



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ CPC U-TYPE ΗΛΙΑΚΟΥ  
ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΚΕΝΟΥ»**

Αντωνία Ράσσου

Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης



## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	
Abstract.....	
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1: Ενεργειακό ζήτημα .....	1
1.2: Κλιματική αλλαγή .....	4
1.3: Ανανεώσιμες Πηγές .....	6
Βιβλιογραφία 1ου κεφαλαίου .....	10
<b>Κεφάλαιο 2: Ηλιακή Ενέργεια και ηλιακοί συλλέκτες .....</b>	<b>11</b>
2.1: Ο Ήλιος.....	11
2.2: Χαρακτηριστικές γωνίες .....	13
2.3: Ολική, άμεση και διάχυτη ακτινοβολία.....	16
2.4: Ηλιακοί συλλέκτες .....	18
2.4.1. Σταθεροί Ηλιακοί συλλέκτες.....	19
2.4.2 Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί συλλέκτες που λειτουργούν με σύστημα tracking (Consentrated Solar Power – CSP) .....	26
Βιβλιογραφία 2 <sup>ου</sup> κεφαλαίου .....	37
<b>Κεφάλαιο 3: Ηλιακός συλλέκτης κενού (ETC).....</b>	<b>38</b>
3.1: Γενικά Χαρακτηριστικά συλλεκτών κενού.....	38
3.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα .....	41
3.3: Σύγκριση μεταξύ συλλέκτη κενού και επίπεδου.....	42
3.4: Ταξινόμηση ETC .....	44
3.4: Ιστορική Αναφορά .....	47
3.5: Μελέτη Θερμικής απόδοση.....	49
3.5: Μαθηματικό μοντέλο παραβολικών κατόπτρων.....	51
Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> κεφαλαίου .....	55
<b>Κεφάλαιο 4: Σχεδιασμός συλλέκτη στο Solidworks.....</b>	<b>57</b>
4.1: Εισαγωγή .....	57
4.2: Σχεδιασμός part ενός σωλήνα-συλλέκτη .....	59

<b>Κεφάλαιο 5: Θερμική μελέτη του συλλέκτη μέσω Flow Simulation .....</b>	<b>77</b>
<b>Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα .....</b>	<b>99</b>

## Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός και η θερμική μελέτη ενός ηλιακού συλλέκτη αποτελούμενου από σωλήνες κενού U-type με κυλινδρικούς απορροφητήρες και παραβολοειδή κάτοπτρα. Η ανάλυση βασίστηκε στη χρήση υπολογιστικών πακέτων αλλά και εμπορικών δεδομένων. Ο συλλέκτης αποτελείται από τα εξής μέρη: 12 γυάλινους σωλήνες διπλού τοιχώματος με ενδιάμεσο κενό και με τους εσωτερικούς σωλήνες να παίζουν ρόλο απορροφητή, χαλκοσωλήνες σε σχήμα U συγκολλημένους με έναν συλλεκτήρα εισόδου-εξόδου, και 12 παραβολοειδή κάτοπτρα. Η συγκεκριμένη επιλογή συλλέκτη έγινε μετά από έρευνα σε σχέση με την απόδοση και την οικονομικότητα του η οποία και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια αναλυτικά αλλά και θα εξετασθεί μέσω της παρούσας μελέτης. Στόχος μας ήταν να σχεδιάσουμε έναν ρεαλιστικά αποδοτικό συλλέκτη και να βελτιστοποιήσουμε τις διάφορες παραμέτρους στην περίπτωση που χρειαστεί. Αρχικά εστιάζουμε στο σχεδιασμό του part ενός μεμονομένου συλλέκτη σε περιβάλλον Solidworks με γνώμονα την καλύτερη οπτική απόδοση με βάση τη θεωρία και προηγούμενες μελέτες. Η αρχική διαστασιολόγηση έγινε με βάση βιομηχανικές εφαρμογές και μελετώντας πρότυπους αντίστοιχους συλλέκτες εμπορίου. Επόμενο στάδιο αποτέλεσε το modelling του assembly του συλλέκτη και τελευταίο και πιο σημαντικό η θερμική ανάλυσή του μέσω του Solidworks Flow Simulation.

Πιο συγκεκριμένα, στο **πρώτο κεφάλαιο** της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η αναγκαιότητα της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερα της ηλιακής ενέργειας για τη κάλυψη των αναγκών της σύγχρονης κοινωνίας. Τα βασικά αίτια για την ανάγκη αυτή πηγάζουν από την εξάντληση των φυσικών πόρων, την συνεχή αύξηση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος και από τα περιβαλλοντικά προβλήματα τα οποία ολοένα και επηρεάζουν περισσότερο την ζωή του σύγχρονου ανθρώπου.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αρχικά γίνεται μια εκτενής περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών της Ηλιακής ενέργειας, όπως το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, οι χαρακτηριστικές της

γωνίες και ο τρόπος υπολογισμού της. Στη συνέχεια γίνεται μιά αναφορά στα βασικά είδη ηλιακών συλλεκτών, την τεχνολογία τους, τη γεωμετρία και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους .

Το  **τρίτο κεφάλαιο**  επικεντρώνεται σε βιβλιογραφικές πληροφορίες σχετικά με τους ηλιακούς συλλέκτες κενού. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ηλιακών συλλεκτών κενού, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, τα είδη και γίνεται μια συγκριση τους με τους επίπεδες ηλιακούς συλλέκτες. Στη συνέχεια επισυνάπτεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή και γίνεται αναφορά στα μαθηματικά μοντέλα γύρω από την θερμική απόδοση και την οπτική χρησιμότητα παραβολικών κατόπτρων.

Στο  **τέταρτο κεφάλαιο**  γίνεται αναλυτική περιγραφή του γεωμετρικού σχεδιασμού του συλλέκτη σε περιβάλλον Solidworks. Με βάση τις διαστάσεις ενός πρότυπου συλλέκτη εμπορίου σχεδιάστηκαν ο εξωτερικός γυάλινος σωλήνας κενού, ο σωλήνας απορρόφησης και ο χαλκοσωλήνας U. Για το σχεδιασμό του ανακλαστήρα πέρα από τις διαστάσεις που έδωσε ο κατασκευαστής βασιστήκαμε στις γεωμετρικές αρχές γύρω από τον σχεδιασμό των cpc κατόπτρων. Τέλος, συμπληρώνοντας τις γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων αυτών σχεδιάζεται ο τελικός συλλέκτης αποτελούμενος από 12 σωλήνες κενού.

Στο  **πέμπτο κεφάλαιο**  γίνεται μια ενδελεχής ανάλυση όλων των βημάτων της προσομοίωσης του συλλέκτη στο Flow Simulation. Παρουσιάζεται η επιλογή των γενικών χαρακτηριστικών του project, των υλικών, των θερμικών οριακών συνθηκών και των ακτινοβολούμενων επιφανειών του συλλέκτη καθώς και ο ορισμός των στόχων της μελέτης.

Στο  **έκτο κεφάλαιο**  γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων του Flow Simulation καθώς και για διάφορες επιπλέον παραμέτρους όπως η θερμοκρασία εισόδου του νερού και η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης σε κάθε περίπτωση υπολογίζονται οι βαθμοί απόδοσης και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

## Abstract

The object of this Thesis is the design and thermal study of a CPC Evacuated Solar Collector consisting of U-type vacuum tubes, cylindrical absorbers and parabolic mirrors. The analysis was based on the use of computer packages and commercial data. The manifold consists of the following parts: 12 double-walled glass tubes with an intermediate vacuum and the inner tubes acting as an absorber, U-shaped copper tubes welded with an inlet-outlet manifold, and 12 parabolic mirrors. This type of collector was chosen after research in relation to its performance and financial situation which will be presented in detail later and will be examined through the present study. Our goal is to design a realistically efficient collector and optimize the various parameters in case they will be implemented. We first focus on the design of the part of a single collector in a Solidworks environment based on the best visual performance, on theory and previous studies. The initial sizing was done based on industrial applications and studying standard corresponding trade collectors. The next stage was the modeling of the collector assembly and last and most important its thermal analysis through Solidworks Flow Simulation.

More specifically, the **first chapter** of this paper presents the necessity of using renewable energy sources and especially solar energy to meet the needs of modern society. The main reasons for this need stem from the depletion of natural resources, the constant increase in the price of electricity and the environmental problems which are increasingly affecting the life of modern man.

The **second chapter** provides a comprehensive description of the basic characteristics of solar energy, such as the spectrum of solar radiation, its characteristic angles and how it is calculated. Moreover, a reference is made to the basic types of solar panels, their technology, geometry, their advantages and disadvantages.

The **third chapter** focuses on bibliographic information on vacuum solar panels. In more detail, the characteristics of vacuum solar panels, their advantages and disadvantages, types

are presented and a comparison is made with flat solar panels. A brief historical overview is then attached and reference is made to mathematical models around the thermal efficiency and optical utility of parabolic mirrors.

The **fourth chapter** provides a detailed description of the collector geometric design in Solidworks environment. The outer glass vacuum tube, the absorption tube and the copper tube were designed based on the dimensions of a standard trade collector. For the design of the reflector beyond the dimensions given by the manufacturer, we relied on the geometric principles around the design of parabolic mirrors. Finally, completing the geometric relationships between these components, the final collector is designed, consisting of 12 vacuum tubes.



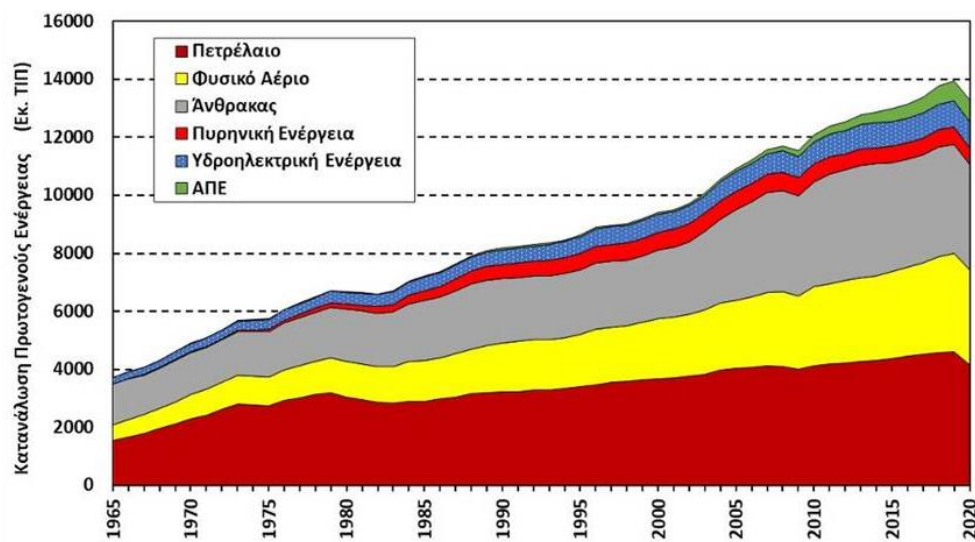
## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1: Ενεργειακό ζήτημα

Αδιαμφισβήτητα όσο εξελίσσεται η ανθρωπότητα και το ανθρώπινο βιοτικό επίπεδο, από τη βιομηχανική επανάσταση και έπειτα, οι ανάγκες για ενέργεια έχουν φτάσει σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα. Αυτό συμβαίνει διότι τομείς όπως οι μεταφορές, οι βιομηχανικές παραγωγές καθώς και οι ανάγκες για θέρμανση, ψύξη και κλιματισμό απαιτούν τεράστια ποσά ενέργειας για να καλυφθούν. Πίσω από την καθημερινή ζωή αλλά και πίσω από την τεχνολογία, το κεφάλαιο, τα κράτη, αλλά και τους διακρατικούς ανταγωνισμούς σημαντική δύναμη αποτελεί το κομμάτι της ενέργειας και η διαχείρισή της. Όμως ο ορρυκτός πλούτος της γης, δηλαδή η βασική πηγή ενέργειας μέχρι πρότινος όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο τείνουν να μειώνονται δραματικά. Αυτό σε συνδιασμό με την κλιματική αλλαγή και την μόλυνση του πλανήτη, μιάς και ο λιγνίτης και το πετρέλαιο κατά την καύση τους απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) βασικό υπεύθυνο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθιστούν απαραίτητη την ανάγκη εξεύρεσης νέων εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Μια απάντηση στο ενεργειακό ζήτημα ήρθε να δώσει η πυρηνική ενέργεια η οποία μπορεί να καλύψει πολύ αποδοτικά τις ενεργειακές ανάγκες χωρίς να συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς στηρίζεται στη σχάση πυρήνων φυσικού ή εμπλουτισμένου ουρανίου ( $\text{U}_{238}$ ,  $\text{U}_{235}$ ). Αν και μεγάλος λόγος γίνεται για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης ενέργειας με πολλούς υποστηρικτές, ακόμα υπάρχουν αμφιβολίες και αμηχανία όσον αφορά το βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας, τα ραδιενεργά απόβλητα, καθώς χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια να διασπαστούν και η διαχείρισή τους αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας.

Τέλος, σημαντικό ρόλο όπως θα δούμε και στην συνέχεια ήρθαν να παίξουν τα τελευταία χρόνια οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτές δεν είναι άλλες από την ηλιακή, την αιολική, την υδροηλεκτρική αλλά και την γεωθερμία. Άξια αναφοράς είναι επίσης η βιομάζα και τα βιοκαύσιμα τα οποία έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται αρκετά τα τελευταία χρόνια μιάς και κατά την καύση τους ανακυκλώνουν το διοξείδιο του άνθρακα, καθώς το ποσό που εκλύεται έχει ήδη απομακρυνθεί από την ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης. Παρακάτω απεικονίζεται η καμπύλη της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης, ανά ενεργειακή πηγή.



Εικόνα 1.1.1: Διαχρονική μεταβολή της πλανητικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας

Είναι φανερό πως υπάρχει μια αυξητική τάση προς τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, γεωθερμική, υδροηλεκτρική, κλπ) καθώς και στη χρήση του φυσικού αερίου το οποίο θεωρείται πιο καθαρό καύσιμο σε σχέση με τα συμβατικά (λιγνίτης, πετρέλαιο).

Στην Ελλάδα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί, η αξιοποίηση των διαθέσιμων πηγών ακολουθεί την παγκόσμια με κάποιες διαφορές. Αρχικά παρατηρούμε την απουσία της πυρηνικής καθώς η Ελλάδα δεν διαθέτει τα αντίστοιχα εργοστάσια, όμως παρατηρούμε μεγάλη ανάπτυξη των ΑΠΕ με τα τελευταία χρόνια σχεδόν να υπερκαλύπτουν την

αξιοποίηση Λιγνίτη. Το ίδιο παρατηρούμε να συμβαίνει από το 2019 και μετά και με το φυσικό αέριο καθώς και με την υδροηλεκτρική ενέργεια το 2021.



Εικόνα 1.1.2: Σύγκριση πηγών ενέργειας στην κάλυψη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα [1.10]



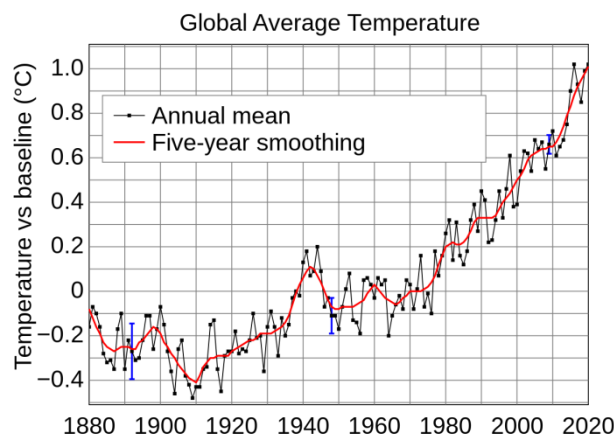
Εικόνα 1.1.3: Χρήση ορυκτών καυσίμων σε σύγκριση με ΑΠΕ ανά έτος στο ελληνικό δίκτυο ηλεκτρισμού [1.10]

## 1.2: Κλιματική αλλαγή

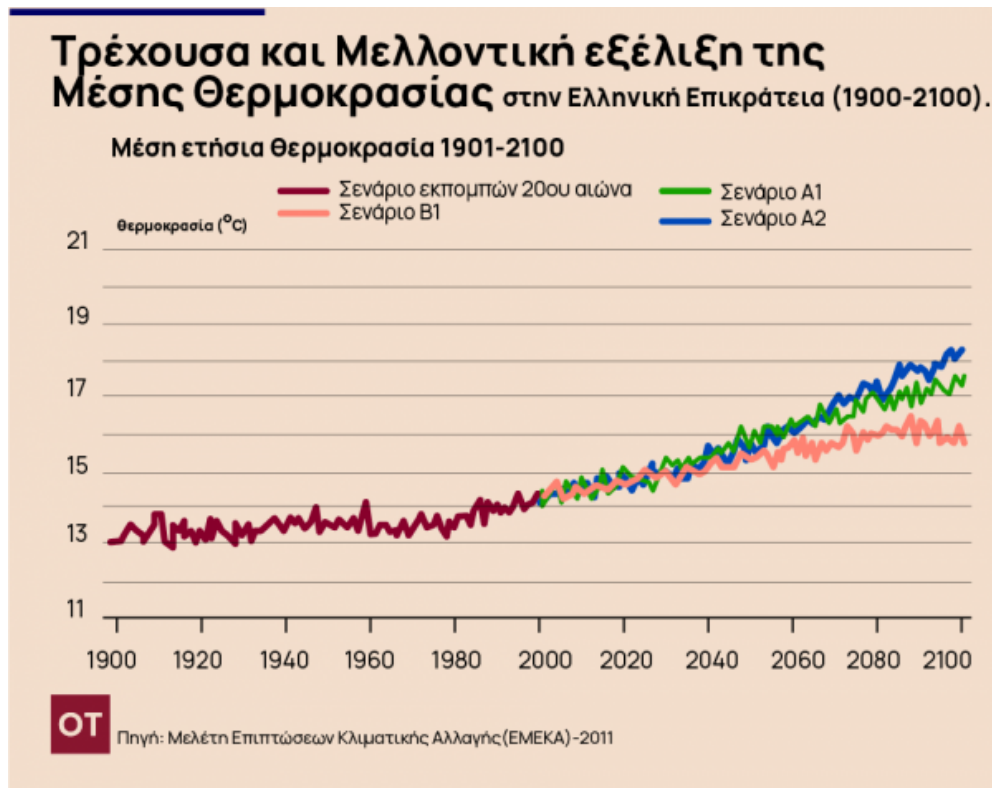
Οι άνθρωποι επηρεάζουν ολοένα και περισσότερο το κλίμα και τη θερμοκρασία της γης μέσω της χρήσης ορυκτών καυσίμων, της αποψίλωσης των ομβρόφιλων δασών και της κτηνοτροφίας. Οι δραστηριότητες αυτές προσθέτουν τεράστιες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου στα αέρια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, προκαλώντας αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και υπερθέρμανση του πλανήτη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών είναι ο καύσωνας των 38 βαθμών Κελσίου που "χτύπησε" τη Σιβηρία, ο οποίος, σύμφωνα με τους επιστήμονες, θα ήταν σχεδόν αδύνατος εάν δεν υπήρχε η κλιματική αλλαγή.

### Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

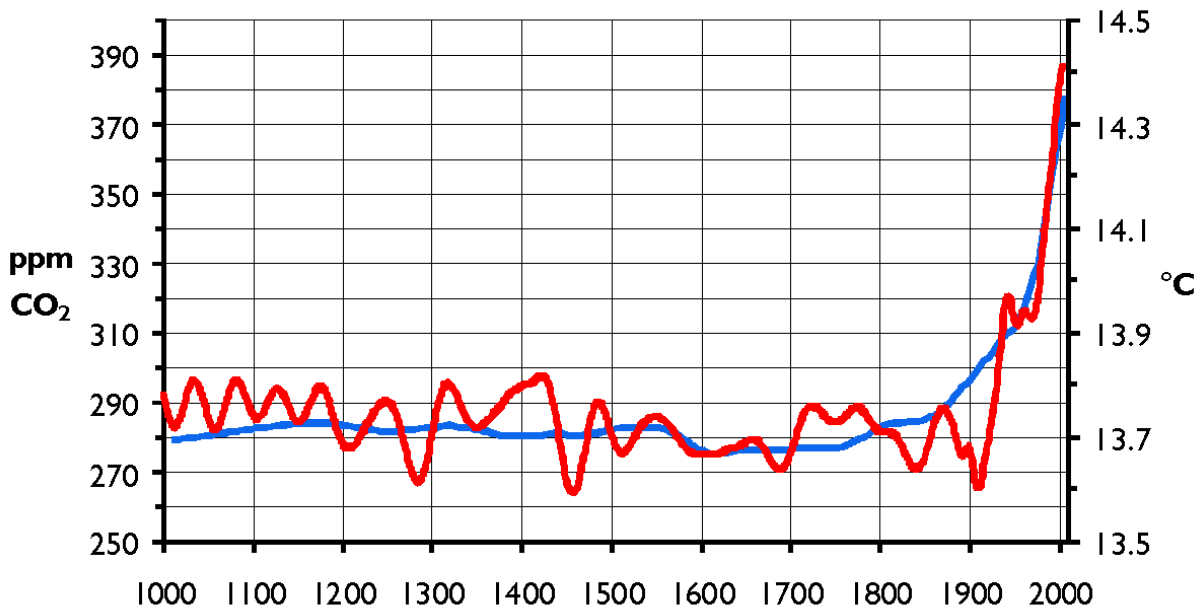
Η Γη, καθώς θερμαίνεται από τον Ήλιο, εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία. Φαινόμενο του θερμοκηπίου ονομάζεται η απορρόφηση αυτής της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας να αυξάνεται. Κανονικά τμήμα αυτής της ακτινοβολίας θα έφευγε στο διάστημα. Τώρα, όμως, απορροφάται από διάφορα αέρια τα οποία παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Τέτοια αέρια είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), τα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και οι τετραχλωράνθρακες (CFC).



Εικόνα 1.2.1: Αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας [<https://www.newscientist.com/article/dn11639-climate-myths-the-cooling-after-1940-shows-co2-does-not-cause-warming/>]



Εικόνα 1.2.2: Τρέχουσα και μελλοντική εξέλιξη της θερμοκρασίας στην Ελληνική επικράτεια (ΕΜΕΚΑ)



Εικόνα 1.2.3: Παγκόσμιες εκπομπές CO<sub>2</sub>

### 1.3: Ανανεώσιμες Πηγές

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή αλλιώς ήπιες μορφές ενέργειας μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων. Ο όρος «ήπιες» έχει να κάνει με δύο βασικά στοιχεία τους. Αρχικά, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη φυσικής υπάρχουσας ενέργειας της Γης. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, που δεν απελευθερώνουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή ραδιενεργά απόβλητα.

#### Αιολική Ενέργεια

Είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές ΑΠΕ προς ηλεκτροπαραγωγή και βρίσκει ευρεία εφαρμογή παγκοσμίως. Αποτελεί βιώσιμη ενέργεια με την έννοια ότι δεν προυποθέτει την καύση ορυκτού και άρα δεν συνεισφέρει στην εκπομπή αέριων ρύπων και στο φαινόμενο θερμοκηπίου ενώ επίσης το «καύσιμό» της είναι αν μη τι άλλο άφθονο και δωρεάν. Παρ'όλα αυτά χρειάζεται μεγάλη προσοχή στην χωρική διαχείριση ενός αιολικού πάρκου, μιάς και η πανίδα και η χλωρίδα ιδίως σε βουνά τείνει να διαταράσσεται λόγω της αλλοίωσης της σύστασης του εδάφους, αλλά και της ηχορύπανσης εξαιτίας της κίνησης των πτερωτών, με δυσάρεστες συνέπειες για το οικοσύστημα.

#### Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Βασίζεται στην μηχανική ενέργεια που προκαλεί η ροή του νερού των ποταμών και των φυσικών ή τεχνητών φραγμάτων, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με την έννοια ότι ο κύκλος του νερού ανανεώνεται συνεχώς από τον ήλιο, όμως η ξηρασία και η κλιματική αλλαγή μπορούν σήμερα και ίσως και στο μέλλον να σταθούν ένα ισχυρό εμπόδιο στην εκμετάλλευσή της. Σήμερα, οι σύγχρονες υδροηλεκτρικές μονάδες παράγουν ηλεκτρισμό χρησιμοποιώντας στροβίλους και γεννήτριες. Η μηχανική ενέργεια που δημιουργείται από το κινούμενο νερό, περιστρέφει τον δρομέα στον στρόβιλο ο οποίος συνδέεται με μιά γεννήτρια.

### **Γεωθερμική Ενέργεια**

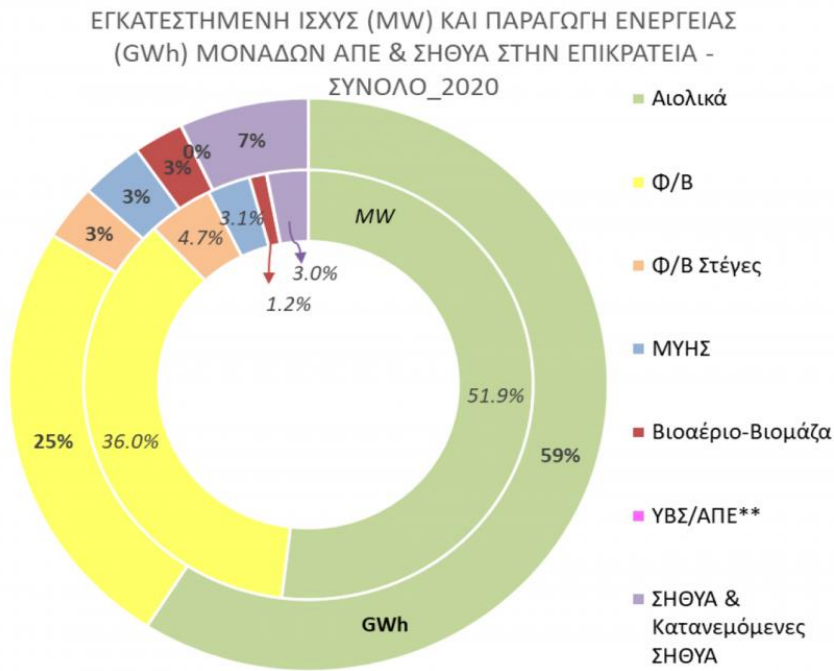
Ο όρος «Γεωθερμία» αναφέρεται στη θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης. Η γεωθερμική ενέργεια βασίζεται στην εκμετάλλευση της ενέργειας από το εσωτερικό της γης από όπου με τη χρήση μιας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας επιτρέπεται η μεταφορά θερμότητας από και προς το έδαφος για παραγωγή ψύξης, θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης για οικιακές αλλά και ευρύτερης κλίμακας εφαρμογές. Θεωρείται ήπια μορφής ενέργεια γιατί δεν είναι επιβλαβής για την ατμόσφαιρα και ανανεώσιμη γιατί οι δεξαμενές γεωθερμίες είναι πρακτικά τεράστιες σε μέγεθος σε σχέση με τις ανθρώπινες ανάγκες.

### **Βιομάζα**

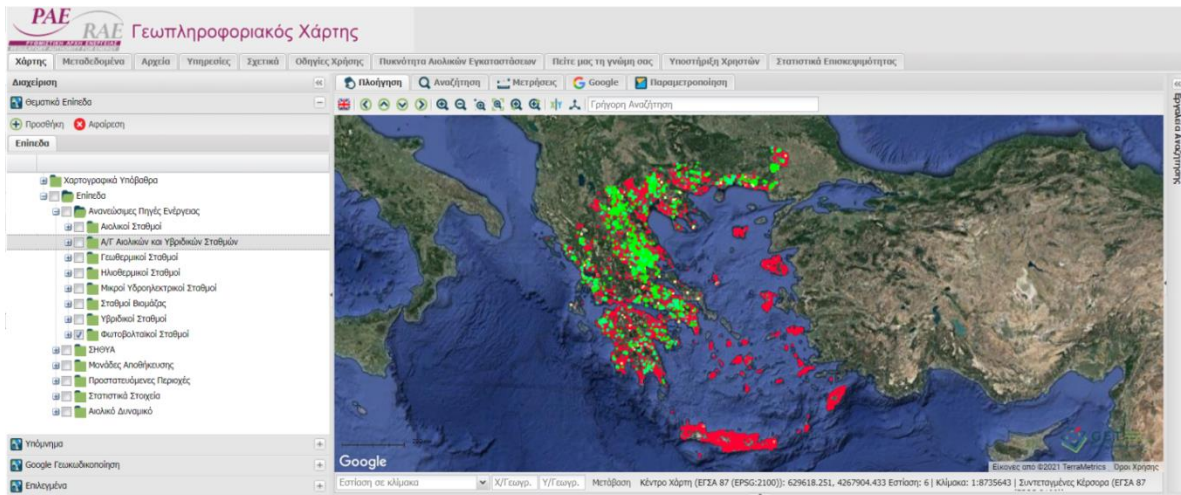
Πρόκειται για ένα σύνολο προϊόντων, αποβλήτων ή υπολειμμάτων βιολογικής προέλευσης φυτικών και ζωικών ουσιών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή και θεωρείται ανανεώσιμη μορφή μίας και τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης δομούνται μετατρέποντας την ηλιακή ενέργεια σε αποθηκευμένη χημική η οποία αποδίδεται κατά την καύση τους. Το καύσιμο βιομάζας στην Ελλάδα είναι γνωστό και ως πέλετ.

### **Ηλιακή Ενέργεια**

Με τον όρο Ηλιακή Ενέργεια χαρακτηρίζουμε το σύνολο των μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Το φως και η θερμότητα που ακτινοβολούνται, απορροφούνται και μετατρέπονται σε άλλες μορφές ενέργειας. Αποτελεί μία από τις κυριότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρισμού απευθείας μέσω φωτοβολταϊκών ή με ενδιάμεση χρήση ατμοπαραγωγών, για θέρμανση και ψύξη χώρων, καθώς και θέρμανση και ψύξη νερού (ηλιοθερμικά συστήματα).

