

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



**Σχεδιασμός και προσομοίωση πρότυπου επίπεδου ηλιακού
συλλέκτη με ομοαξονικό σύστημα ροής**

Χρήστος Λίνδος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017

Ευχαριστίες











Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Τζιβανίδη για τη βοήθειά του και για την ευκαιρία της ανάθεσης της μελέτης του παρόντος θέματος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτριο Κορρέ για τη συνεργασία, καθώς και για τις συμβουλές που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Ευχαριστώ, επιπλέον, το μεταδιδακτορικό ερευνητή Ευάγγελο Μπέλλο που με τις συμβουλές του και τη βοήθειά του με κατεύθυνε στο σωστό δρόμο.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την απaráμιλλη στήριξη και κατανόησή τους σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και γενικότερα των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	IX
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	1
1.1 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΜΕΡΑ	1
1.1.1 Γενικά	1
1.1.2 Ορυκτά καύσιμα	3
1.1.3 Πυρηνική Ενέργεια.....	4
1.1.4 Υδροηλεκτρική Ενέργεια.....	6
1.1.5 Αιολική Ενέργεια.....	7
1.1.6 Ηλιακή Ενέργεια	8
1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	11
1.2.1 Ηλιακή σταθερά	11
1.2.2 Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμοσφαιράς.....	12
1.2.3 Ορισμοί.....	13
1.3 ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ.....	15
1.3.1 Γενικά	15
1.3.2 Αριθμός Reynolds	15
1.3.3 Αριθμός Prandtl.....	16
1.3.4 Αριθμός Nusselt	17
1.4 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ	18
1.4.1 Γενικά	18
1.4.2 Κύρια τμήματα, χαρακτηριστικά λειτουργίας κι εφαρμογές.....	19
1.4.3 Εξίσωση λειτουργίας του συλλέκτη	21
1.4.4 Θερμικές απώλειες του συλλέκτη.....	22
1.4.5 Παράγοντας θερμικής απολαβής του συλλέκτη.....	27
1.4.6 Βαθμός απόδοσης του συλλέκτη	28
1.5 ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΚΕΝΟΥ	28
1.5.1 Γενικά	28
1.5.2 Κύρια τμήματα, χαρακτηριστικά λειτουργίας κι εφαρμογές.....	29
1.5.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	31
2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ SOLIDWORKS	33
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	33
2.2 ΈΝΑΡΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	33
2.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΤΟΛΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ.....	34

2.4	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ	35
2.4.1	Εντολή Line ().....	36
2.4.2	Εντολή Circle ().....	36
2.4.3	Εντολή Smart Dimension ().....	37
2.4.4	Εντολή Trim Entities ().....	38
2.4.5	Εντολή Offset Entities ().....	39
2.4.6	Εντολή Mirror Entities ().....	40
2.5	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΕΡΕΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ	41
2.5.1	Εντολή Extruded Boss/Base ().....	42
2.5.2	Εντολή Revolved Boss/Base ().....	44
2.5.3	Εντολή Swept Boss/Base ().....	46
2.5.4	Εντολή Extruded Cut ().....	47
3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΡΟΗΣ.....	51
3.1	ΤΜΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	51
3.2	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΠΙΣΘΙΑΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ	51
3.3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ	56
3.4	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΓΙΑΣ ΜΟΝΩΣΗΣ	62
3.5	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΛΑΜΑΡΙΝΑΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	65
3.6	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ	66
3.7	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ	68
4	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΣΤΟ FLOW SIMULATION	71
4.1	ΓΕΝΙΚΑ	71
4.2	ΈΝΑΡΞΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	71
4.3	ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΟΥ FLOW SIMULATION	72
4.3.1	Ορισμός του συστήματος μονάδων.....	72
4.3.2	Είδος της ανάλυσης.....	73
4.3.3	Ορισμός των ρευστών και των υλικών	74
4.3.4	Συνθήκες τοιχώματος.....	76
4.3.5	Υπολογιστικό πλέγμα	76
4.3.6	Υποτομέας ρευστού.....	79
4.3.7	Ορισμός των στερεών υλικών.....	80
4.3.8	Ορισμός των επιφανειών που ακτινοβολούν	80
4.3.9	Οριακές συνθήκες	81
4.3.10	Στόχοι.....	83
4.4	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	84
5	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	87
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	87
5.2	ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΕ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	88

5.3	ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.....	88
5.4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ.....	89
5.4.1	<i>Διατύπωση του προβλήματος.....</i>	89
5.4.2	<i>Αποτελέσματα και Συμπεράσματα</i>	91
5.5	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ	102
5.5.1	<i>Ενεργειακός ισολογισμός στα τμήματα της σωλήνωσης.....</i>	102
5.5.2	<i>Αποτελέσματα και Συμπεράσματα</i>	103
5.6	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	107
5.6.1	<i>Διατύπωση του προβλήματος.....</i>	107
5.6.2	<i>Αποτελέσματα και Συμπεράσματα</i>	107
5.7	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	119
5.7.1	<i>Διατύπωση του προβλήματος.....</i>	119
5.7.2	<i>Αποτελέσματα και Συμπεράσματα</i>	119
5.8	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ	129
5.8.1	<i>Διατύπωση του προβλήματος.....</i>	129
5.8.2	<i>Αποτελέσματα και Συμπεράσματα</i>	130
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	135
6.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	135
6.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	136
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	137
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	140

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με ομοαξονικό σύστημα ροής, με στόχο τον προσδιορισμό και τη βελτίωση του βαθμού απόδοσής του, καθώς και την ευελιξία του ως προς διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Στην εν λόγω ανάλυση περιλαμβάνεται ο σχεδιασμός του συλλέκτη στο περιβάλλον του προγράμματος SolidWorks κι η προσομοίωσή του με τη βοήθεια της πλατφόρμας SolidWorks Flow Simulation.

Στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφεται η επικρατούσα ενεργειακή κατάσταση στη σύγχρονη εποχή και σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ αναφέρονται κι οι κυριότερες μορφές ενέργειας του πλανήτη, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, αναλύονται κάποιες βασικές έννοιες της ηλιακής ενέργειας κι επισημαίνονται τα βασικότερα στοιχεία τόσο για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη όσο και για το συλλέκτη κενού, στον οποίο χρησιμοποιείται εκτενώς το ομοαξονικό σύστημα ροής. Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται αναλυτικά οι βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του συλλέκτη στο πρόγραμμα, ενώ ο σχεδιασμός του ορίζεται διεξοδικά στο τρίτο κεφάλαιο, με τη διαδικασία πραγμάτωσης της προσομοίωσής του να καταλαμβάνει το τέταρτο κεφάλαιο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται λεπτομερώς οι διαφορετικές συνθήκες λειτουργίες υπό τις οποίες εξετάστηκε ο συλλέκτης κι ακολουθούν κάποια σχόλια και συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, βρέθηκε πως η μικρότερη διάμετρος σωλήνωσης είναι πιο αποδοτική, καθώς για μία τυπική θερμοκρασία εισόδου στο συλλέκτη, 50°C, παρουσίασε θερμικό βαθμό απόδοσης 41.06%, έναντι 37.88% της μεγαλύτερης διαμέτρου. Επιπλέον, υπολογίστηκε υψηλότερος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στην πρώτη γεωμετρία έναντι της δεύτερης, ενώ η μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας μείωσε την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη, περιορίζοντας παράλληλα και τις απώλειές του. Ο συλλέκτης παρουσίασε αύξηση του βαθμού απόδοσής του με την αύξηση της γωνίας κλίσης του, καθώς περιορίζεται το φαινόμενο της φυσικής συναγωγής του αέρα εντός του διακένου του. Αναφέρεται συγκεκριμένα πως για την ίδια θερμοκρασία εισόδου, η διαφορά από μηδενική γωνία κλίσης έως τις 60° κυμαίνεται από 0.5% έως 5%. Τελευταία παράμετρος αποτέλεσε η παροχή μάζας, για την κάθε τιμή της οποίας υπολογίστηκε η πτώση πίεσης εντός του συλλέκτη, με την χρησιμοποιούμενη αρχικώς παροχή, 0.004 kg/s, να δείχνει καλό συνδυασμό του βαθμού απόδοσης και της πτώσης πίεσης, η οποία πρέπει κατά το δυνατόν να περιοριστεί, καθώς αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό για μεγαλύτερες τιμές της παροχής. Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο, επισημαίνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη μελέτη, καθώς και πιθανοί τομείς μελλοντικής έρευνας.

Abstract

The main object of this diploma thesis is the study of a flat-plate solar collector with a coaxial flow system in order to determine and optimize its thermal efficiency, as well as its versatility regarding various operation conditions. The current analysis includes the design of the collector by using the program SolidWorks and its simulation with the program's platform, SolidWorks Flow Simulation.

In the first chapter, the current global energy state is described and the planet's most significant forms of energy are mentioned, along with their primary elements. Moreover, the basic concepts of solar energy are analyzed and the most common characteristics of the flat-plate solar collector and the evacuated tube collector, in which the coaxial flow system is often used, are referred to. In the second chapter, the commands used for the design of the collector in the program are mentioned, with the design itself occupying the third chapter, while the fourth chapter deals with the collector's simulation implementation.

Throughout the fifth chapter, the collector's operation under the various conditions is described in detail, followed by some comments and conclusions. More specifically, the smaller of the two diameters proved to lead to higher thermal efficiency, since, for a typical inlet water temperature to a solar collector, 50°C, it exhibited a thermal efficiency equal to 41.06%, compared to 37.88% which the bigger diameter showed. Furthermore, in the first geometry, a higher heat transfer coefficient than the second geometry was estimated, while the reduction of the solar intensity in the next section led to lower useful energy, despite reducing the collector's heat losses at the same time. The results showed an increment in the collector's efficiency with the increase of its tilt angle, due to the reduction of the air's natural convection phenomenon inside the collector. Referring to the same inlet water temperature, the efficiency increase varied from 0.5% to 5%, between the zero and the sixty degrees tilt angles. The final parameter examined was the mass flow through the collector, as well as the pressure loss for each value. The initial mass flow value used, 0.004 kg/s, showed a fairly decent combination of high efficiency as well as relatively low pressure loss, the last of which has to be contained, due its high increase rate as the mass flow values becomes greater. In the sixth and final chapter, certain conclusions from the whole analysis are mentioned and some topics for future study are proposed.

Επεξήγηση Συμβόλων

Μεγέθη

A	Επιφάνεια, m^2
A_c	Συλλεκτική επιφάνεια, m^2
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού, J/kgK
D	Διάμετρος, m
F_R	Παράγοντας θερμικής απολαβής, -
e	Σχετική τραχύτητα του σωλήνα, -
f	Συντελεστής τριβής, -
G	Συνολική ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιας επιφανείας, W/m^2
G_b	Άμεση ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιας επιφανείας, W/m^2
G_d	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιας επιφανείας, W/m^2
G_{on}	Κάθετη ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμοσφαιράς, W/m^2
G_{sc}	Ηλιακή σταθερά, W/m^2
G_T	Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, W/m^2
h	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, W/m^2K
k	Θερμική αγωγιμότητα, W/mK
L	Μήκος, m
m	Παροχή μάζας, kg/s
Nu	Αριθμός Nusselt, -
Pr	Αριθμός Prandtl, -
Q	Θερμική ισχύς, W
q	Θερμορορή, W/m^2
Re	Αριθμός Reynolds, -
S	Απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία, W/m^2
T	Θερμοκρασία, $^{\circ}C$
U	Συντελεστής θερμικών απωλειών, W/m^2K
u	Ταχύτητα, m/s

Ελληνικά σύμβολα

α	Απορροφητικότητα, -
α_s	Ηλιακό ύψος, $^{\circ}$
β	Γωνία κλίσης, $^{\circ}$

γ	Αζιμούθιο επιφανείας, °
ϵ	Συντελεστής εκπομπής, -
θ_z	Γωνία ζενίθ, °
η	Θερμικός βαθμός απόδοσης, -
μ	Δυναμική συνεκτικότητα, Ns/m ²
ν	Κινηματική συνεκτικότητα, m ² /s
ρ	Πυκνότητα, kg/m ³
σ	Σταθερά Stefan-Boltzmann, W/m ² K ⁴
τ	Διαπερατότητα, -

Δείκτες

a	Περιβάλλον
a_n	Εξωτερικός σωλήνας, δακτύλιος
b	Οπίσθια πλευρά του συλλέκτη
c	Κάλυμμα
c_{ap}	Εξωτερική πλευρά του εξωτερικού σωλήνα
c_i	Εσωτερική πλευρά του καλύμματος
c_o	Εξωτερική πλευρά του καλύμματος
e	Πλάγια πλευρά του συλλέκτη
f	Ρευστό
i, in	Είσοδος
L	Θερμικές απώλειες
m	Μέση τιμή
o, out	Έξοδος
p	Πλάκα απορρόφησης
s	Εσωτερικό τοίχωμα
t	Κορυφή του συλλέκτη & Εσωτερικός σωλήνας, διανομέας
th	Θεωρητική τιμή
u	Ωφέλιμο
w	Αέρας
1	Εσωτερικός σωλήνας, διανομέας
2	Εξωτερικός σωλήνας, δακτύλιος

1 Εισαγωγή στην Ηλιακή Ενέργεια

1.1 Η ενεργειακή κατάσταση σήμερα

1.1.1 Γενικά

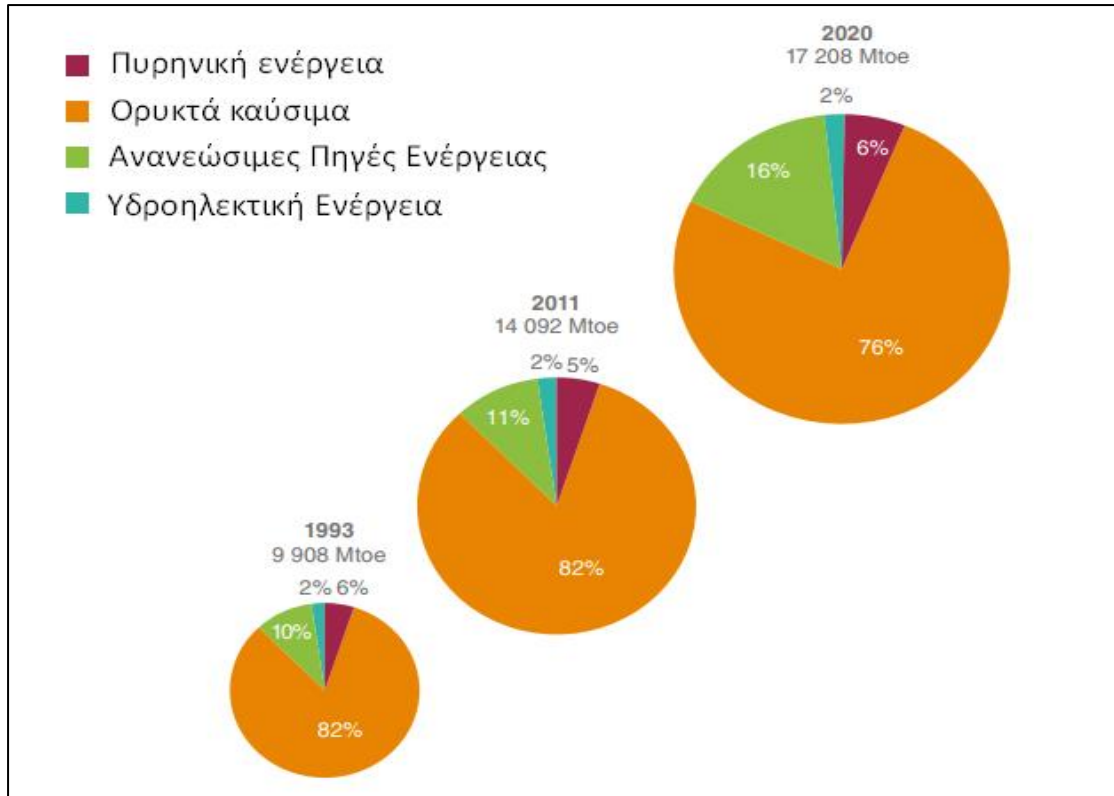
Η ενέργεια αποτελεί ένα σημαντικό δείκτη για κάθε χώρα όσον αφορά τόσο το βιοτικό της επίπεδο όσο και τη διεκπεραίωση όλων των απαραίτητων λειτουργιών της. Η ενέργεια καθίσταται εκμεταλλεύσιμη σε δύο κυρίως μορφές, είτε μέσω των υγρών καυσίμων, που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για τις μεταφορές, είτε με τη μορφή ηλεκτρισμού για την καθημερινή ζωή των πολιτών, όπως για προσωπικούς υπολογιστές, φωτισμό, τηλεόραση και κλιματισμό [1].

Τις τελευταίες δεκαετίες η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση παρουσιάζει ραγδαία αύξηση συγκριτικά με παλιότερα. Αυτό το γεγονός οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες:

- στην αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού της Γης λόγω της βελτίωσης του παγκόσμιου βιοτικού επιπέδου και της ποιότητας ζωής
- στην αύξηση της ζήτησης της ενέργειας ανά κεφαλή σε παγκόσμια κλίμακα, καθώς αγροτικές κι αναπτυσσόμενες χώρες εξελίσσονται σε ανεπτυγμένες και πιο εύπορες [2]

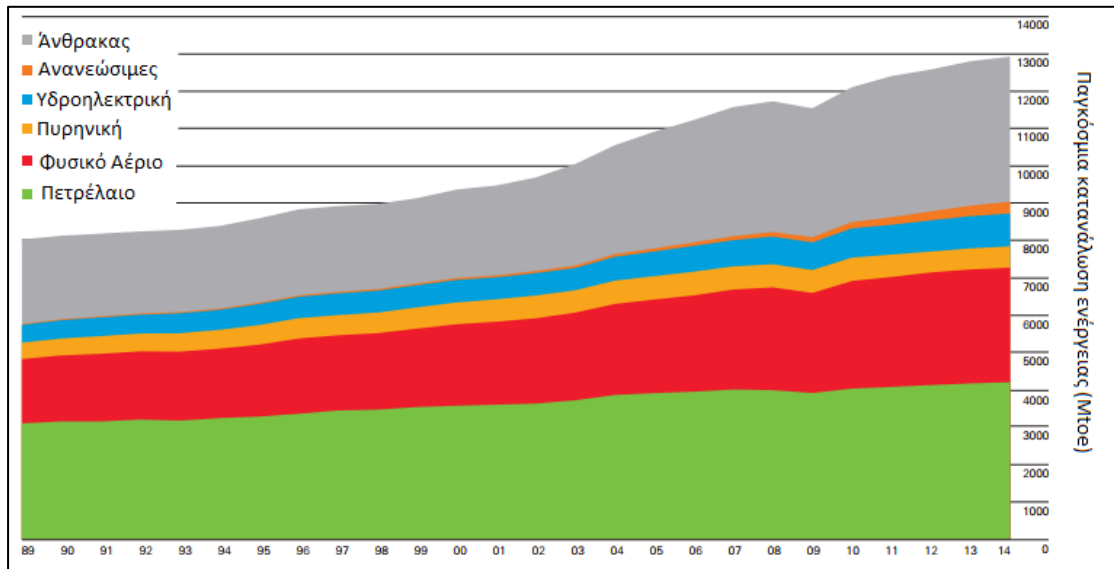
Η προαναφερθείσα αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή ενέργειας φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.1., όπου η επιφάνεια των εκάστοτε διαγραμμάτων είναι ανάλογη του μεγέθους της ενέργειας, μετρημένης σε εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (1 Mtoe = 11630 kWh). Η διαφορά ανά είκοσι περίπου χρόνια είναι έντονη, καθώς φαίνεται μεγάλη αύξηση από το έτος 1993 στο 2011 κι από το 2011 στην εκτίμηση για το 2020.

Τις τελευταίες δεκαετίες επιπλέον έχει καταγραφεί αξιοσημείωτη στροφή στον τρόπο παραγωγής της ενέργειας και κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε παγκόσμια κλίμακα προς τις ανανεώσιμες πηγές, κυρίως την αιολική και την ηλιακή ενέργεια. Μέρος των ανανεώσιμων πηγών αποτελεί κι η υδροηλεκτρική ενέργεια, η οποία κατέχει σημαντικό μερίδιο στην παραγωγή ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες, όπως φαίνεται και στο κάτωθι σχήμα:



Σχήμα 1.1.1: Παγκόσμια παραγωγή ενέργειας για διάφορες πηγές [3]

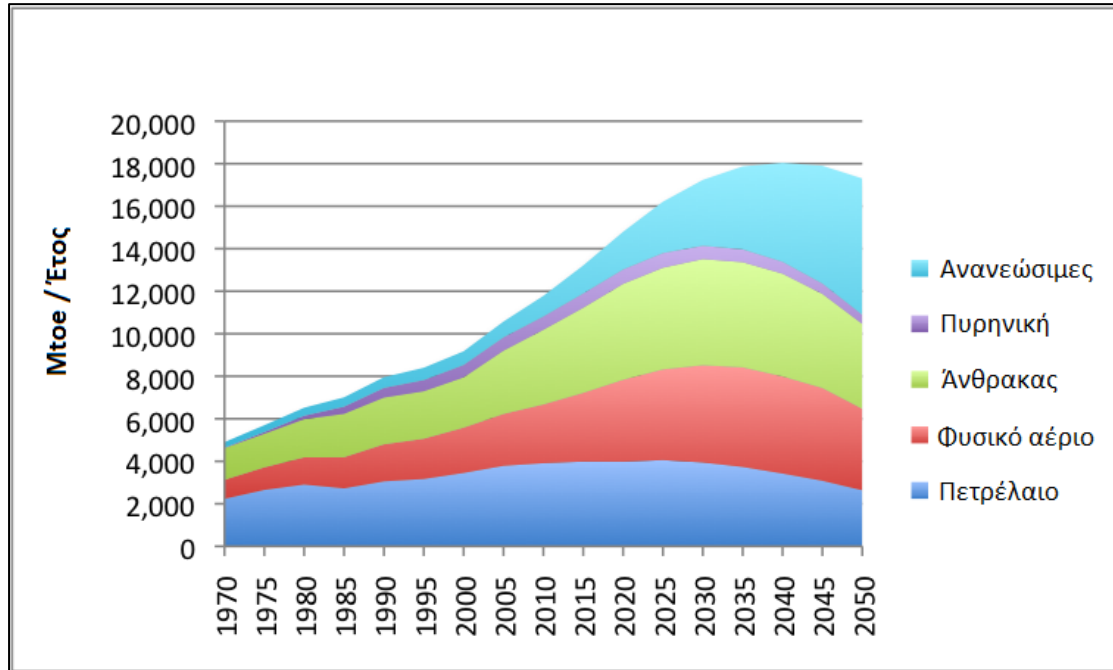
Όπως διακρίνεται στο ακόλουθο σχήμα, το Σχήμα 1.1.2, τις δύο τελευταίες δεκαετίες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πέραν της υδροηλεκτρικής, παρουσιάζουν σταθερή αύξηση στο μερίδιο της παγκόσμιας κατανάλωσης.



Σχήμα 1.1.2: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας [4]

Λόγω της επίγνωσης που σταδιακά αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια όσον αφορά τα ορυκτά καύσιμα και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η παγκόσμια κοινότητα έχει θεσπίσει πολιτικές και κίνητρα, όπως μειωμένη φορολογία, για την χρήση

καθαρών πηγών ενέργειας. Με σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου και τη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, οι τεχνολογίες αυτές αναμένεται να παίξουν ολοένα και σημαντικότερο ρόλο εντός των επόμενων δεκαετιών και να αναδιαμορφώσουν τον τρόπο παραγωγής ενέργειας ανά την υφήλιο. Μία τέτοια πρόβλεψη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.1.3: Πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας έως το 2052 [5]

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν σύντομα οι σημαντικότεροι τρόποι παραγωγής ενέργειας σήμερα, τονίζοντας κάποια χαρακτηριστικά τους έναντι άλλων και λόγους προτίμησης αυτών.

1.1.2 Ορυκτά καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα είναι η κύρια πηγή ενέργειας σε όλο τον κόσμο στη σύγχρονη εποχή, καθώς έχουν σημαντικά θετικά στοιχεία. Μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρισμού σε μία δεδομένη εγκατάσταση, καθώς η μεταφορά τους είναι εύκολη. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργούν με ψηλούς βαθμούς απόδοσης, ψηλότερους από τις παρούσες ανανεώσιμες πηγές, ενώ η κατασκευή ενός εργοστασίου που λειτουργεί με αυτά είναι υλοποιήσιμη σχεδόν παντού.

Αν και, όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.1.1, περίπου το 80% της ενέργειας ανά τον κόσμο σήμερα είναι βασισμένη σε αυτά, η χρήση των ορυκτών καυσίμων σχετίζεται άμεσα με διάφορους κινδύνους. Ο σημαντικότερος εξ αυτών είναι η μόλυνση του ατμοσφαιρικού αέρα με διάφορες επιβλαβείς ουσίες, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο συμβάλλει στην κλιμάκωση του φαινομένου του θερμοκηπίου,

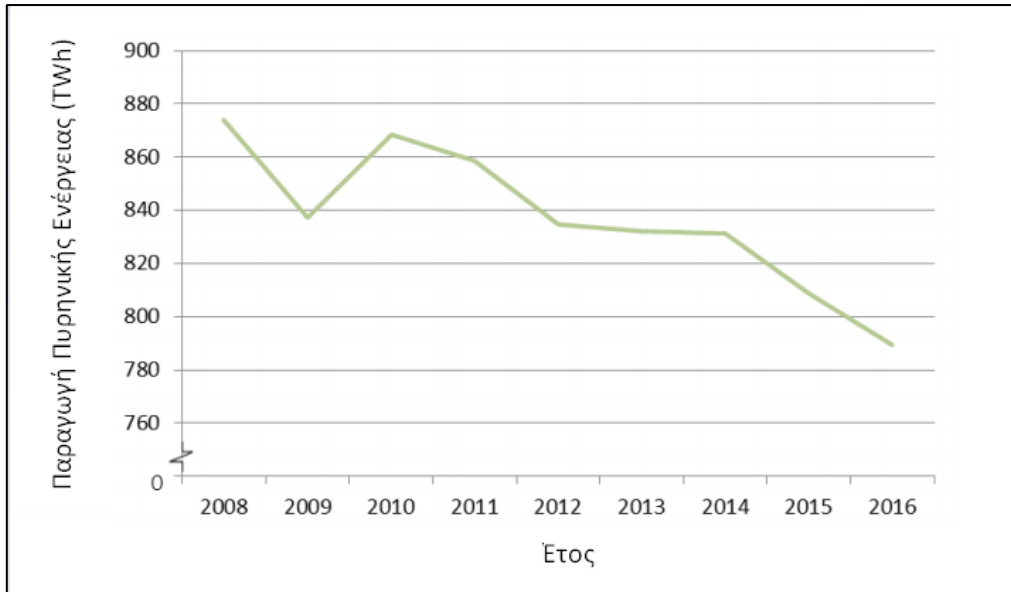
το διοξείδιο του θείου, που μπορεί να προκαλέσει όξινη βροχή, και τα οξειδία του αζώτου, που συμβάλλουν στο φωτοχημικό νέφος.

Ένα ακόμη σοβαρό μειονέκτημα των ορυκτών καυσίμων είναι το γεγονός πως δεν είναι ανανεώσιμα, καθώς υπάρχουν σε συγκεκριμένες ποσότητες κι αναμένεται να καταναλωθούν πλήρως σε μερικές δεκαετίες. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Ενεργειακή Επιτροπή (World Energy Council), η ζήτηση για τα ορυκτά καύσιμα, ξεκινώντας από το πετρέλαιο, αναμένεται να ξεπεράσει την αντίστοιχη παραγωγή στις επόμενες δύο δεκαετίες, επιφέροντας επίσης σημαντικές κοινωνικές κι οικονομικές επιπτώσεις ανά την υφήλιο. Έλλειψη ορυκτών καυσίμων πιθανώς να πυροδοτήσει διεθνείς συγκρούσεις και κρίσεις μεταξύ των χωρών που συνεργάζονται για την παραγωγή και διανομή αυτών. Ακόμη, η χρήση ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα καυσαερίων στην ατμόσφαιρα, όπως διοξείδιο του άνθρακα, οξειδία του αζώτου κι άλλα, που επηρεάζουν την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα τόσο σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο [3].

1.1.3 Πυρηνική Ενέργεια

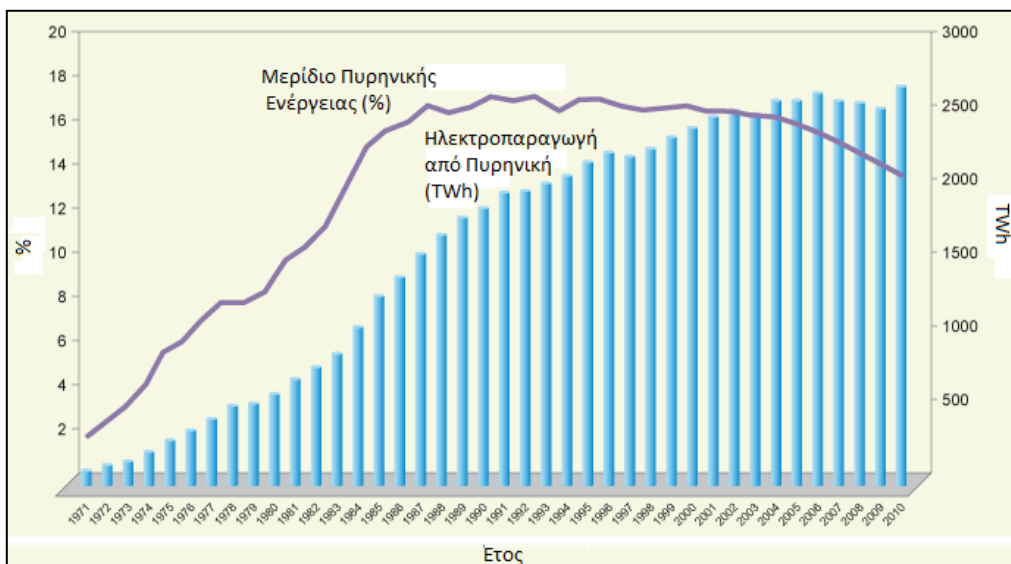
Μία άλλη αξιοσημείωτη μορφή ενέργειας είναι η πυρηνική. Σε γενικές γραμμές, είναι μια αξιόπιστη μορφή ενέργειας ως προς την απόδοση και την παραγωγή έργου, ενώ το γεγονός πως δεν απελευθερώνει αέρα θερμοκηπίου την καθιστά ανταγωνιστική εδώ και πολλά χρόνια. Ωστόσο, τα απόβλητα που παράγονται, αν και μικρές ποσότητες συγκριτικά με την παραγόμενη ισχύ, είναι πολύ τοξικά και πρέπει να αφεθούν να χάσουν τη ραδιενέργειά τους, συνήθως θαμμένα υπογείως. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος της πυρηνικής ενέργειας έγκειται στα πυρηνικά ατυχήματα, κατά τα οποία η ομαλή λειτουργία ενός σταθμού διακόπτεται από κάποια σημαντική βλάβη και συνήθως υπάρχει διαρροή της ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Ατυχήματα όπως στο Chernobyl τα 1986 και στη Fukushima το 2011 οδήγησαν στη σταδιακή μείωση της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, αν κι υπάρχουν ακόμα πολλοί ενεργοί σταθμοί ανά τον κόσμο.

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται η τάση παραγωγής της πυρηνικής ενέργειας στην Ευρώπη, ως απόρροια των πυρηνικών ατυχημάτων πρώτα του Chernobyl κι έπειτα και στη Fukushima:



Σχήμα 1.1.4: Ετήσια παραγωγή πυρηνικής ενέργειας στην Ευρώπη [6]

Σημειώνεται πως η πυρηνική ενέργεια, αν και φθίνουσα σε ευρωπαϊκό επίπεδο, παραμένει σχετικά σταθερή ή ακόμα κι αυξάνεται σε παγκόσμιο, λόγω των υπό κατασκευή σταθμών και λόγω του γεγονότος ότι η διάρκεια ζωής ενός πυρηνικού σταθμού ανέρχεται περίπου στα 20 με 30 χρόνια. Ωστόσο, η ελαφρά αυτή αύξηση λαμβάνει χώρα με μικρότερο ρυθμό από την αύξηση της ζήτησης για περισσότερη ενέργεια ανά τον κόσμο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως και, κατά συνέπεια, ακόμη και το παγκόσμιο μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας μειώνεται, όπως φαίνεται και παρακάτω στο Σχήμα 1.1.5:

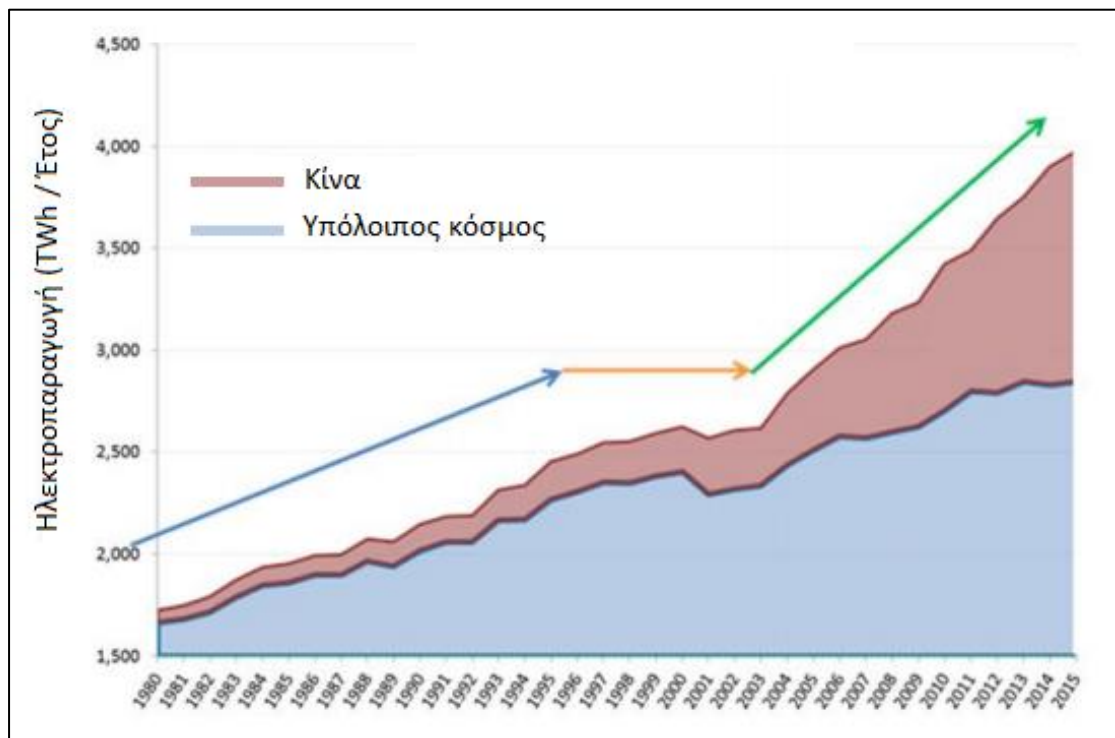


Σχήμα 1.1.5: Παγκόσμια παραγωγή πυρηνικής ενέργειας [7]

1.1.4 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μία πηγή παραγωγής ηλεκτρισμού εδώ κι αρκετά χρόνια. Το «καύσιμο», στην ουσία το νερό, είναι δωρεάν προσφερόμενο από τη φύση, ενώ είναι κι ανανεώσιμο, καθώς ο κύκλος του νερού αποτελεί ένα διηλεκές κι ακατάπαυστο φαινόμενο. Επιπροσθέτως, αποτελεί πλέον μία δοκιμασμένη κι αξιόπιστη μορφή ενέργειας, όπου οι σχετικές τεχνολογίες έχουν μελετηθεί εκτενώς και βελτιστοποιηθεί, ενώ συμβάλει σημαντική στην άμβλυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς δεν παράγονται καθόλου καυσαέρια. Θεωρείται η πιο αξιόπιστη από τις ανανεώσιμες πηγές και μπορεί να καλύψει και φορτία βάσης, πέραν αυτών της αιχμής, αποτελώντας το 71% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε παγκόσμια κλίμακα. [3]

Ωστόσο, στα μειονεκτήματά της συγκαταλέγονται τα υψηλά κόστη αρχικής κατασκευής, κάνοντας τα φράγματα μία σημαντική επένδυση, που απαιτεί λεπτομερές σχεδιασμό. Επιπροσθέτως, τα οικοσυστήματα επί των οποίων κατασκευάζονται τα φράγματα δυσχεραίνονται, καθώς ανάντη του φράγματος σχηματίζεται μία μεγάλης έκτασης λίμνη και εμποδίζονται τα θρεπτικά συστατικά των οχθών να περάσουν και κατόντη του φράγματος, οπότε υποβαθμίζεται το νερό που διέρχεται μέσω του φράγματος για τους οργανισμούς τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά.



Σχήμα 1.1.6: Ηλεκτροπαραγωγή από υδροηλεκτρική ενέργεια [8]

Από το παραπάνω σχήμα, τα διαφορετικού χρώματος βέλη εκφράζουν τους διαφορετικούς ρυθμούς αύξησης κατά την περίοδο ανάπτυξης της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, φαίνεται η αύξηση με το μπλε βέλος που αναπαριστά την αρχική δημοτικότητα της υδροηλεκτρικής ενέργειας, ως απόρροια της αύξησης της ζήτησης της ενέργειας παγκοσμίως, κατά τη δεκαετία του 1980. Έπειτα, κατά τα μέσα της δεκαετίας του '90, επέρχεται μία σταθεροποίηση, η οποία οφείλεται στην αναθεώρηση κατά την κατασκευή και προτάσεις βελτίωσης απόδοσης των φραγμάτων, που οδήγησαν τις επενδύσεις σε στασιμότητα. Τέλος, η αύξηση από το 2005 κι έπειτα οφείλεται στην προαναφερθείσα στροφή προς τις ανανεώσιμες τεχνολογίες προς αποφυγή παραγωγής αερίων θερμοκηπίου αλλά κι απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα.

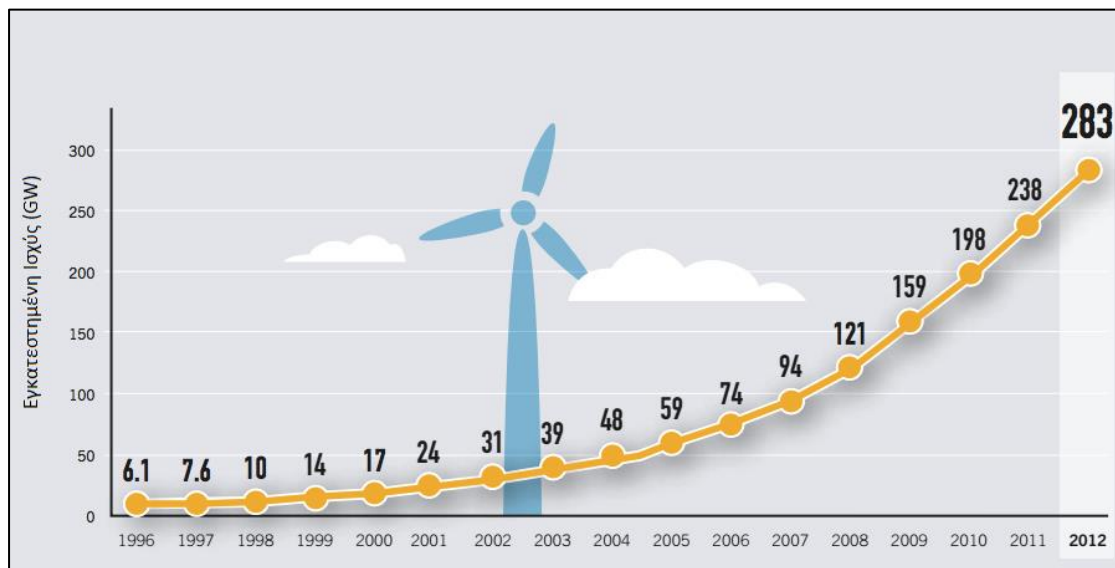
1.1.5 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις πλέον καινοτόμες πηγές ενέργειας από την οποία παράγεται ως επί το πλείστον ηλεκτρισμός, χωρίς ωστόσο αυτό να είναι απαραίτητο. Προέρχεται εμμέσως από την ηλιακή ενέργεια, καθώς ο άνεμος αποτελεί απόρροια των ζεστών και κρύων στρωμάτων του αέρα, καθώς τα πρώτα θερμαίνονται από την ηλιακή ακτινοβολία κι αλληλεπιδρούν θερμικά με τα δεύτερα. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία του ανέμου ο οποίος δύναται να κινήσει τις εγκατεστημένες στα κατάλληλα μέρη ανεμογεννήτριες και να παράγει ρεύμα.

Η αιολική είναι μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, οπότε όχι μόνο δε συμβάλει στην παραγωγή αερίων θερμοκηπίου και υπονόμευση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, αλλά το «καύσιμό» της, ο αέρας, είναι ατελείωτο. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματά της είναι η δυνατότητα παράλληλης εκμετάλλευσης των οικοπέδων επί των οποίων κατασκευάζονται οι ανεμογεννήτριες και για άλλες δραστηριότητες, όπως η γεωργία. Ακόμη, καθίσταται δυνατή η αποκέντρωση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το ρεύμα μπορεί να διανεμηθεί εκεί που παράγεται, στο τοπικό δίκτυο όπου κατασκευάζονται οι ανεμογεννήτριες, σημείο το οποίο εκτιμάται από την ύπαρξη σημαντικού αιολικού δυναμικού στην περιοχή.

Ωστόσο, η παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολικά πάρκα δεν είναι αξιόπιστη, καθώς εξαρτάται από τη συχνότητα, την κατεύθυνση και τα πλάτη του ανέμου, φαινόμενο στο οποίο υπεισέρχεται στοχαστικότητα. Επιπλέον, το αιολικό δυναμικό είναι συνήθως μέγιστο μακριά από τη στεριά και κυρίως σε θαλάσσιες περιοχές, λόγω της μικρής τύρβης με τη λεία επιφάνεια της θάλασσας. Ωστόσο, η σύνδεση με το δίκτυο μακριά από τη στεριά είναι δύσκολα υλοποιήσιμη κι ακριβή στην κατασκευή.

Παρά τα μειονεκτήματά της, όπως φαίνεται κι από το Σχήμα 1.1.7, τα τελευταία χρόνια η αιολική ενέργεια έχει σημειώσει ραγδαία αύξηση στην χρήση της για ηλεκτροπαραγωγή. Το έτος 2015, η συνολική παγκόσμια δυναμικότητα αιολικής ενέργειας έφτασε τα 435 GW, αναλογώντας σε 7% της συνολικής παγκόσμιας δυναμικότητας. Η Δανία το ίδιο έτος παρήγαγε το 42% των αναγκών της σε ηλεκτρισμό μόνο από αιολικά, φτάνοντας σε παγκόσμιο, για την ώρα, ρεκόρ. Η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων συνεχίζεται κι αναμένεται να αυξηθεί κι άλλο, με χώρες όπως η Κίνα που εγκατέστησε την περισσότερη ονομαστική ισχύ για το 2015, 33 GW, να συνεχίζουν να ανεξαρτητοποιούνται από τα ορυκτά καύσιμα. [3]



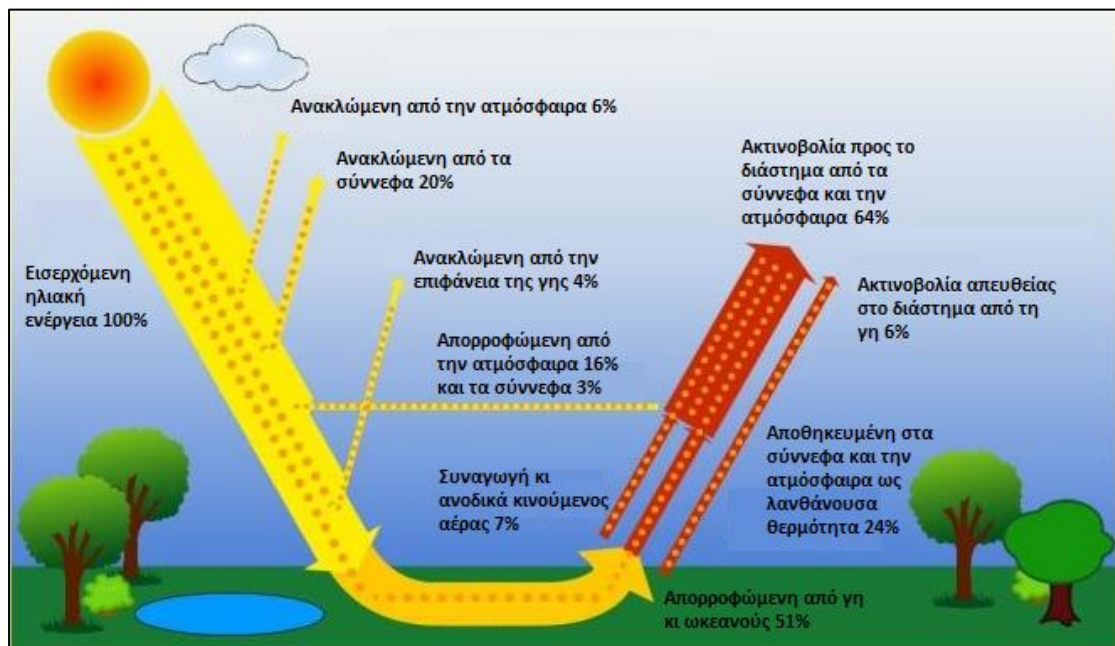
Σχήμα 1.1.7: Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά έτος [9]

1.1.6 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία μορφή ενέργειας υψίστης σημασίας με γνώμονα τα παραπάνω, καθώς όχι μόνο είναι ανανεώσιμη και δεν απελευθερώνει αέρια του θερμοκηπίου, αλλά αποτελεί και την πρωταρχική μορφή ενέργειας όλης της γης, καθώς όλες οι υπόλοιπες μορφές, όπως η αιολική ενέργεια κι η βιομάζα, είναι παραγόμενες από αυτήν. Ένας ακόμη λόγος που η ηλιακή ενέργεια καλείται να παίξει καθοριστικό ρόλο στην κάλυψη της παγκόσμιας ζήτησης είναι το μέγεθος της δυναμικότητάς της. Αποτελεί σε τάξη μεγέθους τη μεγαλύτερη πηγή ενέργειας για τη γη.

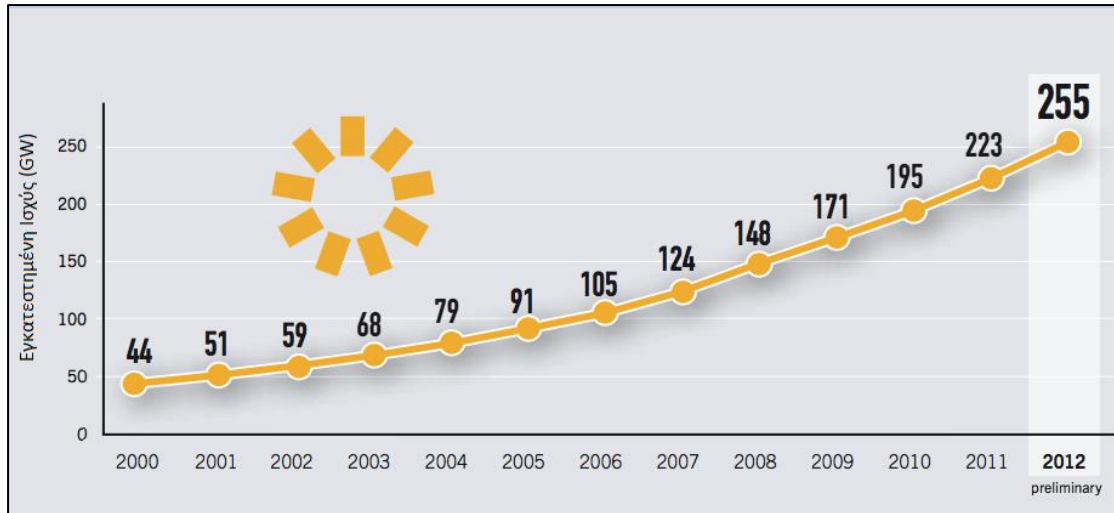
Ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολίας με ρυθμό 3.8×10^{23} kW το δευτερόλεπτο. Από τη συνολική αυτή εκπεμπόμενη ενέργεια, μόνο ένα μικρό τμήμα, περίπου $1.8 \cdot 10^{14}$ kW, δέχεται η γη, η οποία απέχει κατά μέσο όρο 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα από τον ήλιο. Από αυτό το ποσό ακτινοβολίας, περίπου το 60% , $1.08 \cdot 10^{14}$ kW, φτάνει στην επιφάνειά της γης, καθώς ένα μέρος από το

συνολικό απορροφάται από την ατμόσφαιρα, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται πίσω στο διάστημα. Ακόμη κι αν φαίνεται πως χάνεται ένα μεγάλο ποσό της αρχικής ενέργειας κατά τη μεταφορά της από τον ήλιο στη γη, η συνολική ετήσια ενέργεια που προσπίπτει στη γη είναι περισσότερες από 7500 φορές μεγαλύτερη από την παγκόσμια ετήσια κατανάλωση ενέργειας, η οποία ανέρχεται περίπου στα 450 EJ, δηλαδή $450 \cdot 10^{18}$ J. Επίσης, πάλι σε ετήσιο επίπεδο, η ενέργεια που καταφθάνει στην επιφάνεια της γης από τον ήλιο είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από κάθε άλλη μη ανανεώσιμη πηγή, συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών καυσίμων και της πυρηνικής ενέργειας.



Σχήμα 1.1.8: Ενεργειακό ισοζύγιο της γης [10]

Τα τελευταία χρόνια και λόγω των κινδύνων που αφορούν τα ορυκτά καύσιμα και την προστασία του περιβάλλοντος, έχει αυξηθεί η συνείδηση των πολιτών ανά τον κόσμο ως προς τη σημασία της παραγωγής ενέργειας από καθαρές πηγές, χωρίς την παραγωγή καυσαερίων. Έτσι, σε πολλές περιοχές του κόσμου φαίνεται τόσο η τάση για αλλαγή, όσο κι η σταδιακή υιοθέτηση αυτής σε τεχνικό επίπεδο. Παραδείγματος χάρη, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει πολιτικές και σχέδια, με βάση τα οποία μέχρι το 2020, θα παράγει το 20% της ενέργειάς της από ανανεώσιμες πηγές [3]. Από το 2005 μέχρι και το 2010, τα ηλιακά συστήματα έχουν σύνθετο ρυθμό ετήσιας ανάπτυξης της τάξεως του 65%. [9]



Σχήμα 1.1.9: Παγκόσμια εγκατεστημένη ηλιακή θερμική ισχύς ανά έτος [9]

Ως προς τα χαρακτηριστικά της παραγωγής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία, αυτή παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα. Αρχικά, η ενέργεια από τον ήλιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού, μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων, είτε για την παραγωγή θερμότητας ή κλιματισμού σε κάποιο χώρο, μέσω των ηλιοθερμικών συστημάτων. Στα ηλιακά θερμικά συστήματα εντάσσονται διάφορα είδη ηλιακών συλλεκτών, όπως οι απλοί επίπεδοι, ο συλλέκτης κενού κι οι παραβολοειδείς με κάτοπτρα, οι σημαντικότεροι εκ των οποίων θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα.

Η ηλιακή αποτελεί μία καθαρή μορφή ενέργειας από την άποψη ότι, εφόσον πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση των συλλεκτών, έπειτα η ατμόσφαιρα δε μολύνεται με κανέναν απολύτως τρόπο. Είναι επίσης ανανεώσιμη και βιώσιμη, καθώς ο ήλιος θα συνεχίσει να αποτελεί πηγή ενέργειας για ακόμη 6.5 δισεκατομμύρια χρόνια, σύμφωνα με τη NASA, οπότε μπορεί να τροφοδοτεί με ενέργεια και τις επόμενες γενιές, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία εκτιμάται να τελειώσουν σε μερικές δεκαετίες. Η εγκατάστασή τους καθίσταται εύκολα υλοποιήσιμη, καθώς δύνανται να τοποθετηθούν σε τάρτσες κι οροφές, εξοικονομώντας τόσο χώρο όσο και χρήματα, καθώς παράγεται παράλληλα κι ηλεκτρισμός ο οποίος μειώνει τα έξοδα των πολιτών κι αποτελεί ένα σημαντικό κίνητρο. Τέλος, η παραγωγή ενέργειας από τον ήλιο είναι τελείως αθόρυβη, μία διαφορά σε σχέση με την αιολική ενέργεια, ενώ τα πολύ χαμηλά κόστη συντήρησης και λειτουργίας την καθιστούν ολοένα και περισσότερο ανταγωνιστική [11].

Εμπεριέχονται, ωστόσο, και κάποια αξιοσημείωτα αρνητικά που αφορούν τη συγκεκριμένη πηγή. Παρά τα μικρά κόστη μετά την εγκατάσταση, τα αρχικά κόστη είναι ακόμη μεγάλα, αν και μειώνονται κάθε έτος. Για παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες, ένα μέσο σύστημα από άποψη ισχύος ανέρχεται περίπου στα 5 kW και

συνεπώς, έχοντας υπόψη την τιμή ανά kW περίπου στα \$3.16/W, το κόστος του μετά φόρων ανέρχεται στα \$11,060 [11]. Επιπλέον, είναι μία τεχνολογία που δε μπορεί να χαρακτηριστεί απολύτως αξιόπιστη, καθώς απαιτείται ηλιακή ακτινοβολία, συνθήκη που εξαρτάται από τους ακόλουθους τρεις παράγοντες:

- την τοποθεσία της περιοχής ως προς τον Ισημερινό και το κλίμα της, έχοντας μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ακτινοβολίας στις περιοχές επί αυτού
- την εποχή, έχοντας μεγιστοποίηση της ακτινοβολίας το καλοκαίρι
- την ώρα της ημέρας, όπου παράγεται ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά όχι το βράδυ.

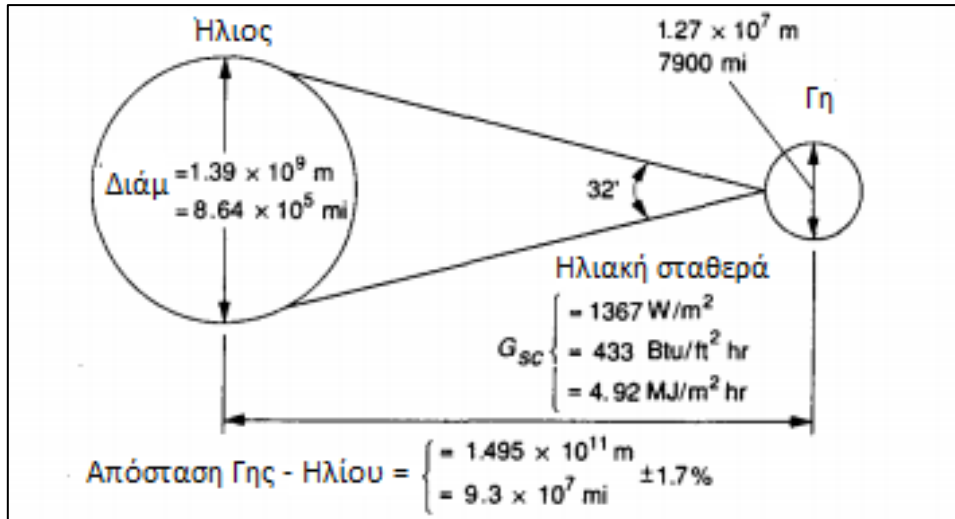
Για την αντιμετώπιση του παραπάνω φαινομένου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μπαταρίες για να αποθηκευτεί ενέργεια όσο αυτή υπάρχει σε αφθονία, όπως κατά τη διάρκεια της ημέρας, και να αποδοθεί το βράδυ. Ωστόσο, οι σύγχρονες μπαταρίες είναι βαριές κι ογκώδεις και απαιτούν μεγάλο χώρο για αποθήκευση. Επιπλέον, η αγορά τους κι η αλλαγή τους, όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο, προσθέτει επιπλέον κόστος [12].

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.3, στο μέλλον η ηλιακή ενέργεια κι οι υπόλοιπες ανανεώσιμες θα παίξουν ακόμη μεγαλύτερο ρόλο στην παγκόσμια κατανάλωση, καθώς οι τεχνολογίες θα συνεχίσουν να εξελίσσονται και οι αποδόσεις να βελτιώνονται, ενώ τα κόστη θα μειώνονται, οπότε κι οι ανανεώσιμες πηγές θα γίνονται ολοένα και πιο συμφέρουσες. Στη συνέχεια, αναφέρονται κάποιες παραπάνω λεπτομέρειες για την ηλιακή ενέργεια, η οποία αναμένεται να πρωταγωνιστήσει σε διάφορες εκφάνσεις κι εφαρμογές της, κατά τις επόμενες δεκαετίες.

1.2 Βασικές έννοιες

1.2.1 Ηλιακή σταθερά

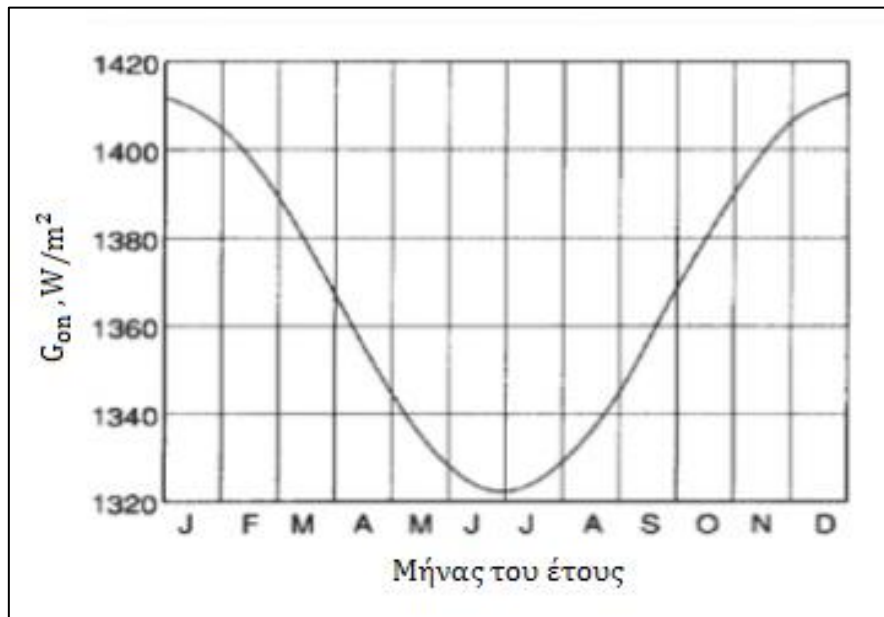
Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η σχετική θέση γης – ηλίου. Η εκκεντρότητα της τροχιάς της γης περί του ήλιου είναι τέτοια που η απόσταση μεταξύ τους διαφέρει από τη μέση τιμή, η οποία είναι $1.495 \cdot 10^{11}$ m, κατά 1.7%. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την ήλιο σε συνδυασμό με τη σχετική του θέση με τη γη έχουν ως συνέπεια μία σχεδόν σταθερή τιμή της έντασης της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας της γης. Η ηλιακή σταθερά, συμβολίζεται με G_{sc} κι ορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται από τον ήλιο μονάδα επιφάνειας εκτός ατμοσφαιράς που είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, όταν η απόσταση γης – ηλίου παίρνει τη μέση τιμή της. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ [13].



Σχήμα 1.2.1: Κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά γης – ηλίου [13]

1.2.2 Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμοσφαιράς

Η μεταβολή της απόστασης γης – ηλίου έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμοσφαιράς κατά $\pm 3\%$ από τη μέση τιμή της.



Σχήμα 1.2.2: Μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμοσφαιράς συναρτήσει των ημερών του έτους [13]

Η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο εκτός ατμοσφαιράς, κάθετο στις ακτίνες, συμβολίζεται με G_{on} και δίδεται από τη σχέση:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)\right) \quad (1.2.1)$$

, όπου n είναι η ημέρα του έτους και παίρνει τιμές από 1 έως 365 [13]. Η σχέση παρουσιάζεται και με τη μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 1.2.2.

1.2.3 Ορισμοί

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν κάποιοι βασικοί ορισμοί μεγεθών που αφορούν τη μελέτη του ηλιακού συλλέκτη:

Γωνία ζενίθ (θ_z) : Ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο, ευθεία κάθετη σε μια δεδομένη επιφάνεια, και την ευθεία όρασης του ηλίου

Ηλιακό ύψος (α_s) : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο, δηλαδή η συμπληρωματική της γωνίας ζενίθ:

$$\theta_z + \alpha_s = 90^\circ \quad (1.2.2)$$

Αζιμούθιο επιφανείας (γ) : Ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Η γωνία παίρνει τιμές από -180° έως 180° με τις εξής τιμές για τα τέσσερα σημεία του ορίζοντα:

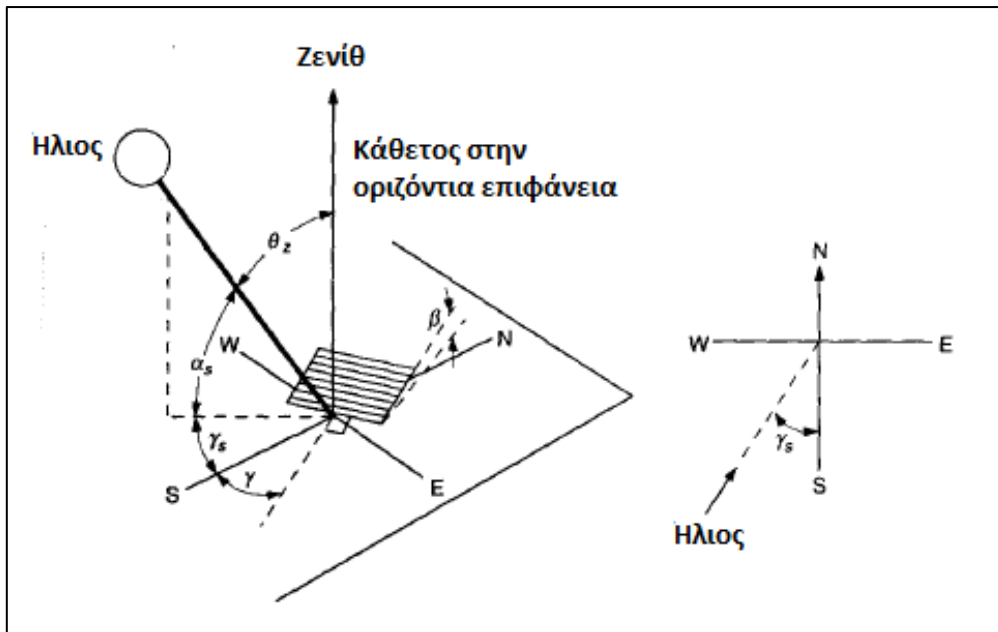
- $\gamma = 0^\circ$ στο νότο
- $\gamma = 90^\circ$ στη δύση
- $\gamma = 180^\circ$ στο βορρά και
- $\gamma = -90^\circ$ στην ανατολή

Αζιμούθιο ηλίου (γ_s) : Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης

Κλίση επιφανείας (β) : Ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Παίρνει τιμές από -180° έως 180° κι ισχύει:

- $\beta = 0^\circ$ για το οριζόντιο επίπεδο
- $\beta = 90^\circ$ για το κατακόρυφο επίπεδο
- $\beta > 90^\circ$ για ένα επίπεδο που, ξεπερνώντας τις 90° , βλέπει προς τα κάτω [14]

Οι εν λόγω γωνίες φαίνονται αναλυτικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.2.3: Χαρακτηριστικές γωνίες επιφάνειας [13]

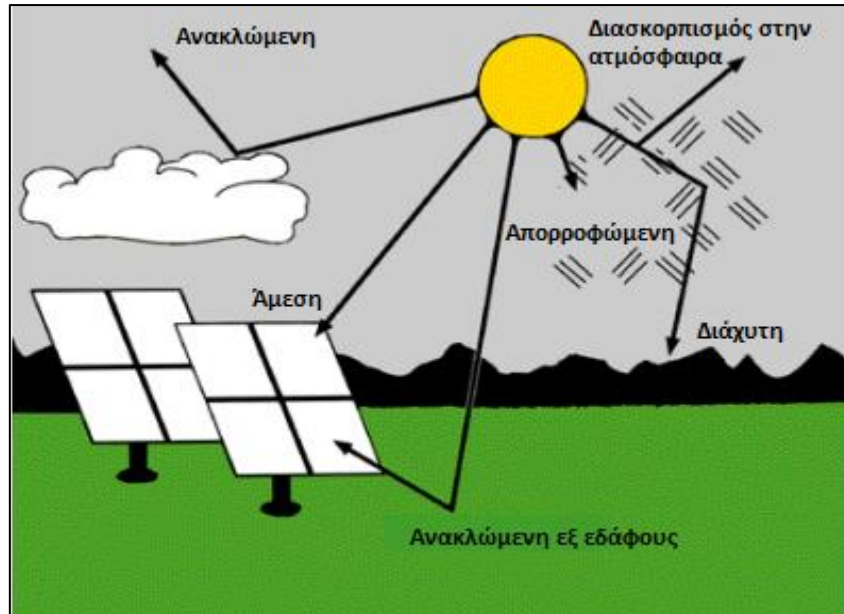
Άμεση ακτινοβολία (G_b): Είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη απευθείας από τον ήλιο χωρίς να διασκορπιστεί μέσα στην ατμόσφαιρα. Με G συμβολίζεται η στιγμιαία της τιμή, ενώ οι μονάδες της είναι W/m^2 . Πέραν της στιγμιαίας τιμής, ορίζεται ακτινοβολία και για την περίοδο μιας ώρας και μιας ημέρας, συμβολίζοντας τις αντίστοιχα με I_b και H_b , ενώ οι μονάδες τους είναι J/m^2 για τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα.

Διάχυτη ακτινοβολία (G_d): Το μέρος της ακτινοβολίας που φτάνει στη γη έχοντας υποστεί πρώτα διασκορπισμό κι αλλαγή κατεύθυνσης μέσα στην ατμόσφαιρα. Οι συμβολισμοί για την ωριαία και την ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία είναι αντίστοιχα I_d και H_d .

Ολική ακτινοβολία (G): Είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας. Συμβολίζεται I και H για την ωριαία και την ημερήσια τιμή της αντίστοιχα.

Σημειώνεται πως ο εν λόγω συμβολισμός αναφέρεται σε οριζόντια επιφάνεια. Οι συμβολισμοί παίρνουν τη μορφή G_{bT} , G_{dT} και G_T για άμεση, διάχυτη και ολική ακτινοβολία επί κεκλιμένης επιφάνειας αντίστοιχα. Παρόμοιοι συμβολισμοί ισχύουν και για τις τιμές σε χρονικό διάστημα μιας ώρας και μιας ημέρας.

Γωνία πρόσπτωσης (θ): Γωνία πρόσπτωσης της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτινών και της κάθετου στην επιφάνεια [14].



Σχήμα 1.2.4: Οι κατηγορίες της ακτινοβολίας [3]

1.3 Αδιάστατοι χαρακτηριστικοί αριθμοί της ροής εντός του συλλέκτη

1.3.1 Γενικά

Η μελέτη της ροής εντός του χρησιμοποιούμενου συλλέκτη είναι πρωταρχικής σημασίας για την ανάλυση της λειτουργίας του, καθώς και για τη μελέτη της συμπεριφοράς του σε διάφορες συνθήκες και, κατά συνέπεια, της απόδοσής του. Η χρήση κάποιων αδιάστατων αριθμών για την περιγραφή ενός προβλήματος βρίσκει εφαρμογή σε ποικίλους τομείς, όπως είναι η θερμοδυναμική, η μηχανική των ρευστών, η μεταφορά μάζας και θερμότητας κι άλλα. Συνεπώς, διευκολύνει και τη μελέτη του ηλιακού συλλέκτη, περιγράφοντας τη ροή εντός αυτού. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι αδιάστατοι αριθμοί που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση μιας τέτοιας μελέτης.

1.3.2 Αριθμός Reynolds

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων σ' ένα ρευστό προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας του ρευστού. Χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον για την περιγραφή της ροής ως προς τα επίπεδα τύρβης, διακρίνοντας τρεις κατηγορίες, τη στρωτή, τη μεταβατική και την τυρβώδη ροή. Όταν ο αριθμός Reynolds καταλαμβάνει μικρές τιμές, οι δυνάμεις που χαρακτηρίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη ροή είναι αυτές της συνεκτικότητας, ενώ όταν κυριότερες είναι οι αδρανειακές δυνάμεις, η τιμή του αδιάστατου αριθμού αυξάνεται κι επέρχεται

σταδιακά η μεταβατική και κατόπιν η τυρβώδης ροή. Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως ακολούθως:

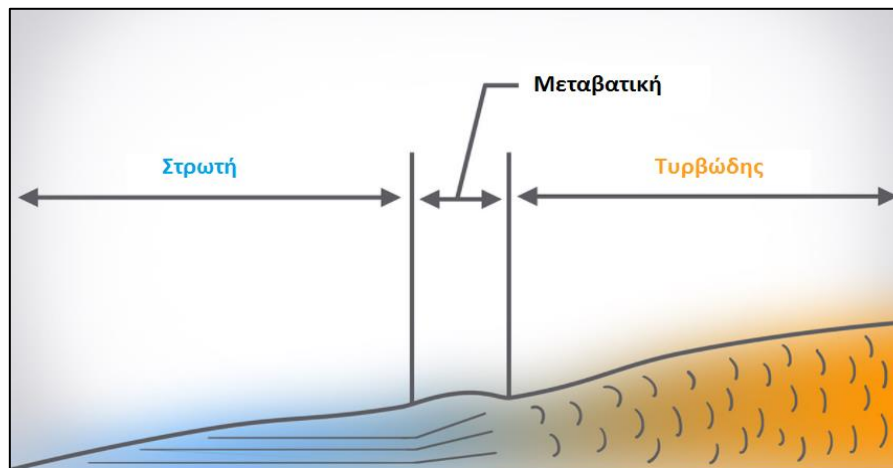
$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (1.3.1)$$

,όπου:

- ρ η πυκνότητα του ρευστού σε kg/m^3
- u η ταχύτητα του ρευστού με m/s
- D η διάμετρος του σωλήνα σε m
- μ η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού σε $\text{Pa}\cdot\text{s}$
- ν η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού σε m^2/s .

