



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ενεργειακή και εξεργειακή μελέτη παραβολικού ηλιακού
συλλέκτη με αέρια εργαζόμενα μέσα»

Επιμέλεια: Δανιήλ Ηλίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Τζιβανίδης Χρήστος

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Τζιβανίδη, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ και να εργαστώ πάνω σε αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα.

Ακόμη θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχές στον υποψήφιο διδάκτορα του τομέα Θερμότητας κ. Ευάγγελο Μπέλλο για την καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές του, που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου για τη συνεχή τους στήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Συμβολισμοί.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	4
1.1: Ήλιος.....	4
1.2: Ηλιακή σταθερά	4
1.3: Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας	5
1.4: Φασματική κατανομή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας.....	6
1.5: Ορισμοί βασικών μεγεθών	6
1.6: Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ.....	11
2.1: Γενικά.....	11
2.1.1: Βασικά χαρακτηριστικά συγκεντρωτικών συλλεκτών.....	12
2.1.2: Είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών	13
2.2: Ηλιακός πύργος.....	13
2.3: Γραμμικός συλλέκτης Fresnel.....	16
2.4: Παραβολικό ηλιακό πιάτο.....	18
2.5: Συλλέκτης τύπου CPC	20
2.6: Συλλέκτης με παραβολικό συγκεντρωτή	22
2.6.1: Βασική αρχή λειτουργίας	22
2.6.2: Ιστορία και εξέλιξη.....	23
2.6.3: Εφαρμογές συλλεκτών PTC.....	29
2.6.4: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.....	36
2.6.5: Νέα εργαζόμενα μέσα	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ.....	38
3.1: Εισαγωγή.....	38
3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συλλέκτη	38
3.3: Έναρξη προγράμματος.....	39
3.4: Σχεδίαση παραβολικού συγκεντρωτή σε δύο διαστάσεις.....	41
3.5: Σχεδίαση απορροφητή και σωλήνα κενού σε δύο διαστάσεις.....	45
3.6: Σχεδίαση συλλέκτη στις τρεις διαστάσεις	47
3.7: Όψεις του συγκεντρωτικού παραβολικού συλλέκτη	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ..	51
4.1: Εισαγωγή.....	51
4.2: Ιδιότητες συνιστωσών συλλέκτη	51

4.3: Βασικές εξισώσεις.....	52
4.4: Θερμοδυναμικές ιδιότητες αερίων	54
4.5: Δεδομένα για την προσομοίωση	58
4.6: Ζητούμενα μεγέθη προσομοίωσης.....	58
4.7: Περιγραφή προσομοίωσης	59
4.7.1: Τοποθέτηση ταπών στον απορροφητή	59
4.7.2: Δημιουργία αρχείου προσομοίωσης.....	60
4.7.3: Ορισμός υλικών.....	66
4.7.4: Ορισμός επιφανειών ακτινοβολίας.....	66
4.7.5: Ορισμός υπολογιστικού πλέγματος.....	70
4.7.6: Ορισμός οριακών συνθηκών	71
4.7.7: Ορισμός στόχων	73
4.7.8: Παραμετρική μελέτη	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΕΡΙΩΝ.....	82
5.1: Εισαγωγή.....	82
5.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης αέρα	82
5.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης ηλίου	88
5.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης διοξειδίου του άνθρακα	93
5.5: Σύγκριση αερίων	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΛΛΑΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ	102
6.1: Εισαγωγή.....	102
6.2: Σχεδιασμός πτερυγίων	102
6.2.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	102
6.2.2: Σχεδιασμός στις δύο διαστάσεις.....	103
6.2.3: Σχεδιασμός στις τρεις διαστάσεις.....	106
6.3: Προσομοίωση.....	109
6.4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	109
6.4.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης αέρα	109
6.4.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης ηλίου	115
6.4.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης διοξειδίου του άνθρακα	121
6.4.4: Σύγκριση αερίων	127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	132
Βιβλιογραφία	135

Περίληψη

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η προσομοίωση ενός συγκεντρωτικού παραβολικού ηλιακού συλλέκτη με αέρια εργαζόμενα μέσα. Ο σχεδιασμός και η προσομοίωση πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Solidworks. Τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα είναι ο αέρας, το ήλιο και το διοξείδιο του άνθρακα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμη δίνονται οι ορισμοί βασικών μεγεθών και αναφέρονται τρόποι μέτρησής της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αρχικά αναφέρονται ορισμένες διαφορές ανάμεσα στους μη-συγκεντρωτικούς (επίπεδοι) και τους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συνηθέστερες τεχνολογίες συγκεντρωτικών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται, όπως είναι ο ηλιακός πύργος, ο γραμμικός συλλέκτης Fresnel, το παραβολικό ηλιακό πιάτο και ο συλλέκτης CPC. Ακολούθως δίνονται βασικά στοιχεία των συγκεντρωτικών παραβολικών συλλεκτών (PTC), που μας ενδιαφέρουν στην παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, μετά από μία σύντομη ιστορική αναδρομή, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των συλλεκτών LUTZ και Eurotrough, οι οποίοι αποτελούν 'σταθμό' στην ανάπτυξη και την εξέλιξη των συλλεκτών PTC. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στις κυριότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται οι συγκεντρωτικοί παραβολικοί συλλέκτες.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αρχικά δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά (γεωμετρικά και οπτικά) του υπό μελέτη συλλέκτη. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου σχεδίασής του στο Solidworks. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο τρόπος απόδοσης των συνιστωσών του συλλέκτη στις δύο και στις τρεις διαστάσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αρχικά δίνονται ορισμένα κύρια χαρακτηριστικά του συλλέκτη, που χρειάζονται για την προσομοίωση και αναφέρονται οι βασικές εξισώσεις για τον προσδιορισμό των διαφόρων μεγεθών. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος δημιουργίας και διαμόρφωσης της προσομοίωσης στο Solidworks. Πιο συγκεκριμένα, για καθένα από τα τρία εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τέσσερις διαφορετικές παροχές μάζας, επιλεγμένες με στόχο την καλύτερη εξεργειακή απόδοση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Δίνονται διάφορα διαγράμματα για καθένα από τα αέρια (θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης, θερμικές απώλειες, πτώση πίεσης, θερμοκρασία απορροφητή και σωλήνα κενού, συντελεστής συναγωγής). Στο τέλος για την παροχή που παρουσιάζει τη βέλτιστη εξεργειακή απόδοση, γίνεται σύγκριση μεταξύ των αερίων.

Στο έκτο κεφάλαιο εξετάζεται η βελτίωση της απόδοσης του συλλέκτη με την εισαγωγή πτερυγίων στο εσωτερικό του απορροφητή. Έτσι, αρχικά περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού των πτερυγίων στο συλλέκτη. Η διαδικασία διαμόρφωσης των προσομοιώσεων είναι παρόμοια με αυτή που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4. Συνολικά εξετάζονται τρεις διαμορφώσεις πτερυγίων. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και γίνεται σύγκριση.

Στο έβδομο κεφάλαιο της εργασίας περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Abstract

The main object of this diploma thesis is the design and simulation of a parabolic trough collector operating with gas working fluids. Specifically, the examined gases are: air, helium and carbon dioxide. The design of the collector and the simulations are accomplished using the software Solidworks.

In the first chapter, the main characteristics of solar energy are described. Also, there are mentioned methods that are used in order to measure solar energy.

The second chapter is related to concentrating collectors. Initially, the main differences between non-concentrating (flat plate) and concentrating solar collectors are presented. Subsequently, the main types of concentrating collectors technology that are used nowadays, such as power tower, linear Fresnel collector, parabolic dish collector and compound parabolic collector (CPC) are mentioned. After that, the characteristics of parabolic trough collector (PTC), which is the main object of this thesis, are presented. More specifically, after a short historical flashback, the two most significant PTC models, which are LUZ and Eurotrough, are described. In the end of the chapter, the basic applications of parabolic trough collectors are given.

In the third chapter, firstly the basic geometrical and optical characteristics of the PTC model are presented. Subsequently, the design of the collector using Solidworks in two and three dimensions is described.

In the fourth chapter, some characteristics of the collector that are needed for the simulations and the basic equations from solar energy and heat transfer are mentioned. Subsequently, the configuration of the simulation case in Solidworks is extensively described. For each gas, there were carried out simulations for four different mass flows and temperature levels which are chosen in order to optimize the exergetic efficiency.

In the fifth chapter, the results of simulations are presented. Especially, for every examined gas, various charts are included (thermal and exergetic efficiency, thermal losses, pressure drop, absorber and glass cover temperature, heat transfer coefficient). In the end, there is a comparison between the three gases for the optimum mass flow (which optimizes the exergetic efficiency).

In the sixth chapter, the enhancement of collectors efficiency by using fins in the absorber is examined. Firstly, the design of the fins using Solidworks is described. Especially, three different fin configurations are examined. In the end of the chapter, the results of the simulations are presented.

Finally in the seventh chapter, the conclusions from the design and the simulations of the collector are mentioned.

Συμβολισμοί

A	Επιφάνεια, m ²	ΔP	Πτώση πίεσης, kPa
L	Μήκος συλλέκτη, m	η	Βαθμός απόδοσης
W	Άνοιγμα παραβολής, m	ΔS	Αύξηση εντροπίας, J/kg/K
f	Εστιακή απόσταση, m	ρ	Πυκνότητα, kg/m ³
D	Διάμετρος, m	μ	Δυναμική συνεκτικότητα, Pa·s
C	Λόγος συγκέντρωσης		
Q	Θερμική ισχύς, W		
G	Στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία, W/m ²		
T	Θερμοκρασία, °C		
T _{sun}	Θερμοκρασία ήλιου, K		
h	Συντελεστής συναγωγής, W/m ² /K		
U _L	Συντελεστής θερμικών απωλειών, W/m ² /K		
E	Εξεργειακή ισχύς, W		
ḡ	Παροχή μάζας, kg/s		
Nu _m	Μέσος αριθμός Nusselt		
Re	Αριθμός Reynolds		
Pr	Αριθμός Prandtl		
R	Σταθερά αερίου, J/kg/K		
c _p	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, J/kg/K		
k	Θερμική αγωγιμότητα, W/m/K		
h _f	Ύψος πτερυγίου, mm		
t _f	Πάχος πτερυγίου, mm		
	Ελληνικά σύμβολα		
ε	Συντελεστής εκπομπής		
α	Συντελεστής απορρόφησης		
σ	Σταθερά Stefan-Boltzmann, 5.67·10 ⁻⁸ W/m ² /K ⁴		
τ	Διαπερατότητα		
			Δείκτες
		a	άνοιγμα (aperture)
		ri	εσωτερικά του απορροφητή (inner receiver)
		ro	εξωτερικά του απορροφητή (outer receiver)
		ci	εσωτερικά του καλύμματος (inner cover)
		co	εξωτερικά του καλύμματος (outer cover)
		r	απορροφητής (receiver)
		c	κάλυμμα (cover)
		u	ωφέλιμη (useful)
		loss	απώλειες (losses)
		b	άμεση (beam)
		th	θερμικός (thermal)
		amb	περιβάλλον (ambient)
		in	είσοδος (inlet)
		out	έξοδος (outlet)
		fm	μέση ρευστού (mean fluid)
		ca	κάλυμμα – περιβάλλον (cover-ambient)
		ex	εξεργειακός (exergetic)
		h	υδραυλική (hydraulic)
		opt	βέλτιστη (optimum)
		f	πτερόγιο (fin)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

1.1: Ήλιος

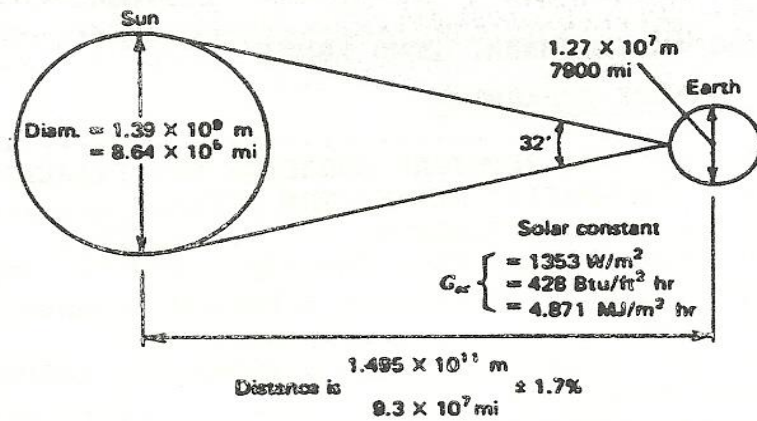
Ο ήλιος είναι μία σφαίρα από καυτή αέρια ύλη με διάμετρο 1.39×10^9 m και μέση απόσταση από τη γη 1.5×10^{11} m. Όπως παρατηρείται από τη γη, ο ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του μία φορά κάθε τέσσερις εβδομάδες. Ωστόσο, δεν περιστρέφεται ως ένα συμπαγές σώμα, αφού η περιστροφή του ισημερινού διαρκεί περίπου 27 μέρες, ενώ η περιστροφή των περιοχών στους πόλους διαρκεί περίπου 30 μέρες. Ο ήλιος έχει ενεργή θερμοκρασία μέλανος σώματος 5777 K. Η θερμοκρασία στις κεντρικές εσωτερικές περιοχές του εκτιμάται από 8×10^6 έως 40×10^6 K και η πυκνότητα εκτιμάται ότι είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα του νερού.

Ο ήλιος είναι ένας αντιδραστήρας σύντηξης όπου η ενέργεια που ακτινοβολείται προέρχεται από διάφορες αντιδράσεις σύντηξης. Η αντίδραση που θεωρείται πιο σημαντική είναι αυτή στην οποία υδρογόνο (δηλαδή τέσσερα πρωτόνια) συντήκεται και σχηματίζεται ήλιο (He). Η μάζα του σχηματιζόμενου ηλίου (He) είναι μικρότερη από αυτή των τεσσάρων πρωτονίων και επομένως η μάζα που χάνεται κατά την αντίδραση μετατρέπεται σε ενέργεια. Η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό του ήλιου σε θερμοκρασίες της τάξης των εκατομμυρίων °C, μεταφέρεται στην επιφάνειά του και στη συνέχεια ακτινοβολείται στο διάστημα. Η ακτινοβολία στον πυρήνα του ήλιου είναι στο φάσμα των ακτίνων x και γ, με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας να αυξάνεται όσο η θερμοκρασία μειώνεται σε μεγαλύτερες ακτινικές αποστάσεις. [2]

1.2: Ηλιακή σταθερά

Η τροχιά της γης περί τον ήλιο είναι τέτοια έτσι ώστε η απόσταση ανάμεσα στη γη και στον ήλιο να μεταβάλλεται κατά $\pm 1.7\%$. Η ηλιακή σταθερά G_{sc} είναι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφάνειας που είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, όταν η απόσταση γης-ήλιου λαμβάνει τη μέση τιμή της.

Οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό της ηλιακής σταθεράς πριν την ανάπτυξη των πυραύλων και άλλων διαστημικών σκαφών, γίνονταν από τη γη. Μία αρχική εκτίμηση έγινε από τον C. G. Abbot και τους συνεργάτες του (1322 W/m^2). Το 1954 η προηγούμενη εκτίμηση αναθεωρήθηκε από τον Johnson στα 1395 W/m^2 . Τα επόμενα χρόνια η διαθεσιμότητα σκαφών, που μπορούσαν να πετάξουν σε μεγάλα ύψη, έδωσε τη δυνατότητα στους ερευνητές να πραγματοποιήσουν μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας σχεδόν εκτός της ατμόσφαιρας. Έτσι μετά από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από εννιά διαφορετικά ερευνητικά προγράμματα, κατέληξαν στην τιμή 1353 W/m^2 . Αυτή η τιμή της ηλιακής σταθεράς έγινε αποδεκτή από τη NASA και την ASTM (American Society of Testing and Materials). [1,2]



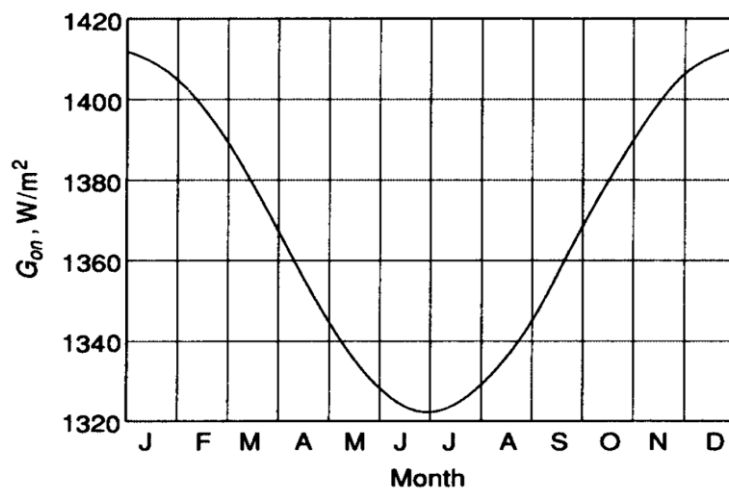
Σχήμα 1.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γης – ήλιου [1]

1.3: Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας

Η μεταβολή της απόστασης γης – ήλιου προκαλεί μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά $\pm 3\%$. [1] Η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας κάθετο στις ακτίνες, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

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

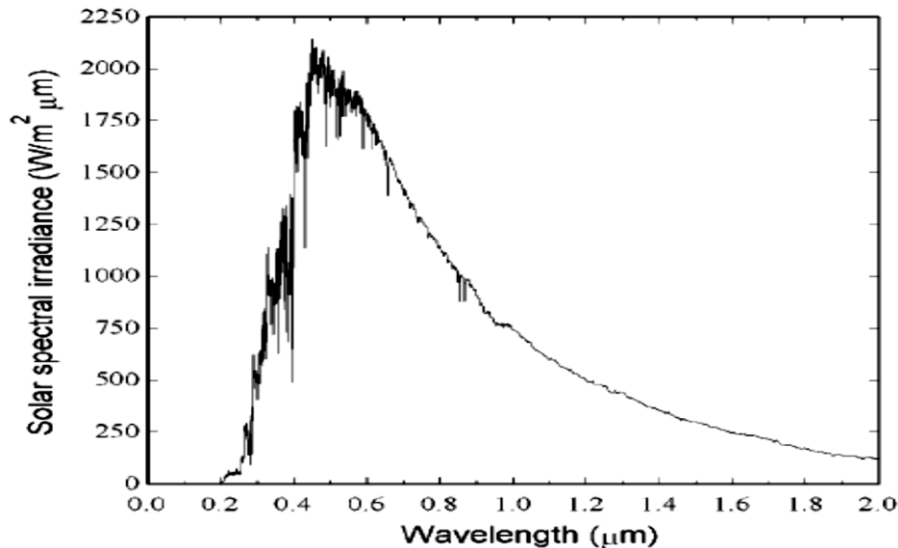
Όπου n είναι η ημέρα του έτους ($1 \div 365$). Η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.2: Μεταβολή της ακτινοβολίας καθέτου επιπέδου εκτός ατμόσφαιρας [2]

1.4: Φασματική κατανομή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας

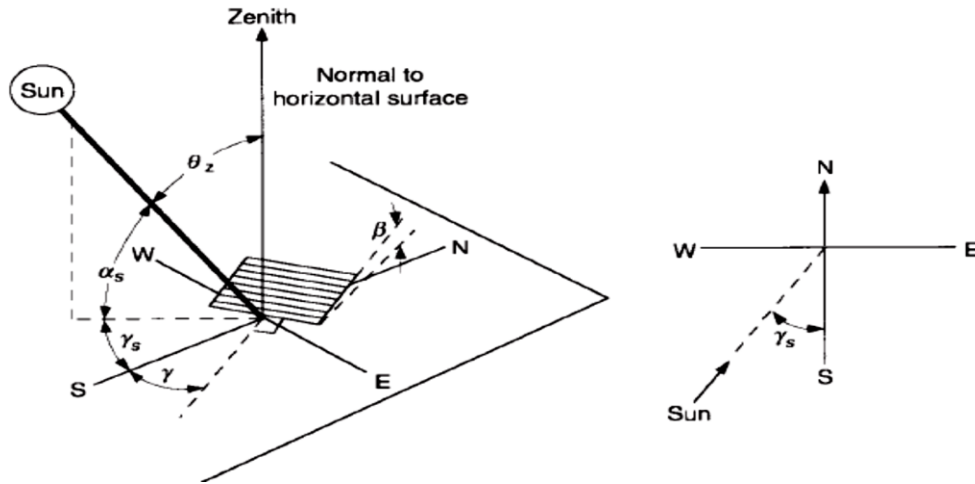
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά τη μέση απόσταση γης-ήλιου:



Σχήμα 1.3: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας [2]

1.5: Ορισμοί βασικών μεγεθών

- **Γωνία ζενίθ (θ_z):** Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου.
- **Ηλιακό ύψος ($\alpha_s = 90^\circ - \theta_z$):** Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ήλιου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.
- **Αζιμούθιο επιφανείας (γ):** Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση.
- **Αζιμούθιο ήλιου (γ_s):** Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της ευθείας όρασης του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.
- **Κλίση επιπέδου (β):** Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ μιας επιπέδου επιφανείας με το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 1.4: Γωνία ζενιθ θ_z , Ηλιακό ύψος α_s , Αζιμούθιο επιφανείας γ , Αζιμούθιο ήλιου γ_s , Κλίση επιπέδου β [2]

- Ηλιακός χρόνος:** Είναι ο χρόνος που μετριέται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό. Ως ηλιακό μεσημέρι θεωρείται η στιγμή που ο ήλιος τέμνει το μεσημβρινό του παρατηρητή. Ο ηλιακός χρόνος, που χρησιμοποιείται στους διάφορους υπολογισμούς, δε συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο που δείχνει το ρολόι. Γι' αυτό πρέπει να γίνεται μετατροπή του τοπικού χρόνου σε ηλιακό, λαμβάνοντας υπόψη δύο διορθώσεις. Η πρώτη διόρθωση σχετίζεται με τη διαφορά μεταξύ του γεωγραφικού μήκους που βρίσκεται ο παρατηρητής και του γεωγραφικού μήκους του μεσημβρινού, στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος. Η δεύτερη διόρθωση σχετίζεται με την εξίσωση του χρόνου, η οποία λαμβάνει υπόψη τις διαταραχές του ρυθμού περιστροφής της γης που επηρεάζουν το χρόνο που διασχίζει ο ήλιος το μεσημβρινό του παρατηρητή. Παρακάτω δίνεται η σχέση μετατροπής του τοπικού χρόνου σε ηλιακό.

$$\text{ηλιακός χρόνος} = \text{τοπικός χρόνος} \pm 4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (1.2)$$

Όπου:

L_{st} : Το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού που βασίζεται ο τοπικός χρόνος.

L_{loc} : Το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή.

E: Η εξίσωση του χρόνου:

$$E(\text{min}) = 9.87 \cdot \sin 2B - 7.53 \cdot \cos B - 1.5 \cdot \sin B \quad (1.3)$$

$$B = 360 \cdot \frac{n-81}{365}, \quad n = 1 \div 365 \text{ η ημέρα του έτους} \quad (1.4)$$

- Ωριαία γωνία (ω):** Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό $0.25^\circ/\text{min}$.

$$\omega = 0.25 \cdot (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι (12:00)}) \quad (1.5)$$

Ισχύει $\omega > 0$ για μ.μ και $\omega < 0$ για π.μ.

- **Ηλιακή απόκλιση (δ):** Είναι η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει $-23.45^\circ < \delta < 23.45^\circ$, με θετικές τιμές προς το βορρά. Η ηλιακή απόκλιση υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360 \cdot (284 + n)}{265} \right] \quad (1.6)$$

Όπου $n = 1 \div 365$, η ημέρα του έτους.

- **Γωνία πρόσπτωσης (θ):** Είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτινών και της καθέτου πάνω σε μια επιφάνεια. Υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

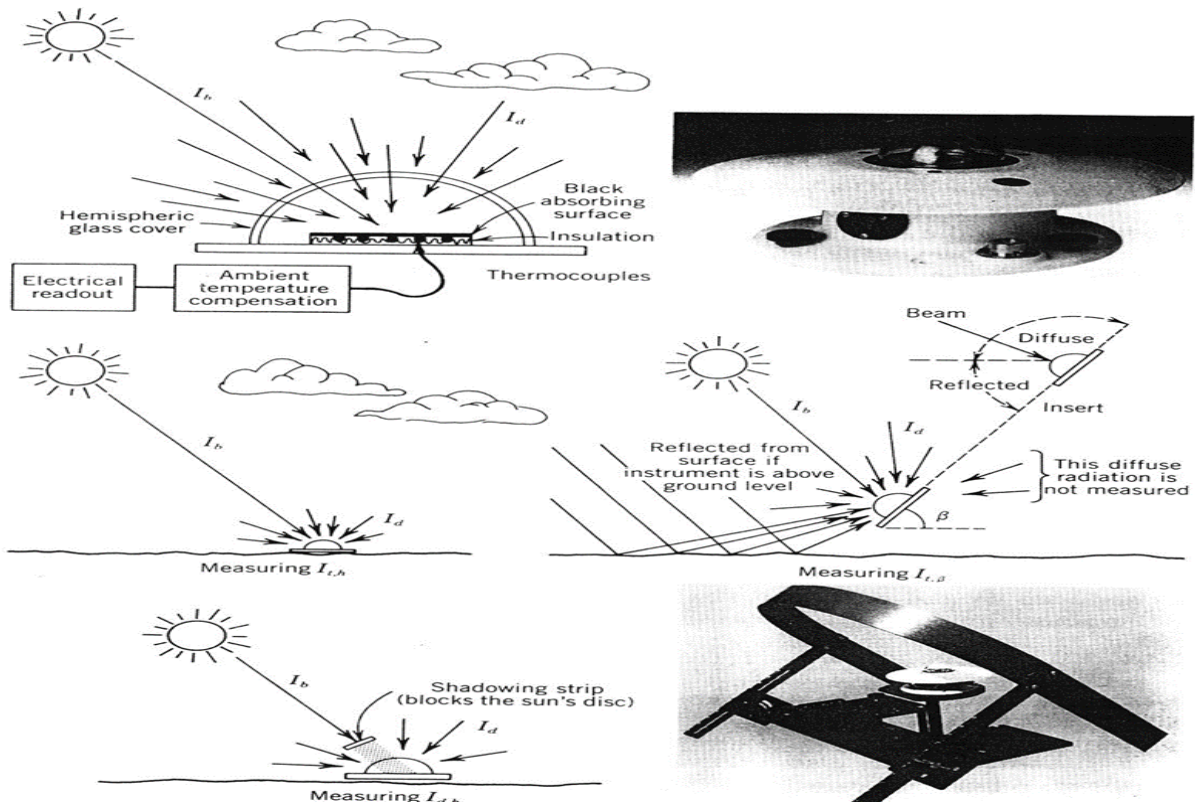
$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega \\ & + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \end{aligned} \quad (1.7)$$

- **Άμεση ακτινοβολία:** Είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη κατ' ευθείαν, χωρίς να διασκορπίζεται στην ατμόσφαιρα. Ο συμβολισμός γίνεται με το δείκτη b . Η στιγμιαία τιμή που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο [σε W/m^2] συμβολίζεται με G_b ενώ για κεκλιμένο επίπεδο ο συμβολισμός είναι G_{bT} . Για διάστημα μιας ημέρας ή ώρας, η άμεσος ακτινοβολία [σε J/m^2] συμβολίζεται με H_b και I_b αντίστοιχα για οριζόντιο επίπεδο και H_{bT} και I_{bT} για κεκλιμένο.
- **Διάχυτη ακτινοβολία:** Είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη μετά από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή της στη γήινη ατμόσφαιρα. Ο συμβολισμός της είναι αντίστοιχος με αυτόν της άμεσης, με χρήση του δείκτη d αντί για b .
- **Ολική ακτινοβολία:** Είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες. Ο συμβολισμός της γίνεται χωρίς δείκτη (G, H, I, G_T, H_T, I_T). [1,2]

1.6: Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας

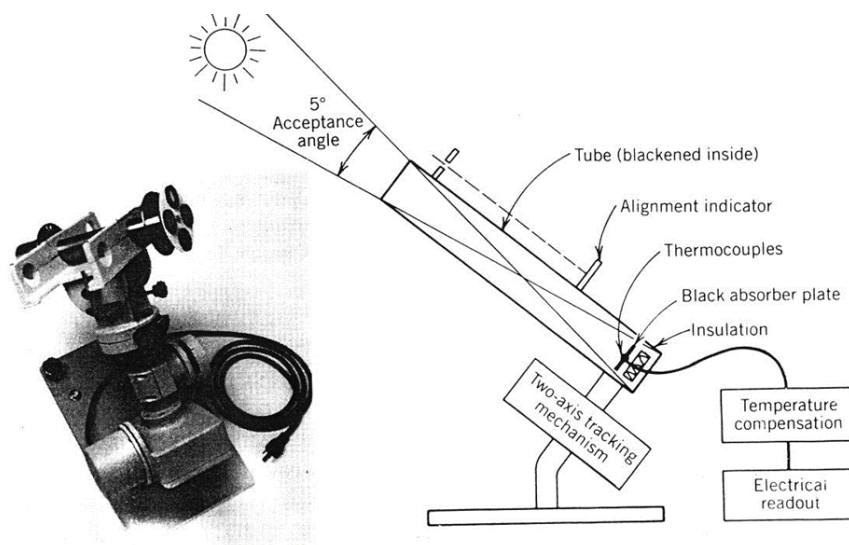
Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται με δύο βασικά όργανα, τα πυρανόμετρα και τα πυρηλιόμετρα.

Πυρανόμετρο: Είναι το κύριο όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας (άμεση και διάχυτη). Η πιο συνηθισμένη σχεδίαση πυρανόμετρου αποτελείται από μία θερμοστήλη (πολλά θερμοστοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά), προσαρμοσμένη σε μία λεπτή σκούρα απορροφητική επιφάνεια. Γύρω από αυτή την επιφάνεια υπάρχει ένα ημισφαιρικό γυάλινο κάλυμμα για να προστατεύει το πυρανόμετρο. Ακόμη το όργανο είναι κατάλληλα μονωμένο για να εμποδίζονται οι απώλειες λόγω αγωγής και συναγωγής. Όταν το πυρανόμετρο είναι σε λειτουργία, η σκούρα επιφάνεια αναπτύσσει θερμοκρασία ανάλογη με το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτή. Τα θερμοστοιχεία του πυρανόμετρου, ανάλογα με τη θερμοκρασία της επιφάνειας παράγουν τάση, η οποία μετρείται με ποτενσιόμετρο και με κατάλληλη βαθμονόμηση το όργανο δείχνει την τιμή της προσπίπτουσας ολικής ακτινοβολίας. Για την πραγματοποίηση μέτρησης της ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου, τοποθετείται με οριζόντιο προσανατολισμό σε κατάλληλη θέση έτσι ώστε να αποφεύγεται τυχόν σκίαση από τον περιβάλλοντα χώρο. Ακόμη μπορεί να τοποθετηθεί και σε κεκλιμένη επιφάνεια (π.χ. σε ένα συλλέκτη) και να μετρήσει την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Μελέτες έχουν δείξει ότι στην περίπτωση της κεκλιμένης επιφάνειας η βαθμονόμηση του οργάνου πρέπει να αλλάζει ανάλογα με την κλίση. Επίσης τα πυρανόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση μόνο της διάχυτης ακτινοβολίας, με τη χρήση ειδικών δίσκων σκίασης που αποκόπτουν την άμεση ακτινοβολία.



Σχήμα 1.5: Πυρανόμετρο [3]

Πυρηλιόμετρο: Είναι όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Αποτελείται από ένα σωλήνα με σκούρα εσωτερική επιφάνεια, ο οποίος έχει προσαρμοσμένα στη μία άκρη του μια σκούρα απορροφητική πλάκα και μια θερμοστήλη. Ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να δέχεται την ακτινοβολία από ένα κώνο με άνοιγμα 5° . Υπάρχει ένα σύστημα δύο αξόνων ώστε να διατηρείται αυτό το άνοιγμα. Έτσι μέσα από το σωλήνα διέρχεται μόνο η άμεση ακτινοβολία, η οποία απορροφάται από την πλάκα. Όπως και στο πυρανόμετρο, τα θερμοστοιχεία δημιουργούν μία τάση η οποία αντιστοιχεί με κατάλληλη βαθμονόμηση στην ακτινοβολία που απορροφήθηκε. [2,3]



Σχήμα 1.6: Πυρηλιόμετρο [3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

2.1: Γενικά

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι ένας ειδικής μορφής εναλλάκτης θερμότητας, που μετατρέπει την ακτινοβολία του ήλιου σε θερμότητα. Η ιδιορρυθμία έγκειται κυρίως στο ότι μεταφέρει ενέργεια μορφής ακτινοβολίας από πολύ μακρινή πηγή (ήλιος) σε ένα ρευστό, σε αντίθεση με τους συμβατικούς εναλλάκτες θερμότητας, όπου η μεταφορά γίνεται από ρευστό σε ρευστό, χωρίς να είναι σημαντικός ο ρόλος της ακτινοβολίας.

Οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους επίπεδους (χωρίς συγκέντρωση ακτινοβολίας) και τους συγκεντρωτικούς. Οι βασικές διαφορές των δύο τύπων είναι οι εξής:

- Οι επίπεδοι (μη-συγκεντρωτικοί) συλλέγουν και απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μία πλάκα απορρόφησης. Αντίθετα οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούν μία οπτική ανακλαστική ή διαθλαστική επιφάνεια, με την οποία επιτυγχάνουν συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια μικρή επιφάνεια απορρόφησης.
- Στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες, λόγω της μικρότερης απορροφητικής επιφάνειας, οι θερμικές απώλειες είναι λιγότερες σε σχέση με τους επίπεδους. Αυτό σημαίνει καλύτερους θερμικούς βαθμούς απόδοσης.
- Η ανακλαστική επιφάνεια των συγκεντρωτικών συλλεκτών απαιτεί λιγότερο υλικό και είναι κατασκευαστικά απλούστερη από την πλάκα απορρόφησης των επίπεδων.
- Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές, που απαιτούν θερμοκρασίες μέχρι περίπου 100 °C πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για υψηλότερες θερμοκρασίες συνίσταται η χρήση συγκεντρωτικών συλλεκτών.
- Μία άλλη βασική διαφορά είναι ότι οι επίπεδοι συλλέκτες εκμεταλλεύονται και τις δύο συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας (άμεση και διάχυτη). Αντίθετα οι συγκεντρωτικοί αξιοποιούν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, γι' αυτό και απαιτείται μηχανικό σύστημα παρακολούθησης του ήλιου.
- Επειδή οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες απαιτούν μηχανισμό κίνησης για την παρακολούθηση του ήλιου, χρειάζονται περισσότερη συντήρηση. Ακόμη η ανακλαστική επιφάνεια μπορεί με το πέρασμα του χρόνου να χάσει την ανακλαστικότητά της και επομένως να χρειαστεί καθαρισμό ή και αντικατάσταση. [1,4]

2.1.1: Βασικά χαρακτηριστικά συγκεντρωτικών συλλεκτών

Βασικό χαρακτηριστικό των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι ο λόγος συγκέντρωσης. Ορίζεται ως το πηλίκο της επιφάνειας ‘ανοίγματος’ ή ‘παραθύρου’ από την οποία εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία προς την επιφάνεια του δέκτη, δηλαδή την επιφάνεια που απορροφά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.1)$$

Στην πράξη ο λόγος συγκέντρωσης κυμαίνεται από 1.5 έως 10000. Όσο αυξάνεται ο λόγος συγκέντρωσης αυξάνεται η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, καθώς και η ακρίβεια κατασκευής και η ποιότητα του οπτικού συστήματος και επομένως το κόστος. Στις ανώτατες τιμές του λόγου συγκέντρωσης, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες είναι πλέον εργαστηριακά όργανα για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Από τη σκοπιά του μηχανικού ενδιαφέρουν οι χαμηλές και οι μέσες συγκεντρώσεις.

Τα κύρια μέρη ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι:

- Ο συγκεντρωτής ή οπτικό σύστημα, που είναι το τμήμα του συλλέκτη που συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία στο δέκτη.
- Ο δέκτης, που περιλαμβάνει τον απορροφητή με το σύστημα μετατροπής της ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας, σχετικά καλύμματα και μόνωση.

Ο συγκεντρωτής μπορεί να είναι:

- i. Ανακλαστικός ή διαθλαστικός
- ii. Επιμήκης (κυλινδρικός) ή κυκλικός. Ο επιμήκης συγκεντρωτής χαρακτηρίζεται ως διδιάστατος και εστιάζει σε ευθεία γραμμή. Αν η κάθετος τομή του προς την ευθεία αυτή είναι παραβολή, τότε ονομάζεται παραβολικός συγκεντρωτής. Ο κυκλικός συγκεντρωτής είναι επιφάνεια εκ περιστροφής (π.χ. σφαίρα ή παραβολοειδής), εστιάζει σε σημείο και χαρακτηρίζεται ως τρισδιάστατος.
- iii. Συνεχής ή αποτελούμενος από τμήματα.
- iv. Χωρίς είδωλο ή με είδωλο. Οι συγκεντρωτές χωρίς είδωλο δίνουν χαμηλό λόγο συγκέντρωσης ($C < 10$) και δε σχηματίζουν σαφώς καθορισμένο είδωλο του ηλίου πάνω στον απορροφητήρα. Οι συγκεντρωτές με είδωλο δίνουν είδωλο πάνω στον απορροφητή και έτσι επιτυγχάνονται πολύ υψηλοί λόγοι συγκέντρωσης.

Ο δέκτης μπορεί να είναι κυρτός, επίπεδος, κοίλος καλυμμένος ή ακάλυπτος. [1]

2.1.2: Είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών

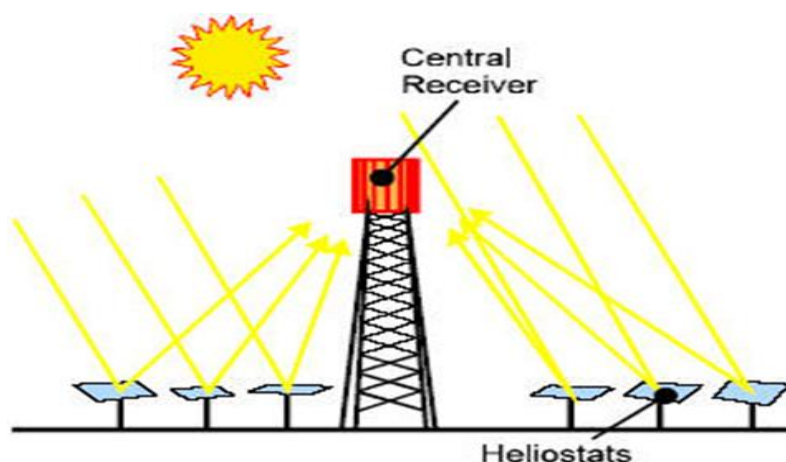
Τα βασικότερα είδη συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών που κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τα εξής:

- Ηλιακός πύργος (Central Receiver Tower)
- Γραμμικός συλλέκτης Fresnel
- Παραβολικό ηλιακό πιάτο (Parabolic Dish Reflector - PDR)
- Συλλέκτης τύπου CPC (Compound Parabolic Collector)
- Συλλέκτης με παραβολικό συγκεντρωτή (Parabolic Trough Collector - PTC)

Στη συνέχεια θα αναφερθούν ορισμένα χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων συλλεκτών και θα δοθεί έμφαση στο συλλέκτη PTC, που είναι και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2: Ηλιακός πύργος

Η εγκατάσταση αποτελείται από εκατοντάδες ή χιλιάδες ηλιοστάτες (κάτοπτρα), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο χώρο με τρόπο ώστε να αποφεύγεται μηχανική ή οπτική αλληλεπίδραση. Κάθε ηλιοστάτης διαθέτει σύστημα δύο αξόνων παρακολούθησης του ήλιου, έτσι ώστε να οδηγεί την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε ένα κεντρικό δέκτη που είναι εγκαταστημένος στην κορυφή του πύργου.



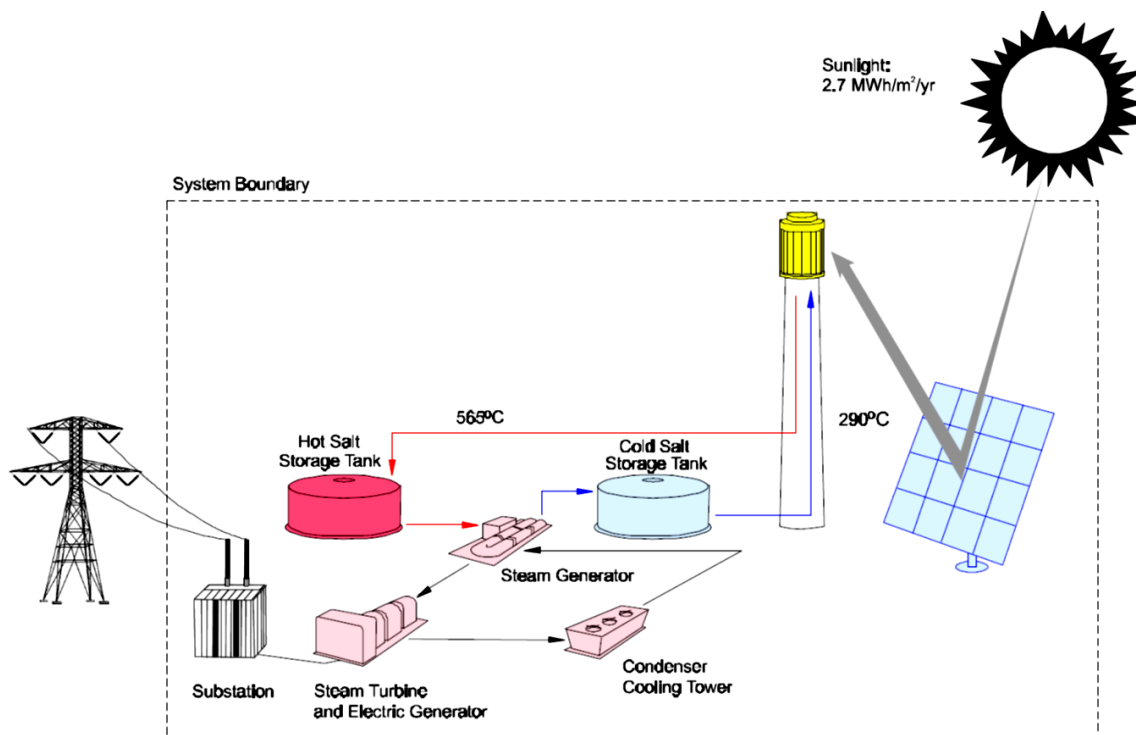
Σχήμα 2.1: Διάταξη ηλιακού πύργου [6]

Ο δέκτης είναι σχεδιασμένος ώστε να απορροφά την προσπίπτουσα ακτινοβολία, αναπτύσσοντας υψηλές θερμοκρασίες. Με τη χρήση εναλλάκτη, η ενέργεια μεταφέρεται σε κάποιο εργαζόμενο μέσο (συνήθως λιωμένο άλας).

Το σύστημα μεταφοράς θερμότητας, που αποτελείται κυρίως από σωληνώσεις, αντλίες και βαλβίδες, οδηγεί το εργαζόμενο μέσο σε ένα κλειστό βρόχο ανάμεσα στο δέκτη, τις δεξαμενές αποθήκευσης και το σύστημα μετατροπής ενέργειας.

Το σύστημα μετατροπής ενέργειας αποτελείται από μια γεννήτρια ατμού, μια στροβιλο-γεννήτρια και βοηθητικό εξοπλισμό, για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση μιας εγκατάστασης παραγωγής ρεύματος τύπου Solar 2 με εργαζόμενο μέσο λιωμένο άλας. Το υγρό άλας σε θερμοκρασία 290 °C οδηγείται με σωληνώσεις από τη δεξαμενή 'κρύου' μέσου στο δέκτη, όπου θερμαίνεται στους 565 °C και καταλήγει στη δεξαμενή 'ζεστού'. Στη συνέχεια το 'ζεστό' άλας οδηγείται σε ένα σύστημα όπου παράγεται υπέρθερος ατμός, ο οποίος στη συνέχεια αποτονώνεται σε στρόβιλο που κινεί γεννήτρια για την παραγωγή ρεύματος. Το άλας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ατμού, μεταφέρεται στη δεξαμενή 'κρύου' για την επαναχρησιμοποίησή του.



Σχήμα 2.2: Εγκατάσταση Solar 2 [6]

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών των εγκαταστάσεων είναι τα εξής:

- Συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια οπτικά και τη μεταφέρουν σε ένα ενιαίο δέκτη ελαχιστοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις μεταφοράς της θερμικής ενέργειας.
- Πετυχαίνουν λόγους συγκέντρωσης της τάξης 300-1500 και επομένως είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στη συλλογή ενέργειας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρισμό.
- Μπορούν εύκολα να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια.
- Πρόκειται γενικά για μεγάλες εγκαταστάσεις (>10 MW_e) και επωφελούνται από τις οικονομίες κλίμακας. Συνήθως είναι της τάξης των 30-400 MW_e. [4,5,6]



Σχήμα 2.3: Εγκατάσταση ηλιακού πύργου [8]

2.3: Γραμμικός συλλέκτης Fresnel



Σχήμα 2.4: Γραμμικός συλλέκτης Fresnel [5]

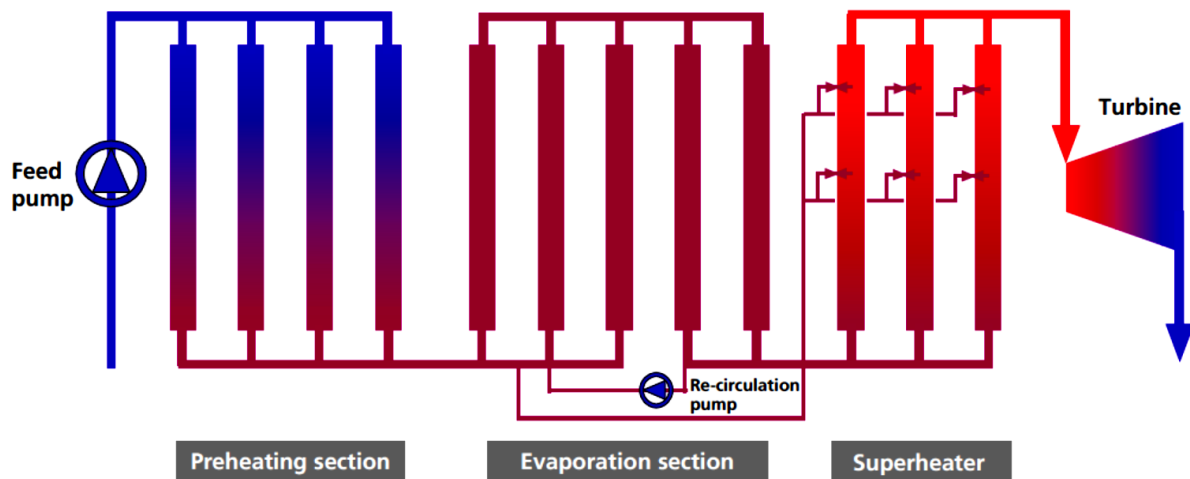
Σε ένα γραμμικό συλλέκτη Fresnel, επίπεδα ή ελαφρώς καμπύλα κάτοπτρα συγκεντρώνουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε ένα στατικό δέκτη, που βρίσκεται αρκετά μέτρα ψηλότερα. Ο δέκτης περιλαμβάνει ένα ανακλαστήρα, ο οποίος συγκεντρώνει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία σε έναν σωλήνα απορρόφησης.

Ο δεύτερος συγκεντρωτής στο δέκτη, όχι μόνο αυξάνει το στόχο για τους ανακλαστήρες Fresnel, αλλά λειτουργεί και ως μόνωση για τον απορροφητήρα. Στο πίσω μέρος διαθέτει αδιαφανή μόνωση και στο μπροστινό μέρος έναν υαλοπίνακα, ο οποίος περιορίζει τις απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής.



Σχήμα 2.5: Τομή δέκτη γραμμικού συλλέκτη Fresnel [7]

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη μιας εγκατάστασης παραγωγής ατμού ισχύος 50 MW, με χρήση γραμμικών συλλεκτών Fresnel. Συγκεκριμένα η διάταξη αποτελείται από 12 σειρές συλλεκτών, με μήκος 1000 m η καθεμιά. Οι σειρές των συλλεκτών είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους παράλληλα και με τρόπο ώστε να υπάρχει διαχωρισμός του πεδίου σε τρία τμήματα για προθέρμανση, ατμοποίηση και υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου.

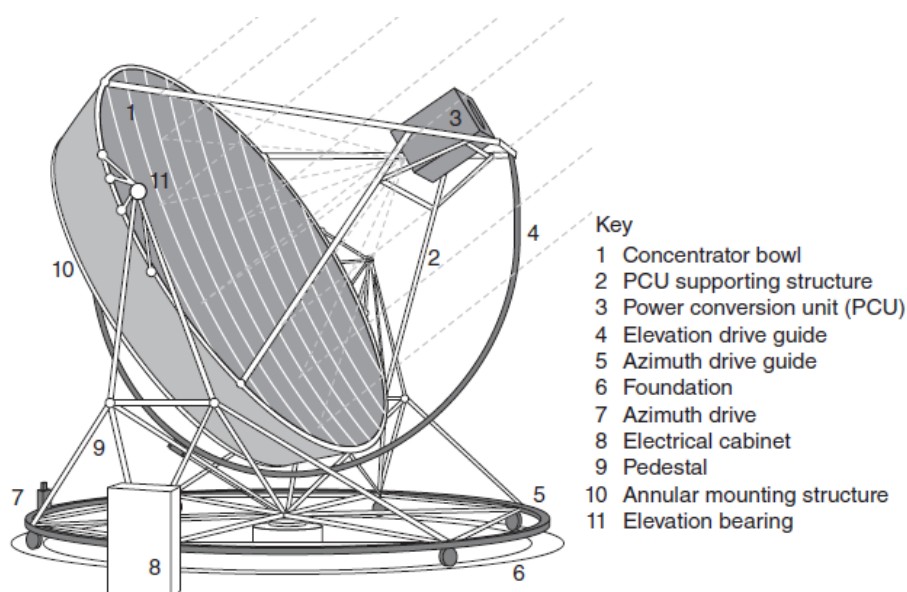


Σχήμα 2.6: Εγκατάσταση συλλεκτών Fresnel [9]

Τα κύρια πλεονεκτήματα των γραμμικών συλλεκτών Fresnel είναι τα εξής:

- Χρησιμοποιούνται οικονομικά επίπεδα κάτοπτρα και απλό σύστημα παρακολούθησης του ήλιου.
 - Δε χρειάζεται τεχνολογία κενού, ούτε υάλινο κάλυμμα.
 - Διαθέτουν σταθερό σωλήνα απορρόφησης, χωρίς να χρειάζονται εύκαμπτες συνδέσεις υψηλής πίεσης.
 - Λόγω της επιπεδότητας του ανακλαστήρα, τα φορτία του ανέμου είναι περιορισμένα.
 - Λόγω της άμεσης παραγωγής ατμού, δε χρειάζεται η χρήση εναλλάκτη θερμότητας.
 - Αποτελεσματική χωροθέτησή τους, αφού μπορούν να τοποθετηθούν ο ένας δίπλα στον άλλο.
- [9]

2.4: Παραβολικό ηλιακό πιάτο



Σχήμα 2.7: Παραβολικό ηλιακό πιάτο [7]

Τα κύρια μέρη ενός παραβολικού ηλιακού πιάτου είναι τα εξής:

- Παραβολοειδής συγκεντρωτής.
- Σύστημα δύο αξόνων για την παρακολούθηση του ήλιου.
- Δέκτης που περιλαμβάνει εναλλάκτη θερμότητας.
- Σύστημα κινητήρα – γεννήτριας.
- Μονάδα ελέγχου.

Το συγκεκριμένο σύστημα μετατρέπει τη θερμική ενέργεια που υπάρχει στην ηλιακή ακτινοβολία σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική.

Ο συγκεντρωτής με ένα σύστημα δύο αξόνων, παρακολουθεί τον ήλιο και συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη, ο οποίος είναι τοποθετημένος κοντά στην εστία της παραβολής. Ο δέκτης, αφού απορροφήσει την ακτινοβολία, αναπτύσσει πολύ υψηλές θερμοκρασίες και με ένα εναλλάκτη μεταφέρει την ενέργεια σε ένα ρευστό, το οποίο είτε χρησιμοποιείται ως το εργαζόμενο μέσο σε ένα κινητήρα που βρίσκεται στο δέκτη, είτε χρησιμοποιείται για διοχέτευση της ενέργειας σε άλλες διεργασίες. Ο κινητήρας κινεί μία γεννήτρια που βρίσκεται επίσης στο δέκτη μετατρέποντας το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η ανακλαστική επιφάνεια του παραβολοειδούς συγκεντρωτή, που είναι συνήθως κατασκευασμένη από επιμεταλλωμένο γυαλί ή πλαστικό, αντανακλά την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μια μικρή περιοχή που ονομάζεται εστία. Το μέγεθος της εστίας εξαρτάται από την ακρίβεια του σχήματος του συγκεντρωτή, την ανακλαστικότητα και την κατάσταση της επιφάνειάς του, καθώς και από την

εστιακή απόσταση. Οι συνηθισμένοι συγκεντρωτές (πίατα) πετυχαίνουν λόγους συγκέντρωσης 1500-4000 και έχουν διάμετρο 2-25 m.

Η μηχανή (κινητήρας) που υπάρχει στο δέκτη του συστήματος, μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική με παρόμοιο τρόπο με τις συμβατικές μηχανές. Συμπιέζει το 'κρύο' εργαζόμενο μέσο, το θερμαίνει και στη συνέχεια το αποτονώνει σε ένα στρόβιλο ή σε έμβολο για την παραγωγή μηχανικού έργου που κινεί τη γεννήτρια.

Για τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν προταθεί ορισμένοι θερμοδυναμικοί κύκλοι. Σε αυτούς περιλαμβάνονται ο κύκλος Rankine με νερό ή κάποιο οργανικό εργαζόμενο μέσο, ο κύκλος Brayton (ανοικτός και κλειστός) και ο κύκλος Stirling. Συνήθως οι μηχανές που επιλέγονται χρησιμοποιούν τους κύκλους Stirling και Brayton. Η χρήση των κύκλων Otto και Diesel δεν είναι εφικτή εξαιτίας της δύσκολης ενσωμάτωσής τους με τη συγκεντρωτική ηλιακή ενέργεια. Τα συστήματα με μηχανές Stirling παράγουν ηλεκτρική ισχύ της τάξης των 25 kW_e και τα συστήματα με μηχανές Brayton 30 kW_e. [7,10]

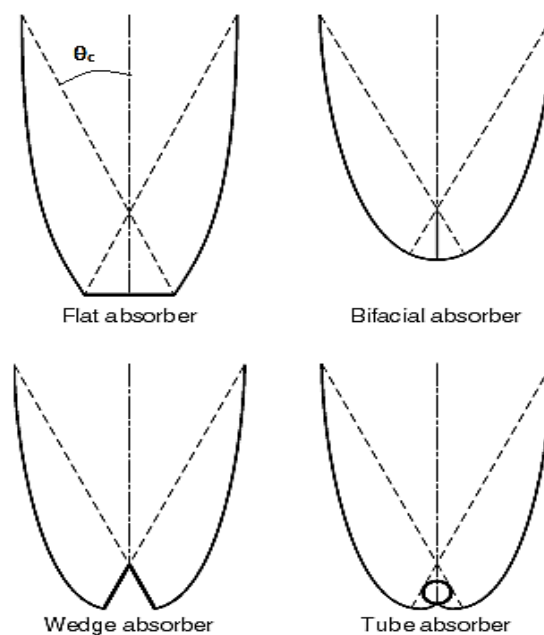


Σχήμα 2.8: EuroDish 10 kW [7]

2.5: Συλλέκτης τύπου CPC

Οι σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές (Compound Parabolic Concentrators), ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτών χωρίς είδωλο και επιτυγχάνουν μικρούς λόγους συγκέντρωσης (1 - 5). Είναι συλλέκτες μέσης θερμοκρασίας (60 – 240 °C) και έχουν στοιχεία και από τους συγκεντρωτικούς και από τους επίπεδους. Συγκεντρώνουν την άμεση ακτινοβολία στο δέκτη με έναν ανακλαστήρα και αξιοποιούν και τη διάχυτη υπό ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης και επομένως έχουν ελάχιστες απαιτήσεις κίνησης για την παρακολούθηση του ήλιου.

Ο απορροφητής της ακτινοβολίας βρίσκεται στο κάτω μέρος του συλλέκτη και μπορεί να έχει διάφορες διαμορφώσεις, οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.9: Διαμορφώσεις απορροφητή συλλέκτη CPC [8]

Οι συλλέκτες CPC έχουν συνήθως επιμήκη (διδιάστατη) μορφή τύπου ‘σκάφης’. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, οι δύο παραβολικές επιφάνειες εκτείνονται μέχρι να γίνουν παράλληλες προς τον άξονα συμμετρίας του συλλέκτη. Η γωνία που σχηματίζεται από το άξονα του CPC και την ευθεία που συνδέει την εστία της μιας παραβολής με το απέναντι άκρο του ανοίγματος, ονομάζεται ημιγωνία αποδοχής θ_c . Αν οι παραβολικές ανακλαστικές επιφάνειες είναι (οπτικά) τέλειες, τότε η ακτινοβολία που εισέρχεται στο άνοιγμα υπό γωνία θ , έτσι ώστε $-\theta_c < \theta < \theta_c$, ανακλάται προς το δέκτη. Για $\theta < -\theta_c$ ή $\theta > \theta_c$, η ακτινοβολία δε φτάνει στο δέκτη. Αποδεικνύεται ότι για έναν (οπτικά) τέλειο επιμήκη συλλέκτη CPC ο λόγος συγκέντρωσης δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{1}{\sin\theta_c} \quad (2.2)$$

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

- Δε μεταβάλλει την ημιγωνία αποδοχής.
- Μεταβάλλει το λόγο του ύψους προς το άνοιγμα.
- Μεταβάλλει το λόγο συγκέντρωσης.
- Μεταβάλλει το μέσο αριθμό ανακλάσεων που υφίσταται η ακτινοβολία μέχρι να φτάσει στον απορροφητή.

Οι συλλέκτες CPC τοποθετούνται συνήθως με το διαμήκη άξονα οριζόντιο και προσανατολισμένο κατά Ανατολή – Δύση. Το επίπεδο του ανοίγματος είναι στραμμένο προς τον ισημερινό, σχηματίζοντας γωνία β με το οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως υπάρχει δυνατότητα περιστροφής περί τον επιμήκη άξονα, έτσι ώστε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει εντός των ορίων που επιβάλλει η γωνία αποδοχής $2\theta_c$. Όσο αυξάνεται ο λόγος συγκέντρωσης, μειώνεται η θ_c με αποτέλεσμα την απαίτηση συχνότερης ρύθμισης.

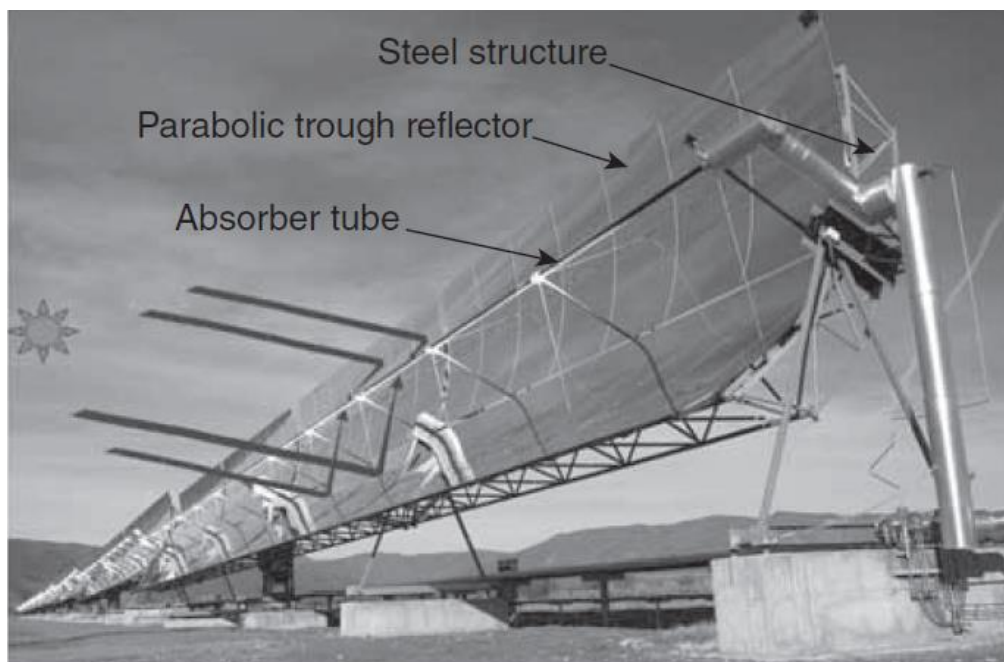
Οι συλλέκτες μπορούν να κατασκευαστούν είτε ως μία ενιαία μονάδα (ένας συγκεντρωτής και ένας δέκτης), είτε με μορφή πάνελ. Στη δεύτερη περίπτωση, ο συλλέκτης φαίνεται σαν επίπεδος. [1,8]



Σχήμα 2.10: Συλλέκτες CPC με μορφή πάνελ [8]

2.6: Συλλέκτης με παραβολικό συγκεντρωτή

2.6.1: Βασική αρχή λειτουργίας



Σχήμα 2.11: Συλλέκτης PTC [7]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα ένας ηλιακός συλλέκτης PTC (Parabolic Trough Collector) αποτελείται από:

- Έναν συγκεντρωτή σχήματος παραβολής.
- Έναν σκούρο μεταλλικό απορροφητικό σωλήνα (δέκτης), καλυμμένο από ένα σωλήνα από γυαλί.
- Σύστημα ενός άξονα για την παρακολούθηση του ήλιου.
- Μεταλλική στήριξη.

Ο παραβολικός συγκεντρωτής αντανakλά την προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία και τη συγκεντρώνει στην εξωτερική επιφάνεια του σκούρου απορροφητικού σωλήνα, ο οποίος είναι τοποθετημένος στη γραμμή εστίασης. Ο σωλήνας αναπτύσσει υψηλή θερμοκρασία και θερμαίνει το εργαζόμενο μέσο που ρέει μέσα σε αυτόν μετατρέποντας έτσι την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική ενέργεια υπό μορφή αισθητής ή λανθάνουσας θερμότητας του ρευστού. Ο συλλέκτης μπορεί να είναι προσανατολισμένος με κατεύθυνση ανατολή-δύση, παρακολουθώντας τον ήλιο από το βορρά στο νότο ή το αντίθετο. Με αυτό το σύστημα δε χρειάζεται ιδιαίτερη ρύθμιση του συλλέκτη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε διάστημα ενός χρόνου, ο προσανατολισμός βορρά-νότου είναι πιο αποδοτικός σε σύγκριση με τον ανατολής-δύσης. Με τον πρώτο συλλέγεται περισσότερη ενέργεια το καλοκαίρι, ενώ με τον δεύτερο το χειμώνα. Η επιλογή του κατάλληλου προσανατολισμού εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή (αν η ενέργεια χρειάζεται το χειμώνα ή το καλοκαίρι). [7,8]

2.6.2: Ιστορία και εξέλιξη

Οι πρώτες καταγραφές σχετικά με τις οπτικές ιδιότητες ενός παραβολικού συγκεντρωτή έγιναν από τον αρχαίο Έλληνα μαθηματικό Διοκλή το δεύτερο αιώνα π.χ. Το πρώτο ηλιακό σύστημα με παραβολικό συγκεντρωτή αναπτύχθηκε είκοσι αιώνες αργότερα. Πιο συγκεκριμένα το πρώτο σύστημα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τον Σουηδό μηχανικό John Ericsson στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Ο συγκεντρωτής της ακτινοβολίας είχε επιφάνεια 3.25 m² και χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή κορεσμένου ατμού που τροφοδοτούσε μια μικρή μηχανή ισχύος 373 W. Το 1883, το αρχικό σχέδιο που περιλάμβανε κάτοπτρο από μεταλλικό φύλλο, αναβαθμίστηκε από τον Ericsson με την εγκατάσταση λεπτών ανακλαστικών λωρίδων από επαργυρωμένο γυαλί σε ένα σκελετό που παρείχε παραβολικό σχήμα με άνοιγμα 3.35 x 4.9 m. Ο συλλέκτης χρησιμοποιήθηκε στην παραγωγή κορεσμένου ατμού με πίεση 0.24 MPa για τη λειτουργία ατμομηχανής (120 rpm) με ένα έμβολο διαμέτρου 0.153 m και διαδρομής 0.2 m.

Το 1913, ο Αμερικάνος μηχανικός Frank Shuman, σχεδίασε και κατασκεύασε στην Αίγυπτο ένα ηλιακό πάρκο με συλλέκτες PTC, που παρήγαγε κορεσμένο ατμό πίεσης 0.1 MPa. Σκοπός της εγκατάστασης ήταν η οδήγηση μιας ατμομηχανής για άντληση αρδευτικού νερού σε μια αγροτική κοινότητα στην περιοχή Meadi κοντά στο Κάιρο.



Σχήμα 2.12: Ένας από τους 5 PTC συλλέκτες της εγκατάστασης [7]

Η εγκατάσταση αποτελούνταν από πέντε συλλέκτες PTC, με συνολική συλλεκτική επιφάνεια 1274.5 m². Κάθε συλλέκτης είχε μήκος 62.17 m, άνοιγμα παραβολής 4.1 m και βαθμό απόδοσης 40%. Τα επόμενα χρόνια λόγω του πρώτου παγκόσμιου πολέμου και της εισόδου του πετρελαίου στην αγορά ενέργειας δε κατασκευάστηκαν αντίστοιχες εγκαταστάσεις.

Το 1935, ο C.G Abbot μετέτρεψε ηλιακή ενέργεια σε μηχανική ισχύ χρησιμοποιώντας έναν συλλέκτη PTC και μία ατμομηχανή 0.37 kW. Τα χρόνια που ακολούθησαν δεν υπήρξε κάποια σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία των συλλεκτών PTC μέχρι την πετρελαϊκή κρίση του 1973. Στη συνέχεια στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν από τη Sandia National

Laboratories τρεις νέοι συλλέκτες PTC. Από το 1980 και μετά, αρκετές εταιρίες ανέπτυξαν νέα σχέδια και μπήκαν στην αγορά σε μικρές κυρίως εφαρμογές.

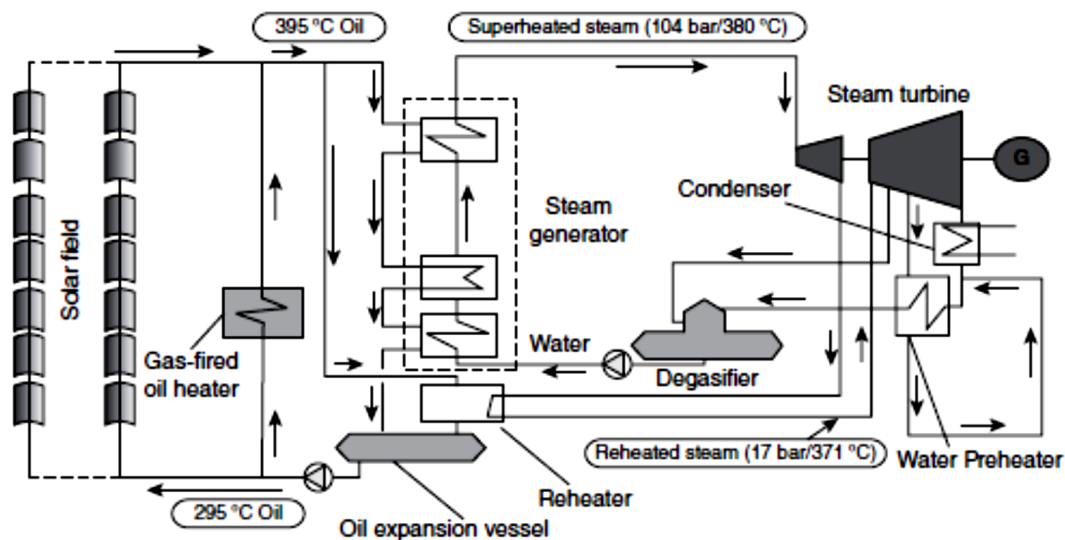
Εγκαταστάσεις SEGS

Το πιο σημαντικό γεγονός του 20^{ου} αιώνα σχετικά με την τεχνολογία των ηλιακών συλλεκτών PTC ήταν ο σχεδιασμός και η κατασκευή από την εταιρία LUZ International Limited, εννιά μονάδων SEGS (Solar Electricity Generating System) στην έρημο Mohave που βρίσκεται στην Καλιφόρνια. Η κατασκευή διήρκησε από το 1984 (SEGS-I) μέχρι το 1990 (SEGS-IX). Παρακάτω δίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά των μονάδων.

	SEGS 1	SEGS 2	SEGS 3	SEGS 4	SEGS 5	SEGS 6	SEGS 7	SEGS 8	SEGS 9
Διάρκεια λειτουργίας	1984- σήμερα	1985- σήμερα	1986- σήμερα	1986- σήμερα	1987- σήμερα	1988- σήμερα	1988- σήμερα	1989- σήμερα	1990- σήμερα
Καθαρή ηλεκτρική ισχύς (MW_e)	13.8	30	30	30	30	30	30	80	80
Βαθμός απόδοσης (%)	28.5	29.40	30.60	30.60	30.60	37.70	37.50	37.60	37.60
Μοντέλο συλλέκτη	LS1	LS1/LS2	LS2	LS2	LS2	LS2	LS3	LS3	LS3
Συνολική επιφάνεια ανοίγματος (m²)	83,000	188,990	230,300	230,300	233,120	188,000	194,280	464,340	483,960
Θερμοκρασίες εισόδου- εξόδου (°C)	241/307	248/320	248/349	248/349	248/349	293/393	293/393	293/390	293/390
Εργαζόμενο μέσο (θερμικό λάδι)	ESSO- 500	M-VP1	M-VP1	M-VP1	M-VP1	M-VP1	M-VP1	M-VP1	M-VP1

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά των 9 μονάδων SEGS της εταιρίας LUZ [7]

Το εργαζόμενο μέσο στις μονάδες SEGS είναι θερμικό λάδι, το οποίο κυκλοφορεί στη διάταξη των συλλεκτών, θερμαίνεται και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για παραγωγή ατμού. Ο ατμός διοχετεύεται σε μια συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αμοστρόβιλο. Για να εξασφαλίζεται συνεχής λειτουργία των μονάδων (και τις ώρες που δεν υπάρχει ήλιος), υπάρχει σύστημα καύσης φυσικού αερίου για την πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο (θερμικό λάδι). Με συνολική ηλεκτρική ισχύ 354 MW και περισσότερα από δύο εκατομμύρια m² συλλεκτικής επιφάνειας, οι μονάδες SEGS έχουν ιδιαίτερα μεγάλη σημασία στην εμπορική ανάπτυξη των συλλεκτών PTC.