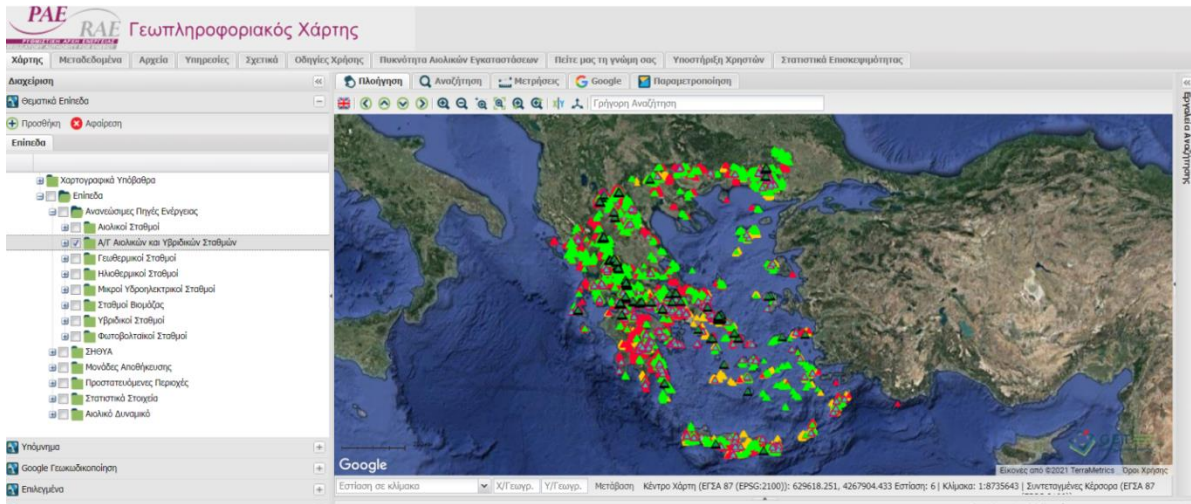


Εικόνα 1.3.1: Εγκατεστημένη ισχύς στην επικράτεια

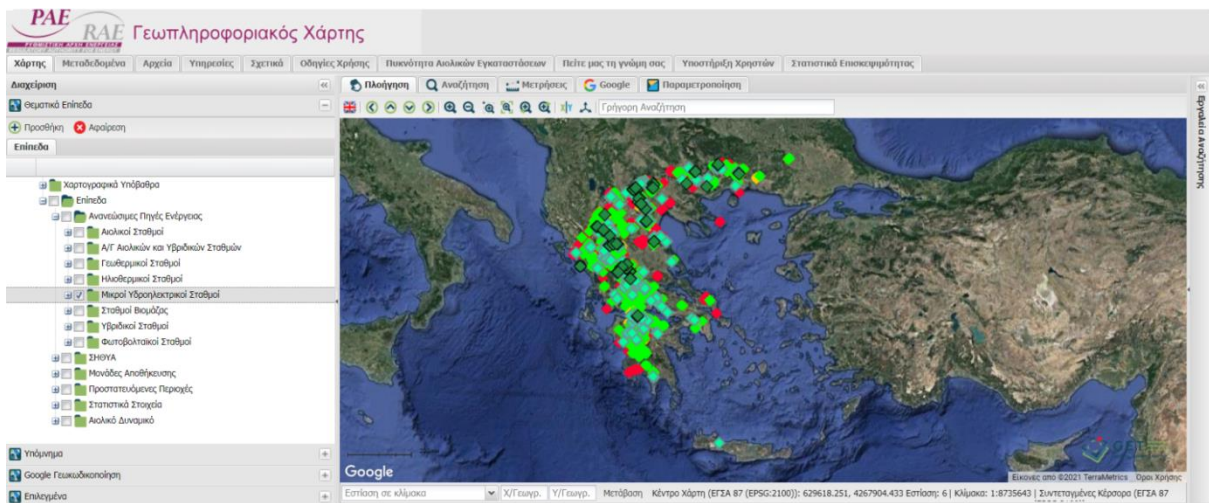


Εικόνα 1.3.2: Εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πάρκα στην Ελλάδα [1.9]





Εικόνα 1.3.2: Εγκατεστημένα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα [1.9]



Εικόνα 1.3.2: Εγκατεστημένοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί στην Ελλάδα [1.9]

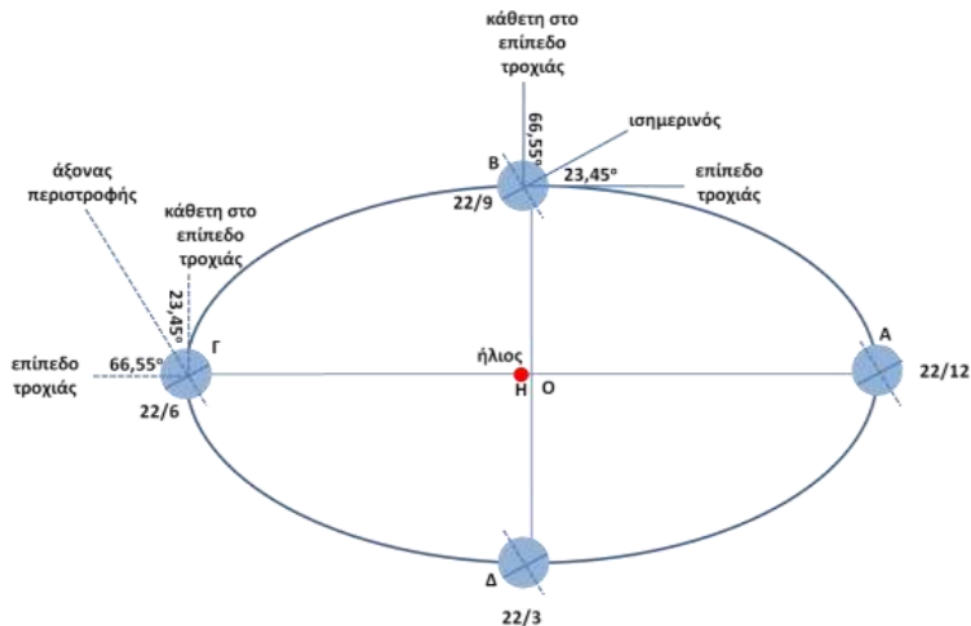
## Βιβλιογραφία 1ου κεφαλαίου

- [1.1] [http://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/downloads/2018/11/NECP\\_131118\\_final.pdf](http://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/downloads/2018/11/NECP_131118_final.pdf)
- [1.2] SA. Kalogirou, Progress in Energy and Combustion Science 2004;30:231–295
- [1.3] [https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες\\_πηγές\\_ενέργειας](https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας)
- [1.4] <https://el.wikipedia.org/wiki/Βιομάζα>
- [1.5] <https://www.nrdc.org/stories/renewable-energy-clean-facts>.
- [1.6] <https://ftp.iza.org/dp8145.pdf>
- [1.7] [https://royalsociety.org/~media/royal\\_society\\_content/policy/projects/climate-evidence-causes/climate-change-evidence-causes.pdf](https://royalsociety.org/~media/royal_society_content/policy/projects/climate-evidence-causes/climate-change-evidence-causes.pdf)
- [1.8] <https://news.b2green.gr/11800/η-εξέλιξη-της-κατανάλωσης-ενέργειας>
- [1.9] <https://geo.rae.gr/>
- [1.10] <https://www.admie.gr/>

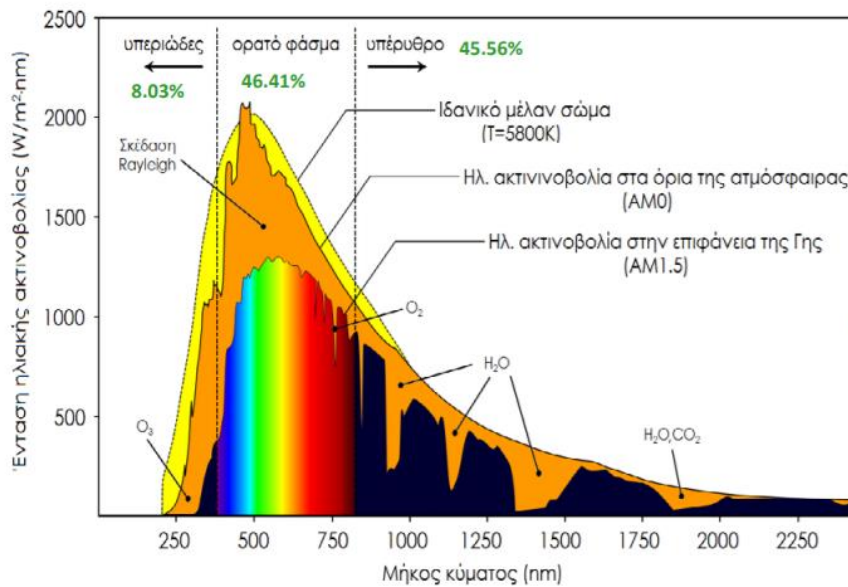
## Κεφάλαιο 2: Ηλιακή Ενέργεια και ηλιακοί συλλέκτες

### 2.1: Ο Ήλιος

Βασική πηγή ενέργειας του συνόλου των φαινομένων, που εξελίσσονται στην ατμόσφαιρα της Γης, αποτελεί ο Ήλιος. Πολύ μικρά ποσά ενέργειας προέρχονται από τα υπόλοιπα άστρα, από το εσωτερικό της Γης και από διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Πρόκειται για τον αστέρα του ηλιακού μας συστήματος και το λαμπρότερο σώμα του ουρανού. Είναι μια σχεδόν τέλεια σφαίρα με διάμετρο 1390 Mm 109 φορές μεγαλύτερη από της Γης, και η μάζα του  $2 \times 10^{30}$  kg και η οποία αποτελεί το 99,86% της μάζας του ηλιακού συστήματος. Η μέση θερμοκρασία του υπολογίζεται γύρω στα 5760 K και η μέση απόστασή του από τη Γη 149,6 Gm η οποία λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο μπορεί να έχει απόκλιση 1,7%. Ο ήλιος παράγει στην επιφάνεια της Γης ισχύ ίση με  $63 \text{ MW/m}^2$  ενέργεια τόσο μεγάλη που ισοδυναμεί με 5000 φορές των συνολικών της πηγών ενέργειας.

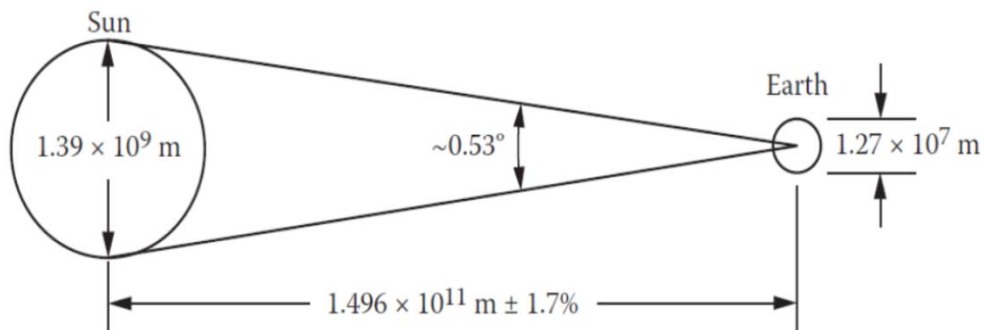


Εικόνα 2.1.1: Η κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο



**Εικόνα 2.1.2:** Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος [2.2]

Το παραπάνω σχήμα αναφέρεται στην ηλιακή σταθερά  $G_{sc}$  η οποία είναι συνάρτηση του μήκους κύματος  $\lambda$ . Πρόκειται για την ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο μονάδα επιφάνειας κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας όταν η απόσταση γης-ηλίου λαμβάνει τη μέση τιμή της. Η φασματική κατανομή της διαχωρίζεται σε 3 περιοχές, την υπεριώδη για μήκη κύματος κάτω από 380 nm με μέση ηλιακή ακτινοβολία  $95 \text{ W/m}^2$ , την ορατή για μήκη κύματος από 380 nm έως 780 nm με μέση ηλιακή ακτινοβολία  $640 \text{ W/m}^2$  και την υπέρυθρη υπεριώδη για μήκη κύματος πάνω από 0.78  $\mu\text{m}$  με μέση ηλιακή ακτινοβολία  $618 \text{ W/m}^2$ . Αθροίζοντας τις παραπάνω επιμέρους μέσες ηλιακές ακτινοβολίες προκύπτει η συνολική μέση ακτινοβολία η οποία αποτελεί και το χαρακτηριστικό μέγεθος της έντασης του ήλιου, στα  $1353 \text{ W/m}^2$ .



**Εικόνα 2.1.2:** Απόσταση γης Ήλιου

Η μεταβολή της απόστασης Γης-Ήλιου προκαλεί μια μεταβολή της ακτινοβολίας με απόκλιση 3% από την μέση τιμή της. Η ακτινοβολία που δέχεται κάθετο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας δίνεται από τη σχέση (2.1):

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

,όπου n ο αύξων αριθμός της μέρας του έτους.

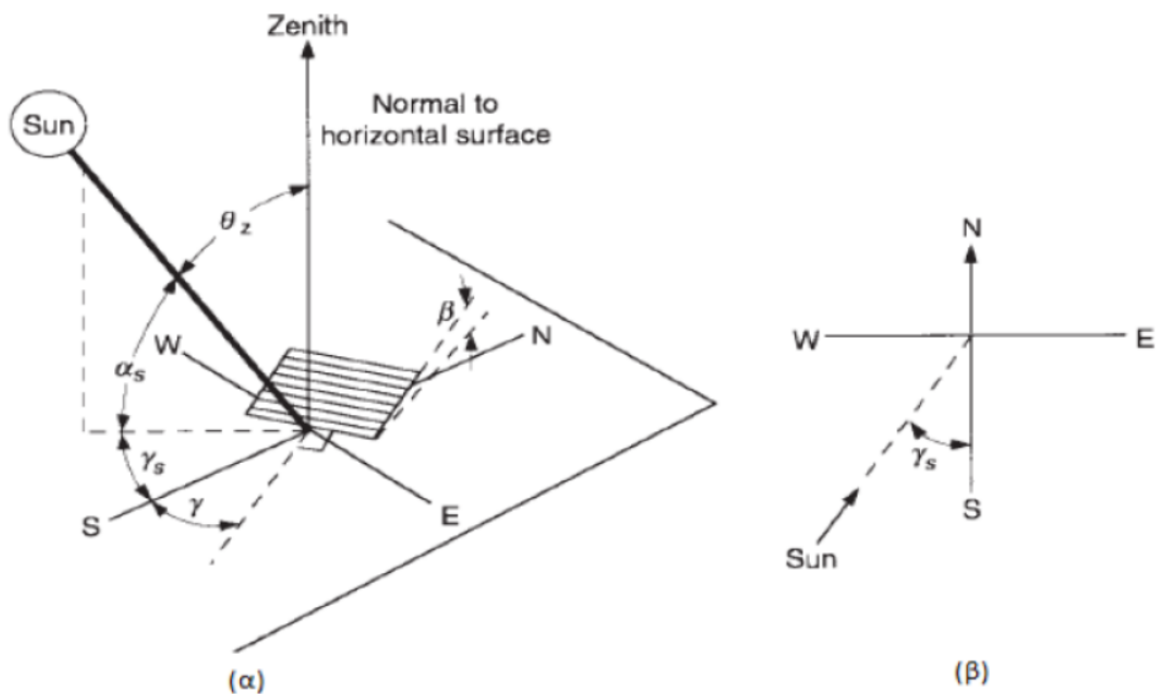
## 2.2: Χαρακτηριστικές γωνίες

Ο προσδιορισμός της θέσης του Ήλιου ως προς τη Γη έχει μεγάλη σημασία για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας και για το λόγο αυτό ορίζονται οι παρακάτω γωνίες:

- Γεωγραφικό πλάτος,  $\phi$  : Η γωνιακή θέση μιάς περιοχής βόρεια ή νότια από τον ησημερινό, με τον βορρά να έχει θετικό πρόσημο. ( $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ )
- Γωνία ζενίθ,  $\theta_z$  : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου. (Εικόνα 2.2.1).
- Ηλιακό ύψος,  $\alpha_s$  : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ήλιου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο. (Εικόνα 2.2.1).
- Αζιμούθιο επιφανείας,  $\gamma$  : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Για όλα τα σημεία του ορίζοντα ισχύει ότι  $-180^\circ < \gamma < 180^\circ$  με  $\gamma=0^\circ$  στο νότο,  $\gamma=90^\circ$  στη δύση,  $\gamma=180^\circ$  στο βορρά και  $\gamma=-90^\circ$  στην ανατολή. (Εικόνα 2.2.1).
- Αζιμούθιο ηλίου,  $\gamma_s$  : Είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης. (Εικόνα 2.2.1).
- Κλίση επιπέδου,  $\beta$  : Είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Ισχύει ότι  $0^\circ < \beta < 180^\circ$ . Για το οριζόντιο επίπεδο είναι  $\beta = 0^\circ$ , ενώ για το κατακόρυφο  $\beta=90^\circ$ . (Εικόνα 2.2.1).

- Ωριαία γωνία ,  $\omega$  : Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό 15o/h το οποίο ισοδυναμεί με 0,25o /min. Υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :  

$$\omega = 0,25 \cdot (\text{min μετά το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (2.2)$$
 Λαμβάνεται  $\omega > 0$  για τις ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι και  $\omega < 0$  για τις ώρες πριν το ηλιακό μεσημέρι.



Εικόνα 2.2.1. Χαρακτηριστικές γωνίες [2.2]

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

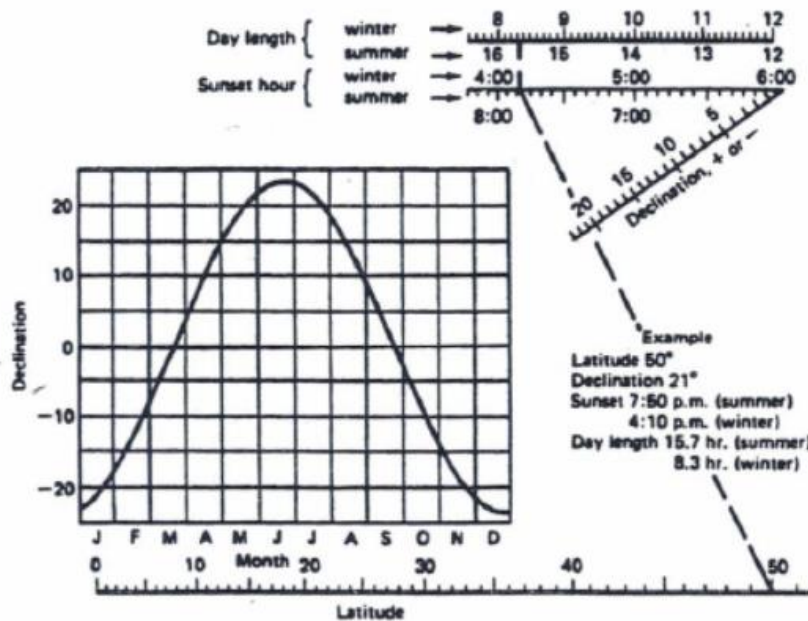
$$\delta = 23.45 \cdot \sin (360 \cdot (284 + n) / 365) , \quad (2.3)$$
 ,όπου ο  $n$  δέχεται τιμές από 1 : 365 και συμβολίζει τον αύξοντα αριθμό μιας οποιασδήποτε μέρας του έτους.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνεται η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  για την μέση μέρα κάθε μήνα, όπου μέση μέρα κάθε μήνα θεωρείται εκείνη που έχει ηλιακή ακτινοβολία περίπου ίση με την μέση ημερίσια.

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

**Πίνακας 2.2.1:** Η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  για την μέση μέρα κάθε μήνα [2.1]

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



Εικόνα 2.2.2: Η μεταβολή της ηλιακής απόκλισης κατά την διάρκεια του έτους [2.3]

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

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega, \quad (2.4)$$

,όπου  $\phi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το οποίο λαμβάνει τιμές μεταξύ  $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ . Για την Αθήνα ισχύει ότι  $\phi = 37.58^\circ$ . [1,15] Για οριζόντιες επιφάνειες ( $\beta = 0^\circ$ ) η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με τη γωνία ζενίθ και άρα ισχύει ότι:

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

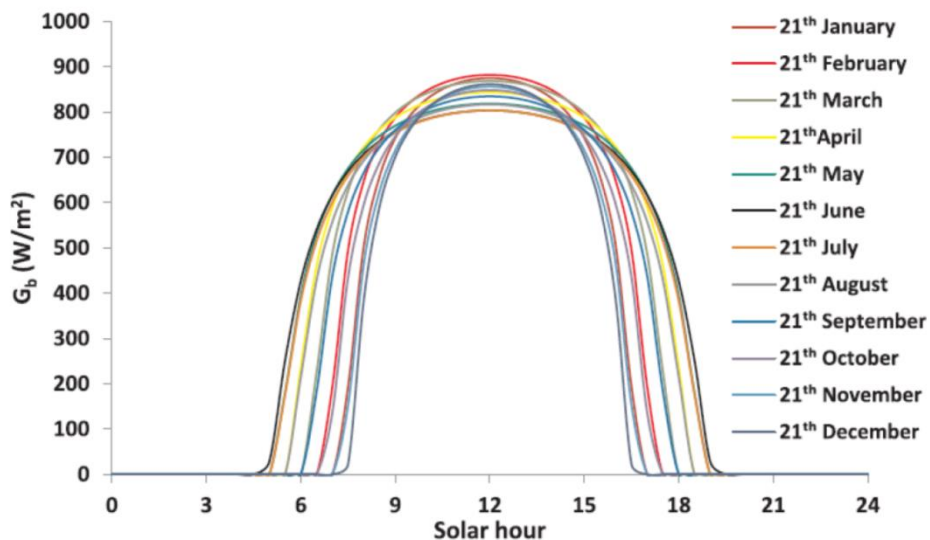
### 2.3: Ολική, άμεση και διάχυτη ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται η Γη χωρίζεται στην άμεση και στη διάχυτη ακτινοβολία. Η στιγμιαία έντασή της μετριέται σε  $W/m^2$  και χρησιμοποιείται συνήθως με το σύμβολο “G” και με κατάλληλους δείκτες σε περίπτωση που αναφερόμαστε στην άμεση (b, beam) ή στη



διάχυτη (d , diffuse) ακτινοβολία. Χρησιμοποιείται το σύμβολο “I” για τις ωριαίες τιμές και το σύμβολο “H” για ημερήσιες τιμές.

- Άμεση ακτινοβολία (  $G_b$  ή  $I_b$  ή  $H_b$  ) : Ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης με ή χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια η πλειοψηφία των ηλιακών συλλεκτών αξιοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Η άμεση ακτινοβολία εξαρτάται από: την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα, το ύψος του ήλιου, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το υψόμετρο του τόπου, την κλίση της επιφάνειας, την απόσταση ήλιου – Γης και την απόκλιση του ήλιου.
- Διάχυτη ακτινοβολία (  $G_d$  ή  $I_d$  ή  $H_d$  ) : Ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνσή της από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα, και από ανάκλαση στην επιφάνεια της Γης και εξαρτάται από: το ύψος του ήλιου, το υψόμετρο του τόπου, το συντελεστή ανάκλασης της επιφάνειας του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών και το ποσό και το είδος των σωματιδίων και των αερίων της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 2.3.1: Άμεση ηλιακή κάθετη ακτινοβολία [2.3]

- Ολική ακτινοβολία (G ή I ή H) : Είναι το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας. Και ισχύει η σχέση:

$$I = I_b + I_d \quad (2.6)$$

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

## 2.4: Ηλιακοί συλλέκτες

Πρόκειται για εναλλάκτες θερμότητας που μετατρέπουν την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας σε εσωτερική ενέργεια του μέσου μεταφοράς. Ο ηλιακός συλλέκτης είναι μία συσκευή που απορροφά την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, τη μετατρέπει σε θερμότητα και τη μεταφέρει στο υγρό (συνήθως αέρας, νερό ή λάδι) που ρέει μέσω του συλλέκτη.

Η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται έτσι μεταφέρεται από το κυκλοφορούν υγρό είτε απευθείας στο ζεστό νερό είτε στον κλιματισμό του χώρου είτε σε μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (boiler) η οποία μπορεί να σχεδιαστεί για χρήση τη νύχτα ή/και συννεφιασμένες μέρες.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ηλιακών συλλεκτών: οι μη συγκεντρωτικοί ή σταθεροί και οι συγκεντρωτικοί. Ένας μη συγκεντρωτικός συλλέκτης έχει την ίδια περιοχή για την αναχαιτίση και για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ για την παρακολούθηση του ήλιου ο συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης έχει συνήθως κοίλης ανάκλασης επιφάνειες για να αναχαιτίσουν και να εστιάσουν την ακτινοβολία του ήλιου σε μικρότερη περιοχή λήψης, αυξάνοντας έτσι τη ροή ακτινοβολίας. Ένας μεγάλος αριθμός ηλιακών συλλεκτών είναι διαθέσιμος στην αγορά.

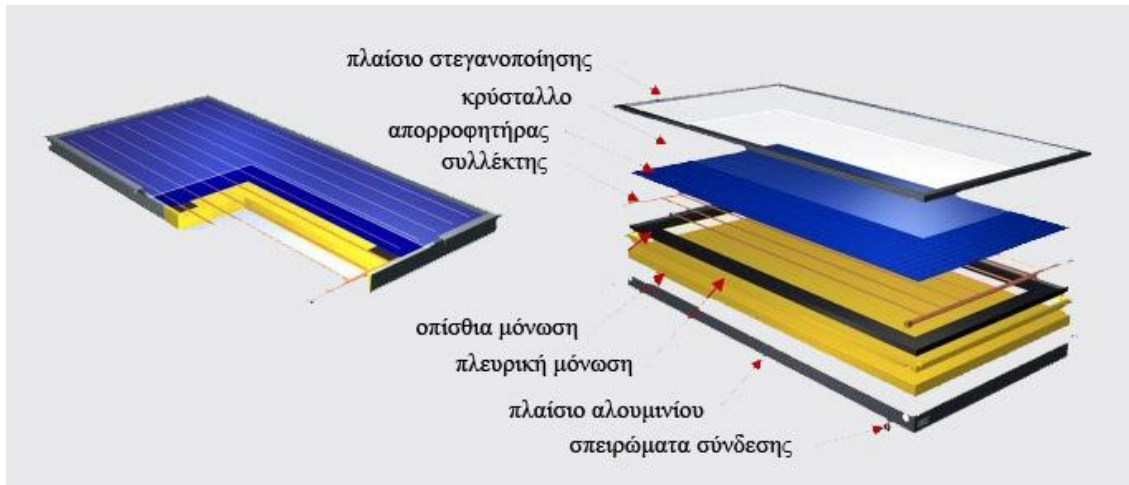
### 2.4.1: Σταθεροί Ηλιακοί συλλέκτες

Οι συλλέκτες ηλιακής ενέργειας διακρίνονται με βάση την κίνησή τους, π.χ. σε ακίνητη, παρακολούθηση (tracking) μονού άξονα και tracking δύο αξόνων, και με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Αρχικά θα εξετάσουμε τους σταθερούς ηλιακούς συλλέκτες. Αυτοί οι συλλέκτες είναι μόνιμα στερεωμένοι στη θέση τους και δεν παρακολουθούν τον ήλιο. Τρεις τύποι συλλεκτών ανήκουν σε αυτή την κατηγορία:

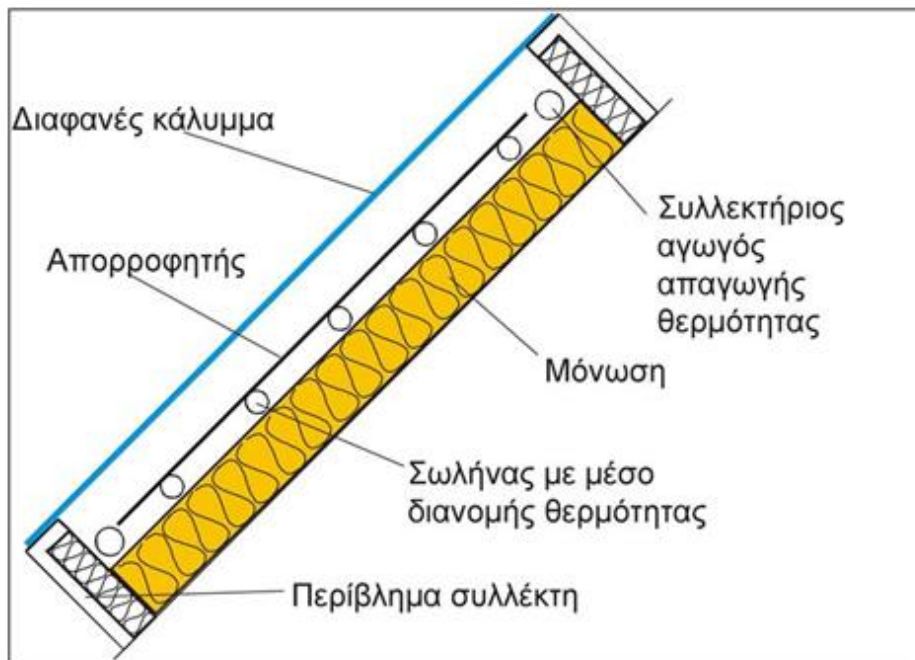
- **Επίπεδοι Ηλιακοί συλλέκτες (Flat Plate Collector - FPC)**

Ένας τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης φαίνεται στο Σχ. 1. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται από ένα διαφανές κάλυμμα και προσκρούει στη μαυρισμένη επιφάνεια του απορροφητήρα υψηλής απορροφητικότητας, ένα μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας απορροφάται από την πλάκα και στη συνέχεια μεταφέρεται στο ρευστό που κυκλοφορεί στους σωλήνες για αποθήκευση ή χρήση. Η κάτω πλευρά του η πλάκα απορρόφησης και η πλευρά του καλύμματος είναι καλά μονωμένα για μείωση των θερμικών απωλειών. Οι σωλήνες υγρού συνδέονται και στα δύο άκρα με μεγάλης διαμέτρου σωλήνες κεφαλής.

Το διαφανές κάλυμμα χρησιμοποιείται για τη μείωση των απωλειών μεταφοράς θερμότητας από την πλάκα απορρόφησης μέσω της συγκράτησης του στάσιμου αέρα μεταξύ της πλάκας απορρόφησης και του γυαλιού. Επίσης μειώνει απώλειες ακτινοβολίας από τον συλλέκτη καθώς το γυαλί είναι διαφανές και η ακτινοβολία βραχέων κυμάτων που δέχεται από τον ήλιο είναι σχεδόν αδιαφανής ως προς τη θερμική ακτινοβολία μακρών κυμάτων που εκπέμπεται από την απορροφητική πλάκα (φαινόμενο θερμοκηπίου).



Εικόνα 2.4.1.1: Τομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

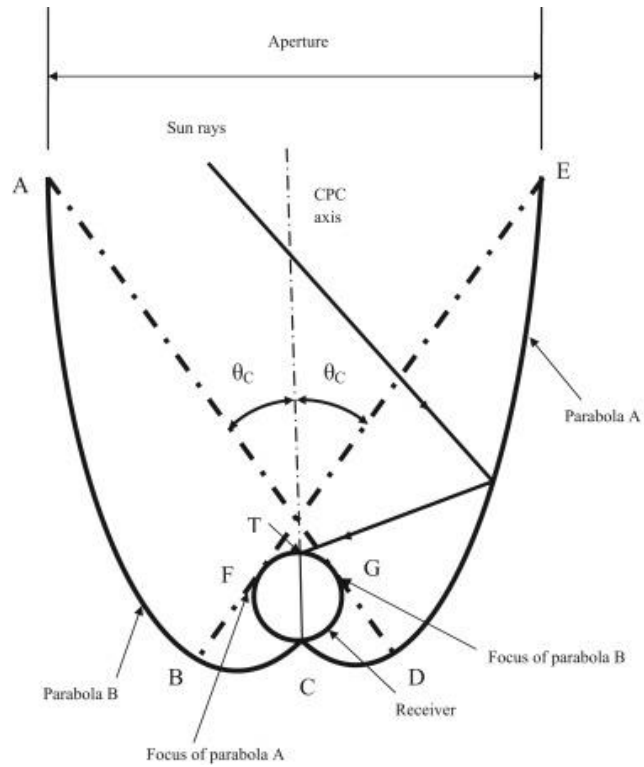


Εικόνα 2.4.1.2: Τομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Οι FPC είναι μακράν ο πιο χρησιμοποιούμενος τύπος συλλέκτη. Χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών μέχρι  $100^{\circ}\text{C}$ , αν και μερικοί νέοι τύποι συλλεκτών κενού απασχολούν όπως άλλωστε και στη συγκεκριμένη εργασία που μπορούν να επιτύχουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές.. Λόγω της εισαγωγής υψηλών επιλεκτικών επιστρώσεων ένας πραγματικός τυπικός FPC μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από  $200^{\circ}\text{C}$ . Με αυτούς τους συλλέκτες, η απόδοση που μπορεί να είναι καλή επιτυγχάνεται μέχρι θερμοκρασίες περίπου  $100^{\circ}\text{C}$ .

