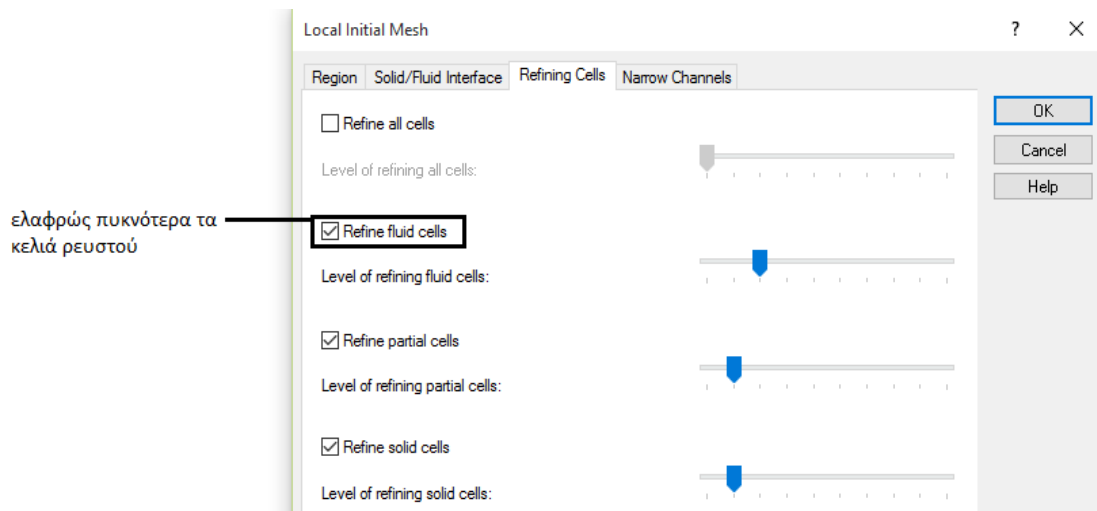
Στη συνέχεια γίνεται ορισμός και επεξεργασία του πλέγματος, με στόχο να υπάρξουν όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα. Επιλέγεται, αρχικά, η εντολή **Initial Mesh** και εμφανίζεται στην οθόνη το παρακάτω ταμπλό στο οποίο και απενεργοποιείται η εντολή **Automatic Settings**.



Σχήμα 5.30 Ορισμός του πλέγματος

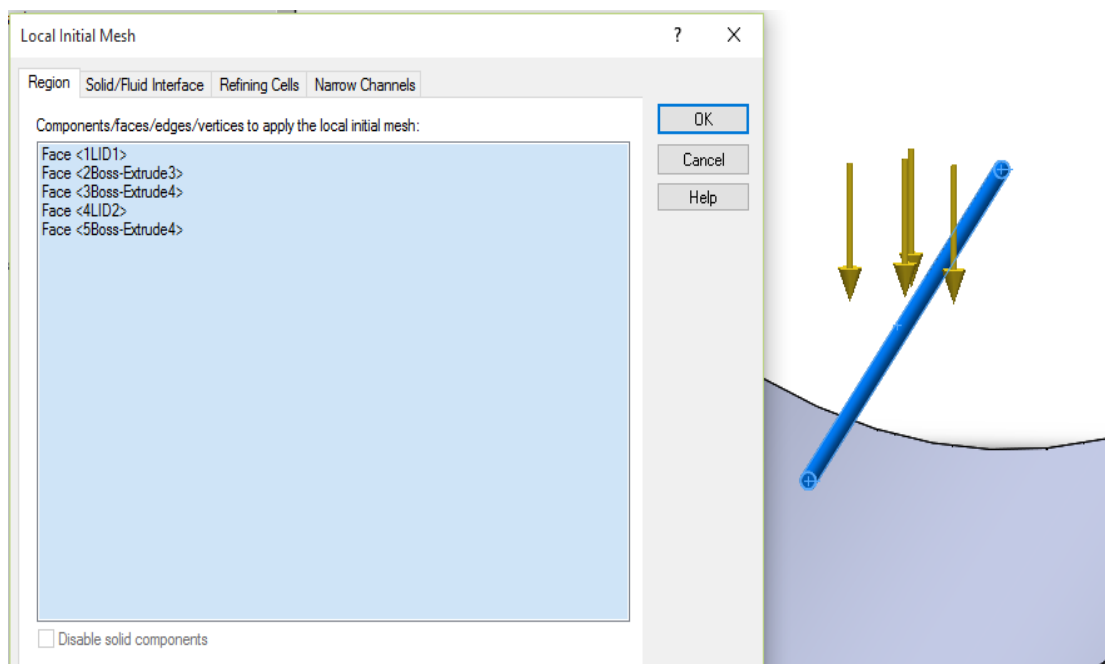
Το πλέγμα που εισάγεται από την εντολή **Initial Mesh** είναι ένα απλό πλέγμα προκειμένου να προσδιοριστεί ο όγκος ελέγχου. Επιλέχθηκε ένα τυπικό πλέγμα 70-50-50 κατά τους άξονες X-Y-Z αντίστοιχα. Ωστόσο, κατά τον άξονα X το πλέγμα επιλέχθηκε να είναι πιο πυκνό, με περισσότερα κελιά μιας και η μελέτη του φαινομένου γίνεται κατά μήκος του σωλήνα.

Επιπλέον, η χρήση της εντολής **Local Initial Mesh** (Σχήμα 5.31) εξασφαλίζει την επιπλέον εστίαση σε συγκεκριμένο τμήμα του συλλέκτη, ειδικότερα στο σωλήνα ρευστού. Εδώ, το πλέγμα επιλέχθηκε να είναι πυκνότερο, με την επιλογή των **Refinements**. Δόθηκε μεγαλύτερη πυκνωση στα κελιά ρευστού (**Refine fluid cells**).



Σχήμα 5.31 Εισαγωγή Local Initial Mesh

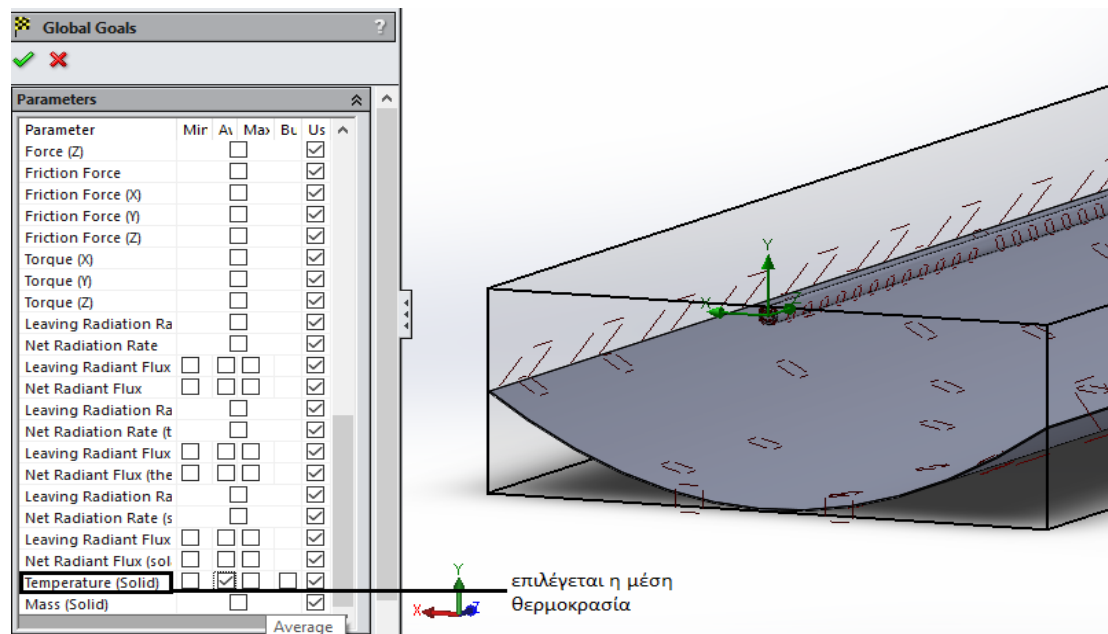
Ειδικότερα, η εισαγωγή του **Local Initial Mesh** γίνεται ως εξής. Αρχικά επιλέγονται τόσο οι επιφάνειες του σωλήνα ρευστού όσο και οι δύο τάπες LIDS στα δύο άκρα του κι έπειτα εισάγονται οι θεμιτές πυκνώσεις.



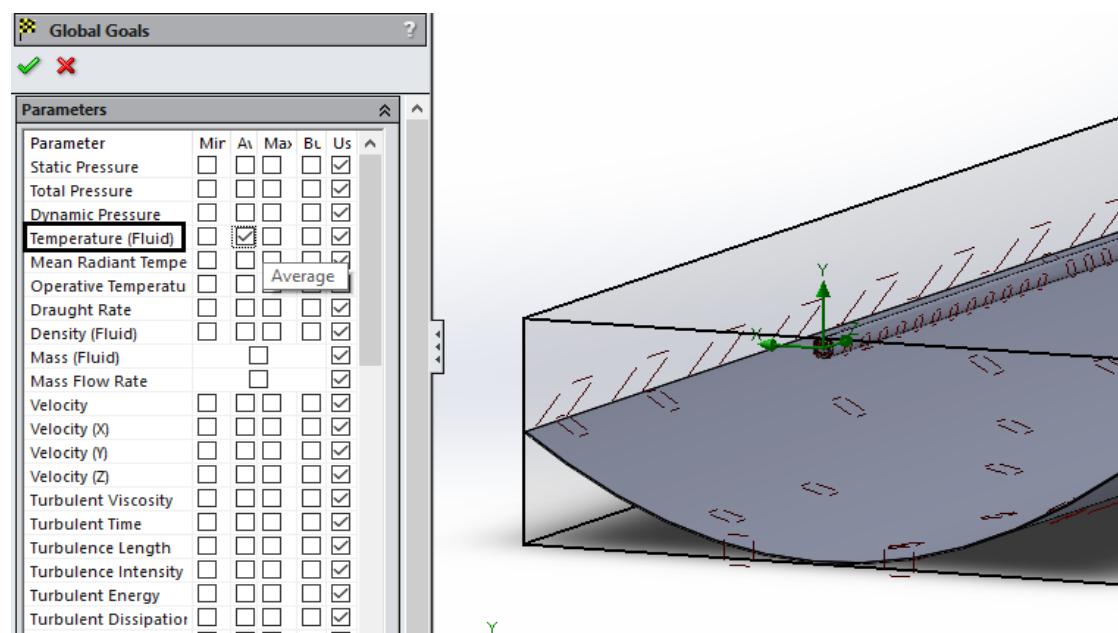
Σχήμα 5.32 Επιλογή επιφανειών για τον ορισμό του Local Initial Mesh

5.10 Ορισμός στόχων

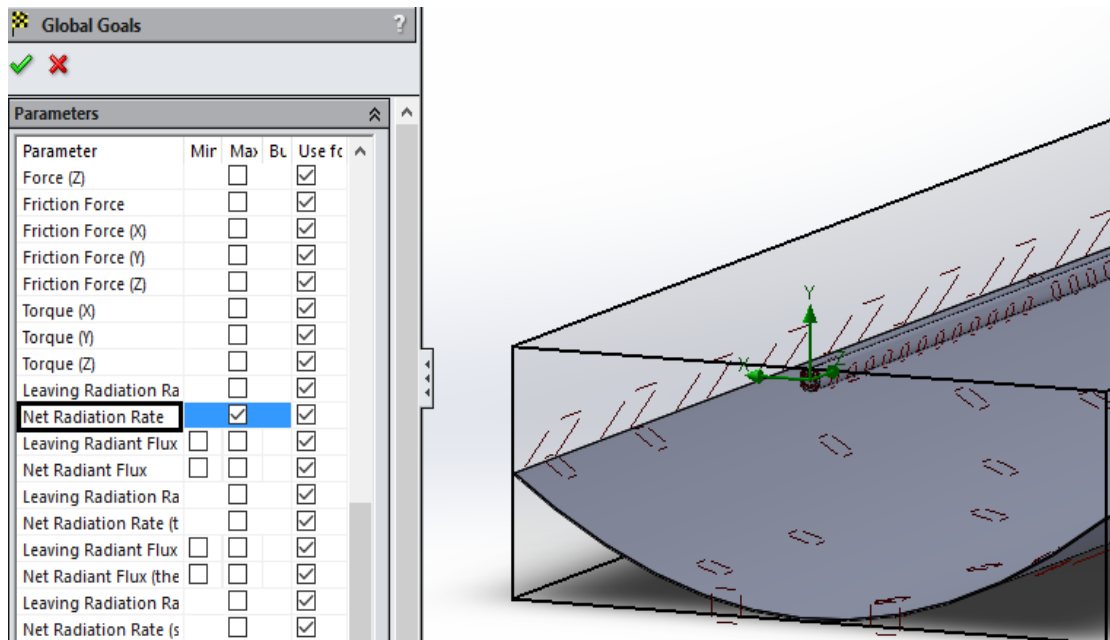
Στο σημείο αυτό επιλέγεται τι θα εμφανίζει το πρόγραμμα ως αποτέλεσμα μετά το πέρας μιας επίλυσης (ενός τρεξίματος). Ορίζονται, λοιπόν, οχτώ στόχοι (Q_{loss} , Q_{in} , Q_{in} , T_{out} , T_r , T_g , H_{out} , H_{in}) καθώς και τρεις θερμοκρασίες **Global Goals** οι οποίες βοηθούν στη σύγκλιση της επίλυσης). Στις παρακάτω εικόνες παρατίθεται ο τρόπος που ορίστηκαν οι στόχοι.



Σχήμα 5.33α Εισαγωγή Global Goal (Temperature Solid)

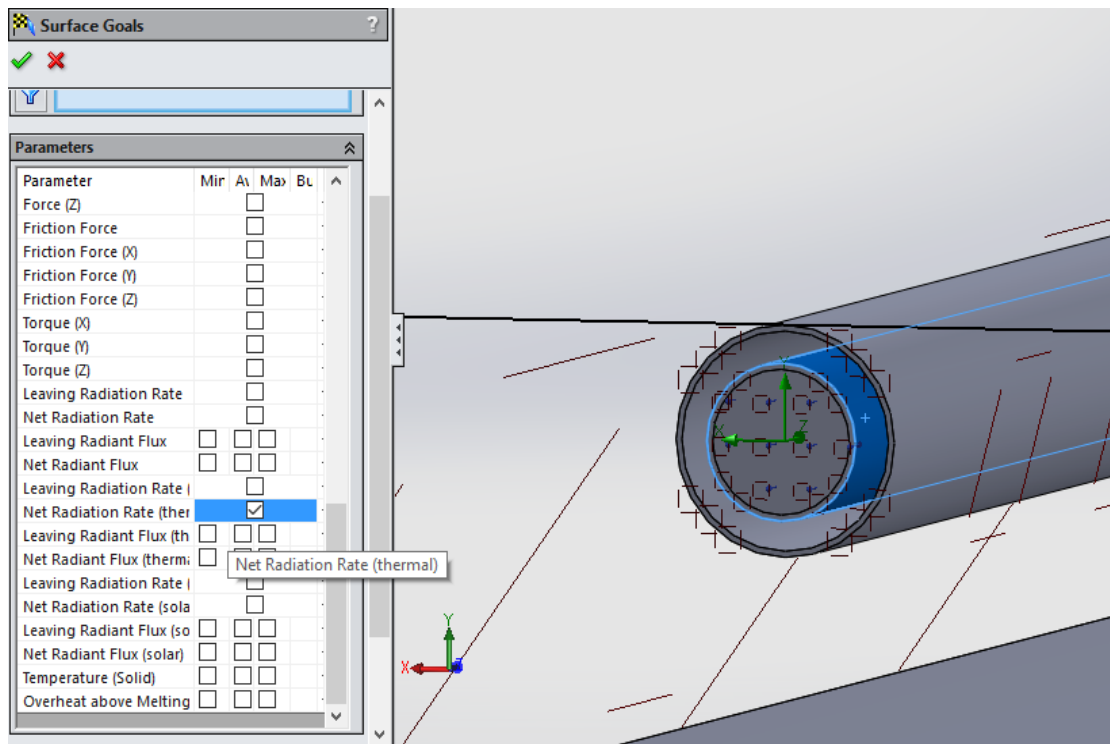


Σχήμα 5.33β Εισαγωγή Global Goal (Temperature Fluid)



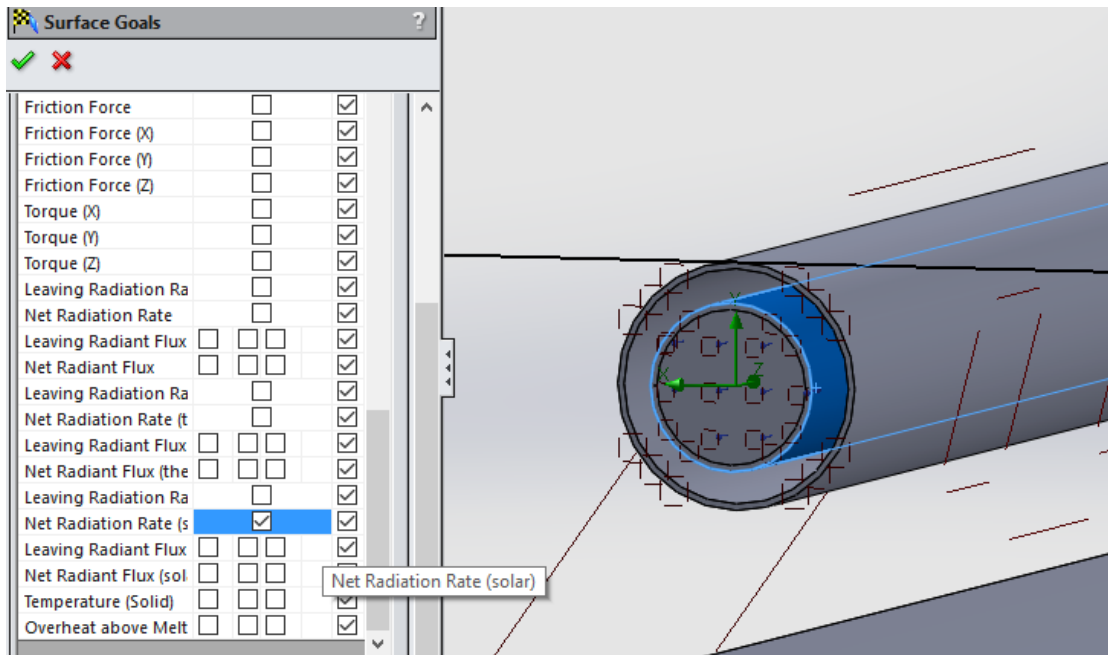
Σχήμα 5.33γ Εισαγωγή Global Goals (Net Ratio Rate)

Στην παρακάτω εικόνα ορίζεται ο στόχος Q_{loss} . Πρόκειται για στόχο που ορίζεται στην επιφάνεια του σωλήνα ρευστού και παρουσιάζει τις απώλειες ακτινοβολίας απορροφητή.



