



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΜΗΚΗ
ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ
ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΣΑ»**

Άγγελος Παπαδόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης

Αθήνα , Φεβρουάριος 2018

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κύριο Χρήστο Τζιβανίδη για τις συμβουλές του καθώς και για την παράθεση αυτού του θέματος.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Ευάγγελο Μπέλλο για την πολύτιμη βοήθεια και καταλυτική συμβολή του στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την πολύτιμη υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	3
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	9
1.1 Ενεργειακό ζήτημα	9
1.2 Κλιματική Αλλαγή.....	11
1.3 Ανανεώσιμες Πηγές.....	12
1.4 Εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας	14
Κεφάλαιο 2: Ηλιακή ενέργεια και τύποι ηλιακών συλλεκτών.....	17
2.1 Φύση του ήλιου.....	17
2.1.1 Ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας	17
2.1.2 Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας.....	18
2.2 Χαρακτηριστικές γωνίες.....	19
2.3 Ηλιακή ακτινοβολία	21
2.3.1 Ολική ακτινοβολία	21
2.3.2 Άμεση ακτινοβολία	23
2.3.3 Διάχυτη ακτινοβολία.....	25
2.4 Ηλιακοί Συλλέκτες	26
2.4.1 Επίπεδοι Συλλέκτες (Flat Plane Collector - FPC).....	26
2.4.2 Συλλέκτες με σωλήνες κενού (ETC).....	28
2.4.3 Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες.....	29
2.4.3.1 Σύνθετος Παραβολικός (Compound Parabolic Collector- CPC)	30
2.4.3.2 Επιμήκης Παραβολικός Συλλέκτης (Parabolic Trough Collector – PTC).....	32
2.4.3.3 Γραμμικός Συλλέκτης Fresnel.....	34
2.4.3.4 Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο (Dish)	35
2.4.3.5 Ηλιακός Πύργος (Solar Tower).....	35
Κεφάλαιο 3: Γραμμικός Συλλέκτης Fresnel.....	39
3.1 Αρχή Λειτουργίας	39
3.2 Ιστορική Αναφορά.....	42
3.3 Σημερινή Κατάσταση.....	44
3.4 Εφαρμογές.....	47
3.5 Μαθηματικό μοντέλο συλλέκτη Fresnel.....	51
3.5.1 Γεωμετρία.....	51
3.5.2 Οπτική ανάλυση	58
3.5.3 Θερμοδυναμική ανάλυση	61
3.5.4 Εξεργειακή ανάλυση	63

3.6 Τρόποι Βελτίωσης Θερμικού Βαθμού Απόδοσης	64
3.6.1 Εφαρμογές Νανοϋλικών	65
3.6.2 Εφαρμογή τηγμένου άλατος και υγρού νατρίου	69
3.6.3 Επιμήκη Πτερύγια στο εσωτερικό του σωλήνα	70
3.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συλλεκτών Fresnel.....	74
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία σχεδιασμού και προσομοίωσης συλλέκτη	79
4.1 Σχεδιαστικά στοιχεία συλλέκτη.....	80
4.2 Σχεδιασμός συλλέκτη στο Solidworks.....	82
4.3 Οπτική και θερμική ανάλυση στο Flow Simulation	89
4.3.1 Εύρεση Βέλτιστης παροχής.....	121
4.3.2 Ανεξαρτησία πλέγματος.....	124
4.4 Στροφή κατόπτρων για διάφορες γωνίες ήλιου	125
4.5 Επιμήκη πτερύγια στο εσωτερικό του σωλήνα	129
4.6 Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς συλλέκτη	132
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα	141
5.1 Αποτελέσματα Simulation σωλήνα χωρίς πτερύγια.....	142
5.1.1 Syltherm 800 με χρήση νανοϋλικών CuO	142
5.1.2 Τηγμένο άλας και υγρό νάτριο	143
5.2 Αποτελέσματα Simulation σωλήνα με πτερύγια	144
5.2.1 Syltherm 800 με χρήση νανοϋλικών CuO	144
5.2.2 Τηγμένο άλας και υγρό νάτριο	146
5.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης (Data Validation)	146
5.4 Επεξεργασία και σύγκριση αποτελεσμάτων.....	152
5.4.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	152
5.4.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	156
5.5 Θερμικές κατανομές σωλήνα για όλα τα θερμικά μέσα	172
5.6 Αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς συλλέκτη.....	186
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και νέα πεδία έρευνας.....	199
6.1 Συμπεράσματα εργασίας	199
6.2 Πεδία μελλοντικής έρευνας	200

Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της εργασίας αποτελεί η οπτική και η θερμική ανάλυση ενός επιμήκη συλλέκτη Fresnel με επίπεδα πρωτεύοντα κάτοπτρα. Ακόμα, ο συλλέκτης μας αποτελείται από τα εξής παρακάτω μέρη: έναν σωλήνα κενού ως απορροφητήρα και ένα παραβολοειδές κάτοπτρο ως δευτερεύον. Αρχικά εστιάζουμε στο σχεδιασμό του συλλέκτη με γνώμονα την καλύτερη οπτική απόδοση σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος λόγω της απλής γεωμετρίας των επίπεδων κατόπτρων, καθώς είναι απλά στο σχεδιασμό και παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή στα φορτία ανέμου. Επίσης, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, είναι αρκετά εύελικτα όταν συνδυάζονται με συστήματα παρακολούθησης ηλίου, τα λεγόμενα (Tracking Systems). Τον συλλέκτη τον σχεδιάζουμε στο λογισμικό Solidworks. Όσον αφορά τις διαστάσεις του, αυτές προκύπτουν κατά κύριο λόγο, από εφαρμογές της βιομηχανίας. Κάποιες όμως, προκύπτουν έπειτα από οπτική βελτιστοποίηση του συλλέκτη στο εργαλείο προσομοίωσης Flow Simulation του Solidworks. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί, η γεωμετρία του δευτερεύοντος κατόπτρου και συγκεκριμένα η απόσταση της εστίας της παραβολής του από το κέντρο του απορροφητήρα. Προκειμένου να μελετήσουμε την θερμική συμπεριφορά του συλλέκτη, χρησιμοποιούμε πάλι το Flow Simulation. Βασική παράμετρος μιας τέτοιας ανάλυσης, είναι το θερμικό μέσο. Ως βασικό θερμικό μέσο, επιλέγουμε το θερμικό έλαιο Syltherm 800. Στη συνέχεια, θα μελετήσουμε διαφορετικά μέσα, με σκοπό να πετύχουμε υψηλότερη θερμική απόδοση συλλέκτη, λόγω των ευνοϊκότερων ιδιοτήτων του εκάστοτε μέσου, όπως για παράδειγμα η υψηλή του θερμική αγωγιμότητα (k).

Αναλυτικότερα, εξετάζουμε τις περιπτώσεις όπου έχουμε ως εργαζόμενο μέσο το θερμικό έλαιο Syltherm800 σε συνδυασμό με νανοϋλικά (CuO) καθώς και σε συνδυασμό με τηγμένο άλας (Molten Salt) και υγρό νάτριο (Liquid Sodium). Προκειμένου να αυξήσουμε τον θερμικό βαθμό απόδοσης, εξετάζουμε την περίπτωση τοποθέτησης εσωτερικών πτερυγίων κατά τον επιμήκη άξονα του σωλήνα κενού. Αυτή η γεωμετρία, χρησιμοποιείται κατά κόρον σε εφαρμογές απορροφητών συγκεντρωτικών συλλεκτών, καθώς όπως θα δούμε και στην περίπτωση μας, η ύπαρξη εσωτερικών πτερυγίων αυξάνει την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας μεταξύ ρευστού και σωλήνα, συνεπώς ο θερμικός βαθμός αυξάνεται.

Αναλυτικότερα, στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια γενική αναφορά στο ενεργειακό ζήτημα του πλανήτη, δηλαδή στο παγκόσμιο προφίλ της ενεργειακής ζήτησης καθώς και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχουν οι συμβατικοί τρόποι παραγωγής ενέργειας (πχ Ατμοηλεκτρικοί Σταθμοί Ενέργειας), όπως είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, λόγω των υψηλών εκπομπών CO_2 στην ατμόσφαιρα. Επίσης, παρουσιάζονται οι βασικές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) καθώς και οι συνήθειες εφαρμογές εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας.

Όσον αφορά το **Κεφάλαιο 2**, αρχικά γίνεται περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του ήλιου, όπως το φάσμα της ακτινοβολίας του, οι γωνίες που μας δίνουν την θέση του στον ουράνιο θόλο (ηλιακή απόκλιση, αζιμούθιο ήλιου, ωριαία γωνία κτλ) καθώς και ο τρόπος υπολογισμού της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος (άμεση και έμμεση). Ακόμα, γίνεται αναφορά στην τεχνολογία, την γεωμετρία και την χρήση της πλειονότητας των ειδών των ηλιακών συλλεκτών. Συγκεκριμένα, εστιάζουμε στις δύο βασικές κατηγορίες, τους επίπεδους και τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναφέρουμε βιβλιογραφικές πληροφορίες για τους επιμήκεις συλλέκτες Fresnel. Αναλυτικότερα, επισυνάπτεται σύντομη ιστορική αναδρομή, σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές, η αρχή λειτουργίας καθώς και τρόποι βελτίωσης του θερμικού βαθμού απόδοσης συλλεκτών Fresnel. Επίσης, δίνεται το απαιτούμενο μαθηματικό μοντέλο ανάλυσης των συλλεκτών το οποίο εμπεριέχει την οπτική, την θερμοδυναμική αλλά και την εξεργειακή τους ανάλυση. Όσον αφορά, στους τρόπους βελτίωσης του θερμικού βαθμού απόδοσης, παρατίθεται μια πληθώρα ερευνών από την βιβλιογραφία που αφορά εφαρμογές νανοϋλικών σε θερμικά έλαια, τηγμένο άλας, υγρό νάτριο και επιμήκη πτερύγια στο εσωτερικό του σωλήνα, του απορροφητήρα.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται αναλυτική περιγραφή του γεωμετρικού σχεδιασμού του συλλέκτη, καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την θερμική προσομοίωση του στο λογισμικό Solidworks. Αρχικά, παρατίθενται όλες οι απαραίτητες διαστάσεις του συλλέκτη. Όπως αναφέραμε στην εισαγωγική παράγραφο αυτής της περίληψης, πραγματοποιήθηκε οπτική βελτιστοποίηση προκειμένου να καθοριστούν ορισμένες από τις εν λόγω διαστάσεις. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια ενδελεχής ανάλυση όλων των βημάτων σχεδιασμού του συλλέκτη αλλά και την προσομοίωση του στο Flow Simulation. Προφανώς, η σχεδίαση έγινε και για τις δύο γεωμετρίες σωλήνα κενού (με πτερύγια και χωρίς) και η προσομοίωση για όλα τα θερμικά μέσα που εξετάζουμε [Syltherm 800- νανοσωματίδια CuO ($\varphi=0\%$, 2% , 4% , 6%), τηγμένο άλας και υγρό νάτριο. Αξίζει να αναφέρουμε ότι οι προσομοιώσεις της ροής στο εσωτερικό του σωλήνα, γίνανε με την βέλτιστη παροχή ($V=200\text{ L/min}$) καθώς αυτή συνδυάζει υψηλό βαθμό θερμικής απόδοσης με χαμηλή πτώση πίεσης. Ακόμα, η θερμική ανάλυση για όλα τα μέσα πραγματοποιήθηκε για ένα πλήθος θερμοκρασιών. Πιο συγκεκριμένα για το Syltherm 800 επιλέχθηκαν οι θερμοκρασίες εισόδου $T_{in}=[350, 400, 450, 500, 550, 600, 650]$ (K), για το τηγμένο άλας, $T_{in}=[550, 600, 650, 700, 750, 800, 850]$ (K), ενώ για το υγρό νάτριο, $T_{in}=[400, 500, 600, 700, 800, 900]$ (K). Επίσης, προκειμένου να εξάγουμε τις καμπύλες του παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης K, πραγματοποιήσαμε παραμετρική οπτική ανάλυση για διάφορες θέσεις του ήλιου. Τέλος για λόγους πληρότητας εξετάσαμε τη δυναμική φύση και συμπεριφορά του συλλέκτη μας ημερησίως, μηνιαίως και ετησίως. Για το συγκεκριμένο σκοπό, αναπτύξαμε ένα υπολογιστικό μοντέλο στη Matlab που βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και περιλαμβάνει τον συλλέκτη μας σε σύνδεση με ένα δοχείο αποθήκευσης. Ο όγκος του δοχείου καθώς και η θερμοκρασία του ρευστού, αποτέλεσαν τις παραμέτρους σχεδίασης.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων της θερμοδυναμικής και οπτικής ανάλυσης του στατικού μοντέλου συλλέκτη σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων με σχολιασμό. Βασικότερα αποτελέσματα αποτελούν: για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=600\text{ K}$ το υγρό νάτριο παρουσιάζει την βέλτιστη θερμική και εξεργειακή απόδοση σε σχέση με τα άλλα εξεταζόμενα μέσα ($\eta_{th}=54.8\%$, $\eta_{ex}=29.74\%$), για το θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\varphi=0\%$) για $T_{in}=600\text{ K}$ η εφαρμογή πτερυγίων επιφέρει αύξηση του η_{th} κατά 0.6% σε σχέση με την περίπτωση χωρίς πτερύγια, η περίπτωση Syltherm 800 ($\varphi=6\%$) για $T_{in}=600\text{ K}$ επιφέρει αύξηση του η_{th} κατά 0.23% σε σχέση με την περίπτωση ($\varphi=0\%$).

Τέλος στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης, δίνονται προτάσεις ζητημάτων που αφορούν τον συλλέκτη Fresnel, για μελλοντική έρευνα.

Abstract

The subject of this Thesis is the optical and thermal analysis of a linear Fresnel collector with flat primary mirrors. Furthermore, our collector consists of the following parts: a vacuum tube as an absorber and a paraboloid mirror as secondary mirror. Initially, we focus on the design of the collector for the best visual performance combined with the low cost due to the simple geometry of the flat mirrors as they are simple in design and show very good resistance to wind loads. Also, as we will see later, they are flexible enough when combined with Solar Tracking Systems.

The design of collector took place in the Solidworks software. As far as its dimensions are concerned, it is mainly derived from industrial applications. Some, however, arise from optical optimization of the collector in the Solidworks Flow Simulation tool. A typical example is the geometry of the secondary mirror and in particular the distance of the center of the parabola from the center of the absorber.

In order to study the thermal behavior of the collector, we also use Flow Simulation. A basic parameter of such an analysis is the thermal fluid. As a basic working medium, we choose the Syltherm 800, thermal oil. We will then study different media in order to achieve higher thermal collector efficiency due to the more favorable properties of the medium, such as its high thermal conductivity (k).

Specifically, we investigate the cases of Syltherm800 in combination with nanomaterials (CuO) , Molten Salt and Liquid Sodium. In order to increase the thermal efficiency we look at the placement of internal fins along the elongated axis of the vacuum tube. This geometry is widely used in solar collector applications, as we will see in our case, the existence of internal fins increases the heat exchange surface between the fluid and the tube, so the thermal efficiency increases.

Explicitly, **Chapter 1** gives a general reference to the global energy issue, namely the global profile of energy demand as well as the environmental impacts of conventional modes of energy production (for example: Steam Electric Power Stations), such as greenhouse effect, due to high CO₂ emissions into the atmosphere. It also presents the basic forms of renewable energy sources (RES) as well as the usual solar energy applications.

With regard to **Chapter 2**, we first describe the basic characteristics of the sun, such as its radiation spectrum, the angles that give us its place in the celestial dome (solar divergence, sun azimuth, hour angle, etc.) and how we calculate radiation that reaches the ground (direct and indirect). Still, reference is made to technology, geometry and the use of most of the solar collectors. In particular, we focus on the two main categories, the flat and the collective collectors. For example, the basic principles of flat collectors with or without vacuum tubes, Compound and Linear parabolic (CPC, LPC) and other collectors are mentioned.

In **Chapter 3** we report bibliographic information about the Fresnel Linear collectors. In detail, a short historical review, modern industrial applications, the principle of operation and ways of improving the thermal efficiency of Fresnel collectors are

attached. Also, the required mathematical model for the analysis of the collectors is given, which includes their optical, thermodynamic and also their energetic analysis. With regard to the ways to improve the thermal efficiency, there is a plethora of research from the literature on nanomaterials in thermal oils, Molten Salt, Liquid Sodium and elongate fins inside the tube, of the absorber.

Chapter 4 gives a detailed description of the geometric design of the collector, as well as the methodology followed for thermal simulation in the Solidworks software. Initially, all the necessary dimensions of the collector are listed. As we mentioned in the introductory paragraph of this summary, visual optimization was performed to determine some of these dimensions. Then follows a thorough analysis of all the design steps of the collector and its simulation in Flow Simulation. Obviously, the design was made for both vacuum tube geometries (with and without internal fins) and the simulation for all the thermal media we examined [Syltherm 800 - CuO nanoparticles ($\varphi = 0\%$, 2% , 4% , 6% Molten Salt and Liquid Sodium. It is worth mentioning that the flow simulations inside the tube were made with the optimum flow rate ($V = 200 \text{ L / min}$) as it combines a high degree of thermal efficiency with a low pressure drop compared to other flow rates. Still, thermal analysis for all media was performed for a number of temperatures (with a fixed volume $V = 200 \text{ L / min}$). More specifically for Syltherm 800, the inlet temperatures are $T_{in} = [350, 400, 450, 500, 550, 600, 650]$ (K) for the Molten Salt, $T_{in} = [550, 600, 650, 700, 750, 800, 850]$ (K), while for Liquid Sodium, $T_{in} = [400, 500, 600, 700, 800, 900]$ (K). In addition, this chapter also refers to the grid independence we performed to find the optimal number of computational grid cells required to smoothly converge the solution to the problem. Furthermore, in order to extract the curves of the incident angle factor K , we performed visual analysis for cases where the solar rays form with the vertical angles $\theta_T = [00, 100, 300, 500, 700]$. In each case, we rotate mirrors with a specific angle (ψ) so as to simulate the Solar noon. Finally, for reasons of completeness, we examined the dynamic nature and behavior of our collector daily, monthly and annually. For this purpose, we developed a computational model based on the finite difference method and includes our collector in connection with a storage container. The volume of the container as well as the fluid inlet temperature were the design parameters of the particular problem. More specifically, the following container volumes This modeling was done in Matlab software.

Chapter 5 presents all the results of the thermodynamic and optical analysis of the static collector model in the form of annotated tables and charts. The main results are: for the inlet temperature $T_{in} = 600 \text{ K}$, Liquid sodium exhibits the optimal thermal and exergy efficiency over the other tested media ($\eta_{th} = 54.8\%$, $\eta_{ex} = 29.74\%$), for the Syltherm 800 thermal oil ($\varphi = 0\%$), the Syltherm 800 ($\varphi = 6\%$) case for $T_{in} = 600 \text{ K}$ results in an increase of 0.25% of the η_{th} by 0.63% compared to the case of ($\varphi = 0\%$). Obviously more analysis is followed in this chapter.

Finally, **Chapter 6** presents the conclusions of this diploma thesis. There are also suggestions for issues about the Fresnel collector for future research.

Ερμηνεία συμβόλων

A	Παράμετρος υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας για την Αθήνα, W/m^2
A_a	Καθαρή επιφάνεια ηλιακού συλλέκτη, m^2
A_T	Εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια θερμικού δοχείου αποθήκευσης, m^2
B	Παράμετρος υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας για την Αθήνα, -
C	Λόγος συγκέντρωσης, -
c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα για σταθερή πίεση, $J/kg K$
D	Διάμετρος, m
D_m	Απόσταση μεταξύ πρωτευόντων κατόπτρων
DR	Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας, K
E	Ημερήσια ενέργεια, kWh
E_x	Εξέργεια, W
F	Μήκος εστίασης, m
f	Συντελεστής τριβής ροής, -
G_b	Άμεση ηλιακή ακτινοβολία, W/m^2
h	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, W/m^2K
h_{out}	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ καλύμματος και αέρα, W/m^2K
K	Παράγοντας γωνίας πρόσπτωσης, -
K_L	Διαμήκης συνιστώσα του παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης, -
K_{mean}	Μέσος ημερήσιος παράγοντας γωνίας πρόσπτωσης . -
K_T	Εγκάρσια συνιστώσα του παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης, -
k	Συντελεστής αγωγιμότητας, W/mK
L	Μήκος σωλήνα, m
m	Παροχή μάζας, kg/s
N_D	Διάρκεια ημέρας, h
N_{rf}	Αριθμός πρωτευόντων κατόπτρων, -
Nu	Αριθμός Nusselt , -
Pr	Αριθμός Prandtl, -
Q	Ροή θερμότητας, W
Re	Αριθμός Reynolds, -
T	Θερμοκρασία, K
T_{am}	Θερμοκρασία περιβάλλοντος, K

T_N	Θερμοκρασία στο τέλος της ημέρας, K
T_{st}	Θερμοκρασία δοχείου αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της ημέρας, K
T_{ref}	Θερμοκρασία αναφοράς, K
T_o	Αρχική θερμοκρασία ημέρας, K
t	Χρόνος, s
t_h	Ωρα, h
u	Ταχύτητα ροής, m/s
U_T	Συντελεστής θερμικών απωλειών δοχείου, W/m ² K
V	Παροχή όγκου, m ³ /s
V_T	Όγκος δοχείου αποθήκευσης, m ³
W	Συνολικό πλάτος, m
W_p	Έργο αντλίας, W
W_0	Πλάτος κατόπτρου, m
Z	Ημερήσια παραγόμενη εξέργεια, kWh
z	Παράμετρος βελτιστοποίησης δευτερεύοντος κατόπτρου

Ελληνικά σύμβολα

α	Συντελεστής απορρόφησης απορροφητήρα, -
β	Παράμετρος υπολογισμού θερμικής αγωγιμότητας νανορευστού
γ_s	Ηλιακό αζιμούθιο, °
δ	Ηλιακή γωνία απόκλισης, °
ΔP	Πτώση πίεσης, kPa
ε	Συντελεστής εκπομπής, -
η	Μέγεθος αξιολόγησης της θερμικής συμπεριφοράς του συλλέκτη
η_{ex}	Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, -
η_{th}	Θερμικός βαθμός απόδοσης, -
θ	Γωνία πρόσπτωσης, °
θ_L	Διαμήκης συνιστώσα της γωνίας πρόσπτωσης, °
θ_T	Εγκάρσια συνιστώσα της γωνίας πρόσπτωσης, °
θ_z	Γωνία ζενίθ, °
μ	Δυναμική συνεκτικότητα, Pa s
ρ	Πυκνότητα, kg/m ³
ρ_1	Ανακλαστικότητα πρωτεύοντων κατόπτρων, -

ρ_2	Ανακλαστικότητα δευτερεύοντος κατόπτρου, -
τ	Διαπερατότητα καλύμματος, -
φ	Γεωγραφικό πλάτος, $^{\circ}$
ω	Ηλιακή ωριαία γωνία, $^{\circ}$

Δείκτες

abs	Απορροφούμενη
am	Περιβάλλον
am,m	Μέση τιμή περιβάλλοντος
bf	Βασικό ρευστό
c	Κάλυμμα
ci	Εσωτερικό κάλυμμα
co	Εξωτερικό κάλυμμα
day	Ημερήσια
fm	Μέση ροής
hmax	Ώρα εμφάνισης μέγιστης θερμοκρασίας
in	Εσωτερική
loss	Θερμικές απώλειες
max	Μέγιστη τιμή
nf	Νανορευστό
np	Νανοςωματίδιο
opt	Οπτικός
out	Εξωτερική
r	Δέκτης
ref	Συνθήκες αναφοράς
ri	Εσωτερική, δέκτη
ro	Εξωτερική, δέκτη
s	Ηλιακή
stored	Αποθηκευμένη στο δοχείο
th	Θεωρητική
u	Ωφέλιμη
0	Κατάσταση αναφοράς

Αρκτικόλεξα

CPC	Compound Parabolic Concentrator
-----	---------------------------------

LFR Linear Fresnel Reflector

ORC Organic Rankine Cycle

PEC Performance Evaluation Criterion

PTC Parabolic Trough Collector

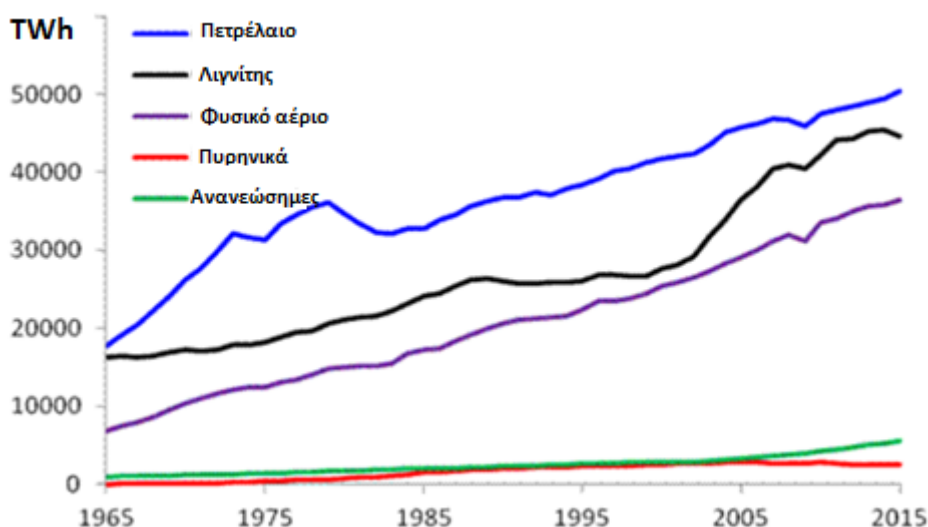
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακό ζήτημα

Αναμφισβήτητα όσο εξελίσσεται η ανθρωπότητα καθώς και το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων οι ανάγκες για ενέργεια έχουν φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα. Αυτό συμβαίνει διότι τομείς όπως οι μεταφορές, οι βιομηχανικές παραγωγές καθώς και οι ανάγκες για θέρμανση και κλιματισμό απαιτούν σημαντικά ποσά ενέργειας προκειμένου να καλυφθούν. Συνεπώς, αυτό έχει οδηγήσει στην ανάγκη εξεύρεσης νέων τρόπων παραγωγής ενέργειας πιο αποδοτικών αλλά και πιο φιλικών προς το περιβάλλον. Κύρια πηγή ενέργειας του πλανήτη μας, αποτελούν αναμφισβήτητα οι ορυκτοί του πόροι όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Βασικό πρόβλημα αυτών, κυρίως των δύο πρώτων, είναι το γεγονός ότι κατά την καύση τους απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) ένα αέριο το οποίο είναι ο βασικός υπεύθυνος για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και κατ' επέκταση για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Ακόμα, σημαντικό κομμάτι της ενεργειακής πίτας καλύπτει και η πυρηνική ενέργεια. Η συγκεκριμένη πηγή μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες με αρκετά αποδοτικό τρόπο και χωρίς να συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου γιατί προφανώς στηρίζεται στο φαινόμενο της σχάσης των πυρήνων φυσικού (U_{238}) ή εμπλουτισμένου ουρανίου (U_{235}). Το βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας, δεν είναι άλλο από τα ραδιενεργά απόβλητα που παράγει το κάθε εργοστάσιο. Τα συγκεκριμένα λόγω της τεράστιας ημιζωής του ουρανίου, για να διασπαστούν χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια. Συνεπώς, η σωστή τους διαχείριση είναι μείζονος σημασίας.

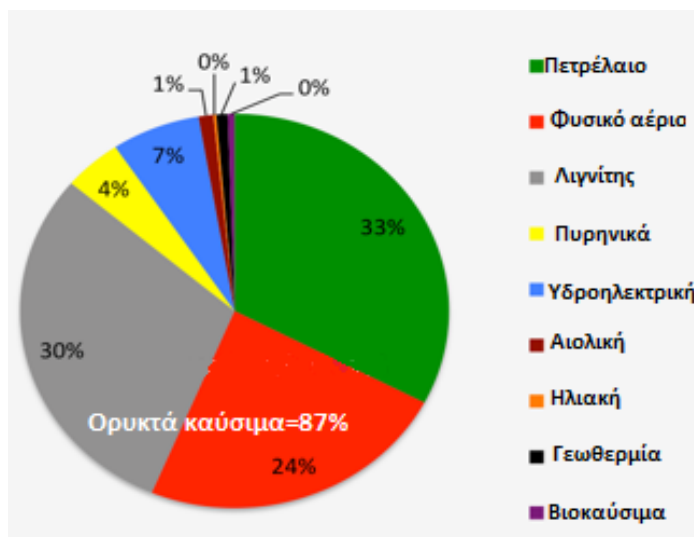
Τέλος, αρκετά μικρή αλλά με συνεχώς αυξανόμενη τάση είναι η συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, βασικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική και η γεωθερμία. Αξίζει να σημειωθεί ότι κομμάτι των ανανεώσιμων, θεωρούνται και τα βιοκαύσιμα, όπως αποξηραμένα φρούτα και πέλετ ξύλου διότι κατά τον κύκλο ζωής τους δέσμευσαν ποσότητες CO_2 τις οποίες απελευθερώνουν κατά την καύση τους, οπότε η συνεισφορά τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μηδενική.

Παρακάτω, απεικονίζεται η καμπύλη της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης, ανά ενεργειακή πηγή.



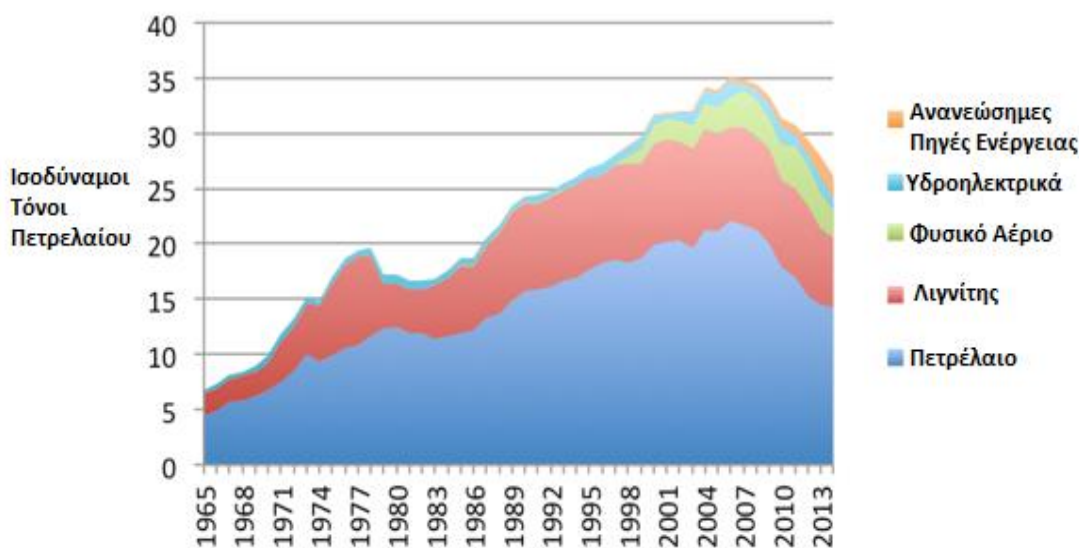
Εικόνα 1.1 : Ενεργειακή κατανάλωση παγκοσμίως [TWh/έτος][1.1]

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα που εκφράζει την ποσοστιαία σχέση των ενεργειακών πηγών κατά το έτος 2013, η πιο διαδεδομένη πηγή ενέργειας στον πλανήτη μας είναι το πετρέλαιο και μετά ακολουθεί, με παραπλήσιο ποσοστό ο λιγνίτης και το φυσικό αέριο.



Εικόνα 1.2 : Κατανομή ενεργειακών πηγών το 2013 [1.2]

Στην Ελλάδα, η ενεργειακή αξιοποίηση των διαθέσιμων πηγών ακολουθεί την παγκόσμια τάση με κάποιες εξαιρέσεις. Αρχικά, παρατηρούμε την απουσία των πυρηνικών καθώς η Ελλάδα δεν διαθέτει αντίστοιχα εργοστάσια, επίσης παρατηρούμε ότι τα υδροηλεκτρικά έχουν ένα σημαντικό κομμάτι σε σχέση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι η χώρα μας διαθέτει αρκετές πηγές λιγνίτη, όμως το ίδιο δεν ισχύει για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο καθώς τις πηγές αυτές τις εισάγει από το εξωτερικό.



Εικόνα 1.3 : Ενεργειακή Κατανομή Ελλάδας ανά έτος εκφρασμένη σε ισοδύναμους τόνους πετρελαίου [1.3]

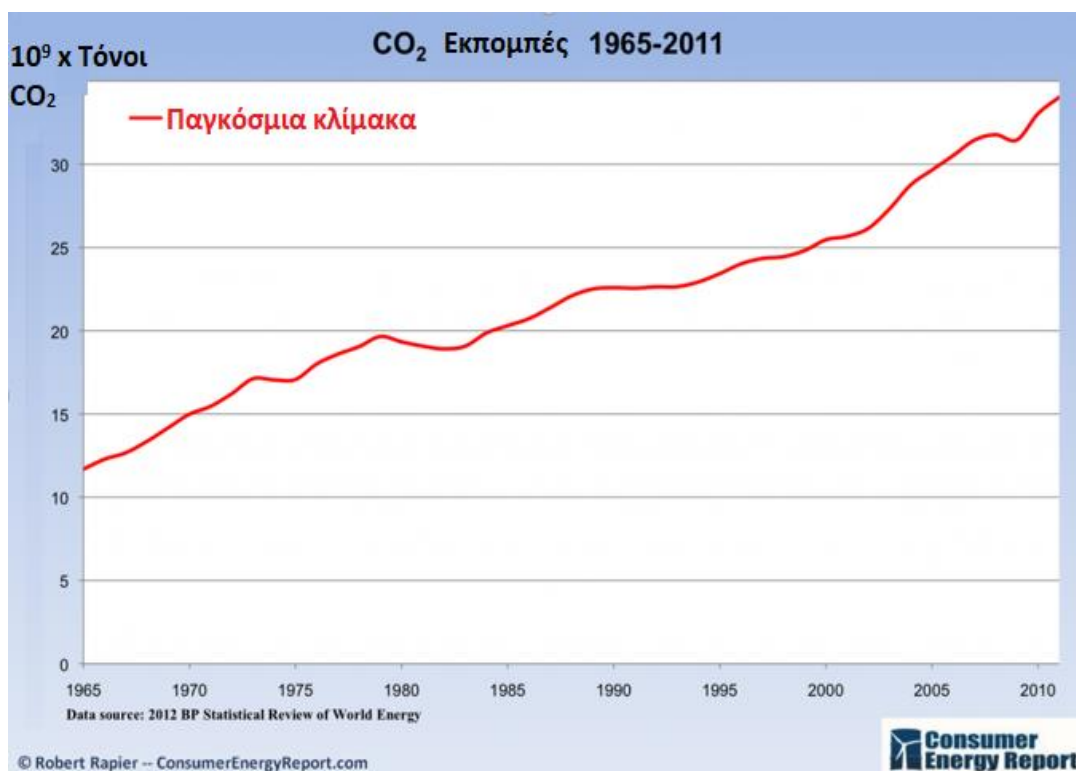
1.2 Κλιματική Αλλαγή

Όπως προαναφέραμε στην ενότητα 1.1, το μεγαλύτερο κομμάτι της ενεργειακής ζήτησης καλύπτεται από τους ορυκτούς πόρους του πλανήτη. Η καύση πετρελαίου και λιγνίτη απελευθερώνει σημαντικό ποσοστό CO₂. Όπως θα αναλύσουμε αυτό αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την κλιματική αλλαγή. Η κλιματική αλλαγή είναι ένα θέμα ιδιαίτερα ευαίσθητο τις τελευταίες δεκαετίες καθώς οι επιπτώσεις της αρχίζουν να είναι πιο αισθητές με την πάροδο του χρόνου. Με αυτό τον όρο εννοούμε τις μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών καθώς και του κλίματος μακροπρόθεσμα. Μερικά από τα αρνητικά αποτελέσματα της αποτελούν, η αύξηση της στάθμης των ωκεανών καθώς οι πάγοι στους πόλους λιώνουν λόγω αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας και η ξήρανση του κλίματος. Κύριο αίτιο αυτής της αυξητικής τάσης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Φαινόμενο Θερμοκηπίου

Η τεράστια παραγωγή ρύπων CO₂ έχει οδηγήσει στην αύξηση της περιεκτικότητας του στα ατμοσφαιρικά στρώματα (βλ.εικόνα 1.4). Έτσι, αυτή η συσσώρευση ατόμων CO₂ εμποδίζει ένα κομμάτι από την θερμότητα που δέχεται η Γή από τον ήλιο μέσω ακτινοβολίας, να ανακλαστεί προς το διάστημα, με αποτέλεσμα να επανεκπέμπεται πίσω στη Γή. Έτσι, παρατηρείται τα τελευταία χρόνια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γής. Συγκεκριμένα, για το χρονικό διάστημα (1905-2005) έχει καταγραφεί αύξηση από 0.6 έως 0.9 °C στην μέση θερμοκρασία επιφανείας της Γής και ο ρυθμός αύξησης αυτής της θερμοκρασίας μεταβάλλεται με διπλάσια ταχύτητα τα τελευταία 50 χρόνια (βλ.εικόνα 1.5) [1.5].

Παρακάτω, φαίνεται η ανοδική τάση των εκπομπών του CO₂ σε παγκόσμιο επίπεδο με βάση πειραματικά δεδομένα κατά το διάστημα 1965-2011.



Εικόνα 1.4 : Παγκόσμιες Εκπομπές CO₂ [10⁹ *Τόνοι CO₂/έτος][1.4]

Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται η διακύμανση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας στο πέρασμα των δεκαετιών.



Εικόνα 1.5 : Διακύμανση των μεταβολών της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας [1.5]

1.3 Ανανεώσιμες Πηγές

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να έχουν σημαντική συμβολή στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου καθώς είναι οι μόνες πηγές ενέργειας που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Πέρα όμως από τα στενά πλαίσια αντιμετώπισης του φαινομένου του θερμοκηπίου τα χαρακτηριστικά τους τις καθιστούν συστατικό στοιχείο μιας νέας αναπτυξιακής πολιτικής και μοναδική μακροπρόθεσμη απάντηση στην πορεία προς τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Μορφές Α.Π.Ε:

- **Γεωθερμική ενέργεια.** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών, όσον αφορά τη θέρμανση, και το 20%, όσον αφορά τον ηλεκτρισμό, με γεωθερμική ενέργεια. Η επιστημονική κοινότητα ταξινομεί συνήθως τη γεωθερμία στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Το υπόγειο νερό ή ο ατμός που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για την κάλυψη θερμικών αναγκών (άμεσες χρήσεις γεωθερμίας), με την κατάλληλη διαχείριση, δεν θα ελαττωθούν, επειδή η κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων θα συνεχίσει να επανατροφοδοτεί τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες και

δε χρειάζονται μεγάλοι γεωλογικοί χρόνοι (περίοδοι) για αναγέννηση. Αρκεί να μη γίνεται υπεράντληση. Όμως, επειδή οι δεξαμενές γεωθερμίας είναι τεράστιες σε μέγεθος συγκριτικά με τις ανάγκες του ανθρώπου, η γεωθερμική ενέργεια είναι πρακτικά ανανεώσιμη.[1.6]

- **Αιολική.** Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.[1.7]
- **Βιομάζα.** Με τον όρο **βιομάζα** αποκαλείται οποιοδήποτε υλικό που παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς (όπως είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κ.λπ.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Το καύσιμο βιομάζας είναι γνωστό στην Ελλάδα κι ως πέλετ.

Η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες προέρχεται από τον Ήλιο. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Οι ζωικοί οργανισμοί αυτή την ενέργεια την προσλαμβάνουν με την τροφή τους και αποθηκεύουν ένα μέρος της. Αυτή την ενέργεια αποδίδει τελικά η βιομάζα, μετά την επεξεργασία και τη χρήση της. Είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί στην πραγματικότητα είναι αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση. [1.8]

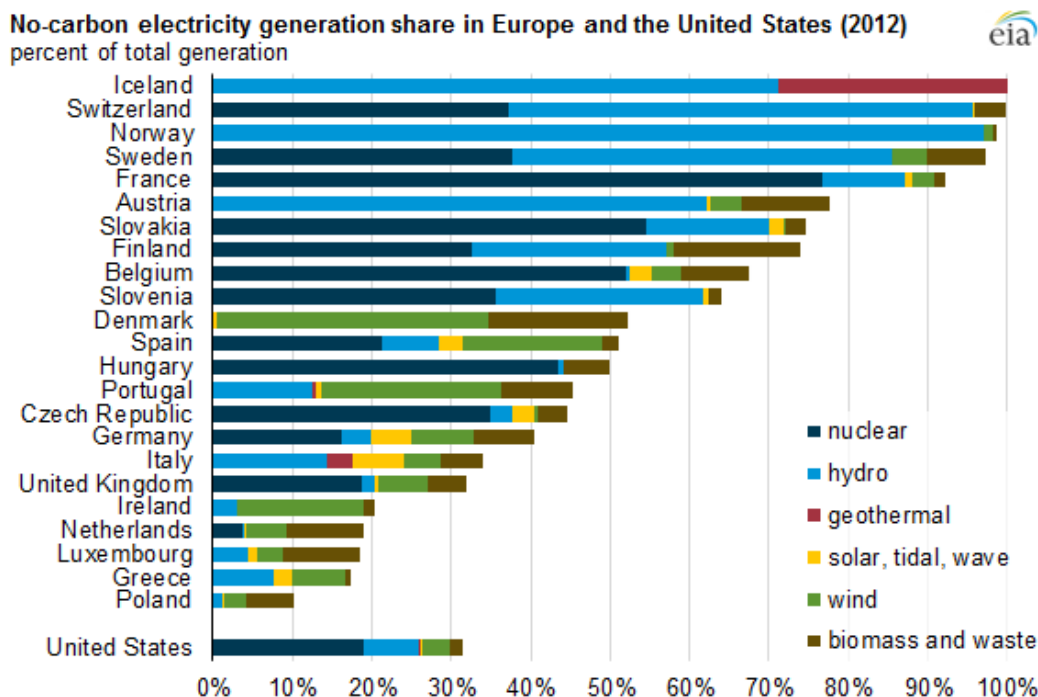
- Η **Υδροηλεκτρική Ενέργεια** είναι η ενέργεια η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού των ποταμών και της μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια στροβίλων και ηλεκτρογεννητριών.

Η ενέργεια αυτή διαχέεται στη φύση από δίνες και ρεύματα, καθώς το νερό ρέει κατηφορικά σε ρυάκια, χείμαρρους και ποτάμια μέχρι να φτάσει στη θάλασσα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του αποθηκευμένου νερού και όσο ψηλότερα βρίσκεται, τόσο περισσότερη είναι η ενέργεια που περιέχει.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, που στηρίζεται στην εκμετάλλευση των ποταμών και των τεχνητών ή φυσικών φραγμάτων. [1.9]

- Η **Ηλιακή ενέργεια** είναι μία ανανεώσιμη πηγή με τεράστιο δυναμικό το οποίο μπορούμε να εκμεταλλευτούμε με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα θέρμανση και ψύξη χώρων μέσω ψυκτών προσρόφησης, για τη θέρμανση του νερού για οικιακή και εργοστασιακή χρήση μέσω των θερμικών συλλεκτών. Επίσης, για την παραγωγή Ηλεκτρισμού μέσω των φωτοβολταϊκών πάνελ αλλά και των συγκεντρωτικών συλλεκτών υψηλών θερμοκρασιών για παραγωγή ατμού.

Παρακάτω, βλέπουμε την ποσοστιαία κατανομή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη και στην Αμερική. Παρατηρούμε, ότι τα υδροηλεκτρικά καθώς και τα πυρηνικά εργοστάσια είναι στην πρώτη θέση της κατανομής με την αιολική να έπεται κυρίως στις Ευρωπαϊκές χώρες. Όσον αφορά την Ελλάδα, στο πεδίο των ΑΠΕ κυριαρχεί η υδροηλεκτρική με μικρή διαφορά από την αιολική.



Εικόνα 1.6 Κατανομή Α.Π.Ε. στην Αμερική και στην Ευρώπη [1.10]

1.4 Εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας

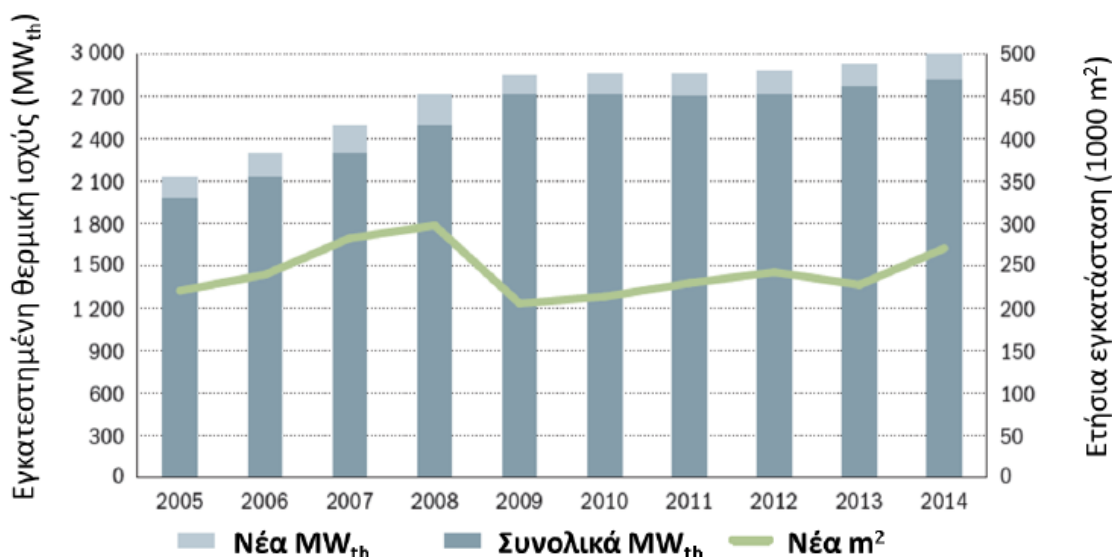
Μπορούμε να χωρίσουμε τις εφαρμογές ηλιακής ενέργειας σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών:

- **Στα παθητικά ηλιακά συστήματα.** Εκμεταλλεύονται την θερμότητα που εκπέμπεται και επιτυγχάνουν την θέρμανση και την ψύξη, μέσω συστήματος προσρόφησης, π.χ. βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων.
- **Στα ενεργητικά ηλιακά συστήματα.** Όπως και τα παθητικά εκμεταλλεύονται τη θερμότητα.

Για οικιακή χρήση: θέρμανση ζεστού νερού χρήσης, ηλιακή ψύξη (απορρόφηση-προσρόφηση), παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά μικρής ισχύος.

Για βιομηχανικές εφαρμογές : Προθέρμανση νερού ή αλλού οργανικού μέσου (ORC) για εγκαταστάσεις Ατμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, χρήση σε εφαρμογές ξήρανσης, συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες (παραβολικοί, Fresnel) υψηλών θερμοκρασιών για παραγωγή ατμού.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την διακύμανση της συνολικής εγκατεστημένης συλλεκτικής επιφάνειας στην Ελλάδα, καθώς και την ετήσια αύξηση της. Παρατηρούμαι ότι μέχρι το έτος 2008 η τάση είναι ανοδική. Αυτό συμβαίνει, διότι από το 2008 και μετά κυριάρχησε η οικονομική κρίση, οπότε περιορίστηκαν αρκετά οι νέες εγκαταστάσεις.



Εικόνα 1.7 Εγκατεστημένη θερμική ισχύς της Ελλάδας [1.11]

Βιβλιογραφία 1^{ου} Κεφαλαίου

- [1.1] en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption
- [1.2] ourfiniteworld.com/2015/07/08/what-greece-cyprus-and-puerto-rico-have-in-common/
- [1.3] euanmearns.com/global-energy-trends-bp-statistical-review-2014/
- [1.4] www.energytrendsinsider.com/2012/07/02/global-carbon-dioxide-emissions-facts-and-figures/
- [1.5] <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/page2.php>
- [1.6] el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας
- [1.7] el.wikipedia.org/wiki/Αιολική_ενέργεια
- [1.8] el.wikipedia.org/wiki/Βιομάζα
- [1.9] users.sch.gr/kpara/ape2009_10/ydrauliki.html
- [1.10] Renewables 2016, Global Status Report, REN21
- [1.11] Evangelos Bellos, Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτίρια, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2016

Κεφάλαιο 2: Ηλιακή ενέργεια και τύποι ηλιακών συλλεκτών

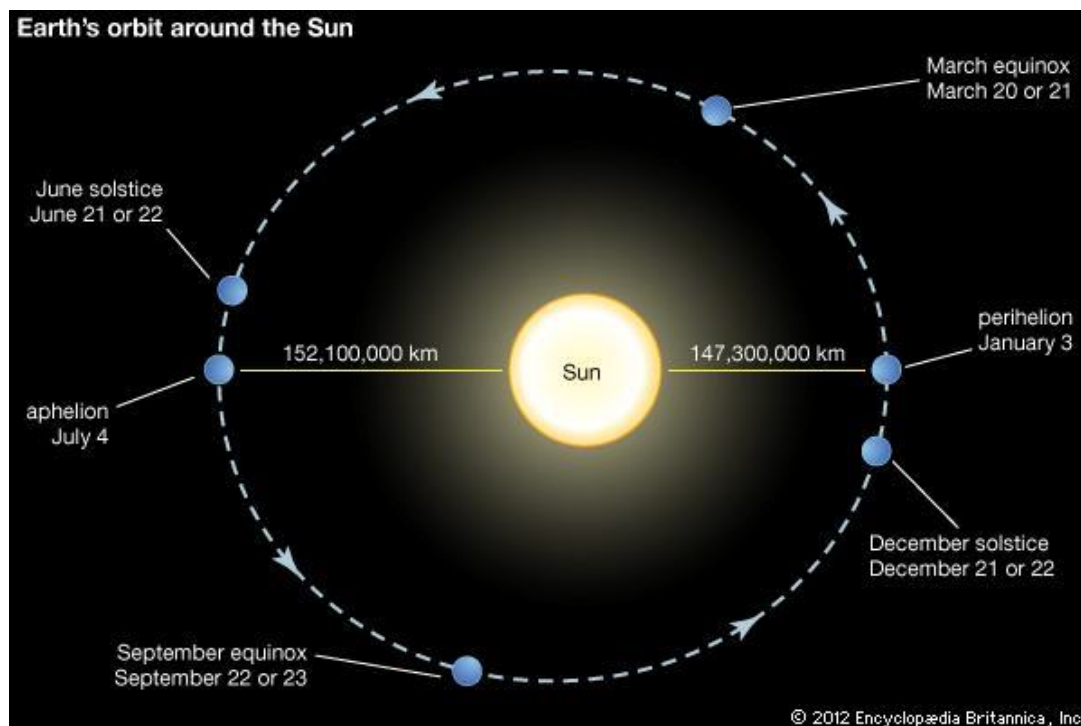
2.1 Φύση του ήλιου

Ο Ήλιος είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και το λαμπρότερο σώμα του ουρανού. Είναι σχεδόν μια τέλεια σφαίρα με διάμετρο 1.4 εκατομμύρια χιλιόμετρα (109 φορές περισσότερο από τη Γη), και η μάζα του (2×10^{30} kg) αποτελεί το 99.86% της μάζας του ηλιακού συστήματος. Η φωτεινότητά του είναι τέτοια, ώστε κατά την διάρκεια της ημέρας να μην επιτρέπει, λόγω της έντονης διάχυσης του φωτός, σε άλλα ουράνια σώματα να εμφανίζονται (με εξαίρεση τη Σελήνη και σπανιότερα την Αφροδίτη). Ο Ήλιος είναι το κοντινότερο στη Γη άστρο, σε απόσταση 149,6 εκατομμυρίων χιλιομέτρων. [2.1]

Η τροχιά της γης περί τον ήλιο είναι τέτοια ώστε η απόσταση μεταξύ των να μεταβάλλεται κατά +/- 1.7% περί τη μέση απόσταση Γης ήλιου.

2.1.1 Ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας

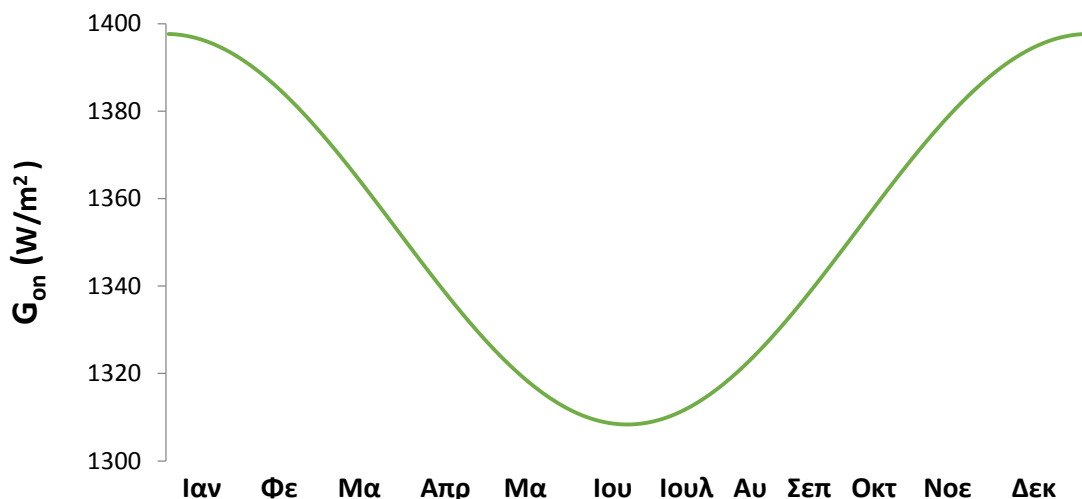
Ηλιακή σταθερά $G_{sc}=1353 \text{ W/m}^2$: είναι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφάνειας κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης ακτινοβολίας όταν η απόσταση γης-ήλιου λαμβάνει τη μέση τιμή της.



Εικόνα 2.1 Φάσεις της γήινης τροχιάς περί τον Ήλιο [2.2]

Επειδή η απόσταση Γης ήλιου είναι ελλειπτική, συνεπώς δεν είναι σταθερή, η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας περιγράφεται από τη σχέση:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left[1 - 0.033 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{n}{365} \right) \right], \quad (2.1)$$

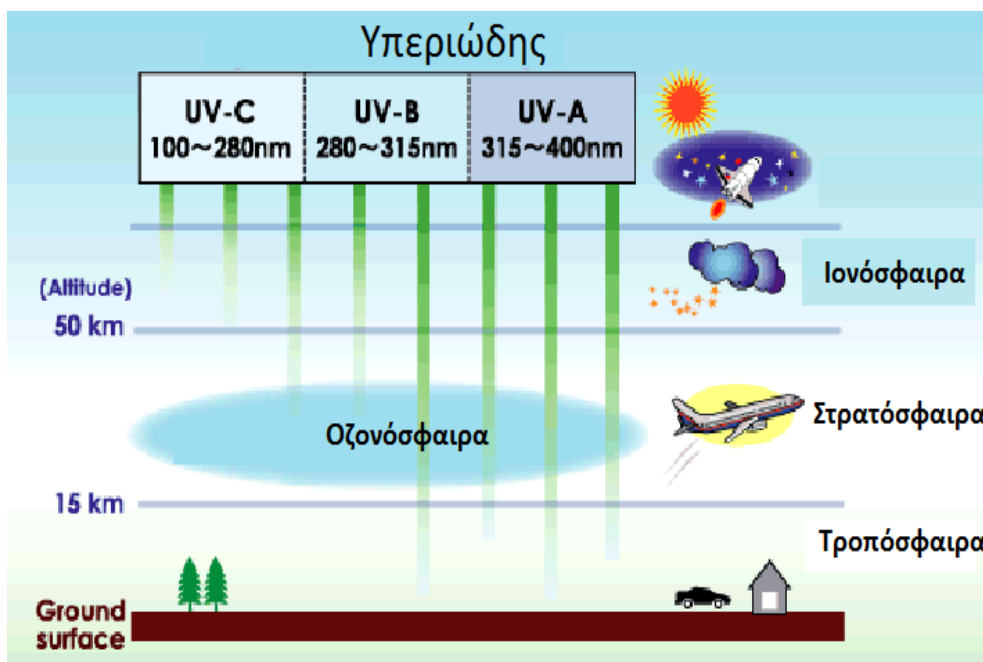


Εικόνα 2.2 Ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε κάθετο επίπεδο

2.1.2 Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 , έχουμε τις εξής φασματικές περιοχές ακτινοβολίας :

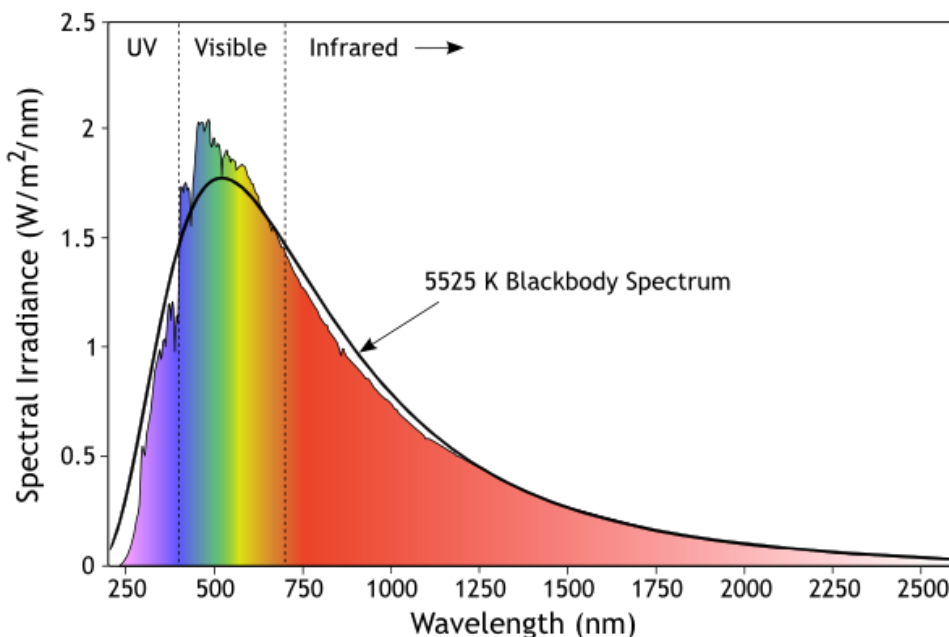
- Υπεριώδης για μήκη κύματος $\lambda < 0.38 \mu\text{m}$ με μέση ενέργεια 95 W/m^2 , από την οποία τα πιο ισχυρά τμήματα απορροφώνται από την Ιονόσφαιρα και τα υπόλοιπα UV-A,UV-B από την οζονόσφαιρα. Η έκθεση των ανθρώπων σε αυτή προκαλεί ποικίλα προβλήματα στην υγεία , με τα πιο απλά να είναι γήρανση των δερματικών κυττάρων και τα πιο επιβλαβή, καρκίνος του δέρματος και μελανώματα.



Εικόνα 2.3 Ατμοσφαιρικά στρώματα Γής ως «φίλτρα» Υπεριώδους Ακτινοβολίας [2.3]

- Ορατή για $0.38 \mu\text{m} < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ και ενέργεια 640 W/m^2 .
- Υπέρυθρος για $\lambda > 0.78 \mu\text{m}$ και ενέργεια 618 W/m^2 . Η απορρόφηση της συμβαίνει από τα στρώματα του CO_2 και από υδρατμούς στην ατμόσφαιρα.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την φασματική κατανομή, του ηλιακού φωτός. Παρατηρούμε, ότι η καμπύλη αυτή τείνει προς την καμπύλη φασματικής απόκρισης του μέλανος σώματος στους 5525 K .



Εικόνα 2.4 Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας [2.4]

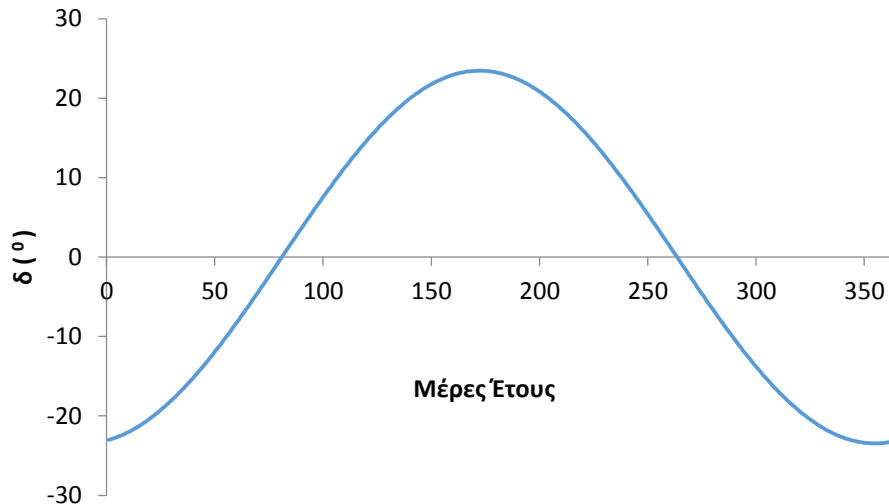
2.2 Χαρακτηριστικές γωνίες

Είναι προφανές ότι ο προσδιορισμός της θέσης του Ήλιου ως προς την Γή είναι μεγάλης σημασίας, προκειμένου να υπολογίσουμε τις ακτινοβολίες που μας ενδιαφέρουν, τις οποίες θα δούμε παρακάτω. Για το λόγο αυτό, έχουμε ορίσει κάποιες σημαντικές γωνίες (όλες σε $^\circ$) που μας δίνουν μια καλή εποπτεία αυτού.

- **Γεωγραφικό πλάτος, ϕ :** Σε συνδυασμό με το γεωγραφικό μήκος μας δίνει τις ακριβείς συντεταγμένες ενός μέρους. Προσδιορίζει την γωνιακή απόσταση των διάφορων τόπων από τον Ισημερινό, ο οποίος έχει γεωγραφικό πλάτος ίσο με 0. Οι περιοχές του Βόρειου ημισφαιρίου έχουν $\phi > 0$ ενώ του Νότιου $\phi < 0$. Για παράδειγμα, η Αθήνα έχει $\phi = 37.97^\circ$.
- **Ηλιακή απόκλιση, δ** είναι η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού, όπου $n = \text{μέρα του έτους}$, [2.15]

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left[\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right] \quad (2.1)$$

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω τύπο, αυτή η γωνία εξαρτάται μονό από την μέρα του έτους και είναι ανεξάρτητο της ώρας. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την μεταβολή της ηλιακής απόκλισης δ , ανά ημέρα του έτους.



Εικόνα 2.5. Ηλιακή Απόκλιση

- **Ωριαία γωνία, ω** είναι ένα μέγεθος που ουσιαστικά μετατρέπει τον ηλιακό χρόνο σε γωνία. Συγκεκριμένα είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό $15^{\circ}/h$

$$\omega = 0.25 \cdot [\text{λεπτά από ηλιακό μεσημέρι}] \quad (2.2)$$

- **Ωριαία γωνία δύσης, ω_s και διάρκεια ημέρας N [2.15] :**

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta} = -\tan \phi \cdot \tan \delta \quad (2.3)$$

$$N = \frac{2}{15} \cdot \text{arc}[\cos(-\tan \phi \cdot \tan \delta)] \quad (2.4)$$

- **Γωνία Ζενίθ, θ_z** είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου [2.15].

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega \quad (2.5)$$

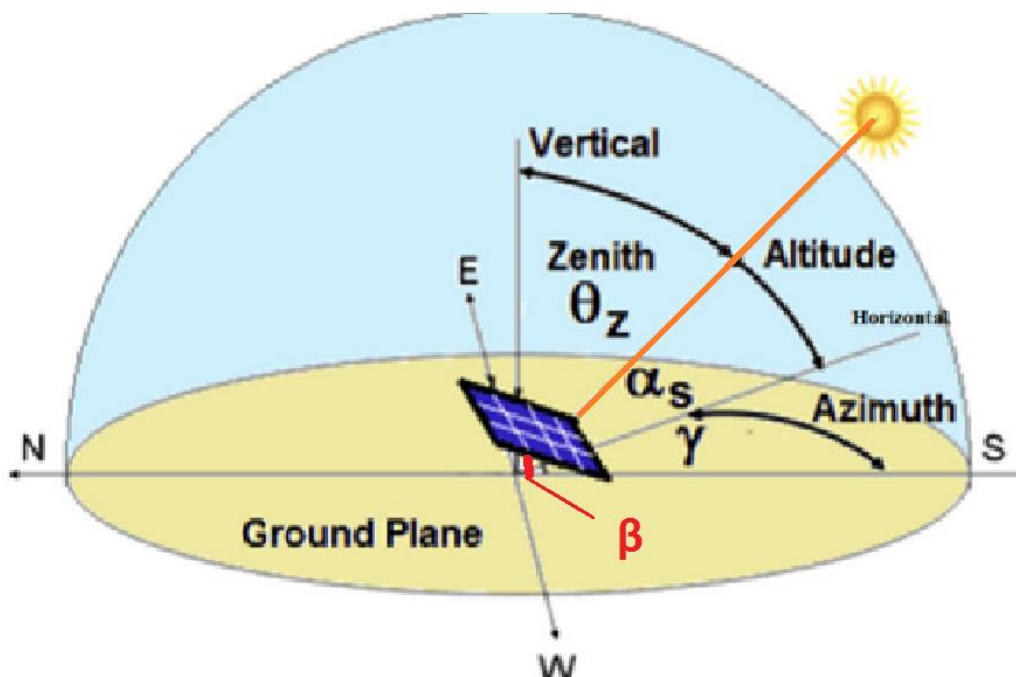
- **Ηλιακό ύψος, α_s** είναι η γωνία που σχηματίζει η ευθεία όρασης του ήλιου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.
- **Κλίση επιπέδου, β** είναι η γωνία που σχηματίζει ένα κεκλιμένο επίπεδο με το οριζόντιο επίπεδο.

- **Αζιμούθιο επιφανείας, γ** Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Με $\gamma=0^\circ$ στο Νότο, $\gamma=90^\circ$ στη Δύση, $\gamma=180^\circ$ στο Βορρά, $\gamma=-90^\circ$ στην Ανατολή.
- **Αζιμούθιο ηλίου, γ_s** είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\sin \theta_z} \quad (2.6)$$

- **Γωνία Πρόσπτωσης, θ** της άμεσου ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια ορίζουμε [2.15]:

$$\cos \theta = \sin \delta * \sin \varphi * \cos \beta - \sin \delta * \cos \varphi * \sin \beta * \cos \gamma + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \beta * \cos \omega + \cos \delta * \sin \varphi * \sin \beta * \cos \gamma * \cos \omega + \cos \delta * \sin \beta * \sin \gamma * \sin \omega \quad (2.7)$$



Εικόνα 2.6 Χαρακτηριστικές Γωνίες [2.5]

2.3 Ηλιακή ακτινοβολία

2.3.1 Ολική ακτινοβολία

Σε αυτή την ενότητα θα δώσουμε τις μαθηματικές σχέσεις με τις οποίες υπολογίζουμε την ακτινοβολία του ήλιου εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντιο επίπεδο. Συγκεκριμένα, θα δούμε τις σχέσεις που δίνουν την στιγμιαία ακτινοβολία, δηλαδή την ισχύ της ανά μονάδα επιφανείας, την ωριαία αλλά και την ημερήσια ενέργεια που προκύπτει από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο. Επίσης, θα δώσουμε τον ορισμό του συντελεστή αιθριότητας προκειμένου να υπολογίσουμε τι μέγεθος

ακτινοβολίας φτάνει εν τέλει στην επιφάνεια της Γης. Τέλος, αναφέρουμε και τον βασικό τρόπο μέτρησης της ολικής ακτινοβολίας αλλά και των συνιστωσών της, άμεση και διάχυτη.

Ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια [2.15]:

Στιγμιαία G_o [W/m^2] :

$$G_o = G_{on} \cdot [\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega] \quad (2.8)$$

Αν ολοκληρώσουμε την παραπάνω σχέση για το ωριαίο διάστημα μεταξύ ω_1 και ω_2 με $\omega_1 < \omega_2$ παίρνουμε την ωριαία ενέργεια:

Ωριαία I_o [J/m^2] :

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{on} \cdot \left[\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2 \cdot \pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{360} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta \right] \quad (2.9)$$

Αν θέσουμε σαν ωριαίες γωνίες $\omega_1 = -\omega_s$ και $\omega_2 = \omega_s$ προκύπτει η ημερήσια ενέργεια

Μηνιαία H_o [J/m^2] :

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} G_{on} \cdot \left[\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_s}{360} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta \right] \quad (2.10)$$

Εξασθένιση ακτινοβολίας λόγω ατμόσφαιρας:

Προφανώς, η ατμόσφαιρα μειώνει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της απορροφητικότητας των στρωμάτων της. Συγκεκριμένα κύριοι παράγοντες εξασθένισης είναι ο διασκορπισμός των ακτινών λόγω των μορίων υδρατμού και σκόνης στην ατμόσφαιρα αλλά και λόγω της απορρόφησης από τα στρώματα O_3, H_2O , και CO_2 . Περισσότερες λεπτομέρειες για την απορροφητικότητα των στρωμάτων αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 2.1.2.

Δείκτης αιθριότητας k

Αρχικά θα πρέπει να ορίσουμε έναν αναγκαίο δείκτη για το σκοπό αυτό, τον δείκτη αιθριότητας K_T . Αυτός εκφράζει, το πόσο διαυγής είναι μια ημέρα.

Έχει τρεις διαφορετικές εκφράσεις, την ωριαία, την ημερήσια και την μηνιαία [2.15].

Συγκεκριμένα:

$$\text{Ωριαίος δείκτης αιθριότητας: } k_T = \frac{I}{I_o} \quad (2.11)$$

$$\text{Ημερήσιος δείκτης αιθριότητας: } K_T = \frac{H}{H_o} \quad (2.12)$$

$$\text{Μηνιαίος δείκτης αιθριότητας } \bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (2.13)$$

Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας :

Η πλέον διαδεδομένη συσκευή για αυτή την εφαρμογή είναι το Πυρανόμετρο:

Το πυρανόμετρο είναι ένα όργανο σχεδιασμένο για τη μέτρηση της ακτινοβολίας σε W/m^2 που προκύπτει από τις ακτινοβολίες που προσπίπτουν σε μια επίπεδη επιφάνεια από το άνω ημισφαίριο αυτής, σε ένα εύρος μήκους κύματος τουλάχιστον 300 έως 2800 (nm). Συνεπώς, μετρά την συνολική οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία, η οποία αποτελείται από τη διάχυτη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο από τον ουράνιο θόλο και την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Αν σκιάζεται το πυρανόμετρο από το άμεσο ηλιακό φως τότε μετρά τη διάχυτη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο από τον ουράνιο θόλο. Αν θέλουμε να μετρήσουμε την άμεση κάθετη στις ακτίνες του ήλιου χρησιμοποιούμε ένα άλλο όργανο, το πυρηλιόμετρο συνεχώς το οποίο είναι συνεχώς στραμμένο προς το κέντρο του ήλιου με αυτόματο ηλιακό ιχνηλάτη το οποίο συνήθως είναι διάταξη φωτοκύτταρων ή στρεφόμενο με σύστημα αυτομάτου ελέγχου το οποίο έχει ως είσοδο την θέση του ήλιου σε κάθε χρονική στιγμή της ημέρας υπολογισμένη από αντίστοιχα λογισμικά. [2.6] Προφανώς, ισχύει ότι η ολική είναι το άθροισμα της άμεσης και της έμμεσης:



Εικόνα 2.7 Πυρανόμετρο [2.7]

2.3.2 Άμεση ακτινοβολία

Ως άμεση ακτινοβολία ορίζουμε το κομμάτι της ολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γής, το οποίο έρχεται κατευθείαν από τον ήλιο χωρίς να διαθλαστεί ή να απορροφηθεί από τα σύννεφα. Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, η πλειονότητα των συγκεντρωτικών συλλεκτών αξιοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Συνεπώς, στην περίπτωση που εξετάζει αυτή η διπλωματική, δηλαδή συγκεντρωτικός επιμήκης συλλέκτης Fresnel με επίπεδα κάτοπτρα, ο υπολογισμός της άμεσης ακτινοβολία είναι η μόνη που μας απασχολεί, καθώς είναι η μόνη αξιοποιήσιμη. Όποτε, θα δοθεί περισσότερο βαρύτητα στον υπολογισμό της, σε σχέση με την διάχυτη.

Σχέση άμεσης ακτινοβολίας σε οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια [2.15]:

G_b = άμεσος ακτινοβολία που δέχεται το οριζόντιο

G_{bT} = άμεσος ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο

G_{bn} = άμεσος ακτινοβολία που δέχεται το κάθετο στις ηλιακές ακτίνες



Εικόνα 2.7 Άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας και κεκλιμένης επιφάνειας.

$$G_b = G_{bn} \cdot \cos \theta_z \tag{2.14}$$

$$G_{bT} = G_{bn} \cdot \cos \theta \tag{2.15}$$

Για εποπτικούς λόγους, ορίζουμε, τον λόγο R_b :

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \tag{2.16}$$

Εμπειρικό μοντέλο άμεσης ακτινοβολίας για την περιοχή της Αθήνας:

Συνεπώς, για να προσδιορίσουμε τη πραγματικά άμεση ακτινοβολία έχουμε στο επίπεδο του εδάφους, θα πρέπει να στηριχτούμε σε στατιστικές μετρήσεις της ακτινοβολίας για την περιοχή που μας ενδιαφέρει.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήσαμε την εμπειρική σχέση για την Αθήνα [2.20], η οποία μας δίνει την τιμή της άμεσης ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες.

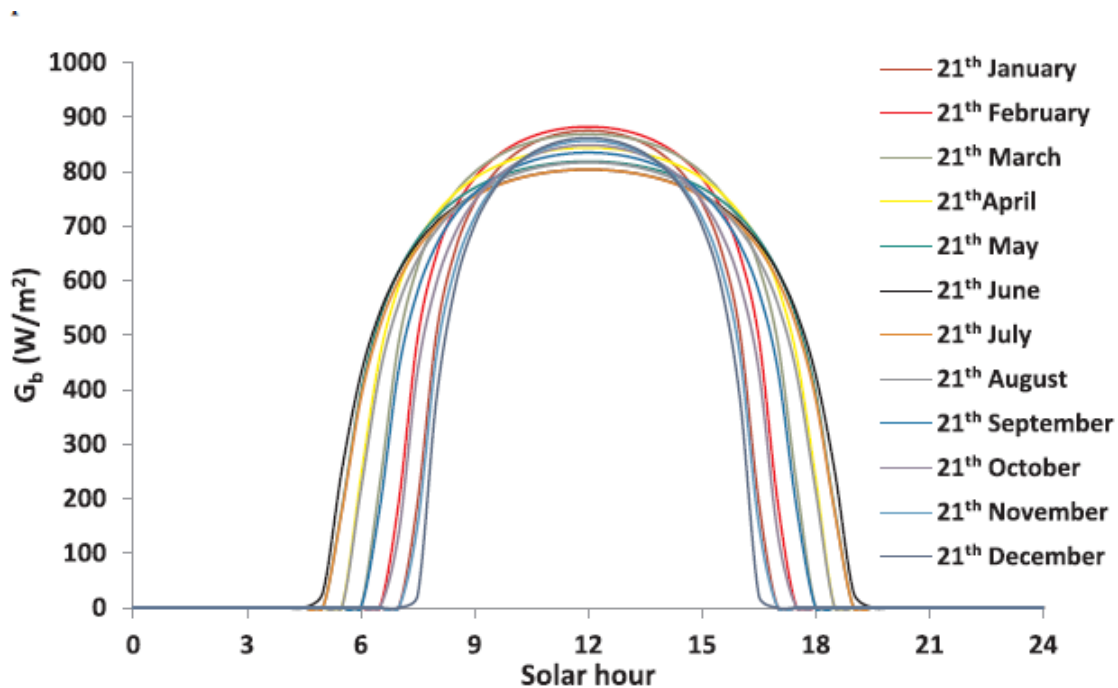
$$G_b = A \cdot \exp \left[- \frac{B}{\cos(\theta_z)} \right] \tag{2.17}$$

Όπου:

Μήνας	A (W/m ²)	B (-)	N _D (h)	T _{am,m} (K)	DR (K)	Μέρες ηλιοφάνειας (-)
Ιανουάριος	1107.40	0.1243	9.78	285.44	7.67	12
Φεβρουάριος	1091.82	0.1393	10.81	286.50	8.21	10
Μάρτιος	1064.08	0.1600	12.00	289.82	9.17	15
Απρίλιος	1033.22	0.1817	13.23	294.74	10.36	18
Μάιος	1008.56	0.1985	14.22	299.89	11.45	19
Ιούνιος	995.55	0.2074	14.64	304.05	12.17	21
Ιούλιος	997.79	0.2062	14.26	305.85	12.29	28
Αύγουστος	1015.14	0.1951	13.25	304.92	11.78	28
Σεπτέμβριος	1044.22	0.1761	11.98	301.41	10.77	19
Οκτώβριος	1077.09	0.1542	10.75	296.48	9.57	17
Νοέμβριος	1106.10	0.1339	9.74	291.17	8.45	16
Δεκέμβριος	1116.91	0.1241	9.36	287.21	7.77	15

Πίνακας 2.1 Σταθερές A,B της σχέσης 2.17 για τη μέση μέρα κάθε μήνα [2.20].

Συνεπώς, η κατανομή της G_b κατά τη διάρκεια της ημέρας για την μέση ημέρα κάθε μήνα θα είναι όπως παρακάτω:



Εικόνα 2.8 Κατανομή της G_b κατά τη διάρκεια της ημέρας για την μέση ημέρα κάθε μήνα [2.20].

2.3.3. Διάχυτη ακτινοβολία

Ως διάχυτη ακτινοβολία ορίζουμε την ακτινοβολία η οποία δεν έρχεται άμεσα από τον ήλιο αλλά προέρχεται από την διάθλαση και την μερική απορρόφηση των ακτινών από τα σύννεφα.

Κάθε συλλέκτης αξιοποιεί διαφορετικά την διάχυτη ακτινοβολία. Για παράδειγμα στους επίπεδους συλλέκτες συνεισφέρουν μερικώς ως συνιστώσα της ολικής ακτινοβολίας. Σε άλλους συλλέκτες όπως είναι οι συγκεντρωτικοί έχουν μηδαμινό ρόλο στην απόδοση. Ο τρόπος που την υπολογίζουμε είναι μέσω της ολικής ακτινοβολίας. Συνήθως οι μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας αντιστοιχούν σε τιμές ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια.

Ανάλυση ολικής ακτινοβολίας σε άμεση και διάχυτη:

Όπου:

I_0 , H_0 έχουν ορισθεί με τις σχέσεις 2.9 , 2.10

I = ωριαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

H = ημερήσια ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση έχουν αναπτυχθεί πολλά εμπειρικά μοντέλα

Ένα ιδιαίτερα πρακτικό μοντέλο είναι του Collars-Pereira and Rabl (1979) ανέπτυξαν την παρακάτω συσχέτιση [2.15]:

Για $K_T \leq 0.17$:

$$\frac{H}{H_d} = 0.99 , \quad (2.18)$$

Για $0.17 < K_T \leq 0.75$:

$$\frac{H}{H_d} = 1.188 - 2.272 \cdot K_T + 9.473 \cdot K_T^2 - 21.865 \cdot K_T^3 + 14.648 \cdot K_T^4, \quad (2.19)$$

Για $0.75 < K_T \leq 0.8$:

$$\frac{H}{H_d} = 0.54 \cdot K_T + 0.632, \quad (2.20)$$

Για $K_T \geq 0.8$:

$$\frac{H}{H_d} = 0.2, \quad (2.21)$$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν και για το G , G_d .

2.4 Ηλιακοί Συλλέκτες

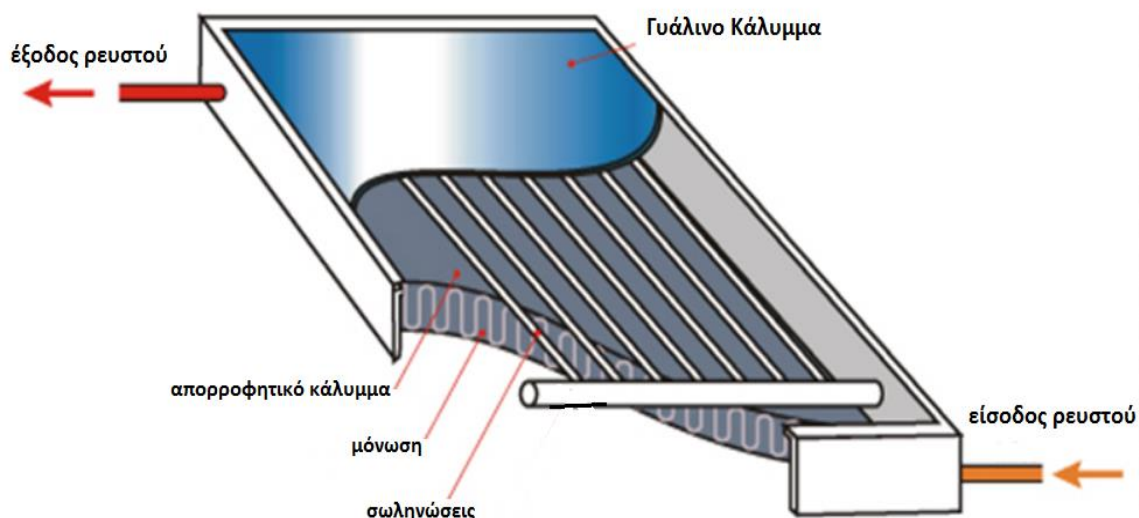
Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι εναλλάκτες που μεταφέρουν την θερμότητα που απορροφούν λόγω ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα ρευστό. Έχουν, τεράστια ποικιλία εφαρμογών όπως αναφέραμε στην παράγραφο 1.4. Συνοπτικά, η κύρια τους εφαρμογή είναι η παραγωγή ζεστού νερού για οικιακή χρήση είτε η θέρμανση οποιουδήποτε θερμικού μέσου για βιομηχανικές εφαρμογές.

Υπάρχουν πολλά είδη συλλεκτών. Για αυτό το λόγο, έχουν αναπτυχθεί δύο μεγάλες κατηγορίες. Οι επίπεδοι και οι συγκεντρωτικοί. Για οικονομικοτεχνικούς λόγους, οι επίπεδοι αποτελούν την ισχυρή πλειονότητα. Και αυτό διότι είναι πολύ απλής γεωμετρίας και κατασκευής καθώς και ότι στις οικιακές χρήσεις δεν απαιτούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες, συνεπώς οι επίπεδοι καλύπτουν αποτελεσματικά την όποια ζήτηση. Στην αντίθετη πλευρά, οι συγκεντρωτικοί χαρακτηρίζονται από πιο περίπλοκες γεωμετρικές κατασκευές διότι όπως λέει και το όνομα τους σκοπός τους είναι η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας από μια πρωτεύουσα κατοπτρική επιφάνεια σε μια μικρότερη, προφανώς κυλινδρική, και συνήθως χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές είτε σε εφαρμογές παραγωγής ατμού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.4.1 Επίπεδοι Συλλέκτες (Flat Plane Collector - FPC)

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα αναφερθούμε στο πιο εμπορικά διαδεδομένο τύπο ηλιακού συλλέκτη, τον επίπεδο. Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες, χρησιμοποιούνται συνήθως σε οικιακές εφαρμογές για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και για άλλες εφαρμογές που απαιτούν μεσαίου μεγέθους θερμοκρασίες συνήθως κάτω από 100°C . Όπως προαναφέρθηκε, οι συγκεκριμένες διατάξεις συλλεκτών χαρακτηρίζονται από σχετικά απλή κατασκευή και ευελιξία κατά την εγκατάστασή τους. Αυτό, τους κάνει ιδιαίτερα προσιτούς ως προς το κόστος. Τέλος, συνήθως συνοδεύονται από ένα δοχείο αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης. Το συγκεκριμένο σύστημα δεν απαιτεί κυκλοφορητή, καθώς το θερμικό μέσο κυκλοφορεί με φυσικό τρόπο λόγω της διαφοράς πυκνοτήτων του [2.15].

Τα κύρια μέρη του επίπεδου συλλέκτη όπως φαίνονται παρακάτω στην εικόνα 2.9 είναι τα εξής:



Εικόνα 2.9 Κύρια μέρη ενός επίπεδου συλλέκτη [2.9].

- Απορροφητήρας ή πλάκα απορρόφησης: Είναι μια σκουρόχρωμη επιφάνεια, η οποία φέρει τους σωλήνες που κυκλοφορεί το ρευστό και απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Χαρακτηριστικό μέγεθος που τον χαρακτηρίζει είναι ο συντελεστής απορροφητικότητας α , που εκφράζει πόση ακτινοβολία απορροφά η πλάκα σε σχέση με το τι προσπίπτει πάνω της.
- Διαφανές κάλυμμα: Είναι το κάλυμμα που βρίσκεται στην κορυφή του συλλέκτη. Είναι σχεδόν πάντα από γυαλί με υψηλή διαπερατότητα και μπορεί να είναι παρά πάνω από ένα στο πλήθος. Ο κύριος στόχος του είναι να μειώνει τις απώλειες συναγωγής. Χαρακτηριστικό μέγεθος που το χαρακτηρίζει είναι ο συντελεστής διαπερατότητας ϵ που εκφράζει πόση ακτινοβολία διαπερνά το κάλυμμα σε σχέση με το τι προσπίπτει στην επιφάνεια του.
- Μόνωση: Βρίσκεται στη βάση και στις παράπλευρες επιφάνειες ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες. Το πιο σύνηθες υλικό μόνωσης για συλλέκτες είναι ο υαλοβάμβακας ή και ο πετροβάμβακας.
- Πλαίσιο: Αποτελεί τη βάση στήριξης όλων των παραπάνω τμημάτων του συλλέκτη, όπως των σωλήνων του απορροφητήρα καθώς και των υάλινων καλυμμάτων.

Ωφέλιμη Ισχύς :

Βασικά αναγκαία μεγέθη για την θερμοδυναμική ανάλυση του επίπεδου συλλέκτη είναι τα εξής [2.15] :

- G_T [W/m^2]: Η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο του συλλέκτη.
- S [W/m^2]: Απορροφούμενη ακτινοβολία από τον συλλέκτη. Πολύ σημαντική είναι η σχέση :

$$S = G_T \cdot (\tau\alpha) \quad (2.16)$$

- U_L [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]: Ολικός συντελεστής θερμικών απωλειών, προκύπτει από μια ενδελεχή ανάλυση η οποία δεν είναι σχετική με το θέμα αυτής της εργασίας.
- T_i, T_a [$^\circ C$]: Θερμοκρασία εισόδου ρευστού και περιβάλλοντος αντίστοιχα.
- F_R : Παράγων θερμικής απολαβής, είναι ο λόγος της πραγματικής αποδιδόμενης θερμικής ισχύος προς την θερμική ισχύ που θα απεδίδετο αν ολόκληρος ο απορροφητήρας είχε την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού.

Μια ιδιαίτερα πρακτική σχέση για να βρούμε την ωφέλιμη ισχύ είναι η παρακάτω:

$$Q_u = A_C \cdot F_R \cdot [(\tau\alpha) \cdot G_T - U_L \cdot (T_i - T_a)] \quad (2.22)$$

2.4.2 Συλλέκτες με σωλήνες κενού (ETC)

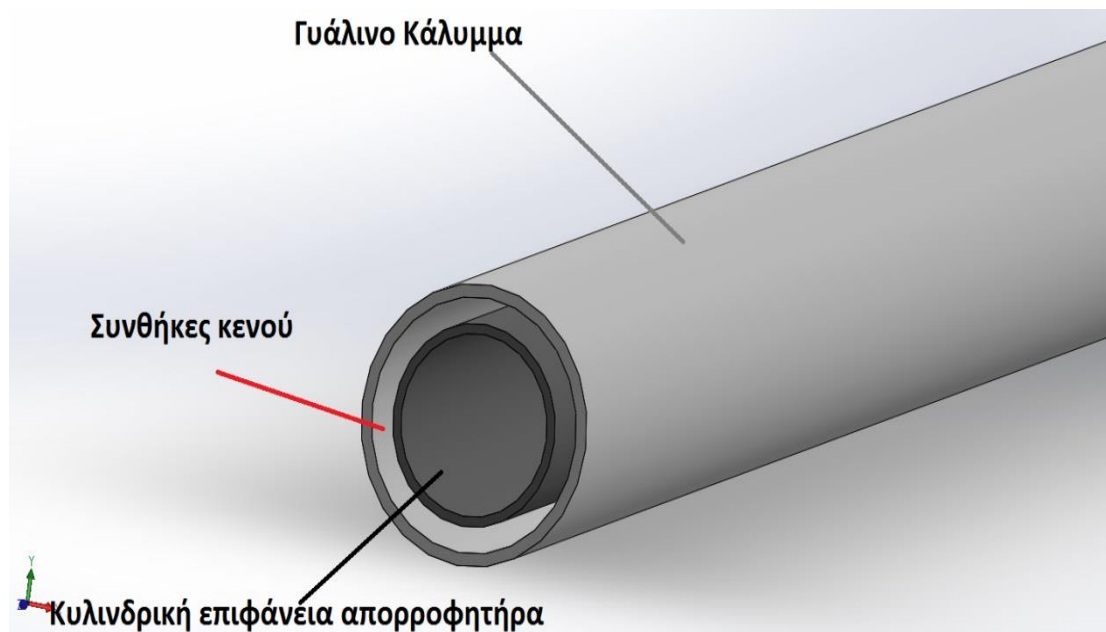


Εικόνα 2.10 Επίπεδος συλλέκτης κενού [2.10]

Προκειμένου να αυξήσουμε τον θερμικό βαθμό απόδοσης του επίπεδου συλλέκτη, αλλά και οποιουδήποτε άλλου συλλέκτη, θα πρέπει να μειώσουμε τις θερμικές απώλειες. Όπως γνωρίζουμε από τις αρχές μεταφοράς θερμότητας, αυτές οφείλονται σε τρεις συνιστώσες μετάδοσης θερμότητας, την αγωγή την συναγωγή και την ακτινοβολία. Μια πολύ καλή εφαρμογή για αυτό το θέμα είναι οι σωλήνες κενού. Συγκεκριμένα, αυτοί μειώνουν δραστικά τις θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής. Αυτό το πετυχαίνουν, επειδή όπως δηλώνει και το όνομα τους είναι σωλήνες, συνήθως από χαλκό, με γυάλινο κυλινδρικό κάλυμμα με συνθήκες κενού, πολύ χαμηλή πίεση, ανάμεσα στις δύο επιφάνειες. Έτσι, ο συντελεστής συναγωγής μηδενίζεται, οπότε όπως προαναφέραμε θα έχουμε απώλειες μόνο μέσω ακτινοβολίας.

Γενικά, οι συγκεκριμένοι συλλέκτες χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς λειτουργούν αποδοτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, πάνω από $100^\circ C$, και σε μεγάλες πιέσεις θερμικών μέσων. Βασικό τους μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος αλλά και το ότι είναι ευάλωτοι στις συνθήκες περιβάλλοντος υπό την άποψη του κινδύνου εισχώρησης υγρασίας με αποτέλεσμα την διάβρωση των σωλήνων, καθώς και η σταδιακή πλήρωση του κενού στην πάροδο των χρόνων με μοναδική λύση την ολική καταστροφή τους. Τέλος, είναι ανάγκη να τονίσουμε ότι οι

σωλήνες κενού χρησιμοποιούνται επίσης στην πλειονότητα των συγκεντρωτικών συλλεκτών, τους οποίους θα δούμε στην συνέχεια.



Εικόνα 2.11 Κύρια μέρη ενός σωλήνα κενού, σχεδιασμός στο Solidworks

2.4.3 Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, όταν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες θερμικών μέσων τότε οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες είναι μονόδρομος. Η βασική ιδέα είναι η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια μικρή επιφάνεια απορρόφησης, με παρεμβολή μίας οπτικής ανακλαστικής επιφάνειας μεταξύ ήλιου και απορροφητικής επιφάνειας, με αποτέλεσμα να υπάρχει υψηλή συγκέντρωση ενέργειας, αρά και μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

Ένα βασικό εποπτικό μέγεθος για τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες είναι ο **λόγος συγκέντρωσης** που εκφράζει τον λόγο της κατοπτρικής επιφάνειας ή αλλιώς επιφάνεια ανοίγματος A_a προς την απορροφητική επιφάνεια ή αλλιώς επιφάνεια δέκτη A_r .

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.23)$$

Ο λόγος συγκέντρωσης κυμαίνεται από 1.5 έως 10000. Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο μεγάλοι λόγοι συγκέντρωσης έχουν συνήθως μόνο εργαστηριακό ενδιαφέρον και δεν συναντώνται στην βιομηχανία. Προφανώς όσο αυξάνεται αυτός ο λόγος τόσο αυξάνονται οι θερμοκρασίες καθώς και η ακρίβεια της κατασκευής άρα και το κόστος.

Γεωμετρία συγκεντρωτικών:

Υπάρχει πολύ μεγάλη ποικιλία στο σχεδιασμό αυτών των συλλεκτών. Συγκεκριμένα, ο **δέκτης** μπορεί να ναι κυρτός, επίπεδος, κοίλος, καλυμμένος ή ακάλυπτος.

Ο συγκεντρωτής :

- Ανακλαστικός ή διαθλαστικός (κάτοπτρο, φακός)

- Επιμήκης κυλινδρικός ή κυκλικός, ο πρώτος εστιάζει σε ευθεία γραμμή και θεωρείται δισδιάστατος, ο δεύτερος είναι επιφάνεια εκ περιστροφής (πχ παραβολοειδές πιάτο), θεωρείται τρισδιάστατος και εστιάζει σε σημείο.
- Με είδωλο ή χωρίς. Οι πρώτοι ανάλογα με την ποιότητα της ανακλαστικής τους επιφάνεια δίνουν αντίστοιχης ποιότητας είδωλο του ήλιου στον απορροφητή και χαρακτηρίζονται από υψηλούς λόγους συγκέντρωσης. Οι δεύτεροι, δεν σχηματίζουν σαφώς καθορισμένο είδωλο του ήλιου και για αυτό το λόγο έχουν μικρό λόγο συγκέντρωσης $C < 5$.
- Συνεχής ή τμηματικός.

Οι βασικότεροι συγκεντρωτικοί συλλέκτες είναι:

- Σύνθετος Παραβολικός (Compound Parabolic Collector- CPC)
- Παραβολικός Συλλέκτης με Κάτοπτρο (Parabolic Trough Collector- PTC)
- Γραμμικός Συλλέκτης Fresnel
- Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο (Solar Dish Collector)
- Ηλιακός Πύργος (Solar Tower)

2.4.3.1 Σύνθετος Παραβολικός (Compound Parabolic Collector- CPC)

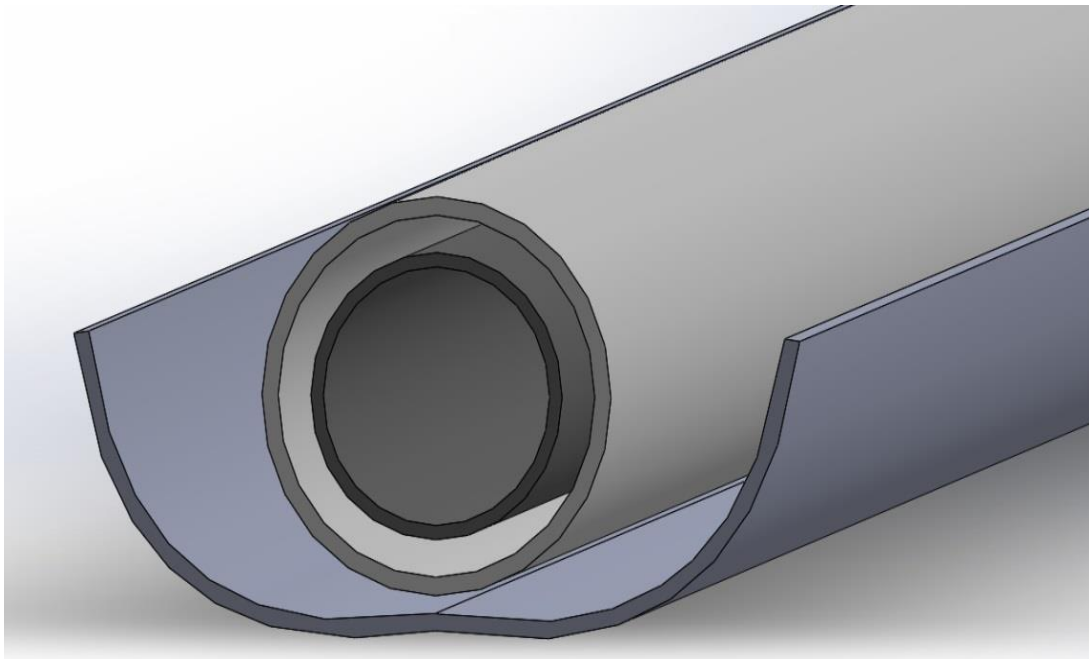
Το συγκεκριμένο είδος συλλέκτη έχει μικρούς λόγους συγκέντρωσης και ανήκει στην κατηγορία συλλεκτών χωρίς είδωλο. Όπως η πλειονότητα των συγκεντρωτικών έτσι και αυτός βασίζεται στην ανακλαστική ιδιότητα της παραβολής, κάτι που θα επεξηγήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο. Ένα θετικό του στοιχείο είναι ότι σε αντίθεση με άλλου συγκεντρωτικούς συλλέκτης αυτός εκμεταλλεύεται και την διάχυτη ακτινοβολία (βλ.εικόνα 2.13) αλλά και την άμεση για μεγάλο εύρος γωνιών. Οπότε δεν απαιτούν σύστημα παρακολούθησης του ήλιου. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.14 το κάτοπτρο αποτελείται από τμήματα δύο παραβολών οι οποίες εκτείνονται μέχρι να γίνουν παράλληλες προς τον άξονα συμμετρίας του CPC. Η γωνία θ_c ονομάζεται ημιγωνία αποδοχής και σχηματίζεται από τον άξονα του CPC και την ευθεία που συνδέει την εστία της μιας παραβολής με το απέναντι άκρο του ανοίγματος. Όσον αφορά την φύση των ανακλάσεων, αν οι κατοπτρικές είναι τέλειες επιφάνειες, ιδανικά, τότε η ακτινοβολία που εισέρχεται στο άνοιγμα υπό γωνία θ , έτσι ώστε $-\theta_c < \theta < \theta_c$, ανακλάται προς τον δέκτη, αλλιώς οι ακτίνες δεν φτάνουν καθόλου στον δέκτη [2.15].

Ο λόγος συγκέντρωσης του CPC ορίζεται ως:

$$C = \frac{1}{\sin \theta_c} \quad (2.24)$$

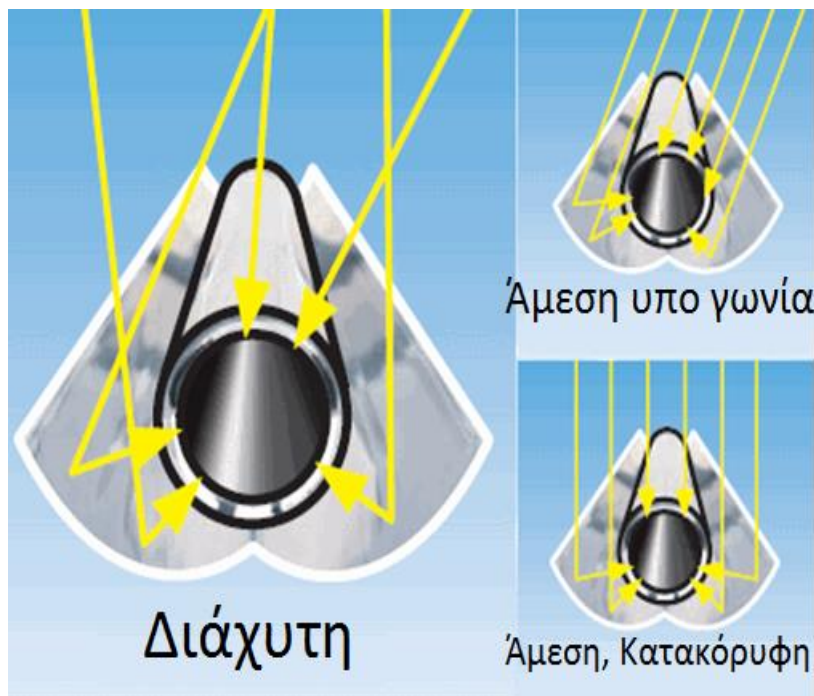
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πάνω άκρα των παραβολικών πλευρών δεν συνεισφέρουν ουσιαστικά στην συγκέντρωση των ακτινών, οπότε προκειμένου να μειώσουμε το κόστος με πολύ μικρή μεταβολή στην απόδοση μπορούμε να μειώσουμε το ύψος των παραβολών.

Όσον αφορά, τον προσανατολισμό τους, τοποθετούνται κατά τον διαμήκη άξονα προσανατολισμένο στην διεύθυνση Ανατολής-Δύσης. Το επίπεδο του ανοίγματος είναι στραμμένο προς τον ισημερινό, σχηματίζοντας γωνία β με το οριζόντιο επίπεδο. Στην παρακάτω εικόνα, βλέπουμε έναν σύνθετο παραβολικό συλλέκτη σχεδιασμένο στο Solidworks.



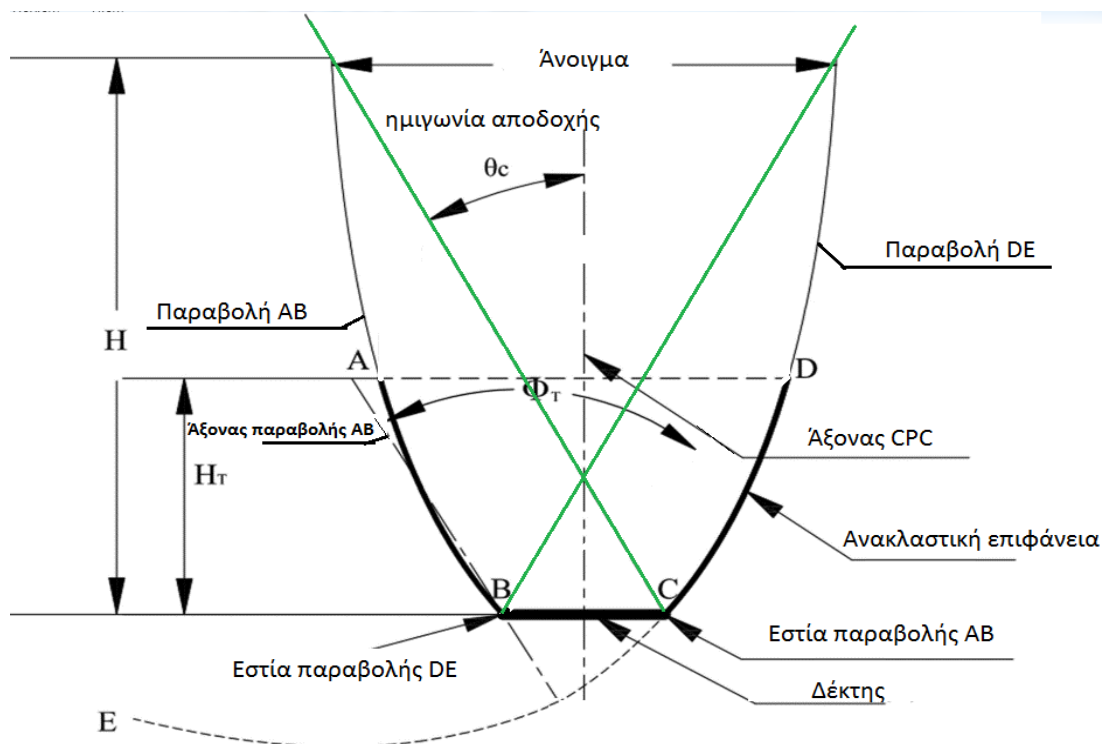
Εικόνα 2.12 Συλλέκτης CPC, σχεδιασμός στο Solidworks

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τον τρόπο με τον οποίο το παραβολικό κάτοπτρο εστιάζει τις ηλιακές ακτίνες στον απορροφητήρα, καθώς και το ότι αξιοποιεί και την διάχυτη ακτινοβολία.