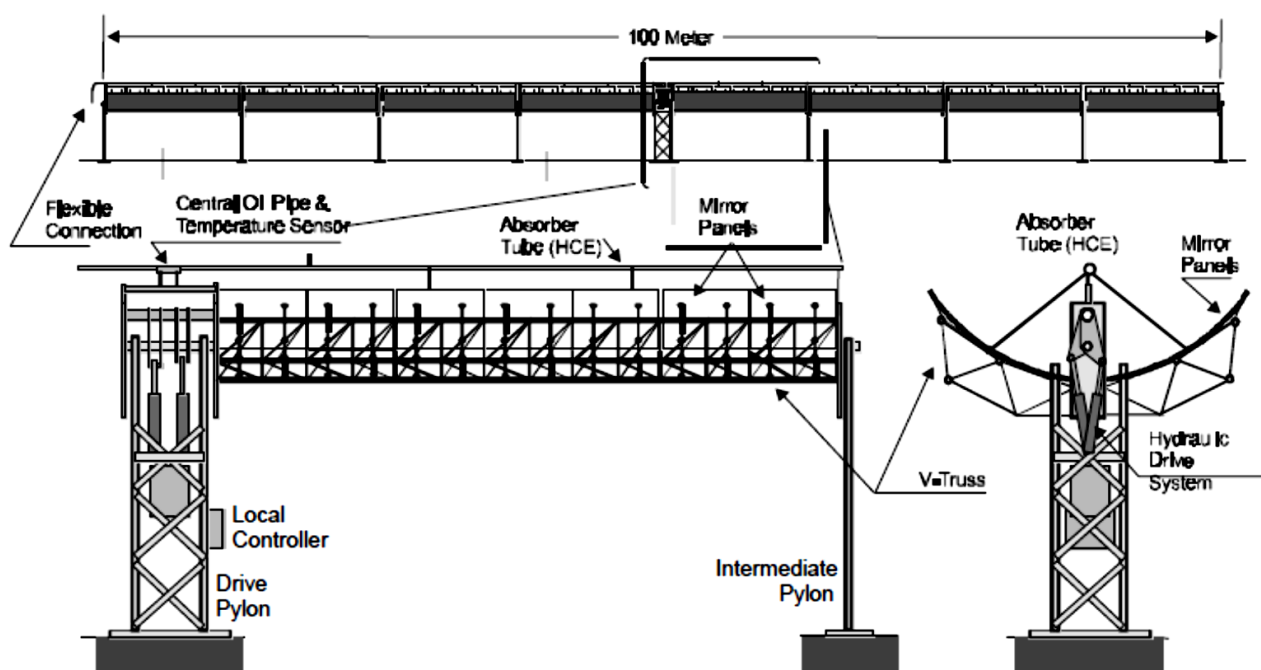
Σχήμα 2.13: Τυπική διάταξη μονάδας SEGS [7]

Ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα της εταιρίας LUZ ήταν η ανάπτυξη τριών ιδιαίτερα αξιόπιστων συλλεκτών PTC, των LS1, LS2 και LS3, που χρησιμοποιήθηκαν στις μονάδες SEGS. Ο συλλέκτης LS1, που χρησιμοποιήθηκε στη πρώτη μονάδα SEGS-I το 1984, είχε μήκος 50.2 m και άνοιγμα παραβολής 2.5 m, μεγέθη παρόμοια με άλλα σχέδια της εποχής. Σύντομα διαπιστώθηκε ότι για την κατασκευή μεγαλύτερων εγκαταστάσεων, χρειαζόνταν μεγαλύτεροι σε μέγεθος συλλέκτες. Γι' αυτό το λόγο η LUZ προχώρησε στην κατασκευή των συλλεκτών LS2 και LS3. Στη συνέχεια θα δοθούν ορισμένα χαρακτηριστικά του συλλέκτη LS3, που είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός. [7]

Συλλέκτης	LUZ LS-1	LUZ LS-2	LUZ LS-3
Έτος κατασκευής	1984	1985	1988
Επιφάνεια (m ²)	128	235	545
Άνοιγμα παραβολής (m)	2.5	5	5.7
Μήκος (m)	50	48	99
Διάμετρος δέκτη (m)	0.042	0.07	0.07
Λόγος συγκέντρωσης	61:1	71:1	82:1
Οπτικός βαθμός απόδοσης	0.734	0.737	0.764
Απορροφητικότητα δέκτη	0.94	0.94	0.99
Συντελεστής ανάκλασης κατόπτρων	0.94	0.94	0.94
Συντελεστής εκπομπής δέκτη	0.3	0.24	0.19
Σε θερμοκρασία (°C)	300	300	350
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	307	349	390

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά των συλλεκτών LS1, LS2 και LS3 [11]

Συλλέκτης LS3



Σχήμα 2.14: Ο συλλέκτης LS3 [11]

Ο συλλέκτης LS3 χρησιμοποιήθηκε στις μεγαλύτερες μονάδες των 80 MW. Οι ανακλαστήρες του είναι κατασκευασμένοι από γυάλινα πάνελ, τα οποία στηρίζονται με ένα σύστημα που παρέχει δομική ακεραιότητα. Το άνοιγμα της παραβολής των ανακλαστήρων είναι 5.76 m και το μήκος 95.2 m. Τα κάτοπτρα είναι κατασκευασμένα από χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο γυαλί με μεταδοτικότητα 98% και είναι καλυμμένα με προστατευτικές επιστρώσεις. Ακόμη για να αποκτήσουν τα κάτοπτρα το παραβολικό τους σχήμα, χρησιμοποιούνται παραβολικού σχήματος καλούπια που θερμαίνονται σε ειδικούς φούρνους. Τα κάτοπτρα στερεώνονται στο συλλέκτη με κεραμικά στηρίγματα, με τη χρήση ειδικής κόλλας. Η υψηλή ποιότητα των κατόπτρων επιτρέπει το 97% της ανακλώμενης ακτινοβολίας να προσπίπτει πάνω στο δέκτη.

Ο γραμμικός δέκτης του συλλέκτη, είναι ένας από τους βασικούς λόγους της υψηλής απόδοσής του. Αποτελείται από ένα χαλύβδινο σωλήνα 70 mm με κεραμομεταλλουργική επιλεκτική επιφάνεια, ο οποίος περιβάλλεται από ένα γυάλινο σωλήνα κενού. Ο λόγος ύπαρξης του σωλήνα κενού είναι η προστασία της επιλεκτικής επιφάνειας από την οξείδωση και η μείωση των θερμικών απωλειών στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Το κενό διατηρείται σε πίεση περίπου 0.013 Pa. Η κεραμομεταλλουργική επίστρωση του χαλύβδινου σωλήνα εξασφαλίζει πολύ καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας, με απορροφητικότητα άμεσης ακτινοβολίας 0.96 και συντελεστή εκπομπής 0.19 στους 350 °C. Επίσης ο γυάλινος σωλήνας διαθέτει αντι-ανακλαστική επίστρωση και στις δύο επιφάνειες (εσωτερική και εξωτερική) για τη μείωση των απωλειών λόγω αντανάκλασης. Στο εσωτερικό του υπάρχουν ουσίες, οι οποίες απορροφούν το υδρογόνο και άλλα αέρια που διεισδύουν στο σωλήνα με την πάροδο του χρόνου.

Ο συλλέκτης LS3 περιστρέφεται γύρω από τον άξονα βορρά – νότου για να παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο άξονας περιστροφής βρίσκεται στο κέντρο μάζας του συλλέκτη για την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ισχύος παρακολούθησης. Το σύστημα οδήγησης

χρησιμοποιεί υδραυλικά έμβολα για την κίνηση του συλλέκτη. Το σύστημα παρακολούθησης βασίζεται σε ένα ηλιακό αισθητήρα για την ακριβή ευθυγράμμιση που απαιτείται. Ένας τοπικός ελεγκτής ελέγχει το σύστημα παρακολούθησης, τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου και στέλνει αναφορές σχετικά με τη λειτουργία και διαγνωστικά στον κεντρικό υπολογιστή που βρίσκεται στο δωμάτιο ελέγχου. [11]

Συλλέκτης Eurotrough

Το 1998, αφού είχε κλείσει η εταιρία LUZ, διάφορες ευρωπαϊκές εταιρίες και ερευνητικά εργαστήρια (Abengoa/Inabensa, Fichtner Solar, Flabeg Solar Int., Schlaich Bergermann und Partner, Iberdrola, Solel Solar Systems, CIEMAT, CRES and DLR) συνεργάστηκαν με σκοπό την ανάπτυξη μιας νέας γενιάς συλλεκτών PTC για οικονομικά αποδοτικές εφαρμογές, αφού ο συλλέκτης LS3 δεν ήταν πλέον ανταγωνιστικός.

Μετά την ανάλυση αρκετών διαφορετικών σχεδίων, κατέληξαν στην ανάπτυξη του συλλέκτη Eurotrough, ο οποίος είχε γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρόμοια με του LS3. Στον συγκεκριμένο συλλέκτη έχει ιδιαίτερη σημασία το δικτύωμα που διαθέτει (torque box), το οποίο παρέχει ακαμψία και εμποδίζει τη συστρόφη του, εξασφαλίζοντας καλή γεωμετρική και οπτική απόδοση υπό μέσες ταχύτητες αέρα (<35 km/h).



Σχήμα 2.15: Δικτύωμα στήριξης συλλέκτη ET-100 [7]

Το πρώτο μοντέλο που κατασκευάστηκε το 2000 είναι το ET-100. Το συνολικό του μήκος είναι 100 m (αποτελείται από 8 τμήματα), ενώ η συνολική επιφάνεια του ανοίγματος της παραβολής είναι 545 m². Η υψηλή αντοχή του δικτύωματος (torque box) επέτρεψε την κατασκευή μεγαλύτερου συλλέκτη. Έτσι αναπτύχθηκε το 2005 το μοντέλο ET-150, συνολικού μήκους 150 m (12 τμήματα) και συνολική επιφάνεια ανοίγματος παραβολής 820 m².

Τα βασικά πλεονεκτήματα του συλλέκτη Eurotrough σε σχέση με παλαιότερα σχέδια είναι:

- Μικρότερη παραμόρφωση του συλλέκτη λόγω βαρύτητας και φορτίων ανέμων, με αποτέλεσμα αυξημένη οπτική απόδοση.
- Η αύξηση του μήκους του συλλέκτη από 100 m (ET-100) σε 150 m (ET-150), οδήγησε στην απλούστευση του μηχανισμού κίνησης και τη μείωση του αριθμού των σωλήνων διασύνδεσης, με αποτέλεσμα τη μείωση των θερμικών απωλειών και του συνολικού κόστους.
- Λιγότερη σκίαση λόγω του βελτιωμένου δέκτη.
- Η χαλύβδινη κατασκευή στήριξης είναι κατά 14% ελαφρύτερη από του συλλέκτη LS3.
- Λιγότερα εξαρτήματα αυξάνοντας την ικανότητα παραγωγής μεγάλης κλίμακας.
- Χαμηλότερες απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης.
- Απλοποιημένη κατασκευή, μειώνοντας το κόστος συναρμολόγησης.
- Όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους κατά 10%.



Σχήμα 2.16: Συλλέκτης Eurotrough [12]

Αρκετές εταιρίες έχουν κατασκευάσει συλλέκτες PTC, διατηρώντας τη φιλοσοφία του συλλέκτη Eurotrough. Η κεντρική ιδέα είναι η διατήρηση των βασικών γεωμετρικών του χαρακτηριστικών, με αλλαγές που αποσκοπούν στη βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους. [12]

2.6.3: Εφαρμογές συλλεκτών PTC

Παρακάτω θα αναφερθούν διάφορες εφαρμογές των συλλεκτών PTC.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Υπάρχουν δύο τρόποι για την ενσωμάτωση ενός ηλιακού πάρκου συλλεκτών PTC σε μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση αμοστροβίλου (κύκλος Rankine):

Ο πρώτος είναι η παραγωγή ατμού σε εναλλάκτη θερμότητας με τη χρήση του εργαζόμενου μέσου που θερμαίνεται στους συλλέκτες (συνήθως θερμικό λάδι). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι μονάδες SEGS που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

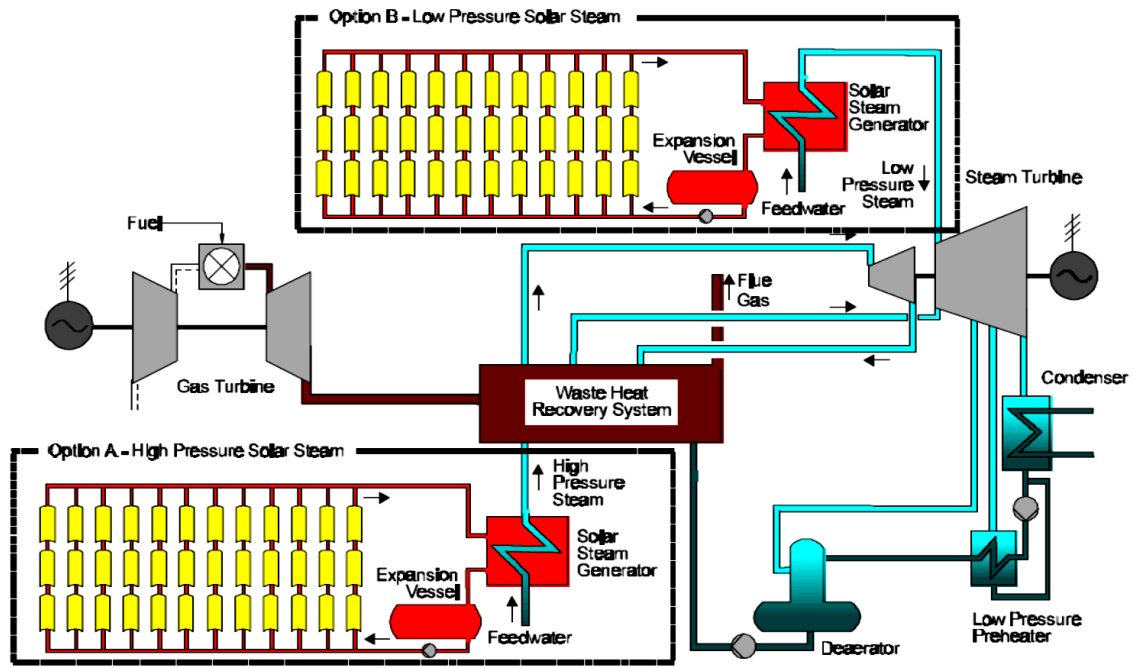
Ο δεύτερος είναι η άμεση παραγωγή ατμού στους συλλέκτες (εργαζόμενο μέσο νερό). Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι:

- Εξαλείφονται οι κίνδυνοι για το περιβάλλον που μπορεί να προκαλέσει το θερμικό λάδι (πυρκαγιά, διαρροή).
- Η απόδοση της μονάδας βελτιώνεται, αφού δε χρειάζεται εναλλάκτης θερμότητας για την παραγωγή του ατμού.
- Η διαμόρφωση της εγκατάστασης είναι πιο απλή, αφού δε χρειάζεται εναλλάκτης θερμότητας και βοηθητικά συστήματα για το θερμικό λάδι.
- Η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου μπορεί να αυξηθεί πάνω από το όριο των 400 °C που επιβάλλεται από τα θερμικά έλαια.

Τα μειονεκτήματα της άμεσης παραγωγής ατμού είναι:

- Η υψηλή πίεση λειτουργίας απαιτεί κατάλληλο υδραυλικό σύστημα, που αυξάνει το κόστος.
- Το νερό μπορεί να παγώσει.
- Η παροχή του νερού πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη που απαιτείται για καλύτερο έλεγχο της ροής.
- Τα συστήματα ελέγχου που χρειάζονται είναι πολύπλοκα και ακριβά, λόγω της διφασικής ροής στο εσωτερικό των αγωγών.

Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η ενσωμάτωση των ηλιακών συλλεκτών σε ένα σύστημα συνδυασμένου κύκλου (ISCCS – Integrated Solar Combined Cycle System). Γενικά, σε αυτές τις εγκαταστάσεις, τα θερμά καυσαέρια που απορρίπτονται από έναν αεριοστροβίλο (κύκλος Brayton), διοχετεύονται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού που κινεί έναν αμοστροβίλο (κύκλος Rankine). Όταν ενσωματώνεται η ηλιακή ενέργεια, ο ατμός που παράγεται από τους συλλέκτες κατευθύνεται είτε στο τμήμα υψηλής πίεσης του στροβίλου, είτε στο τμήμα χαμηλής. Τα καυσαέρια από τον αεριοστροβίλο χρησιμοποιούνται για προθέρμανση ή υπερθέρμανση του ατμού. [11,12]



Σχήμα 2.17: Σύστημα συνδυασμένου κύκλου (ISCCS) [11]

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν ορισμένες ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο, με χρήση συλλεκτών PTC:

Solana Generating Station



Σχήμα 2.18: Εγκατάσταση Solana

Περιοχή	Φοίνιξ, ΗΠΑ
Έτος λειτουργίας	2013
Ισχύς (MW)	280
Μοντέλο συλλεκτών	Abengoa Solar (E2)
Συνολική επιφάνεια ανοίγματος παραβολής (m²)	2,200,000

Πίνακας 2.3: Εγκατάσταση Solana

Andasol I, II και III



Σχήμα 2.19: Εγκαταστάσεις Andasol

	Andasol I	Andasol II	Andasol III
Περιοχή	Γρανάδα, Ισπανία	Γρανάδα, Ισπανία	Γρανάδα, Ισπανία
Έτος λειτουργίας	2008	2009	2011
Ισχύς (MW)	50	50	50
Μοντέλο συλλεκτών	Flagsol SKAL - ET 150	Flagsol SKAL – ET 150	Flagsol SKAL - ET 150
Συνολική επιφάνεια ανοίγματος παραβολής (m²)	510,120	510,120	510,120

Πίνακας 2.4: Εγκαταστάσεις Andasol I, II και III

Martin Next Generation Solar Energy Center (MNGSEC)



Σχήμα 2.20: Εγκατάσταση συμπαραγωγής Martin Next Generation Solar Energy Center

Περιοχή	Φλόριντα, ΗΠΑ
Έτος λειτουργίας	2010
Ισχύς ηλιακών (MW)	75
Μοντέλο συλλεκτών	Gossamer Space Frames (LAT 1)
Συνολική επιφάνεια ανοίγματος παραβολής (m²)	464,908

Πίνακας 2.5: Εγκατάσταση συμπαραγωγής MNGSEC

[15]

Παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για παραγωγή θερμότητας για βιομηχανικές εφαρμογές είναι ένας τομέας με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης. Σκοπός είναι η μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και επομένως η μείωση των εκπομπών CO₂. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας συλλέκτη εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία που απαιτείται. Για θερμοκρασίες κάτω από 120 °C, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη-συγκεντρωτικοί συλλέκτες (π.χ. επίπεδος) που υπάρχουν σε ευρεία κλίμακα στο εμπόριο. Για εφαρμογές με υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικοί συλλέκτες PTC, καθώς και οι άλλες τεχνολογίες που έχουν αναφερθεί. Ακόμη ιδιαίτερη σημασία έχει το είδος της διεργασίας. Για παράδειγμα, αν χρειάζεται ζεστό νερό για καθαρισμό μετά την επεξεργασία τροφίμων, το ηλιακό σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να ζεσταίνει νερό, ενώ αν χρειάζεται ατμός για να λειτουργεί ένας αποστειρωτής, το σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί για να παράγει ατμό.

Οι πιο σημαντικοί τομείς της βιομηχανίας που χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες για την παραγωγή θερμότητας είναι η βιομηχανία τροφίμων, η κλωστοϋφαντουργία, η βιομηχανία μέσω μεταφοράς και η επεξεργασία μετάλλων, πλαστικών και χημικών προϊόντων. Ορισμένες από τις πιο συνηθισμένες διεργασίες είναι:

- Καθαρισμός
- Ξήρανση
- Εξάτμιση και απόσταξη
- Παστερίωση
- Αποστείρωση
- Τήξη
- Κατεργασία επιφανειών

Τα μειονεκτήματα της χρήσης της ηλιακής ενέργειας στις βιομηχανικές εφαρμογές είναι:

- Η έλλειψη χώρου τοποθέτησης των συλλεκτών. Οι υπάρχουσες στέγες, εφόσον δεν υπάρχει άλλος χώρος για την τοποθέτησή τους, συχνά δεν είναι αρκετά μεγάλες και στιβαρές για να μπορούν να τους υποστηρίξουν.
- Το βιομηχανικό περιβάλλον συνεπάγεται υψηλό κίνδυνο διάβρωσης των συλλεκτών.
- Ο ήλιος δεν αποτελεί σταθερή πηγή ενέργειας. [8,12]

Παραγωγή ζεστού νερού και θέρμανση χώρων

Μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές των ηλιακών θερμικών συστημάτων είναι η παραγωγή ζεστού νερού. Συνήθως, οι θερμοκρασίες που απαιτούνται είναι κάτω από 100 °C και οι συλλέκτες που επιλέγονται είναι οι μη-συγκεντρωτικοί. Ωστόσο, σε εφαρμογές που απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ζεστού νερού, χρειάζεται εγκατάσταση πολύ μεγάλης συλλεκτικής επιφάνειας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η χρήση συλλεκτών PTC έχει ενδιαφέρον, αφού παρέχουν θερμική ενέργεια σε υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που απαιτούνται και επομένως μπορούν να εξυπηρετηθούν μεγαλύτερες ανάγκες αν αναμειχθεί το ζεστό εργαζόμενο μέσο με ψυχρότερο.

Παραδείγματα εφαρμογών με υψηλή κατανάλωση ζεστού νερού είναι τα συστήματα θέρμανσης μεγάλων κολυμβητηρίων και τα συστήματα ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης για μεγάλα κτίρια όπως εργοστάσια, νοσοκομεία, εκπαιδευτικά ιδρύματα, αθλητικές εγκαταστάσεις, αεροδρόμια, σταθμοί τρένων, κ.τ.λ.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης συλλεκτών PTC σε αυτές τις εφαρμογές είναι:

- Λιγότερες θερμικές απώλειες και επομένως καλύτερη θερμική απόδοση
- Μικρότερη συλλεκτική επιφάνεια χρειάζεται για δεδομένη απαίτηση ισχύος.

Τα μειονεκτήματα είναι :

- Το σύστημα παρακολούθησης του ηλίου που χρειάζονται οι συλλέκτες PTC αυξάνει το κόστος συντήρησης και λειτουργίας.
- Το γεγονός ότι αξιοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία θέτει γεωγραφικούς περιορισμούς στην τοποθέτησή τους.
- Όταν η ταχύτητα του αέρα είναι πολύ υψηλή, η λειτουργία τους πρέπει να διακόπτεται. [12]

Αφαλάτωση

Η ηλιακή αφαλάτωση είναι μία διαδικασία που χρησιμοποιεί η φύση για την παραγωγή της βροχής, που είναι η κύρια πηγή καθαρού πόσιμου νερού. Η ηλιακή ακτινοβολία, προσπίπτει στην επιφάνεια της θάλασσας και απορροφάται ως θερμότητα, προκαλώντας εξάτμιση νερού. Οι υδρατμοί που παράγονται ανυψώνονται και κινούνται από τους ανέμους. Όταν ψυχθούν αρκετά και φτάσουν το σημείο δρόσου, υγροποιούνται και καθαρό νερό επιστρέφει στην επιφάνεια της γης ως βροχή. Τα διαθέσιμα συστήματα αφαλάτωσης που έχει κατασκευάσει ο άνθρωπος στηρίζονται σε αυτή τη διαδικασία.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Διεργασίες αλλαγής φάσης ή θερμικές διεργασίες
- Διεργασίες με μεμβράνες ή διεργασίες μιας φάσης

Διεργασίες αλλαγής φάσης	Διεργασίες με μεμβράνες
Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης (MEB) Απόσταξη πολλαπλής φάσης (MSF) Συμπίεση ατμών (Vapour Compression – VC) Ηλιακοί αποστακτήρες (Solar Stills)	Αντίστροφη ώσμωση (Reverse osmosis – RO) Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis – ED)

Πίνακας 2.6: Κατηγορίες μεθόδων αφαλάτωσης

Η ηλιακή ενέργεια που χρησιμοποιείται για την αφαλάτωση, είτε μετατρέπεται σε θερμική που απαιτείται για την πρώτη κατηγορία, είτε μετατρέπεται σε ηλεκτρική που χρειάζεται για τη δεύτερη. Τα ηλιακά συστήματα αφαλάτωσης χωρίζονται στα άμεσα και τα έμμεσα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα άμεσου συστήματος είναι ο ηλιακός αποστακτήρας, που χρησιμοποιεί τεχνική που βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου για την επίτευξη της αφαλάτωσης. Τα έμμεσα συστήματα αποτελούνται από δύο μέρη, ένα για τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και ένα για την αφαλάτωση.

Οι συλλέκτες PTC χρησιμοποιούνται στα έμμεσα συστήματα. Κύριες εφαρμογές τους (παραγωγή ατμού) ανήκουν στην κατηγορία των διεργασιών αλλαγής φάσης και είναι:

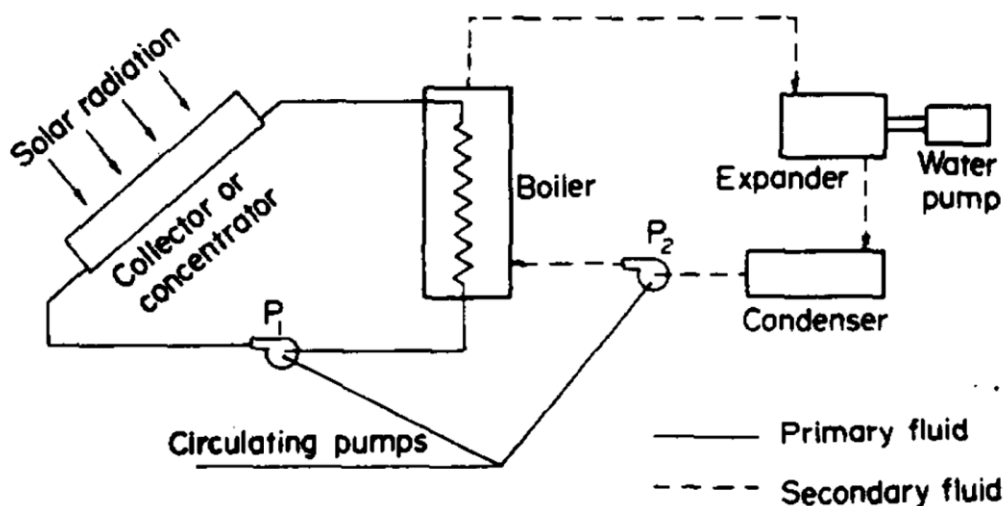
- Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης (MEB)
- Απόσταξη πολλαπλής φάσης (MSF)

Στις διεργασίες με μεμβράνες προτιμώνται φωτοβολταϊκά συστήματα. [13]

Άντληση νερού άρδευσης

Αυτή η εφαρμογή έχει ενδιαφέρον σε απομονωμένες αγροτικές περιοχές, που το ηλεκτρικό δίκτυο είναι μακριά και η μεταφορά ορυκτών καυσίμων αντιοικονομική. Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια είναι άφθονη στις περισσότερες ξηρές περιοχές, όπου η γεωργία εξαρτάται από την άρδευση και δε χρειάζονται συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, αφού οι αντλίες μπορούν να λειτουργούν τις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια.

Η θερμική ενέργεια που παράγεται στους συλλέκτες, πρέπει να μετατραπεί σε μηχανική για τη λειτουργία της αντλίας. Όταν χρησιμοποιούνται συλλέκτες PTC, προτείνεται ο θερμοδυναμικός κύκλος Rankine. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, υπάρχουν δύο κυκλώματα. Στο πρώτο ρέει το εργαζόμενο μέσο των συλλεκτών (>200 °C) και στο δεύτερο κύκλωμα νερό. Με ένα εναλλάκτη θερμότητας παράγεται ατμός από τη θερμική ενέργεια των ηλιακών και αποτονώνεται σε ένα στρόβιλο, ο οποίος κινεί την αντλία. [14]



Σχήμα 2.21: Διάταξη εγκατάστασης άντλησης νερού [14]

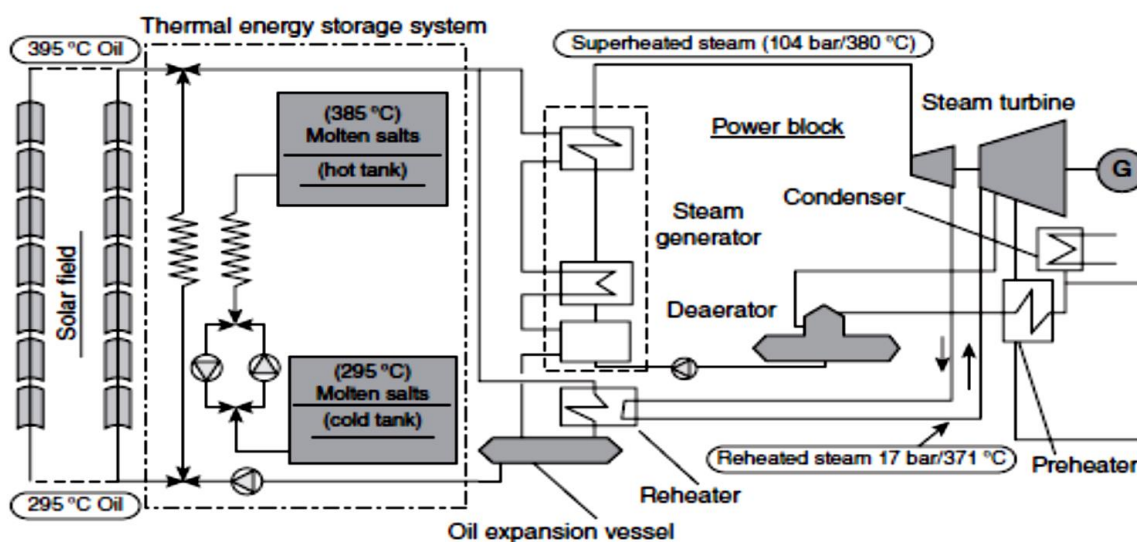
Εφαρμογές στη Χημεία

Στον κλάδο της φωτοχημείας, ειδικές φωτοχημικές αντιδράσεις αξιοποιούν τα φασματικά χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας για να επιφέρουν ειδικούς καταλυτικούς μετασχηματισμούς, που βρίσκουν χρήση στην απομάκρυνση επικίνδυνων οργανικών ουσιών από το νερό ή τον αέρα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες PTC που διαθέτουν έναν υάλινο αγωγό στη θέση του μεταλλικού απορροφητικού σωλήνα, που λειτουργεί ως φωτοαντιδραστήρας. Το ρευστό που πρόκειται να 'καθαριστεί' ρέει μέσα στον υάλινο αγωγό. Η αξιοποίηση της υπεριώδους ακτινοβολίας σε συνδυασμό με ένα φωτοκαταλύτη (π.χ. διοξείδιο του τιτανίου – TiO_2), σωματίδια του οποίου εμπεριέχονται στο ρευστό, επιτυγχάνει την αποσύνθεση των επικίνδυνων οργανικών ουσιών σε μη τοξικές. [8]

2.6.4: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Η εμπειρία στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι περιορισμένη σε σχέση με τους συλλέκτες. Η εγκατάσταση SEGS I χρησιμοποίησε ένα σύστημα, που αποθήκευε σε δύο δεξαμενές θερμικό λάδι ESSO 500 με συνολική θερμοχωρητικότητα 140 MWh. Το συγκεκριμένο σύστημα τέθηκε σε λειτουργία το 1984 και καταστράφηκε από φωτιά το 1999. Η λειτουργία του θεωρούνταν αξιόπιστη και αποτελεσματική μέχρι τότε.

Λόγω του υψηλού περιβαλλοντικού κινδύνου των μεγάλων δεξαμενών γεμάτων με θερμικό λάδι, οι πρόσφατες εγκαταστάσεις συλλεκτών PTC χρησιμοποιούν ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας δύο δεξαμενές λιωμένου άλατος. Τυπική διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.22: Τυπική διάταξη μονάδας με δεξαμενές λιωμένου άλατος για αποθήκευση ενέργειας [7]

Τις ώρες με ηλιοφάνεια, οι συλλέκτες παρέχουν ενέργεια τόσο στο τμήμα παραγωγής ισχύος της εγκατάστασης όσο και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Το λιωμένο άλας αντλείται από τη δεξαμενή ‘κρύου’ (295 °C), θερμαίνεται σε έναν εναλλάκτη από το εργαζόμενο μέσο (θερμικό λάδι) και αποθηκεύεται στη δεξαμενή ‘ζεστού’ (385 °C). Τις ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (δε λειτουργούν οι συλλέκτες) η λειτουργία είναι αντίστροφη. Το λιωμένο άλας αντλείται από τη δεξαμενή ‘ζεστού’, αποδίδει την αποθηκευμένη ενέργειά του στο εργαζόμενο μέσο της μονάδας και καταλήγει στη δεξαμενή κρύου. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται περεταίρω λειτουργία της εγκατάστασης. [7]

2.6.5: Νέα εργαζόμενα μέσα

Τα θερμικά έλαια που χρησιμοποιούνται κυρίως ως εργαζόμενα στους ηλιακούς συγκεντρωτικούς παραβολικούς συλλέκτες έχουν, όπως έχει αναφερθεί, δύο μειονεκτήματα:

- Δε πρέπει να ξεπεράσουν τη θερμοκρασία των 400 °C, γιατί αποσυντίθενται.
- Υπάρχει κίνδυνος πυρκαγιάς σε περίπτωση διαρροής τους.

Το όριο των 400 °C είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Νέα εργαζόμενα μέσα έχουν προταθεί και είναι υπό μελέτη για την αντικατάσταση των θερμικών ελαίων. Μερικά από αυτά είναι:

Λιωμένο άλας

Το λιωμένο άλας σε σύγκριση με τα θερμικά έλαια, μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, αφού έχει καλή θερμική ισορροπία μέχρι τους 575 °C. Ακόμη η κατασκευή μιας εγκατάστασης είναι πιο απλή, αφού το λιωμένο άλας μπορεί να αποθηκευτεί άμεσα στις δεξαμενές, χωρίς να χρειάζεται εναλλάκτης. Ένα μειονέκτημα είναι ότι το σημείο κρυσταλοποίησής του (>125 °C) είναι πολύ υψηλότερο σε σχέση με του θερμικού ελαίου (>12 °C) και χρειάζεται ένα ακριβό σύστημα παρακολούθησης της θερμοκρασίας για την αποφυγή στερεοποίησής του όταν ο καιρός είναι κρύος. [7]

Τηγμένα μέταλλα

Πρόσφατα έχει προταθεί η χρήση τηγμένων μετάλλων ως εργαζόμενα μέσα, τα οποία σε υψηλές θερμοκρασίες (~1000 °C) μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση. Μερικά εργαζόμενα μέσα με καλές θερμοδυναμικές ιδιότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι: τηγμένος Κασσίτερος (Sn), Γάλλιο (Ga), Νάτριο (Na) και Μόλυβδος- Βισμούθιο (PbBi), για τα οποία μάλιστα υπάρχει εμπειρία από την πυρηνική τεχνολογία. Τα συγκεκριμένα μέταλλα έχουν υψηλή θερμοκρασία βρασμού, χημική ισορροπία σε υψηλές θερμοκρασίες και καλό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Το μειονέκτημα των περισσότερων τηγμένων μετάλλων είναι η μικρή τους θερμοχωρητικότητα. [16]

Αέρια εργαζόμενα μέσα

Η χρήση αέριων εργαζόμενων στους συλλέκτες PTC, αποτελεί ένα ενδιαφέρον θέμα μελέτης. Μπορούν να λειτουργήσουν σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, χωρίς να έχουν τους περιορισμούς των θερμικών ελαίων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστούν και θα γίνει σύγκριση στα εξής αέρια:

- Αέρας
- Ήλιο
- Διοξείδιο του άνθρακα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

3.1: Εισαγωγή

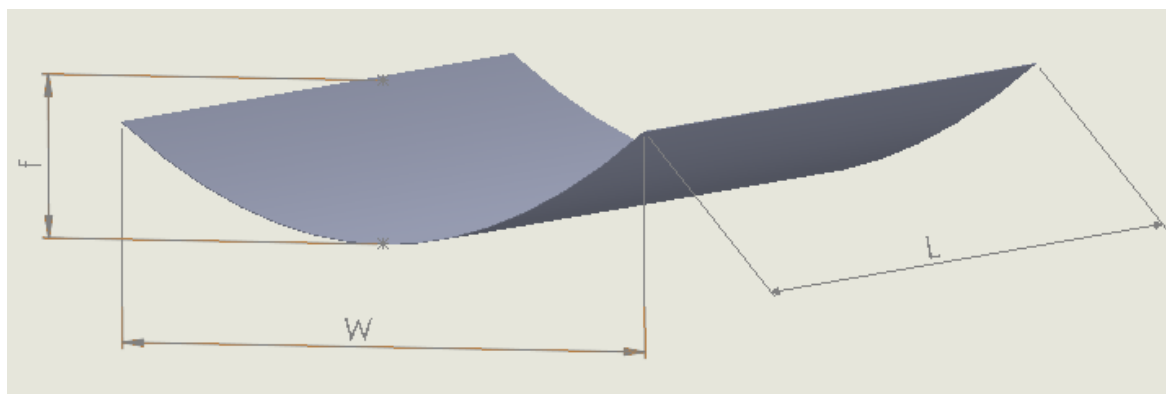
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική περιγραφή του τρόπου σχεδίασης ενός συγκεντρωτικού παραβολικού συλλέκτη τύπου Eurotrough με τη χρήση του λογισμικού **Solidworks**. Οι συλλέκτες Eurotrough έχουν συνήθως συνολικό μήκος 100 – 150 m αποτελούμενο από κομμάτια. Στην παρούσα εργασία θα σχεδιαστεί και θα μελετηθεί ένα κομμάτι μήκους 12 m. Αρχικά θα γίνει περιγραφή του τρόπου σχεδιασμού των συνιστωσών του συλλέκτη (συγκεντρωτής, απορροφητής και σωλήνας κενού) στις δύο διαστάσεις και στη συνέχεια του τρόπου απόδοσης της τρίτης διάστασης.

3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συλλέκτη

Παραβολικός συγκεντρωτής

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες
Μήκος συγκεντρωτή	L	12	m
Άνοιγμα παραβολής	W	5.8	m
Εστιακή απόσταση	f	1.71	m
Επιφάνεια ανοίγματος	A _a	69.6	m ²

Πίνακας 3.1: Διαστάσεις συγκεντρωτή

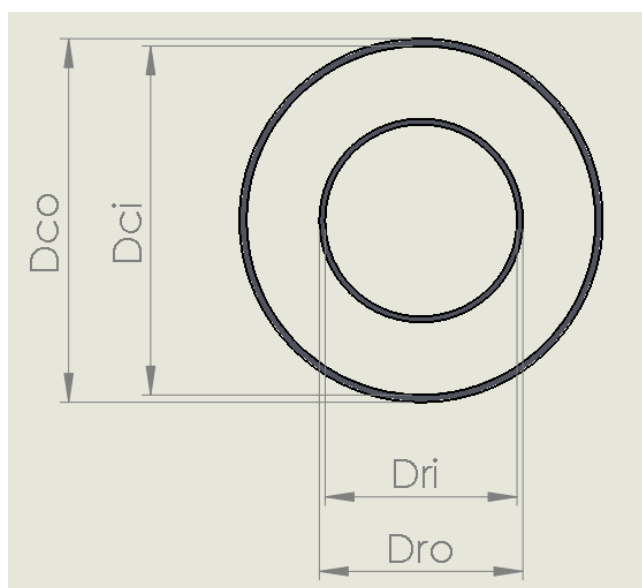


Σχήμα 3.1: Παραβολικός συγκεντρωτής

Απορροφητής και σωλήνας κενού

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες
Εσωτερική διάμετρος απορροφητή	$D_{\pi i}$	0.066	m
Εξωτερική διάμετρος απορροφητή	$D_{r o}$	0.070	m
Εσωτερική διάμετρος σωλήνα κενού	$D_{c i}$	0.120	m
Εξωτερική διάμετρος σωλήνα κενού	$D_{c o}$	0.125	m

Πίνακας 3.2: Διαστάσεις απορροφητή και σωλήνα κενού



Σχήμα 3.2: Απορροφητής και σωλήνας κενού

Ο λόγος συγκέντρωσης του συλλέκτη είναι:

$$C = \frac{A_a}{A_{r o}} = \frac{A_a}{\pi \cdot D_{r o} \cdot L} = 26.37 \quad (3.1)$$

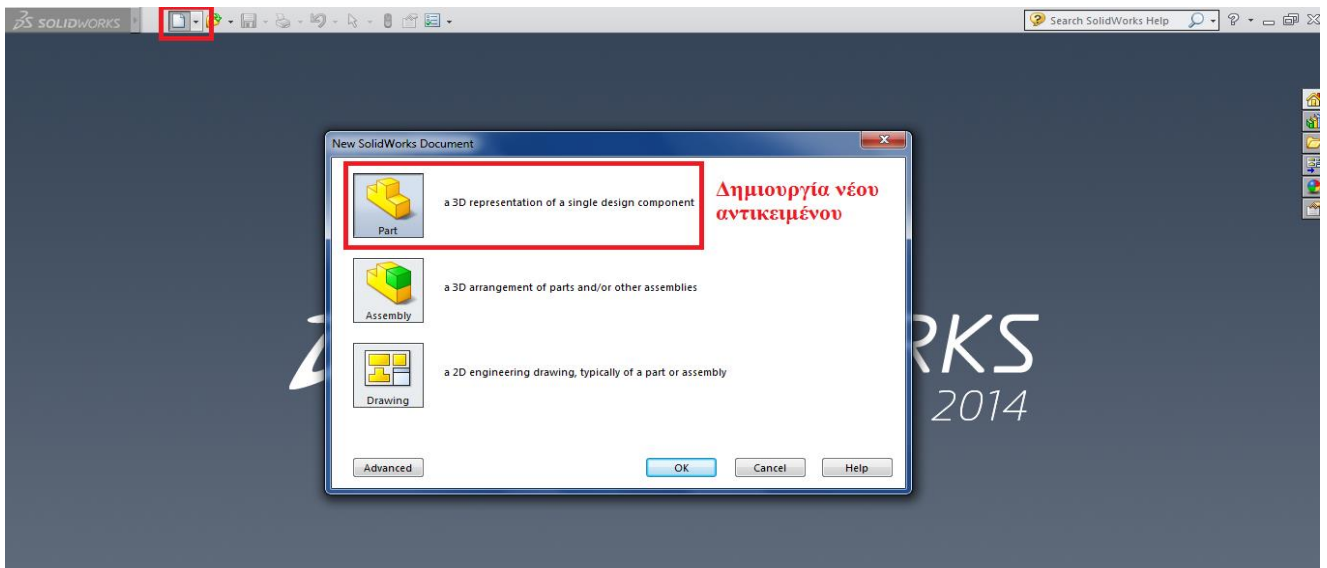
[17, 18]

3.3: Έναρξη προγράμματος

Αρχικά στο περιβάλλον του Solidworks επιλέγεται η εντολή **New** για τη δημιουργία ενός νέου αρχείου. Στο παράθυρο που εμφανίζεται υπάρχουν τρεις επιλογές:

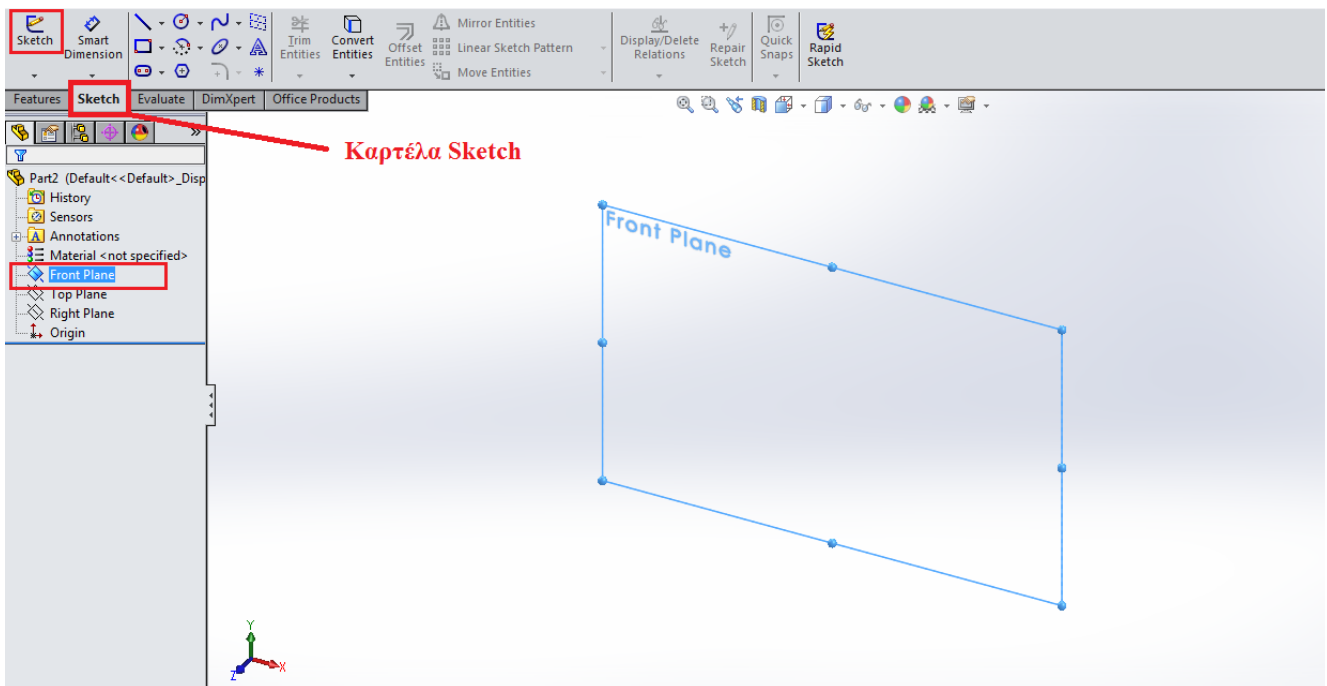
- **Part**: Δημιουργία νέου αντικειμένου.
- **Assembly**: Δημιουργία συναρμολογημένης κατασκευής από επιμέρους αντικείμενα.
- **Drawing**: Δημιουργία σχεδίου.

Επιλέγεται η εντολή **Part** για τη δημιουργία ενός νέου αντικειμένου.



Σχήμα 3.3: Δημιουργία νέου αντικειμένου

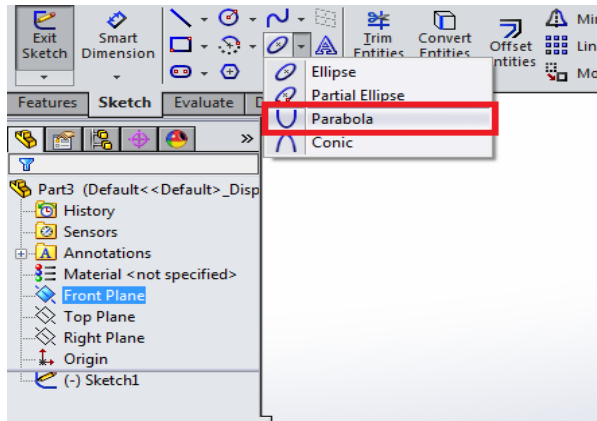
Στη συνέχεια, στο περιβάλλον που εμφανίζεται, επιλέγεται από την αριστερή στήλη ως επίπεδο σχεδίασης το **Front** και μετά χρησιμοποιείται η εντολή **Sketch** στην καρτέλα **Sketch** για τη δημιουργία ενός σχεδίου δύο διαστάσεων.



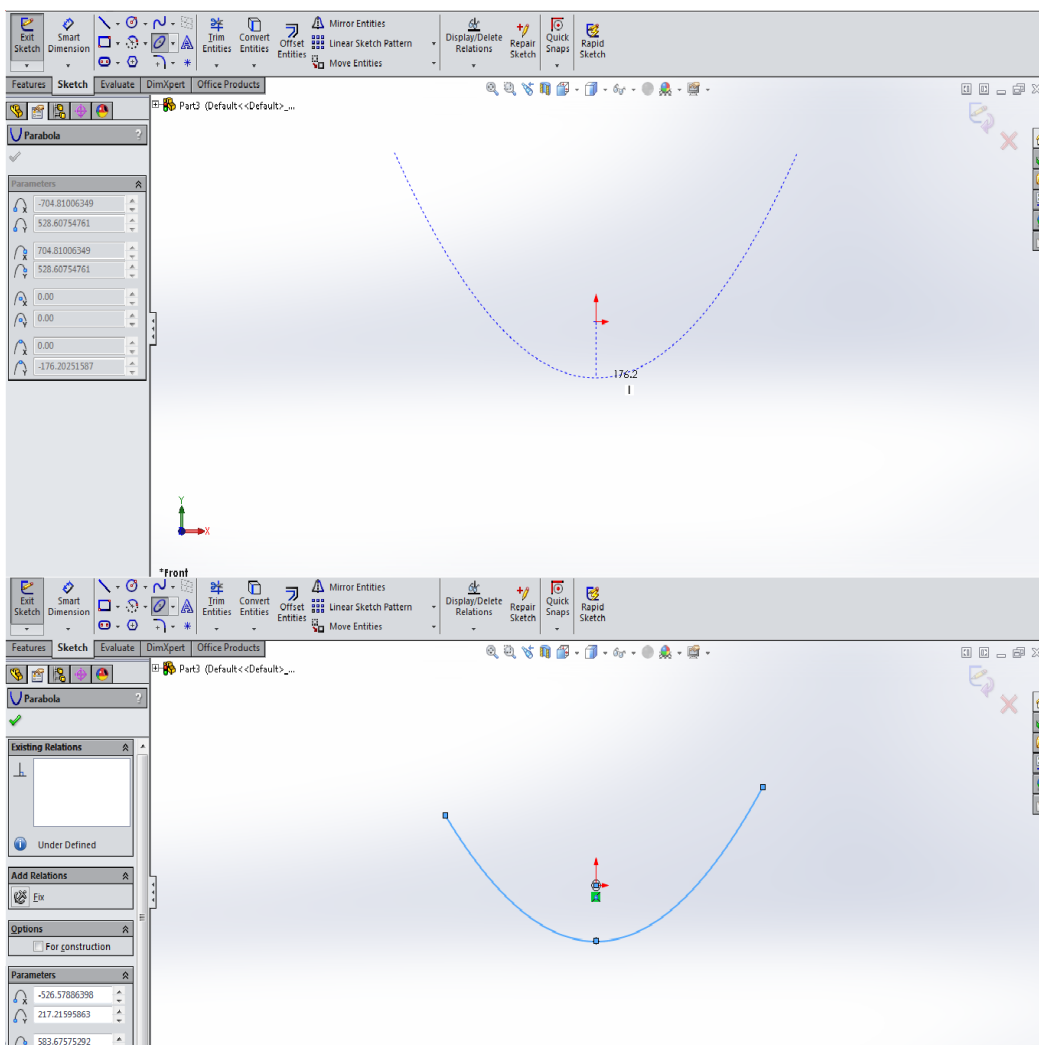
Σχήμα 3.4: Επιλογή επιπέδου σχεδίασης

3.4: Σχεδίαση παραβολικού συγκεντρωτή σε δύο διαστάσεις

Από την καρτέλα *Sketch* επιλέγεται η εντολή *Parabola*. Με εστία την αρχή των αξόνων (*Origin*), χαράσσεται η παραβολή όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:

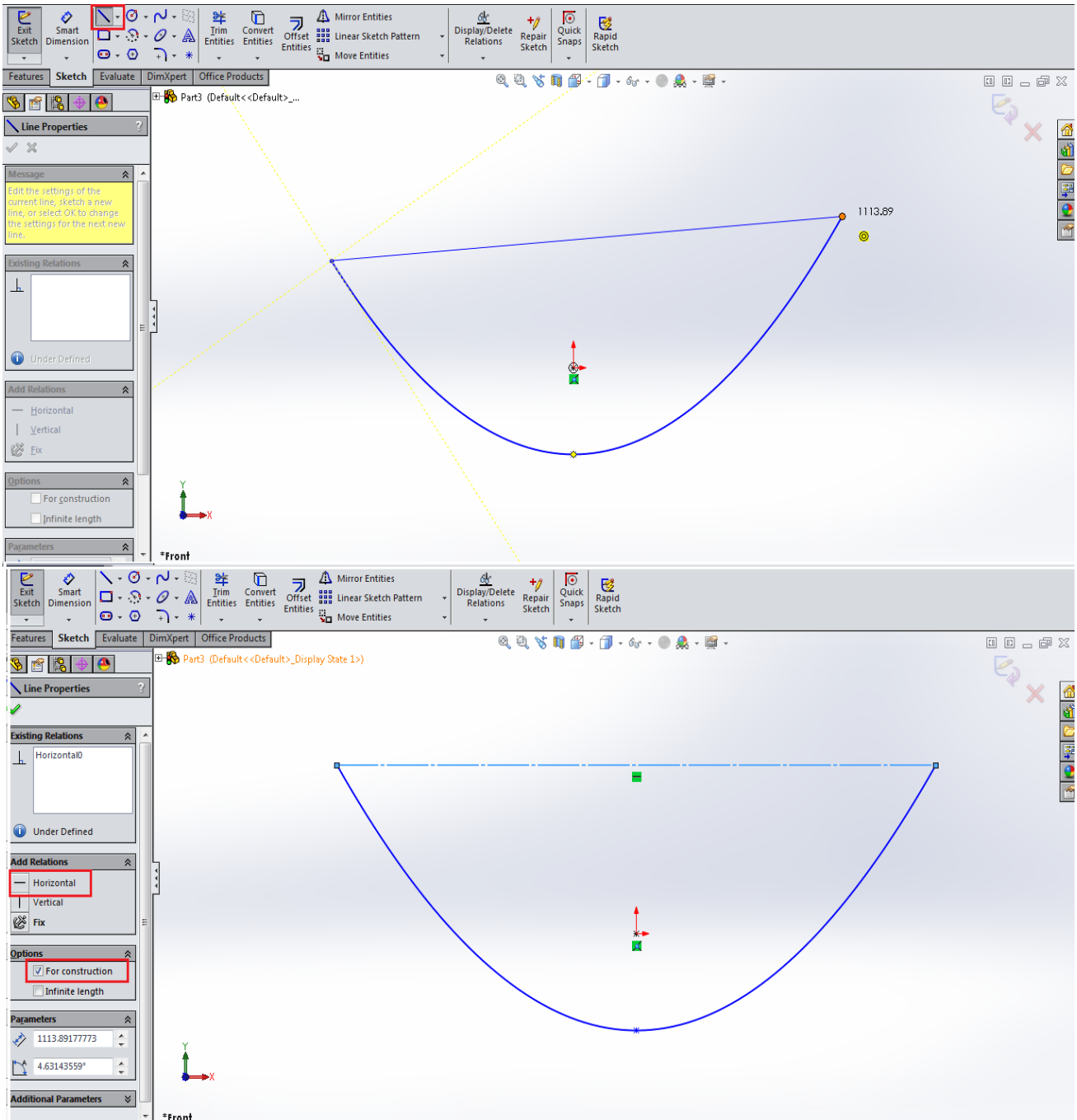


Σχήμα 3.5: Εντολή Parabola



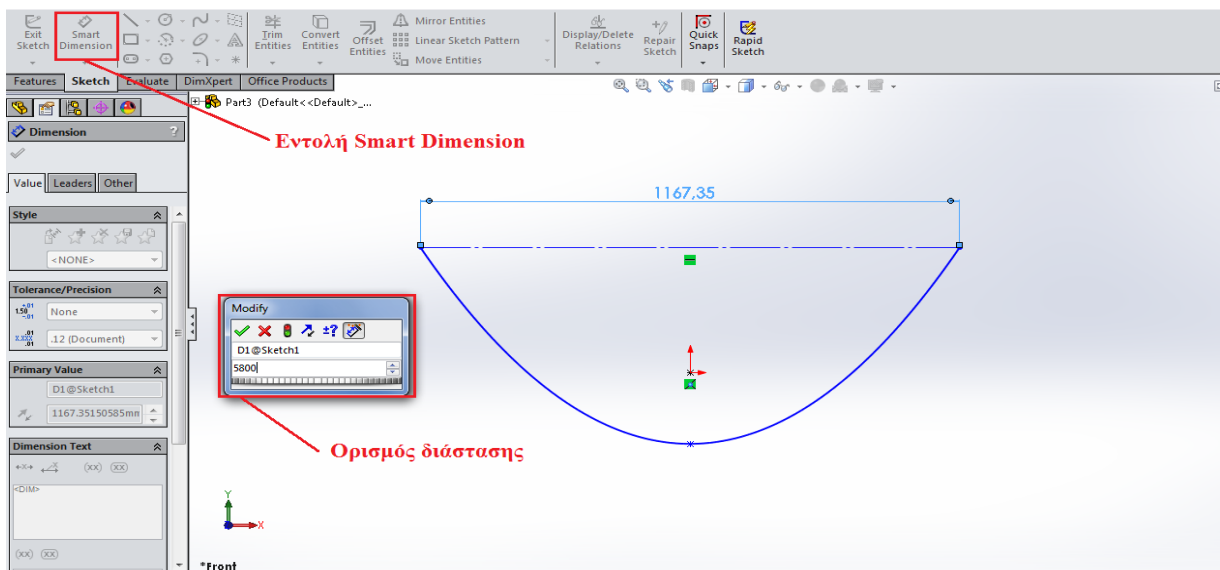
Σχήμα 3.6: Σχεδίαση παραβολής

Από την καρτέλα *Sketch*, επιλέγεται η εντολή *Line* και σχεδιάζεται μία γραμμή που ενώνει τα άκρα της παραβολής. Έπειτα, επιλέγεται αυτή η γραμμή και από τη λίστα που εμφανίζεται αριστερά, στην καρτέλα *Add Relations* επιλέγεται η εντολή *Horizontal* και στην καρτέλα *Options*, μαρκάρεται το *For Construction*. Με αυτές τις εντολές, η γραμμή που σχεδιάστηκε γίνεται οριζόντια και από συμπαγής μετατρέπεται σε αξονική. Έτσι επιτυγχάνεται τα δύο άκρα της παραβολής που σχεδιάστηκαν να έρθουν στο ίδιο ύψος. Ο ρόλος της γραμμής είναι βοηθητικός, γι' αυτό και μετατράπηκε σε αξονική.



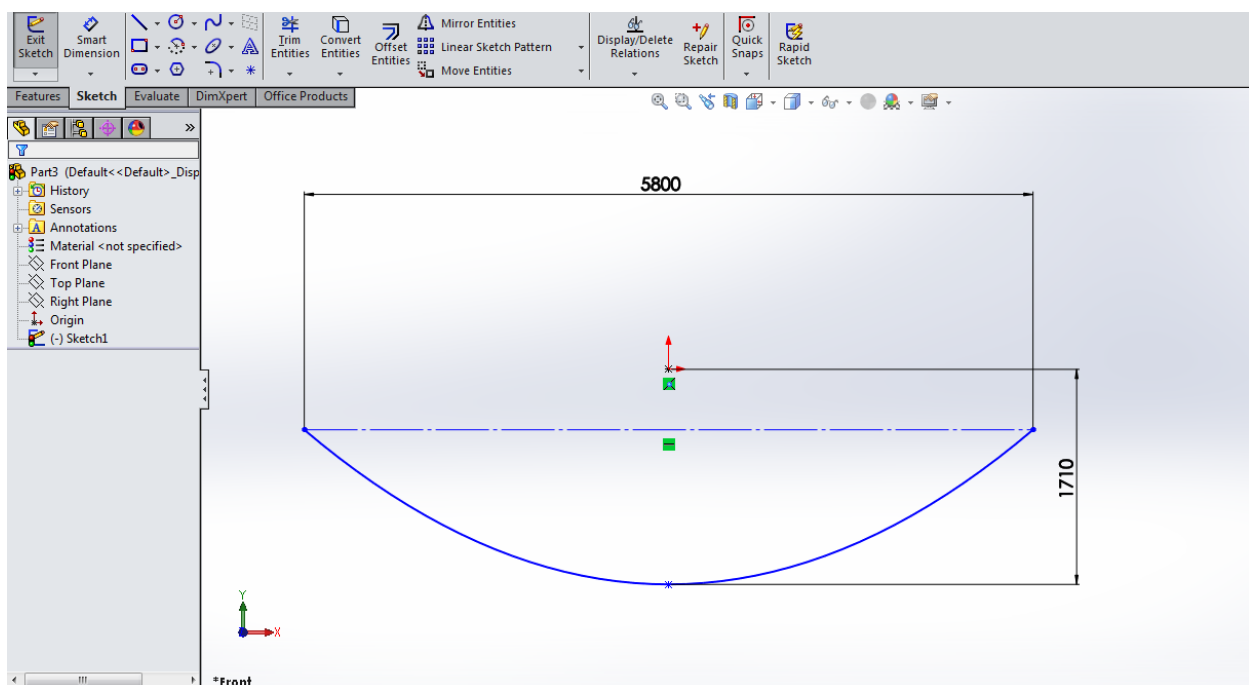
Σχήμα 3.7: Ευθυγράμμιση παραβολής

Επόμενο βήμα είναι η καταχώρηση των διαστάσεων. Με τη χρήση της εντολής *Smart Dimension*, αρχικά επιλέγονται τα δύο άκρα της παραβολής, έτσι ώστε να οριστεί η διάσταση του ανοίγματος, η οποία είναι $W = 5.8 \text{ m}$ (στο Solidworks σε mm που είναι η προεπιλογή).



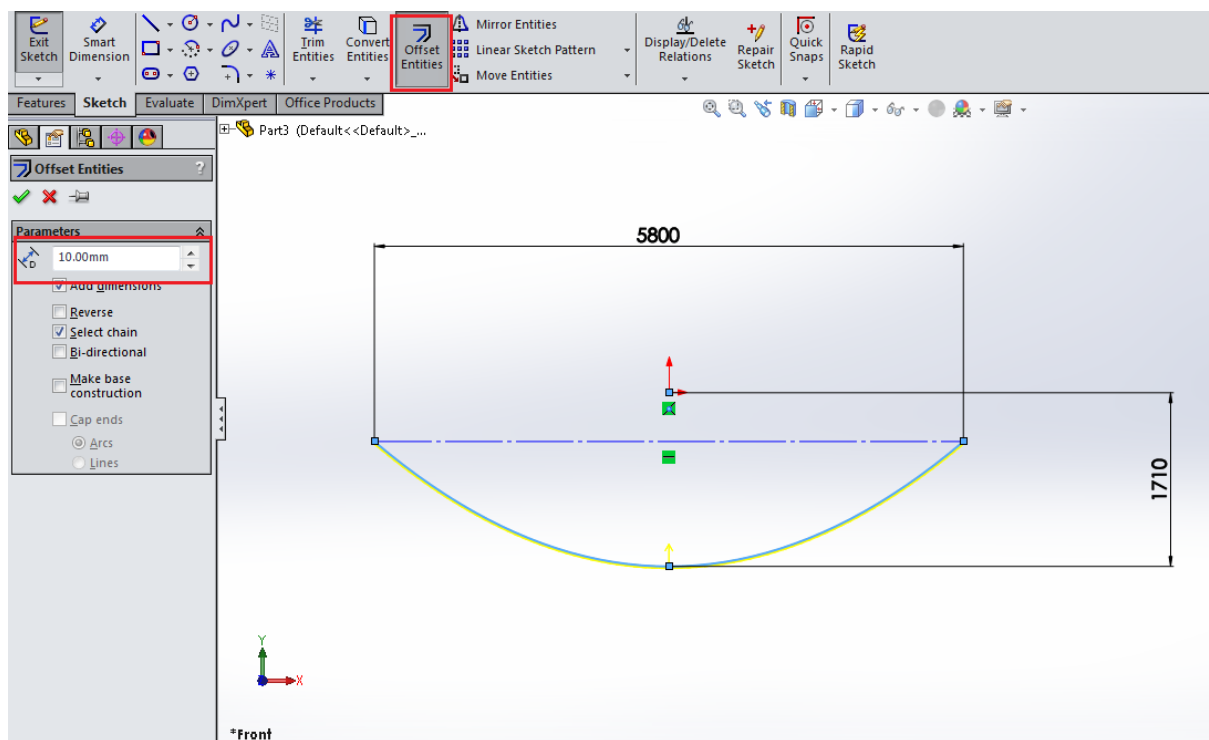
Σχήμα 3.8: Ορισμός διάστασης ανοίγματος παραβολής

Η επόμενη διάσταση που πρέπει να οριστεί είναι η εστιακή απόσταση. Με την ίδια εντολή, επιλέγεται η αρχή των αξόνων (*Origin*) και το κατώτερο σημείο της παραβολής και ορίζεται απόσταση $f = 1710 \text{ mm}$.



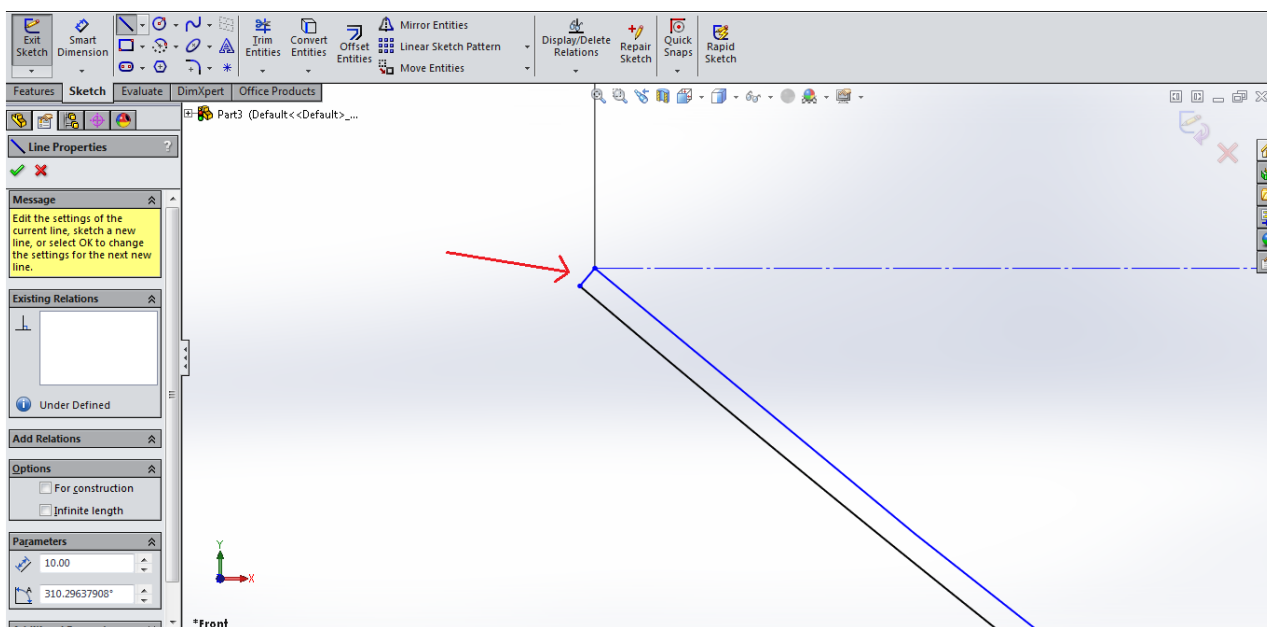
Σχήμα 3.9: Ορισμός εστιακής απόστασης

Αφού ολοκληρώθηκε η διαστασιολόγηση, πρέπει να οριστεί το πάχος του παραβολικού συγκεντρωτή. Γι' αυτό, επιλέγεται η παραβολή που σχεδιάστηκε και χρησιμοποιείται η εντολή *Offset Entities*. Στη λίστα που εμφανίζεται αριστερά ορίζεται πάχος 10 mm.

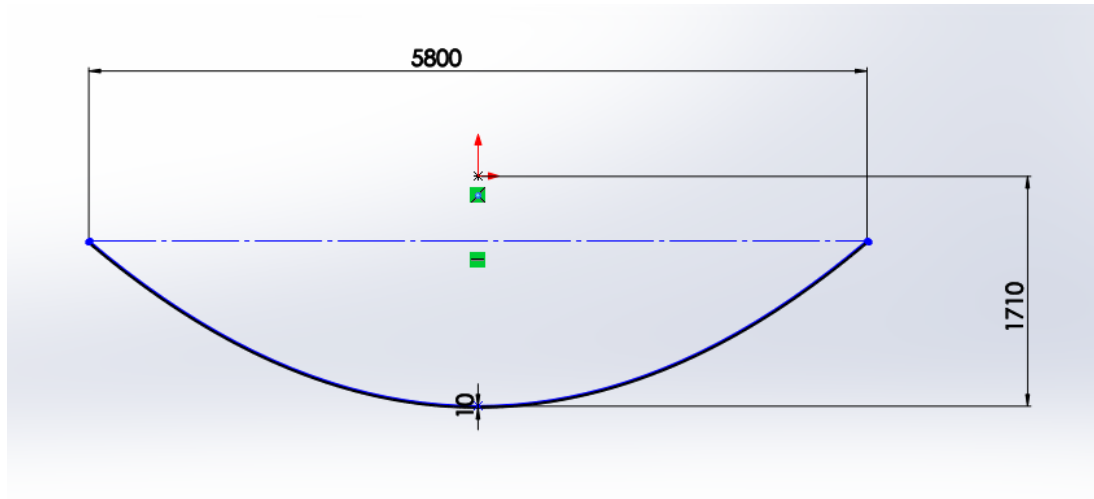


Σχήμα 3.10: Ορισμός πάχους συγκεντρωτή

Με την εντολή *Offset Entities*, δημιουργήθηκε μία δεύτερη όμοια παραβολή σε απόσταση 10 mm. Για να ολοκληρωθεί η σχεδίαση του παραβολικού συγκεντρωτή στις δύο διαστάσεις αρκεί να ενωθούν τα άκρα των δύο παραβολών με μία γραμμή με την εντολή *Line*.