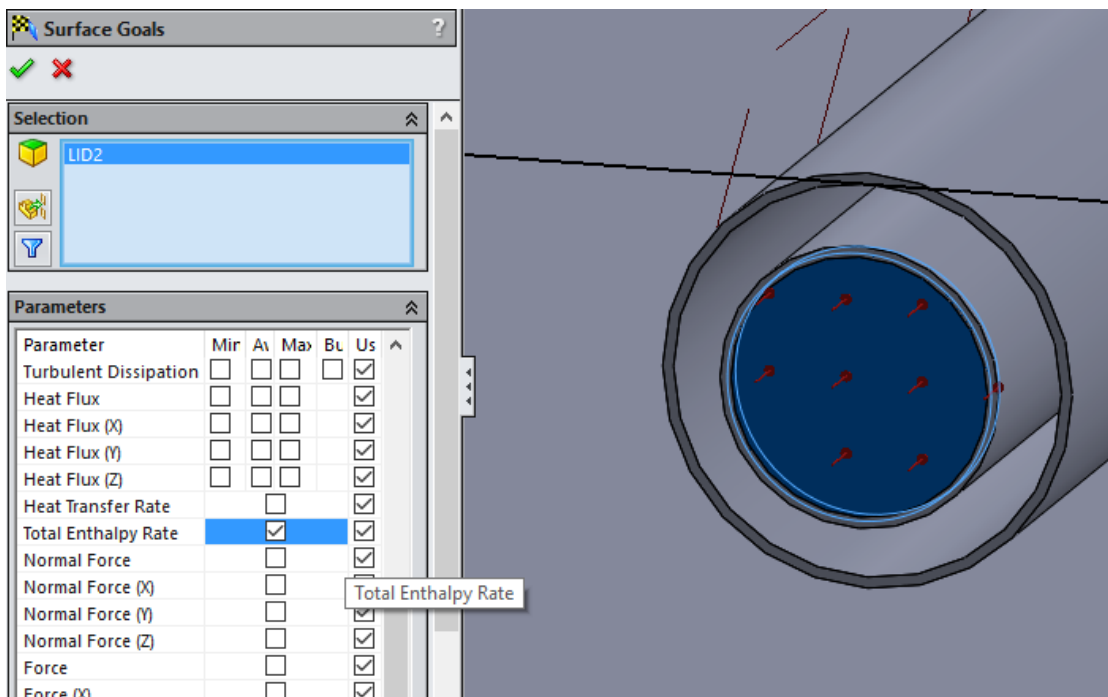
Σχήμα 5.34α Εισαγωγή Surface Goal (Q_{loss})

Έπειτα, ορίζεται ως επιφανειακός στόχος στον απορροφητή το Q_{in} που είναι το ποσό της ηλιακής ενέργειας που δεσμεύει ο απορροφητής.

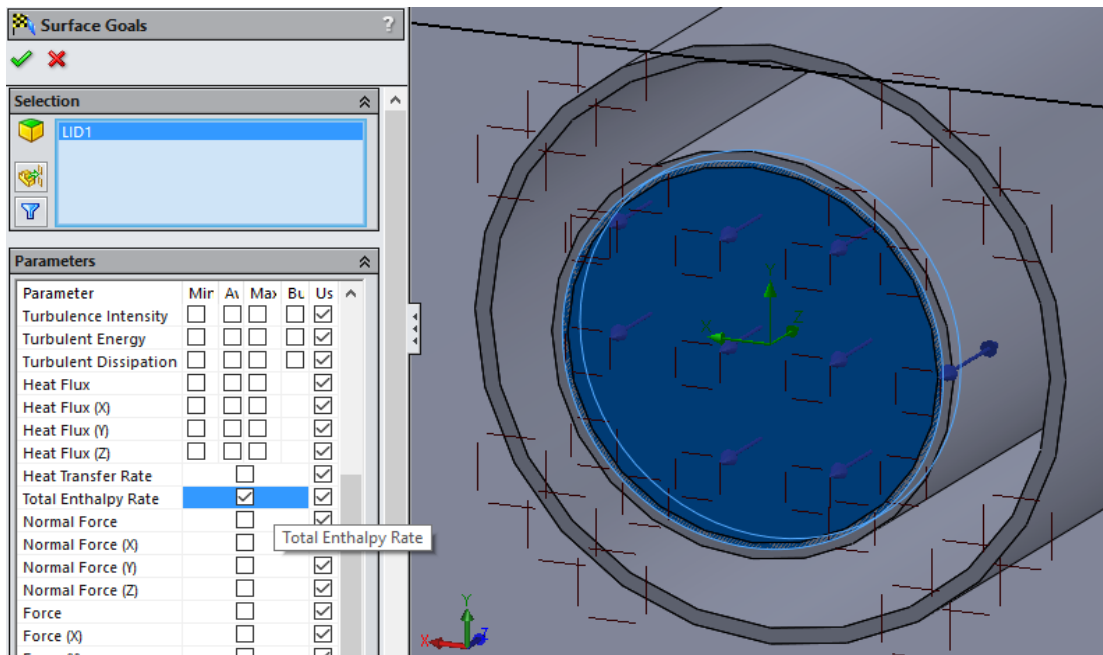


Σχήμα 5.34β Εισαγωγή Surface Goal (Q_{in})

Ακολουθως, ως στόχοι ορίζονται, επίσης, οι ολικές ενθαλπίες τόσο στην μία άκρη του σωλήνα εκεί όπου εισάγεται το ρευστό (H_{in}) όσο και στην άλλη άκρη του σωλήνα όπου είναι η έξοδος του ρευστού (H_{out}).

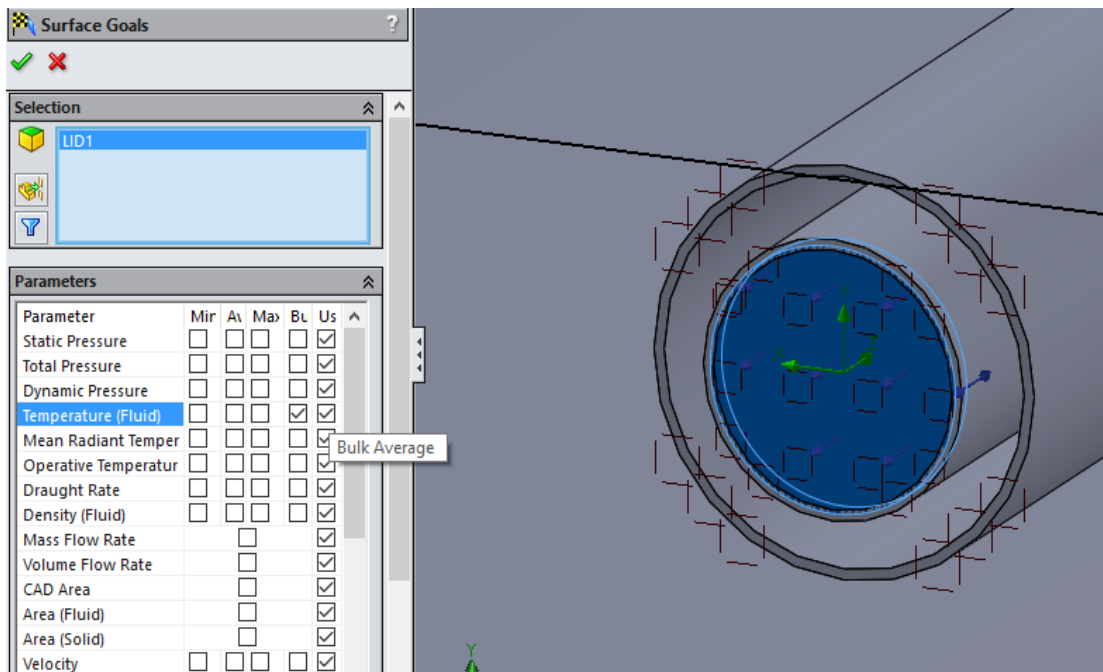


Σχήμα 5.34γ Εισαγωγή Surface Goal (H_{in})

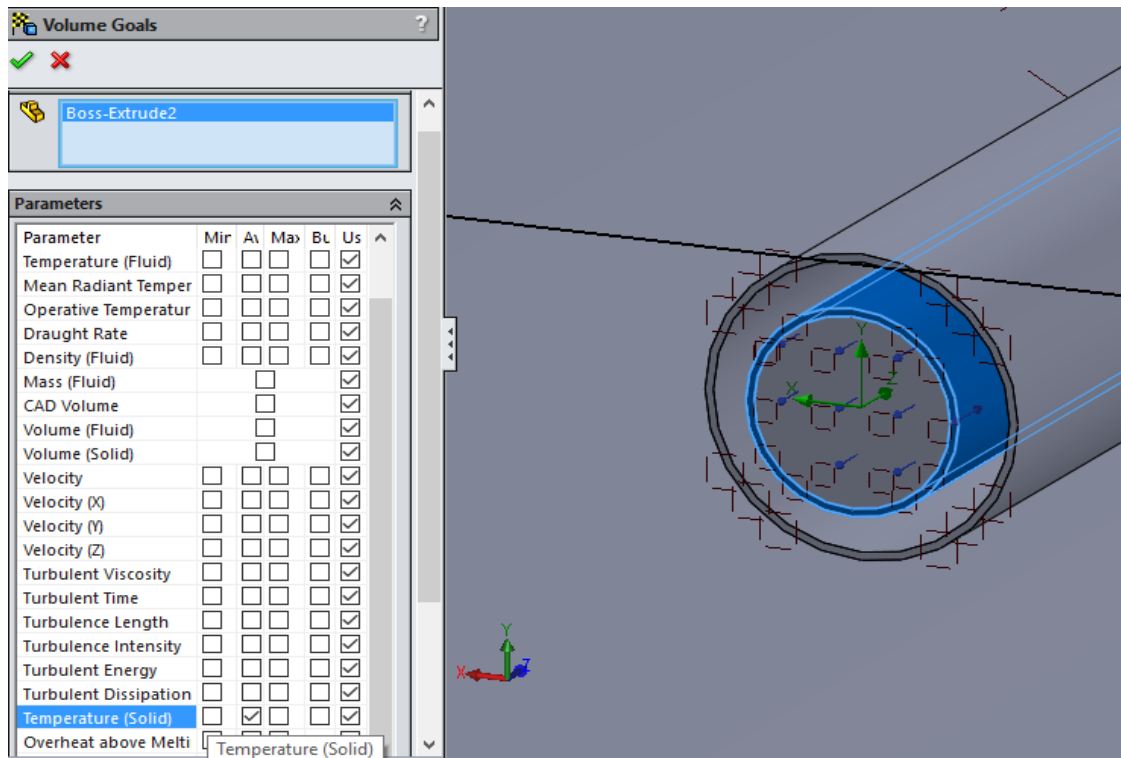


Σχήμα 5.34δ Εισαγωγή Surface Goal (H_{out})

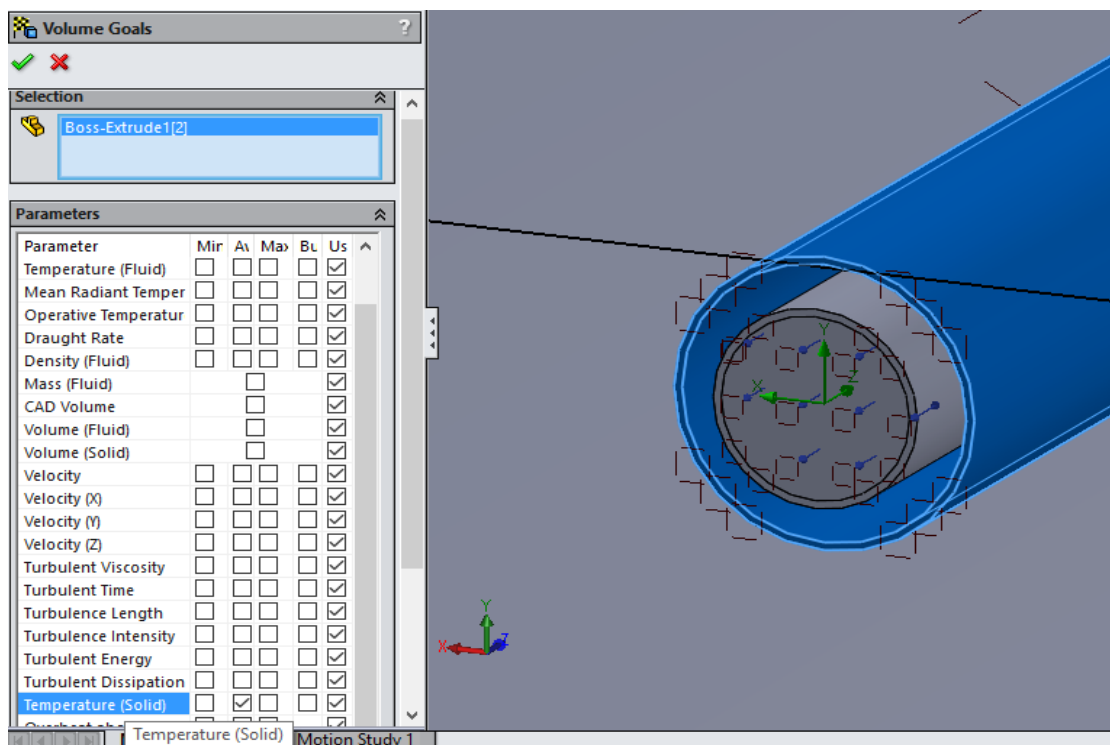
Τέλος, ως στόχοι θα ορισθούν κάποιες ενδεικτικές για το σύστημα θερμοκρασίες. Αυτές είναι η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το σωλήνα (T_{out}), η θερμοκρασία του σωλήνα ρευστού-receiver (T_r) και η θερμοκρασία του σωλήνα γυαλιού-glass (T_g).



Σχήμα 5.34ε Εισαγωγή Surface Goal (T_{out})

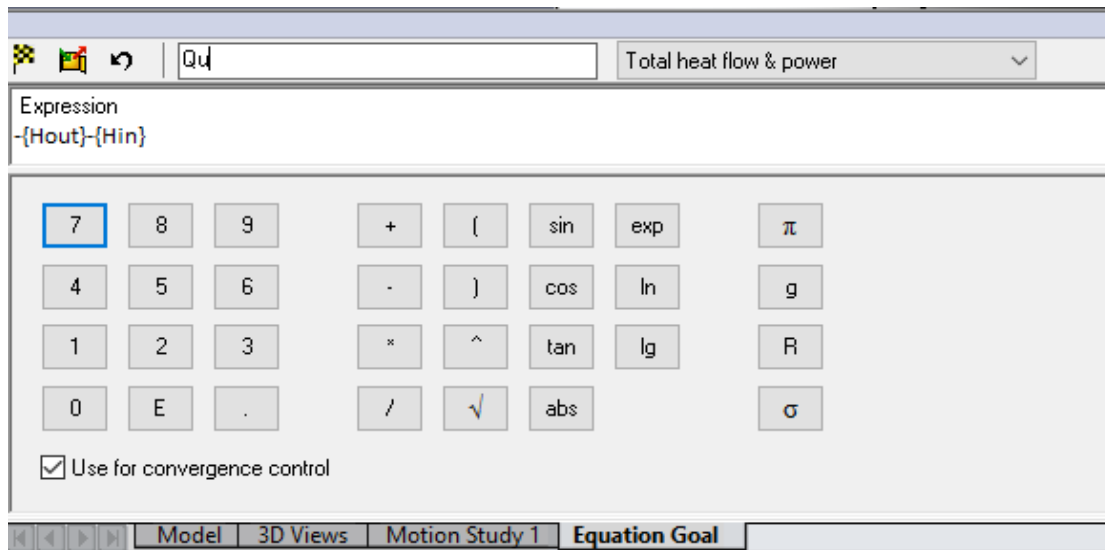


Σχήμα 5.35α Εισαγωγή Volume Goal (T_r)



Σχήμα 5.35β Εισαγωγή Volume Goal (T_g)

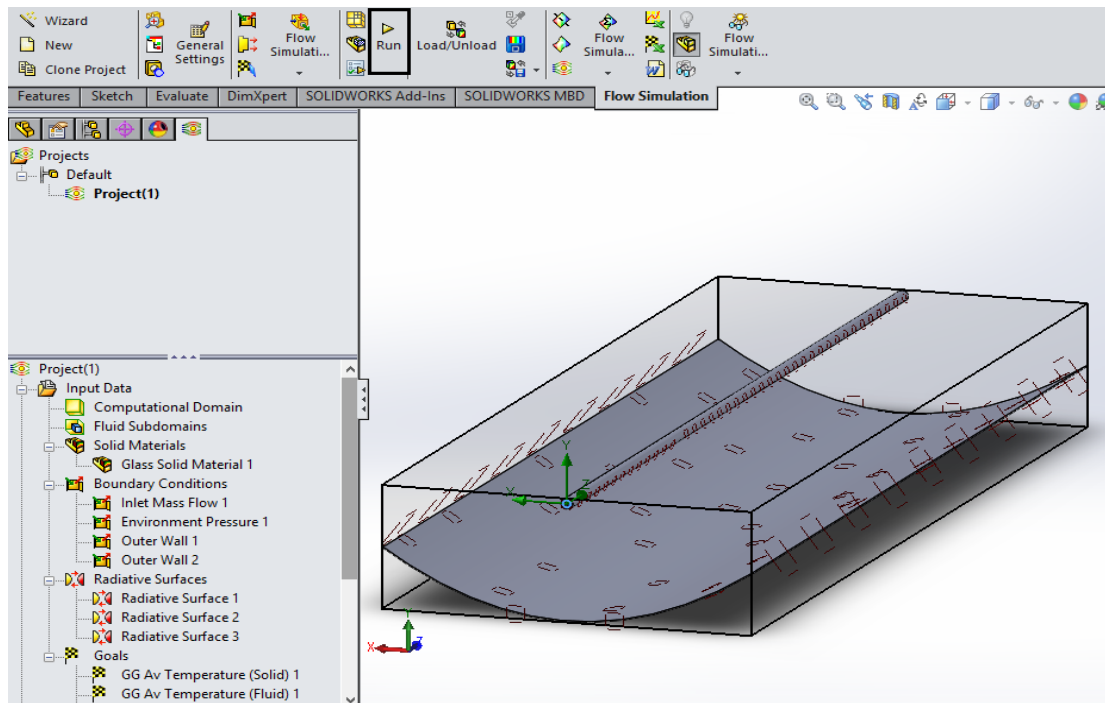
Τέλος, ορίζεται ως στόχος προς υπολογισμό η ωφέλιμη θερμότητα Q_u . Ο στόχος αυτός ορίζεται ως εξίσωση (Equational Goal), δηλαδή ίσος με τη διαφορά των ολικών ενθαλπιών εξόδου και εισόδου.