Για ροή εντός κυλινδρικού σωλήνα, ο Reynolds καθορίζει τον χαρακτήρα της ροής, ως εξής:

- Στρωτή, όταν $Re < 2300$
- Μεταβατική, όταν $2300 < Re < 4000$
- Τυρβώδης, όταν $Re > 4000$ [15]



Σχήμα 1.3.1: Επίπεδο τύρβης της ροής ανάλογα με τον αριθμό Reynolds [16]

1.3.3 Αριθμός Prandtl

Ένας άλλος σημαντικός αδιάστατος αριθμός για την περιγραφή της ροής εντός του σωλήνα είναι ο αριθμός Prandtl. Ο συγκεκριμένος αριθμός εξαρτάται μόνο από το ίδιο το ρευστό και τις ιδιότητές του κι ορίζεται ως ο λόγος της διάχυσης λόγω ορμής προς τη διάχυση λόγω μετάδοσης θερμότητας του ρευστού.

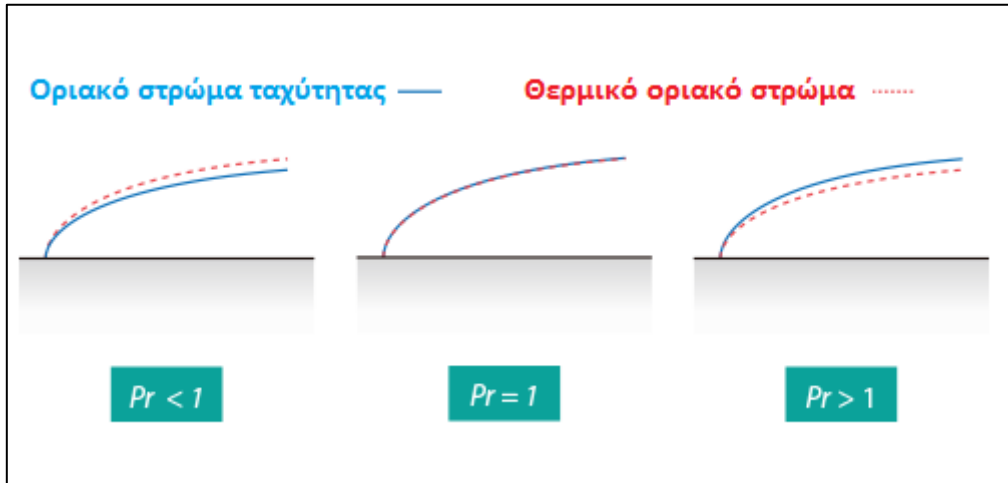
$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (1.3.2)$$

, όπου:

- C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού σε J/kgK
- μ η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού σε $\text{Pa}\cdot\text{s}$

- k η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού σε W/mK

Ο αριθμός Prandtl επίσης εκφράζει το λόγο του οριακού στρώματος της ταχύτητας προς το θερμικό οριακό στρώμα, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Μικρή τιμή του αριθμού Prandtl εκφράζει πως η διάχυση λόγω θερμότητας λαμβάνει χώρα με μεγαλύτερο ρυθμό από αυτή λόγω ορμής, αντίστοιχα πως το θερμικό οριακό στρώμα είναι μεγαλύτερο από το οριακό στρώμα της ταχύτητας.



Σχήμα 1.3.2: Σχηματική αναπαράσταση του αριθμού Prandtl [17]

1.3.4 Αριθμός Nusselt

Ο αριθμός Nusselt ορίζεται ως ο λόγος της μεταφοράς θερμότητας διά συναγωγής προς τη μετάδοση θερμότητας διά αγωγής επί του οριακού στρώματος. Έτσι, για χαμηλές τιμές του αριθμού Nusselt, η μεταδιδόμενη θερμότητα οφείλεται κυρίως στην αγωγή, αντιστοιχώντας σε στρωτή ροή, ενώ για τη ψηλές τιμές του, έχουμε κυριαρχία της συναγωγής κι η ροή είναι τυρβώδης. Μπορεί επίσης να ερμηνευθεί κι ως η αντίσταση σε αγωγή προς την αντίσταση σε συναγωγή του υλικού ή του ρευστού στο οποίο αναφέρεται.

Ο αριθμός Nusselt είναι συνάρτηση των δύο προαναφερθέντων αριθμών, Reynolds και Prandtl κι ο ορισμός του είναι ο παρακάτω:

$$Nu = \frac{h_f \cdot D_i}{k} \quad (1.3.3)$$

, όπου:

- h_f ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ ρευστού και σωλήνα σε W/m²K
- D_i η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα σε m
- k η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού σε W/mK

Έχουν προκύψει ποικίλες εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt, που μπορεί να αφορούν είτε στρωτή ροή, όπως η ακόλουθη:

$$[18] \quad Nu = 3.66 + \frac{0.0668 \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot D_i / L}{1 + 0.04 \cdot (\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot D_i / L)^{2/3}} \quad (1.3.4)$$

, είτε να ισχύουν στην τυρβώδη περιοχή της ροής, όπως οι παρακάτω:

$$[19] \quad Nu_D = 0.023 \cdot \text{Re}_D^{4/5} \cdot \text{Pr}^n, \begin{cases} n = 0.3, T_s < T_m \\ n = 0.4, T_s > T_m \end{cases} \quad (1.3.5)$$

$$[20] \quad Nu_D = \frac{(f/8) \cdot (\text{Re}_D - 1000) \cdot \text{Pr}}{1 + 12.7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (1.3.6)$$

, ενώ για το συντελεστή τριβής f ισχύει η ακόλουθη σχέση, υπό την παραδοχή της λείας επιφάνειας τοιχώματος του σωλήνα ($e=0$):

$$[21] \quad f = (0.790 \cdot \text{Re}_D - 1.64)^{-2} \quad (1.3.7)$$

, όπου:

- Re ο αριθμός Reynolds της ροής
- Pr ο αριθμός Prandtl της ροής
- D_i η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα σε m
- L το μήκος του σωλήνα σε m
- T_s η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα σε °C
- T_m η μέση θερμοκρασία του ρευστού σε °C

1.4 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

1.4.1 Γενικά

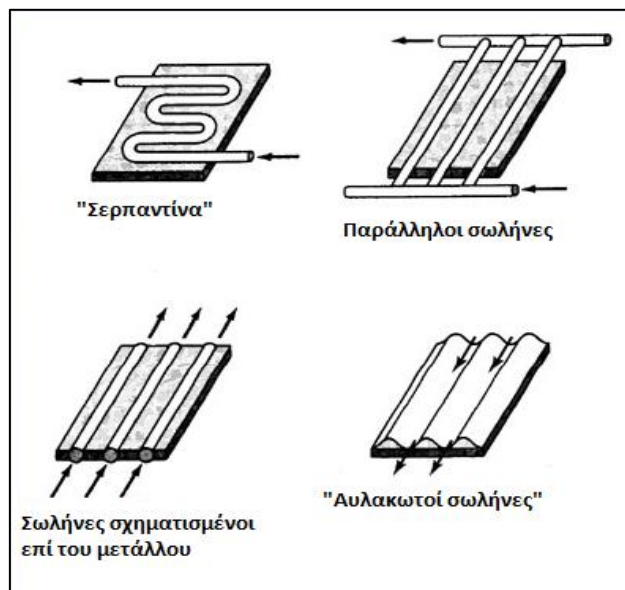
Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν έναν χρήσιμο κι ευρέως χρησιμοποιούμενο τρόπο συλλογής ενέργειας από τον ήλιο, ειδικά τα τελευταία χρόνια. Στην ουσία ο ηλιακός συλλέκτης είναι ένας ειδικής μορφής εναλλάκτης θερμότητας, που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Διαφέρει από τους συμβατικούς εναλλάκτες από ποικίλες απόψεις. Σε ένα συνηθισμένο εναλλάκτη, η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται μεταξύ δύο ρευστών που είναι σε σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ τους, ενώ το φαινόμενο χαρακτηρίζεται από υψηλούς συντελεστές μετάδοσης θερμότητας και η ακτινοβολία δεν παίζει σημαντικό ρόλο.

Αντιθέτως, στον ηλιακό συλλέκτη μεταφέρεται ενέργεια από μία μακρινή πηγή ακτινοβολίας, τον ήλιο, στο ρευστό, το οποίο μπορεί να είναι είτε υγρό είτε αέριο. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ωστόσο, χρησιμοποιείται το νερό λόγω της μεγάλης ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση (C_p) που το χαρακτηρίζει. Η τιμή της έντασης της ακτινοβολίας εκτιμάται στην καλύτερη περίπτωση περίπου 1000 W/m^2 , χωρίς την ύπαρξη κατόπτρου, ενώ η διακύμανσή της είναι αρκετά μεγάλη ανάλογα με το μήνα, την ημέρα, καθώς και την ώρα εντός της ημέρας. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας λαμβάνει τιμές από 0.3 έως $3 \mu\text{m}$ κι είναι σημαντικά μικρότερο από το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τις περισσότερες επιφάνειες. Προκύπτει, επομένως, το συμπέρασμα πως η μελέτη των ηλιακών συλλεκτών περιλαμβάνει προβλήματα που χρήζουν αντιμετώπισης, όπως η χαμηλή ένταση κι η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και τη σημαντική παράμετρο της ίδιας της συμπεριφοράς της ακτινοβολίας ως προς το μήκος κύματος, την απορρόφηση και την εκπομπή [13].

1.4.2 Κύρια τμήματα, χαρακτηριστικά λειτουργίας κι εφαρμογές

Τα σημαντικότερα στοιχεία που απαρτίζουν έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη είναι τα παρακάτω:

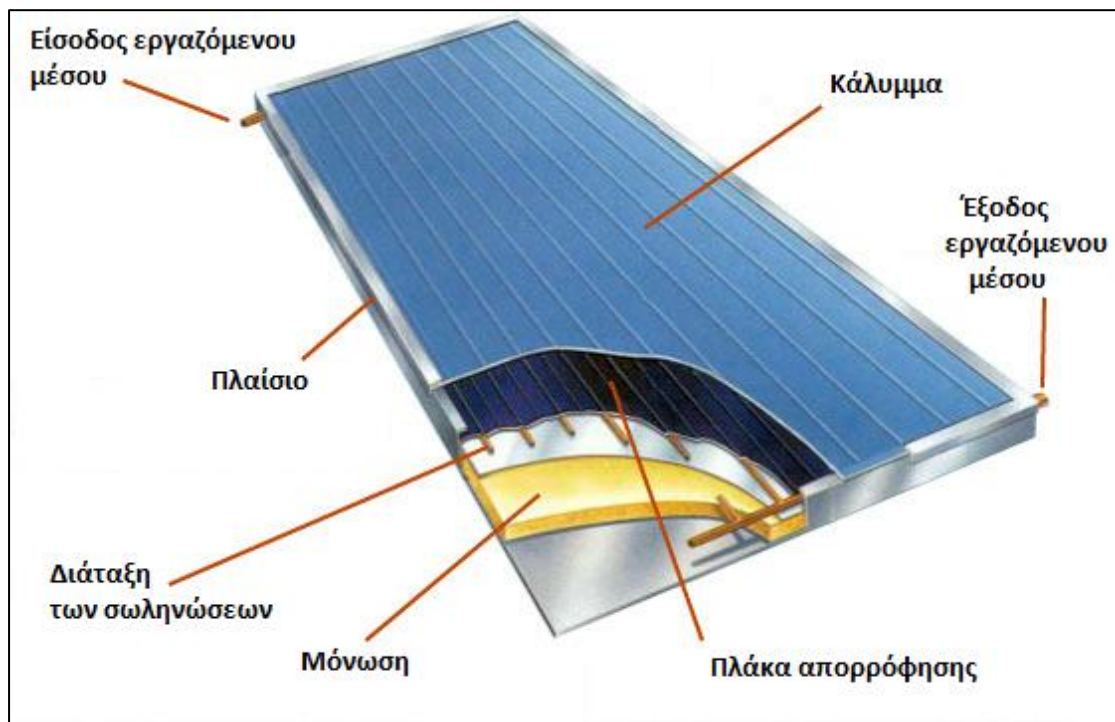
- Η είσοδος του εργαζόμενου μέσου στη διάταξη των σωληνώσεων, συνήθως από την κάτω μεριά του συλλέκτη, ώστε κατά τη θέρμανσή του να ανέρχεται και να συνυπάρχει με τη φυσική κυκλοφορία
- Η διάταξη των σωληνώσεων, που μπορεί να πάρει διάφορες μορφές, όπως ο σχηματισμός οφιοειδούς συστήματος («σερπαντίνας»), ή παράλληλων σωλήνων



Σχήμα 1.4.1: Κατηγορίες διάταξης των σωληνώσεων του επίπεδου συλλέκτη [22],[23]

- Η πλάκα απορρόφησης, η οποία απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, συνήθως μαύρου χρώματος κι επιλεκτική, για να μεγιστοποιηθεί η απορρόφηση κι η απόδοση του συλλέκτη
- Το κάλυμμα, το οποίο προστατεύει την πλάκα απορρόφησης, επιτρέποντας στην ηλιακή ακτινοβολία να διέρχεται μέσω αυτού
- Το πλαίσιο, συνήθως κατασκευασμένο από αλουμίνιο ή γαλβανισμένο χάλυβα, κρατάει σταθερή την πλάκα απορρόφησης επιφέροντας επιπλέον προστασία
- Η μόνωση, η οποία καλύπτει περιμετρικά κι από την πίσω μεριά την πλάκα απορρόφησης, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας
- Η έξοδος του εργαζόμενου μέσου από τη διάταξη των σωληνώσεων, όπου μεταφέρεται στο δοχείο ή τον επιθυμητό για το ζεστό νερό χώρο

Τα εν λόγω τμήματα αναπαρίστανται κι αναλυτικότερα στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 1.4.2: Τα κύρια τμήματα του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [24]

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές της καθημερινότητας, σε γενικά μεσαίες θερμοκρασίες, έως και 100 °C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα κύρια στοιχεία που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία τους είναι τα κάτωθι:

- Εκμεταλλεύονται τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία

- Δεν απαιτούν σύστημα παρακολούθησης το ηλίου κατά τη διάρκεια της ημέρας (tracking)
- Απαιτούν λίγη συντήρηση, οπότε ελαττώνονται σημαντικά τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας
- Είναι λιγότερο πολύπλοκοι από μηχανικής άποψης από τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες, οι οποίοι απαιτώντας και παρακολούθηση του ήλιου, αποτελούνται από κινούμενα μέρη

Το πεδίο εφαρμογών των επίπεδων συλλεκτών ολοένα και διευρύνεται σήμερα, καθώς γίνεται προσπάθεια για ολοένα και περισσότερη εκμετάλλευση της ενέργειας του ηλίου. Οι κύριες εφαρμογές τους είναι οι εξής:

- Θέρμανση Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX)
- Θέρμανση Κτηρίων
- Κλιματισμός
- Θερμικές Διεργασίες σε βιομηχανικό επίπεδο

1.4.3 Εξίσωση λειτουργίας του συλλέκτη

Κατά τη λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση, η συμπεριφορά του συλλέκτη περιγράφεται από μία εξίσωση, η οποία εκφράζει τη μετατροπή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ωφέλιμη ενέργεια, καθώς και σε απώλειες θερμότητας και οπτικές απώλειες. Αρχικά, ορίζεται η απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία, ως η διαφορά μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και των οπτικών απωλειών, σε μονάδες W/m^2 :

$$S = (\tau\alpha) \cdot G_T \quad (1.4.1)$$

, όπου:

- $(\tau\alpha)$ το γινόμενο διαπερατότητας του καλύμματος - απορροφητικότητας της πλάκας απορρόφησης
- G_T η ένταση της στιγμιαίας προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε W/m^2

Οι θερμικές απώλειες που χάνονται από το κάλυμμα και τα τοιχώματα του συλλέκτη μέσω αγωγής, συναγωγής κι ακτινοβολίας εκφράζονται από το συντελεστή ολικών απωλειών, ο οποίος συμβολίζεται με U_L , ενώ οι μονάδες του είναι W/m^2K . Έτσι, προκύπτει η έκφραση για την ωφέλιμη ενέργεια που παράγεται από το συλλέκτη σε W :

$$\dot{Q}_u = A_c \cdot [S - U_L \cdot (T_{p,m} - T_a)] \quad (1.4.2)$$

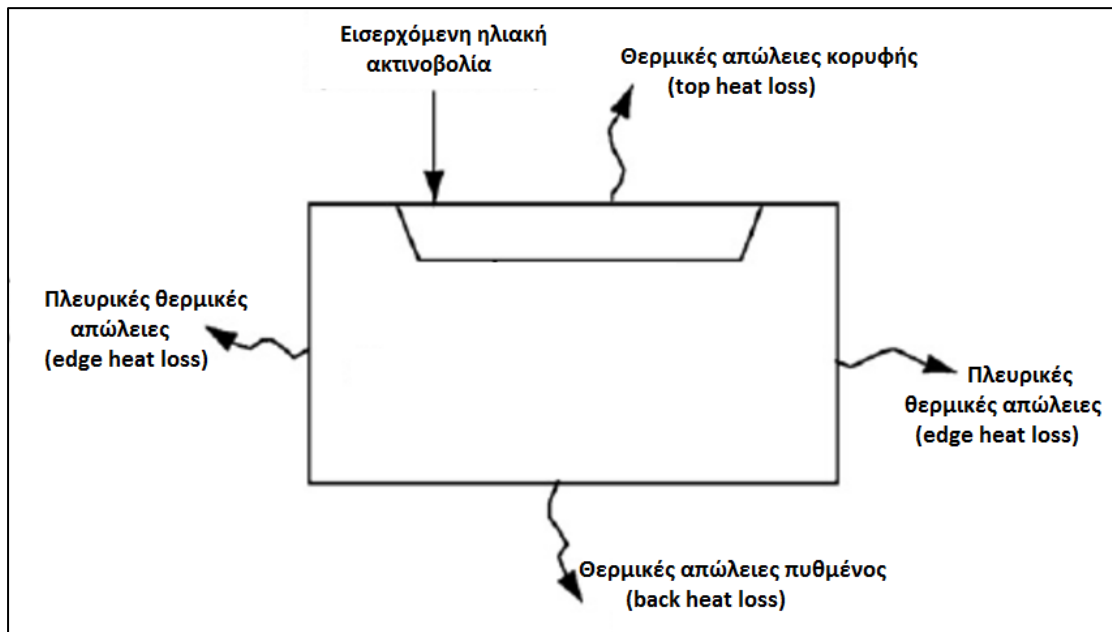
, όπου:

- A_c η επιφάνεια του συλλέκτη, που ταυτίζεται με την επιφάνεια του καλύμματος, σε m^2
- S η απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2
- U_L ο συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη σε W/m^2K
- $T_{p,m}$ η μέση θερμοκρασία του απορροφητήρα σε $^{\circ}C$
- T_a η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε $^{\circ}C$ [14]

Αν και πολύ σημαντική εξίσωση για τη λειτουργία του συλλέκτη, η Εξίσωση 1.4.2 περιέχει τον όρο $T_{p,m}$, τη μέση θερμοκρασία του απορροφητήρα, η οποία είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, καθώς εξαρτάται από τρεις κύριους παράγοντες:

- Το σχεδιασμό και τις διαστάσεις του συλλέκτη
- Την προσπίπτουσα ακτινοβολία, G_T
- Τις εισερχόμενες ροϊκές συνθήκες εντός της διάταξης των σωλήνων [13]

1.4.4 Θερμικές απώλειες του συλλέκτη



Σχήμα 1.4.3: Οι θερμικές απώλειες του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [25]

Κατά τη διατύπωση της Εξίσωσης 1.4.2, εισήχθη ο όρος U_L , ο συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη, μετρημένος σε W/m^2K . Ο συντελεστής U_L αφορά τις συνολικές θερμικές απώλειες του συλλέκτη προς το περιβάλλον κι αποτελείται από τις τρεις ακόλουθες συνιστώσες:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (1.4.3)$$

, όπου:

- U_t (top), οι θερμικές απώλειες κορυφής του συλλέκτη σε W/m^2K
- U_b (back), οι θερμικές απώλειες πυθμένος του συλλέκτη σε W/m^2K
- U_e (edge), οι πλευρικές θερμικές απώλειες του συλλέκτη σε W/m^2K

Η πιο σημαντική συνιστώσα των θερμικών απωλειών ενός απλού επίπεδου συλλέκτη εκ των προαναφερθέντων είναι οι απώλειες κορυφής. Αυτό συμβαίνει διότι η άνω μεριά του συλλέκτη είναι η μόνη που δε διαθέτει μόνωση για τον περιορισμό των απωλειών, καθώς είναι απαραίτητη η διαφάνεια του γυάλινου καλύμματος προκειμένου να διέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία και να προσπίπτει στην πλάκα απορρόφησης. Επομένως, τόσο μέσω συναγωγής όσο και μέσω ακτινοβολίας από την πλάκα, ένα σημαντικό ποσό θερμότητας διαφεύγει από την κορυφή του συλλέκτη.

Πέραν της έλλειψης μόνωσης, στις απώλειες κορυφής συμβάλλουν κι οι διαστάσεις του συλλέκτη και συγκεκριμένα ο συντελεστής θέασης κατά την ακτινοβολία της πλάκας προς το κάλυμμα [14]. Όπως φαίνεται κι από το Σχήμα 1.4.4 που ακολουθεί, σύμφωνα με τις διαστάσεις ενός τυπικού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη, η επιφάνεια της πλάκας απορρόφησης βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την παράλληλη προς αυτήν επιφάνεια του καλύμματος. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη μεγάλη επιφάνειά τους σε σχέση με τις πλευρικές επιφάνειες καταλήγουν σε έναν πολύ υψηλό συντελεστή θέασης από τον απορροφητή στο κάλυμμα και, κατά συνέπεια, στο περιβάλλον, οπότε οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι σημαντικές. Επιπλέον, υπό αυτό το πρίσμα, η ακτινοβολία από την πλάκα προς τις πλευρικές επιφάνειες μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα [14].

Επομένως, οι απώλειες κορυφής του συλλέκτη συμπεριλαμβανομένων των όρων συναγωγής κι ακτινοβολίας εκφράζονται με την παρακάτω εξίσωση, ανηγμένες στη συλλεκτική επιφάνεια (W/m^2) :

$$q_t = h_{pc} \cdot (T_p - T_c) + \frac{\sigma(T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (1.4.4)$$

, όπου:

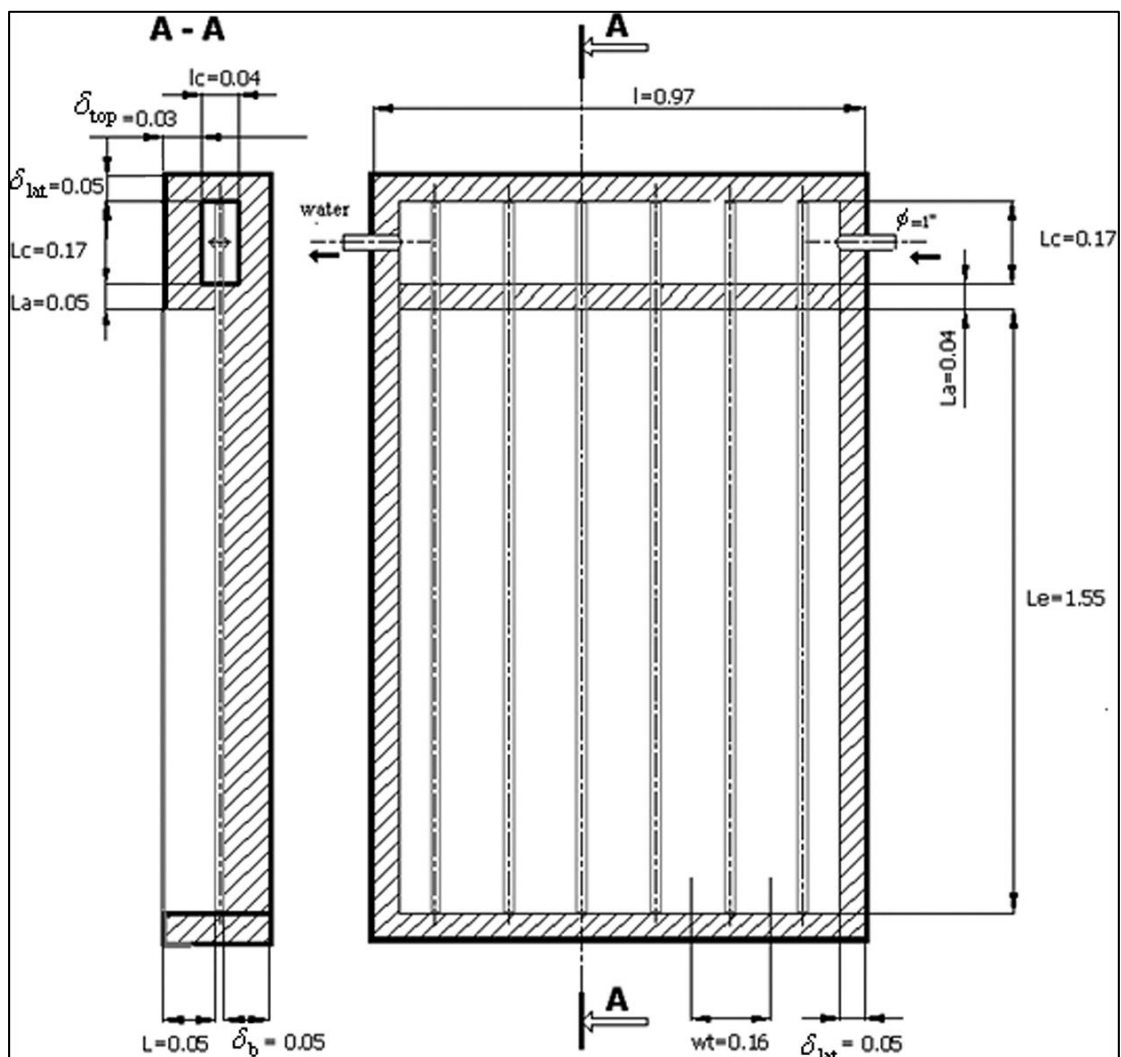
- h_{pc} ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας διά συναγωγής από την πλάκα προς το κάλυμμα σε W/m^2K
- T_p η θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης σε K
- T_c η θερμοκρασία του καλύμματος σε K
- $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ η σταθερά Stefan – Boltzmann
- ε_p ο συντελεστής εκπομπής της πλάκας απορρόφησης

- ϵ_c ο συντελεστής εκπομπής του καλύμματος

Μία τυπική τιμή για το συντελεστή εκπομπής του καλύμματος είναι $\epsilon_c = 0.88$, ενώ για τον απορροφητή η τιμή του ποικίλει ανάλογα με τις ιδιότητες της επιφάνειας απορρόφησης. Έχουμε τις ακόλουθες δύο περιπτώσεις:

- $\epsilon_p = 0.1$
- $\epsilon_p = 0.95$

, που ισχύουν για επιλεκτική και μη επιλεκτική επιφάνεια αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση, η απορροφητικότητα της επιλεκτικής επιφάνειας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή και, συνεπώς, η εκπομπή είναι χαμηλή λόγω της αλλαγής του μεγάλου μήκους κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, ενώ το αντίθετο ισχύει για τη μη επιλεκτική επιφάνεια [14].



Σχήμα 1.4.4: Μηχανολογικό σχέδιο ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [26]

Θεωρώντας, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, οι θερμορροές από και προς την πλάκα απορρόφησης μπορούν να θεωρηθούν σταθερές, επομένως η θερμορροή από τον απορροφητή προς το

κάλυμμα θα είναι ίση με τη θερμοροή από το κάλυμμα προς το περιβάλλον. Άρα οι θερμικές απώλειες κορυφής του συλλέκτη εκφράζονται και με την παρακάτω έκφραση:

$$q_t = q_{p-c} = q_{c-a} = h_{ca} \cdot (T_c - T_a) + \sigma \cdot \varepsilon_c \cdot (T_c^4 - T_a^4) \quad (1.4.5)$$

, όπου:

- h_{ca} ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας διά συναγωγής από το κάλυμμα προς το περιβάλλον σε W/m^2K
- T_c η θερμοκρασία του καλύμματος σε K
- T_a η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε K
- $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ η σταθερά Stefan – Boltzmann
- ε_c ο συντελεστής εκπομπής του καλύμματος

Σημειώνεται πως στον όρο της ακτινοβολίας, η θερμοκρασία που ακτινοβολεί προς το κάλυμμα, δηλαδή ο όρος που αφαιρείται, είναι όχι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_a αλλά η θερμοκρασία ουρανού, T_{sky} , καθώς το ίδιο το κάλυμμα ακτινοβολεί προς τον ουρανό και το αντίστροφο. Ωστόσο, εδώ θεωρείται πως η θερμοκρασία T_a είναι μία καλή προσέγγιση της T_{sky} , παραδοχή η οποία είναι αρκετά κοντά στην πραγματικότητα.

Όσον αφορά τις απώλειες πυθμένος, αυτές εκφράζουν το ποσό θερμότητας που χάνεται από την πίσω πλευρά του συλλέκτη προς το περιβάλλον. Ο συντελεστής θερμικών απωλειών, που είναι το αντίστροφο της θερμικής αντίστασης, για τις οπίσθιες απώλειες δίδεται από την παρακάτω εξίσωση [14]:

$$U_b = \frac{k}{L_b} \quad (1.4.6)$$

, όπου:

- k η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης σε W/mK
- L_b το πάχος της οπίσθιας μόνωσης σε m

Κατά τις πλευρικές απώλειες, αν υποθεθεί μονοδιάστατη ροή θερμότητας κάθετα στις πλευρικές επιφάνειες, έχουμε αντίστοιχα με τις πυθμένος [14]:

$$U_e = \frac{k}{L_e} \quad (1.4.7)$$

, όπου:

- k η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης σε W/mK

- L_e το πάχος της οπίσθιας μόνωσης σε m

Ωστόσο, για να υπάρχει κοινή βάση αναφοράς ως προς την επιφάνεια στην οποία ανάγονται τα μεγέθη, όπως και στις απώλειες κορυφής και πυθμένος, γίνεται η αναγωγή στη συλλεκτική επιφάνεια, αντί για την πλευρική [14]:

$$U_e = U_e' \cdot \frac{A_e}{A_c} = \frac{k}{L_e} \cdot \frac{A_e}{A_c} \quad (1.4.8)$$

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να εκφράσουμε την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη, συναρτήσει όλων των απωλειών, πραγματοποιώντας ισολογισμό ενέργειας στο συλλέκτη:

$$S \cdot A_c = \dot{Q}_u + \dot{Q}_L = \dot{Q}_u + \dot{Q}_t + \dot{Q}_b + \dot{Q}_e \quad (1.4.9)$$

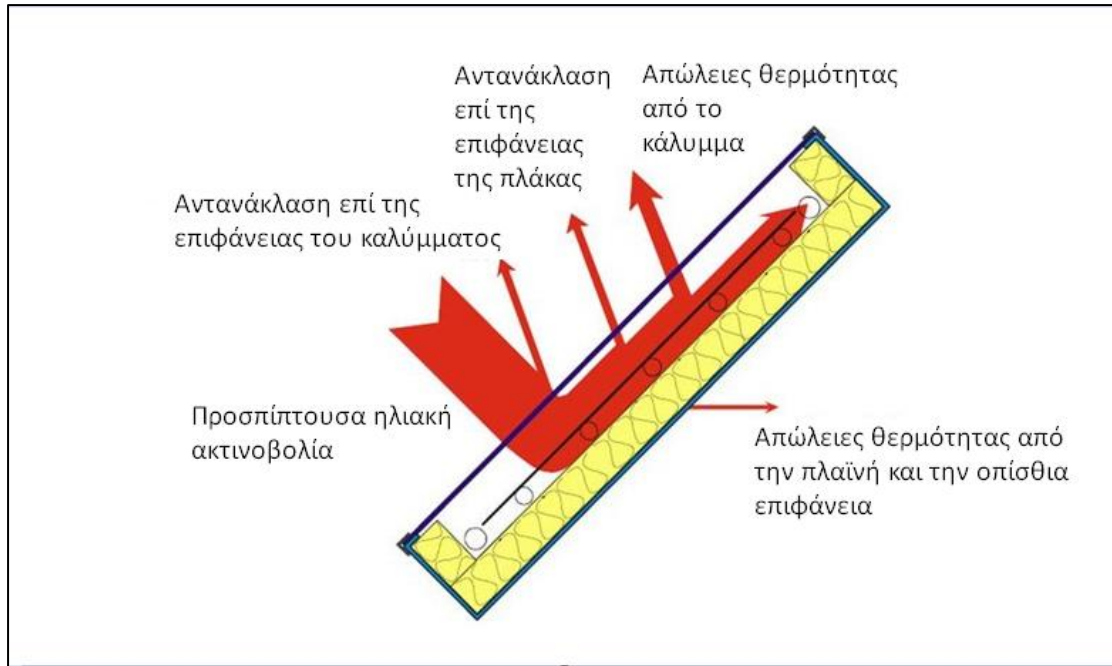
, άρα:

$$\dot{Q}_u = S \cdot A_c - \dot{Q}_L = S \cdot A_c - \dot{Q}_t - \dot{Q}_b - \dot{Q}_e \quad (1.4.10)$$

, όπου:

- S η απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2
- A_c η συλλεκτική επιφάνεια σε m^2
- Q_u η ωφέλιμη θερμική ισχύς σε W
- Q_L οι συνολικές θερμικές απώλειες του συλλέκτη σε W
- Q_t οι θερμικές απώλειες κορυφής του συλλέκτη σε W
- Q_b οι θερμικές απώλειες πυθμένος του συλλέκτη σε W
- Q_e οι πλευρικές θερμικές απώλειες του συλλέκτη σε W

Επιπλέον, σημειώνεται πως υφίστανται κι ένα μέρος οπτικών απωλειών από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ωστόσο αυτές είναι πολύ μικρότερες ως προς την τάξη μεγέθους από τις θερμικές κι αμελούνται στην παρούσα ανάλυση [14].



Σχήμα 1.4.5: Ισολογισμός ενέργειας στον ηλιακό συλλέκτη [27]

1.4.5 Παράγοντας θερμικής απολαβής του συλλέκτη

Ένα ακόμη σημαντικό μέγεθος για τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη είναι ο παράγοντας θερμικής απολαβής, F_R . Ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικά μεταφερόμενης θερμικής ισχύος, \dot{Q}_u , προς τη θερμική ισχύ που θα αποδιδόταν εάν ολόκληρη η πλάκα απορρόφησης είχε τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού, $T_{f,i}$, που είναι κι μέγιστη δυνατή που μπορεί να παραχθεί από το συλλέκτη. Ως μέγεθος, είναι δείγμα της ποιότητας ολόκληρου του συλλέκτη, καθώς έχει την έννοια του βαθμού απόδοσης ενός εναλλάκτη. Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε, η εξίσωση του παράγοντα θερμικής απολαβής είναι η ακόλουθη [14]:

$$F_R = \frac{\dot{Q}_u}{A_c \cdot [S - U_L \cdot (T_{f,i} - T_a)]} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{f,o} - T_{f,i})}{A_c \cdot [S - U_L \cdot (T_{f,i} - T_a)]} \quad (1.4.11)$$

, όπου:

- \dot{Q}_u η ωφέλιμη θερμική ισχύς σε W
- A_c η συλλεκτική επιφάνεια σε m^2
- S η απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2
- U_L ο συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη σε W/m^2K
- $T_{f,i}$ η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη σε $^{\circ}C$
- T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε $^{\circ}C$
- \dot{m} η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου σε kg/s

- C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου μέσου σε J/kgK
- $T_{f,o}$ η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το συλλέκτη σε °C

1.4.6 Βαθμός απόδοσης του συλλέκτη

Ως στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη, ορίζεται ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύος Q_u προς την αντίστοιχη στιγμιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του συλλέκτη, ($A_c \cdot G_T$). Εκφράζοντας αρχικά την αποδιδόμενη ισχύ συναρτήσει των S και F_R από τις εξισώσεις 1.4.1 κι 1.4.11 αντίστοιχα, προκύπτει [14]:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} = F_R \cdot (\tau\alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{T_i - T_a}{G_T} \quad (1.4.12)$$

ή αλλιώς μπορεί να εκφραστεί και συναρτήσει των θερμοκρασιών εισόδου κι εξόδου από το συλλέκτη T_i και T_o :

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i)}{A_c \cdot G_T} \quad (1.4.13)$$

, όπου:

- Q_u η αποδιδόμενη θερμική ισχύς σε W
- A_c η επιφάνεια του συλλέκτη σε m^2
- S η απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2
- U_L ο συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη σε W/m^2K
- T_i η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη σε °C
- T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε °C
- \dot{m} η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου σε kg/s
- C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου μέσου σε J/kgK
- T_o η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το συλλέκτη σε °C

1.5 Συλλέκτης κενού

1.5.1 Γενικά

Οι κλασικοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες σχεδιάστηκαν αρχικά για χρήση ως επί το πλείστον σε θερμά κλίματα, που χαρακτηρίζονται από έντονη ηλιοφάνεια. Παρουσιάζουν, ωστόσο, σημαντικά μειονεκτήματα κατά τη λειτουργία τους σε λιγότερο ιδανικές συνθήκες, παραδείγματος χάρη σε ημέρες που επικρατεί κρύο, φυσάει ή και βρέχει. Επιπλέον, επηρεάζονται και με άλλους τρόπους από τον

ατμοσφαιρικό αέρα, παραδείγματος χάρη από την υγρασία του περιβάλλοντος, τα οποία μπορεί να επιδεινώσουν την απόδοσή τους και να καταλήξουν σε πρώιμη αστοχία του συστήματος [28]. Επιπροσθέτως, λόγω του υψηλού συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών που τους χαρακτηρίζει, οι συνηθισμένοι απλοί επίπεδοι συλλέκτες δεν καθίστανται πρακτικοί για εφαρμογές σε υψηλότερες θερμοκρασίες, περίπου από 80 °C και πάνω. Για τέτοιας τάξης μεγέθους θερμοκρασίες, προκύπτει η ανάγκη για περιορισμό του συντελεστή απωλειών, που μπορεί να επιτευχθεί μέσω των συλλεκτών κενού [29].

Το βασικό χαρακτηριστικό των συλλεκτών κενού είναι πως κατασκευάζονται ερμητικά κλειστοί προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες συναγωγής προς το περιβάλλον. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο μόνος παράγοντας που ουσιαστικά συμβάλλει στις απώλειες θερμότητας είναι η ακτινοβολία, αυξάνοντας κατά συνέπεια το θερμικό βαθμό απόδοσης. Οι σωλήνες ως εξαρτήματα υπολογίζονται πως έχουν διάρκεια ζωής της τάξεως των 20 χρόνων, ενώ επιδεικνύουν εξαιρετική λειτουργία κατά το εύρος θερμοκρασιών από 120 έως 150 °C. Αν και δε διαθέτουν σύστημα παρακολούθησης του ήλιου, δίνεται η δυνατότητα εγκατάστασης κατόπτρου για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης [29].

1.5.2 Κύρια τμήματα, χαρακτηριστικά λειτουργίας κι εφαρμογές

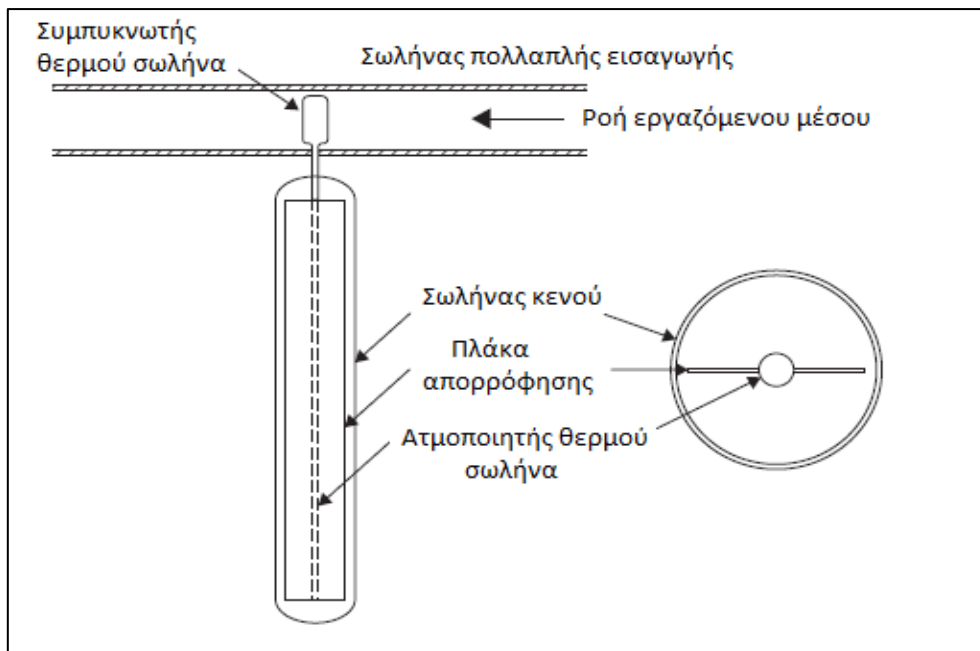
Οι τρεις κυριότερες κατηγορίες των ηλιακών συλλεκτών κενού είναι οι εξής:

- συλλέκτης κενού θερμού σωλήνα
- συλλέκτης κενού τύπου “U” ή σχεδίαση της εταιρείας Glass Company
- συλλέκτης κενού ομοαξονικής διάταξης σωλήνων ή σχεδίαση της εταιρείας Owens Illinois

, ενώ τα βασικά τους τμήματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 1.5.1 και 1.5.2 που ακολουθούν.

Ο συλλέκτης τύπου θερμού σωλήνα χρησιμοποιεί υλικά αλλαγής φάσης για την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας. Βασικό του χαρακτηριστικό αποτελεί ο θερμός σωλήνας, ένας σωλήνας με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, ο οποίος είναι τοποθετημένος επί ενός χάλκινου πτερυγίου βαμμένο μαύρο, το οποίο στην ουσία αποτελεί την απορροφητική επιφάνεια. Όλη η διάταξη στεγάζεται εντός κάποιου άλλου, εξωτερικού σωλήνα, επί του οποίου επικρατούν συνθήκες κενού (Σχήμα 1.5.1). Προεξέχοντας από την κορυφή κάθε σωλήνα, επί της διόδου πολλαπλής εισαγωγής (manifold), είναι τοποθετημένη μια μεταλλική άκρη, όπου λαμβάνει χώρα η συμπίκνωση. Ολόκληρος ο σωλήνας διατρέχεται από μια μικρή ποσότητα εργαζόμενου μέσου αλλαγής φάσης, παραδείγματος χάρη μεθανόλης, που υφίσταται έναν κύκλο αλληλουχίας ατμοποίησης – συμπίκνωσης. Οι συλλέκτες θερμού

σωλήνα είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες να πληρούνται οι προϋποθέσεις για την ατμοποίηση. Έτσι, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην πλάκα απορρόφησης ζεσταίνει το σωλήνα, που με τη σειρά του ζεσταίνει κι ατμοποιεί το εργαζόμενο μέσο. Ο παραγόμενος ατμός ανέρχεται εντός του σωλήνα, όπου συναντώντας το κρύο νερό που διαρρέει την πολλαπλή εισαγωγή, συμπυκνώνεται και μεταφέρει σε αυτό μεγάλο ποσό θερμότητας, λόγω της μεγάλης λανθάνουσας θερμότητας που χαρακτηρίζει το εργαζόμενο μέσο. Το συμπυκνωμένο ρευστό επιστρέφει με φυσική κυκλοφορία στο κάτω άκρο του θερμού σωλήνα κι η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, πρόκειται για πολλαπλή εισαγωγή όπου πολλοί σωλήνες είναι τοποθετημένοι παράλληλα και συντελούν όλοι μαζί στη μετάδοση θερμότητας του κυρίως σωλήνα. Επίσης, ο εν λόγω σωλήνας μπορεί να αποτελεί κι απλά ένα τροφοδοτικό δοχείο, στο οποίο αποδίδεται άμεσα η θερμότητα μέσω του παραπάνω συστήματος [28].

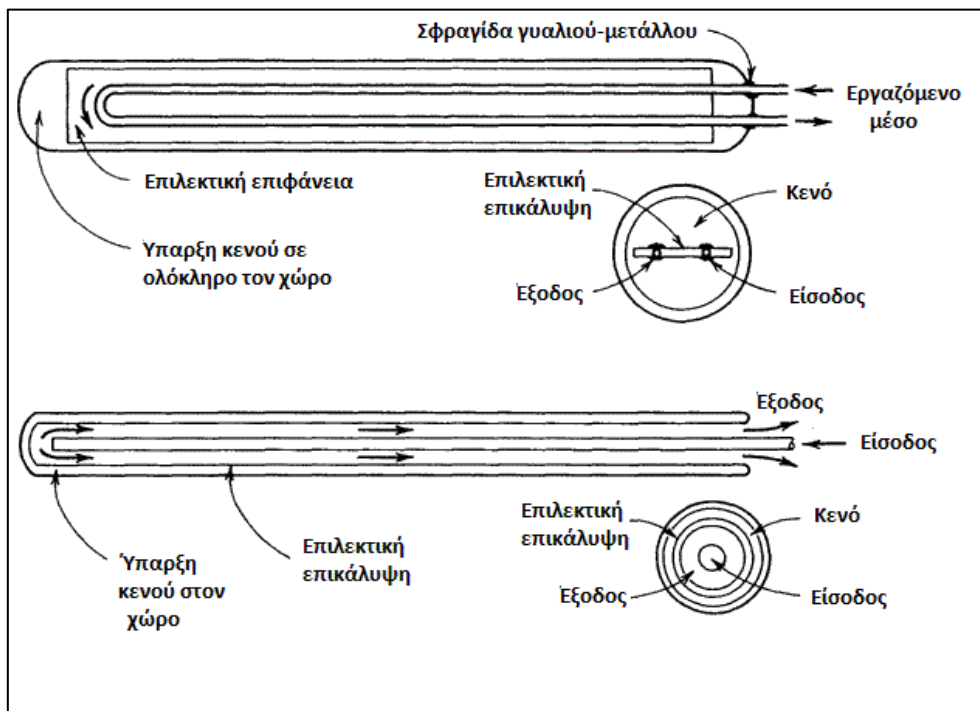


Σχήμα 1.5.1: Ο συλλέκτης κενού θερμού σωλήνα [28]

Στο συλλέκτη κενού της Corning Glass ή τύπου “U”, μία επίπεδη πλάκα απορρόφησης κι ένας σωλήνας εντός του οποίου ρέει νερό έχουν ενσωματωθεί εντός ενός γυάλινου σωλήνα, στον οποίο επικρατεί κενό. Όπως διακρίνεται κι από το Σχήμα 1.5.2, καθώς η πλάκα απορρόφησης απορροφά επιλεκτικά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, αποθηκεύεται η θερμότητα, η οποία έπειτα εξάγεται προς τον ενσωματωμένο σωλήνα και κατά σειρά προς το εργαζόμενο μέσο, συνήθως το νερό, κι εξέρχεται τελικά από το σύστημα.

Κατά την τρίτη διαμόρφωση, την σχεδίαση της Owens Illinois ή αλλιώς την σωλήνωση με ομοαξονική διάταξη, η επιλεκτική επιφάνεια ταυτίζεται με την

εξωτερική επιφάνεια του εξωτερικού, συνήθως χάλκινου σωλήνα, την οποία χαρακτηρίζει μία στρώση επιλεκτικής επικάλυψης (Σχήμα 1.5.2). Η είσοδος κι η έξοδος του εργαζόμενου μέσου γίνεται εντός αυτού του ομοαξονικού σωλήνα, αρχικά εισερχόμενο στο μικρότερης διαμέτρου σωλήνα στο κέντρο κι έπειτα, προσπίπτοντας στην άκρη του εξωτερικού σωλήνα, αλλάζει κατεύθυνση και ρέει με αντίθετη φορά εντός του δακτυλίου (η εξωτερική μεριά του οποίου αποτελεί τη συλλεκτική επιφάνεια) που σχηματίζεται μεταξύ των δύο αυτών σωλήνων. Ολόκληρο το προαναφερθέν σύστημα στεγάζεται εντός ενός μεγαλύτερου, γυάλινου σωλήνα, εντός του οποίου επικρατεί κενό για τη μείωση των θερμικών απωλειών [30].



Σχήμα 1.5.2: Οι συλλέκτες κενού τύπου “U” και ομοαξονικής διάταξης [30]

Οι κυριότερες εφαρμογές που μπορούν να υποστηριχθούν κατά κύριο λόγο από τέτοιους συλλέκτες είναι οι εξής:

- Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX)
- Κλιματισμός και θέρμανση χώρων
- Ηλιακά υποβοηθούμενη δεξαμενή
- Θέρμανση νερού σε γεωργικό, δημοτικό και βιομηχανικό επίπεδο

1.5.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Οι συλλέκτες κενού έχουν αποδείξει ότι ο συνδυασμός της επιλεκτικής επιφάνειας του απορροφητή και του περιορισμού της συναγωγής έχουν ως αποτέλεσμα καλή απόδοση και στις υψηλές θερμοκρασίες. Η παρουσία κενού μειώνει σημαντικά τις απώλειες λόγω αγωγής και συναγωγής, οπότε η συμπεριφορά

τους σε ψηλότερες θερμοκρασίες έναντι των απλών επίπεδων είναι βελτιωμένη. Τονίζεται, επίσης, η συλλογή τόσο άμεσης όσο και διάχυτης ακτινοβολίας, όπως κι οι επίπεδοι, ενώ σημειώνεται πως η απόδοσή τους είναι ψηλότερη για μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης, δίνοντάς τους το πλεονέκτημα έναντι των επίπεδων στην ευελιξία λειτουργίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που χαρακτηρίζει κυρίως τη διάταξη θερμού σωλήνα είναι η «αυτοπροστασία» του από τον παγετό και την υπερθέρμανση. Αυτό συμβαίνει διότι δε μπορεί να λάβει χώρα ατμοποίηση ή συμπύκνωση πάνω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης κι ο θερμός σωλήνας προσφέρει προστασία από τέτοιες ακραίες συνθήκες [28]. Αξιοσημείωτο θετικό στοιχείο αποτελεί επίσης η αυτονομία λειτουργίας του κάθε σωλήνα, καθώς σε περίπτωση αστοχίας του ενός, αυτό αντικαθίσταται τοπικά, χωρίς την ανάγκη για αντικατάσταση ολόκληρης της διάταξης της σωλήνωσης.

Αν και χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, η θερμοκρασία λειτουργίας των συλλεκτών κενού δεν είναι αυθαίρετη. Η αποδόμηση των ελαστομερών σφραγίδων, ο διαφορετικός ρυθμός θερμικής διαστολής των υλικών καθώς και οι περιορισμός των επικαλύψεων καθιστούν ως άνω όριο λειτουργίας τους θερμοκρασίες που είναι αρκετά χαμηλότερες από τις μέγιστες που μπορούν να αποδώσουν σε ηλιακό μεσημέρι. Οι σχεδιαστές καλούνται να βρουν τρόπους να ξεπεράσουν αυτά τα προβλήματα, καθώς οι συλλέκτες κενού είναι αρκετά λιγότερο δοκιμασμένοι τεχνολογία σε βάθος χρόνου, συγκριτικά με τους απλούς επίπεδους [30]. Τέλος, τονίζεται ως αξιοσημείωτο μειονέκτημα των συλλεκτών κενού το αυξημένο κόστος τους σε σχέση με τους επίπεδους, καθώς κι ο χαμηλότερος οπτικός βαθμός απόδοσής τους, ο οποίος ωστόσο μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη κατόπτρων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, αναφέρεται πως ένας αρκετά σημαντικός δείκτης κατά την επιλογή του κατάλληλου είδους συλλέκτη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας, καθώς σε χαμηλές τιμές, παραδείγματος χάρη έως 50 °C, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο ο επίπεδος, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες, της τάξης των 100 με 120 °C, επιλέγεται ο συλλέκτης κενού.

Συνολικά, η σύγκριση μεταξύ του απλού επίπεδου συλλέκτη και του συλλέκτη κενού συνεχίζεται, δίχως καμία εκ των δύο τεχνολογιών να έχει κάποιο ισχυρό χαρακτηριστικό επιβολής της έναντι της άλλης. Ωστόσο, για δεδομένη διαθέσιμη συλλεκτική επιφάνεια, ο συλλέκτης κενού είναι πιθανότερο να διατηρήσει την αποτελεσματικότητά του, για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος και απαιτήσεις σε φορτίο. Ο απλός επίπεδος, από την άλλη μεριά, λειτουργεί με μεγαλύτερη αξιοπιστία σε θερμά κλίματα με διαρκή ηλιοφάνεια, περιορίζοντας ωστόσο σημαντικά τη λειτουργία του σε συνθήκες συννεφιάς, σε σύγκριση με το συλλέκτη κενού.

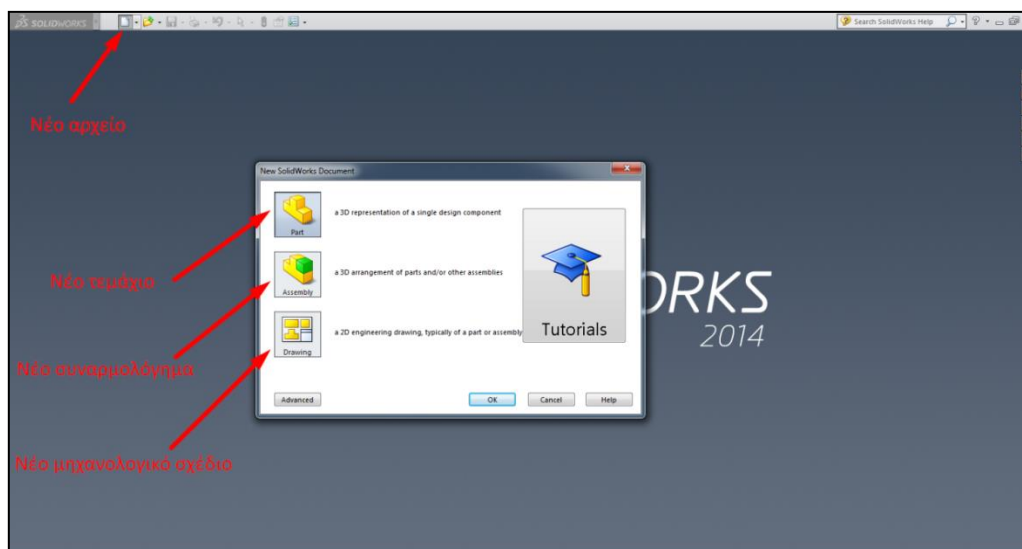
2 Εισαγωγή στο SolidWorks

2.1 Γενικά

Μείζονα ρόλο στην εκπόνηση της συγκεκριμένης μελέτης έπαιξε το λογισμικό SolidWorks, η δημιουργία του οποίου αποδίδεται στην εταιρεία Dassault Systèmes SolidWorks, με μεγάλο εύρος εφαρμογών, τόσο στην εκπαίδευση όσο και στη βιομηχανία. Το πρόγραμμα προσφέρει ποικίλες δυνατότητες στον χρήστη, όπως σχέδιο τόσο στο δισδιάστατο όσο και στον τρισδιάστατο χώρο, με εναλλαγές από τον έναν στον άλλο, καθώς και μεμονωμένο σχεδιασμό ενός τεμαχίου ή σε συνδυασμό με άλλα τεμάχια, δημιουργώντας ένα συναρμολόγημα (assembly). Οι διαστάσεις των εκάστοτε σχεδιαζόμενων αντικειμένων ορίζονται χειροκίνητα από τον χρήστη μέσω μίας συγκεκριμένης εντολής που θα αναφερθεί μετέπειτα, προσφέροντας τη δυνατότητα μεταβολής αυτών, μετά την ολοκλήρωση του τεμαχίου. Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται βολική η παραμετρική μελέτη κατά την προσομοίωση και η συμπεριφορά του αντικειμένου σε διάφορους σχεδιασμούς. Οι δε προαναφερθείσες προσομοιώσεις διαθέτουν επίσης μια ποικιλία, καθώς μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τομείς από τη μελέτη μηχανικής αντοχής ενός τεμαχίου μέχρι τη μετάδοση θερμότητας και τη μηχανική των ρευστών.

2.2 Έναρξη λειτουργίας

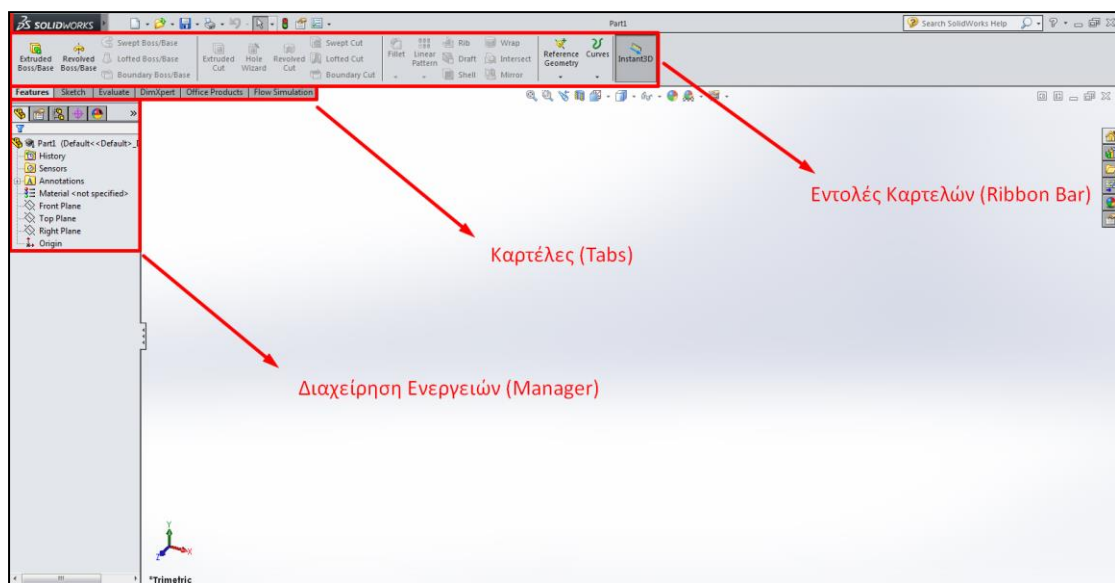
Για τη δημιουργία ενός καινούργιου αρχείου προς μελέτη, επιλέγεται το εικονίδιο **New** (📄), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, το οποίο μπορεί να είναι ένα μεμονωμένο τεμάχιο, ένα συναρμολόγημα, δηλαδή ένα σύνολο συνεργαζόμενων τεμαχίων, είτε ένα μηχανολογικό σχέδιο που αναφέρεται σε ένα εκ των παραπάνω.



Σχήμα 2.2.1: Δημιουργία νέου αρχείου στο SolidWorks

Επιλέγοντας ένα μεμονωμένο τεμάχιο, παρουσιάζεται η οθόνη επεξεργασίας που φαίνεται στη συνέχεια, στο Σχήμα 2.2.2. Στο εν λόγω σχήμα διακρίνονται οι συνιστώσες σχεδιασμού, οι οποίες συγκεκριμένα είναι:

- οι καρτέλες, στις οποίες περιλαμβάνονται οι εντολές τόσο για το σχέδιο στο επίπεδο όσο και για την αναπαράσταση στον τρισδιάστατο χώρο
- οι εντολές της κάθε καρτέλας, με τις οποίες υλοποιούνται τα χαρακτηριστικά του τεμαχίου
- η διαχείριση μέσω του δέντρου ενεργειών, όπου γίνεται καταγραφή των εν λόγω χαρακτηριστικών








Σχήμα 2.2.2: Αρχική οθόνη δημιουργίας τεμαχίου

2.3 Βασικές εντολές σχεδίασης


Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εν γένει για την αναπαράσταση αντικειμένων στον χώρο, χρησιμοποιείται η σχεδίαση στο επίπεδο κι έπειτα με διάφορων ειδών εντολές που θα εξηγηθούν στη συνέχεια γίνεται η μετάβαση στις τρεις διαστάσεις. Οι πιο χρήσιμες και απαραίτητες εντολές σχεδίασης στις δύο διαστάσεις παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

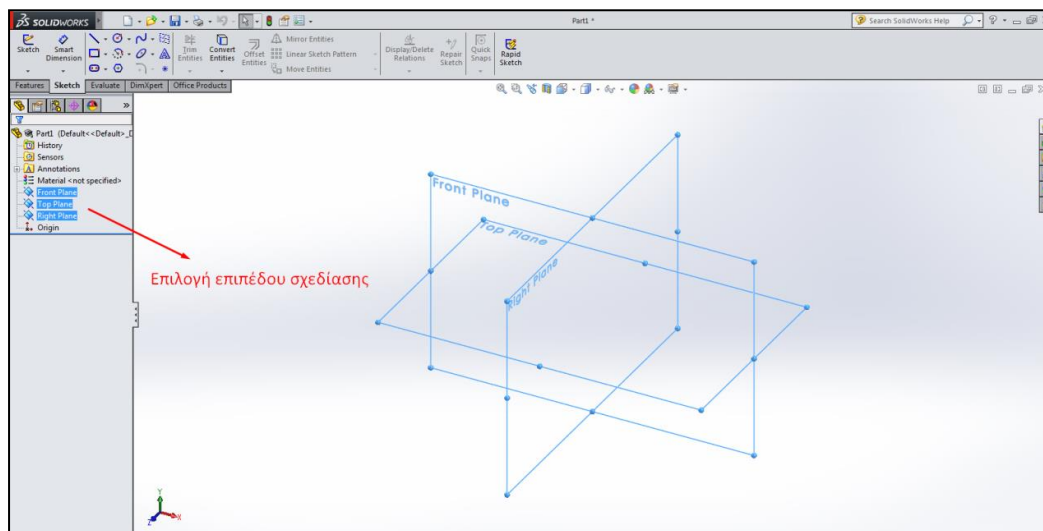
Πίνακας 2.3.1 : Βασικές εντολές σχεδίασης στο επίπεδο του SolidWorks

Συμβολισμός	Ονομασία	Χρήση εντολής
	Line	Σχεδίαση συμπαγούς ή αξονικής γραμμής

Συμβολισμός	Ονομασία	Χρήση εντολής
	Circle	Σχεδίαση κύκλου
	Corner Rectangle	Σχεδίαση ορθογωνίου παραλληλογράμμου από γωνία του
	Centerpoint Arc	Σχεδίαση τόξου κύκλου από το κέντρο του
	Trim Entities	Περικοπή υπάρχοντος ευθυγράμμου τμήματος
	Smart Dimension	Απόδοση διάστασης σε καμπύλη ή ευθύγραμμο τμήμα
	Offset Entities	Δημιουργία γεωμετρικά όμοιων σχημάτων
	Mirror Entities	Δημιουργία κατοπτρικών γεωμετριών ως προς άξονα

2.4 Εισαγωγή στη σχεδίαση

Αρχικά, επιλέγεται το επίπεδο επί του οποίου θα πραγματοποιηθεί το σχέδιο, ανάλογα με την όψη του τεμαχίου που θα σχεδιαστεί σε πρώτη φάση. Το επιλεγόμενο επίπεδο επιβεβαιώνεται είτε μέσω την εντολής **Sketch** () είτε απλά επιλέγοντας την επιθυμητή εντολή με βάση το επίπεδο.

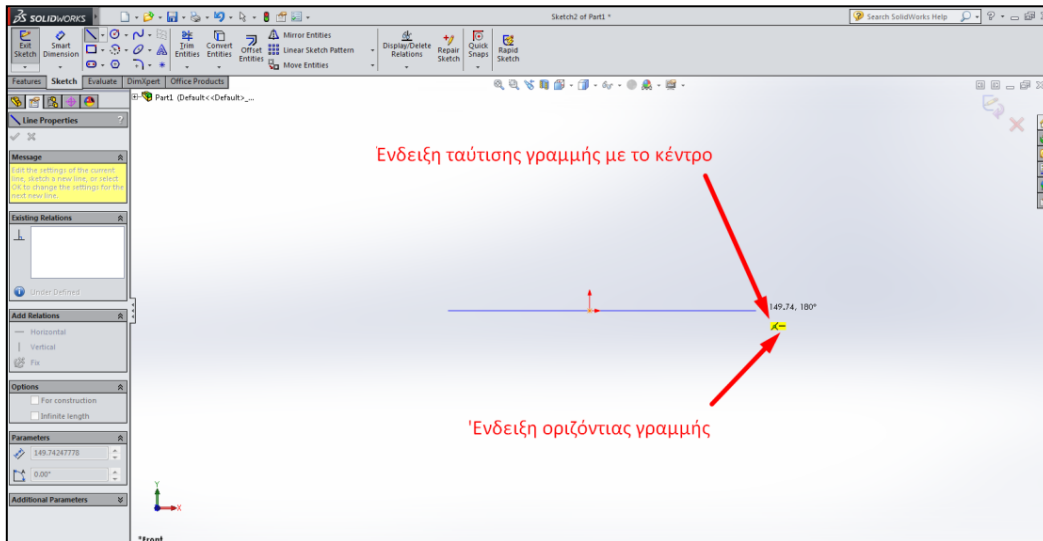


Σχήμα 2.4.1 : Επιλογή του επιπέδου σχεδίασης

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι βασικότερες κι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες εντολές κατά τη σχεδίαση.

2.4.1 Εντολή Line (↘)

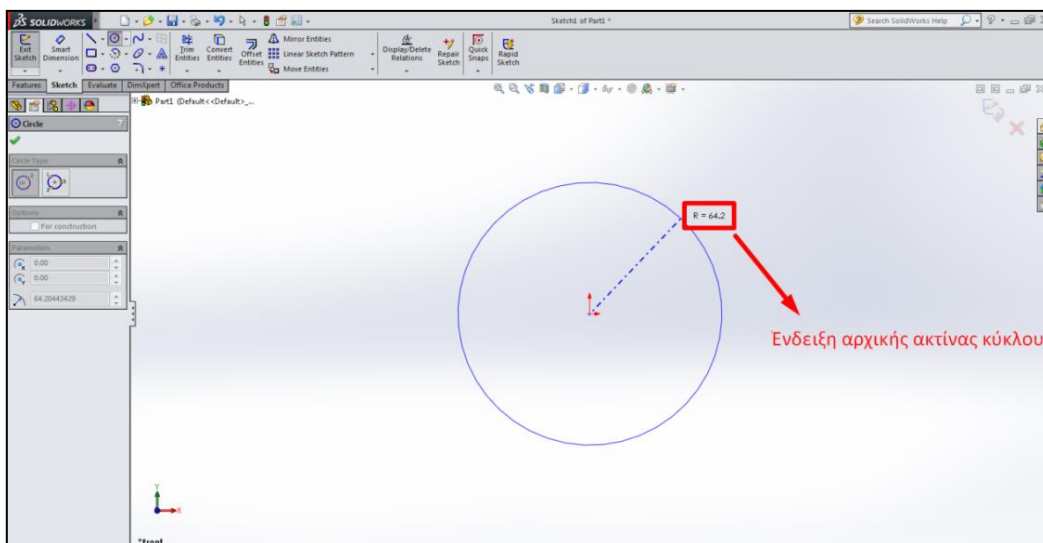
Κατά την επιλογή της δεδομένης εντολής, το ίδιο το λογισμικό υποβοηθά τον χρήστη, γεγονός που λαμβάνει χώρα σχεδόν σε κάθε εντολή, όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Παραδείγματος χάρη, το πρόγραμμα εμφανίζει ένδειξη στην περίπτωση που η σχεδιαζόμενη γραμμή είναι οριζόντια ή κατακόρυφη ως προς την αρχή των αξόνων, το οποίο βοηθάει σημαντικά, διευκολύνοντας τη διαδικασία και μειώνοντας το σχεδιαστικό χρόνο, όπως φαίνεται και στο κάτωθι σχήμα:



Σχήμα 2.4.2: Σχεδίαση γραμμής

2.4.2 Εντολή Circle (⊙)

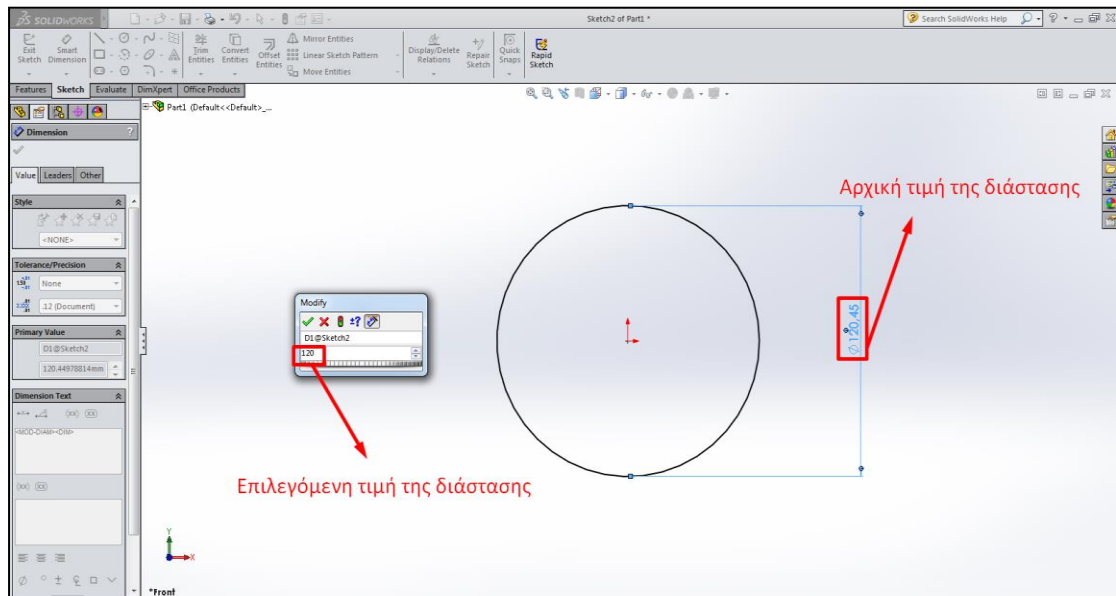
Μέσω αυτής της εντολής, σχηματίζεται ένας κύκλος αυθαίρετης, αρχικά, ακτίνας, ξεκινώντας από τον ορισμό της θέσης του κέντρου του.