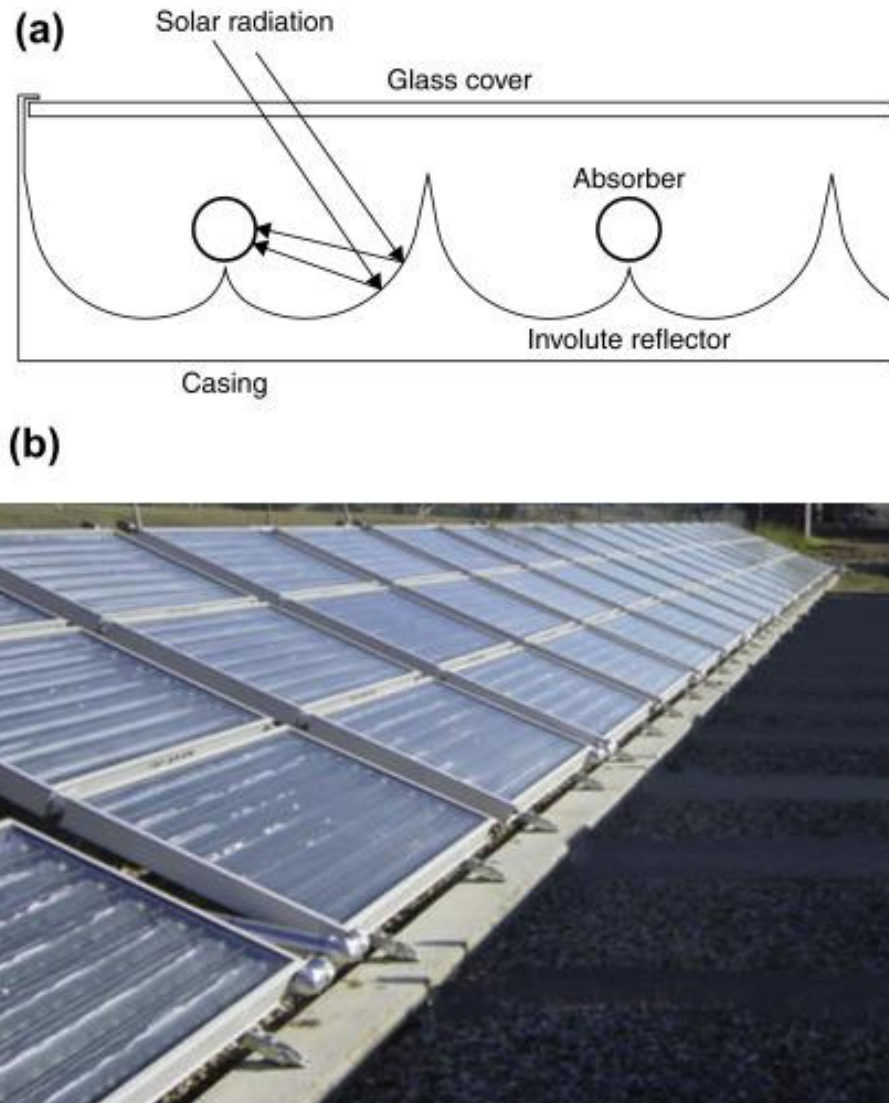
- **Σύνθετοι Παραβολικοί Συγκεντρωτές ( Compound Parabolic Collectors – CPC)**

Οι CPC συλλέκτες, όπως δηλαδή και ο συλλέκτης που θα μελετήσουμε σε αυτή την εργασία και που θα παρουσιάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο πιο αναλυτικά, είναι συγκεντρωτές χωρίς είδωλο. Αυτοί έχουν την ικανότητα ανάκλασης στον απορροφητή σχεδόν όλης της προσπίπτουσας ακτιβολίας. Η αναγκαιότητα μετακίνησης του συγκεντρωτή για την προσαρμογή του μεταβαλλόμενου ηλιακού προσανατολισμού μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας μια γούρνα με δύο τμήματα παραβολής αντικριστά μεταξύ τους.



Εικόνα 2.4.1.3: Πρόοψη CPC συλλέκτη

Οι σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές μπορούν να δεχτούν την εισερχόμενη ακτινοβολία σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος γωνιών. Με τη χρήση πολλαπλών εσωτερικών αντανakλάσεων, οποιαδήποτε ακτινοβολία εισέρχεται εντός του διαφράγματος μπορεί και ανακατευθύνεται προς την επιφάνεια του απορροφητή που βρίσκεται στο κάτω μέρος του συλλέκτη.

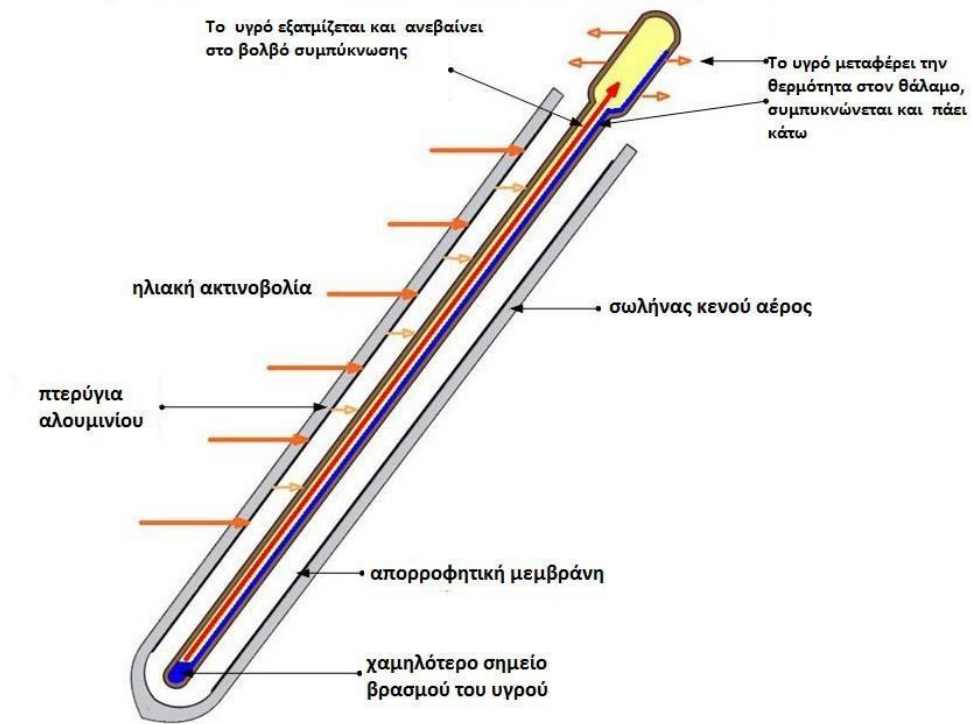


Εικόνα 2.4.1.4: CPC ηλιακοί συλλέκτες

- **Ηλιακοί συλλέκτες κενού (Evacuated Tube Collectors - ETC)**

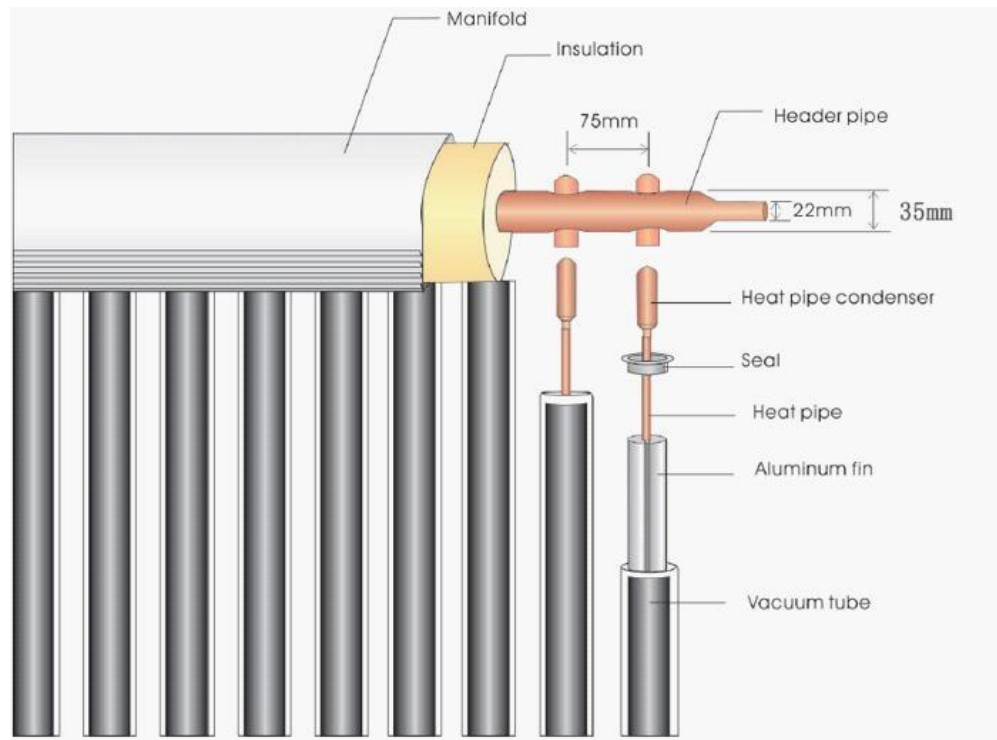
Οι συμβατικοί απλοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες αναπτύχθηκαν για χρήση σε ηλιόλουστα και ζεστά κλίματα. Τα οφέλη τους όμως μειώνονται σημαντικά όταν οι συνθήκες γίνονται δυσμενείς κατά τις κρύες, συννεφιασμένες και θυελλώδεις μέρες. Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού λειτουργούν διαφορετικά από τους άλλους συλλέκτες

που διατίθενται στην αγορά. Αυτοί οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούνται από έναν σωλήνα θερμότητας μέσα σε σωλήνα σφραγισμένο με κενό.



Εικόνα 2.4.1.5: Τομή ηλιακού συλλέκτη κενού





Εικόνα 2.4.1.6: Τομή ηλιακού συλλέκτη κενού

Οι ETC έχουν δείξει ότι ο συνδυασμός μιας επιλεκτικής επιφάνειας και ενός αποτελεσματικού ψυκτικού μέσου μπορεί να οδηγήσει σε πολύ καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες. Το κενό μειώνει τις απώλειες θερμότητας οπότε οι ETC μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τους FPC. Όπως οι FPC, συλλέγουν τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία. Ωστόσο, η απόδοσή τους είναι υψηλότερη σε χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης. Αυτή η επίδραση τείνει να δώσει στους ETC ένα πλεονέκτημα έναντι των FPC όσον αφορά τη λειτουργία τους καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

## 2.4.2: Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί συλλέκτες που λειτουργούν με σύστημα tracking (Consentrated Solar Power – CSP)

Μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες από αυτές που επιτυγχάνονται με FPC αν συγκεντρωθεί μεγάλη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε σχετικά μικρή περιοχή συλλογής. Αυτό γίνεται με παρεμβολή μιάς οπτικής συσκευής μεταξύ της πηγής ακτινοβολίας και της απορροφητικής επιφάνειας. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τους συμβατικούς επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες.

Τα κυριότερα είναι:

1. Το εργαζόμενο ρευστό μπορεί να επιτύχει υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με ένα σύστημα επίπεδης πλάκας για την ίδια επιφάνεια συλλογής ηλιακής ενέργειας.
2. Η θερμική απόδοση είναι μεγαλύτερη λόγω της μικρής περιοχής απώλειας θερμότητας σε σχέση με την περιοχή του δέκτη.

Ένα σοβαρό μειονέτημά τους όμως είναι ότι ενώ οι ανακλαστικές επιφάνειες απαιτούν λιγότερο υλικό από τους FPC εξαιτίας της μηχανισμού tracking το συνολικό κόστος μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερο.

Οι συλλέκτες που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι:

- **Επιμήκης Παραβολικός Συλλέκτης (Parabolic Through Collector – PTC)**

Για την παροχή υψηλών θερμοκρασιών με καλή απόδοση απαιτείται ηλιακός συλλέκτης υψηλής απόδοσης. Οι PTC μπορούν να παράγουν αποτελεσματικά θερμότητα σε θερμοκρασίες μεταξύ 50° και 400°C. Οι PTC κατασκευάζονται με κάμψη ενός φύλλου ανακλαστικού υλικού σε παραβολικό σχήμα. Ένας μεταλλικός

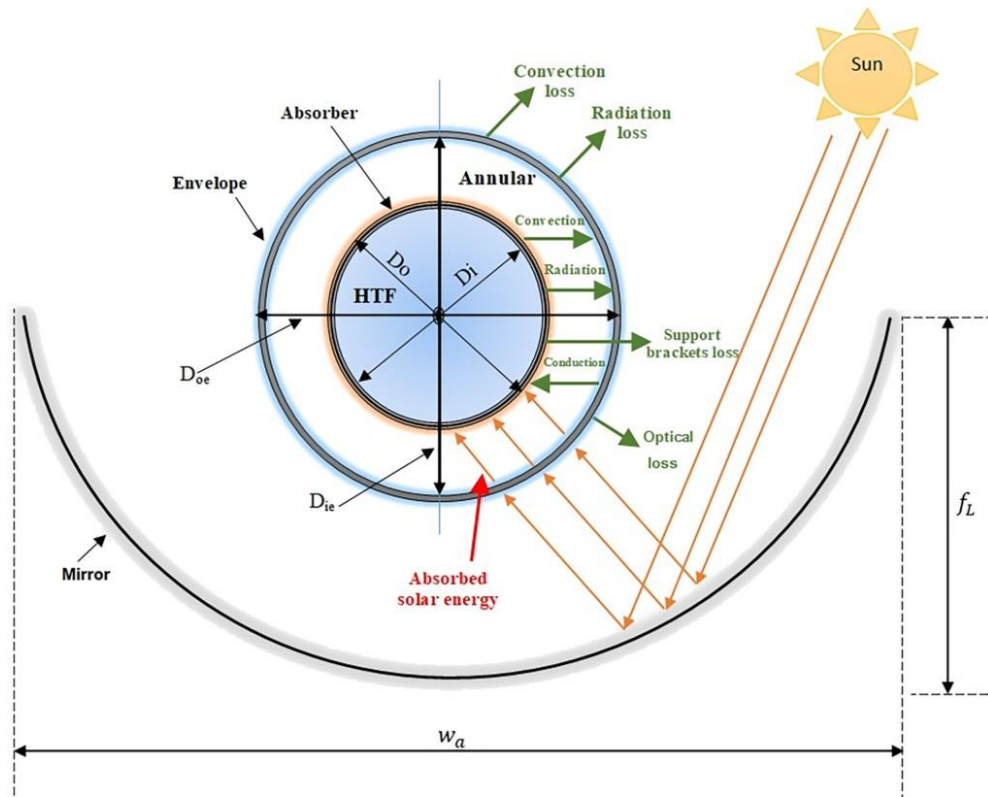
μαύρος σωλήνας, καλυμμένος με έναν γυάλινο σωλήνα για τη μείωση των απωλειών θερμότητας, τοποθετείται κατά μήκος της εστιακής γραμμής του δέκτη (Εικ. 4). Όταν η παραβολή είναι στραμμένη προς τον ήλιο, αντανακλώνται παράλληλες ακτίνες που προσπίπτουν στον ανακλαστήρα πάνω στο σωλήνα του δέκτη. Για την επιθυμητή απόδοση αρκεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα tracking ενός άξονα. Ο συλλέκτης μπορεί να προσανατολιστεί με κατεύθυνση σε ανατολή-δύση, παρακολουθώντας τον ήλιο από βορρά προς νότο ή με προσανατολισμό με κατεύθυνση βορρά-νότου και παρακολούθηση του ήλιου από ανατολή προς δύση.

#### Πλεονεκτήματα:

- ✓ Το χαμηλό κόστος που παρέχουν οι PTC είναι το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους.
- ✓ Δημιουργούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες που είναι κατάλληλες για παραγωγή ατμού. Η θερμική αποθήκευση σε μονωμένες δεξαμενές μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια τη νύχτα.

#### Μειονεκτήματα:

- ✗ Η παρακολούθηση του ήλιου είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ηλιακής συλλογής από PTC, διαφορετικά η παραγωγή θα μειωθεί. Αυτό αυξάνει το κόστος και τη συντήρηση που σχετίζονται με τη συντήρηση των κινούμενων κατασκευών.
- ✗ Η υψηλή συγκέντρωση ηλιακού φωτός είναι απαραίτητη για την καλή λειτουργία ενός PTC . Στο διάχυτο φως, υπάρχει αδυναμία αποτελεσματικής εστίασης του ηλιακού φωτός και η έξοδος μειώνεται δραματικά.
- ✗ Τα τηγμένα άλατα παγώνουν σε υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή από 120°C έως 220°C. Υπάρχει κίνδυνος να παγώσει τη νύχτα που επηρεάζει τη λειτουργία των PTC.



Εικόνα 2.4.2.1: Τομή PTC συλλέκτη



Εικόνα 2.4.2.2: Φωτογραφία PTC ηλιακού συλλέκτη

- **Γραμμικός συλλέκτης Fresnel (Linear Fresnel Reflector – LFR)**

Ένας γραμμικός ανακλαστήρας Fresnel χρησιμοποιεί επίπεδα κάτοπτρα. Η ηλιακή ενέργεια που συλλέγει στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού που με τη σειρά του κινεί έναν στρόβιλο. Αυτή η τεχνολογία οδηγεί στην παραγωγή ατμού απευθείας και δεν χρησιμοποιεί υγρό μεταφοράς θερμότητας ή άλλο μέσο. Το ηλιακό φως που συγκεντρώνεται με τη βοήθεια κατόπτρων βράζει το νερό που υπάρχει στους σωλήνες του δέκτη και έτσι δημιουργείται ατμός. Δεν χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας σε αυτό το σύστημα.

Ο Fresnel αναπτύσσεται γρήγορα τις τελευταίες δεκαετίες. Ένας γραμμικός ανακλαστήρας Fresnel λειτουργεί χρησιμοποιώντας το φαινόμενο του φακού Fresnel που αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τον Γάλλο φυσικό Augustin-Jean Fresnel. Ο σχεδιασμός επιτρέπει την κατασκευή φακών μεγάλου διαφράγματος και μικρής εστιακής απόστασης χωρίς τη μάζα και τον όγκο του υλικού που θα απαιτούσε ένας φακός συμβατικού σχεδιασμού. Βοηθά στη μείωση του κόστους καθώς οι παραβολικοί ανακλαστήρες αποδείχθηκαν δαπανηροί.

Σε αντίθεση με τους PTC, ο δέκτης είναι σταθερός ενώ οι διακριτοί επίπεδοι ή ελαφρώς καμπύλοι συγκεντρωτικοί καθρέφτες τοποθετούνται στο έδαφος με σύστημα παρακολούθησης του ήλιου ενός άξονα. Με τη χρήση δευτερευόντων συγκεντρωτών, ο λόγος συγκέντρωσης του LFR μπορεί να φτάσει πάνω από 100.

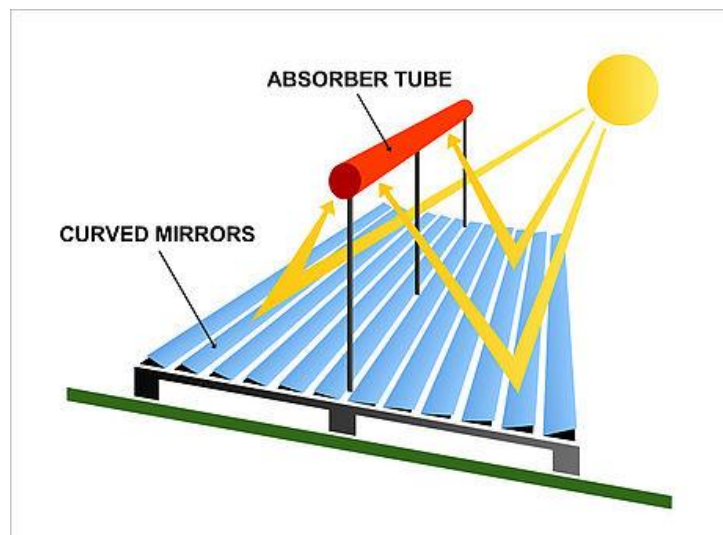
Πλεονεκτήματα:

- ✓ Χρησιμοποιούνται επίπεδοι καθρέφτες που είναι φθηνότεροι και μπορούν να τοποθετηθούν περισσότεροι ανακλαστήρες στον ίδιο χώρο, κάτι που επιτρέπει την πιο αποτελεσματική χρήση της διαθέσιμης ηλιοφάνειας.

- ✓ Η δομή που χρησιμοποιείται είναι πολύ πιο απλή, ο σωλήνας μονής απορρόφησης μπορεί να μοιράζεται μεταξύ πολλών καθρεφτών. Το κόστος συντήρησης είναι επίσης μικρότερο.
- ✓ Οι γραμμικοί ανακλαστήρες Fresnel παράγουν γενικά απευθείας ατμό και καταργούν την απαίτηση ακριβών εναλλακτών θερμότητας.

Μειονεκτήματα:

- ✗ Για να αποφευχθεί η σκίαση, οι καθρέφτες πρέπει να τοποθετούνται σε μεγαλύτερη περιοχή που απαιτεί περισσότερη γη και επομένως αυξάνει το κόστος.
- ✗ Δεν παράγονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με άλλους CSP και επομένως η απόδοση είναι μικρότερη.



Εικόνα 2.4.2.3: Σκίτσο συλλέκτη LFR



Εικόνα 2.4.2.4: Φωτογραφία συλλέκτη LFR

- **Ηλιακός Πύργος (Solar Power Tower – SPT)**

Ένας πύργος ηλιακής ενέργειας ονομάζεται επίσης «Ηλιοστάτης» ηλεκτροπαραγωγής. Είναι βασικά ένα είδος ηλιακής εγκατάστασης που χρησιμοποιεί ένα σχέδιο πύργου για να εστιάσει το ηλιακό φως που προσπίπτει σε αυτό. Οι καθρέφτες εστιάζουν το φως του ήλιου σε έναν κεντρικό πύργο που λειτουργεί ως δέκτης σε αυτή την περίπτωση. Μερικά από τα αρχικά σχεδιασμένα έργα χρησιμοποίησαν νερό για να παράγουν απευθείας ατμό που γύρναγε έναν στρόβιλο, αλλά τώρα χρησιμοποιείται λιωμένο αλάτι.

Το ηλιακό φως που εστιάζεται από τους καθρέφτες (ηλιοστάτες) κατευθύνεται στον πύργο (δέκτης) ο οποίος στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να θερμάνει το μείγμα λιωμένου αλατιού το οποίο με τη σειρά του παράγει ατμό που οδηγεί τον στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα λιωμένου αλατιού επιτρέπει την αποθήκευση πέρα από τις ώρες της ημέρας για χρήση κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το λιωμένο αλάτι αντλείται από μια ψυχρή δεξαμενή στους 290°C, η οποία στη συνέχεια θερμαίνεται στους 565°C και στη συνέχεια αντλείται σε μια ζεστή

δεξαμενή για αποθήκευση. Όποτε απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια ανάλογα με τη χρήση, αυτή η ζεστή δεξαμενή παρέχει το θερμαινόμενο αλάτι που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Μετά τη θέρμανση, επιστρέφει ξανά στην κρύα δεξαμενή. Στη συνέχεια, ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Δύο εξαιρετικά επιτυχημένοι πύργοι ηλεκτροδότησης λειτούργησαν επιδεικνύοντας την ικανότητά τους:

Το εργοστάσιο Solar One ισχύος 10 MW κοντά στο Barstow της Καλιφόρνια, το οποίο παρήγαγε πάνω από 38 εκατομμύρια κιλοβατώρες ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη λειτουργία του από το 1982 έως το 1988. Ήταν το μεγαλύτερο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Εύστοχα απέδειξε την ικανότητα παραγωγής 10 MW για οκτώ ώρες την ημέρα στο θερινό ηλιοστάσιο και τέσσερις ώρες την ημέρα κοντά στο χειμερινό ηλιοστάσιο.

Το εργοστάσιο Solar Two ήταν μια βελτίωση σε σχέση με το Solar One και χρησιμοποίησε την τεχνολογία λιωμένου αλατιού. Παρείχε ρεύμα για 24 ώρες σε ένα πείραμα για μια εβδομάδα πριν από τη διακοπή λόγω σύννεφων. Το IT παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια 10 MW και λειτουργούσε έως τρεις ώρες μετά τη δύση του ηλίου.

Πλεονεκτήματα:

- ✓ Το εγγενές πλεονέκτημα ενός πύργου ηλιακής ενέργειας είναι ότι η συγκέντρωση του φωτός σε έναν μόνο δέκτη (τον πύργο) αποδίδει υψηλότερες θερμοκρασίες.
- ✓ Οι καθρέφτες σε ένα σύστημα πύργων ηλιακής ενέργειας λαμβάνουν το ηλιακό φως παρακολουθώντας τον ήλιο σε δύο άξονες. Αυτό είναι πιο πλεονεκτικό καθώς μπορεί να λαμβάνει ηλιοφάνεια ακόμα και όταν ο ήλιος



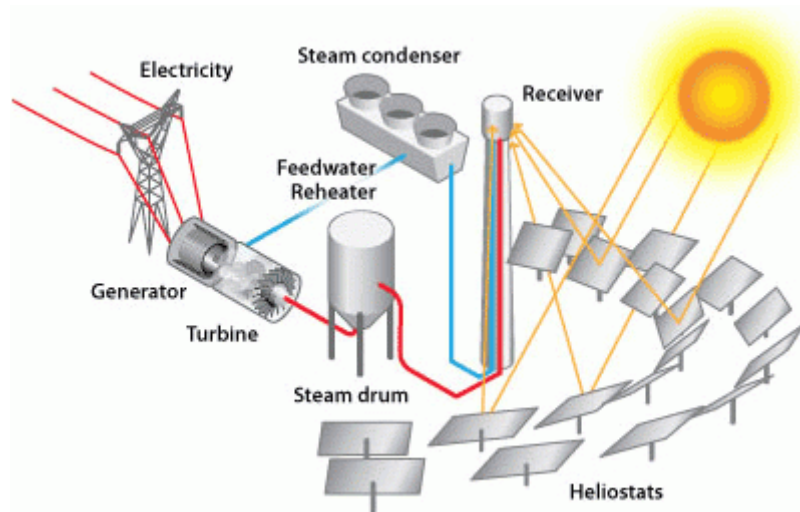
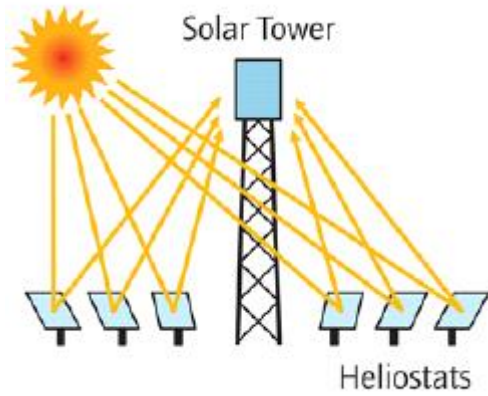
είναι χαμηλά στον ουρανό, όπως συμβαίνει κατά τους χειμερινούς μήνες ή ακόμα και την αυγή και το λυκόφως. Περισσότερη ηλιοφάνεια χρησιμοποιείται αποτελεσματικά.

- ✓ Οι πύργοι ηλιακής ενέργειας είναι συστήματα φιλικά προς το περιβάλλον. Δεν απελευθερώνονται επικίνδυνα αέρια ή υγρές εκπομπές. Εάν συμβεί διαρροή αλατιού, το αλάτι θα παγώσει πριν συμβεί σημαντική μόλυνση του εδάφους. Στη συνέχεια, μπορεί να παραληφθεί με ένα φτυάρι και να ανακυκλωθεί εάν είναι απαραίτητο.

#### Μειονεκτήματα:

- ✗ Απαιτείται πολύ μεγάλη έκταση γης και επομένως είναι κατάλληλα για περιοχές όπως η έρημος.
- ✗ Η απόδοση είναι μικρότερη από τα συστήματα stirling.
- ✗ Απαιτείται μια άκαμπτη δομή και περισσότερη στήριξη για τον μεγάλο αριθμό καθρεφτών που χρησιμοποιούνται.
- ✗ Ο άνεμος προκαλεί προβλήματα με τους καθρέφτες που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση.

Ο πρώτος πύργος ηλιακής ενέργειας με εμπορική συγκέντρωση φυτών Solar 10 ή PS10 της Ευρώπης λειτουργεί κοντά στη Σεβίλλη της Νότιας Ισπανίας. Ο ηλιακός πύργος ισχύος 11 μεγαβάτ (MW) παράγει ηλεκτρική ενέργεια με 624 μεγάλους κινητούς καθρέφτες.



Εικόνα 2.4.2.5: Φωτογραφίες και σκίτσα συλλεκτών SPT

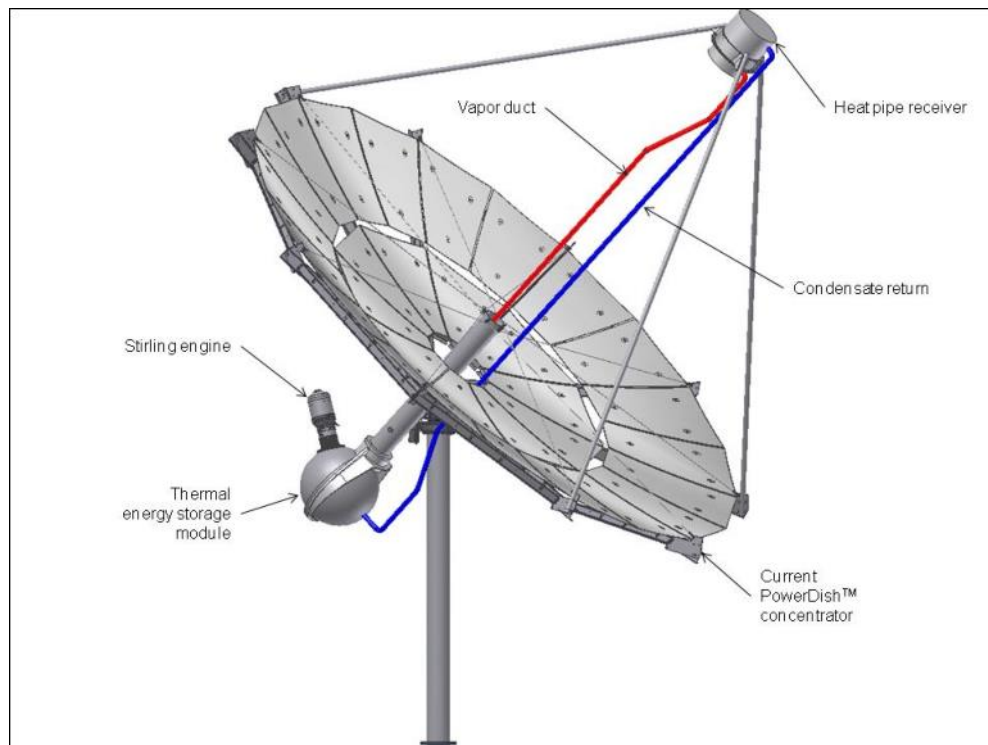
- **Ηλιακό παραβολικό πιάτο (Solar Parabolic Dish - SPD)**

Η γεωμετρία του παραβολικού πιάτου συγκεντρώνει το φως σε ένα μόνο εστιακό σημείο, δηλαδή όλες οι ακτίνες του ήλιου που είναι παράλληλες στον άξονα της παραβολής κατευθύνονται προς τον κεντρικό δέκτη. Αυτό επιτρέπει σε αυτόν τον τύπο συλλέκτη να επιτυγχάνει τις υψηλότερες αναλογίες συγκέντρωσης μεταξύ όλων των άλλων τύπων ηλιακών συλλεκτών. Ο SPD πρέπει να είναι προσανατολισμένος προς τον ήλιο. Συνήθως, οι απώλειες σε αυτήν την τεχνολογία συνδέονται με τις ατέλειες της ευθυγράμμισης των πιάτων και τη μη ιδανικότητα της αντανάκλασης. Ο κινητήρας που μετατρέπει τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική τοποθετείται στο εστιακό σημείο. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας (με πολλά πιάτα ομαδοποιημένα σε συστοιχίες) όσο και για αυτόνομα μικρής κλίμακας συστήματα παραγωγής ενέργειας που θα παρέχουν ενέργεια σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις εκτός δικτύου.