Σχήμα 5.36 Εισαγωγή Equational Goal (Q_u)

5.11 Έναρξη επίλυσης

Το πρόγραμμα είναι πλέον έτοιμο να τρέξει, επιλέγοντας απλά την εντολή **Run** όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 5.37).



Σχήμα 5.37 Έναρξη επίλυσης με την εντολή Run

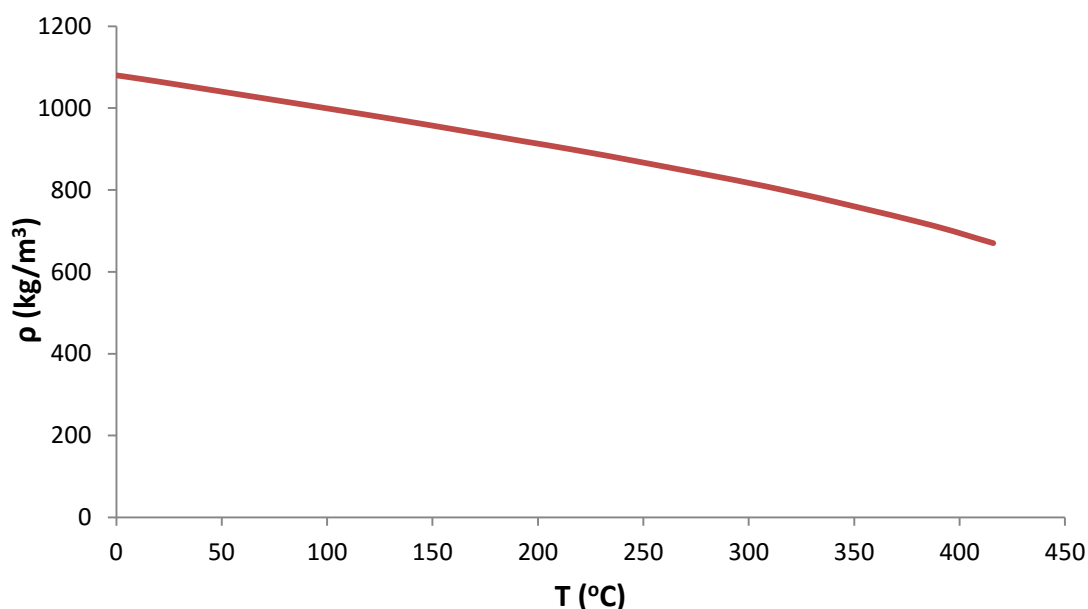
Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα της προσομοίωσης

Ο συλλέκτης έχει σχεδιασθεί πλήρως καθώς επίσης έχουν γίνει και όλοι οι απαραίτητοι για την επίλυση ορισμοί. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παράθεση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης τόσο με διαγράμματα όσο και με πίνακες.

Αρχικά, ο συλλέκτης λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο (ρευστό) το λάδι (**Thermal Oil**), όπως παρουσιάστηκε νωρίτερα. Το λάδι έχει ιδιότητες που οι τιμές τους δόθηκαν στη βάση δεδομένων του Solidworks. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις ιδιότητες του λαδιού.

6.1. Διαγράμματα ιδιοτήτων λαδιού Thermal Oil

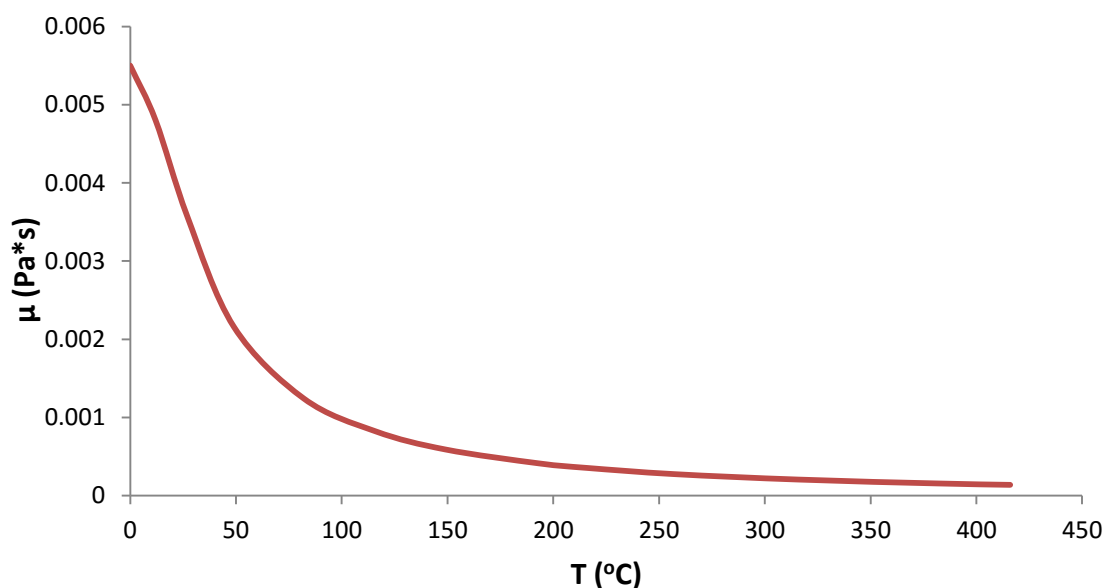
6.1.1 Πυκνότητα (ρ)



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα πυκνότητας Thermal Oil

Επειδή το λάδι έχει μεγάλη πυκνότητα, η ροή στο σωλήνα είναι στρωτή. Παρατηρείται πως η πυκνότητα του λαδιού για ίδιες θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Τα διαγράμματα πυκνότητας νερού-λαδιού έχουν την ίδια μορφή, ωστόσο η πυκνότητα του λαδιού με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από τον αντίστοιχο ρυθμό μείωσης της πυκνότητας στο νερό.

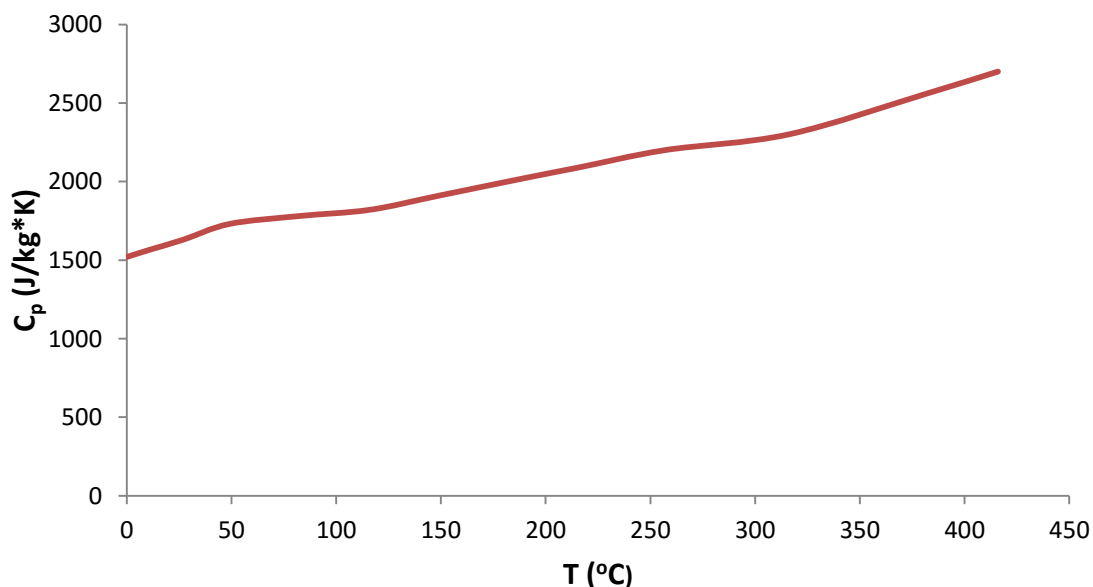
6.1.2 Ιξώδες (μ)



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ιξώδους Thermal Oil

Εδώ, το ιξώδες του λαδιού μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του. Εν συγκρίσει με το νερό, το λάδι έχει αρκετά μεγαλύτερες τιμές ιξώδους για ίδιες θερμοκρασίες. Πρόκειται για πιο συνεκτικό ρευστό (πιο παχύρευστο) από το νερό.

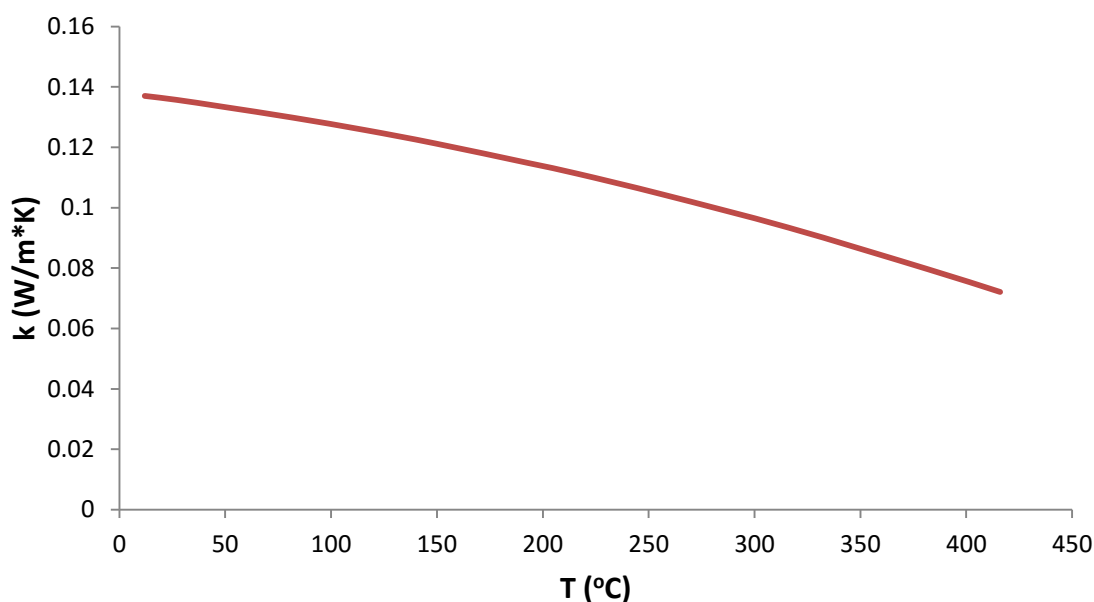
6.1.3 Θερμοχωρητικότητα (C_p)



Σχήμα 6.3 Διάγραμμα θερμοχωρητικότητας Thermal Oil

Όσον αφορά τη θερμοχωρητικότητα, το λάδι έχει μικρότερη εν συγκρίσει με το νερό για ίδιες θερμοκρασίες, γεγονός που προκαλεί μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας στο σωλήνα ρευστού του συλλέκτη σε σχέση με αυτή του νερού.

6.1.4 Θερμική αγωγιμότητα (k)



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας Thermal Oil

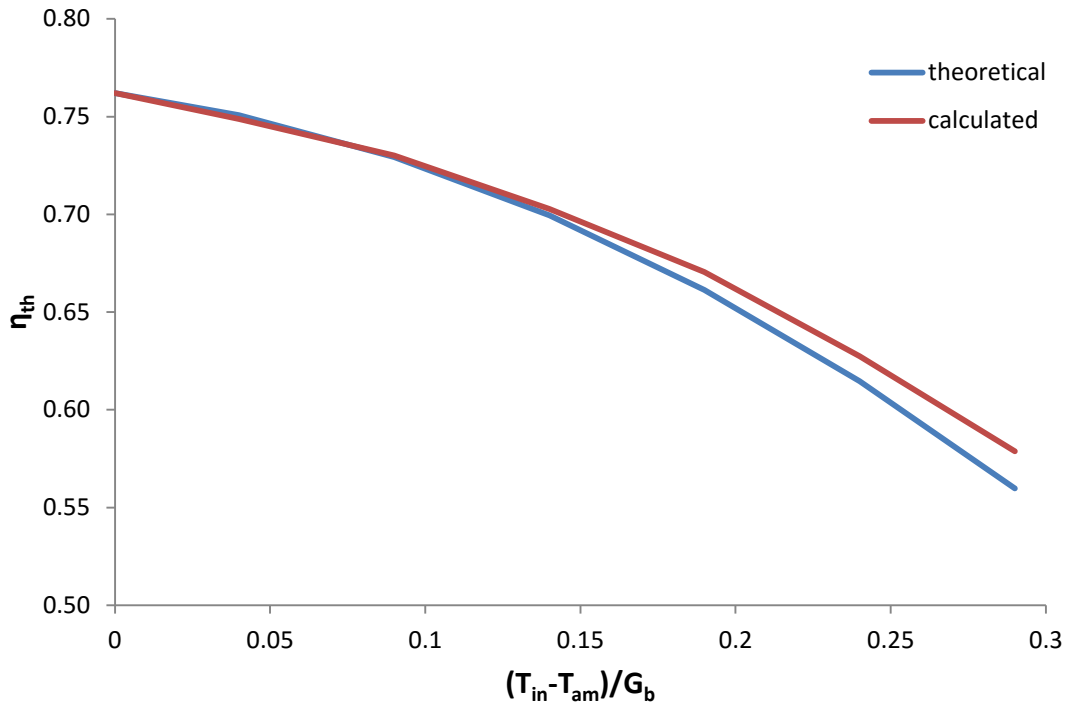
Η θερμική αγωγιμότητα του λαδιού είναι μικρότερη από αυτή του νερού για ίδιες θερμοκρασίες. Λόγω της μικρής θερμικής του αγωγιμότητας, λοιπόν, δεν αυξάνεται η θερμοκρασία του ρευστού στο εσωτερικό του σωλήνα.

6.2 Διαγράμματα αποτελεσμάτων με εργαζόμενο μέσο το λάδι (Thermal oil)

Αρχικά, στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ως εργαζόμενο μέσο (ρευστό) το λάδι (Thermal oil) του οποίου οι ιδιότητες φαίνονται παραπάνω. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

6.2.1 Βαθμός απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη με εργαζόμενο μέσο το Thermal Oil

Σε αυτό το σημείο, το σχεδιασμένο μοντέλο προσομοιώνεται με σκοπό να υπολογισθεί ο βαθμός απόδοσής του. Ο υπολογισμένος (calculated) βαθμός απόδοσης, έπειτα, συγκρίνεται με τον θεωρητικό (theoretical) βαθμό απόδοσης. Ειδικότερα, η προσομοίωση αυτή γίνεται σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (10~350°C) έτσι ώστε να προκύψει όσο το δυνατό ακριβέστερη καμπύλη του βαθμού απόδοσης. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης δίνεται στο Σχήμα 6.5 και είναι προφανές πως οι δύο καμπύλες βρίσκονται πολύ κοντά η μία στην άλλη. Ο θεωρητικός (theoretical) βαθμός απόδοσης είναι λίγο μικρότερος για υψηλότερες θερμοκρασίες ρευστού διότι η συσχέτιση της εξίσωσης (3.7) εφαρμόζεται κυρίως για θερμοκρασίες άνω των 300 °C.

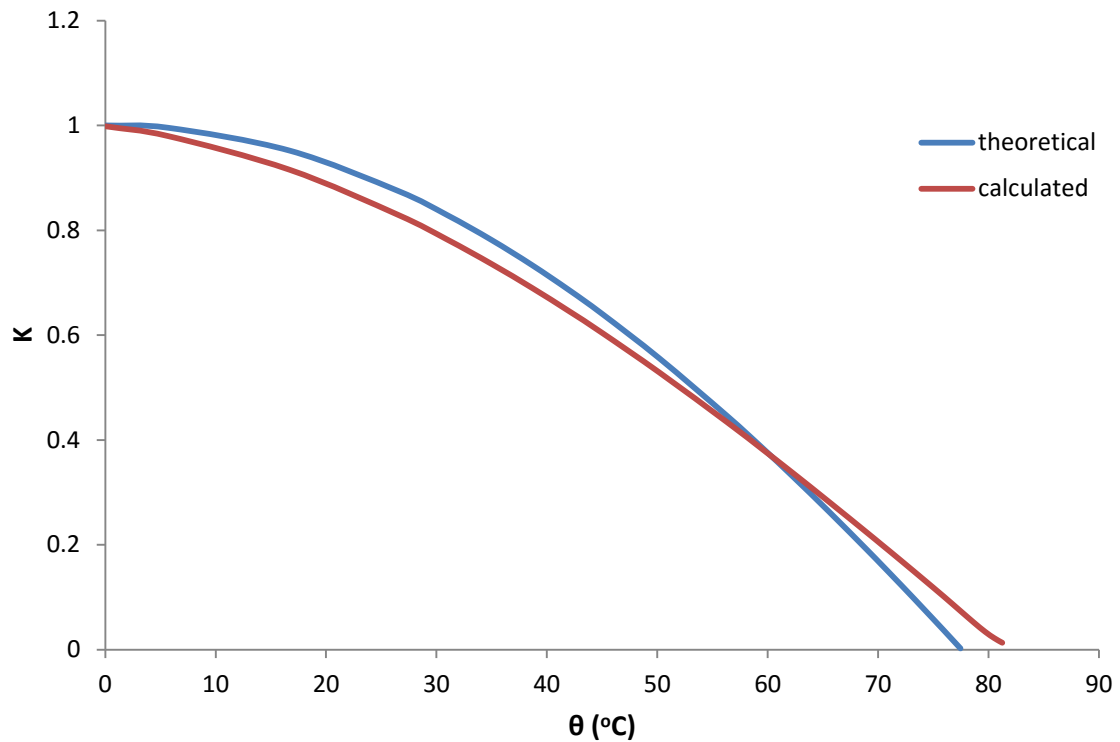


Σχήμα 6.5 Σύγκριση καμπυλών υπολογισμένου βαθμού απόδοσης και θεωρητικού βαθμού απόδοσης

Είναι, επίσης, φανερό ότι ο υπολογισμένος (calculated) βαθμός απόδοσης του συστήματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στο σωλήνα, δεδομένου ότι η τελευταία προκαλεί έμμεσα αύξηση των θερμικών απωλειών και κατά συνέπεια μείωση της ωφέλιμης ισχύος.