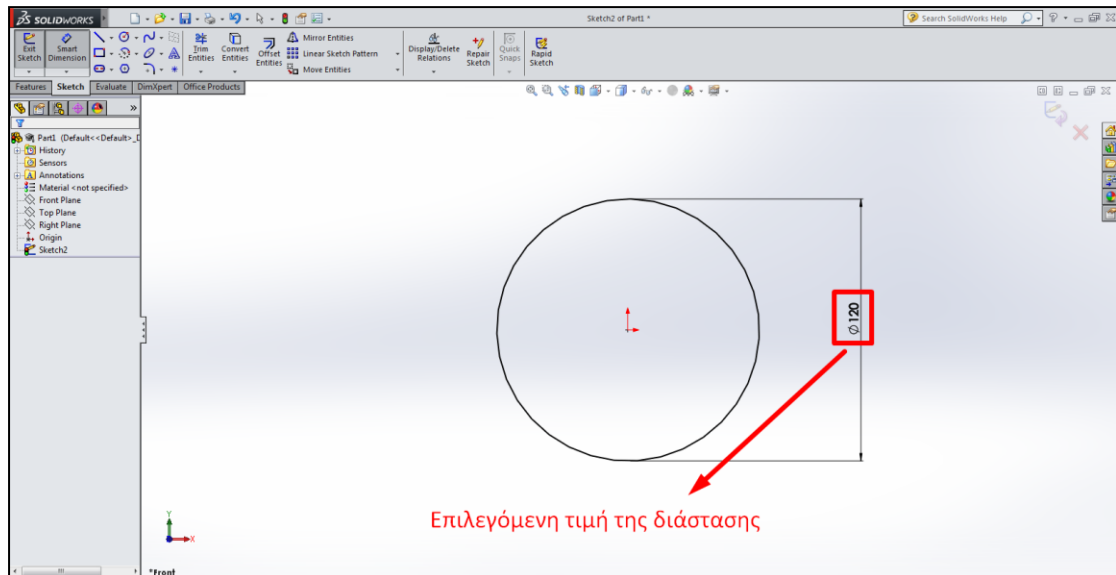
Σχήμα 2.4.3: Σχεδίαση κύκλου

2.4.3 Εντολή Smart Dimension ()

Πρόκειται για μία επίσης πολύ σημαντική εντολή, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να ορίζει με ακρίβεια τις διαστάσεις γεωμετριών, παραδείγματος χάρη γραμμών και κύκλων, όπως προαναφέρθηκε. Αφού επιλεγεί η εντολή από το Ribbon bar, εφαρμόζεται στη δεδομένη γεωμετρία κι έπειτα εμφανίζεται ένα παράθυρο από το πρόγραμμα για τον ακριβή προσδιορισμό της διάστασης.



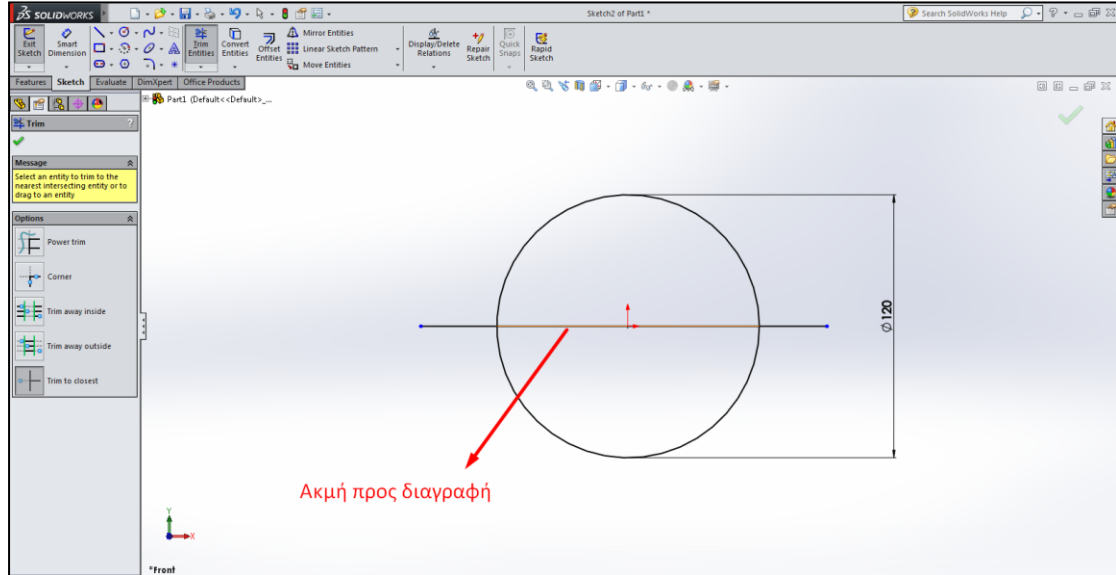
Σχήμα 2.4.4: Απόδοση διάστασης σε κύκλο



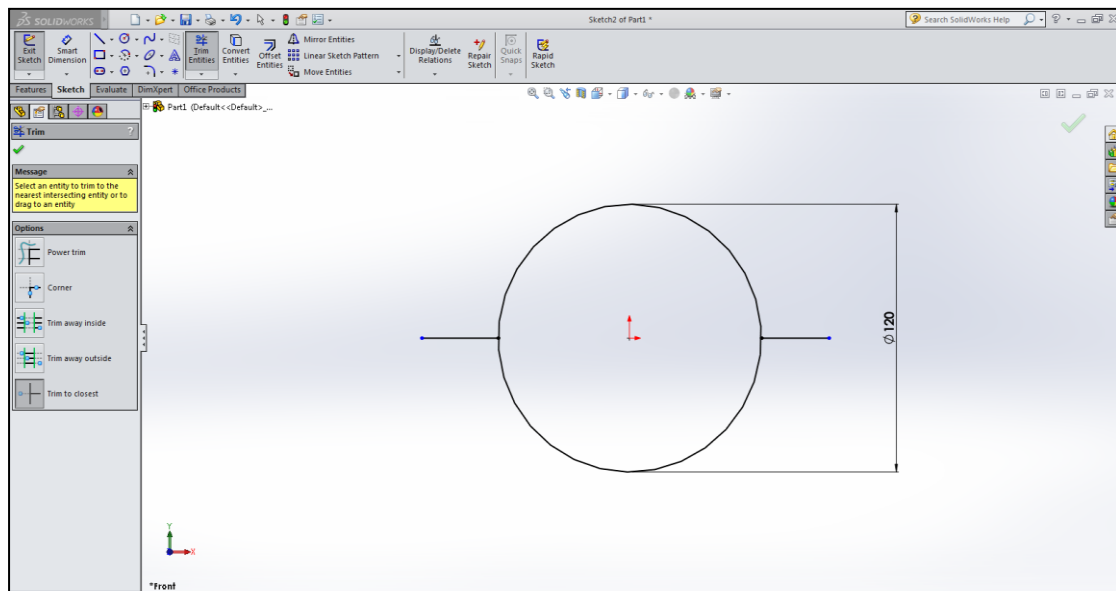
Σχήμα 2.4.5: Εφαρμογή επιλεγόμενης διάστασης σε κύκλο

2.4.4 Εντολή Trim Entities (✂)

Η εντολή αυτή προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα διαγραφής από το σχέδιο τυχόν ανεπιθύμητων τμημάτων κάποιων γεωμετριών, όπως περιπτώσεων ακμών ή ευθύγραμμων τμημάτων. Η λειτουργία της παρουσιάζεται στη συνέχεια:



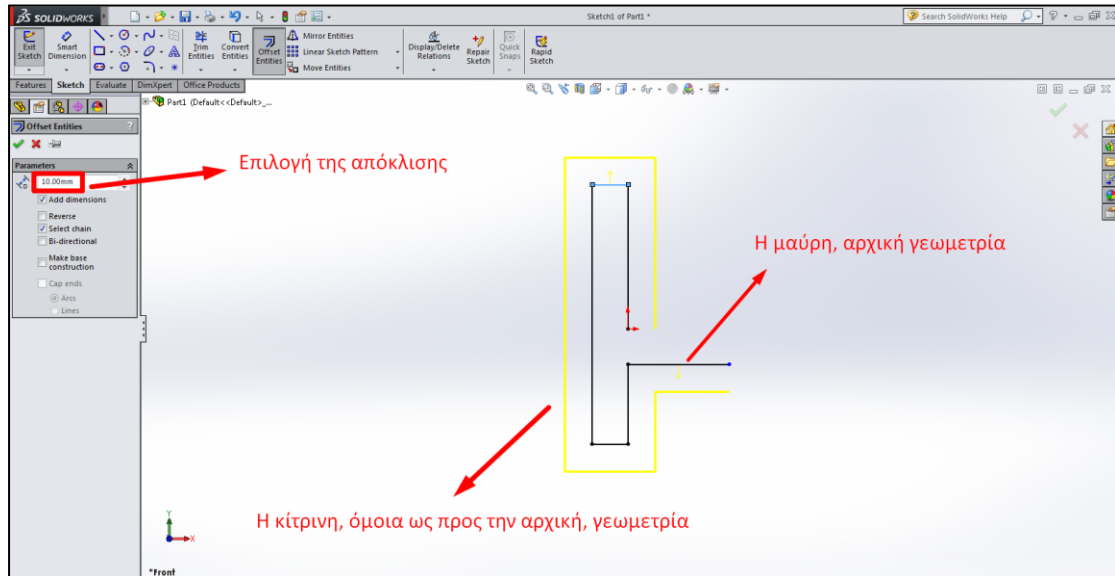
Σχήμα 2.4.6: Καθορισμός ανεπιθύμητου τμήματος προς περικοπή



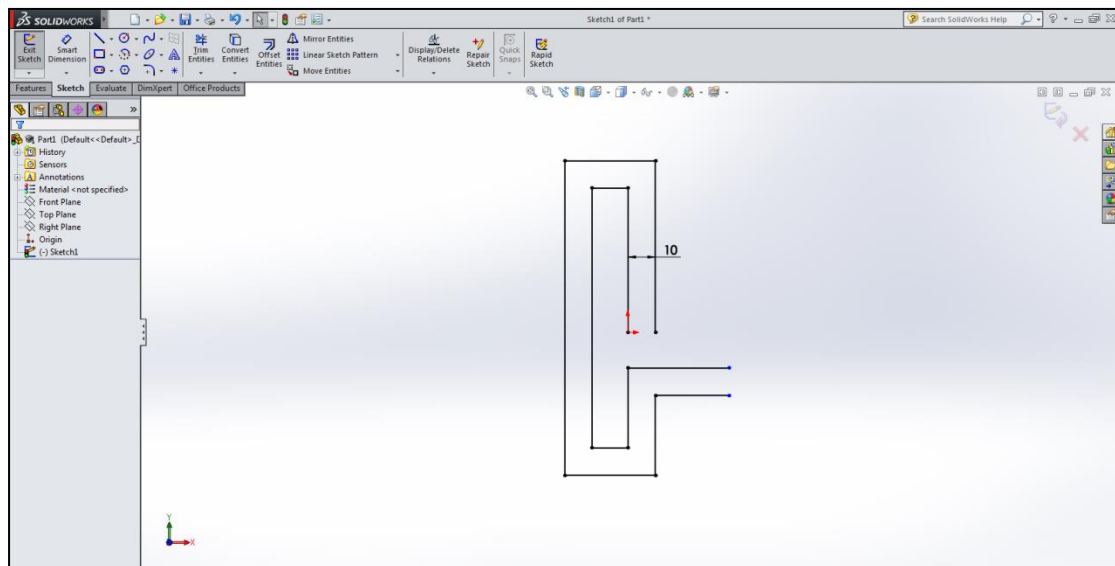
Σχήμα 2.4.7: Προκύπτουσα γεωμετρία από την περικοπή

2.4.5 Εντολή Offset Entities ()

Με αυτήν την εντολή, δημιουργείται με βάση το σχήμα μίας υπάρχουσας γεωμετρίας μία όμοια της πρώτης, με μία επιλεγόμενη από τον χρήστη απόκλιση από την αρχική.



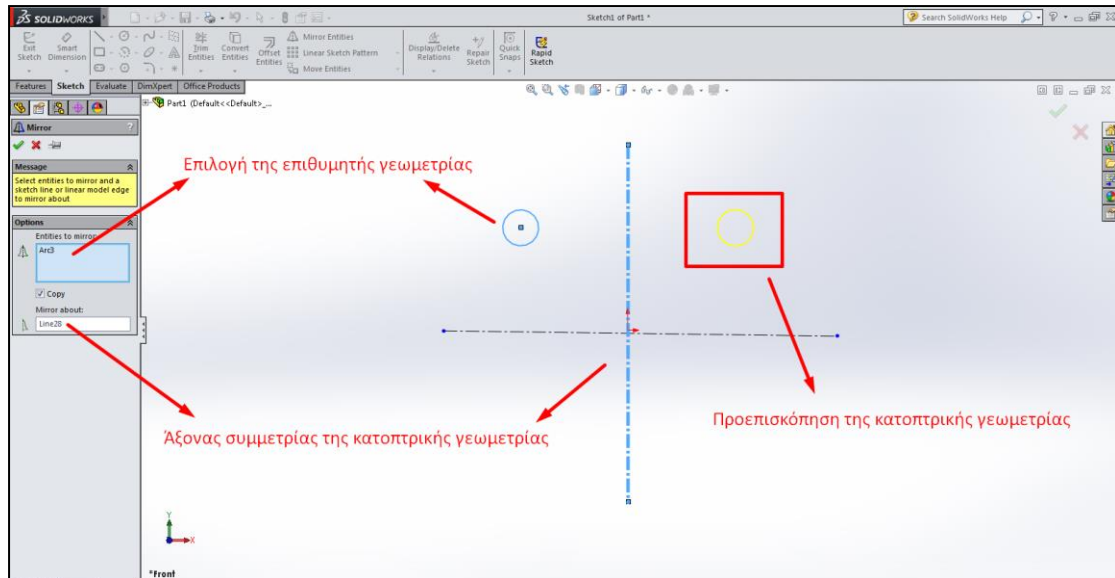
Σχήμα 2.4.8: Ορισμός και προεπισκόπηση της όμοιας γεωμετρίας



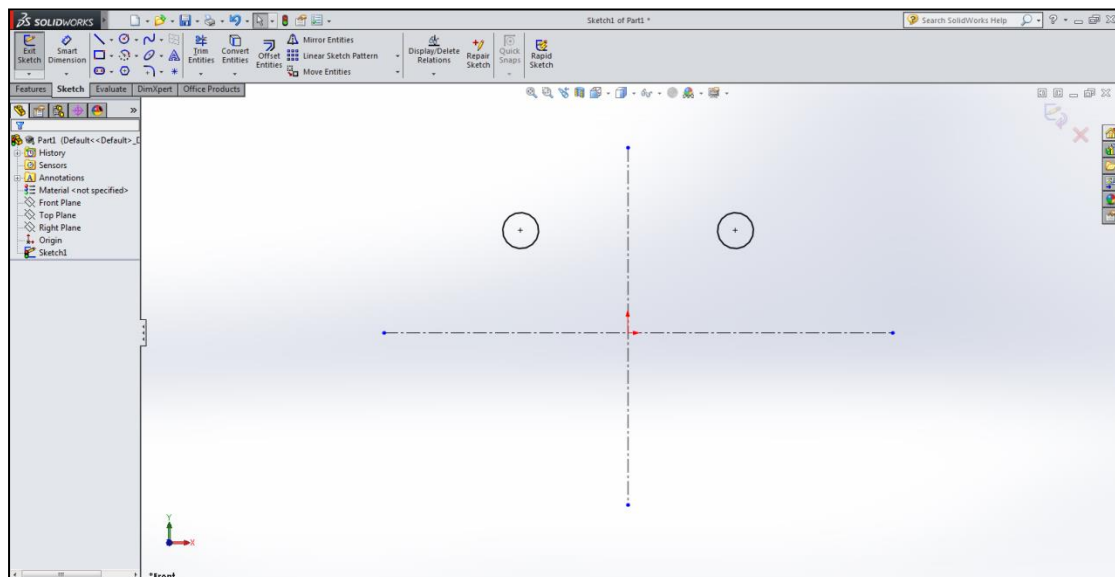
Σχήμα 2.4.9: Προκύπτουσα γεωμετρία από την εντολή Offset Entities

2.4.6 Εντολή Mirror Entities (⚠)

Αυτή η εντολή μπορεί, έχοντας πάλι μία δεδομένη γεωμετρία, όπως έναν κύκλο, μία ευθεία ή και κάποιο πιο περίπλοκο σχήμα, να αναπαράγει αυτή τη γεωμετρία, δημιουργώντας ένα αντίγραφο, συμμετρικό ως προς κάποιον άξονα. Ο άξονας αυτός μπορεί να είναι είτε συμπαγής είτε αξονική ευθεία.




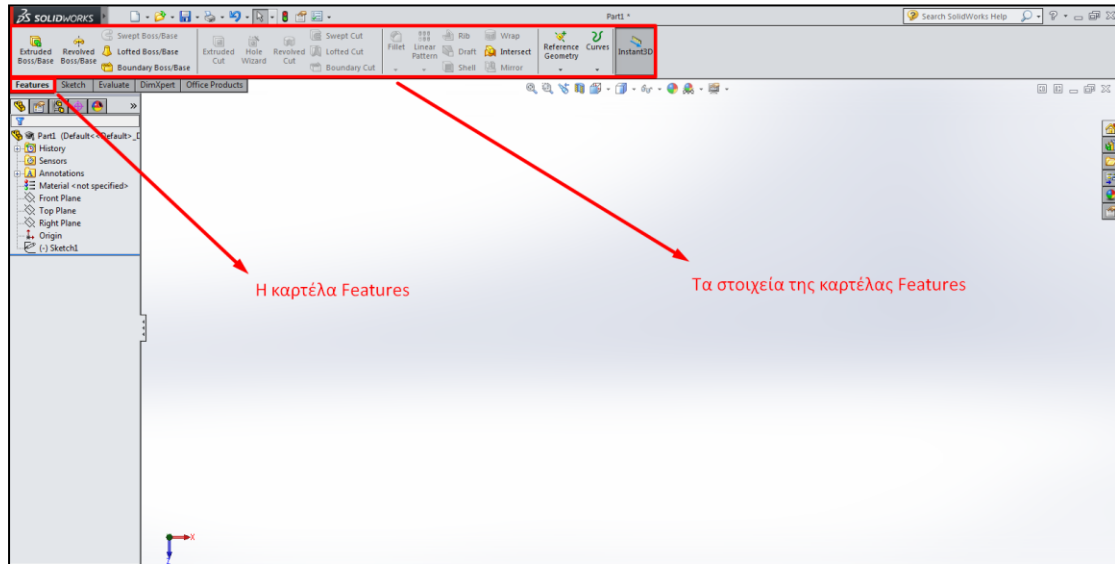
Σχήμα 2.4.10: Ορισμός και προεπισκόπηση της κατοπτρικής γεωμετρίας



Σχήμα 2.4.11: Προκύπτουσα γεωμετρία από την εντολή Mirror Entities

2.5 Εισαγωγή στη δημιουργία στερεού σώματος





Αφού ολοκληρωθεί το σχέδιο στο επίπεδο, επιλέγεται η εντολή **Exit Sketch** () πάνω αριστερά στην οθόνη, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μετάβαση στον τρισδιάστατο χώρο. Αυτό επιτυγχάνεται σε πρώτη φάση διαλέγοντας την καρτέλα **Features**, όπου παρουσιάζεται μια ευρεία κατηγορία εντολών, οι οποίες θα αναφερθούν ως προς τη λειτουργία τους στη συνέχεια.






Σχήμα 2.5.1: Επιλογή των εντολών κατηγορίας Features

Οι κυριότερες εντολές που εφαρμόζονται στο τρισδιάστατο επίπεδο παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα, ενώ ο ρόλος της κάθε μίας εκφράζεται αναλυτικά μετέπειτα.

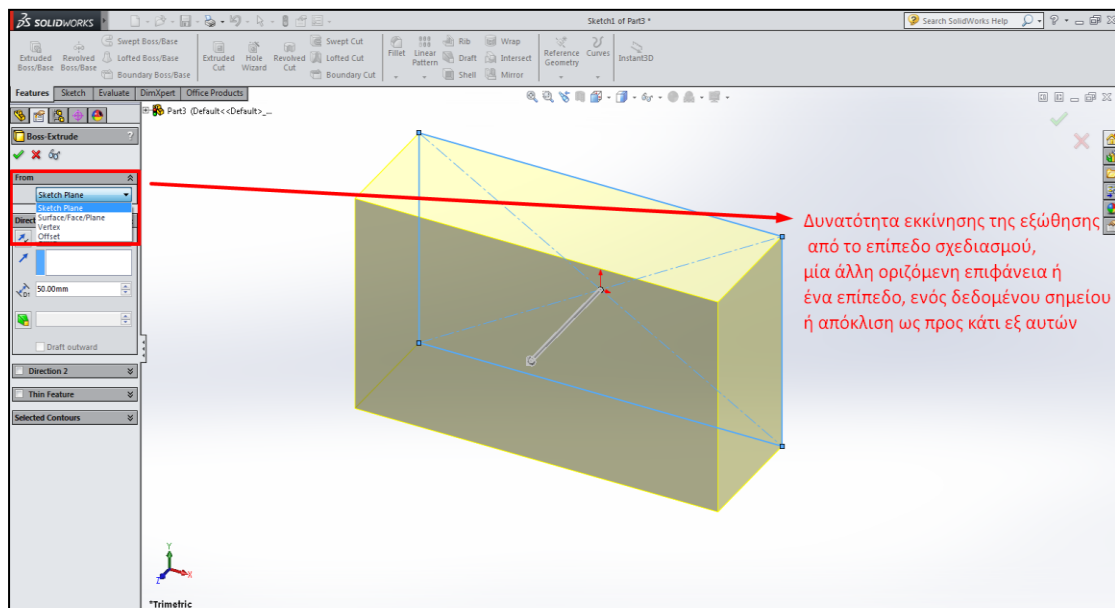
Πίνακας 2.5.1: Βασικές εντολές δημιουργίας στερεού σώματος στο SolidWorks

Συμβολισμός	Ονομασία	Χρήση Εντολής
	Extruded Boss/Base	Εξώθηση δεδομένου περιγράμματος στον χώρο
	Revolved Boss/Base	Δημιουργία εκ περιστροφής συμμετρικού αντικειμένου
	Swept Boss/Base	Δημιουργία γεωμετρίας εκ περιγράμματος σε τρισδιάστατο μονοπάτι
	Extruded Cut	Διάτρηση περιγράμματος σε υπάρχον στερεό σώμα

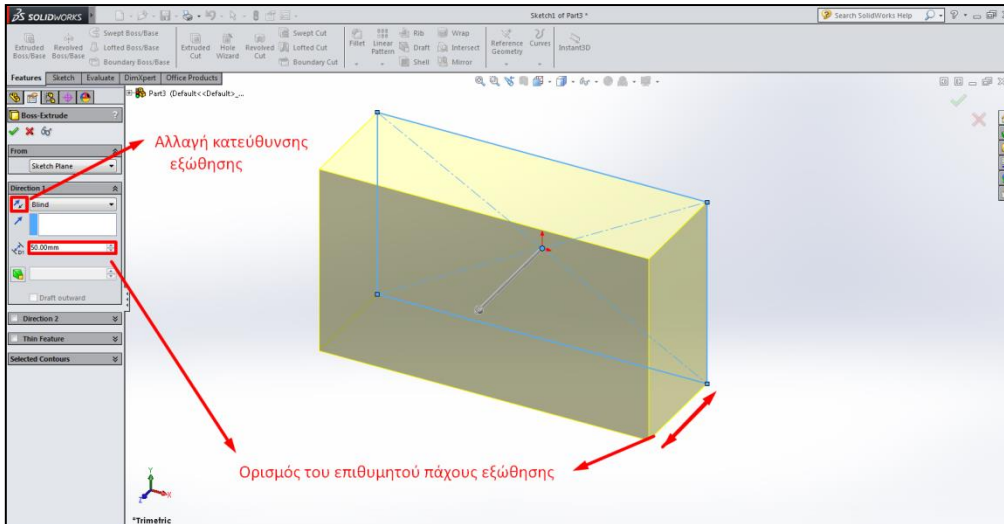
Συμβολισμός	Ονομασία	Χρήση Εντολής
	Revolved Cut	Διάτρηση εκ περιστροφής συμμετρικού περιγράμματος από σώμα
	Linear Pattern	Αντιγραφή ενός στερεού σώματος επί μονοπατιού
	Mirror	Δημιουργία κατοπτρικού στερεού σώματος ως προς κάποιο επίπεδο

2.5.1 Εντολή Extruded Boss/Base ()

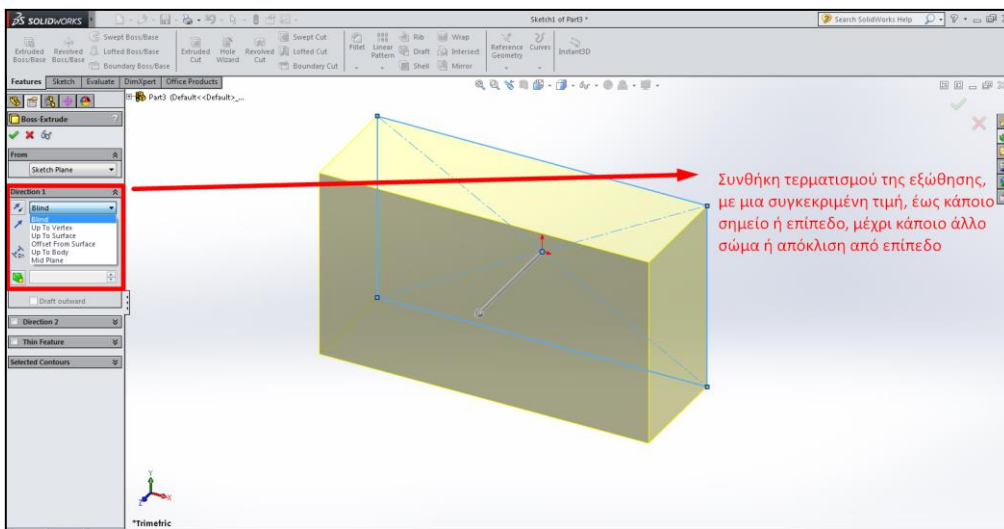
Αποτελεί τη βασικότερη εντολή κατά την τρισδιάστατη αναπαράσταση. Δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός αντικειμένου στον χώρο από ένα κλειστό περίγραμμα στο επίπεδο, «προεκτείνοντάς» το στον χώρο, στην ουσία κατά μία διάσταση, κάθετο στο επίπεδο σχεδιασμού. Υπάρχουν, επιπλέον, διάφορες εναλλακτικές σχεδιασμού, που περιλαμβάνουν την εκκίνηση του επιπέδου από το οποίο θα γίνει η κατασκευή, την επιλογή «λεπτού τοιχώματος» (Thin Feature), τις δύο κατευθύνσεις κατά την εξώθηση κι άλλα.



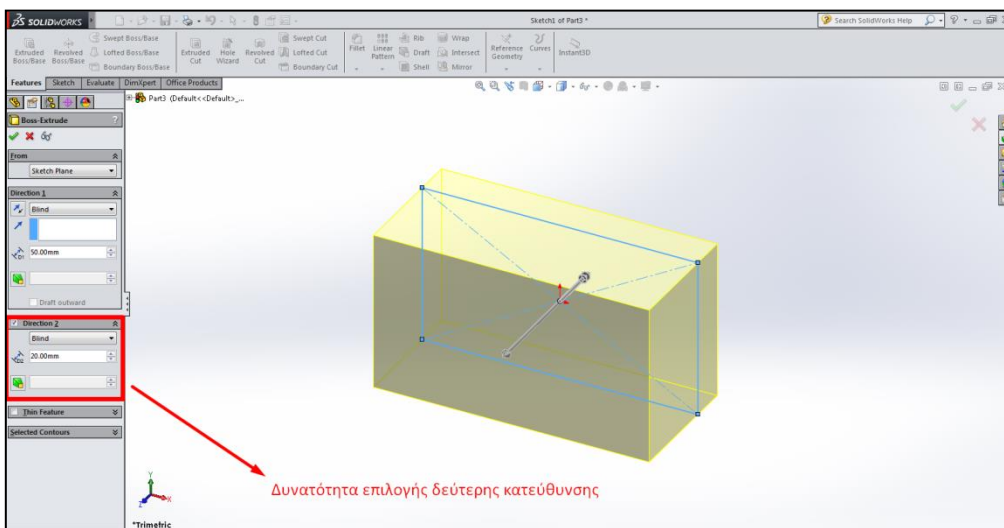
Σχήμα 2.5.2: Ορισμός και προεπισκόπηση κατά την εντολή Extruded Boss/Base



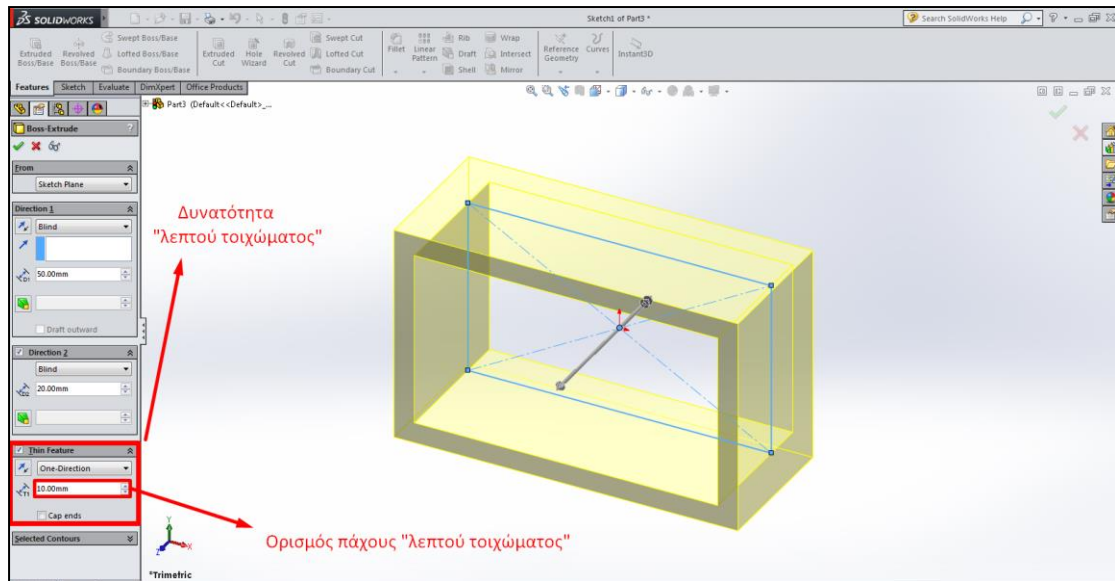
Σχήμα 2.5.3: Εκκίνηση της εξώθησης κατά την εντολή Extruded Boss/Base



Σχήμα 2.5.4: Τερματισμός της εξώθησης κατά την εντολή Extruded Boss/Base



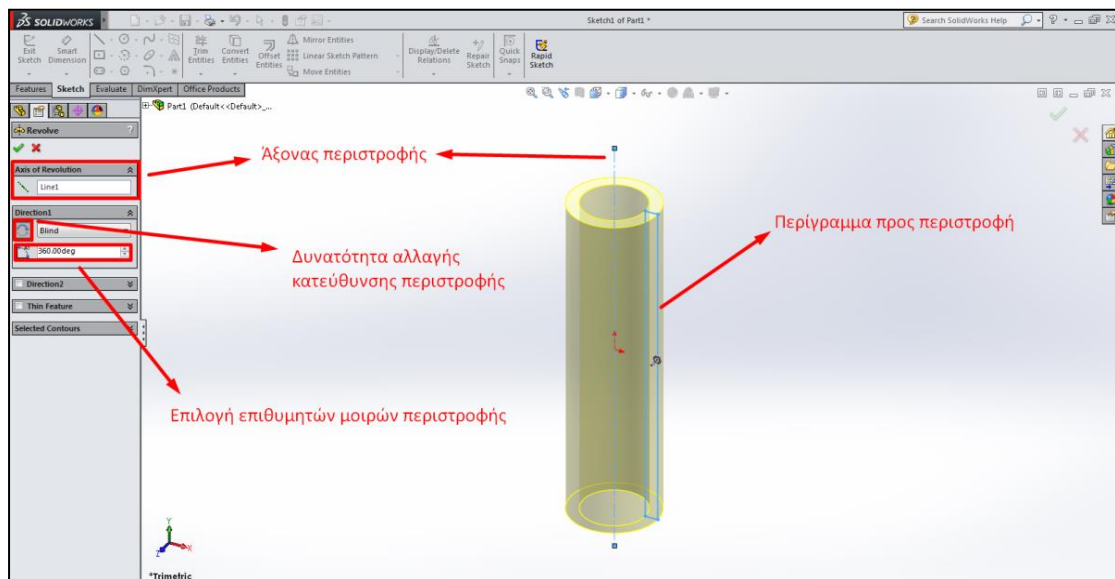
Σχήμα 2.5.5: Επιλογή δεύτερης κατεύθυνσης κατά την εντολή Extruded Boss/Base



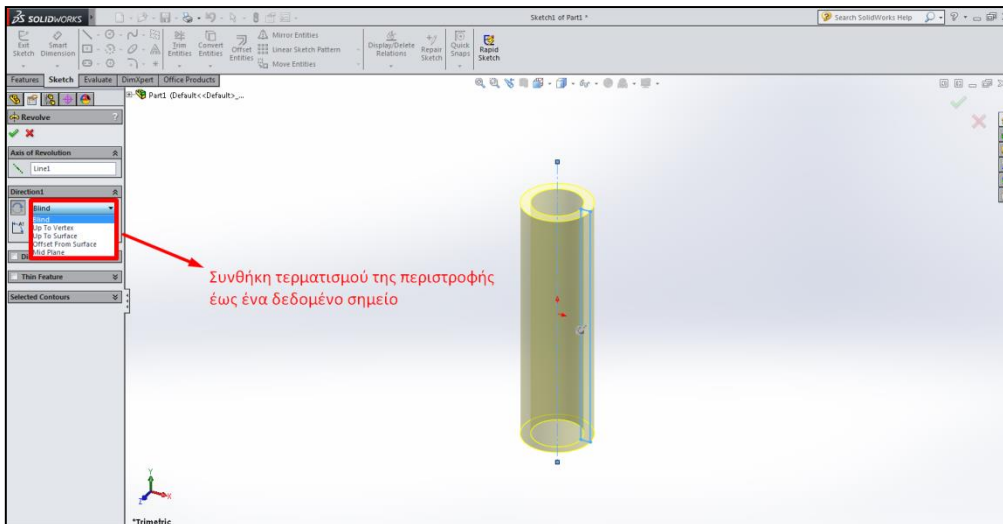
Σχήμα 2.5.6: Χαρακτηριστικό «λεπτού τοιχώματος» κατά την εντολή Extruded Boss/Base

2.5.2 Εντολή Revolved Boss/Base ()

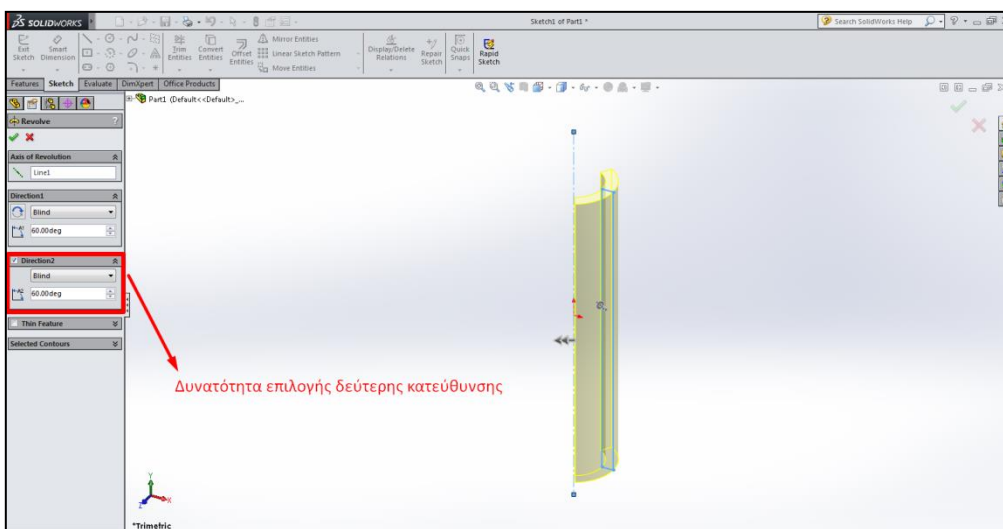
Η συγκεκριμένη εντολή επιτρέπει στον χρήστη τη δημιουργία εκ περιστροφής συμμετρικών στερεών σωμάτων, επιλέγοντας ένα κλειστό περίγραμμα από ένα σχέδιο και περιστρέφοντάς το περί ενός άξονα, που μπορεί να είναι είτε συμπαγής είτε αξονική γραμμή. Όπως και παραπάνω, δίνονται διάφορες επιλογές κατά τη διεκπεραίωση της εντολής, όπως δεύτερη κατεύθυνση, επιθυμητές μοίρες περιστροφής και δυνατότητα συνθήκης τερματισμού ως προς κάποιο σημείο ή επίπεδο, όπως και προηγουμένως.



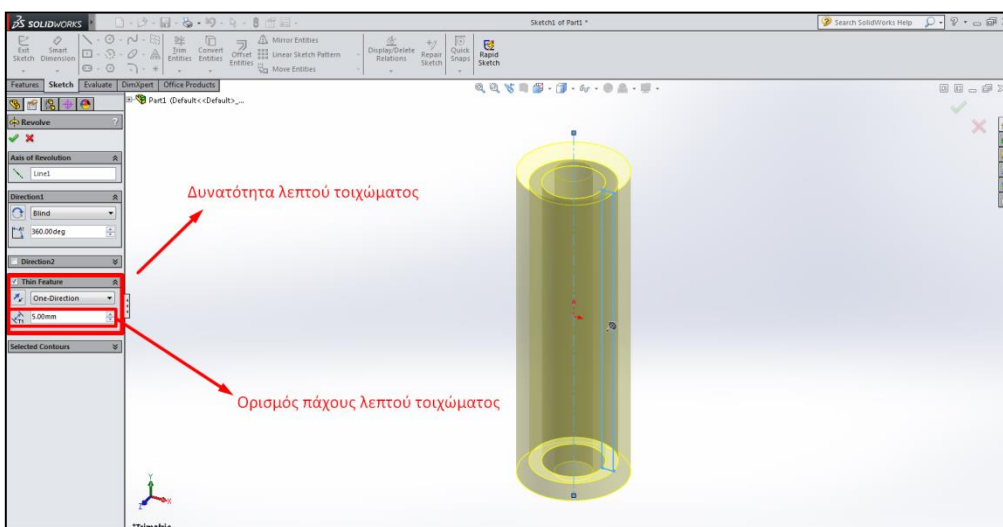
Σχήμα 2.5.7: Ορισμός και προεπισκόπηση κατά την εντολή Revolved Boss/Base



Σχήμα 2.5.8: Τερματισμός της περιστροφής κατά την εντολή Revolved Boss/Base



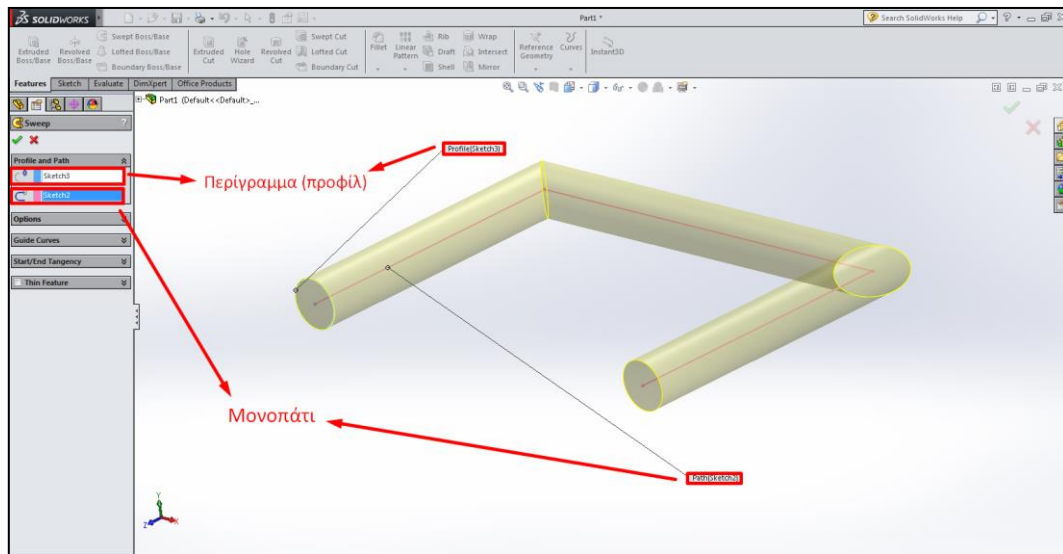
Σχήμα 2.5.9: Επιλογή δεύτερης κατεύθυνσης κατά την εντολή Revolved Boss/Base



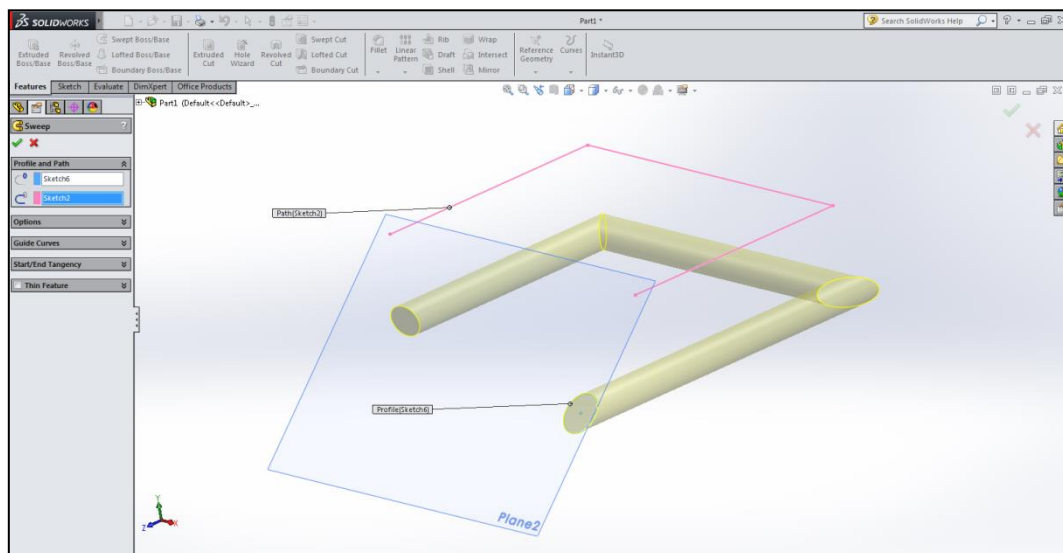
Σχήμα 2.5.10: Χαρακτηριστικό «λεπτού τοιχώματος» κατά την εντολή Revolved Boss/Base

2.5.3 Εντολή Swept Boss/Base (G)

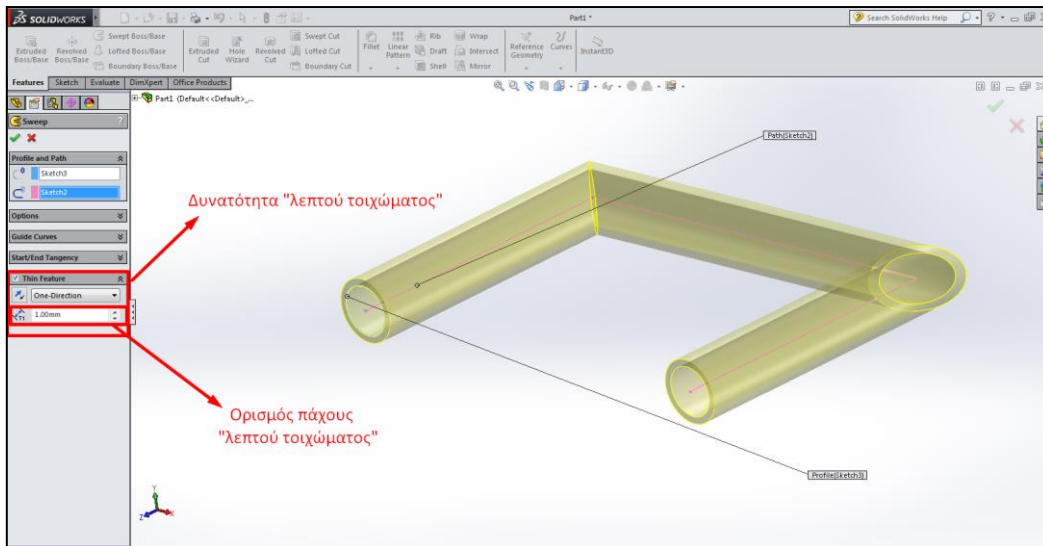
Κατά την εκτέλεση αυτής της εντολής, απαιτούνται δύο ειδών σχέδια, το περίγραμμα και το μονοπάτι. Συγκεκριμένα, το περίγραμμα εξωθείται κατά την κατεύθυνση του μονοπατιού στον τρισδιάστατο χώρο, το οποίο μπορεί να είναι είτε κλειστό είτε ανοιχτό, δημιουργώντας έτσι ένα στερεό σώμα. Συνήθως δε το περίγραμμα βρίσκεται σε επίπεδο 90 μοιρών ως προς το μονοπάτι, χωρίς αυτό ωστόσο να είναι απαραίτητο, όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 2.5.12, ενώ υπάρχει και σε αυτήν την εντολή η επιλογή «λεπτού τοιχώματος».



Σχήμα 2.5.11: Ορισμός και προεπισκόπηση κατά την εντολή Swept Boss/Base



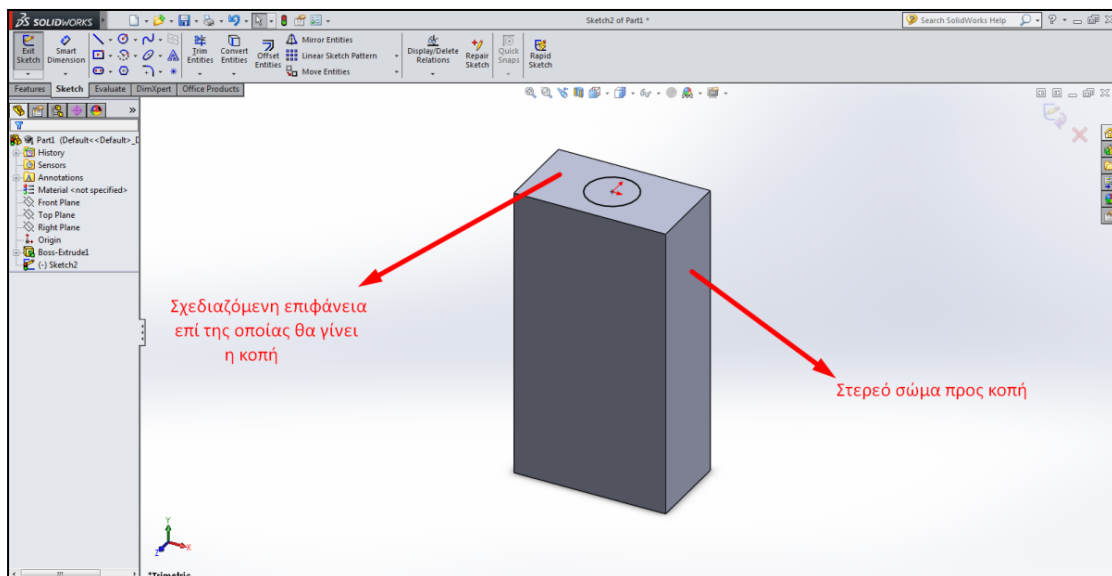
Σχήμα 2.5.12: Ορισμός περιγράμματος σε άλλο επίπεδο κατά την εντολή Swept Boss/Base



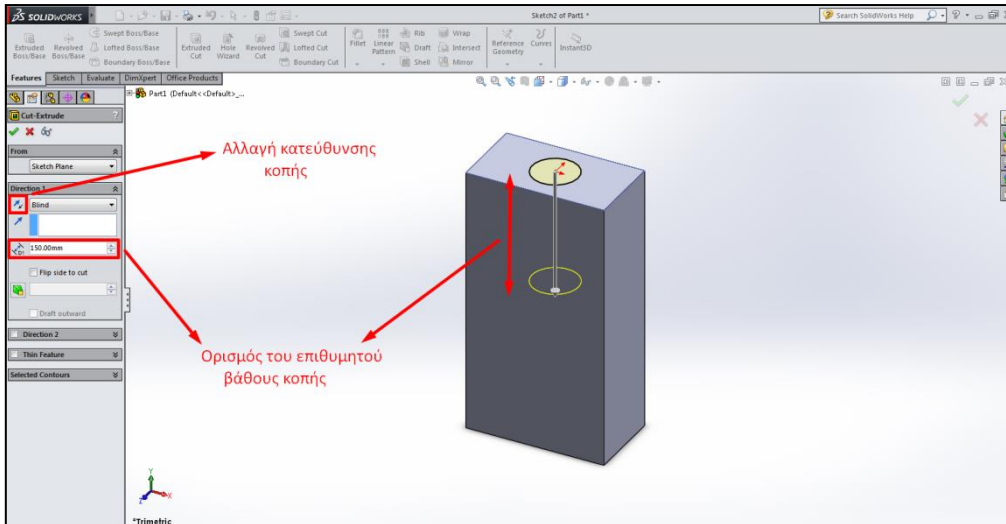
Σχήμα 2.5.13: Χαρακτηριστικό «λεπτού τοιχώματος» κατά την εντολή Sweep Boss/Base

2.5.4 Εντολή Extruded Cut ()

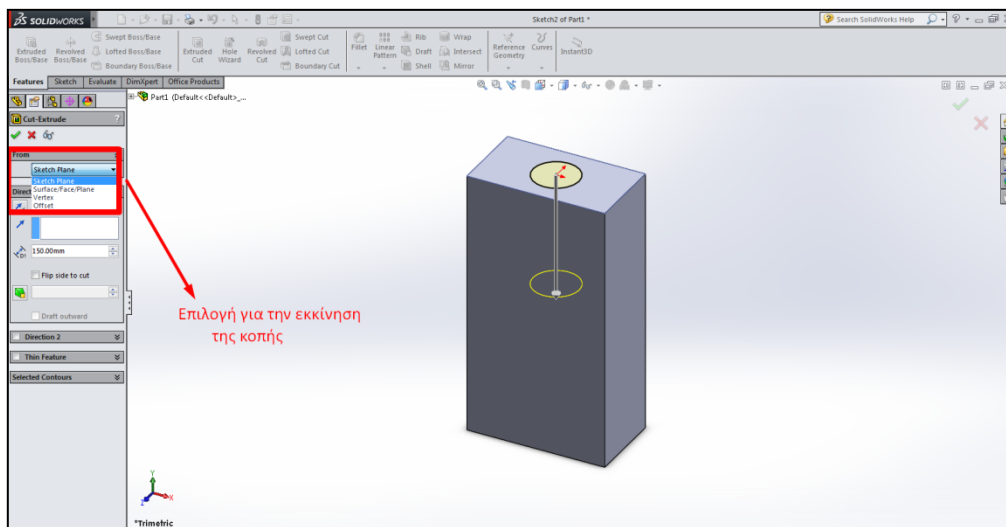
Η συγκεκριμένη εντολή λειτουργεί σχεδιαστικά κατά παρόμοιο τρόπο με την Extruded Boss/Base, ωστόσο αντί να προσθέτει τη σχεδιαζόμενη γεωμετρία από κάποιο επίπεδο ή επιφάνεια, την αφαιρεί από ένα στερεό σώμα που έχει υλοποιηθεί προηγουμένως. Κατά συνέπεια, το κόψιμο που πραγματοποιείται κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να έχει διάφορες μορφές, όπως αφαίρεση υλικού με σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου, κυλίνδρου κι άλλα.



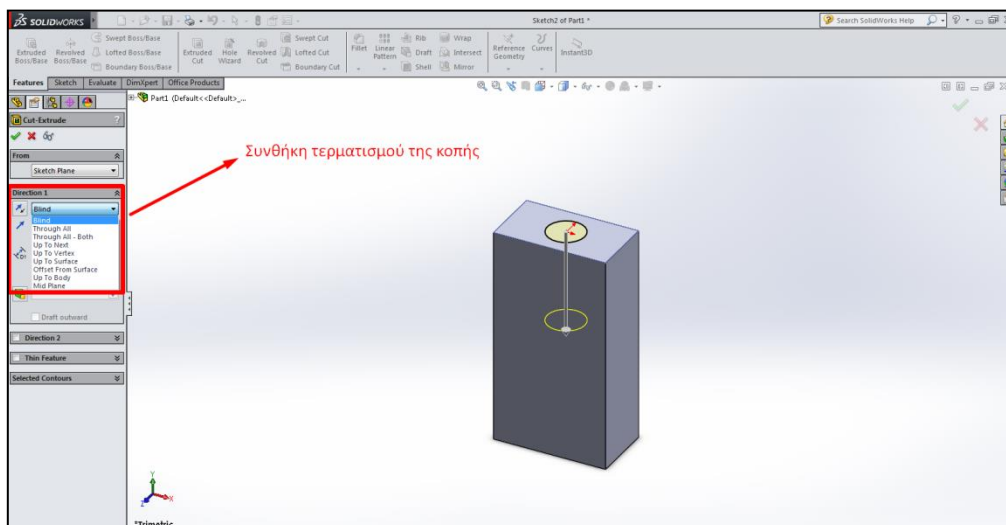
Σχήμα 2.5.14: Σχεδιασμός επί επιφάνειας κατά την εντολή Extruded Cut



Σχήμα 2.5.15: Ορισμός και προεπισκόπηση κατά την εντολή Extruded Cut

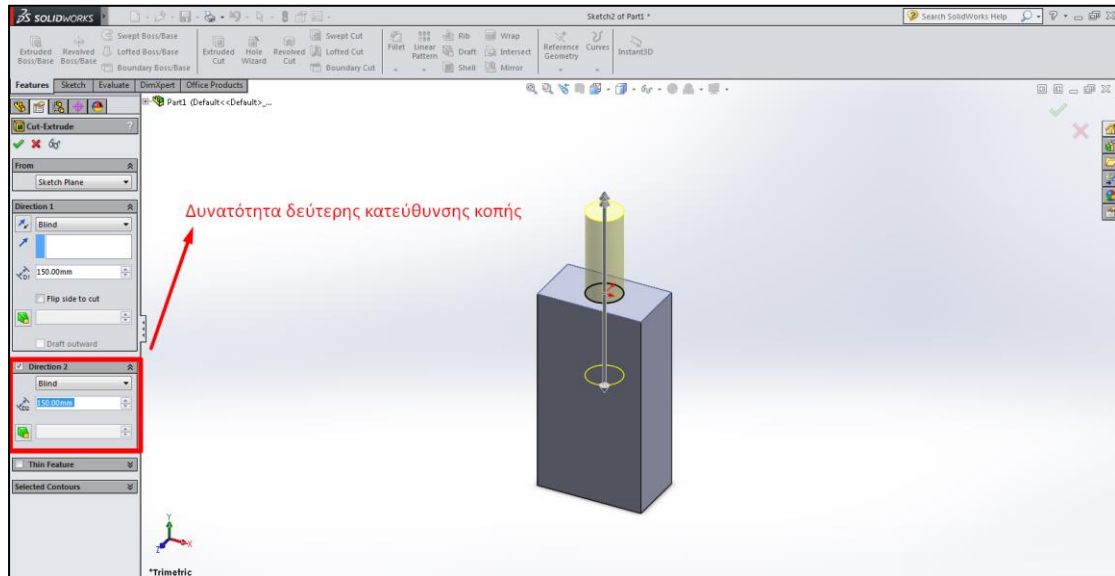


Σχήμα 2.5.16: Εκκίνηση της κοπής κατά την εντολή Extruded Cut

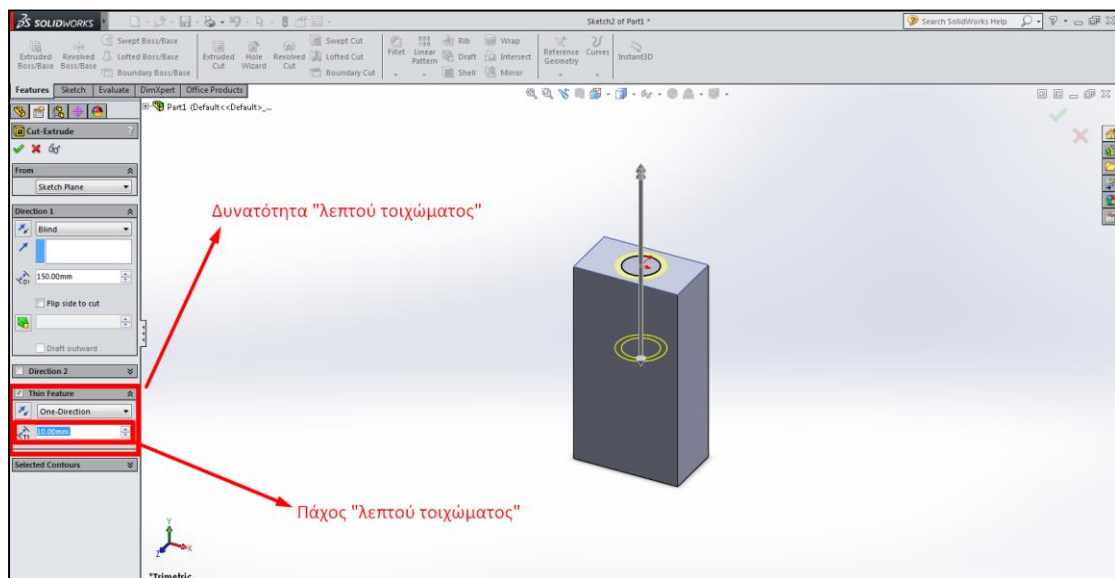


Σχήμα 2.5.17: Τερματισμός της εξώθησης κατά την εντολή Extruded Cut

Όπως και προηγουμένως, δίνεται η δυνατότητα και δεύτερης κατεύθυνσης κοπής, η οποία επιδεικνύεται παρακάτω. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ωστόσο, είναι προφανές ότι αυτή δεν έχει πρακτική σημασία, καθώς το νοητό στερεό, ο όγκος του οποίου αποτελεί τον αφαιρούμενο όγκο κοπής, δεν έρχεται σε επαφή με κάποιο στερεό κατά την έννοια της αντίθετης κατεύθυνσης, οπότε δεν υφίσταται κοπή κάποιου υλικού.



Σχήμα 2.5.18: Επιλογή δεύτερης κατεύθυνσης κατά την εντολή Extruded Cut



Σχήμα 2.5.19: Χαρακτηριστικό «λεπού τοιχώματος» κατά την εντολή Extruded Cut

Στη συνέχεια, κάνοντας χρήση τόσο των σχεδιαστικών εντολών όσο και των εντολών στερεού σώματος, περιγράφεται διεξοδικά ο σχεδιασμός του συλλέκτη με το πρόγραμμα SolidWorks. Αναλύονται αρχικά τα τμήματά του αποτελούν, ο επιμέρους

σχεδιασμός τους κι η συνεργασία κάθε ενός εξ αυτών για τη δημιουργία σου συνολικού συλλέκτη.

3 Σχεδιασμός του συλλέκτη με ομοαξονικό σύστημα ροής

3.1 Τμήματα του συλλέκτη

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα αναλυθεί ο εξεταζόμενος επίπεδος ηλιακός συλλέκτης ομοαξονικής διάταξης ως προς το σχεδιασμό του, ως προς τα μέρη του αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αυτά συνεργάζονται. Τα κύρια μέρη που αποτελούν το συλλέκτη κατά σειρά σχεδιασμού είναι τα ακόλουθα:

- Οπίσθια μόνωση
- Πλάκα απορρόφησης
- Διάταξη της σωλήνωσης , διανομέας κι εξωτερικός σωλήνας
- Πλάγια μόνωση
- Λαμαρίνα στήριξης του συλλέκτη
- Πλαίσιο αλουμινίου
- Κάλυμμα
- Στεγανοποίηση του καλύμματος

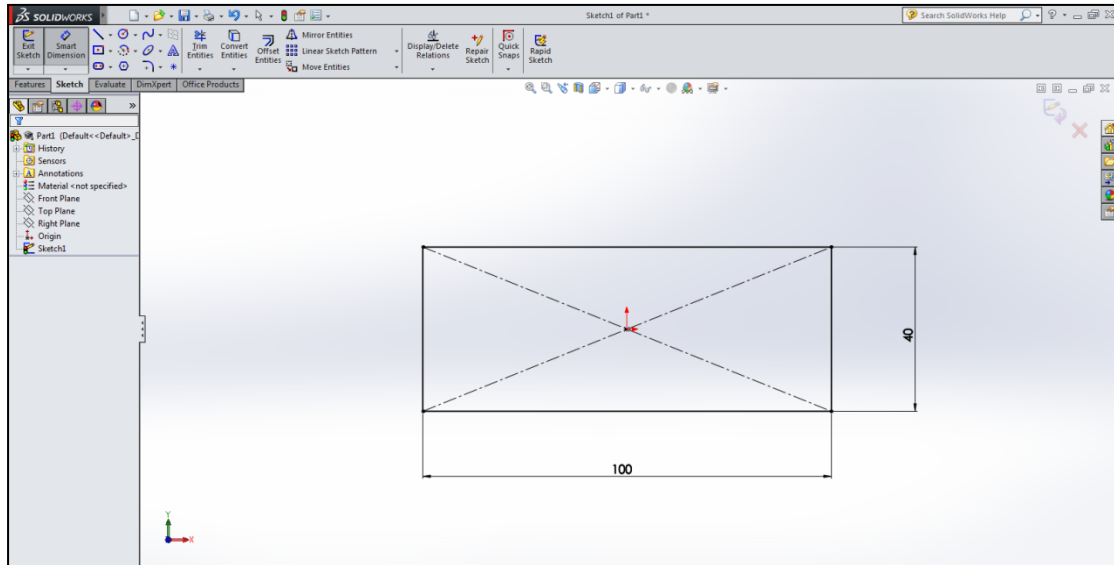
3.2 Σχεδιασμός της οπίσθιας μόνωσης και της πλάκας απορρόφησης

Το πρώτο τμήμα του συλλέκτη που σχεδιάστηκε είναι η πίσω μόνωση κι έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς επί αυτής θα στηριχθεί η πλάκα απορρόφησης. Δημιουργείται αρχικά σχεδιάζοντας το προφίλ της πρόοψής της, στο **Front Plane** κι έπειτα εξωθείται κατά την κατεύθυνση του βάρους, δημιουργώντας το τρισδιάστατο στερεό σώμα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη για την πίσω μόνωση.

Πίνακας 3.2.1: Χαρακτηριστικά της οπίσθιας μόνωσης

Χαρακτηριστικό συνιστώσας	Τιμή
Μήκος (mm)	1000
Πλάτος (mm)	100
Ύψος (mm)	40
Υλικό	Υαλοβάμβακας
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	0.04

Αρχικά, κατασκευάζεται στο **Front Plane** ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με την εντολή **Center Rectangle** περί του σημείου της αρχής των αξόνων με βάση 100 mm κι ύψος 40 mm.