Εικόνα 2.13 Ακτινοβολία σε συλλέκτη CPC

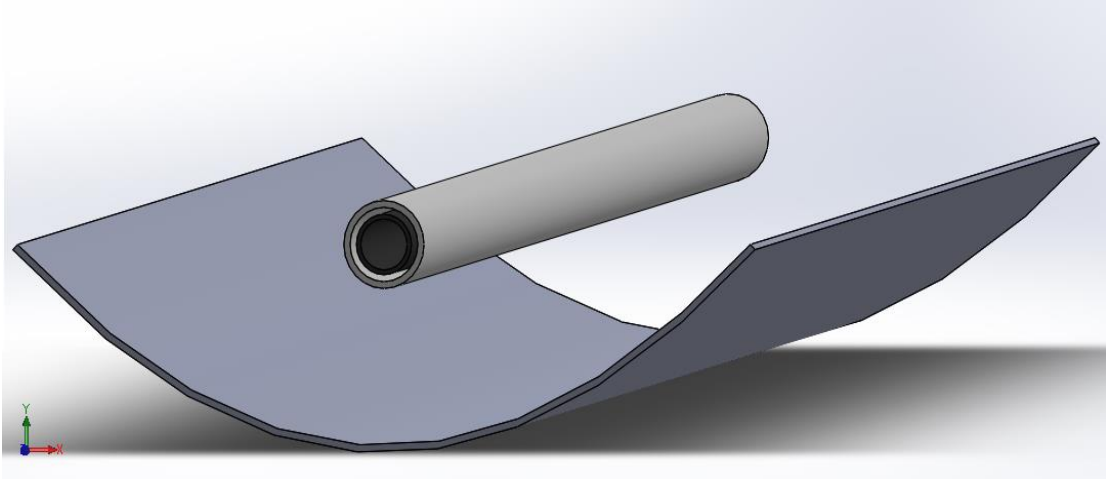
Τέλος, στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός CPC, όπως το άνοιγμα του, οι παραβολικές ανακλαστικές επιφάνειες του, οι εστίες τους καθώς και η ημιγωνία αποδοχής.



Εικόνα 2.14 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά CPC [2.11]

2.4.3.2 Επιμήκης Παραβολικός Συλλέκτης (Parabolic Trough Collector – PTC)

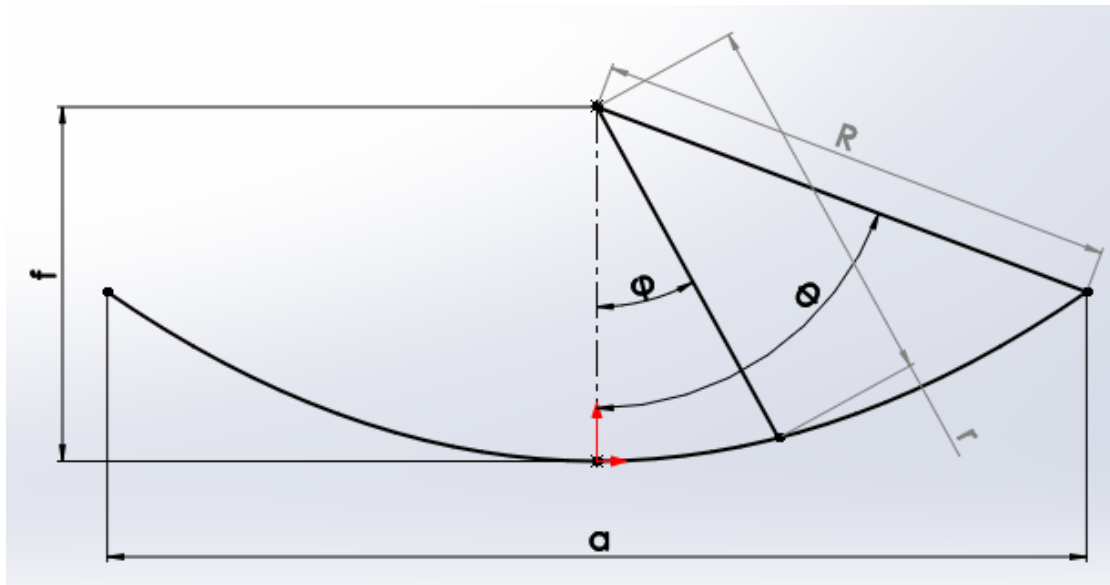
Αρχικά, οι συγκεκριμένοι συλλέκτες έχουν κάτοπτρο παραβολικής μορφής το οποίο συγκεντρώνει στον απορροφητή, ο οποίος είναι ένας σωλήνας κενού, τις ακτίνες του ηλίου. Όπως, η πλειονότητα των συγκεντρωτικών έτσι και αυτός ο συλλέκτης αξιοποιεί μόνο την άμεση ακτινοβολία και μεγιστοποιεί την απόδοση του όταν ο ήλιος είναι στην κατακόρυφη θέση (ηλιακό μεσημέρι). Ο λόγος συγκέντρωσης στους PTC είναι μεσαίου μεγέθους και κυμαίνεται μεταξύ 10-45. Λειτουργεί με ένα μεγάλο εύρος θερμικών μέσων, όπως για παράδειγμα νερό, θερμικό λάδι είτε καθαρό είτε εμπλουτισμένο με νανοϋλικά όπως νανοσωματίδια CuO , ακόμα και τηγμένο άλας. Τα μη συμβατικά αυτά θερμικά μέσα χρησιμοποιούνται διότι όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο αυξάνουν τον θερμικό βαθμό απόδοσης. Οι θερμοκρασίες εξόδου του θερμικού μέσου, που μπορεί να πετύχει μπορεί να φτάσουν έως 400°C με εύκολο τρόπο, παρόλα αυτά μπορεί να επιτύχει και μεγαλύτερες θερμοκρασίες αλλά με μη συμβατικές τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα ειδικά θερμικά μέσα και πτερύγια εντός της ροής, αυτό το γεγονός τους καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμους για βιομηχανικές εφαρμογές, όπως παραγωγή ατμού για χρήση σε θερμικό κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για βιομηχανική ξήρανση καθώς και σε εφαρμογές αφαλάτωσης. Συγκεκριμένα, στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής οι επιμήκεις παραβολικοί αποτελούν την πλειονότητα των εφαρμογών, έναντι άλλων συγκεντρωτικών με ποσοστό που αγγίζει το 90% [2.16, 2.17, 2.18] Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε έναν κοινό συλλέκτη PTC σχεδιασμένο στο Solidworks.



Εικόνα 2.15 Συλλέκτης PTC με σωλήνα κενού, σχεδιασμός στο Solidworks

Γεωμετρικά μεγέθη PTC :

Στο παρακάτω σχήμα διακρίνονται τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη των PTC. Συγκεκριμένα, φαίνεται η τομή κάθετη προς τον διαμήκη άξονα του PTC και τα βασικά μεγέθη όπως το άνοιγμα a , η εστιακή απόσταση f , η ακτίνα r και η γωνία φ στον τυχόν σημείο της παραβολής. Τέλος, R και Φ ονομάζονται η ακτίνα και η γωνία χείλους του συλλέκτη αντίστοιχα [2.15].



Εικόνα 2.16 Συλλέκτης PTC με σωλήνα κενού

Τέλος, είναι σημαντικό να ορίσουμε τις εξισώσεις που διέπουν την γεωμετρία του [2.15].

Η παραβολή δίνεται από την εξίσωση :

$$y^2 = 4 \cdot f \cdot x \quad (2.25)$$

Και τα μεγέθη r, φ συνδέονται με τη σχέση:

$$r = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos \phi} \quad (2.26)$$

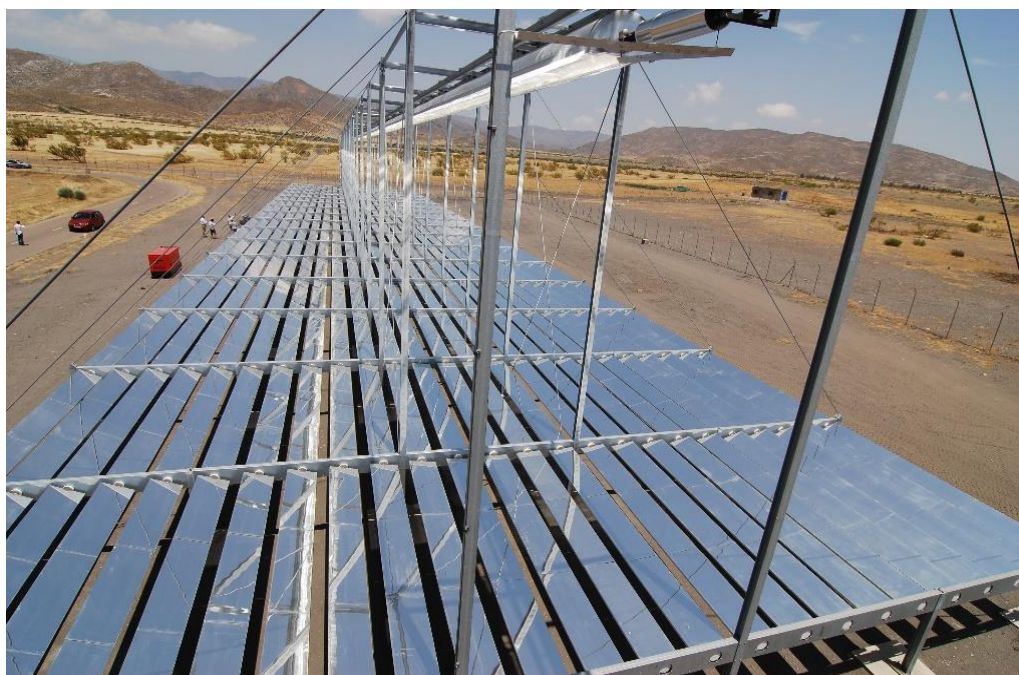
Καθοριστικός παράγων για τη λειτουργία του συλλέκτη και την εκμετάλλευση της ακτινοβολίας, είναι η εστιακή απόσταση f και το άνοιγμα a .

Επομένως, ο λόγος a/f χαρακτηρίζει την φωτεινότητα του ειδώλου στον απορροφητήρα.

2.4.3.3 Γραμμικός Συλλέκτης Fresnel

Όπως και ο PTC, έτσι και ο Fresnel είναι συγκεντρωτικός συλλέκτης με κάτοπτρα που εστιάζουν στον απορροφητήρα και εκμεταλλεύεται μόνο την άμεση ακτινοβολία.. Προφανώς, η λειτουργία του στηρίζεται επίσης στην ανακλαστική ιδιότητα της παραβολής. Επίσης, η απόδοση του μεγιστοποιείται κατά το ηλιακό μεσημέρι, όμως για τις υπόλοιπες γωνίες του ήλιου σε σχέση με την κατακόρυφο, η απόδοση του μειώνεται αρκετά. Αποτελείται από τα πρωτεύοντα κάτοπτρα και συνήθως από ένα δευτερεύον στην κορυφή του απορροφητή, προκειμένου να αυξήσει τον οπτικό βαθμό απόδοσης του συλλέκτη.

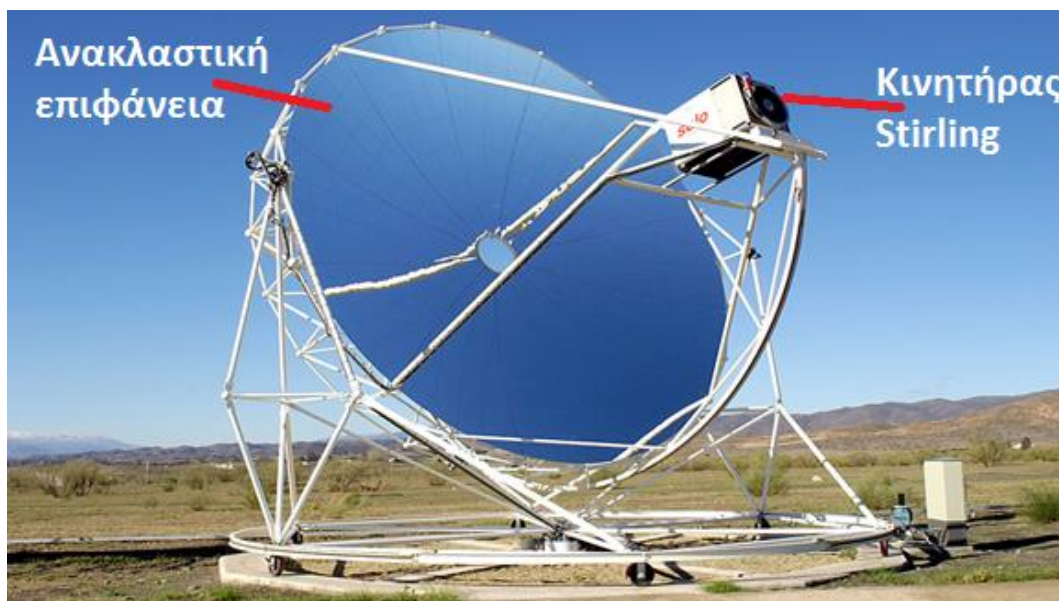
Όσον, αφορά τη γεωμετρία του, υπάρχουν πολλές παραλλαγές ως προς το σχήμα των πρωτευόντων αλλά και των δευτερευόντων κατόπτρων. Συγκεκριμένα, τα πρωτεύοντα κάτοπτρα μπορεί να ναι είτε επίπεδα είτε παραβολικής μορφής. Όπως, θα αναλύσουμε και παρακάτω τα επίπεδα κάτοπτρα, τα οποία είναι και η εφαρμογή που εξετάζουμε σε αυτή την εργασία διέπονται από πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα καμπυλόγραμμα, όπως είναι το χαμηλότερο κόστος, καθώς και η ευκολία περιστροφής τους για παρακολούθηση του ήλιου. Το δευτερεύον κάτοπτρο, αν υπάρχει, συνήθως είναι παραβολικού σχήματος ή άλλου σχήματος που προσεγγίζει την παραβολή. Παρόλα αυτά, ο συγκεκριμένος συλλέκτης, αποτελεί το αντικείμενο αυτής της εργασίας, οπότε περισσότερη ανάλυση γίνεται στο κεφάλαιο 3.



Εικόνα 2.17 Συλλέκτης Fresnel με σωλήνα κενού [2.12]

2.4.3.4 Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο (Dish)

Ο συγκεκριμένος συλλέκτης έχει ως κάτοπτρο ένα παραβολοειδές πιάτο, δηλαδή ένα γεωμετρικό σχήμα που προκύπτει εκ περιστροφής από μια αρχική παραβολή. Χαρακτηριστικό του, είναι ότι εστιάζει σε σημείο και όχι κατά μήκος μια ευθείας όπως οι προηγούμενοι συλλέκτες που έχουμε δει. Αυτό, δίνει τη δυνατότητα επίτευξης υψηλών λόγων συγκέντρωσης, της τάξεως 600-1500 άρα και αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες εξόδου του θερμικού μέσου, της τάξεως των 1500⁰C [2.16]. Έτσι, στο εστιακό σημείο τοποθετείται ο απορροφητής, ο οποίος ως επί το πλείστον είναι ένας κινητήρας Stirling.



Εικόνα 2.18 Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο[2.13]

Ακόμα, αξιοποιεί μόνο την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία. Λόγω της σύνθετης γεωμετρίας του, είναι υψηλού κόστους και χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως παραγωγή ενέργειας με κινητήρες Stirling και η εγκατάσταση του γίνεται σε αποκεντρωμένες περιοχές λόγω χωροταξικών λόγων. Τέλος, σε αυτούς τους συλλέκτες είναι αναγκαία η χρήση συστήματος παρακολούθησης του ήλιου (tracking system), έτσι ώστε να χει όσο το δυνατόν βέλτιστη απόδοση. Συγκεκριμένα, το σύστημα αυτό επιτρέπει την περιστροφή του πιάτου σε δύο άξονες, στον κατακόρυφο και στον οριζόντιο. Περισσότερα για την τεχνολογία tracking system αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

2.4.3.5 Ηλιακός Πύργος (Solar Tower)

Στην κορυφή των συγκεντρωτικών συλλεκτών ως προς τον λόγο συγκέντρωσης άρα και στην επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών βρίσκεται ο ηλιακός πύργος. Συγκεκριμένα, αυτό το είδος συλλέκτη περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό κατόπτρων τα οποία βρίσκονται περιμετρικά ενός πύργου και εστιάζουν την προσπίπτουσα σε αυτά ακτινοβολία, σε έναν σημειακό απορροφητή που βρίσκεται στην κορυφή αυτού του πύργου. Όπως είναι αναμενόμενο, αυτή η σχέση μεγέθους μεταξύ ανακλαστικής επιφάνειας και επιφάνειας απορρόφησης οδηγεί σε πολύ μεγάλους λόγους συγκέντρωσης που μπορεί να φτάσουν ακόμα και 2000 [2.16]. Έτσι, γίνεται επίτευξη μεγάλων θερμοκρασιών εργαζόμενου μέσου, συνήθως νερού, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές θερμικών κύκλων, για παράδειγμα κύκλος νερού

ατμού Rankine ή οργανικών μέσων O.R.C. , σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός, ότι η εγκατάσταση αυτού του συλλέκτη είναι μεγάλης ισχύος της τάξεως δεκάδων MW , τον καθιστά μια αποδοτική και συμφέρουσα λύση λόγω της οικονομίας κλίμακας.



Εικόνα 2.19 Ηλιακός πύργος [2.14]

Βιβλιογραφία 2^ο Κεφαλαίου

- [2.1] socratic.org/questions/what-is-the-distance-between-the-sun-and-the-earth
- [2.2] earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalWarming/page2.php
- [2.3] www.theozonehole.com/uvrays.htm
- [2.4] www.quora.com/Does-the-black-body-radiation-curve-only-apply-to-perfect-black-bodies-Does-it-also-apply-to-any-object-at-some-temperature
- [2.5] www.researchgate.net/figure/304628964_fig4_Figure-4-Azimuthal-zenith-and-hour-angles-for-solar-radiation-evaluation
- [2.6] www.scienter.gr/web/el/pyranometers.php
- [2.7] el.wikipedia.org/wiki/Πυρανόμετρο#/media/File:Pyranometer.jpg
- [2.8] www.gogreenheatsolutions.co.za/?q=project-type/solar-water-heating/flat-plate-collector
- [2.10] www.centrometal.hr/en/cvskc-10/
- [2.11] www.powerfromthesun.net/Book/chapter09/chapter09.html
- [2.12] www.dlr.de/en/DesktopDefault.aspx/tabid-4530/3681_read-9671/3681_page-4/gallery-1/gallery_read-Image.1.3622/
- [2.13] commons.wikimedia.org/wiki/File:Vista-disco-Eurodish.jpg
- [2.14] news.energysage.com/tag/concentrating-solar-power/

- [2.15] Θερμικά-Ηλιακά συστήματα , Κίμων Α. Αντώπουλος, Αθήνα 2015
- [2.16] SA. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science 2004 ;30:231–295
- [2.17] M. Gunther, M. Joemann, S. Csambor, Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 5, Parabolic Trough Technology
- [2.18] M. Binotti, G. Zhu, A. Gray, G. Manzolini, P. Silva, Geometric analysis of three-dimensional effects of parabolic trough collectors, Solar Energy 2013;88:88-96
- [2.19] Woodhead Publishing Limited, 2012, Concentrating solar power technology Principles, developments and applications, Edited by Keith Lovegrove and Wes Stein
- [2.20] Evangelos Bellos , Christos Tzivanidis, Vassilis Belessiotis Daily performance of parabolic trough solar collectors, Solar Energy 2017; 158: 667

Κεφάλαιο 3: Γραμμικός Συλλέκτης Fresnel

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύεται ο συλλέκτης Fresnel, από απόψεως αρχής λειτουργίας, ιστορικής πορείας, εφαρμογών στην βιομηχανία, γεωμετρίας καθώς και θερμικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, στο κομμάτι της θερμικής ανάλυσης θα εξετάσουμε εναλλακτικούς τρόπους βελτίωσης του θερμικού βαθμού απόδοσης. Αυτό θα το διερευνήσουμε δοκιμάζοντας διαφορετικά θερμικά μέσα όπως Syltherm 800 με διάφορους ποσοστιαίους εμπλουτισμούς νανοϋλικών CuO. Ένας άλλος τρόπος βελτίωσης του θερμικού βαθμού απόδοσης είναι η προσθήκη εσωτερικών πτερυγίων στον απορροφητή. Στο κομμάτι της γεωμετρίας, θα αναλυθούν όλες οι διαστάσεις του συλλέκτη Fresnel καθώς και αρκετές παραλλαγές της διάταξης του. Τέλος θα αναφέρουμε τα θετικά και τα αρνητικά αυτών των συλλεκτών σε σχέση με τους επιμήκεις παραβολικούς.

3.1 Αρχή Λειτουργίας

Ο επιμήκης συλλέκτης Fresnel ανήκει στην κατηγορία των συγκεντρωτικών συλλεκτών με κάτοπτρο. Η βασική του διαφορά, με άλλους συγκεντρωτικούς είναι ότι τα κάτοπτρα του δεν είναι συνεχή και ότι δεν είναι απαραίτητα παραβολικού σχήματος, κάνοντας τα έτσι πολύ πιο εύκολα στην κατασκευή. Παρακάτω, φαίνεται μια τυπική διάταξη Fresnel με επίπεδα κάτοπτρα.



Εικόνα 3.1 Συλλέκτης Fresnel χωρίς δευτερεύον κάτοπτρο [3.1]

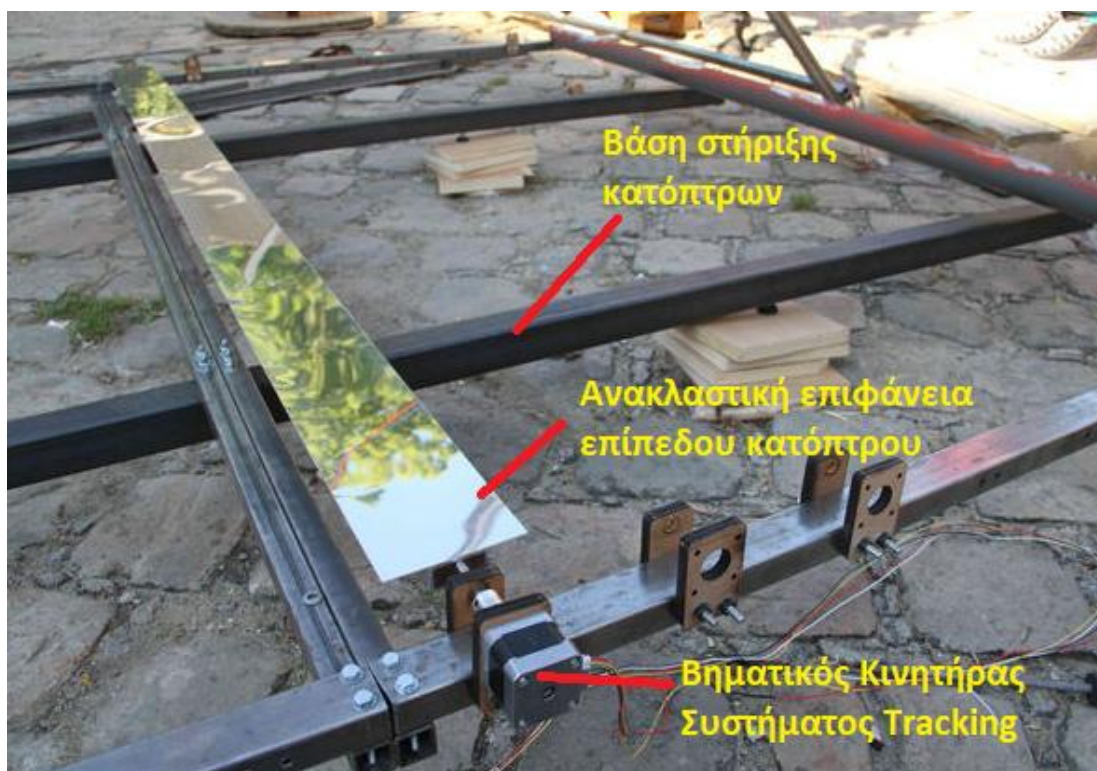
Βασικά εξαρτήματα διάταξης Fresnel:

Όπως έχουμε προαναφέρει στην ενότητα και 2.4.3.3 ο συλλέκτης Fresnel αποτελείται από τα παρακάτω:

- **Πρωτεύοντα κάτοπτρα**, είναι μια δισδιάστατη συστοιχία από επίπεδα ή καμπυλωτά κάτοπτρα με ιδιαίτερα υψηλή ανακλαστικότητα της τάξεως του 90-95%. Αξίζει να σημειωθεί πως η πλειονότητα των Fresnel στην αγορά διαθέτουν επίπεδα κάτοπτρα και όχι καμπυλόγραμμα για λόγους ευκολίας

κατασκευής και συνεπώς μικρότερου κόστους. Επίσης, αυτά τα κάτοπτρα αποτελούν τμήμα άλλοτε ισάριθμων παραβολών και άλλοτε μιας ενιαίας παραβολής, περισσότερα θα αναφέρουμε παρακάτω στο κομμάτι της γεωμετρίας. Όπως θα δούμε και παρακάτω συνήθως η κίνηση τους ελέγχεται από ένα σύστημα παρακολούθησης του ήλιου με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία.

- **Σύστημα παρακολούθησης (tracking system)**, πρόκειται για ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου που έχει ως σκοπό να περιστρέφει τα πρωτεύοντα κάτοπτρα έτσι ώστε να δημιουργούνται συνθήκες ηλιακού μεσημεριού όσον αφορά τη γωνία πρόσπτωσης των ακτινών. Το πόσο θα πρέπει να τα περιστρέψει κάθε φορά θα το αναλύσουμε στην ενότητα της γεωμετρίας. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο είδη tracking system, που διαφοροποιούνται ανάλογα με το πώς πληροφορούμαστε για την θέση του ήλιου. Το πρώτο χρησιμοποιεί μαθηματικούς αλγορίθμους που διατυπώνουν τη θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο κάθε στιγμή και το δεύτερο χρησιμοποιεί φωτοκύτταρα τα οποία έχουν ακρίβεια 0.05° . Σε κάθε περίπτωση, αυτά δίνουν την εντολή σε έναν επενεργητή ο οποίος περιλαμβάνει βηματικούς σερβοκινητήρες και έτσι περιστρέφουν τα κάτοπτρα [3.7].



Εικόνα 3.2 Άποψη ενός πρωτεύοντος επίπεδου κατόπτρου [3.2]

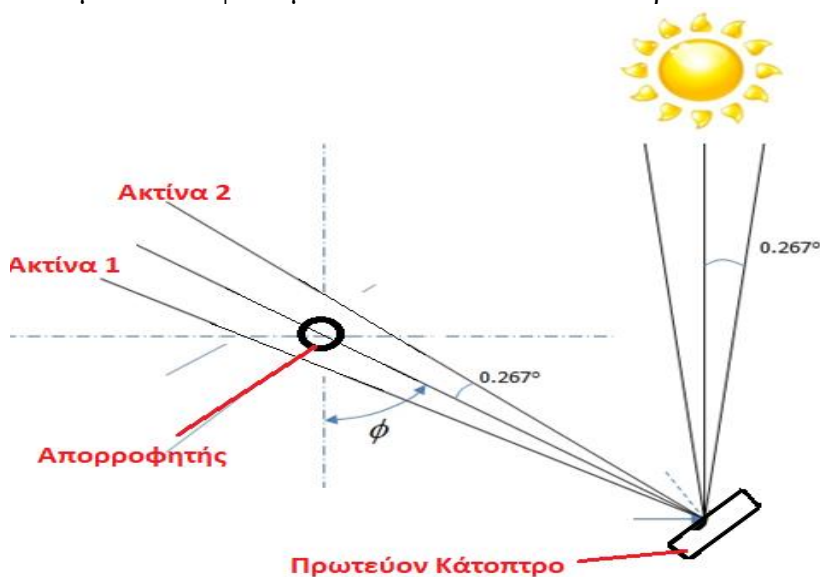
- **Απορροφητής**, είναι ο γνωστός, από προηγούμενα κεφάλαια σωλήνας κενού και βρίσκεται στην εστία των παραβολών που περνάνε από τα κέντρα των κατόπτρων. Η θέση του είναι πάντα κάποια μέτρα πάνω από τα πρωτεύοντα κάτοπτρα (συνήθως 2 με 3 μέτρα) και στηρίζεται από σκαλωσιές όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1. Τέλος, ο επιμήκης άξονας του βρίσκεται στη διεύθυνση Βορρά-Νότου [3.9].



Εικόνα 3.3 Εξαρτήματα Σωλήνα Κενού [3.3]

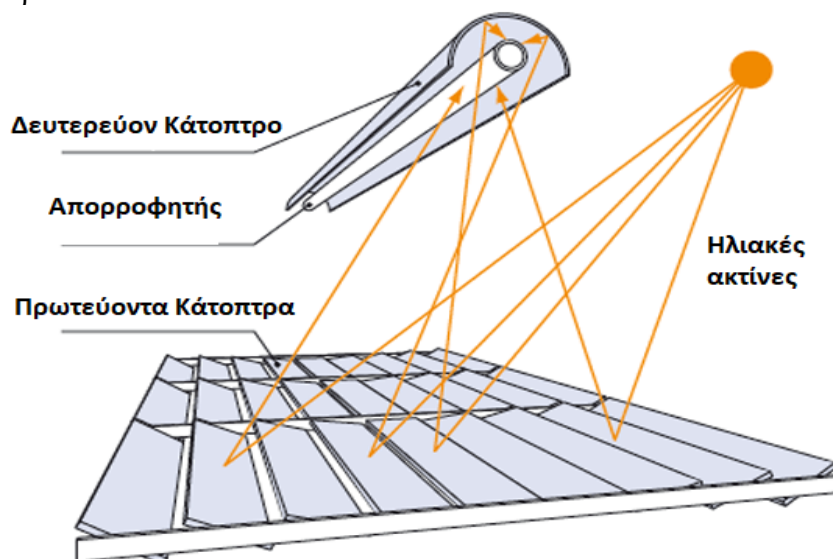
- **Δευτερεύον κάτοπτρο**, αυτό εξαρτάται από την εφαρμογή και δεν είναι απαραίτητο. Συγκεκριμένα, το συγκεκριμένο κάτοπτρο είναι ποικίλων σχημάτων, όπως για παράδειγμα παραβολοειδές, CPC ή τραπεζοειδές. Οι ανακλαστικές του ιδιότητες είναι περίπου όμοιες με αυτές των πρωτεύοντων κατόπτρων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατασκευή του καθώς και η εγκατάσταση του είναι ιδιαίτερα δύσκολη καθώς μια μικρή απόκλιση στις διαστάσεις του μπορεί να το κάνει εντελώς αναποτελεσματικό, ειδικά στην περίπτωση του CPC. Από τη βιβλιογραφία έχουν δημοσιευθεί αρκετές έρευνες βελτιστοποίησης του δευτερεύοντος κατόπτρου όπως αυτή του Zhu 2017 et al [3.8].

Ένα βασικό πρόβλημα για την εφαρμογή αυτού του συλλέκτη είναι ότι οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν με μορφή κώνου στα επίπεδα κάτοπτρα με ημιγωνία κωνικότητας 0.267° (βλ. εικόνα 3.4) [3.7]. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι το ύψος του απορροφητή από το έδαφος, τόσο αυτές οι ακτίνες «ανοίγουν» με αποτέλεσμα κάποιες από αυτές να διαφεύγουν και να μην τις εκμεταλλευόμαστε. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται στα ακριανά κάτοπτρα.



Εικόνα 3.4 Μη εκμεταλλεύσιμες ακτίνες (1,2) λόγω κωνικότητας της ακτινοβολίας του ήλιου

Συνεπώς, κύριος στόχος του δευτερεύοντος κατόπτρου είναι να επανεστιάσει τις «χαμένες» αυτές ακτίνες που προκύπτουν από την κωνικότητα των ακτινών του ήλιου, με διαδοχικές ανακλάσεις στον απορροφητή. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στο κομμάτι της γεωμετρίας θα αναφερθούν περισσότερες λεπτομέρειες ως προς τις διάφορες σχηματικές παραλλαγές του δευτερεύοντος κατόπτρου.



Εικόνα 3.5 Λειτουργία δευτερεύοντος κατόπτρου [3.4]

3.2 Ιστορική Αναφορά

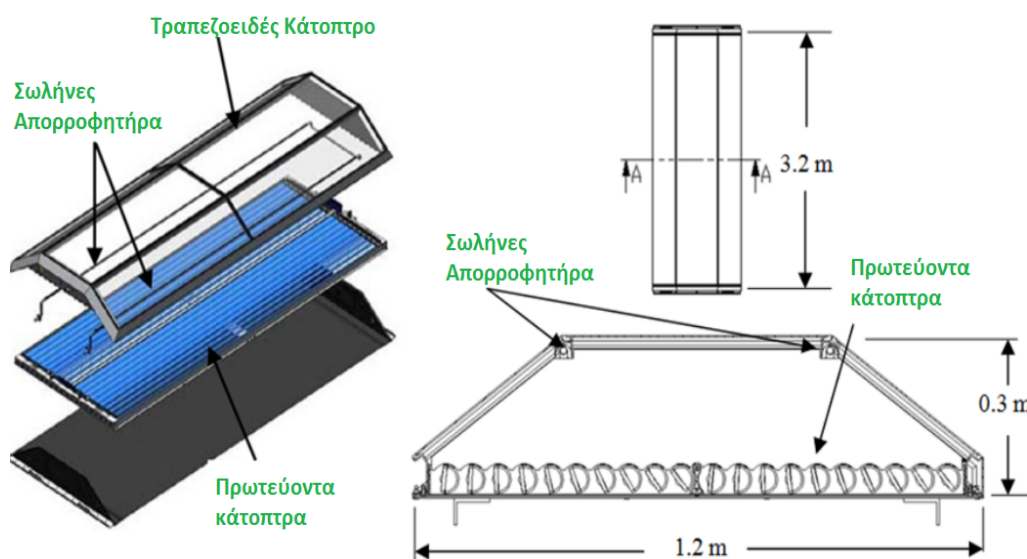
Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες πρωτοεμφανίστηκαν ως «concept» κατά τον 19^ο αιώνα και πήραν το όνομα τους από τον φυσικό οπτικό αναλυτή Augustine Jean Fresnel. Ο συγκεκριμένος, γεννήθηκε το 1788 στην Γαλλία και είχε ασχοληθεί με πολλά θέματα οπτικής και έγινε ιδιαίτερα γνωστός για τον φακό που κατασκεύασε, κάτοπτρο Fresnel [3.11], καθώς και τον ομώνυμο συλλέκτη. Κατά την ίδια χρονική περίοδο ο Buffon ερεύννησε την φύση των στρεφόμενων ανακλαστήρων και κατά πόσο αυτοί μπορούν να εστιάσουν τις ηλιακές ακτίνες σε ένα σημείο προκειμένου να γίνει εκμετάλλευση της συσσωρευμένης αυτής ενέργειας. Οι πρώτες πειραματικές δοκιμές του συλλέκτη Fresnel ωστόσο, έγιναν αρκετά χρόνια αργότερα από την πρώτη θεώρηση του και συγκεκριμένα το 1960 από τον Giorgio Francia στην Τζένοα (βλ. Εικόνα 3.6). Έπειτα ακολούθησε η πρώτη βιομηχανική του παραγωγή από την εταιρεία SunTech το 1973. Επρόκειτο για έναν συλλέκτη ο οποίος περιλαμβανόταν από 10 κυρτά κάτοπτρα και είχε λόγο συγκέντρωσης 40. Κατά την ίδια δεκαετία οι Shaner και Duff σχεδίασαν έναν αντίστοιχο συλλέκτη με την SunTech, με μόνη διαφορά ότι ο συγκεκριμένος είχε 6 κάτοπτρα και κυλινδρικό δέκτη που ονομάστηκε Itek. Το ίδιο έτος έγινε ο σχεδιασμός του μεγαλύτερου έως τώρα από άποψη ισχύος συλλέκτη Fresnel. Αναλυτικότερα, είχε συνολικό μήκος συλλεκτών 1.68 km και η παραγόμενη ισχύς του ήταν της τάξεως MW, σχεδιαστής του ήταν ο Di Canio. Όπως προαναφέραμε στην ενότητα 3.1 προκειμένου να αυξηθεί ο οπτικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη αναγκαία επιλογή είναι η προσθήκη δευτερεύοντος κατόπτρου αλλά και συστήματος παρακολούθησης του ήλιου (tracking system). Παρόλα αυτά, αυτός ο σχεδιασμός έγινε για πρώτη φορά το 1990 από τους Feuerman και Gordon. Το σημαντικότερο σχεδιαστικό βήμα που συμπίπτει με την σημερινή του μορφή, ήταν η

προσθήκη σωλήνα κενού ως απορροφητή, από τον Mills. Ως προς τον σχεδιασμό του δευτερεύοντος κατόπτρου έχουν προταθεί αρκετοί σχεδιασμοί οι σημαντικότεροι είναι οι επακόλουθοι. Το 1999, η εταιρεία Solsearch σχεδίασε ένα δευτερεύον κάτοπτρο με βάση πειραματικά δεδομένα, η γεωμετρία του οποίου προέκυψε έτσι ώστε οι ανακλώμενες ακτίνες να προσπίπτουν στον σωλήνα κενού. Επόμενος σημαντικός σχεδιασμός, είναι αυτός του τραπεζοειδούς κατόπτρου το οποίο σχεδιάστηκε από τον Reynolds το 2001 και δύο χρόνια αργότερα ακολούθησε ο σχεδιασμός του τραπεζοειδούς κατόπτρου με πολλαπλούς σωλήνες απορρόφησης από τους Pye et all [2.16], [2.19], [3.5], [3.6],[3.10]. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε, την πρωτοποριακή για την εποχή πειραματική εγκατάσταση του Giorgio Francia το 1960.



Εικόνα 3.6 Ο πειραματικός συλλέκτης του Francia, Τζένοα, 1960 [3.10]

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται μια άποψη από τον σχεδιασμό του συλλέκτη με τραπεζοειδές κάτοπτρο με πολλαπλούς σωλήνες απορρόφησης από τους Pye et all το 2003.



Εικόνα 3.7 Συλλέκτη με τραπεζοειδές κάτοπτρο με πολλαπλούς σωλήνες απορρόφησης [3.6]

3.3 Σημερινή Κατάσταση

Σήμερα, οι εγκαταστάσεις συλλεκτών Fresnel έχουν αυξηθεί σημαντικά ανά τον κόσμο. Η πλειονότητα των εγκαταστάσεων παρατηρούνται προφανώς σε νότιες περιοχές, όπως η Ισπανία και η Ιταλία από την Ευρώπη, η πολιτεία της Νεβάδα στις ΗΠΑ και η Ινδία λόγω του υψηλού ηλιακού δυναμικού τους. Μερικές από τις εταιρείες που ξεχωρίζουν σε αυτές τις εφαρμογές είναι οι εξής: Novatec, Areva και Soltigua . Παρακάτω, θα δούμε αναλυτικότερες πληροφορίες για το έργο αυτών των εταιρειών.

Novatec :

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τις εγκαταστάσεις PE1 (Nova 1), PE2 (Supernova) της Γερμανικής εταιρείας Novatec στην Ισπανία , η οποία είναι από τις μεγαλύτερες στο χώρο των Fresnel. Οι συγκεκριμένες, μπορούν να φτάσουν σε θερμοκρασίες έως και $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ και χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή. Η εγκατάσταση PE1, αποτελεί την πρώτη εγκατάσταση Fresnel που συνδέθηκε με το δίκτυο κατά το έτος 2009. Έχει συνολική θερμική ισχύ 1.4 MW , καθαρή κατοπτρική επιφάνεια $14,000\text{ m}^2$ η οποία αποτελείται από 2 σειρές επίπεδων κατόπτρων μήκους 800 m η καθεμία.



Εικόνα 3.8 Μονάδες PE1 και PE2 της Novatec, Ισπανία [3.10]

Συγκεκριμένα, η εγκατάσταση Fresnel PE2 της Novatec στο Καλασπέρα της Ισπανίας είναι η μεγαλύτερη στον κόσμο από άποψη παραγόμενης ισχύος. Αναλυτικότερα, πρόκειται για μια εγκατάσταση που ξεκίνησε την λειτουργία της το 2012 και έχει ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 30 MWe με επιφάνεια πρωτευόντων κατόπτρων που φτάνει τα $302,000\text{ m}^2$. Τα κάτοπτρα είναι τοποθετημένα σε 28 σειρές μήκους 950 m η κάθε μια σε ύψος 1 m από το έδαφος. Ο σωλήνας του απορροφητήρα, βρίσκεται σε ύψος 8 m . Από το 2013, με την συνεργασία της γερμανικής χημικής εταιρείας BASF, η Novatec χρησιμοποιεί ως θερμικό μέσο

τηγμένο άλας, αυτό δίνει την δυνατότητα στην επίτευξη θερμοκρασιών της τάξεως των 520°C . Σύμφωνα με τα στοιχεία της εταιρείας, η εγκατάσταση παράγει 50 kWh ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες 12,000 νοικοκυριών στην Ισπανία [3.12].



Εικόνα 3.9 Πανοραμική Άποψη της Ηλεκτροπαραγωγικής Μονάδα RE2 της Novatec, Ισπανία [3.12]

Areva (Ausra)

Η συγκεκριμένη εδράζεται στο Mountain View στην Καλιφόρνια της Αμερικής. Διαθέτει αρκετές μονάδες γραμμικών συλλεκτών Fresnel με κυριότερες αυτές στην Τουσόν της Αριζόνα και στον σταθμό Kimberlina στο Bakerfield της Καλιφόρνια [3.15].

Όσον αφορά, τον σταθμό στην Τουσόν, αυτή η εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε το 2013 σε συνεργασία με την Tucson Electric Power –TEP [3.16]. Σκοπός της ήταν να κάνει μια προσθήκη ισχύος στον ήδη υπάρχοντα σταθμό ισχύος 156 MW ο οποίος είναι σταθμός διπλού καυσίμου (λιγνίτης και φυσικό αέριο). Η συγκεκριμένη μονάδα Fresnel έχει ισχύ 5 MW, επίπεδα πρωτεύοντα κάτοπτρα και θερμικό μέσο, νερό. Σύμφωνα με την Areva αυτή η προσθήκη ισχύος θα επιφέρει τα εξής θετικά στοιχεία [3.16]:

- Είναι μια αποδοτική κίνηση, χαμηλού κόστους και φιλική προς το περιβάλλον και συνεισφέρει στο περιβαλλοντολογικό όραμα της Αριζόνα σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές.
- Η ισχύς αυτή ισοδυναμεί με την καύση 1302575 m^3 φυσικού αερίου ή 3600 τόνου λιγνίτη ετησίως.
- Το παραπάνω οδηγεί σε μείωση των εκπομπών CO_2 κατά 6500 τόνους ετησίως.
- Δημιουργία νέων θέσεων εργασίας για την τοπική κοινωνία.

Τέλος, ο σταθμός Kimberlina είναι ο πρώτος σταθμός με συλλέκτη Fresnel στις ΗΠΑ. Κατασκευάστηκε το 2008 και χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή σε

θερμικό κύκλο με παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Έχει παραγόμενη ισχύς 5 MW και αποτελείται από 3 σειρές επίπεδων κατόπτρων μήκους 385 m η καθεμία. Η κάθε σειρά περιλαμβάνει 10 κάτοπτρα πλάτους 2 m τα οποία διαθέτουν σύστημα παρακολούθησης του Ήλιου. Η συνολική καθαρή κατοπτρική επιφάνεια είναι 25,988 m². Ο κύκλος λειτουργίας της είναι ο κλασικός Rankine με θερμικό μέσο, νερό το οποίο έχει θερμοκρασία εξόδου 300⁰C και πίεση λειτουργίας 40 bar [3.17].

Soltigua concentrating solutions

Μια ακόμα εφαρμογή γραμμικού συλλέκτη Fresnel είναι αυτή της εταιρείας Soltigua η οποία παράγει τα παρακάτω μοντέλα γραμμικών συλλεκτών Fresnel. Η συγκεκριμένη εταιρεία εδράζεται στην Ιταλία και δραστηριοποιείται σε συστήματα Tracking, παραβολικούς επιμήκεις συλλέκτες (PTC) αλλά και συλλέκτες Fresnel [3.14].

Μοντέλο	FLT10v-24	FLT10v-36	FLT10v-48	FLT10v-60	FLT10v-72
Καθαρή συλλεκτική επιφάνεια [m ²]	148.5	222.8	297.0	371.3	445.5
Πλάτος [m]	8.05				
Μήκος [m]	25.02	37.35	49.68	62.01	74.34
Κάτοπτρα	Καλή αντοχή στις καιρικές συνθήκες με υψηλή ανακλαστικότητα				
Απορροφητής	Σωλήνας κενού με επιλεκτική επιφάνεια και δευτερεύον κάτοπτρο				
Θερμοκρασία Λειτουργίας	Έως 320 ⁰ C				
Θερμικό μέσο	Νερό για θερμοκρασίες κάτω από 220 ⁰ C, αλλιώς θερμικό έλαιο				
Πίεση	20 bar για νερό, 10 bar για θερμικό έλαιο				

Πίνακας 3.1 Στοιχεία συλλεκτών Soltigua [3.14]



Εικόνα 3.10 Συλλέκτης Fresnel FLT10v-48, Soltigua [3.14]

Επιπλέον, οι συγκεκριμένοι συλλέκτες διαθέτουν τα εξής χαρακτηριστικά [3.14]:

- Σύστημα παρακολούθησης Ήλιου υψηλής ακρίβειας. Συγκεκριμένα το σύστημα iTracker της εταιρείας, μπορεί να προσφέρει έως και 30% αύξηση στην ετήσια παραγόμενη ενέργεια σε αντίθεση με ένα ακίνητο σύστημα. Επίσης, έχει εύρος περιστροφής 110° στον άξονα της επιλογής μας (βλ.σχήμα 3.11).
- Σύστημα PLC περιστροφής των πρωτευόντων κατόπτρων σε περίπτωση υψηλών ανέμων. Αυτό σημαίνει ότι διακρίνονται από υψηλή αντοχή σε τέτοιου είδους φορτία, συγκεκριμένα σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους αντέχουν ανέμους με ταχύτητα 80 km/h, χωρίς κανένα πρόβλημα λειτουργίας, ενώ αν περιστραφούν για να αποφύγουν αυτά τα φορτία, αντέχουν ταχύτητες έως και 200 km/h.
- Σύστημα PLC που επιτρέπει τον απομακρυσμένο χειροκίνητο έλεγχο των κατόπτρων.



Εικόνα 3.11 Μηχανισμός tracking, iTracker της Soltigua [3.14]

3.4 Εφαρμογές

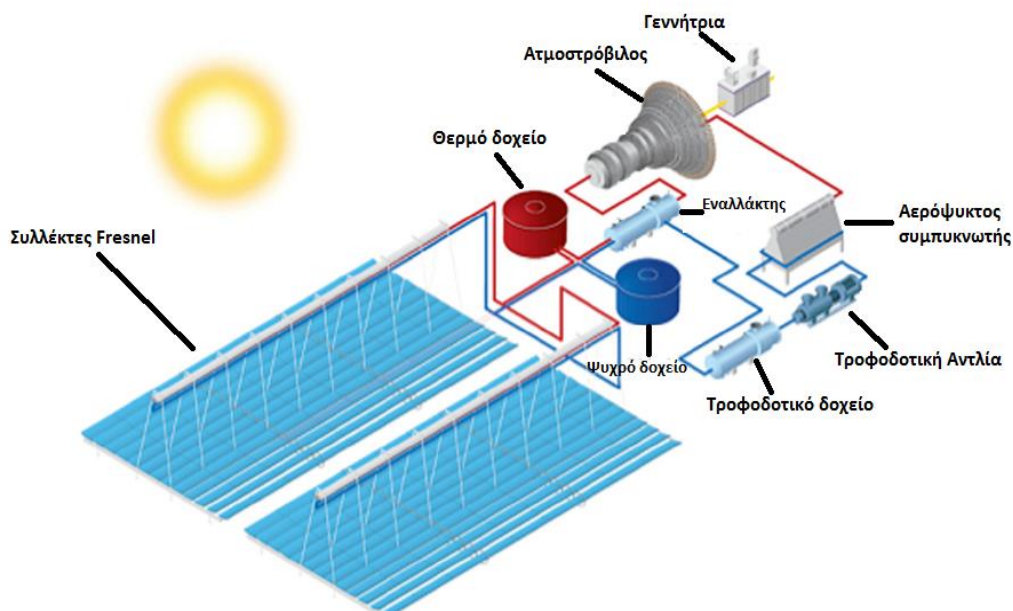
Οι συλλέκτες Fresnel, όπως η πλειονότητα των συγκεντρωτικών συλλεκτών χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες. Κάποιες, έχουν ήδη αναφερθεί όμως σε αυτό το σημείο θα τις αναλύσουμε ενδελεχώς.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:

Για αυτή την εφαρμογή, υπάρχουν δύο εναλλακτικές που έχουν να κάνουν με τον θερμικό κύκλο. Ο ένας τρόπος είναι το άμεσο κύκλωμα, όπου σε αυτό το θερμικό μέσο που κυκλοφορεί στον απορροφητήρα είναι και το εργαζόμενο μέσο του κύκλου Rankine, δηλαδή ατμοποιείται και πάει απευθείας στον στρόβιλο. Ο άλλος τρόπος είναι ο έμμεσος, σε αυτόν το θερμικό μέσο που κυκλοφορεί στον σωλήνα του απορροφητήρα, θερμαίνει με εναλλάκτη το θερμικό μέσο του κύκλου Rankine το οποίο κυκλοφορεί στο δευτερεύον κύκλωμα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι μπορούν να

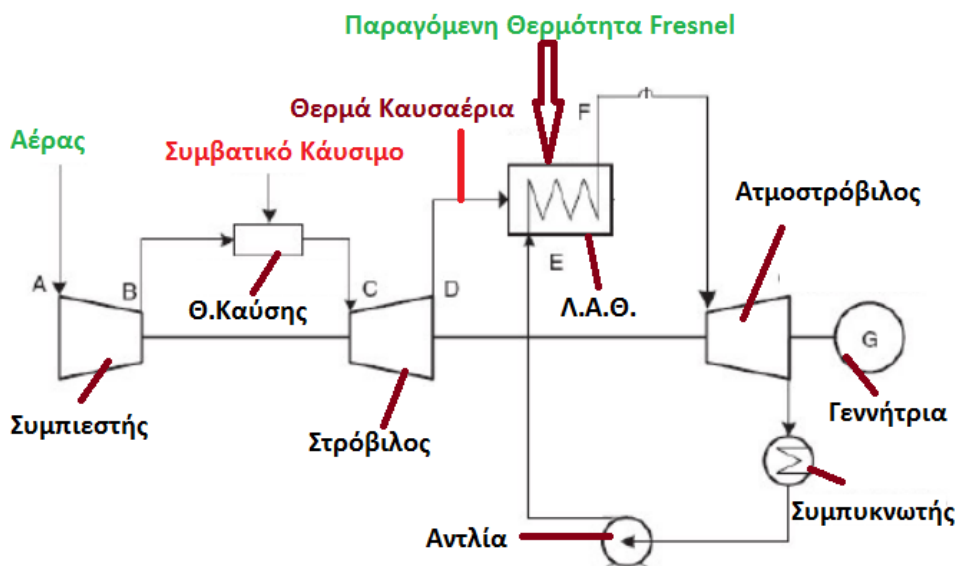
χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε τύπο κύκλου Rankine, δηλαδή σε περίπτωση αναθέρμανσης, υπερθέρμανσης και προθέρμανσης. Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη ενότητα, οι συλλέκτες Fresnel λειτουργούν αποδοτικά κατά την θερινή περίοδο το ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος είναι ψηλά στον ουράνιο θόλο. Έτσι, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση προθέρμανσης του θερμικού μέσου όταν ο συλλέκτης υπολειτουργεί, το οποίο θα λειτουργεί με λέβητα, συμβατού καυσίμου [3.13].

Στην παρακάτω εικόνα, βλέπουμε τα κύρια εξαρτήματα ενός τυπικού έμμεσου θερμικού κύκλου Fresnel. Συγκεκριμένα, το θερμικό μέσο (συνήθως θερμικό έλαιο) ξεκινά από το ψυχρό δοχείο και καταλήγει στο θερμό δοχείο αφού έχει θερμανθεί από τις δύο βαθμίδες Fresnel. Στη συνέχεια πηγαίνει στον εναλλάκτη όπου θερμαίνει το μέσο του δευτερεύοντος κυκλώματος (συνήθως νερό) το οποίο ατμοποιείται και εκτονώνεται στον αμοστρόβιλο περιστρέφοντας την γεννήτρια. Τέλος, ο κορεσμένος ατμός που εξέρχεται από τον αμοστρόβιλο, πηγαίνει προς τον συμπυκνωτή όπου γίνεται κορεσμένο συμπύκνωμα και μέσω της τροφοδοτικής αντλίας επιστρέφει στο τροφοδοτικό δοχείο.



Εικόνα 3.12 Τυπική εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής με συλλέκτες Fresnel [3.13]

Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα συνδυασμένου κύκλου, δηλαδή συστημάτων που συνδυάζει τον κύκλο Rankine και Joule. Σε αυτό το σύστημα, χρησιμοποιείται ένα συμβατικό καύσιμο όπως φυσικό αέριο και πετρέλαιο το οποίο προσφέρει θερμική ενέργεια σε έναν στρόβιλο ισχύος (κύκλος Joule). Τα θερμά καυσαέρια που εξέρχονται από τον στρόβιλο προσδίδουν θερμότητα σε έναν λέβητα ανάκτησης θερμότητας στον οποίο γίνεται η ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου το οποίο στη συνέχεια κατευθύνεται στον αμοστρόβιλο της εγκατάστασης (κύκλος Rankine). Σε αυτό το σύστημα, το θερμικό μέσο που εξέρχεται από τον Fresnel, συνεισφέρει στην πρόσδοση θερμότητας στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας του κύκλου Rankine [3.7]. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε, το θερμικό κύκλωμα αυτής της εφαρμογής.



Εικόνα 3.13 Συνδυασμένος κύκλος με συλλέκτη Fresnel

Ηλιακή ψύξη

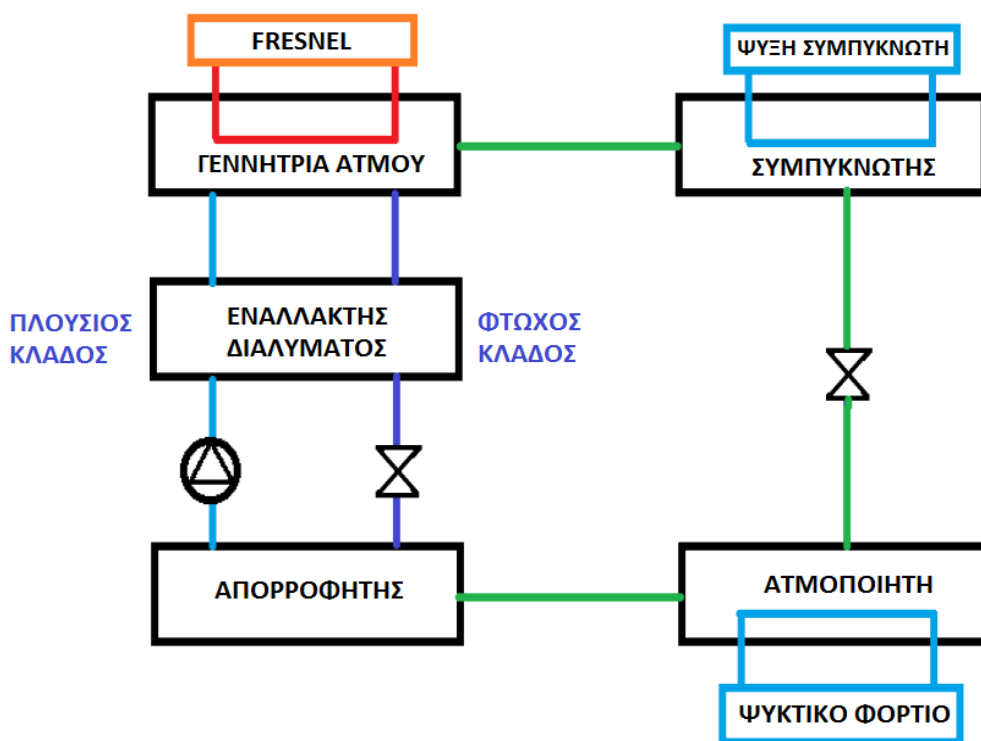
Στην εποχή μας, είναι πολύ αυξημένες οι ανάγκες κλιματισμού χώρων, συντήρησης τροφίμων και φαρμάκων αλλά και η κάλυψη υψηλών ψυκτικών φορτίων που απαιτούν αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνολογίες ψύξης που δεν έχουν να κάνουν μόνο με την κλασική συμπίεση ατμών. Κάποιες από αυτές είναι η ψύξη με απορρόφηση, προσρόφηση αλλά και η εξατμιστική ψύξη. Μια πολύ σημαντική εφαρμογή των συγκεντρωτικών συλλεκτών και πιο συγκεκριμένα του συλλέκτη Fresnel είναι η συμμετοχή τους τέτοιου είδους συστήματα ψύξης. Παρακάτω θα αναλύσουμε την ψύξη με απορρόφηση καθώς απαιτεί υψηλότερες θερμοκρασίες στην γεννήτρια ατμών από την εκρόφηση, άρα ταιριάζει περισσότερο με τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες Fresnel.

Ψύξη με απορρόφηση

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο φαινόμενο της ατμοποίησης όπως και η συμπίεση ατμών. Αυτό που ξεχωρίζει τους κύκλους απορρόφησης και τους κύκλους προσρόφησης από τους κύκλους μηχανική συμπίεση ατμών είναι η πολύ φθηνότερη παραγωγή ψυκτικής ισχύος των κρατών. Αυτό συμβαίνει, διότι οι κύκλοι αυτοί δεν χρησιμοποιούν συμπιεστή αλλά μία αντλία για την ανύψωση της πίεσης. Αυτό συμβαίνει διότι το υγρό μείγμα απαιτεί πολύ μικρότερη ενέργεια συμπίεσης σε σχέση με ένα αέριο για να μεταβληθεί η πίεση του. Πρακτικά την ανύψωση της πίεσης την πετυχαίνουμε με θερμικό τρόπο. Συνεπώς το μοναδικό σημείο που χρειάζεται να προσδώσουμε ισχύς στο κύκλωμα μας είναι η γεννήτρια ατμών εκεί που ουσιαστικά εκμεταλλευόμαστε την θερμική ενέργεια από τα Ηλιακά.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες αυτής της τεχνολογίας που αφορούν τα εργαζόμενα μέσα. Για ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιείται ο κύκλος αμμωνίας – νερού ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$), ενώ για υψηλότερες ο κύκλος νερού - βρωμιούχου λιθίου ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$). Στην πρώτη περίπτωση, το ψυκτικό μέσο είναι η αμμωνία και το μέσο απορροφήσεως το νερό. Στην δεύτερη περίπτωση, ψυκτικό μέσο είναι το νερό και μέσο απορροφήσεως το διάλυμα βρωμιούχου λιθίου. Παρακάτω, έπεται μια σύντομη περιγραφή του κύκλου αμμωνίας – νερού ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$).

Ξεκινώντας από τον ατμοποιητή το ψυκτικό μας μέσο απορροφάται από το νερό στον απορροφητή προσδίδοντας έτσι θερμότητα στο περιβάλλον καθώς πρόκειται για μία εξώθερμη μεταβολή. Συνήθως, αυτή τη θερμότητα την παραλαμβάνουμε με ένα κύκλωμα ψυκτικού νερού καθώς για να έχουμε καλή απόδοση στον απορροφητή θέλουμε να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη θερμοκρασία. Στη συνέχεια ανυψώνουμε την πίεση στον πλούσιο κλάδο και συναντάμε τον εναλλάκτη διαλύματος. Έπειτα, οδηγούμαστε στη γεννήτρια η οποία θερμαίνεται από το θερμικό μέσο που εξέρχεται από τον συλλέκτη Fresnel, έτσι ώστε να γίνει διαχωρισμός της αμμωνίας από το νερό. Έτσι, το υγρό νερό θα συνεχίσει στον κλάδο πτωχής διάλυσης ψυκτικού και στη συνέχεια αποτονώνεται στον απορροφητή. Η αμμωνία θα συνεχίσει στον ψυκτικό κύκλο και στη συνέχεια οδηγείται στον συμπυκνωτή. Τέλος, αποτονώνεται στον ατμοποιητή, όπου θα παραλάβει και το εκάστοτε ψυκτικό φορτίο. Στο παρακάτω, σχήμα φαίνεται ο αντίστοιχος ψυκτικός κύκλος.



Εικόνα 3.12 Κύκλωμα απορρόφησης αμμωνίας νερού ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$)

Παραγωγή θέρμανσης χώρων και ζεστού νερού χρήσης :

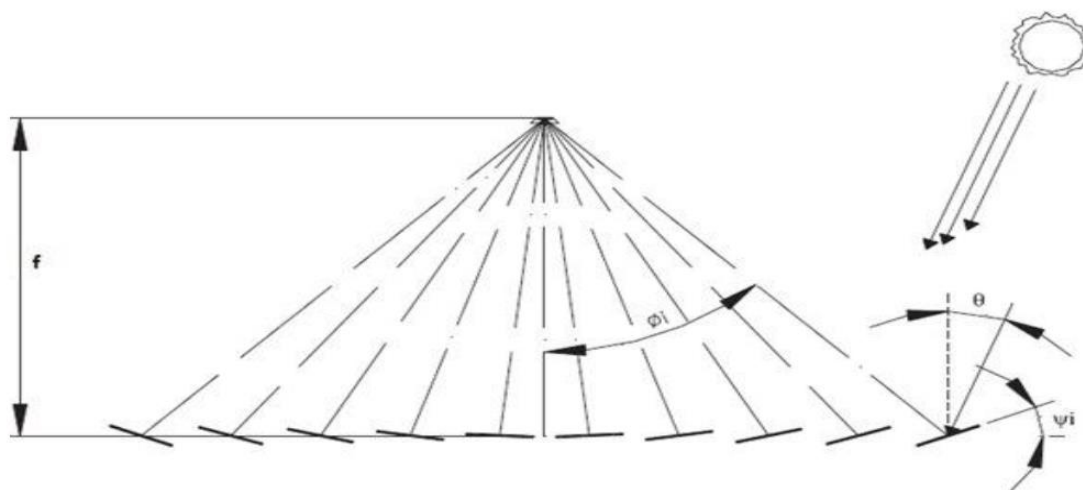
Όπως έχουμε προαναφέρει μια από τις πιο βασικές εφαρμογές των ηλιακών συλλεκτών αποτελεί η κάλυψη θερμικών φορτίων που έχουν να κάνουν με ζεστό νερό χρήσης αλλά και με τη θέρμανση χώρων. Ωστόσο, αυτές οι εφαρμογές δεν απαιτούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες (συνήθως κάτω από 100°C) οπότε για την ικανοποίησή τους αρκούν και οι επίπεδοι συλλέκτες. Το πλεονέκτημα, των συλλεκτών Fresnel και εν γένει της πλειονότητας των συγκεντρωτικών είναι ότι επειδή παράγουν υψηλές θερμοκρασίες μπορούν με μικρότερη παροχή να καλύψουν μεγάλα θερμικά φορτία. Κατά συνέπεια, με την χρήση αυτών μπορούμε να εξοικονομήσουμε συλλεκτική επιφάνεια σε σχέση με τους επίπεδους. Επίσης, χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες θερμικές απώλειες. Το βασικό μειονέκτημα τους

τα επίπεδα κάτοπτρα αποτελούν κομμάτια πολλών παραβολών, συγκεκριμένα κάθε κέντρο επίπεδου κατόπτρου ανήκει σε μια ξεχωριστή παραβολή. Το χαρακτηριστικό της δεύτερης κατηγορίας είναι ότι είναι πιο εύκολη στην εγκατάσταση και έχει μεγαλύτερη αντοχή στα φορτία του ανέμου σε σχέση με την πρώτη καθώς τα κέντρα όλων των κατόπτρων βρίσκονται στο ίδιο ύψος.

Όπως θα αναφερθεί σε επόμενη ενότητα, για τον σχεδιασμό του συλλέκτη της συγκεκριμένης εργασίας επιλέχθηκε η τελευταία κατηγορία επίπεδων κατόπτρων, δηλαδή αυτή με τα ισοϋψή κέντρα κατόπτρων. Η μαθηματική συνθήκη για να ανήκουν τα κέντρα των κατόπτρων σε παραβολή με εστία τον απορροφητήρα σχετίζεται με την γωνία στροφής τους [3.7].

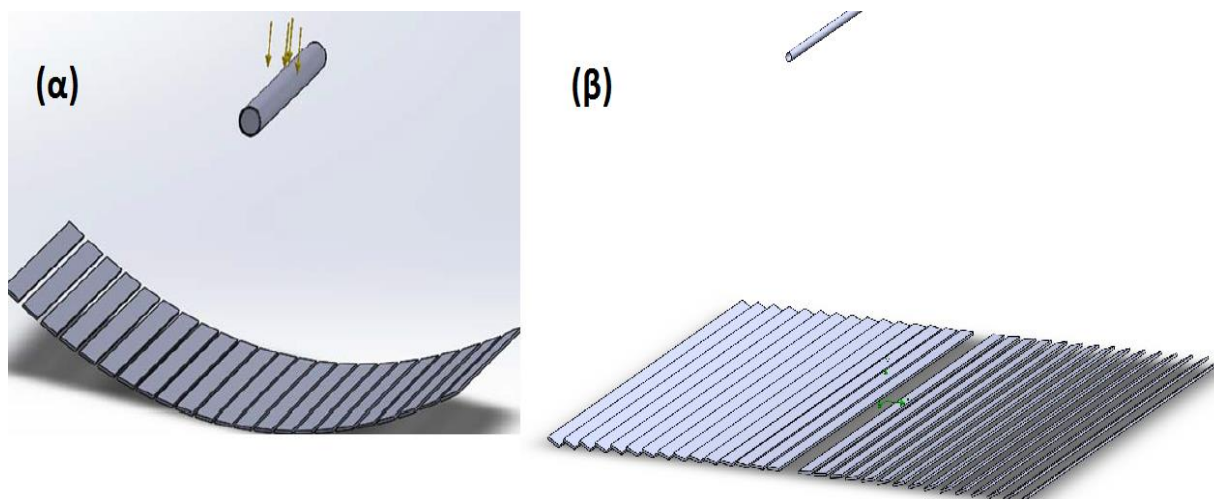
Συγκεκριμένα, αν ϕ είναι η γωνία που σχηματίζει το κέντρο ενός κατόπτρου με το κέντρο του απορροφητήρα που βρίσκεται στην εστία της αντίστοιχης παραβολής σε ύψος f , θ είναι η γωνία μεταξύ του κατακόρυφου άξονα και των ηλιακών ακτινών, τότε η γωνία κλίσης ψ των κατόπτρων ως προς τον οριζόντιο άξονα θα δίνεται από τη σχέση:

$$\psi_i = \frac{\phi_i - \theta}{2} \tag{3.1}$$



Εικόνα 3.14 Κλίση κατόπτρων συναρτήσει της γωνίας θ [3.19]

Γενικά, τα πρωτεύοντα κάτοπτρα τοποθετούνται σε σειρές με μήκος όσο ο σωλήνας του απορροφητήρα και πλάτος όσο το άνοιγμα της παραβολής της εκάστοτε εφαρμογής. Ένα ακόμα σημαντικό γεωμετρικό μέγεθος που αφορά τα πρωτεύοντα κάτοπτρα είναι το κενό μεταξύ τους. Έτσι, θα πρέπει να γίνεται προσεκτικός χωροταξικός σχεδιασμός έτσι ώστε τα κενά να μην είναι τόσο μικρά ώστε να υπάρχουν προβλήματα σκίασης των κατόπτρων, αλλά ταυτόχρονα να μην είναι μεγάλα καθώς έτσι θα έχουμε μεγάλες οπτικές απώλειες λόγω της μειωμένης ανακλαστικής επιφάνειας. Όπως θα αναφέρουμε στη συνέχεια, είναι αναγκαία η ύπαρξη συστήματος παρακολούθησης του ήλιου, το οποίο θα στρέφει τα κάτοπτρα προς τις ακτίνες του ήλιου έτσι ώστε να προσεγγίζουν το ηλιακό μεσημέρι. Οπότε τα κάτοπτρα θα στρέφονται κάθε φορά κατά τη γωνία ψ . Τέλος, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, σε περιπτώσεις υψηλών φορτίων ανέμου τα κάτοπτρα έχουν την δυνατότητα να οριζοντιοποιούνται με σκοπό να τα αντέχουν.



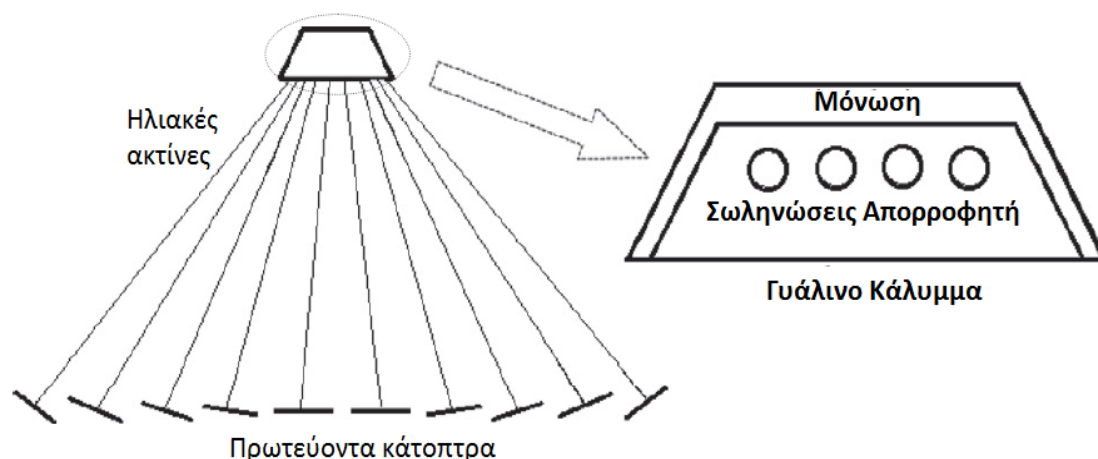
Εικόνα 3.15 Επίπεδα κάτοπτρα ως κομμάτια μίας ενιαίας παραβολής (α), κάτοπτρα ως κομμάτια πολλών παραβολών, σχεδιασμός στο Solidworks (β)

Δευτερεύον κάτοπτρο

Γενικά για τη γεωμετρία του συγκεκριμένου έχουν προταθεί πολλές καινοτομικές ιδέες. Οι βασικότερες παραλλαγές του είναι το τραπεζοειδές κάτοπτρο, το CPC και το απλό παραβολικό. Παρακάτω θα αναλύσουμε τη κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες.

Τραπεζοειδές Κάτοπτρο:

Η συγκεκριμένη μορφή κατόπτρου εκτός από το να επανεστιάζει τις ηλιακές ακτίνες στους σωλήνες του απορροφητήρα, έχει επίσης και μονωτικό ρόλο. Αυτό το πετυχαίνει καθώς στην βάση του έχει γυάλινο κάλυμμα το οποίο κλείνει αεροστεγώς τον χώρο που περικλείεται από τους σωλήνες και το κάτοπτρο. Έτσι, μειώνει τις απώλειες συναγωγής με το περιβάλλον. Με λίγα λόγια, όταν οι σωλήνες του απορροφητή δεν είναι τύπου κενού, χρησιμοποιείται το γυάλινο κάλυμμα. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το γυάλινο κάλυμμα αφορά μόνο οικονομικούς λόγους, καθώς οι σωλήνες του κενού είναι πιο αποδοτική λύση, αλλά ταυτόχρονα πιο ακριβοί.

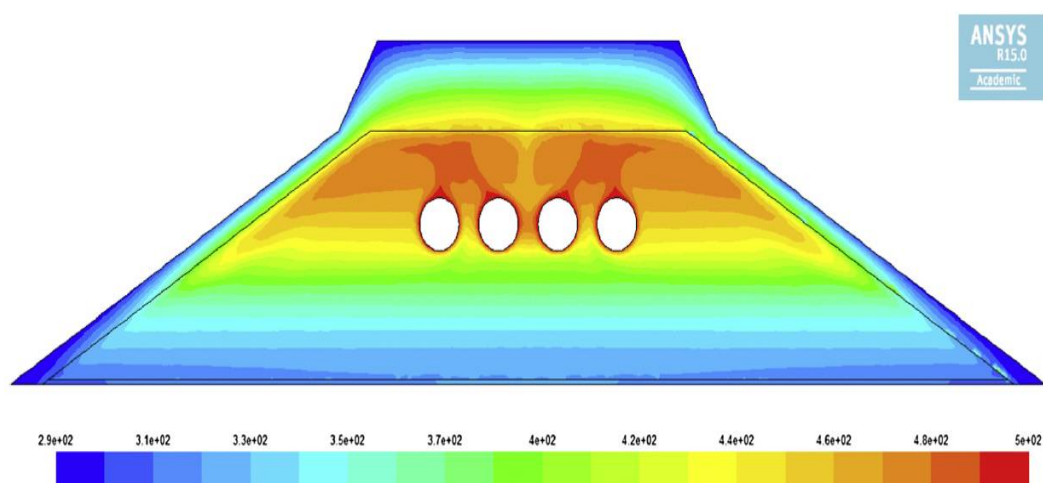


Εικόνα 3.16 Κύρια μέρη τραπεζοειδούς δευτερεύοντος κατόπτρου [3.20]

Αξίζει να σημειωθεί, ότι τις περισσότερες φορές στις εφαρμογές με τραπεζοειδές κάτοπτρο ο απορροφητής αποτελείται από πλήθος σωλήνων και όχι από ένα μοναδικό σωλήνα. Επίσης, όπως θα δούμε στη συνέχεια το τραπεζοειδές κάτοπτρο

αποτελεί την πιο απλή άρα και φθηνή επιλογή δευτερεύοντος κατόπτρου, σε σχέση με το CPC και το απλό παραβολοειδές, καθώς έχει πιο απλή κατασκευή και εγκατάσταση. Παρόλα αυτά, δεν είναι τόσο αποδοτικό από άποψη οπτικής σε σχέση με τα άλλα δύο είδη, καθώς αυτά αποτελούν παραβολές οι οποίες διέπονται από την ανακλαστική ιδιότητα, όπως έχουμε αναφέρει στην αρχή αυτής της ενότητας.

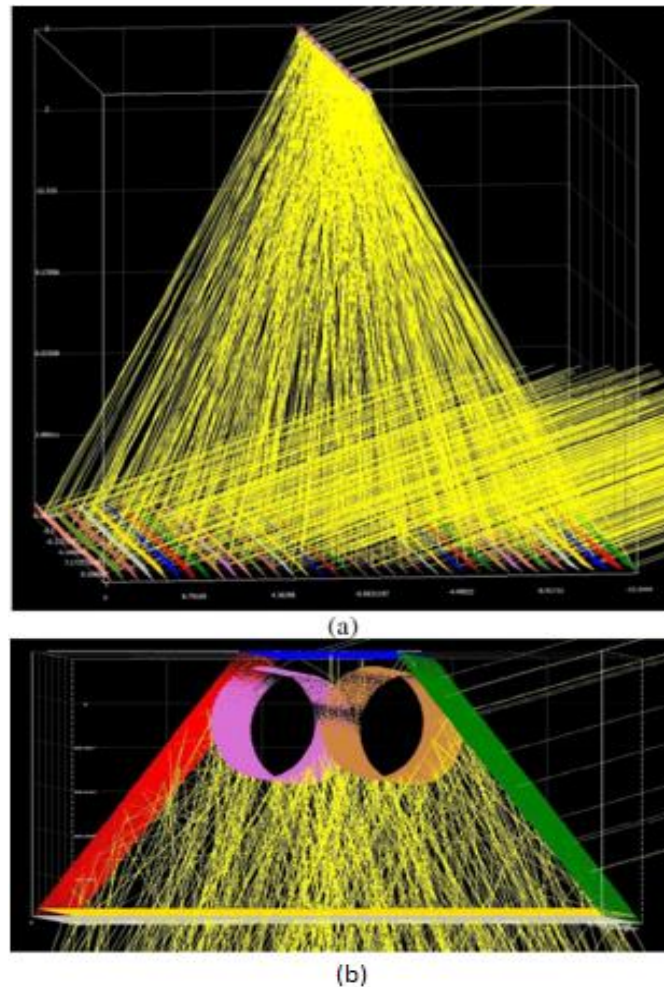
Στην παρακάτω εικόνα, βλέπουμε τη θερμοκρασιακή κατανομή στο χώρο που περικλείεται από το τραπεζοειδές κάτοπτρο και την γυάλινη βάση με θερμοκρασία περιβάλλοντος 300 K και θερμοκρασία εξωτερικού τοιχώματος σωλήνων 500 K. Όπως αναμενόταν η πιο θερμή περιοχή είναι κοντά στους σωλήνες του απορροφητή. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως το πεδίο είναι κατά κάποιο τρόπο ομοιόμορφο καθώς στον χώρο αυτό υπάρχει ανακυκλοφορία του αέρα, λόγω διαφοράς πυκνοτήτων.



Εικόνα 3.17 Θερμοκρασιακή Κατανομή στο χώρο που περικλείεται από το τραπεζοειδές κάτοπτρο και την γυάλινη βάση [3.20]

Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενες ενότητες, ο βασικός λόγος τοποθέτησης δευτερεύοντος κατόπτρου, έχει να κάνει με τις ανεκμετάλλευτες ηλιακές ακτίνες λόγω της κωνικότητάς τους, ένα φαινόμενο το οποίο δυσχεραίνει, όσο ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά στον ουράνιο θόλο άρα η γωνία του με την κατακόρυφο μεγαλώνει. Επομένως, είναι χρήσιμο εκτός από προσομοιώσεις που έχουν να κάνουν με την θερμοκρασιακή κατανομή στο κάτοπτρο, να πραγματοποιούμε οπτικές προσομοιώσεις που δείχνουν την πορεία των ακτινών, και κατά πόσο αυτές επανεστιάζονται στον απορροφητή.

Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται μια οπτική προσομοίωση σε τραπεζοειδές κάτοπτρο, για γωνία πρόσπτωσης ηλιακών ακτινών $\theta=70^{\circ}$ που δημοσιεύθηκε στην εργασία του M.A. Moghimi et al [3.21]. Η εικόνα (a) είναι η συνολική εικόνα του συλλέκτη, ενώ η εικόνα (b) είναι το τραπεζοειδές κάτοπτρο σε μεγέθυνση.

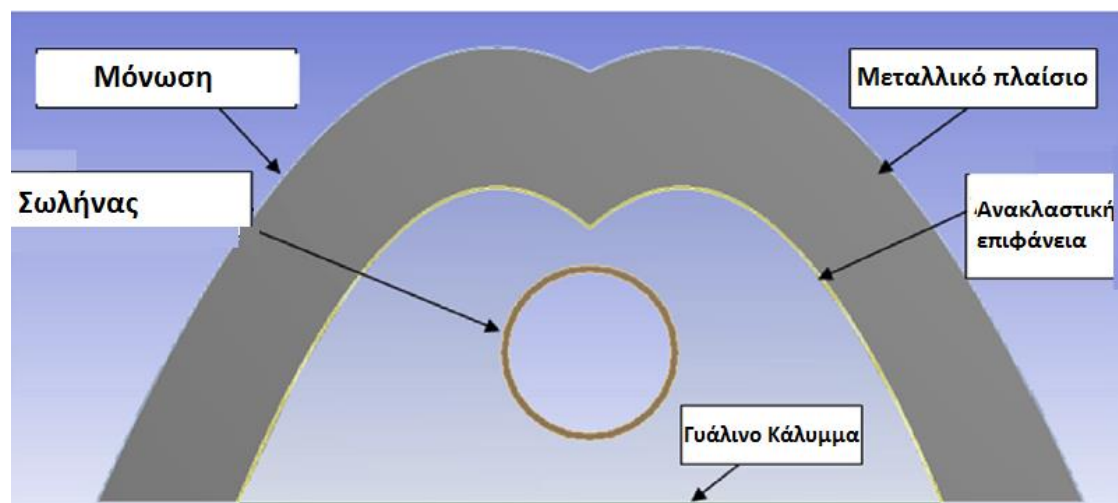


Εικόνα 3.18 Προσομοίωση ανακλούμενων ακτινών σε τραπεζοειδές κάτοπτρο για γωνία ήλιου 70° ως προς τον κατακόρυφο άξονα [3.21]

Σύνθετο Παραβολικό Κάτοπτρο – CPC

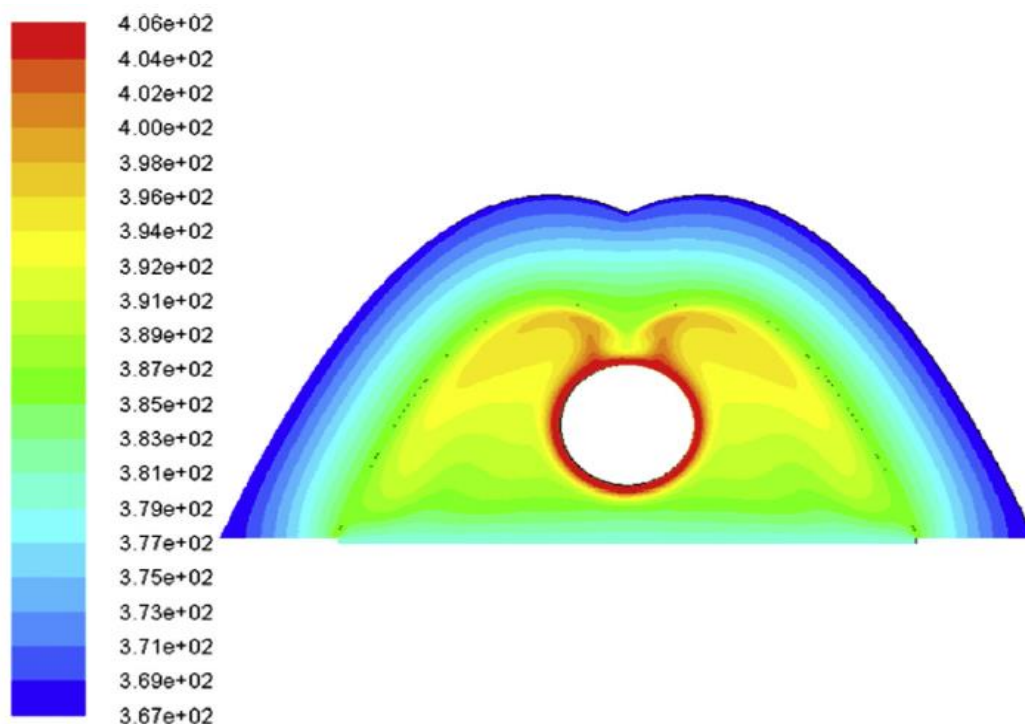
Το συγκεκριμένο είδος έχει πολλά κοινά με το τραπεζοειδές, μόνο που έχει πολύ καλύτερη ανακλαστική συμπεριφορά καθώς αποτελείται από δύο παραβολές που εστιάζουν στον απορροφητή. Χαρακτηριστικό τους μειονέκτημα, είναι η δύσκολη κατασκευή και εγκατάστασή τους, συνεπώς είναι επιλογή με ιδιαίτερα υψηλό κόστος. Επίσης, αν για κάποιο λόγο υποστεί έστω και ελάχιστη μηχανική παραμόρφωση τότε η ανακλαστική του απόδοση μειώνεται δραματικά, αυτό το συναντάμε σε κάθε παραβολοειδές κάτοπτρο. Όπως και τα τραπεζοειδή, όταν ο απορροφητής δεν είναι σωλήνας κενού, τοποθετείται συχνά γυάλινο κάλυμμα στη βάση του κατόπτρου, έτσι ώστε να μειωθούν οι απώλειες λόγω συναγωγής. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το συγκεκριμένο κάλυμμα είναι ανάγκη να είναι μια επιλεκτική επιφάνεια, δηλαδή να έχει υψηλή διαπερατότητα, χαμηλή ανακλαστικότητα και απορροφητικότητα έτσι ώστε να μην μειώνει σημαντικά τον συνολικό οπτικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Τέλος, μια σημαντική διαφορά μεταξύ του σωλήνα κενού και του κανονικού σωλήνα με γυάλινο κάλυμμα κατόπτρου, είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση οι απώλειες συναγωγής απλώς μειώνονται σε ένα βαθμό και δεν μηδενίζονται εντελώς όπως στην πρώτη περίπτωση. Αυτό συμβαίνει, διότι στην δεύτερη περίπτωση δεν έχουμε συνθήκες κενού καθώς κάτι τέτοιο είναι πρακτικά

αδύνατο από άποψης κατασκευής [3.21, 3.22, 3.23]. Στην παρακάτω εικόνα, αποτυπώνονται τα βασικά μέρη ενός δευτερεύοντος κατόπτρου με γυάλινη βάση.



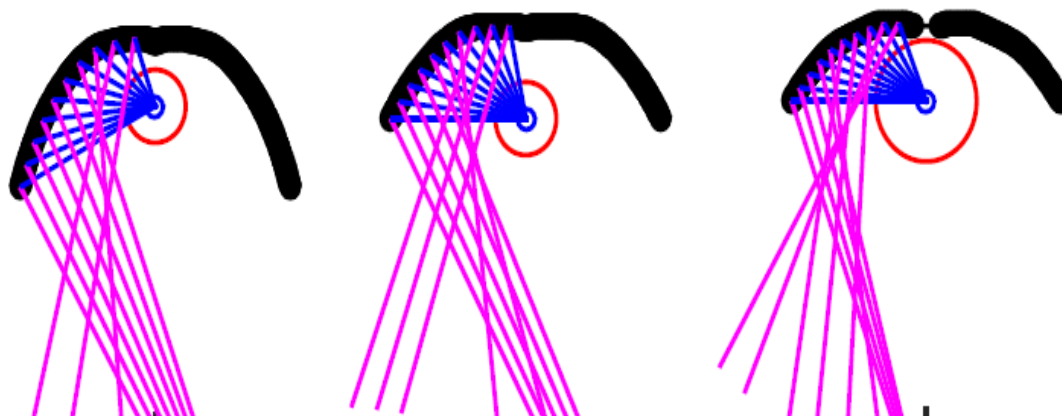
Εικόνα 3.19 Κύρια μέρη δευτερεύοντος κατόπτρου τύπου CPC [3.22]

Στην παρακάτω εικόνα, βλέπουμε μια προσομοίωση στο ANSYS που δημοσιεύθηκε από τους Hani Beltagy et al το 2016. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση αφορούσε τη θερμοκρασιακή κατανομή στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ του δευτερεύοντος κατόπτρου μορφής CPC και του γυάλινου καλύμματος και είχε τα εξής δεδομένα: θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 300 K και θερμοκρασία εξωτερικού τοιχώματος σωλήνα 410 K.



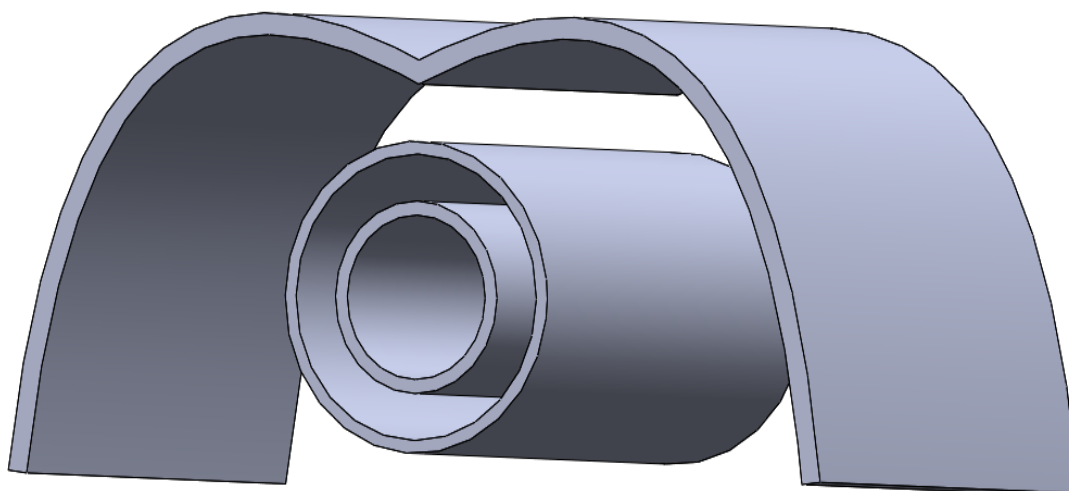
Εικόνα 3.20 Θερμοκρασιακή Κατανομή στο χώρο που περικλείεται από το CPC κάτοπτρο και την γυάλινη βάση [3.22]

Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνονται διάφοροι γεωμετρικοί σχεδιασμοί του δευτερεύοντος κατόπτρου με σκοπό την οπτική βελτιστοποίηση του συλλέκτη που δημοσιεύθηκαν επίσης στην εργασία του Hani Beltagy et al. Αυτοί οι σχεδιασμοί έχουν ως παράμετρο το άνοιγμα του κατόπτρου, την υψομετρική του απόσταση από το κέντρο του απορροφητή, καθώς και το μέγεθος του σωλήνα του απορροφητή. Με το ρόζ χρώμα είναι σχεδιασμένες οι ακτίνες που φτάνουν από τα πρωτεύοντα κάτοπτρα και με μπλέ οι ανακλώμενες με κατεύθυνση το κέντρο του σωλήνα.



Εικόνα 3.21 Διάφορες γεωμετρικές παραλλαγές βελτιστοποίησης του CPC κατόπτρου [3.23]

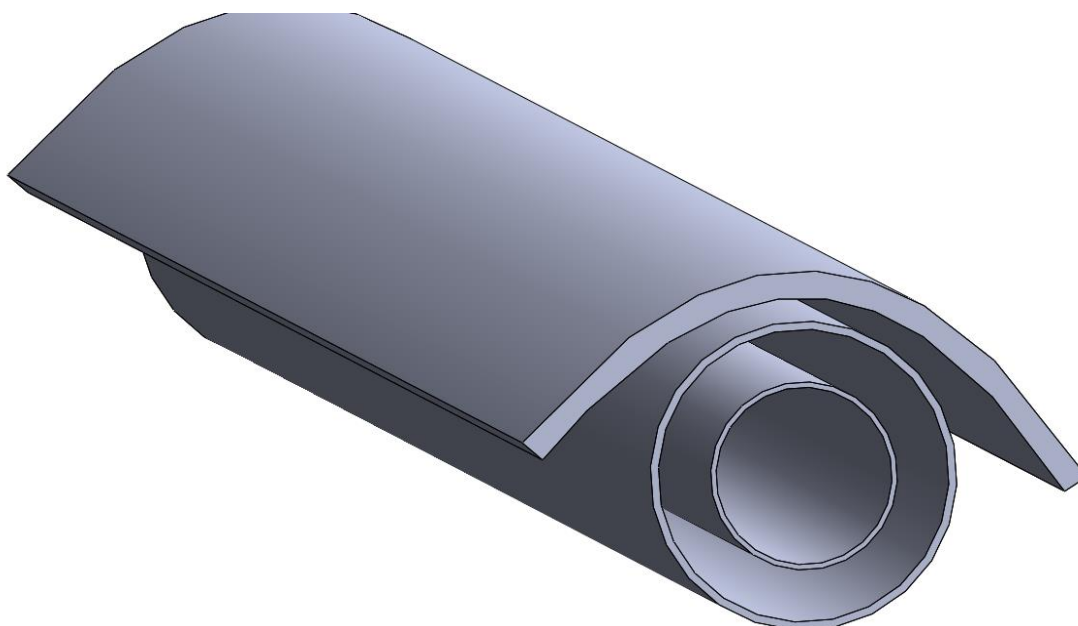
Όπως αναφέραμε παραπάνω, για να μειώσουμε δραστικά τις θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής, αντί για τοποθέτηση γυάλινης βάσης στο κάτοπτρο, καταφεύγουμε στην λύση του σωλήνα κενού στον απορροφητήρα. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται αυτή η εφαρμογή.



Εικόνα 3.22 CPC κάτοπτρο σε συλλέκτη Fresnel με σωλήνα Κενού, σχεδιασμός στο Solidworks

Απλό Παραβολικό Κάτοπτρο

Αυτό το είδος κατόπτρου έχει αρκετές ομοιότητες με το κάτοπτρο τύπου CPC με την βασική διαφορά ότι είναι πιο απλής γεωμετρίας, χωρίς όμως να χάνει σε οπτική απόδοση. Όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, η εγκατάσταση Fresnel που θα εξετάσουμε σε αυτή την εργασία, έχει ως δευτερεύον κάτοπτρο αυτό το είδος. Συνεπώς, περεταίρω ανάλυση για αυτό το είδος κατόπτρου θα ακολουθήσει στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Γενικά, αξίζει να αναφέρουμε ότι βασικές γεωμετρικές παράμετροι για το σχεδιασμό του αποτελούν η απόσταση του κατόπτρου από τον σωλήνα, το άνοιγμα της παραβολής και αλλά και η θέση της εστίας της. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται αυτό το είδος κατόπτρου σε σωλήνα κενού, ενός συλλέκτη Fresnel.



Εικόνα 3.23 Παραβολοειδές κάτοπτρο σε συλλέκτη Fresnel με σωλήνα Κενού, σχεδιασμός στο Solidworks

3.5.2 Οπτική ανάλυση

Προκειμένου να βρούμε το μέγεθος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στον απορροφητήρα, είναι χρήσιμο να κάνουμε μια μοντελοποίηση η οποία απαιτεί κάποια βασικά μεγέθη, όπως η ανακλαστικότητα ρ , ο βαθμός σύλληψης γ και το γινόμενο διαπερατότητας και απορροφητικότητας του συλλέκτη μας. Αυτά, θα μας δώσουν μία πρώτη προσέγγιση για τον οπτικό βαθμό απόδοσης. Στην συνέχεια αυτής της ενότητας θα δούμε ότι, όπως είναι προφανές ο οπτικός βαθμός απόδοσης εκτός των παραπάνω εξαρτάται και από την θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο. Για το λόγο αυτό, θα ορίσουμε ένα μέγεθος που λέγεται παράγοντας γωνίας πρόσπτωσης K , ο οποίος δείχνει πόσο μεταβάλλεται ο οπτικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη σε σχέση με τη βέλτιστη περίπτωση, όπου ο ήλιος βρίσκεται στην υψηλότερη θέση, δηλαδή κατά το ηλιακό μεσημέρι.

Ανακλαστικότητα κατόπτρων (ρ)

Ο συγκεκριμένος δείκτης, μας δείχνει ποιοτικά πόσο αποδοτικά ανακλά την ακτινοβολία ένα κάτοπτρο. Συγκεκριμένα, η τιμή του δίνεται από τον λόγο της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από το κάτοπτρο προς αυτή που προσπίπτει σε αυτό. Προφανώς, σε κάθε εφαρμογή κατόπτρου, θέλουμε την τιμή αυτή αρκετά υψηλή. Για το λόγο αυτό, τις περισσότερες φορές η επιφάνεια των κατόπτρων ενισχύεται με λεπτή στρώση ανακλαστικών στοιχείων, οπότε και οι τιμές της ανακλαστικότητας κυμαίνονται από 90% έως 95%. Στην περίπτωση του συλλέκτη Fresnel, επειδή έχουμε δύο ειδών κάτοπτρα, τα πρωτεύοντα και το δευτερεύον, είναι ανάγκη να είναι ίδιας ανακλαστικής ποιότητας, δηλαδή να έχουν ίδιο ρ [2.15, 3.7].

Βαθμός σύλληψης (γ)

Πρόκειται για ένα μέγεθος το οποίο χαρακτηρίζει την ικανότητα των πρωτευόντων κατόπτρων να στέλνουν αποδοτικά τις ηλιακές ακτίνες στο δευτερεύον κάτοπτρο. Συνεπώς εξαρτάται από την γεωμετρία και τη χωροταξία των πρωτευόντων κατόπτρων αλλά και από την ποιότητα της επιφάνειάς τους. Επίσης, εξαρτάται και από την γεωμετρία του δευτερεύοντος κατόπτρου. Για παράδειγμα αν είναι σκονισμένα ή έχουν φθαρεί επιφανειακά. Τέλος, ένας ακόμα λόγος που οι ακτίνες δεν φτάνουν στον απορροφητήρα είναι η κωνικότητα τους κάτι που έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη ενότητα. Ορίζεται, ως ο λόγος της ακτινοβολίας που φτάνει στον απορροφητήρα προς την ακτινοβολία που στέλνουν τα κάτοπτρα. Σε εφαρμογές Fresnel, η τιμή του κυμαίνεται από 60% έως και 85 % κάτι που εξαρτάται από την ποιότητα και τη γεωμετρία των πρωτευόντων κατόπτρων, ενώ σε εφαρμογές PTC κυμαίνεται σε αρκετά υψηλότερες τιμές που αγγίζουν το 90% με 95%. Συνεπώς, εδώ φαίνεται με τον καλύτερο τρόπο η ανάγκη δευτερεύοντος κατόπτρου στους συλλέκτες Fresnel.[3.7, 3.9].

Γινόμενο διαπερατότητας- απορροφητικότητας ($\tau\alpha$)

Με τον όρο τ εννοούμε την διαπερατότητα του γυάλινου καλύμματος την οποία την θέλουμε όσο το δυνατόν υψηλότερη, τυπική τιμή επιλεκτικής επιφάνειας είναι 95%. Με τον όρο α ονομάζουμε την απορροφητικότητα του απορροφητήρα, την οποία την θέλουμε επίσης υψηλή, κυμαίνεται από 90% έως 95%. Άρα, το γινόμενο τους φτάνει την τιμή από 80% έως 88% στους σύγχρονους συλλέκτες [2.15].

Οπτικός βαθμός απόδοσης (η_{opt})

Το συγκεκριμένο μέγεθος είναι πολύ μεγάλης σημασίας ειδικά στην περίπτωση των συγκεντρωτικών συλλεκτών, καθώς καθορίζει σε πολύ υψηλό βαθμό τον συνολικό βαθμό απόδοσης. Ορίζεται ως ο λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τον απορροφητήρα Q_{abs} προς την ακτινοβολία που προσπίπτει στα κάτοπτρα Q_{solar} . Τυπικές τιμές του για συλλέκτη Fresnel κατά το ηλιακό μεσημέρι είναι μεταξύ 55% και 70%, αυτές καθορίζονται απολύτως από την εκάστοτε τεχνολογία κατόπτρων που χρησιμοποιεί ο συλλέκτης. Για παράδειγμα, οι υψηλές τιμές αυτού του διαστήματος αφορούν περιπτώσεις συλλεκτών Fresnel με παραβολικά πρωτεύοντα κάτοπτρα και CPC δευτερεύον, ενώ οι χαμηλές με επίπεδα κάτοπτρα και δευτερεύον χαμηλής απόδοσης. Παρακάτω, βλέπουμε τον τύπο για τον υπολογισμό του οπτικού βαθμού απόδοσης.

$$\eta_{opt} = \frac{Q_{abs}}{Q_{solar}} \quad (3.2)$$

Ο μέγιστος οπτικός βαθμός απόδοσης που συμβαίνει για $\theta=0^\circ$ δίνεται από την σχέση, με ρ_1, ρ_2 οι ανακλαστικότητες των πρωτευόντων και του δευτερεύοντος κατόπτρου αντίστοιχα, $(\tau\alpha)$ το γινόμενο διαπερατότητας του καλύμματος και απορροφητικότητας του απορροφητή και γ_o ο βαθμός σύλληψης για $\theta=0^\circ$:

$$\eta_{opt,max} = \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \gamma_o \cdot (\tau\alpha) \quad (3.3)$$

Παράγοντας γωνίας πρόσπτωσης K (Incident angle modifier)

Είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος το οποίο, όπως αναφέραμε στην εισαγωγή αυτής της ενότητας, δείχνει την μεταβολή του οπτικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο. Συγκεκριμένα, μας δείχνει πόσο μεταβάλλεται αυτός, σε σχέση με την βέλτιστη περίπτωση δηλαδή για $\theta=0^\circ$. Ορίζεται ως ο λόγος, της τιμής του οπτικού βαθμού απόδοσης για μία οποιαδήποτε γωνία θ προς την αντίστοιχη τιμή του οπτικού για $\theta=0^\circ$. Γενικά, η τιμή του δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$K(\theta) = \frac{\eta_{opt}(\theta)}{\eta_{opt,max}} \quad (3.4)$$

Συνεπώς, αν συνδυάσουμε τις σχέσεις (3.3) και (3.4) προκύπτει η παρακάτω ιδιαίτερα χρήσιμη σχέση:

$$\eta_{opt}(\theta) = \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \gamma_o \cdot (\tau\alpha) \cdot K(\theta) \quad (3.5)$$

Συνιστώσες K_L, K_T και γωνίες θέσεις ήλιου

Είναι ιδιαίτερα άξιο αναφοράς, το γεγονός ότι ο παράγοντας K αποτελείται από δύο συνιστώσες και συγκεκριμένα είναι το γινόμενο των K_L και K_T . Η πρώτη, είναι η συνιστώσα του K κατά τον επιμήκη άξονα του συλλέκτη (longitude) και η δεύτερη είναι η συνιστώσα κατά τον εγκάρσιο άξονα (transverse).

$$K(\theta) \approx K_L(\theta_L) \cdot K_T(\theta_T) \quad (3.6)$$

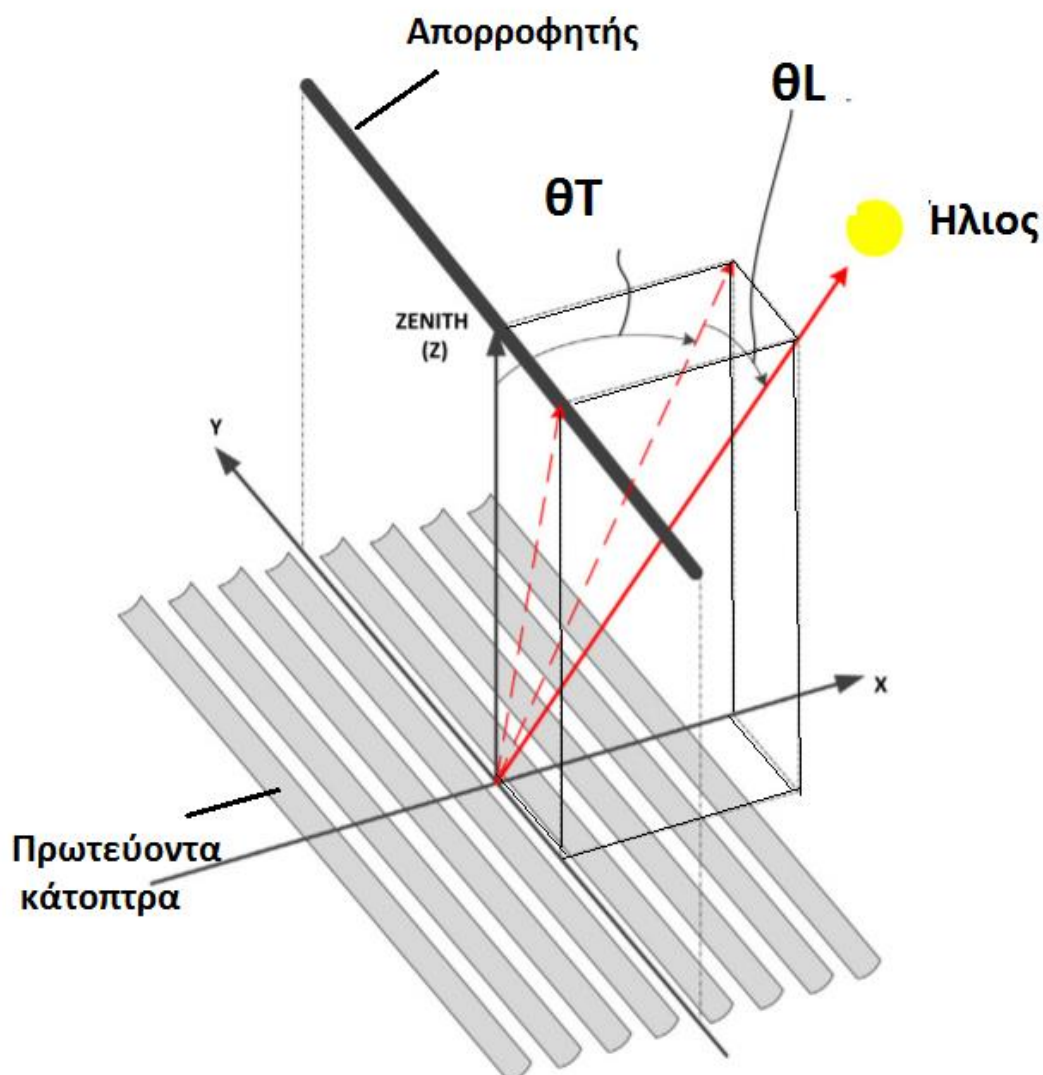
Για να ορίσουμε τις παραπάνω μεταβλητές, θα πρέπει πρώτα να ορίσουμε τις αντίστοιχες γωνίες πρόσπτωσης του ήλιου θ_L, θ_T . Αυτές, προκύπτουν από τη προβολή της γωνίας πρόσπτωσης στα δύο κάθετα επίπεδα και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [3.7], [3.13]

$$\tan^2(\theta) = \tan^2(\theta_L) + \tan^2(\theta_T) \quad (3.7)$$

$$\tan(\theta_L) = \cos(\gamma_s) \cdot \tan(\theta), \quad (3.8)$$

$$\tan(\theta_T) = \sin(\gamma_s) \cdot \tan(\theta), \quad (3.9)$$

Οι απώλειες που οφείλονται στην εγκάρσια γωνία θ_T λέγονται απώλειες συνημίτονου (cosine losses), ενώ αυτές που οφείλονται στην διαμήκη γωνία θ_L ονομάζονται απώλειες τέλους (end losses). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [3.7], [3.13], οι πιο σημαντικές απώλειες είναι αυτές που προκαλούνται από την μεταβολή της θ_T . Συνεπώς, η γωνία στροφής των κατόπτρων από το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου είναι η θ_T . Συνεπώς, με αυτή την πληροφορία γίνεται κατανοητός ο λόγος για τον οποίο το σύστημα παρακολούθησης λειτουργεί κατά την διεύθυνση Βορρά-Νότου (N-S), με τον άξονα του απορροφητήρα να βρίσκεται στη διεύθυνση Ανατολής- Δύσης (E-W), καθώς η μετακίνηση του ήλιου σε αυτή τη διεύθυνση (N-S) είναι μικρή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται οι συνιστώσες της γωνίας πρόσπτωσης θ_T , θ_L σχεδιασμένες ως προς το σύστημα του συλλέκτη Fresnel.