Η επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε κατά την προσομοίωση είναι ο συντελεστής τροποποίησης του βαθμού απόδοσης (Optical efficiency modifier) για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Η γωνία πρόσπτωσης μελετάται κατά μήκος του σωλήνα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες χρησιμοποιείται ένα σύστημα εντοπισμού έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι εγκάρσιες γωνίες. Με αυτό τον τρόπο όλες οι ακτίνες θα προσπίπτουν σωστά επάνω στον απορροφητή. Στο Σχήμα 6.6 φαίνεται πως ο υπολογισμένος (calculated) συντελεστής τροποποίησης του βαθμού απόδοσης K βρίσκεται κοντά με τον θεωρητικό (theoretical) της εξίσωσης (3.6) [24]. Το αποτέλεσμα αυτό ενισχύει την αξιοπιστία του αναπτυσσόμενου μοντέλου.

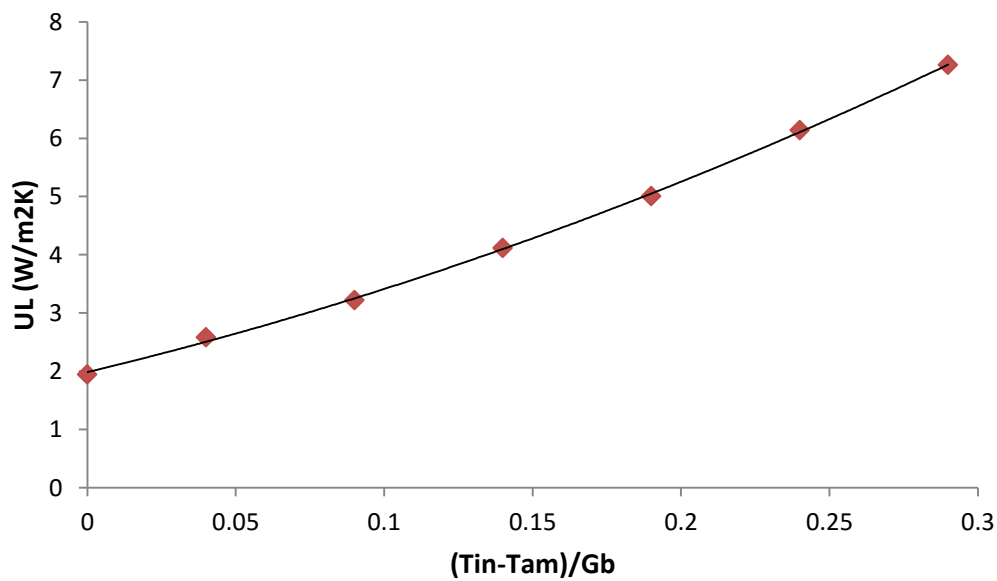
$$K(\theta) = \cos(\theta) + 0.0003178 \cdot \theta - 0.0000143 \cdot \theta^2 \quad (6.1)$$



Σχήμα 6.6 Έλεγχος του συντελεστή τροποποίησης του βαθμού απόδοσης

6.2.2 Καμπύλη συντελεστή ολικών απωλειών (U_L)

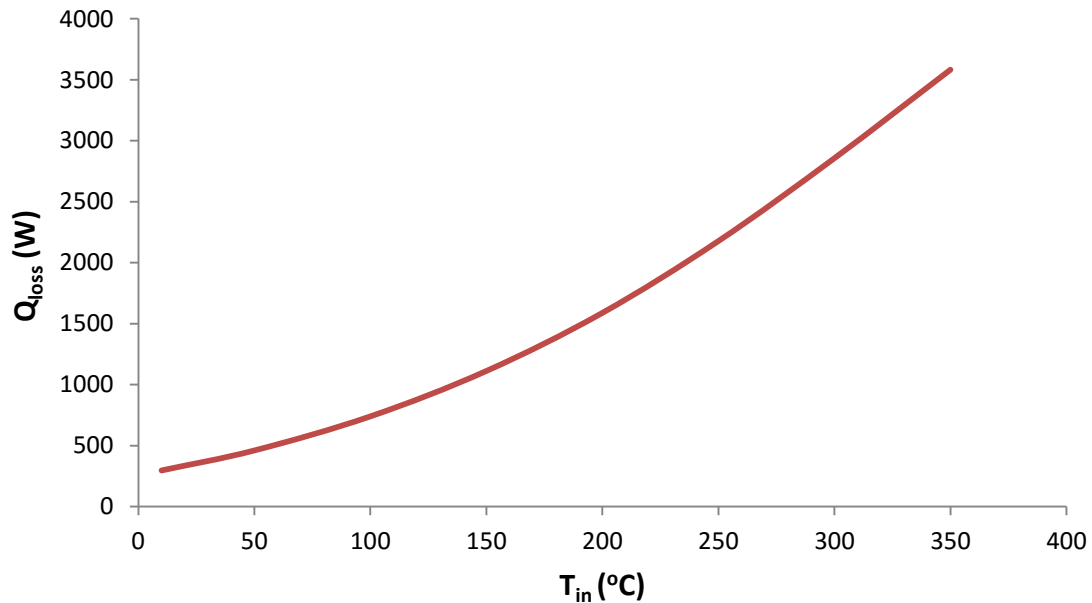
Στο Σχήμα 6.7 που έπεται, παρατηρείται η αύξηση του συντελεστή ολικών απωλειών ανά τετραγωνικά απορροφητή U_L καθώς ο συντελεστής $(T_{in}-T_{am}) / G_b$ αυξάνεται, γεγονός απόλυτα λογικό δεδομένης της αύξησης της θερμοκρασίας των συνιστωσών του συλλέκτη.



Σχήμα 6.7 Καμπύλη συντελεστή ολικών απωλειών

6.2.3 Καμπύλη απωλειών ακτινοβολίας απορροφητή (Q_{loss})

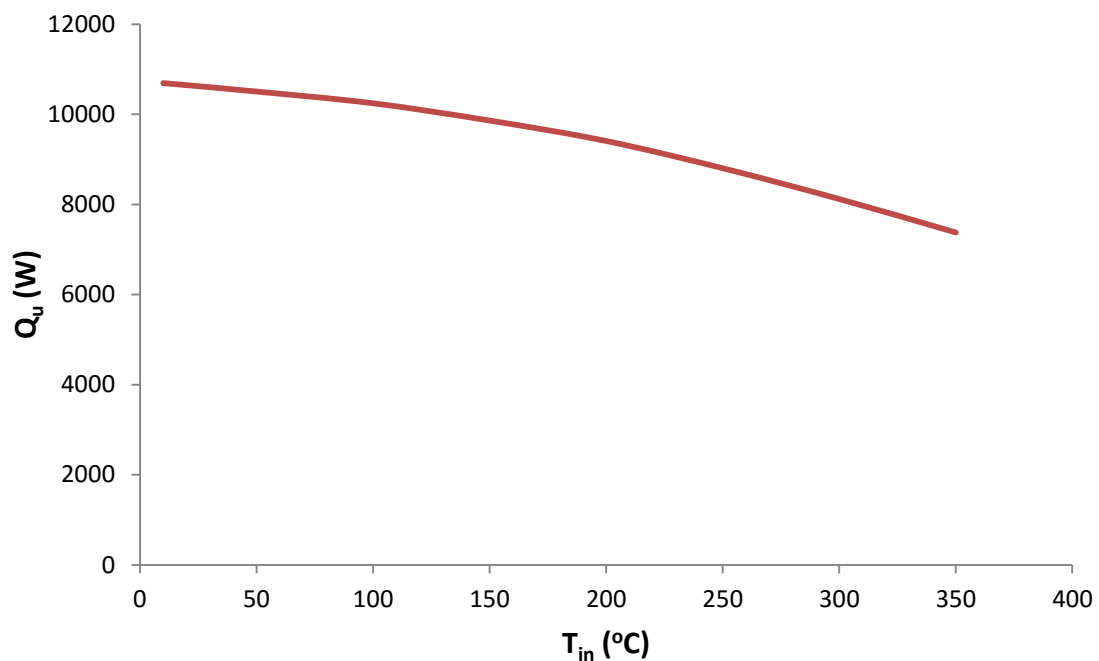
Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζονται οι απώλειες ακτινοβολίας του απορροφητή του ηλιακού συλλέκτη PTC. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρείται αύξηση των απωλειών με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου.



Σχήμα 6.8 Καμπύλη απωλειών ακτινοβολίας απορροφητή

6.2.4 Καμπύλη ωφέλιμης ισχύος (Q_u)

Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η ωφέλιμη ισχύς Q_u (ή $Q_{ωφ}$) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στον απορροφητή (T_{in}).



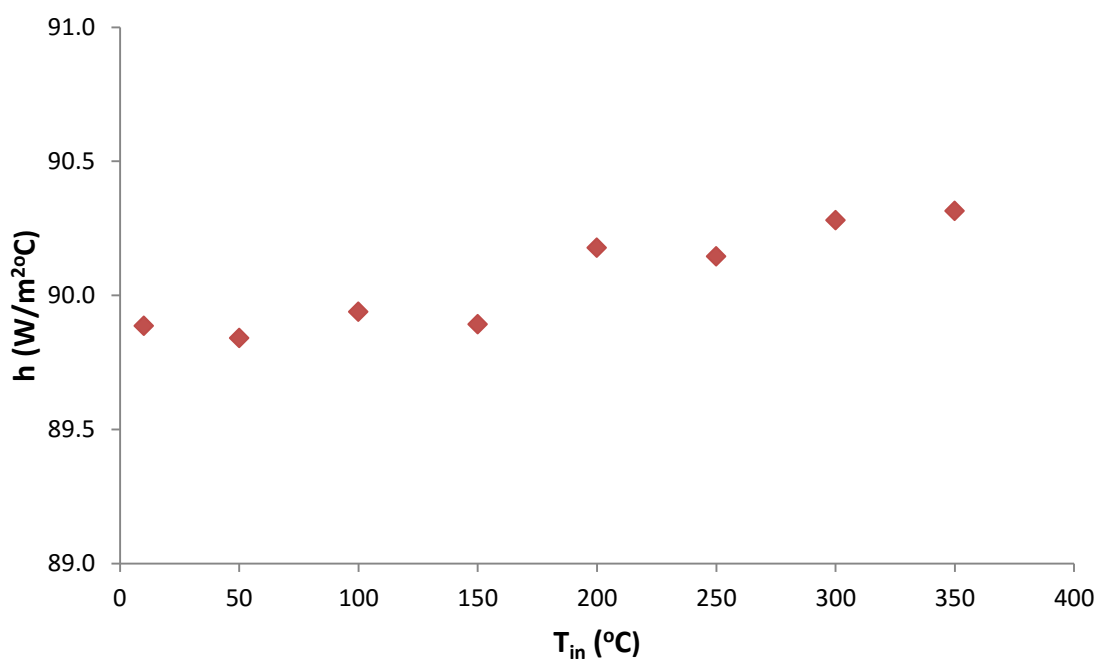
Σχήμα 6.9 Καμπύλη ωφέλιμης ισχύος

Από το διάγραμμα φαίνεται πως με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στον απορροφητή μειώνεται η ωφέλιμη ισχύς, γεγονός απολύτως λογικό, καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στον απορροφητή μειώνεται τελικά η θερμοκρασιακή διαφορά ($T_{out} - T_{in}$) έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της ωφέλιμης ισχύος.

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (6.2)$$

6.2.5 Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (h)

Στο Σχήμα 6.10 παρουσιάζεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} . Ο συντελεστής αυτός εκφράζει τη συναλλαγή θερμότητας δι' ακτινοβολίας μεταξύ του απορροφητή και του σωλήνα κενού. Παρατηρείται πως είναι περίπου σταθερό στην τιμή $90 \text{ W/m}^2\text{°C}$ και κι έχει μία μικρή αυξητική τάση καθώς η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου αυξάνεται.



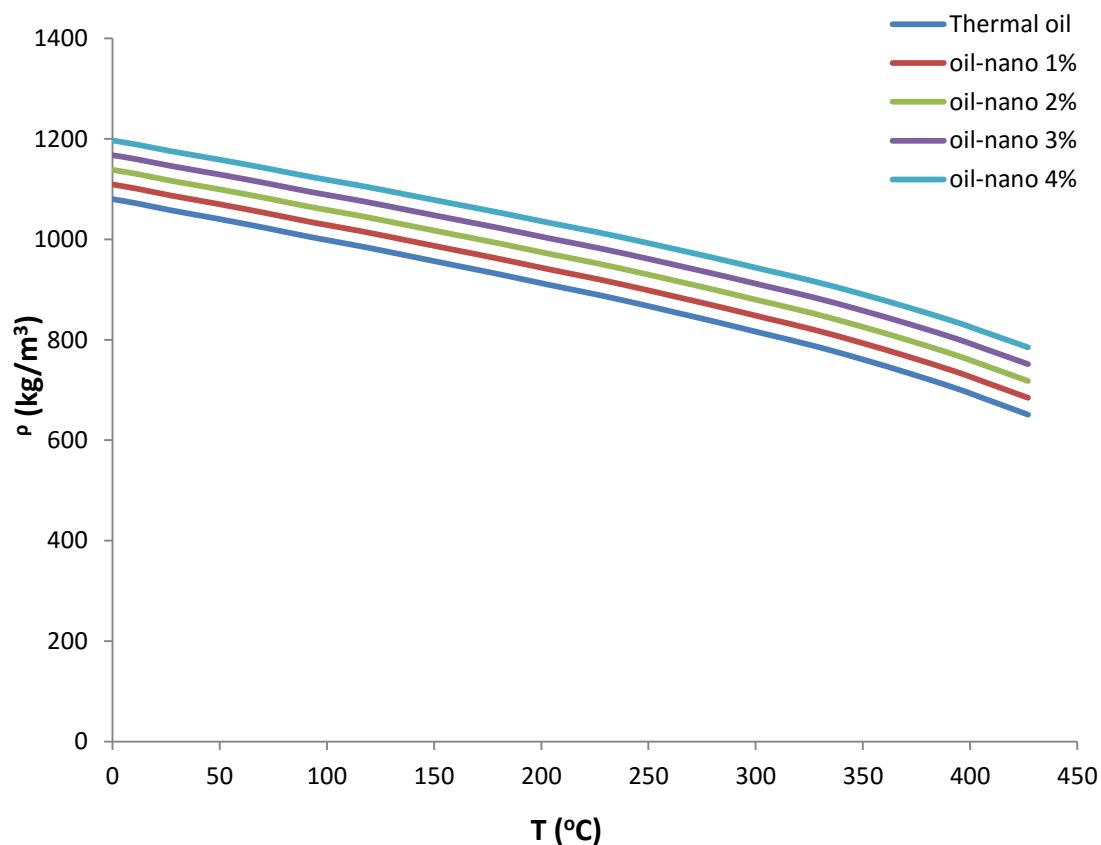
Σχήμα 6.10 Καμπύλη συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

6.3 Διαγράμματα ιδιοτήτων νανοϋλικού Al_2O_3

Για την ολοκλήρωση της εργασίας και την εξαγωγή συμπερασμάτων, ο συλλέκτης προσομοιώθηκε έχοντας ως εργαζόμενο μέσο νανοϋλικό Al_2O_3 . Για μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο εμπειριστατωμένη μελέτη το νανοϋλικό δημιουργήθηκε με τέσσερις διαφορετικές περιεκτικότητες σωματιδίων μετάλλου, 1%, 2%, 3% και 4%. Οι ιδιότητες του νανοϋλικού αυτού υπολογίστηκαν σύμφωνα με το τυπολόγιο που παρουσιάζεται σε περασμένο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3). Οι ιδιότητες αυτές αποθηκεύθηκαν στη βάση δεδομένων του Solidworks και τα διαγράμματά τους παρουσιάζονται παρακάτω.