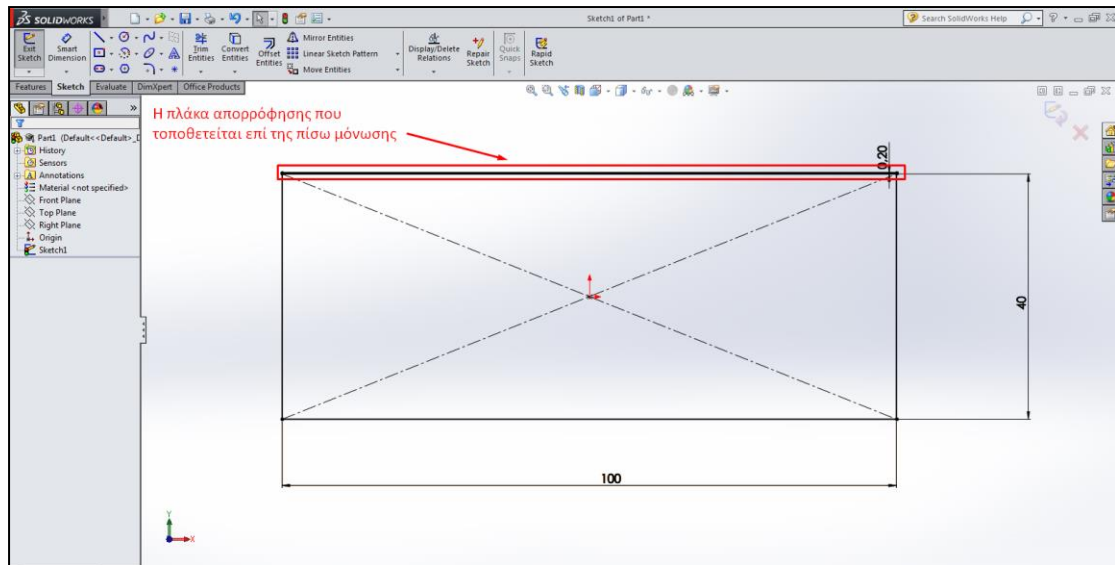
Σχήμα 3.2.1: Βασικός κορμός της οπίσθιας μόνωσης

Έπειτα, διαμορφώνεται ένα παραλληλόγραμμο όμοιο με το αρχικό μέσω της εντολής **Offset Entities** που αναφέρθηκε προηγουμένως, δημιουργώντας παράλληλα και την πλάκα απορρόφησης. Ο λόγος που η σχεδίαση των δύο γίνεται ταυτόχρονα κι όχι διαδοχικά θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Παρατίθενται παρακάτω και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της πλάκας απορρόφησης:

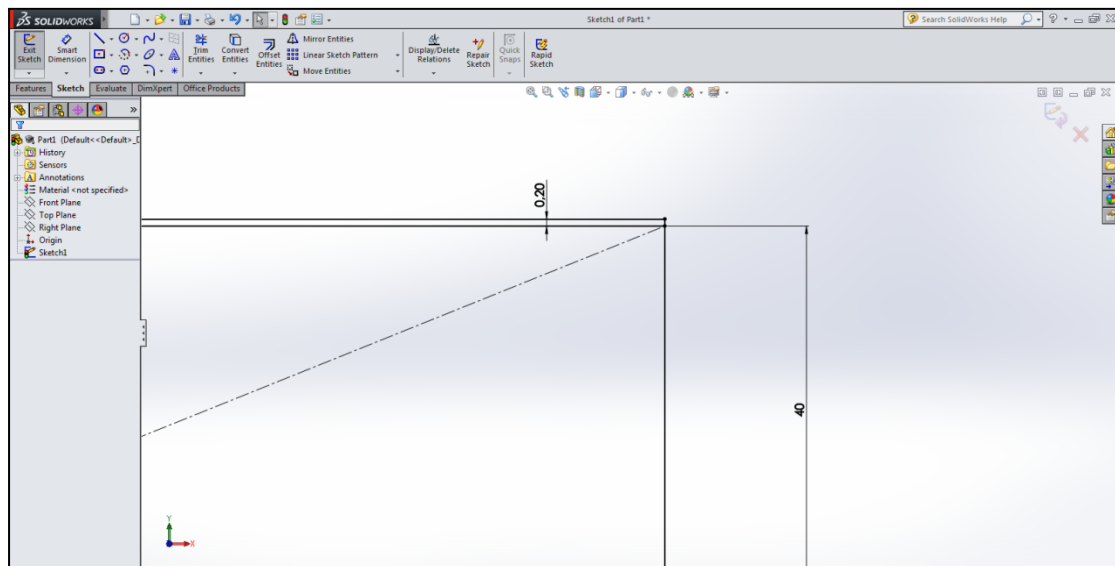
Πίνακας 3.2.2: Χαρακτηριστικά της πλάκας απορρόφησης

Χαρακτηριστικό συνιστώσας	Τιμή
Μήκος (mm)	1000
Πλάτος (mm)	100
Ύψος (mm)	0.2
Υλικό	Χαλκός

Επομένως, σχηματίζεται η εν λόγω διάταξη, που φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα:



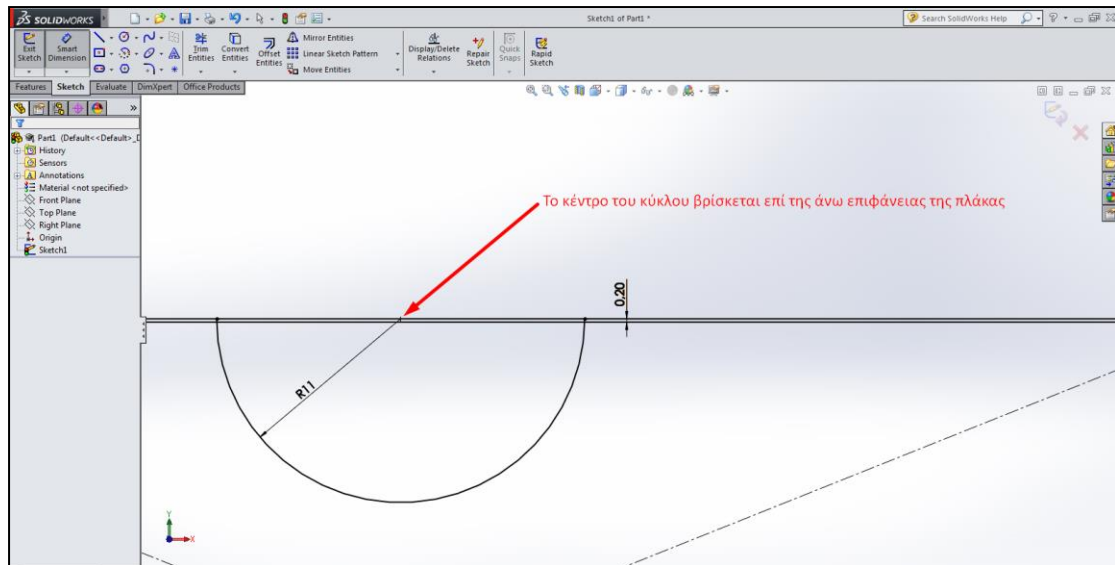
Σχήμα 3.2.2: Σχεδίαση της πλάκας απορρόφησης



Σχήμα 3.2.3: Λεπτομέρεια από τη σχεδίαση της πλάκας απορρόφησης

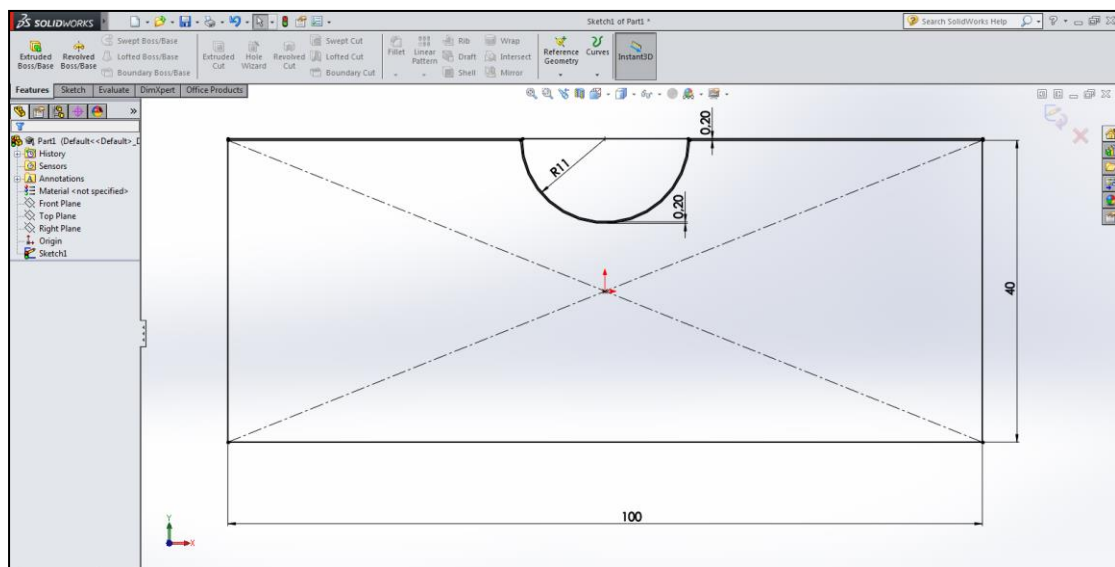
Κατόπιν, χρησιμοποιώντας την εντολή **Centerpoint Arc**, δημιουργείται η κοιλότητα σχήματος ημικυκλίου, επί της οποίας έπειτα θα στεγαστεί η διάταξη της σωλήνωσης. Εδώ καθίσταται φανερός ο λόγος που είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη σχεδίαση της πλάκας και της μόνωσης, καθώς το κέντρο του ημικυκλίου βρίσκεται επί της άνω επιφάνειας της πλάκας απορρόφησης κι όχι επί της άνω επιφάνειας της μόνωσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2.4.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός της χρήσης της εντολής **Smart Dimension** για να τεθεί η ακτίνα του ημικυκλίου ίση με 11mm. Επί αυτής της κοιλότητας, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, θα τοποθετηθεί η εξωτερική πλευρά του εξωτερικού σωλήνα της διάταξης σωλήνωσης, διαμέτρου $D_{0,2} = 22 \text{ mm}$.



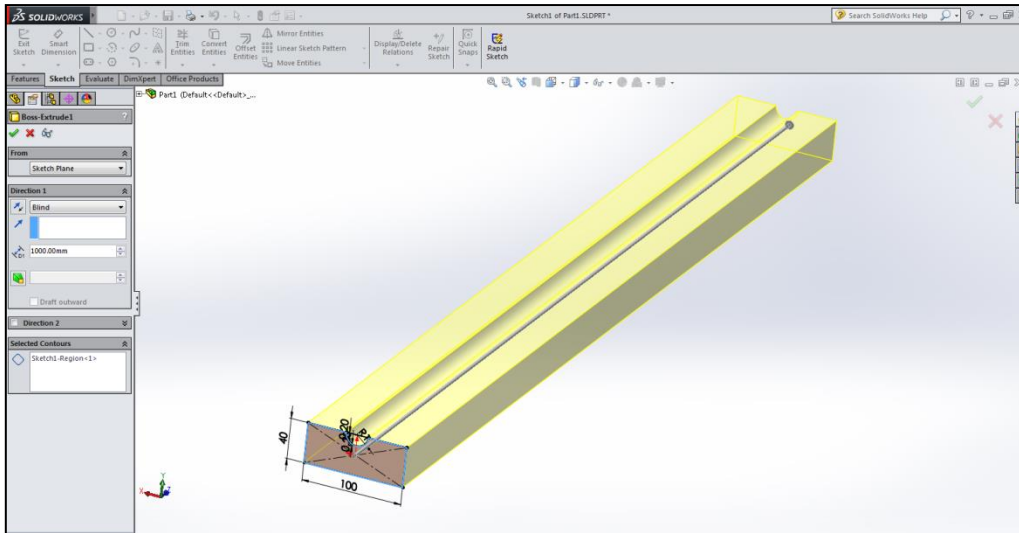
Σχήμα 3.2.4: Σχεδίαση του ημικυκλίου της πλάκας απορρόφησης

Χρησιμοποιώντας κατά σειρά τις εντολές **Offset Entities**, με πάχος 0.2 mm για να δημιουργηθεί το πάχος της πλάκας περιμετρικά και **Trim Entities**, ώστε να διαγραφούν οι περιττές ακμές από την προηγούμενη εντολή, προκειμένου να είναι εφικτή η εξώθηση της γεωμετρίας αργότερα, ολοκληρώνεται η σχεδίαση του δισδιάστατου σχεδίου της μόνωσης και της πλάκας απορρόφησης.

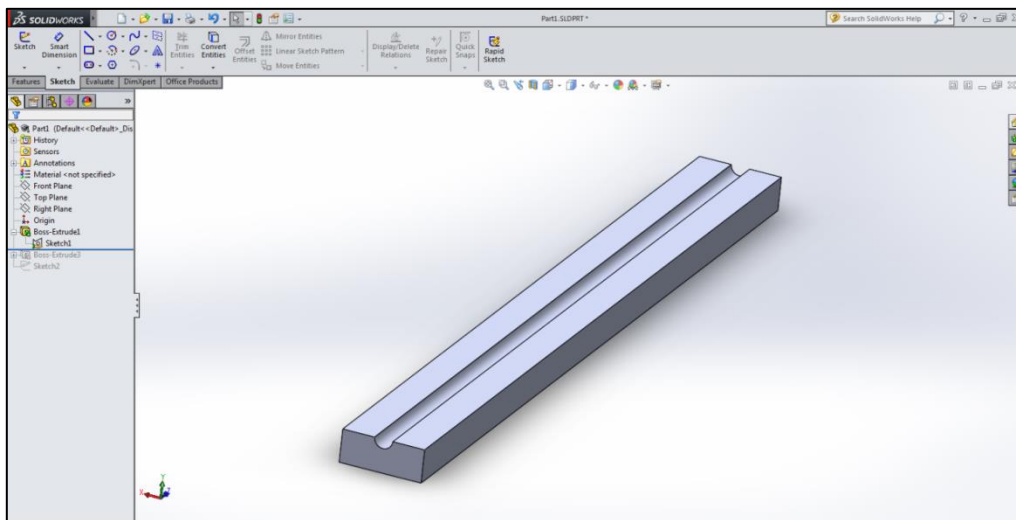


Σχήμα 3.2.5: Ολοκληρωμένο σχέδιο της οπίσθιας μόνωσης και της πλάκας απορρόφησης

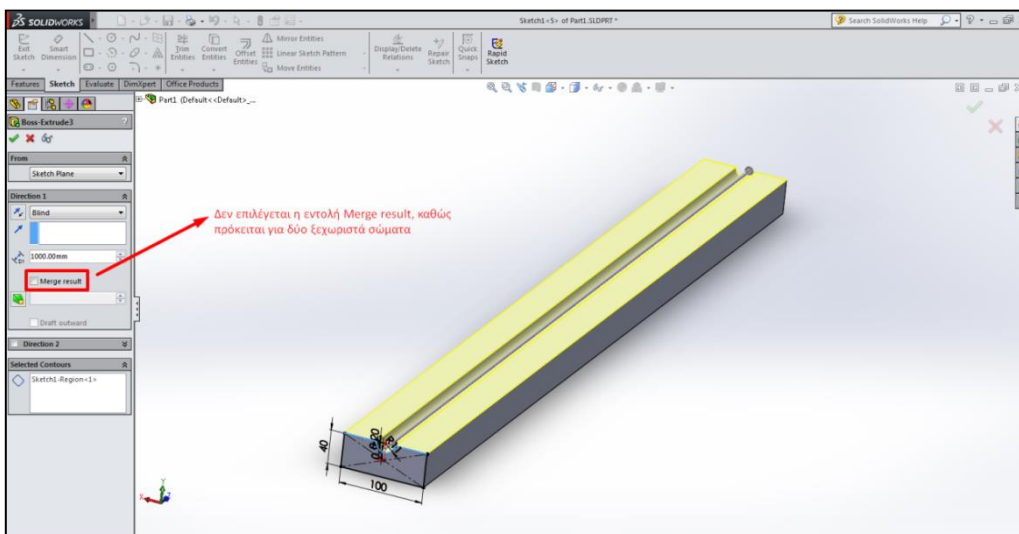
Έχοντας ολοκληρώσει το σχέδιο, μπορεί πλέον να πραγματοποιηθεί η εξώθηση των δύο συνιστωσών ξεχωριστά, διότι πρόκειται για διαφορετικά σώματα με διαφορετικά υλικά, μέσω της εντολής **Extruded Boss/Base**. Κατά σειρά, επομένως, προκύπτουν:



Σχήμα 3.2.6: Εξώθηση της οπίσθιας μόνωσης

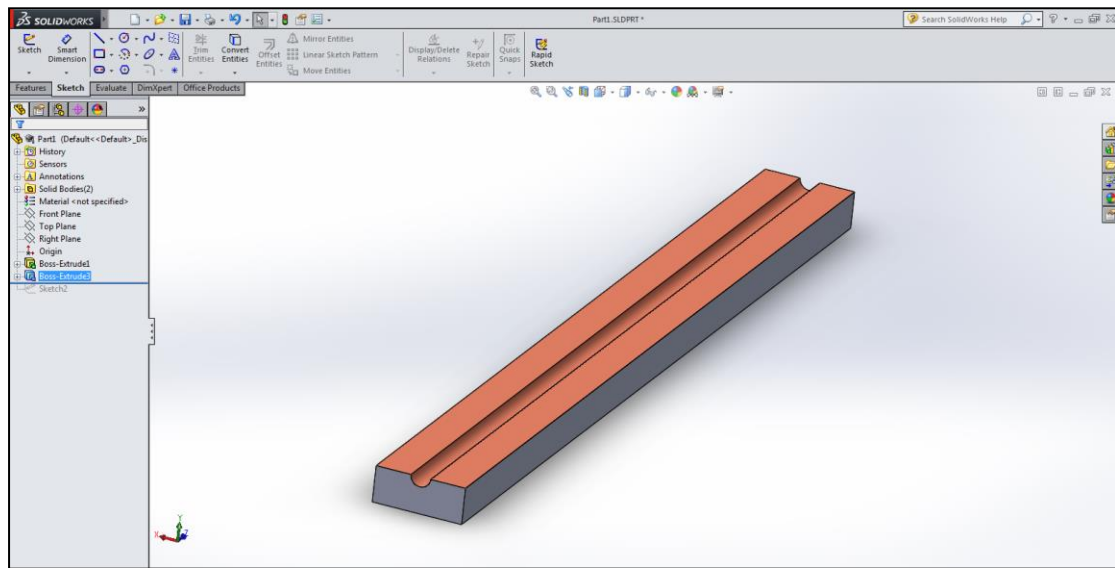


Σχήμα 3.2.7: Ολοκληρωμένη σχεδίαση της οπίσθιας μόνωσης



Σχήμα 3.2.8: Εξώθηση της πλάκας απορρόφησης

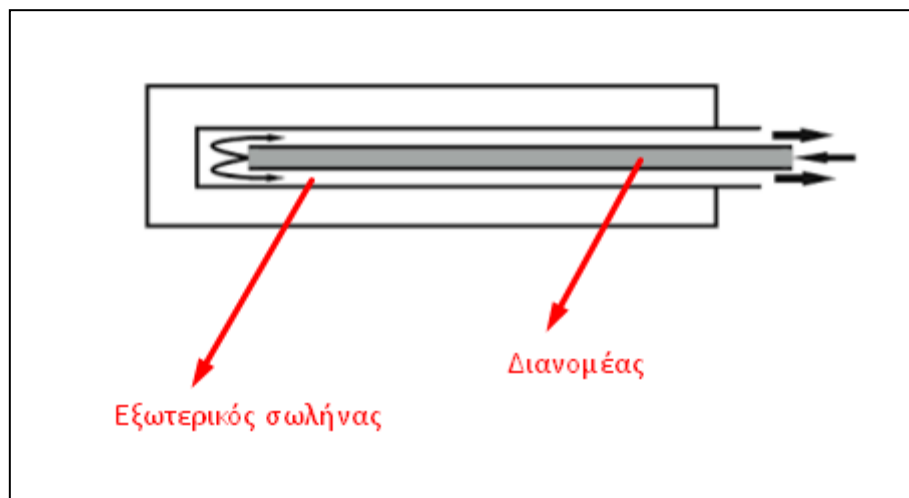
Μετά και την εξώθηση, επιλέγοντας ως υλικό της πλάκας τον χαλκό, λαμβάνεται η τελική μορφή των δύο σωμάτων.



Σχήμα 3.2.9: Ολοκλήρωση του σχεδιασμού της πλάκας απορρόφησης και της οπίσθιας μόνωσης

3.3 Σχεδιασμός της διάταξης της σωλήνωσης

Επόμενο μέρος που απαιτείται να σχεδιαστεί είναι η διάταξη της σωλήνωσης ομοαξονικού τύπου, που περιλαμβάνει το διανομέα και τον εξωτερικό σωλήνα. Το κρύο νερό εισέρχεται στο σύστημα μέσω του εσωτερικού σωλήνα, του διανομέα, κι έπειτα προσπίπτει στην άκρη του εξωτερικού σωλήνα, οπότε η ροή αλλάζει κατεύθυνση και πραγματοποιεί αντίρροπη πορεία, διαμέσου του δακτυλίου που σχηματίζεται από τους δύο σωλήνες. Στο τέλος της διαδρομής κατά μήκος του δακτυλίου είναι κι η έξοδος από το συλλέκτη.



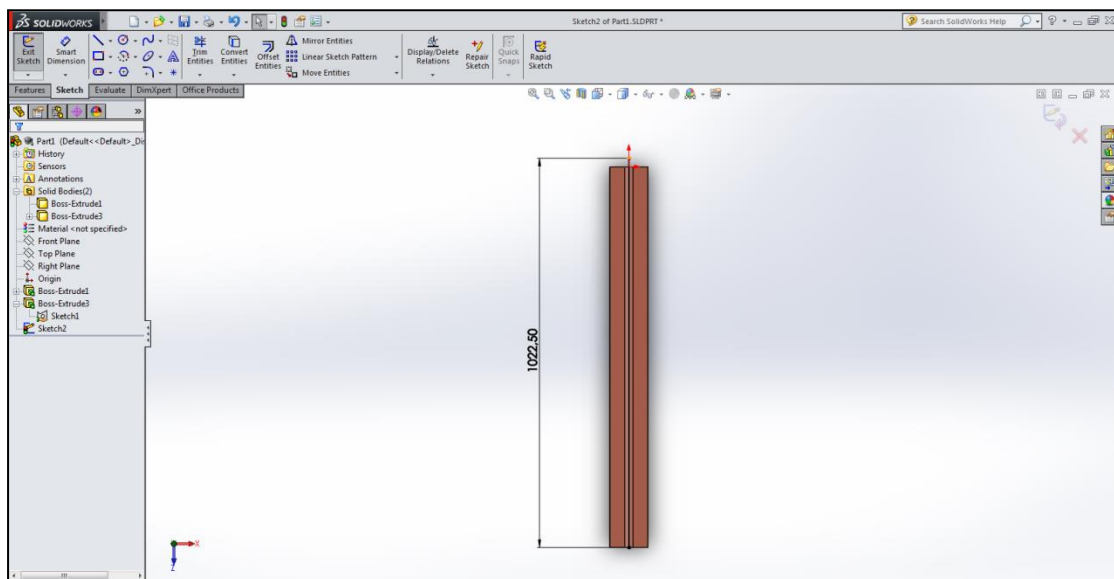
Σχήμα 3.3.1: Διάταξη ομοαξονικού συστήματος ροής

Παρατίθενται στη συνέχεια τα κυριότερα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μελετώμενου μοντέλου, που αφορά την ομοαξονική διάταξη:

Πίνακας 3.3.1: Χαρακτηριστικά της ομοαξονικής διάταξης των σωλήνων

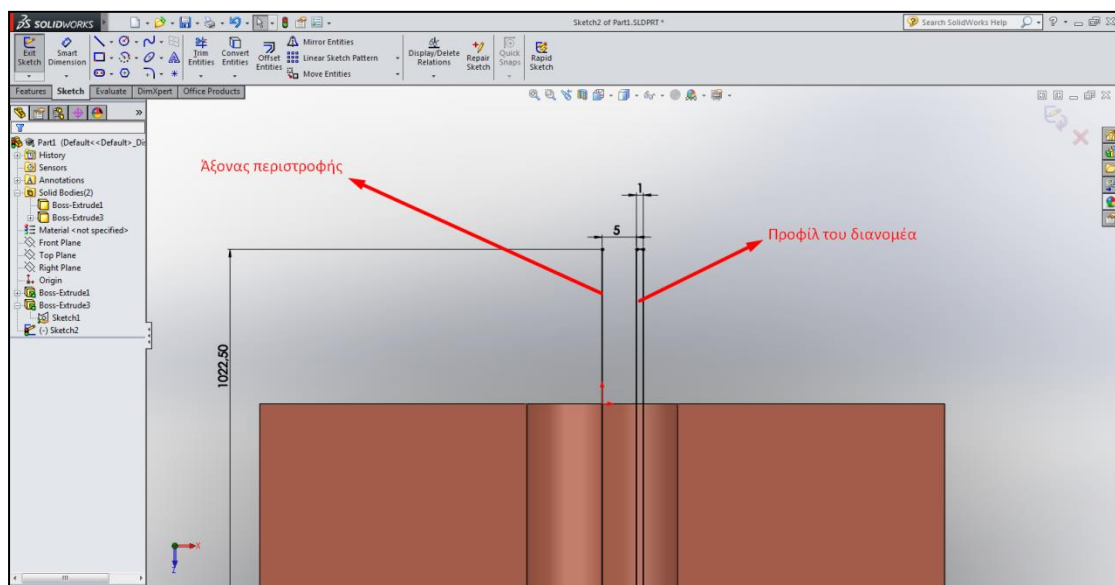
Χαρακτηριστικό συνιστώσας	Τιμή
Εσωτερική διάμετρος του διανομέα, $D_{i,1}$ (mm)	10
Εσωτερική διάμετρος του εξωτερικού σωλήνα, $D_{o,1}$ (mm)	20
Πάχος σωλήνων (mm)	1
Υλικό	Χαλκός

Καθώς πρόκειται για ένα εκ περιστροφής συμμετρικό τεμάχιο, γίνεται χρήσης της εντολής **Revolved Boss/Base**, χρησιμοποιώντας ως επίπεδο σχεδίασης την άνω πλευρά της πλάκας απορρόφησης. Αρχικά, σχηματίζεται μία ευθεία που διέρχεται από τον άξονα των προηγούμενων κυλινδρικών γεωμετριών, καθώς αυτός ταυτίζεται και με τον άξονα του σωλήνα, εφόσον όλα τα τμήματα είναι ομοαξονικά. Τίθεται μια διάσταση ίση προς 1002.5 mm, οπότε ο προκύπτων σωλήνας ξεπερνάει τη μόνωση και την πλάκα. Η εν λόγω διαστασιολόγηση γίνεται ώστε η σωλήνωση να είναι σε θέση να εξέρχεται κι από την πλάγια μόνωση, που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

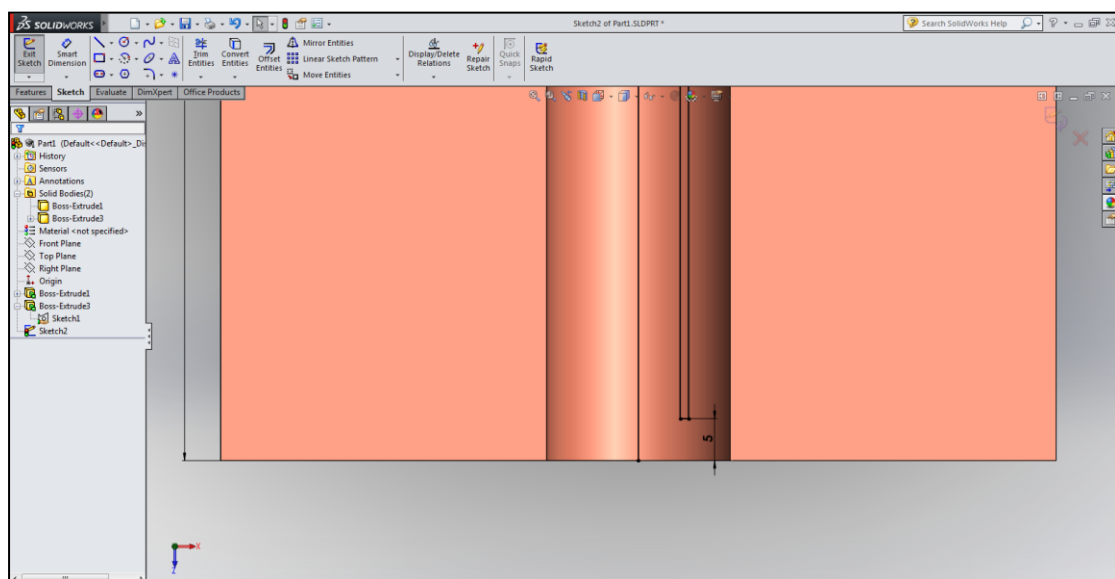


Σχήμα 3.3.2: Σχεδίαση του άξονα συμμετρίας του σωλήνα

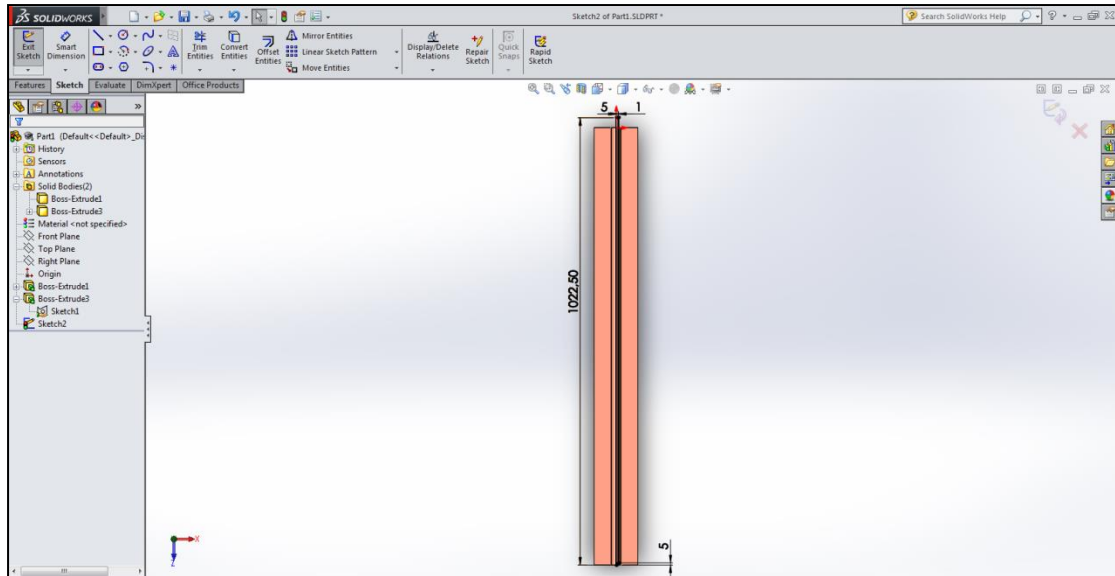
Έπειτα, σχεδιάζεται ο διανομέας. Σχηματίζεται ένα παραλληλόγραμμο μέσω της εντολής **Center Rectangle**, το οποίο ξεκινάει από το πέρας της ευθείας του άξονα συμμετρίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3.3. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται η απόσταση κατά την οριζόντια έννοια από τον άξονα συμμετρίας με την εντολή **Smart Dimension** ίση προς 5 mm, με την επιθυμητή εσωτερική ακτίνα δηλαδή του σωλήνα. Προσδιορίζεται επίσης το πάχος του σωλήνα ίσο με 1 mm, ενώ η απόσταση κατά την κατακόρυφη έννοια από την άλλη άκρη του συλλέκτη επιλέγεται ίση με την ακτίνα, δηλαδή 5 mm, για σχεδιαστικούς λόγους που θα γίνουν φανεροί στην επόμενη συνιστώσα, τον εξωτερικό σωλήνα. Έτσι ολοκληρώνεται το προφίλ του διανομέα, το οποίο έπειτα μέσω της εντολής **Revolved Boss/Base** θα περιστραφεί περί του άξονα και θα δημιουργήσει το επιθυμητό στερεό σώμα.



Σχήμα 3.3.3: Σχεδίαση του κυρίως σώματος του διανομέα

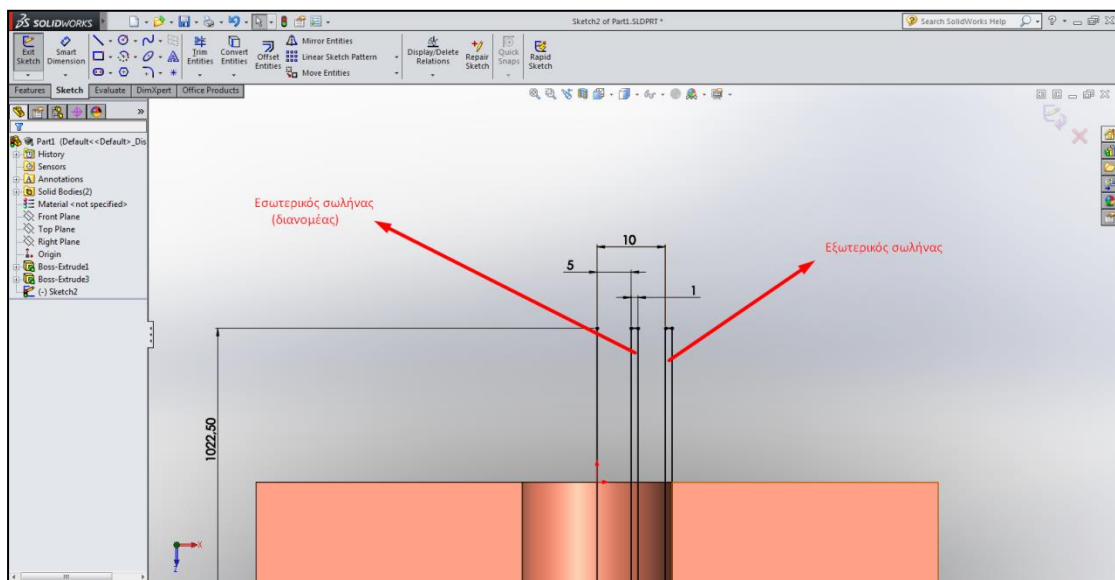


Σχήμα 3.3.4: Σχεδίαση του άκρου του διανομέα



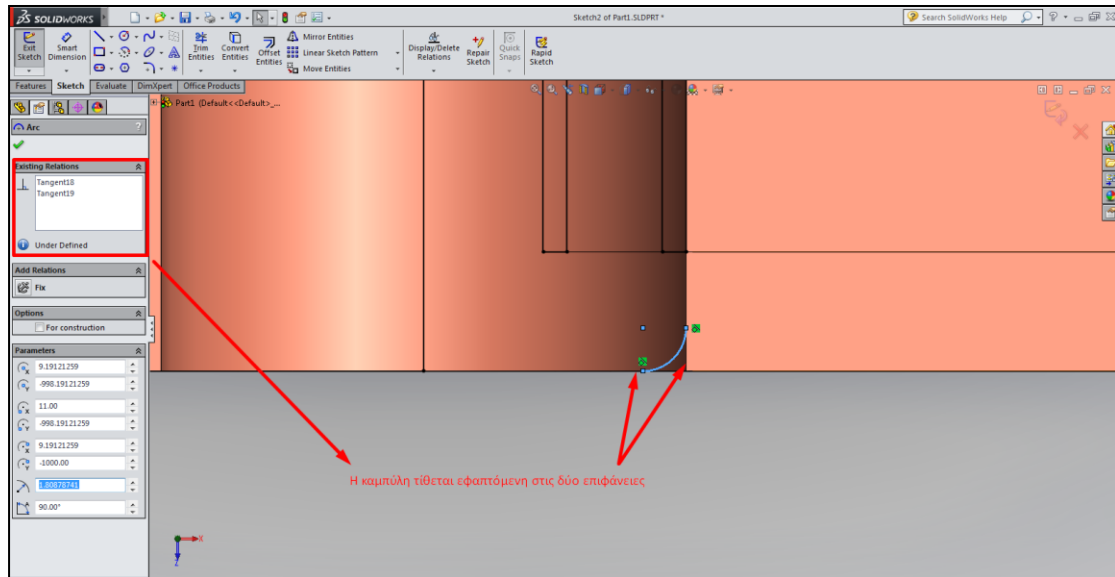
Σχήμα 3.3.5: Ολοκληρωμένη σχεδίαση του διανομέα

Κατόπιν, διαμορφώνεται ο εξωτερικός σωλήνας, κατά παρόμοιο τρόπο, σχεδιάζοντας αρχικά το προφίλ του κι εκτελώντας την εντολή **Revolved Boss/Base** συνολικά για τη διάταξη. Όπως διευκρινίζεται κι από τον Πίνακα 3.3.1, η εσωτερική διάμετρος του εξωτερικού σωλήνα είναι ίση με 20 mm, επομένως σχεδιάζεται μια ευθεία σε απόσταση ίση με την ακτίνα, δηλαδή 10 mm, από τον άξονα συμμετρίας του. Έπειτα, σχεδιάζεται και μια παράλληλη ευθεία προς αυτή, η εξωτερική πλευρά του σωλήνα, σε απόσταση όπως προαναφέρθηκε 1 mm, η οποία ταυτίζεται με το πάχος του σωλήνα.



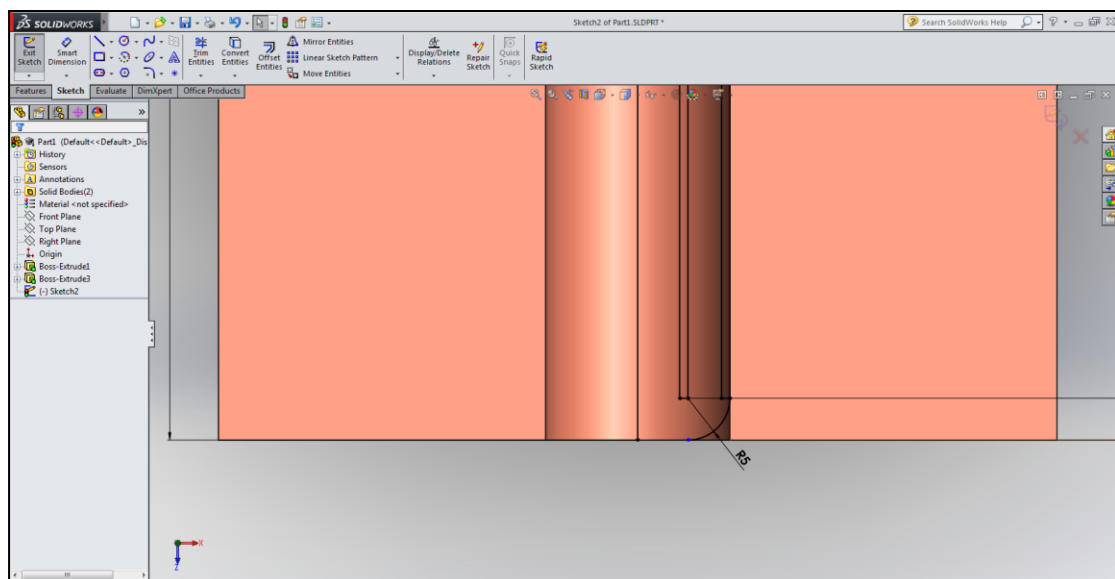
Σχήμα 3.3.6: Σχεδίαση του κυρίως σώματος του εξωτερικού σωλήνα

Πέραν του κυρίως κορμού του εξωτερικού σωλήνα, πρέπει να σχεδιαστεί κι η διαμόρφωση στην άκρη του εξωτερικού σωλήνα (cap), επί της οποίας πραγματοποιείται η στροφή της ροής. Σχεδιάζεται με καμπυλότητα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν κατά το δυνατόν οι τριβές κατά την αλλαγή κατεύθυνσης του ρευστού. Αρχικά, σχεδιάζεται η εξωτερική ακτίνα της καμπυλότητας, χρησιμοποιώντας την εντολή **Centerpoint Arc**, οπότε και σχηματίζεται ένα τεταρτοκύκλιο. Έπειτα, ορίζεται η καμπύλη ως εφαπτόμενη στις δύο εξής κάθετες επιφάνειες:



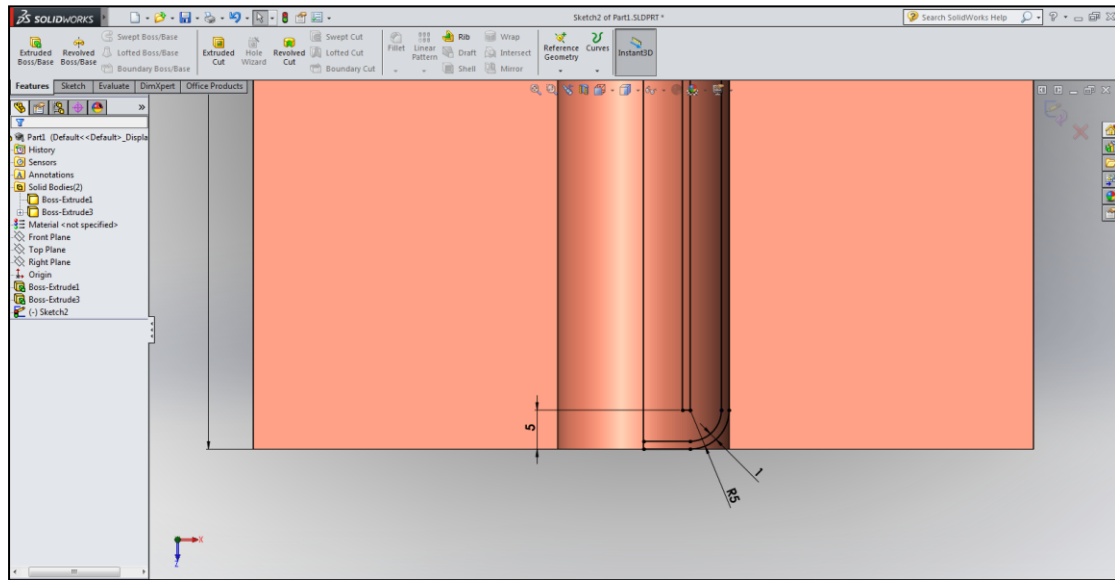
Σχήμα 3.3.7: Σχεδίαση της καμπυλότητας του εξωτερικού σωλήνα

Έπειτα, με την εντολή **Smart Dimension** η ακτίνα ίση με 5 mm:



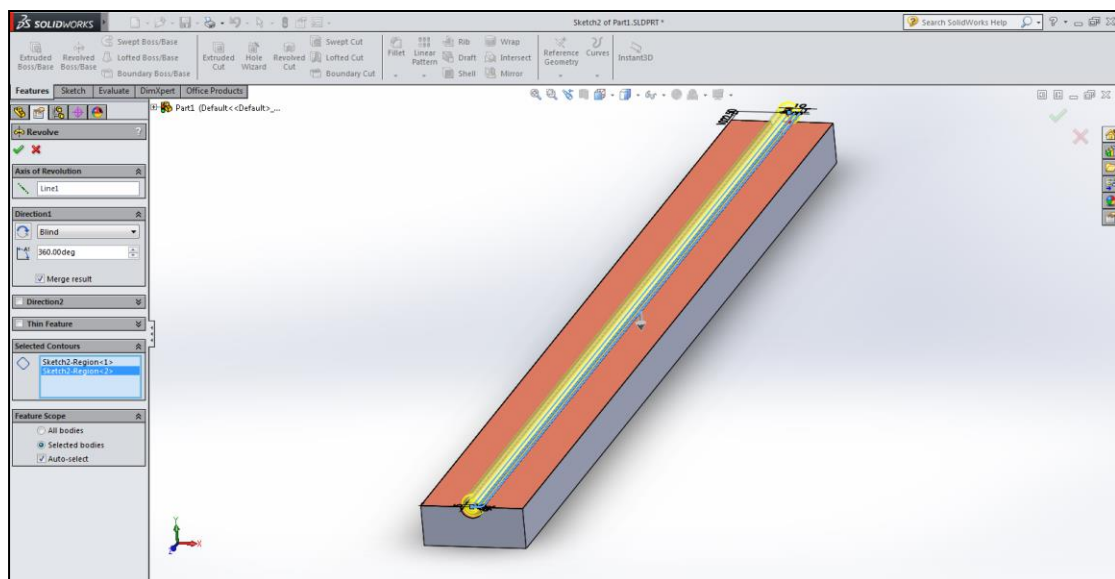
Σχήμα 3.3.8: Ορισμός της καμπυλότητας του εξωτερικού σωλήνα

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία της εσωτερικής μεριάς του εξωτερικού σωλήνα, μέσω της εντολής **Offset Entities** κι έπειτα η επέκταση των καμπυλών κατά την οριζόντια έννοια μέχρι και τον άξονα συμμετρίας. Επιπλέον, διαγράφεται το οριζόντιο τμήμα του προηγούμενως σχεδιαζόμενου παραλληλόγραμμου, έτσι ώστε το προφίλ κατά την περιστροφική εξώθηση να είναι μη διακοπτόμενο. Συνεπώς, ολοκληρώνεται το σχέδιο του εξωτερικού σωλήνα, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3.3.9 που ακολουθεί:



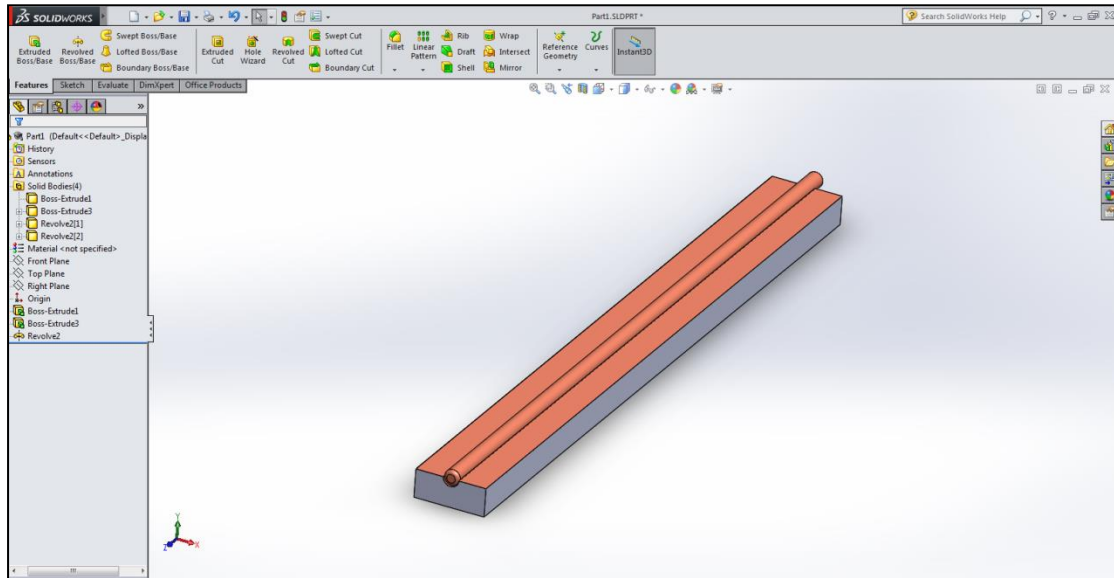
Σχήμα 3.3.9: Ολοκληρωμένη σχεδίαση του εξωτερικού σωλήνα

Επομένως, εκτελώντας την εντολή **Revolved Boss/Base**, ολοκληρώνεται συνολικά η διάταξη των σωλήνων, τόσο του διανομέα, όσο και του εξωτερικού σωλήνα:

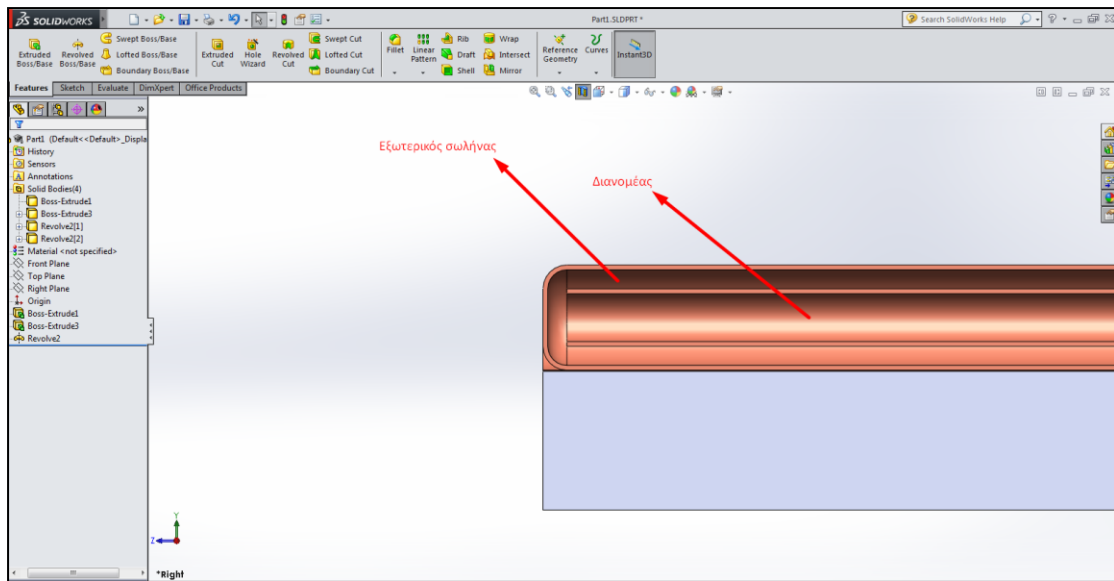


Σχήμα 3.3.10: Περιστροφή της διάταξης των σωλήνων

Επιλέγοντας κι ως υλικό των σωληνώσεων τον χαλκό, παίρνουμε την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 3.3.11: Ολοκλήρωση του σχεδιασμού της διάταξης της σωλήνωσης



Σχήμα 3.3.12: Λεπτομέρεια από τη διαμόρφωση της διάταξης της σωλήνωσης

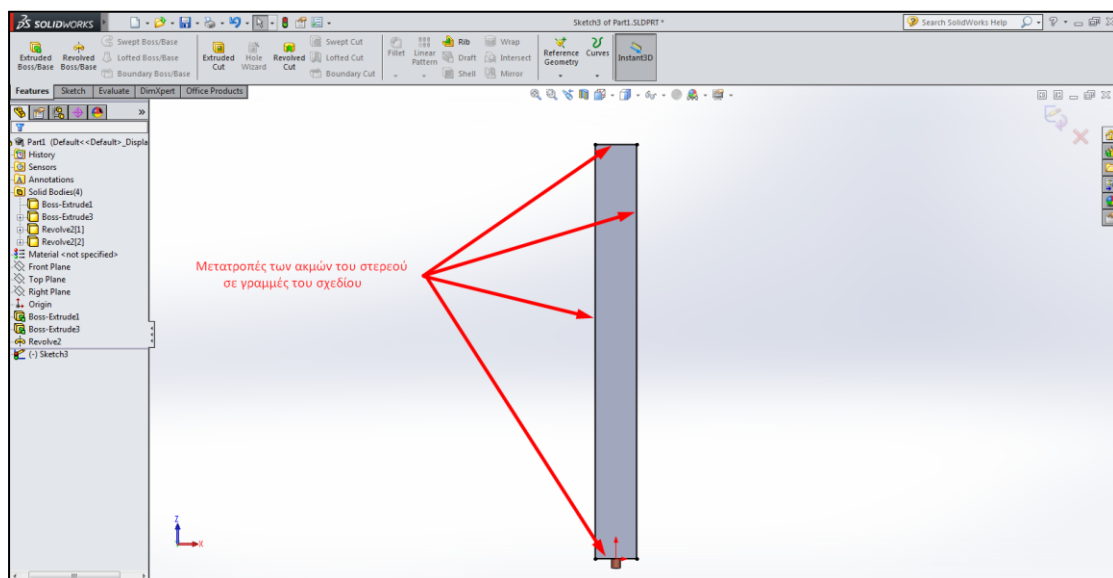
3.4 Σχεδιασμός της πλάγιας μόνωσης

Πέραν της οπίσθιας μόνωσης, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών προς το περιβάλλον, είναι απαραίτητη κι η πλάγια μόνωση, η οποία περιβάλλει περιμετρικά το συλλέκτη. Παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα τα βασικά της χαρακτηριστικά:

Πίνακας 3.4.1: Χαρακτηριστικά της πλάγιας μόνωσης

Χαρακτηριστικό συνιστώσας	Τιμή
Μήκος (mm)	1040
Πλάτος (mm)	140
Ύψος από την επιφάνεια της πλάκας (mm)	40
Πάχος (mm)	20
Υλικό	Υαλοβάμβακας
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	0.04

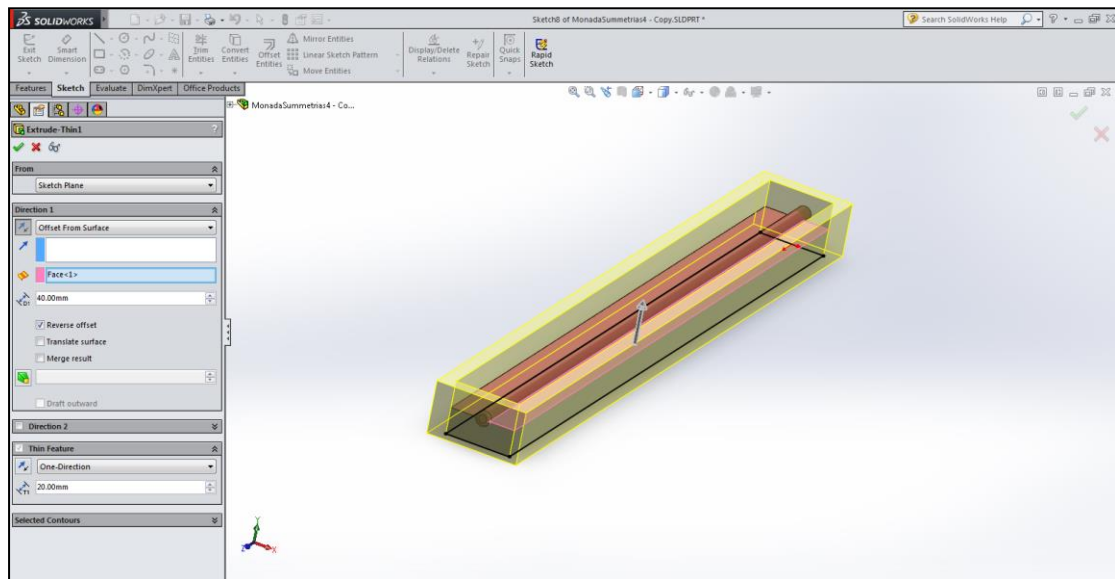
Ως προς τη σχεδίασή της, η πλάγια μόνωση είναι αρκετά απλή μέσω των προαναφερθεισών εντολών. Αρχικά, επιλέγοντας ένα νέο **Sketch** επί της κάτω επιφάνειας της οπίσθιας μόνωσης και μέσω της εντολής **Convert Entities**, δημιουργούνται πλευρές για το σχέδιο από τις ήδη υπάρχουσες ακμές του στερεού σώματος, ως εξής:



Σχήμα 3.4.1: Σχεδίαση του προφίλ της πλάγιας μόνωσης

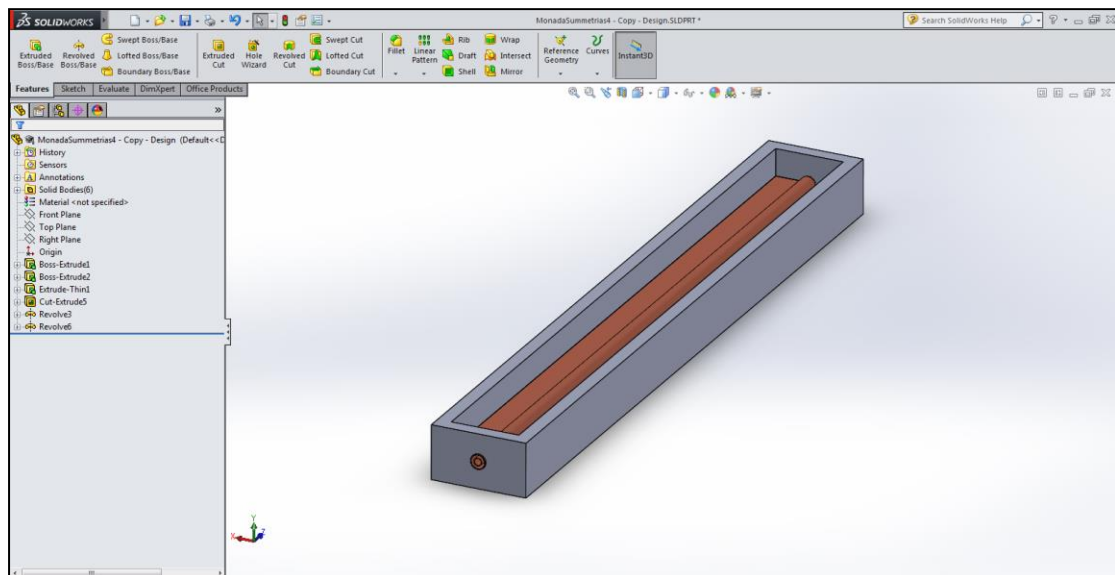
Στη συνέχεια, επιλέγεται η επιφάνεια που δημιουργείται από τις τέσσερις αυτές ακμές και χρησιμοποιώντας την εντολή **Extruded Boss/Base**, και συγκεκριμένα μέσω του χαρακτηριστικού «λεπτού τοιχώματος» **Thin Feature**,

διαμορφώνεται το στερεό σώμα της πλάγιας μόνωσης, με βάση και τον Πίνακα 3.4.1 :



Σχήμα 3.4.2: Εξώθηση της πλάγιας μόνωσης

Πρέπει έπειτα να σχεδιαστεί και μια εσοχή για να στεγαστεί η διάταξη των σωλήνων επί της πλάγιας μόνωσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Κάνοντας χρήση της εντολής **Extruded Cut** διαμορφώνεται ένας κύκλος διαμέτρου όσο η εξωτερική διάμετρος του εξωτερικού σωλήνα, 22 mm, και για την επιλογή κοπής έως την άκρη της μόνωσης, παίρνουμε την τελική μορφή:



Σχήμα 3.4.3: Ολοκλήρωση του σχεδιασμού της πλάγιας μόνωσης

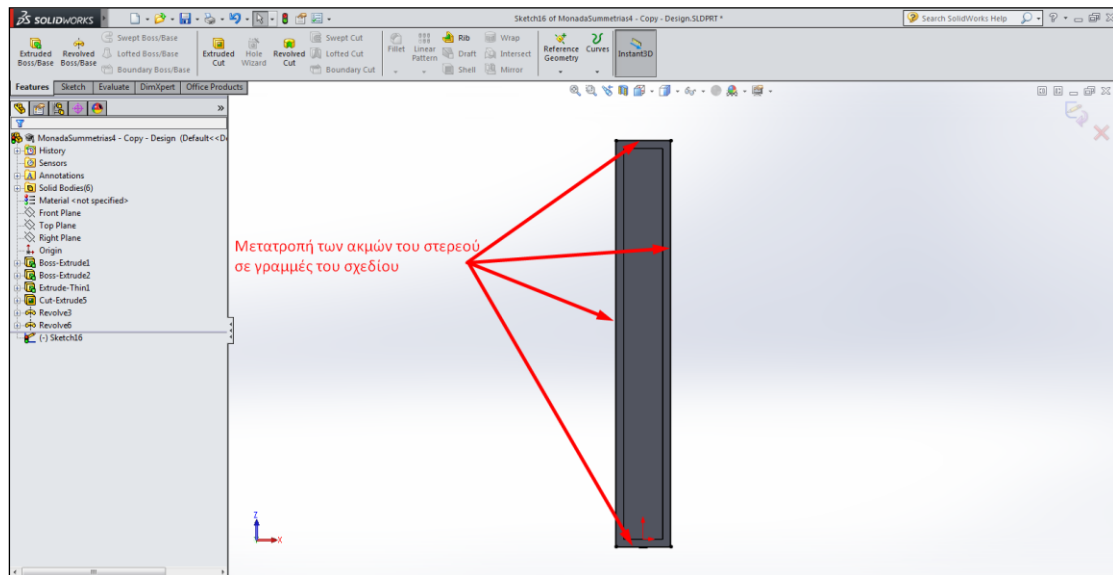
3.5 Σχεδιασμός της λαμαρίνας στήριξης

Έπειτα, σειρά έχει η λαμαρίνα στήριξης του συλλέκτη, η οποία τοποθετείται κάτω από τα προηγούμενα στοιχεία του και τα συγκρατεί όλα μαζί. Τα κατασκευαστικά της χαρακτηριστικά παρατίθενται στον κάτωθι πίνακα:

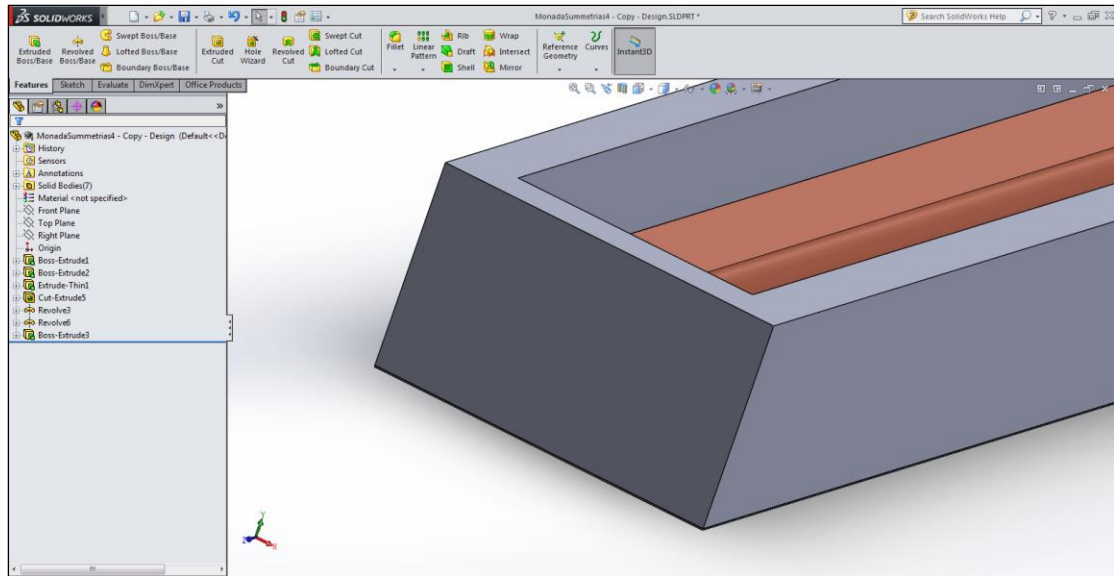
Πίνακας 3.5.1: Χαρακτηριστικά της λαμαρίνας στήριξης

Χαρακτηριστικό συνιστώσας	Τιμή
Μήκος (mm)	1040
Πλάτος (mm)	140
Πάχος (mm)	0.6
Υλικό	Αλουμίνιο

Η σχεδιάσή της είναι αρκετά απλή, αρχικά μετατρέποντας τις ακμές της πλάγιας μόνωσης σε γραμμές σχεδίου όπως και προηγουμένως μέσω της εντολής **Convert Entities** και πραγματοποιώντας την εξώθηση εγκάρσια στο συγκεκριμένο επίπεδο κατά 0.6 mm, που ταυτίζεται με την τιμή της διάστασης του πάχους της. Επομένως, προκύπτουν κατά σειρά:



Σχήμα 3.5.1: Σχεδίαση του προφίλ της λαμαρίνας στήριξης



Σχήμα 3.5.2: Λεπτομέρεια από την ολοκλήρωση της λαμαρίνας στήριξης

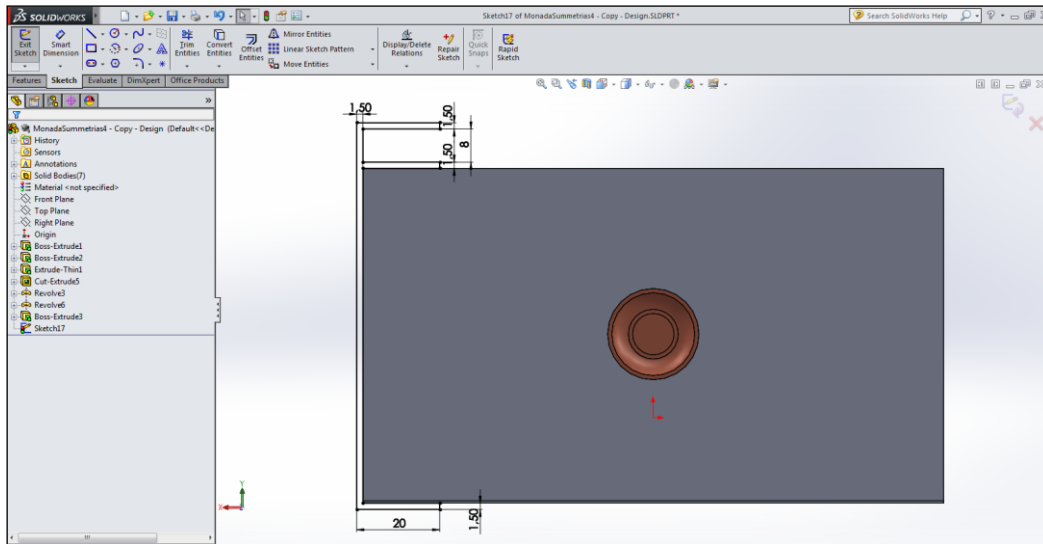
3.6 Σχεδιασμός του πλαισίου

Μετά και την υλοποίηση της λαμαρίνας στήριξης, έπεται ο σχεδιασμός του πλαισίου εντός του οποίου στηρίζεται η όλη διάταξη καθώς και το κάλυμμα κι η στεγανοποίησή του, που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Το πλαίσιο συνολικά καλύπτει και τις τέσσερις μεριές περιμετρικά της πλάγιας μόνωσης, ενώ στηρίζει όλα τα προαναφερθέντα τμήματα τόσο από την πάνω όσο κι από την κάτω μεριά. Παρουσιάζεται, όπως και στα προηγούμενα τμήματα του συλλέκτη, ο πίνακας των χαρακτηριστικών του πλαισίου:

Πίνακας 3.6.1: Χαρακτηριστικά του πλαισίου

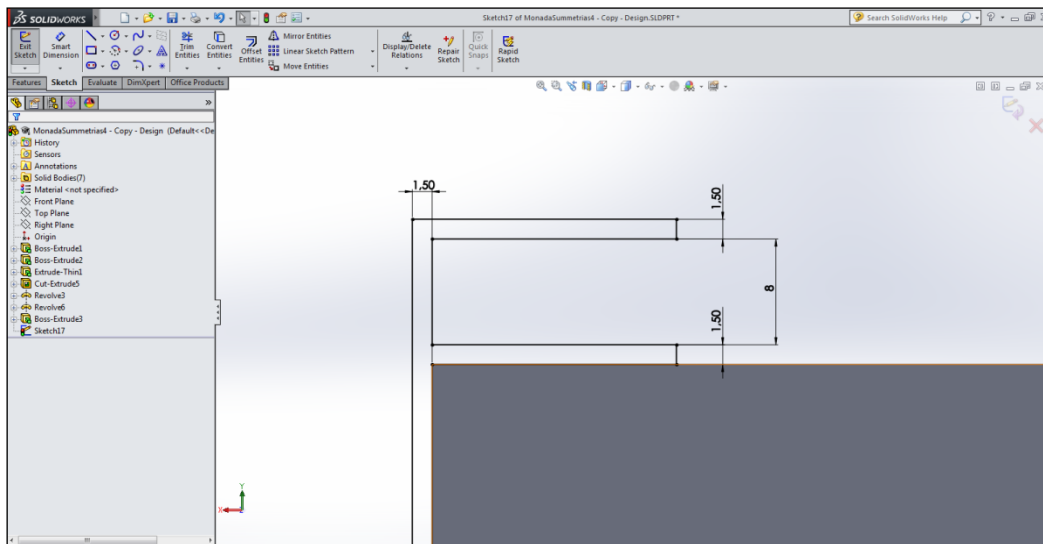
Χαρακτηριστικό συνιστώσας	Τιμή
Μήκος (mm)	1043
Πλάτος (mm)	143
Πάχος (mm)	1.5
Υλικό	Αλουμίνιο 6063-T4

Ως προς το σχεδιασμό, αρχικά δημιουργείται η γενέτειρά του κατά μία πλευρά, του μήκους, κι έπειτα το σχέδιο αυτό επεκτείνεται και κατά την έννοια του πλάτους, τόσο από την μπροστινή όσο κι από την οπίσθια πλευρά. Για την πραγμάτωση της τρισδιάστατης γεωμετρίας, εφαρμόζεται η εντολή **Swept Boss/Base** επί του σχεδίου. Παρατίθεται στη συνέχεια ένα δισδιάστατο σκίτσο του πλαισίου που χρησιμοποιείται με βάση την προαναφερθείσα λογική:



Σχήμα 3.6.1: Δισδιάστατο σχέδιο του πλαισίου

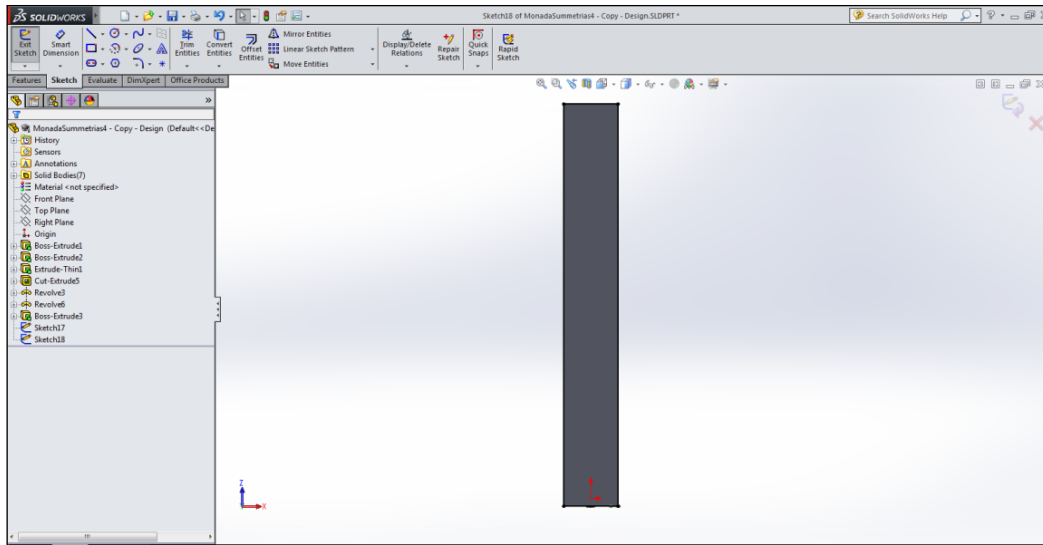
Κατόπιν, παρουσιάζεται μια λεπτομέρεια του πλαισίου από το άνω μέρος του, επί του οποίου θα στεγαστεί το κάλυμμα κι η στεγανοποίηση του καλύμματος:



Σχήμα 3.6.2: Λεπτομέρεια από το σχέδιο του πλαισίου

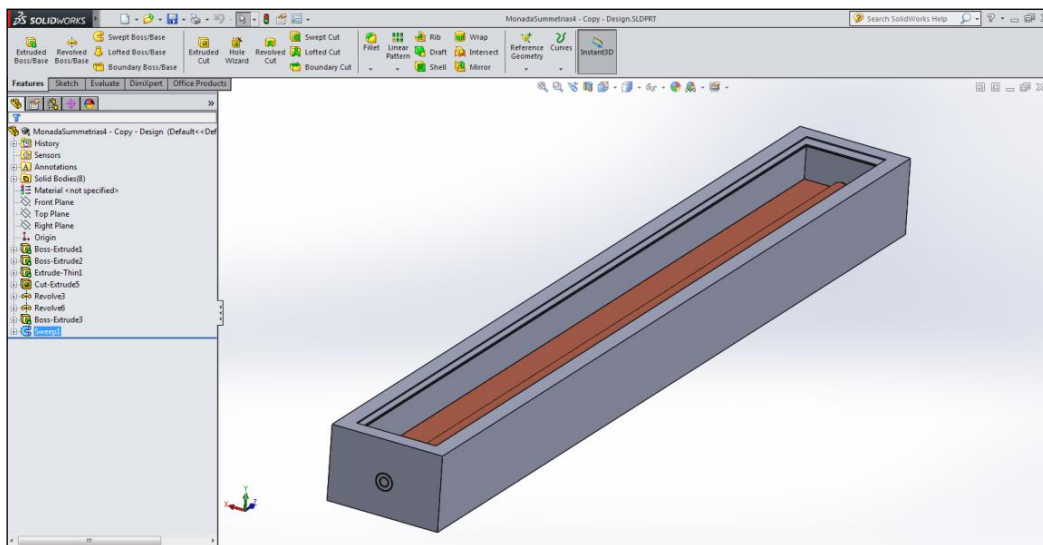
Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης εντολής, πέρα από το προφίλ της γεωμετρίας της οποίας θα γίνει η εξώθηση, απαιτείται κι ο προσδιορισμός ενός μονοπατιού. Το μονοπάτι στην ουσία είναι η περίμετρος του συλλέκτη, οπότε αυτό

προσδιορίζεται εύκολα μέσω της εντολής **Convert Entities**, όπως προηγουμένως, επιλέγοντας τις τέσσερις ακμές του συλλέκτη, ως ακολούθως:



Σχήμα 3.6.3: Προσδιορισμός του μονοπατιού της εντολής Swept Boss/Base

Έχοντας προσδιορίσει πλήρως τόσο το προφίλ όσο και το μονοπάτι για την εντολή **Swept Boss/Base**, αφού αυτή εκτελεστεί, προκύπτει τελικά η τελική μορφή του πλαισίου που περιβάλλει το συλλέκτη:



Σχήμα 3.6.4: Ολοκλήρωση του σχεδιασμού του πλαισίου

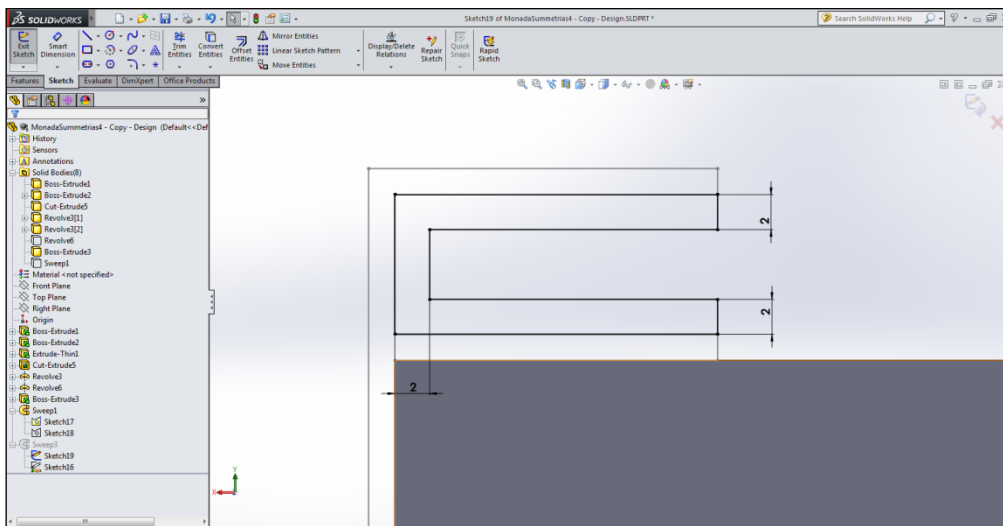
3.7 Σχεδιασμός του καλύμματος και της στεγανοποίησης

Κατά παρόμοιο τρόπο με το πλαίσιο, σχεδιάζεται εύκολα μέσω της ίδιας εντολής, **Swept Boss/Base**, κι η στεγανοποίηση επί της οποίας θα στεγαστεί το κάλυμμα. Τα βασικά της χαρακτηριστικά φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

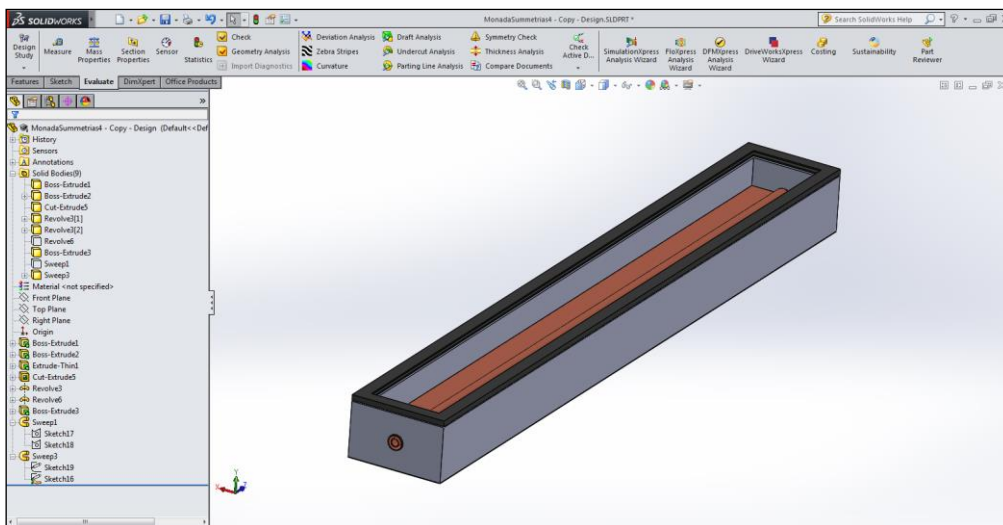
Πίνακας 3.7.1: Χαρακτηριστικά της στεγανοποίησης του καλύμματος

Χαρακτηριστικό συνιστώσας	Τιμή
Μήκος (mm)	1040
Πλάτος (mm)	140
Πάχος (mm)	2
Υλικό	EPDM (είδος συνθετικού καουτσούκ)

Διαμορφώνεται κατόπιν το προφίλ της στο επίπεδο, καθώς κι ο ολοκλήρωση της εντολής με μονοπάτι τις τέσσερις πλευρές του συλλέκτη, όπως και στα προηγούμενα τμήματα, τα οποία διακρίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 3.7.1: Δισδιάστατο σχέδιο της στεγανοποίησης του καλύμματος



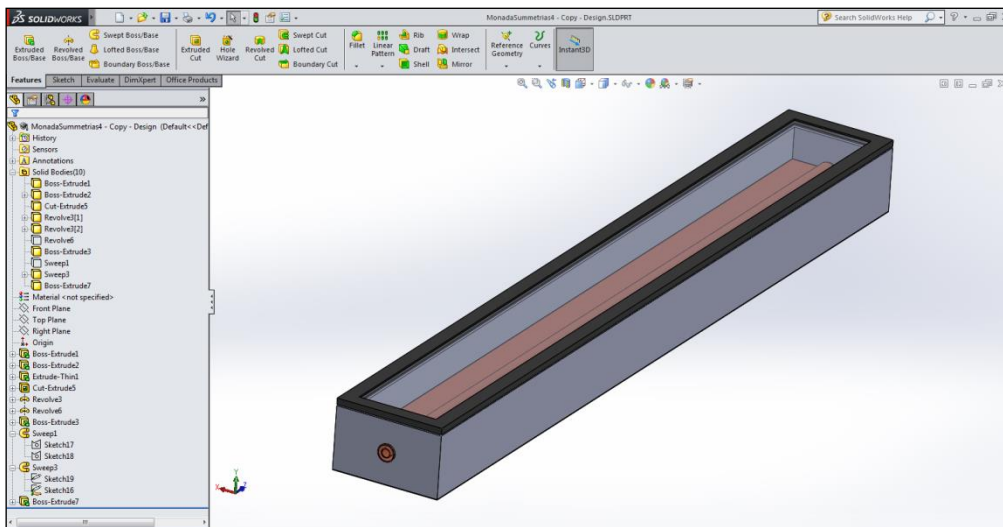
Σχήμα 3.7.2: Ολοκλήρωση του σχεδιασμού της στεγανοποίησης του καλύμματος

Έπειτα, σχεδιάζεται επί της στεγανοποίησης το γυάλινο κάλυμμα του συλλέκτη, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3.7.2: Χαρακτηριστικά του καλύμματος

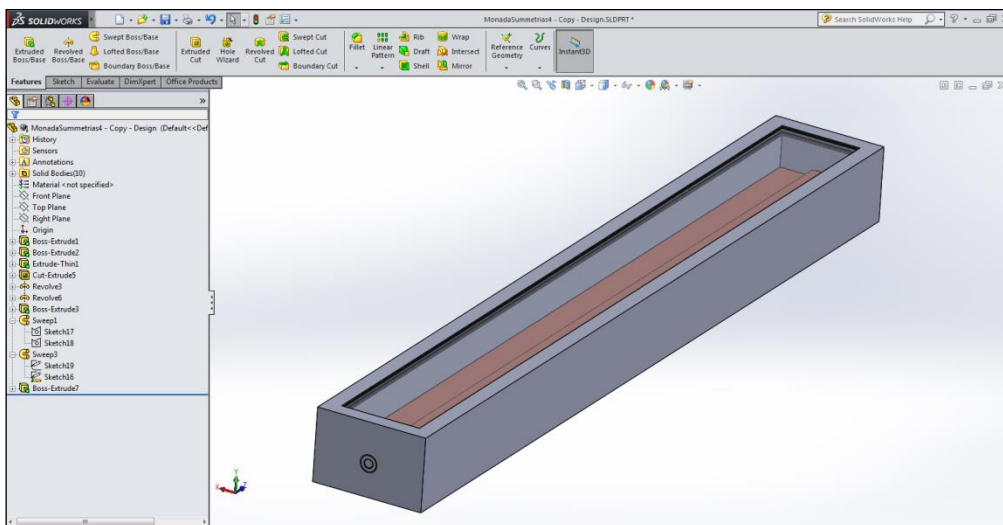
Χαρακτηριστικό συνιστώσας	Τιμή
Μήκος (mm)	1036
Πλάτος (mm)	136
Πάχος (mm)	4
Υλικό	Γυαλί

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά, διαμορφώνεται το κάλυμμα, με μία απλή εφαρμογή της εντολής **Extruded Boss/Base**:



Σχήμα 3.7.3: Ολοκλήρωση του σχεδιασμού του καλύμματος

Με το κάλυμμα, ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός του ηλιακού συλλέκτη:



Σχήμα 3.7.4: Ολοκλήρωση του ηλιακού συλλέκτη



4 Εισαγωγή του συλλέκτη στο Flow Simulation

4.1 Γενικά

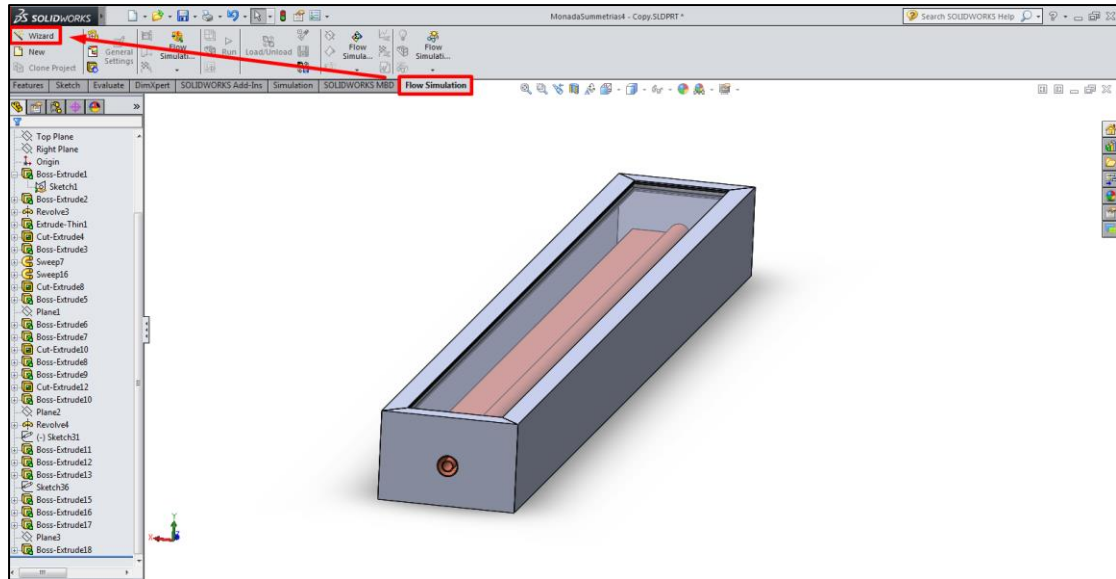
Μετά το πέρας του σχεδιασμού του συλλέκτη, έπεται η προσομοίωσή του στις διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Αυτή η διαδικασία διεκπεραιώθηκε με την εφαρμογή Flow Simulation που εμπεριέχεται στο πρόγραμμα SolidWorks. Δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να δοκιμάσει διάφορες οριακές συνθήκες, υπολογιστικά πλέγματα σε ένα συγκεκριμένο τεμάχιο και να πάρει συγκεκριμένες εξόδους – στόχους, που μπορεί να είναι θερμοδυναμικού χαρακτήρα, όπως η θερμοκρασία κι η πίεση, ροϊκού χαρακτήρα, όπως η ταχύτητα, χαρακτήρα μηχανικής αντοχής, όπως οι εφαρμόζουσες μηχανικές τάσεις επί του τεμαχίου, κι άλλα.

Το SolidWorks Flow Simulation έχει βοηθήσει σημαντικά σε επίπεδο εκπαίδευσης, καθώς οι φοιτητές που το χρησιμοποιούν είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται καλύτερα τη φυσική σημασία διάφορων επιστημονικών πεδίων, όπως η μηχανική ρευστών κι η μεταφορά θερμότητας, καθώς τους προσφέρεται καλύτερη εποπτεία κι ακριβέστερη οπτικοποίηση. Χρησιμοποιείται, επιπροσθέτως, και σε επίπεδο βιομηχανίας, καθώς λόγω της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων του, μειώνει σημαντικά τον χρόνο και το κόστος του σχεδιασμού και του πειράματος ενός καινούργιου δοκιμίου, δίνοντας τη δυνατότητα διορθώσεων επί της γεωμετρίας του, δίχως την ανάγκη για πραγματική υλοποίηση του αντικειμένου, αλλά με απλή προσομοίωση και βελτιστοποίηση μέσω δοκιμής και σφάλματος. Τέλος, τονίζεται πως τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν κατά την ανάλυση με το SolidWorks Flow Simulation είναι έγκυρα κι η ισχύς τους έχει διαπιστωθεί και σε ποικίλες δημοσιεύσεις [31] – [22] – [32] – [33] – [34].

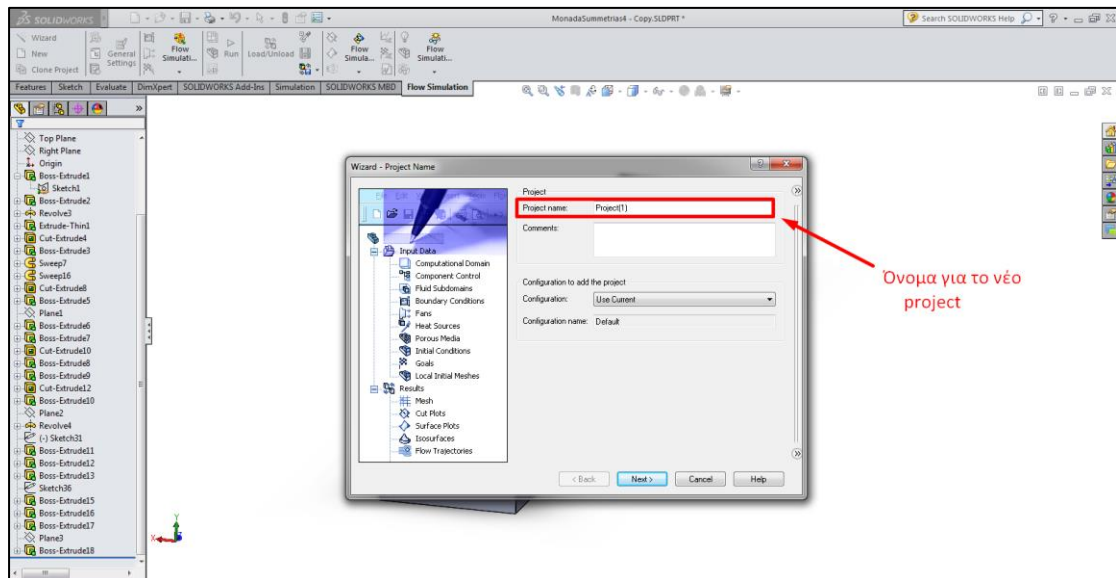
4.2 Έναρξη μελέτης

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η εφαρμογή Flow Simulation του SolidWorks πρέπει να ενεργοποιηθεί από τις ρυθμίσεις του προγράμματος. Αρχικά επιλέγεται το εικονίδιο **Options**  κι έπειτα η επιλογή **Add-Ins**. Στη συνέχεια, επιλέγεται από τη λίστα καρτελών, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, το Flow Simulation για να εμφανιστούν οι επιλογές του. Για να ξεκινήσει μία νέα μελέτη, απαιτείται η εντολή **Wizard**  από την καρτέλα του Flow Simulation. Η πρώτη ρύθμιση που καλείται να κάνει ο χρήστης είναι η ονομασία του καινούργιου project [35].

Έπειτα, ακολουθούν οι ρυθμίσεις που γίνονται κι αφορούν κάποια υπολογιστικά μεγέθη για το τεμάχιο που μελετάται.



Σχήμα 4.2.1: Αρχή της μελέτης μέσω του Wizard

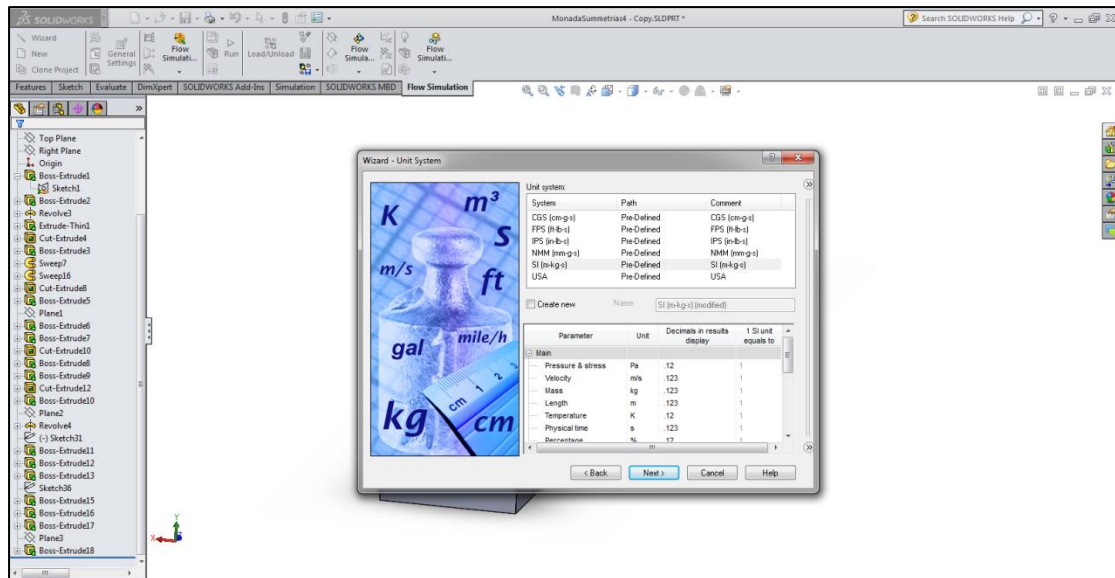


Σχήμα 4.2.2: Ονομασία στην καινούργια μελέτη (project)

4.3 Ρυθμίσεις του Flow Simulation

4.3.1 Ορισμός του συστήματος μονάδων

Επιλέγοντας την επόμενη ρύθμιση μετά από την ονομασία της μελέτης, προσδιορίζεται το σύστημα μονάδων που θα χρησιμοποιηθεί για όλα τα μεγέθη που αφορούν το τεμάχιο. Μεταξύ των επιλογών, διακρίνεται το διεθνές σύστημα, SI, το αμερικάνικο κι άλλα. Κατά την υλοποίηση της συνολικής μελέτης του ηλιακού συλλέκτη για όλες τις περιπτώσεις, το σύστημα μονάδων που επιλέχθηκε ήταν το διεθνές, με την εξαίρεση της πίεσης και της θερμοκρασίας, που μετρώνται σε bar και °C αντίστοιχα [35].



Σχήμα 4.3.1: Επιλογή του συστήματος μονάδων κατά τη μελέτη

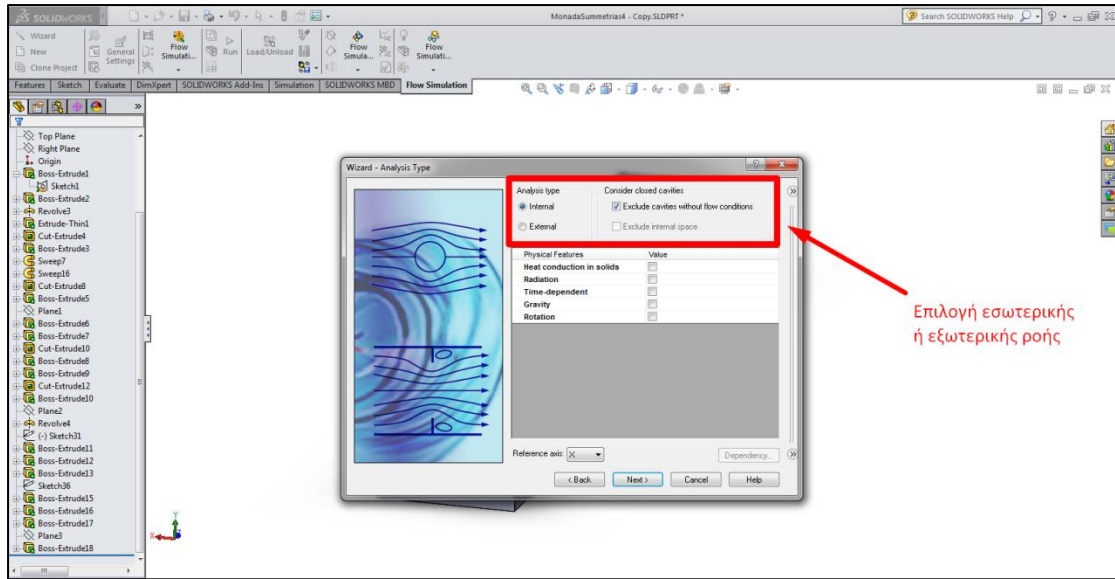
4.3.2 Είδος της ανάλυσης

Η επόμενη επιλογή είναι αυτή του είδους της ροής, εάν πρόκειται για εσωτερική ή εξωτερική. Επιπλέον, ο χρήστης καλείται να ορίσει τα φαινόμενα που επικρατούν στο σύστημα, όπως η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής στα στερεά σώματα, στα ρευστά, η ακτινοβολία κι η έντασή της, κι άλλα.

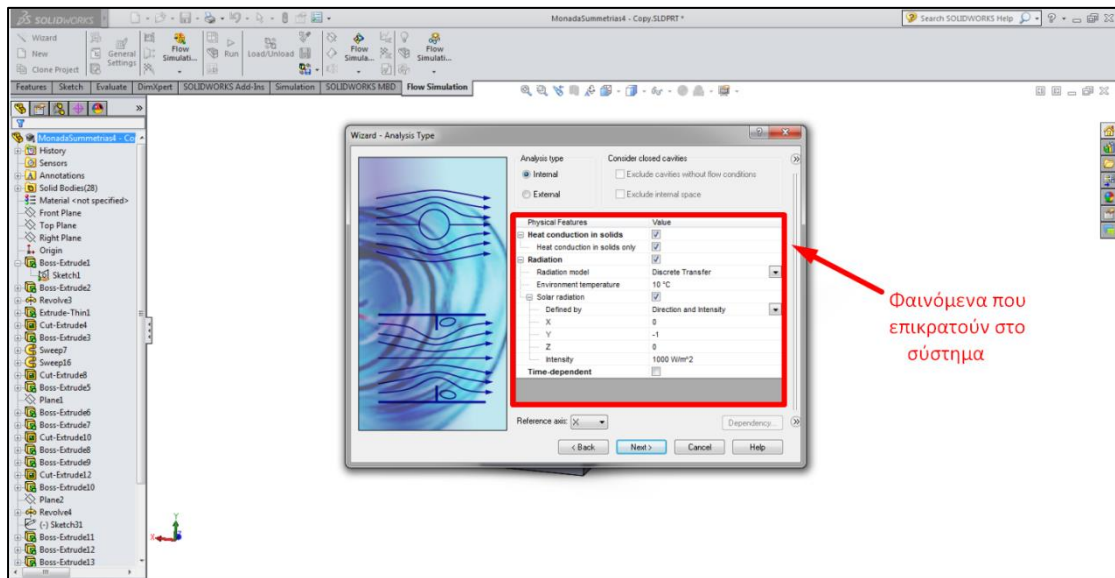
Στη συγκεκριμένη μελέτη, η ροή ορίζεται ως εσωτερική, καθώς το νερό διατρέχει το σύστημα σωλήνωσης του συλλέκτη, χωρίς να έρχεται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον. Τονίζεται, επίσης, πως δεν επιλέγεται ο αποκλεισμός των κοιλοτήτων χωρίς οριακές συνθήκες, καθώς είναι καίριας σημασίας για την ανάλυση να συμπεριληφθεί κι ο αέρας εντός του συλλέκτη, προκειμένου να μελετηθεί η κίνησή του κι η μεταφορά θερμότητας από την πλάκα στο κάλυμμα μέσου αυτού.

Από τα φαινόμενα που περιγράφουν τη ροή, ορίζονται τα εξής [35]:

- Μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής για τα στερεά, συμπεριλαμβάνοντας και τη σχετική κατηγορία για τα ρευστά
- Ακτινοβολία, επιλέγοντας ως μοντέλο τη Διακριτή Μεταφορά και θέτοντας τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 10°C
- Ηλιακή ακτινοβολία, οριζόμενη τόσο ως κατεύθυνση, με διάνυσμα κατεύθυνσης κατά τον άξονα Y και με αρνητική φορά, ώστε να είναι κάθετη στη συλλεκτική επιφάνεια, όσο κι ως ένταση, η οποία αρχικά ορίζεται 1000 W/m² και μετά αλλάζει, σε κάποιες από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις
- Βαρύτητα, οριζόμενη κι αυτή κατά την κατεύθυνση (-Y), με μέτρο 9.81 m/s²



Σχήμα 4.3.2: Χαρακτηρισμός της ροής ως εσωτερική ή εξωτερική



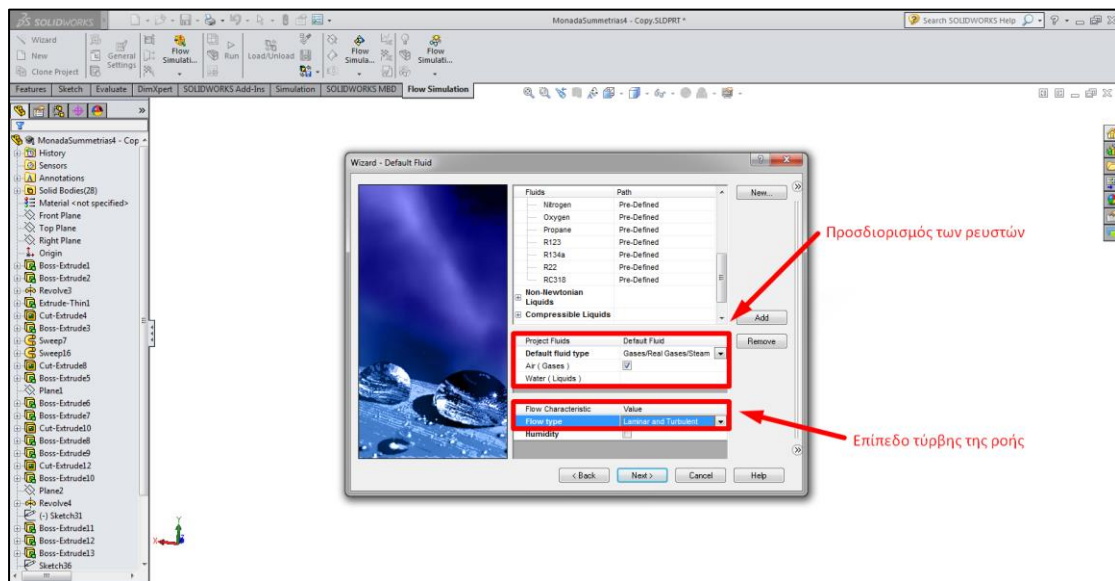
Σχήμα 4.3.3: Ορισμός των φαινομένων του συστήματος

4.3.3 Ορισμός των ρευστών και των υλικών

Αφού οριστούν το είδος της ανάλυσης και τα φαινόμενα που επικρατούν στο σύστημα, πρέπει να προσδιοριστούν τα ρευστά που συμμετέχουν κατά την αλληλεπίδραση του συλλέκτη με το περιβάλλον του. Στη δεδομένη εφαρμογή, αυτά τα δύο είναι το νερό, που διατρέχει το σύστημα σωλήνωσης του συλλέκτη κι απορροφά τη θερμότητα από την πλάκα απορρόφησης, κι ο αέρας που συναλλάσει θερμότητα μεταξύ της πλάκας και του καλύμματος μέσω της κίνησής του και της ανακυκλοφορίας λόγω φυσικής συναγωγής. Συγκεκριμένα, ορίζεται ως προεπιλεγμένο ρευστό ο αέρας, μαζί με την επιλογή να συμπεριληφθούν οι κοιλότητες χωρίς οριακές συνθήκες. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα όλες οι ανοιχτές

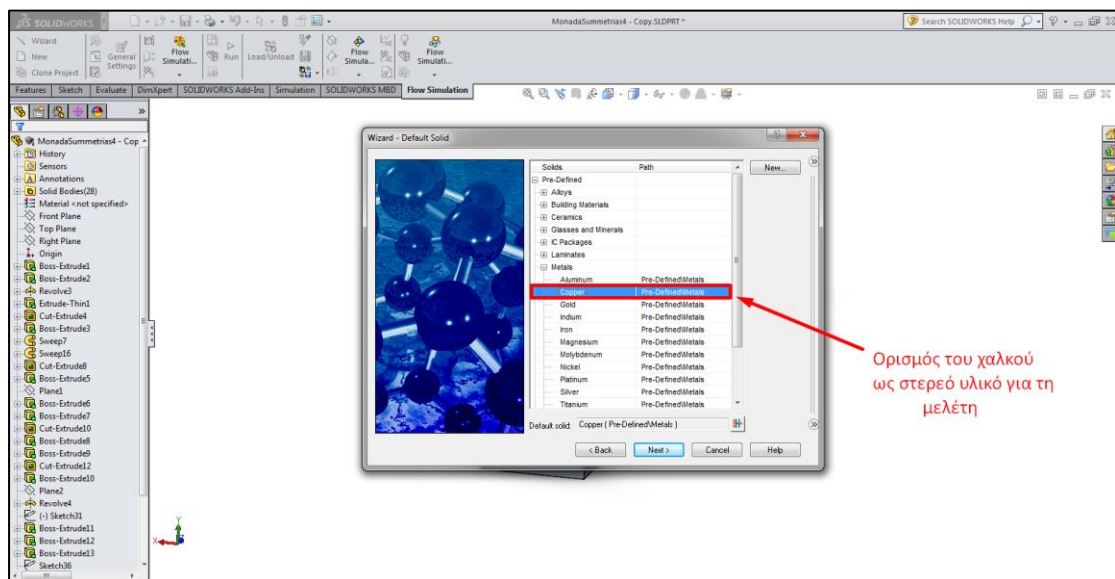
κοιλότητες που δημιουργούνται κατά το σχεδιασμό του συλλέκτη να περιέχουν το προεπιλεγμένο ρευστό, τον αέρα, εκτός αν τεθεί κάποια επιπλέον ρύθμιση μετέπειτα. Προκειμένου να οριστεί το νερό εντός της σωλήνωσης, θα εισαχθεί η έννοια του υποτομέα ρευστού, σε επόμενη ενότητα.

Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα να επιλεγεί το επίπεδο τύρβης της ροής, δηλαδή εάν πρόκειται για στρωτή ροή, τυρβώδη ή και τα δύο. Εδώ επιλέγεται ροή στρωτή και τυρβώδη, καθώς σε διαφορετικές περιοχές εμφανίζεται διαφορετικό επίπεδο τύρβης, παραδείγματος χάρη στο διανομέα, τον εσωτερικό σωλήνα, έχουμε διαφορετικό αριθμό Reynolds από ότι στο δακτύλιο [35].



Σχήμα 4.3.4: Προσδιορισμός των ρευστών και του επιπέδου τύρβης της ροής

Επίσης, μέσω της επόμενης κατηγορίας, ορίζεται το προεπιλεγμένο στερεό υλικό που περιγράφει το συλλέκτη, ο χαλκός.

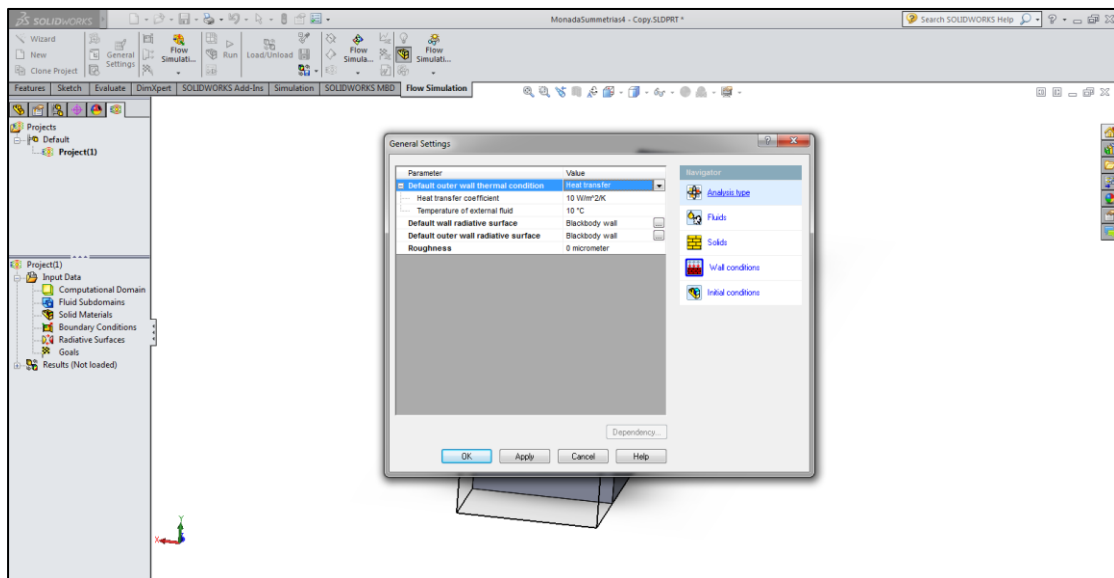


Σχήμα 4.3.5: Προσδιορισμός των στερεών υλικών για τη μελέτη

4.3.4 Συνθήκες τοιχώματος


Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που πρέπει να οριστούν για τη μελέτη του ηλιακού συλλέκτη είναι οι συνθήκες αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον. Αυτές παίζουν καθοριστικό ρόλο σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συλλέκτη, επηρεάζοντας το ωφέλιμο φορτίο και το βαθμό απόδοσής του μέσω των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, προσδιορίζονται τα εξής στοιχεία:

- Προεπιλεγμένη συνθήκη στο εξωτερικό τοίχωμα, όπου επιλέγεται συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ίσος με $h_w = 10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος 10°C
- Προεπιλεγμένη ραδιενεργός επιφάνεια τοιχώματος, η οποία θεωρείται ως μέλαν σώμα
- Τραχύτητα, η οποία πάρθηκε ίση με μηδέν



Σχήμα 4.3.6: Προσδιορισμός των συνθηκών τοιχώματος για τη μελέτη

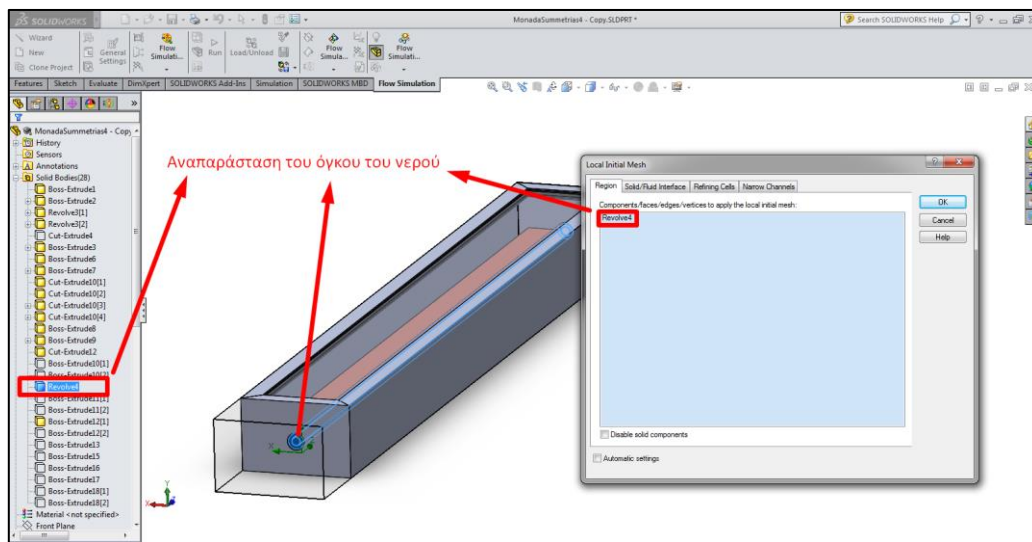
4.3.5 Υπολογιστικό πλέγμα

Το υπολογιστικό πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση αποτελεί μία ακόμη αξιοσημείωτη παράμετρο για τη διεκπεραίωση της μελέτης του συλλέκτη. Το πλέγμα μπορεί να οριστεί με ακρίβεια από τον χρήστη μέσω της εντολής **Initial Mesh** (), ορίζοντας επακριβώς το πλήθος των κελιών κατά την έννοια των τριών διαστάσεων στον χώρο, (N_x, N_y, N_z) , όπου N_x , N_y , N_z το πλήθος των κελιών σε καθένα από τους τρεις άξονες (x, y, z) αντίστοιχα.

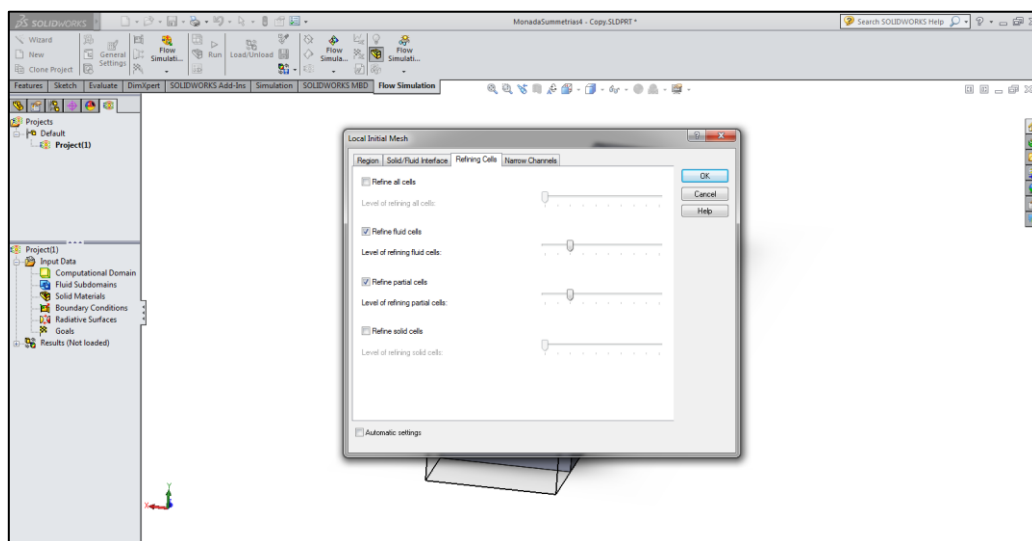
Σε αυτό το σημείο, τονίζεται το γεγονός πως υπάρχει μεγαλύτερη απαίτηση για ακρίβεια στην περιοχή του διακινούμενου νερού από ότι στα υπόλοιπα τμήματα

του συλλέκτη, όπως το πλαίσιο, τη μόνωση και τα άλλα. Για αυτό το σκοπό, δημιουργείται ένα «τοπικό» πλέγμα, που είναι πιο πυκνό για τις περιοχές μεγαλύτερου ενδιαφέροντος. Αυτό το πλέγμα πραγματοποιείται μέσω της εντολής **Local Initial Mesh** (🔍). Αρχικά, ο χρήστης καλείται να προσδιορίσει την επιφάνεια ή τον όγκο επί του οποίου θα σχηματιστεί το πλέγμα κι έπειτα να καθορίσει την επιθυμητή πύκνωση αυτού.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, κατασκευάζεται ένα στερεό σώμα, όγκου όσο του διακινούμενου νερού και σχήμα που παίρνει τη μορφή του εσωτερικού της διάταξης της σωλήνωσης. Το στερεό αυτό σώμα παίζει το ρόλο του όγκου του νερού, ενώ στη συνέχεια εξαιρείται από την ανάλυση του Flow Simulation, καθώς ο ρόλος του είναι εικονικός για την πύκνωση του πλέγματος και δεν υφίσταται στην πραγματική λειτουργία του συλλέκτη.



Σχήμα 4.3.7: Επιλογή του όγκου του νερού για το «τοπικό» πλέγμα

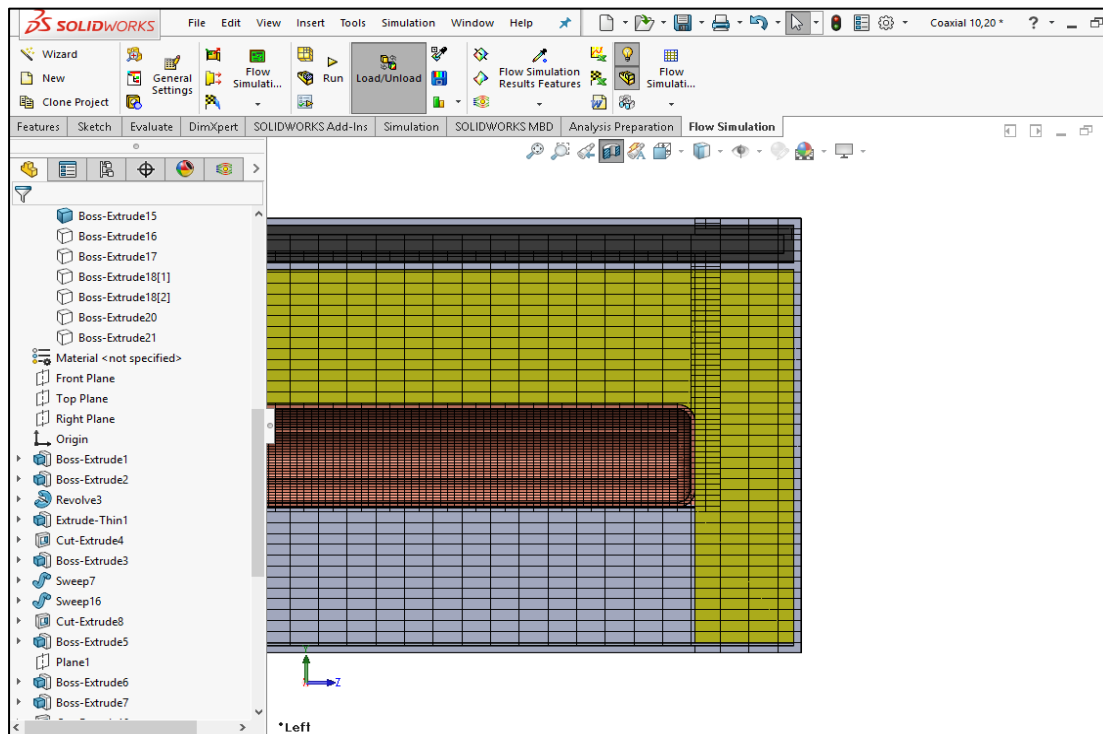


Σχήμα 4.3.8: Ρύθμιση της επιθυμητής πύκνωσης για το «τοπικό» πλέγμα

Για τον καθορισμό του χρησιμοποιούμενου πλέγματος, δοκιμάστηκαν διάφορα πλέγματα, λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία των διαστάσεων του συλλέκτη, ενώ η είσοδος του νερού στο συλλέκτη πάρθηκε σταθερή για κάθε πλέγμα κι ίση με 50°C. Από τα πλέγματα που δοκιμάστηκαν, κάποια είχαν πύκνωση μέσω του «τοπικού» πλέγματος, ενώ κάποια άλλα είχαν ομοιόμορφη κατανομή του πλήθος των κελιών. Τα εξεταζόμενα πλέγματα είναι:

- (45,40,180) – Fluid Refinement=1, Partial Refinement=1
- (60,55,180) – Fluid Refinement=1, Partial Refinement=1
- (65,60,180) – Fluid Refinement=1, Partial Refinement=1
- (70,65,200) – Fluid Refinement=1, Partial Refinement=1
- (45,40,180) – Fluid Refinement=2, Partial Refinement=2

Επιλέχθηκε τελικά το τελευταίο πλέγμα, (45,40,180) – Fluid Refinement=2, Partial Refinement=2, που περιλαμβάνει πύκνωση των κελιών δύο φορές στις περιοχές του νερού και στις περιοχές διεπιφάνειας μεταξύ των δύο ρευστών και του στερεού. Το επιλεγόμενο πλέγμα έβγαζε αποτελέσματα που συνέπιπταν με τα πιο αναλυτικά πλέγματα, ενώ υπερτερούσε έναντι αυτών από την άποψη του υπολογιστικού χρόνου, καθώς τα πιο λεπτομερή πλέγματα είχαν όχι μόνο περισσότερο χρόνο υπολογισμού αλλά και μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, χωρίς να προσφέρουν κάποια επιπλέον πληροφορία.



Σχήμα 4.3.9: Λεπτομέρεια από το υπολογιστικό πλέγμα του συλλέκτη, όπου διακρίνονται οι περιοχές της πύκνωσης στο νερό και στη διεπιφάνεια των ρευστών, του νερού και του αέρα, με το στερεά τμήματα

4.3.6 Υποτομέας ρευστού

Ο υποτομέας ρευστού, **Fluid Subdomain** (🔧), αποτελεί μία ακόμη ουσιώδη παράμετρο που πρέπει να ρυθμιστεί στην παρούσα ανάλυση. Επιτρέπει στον χρήστη να ορίσει περιοχές ή κοιλότητες τις οποίες διατρέχει κάποιο ρευστό διαφορετικό από το προεπιλεγμένο. Στην παρούσα ανάλυση, το ρευστό που ορίζεται να διακινεί τη διάταξη της σωλήνωσης είναι το νερό, το οποίο διαφέρει από το προεπιλεγμένο, το οποίο είναι ο αέρας.

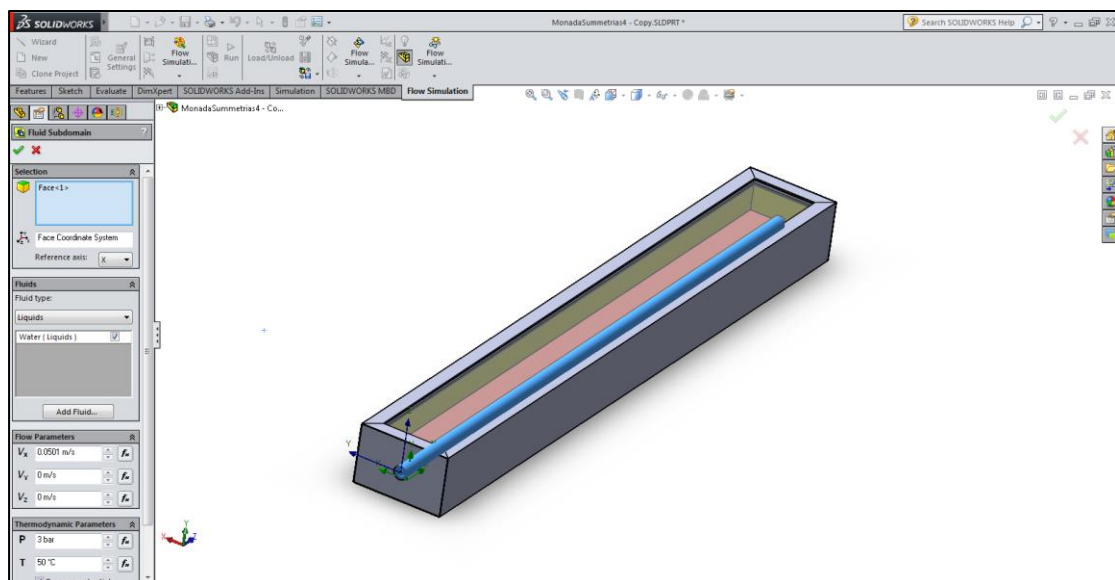
Ορίζεται επίσης η επιφάνεια που αποτελεί το όριο μεταξύ του ρευστού και του στερεού, καθώς κι ταχύτητα του ρευστού κατά την είσοδό του στο διανομέα. Αυτή καθορίζεται από την παροχή μάζας, την πυκνότητα του νερού και τη γεωμετρία, ως εξής:

$$u = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4}} \quad (4.3.1)$$

, όπου για τη συγκεκριμένη γεωμετρία με $D_i = 10 \text{ mm}$, προκύπτει:


$$u = 0.0501 \text{ m/s}$$

Θέτοντας και τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά κατά την είσοδο, την πίεση και τη θερμοκρασία, ολοκληρώνεται ο προσδιορισμός του υποτομέα ρευστού, ενώ μετά την ολοκλήρωσή του, παρουσιάζεται κι ο οριζόμενος όγκος του ρευστού.




Σχήμα 4.3.10: Ορισμός του υποτομέα ρευστού

4.3.7 Ορισμός των στερεών υλικών

Πέραν του προεπιλεγμένου υλικού που είναι ο χαλκός, πρέπει να προστεθούν τα υπόλοιπα υλικά, προκειμένου να προσδιοριστούν οι ιδιότητες και των υπόλοιπων τμημάτων του συλλέκτη. Μέσω της εντολής **Solid Materials** () , ορίζονται κατά σειρά όλα τα υλικά, επιλέγοντας παράλληλα τα αντίστοιχα στερεά σώματα που υλοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο ως τμήματα του συλλέκτη. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

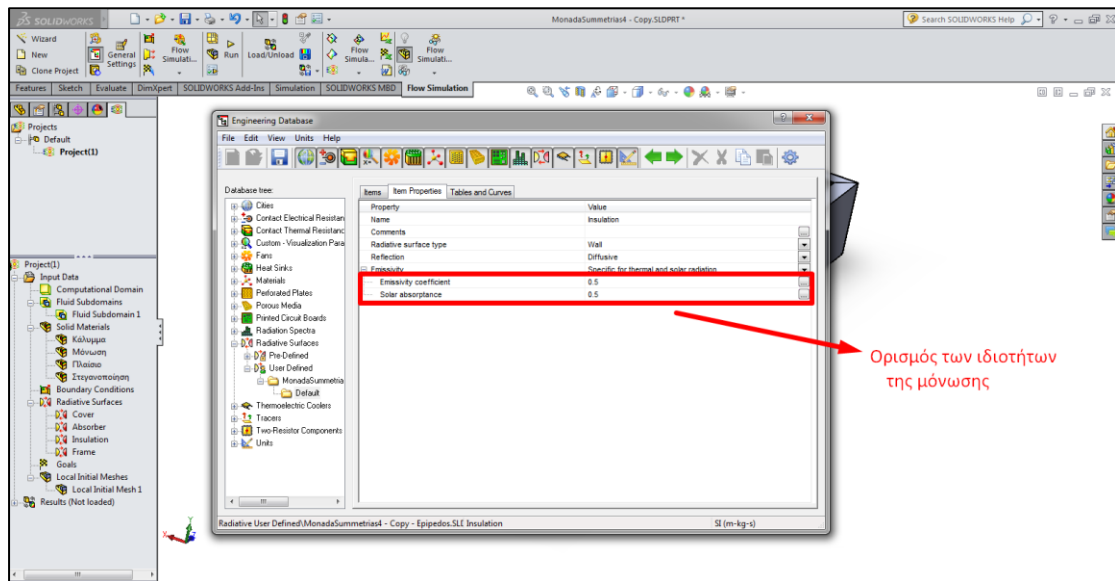
- Το κάλυμμα, το οποίο ορίζεται ως υλικό γυαλί και διαφανές ως προς τη θερμική ακτινοβολία
- Η μόνωση, το υλικό της οποίας είναι ο υαλοβάμβακας και είναι αδιαφανής
- Το πλαίσιο, που τίθεται υλικό οριζόμενο από τον χρήστη, Αλουμίνιο 6063-T4, με πυκνότητα ίση με 2710 kg/m^3 , ειδική θερμοχωρητικότητα ίση με 900 J/kgK και θερμική αγωγιμότητα ίση με 200 W/mK , αδιαφανές ως προς την ακτινοβολία
- Τη στεγανοποίηση του καλύμματος, η οποία ορίζεται ως υλικό καουτσούκ, θεωρώντας πως είναι αδιαφανής ως προς την ακτινοβολία

4.3.8 Ορισμός των επιφανειών που ακτινοβολούν

Επόμενη παράμετρος του Flow Simulation που καλείται να ορίσει ο χρήστης είναι τα τμήματα του συλλέκτη που ακτινοβολούν. Η ρύθμιση αυτή υλοποιείται μέσω της εντολής **Radiative Surfaces** () κι επιλέγεται κάθε μέρος του συλλέκτη ξεχωριστά. Κατά σειρά, αυτά είναι:

- Το κάλυμμα, οι ιδιότητες του οποίου πρέπει να οριστούν χειροκίνητα, θέτοντας το συντελεστή εκπομπής του ίσο με 0.88, ενώ η διαπερατότητά του περιλαμβάνεται στο γινόμενο με την απορροφητικότητα της πλάκας που τίθεται στη συνέχεια
- Ο απορροφητήρας, με συντελεστή εκπομπής που τίθεται ίσος με 0.1 καθώς πρόκειται για επιλεκτική επιφάνεια και απορροφητικότητα ίση με 0.8, τιμή στην οποία περιλαμβάνεται κι η διαπερατότητα του καλύμματος
- Η μόνωση, της οποίας οι τιμές τόσο του συντελεστή εκπομπής όσο και της απορροφητικότητας θεωρούνται ίσες προς 0.5
- Το πλαίσιο, το οποίο θεωρείται ότι συναλλάσσει θερμότητα μόνο με συναγωγή κι όχι με ακτινοβολία, άρα ο συντελεστής εκπομπής του κι η απορροφητικότητά του λαμβάνονται ίσες με το μηδέν

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά ο ορισμός ενός εκ των παραπάνω τμημάτων, της μόνωσης:



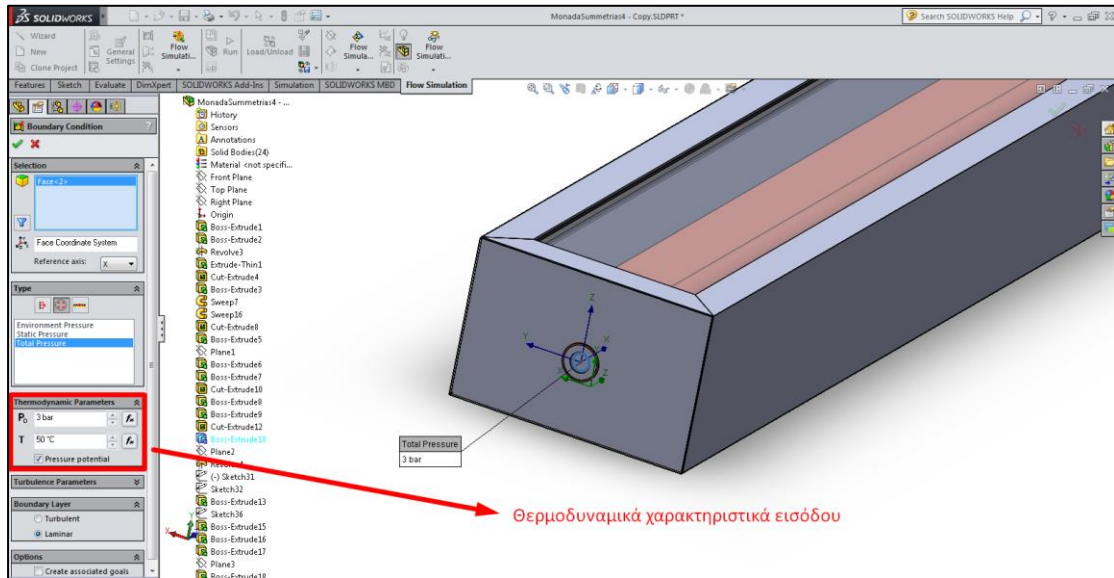
Σχήμα 4.3.11: Ορισμός των ιδιοτήτων της μόνωσης

4.3.9 Οριακές συνθήκες

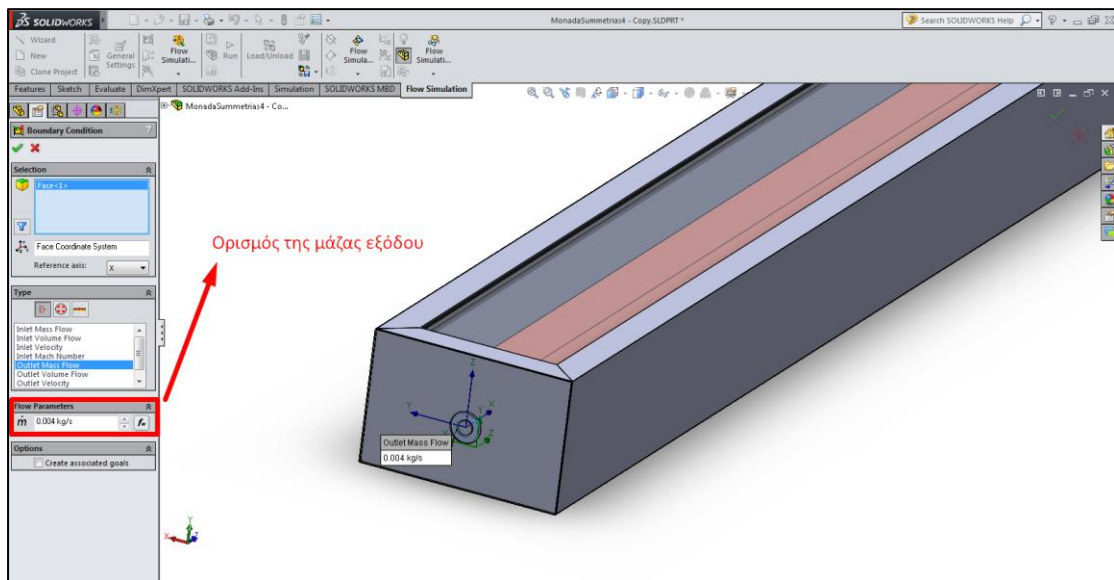
Μία απαραίτητη ρύθμιση που πρέπει να πραγματοποιηθεί για κάθε προσομοίωση είναι η διατύπωση των οριακών συνθηκών που λαμβάνουν χώρα στην είσοδο και την έξοδο του νερού από το σύστημα. Η υλοποίησή τους γίνεται μέσω της εντολής **Boundary Conditions** (📏). Κατ' αυτόν τον τρόπο, ορίζονται οι εξής συνθήκες:

- **Είσοδος (Inlet)**, η οποία περιγράφει την είσοδο του νερού στο σύστημα μέσω παροχής μάζας ή θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών. Μία οριακή συνθήκη μπορεί να πάρει τρεις μορφές κατά την προσομοίωση, οριακή συνθήκη μάζας, οριακή συνθήκη πίεσης ή οριακή συνθήκη τοιχώματος. Στη δεδομένη μελέτη, ορίστηκε στην είσοδο του διανομέα μία συνθήκη τύπου πίεσης, όπου προσδιορίστηκε η ολική πίεση εισόδου, 3 bar, κι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στους 50°C, η οποία ωστόσο όπως θα δειχθεί παρακάτω παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα την εξεταζόμενη περίπτωση. Τέλος, ρυθμίζεται το οριακό στρώμα της ροής κατά την είσοδο, όντας αρχικά στρωτό.
- **Έξοδος (Outlet)**, είναι οριακή συνθήκη τύπου μάζας και περιγράφει τη μάζα ρευστού που εξέρχεται από το σύστημα, όντας προφανώς ίση με την εισερχόμενη. Εφαρμόζεται στην έξοδο του δακτυλίου και τίθεται ίση με 0.004 kg/s.
- **Οριακή συνθήκη τοιχώματος**, η οποία τίθεται για ορίσει το άκρο του σωλήνα. Εφαρμόζεται επί της μετωπικής εξωτερικής επιφάνειας του σωλήνα κι ορίζεται

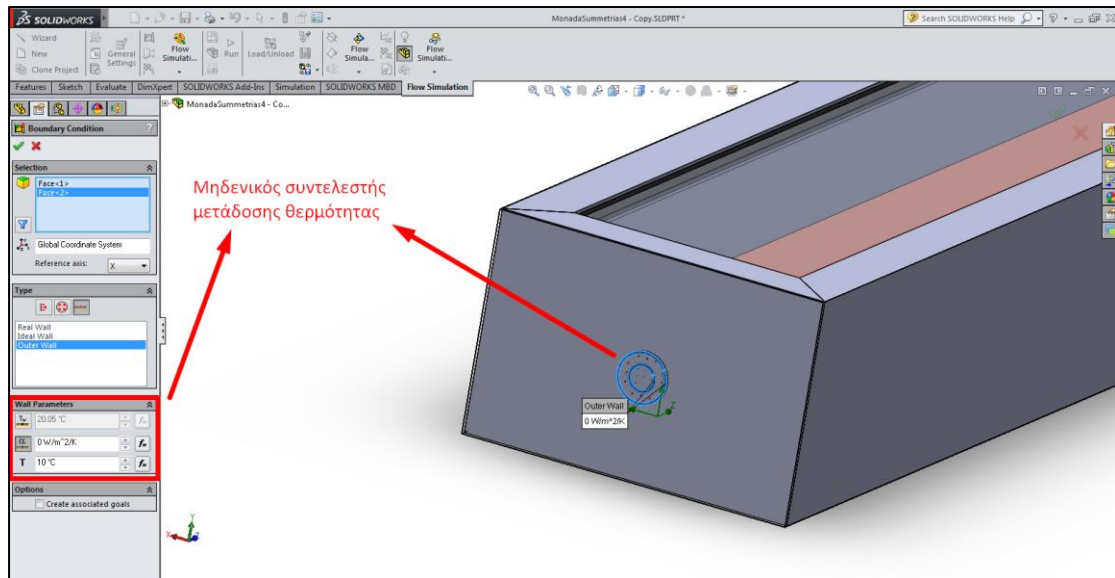
έτσι ώστε να μην υπάρχουν απώλειες με το περιβάλλον, καθώς σε έναν πλήρως λειτουργικό συλλέκτη, το σημείο εκείνο θα αποτελούσε τη συνέχεια της σωλήνωσης. Τίθεται, επομένως, η θερμοκρασία περιβάλλοντος του ρευστού (του ατμοσφαιρικού αέρα) ίση με 10 °C, ενώ ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λαμβάνεται ίσος με το μηδέν.



Σχήμα 4.3.12: Ορισμός της οριακής συνθήκης εισόδου



Σχήμα 4.3.13: Ορισμός της οριακής συνθήκης εξόδου



Σχήμα 4.3.14: Ορισμός της οριακής συνθήκης τοιχώματος

4.3.10 Στόχοι

Για την εκτέλεση κάθε προσομοίωσης, πρέπει να τεθούν οι στόχοι της, που είναι τα ζητούμενα μεγέθη προς υπολογισμό από τον χρήστη. Τα πιο πολλά εξ αυτών είναι θερμοκρασίες, αλλά αυτό δεν είναι απαραίτητο, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, καθώς μπορεί να περιλαμβάνονται κι άλλα μεγέθη, όπως θερμορροές ή πιέσεις. Ο ορισμός των στόχων πραγματοποιείται με την εντολή **Goals** (🎯) η οποία περιλαμβάνει ποικίλες κατηγορίες, όπως στόχος επιφάνειας, στόχος όγκου, στόχος οριζόμενος από εξίσωση κι άλλα. Στη δεδομένη μελέτη, οι πιο πολλοί στόχοι είναι τύπου επιφάνειας, ωστόσο η μέση θερμοκρασία του ρευστού, όπως θα φανεί στη συνέχεια, αποτελεί στόχο όγκου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το στερεό σώμα που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα και που εκφράζει τον όγκο του ρευστού για τον ορισμό του συγκεκριμένου στόχου. Τονίζεται ξανά πως το εν λόγω σώμα δε λαμβάνεται υπόψη κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, καθώς ο ρόλος του είναι εικονικός. Όλοι οι στόχοι για τη σύγκλιση της προσομοίωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί στη συνέχεια.

Σημειώνεται, επιπλέον, πως τα μεγέθη των στόχων που αφορούν κάποιο ρευστό, όπως το νερό τέθηκαν ως σταθμισμένοι στόχοι, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η κίνηση του ρευστού. Αντίθετα, τα ακίνητα τμήματα του συλλέκτη τέθηκαν ως στόχοι στερεών σωμάτων, χωρίς να περιέχεται η ταχύτητα στους υπολογισμούς από το πρόγραμμα.

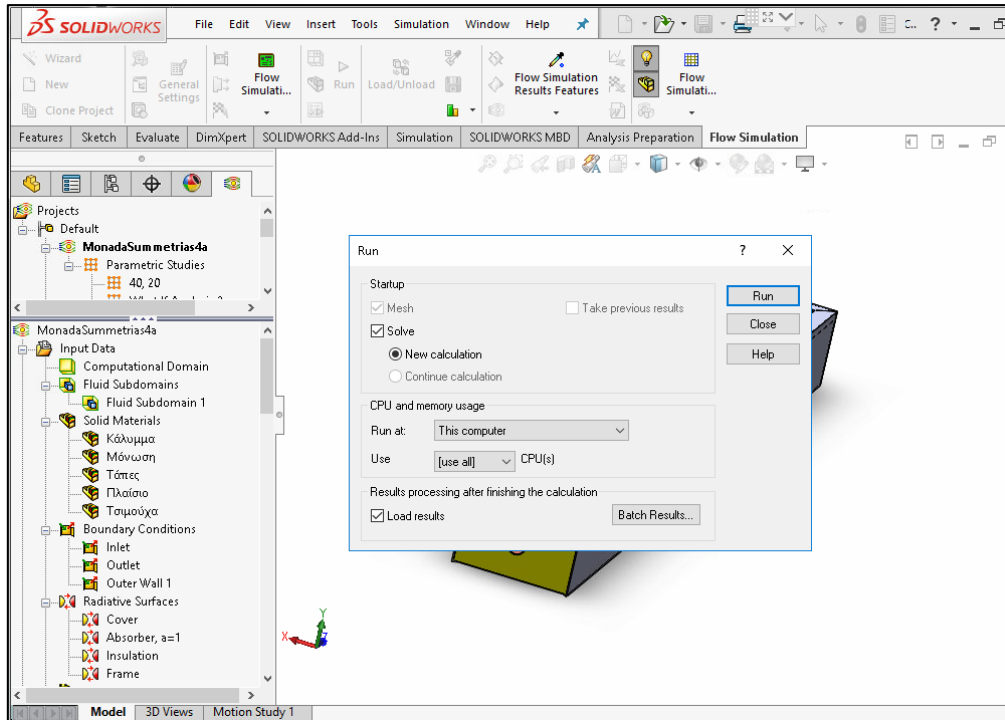
Πίνακας 4.3.1: Οι στόχοι κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης

Στόχος	Περιγραφή στόχου
T_{out} (°C)	Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη
T_p (°C)	Θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης
T_{co} (°C)	Εξωτερική θερμοκρασία του καλύμματος
T_{ci} (°C)	Εσωτερική θερμοκρασία του καλύμματος
$T_{out,2}$ (°C)	Θερμοκρασία του νερού λίγο πριν την τάπα εξόδου
Frame Heat Transfer Rate (W)	Απώλειες συναγωγής περιμετρικά και πίσω από το συλλέκτη
$T_{o,t}$ (°C)	Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το διανομέα
$T_{i,an}$ (°C)	Θερμοκρασία εισόδου του νερού στο δακτύλιο
T_f (°C)	Μέση θερμοκρασία του νερού στο συλλέκτη

4.4 Εκτέλεση και συλλογή αποτελεσμάτων

Με τον προσδιορισμό των στόχων της προσομοίωσης, ολοκληρώνονται συνολικά οι ρυθμίσεις επί του συλλέκτη και πλέον ακολουθεί η εκτέλεσή της. Η εκκίνηση της εκτέλεσης ορίζεται με την εντολή **Run** (▶) , οι επιλογές της οποίας διακρίνονται στο παρακάτω σχήμα.

Μετά από τις παραπάνω ρυθμίσεις και την ολοκλήρωση του υπολογισμού της εκάστοτε περίπτωσης, έχουν προσδιοριστεί πλήρως όλα τα θερμοδυναμικά και ροϊκά μεγέθη σε όλους τους κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος του συλλέκτη. Μπορούν, επομένως, να ληφθούν οι τιμές κάποιων σημαντικών μεγεθών από το πρόγραμμα, οι οποίες έπειτα θα χρησιμοποιηθούν για τους απαραίτητους υπολογισμούς που περιγράφουν τη λειτουργία τη συλλέκτη. Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, καθώς και μετά από αυτήν, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να παρακολουθεί αυτά τα μεγέθη στόχους που ορίστηκαν προηγουμένως, και τη σύγκλιση αυτών με βάση συγκεκριμένα κριτήρια.



Σχήμα 4.4.1: Παράθυρο εκτέλεσης της προσομοίωσης

Τα κριτήρια σύγκλισης μπορεί είτε να τα ορίσει ο χρήστης είτε να οριστούν αυτόματα από το πρόγραμμα. Στη συγκεκριμένη ανάλυση, οι στόχοι και τα κριτήριά τους έχουν ως ακολούθως:

- Η θερμοκρασία εξόδου του νερού και για τους δύο στόχους του παραπάνω πίνακα έχει κριτήριο σύγκλισης $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, που ορίζεται χειροκίνητα
- Οι θερμοκρασίες του καλύμματος, εσωτερική κι εξωτερική, καθώς κι η θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης έχουν κριτήριο σύγκλισης $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, που ορίζεται χειροκίνητα
- Οι απώλειες συναγωγής περιμετρικά και πίσω από το συλλέκτη έχουν κριτήριο σύγκλισης 0.1 W που ορίζεται χειροκίνητα
- Οι θερμοκρασίες εξόδου από το διανομέα, εισόδου στο δακτύλιο καθώς κι η μέση θερμοκρασία του ρευστού έχουν κριτήριο σύγκλισης που ορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα

Η οθόνη παρουσίασης των στόχων που προκύπτουν κατά τους υπολογισμούς από το πρόγραμμα έχει τη μορφή που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Στο εν λόγω σχήμα μπορεί, επίσης, να διακριθεί, δεξιά από τη στήλη της προόδου της σύγκλισης, το κριτήριο σύγκλισης για τον κάθε στόχο και γίνεται ξεκάθαρος ο διαχωρισμός μεταξύ του χειροκίνητου κριτηρίου και του αυτόματου από το πρόγραμμα. Το πρόγραμμα, τέλος, προσφέρει τη δυνατότητα προώθησης των αποτελεσμάτων για περαιτέρω επεξεργασία σε φύλλο εργασίας Excel.

Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
Frame Heat Transfer Rate	24.3704 W	Achieved (IT = 563)	0.1 W	24.3948 W
Tci	19.4621 °C	Achieved (IT = 546)	0.05 °C	19.4721 °C
Tco	20.2561 °C	Achieved (IT = 760)	0.05 °C	20.2657 °C
Tf	51.9133 °C	Achieved (IT = 545)	0.058746 °C	51.9102 °C
Ti,an	51.1493 °C	Achieved (IT = 635)	0.0316609 °C	51.1473 °C
To,t	51.1282 °C	Achieved (IT = 697)	0.0227538 °C	51.1265 °C
Tout	52.4082 °C	Achieved (IT = 874)	0.01 °C	52.4052 °C
Tp	56.9451 °C	Achieved (IT = 696)	0.05 °C	56.9651 °C
Tout2	52.9865 °C	Achieved (IT = 871)	0.01 °C	52.9855 °C

Σχήμα 4.4.2: Η λίστα των στόχων κατά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης

Από τους παραπάνω στόχους, ξεχωρίζουν κάποια σημαντικά μεγέθη που είναι απαραίτητα μετέπειτα για τον υπολογισμό της ωφέλιμης ισχύος και του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη. Τα μεγέθη αυτά παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.4.1: Αποτελέσματα προς επεξεργασία μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης

Συμβολισμός	Μέγεθος
T_{out} (°C)	Θερμοκρασία εξόδου από το συλλέκτη
$T_{out,2}$ (°C)	Θερμοκρασία πριν την τάπα εξόδου
T_p (°C)	Μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης
T_{co} (°C)	Θερμοκρασία της εξωτερικής πλευράς του καλύμματος
Frame Heat Transfer Rate - FHTR (W)	Απώλειες συναγωγής περιμετρικά και πίσω από το συλλέκτη

Στην ουσία το μέγεθος Frame Heat Transfer Rate που λαμβάνεται από την προσομοίωση αποτελεί το άθροισμα των πλευρικών απωλειών και των απωλειών πυθμένος του συλλέκτη:

$$FHTR = Q_{e,b} = Q_e + Q_b$$

5 Εξεταζόμενες περιπτώσεις

5.1 Εισαγωγή

Μετά το πέρας του σχεδιασμού του συλλέκτη, έπεται η δοκιμή του σε επίπεδο προσομοίωσης από το πρόγραμμα, προκειμένου να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η ανάλυση ηλιακών συλλεκτών μέσω του SolidWorks Flow Simulation χρησιμοποιείται ευρέως για δημοσιεύσεις και προώθηση καινοτόμων ιδεών. Οι Μπέλλος , Τζιβανίδης, Κορρές κι Αντωνόπουλος [31] μελέτησαν μία μονάδα συμμετρίας επίπεδου ηλιακού συλλέκτη, ανάγοντας τα αποτελέσματα και στο συνολικό συλλέκτη, ενώ υπολόγισαν και το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του νερού και του απορροφητήρα. Οι Κορρές και Τζιβανίδης [22] μελέτησαν θερμικά έναν ολόκληρο συλλέκτη με οφιοειδές σύστημα ροής («σερπαντίνα»), υπολογίζοντας την απόδοσή του κι αναλύοντας τη θερμοκρασιακή κατανομή και τις δευτερεύουσες ροές εντός του συστήματος σωλήνωσης. Επίσης, οι Κορρές και Τζιβανίδης [32] πραγματοποίησαν θερμική κι οπτική ανάλυση σε ένα συλλέκτη κενού τύπου U με παραβολικό κάτοπτρο και κυλινδρικό απορροφητήρα, προσδιορίζοντας την απόδοση και τις απώλειές του, καθώς και το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από τον απορροφητήρα στο νερό. Ακόμη, ένας συλλέκτης κενού με παραβολικό κάτοπτρο κι επίπεδο απορροφητήρα αυτή τη φορά μελετήθηκε θερμικά κι οπτικά από τους Κορρέ, Τζιβανίδη, Αλεξόπουλο και Μητσόπουλο [34]. Ως προς το ομοαξονικό σύστημα ροής, αναλύθηκε από τους Κορρέ και Τζιβανίδη [33] στο πλαίσιο ενός συλλέκτη κενού με παραβολικό κάτοπτρο, προσδιορίζοντας την απόδοση και τις συνολικές του απώλειες για διάφορα σημεία λειτουργίας.

Κατά την κατάστρωση των περιπτώσεων που θα εκτελεστούν, λήφθηκαν υπόψη διάφορες κατηγορίες παραμέτρων που επιδρούν στο σύστημα, οι οποίες διακρίνονται σε ποικίλες κατηγορίες. Έτσι, εξετάστηκαν κάποιες λειτουργικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία εισόδου, η πτώση πίεσης κι η παροχή μάζας του ρευστού, κάποιες κατασκευαστικές παράμετροι του συλλέκτη, όπως η γωνία κλίσης του κι η γεωμετρία της σωλήνωσης, καθώς και παράμετροι που αφορούν το περιβάλλον του συλλέκτη, όπως η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ακολουθούν, έπειτα, οι αντίστοιχες ενότητες που περιγράφουν τις προαναφερθείσες περιπτώσεις λειτουργίας.

5.2 Σταθερές παράμετροι σε όλες τις περιπτώσεις

Αν κι ο συλλέκτης εξετάζεται ως προς ποικίλες μεταβλητές από τρέξιμο σε τρέξιμο, υπάρχουν κάποια μεγέθη, των οποίων οι τιμές παραμένουν αμετάβλητες σε κάθε περίπτωση. Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.1 που ακολουθεί. Οι ιδιότητες του νερού που δεν παραμένουν σταθερές, αλλά μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, παρατίθενται ξεχωριστά στο Παράρτημα Α.

Πίνακας 5.2.1: Σταθερά μεγέθη κατά την προσομοίωση

Μέγεθος	Περιγραφή μεγέθους	Τιμή
h_w (W/m ² K)	Συντελεστής συναγωγής με το περιβάλλον	10
A_c (m ²)	Συλλεκτική επιφάνεια	0.1
ε_c	Συντελεστής εκπομπής του καλύμματος	0.88
σ (W/m ² K ⁴)	Σταθερά Stefan-Boltzmann	$5.67 \cdot 10^{-8}$
T_a (°C)	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	10
α	Απορροφητικότητα της πλάκας απορρόφησης	0.8
ε_{ins}	Συντελεστής εκπομπής της μόνωσης	0.5
k_{ins} (W/mK)	Θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης	0.04
A_e (m ²)	Πλευρική επιφάνεια της μόνωσης	0.088

5.3 Σχέσεις υπολογισμού των μεγεθών

Πριν την ανάπτυξη των περιπτώσεων και των αποτελεσμάτων τους, προσδιορίζεται το σύνολο κι η αλληλουχία των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του συλλέκτη, της ωφέλιμης ισχύος και του βαθμού απόδοσης. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, λαμβάνοντας τα αποτελέσματα του Flow Simulation μετά από τη διεκπεραίωση της εκτέλεσης κάθε περίπτωσης, λαμβάνονται οι τιμές ορισμένων μεγεθών, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.3.1. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των ζητούμενων, εφαρμόζεται μία σειρά βημάτων για κάθε περίπτωση και για κάθε διαφορετική θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη, ως ακολούθως.

Αρχικά, υπολογίζονται οι απώλειες κορυφής, γνωρίζοντας τόσο τη θερμοκρασία της εξωτερικής πλευράς του καλύμματος, όσο και του περιβάλλοντος:

$$\dot{Q}_i = A_c \cdot h_w \cdot (T_{co} - T_a) + A_c \cdot \sigma \cdot \varepsilon_c \cdot (T_{co}^4 - T_a^4) \quad (5.3.1)$$

, όπου ο πρώτος όρος αφορά τη συναγωγή κι ο δεύτερος την ακτινοβολία, καθώς όλα τα μεγέθη είναι πλέον γνωστά.

Έπειτα, γνωρίζοντας τις υπόλοιπες απώλειες του συλλέκτη από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αθροίζοντας τις απώλειες κορυφής που μόλις υπολογίστηκαν, προκύπτουν οι συνολικές θερμικές απώλειες σε W :

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_t + \dot{Q}_{e,b} \quad (5.3.2)$$

Πλέον μπορεί να προσδιοριστεί η ωφέλιμη ισχύς του συλλέκτη:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (5.3.3)$$

Συνεπώς, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης για κάθε θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c \cdot G_T} \quad (5.3.4)$$

Γνωρίζοντας το βαθμό απόδοσης και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (1.4.12), μπορούμε να προσδιορίσουμε από την καμπύλη του βαθμού απόδοσης τον παράγοντα θερμικής απολαβής F_R και το συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών U_L του συλλέκτη, εφόσον είναι γνωστό τόσο το γινόμενο (τα) αλλά κι οι σταθερές της ευθείας προσέγγισης. Συγκεκριμένα, εάν η εξίσωση της ευθείας έχει την εξής μορφή:

$$y = -a \cdot x + b \quad (5.3.5)$$

, τότε θα ισχύει:

$$F_R U_L = a \quad (5.3.6)$$

και:

$$F_R (\tau \alpha) = b \quad (5.3.7)$$

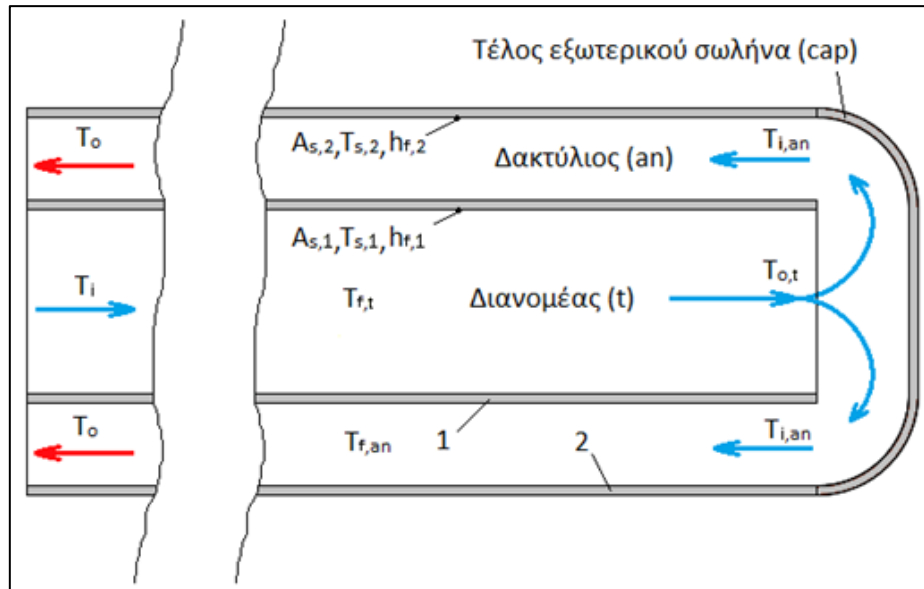
Επομένως, υπολογίζονται τα δύο ζητούμενα χαρακτηριστικά του συλλέκτη, F_R και U_L .

5.4 Προσομοίωση ως προς τη γεωμετρία της σωλήνωσης

5.4.1 Διατύπωση του προβλήματος

Στη συγκεκριμένη ενότητα, εξετάστηκε η επίδραση της γεωμετρίας της σωλήνωσης στη συμπεριφορά του συλλέκτη για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες, στις οποίες η αλλαγή έγκειτο στην αλλαγή της διαμέτρου του διανομέα αλλά και του εξωτερικού σωλήνα. Συγκεκριμένα,

όπως διακρίνεται στο ακόλουθο σχήμα, το Σχήμα 5.4.1, μεταβλήθηκαν οι τιμές των διαμέτρων $D_{i,1}$ και $D_{i,2}$, διατηρώντας το πάχος του σωλήνα σταθερό, 1 mm. Έπειτα, παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις υπολοίπες παραμέτρους που θεωρήθηκαν σταθερές, όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ή με ένα συγκεκριμένο εύρος για κάθε περίπτωση, όπως η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη.



Σχήμα 5.4.1: Σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας της σωλήνωσης [33]

Πίνακας 5.4.1: Οι δύο εξεταζόμενες γεωμετρίες της σωλήνωσης

Περίπτωση	Εσωτερική διάμετρος διανομέα $D_{i,1}$ (mm)	Εσωτερική διάμετρος εξωτερικού σωλήνα $D_{i,2}$ (mm)	Πάχος σωλήνα (mm)
1 ^η	10	20	1
2 ^η	5	10	1

Πίνακας 5.4.2: Ορισμός των παραμέτρων κατά τη σύγκριση των γεωμετριών σωλήνωσης

Παράμετρος	Τιμή / Εύρος
T_{in}	$10 \div 80^{\circ}\text{C}$, ανά 10°C
G_T	1000 W/m^2
\dot{m}	0.004 kg/s
β	0°
Γεωμετρία σωλήνωσης ($D_{i,1}$, $D_{i,2}$)	$(10,20)$, $(5,10)$ [mm, mm]

Στο σημείο αυτό, πρέπει να γίνει αναφορά και στο χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό πλέγμα για την περίπτωση της δεύτερης γεωμετρίας, (5,10). Όπως και στον ομοαξονικό συλλέκτη (10,20), δοκιμάστηκαν διάφορα πλέγματα, επίσης θεωρώντας σταθερή θερμοκρασία εισόδου του νερού στους 50°C. Κάποια από αυτά ήταν τα ακόλουθα:

- (45,40,180)
- (55,50,220)
- (60,55,180)
- (65,60,180)
- (70,65,200)
- (45,40,180) – Fluid Refinement=2, Partial Refinement=2
- (55,50,220) - Fluid Refinement=2, Partial Refinement=2

Κατά την ίδια λογική με την αρχική γεωμετρία στην αντίστοιχη ενότητα του Κεφαλαίου 4, επιλέχθηκε το πλέγμα (55,50,220) – Fluid Refinement=2, Partial Refinement=2, καθώς ήταν υψίστης σημασίας η ακρίβεια μέσω της πύκνωσης στις περιοχές που διακινείται το νερό. Αντίστοιχα, απορρίπτεται η συνολική, ομοιόμορφη στον όγκο του συλλέκτη πύκνωση του πλέγματος, καθώς τα στερεά τμήματά του, όπως η μόνωση και το πλαίσιο, δεν απαιτούν τόση ακρίβεια και τα μεγέθη τους υπολογίζονται ικανοποιητικά και δίχως αυτήν. Ακόμη, σημειώνεται πως ο λόγος που επιλέχθηκε το πλέγμα (55,50,220) – Fluid Refinement=2, Partial Refinement=2 έναντι του (45,40,180) - Fluid Refinement=2, Partial Refinement=2 ήταν ότι το πρώτο έτεινε να βγάζει αποτελέσματα πιο κοντινά στα αναλυτικότερα πλέγματα απ' ότι το δεύτερο, το οποίο είχε κάποιες αποκλίσεις. Τονίζεται, τέλος, πως για τη συνέχεια όλων των εξεταζόμενων περιπτώσεων, το επιλεγόμενο πλέγμα για το συγκεκριμένο συλλέκτη θα είναι το (55,50,220) - Fluid Refinement=2, Partial Refinement=2.

5.4.2 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Αφού εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις για τις δύο γεωμετρίες και για όλες τις προαναφερθείσες τιμές των θερμοκρασιών εισόδου, προέκυψαν τα αποτελέσματα που ακολουθούν, τόσο σε μορφή πινάκων, όσο και σε μορφή διαγραμμάτων. Αρχικά, παρουσιάζεται ένας συνοπτικός πίνακας σχετικά με τα τρία πιο σημαντικά μεγέθη του συλλέκτη, το βαθμό απόδοσης, τη θερμοκρασία εξόδου και την ωφέλιμη ισχύ κι έπειτα αναλύεται η κατανομή της ισχύος στα τρία τμήματα της σωλήνωσης, στο διανομέα (tube), στην άκρη του εξωτερικού σωλήνα (cap) και στο δακτύλιο (annuli) για τις δύο γεωμετρίες. Παρουσιάζονται, κατόπιν, κάποια αξιοσημείωτα διαγράμματα

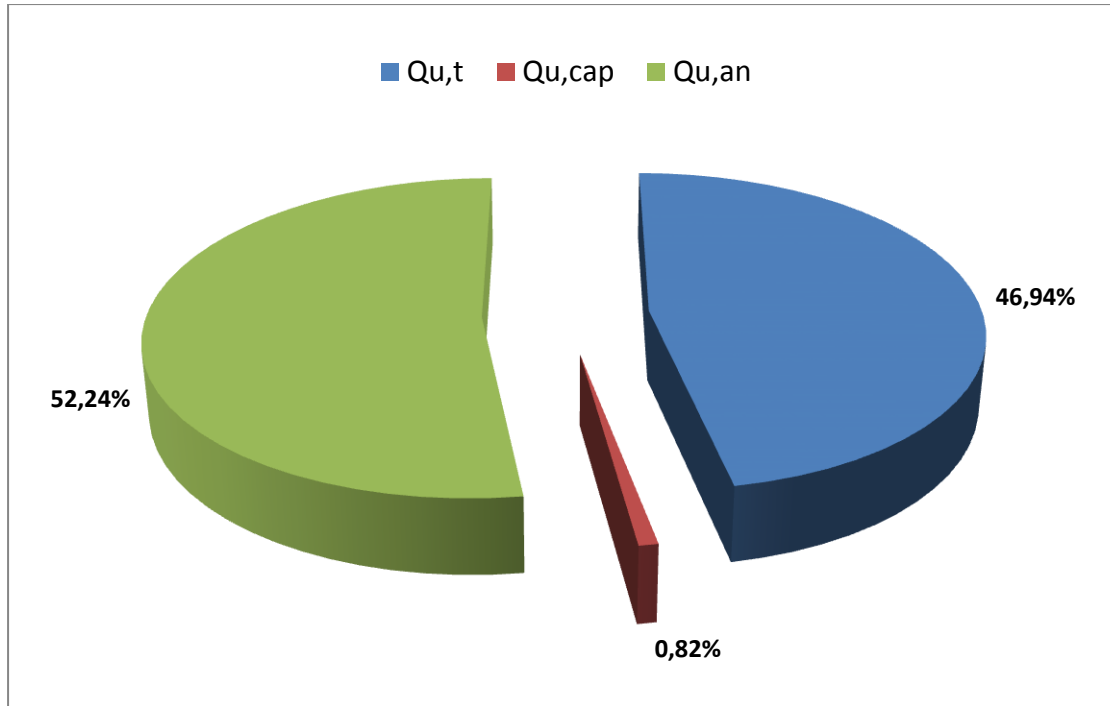
που επιτρέπουν στον αναγνώστη να έχει καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων της εν λόγω εξεταζόμενης περίπτωσης.

Πίνακας 5.4.3: Βαθμός απόδοσης, θερμοκρασία εξόδου κι ωφέλιμη ισχύς για τις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης

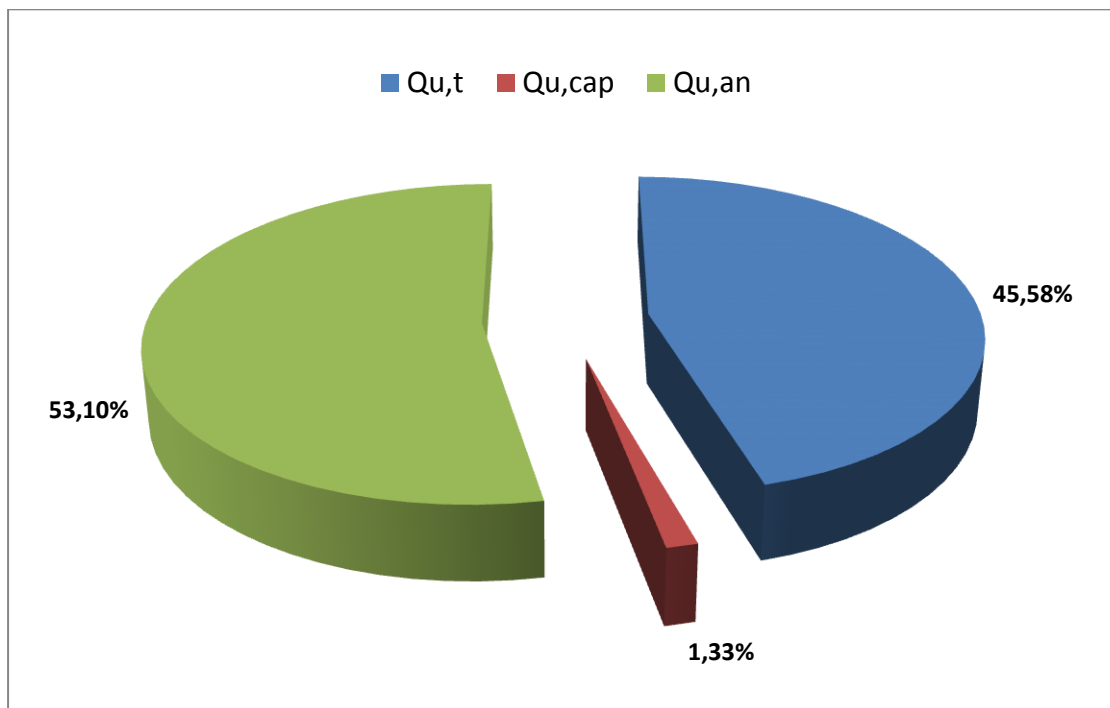
T_{in} (°C)	η		T_{out} (°C)		Q_u (kW)	
	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)
10	0.7324	0.7358	14.37	14.39	73.24	73.58
20	0.6603	0.6570	23.94	23.92	66.03	65.70
30	0.5816	0.5682	33.47	33.39	58.16	56.82
40	0.4961	0.4760	42.96	42.84	49.61	47.60
50	0.4106	0.3788	52.45	52.26	41.06	37.88
60	0.3218	0.2816	61.92	61.68	32.18	28.16
70	0.2330	0.1810	71.39	71.08	23.30	18.10
80	0.1441	0.0788	80.86	80.47	14.41	7.88

Πίνακας 5.4.4: Κατανομή του ωφέλιμου φορτίου για τις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης στα τρία τμήματα της σωλήνωσης

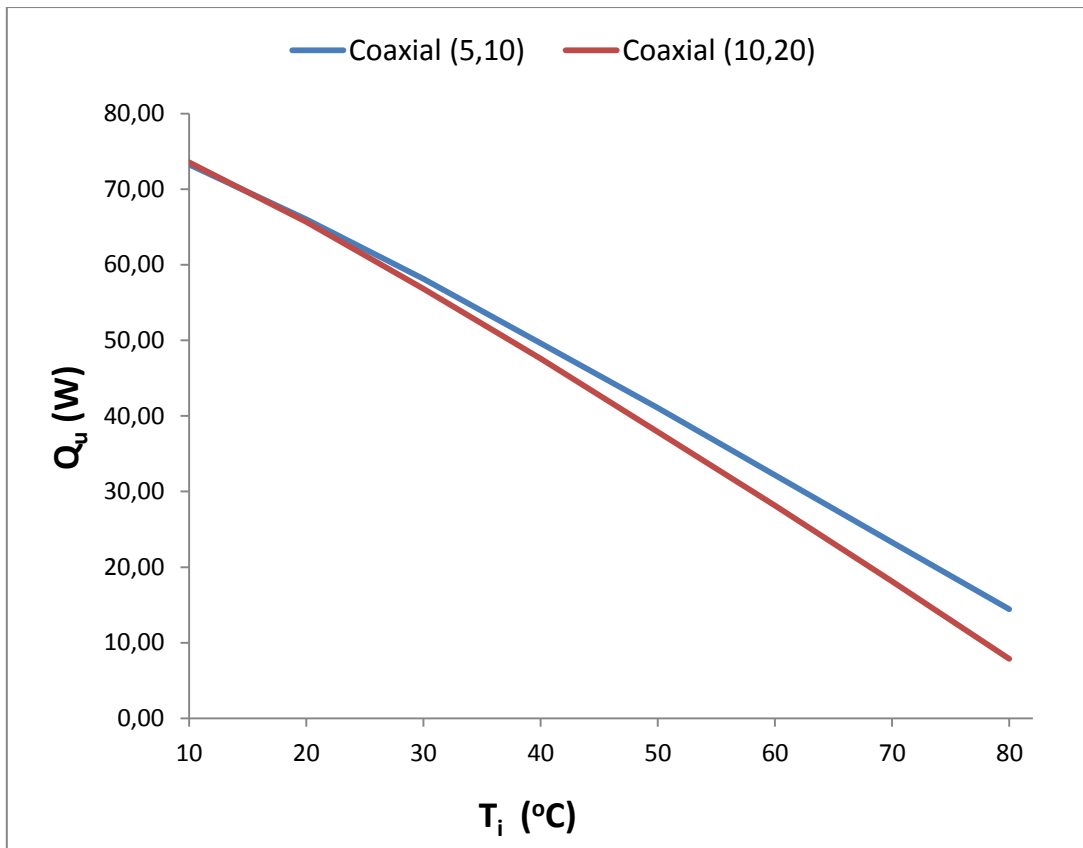
T_{in} (°C)	$Q_{u,t} / Q_u$ (%)		$Q_{u,cap} / Q_u$ (%)		$Q_{u,an} / Q_u$ (%)	
	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)
10	15.79	17.54	1.37	1.59	82.84	80.87
20	18.27	23.47	1.27	1.53	80.46	75.00
30	21.33	30.09	1.15	1.18	77.52	68.73
40	38.18	36.97	0.68	1.41	61.15	61.62
50	46.94	45.58	0.82	1.33	52.24	53.10
60	56.25	57.14	1.04	1.19	42.71	41.67
70	71.22	79.63	0.72	1.85	28.06	18.52
80	100.00	153.19	1.16	2.13	-1.16	-55.32



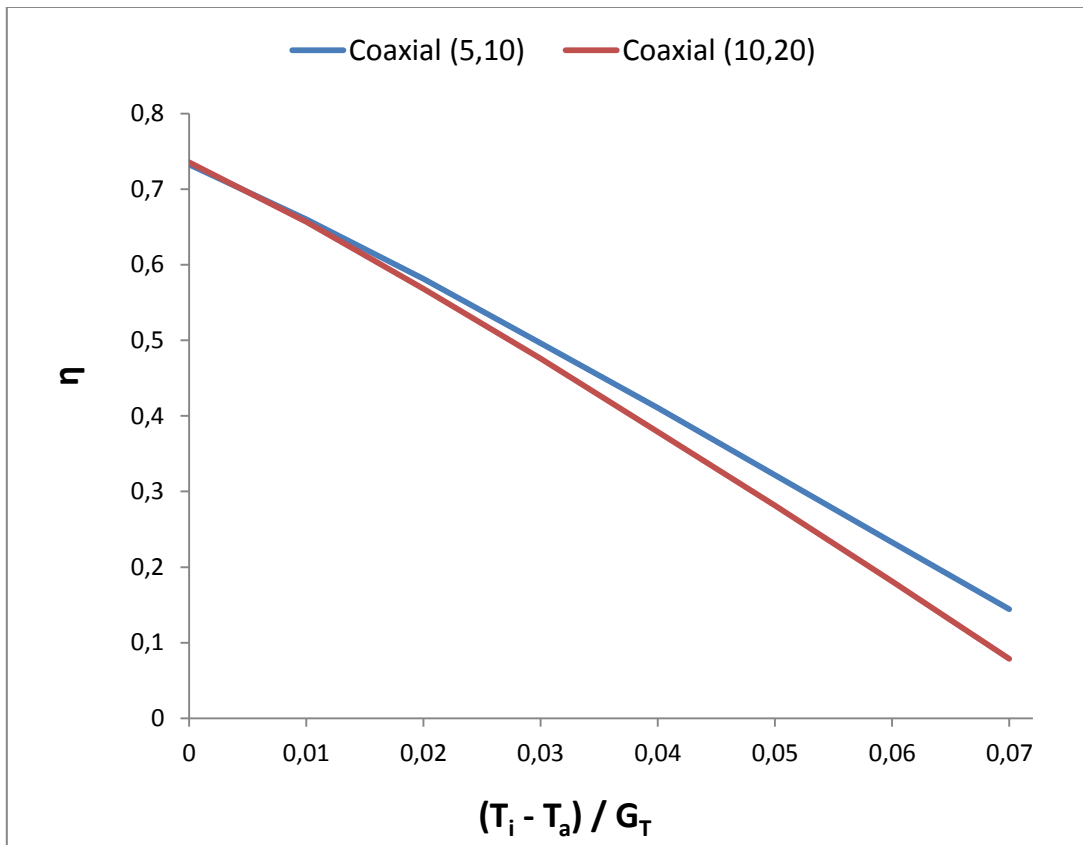
Διάγραμμα 5.4.1: Κατανομή της ωφέλιμης ισχύος στα τρία τμήματα της σωλήνωσης για το συλλέκτη (5,10) και θερμοκρασία εισόδου ίση με 50°C



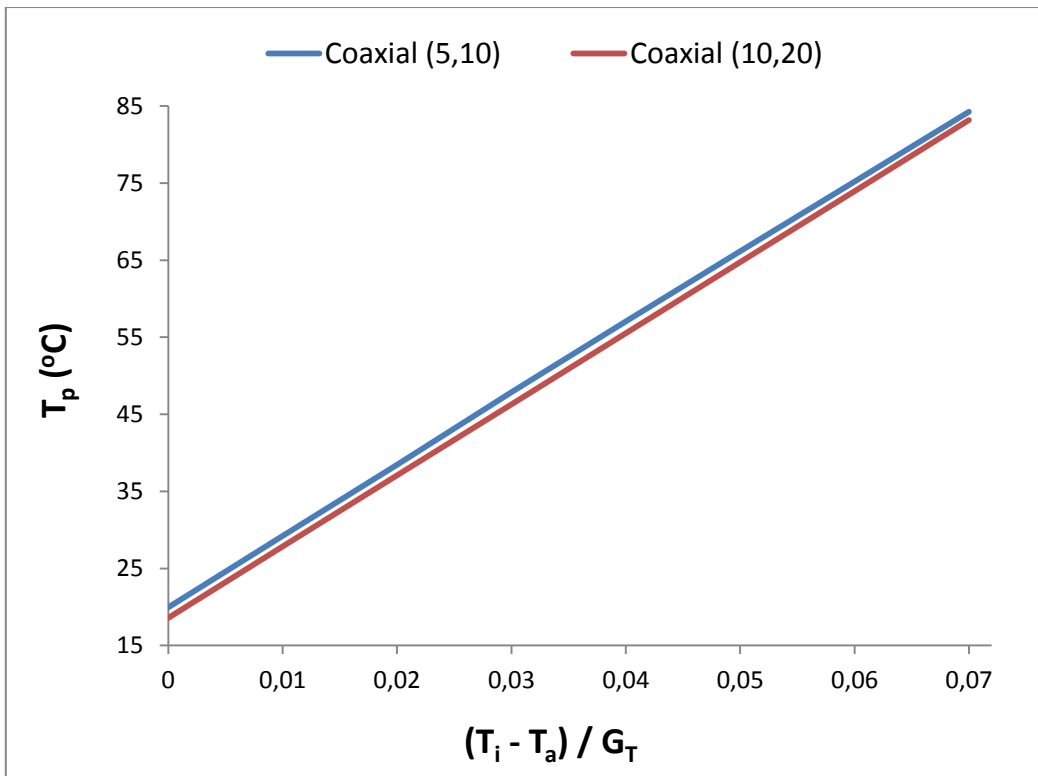
Διάγραμμα 5.4.2: Κατανομή της ωφέλιμης ισχύος στα τρία τμήματα της σωλήνωσης για το συλλέκτη (10,20) και θερμοκρασία εισόδου ίση 50°C



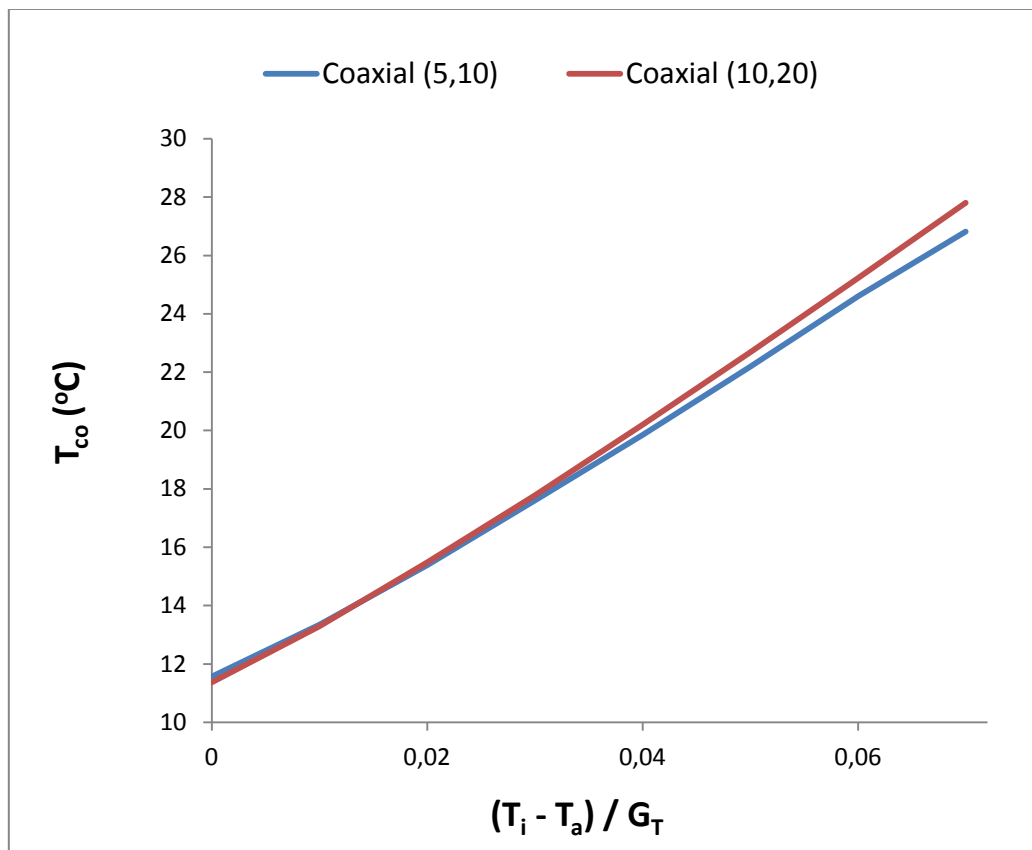
Διάγραμμα 5.4.3: Ωφέλιμη ισχύς για τις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης



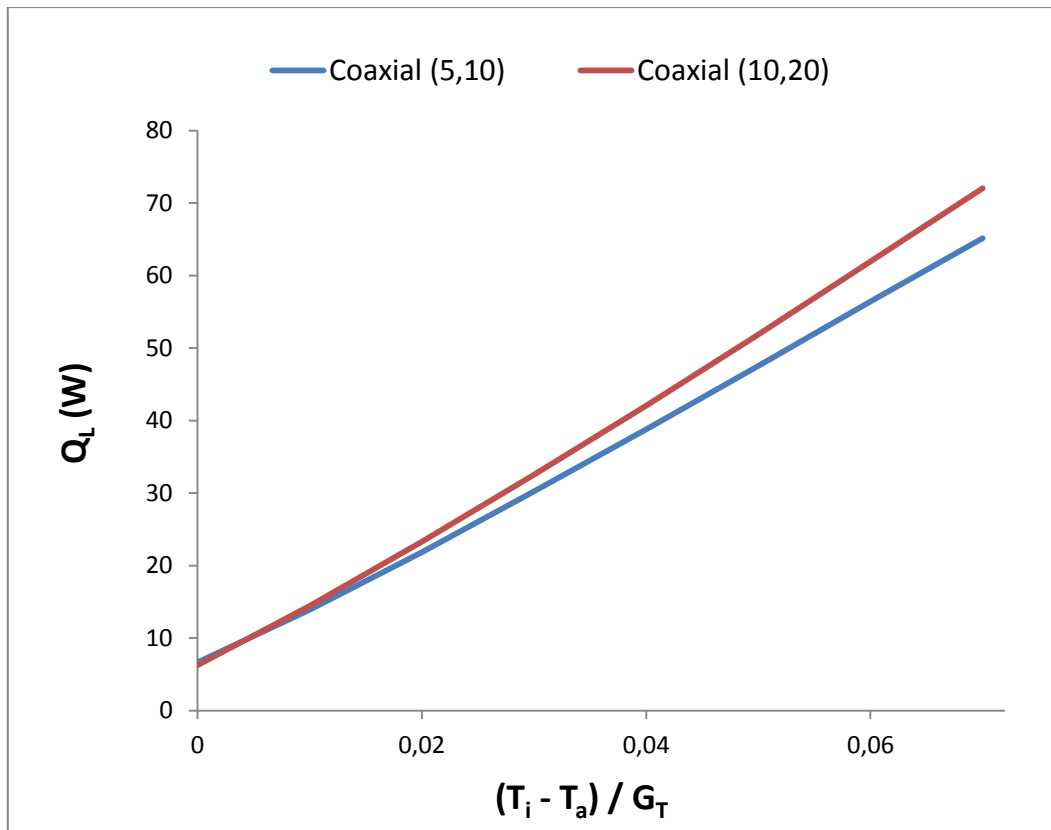
Διάγραμμα 5.4.4: Καμπύλη απόδοσης για τις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης



Διάγραμμα 5.4.5: Θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης για τις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης



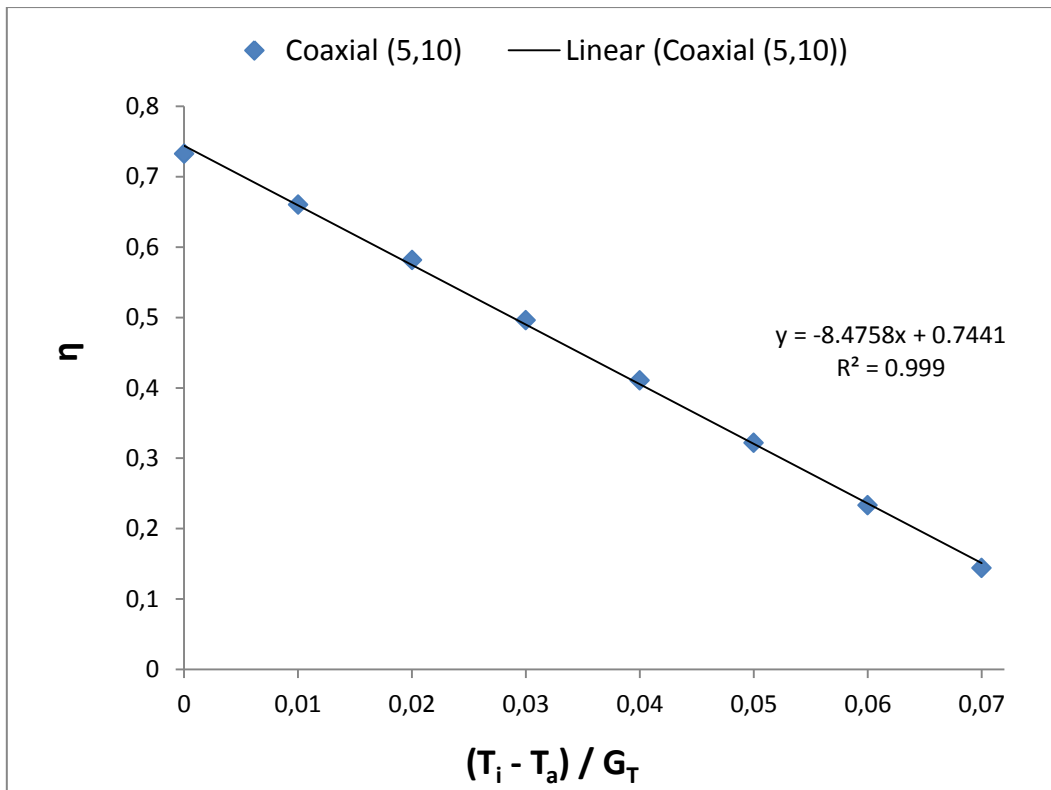
Διάγραμμα 5.4.6: Θερμοκρασία του καλύμματος για τις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης



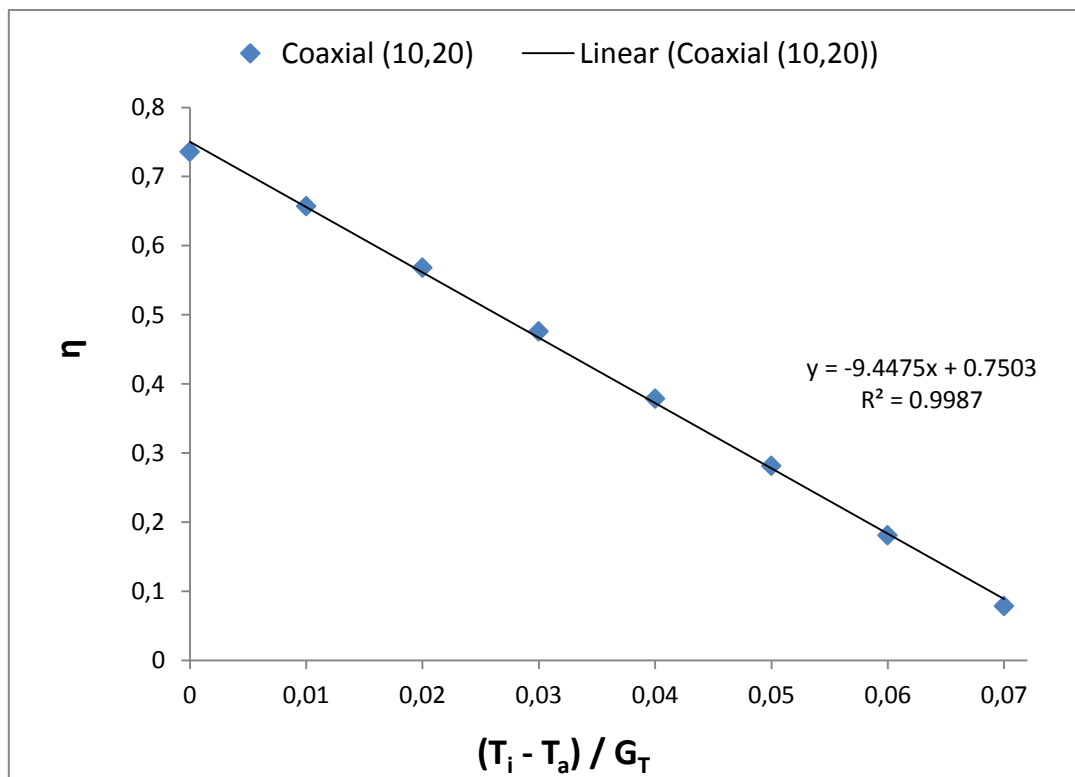
Διάγραμμα 5.4.7: Συνολικές θερμικές απώλειες για τις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης

Επιπροσθέτως, μέσω των καμπυλών απόδοσης των δύο συλλεκτών, είναι δυνατός ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών λειτουργίας του συλλέκτη, του παράγοντα θερμικής απολαβής, F_R , και του συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών, U_L . Προσεγγίζοντας την κάθε μία εκ των δύο καμπυλών του Διαγράμματος 5.4.4 με ευθεία γραμμή τάσης, προκύπτουν τα Διαγράμματα 5.4.8 και 5.4.9 για τους δύο συλλέκτες (5,10) και (10,20) αντίστοιχα, τα οποία παρατίθενται στη συνέχεια.

Στα εν λόγω διαγράμματα επίσης διακρίνεται κι ο συντελεστής προσδιορισμού, R^2 , ο οποίος δείχνει πόσο καλά εκφράζει η συνάρτηση προσέγγισης την εκάστοτε καμπύλη απόδοσης. Καθώς αυτός έχει τιμή πάνω από 0.99, που είναι πολύ κοντά στη μονάδα και στις δύο περιπτώσεις, η γραμμή τάσης συμπίπτει σχεδόν ακριβώς με την καμπύλη απόδοσης του συλλέκτη.



Διάγραμμα 5.4.8: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη (5,10) με ευθεία γραμμή τάσης



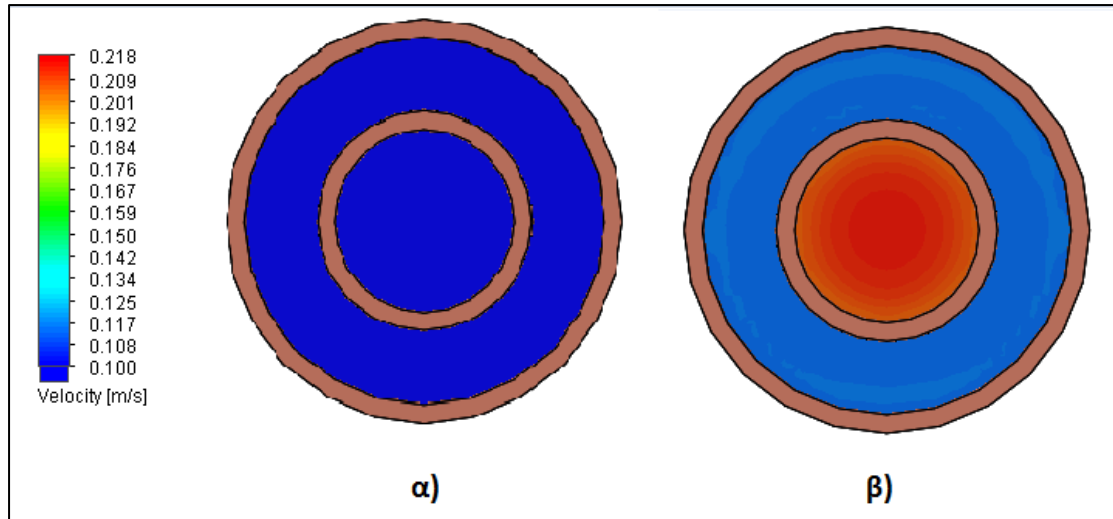
Διάγραμμα 5.4.9: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη (10,20) με ευθεία γραμμή τάσης

Έχοντας την εξίσωση της ευθείας γραμμής τάσης που προσεγγίζει την καμπύλη απόδοσης και για τις δύο περιπτώσεις, προσδιορίζονται τα δύο ζητούμενα μεγέθη, με βάση και τις εξισώσεις 5.3.5, 5.3.6 και 5.3.7 από την ενότητα 5.3. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.4.5: Παράγοντας θερμικής απολαβής και συντελεστής ολικών απωλειών για τις δύο γεωμετρίες

	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)
F_R (τα)	0.7441	0.7503
$F_R U_L$	8.4758	9.4475
F_R	0.9301	0.9379
U_L (W/m² K)	9.1125	10.0733

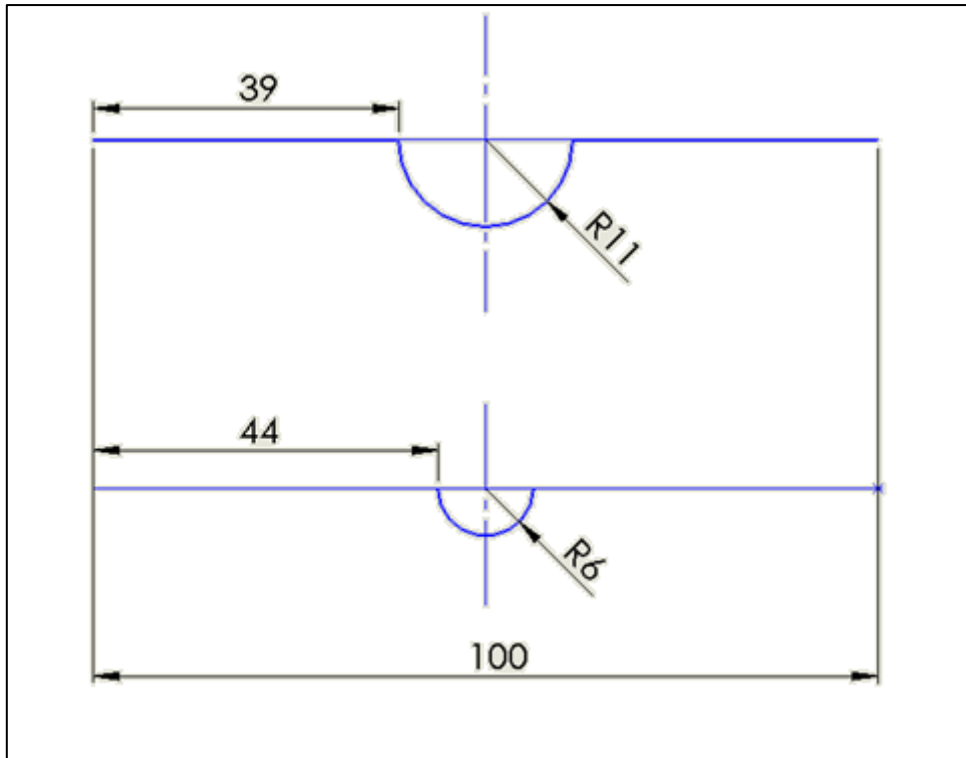
Από τα διαγράμματα εξάγεται το συμπέρασμα πως ο συλλέκτης (5,10) παρουσιάζει καλύτερη θερμική συμπεριφορά του από το συλλέκτη (10,20). Διακρίνεται τόσο από τον Πίνακα 5.4.3 όσο κι από τα Διαγράμματα 5.4.3, 5.4.4, 5.4.6 και 5.4.7, πως ο συλλέκτης (5,10) έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης κι ωφέλιμη ισχύ, ενώ παρουσιάζει χαμηλότερη εξωτερική θερμοκρασία καλύμματος και συνολικές θερμικές απώλειες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα υψηλότερα επίπεδα τύρβης που επικρατούν στο συλλέκτη (5,10) έναντι του (10,20), καθώς οι δύο συλλέκτες έχουν κοινή παροχή διακινούμενου ρευστού αλλά στον πρώτο αναπτύσσεται μεγαλύτερη ταχύτητα λόγω της μικρότερης διατομής. Οι ταχύτητες των δύο συλλεκτών διακρίνονται και στο Σχήμα 5.4.2 που ακολουθεί, ενδεικτικά για μια τυπική θερμοκρασία εισόδου στον ηλιακό συλλέκτη, 50°C. Καθώς η ροή έχει μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης, αυξάνεται ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από το τοίχωμα της σωλήνωσης στο ρευστό, όπως θα αναλυθεί και στην επόμενη ενότητα, οπότε αυτό απορροφά περισσότερη θερμότητα κι αυξάνεται, ως αποτέλεσμα, η ωφέλιμη ισχύς κι ο βαθμός απόδοσης. Καθώς απορροφάται περισσότερη θερμότητα από το νερό, προκύπτει, από το ενεργειακό ισοζύγιο του συλλέκτη, πως μικρότερο ποσό από τη διαθέσιμη θερμότητα στο συλλέκτη παραμένει ανεκμετάλλευτο με τη μορφή των απωλειών, γεγονός που αποτυπώνεται και στον Πίνακα 5.4.5 όπου φαίνεται πως ο συλλέκτης (5,10) έχει μικρότερο συντελεστή ολικών απωλειών από τον (10,20).



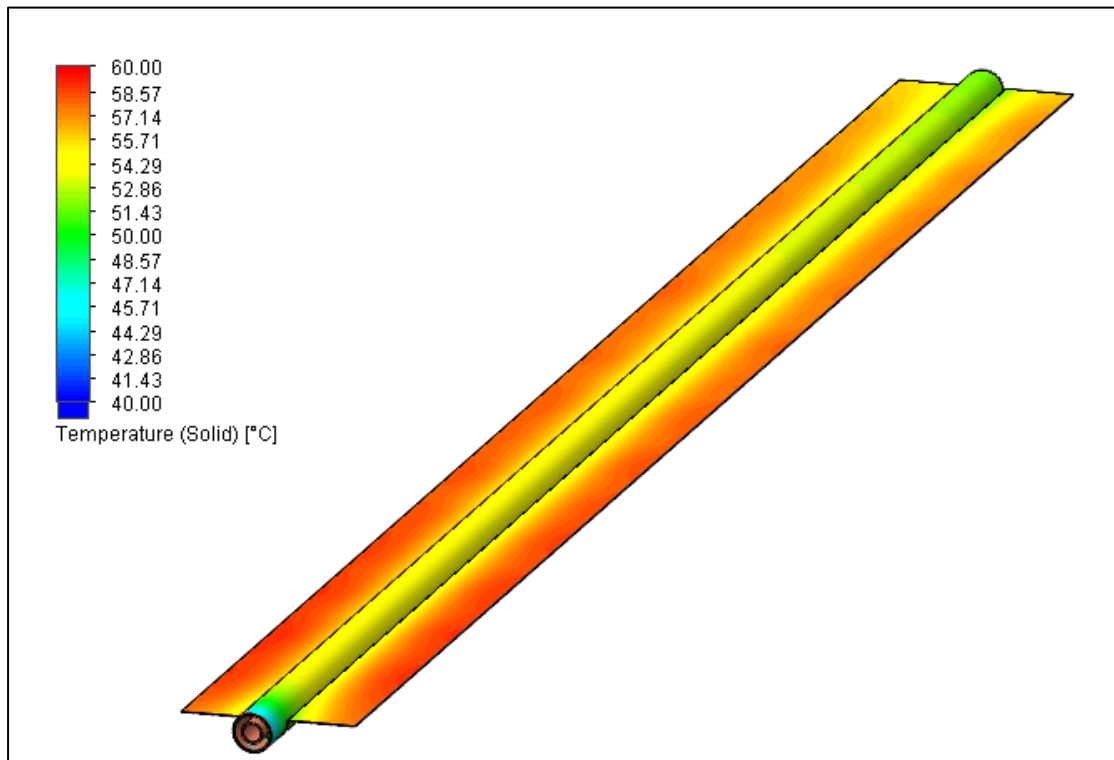
Σχήμα 5.4.2: Σύγκριση των ταχυτήτων του νερού εντός της σωλήνωσης για θερμοκρασία εισόδου ίση με 50°C για α) το συλλέκτη (10,20) και β) το συλλέκτη (5,10)

Αξιοσημείωτο είναι ωστόσο το γεγονός πως ο συλλέκτης (5,10) έχει μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης, η οποία αποτελεί πηγή απωλειών, ενώ έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης στο μελετώμενο θερμοκρασιακό εύρος. Αυτό οφείλεται στη διαφορά της γεωμετρίας της πλάκας απορρόφησης μεταξύ των δύο συλλεκτών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.3 που ακολουθεί, λόγω της σταθερής διάστασης του πλάτους της πλάκας, 100 mm, και της μεταβλητής διαμέτρου κι άρα επιφάνειας της σωλήνωσης, το μέρος της επιφάνειας της πλάκας που δεν προσδίδει θερμότητα στο ρευστό είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση του συλλέκτη (5,10), που αντιστοιχεί στο κάτω σκίτσο του Σχήματος 5.4.3. Οπότε, καθώς η πλάκα απορροφά την προσπίπτουσα ακτινοβολία κι αυξάνεται η θερμοκρασία της, στην περίπτωση του συλλέκτη (5,10) μεγαλύτερο μέρος της πλάκας παραμένει σε υψηλή θερμοκρασία έναντι του (10,20) και, συνεπώς, στο συλλέκτη (5,10) η πλάκα απορρόφησης έχει υψηλότερη μέση θερμοκρασία, όπως διακρίνεται και στα Σχήματα 5.4.4 και 5.4.5, που έπονται στη συνέχεια.

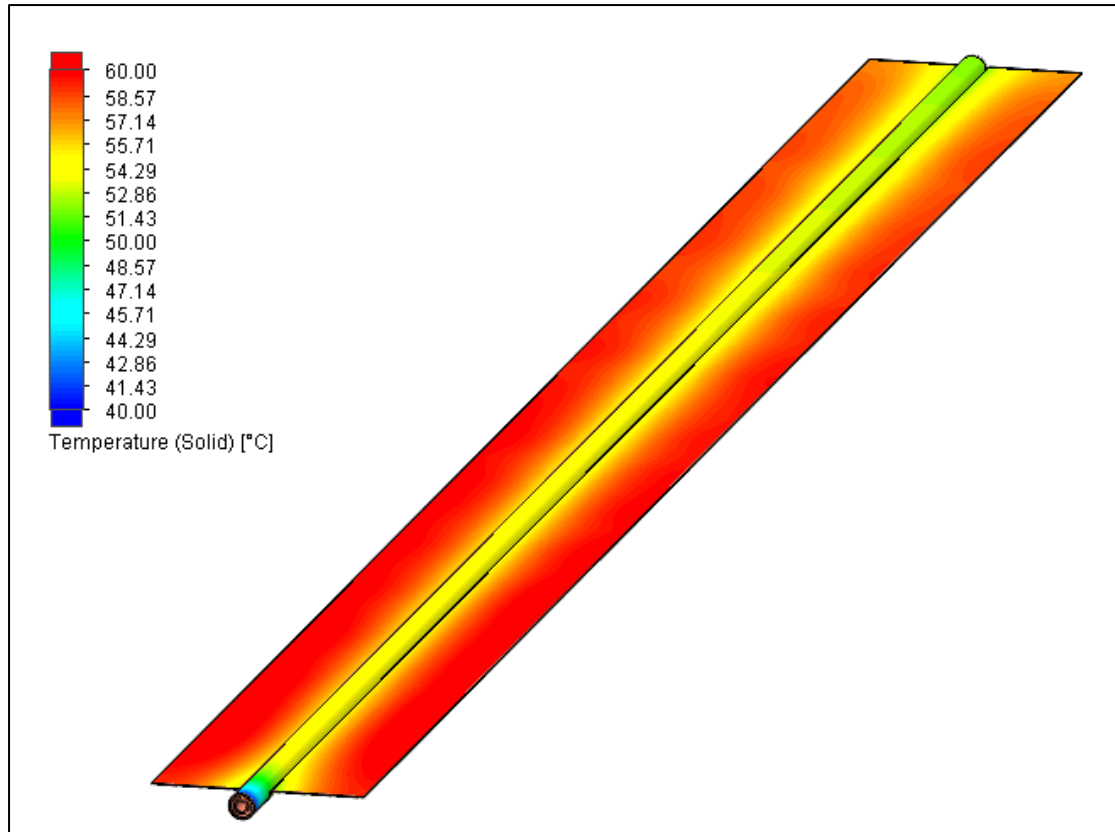
Ως προς την κατανομή της ωφέλιμης ισχύος στα τρία τμήματα της σωλήνωσης, παρατηρείται ότι, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη, το ποσοστό του διανομέα στην ωφέλιμη ισχύ αυξάνεται και του δακτυλίου μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό εισέρχεται στο συλλέκτη με διαρκώς υψηλότερη θερμοκρασία και μειώνεται η ικανότητά του να παραλάβει θερμότητα από την πλάκα απορρόφησης, επομένως η θερμοκρασία του νερού εντός του δακτυλίου δε μεταβάλλεται πολύ κι επομένως η ωφέλιμη ενέργεια που αντιστοιχεί στο δακτύλιο πέφτει συναρτήσει της αυξανόμενης θερμοκρασίας εισόδου.



Σχήμα 5.4.3: Οι δύο πλάκες απορρόφησης που αντιστοιχούν στις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης, το συλλέκτη (10,20) πάνω και το συλλέκτη (5,10) κάτω



Σχήμα 5.4.4: Κατανομή της θερμοκρασίας επί της πλάκας απορρόφησης του συλλέκτη (10,20) για θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



Σχήμα 5.4.5: Κατανομή της θερμοκρασίας επί της πλάκας απορρόφησης του συλλέκτη (5,10) για θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C

Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα στις πολύ ψηλές θερμοκρασίες εισόδου, η μέγιστη θερμοκρασία του συλλέκτη να επιτυγχάνεται πριν την έξοδό του, που είναι το τέλος του δακτυλίου, αλλά στην είσοδο του δακτυλίου, οπότε και παράγεται «αρνητική ωφέλιμη ισχύς» στο τμήμα του δακτυλίου, που έχει τη φυσική σημασία πως το νερό εντός του συγκεκριμένου τμήματος παίρνει θερμότητα από το διανομέα, λειτουργώντας ως καταβόθρα θερμότητας. Αντίθετα, στις χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου, το ρευστό του δακτυλίου παραλαμβάνει θερμότητα από την πλάκα απορρόφησης, η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία της από την απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, και την προσδίδει στο νερό εντός του δακτυλίου, το οποίο όντας σε χαμηλότερη θερμοκρασία, μπορεί να παραλάβει μεγάλο ποσό θερμότητας.

Σημειώνεται, τέλος, πως η άκρη του εξωτερικού σωλήνα συμμετέχει ελάχιστα στη συνολική ωφέλιμη ισχύ, καθώς το ποσοστό της διακυμαίνεται από 0.7% έως περίπου 2% και για τους δύο συλλέκτες. Παρατηρείται λίγο αυξημένο το μεριδίό της στο συλλέκτη (10,20) έναντι του (5,10), καθώς αυξάνεται ελαφρώς η επιφάνεια του τμήματος αυτού, δίνοντας στο ρευστό μεγαλύτερο ποσό θερμότητας στον πρώτο από το δεύτερο.

5.5 Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας εντός της σωλήνωσης για τις δύο γεωμετρίες της σωλήνωσης

5.5.1 Ενεργειακός ισολογισμός στα τμήματα της σωλήνωσης

Ο προσδιορισμός του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από τη σωλήνωση στο ρευστό είναι από τους σημαντικότερους υπολογισμούς κατά τη μελέτη ενός ηλιακού συλλέκτη. Υπολογίζεται κι εξετάζεται για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες σωλήνωσης από τις σχέσεις που ακολουθούν, σύμφωνα με το συμβολισμό του Σχήματος 5.4.1. Πραγματοποιώντας ισολογισμό ενέργειας στο διανομέα (tube), προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$[33] \quad \dot{Q}_{u,t} = \dot{m} \cdot C_p (T_{o,t} - T_{in}) = h_{f,1} \cdot A_{s,1} \cdot (T_{s,1} - T_{f,t}) \quad (5.5.1)$$

Για την άκρη του εξωτερικού σωλήνα (cap), ισχύει:

$$[33] \quad \dot{Q}_{u,cap} = \dot{m} \cdot C_p (T_{i,an} - T_{o,t}) \quad (5.5.2)$$

Ενώ για το δακτύλιο (annuli), θα είναι:

$$[33] \quad \dot{Q}_{u,an} = \dot{m} \cdot C_p (T_{out} - T_{i,an}) = h_{f,2} \cdot A_{s,2} \cdot (T_{s,2} - T_{f,an}) - \dot{Q}_{u,t} \quad (5.5.3)$$

, εφόσον ο δακτύλιος δίνει ένα μέρος της απορροφημένης από την πλάκα απορρόφησης θερμότητάς του στο διανομέα.

Από τις παραπάνω Εξισώσεις 5.5.1, 5.5.2 και 5.5.3, όλα τα μεγέθη είναι γνωστά από τα αποτελέσματα της κάθε προσομοίωσης, εκτός από τους δύο ζητούμενους συντελεστές, $h_{f,1}$ και $h_{f,2}$. Έχοντας υπολογίσει τις τιμές των συντελεστών της προσομοίωσης, στη συνέχεια, προσδιορίζονται κι οι θεωρητικές τιμές των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας για τις ίδιες συνθήκες, μέσω των Εξισώσεων 1.3.1 έως 1.3.7 που ανήκουν στην ενότητα 1.3.

5.5.2 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

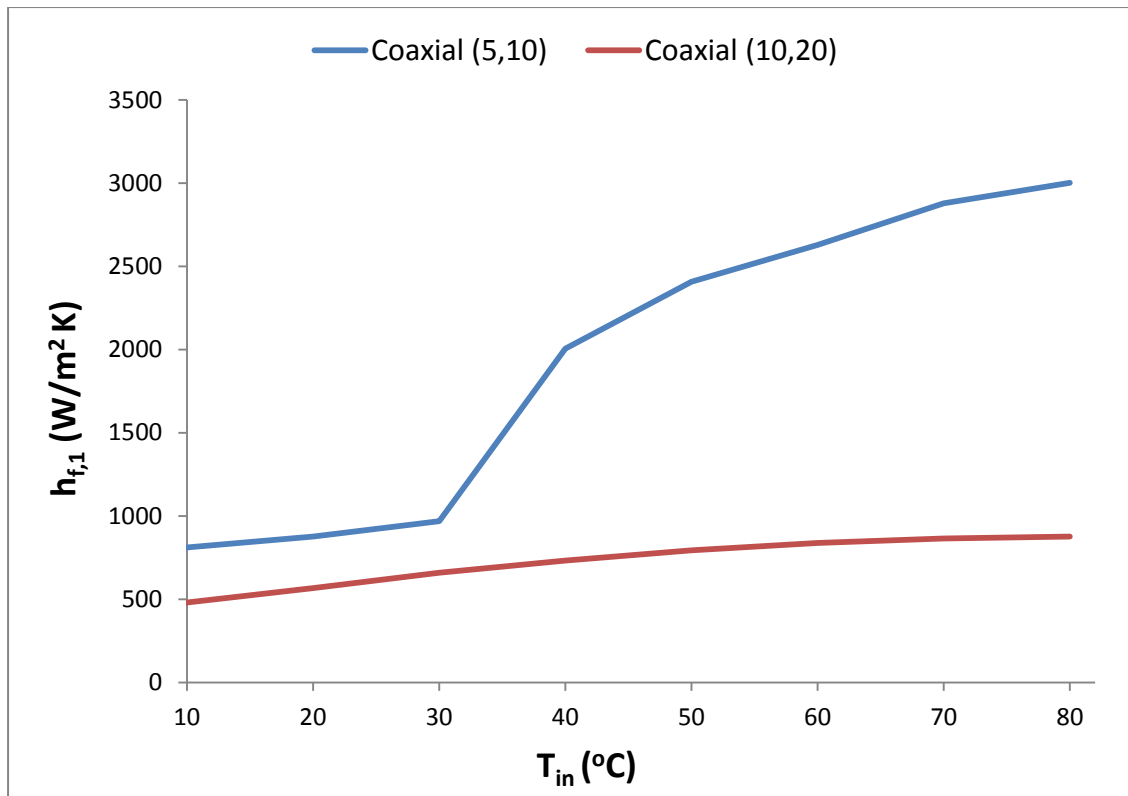
Υπολογίζοντας τις τιμές του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας για τις δύο γεωμετρίες, μέσω της προσομοίωσης και μέσω των θεωρητικών σχέσεων, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα, με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων.