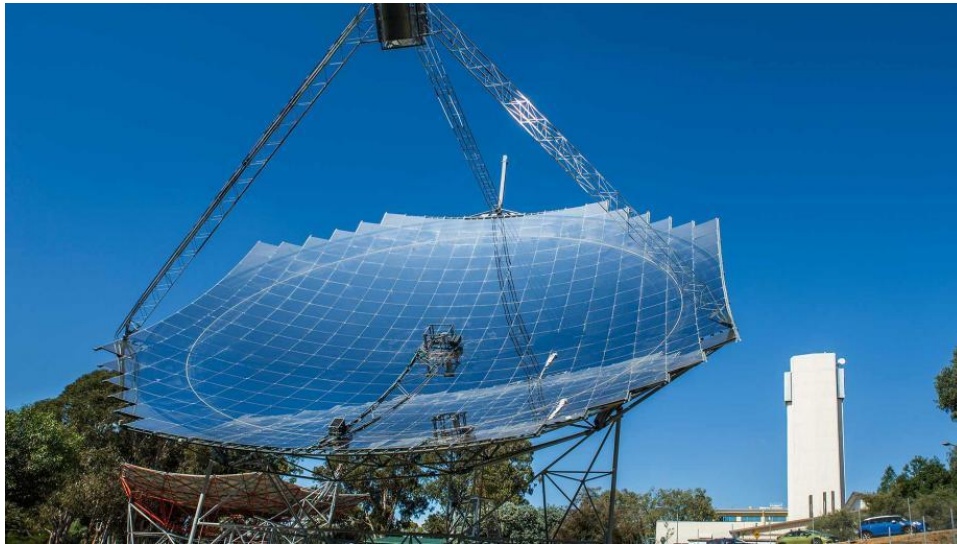
Ο λόγος συγκέντρωσης είναι αρκετά υψηλός και κυμαίνεται συνήθως από 600 έως 2000. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών οι οποίες μπορούν να ξεπεράσουν τους 1000°C και να φτάσουν έως και τους 1500 °C κάτι που οδηγεί σε υψηλή ενεργειακή αλλά και εξεργειακή απόδοση. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας σε απομακρυσμένες τοποθεσίες για την παροχή αυτοσυντηρούμενης ενέργειας για θέρμανση νερού, άντληση νερού και εναλλακτική ισχύ. Ένα από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων πιάτων Stirling είναι η χαμηλή «αδράνεια» τους - αρχίζουν να παράγουν ισχύ πολύ γρήγορα μόλις η άμεση ακτινοβολία δέσμης χτυπήσει τον ανακλαστήρα, αλλά, ταυτόχρονα, είναι πολύ ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της ηλιακής έντασης και των αποτελεσμάτων σε απότομη διακύμανση της ισχύος εξόδου και συχνές διακοπές, εάν οι μετεωρολογικές συνθήκες δεν είναι τέλειες. Λόγω του υψηλού διαλείμματος, οι εφαρμογές

αποθήκευσης ενέργειας που θα μείωναν την ισχύ εξόδου θα ήταν επιθυμητές, αλλά αυτή τη στιγμή δεν είναι καλά ανεπτυγμένες.

Υπάρχουν μηχανές οι οποίες χρησιμοποιούν το κύκλο Stirling, Rankine και Brayton. Επίσης υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκού στοιχείου στην εστία της παραβολής για παραγωγή ηλεκτρισμού. Η βασικότερη εφαρμογή είναι η χρήση μηχανής Stirling για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μερικών kW ανά συγκεντρωτή η οποία εξελίσσεται τα τελευταία χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετείται στην εστία του κατόπτρου ώστε όλη η ηλιακή ακτινοβολία να συγκεντρώνεται εκεί. Η μηχανή Stirling χρησιμοποιεί τη θερμική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρισμού με υψηλό βαθμό απόδοσης της τάξης του 30%. Το κόστος της τεχνολογίας αυτής είναι της τάξης 2000-3000€/Kw το οποίο είναι μεγάλο αλλά όχι παράλογο για τους επενδυτές.



Εικόνα 2.4.2.6: Φωτογραφία συλλέκτη SPD



Εικόνα 2.4.2.7: Φωτογραφία συλλέκτη SPD

## Βιβλιογραφία 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου

[2.1] Κ.Α. Αντωνόπουλος. Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα (Μέρος Πρώτο). Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2015.

[2.2] J.A. Duffie, W.A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes, fourth edition. Wiley, 2013.

[2.3] E.Bellos, C.Tzivanidis, V.Belessiotis. Daily Performance of parabolic trough collectors. Solar Energy 2017

[2.4] Ε.Α. Μπέλλος. Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συλλεκτών σε κτίρια. Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016.

## Κεφάλαιο 3: Ηλιακός συλλέκτης κενού (ETC)

Αρχικά, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει μια εκτενής αναφορά στα γενικά χαρακτηριστικά, τα είδη, τις αρχές σχεδιασμού και τις λειτουργίες των συλλεκτών κενού. Στη συνέχεια θα εστιάσουμε στην θερμική τους μελέτη αλλά και στην χρησιμότητα της χρήσης παραβολικών κατόπτρων απο άποψη οπτικής. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι ελάχιστη είναι η υπάρχουσα βιβλιογραφία σε σχέση με τον συλλέκτη που επιλέξαμε να μελετήσουμε.

### 3.1: Γενικά Χαρακτηριστικά συλλεκτών κενού

Ο ηλιακός συλλέκτης κενού (ETC) είναι μια συσκευή με επιφανειακή επίστρωση και μόνωση κενού που χρησιμοποιείται για την παροχή θερμότητας σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία για διάφορες εφαρμογές, όπως θέρμανση νερού, κλιματισμό κ.λπ.. Αν και υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τη θέρμανση του εργαζόμενου ρευστού, ο συλλέκτης κενού είναι πιο ελκυστικός λόγω της ικανότητάς του να επιτυγχάνει υψηλή θερμοκρασία και υψηλή θερμική απόδοση. Επίσης, είναι οικονομικά αποδοτικός, αξιόπιστος και έχει πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής.

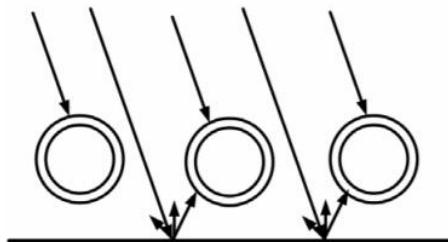
Οι συμβατικοί απλοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες αναπτύχθηκαν για χρήση σε ηλιόλουστα και ζεστά κλίματα. Τα οφέλη τους μειώνονται σημαντικά όταν οι συνθήκες γίνονται δυσμενείς κατά τη διάρκεια κρύων και συννεφιασμένων ημερών. Επιπλέον, οι καιρικές επιδράσεις μπορούν να προκαλέσουν πρόωρη φθορά των εσωτερικών υλικών με αποτέλεσμα μειωμένη απόδοση και αποτυχία του συστήματος. Αυτές οι αδυναμίες μειώνονται στους ηλιακούς συλλέκτες κενού. Οι συλλέκτες κενού θερμαίνουν το νερό σε οικιακές εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες. Η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται από τον εξωτερικό γυάλινο σωλήνα και χτυπά τον σωλήνα απορρόφησης. Η θερμότητα μεταφέρεται στο υγρό που γεμίζει τον σωλήνα απορρόφησης. Το θερμαινόμενο

υγρό κυκλοφορεί μέσω του απορροφητικού σωλήνα, ανεβαίνει σε δεξαμενή αποθήκευσης λόγω της διακύμανσης στην πυκνότητα του νερού και αντικαθίσταται από το πιο δροσερό, πιο βαρύ κρύο νερό από το κάτω μέρος της δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού.

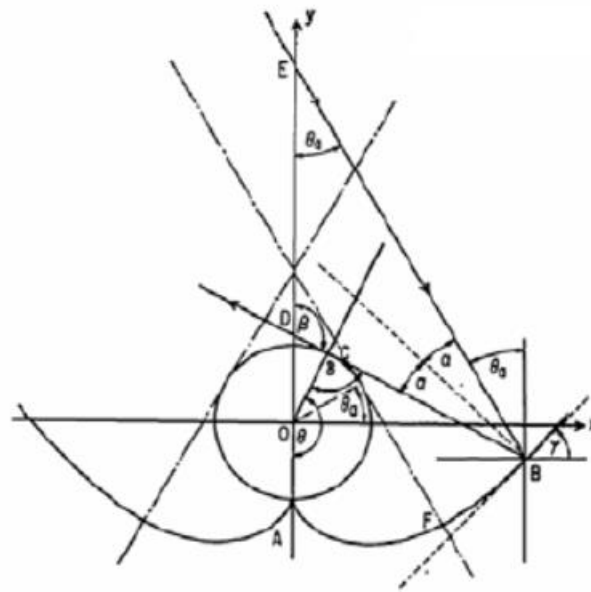
Εφαρμογές Ηλιακών συλλεκτών κενού αέρος:

1. Ηλιακή θέρμανση νερού
2. Ηλιακή θέρμανση και ψύξη χώρων
3. Ψύξη απορρόφησης / προσρόφησης
4. Θερμότητα βιομηχανικής διεργασίας
5. Αφαλάτωση
6. Ηλιακό μαγείρεμα
7. Ξηρές καλλιέργειες

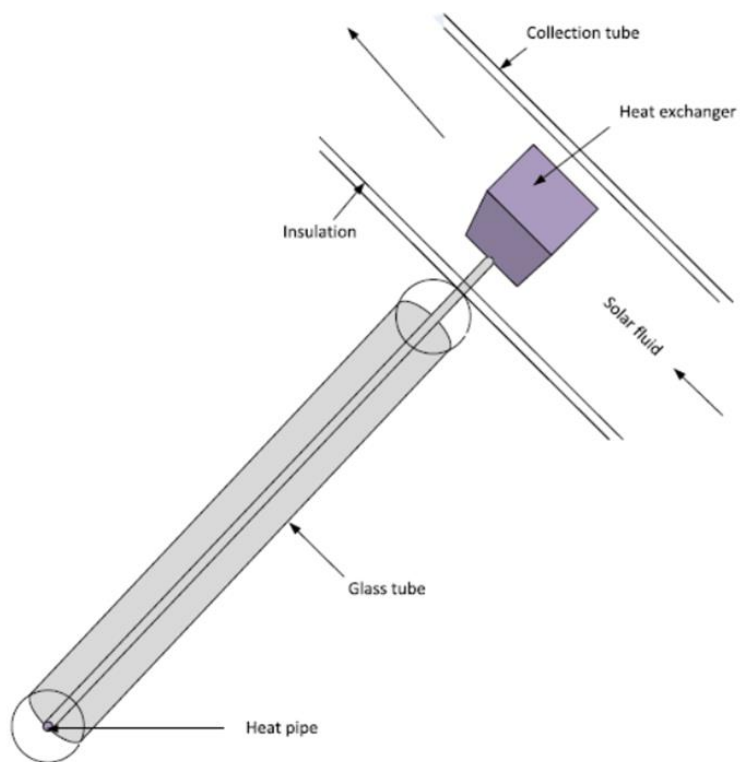
Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού αποτελούνται συνήθως από μια σειρά σωλήνων κενού τοποθετημένων πάνω από έναν ανακλαστήρα. Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει στην επιφάνεια του απορροφητή εξαρτάται από παράγοντες όπως η απόσταση μεταξύ των σωλήνων, η απόσταση μεταξύ των σωλήνων και του ανακλαστήρα, η διάμετρος του σωλήνα, το σχήμα και το υλικό του ανακλαστήρα. Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα σχήματα ανακλαστήρα: με επίπεδο ανακλαστήρα και ένας πιο σύνθετος περικομμένος ανακλαστήρας CPC που προτάθηκε για πρώτη φορά από Winston and Hinterberger (1975) και Rabl (1976) και αποτελείται από δύο παραβολικά κάτοπτρα που εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία και από τις δύο πλευρές του σωλήνα.



Εικόνα 3.1.1: Επίπεδος ανακλαστήρας



Εικόνα 3.1.2: Παραβολικός ανακλαστήρας

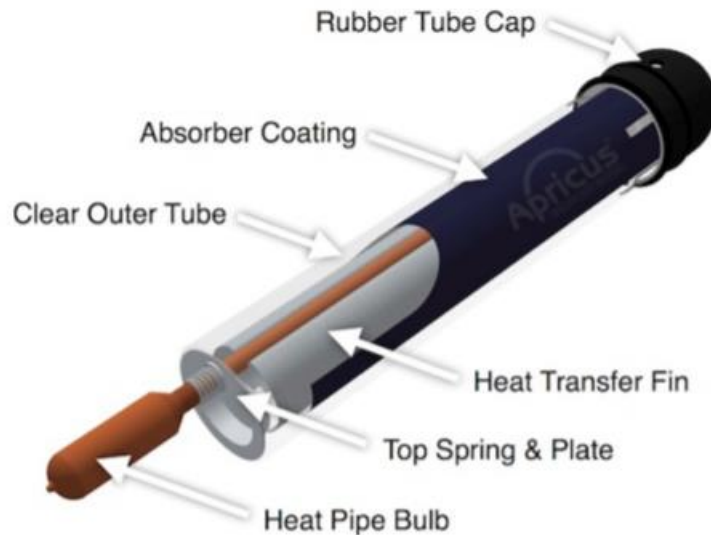


Εικόνα 3.1.3: Τομή συλλέκτη ETC [3.1]



Οι ETC αποτελούνται από σειρές παράλληλων, διαφανών γυάλινων σωλήνων. Καθε σωλήνας αποτελείται από έναν γυάλινο εξωτερικό σωλήνα και έναν εσωτερικό σωλήνα ή απορροφητή, καλυμμένο με επιλεκτική επίστρωση που απορροφά καλά την ηλιακή ενέργεια αλλά αναστέλλει την απώλεια θερμότητας από την ακτινοβολία (Johari et al., 2012; Patel et al., 2012). Ο αέρας αποσύρεται («εκκενώνεται») από τον χώρο μεταξύ των σωλήνων και σχηματίζουν ένα κενό, το οποίο εξαλείφει την απώλεια θερμότητας.

Οι ETC είναι κατάλληλοι επίσης για βιομηχανικές εφαρμογές, και γίνονται πιο οικονομικά αποδοτικοί εκεί όπου χρειάζονται υψηλές θερμοκρασίες νερού ή ατμού (Yadav and Tripathi, 2016).



Εικόνα 3.1.4: Αποτελούμενα μέρη συλλέκτη κενού [3.2]

### 3.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα:

1. Ευαίσθητη και υψηλή απόκριση μεταφοράς θερμότητας. Χωρίς πρόσθετο υγρό καθώς η γλυκόλη χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας στο νερό, χωρίς κινητά μέρη και

χωρίς κανέναν θόρυβο. Λειτουργεί χωρίς ρεύμα, ανθεκτικός για περισσότερα από 15 χρόνια.

2. Εκτεταμένη ανεξαρτησία του συλλέκτη κενού αέρος από το κακές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η συνέπεια είναι η συνεχής απόδοση του συλλέκτη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

3. Η επιφάνεια απορρόφησης του (ETC) δεν εκτίθεται σε επιρροές του περιβάλλοντος όπως η υγρασία, το οξυγόνο και η προκύπτουσα διάβρωση, Ως εκ τούτου, ο συλλέκτης κενού έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.

4. Υψηλότερη ετήσια απόδοση λόγω υψηλότερης απόδοσης σε μεταβατικές εποχές και χειμωνιάτικη ηλιοφάνεια.

Μειονεκτήματα:

1. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε μη παγετώδεις περιοχές με τη χαμηλότερη θερμοκρασία όχι κάτω από  $-5^{\circ}\text{C}$ .

2. Όταν σπάσει ο σωλήνας, το νερό της δεξαμενής αποθήκευσης θα διαρρεύσει.

3. Χρειάζεται μόνο καθαρό νερό (οι σωλήνες μπορούν να φράξουν με λάσπη και άμμο).

4. Ο περιορισμός όλων των συλλεκτών γυάλινων σωλήνων είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για ένα σύστημα χαμηλής πίεσης, καθώς οι σωλήνες αντέχουν μόνο λίγα μέτρα κεφαλή νερού.

5. Επειδή οι σωλήνες είναι γυάλινοι, μπορεί να καταστραφούν από εξωτερική κρούση.

### **3.3: Σύγκριση μεταξύ συλλέκτη κενού και επίπεδου**

Οι συλλέκτες κενού υπερτερούν σε κάποιο βαθμό έναντι των επίπεδων με τους εξής τρόπους:

1. Λόγω του κυλινδρικού σχήματος του συλλέκτη κενού, ο ήλιος είναι κάθετα στην επιφάνεια του συλλέκτη για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας. Οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν το

μειονέκτημα ότι ο ήλιος είναι κάθετα στον συλλέκτη μόνο το μεσημέρι και έτσι ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που χτυπά την επιφάνεια του συλλέκτη είναι πιθανό να ανακλάται.

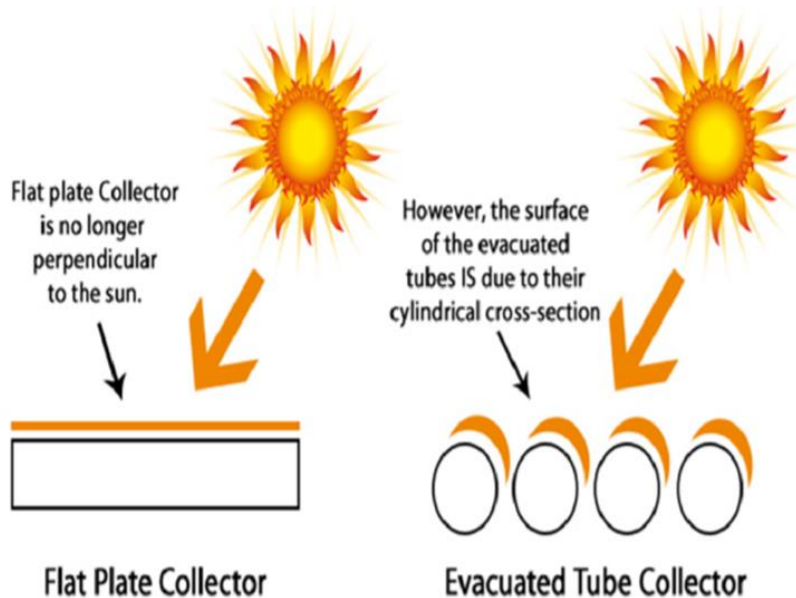
2. Όπως υποδηλώνει το όνομα, ο συλλέκτης κενού χρησιμοποιεί μόνωση με κενό, πράγμα που μειώνει σημαντικά τις απώλειες θερμότητας από το εσωτερικό του σωλήνα. Ως αποτέλεσμα, οι εξωτερικές θερμοκρασίες έχουν ελάχιστη επίδραση στην απόδοσή του.

3. Οι συλλέκτες κενού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες υπό το μηδέν χωρίς να υποστεί ζημιά το σύστημα. Επίπεδα συστήματα συχνά απαιτούν ακριβά και περίπλοκα συστήματα «αντιψυκτικού».

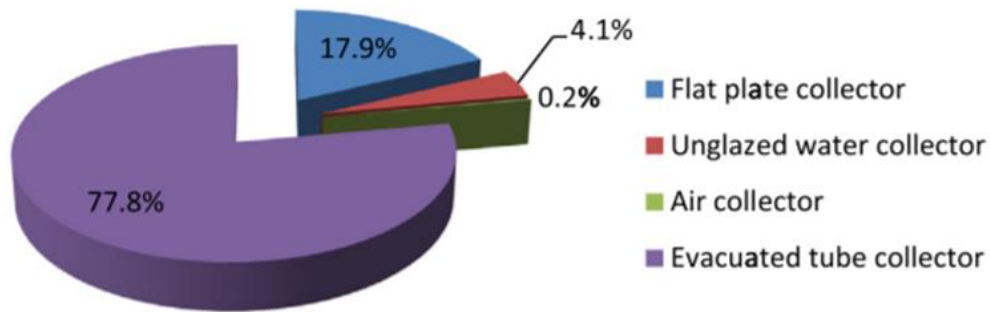
4. Οι ETC είναι ισχυροί, μακράς διάρκειας, φθηνοί και οι σωλήνες είναι αποσπώμενοι και είναι εύκολο να αντικατασταθούν.

5. Λόγω της υψηλής απόδοσης απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας ακόμη και κατά τη διάρκεια συννεφιασμένων ημερών, σε συνδυασμό με εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες των σωλήνων, οι συλλέκτες κενού θα θερμαίνουν το νερό όλο το χρόνο (απαιτείται εφεδρικό σύστημα θέρμανσης για ιδιαίτερα συννεφιασμένο ή βροχερό καιρό)

6. Λόγω των διαφόρων πλεονεκτημάτων του συλλέκτη κενού σωλήνα έναντι του επίπεδου Συλλέκτη η απόδοση του συλλέκτη κενού ανά καθαρό  $m^2$  επιφάνειας συλλέκτη, είναι ανώτερη από τον επίπεδο.



Εικόνα 3.3.1: Σύγκριση μεταξύ FPC ETC

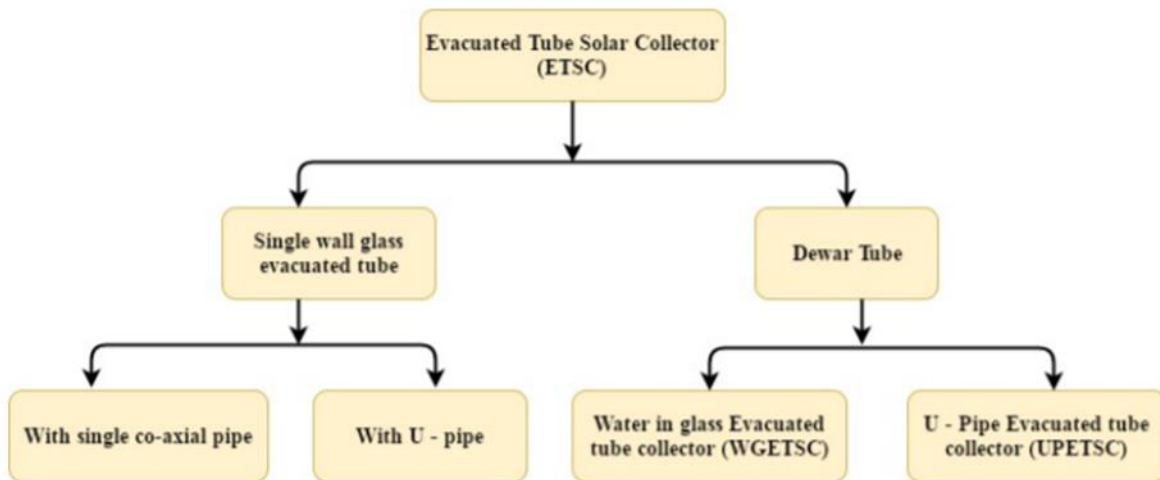


Εικόνα 3.3.2: Χρήση ηλιακών συλλεκτών κατά το 2012 [3.3]

### 3.4: Ταξινόμηση ETC

Οι διαθέσιμοι τύποι ηλιακών συλλεκτών κενού σωλήνα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες ως:

- γυάλινος σωλήνας εκκένωσης μονού τοιχώματος
- Σωλήνας Dewar.



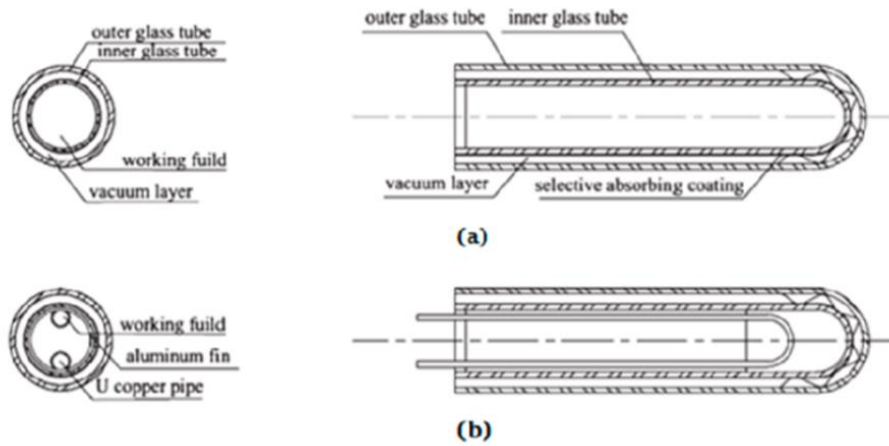
Εικόνα 3.4.1: Ταξινόμηση ETC [3.2]

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές των δύο βασικών τύπων. για παράδειγμα, η εξαγωγή θερμότητας μπορεί να είναι μέσω σωλήνα U, σωλήνα θερμότητας ή άμεσης επαφής υγρού (Gao et al., 2013). Οι Kim και Seo (2007) ερεύνησαν τη θερμική απόδοση ενός ETC με

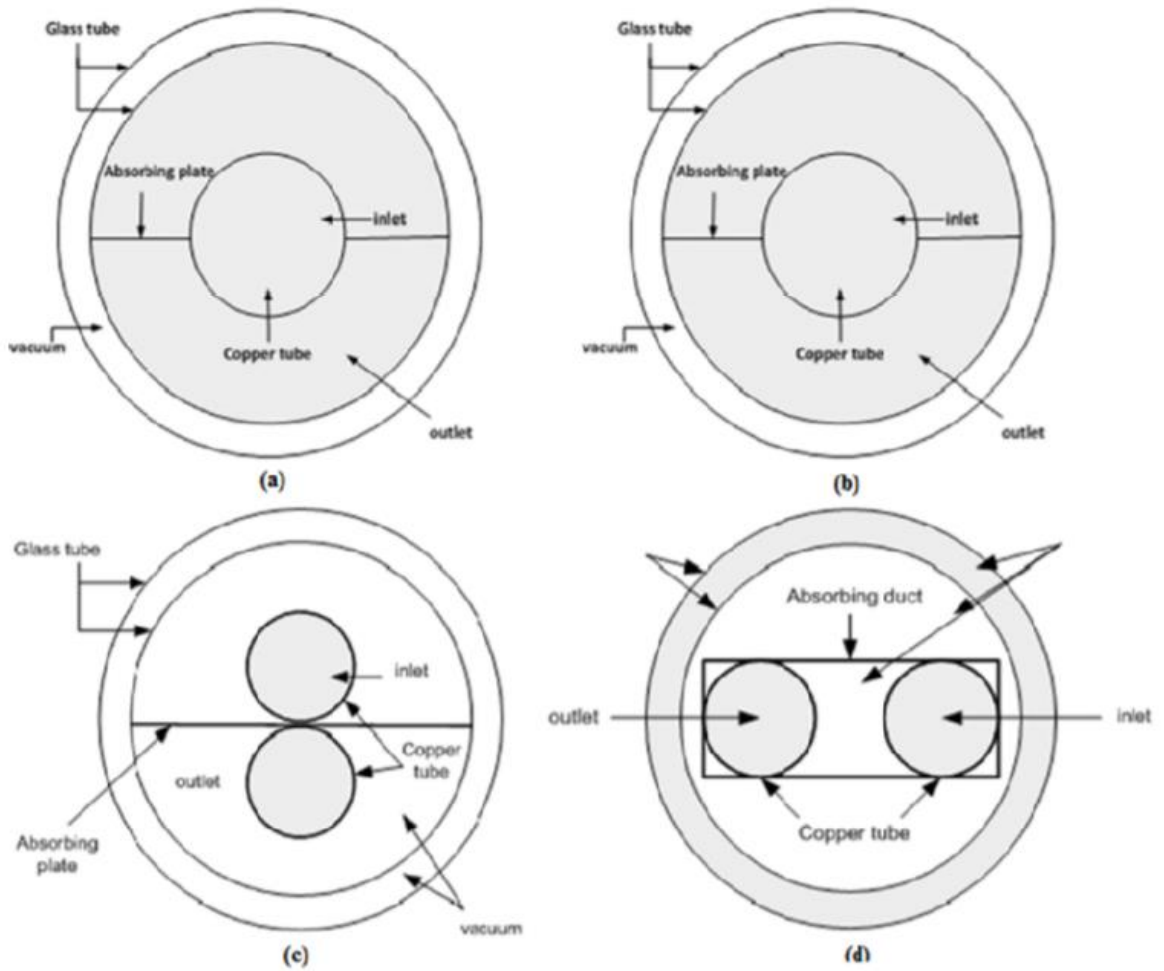
τέσσερις διαφορετικού σχήματος απορροφητές τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά. Τα τέσσερα διαφορετικά σχήματα είναι: σωλήνας με πτερύγια (Μοντέλο I), σωλήνας συγκολλημένος μέσα σε κυκλικό πτερύγιο (Μοντέλο II), σωλήνας U συγκολλημένος σε χάλκινη πλάκα (Μοντέλο III) και σωλήνας U συγκολλημένος μέσα σε έναν ορθογώνιο αγωγό (Μοντέλο IV) [Εικόνα 3.4.3].

Ο σωλήνας Dewar είναι ένα άλλο δημοφιλές σχέδιο του ETC που είναι κατασκευασμένο από δύο λεπτά βοριοπυριτικά γυάλινα τοιχώματα που σχηματίζουν τους εσωτερικούς και εξωτερικούς σωλήνες. Μια επιλεκτική επικάλυψη απορρόφησης εναποτίθεται στο εξωτερικό τοίχωμα του εσωτερικού σωλήνα για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας, και το στρώμα μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών σωλήνων εκκενώνεται για να μειωθεί η απώλεια θερμότητας. Οι ηλιακοί συλλέκτες σωλήνων κενού (WGETSC) χρησιμοποιούν σήμερα πιο ευρέως για συστήματα ζεστού νερού σωλήνα Dewar με τοποθετημένο σωλήνα U ή σωλήνα θερμότητας (UPETSC) λόγω της χαμηλότερης τιμής του. Το UPETSC αναπτύχθηκε με βάση τη βελτίωση του WGETSC.