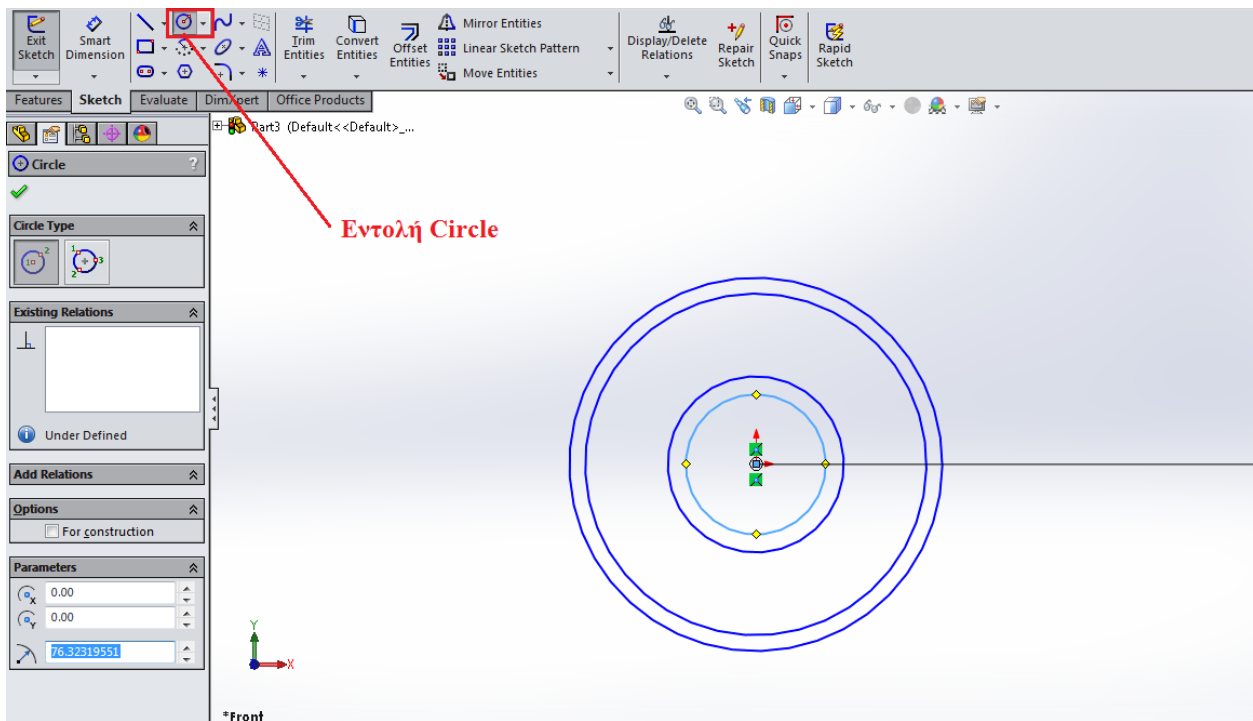
Σχήμα 3.11: Ένωση άκρων παραβολών (μια πλευρά)



Σχήμα 3.12: Ο παραβολικός συγκεντρωτής

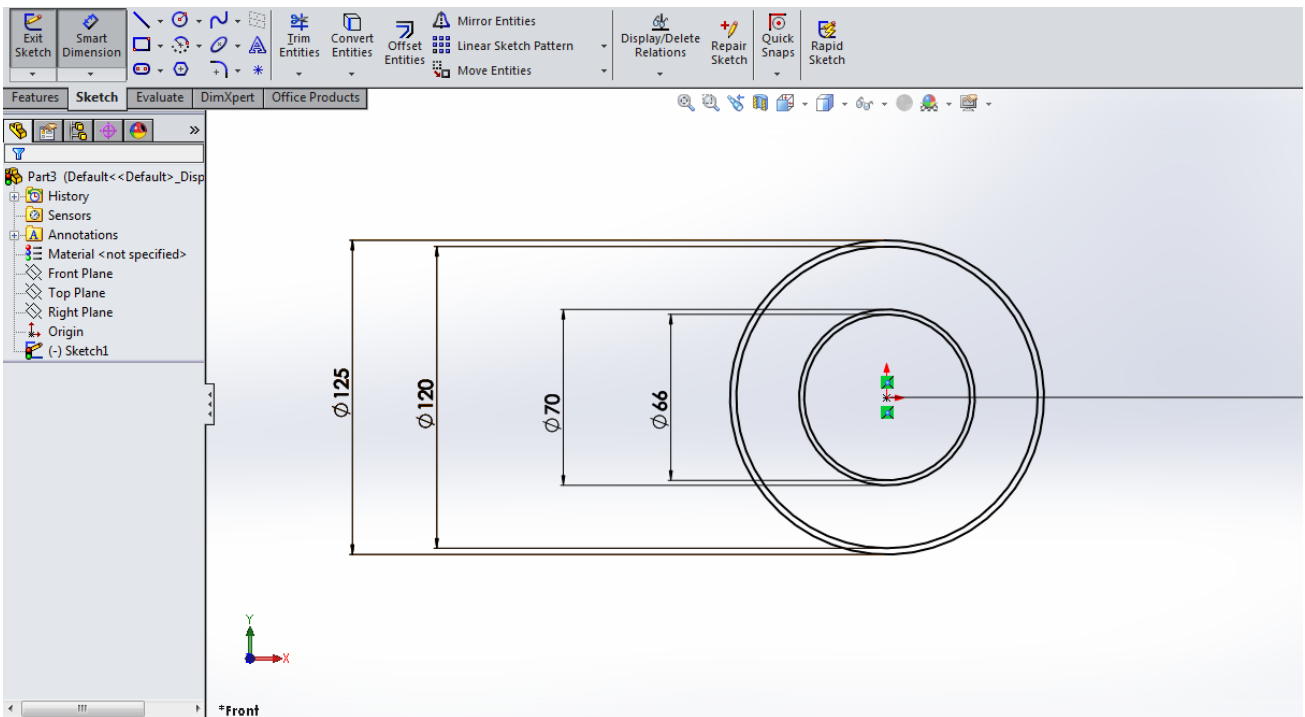
3.5: Σχεδίαση απορροφητή και σωλήνα κενού σε δύο διαστάσεις

Στο ίδιο *Sketch* που σχεδιάστηκε ο συγκεντρωτής, χρησιμοποιείται η εντολή *Circle* και με κέντρο την αρχή των αξόνων (εστία της παραβολής), σχεδιάζονται τέσσερις κύκλοι, δύο που αντιστοιχούν στην εσωτερική και εξωτερική διάμετρο του απορροφητικού σωλήνα και δύο αντίστοιχα για το σωλήνα κενού.



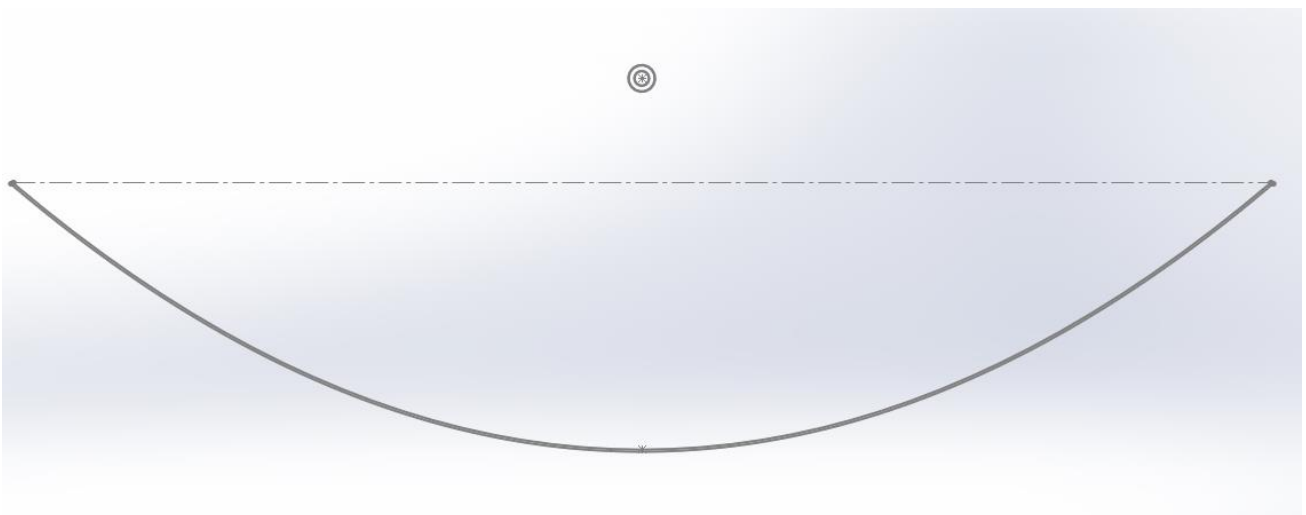
Σχήμα 3.13: Σχεδίαση απορροφητή και σωλήνα κενού

Στη συνέχεια με την εντολή **Smart Dimension** καταχωρούνται οι εσωτερικές και εξωτερικές διαμέτρους των δύο σωλήνων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.14: Καταχώρηση διαμέτρων στον απορροφητή και το σωλήνα κενού

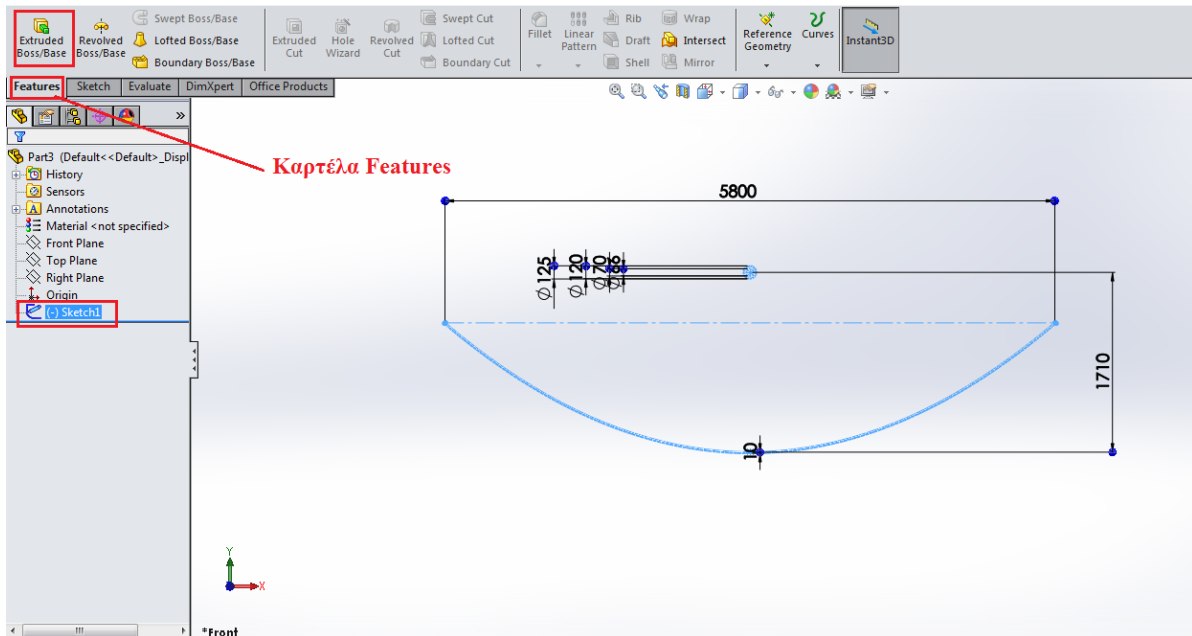
Με τη σχεδίαση του απορροφητή και του σωλήνα κενού έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του συλλέκτη στις δύο διαστάσεις. Ολοκληρώνεται το σχέδιο με την εντολή **Exit Sketch**. Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή του τρόπου ανάπτυξης των συνιστωσών στην τρίτη διάσταση (δημιουργία στερεού σώματος).



Σχήμα 3.15: Ο συγκεντρωτικός παραβολικός συλλέκτης στις δύο διαστάσεις

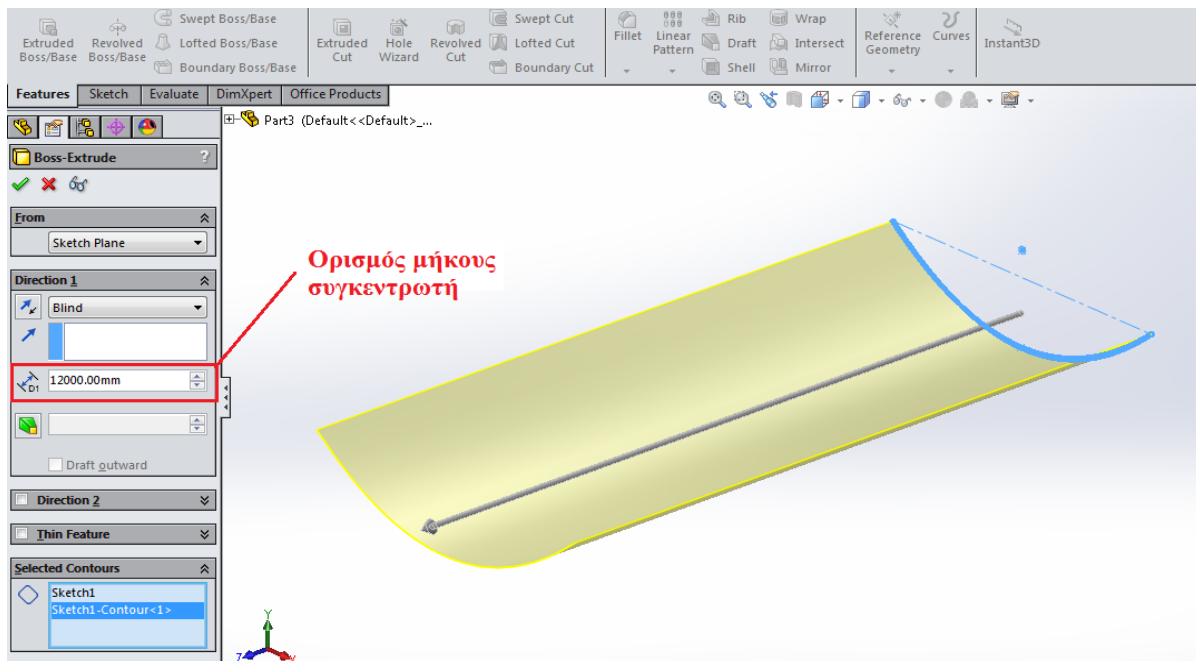
3.6: Σχεδίαση συλλέκτη στις τρεις διαστάσεις

Αρχικά από την αριστερή στήλη επιλέγεται το *Sketch* που δημιουργήθηκε πριν και από την καρτέλα *Features* επιλέγεται η εντολή *Extruded Boss/Base*.

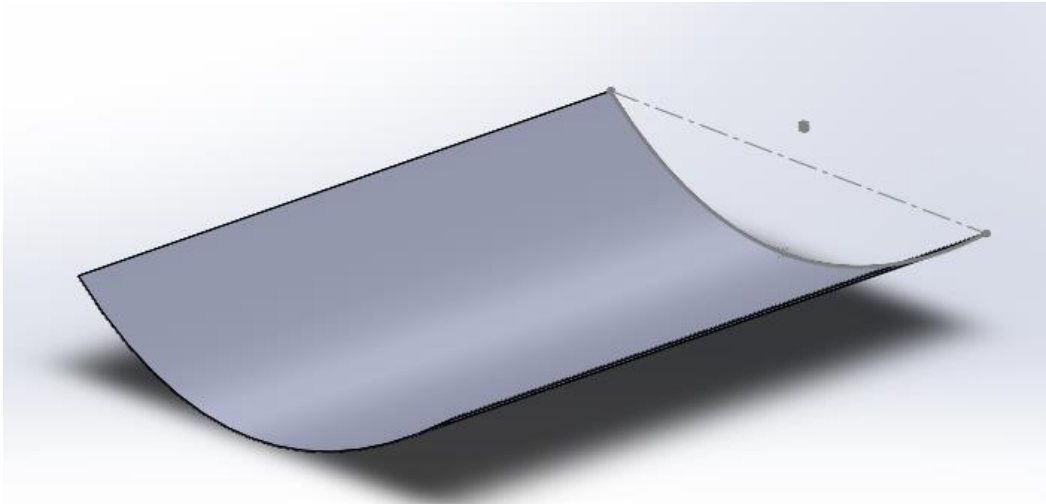


Σχήμα 3.16: Εντολή Extruded Boss/Base

Στη συνέχεια επιλέγεται ο παραβολικός συγκεντρωτής και στην αριστερή στήλη που έχει εμφανιστεί, στην καρτέλα *Direction 1* ορίζεται μήκος ανάπτυξης όσο είναι το μήκος του συγκεντρωτή, δηλαδή 12 m (στο πρόγραμμα σε mm).

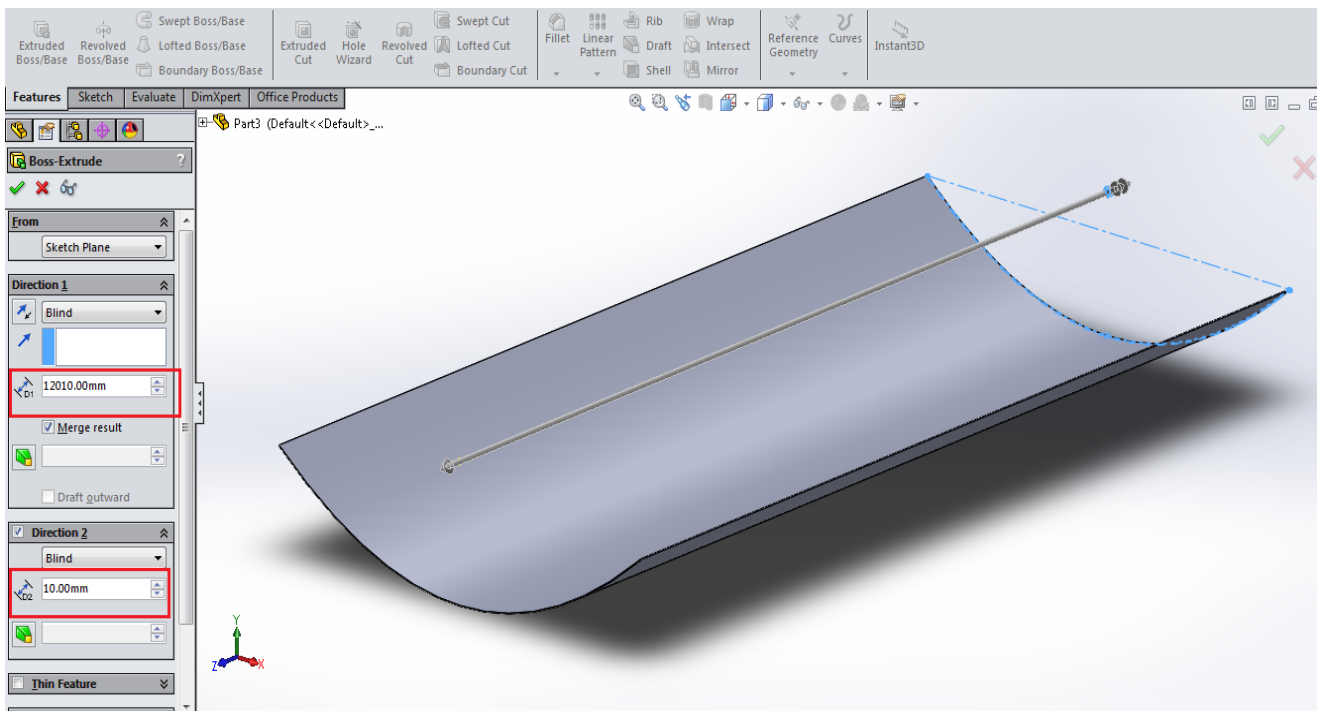


Σχήμα 3.17: Ορισμός μήκους συγκεντρωτή



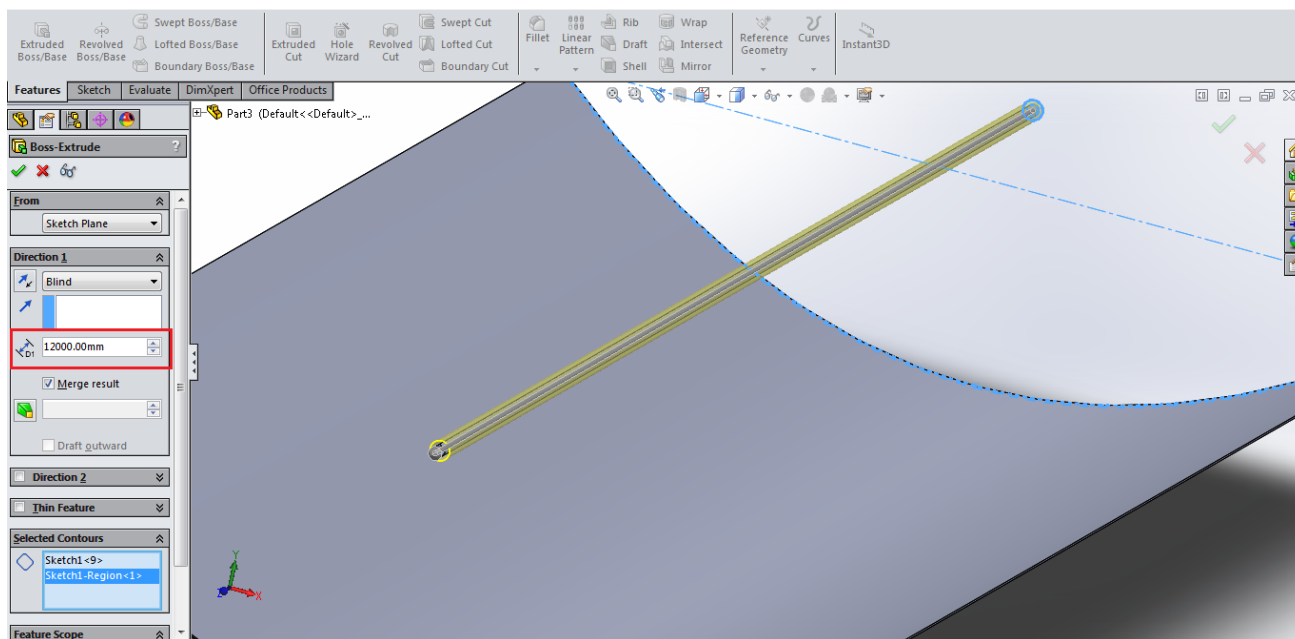
Σχήμα 3.18: Παραβολικός συγκεντρωτής

Με τον ίδιο τρόπο γίνεται και ο ορισμός του μήκους ανάπτυξης του απορροφητή και του σωλήνα κενού. Στον απορροφητή θα οριστεί μήκος λίγο μεγαλύτερο από του συγκεντρωτή για λόγο που θα εξηγηθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Με την εντολή **Extruded Boss/Base**, αφού επιλεγθεί ο απορροφητής, στην καρτέλα **Direction 1** ορίζεται μήκος 12010 mm και στην καρτέλα **Direction 2** ορίζεται μήκος 10 mm. Έτσι ο απορροφητής θα προεξέχει από τον παραβολικό συγκεντρωτή 10 mm από κάθε πλευρά.



Σχήμα 3.19: Ορισμός μήκους απορροφητή

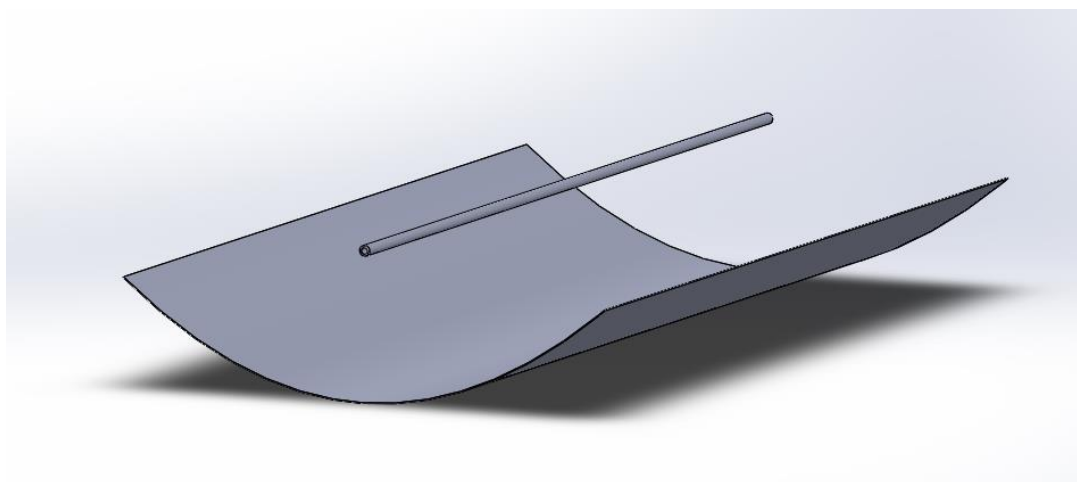
Στο σωλήνα κενού με τον ίδιο τρόπο στην καρτέλα *Direction 1* ορίζεται μήκος 12000 mm.



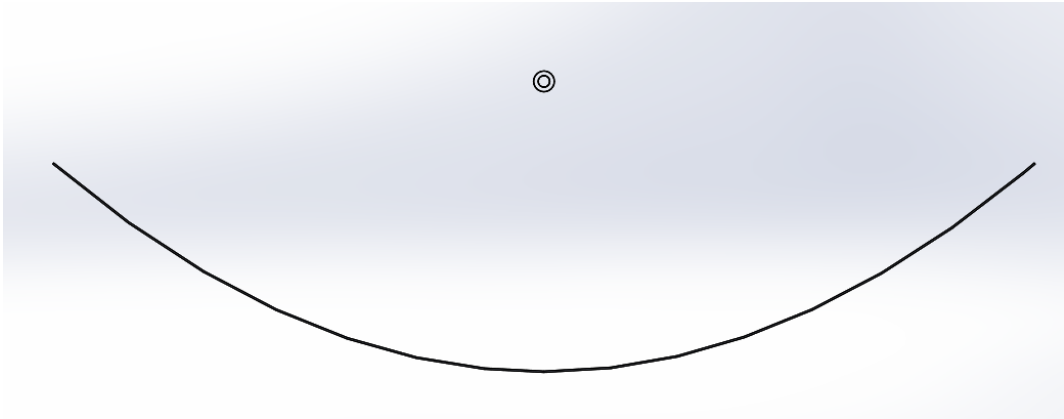
Σχήμα 3.20: Ορισμός μήκους σωλήνα κενού

Αυτό ήταν το τελευταίο βήμα στη σχεδίαση του συλλέκτη. Στο τελευταίο τμήμα του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν σχήματα με τις όψεις του.

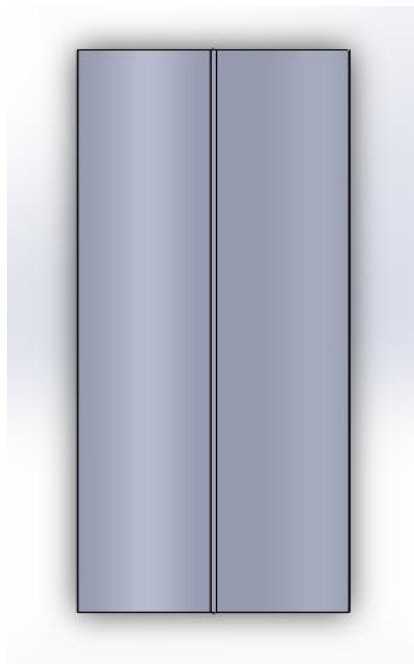
3.7: Όψεις του συγκεντρωτικού παραβολικού συλλέκτη



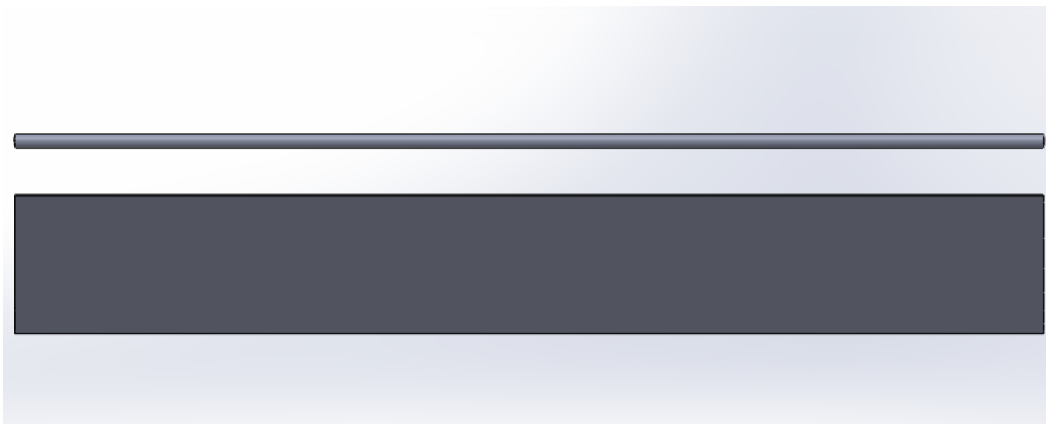
Σχήμα 3.21: Γενική όψη του συγκεντρωτικού παραβολικού συλλέκτη



Σχήμα 3.22: Πρόοψη συλλέκτη



Σχήμα 3.23: Κάτοψη συλλέκτη



Σχήμα 3.24: Πλάγια όψη συλλέκτη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

4.1: Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει προσομοίωση και μελέτη του συγκεντρωτικού παραβολικού συλλέκτη που σχεδιάστηκε. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναλυτική περιγραφή του τρόπου δημιουργίας και διαμόρφωσης αρχείου προσομοίωσης στο Solidworks με τη χρήση της πρόσθετης λειτουργίας *Flow Simulation*. Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα **2.6.5**, θα εξεταστεί η συμπεριφορά (ενεργειακή και εξεργειακή) τριών αερίων ως εργαζόμενα μέσα στο συλλέκτη, του ατμοσφαιρικού αέρα, του ηλίου (He) και του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Για καθένα από αυτά θα εξεταστούν τέσσερις παροχές μάζας (επιλεγμένες για καλύτερη εξεργειακή απόδοση) με παράμετρο τη θερμοκρασία εισόδου.

4.2: Ιδιότητες συνιστωσών συλλέκτη

Παρακάτω δίνονται ορισμένες βασικές ιδιότητες των συνιστωσών του συλλέκτη που χρειάζονται για την προσομοίωση.

Απορροφητής:

- Υλικό: Χαλκός (Copper)
- Τύπος: Επιλεκτικός
- Συντελεστής εκπομπής: $\epsilon_r = 0.095$
- Συντελεστής απορρόφησης: $\alpha = 0.8$

Σωλήνας κενού:

- Υλικό: Γυαλί
- Συντελεστής εκπομπής: $\epsilon_c = 0.88$
- Διαπερατότητα καλύμματος: $\tau = 1$ (συμπεριλήφθηκε στο συντελεστή απορρόφησης του απορροφητή)

4.3: Βασικές εξισώσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν για τους απαραίτητους υπολογισμούς:

Ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς:

$$Q_u = Q_{in} - Q_{loss} \quad (4.1)$$

Προσπίπτουσα ηλιακή ισχύς:

$$Q_{solar} = A_a \cdot G_b \quad (4.2)$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_{solar}} \quad (4.3)$$

Θερμικές απώλειες: Οι θερμικές απώλειες του συλλέκτη μπορούν να υπολογιστούν με διάφορους τρόπους, χρησιμοποιώντας διαφορετικές θερμοκρασίες αναφοράς:

$$Q_{loss} = U_L \cdot A_{ro} \cdot (T_r - T_{amb}) \quad (4.4)$$

$$Q_{loss} = \frac{\sigma \cdot A_{ro} \cdot (T_r^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \cdot \frac{A_{ro}}{A_{ci}}} \quad (4.5)$$

$$Q_{loss} = A_{co} \cdot h_{ca} \cdot (T_c - T_{amb}) + \varepsilon_c \cdot A_{co} \cdot \sigma \cdot (T_c^4 - T_{amb}^4) \quad (4.6)$$

Στην παρούσα εργασία, οι θερμικές απώλειες θα υπολογίζονται από το Solidworks. Για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικών απωλειών, θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 4.4:

$$U_L = \frac{Q_{loss}}{A_{ro} \cdot (T_r - T_{amb})} \quad (4.7)$$

Εξέργεια: Η εξέργεια είναι το μέγιστο δυνατό έργο που μπορεί να παραχθεί από μια δεδομένη πηγή ενέργειας. Πρακτικά, η ροή εξέργειας E μιας θερμότητας Q η οποία έχει θερμοκρασία T [K], σε ένα περιβάλλον θερμοκρασίας T_{amb} [K] ισούται με το έργο που θα μπορούσε να παράξει μια μηχανή Carnot, δηλαδή:

$$E = Q \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T}\right) \quad (4.8)$$

Εν γένει, η εξέργεια μιας θερμότητας Q ισούται με την ίδια τη θερμότητα μειωμένη κατά μία ποσότητα η οποία εκφράζεται μέσω της αύξησης της εντροπίας κατά την παραγωγή έργου, δηλαδή:

$$E_u = Q_u - T_{\text{amb}} \cdot \Delta S \quad (4.9)$$

Η ροή εξέργειας ενός θερμαινόμενου ρευστού υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, η οποία λαμβάνει υπόψη την ωφέλιμη ισχύ, τις θερμοκρασίες εισόδου – εξόδου του ρευστού και την πτώση πίεσης. Η πτώση πίεσης έχει ιδιαίτερη σημασία στους συλλέκτες με αέρια εργαζόμενα μέσα, ειδικά σε περιπτώσεις με μεγάλες παροχές μάζας.

$$E_u = Q_u - \dot{m} \cdot c_p \cdot T_{\text{amb}} \cdot \ln \frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{in}}} - \dot{m} \cdot T_{\text{amb}} \cdot \frac{\Delta P}{\rho \cdot T_{\text{fm}}} \quad (4.10)$$

$$T_{\text{fm}} = \frac{T_{\text{out}} + T_{\text{in}}}{2} \quad (4.11)$$

Για την εξέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας θα χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση, που βασίζεται στη θεωρία του Petela:

$$E_{\text{solar}} = Q_{\text{solar}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{sun}}} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{sun}}}\right)^4\right] \quad (4.12)$$

$$T_{\text{sun}} = 5770 \text{ K}$$

Εξεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{E_u}{E_{\text{solar}}} \quad (4.13)$$

Συντελεστής συναγωγής μεταξύ εργαζόμενου μέσου και απορροφητή:

Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ εργαζόμενου μέσου και απορροφητή, μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με την παρακάτω σχέση:

$$h = \frac{Q_u}{A_{\text{ri}} \cdot (T_r - T_{\text{fm}})} \quad (4.14)$$

Ο δεύτερος τρόπος είναι από τη σχέση ορισμού του αριθμού Nusselt:

$$\text{Nu}_m = \frac{h \cdot D_{\text{ri}}}{k} \quad (4.15)$$

Για στρωτή ροή ($\text{Re} < 2300$), ο αριθμός Nusselt δίνεται από τη σχέση Hausen:

$$Nu_m = 3.66 + \frac{0.0668 \cdot Re \cdot Pr \cdot D_{ri}/L}{1 + 0.04 \cdot (Re \cdot Pr \cdot D_{ri}/L)^{\frac{2}{3}}} \quad (4.16)$$

Για τυρβώδη ροή ($Re > 4000$), ο αριθμός Nusselt δίνεται από τη σχέση:

$$Nu_m = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (4.17)$$

Ο αριθμός Reynolds δίνεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_{ri} \cdot \mu} \quad (4.18)$$

Ο αριθμός Prandtl δίνεται από τη σχέση:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (4.19)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις:

$$A_i = \pi \cdot D_i \cdot L \quad (4.20)$$

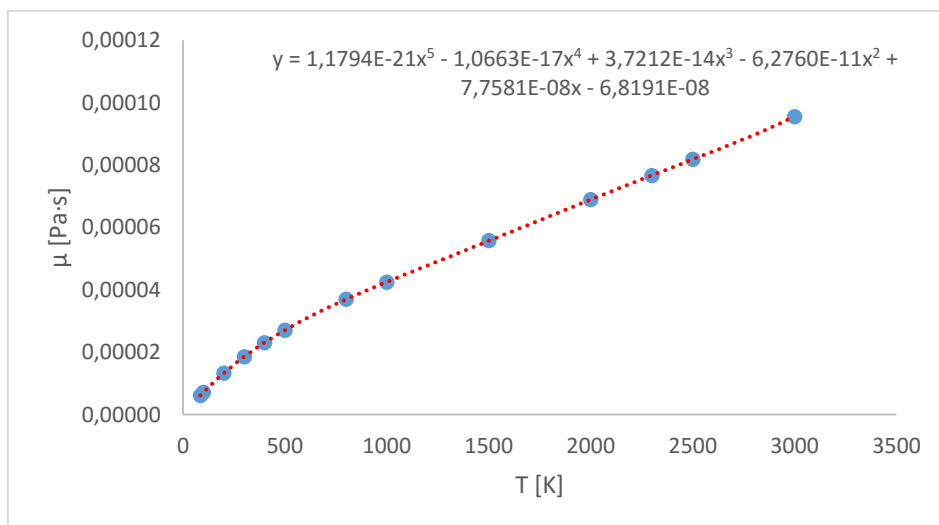
$$i = r_i, r_o, c_i, c_o$$

[19,20,21,22,23]

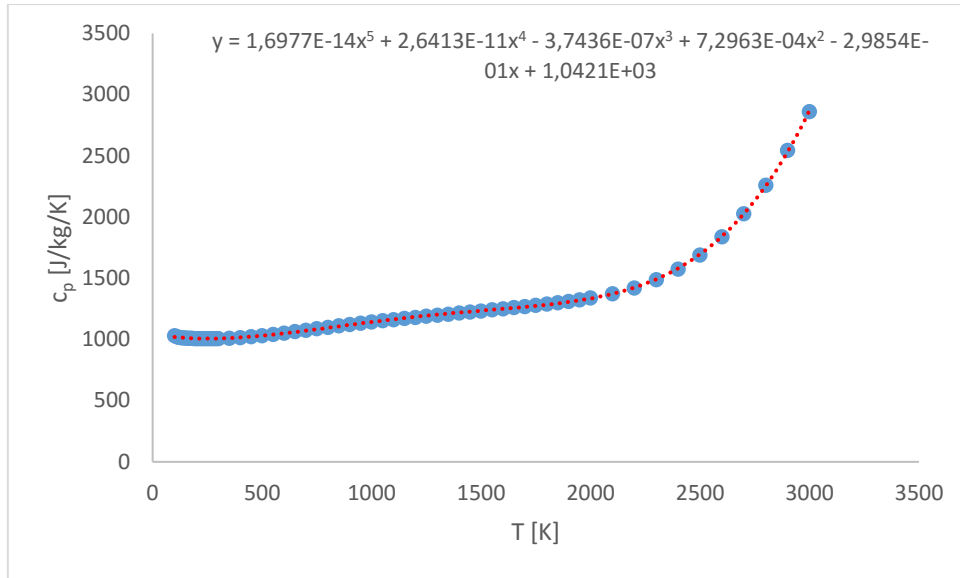
4.4: Θερμοδυναμικές ιδιότητες αερίων

Για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες (ειδική θερμοχωρητικότητα c_p , δυναμική συνεκτικότητα μ και θερμική αγωγιμότητα k) των τριών εξεταζόμενων εργαζόμενων μέσων, θα χρησιμοποιηθούν οι πίνακες που παρέχει το Solidworks. Οι ιδιότητες αυτές δίνονται συναρτήσει της θερμοκρασίας (σε K). Για διευκόλυνση των υπολογισμών, με τη βοήθεια του προγράμματος Microsoft Excel, δημιουργήθηκαν καμπύλες προσέγγισης των ιδιοτήτων. Τα διαγράμματα με τις εξισώσεις των καμπύλων, για κάθε αέριο, φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:

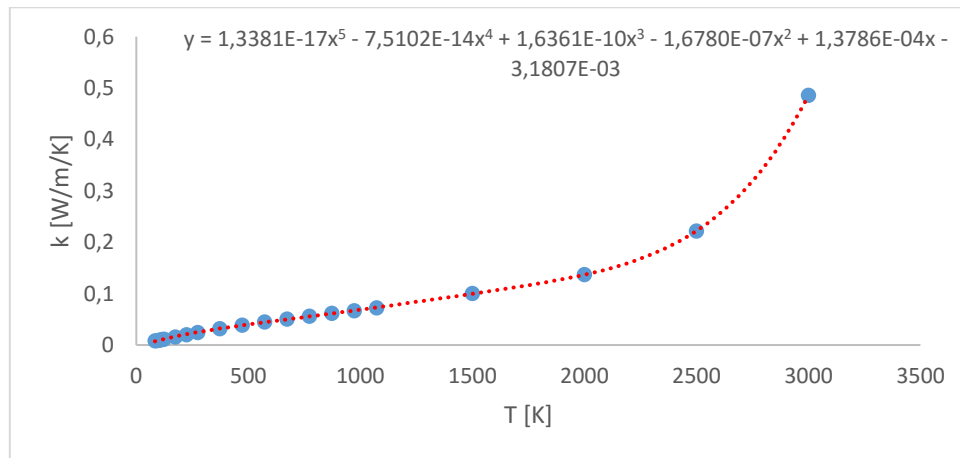
Ατμοσφαιρικός αέρας:



Σχήμα 4.1: Δυναμική συνεκτικότητα αέρα

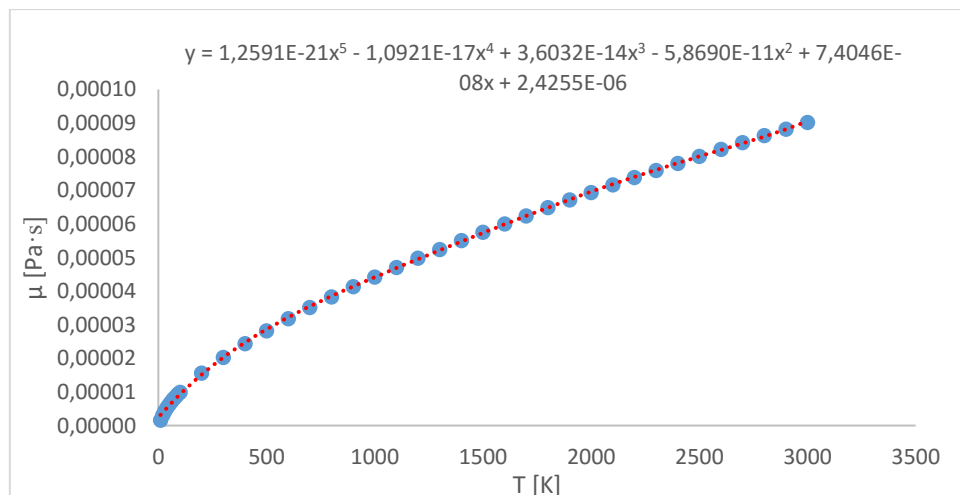


Σχήμα 4.2: Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα

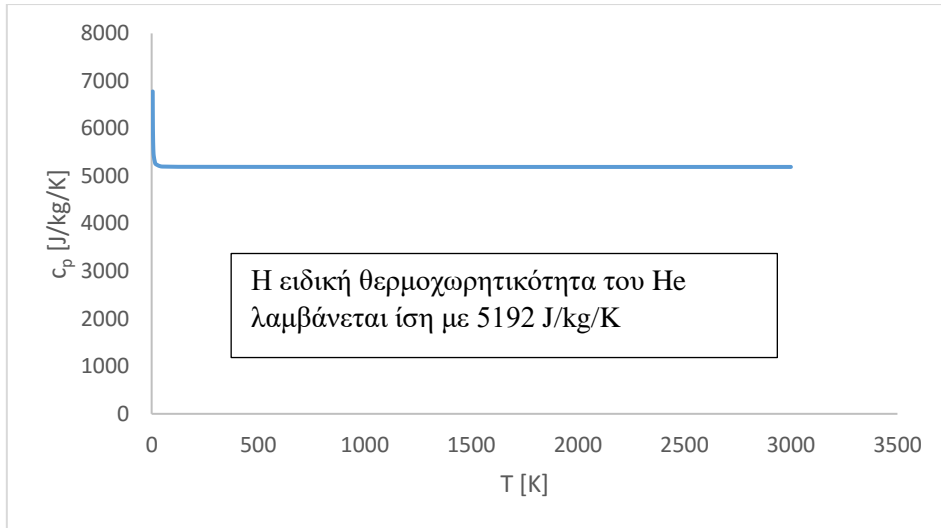


Σχήμα 4.3: Θερμική αγωγιμότητα αέρα

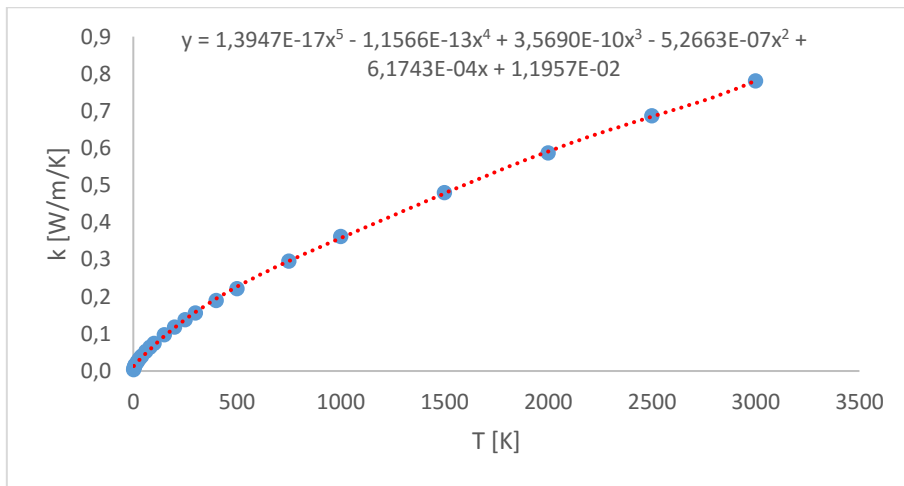
Ήλιο:



Σχήμα 4.4: Δυναμική συνεκτικότητα He

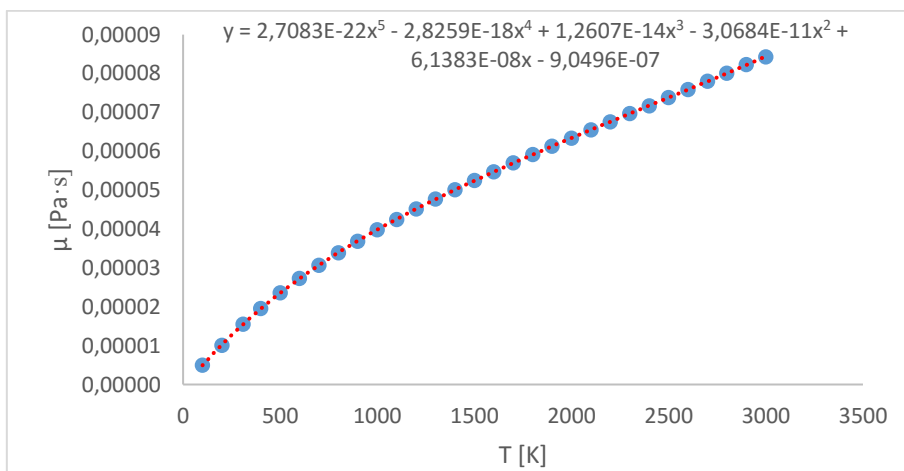


Σχήμα 4.5: Ειδική θερμοχωρητικότητα He

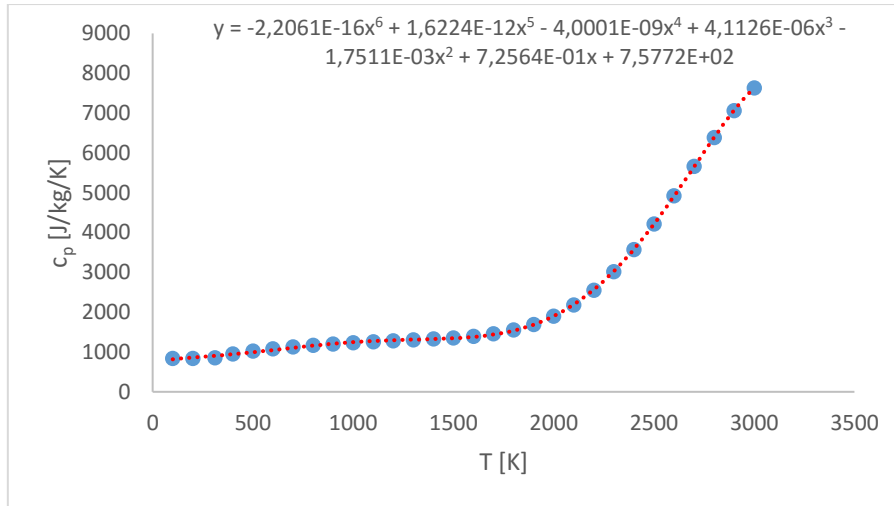


Σχήμα 4.6: Θερμική αγωγιμότητα He

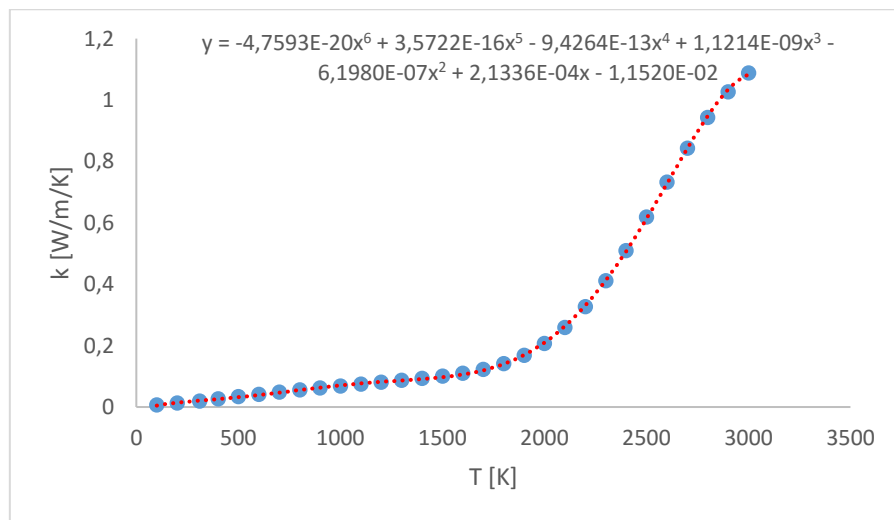
Διοξείδιο του άνθρακα:



Σχήμα 4.7: Δυναμική συνεκτικότητα CO₂



Σχήμα 4.8: Ειδική θερμοχωρητικότητα CO₂



Σχήμα 4.9: Θερμική αγωγιμότητα CO₂

Η πυκνότητα των εργαζόμενων μέσων υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T_{fm}} \quad (4.21)$$

Στους υπολογισμούς θεωρείται ατμοσφαιρική πίεση $P=101325$ Pa.

Η σταθερά R για το κάθε αέριο είναι:

- Αέρας: 287 J/kg/K
- Ήλιο: 2077 J/kg/K
- Διοξείδιο του άνθρακα: 188.9 J/kg/K

Όλοι οι υπολογισμοί των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων γίνονται για μέση θερμοκρασία (εξίσωση 4.11).

4.5: Δεδομένα για την προσομοίωση

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα δεδομένα μεγέθη για καθένα από τα τρία αέρια εργαζόμενα μέσα. Γενικά από τα δεδομένα το μόνο μέγεθος που είναι διαφορετικό για κάθε αέριο είναι η παροχή μάζας. Έτσι στον πρώτο πίνακα περιλαμβάνονται τα ‘κοινά’ δεδομένα και στο δεύτερο οι παροχές μάζας.

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Θερμοκρασία εισόδου	T_{in}	10 – 500 (15 τιμές)	°C
Πίεση στην έξοδο (στατική)	P_{out}	1.01325	bar
Στιγμιαία προσπίπτουσα ακτινοβολία	G_b	1000	W/m ²
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{amb}	10	°C
Συντελεστής συναγωγής καλύμματος-περιβάλλοντος	h_{ca}	10	W/m ² /K

Πίνακας 4.1: Δεδομένα προσομοίωσης κοινά και για τα τρία εργαζόμενα μέσα

Εργαζόμενο μέσο	Παροχή μάζας \dot{m}	Μονάδες
Ατμοσφαιρικός αέρας	0.05 / 0.1 / 0.15 / 0.2	kg/s
Ήλιο	0.01 / 0.03 / 0.05 / 0.07	kg/s
Διοξείδιο του άνθρακα	0.1 / 0.15 / 0.2 / 0.25	kg/s

Πίνακας 4.2: Παροχές μάζας για καθένα εργαζόμενο μέσο

4.6: Ζητούμενα μεγέθη προσομοίωσης

Στον παρακάτω πίνακα περιλαμβάνονται τα μεγέθη που θα οριστούν στο Solidworks να επιστρέφει ως αποτελέσματα μετά το πέρας της προσομοίωσης.

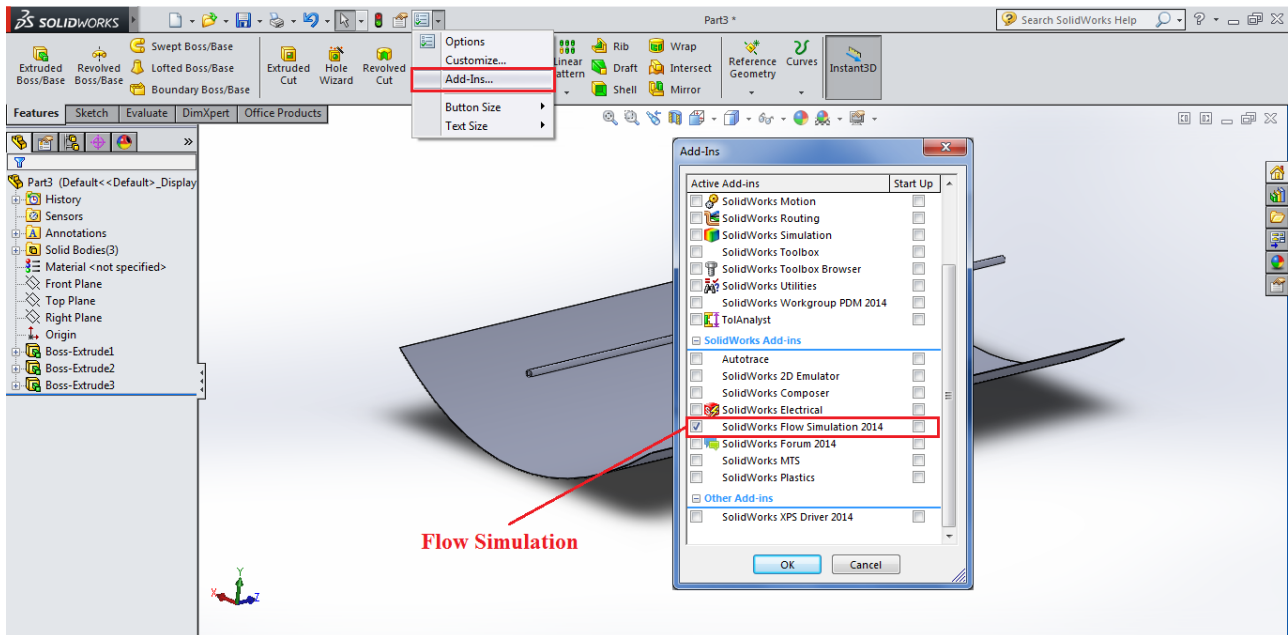
Μέγεθος	Συμβολισμός
Θερμοκρασία εξόδου εργαζόμενου μέσου	T_{out}
Μέση θερμοκρασία απορροφητή	T_r
Μέση θερμοκρασία υάλινου καλύμματος	T_c
Καθαρή ακτινοβολία που δέχεται ο απορροφητής	Q_{in}
Θερμικές απώλειες	Q_{loss}
Πίεση εισόδου	P_{in}
Πίεση εξόδου	P_{out}
Πτώση πίεσης	ΔP

Πίνακας 4.3: Ζητούμενα μεγέθη προσομοίωσης

4.7: Περιγραφή προσομοίωσης

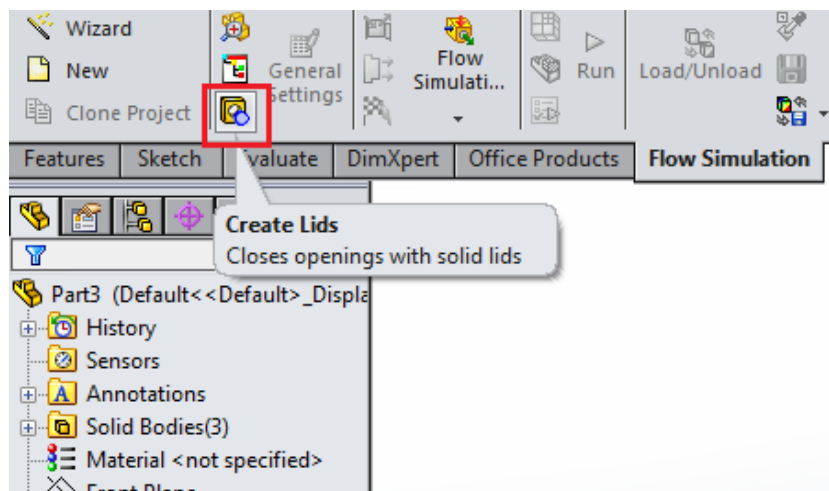
4.7.1: Τοποθέτηση ταπών στον απορροφητή

Αρχικά πρέπει να ενεργοποιηθεί η πρόσθετη λειτουργία **Flow Simulation** στο Solidworks. Έχοντας ανοικτό το αρχείο του συλλέκτη που σχεδιάστηκε, από την καρτέλα **Add-Ins** επιλέγεται το **Flow Simulation** όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



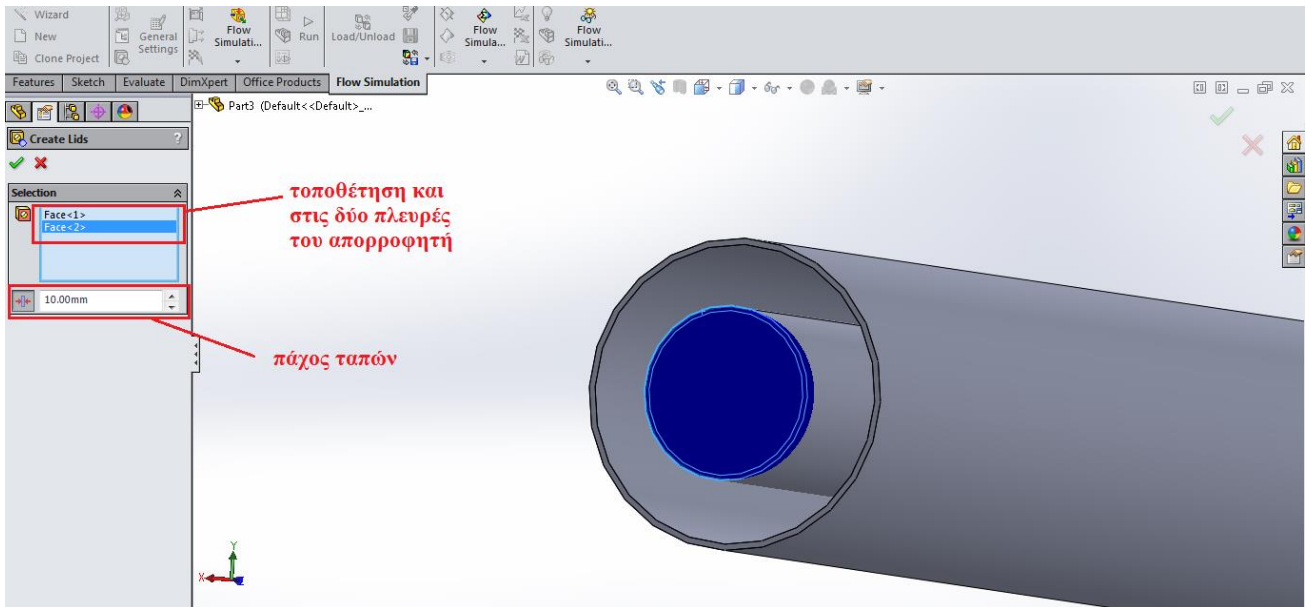
Σχήμα 4.10: Έναρξη Flow Simulation

Επόμενο βήμα είναι να οριστεί ο χώρος που θα ρέει το εργαζόμενο μέσο. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ταπών στην είσοδο και την έξοδο του απορροφητή. Στην καρτέλα **Flow Simulation**, επιλέγεται η εντολή **Create Lids**.



Σχήμα 4.11: Η εντολή Create Lids

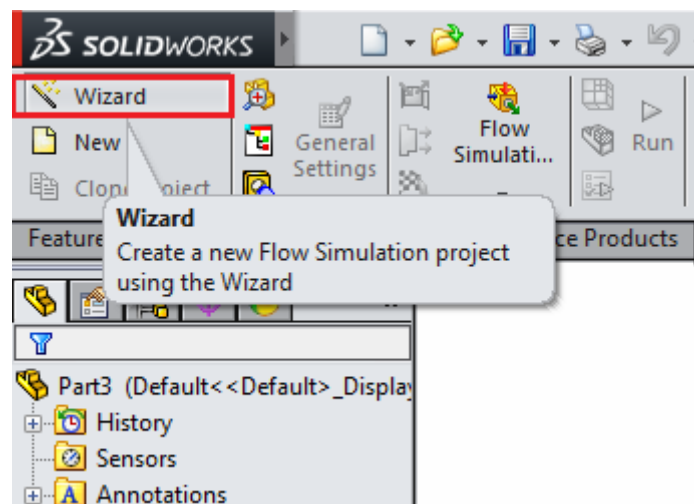
Στη συνέχεια επιλέγονται η είσοδος και η έξοδος του απορροφητή για την τοποθέτηση των ταπών. Στην καρτέλα που εμφανίζεται αριστερά, ορίζεται το πάχος των ταπών στα 10 mm. Ο λόγος που στο σχεδιασμό του απορροφητή ορίστηκε να προεξέχει από τις άλλες συνιστώσες 10 mm είναι για την τοποθέτηση αυτών των ταπών, έτσι ώστε το ρευστό να ρέει σε όλο το μήκος του συλλέκτη (12 m).



Σχήμα 4.12: Τοποθέτηση ταπών στα άκρα του απορροφητή

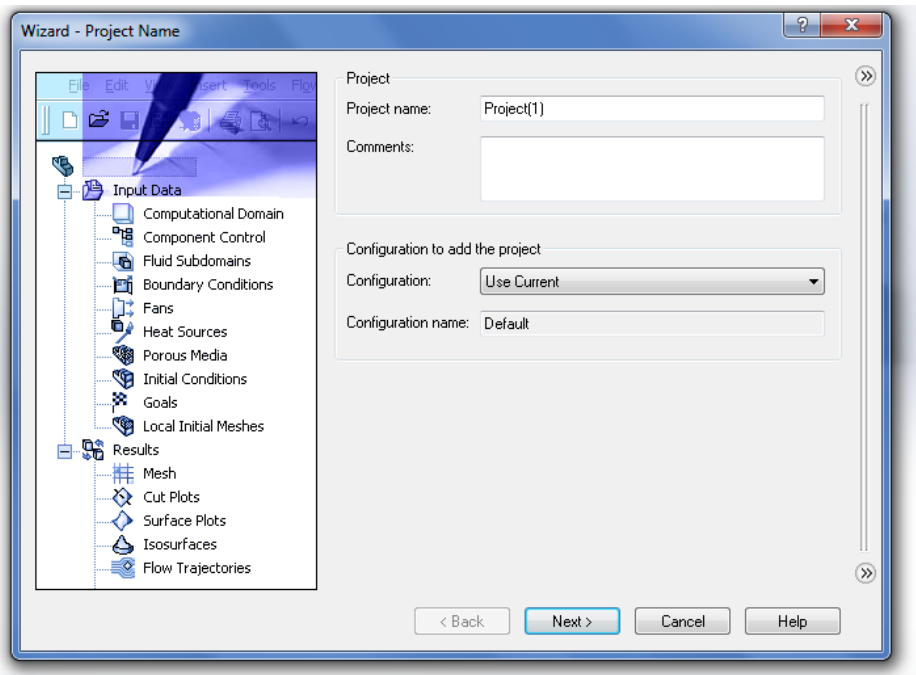
4.7.2: Δημιουργία αρχείου προσομοίωσης

Στην καρτέλα *Flow simulation*, επιλέγεται η εντολή *Wizard* για τη δημιουργία ενός αρχείου προσομοίωσης.



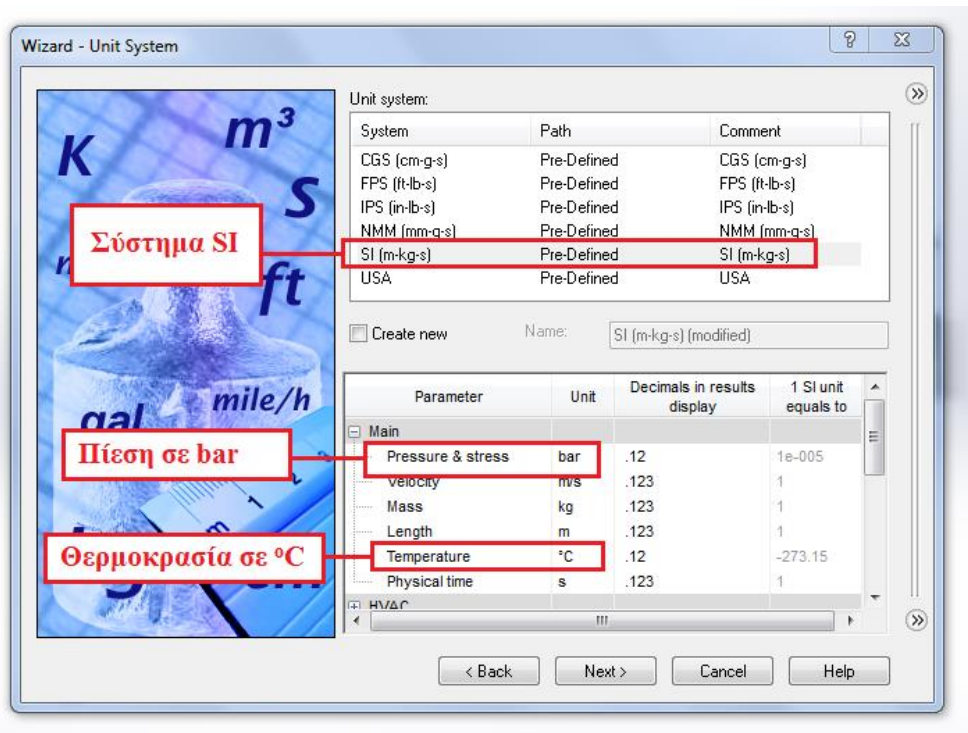
Σχήμα 4.13: Δημιουργία νέας προσομοίωσης

Στο πρώτο παράθυρο που εμφανίζεται, υπάρχουν επιλογές για την ονομασία του project και δε γίνεται κάποια αλλαγή.



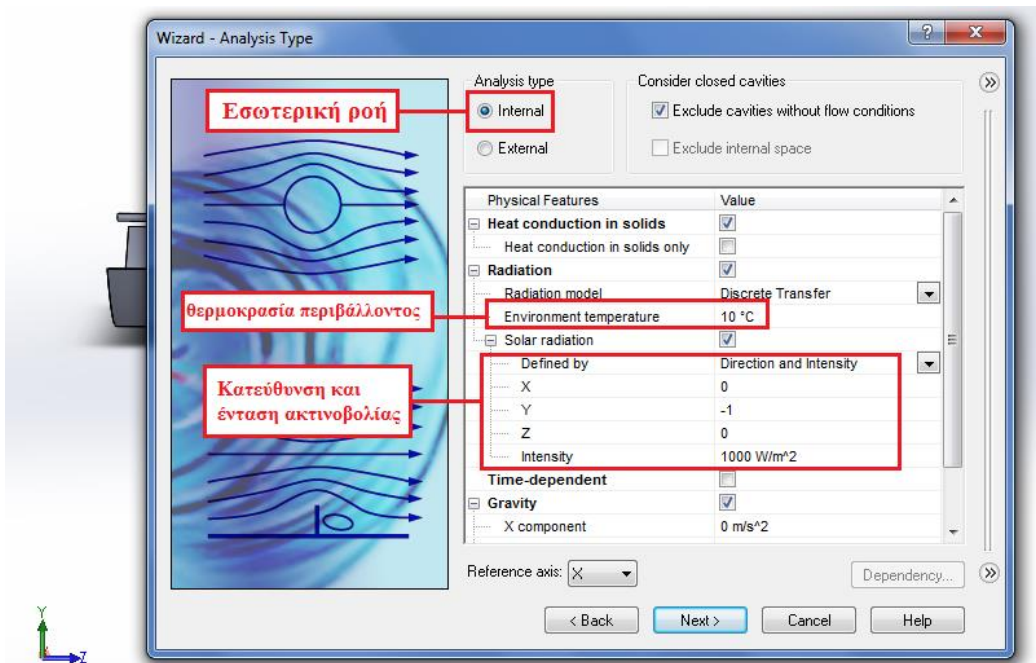
Σχήμα 4.14: Ονομασία νέου project

Στο δεύτερο παράθυρο ορίζονται οι επιθυμητές μονάδες μέτρησης. Επιλέγεται σύστημα μονάδων SI, μονάδα πίεσης το bar και θερμοκρασίας οι βαθμοί Κελσίου.

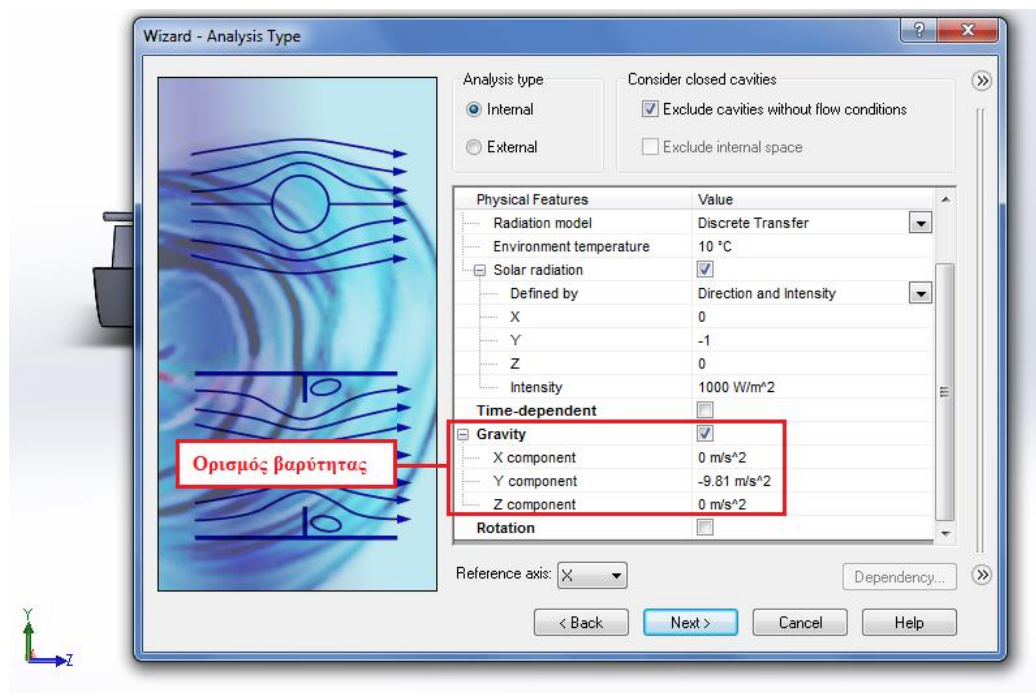


Σχήμα 4.15: Ορισμός μονάδων μέτρησης

Στο τρίτο παράθυρο αρχικά ορίζεται ότι πρόκειται για εσωτερική ροή (ροή σε σωλήνα). Στη συνέχεια επιλέγεται μεταφορά θερμότητας με αγωγή στα στερεά και με ακτινοβολία. Συγκεκριμένα στην ακτινοβολία ορίζεται ότι προσπίπτει κάθετα στο συλλέκτη ($Y = -1$). Ακόμη επιλέγονται θερμοκρασία περιβάλλοντος $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ένταση ακτινοβολίας 1000 W/m^2 . Στο τέλος του παραθύρου επιλέγεται να ληφθεί υπόψη και η βαρύτητα (στον άξονα Y).