6.3.1 Πυκνότητα (ρ)

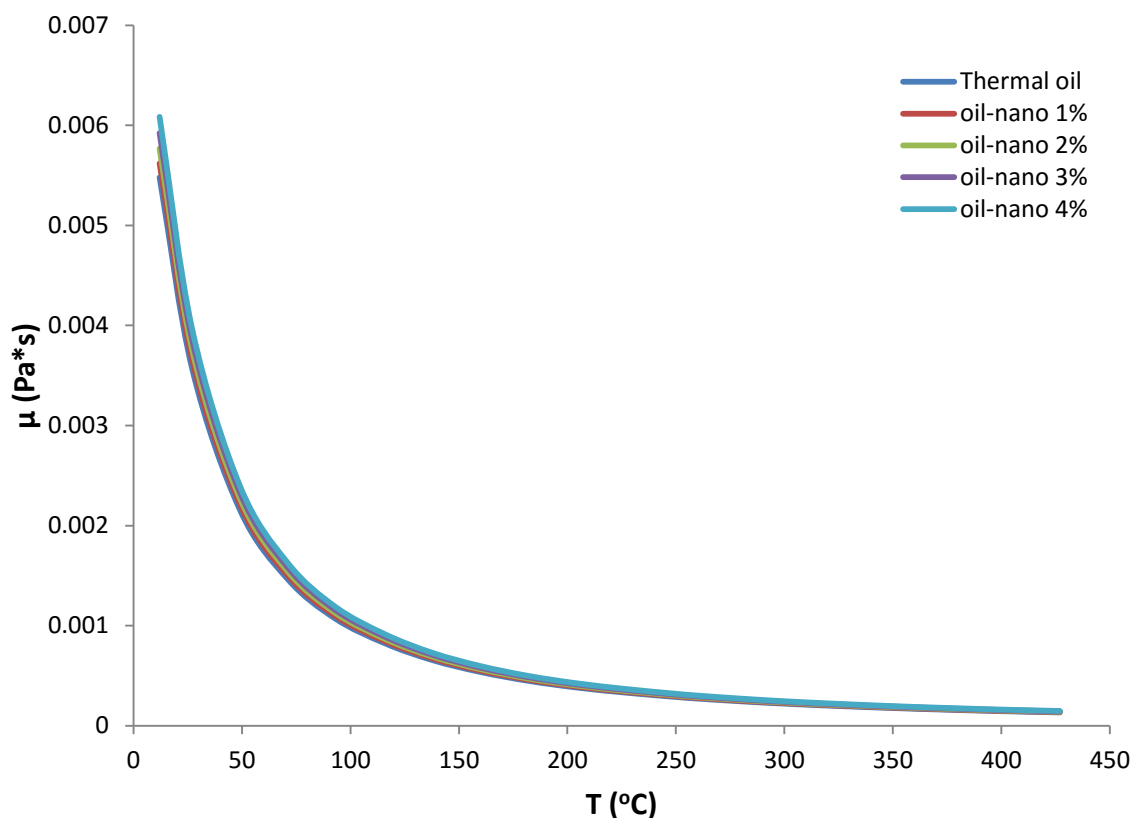
Η πυκνότητα του νανοϋλικού μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Επίσης, για ίδιες θερμοκρασίες το Al_2O_3 με μεγαλύτερη περιεκτικότητα οξειδίων έχει μεγαλύτερη πυκνότητα. Συγκριτικά, επίσης, με το λάδι το νανοϋλικό οποιασδήποτε περιεκτικότητας έχει μεγαλύτερη πυκνότητα.



Σχήμα 6.11 Πυκνότητα Al_2O_3

6.3.2 Ιξώδες (μ)

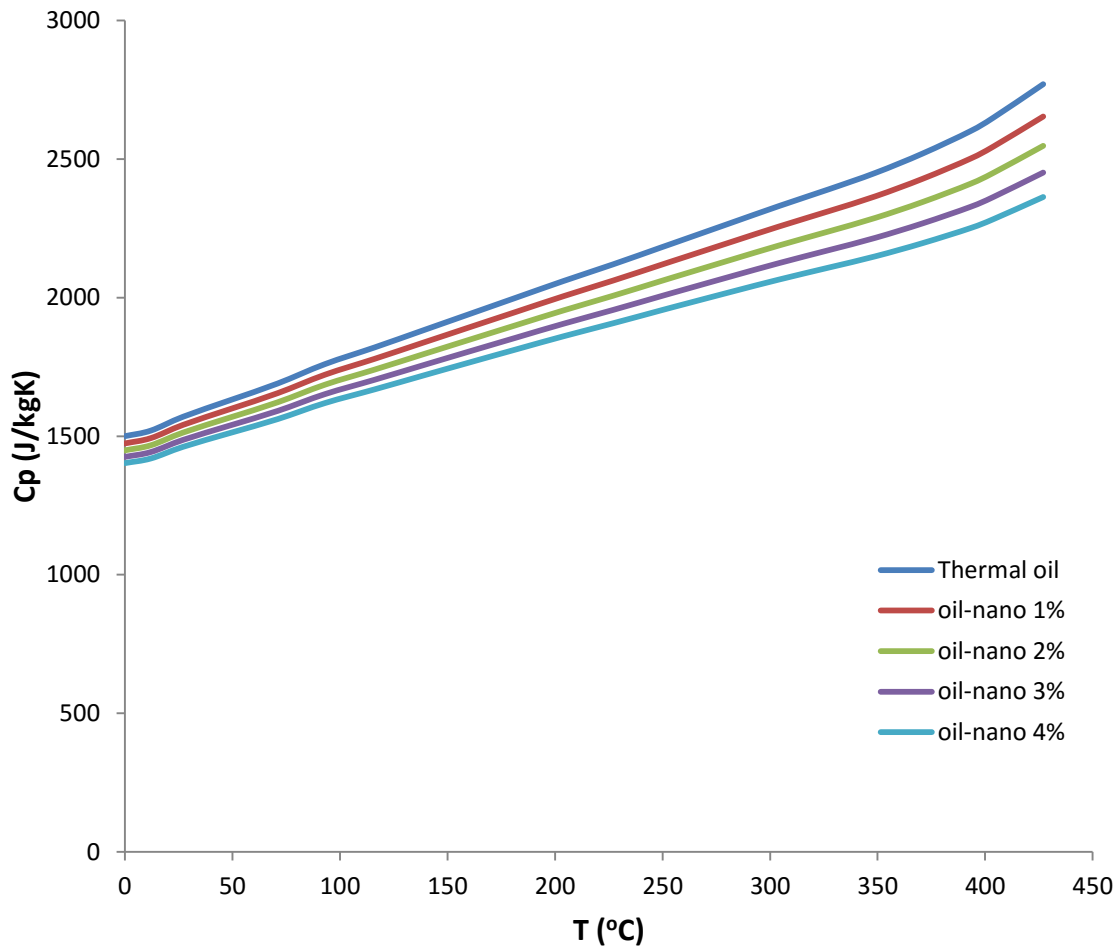
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12 που ακολουθεί, το νανοϋλικό έχει σχεδόν ίδιες τιμές ιξώδους για κάθε ποσοστό περιεκτικότητας. Ειδικότερα, παρατηρούνται ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές ιξώδους για νανοϋλικό με μεγαλύτερη περιεκτικότητα, για την ίδια θερμοκρασία. Επίσης, σε σύγκριση με το λάδι (Thermal oil) το νανοϋλικό έχει μεγαλύτερο ιξώδες.



Σχήμα 6.12 Ιξώδες Al_2O_3

6.3.3 Θερμοχωρητικότητα (C_p)

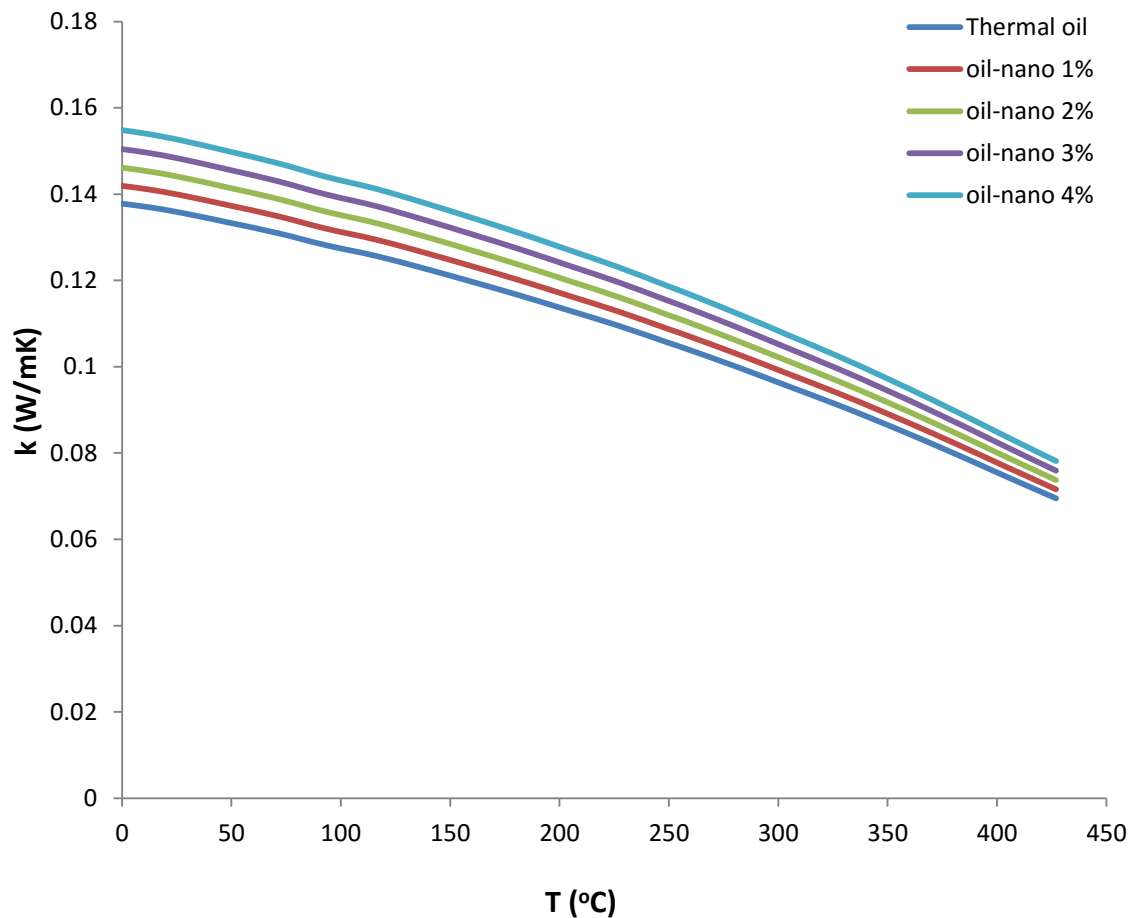
Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται πως το λάδι (Thermal oil) έχει μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα συγκριτικά με το νανοϋλικό, οποιαδήποτε περιεκτικότητα και αν έχει αυτό. Όσον αφορά το νανοϋλικό Al_2O_3 , παρατηρείται πως όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητά του σε οξείδια, τόσο μικρότερη θερμοχωρητικότητα αυτό έχει. Συνεπώς, στο νανοϋλικό με τη μικρότερη περιεκτικότητα παρατηρείται και η μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας στο σωλήνα του ρευστού.



Σχήμα 6.13 Θερμοχωρητικότητα Al_2O_3

6.3.4 Θερμική αγωγιμότητα (k)

Στο Σχήμα 6.14 διακρίνεται πως το νανοϋλικό που έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα έχει και υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα από το νανοϋλικό με μικρότερη περιεκτικότητα, για ίδιες θερμοκρασίες. Τη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα την έχει το λάδι (Thermal oil), κι έτσι η αύξηση στο σωλήνα του ρευστού με λάδι ως εργαζόμενο μέσο είναι μικρότερη από αυτή με νανοϋλικό ως εργαζόμενο μέσο. Παρατηρείται, επίσης, πως καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, οι διαφορές στις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας για κάθε ρευστό μειώνονται.



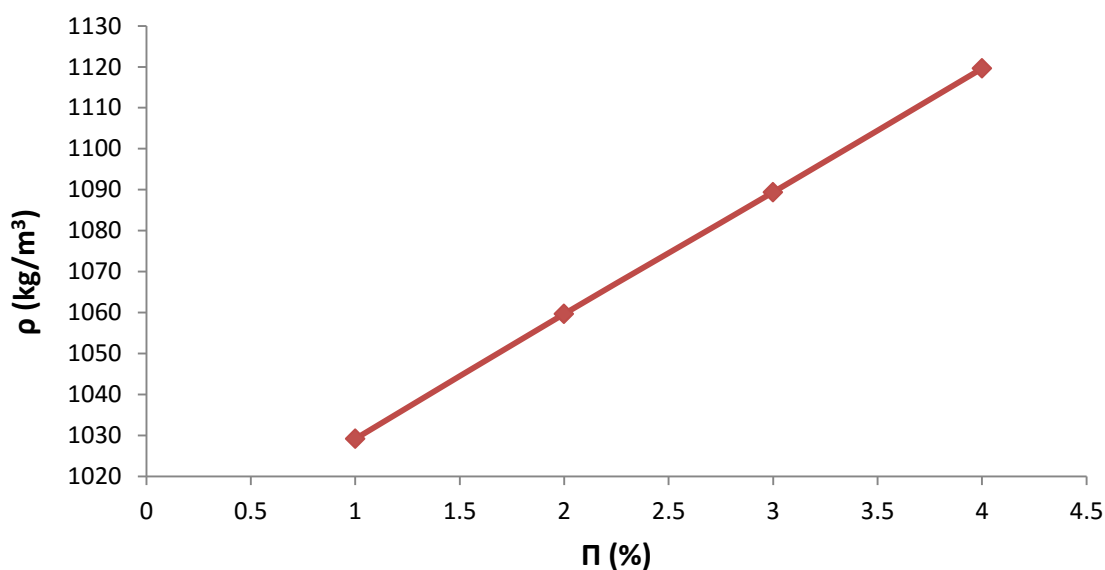
Σχήμα 6.14 Θερμική αγωγιμότητα Al_2O_3

6.4 Διαγράμματα ιδιοτήτων νανοϋλικού Al_2O_3 σε δεδομένη θερμοκρασία 100 °C

Στην εν λόγω ενότητα θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα της πυκνότητας, του ιξώδους, της θερμοχωρητικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας του Al_2O_3 στη θερμοκρασία των 100 °C για κάθε μία από τις τέσσερις διαφορετικές περιεκτικότητες σε οξείδια (1%, 2%, 3% και 4%). Σκοπός είναι να παρουσιαστεί η μεταβολή των τιμών για κάθε ιδιότητα καθώς η περιεκτικότητα του νανοϋλικού αλλάζει.

6.4.1 Πυκνότητα (ρ)

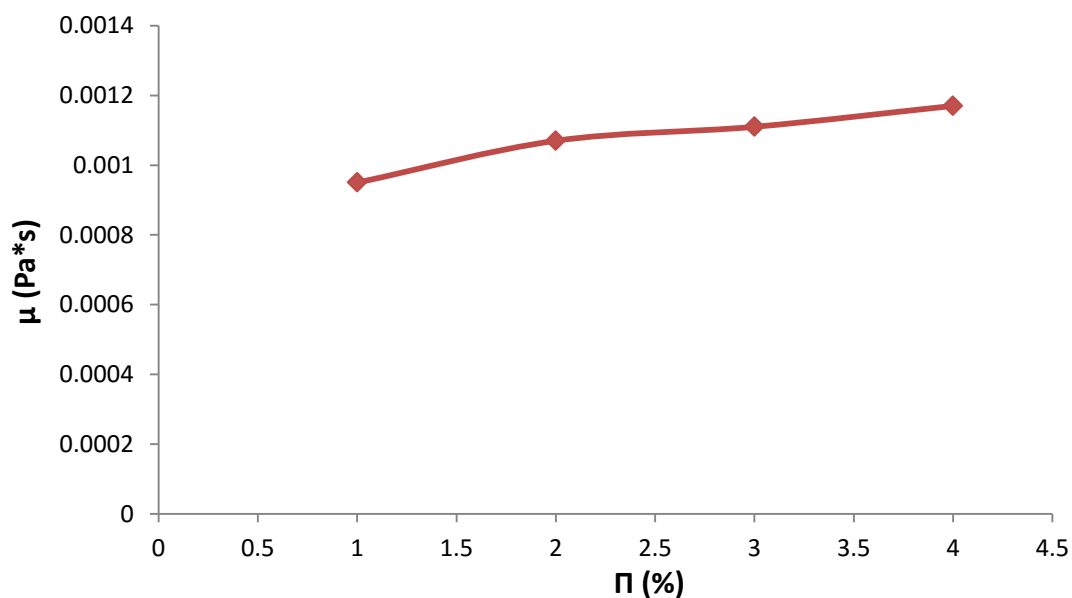
Από το Σχήμα 6.15 εύκολα παρατηρείται πως η πυκνότητα του νανοϋλικού αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει της περιεκτικότητας.



Σχήμα 6.15 Πυκνότητα Al_2O_3 για διαφορετικές περιεκτικότητες Π (%)

6.4.2 Ιξώδες (μ)

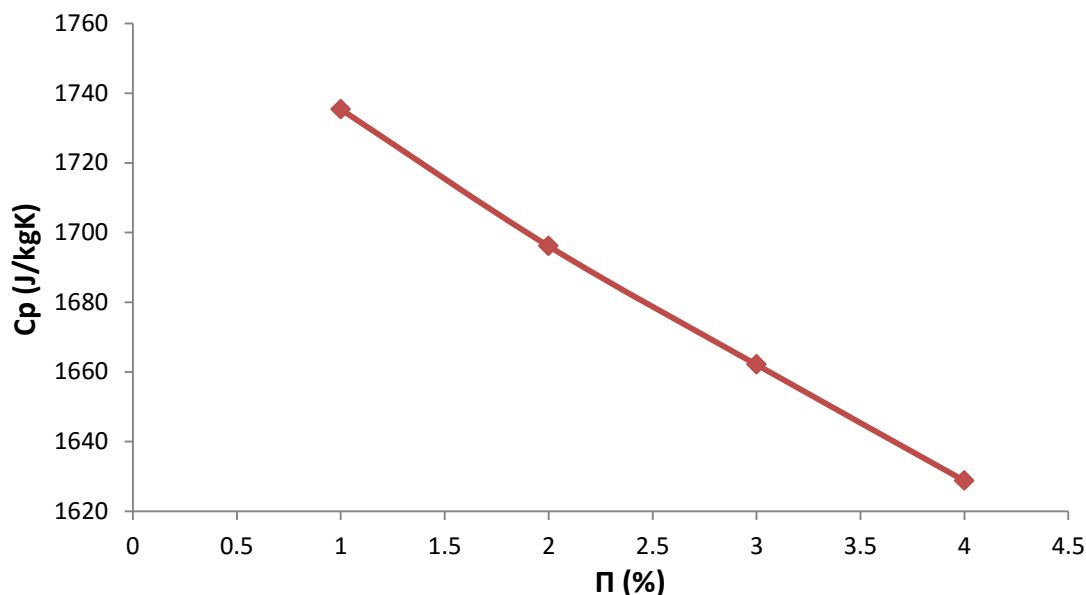
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.16 το ιξώδες του Al_2O_3 παρουσιάζει μία μικρή αύξηση καθώς η περιεκτικότητα του νανοϋλικού αυξάνεται. Το νανοϋλικό με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα είναι και πιο συνεκτικό, αφού έχει μεγαλύτερο ιξώδες.