Εικόνα 3.24 Συνιστώσες γωνίας πρόσπτωσης ήλιου (θ_T , θ_L) [3.13]

3.5.3 Θερμοδυναμική ανάλυση

Σε αυτή την ενότητα θα δώσουμε τις βασικές εξισώσεις που απαιτεί η θερμοδυναμική ανάλυση του συλλέκτη Fresnel. Στην παρακάτω εξίσωση υπολογίζεται η καθαρή κατοπτρική επιφάνεια A_a [m^2] ή αλλιώς επιφάνεια ανοίγματος, δηλαδή η επιφάνεια

των πρωτεύοντων κατόπτρων αν αφαιρέσουμε από αυτά την επιφάνεια των κενών που έχουν μεταξύ τους. Προκειμένου να το υπολογίσουμε θεωρούμε ότι όλα τα κάτοπτρα βρίσκονται στην οριζόντια θέση.

$$A_a = N_{rf} \cdot W_0 \cdot L, \quad (3.10)$$

Όπου: N_{rf} , το πλήθος των κατόπτρων, W_0 , το μήκος του κάθε κατόπτρου και L το μήκος της κάθε σειράς κατόπτρων.

Συνεπώς η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα κάτοπτρα Q_s [W] υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση, όπου G_b η ισχύς της κάθετης στα κάτοπτρα ακτινοβολίας ανηγμένη στην επιφάνεια [W/m^2] :

$$Q_s = A_a \cdot G_b, \quad (3.11)$$

Η ωφέλιμη ισχύς του συλλέκτη Q_u [W], μπορεί να υπολογιστεί από ισολογισμό ενέργειας στο ρεύμα του εργαζόμενου μέσου, όπου m [kg/s] είναι η παροχή μάζας και c_p η θερμοχωρητικότητα [J/kgK] του ρευστού, ενώ T_{out} και T_{in} η θερμοκρασία εξόδου και εισόδου αντίστοιχα.

$$Q_u = m \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}), \quad (3.12)$$

Το πιο βασικό μέγεθος το οποίο χαρακτηρίζει τον κάθε συλλέκτη είναι σίγουρα ο θερμικός βαθμός απόδοσης του (η_{th}). Συγκεκριμένα, ορίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s}, \quad (3.13)$$

Επειδή, σε επόμενο κεφάλαιο θα προχωρήσουμε στην οπτική αλλά και στην θερμοδυναμική προσομοίωση του συλλέκτη Fresnel με το Flow simulation του Solidworks, είναι αναγκαίο να υπολογίσουμε κάποια μεγέθη έτσι ώστε να μπορούμε να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα που θα μας δώσει το πρόγραμμα και κατά πόσο απέχουν από την θεωρία. Τα μεγέθη αυτά αποτελούν: ο αριθμός Nusselt (Nu) ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (h) και ο συντελεστής τριβής της ροής (f). Οι συγκεκριμένοι αριθμοί δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [3.24].

$$h = \frac{Q_u}{(\pi \cdot D_{ri} \cdot L) \cdot (T_r - T_{fm})}, \quad (3.14)$$

Όπου D_{ri} η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα και (T_{fm}) είναι η μέση θερμοκρασία του ρευστού που δίνεται από τη σχέση :

$$T_{fm} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}, \quad (3.15)$$

Ο ορισμός του αριθμού Nu δίνεται από τον παρακάτω τύπο, όπου k [W/mK] είναι η αγωγιμότητα του ρευστού :

$$Nu = \frac{h \cdot D_{ri}}{k}, \quad (3.16)$$

Για τυρβώδη ροή, δηλαδή με $Re > 2300$ η σχέση απαιτεί τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds (Re) του Prandtl (Pr) και του θεωρητικού συντελεστή τριβής f_{th} [3.26] οι οποίοι δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις, όπου μ [Pa s] είναι η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού:

$$Re = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot D_{ri} \cdot \mu}, \quad (3.17)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k}, \quad (3.18)$$

$$f_{th} = \frac{0.184}{Re^{0.2}}, \quad (3.19)$$

Οπότε σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός Nu δίνεται από την παρακάτω σχέση [3.25]:

$$Nu_{th} = \frac{\left(\frac{f_{th}}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12.8 \cdot \sqrt{\frac{f_{th}}{8}} \cdot (Pr^{0.68} - 1)}, \quad (3.20)$$

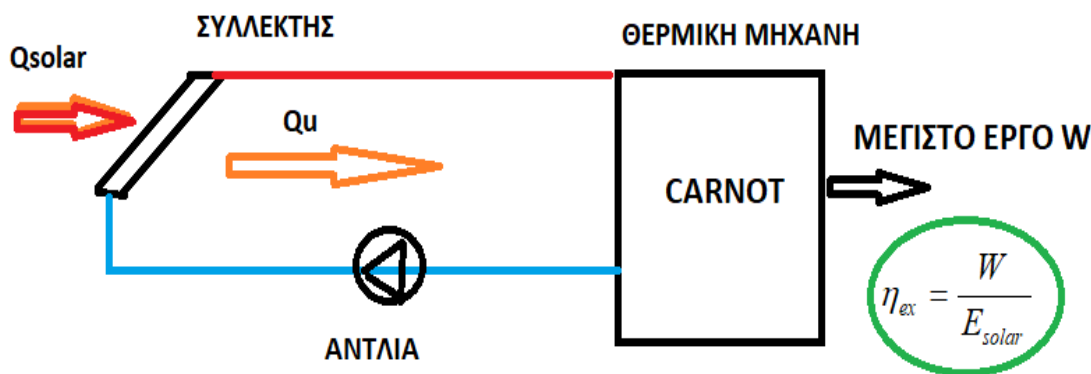
Ο συντελεστή τριβής που θα προκύψει από τα αποτελέσματα που θα δώσει το Solidworks υπολογίζεται από τον τύπο της πτώσης πίεσης στον σωλήνα, όπου ΔP πτώση πίεσης, ρ και u η πυκνότητα και η ταχύτητα του ρευστού αντίστοιχα και L το μήκος του σωλήνα:

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2} \cdot \left(\frac{D_{ri}}{L}\right), \quad (3.21)$$

3.5.4 Εξεργειακή ανάλυση

Ο λόγος που πραγματοποιούμε εξεργειακή ανάλυση έχει να κάνει με τον 2^ο θερμοδυναμικό νόμο ο οποίος εισάγει την έννοια της εντροπίας. Συγκεκριμένα, με τον όρο εξέργεια εννοούμε το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από την ενέργεια αυτή με αναφορά τις συνθήκες του περιβάλλοντος (συνήθως 25°C και πίεση 1.01325 bar) [3.7]. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης (η_{ex}) ενός συστήματος δείχνει πόσο κοντά στον κύκλο Carnot είναι ο θερμοδυναμικός του κύκλος. Ορίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης εξέργειας (Ex_u), προς την εξέργεια εισόδου του συστήματος, στην περίπτωση των θερμικών συλλεκτών, την εξέργεια του ήλιου (Ex_s). Αξίζει να σημειώσουμε πως η απόδειξη των παρακάτω σχέσεων ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής αλλά επισυνάπτονται στις βιβλιογραφικές πηγές [3.7], [3.27], [3.28]. Τα παραπάνω μεγέθη δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_u}{Ex_s}, \quad (3.22)$$



Εικόνα 3.25 Ποιοτικό διάγραμμα εξεργειακής ροής σε θερμικό συλλέκτη

Η ωφέλιμη εξέργεια στον συλλέκτη Fresnel (Ex_u) δίνεται από τον τύπο:

$$Ex_u = m \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) - m \cdot c_p \cdot T_{ref} \cdot \ln \left[\frac{T_{out}}{T_{in}} \right] - \frac{T_{ref} \cdot m \cdot \Delta P}{T_{fm} \cdot \rho_{fm}}, \quad (3.23)$$

Η εξέργεια του ήλιου (Ex_s) δίνεται από τη σχέση του Petela [3.29].

$$Ex_s = Q_s \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{T_{ref}}{T_{sun}} \right] + \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{T_{ref}}{T_{sun}} \right]^4 \right), \quad (3.24)$$

Όπου η θερμοκρασία του ήλιου (T_{sun}) θεωρείται ίση με 5770 K και η θερμοκρασία αναφοράς (T_{ref}) θεωρείται ίση με 298.15 K.

3.6 Τρόποι Βελτίωσης Θερμικού Βαθμού Απόδοσης

Όπως είναι προφανές, η βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης των θερμικών συλλεκτών αποτελεί μεγάλη αναγκαιότητα, καθώς υψηλότερη απόδοση σημαίνει υψηλότερο οικονομικό όφελος. Η λογική της βελτίωσης του θερμικού βαθμού έχει να κάνει με την αποδοτικότερη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του σωλήνα και του ρευστού, αλλά και με τον περιορισμό των θερμικών απωλειών. Όσον αφορά τις απώλειες η καταλληλότερη επέμβαση που μπορούμε να κάνουμε είναι η εφαρμογή σωλήνα κενού για τους λόγους που έχουμε αναφέρει, αναλυτικά σε προηγούμενες ενότητες. Όσον αφορά την αποδοτικότερη συναλλαγή θερμότητας, αυτή σχετίζεται με δύο βασικά μεγέθη όπως ξέρουμε και από την μετάδοση θερμότητας την επιφάνεια συναλλαγής αλλά και την θερμική διαπερατότητα η οποία έχει να κάνει και τις θερμικές ιδιότητες του ρευστού. Συνεπώς, προκειμένου να παρέμβουμε στο πρώτο μέγεθος, δηλαδή στην αύξηση της επιφάνειας μία λύση είναι η τοποθέτηση εσωτερικών πτερυγίων κατά μήκος του σωλήνα. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια η συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να βοηθάει στο κομμάτι της θερμικής απόδοσης, αλλά ταυτόχρονα δημιουργεί απώλειες πίεσης κάτι το οποίο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό τους. Όσον αφορά την αύξηση της θερμικής διαπερατότητας, μπορούμε να διαλέξουμε κατάλληλης φύσης ρευστά με αυξημένη θερμική

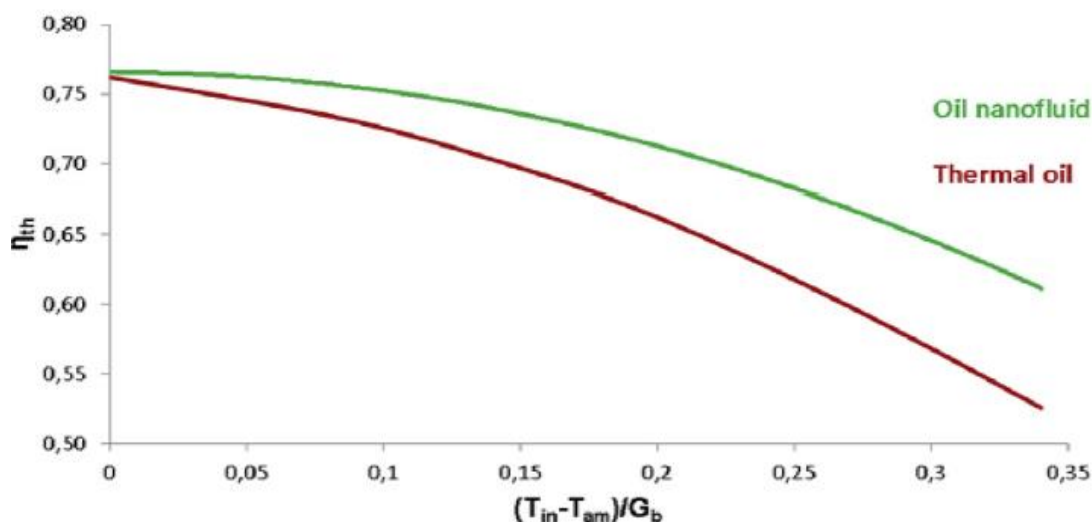
αγωγιμότητα. Τέτοια ρευστά, αποτελούν τα θερμικά έλαια με την προσθήκη νανοϋλικών (CuO), τηγμένο άλας (molten salt) και υγρό νάτριο (liquid sodium).

3.6.1 Εφαρμογές Νανοϋλικών

Τα πιο συνηθισμένα νανοϋλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλιακών συλλεκτών είναι τα εξής : Cu, CuO, TiO₂, Al₂O₃, Fe, Fe₂O₃ και SiO₂ [3.30].

Για το συγκεκριμένο θέμα, τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί αρκετή έρευνα παγκοσμίως μέσω σχετικών δημοσιεύσεων. Κάποιες από τις πιο σημαντικές αποτελούν οι παρακάτω.

Οι Bellos et al. [3.31] στην δημοσίευσή τους το 2016 στο Renewable Energy, ερευνήσαν την χρήση Al₂O₃ μέσα σε θερμικό έλαιο. Αποδείχτηκε, ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών αυξήθηκε έως 4.25%. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται ξεκάθαρα η διαφορά στις καμπύλες απόδοσης μεταξύ της λειτουργίας με θερμικό έλαιο και της λειτουργίας με έλαιο και προσθήκη νανοϋλικών Al₂O₃.



Εικόνα 3.26 Σύγκριση θερμικών βαθμών με καθαρό λάδι και με προσθήκη νανοϋλικών Al₂O₃ [3.31].

Σε μια επόμενη μελέτη οι Bellos et al. [3.32] μελέτησαν την εγκατάσταση τριπαραγωγής με παραβολικό συλλέκτη που χρησιμοποιεί νανοϋλικά όπως είναι το Al₂O₃ και το CuO. Συγκεκριμένα, σε αυτή την εργασία δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού των θερμικών ιδιοτήτων ενός θερμικού ελαίου συναρτήσει της περιεκτικότητας του σε νανοϋλικά. Αυτές οι σχέσεις, θυμίζουν στην πλειονότητα τους τον κανόνα του μοχλού, όμως δεν είναι αρκετά ακριβές αυτό. Κάποιες από αυτές τις σχέσεις είναι οι παρακάτω, δηλαδή της πυκνότητας ρ , της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p , της θερμικής αγωγιμότητας k και της δυναμικής συνεκτικότητας μ όπου ο δείκτης η_f συμβολίζει το τελικό ρευστό με την προσθήκη νανοϋλικού, η_b συμβολίζει το νανοϋλικό περιεκτικότητας ϕ και η_{bf} συμβολίζει το βασικό ρευστό (θερμικό έλαιο ή νερό), ενώ για την εξίσωση της θερμικής αγωγιμότητας το μέγεθος β είναι μια παράμετρος που συνήθως παίρνει τιμή 0.1 [3.32], [3.34]:

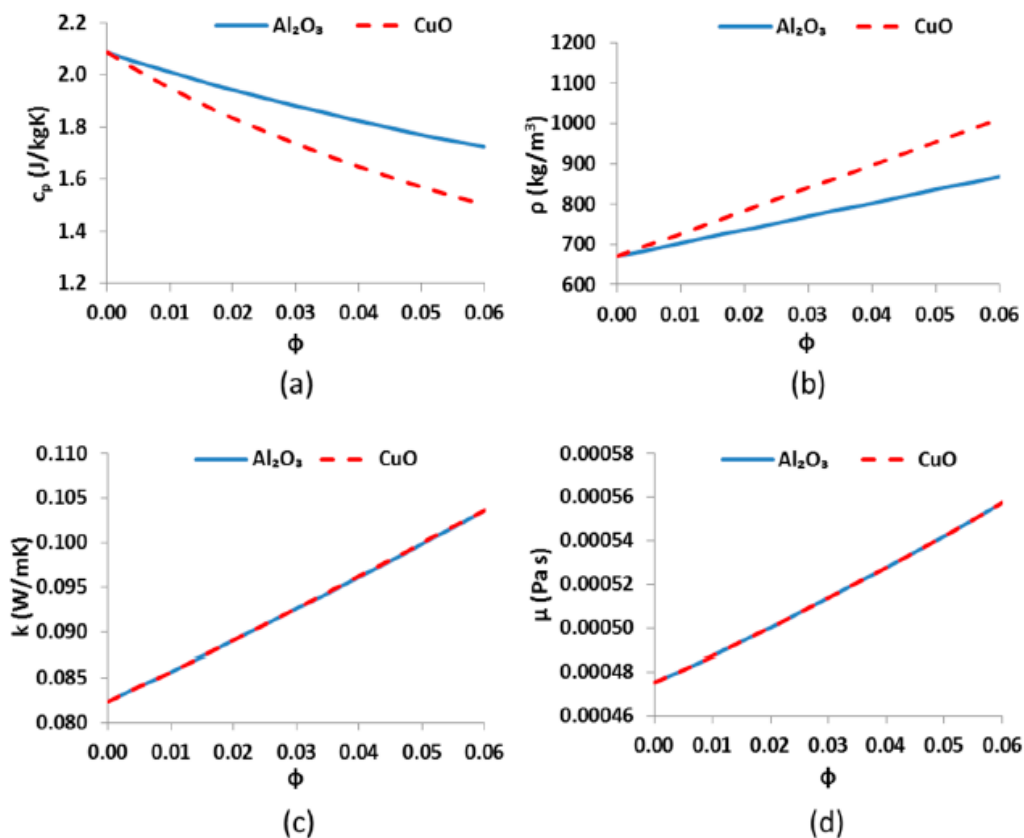
$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \cdot (1 - \phi) + \rho_{np} \cdot \phi \quad (3.25)$$

$$c_{p,nf} = \frac{\rho_{bf} \cdot (1 - \phi)}{\rho_{nf}} \cdot c_{p,bf} + \frac{\rho_{np}}{\rho_{nf}} \cdot c_{p,np} \quad (3.26)$$

$$k_{nf} = k_{bf} \cdot \frac{k_{np} + 2 \cdot k_{bf} + 2 \cdot (k_{np} - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3 \cdot \phi}{k_{np} + 2 \cdot k_{bf} - (k_{np} - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3 \cdot \phi} \quad (3.27)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \cdot (1 + 2.5 \cdot \phi + 6.2 \cdot \phi^2) \quad (3.28)$$

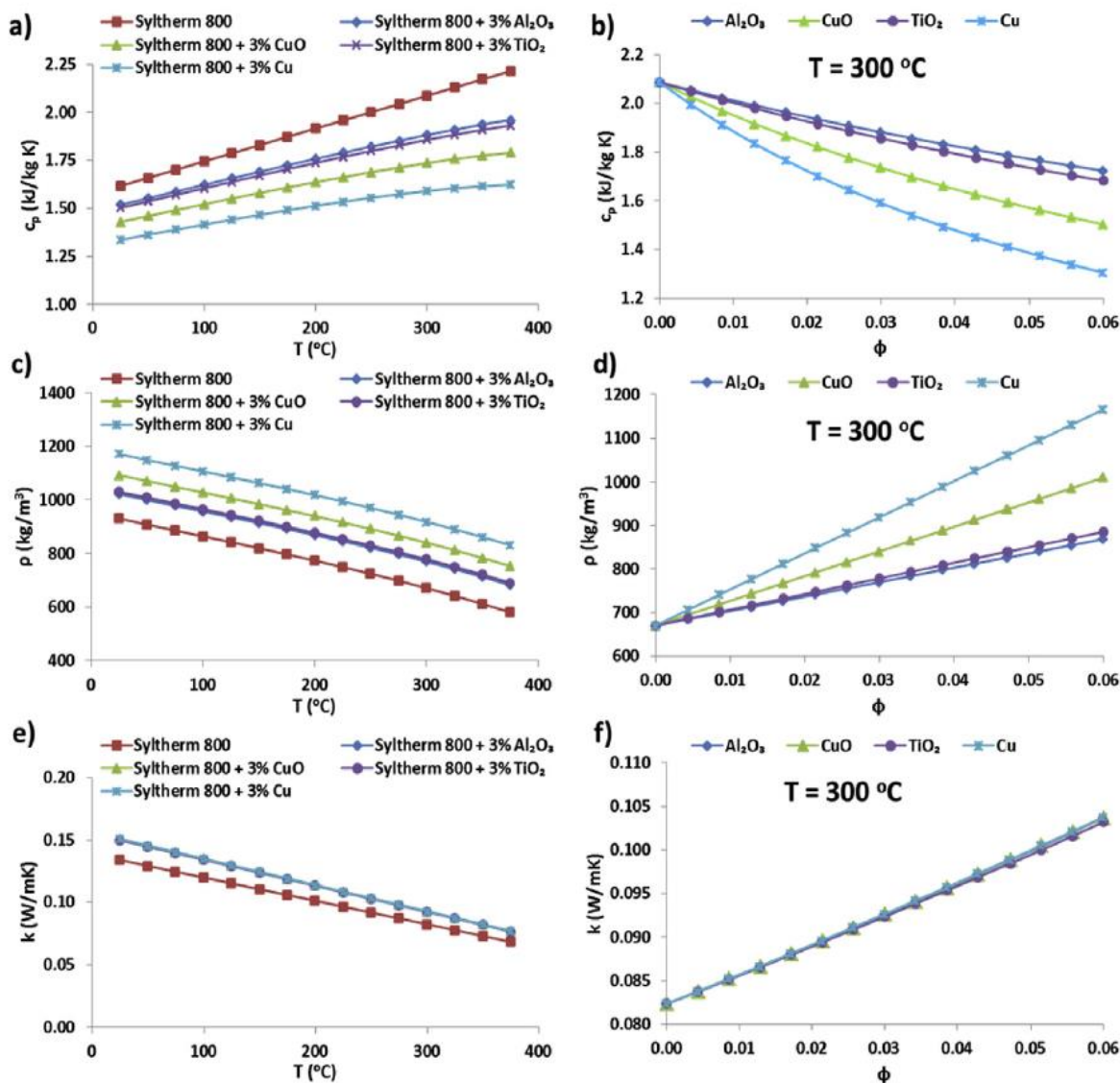
Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις παραπάνω θερμικές ιδιότητες του ρευστού συναρτήσει της περιεκτικότητας ϕ σε νανοϋλικό.



Εικόνα 3.27 Θερμικές ιδιότητες θερμικού μέσου με νανοϋλικό (a) Ειδική θερμοχωρητικότητα (b) Πυκνότητα (c) Θερμική αγωγιμότητα (d) Δυναμική συνεκτικότητα [3.34]

Επίσης, σε μια ακόμα εργασία τους οι Bellos et al. [3.33] μελέτησαν την εφαρμογή νανοϋλικών σε παραβολικό συλλέκτη για έναν κύκλο ORC. Συγκεκριμένα, τα νανοϋλικά που εφαρμόστηκαν ήταν τα : Cu, TiO₂, Al₂O₃ και το CuO για διάφορες περιεκτικότητες και θερμοκρασίες λειτουργίας. Το βασικό ρευστό που αναμειγνύεται με τα νανοϋλικά είναι το μέσο Syltherm800 . Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες αυτών των ρευστών. Χαρακτηριστικό είναι ότι για υψηλότερες περιεκτικότητες παρατηρούμαι αύξηση της πυκνότητας ρ αλλά και του

συντελεστή αγωγιμότητας k , κάτι που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό για ένα θερμικό μέσο.



Εικόνα 3.28 Θερμικές ιδιότητες θερμικού μέσου Syltherm800 με νανοϋλικό (a) Ειδική θερμοχωρητικότητα για διάφορες θερμοκρασίες (b) Ειδική θερμοχωρητικότητα για διάφορες συγκεντρώσεις (c) Πυκνότητα για διάφορες θερμοκρασίες (d) Πυκνότητα για διάφορες συγκεντρώσεις (e) Θερμική αγωγιμότητα για διάφορες θερμοκρασίες (f) Θερμική αγωγιμότητα για διάφορες συγκεντρώσεις [3.33]

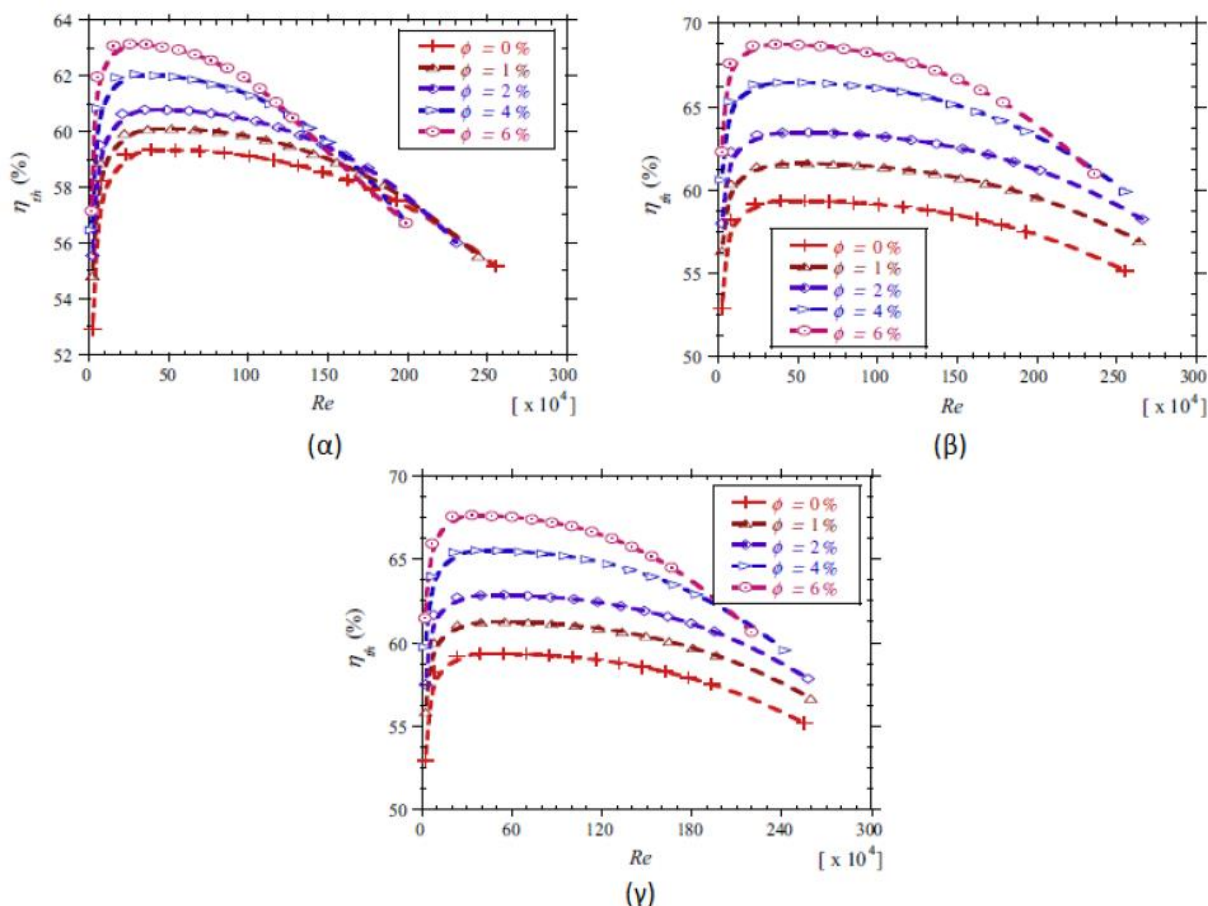
Μια ακόμα ενδιαφέρουσα μελέτη, είναι αυτή των Mwesigye και Meyer [3.35] οι οποίοι μελέτησαν την λειτουργία συλλέκτη τύπου PTC με τρία διαφορετικά μέσα: το θερμικό έλαιο Therminol VP-1 με χαλκό (Cu), με σίδηρο (Fe) και με Al₂O₃. Τι μεγαλύτερη θερμική απόδοση παρουσίασε η εφαρμογή του Therminol VP-1 με σίδηρο, καθώς ο σίδηρος έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, οπότε ευνοεί την αποδοτική μετάδοση θερμότητας, ενώ την χαμηλότερη απόδοση την έδωσε το Al₂O₃.

Αναλυτικότερα, παρουσιάστηκαν οι εξής βελτιώσεις στον θερμικό βαθμό απόδοσης ανά θερμικό μέσο για λόγο συγκέντρωσης συλλέκτη 113:

Νανοϋλικό	Σίδηρος (Fe)	Χαλκός Cu	Al ₂ O ₃
Αύξηση Θερμικού Βαθμού Απόδοσης	13.9%	12.5%	7.2%

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα μελέτης των Mwesigye και Meyer [3.35]

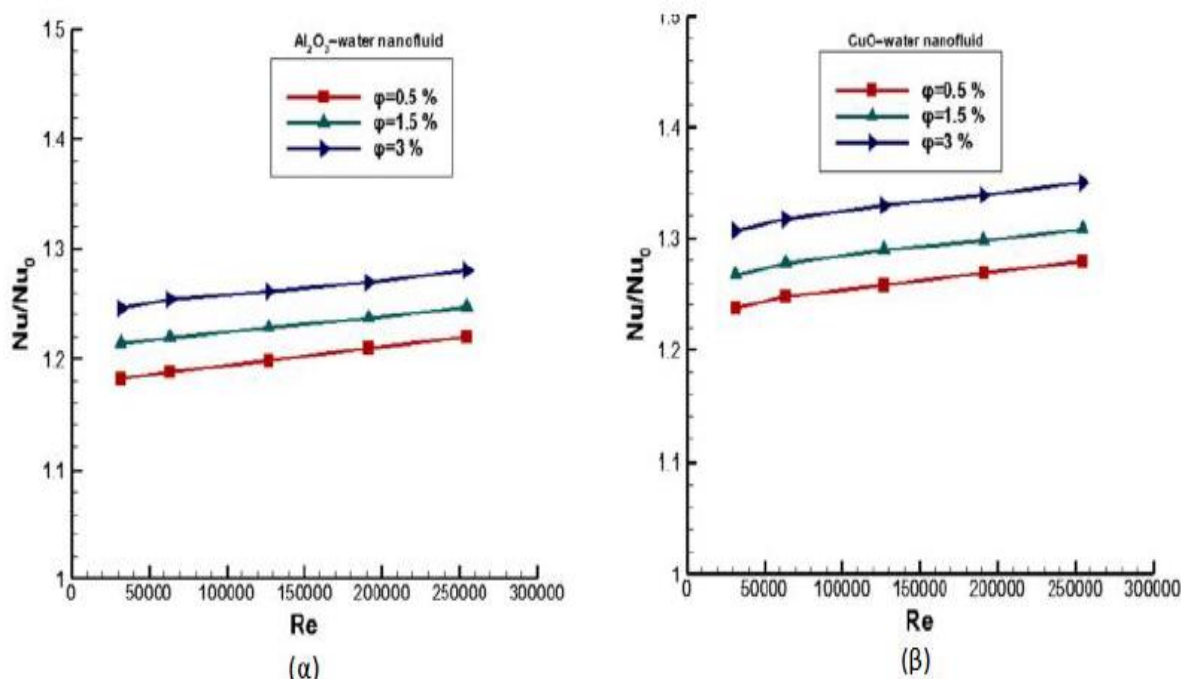
Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται οι καμπύλες του θερμικού βαθμού απόδοσης για διαφορετικές συστάσεις νανοϋλικών για θερμοκρασία 600 K συναρτήσει του αριθμού Reynolds.



Εικόνα 3.29 Θερμικός βαθμός απόδοσης για διαφορετικές συστάσεις κατ' όγκο (ϕ) του νανοϋλικού στο εργαζόμενο μέσο σε συνάρτηση με αριθμό Reynolds (Θερμοκρασία εισόδου 600K) Therminol VP-1 (α) Al₂O₃ (β) Σίδηρο (Fe) (γ) Χαλκό Cu

Τέλος, οι Ghasemi και Ranjbar [3.36] μελέτησαν την λειτουργία PTC με νανοσωματίδια χαλκού Cu και Al₂O₃ με κυρίως ρευστό το νερό. Όπως ήταν αναμενόμενο, προέκυψε βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, με αυτή την προσθήκη σε σχέση με το καθαρό νερό, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Nusselt. Ακόμα, προέκυψε αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας (h) κατά 28% για εργαζόμενο μέσο νερό με $\phi=3\%$ Al₂O₃ και κατά 35% για νερό με $\phi=3\%$ CuO σε

σχέση με το καθαρό νερό. Στο παρακάτω σχήμα, βλέπουμε την ποσοστιαία μεταβολή του αριθμού Nusselt συναρτήσει της κατ' όγκο αναλογίας και του αριθμού Reynolds.



Εικόνα 3.30 Λόγος Nusselt συναρτήσει του αριθμού Reynolds και της αναλογίας: (α) Al_2O_3 , (β) CuO [3.36]

3.6.2 Εφαρμογή τηγμένου άλατος και υγρού νατρίου

Γενικά, σε συλλέκτες Fresnel χρησιμοποιούνται θερμικά έλαια όπως Therminol VP1, Dowtherm A, Syltherm 800 και Sandotherm. Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, προκειμένου να δημιουργήσουμε καλύτερες θερμικές ιδιότητες σε αυτά, τα εμπλουτίζουμε με νανοϋλικά. Παρόλα αυτά, όταν έχουμε απαιτήσεις υψηλών θερμοκρασιών (πάνω από $400^\circ C$), τα θερμικά έλαια χάνουν τις ευεργετικές τους θερμοδυναμικές ιδιότητες. Για αυτό το λόγο, η επιστημονική κοινότητα έχει ασχοληθεί ιδιαίτερα με την εύρεση μέσων που να αντέχουν υψηλές θερμοκρασίες, χωρίς να φθείρονται οι ιδιότητες τους. Βασικοί υποψήφιοι, αποτελούν το τηγμένο άλας (molten salt) και το υγρό νάτριο (liquid sodium). Αξίζει να σημειωθεί, πως καθώς αυτά τα δύο μέσα εξετάζονται στον συλλέκτη Fresnel αυτής της εργασίας, οι θερμοδυναμικές τους ιδιότητες, καθώς και η επίδραση τους στην βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, θα αναλυθεί ενδελεχώς σε επόμενα κεφάλαια.

Τηγμένο άλας – Molten salt

Αναλυτικότερα, το τηγμένο άλας μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασίες της τάξεως $550^\circ C$ - $600^\circ C$ με αρκετά καλές θερμικές ιδιότητες. Επίσης, ένα ακόμα θετικό του είναι ότι μπορεί να παίζει και το ρόλο του αποθηκευτικού μέσου λόγω της ιδιαίτερα υψηλής πυκνότητάς του. Παρόλα αυτά συνοδεύεται από ένα βασικό μειονέκτημα. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, κάτω από $150^\circ C$, υπάρχουν φαινόμενα κρυσταλοποίησης κάτι που μπορεί να φθείρει τους σωλήνες και την αντλία κυκλοφορίας [3.37], [3.38].

Όσον αφορά την βιβλιογραφία για τις εφαρμογές τηγμένου άλατος σε συλλέκτες Fresnel, ο Qiu et al. ερεύνησαν θερμικά και οπτικά έναν συλλέκτη Fresnel με θερμικό

μέσο τηγμένο άλας, καμπυλωτά πρωτεύοντα κάτοπτρα, σωλήνα κενού για απορροφητή και δευτερεύον κάτοπτρο μορφής CPC [3.40]. Αποτέλεσμα αυτής της έρευνας, ήταν ότι για 800 K θερμοκρασία λειτουργίας, ο θερμικός βαθμός απόδοσης κυμαινόταν στο 45%.

Υγρό νάτριο (liquid sodium)

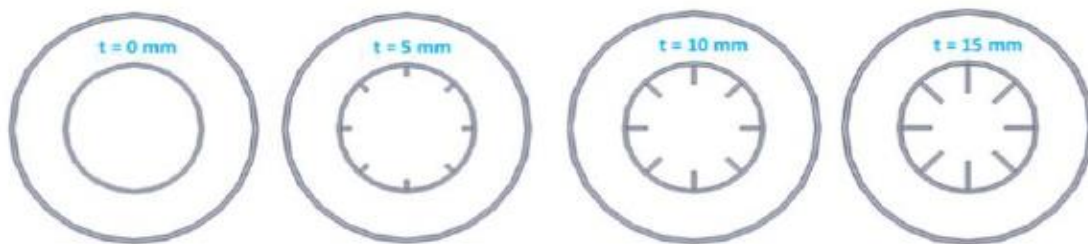
Ένα ακόμα πολλά υποσχόμενο θερμικό μέσο, με ιδιαίτερα καλές θερμικές ιδιότητες, σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (έως και 900°C) είναι το υγρό νάτριο (liquid sodium) [3.38], [3.41]. Ένα πολύ μεγάλο θετικό του είναι η πολύ μεγάλη θερμική του αγωγιμότητα (k), γεγονός που προκύπτει από την μεταλλική του φύση. Παρόλα αυτά, έχει ένα βασικό αρνητικό το οποίο δεν είναι άλλο από την υψηλή του τοξικότητα και αντιδραστικότητα. Συγκεκριμένα, η αντίδραση του με τον αέρα και το νερό δημιουργεί μεγάλο κίνδυνο για δημιουργία φλόγας. Συνεπώς, απαιτείται ιδιαίτερα προσεκτικός χειρισμός σε αυτή την εφαρμογή [3.39].

3.6.3 Επιμήκη Πτερύγια στο εσωτερικό του σωλήνα

Όπως αναφέραμε στην εισαγωγή αυτής της ενότητας, η τοποθέτηση εσωτερικών πτερυγίων κατά μήκος του σωλήνα οδηγεί σε αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης, καθώς αυξάνει την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, αλλά και δημιουργεί συστροφή στο ρευστό, οπότε ευνοεί την ανταλλαγή θερμότητας. Συγκεκριμένες εφαρμογές, έχουν μελετηθεί από πολλούς ερευνητές με σκοπό την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας αλλά και της χωροταξίας των πτερυγίων. Αξίζει να σημειώσουμε ότι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος αξιολόγησης της θερμικής συμπεριφοράς του συλλέκτη είναι ο δείκτης Performance Evaluation Criteria (PEC) το οποίο συμβολίζεται με το γράμμα (η). Συγκεκριμένα, λαμβάνει υπόψη την μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας μέσω της μεταβολής του Nusselt, αλλά και την αύξηση της πτώσης πίεσης μέσω του συντελεστή τριβής f . Προφανώς, για $\eta > 1$, υπάρχει βελτίωση της θερμικής απόδοσης. Επίσης αυτός ο δείκτης, έχει νόημα μόνο όταν μεταξύ των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων που η μόνη τους διαφορά είναι η γεωμετρία του σωλήνα. Παρακάτω δίνεται ο τύπος υπολογισμού του (η), όπου με τον δείκτη (o) αναφέρονται τα μεγέθη που αφορούν τον σωλήνα αναφοράς, για παράδειγμα χωρίς πτερύγια, ενώ τα μεγέθη χωρίς δείκτη είναι η περίπτωση που εξετάζουμε (με πτερύγια). [3.43].

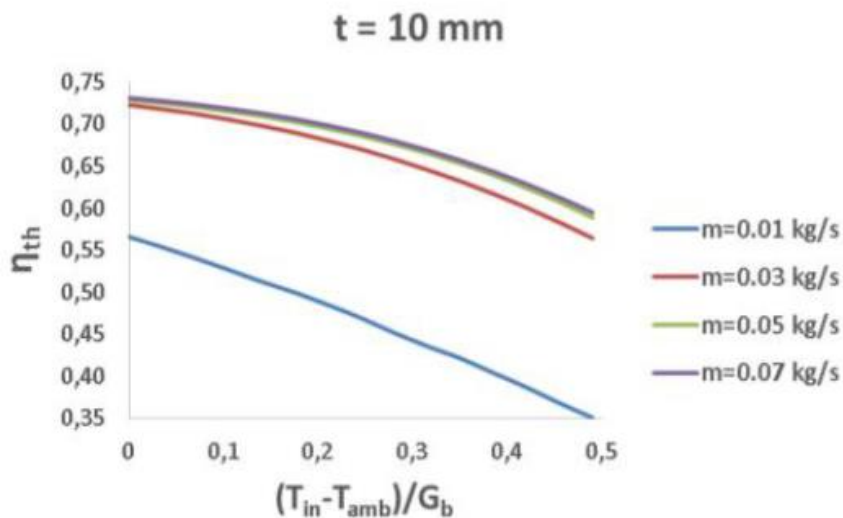
$$PEC = \eta = \frac{(Nu/Nu_o)}{\left(\frac{f}{f_o}\right)^{1/3}} \quad (3.29)$$

Οι Bellos et al. [3.42] εξέτασαν την εφαρμογή εσωτερικών επιμηκών πτερυγίων σε απορροφητήρα ενός συλλέκτη PTC τύπου EuroTrough. Μελέτησαν την λειτουργία του με θερμικά μέσα, διάφορα αέρια όπως αέρας, CO₂ και ήλιο (He). Έχοντας ως κριτήριο την βέλτιστη εξεργειακή απόδοση, κατέληξαν ότι το βέλτιστο μήκος του πτερυγίου είναι 10 mm. Στο παρακάτω σχήμα, βλέπουμε τις περιπτώσεις πτερυγίων που εξέτασαν.



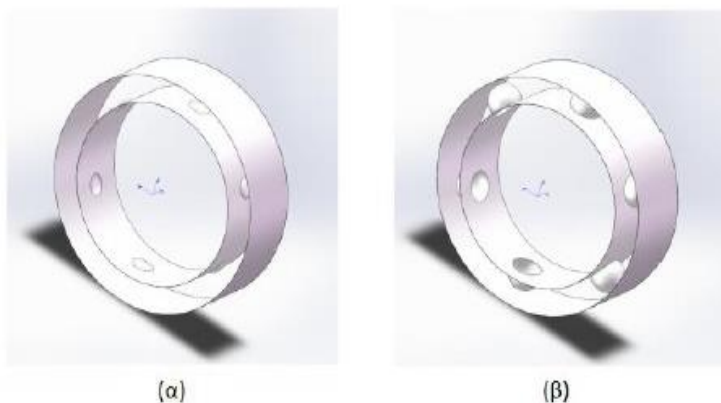
Εικόνα 3.31 Κυλινδρικές τομές 4 εξεταζόμενων περιπτώσεων [3.42]

Στην συνέχεια, για τη βέλτιστη διάσταση πτερυγίου υπολόγισαν την μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης για διάφορες παροχές μάζας, συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα.



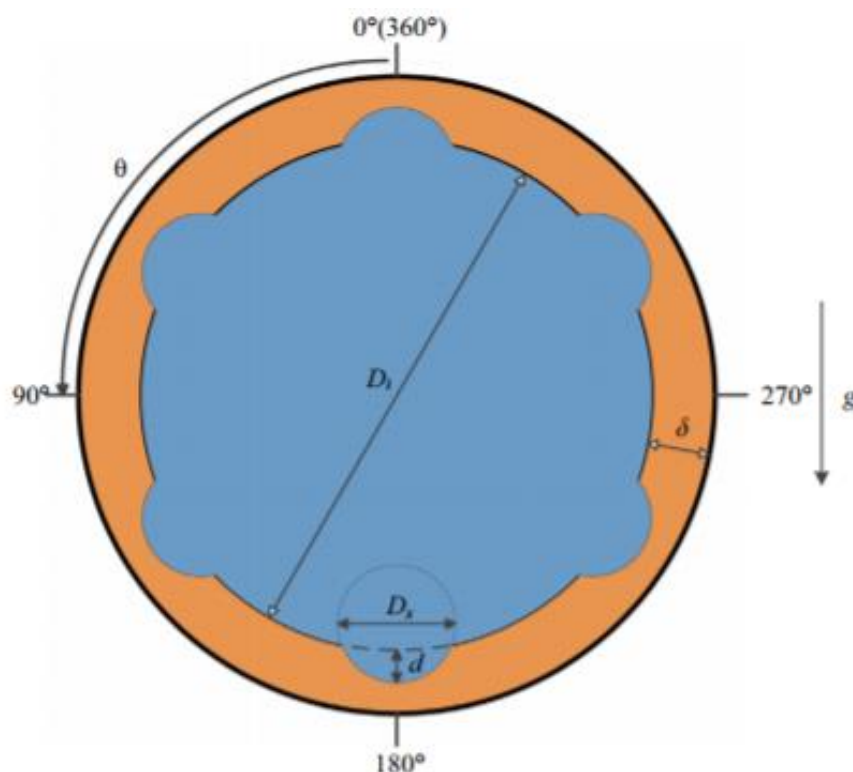
Εικόνα 3.32 Θερμικός βαθμός απόδοσης για διαφορετικές παροχές μάζας θερμικού μέσου , για πτερύγιο μήκους 10 mm [3.42]

Μια ακόμα σημαντική μελέτη, έγινε από τους Huang et al. [3.44] οι οποίοι εξέτασαν έναν σωλήνα απορροφητήρα με κοιλοότητες. Βασική σχεδιαστική παράμετρος βελτιστοποίησης του θερμικού βαθμού απόδοσης είναι το βάθος αυτών των κοιλοτήτων. Συγκεκριμένα, εξέτασαν δύο περιπτώσεις. Την περίπτωση A που αφορά τις κοιλοότητες με μικρότερος βάθος και την περίπτωση B που αφορά μεγαλύτερα βάθη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι δύο αυτοί σχεδιασμοί.



Εικόνα 3.33 Οι δύο περιπτώσεις (α, β) κοιλοτήτων [3.44]

Παρακάτω, βλέπουμε ένα αρκετά κατατοπιστικό σχήμα των γεωμετρικών διαστάσεων των κοιλιοτήτων στον σωλήνα, καθώς και τις διαστάσεις σε πίνακα, των δύο περιπτώσεων.

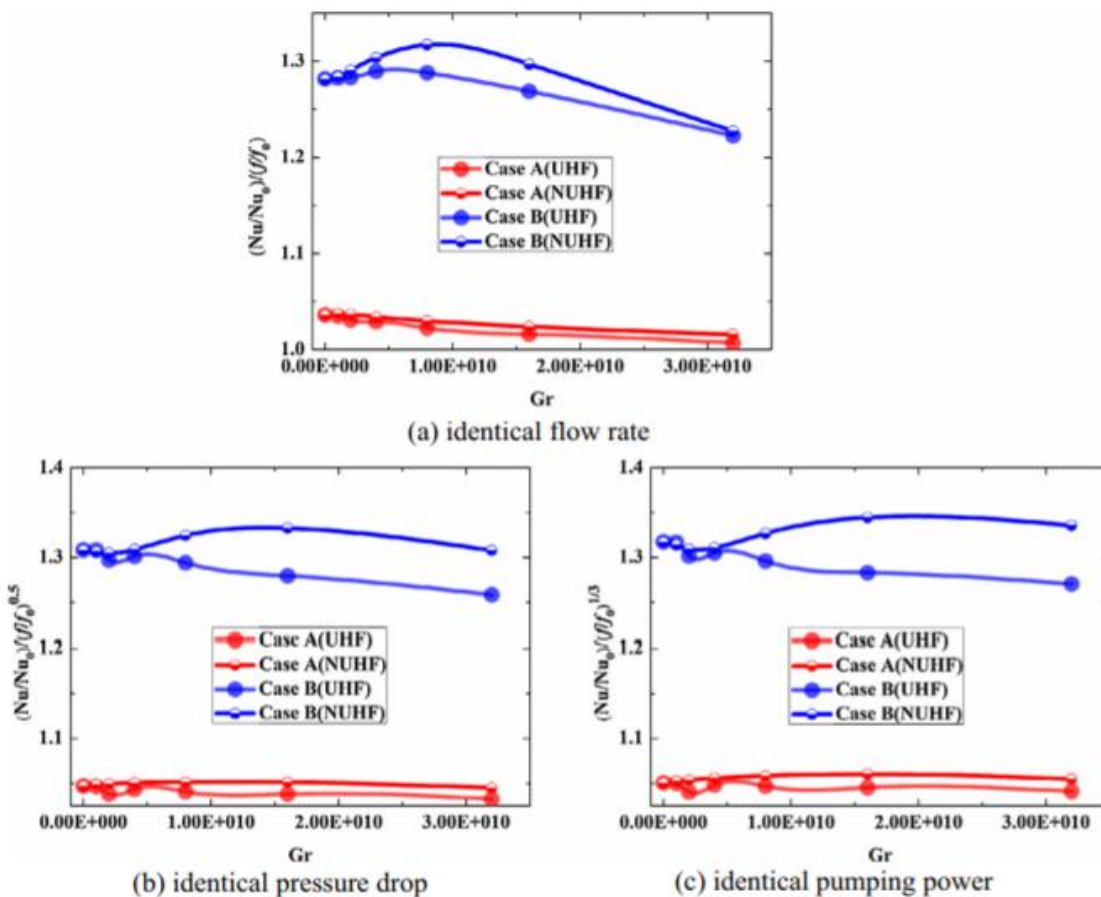


Dimpled receiver tube		
Parameter	Case A	Case B
δ	0.008 m	0.008 m
d	0.001 m	0.007 m
D_1	0.027 m	0.027 m
D_2	0.01 m	0.01 m
L	0.02 m	0.02 m

Εικόνα 3.34 Γεωμετρικές διαστάσεις δύο περιπτώσεων [3.44]

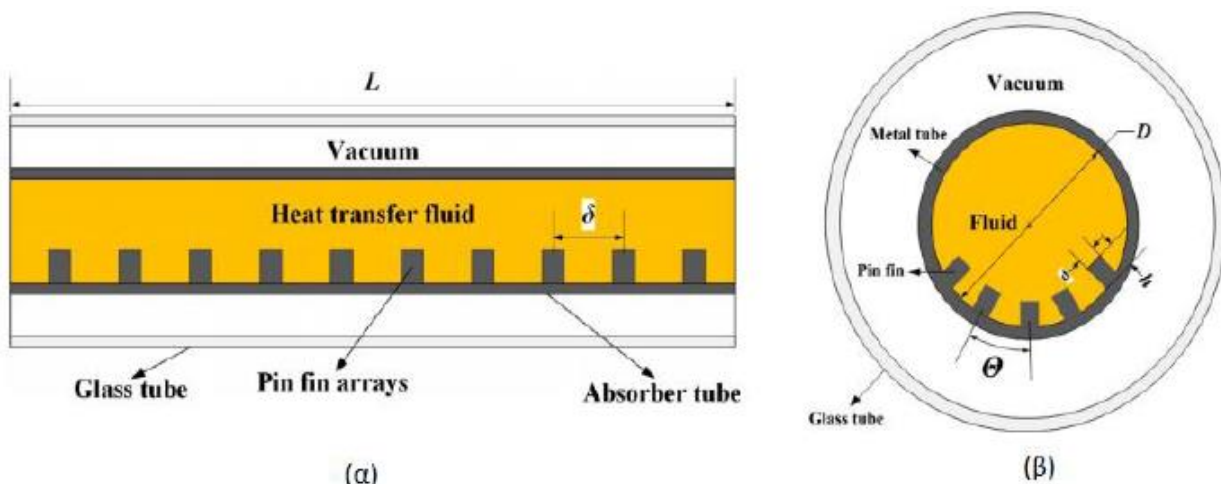
Τα αποτελέσματα της έρευνας τους, έδειξαν ότι οι βαθύτερες κοιλότητες στον απορροφητήρα, οδηγούν σε υψηλότερο θερμικό απόδοσης, καθώς όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα στην περίπτωση (β), έχουμε υψηλότερη τιμή του δείκτη (η) η οποία φτάνει έως και 1.35.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τη διακύμανση του (η) συναρτήσει του αριθμού Grashof για τις δύο περιπτώσεις κοιλιοτήτων. Με τον δείκτη UHF (Uniform Heat Flux) αναφερόμαστε στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής θερμικής ακτινοβολίας στον απορροφητήρα και αντίστοιχα, ο δείκτης NUHF (Non-Uniform Heat Flux) αναφέρεται στην περίπτωση μη ομοιόμορφης κατανομής θερμικής ακτινοβολίας. Αξίζει να σημειωθεί πως για οποιαδήποτε τιμή του αριθμού Grashof, η περίπτωση (β) παρουσιάζει καλύτερη θερμική συμπεριφορά.



Εικόνα 3.35 Μεταβολή του (η) συναρτήσει του αριθμού Grashof για τις δύο περιπτώσεις κοιλοτήτων. Όπου: (a) Σύγκριση με σταθερή παροχή μάζας (b) Σύγκριση με κοινή πτώση πίεσης (c) Σύγκριση με κοινό έργο αντλίας [3.44]

Τέλος, οι Gong et al. [3.45] ερεύνησαν την εφαρμογή μικρών καρφίτσωτών πτερυγίων κατά μήκος του σωλήνα, και τα αποτελέσματα έδειξαν βελτίωση έως και 9% στον αριθμό Nusselt, και συνολική βελτίωση του δείκτη (η) κατά 12%. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται η γεωμετρία της εφαρμογής.



Εικόνα 3.36 (α) Πλάγια τομή (β) Πρόσθια τομή σωλήνα

3.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συλλεκτών Fresnel

Όπως κάθε τεχνολογία συλλεκτών, έτσι και οι Fresnel παρουσιάζουν μια πληθώρα θετικών αλλά και αρνητικών στοιχείων, τα οποία θα αναπτυχθούν αναλυτικά παρακάτω.

Πλεονεκτήματα

- Έχουν χαμηλό βάρος, έως και 30% λιγότερο από αντίστοιχης ισχύος παραβολικούς συλλέκτες, το οποίο αντιστοιχεί σε χαμηλότερο κόστος [3.46].
- Η συγκεκριμένη τεχνολογία, έχει μεγάλα περιθώρια βελτίωσης από άποψη οπτικής και θερμικής συμπεριφοράς.
- Μπορούν να φτάσουν σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως με εναλλακτικά εργαζόμενα μέσα, όπως υγρό νάτριο, οπότε μπορούν να λειτουργήσουν ως πηγή ατμοποίησης σε κύκλους Rankine και ORC.
- Καθώς, στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται επίπεδα κατόπτρα, οι συλλέκτες αυτοί διέπονται από εύκολη σχεδίαση και εγκατάσταση, οπότε έχουν μειωμένο κόστος.
- Η απλότητα στην γεωμετρία των πρωτευόντων κατόπτρων, οδηγεί επίσης σε καλύτερη αντοχή απέναντι στα φορτία ανέμου.
- Διαθέτουν πιο απλό σύστημα παρακολούθησης ήλιου, σε σχέση με τους παραβολικούς, καθώς ο απορροφητήρας είναι σταθερός.
- Η αύξηση του λόγου συγκέντρωσης είναι σχετικά εύκολη, καθώς επιτυγχάνεται απλά με την αύξηση της επιφάνειας πρωτευόντων κατόπτρων.

Μειονεκτήματα

- Έχουν σχετικά χαμηλό οπτικό βαθμό απόδοσης, κάτι που οφείλεται στην ύπαρξη του δευτερεύοντος κατόπτρου το οποίο προσθέτει επιπλέον οπτικές απώλειες λόγω ανακλάσεων.
- Επειδή, έχουμε ως στόχο την μείωση των κενών μεταξύ των πρωτευόντων κατόπτρων προκειμένου να μην μειωθεί ο οπτικός βαθμός απόδοσης, εμφανίζονται προβλήματα σκίασης όταν μεταβάλλεται η γωνία του ήλιου ως προς την οριζόντιο.
- Καθώς εκμεταλλεύεται μόνο την άμεση ακτινοβολία, είναι προφανές ότι η απόδοση του πέφτει αρκετά κατά τις ώρες της μέρας που ο ήλιος είναι χαμηλά αλλά και κατά την χειμερινή περίοδο.

Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου

- [3.1] www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10615#gallery/19751
- [3.2] www.instructables.com/id/Solar-OSE-Solar-concentrator-for-steam-generation/
- [3.3] www.bine.info/en/topics/publikation/solarthermische-kraftwerke-2/?cHash=23b8880d7230112d83f6557108ddc306&type=333
- [3. 4] gr.pinterest.com/pin/542261611362130260/
- [3.5] D. Reynolds, M. Jance, M. Behnia, GL. Morrison, An experimental and computational study of the heat loss characteristics of a trapezoidal cavity absorber, Proc. Of International Solar Energy Society Solar World Congress 2001, Adelaide
- [3.6] JD. Pye, GL. Morrison, M. Behnia, DR. Mills, Modelling of the cavity heat transfer for the compact linear Fresnel reflector, Proc. Australia and New Zealand Solar Energy Society Conference 2003, Adelaide.
- [3.7] Ευάγγελος Μπέλλος, Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτίρια PhD Αθήνα, 2016
- [3.8] Yanqing Zhu, Jifu Shi, Yujian Li, Leilei Wang, Qizhang Huang, Gang Xu, Design and thermal performances of a scalable linear Fresnel reflector solar system, Energy Conversion and Management, 2017;146
- [3.9] Evangelos Bellos, Emmanouil Mathioulakis, Christos Tzivanidis, Vassilis Belessiotis, Kimon A. Antonopoulos, Experimental and numerical investigation of a linear Fresnel Solar collector with flat plate receiver, Energy Conversion and Management, 2016;130
- [3.10] Silvi, The Pioneering Work on Linear Fresnel Reflector Concentrators (LFCs) in Italy, Italian Group for the History of Solar Energy, 2014
- [3.11] en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_lens
- [3.12] www.novatecsolar.com/100-1-PE2-operations-eng.html
- [3.13] Guangdong Zhu, Tim Wendelin, Michael J. Wagner, Chuck Kutscher, History, current state and future of linear Fresnel concentrating solar collectors, Solar Energy, 2013;143
- [3.14] www.soltigua.com/products/
- [3.15] www.new.areva.com/EN/operations-3641/compact-linear-fresnel-reflector-technology.html
- [3.16] Sundt Solar Boost Project, A clean power boost for Arizona
- [3.17] https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=37
- [3.18] Σ. Χατζηδάκης, Σημειώσεις ψύξης, 2015
- [3.19] J.Facao, AC. Oliveira, Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator, Renewable Energy 2011; 36(1):90-96

- [3.20] M.A. Moghimi, K.J. Craig, J.P. Meyer, Optimization of a trapezoidal cavity absorber for the Linear Fresnel Reflector, *Solar Energy* 2015;119:343-361
- [3.21] M.A. Moghimi, K.J. Craig, J.P. Meyer, Simulation-based optimization of a linear Fresnel collector mirror field and receiver for optical, thermal and economic performance, *Solar Energy* 2017;153:655-678
- [3.22] H. Beltagy, D. Semmar, C. Leahaut, N. Said, Theoretical and experimental performance analysis of a Fresnel type solar concentrator, *Renewable Energy* 2016;6 (1A):14-22
- [3.23] Guangdong Zhu, New adaptive method to optimize the secondary reflector of linear Fresnel collectors, *Solar Energy* 2017;146:171-186
- [3.24] E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors, *Applied Thermal Engineering* 2017;158: 663-678
- [3.25] J. Leinhard IV, J. Leinhard V, A Heat Transfer Textbook, fourth ed. Phlogiston Press, USA, 2012;354-360
- [3.26] D. Taler, Determining velocity and friction factor for turbulent flow in smooth tubes, *International Journal of Thermal Sciences* 2016;105:109-122
- [3.27] R. Loni, A.B. Kasaeian, O. Mahian, A.Z. Sahin, Thermodynamic analysis of an organic rankine cycle using a tubular solar cavity receiver, *Energy Conversion and Management* 2016;127:494-503
- [3.28] E. Bellos, C. Tzivanidis, A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors, *Energy Conversion and Management* 2017
- [3.29] R. Petela, Exergy of undiluted thermal radiation, *Solar Energy* 2003;74(6): 469-488
- [3.30] S. Hassani, R. Saidur, S. Mekhilef, A.Hepbasli, A new correlation for predicting the thermal conductivity of nanofluids; using dimensional analysis, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2015;90:121-130
- [3.31] E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, G. Gkinis, Thermal enhancement of solar parabolic trough collectors by using nanofluids and converging-diverging absorber tube, *Renewable Energy* 2016;94:213-222
- [3.32] Optimization of a Solar-Driven Trigenation System with Nanofluid-Based Parabolic Trough Collectors, Evangelos Bellos and Christos Tzivanidis, *Energies*, 2017
- [3.33] Parametric analysis and optimization of an Organic Rankine Cycle with nanofluid based solar parabolic trough collectors ,Evangelos Bellos*, Christos Tzivanidis, *Renewable Energy*, 2017;114:3-4
- [3.34] Duangthongsuk, W. Wongwises, S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2010;53: 334-344

- [3.35] A. Mwesigye, J.P. Meyer, Optimal thermal and thermodynamic performance of a solar parabolic trough receiver with different nanofluids and at different concentration ratios, *Applied Energy* 2017 ;193:393-413
- [3.36] S.E. Ghasemi, A.A. Ranjbar, Thermal performance analysis of solar parabolic trough collector using nanofluid as working fluid: A CFD modelling study, *Journal of Molecular Liquids* 2016;222:159-166
- [3.37] P.D. Myers Jr, D.Y. Goswami, Thermal energy storage using chloride salts and their eutectics, *Applied Thermal Engineering* 2016;109
- [3.38] E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors, *Applied Thermal Engineering* 2017;158: 663-678
- [3.39] J. Coventry, C. Andraka, J. Pye, M. Blanco, J. Fisher, A review of sodium receiver technologies for central receiver solar power plants, *Solar Energy* 2015;122: 749-762
- [3.40] Y. Qiu, YL. He, ZD. Cheng, K. Wang, Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods, *Applied Energy* 2015 ;146:162-173
- [3.41] V.V. Wadekar, Ionic liquids as heat transfer fluids – An assessment using industrial exchanger geometries, *Applied Thermal Engineering* 2016;111:1581-1587
- [3.42] E. Bellos, C. Tzivanidis, I. Daniil, K.A. Antonopoulos, The impact of internal longitudinal fins in parabolic trough collectors operating with gases, *Energy Conversion and Management* 2017; 135:35-54
- [3.43] A. Hasanpour, M. Farhadi, K. Sedighi, A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2014 ;55:53-62

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία σχεδιασμού και προσομοίωσης συλλέκτη

Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη ενότητα, βασική απαίτηση κατά τον σχεδιασμό ενός συλλέκτη, είναι να έχει υψηλό θερμικό βαθμό απόδοσης. Για το λόγο αυτό, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα μελετήσουμε τρόπους βελτίωσης του τελευταίου. Έχουμε αναφέρει, ότι υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι βελτίωσης. Ο ένας έχει να κάνει με την γεωμετρία του σωλήνα του απορροφητήρα, και είναι η τοποθέτηση εσωτερικών πτερυγίων κατά την αξονική διεύθυνση με σκοπό την αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας αλλά και την αύξηση του επιπέδου τύρβης στην ροή, κάτι που αυξάνει τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας δια συναγωγής, h . Ο δεύτερος, αφορά τις φυσικές ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου. Στην ενότητα 3.6.1 διατυπώσαμε τους λόγους για τους οποίους ο εμπλουτισμός των θερμικών ελαίων με νανοϋλικά βελτιώνει τις θερμικές του ιδιότητες, όπως κάναμε ομοίως με τα εναλλακτικά μέσα υγρό νάτριο και τηγμένο άλας.

Συνεπώς, στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε την συμπεριφορά δύο μερικώς διαφορετικών συλλεκτών Fresnel, οι οποίοι έχουν ως απορροφητήρα:

- Έναν απλό επίπεδο σωλήνα κενού, χωρίς πτερύγια.
- Έναν σωλήνα κενού με εσωτερικά επιμήκη πτερύγια κατά μήκος τις ροής.

Και οι δύο περιπτώσεις θα είναι συλλέκτες Fresnel με όμοιας γεωμετρίας επίπεδα κάτοπτρα αλλά και όμοιο παραβολικό δευτερεύον κάτοπτρο. Όσον αφορά τα θερμικά μέσα, θα εξετάσουμε τις εξής εφαρμογές, οι οποίες θα εφαρμοστούν και για τους δύο παραπάνω σχεδιασμούς συλλεκτών:

- Καθαρό Θερμικό έλαιο Syltherm800
- Θερμικό έλαιο Syltherm800 με κατ' όγκο περιεκτικότητα νανοϋλικών CuO $\phi=2\%$, 4% και 6% .
- Τηγμένο άλας (Molten salt)
- Υγρό νάτριο (Liquid sodium)

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιασθούν, οι διαστάσεις του συλλέκτη που θα μελετηθεί (ίδιες και για τις δύο περιπτώσεις απλά στην μια περίπτωση έχουμε εσωτερικά πτερύγια), ο τρόπος σχεδιασμού στο Solidworks, η θερμική και οπτική του ανάλυση και τέλος, η αξιολόγηση του με βάση θεωρητικές σχέσεις (validation) το οποίο θα παρουσιασθεί στο κεφάλαιο 5. Τέλος, θα μελετηθεί η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος συλλέκτη και δοχείου αποθήκευσης, όσον αφορά την ημερήσια, την μηνιαία και την ετήσια λειτουργία του.

Σχεδιασμός (Design)

Συγκεκριμένα, όσον αφορά το σχεδιαστικό κομμάτι, θα δοθούν αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήσαμε προκειμένου να σχεδιάσουμε το κάθε κομμάτι του συλλέκτη τα οποία αποτελούν, τα πρωτεύοντα επίπεδα κάτοπτρα, ο σωλήνας κενού του απορροφητήρα (με πτερύγια και χωρίς) και το δευτερεύον κάτοπτρο. Αξίζει να σημειώσουμε, ότι προκειμένου να σχεδιάσουμε το παραβολικής μορφής δευτερεύον κάτοπτρο προχωρήσαμε σε παραμετρική ανάλυση με σκοπό την βέλτιστη οπτική του απόδοση, έχοντας ως γεωμετρική παράμετρο την απόσταση του κατόπτρου από τον σωλήνα κενού. Επίσης, για τον σχεδιασμό του απορροφητήρα με πτερύγια,

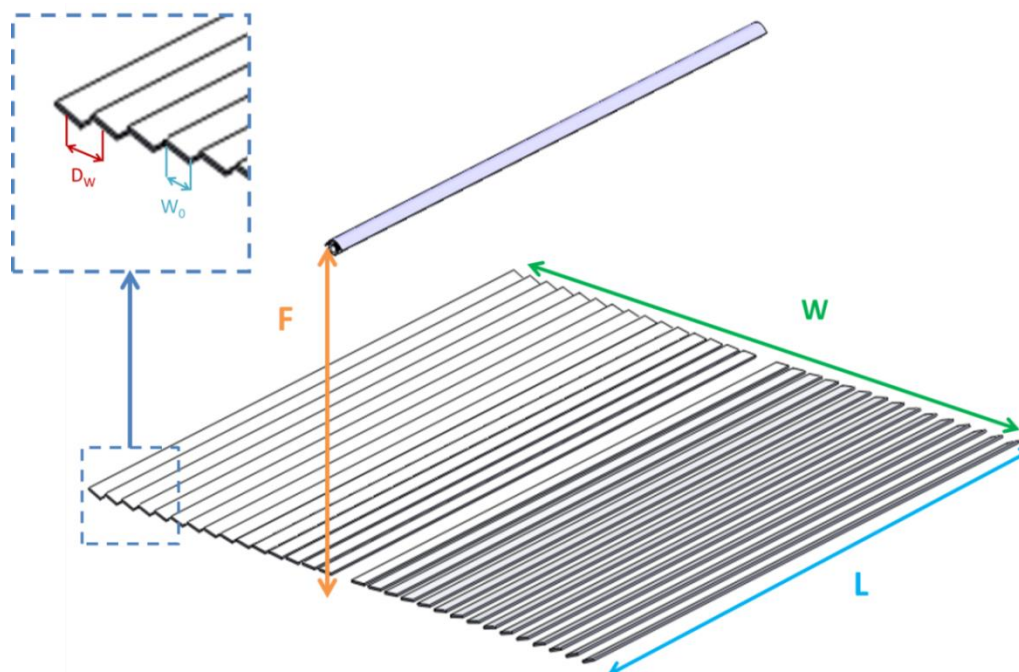
θεωρήσαμε ως δεδομένο τις διαστάσεις του κάθε πτερυγίου οι οποίες προέκυψαν μετά από την θερμοδυναμική μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Διπλωματική εργασία του Δημήτρη Τσιμπούκη [4.1] με σκοπό τη βελτιστοποίηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.

Προσομοίωση (Simulation)

Όσον αφορά την προσομοίωση του συλλέκτη στο Flow Simulation, ομοίως με πριν θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήσαμε. Συγκεκριμένα, αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τον ορισμό του όγκου ελέγχου και τον υπολογισμό των πεπερασμένων κελιών του (που προκύπτουν από ανεξαρτησία πλέγματος), τον καθορισμό των υλικών του κάθε κομματιού, το «πέρασμα» των θερμικών ιδιοτήτων του εκάστοτε θερμικού μέσου στο πρόγραμμα, τον καθορισμό της ηλιακής ακτινοβολίας και των ακτινών του ήλιου, τις οριακές συνθήκες του προβλήματος και ακόμα πολλές παραμέτρους που θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα.

4.1 Σχεδιαστικά στοιχεία συλλέκτη

Όπως έχουμε αναφέρει όσον αφορά τον τύπο του συλλέκτη, πρόκειται για έναν Fresnel με επίπεδα κάτοπτρα, σωλήνα κενού και δευτερεύον κάτοπτρο παραβολικής μορφής. Σε αυτή την ενότητα, θα δώσουμε σε μορφή πινάκων και εικόνων τις διαστάσεις αλλά και τις οπτικές ιδιότητες του συλλέκτη που θα μελετήσουμε. Είναι αναγκαίο να αναφέρουμε ότι οι διαστάσεις αυτές αφορούν και τις δύο σχεδιαστικές περιπτώσεις (με πτερύγια και χωρίς), όμως οι διαστάσεις των πτερυγίων θα δοθούν στην αντίστοιχη ενότητα. Οι περισσότερες από αυτές τις πληροφορίες, καθορίστηκαν από εμάς με κριτήριο πραγματικές εφαρμογές συλλεκτών Fresnel (βλ. πίνακα 4.1).



Εικόνα 4.1 Διάταξη συλλέκτη

Όπου η καθαρή επιφάνεια ανοίγματος A_a , η κυλινδρική επιφάνεια του απορροφητή A_{abs} και ο λόγος συγκέντρωσης C δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$A_a = N_{rf} \cdot W_0 \cdot L, \quad (4.1)$$

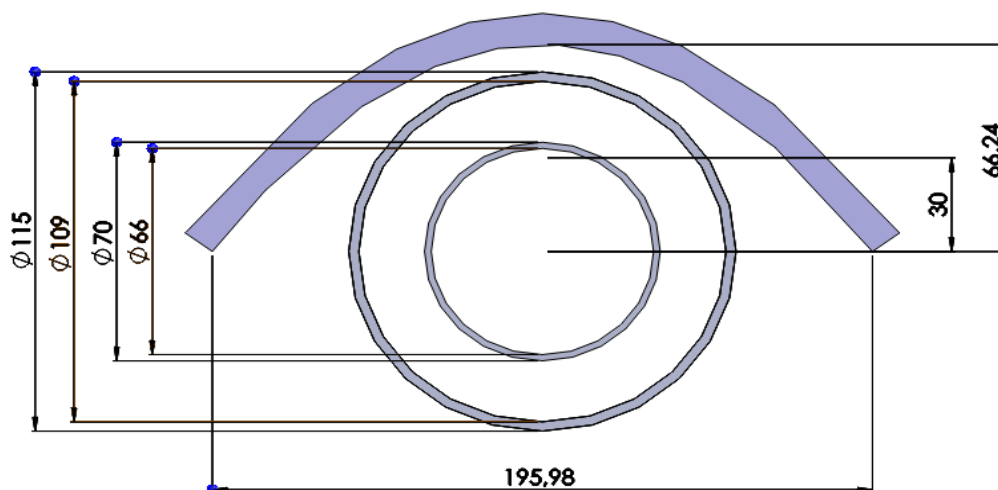
$$A_{abs} = \pi \cdot D_{ro} \cdot L, \tag{4.2}$$

$$C = \frac{A_a}{A_{abs}}, \tag{4.3}$$

Γεωμετρικό Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή
Πλάτος συνολικής επιφανείας κατόπτρων	W	6 m
Μήκος συνολικής επιφανείας κατόπτρων	L	6 m
Ύψος γραμμής εστίασης παραβολών	F	3 m
Πλάτος μεμονωμένου πρωτεύοντος κατόπτρου	W ₀	0.15 m
Πάχος μεμονωμένου πρωτεύοντος κατόπτρου	t	0.02 m
Απόσταση κέντρων πρωτευόντων κατόπτρων	D _w	0.2 m
Αριθμός πρωτευόντων κατόπτρων	N _{rf}	30
Καθαρή επιφάνεια ανοίγματος	A _a	27.0 m ²
Λόγος συγκέντρωσης	C	20.46
Εσωτερική διάμετρος απορροφητήρα	D _{ri}	0.066 m
Εξωτερική διάμετρος απορροφητήρα	D _{ro}	0.070 m
Εσωτερική διάμετρος γυάλινου καλύμματος	D _{ci}	0.109 m
Εξωτερική διάμετρος γυάλινου καλύμματος	D _{co}	0.109 m
Συντελεστής εκπομπής γυάλινου καλύμματος	ε _c	0.86
Διαπερατότητα γυάλινου καλύμματος	τ	0.95
Συντελεστής απορρόφησης απορροφητήρα	α	0.92
Ανακλαστικότητα πρωτευόντων κατόπτρων	ρ ₁	0.94
Ανακλαστικότητα δευτερεύοντος κατόπτρου	ρ ₂	0.94

Πίνακας 4.1 Σχεδιαστικά μεγέθη συλλέκτη

Όσον αφορά το δευτερεύον κάτοπτρο οι διαστάσεις του, όπως το άνοιγμα του και η απόσταση του από τον σωλήνα κενού, προέκυψαν ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης του οπτικού βαθμού απόδοσης. Περισσότερες λεπτομέρειες για την εύρεση αυτών, θα γίνει αφού αναλύσουμε τον σχεδιασμό στο Solidworks.



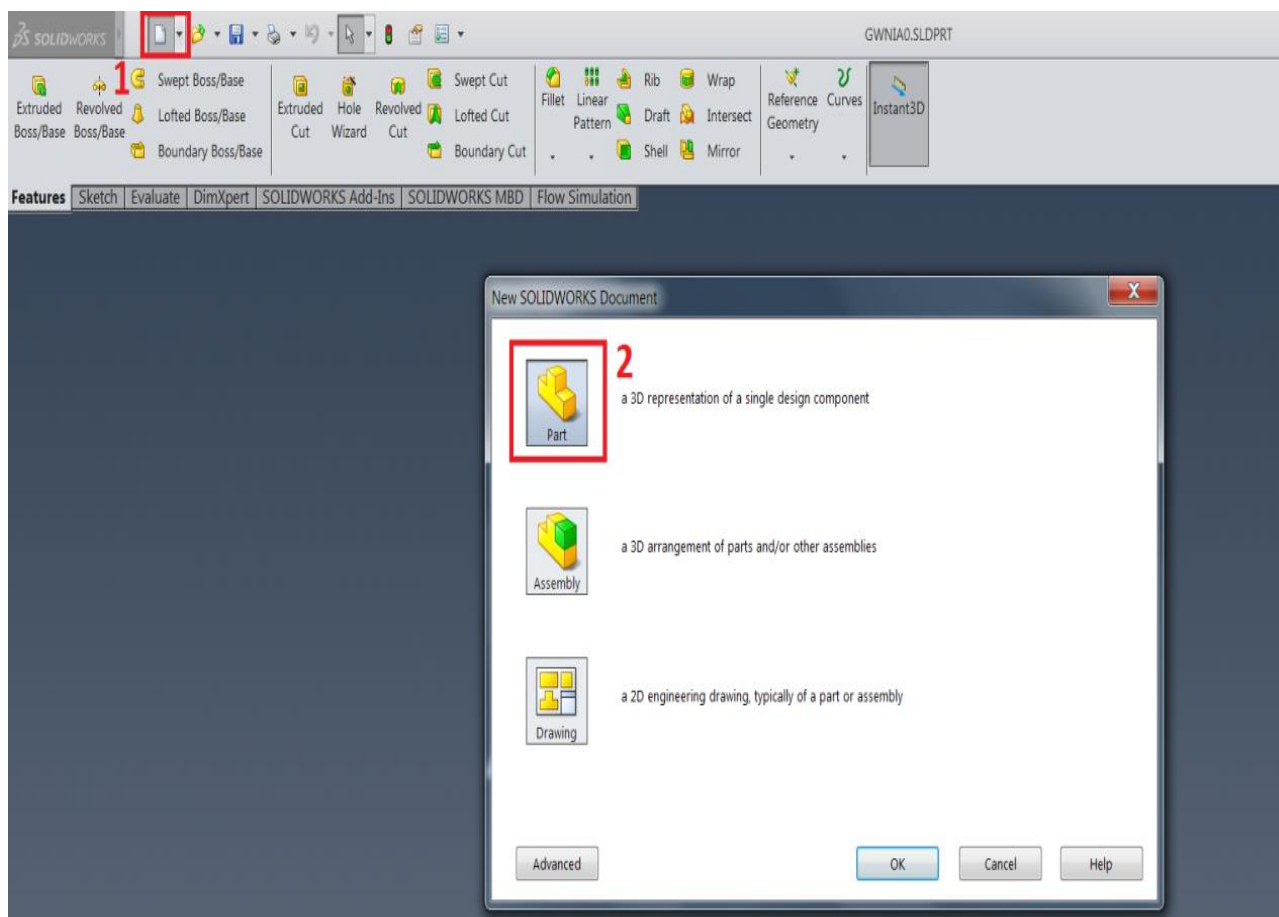
Εικόνα 4.2 Κάθετη τομή στον άξονα του απορροφητήρα και του δευτερεύοντος κατόπτρου

4.2 Σχεδιασμός συλλέκτη στο Solidworks

Στην ενότητα αυτή, θα περιγράψουμε τα βήματα που ακολουθήσαμε για τον σχεδιασμό του συλλέκτη στο λογισμικό Solidworks.

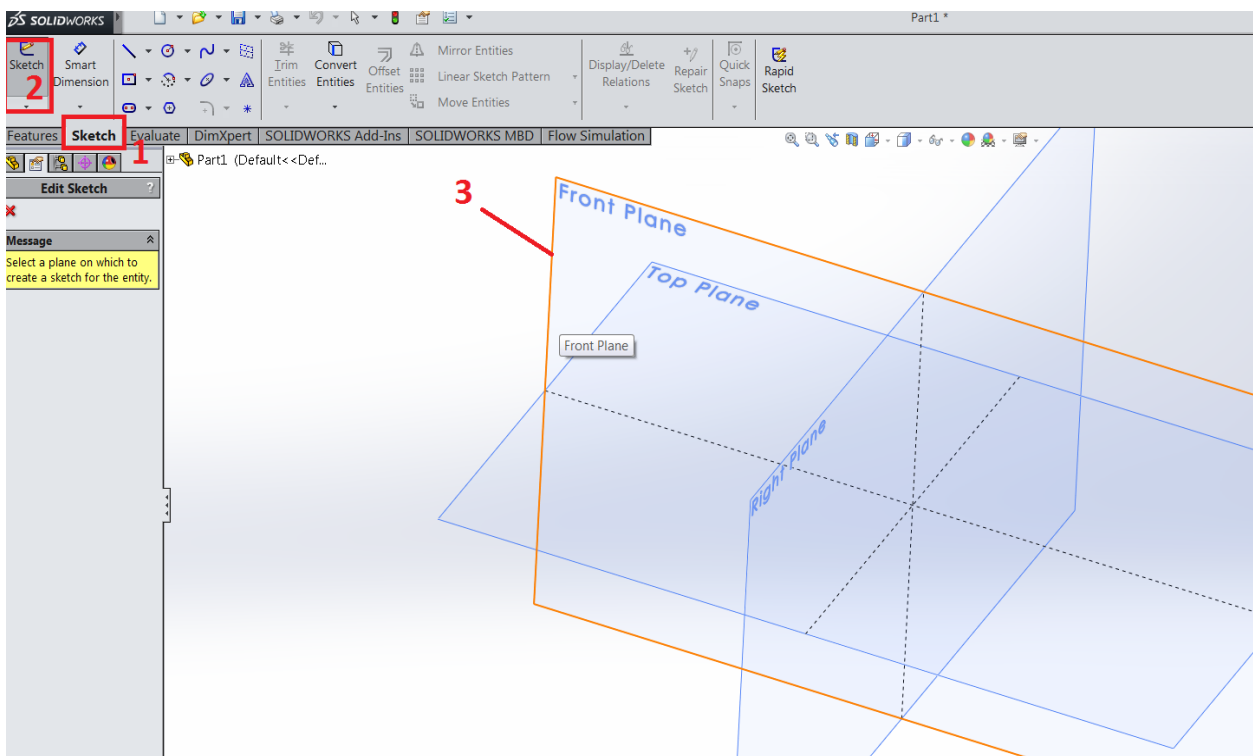
Σχεδιασμός πρωτευόντων κατόπτρων

Αρχικά, δημιουργούμε ένα part. Τα αρχεία μορφής part, τα δημιουργούμε όταν θέλουμε να φτιάξουμε μεμονωμένα εξαρτήματα, ενώ τα assembly τα χρησιμοποιούμε όταν θέλουμε να συναρμολογήσουμε, όλα τα parts. Παρόλα αυτά, στην εφαρμογή μας θα σχεδιαστούν όλα σε ένα part χάρη οικονομίας υπολογιστικού χρόνου. Αυτό μας επιτρέπεται, καθώς δεν μελετάμε ένα δυναμικό ή στατικό πρόβλημα από άποψη μηχανικής, απλά θα το μελετήσουμε ενεργειακά. Συνεπώς, δεν είναι η αναγκαία η σχεδίαση του συλλέκτη μας, με όλα τα εξαρτήματά του, όπως οι σκαλωσιές του απορροφητήρα και οι διάφοροι κοχλίες, καθώς δεν επηρεάζουν την θερμική και οπτική προσομοίωση.



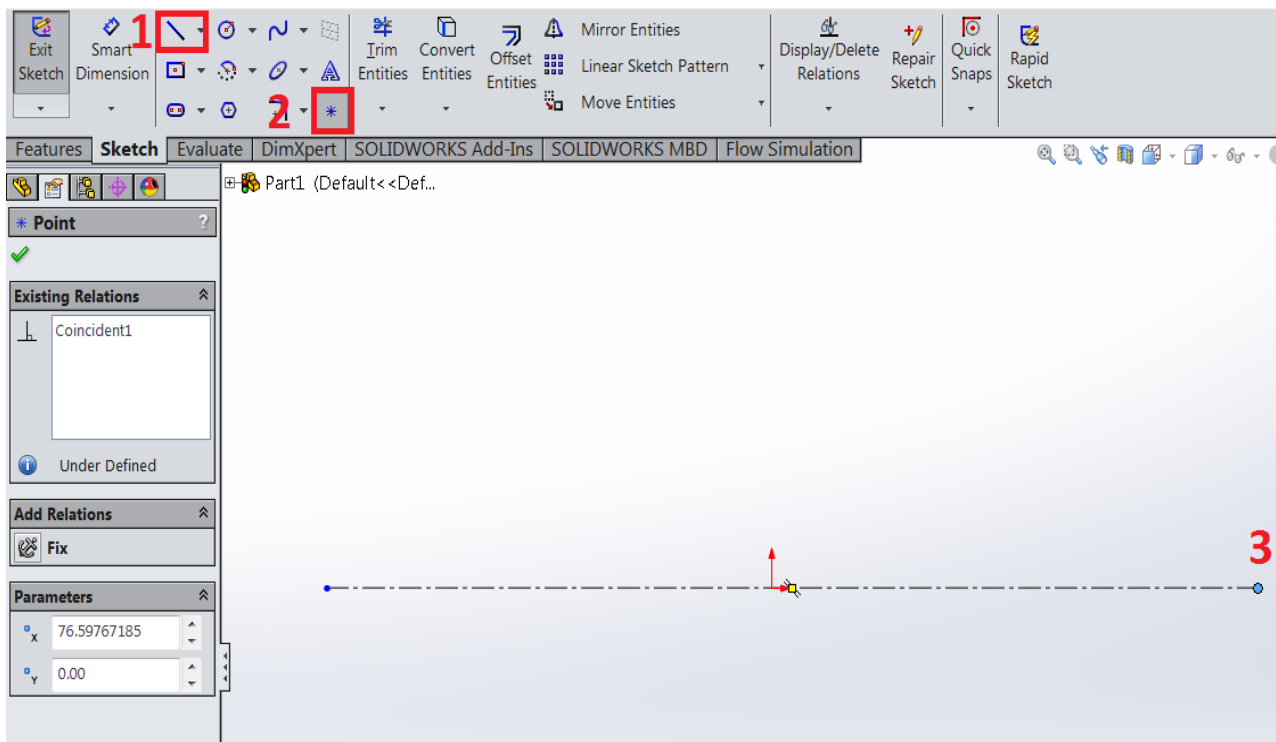
Εικόνα 4.3 (1) Δημιουργία νέου αρχείου, (2) Εντολή Part

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε την εντολή sketch, έτσι ώστε να σχεδιάσουμε το μοντέλο μας σε δύο διαστάσεις, όπου στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε την εντολή extrude για να του δώσουμε τρισδιάστατη μορφή. Όσον αφορά, το extrude θα αναλυθεί περισσότερο, παρακάτω. Τα παραπάνω βήματα φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



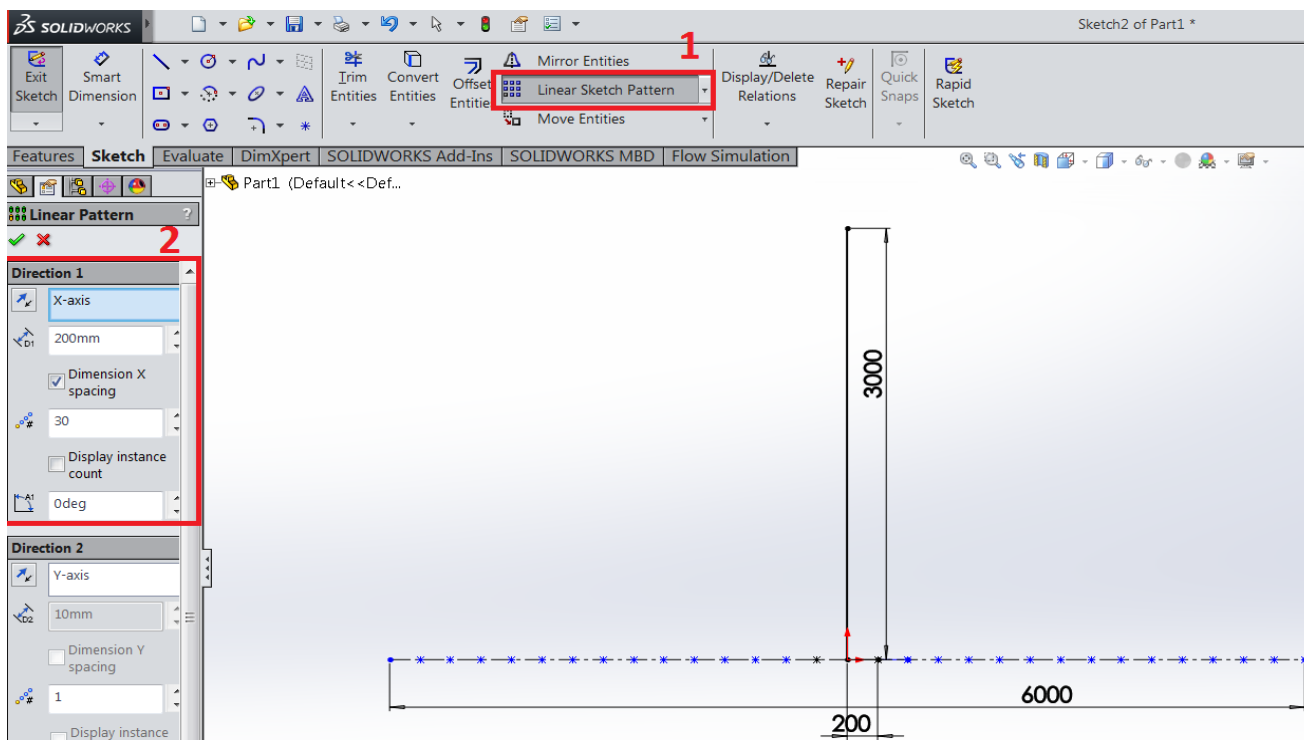
Εικόνα 4.4 (1) Μενού sketch, (2) Εντολή sketch, (3) Επιλογή επίπεδου σχεδίασης, Πρόσθιο επίπεδο-Front plane

Στην συνέχεια, θα σχεδιάσουμε τα κέντρα των 30 πρωτευόντων κατόπτρων, τα οποία βρίσκονται στην ίδια ευθεία, όπου το κάθε ένα ανήκει σε αντίστοιχη παραβολή με εστία το κέντρο του απορροφητήρα και απέχουν μεταξύ τους $D_w=0.2$ m.



Εικόνα 4.5 (1) Σχεδιασμός ευθείας κέντρων κατόπτρων, (2)-(3) Επιλογή και σχεδιασμός ακραίου σημείου

Έπειτα, αφού σχεδιάσουμε την κατακόρυφη ευθεία μήκους 3 m που περνάει από το κέντρο του απορροφητήρα, χρησιμοποιούμε την εντολή Linear Sketch Pattern προκειμένου να δημιουργήσουμε και τα 30 κέντρα, κατά μήκος της ευθείας.



Εικόνα 4.6 (1)-(2) Επιλογή της εντολής Linear Sketch Pattern

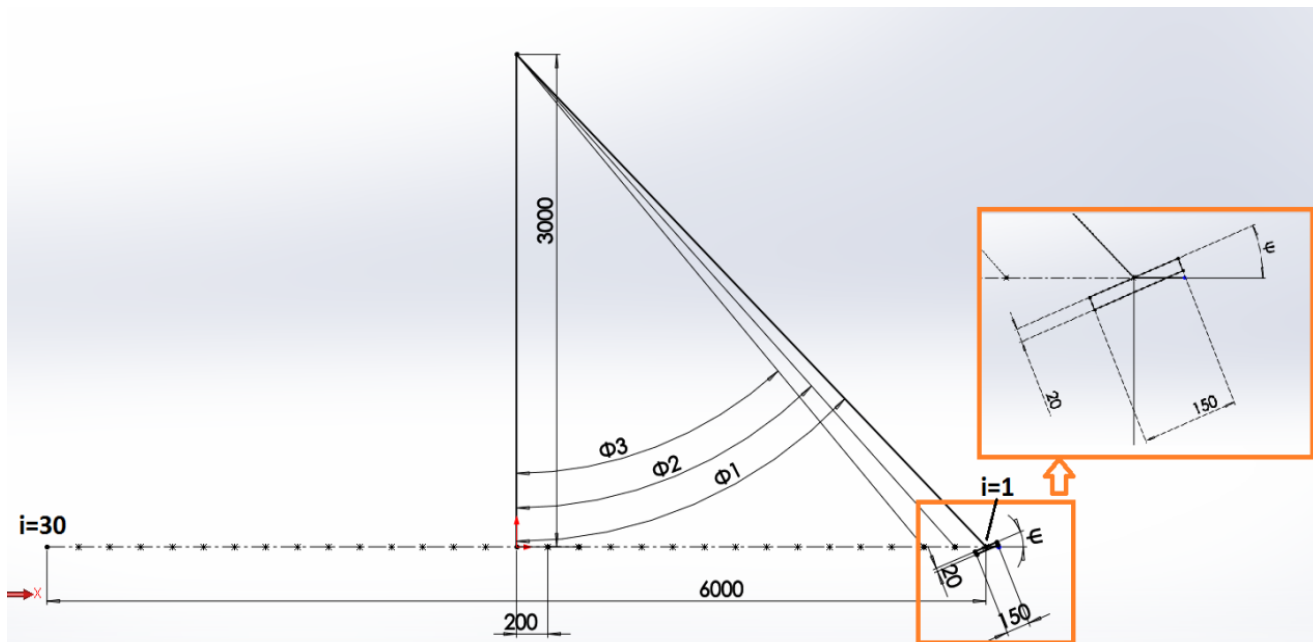
Όπως έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 3, όλα τα κέντρα των πρωτευόντων κατόπτρων ανήκουν σε αντίστοιχες παραβολές με εστία το κέντρο του σωλήνα. Αυτό, ισοδυναμεί με κλίση κατόπτρου ψ , όπου θ_T είναι η γωνία του ήλιου ως προς την κατακόρυφο και θ είναι η γωνία μεταξύ του κέντρου του σωλήνα και του κέντρου του κατόπτρου. Η κλίση για το i κάτοπτρο όπου $i=[1,30]$ με $i=1$ το δεξί ακραίο και $i=30$ το αριστερό ακραίο κάτοπτρο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\psi_i = \frac{\phi_i - \theta_T}{2}, \quad (4.4)$$

Αξίζει να αναφέρουμε ότι όλες οι εικόνες από τα βήματα σχεδίασης, είναι για γωνία ήλιου $\theta_T=0^\circ$, σε επόμενη ενότητα θα παρουσιασθούν οι τελικές εικόνες του συλλέκτη για όλες τις εξεταζόμενες γωνίες θ_T . Για γωνία $\theta_T=0^\circ$, οι αντίστοιχες ψ φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Βασική σημείωση είναι ότι μόνο σε αυτή την περίπτωση οι γωνίες κλίσεως των κατόπτρων είναι συμμετρικές ως προς την κατακόρυφο.

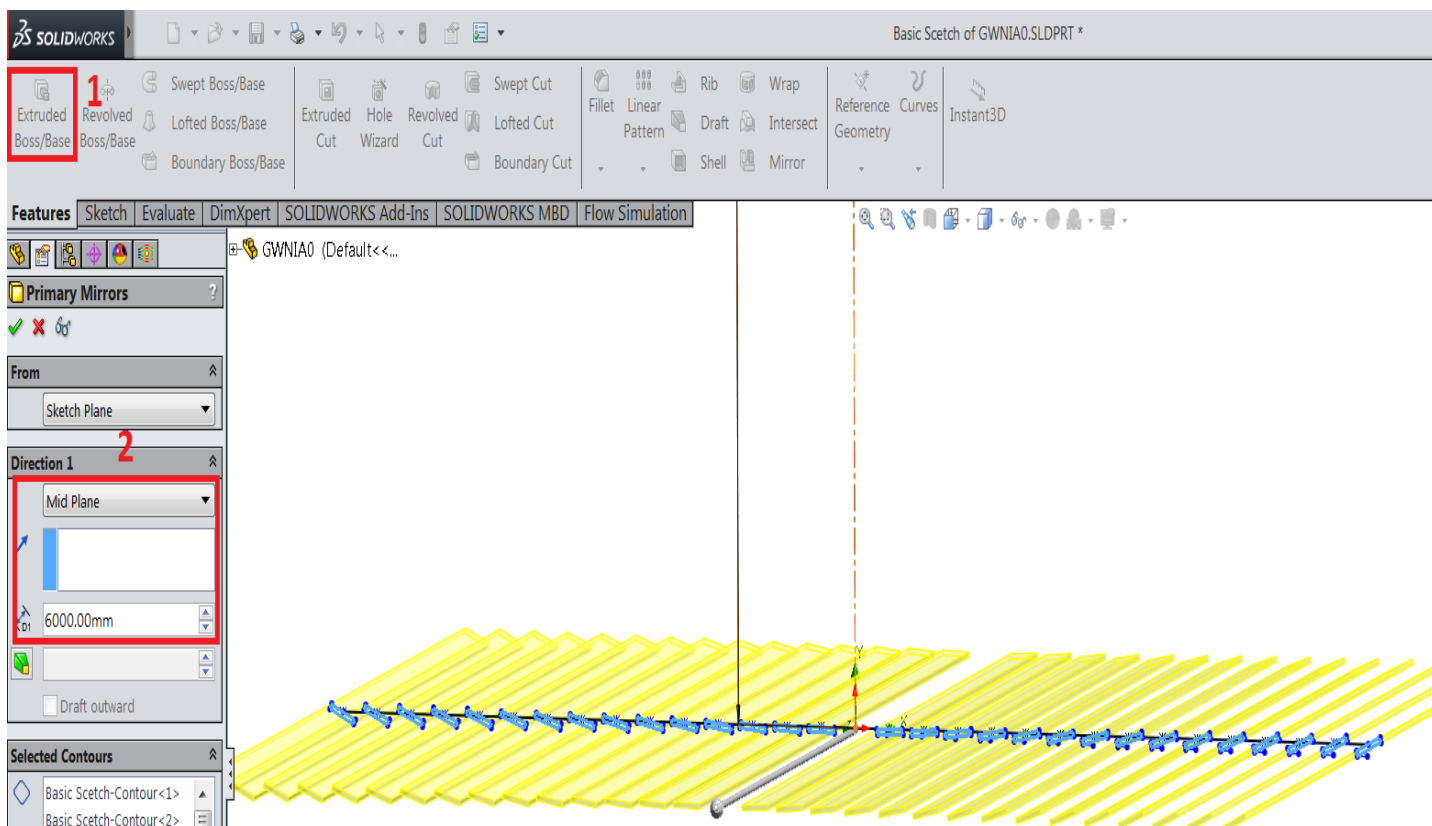
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ϕ_i	45	43.04	40.92	38.66	36.26	33.7	30.96	28.08	25.02	21.8	18.44	14.94	11.32	7.6	3.82
Ψ_i	22.5	21.52	20.46	19.33	18.13	16.85	15.48	14.04	12.51	10.9	9.22	7.47	5.66	3.8	1.91

Πίνακας 4.2 Γωνίες κλίσεως κατόπτρων (ψ) για $\theta_T=0^\circ$



Εικόνα 4.7 Σχεδιασμός του ακραίου κατόπτρου, κλίσης ψ

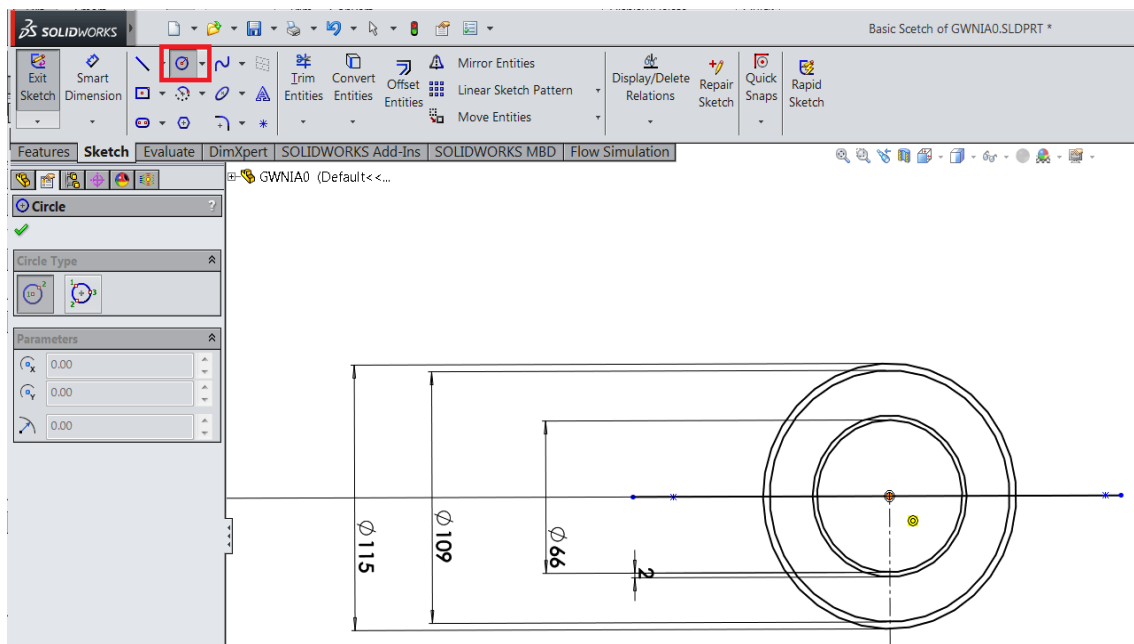
Με παρόμοιο τρόπο, και με βάση τον πίνακα 4.2 σχεδιάζουμε και τα υπόλοιπα κάτοπτρα του συλλέκτη. Στην συνέχεια, χρησιμοποιούμε την εντολή extruded boss/base και επιλέγουμε όλες τις επιφάνειες πρωτεύοντων κατόπτρων έτσι ώστε να τους δώσουμε βάθος μέτρου 6 m.



Εικόνα 4.8(1) Εντολή extruded boss/base (2) Επιλογή επιφανειών και βάθους που προσδίδουμε σε αυτές.

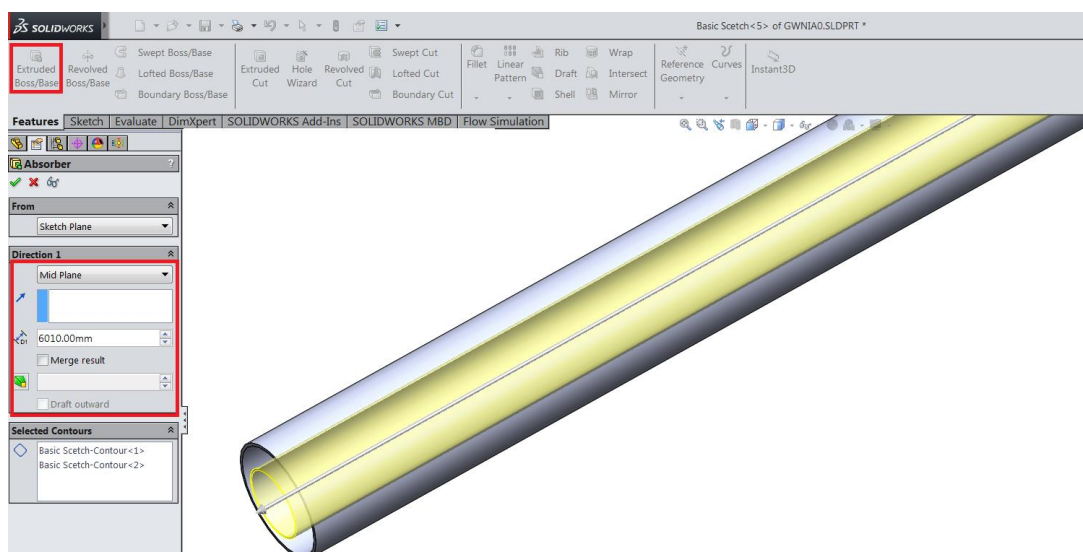
Σχεδιασμός απορροφητήρα

Ο απορροφητήρας αποτελείται από έναν χάλκινο σωλήνα με εσωτερική διάμετρο $D_{\text{fi}} = 0.066 \text{ m}$ και εξωτερική διάμετρο $D_{\text{fo}} = 0.070 \text{ m}$, καθώς και από το γυάλινο επιλεκτικό κάλυμμα με εσωτερική διάμετρο $D_{\text{ci}} = 0.109 \text{ m}$ και εξωτερική διάμετρο $D_{\text{co}} = 0.115 \text{ m}$. Στο ίδιο επίπεδο με πριν (Front plane), σε ύψος 3 m από την ευθεία των κέντρων των κατόπτρων σχεδιάζουμε τους παρακάτω κύκλους, και με την εντολή Smart Dimension τους διαστασιολογούμε.