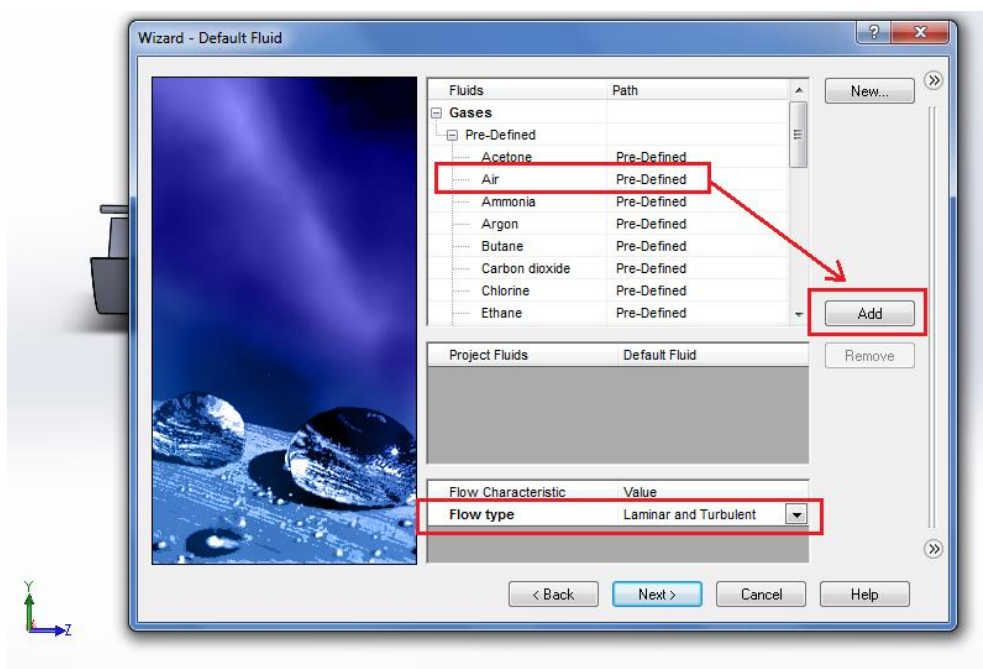


Σχήμα 4.16: Ορισμός αγωγής και ακτινοβολίας



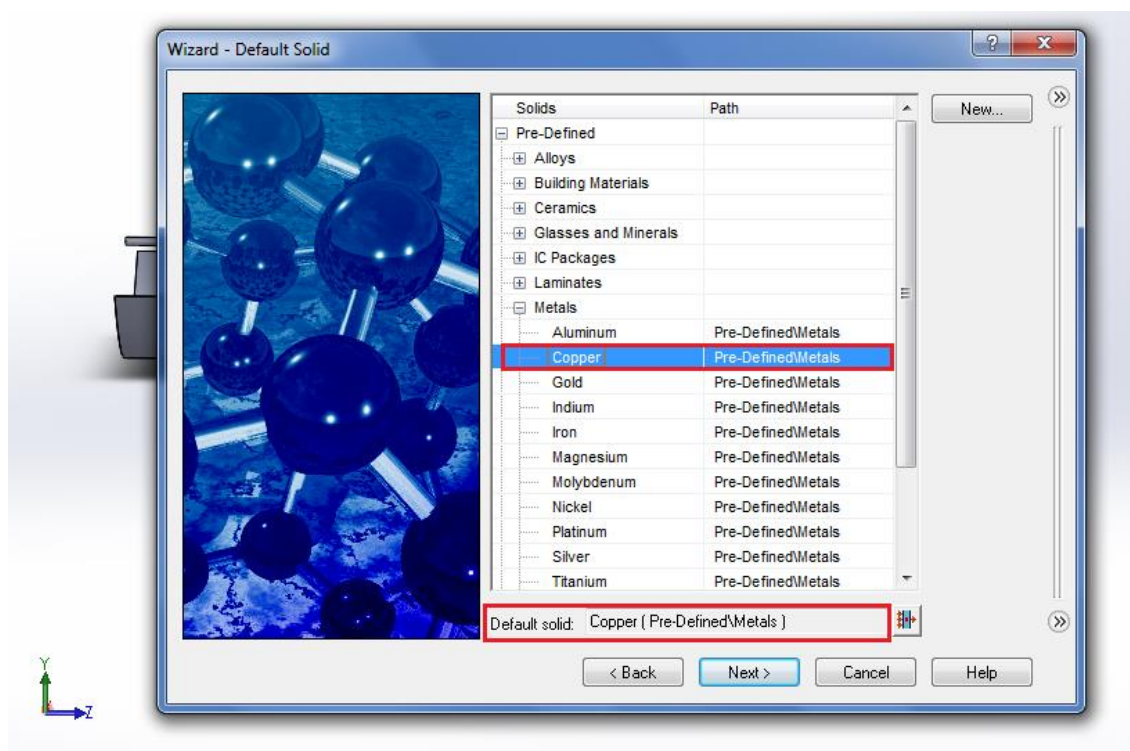
Σχήμα 4.17: Ορισμός βαρύτητας

Στο τέταρτο παράθυρο ορίζεται το εργαζόμενο μέσο. Αρχικά επιλέγεται ο αέρας και τύπος ροής στρωτή – τυρβώδης. Όλες οι ρυθμίσεις που γίνονται είναι κοινές και για τα τρία εξεταζόμενα αέρια. Πρακτικά για τη μελέτη των άλλων δύο αερίων οι αλλαγές που θα γίνουν είναι σε αυτό το παράθυρο και στον ορισμό της παροχής μάζας (στις οριακές συνθήκες).



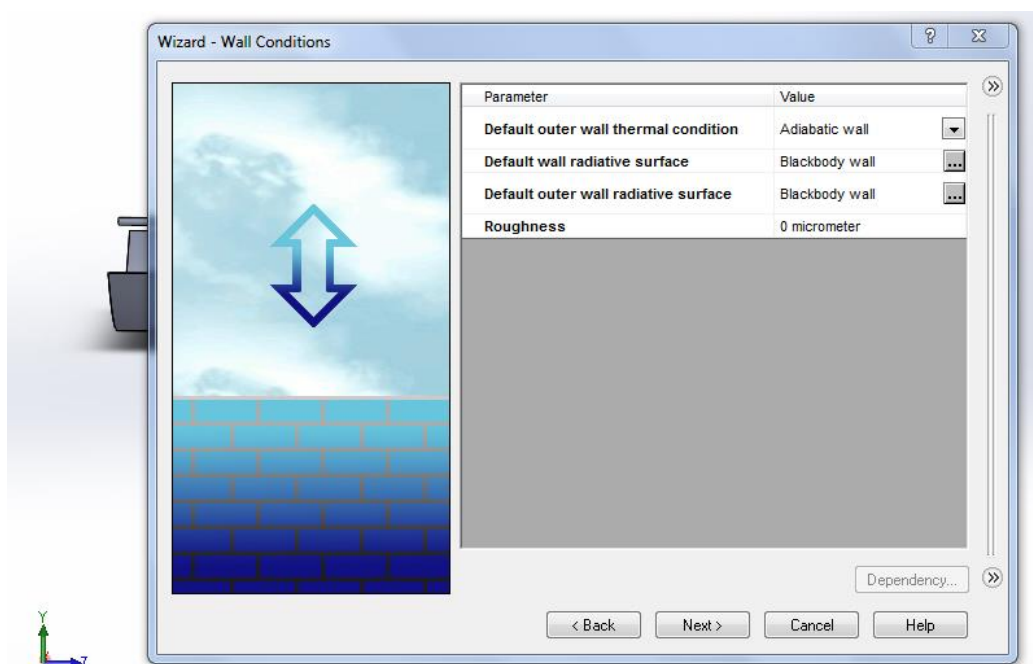
Σχήμα 4.18: Ορισμός εργαζόμενου μέσου

Στο πέμπτο παράθυρο ορίζεται ως προεπιλεγμένο υλικό στερεών σωμάτων ο χαλκός (χρειάζεται για τον απορροφητή).



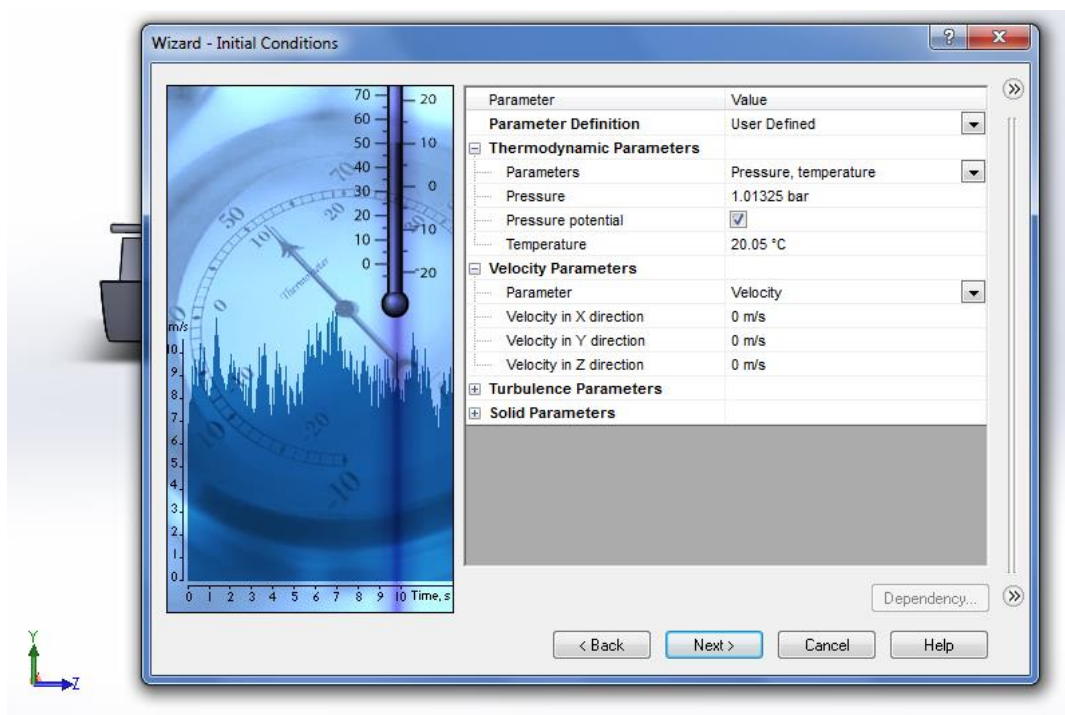
Σχήμα 4.19: Ορισμός προεπιλεγμένου υλικού στερεών σωμάτων

Στο έκτο παράθυρο, που περιλαμβάνει τις συνθήκες μεταφοράς θερμότητας στα στερεά σώματα, διατηρούνται οι προεπιλογές (αδιαβατικά εξωτερικά τοιχώματα και απορροφητικές επιφάνειες στην ηλιακή ακτινοβολία).



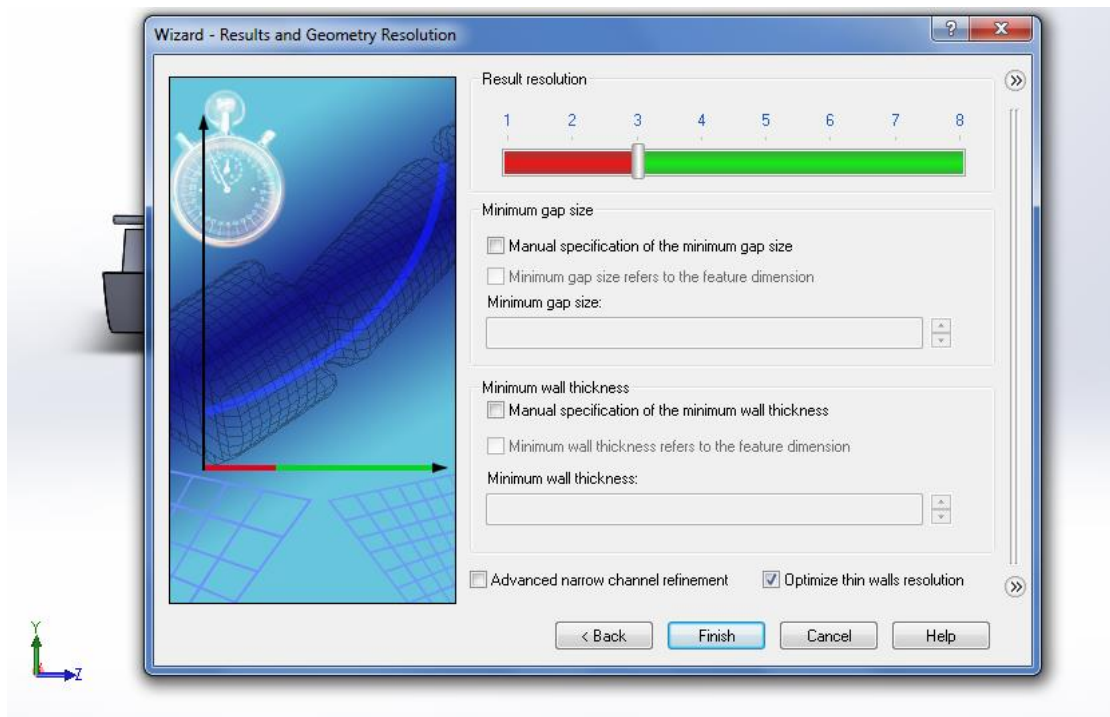
Σχήμα 4.20: Προεπιλεγμένες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας στα στερεά σώματα

Στο έβδομο παράθυρο, που περιλαμβάνει τις αρχικές συνθήκες, διατηρούνται οι προεπιλογές.



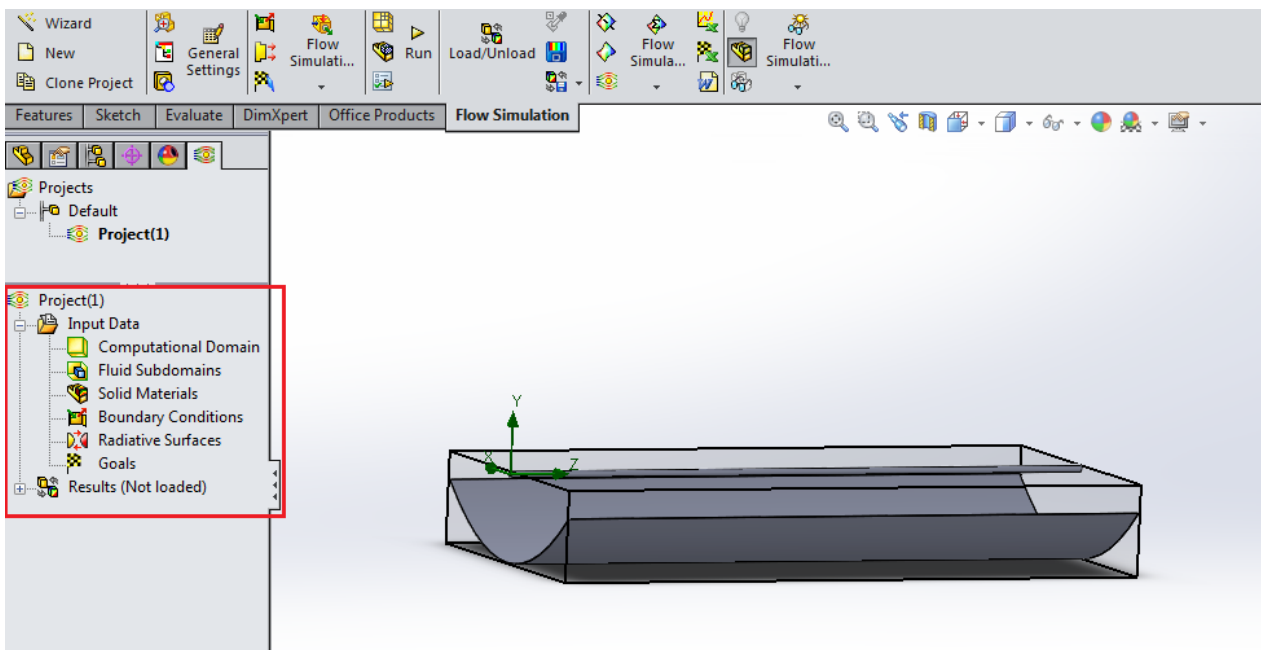
Σχήμα 4.21: Αρχικές συνθήκες (προεπιλογή)

Στο όγδοο και τελευταίο παράθυρο, που περιλαμβάνει το υπολογιστικό πλέγμα, διατηρείται το προεπιλεγμένο (θα οριστεί σε επόμενο βήμα).



Σχήμα 4.22: Υπολογιστικό πλέγμα (προεπιλογή)

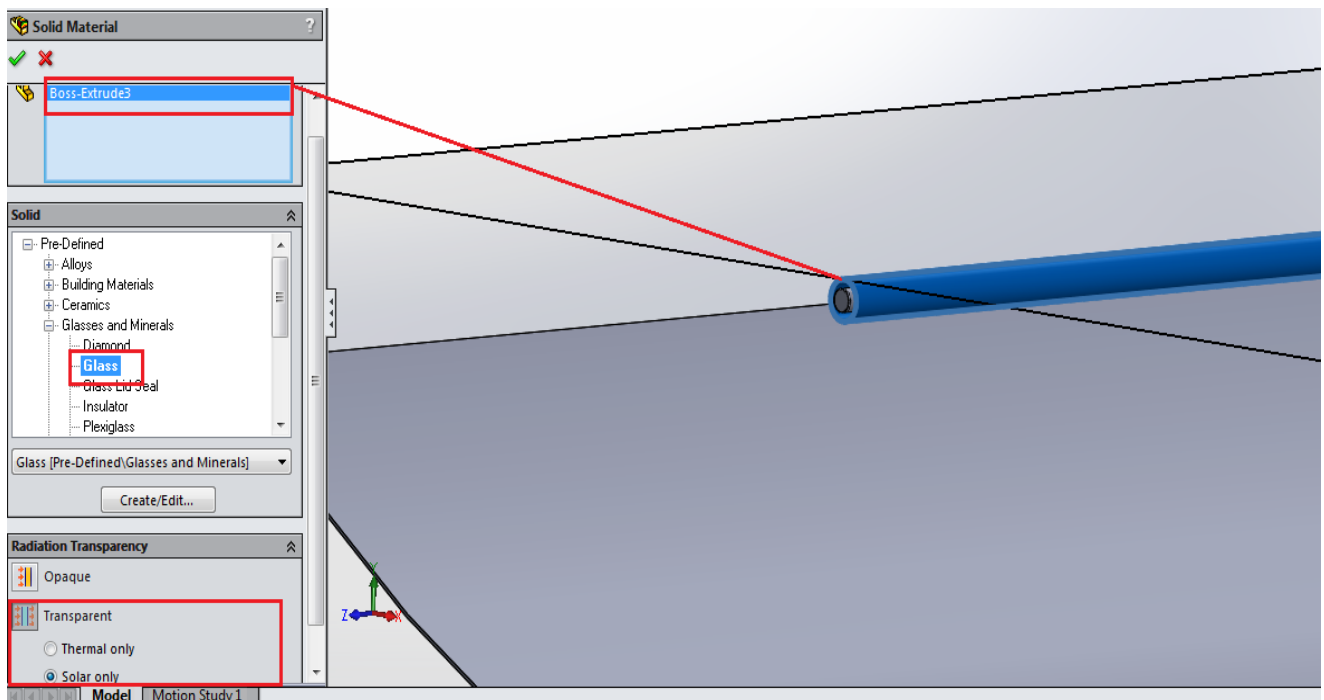
Με την ολοκλήρωση της δημιουργίας του αρχείου προσομοίωσης, στην αριστερή στήλη του προγράμματος εμφανίζεται (στην καρτέλα **Flow Simulation Analysis**) το δέντρο ενεργειών του, το οποίο περιλαμβάνει το τμήμα **Input Data** (δεδομένα που εισάγει ο χρήστης) και το τμήμα **Results** (αποτελέσματα της προσομοίωσης).



Σχήμα 4.23: Δέντρο ενεργειών αρχείου προσομοίωσης

4.7.3: Ορισμός υλικών

Στην προηγούμενη ενότητα ορίστηκε ως προεπιλεγμένο υλικό για τα στερεά σώματα ο χαλκός. Αυτό είναι το υλικό του απορροφητή. Σε αυτό το σημείο θα οριστεί το γυαλί ως υλικό του σωλήνα κενού. Στο δέντρο ενεργειών επιλέγεται με δεξί κλικ **Solid Materials**→**Insert Solid Material**. Έπειτα επιλέγεται η επιφάνεια του σωλήνα κενού. Στην καρτέλα **Solid** επιλέγεται **Pre-Defined**→**Glasses and Minerals**→**Glass**. Στην καρτέλα **Radiation Transparency** επιλέγεται **Transparent**→**Solar only**, έτσι ώστε ο υάλινος σωλήνας κενού να είναι διαπερατός μόνο από την ηλιακή ακτινοβολία.



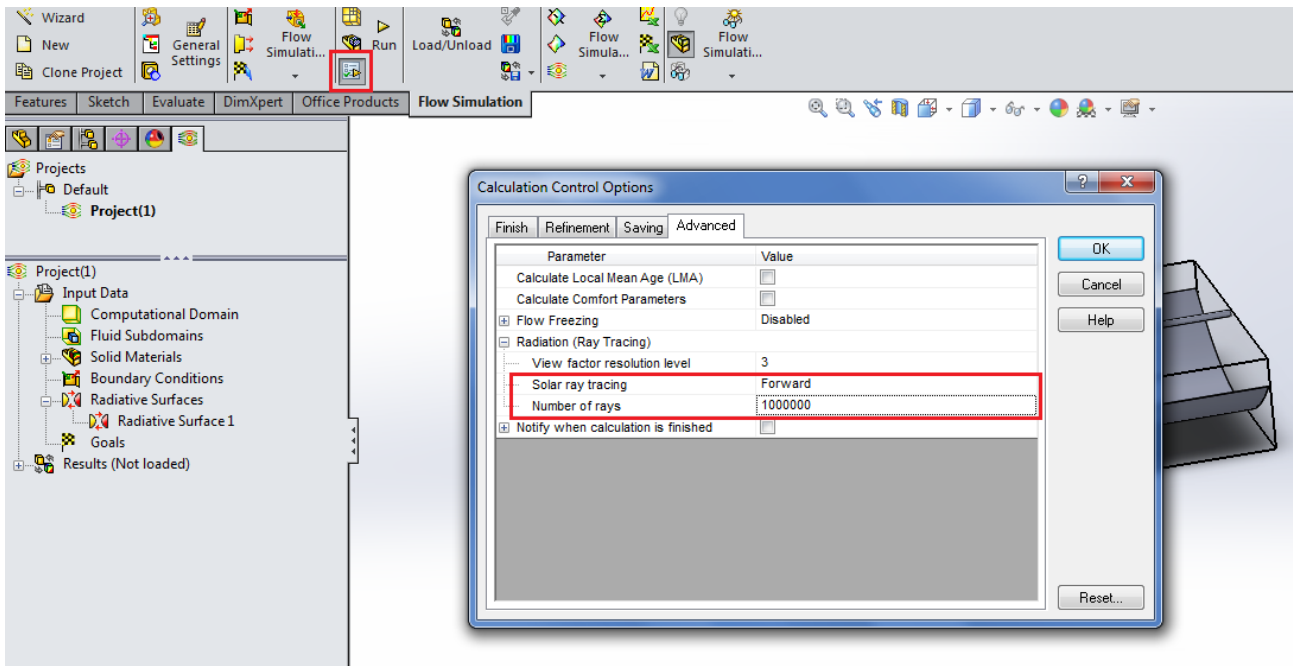
Σχήμα 4.24: Ορισμός υλικού σωλήνα κενού

Για τον παραβολικό συγκεντρωτή δε χρειάζεται να οριστεί κάποιο συγκεκριμένο υλικό, αφού δεν επηρεάζει την προσομοίωση.

4.7.4: Ορισμός επιφανειών ακτινοβολίας

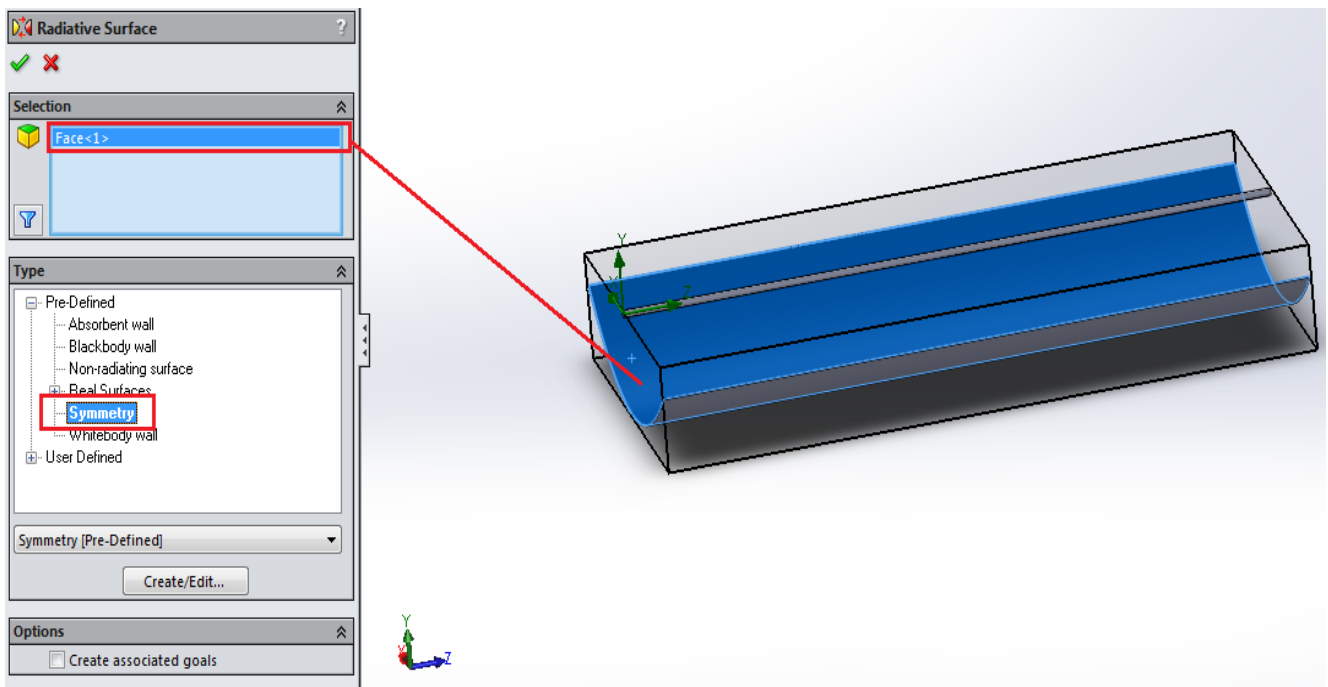
Αρχικά θα οριστούν οι ανακλάσεις. Επιλέγεται η εντολή **Calculation Control Options** (στην καρτέλα **Flow Simulation**). Στην καρτέλα **Advanced** ορίζεται στην παράμετρο **Radiation**:

- **Solar Ray Tracing** → **Forward**
- **Number of rays** → **1000000** (αριθμός ακτινών)



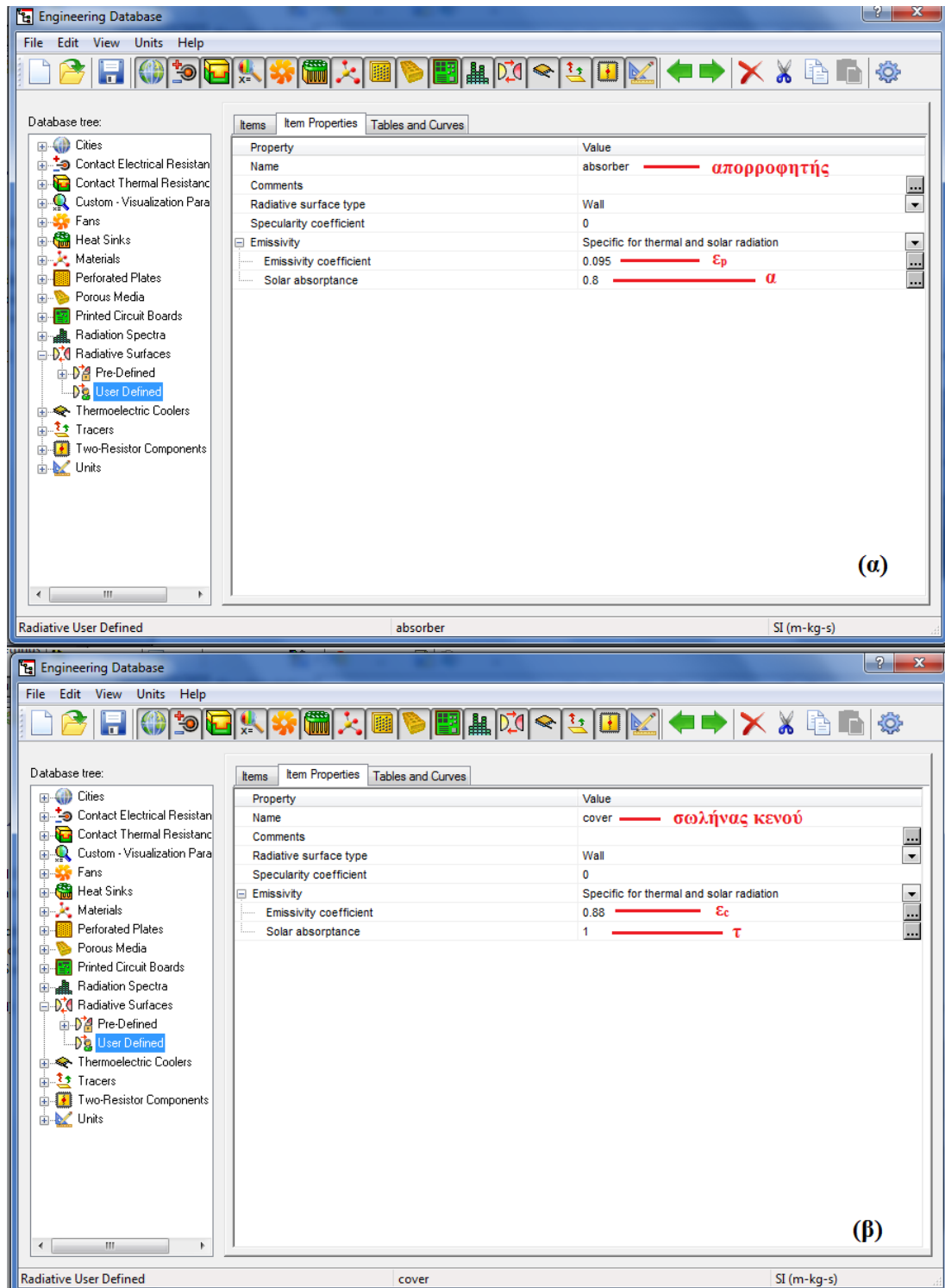
Σχήμα 4.25: Ορισμός ανακλάσεων

Η πρώτη επιφάνεια που θα οριστεί είναι αυτή του παραβολικού συγκεντρωτή. Στο δέντρο ενεργειών επιλέγεται με δεξί κλικ **Radiative Surfaces** → **Insert Radiative Surface**. Ακολούθως επιλέγεται η εσωτερική επιφάνεια του συγκεντρωτή. Στην καρτέλα **Type**, από το **Pre-Defined** επιλέγεται το **Symmetry**.



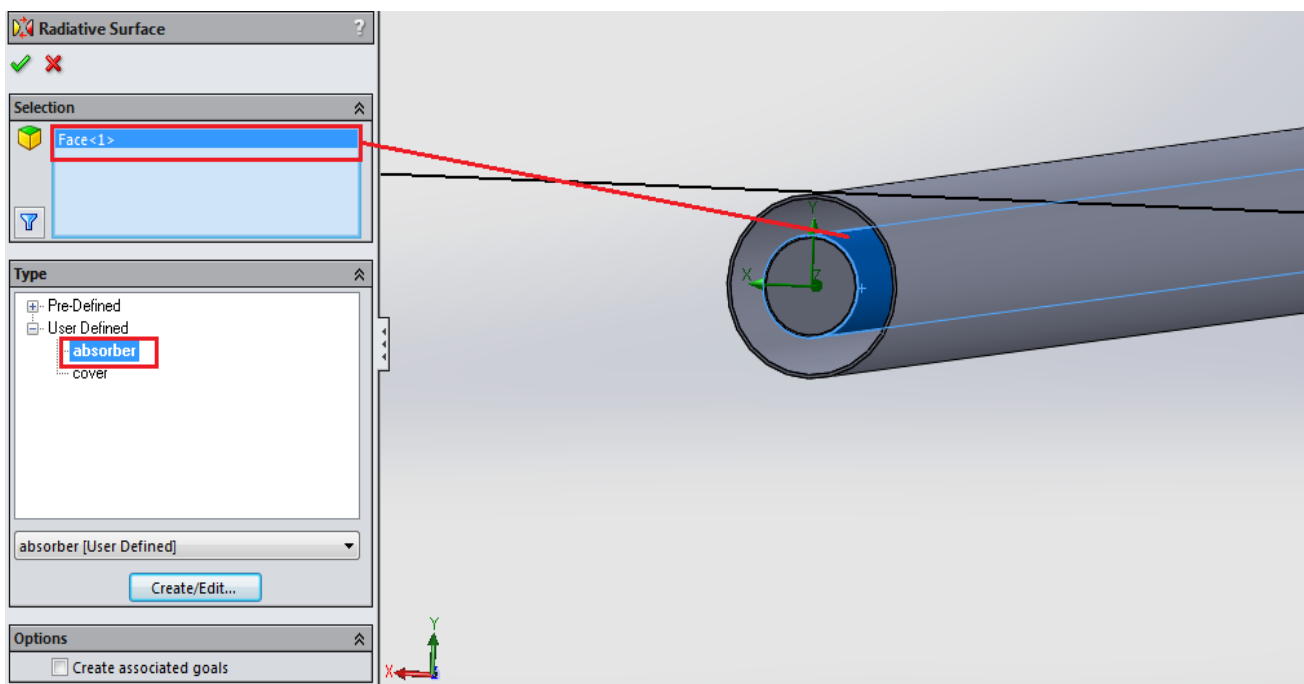
Σχήμα 4.26: Ορισμός του συγκεντρωτή

Οι επόμενες δύο επιφάνειες που θα οριστούν είναι του απορροφητή και του σωλήνα κενού. Πριν από αυτό όμως, πρέπει να εισαχθούν στο Solidworks οι ιδιότητές τους (συντελεστές εκπομπής και απορρόφησης). Γι' αυτό επιλέγεται η βάση δεδομένων του προγράμματος με την εντολή **Engineering Database**. Από την αριστερή στήλη επιλέγεται **Radiative Surfaces** → **User Defined** → **δεξί κλικ** → **New Item** και στο δεξί μέρος η καρτέλα **Item Properties** όπου ορίζονται οι ιδιότητες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



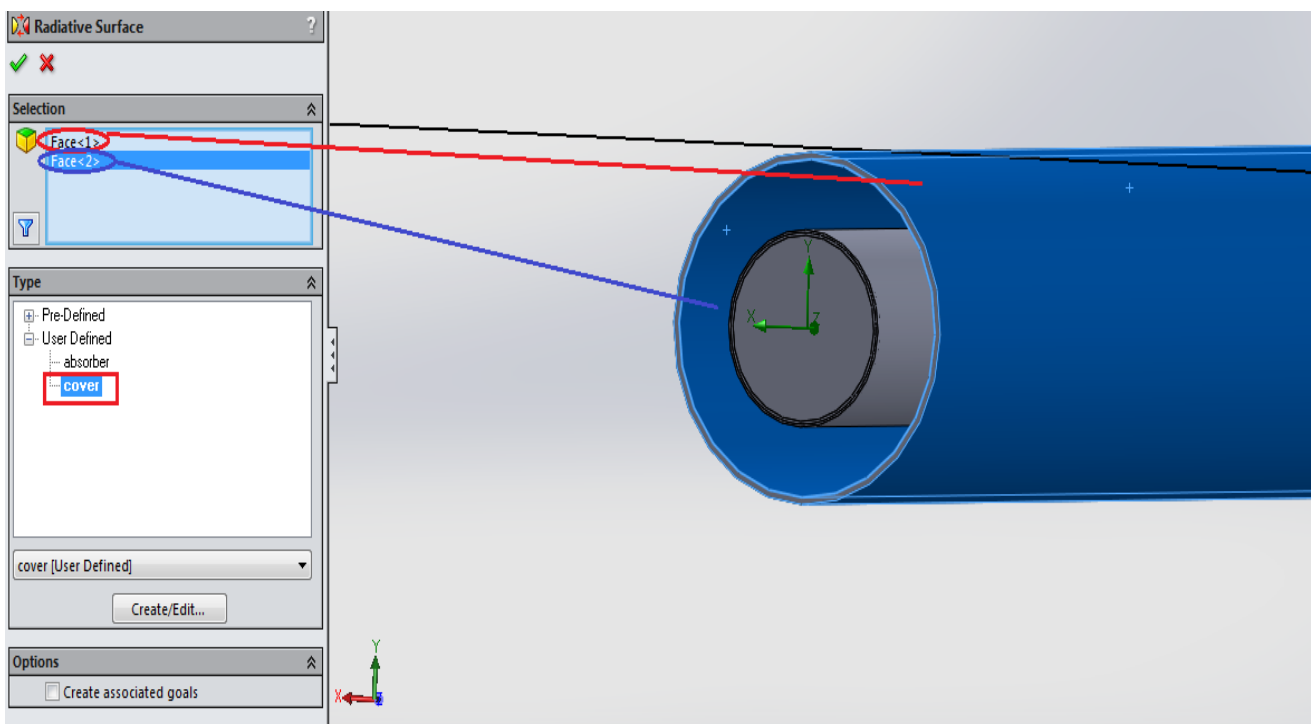
Σχήμα 4.27: Ιδιότητες (α) απορροφητή και (β) σωλήνα κενού

Αφού εισήχθησαν οι ιδιότητες, ορίζεται η επιφάνεια ακτινοβολίας του απορροφητή με παρόμοιο τρόπο με του συγκεντρωτή. Επιλέγεται η εξωτερική του επιφάνεια και στην καρτέλα **Type**, από το **User Defined** επιλέγεται το **absorber**.



Σχήμα 4.28: Ορισμός απορροφητή

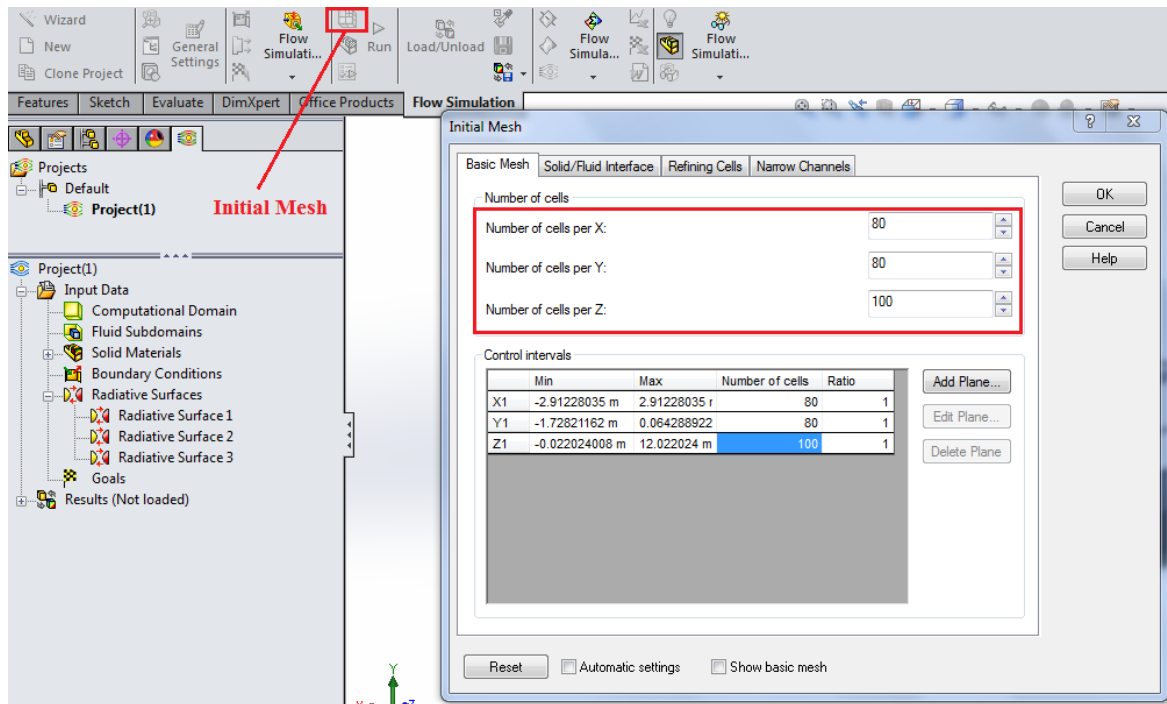
Αντίστοιχα για το σωλήνα κενού, επιλέγονται και οι δύο επιφάνειές του (εσωτερική – εξωτερική) και στην καρτέλα **Type**, από το **User Defined** επιλέγεται το **cover**.



Σχήμα 4.29: Ορισμός σωλήνα κενού

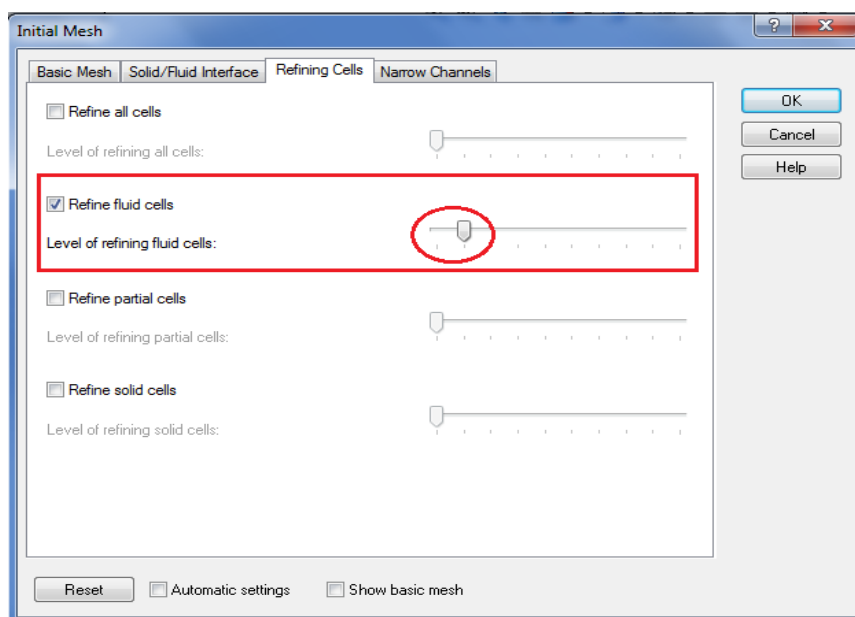
4.7.5: Ορισμός υπολογιστικού πλέγματος

Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του πλέγματος. Επιλέγεται η εντολή **Initial Mesh** (στην καρτέλα **Flow Simulation**). Στο παράθυρο που εμφανίζεται, απενεργοποιείται η επιλογή **Automatic settings** και στη συνέχεια ορίζεται αριθμός κόμβων 80 – 80 – 100 (κατά X – Y – Z).



Σχήμα 4.30: Ορισμός του πλέγματος

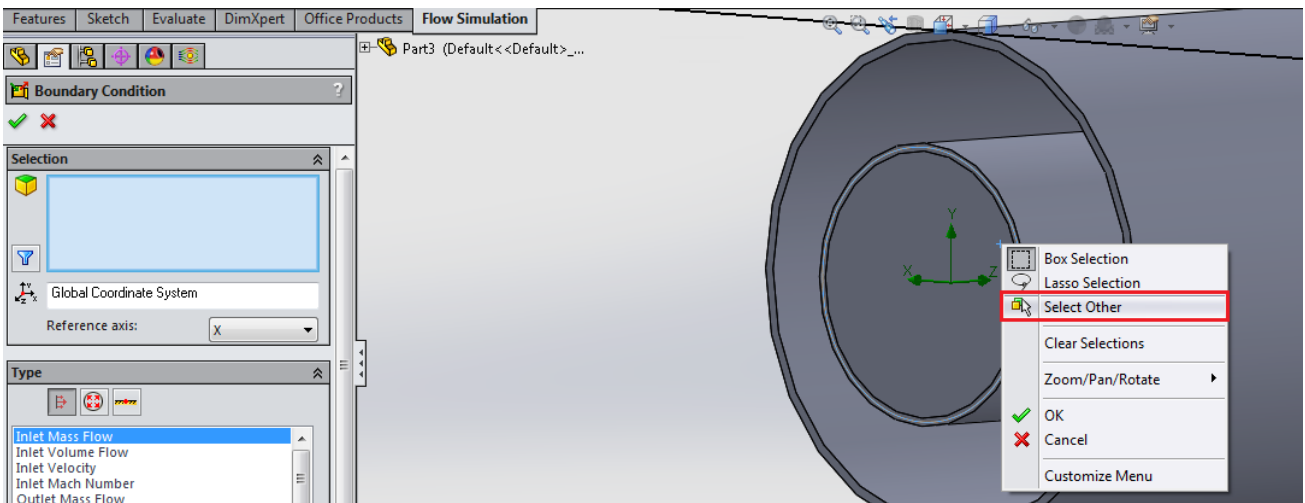
Ακολούθως, στην καρτέλα **Refining Cells** επιλέγεται το **Refine fluid cells** και στην κλίμακα **Level of refining fluid cells** επιλέγεται η δεύτερη ‘γραμμή’. Ο σκοπός αυτής της επιλογής είναι το πρόγραμμα να πυκνώνει τα υπολογιστικά ‘κελιά’ όπου υπάρχει ρευστό για μεγαλύτερη ακρίβεια.



Σχήμα 4.31: Πύκνωση κελιών

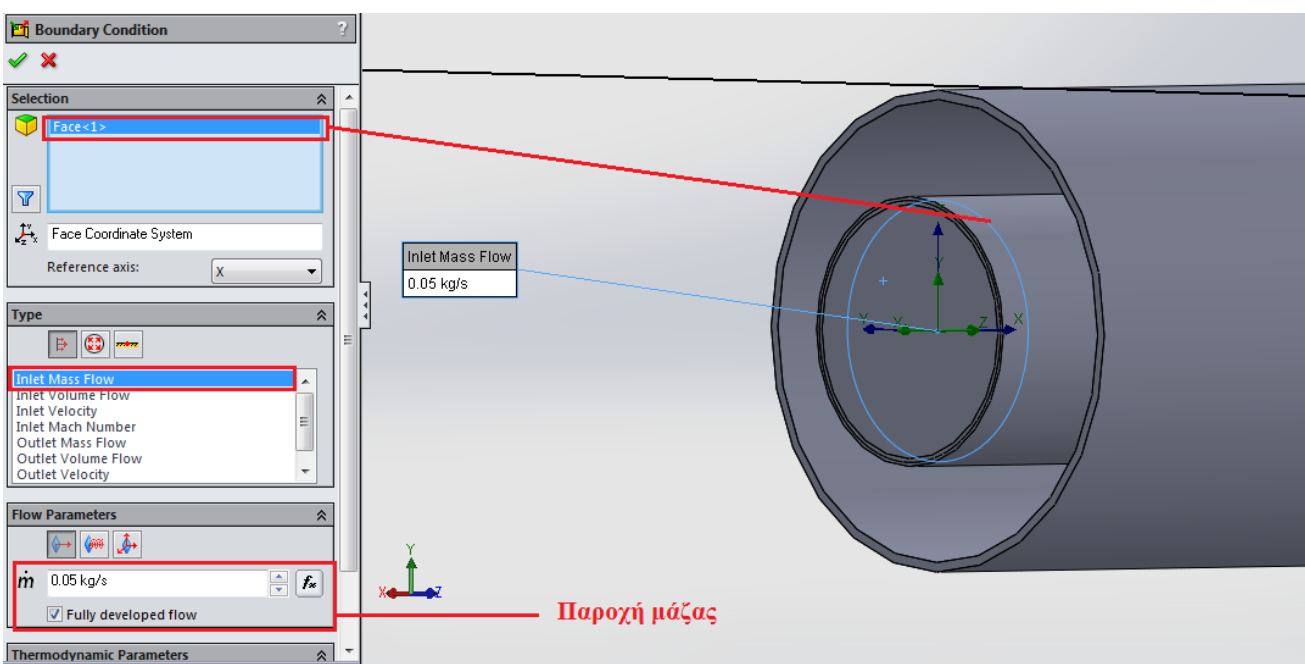
4.7.6: Ορισμός οριακών συνθηκών

Η πρώτη οριακή συνθήκη που θα οριστεί στο πρόγραμμα είναι η παροχή μάζας και η θερμοκρασία στην είσοδο. Στο δέντρο ενεργειών, επιλέγεται με δεξί κλικ **Boundary Conditions** → **Insert Boundary Condition**. Ως επιφάνεια εισόδου ορίζεται η εσωτερική επιφάνεια της τάπας, κάνοντας δεξί κλικ στην εξωτερική της επιφάνεια και επιλέγοντας την εσωτερική με την εντολή **Select Other**.

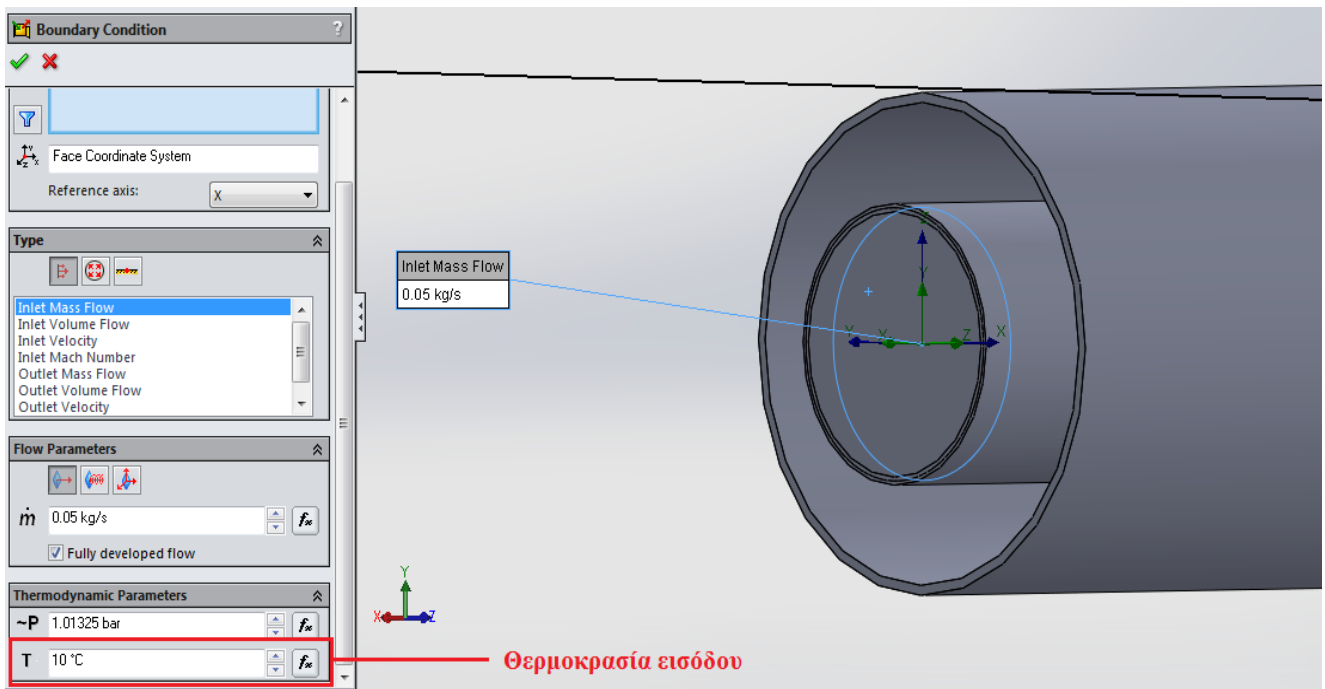


Σχήμα 4.32: Η εντολή Select Other

Στη συνέχεια, στην καρτέλα **Type** επιλέγεται **Inlet Mass Flow** (παροχή μάζας εισόδου). Στην καρτέλα **Flow Parameters** μαρκάρεται η επιλογή **Fully developed flow** (πλήρως αναπτυγμένη ροή) και ορίζεται η παροχή μάζας (μία από τις εξεταζόμενες για αέρα). Στην καρτέλα **Thermodynamic Parameters** ορίζονται η θερμοκρασία εισόδου του αέρα και η πίεση (είναι η πίεση που επικρατεί στο περιβάλλον, όχι του αέρα και δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα).

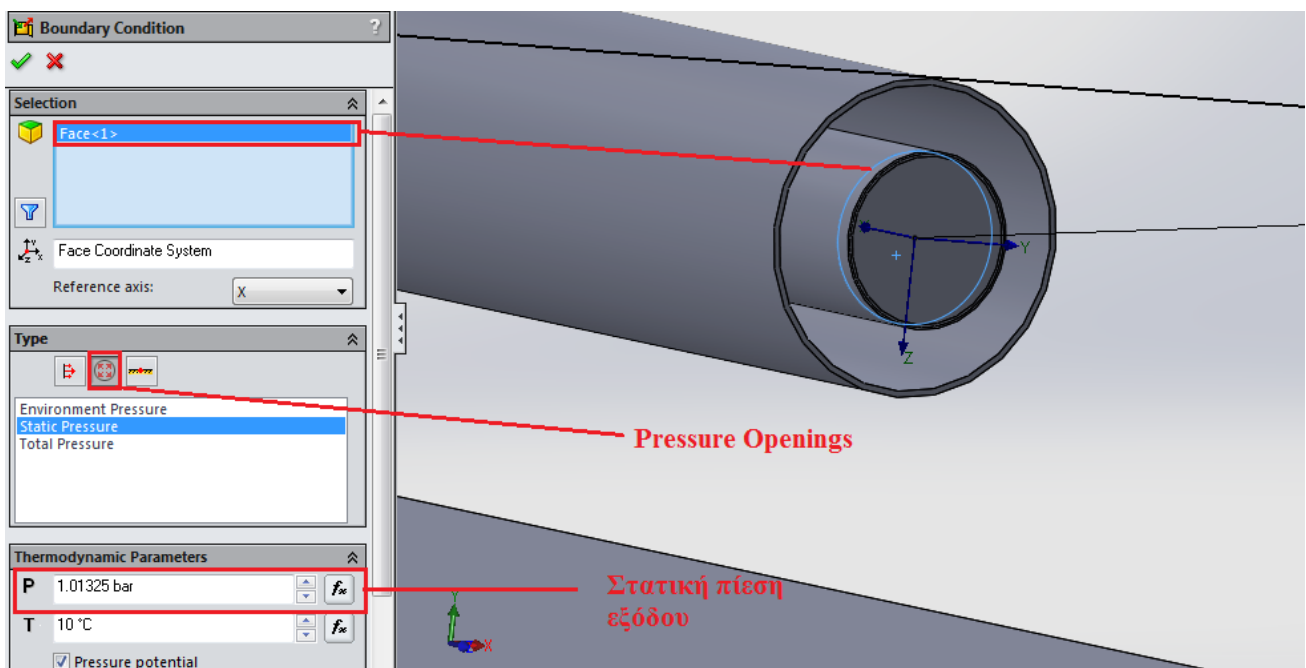


Σχήμα 4.33: Ορισμός παροχής μάζας στην είσοδο του απορροφητή



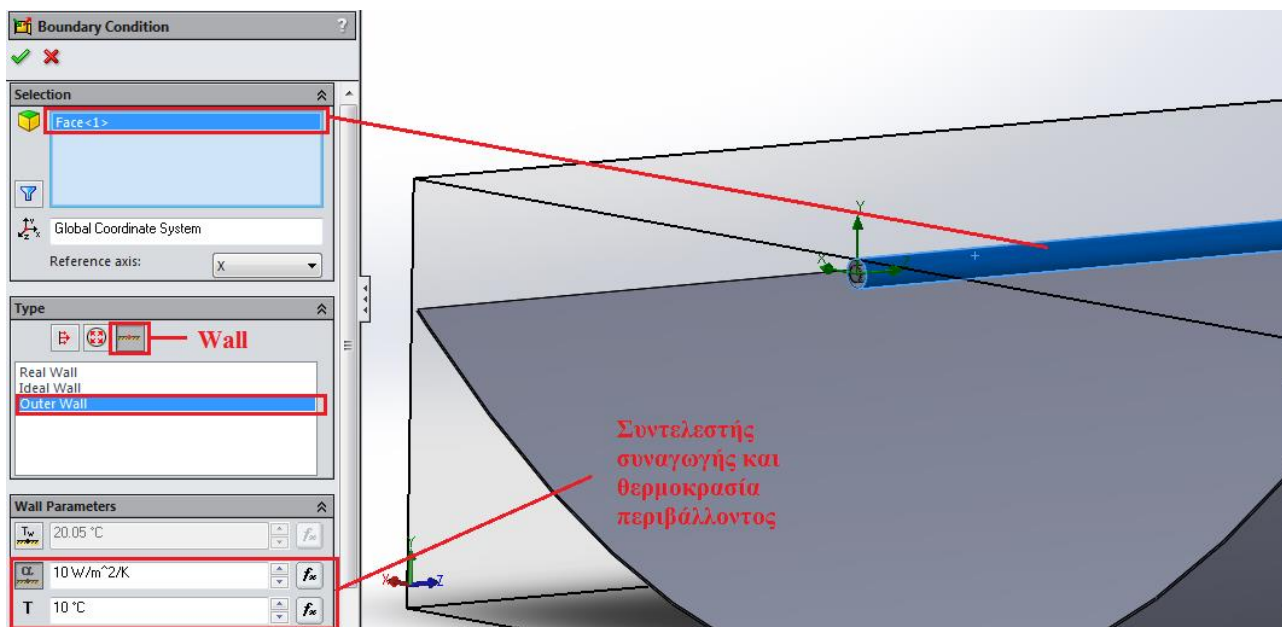
Σχήμα 4.34: Ορισμός θερμοκρασίας στη είσοδο του απορροφητή

Ακολουθώς θα οριστεί η στατική πίεση στην έξοδο του απορροφητή. Με τον ίδιο τρόπο όπως και στην είσοδο επιλέγεται να εισαχθεί η οριακή συνθήκη στην εσωτερική πλευρά της τάπας εξόδου. Στην καρτέλα **Type** επιλέγεται το εικονίδιο **Pressure Openings** και μετά το **Static Pressure**. Στην καρτέλα **Thermodynamic Parameters** ορίζεται στατική πίεση εξόδου του αέρα 1.01325 bar. Στην επιλογή που υπάρχει για τη θερμοκρασία, η οποία δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα (θερμοκρασία που καταλήγει το εργαζόμενο μέσο), δίνεται τιμή 10 °C.



Σχήμα 4.35: Ορισμός στατικής πίεσης στην έξοδο

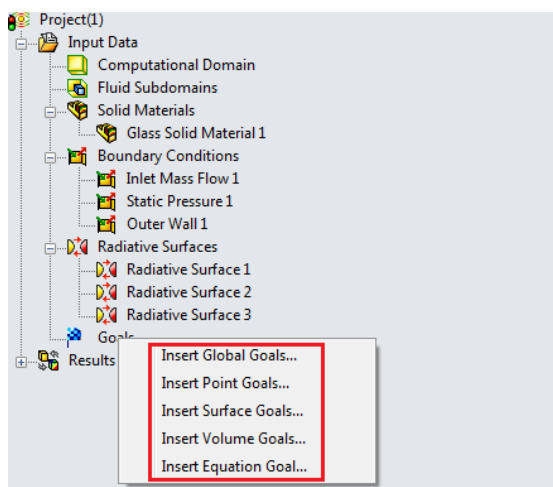
Η τελευταία οριακή συνθήκη αφορά το σωλήνα κενού. Θα οριστεί η συναγωγή της εξωτερικής επιφάνειάς του με το περιβάλλον. Όπως και πριν με δεξί κλικ στο **Boundary Conditions**, εισάγεται μία νέα οριακή συνθήκη. Έπειτα επιλέγεται η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα κενού και στην καρτέλα **Type** επιλέγεται το εικονίδιο **Wall**. Ως τύπος οριακής συνθήκης επιλέγεται το **Outer Wall**. Στην καρτέλα **Wall Parameters**, ορίζεται συντελεστής συναγωγής $10 \text{ W/m}^2/\text{K}$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $10 \text{ }^\circ\text{C}$.



Σχήμα 4.36: Ορισμός συντελεστή συναγωγής σωλήνα κενού – περιβάλλοντος

4.7.7: Ορισμός στόχων

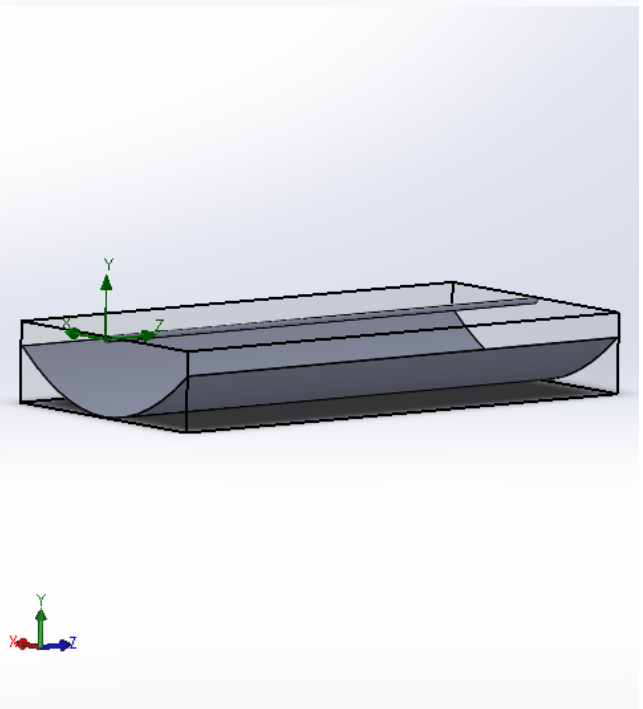
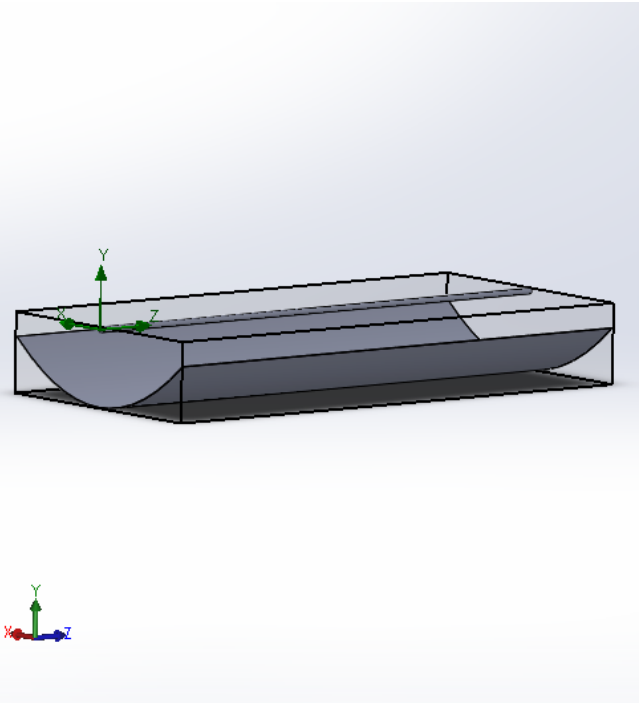
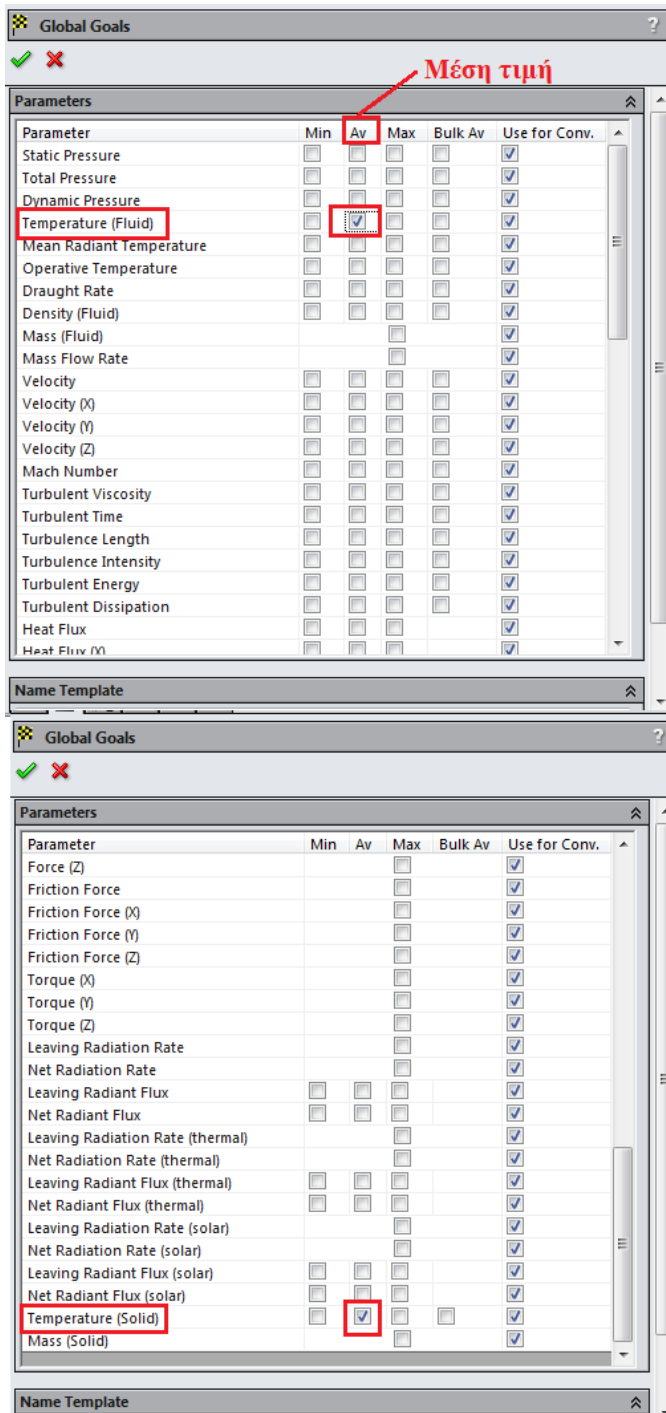
Σε αυτήν την ενότητα θα οριστούν τα αποτελέσματα (στόχοι) που θα εμφανίζει το Solidworks μετά το πέρας της προσομοίωσης. Στο δέντρο ενεργειών, κάνοντας δεξί κλικ στο **Goals**, εμφανίζεται μία λίστα με τα είδη των στόχων που μπορούν να οριστούν.



Σχήμα 4.37: Εισαγωγή στόχων

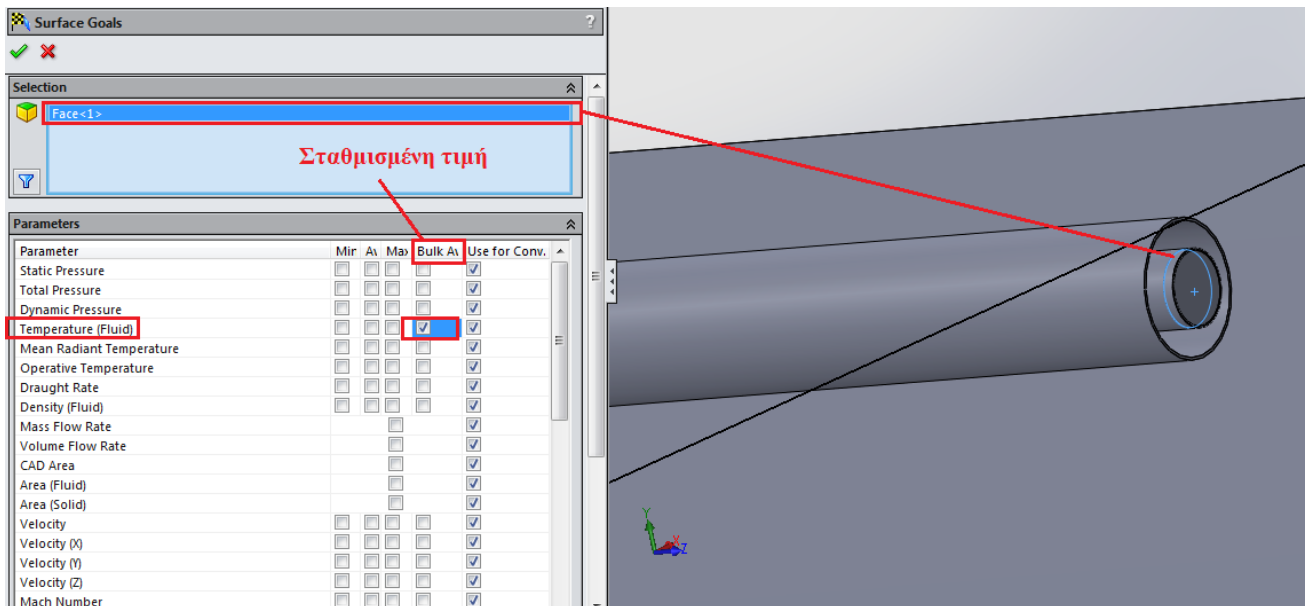
Αρχικά επιλέγονται οι μεταβλητές που θα καθορίσουν τη σύγκλιση της προσομοίωσης. Επιλέγεται να εισαχθούν *Global Goals*. Στο παράθυρο που εμφανίζεται μαρκάρονται τα εξής:

- *Temperature (Fluid)* → Η μέση τιμή (Av)
- *Temperature (Solid)* → Η μέση τιμή (Av)



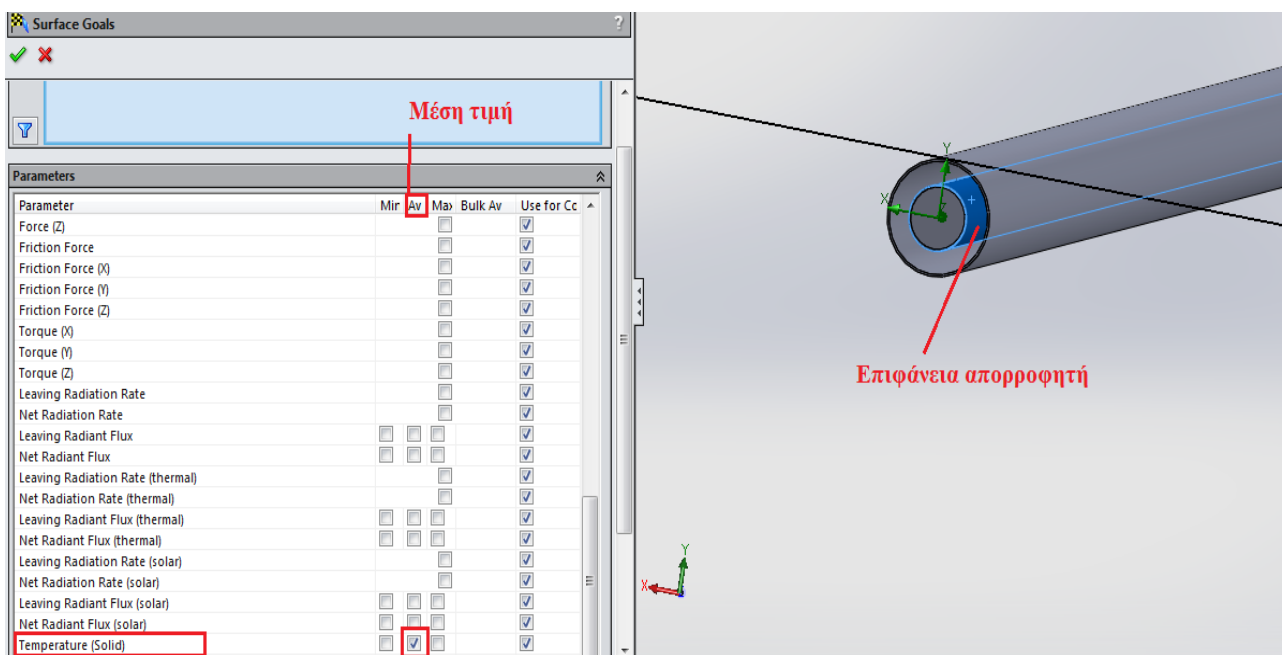
Σχήμα 4.38: Global Goals

Ακολουθώς θα οριστεί η θερμοκρασία στην έξοδο του απορροφητή (T_{out}). Με δεξί κλικ στο **Goals** επιλέγεται **Insert Surface Goals**. Αφού επιλεχθεί η εσωτερική επιφάνεια της τάπας εξόδου (με την εντολή **Select Other**), στην καρτέλα **Parameters** επιλέγεται **Temperature (Fluid)** και μαρκάρεται το **Bulk Av** (σταθμισμένη με βάση την παροχή).