Σχήμα 6.16 Ιξώδες Al_2O_3 για διαφορετικές περιεκτικότητες Π (%)

6.4.3 Θερμοχωρητικότητα (C_p)

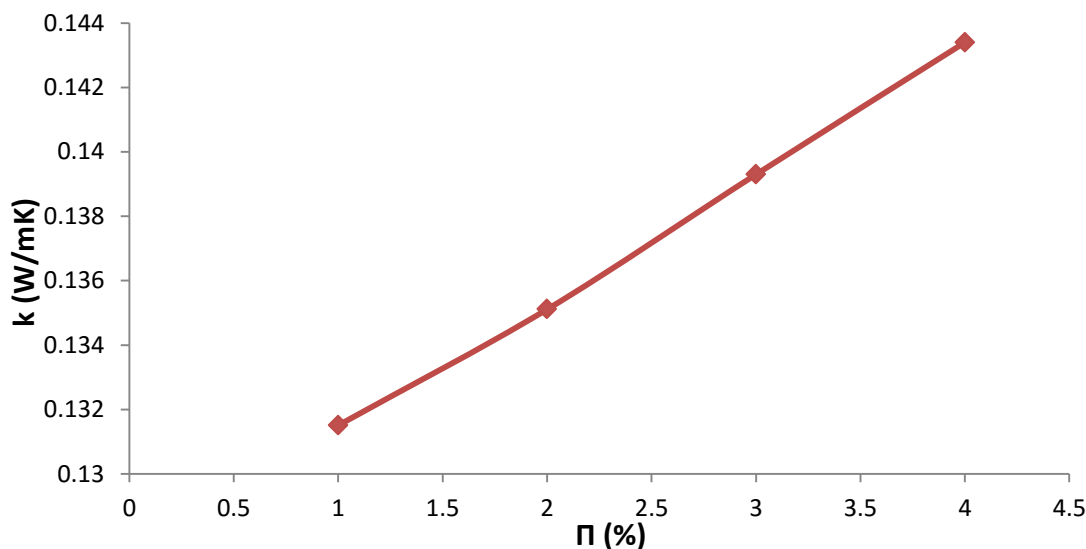
Στο Σχήμα 6.17 φαίνεται πως η θερμοχωρητικότητα του νανοϋλικού μειώνεται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει της περιεκτικότητας. Το νανοϋλικό με μικρότερη περιεκτικότητα έχει μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα κι επομένως προκαλεί μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας του σωλήνα ρευστού.



Σχήμα 6.17 Θερμοχωρητικότητα Al_2O_3 για διαφορετικές περιεκτικότητες Π (%)

6.4.4 Θερμική αγωγιμότητα (k)

Στο Σχήμα 6.18 φαίνεται η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της περιεκτικότητας. Παρατηρείται πως η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά.



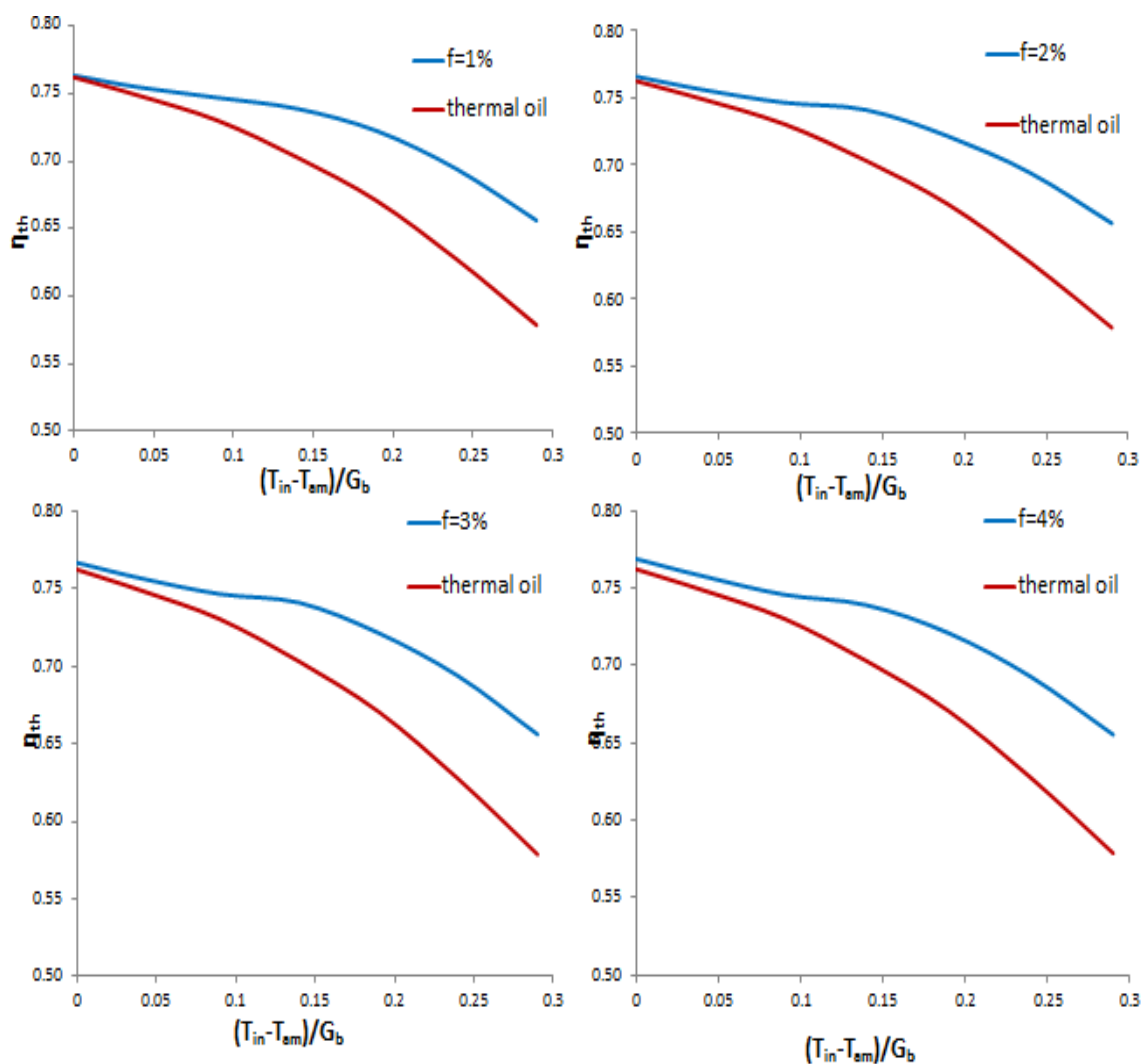
Σχήμα 6.18 Θερμική αγωγιμότητα Al_2O_3 για διαφορετικές περιεκτικότητες Π (%)

6.5 Διαγράμματα για τις διαφορετικές περιεκτικότητες

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ο θερμικός βαθμός απόδοσης (η_{th}), ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης (η_{ex}) και ο συντελεστής ολικών απωλειών (U_L) για κάθε μία από τις τέσσερις περιεκτικότητες f , ξεχωριστά.

6.5.1 Θερμικός βαθμός απόδοσης (η_{th})

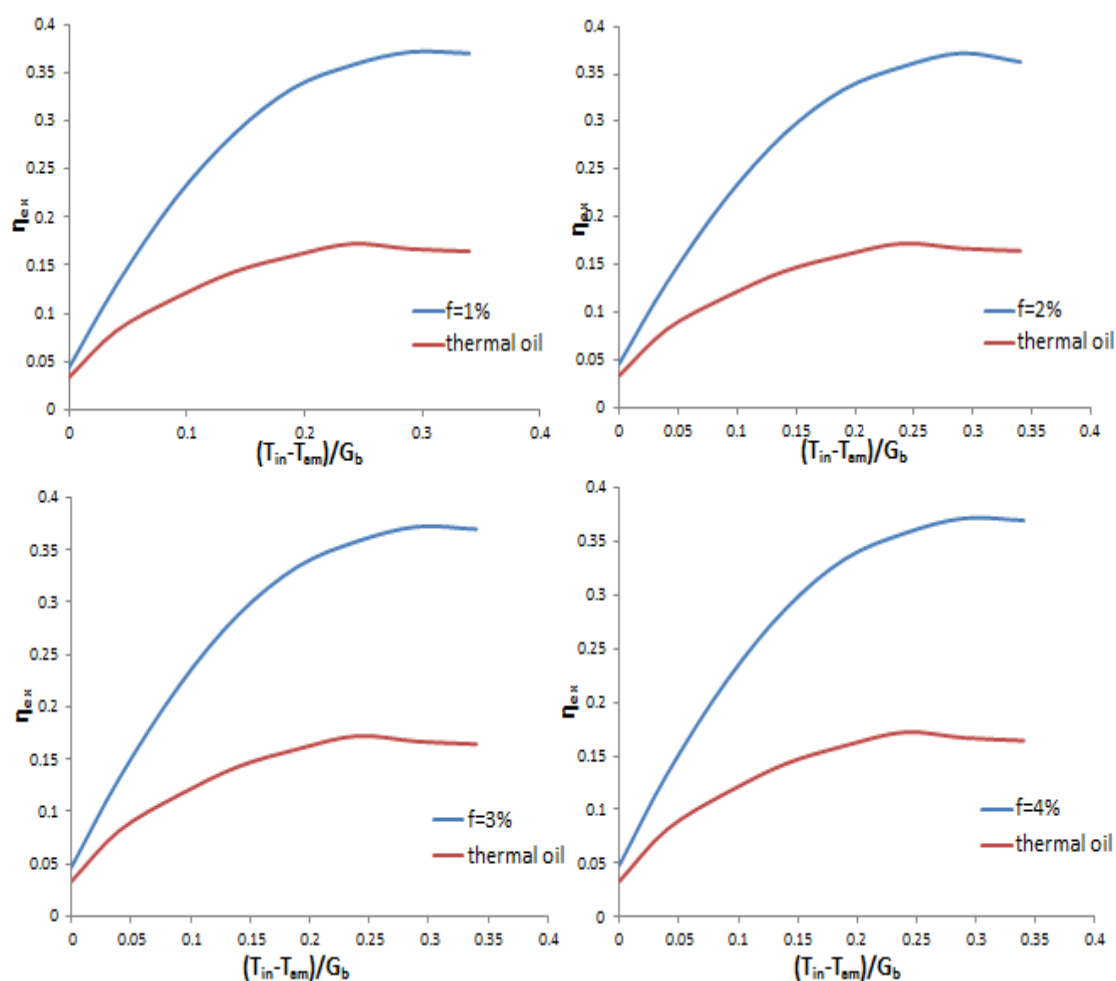
Στο Σχήμα 6.19 παρατηρείται αρχικά, όπως ήταν αναμενόμενο πως ο θερμικός βαθμός απόδοσης με εργαζόμενο μέσο τα νανοϋλικά (οποιασδήποτε περιεκτικότητας) είναι μεγαλύτερος του βαθμού απόδοσης με εργαζόμενο μέσο το Thermal oil. Έπειτα, παρατηρείται πως όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός απόδοσης, αν και οι μεταξύ τους διαφορές είναι μικρές.



Σχήμα 6.19 Θερμικός βαθμός απόδοσης για κάθε περιεκτικότητα

6.5.2 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης (η_{ex})

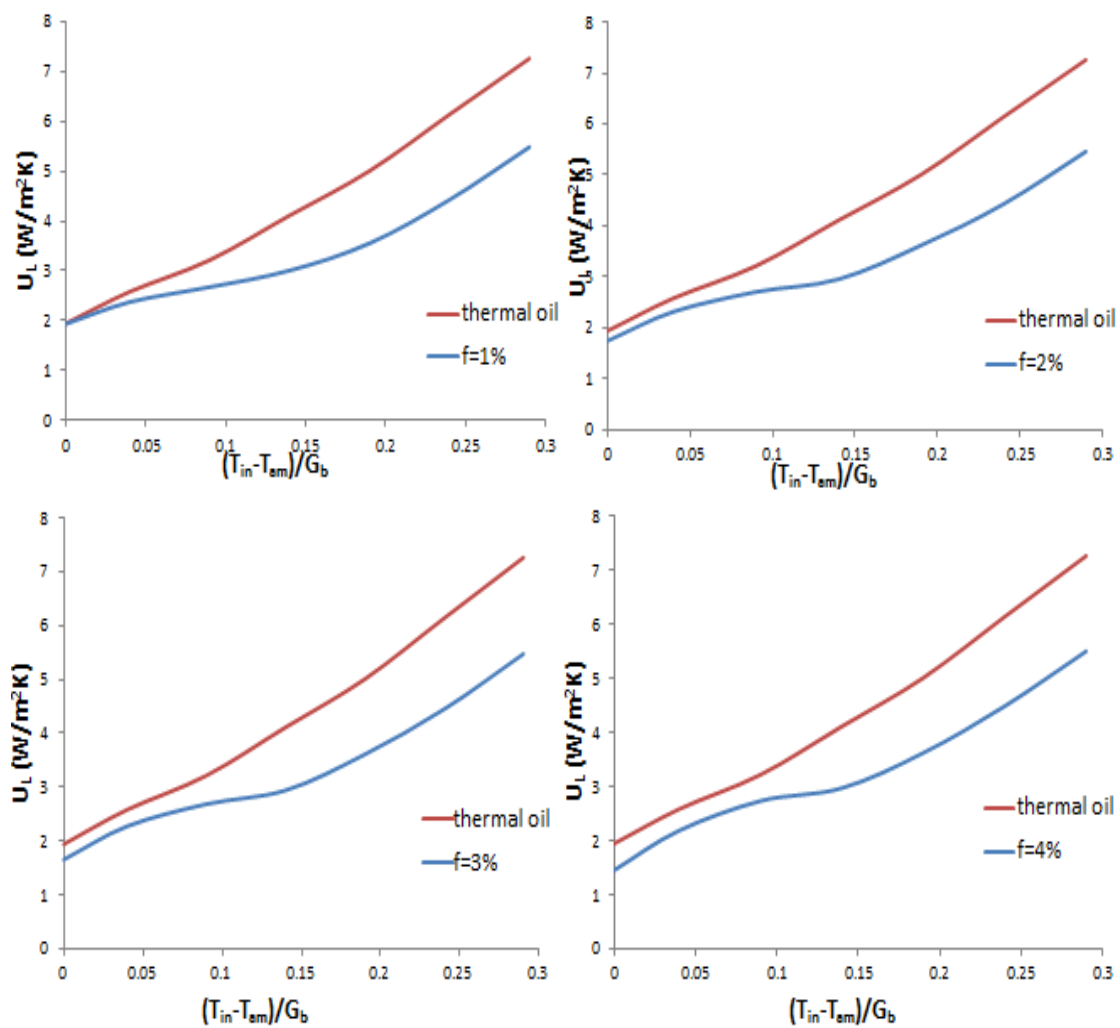
Από το Σχήμα 6.20 όπου παρουσιάζεται ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης, συμπεραίνεται πως ο εξεργειακός βαθμός του συστήματος με εργαζόμενο μέσο τα νανοϋλικά (οποιασδήποτε περιεκτικότητας) είναι μεγαλύτερος απ'όταν το εργαζόμενο μέσο είναι το Thermal oil. Όσον αφορά τις διαφορετικές περιεκτικότητες, οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης είναι ίδιοι για κάθε μία από τις τέσσερις περιεκτικότητες.



Σχήμα 6.20 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης για κάθε περιεκτικότητα

6.5.3 Συντελεστής ολικών απωλειών (U_L)

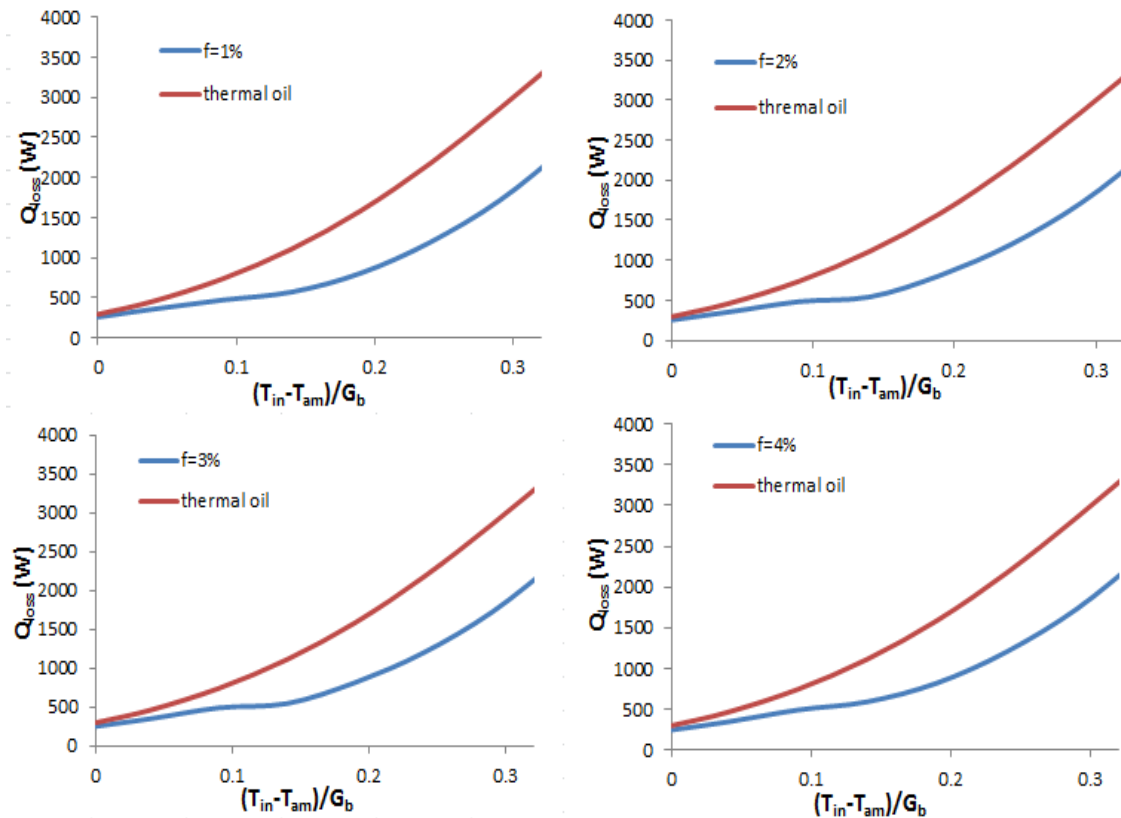
Στο Σχήμα 6.21 που έπεται, παρουσιάζεται ο συντελεστής ολικών απωλειών ανά τετραγωνικά απορροφητή. Αρχικά, εύκολα παρατηρείται πως ο συντελεστής αυτός είναι μεγαλύτερος για συστήματα με εργαζόμενο μέσο το Thermal oil από τα συστήματα που έχουν ως εργαζόμενο μέσο νανοϋλικά, ανεξαρτήτως της περιεκτικότητας αυτών. Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα τόσο μειώνεται ο συντελεστής ολικών απωλειών, επομένως και οι απώλειες.