Εικόνα 4.9 Επίπεδος σχεδιασμός απορροφητήρα

Έπειτα, με την εντολή extruded boss/base, επιλέγουμε τις κυλινδρικές επιφάνειες του σωλήνα κενού και δίνουμε τα εξής μήκη. Στον χάλκινο σωλήνα δίνουμε μήκος 6.010 m και στο γυάλινο κάλυμμα 6.0 m όσο και το βάθος των κατόπτρων. Αυτή η εξοχή του χάλκινου σωλήνα, σχεδιάζεται για κατασκευαστικούς λόγους που έχουν να κάνουν με την συνδεσμολογία των σωλήνων.



Εικόνα 4.10 Τρισδιάστατος σχεδιασμός σωλήνα κενού

Σχεδιασμός δευτερεύοντος κατόπτρου

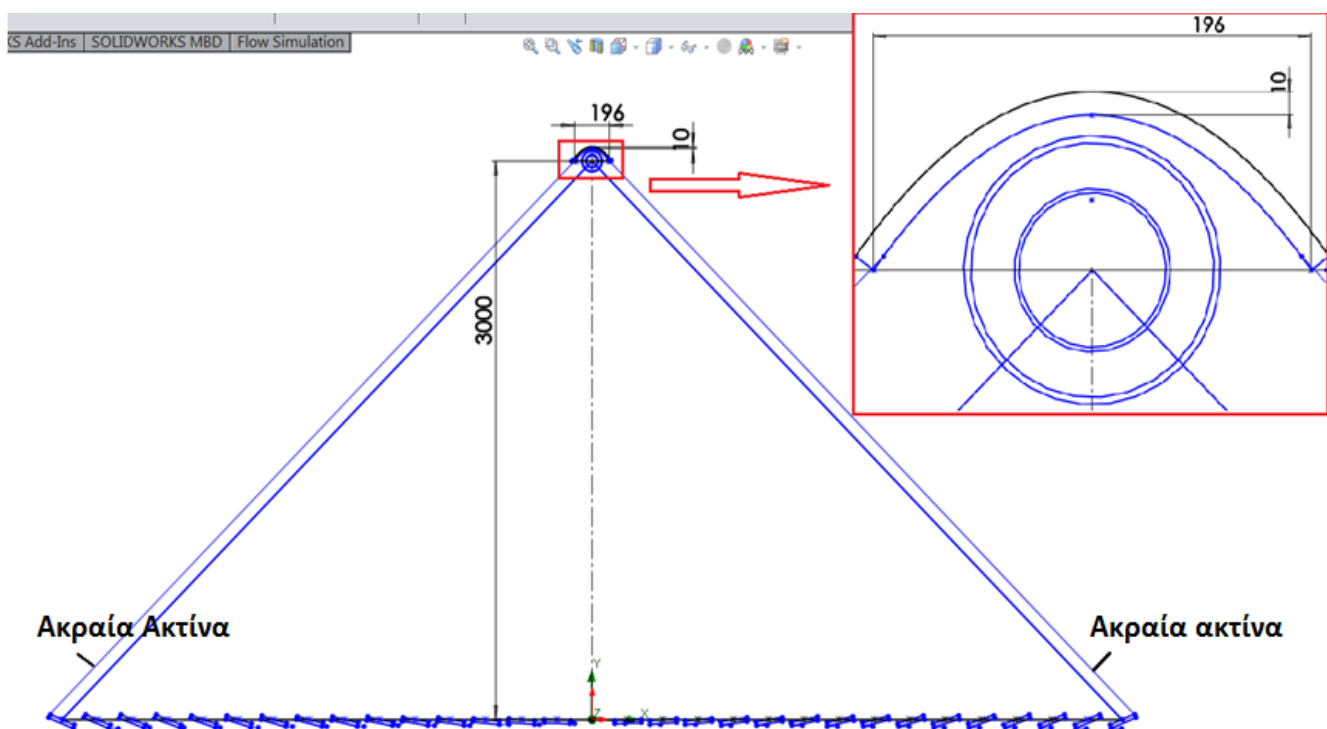
Για τον σχεδιασμό του δευτερεύοντος κατόπτρου, προκειμένου να έχουμε ταυτόχρονα μια σχετικά απλή γεωμετρία αλλά ταυτόχρονα και καλή οπτική απόδοση, επιλέξαμε να έχει μορφή απλής παραβολής. Δηλαδή μια ενδιάμεση λύση, μεταξύ του τραπεζοειδούς και του CPC κατόπτρου. Η παραβολή αυτή θα έχει την εστία της λίγο πάνω από το κέντρο του απορροφητήρα για κατασκευαστικούς λόγους. Επίσης θα έχει πάχος 10 mm, κάτι που συναντάτε αρκετά στην βιομηχανία. Το άνοιγμα της αλλά και το εστιακό της σημείο θα προκύψει έπειτα από οπτική βελτιστοποίηση.

Άνοιγμα παραβολικού κατόπτρου

Όπως έχουμε αναφέρει, η κύρια λειτουργία του δευτερεύοντος κατόπτρου, είναι να ανακλά τις ανεκμετάλλευτες ακτίνες, που δεν βρίσκουν τον απορροφητήρα, είτε λόγω ακαθαρσιών και μικρό-ανωμαλιών στην κατοπτρική επιφάνεια των πρωτευόντων κατόπτρων, είτε λόγω της κωνικότητας των ηλιακών ακτινών. Συγκεκριμένα, το άνοιγμα της θα πρέπει να έχει τέτοιο μήκος, έτσι ώστε να μπορεί να ανακλάσει την πιο ακραία ακτίνα των ακραίων κατόπτρων $i=1$ και $i=30$, πίσω στον απορροφητήρα.

Έτσι, βρέθηκε ότι το άνοιγμα αυτό θα πρέπει να είναι **$S=0.196$ m**.

Στο παρακάτω σχήμα, βλέπουμε τον εν λόγω σχεδιασμό.



Εικόνα 4.11 Σχεδιασμός ανοίγματος δευτερεύοντος παραβολικού κατόπτρου

Απόσταση μεταξύ εστίας παραβολής και κέντρο σωλήνα κενού

Προκειμένου, να προσδιορίσουμε το εν λόγω μέγεθος θα πρέπει να λάβουμε υπόψη δύο παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας, είναι κατασκευαστικός και περιορίζει αυτή την απόσταση, έτσι ώστε να μην έρχεται σε επαφή το δευτερεύον κάτοπτρο με τον απορροφητήρα. Ο δεύτερος, θα προκύψει ως αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του οπτικού βαθμού απόδοσης. Συγκεκριμένα, όπως έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 3, ο οπτικός βαθμός απόδοσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

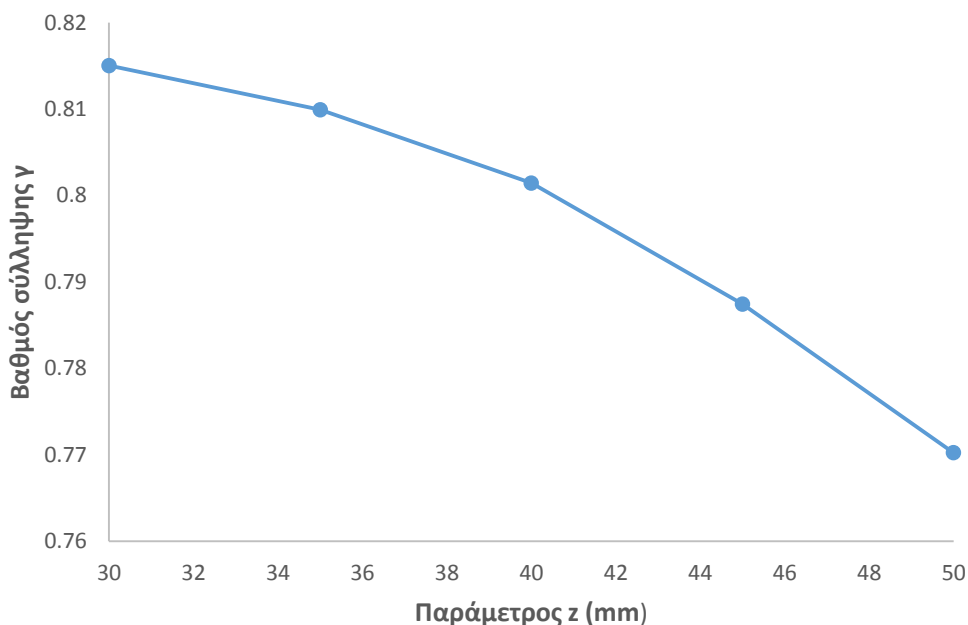
$$\eta_{opt}(\theta) = \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \gamma_o \cdot (\tau\alpha) \cdot K(\theta) \quad (4.5)$$

Τα μεγέθη ρ_1 , ρ_2 και $(\tau\alpha)$ έχουν δοθεί στον πίνακα της εικόνας 4.1 και αφορούν τα υλικά και την ποιότητα επιφανείας των κατόπτρων και τέλος την διαπερατότητα του γυάλινου καλύμματος και την απορροφητικότητα του χάλκινου σωλήνα, αντίστοιχα. Επίσης το μέγεθος K εξαρτάται αποκλειστικά από την κίνηση του ήλιου στον ουράνιο θόλο. Συνεπώς, η μόνη μεταβλητή που μπορεί να βελτιωθεί είναι ο βαθμός σύλληψης, ο οποίος αφορά την γεωμετρία του δευτερεύοντος κατόπτρου. Συγκεκριμένα, ο βαθμός σύλληψης δίνεται από την σχέση:

$$\gamma = \frac{Q_{abs}}{Q_{sol} \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (\tau\alpha)} \quad (4.6)$$

Το Q_{abs} είναι η θερμότητα που δέχεται ο απορροφητής και το Q_{sol} είναι η ακτινοβολία που ανακλάται από τα πρωτεύοντα κάτοπτρα. Τα δύο αυτά μεγέθη προκύπτουν από την οπτική ανάλυση που πραγματοποιήσαμε στο Flow Simulation του Solidworks. Η διαδικασία αυτή θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα ενδελεχώς.

Συνεπώς, εφαρμόσαμε αυτή την ανάλυση για διάφορες τιμές, της απόστασης μεταξύ κέντρου του σωλήνα και της εστίας του δευτερεύοντος παραβολικού κατόπτρου, z και καταλήξαμε ότι βέλτιστο βαθμό σύλληψης γ πετυχαίνουμε για $z=30$ mm. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν, είναι για $z=(30, 35, 40, 45, 50)$. Αξίζει να σημειωθεί, πως για z κάτω από 30 mm υπάρχουν ενδεχόμενα επαφής μεταξύ κατόπτρου και σωλήνα απορροφητήρα, που μπορεί να οφείλονται σε ταλαντώσεις από τα φορτία αέρα, ή ακόμα και από θερμικές διαστολές των μετάλλων. Επομένως, από 30 mm και πάνω, είμαστε στην ασφαλή μεριά σχεδίασης. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την μεταβολή του γ συναρτήσει του μεγέθους z .

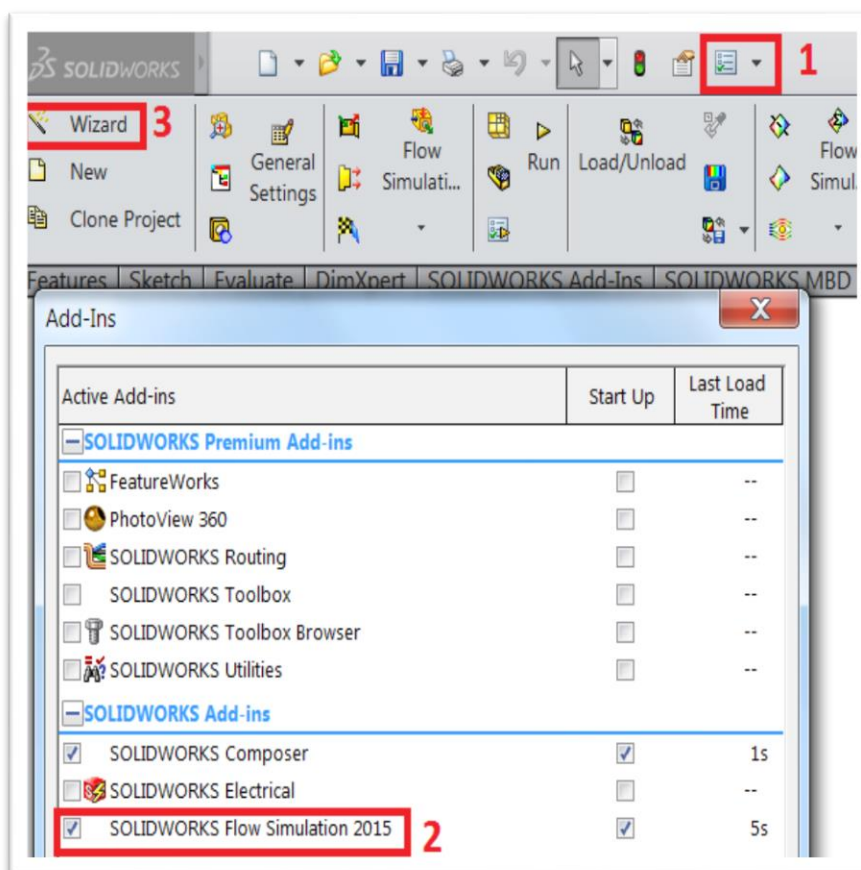


Εικόνα 4.12 Βαθμός σύλληψης για διάφορες τιμές του z

4.3 Οπτική και θερμική ανάλυση στο Flow Simulation

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα περιγράψουμε αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήσαμε, κατά την θερμική και οπτική ανάλυση στο Flow Simulation. Αναλυτικότερα, θα αναφερθούμε στα υλικά της κατασκευής μας καθώς και στις ιδιότητες τους. Επίσης, θα ορίσουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, το πλήθος των ακτινών καθώς και στην διεύθυνση της. Ακόμα θα δώσουμε τις οριακές συνθήκες του προβλήματος, όπως η πίεση και η παροχή εισόδου, καθώς και η συναγωγή στο εξωτερικό κάλυμμα. Ιδιαίτερη αναφορά θα γίνει επίσης στις ιδιότητες των θερμικών μέσων που θα χρησιμοποιήσουμε, στην τοπική πυκνωση πλέγματος, όπου είναι αναγκαία, καθώς και στο βέλτιστο υπολογιστικό πλέγμα της προσομοίωσης. Όλη αυτή η επεξήγηση, θα γίνει με πλήθος παραστατικών εικόνων από το περιβάλλον του λογισμικού, οι οποίες θα συνοδεύονται από κατατοπιστικά σχόλια. Είναι σημαντικό να τονίσουμε, πως όλα τα παρακάτω θα γίνουν για γωνία ήλιου $\theta_T=0^0$.

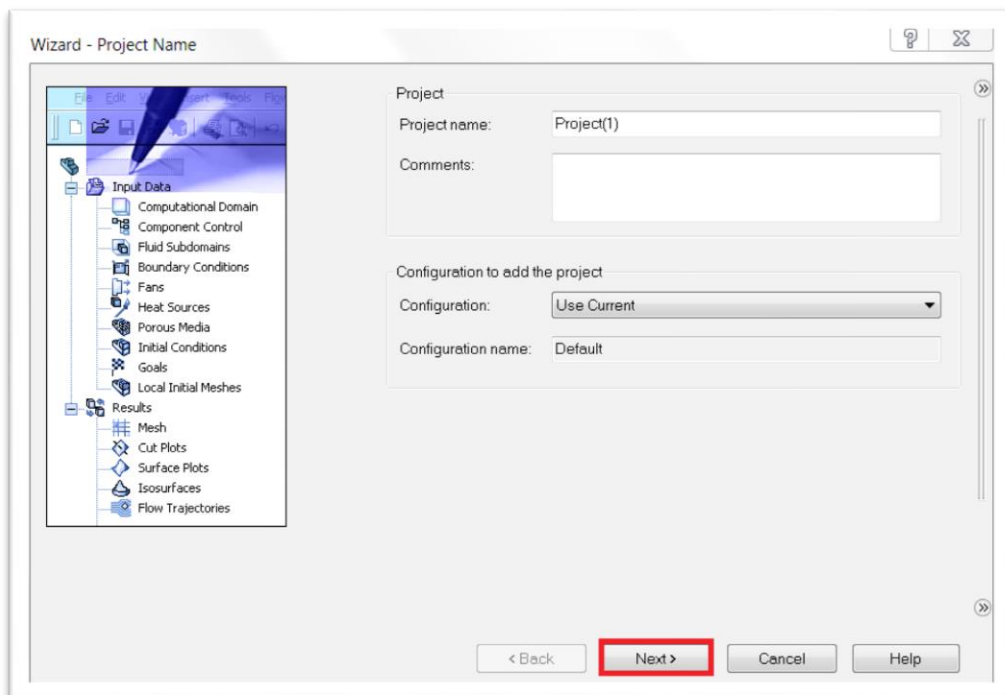
1. Αρχικά, ενεργοποιούμε το συγκεκριμένο add in στο βασικό μενού του λογισμικού και στη συνέχεια με την εντολή Wizard φτιάχνουμε νέο Project προσομοίωσης.



Εικόνα 4.13 (1),(2) Ενεργοποίηση Add-in (3) Δημιουργία νέου Wizard

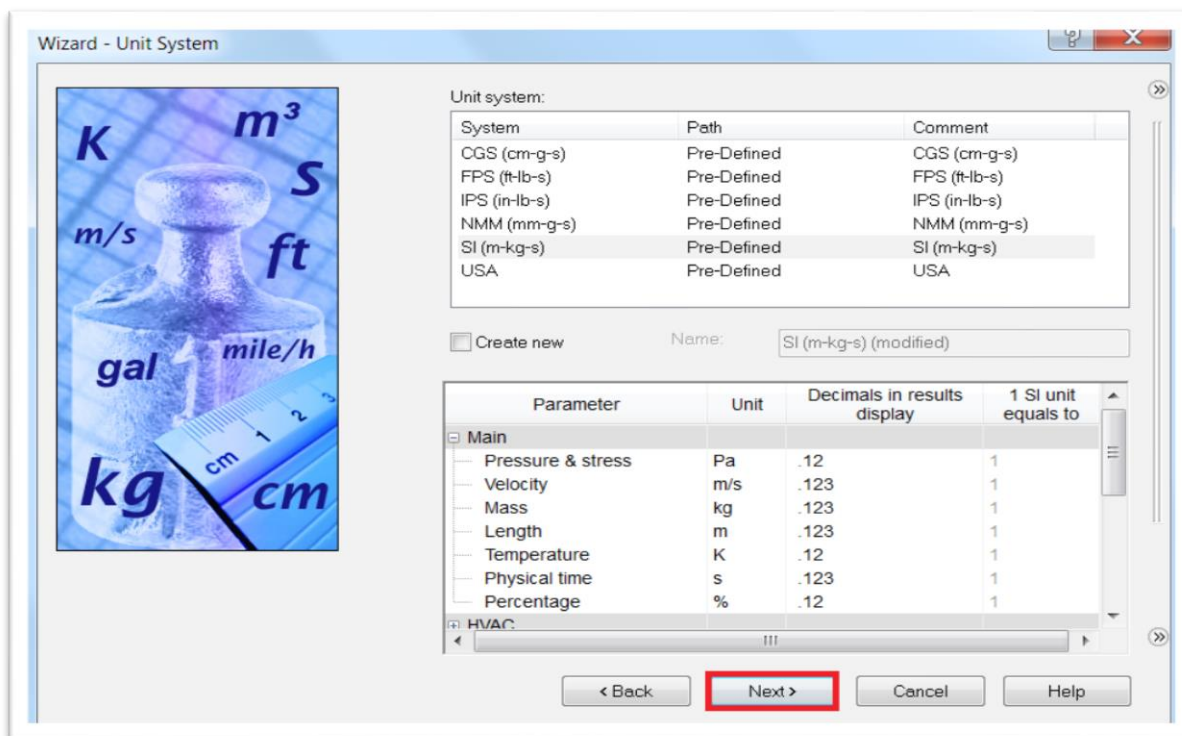
2. Στη συνέχεια, ξεκινάμε να βάζουμε τα δεδομένα του μοντέλου μας, στα επιμέρους μενού του Wizard.

Στην πρώτη καρτέλα που εμφανίζεται, έχουμε τη δυνατότητα να ονομάσουμε το Project μας καθώς και να προσθέσουμε σχόλια. Για να συνεχίσουμε, πατάμε Next.



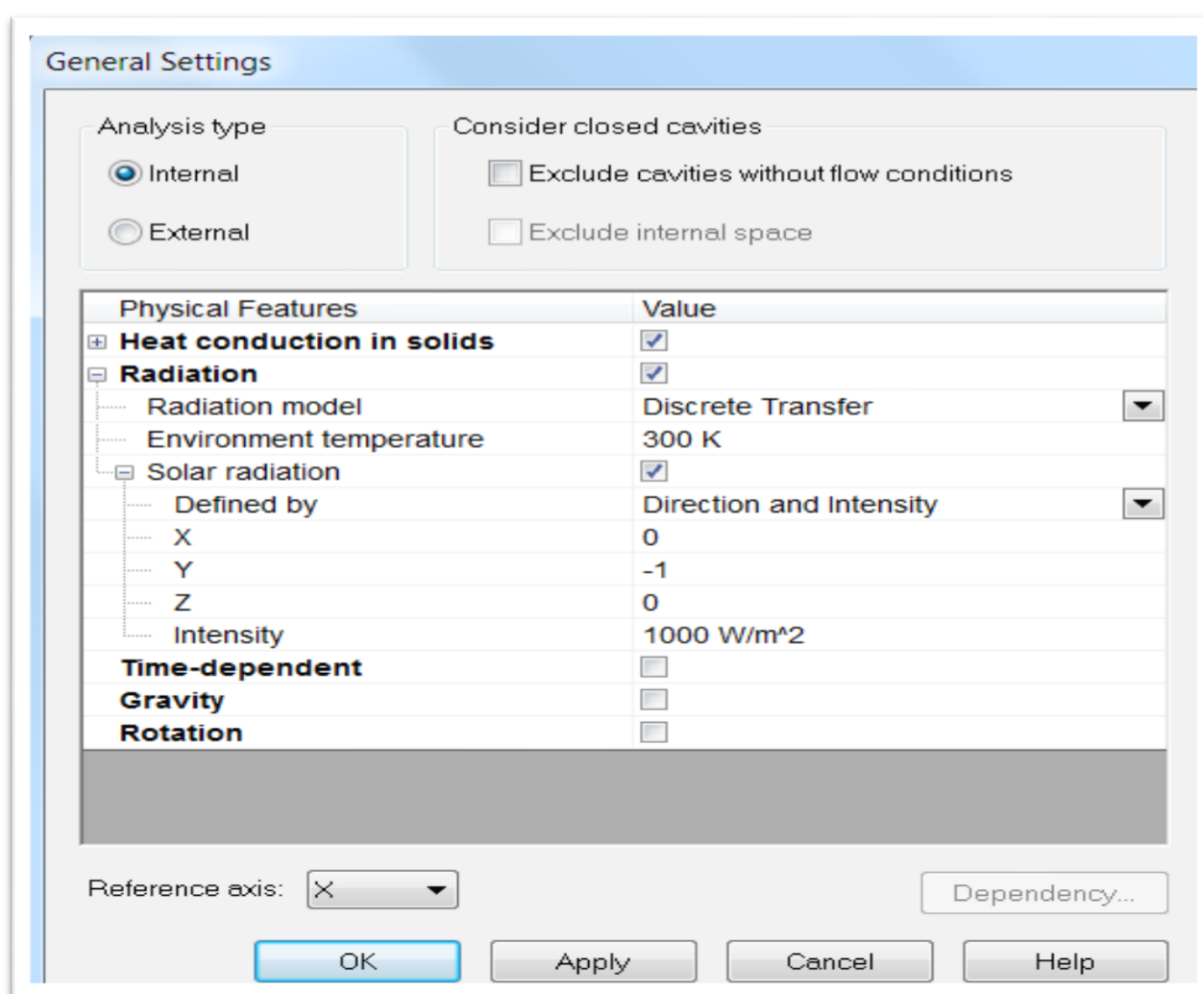
Εικόνα 4.14 Ονομασία Project

3. Στην επόμενη καρτέλα ορίζουμε, τις μονάδες των φυσικών μεγεθών του συστήματος που επιθυμούμε, όπως η θερμοκρασία και η πίεση. Εμείς, επιλέγουμε τις Standard μονάδες του συστήματος SI και στη συνέχεια πατάμε Next.



Εικόνα 4.15 Ορισμός μονάδων προβλήματος

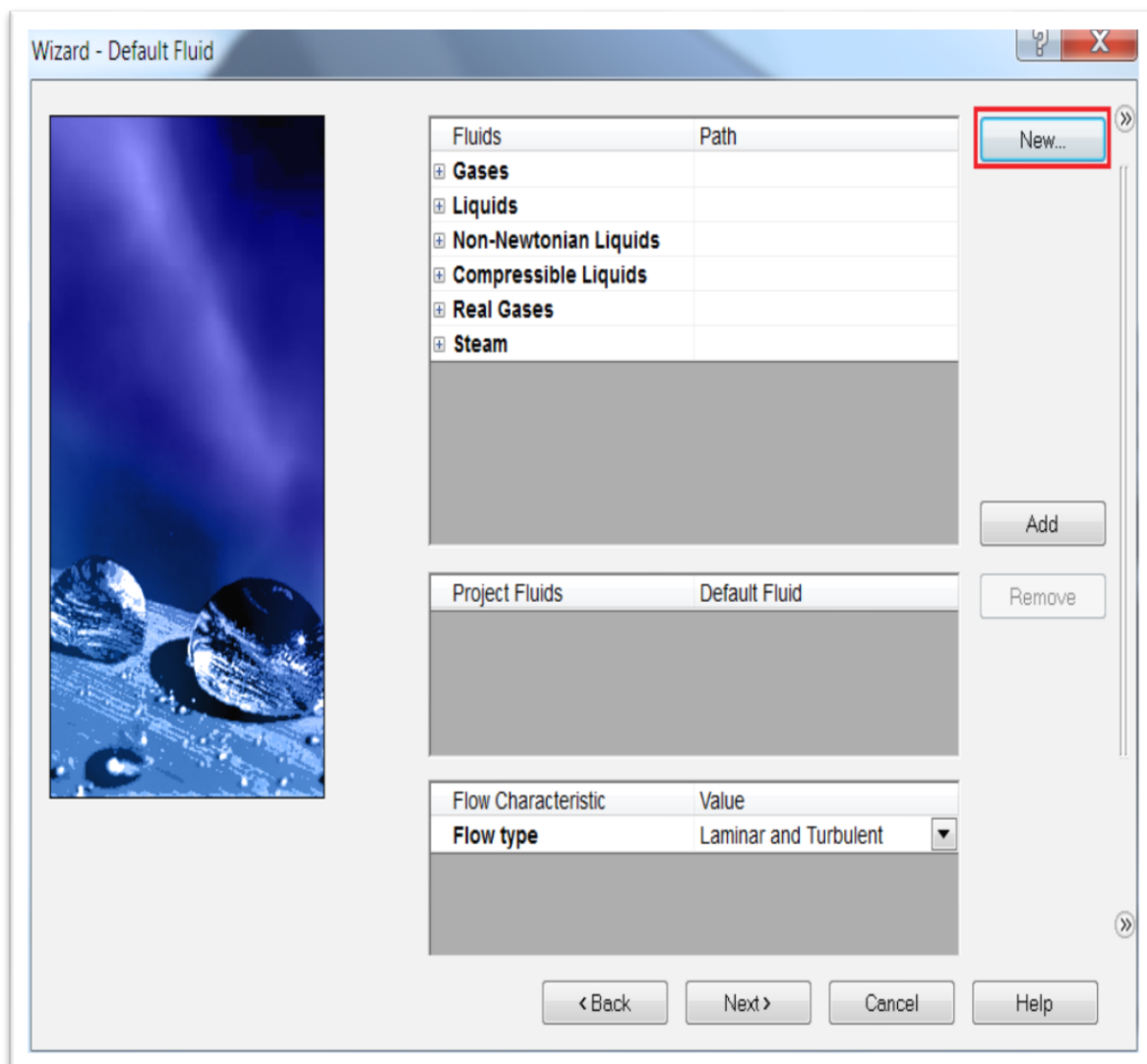
4. Στη συγκεκριμένη καρτέλα, ορίζουμε τον τύπο μελέτης που θα κάνουμε (εσωτερική ή εξωτερική), τους τρόπους μετάδοσης θερμότητας που θα έχουμε και προσδιορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται παρακάτω κάνουμε Click στην επιλογή Internal στον τύπο της ανάλυσης, στο Heat conduction in Solids, δηλαδή μετάδοση θερμότητας δια αγωγής μεταξύ σωμάτων και στο Radiation, όπου αφού επιλέξουμε την επιλογή Discrete Transfer και Solar Radiation που αφορά το μοντέλο της ακτινοβολίας, στην συνέχεια βάζουμε θερμοκρασία περιβάλλοντος 300 K, κατεύθυνση ηλιακής ακτινοβολίας κατακόρυφη (X=0, Y=-1, Z=0) και ένταση αυτής (Intensity) 1000 W/m². Οι υπόλοιπες επιλογές, αφορούν τις περιπτώσεις του δυναμικού φαινομένου και το αν θα λάβουμε υπόψη την βαρύτητα και την συστροφή. Στην δική μας περίπτωση, μελετούμε την σταθερή κατάσταση του συλλέκτη και δεν λαμβάνουμε υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους, οπότε τις αφήνουμε κενές. Για να συνεχίσουμε πατάμε OK.



Εικόνα 4.16 Προσδιορισμός ηλιακής ακτινοβολίας

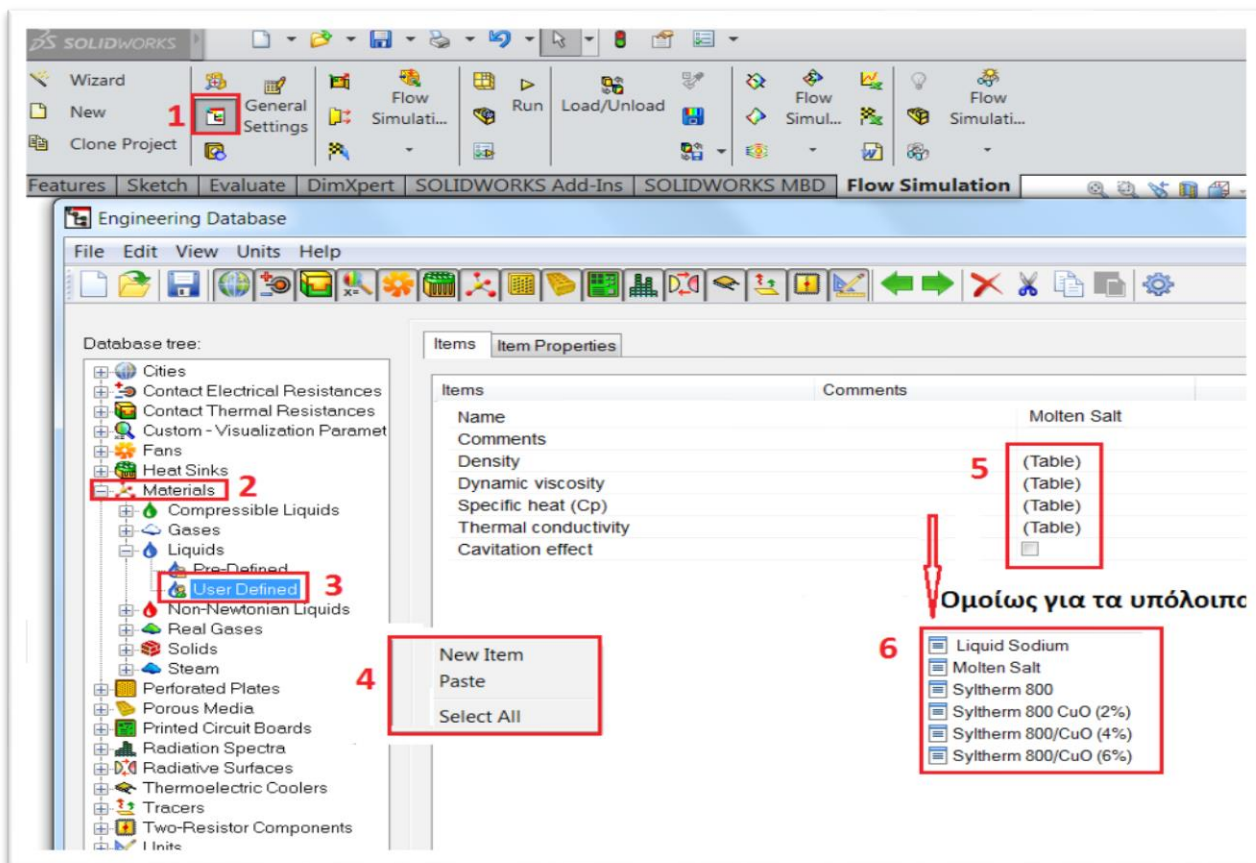
5. Σε αυτό το βήμα, μας ζητείται να προσδιορίσουμε το εργαζόμενο ρευστό του μοντέλου. Όπως έχουμε προαναφέρει τα εργαζόμενα μέσα που θα εξετάσουμε είναι τα εξής : Καθαρό Θερμικό έλαιο Syltherm800, με κατ' όγκο περιεκτικότητα νανοϋλικών CuO φ=2%, 4% και 6%, Τηγμένο άλας (Molten salt) και Υγρό νάτριο (Liquid sodium). Προφανώς οι βιβλιοθήκες του λογισμικού δεν περιέχουν τόσο εξειδικευμένα μέσα. Για

το λόγο αυτό, θα πρέπει να τα προσθέσουμε εμείς, με την μορφή πινάκων. Αρχικά, πατάμε το tab, New όπως φαίνεται παρακάτω.

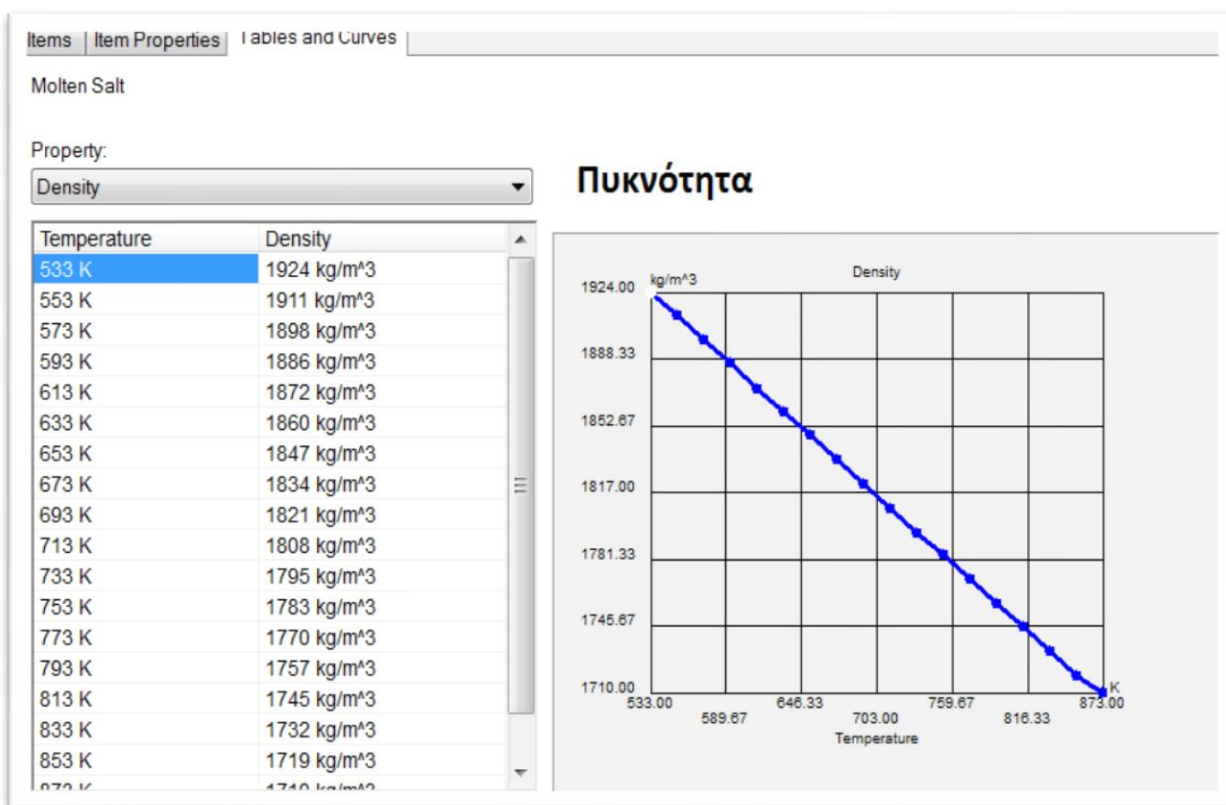


Εικόνα 4.17 Μενού επιλογής εργαζόμενου ρευστού

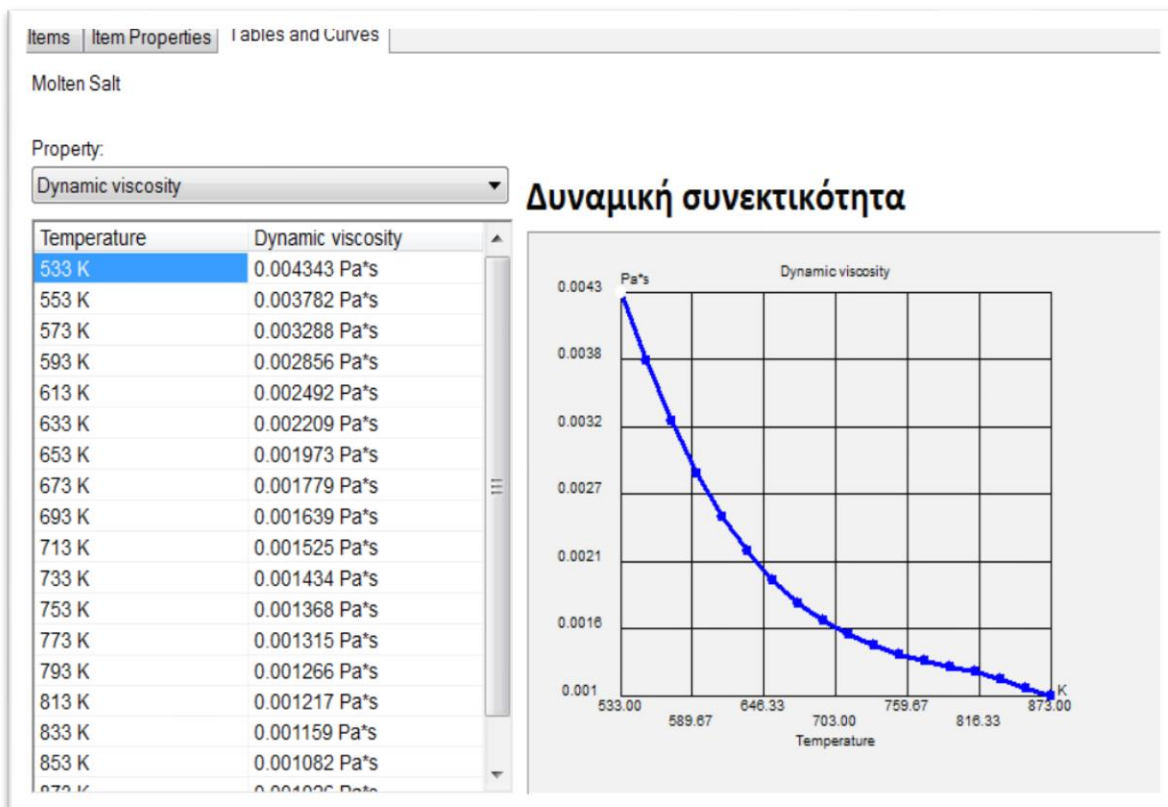
Έτσι ανοίγει το μενού Engineering Database (1), έπειτα πατάμε αριστερό Click στην επιλογή Materials (2) και στη συνέχεια επιλέγουμε Liquids. Στη συνέχεια, κάνουμε δεξί Click στην επιλογή User Defined (3) και πατάμε New Item (4). Στο σχετικό μενού έχουμε την δυνατότητα να ονομάσουμε το θερμικό μέσο που θα προσθέσουμε, καθώς και να ορίσουμε τις θερμικές του ιδιότητες, όπως πυκνότητα (Density, ρ), δυναμική συνεκτικότητα (Dynamic Viscosity, μ), ειδική θερμοχωρητικότητα (Specific heat, C_p) και θερμική αγωγιμότητα (Thermal Conductivity, k). Αυτές θα προστεθούν με την μορφή πίνακα συναρτήσεως της θερμοκρασίας τους (5). Στις εικόνες 4.19 έως και 4.22 βλέπουμε την κάθε παραπάνω ιδιότητα του τηγμένου άλατος σε μορφή διαγράμματος συναρτήσεως της θερμοκρασίας του. Αξίζει να σημειωθεί, πως οι εικόνες αυτές αφορούν το τηγμένο άλας χάρην παραδείγματος και οικονομίας λόγου, καθώς η παραπάνω διαδικασία θα γίνει για όλα τα θερμικά μέσα που αναφέραμε παραπάνω, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο (6).



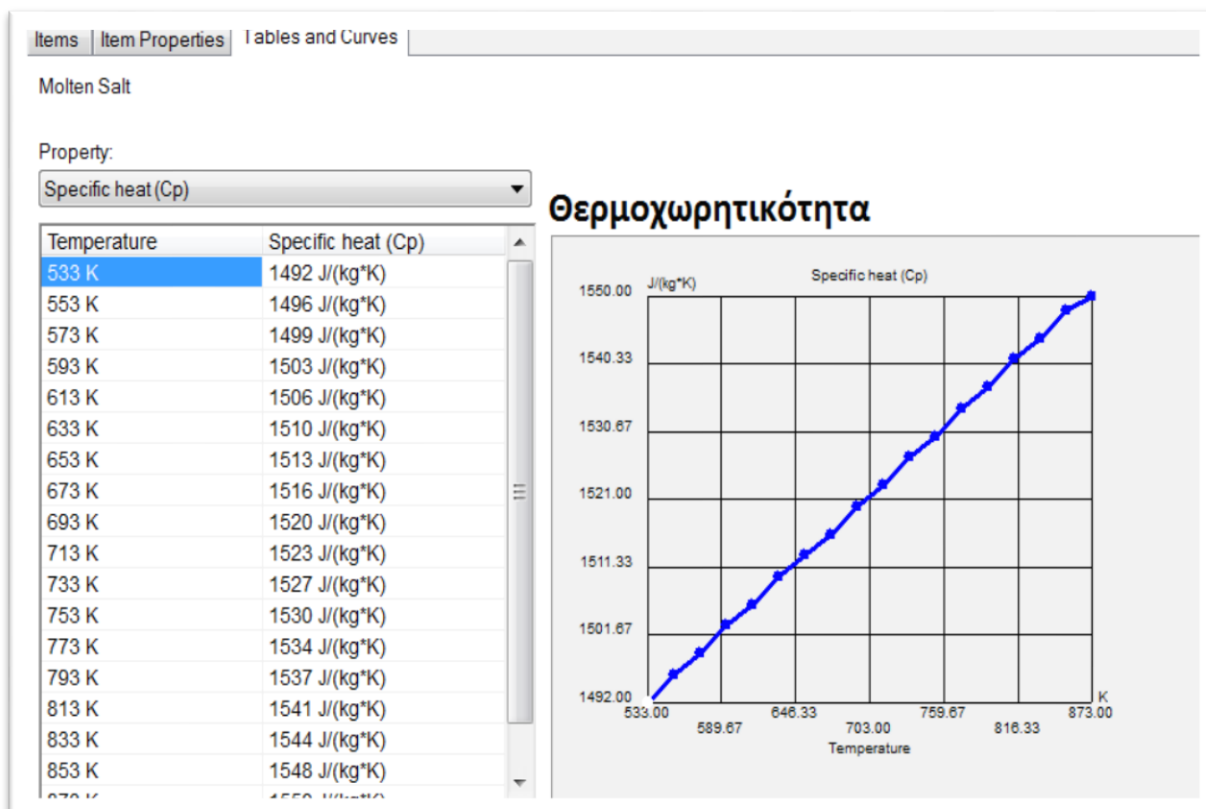
Εικόνα 4.18 Δημιουργία νέων θερμικών μέσων



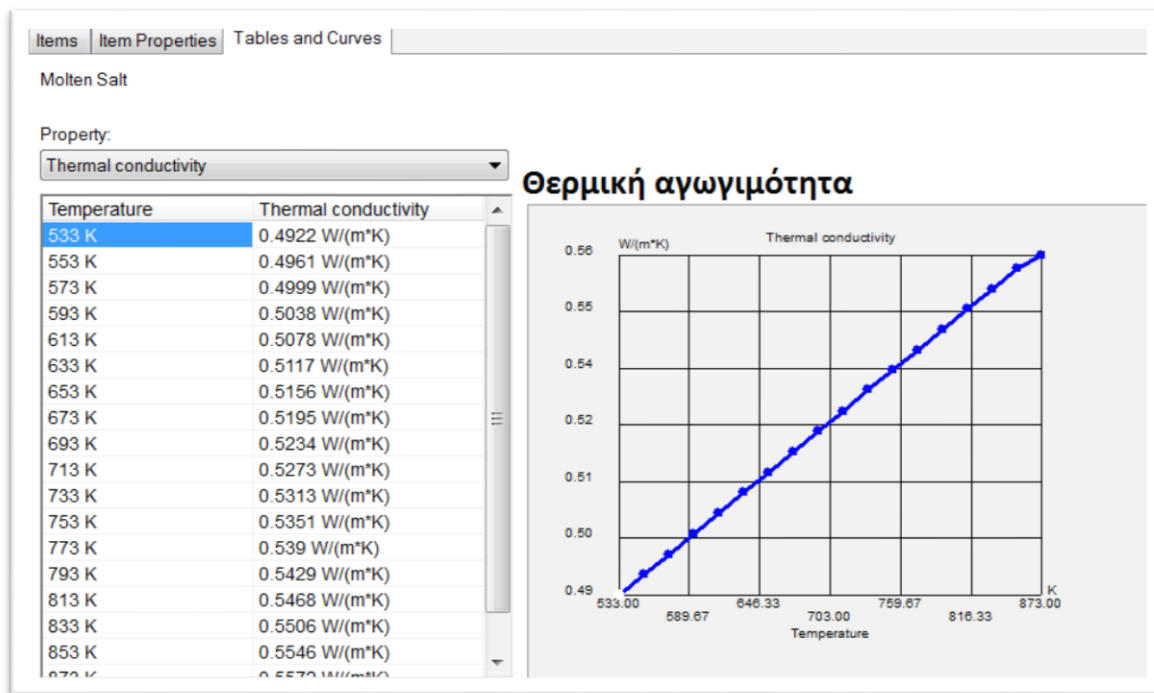
Εικόνα 4.19 Πίνακας πυκνότητας Τηγμένου άλατος (Molten salt)



Εικόνα 4.20 Πίνακας δυναμικής συνεκτικότητας Τηγμένου άλατος (Molten salt)

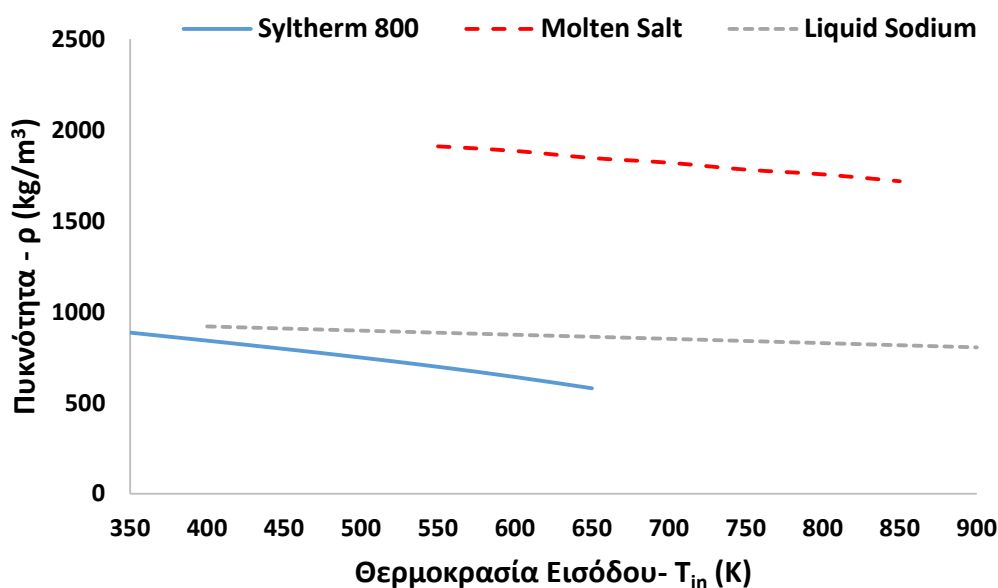


Εικόνα 4.21 Πίνακας θερμοχωρητικότητας Τηγμένου άλατος (Molten salt)



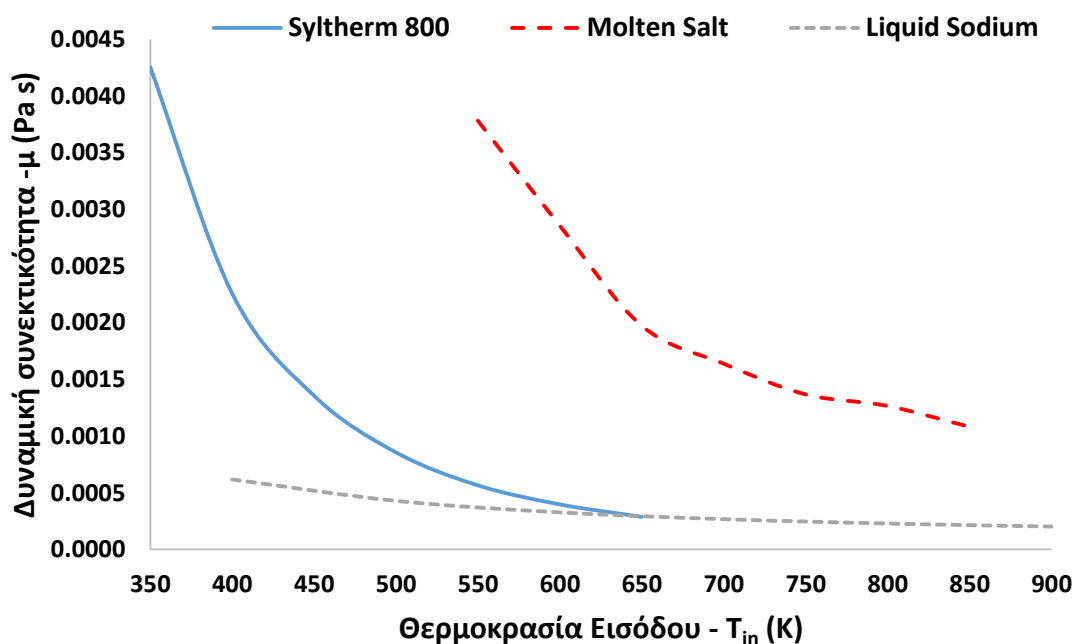
Εικόνα 4.22 Πίνακας θερμικής αγωγιμότητας Τηγμένου άλατος (Molten salt)

Είναι πολύ σημαντικό να διακρίνουμε τις διαφορές μεταξύ των ιδιοτήτων των εξεταζόμενων μέσων που εξετάζουμε. Αξίζει να σημειωθεί, πως η σύγκριση γίνεται μόνο στα μέσα που έχουν διαφορετική φύση, δηλαδή (Syltherm 800- τηγμένο άλας – υγρό νάτριο) είτε μεταξύ της καθαρής ουσίας και της εμπλουτισμένης με νανοϋλικά (Syltherm 800 pure – Syltherm 800+ CuO). Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τη σύγκριση των πυκνοτήτων μεταξύ Syltherm 800- τηγμένο άλας – υγρό άζωτο. Παρατηρούμε ότι το Syltherm 800 λειτουργεί σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα άλλα δύο μέσα, καθώς όντας θερμικό έλαιο, σε υψηλές θερμοκρασίες χάνει τις ιδιότητες του.

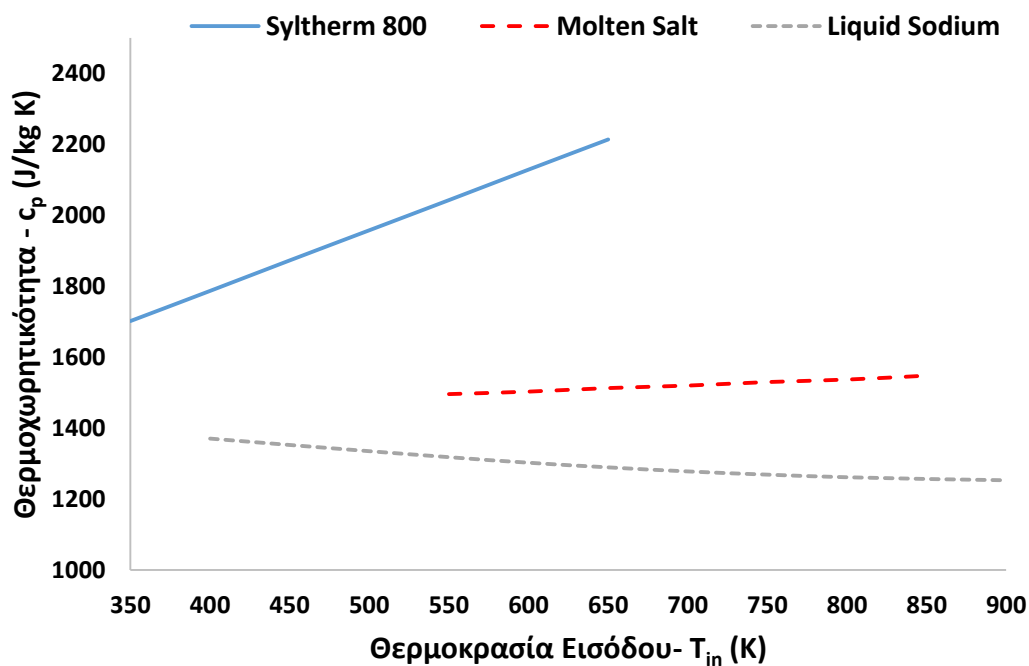


Εικόνα 4.23 Σύγκριση πυκνότητας Syltherm800, Molten Salt, Liquid Sodium για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου

Στο παρακάτω σχήμα, βλέπουμε ότι η δυναμική συνεκτικότητα του Syltherm 800 είναι αρκετά πιο απότομη από αυτή του υγρού νατρίου, αυτό δείχνει ότι το θερμικό έλαιο είναι πιο ευαίσθητο στην μεταβολή της θερμοκρασίας του.

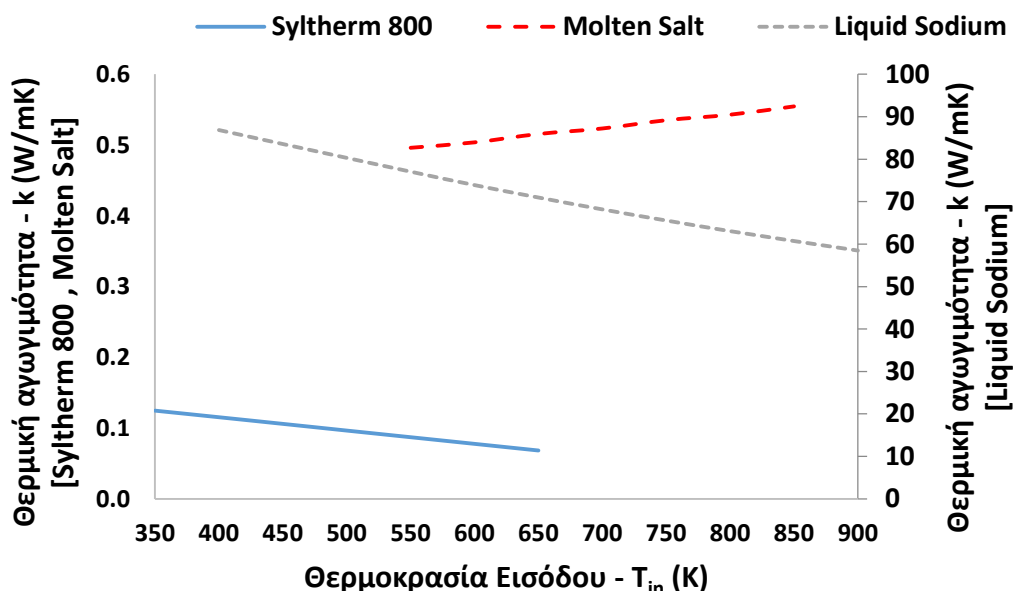


Εικόνα 4.24 Σύγκριση δυναμικής συνεκτικότητας Syltherm800, Molten Salt, Liquid Sodium για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου



Εικόνα 4.25 Σύγκριση θερμοχωρητικότητας Syltherm800, Molten Salt, Liquid Sodium για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου

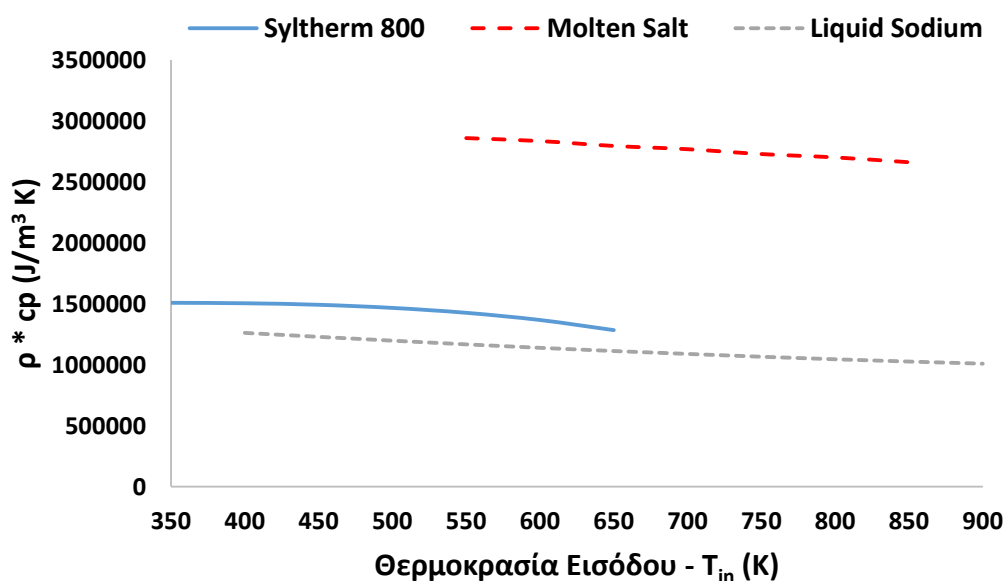
Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε, την σύγκριση των θερμική αγωγιμοτήτων. Όπως, ήταν αναμενόμενο παρατηρούμε ότι ο συντελεστής k του υγρού νατρίου είναι τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος σε σχέση με των υπόλοιπων μέσων. Αυτό οφείλεται στην μεταλλική φύση του υγρού νατρίου.



Εικόνα 4.26 Σύγκριση θερμικής αγωγιμότητας Syltherm800, Molten Salt, Liquid Sodium για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου

Ένα αρκετά σημαντικό διάγραμμα το οποίο μας δείχνει ποιοτικά το πόσο καλές θερμικές ιδιότητες έχει ένα μέσο είναι το γινόμενο $\rho \cdot C_p$, καθώς η ωφέλιμη ισχύς που απορροφά το μέσο δίνεται από την γνωστή σχέση, όπου V είναι η παροχή όγκου του ρευστού:

$$Q_u = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (4.7)$$

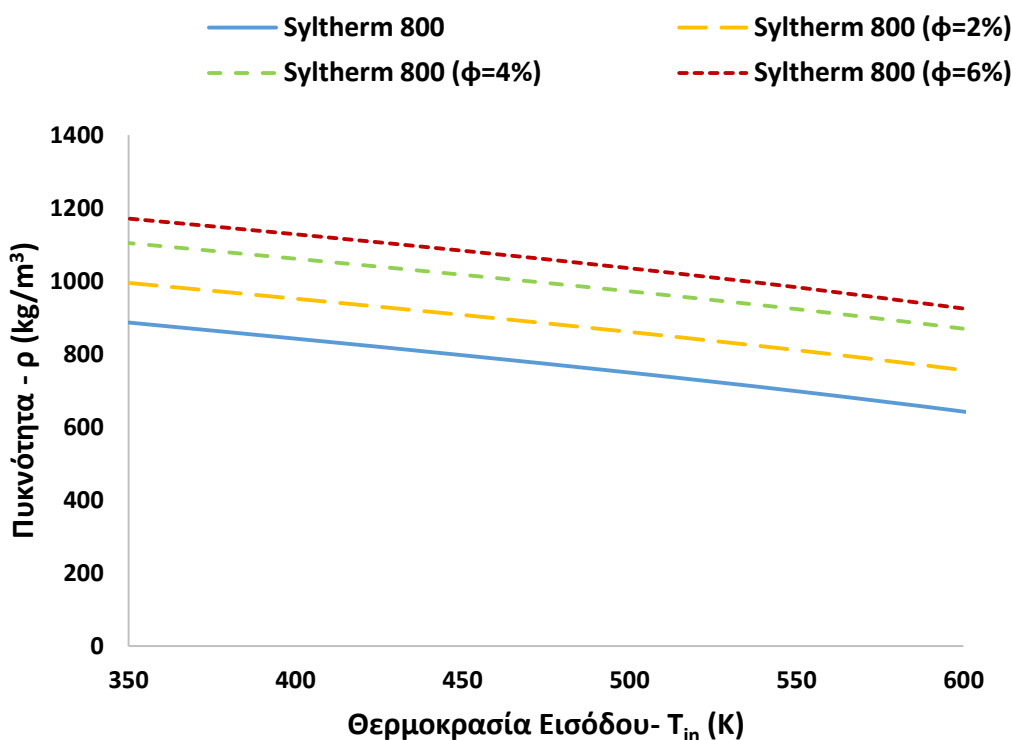


Εικόνα 4.27 Σύγκριση γινομένου ($\rho \cdot C_p$) Syltherm800, Molten Salt, Liquid Sodium για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου

Συνεπώς, διαπιστώνουμε ότι το τηγμένο άλας (Molten Salt) έχει τις ευνοϊκότερες θερμικές ιδιότητες για την μεταφορά θερμότητας.

Στις επόμενες εικόνες, από 4.28 έως 4.31 βλέπουμε τα αντίστοιχα με τα παραπάνω διαγράμματα, τα οποία συγκρίνουν τις ιδιότητες του καθαρού Syltherm 800 με αυτές που προκύπτουν από την ποσοστιαία κατ' όγκο προσθήκη νανοϋλικών CuO.

Στο διάγραμμα 4.28, όπου συγκρίνουμε τις πυκνότητες, παρατηρούμε όπως αναμενόταν ότι όσο αυξάνεται το φ, αυξάνεται η πυκνότητα του μέσου.



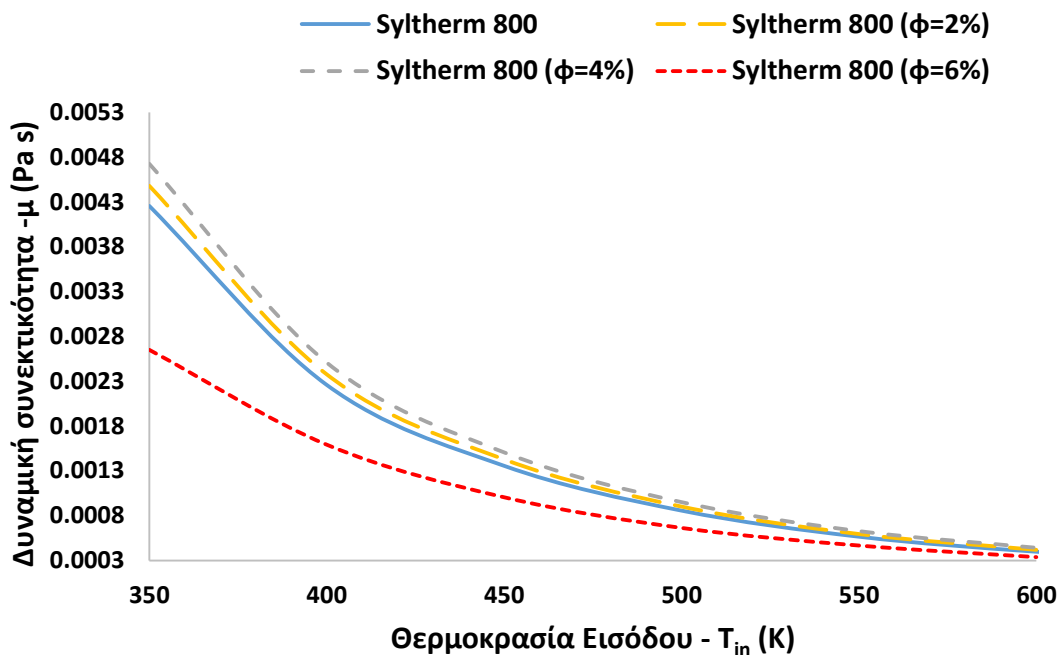
Εικόνα 4.28 Σύγκριση πυκνότητας μεταξύ καθαρού Syltherm800, και εμπλουτισμένου με Νανοϋλικά (CuO) για φ=2%, 4%, 6%, για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου.

Στο παρακάτω σχήμα, παρατηρούμε ότι η προσθήκη νανοϋλικών CuO, επιφέρει σημαντική βελτίωση στην δυναμική συνεκτικότητα. Αυτό, όμως δεν είναι επιθυμητό καθώς συνδέεται με το βασικό μειονέκτημα των νανοϋλικών CuO, την πτώση πίεσης. Συγκεκριμένα, μεγάλες τιμές δυναμικής συνεκτικότητας μ , συνδέεται με μικρότερο αριθμό Reynolds και αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μεγάλες τιμές του συντελεστή τριβής f , αυξάνοντας έτσι την πτώση πίεσης. Ο συλλογισμός αυτός, στηρίζεται στις παρακάτω εξισώσεις που έχουν αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3.

$$Re = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot D_{ri} \cdot \mu}, \quad (4.8)$$

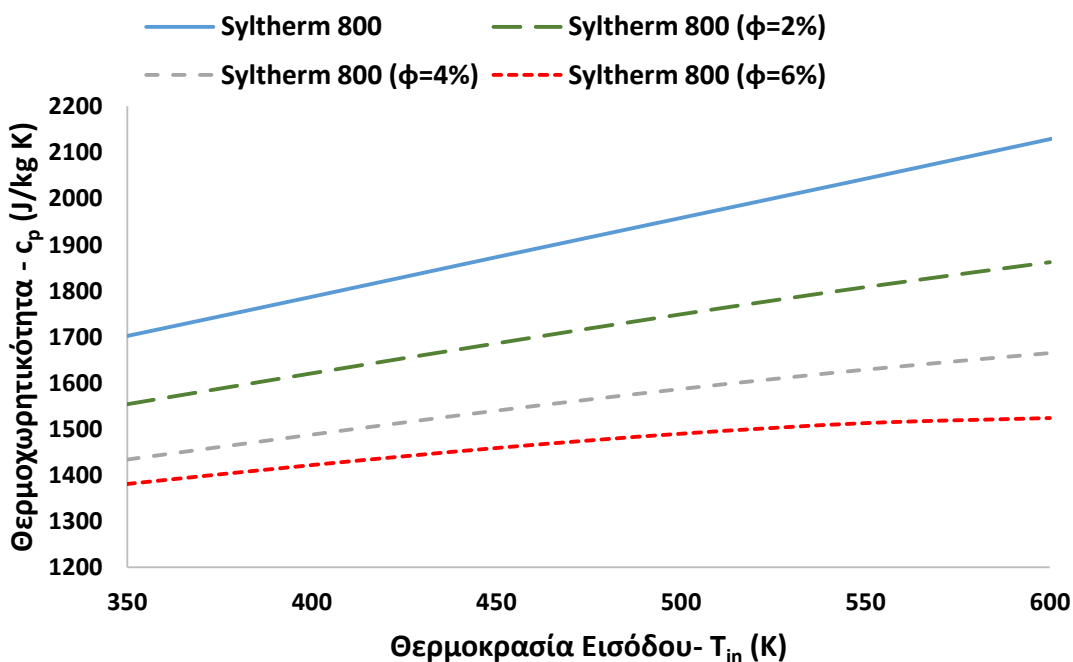
$$f_{th} = \frac{0.184}{Re^{0.2}}, \quad (4.9)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot f \cdot \frac{L}{D_{ri}} \quad (4.10)$$

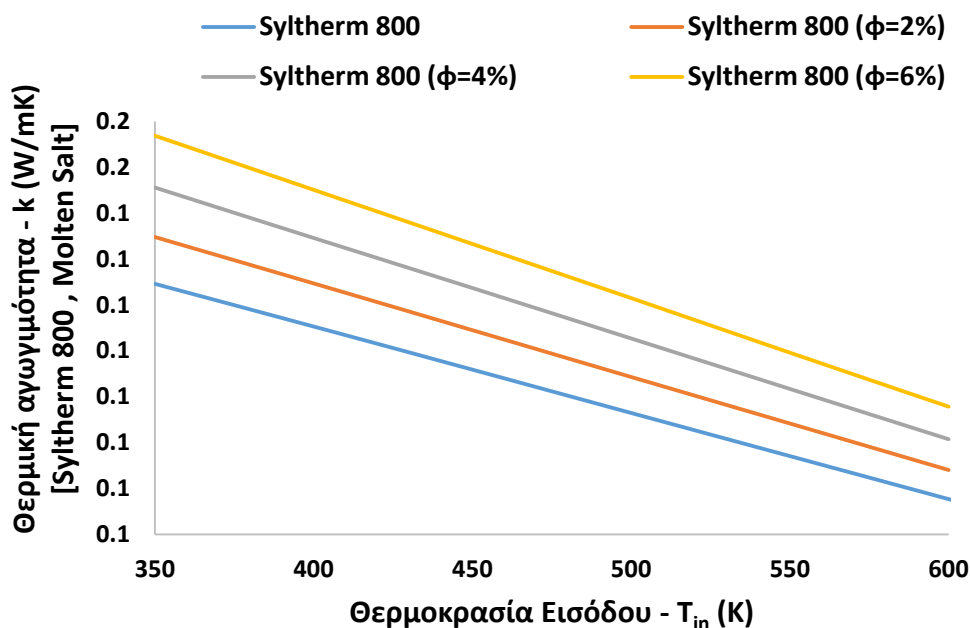


Εικόνα 4.29 Σύγκριση δυναμικής συνεκτικότητας μεταξύ καθαρού Syltherm800, και εμπλουτισμένου με Νανοϋλικά (CuO) για φ=2%, 4%, 6%, για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου.

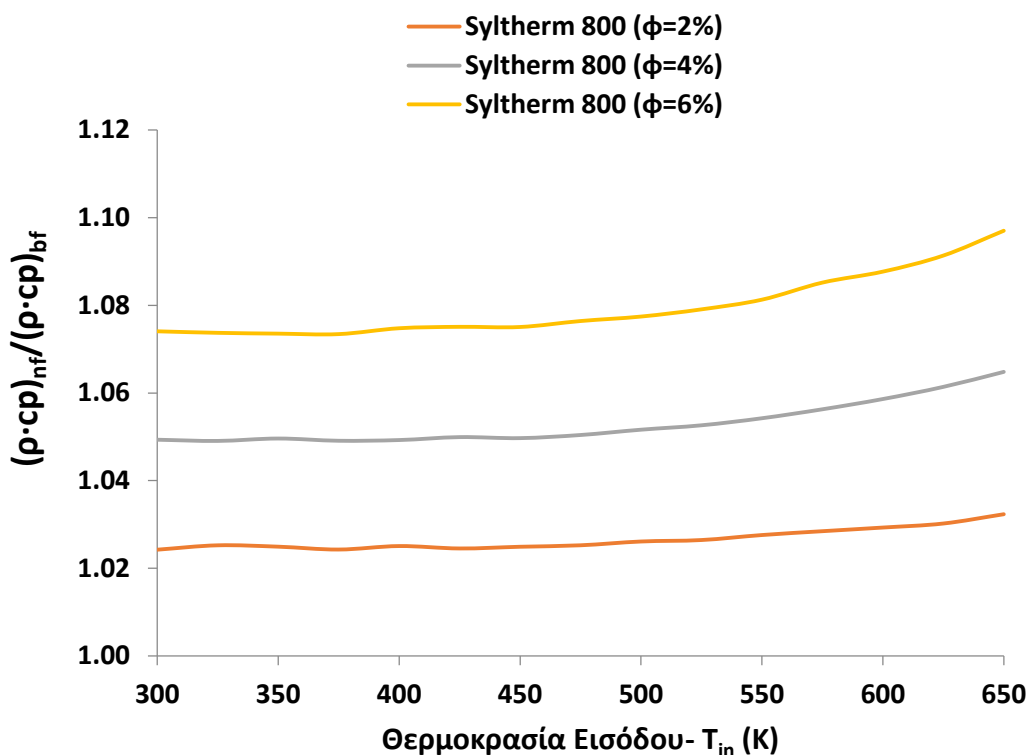
Όσον αφορά τις διαφορές στην θερμοχωρητικότητα, παρατηρούμε ότι με την προσθήκη νανοϋλικών CuO αυτή μειώνεται. Επίσης, διακρίνουμε ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, αυτές οι διαφορές γίνονται ακόμα πιο έντονες.



Εικόνα 4.30 Σύγκριση θερμοχωρητικότητας μεταξύ καθαρού Syltherm800, και εμπλουτισμένου με Νανοϋλικά (CuO) για φ=2%, 4%, 6%, για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου.



Εικόνα 4.31 Σύγκριση θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ καθαρού Syltherm800, και εμπλουτισμένου με Νανοϋλικά (CuO) για φ=2%, 4%, 6%, για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου.



Εικόνα 4.32 Σύγκριση λόγου $\frac{(\rho \cdot C_p)_{nf}}{(\rho \cdot C_p)_{bf}}$ μεταξύ καθαρού Syltherm800, και εμπλουτισμένου με Νανοϋλικά (CuO) για φ=2%, 4%, 6%, για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου.

Στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται η μεταβολή του $\frac{(\rho \cdot C_p)_{nf}}{(\rho \cdot C_p)_{bf}}$, όπου ο δείκτης nf αναφέρεται στο

εμπλουτισμένο λάδι με νανοϋλικό (CuO) (nanofluid), ενώ ο αντίστοιχος δείκτης bf αναφέρεται στο καθαρό Syltherm 800 (base fluid). Όπως έχουμε ξαναπεί, το γινόμενο $\rho \cdot C_p$, σχετίζεται άμεσα με την συναλλασσόμενη θερμότητα μεταξύ μετάλλου και ρευστού, κάτι που φαίνεται και στην εξίσωση 4.7. Η μεταβολή αυτού του μεγέθους μας πληροφορεί ποιοτικά, κατά πόσο βελτιώσαμε τις θερμικές ιδιότητες ενός μέσου με την προσθήκη νανοσωματιδίων σε αυτό. Όπως φαίνεται στο σχήμα, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νανοϋλικά (CuO), τόσο μεγαλύτερος είναι ο παραπάνω λόγος, συνεπώς η βελτίωση των ιδιοτήτων, κάτι που ήταν αναμενόμενο.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε, πώς τα παραπάνω διαγράμματα τα οποία αφορούν το Syltherm 800 και την προσθήκη νανοσωματιδίων σε αυτό, προέκυψαν με τις εξής εξισώσεις οι οποίες έχουν αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3.

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \cdot (1 - \phi) + \rho_{np} \cdot \phi \quad (4.11)$$

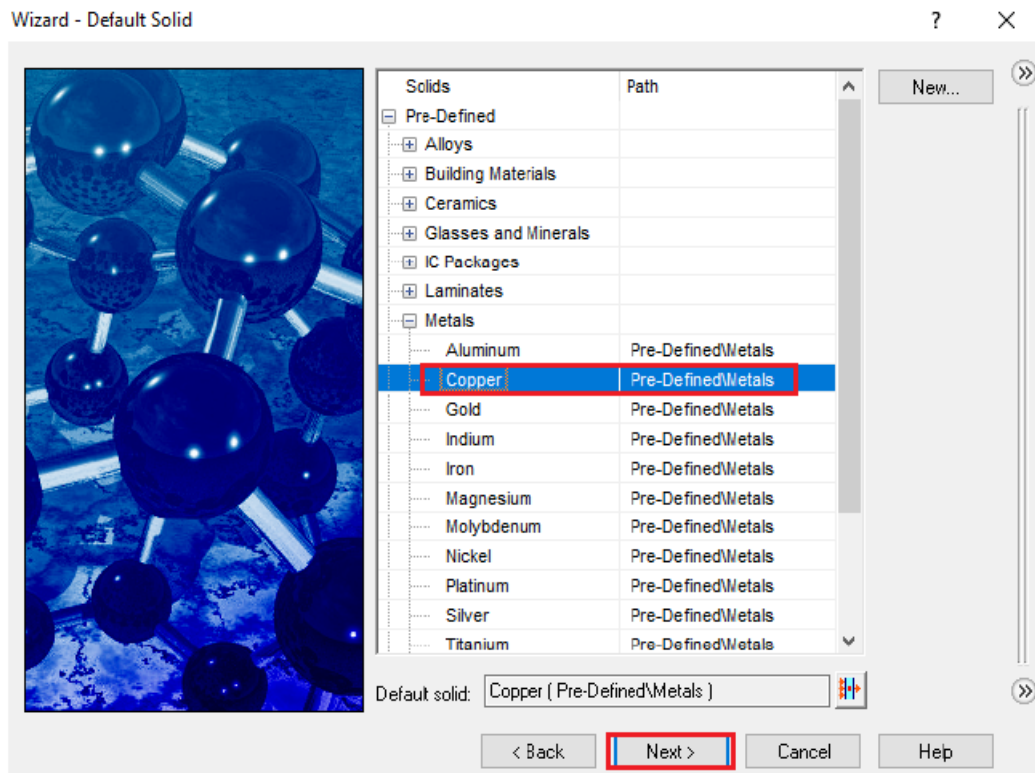
$$c_{p,nf} = \frac{\rho_{bf} \cdot (1 - \phi)}{\rho_{nf}} \cdot c_{p,bf} + \frac{\rho_{np}}{\rho_{nf}} \cdot c_{p,np} \quad (4.12)$$

$$k_{nf} = k_{bf} \cdot \frac{k_{np} + 2 \cdot k_{bf} + 2 \cdot (k_{np} - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3 \cdot \phi}{k_{np} + 2 \cdot k_{bf} - (k_{np} - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3 \cdot \phi} \quad (4.13)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \cdot (1 + 2.5 \cdot \phi + 6.2 \cdot \phi^2) \quad (4.14)$$

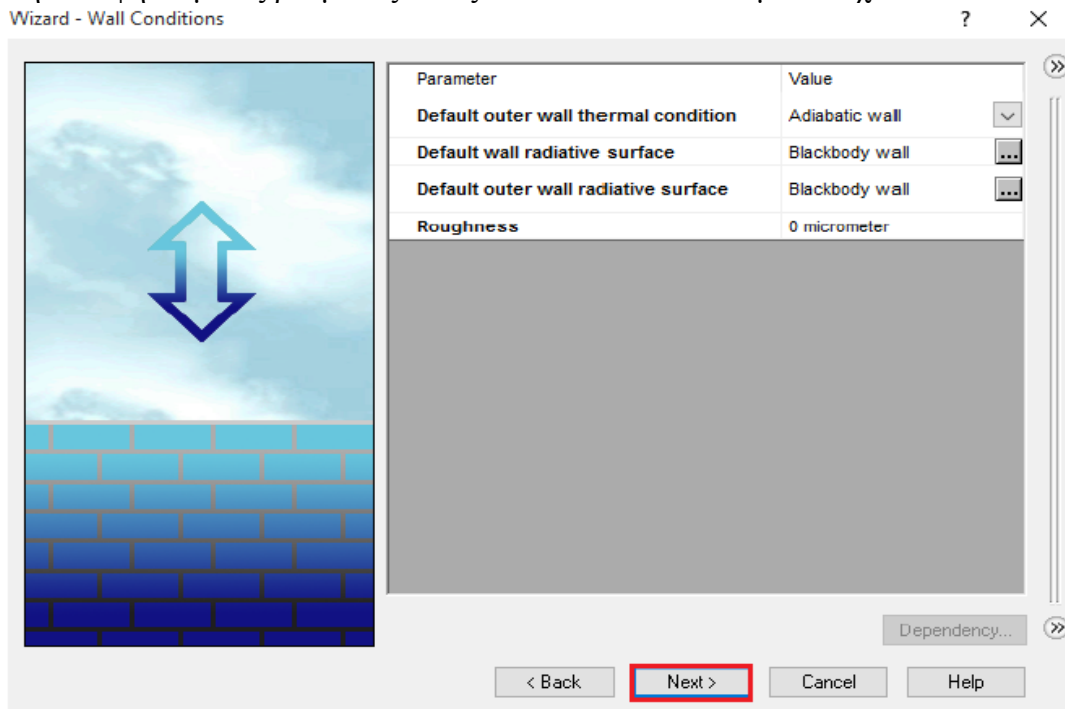
Η σχέση 4.11, μας δίνει την πυκνότητα του nanofluid και ουσιαστικά είναι ο κανόνας του μοχλού, αυτό συμβαίνει διότι η πυκνότητα είναι ογκομετρικό μέγεθος, όπως ακριβώς και το ϕ . Η σχέση 4.12 δίνει την ειδική θερμοχωρητικότητα του τελικού ρευστού, έχει αποδειχθεί με πειραματικά στοιχεία και αναφέρεται στην δημοσίευση του K. Khanafer et al. [4.5]. Η 4.13 δίνει την θερμική αγωγιμότητα και έχει προταθεί από τους Yu και Choi [4.6]. Ο συντελεστής β αφορά την γεωμετρία του νανοσωματιδίου και δίνεται από την εργασία του W. Duangthongsuk et al. [4.10], εμείς θεωρήσαμε $\beta=0.1$. Ουσιαστικά, αυτός ο τύπος αποτελεί μια τροποποίηση της εξίσωσης Maxwell. Όσον αφορά, την δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού, δίνεται από την εξίσωση 4.14 και αποτελεί το μοντέλο του Batchelor [4.7]. Αξίζει να αναφέρουμε, ότι για την συνεκτικότητα υπάρχει και το μοντέλο του Brinkman [4.8], [4.9], το οποίο έχει αρκετή ακρίβεια ιδιαίτερα για σφαιρικά νανοσωματίδια. Παρόλα αυτά, εμείς χρησιμοποιούμε το μοντέλο του Batchelor, καθώς έχεις 2 όρους, συνεπώς περισσότερη ακρίβεια υπολογισμού.

6. Σε αυτό το βήμα, ορίζουμε τα υλικά κατασκευής του συλλέκτη. Συγκεκριμένα, διαλέγουμε τον χαλκό. Περισσότερες ιδιότητες που αφορούν τα υπόλοιπα μέρη του συλλέκτη θα προστεθούν, στην συνέχεια.



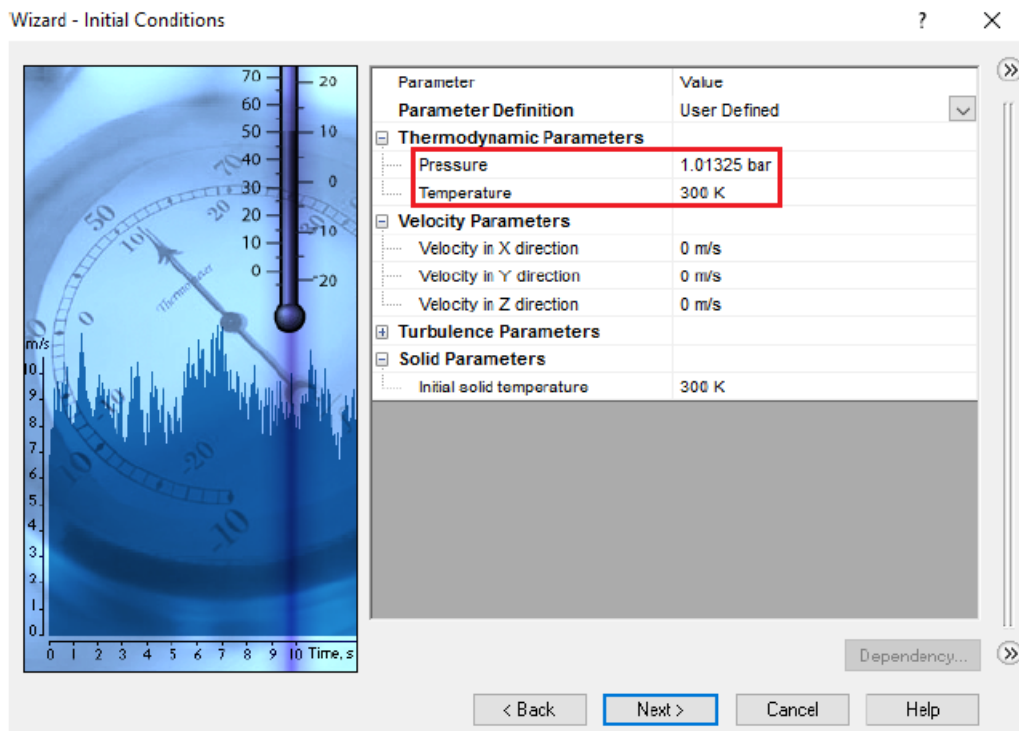
Εικόνα 4.33 Επιλογή υλικού απορροφητήρα

7. Στη συγκεκριμένη καρτέλα, προσδιορίζουμε τη θερμική συμπεριφορά των τοιχωμάτων του σωλήνα. Αφήνουμε τις ρυθμίσεις αυτές στο Default και πατάμε συνέχεια.



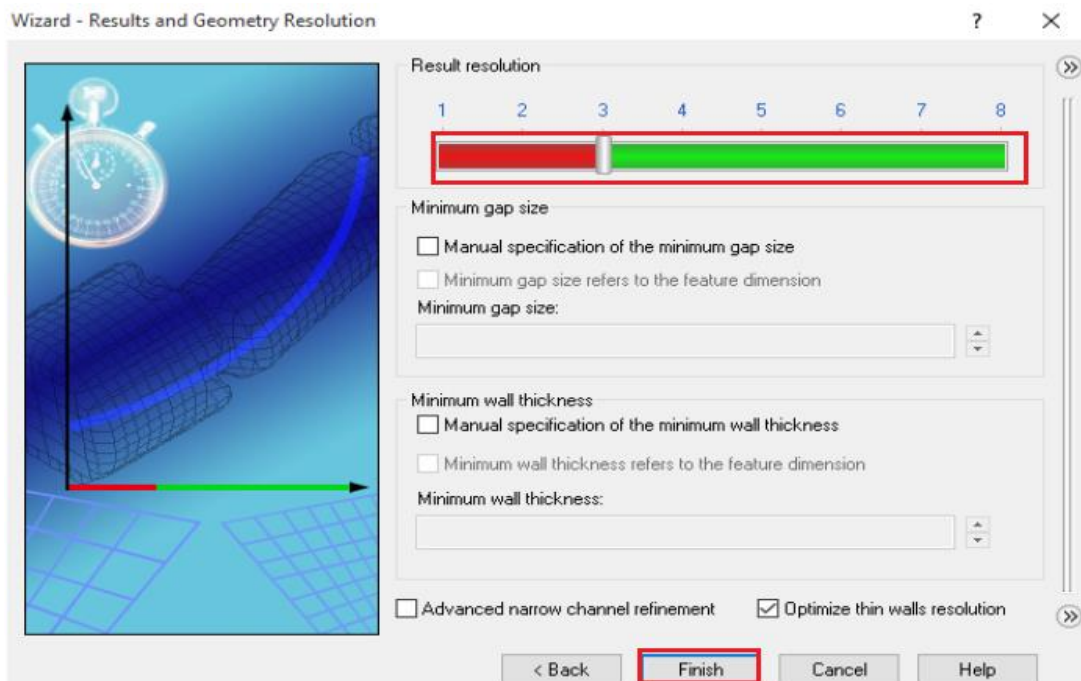
Εικόνα 4.34 Θερμικός προσδιορισμός των επιφανειών του απορροφητήρα

8. Σε αυτό το βήμα, ορίζουμε τις αρχικές τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας, που είναι αναγκαίες για την επίλυση του μοντέλου.



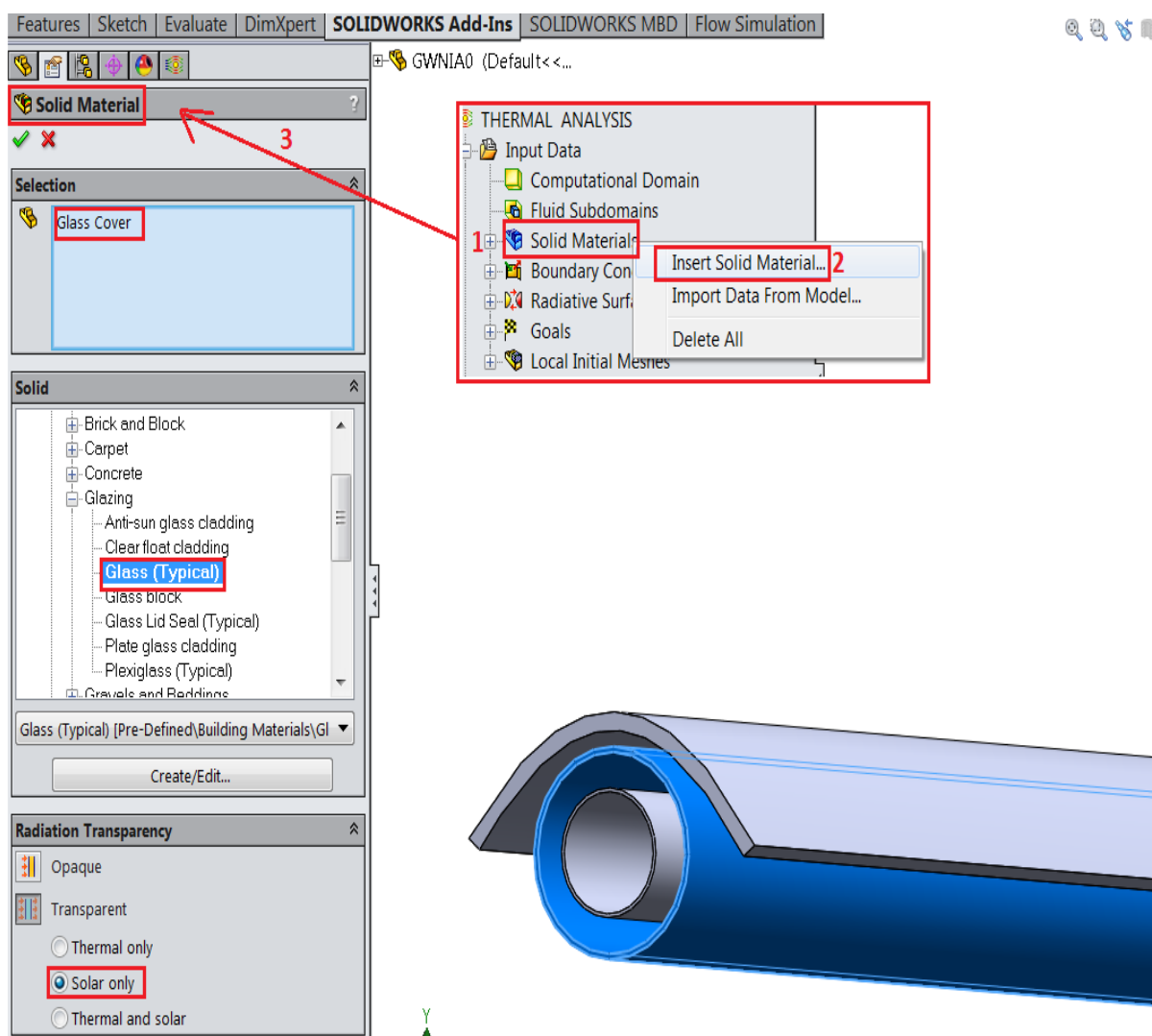
Εικόνα 4.35 Προσδιορισμός θερμοκρασίας και πίεσης περιβάλλοντος

9. Εδώ ορίζουμε την πυκνωση του πλέγματος, το οποίο αρχικά το αφήνουμε στην αυτόματη λειτουργία, κάτι που θα αλλάξουμε στη συνέχεια.



Εικόνα 4.36 Πρωταρχική μορφή υπολογιστικού πλέγματος

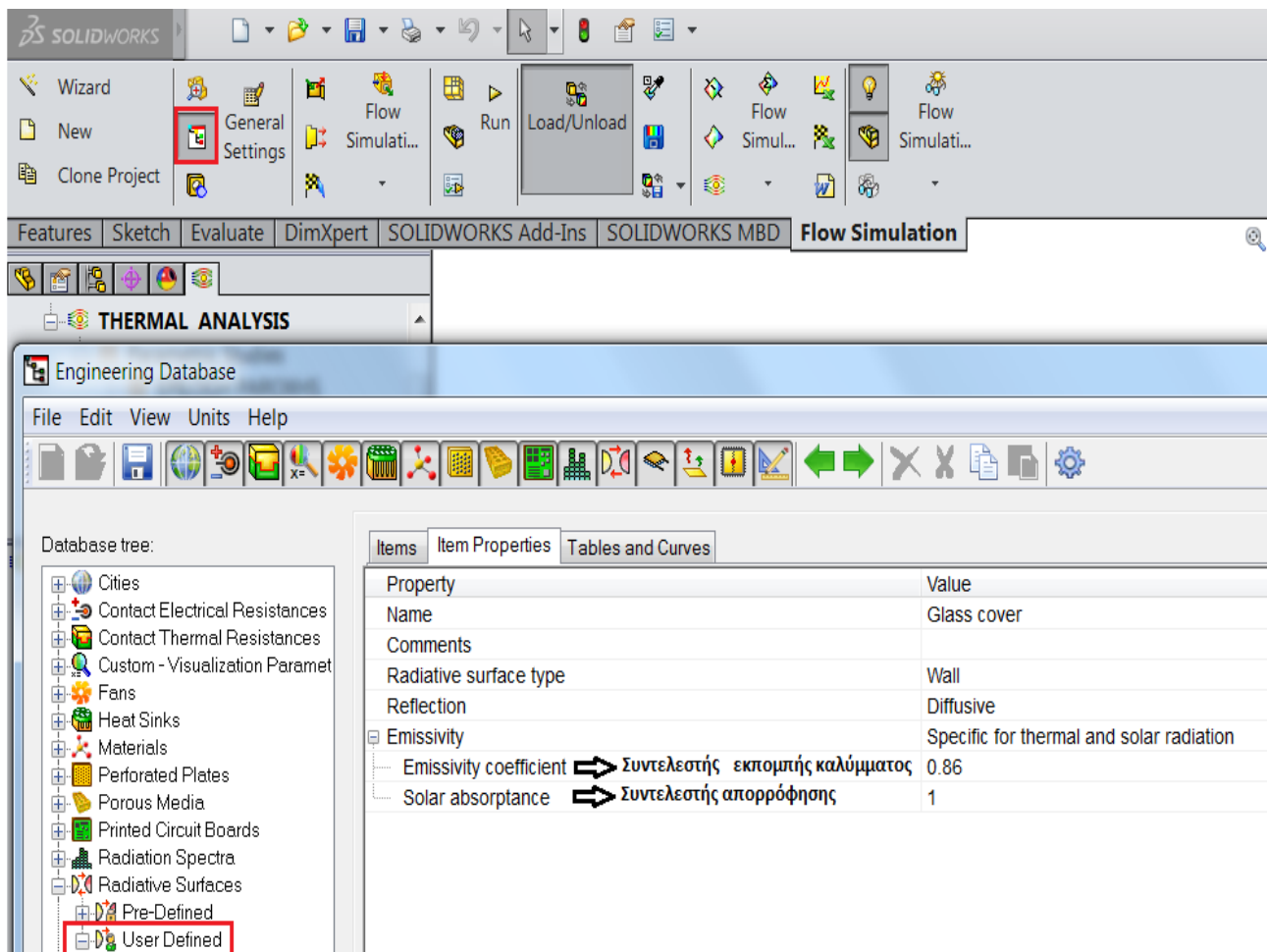
10. Σε αυτό το βήμα ορίζουμε το υλικό του γυάλινου καλύμματος.



Εικόνα 4.37 Προσδιορισμός υλικού γυάλινου καλύμματος (1), (2) Μενού Solid Material (3) Επιλογή υλικού και πως αλληλεπιδρά με την ακτινοβολία

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, αρχικά κάνουμε δεξί click στο tab Solid Materials (1), στη συνέχεια κάνουμε click στο tab Insert Solid Material (2) και επιλέγουμε την εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος. Έπειτα, από το μενού Solid, επιλέγουμε Glazing → Glass (Typical). Από το μενού, Radiation Transparency ορίζουμε το είδος ακτινοβολίας που διαπερνά το γυάλινο κάλυμμα, συγκεκριμένα επιλέγουμε Transparent → Solar only (δηλαδή το διαπερνά η ηλιακή ακτινοβολία).

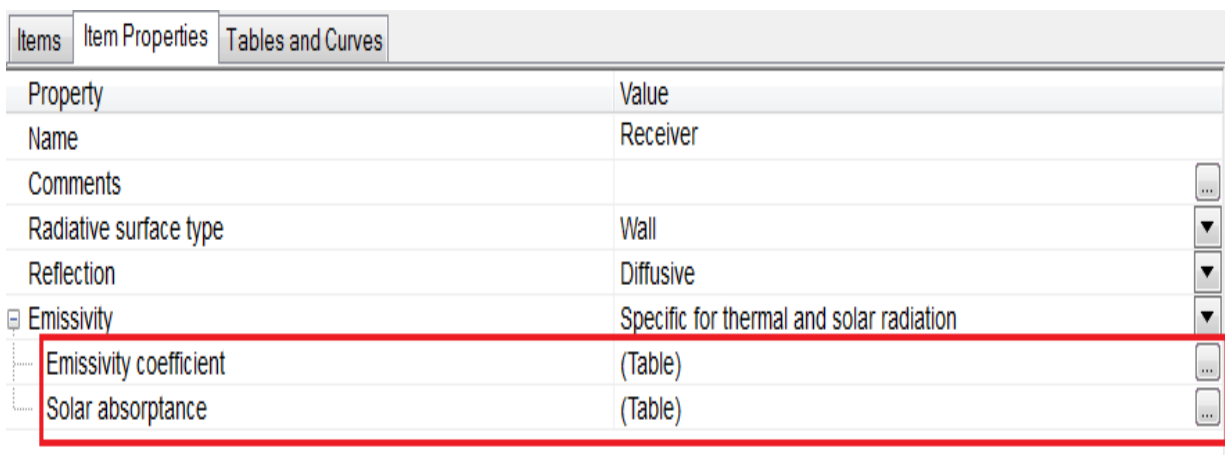
11. Στα πλαίσια του προηγούμενο βήματος, όπου ορίσαμε το υλικό του γυάλινου καλύμματος, τώρα θα πρέπει να ορίσουμε τις ιδιότητες του. Για το λόγο αυτό, κάνουμε click στο εικονίδιο Engineering Database → Radiative Surfaces → User-Defined. Εκεί ονομάζουμε την επιφάνεια μας (Glass Cover) και ορίζουμε ως συντελεστή εκπομπής (emittance coefficient) $\epsilon_r=0.86$ και συντελεστή απορρόφησης καλύμματος $\alpha=1$. Τα στοιχεία αυτά, φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα



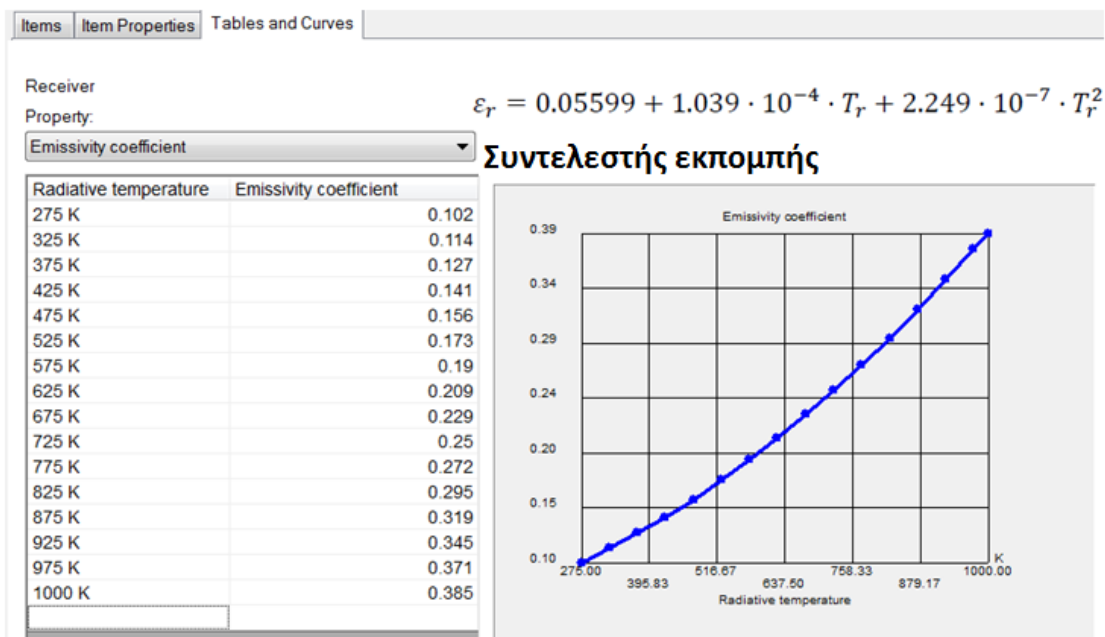
Εικόνα 4.38 Προσθήκη ιδιοτήτων γυάλινου καλύμματος

Την ίδια ακριβώς διαδικασία, εφαρμόζουμε για την επιφάνεια του απορροφητή με μόνη διαφορά ότι για τις δύο αυτές ιδιότητες (ϵ_r - α) χρησιμοποιούμε πίνακες. Συγκεκριμένα, για τον συντελεστή εκπομπής χρησιμοποιούμε την παρακάτω εξίσωση [4.2]:

$$\epsilon_r = 0.0559 + 1.039 \cdot 10^{-4} \cdot T_r + 2.249 \cdot 10^{-7} \cdot T_r^2 \quad [4.15]$$



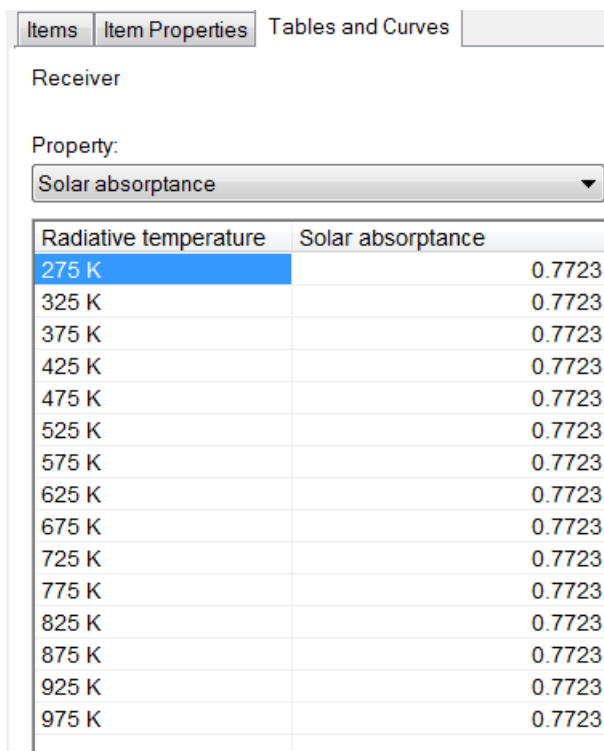
Εικόνα 4.39 Προσθήκη ιδιοτήτων απορροφητή σε μορφή πίνακα



Εικόνα 4.40 Συντελεστής εκπομπής σωλήνα συναρτήσει της θερμοκρασίας μετάλλου

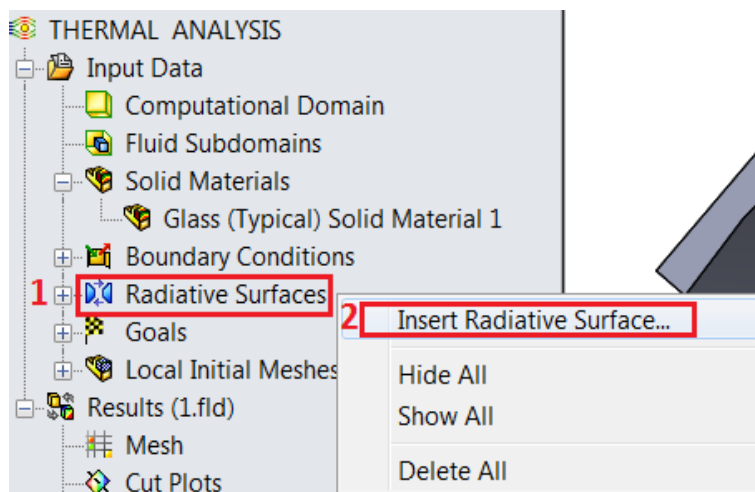
Ομοίως, ο συντελεστής απορρόφησης a_{abs} ορίζεται από την σχέση, όπου $\rho_1 = \rho_2 = 0.94$, $\tau = 0.95$ και $\alpha = 0.92$, αξίζει να σημειωθεί ότι την τιμή αυτή την τοποθετούμε στο πρόγραμμα σαν πίνακα, ακόμα και αν είναι σταθερή, διότι αυτό απαιτεί το λογισμικό:

$$a_{abs} = \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot (\tau \cdot \alpha) \tag{4.16}$$



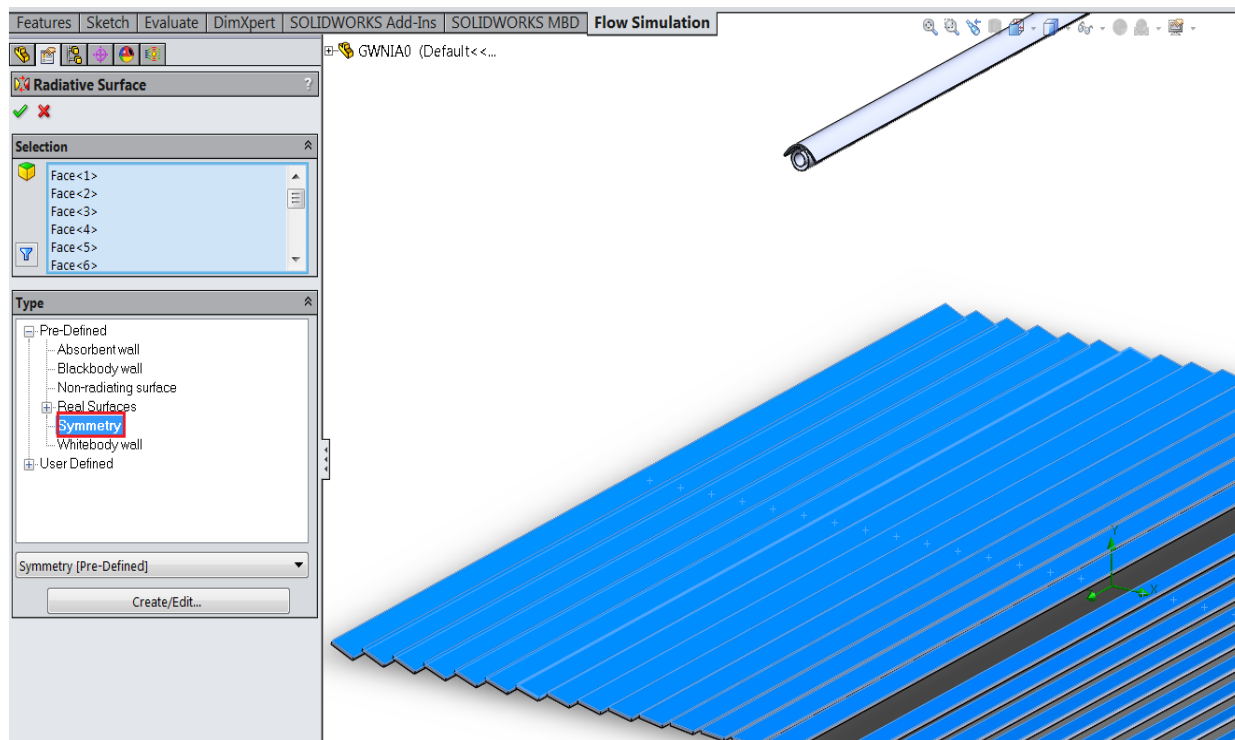
Εικόνα 4.41 Απορροφητικότητα σωλήνα

12. Στην συνέχεια, ξεκινάμε να ορίζουμε τις επιφάνειες ακτινοβολίας, κάτι που είναι απαραίτητο για την οπτική ανάλυση. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, κάνουμε δεξί click στο εικονίδιο Radiative Surfaces (1) και στη συνέχεια επιλέγουμε Insert Radiative Surface (2). Αυτό, το επαναλαμβάνουμε για όλες τις επιφάνειες του συλλέκτη, δηλαδή για τα πρωτεύοντα κάτοπτρα, τον απορροφητήρα, το δευτερεύον κάτοπτρο και το γυάλινο κάλυμμα.