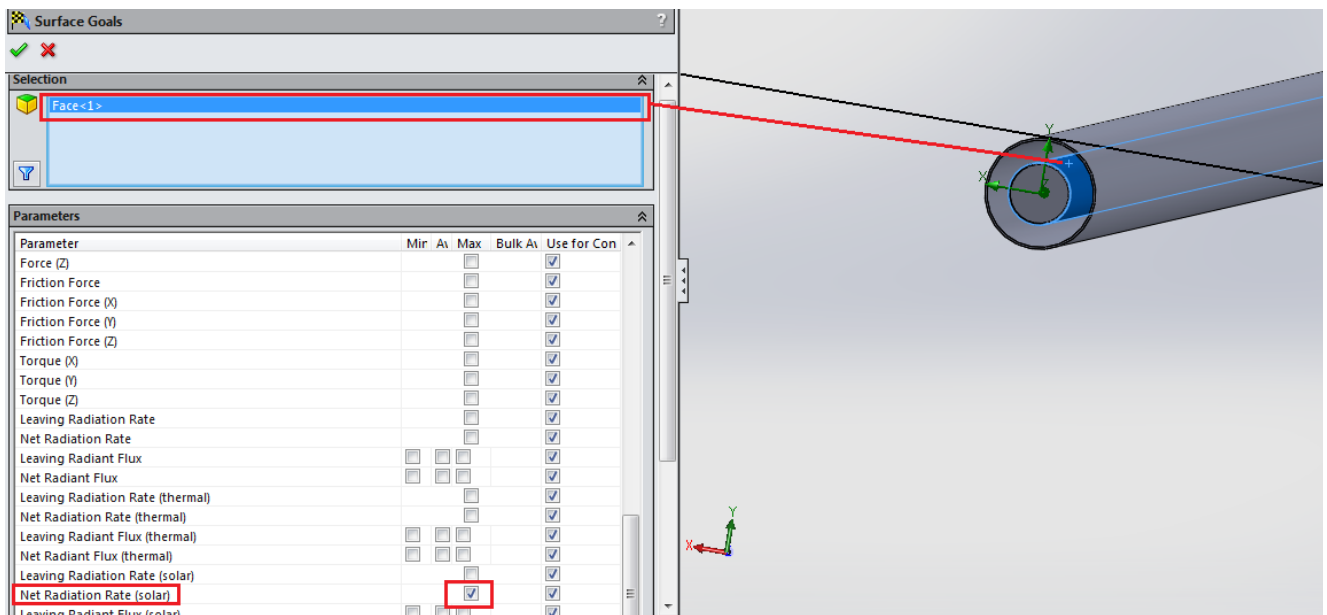
Σχήμα 4.39: Θερμοκρασία εξόδου (T_{out})

Επόμενος στόχος είναι η μέση θερμοκρασία του απορροφητή (T_r). Με παρόμοιο τρόπο επιλέγεται **Insert Surface Goals**. Αφού επιλεχθεί η επιφάνεια του απορροφητή, στην καρτέλα **Parameters** μαρκάρεται το **Average (Av)** στο **Temperature (Solid)**.



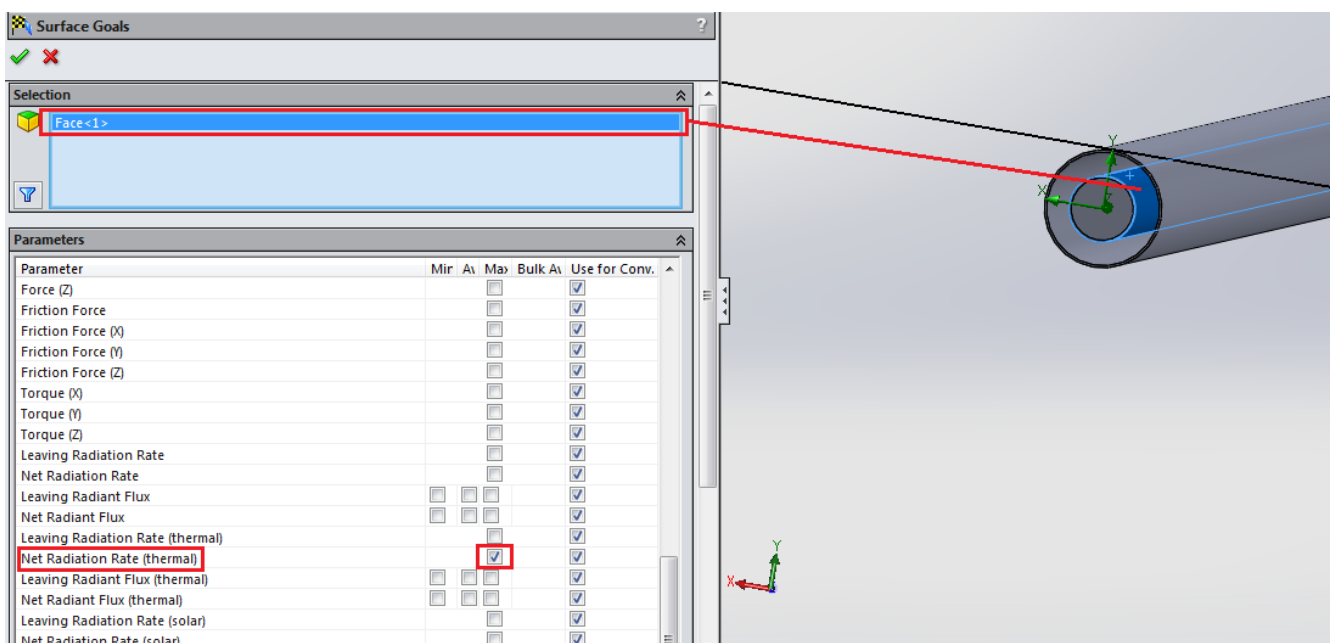
Σχήμα 4.40: Μέση θερμοκρασία απορροφητή (T_r)

Στη συνέχεια θα οριστεί η καθαρή ακτινοβολία που δέχεται ο απορροφητής (Q_{in}). Όμοια με πριν, τα βήματα είναι: **Goals** → **Insert Surface Goals** → επιλογή επιφάνειας απορροφητή → καρτέλα **Parameters** → **Net Radiation Rate (solar)**.



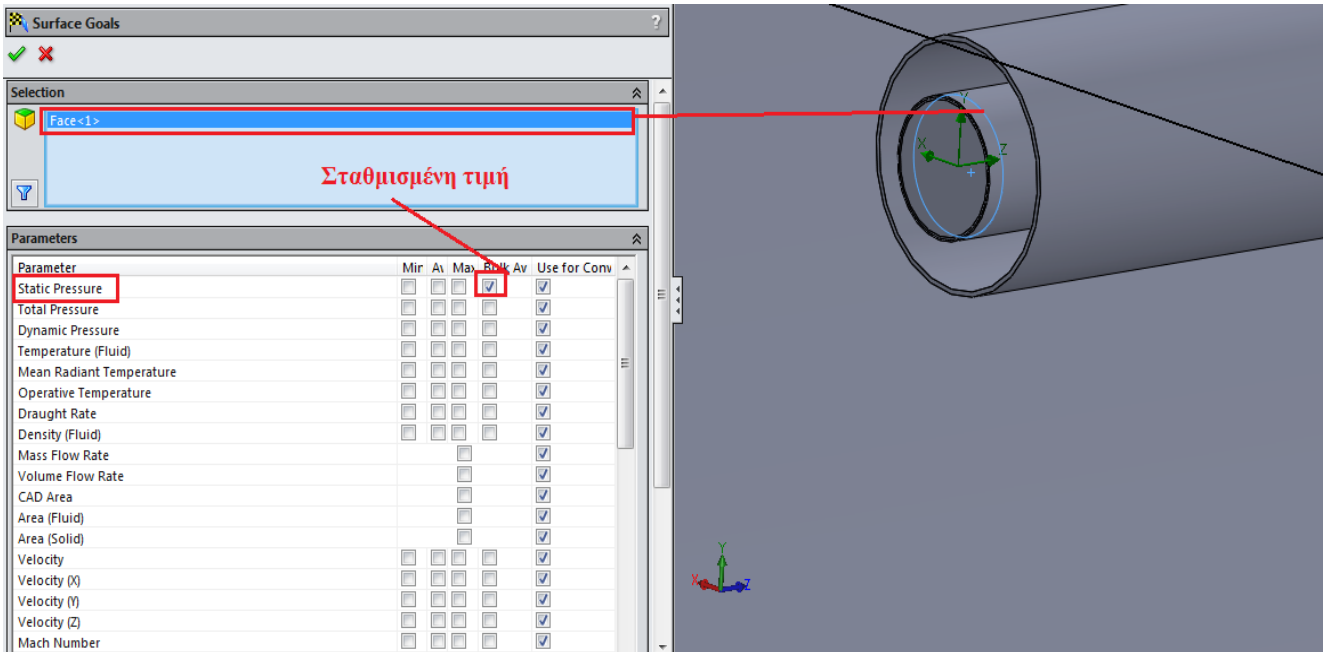
Σχήμα 4.41: Καθαρή ακτινοβολία που δέχεται ο απορροφητής (Q_{in})

Ο επόμενος στόχος είναι οι θερμικές απώλειες (Q_{loss}). Τα βήματα είναι τα εξής: **Goals** → **Insert Surface Goals** → επιλογή επιφάνειας απορροφητή → καρτέλα **Parameters** → **Net Radiation Rate (thermal)**.

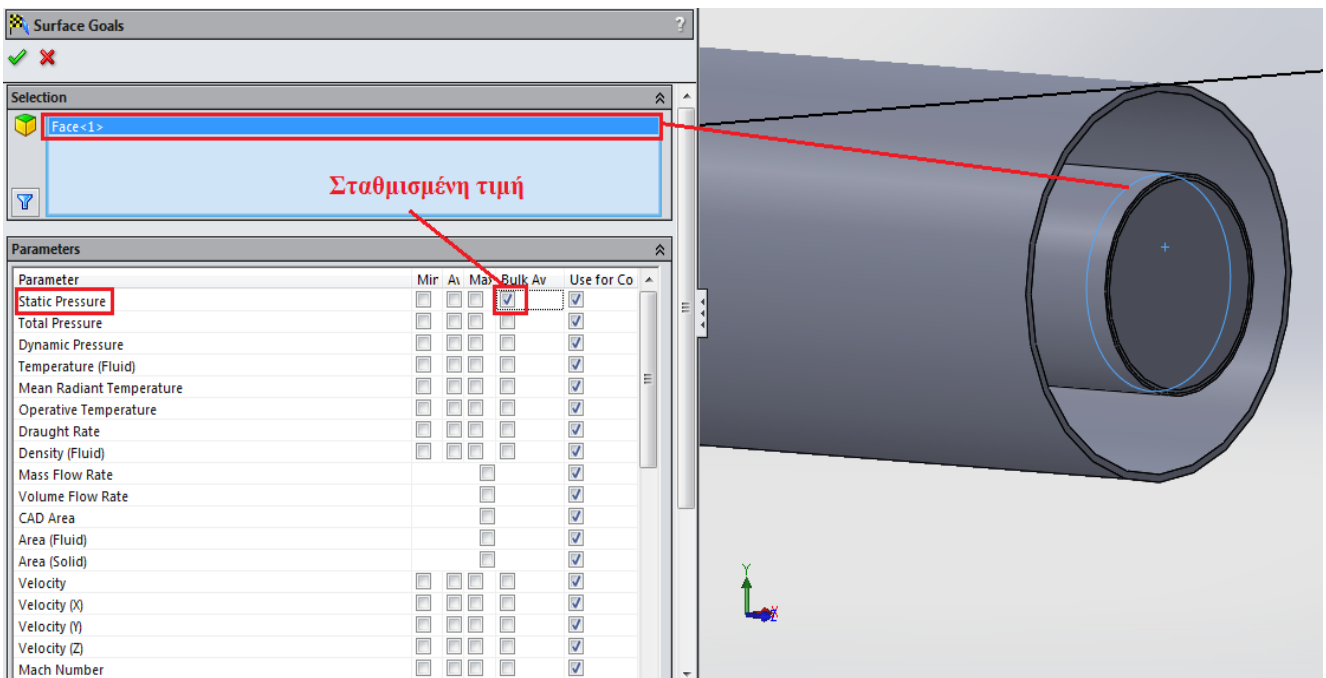


Σχήμα 4.42: Θερμικές απώλειες (Q_{loss})

Έπειτα θα οριστεί η στατική πίεση στην είσοδο (P_{in}) και την έξοδο (P_{out}). Τα βήματα είναι: **Goals** → **Insert Surface Goals** → επιλογή εσωτερικής επιφάνειας τάπας εισόδου και εξόδου αντίστοιχα (με την εντολή **Select Other**) → καρτέλα **Parameters** → **Static Pressure** → **Bulk Av** (σταθμισμένη τιμή).

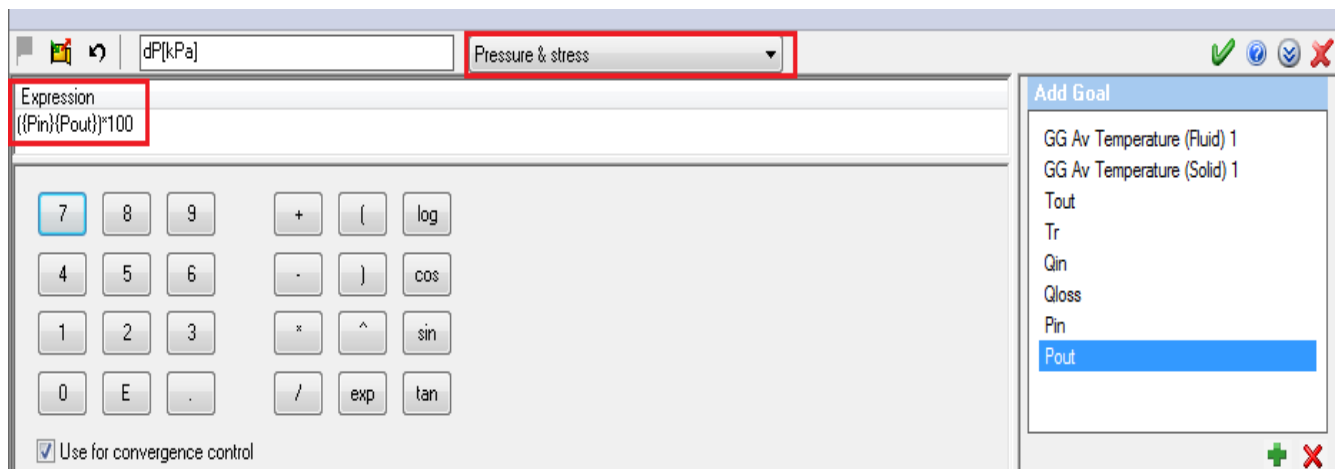


Σχήμα 4.43: Στατική πίεση εισόδου (P_{in})



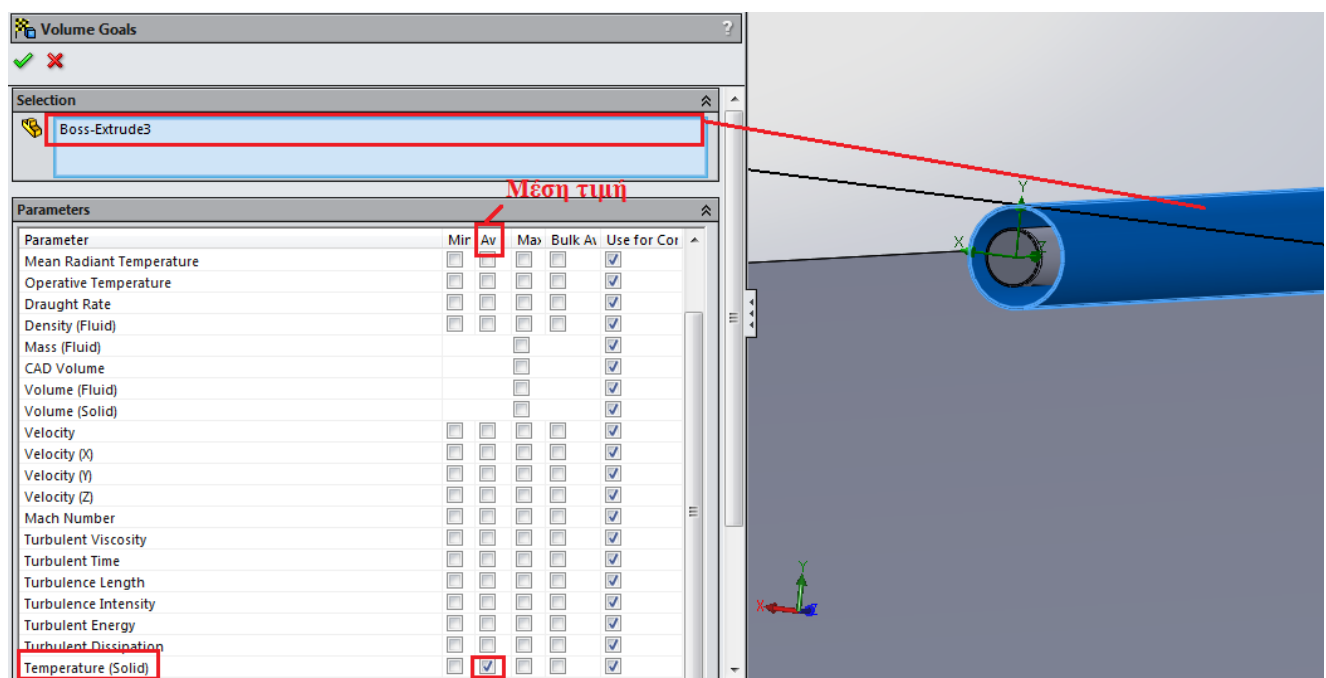
Σχήμα 4.44: Στατική πίεση εξόδου (P_{out})

Οι πιέσεις στην είσοδο και έξοδο τις ορίστηκαν για την εισαγωγή της πτώσης πίεσης ΔP , την οποία το πρόγραμμα θα εμφανίζει σε kPa. Επιλέγεται να εισαχθεί **Equation Goal**. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα $dP = (P_{in} - P_{out}) * 100$ (σε kPa).



Σχήμα 4.45: Πτώση Πίεσης (ΔP)

Ο τελευταίος στόχος που θα οριστεί είναι η μέση θερμοκρασία του σωλήνα κενού (T_c). Τα βήματα που ακολουθούνται είναι: **Goals** \rightarrow **Insert Volume Goals** \rightarrow επιλογή σωλήνα κενού \rightarrow καρτέλα **Parameters** \rightarrow **Temperature (Solid)** \rightarrow Av (μέση τιμή).

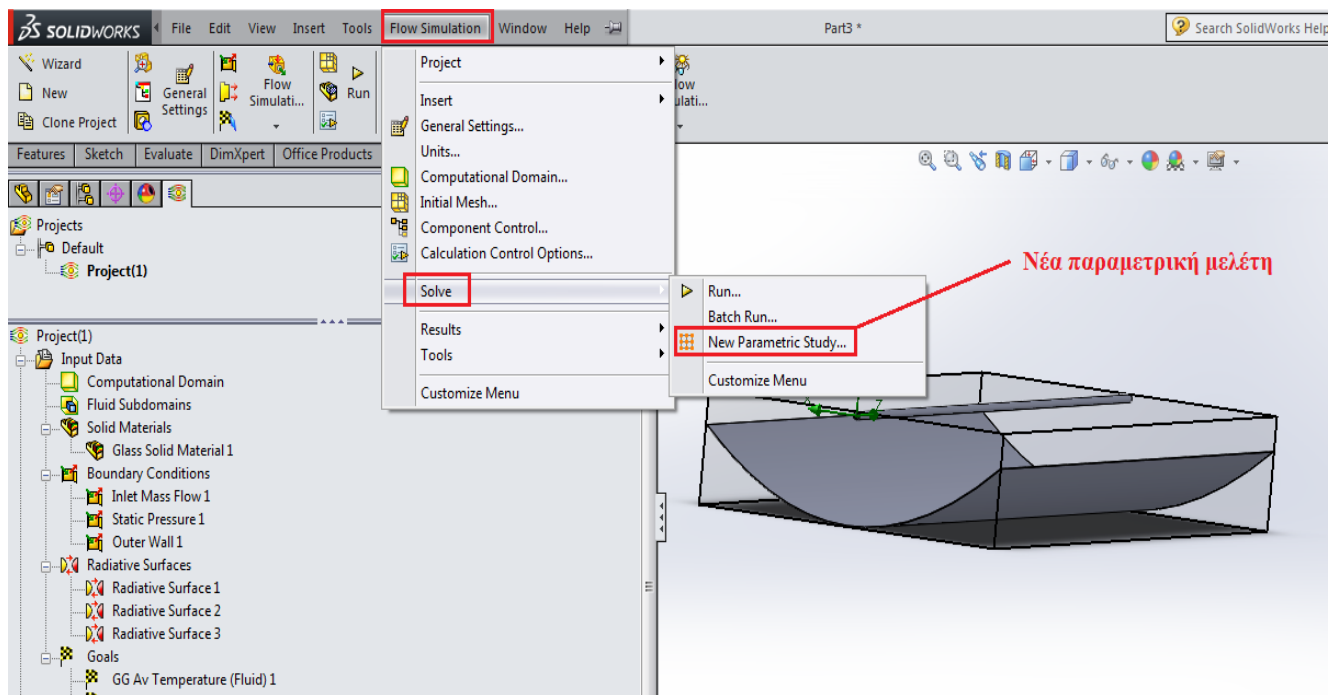


Σχήμα 4.46: Θερμοκρασία σωλήνα κενού (T_c)

4.7.8: Παραμετρική μελέτη

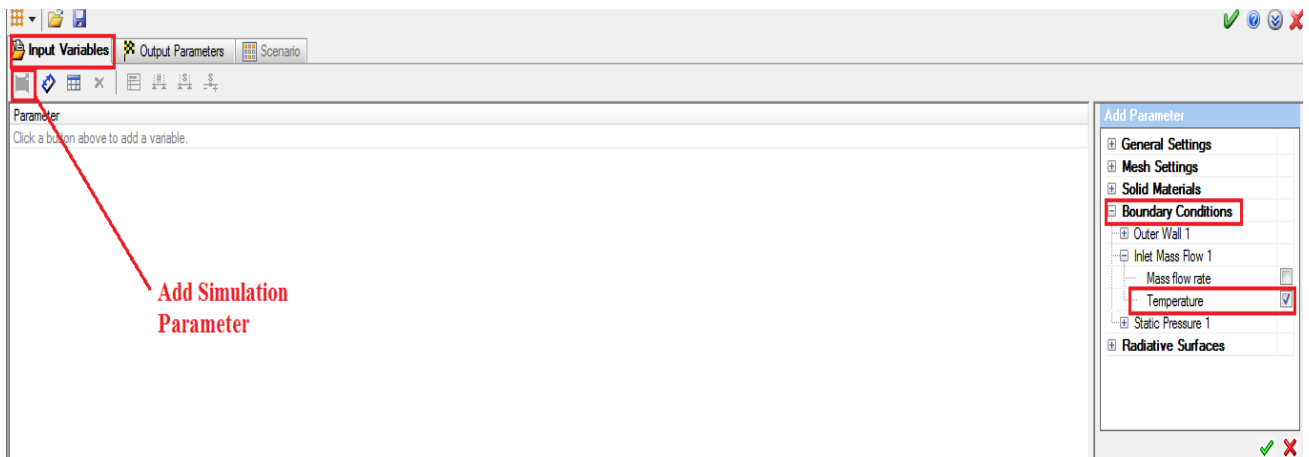
Αφού ολοκληρώθηκε η διαμόρφωση του αρχείου προσομοίωσης, μπορεί να ξεκινήσει η επίλυση. Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4.5, θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις για ένα εύρος θερμοκρασιών εισόδου από τους 10 °C (θερμοκρασία περιβάλλοντος) μέχρι τους 500 °C (συνολικά 15 τιμές). Το Solidworks δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας παραμετρικής μελέτης, χρησιμοποιώντας ως παράμετρο μία ή περισσότερες από τις οριακές συνθήκες (σε αυτή την περίπτωση τη θερμοκρασία εισόδου).

Για τη δημιουργία μιας νέας παραμετρικής μελέτης, από το μενού του Solidworks επιλέγεται **Flow Simulation** → **Solve** → **New Parametric Study**.



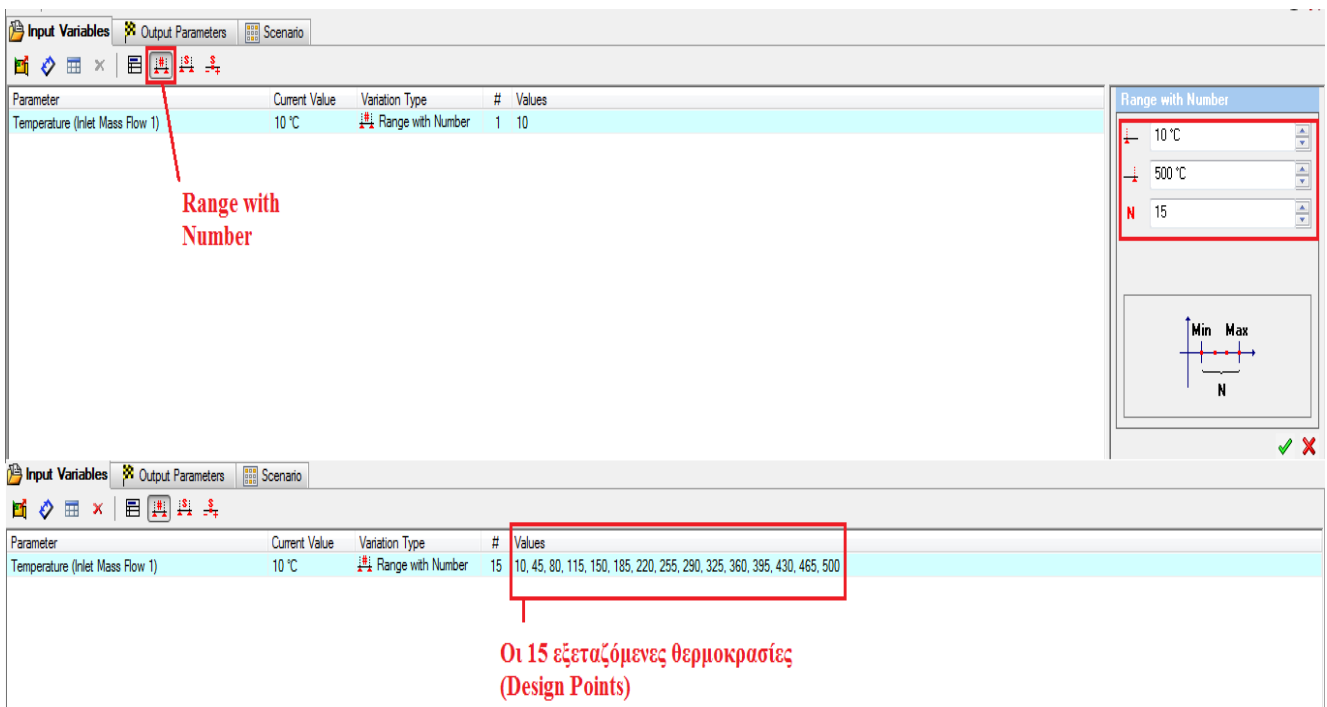
Σχήμα 4.47: Δημιουργία νέας παραμετρικής μελέτης

Στο παράθυρο που εμφανίζεται, στην καρτέλα **Input Variables** επιλέγεται το εικονίδιο **Add Simulation Parameter**. Στη λίστα που εμφανίζεται δεξιά επιλέγεται **Boundary Conditions** → **Inlet Mass Flow 1** και μαρκάρεται το **Temperature**. Με αυτό τον τρόπο έχει οριστεί η θερμοκρασία εισόδου ως παράμετρος.



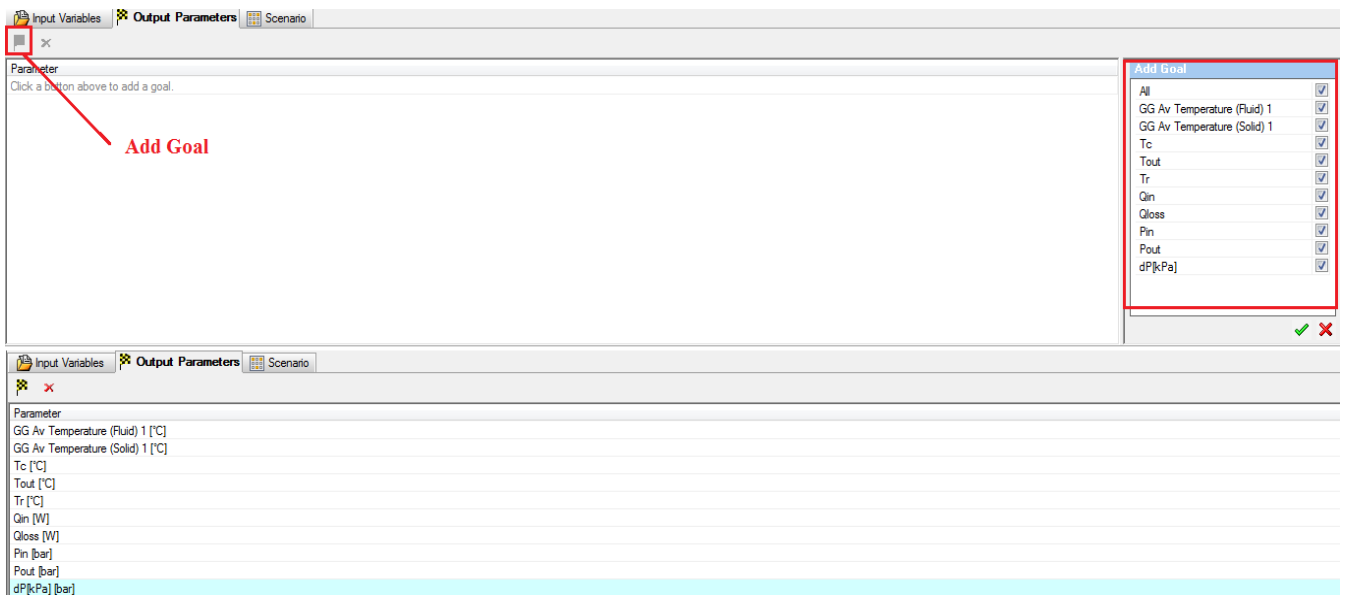
Σχήμα 4.48: Εισαγωγή θερμοκρασίας εισόδου (T_{in}) ως παράμετρο

Στη συνέχεια για να οριστούν τα σημεία μελέτης (θερμοκρασίες εισόδου) επιλέγεται το εικονίδιο **Range with Number** και στο παράθυρο που εμφανίζεται δεξιά επιλέγεται αρχική θερμοκρασία 10 °C, τελική 500 °C και αριθμός εξεταζόμενων θερμοκρασιών 15.



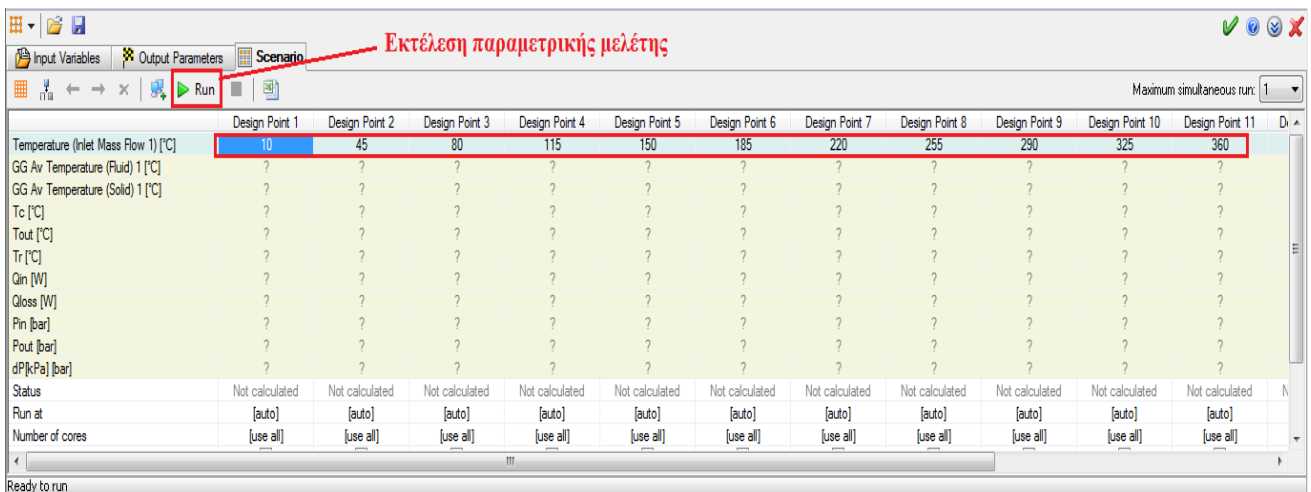
Σχήμα 4.49: Ορισμός αριθμού εξεταζόμενων θερμοκρασιών

Ακολούθως στην καρτέλα **Output Parameters**, επιλέγεται το εικονίδιο **Add Goal**. Στο παράθυρο που εμφανίζεται δεξιά, μαρκάρεται το **All** και με αυτόν τον τρόπο ορίζονται στην παραμετρική μελέτη οι στόχοι που είχαν εισαχθεί στην προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 4.50: Εισαγωγή των στόχων στην παραμετρική μελέτη

Αφού ολοκληρώθηκε η διαμόρφωση της παραμετρικής μελέτης, στην καρτέλα *Scenario*, φαίνονται οι 15 περιπτώσεις προς προσομοίωση. Για την εκτέλεση της παραμετρικής μελέτης επιλέγεται το εικονίδιο *Run*.



Σχήμα 4.51: Εκτέλεση παραμετρικής μελέτης

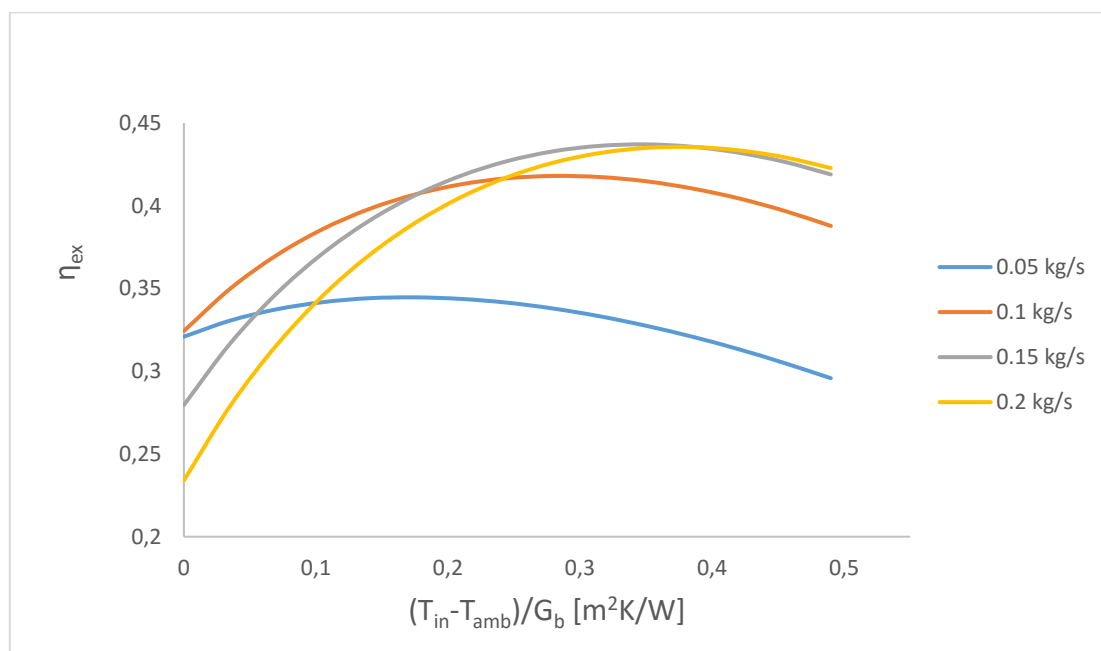
Για καθένα από τα τρία εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα, θα πραγματοποιηθούν τέσσερις παραμετρικές μελέτες, μία για κάθε παροχή μάζας. Όπως έχει αναφερθεί, η παροχή μάζας ορίζεται στις οριακές συνθήκες στο δέντρο ενεργειών. Το αρχείο προσομοίωσης είναι το ίδιο και για τα τρία εξεταζόμενα αέρια. Η εναλλαγή των αερίων γίνεται εύκολα στις ρυθμίσεις (*General Settings*) του αρχείου της προσομοίωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΕΡΙΩΝ

5.1: Εισαγωγή

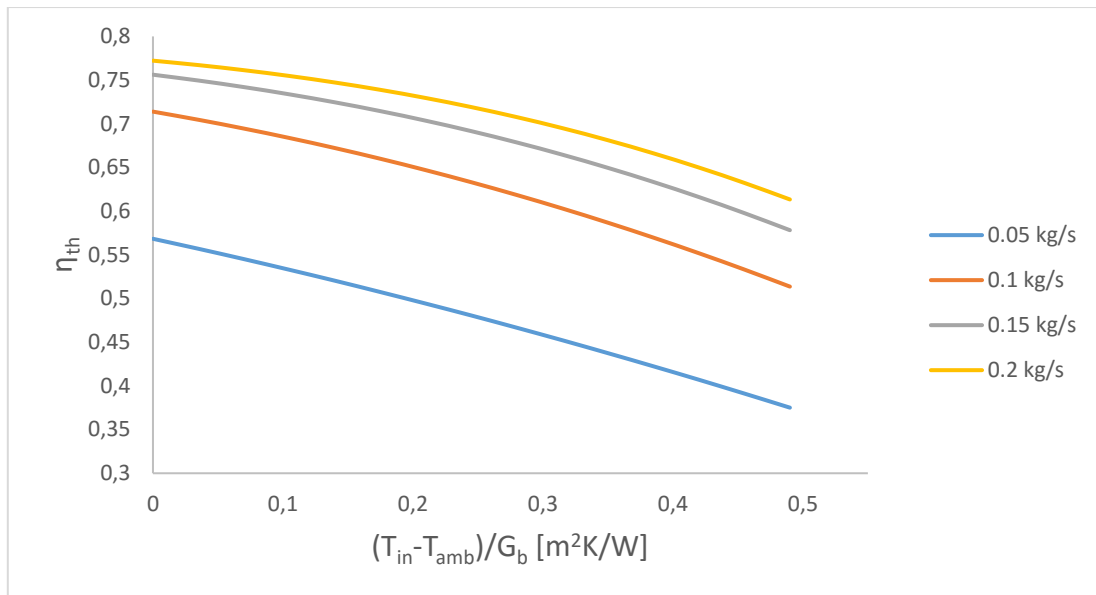
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα για καθένα από τα εργαζόμενα μέσα (για τις εξεταζόμενες παροχές), παρουσιάζονται τα διαγράμματα του εξεργειακού βαθμού απόδοσης, του θερμικού βαθμού απόδοσης, του συντελεστή θερμικών απωλειών, της πτώσης πίεσης και των θερμοκρασιών του απορροφητή και του σωλήνα κενού συναρτήσει της μεταβλητής $(T_{in} - T_{amb})/G_b$. Ακόμη γίνεται σύγκριση των αερίων για τις παροχές που μεγιστοποιούν τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Επίσης για τη βέλτιστη παροχή δίνονται ο συντελεστής συναγωγής, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις και συγκρίνεται με το θεωρητικό (υπολογισμός από αριθμό Nusselt), καθώς και διάφορες θερμοκρασιακές κατανομές (εικόνες από Solidworks).

5.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης αέρα



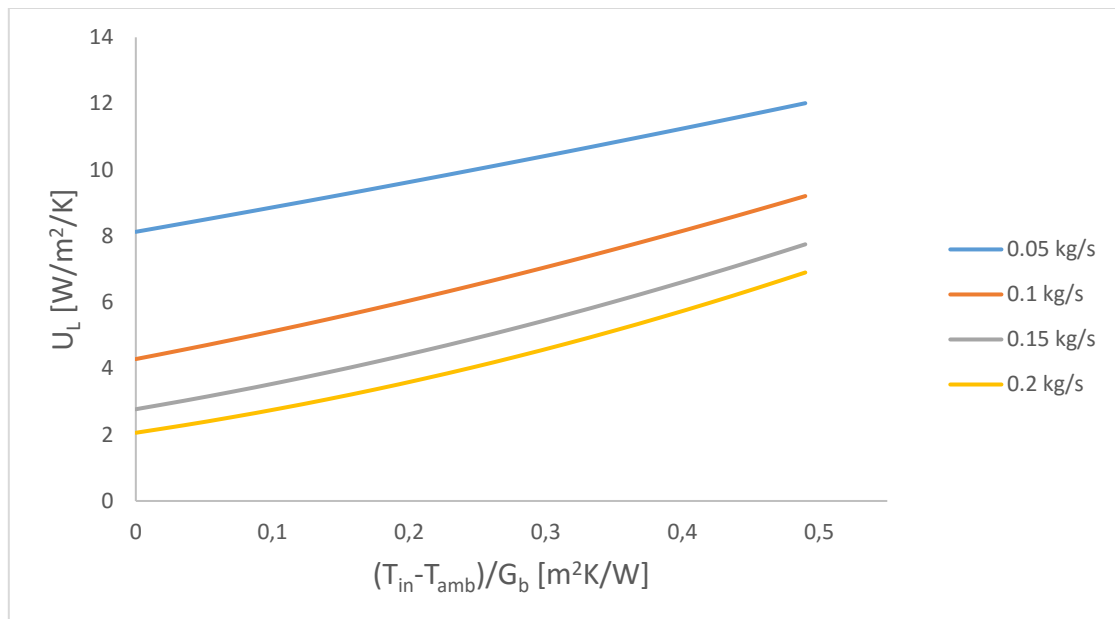
Σχήμα 5.1: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης αέρα

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι φανερό ότι η παροχή μάζας που παρουσιάζει την καλύτερη εξεργειακή απόδοση είναι τα 0.15 kg/s. Όπως παρατηρείται για τις διάφορες παροχές, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αρχικά αυξάνεται, στη συνέχεια παρουσιάζει μέγιστο σε διαφορετική θερμοκρασία εισόδου κάθε φορά και έπειτα ελαττώνεται.



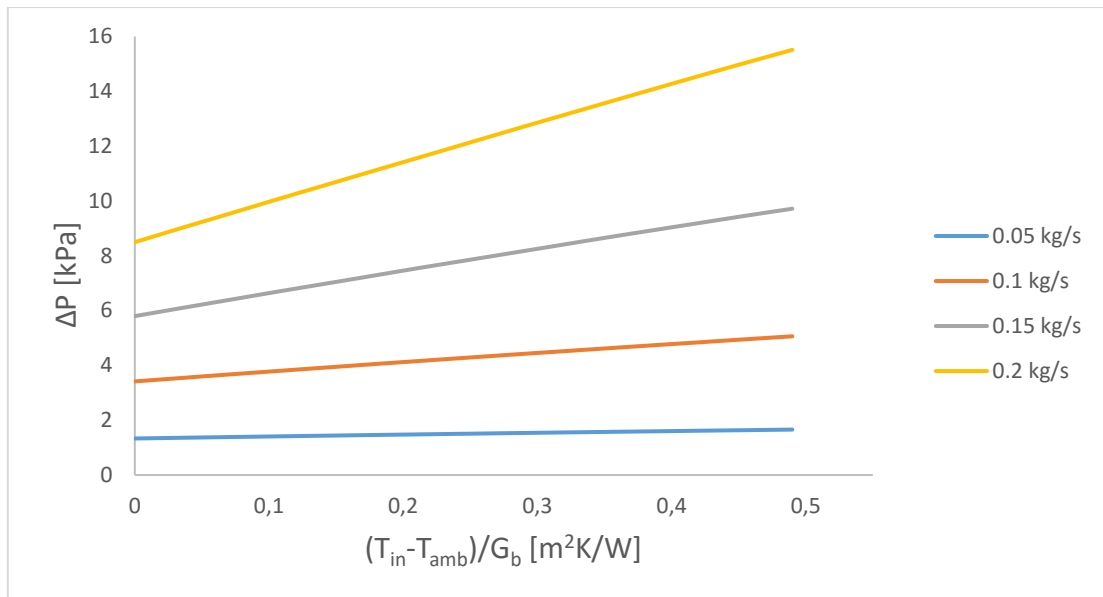
Σχήμα 5.2: Θερμικός βαθμός απόδοσης αέρα

Από το διάγραμμα του θερμικού βαθμού απόδοσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον απορροφητή, αυτός μειώνεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου προκαλεί αύξηση των θερμικών απωλειών και επομένως μείωση της ωφέλιμης ισχύος (άρα και του βαθμού απόδοσης). Ακόμη όσο αυξάνεται η παροχή, αυξάνονται και οι τιμές του βαθμού απόδοσης.



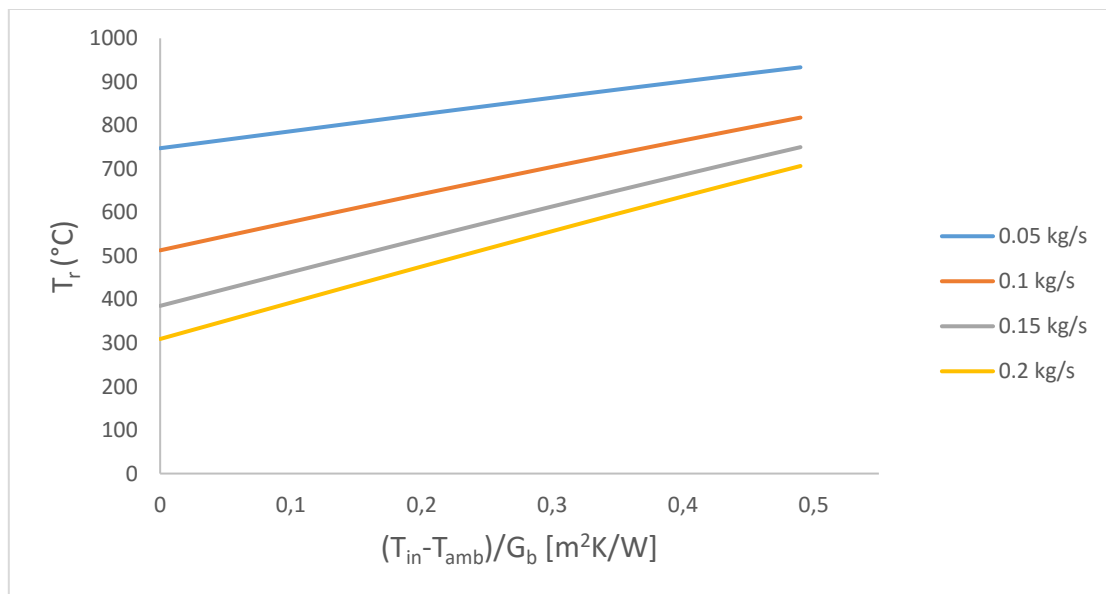
Σχήμα 5.3: Συντελεστής θερμικών απωλειών αέρα

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του αέρα. Ακόμη παρατηρείται ότι οι θερμικές απώλειες μειώνονται με την αύξηση της παροχής μάζας.



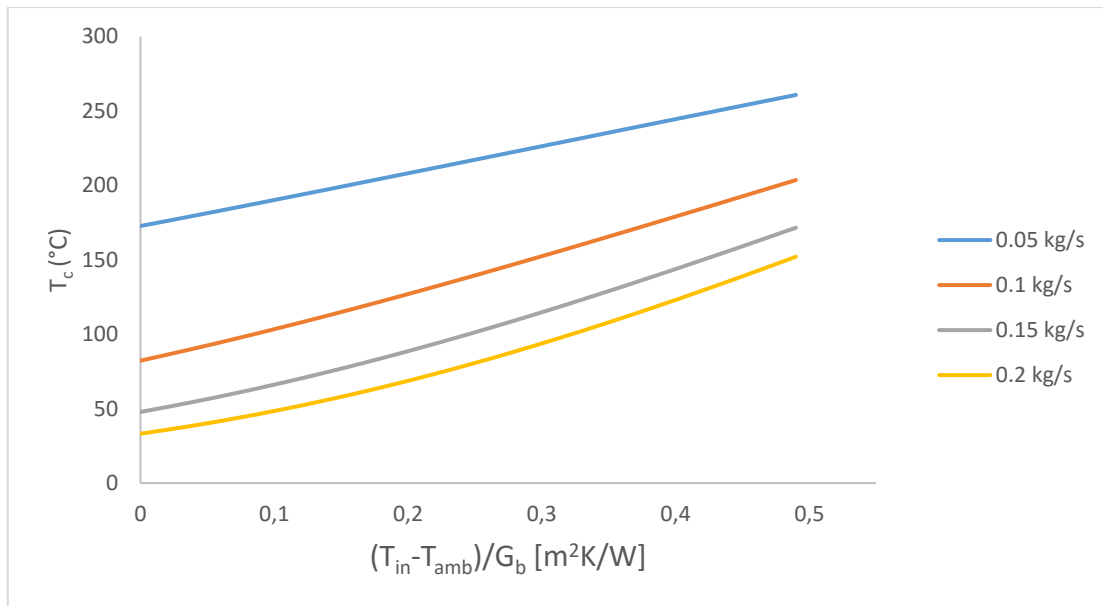
Σχήμα 5.4: Πτώση πίεσης αέρα

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η πτώση πίεσης γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου. Ακόμη η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη σε μεγαλύτερες παροχές μάζας.



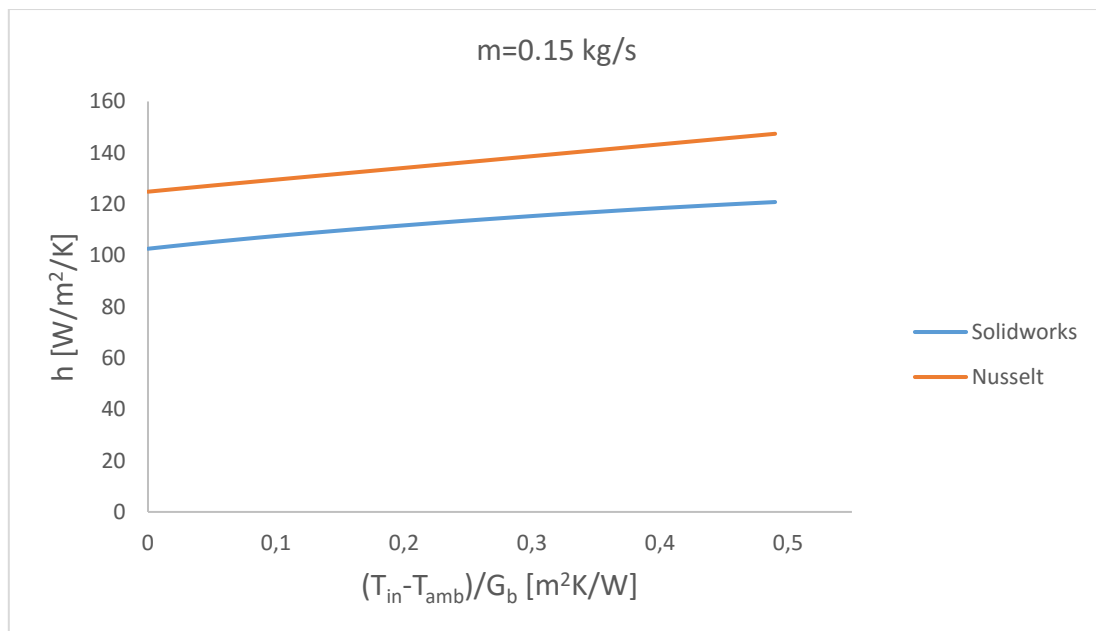
Σχήμα 5.5: Μέση θερμοκρασία απορροφητή αέρα

Η μέση θερμοκρασία του απορροφητή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στο συλλέκτη. Ακόμη παρατηρείται ότι με την αύξηση της παροχής μάζας οι τιμές μειώνονται, αφού μειώνονται και οι θερμικές απώλειες.



Σχήμα 5.6: Μέση θερμοκρασία σωλήνα κενού αέρα

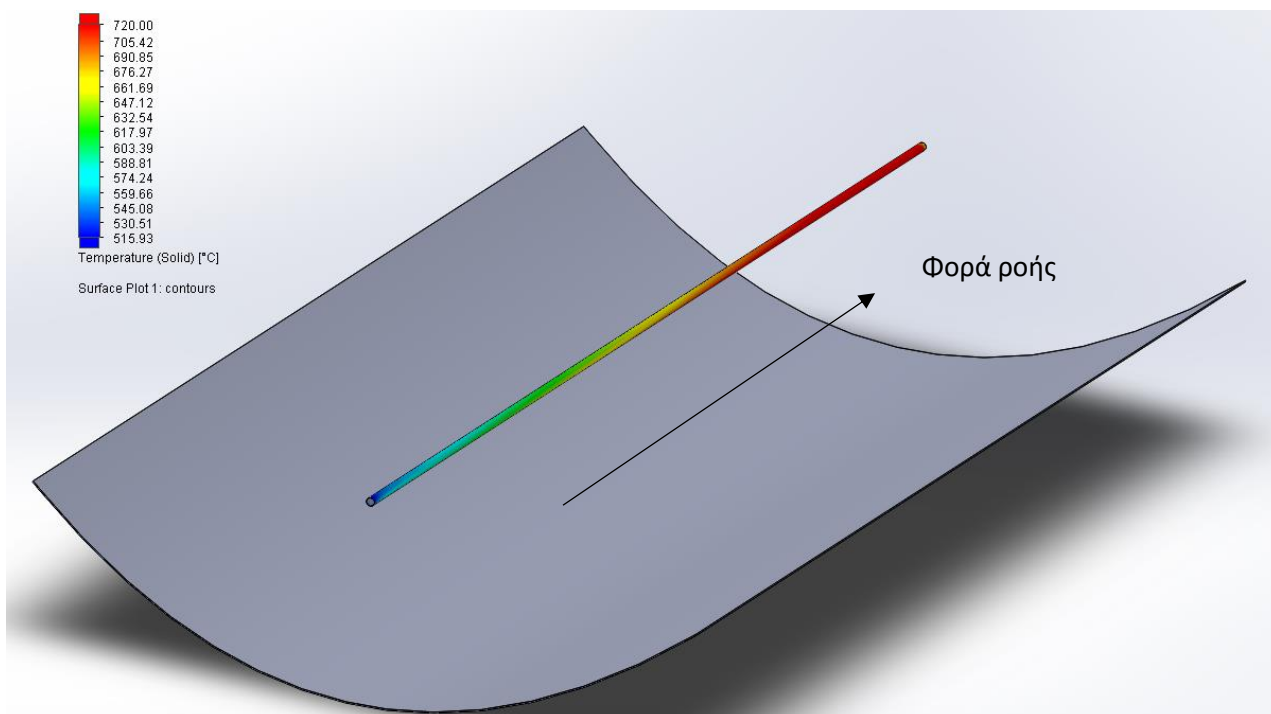
Οι μέση θερμοκρασία του σωλήνα κενού αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου. Ακόμη οι τιμές της μειώνονται με την αύξηση της παροχής μάζας.



Σχήμα 5.7: Συντελεστής συναγωγής αέρα - απορροφητή

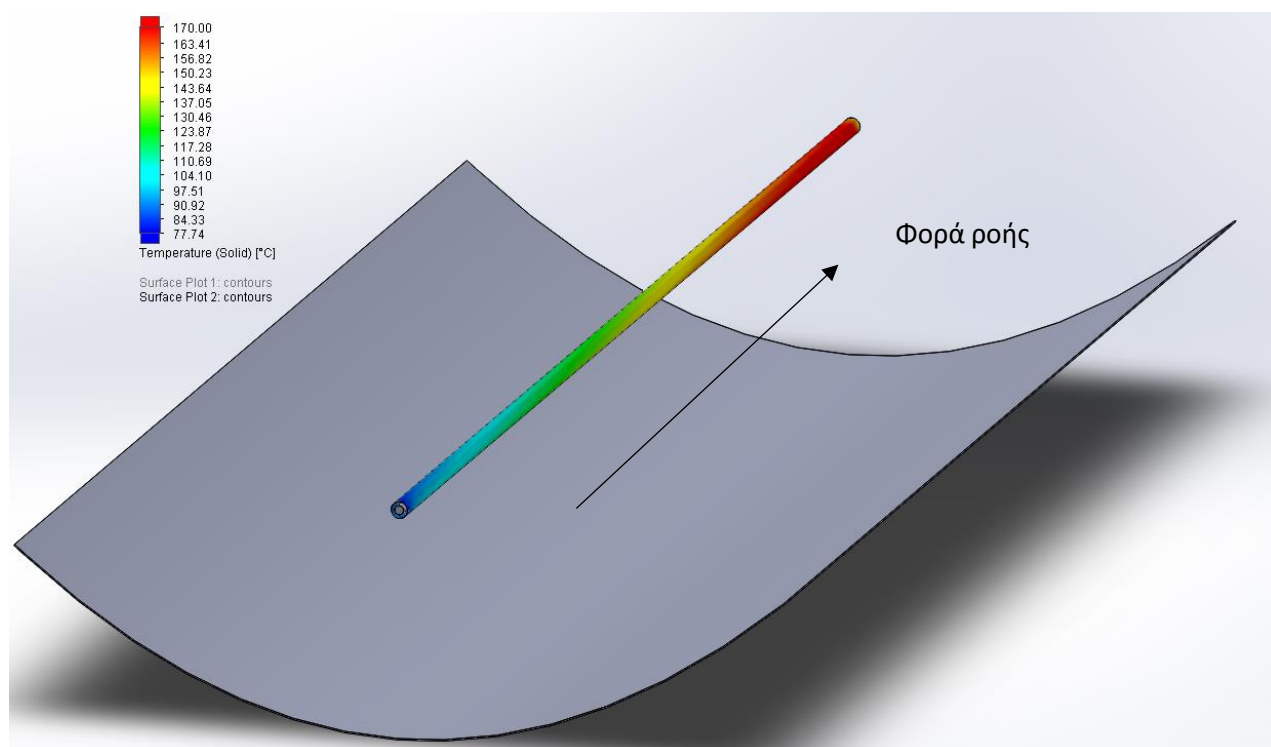
Παρατηρείται ότι ο συντελεστής συναγωγής αέρα – απορροφητή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου. Ακόμη οι τιμές που προκύπτουν από το Solidworks είναι λίγο μικρότερες από αυτές που υπολογίζονται από τον αριθμό Nusselt. Η διαφορά είναι περίπου 20 %.

Παρακάτω παρουσιάζονται σχήματα με κατανομές θερμοκρασίας για θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο συλλέκτη 395 °C και παροχή μάζας 0.15 kg/s.



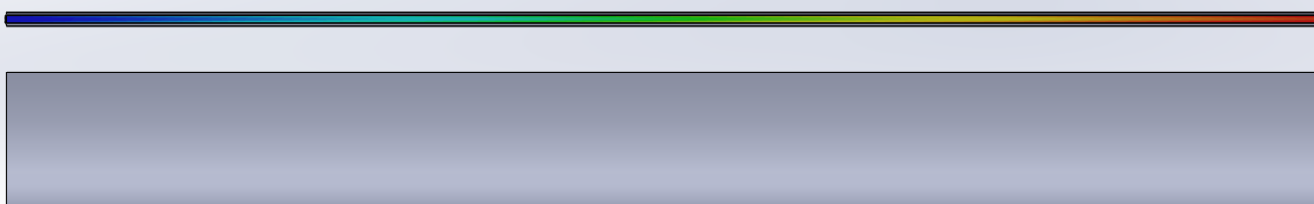
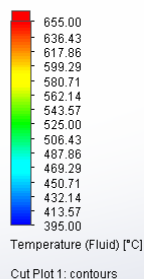
Σχήμα 5.8: Κατανομή θερμοκρασίας απορροφητή

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του απορροφητή αυξάνεται όσο ο αέρας ρέει προς την έξοδο.



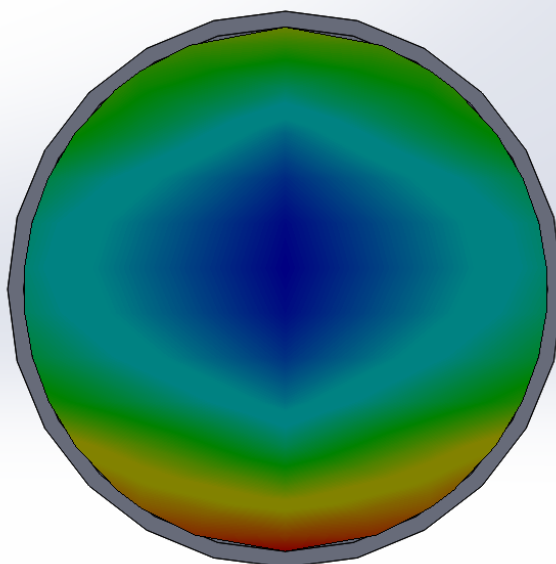
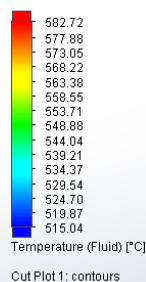
Σχήμα 5.9: Κατανομή θερμοκρασίας σωλήνα κενού

Η θερμοκρασία του σωλήνα κενού αυξάνεται κατά μήκος του, έχοντας αρκετά μικρότερες τιμές σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του απορροφητή.



Σχήμα 5.10: Κατανομή θερμοκρασίας αέρα στο εσωτερικό του απορροφητή (τομή στη μέση)

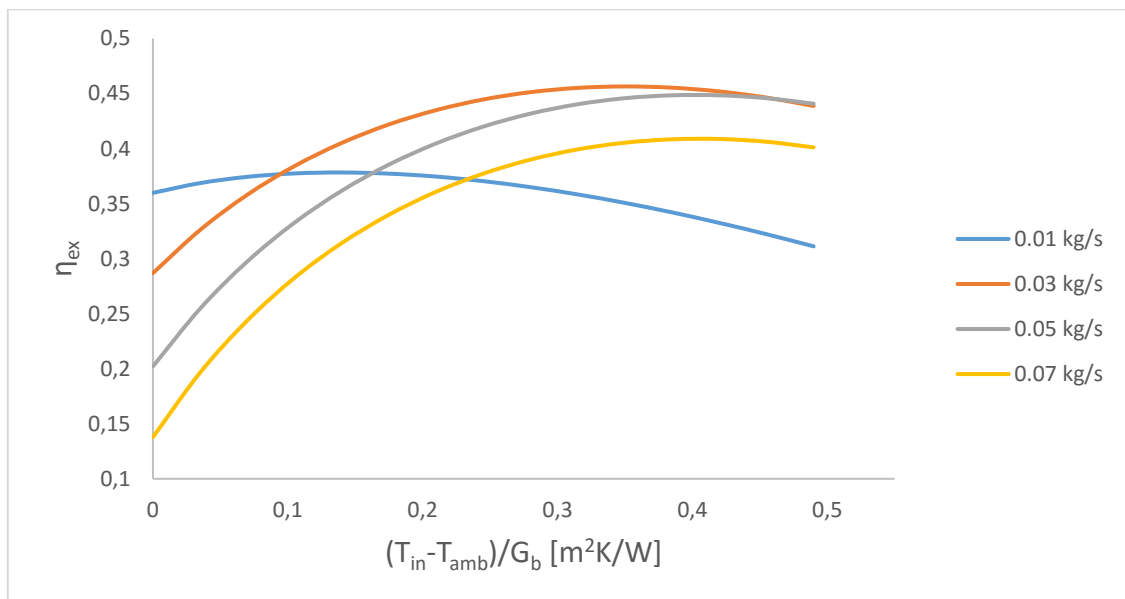
Στο σχήμα 5.10 φαίνεται η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στο πέρασμά του μέσα στον απορροφητή, η οποία είναι περίπου 260 °C.



Σχήμα 5.11: Κατανομή θερμοκρασίας αέρα στο μέσο του απορροφητή

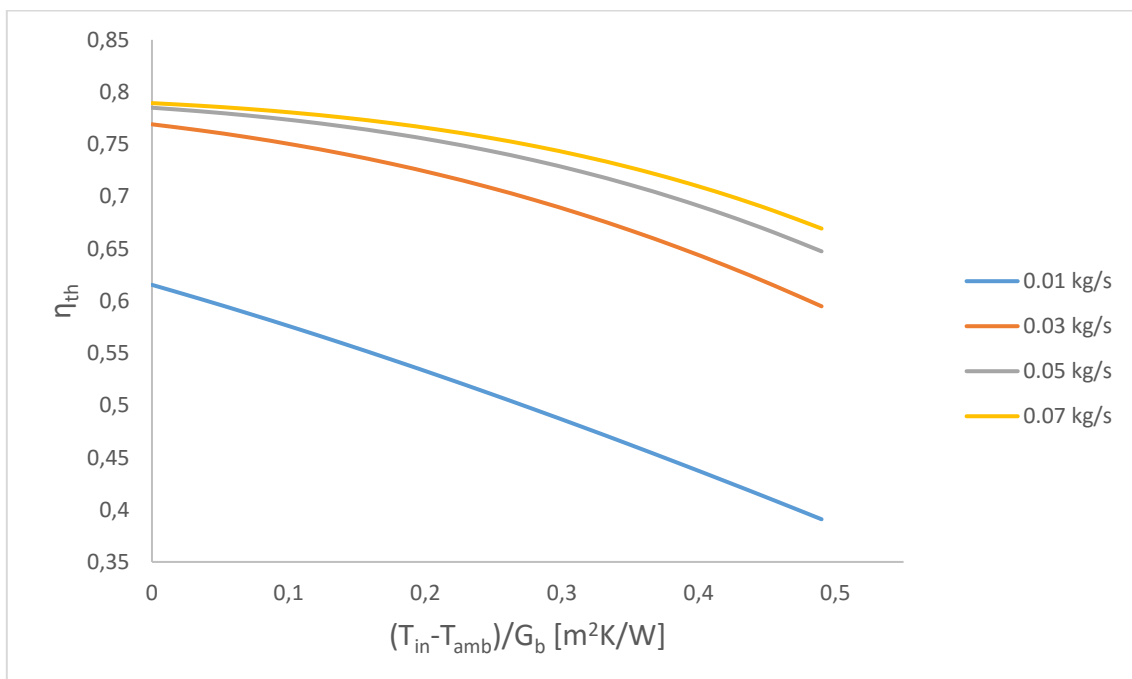
Στο σχήμα 5.11 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο μέσο του απορροφητή (6 m). όπως παρατηρείται, η θερμοκρασία έχει χαμηλότερες τιμές κοντά στον άξονα, ενώ αυξάνεται κοντά στα τοιχώματα.

5.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης ηλίου



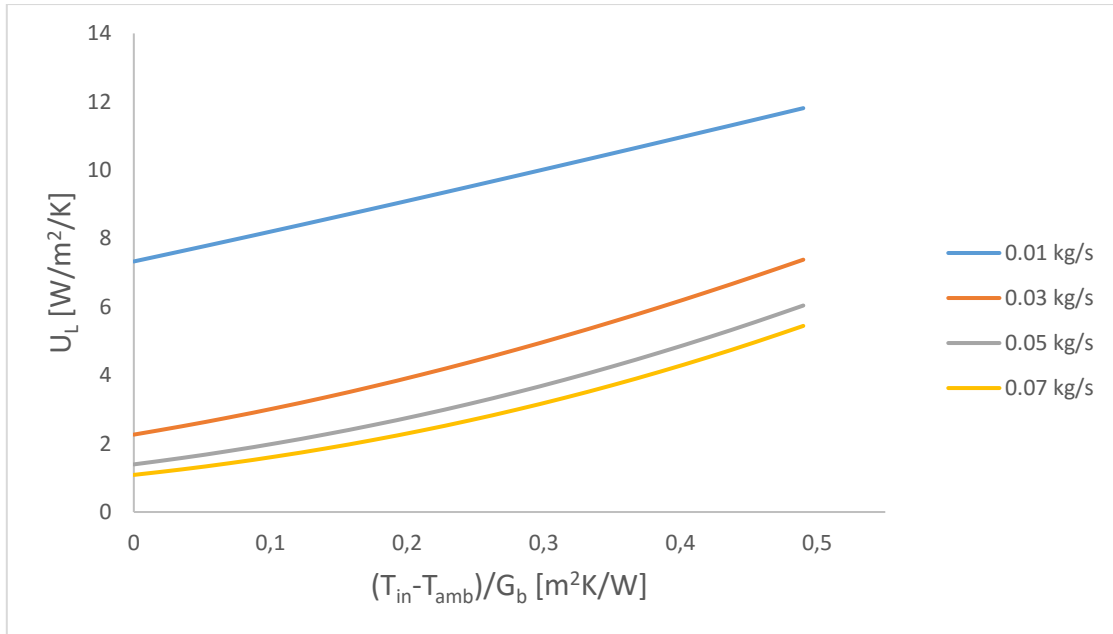
Σχήμα 5.12: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης He

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η παροχή μάζας για το ήλιο που παρουσιάζει την καλύτερη εξεργειακή απόδοση είναι τα 0.03 kg/s.