Πίνακας 5.5.1: Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στο διανομέα για τις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης

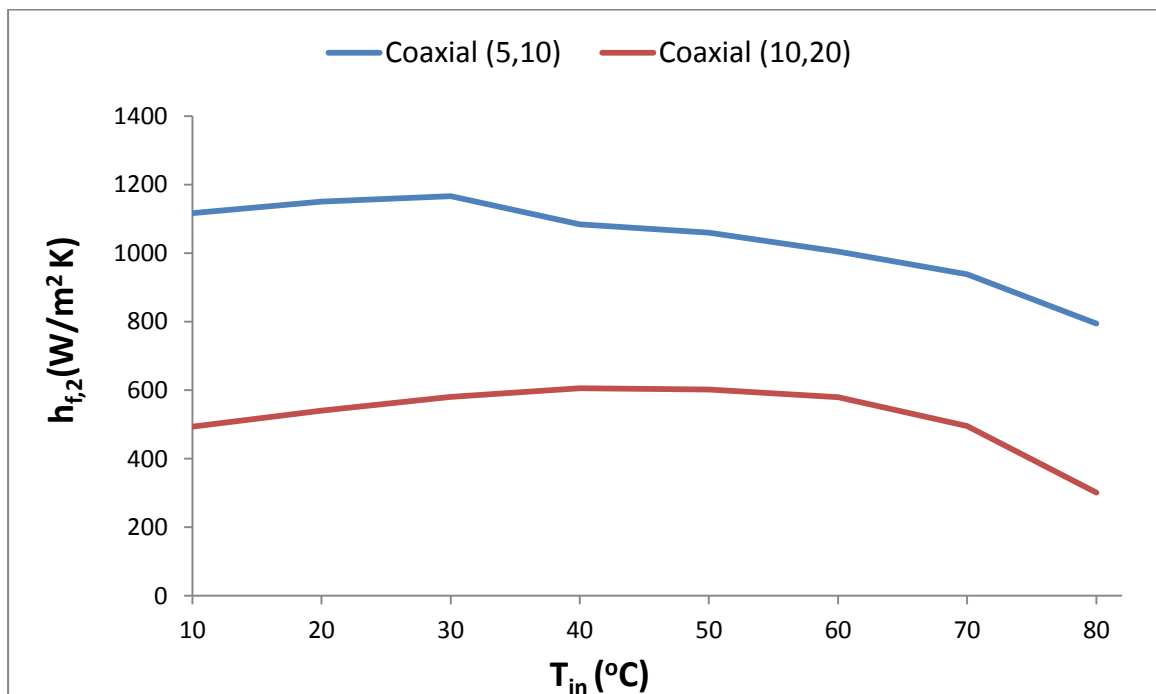
T_{in} (°C)	$h_{f,1}$ (W/m ² K)		$h_{f,th,1}$ (W/m ² K)	
	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)
10	811.8	479.9	619.3	309.6
20	876.6	566.7	634.0	317.0
30	968.6	659.3	647.6	323.8
40	2005.4	733.0	1870.6	537.2
50	2408.3	793.0	2032.8	583.8
60	2629.9	837.7	2188.1	628.4
70	2879.5	865.9	2336.2	670.9
80	3001.6	876.6	2477.1	711.4

Πίνακας 5.5.2: Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στο δακτύλιο για τις δύο γεωμετρίες σωλήνωσης

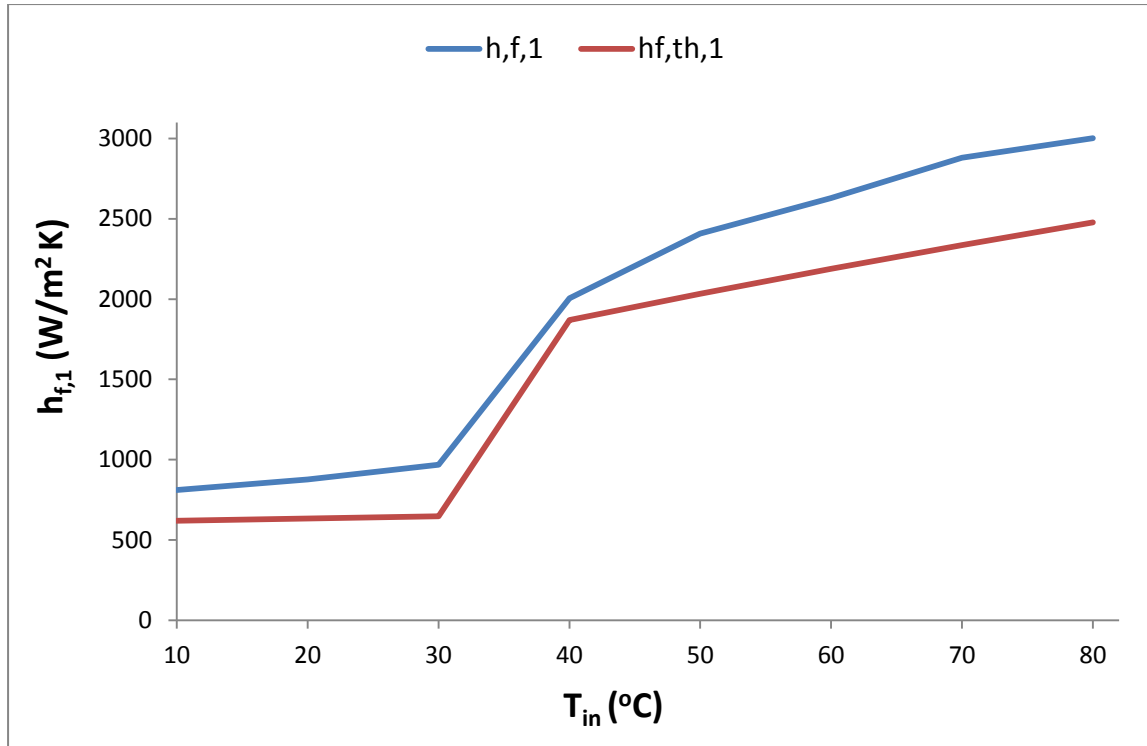
T_{in} (°C)	$h_{f,2}$ (W/m ² K)		$h_{f,th,2}$ (W/m ² K)	
	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)	Coaxial (5,10)	Coaxial (10,20)
10	1117.1	493.8	780.0	302.6
20	1150.6	540.3	802.6	311.2
30	1166.1	580.8	823.6	319.1
40	1084.0	605.8	842.2	326.1
50	1060.2	601.8	858.1	332.1
60	1004.8	579.4	871.3	337.1
70	938.3	495.5	882.1	341.1
80	794.7	301.0	890.5	344.3



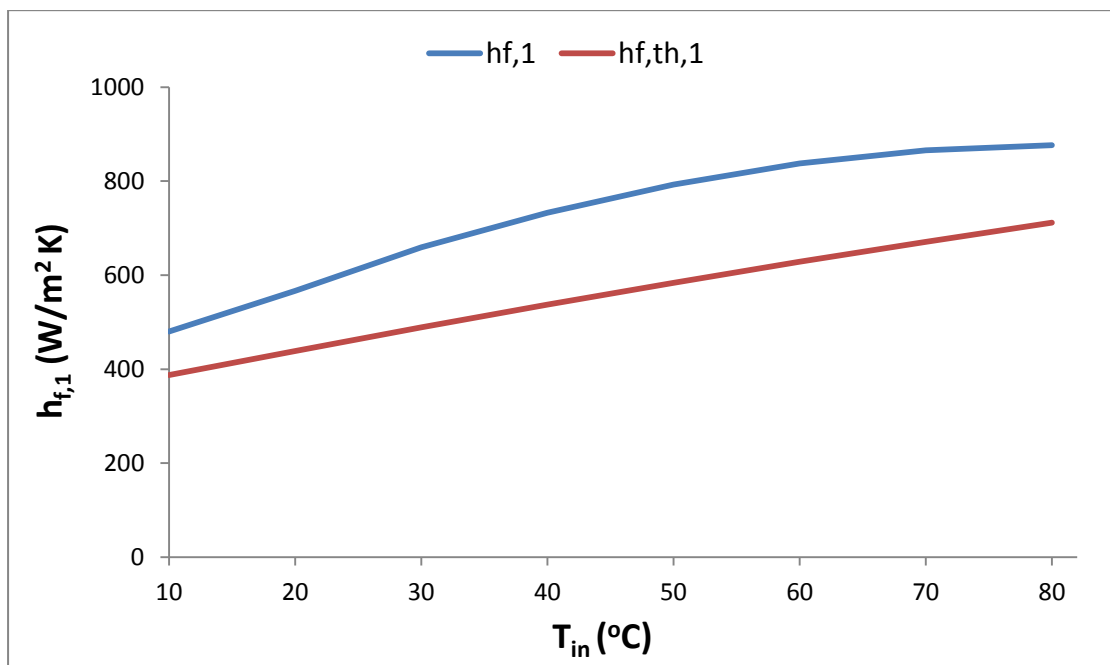
Διάγραμμα 5.5.1: Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στο διανομέα από την προσομοίωση για τις δύο γεωμετρίες της σωλήνωσης



Διάγραμμα 5.5.2: Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στο δακτύλιο από την προσομοίωση για τις δύο γεωμετρίες της σωλήνωσης



Διάγραμμα 5.5.3: Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στο διανομέα από την προσομοίωση και θεωρητικός για το συλλέκτη (5,10)



Διάγραμμα 5.5.4: Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στο διανομέα από την προσομοίωση και θεωρητικός για το συλλέκτη (10,20)

Παρατηρείται αρχικά ότι, όπως επισημάνθηκε και στην ενότητα 5.4.2, ο συλλέκτης (5,10) παρουσιάζει υψηλότερο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από τον (10,20) για δεδομένη θερμοκρασία εισόδου, τόσο στο διανομέα όσο και στο δακτύλιο, όπως διακρίνεται και στα Διαγράμματα 5.5.1 και 5.5.2. Λόγω της υψηλότερης ταχύτητας που αναπτύσσεται στον πρώτο (Σχήμα 5.4.2) η ροή εμφανίζει μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης από το δεύτερο, επομένως βελτιώνεται η μετάδοση της θερμότητας από το σωλήνα στο ρευστό.

Η μετάβαση της ροής σταδιακά από στρωτή σε μεταβατική κι έπειτα σε τυρβώδη αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 5.5.3 για το συλλέκτη (5,10), με την απότομη αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Σημειώνεται επίσης πως κι ο συλλέκτης (10,20) παρουσιάζει αύξηση των επιπέδων τύρβης της ροής λόγω της αύξησης του αριθμού Reynolds που οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5.5.4, ωστόσο δεν υφίσταται τόσο απότομη αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.

Όσον αφορά τη σύγκριση με τα θεωρητικά μοντέλα, η προσομοίωση τα προσεγγίζει αρκετά καλά, ειδικά στην περίπτωση του διανομέα του συλλέκτη (5,10) στο Διάγραμμα 5.5.3, με σχετικά μικρές αποκλίσεις. Ως προς το διανομέα του συλλέκτη γεωμετρίας (10,20), η μορφή της καμπύλης της προσομοίωσης συμφωνεί με τη μορφή της καμπύλης από τις θεωρητικές σχέσεις, σημειώνοντας όμως κάπως μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα από το διανομέα του συλλέκτη (5,10) τόσο λόγω μικρότερης απολύτου τιμής του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του πρώτου από τον δεύτερο, όσο και μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των τιμών της προσομοίωσης και της προσέγγισης. Όσον αφορά τη σύγκριση των θεωρητικών σχέσεων και της προσομοίωσης στο τμήμα του δακτυλίου, αυτή εμφανίζει σημαντικές αποκλίσεις και συνεπώς δεν αποτυπώνεται σε κάποιο διάγραμμα, καθώς οι εξισώσεις δεν περιγράφουν το φαινόμενο με ακρίβεια, αφού αυτό είναι διαφορετικό από την περίπτωση του διανομέα. Το διακινούμενο ρευστό στο δακτύλιο δεν περιβάλλεται από ένα σωλήνα με περίπου σταθερή θερμοκρασία απορροφώντας θερμότητα από αυτόν αλλά βρίσκεται μεταξύ δύο σωλήνων, ενώ όχι μόνο απορροφά θερμότητα από κάποια επιφάνεια, την εσωτερική του εξωτερικού σωλήνα, αλλά προσδίδει κι ένα ποσό θερμότητας σε μία άλλη, την εξωτερική πλευρά του εσωτερικού σωλήνα.

Τέλος, επισημαίνεται πως η προσομοίωση και στους δύο συλλέκτες, υπολογίζει μεγαλύτερο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από τις αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές των θεωρητικών σχέσεων.

5.6 Προσομοίωση ως προς την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

5.6.1 Διατύπωση του προβλήματος

Μία άλλη παράμετρος υπό την οποία εξετάστηκε ο συλλέκτης είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε σύγκριση με την πραγματική λειτουργία ενός εγκατεστημένου συλλέκτη, η μειωμένη ένταση της ακτινοβολίας οφείλεται είτε σε συνθήκες νέφωσης είτε στην εποχή του χρόνου, παραδείγματος χάρη τον χειμώνα, που η ένταση είναι μικρότερη από το καλοκαίρι.

Πίνακας 5.6.1: Ορισμός των παραμέτρων κατά τη σύγκριση των εντάσεων της ηλιακής ακτινοβολίας

Παράμετρος	Τιμή / Εύρος
T_{in}	10 ÷ 80°C , ανά 10°C
G_T	600, 800, 1000 W/m ²
\dot{m}	0.004 kg/s
β	0°
Γεωμετρία σωλήνωσης ($D_{i,1}$, $D_{i,2}$)	(5,10) [mm, mm]

5.6.2 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε αυτήν την περίπτωση είναι:

Πίνακας 5.6.2: Βαθμός απόδοσης του συλλέκτη για τις τρεις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

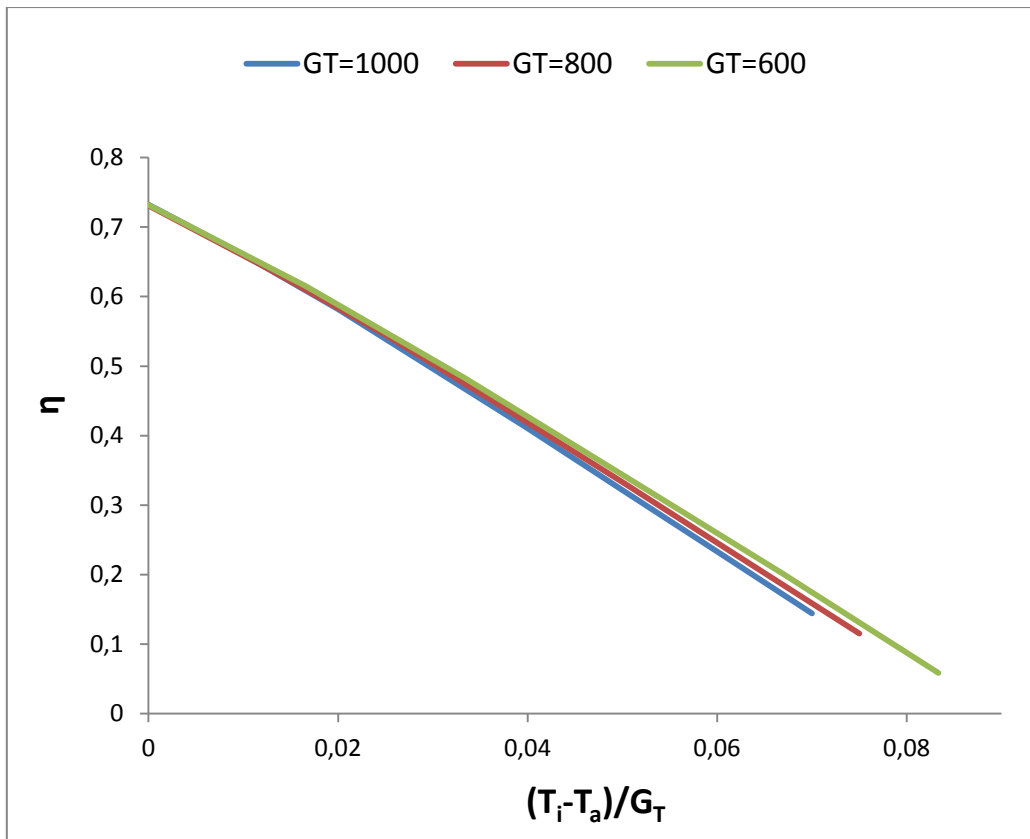
T_{in} (°C)	η		
	$G_T = 1000 \text{ W/m}^2$	$G_T = 800 \text{ W/m}^2$	$G_T = 600 \text{ W/m}^2$
10	0.7324	0.7312	0.73185
20	0.6603	0.6411	0.6145
30	0.5816	0.5447	0.4832
40	0.4961	0.4400	0.3436
50	0.4106	0.3331	0.2039
60	0.3218	0.2242	0.0587
70	0.2330	0.1152	-
80	0.1441	-	-

Πίνακας 5.6.3: Θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη για τις τρεις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

T_{in} (°C)	T_{out} (°C)		
	$G_T = 1000 \text{ W/m}^2$	$G_T = 800 \text{ W/m}^2$	$G_T = 600 \text{ W/m}^2$
10	14.37	13.49	12.62
20	23.94	23.06	22.2
30	33.47	32.6	31.73
40	42.96	42.1	41.23
50	52.45	51.59	50.73
60	61.92	61.07	60.21
70	71.39	70.55	-
80	80.86	-	-

Πίνακας 5.6.4: Ωφέλιμη ισχύς του συλλέκτη για τις τρεις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

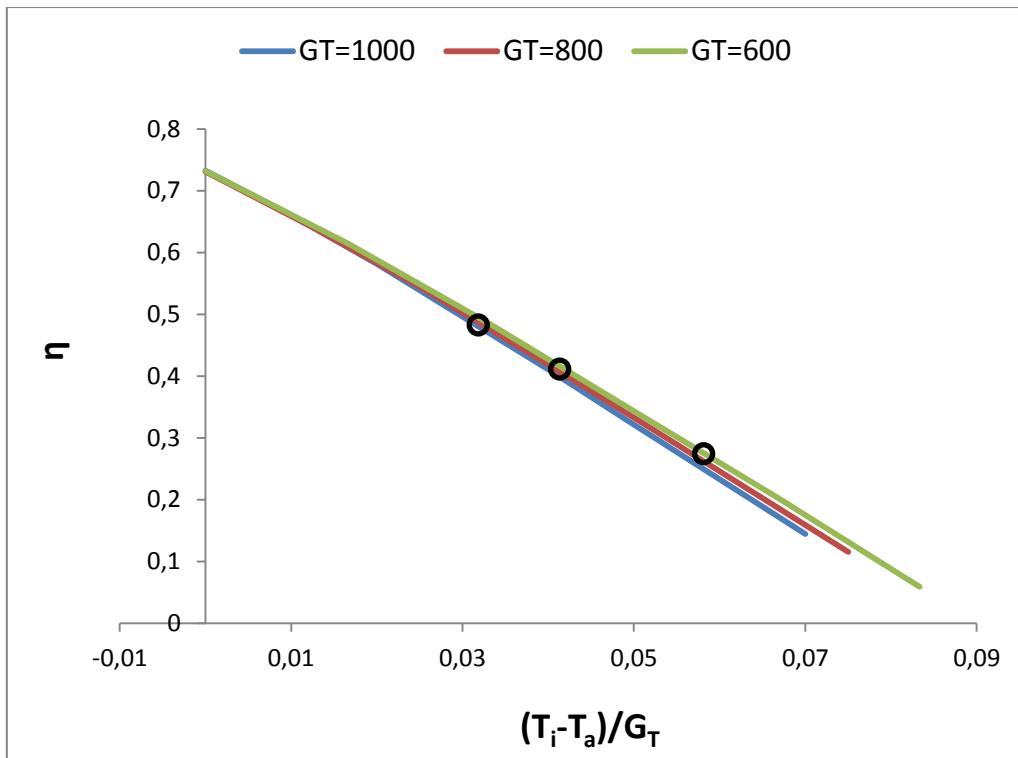
T_{in} (°C)	Q_u (W)		
	$G_T = 1000 \text{ W/m}^2$	$G_T = 800 \text{ W/m}^2$	$G_T = 600 \text{ W/m}^2$
10	73.24	58.49	43.91
20	66.03	51.29	36.87
30	58.16	43.58	28.99
40	49.61	35.20	20.61
50	41.06	26.65	12.23
60	32.18	17.93	3.52
70	23.30	9.22	-
80	14.41	-	-



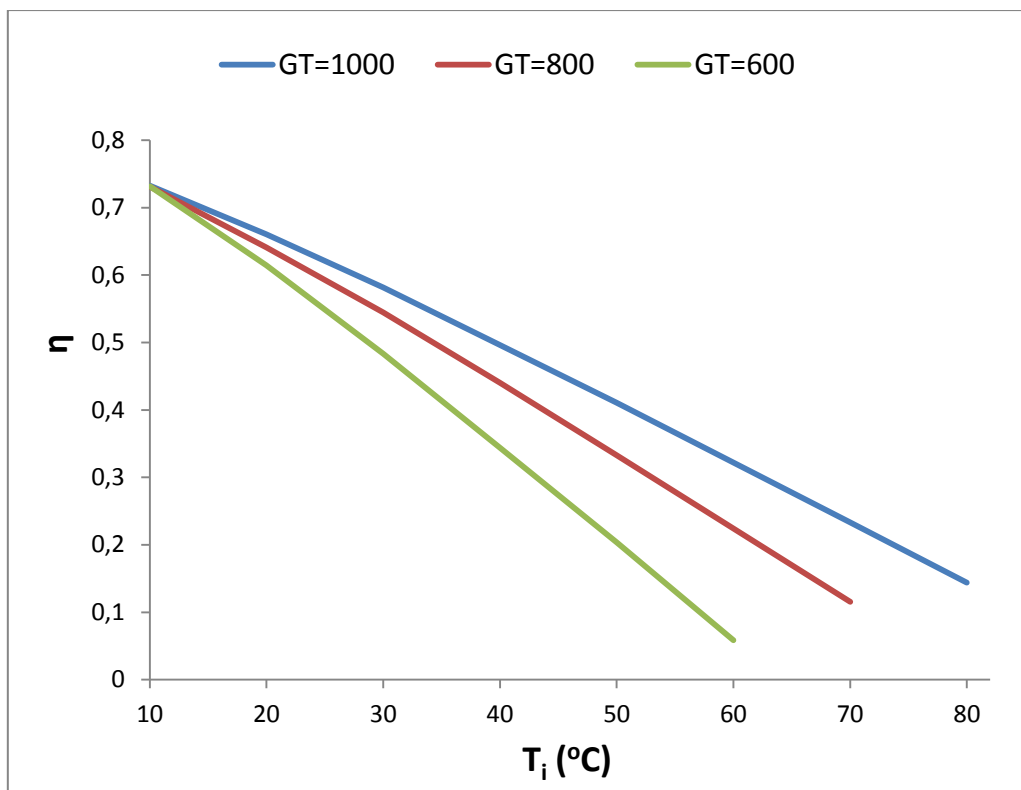
Διάγραμμα 5.6.1: Καμπύλη απόδοσης για τις τρεις τιμές της έντασης της ακτινοβολίας

Το διάγραμμα παίρνει την εξής μορφή λόγω της διαφορετικής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, που εμπεριέχεται στον όρο ανηγμένης θερμοκρασίας εισόδου του οριζόντιου άξονα. Έτσι, όπως μπορεί να διακριθεί και στο διάγραμμα που ακολουθεί, το Διάγραμμα 5.6.2, οι καμπύλες απόδοσης διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ως προς την τετμημένη, καθώς, για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία εισόδου, παραδείγματος χάρη 50°C , οι αντίστοιχες τιμές του όρου ανηγμένης θερμοκρασίας εισόδου, $(T_i - T_a)/G_T$, δε βρίσκονται σε μία κατακόρυφη ευθεία, λόγω του παρονομαστή, της έντασης της ακτινοβολίας δηλαδή, που αλλάζει από περίπτωση σε περίπτωση.

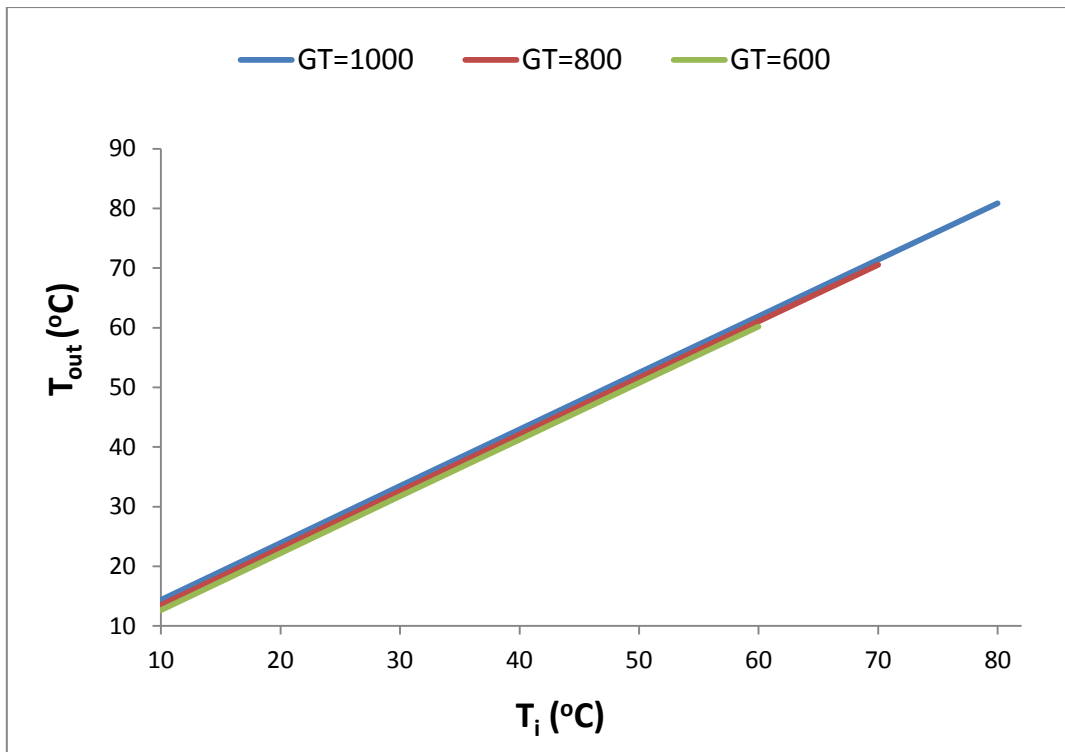
Συνεπώς, για να γίνονται καλύτερα αντιληπτά τα διαγράμματα, κατά τη συγκεκριμένη ενότητα σύγκρισης των διαφορετικών τιμών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, η τετμημένη των διαγραμμάτων θα είναι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη, αντί για τη διαφορά θερμοκρασίας προς την ένταση της ακτινοβολίας. Τα διαγράμματα, επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατίθενται στη συνέχεια.



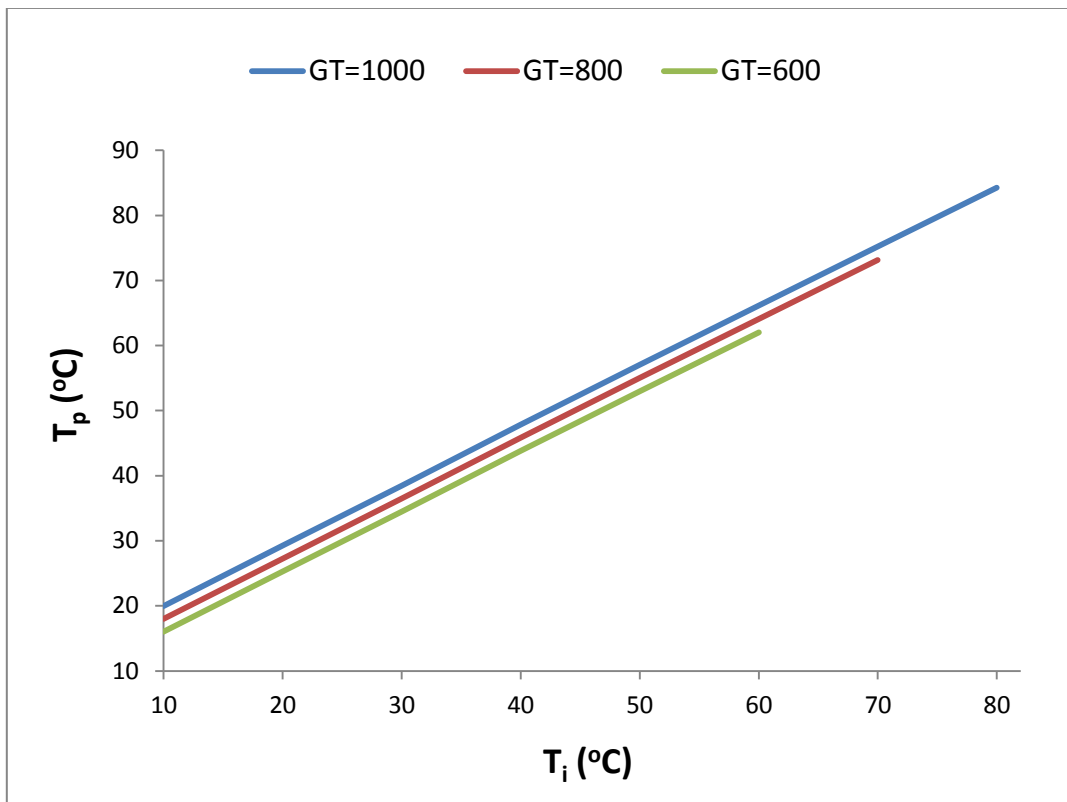
Διάγραμμα 5.6.2: Βαθμός απόδοσης του συλλέκτη για θερμοκρασία εισόδου ίση με 50°C για τις τρεις τιμές της έντασης της ακτινοβολίας



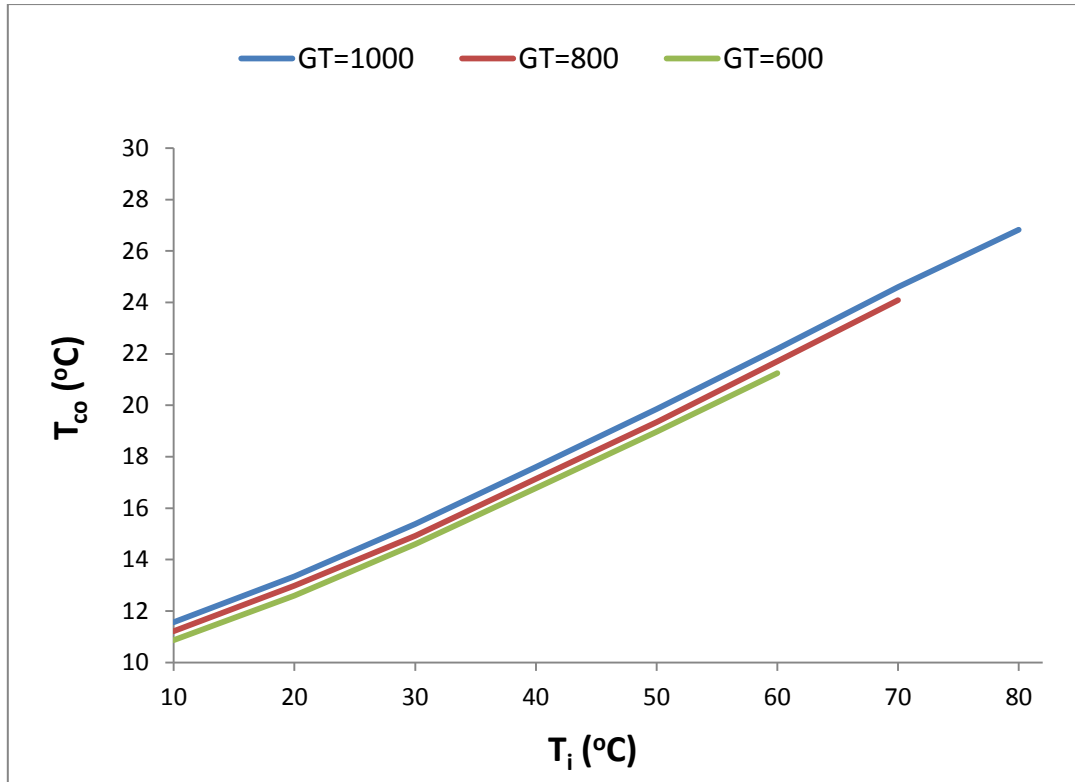
Διάγραμμα 5.6.3: Καμπύλη απόδοσης για τις τρεις τιμές της έντασης της ακτινοβολίας συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου



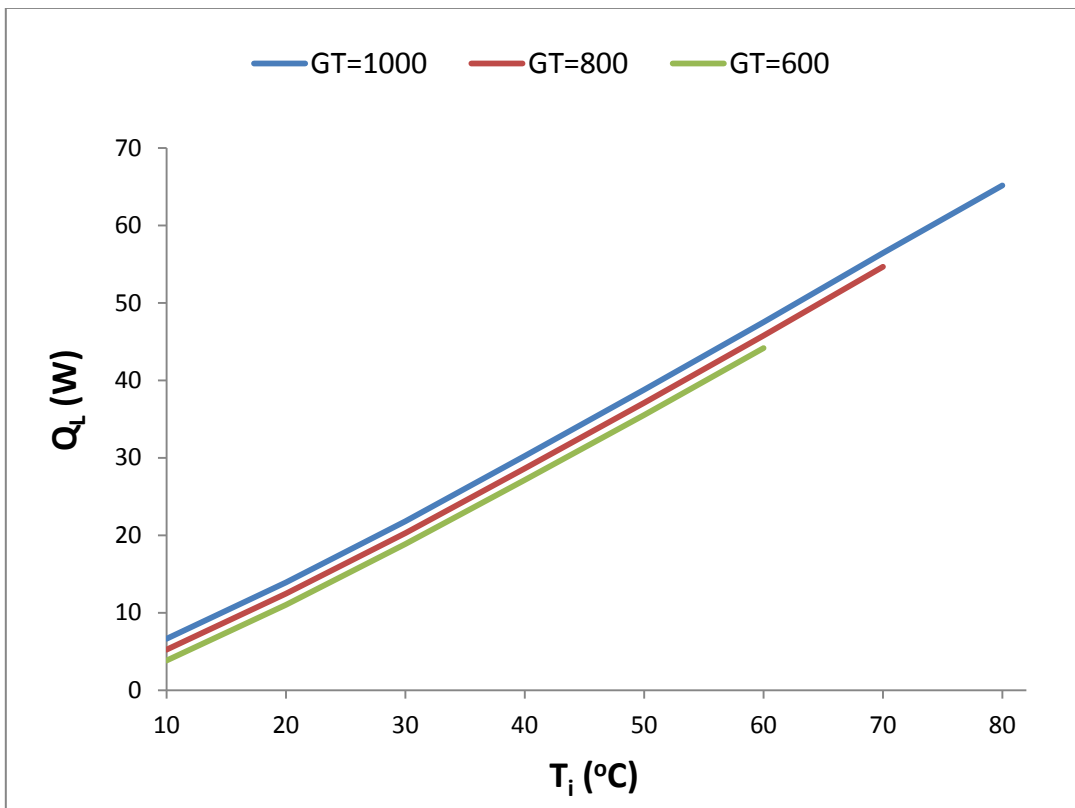
Διάγραμμα 5.6.4: Θερμοκρασία εξόδου για τις τρεις τιμές της έντασης της ακτινοβολίας συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου



Διάγραμμα 5.6.5: Θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης για τις τρεις τιμές της έντασης της ακτινοβολίας συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου

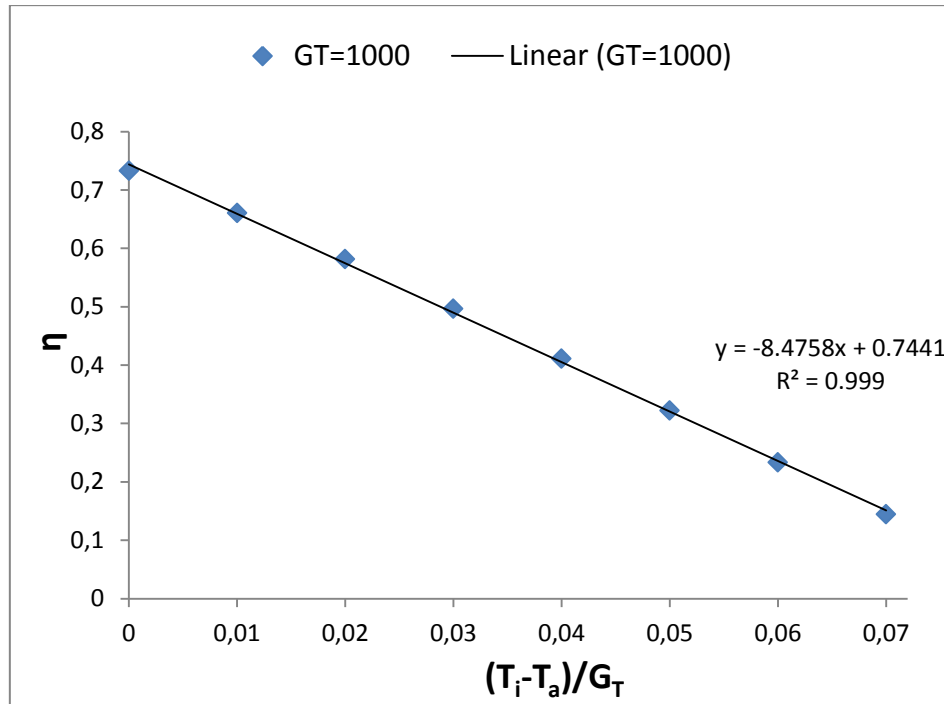


Διάγραμμα 5.6.6: Θερμοκρασία του καλύμματος για τις τρεις τιμές της έντασης της ακτινοβολίας συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου

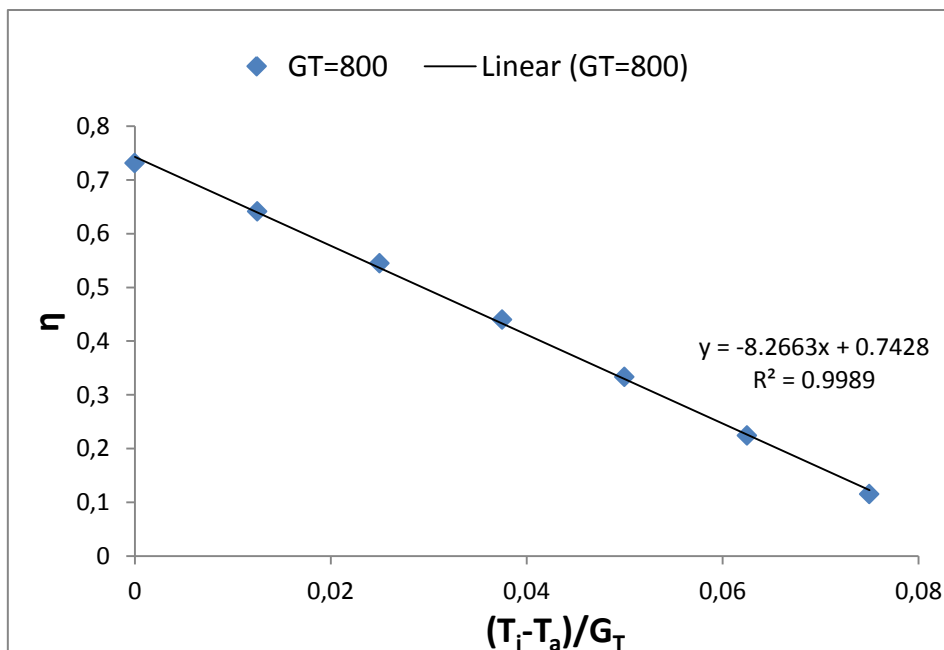


Διάγραμμα 5.6.7: Συνολικές θερμικές απώλειες για τις τρεις τιμές της έντασης της ακτινοβολίας συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου

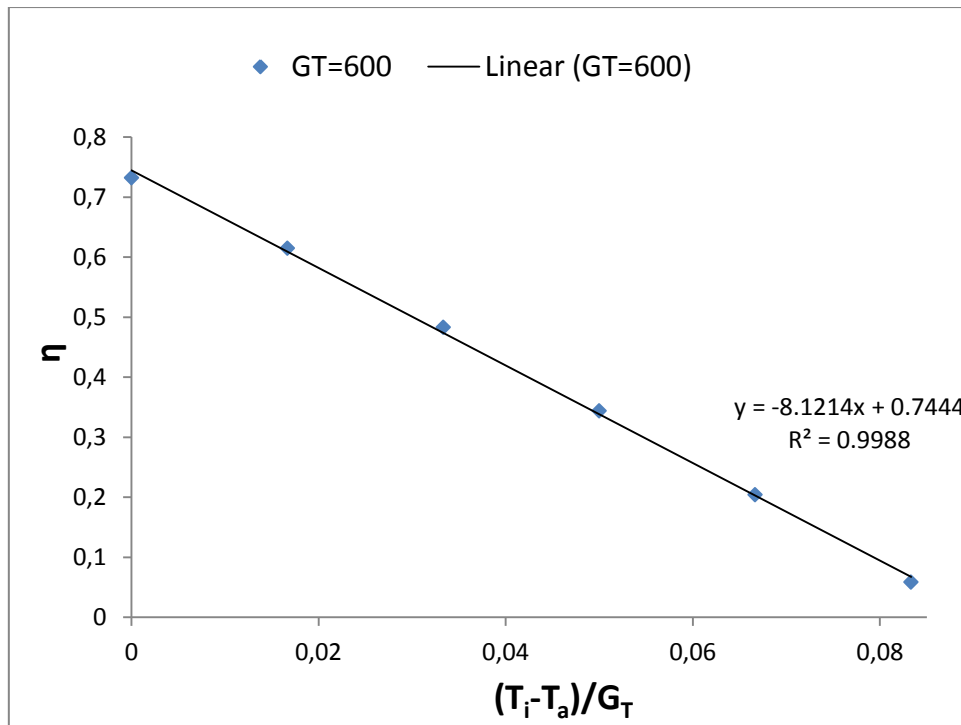
Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, μπορούν πλέον να προσδιοριστούν ο παράγοντας θερμικής απολαβής F_R κι ο συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών U_L του συλλέκτη. Τοποθετώντας ξεχωριστά την κάθε καμπύλη απόδοσης του συλλέκτη για τις τρεις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και προσεγγίζοντας κάθε μία εξ αυτών με ευθεία γραμμή τάσης, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:



Διάγραμμα 5.6.8: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη με ευθεία γραμμή τάσης για προσπίπτουσα ακτινοβολία ίση με $G_T = 1000 \text{ W/m}^2$



Διάγραμμα 5.6.9: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη με ευθεία γραμμή τάσης για προσπίπτουσα ακτινοβολία ίση με $G_T = 800 \text{ W/m}^2$



Διάγραμμα 5.6.10: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη με ευθεία γραμμή τάσης για προσπίπτουσα ακτινοβολία ίση με $G_T = 600 \text{ W/m}^2$

Επομένως, έχοντας πλέον γνωστές τις εξισώσεις των ευθειών γραμμών τάσης για κάθε περίπτωση, υπολογίζονται τα δύο ζητούμενα μεγέθη, τα οποία παρατίθενται για κάθε περίπτωση στον κάτωθι πίνακα.

Πίνακας 5.6.5: Παράγοντας θερμικής απολαβής και συντελεστής ολικών απωλειών για τις τρεις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

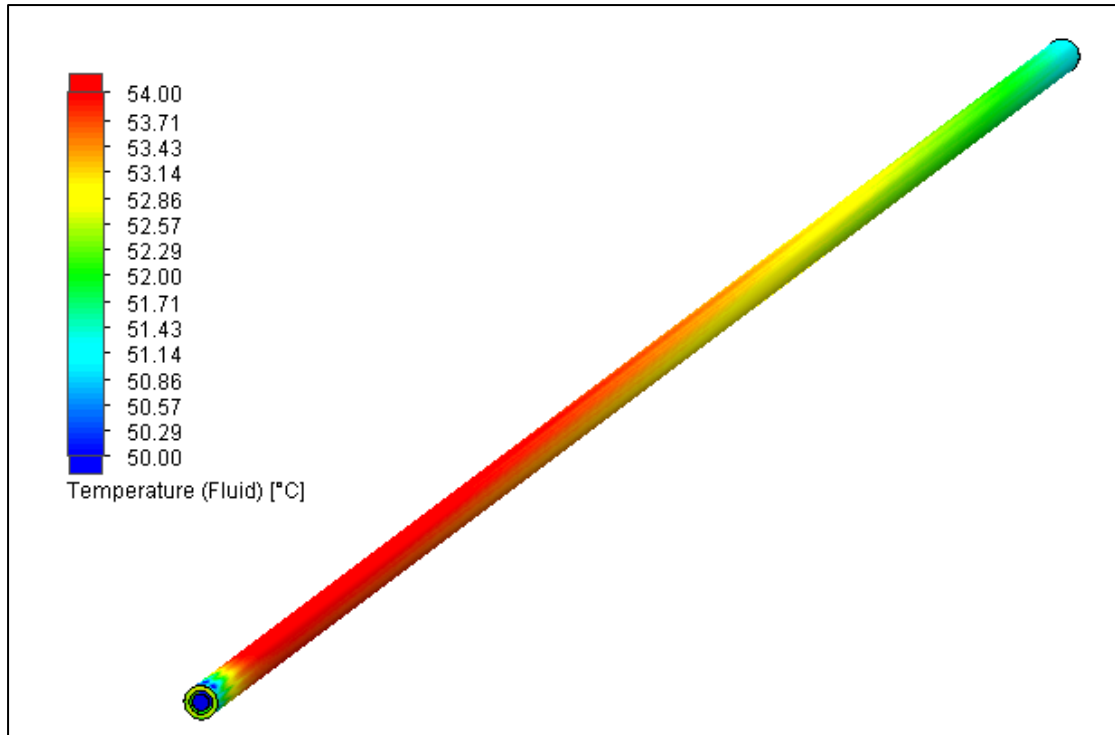
	$G_T = 1000 \text{ W/m}^2$	$G_T = 800 \text{ W/m}^2$	$G_T = 600 \text{ W/m}^2$
(τα)	0.8	0.8	0.8
F_R (τα)	0.7441	0.7428	0.7444
$F_R U_L$	8.4758	8.2663	8.1214
F_R	0.9301	0.9285	0.9305
U_L ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)	9.1125	8.9029	8.7280

Όπως παρατηρείται από τους Πίνακες 5.6.2, 5.6.3 και 5.6.4 για δεδομένη θερμοκρασία εισόδου, ο συλλέκτης παρουσιάζει ψηλότερο βαθμό απόδοσης κι ωφέλιμη ισχύ καθώς αυξάνεται η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία οφείλεται στην αυξημένη θερμοκρασιακή ανύψωση του ρευστού καθώς αυξάνεται η ένταση της ακτινοβολίας. Το συγκεκριμένο γεγονός αποτυπώνεται στα

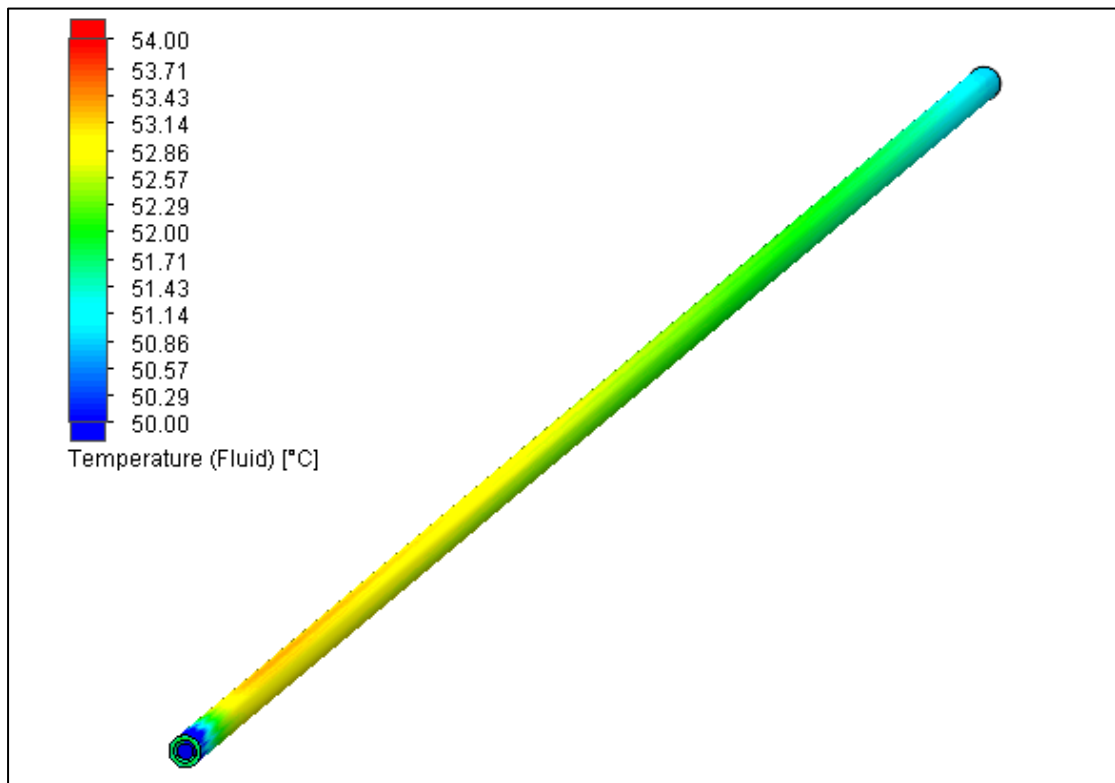
Σχήματα 5.6.1, 5.6.2 και 5.6.3 για μία τυπική θερμοκρασία εισόδου στο συλλέκτη, 50°C. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς για μεγαλύτερη τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνεται η διαθέσιμη ενέργεια στο σύστημα, οπότε η πλάκα απορρόφησης μπορεί να απορροφήσει μεγαλύτερο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας, να το μετατρέψει σε θερμότητα και να το προσδώσει έπειτα στο νερό. Επίσης, στις χαμηλότερες ακτινοβολίες και για υψηλές θερμοκρασίες εισόδου, δεν έχει περιληφθεί στους αντίστοιχους πίνακες η τιμή των τριών παραπάνω μεγεθών, καθώς σε εκείνες τις συνθήκες το νερό εισέρχεται με μεγάλη θερμοκρασία στο συλλέκτη κι η διαθέσιμη ενέργεια στο σύστημα δεν αρκεί για την πρόσδοση θερμότητας στο ρευστό, έχοντας ως αποτέλεσμα αρνητικές τιμές. Κατά συνέπεια, η θερμοκρασιακή διαφορά του νερού, η ωφέλιμη ισχύς κι ο βαθμός απόδοσης θα λάμβαναν αρνητικές τιμές.

Μία αξιοσημείωτη παρατήρηση που προκύπτει από τα Διαγράμματα 5.6.5, 5.6.6 και 5.6.7 είναι πως, για μεγαλύτερες τιμές της έντασης της ακτινοβολίας, προκύπτει υψηλότερη θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης, καθώς κι εξωτερική θερμοκρασία καλύμματος και συνολικές θερμικές απώλειες. Καθώς η διαθέσιμη ενέργεια στο σύστημα είναι μεγαλύτερη με την αυξανόμενη ένταση της ακτινοβολίας, η πλάκα απορρόφησης αποκτά υψηλή θερμοκρασία και, καθώς δεν προσδίδει όλη την απορροφημένη θερμότητά της στο νερό, τη μεταφέρει στον αέρα ο οποίος με τη σειρά του μέσω της φυσικής συναγωγής του μεταξύ του καλύμματος και της πλάκας τη μεταφέρει στο κάλυμμα, το οποίο χάνει θερμότητα προς το περιβάλλον. Συνεπώς, το φαινόμενο εντείνεται καθώς αυξάνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κι έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση και των συνολικών θερμικών απωλειών. Η συσχέτιση αυτή αποτυπώνεται και στον Πίνακα 5.6.5, όπου διακρίνεται μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία λαμβάνει την τιμή 1000 W/m² από τις 800 W/m² και 600 W/m² αντίστοιχα. Το αυξημένο θερμοκρασιακό επίπεδο του συλλέκτη συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας διακρίνεται επίσης και στα Σχήματα 5.6.4, 5.6.5 και 5.6.6 που ακολουθούν ενδεικτικά για θερμοκρασία εισόδου 50°C.

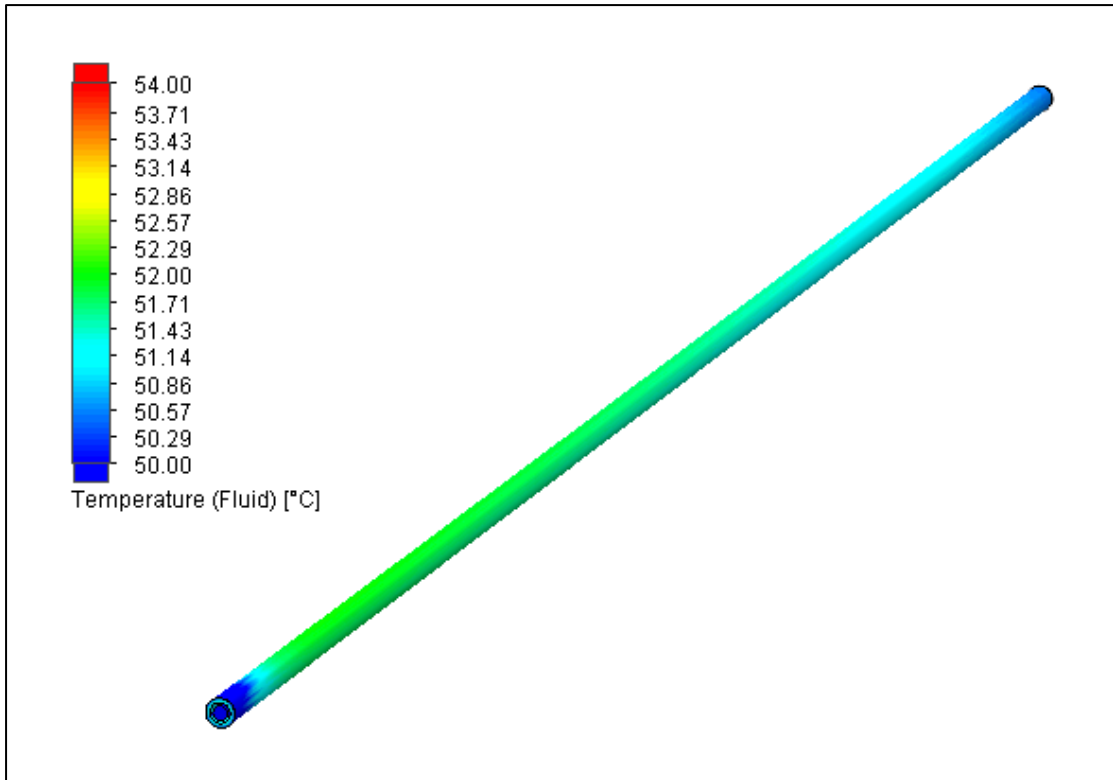
Συμπεραίνεται, τέλος, πως ο καλύτερος βαθμός απόδοσης στις υψηλότερες τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται στο γεγονός πως η υψηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά του νερού που επιτυγχάνεται σε αυτές υπερτερεί έναντι της αύξησης των θερμικών απωλειών για τις ίδιες συνθήκες.



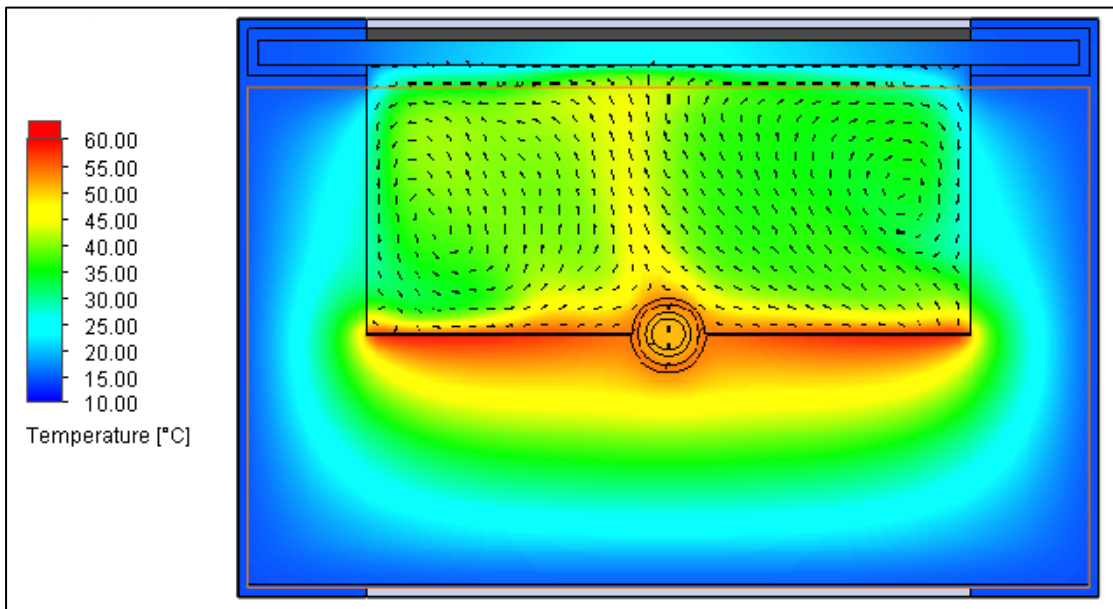
Σχήμα 5.6.1: Θερμοκρασιακό πεδίου του νερού για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 1000 W/m^2 και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



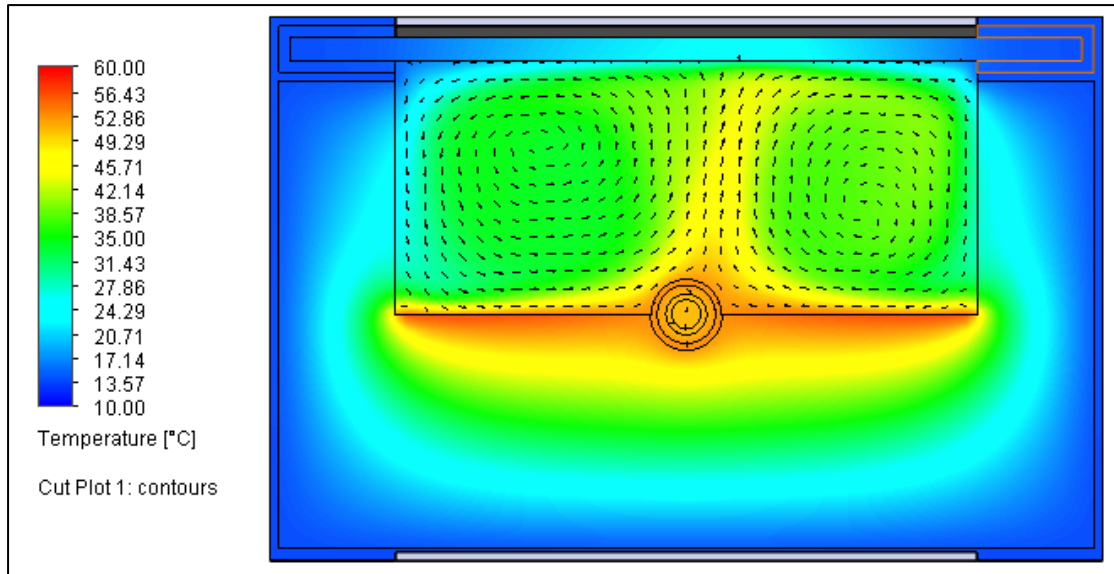
Σχήμα 5.6.2: Θερμοκρασιακό πεδίου του νερού για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 800 W/m^2 και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



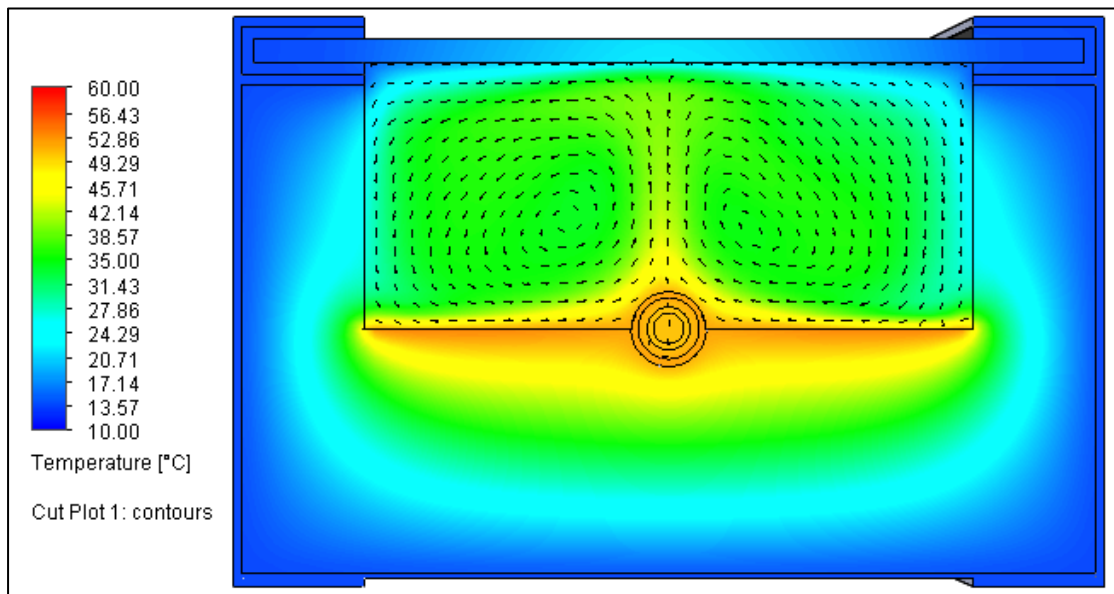
Σχήμα 5.6.3: Θερμοκρασιακό πεδίο του νερού για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 600 W/m^2 και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



Σχήμα 5.6.4: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 1000 W/m^2 και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



Σχήμα 5.6.5: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 800 W/m^2 και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



Σχήμα 5.6.6: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 600 W/m^2 και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C

5.7 Προσομοίωση ως προς τη γωνία κλίσης του συλλέκτη

5.7.1 Διατύπωση του προβλήματος

Η επόμενη παράμετρος η οποία εξετάζεται είναι η γωνία κλίσης του συλλέκτη. Οι τιμές που πάρθηκαν κατά την προσομοίωση καθώς κι οι παράμετροι που παραμένουν σταθερές κατά τη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα, επιλέγοντας τη γεωμετρία (5,10) του συστήματος σωλήνωσης, καθώς, όπως αποδείχθηκε και παραπάνω, εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα.

Πίνακας 5.7.1: Ορισμός των παραμέτρων κατά τη σύγκριση των γωνιών κλίσης

Παράμετρος	Τιμή / Εύρος
T_{in}	10, 30, 50, 70°C
G_T	1000 W/m ²
\dot{m}	0.004 kg/s
β	0, 15, 30, 45, 60°
Γεωμετρία σωλήνωσης ($D_{i,1}$, $D_{i,2}$)	(5,10) [mm, mm]

5.7.2 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Έπειτα από την εκτέλεση των τεσσάρων το πλήθος διαφορετικών κλίσεων, καθώς η πρώτη περίπτωση, με μηδενική γωνία κλίσης, είχε πραγματοποιηθεί σε προηγούμενο χρόνο, προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες για όλες τις γωνίες κλίσεως.