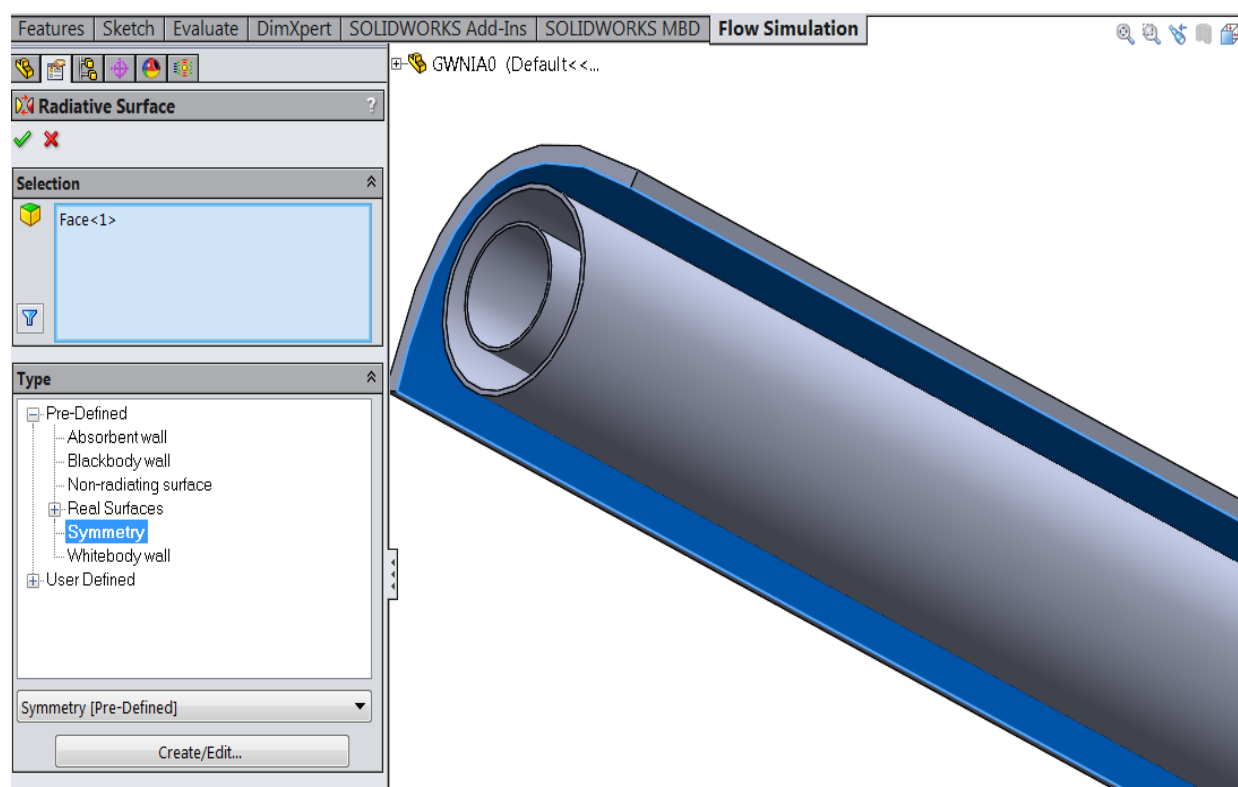
Εικόνα 4.42 Προσδιορισμός επιφανειών ακτινοβολίας

Αρχικά ορίζουμε τις επιφάνειες των πρωτευόντων κατόπτρων. Αφού, έχουμε ανοίξει το μενού Radiative Surface, επιλέγουμε την εν λόγω επιφάνεια και στο μενού Type κάνουμε click στο Pre-Defined → Real Surfaces → Symmetry. Με την εντολή symmetry, δηλώνουμε ότι τα πρωτεύοντα κάτοπτρα είναι τέλειες ανακλαστικές επιφάνειες.



Εικόνα 4.43 Προσδιορισμών ιδιοτήτων ακτινοβολίας πρωτευόντων κατόπτρων

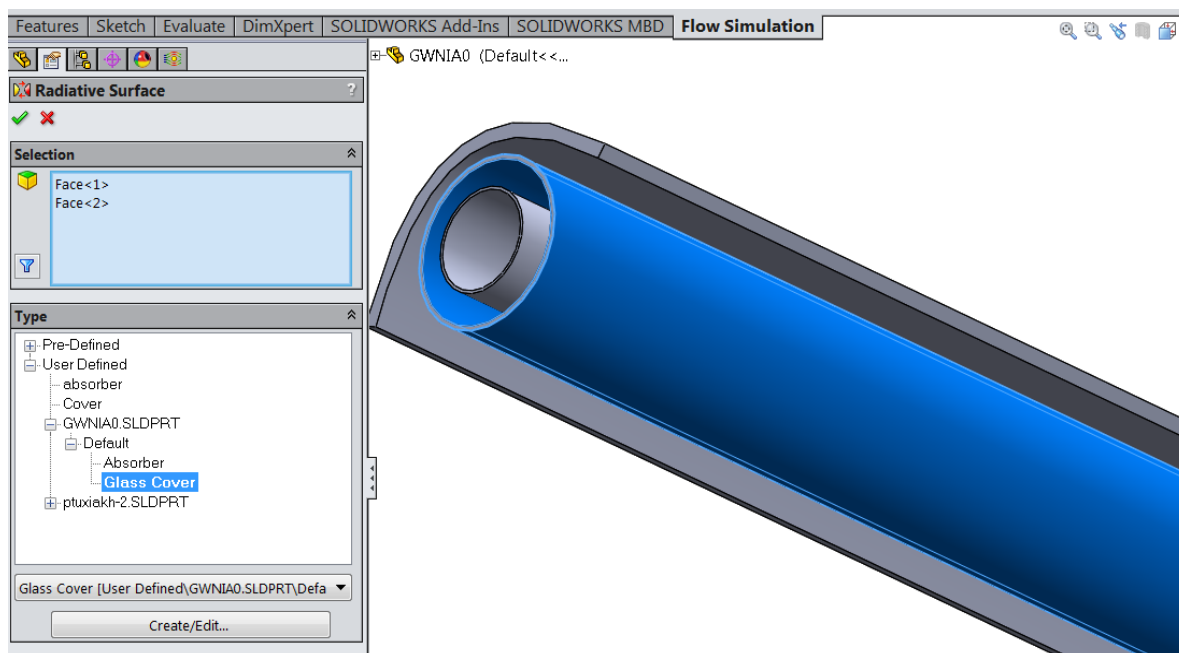
Σειρά έχει το δευτερεύον παραβολικό κάτοπτρο, το οποίο επίσης ορίζουμε ως τέλεια ανακλαστική επιφάνεια στο πρόγραμμα. Στο σημείο αυτό, αξίζει να σταθούμε στο ότι αυτή η θεώρηση γίνεται αποκλειστικά για τις ανάγκες του προγράμματος, καθώς όπως έχουμε αναφέρει αρκετές φορές, η ανακλαστικότητα των πρωτεύοντων αλλά και του δευτερεύοντος κατόπτρου είναι $\rho=0.94$. Αυτό όμως, το έχουμε συνυπολογίσει όταν ορίσαμε την απορροφητικότητα του σωλήνα στο βήμα 11, από την σχέση 4.12. Με λίγα λόγια, κάναμε ένα είδος αναγωγής των οπτικών απωλειών των κατόπτρων του συλλέκτη στην ισοδύναμη απορροφητικότητα του. Το αποτέλεσμα που θα προκύψει, θα είναι ακριβώς το ίδιο, είτε κάνουμε αναγωγή είτε όχι, απλά με αυτό τον τρόπο εξοικονομούμε υπολογιστικό χρόνο. Μετά από αυτήν την επεξήγηση, επιστρέφουμε στον ορισμό της επιφάνειας ακτινοβολίας του δευτερεύοντος κατόπτρου. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με τα πρωτεύοντα, επιλέγουμε την κάτω πλευρά του και κάνουμε click στο Pre-Defined → Real Surfaces → Symmetry.



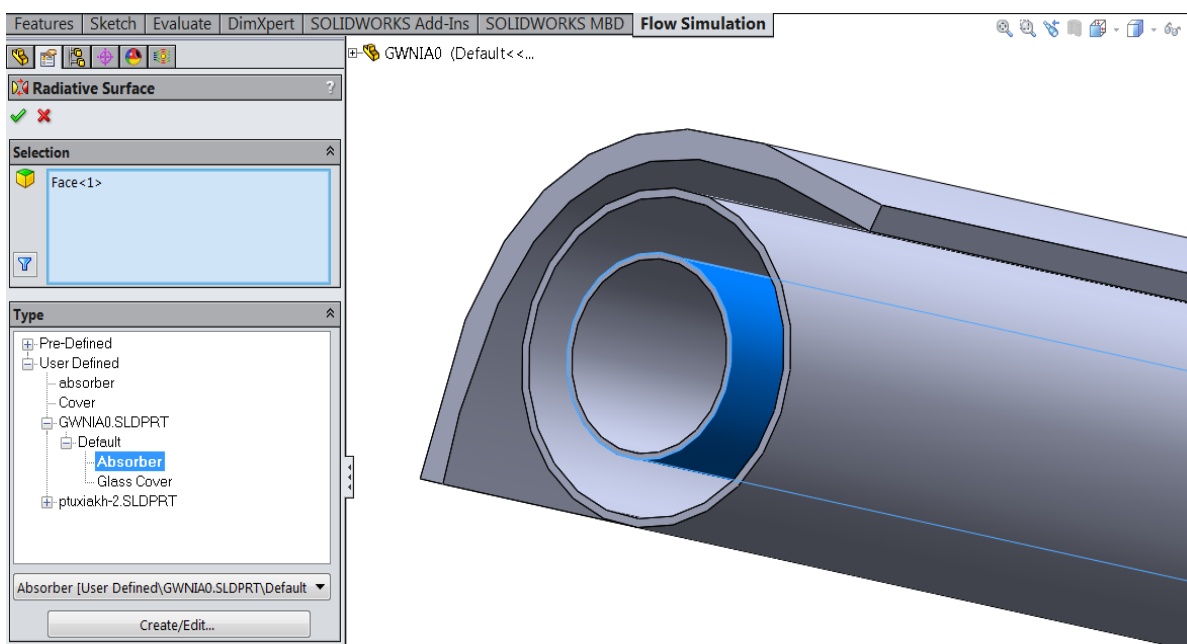
Εικόνα 4.44 Προσδιορισμών ιδιοτήτων ακτινοβολίας δευτερεύοντος κατόπτρου

Όσον αφορά, το γυάλινο κάλυμμα του σωλήνα κενού ανοίγουμε πάλι το μενού Radiative Surfaces και επιλέγουμε την εσωτερική και εξωτερική κυλινδρική του επιφάνεια. Στο βήμα 11, είχαμε προσθέσει τις ιδιότητες αυτής της επιφάνειας, συγκεκριμένα τον συντελεστή εκπομπής και την απορροφητικότητα του καλύμματος. Έτσι, στο μενού Type επιλέγουμε User Defined → «το όνομα του αρχείου» → Glass Cover το οποίο περιέχει τις ιδιότητες που ορίσαμε εμείς. Αυτή η διαδικασία διατυπώνεται πιο παραστατικά στην εικόνα 4.45.

Με όμοιο τρόπο με το γυάλινο κάλυμμα, ορίζουμε την επιφάνεια ακτινοβολίας του χάλκινου σωλήνα. Με μόνη διαφορά, ότι αυτή τη φορά επιλέγουμε τις ιδιότητες επιφανείας που είχαμε ορίσει για τον απορροφητήρα στο βήμα 11. Δηλαδή, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.46, στο μενού Type επιλέγουμε User Defined → «το όνομα του αρχείου» → Absorber. Έτσι, με τον ορισμό της επιφάνειας του απορροφητήρα, ολοκληρώνεται αυτό το βήμα.



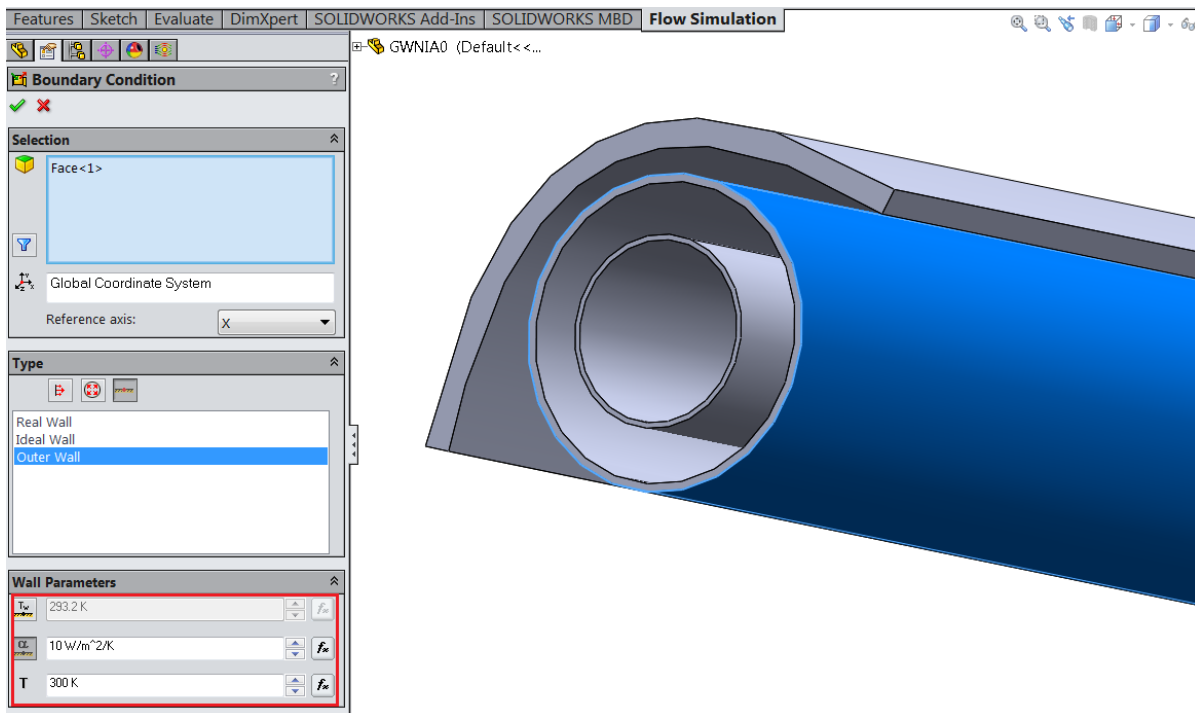
Εικόνα 4.45 Προσδιορισμών ιδιοτήτων ακτινοβολίας γυάλινου καλύμματος



Εικόνα 4.46 Προσδιορισμών ιδιοτήτων ακτινοβολίας απορροφητήρα

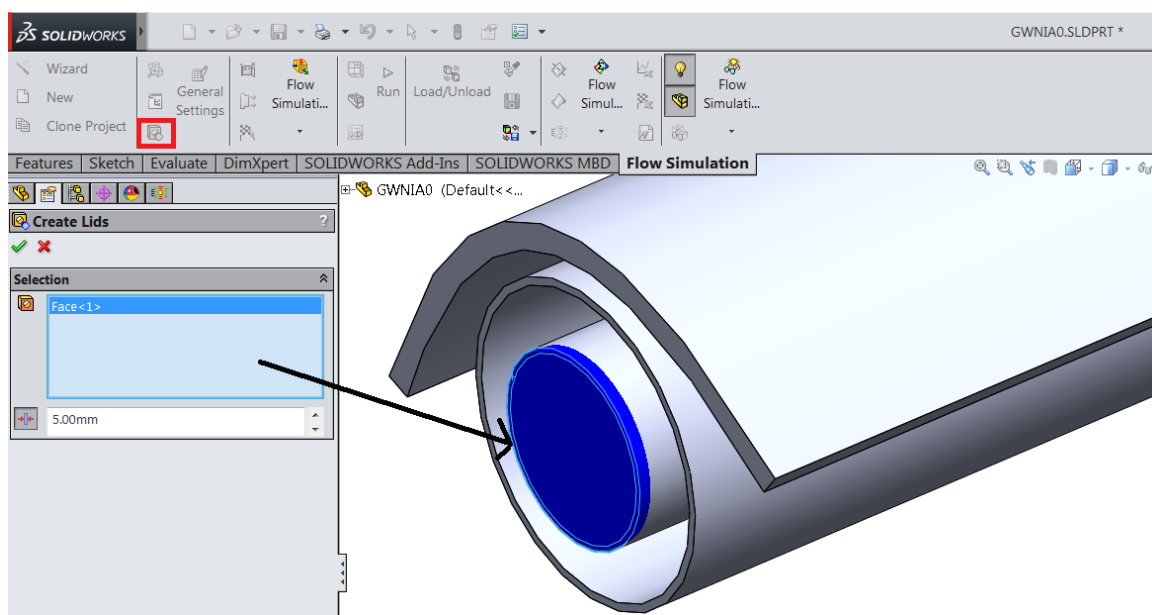
13. Στο συγκεκριμένο βήμα, θα ορίσουμε τις οριακές συνθήκες του προβλήματος, δηλαδή εκείνες τις συνθήκες που είναι αναγκαίες για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων. Αυτές περιλαμβάνουν, την συναγωγή στην εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος, την πίεση την έξοδο του σωλήνα και την παροχή εισόδου. Αρχικά, ορίζουμε την οριακή συνθήκη συναγωγής στο γυάλινο κάλυμμα. Σε αυτό, επικρατεί συναγωγή λόγω αέρα που κινείται με 1 m/s, άρα θεωρούμε $h_w=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος 300 K. Πατάμε αριστερό click στο εικονίδιο Boundary Conditions → Insert Boundary Conditions. Στο σχετικό menu, επιλέγουμε αρχικά την εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος στο menu Type, κάνουμε click

στο Wall → Outer Wall → στο Wall Parameters εισάγουμε τις συνθήκες που αναφέραμε προηγουμένως .



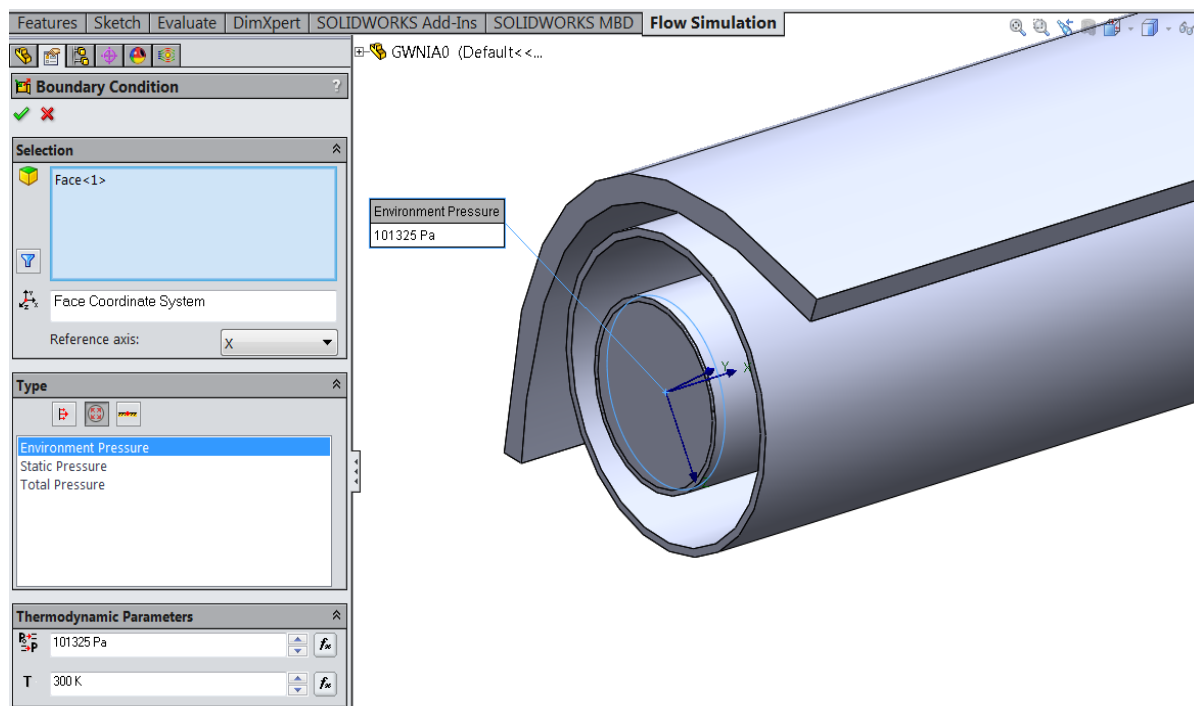
Εικόνα 4.47 Οριακή συνθήκη συναγωγής στο γυάλινο κάλυμμα

Προκειμένου, να προσθέσουμε τις επόμενες οριακές συνθήκες που αφορούν την πίεση εξόδου και την παροχή εισόδου, το πρόγραμμα απαιτεί την δημιουργία κλειστού υπολογιστικού όγκου. Συνεπώς, πρέπει να κλείσουμε τις διατομές εισόδου και εξόδου με τάπες. Αυτό, το πετυχαίνουμε με την εντολή Create Lids. Συγκεκριμένα, επιλέγουμε το σχετικό εικονίδιο από το κεντρικό μενού του Flow Simulation και στη συνέχεια επιλέγουμε την δακτυλιοειδή επιφάνεια εισόδου και εξόδου του χάλκινου σωλήνα, επιλέγοντας πάχος 5 mm.



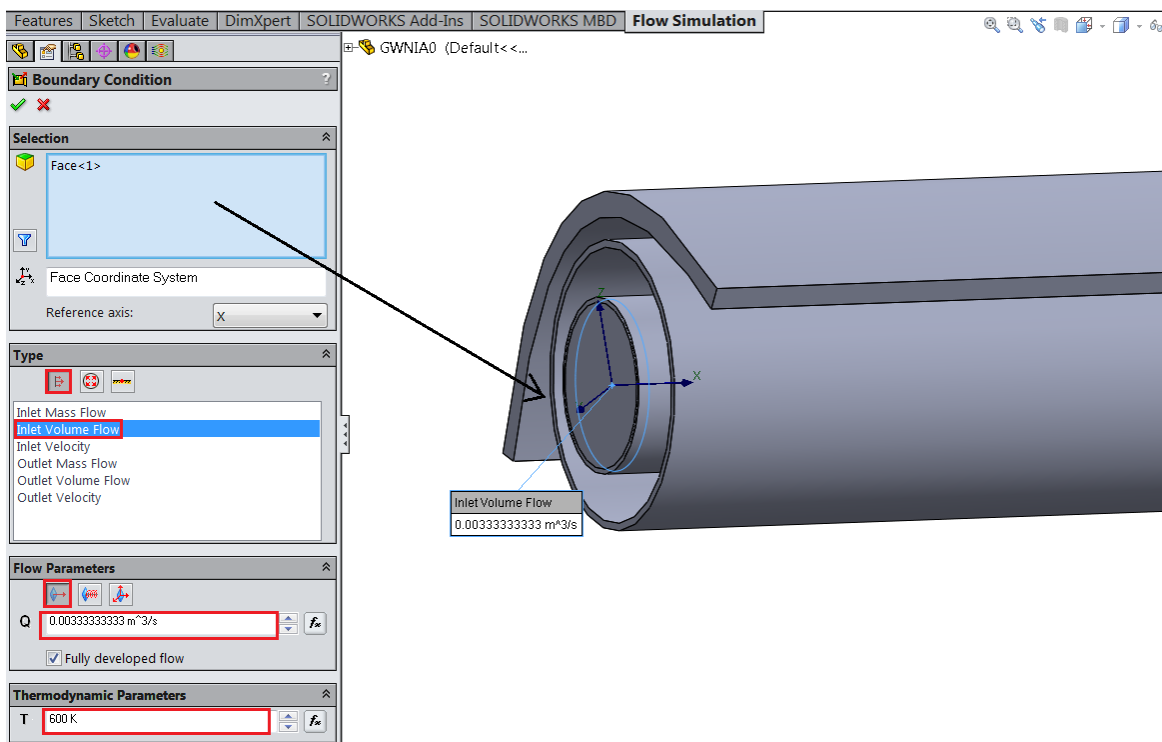
Εικόνα 4.48 Δημιουργία τάπας εισόδου και εξόδου

Αφού δημιουργήσαμε τις τάπες, προσθέτουμε την οριακή συνθήκη πίεσης εξόδου, όπου την ορίζουμε ως ατμοσφαιρική. Συγκεκριμένα, ανοίγουμε πάλι το menu Boundary Conditions, πατάμε δεξί click στην διατομή της τάπας εξόδου και στη συνέχεια στο tab που εμφανίζεται πατάμε Select other και επιλέγουμε την εσωτερική επιφάνεια της τάπας. Στη συνέχεια στο menu Type επιλέγουμε: Pressure Openings → Environment Pressure και στο menu Thermodynamics Parameters ορίζουμε την πίεση και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οπότε, ορίζουμε: $P_{out,env}=101325$ Pa και $T_{env}=300$ K.



Εικόνα 4.49 Οριακή συνθήκη πίεσης περιβάλλοντος στην έξοδο

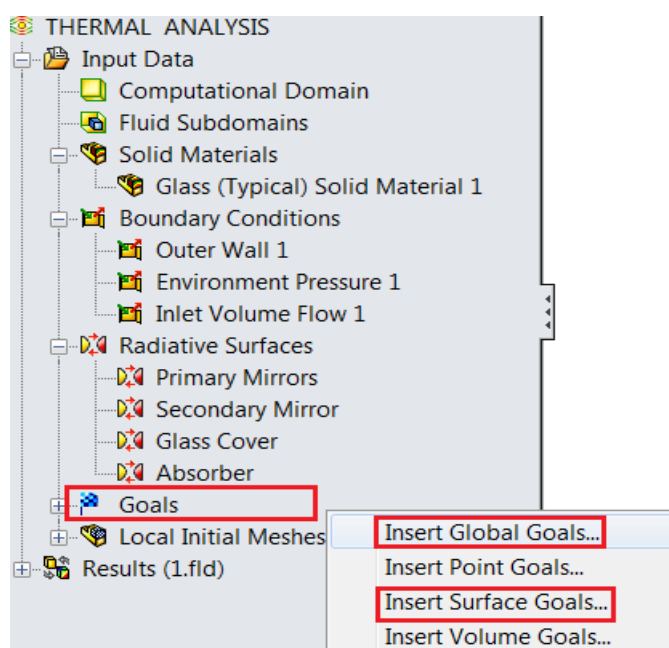
Όσον αφορά την συνθήκη παροχής όγκου πραγματοποιούμε παρόμοια διαδικασία με πριν. Δηλαδή, αφού ανοίξουμε το menu Boundary Conditions και επιλέξουμε την εσωτερική επιφάνεια, με το select other, στο μενού Type κάνουμε click στο εικονίδιο Flow Openings → Inlet Volume Flow. Έπειτα, στο section Flow Parameters επιλέγουμε το εικονίδιο Normal to Face και βάζουμε ως παροχή όγκου $V=200$ L/min ή 0.0033 m³/s. Τέλος, κάνουμε click στην επιλογή , Full Developed Flow, δηλαδή πλήρως ανεπτυγμένη ροή, καθώς όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως μελετάμε την μόνιμη κατάσταση του προβλήματος. Όπως θα αναλύσουμε και σε επόμενη ενότητα, αυτή η $V=200$ L/min αποτελεί τη βέλτιστη παροχή καθώς συνδυάζει υψηλό βαθμό θερμικής απόδοσης με χαμηλή πτώση πίεσης σε σχέση με άλλες παροχές που εφαρμόσαμε. Όσον αφορά την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού, όπως θα δούμε και σε επόμενη ενότητα αποτελεί μεταβλητή παράμετρος και η επιλογή της εξαρτάται από το θερμικό μέσο. Για παράδειγμα, στην εφαρμογή τηγμένο άλας δεν μπορούμε να έχουμε μικρές θερμοκρασίες λειτουργίας, συγκεκριμένα κάτω από 450 K , καθώς όπως αναφέραμε στην ενότητα 3.6.2 σε αυτές τις θερμοκρασίες υπάρχει κίνδυνος κρυσταλοποίησης του μέσου. Με την ίδια λογική, το Syltherm 800 ως θερμικό έλαιο, δεν μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά σε θερμοκρασίες πάνω από 600 K, καθώς χάνει τις ιδιότητες του. Επιστρέφοντας στο λογισμικό του Flow simulation, για να ορίσουμε την θερμοκρασία λειτουργίας του μέσου, απλώς πληκτρολογούμε την τιμή της στο tab Thermodynamic Parameters. Η διαδικασία αυτή φαίνεται αναλυτικά στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.50 Οριακή συνθήκη παροχής όγκου στην είσοδο του σωλήνα

14. Στο σημείο αυτό, ορίζουμε τους στόχους σύγκλισης της ανάλυσης ή αλλιώς Goals. Με λίγα λόγια, με τον όρο Goals εννοούμε τα μεγέθη που θα προκύψουν ως Output του Simulation. Τα Goals χωρίζονται σε Global που αφορούν γενικούς στόχους σύγκλισης, Surface που σχετίζονται με την τιμή επιφανειακών μεγεθών και Volume που αφορούν ομοίως μεγέθη που θέλουμε να υπολογίσουμε για έναν συγκεκριμένο όγκο.

Αρχικά, για να ανοίξουμε το μενού Goals κάνουμε δεξί Click στο σχετικό εικονίδιο που βρίσκεται στο δέντρο εντολών του Flow Simulation



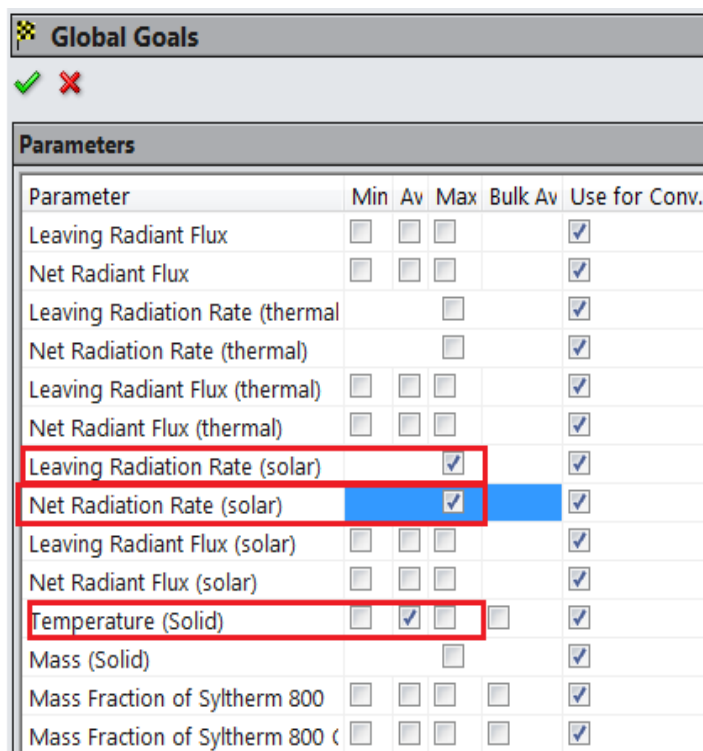
Εικόνα 4.51 Μενού Goals

Στην συνέχεια επιλέγουμε το είδος Goal που επιθυμούμε να ορίσουμε. Την διαδικασία αυτή προφανώς την επαναλαμβάνουμε για να ορίσουμε όλα τα είδη. Πριν όμως δείξουμε τις σχετικές εικόνες από το πρόγραμμα είναι σημαντικό να ορίσουμε τη φυσική σημασία που έχει κάθε Goal, που θα ορίσουμε. Στον παρακάτω πίνακα, διατυπώνουμε όλα τα Goals που θα ορίσουμε, το είδος τους καθώς και την φυσική τους έννοια.

	Φυσικό Μέγεθος	Ονομασία Solidworks
Global Goals	Καθαρή ακτινοβολία	Net Radiation Rate
	Μέγεθος σύγκλισης	Leaving Radiation Rate
	Μέση θερμοκρασία στερεού	Average Temp. Solid
Surface Goals	Θερμότητα απορροφητή Q_{abs}	Net Radiation Rate (Solar)
	Θερμικές απώλειες Q_{losses}	Net Radiation Rate (Thermal)
	Θερμοκρασία εξόδου T_{out}	Temperature (Fluid)
	Θερμοκρασία Στερεού T_r	Temperature (Solid)
	Στατική πίεση εισόδου P_{in}	Static Pressure
	Στατική πίεση εξόδου P_{out}	Static Pressure
	Πτώση πίεσης ΔP	$P_{in}-P_{out}$
Volume Goals	Θερμοκρασία καλύμματος T_C	Temperature (Solid)

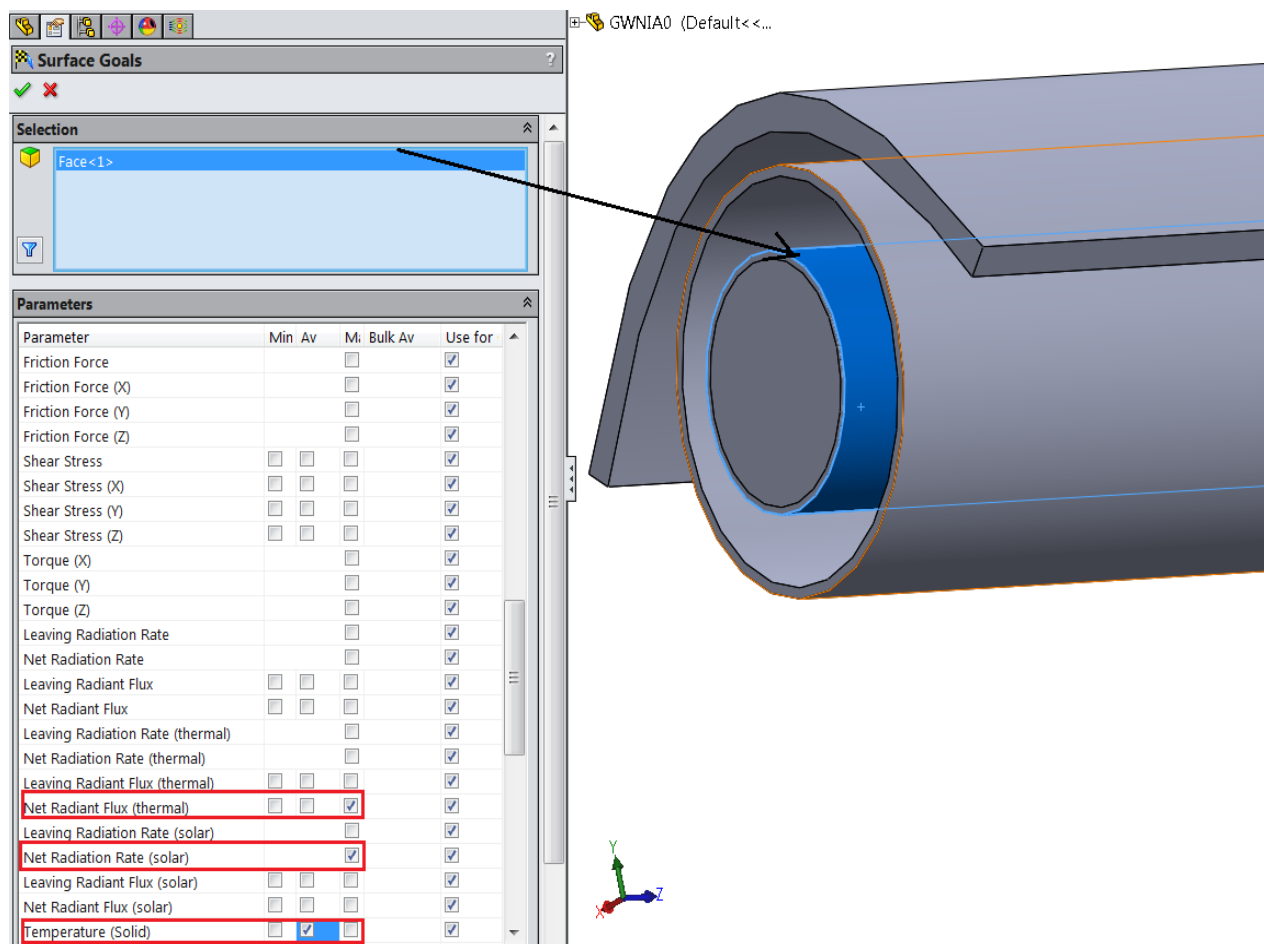
Πίνακας 4.3 Περιγραφή και είδος Στόχων- Goals

Αρχικά, ξεκινάμε με τον ορισμό των Global Goals. Στο σχετικό menu, επιλέγουμε την μέση τιμή του μεγέθους Temperature (Solid) , την μέγιστη τιμή του Net Radiation Rate και την μέγιστη τιμή του Leaving Radiation. Η διαδικασία αυτή, φαίνεται αναλυτικά στο παρακάτω σχήμα. Στην συνέχεια, επιλέγουμε την εντολή Insert surface Goals, για να ορίσουμε όλα τα επιφανειακά μεγέθη που θέλουμε να υπολογίσει το Flow Simulation.



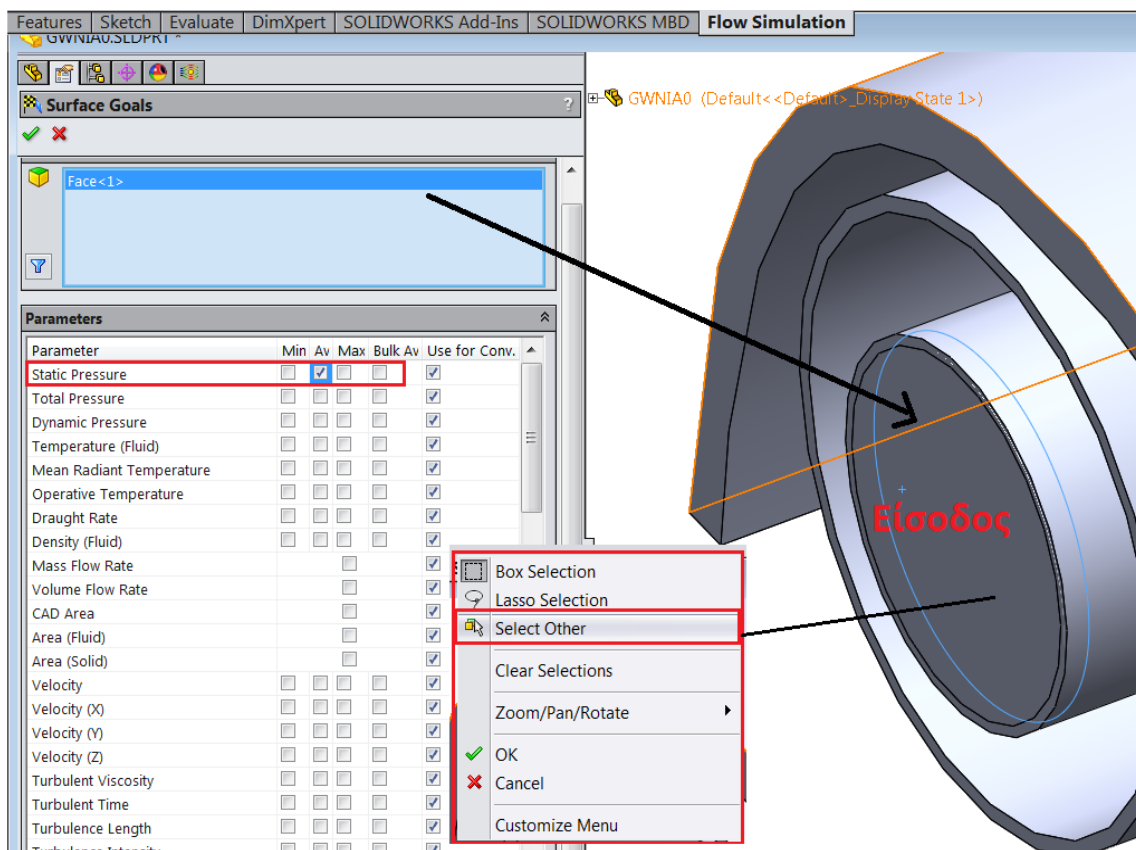
Εικόνα 4.52 Ορισμός Global Goals

Στη συνέχεια, θα ορίσουμε τα Surface Goals για τον απορροφητήρα. Συγκεκριμένα, θέλουμε να υπολογίσουμε την Θερμότητα απορροφητή Q_{abs} , τις θερμικές απώλειες του Q_{losses} καθώς και τη θερμοκρασία επιφανείας του T_r . Αφού έχουμε ανοίξει το menu των Surface Goals, επιλέγουμε την εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια του απορροφητήρα και κάνουμε Click στο Net Radiant Flux (thermal και Solar) και στο Temperature (Solid)

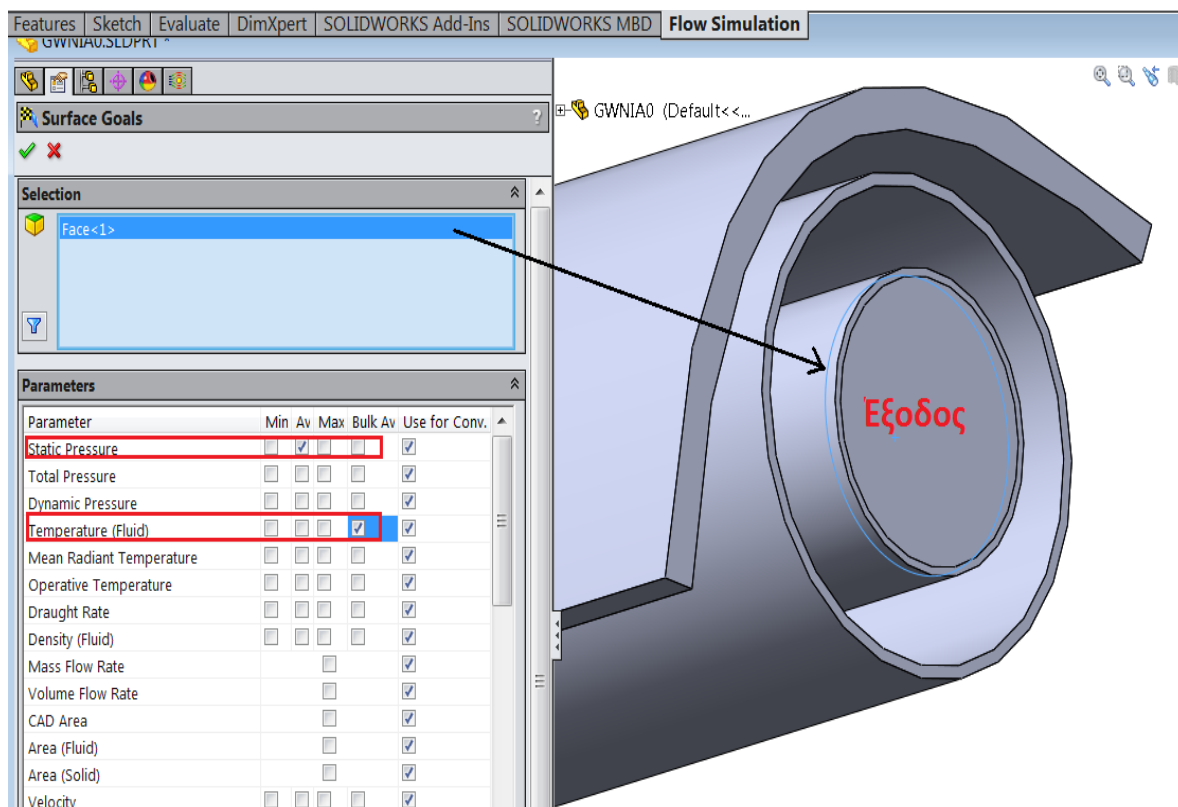


Εικόνα 4.53 Ορισμός Surface Goals στην εξωτερική επιφάνεια του απορροφητήρα

Προκειμένου να υπολογίσουμε την πτώση πίεσης στον σωλήνα, το οποίο είναι ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος για τη μελέτη μας καθώς μας πληροφορεί για το έργο της αντλίας κυκλοφορίας, πρέπει να ξέρουμε τις στατικές πιέσεις στην είσοδο και στην έξοδο του απορροφητήρα. Τέλος, ένα ακόμα μέγεθος ζωτικής σημασίας, που πρέπει να υπολογίσουμε είναι η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού, το οποίο αντιπροσωπεύει την απόδοση του συλλέκτη μας. Για τους παραπάνω λόγους, πρέπει να ορίσουμε τα αντίστοιχα Surface Goals. Αρχικά, όσον αφορά τα Goals της διατομή εισόδου του απορροφητήρα, ανοίγουμε το menu Surface Goals και για να επιλέξουμε την επιφάνεια που μας ενδιαφέρει, κάνουμε δεξί click και επιλέγουμε Select other στο menu που προκύπτει. Έπειτα, διαλέγουμε την εσωτερική επιφάνεια της τάπας και κάνουμε click στο Average Static Pressure. Τέλος για τα Goals της διατομής εξόδου πραγματοποιούμε την ίδια διαδικασία, δηλαδή επιλέγουμε την εσωτερική επιφάνεια της τάπας και κάνουμε click στα εξής Goals : Average Static Pressure και Temperature Fluid Bulk. Στα δύο επόμενα σχήματα (εικόνα 4.54, 4.55), φαίνεται αναλυτικά αυτή η διαδικασία.

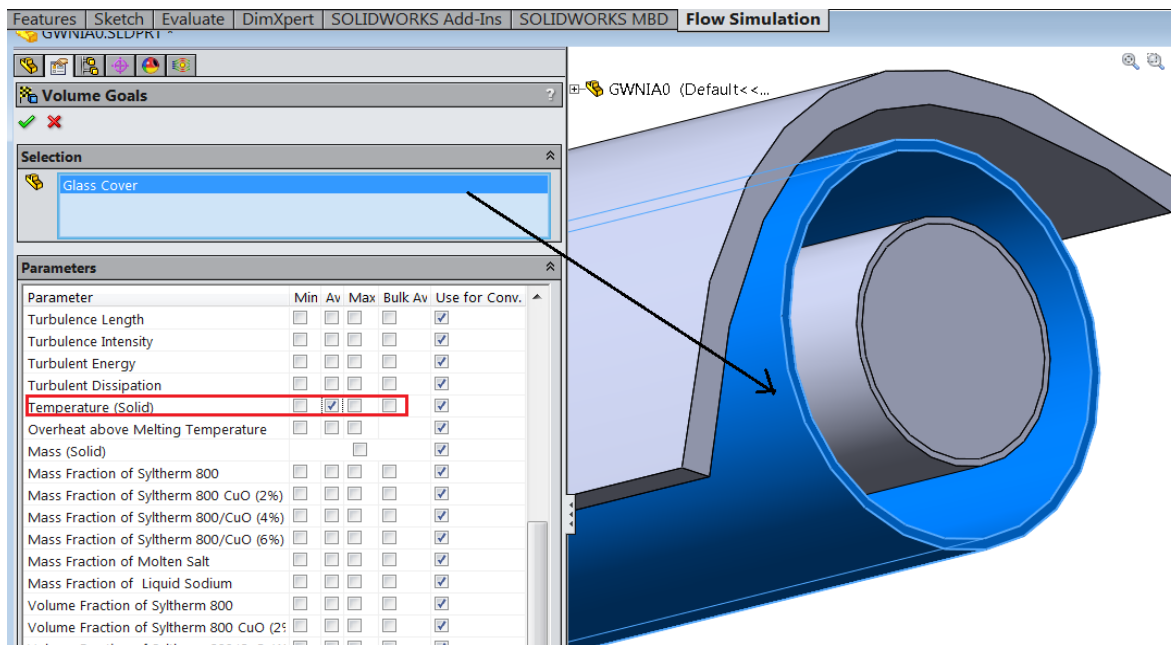


Εικόνα 4.54 Ορισμός Surface Goals στην είσοδο του απορροφητήρα



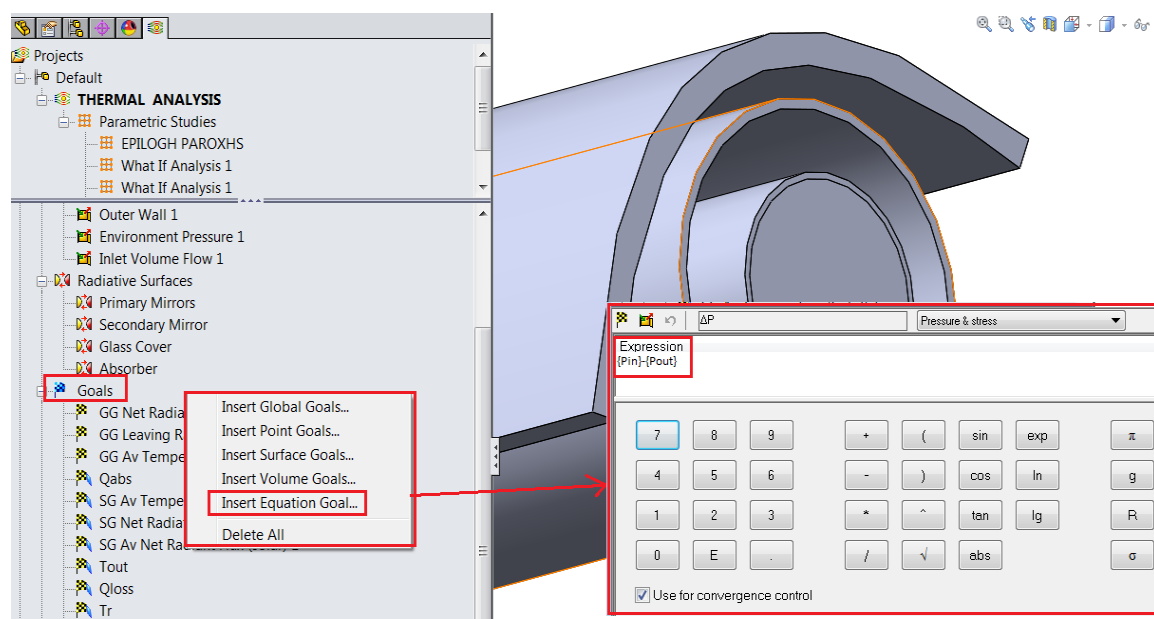
Εικόνα 4.55 Ορισμός Surface Goals στην έξοδο του απορροφητήρα

Όσον αφορά τα Volume Goals, θα ορίσουμε μόνο την θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος του σωλήνα κενού. Συγκεκριμένα, από το menu που φαίνεται στην εικόνα 4.51, επιλέγουμε Insert Volume Goals. Στη συνέχεια, επιλέγουμε το part του γυάλινου καλύμματος και κάνουμε click στο Temperature (Solid).



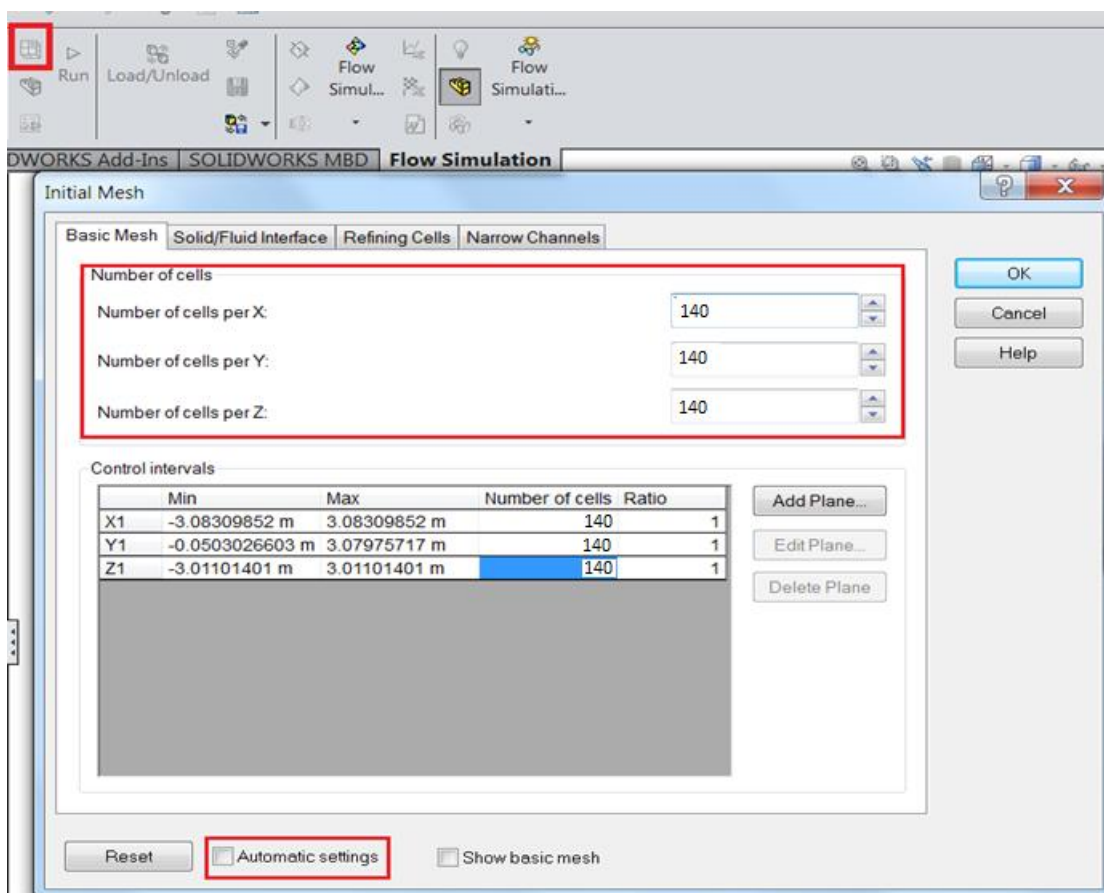
Εικόνα 4.56 Ορισμός Volume Goals στην επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος

Ένα είδος Goals που δεν αναφέραμε προηγουμένως, είναι το Equation Goal. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε ένα μέγεθος που θέλουμε ως αποτέλεσμα με τη μορφή εξίσωσης. Θα το χρησιμοποιήσουμε προκειμένου το πρόγραμμα να μας δίνει σε κάθε περίπτωση την μεταβολή πίεσης στον σωλήνα. Για να το ορίσουμε, επιλέγουμε το tab Insert Equation Goal και στη συνέχεια, στο πλαίσιο που εμφανίζεται γράφουμε την εξίσωση που μας δίνει το μέγεθος που θέλουμε.



Εικόνα 4.57 Ορισμός Equation Goals

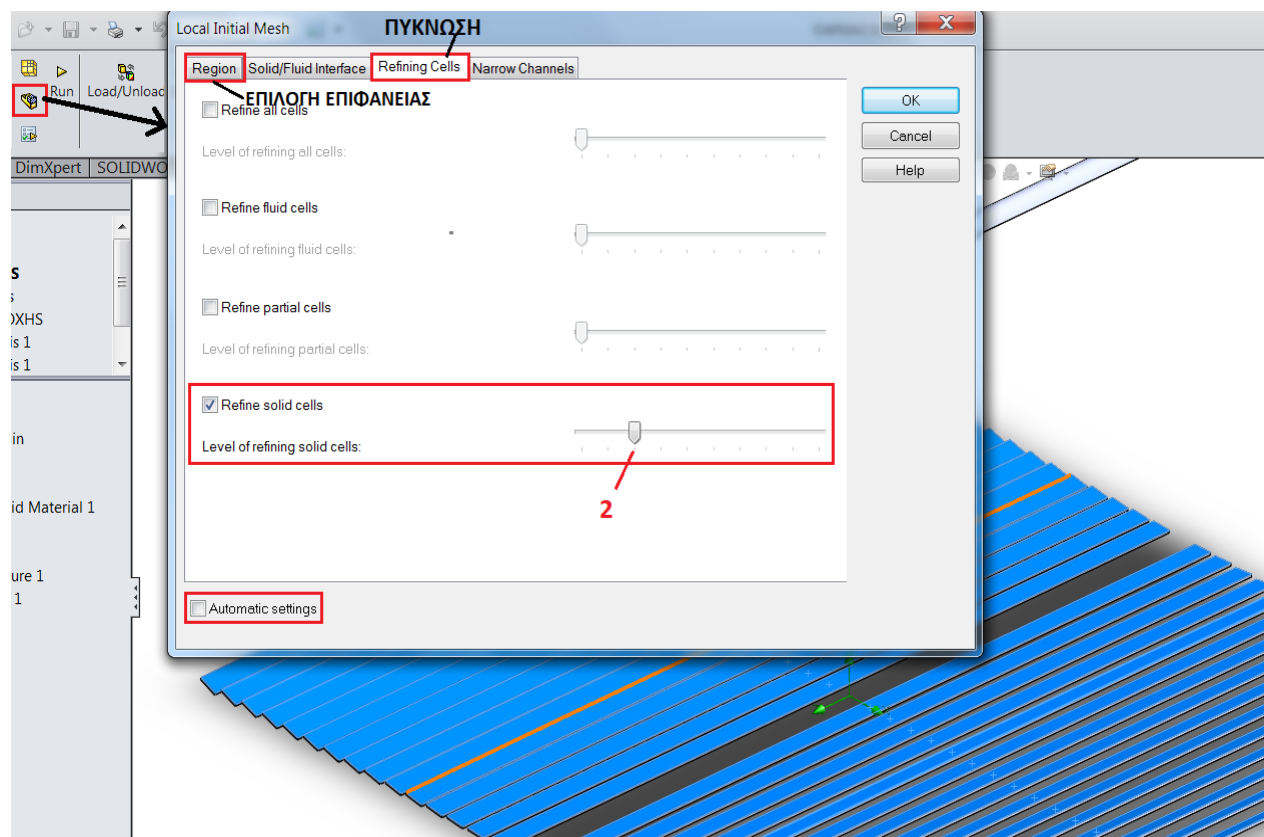
15. Στο συγκεκριμένο βήμα, θα ορίσουμε το υπολογιστικό πλέγμα του μοντέλου. Αξίζει να σημειωθεί, πως μετά από δοκιμές για διάφορους συνδυασμούς αριθμών κελιών (70x70x70, 80x80x80, 90x90x90, 100x100x100, 110x110x110, 120x120x120) και τέλος με ανεξαρτησία πλέγματος καταλήξαμε ότι το βέλτιστο πλέγμα είναι το 140x140x140. Αργότερα, θα ακολουθήσει ειδική ενότητα για την επεξήγηση αυτού. Για να ορίσουμε το πλέγμα, στο περιβάλλον του λογισμικού, επιλέγουμε το αντίστοιχο εικονίδιο (Initial Mesh) που βρίσκεται στο menu του Flow Simulation, κάνουμε Uncheck στην επιλογή Automatic Settings, καθώς θέλουμε να αλλάξουμε το πλέγμα manually, και στη συνέχεια ορίζουμε τον αριθμό των κελιών στους άξονες X,Y,Z και πατάμε OK. Η διαδικασία αυτή, φαίνεται αναλυτικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.58 Ορισμός αριθμού κελιών του υπολογιστικού πλέγματος

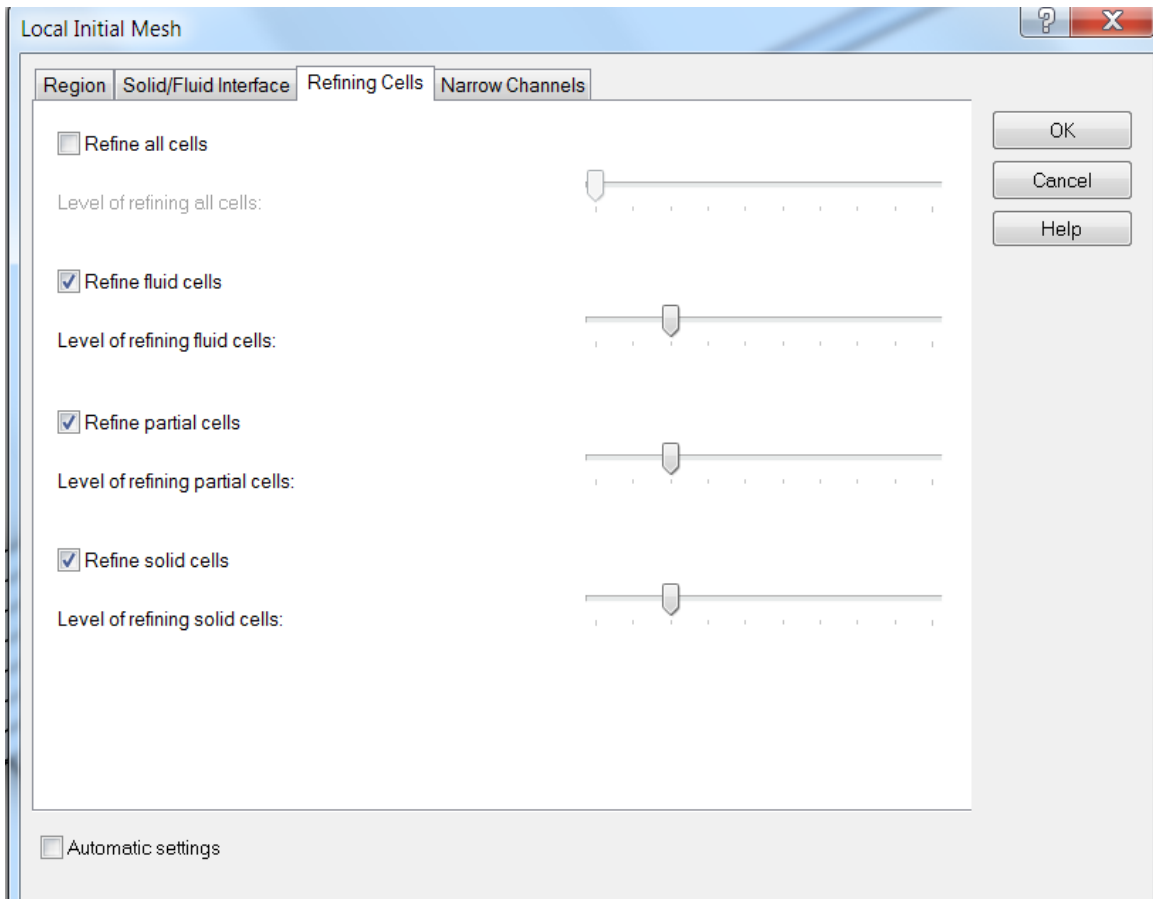
Στη συνέχεια, πραγματοποιούμε πύκνωση πλέγματος σε όλα τα parts του συλλέκτη, καθώς εκεί θέλουμε πιο αναλυτικούς υπολογισμούς. Στο περιβάλλον του λογισμικού η πύκνωση γίνεται με την εντολή Local Initial Mesh. Αρχικά για ανοίξουμε το συγκεκριμένο, κάνουμε click στο αντίστοιχο εικονίδιο στο menu του Flow Simulation. Για να επιλέξουμε την επιφάνεια πύκνωσης, κάνουμε click στο tab Region και μετά διαλέγουμε την επιφάνεια που θέλουμε. Για να προσδιορίσουμε το επίπεδο της πύκνωσης, αρχικά επιλέγουμε το tab Refining Cells και στη συνέχεια μετακινούμε τον δείκτη σε κάθε μπάρα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το πρόγραμμα, διαθέτει 4 είδη πύκνωσης (Refine): All cells (ομοιόμορφη πύκνωση σε όλα τα κελία του πλέγματος), Fluid cells (κελία που αφορούν την ροή του ρευστού), Partial cells, Solid cells (κελία που αφορούν τα στερεά parts του συλλέκτη). Αξίζει να σημειώσουμε πως το

επίπεδο πύκνωσης σε κάθε part, καθορίστηκε με ποιοτικό τρόπο και συγκεκριμένα με δοκιμές διαφόρων levels. Ξεκινάμε, με την πύκνωση των πρωτεύοντων κατόπτρων, όπου επιλέγουμε πύκνωση στερεών κελιών (Solid cells), επιπέδου 2. Τα άλλα είδη, δεν χρειάζονται περαιτέρω ενίσχυση, καθώς τα πρωτεύοντα κάτοπτρα συμμετέχουν στο μοντέλο του συλλέκτη μόνο ως ιδανικές ανακλαστικές επιφάνειες.

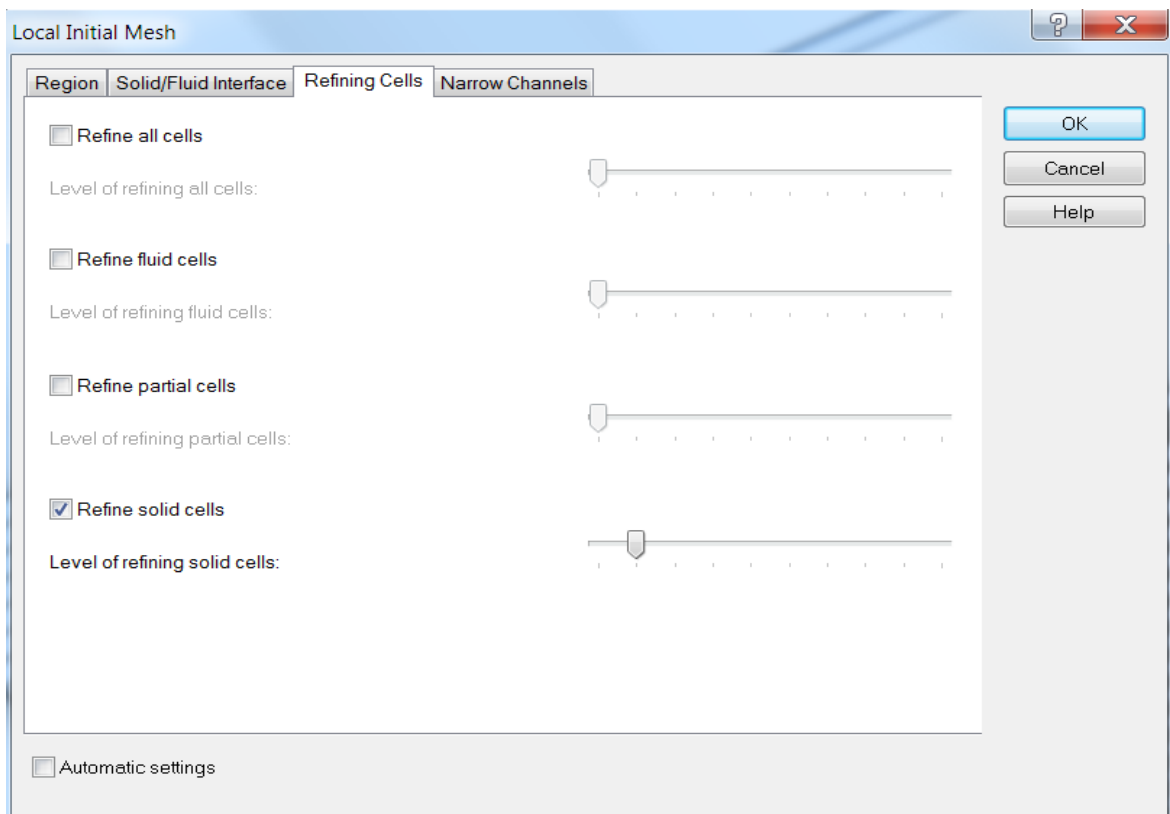


Εικόνα 4.59 Πύκνωση πλέγματος στα πρωτεύοντα κάτοπτρα

Όσον αφορά, την πύκνωση του σωλήνα κενού, πραγματοποιούμε πύκνωση μόνο στο χάλκινο σωλήνα και όχι στο γυάλινο κάλυμμα. Συγκεκριμένα, στον σωλήνα επιθυμούμε να έχουμε αρκετά πυκνό πλέγμα καθώς εκεί έχουμε τη ροή του θερμικού μέσου. Συνεπώς, θα πρέπει να επιλέξουμε 3 είδη πύκνωσης (Refinement) : Fluid cells (καθώς έχουμε ροή ρευστού), Partial cells (προκειμένου να έχουμε περισσότερη λεπτομέρεια στα συνοριακά κελιά, μεταξύ μετάλλου και ρευστού), Solid cells (κελιά που αφορούν τα στερεά parts του συλλέκτη). Οπότε, αφού επιλέξουμε την επιφάνεια του χάλκινου σωλήνα με την εντολή Region στη συνέχεια, στην καρτέλα Refining Cells, μετακινούμε τον δείκτη των Fluid cells, Partial cells Solid cells στο επίπεδο 2 και πατάμε OK. Η διαδικασία αυτή, φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 4.61. Τέλος, για την πύκνωση του δευτερεύοντος κατόπτρου κάνουμε παρόμοια διαδικασία με την πύκνωση των πρωτεύοντων, καθώς όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο βήμα και τα πρωτεύοντα και το δευτερεύον αποτελούν τέλειες ανακλαστικές επιφάνειες, συνεπώς θέλουν πύκνωση μόνο των στερεών κελιών. Η μόνη διαφορά, είναι ότι δεν απαιτείται τόσο έντονη πύκνωση στο δευτερεύον όσο στα πρωτεύοντα, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό ανακλάσεων προφανώς γίνεται σε αυτά. Συνεπώς, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.60, αφού επιλέξουμε το part του δευτερεύοντος κατόπτρου με την εντολή Region, επιλέγουμε επίπεδο 1 στην μπάρα του Solid cells.

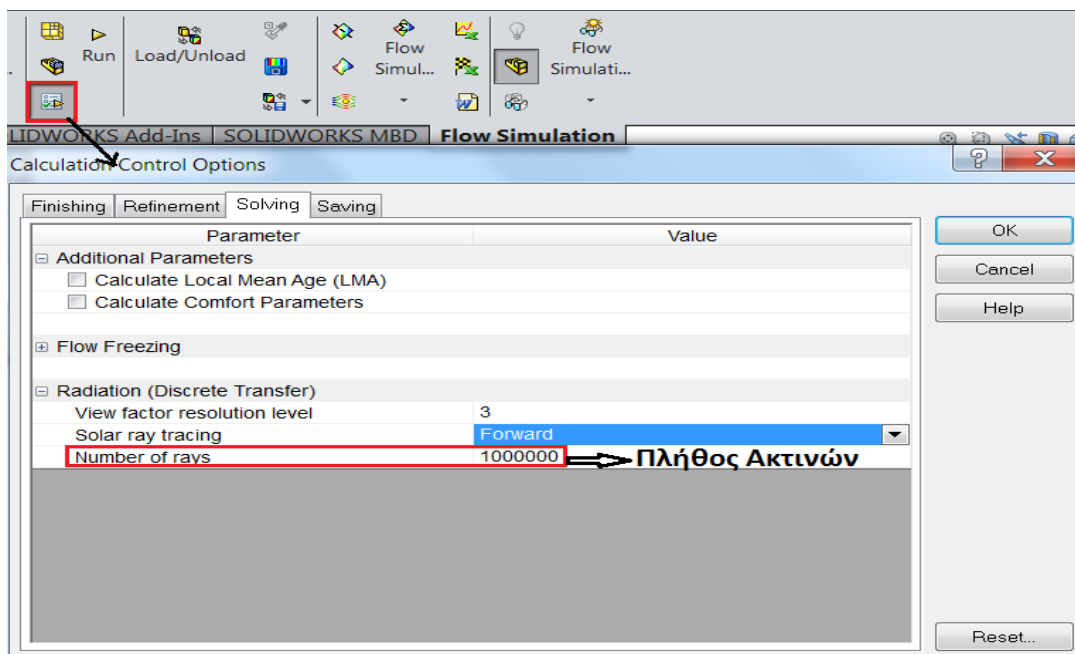


Εικόνα 4.60 Πύκνωση πλέγματος απορροφητήρα



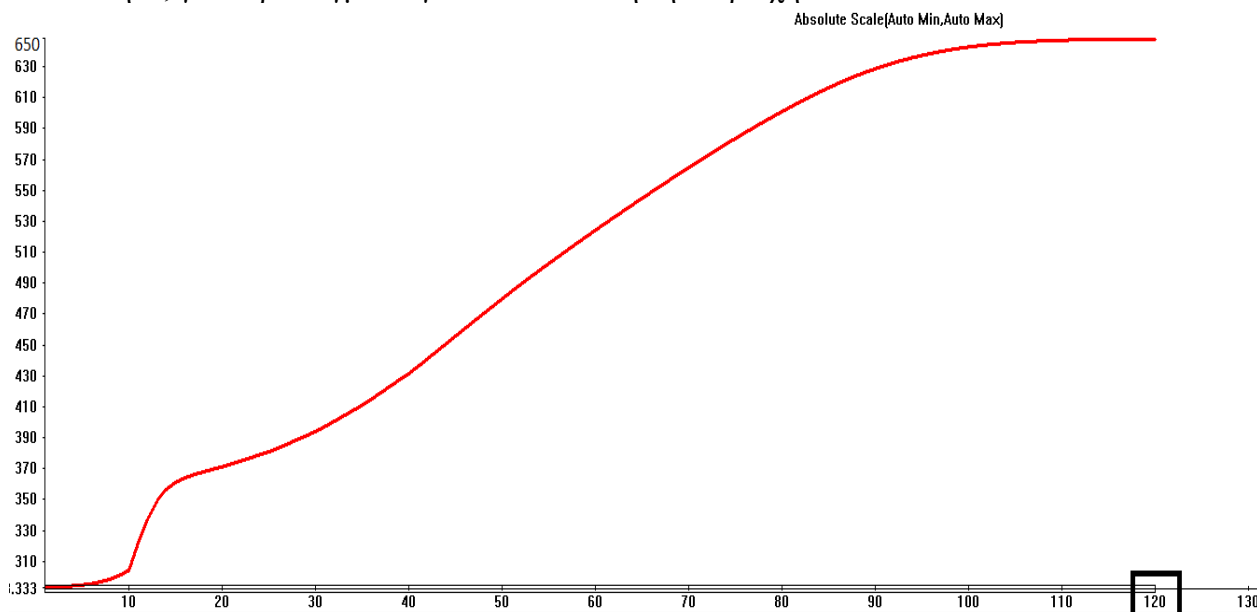
Εικόνα 4.61 Πύκνωση πλέγματος δευτερεύοντος κατόπτρου

16. Σε αυτό το βήμα, θα καθορίσουμε το πλήθος των ηλιακών ακτινών και το βέλτιστο πλήθος επαναλήψεων της προσομοίωσης. Αρχικά, όσον αφορά τις ηλιακές ακτίνες, για να τις ορίσουμε κάνουμε click στο εικονίδιο Calculation Control Options, που βρίσκεται στο menu του Flow Simulation. Έπειτα, κάνουμε click στο tab Solving του σχετικού menu, και στο section Number of Rays επιλέγουμε 1000000, ένα αρκετά καλό πλήθος για να συγκλίνουν οι λύσεις μας.

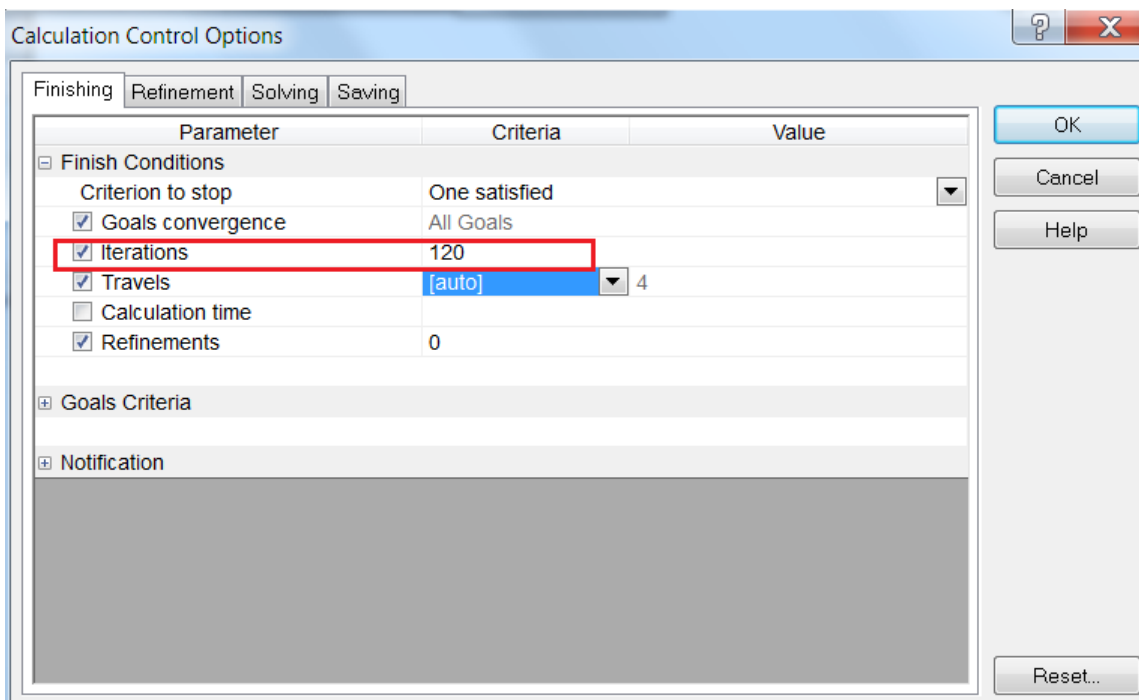


Εικόνα 4.62 Ορισμός πλήθους ακτινών

Τέλος, όσον αφορά τις μέγιστες επαναλήψεις που θα εκτελέσει το πρόγραμμα, αυτές τις ορίζουμε από το menu του Calculation Control Options κάνοντας click στο tab Finishing και επιλέγοντας 120 στο section του Iterations. Οι 120 επαναλήψεις αποτελούν βέλτιστη επιλογή για το πλέγμα μας, καθώς όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα η λύση της θερμοκρασίας του σωλήνα, για παράδειγμα συγκλίνει σε εκείνη την περιοχή.

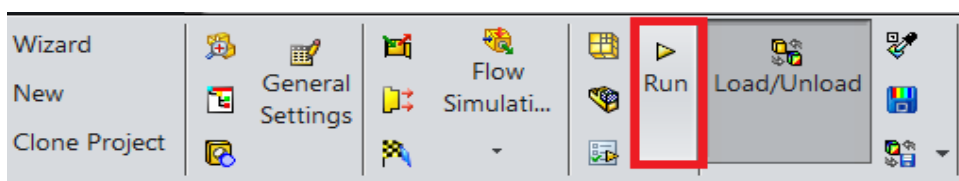


Εικόνα 4.63 Σύγκλισης της T_r (βέλτιστο πλήθος επαναλήψεων)



Εικόνα 4.64 Ορισμός επαναλήψεων προσομοίωσης

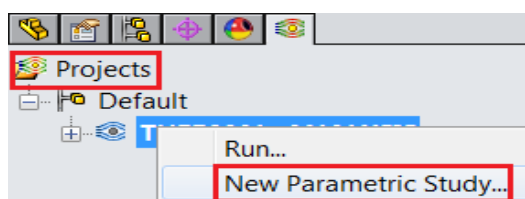
17. Αφού ορίσαμε, όλα τα απαραίτητα μεγέθη για την προσομοίωση, επιλέγουμε την εντολή Run, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Εικόνα 4.65 Εντολή Run

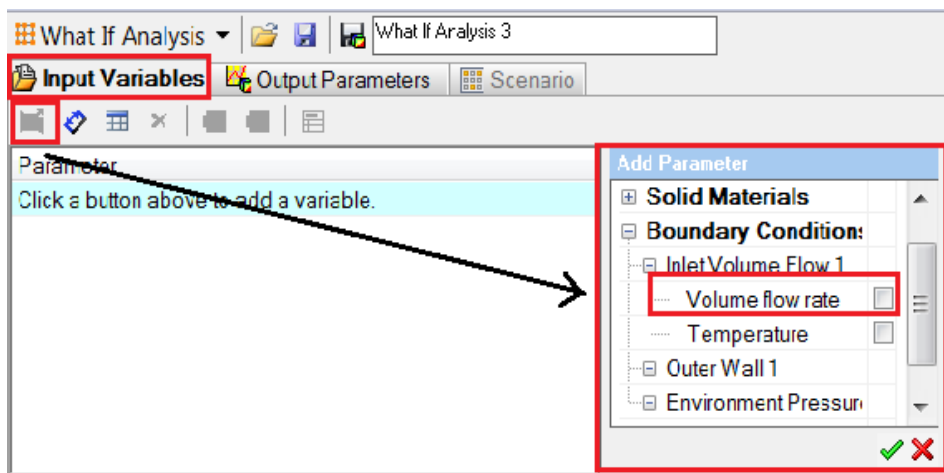
4.3.1 Εύρεση Βέλτιστης παροχής

Στο βήμα 13 της προηγούμενης ενότητας, ορίσαμε τις οριακές συνθήκες του μοντέλου. Μια από αυτές τις συνθήκες, ήταν και η παροχή όγκου στην είσοδο του σωλήνα. Συγκεκριμένα, επιλέξαμε 200 L/s καθώς αυτή αποτελεί την βέλτιστη παροχή ρευστού ως προς τον θερμικό βαθμό απόδοσης και ταυτόχρονα έχει χαμηλή πτώση πίεσης. Στην ενότητα αυτή, θα αναλύσουμε τον τρόπο εύρεσης της, μέσω του Solidworks. Συγκεκριμένα, το λογισμικό μας δίνει την δυνατότητα να «τρέξουμε» την ανάλυση για διάφορες τιμές παροχής, που καθορίζουμε εμείς. Αυτό γίνεται, με την εντολή New Parametric Study. Για να την εφαρμόσουμε κάνουμε δεξί click, στο Projects → Default και την επιλέγουμε.



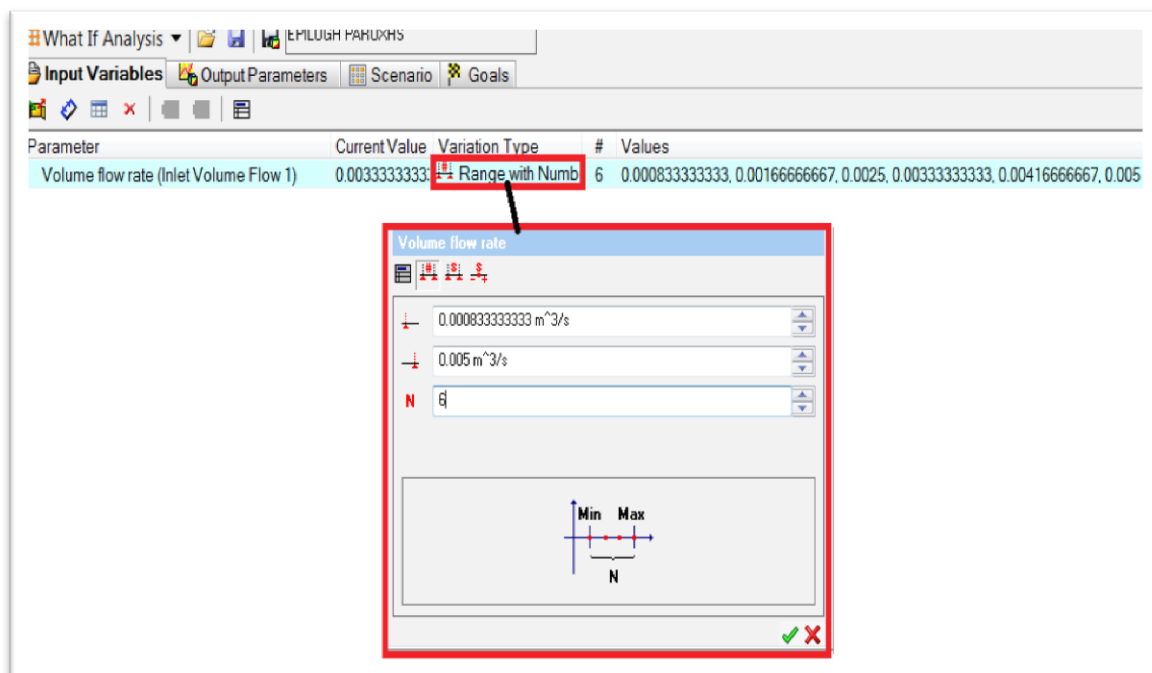
Εικόνα 4.66 Εντολή New Parametric Study

Στην συνέχεια, στο σχετικό menu (What if Analysis) που εμφανίζεται, επιλέγουμε Input Variables → Add Simulation Parameters και στο menu Add Parameter επιλέγουμε Boundary Condition → Volume Flow Rate (παροχή όγκου εισόδου). Η παρακάτω διαδικασία αποτυπώνεται στην εικόνα 4.67.



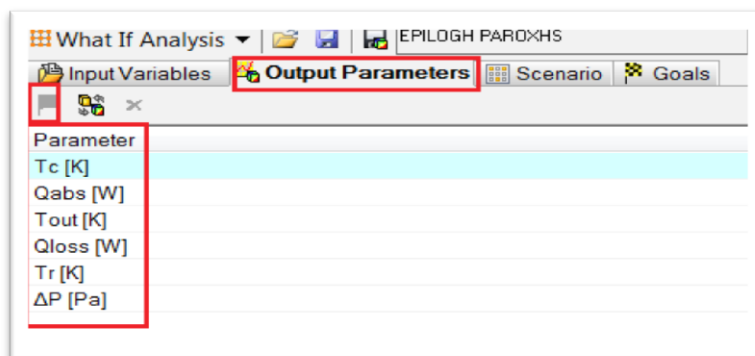
Εικόνα 4.67 Επιλογή παροχής όγκου ως Input Variable

Έπειτα, ορίζουμε το διάστημα και το βήμα της παροχής όγκου. Συγκεκριμένα, κάνουμε click στο Variation Type → Range With Number, και ορίζουμε 6 παραμετρικά σημεία παροχής στο διάστημα [50,300] L/s.

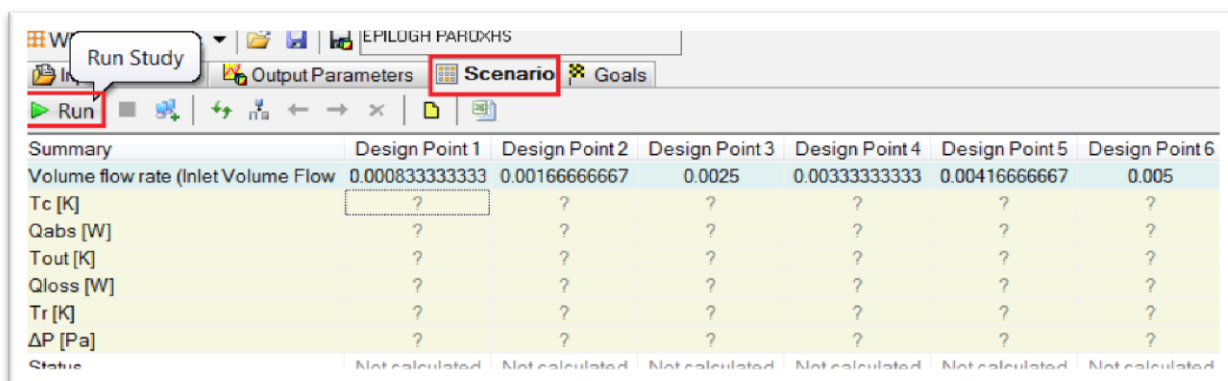


Εικόνα 4.68 Καθορισμός σημείων μελέτης

Τέλος, ορίζουμε τις παραμέτρους που θέλουμε ως εξόδους της ανάλυσης. Αναλυτικότερα, επιλέγουμε το tab Output Parameters και στη συνέχεια, διαλέγουμε όλα τα μεγέθη που μας χρειάζονται. Στην παρακάτω εικόνα 4.69, φαίνεται αυτή η διαδικασία. Αφού ορίσουμε και τα Outputs, στη συνέχεια κάνουμε click στο Scenario → Run προκειμένου να εξάγουμε τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.70.

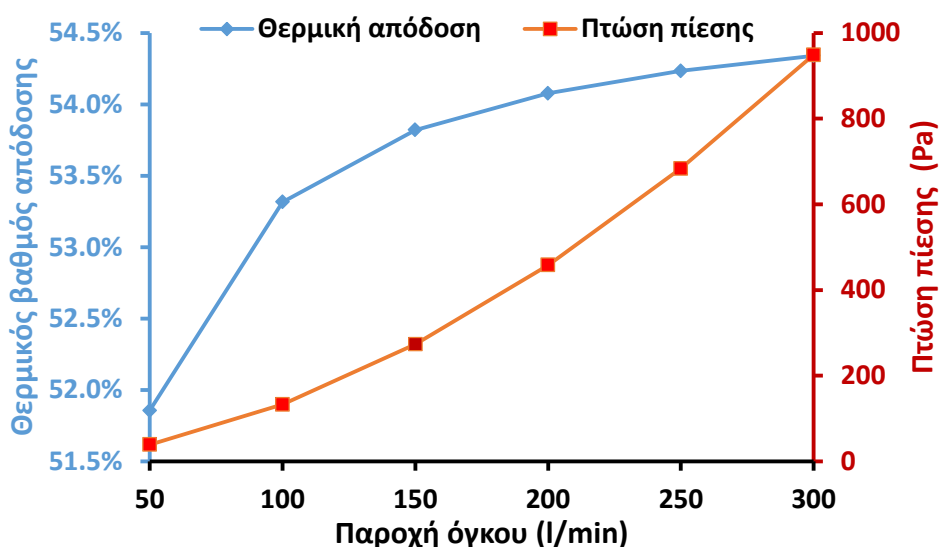


Εικόνα 4.69 Ορισμός μεταβλητών εξόδου



Εικόνα 4.70 Menu Scenario και σημεία μελέτης

Σύμφωνα, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η περιοχή παροχών κοντά στα 200 L/min συνδυάζει υψηλό θερμικό βαθμό απόδοσης με χαμηλή πτώση πίεσης, το οποίο σημαίνει χαμηλότερο έργο αντλίας κυκλοφορίας, άρα λιγότερο λειτουργικό κόστος. Συνεπώς, επιλέγουμε αυτή την παροχή όγκου. Αξίζει να σημειωθεί, πως σε όλα τα μέσα θα χρησιμοποιήσουμε ίδια παροχή όγκου, καθώς επιθυμούμε να έχουμε κοινή ταχύτητα ροής σε όλες τις περιπτώσεις.



Εικόνα 4.71 Μεταβολή θερμικής απόδοσης και πτώσης πίεσης, συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής

Τέλος, είναι ανάγκη να σημειώσουμε ότι περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο που επεξεργαζόμαστε τα εξαγόμενα αποτελέσματα από το πρόγραμμα, δίνονται στο παρακάτω κεφάλαιο.

4.3.2 Ανεξαρτησία πλέγματος

Στο βήμα 15 της ενότητας 4.3, αναφερθήκαμε στον αριθμό κελιών του υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιήσαμε για το μοντέλο μας και ότι αυτό αποτελεί το βέλτιστο. Στην υποενότητα αυτή, θα αναφέρουμε τους λόγους που επιλέξαμε το πλέγμα 140x140x140, ως το βέλτιστο. Συγκεκριμένα, εφαρμόσαμε μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος, δηλαδή κάναμε δοκιμές με αρκετά πλέγματα και εκεί που υπήρχε σύγκλιση της λύσης, έχουμε ανεξαρτησία πλέγματος, δηλαδή όσο και να αυξήσουμε το πλήθος των κελιών δεν θα υπάρχει ουσιαστική διαφορά στο αποτέλεσμα. Αξίζει να σημειώσουμε, πως και το πλέγμα 120x120x120, δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα, παρ' όλα αυτά, επιλέγουμε το 140x140x140, καθώς δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στον υπολογιστικό χρόνο, μεταξύ τους. Ακόμα, εκτός από το αρχικό πλέγμα, ο ορισμός των ηλιακών ακτινών του μοντέλου, απαιτεί και αυτός μελέτη ανεξαρτησίας πλήθους, αλλά επειδή οι διαφορές στους υπολογιστικούς χρόνους για διαφορετικά πλήθη ακτινών, είναι αμελητέες σε σχέση με τις αντίστοιχες διαφορές που αφορούν τον ορισμό των αρχικών πλεγμάτων, ορίζουμε ένα αρκετά ικανοποιητικό πλήθος ακτινών (1000000) όπως αναφέραμε στο βήμα 16 της ενότητας 3.2, χωρίς περεταίρω μελέτη.

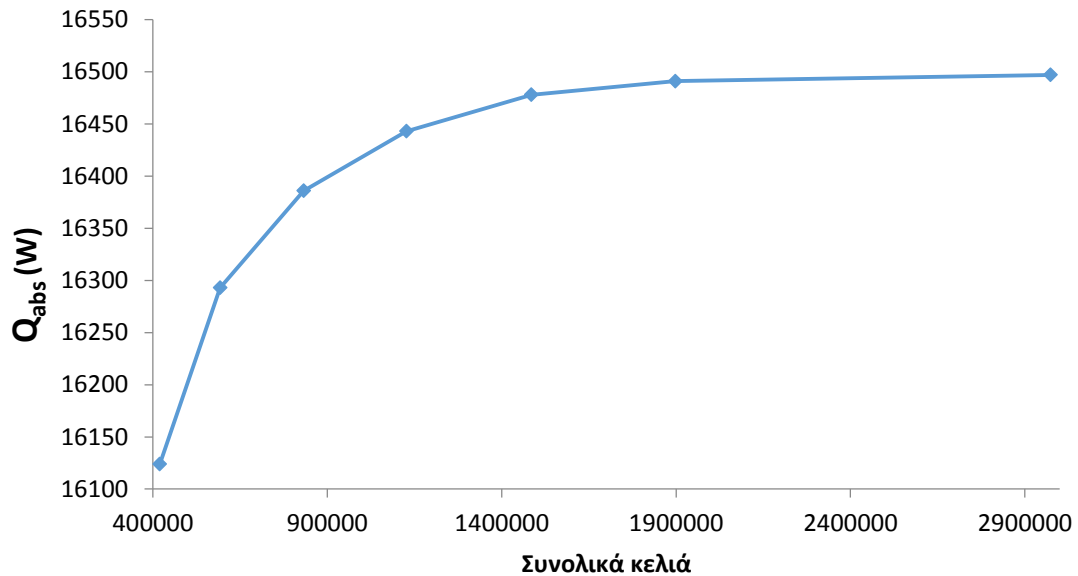
Όσον αφορά τον ορισμό του αρχικού πλέγματος, ως μεταβλητή σύγκλισης, επιλέξαμε την θερμότητα που απορροφά ο σωλήνας Q_{abs} και πραγματοποιήσαμε το flow simulation για τα εξής πλέγματα: 70x70x70, 80x80x80, 90x90x90, 100x100x100, 110x110x110, 120x120x120, 140x140x140. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω, πίνακα και διάγραμμα.

Parameter	Value
Status	Calculation
Fluid cells	5764
Solid cells	1750664
Partial cells	141700

Εικόνα 4.72 Περιβάλλον λογισμικού: Συνολικά κελιά ανά είδος, για το πλέγμα 120x120x120

Αρχικό Πλέγμα	Συνολικά κελιά	Q_{abs} (W)
70x70x70	419552	16124
80x80x80	592752	16293
90x90x90	831998	16386
100x100x100	1126700	16443
110x110x110	1485476	16478
120x120x120	1898108	16491
140x140x140	2973642	16497

Πίνακας 4.4 Απορροφημένη θερμότητα απορροφητή Q_{abs} , για κάθε εξεταζόμενο πλέγμα



Εικόνα 4.73 Ανεξαρτησία πλέγματος με μέγεθος σύγκλισης το Q_{abs}

4.4 Στροφή κατόπτρων για διάφορες γωνίες ήλιου

Στις εφαρμογές συλλεκτών Fresnel, όπως έχουμε προαναφέρει, είναι αναγκαία η ύπαρξη συστήματος παρακολούθησης ηλίου. Συνεπώς, θα πρέπει η μελέτη μας να λαμβάνει υπόψη την μετατόπιση του ήλιου στον ουράνιο θόλο. Παρ' όλα αυτά, πρέπει να σημειώσουμε ότι όλα τα αποτελέσματα της θερμικής προσομοίωσης που θα ακολουθήσουν στο κεφάλαιο 5 αναφέρονται στην περίπτωση που ο ήλιος είναι στην υψηλότερη του θέση, και είναι πάνω ακριβώς από τον απορροφητήρα. Τα μόνα αποτελέσματα που θα εξάγουμε για στρεφόμενα κάτοπτρα, προκύπτουν από την οπτική ανάλυση του συλλέκτη και θα μας δώσουν τις τιμές του παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης K (Incident angle modifier) και των επιμέρους συνιστωσών του (K_L , K_T). Θυμίζουμε, ότι ο συντελεστής αυτός μας δείχνει πόσο μεταβάλλεται ο οπτικός βαθμός απόδοσης για μια οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών, σε σχέση με την βέλτιστη περίπτωση δηλαδή για $\theta=0^\circ$. Οι σχέσεις που σχετίζονται με το μέγεθος αυτό, έχουν δοθεί αναλυτικά στην ενότητα 3.5.2, για λόγους πληρότητας επισυνάπτουμε ξανά την πιο βασική εξ' αυτών :

$$K(\theta) = \frac{\eta_{opt}(\theta)}{\eta_{opt,max}} \quad (4.17)$$

Γενικά, η γωνία ήλιου που μας ενδιαφέρει σε αυτή την εφαρμογή είναι η θ_T , δηλαδή η εγκάρσια συνιστώσα (transversal) της γωνίας πρόσπτωσης θ . Αυτό συμβαίνει, καθώς σύμφωνα με όσα αναφέραμε στην υποενότητα 3.5.2 [3.7], [3.13], οι πιο σημαντικές οπτικές απώλειες είναι οι απώλειες συνημίτονου δηλαδή, αυτές που προκαλούνται από την μεταβολή της θ_T . Επομένως, το σύστημα παρακολούθησης θα περιστρέφει τα κάτοπτρα κατά την γωνία ψ η οποία δίνεται από την σχέση 4.4. Συνεπώς αν εφαρμόσουμε την σχέση αυτή για γωνίες ήλιου $\theta_T=0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας των κλίσεων, ψ .

Σημείωση : Όλες οι γωνίες είναι σε μοίρες, με τον δείκτη $i=[1-15]$ είναι τα δεξιά, ενώ για $i=[16-30]$ τα αριστερά κάτοπτρα.