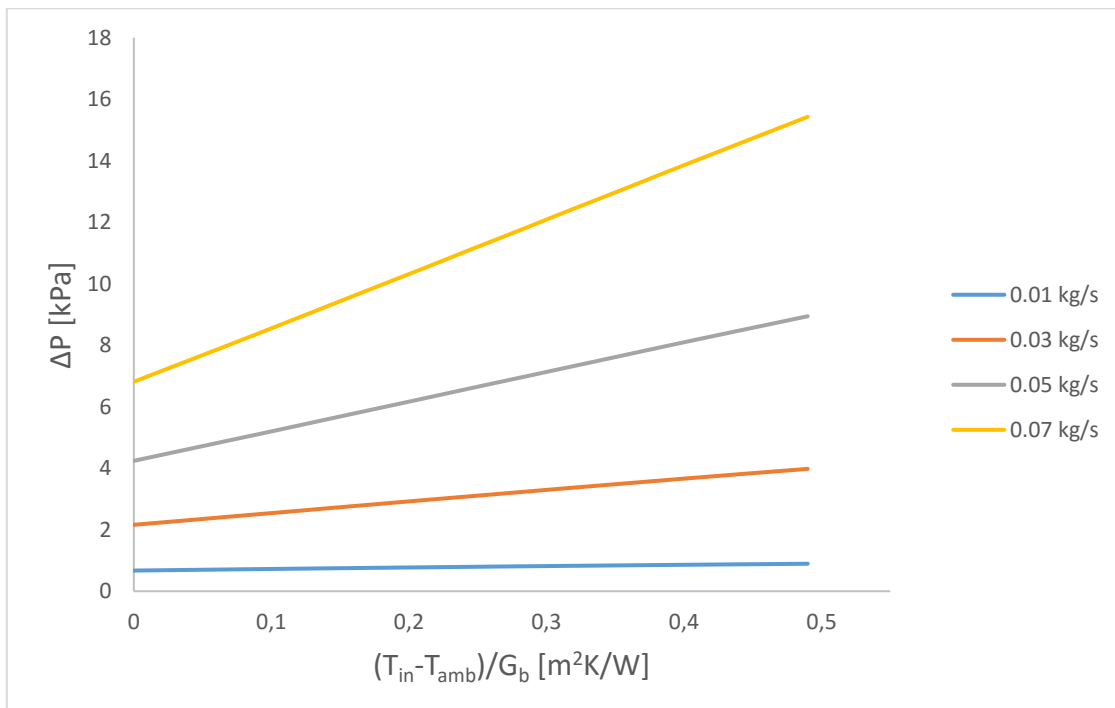
Σχήμα 5.13: Θερμικός βαθμός απόδοσης He

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης έχει αντίστοιχη συμπεριφορά για τις διάφορες παροχές μάζας του ηλίου με αυτή του αέρα.



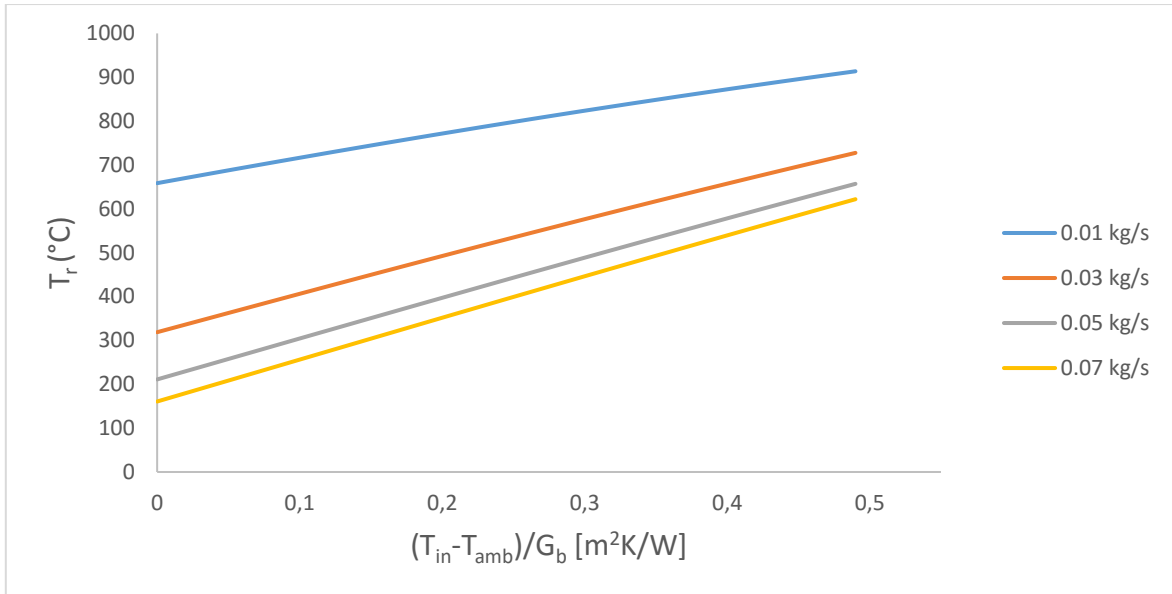
Σχήμα 5.14: Συντελεστής θερμικών απωλειών He

Όπως και στην περίπτωση του αέρα, ο συντελεστής των θερμικών απωλειών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του ηλίου στον απορροφητή και οι τιμές του μειώνονται όσο αυξάνεται η παροχή μάζας.

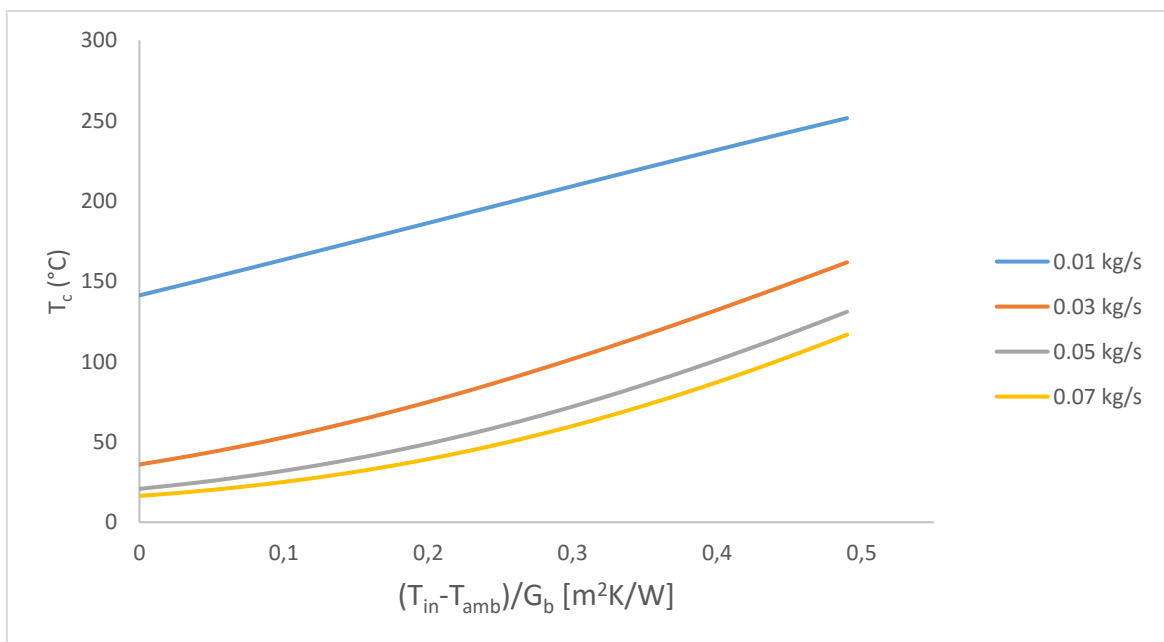


Σχήμα 5.15: Πτώση πίεσης He

Η πτώση πίεσης αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου και έχει μεγαλύτερες τιμές όσο αυξάνει η παροχή μάζας.

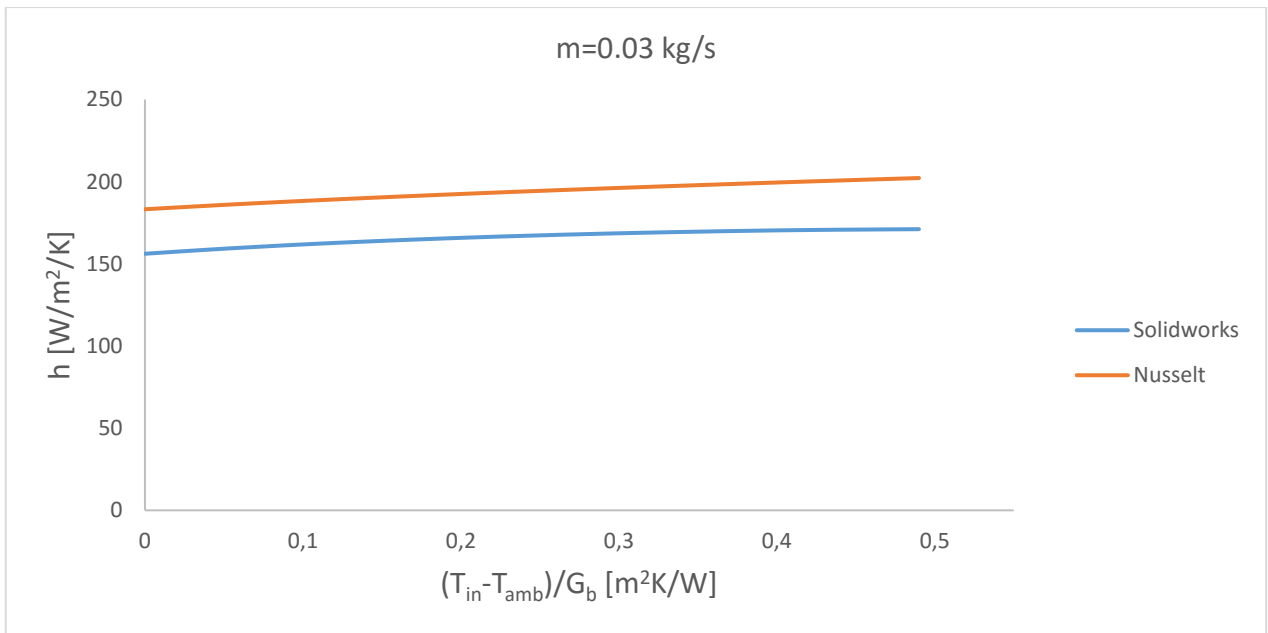


Σχήμα 5.16: Μέση θερμοκρασία απορροφητή He



Σχήμα 5.17: Μέση θερμοκρασία σωλήνα κενού He

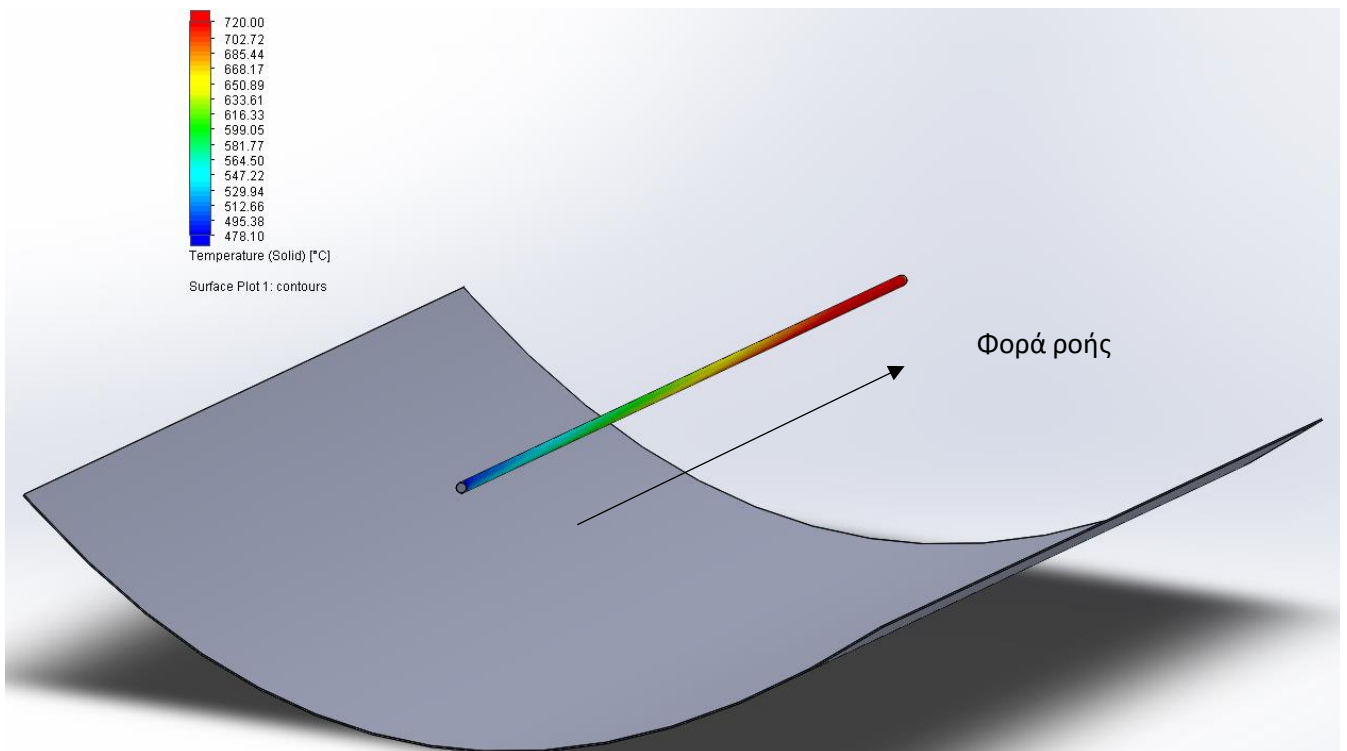
Οι μέσες θερμοκρασίες απορροφητή και σωλήνα κενού όπως και στην περίπτωση του αέρα, αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου και έχουν μικρότερες τιμές σε μεγαλύτερες παροχές μάζας.



Σχήμα 5.18: Συντελεστής συναγωγής He - απορροφητή

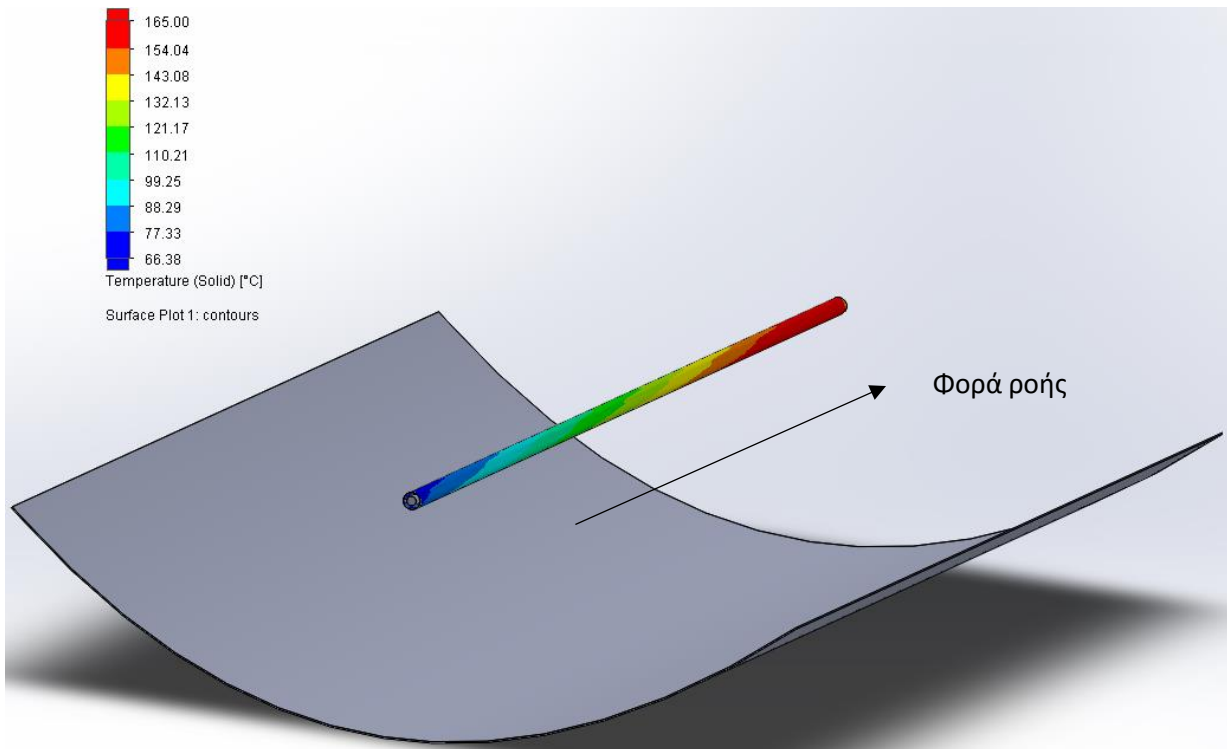
Ο συντελεστής συναγωγής ηλίου – απορροφητή αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου. Ακόμη οι τιμές που προκύπτουν από το Solidworks είναι λίγο μικρότερες από αυτές που προκύπτουν από τον αριθμό Nusselt.

Παρακάτω παρουσιάζονται σχήματα με κατανομές θερμοκρασίας για θερμοκρασία εισόδου του He στο συλλέκτη 395 °C και παροχή μάζας 0.03 kg/s.



Σχήμα 5.19: Κατανομή θερμοκρασίας απορροφητή

Η θερμοκρασία του απορροφητή αυξάνεται όσο το ήλιο ρέει προς την έξοδο.



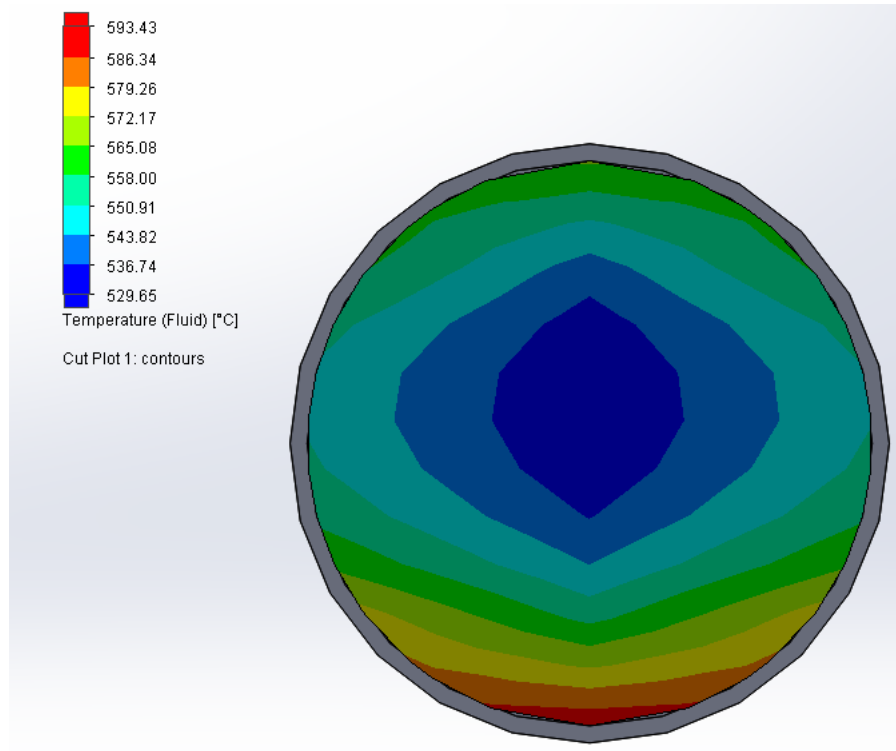
Σχήμα 5.20: Κατανομή θερμοκρασίας σωλήνα κενού

Η θερμοκρασία του σωλήνα κενού αυξάνεται κατά μήκος του έχοντας μικρότερες τιμές σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του απορροφητή.



Σχήμα 5.21: Κατανομή θερμοκρασίας He στο εσωτερικό του απορροφητή (τομή στη μέση)

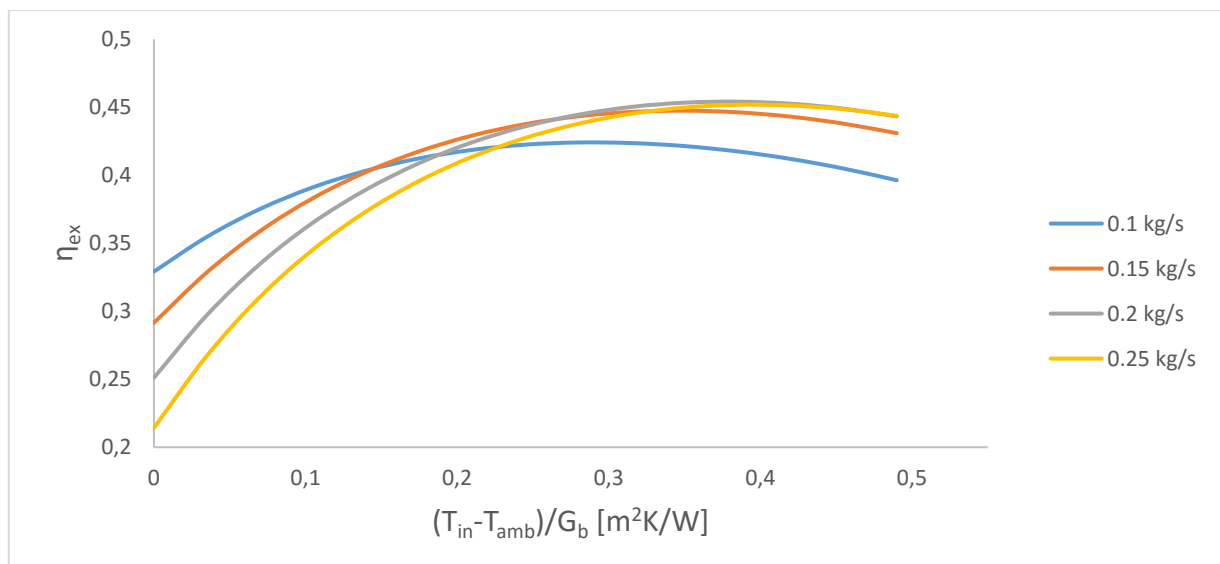
Στο σχήμα 5.21 φαίνεται η αύξηση της θερμοκρασίας του ηλίου μέσα στον απορροφητή, η οποία είναι περίπου 286 °C.



Σχήμα 5.22: Κατανομή θερμοκρασίας He στο μέσο του απορροφητή

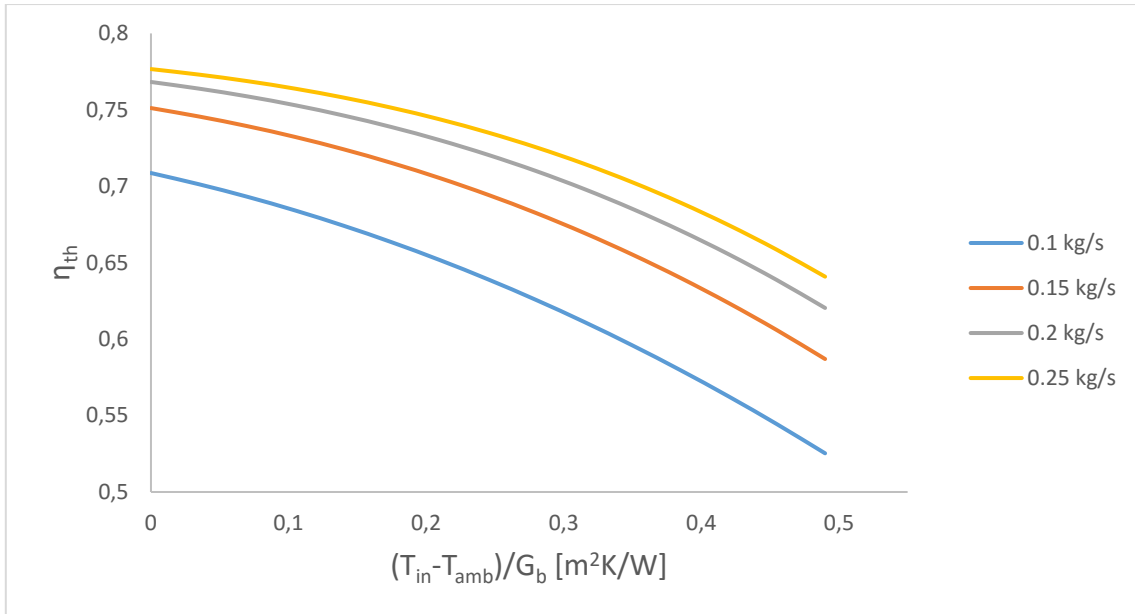
Στο σχήμα 5.22 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας του He στη μέση του απορροφητή. Οι τιμές της είναι μεγαλύτερες κοντά στα τοιχώματα σε σχέση με τις περιοχές κοντά στον άξονα.

5.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης διοξειδίου του άνθρακα



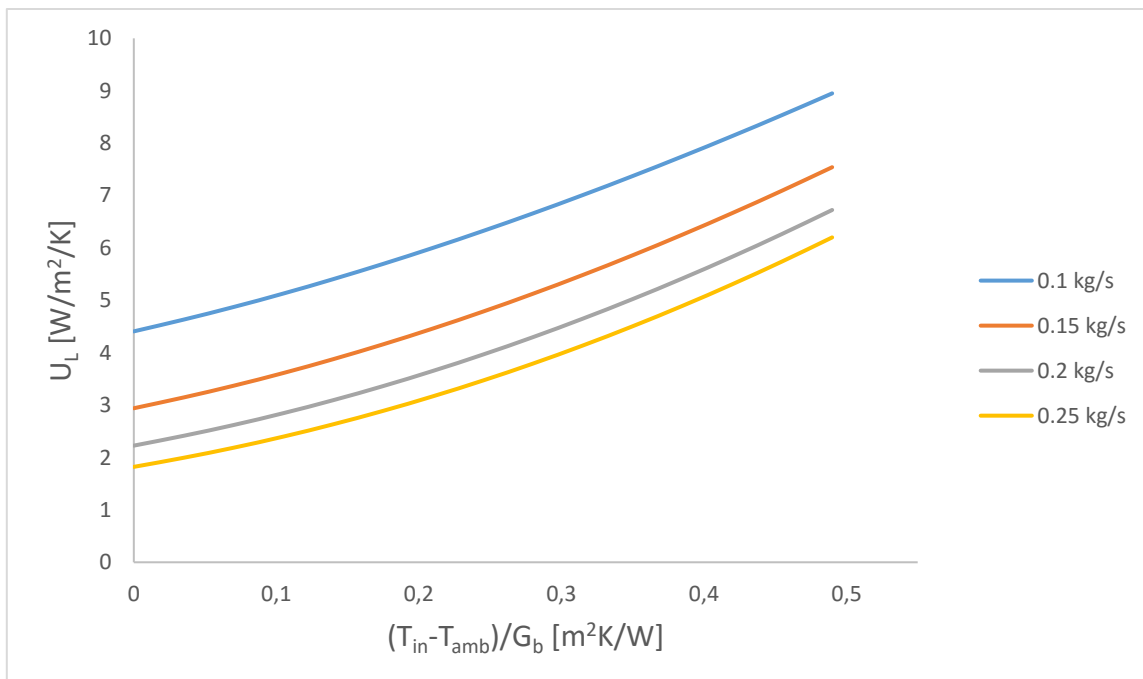
Σχήμα 5.23: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης CO₂

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η παροχή μάζας που παρουσιάζει την καλύτερη εξεργειακή απόδοση για το CO₂ είναι τα 0.2 kg/s.



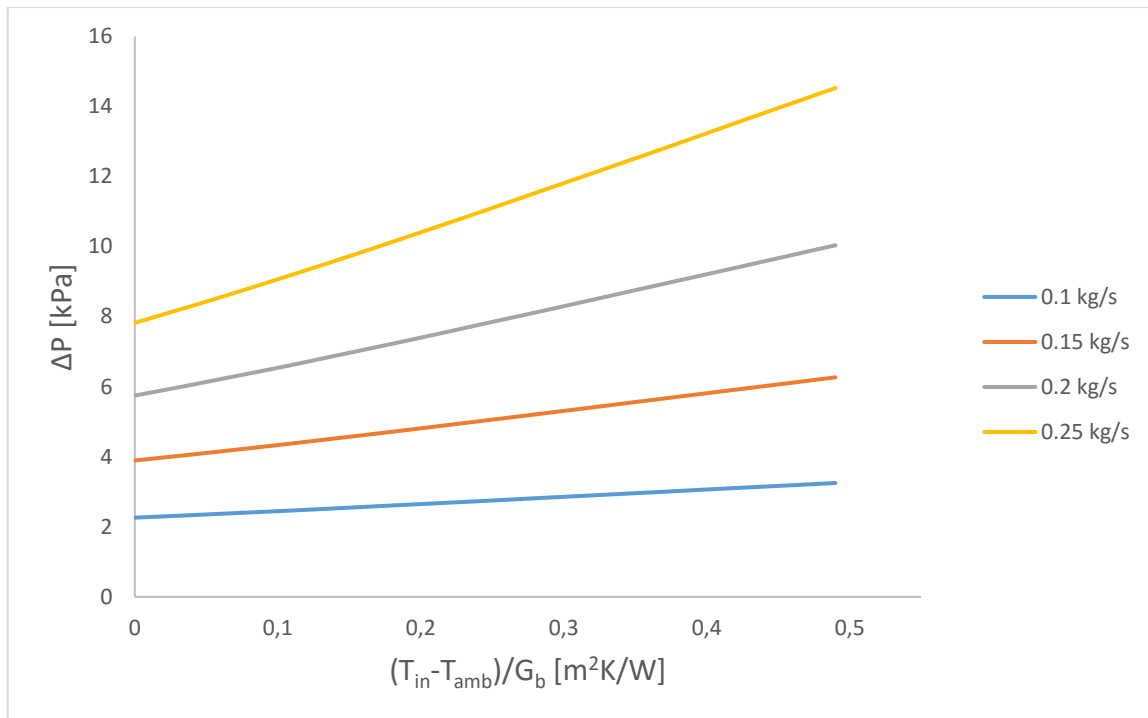
Σχήμα 5.24: Θερμικός βαθμός απόδοσης CO₂

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης για το CO₂ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, όπως και στα προηγούμενα εργαζόμενα μέσα και οι τιμές του αυξάνονται σε μεγαλύτερες παροχές μάζας.



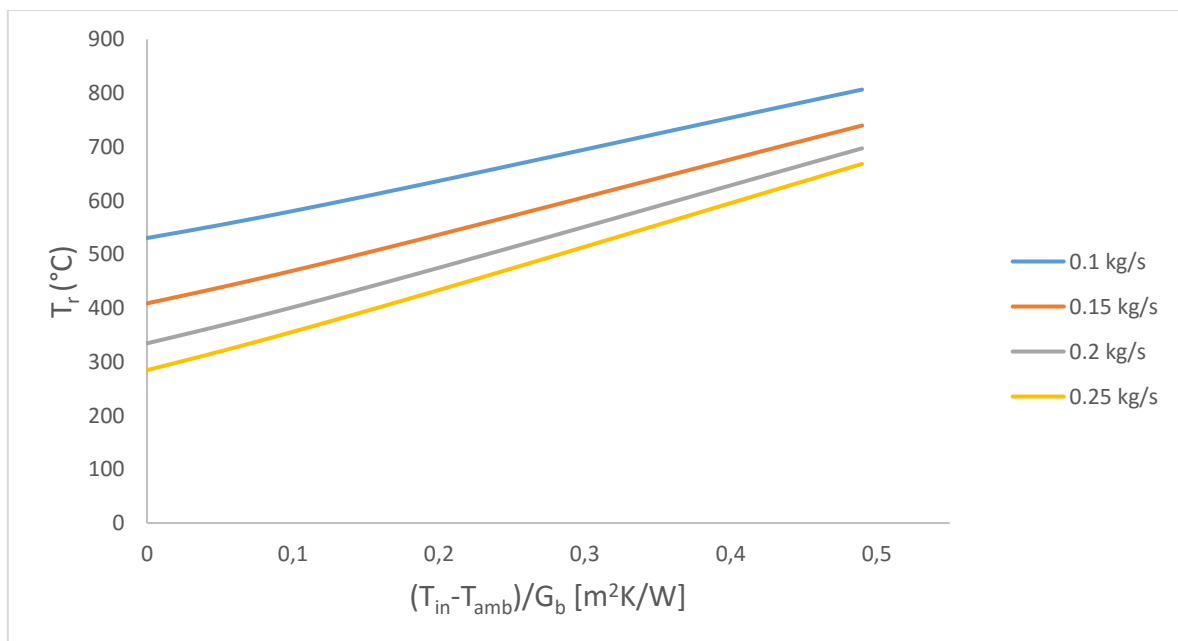
Σχήμα 5.25: Συντελεστής θερμικών απωλειών CO₂

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών όπως και στα άλλα εργαζόμενα μέσα αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου και έχει μικρότερες τιμές για μεγαλύτερες παροχές μάζας.

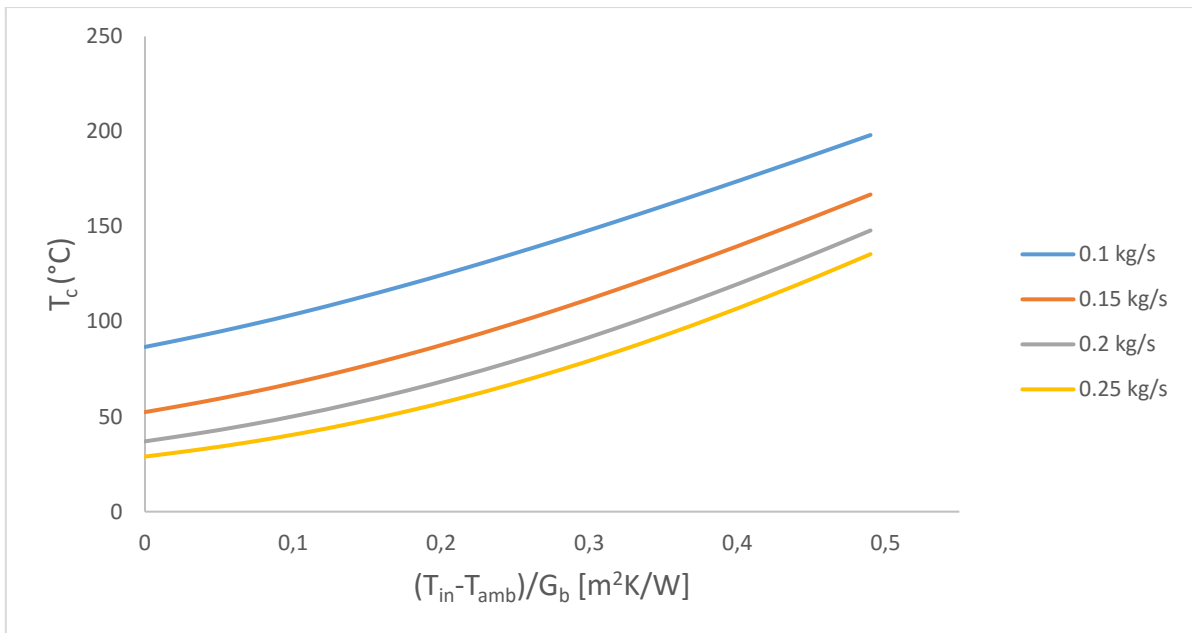


Σχήμα 5.26: Πτώση πίεσης CO₂

Η πτώση πίεσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου και είναι μεγαλύτερη σε πιο μεγάλες παροχές μάζας.

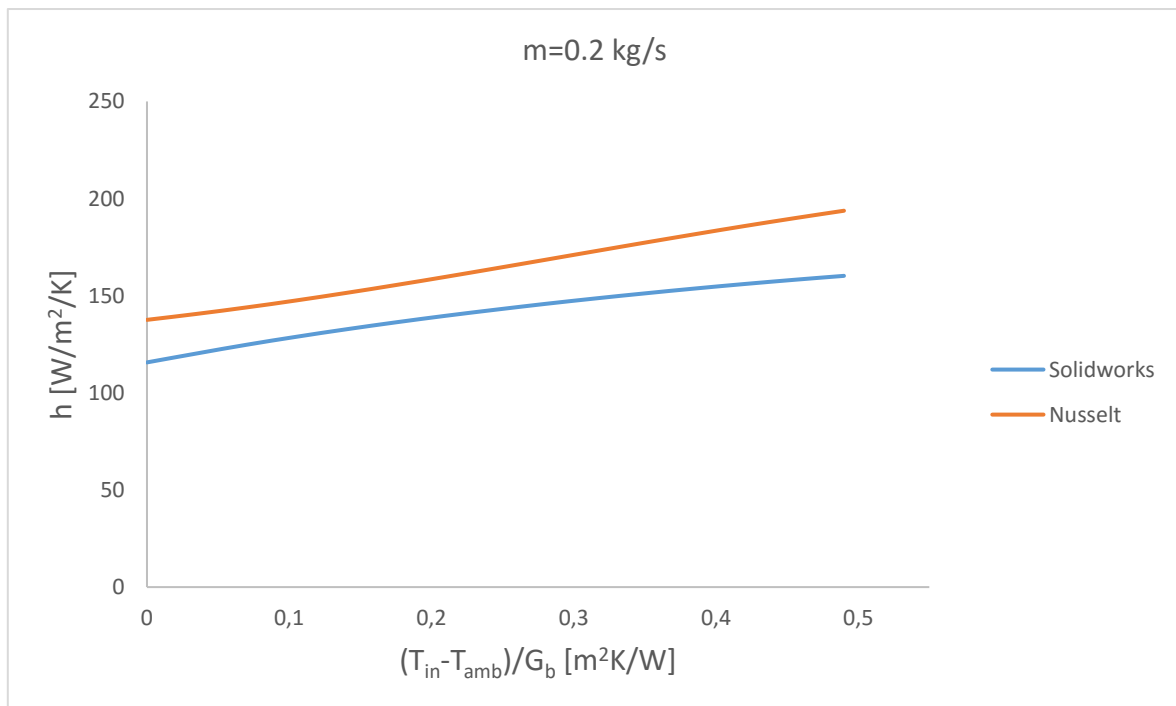


Σχήμα 5.27: Μέση θερμοκρασία απορροφητή CO₂



Σχήμα 5.28: Μέση θερμοκρασία σωλήνα κενού CO₂

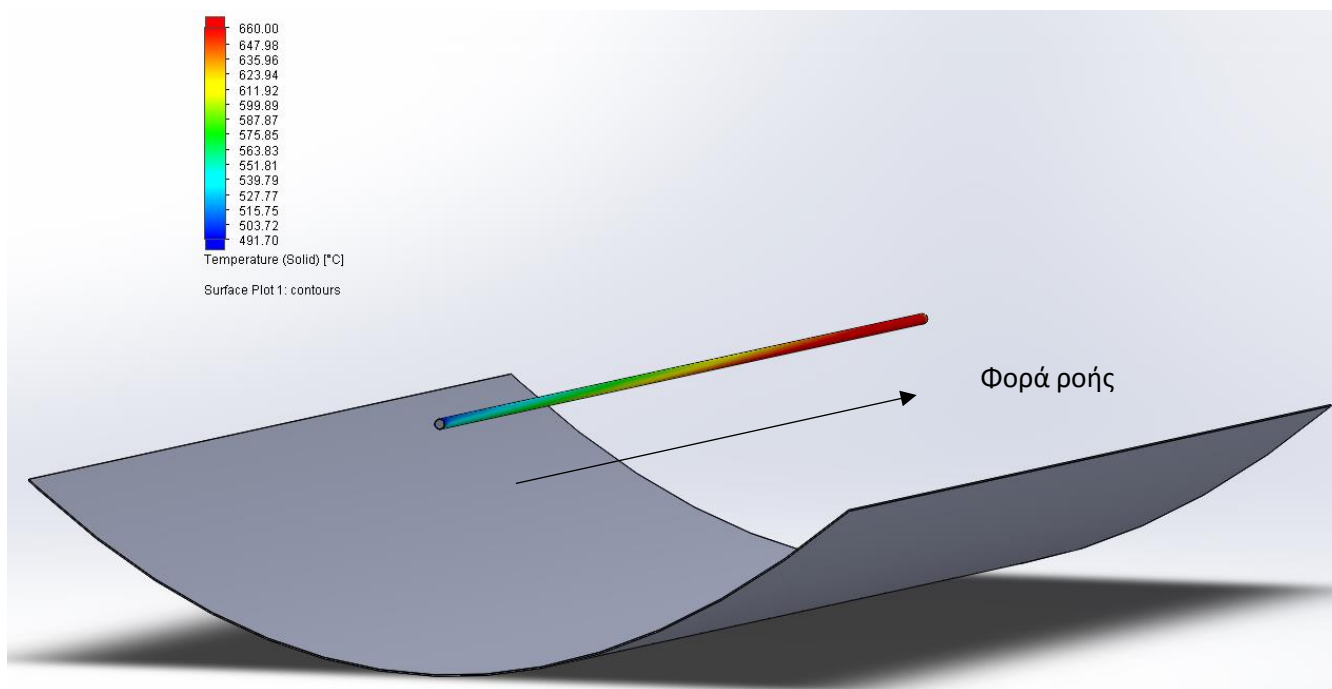
Οι μέσες θερμοκρασίες απορροφητή και σωλήνα κενού όπως και στα άλλα αέρια αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου και έχουν μικρότερες τιμές σε μεγαλύτερες παροχές μάζας.



Σχήμα 5.29: Συντελεστής συναγωγής CO₂ - απορροφητή

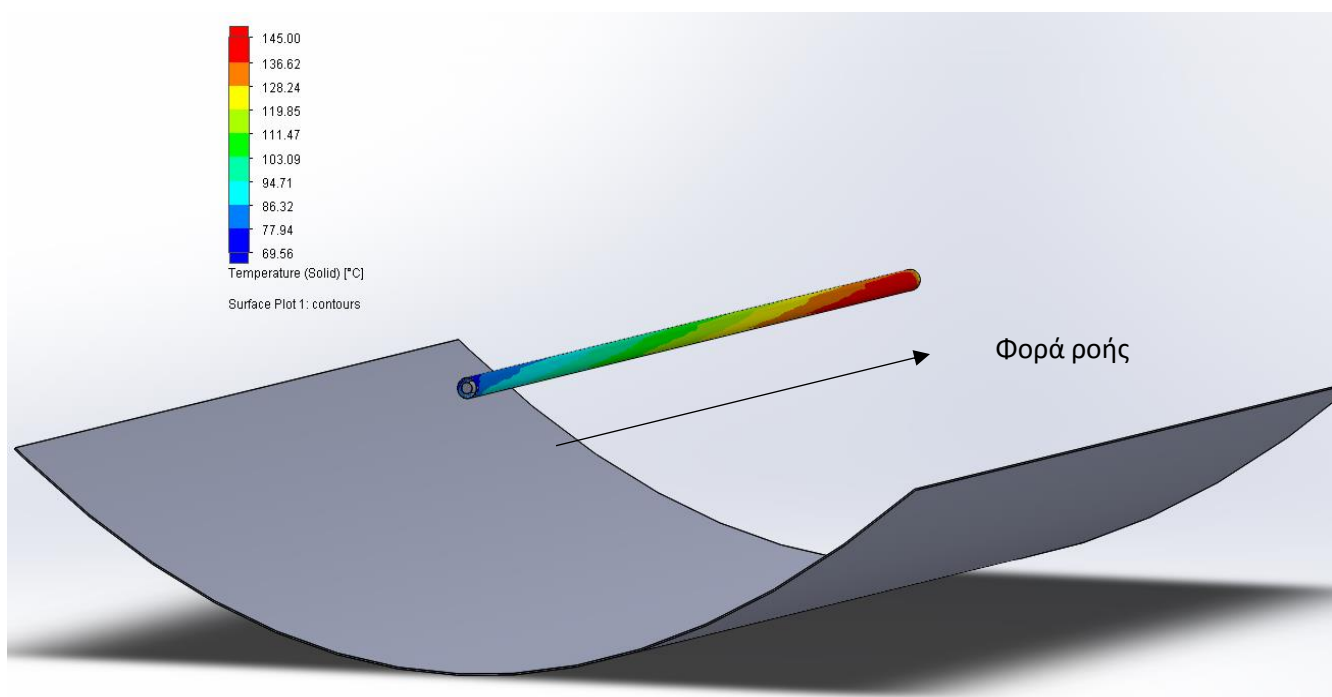
Ο συντελεστής συναγωγής CO₂ – απορροφητή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου. Ακόμη οι τιμές που προκύπτουν από το Solidworks είναι λίγο μικρότερες από αυτές που προκύπτουν από τον αριθμό Nusselt.

Παρακάτω παρουσιάζονται σχήματα με κατανομές θερμοκρασίας για θερμοκρασία εισόδου του CO₂ στο συλλέκτη 395 °C και παροχή μάζας 0.2 kg/s.



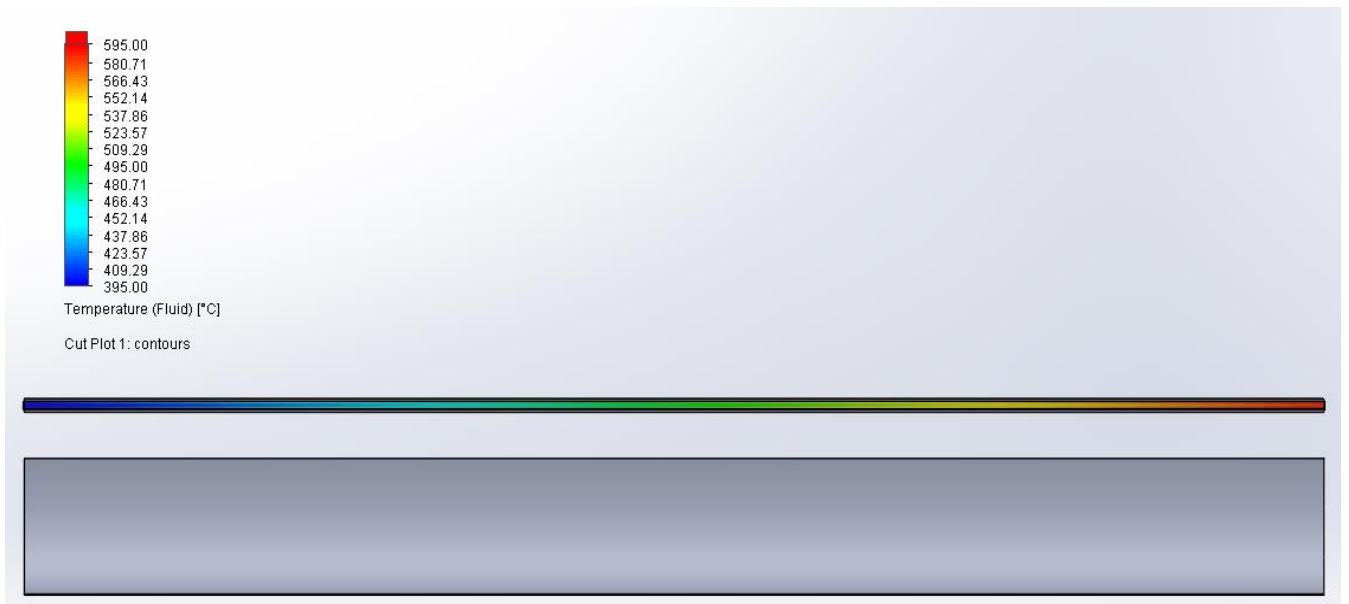
Σχήμα 5.30: Κατανομή θερμοκρασίας απορροφητή

Η θερμοκρασία του απορροφητή αυξάνεται όσο το CO₂ ρέει προς την έξοδο.



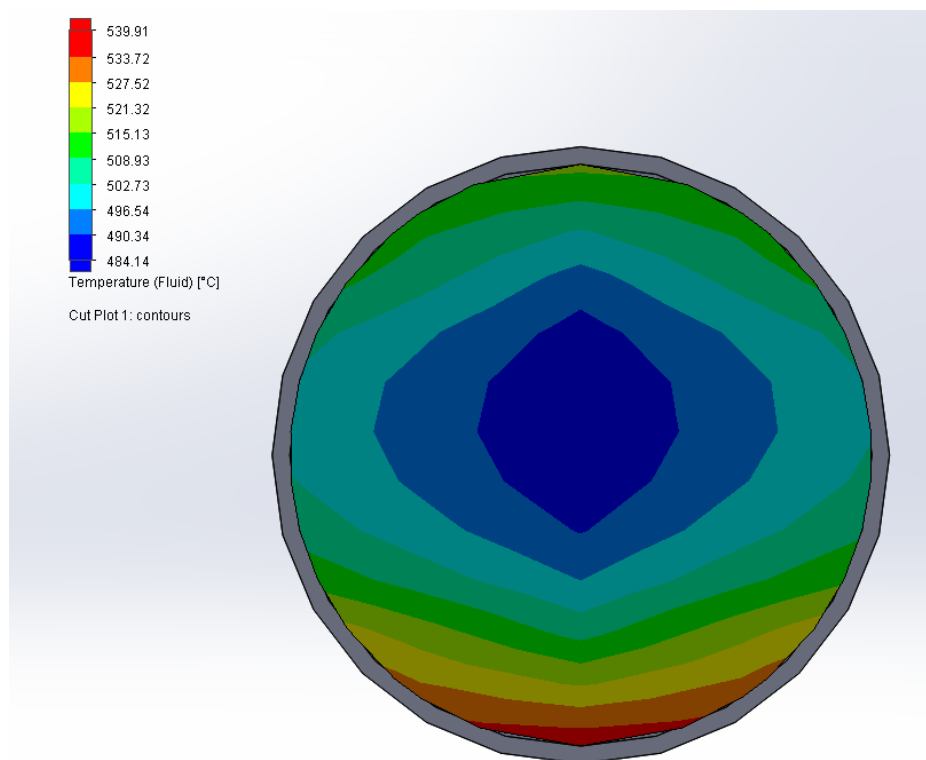
Σχήμα 5.31: Κατανομή θερμοκρασίας σωλήνα κενού

Η θερμοκρασία του σωλήνα κενού αυξάνεται κατά μήκος του έχοντας μικρότερες τιμές σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του απορροφητή.



Σχήμα 5.32: Κατανομή θερμοκρασίας CO₂ στο εσωτερικό του απορροφητή (τομή στη μέση)

Στο σχήμα 5.32 φαίνεται η αύξηση της θερμοκρασίας του CO₂ μέσα στον απορροφητή, η οποία είναι περίπου 200 °C.



Σχήμα 5.33: Κατανομή θερμοκρασία CO₂ στο μέσο του απορροφητή

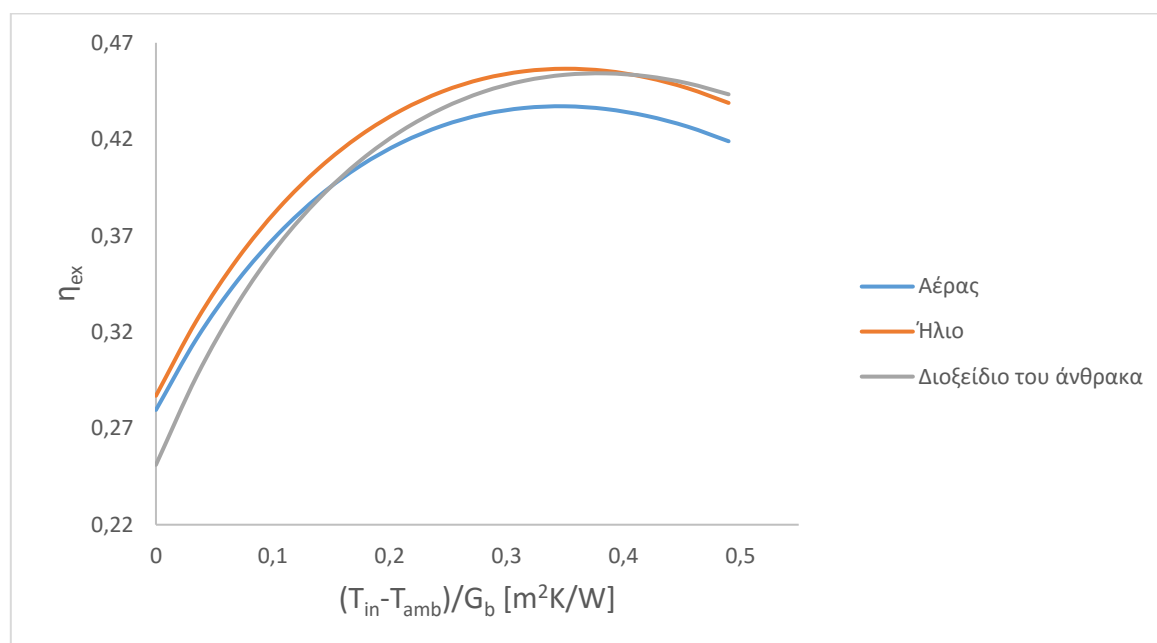
Στο σχήμα 5.33 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας του CO₂ στο μέσο του απορροφητή. Οι τιμές της είναι μεγαλύτερες κοντά στα τοιχώματα σε σχέση με τις περιοχές γύρω από τον άξονα.

5.5: Σύγκριση αερίων

Η σύγκριση των τριών αερίων θα γίνει για τις παροχές που παρουσιάζουν την καλύτερη εξεργειακή απόδοση. Όπως προέκυψε από τα διαγράμματα αυτές είναι:

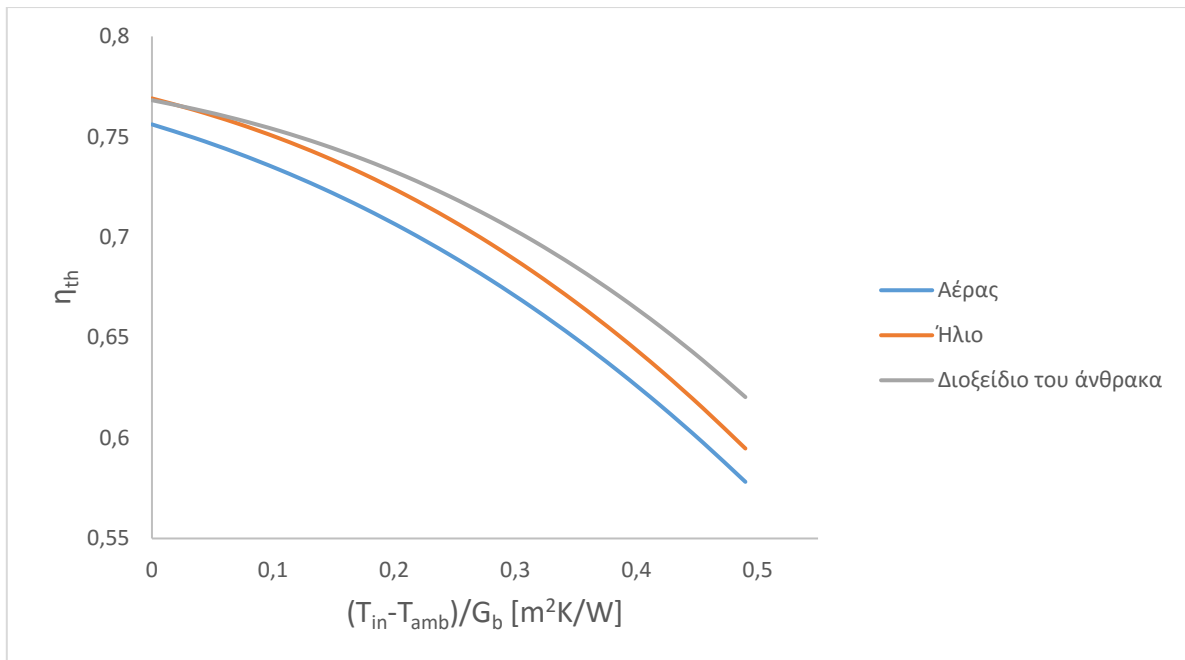
Εργαζόμενο μέσο	Αέρας	Ήλιο (He)	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)
Βέλτιστη παροχή μάζας \dot{m}_{opt} (kg/s)	0.15	0.03	0.2

Πίνακας 5.1: Παροχές με καλύτερη εξεργειακή απόδοση για τα τρία εξεταζόμενα αέρια



Σχήμα 5.34: Σύγκριση εξεργειακών βαθμών απόδοσης

Στο το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι το αέριο που έχει εξεργειακά καλύτερη απόδοση είναι το ήλιο. Σε υψηλές θερμοκρασίες εισόδου (> 400 °C) το διοξείδιο του άνθρακα έχει λίγο καλύτερη απόδοση. Επίσης για θερμοκρασίες εισόδου μέχρι περίπου 150 °C, ο αέρας έχει καλύτερη εξεργειακή απόδοση από το διοξείδιο του άνθρακα.



Σχήμα 5.35: Σύγκριση θερμικών βαθμών απόδοσης

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το εργαζόμενο μέσο που παρουσιάζει τον καλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης είναι το διοξείδιο του άνθρακα.

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα τρία εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα:

Αέρας - $\dot{m}_{opt} = 0.15 \text{ kg/s}$									
$T_{in}(^{\circ}C)$	$T_{out}(^{\circ}C)$	$T_r(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(W/m^2/K)$	$\Delta P(kPa)$	$h(W/m^2/K)$ Solidworks	$h(W/m^2/K)$ Θεωρητικό
10	348.38	385.36	47.82	0.756	0.280	2.771	5.797	102.6	124.8
45	378.41	412.42	53.74	0.749	0.317	3.024	6.092	104.4	126.5
80	407.96	439.48	60.19	0.742	0.347	3.293	6.384	106.2	128.1
115	437.10	466.47	67.17	0.734	0.371	3.579	6.677	107.8	129.8
150	465.73	493.31	74.65	0.725	0.391	3.879	6.963	109.3	131.4
185	493.99	520.00	82.63	0.714	0.406	4.196	7.249	110.7	133.0
220	521.86	546.50	91.08	0.703	0.418	4.529	7.537	112.1	134.6
255	549.38	572.77	99.97	0.692	0.427	4.877	7.814	113.4	136.2
290	576.49	598.83	109.26	0.679	0.433	5.242	8.092	114.6	137.8
325	603.32	624.66	118.93	0.665	0.436	5.622	8.370	115.8	139.4
360	629.73	650.25	128.95	0.650	0.437	6.017	8.650	116.9	141.0
395	655.86	675.58	139.26	0.633	0.436	6.428	8.920	118.0	142.6
430	681.63	700.66	149.83	0.616	0.432	6.854	9.188	119.0	144.2
465	707.03	725.44	160.58	0.598	0.426	7.294	9.456	119.9	145.8
500	732.12	749.96	171.54	0.578	0.419	7.750	9.714	120.8	147.4

Πίνακας 5.2: Υπολογισμένα μεγέθη αέρα

Ήλιο - $\dot{m}_{opt} = 0.03 \text{ kg/s}$									
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$ Solidworks	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$ Θεωρητικό
10	351.84	318.71	35.97	0.769	0.287	2.264	2.160	156.1	183.2
45	384.12	349.42	41.26	0.763	0.326	2.507	2.292	158.3	185.1
80	416.00	380.06	47.20	0.757	0.358	2.769	2.427	160.3	186.9
115	447.47	410.58	53.79	0.749	0.384	3.050	2.559	162.0	188.5
150	478.49	440.94	61.02	0.741	0.405	3.352	2.694	163.6	190.1
185	509.05	471.07	68.87	0.731	0.422	3.673	2.826	164.9	191.5
220	539.18	500.96	77.35	0.721	0.435	4.014	2.959	166.1	192.9
255	568.76	530.56	86.39	0.709	0.445	4.373	3.090	167.2	194.2
290	597.86	559.83	95.98	0.697	0.451	4.751	3.220	168.1	195.5
325	626.40	588.76	106.04	0.683	0.455	5.147	3.351	168.9	196.7
360	654.39	617.32	116.55	0.668	0.457	5.561	3.479	169.6	197.9
395	681.84	645.48	127.43	0.651	0.455	5.991	3.607	170.2	199.0
430	708.74	673.28	138.65	0.634	0.452	6.439	3.734	170.6	200.1
465	735.00	700.66	150.14	0.615	0.446	6.902	3.856	170.9	201.2
500	760.70	727.60	161.82	0.595	0.439	7.381	3.979	171.1	202.2

Πίνακας 5.3: Υπολογισμένα μεγέθη ηλίου

Διοξείδιο του άνθρακα - $\dot{m}_{opt} = 0.2 \text{ kg/s}$									
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$ Solidworks	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$ Θεωρητικό
10	287.21	334.40	37.00	0.768	0.251	2.227	5.749	115.7	137.6
45	313.84	357.07	41.08	0.764	0.297	2.414	6.017	120.3	140.6
80	340.83	380.57	45.69	0.759	0.335	2.620	6.298	124.7	144.0
115	368.27	405.09	50.92	0.753	0.365	2.847	6.580	128.9	147.6
150	396.23	430.44	56.82	0.746	0.389	3.095	6.882	132.7	151.4
185	424.36	456.30	63.33	0.739	0.409	3.364	7.182	136.3	155.5
220	452.64	482.57	70.49	0.730	0.424	3.654	7.490	139.7	159.7
255	481.03	509.18	78.28	0.721	0.436	3.965	7.806	142.8	164.1
290	509.44	535.95	86.68	0.710	0.445	4.297	8.117	145.8	168.5
325	537.80	562.85	95.66	0.698	0.450	4.650	8.435	148.6	172.9
360	566.11	589.82	105.18	0.685	0.453	5.023	8.756	151.2	177.3
395	594.30	616.78	115.21	0.671	0.454	5.418	9.074	153.7	181.6
430	622.34	643.70	125.72	0.655	0.453	5.833	9.394	156.0	185.8
465	650.19	670.53	136.62	0.639	0.449	6.268	9.716	158.2	189.9
500	677.87	697.25	147.92	0.620	0.443	6.724	10.037	160.2	193.7

Πίνακας 5.4: Υπολογισμένα μεγέθη διοξειδίου του άνθρακα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΛΛΑΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ

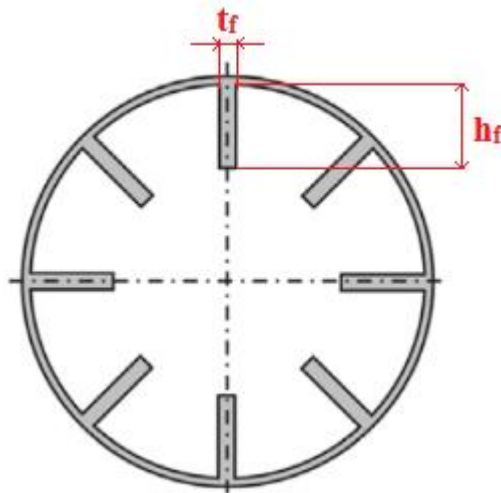
6.1: Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί η αλλαγή στη γεωμετρία του απορροφητικού σωλήνα του συλλέκτη που σχεδιάστηκε, με την χρήση πτερυγίων στο εσωτερικό του, τα οποία θα εκτείνονται σε όλο το μήκος του (ένα σώμα, όχι σειρές). Σκοπός της αύξησης της επιφάνειας συναλλαγής είναι η βελτίωση της απόδοσης του συλλέκτη. Θα εξεταστεί και για τα τρία εργαζόμενα μέσα η ίδια διαμόρφωση απορροφητή, για τρία διαφορετικά μήκη πτερυγίων.

6.2: Σχεδιασμός πτερυγίων

6.2.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Αρχικά θα αναφερθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων. [24]



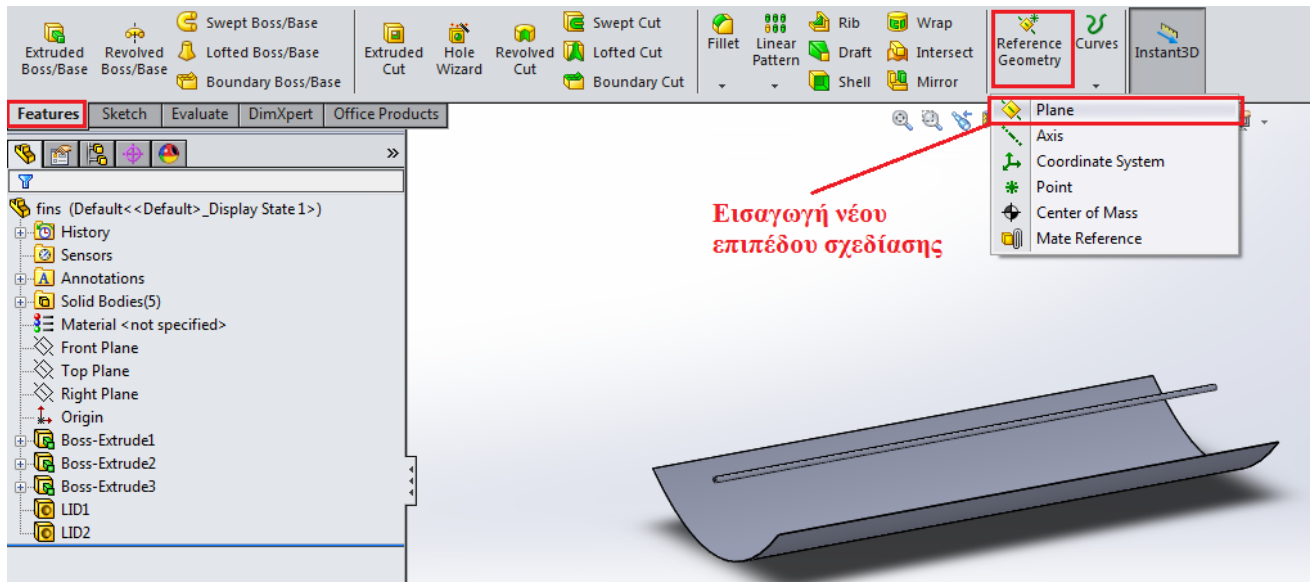
Σχήμα 6.1: Πτερύγια

Μέγεθος	Διαμόρφωση 1	Διαμόρφωση 2	Διαμόρφωση 3
Ύψος πτερυγίου h_f (mm)	5	10	15
Πάχος πτερυγίου t_f (mm)	2	2	2
Αριθμός	8	8	8

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά πτερυγίων

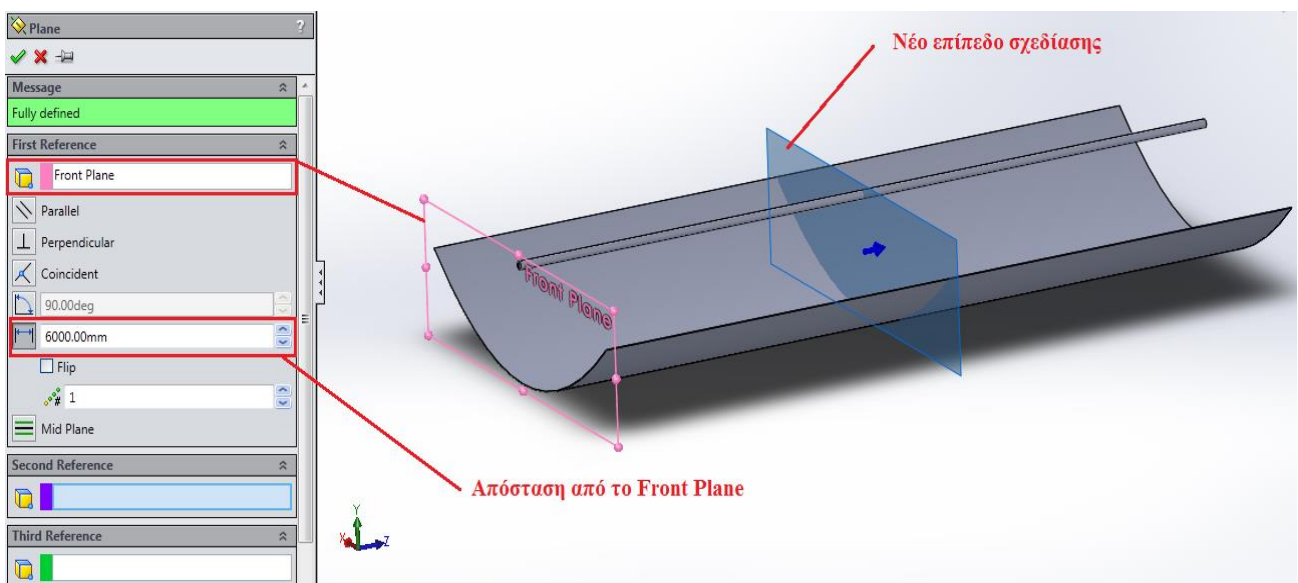
6.2.2: Σχεδιασμός στις δύο διαστάσεις

Αρχικά επιλέγεται να επεξεργαστεί το αρχείο του συλλέκτη που σχεδιάστηκε στο κεφάλαιο 3. Για διευκόλυνση του σχεδιασμού, θα επιλεγθεί να σχεδιαστεί το διδιάστατο *Sketch* σε επίπεδο παράλληλο στο *Front Plane*, το οποίο θα βρίσκεται στη μέση του συλλέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή *Reference Geometry* (καρτέλα *Features*).



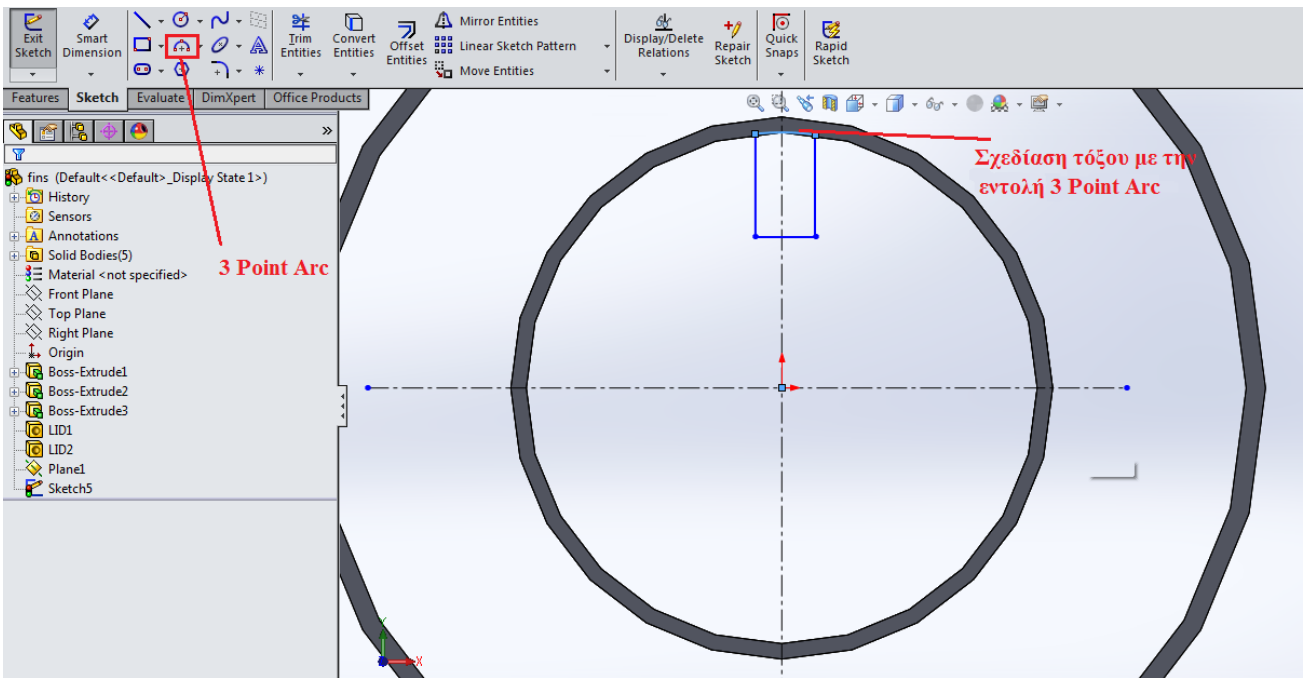
Σχήμα 6.2: Εντολή Reference Geometry

Στη συνέχεια, αφού επιλεγθεί ως επίπεδο αναφοράς το *Front Plane*, ορίζεται το νέο επίπεδο (*Plane 1*) να απέχει 6000 mm .