Ένας σωλήνας U (γενικά χάλκινος σωλήνας με διάμετρο 8–10 mm) και πτερύγια αλουμινίου εισάγεται στην εσωτερική κοιλότητα του σωλήνα. Η βασική διαφορά είναι ότι κάθε εκκενωμένος σωλήνας ενός WGETSC είναι γεμάτος με εργαζόμενο ρευστό και υγρό περιέχεται μόνο στον σωλήνα U του UPETSC. Ρευστό ρέει στον σωλήνα U για να απορροφήσει και να παρασύρει τη χρήσιμη ενέργεια. [Εικόνα 3.4.2]



Εικόνα 3.4.2: Τομές σωλήνων Dewar a) WGET b) U-Pipe (UPET) [3.2]



Εικόνα 3.4.3: Τομές μοντέλων a) I, b) II, c) III, d) IV [3.4]

Το σχήμα του ηλιακού συλλέκτη κενού σωλήνα U που θα μελετήσουμε αποτελείται από εξωτερικό γυάλινο σωλήνα, εσωτερικό γυάλινο σωλήνα, χάλκινο σωλήνα U και συχνά πτερύγια χαλκού ή αλουμινίου. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει στην εξωτερική επιφάνεια του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα μεταφέρεται στον εσωτερικό γυάλινο σωλήνα και απορροφάται από το πτερύγιο. Η ενέργεια που συλλέγεται από το πτερύγιο μεταφέρεται μέσω αγωγιμότητας στον σωλήνα U και από εκεί στο εργαζόμενο ρευστό που ρέει μέσα στο σωλήνα U.

### **3.4: Ιστορική Αναφορά**

Η μελέτη για τη μεταφορά θερμότητας που λαμβάνει χώρα σε έναν συλλέκτη κενού ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970. Το πρώτο μαθηματικό μοντέλο για ανάλυση μεταφοράς θερμότητας και προβλέψεις απόδοσης του προαναφερθέντος συλλέκτη αναφέρθηκε από τον Eberlein χρησιμοποιώντας τον αέρα ως εργαζόμενο ρευστό. Ο συγγραφέας διαπίστωσε ότι η συνολική απώλεια θερμότητας ήταν πολύ μικρή στον συλλέκτη λόγω του εκκενωμένου δακτυλιοειδούς χώρου μεταξύ των γυάλινων σωλήνων. Οι Zhiqiang et al και Morrision et al διερεύνησαν τη ροή της φυσικής κυκλοφορίας στον σωλήνα συλλέκτη χρησιμοποιώντας νερό ως εργαζόμενο ρευστό. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο άνωσης και ο ρυθμός ροής μάζας μέσα στο σωλήνα έπαιξε σημαντικό ρόλο στη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας. Οι Hazami et al και Nkwetta et al μελέτησαν τη θερμική απόδοση του νερού σε έναν ηλιακό συλλέκτη κενού σωλήνα με διαφορετική εσωτερική επικάλυψη γυάλινων επιφανειών. Οι Badar et al αξιολόγησαν το συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ενός ETC συλλέκτη U-σωλήνα τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά και ανέφεραν ότι ο αριθμητικά προβλεπόμενος συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας έχει καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Ο Gao et al πρότεινε ένα νέο μαθηματικό μοντέλο για την πρόβλεψη της θερμικής απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη κενού U-tube λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της ακτίνας και του άξονα

του σωλήνα και επικύρωσε το μοντέλο με πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν με χρήση πτερυγίου αλουμινίου. Διερεύνησαν την εξάρτηση της θερμικής απόδοσης από την κατάσταση του περιβάλλοντος και τις παραμέτρους σχεδιασμού σωλήνων. Οι Kiran et al ανέπτυξαν μια αναλυτική λύση για την πρόβλεψη της θερμικής απόδοσης ενός ηλιακού ETC χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά εργαζόμενα ρευστά. Ayala et al μελέτησε αριθμητικά U-tubes ETC ηλιακό συλλέκτη για μια ειδική περίπτωση όπου η θερμοκρασία λειτουργίας εισόδου υγρού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Προέβλεψαν επίσης τη θερμοκρασία εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά μοντέλα, π.χ. το μοντέλο προσέγγισης Boussinesq (BA) και τη διακύμανση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του μοντέλου θερμοκρασίας (VPT). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο BA έχει μια πιο στενή σχέση τόσο για τη θερμική απόδοση όσο και για τη θερμοκρασία εξόδου σε σύγκριση με το μοντέλο VPT.

Από τη βιβλιογραφία φαίνεται ότι πολύ λίγα αριθμητικά μοντέλα αναπτύχθηκαν για την πρόβλεψη της θερμικής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη κενού U-tube. Κανένα από τα αναφερόμενα μοντέλα δεν εξέτασε τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας που συμβαίνουν σε ολόκληρη τη γεωμετρία του ηλιακού συλλέκτη εκκενωμένου σωλήνα (εξωτερικός και εσωτερικός γυάλινος σωλήνας, απορροφητικός σωλήνας και σωλήνας U). Τα περισσότερα από τα αναφερόμενα μοντέλα ανέλυσαν μόνο τις διαδικασίες μεταφοράς κατά μήκος του συλλέκτη U-tube λαμβάνοντας απλουστευμένες υποθέσεις όπου η θερμική απόδοση ολόκληρου του συλλέκτη δεν είχε προβλεφθεί και απεικονιστεί. Επίσης, οι περισσότεροι από τους συγγραφείς ανέπτυξαν τα δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα και κανείς δεν έχει αναφέρει την τρισδιάστατη αριθμητική μελέτη σε ολόκληρη την περιοχή διατομής του ηλιακού συλλέκτη κενού. Επιπλέον, υπάρχει έλλειψη βαθιάς ανάλυσης απόδοσης σε ηλιακό συλλέκτη κενού U-tube με διαφορετικούς συνδυασμούς ειδών εργαζόμενου υγρού και υλικών U-tube. Ακόμα εξετάζεται η επίδραση του ρυθμού ροής σε διαφορετικούς συνδυασμούς εργαζόμενων ρευστών και υλικών σωλήνα U. Περαιτέρω, διερευνάται η θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη κενού που χρησιμοποιεί διαφορετικά υλικά πλήρωσης.



Ο ηλιακός συλλέκτης κενού είναι παρόμοιος με έναν εναλλάκτη θερμότητας που απορροφά την ηλιακή ενέργεια και τη μεταφέρει στο εργαζόμενο ρευστό (εικόνα 1). Μια μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων που βασίζεται σε τρισδιάστατο μοντέλο ηλιακού συλλέκτη U-tube κενού για γεμισμένο και μη γεμισμένο τύπο αναπτύχθηκε με βάση τις ακόλουθες υποθέσεις, τα στερεά υλικά (γυαλί, αλουμίνιο ή χαλκός) και το εργαζόμενο ρευστό να είναι ισότροπα, με σταθερή κατάσταση κατά μήκος του συλλέκτη. Η ροή είναι στρωτή, μόνο η μεταφορά θερμότητας ακτινοβολίας λαμβάνει χώρα κατά μήκος του δακτυλιοειδούς χώρου-μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα, το διάκενο αέρα μεταξύ της εσωτερικής γυάλινης επιφάνειας και του υλικού πτερυγίου (αλουμίνιο ή χαλκός) είναι αμελητέα και η αγωγή μεταφορά θερμότητας μεταξύ του υλικού και του αέρα είναι αμελητέα, λόγω χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του ενδιάμεσου κενού.

### 3.5: Μελέτη Θερμικής απόδοσης

Υπάρχουν δύο διαφορετικές διαδικασίες για τη μέτρηση της θερμικής απόδοσης με βάση τη θεωρία: μέθοδος δοκιμής σταθερής κατάστασης και η μέθοδος δυναμικής δοκιμής. Οι οριακές συνθήκες για την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού διατηρούνται σταθερές κατά τη διάρκεια της δοκιμής σταθερής κατάστασης και για την δυναμική δοκιμή οι οριακές συνθήκες είναι ελεύθερες να ποικίλουν. Και στις δύο τεχνικές, η ηλιακή ενέργεια είναι η πηγή της θερμότητας. Επομένως, η ακτινοβολία είναι η είσοδος ενέργειας η οποία λαμβάνεται και απορροφάται από τον συλλέκτη και στη συνέχεια μεταφέρεται στο εργαζόμενο ρευστό. Θερμικές απώλειες συμβαίνουν κατά τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας που εμπλέκεται σε έναν ETC. Μπορεί να συμβεί μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Για την εκτέλεση της θερμικής ισορροπίας, πρέπει να συμπεριληφθούν όλες αυτές οι διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας.

Η θερμική απώλεια, το  $Q_L$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Q_L = S - Q_u \quad (3.1)$$

Η ωφέλιμη θερμότητα που παρέχεται από έναν ηλιακό συλλέκτη είναι η διαφορά μεταξύ της ενέργειας που απορροφάται από το ρευστό και των απωλειών θερμότητας από την επιφάνεια προς το περιβάλλον.

$$Q_u = S - Q_L \quad (3.2)$$

Για τη θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη σε σταθερή κατάσταση οι συνθήκες μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$Q_u/A_c = F_R(\tau\alpha)G - F_R U_L(T_m - T_a) \quad (3.3)$$

Παρατηρείται ότι η θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται από την ένταση του ηλιακού φωτός που χτυπά την επιφάνεια συλλέκτη, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος περιβάλλοντος και την πλάκα απορρόφησης και την οπτική και θερμική του απόδοση που αντιπροσωπεύονται από τις τιμές των  $(\tau\alpha)$  και  $U_L$  αντίστοιχα.

Στη διαθέσιμη βιβλιογραφία ο συντελεστής διαπερατότητας και απορρόφησης  $(\tau\alpha)$  δίνεται περίπου 0,836. Η ωφέλιμη ενέργεια μπορεί επίσης να εκφραστεί:

$$Q_u = mC_p(T_{out} - T_{in}) \quad (3.4)$$

όπου  $C_p$  είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού.

Η θερμική απόδοση ενός ETSC μπορεί να μετρηθεί και με τις δύο εξισώσεις:

$$\eta = Q_u/A_c G \quad (3.5)$$

$$\eta = mC_p(T_{out} - T_{in}) / A_c G \quad (3.6)$$

Εξ. (3.6) δίνει την απόδοση του ηλιακού συλλέκτη κενού με δεδομένα την τιμή της παροχής και της μετρούμενης τιμής της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του εργαζόμενου ρευστού.

Ένας άλλος τρόπος για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης είναι ο υπολογισμός της ισχύος εξόδου λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες θερμότητας που εμφανίζονται.

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L (T_m - T_a) / G \quad (3.7)$$

Η απόδοση του συλλέκτη εξαρτάται από τον συντελεστή απώλειας θερμότητας ( $U_L$ ) και το σχέδιο της απορροφητικής πλάκας του συλλέκτη. Επομένως, προσεγγιστικά το γινόμενο  $F_R U_L$  θα είναι:

$$F_R U_L = c_1 + c_2 (T_m - T_a) \quad (3.8)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.7), (3.8) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - c_1 (T_m - T_a) / G - c_2 (T_m - T_a)^2 / G \quad (3.9)$$

### 3.5: Μαθηματικό μοντέλο παραβολικών κατόπτρων

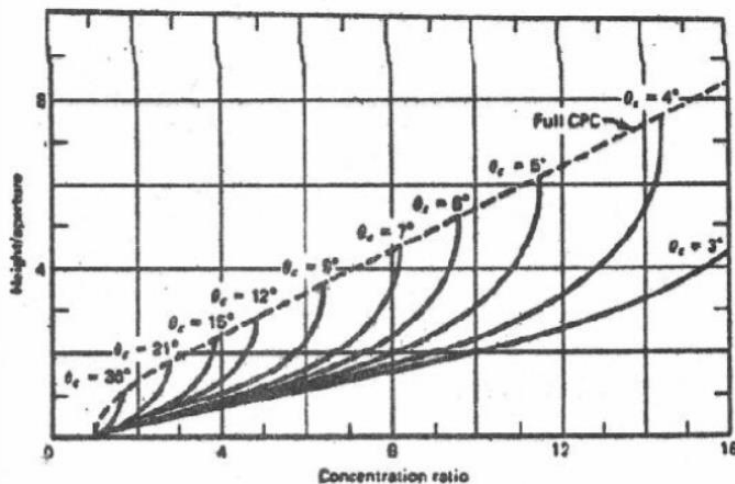
Η συνηθέστερη μορφή των συλλεκτών είναι η δισδιάστατη τύπου σκάφης. Κάθε πλευρά του συλλεκτη είναι τμήμα παραβολής. Και οι δύο παραβολικές επιφάνειες εκτείνονται μέχρι να γίνουν παράλληλες προς τον άξονα συμμετρίας. Η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα του συλλεκτη και την ευθεία που συνδέει την εστία της μιας παραβολής με το απέναντι άκρο του ανοίγματος, ονομάζεται ημιγωνία αποδοχής  $\theta_c$ . Αν οι παραβολικές ανακλαστικές επιφάνειες είναι (οπτικά) τέλειες, τότε η ακτινοβολία που εισέρχεται στο άνοιγμα υπό γωνία

$\theta$ , έτσι ώστε  $-\theta_c < \theta < \theta_c$ , ανακλάται προς το δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του συλλεκτή. Για  $\theta < -\theta_c$  ή  $\theta > \theta_c$  η ακτινοβολία δεν φτάνει στο δέκτη. Ο λόγος συγκέντρωσης δίνεται από τη σχέση:

$$C = 1/\sin\theta_c \quad (3.10)$$

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

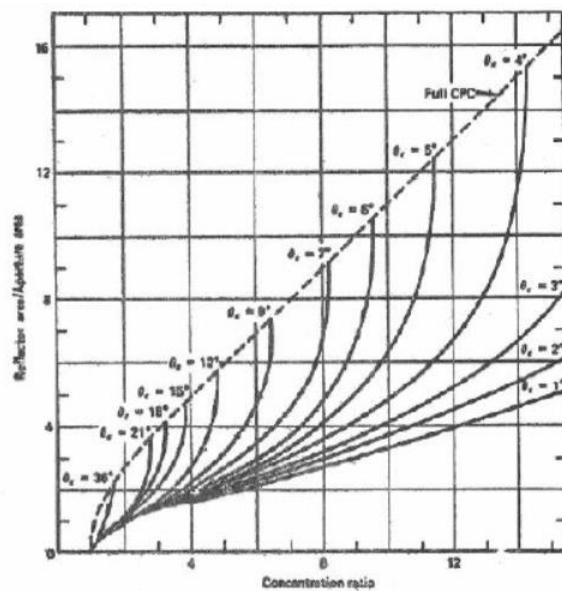
- i. δεν μεταβάλλει την ημιγωνία αποδοχής
- ii. μεταβάλλει το λόγο του ύψους προς το άνοιγμα
- iii. μεταβάλλει το λόγο συγκέντρωσης
- iv. μεταβάλλει το μέσο αριθμό ανακλάσεων που υφίσταται η ακτινοβολία μέχρι να φτάσει στον απορροφητήρα.



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

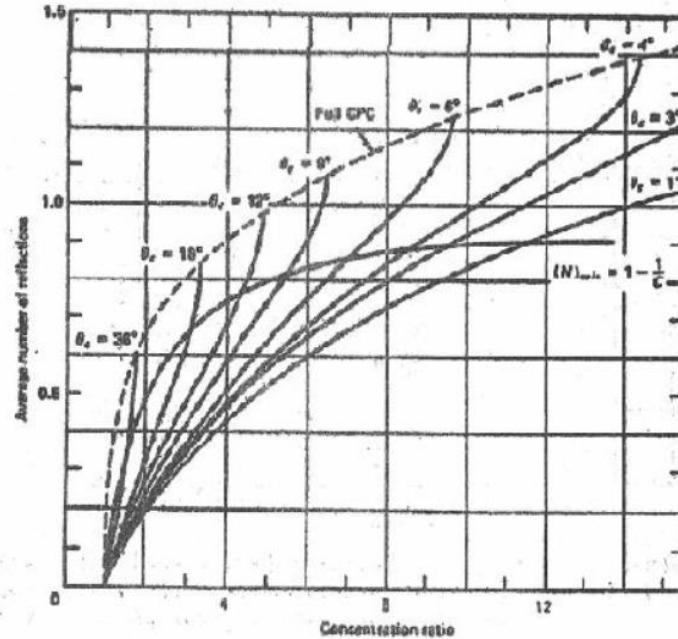
**Εικόνα 3.5.1:** Λόγος του ύψους προς το άνοιγμα σε συλλέκτες CPC συναρτήσεις λόγου συγκέντρωσης και ημιγωνίας αποδοχής [3.5]

Ο λόγος του ύψους προς το άνοιγμα, ο λόγος της ανακλαστικής επιφάνειας προς την επιφάνεια του ανοίγματος και ο μέσος αριθμός ανακλάσεων δίδονται στις εικόνες 3.5.1, 3.5.2, 3.5.3 αντίστοιχα συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και με παράμετρο την ημιγωνία αποδοχής  $\theta_c$ , για πλήρεις και αποκομμένους, τέλειους, παραβολικούς ανακλαστήρες.



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

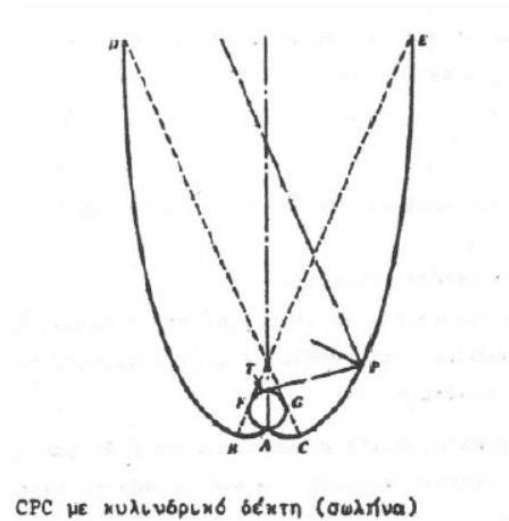
**Εικόνα 3.5.2:** Λόγος της ανακλαστικής επιφάνειας προς την επιφάνεια του ανοίγματος [3.5]



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

Εικόνα 3.5.3: Μέσος αριθμός ανακλάσεων [3.5]

Στην εικόνα 3.5.4 φαίνεται ένας συλλέκτης με ανακλαστήρα παραβολικού τύπου με κυλινδρικό δέκτη, στον οποίο φαίνεται και ο τρόπος γένεσης του σχήματος της ανακλαστικής επιφάνειας που απαιτείται για τον δέκτη αυτό. Έτσι, στο τυχόν σημείο P της επιφάνειας CE πρέπει η κάθετος στο κάτοπτρο να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στον απορροφητήρα, PT, και η ευθεία που διέρχεται από το P και σχηματίζει γωνία  $\theta_c$  με τον άξονα του συλλεκτή. Η παραπάνω μέθοδος γένεσης της ανακλαστικής επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε σχήμα κυρτού δέκτη.



Εικόνα 3.5.4: Συλλέκτης με ανακλαστήρα παραβολικού τύπου με κυλινδρικό δέκτη [3.5]

Ο ανακλαστήρας του παραπάνω σχήματος χρησιμοποιείται συνήθως αποκομμένος με σωληνοειδή δέκτη κενού και μάλιστα σε συστοιχία πολλών ομοίων, η οποία φέρει επίπεδο υάλινο κάλυμμα.

## Βιβλιογραφία 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου

[3.1] M.A.Sabiha, R.Saidur b, Saad Mekhilef , Omid Mahian, Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.016>

[3.2][https://www.researchgate.net/publication/331177976\\_THERMAL\\_PERFORMANCE\\_OF\\_EVACUATED\\_TUBE\\_SOLAR\\_HEATING\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/331177976_THERMAL_PERFORMANCE_OF_EVACUATED_TUBE_SOLAR_HEATING_SYSTEM)

[3.3] IEASHCworldwidereport. (<<http://www.solarserver.com/solar-magazine/solar-news/archive-2012/2012/kw20/iea-solar-heating-and-cooling-programme-solar-thermal-markets-grew-14-in-2010.html>>); 2012.

[3.4] [http://refhub.elsevier.com/S1364-0321\(15\)00663-2/sbref19](http://refhub.elsevier.com/S1364-0321(15)00663-2/sbref19)

[3.5] “Θερμικά-ηλιακά Συστήματα μέρος πρώτο”, (Κ. Α. Αντωνόπουλος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004)

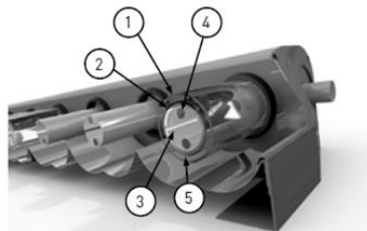


## Κεφάλαιο 4: Σχεδιασμός συλλέκτη στο Solidworks

### 4.1: Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε τα βήματα που ακολουθήσαμε για τον σχεδιασμό του ETC συλλέκτη σε περιβάλλον Solidworks. Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι σχεδιάσαμε μόνο τα χρήσιμα εξαρτήματα από ενεργειακή σκοπιά, καθώς οποιοδήποτε άλλο (π.χ. κοχλίες, βάση στήριξης, μόνωση κ.α.) κρίναμε ότι δεν επηρεάζει την θερμική ή οπτική προσομοίωση του συλλέκτη. Αρχικά, χρησιμοποιήσαμε τις διαστάσεις (διαμέτρους, πάχη και μήκη σωλήνων) από τις τεχνικές προδιαγραφές ενός παρεμφερή συλλέκτη εμπορίου. Επιπρόσθετα, για να επιτύχουμε τα σωστά constraints μεταξύ συλλέκτη και ανακλαστήρα με βάση τη θεωρία της οπτικής σε σχέση με τα CPC κάτοπτρα δουλέψαμε σε επίπεδο ενός κοινού part και έπειτα μεταφέραμε τα features σε ξεχωριστά parts για να μπορέσουμε να χειριστούμε σχεδιαστικά πιο εύκολα τυχόν τροποποιήσεις σε επίπεδο assembly. Να αναφέρουμε επίσης ότι παρότι σχεδιάσαμε τα πτερύγια όπως υποδεικνύει κι ο κατασκευαστής, αναγκαστήκαμε να τα αφαιρέσουμε διότι το μοντέλο μας γινόταν πολύ «βαρύ» και δύσχρηστο σε επίπεδο flow simulation όπως θα πούμε και σε επόμενο κεφάλαιο.

ΤΟΜΗ ΣΩΛΗΝΑ



1. Εξωτερικός γυάλινος σωλήνας
2. Εσωτερικός γυάλινος σωλήνας με επιφάνεια Selective
3. Πτερύγια χαλκού (με συγκόλληση ultrasonic)
4. Χαλκοσωλήνας σχήματος U
5. Κενό αέρος

Εικόνα 3. Τομή σωλήνα ETC συλλέκτη εμπορίου

([https://www.calpak.gr/el/uploads/media/VTS\\_technical.pdf](https://www.calpak.gr/el/uploads/media/VTS_technical.pdf))



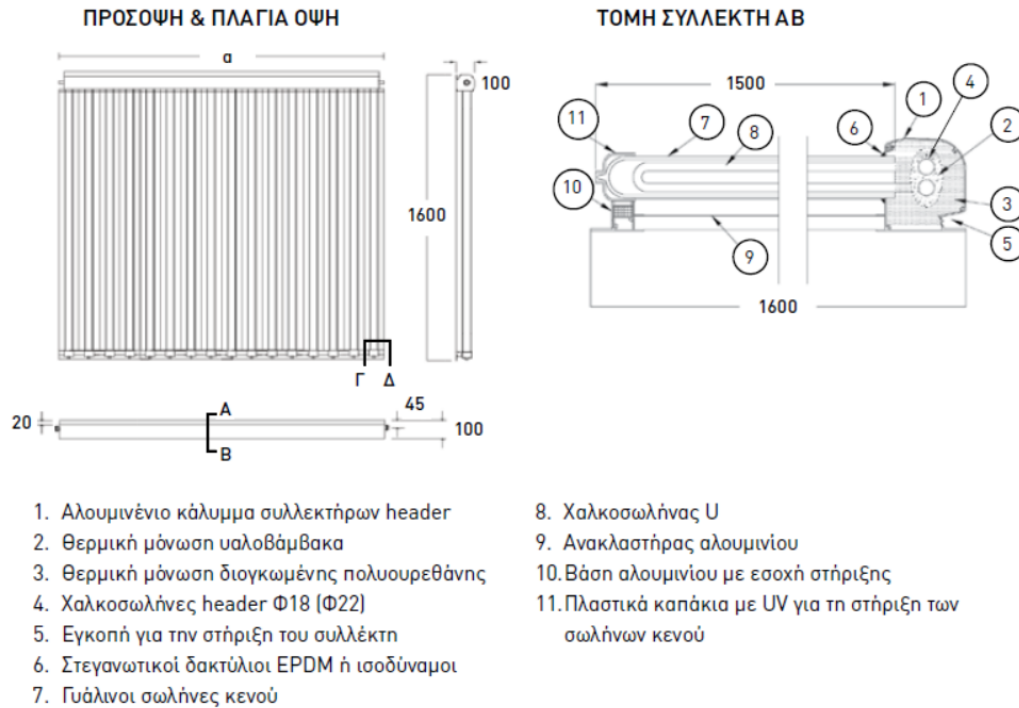
Εικόνα 1. Ο ETC συλλέκτης εμπορίου στον οποίο βασιστήκαμε κατασκευαστικά.

(<https://www.calpak.gr/el/products/boilers/vacuum-vtn/92>)

Μοντέλο		10 VTS	12 VTS	14 VTS	16 VTS
Αριθμός σωλήνων		10	12	14	16
Ολική Επιφάνεια	m <sup>2</sup>	1,79	2,13	2,48	2,86
Επιφάνεια παραθύρου	m <sup>2</sup>	1,62	1,96	2,26	2,55
Επιφάνεια απορροφητή	m <sup>2</sup>	1,64	1,99	2,30	2,60
Διάσταση: πλάτος (α)	mm	1193	1420	1653	1887
Διάσταση: ύψος (β)	mm	1600	1600	1600	1600
Διάσταση: πάχος (γ)	mm	110	110	110	110
Ενεργή θερμοχωρητικότητα	KJ/k	63	76	89	102
Βάρος	kg	29,5	35	41	47
Περιεχόμενο θερμικού υγρού	kg	2,1	2,5	2,9	3,3
Θερμοκρασία στασιμότητας	°C	278	278	278	278
Συνδέσεις υδραυλικές		Φ18 (Φ22)*	Φ18 (Φ22)*	Φ18 (Φ22)*	Φ18 (Φ22)*
Μέγιστη πίεση λειτουργίας	bar	10	10	10	10
Σταθερά χρόνου	sec	228	228	228	228
Συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης στις 50°		96%	96%	96%	96%

Εικόνα 2. Πρότυπες τεχνικές προδιαγραφές ETC συλλέκτη εμπορίου

([https://www.calpak.gr/el/uploads/media/VTS\\_technical.pdf](https://www.calpak.gr/el/uploads/media/VTS_technical.pdf))



Εικόνα 2. Τομές και στοιχεία ETC συλλέκτη εμπορίου

[https://www.calpak.gr/el/uploads/media/VTS\\_technical.pdf](https://www.calpak.gr/el/uploads/media/VTS_technical.pdf)

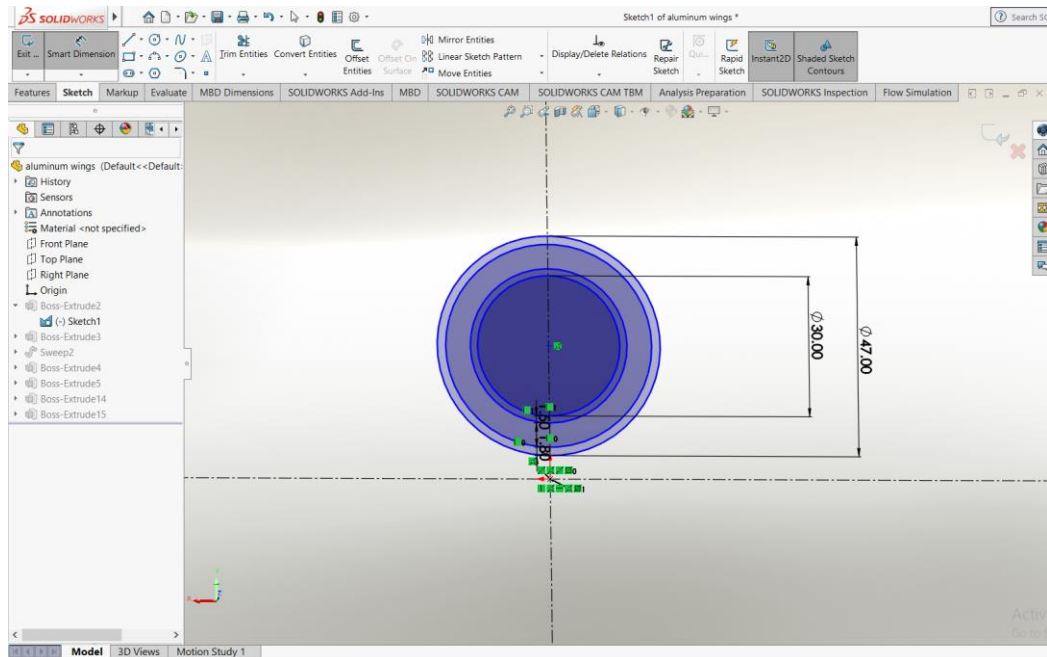
## 4.2: Σχεδιασμός part ενός σωλήνα-συλλέκτη

Δημιουργούμε sketch για σωλήνα συλλέκτη Φ47 πάχους 1,8mm και σωλήνα απορροφητή Φ30 πάχους 1,5mm και δίνουμε με την εντολή Extrude μήκος 1500mm.