Κάτοπτρα (i)	$\theta_T=0^\circ$	$\theta_T=10^\circ$	$\theta_T=30^\circ$	$\theta_T=50^\circ$	$\theta_T=70^\circ$
1	22.5	27.5	37.5	47.5	57.5
2	21.52	26.52	36.52	46.52	56.52
3	20.46	25.46	35.46	45.46	55.46
4	19.33	24.33	34.33	44.33	54.33
5	18.13	23.13	33.13	43.13	53.13
6	16.85	21.85	31.85	41.85	51.85
7	15.48	20.48	30.48	40.48	50.48
8	14.04	19.04	29.04	39.04	49.04
9	12.51	17.51	27.51	37.51	47.51
10	10.90	15.9	25.9	35.9	45.9
11	9.22	14.22	24.22	34.22	44.22
12	7.47	12.47	22.47	32.47	42.47
13	5.66	10.66	20.66	30.66	40.66
14	3.80	8.8	18.8	28.8	38.8
15	1.91	6.91	16.91	26.91	36.91
16	1.91	17.5	7.5	-2.50	-12.5
17	3.80	16.52	6.52	-3.48	-13.48
18	5.66	15.46	5.46	-4.54	-14.54
19	7.47	14.33	4.33	-5.67	-15.67
20	9.22	13.13	3.13	-6.87	-16.87
21	10.9	11.85	1.85	-8.15	-18.15
22	12.51	10.48	0.48	-9.52	-19.52
23	14.04	9.04	-0.96	-10.96	-20.96
24	15.48	7.51	-2.49	-12.49	-22.49
25	16.85	5.9	-4.1	-14.1	-24.1
26	18.13	4.22	-5.78	-15.78	-25.78
27	19.33	2.47	-7.53	-17.53	-27.53
28	20.46	0.66	-9.34	-19.34	-29.34
29	21.52	-1.2	-11.2	-21.2	-31.2
30	22.5	-3.09	-13.09	-23.09	-33.09

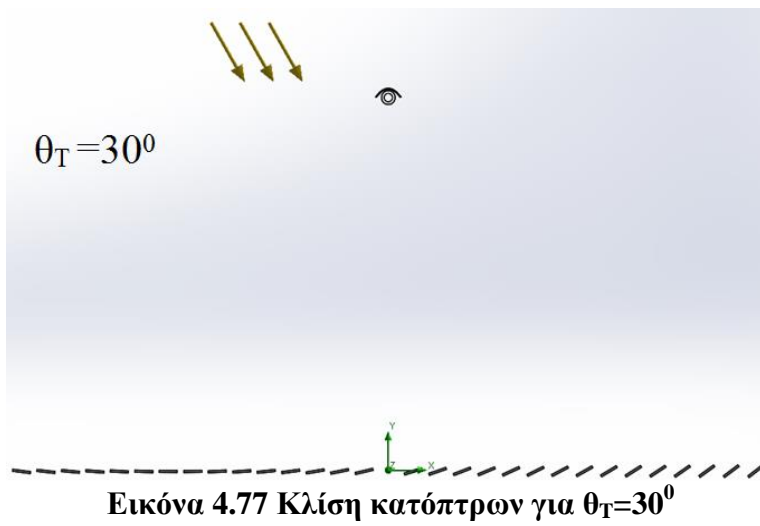
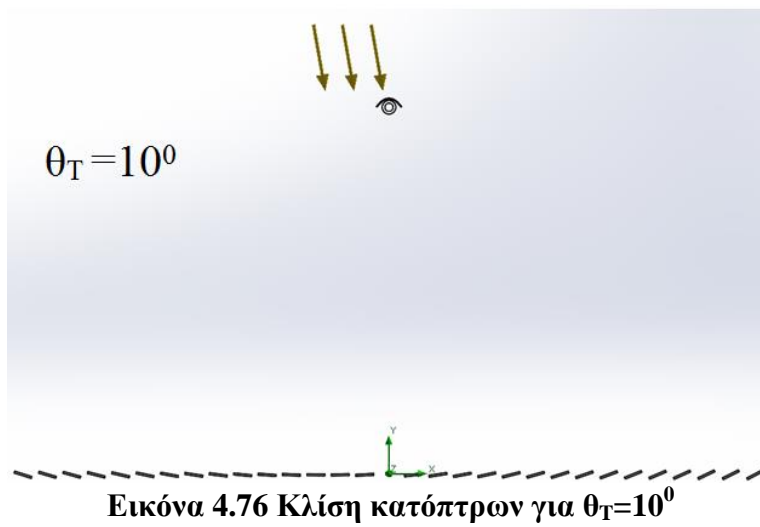
Πίνακας 4.5 Κλίσεις κατόπτρων, συναρτήσει διάφορων γωνιών θ_T

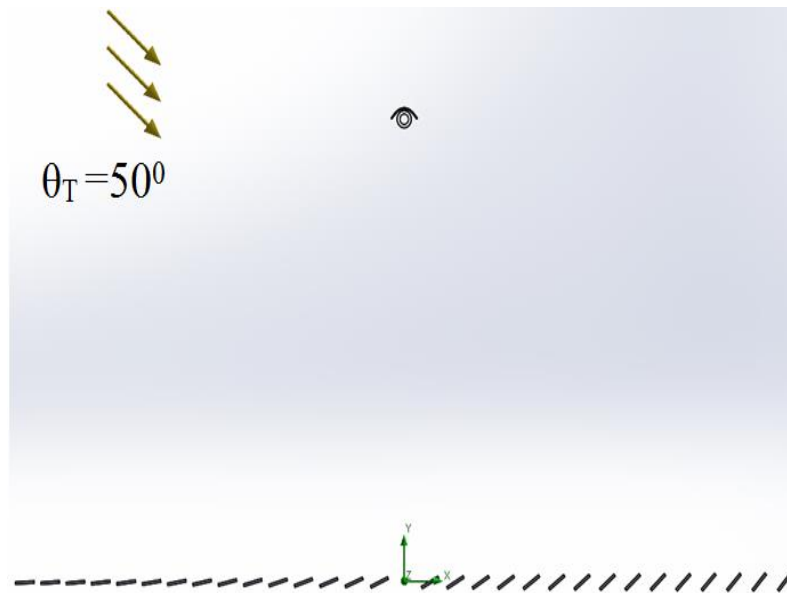
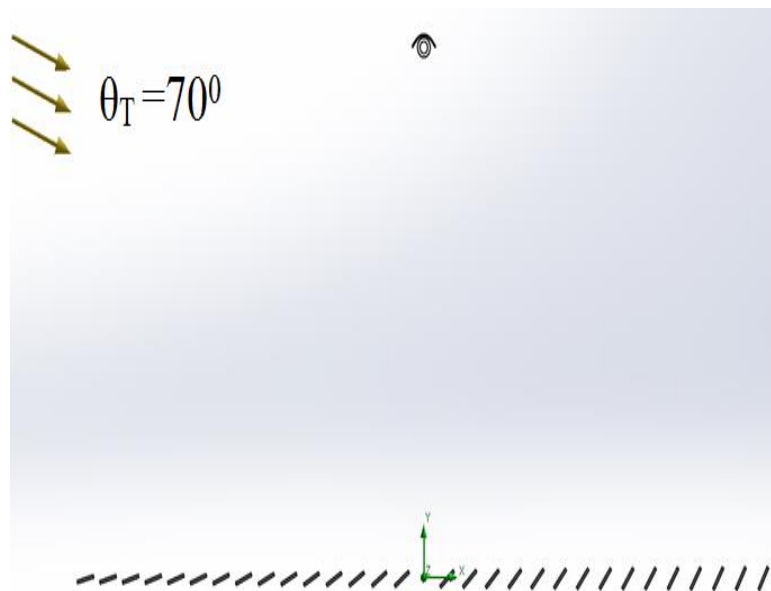
Ακόμα, για να αλλάξουμε την γωνία ήλιου στην θερμική προσομοίωση, ανατρέχουμε στο βήμα 4 της ενότητας 4.3 και στην επιλογή της κατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας κρατάμε σταθερά τα ($X=0, Z=0$) και κατά την τρίτη διεύθυνση βάζουμε $Y= -\tan(\theta_T)$.



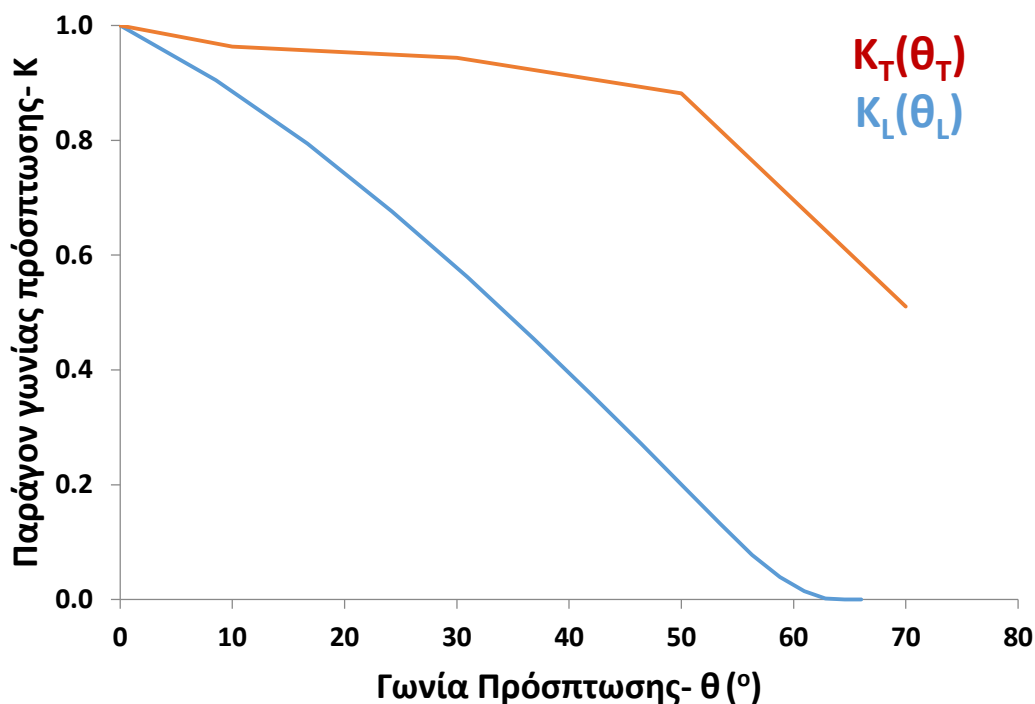
Εικόνα 4.74 Μεταβολή γωνίας ήλιου θ_T

Συνεπώς, σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 4.5, με την εντολή Smart Dimension του Solidworks, στρέφουμε όλα τα πρωτεύοντα κάτοπτρα για τις γωνίες ήλιου $\theta_T=0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$. Όλες οι περιπτώσεις, αποτυπώνονται στις εικόνες 4.75 έως 4.79.



Εικόνα 4.78 Κλίση κατόπτρων για $\theta_T=50^\circ$ Εικόνα 4.79 Κλίση κατόπτρων για $\theta_T=70^\circ$

Αφού χρησιμοποιήσουμε το flow simulation για κάθε περίπτωση, εστιάζοντας μόνο στην οπτική ανάλυση, βρίσκουμε την απορροφημένη ακτινοβολία του σωλήνα. Αυτό το κάναμε, προκειμένου να συγκρίνουμε τις παραπάνω περιπτώσεις με αυτήν της $\theta_T = 0^\circ$ από άποψη απόδοσης. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, αυτό είναι εφικτό με την χρήση του παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης K (Incident angle modifier). Αξίζει να σημειώσουμε πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αφορούν μόνο την συνιστώσα K_T , καθώς αυτή έχει νόημα για την εγκατάστασή μας. Παρ' όλα αυτά, για λόγους πληρότητας κάνουμε αντίστοιχη διαδικασία με την παραπάνω, για την επιμήκη συνιστώσα της γωνίας πρόσπτωσης (Longitudinal), προκειμένου να υπολογίσουμε την συνιστώσα K_L . Συνεπώς με την χρήση της σχέσης 4.13 προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα που δείχνει την μεταβολή του K_L , K_T συναρτήσεως των θ_L , θ_T , εκφρασμένων σε κοινό άξονα.



Εικόνα 4.80 Παράγοντας K και επιμέρους συνιστώσες K_L, K_T συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

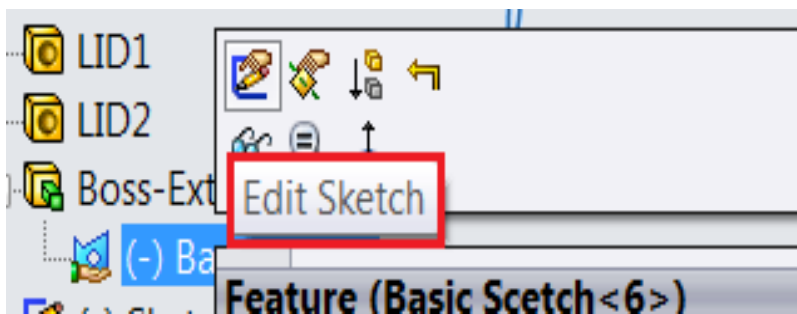
4.5 Επιμήκη πτερύγια στο εσωτερικό του σωλήνα

Όπως έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 3, προκειμένου να αυξήσουμε τον θερμικό βαθμό απόδοσης του συλλέκτη, εκτός από το να βελτιώσουμε τις ιδιότητες του θερμικού μέσου, μια λύση είναι η εφαρμογή εσωτερικών πτερυγίων κατά τον επιμήκη άξονα του σωλήνα. Αυτό συμβαίνει, καθώς έτσι αυξάνουμε την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας και δημιουργούμε συνθήκες τύρβης στην ροή, αυξάνοντας έτσι τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Στο κεφάλαιο 3, έχουμε παραθέσει αρκετές έρευνες βελτιστοποίησης της γεωμετρίας των πτερυγίων με σκοπό την καλύτερη θερμική απόδοση και την χαμηλή πτώση πίεσης. Εμείς, για τις ανάγκες του δικού μας συλλέκτη, χρησιμοποιούμε την βέλτιστη γεωμετρία πτερυγίων που υπολόγισαν οι Bellos et al. [4.3], [4.4]. Όσον αφορά, το μήκος των πτερυγίων, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι δεν θα είναι ακριβώς ίσο με αυτό του σωλήνα, αλλά θα είναι μετατοπισμένα κατά 5 mm από κάθε άκρο του, για να μην υπάρχει επαφή με τις τάπες στεγανοποίησης. Επομένως, οι σχετικές διαστάσεις δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πλήθος	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)
8	5990	2	9.98

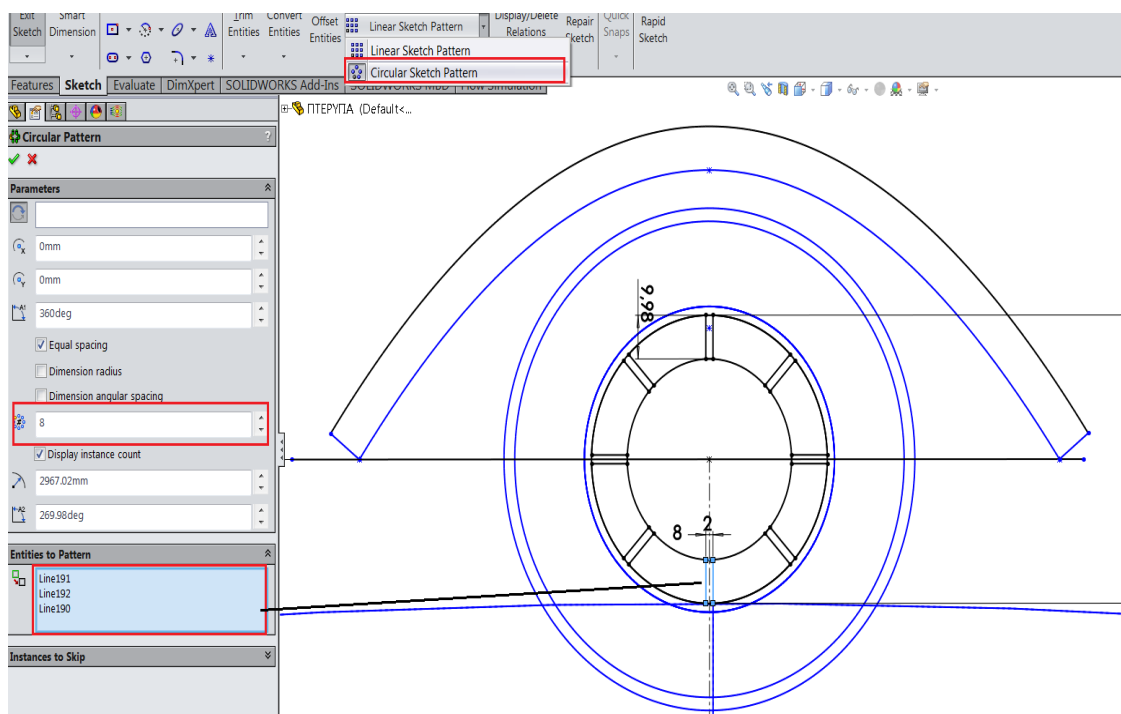
Πίνακας 4.6 Βασικές διαστάσεις πτερυγίων

Ο σχεδιασμός τους θα γίνει με παρόμοια βήματα που αναφέραμε στην ενότητα 4.3. Συγκεκριμένα, στο ίδιο αρχείο Solidworks, εφόσον είμαστε στο menu του Sketch, κάνουμε δεξί click στο Basic sketch (αρχικό) και επιλέγουμε Edit sketch, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



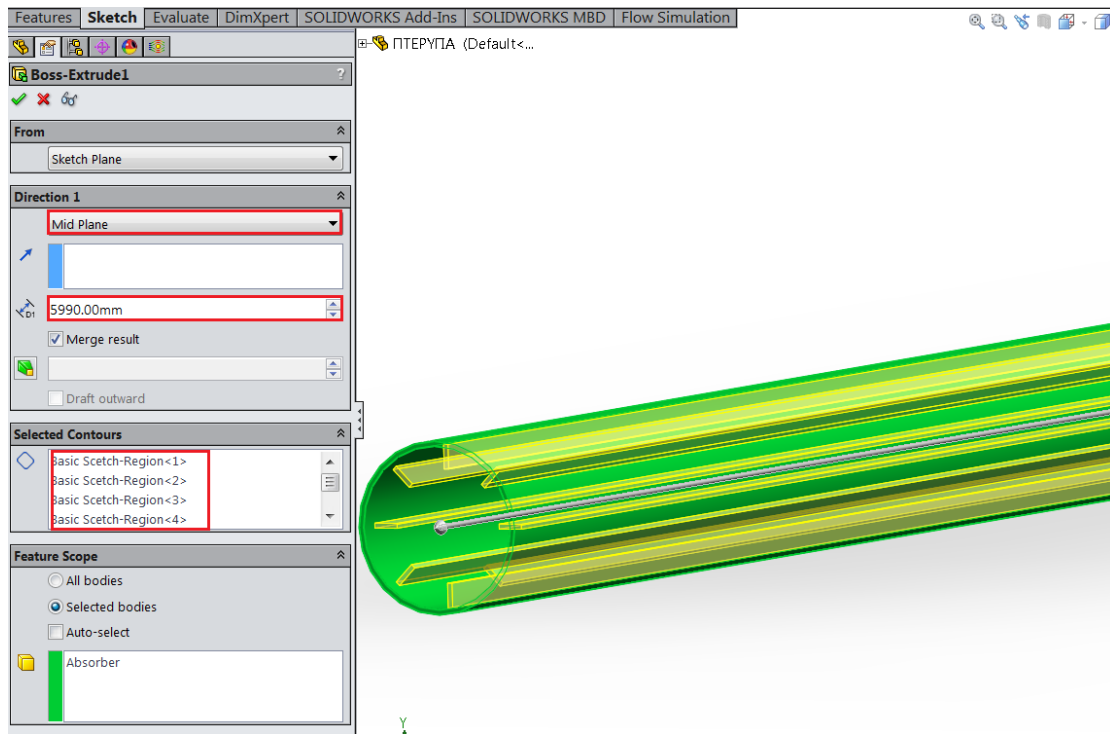
Εικόνα 4.81 Εντολή Edit Sketch

Έπειτα, σχεδιάζουμε έναν κύκλο διαμέτρου 46 mm, ο οποίος θα αποτελεί το πάνω όριο των περυγίων. Ακόμα, σχεδιάζουμε ένα περύγιο με τις διαστάσεις που αναφέραμε στον πίνακα 4.6. Τέλος, προκειμένου να σχεδιάσουμε και τα υπόλοιπα περύγια, κατά την περιμετρική διεύθυνση χρησιμοποιούμε την εντολή Circular Sketch Pattern που βρίσκεται στο menu του Linear Sketch Pattern. Εκεί επιλέγουμε το σχήμα που θέλουμε να αναπαράγουμε, το πλήθος των μελών του Pattern, καθώς και την κυκλική διεύθυνση που θα ανήκουν αυτά. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται αναλυτικά η παραπάνω διαδικασία.



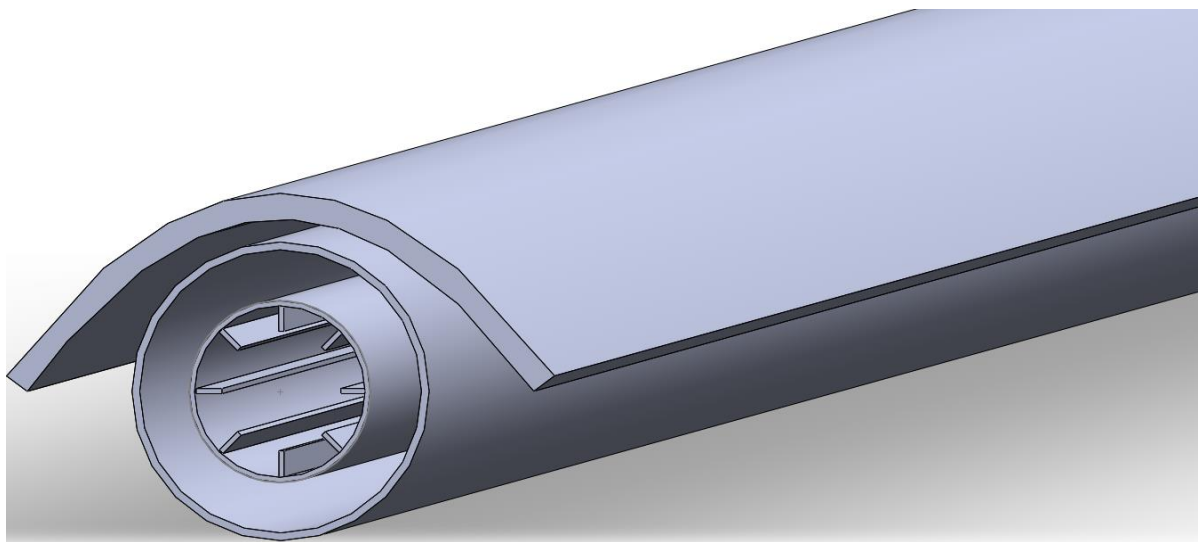
Εικόνα 4.82 Δισδιάστατος σχεδιασμός περυγίων

Τέλος, για να προσδώσουμε τρισδιάστατη μορφή στα περύγια, χρησιμοποιούμε την γνωστή εντολή Extruded Boss/ Base. Συγκεκριμένα, επιλέγουμε την επιφάνεια των περυγίων, ορίζουμε το μήκος τους στα 5990 mm και κάνουμε click στο tab mid plane για να γίνει συμμετρικά η κατασκευή τους. Επίσης, είναι βασικό να επιλέξουμε το Merge Result, για να τα θεωρήσει ως κομμάτι του σωλήνα και όχι ως ξεχωριστή κατασκευή. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται αναλυτικά αυτή η διαδικασία.



Εικόνα 4.83 Τρισδιάστατη σχεδίαση πτερυγίων με την εντολή Extruded Boss/Base

Συνεπώς, η τελική μορφή του συλλέκτη μας είναι όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

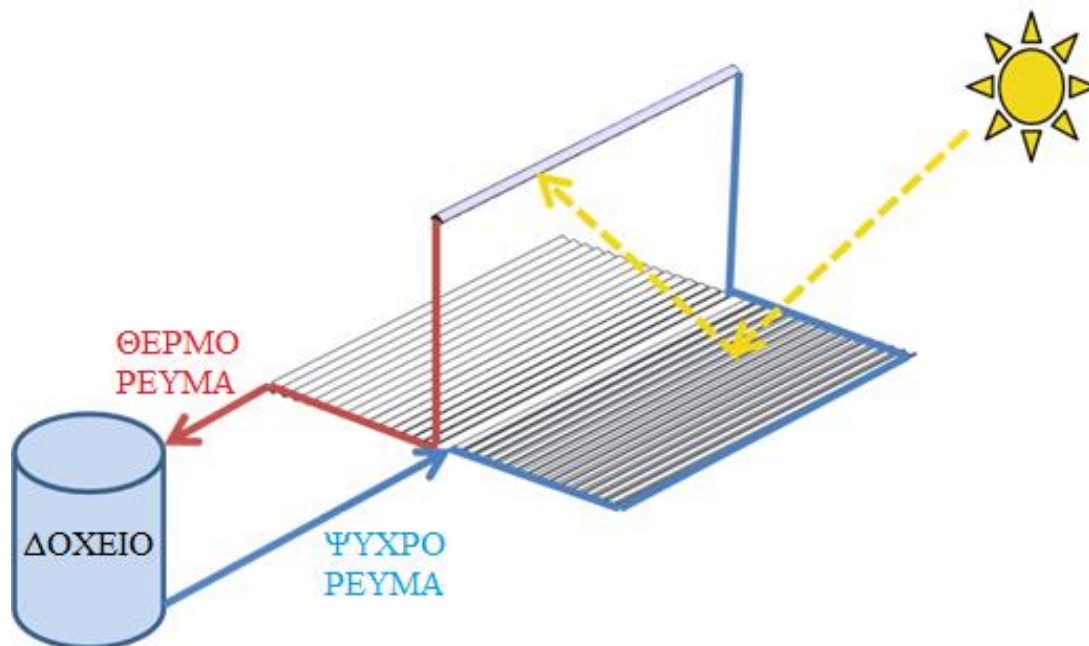


Εικόνα 4.84 Τελική μορφή συλλέκτη Fresnel με εσωτερικά πτερύγια κατά το μήκος του απορροφητήρα

Όσον αφορά το Flow Simulation σε αυτή την περίπτωση, θα γίνει ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως με την περίπτωση σωλήνα χωρίς πτερύγια. Το αρχικό πλέγμα (140x140x140), θα παραμείνει το ίδιο με μόνη διαφορά, ότι στην πυκνωση το πρόγραμμα θα δημιουργήσει περισσότερα Solid Cells, επειδή έχουμε περισσότερο υλικό σε σχέση με την απλή γεωμετρία (σωλήνας χωρίς πτερύγια). Για το λόγο αυτό, η αναλυτική επεξήγηση της διαδικασίας είναι περιττή για αυτήν την εφαρμογή.

4.6 Μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς συλλέκτη

Σε κάθε είδους θερμικού συλλέκτη, είναι αναγκαίο να εξετάζουμε τη θερμική συμπεριφορά και την απόδοση του κατά την χρονομεταβαλλόμενη λειτουργία. Ειδικά στους συγκεντρωτικούς, λόγω της υψηλής τους εξάρτησης από την θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο η μελέτη αυτή είναι ζωτικής σημασίας. Επομένως, στην περίπτωση του συλλέκτη Fresnel της συγκεκριμένης εργασίας, θα εξετάσουμε την θερμική του απόδοση στα πλαίσια, ημέρας, μήνα, έτους. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε περιλαμβάνει, τον συλλέκτη μας σε σύνδεση με ένα θερμικό δοχείο.



Εικόνα 4.85 Συλλέκτης Fresnel σε σύνδεση με θερμικό δοχείο αποθήκευσης

Βασικές παράμετροι σχεδίασης, αποτελούν ο όγκος του δοχείου V_T και η θερμοκρασία εισόδου του θερμικού μέσου T_{in} . Η μοντελοποίηση του δοχείου γίνεται με ενιαίο τρόπο, δηλαδή δεν το χωρίζουμε σε στρώματα, καθώς τα αποτελέσματα είναι ομοίως ικανοποιητικά. Προκειμένου, να ορίσουμε την άμεση ηλιακή ακτινοβολία καθώς και την θερμοκρασία περιβάλλοντος, χρησιμοποιούμε το μοντέλο που αναφέρεται στην δημοσίευση του Bellos et al. [4.11]. Επίσης, θα ασχοληθούμε μόνο με τις ώρες της ημέρας, καθώς την νύχτα προφανώς ο συλλέκτης δεν λειτουργεί. Επίσης, στον υπολογισμό της ετήσιας απόδοσης, λαμβάνουμε υπόψη μόνο τις μέρες ηλιοφάνειας τις οποίες αντλούμε από την ίδια δημοσίευση [4.11]. Αρχικά, πρώτος στόχος της μοντελοποίησης, είναι η εύρεση των καμπυλών του παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης K και των επιμέρους συνιστώσεων του (K_L , K_T) κατά την διάρκεια της ημέρας. Αυτό το πραγματοποιούμε, αφού έχουμε υπολογίσει τα αντίστοιχα πολυώνυμα προσέγγισης, τα οποία προκύπτουν από τα αποτελέσματα της θερμικής προσομοίωσης. Περισσότερη ανάλυση του τρόπου υπολογισμού αυτών των πολυωνύμων παρατίθεται στο κεφάλαιο 5. Παρόμοια διαδικασία, ακολουθούμε για

τον οπτικό βαθμό απόδοσης, τον οποίο επίσης υπολογίζουμε στα πλαίσια του χρόνου, χρησιμοποιώντας πολυώνυμο προσέγγισης.

Επόμενος στόχος, είναι η εύρεση της θερμοκρασίας του δοχείου στο τέλος της ημέρας T_s , της διαθέσιμης ενέργειας στον απορροφητή E_{avail} όπου λαμβάνει υπόψη τις οπτικές απώλειες πρόσπτωσης, καθώς και την αποθηκευμένη θερμότητα στο δοχείο E_{stor} . Αφού υπολογίσουμε όλα αυτά στα πλαίσια της μέρας, του κάθε μήνα και του έτους συνολικά, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ημερήσια τιμή του παράγοντα γωνία πρόσπτωσης K_{mean} και την μέση τιμή του βαθμού απόδοσης $\eta_{th,mean}$. Όλα αυτά τα μεγέθη δίνονται από τους παρακάτω τύπους. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση του προβλήματος. Τέλος, όλη η μοντελοποίηση έγινε στο μαθηματικό λογισμικό Matlab. Παρακάτω, θα δούμε αναλυτική περιγραφή των βημάτων που ακολουθήσαμε, με παράθεση τυπολογίου, εικόνων από τον κώδικα και κατατοπιστικών σχόλιων.

Χρονική διακριτοποίηση προβλήματος

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή αυτής της ενότητας, το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει είναι οι ώρες της ημέρας, πριν την δύση του ήλιου. Συνεπώς, μοντελοποιούμε την ημέρα θεωρώντας ως $t=0$ την στιγμή της ανατολής του ήλιου και $t=N$ την στιγμή δύσης ήλιου, όπου N είναι η διάρκεια της ημέρας και δίνεται από τον παρακάτω τύπο, με $\phi=38^\circ$ το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας και δ η ηλιακή απόκλιση (4.18).

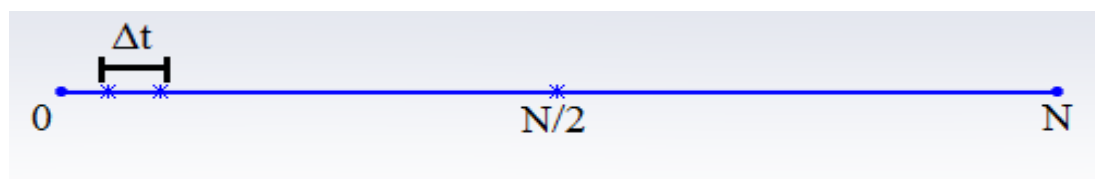
$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left[\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right], \quad (4.18)$$

$$N_D = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)), \quad (4.19)$$

Έχοντας ορίσει το χρονικό διάστημα και αφού το μετατρέψουμε σε δευτερόλεπτα, δηλαδή $[0, N \cdot 3600]$, προχωράμε στην διακριτοποίηση του. Έτσι, αν θεωρήσουμε ότι η μέρα χωρίζεται σε M το πλήθος, κομμάτια τότε το χρονικό βήμα Δt καθώς και η στιγμιαία χρονική στιγμή t θα δίνονται από τους παρακάτω τύπους.

$$\Delta t = \frac{N \cdot 3600}{M}, \quad (4.20)$$

$$t_{(i)} = (i - 1) \cdot \Delta t, \quad \text{με } i=[1, M+1] \quad (4.21)$$



Εικόνα 4.86 Διακριτοποίηση ημέρας

Η ωριαία γωνία (ω), δίνεται από την παρακάτω σχέση που αποτελεί μια παραλλαγή της εξίσωσης (2.2).

$$\omega = \frac{15}{3600} \cdot \left[t - \frac{N}{2} \cdot 3600 \right] \cdot \frac{\pi}{180} \quad (4.22)$$

Γωνίες ήλιου θ_L , θ_T και παράγοντας γωνίας πρόσπτωσης K

Η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών, σε οριζόντιο επίπεδο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\cos(\theta) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega), \quad (4.23)$$

Η γωνία αζιμουθίου του ήλιου, γ_s υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sin(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\sin(\theta)}, \quad (4.24)$$

Συνεπώς, η συνιστώσα κατά την επιμήκη (Longitudinal), θ_L και την εγκάρσια διεύθυνση (Trasversal), θ_T της γωνίας θ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$\tan(\theta_L) = \cos(\gamma_s) \cdot \tan(\theta), \quad (4.25)$$

$$\tan(\theta_T) = \sin(\gamma_s) \cdot \tan(\theta), \quad (4.26)$$

Άμεση ακτινοβολία και θερμοκρασία περιβάλλοντος στην Αθήνα

Καθοριστικά δεδομένα για το μοντέλο είναι οι καιρικές συνθήκες στην Αθήνα, δηλαδή η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{am} και η ακτινοβολία G_b .

Όσον αφορά την άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα στα κάτοπτρα, στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήσαμε την εμπειρική σχέση για την Αθήνα [4.11], η οποία δίνεται παρακάτω μαζί με τον πίνακα που δίνει τις παραμέτρους της.

$$G_b = A \cdot \exp\left[-\frac{B}{\cos(\theta_z)}\right], \quad (4.27)$$

Μήνας	A (W/m ²)	B (-)	N _D (h)	T _{am,m} (K)	DR (K)	Μέρες ηλιοφάνειας (-)
Ιανουάριος	1107.40	0.1243	9.78	285.44	7.67	12
Φεβρουάριος	1091.82	0.1393	10.81	286.50	8.21	10
Μάρτιος	1064.08	0.1600	12.00	289.82	9.17	15
Απρίλιος	1033.22	0.1817	13.23	294.74	10.36	18
Μάιος	1008.56	0.1985	14.22	299.89	11.45	19
Ιούνιος	995.55	0.2074	14.64	304.05	12.17	21
Ιούλιος	997.79	0.2062	14.26	305.85	12.29	28
Αύγουστος	1015.14	0.1951	13.25	304.92	11.78	28
Σεπτέμβριος	1044.22	0.1761	11.98	301.41	10.77	19
Οκτώβριος	1077.09	0.1542	10.75	296.48	9.57	17
Νοέμβριος	1106.10	0.1339	9.74	291.17	8.45	16
Δεκέμβριος	1116.91	0.1241	9.36	287.21	7.77	15

Πίνακας 4.7 Σταθερές A,B για τον υπολογισμό της G_b

Ένα ακόμα σημαντικό μέγεθος, αποτελεί η οριζόντια συνιστώσα της G_b , η $G_{b,hor}$ που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$G_{b,hor} = G_b \cdot \cos \theta, \quad (4.28)$$

Όσον αφορά την θερμοκρασία περιβάλλοντος αυτή δίνεται από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο, όπου DR (Daily Range) είναι η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας και δίνεται στον παραπάνω πίνακα, t_h είναι η συγκεκριμένη ώρα που ερευνάμε, $t_{h,max}$ είναι η ώρα εμφάνισης της μέγιστης θερμοκρασίας (θεωρήσαμε 14:00 το μεσημέρι) και $T_{am,m}$ είναι η μέση θερμοκρασία της μέσης ημέρας του μήνα και δίνεται στον πίνακα 4.8 [4.11], [4.12]:

$$T_{am} = T_{am,m} + \frac{DR}{2} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t_h - t_{h,max}}{24}\right), \quad (4.29)$$

Μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΜΑΙ	ΑΠΡ	ΙΟΥ Ν	ΙΟΥ Λ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
$T_{am,m}$ (°C)	12.28	13.35	16.67	21.59	26.74	30.9	32.7	31.77	28.26	23.33	18.02	14.06

Πίνακας 4.8 Μέσες θερμοκρασίες κάθε μήνα

Με την θεώρηση ότι η ώρα εμφάνισης της μέγιστης θερμοκρασίας είναι στις 14:00 το μεσημέρι, η σχέση (4.28) προκειμένου να εισαχθεί στο μοντέλο με το σωστό τρόπο παίρνει την εξής μορφή.

$$T_{am} = T_{am,m} + \frac{DR}{2} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t - \left(\frac{N}{2} + 2\right) \cdot 3600}{24 \cdot 3600}\right) \quad (4.30)$$

Δοχείο αποθήκευσης και θερμικό μέσο

Βασικό μέγεθος για ένα δοχείο, είναι ο όγκος του. Για την παρούσα εργασία θα εφαρμόσουμε τις περιπτώσεις $V_T = (2, 3, 4, 5) \text{ m}^3$. Όσον αφορά τις θερμικές του ιδιότητες, θεωρούμε ως συντελεστή θερμικών απωλειών, που περιλαμβάνει την θερμική αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία των τοιχωμάτων του δοχείου, προς το περιβάλλον $U=0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$, μια τιμή αρκετά συνηθισμένη στην βιβλιογραφία [4.13]. Όσον αφορά, το θερμικό μέσο, επιλέγουμε Syltherm 800, χωρίς προσθήκη νανοσωματίδιων CuO. Μία ακόμα παράμετρος σχεδιασμού, είναι η θερμοκρασία εισόδου του μέσου. Συγκεκριμένα, εφαρμόζουμε τις περιπτώσεις $T_{in} = (300, 350, 400, 450, 500) \text{ K}$. Στο κεφάλαιο 5 (αποτελέσματα), θα βρούμε τις περιπτώσεις όγκου δοχείου (V_T) και θερμοκρασίας εισόδου (T_{in}), που βελτιστοποιούν την θερμική απόδοση.

Εξισώσεις ενέργειας

Ξεκινάμε την ανάλυση με τον ισολογισμό ενέργειας στο δοχείο, δηλαδή η αποθηκευμένη ενέργεια Q_{stored} στο δοχείο, ισούται με την διαφορά της ωφέλιμης θερμότητας Q_u με τις θερμικές απώλειες στο περιβάλλον Q_{loss} .

$$Q_{stored} = Q_u - Q_{loss}, \quad (4.31)$$

Οι θερμικές απώλειες του δοχείου (Q_{loss}) δίνονται από τον παρακάτω τύπο, όπου A_T είναι η κυλινδρική επιφάνεια του δοχείου:

$$Q_{loss} = A_T \cdot U_T \cdot (T_{st} - T_{am}), \quad (4.32)$$

$$A_T = 6 \cdot V_T^{2/3} \quad (4.33)$$

Η αποθηκευμένη θερμότητα (Q_{stored}), εκφράζεται με την βοήθεια των πεπερασμένων διαφορών όπως παρακάτω, όπου με m , c_p , η μάζα και η θερμοχωρητικότητα του εργαζόμενου θερμικού μέσου:

$$Q_{stored} = m \cdot c_p \cdot \frac{dT_{st}}{dt} = \rho \cdot c_p \cdot V_T \cdot \frac{dT_{st}}{dt} = \rho \cdot c_p \cdot V_T \cdot \left(\frac{T_{st}^{i+1} - T_{st}^i}{\Delta t} \right), \quad (4.34)$$

Τέλος, η ωφέλιμη ισχύς Q_u εκφράζεται με την παρακάτω γνωστή σχέση:

$$Q_u = (A_a \cdot G_b) \cdot \eta_{th}, \quad (4.35)$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης αποτελεί μια έκφραση που περιλαμβάνει την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού T_{in} , την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{am} , την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία G_b , και τις συνιστώσες της γωνίας πρόσπτωσης θ_L , θ_T , δηλαδή:

$$\eta_{th} = \eta_{th}(T_{in}, T_{am}, G_b, \theta_L, \theta_T), \quad (4.36)$$

Πολύωνυμα προσέγγισης η_{th} , K

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή αυτής της ενότητας, στο κεφάλαιο 5 με δεδομένο τα αποτελέσματα της προσέγγισης καταλήξαμε σε πολύωνυμα προσέγγισης για τον θερμικό βαθμό απόδοσης και για τον παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης K (K_T , K_L). Αυτά δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

Επιμήκης διεύθυνση (Longitudinal)

$$K_L(\theta_L) = 1 - 0.654 \left(\frac{\theta_L}{100} \right) - 3.54 \left(\frac{\theta_L}{100} \right)^2 + 3.36 \left(\frac{\theta_L}{100} \right)^3, \quad (4.37)$$

Εγκάρσια διεύθυνση (Transversal):

$$K_T(\theta_T) = 1 - 0.724 \left(\frac{\theta_T}{100} \right) + 3.25 \left(\frac{\theta_T}{100} \right)^2 - 4.60 \left(\frac{\theta_T}{100} \right)^3, \quad (4.38)$$

Ολικός παράγοντας γωνίας πρόσπτωσης

$$K(\theta) = K_L(\theta_L) \cdot K_T(\theta_T), \quad (4.39)$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης η_{th}

$$\eta_{th} = 0.6085 \cdot K(\theta_L, \theta_T) - 0.0189 \frac{(T_{in} - T_{am})}{G_b} - 4.4 \cdot 10^{-4} \frac{(T_{in} - T_{am})^2}{G_b} - 2.74 \cdot 10^{-9} \frac{(T_{in} - T_{am})^4}{G_b}, \quad (4.40)$$

Υπολογισμός επιθυμητών μεγεθών

Τα εν λόγω μεγέθη, υπολογίζονται όπως φαίνονται στους παρακάτω τύπους με ολοκληρώματα, όμως επειδή έχουμε διακριτοποιήσει το πρόβλημα μας, αυτά υπολογίζονται με αθροίσματα, όπου Δt το χρονικό βήμα του μοντέλου, που υπολογίζεται από την σχέση 4.20.

Αρχικά, η ημερήσια ενέργεια λόγω ακτινοβολίας που προσπίπτει στα κάτοπτρα (E_s) υπολογίζεται ως εξής (σε kWh):

$$E_s = \int_{N_D} A_a \cdot G_b \cdot 10^{-3} \cdot dt_h, \quad (4.41)$$

Η διαθέσιμη ενέργεια στον απορροφητή (E_{avail}) [kWh], λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις απώλειες που συνδέονται με τον παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης K , δηλαδή θεωρώντας ότι ο οπτικός βαθμός απόδοσης είναι ίσος 100%.

$$E_{avail} = \int_{N_D} A_a \cdot K(\theta) \cdot G_b \cdot 10^{-3} \cdot dt_h, \quad (4.42)$$

Έχοντα υπολογίσει τα 2 παραπάνω μεγέθη, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση τιμή του ημερήσιου παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης (K_{mean}):

$$K_{mean} = \frac{E_{avail}}{E_s}, \quad (4.43)$$

Η αποθηκευμένη θερμότητα (E_{st}) [kWh], του δοχείου στο τέλος της ημέρας δίνεται από τον παρακάτω τύπο, όπου T_N , T_o η θερμοκρασία στο τέλος και στην αρχή της ημέρας αντίστοιχα:

$$E_{st} = \rho \cdot c_p \cdot V_T \cdot (T_N - T_o) / (3600 \cdot 1000), \quad (4.44)$$

Στο κεφάλαιο 3 μιλήσαμε για ένα αρκετά σημαντικό μέγεθος της θερμικής ανάλυσης, την εξέργεια. Αυτή ισούται με το μέγιστο έργο που θα μπορούσαμε να πάρουμε σε ιδανικές συνθήκες. Από την δημοσίευση του Bellos et al. [4.14], παίρνουμε την παρακάτω εξίσωση, που μας δίνει την αποθηκευμένη εξέργεια στο δοχείο (Z_{st}) [kWh], με $T_{ref}=298.15$ K

$$Z_{st} = E_{st} \cdot \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_N} \right), \quad (4.45)$$

Όπως είχαμε αναφέρει στο κομμάτι της εξεργειακής ανάλυσης του προηγούμενου κεφαλαίου, η εξέργεια του ήλιου υπολογίζεται από τον τύπο του Petela [4.15]. Όπου η θερμοκρασία του ήλιου (T_{sun}) θεωρείται ίση με 5770 K.

$$Ex_s = Q_s \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{T_{ref}}{T_{sun}} \right] + \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{T_{ref}}{T_{sun}} \right]^4 \right), \quad (4.46)$$

Έτσι η ημερήσια εξέργεια (Z_s) του ήλιου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (υπολογισμένη σε kWh):

$$Z_s = \int_{N_D} E_{x_s} \cdot 10^{-3} dt_h, \quad (4.47)$$

Συνεπώς, μπορούμε να βρούμε την ημερήσια θερμική και εξεργειακή απόδοση του συλλέκτη με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\eta_{th,day} = \frac{E_{st}}{E_s}, \quad (4.48)$$

$$\eta_{ex,day} = \frac{Z_{st}}{Z_s}, \quad (4.49)$$

Στις επόμενες εικόνες φαίνεται, ο αλγόριθμός επίλυσης του προβλήματος στο περιβάλλον της Matlab, προκειμένου να έχουμε μια εποπτική εικόνα για το μοντέλο.

<pre>Tamm=[12.29,13.35,16.67,21.59,26.74,30.9,32.7,31.77,28.26,23.33,18.02,14.06]; DR=[7.67,8.21,9.17,10.36,11.45,12.17,12.29,11.78,10.77,9.57,8.45,7.77];</pre>	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
<pre>Aa=27; % m^2 A=[1107.4,1091.82,1064.08,1033.22,1008.56,995.55,997.5,1015.14,1044.22,1077.09,1106.1,1116.91]; B=[0.1243,0.1393,0.16,0.1817,0.1985,0.2074,0.2062,0.1951,0.1761,0.1542,0.1339,0.1241]; d=[-20.9,-13,-2.4,9.4,18.8,23.1,21.2,13.5,2.2,-9.6,-18.9,-23]; f=38;%lat</pre>	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ G_b
<pre>Vtank=5; a=280;</pre>	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ (ΟΓΚΟΣ ΔΟΧΕΙΟΥ, ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ)
<pre>for m=1:12 Nd=2/15*acosd(-tand(f)*tand(d(m))); %Duration of day M=1000; %shmeia Dt=Nd*3600/M; %xroniko vhma</pre>	ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Εικόνα 4.88 Προγραμματιστικό μοντέλο (Μέρος Α)

<pre>for m=1:12</pre>	ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΜΗΝΕΣ
<pre>Nd=2/15*acosd(-tand(f)*tand(d(m))); %Duration of day M=1000; %shmeia Dt=Nd*3600/M; %xroniko vhma %doxeio U=0.8;% r=800; Cp=1800; Atank=6*Vtank^(2/3); Tin(1)=a; Ts(1)=Tin(1);</pre>	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΧΕΙΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ
<pre>for i=1:M+1</pre>	ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΑΗΤΕΣ
<pre>t(i)=(i-1)*Dt; %orismos xronou w(i)=15*(t(i)-(Nd/2)*3600)/3600; %xronikh gwnia costhiz(i)=sind(d(m))*sind(f)+cosd(d(m))*cosd(f)*cosd(w(i)); %gwnia prosp th(i)=acosd(costhiz(i)); %qs !!</pre>	

Εικόνα 4.89 Προγραμματιστικό μοντέλο (Μέρος Β)


```

sin_gs(i)=cosd(d(m))*sind(w(i))/sind(th(i));

tan_gs(i)=sind(w(i))/(sind(f)*cosd(w(i))-cosd(f)*tand(d(m))); ΕΥΡΕΣΗ γs
cos_gs(i)=sin_gs(i)/tan_gs(i);
gss(i)=acosd(cos_gs(i));

th_L(i)=atand(tand(th(i)+0.005)*cos_gs(i));
th_T(i)=atand(tand(th(i)+0.005)*sin_gs(i));
KL(i)=abs((1-0.654*(abs(th_L(i)))/100)-3.54*((abs(th_L(i)))/100)^2+3.36*((abs(th_L(i)))/100)^3)
if KL(i)<0
    KL(i)=0;
end
KT(i)=max((1-0.724*(abs(th_T(i)))/100)+3.25*(abs(th_T(i)))/100)^2-4.6*(abs(th_T(i)))/100^3,0);
if KT(i)<0
    KT(i)=0;
end

Gb(i)=A(m)*exp(-B(m)/(coshiz(i)+0.0001)); %amesh
Qsol(i)=Aa*Gb(i);
nth(i)=max((0.6085*KL(i)*KT(i)-0.01887*(Tin(i)-Tam(i))/Gb(i)-4.4*10^-4*(Tin(i)-Tam(i))^2/Gb(i)

```

ΚL, ΚT

ηth

Εικόνα 4.90 Προγραμματιστικό μοντέλο (Μέρος Γ)

%ENERGEIES

```

Qu(i)=nth(i)*Qsol(i);
Qloss(i)=U*Atank*(Tin(i)-Tam(i));
Qst(i)=Qu(i)-Qloss(i);
Eavail(i)=Qsol(i)*KT(i)*KL(i);
Es_hor(i)=cosd(th(i))*Gb(i);

```

**ΟΡΙΣΜΟΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ**

if i<M+1

Tin(i+1)=Ts(i);

Ts(i+1)=Dt*Qst(i)/(r*Cp*Vtank)+Ts(i);

ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ

end

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

```

Eavail_tot(m)=sum(Eavail)/1000*Dt/3600;
Es_tot(m)=(sum(Gb)/1000*Dt/3600)*Aa;
Estor(m)=(r*Cp*Vtank*(Ts(M+1)-Ts(1)))/(1000*3600);
Es_hor_tot(m)=Aa*sum(Es_hor)/1000*Dt/3600;
Tstorage(m)=Ts(M+1);

```

Εικόνα 4.90 Προγραμματιστικό μοντέλο (Μέρος Δ)

Βιβλιογραφία 4^ο Κεφαλαίου

- [4.1] Τσιμπούκης Δημήτριος, Θερμική και υδραυλική ανάλυση παραβολικού ηλιακού συλλέκτη με πτερύγια εντός ροής , Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2017
- [4.2] R. Forristall, Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver. Colorado: National Renewable Energy Laboratory (NREL); 2003
- [4.3] E. Bellos, C. Tzivanidis, D. Tsimpoukis, Thermal enhancement of parabolic trough collector with internally finned absorbers, *Solar Energy* 2017;157:514-531
- [4.4] E. Bellos, C. Tzivanidis, D. Tsimpoukis, Multi-criteria evaluation of parabolic trough collector with internally finned absorbers, *Applied Energy* 2017;205:540-561
- [4.5] K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2011;54(19):4410-4428
- [4.6] W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, *J. Nanoparticle Res.* 5 (2003) 167.
- [4.7] G.K. Batchelor, The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles, *J. Fluid Mech.* 83 (1977) 97-117.
- [4.8] O. Mahian, S. Mahmud, S.Z. Heris, Effect of uncertainties in physical properties on entropy generation between two rotating cylinders with nanofluids, *J. Heat Transfer* 134 (2012) 101704-101711.
- [4.9] O. Mahian, A. Kianifar, A.Z. Sahin, S. Wongwises, Entropy generation during Al₂O₃/water nanofluid flow in a solar collector: effects of tube roughness, nanoparticle size, and different thermophysical models, *Int. J. Heat Mass Transf.* 78 (2014) 64-75.
- [4.10] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime, *Int. J. Heat Mass Transf.* 53 (1-3) (2010) 334-344.
- [4.11] Evangelos Bellos, Christos Tzivanidis, Vassilis Belessiotis Daily performance of parabolic trough solar collectors, *Solar Energy* 2017; 158: 663-678
- [4.12] Κίμων Α. Αντώπουλος Θερμικά-Ηλιακά συστήματα , Αθήνα 2015
- [4.13] E. Bellos, C. Tzivanidis, C. Symeou, K.A. Antonopoulos, Energetic, exergetic and financial evaluation of a solar driven absorption chiller – A dynamic approach, *Energy Conversion and Management* 2017;137:34-48
- [4.14] E. Bellos, C. Tzivanidis, Yearly performance of a hybrid PV operating with nanofluid, *Renewable Energy* 2017;113:867-884
- [4.15] R. Petela, Exergy of undiluted thermal radiation, *Solar Energy* 2003;74(6):469-488

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιάσουμε όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την θερμική ανάλυση του συλλέκτης μας στο Flow Simulation του λογισμικού Solidworks. Τα αποτελέσματα αυτά, τα είχαμε ορίσει με την εντολή Goals του προγράμματος, στο προηγούμενο κεφάλαιο. Καθώς αυτά αποτελούν αποτελέσματα που προκύπτουν από λογισμικό, είναι αναγκαίο να ελέγξουμε την ορθότητα τους, προκειμένου να αξιολογήσουμε την αξιοπιστία του προγράμματος. Έτσι, θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο της αξιολόγησης δεδομένων (Validation). Δηλαδή, θα συγκρίνουμε κάποια μεγέθη που είναι υπολογισμένα από το πρόγραμμα, με τις τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή θεωρητικών σχέσεων. Στην πλειονότητα των επιστημονικών δημοσιεύσεων, επιλέγονται ως μεγέθη αξιολόγησης ο αριθμός Nusselt και ο συντελεστής τριβής της ροής f . Περισσότερα για αυτή την μέθοδο, θα αναφερθούν στην αντίστοιχη ενότητα. Ακόμα, θα αφιερώσουμε μεγάλο κομμάτι αυτού το κεφαλαίου, στον σκοπό την εργασίας, δηλαδή τις συγκρίσεις. Στο σημείο αυτό, για λόγους πληρότητας θα αναφέρουμε όλες τις περιπτώσεις (απορροφητήρα και θερμικού μέσου) που θα ελέγξουμε.

Περιπτώσεις απορροφητήρα:

- Έναν απλό επίπεδο σωλήνα κενού, χωρίς πτερύγια (Smooth tube).
- Έναν σωλήνα κενού με εσωτερικά επιμήκη πτερύγια κατά μήκος τις ροής (Finned Tube).

Περιπτώσεις θερμικών μέσων:

- Καθαρό Θερμικό έλαιο Syltherm800
- Θερμικό έλαιο Syltherm800 με κατ' όγκο περιεκτικότητα νανοϋλικών CuO $\varphi=2\%$, 4% και 6% .
- Τηγμένο άλας (Molten salt)
- Υγρό νάτριο (Liquid sodium)

Επομένως, θα έχουμε 6 διαφορετικά μέσα για 2 απορροφητήρες διαφορετικής γεωμετρίας, άρα θα «τρέξουμε» συνολικά 12 περιπτώσεις. Εμείς θα συγκρίνουμε, όλες αυτές τις περιπτώσεις με την βασική εφαρμογή, δηλαδή απορροφητή χωρίς πτερύγια (Smooth) - καθαρό θερμικό έλαιο Syltherm 800. Κάποια από τα μεγέθη σύγκρισης, είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης η_{th} , ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης η_{ex} , η πτώση πίεσης ΔP και άλλα ακόμα, τα οποία θα αναφέρουμε στην αντίστοιχη ενότητα. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειώσουμε πως για όλες τις περιπτώσεις επιλέγουμε την ίδια παροχή όγκου $V_{in}=200$ L/s, καθώς όπως αποδείξαμε στο κεφάλαιο 4 αυτή αποτελεί την βέλτιστη από άποψη θερμικής απόδοσης. Όσον αφορά, τις θερμοκρασίες λειτουργίας για λόγους που έχουμε αναφέρει το κάθε μέσο απαιτεί διαφορετικές θερμοκρασίες. Αυτές που θα χρησιμοποιήσουμε (όλες σε K), για κάθε μέσο φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Syltherm 800	350	400	450	500	550	600	650
Τηγμένο άλας	550	600	650	700	750	800	850
Υγρό νάτριο	400	500	600	700	800	900	-

Πίνακας 5.1 Θερμοκρασίες δοκιμών προσομοίωσης (T_{in}) [K], για κάθε θερμικό μέσο.

Επιπροσθέτως, θα δώσουμε παραστατικές εικόνες από το λογισμικό που θα αποτυπώνουν την θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος του σωλήνα (μορφή Contour) για κάθε περίπτωση θερμικού, προκειμένου να έχουμε πιο ολοκληρωμένη άποψη για τα αποτελέσματα μας. Τέλος, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα του δυναμικού προβλήματος, δηλαδή της ημερήσιας, μηνιαίας και ετήσιας θερμικής συμπεριφοράς του γραμμικού συλλέκτη Fresnel. Κάποια από αυτά περιλαμβάνουν την ημερήσια μεταβολή των συντελεστών K_L , K_T για τους 12 μήνες του έτους, την διακύμανση του θερμικού βαθμού απόδοσης η_{th} , την ετήσια παραγόμενη ενέργεια E_{annual} για μεταβλητό όγκο δοχείου V_T και μεταβλητή θερμοκρασία εισόδου ρευστού T_{in} , καθώς και αρκετά ακόμη. Περισσότερα, θα αναφέρουμε στην αντίστοιχη ενότητα.

5.1 Αποτελέσματα Simulation σωλήνα χωρίς πτερύγια

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε σε μορφή πινάκων τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την θερμική προσομοίωση στο Solidworks, για την περίπτωση απορροφητήρα χωρίς πτερύγια. Τα μεγέθη που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες, είναι: T_{in} [K] → θερμοκρασία εισόδου ρευστού, T_c [K] → θερμοκρασία γυάλινου καλύμματος, Q_{abs} [W] → θερμότητα που απορροφά ο απορροφητήρας, T_{out} [K] → θερμοκρασία εξόδου ρευστού, Q_{loss} [W] → απώλειες θερμότητας απορροφητήρα, T_r [K] → θερμοκρασία μετάλλου απορροφητή, ΔP [bar] → απώλειες πίεσης ροής, λόγω τριβών.

5.1.1 Syltherm 800 με χρήση νανοϋλικών CuO

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για το θερμικό μέσο Syltherm 800 καθώς και του νανορευστού που προκύπτει από την προσθήκη νανοσωματιδίων CuO περιεκτικότητας κατ' όγκο $\varphi = 2\%$, 4% , 6% , για θερμοκρασίες εισόδου που αναφέρονται στον πίνακα 5.1. Τα υπόλοιπα μέσα που χρησιμοποιήσαμε δηλαδή το τηγμένο άλας (molten salt) και του υγρό νάτριο (liquid sodium), θα παρουσιαστούν στην επόμενη υποενότητα. Αξίζει να αναφέρουμε, πώς το πρόγραμμα μας παρουσίαζε τα αποτελέσματα με αρκετά δεκαδικά σημεία, έτσι κατά την επεξεργασία τους στο Excell κρατήσαμε 2 δεκαδικά ψηφία, έτσι ώστε να είναι ευπαρουσίαστα, χωρίς να αλλοιώνεται σημαντικά η ακρίβεια τους. Παρακάτω βλέπουμε τους σχετικούς πίνακες:

Syltherm 800							
T_{in} [K]	350	400	450	500	550	600	650
T_c [K]	304.23	308.55	315.76	326.41	341.79	362.78	389.90
Q_{abs} [W]	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49
T_{out} [K]	353.23	403.21	453.21	503.22	553.22	603.21	653.17
Q_{loss} [W]	118.22	240.28	446.84	758.79	1223.56	1890.21	2811.18
T_r [K]	381.06	423.74	470.90	518.31	566.44	615.19	664.21
ΔP [Pa]	996.19	827.28	705.49	607.03	525.49	458.02	399.44

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα Flow Simulation για Syltherm 800 με $\varphi=0\%$ και απορροφητήρα χωρίς πτερύγια (Smooth)

Syltherm 800 /CuO $\phi=2\%$							
T_{in} [K]	350	400	450	500	550	600	650
T_c [K]	303.94	308.37	315.43	325.98	341.22	362.09	389.06
Q_{abs} [W]	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49
T_{out} [K]	353.16	403.14	453.14	503.14	553.14	603.12	653.08
Q_{loss} [W]	110.03	235.32	437.38	745.81	1206.06	1866.97	2781.20
T_r [K]	377.40	422.32	469.13	516.66	564.91	613.73	662.82
ΔP [Pa]	1099.26	918.37	788.32	683.96	597.78	526.95	465.62

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα Flow Simulation για Syltherm 800 με $\phi=2\%$ και απορροφητήρα χωρίς πτερύγια (Smooth)

Syltherm 800 /CuO $\phi=4\%$							
T_{in} [K]	350	400	450	500	550	600	650
T_c [K]	303.72	308.19	315.16	325.63	340.78	361.55	388.40
Q_{abs} [W]	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49
T_{out} [K]	353.09	403.07	453.06	503.06	553.06	603.04	653.00
Q_{loss} [W]	103.80	230.18	429.54	735.42	1192.29	1849.11	2757.66
T_r [K]	374.49	420.84	467.63	515.32	563.70	612.61	661.73
ΔP [Pa]	1203.52	1010.12	871.67	761.13	670.16	595.73	531.37

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα Flow Simulation για Syltherm 800 με $\phi=4\%$ και απορροφητήρα χωρίς πτερύγια (Smooth)

Syltherm 800 /CuO $\phi=6\%$							
T_{in} [K]	350	400	450	500	550	600	650
T_c [K]	303.55	308.03	314.94	325.35	340.42	361.11	387.88
Q_{abs} [W]	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49
T_{out} [K]	353.02	403.00	453.00	502.99	552.98	602.96	652.91
Q_{loss} [W]	98.94	225.53	423.04	726.89	1181.14	1834.58	2738.76
T_r [K]	372.15	419.46	466.38	514.22	562.70	611.68	660.85
ΔP [Pa]	1308.77	1102.60	955.70	838.61	742.54	664.40	596.93

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα Flow Simulation για Syltherm 800 με $\phi=6\%$ και απορροφητήρα χωρίς πτερύγια (Smooth)

5.1.2 Τηγμένο άλας και υγρό νάτριο

Στην υποενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα του προγράμματος για την περίπτωση θερμικών μέσων τηγμένο άλας και υγρό νάτριοστον απορροφητήρα χωρίς πτερύγια. Αξίζει να αναφέρουμε, πώς στην περίπτωση του υγρού νατρίου, πραγματοποιήσαμε θερμοκρασίες έως 900 K, καθώς με δοκιμές στο Flow Simulation για υψηλότερες θερμοκρασίες, διαπιστώσαμε πώς ο συλλέκτης υπολειπεται, καθώς μηδενίζεται ο βαθμός απόδοσης του. Συγκεκριμένα, υπολογίσαμε πως η θερμοκρασία κατά την οποία μηδενίζεται ακριβώς ο θερμικός βαθμός απόδοσης ($\eta_{th}=0$), είναι η $T=948$ K. Αυτό συμβαίνει διότι οι απώλειες προς το περιβάλλον είναι μεγαλύτερες από την προσδιδόμενη θερμότητα, λόγω ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή ονομάζεται στην βιβλιογραφία, θερμοκρασία στασιμότητας (Stagnation Temperature point) και εξαρτάται από τις συνθήκες του προβλήματος. Επομένως δεν είναι σταθερή, καθώς μεταβάλλεται συναρτήσει του θερμικού μέσου, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, την

ταχύτητα ανέμου στο ύψος του σωλήνα, της γωνίας θ του ήλιου, καθώς και από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στους παρακάτω πίνακες βλέπουμε τα σχετικά αποτελέσματα, που προέκυψαν από το πρόγραμμα για τα εν λόγω θερμικά μέσα:

Τηγμένο άλας							
T_{in} [K]	550	600	650	700	750	800	850
T_c [K]	338.39	358.36	384.35	416.32	454.09	496.44	541.81
Q_{abs} [W]	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49
T_{out} [K]	551.61	601.56	651.48	701.37	751.21	801.00	850.73
Q_{loss} [W]	1117.65	1743.54	2612.78	3777.80	5317.14	7291.89	9755.92
T_r [K]	556.91	605.77	654.85	704.12	753.45	802.75	851.91
ΔP [Pa]	1760.79	1608.76	1485.52	1396.88	1335.64	1290.49	1237.78

Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα Flow Simulation για Τηγμένο άλας και απορροφητήρα χωρίς πτερύγια (Smooth)

Υγρό νάτριο						
T_{in} [K]	400	500	600	700	800	900
T_c [K]	306.20	322.53	356.92	415.12	495.55	588.84
Q_{abs} [W]	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49
T_{out} [K]	403.89	503.97	603.89	703.50	802.60	901.01
Q_{loss} [W]	172.95	642.02	1695.96	3729.62	7247.20	12775.28
T_r [K]	402.58	502.64	602.59	702.34	801.75	900.68
ΔP [Pa]	666.93	608.17	565.65	532.91	505.99	482.60

Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα Flow Simulation για Υγρό νάτριο απορροφητήρα χωρίς πτερύγια (Smooth)

5.2 Αποτελέσματα Simulation σωλήνα με πτερύγια

Αρκετές φορές, έχουμε αναφέρει την σημαντικότητα της προσθήκης πτερυγίων στην εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του σωλήνα ροή ως τρόπο αύξησης του θερμικού βαθμού απόδοσης. Αυτό, συμβαίνει λόγω της αύξησης της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας και της αύξησης του επιπέδου τύρβης στην ροή. Ένας ακόμα λόγος που βελτιώνει την απόδοση, είναι ότι φέρνει το ζεστό μεταλλικό πτερύγιο στον πυρήνα της ροής, συνεπώς έχουμε βέλτιστη μετάδοση θερμότητας. Παρόλα αυτά, όπως θα δούμε και στα αποτελέσματα, τα πτερύγια προκαλούν μεγάλες υδραυλικές πτώσεις πίεσης. Όπως αναφέραμε στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου, για την περίπτωση του σωλήνα με πτερύγια θα εφαρμόσουμε ξανά όλα τα θερμικά μέσα (Syltherm 800, τηγμένο άλας, υγρό νάτριο), που εφαρμόσαμε και στην απλή περίπτωση (Smooth absorber).

5.2.1 Syltherm 800 με χρήση νανοϋλικών CuO

Σε αυτή την υποενότητα, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από το λογισμικό για την περίπτωση της χρήσης Syltherm 800 με χρήση νανοϋλικών CuO με κατ' όγκο περιεκτικότητες $\varphi=2\%$, 4% , 6% . Στους παρακάτω πίνακες, [5.8 έως 5.11] φαίνονται τα εν λόγω αποτελέσματα.

Syltherm 800							
T _{in} [K]	350	400	450	500	550	600	650
T _c [K]	304.65	308.18	314.87	324.72	339.54	359.96	386.49
Q _{abs} [W]	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49
T _{out} [K]	353.23	403.21	453.21	503.22	553.23	603.23	653.19
Q _{loss} [W]	130.16	229.69	421.54	708.78	1155.31	1800.68	2698.77
T _r [K]	386.12	420.68	466.08	511.82	560.36	609.49	658.92
ΔP [Pa]	1674.72	1266.80	1214.27	1257.36	1127.01	1000.91	874.58

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα Flow Simulation για Syltherm 800 με φ=0% και απορροφητήρα με πτερύγια (Finned)

Syltherm 800 /CuO φ=2%							
T _{in} [K]	350	400	450	500	550	600	650
T _c [K]	304.22	307.98	314.54	324.40	339.21	359.57	386.02
Q _{abs} [W]	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49	16491.49
T _{out} [K]	353.16	403.14	453.14	503.14	553.15	603.14	653.10
Q _{loss} [W]	118.08	224.29	411.75	699.10	1145.02	1787.75	2682.28
T _r [K]	380.99	419.08	464.16	510.53	559.42	608.65	658.13
ΔP [Pa]	1824.94	1410.17	1410.53	1457.42	1293.36	1155.09	1021.97

Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα Flow Simulation για Syltherm 800 με φ=2% και απορροφητήρα με πτερύγια (Finned)

Syltherm 800 /CuO φ=4%							
T _{in} [K]	350	400	450	500	550	600	650
T _c [K]	303.91	307.82	314.11	324.04	338.74	359.03	385.37
Q _{abs} [W]	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40
T _{out} [K]	353.09	403.07	453.00	502.99	552.99	602.97	652.92
Q _{loss} [W]	109.14	219.67	399.09	688.23	1130.21	1769.85	2658.36
T _r [K]	376.98	417.71	461.64	509.06	558.07	607.49	657.00
ΔP [Pa]	1983.20	1544.27	1787.45	1794.28	1624.30	1459.51	1314.56

Πίνακας 5.10 Αποτελέσματα Flow Simulation για Syltherm 800 με φ=4% και απορροφητήρα με πτερύγια (Finned)

Syltherm 800 /CuO φ=6%							
T _{in} [K]	350	400	450	500	550	600	650
T _c [K]	303.65	307.68	314.11	324.04	338.74	359.03	385.37
Q _{abs} [W]	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40
T _{out} [K]	353.02	403.01	453.00	502.99	552.99	602.97	652.92
Q _{loss} [W]	102.03	215.68	399.09	688.23	1130.21	1769.85	2658.36
T _r [K]	373.64	416.50	461.64	509.06	558.07	607.49	657.00
ΔP [Pa]	2156.22	1682.90	1787.45	1794.29	1624.33	1459.50	1314.59

Πίνακας 5.11 Αποτελέσματα Flow Simulation για Syltherm 800 με φ=6% και απορροφητήρα με πτερύγια (Finned)

Ήδη βλέποντας κάποιος τα αποτελέσματα, με την πρώτη ματιά διαπιστώνει την αύξηση των υδραυλικών απωλειών ΔP και την αύξηση του Tout, σε σχέση με την

απλή περίπτωση απορροφητήρα χωρίς πτερύγια. Παρόλα αυτά, ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων θα πραγματοποιηθεί στην ενότητα 4.4.

5.2.2 Τηγμένο άλας και υγρό νάτριο

Ομοίως με προηγουμένως, εδώ παρουσιάζουμε τους πίνακες με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις περιπτώσεις θερμικού μέσου, τηγμένο άλας και υγρό νάτριο, αντίστοιχα.

Τηγμένο άλας						
T_{in} [K]	600	650	700	750	800	850
T_c [K]	357.67	383.36	415.11	452.59	494.67	539.74
Q_{abs} [W]	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40
T_{out} [K]	601.55	651.47	701.36	751.20	800.99	850.70
Q_{loss} [W]	1724.17	2584.96	3748.21	5287.79	7270.66	9748.83
T_r [K]	604.47	653.46	702.94	752.48	801.97	851.35
ΔP [Pa]	2934.35	3117.04	2991.88	2871.79	2795.39	2707.48

Πίνακας 5.12 Αποτελέσματα Flow Simulation για Τηγμένο άλας και απορροφητήρα με πτερύγια (Finned)

Υγρό νάτριο						
T_{in} [K]	400	500	600	700	800	900
T_c [K]	306.20	322.52	356.84	414.70	494.36	586.53
Q_{abs} [W]	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40	16491.40
T_{out} [K]	403.89	503.97	603.89	703.49	802.58	900.94
Q_{loss} [W]	172.99	641.92	1695.84	3731.04	7258.11	12821.33
T_r [K]	402.57	502.63	602.57	702.31	801.70	900.63
ΔP [Pa]	1455.44	1336.42	1245.89	1175.78	1118.22	1067.82

Πίνακας 5.13 Αποτελέσματα Flow Simulation για Υγρό νάτριο και απορροφητήρα με πτερύγια (Finned)

5.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης (Data Validation)

Στην ενότητα αυτή, θα αναφερθούμε στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που μας έδωσε το πρόγραμμα. Αυτό είναι αναγκαίο προκειμένου τα τελικά συμπεράσματα που θα εξάγουμε να έχουν μια λογική υπόσταση και να περιγράφουν με ακρίβεια την πραγματική κατάσταση. Συνεπώς, οποιοδήποτε λογισμικό και να χρησιμοποιούμε, πάντα είναι αναγκαίο να αξιολογούμε την αξιοπιστία των υπολογισμών του. Για να εφαρμόσουμε αυτή την αξιολόγηση, θα καταφύγουμε σε συγκρίσεις κάποιων θερμικών μεγεθών που θα εξάγει το πρόγραμμα, όπως ο αριθμός Nusselt και ο συντελεστής τριβής της ροής f , με τις θεωρητικές τους τιμές. Ο λόγος που επιλέγουμε τα δύο αυτά μεγέθη, είναι λόγω της αποκλειστικής τους χρήση στην βιβλιογραφία. Εκτός αυτού, είναι 2 μεγέθη, τα οποία είναι καθοριστικά για την ροή μας. Συγκεκριμένα, ο αριθμός Nusselt εκφράζει τον λόγο του συντελεστή συναγωγής προς τον συντελεστή αγωγής της ροής, ενώ ο f μας δείχνει το μέγεθος των υδραυλικών απωλειών της ροής. Επίσης, ένας λόγος που χρησιμοποιούμε αυτά τα μεγέθη, είναι το γεγονός πως έχουμε πληθώρα θεωρητικών εξισώσεων υπολογισμού τους στην βιβλιογραφία. Επομένως, εμείς θα συγκρίνουμε τις θεωρητικές τιμές αυτές,

με τα αποτελέσματα του προγράμματος. Προφανώς, επιθυμούμε να συγκλίνουν όσο το δυνατόν περισσότερο. Βασική σημείωση, είναι ότι θα πραγματοποιήσουμε αξιολόγηση αποτελεσμάτων μόνο στην απλή περίπτωση απορροφητή (Smooth). Όσον αφορά τις εξισώσεις που χρησιμοποιούμε, για τον αριθμό Nusselt υπάρχουν 3 τύποι. Συγκεκριμένα, όταν έχουμε καθαρό θερμικό έλαιο Syltherm 800 και τηγμένο άλας χρησιμοποιούμε την εξίσωση (5.6), από την βιβλιογραφία [5.3]. Όταν έχουμε προσθήκη νανοϋλικών στο Syltherm 800, χρησιμοποιούμε την σχέση (5.7), των Pak και Cho [5.4]. Τέλος, για την περίπτωση υγρού νατρίου, εφαρμόζουμε την σχέση (5.8) [5.1]. Βασική προϋπόθεση για τον υπολογισμό των παραπάνω σχέσεων, είναι η εύρεση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας h , του αριθμού Reynolds και Prandtl και της θεωρητικής τιμής του συντελεστή τριβής f_{th} . Για τις σχέσεις των μεγεθών h , Re , Pr χρησιμοποιήσαμε την πηγή [5.2], ενώ για τον υπολογισμό του f_{th} την πηγή [5.5], από την βιβλιογραφία.

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας [5.2]:

$$h = \frac{Q_u}{(\pi \cdot D_{ri} \cdot L) \cdot (T_r - T_{fm})}, \quad (5.1)$$

Όπου Q_u η ωφέλιμη θερμότητα στον απορροφητή, D_{ri} η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα και (T_{fm}) είναι η μέση θερμοκρασία του ρευστού που δίνεται από τη σχέση :

$$T_{fm} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}, \quad (5.2)$$

Για τυρβώδη ροή, δηλαδή με $Re > 2300$ η σχέση απαιτεί τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds (Re) του Prandtl (Pr) και του θεωρητικού συντελεστή τριβής f_{th} [5.5] οι οποίοι δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις, όπου μ [Pa s] είναι η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού:

$$Re = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot D_{ri} \cdot \mu}, \quad (5.3)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k}, \quad (5.4)$$

$$f_{th} = \frac{0.184}{Re^{0.2}}, \quad (5.5)$$

Για τις περιπτώσεις, Θερμικού ελαίου Syltherm 800 και τηγμένο άλας [5.3]:

$$Nu_{th} = \frac{\left(\frac{f_{th}}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12.8 \cdot \sqrt{\frac{f_{th}}{8}} \cdot (Pr^{0.68} - 1)}, \quad (5.6)$$

Για τις περιπτώσεις, Θερμικού ελαίου Syltherm 800 με προσθήκη νανοϋλικών CuO [5.4]:

$$Nu_{th} = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.5}, \quad (5.7)$$

Για την περίπτωση, υγρού νατρίου, ισχύει η σχέση παρακάτω σχέση [5.1] :

$$Nu_{th} = 7 + 0.025 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.8} \quad (5.8)$$

Αφού ορίσαμε τις θεωρητικές τιμές, του αριθμού Nusselt (Nu_{th}) και του συντελεστή τριβής (f_{th}), τώρα θα τις συγκρίνουμε με τις τιμές των μεγεθών, που προκύπτουν από το πρόγραμμα με την βοήθεια των παρακάτω σχέσεων:

Ο ορισμός του αριθμού Nu δίνεται από τον παρακάτω τύπο, όπου k [W/mK] είναι η αγωγιμότητα του ρευστού :

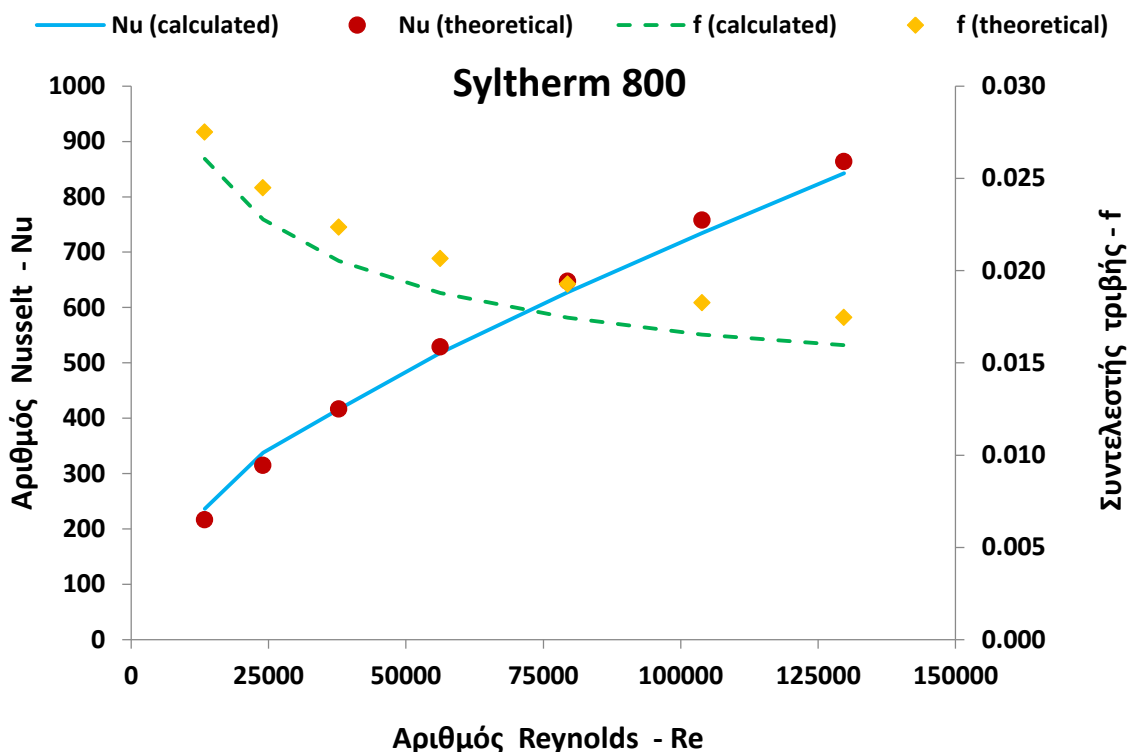
$$Nu = \frac{h \cdot D_{ri}}{k}, \quad (5.9)$$

Ο συντελεστής τριβής που θα προκύψει από τα αποτελέσματα που θα δώσει το Solidworks_υπολογίζεται από τον τύπο της πτώσης πίεσης στον σωλήνα, όπου ΔP πτώση πίεσης, ρ και u η πυκνότητα και η ταχύτητα του ρευστού αντίστοιχα και L το μήκος του σωλήνα:

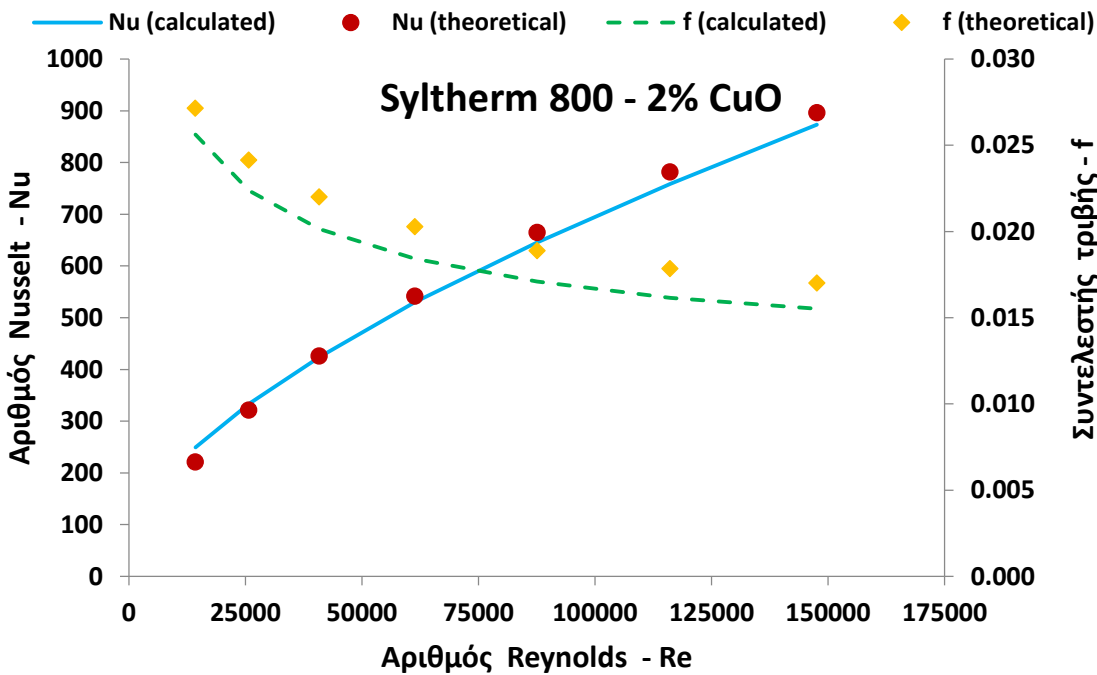
$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2} \cdot \left(\frac{D_{ri}}{L} \right), \quad (5.10)$$

Συνεπώς, έχοντας υπολογίσει και τις θεωρητικές τιμές των μεγεθών αλλά και αυτές που προκύπτουν από το Flow Simulation, μπορούμε να τις συγκρίνουμε. Για καλύτερο εποπτικό αποτέλεσμα, επιλέγουμε να τα αποτυπώσουμε αυτές τις συγκρίσεις με αντίστοιχα διαγράμματα. Σημαντική διευκρίνιση, αποτελεί το γεγονός ότι έχουμε επιλέξει τον αριθμό Reynolds της ροής, ως μεταβλητή στον οριζόντιο άξονα. Αυτό το κάνουμε, διότι όπως γνωρίζουμε ο αριθμός αυτός εκφράζει τον λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας που ασκούνται στο ρευστό. Επίσης μας πληροφορεί, για το αν μία ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης ($Re > 2300$). Συνεπώς, είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει τη ροή. Επίσης, βρίσκεται μέσα σε όλες τις εξισώσεις θεωρητικών μεγεθών του προβλήματος. Τέλος, ένας ακόμα λόγος που χαράσσουμε τις καμπύλες σύγκρισης των παραπάνω μεγεθών, έχοντας ως τετμημένη μεταβλητή τον αριθμό Reynolds, είναι το γεγονός πως πληθώρα επιστημονικών δημοσιεύσεων πράττει ακριβώς αυτό.

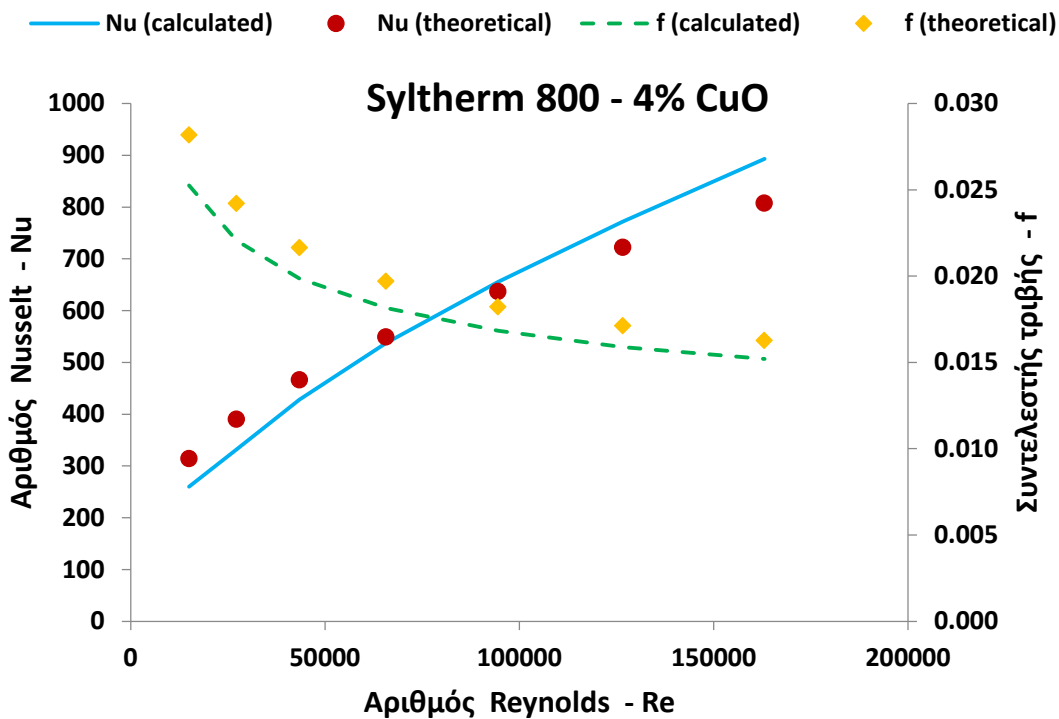
Παρακάτω βλέπουμε τα συγκριτικά διαγράμματα για όλες τις περιπτώσεις μέσων και για τις αντίστοιχες εξεταζόμενες θερμοκρασίες, με σταθερή παροχή όγκου $V=200$ L/s για απορροφητή χωρίς πτερύγια.



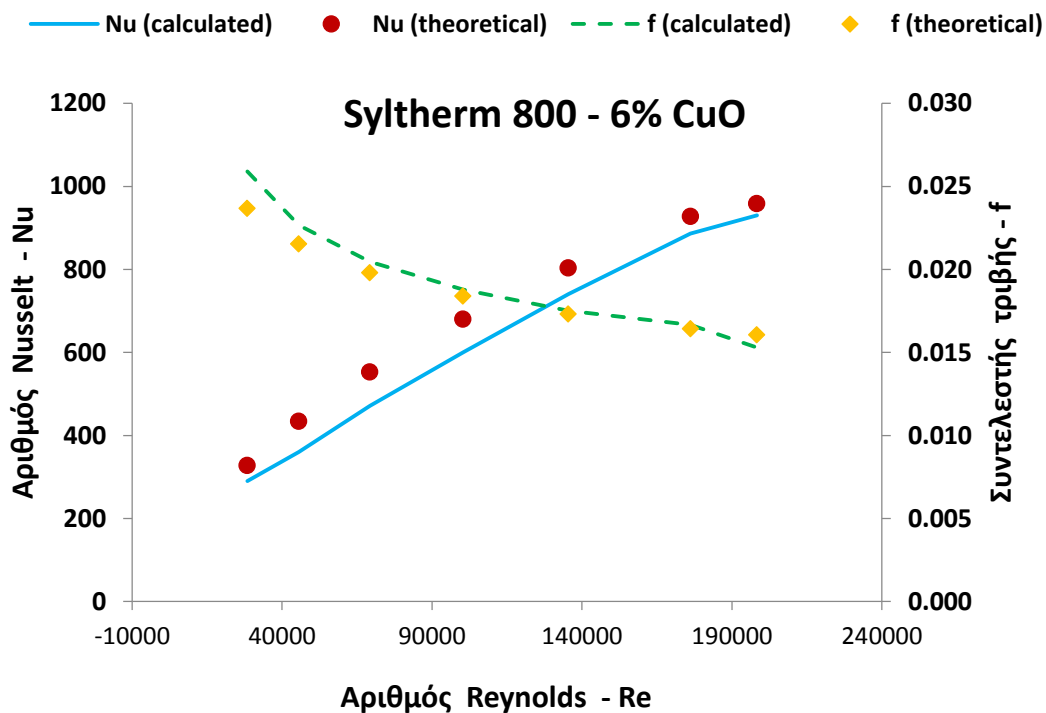
Εικόνα 5.1 Συγκριτικό διάγραμμα αξιολόγησης αποτελεσμάτων για το θερμικό μέσο Syltherm 800



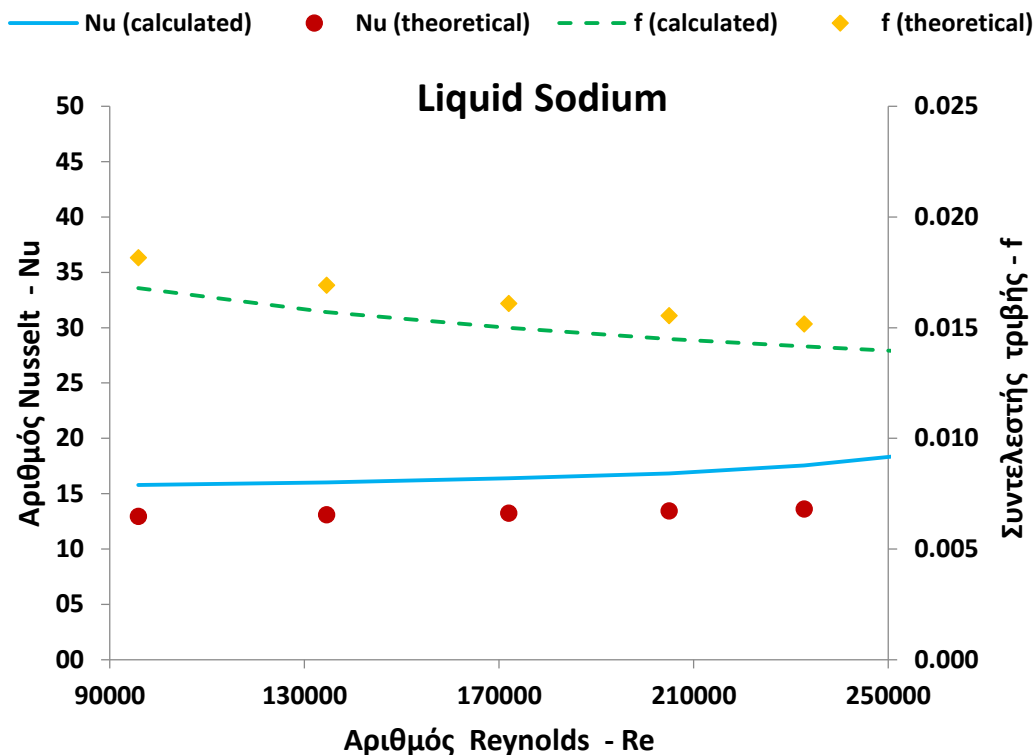
Εικόνα 5.2 Συγκριτικό διάγραμμα αξιολόγησης αποτελεσμάτων για το θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\phi=2\%$)



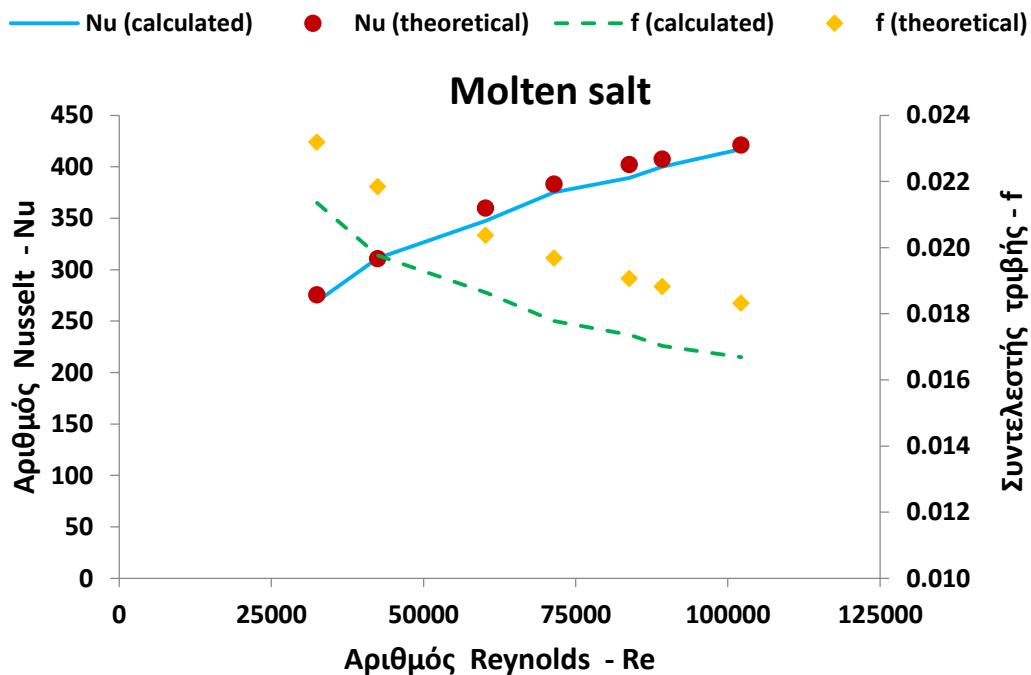
Εικόνα 5.3 Συγκριτικό διάγραμμα αξιολόγησης αποτελεσμάτων για το θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\phi=4\%$)



Εικόνα 5.4 Συγκριτικό διάγραμμα αξιολόγησης αποτελεσμάτων για το θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\phi=6\%$)



Εικόνα 5.5 Συγκριτικό διάγραμμα αξιολόγησης αποτελεσμάτων για το θερμικό μέσο Liquid Sodium



Εικόνα 5.6 Συγκριτικό διάγραμμα αξιολόγησης αποτελεσμάτων για το θερμικό μέσο Molten Salt

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, σε γενικές γραμμές, το πρόγραμμα μας δίνει αξιόπιστες τιμές. Οι αποκλίσεις, μπορεί να οφείλονται σε μια πληθώρα από λόγους που σχετίζονται είτε με το πρόγραμμα, είτε με τις ίδιες τις σχέσεις. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το πρόγραμμα, οι λόγοι μπορεί να οφείλονται στο πλέγμα και γενικά σε θέματα σύγκλισης. Επίσης, οι σχέσεις που χρησιμοποιήσαμε, αποτελούν στην πλειονότητα τους προσεγγίσεις, καθώς είναι αδύνατο να υπολογιστούν τα μεγέθη αυτά με ακριβείς σχέσεις, συνεπώς μεταφέρουν πιθανότατα ένα σφάλμα.

5.4 Επεξεργασία και σύγκριση αποτελεσμάτων

Στην συγκεκριμένη ενότητα, με χρήση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, θα υπολογίσουμε κάποια χρήσιμα θερμικά μεγέθη για κάθε περίπτωση θερμικού μέσου και για τις δύο γεωμετρίες σωλήνων του απορροφητήρα (με πτερύγια και χωρίς), συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} του θερμικού μέσου, στον απορροφητήρα. Στην συνέχεια, θα επεξεργαστούμε περαιτέρω αυτά τα δεδομένα, έτσι ώστε να κάνουμε συγκρίσεις, όσον αφορά την θερμική βελτίωση που πετυχαίνουμε με κάθε εφαρμογή, πάντα σε σύγκριση με τον απορροφητήρα χωρίς πτερύγια με θερμικό μέσο Syltherm 800, χωρίς προσθήκη νανοσωματιδίων. Τέλος, θα παραθέσουμε τα αντίστοιχα συγκριτικά διαγράμματα με ενδελεχή σχολιασμό επ' αυτών.

5.4.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Στην παρούσα φάση, θα υπολογίσουμε τον θερμικό βαθμό απόδοσης η_{th} , τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας h , τον αριθμό Nusselt, τον συντελεστή τριβής f και τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης η_{ex} . Για τον υπολογισμό, του αριθμού Nusselt θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο (5.9), ενώ για τον συντελεστή τριβής της ροής f τον τύπο (5.10). Όσον αφορά τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης η_{ex} και τον θερμικό βαθμό απόδοσης η_{th} , χρησιμοποιούμε τους (3.22) και (3.12) αντίστοιχα. Παρακάτω φαίνονται οι σχετικοί πίνακες, που απεικονίζουν τα εν λόγω μεγέθη για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες εισόδου, καθώς και τις μέσες τιμές τους.

Απορροφητήρας χωρίς πτερύγια (Smooth)

Αρχικά, οι πίνακες από 5.14 έως 5.19 αφορούν τα αποτελέσματα για απορροφητήρα χωρίς επιμήκη πτερύγια στο εσωτερικό του.

Syltherm 800								
T_{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
η_{th}	60.64%	60.19%	59.42%	58.27%	56.55%	54.08%	50.67%	57.12%
Q_{loss} (W)	118.22	240.28	446.84	758.79	1223.56	1890.21	2811.18	1069.87
Nu	236.77	337.83	416.46	518.10	627.49	734.34	842.35	530.48
h (W/m ² K)	446.99	590.17	668.22	757.14	827.62	864.18	871.19	717.93
f	0.0261	0.0228	0.0205	0.0188	0.0174	0.0165	0.0160	0.0197
T_r (K)	381.06	423.74	470.90	518.31	566.44	615.19	664.21	519.98
T_{out} (K)	353.23	403.21	453.21	503.22	553.22	603.21	653.17	503.21
η_{ex}	10.28%	17.04%	21.91%	25.40%	27.77%	29.20%	29.70%	23.04%

Πίνακας 5.14 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια

Syltherm 800 /CuO φ=2%								
T _{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	AVERAGE
n _{th}	60.67%	60.21%	59.46%	58.32%	56.61%	54.16%	50.78%	57.17%
Q _{loss} (W)	110.03	235.32	437.38	745.81	1206.06	1866.98	2781.20	1054.68
Nu	249.68	333.29	423.62	530.58	645.40	758.79	873.02	544.91
h (W/m ² K)	509.95	629.72	734.92	838.48	920.78	965.96	976.72	796.65
f	0.0256	0.0224	0.0201	0.0184	0.0171	0.0162	0.0155	0.0193
T _r (K)	377.40	422.32	469.13	516.66	564.91	613.73	662.82	518.14
T _{out} (K)	353.16	403.14	453.14	503.14	553.14	603.12	653.08	503.13
η _{ex}	10.21%	16.96%	21.87%	25.42%	27.84%	29.27%	29.74%	23.04%

Πίνακας 5.15 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 (φ=2%) σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια

Syltherm 800 /CuO φ=4%								
T _{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n _{th}	60.70%	60.23%	59.49%	58.36%	56.66%	54.23%	50.87%	57.22%
Q _{loss} (W)	103.80	230.18	429.54	735.42	1192.29	1849.11	2757.66	1042.57
Nu	260.20	332.05	427.95	537.75	655.89	771.96	893.04	554.12
h (W/m ² K)	574.01	677.18	802.08	918.24	1010.66	1061.21	1078.96	874.62
f	0.0253	0.0221	0.0199	0.0182	0.0168	0.0159	0.0152	0.0190
T _r (K)	374.49	420.84	467.63	515.32	563.70	612.61	661.73	516.62
T _{out} (K)	353.09	403.07	453.06	503.06	553.06	603.04	653.00	503.06
η _{ex}	10.13%	16.91%	21.86%	25.43%	27.89%	29.34%	29.77%	23.05%

Πίνακας 5.16 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 (φ=4%) σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια

Syltherm 800 /CuO φ=6%								
T _{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n _{th}	60.71%	60.24%	59.51%	58.39%	56.70%	54.28%	50.94%	57.25%
Q _{loss} (W)	98.94	225.53	423.04	726.89	1181.14	1834.58	2738.76	1032.70
Nu	290.43	360.51	471.47	599.75	740.54	886.30	460.30	544.19
h (W/m ² K)	638.50	728.12	867.94	995.96	1097.68	1154.61	1177.26	951.44
f	0.0259	0.0227	0.0205	0.0188	0.0175	0.0167	0.0110	0.0190
T _r (K)	372.15	419.46	466.38	514.22	562.70	611.68	660.85	515.35
T _{out} (K)	353.02	403.00	453.00	502.99	552.98	602.96	652.91	502.98
η _{ex}	10.19%	17.24%	22.46%	26.35%	29.12%	30.90%	26.13%	23.20%

Πίνακας 5.17 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 (φ=6%) σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια

Τηγμένο άλας								
T _{in} (K)	550	600	650	700	750	800	850	Μέση τιμή
n _{th}	56.94%	54.62%	51.40%	47.09%	41.39%	34.07%	24.95%	44.35%
Q _{loss} (W)	1117.65	1743.54	2612.78	3777.80	5317.14	7291.89	9755.92	4516.67
Nu	269.06	311.02	347.48	375.26	389.09	399.97	417.24	358.44
h (W/m ² K)	2022.42	2374.11	2714.53	2975.95	3154.56	3290.08	3506.06	2862.53
f	0.0214	0.0198	0.0186	0.0178	0.0174	0.0170	0.0167	0.0184
T _r (K)	556.91	605.77	654.85	704.12	753.45	802.75	851.91	704.25
T _{out} (K)	551.61	601.56	651.48	701.37	751.21	801.00	850.73	701.28
η _{ex}	28.14%	29.58%	30.05%	29.18%	27.02%	23.22%	17.75%	26.42%

Πίνακας 5.18 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Τηγμένο άλας σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια

Υγρό νάτριο							
T _{in} (K)	400	500	600	700	800	900	Μέση τιμή
n _{th}	60.44%	58.70%	54.80%	47.27%	34.24%	13.76%	44.87%
Q _{loss} (W)	172.95	642.02	1695.96	3729.62	7247.20	12775.28	4377.17
Nu	15.77	16.01	16.38	16.83	17.54	18.59	16.85
h (W/m ² K)	20757.37	19475.57	18339.51	17380.86	16759.68	16466.13	18196.52
f	0.0168	0.0157	0.0150	0.0145	0.0142	0.0139	0.0150
T _r (K)	402.58	502.64	602.59	702.34	801.75	900.68	652.10
T _{out} (K)	403.89	503.97	603.89	703.50	802.61	901.01	653.14
η _{ex}	16.65%	25.56%	29.74%	29.31%	23.34%	10.32%	22.49%

Πίνακας 5.19 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Υγρό νάτριο σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια

Απορροφητήρας με πτερύγια (Finned)

Ομοίως με προηγουμένως, οι παρακάτω πίνακες (5.20 έως 5.25) αφορούν τα εν λόγω μεγέθη για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες εισόδου μέσου, σε απορροφητήρα με εσωτερικά επιμήκη πτερύγια.