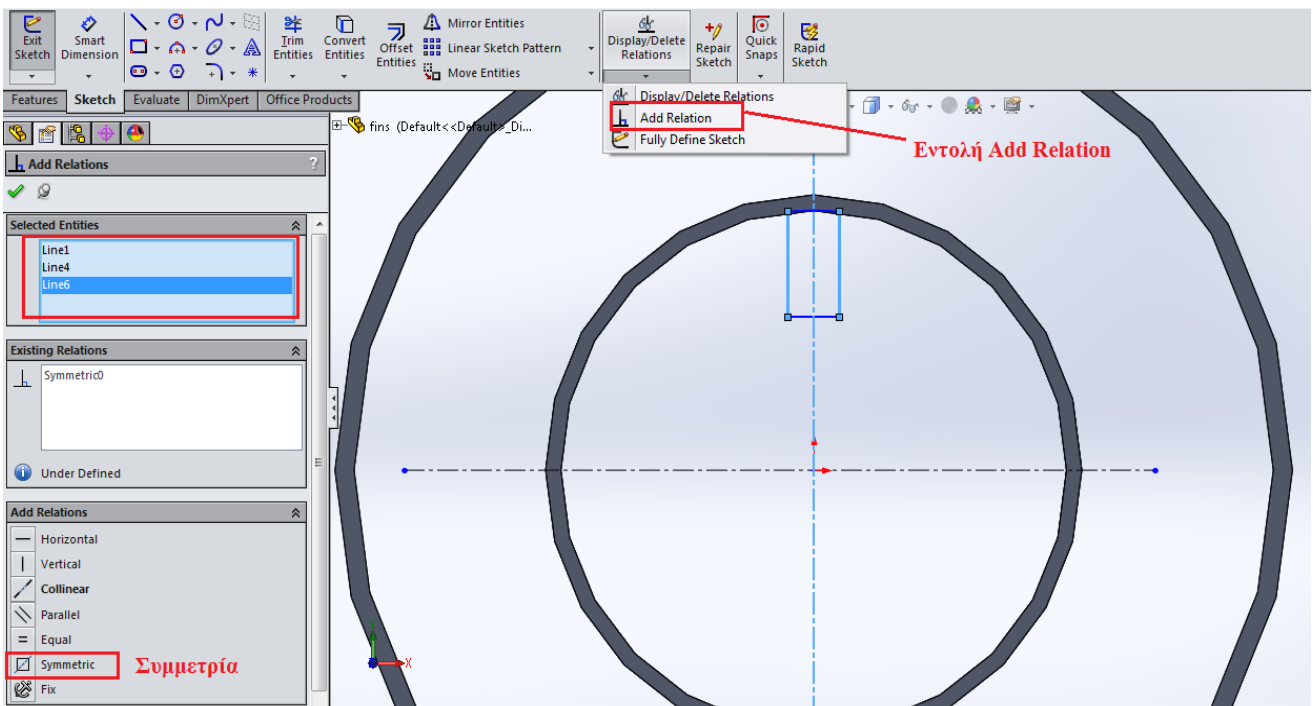
Σχήμα 6.3: Εισαγωγή νέου επιπέδου σχεδίασης Plane 1

Ακολουθως επιλέγεται το **Plane 1** και δημιουργείται ένα νέο **Sketch**. Ως πρώτο βήμα στη σχεδίαση, χαράσσονται με την εντολή **Line** → **Centerline** δύο βοηθητικές αξονικές γραμμές. Έπειτα με τη χρήση των εντολών **Line** και **3 Point Arc**, σχεδιάζεται ένα περυσίγιο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



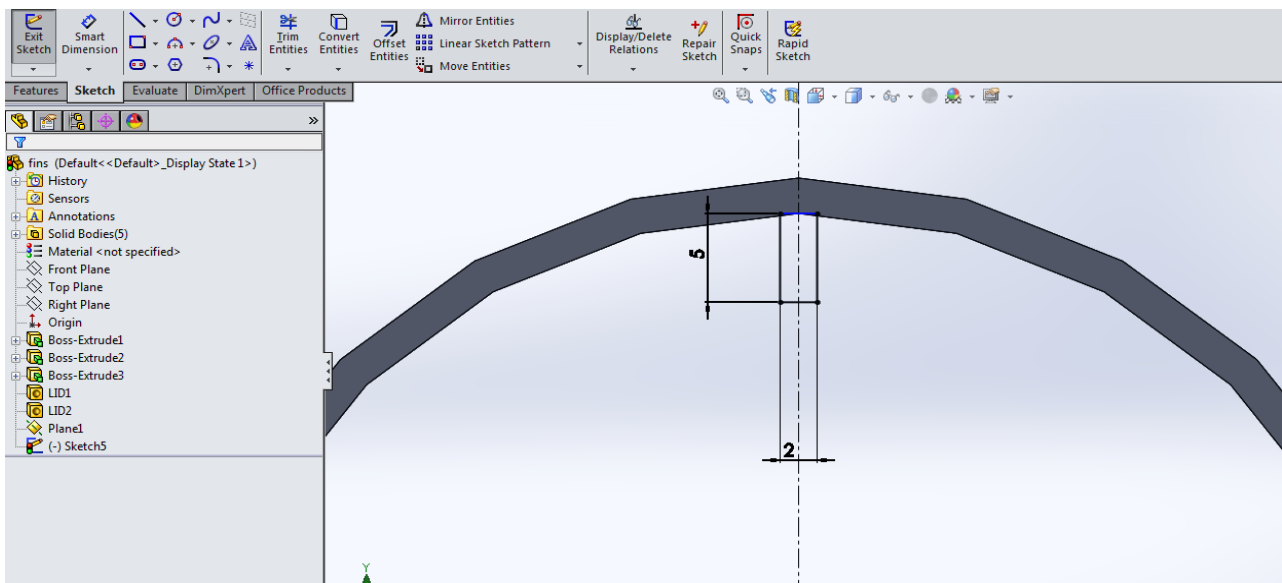
Σχήμα 6.4: Σχεδίαση περυσίγιο

Πριν τη διαστασιολόγηση, με την εντολή **Add Relation**, ορίζεται οι δύο παράλληλες ευθείες πλευρές του περυσίγιο να είναι συμμετρικές ως προς την αξονική.



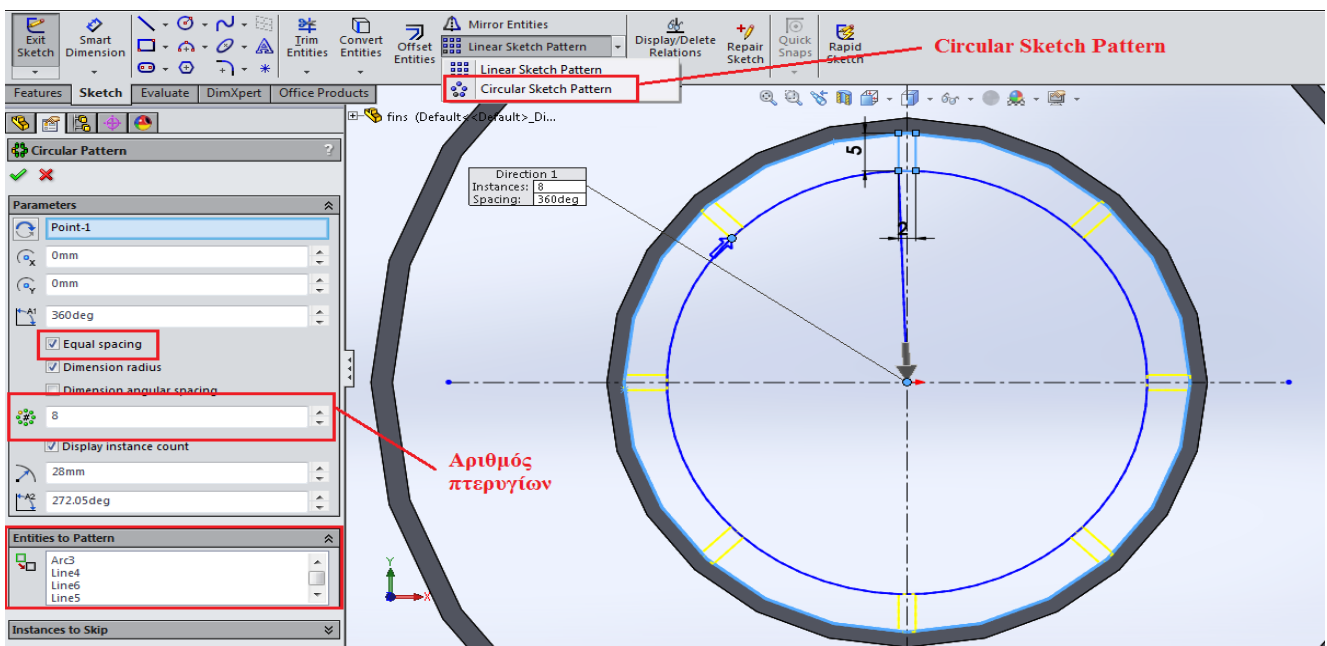
Σχήμα 6.5: Καθορισμός συμμετρίας

Με την εντολή **Smart Dimension** ορίζεται το πάχος του πτερυγίου στα 2 mm και το ύψος στα 5 mm. Για τις άλλες δύο διαμορφώσεις, απλά γίνεται επεξεργασία του **Sketch** και ορίζεται το νέο ύψος (10 και 15 mm).



Σχήμα 6.6: Διαστασιολόγηση πτερυγίου

Αφού ολοκληρώθηκε η σχεδίαση και η διαστασιολόγηση ενός πτερυγίου, πρέπει να σχεδιαστούν και τα υπόλοιπα. Ένας εύκολος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθεί η εντολή **Circular Sketch Pattern**, με την οποία θα ‘αντιγραφεί’ το πτερύγιο που σχεδιάστηκε κυκλικά. Αφού ενεργοποιηθεί η εντολή, στο παράθυρο που εμφανίζεται αριστερά, στην καρτέλα **Entities to Pattern** επιλέγεται το πτερύγιο (τρεις γραμμές και ένα τόξο). Στην καρτέλα **Parameters**, μαρκάρεται η επιλογή **Equal Spacing** έτσι ώστε τα πτερύγια να απέχουν ίσες αποστάσεις και ορίζεται συνολικός αριθμός πτερυγίων 8.

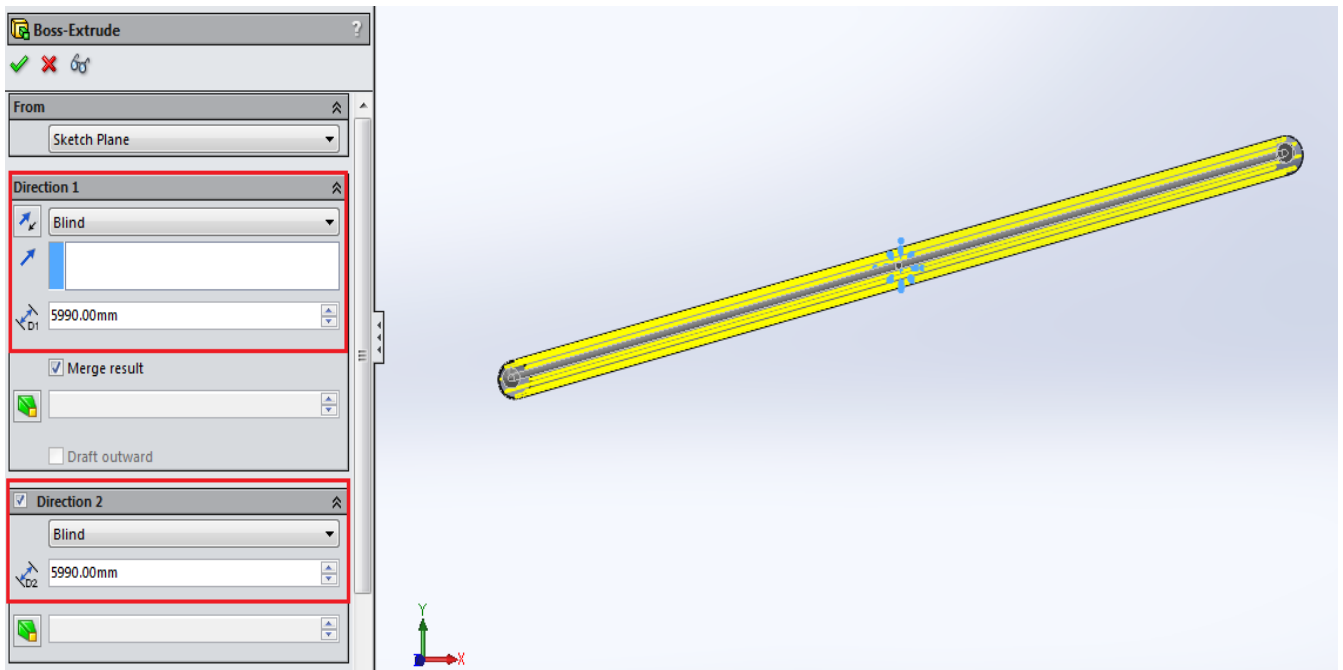


Σχήμα 6.7: Αντιγραφή πτερυγίου με την εντολή Circular Sketch Pattern

Ο σχεδιασμός των πτερυγίων στις δύο διαστάσεις ολοκληρώνεται με την εντολή **Exit Sketch**.

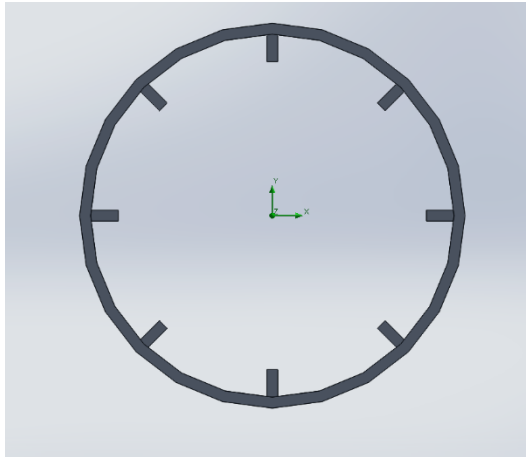
6.2.3: Σχεδιασμός στις τρεις διαστάσεις

Έχοντας επιλεγμένο το **Sketch** που δημιουργήθηκε, χρησιμοποιείται η εντολή **Extruded Boss/Base**. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, στο αριστερό παράθυρο που εμφανίζεται, στις καρτέλες **Direction 1** και **Direction 2** ορίζεται το μήκος ανάπτυξης. Εδώ θα οριστεί 5990 mm και στις δύο κατευθύνσεις, αφήνοντας έτσι απόσταση 10 mm από την εσωτερική επιφάνεια κάθε τάπας. Αυτό γίνεται για ασφάλεια ώστε να μην ενωθούν οι τάπες με τα πτερύγια.

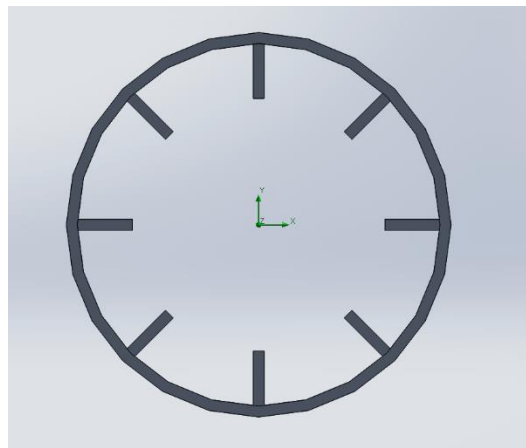


Σχήμα 6.8: Ορισμός μήκους ανάπτυξης πτερυγίων (ο σωλήνας κενού έχει αποκρυφθεί)

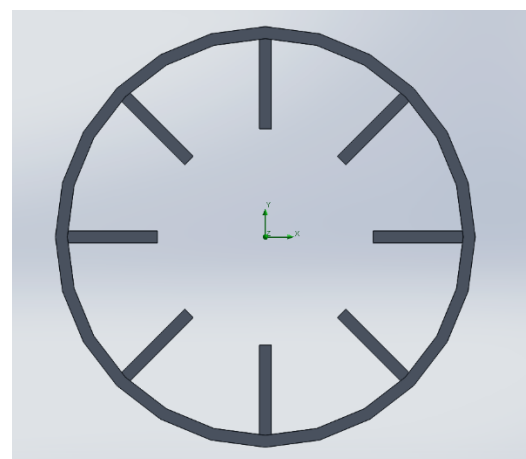
Αυτό ήταν το τελευταίο βήμα της σχεδίασης των πτερυγίων. Όπως αναφέρθηκε, η αλλαγή του ύψους γίνεται εύκολα κάνοντας επεξεργασία (**Edit Sketch**) το διδιάστατο σχέδιο που δημιουργήθηκε. Στη συνέχεια ακολουθούν ορισμένα σχήματα με τα βασικά χαρακτηριστικά της νέας διαμόρφωσης του απορροφητή (στα σχήματα 6.12, 6.13 και 6.14, ο απορροφητής έχει γίνει διάφανος για να φαίνονται οι διαμορφώσεις).



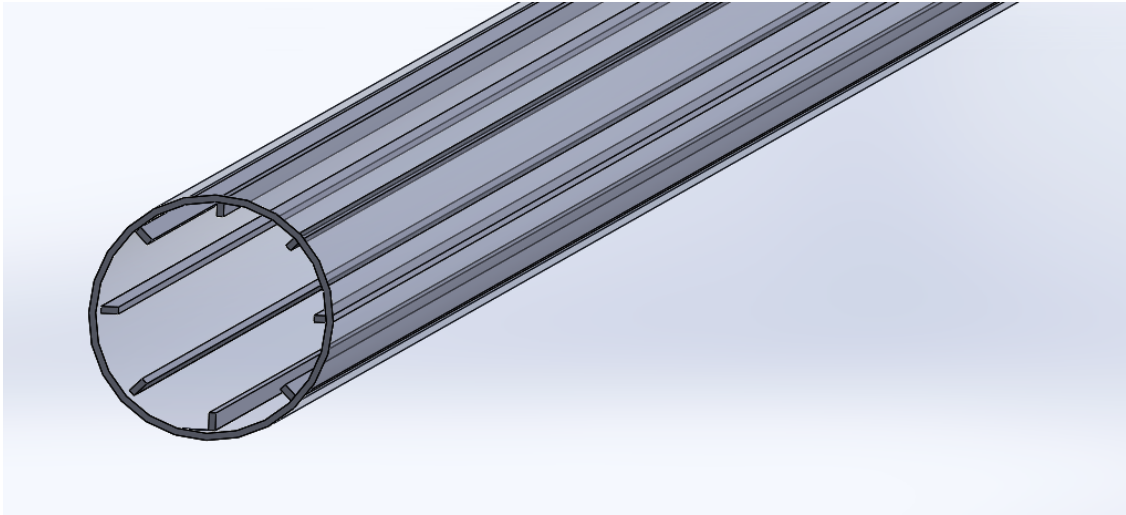
Σχήμα 6.9: Πλάγια όψη απορροφητή (ύψος πτερυγίων 5 mm)



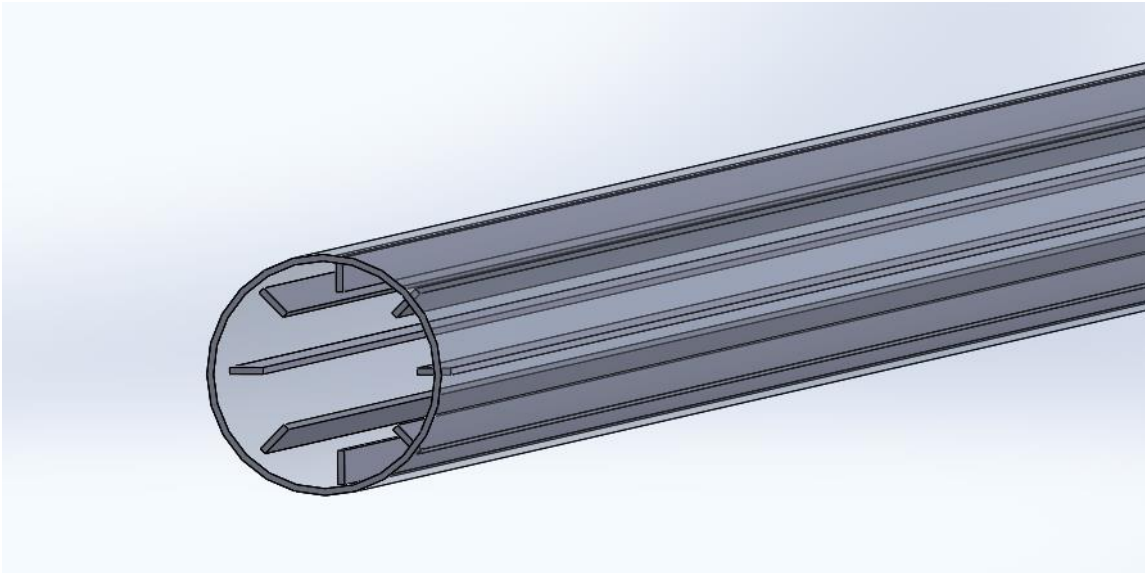
Σχήμα 6.10: Πλάγια όψη απορροφητή (ύψος πτερυγίων 10 mm)



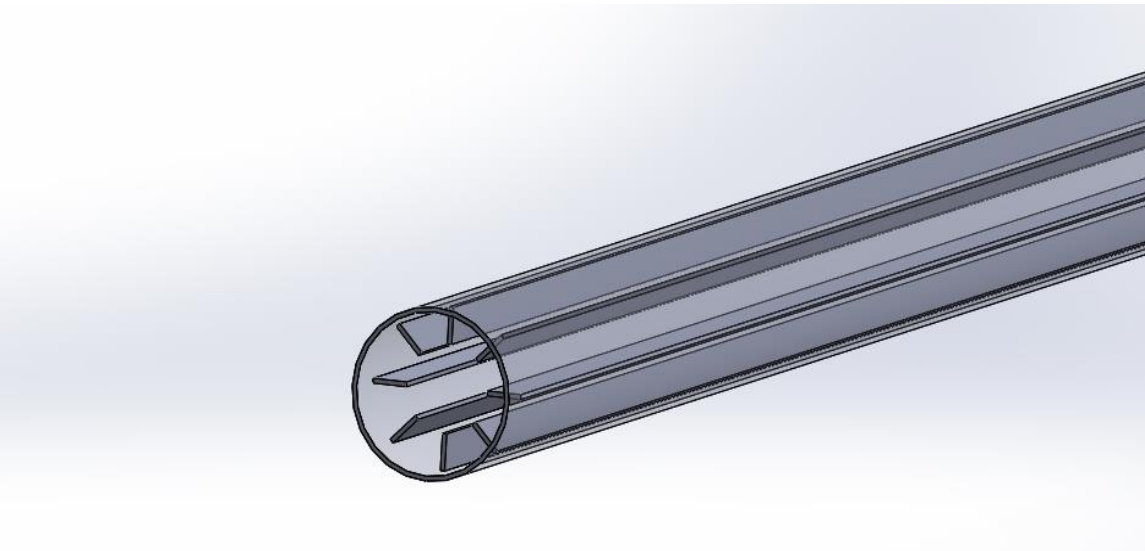
Σχήμα 6.11: Πλάγια όψη απορροφητή (ύψος πτερυγίων 15 mm)



Σχήμα 6.12: Διαμόρφωση απορροφητή (πτερύγια 5 mm)



Σχήμα 6.13: Διαμόρφωση απορροφητή (πτερύγια 10 mm)



Σχήμα 6.14: Διαμόρφωση απορροφητή (πτερύγια 15 mm)

6.3: Προσομοίωση

Το αρχείο προσομοίωσης είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό στο Κεφάλαιο 4. Για κάθε εργαζόμενο μέσο θα γίνουν προσομοιώσεις για τη βέλτιστη παροχή (Πίνακας 5.1) και για τις τρεις διαμορφώσεις πτερυγίων. Για τους αναγκαίους υπολογισμούς, η μόνη διαφορά βρίσκεται στην εσωτερική διάμετρο του απορροφητή D_{ri} . Με την είσοδο των πτερυγίων, ο σωλήνας δεν είναι πλέον κενός. Γι' αυτό όπου απαιτείται θα χρησιμοποιηθεί η υδραυλική διάμετρος, η οποία ορίζεται ως:

$$D_h = \frac{4 \cdot A_{NET}}{P} \approx \frac{\pi \cdot D_{ri}^2 - 32 \cdot h_f \cdot t_f}{\pi \cdot D_{ri} + 16 \cdot h_f} \quad (6.1)$$

Όπου h_f , t_f είναι το ύψος και το πάχος των πτερυγίων αντίστοιχα.

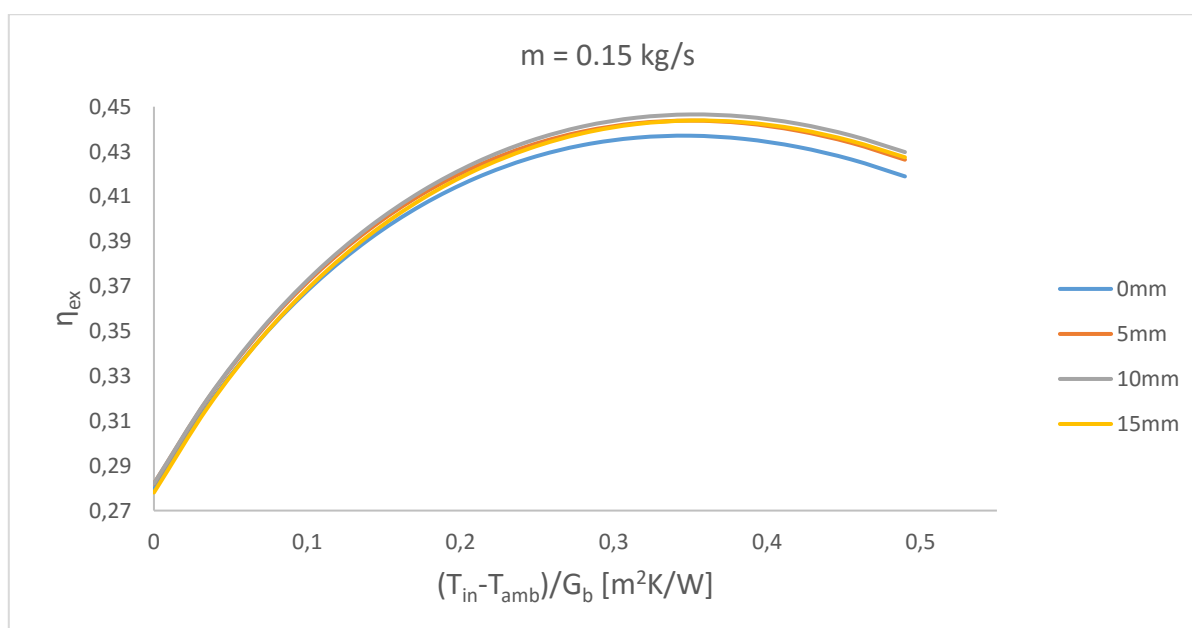
Η υδραυλική διάμετρος για τις τρεις διαμορφώσεις πτερυγίων φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Μέγεθος	Διαμόρφωση 1	Διαμόρφωση 2	Διαμόρφωση 3
Ύψος πτερυγίου h_f (mm)	5	10	15
Πάχος πτερυγίου t_f (mm)	2	2	2
Υδραυλική διάμετρος D_h (m)	0.0465	0.0355	0.0284

Πίνακας 6.2: Υδραυλική διάμετρος

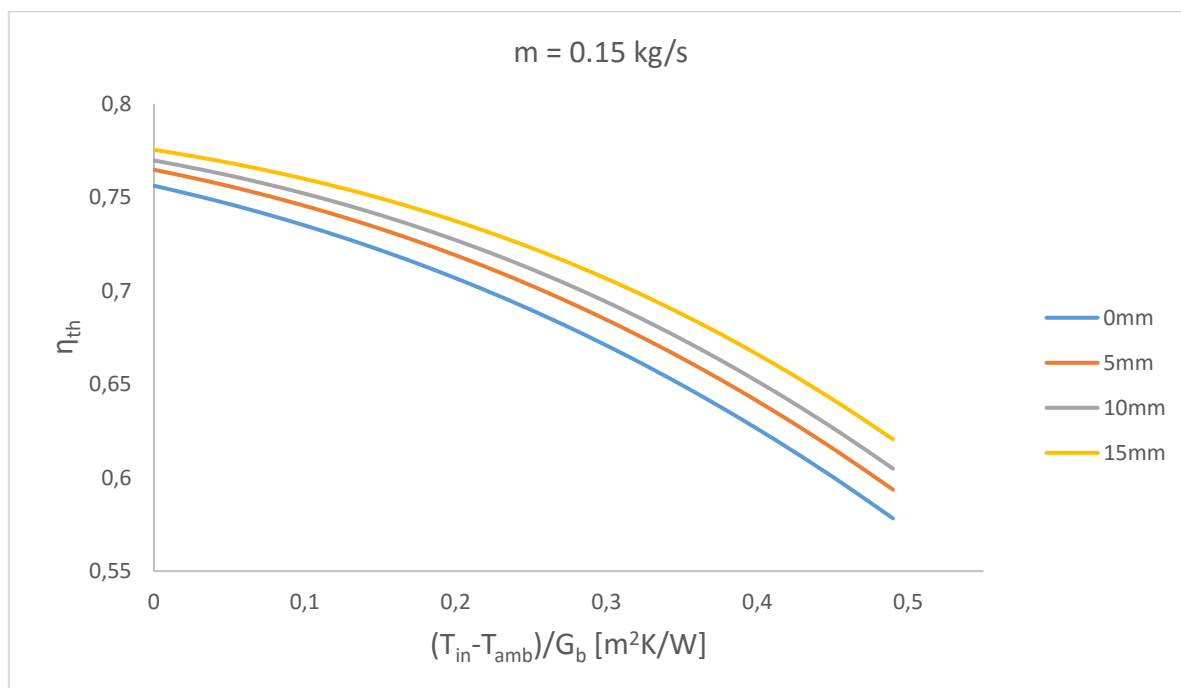
6.4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων

6.4.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης αέρα



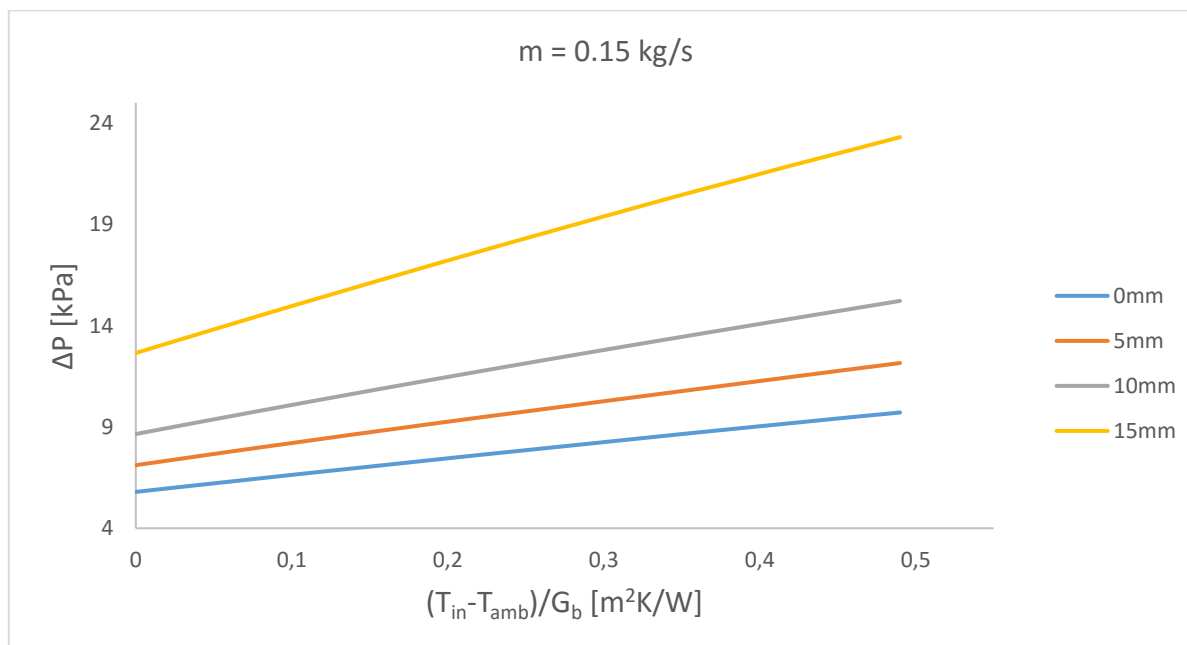
Σχήμα 6.15: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης αέρα

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η αλλαγή στη γεωμετρία του απορροφητή με την εισαγωγή πτερυγίων, βελτιώνει τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Η διαμόρφωση που παρουσιάζει την μεγαλύτερη αύξηση είναι αυτή των 10 mm.



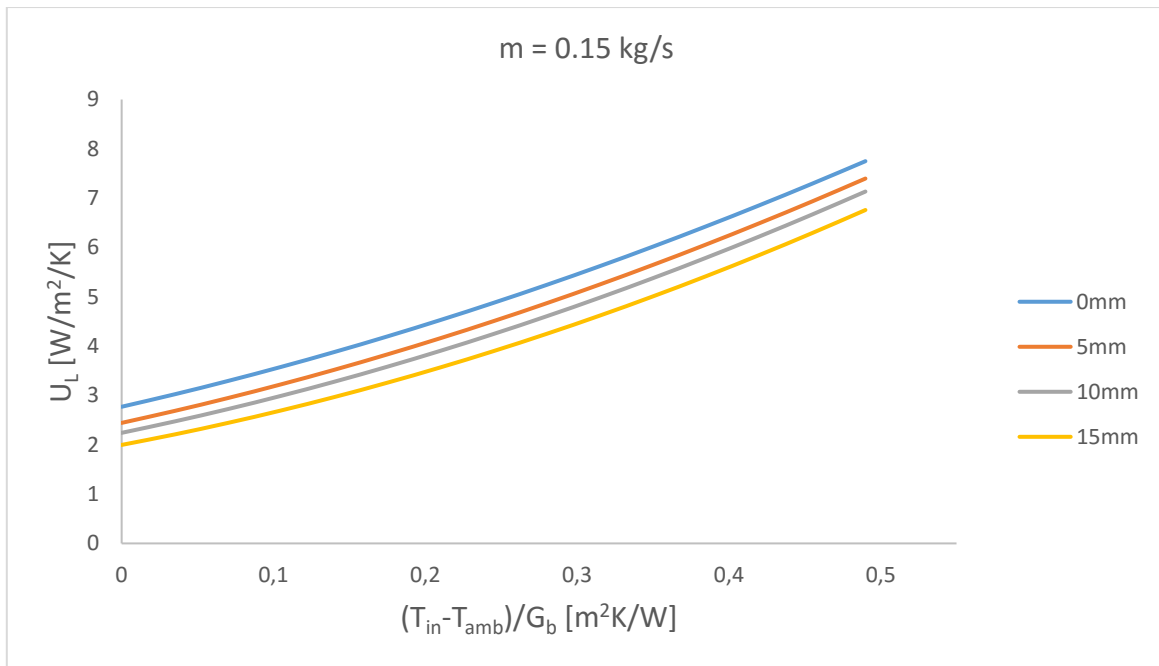
Σχήμα 6.16: Θερμικός βαθμός απόδοσης αέρα

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης παρατηρείται ότι αυξάνεται με την αύξηση του ύψους των πτερυγίων.



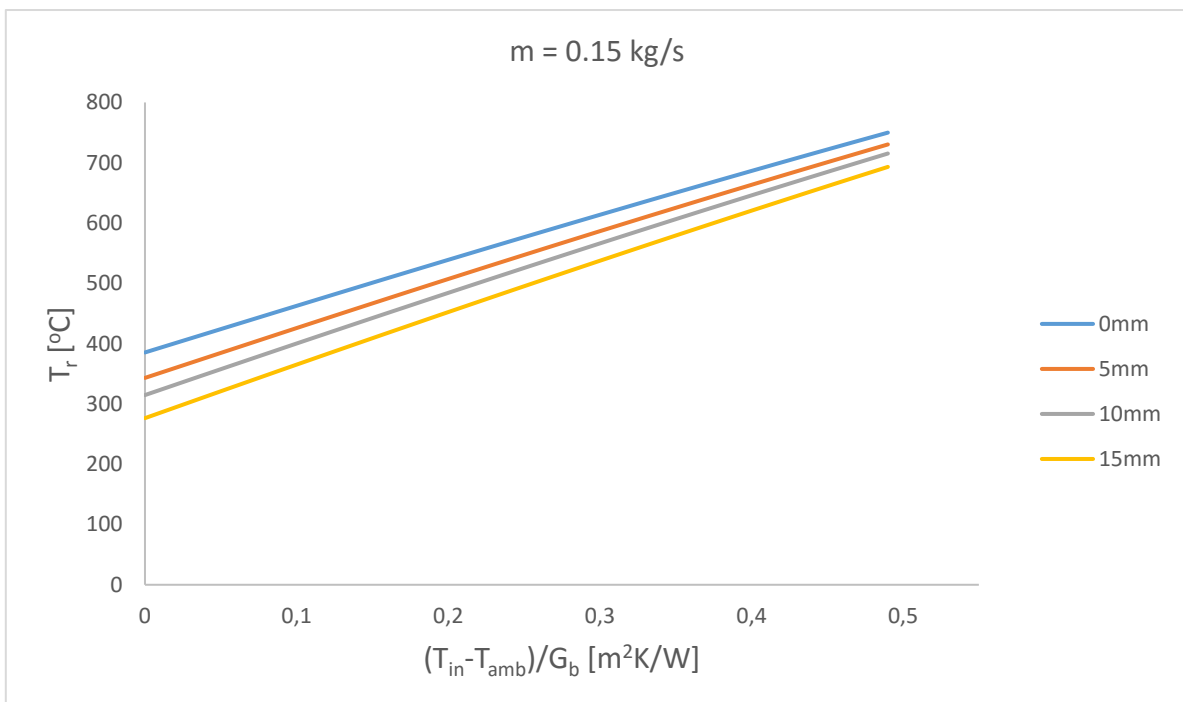
Σχήμα 6.17: Πτώση πίεσης αέρα

Η πτώση πίεσης αυξάνεται με την αύξηση του ύψους των πτερυγίων όπως ήταν αναμενόμενο.

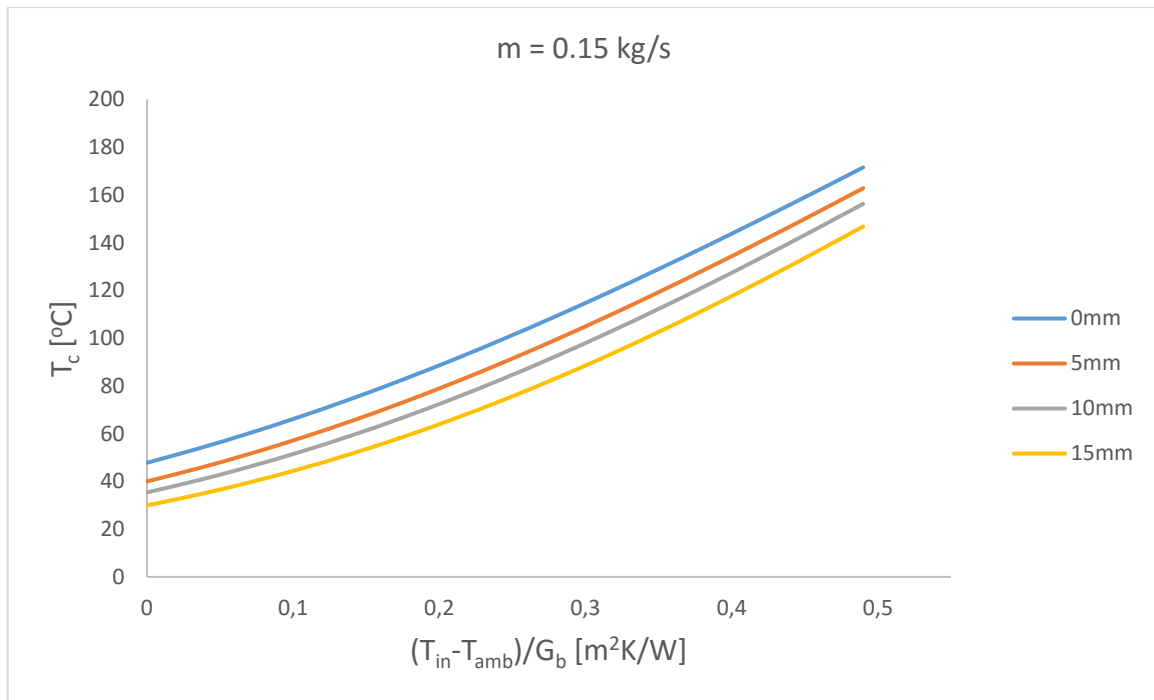


Σχήμα 6.18: Συντελεστής θερμικών απωλειών αέρα

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι ο συντελεστής θερμικών απωλειών μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων.

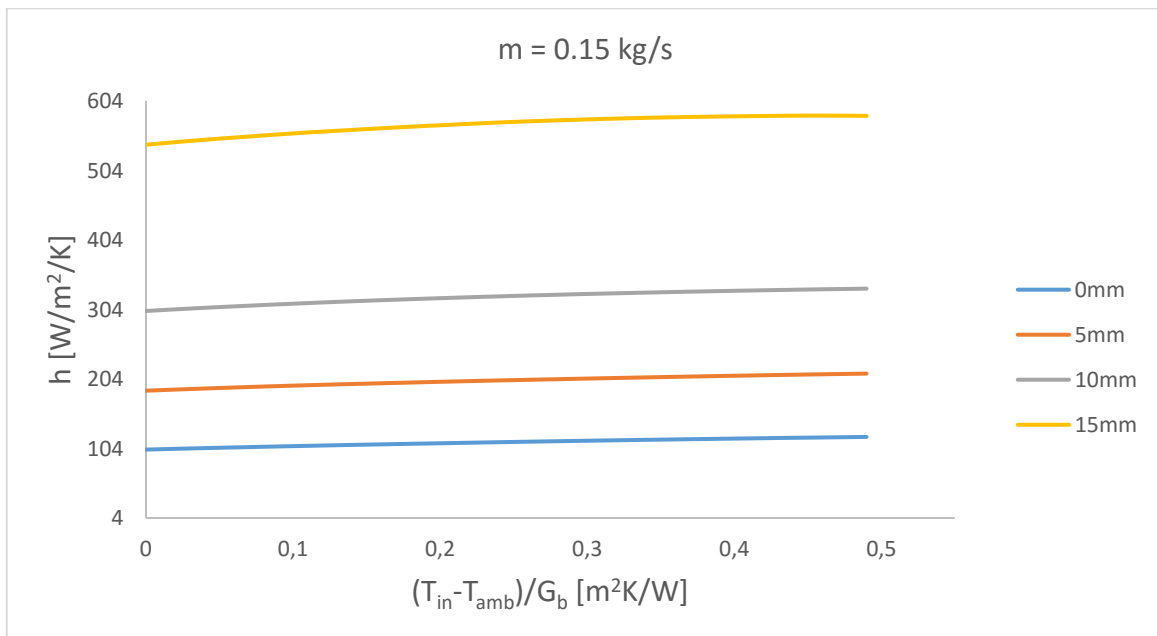


Σχήμα 6.19: Μέση θερμοκρασία απορροφητή αέρα



Σχήμα 6.20: Μέση θερμοκρασία σωλήνα κενού αέρα

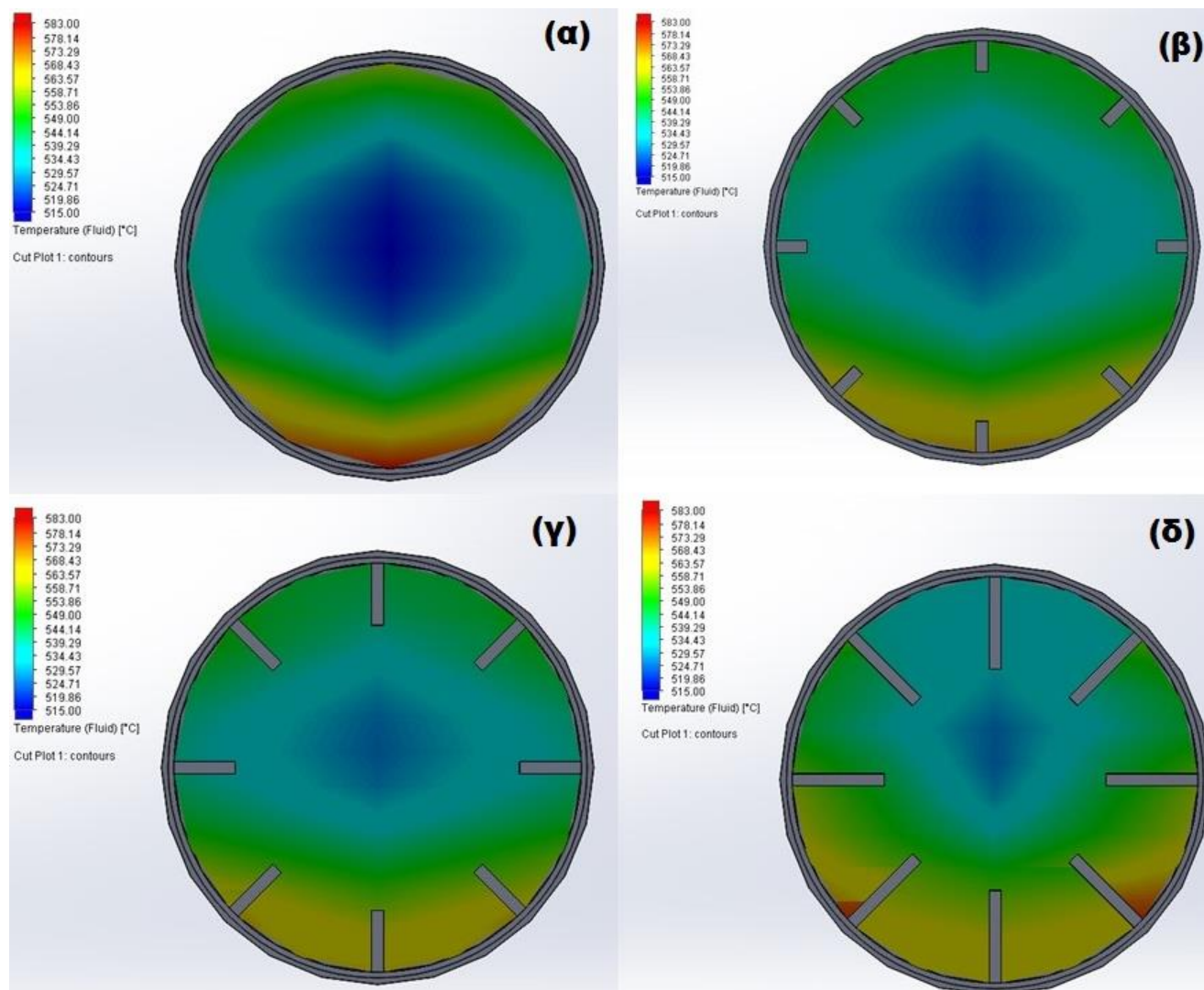
Στα δύο παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία τόσο του απορροφητή όσο και του σωλήνα κενού, παρουσιάζουν μικρότερες τιμές όσο αυξάνεται το μήκος των πτερυγίων.



Σχήμα 6.21: Συντελεστής συναγωγής αέρα - απορροφητή

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής συναγωγής έχει μεγαλύτερες τιμές όσο αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων, αφού σε κάθε περίπτωση αυξάνεται η επιφάνεια συναλλαγής.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο μέσο του απορροφητή (6m) για καθεμιά από τις εξεταζόμενες διαμορφώσεις (χωρίς πτερύγια, πτερύγια ύψους 5mm, 10mm και 15mm).



Σχήμα 6.22: Κατανομή θερμοκρασίας αέρα στο μέσο του απορροφητή για διαμορφώσεις: (α) χωρίς πτερύγια, (β) πτερύγια ύψους 5mm, (γ) πτερύγια ύψους 10mm και (δ) πτερύγια ύψους 15mm

Στο σχήμα 6.22 παρατηρείται ότι η ενσωμάτωση των πτερυγίων στον απορροφητή αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα κυρίως στις περιοχές κοντά στον άξονα. Ακόμη η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων.

Παρακάτω περιλαμβάνονται πίνακες με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις τρεις διαμορφώσεις πτερυγίων που εξετάστηκαν για τον αέρα.

Αέρας – $\dot{m}_{opt} = 0.15 \text{ kg/s}$								
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$
10	352.32	343.14	40.01	0.765	0.282	2.444	7.115	187.4
45	382.55	372.13	45.48	0.759	0.320	2.687	7.502	190.2
80	412.40	401.08	51.52	0.752	0.350	2.947	7.888	192.7
115	441.76	429.89	58.15	0.744	0.375	3.225	8.260	195.0
150	470.63	458.54	65.34	0.736	0.395	3.520	8.637	197.0
185	499.11	486.98	73.10	0.726	0.411	3.832	9.000	198.9
220	527.22	515.18	81.38	0.716	0.423	4.161	9.364	200.7
255	554.91	543.11	90.18	0.705	0.433	4.507	9.715	202.4
290	582.21	570.77	99.45	0.692	0.439	4.870	10.068	204.0
325	609.13	598.13	109.16	0.679	0.443	5.250	10.421	205.5
360	635.73	625.19	119.27	0.664	0.444	5.647	10.770	207.0
395	661.94	651.95	129.75	0.648	0.443	6.060	11.119	208.4
430	687.81	678.39	140.52	0.631	0.439	6.490	11.466	209.7
465	713.28	704.51	151.56	0.613	0.434	6.935	11.813	210.9
500	738.40	730.34	162.83	0.594	0.426	7.397	12.157	212.0

Πίνακας 6.3: Υπολογισμένα μεγέθη αέρα - ύψος πτερυγίων 5 mm

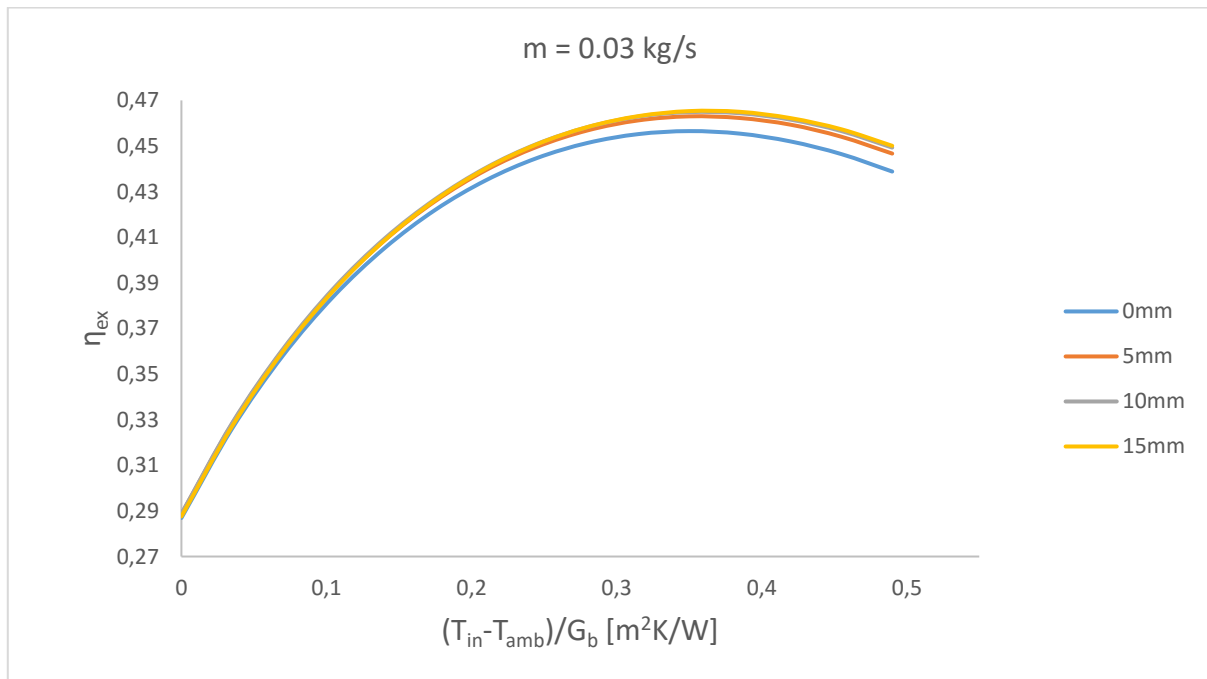
Αέρας – $\dot{m}_{opt} = 0.15 \text{ kg/s}$								
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$
10	354.49	314.65	35.39	0.770	0.282	2.242	8.653	302.2
45	384.98	344.71	40.47	0.764	0.320	2.474	9.161	306.3
80	414.96	374.66	46.14	0.758	0.351	2.723	9.662	309.9
115	444.53	404.42	52.40	0.751	0.376	2.992	10.158	313.2
150	473.65	433.99	59.26	0.743	0.396	3.278	10.647	316.2
185	502.31	463.34	66.73	0.734	0.412	3.582	11.130	318.9
220	530.58	492.45	74.77	0.724	0.425	3.905	11.605	321.4
255	558.44	521.31	83.38	0.713	0.435	4.246	12.075	323.6
290	585.90	549.92	92.52	0.701	0.441	4.605	12.538	325.7
325	612.99	578.26	102.15	0.688	0.445	4.983	12.995	327.5
360	639.68	606.31	112.26	0.674	0.447	5.378	13.447	329.1
395	665.99	634.04	122.76	0.659	0.446	5.791	13.894	330.7
430	691.90	661.46	133.64	0.642	0.442	6.222	14.339	332.0
465	717.42	688.54	144.83	0.624	0.437	6.669	14.780	333.3
500	742.53	715.30	156.28	0.605	0.430	7.134	15.222	334.4

Πίνακας 6.4: Υπολογισμένα μεγέθη αέρα - ύψος πτερυγίων 10 mm

Αέρας - $\dot{m}_{opt} = 0.15 \text{ kg/s}$								
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$
10	356.90	276.35	29.97	0.775	0.278	1.997	12.652	541.8
45	387.67	307.60	34.47	0.771	0.316	2.210	13.468	548.0
80	417.93	338.68	39.57	0.765	0.347	2.443	14.280	553.5
115	447.81	369.57	45.28	0.759	0.372	2.695	15.082	558.7
150	477.15	400.23	51.62	0.752	0.392	2.967	15.871	563.1
185	506.11	430.67	58.60	0.744	0.409	3.258	16.659	567.1
220	534.69	460.88	66.21	0.735	0.422	3.569	17.436	570.8
255	562.87	490.83	74.43	0.725	0.431	3.899	18.201	574.2
290	590.56	520.55	83.25	0.713	0.438	4.249	18.958	576.8
325	617.89	550.02	92.66	0.701	0.442	4.619	19.709	579.1
360	644.80	579.22	102.60	0.688	0.444	5.009	20.454	580.9
395	671.28	608.14	113.02	0.673	0.443	5.418	21.172	582.2
430	697.36	636.78	123.91	0.657	0.440	5.846	21.899	583.1
465	723.04	665.11	135.20	0.639	0.435	6.293	22.597	583.7
500	748.11	693.11	146.81	0.621	0.427	6.760	23.306	583.9

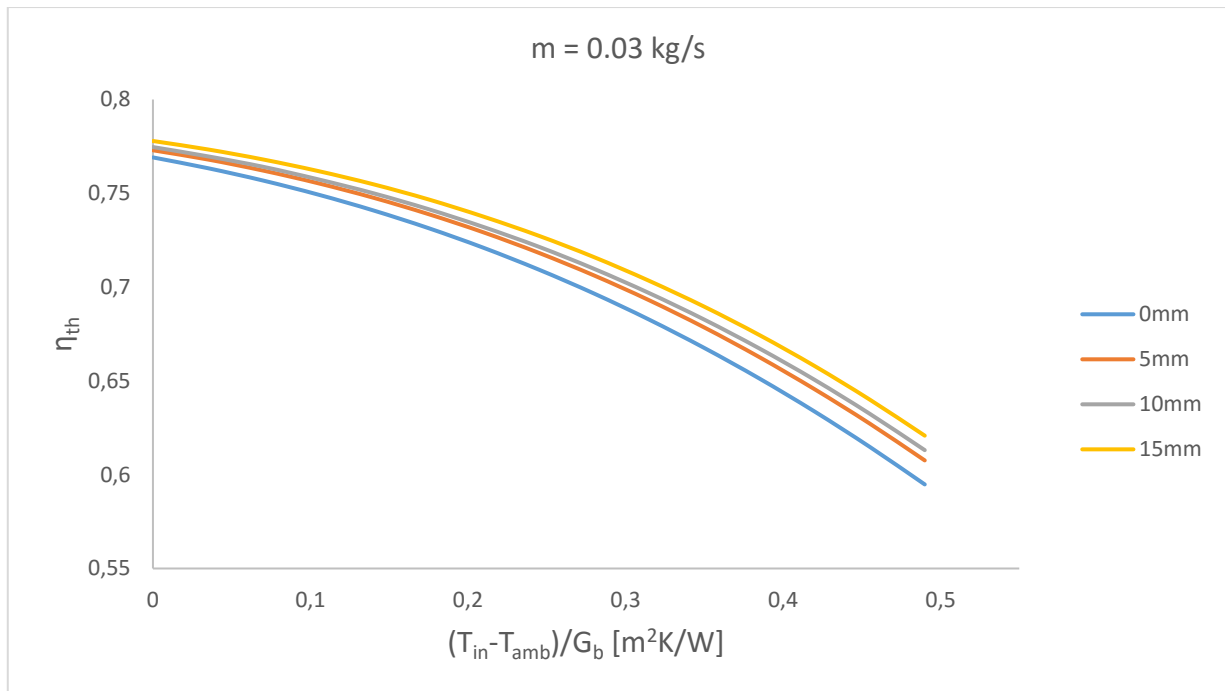
Πίνακας 6.5: Υπολογισμένα μεγέθη αέρα - ύψος πτερυγίων 15 mm

6.4.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης ηλίου



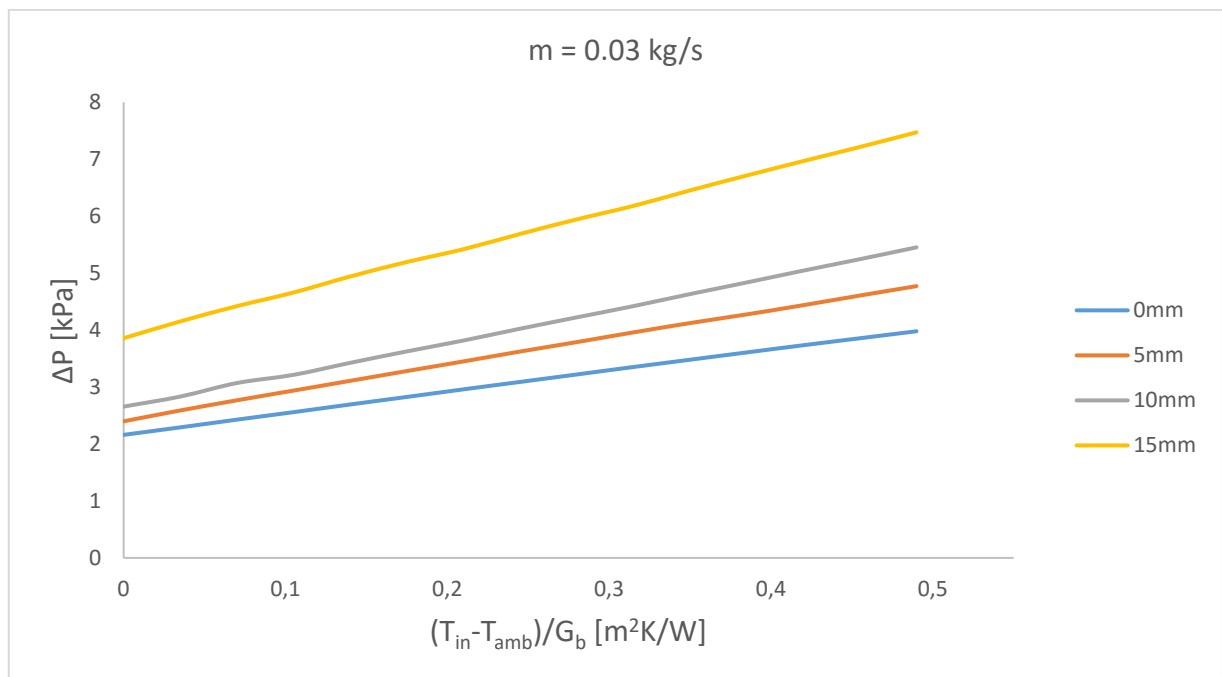
Σχήμα 6.23: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης He

Για το ήλιο παρατηρείται ότι η χρήση των πτερυγίων στο εσωτερικό του απορροφητή βελτιώνει τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Η διαμόρφωση των πτερυγίων με ύψος 15 mm φαίνεται να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη βελτίωση.



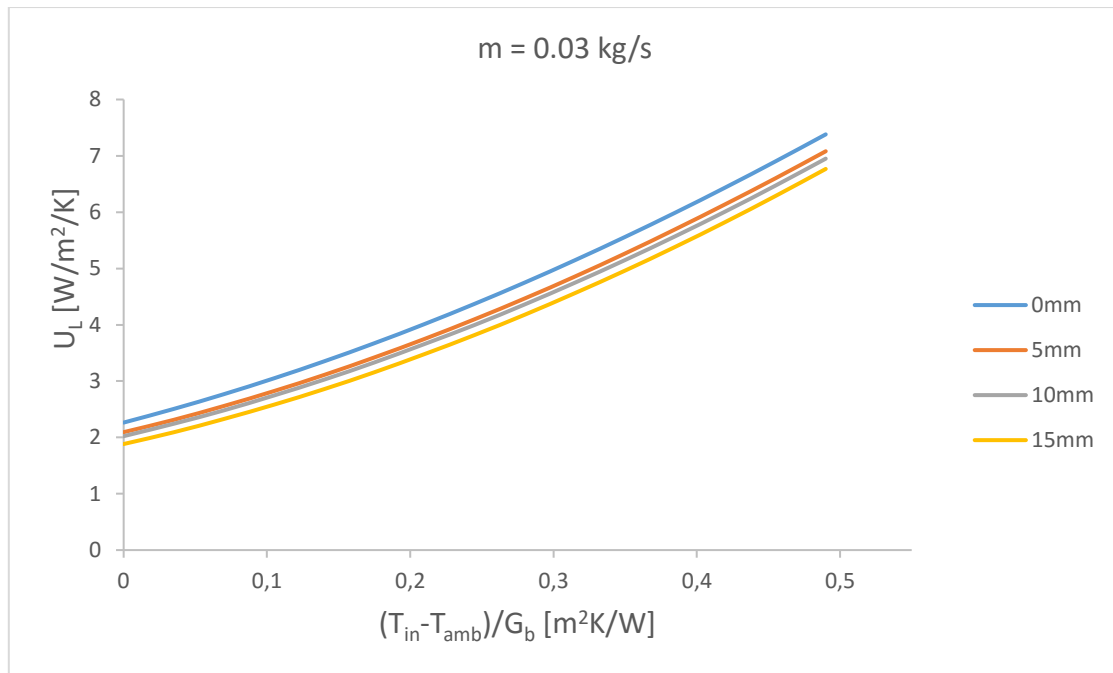
Σχήμα 6.24: Θερμικός βαθμός απόδοσης He

Όπως και στην περίπτωση του αέρα, έτσι και για το ήλιο, ο θερμικός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές όσο αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων.



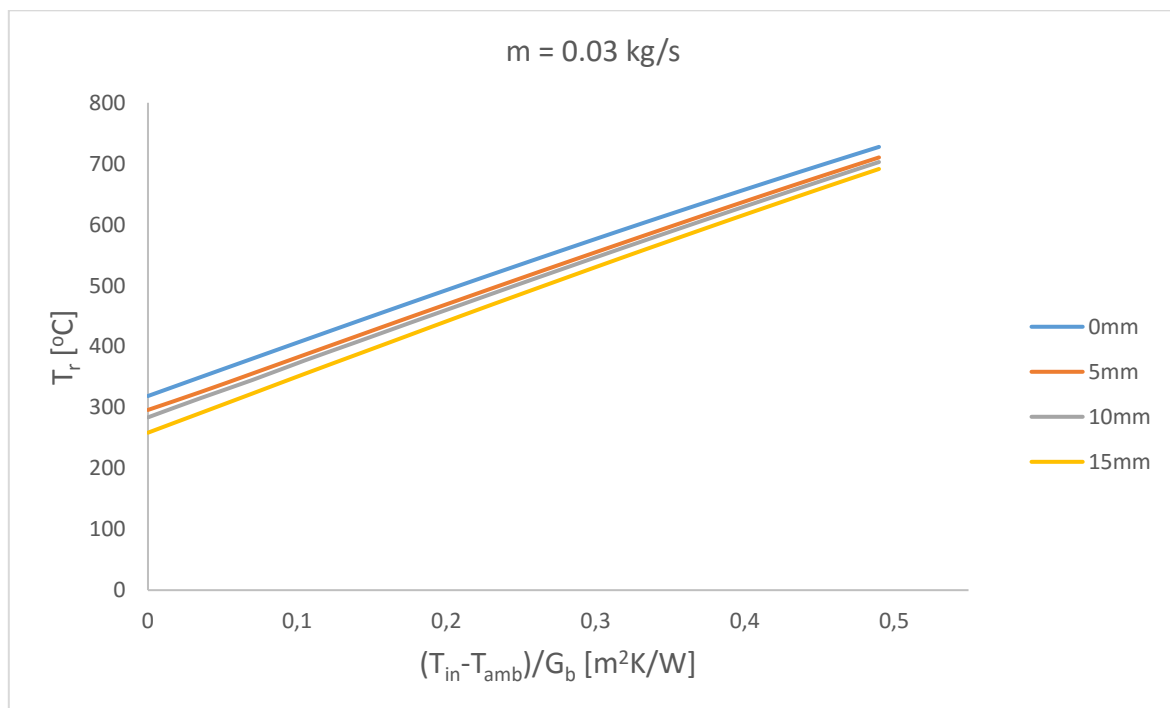
Σχήμα 6.25: Πτώση πίεσης He

Από το παραπάνω σχήμα είναι φανερό ότι η πτώση πίεσης αυξάνεται για τις διαμορφώσεις με τα πτερύγια όπως ήταν αναμενόμενο.

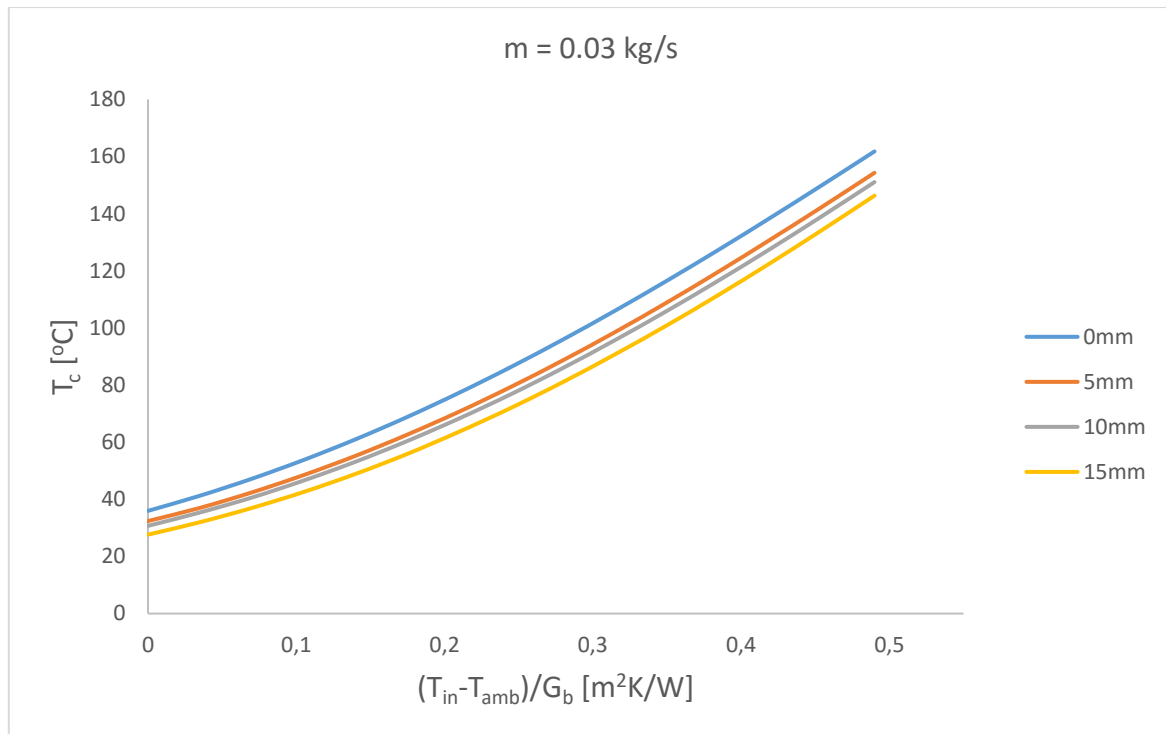


Σχήμα 6.26: Συντελεστής θερμικών απωλειών He

Και στην περίπτωση του ηλίου, ο συντελεστής θερμικών απωλειών μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος των περυγίων.