Πίνακας 5.7.2: Βαθμός απόδοσης του συλλέκτη για τις τιμές της γωνίας κλίσης

T_{in} (°C)	η				
	$\beta=0^\circ$	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$
10	0.7324	0.7323	0.7341	0.7369	0.7385
30	0.5816	0.5832	0.5858	0.5937	0.5970
50	0.4106	0.4165	0.4258	0.4350	0.4435
70	0.2330	0.2446	0.2563	0.2728	0.2849

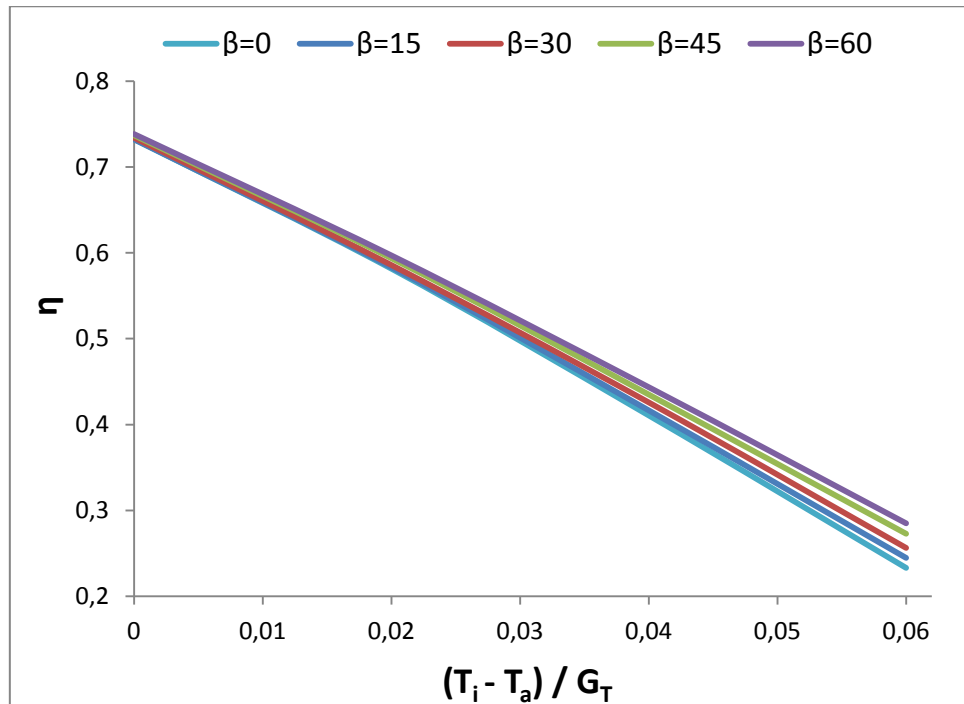
Πίνακας 5.7.3: Θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη για τις τιμές της γωνίας κλίσης

T_{in} (°C)	T_{out} (°C)				
	$\beta=0^\circ$	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$
10	14.37	14.37	14.38	14.40	14.41
30	33.47	33.48	33.50	33.54	33.56
50	52.45	52.49	52.54	52.60	52.65
70	71.39	71.46	71.53	71.63	71.70

Πίνακας 5.7.4: Ωφέλιμη ισχύς του συλλέκτη για τις τιμές της γωνίας κλίσης

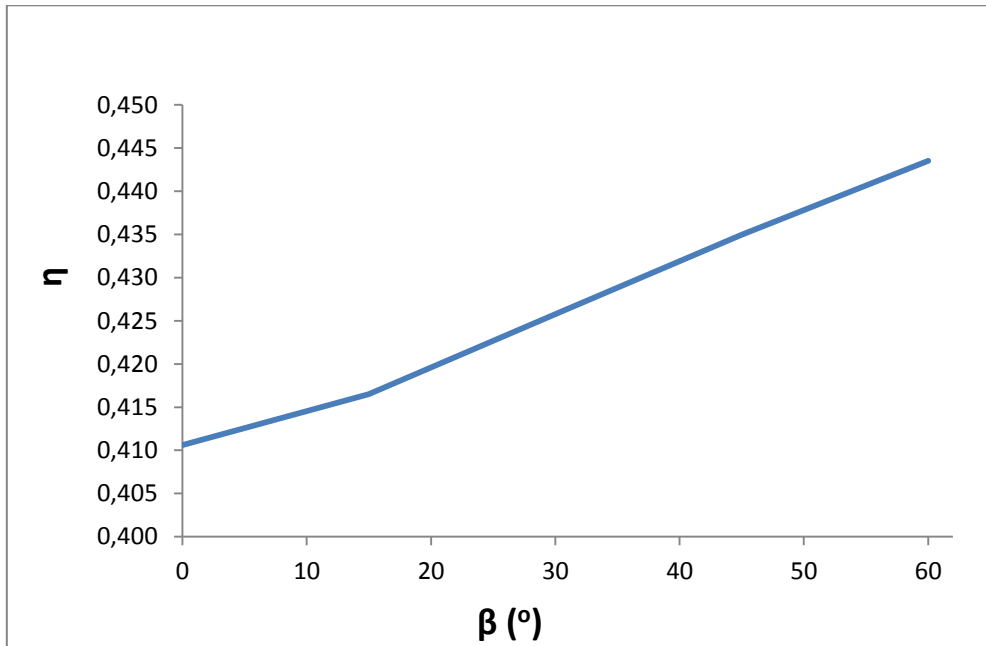
T_{in} (°C)	Q_u (W)				
	$\beta=0^\circ$	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$
10	73.24	73.23	73.41	73.69	73.85
30	58.16	58.32	58.58	59.37	59.70
50	41.06	41.65	42.58	43.50	44.35
70	23.30	24.46	25.63	27.28	28.49

Παρατίθενται στη συνέχεια και τα σχετικά διαγράμματα για καλύτερη εποπτεία όσον αφορά τη σύγκριση των διαφόρων γωνιών κλίσης του συλλέκτη μεταξύ τους:

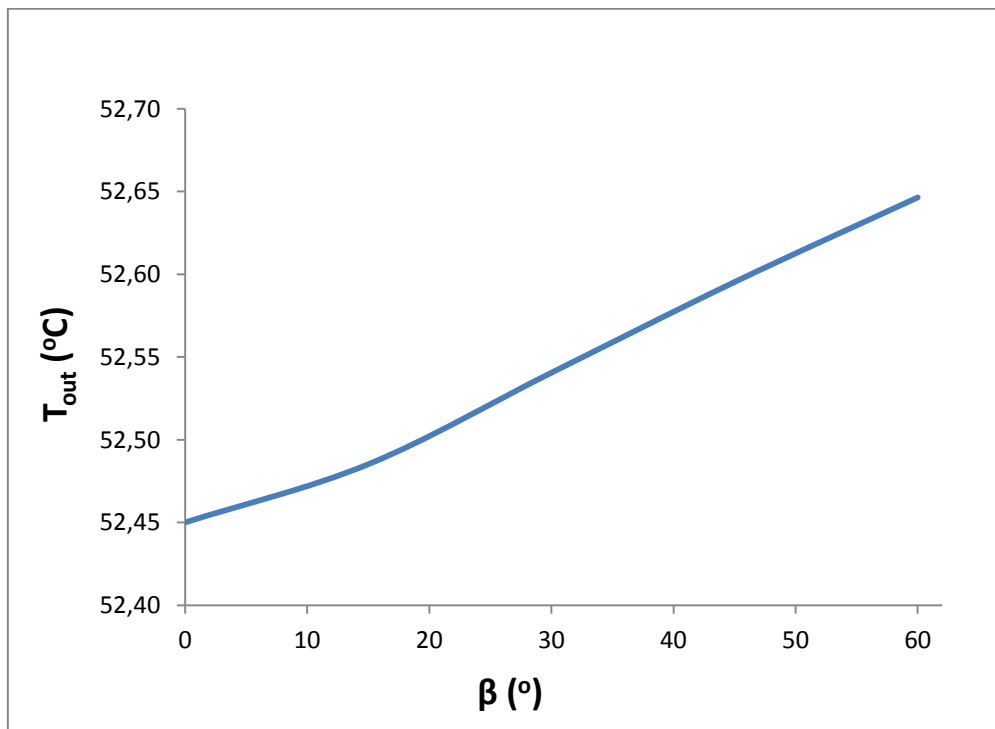


Διάγραμμα 5.7.1: Καμπύλη απόδοσης για τις διάφορες γωνίες κλίσης του συλλέκτη

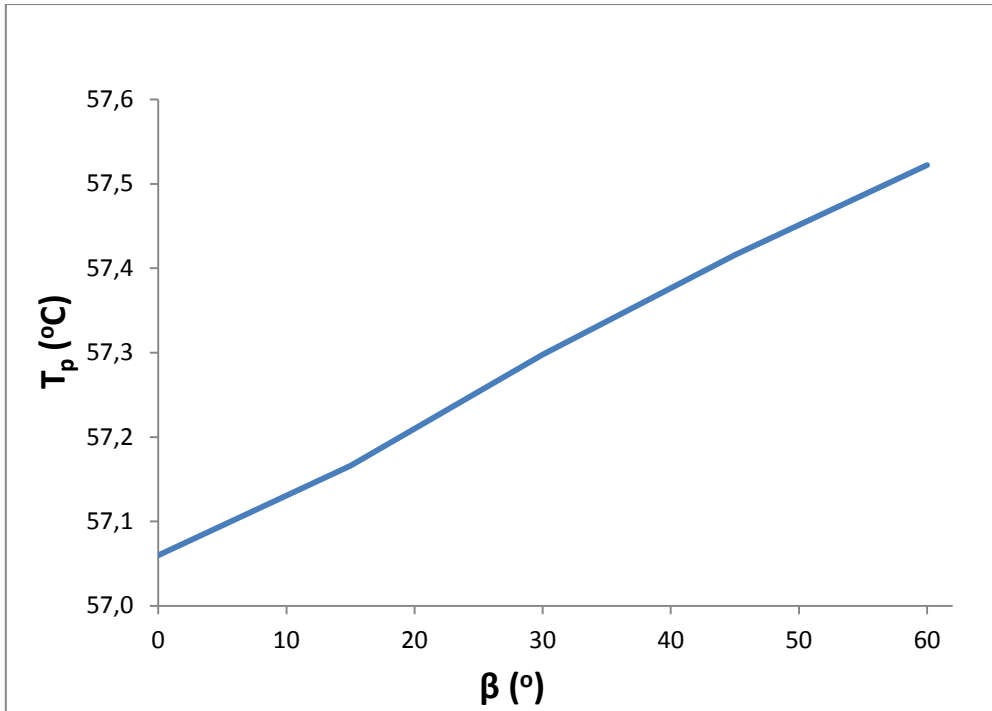
Ενώ για μία συγκεκριμένη τυπική τιμή εισόδου του νερού στο συλλέκτη, στους 50°C, παίρνουμε τα ακόλουθα διαγράμματα για όλες τις γωνίες κλίσης:



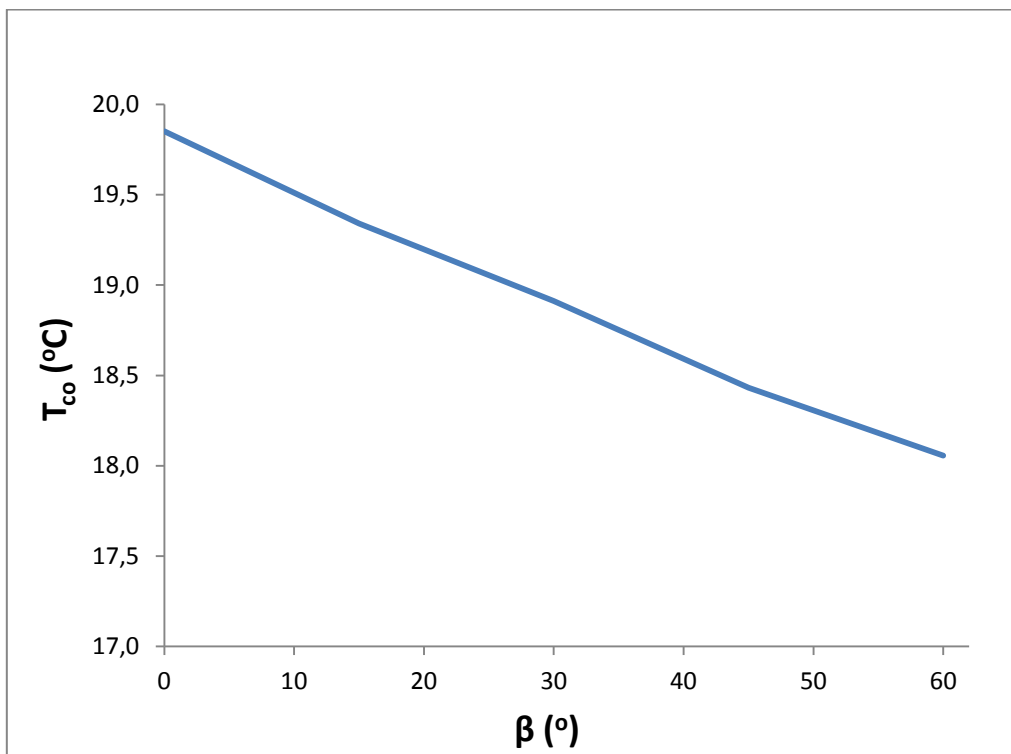
Διάγραμμα 5.7.2: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της γωνίας κλίσης του συλλέκτη για θερμοκρασία εισόδου ίση με 50°C



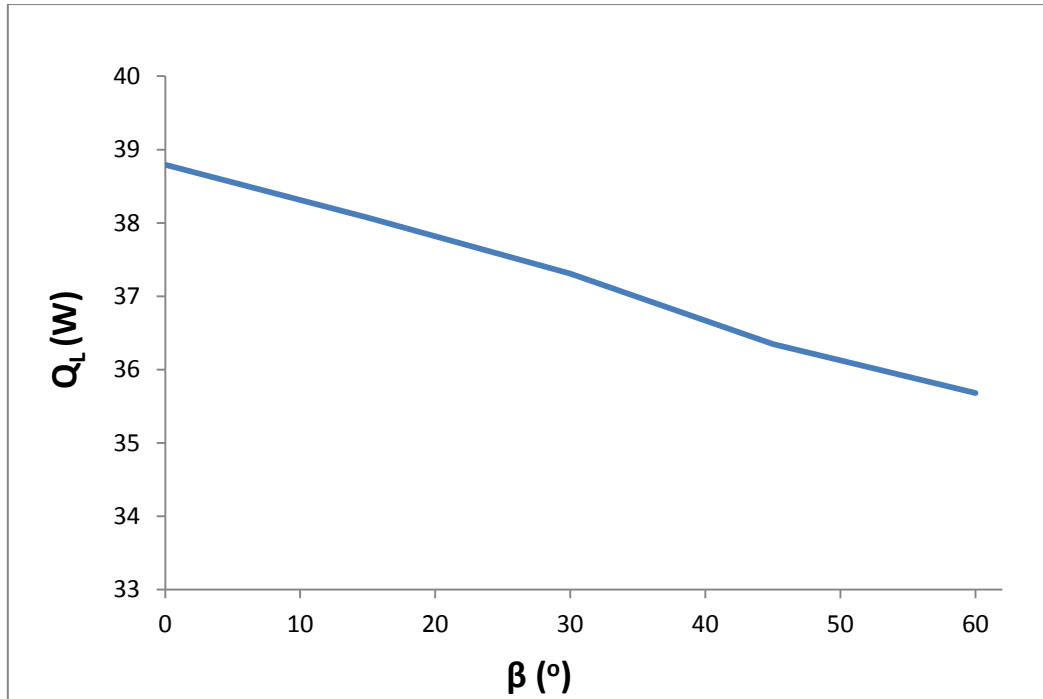
Διάγραμμα 5.7.3: Θερμοκρασία εξόδου συναρτήσει της γωνίας κλίσης του συλλέκτη για θερμοκρασία εισόδου ίση με 50°C



Διάγραμμα 5.7.4: Θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης συναρτήσει της γωνίας κλίσης του συλλέκτη για θερμοκρασία εισόδου ίση με 50°C

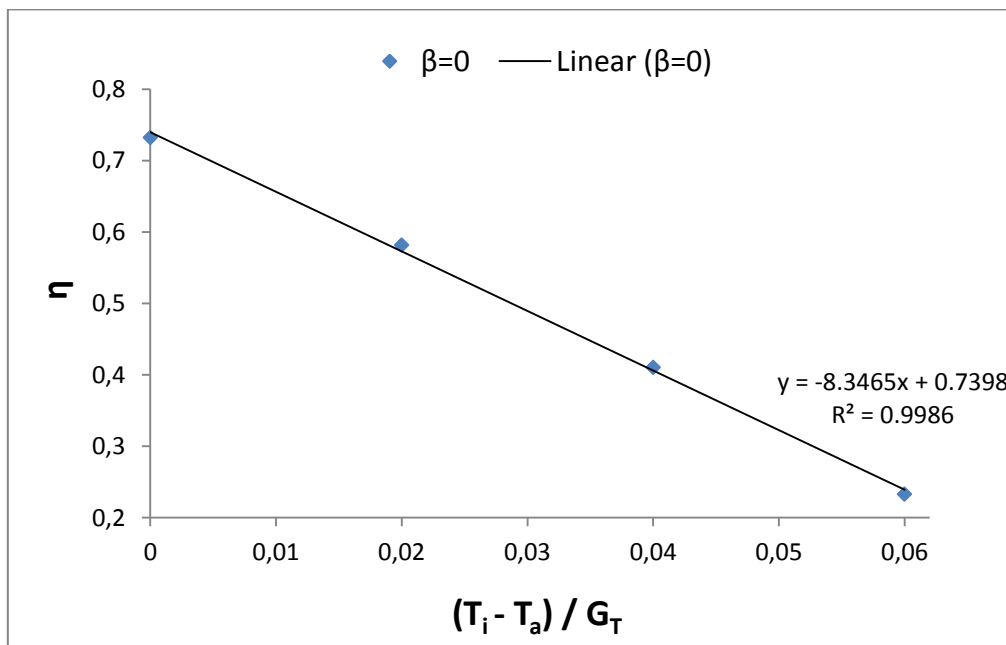


Διάγραμμα 5.7.5: Θερμοκρασία του καλύμματος συναρτήσει της γωνίας κλίσης του συλλέκτη για θερμοκρασία εισόδου ίση με 50°C

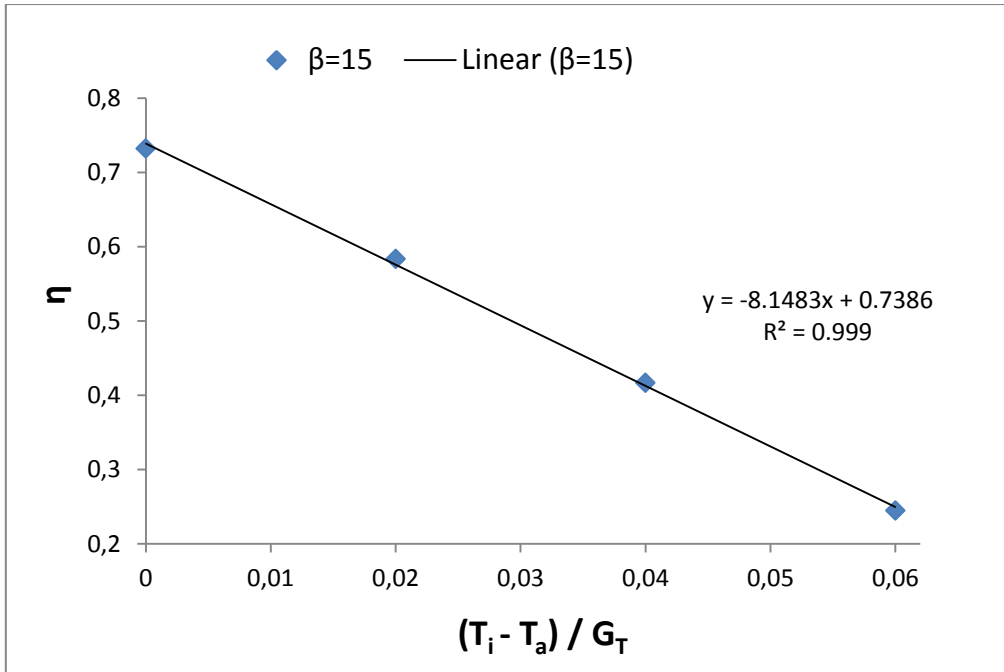


Διάγραμμα 5.7.6: Συνολικές θερμικές απώλειες συναρτήσει της γωνίας κλίσης του συλλέκτη για θερμοκρασία εισόδου ίση με 50°C

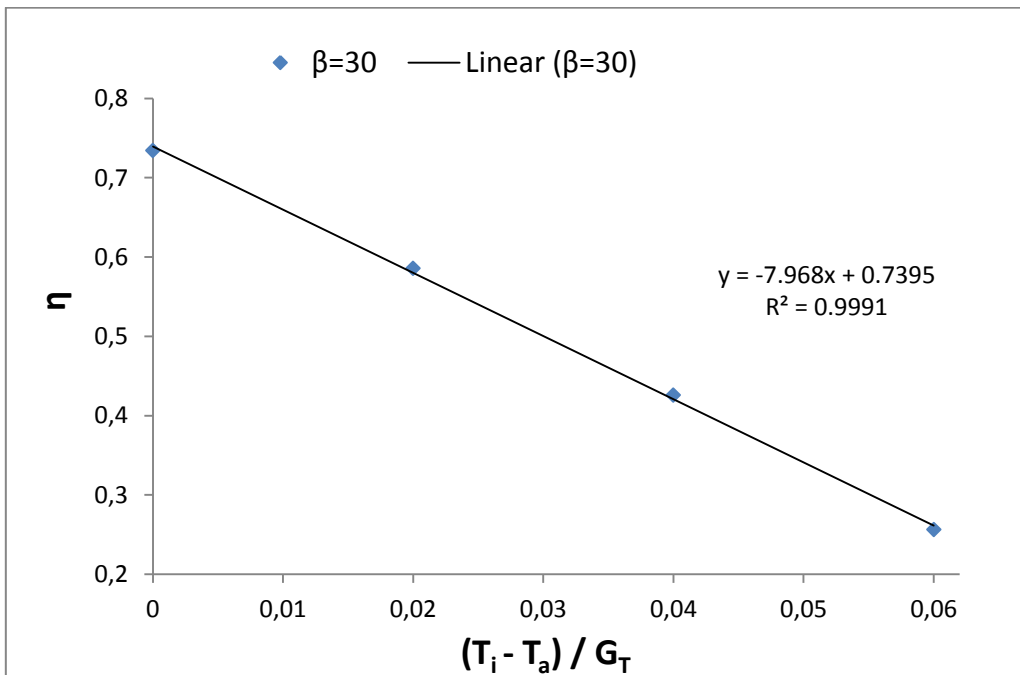
Όπως και στις προηγούμενες ενότητες, χρησιμοποιώντας τις καμπύλες απόδοσης για κάθε γωνία κλίσης του συλλέκτη και προσεγγίζοντας την κάθε μία από αυτές μέσω ευθείας γραμμής τάσης, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα για τον παράγοντα απόδοσης και το συντελεστή ολικών απωλειών του συλλέκτη:



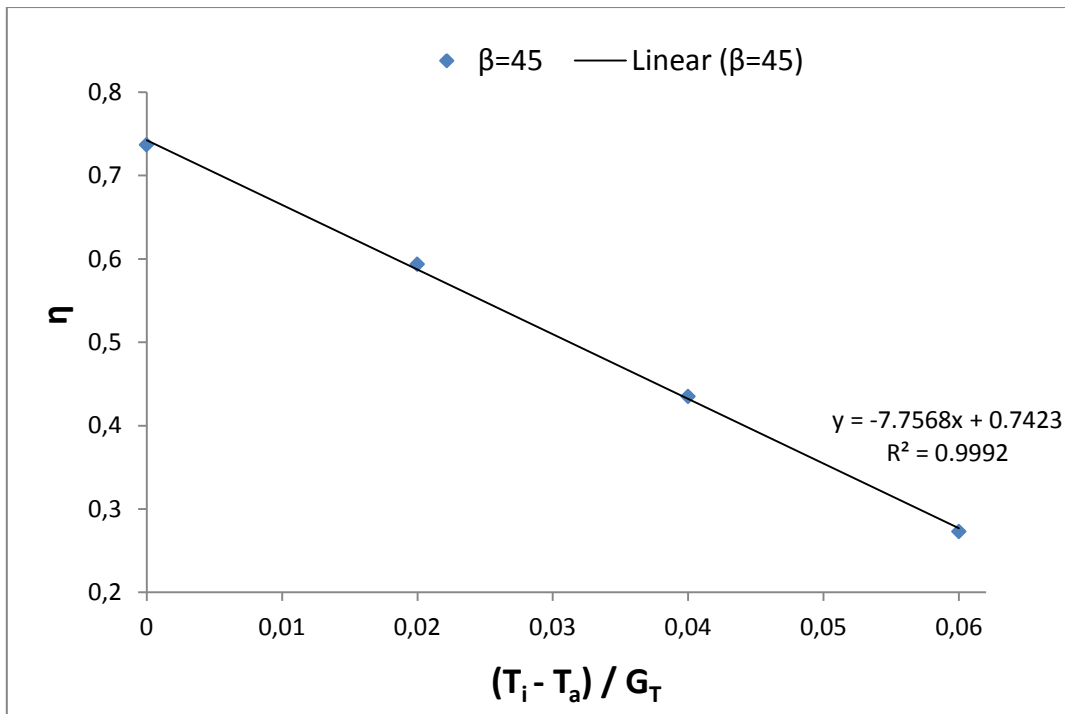
Διάγραμμα 5.7.7: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη με ευθεία γραμμή τάσης για γωνία κλίσης του συλλέκτη ίση με $\beta=0^\circ$



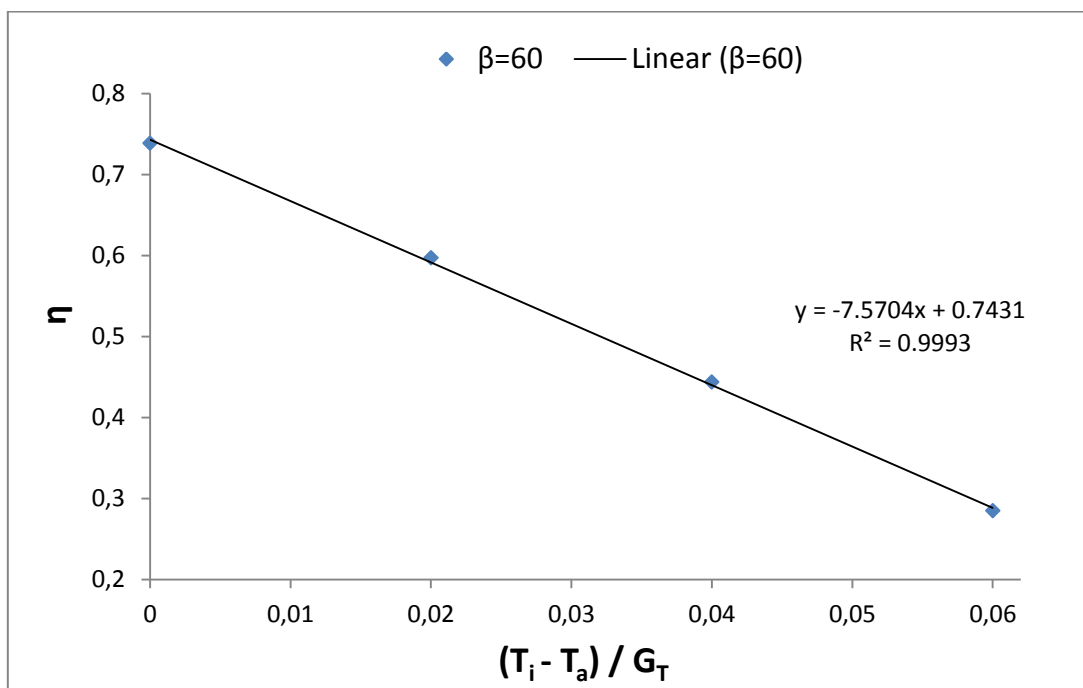
Διάγραμμα 5.7.8: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη με ευθεία γραμμική τάσης για γωνία κλίσης του συλλέκτη ίση με $\beta=15^\circ$



Διάγραμμα 5.7.9: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη με ευθεία γραμμική τάσης για γωνία κλίσης του συλλέκτη ίση με $\beta=30^\circ$



Διάγραμμα 5.7.10: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη με ευθεία γραμμή τάσης για γωνία κλίσης του συλλέκτη ίση με $\beta=45^\circ$



Διάγραμμα 5.7.11: Προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του συλλέκτη με ευθεία γραμμή τάσης για γωνία κλίσης του συλλέκτη ίση με $\beta=60^\circ$

Κατά συνέπεια, είναι γνωστοί πλέον οι δύο όροι της κάθε ευθείας γραμμής τάσης για κάθε γωνία κλίσης του συλλέκτη κι είναι δυνατόν να υπολογιστούν ο παράγοντας θερμικής απολαβής F_R κι ο συντελεστής ολικών απωλειών U_L σε κάθε περίπτωση, όπως και στις προηγούμενες ενότητες. Οι τιμές των ζητούμενων μεγεθών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

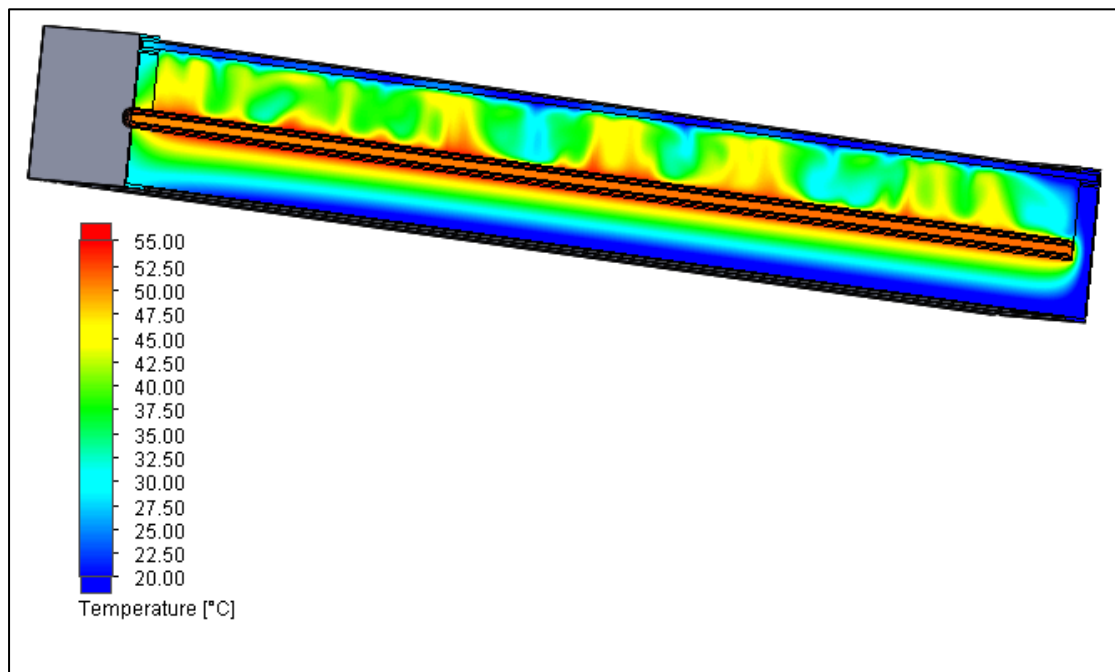
Πίνακας 5.7.5: Παράγοντας θερμικής απολαβής και συντελεστής ολικών απωλειών για τις τιμές της γωνίας κλίσης του συλλέκτη

	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 15^\circ$	$\beta = 40^\circ$	$\beta = 45^\circ$	$\beta = 60^\circ$
(τα)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
F_R (τα)	0.7398	0.7386	0.7395	0.7423	0.7431
$F_R U_L$	8.3465	8.1483	7.9680	7.7568	7.5704
F_R	0.9248	0.9233	0.9244	0.9279	0.9289
U_L (W/m² K)	9.0257	8.8257	8.6199	8.3597	8.1501

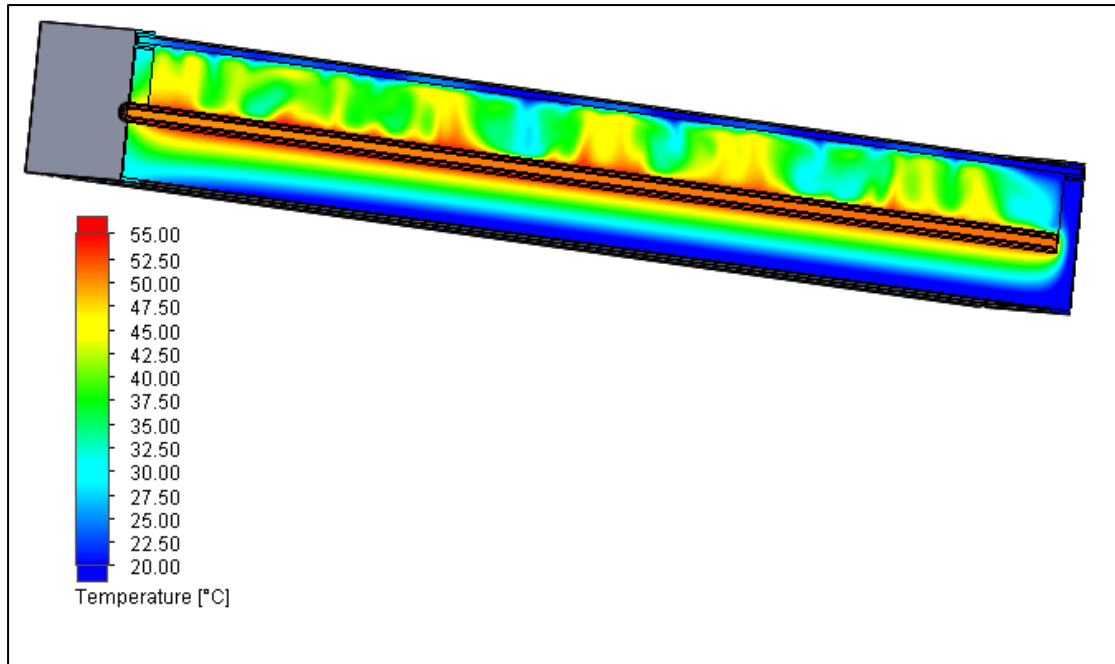
Από το Διάγραμμα 5.7.1 διακρίνεται πως οι καμπύλες του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τιμές της γωνίας κλίσης του είναι λίγο ψηλότερα από τις χαμηλότερες τιμές, δηλαδή ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση της γωνίας κλίσης του. Έπειτα, στα υπόλοιπα διαγράμματα φαίνεται πως αυξάνονται το ωφέλιμο φορτίο κι η θερμοκρασιακή διαφορά και μειώνονται η εξωτερική θερμοκρασία του καλύμματος κι οι συνολικές θερμικές απώλειες, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη.

Παρά ταύτα, παρατηρείται πως αυξάνεται κι η θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης με την αύξηση της γωνίας κλίσης, η οποία όμως δε φαίνεται να οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες, όπως αυτές αποτυπώνονται τόσο στο αντίστοιχο διάγραμμα, το Διάγραμμα 5.7.6, όσο και στον Πίνακα 5.7.5 μέσω του συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον περιορισμό του φαινομένου της φυσικής συναγωγής του αέρα εντός του συλλέκτη. Καθώς αυξάνεται η γωνία κλίσης, η κίνηση του αέρα εντός του συλλέκτη δεν ορίζεται σε τόσο μεγάλο βαθμό από την ανακυκλοφορία λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του από την απορρόφηση θερμότητας από την πλάκα και μείωσης της θερμοκρασίας του από την πρόσδοση θερμότητας προς στο κάλυμμα. Το φαινόμενο αυτό εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα, ωστόσο καθοριστικό ρόλο παίζει κι η βαρύτητα, η επίδραση της οποίας γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται η κλίση. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο ψυχρός

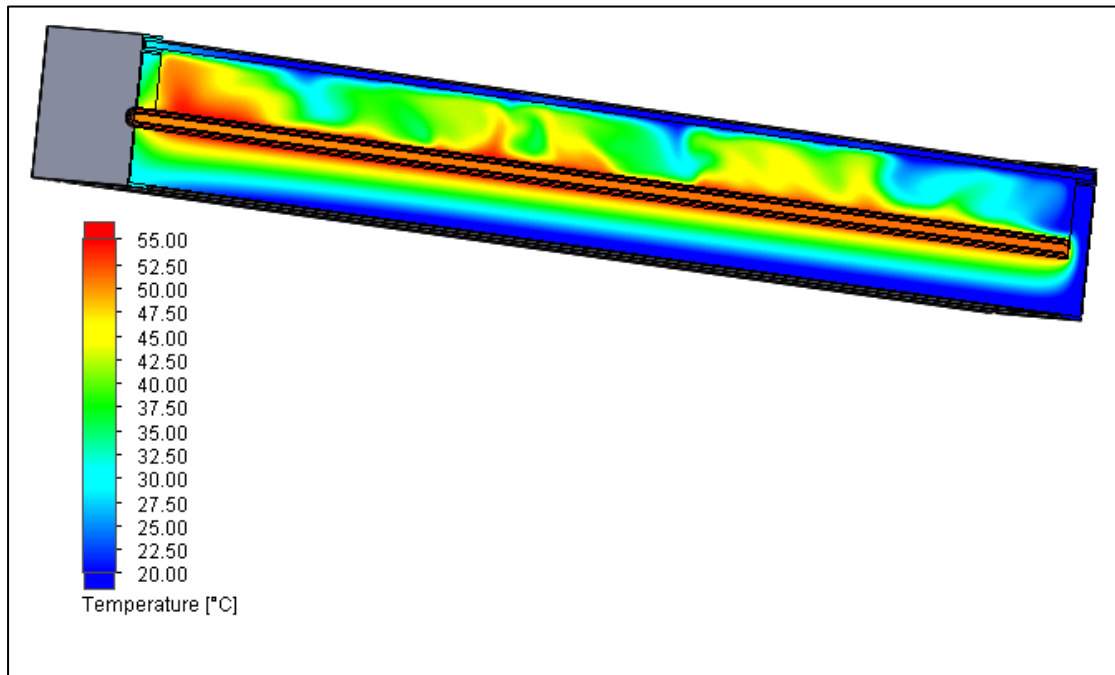
αέρας εγκλωβίζεται στο κάτω μέρος του συλλέκτη, ενώ ο θερμός στο πάνω, λόγω της διαφοράς πυκνότητας η οποία οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας τους. Έτσι, ο αέρας δεν ανακυκλοφορεί σε τόσο μεγάλο βαθμό και δεν απάγει θερμότητα από την πλάκα, οπότε η θερμοκρασία της παραμένει αρκετά ψηλά και περιορίζονται οι θερμικές απώλειες, καθώς μειώνεται το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται από την πλάκα στο κάλυμμα μέσω του αέρα. Στα Σχήματα 5.7.1, 5.7.2, 5.7.3 και 5.7.4 παρουσιάζονται οι τέσσερις από τις συνολικά πέντε εξεταζόμενες τιμές της γωνίας κλίσης, 15°, 30°, 45° και 60° αντίστοιχα για μία τυπική τιμή της θερμοκρασίας εισόδου στο συλλέκτη, 50°C. Μέσω των σχημάτων, παρατηρείται με καλύτερη εποπτεία το φαινόμενο, καθώς, πέραν της διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα εντός του διακένου λόγω της φυσικής ανακυκλοφορίας του, φαίνεται σταδιακά με την αύξηση της γωνίας κλίσης η ολοένα και μεγαλύτερη συσσώρευση του κρύου αέρα στο ψυχρό άκρο του συλλέκτη (δεξιά) και του ζεστού αέρα στο θερμό άκρο (αριστερά) αντίστοιχα.



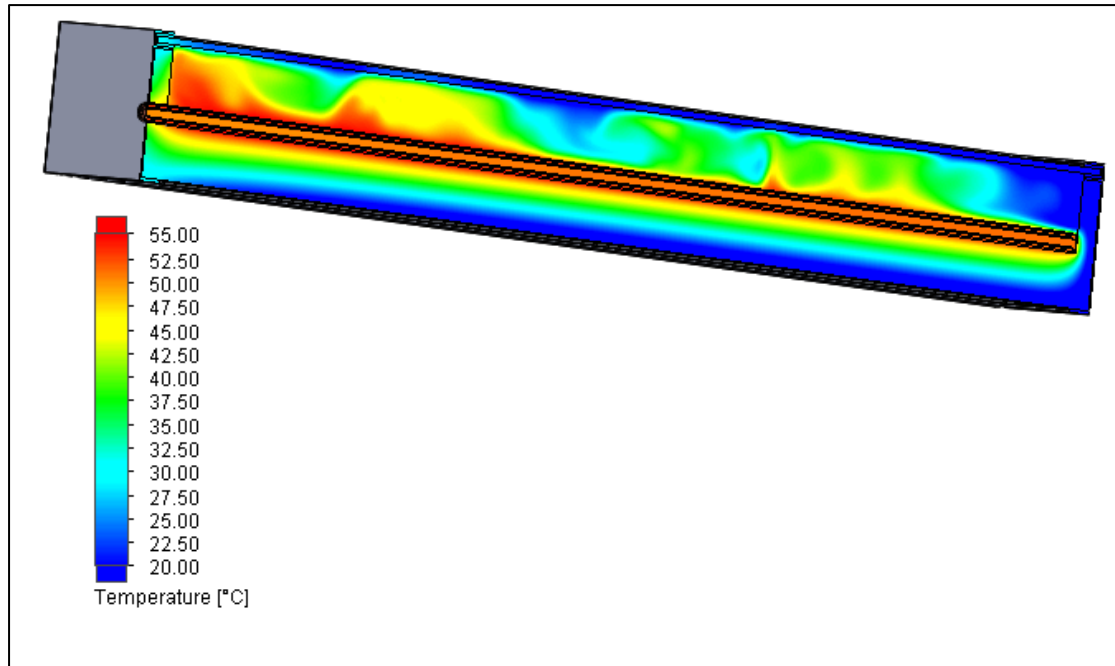
Σχήμα 5.7.1: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για τη γωνία κλίσης ίση με 15° και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



Σχήμα 5.7.2: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για τη γωνία κλίσης ίση με 30° και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



Σχήμα 5.7.3: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για τη γωνία κλίσης ίση με 45° και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



Σχήμα 5.7.4: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για τη γωνία κλίσης ίση με 60° και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C

5.8 Προσομοίωση ως προς την παροχή μάζας του ρευστού

5.8.1 Διατύπωση του προβλήματος

Η τελευταία παράμετρος υπό την οποία εξετάζεται η λειτουργία του συλλέκτη είναι η παροχή μάζας του διακινούμενου νερού, υπολογίζοντας ταυτόχρονα και τις απώλειες πίεσης για την κάθε περίπτωση. Η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη τίθεται ίση με 50°C, μία τυπική τιμή εισόδου για τους επίπεδους συλλέκτες. Οι σταθερές παράμετροι κι οι εξεταζόμενες περιπτώσεις παρατίθενται συνοπτικά στον κάτωθι πίνακα.

Πίνακας 5.8.1: Ορισμός των παραμέτρων κατά τη σύγκριση των παροχών μάζας

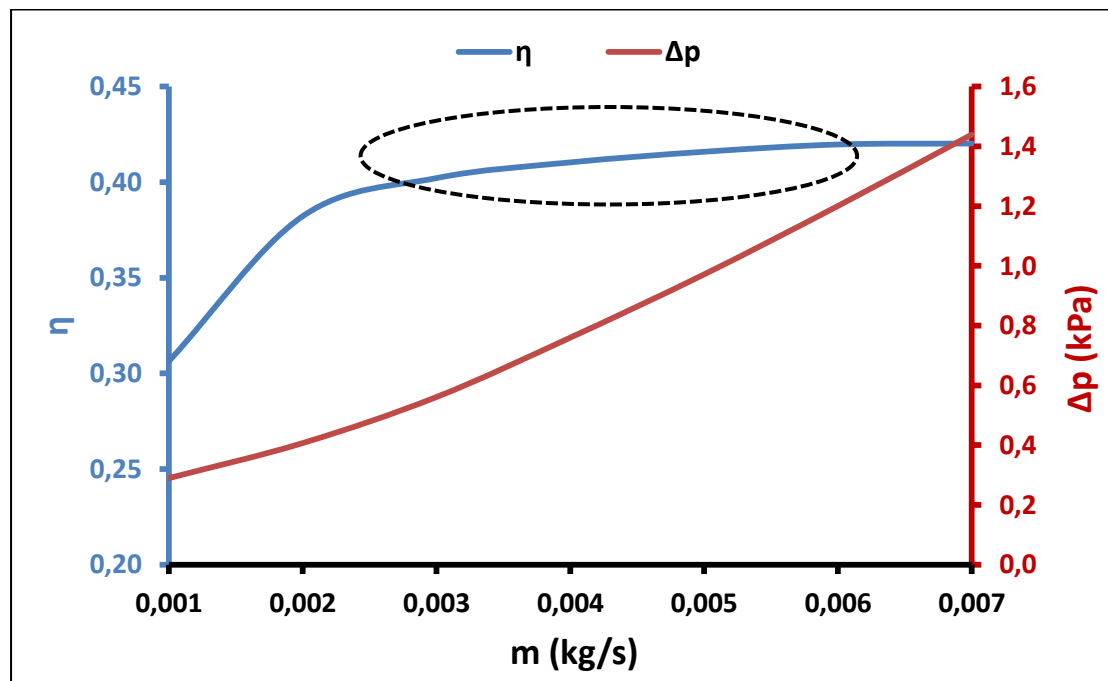
Παράμετρος	Τιμή / Εύρος
T_{in}	50°C
G_T	1000 W/m ²
\dot{m}	0.001÷0.007 kg/s, ανά 0.001 kg/s
β	0°
Γεωμετρία σωλήνωσης ($D_{i,1}$, $D_{i,2}$)	(5,10) [mm, mm]

5.8.2 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

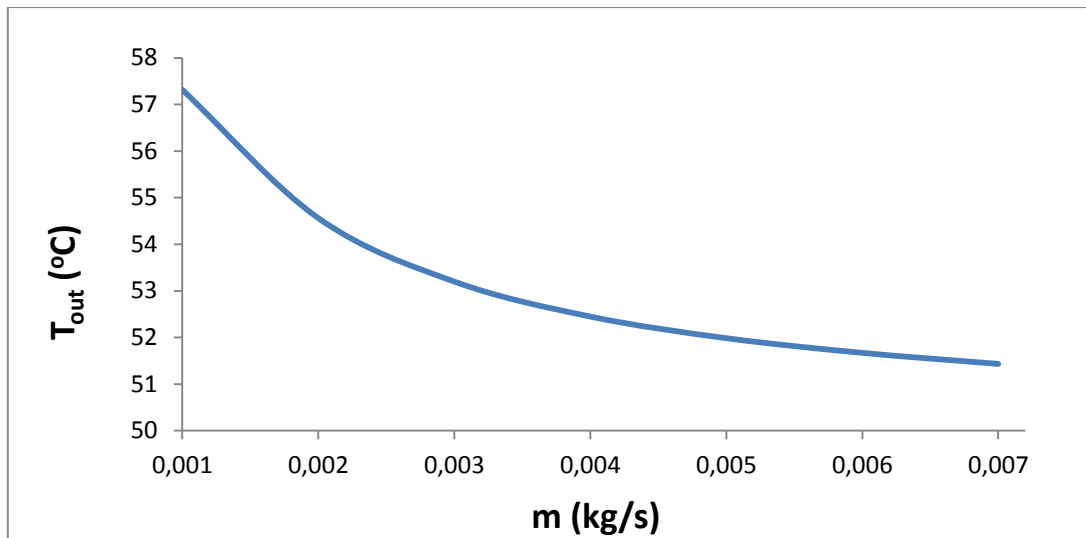
Συνολικά πραγματοποιήθηκαν επτά το πλήθος προσομοιώσεις για την παροχή μάζας. Τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8.2 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.8.2: Βαθμός απόδοσης, θερμοκρασία εξόδου κι ωφέλιμο φορτίο του συλλέκτη για τις διάφορες τιμές της παροχής μάζας

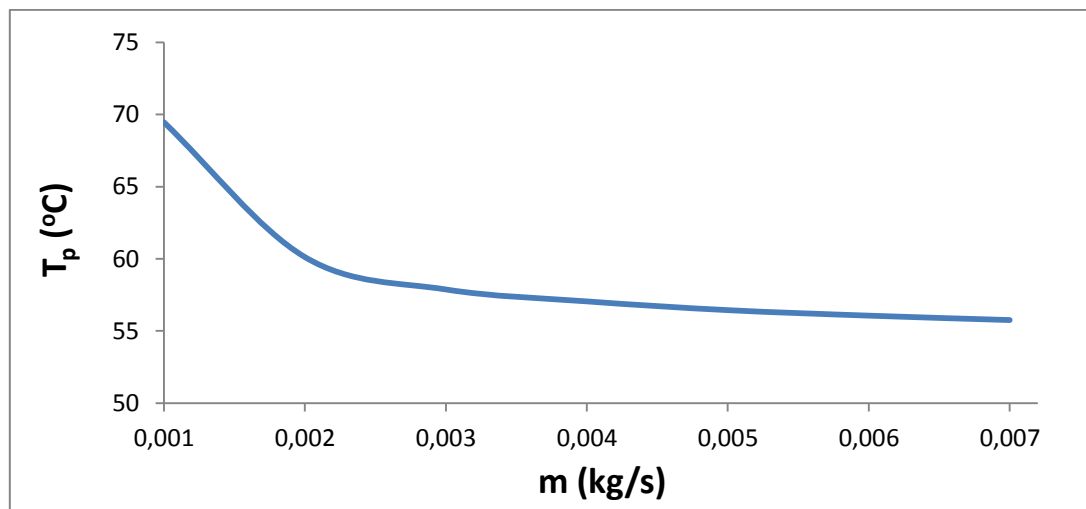
m (kg/s)	η	T_{out} (°C)	Q_u (W)
0.001	0.3065	57.31	30.65
0.002	0.3822	54.56	38.22
0.003	0.4021	53.20	40.21
0.004	0.4103	52.45	41.03
0.005	0.4159	51.99	41.59
0.006	0.4197	51.67	41.97
0.007	0.4202	51.43	42.02



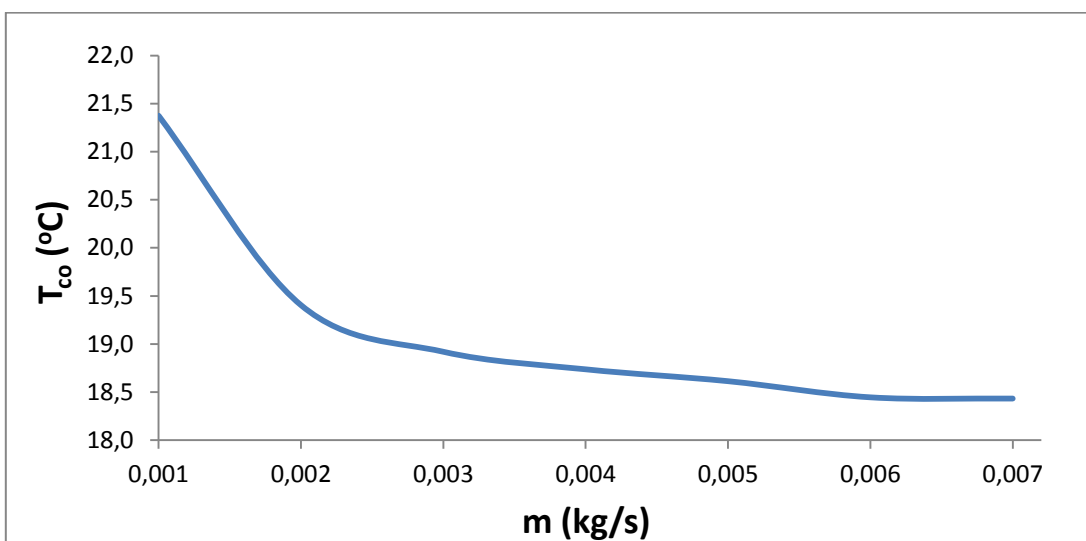
Διάγραμμα 5.8.1: Βαθμός απόδοσης και πτώση πίεσης του συλλέκτη για τις διάφορες τιμές της παροχής μάζας



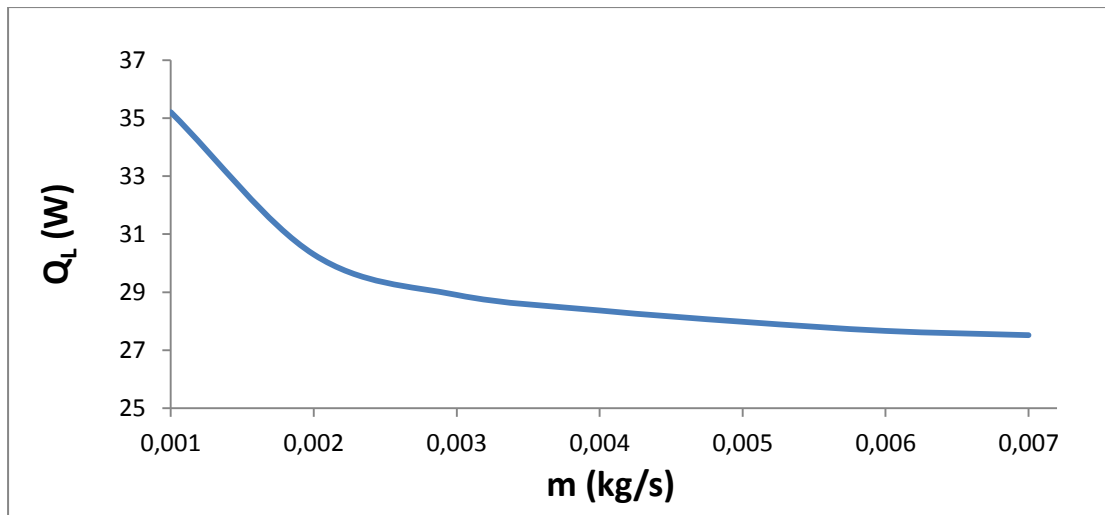
Διάγραμμα 5.8.2: Θερμοκρασία εξόδου συναρτήσει της παροχής μάζας



Διάγραμμα 5.8.3: Θερμοκρασία της πλάκας συναρτήσει της παροχής μάζας



Διάγραμμα 5.8.4: Θερμοκρασία του καλύμματος συναρτήσει της παροχής μάζας

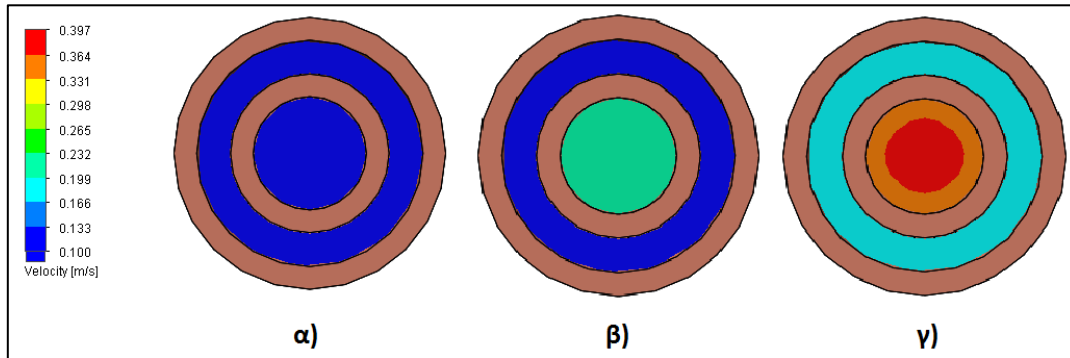


Διάγραμμα 5.8.5: Συνολικές θερμικές απώλειες συναρτήσει της παροχής μάζας

Αρχικά, παρατηρείται από τον Πίνακα 5.8.2 και το Διάγραμμα 5.8.2 πως με αύξηση της παροχής μάζας του ρευστού, μειώνεται η θερμοκρασιακή διαφορά του εντός του συλλέκτη, διατηρώντας τη θερμοκρασία εισόδου σταθερή στους 50°C. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η διαθέσιμη ενέργεια με τη μορφή θερμότητας στο συλλέκτη είναι συγκεκριμένη, λόγω της σταθερής τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε προσδίδοντας το ίδιο ποσό θερμότητας σε περισσότερη μάζα ρευστού θα οδηγήσει σε μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας του. Επιπλέον, πάλι από τον Πίνακα 5.8.2, διακρίνεται η αύξηση της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη, το οποίο σημαίνει πως η αύξηση της παροχής μάζας συμβάλλει στη μεταβολή της ωφέλιμης ισχύος περισσότερο από ότι συμβάλλει η μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς σε αυτήν. Ένας ακόμη παράγοντας στον οποίο οφείλεται η αύξηση της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη είναι η αύξηση του επιπέδου τύρβης της ροής συναρτήσει της παροχής μάζας, καθώς επιτυγχάνεται αύξηση της ταχύτητας του ρευστού, εφόσον η διατομή παραμένει σταθερή. Στο Σχήμα 5.8.1 αποτυπώνεται η εν λόγω αύξηση της ταχύτητας του νερού εντός της σωλήνωσης, για τρεις από τις συνολικά επτά εξεταζόμενες τιμές της παροχής μάζας.

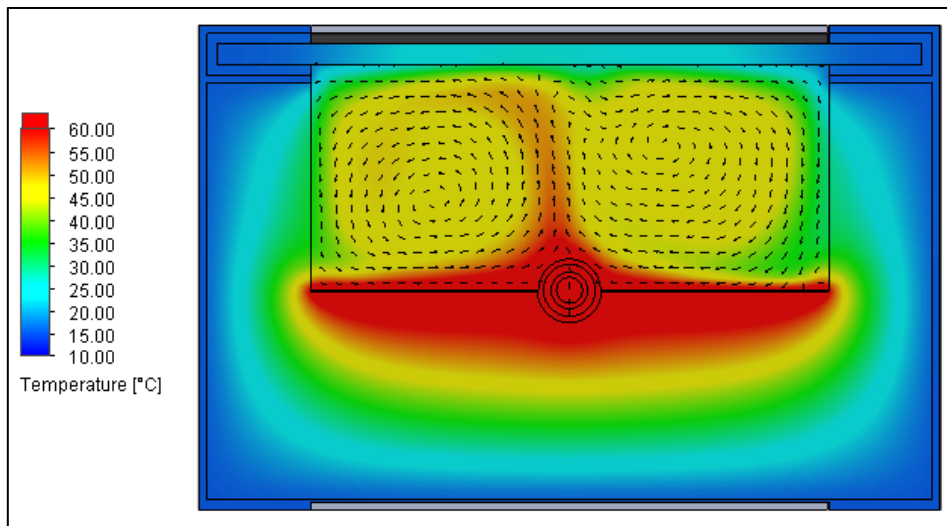
Επιπλέον, από το Διάγραμμα 5.8.1 συμπεραίνεται πως ο βαθμός απόδοσης κι η πτώση πίεσης αυξάνονται συναρτήσει της παροχής μάζας του συλλέκτη, με τον πρώτο να αυξάνει με μικρότερο ρυθμό από τη δεύτερη. Τονίζεται επίσης πως από ένα σημείο κι έπειτα ο βαθμός απόδοσης παραμένει περίπου σταθερός, επομένως ο συλλέκτης μπορεί να λειτουργήσει με κάποια από τις εν λόγω παροχές, με μικρές μεταβολές της τιμής του. Από το ίδιο διάγραμμα διακρίνεται ακόμη πως η παροχή που επιλέχθηκε στις προηγούμενες περιπτώσεις, 0.004 kg/s, έχει καλό βαθμό απόδοσης, βρισκόμενη στη σταθερή περίπου περιοχή, έχοντας ταυτόχρονα αρκετά μικρή πτώση πίεσης, συγκριτικά με τις υψηλότερες παροχές. Συνεπώς, η εν λόγω

παροχή εμφανίζει ικανοποιητική διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών, συνδυάζοντας υψηλό βαθμό απόδοσης και χαμηλή τιμή της πτώσης πίεσης.

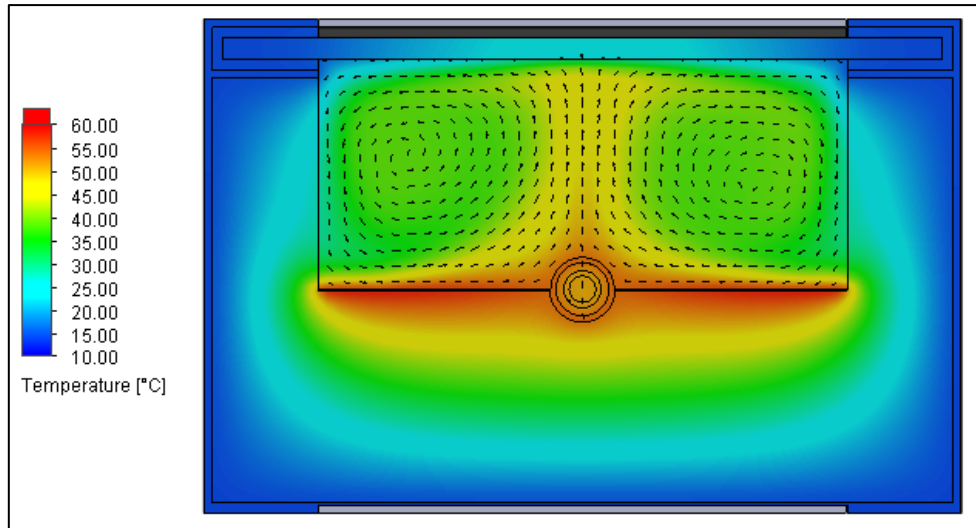


Σχήμα 5.8.1: Σύγκριση των ταχυτήτων του νερού εντός της σωλήνωσης για θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C για α) παροχή ίση με 0.001 kg/s , β) παροχή ίση με 0.004 kg/s και γ) παροχή ίση με 0.007 kg/s

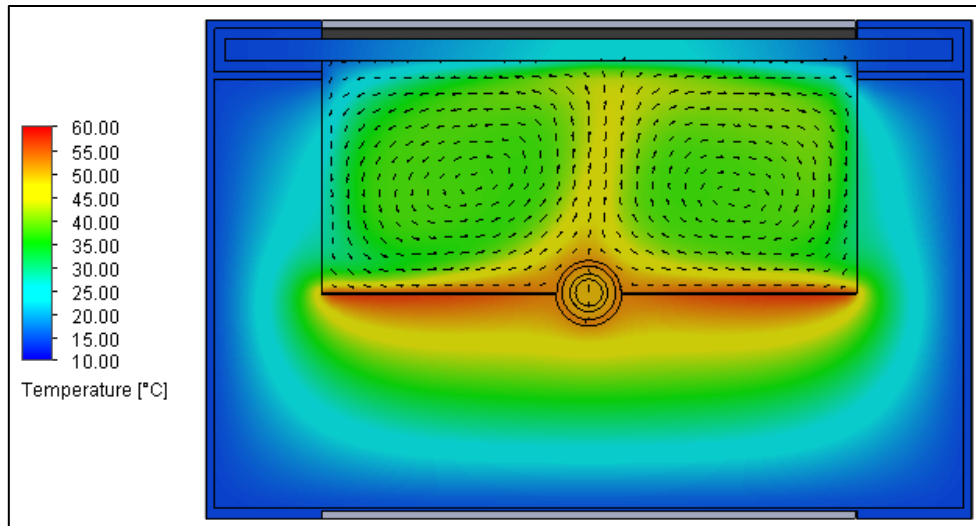
Τέλος, η μορφή των Διαγραμμάτων 5.8.3, 5.8.4 και 5.8.5 δικαιολογείται, καθώς, λόγω της αύξησης της παροχής, πέφτει όλο το θερμοκρασιακό επίπεδο του συλλέκτη, καθώς απορροφάται περισσότερη θερμότητα από το ρευστό κι άρα μειώνεται η θερμοκρασία της πλάκας, άρα μεταφέρεται μικρότερο ποσό θερμότητας από την πλάκα στο κάλυμμα μέσω του αέρα εντός του συλλέκτη, μειώνοντας την εξωτερική θερμοκρασία του καλύμματος κι έχοντας, ως αποτέλεσμα, τη μείωση των συνολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη προς το περιβάλλον, όπως διακρίνεται και στα Σχήματα 5.8.2, 5.8.3 και 5.8.4 που ακολουθούν.



Σχήμα 5.8.2: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για την παροχή μάζας του νερού ίση με 0.001 kg/s και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



Σχήμα 5.8.3: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για την παροχή μάζας του νερού ίση με 0.004 kg/s και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C



Σχήμα 5.8.4: Θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη για την παροχή μάζας του νερού ίση με 0.007 kg/s και τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ίση με 50°C

6 Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα της μελέτης

Σε όλη την έκταση της εργασίας, έγινε σχεδιασμός και προσομοίωση της λειτουργίας ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με ομοαξονικό σύστημα ροής με τη βοήθεια του λογισμικού SolidWorks. Εξετάστηκαν διάφορες παράμετροι λειτουργίας του συλλέκτη, για καθεμία από τις οποίες προέκυψαν διαφορετικά συμπεράσματα.

Εξετάζοντας τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες της σωλήνωσης, φάνηκε πως ο συλλέκτης (5,10) υπερέχει του (10,20) , καθώς η ροή εντός αυτού χαρακτηρίζεται από υψηλότερα επίπεδα τύρβης, γεγονός που οφείλεται στη μικρότερη διάμετρο και την κοινή παροχή μάζας των δύο συλλεκτών. Λόγω της υψηλής τύρβης, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας εντός της σωλήνωσης παρουσιάζεται πολύ βελτιωμένος συγκριτικά με το μεγαλύτερης διαμέτρου συλλέκτη, επομένως ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας από την πλάκα στο ρευστό, οδηγώντας σε ψηλότερη ωφέλιμη ισχύ και παράλληλα μειώνοντας τις θερμικές απώλειες του συλλέκτη. Αναλύθηκε, επίσης, η συμμετοχή των τριών τμημάτων της σωλήνωσης στη συνολική ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη. Διαπιστώθηκε πως στις χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ωφέλιμης ισχύος ανήκει στο δακτύλιο (annuli), ενώ καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου, ολοένα και μεγαλύτερο ποσοστό της ωφέλιμης ισχύος παράγεται στο διανομέα (tube), με το δακτύλιο να παρουσιάζει πτωτική τάση, ενώ η άκρη του εξωτερικού σωλήνα (cap) συμμετέχει με σταθερά μικρό ποσοστό, περίπου 0.7% έως 2%. Τέλος, συγκρίθηκε ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας των δύο γεωμετριών με αντίστοιχες θεωρητικές σχέσεις, οι οποίες προσέγγιζαν σχετικά καλά τις τιμές της προσομοίωσης στο διανομέα, ειδικά στο συλλέκτη (5,10), με σημαντική ωστόσο απόκλιση στο δακτύλιο των δύο συλλεκτών, καθώς το φαινόμενο διαφέρει από αυτό που περιγράφουν οι εξισώσεις.

Η ανάλυση όσον αφορά την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έδειξε ότι για μεγαλύτερες τιμές της, παρατηρείται μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά του νερού κι άρα ωφέλιμη ισχύ. Ωστόσο, στις υψηλές τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, σημειώνεται μεγαλύτερη θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης και, συνεπώς, μεγαλύτερες θερμικές απώλειες του συλλέκτη. Συνολικά, παρατηρείται αύξηση του βαθμού απόδοσης με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας, που σημαίνει πως η αύξηση της ωφέλιμης ισχύος συμμετέχει περισσότερο στη μεταβολή του βαθμού απόδοσης από ότι η αύξηση των θερμικών απωλειών σε αυτή.

Κατά τη μελέτη της λειτουργίας του συλλέκτη σε διάφορες γωνίες κλίσης, διαπιστώθηκε πως αύξηση της κλίσης του συλλέκτη οδηγεί σε ελαφρά αύξηση της

ωφέλιμης ισχύος και του βαθμού απόδοσής του, μειώνοντας τις θερμικές απώλειες. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από τον περιορισμό του φαινομένου της φυσικής συναγωγής του αέρα μεταξύ της θερμής πλάκας και του ψυχρού καλύμματος, καθώς η βαρύτητα παίζει ολοένα και μεγαλύτερο ρόλο στην κίνηση του αέρα όσο αυξάνεται η κλίση του συλλέκτη, δυσχεραίνοντας τη μεταφορά θερμότητας από την πλάκα στο κάλυμμα. Ως αποτέλεσμα, μειώνονται οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον, ενώ αυξάνεται η ωφέλιμη ισχύς, αφού η διαθέσιμη ενέργεια στο συλλέκτη είναι συγκεκριμένη κι εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Ως προς την τελευταία παράμετρο λειτουργίας, την παροχή μάζας, παρατηρήθηκε αύξηση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη και της ωφέλιμης ισχύος, ενώ μειώθηκαν η θερμοκρασιακή διαφορά του νερού κι οι θερμικές απώλειες. Η ωφέλιμη ισχύς αυξάνεται παρά τη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς, καθώς αυξάνεται η παροχή και με αυτήν τα επίπεδα τύρβης της ροής, που οδηγούν σε αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας εντός της σωλήνωσης, άρα καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας από την πλάκα απορρόφησης. Οι απώλειες μειώνονται καθώς μειώνεται όλο το θερμοκρασιακό πεδίο του συλλέκτη. Τέλος, συγκρίθηκε ο βαθμός απόδοσης που αντιστοιχεί σε κάθε παροχή με την πτώση πίεσης που προκαλείται εντός του συλλέκτη. Καθώς η πτώση πίεσης αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από το βαθμό απόδοσης, απαιτείται μία ενδιάμεση παροχή με σχετικά καλό βαθμό απόδοσης και σχετικά χαμηλή πτώση πίεσης, κατηγορία στην οποία εμπίπτει η αρχική παροχή που χρησιμοποιήθηκε, 0.004 kg/s.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Πέραν της συγκεκριμένης μελέτης, υπάρχουν ποικίλα πεδία μπορούν να εξεταστούν στο μέλλον όσον αφορά το συγκεκριμένο είδος του ηλιακού συλλέκτη. Μερικά από αυτά είναι:

- Η σύγκριση του επιπέδου ηλιακού συλλέκτη με ομοαξονικό σύστημα ροής σε σχέση με τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη με το κλασικό σύστημα ροής
- Πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων για τη διαπίστωση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων της λειτουργίας του συλλέκτη με ομοαξονικό σύστημα ροής στις εξεταζόμενες συνθήκες
- Η προσθήκη κατόπτρων για τη βελτίωση του οπτικού και θερμικού βαθμού απόδοσης του συλλέκτη με ομοαξονικό σύστημα ροής
- Η εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης σε συνδυασμό με την κλασική μόνωση υαλοβάμβακα για τον περιορισμό των θερμικών απωλειών του συλλέκτη

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ghosh, T. K., Prelas, M. A. (2009). *Energy Resources and Systems* (Τόμ. 1 : Fundamentals and Non-Renewable Resources). Columbia, USA: Springer.
- [2] Michaelides, E.E. (2012). *Alternative Energy Sources*. Springer.
- [3] World Energy Council. (2016). *World Energy Sources*.
<https://www.worldenergy.org/>, London EC3V 3NH, United Kingdom.
- [4] BP. (June 2015). *BP Statistical Review of World Energy*
- [5] Randers, J. (2012). *2052-A Global Forecast for the Next Forty Years*. Cambridge.
- [6] *International Energy Agency*. (2017, April 17). Ανάκτηση από Statistics: Key electricity trends 2016:
<https://www.iea.org/newsroom/news/2017/april/statistics-key-electricity-trends-2016.html>
- [7] *World Nuclear Association*. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.world-nuclear.org/>
- [8] Forbes, A. (2015, May 19). *Hydropower's big splash – Word Energy Council projects decades of strong growth*. Ανάκτηση από Energy Post: <http://energypost.eu/hydropowers-big-splash-word-energy-council-projects-decades-strong-growth/>
- [9] *Clean Technica*. (n.d.). Ανάκτηση από <https://cleantechnica.com/>
- [10] Jordan, R. &. (2013, October). Development of e-learning modules for teaching energy for sustainable world. *17th International Symposium on Power Electronics*.
- [11] Matasci, S. (2017, June 9). *How Much Do Solar Panels Cost in the U.S. in 2017?* Ανάκτηση από Energy Sage: <http://news.energysage.com/how-much-does-the-average-solar-panel-installation-cost-in-the-u-s/>
- [12] Kukreja, R. (n.d.). *Solar Energy Pros and Cons*. Ανάκτηση από Conserve Energy Future: <http://www.conserve-energy-future.com/pros-and-cons-of-solar-energy.php>
- [13] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (n.d.). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Second εκδ.). Wiley Interscience.
- [14] Αντωνόπουλος, Κ. Α. (2015). *Θερμικά - Ηλιακά Συστήματα* (Τόμ. 1ο). Αθήνα
- [15] *Reynolds Number*. (n.d.). Ανάκτηση από Engineering Toolbox: http://www.engineeringtoolbox.com/reynolds-number-d_237.html

- [16] Udris, A. (2016, 01 28). *How Turbulent Is The Airflow Over Your Wings?* Ανάκτηση από Bold Method.
- [17] *CAE Glossary*. (2017). Ανάκτηση από Cradle MSC Software Company: <http://www.cradle-cfd.com/glossary/detail/0000000034?c=en>
- [18] Bengtson, H. (2013, 08 05). *Calculation of Forced Convection Heat Transfer Coefficients.*) Ανάκτηση από Bright Hub Engineering: <http://www.brighthubengineering.com/hvac/91056-calculation-of-forced-convection-heat-transfer-coefficients/>
- [19] Price, R. (2003, 04 02). Ανάκτηση από Correlations for Heat Transfer Coefficients: <http://facstaff.cbu.edu/rprice/lectures/htcoeff.html>
- [20] Gnielinski, V. (1975). *Neue Gleichungen für den Wärme- und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen*. Forsch. Ing.-Wes.
- [21] Incropera, F., & DeWitt, D. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th εκδ.). Hoboken: Wiley.
- [22] Korres, D., & Tzivanidis, C. (2016, JUNE 19-23). Thermal analysis of an entire flat plate collector with a serpentine flow system and determination of the water and air flow and convection regime. *Proceedings of ECOS 2016 - The 29th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and enviromental impact of energy systems*.
- [23] *The different types of solar thermal panel collectors*. (n.d.). Ανάκτηση από The Renewable Energy Hub: <https://www.renewableenergyhub.co.uk/solar-thermal-information/the-different-types-of-solar-thermal-panel-collectors.html>
- [24] *Solar hot water collectors*. (2017). Ανάκτηση από Green Spec - Green Building Design, Products and Materials in the UK: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/solar-collectors/>
- [25] Hossain, M., Saidur, R., Fayaz, H., Rahimb, N., Islama, M., Ahamed, J., και συν. (2011, June 24). Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [26] Taoufik, B., Foued, M., & Abdelmajid, J. (2013, May 31). Parametric Study of a Flat Plate Wick Assisted Heat Pipe Solar Collector. *Journal of Solar Energy Engineering*.
- [27] *Mechanical Engineering - A Complete Online Guide For Every Mechanical Engineer*. (n.d.). Ανάκτηση από Flat Plate Collectors | Flat Plate Heat Exchanger | Solar Thermal Collectors:

- <http://www.mechanicalengineeringblog.com/4329-flat-plate-collectors-flat-plate-heat-exchanger-solar-thermal-collectors/>
- [28] Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems* (Second εκδ.). Elsevier.
- [29] Rabl, A. (1985). *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York, Oxford.
- [30] *Flat Plate Collectors*. (n.d.). Ανάκτηση από Power From The Sun: <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter06/chapter06.html>
- [31] Bellos, E., Tzivanidis, C., Korres, D., & Antonopoulos, K. (2015, JUNE 30-JULY 3). Thermal analysis of a flat plate collector with Solidworks and determination of convection heat coefficient between water and absorber. *Proceedings of ECOS 2015 - The 28th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and enviromental impact of energy systems*.
- [32] Korres, D., & Tzivanidis, C. (2016, June 19-23). Optical and thermal analysis of a new U-type Evacuated Tube Collector with a Mini-Compound Parabolic Concentrator and a cylindrical absorber. *Proceedings of ECOS 2016 - The 29th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and enviromental impact of energy systems*.
- [33] Korres, D., & Tzivanidis, C. (2017, May 14-17). Investigation of a coaxial flow evacuated tube collector with a mini-compound parabolic concentrator. *9th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEEES-9)*.
- [34] Korres, D., Tzivanidis, C., Alexopoulos, J., & Mitsopoulos, G. (2016, July 6-9). Thermal and optical investigation of a U-type evacuated tube collector with a mini-compound parabolic concentrator and a flat absorber. *7th International Conference from "Scientific Computing to Computational Engineering"*.
- [35] Dassault Systemes. (n.d.). *Tutorial Flow Simulation 2014*.

Παράρτημα Α: Πίνακας ιδιοτήτων του νερού

T(°C)	ρ (kg/m³)	μ ($\cdot 10^{-3}$ Pa·s)	C_p (J/kgK)	k (W/mK)
0	999.79	1.791	4219.9	0.561
5	999.92	1.518	4205.4	0.571
10	999.65	1.306	4195.5	0.580
15	999.05	1.137	4188.8	0.589
20	998.16	1.001	4184.4	0.598
25	997	0.890	4181.6	0.607
30	995.6	0.797	4180.1	0.615
35	993.99	0.719	4179.5	0.623
40	992.17	0.653	4179.6	0.631
45	990.17	0.596	4180.4	0.637
50	987.99	0.547	4181.6	0.644
55	985.65	0.504	4183.2	0.649
60	983.16	0.466	4185.1	0.654
65	980.51	0.433	4187.5	0.659
70	977.73	0.404	4190.2	0.663
75	974.81	0.378	4193.3	0.667
80	971.76	0.354	4196.9	0.670