Syltherm 800								
T _{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n _{th}	60.60%	60.23%	59.52%	58.45%	56.80%	54.41%	51.08%	57.30%
Q _{loss} (W)	130.16	229.69	421.54	708.78	1155.32	1800.68	2698.77	1020.70
Nu	201.88	392.20	556.23	850.20	1068.79	1274.92	1463.71	829.71
h (W/m ² K)	381.13	685.16	892.49	1242.45	1409.68	1500.35	1513.83	1089.30
f	0.0438	0.0349	0.0353	0.0389	0.0374	0.0361	0.0349	0.0373
T _r (K)	386.12	420.68	466.08	511.82	560.36	609.49	658.92	516.21
T _{out} (K)	353.23	403.21	453.21	503.22	553.23	603.23	653.19	503.22
η _{ex}	10.24%	17.09%	21.97%	25.52%	27.93%	29.42%	30.00%	23.17%

Πίνακας 5.20 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 σε απορροφητήρα με πτερύγια

Syltherm 800 /CuO $\phi=2\%$								
T_{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
η_{th}	60.64%	60.25%	59.55%	58.49%	56.84%	54.46%	51.14%	57.34%
Q_{loss} (W)	118.08	224.29	411.75	699.10	1145.02	1787.75	2682.28	1009.75
Nu	219.09	395.24	591.51	896.70	1101.38	1310.07	1506.99	860.14
h (W/m ² K)	447.48	746.76	1026.19	1417.06	1571.31	1667.76	1686.00	1223.22
f	0.0425	0.0343	0.0360	0.0393	0.0370	0.0354	0.0341	0.0369
T_r (K)	380.99	419.08	464.16	510.53	559.42	608.65	658.13	514.43
T_{out} (K)	353.16	403.14	453.14	503.14	553.15	603.14	653.10	503.14
η_{ex}	10.16%	16.99%	21.93%	25.52%	27.99%	29.48%	30.01%	23.15%

Πίνακας 5.21 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\phi=2\%$) σε απορροφητήρα με πτερύγια

Syltherm 800 /CuO $\phi=4\%$								
T_{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
η_{th}	60.68%	60.27%	59.60%	58.53%	56.89%	54.52%	51.23%	57.39%
Q_{loss} (W)	109.14	219.67	399.09	688.23	1130.21	1769.85	2658.36	996.37
Nu	234.66	396.63	680.60	983.04	1219.02	1434.15	1661.81	944.28
h (W/m ² K)	517.68	808.89	1275.62	1678.62	1878.40	1971.53	2007.77	1448.36
f	0.0416	0.0337	0.0407	0.0428	0.0408	0.0389	0.0376	0.0395
T_r (K)	376.98	417.71	461.64	509.06	558.07	607.49	657.00	512.56
T_{out} (K)	353.09	403.07	453.00	502.99	552.99	602.97	652.92	503.00
η_{ex}	10.09%	16.94%	22.90%	26.44%	28.89%	30.33%	30.76%	23.77%

Πίνακας 5.22 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\phi=4\%$) σε απορροφητήρα με πτερύγια

Syltherm 800 /CuO $\phi=6\%$								
T_{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
η_{th}	60.70%	60.28%	59.60%	58.53%	56.89%	54.52%	51.23%	57.39%
Q_{loss} (W)	102.03	215.68	399.09	688.23	1130.21	1769.85	2658.36	994.78
Nu	250.38	396.88	631.59	911.84	1131.16	1330.07	1541.21	884.73
h (W/m ² K)	595.23	872.54	1275.61	1678.62	1878.41	1971.53	2007.77	1468.53
f	0.0412	0.0333	0.0367	0.0384	0.0364	0.0344	0.0330	0.0362
T_r (K)	373.65	416.50	461.64	509.06	558.07	607.49	657.00	511.91
T_{out} (K)	353.02	403.01	453.00	502.99	552.99	602.97	652.92	502.99
η_{ex}	10.09%	16.87%	21.91%	25.55%	28.07%	29.56%	30.03%	23.15%

Πίνακας 5.23 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\phi=6\%$) σε απορροφητήρα με πτερύγια

Τηγμένο άλας								
T _{in} (K)	550	600	650	700	750	800	850	Μέση τιμή
n _{th}	56.98%	54.69%	51.51%	47.20%	41.49%	34.15%	24.97%	44.43%
Q _{loss} (W)	1106.94	1724.17	2584.96	3748.21	5287.79	7270.66	9748.83	4495.94
Nu	322.50	420.62	524.94	571.51	590.38	611.23	646.09	526.75
h (W/m ² K)	2424.14	3210.76	4100.91	4532.27	4786.53	5027.84	5429.13	4215.94
f	0.0330	0.0361	0.0391	0.0381	0.0373	0.0369	0.0365	0.0367
T _r (K)	555.90	604.47	653.46	702.94	752.48	801.97	851.35	703.23
T _{out} (K)	551.60	601.55	651.47	701.36	751.20	800.99	850.70	701.27
η _{ex}	28.33%	29.78%	30.28%	29.43%	27.30%	23.53%	18.09%	26.68%

Πίνακας 5.24 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Τηγμένο άλας σε απορροφητήρα με πτερύγια

Υγρό νάτριο							
T _{in} (K)	400	500	600	700	800	900	Μέση τιμή
n _{th}	60.44%	58.70%	54.80%	47.26%	34.20%	13.59%	44.83%
Q _{loss} (W)	172.99	641.92	1695.84	3731.04	7258.11	12821.33	4386.87
Nu	15.85	16.25	16.89	17.65	18.82	20.83	17.72
h (W/m ² K)	20858.90	19768.84	18909.00	18233.13	17983.39	18457.27	19035.09
f	0.0366	0.0345	0.0330	0.0320	0.0313	0.0307	0.0330
T _r (K)	402.57	502.63	602.57	702.31	801.70	900.63	652.07
T _{out} (K)	403.89	503.97	603.89	703.49	802.58	900.94	653.13
η _{ex}	16.66%	25.58%	29.76%	29.35%	23.41%	10.45%	22.53%

Πίνακας 5.25 Χρήσιμα θερμικά μεγέθη για λειτουργία με θερμικό μέσο Υγρό νάτριο σε απορροφητήρα με πτερύγια

5.4.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Η συγκεκριμένη υποενοότητα, αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό μέρος αυτής της εργασίας. Αυτό, οφείλεται στο γεγονός ότι στόχος της, είναι να εξετάσει τρόπους αύξησης του θερμικού βαθμού απόδοσης. Όπως έχουμε αναφέρει, αυτοί συνδέονται είτε με την φύση του θερμικού μέσου, είτε με την προσθήκη πτερυγίων στο εσωτερικό του απορροφητήρα. Συνεπώς, η σύγκριση όλων των διαφορετικών περιπτώσεων, με την βασική μας εφαρμογή η οποία είναι ο συλλέκτης Fresnel με απορροφητήρα χωρίς πτερύγια και θερμικό μέσο Syltherm 800, θα μας δώσει χρήσιμα συμπεράσματα, δηλαδή το κατά πόσο έχουμε βελτίωση στην απόδοση. Επομένως, στο παρόν σημείο, συγκρίνουμε όλα τα μεγέθη που υπολογίσαμε στην ενότητα 4.4.1 με την αρχική μας περίπτωση (Smooth absorber – Syltherm 800). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες, σε μορφή ποσοστιαίων μεταβολών. Σχολιασμός αυτών των μεταβολών, θα πραγματοποιηθεί στο κομμάτι των διαγραμμάτων, που θα ακολουθήσει μετά από τους εν λόγω πίνακες.

Απορροφητήρας χωρίς πτερύγια (Smooth)

Αρχικά, οι πίνακες από 5.26 έως 5.30 αφορούν τα συγκριτικά αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων σε σύγκριση πάντα με την αρχική μας περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800), για απορροφητήρα χωρίς επιμήκη πτερύγια στο εσωτερικό του.

Syltherm 800 /CuO $\phi=2\%$								
T_{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n_{th}	0.05%	0.03%	0.06%	0.08%	0.11%	0.16%	0.22%	0.10%
Q_{loss} (W)	-6.92%	-2.06%	-2.12%	-1.71%	-1.43%	-1.23%	-1.07%	-2.36%
Nu	5.45%	-1.34%	1.72%	2.41%	2.86%	3.33%	3.64%	2.58%
h (W/m ² K)	14.09%	6.70%	9.98%	10.74%	11.26%	11.78%	12.11%	10.95%
f	-1.70%	-1.76%	-1.86%	-1.92%	-2.03%	-2.24%	-2.69%	-2.03%
T_r (K)	-0.96%	-0.34%	-0.38%	-0.32%	-0.27%	-0.24%	-0.21%	-0.39%
T_{out} (K)	-0.02%	-0.02%	-0.02%	-0.02%	-0.02%	-0.01%	-0.01%	-0.02%
η_{ex}	-0.73%	-0.49%	-0.16%	0.07%	0.23%	0.26%	0.12%	-0.10%

Πίνακας 5.26 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\phi=2\%$) σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Syltherm 800 /CuO $\phi=4\%$								
T_{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n_{th}	0.09%	0.06%	0.11%	0.15%	0.20%	0.28%	0.39%	0.18%
Q_{loss} (W)	-12.20%	-4.20%	-3.87%	-3.08%	-2.56%	-2.17%	-1.90%	-4.28%
Nu	9.90%	-1.71%	2.76%	3.79%	4.53%	5.12%	6.02%	4.34%
h (W/m ² K)	28.42%	14.74%	20.03%	21.28%	22.12%	22.80%	23.85%	21.89%
f	-3.02%	-3.10%	-3.22%	-3.36%	-3.54%	-3.91%	-4.69%	-3.55%
T_r (K)	-1.72%	-0.68%	-0.70%	-0.58%	-0.48%	-0.42%	-0.37%	-0.71%
T_{out} (K)	-0.04%	-0.03%	-0.03%	-0.03%	-0.03%	-0.03%	-0.03%	-0.03%
η_{ex}	-1.49%	-0.78%	-0.20%	0.12%	0.41%	0.46%	0.21%	-0.18%

Πίνακας 5.27 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\phi=4\%$) σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Syltherm 800 /CuO $\phi=6\%$								
T_{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n_{th}	0.12%	0.09%	0.15%	0.20%	0.28%	0.38%	0.53%	0.25%
Q_{loss} (W)	-16.31%	-6.14%	-5.33%	-4.20%	-3.47%	-2.94%	-2.58%	-5.85%
Nu	22.66%	6.71%	13.21%	15.76%	18.02%	20.69%	-45.35%	7.39%
h (W/m ² K)	42.85%	23.37%	29.89%	31.54%	32.63%	33.61%	35.13%	32.72%
f	-0.58%	-0.51%	-0.36%	-0.02%	0.36%	0.76%	-30.87%	-4.46%
T_r (K)	-2.34%	-1.01%	-0.96%	-0.79%	-0.66%	-0.57%	-0.51%	-0.98%
T_{out} (K)	-0.06%	-0.05%	-0.05%	-0.04%	-0.04%	-0.04%	-0.04%	-0.05%
η_{ex}	-0.94%	1.15%	2.52%	3.72%	4.83%	5.82%	-4.59%	1.79%

Πίνακας 5.28 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 ($\phi=6\%$) σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Τηγμένο άλας				
T_{in} (K)	550	600	650	Μέση τιμή
n_{th}	0.69%	1.00%	1.45%	1.05%
Q_{loss} (W)	-8.66%	-7.76%	-7.06%	-7.82%
Nu	-57.12%	-57.65%	-58.75%	-57.84%
h (W/m ² K)	144.37%	174.72%	211.59%	176.89%
f	22.40%	19.60%	16.81%	19.60%
T_r (K)	-1.68%	-1.53%	-1.41%	-1.54%
T_{out} (K)	-0.29%	-0.27%	-0.26%	-0.28%
η_{ex}	1.33%	1.31%	1.17%	1.27%

Πίνακας 5.29 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Τηγμένο άλας σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Υγρό νάτριο				
T_{in} (K)	400	500	600	Μέση τιμή
n_{th}	0.41%	0.74%	1.33%	0.83%
Q_{loss} (W)	-28.02%	-15.39%	-10.28%	-17.90%
Nu	-95.33%	-96.91%	-97.77%	-96.67%
h (W/m ² K)	3417.16%	2472.26%	2022.18%	2637.20%
f	-26.25%	-16.37%	-9.31%	-17.31%
T_r (K)	-4.99%	-3.02%	-2.05%	-3.36%
T_{out} (K)	0.17%	0.15%	0.11%	0.14%
η_{ex}	4.67%	0.65%	1.84%	2.39%

Πίνακας 5.30 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Υγρό νάτριο σε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Απορροφητήρας με πτερύγια (Finned)

Οι πίνακες από 5.31 έως 5.36 αφορούν τα συγκριτικά αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων σε σύγκριση πάντα με την αρχική μας περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800), για απορροφητήρα με επιμήκη πτερύγια στο εσωτερικό του.

Syltherm 800								
T_{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n_{th}	-0.07%	0.06%	0.16%	0.32%	0.45%	0.61%	0.82%	0.34%
Q_{loss} (W)	10.10%	-4.41%	-5.66%	-6.59%	-5.58%	-4.74%	-4.00%	-2.98%
Nu	-14.73%	16.10%	33.56%	64.10%	70.33%	73.61%	73.77%	45.25%
h (W/m ² K)	-14.73%	16.10%	33.56%	64.10%	70.33%	73.61%	73.77%	45.25%
f	68.11%	53.13%	72.12%	107.13%	114.47%	118.53%	118.95%	93.21%
T_r (K)	1.33%	-0.72%	-1.02%	-1.25%	-1.07%	-0.93%	-0.80%	-0.64%
T_{out} (K)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
η_{ex}	-0.431%	0.289%	0.305%	0.488%	0.576%	0.754%	0.593%	0.368%

Πίνακας 5.31 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 σε απορροφητήρα με πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Syltherm 800 /CuO φ=2%								
T _{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n _{th}	0.00%	0.10%	0.22%	0.38%	0.51%	0.70%	0.94%	0.41%
Q _{loss} (W)	-0.12%	-6.65%	-7.85%	-7.87%	-6.42%	-5.42%	-4.59%	-5.56%
Nu	-7.47%	16.99%	42.04%	73.07%	75.52%	78.40%	78.90%	51.07%
h (W/m ² K)	0.11%	26.53%	53.57%	87.16%	89.86%	92.99%	93.53%	63.39%
f	63.19%	50.84%	75.60%	109.01%	111.96%	114.28%	113.58%	91.21%
T _r (K)	-0.02%	-1.10%	-1.43%	-1.50%	-1.24%	-1.06%	-0.91%	-1.04%
T _{out} (K)	-0.02%	-0.02%	-0.02%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.02%
η _{ex}	-1.20%	-0.29%	0.11%	0.48%	0.76%	0.95%	1.02%	0.261%

Πίνακας 5.32 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 (φ=2%) σε απορροφητήρα με πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Syltherm 800 /CuO φ=4%								
T _{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n _{th}	0.05%	0.13%	0.30%	0.45%	0.61%	0.82%	1.12%	0.50%
Q _{loss} (W)	-7.67%	-8.58%	-10.69%	-9.30%	-7.63%	-6.37%	-5.44%	-7.95%
Nu	-0.89%	17.41%	63.43%	89.74%	94.27%	95.30%	97.28%	65.22%
h (W/m ² K)	15.82%	37.06%	90.90%	121.71%	126.96%	128.14%	130.46%	93.01%
f	59.80%	48.14%	98.46%	127.82%	133.78%	135.41%	135.78%	105.60%
T _r (K)	-1.07%	-1.42%	-1.97%	-1.78%	-1.48%	-1.25%	-1.09%	-1.44%
T _{out} (K)	-0.04%	-0.03%	-0.05%	-0.04%	-0.04%	-0.04%	-0.04%	-0.04%
η _{ex}	-1.85%	-0.62%	4.55%	4.09%	4.03%	3.87%	3.57%	2.520%

Πίνακας 5.33 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 (φ=4%) σε απορροφητήρα με πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Syltherm 800 /CuO φ=6%								
T _{in} (K)	350	400	450	500	550	600	650	Μέση τιμή
n _{th}	0.10%	0.15%	0.30%	0.45%	0.61%	0.82%	1.12%	0.51%
Q _{loss} (W)	-13.70%	-10.24%	-10.69%	-9.30%	-7.63%	-6.37%	-5.44%	-9.05%
Nu	5.75%	17.48%	51.66%	76.00%	80.27%	81.13%	82.97%	56.46%
h (W/m ² K)	33.16%	47.84%	90.90%	121.71%	126.96%	128.14%	130.46%	97.03%
f	58.26%	46.27%	78.93%	104.43%	108.49%	108.20%	106.51%	87.30%
T _r (K)	-1.95%	-1.71%	-1.97%	-1.78%	-1.48%	-1.25%	-1.09%	-1.60%
T _{out} (K)	-0.06%	-0.05%	-0.05%	-0.04%	-0.04%	-0.04%	-0.04%	-0.05%
η _{ex}	5.12%	-1.00%	0.01%	0.58%	1.05%	1.22%	1.10%	1.155%

Πίνακας 5.34 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Syltherm 800 (φ=6%) σε απορροφητήρα με πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Τηγμένο άλας				
T_{in} (K)	550	600	650	Μέση τιμή
η_{th}	0.76%	1.14%	1.65%	1.18%
Q_{loss} (W)	-9.53%	-8.78%	-8.05%	-8.79%
Nu	-48.60%	-42.72%	-37.68%	-43.00%
h (W/m ² K)	192.90%	271.54%	370.72%	278.39%
f	89.15%	118.15%	145.09%	117.46%
T_r (K)	-1.86%	-1.74%	-1.62%	-1.74%
T_{out} (K)	-0.29%	-0.28%	-0.26%	-0.28%
η_{ex}	1.99%	2.00%	1.93%	1.97%

Πίνακας 5.35 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Τηγμένο άλας σε απορροφητήρα με πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Υγρό νάτριο				
T_{in} (K)	400	500	600	Μέση τιμή
η_{th}	0.41%	0.74%	1.33%	0.83%
Q_{loss} (W)	-28.01%	-15.40%	-10.28%	-17.90%
Nu	-95.31%	-96.86%	-97.70%	-96.62%
h (W/m ² K)	3434.36%	2511.00%	2088.08%	2677.81%
f	60.94%	83.77%	99.74%	81.48%
T_r (K)	-5.00%	-3.03%	-2.05%	-3.36%
T_{out} (K)	0.17%	0.15%	0.11%	0.14%
η_{ex}	-1.04%	0.71%	1.91%	0.53%

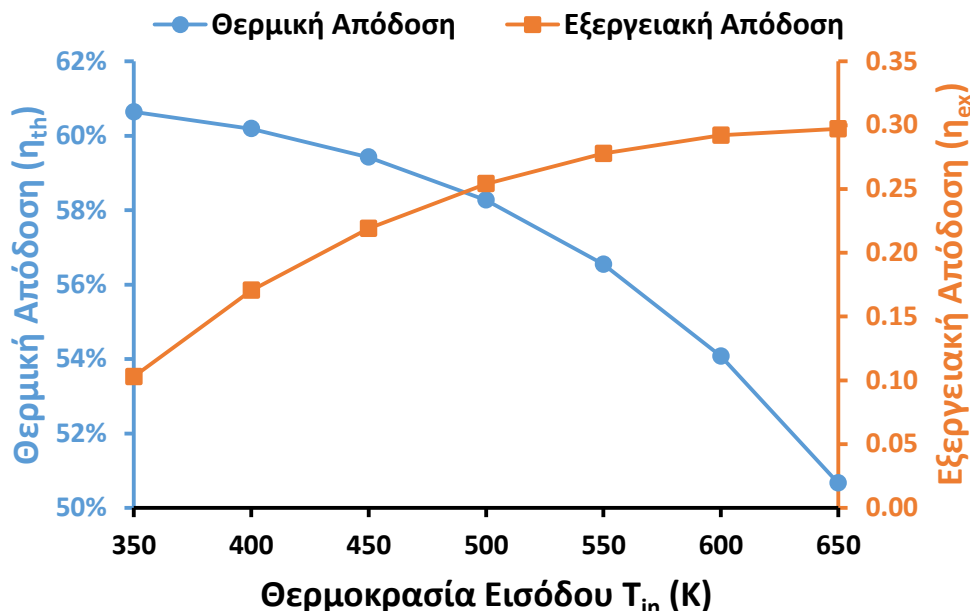
Πίνακας 5.36 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμικών μεγεθών για λειτουργία με θερμικό μέσο Υγρό νάτριο σε απορροφητήρα με πτερύγια, σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση (Smooth Absorber – Syltherm 800)

Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, η βασική μας εφαρμογή αποτελεί η περίπτωση, απορροφητήρα χωρίς πτερύγια με θερμικό μέσο το Syltherm 800. Εμείς, με την προσθήκη νανοσωματιδίων CuO αλλά και την εξ' ολοκλήρου αλλαγή του μέσου και αντικατάσταση του με τηγμένο άλας (Molten salt) και υγρό νάτριο (Liquid sodium) καθώς και την τοποθέτηση εσωτερικών πτερυγίων αποσκοπούμε στην βελτίωση των θερμικών μεγεθών απόδοσης.

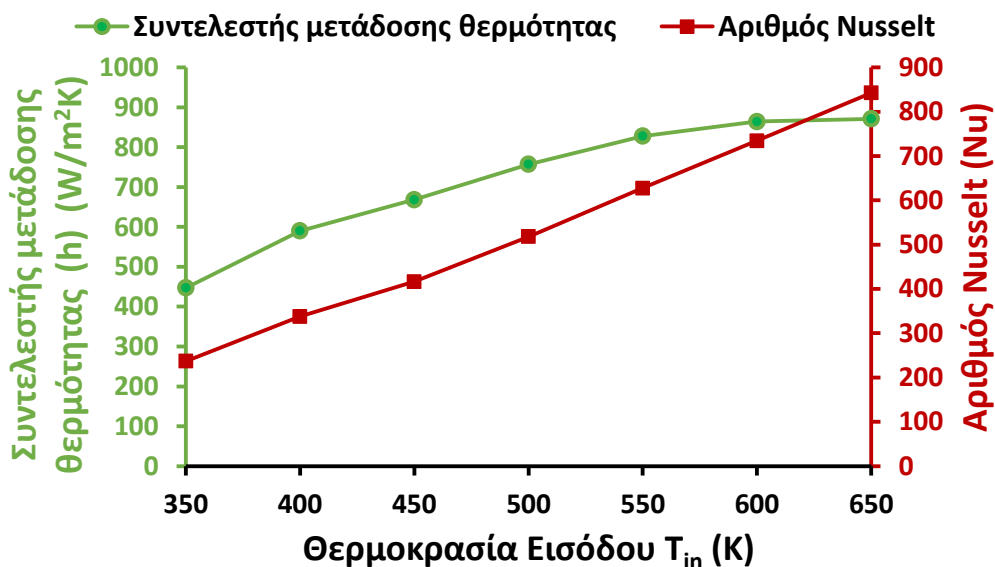
Συγκριτικά διαγράμματα και σχολιασμός τους

Για το λόγο αυτό, ειδικά για την αρχική περίπτωση, στα παρακάτω σχήματα, βλέπουμε την μεταβολή του θερμικού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης (βλ. εικόνα 5.7), την μεταβολή του αριθμού Nusselt αλλά και του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας h , όλα συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} του Syltherm 800. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το διάγραμμα της εικόνας 5.7, διαπιστώνουμε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης (η_{th}) μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Αυτό οφείλεται στην αύξηση των θερμικών απωλειών (Q_{loss}) και κατ' επέκταση στην μείωση της ωφέλιμης ισχύος Q_u . Εν αντιθέσει, με την αύξηση της T_{in} ο εξεργειακός βαθμός (η_{ex}) αυξάνεται, καθώς αυξάνεται ο αριθμητής του, δηλαδή η ωφέλιμη εξέργεια στον συλλέκτη Fresnel (Ex_u). Για το σχήμα της εικόνας 5.8,

παρατηρούμε ότι ο συντελεστής h αυξάνεται με την αύξηση της T_{in} , καθώς όπως φαίνεται στον τύπο 3.14, μπορεί μεν να μειώνεται ο αριθμητής του (Q_u) αλλά επειδή αυξάνεται η μέση θερμοκρασία της ροής T_{fm} , μειώνεται ο όρος $T_r - T_{fm}$, συνεπώς αυξάνεται το κλάσμα (h). Επίσης παρατηρούμε ότι, ο αριθμός Nusselt αυξάνεται με παρόμοια κλίση με τον h καθώς είναι γραμμικά ανάλογα μεγέθη, όπως δείχνει και η σχέση 3.16.



Εικόνα 5.7 Μεταβολή θερμικού βαθμού απόδοσης (η_{th}) και εξεργειακού βαθμού απόδοσης (η_{ex}) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου (T_{in}) για θερμικό μέσο Syltherm800 και απορροφητή χωρίς πτερύγια



Εικόνα 5.8 Μεταβολή συντελεστή μετάδοσης θερμότητας (h) και αριθμού Nusselt (Nu) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου (T_{in}) για θερμικό μέσο Syltherm800 και απορροφητή χωρίς πτερύγια

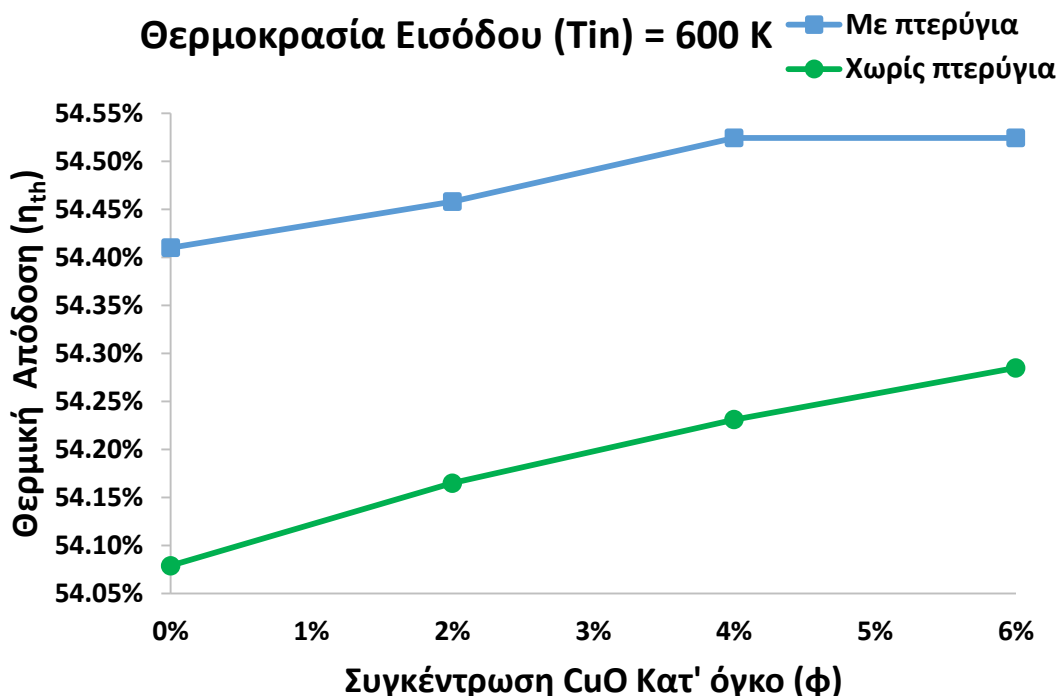
Σύγκριση, Syltherm 800 ($\phi=2\%$, 4% , 6%) για απορροφητήρα, με και χωρίς πτερύγια
 Όπως υποδηλώνει και ο τίτλος αυτής της παραγράφου, στα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν, θα συγκρίνουμε κάποια χαρακτηριστικά θερμικά μεγέθη μεταξύ των εν λόγω περιπτώσεων. Αξίζει να σημειώσουμε, πως συγκρίνουμε τις περιπτώσεις νανοϋλικών μεταξύ τους και όχι με τα άλλα θερμικά μέσα (τηγμένο άλας, υγρό νάτριο) καθώς, θέλουμε να μελετήσουμε αν η προσθήκη τους στο θερμικό έλαιο Syltherm 800 επιφέρει βελτιώσεις στην απόδοση και κατά πόσο επηρεάζει η κατ' όγκο σύσταση CuO ($\phi\%$) την αύξηση αυτή. Τα μεγέθη που θα συγκρίνουμε σε αυτήν την παράγραφο, είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης η_{th} , τον αριθμό PEC και τον λόγο h/h_0 , όπου h_0 είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας για την περίπτωση του Syltherm 800 για απορροφητή χωρίς πτερύγια. Αξίζει να υπενθυμίσουμε, ότι ο αριθμός (PEC) Performance Evaluation Criteria ο οποίος συμβολίζεται με το γράμμα (η) αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέγεθος αξιολόγησης της θερμικής συμπεριφοράς του συλλέκτη. Προφανώς, λαμβάνει υπόψη την μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας μέσω της μεταβολής του Nusselt, αλλά και την αύξηση της πτώσης πίεσης μέσω του συντελεστή τριβής f . Συγκεκριμένα, δίνεται από τον τύπο 3.29. Επίσης, όταν παίρνει τιμές πάνω από την μονάδα $\eta > 1$, υπάρχει βελτίωση της θερμικής απόδοσης.

Σχολιασμός διαγραμμάτων 5.9 έως 5.17

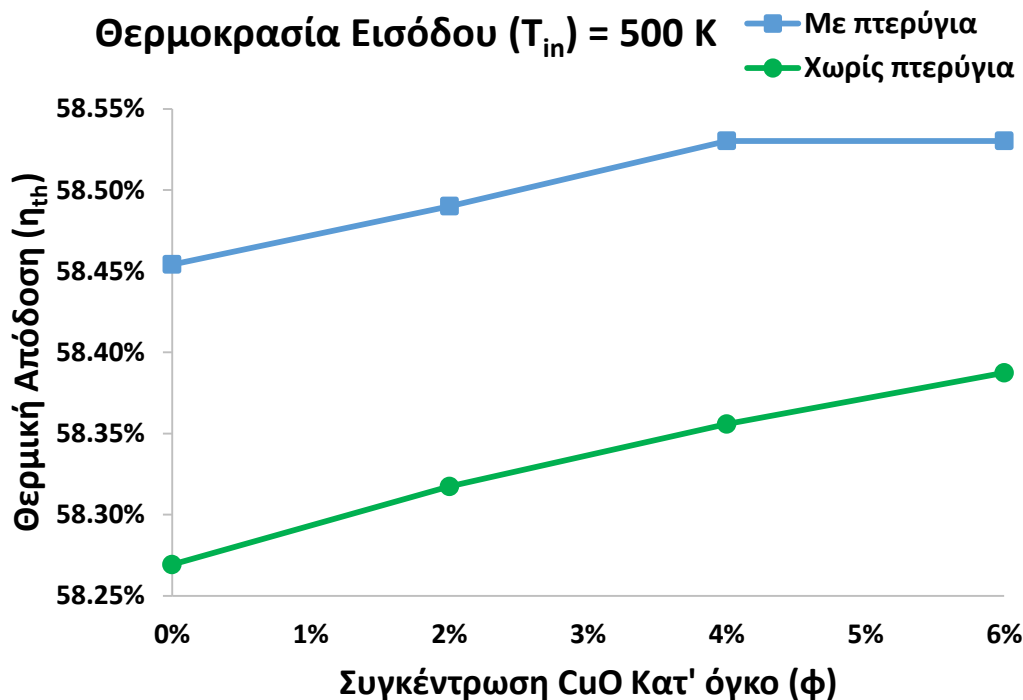
Εμείς, θα παρουσιάσουμε τα συγκριτικά αποτελέσματα των εν λόγω μεγεθών, συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης (ϕ) νανοσωματιδίων CuO και της γεωμετρίας του απορροφητή, για τις θερμοκρασίες εισόδου, $T_{in}=400, 500, 600$ K.

Αναλυτικότερα, στα σχήματα των εικόνων 5.9, 5.10, 5.11, βλέπουμε την μεταβολή του η_{th} , συναρτήσει του ϕ , για $T_{in}=600$ K, 500 K, 400 K. Παρατηρούμε, πως όσο αυξάνεται, η κατ' όγκο σύσταση (ϕ), τόσο αυξάνει και ο θερμικός βαθμός απόδοσης η_{th} . Αυτό, συμβαίνει καθώς, για μεγαλύτερα ϕ , όπως έχουμε δει στα διαγράμματα των εικόνων 4.31 και 4.32, έχουμε υψηλότερο συντελεστή αγωγιμότητας (k), άρα μεγαλύτερο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας h , λόγω της σχέσης 3.16, αλλά και υψηλότερη τιμή του γινομένου $\rho \cdot C_p$ το οποίο συνδέεται άμεσα με την ωφέλιμη θερμότητα Q_u λόγω της σχέσης 3.12. Ακόμα, είναι ξεκάθαρο, ότι η προσθήκη πτερυγίων επιφέρει αύξηση του η_{th} , κάτι που αναμενόταν, καθώς αυξάνει τον συντελεστή h και την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Επίσης, παρατηρούμε ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες T_{in} , μειώνεται ο η_{th} . Ενδεικτικά, βλέπουμε ότι για $\phi=4\%$, έχουμε τα εξής ζευγάρια τιμών για την περίπτωση απορροφητή χωρίς πτερύγια: ($T_{in}=400$ K, $\eta_{th}=66.22\%$, $T_{in}=500$ K, $\eta_{th}=58.35\%$, $T_{in}=600$ K, $\eta_{th}=54.23\%$). Αυτό οφείλεται, στην αύξηση των θερμικών απωλειών Q_{loss} και κατ' επέκταση στην μείωση της ωφέλιμης Q_u . Στα σχήματα 5.12, 5.13, 5.14, βλέπουμε την μεταβολή του PEC συναρτήσει του ϕ . Παρατηρούμε, ότι στις περιπτώσεις με πτερύγια, έχουμε αρκετά υψηλότερες τιμές του PEC σε σχέση με αυτή χωρίς πτερύγια, κάτι που ήταν αναμενόμενο, λόγω της μεγαλύτερης αύξησης του Nusselt, όπως φαίνεται στην σχέση 3.29. Επίσης παρατηρούμε, πως όσο αυξάνεται η T_{in} , έχουμε υψηλότερες τιμές του PEC για σταθερή σύσταση. Αυτό, οφείλεται στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας ροής T_{fm} και συνεπώς στην αύξηση του h , όπως φαίνεται στον τύπο 3.14, άρα και του Nusselt, βλέπε σχέση 3.16. Τέλος, στα σχήματα 5.15, 5.16, 5.17 φαίνεται η μεταβολή του λόγου h/h_0 , όπου ο δείκτης ο υποδηλώνει την βασική μας εφαρμογή.

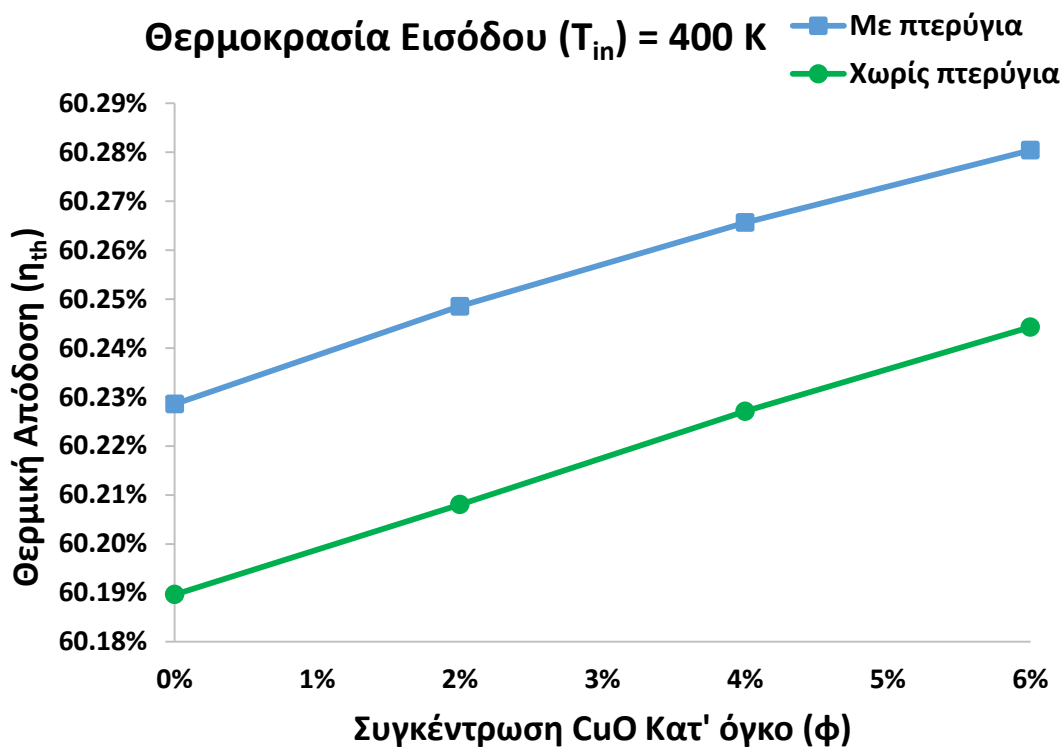
Παρατηρούμε, πώς όσο αυξάνει το ϕ , ο λόγος αυτός αυξάνεται καθώς αυξάνεται το h , για τους λόγους που έχουμε προαναφέρει. Επίσης στην εφαρμογή με πτερύγια, λαμβάνει υψηλότερες τιμές, εξαιτίας πάλι του μεγαλύτερου h . Παρακάτω, βλέπουμε τα εν λόγω διαγράμματα.



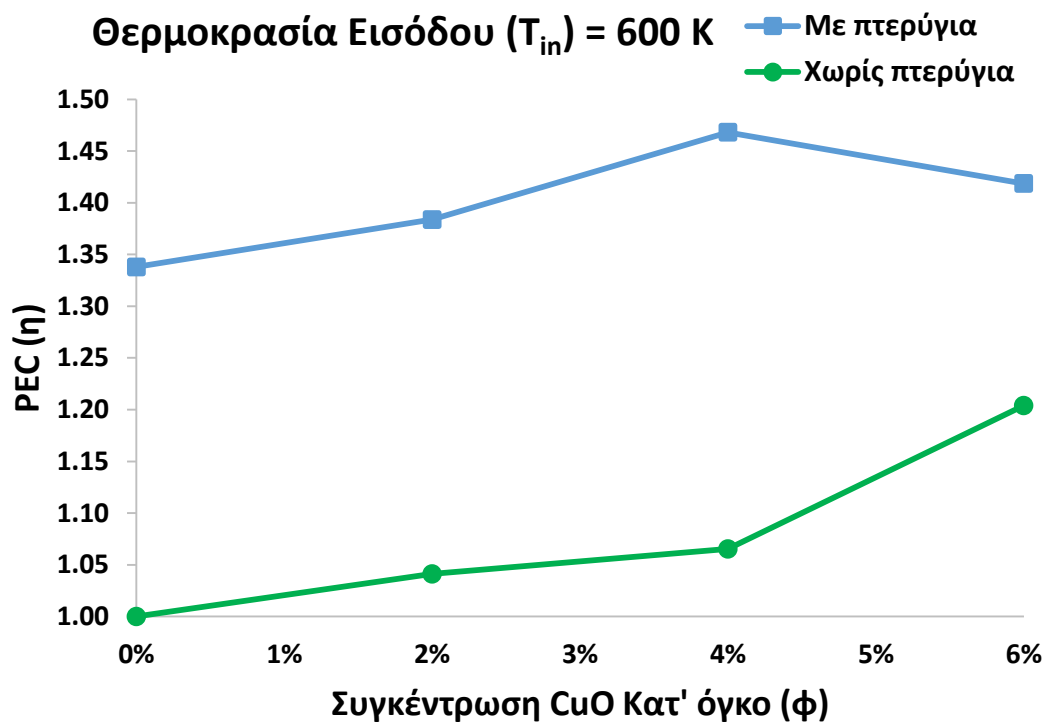
Εικόνα 5.9 Μεταβολή θερμοκού βαθμού απόδοσης η_{th} , συναρτήσε της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=600 K$



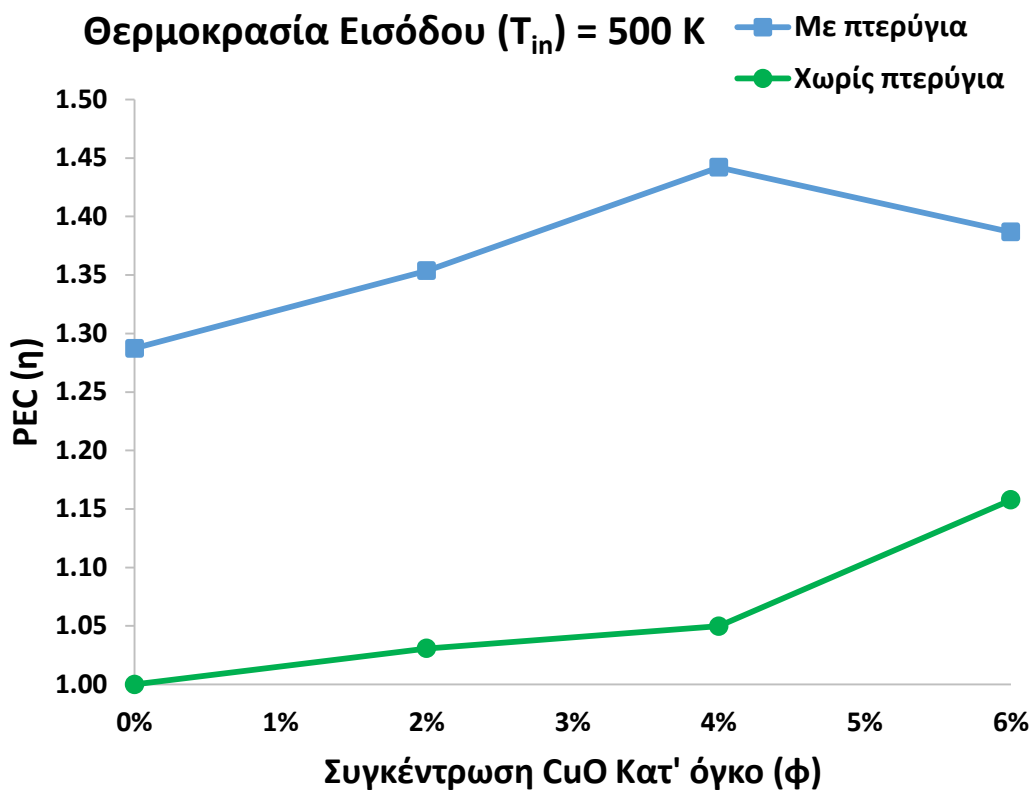
Εικόνα 5.10 Μεταβολή θερμοκού βαθμού απόδοσης η_{th} συναρτήσε της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=500 K$



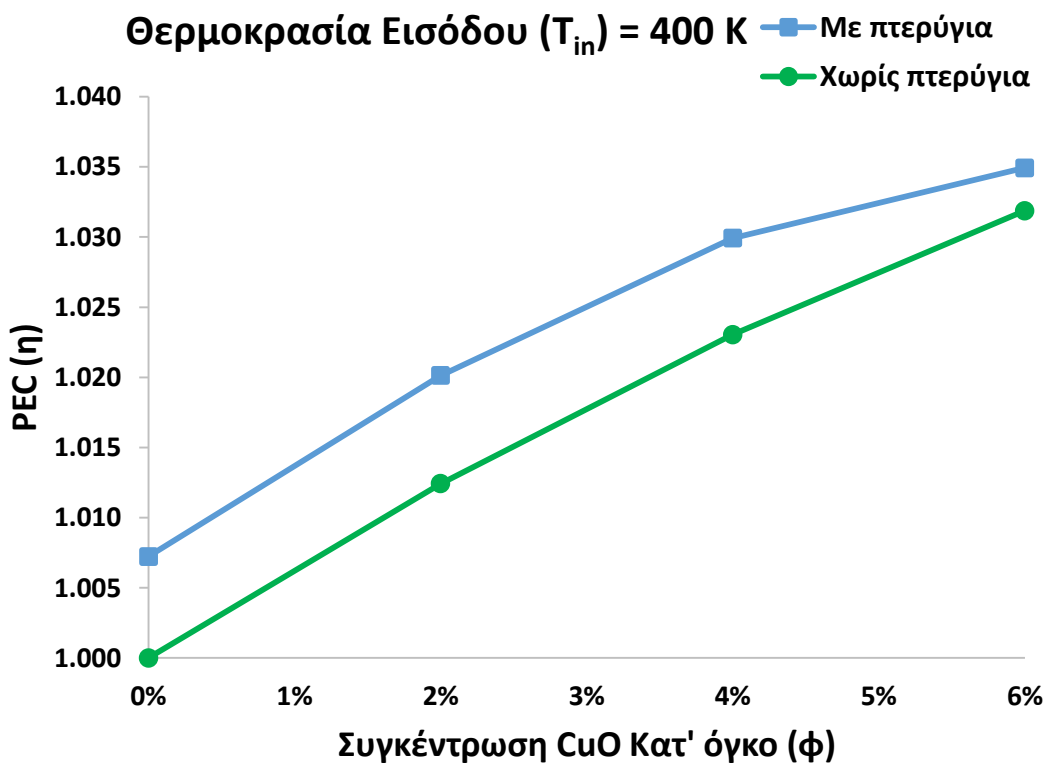
Εικόνα 5.11 Μεταβολή θερμικού βαθμού απόδοσης η_{th} συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=400 K$



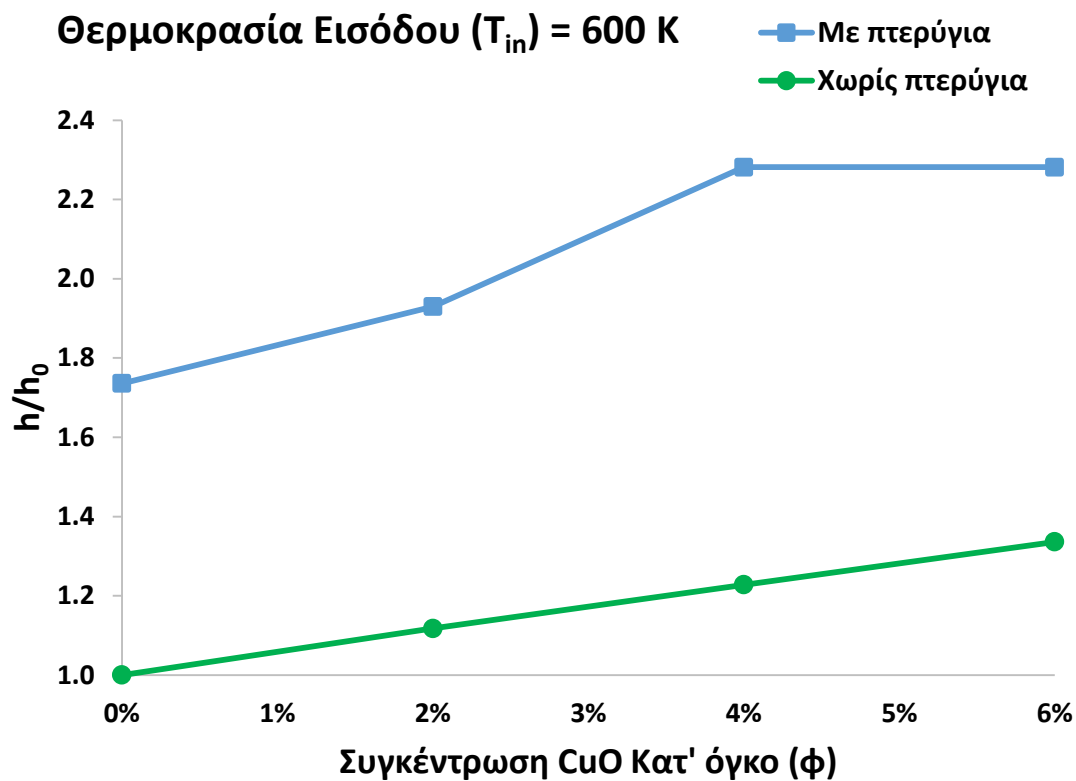
Εικόνα 5.12 Μεταβολή αριθμού PEC, συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=600 K$



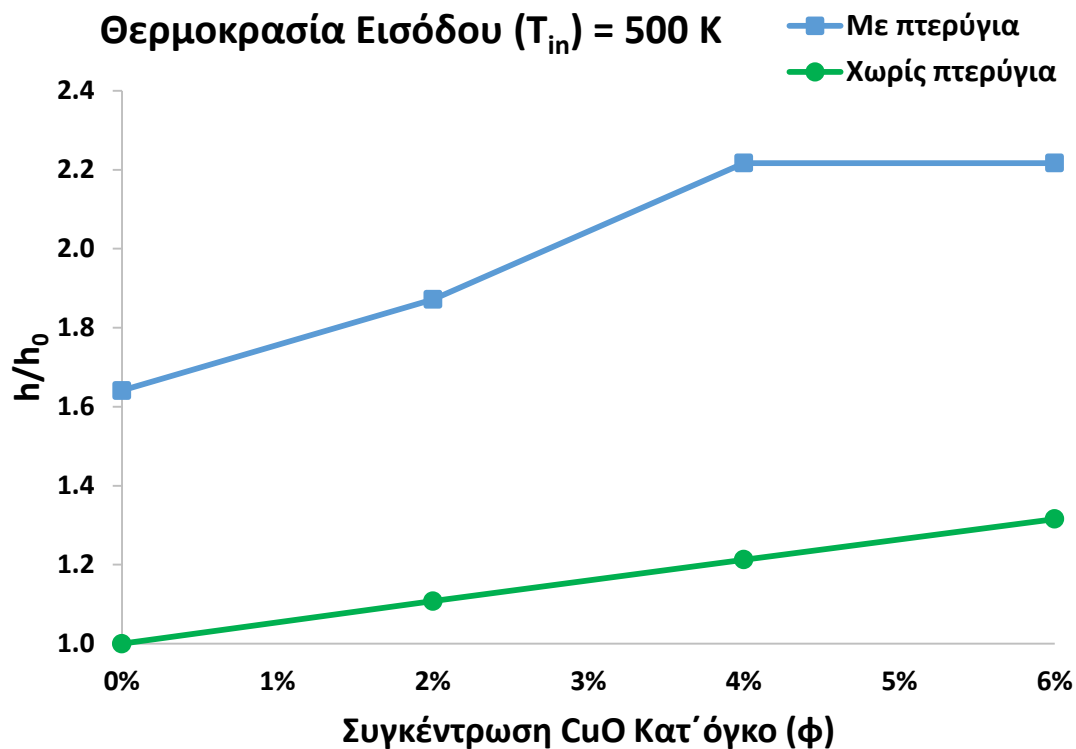
Εικόνα 5.13 Μεταβολή αριθμού PEC, συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=500 K$



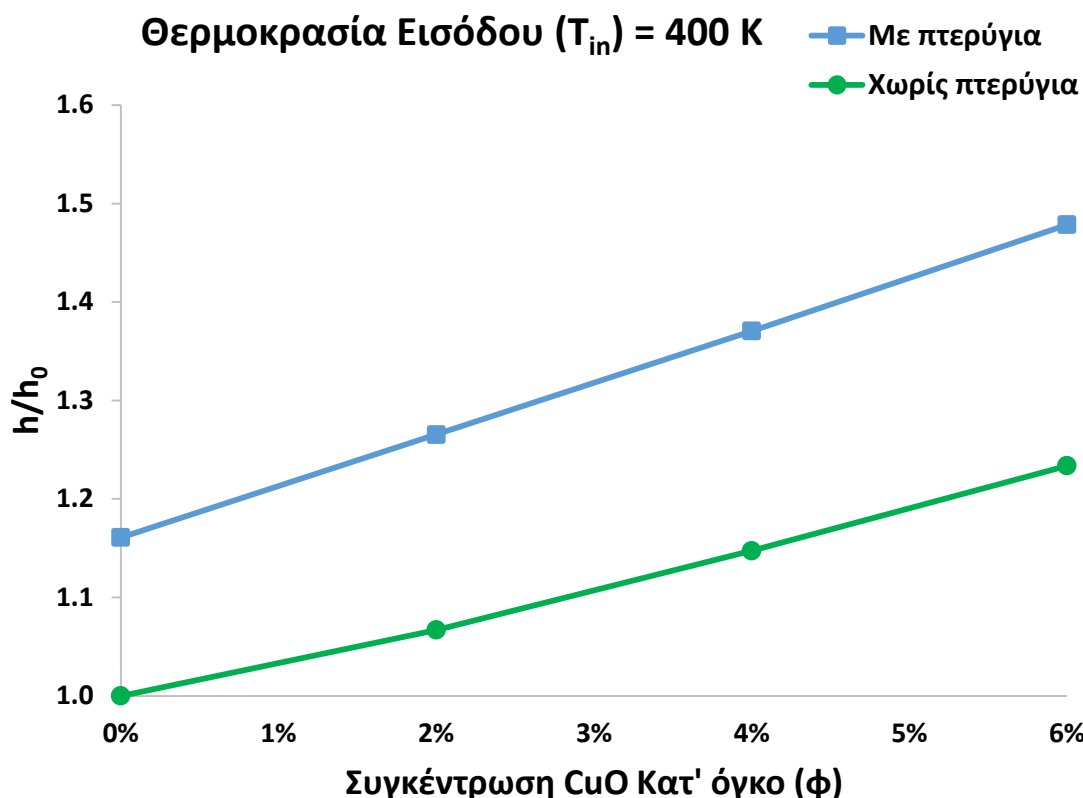
Εικόνα 5.14 Μεταβολή αριθμού PEC, συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=400 K$



Εικόνα 5.15 Μεταβολή λόγου h/h_0 , συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=600 K$



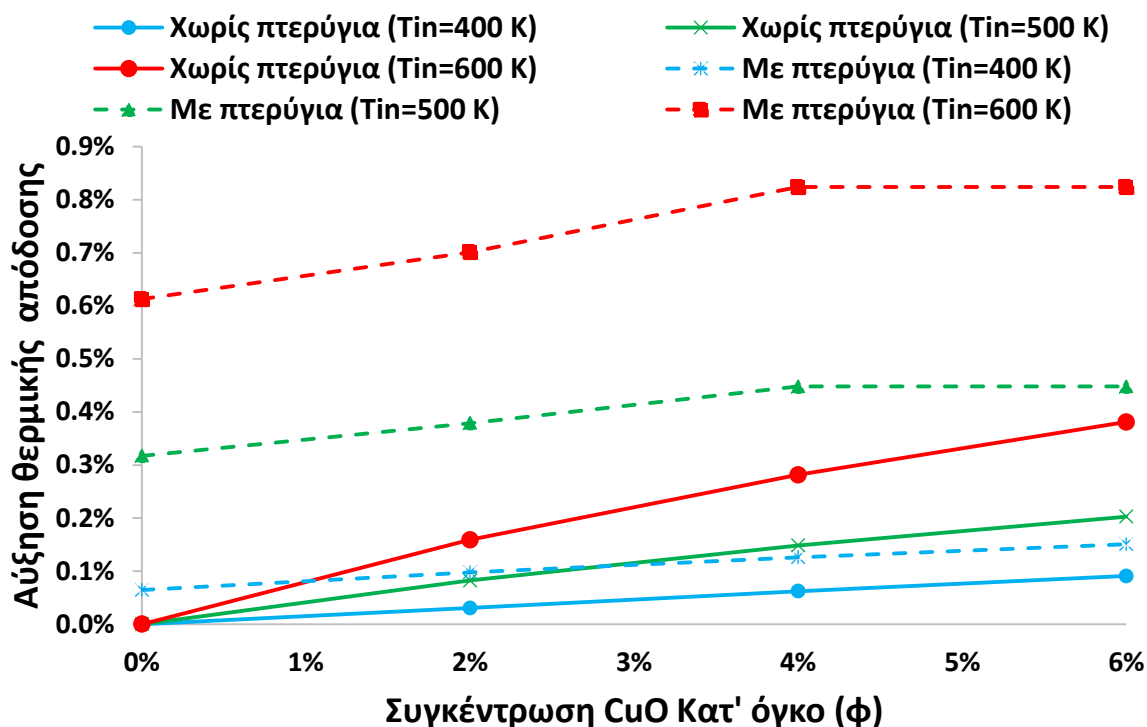
Εικόνα 5.16 Μεταβολή λόγου h/h_0 , συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=500 K$



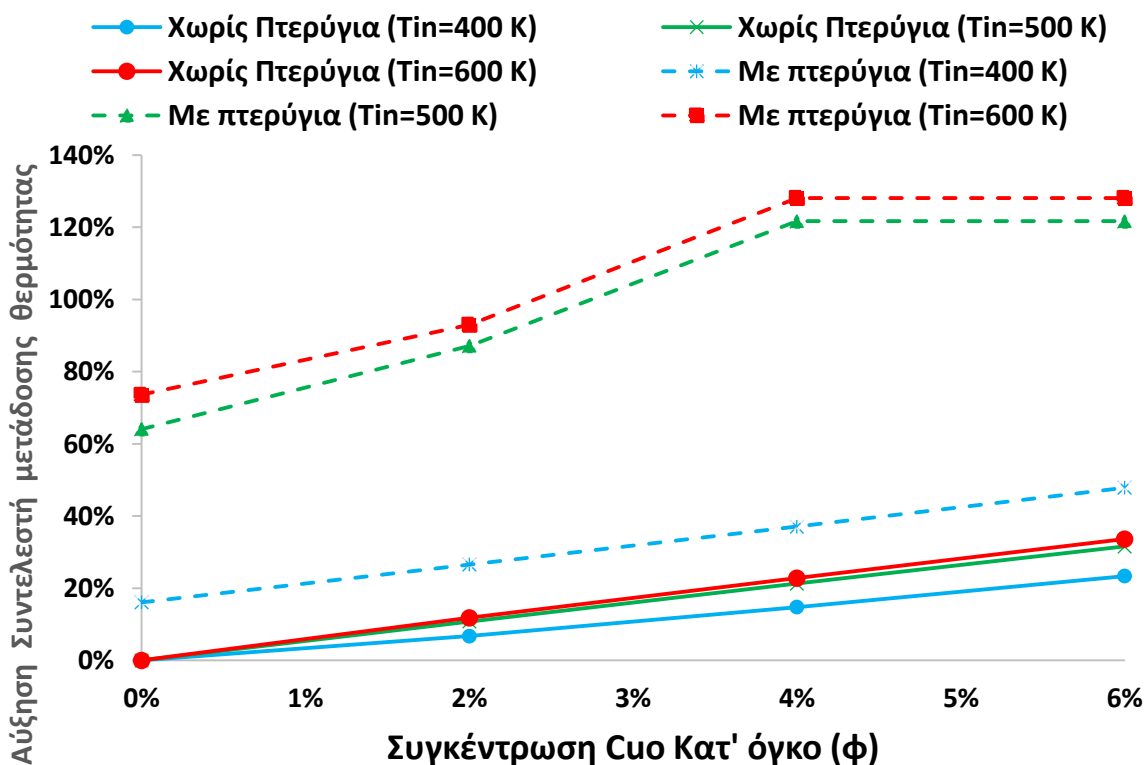
Εικόνα 5.17 Μεταβολή λόγου h/h_0 , συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=400$ K

Σχολιασμός διαγραμμάτων 5.18 και 5.19

Τα συγκεκριμένα διαγράμματα, αποτυπώνουν την αύξηση του βαθμού απόδοσης και του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, κάθε εφαρμογής σε σχέση με την περίπτωση Syltherm 800 σε απορροφητή χωρίς πτερύγια. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση απορροφητήρα με πτερύγια για $\phi=4$ % και $T_{in}=600$ K πετυχαίνουμε την μέγιστη βελτίωση του βαθμού απόδοσης, της τάξεως + 0.8%. Επίσης, στο διάγραμμα 5.18 παρατηρούμε ότι στην πλειονότητα τους, οι εφαρμογές με πτερύγια συνεισφέρουν περισσότερο στην αύξηση του βαθμού απόδοσης, από ότι η σύσταση κατ' όγκο νανοσωματιδίων CuO στο Syltherm 800. Ακόμα, όσον αφορά την σύσταση (ϕ) στην περίπτωση των πτερυγίων η τιμή 4% είναι η βέλτιστη και διαφέρει ελάχιστα με την περίπτωση 6%. Στο διάγραμμα 5.19, παρατηρούμε, όπως αναμενόταν ότι η μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h , ακολουθεί από άποψη μονοτονίας, αυτή του θερμικού βαθμού απόδοσης, καθώς το h επηρεάζει γραμμικά την ωφέλιμη θερμότητα $Q_{u_}$ (σχέση 3.14) και συνεπώς και τον η_{th} (σχέση 3.13). Συνεπώς, η μεγαλύτερη αύξηση +130%, συμβαίνει ομοίως με προηγούμενως, στην περίπτωση απορροφητήρα με πτερύγια για $\phi=4$ % και $T_{in}=600$ K. Μια ακόμα χρήσιμη παρατήρηση, είναι ότι παρά την πολύ μεγάλη βελτίωση του h , ο θερμικός βαθμός αυξήθηκε αμυδρά. Επομένως, διαπιστώνουμε πως στην περίπτωση μας (γραμμικός συλλέκτης Fresnel), το μεγαλύτερο ποσοστό του θερμικού βαθμού, αποτελεί ο οπτικός βαθμός απόδοσης. Συνεπώς, απαιτείται πολύ προσεκτικός σχεδιασμός της εγκατάστασης (πρωτεύοντα κάτοπτρα, δευτερεύον κάτοπτρο) με σκοπό την αύξηση της οπτικής απόδοσης της. Παρακάτω, βλέπουμε τα εν λόγω διαγράμματα.



Εικόνα 5.18 Αύξηση θερμικού βαθμού απόδοσης η_{th} , συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασίες εισόδου $T_{in}=400$ K, 500K, 600 K



Εικόνα 5.19 Αύξηση συντελεστή μετάδοσης θερμότητας h , συναρτήσει της κατ' όγκο σύστασης CuO (ϕ) στο Syltherm 800, για θερμοκρασίες εισόδου $T_{in}=400$ K, 500K, 600 K

Αφού συγκρίναμε τις περιπτώσεις του Syltherm 800 με την προσθήκη νανοσωματιδίων CuO για απορροφητήρα με και χωρίς πτερύγια, τώρα θα προχωρήσουμε στην σύγκριση θερμικών μέσων με εντελώς διαφορετική φύση. Συγκεκριμένα, τα θερμικά μέσα αυτά, είναι το Syltherm 800, το τηγμένο άλας (Molten salt) και το υγρό νάτριο (Liquid sodium). Τα μεγέθη που θα συγκρίνουμε, είναι τα εξής: θερμικός βαθμός απόδοσης η_{th} , εξεργειακός βαθμός απόδοσης η_{ex} , έργο τροφοδοτικής αντλίας W_p και πτώση πίεσης κατά μήκος του σωλήνα ΔP . Αυτό, θα γίνει με την χρήση συγκριτικών διαγραμμάτων.

Σχολιασμός διαγραμμάτων 5.20 έως 5.23

Αρχικά, στο σχήμα της εικόνας 5.20, βλέπουμε την μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης η_{th} , συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} για τα 3 εξεταζόμενα θερμικά μέσα. Η πρώτη παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε, αφορά το πεδίο τιμών της T_{in} . Δηλαδή, ότι το τηγμένο άλας και το υγρό άζωτο λειτουργούν σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το Syltherm 800. Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενα κεφάλαια, αυτό οφείλεται στο ότι το θερμικό έλαιο, χάνει τις ιδιότητες του σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 650 K) και στο ότι το τηγμένο άλας παρουσιάζει προβλήματα κρυσταλλοποίησης στις χαμηλές θερμοκρασίες. Δεύτερον, παρατηρούμε ότι σμε την αύξηση της T_{in} , ο η_{th} μειώνεται, λόγω αύξησης των θερμικών απωλειών. Ακόμα, βλέπουμε πως οι διαφορές στον η_{th} μεταξύ των εν λόγω μέσων είναι πολύ μικρές. Παρόλα αυτά, στην μόνη κοινή θερμοκρασιακή περιοχή τους (550 K – 650 K), υπερτερεί το υγρό νάτριο με πολύ μικρή διαφορά από το τηγμένο άλας. Από τα δεδομένα αυτά, υπολογίσαμε τα πολυώνυμα προσέγγισης για τον θερμικό βαθμό απόδοσης και για τα 3 μέσα, στις αντίστοιχες θερμοκρασίες εισόδου. Οι τύποι αυτοί έχουν ως μεταβλητή τον λόγο $\frac{T_{in} - T_{am}}{G_b}$ και φαίνονται παρακάτω.

Syltherm 800 (350 K < T_{in} < 650K)

$$\eta_{th} = 0.6085 - 0.01887 \frac{(T_{in} - T_{am})}{G_b} - 4.4 \cdot 10^{-4} \frac{(T_{in} - T_{am})^2}{G_b} - 2.735 \cdot 10^{-9} \frac{(T_{in} - T_{am})^4}{G_b} \quad (5.11)$$

Τηγμένο άλας (550 K < T_{in} < 850K)

$$\eta_{th} = 0.5918 + 0.1364 \frac{(T_{in} - T_{am})}{G_b} - 7.8 \cdot 10^{-4} \frac{(T_{in} - T_{am})^2}{G_b} - 1.978 \cdot 10^{-9} \frac{(T_{in} - T_{am})^4}{G_b} \quad (5.12)$$

Υγρό νάτριο (400 K < T_{in} < 900K)

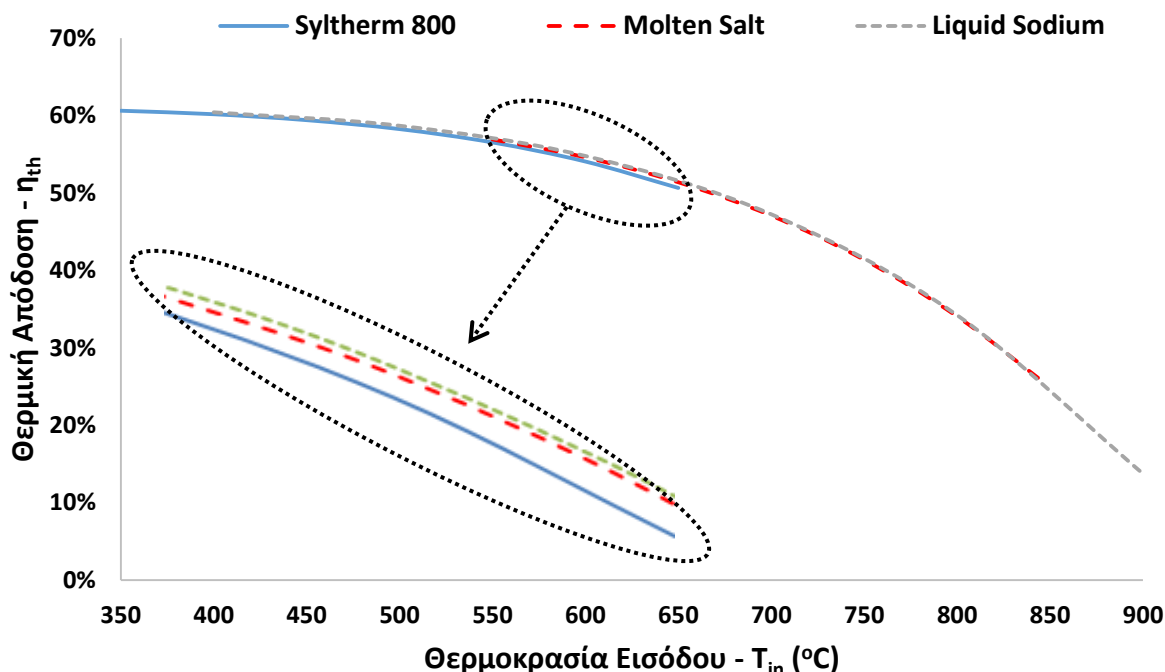
$$\eta_{th} = 0.6052 + 0.05468 \frac{(T_{in} - T_{am})}{G_b} - 6.3 \cdot 10^{-4} \frac{(T_{in} - T_{am})^2}{G_b} - 2.110 \cdot 10^{-9} \frac{(T_{in} - T_{am})^4}{G_b} \quad (5.13)$$

Αξίζει να αναφέρουμε πως η εξίσωση 5.11 θα χρησιμοποιηθεί και στο κομμάτι μελέτης της ημερήσιας απόδοσης του συλλέκτη Fresnel. Περισσότερα, έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 4 και συγκεκριμένα στην ενότητα 4.6.

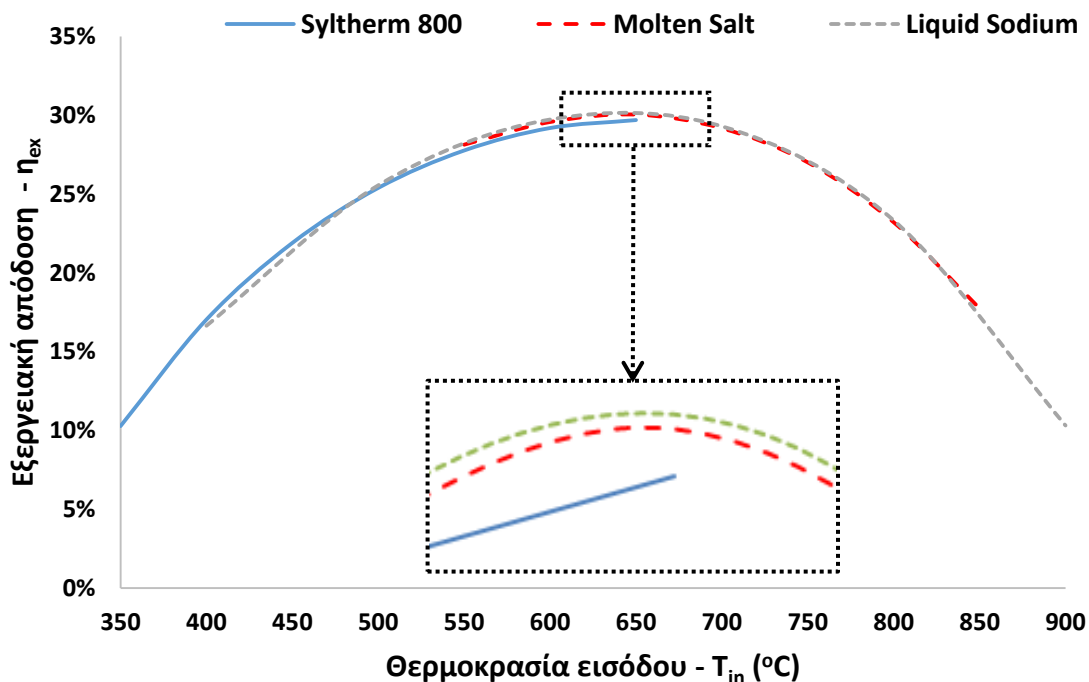
Όσον αφορά, το σχήμα της εικόνας 5.21, παρουσιάζεται η μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του συλλέκτη, συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} για τα τρία εν λόγω θερμικά μέσα. Αρχικά, παρατηρούμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις, έχουμε μέγιστη απόδοση στην $T_{in}=650$ K. Επίσης, βλέπουμε ότι, όπως και πριν οι διαφορές είναι πολύ μικρές, παρόλα αυτά το υγρό νάτριο έχει την καλύτερη εξεργειακή συμπεριφορά, με ελάχιστη διαφορά από το τηγμένο άλας. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.22 φαίνεται η μεταβολή του έργου που καταναλώνει η τροφοδοτική αντλία (W_p). Παρατηρούμε, ότι στην περίπτωση του τηγμένου άλατος, έχουμε μεγαλύτερες τιμές απαιτούμενου έργου, καθώς έχουμε υψηλότερες τιμές πτώσης πίεσης (ΔP). Αυτό συμβαίνει, επειδή το τηγμένο άλας έχει υψηλότερες τιμές δυναμικής συνεκτικότητας (μ) σε σχέση με τα άλλα δύο μέσα. Για το λόγο αυτό, μειώνεται ο αριθμός Reynolds της ροής (βλέπε σχέση 3.17) και έτσι έχουμε αύξηση του συντελεστή τριβής f (βλέπε σχέση 3.19), ο οποίος είναι ανάλογος της πτώσης πίεσης στο μήκος της ροής, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση (βλέπε σχέση 5.14, όπου m είναι η παροχή μάζας του θερμικού μέσου και ρ η πυκνότητα του). Στο σχήμα της εικόνας 5.23, αποτυπώνεται η μεταβολή της υδραυλικής πτώσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου. Όπως αναμενόταν, ακολουθεί την ίδια πορεία με την καμπύλη του έργου αντλίας W_p λόγω της σχέσης 5.14.

$$W_p = \frac{m}{\rho} \cdot \Delta P, \quad (5.14)$$

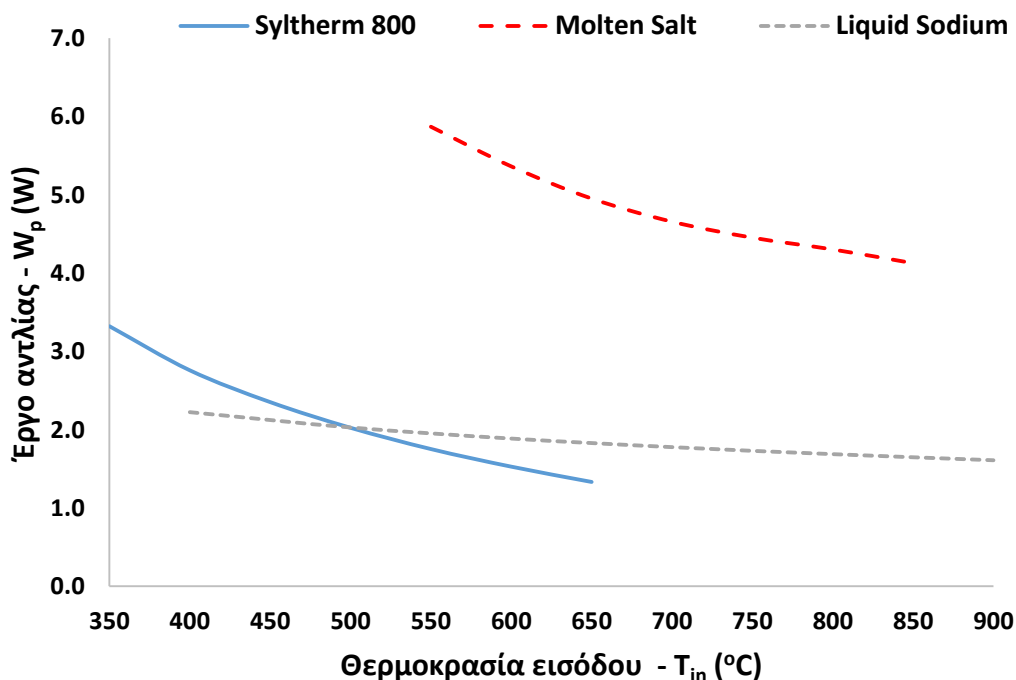
Παρακάτω ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα:



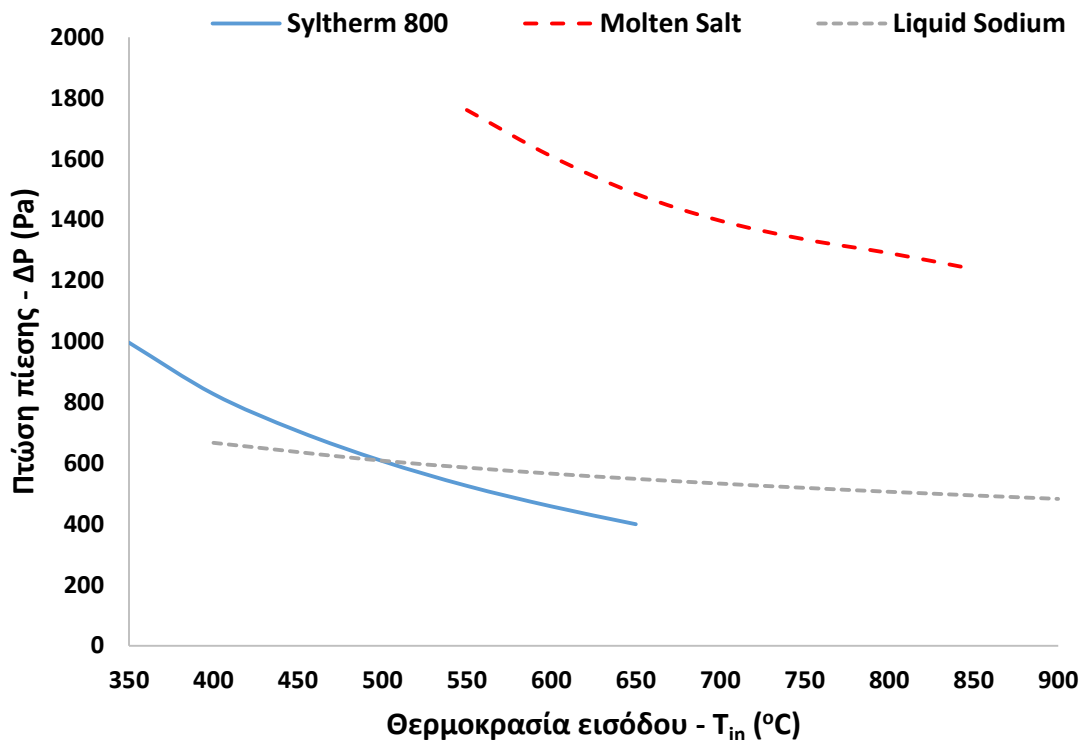
Εικόνα 5.20 Μεταβολή θερμικού βαθμού απόδοσης η_{th} , συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} για τα θερμικά μέσα: Syltherm 800, Molten Salt, Liquid Sodium



Εικόνα 5.21 Μεταβολή εξεργειακού βαθμού απόδοσης η_{ex} , συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} για τα θερμικά μέσα: Syltherm 800, Molten Salt, Liquid Sodium



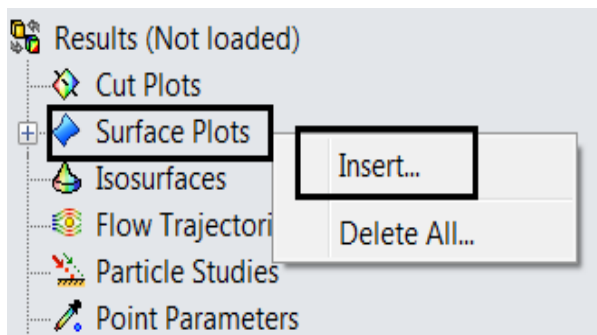
Εικόνα 5.22 Μεταβολή έργου αντλίας W_p , συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} για τα θερμικά μέσα: Syltherm 800, Molten Salt, Liquid Sodium



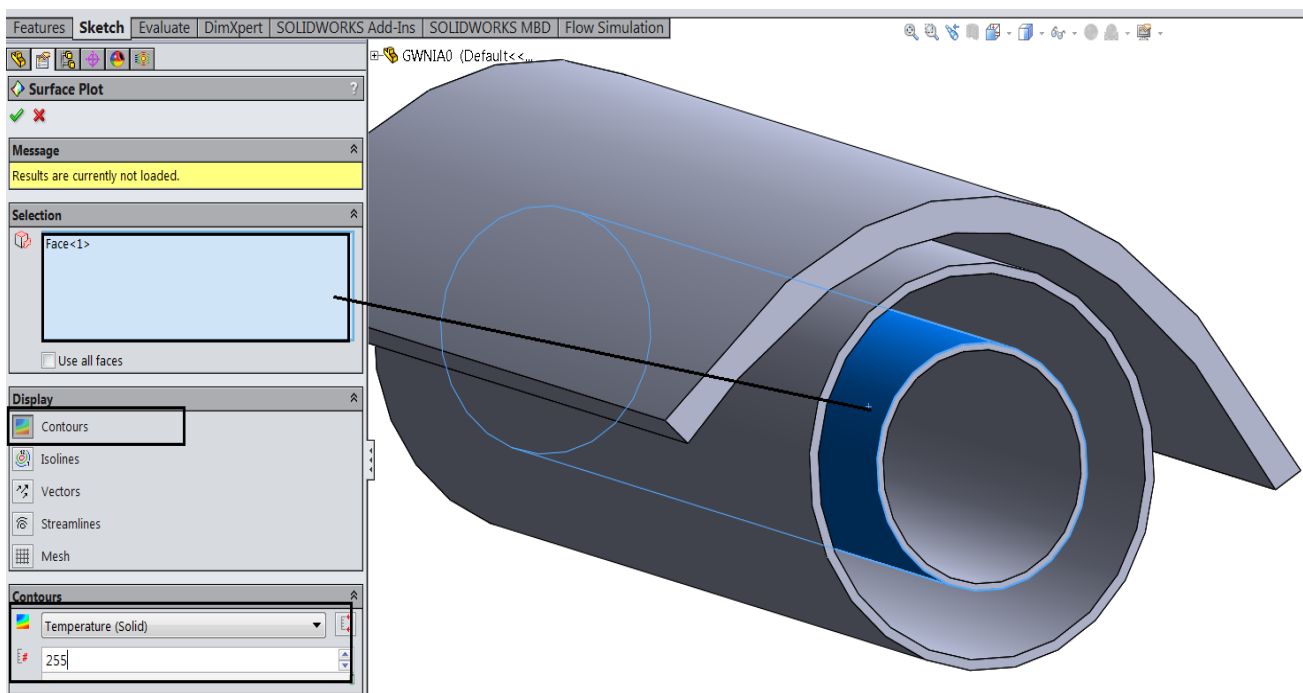
Εικόνα 5.23 Μεταβολή πτώση πίεσης ΔP , συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} για τα θερμικά μέσα: Syltherm 800, Molten Salt, Liquid Sodium

5.5 Θερμικές κατανομές σωλήνα για όλα τα θερμικά μέσα

Στη συγκεκριμένη ενότητα, θα παρουσιάσουμε την επιφανειακή κατανομή θερμοκρασίας του απορροφητή, για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, δηλαδή για όλα τα θερμικά μέσα που έχουμε αναφέρει, καθώς και τις δύο περιπτώσεις γεωμετρίας σωλήνα. Αυτό, το πραγματοποιούμε, έτσι ώστε να έχουμε μια καλύτερη εποπτεία ως προς την θερμική κατάσταση του προβλήματος. Το Flow Simulation, του Solidworks, μας παρέχει αυτή τη δυνατότητα, με την χρήση της εντολής Surface Plots. Όπως φαίνεται και παρακάτω, στο δέντρο εντολών του Flow Simulation, ανοίγουμε τα Results, πατάμε δεξί Click στο Surface Plots και επιλέγουμε Insert (βλέπε εικόνα 5.24). Στην συνέχεια, επιλέγουμε και την εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα, στο menu του Display κάνουμε Click στο Contours και τέλος επιλέγουμε ως μεταβλητή της κατανομής της θερμοκρασία του στερεού, Temperature (Solid) και ορίζουμε την ανάλυση των γραφικών στο 255 (βλέπε εικόνα 5.25).



Εικόνα 5.24 Εντολή Surface Plots

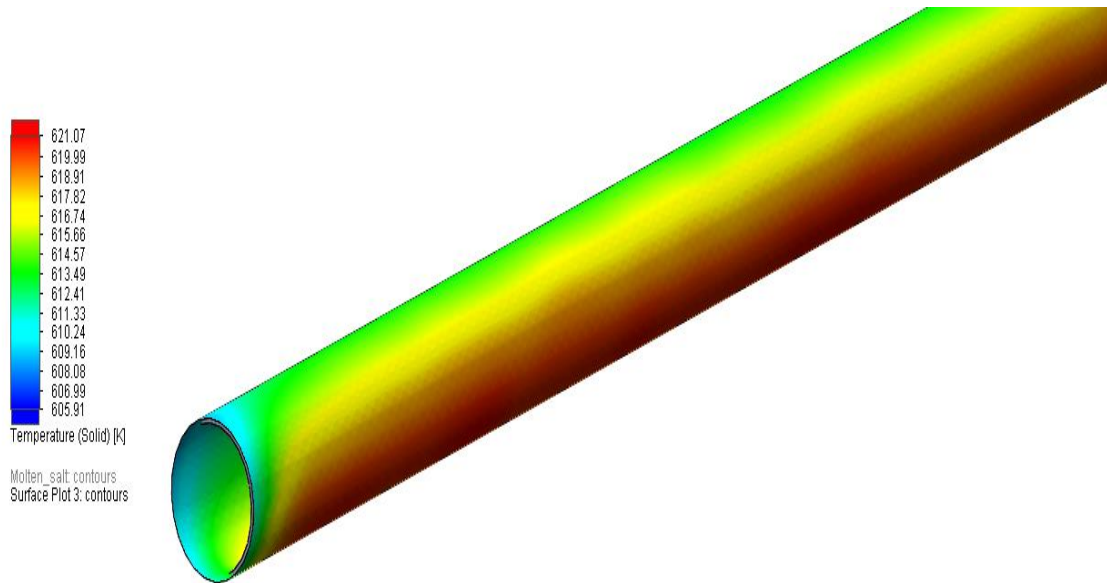


Εικόνα 5.25 Ορισμός επιφάνειας, εντολής Surface Plots

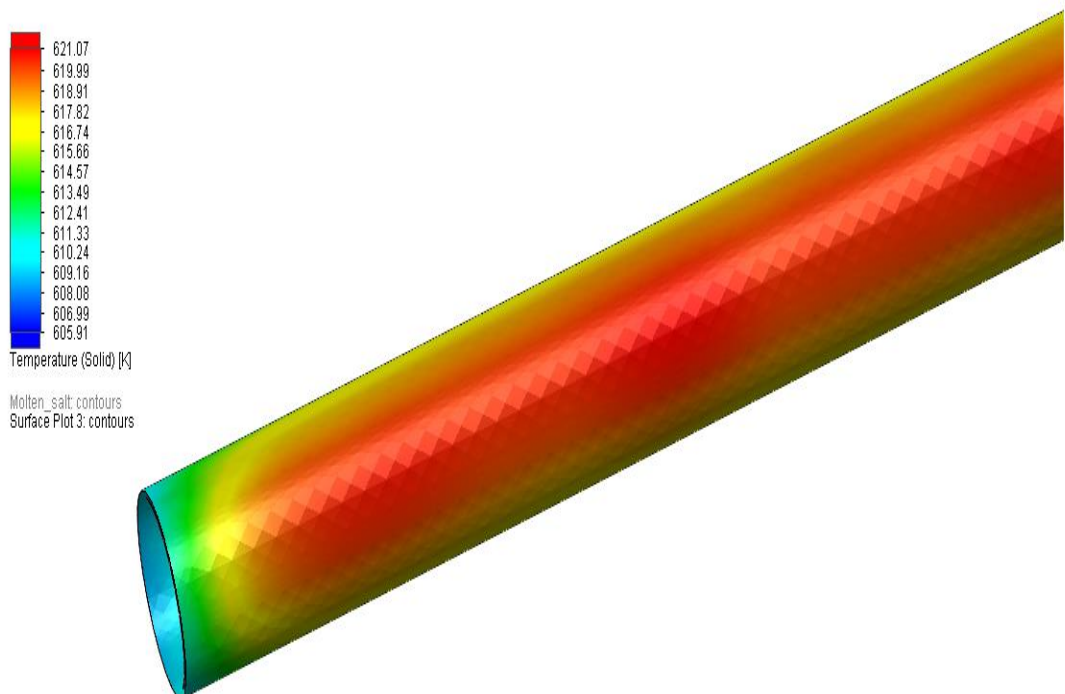
Εξαγόμενα συμπεράσματα

Την παραπάνω διαδικασία, την ακολουθούμε για όλα τα εξεταζόμενα θερμικά μέσα και για τις 2 διαφορετικές γεωμετρίες σωλήνα. Έτσι, δημιουργούμε όλες τις απαιτούμενες θερμοκρασιακές κατανομές. Με βάση τις παρακάτω εικόνες, μπορούμε να εξαγάγουμε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για την θερμική απόδοση του συλλέκτη. Αρχικά, παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις που έχουμε απορροφητήρα χωρίς πτερύγια, έχουμε υψηλότερες θερμοκρασίες μετάλλου. Αυτό οφείλεται στην μικρότερη επιφάνεια συναλλαγής σε σχέση με τις εφαρμογές πτερυγίων. Επίσης, όσον αφορά το θερμικό μέσο Syltherm 800 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε την περιεκτικότητα σε νανοσωματίδια φ, η θερμοκρασία μετάλλου μειώνεται, καθώς αυξάνεται ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας h , λόγω της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας του μέσου, k . Το γεγονός αυτό, οδηγεί σε χαμηλότερες θερμικές απώλειες. Για τον ίδιο λόγο, οι εφαρμογές τηγμένου άλατος και υγρό νάτριο, παρουσιάζουν μικρότερες θερμοκρασίες επιφανείας σε σχέση με το Syltherm 800. Ακόμα, όπως αναμενόταν η κάτω κυλινδρική επιφάνεια του σωλήνα είναι η πιο θερμή περιοχή του σώματος, καθώς είναι προσανατολισμένη προς τα πρωτεύοντα κάτοπτρα, συνεπώς δέχεται το μέγιστο πλήθος ηλιακών ακτινών. Αυτό, ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις όπως υποδηλώνουν και οι παρακάτω εικόνες. Τέλος, παρατηρούμε πως η διατομή εξόδου και εισόδου, αποτελούν τις πιο ψυχρές περιοχές του σωλήνα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση των θερμικών απωλειών εκεί, καθώς αυξάνεται η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον, μέσω συναγωγής. Οι απώλειες αυτές, ονομάζονται απώλειες άκρων σωλήνα.

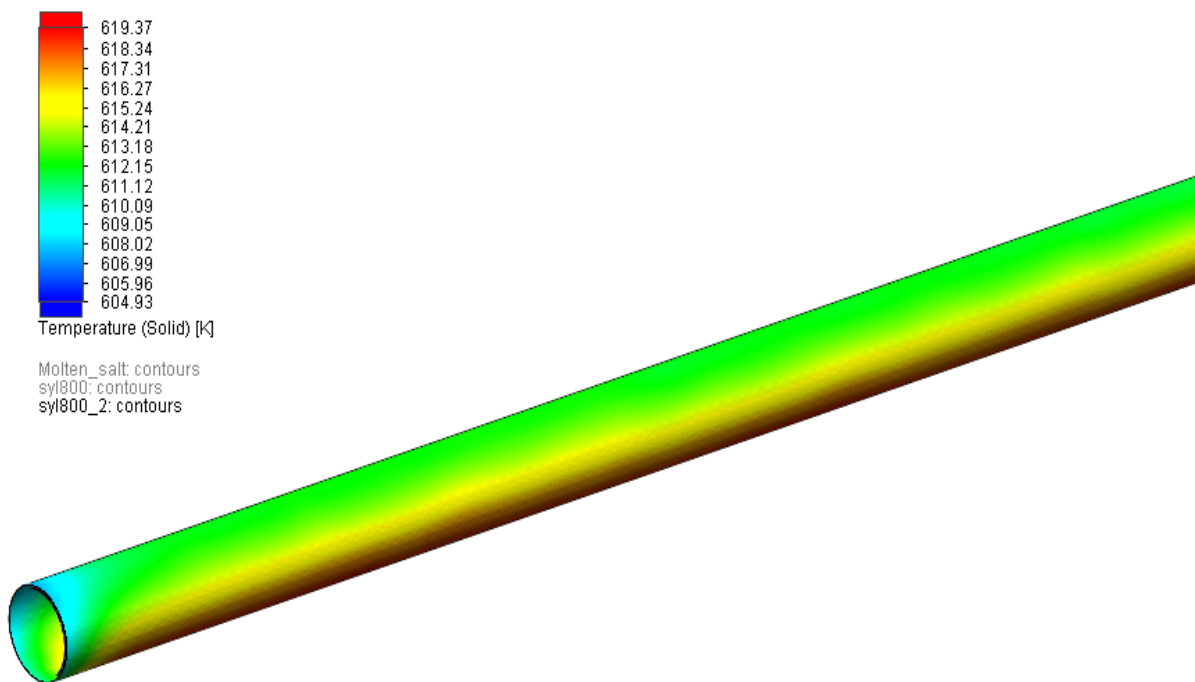
Στις εικόνες, 5.26 έως και 5.49 φαίνονται οι θερμοκρασιακές κατανομές κατά μήκος της κυλινδρικής επιφάνειας του σωλήνα για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Αξίζει να αναφερθεί, πως για λόγους εποπτείας, επισυνάπτονται και οι όψεις του κάτω μέρους του απορροφητήρα, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται εκεί.