Σχήμα 6.21 Συντελεστής ολικών απωλειών

6.5.4 Καμπύλη απωλειών ακτινοβολίας απορροφητή (Q_{loss})

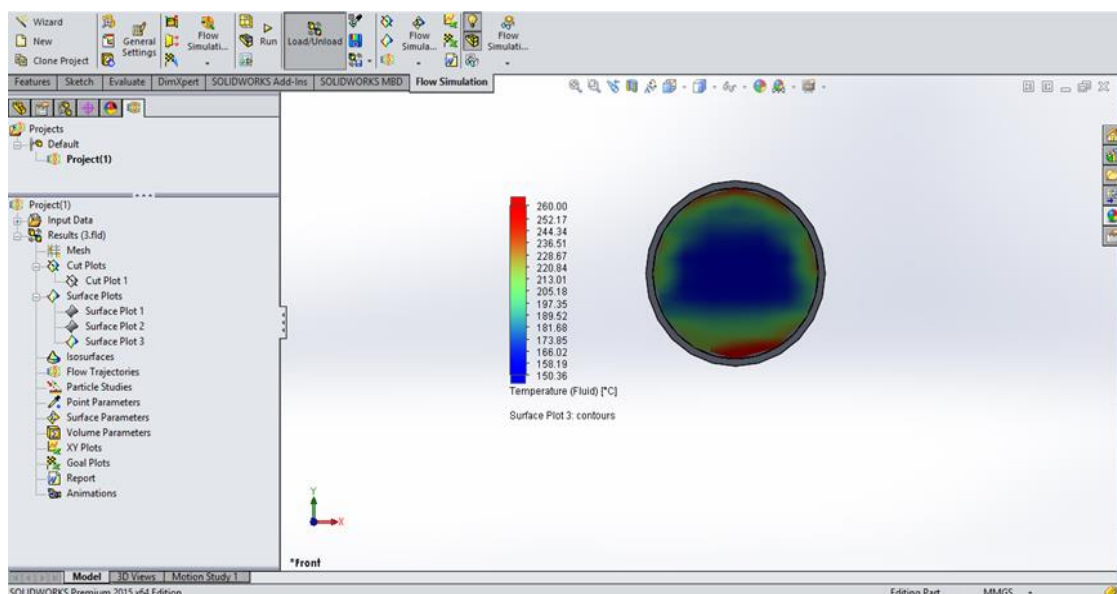
Στο Σχήμα 6.22 παρουσιάζεται η καμπύλη απωλειών ακτινοβολίας του απορροφητή. Μία πρώτη παρατήρηση είναι πως οι απώλειες ακτινοβολίας για εργαζόμενο μέσο το Thermal Oil είναι μεγαλύτερες από τα νανοϋλικά. Έπειτα, παρατηρείται πως για θερμοκρασία εισόδου έως και 50°C οι απώλειες μειώνονται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα. Ωστόσο, από τους 50°C και πάνω, οι απώλειες αυξάνονται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα. Οι αυξομειώσεις των απωλειών είναι μικρές.



Σχήμα 6.22 Απώλειες ακτινοβολίας απορροφητή

6.6 Θερμοκρασιακά πεδία του ηλιακού συλλέκτη PTC

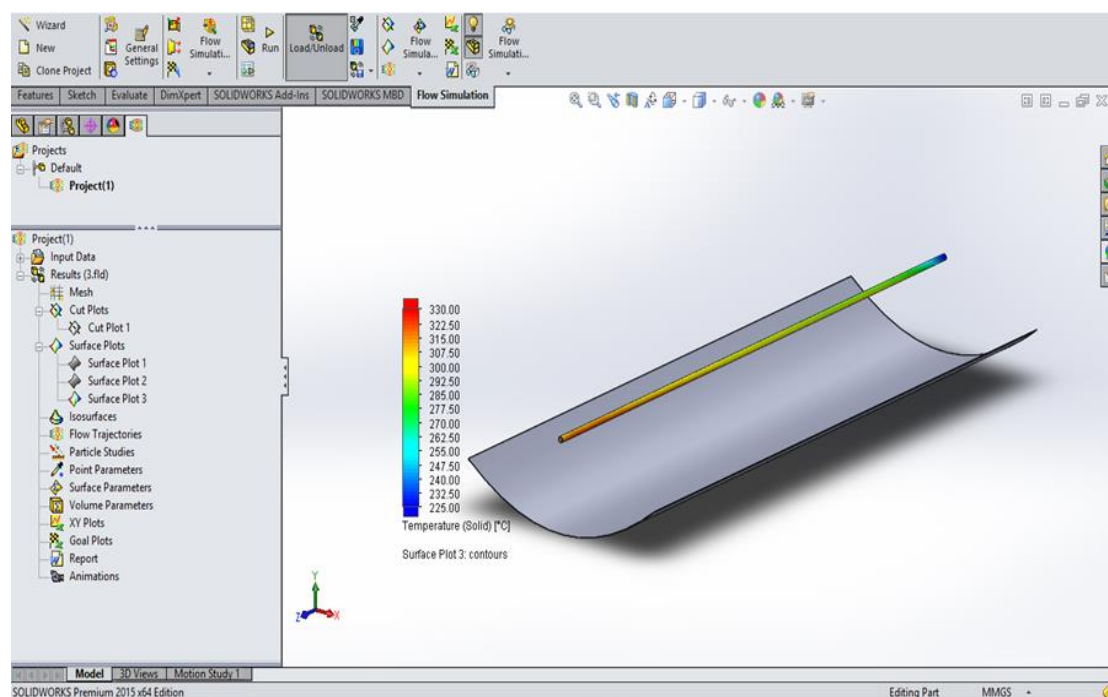
Παρακάτω παρατίθενται οι κατανομές των θερμοκρασιακών πεδίων για μέση θερμοκρασία λαδιού 200°C . Αρχικά δίνεται το θερμοκρασιακό πεδίο του απορροφητή σε πρόοψη.



Σχήμα 6.23 Θερμοκρασιακό πεδίο του απορροφητή σε πρόοψη

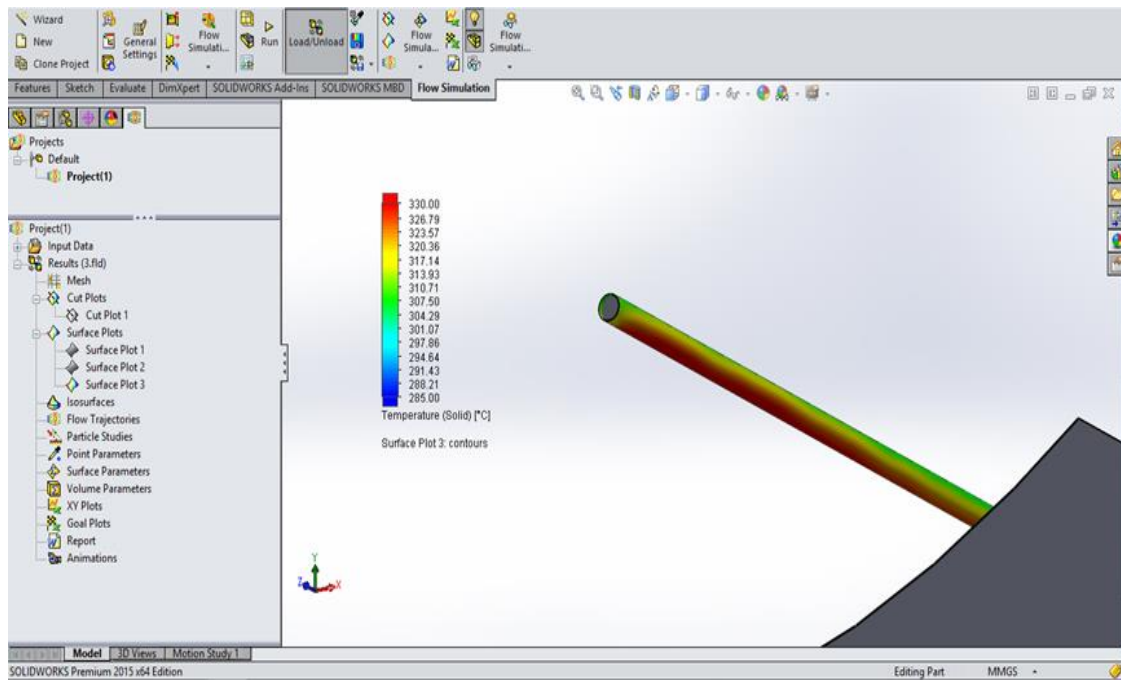
Στο Σχήμα 6.23 παρατηρείται ότι όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στον άξονα του απορροφητή η θερμοκρασία του λαδιού έχει χαμηλότερες τιμές, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα και πλησιάζουμε τα τοιχώματα του χαλκοσωλήνα η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτό είναι απόλυτα λογικό καθώς η θερμότητα μέσω ακτινοβολίας που φτάνει στον απορροφητή πρώτα προσβάλλει τα τοιχώματα εξωτερικά και στη συνέχεια εισχωρεί δια αγωγής στο εσωτερικό των τοιχωμάτων. Τέλος, μέσω συναγωγής ζεσταίνεται το λάδι.

Στη συνέχεια (Σχήμα 6.24) δίνεται το θερμοκρασιακό πεδίο του απορροφητή σε πλάγια όψη από την οποία διακρίνεται πως όσο προχωράμε προς την έξοδο του απορροφητή τόσο πιο θερμός είναι αυτός (κόκκινο χρώμα). Και αυτό καθώς στην είσοδο του απορροφητή, το λάδι εισέρχεται με μία θερμοκρασία $\sim 200^{\circ}\text{C}$ και μέσω της θερμότητας που φτάνει στον απορροφητή λόγω των ανακλάσεων της ηλιακής ακτινοβολίας, βγαίνει το λάδι με μία θερμοκρασία $\sim 330^{\circ}\text{C}$.



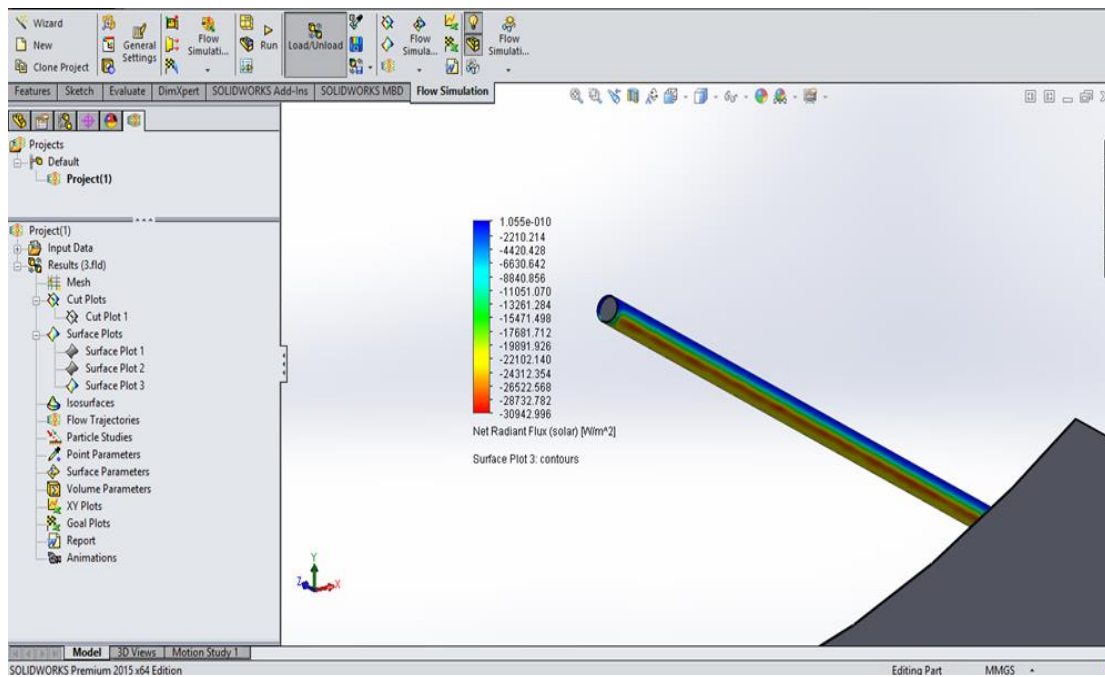
Σχήμα 6.24 Θερμοκρασιακό πεδίο του απορροφητή σε πλάγια όψη

Στο Σχήμα 6.25 που ακολουθεί, φαίνεται πως ο απορροφητής έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία στη βάση του ενώ στην κορυφή του είναι λιγότερο ζεστός. Αυτό διότι οι ακτίνες του ηλίου από το κάτοπτρο ανακλώνται προς την βάση του απορροφητή.



Σχήμα 6.25 Θερμοκρασιακό πεδίο του απορροφητή σε άνοψη

Ακολουθεί, στο Σχήμα 6.26, το πεδίο που δείχνει την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία. Παρατηρείται ότι η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη στο κάτω μέρος του απορροφητή διότι αυτό δέχεται το μεγαλύτερο ποσοστό των ανακλώμενων στο κάτωτοππο ακτινών.



Σχήμα 6.26 Πεδίο απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας απορροφητή

6.7 Οπτική βελτιστοποίηση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη PTC

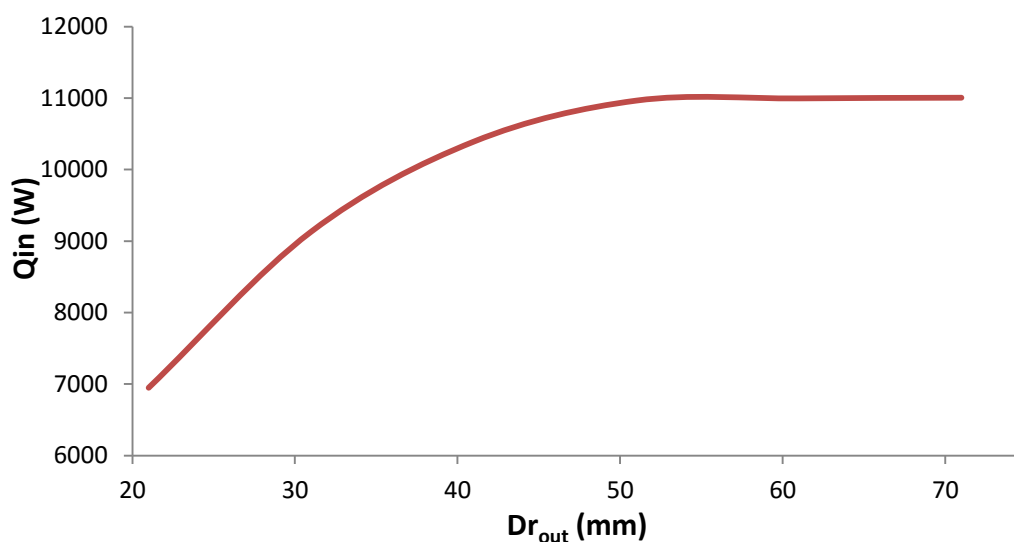
Στόχος αυτής της ενότητας της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση του ηλιακού συλλέκτη PTC που χρησιμοποιήθηκε. Μελετάται, λοιπόν, είτε η αποδοχή και δικαιολόγηση των χαρακτηριστικών που έχει ο συλλέκτης από τον κατασκευαστή του είτε οι προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση του συλλέκτη.

6.7.1 Οπτική βελτιστοποίηση ελέγχοντας τις διαμέτρους $D_{r,in}$, $D_{r,out}$ του απορροφητή

Με δεδομένες τις διαμέτρους του απορροφητή (εσωτερική διάμετρος $D_{r,in}=47mm$, εξωτερική διάμετρος $D_{r,out}=51mm$) μελετήθηκε ο απορροφητής και σε διαφορετικές τιμές των διαμέτρων. Στόχος, να ελεγχθεί βάσει της απορροφούμενης θερμότητας, ποιο ζευγάρι διαμέτρων βελτιστοποιεί τον συλλέκτη. Προέκυψε, λοιπόν, ο παρακάτω πίνακας και το παρακάτω διάγραμμα.

$D_{r,in}$ (mm)	$D_{r,out}$ (mm)	Q_{in} (W)
17	21	6949
27	31	9132
37	41	10391
47	51	10965
57	61	10996
67	71	11005

Πίνακας 6.1 Απορροφούμενη θερμότητα για διάφορες τιμές διαμέτρων του απορροφητή



Σχήμα 6.27 Διάγραμμα απορροφούμενης θερμότητας συναρτήσει της εξωτερικής διαμέτρου του απορροφητή

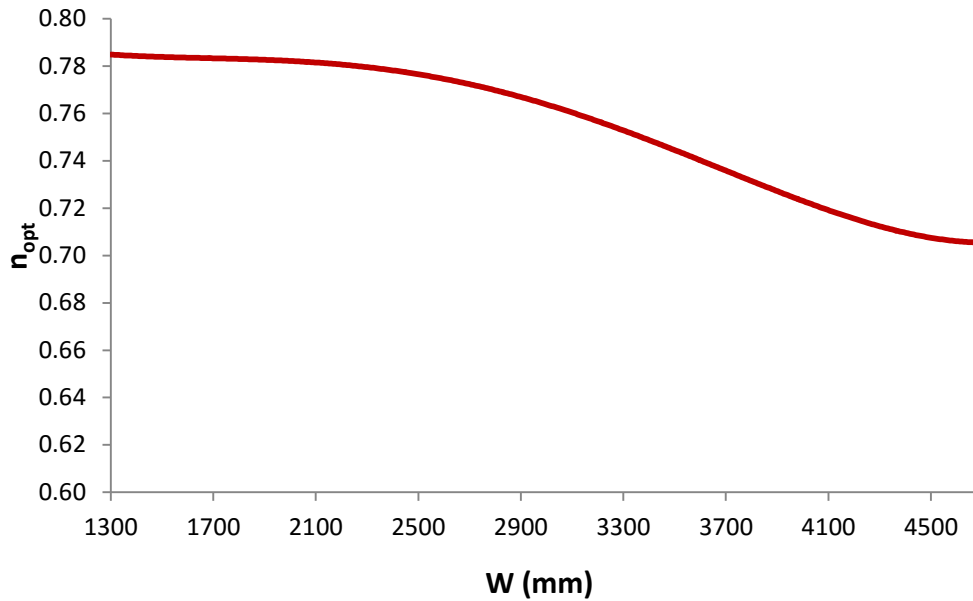
Στο Σχήμα 6.27 παρατηρείται ότι από την τιμή $D_{r,out} = 51mm$ εμφανίζεται το λεγόμενο «γόνατο». Από αυτή την τιμή και πάνω υπάρχει κορεσμός, η καμπύλη γίνεται οριζόντια, δηλαδή δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της απορροφούμενης θερμότητας Q_{in} . Επομένως επιλέγεται ως βέλτιστη εξωτερική διάμετρος του απορροφητή $D_{r,out} = 51mm$ για την οποία έχω τη μέγιστη απορροφούμενη θερμότητα χωρίς να υπάρχει κορεσμός, την οποία και σωστά έχει δώσει ο κατασκευαστής.