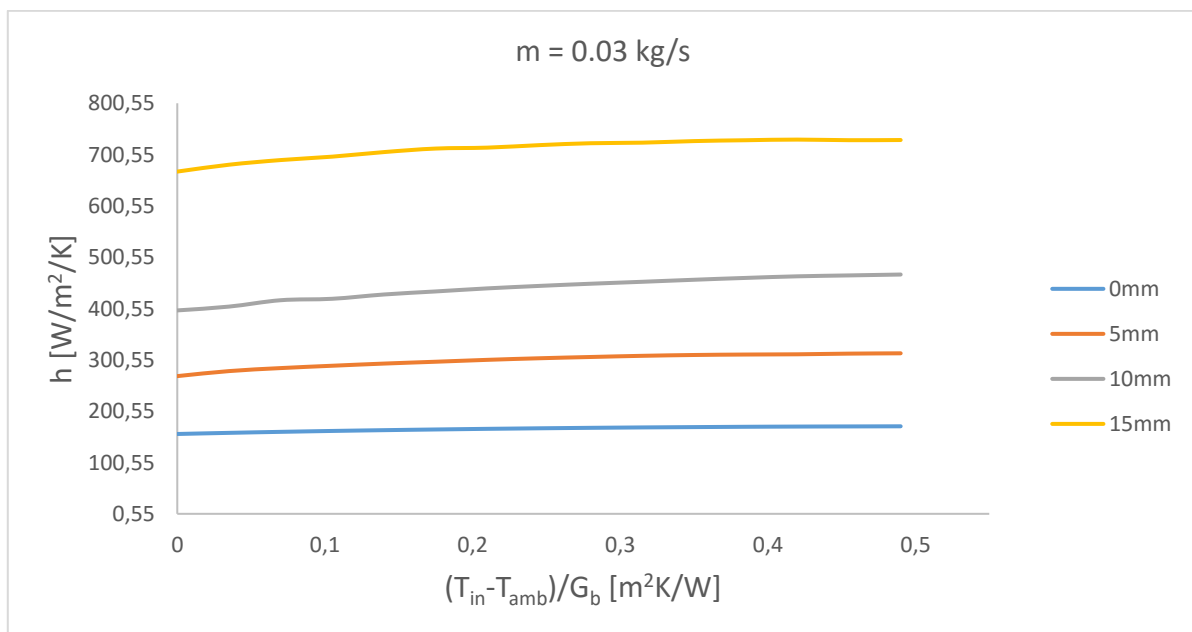


Σχήμα 6.27: Μέση θερμοκρασία απορροφητή He



Σχήμα 6.28: Μέση θερμοκρασία σωλήνα κενού He

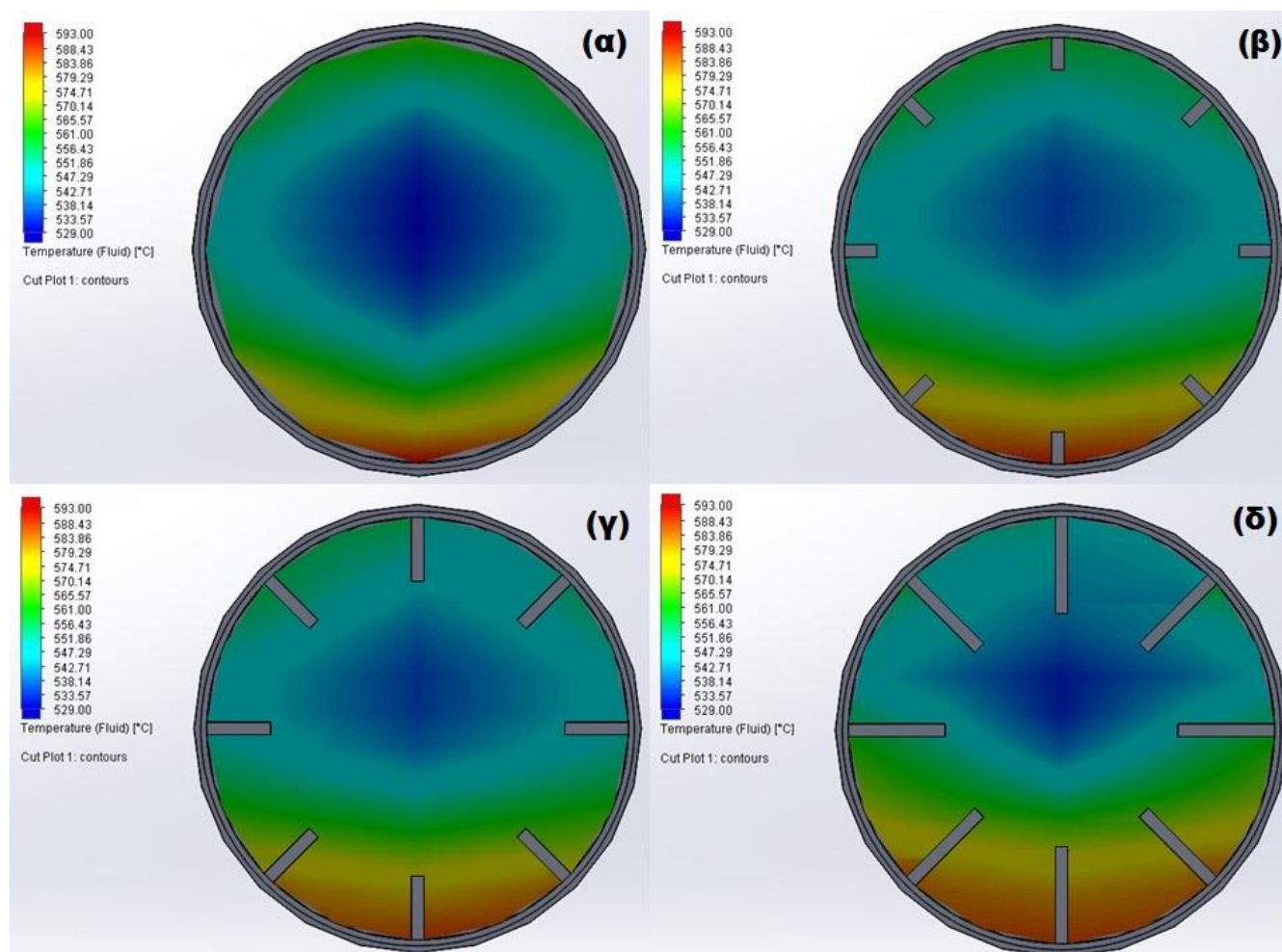
Η μέση θερμοκρασία απορροφητή και σωλήνα κενού παρουσιάζουν μικρότερες τιμές όσο αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων.



Σχήμα 6.29: Συντελεστής συναγωγής He – απορροφητή

Παρατηρείται ότι και στην περίπτωση του ηλίου, η ενσωμάτωση των πτερυγίων στο εσωτερικό του απορροφητή βελτιώνει τη μετάδοση θερμότητας.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας του ηλίου στο μέσο του απορροφητή (6m) για καθεμιά από τις εξεταζόμενες διαμορφώσεις (χωρίς πτερύγια, πτερύγια ύψους 5mm, 10mm και 15mm).



Σχήμα 6.30: Κατανομή θερμοκρασίας He στο μέσο του απορροφητή για διαμορφώσεις: (α) χωρίς πτερύγια, (β) πτερύγια ύψους 5mm, (γ) πτερύγια ύψους 10mm και (δ) πτερύγια ύψους 15mm

Στο σχήμα 6.30 παρατηρείται ότι και στην περίπτωση του ηλίου, η ενσωμάτωση των πτερυγίων αυξάνει τη θερμοκρασία του. Πιο συγκεκριμένα στις διαμορφώσεις των 5mm και 10mm είναι φανερή η αύξηση της θερμοκρασίας κυρίως στις περιοχές κοντά στον άξονα σε σύγκριση με τη διαμόρφωση χωρίς πτερύγια. Στη διαμόρφωση των 15mm, η θερμοκρασία κοντά στον άξονα είναι λίγο χαμηλότερη αλλά αυξημένη στις υπόλοιπες περιοχές.

Παρακάτω περιλαμβάνονται πίνακες με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις τρεις διαμορφώσεις πτερυγίων που εξετάστηκαν για τον ήλιο.

Ήλιο – $\dot{m}_{opt} = 0.03 \text{ kg/s}$								
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$
10	353.49	295.84	32.40	0.773	0.289	2.094	2.398	268.9
45	386.25	325.02	37.01	0.768	0.328	2.313	2.589	278.7
80	418.47	355.56	42.42	0.762	0.361	2.559	2.767	284.5
115	450.27	386.33	48.50	0.755	0.387	2.824	2.938	289.1
150	481.63	416.99	55.24	0.748	0.409	3.111	3.109	293.3
185	512.54	447.55	62.68	0.739	0.426	3.421	3.281	296.9
220	542.94	477.75	70.72	0.729	0.439	3.749	3.450	300.6
255	572.89	507.83	79.42	0.718	0.450	4.099	3.623	303.7
290	602.26	537.69	88.72	0.706	0.457	4.468	3.788	306.2
325	631.11	567.24	98.56	0.693	0.461	4.857	3.959	308.4
360	659.41	596.56	108.93	0.679	0.463	5.266	4.123	310.1
395	687.08	625.63	119.78	0.663	0.462	5.696	4.275	311.0
430	714.06	654.31	131.02	0.646	0.459	6.142	4.437	311.4
465	740.71	682.48	142.53	0.627	0.454	6.602	4.606	312.7
500	766.62	710.29	154.33	0.608	0.447	7.081	4.772	313.3

Πίνακας 6.6: Υπολογισμένα μεγέθη He - ύψος πτερυγίων 5 mm

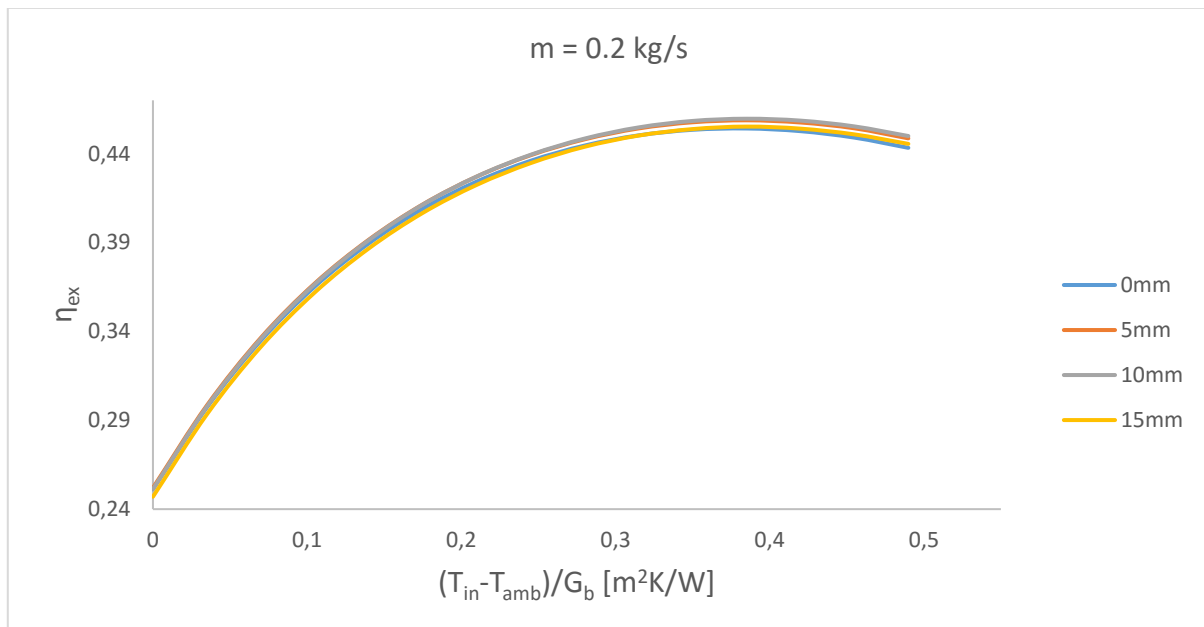
Ήλιο – $\dot{m}_{opt} = 0.03 \text{ kg/s}$								
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$
10	354.39	283.67	30.71	0.775	0.289	2.022	2.657	396.9
45	387.03	314.98	35.40	0.770	0.329	2.243	2.833	404.3
80	419.41	345.02	40.62	0.764	0.361	2.481	3.070	416.8
115	451.23	376.97	46.59	0.757	0.388	2.746	3.214	419.6
150	482.68	407.46	53.17	0.750	0.409	3.027	3.425	427.9
185	513.76	438.23	60.45	0.742	0.427	3.332	3.626	433.9
220	544.21	468.63	68.35	0.732	0.441	3.659	3.817	439.8
255	574.34	499.04	76.85	0.721	0.451	3.998	4.024	444.6
290	603.83	529.11	86.02	0.710	0.458	4.363	4.223	448.9
325	632.75	558.90	95.75	0.697	0.463	4.748	4.420	452.7
360	661.21	588.33	105.98	0.683	0.465	5.150	4.632	456.7
395	689.08	617.42	116.67	0.667	0.464	5.572	4.835	460.2
430	716.35	646.17	127.78	0.651	0.462	6.013	5.044	463.3
465	742.89	674.64	139.28	0.633	0.457	6.473	5.245	465.1
500	768.89	702.72	151.08	0.613	0.449	6.950	5.453	466.8

Πίνακας 6.7: Υπολογισμένα μεγέθη He - ύψος πτερυγίων 10 mm

Ήλιο – $\dot{m}_{opt} = 0.03 \text{ kg/s}$								
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$
10	355.71	258.50	27.65	0.778	0.288	1.883	3.857	667.4
45	388.73	290.60	31.99	0.773	0.327	2.092	4.152	680.8
80	421.02	322.76	36.97	0.768	0.360	2.328	4.420	689.9
115	453.14	355.06	42.58	0.762	0.387	2.582	4.660	696.5
150	484.68	386.79	48.90	0.755	0.409	2.858	4.941	705.4
185	515.87	418.47	55.92	0.747	0.426	3.158	5.195	712.3
220	546.56	450.31	63.70	0.738	0.440	3.480	5.420	714.1
255	576.78	481.55	72.06	0.727	0.451	3.819	5.688	719.0
290	606.44	512.52	81.09	0.716	0.458	4.180	5.943	722.7
325	635.54	543.35	90.76	0.703	0.463	4.563	6.180	723.8
360	664.03	573.59	100.93	0.690	0.465	4.963	6.452	726.9
395	691.95	603.56	111.63	0.674	0.465	5.384	6.713	728.5
430	719.40	633.22	122.81	0.658	0.462	5.826	6.967	729.7
465	745.97	662.51	134.41	0.640	0.457	6.288	7.215	730.0
500	772.12	691.34	146.32	0.621	0.450	6.767	7.471	730.3

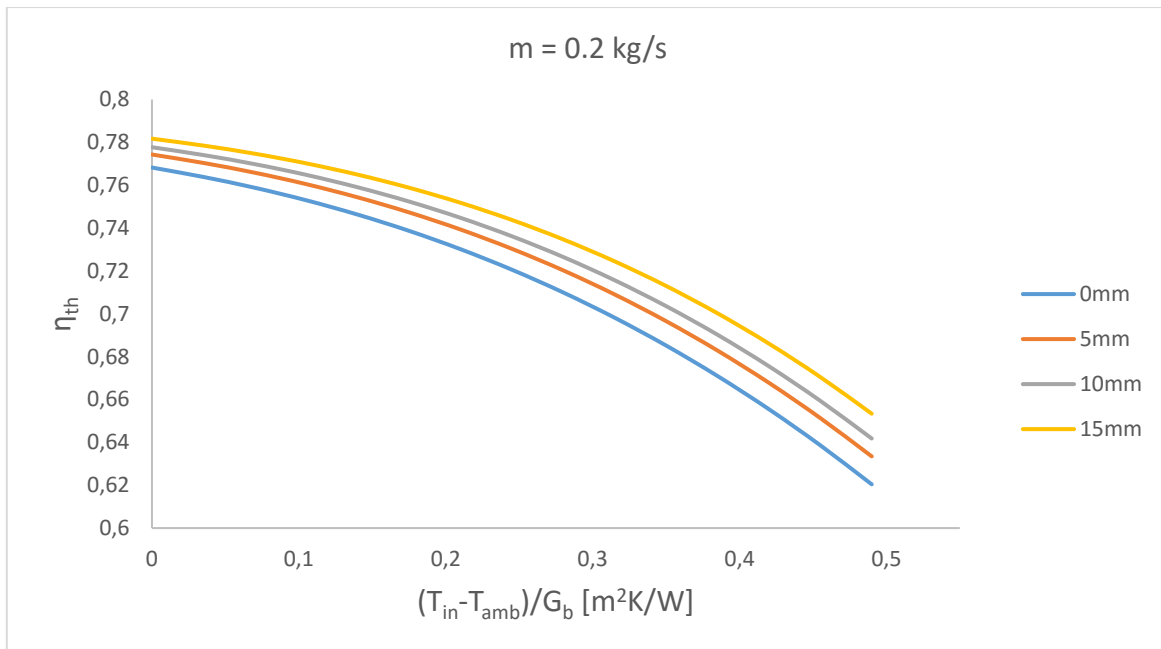
Πίνακας 6.8: Υπολογισμένα μεγέθη He - ύψος πτερυγίων 15 mm

6.4.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης διοξειδίου του άνθρακα



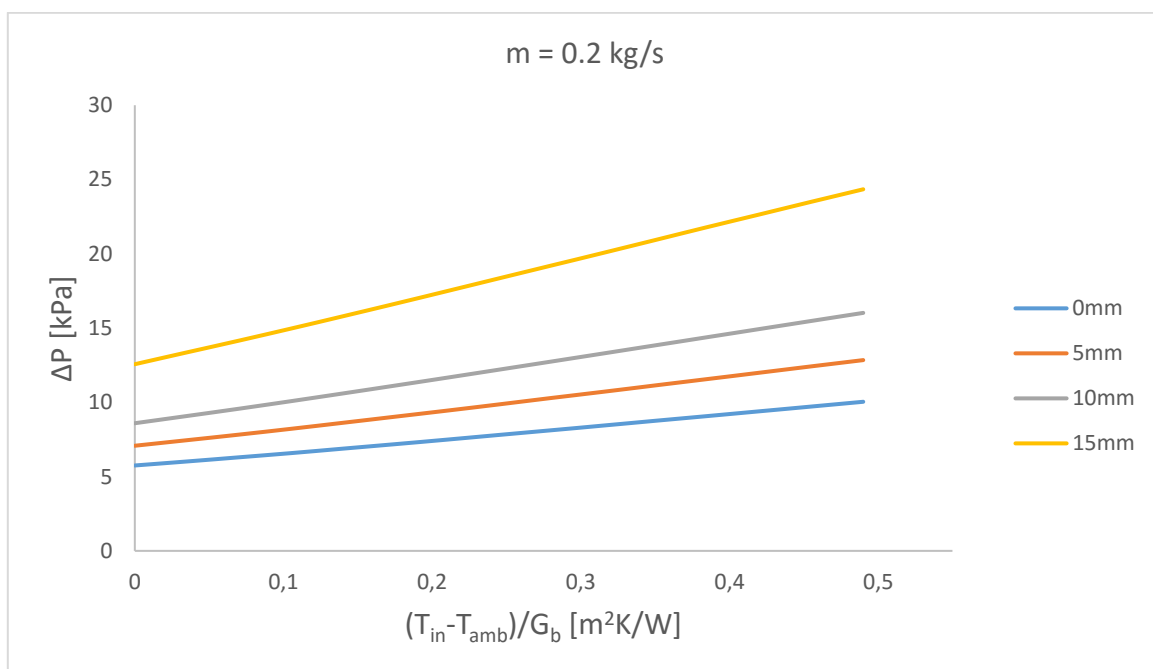
Σχήμα 6.31: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης CO_2

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι και στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα, η εξεργειακή απόδοση βελτιώνεται με τη χρήση των πτερυγίων. Πιο συγκεκριμένα, η διαμόρφωση που φαίνεται να είναι καλύτερη είναι αυτή των 10 mm.



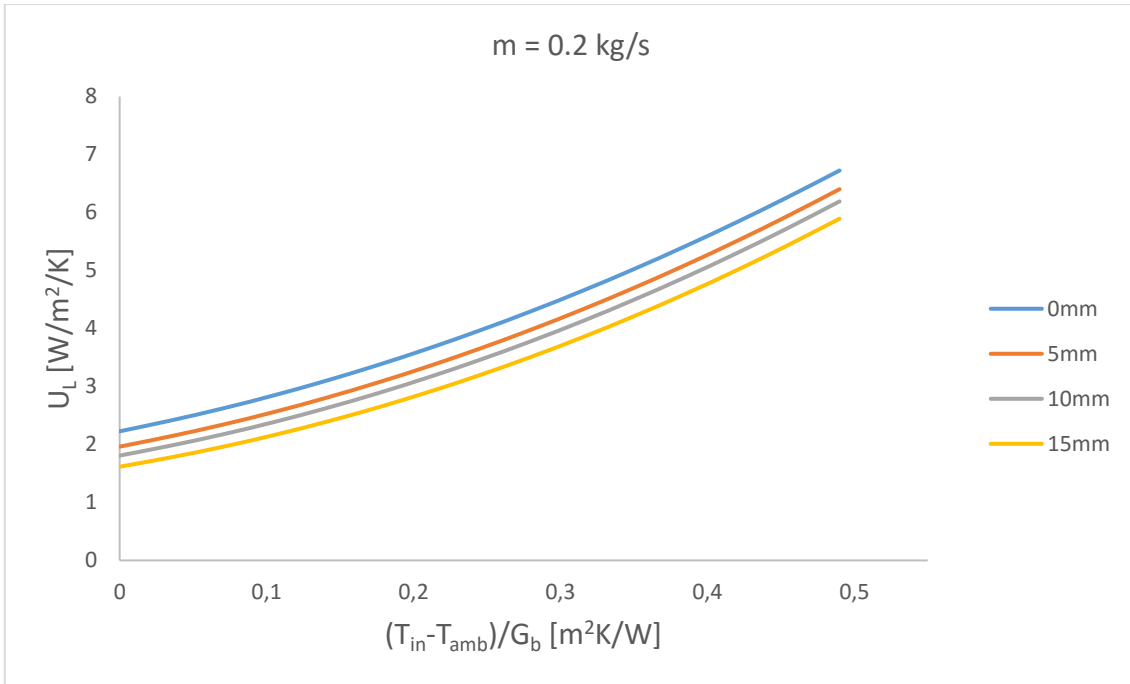
Σχήμα 6.32: Θερμικός βαθμός απόδοσης CO₂

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης και στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα, αυξάνεται με την αύξηση του ύψους των πτερυγίων.



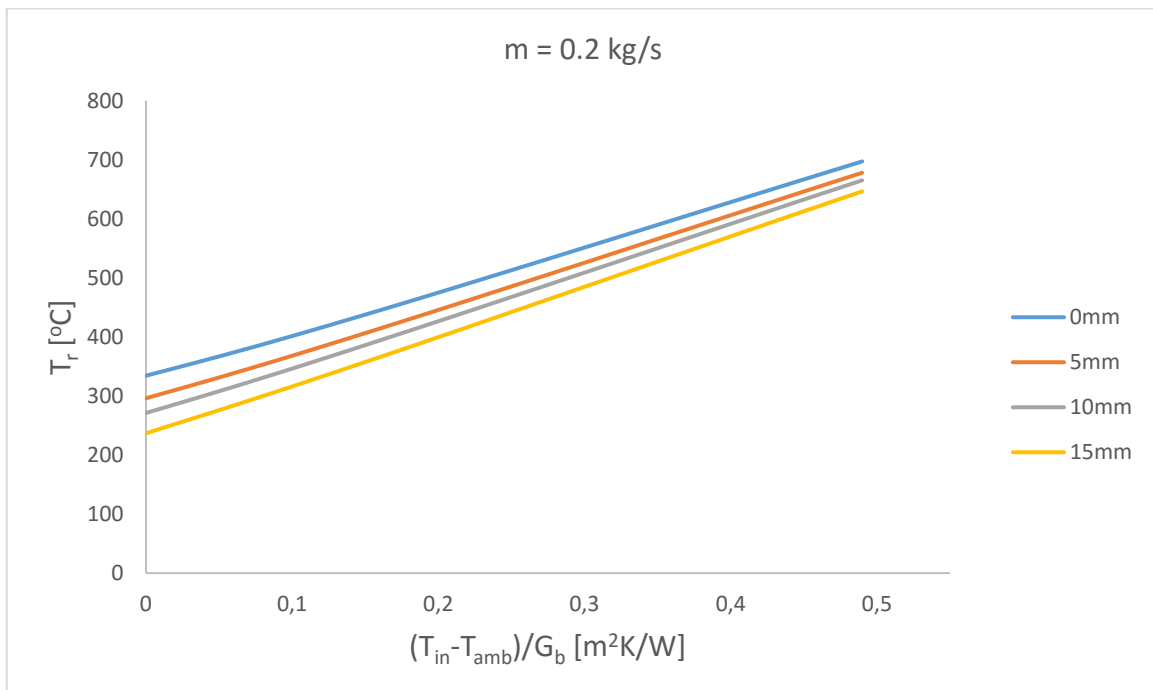
Σχήμα 6.33: Πτώση πίεσης CO₂

Η πτώση πίεσης αυξάνεται με την ενσωμάτωση των πτερυγίων στον απορροφητή όπως ήταν αναμενόμενο.

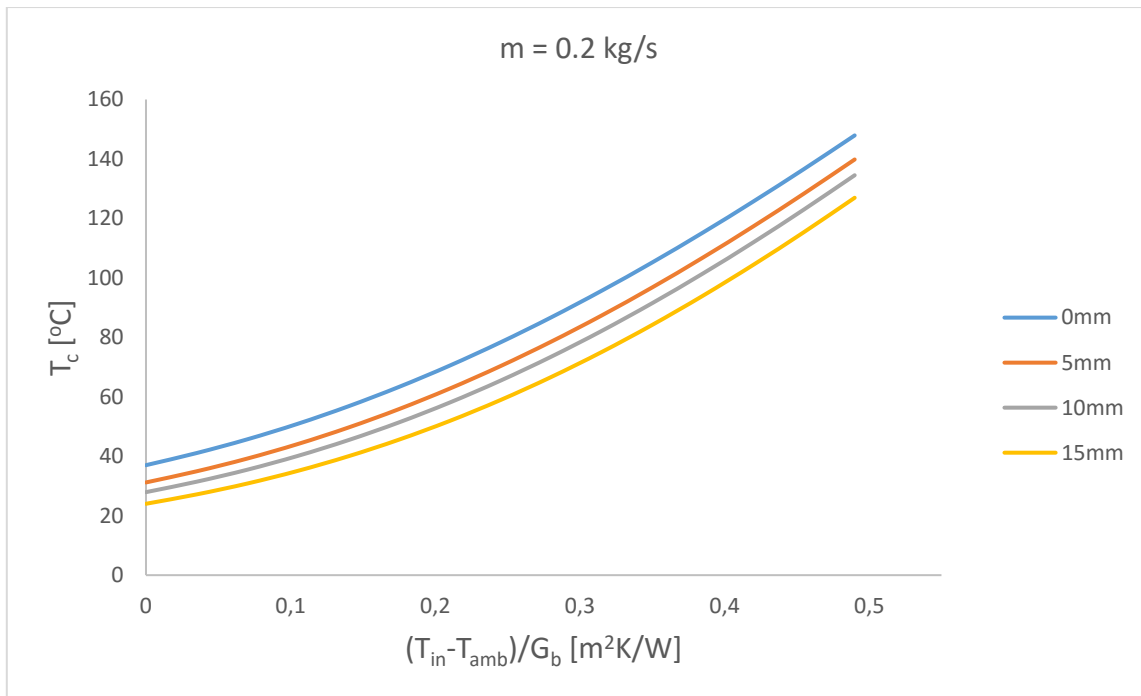


Σχήμα 6.34: Συντελεστής θερμικών απωλειών CO₂

Και στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα, ο συντελεστής θερμικών απωλειών μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος των περυγίων.

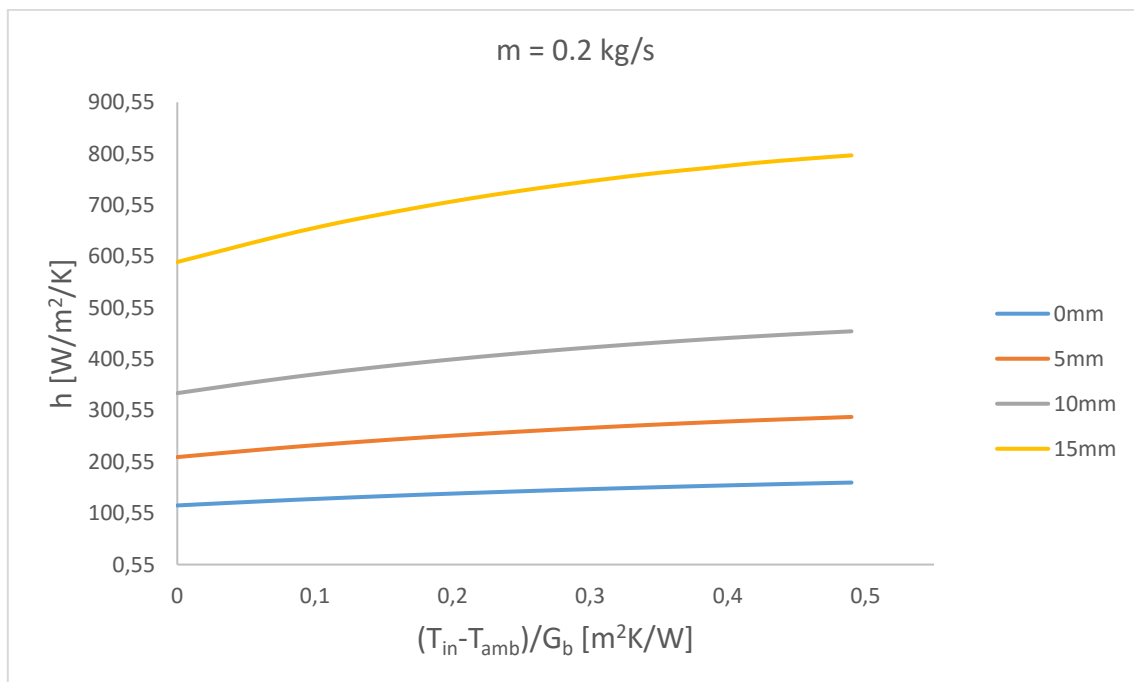


Σχήμα 6.35: Μέση θερμοκρασία απορροφητή CO₂



Σχήμα 6.36: Μέση θερμοκρασία σωλήνα κενού CO₂

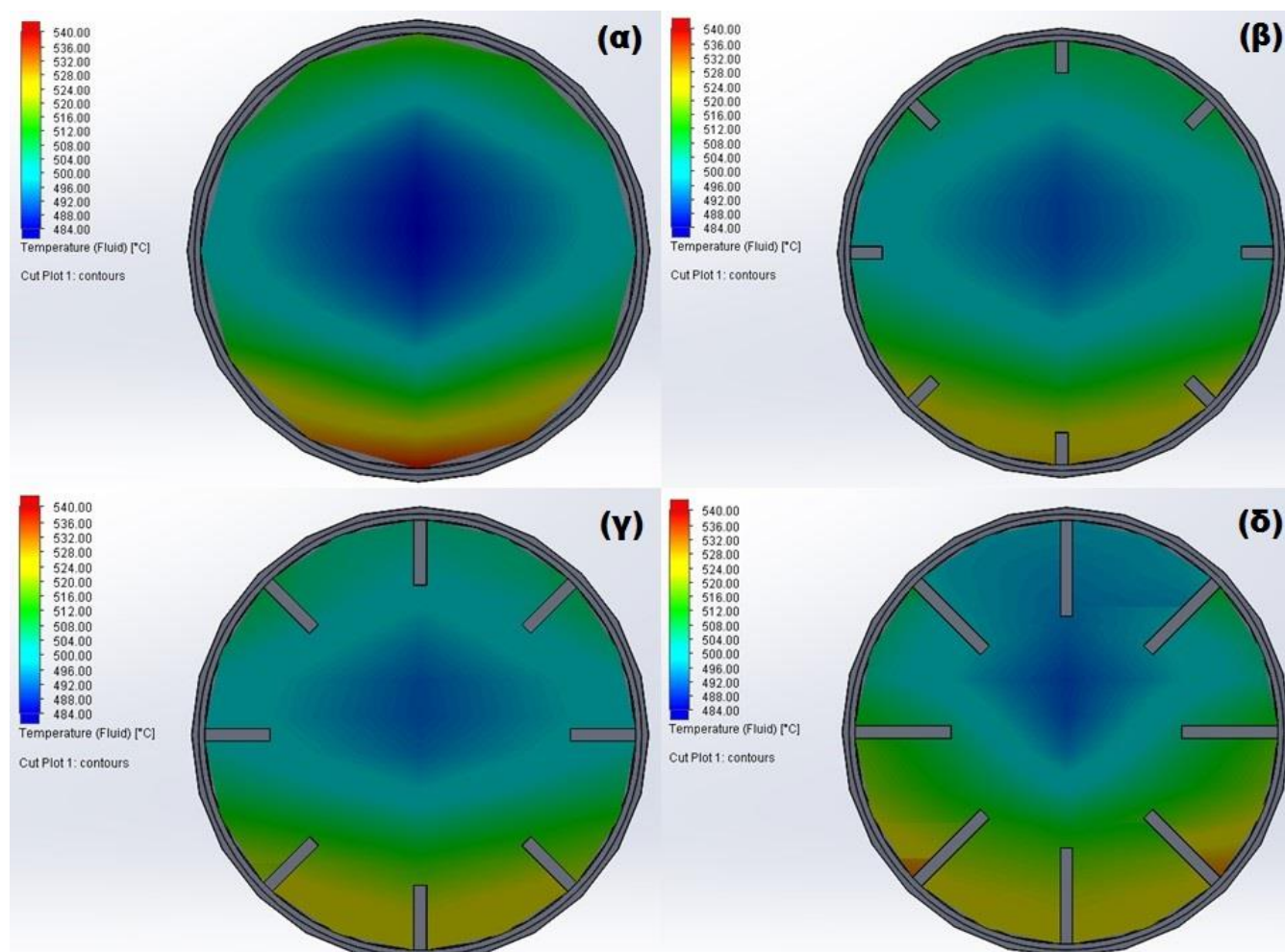
Η μέση θερμοκρασία του απορροφητή και του σωλήνα κενού έχουν μικρότερες τιμές όσο αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων.



Σχήμα 6.37: Συντελεστής συναγωγής CO₂ - απορροφητή

Όπως στα δύο προηγούμενα εργαζόμενα μέσα, έτσι και στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα, η χρήση πτερυγίων στο εσωτερικό του απορροφητή βελτιώνει τη μετάδοση θερμότητας.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας του διοξειδίου του άνθρακα στο μέσο του απορροφητή (6m) για καθεμιά από τις εξεταζόμενες διαμορφώσεις (χωρίς πτερύγια, πτερύγια ύψους 5mm, 10mm και 15mm).



Σχήμα 6.38: Κατανομή θερμοκρασίας CO₂ στο μέσο του απορροφητή για διαμορφώσεις: (α) χωρίς πτερύγια, (β) πτερύγια ύψους 5mm, (γ) πτερύγια ύψους 10mm και (δ) πτερύγια ύψους 15mm

Στο σχήμα 6.38 παρατηρείται ότι και για το διοξείδιο του άνθρακα, η χρήση πτερυγίων στο εσωτερικό του απορροφητή οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Στις διαμορφώσεις των πτερυγίων με ύψος 5mm και 10mm, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι πιο εμφανής κοντά στον άξονα, ενώ στα 15mm στις υπόλοιπες περιοχές.

Παρακάτω περιλαμβάνονται πίνακες με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις τρεις διαμορφώσεις πτερυγίων που εξετάστηκαν για τον διοξείδιο του άνθρακα.

Διοξείδιο του άνθρακα – $\dot{m}_{opt} = 0.2 \text{ kg/s}$								
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$
10	289.37	296.20	31.20	0.774	0.252	1.962	7.079	209.8
45	316.11	320.63	34.94	0.770	0.298	2.142	7.450	218.3
80	343.13	345.80	39.21	0.766	0.336	2.340	7.824	226.4
115	370.74	371.90	44.12	0.761	0.367	2.559	8.217	234.0
150	398.85	398.73	49.67	0.754	0.392	2.800	8.622	240.9
185	427.09	425.99	55.87	0.747	0.411	3.062	9.031	247.3
220	455.53	453.64	62.76	0.739	0.427	3.346	9.441	253.3
255	484.08	481.55	70.30	0.730	0.439	3.652	9.862	258.8
290	512.59	509.60	78.50	0.720	0.448	3.979	10.290	264.0
325	541.08	537.74	87.33	0.709	0.454	4.328	10.709	268.8
360	569.50	565.94	96.78	0.697	0.458	4.699	11.137	273.3
395	597.76	594.09	106.81	0.683	0.459	5.092	11.564	277.4
430	625.91	622.21	117.35	0.668	0.458	5.507	11.991	281.2
465	653.74	650.22	128.38	0.651	0.454	5.944	12.421	284.6
500	681.59	678.11	139.83	0.633	0.449	6.402	12.842	288.0

Πίνακας 6.9: Υπολογισμένα μεγέθη CO₂ - ύψος πτερυγίων 5 mm

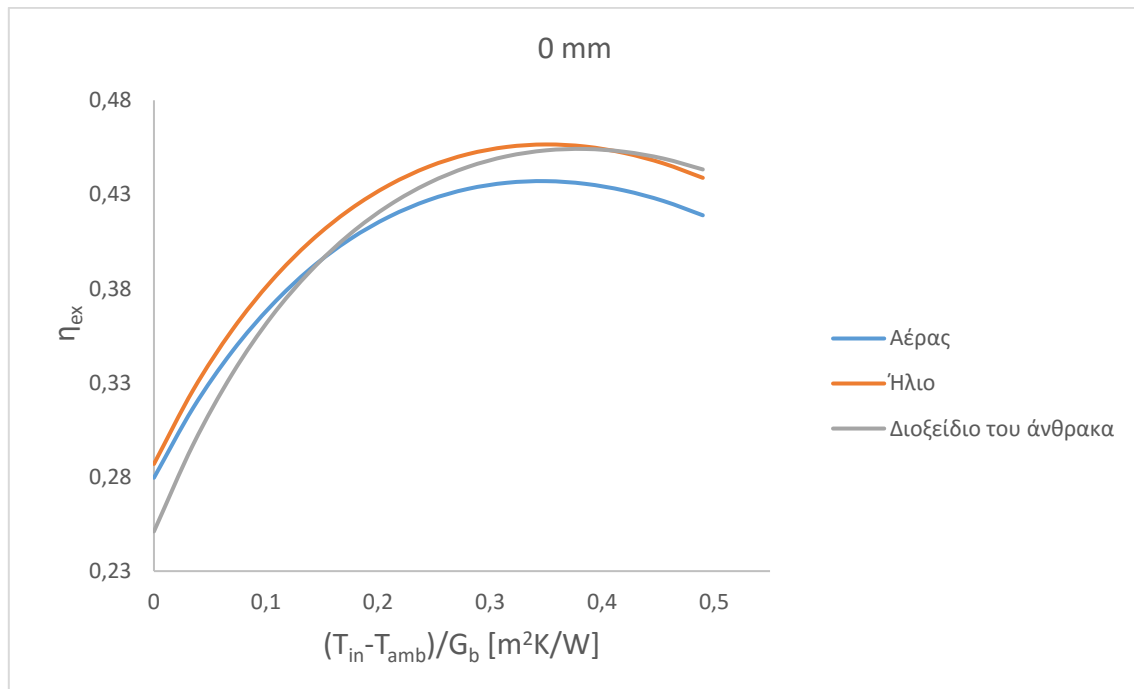
Διοξείδιο του άνθρακα – $\dot{m}_{opt} = 0.2 \text{ kg/s}$								
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$
10	290.48	271.20	27.92	0.778	0.251	1.807	8.594	334.3
45	317.31	296.89	31.43	0.774	0.298	1.981	9.078	347.7
80	344.42	323.18	35.47	0.770	0.336	2.173	9.569	360.7
115	372.11	350.29	40.12	0.765	0.367	2.386	10.077	372.5
150	400.28	378.09	45.43	0.759	0.391	2.621	10.598	383.3
185	428.61	406.26	51.40	0.752	0.411	2.878	11.126	393.3
220	457.14	434.75	58.06	0.745	0.427	3.156	11.659	402.6
255	485.76	463.50	65.41	0.736	0.439	3.457	12.200	411.0
290	514.37	492.34	73.44	0.726	0.448	3.780	12.743	419.0
325	542.94	521.26	82.14	0.716	0.455	4.126	13.289	426.2
360	571.43	550.21	91.49	0.704	0.458	4.494	13.835	432.9
395	599.80	579.11	101.45	0.690	0.460	4.884	14.383	439.2
430	628.00	607.96	111.97	0.676	0.459	5.298	14.931	444.8
465	656.00	636.69	123.02	0.659	0.455	5.734	15.478	449.9
500	683.79	665.28	134.53	0.642	0.450	6.192	16.021	454.7

Πίνακας 6.10: Υπολογισμένα μεγέθη CO₂ - ύψος πτερυγίων 10 mm

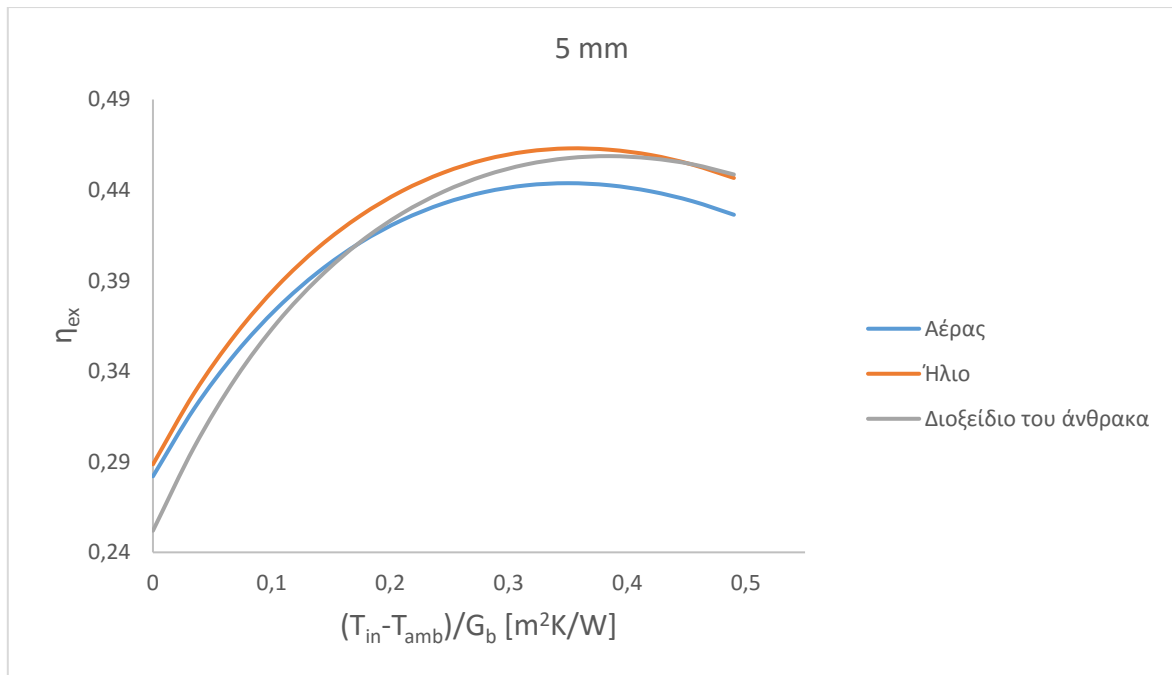
Διοξείδιο του άνθρακα – $\dot{m}_{opt} = 0.2 \text{ kg/s}$								
$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_r(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	η_{th}	η_{ex}	$U_L(\text{W/m}^2/\text{K})$	$\Delta P(\text{kPa})$	$h(\text{W/m}^2/\text{K})$
10	291.76	236.93	24.01	0.782	0.247	1.616	12.566	589.6
45	318.65	264.18	27.16	0.778	0.293	1.778	13.362	613.5
80	345.87	291.83	30.82	0.775	0.331	1.959	14.152	637.3
115	373.71	320.21	35.09	0.770	0.362	2.161	14.963	659.0
150	401.98	349.20	40.00	0.765	0.387	2.386	15.794	678.2
185	430.42	378.51	45.59	0.759	0.407	2.633	16.633	695.6
220	459.11	408.10	51.88	0.752	0.422	2.902	17.487	711.9
255	487.85	437.88	58.89	0.744	0.435	3.195	18.347	726.5
290	516.55	467.74	66.61	0.735	0.444	3.510	19.203	739.7
325	545.28	497.67	75.04	0.724	0.450	3.848	20.058	752.0
360	573.92	527.60	84.17	0.713	0.454	4.210	20.923	763.2
395	602.29	557.47	93.97	0.700	0.455	4.596	21.793	772.5
430	630.72	587.28	104.41	0.686	0.454	5.005	22.642	782.3
465	658.81	616.98	115.41	0.670	0.451	5.438	23.498	790.2
500	686.65	646.53	126.95	0.653	0.445	5.894	24.341	797.1

Πίνακας 6.11: Υπολογισμένα μεγέθη CO₂ - ύψος πτερυγίων 15 mm

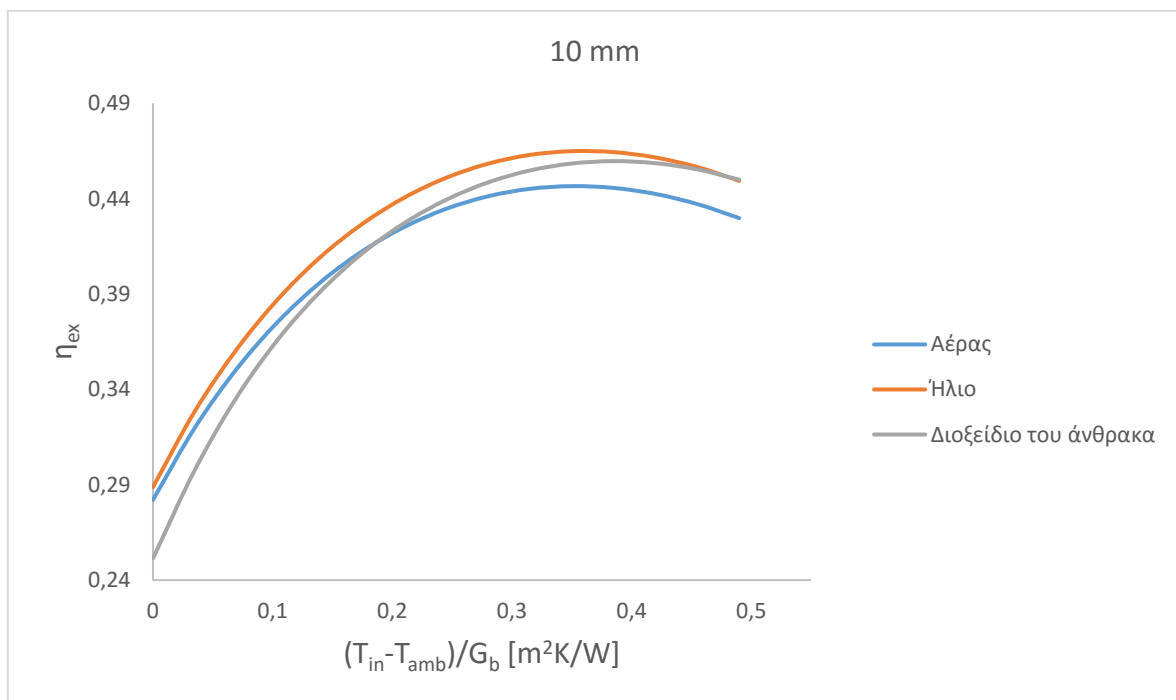
6.4.4: Σύγκριση αερίων



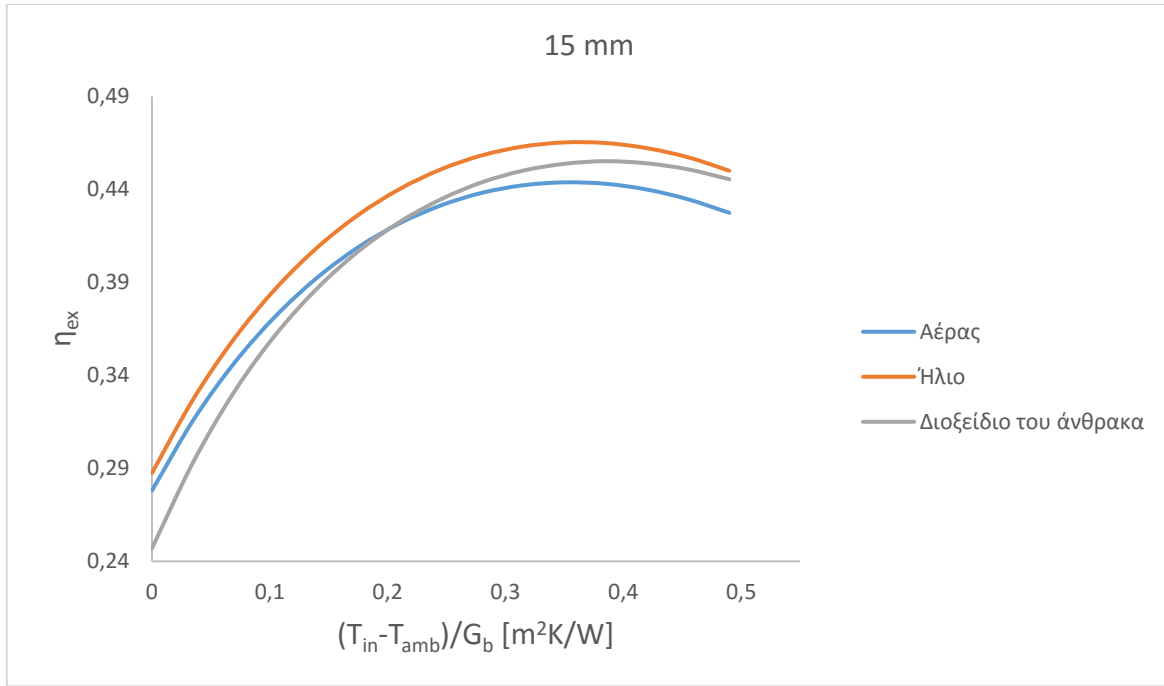
Σχήμα 6.39: Σύγκριση εξεργειακών βαθμών απόδοσης (0 mm)



Σχήμα 6.40: Σύγκριση εξεργειακών βαθμών απόδοσης (5 mm)

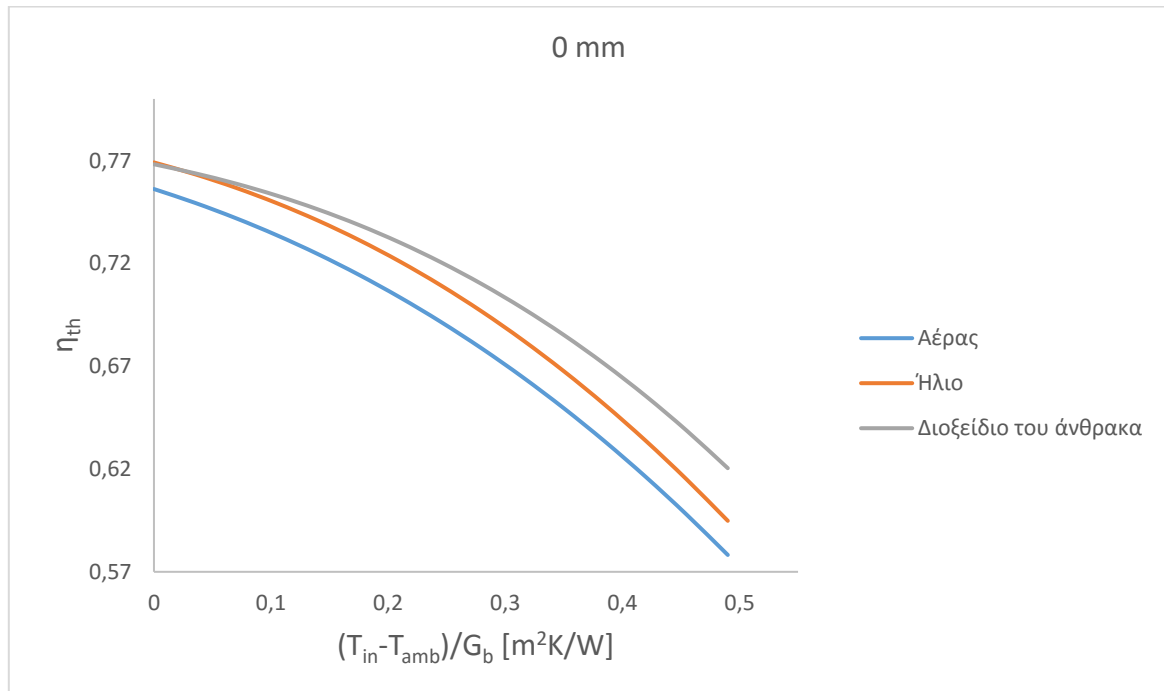


Σχήμα 6.41: Σύγκριση εξεργειακών βαθμών απόδοσης (10 mm)

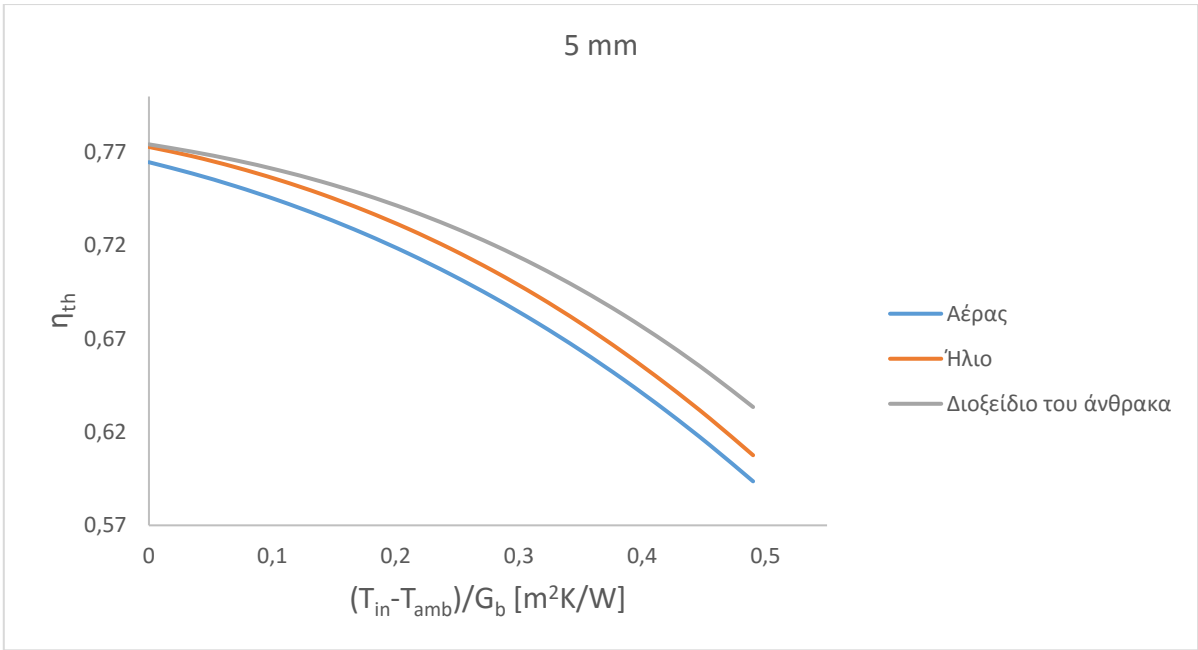


Σχήμα 6.42: Σύγκριση εξεργειακών βαθμών απόδοσης (15 mm)

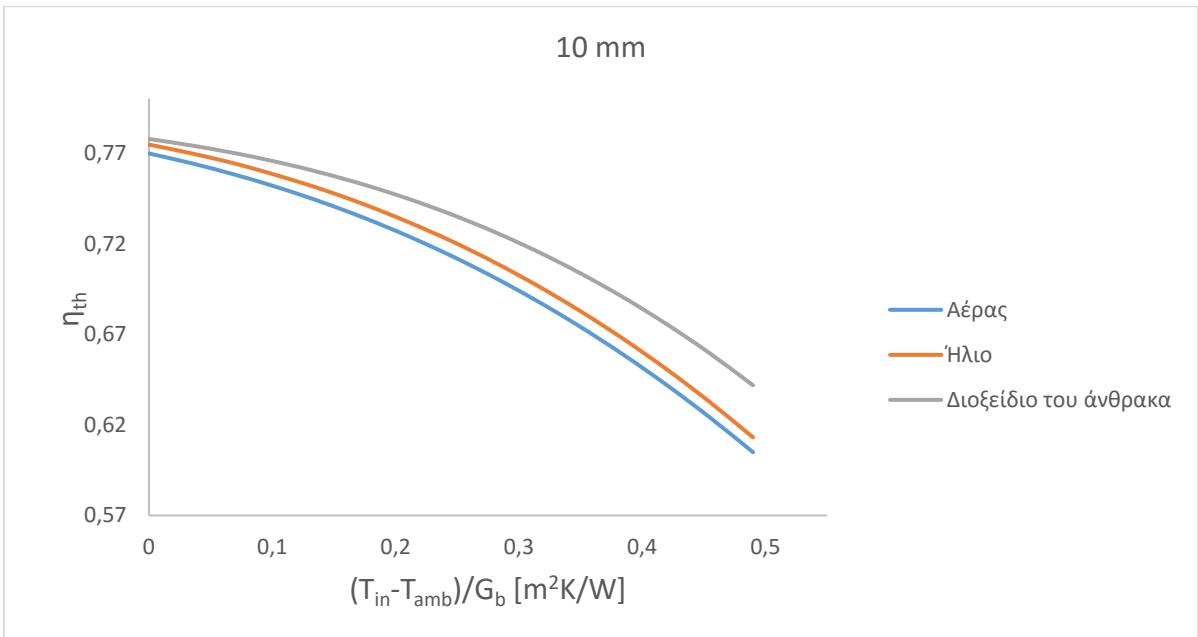
Σε όλες τις διαμορφώσεις του απορροφητή, το εργαζόμενο μέσο που παρουσιάζει την καλύτερη εξεργειακή απόδοση είναι το ήλιο. Στην διαμόρφωση του σωλήνα χωρίς πτερύγια, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, το διοξείδιο του άνθρακα σε υψηλές θερμοκρασίες (>400 °C) υπερτερεί.



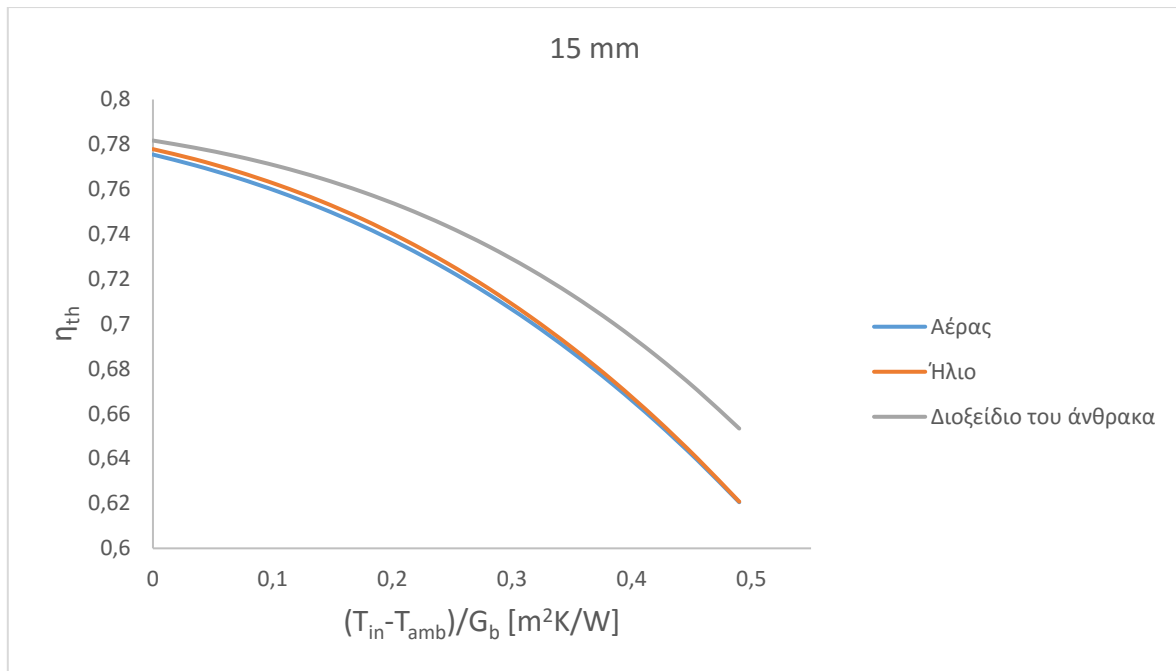
Σχήμα 6.43: Σύγκριση θερμικών βαθμών απόδοσης (0 mm)



Σχήμα 6.44: Σύγκριση θερμικών βαθμών απόδοσης (5 mm)



Σχήμα 6.45: Σύγκριση θερμικών βαθμών απόδοσης (10 mm)



Σχήμα 6.46: Σύγκριση θερμικών βαθμών απόδοσης (15 mm)

Σε όλες τις διαμορφώσεις, το εργαζόμενο μέσο που παρουσιάζει την καλύτερη θερμική απόδοση είναι το διοξείδιο του άνθρακα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός και η προσομοίωση ενός συγκεντρωτικού παραβολικού συλλέκτη Eurotrough. Συγκεκριμένα έγινε θερμική και εξεργειακή μελέτη τριών αερίων εργαζόμενων μέσων (αέρας, ήλιο, διοξείδιο του άνθρακα). Εξετάστηκαν για το καθένα τέσσερις διαφορετικές παροχές μάζας και η μελέτη έγινε για ένα εύρος θερμοκρασιών εισόδου 10 – 500 °C. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι τα εξής (κοινά και για τα τρία εργαζόμενα μέσα):

- Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει μέγιστο σε διαφορετική θερμοκρασία εισόδου για κάθε εξεταζόμενη παροχή μάζας. Όπως προέκυψε, η παροχή που έχει την καλύτερη εξεργειακή απόδοση για κάθε αέριο είναι:
 - Αέρας $\rightarrow \dot{m}_{opt} = 0.15 \text{ kg/s}$
 - Ήλιο $\rightarrow \dot{m}_{opt} = 0.03 \text{ kg/s}$
 - Διοξείδιο του άνθρακα $\rightarrow \dot{m}_{opt} = 0.2 \text{ kg/s}$
- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, αφού η τελευταία προκαλεί αύξηση των θερμικών απωλειών και επομένως μείωση της ωφέλιμης ισχύος. Ακόμη ο θερμικός βαθμός απόδοσης έχει μεγαλύτερες τιμές όσο αυξάνει η παροχή μάζας.
- Ο συντελεστής θερμικών απωλειών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου και παρουσιάζει μικρότερες τιμές όσο αυξάνεται η παροχή μάζας.
- Η πτώση πίεσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου. Ακόμη η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη σε μεγαλύτερες παροχές μάζας.
- Οι μέση θερμοκρασία του απορροφητή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου και έχει μικρότερες τιμές για μεγαλύτερες παροχές μάζας.
- Η μέση θερμοκρασία του σωλήνα κενού έχει αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή του απορροφητή.
- Ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του εργαζόμενου μέσου και του απορροφητή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου.

Συγκρίνοντας τα τρία εργαζόμενα μέσα στις βέλτιστες παροχές μάζας, διαπιστώνεται ότι το ήλιο παρουσιάζει την καλύτερη εξεργειακή απόδοση στο μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών εισόδου. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 400 °C, το διοξείδιο του άνθρακα είναι πιο αποδοτικό. Επίσης για χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου (< 115 °C), ο αέρας είναι πιο αποδοτικός εξεργειακά από το διοξείδιο του άνθρακα. Όσον αφορά το θερμικό βαθμό απόδοσης, το εργαζόμενο μέσο που υπερτερεί σε όλο το εύρος των εξεταζόμενων θερμοκρασιών εισόδου είναι το διοξείδιο του άνθρακα.

Επιπλέον, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσής του συλλέκτη, εξετάστηκε η αλλαγή στη γεωμετρία του απορροφητή με την εισαγωγή πτερυγίων στο εσωτερικό του. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις που αποτελούνται από οκτώ πτερύγια ύψους 5, 10 και 15 mm. Για καθένα εργαζόμενο μέσο, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τη βέλτιστη παροχή μάζας (όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις για τη διαμόρφωση χωρίς τα πτερύγια).

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του θερμικού και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης για καθεμιά από τις εξεταζόμενες διαμορφώσεις του απορροφητή σε σχέση με τη διαμόρφωση χωρίς πτερύγια. Βασικό συμπέρασμα είναι ότι η αλλαγή στη γεωμετρία του απορροφητή βελτιώνει την εξεργειακή και τη θερμική απόδοση του συλλέκτη και στα τρία εργαζόμενα μέσα. Για τη διαμόρφωση των πτερυγίων ύψους 15 mm παρατηρείται μικρή μείωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης στην περίπτωση του αέρα για χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου, ενώ στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζεται βελτίωση μετά τους 360 °C.

	T_{in} [°C]	h_f [mm]	Αέρας			Ήλιο			Διοξείδιο του άνθρακα		
			5	10	15	5	10	15	5	10	15
10	η_{th}		1.13	1.79	2.55	0.50	0.72	1.14	0.79	1.24	1.76
	η_{ex}		0.86	0.89	-0.54	0.59	0.65	0.23	0.35	0.09	-1.64
45	η_{th}		1.23	1.97	2.83	0.61	0.83	1.31	0.86	1.34	1.92
	η_{ex}		0.93	1.01	-0.25	0.61	0.73	0.31	0.38	0.18	-1.31
80	η_{th}		1.34	2.15	3.12	0.70	0.97	1.49	0.92	1.45	2.09
	η_{ex}		0.97	1.14	0.00	0.67	0.80	0.51	0.47	0.31	-1.04
115	η_{th}		1.44	2.34	3.43	0.81	1.08	1.67	1.00	1.57	2.29
	η_{ex}		1.04	1.27	0.23	0.75	0.91	0.66	0.49	0.38	-0.89
150	η_{th}		1.55	2.54	3.75	0.91	1.24	1.88	1.08	1.71	2.50
	η_{ex}		1.11	1.39	0.45	0.84	1.03	0.84	0.54	0.48	-0.72
185	η_{th}		1.66	2.74	4.08	1.02	1.38	2.09	1.17	1.85	2.72
	η_{ex}		1.18	1.52	0.66	0.91	1.12	1.01	0.61	0.58	-0.56
220	η_{th}		1.77	2.94	4.42	1.14	1.54	2.30	1.26	2.00	2.97
	η_{ex}		1.25	1.66	0.85	1.02	1.26	1.19	0.66	0.67	-0.44
255	η_{th}		1.88	3.15	4.77	1.26	1.72	2.54	1.35	2.16	3.22
	η_{ex}		1.32	1.79	1.03	1.11	1.39	1.36	0.72	0.78	-0.30
290	η_{th}		1.99	3.35	5.12	1.38	1.89	2.79	1.45	2.33	3.49
	η_{ex}		1.39	1.91	1.22	1.22	1.54	1.55	0.79	0.88	-0.15
325	η_{th}		2.10	3.56	5.48	1.51	2.07	3.03	1.56	2.50	3.77
	η_{ex}		1.48	2.05	1.39	1.32	1.69	1.73	0.86	0.99	-0.03
360	η_{th}		2.21	3.77	5.85	1.64	2.26	3.29	1.66	2.68	4.06
	η_{ex}		1.54	2.17	1.55	1.41	1.82	1.92	0.93	1.10	0.09
395	η_{th}		2.32	3.98	6.21	1.75	2.46	3.56	1.77	2.87	4.36
	η_{ex}		1.61	2.29	1.71	1.50	1.96	2.10	1.01	1.21	0.24
430	η_{th}		2.44	4.19	6.58	1.88	2.67	3.83	1.88	3.06	4.67
	η_{ex}		1.67	2.40	1.83	1.62	2.11	2.26	1.08	1.31	0.31
465	η_{th}		2.55	4.40	6.95	2.02	2.87	4.10	1.99	3.25	4.99
	η_{ex}		1.73	2.50	1.93	1.71	2.26	2.44	1.17	1.40	0.41
500	η_{th}		2.66	4.61	7.32	2.15	3.07	4.37	2.10	3.45	5.32
	η_{ex}		1.78	2.59	2.03	1.80	2.39	2.57	1.20	1.50	0.50

Πίνακας 7.1: Ποσοστιαία (%) μεταβολή θερμικού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης

Για τα υπόλοιπα μεγέθη, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι τα εξής (κοινά και για τα τρία εργαζόμενα μέσα):

- Ο συντελεστής θερμικών απωλειών παρουσιάζει μείωση με τη χρήση των πτερυγίων, η οποία είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται το ύψος τους.
- Η πτώση πίεσης αυξάνεται με την χρήση των πτερυγίων και είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται το ύψος τους.
- Η μέση θερμοκρασία του απορροφητή και του σωλήνα κενού μειώνονται όσο αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων.
- Η μετάδοση θερμότητας βελτιώνεται, αφού ο συντελεστής συναγωγής εργαζόμενου μέσου – απορροφητή έχει μεγαλύτερες τιμές όσο αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων.

Μελλοντική έρευνα:

Σε μελλοντικές έρευνες, μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά του αέρα, του ηλίου και του διοξειδίου του άνθρακα σε υψηλότερες θερμοκρασίες εισόδου (> 500 °C). Ακόμη μπορούν να μελετηθούν διαφορετικές γεωμετρίες στο εσωτερικό του απορροφητή (π.χ. πτερύγια με διαφορετικά ύψη). Επίσης ενδιαφέρον θέμα μελέτης αποτελεί και η χρήση του διοξειδίου του άνθρακα σε υπερκρίσιμη κατάσταση ως εργαζόμενο μέσο.

Βιβλιογραφία

1. «Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα (Μέρος Πρώτο)», Κ. Α. Αντωνόπουλος, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2011
2. «Solar Engineering of Thermal Processes, fourth edition», J. A. Duffie, W. A. Beckman, Wiley 2013
3. <http://www.powerfromthesun.net/book.html>
4. Soteris A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 30, Issue 3, 2004, Pages 231-295, ISSN 0360-1285
5. https://mitei.mit.edu/system/files/Chapter%203_compressed.pdf
6. http://www.solarpaces.org/images/pdfs/solar_tower.pdf
7. «Concentrating solar power technology: Principles, developments and applications», K. Lovegrove, W. Stein, Woodhead Publishing
8. «Solar Energy Engineering: Processes and Systems», Soteris A. Kalogirou
9. http://www.solarpaces.org/images/pdfs/solarpaces_fresnel_9_2002.pdf
10. http://www.solarpaces.org/images/pdfs/solar_dish.pdf
11. http://solarpaces.org/images/pdfs/solar_trough.pdf
12. A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Pérez, Parabolic-trough solar collectors and their applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 7, September 2010, Pages 1695-1721, ISSN 1364-0321
13. Soteris Kalogirou, Use of parabolic trough solar energy collectors for sea-water desalination, Applied Energy, Volume 60, Issue 2, June 1998, Pages 65-88, ISSN 0306-2619
14. Mehdi N. Bahadori, Solar water pumping, Solar Energy, Volume 21, Issue 4, 1978, Pages 307-316, ISSN 0038-092X
15. <http://www.nrel.gov>
16. Nikola Lorenzin, Alberto Abánades, A review on the application of liquid metals as heat transfer fluid in Concentrated Solar Power technologies, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 41, Issue 17, 11 May 2016, Pages 6990-6995, ISSN 0360-3199
17. <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/51762451EN6.pdf>
18. http://www.schott.com/csp/english/download/schott_ptr70_4th_generation_datasheet.pdf
19. C. Tzivanidis, E. Bellos, D. Korres, K.A. Antonopoulos, G. Mitsopoulos, Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 6, September 2015, Pages 226-237, ISSN 2214-157X
20. Evangelos Bellos, Christos Tzivanidis, Kimon A. Antonopoulos, Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types, Applied Thermal Engineering, Volume 102, 5 June 2016, Pages 749-759, ISSN 1359-4311
21. Javad Yazdanpanahi, Faramarz Sarhaddi, Mohsen Mahdavi Adeli, Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses, Solar Energy, Volume 118, August 2015, Pages 197-208, ISSN 0038-092X
22. Evangelos Bellos, Christos Tzivanidis, Kimon A. Antonopoulos, Ilias Daniil, The use of gas working fluids in parabolic trough collectors – An energetic and exergetic analysis, Applied Thermal Engineering, Volume 109, Part A, 25 October 2016, Pages 1-14, ISSN 1359-4311
23. «Αρχές Μεταφοράς θερμότητας και Μάζης», Κακάτσιος Κ. Ξενοφών
24. Jacek Kasperski, Magdalena Nemś, Investigation of thermo-hydraulic performance of concentrated solar air-heater with internal multiple-fin array, Applied Thermal Engineering, Volume 58, Issues 1–2, September 2013, Pages 411-419, ISSN 1359-4311
25. Solidworks tutorial