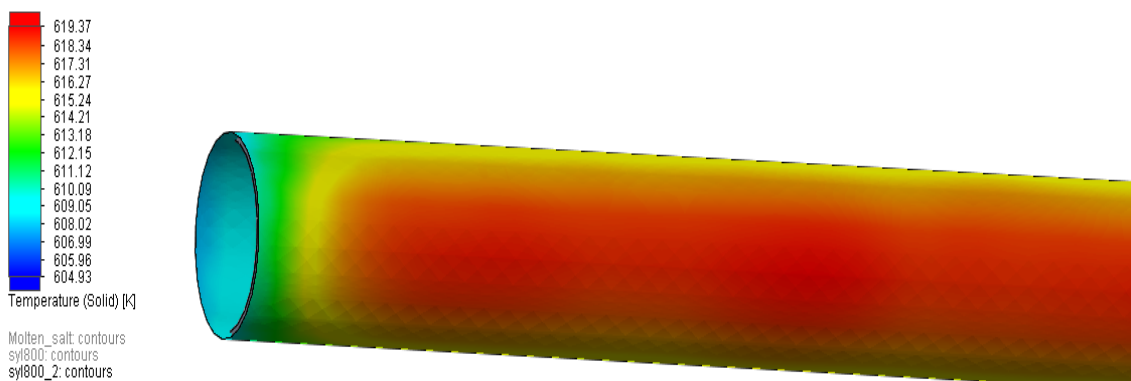
Εικόνα 5.26 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 και σωλήνα χωρίς πτερύγια



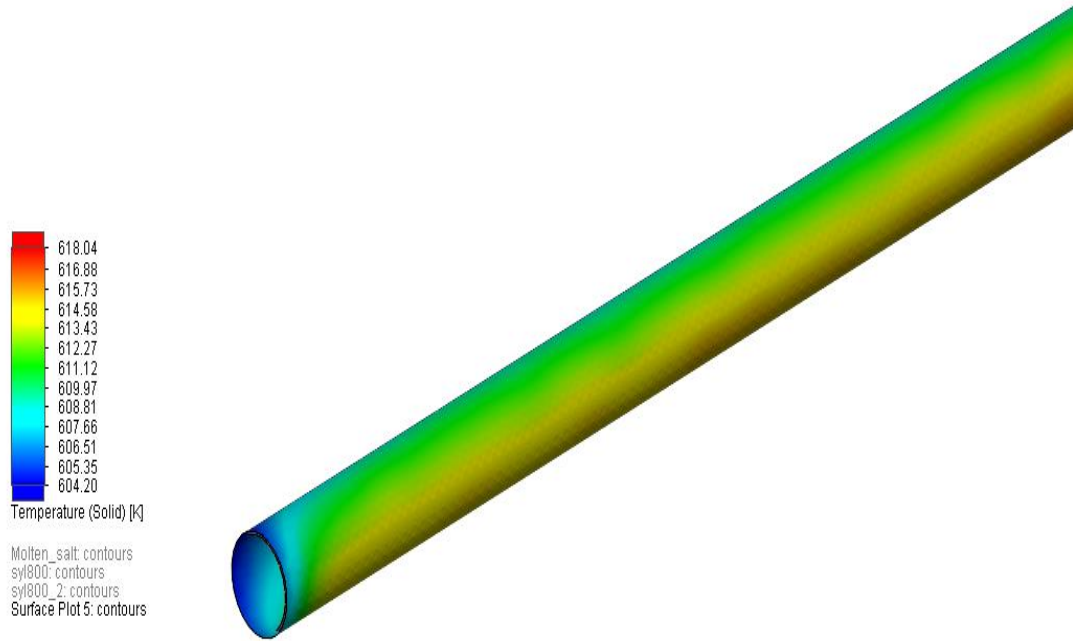
Εικόνα 5.27 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 και σωλήνα χωρίς πτερύγια



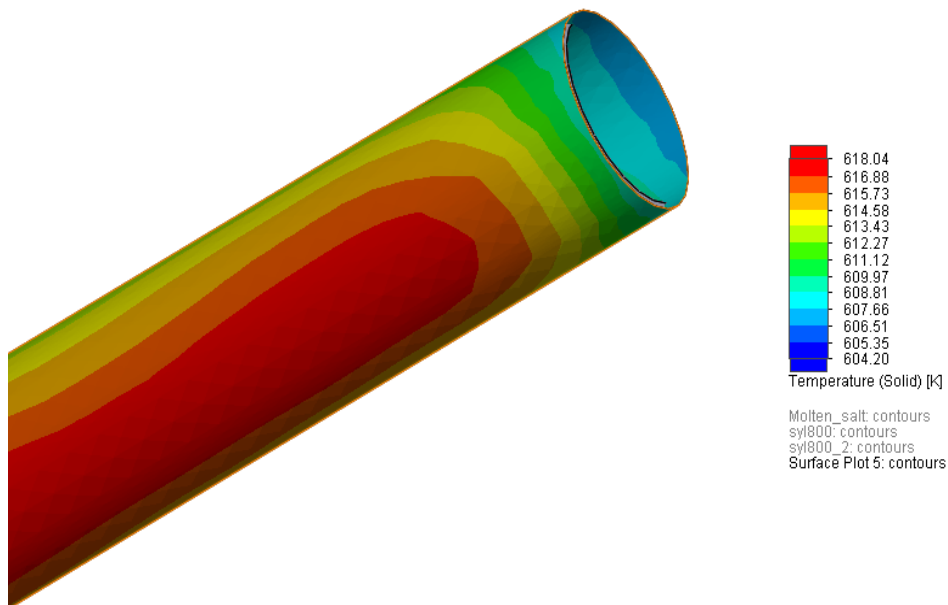
Εικόνα 5.28 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=2\%$) και σωλήνα χωρίς πτερύγια



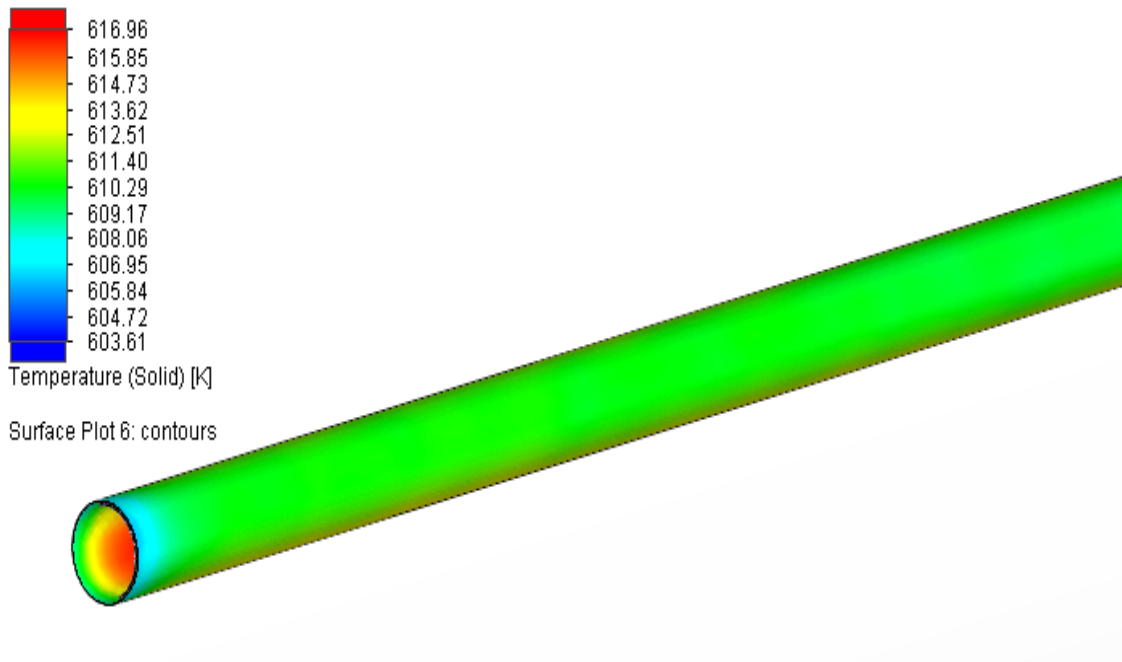
Εικόνα 5.29 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=2\%$) και σωλήνα χωρίς πτερύγια



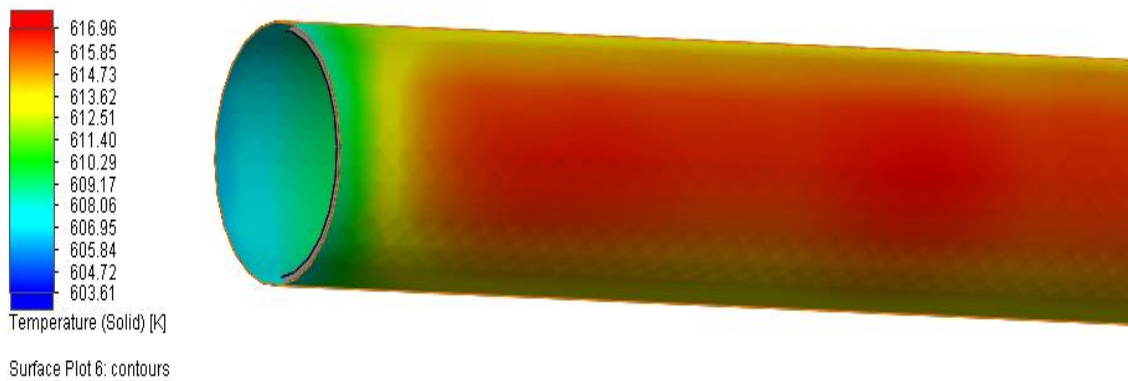
Εικόνα 5.30 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=4\%$) και σωλήνα χωρίς πτερύγια



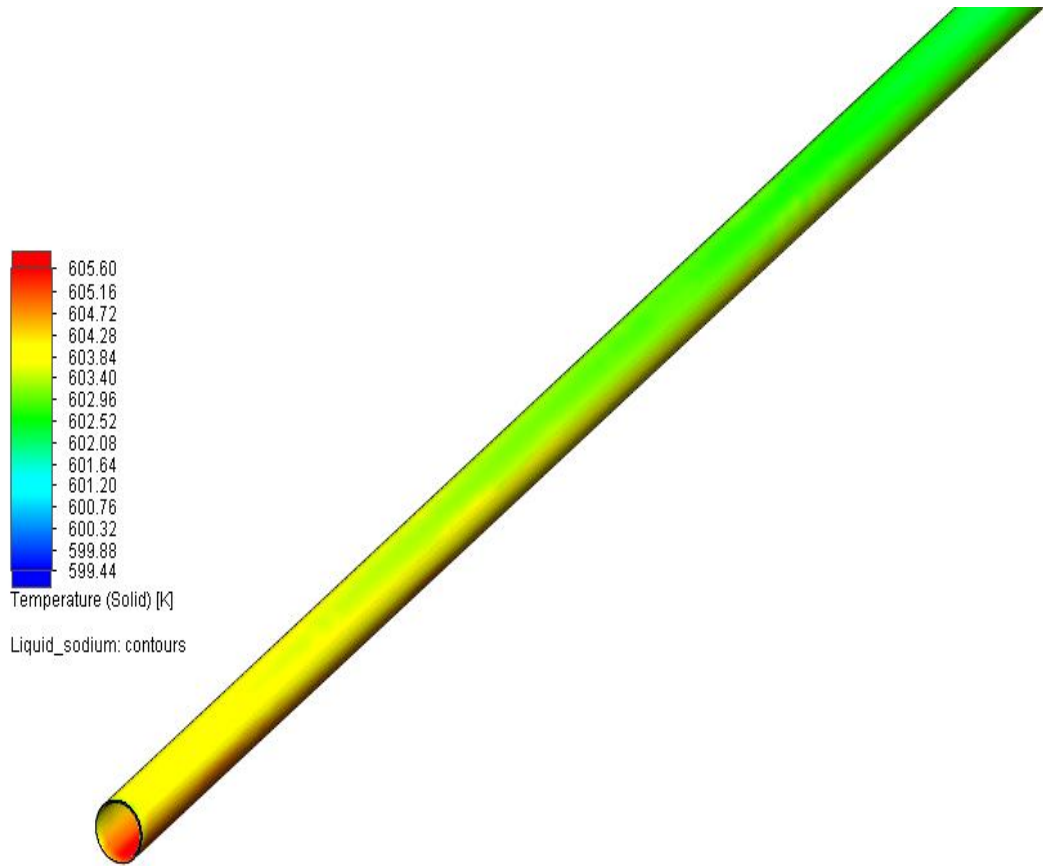
Εικόνα 5.31 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=4\%$) και σωλήνα χωρίς πτερύγια



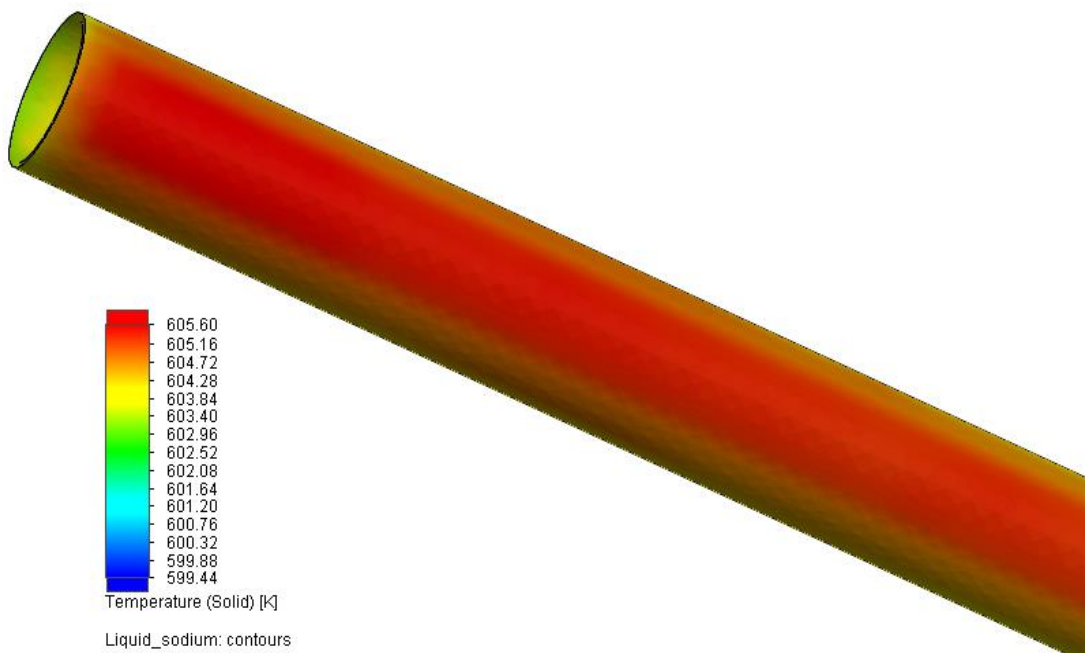
Εικόνα 5.32 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=6\%$) και σωλήνα χωρίς πτερύγια



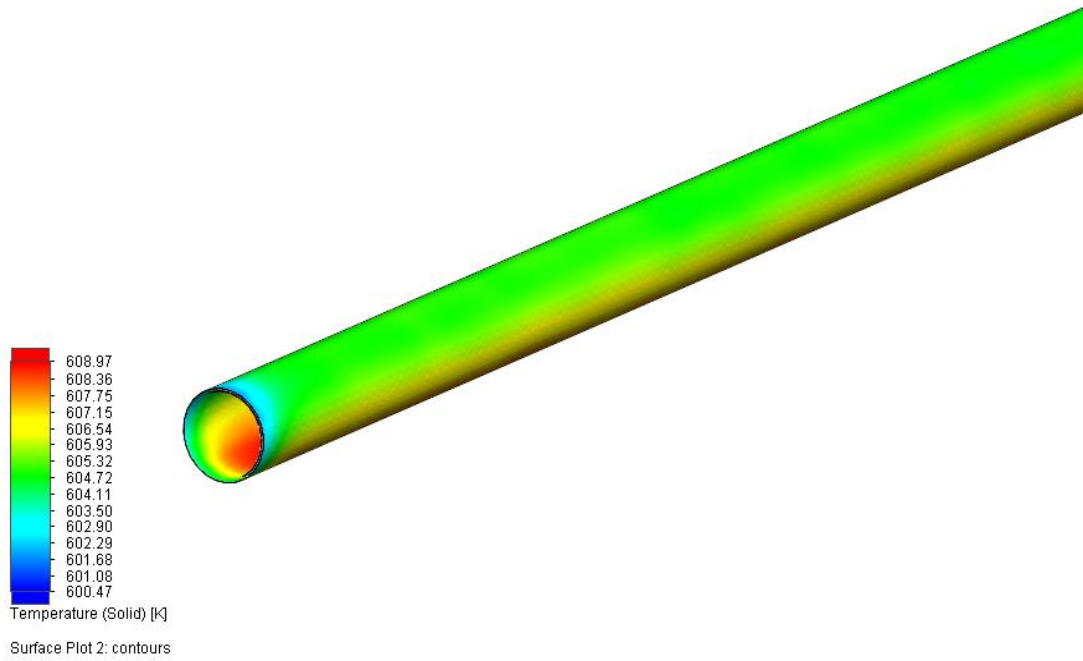
Εικόνα 5.33 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=6\%$) και σωλήνα χωρίς πτερύγια



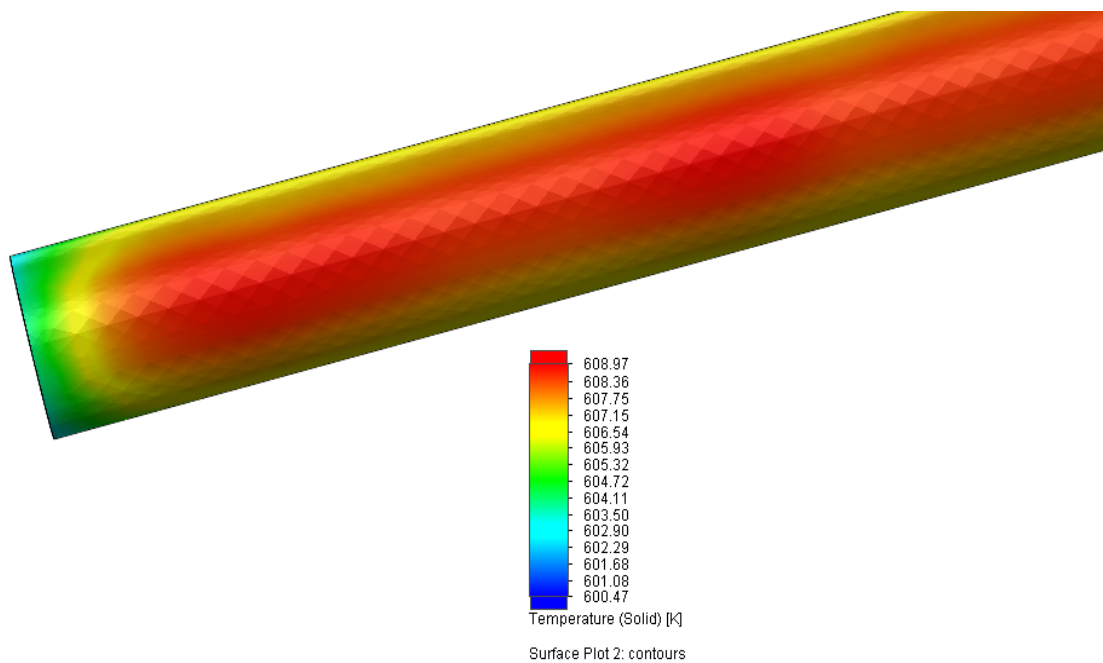
Εικόνα 5.34 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Liquid Sodium και σωλήνα χωρίς πτερύγια



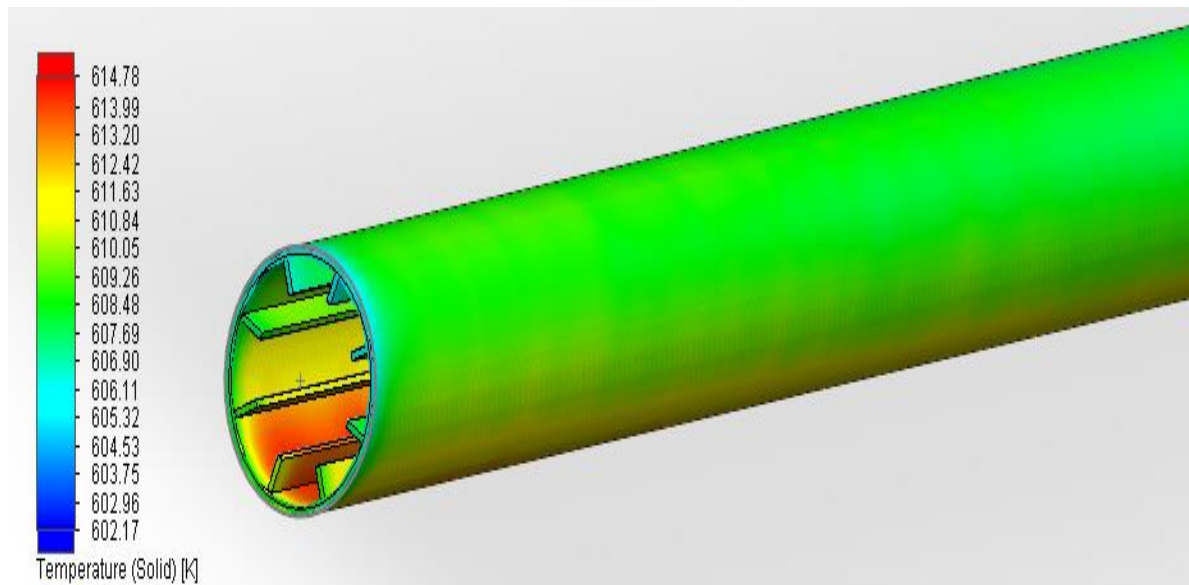
Εικόνα 5.35 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Liquid Sodium και σωλήνα χωρίς πτερύγια



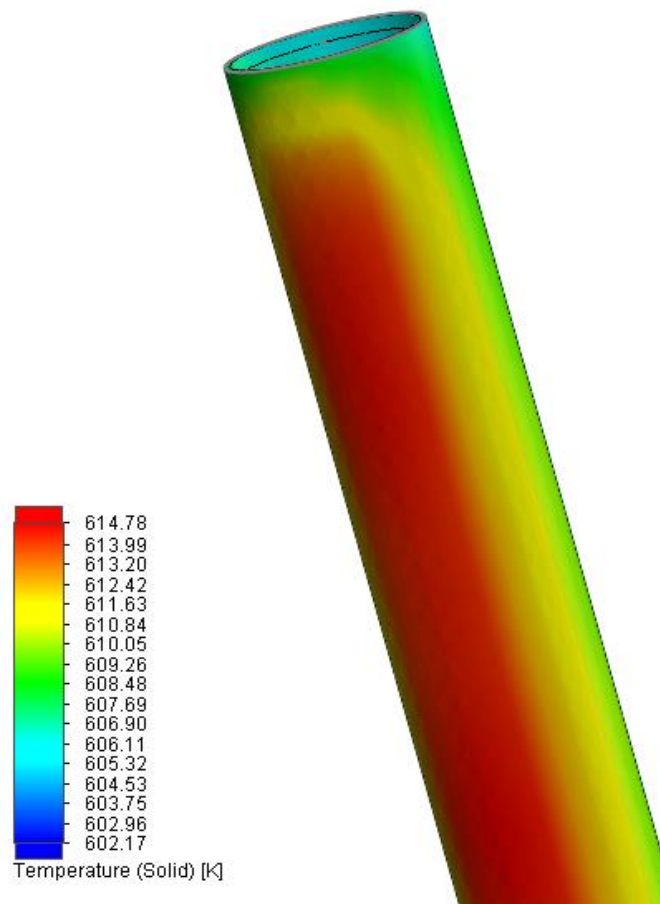
Εικόνα 5.36 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Molten Salt και σωλήνα χωρίς πτερύγια



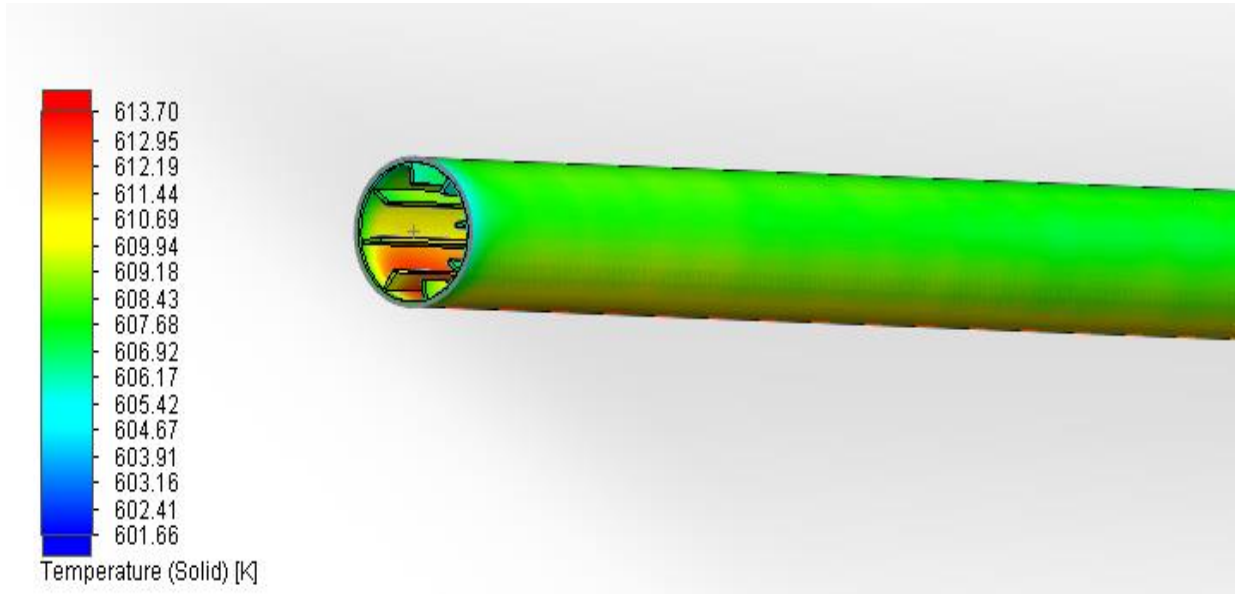
Εικόνα 5.37 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Molten Salt και σωλήνα χωρίς πτερύγια



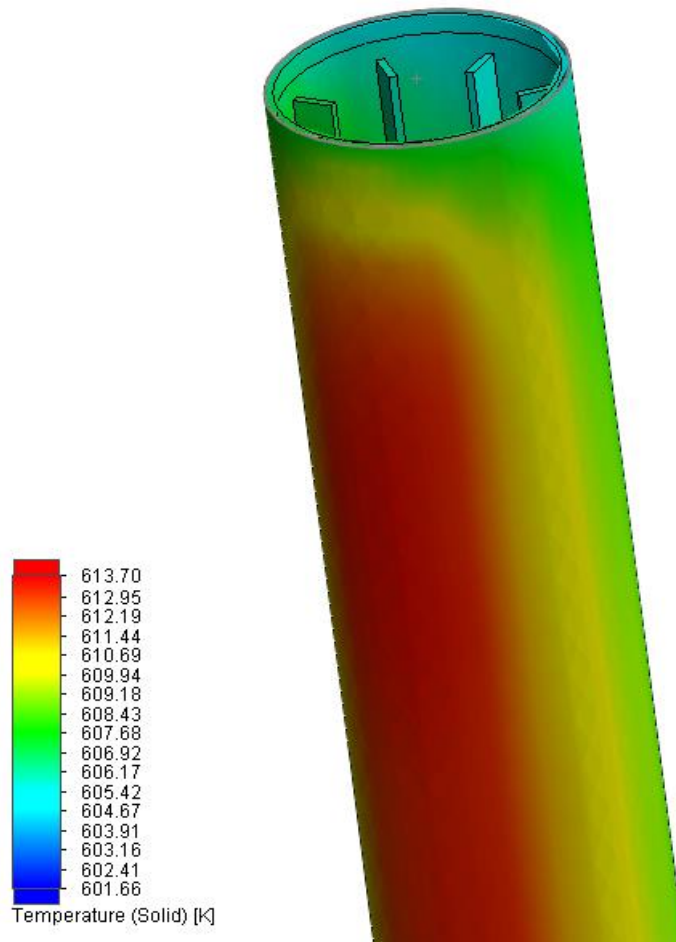
Εικόνα 5.38 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 και σωλήνα με πτερύγια



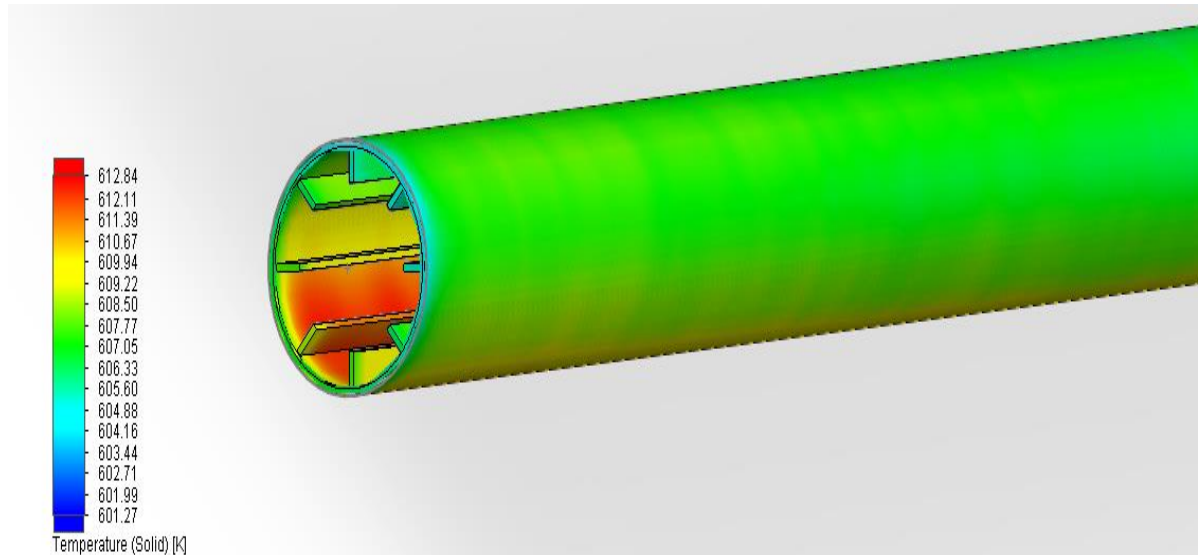
Εικόνα 5.39 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 και σωλήνα με πτερύγια



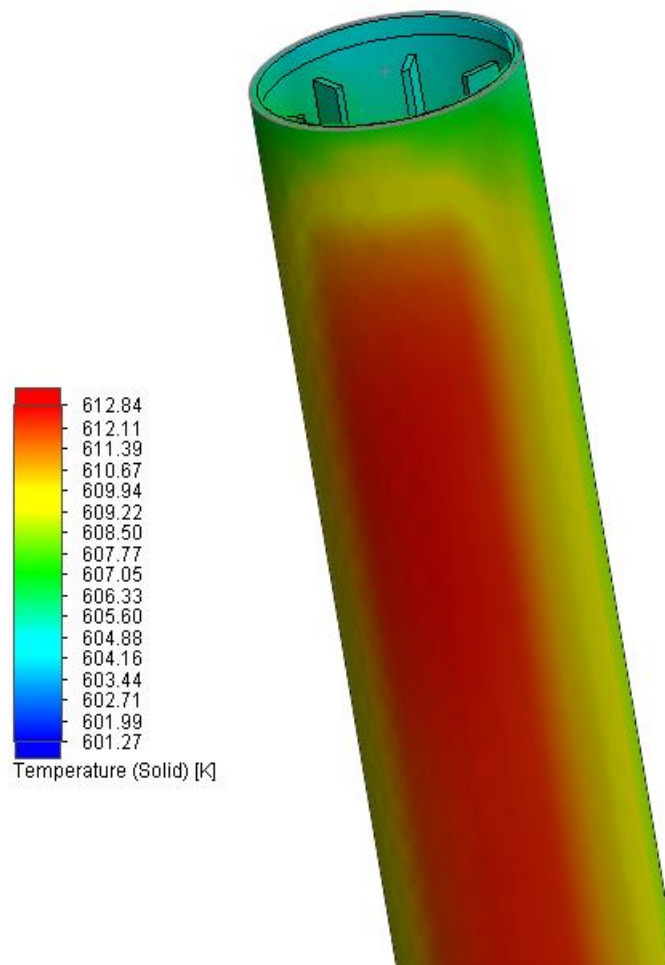
Εικόνα 5.40 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=2\%$) και σωλήνα με πτερύγια



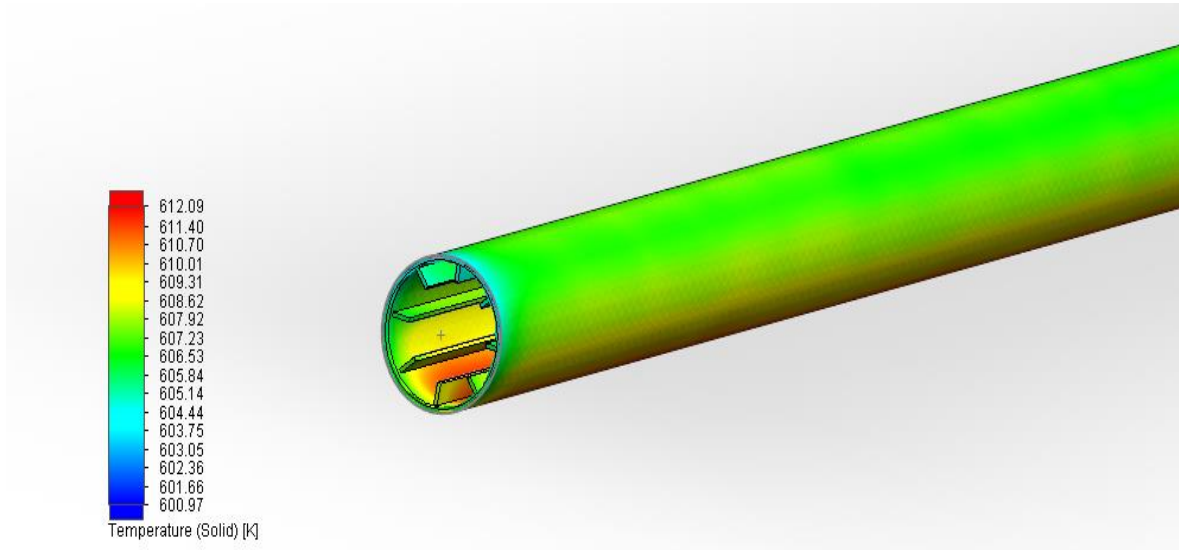
Εικόνα 5.41 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=2\%$) και σωλήνα με πτερύγια



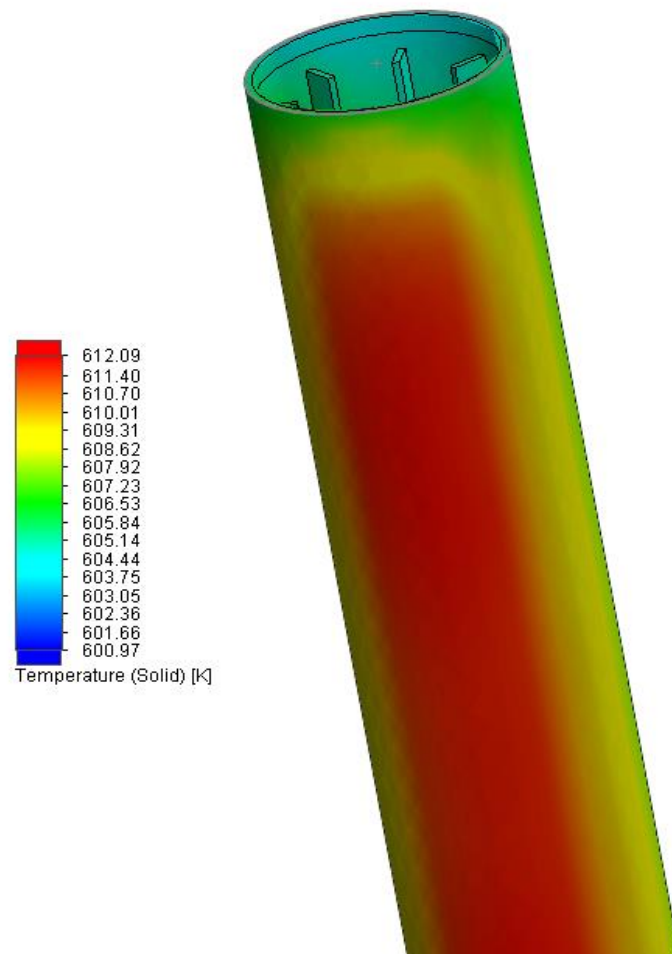
Εικόνα 5.42 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=4\%$) και σωλήνα με πτερύγια



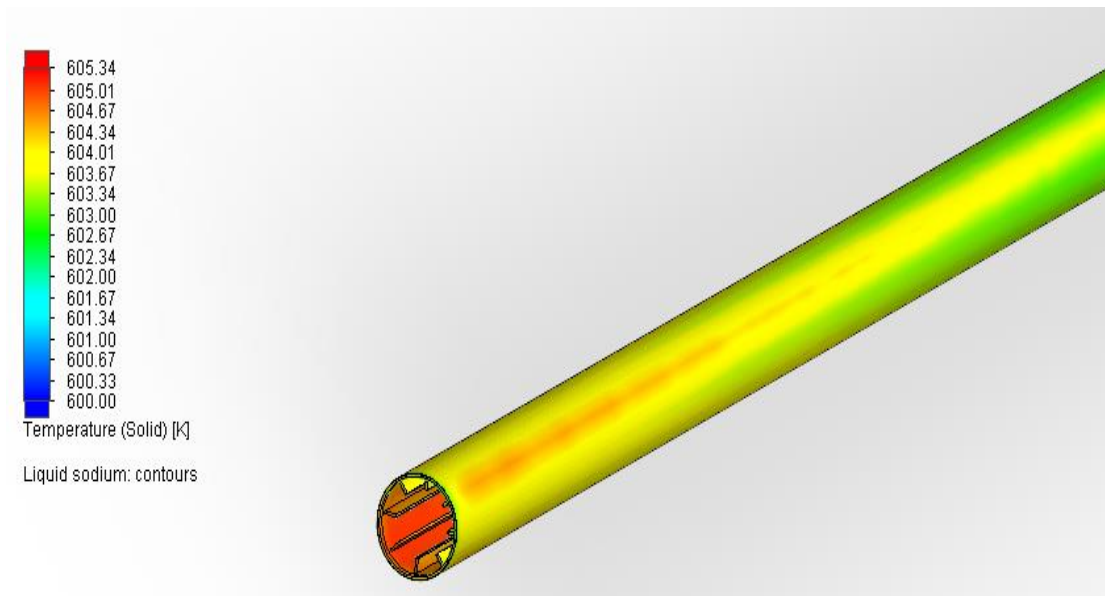
Εικόνα 5.43 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=4\%$) και σωλήνα με πτερύγια



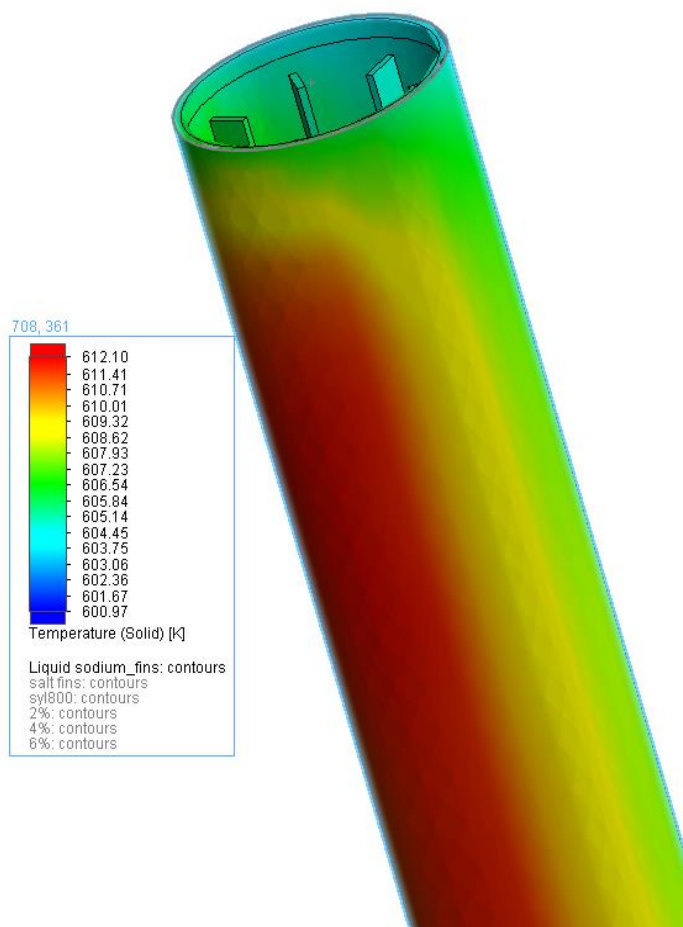
Εικόνα 5.44 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=6\%$) και σωλήνα με πτερύγια



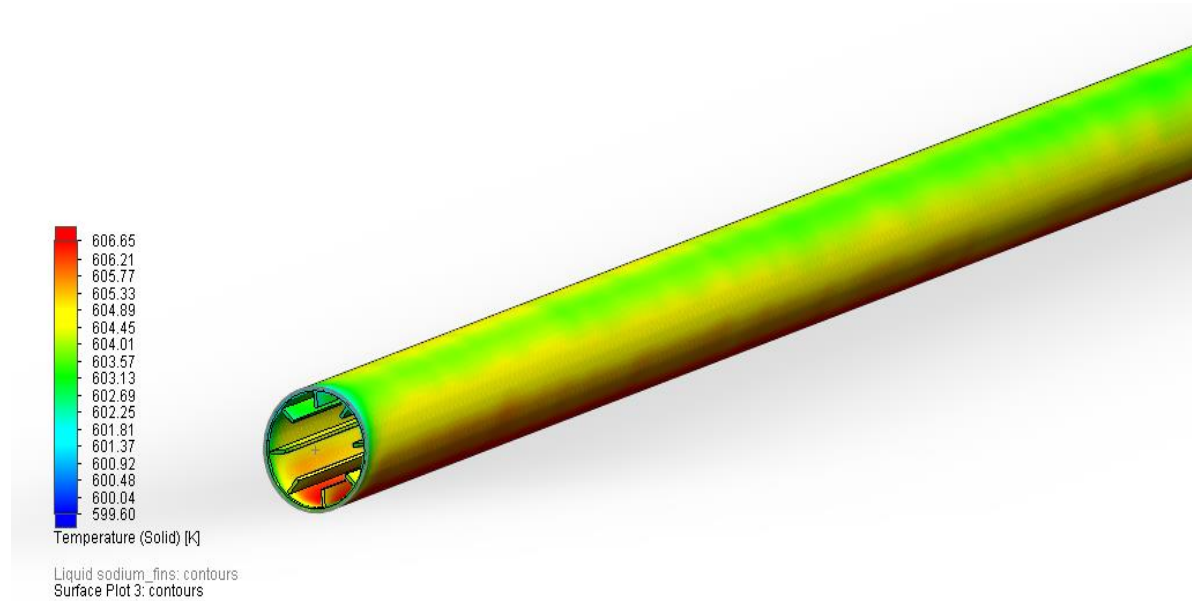
Εικόνα 5.45 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Syltherm 800 ($\phi=6\%$) και σωλήνα με πτερύγια



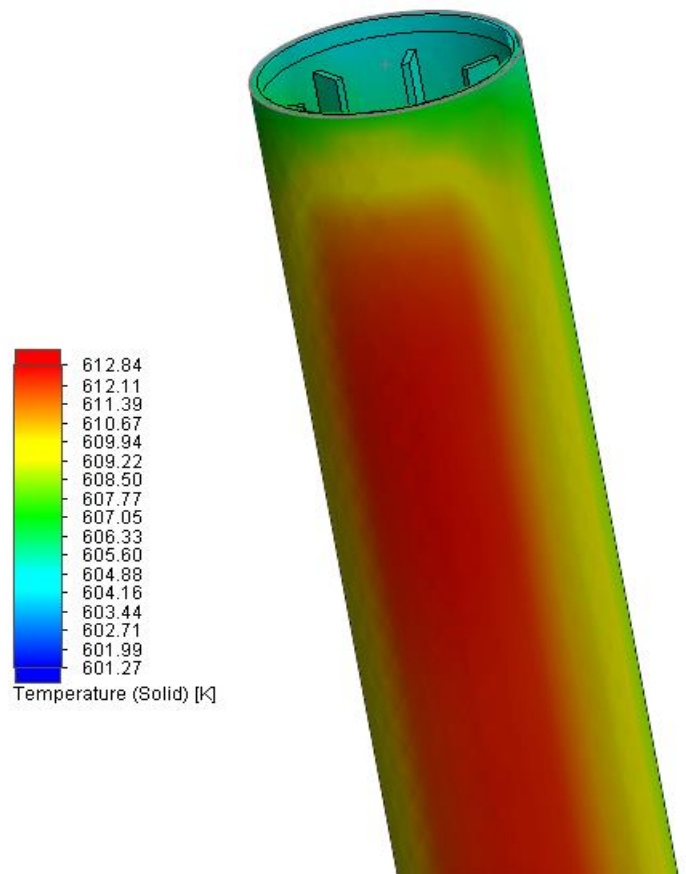
Εικόνα 5.46 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Liquid Sodium και σωλήνα με πτερύγια



Εικόνα 5.47 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Liquid Sodium και σωλήνα με πτερύγια

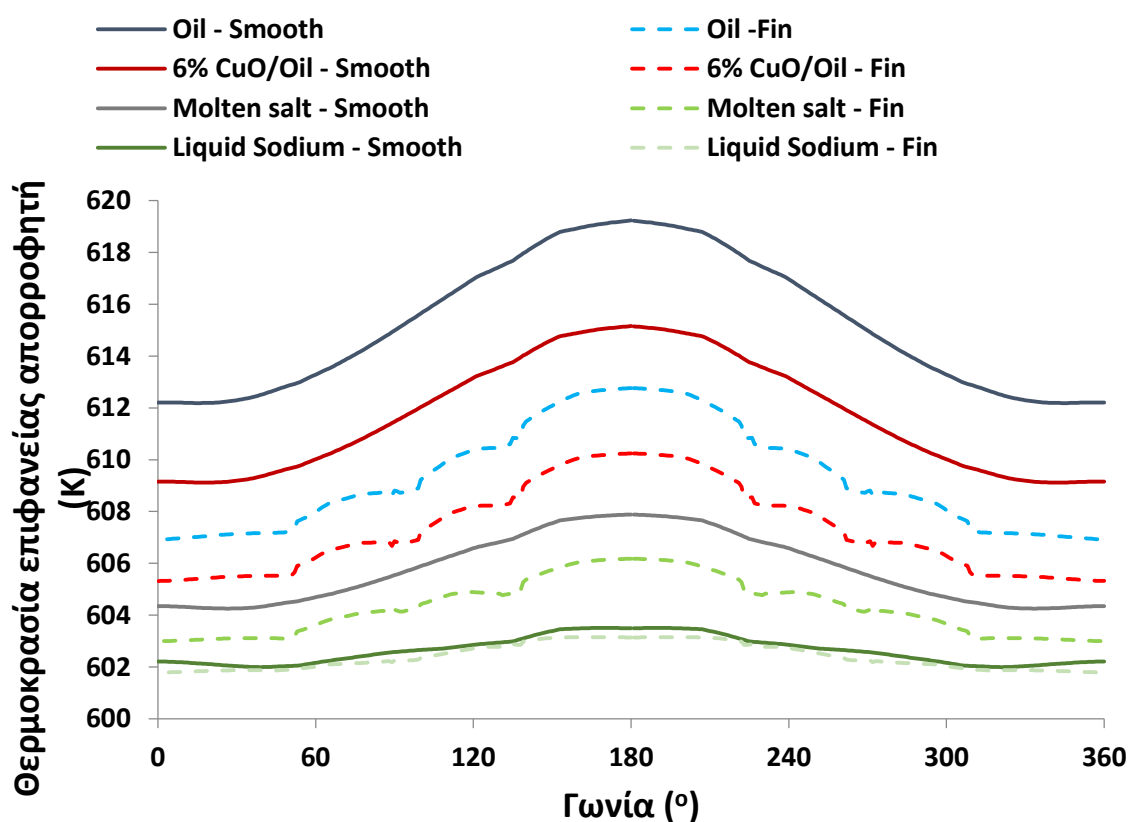


Εικόνα 5.48 Κατανομή θερμοκρασιών στον απορροφητήρα, για την περίπτωση Molten Salt και σωλήνα με πτερύγια



Εικόνα 5.49 Κατανομή θερμοκρασιών στο κάτω μέρος του απορροφητήρα, για την περίπτωση Molten Salt και σωλήνα με πτερύγια

Στο παρακάτω διάγραμμα, βλέπουμε την μεταβολή της θερμοκρασίας του απορροφητήρα, κατά την περιμετρική έννοια της διατομής του. Η μορφή του σχήματος αυτού, επιβεβαιώνουν τα αρχικά σχόλια που κάναμε για το μέγεθος των θερμοκρασιών. Δηλαδή, ότι όλες οι περιπτώσεις σωλήνα με πτερύγια παρουσιάζουν μικρότερες θερμοκρασίες επιφανείας, σε σύγκριση με τον απλής γεωμετρίας σωλήνα, για το ίδιο θερμικό μέσο. Το ίδιο ισχύει και για τις περιπτώσεις Syltherm 800 ($\phi=2\%$, 4% , 6%), τηγμένου άλατος και υγρού νατρίου, σε σχέση με το Syltherm 800 ($\phi=0\%$), λόγω αύξησης του συντελεστή h . Τέλος, στις καμπύλες που αφορούν τον απορροφητήρα με πτερύγια, παρατηρούμε κάποιες ασυνέχειες. Αυτές, οφείλονται στην ύπαρξη των πτερυγίων στο εσωτερικό, τα οποία αλοιώνουν την ομοιομορφία του θερμοκρασιακού προφίλ.



Εικόνα 5.50 Κατανομή θερμοκρασιών στην κυλινδρική επιφάνεια του απορροφητήρα, για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις

5.6 Αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς συλλέκτη

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναφέραμε ότι η μελέτη της ημερήσιας, μηνιαίας και ετήσιας απόδοσης του συλλέκτη Fresnel, είναι αναγκαία λόγω της υψηλής ευαισθησίας του στις μεταβολές της θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο. Για το λόγω αυτό, δημιουργήσαμε ένα υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς του συλλέκτη σε σύνδεση με ένα δοχείο αποθήκευσης. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογιστικό αλγόριθμο στο λογισμικό Matlab.

Αρχικά, στον πίνακα 5.37 βλέπουμε, τα μεγέθη εκείνα τα οποία εξαρτώνται μόνο από την ισχύ της άμεσης ακτινοβολίας, G_b , κατά τις μέσες ημέρες του κάθε μήνα.

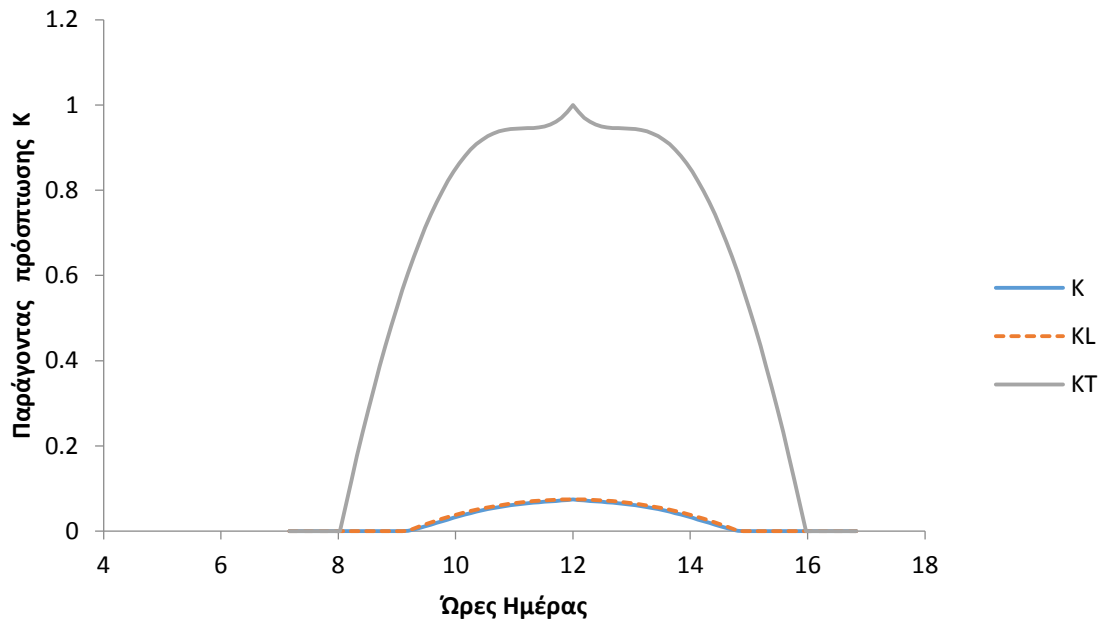
Αυτά είναι τα εξής: η ημερήσια ενέργεια λόγω ακτινοβολίας που προσπίπτει στα πρωτεύοντα κάτοπτρα (E_s , σχέση 4.41), η διαθέσιμη ενέργεια στον απορροφητή (E_{avail} , σχέση 4.42) και η μέση τιμή του ημερήσιου παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης (K_{mean} , σχέση 4.43).

	E_{avail} (kWh)	E_s (kWh)	K_{mean}
ΙΑΝΟΥΡΙΟΣ	6.51	178.61	0.04
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	23.21	198.27	0.12
ΜΑΡΤΙΟΣ	62.36	216.60	0.29
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	125.10	231.91	0.54
ΜΑΙΟΣ	163.54	241.61	0.68
ΙΟΥΝΙΟΣ	172.88	244.61	0.71
ΙΟΥΛΙΟΣ	168.06	241.20	0.70
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	142.19	231.99	0.61
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	83.76	217.97	0.38
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	32.99	199.62	0.17
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	9.59	181.36	0.05
ΔΕΚΕΜΒΡΗ	3.99	171.09	0.02

Πίνακας 5.37 Ετήσια κατανομή E_{avail} , E_s , K_{mean}

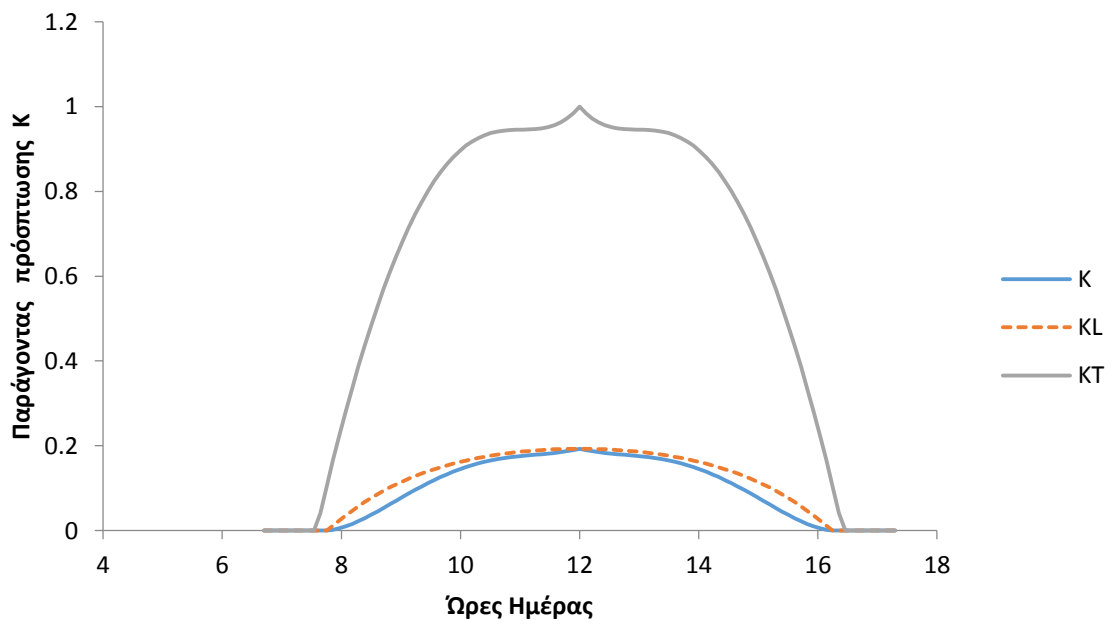
Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενα κεφάλαια, ο παράγοντας γωνίας πρόσπτωσης K , καθώς και οι επιμέρους συνιστώσες του (K_L , K_T), αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη, που μας δείχνουν την μεταβολή της οπτικής απόδοσης του συλλέκτη, συναρτήσει της θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο. Υπενθυμίζεται, ότι στο κεφάλαιο 4 είχαμε δώσει τα αντίστοιχα πολυώνυμα προσέγγισης. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό του K_L χρησιμοποιούμε την σχέση 4.37, για το K_T την σχέση 4.38 και για τον υπολογισμό του K την 4.39. Στα παρακάτω σχήματα, αποτυπώνεται η μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας, για τους 12 μήνες. Παρατηρούμε, ότι η συνιστώσα κατά τον εγκάρσιο άξονα (K_T) διατηρεί ίδια μορφή για όλους τους μήνες. Αυτό συμβαίνει, καθώς η γωνία θ_T εξαρτάται από την πορεία του ήλιου στον άξονα Ανατολής- Δύσης. Εν αντιθέσει, η μορφή του K_L , αλλάζει σημαντικά στο πέρασμα των μηνών. Συγκεκριμένα, η διαφορά φαίνεται μεταξύ χειμερινών (Οκτώβριος- Φεβρουάριος) και θερινών (Μάρτιος- Σεπτέμβριος) μηνών. Αυτό, οφείλεται στο ότι οι απώλειες κατά την επιμήκη διεύθυνση (απώλειες τέλους) είναι πιο έντονες κατά τον χειμώνα. Ακόμα, παρατηρούμε ότι για τους θερινούς μήνες (με κορυφαίους τον Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο) έχουμε υψηλές τιμές του K , κάτι που είναι λογικό καθώς ο ήλιος βρίσκεται σε πιο υψηλή θέση στον ουράνιο θόλο. Αντιθέτως, στους χειμερινούς μήνες (κυρίως Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Νοέμβριο, Δεκέμβριο), έχουμε πολύ χαμηλές τιμές του K επομένως, ο συλλέκτης μας θα υπολειπεται. Η φυσική ερμηνεία αυτού, έγκειται στο γεγονός ότι για πολύ χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης, ένα μεγάλο ποσοστό ανακλώμενων ακτινών από τα πρωτεύοντα 5.62 κάτοπτρα, παραμένει ανεκμετάλλευτο, καθώς διαφεύγει στο περιβάλλον. Τέλος, όπως φαίνεται σε όλα τα διαγράμματα ο συντελεστής K μεγιστοποιείται κατά το ηλιακό μεσημέρι (12:00), επειδή ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο, οπότε $\theta_T=0^\circ$. Παρακάτω, βλέπουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα (5.51 έως 5.62), για τους 12 μήνες, καθώς και την τρισδιάστατη απεικόνισή τους στην εικόνα 5.63.

Ιανουάριος

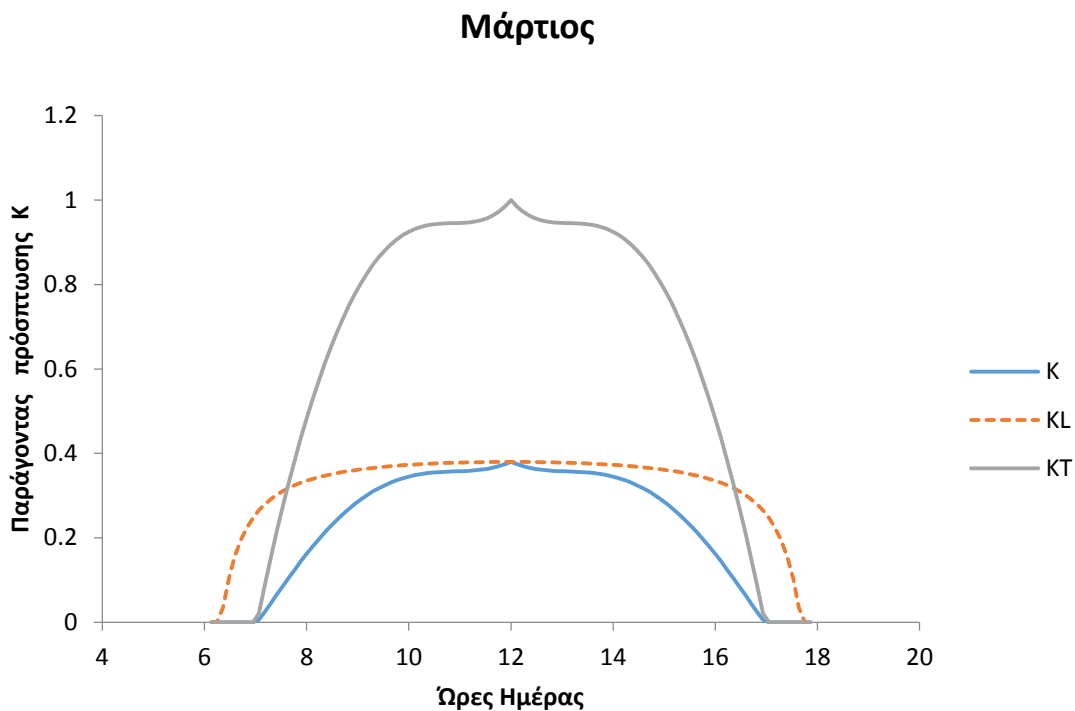


Εικόνα 5.51 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Ιανουάριο

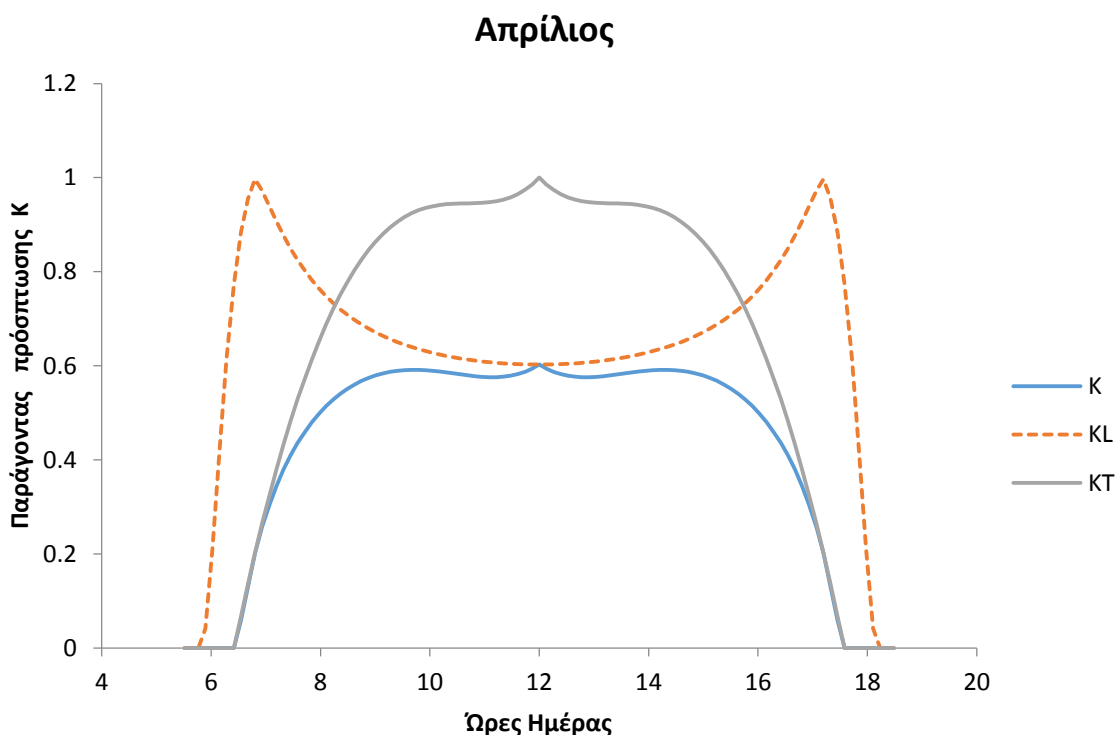
Φεβρουάριος



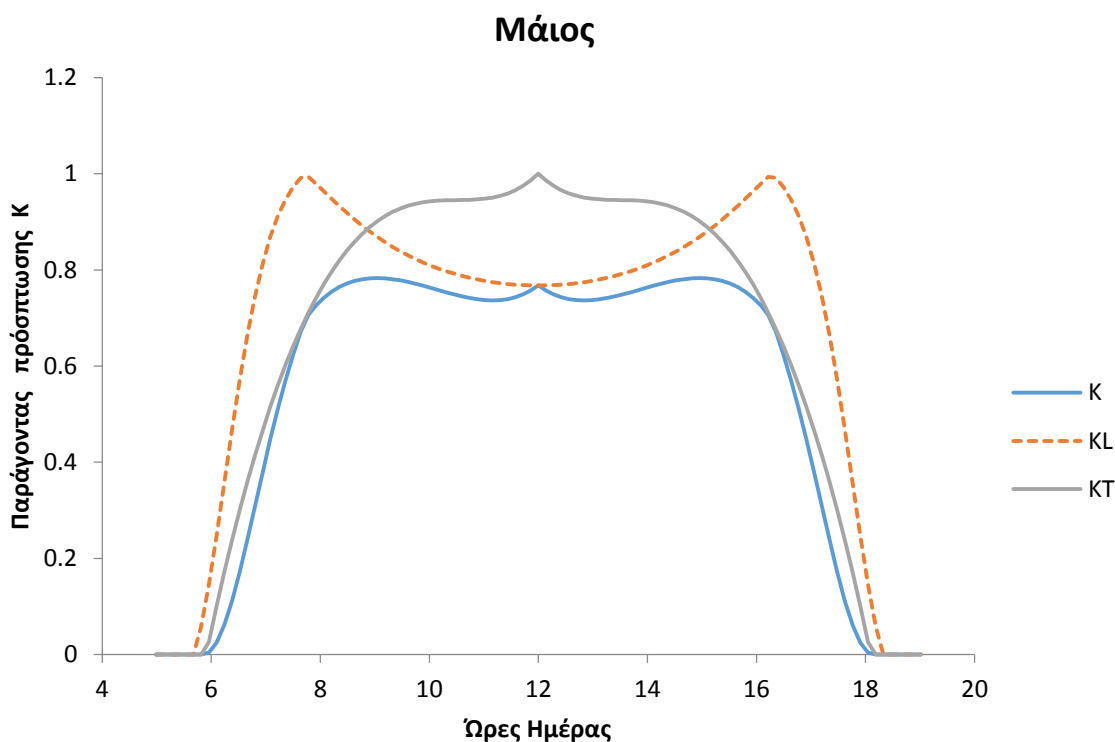
Εικόνα 5.52 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Φεβρουάριο



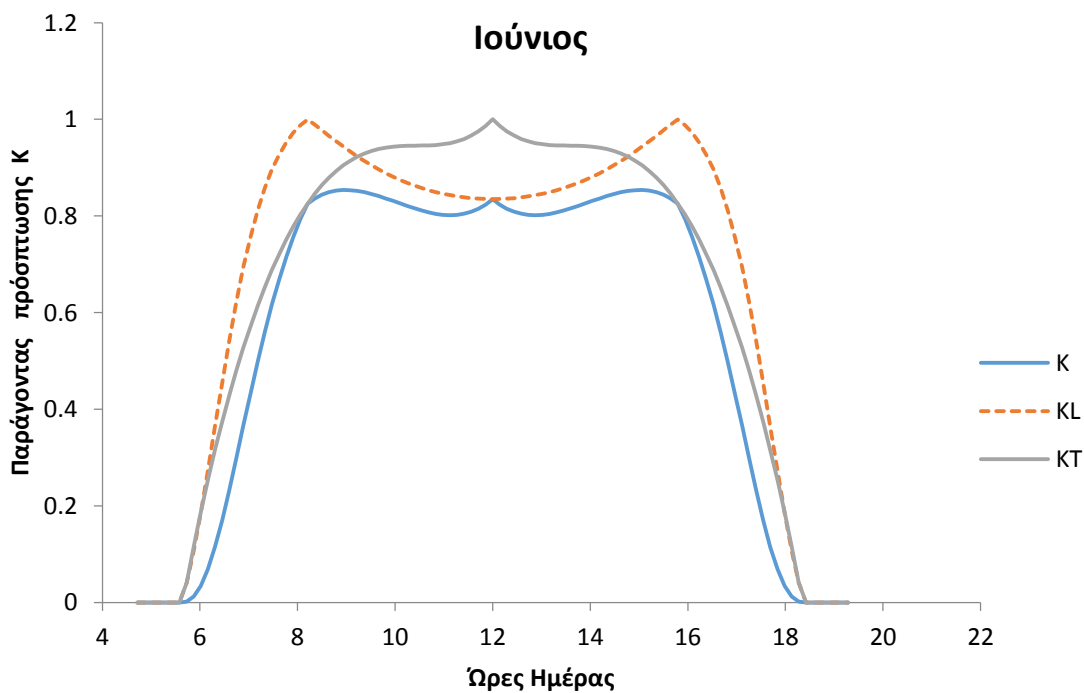
Εικόνα 5.53 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Μάρτιο



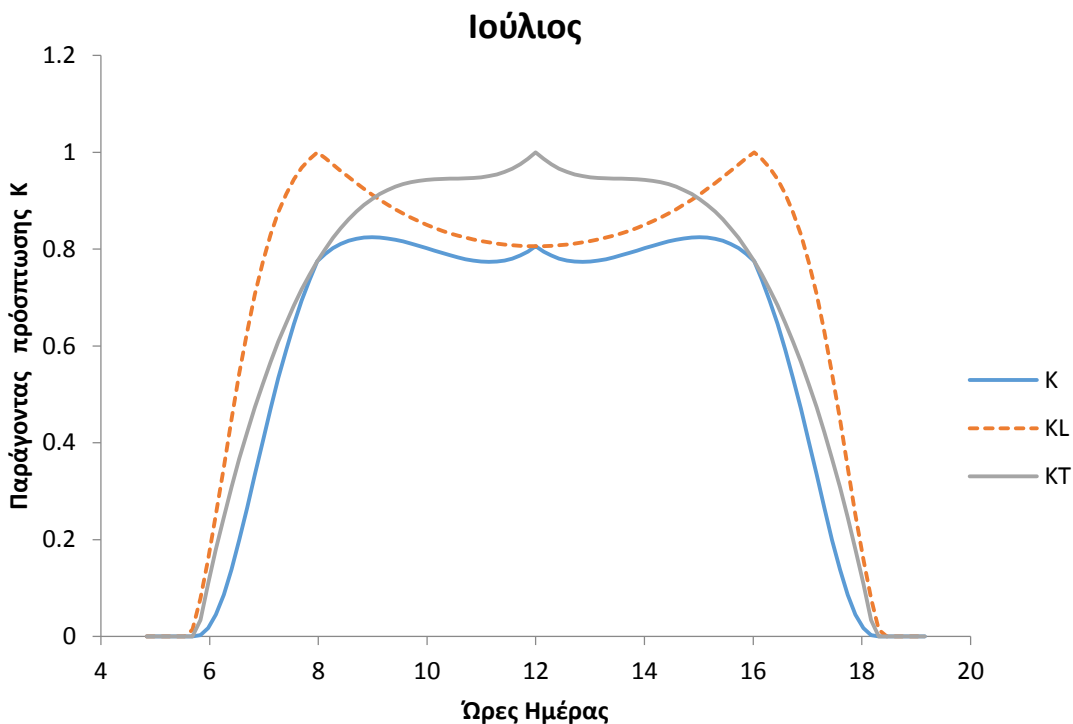
Εικόνα 5.54 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Απρίλιο



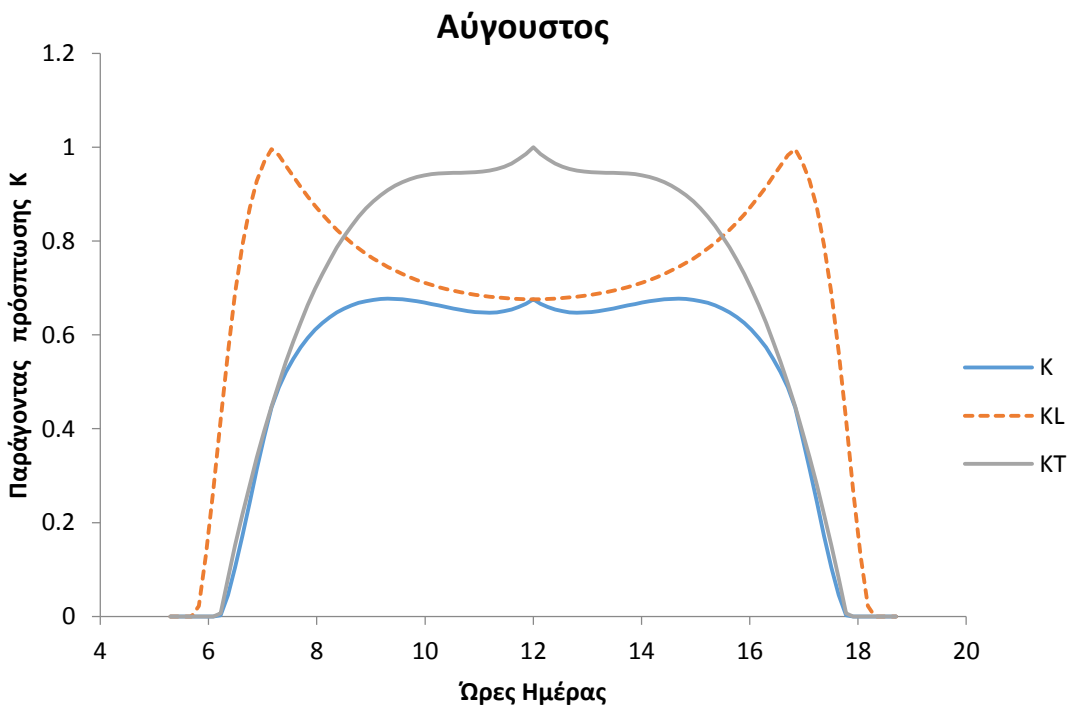
Εικόνα 5.55 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Μάιο



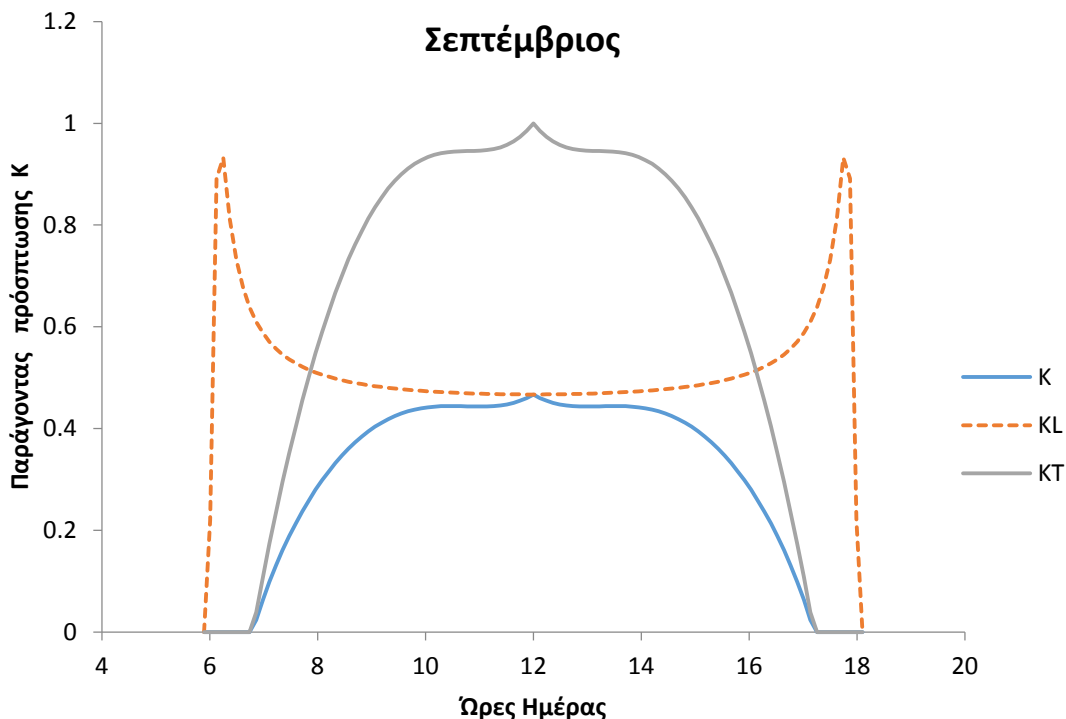
Εικόνα 5.56 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Ιούνιο



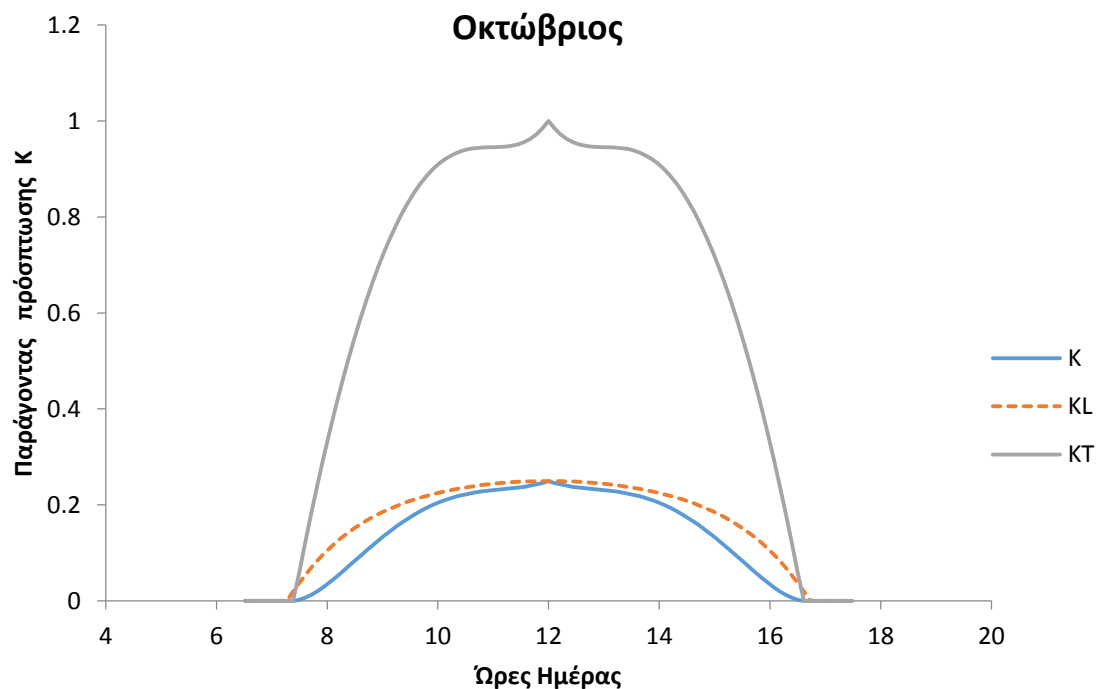
Εικόνα 5.57 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Ιούλιο



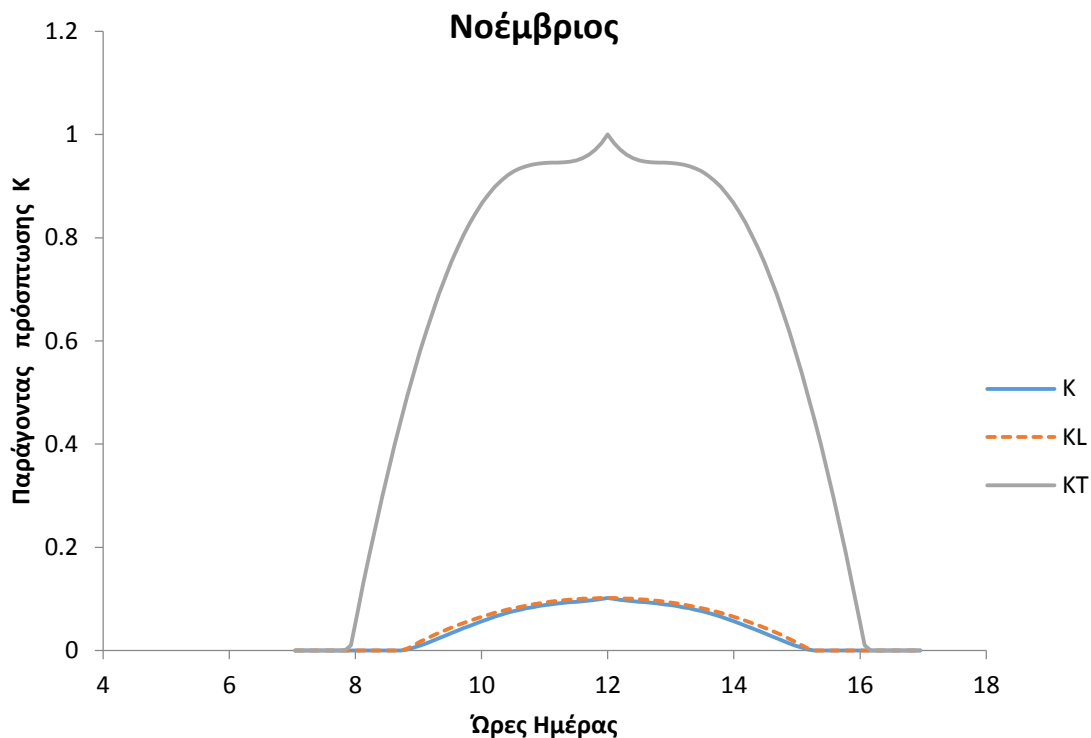
Εικόνα 5.58 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Αύγουστο



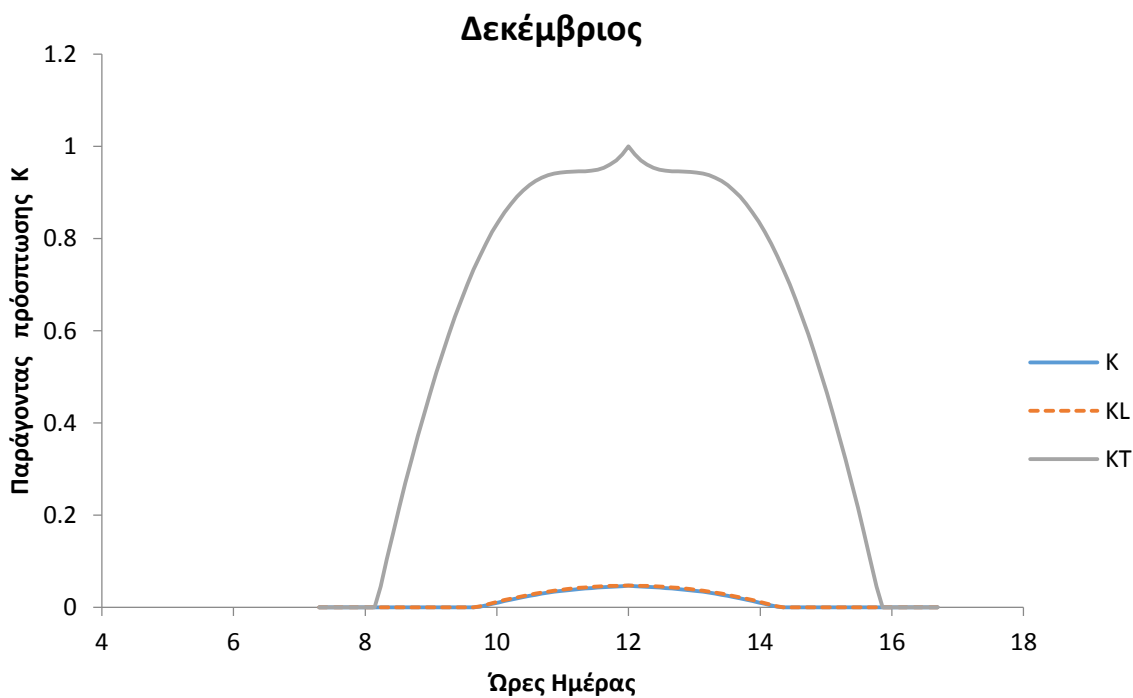
Εικόνα 5.59 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Σεπτέμβριο



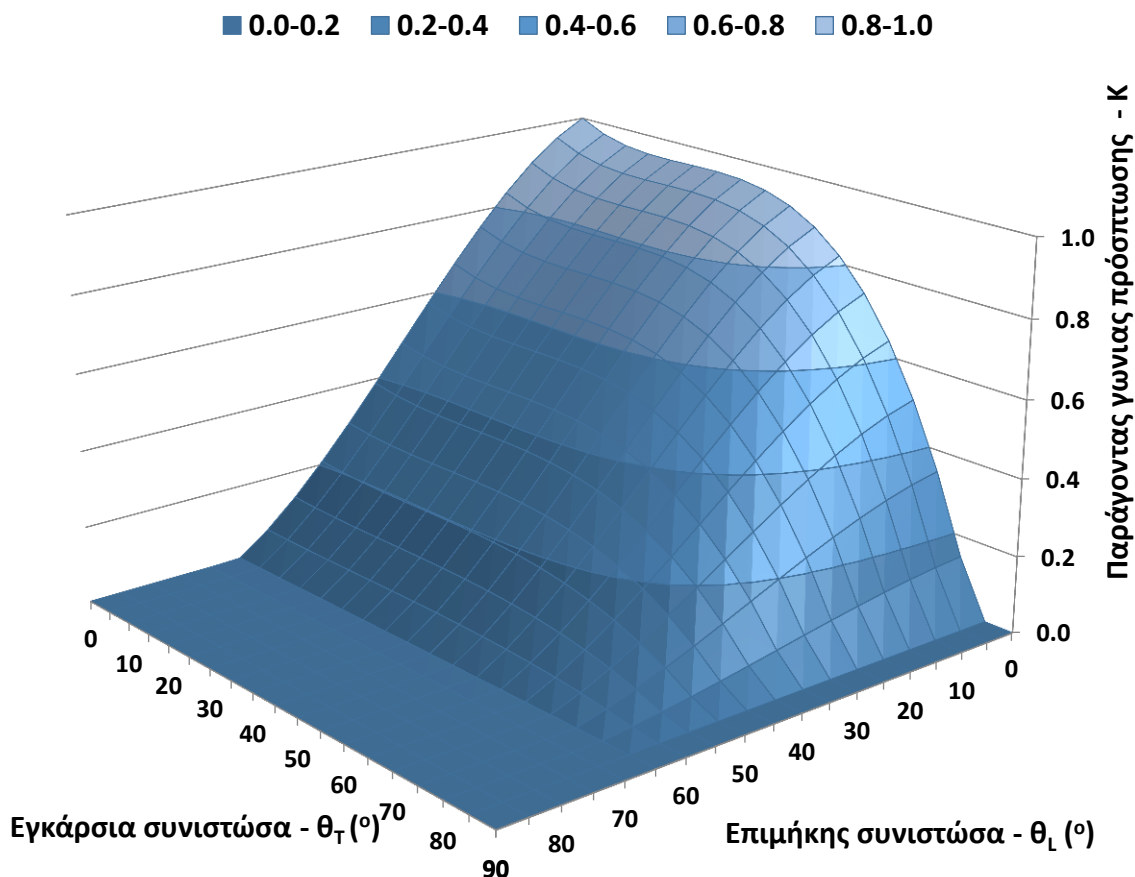
Εικόνα 5.60 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Οκτώβριο



Εικόνα 5.61 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Νοέμβριο

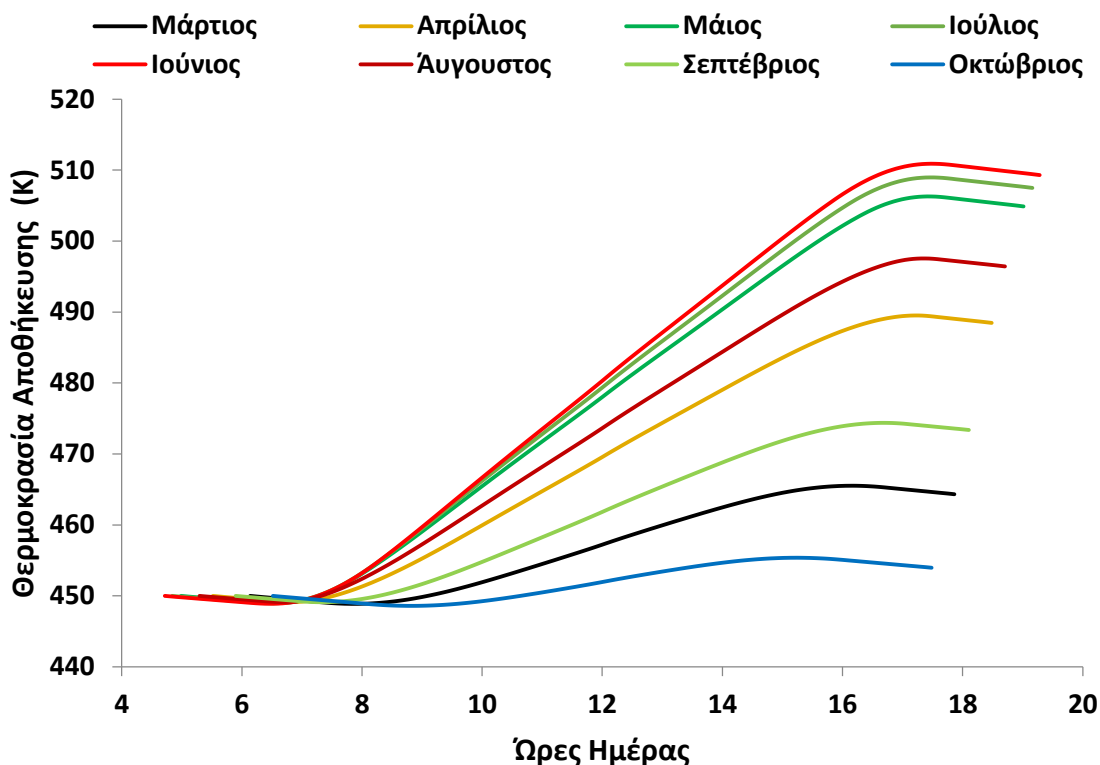


Εικόνα 5.62 Μεταβολή των K , K_L , K_T κατά τη διάρκεια της ημέρας για τον Δεκέμβριο



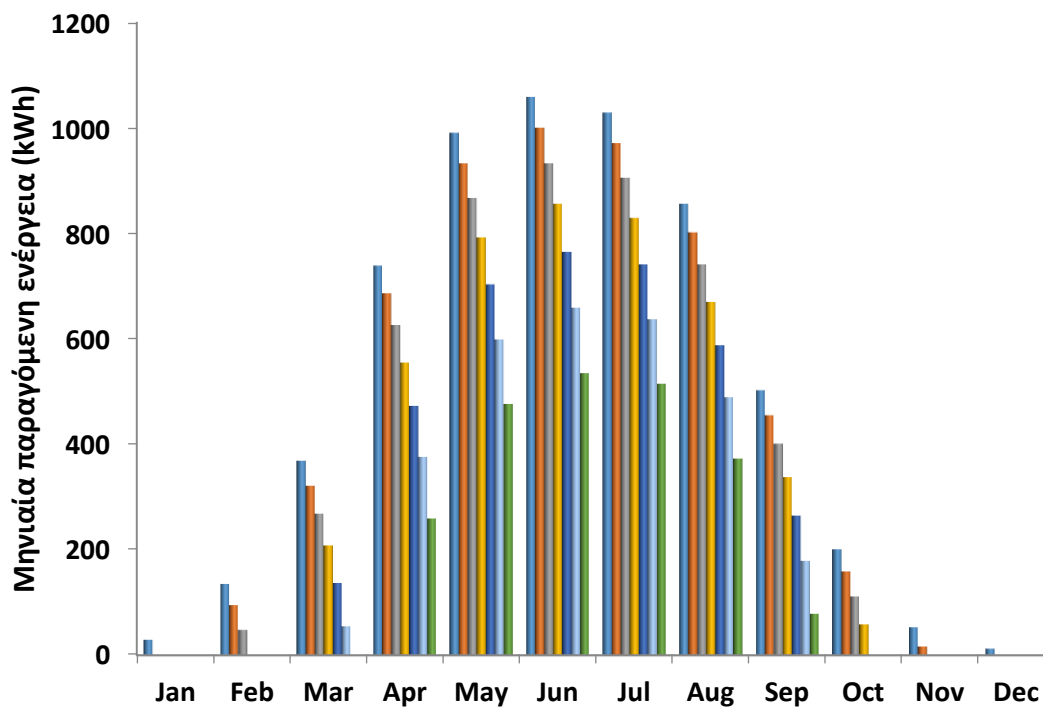
Εικόνα 5.63 Τρισδιάστατη απεικόνιση συντελεστή K συναρτήσει θ_L , θ_T

Ένα αρκετά σημαντικό μέγεθος, για το μοντέλο μας, αποτελεί η θερμοκρασία αποθήκευσης του μέσου στο δοχείο αποθήκευσης, στο τέλος της ημέρας. Αυτή υπολογίζεται από την επίλυση των σχέσεων 4.31, 4.32, 4.34, 4.35. Στο παρακάτω διάγραμμα (5.64), βλέπουμε την μεταβολή της για τους μήνες που λειτουργεί αποδοτικά ο συλλέκτης μας. Όπως αναμενόταν, έχουμε μεγιστοποίηση της κατά τον Ιούνιο και τον Ιούλιο. Στο σχήμα, 5.65 αποτυπώνεται η μηνιαία παραγόμενη ενέργεια του συλλέκτη E_{st} η οποία υπολογίζεται από την σχέση 4.44 πολλαπλασιασμένη με τις μέρες ηλιοφάνειας για κάθε μήνα από τον πίνακα, 4.7. Παρατηρούμε, ότι όσο μικρότερη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού T_o έχουμε, τόσο περισσότερη ενέργεια παράγεται. Αυτό οφείλεται στον υψηλότερο βαθμό απόδοσης, λόγω χαμηλών θερμικών απωλειών. Ακόμα, στο ίδιο σχήμα, βλέπουμε ότι ο βέλτιστος μήνας είναι ο Ιούνιος με 1100 kWh παραγόμενη ενέργεια, ενώ οι χειμερινοί μήνες, όπως ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος, ο Νοέμβριος και ο Δεκέμβριος έχουν αμυδρή παραγωγή. Ουσιαστικά, όπως έχουμε προαναφέρει εκείνους τους μήνες ο συλλέκτης υπολειτουργεί. Τέλος, στο σχήμα της εικόνας 5.66 φαίνεται η αποθηκευμένη εξέργεια στο δοχείο (Z_{st}) [kWh] η οποία δίνεται από την σχέση 4.45. Εφόσον, είναι ανάλογη της E_{st} , έχουμε μεγιστοποίηση της κατά τον Ιούνιο, με τους Ιούλιο και Αύγουστο να ακολουθούν, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4.45. Επίσης, βλέπουμε ότι όσον αφορά την θερμοκρασία εισόδου T_o , η βέλτιστη ως προς την άποψη της εξεργειακής απόδοσης αποτελεί η $T_o = 450$ K με μικρή διαφορά από την $T_o = 500$ K.

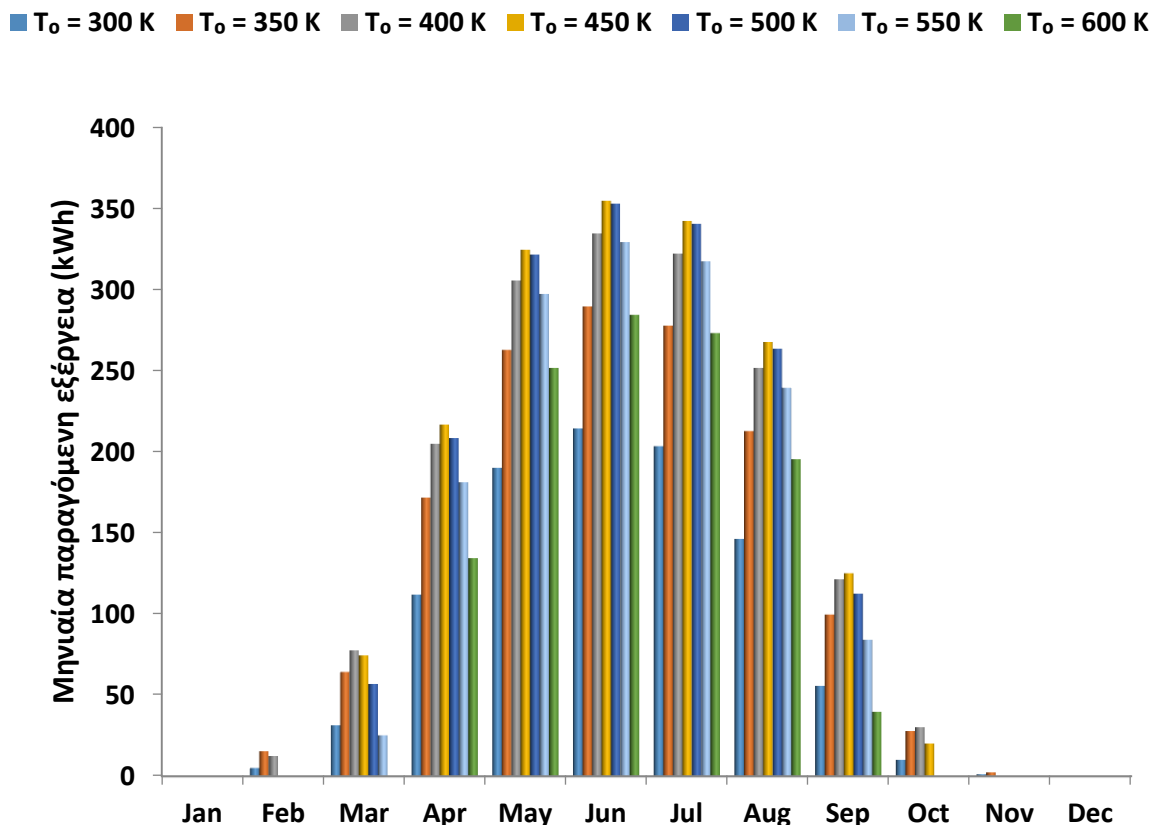


Εικόνα 5.64 Θερμοκρασία αποθήκευσης δοχείου κατά τη διάρκεια της ημέρας

■ $T_o = 300\text{ K}$ ■ $T_o = 350\text{ K}$ ■ $T_o = 400\text{ K}$ ■ $T_o = 450\text{ K}$ ■ $T_o = 500\text{ K}$ ■ $T_o = 550\text{ K}$ ■ $T_o = 600\text{ K}$

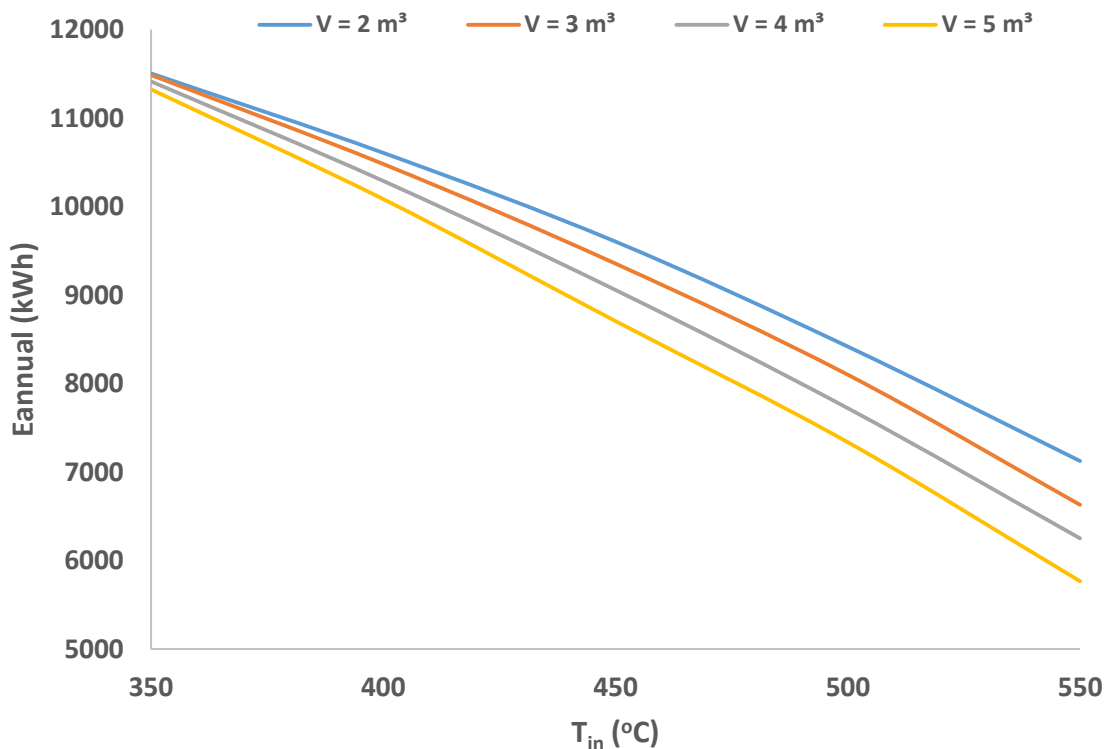


Εικόνα 5.65 Μηνιαία παραγόμενη ενέργεια συλλέκτη

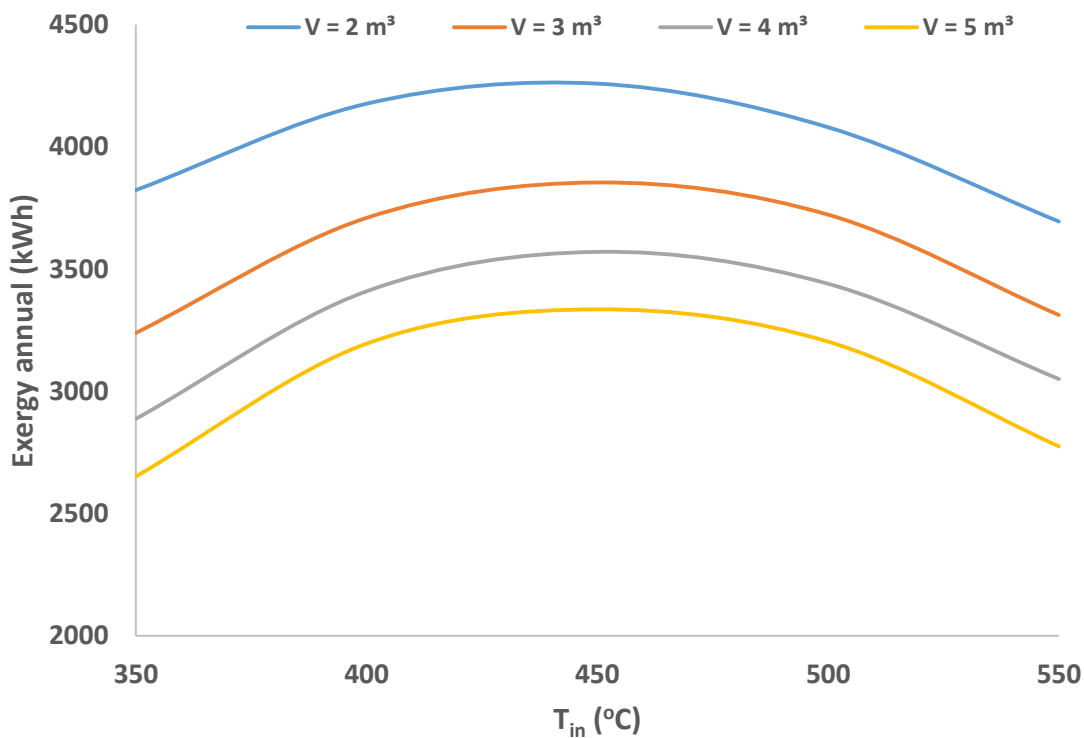


Εικόνα 5.66 Μηνιαία παραγόμενη εξέργεια συλλέκτη

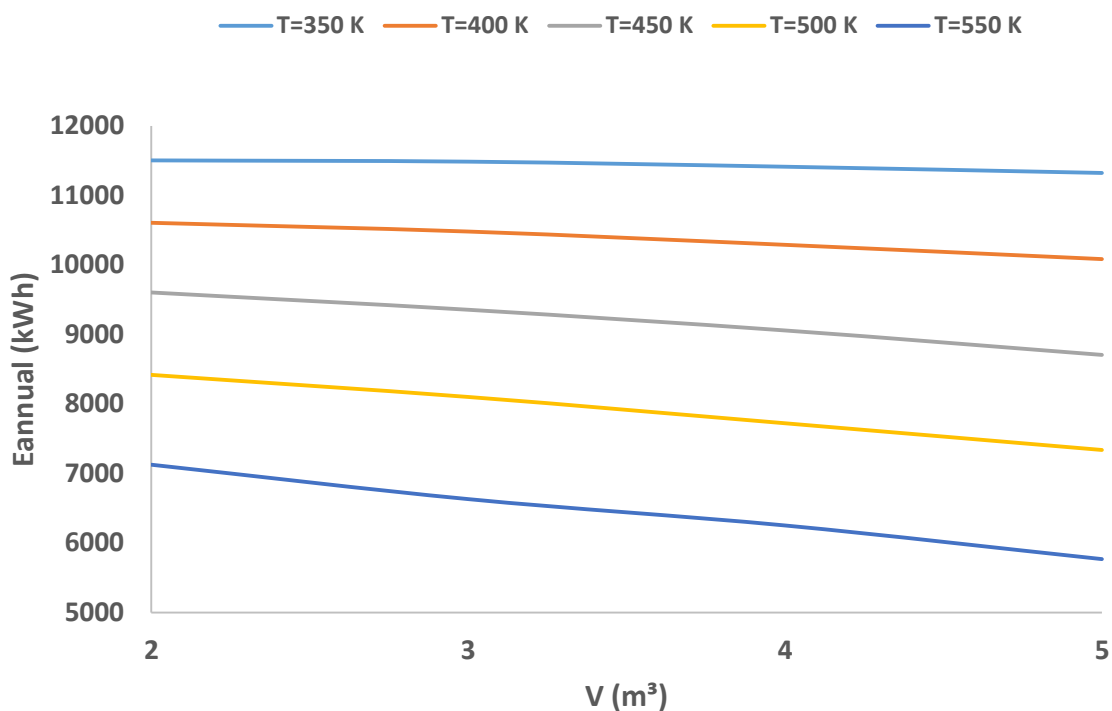
Είναι αρκετά σημαντικό, να εξετάσουμε παραμετρικά την συμπεριφορά του συλλέκτη. Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 4, οι παράμετροι σχεδίασης μας αποτελούν ο όγκος του δοχείου V_{tank} και η θερμοκρασία εισόδου του θερμικού μέσου T_{in} . Στο σχήμα 5.67, βλέπουμε την ετήσια παραγόμενη ενέργεια E_{annual} η οποία είναι το άθροισμα των μηνιαίων ενεργειών του σχήματος 5.65, συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου T_{in} , με παράμετρο σχεδίασης το V_T . Παρατηρούμε, ότι όσο μικρότερος είναι ο όγκος του δοχείου, τόσο αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια. Αυτό οφείλεται στις μικρότερες θερμικές απώλειες του δοχείου προς το περιβάλλον λόγω μικρότερης επιφάνειας συναλλαγής. Επίσης, για μικρότερες T_{in} έχουμε υψηλότερη ετήσια παραγόμενη ενέργεια, λόγω υψηλότερου θερμικού βαθμού απόδοσης. Όσον αφορά την εξέργεια, αυτή αποτελεί το άθροισμα των μηνιαίων τιμών του σχήματος 5.66. Επομένως, στο σχήμα της εικόνας 5.68 βλέπουμε ότι μεγιστοποιείται στην $T_{\text{in}} = 450\text{ K}$ κάτι που διαπιστώσαμε στο σχήμα 5.66. Επίσης, για μικρότερο όγκο δοχείου, για τον ίδιο λόγο με προηγουμένως, έχουμε υψηλότερες τιμές ετήσιας παραγόμενης εξέργειας. Στο διάγραμμα 5.69, αποτυπώνεται η μεταβολή της E_{annual} με τετμημένη τον όγκο του δοχείου και παράμετρο την T_{in} . Συγκρίνοντας, το σχήμα αυτό με το αντίστοιχο, της 5.65 παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία εισόδου, επηρεάζει περισσότερο την ενέργεια από ότι ο όγκος του δοχείου. Το ίδιο συμπεραίνουμε και για την ετήσια εξέργεια του σχήματος 5.70 σε σύγκριση με το 5.66. Παρακάτω, ακολουθούν τα εν λόγω διαγράμματα.



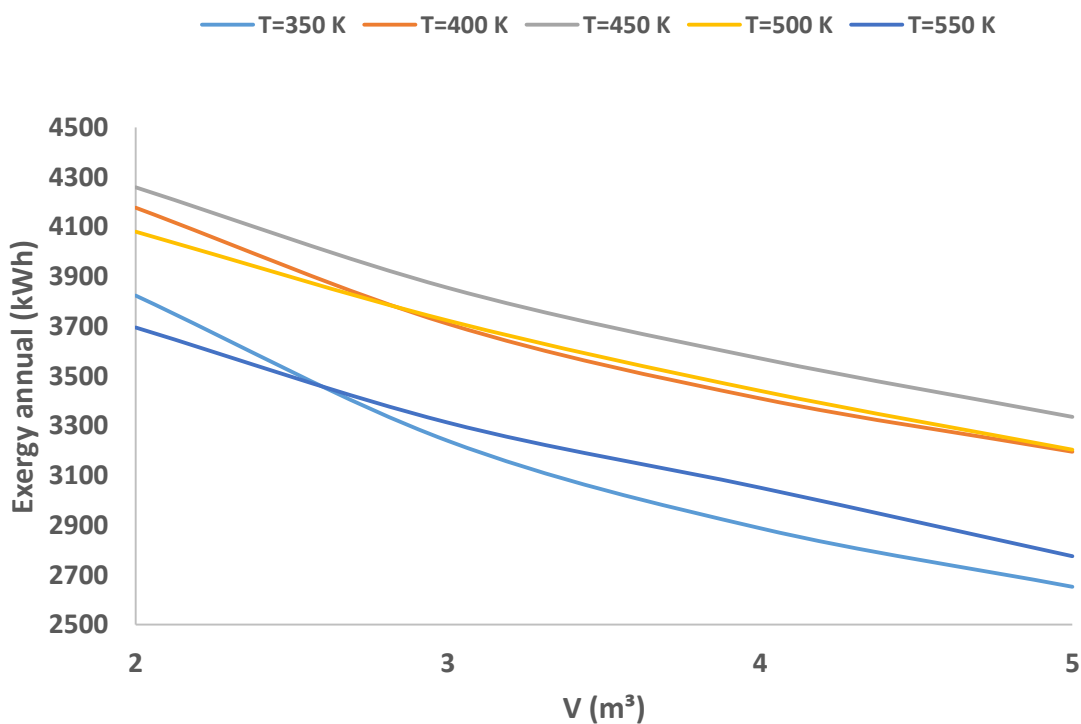
Εικόνα 5.67 Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου, για $V_T = 2, 3, 4, 5 \text{ m}^3$



Εικόνα 5.68 Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου, για $V_T = 2, 3, 4, 5 \text{ m}^3$



Εικόνα 5.69 Ετήσια παραγόμενη ενέργεια συναρτήσει του όγκου του δοχείου, για $T_{in}=350, 400, 450, 500, 550$ K



Εικόνα 5.70 Ετήσια παραγόμενη εξέργεια συναρτήσει του όγκου του δοχείου, για $T_{in}=350, 400, 450, 500, 550$ K

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και νέα πεδία έρευνας

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφέρουμε τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Επίσης, θα επισημάνουμε κάποια βασικά στοιχεία του συλλέκτη τα οποία είναι ανάγκη να μελετηθούν σε νέες έρευνες.

6.1 Συμπεράσματα εργασίας

Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, μελετήσαμε την θερμική αλλά και την οπτική συμπεριφορά ενός γραμμικού συλλέκτη Fresnel με επίπεδα πρωτεύοντα κάτοπτρα και παραβολικό δευτερεύον κάτοπτρο. Αυτό το πραγματοποιήσαμε με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου προσομοίωσης, Flow Simulation του λογισμικού Solidworks. Προκειμένου να μελετήσουμε τρόπους αύξησης του θερμικού βαθμού απόδοσης, αρχικά μελετήσαμε την απόδοση για διαφορετικά θερμικά μέσα. Το μέσο αναφοράς, το οποίο συγκρίναμε με όλα τα υπόλοιπα, είναι το Syltherm 800. Πρώτα, δοκιμάσαμε την περίπτωση εμπλουτισμού του Syltherm 800 με νανοσωματίδια CuO και συγκεκριμένα για κατ' όγκο σύσταση $\varphi=2\%$, 4% , 6% . Έπειτα, δοκιμάσαμε τα θερμικά μέσα τηγμένο άλας και υγρό νάτριο τα οποία ενδείκνυνται για θερμοκρασίες εισόδου $T_{in} > 600$ K. Τέλος, μελετήσαμε την περίπτωση της εφαρμογής εσωτερικών πτερυγίων κατά τον επιμήκη άξονα του σωλήνα του απορροφητήρα. Προφανώς, για την εν λόγω γεωμετρία, εξετάσαμε τη λειτουργία για όλα τα παραπάνω θερμικά μέσα. Στη συνέχεια προκειμένου να διαπιστώσουμε την ορθότητα των υπολογισμών της προσομοίωσης, προχωρήσαμε σε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (Validation) συγκρίνοντας αυτά με τις θεωρητικές τιμές των μεγεθών Nusselt, f (συντελεστής τριβής ροής). Έτσι διαπιστώσαμε, ότι το Flow Simulation, έδινε αρκετά ικανοποιητικά ως προς την ορθότητα τους, αποτελέσματα.

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε τα εξής:

- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) μειώνεται, με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου (T_{in}), ενώ ο εξεργειακός (η_{ex}) αυξάνεται.
- Για οποιοδήποτε εξεταζόμενο θερμικό μέσο, η τοποθέτηση εσωτερικών πτερυγίων παρουσιάζει καλύτερη θερμική απόδοση, σε σχέση με την περίπτωση απλής γεωμετρίας απορροφητήρα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση Syltherm 800 ($\varphi=0\%$) για $T_{in}=600$ K η εφαρμογή πτερυγίων επιφέρει αύξηση του η_{th} κατά 0.6% .
- Στις περιπτώσεις θερμικού ελαίου Syltherm 800 με νανοσωματίδια CuO, όσο αυξάνεται, η κατ' όγκο σύσταση (φ), τόσο αυξάνει και ο θερμικός βαθμός απόδοσης η_{th} , παρ' όλα αυτά αυξάνεται και η πτώση πίεσης. Ενδεικτικά, η περίπτωση Syltherm 800 ($\varphi=6\%$) για $T_{in}=600$ K επιφέρει αύξηση του η_{th} κατά 0.23% .
- Οι εφαρμογές με πτερύγια συνεισφέρουν περισσότερο στην αύξηση του βαθμού απόδοσης, από ότι η σύσταση κατ' όγκο νανοσωματιδίων CuO στο Syltherm 800.
- Στην θερμοκρασία εισόδου $T_{in}=600$ K το υγρό νάτριο παρουσιάζει την βέλτιστη θερμική και εξεργειακή απόδοση ($\eta_{th}=54.8\%$, $\eta_{ex}=29.74\%$), με ελάχιστη διαφορά από το τηγμένο άλας.

Συμπεράσματα δυναμικής συμπεριφοράς συλλέκτη

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το υπολογιστικό μοντέλο της δυναμικής συμπεριφοράς του συλλέκτη, συμπεραίνουμε τα εξής:

- Η συνιστώσα του παράγοντα γωνίας πρόσπτωσης κατά τον εγκάρσιο άξονα (K_T) διατηρεί ίδια μορφή για όλους τους μήνες. Αντίθετα, η μορφή του K_L , αλλάζει σημαντικά στο πέρασμα των μηνών.
- Για τους θερινούς μήνες (με κορυφαίους τον Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο) έχουμε υψηλές τιμές του K , ενώ κατά τη διάρκεια της ημέρας μεγιστοποιείται κατά το ηλιακό μεσημέρι (12:00), επειδή ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο, οπότε $\theta_T=0^\circ$. Κατά τους χειμερινούς μήνες, το K έχει πολύ μικρές τιμές με αποτέλεσμα ο συλλέκτης να υπολειπεται.
- Η θερμοκρασία αποθήκευσης του μέσου στο δοχείο αποθήκευσης, στο τέλος της ημέρας αλλά και η μηνιαία παραγόμενη ενέργεια του συλλέκτης E_{st} μεγιστοποιούνται κατά τον Ιούνιο και τον Ιούλιο.
- Η βέλτιστη θερμοκρασία εισόδου T_o ως προς εξεργειακή απόδοση αποτελεί η $T_o=450\text{ K}$ με μικρή διαφορά από την $T_o=500\text{ K}$.
- Για μικρότερους όγκους δοχείου, αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια. Επίσης, για μικρότερες T_{in} έχουμε υψηλότερη ετήσια παραγόμενη ενέργεια, λόγω υψηλότερου θερμικού βαθμού απόδοσης.

6.2 Πεδία μελλοντικής έρευνας

Μερικά βασικά ζητήματα που αφορούν τους συλλέκτες Fresnel, τα οποία χρίζουν περισσότερη έρευνα στο μέλλον είναι τα εξής:

- Οικονομοτεχνική μελέτη του συλλέκτη.
- Νέες οπτικές βελτιστοποιήσεις που αφορούν τη γεωμετρία των πρωτευόντων κατόπτρων, όπως η περίπτωση των καμπυλόγραμμων (Curved Mirrors).
- Βελτιστοποιήσεις στην γεωμετρία του δευτερεύοντος κατόπτρου, όπως τύπου CPC ή άλλης μορφής, καθώς και απλούστερες γεωμετρίες όπως τραπεζοειδές κάτοπτρο.
- Εμπλουτισμός θερμικών ελαίων με νανοσωματίδια άλλων στοιχείων (εκτός του CuO), όπως Τιτάνιο, ή και ακόμα υβριδικά νανοσωματίδια, δηλαδή σωματίδια που προέρχονται από περισσότερα από ένα μεταλλικά στοιχεία.