6.7.2 Οπτική βελτιστοποίηση ελέγχοντας το άνοιγμα W του συλλέκτη

Με δεδομένο το άνοιγμα του απορροφητή $W = 2300mm$ μελετήθηκε ο απορροφητής δίνοντας στο W διαφορετικές τιμές. Στόχος είναι να ελεγχθεί με βάση τον οπτικό βαθμό απόδοσης η_{opt} ποια τιμή του ανοίγματος βελτιστοποιεί τον συλλέκτη. Προέκυψε, λοιπόν, ο παρακάτω πίνακας και το παρακάτω διάγραμμα.

W	Q_{in}	η_{opt}	W	Q_{in}	η_{opt}
1300	6219	0.78	3100	14395	0.76
1500	7172	0.78	3300	15193	0.75
1700	8129	0.78	3500	15980	0.75
1900	9081	0.78	3700	16731	0.74
2100	10034	0.78	3900	17184	0.72
2300	10967	0.78	4100	17941	0.72
2500	11763	0.77	4300	18580	0.71
2700	12735	0.77	4500	19541	0.71
2900	13480	0.76	4700	20213	0.71

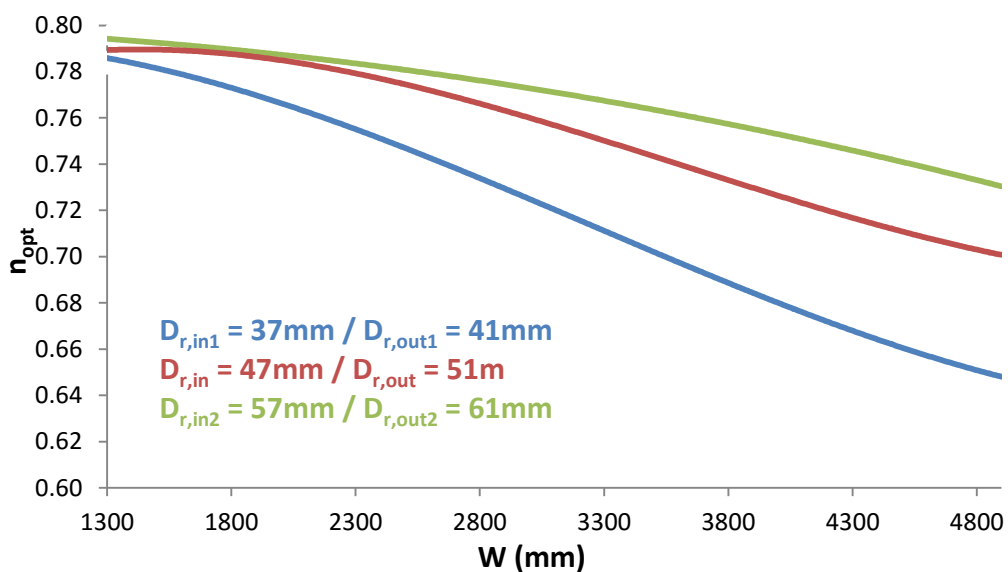
Πίνακας 6.2 Οπτικός βαθμός απόδοσης για διάφορες τιμές του ανοίγματος W του συλλέκτη



Σχήμα 6.28 Διάγραμμα οπτικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει του ανοίγματος του συλλέκτη

Από το Σχήμα 6.28 παρατηρείται ότι ο οπτικός βαθμός απόδοσης η_{opt} διατηρεί σταθερή την μέγιστη τιμή του έως το $W = 2300mm$. Η τιμή αυτή είναι και η τιμή ανοίγματος που έχει δώσει ο κατασκευαστής, επομένως υπάρχει επιβεβαίωση κι εδώ.

Επιπλέον, μελετήθηκε η βελτιστοποίηση του ανοίγματος W του συλλέκτη δοκιμάζοντας ζεύγη διαμέτρων $D_{r,in}$ και $D_{r,out}$ διαφορετικά από τα δεδομένα, που έχουν δοθεί από τον κατασκευαστή. Έτσι, αντί για ($D_{r,in} = 47mm$ και $D_{r,out} = 51mm$) μελετήθηκαν τα ζεύγη ($D_{r,in1} = 37mm / D_{r,out1} = 41mm$) και ($D_{r,in2} = 57mm / D_{r,out2} = 61mm$). Προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.29).



Σχήμα 6.29 Βελτιστοποίηση ανοίγματος W για διαφορετικά ζεύγη διαμέτρων

Παρατηρείται πως για το ζεύγος μικρότερων διαμέτρων $D_{r,in1} = 37mm / D_{r,out,1} = 41mm$ το άνοιγμα W λαμβάνει σχετικά μικρές τιμές, ενώ για το ζεύγος μεγαλύτερων διαμέτρων $D_{r,in2} = 57mm / D_{r,out2} = 61mm$ το άνοιγμα W πρέπει να είναι μεγαλύτερο.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε ένας συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης τύπου PTC. Αρχικά, αναφέρθηκαν γενικά στοιχεία περί ηλιακής ενέργειας, νανοϋλικών καθώς και οι απαραίτητες εξισώσεις. Επίσης, έγινε αναφορά σε διάφορα είδη ηλιακών συλλεκτών δίνοντας έμφαση στους συγκεντρωτικούς παραβολικούς συλλέκτες τύπου PTC. Στη συνέχεια, έγινε ο δισδιάστατος και ο τρισδιάστατος σχεδιασμός συλλέκτη PTC, αφού πρώτα έγινε μια εισαγωγή στο Solidworks για την καλύτερη κατανόηση του προγράμματος. Στην εισαγωγή αυτή περιγράφηκαν οι σημαντικότερες για την εργασία εντολές ώστε να δημιουργηθεί μια κατανοητή ροή στο κείμενο. Έπειτα, έγινε ο δισδιάστατος και τρισδιάστατος σχεδιασμός του συλλέκτη περιγράφοντας αναλυτικά κάθε βήμα που ακολουθήθηκε. Για το σχεδιασμό έγιναν τα εξής βήματα: αφού διαστατοποιήθηκε ο απορροφητής δίνοντας τιμές για τις διαμέτρους του καθώς και ο ομόκεντρος με τον απορροφητή σωλήνας γυαλιού που τον περιβάλλει σχεδιάστηκε το παραβολικό κάτοπτρο δίνοντάς του τις κατάλληλες διαστάσεις. Η απόσταση του κατόπτρου με τους παραπάνω σωλήνες είναι ίση με την εστιακή απόσταση της παραβολής (φέρεται μία κάθετη ευθεία που συνδέει το κέντρο των σωλήνων με την εστία της παραβολής). Στη συνέχεια έγινε το τρισδιάστατο μοντέλο προσδίδοντας μήκος στις ήδη υπάρχουσες διαστάσεις.

Μετά την ολοκλήρωση αυτών, χρησιμοποιώντας το Flow Simulation του Solidworks έγινε η προσομοίωση του συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη PTC. Αρχικά, δημιουργήθηκε το αρχείο προσομοίωσης (flow simulation project). Στη συνέχεια ορίστηκε το πλέγμα, οι οριακές συνθήκες, οι ακτινοβολούμενες επιφάνειες και οι στόχοι. Πλέον, αφού ορίστηκαν αυτά, το μοντέλο ήταν έτοιμο για προσομοίωση. Κάνοντας τα τρεξίματα καταλήξαμε σε κάποια αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιήθηκε λάδι, του οποίου οι ιδιότητες παρουσιάστηκαν παραπάνω. Επιπρόσθετα, βασικό αντικείμενο της εργασίας είναι η προσομοίωση του συλλέκτη με εργαζόμενο μέσο τα νανοϋλικά. Οι ιδιότητες των νανοϋλικών ορίστηκαν στο Solidworks και παρουσιάστηκαν λεπτομερώς σε διαγράμματα. Η προσομοίωση έγινε με νανοϋλικά τεσσάρων διαφορετικών περιεκτικοτήτων 1%, 2%, 3% και 4%.

Ο συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης τύπου PTC που σχεδιάστηκε παρουσιάζει άνοιγμα $W=2300\text{mm}$ και έχει μήκος $L=6200\text{mm}$. Ο απορροφητής αποτελείται από ένα χάλκινο σωλήνα, που μέσα του ρέει το ρευστό, με εσωτερική διάμετρο $D_{r,in}=47\text{mm}$ και εξωτερική διάμετρο $D_{r,out}=51\text{mm}$. Ο εν λόγω σωλήνας περικλείεται από έναν σωλήνα γυαλιού με εσωτερική διάμετρο $D_{g,in}=71\text{mm}$ και εξωτερική $D_{g,out}=75\text{mm}$. Ανάμεσα στους δύο σωλήνες υπάρχει κενό.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συλλέκτη με εργαζόμενο μέσο το Thermal oil, μας οδήγησαν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του λαδιού στο σωλήνα, δεδομένου ότι η τελευταία προκαλεί έμμεσα αύξηση των θερμικών απωλειών και κατά συνέπεια μείωση της ωφέλιμης ισχύος.
2. Έγινε επαλήθευση για το συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης K .
3. Παρατηρείται η αύξηση του συντελεστή ολικών απωλειών ανά τετραγωνικά απορροφητή (U_L) με την αύξηση του συντελεστή $(T_{in}-T_{am})/G_b$.
4. Με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στον απορροφητή μειώνεται η ωφέλιμη ισχύς, γεγονός απόλυτα λογικό καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στον απορροφητή μειώνεται τελικά η θερμοκρασιακή διαφορά $(T_{out} - T_{in})$ έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της ωφέλιμης ισχύος.

Ακολούθως, η προσομοίωση του ηλιακού συλλέκτη έγινε και με τη χρήση νανοϋλικών και τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

1. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε Al_2O_3 , τόσο μεγαλύτερος είναι και ο θερμικός βαθμός απόδοσης.
2. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος με εργαζόμενο μέσο τα νανοϋλικά (οποιασδήποτε περιεκτικότητας) είναι μεγαλύτερος απ'όταν το εργαζόμενο μέσο είναι το Thermal oil. Ωστόσο, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης παραμένει ίδιος ανεξαρτήτως της περιεκτικότητας.
3. Ο συντελεστής ολικών απωλειών U_L είναι μεγαλύτερος για συστήματα με εργαζόμενο μέσο το Thermal oil από τα συστήματα που έχουν ως εργαζόμενο μέσο νανοϋλικά, ανεξαρτήτως της περιεκτικότητας αυτών. Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα τόσο μειώνεται ο συντελεστής ολικών απωλειών, επομένως και οι απώλειες.

Ακόμα, στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε και οπτική βελτιστοποίηση του ηλιακού συλλέκτη PTC. Αρχικά, αλλάξαμε την τιμή της εσωτερικής ($D_{r,in}$) και της εξωτερικής ($D_{r,out}$) διαμέτρου, ενώ έπειτα αλλάξαμε την τιμή του ανοίγματος W .

Όσον αφορά τις τιμές των διαμέτρων, επιβεβαιώθηκε πως το ζευγάρι διαμέτρων που έχει δοθεί από τον κατασκευαστή είναι και το βέλτιστο. Ομοίως, και για το άνοιγμα όπου κι εκεί επιβεβαιώθηκε πως το άνοιγμα που έχει δώσει ο κατασκευαστής είναι το βέλτιστο.

Φυσικά, υπάρχουν περιθώρια για μελλοντική έρευνα των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών τύπου PTC. Έτσι, μία έρευνα με τον συγκεκριμένο ηλιακό συλλέκτη και τη χρήση των νανοϋλικών ως εργαζόμενο μέσο σε πραγματικές συνθήκες (π.χ. στην περιοχή της Αθήνας) και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (π.χ. ολόκληρη τη μέρα) θα απέδιδε ρεαλιστικότερα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

1. “Θερμικά–ηλιακά Συστήματα μέρος πρώτο”, (Κ.Α. Αντωνόπουλος, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004)
2. “Φυσική της ατμόσφαιρας”, (Α. Μπάη, Δ. Μπουλή, Κ. Τουρπάλη, Θεσσαλονίκη 2011)
3. “Solar thermal collectors and applications”, (Soteris A. Kalogirou)
4. “Solar engineering of thermal processes”, (2nd edition, T.A. Puffie, W.A. Beckman, Wiley 1991)
5. “Συμβατικές & Ήπιες μορφές ενέργειας”, (Κ.Α. Μπαλάρας, Α.Α. Αργυρίου, Φ.Ε. Καραγιάννη, Αθήνα 2006)
6. “Solar energy: Fundamentals in building a design”, (B. Anderson, New York: Mc Graw-Hill; 1977)
7. www.worldwatch.org
8. Dincer J., Energy and environmental impacts: present and future perspectives. Energy Sources;1998
9. Dincer I., Environmental impacts of energy. Energy Policy;1998
10. Dincer I., Rosen M., A worldwide perspective on energy, environment and sustainable development. Int J Energy Res;1998
11. Meinel AB, Meinel MP. Applied solar energy: an introduction. Reading, MA:Addison-Wesley;1976
12. Kreider JF, Kreith F., Solar heating and cooling. New York: Mc Graw-Hill; 1977
13. Kalogirou S. Solar water heating in Cyprus. Current status of technology and problems. Renewable Energy;1997
14. ASHRAE Handbook of HVAC Applications, Atlanta;1995
15. Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Nousia Th., Solar Collectors with coloured absorbers, Solar Energy;2000
16. Mills DR, Giutronich JE, Asymmetrical non-imaging cylindrical solar concentrators. Solar Energy;1978
17. “An evaluation on thermal performance of CPC solar collector”, Young Kim, Gui Young Han, Taebeom Seo, International Communications in Heat and Mass Transfer;2008
18. Kalogirou S., Eleftheriou P., Lloyd S., Ward J., Design and performance characteristics of a parabolic trough solar collector system, Appl. Energy;1994
19. Romeo M., Buck R., Pacheco JE, An update on solar central receiver systems projects and technologies. Solar Energy Engng;2002
20. Francia G, Pilot plants of solar steam generation systems. Solar Energy;1968
21. “High power solar installations”, Baum V.A., Solar Energy;1957
22. Pitz-Paal R., Concentrating solar technologies: the key to renewable electricity and process heat for a wide range of applications. Proceedings of the World Renewable Energy Congress VII on CD-ROM, Cologne, Germany;2002
23. Kalogirou S., Solar Energy utilization using parabolic trough collectors in Cyprus. MPhil Thesis.The Polytechnic of Wales;1991

24. Vasquez-Padilla R., Simplified methodology for designing parabolic trough solar power plants, PhD dissertation, University of South Florida, Tampa FL;2011
25. Lippke F., Simulation of the part-load behavior of a 30MWe SEGS plant, SAND-95-1293, Sandia National Labs, Albuquerque, NM, United States;1995
26. Zarza Moya 2012
27. Das SK, Putra N., Thiesen P., Roetzel W., Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. ASME Journal of Heat transfer
28. Eastman JA, Phillpot, Choi SUS, Keblinski K., Thermal transport in nanofluids
29. Eric DK, Engines of creation. 4th edition. London:Oxford Press;1986
30. Maxwell JC, A treatise on electricity and magnetism, vol.1, UK:Oxford
31. Moraveji MK, Darabi M., Haddad SMH., Pavarnejad R., Modeling of convective heat transfer of a nanofluid in the developing region of tube flow with computational fluid dynamics
32. Teng T-P, Hung Yi-H, Teng T-C, Mo H-E, Hsu H-G, The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. Appl Energy;2010
33. Zeinali Herris S., Etemad SG, Esfahany M Nasr, Experimental Investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. Int Commun Heat Mass Transf
34. J.C. Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, second ed, Clarendon Press, Oxford, UK 1881
35. Y. Xuan, Q. Li, Investigation of convective heat transfer and flow features of nanofluids. J. Heat Transf
36. G.K.Batchelor, The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles, J. Fluid Mech.
37. E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, G. Gkinis, Thermal enhancement of solar parabolic trough collectors by using nanofluids and converging-diverging absorber tube, Renewable Energy, Volume 94, August 2016
38. Kalogirou A.S., Solar Thermal Collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science
39. Kotas JJ, The Exergy Method of Thermal Plant Analysis; Krieger Publish Company: Malabar, FL, USA, 1995
40. Bejan A., Advanced Engineering Thermodynamics; Wiley Interscience: New York, NY, USA, 1988
41. R. Petela, Exergy analysis of solar radiation, (Chapter 2) in N. Enteria, A. Akbarzadeh (Eds.), Solar Thermal Sciences and Engineering Applications, CRC Press, Taylor & Francis Group 2013
42. S. Kalogirou, Solar Energy Engineering, edited by Soteris A. Kalogirou, Academic Press, Boston, 2009
43. J. Leinhard IV, J. Leinhard V, A Heat Transfer Textbook.4th edition. USA: Philogiston Press

44. Y. Xuan, Q. Li, Investigation of convective heat transfer and flow features of nanofluids, J. Heat Transf
45. R. Forristall, Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver
46. Solutia, Thermanal VP-1, Heat Transfer Fluid