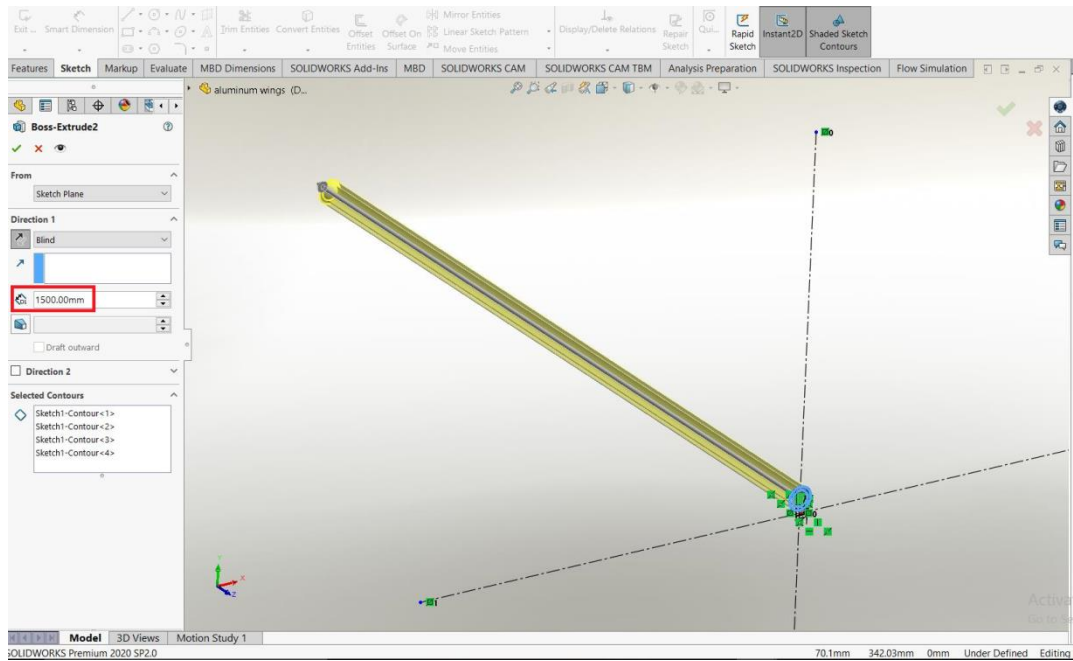
Στη συνέχεια σχεδιάζουμε τον ανακλαστήρα δημιουργώντας τα καταλληλα constraints του Sketch. Θέλουμε άνοιγμα της κάθε παραβολής σύμφωνα με τον κατασκευαστή στα 50mm. Αρχικά χαράσσεται μιά παραβολή με εστία στον οριζόντιο άξονα.

Στη συνέχεια με την εντολή Mirror entities χαράσσεται και η δεύτερη παραβολή. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η κάθε παραβολή πρέπει να περνάει από την εστία της άλλης, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται τραβώντας με το ποντίκι την εστία της μιας παραβολής

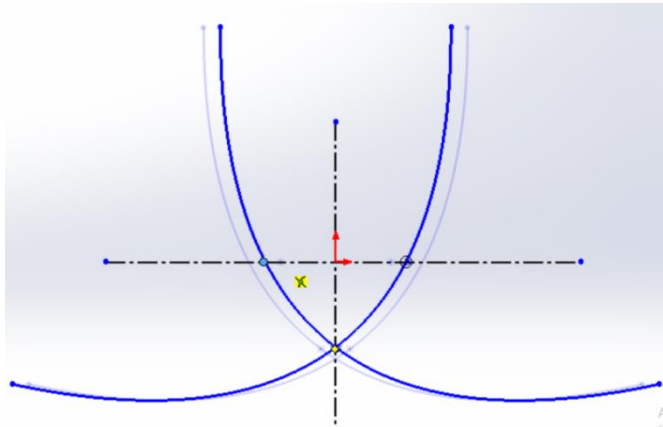
μέχρι να πέσει πάνω στην άλλη παραβολή. Το σχήμα που ακολουθείται είναι όπως το παρακάτω.



Εικόνα 4. Σχεδιασμός του Sketch των σωλήνων καλύμματος και απορροφητή

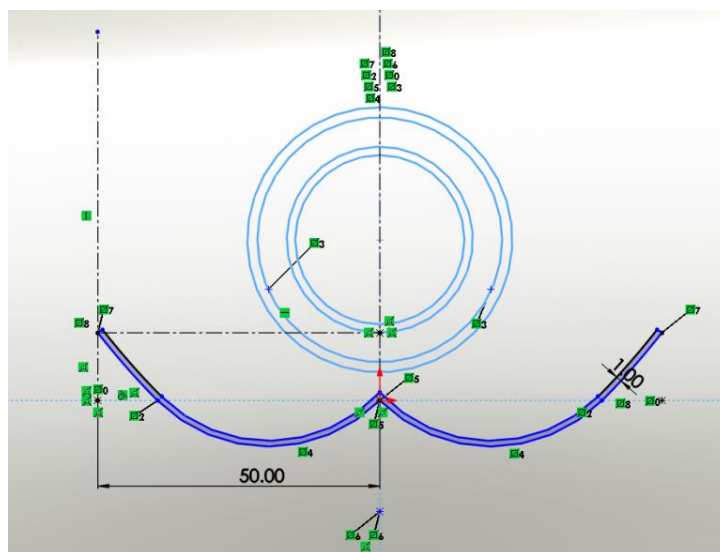


Εικόνα 5. Boss-Extrude σωλήνων καλύμματος και απορροφητή



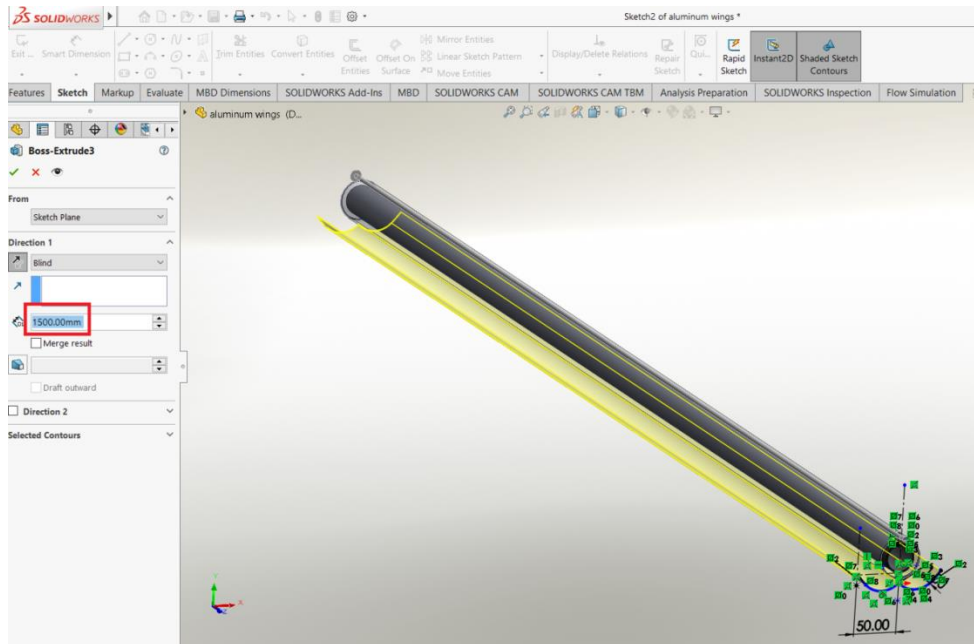
Εικόνα 6. Σύρεται με το ποντίκι η εστία της μιας παραβολής μέχρι να εμφανιστεί το σύμβολο που δείχνει την τομή της εστίας με την παραβολή και τον άξονα.

Με την εντολή Trim entities κόβονται τα τμήματα που εξέχουν κάτω από τον οριζόντιο άξονα. Έπειτα, με την εντολή Tangentarc σχεδιάζουμε τα ημικύκλια με αρχές τις εστίες των παραβολών και τέλος τα κέντρα των αξόνων. Τα δύο ημικύκλια θα πρέπει να είναι εφαπτομενικά μεταξύ τους. Με την εντολή Offset Entities δίνουμε το πάχος του κατόπτρου περί το 1mm και αποκόπτουμε με Trim entities τα κομμάτια που εξέχουν σύμφωνα με την συνθήκη πως η οριζόντια παράλληλη ευθεία στον άξονα X που τέμνει το άκρο της παραβολής είναι ταυτόχρονα και εφαπτομενική στην εξωτερική διάμετρο του απορροφητή (Εικόνες 7, 8).

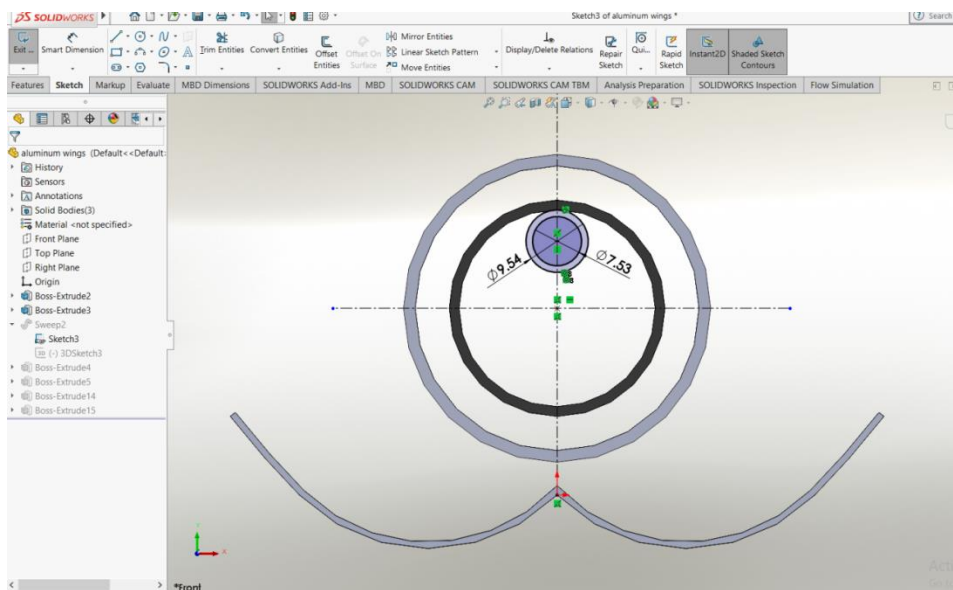


Εικόνα 7. Τελικό Sketch κατόπτρου

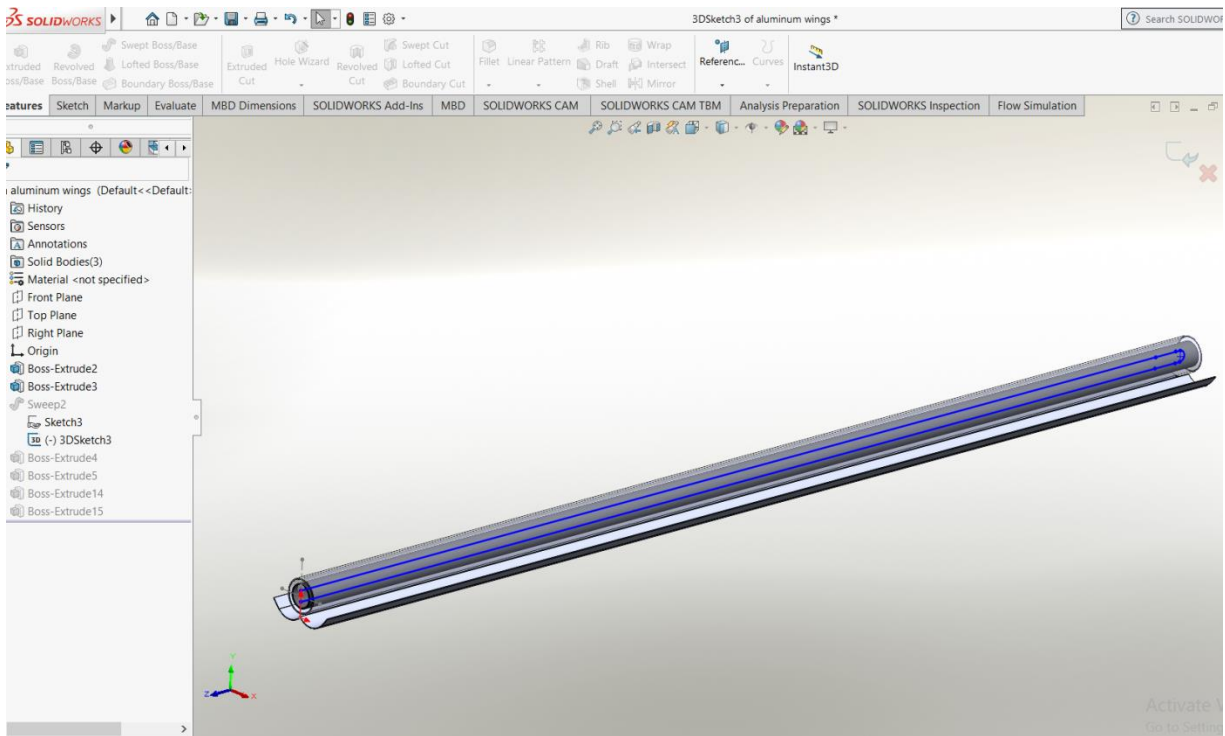
Για το σχεδιασμό του χαλκοσωλήνα αρχικά σχεδιάζουμε το κομμάτι “U” στο ίδιο part για να αποφύγουμε τυχόν conflicts στα features σε μετέπειτα επίπεδο modelling. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή θέλουμε να επιτύχουμε μια εξωτερική διάμετρο περί το 9,54mm και μια εσωτερική στα 7,53mm. Τα νούμερα είναι σχετικά μη στρογγυλοί αριθμοί καθώς ο κατασκευαστής τα δίνει σε ίντσες. Έπειτα με χρήση 3d sketch σχεδιάζουμε το path του Sweep για την κατασκευή του U feature ως προς τον άξονα Z (Εικόνες 9,10).



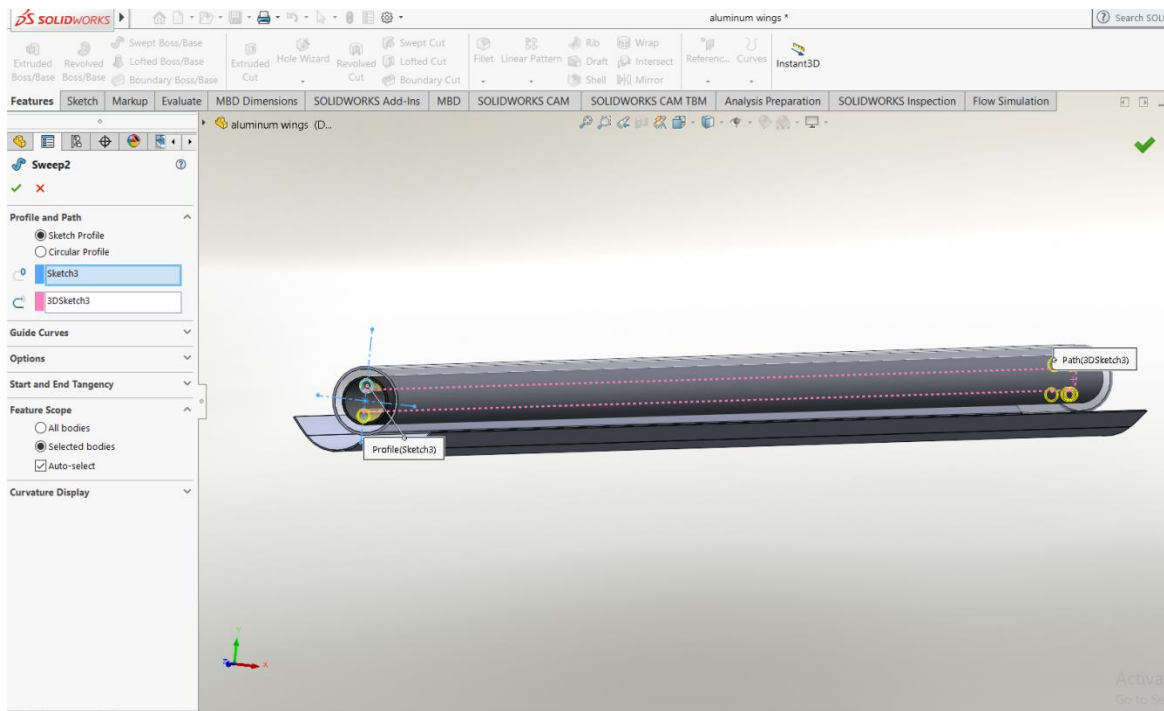
Εικόνα 8. Boss-Extrude 1500mm κατόπτρου



Εικόνα 9. Σχεδιασμός του profile-sketch για το Sweep σχεδίασης του σωλήνα U

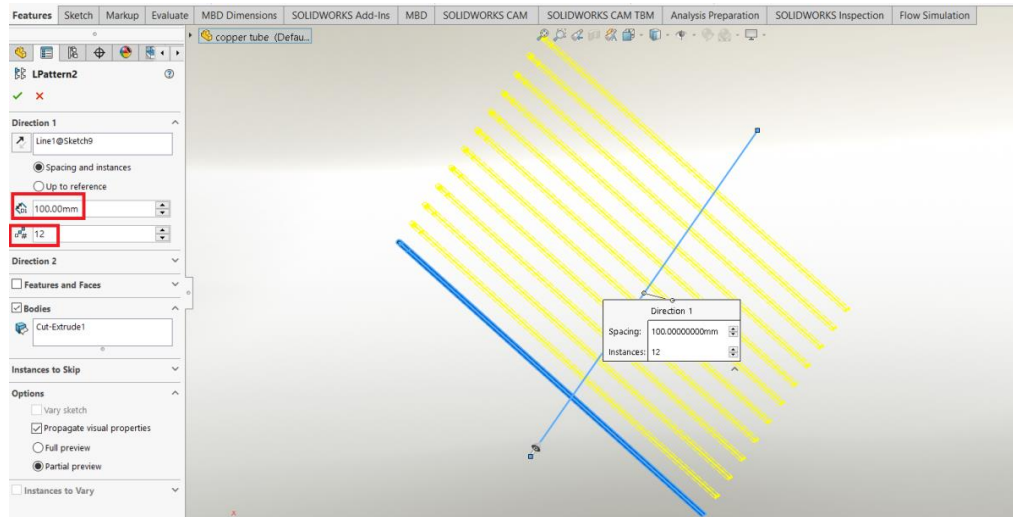


Εικόνα 10. 3d-sketch του direction-sketch του Sweep του σωλήνα U



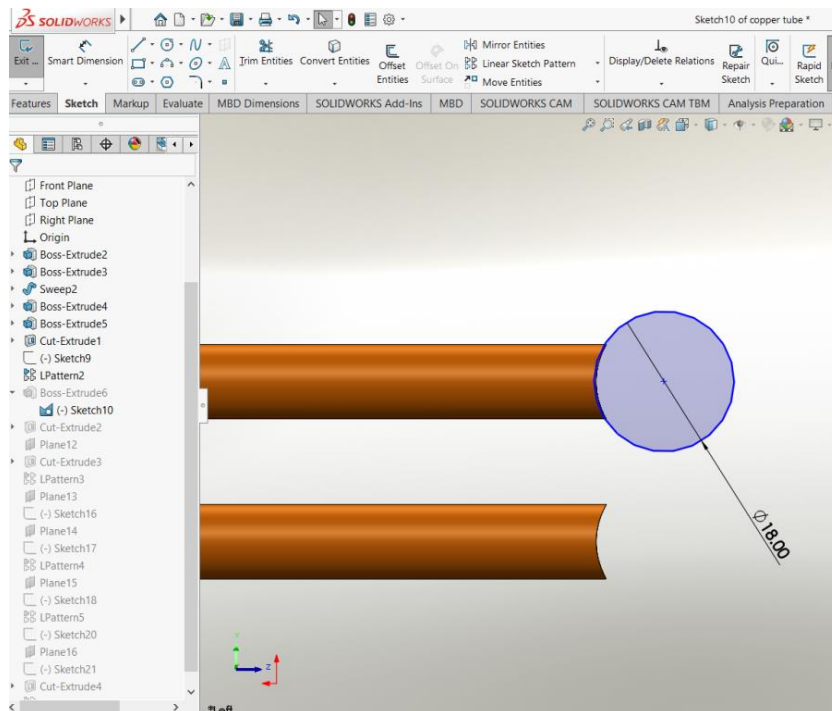
Εικόνα 11. Sweep σωλήνα U

Σε αυτό το σημείο σταματάμε να ασχολούμαστε με αυτό το part και ουσιαστικά αντιγράφουμε τα features σε ξεχωριστά parts. Μόνο στο part του χαλκοσωλήνα θα χρειαστεί να επέμβουμε όπου κάνουμε pattern για 12 μέρη που απέχουν όπως μας υπέδειξε ο κατασκευαστής 100 mm.



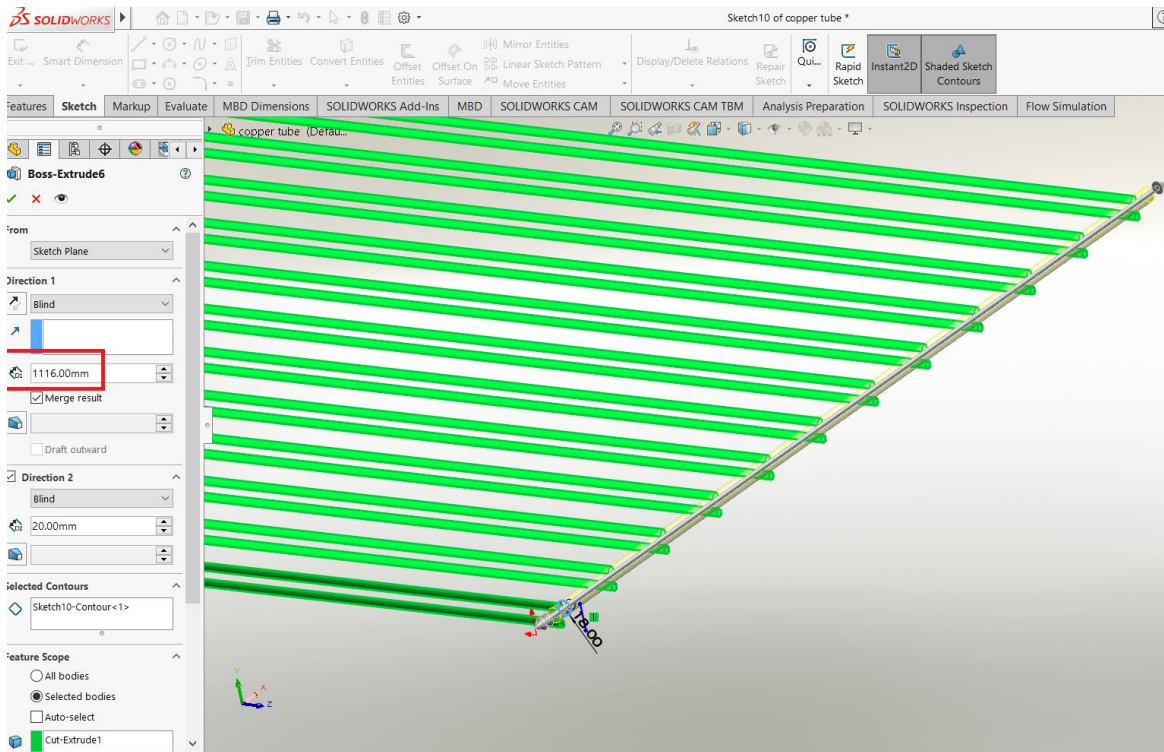
Εικόνα 11. Pattern χαλκοσωλήνα

Σε επόμενο βήμα στο επίπεδο (X,Z) σχεδιάζουμε την κεφαλή του κάθετου συλλεκτήρα του χαλκοσωλήνα με εξωτερική διάμετρο 18mm και δίνουμε μήκος περίπου 1120mm.



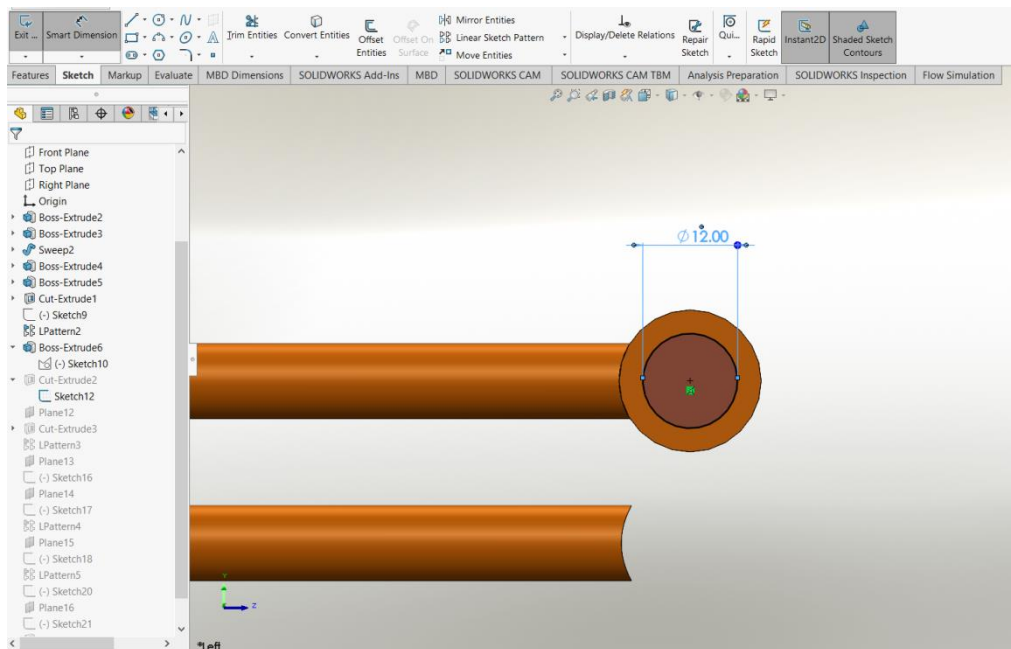
Εικόνα 12. Sketch κεφαλής χαλκοσωλήνα



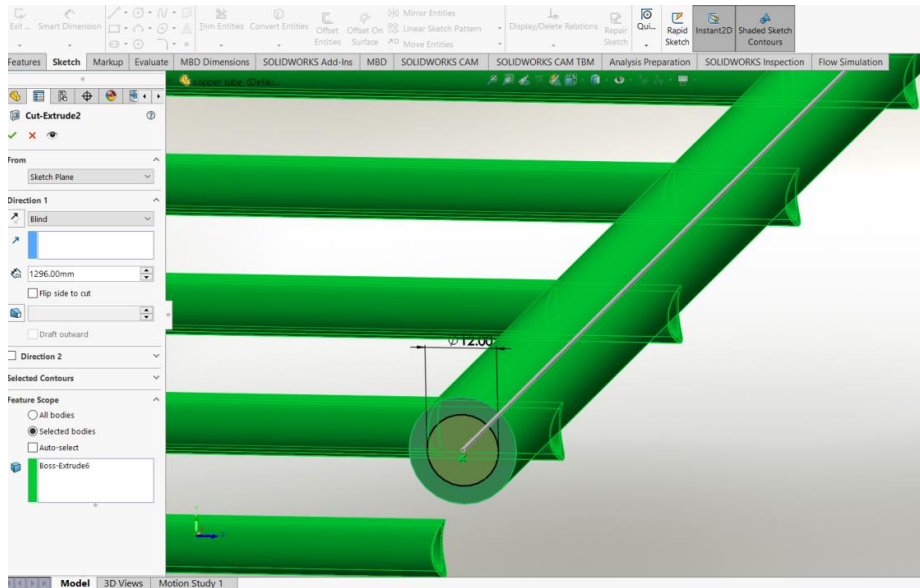


Εικόνα 13. Boss-Extrude συλλεκτήρα

Έπειτα με cut extrude για  $\Phi 12$  mm δημιουργούμε το εσωτερικό του σωλήνα.

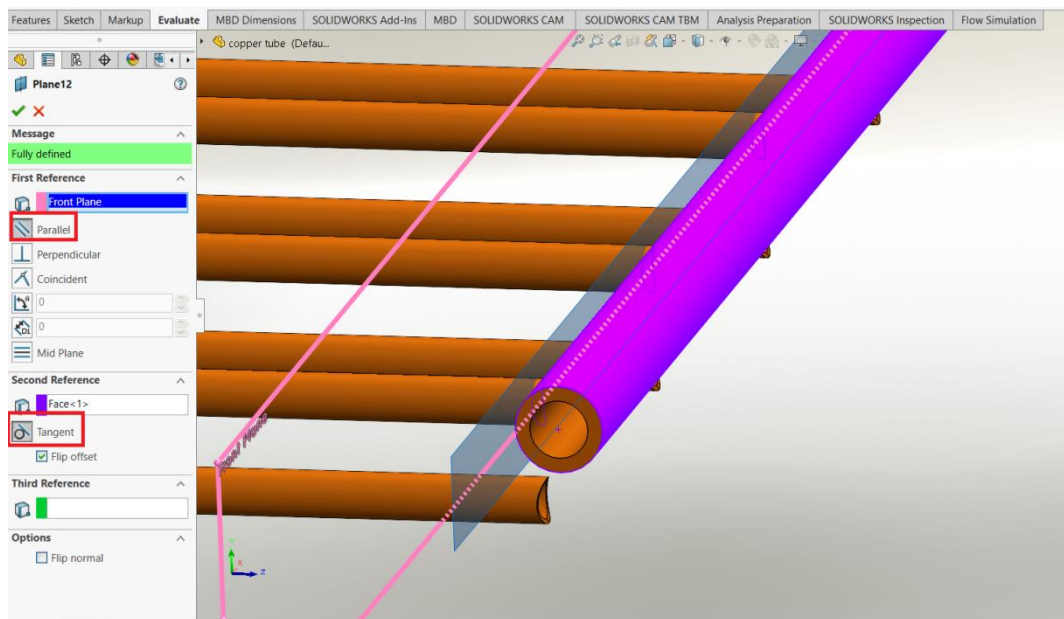


Εικόνα 14. Sketch εσωτερικής διαμέτρου άνω σωλήνα συλλεκτήρα

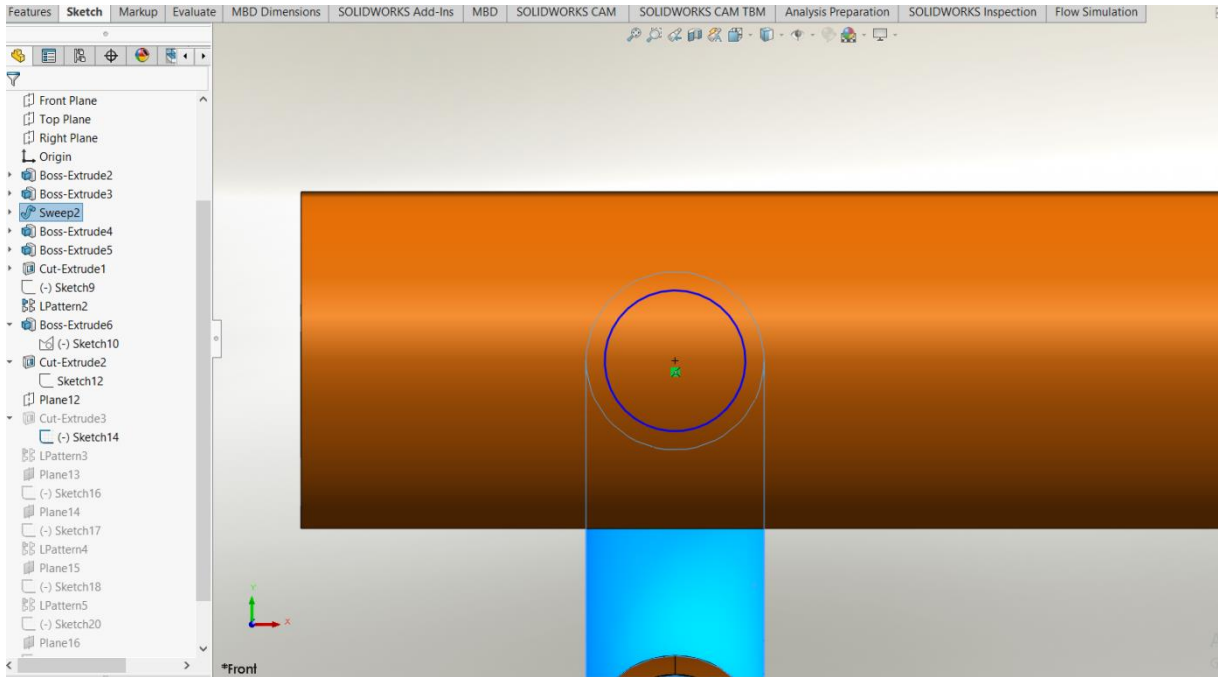


Εικόνα 14. Cut-Extrude εσωτερικής διαμέτρου άνω σωλήνα συλλεκτήρα

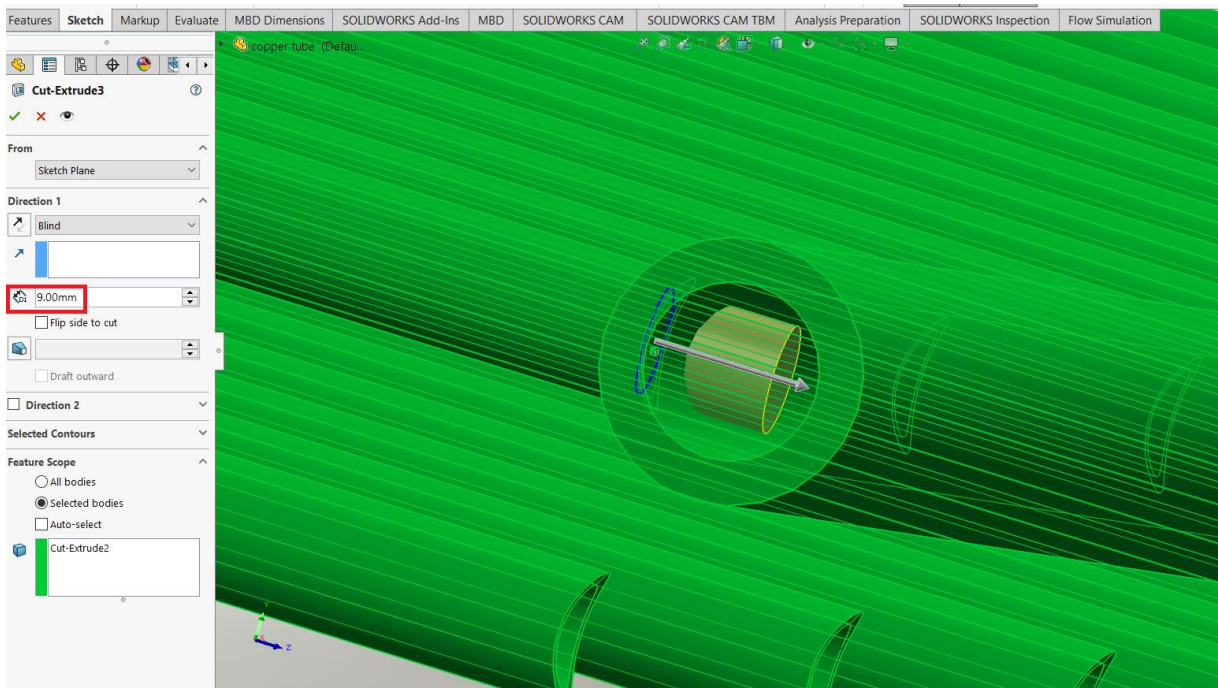
Για την δημιουργία των οπών στις ενώσεις μεταξύ των 12 σωλήνων U και του κάθετου σωλήνα δημιουργούμε ένα εφαπτομενικό Plane στον κάθετο σωλήνα στο σημείο της ένωσης και με project geometry προβάλλουμε σε αυτό το plane τις «οπή» του εσωτερικού ενός χαλκοσωλήνα U. Στη συνέχεια με cut extrude δημιουργούμε μια τρύπα στο πλαινό μέρος του καθετου σωλήνα την οποία την πολλαπλασιάζουμε 12 φορές με pattern ανά απόσταση 100mm.



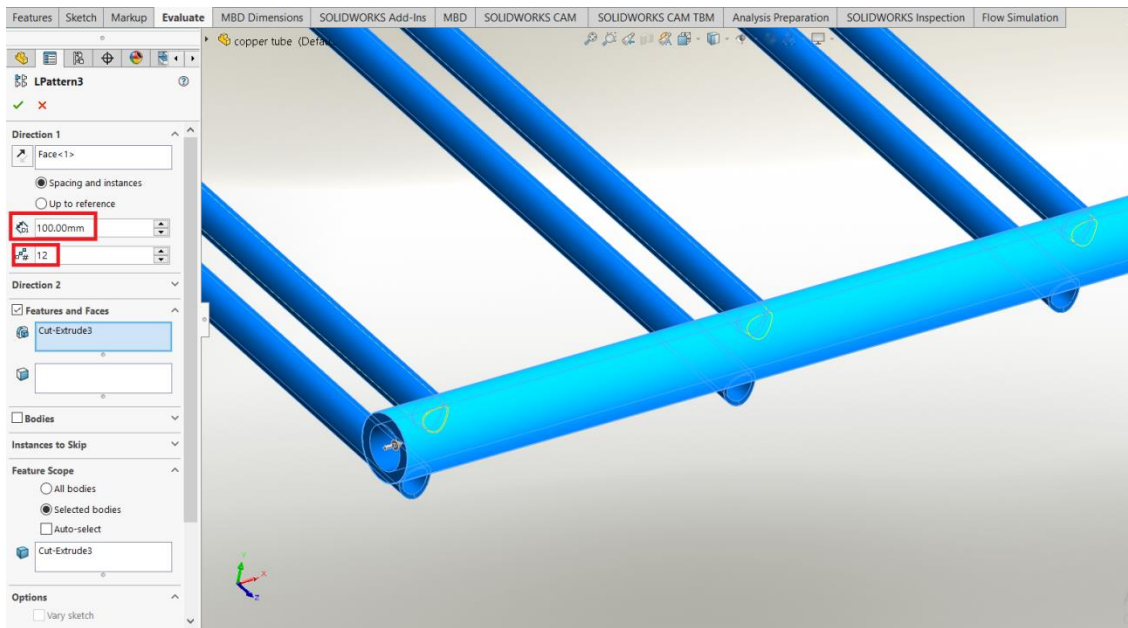
Εικόνα 15. Tangent Plane άνω συλλεκτήρα



Εικόνα 16. Project geometry εσωτερικής διαμέτρου σωλήνα U σε άνω συλλεκτήρα

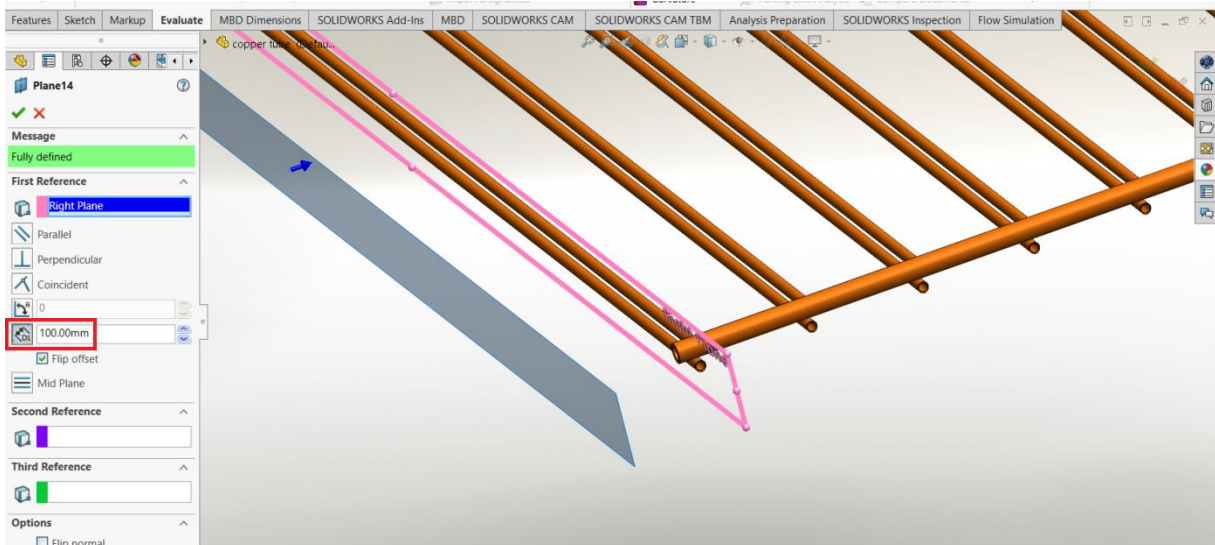


Εικόνα 17. Cut-extrude σπής ενώσεως σωλήνα U και άνω συλλεκτήρα

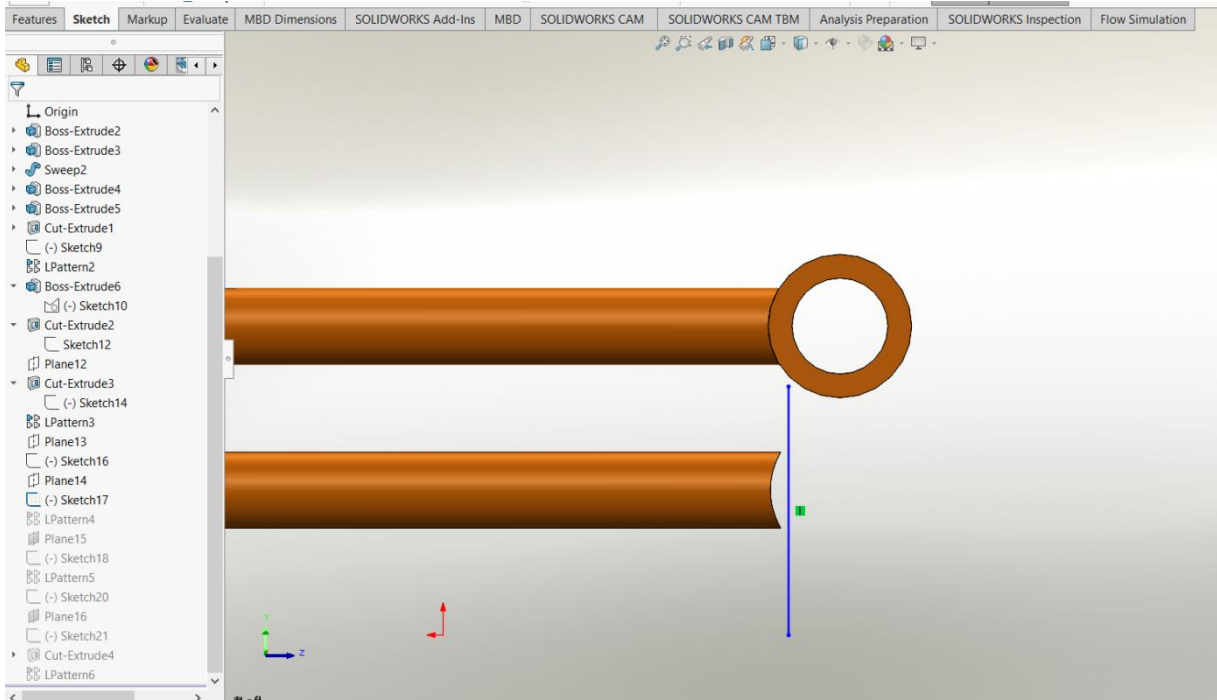


Εικόνα 18. Pattern οπών ενόσσεως σωλήνων U και άνω συλλεκτήρα

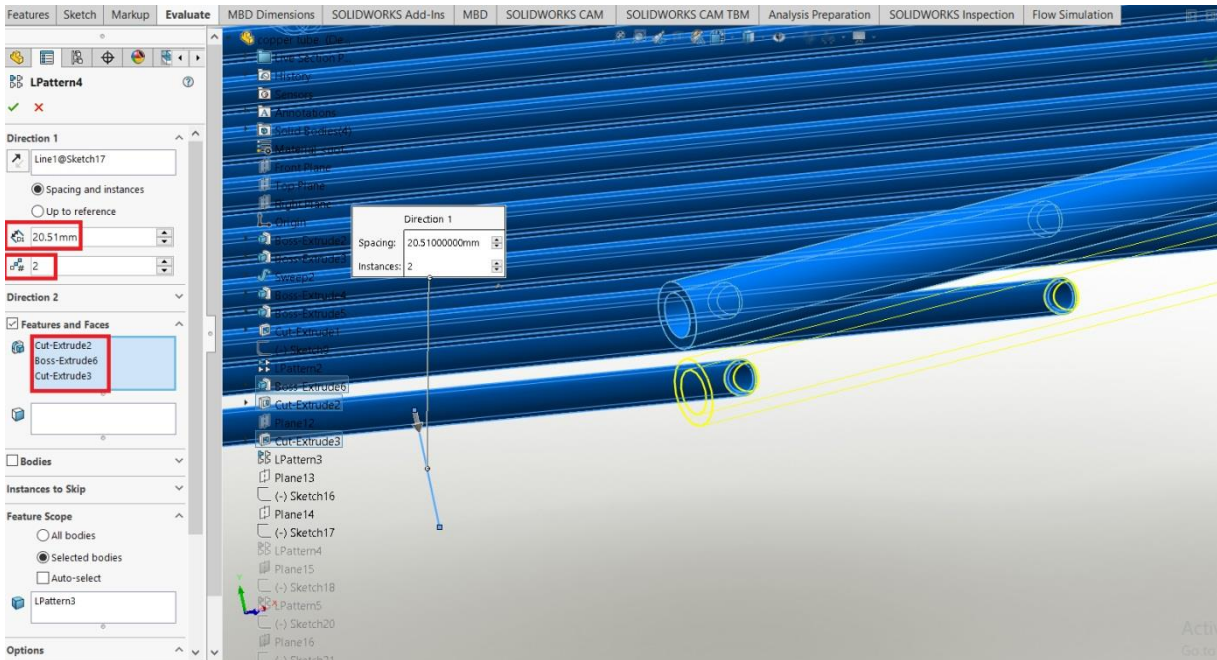
Τέλος, κάνουμε pattern τον κάθετο σωλήνα για να δημιουργήσουμε έναν ίδιο και στο κάτω μέρος της σωλήνωσης. Για να το επιτύχουμε αυτό σχεδιάσαμε μια ευθεία γραμμή σε Right plane για να δόσουμε την κατεύθυνση του pattern και το βήμα του pattern είναι ακριβώς όσο και η measured απόσταση των κέντρων στις άκρες του σωλήνα U (περί τα 20,5mm). Επειδή οι οπές δεν γίνονταν pattern από τον πάνω σωλήνα στον κάτω, ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία και για τον κάτω σωλήνα με project geometry της οπής από τον σωλήνα U.



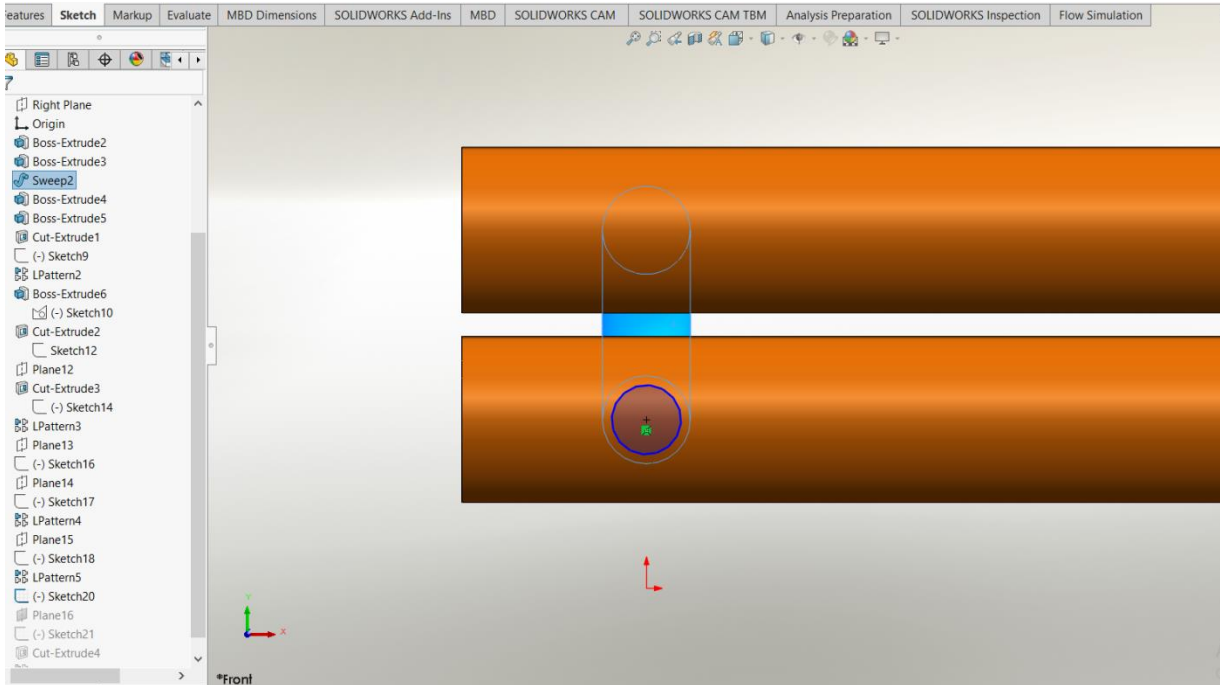
Εικόνα 19. Plane Offset – Right Plane για σχεδίαση sketch για pattern-direction



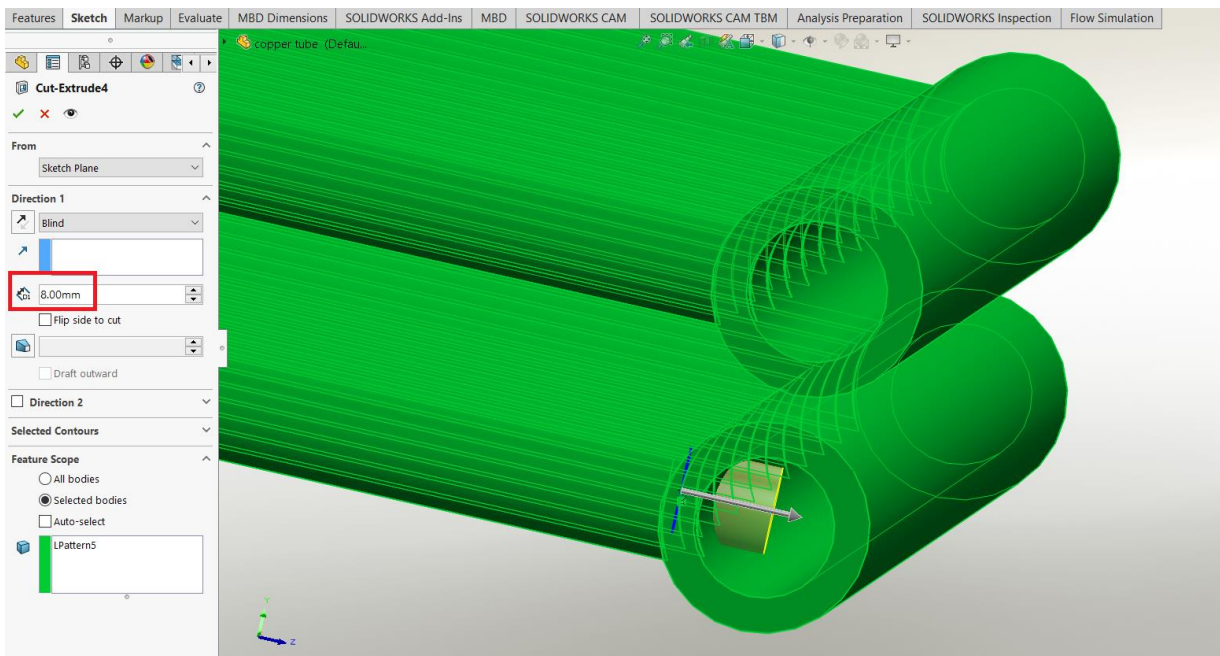
Εικόνα 20. Sketch direction για pattern



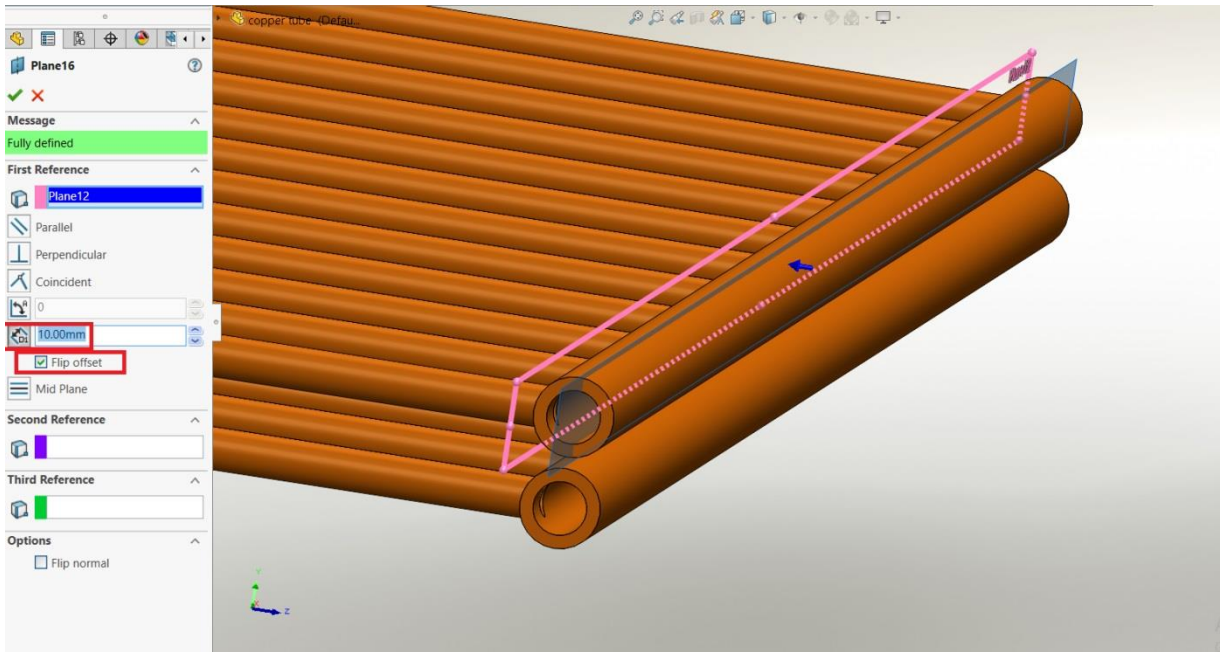
Εικόνα 21. Pattern για τη δημιουργία του κάτω συλλεκτήρα



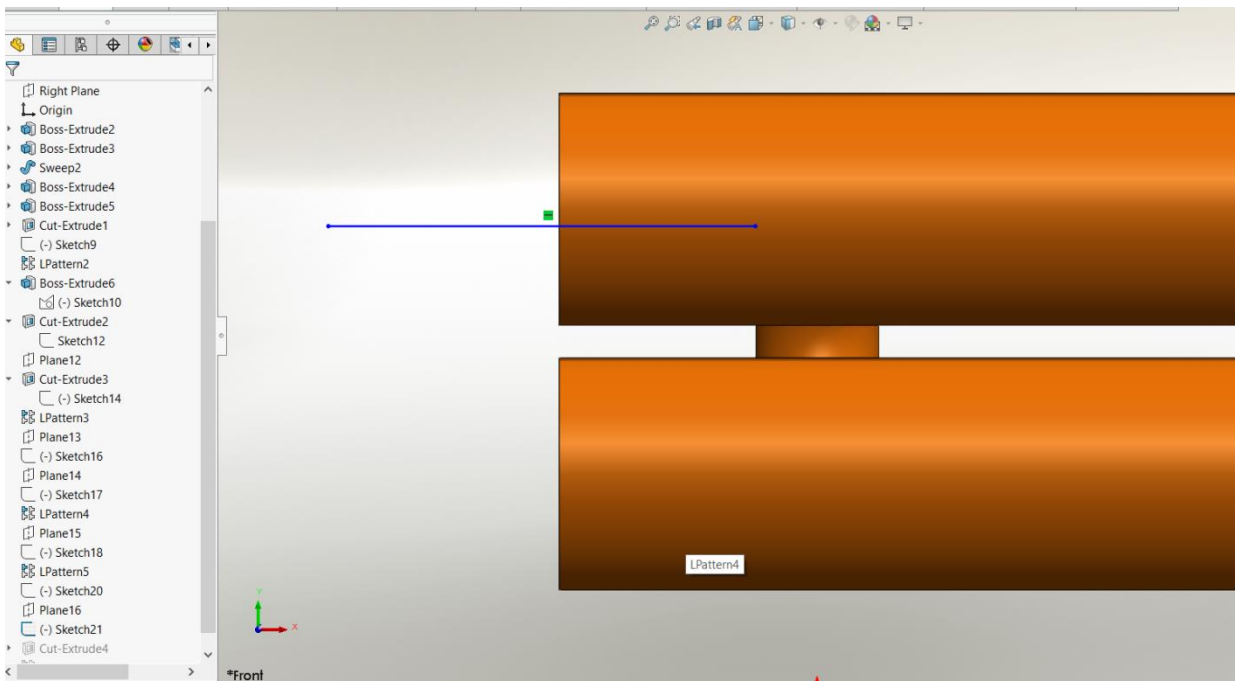
Εικόνα 22. Project geometry της εσωτερικής διαμετρου του σωλήνα U στον κάτω συλλεκτήρα



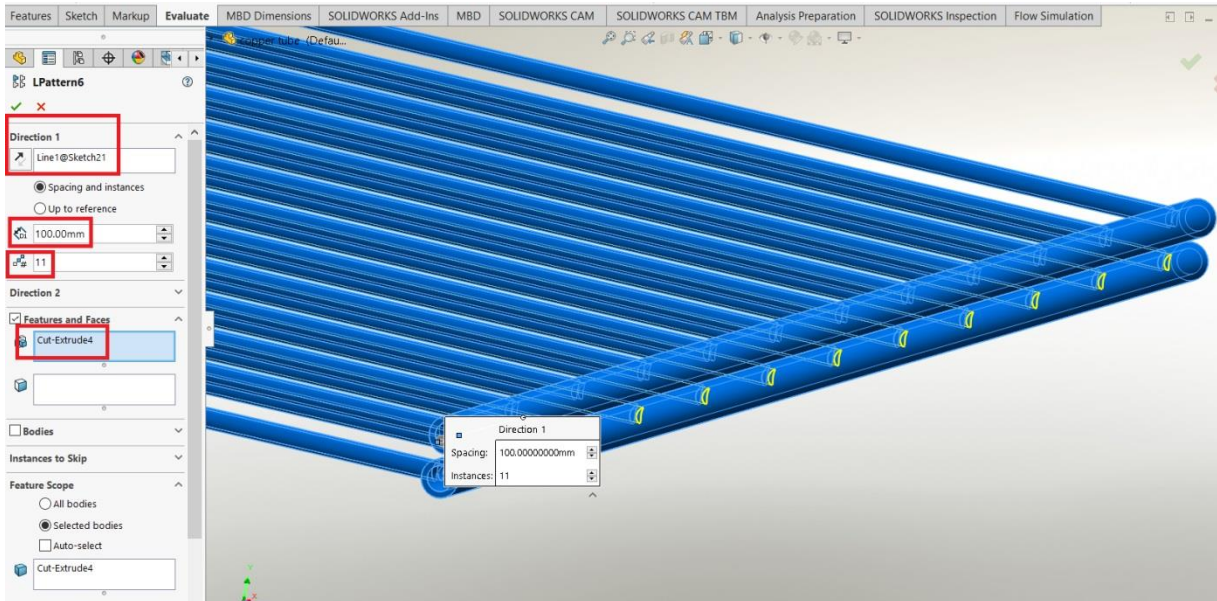
Εικόνα 25. Cut extrude οπής ενώσεως σωλήνα U και κάτω συλλεκτήρα



Εικόνα 23. Δημιουργία plane για το σχεδιασμό direction sketch για το pattern των οπών ενώσεως των σωλήνων  
U με τον κάτω συλλεκτήρα

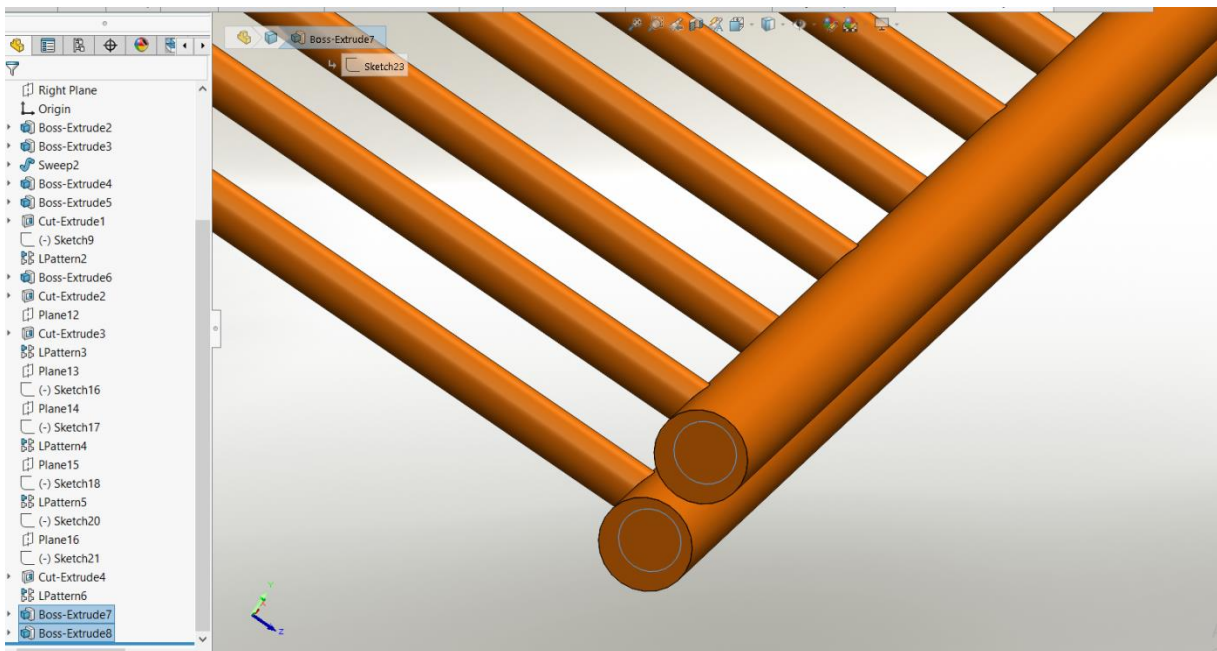


Εικόνα 24. Δημιουργία direction Sketch για pattern



Εικόνα 25. Pattern οπών ενώσεως σωλήνων U και κάτω συλλεκτήρα

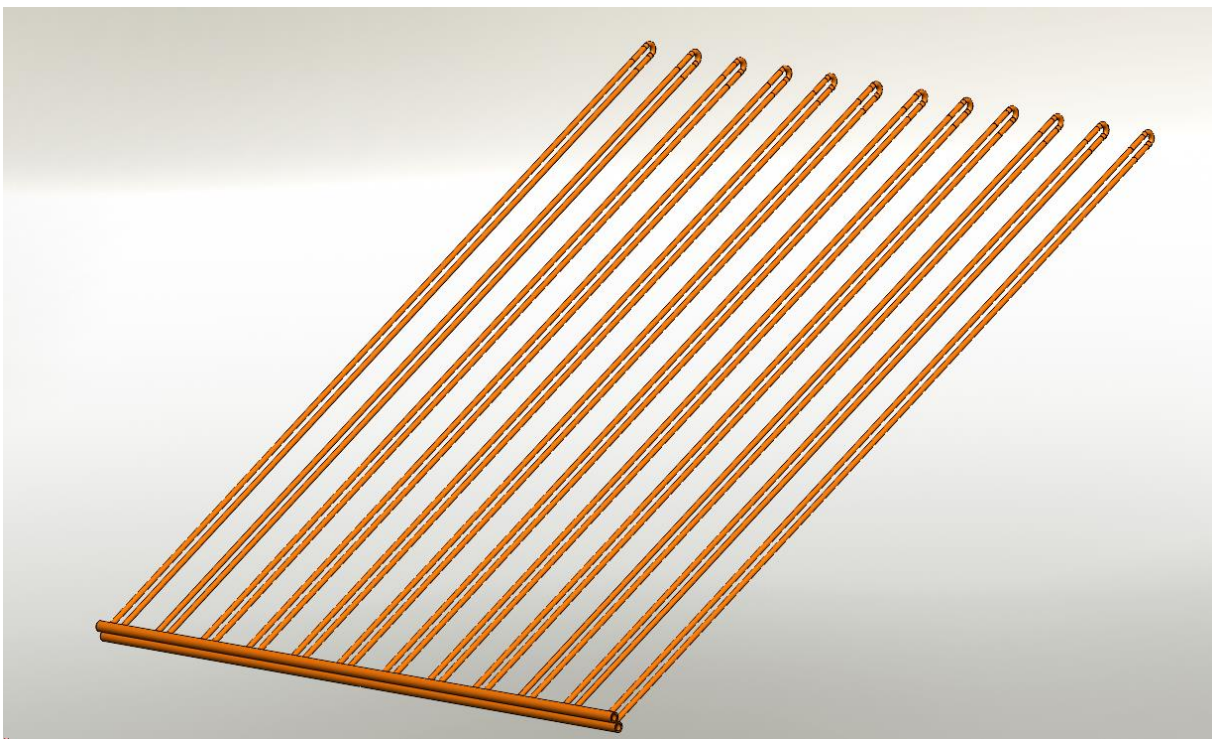
Τέλος κλείσαμε τις δύο από τις τέσσερις εξόδους του χαλκοσωλήνα με boss extrude 3mm.



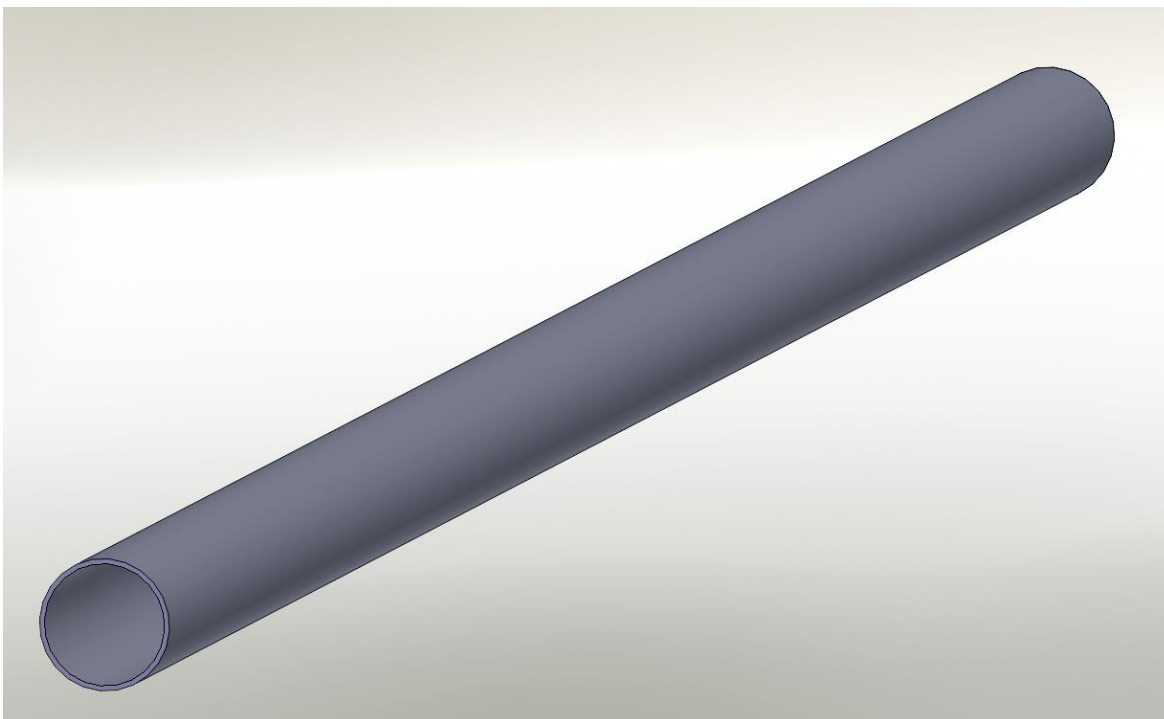


Εικόνα 26. «Κλείσιμο» των δεξιά εξόδων του χαλκοσωλήνα

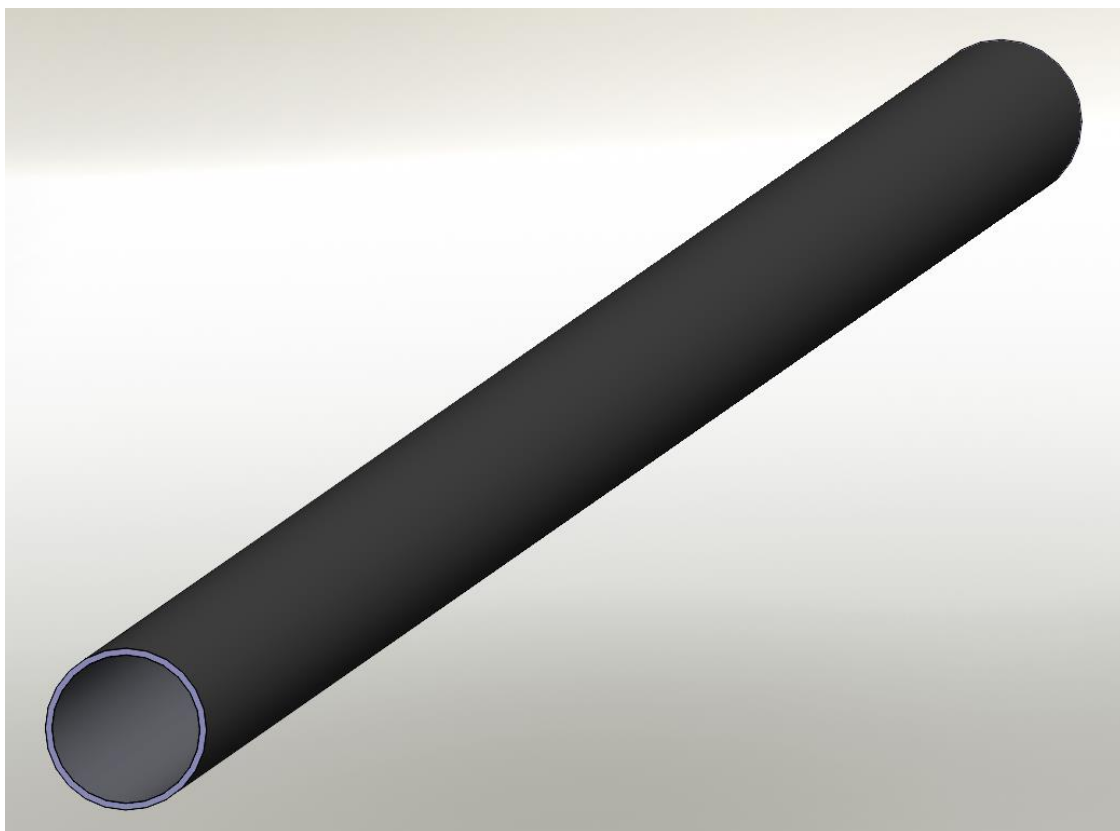
Παρακάτω φαίνονται συγκεντρωτικά όλα τα τελικά parts του συλλέκτη:



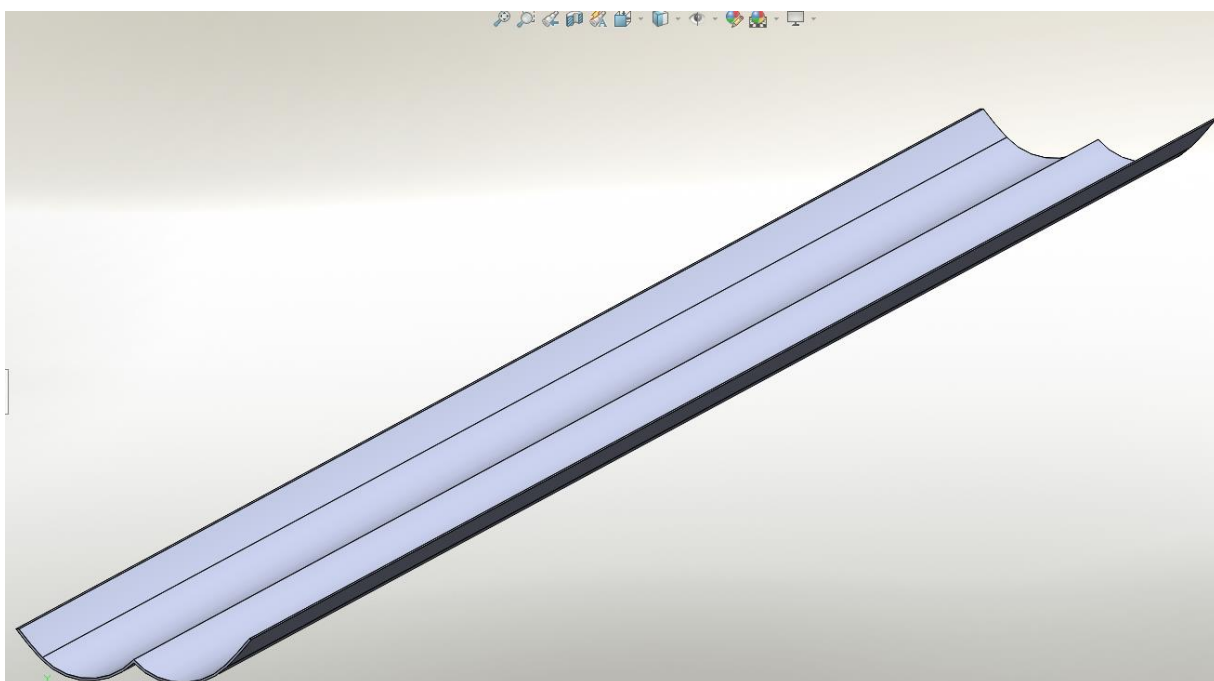
Εικόνα 27. Χαλκοσωλήνας



Εικόνα 28. Εξωτερικός γυάλινος σωλήνας-κάλυμμα

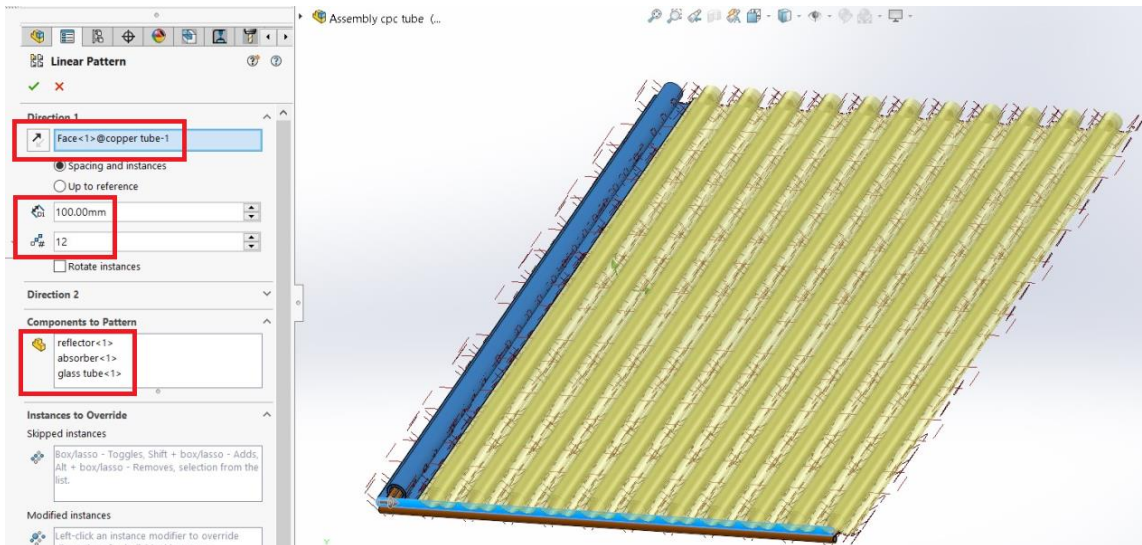


Εικόνα 29. Σωλήνας απορροφητής



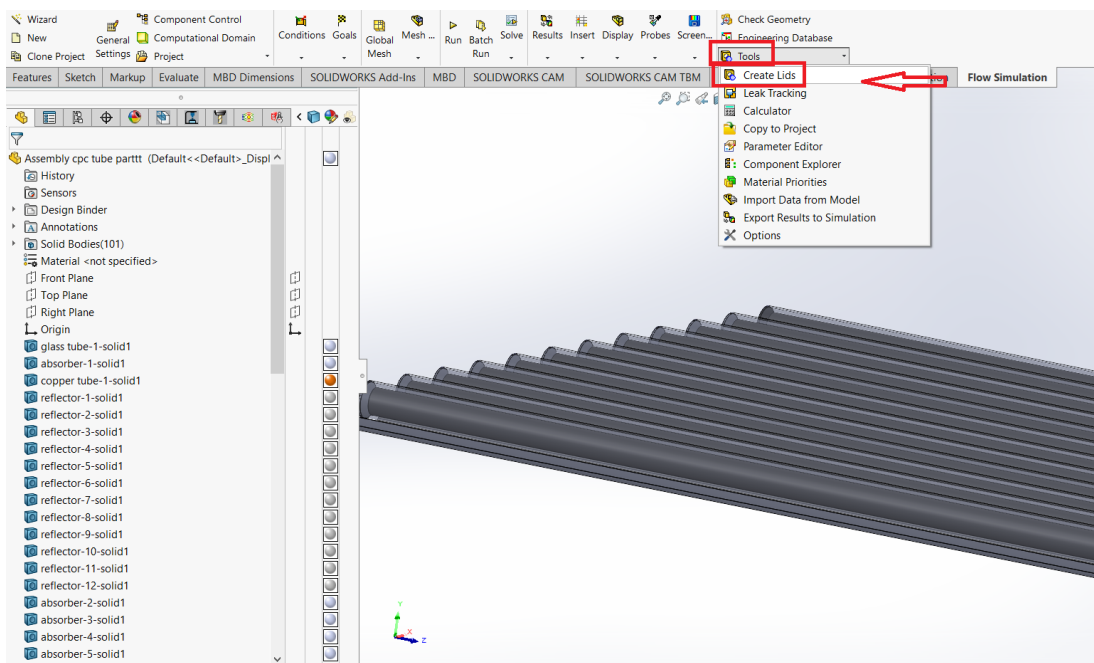
Εικόνα 30. Κάτοπτρο

Στο assembly φορτώνουμε τα parts και τα κάνουμε pattern 12 φορές με βήμα 100mm. Έπειτα κάνουμε save as το αρχείο ως part καθαρά και μόνο για να δουλέψουμε το flow simulation το οποίο παρατηρήσαμε ότι «φόρτωνε» πολύ πιο αργά για το assembly.



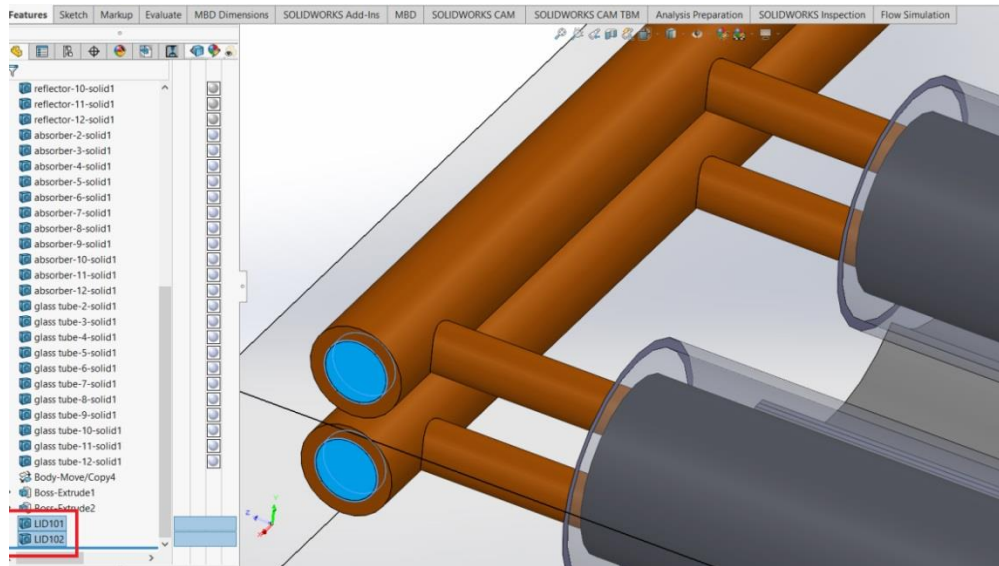
Εικόνα 32. Pattern στα parts για την κατασκευή του συλλέκτη

Στο τελικό μας part για να δουλέψουμε στο flow simulation πρέπει να ορίσουμε την είσοδο και την έξοδο της ροής του ρευστού δημιουργώντας ουσιαστικά τάπες ή leads.



Εικόνα 33. Εντολή Create Lids

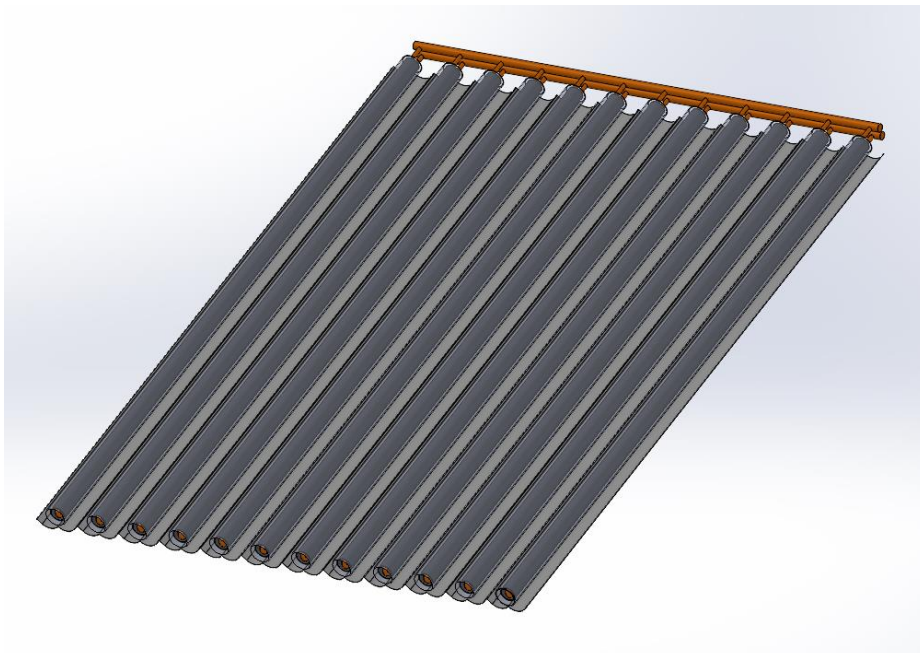
Και επιλέγουμε τις επιφάνειες του σωλήνα που θέλουμε να «κλείσουμε».



Εντολή 34. Δημιουργία ταπών-leads

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι ίσως να ήταν πιο σωστό να τοποθετούσαμε την είσοδο από την αριστερή πλευρά και την έξοδο από τη δεξιά προκειμένου να μπορεί να συνδέεται σειριακά ο συλλέκτης με έναν άλλον, όμως στην προκειμένη μελέτη αυτό δεν μας αφορά όποτε το που θα τοποθετηθούν τα leads δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο.

Παρακάτω φαίνεται ο σχεδιαστικά ολοκληρωμένος συλλέκτης μας:

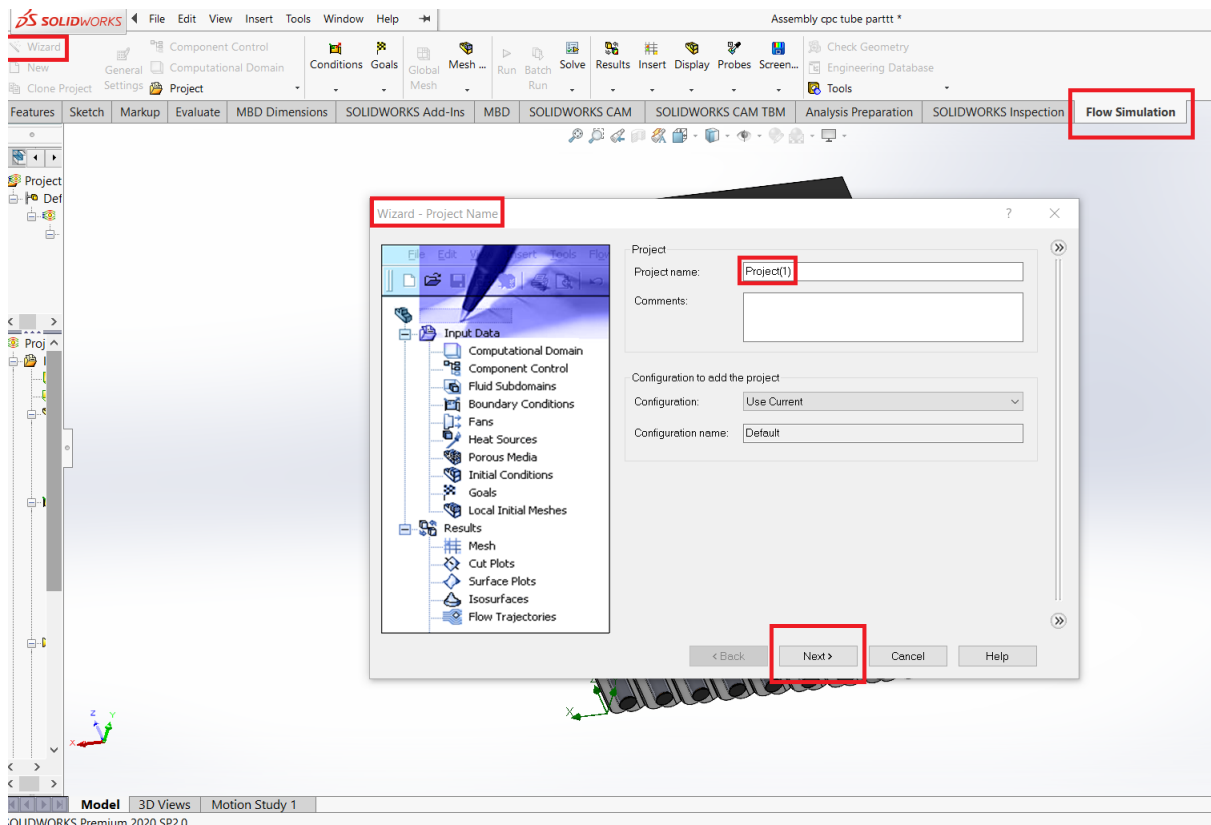


Εικόνα 35. Τελικό μοντέλο συλλέκτη

## Κεφάλαιο 5: Θερμική μελέτη του συλλέκτη μέσω Flow Simulation

Στόχος μας σε αυτό το κεφάλαιο είναι να ελέγξουμε την αποδοτικότητα του συλλέκτη που σχεδιάσαμε.

Από την καρτέλα «Flow Simulation» δημιουργούμε ένα νέο project μέσω της εντολής «Wizard». [Εικόνα 5.1]



Εικόνα 5.1. Δημιουργία Flow Simulation Project

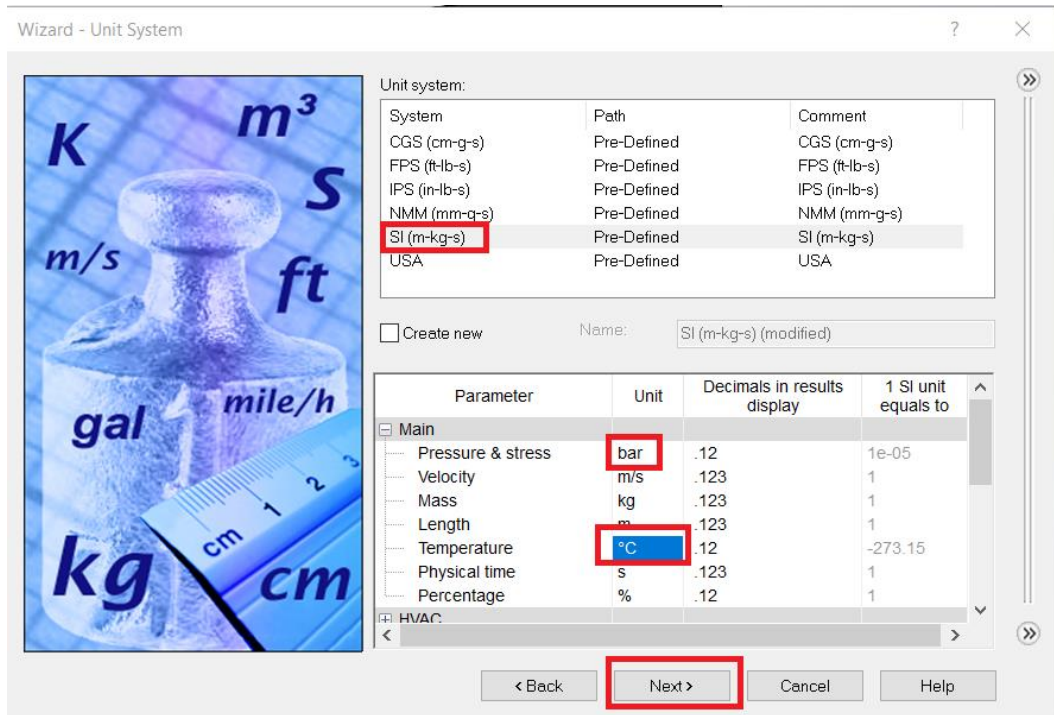
Ορίζουμε SI σύστημα μέτρησης, bar για μονάδες μέτρησης της πίεσης και °C για τη θερμοκρασία. [Εικόνα 5.2]

Στη συνέχεια εφόσον έχουμε ροή εντός σωλήνα επιλέγουμε «Internal» Flow Analysis και «Exclude cavities without flow conditions» προκειμένου να μην έχουμε ροή κοντά σε οποιοδήποτε τοίχος δεν έχει οριστεί στα boundary conditions όπως θα δούμε και παρακάτω. Διαλέγουμε «Heat conduction in solids» καθώς υπάρχει μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής σε στερεά τοιχώματα. [Εικόνα 5.3]

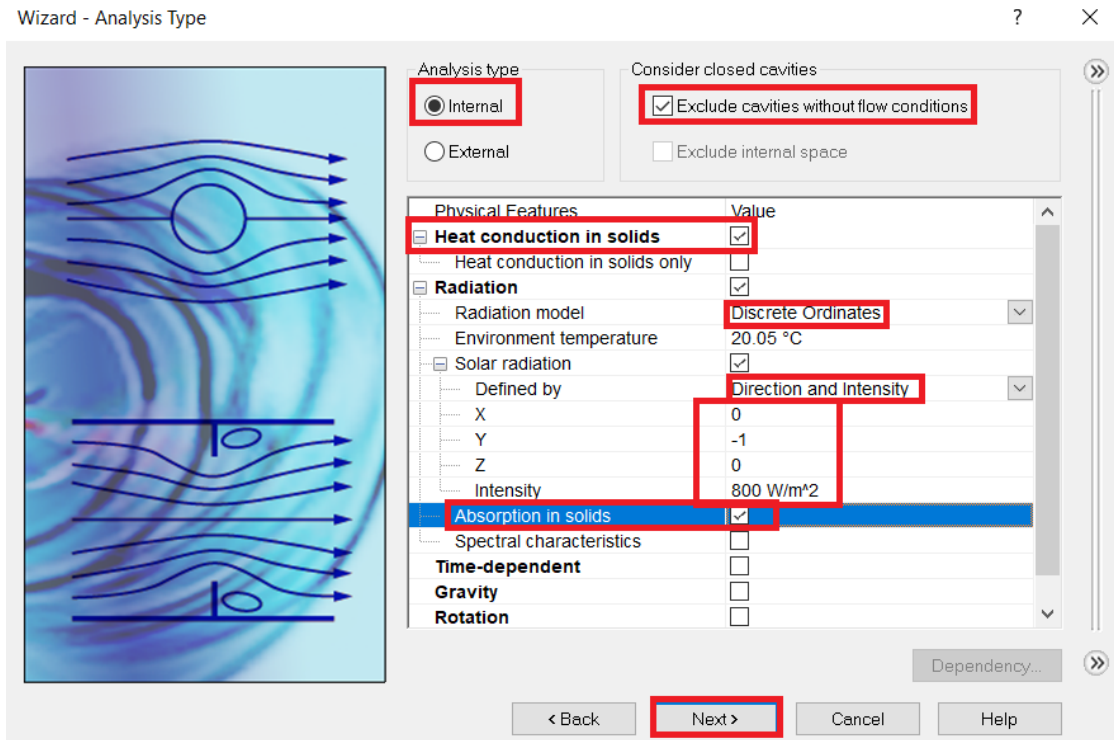
Επιλέγουμε «Radiation» , «Discrete Ordinates» και θερμοκρασία περιβάλλοντος σαν θερμοκρασία αναφοράς στους 20.05 °C. Η «Discrete Ordinates» ή αλλιώς μέθοδος των διακριτών τεταγμένων ή μέθοδος Sn είναι μια συνάρτηση έντασης που εξαρτάται από τη θέση και την κατεύθυνση για την περιγραφή του πεδίου ακτινοβολίας. Το πεδίο έντασης μπορεί καταρχήν να λυθεί από την Διαφορική εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας (Radiation Transfer Equation - RTE), αλλά μια ακριβής λύση είναι συνήθως αδύνατη και ακόμη και στην περίπτωση γεωμετρικά απλών συστημάτων μπορεί να περιέχει ασυνήθιστες ειδικές συναρτήσεις. Η μέθοδος των διακριτών τεταγμένων είναι ένας τρόπος για να λυθεί κατά προσέγγιση η RTE με διακριτοποίηση τόσο του τομέα  $xyz$  όσο και των γωνιακών μεταβλητών που καθορίζουν την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. [Εικόνα 5.3]

Στη συνέχεια επιλέγουμε «Solar Radiation» και «Direction and Intensity» για να ορίσουμε την ηλιακή ακτινοβολία με βάση την κατεύθυνση και την έντασή της. Για κατεύθυνση θα επιλέξουμε ουσιαστικά το ιδιοδιάνυσμα  $(X,Y,Z)=(0,-1,0)$  , προκειμένου να μελετήσουμε την περίπτωση όπου οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του συλλέκτη με διεύθυνση προς τα κάτω, και για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας επιλέγουμε  $800 \text{ W/m}^2$ . Επιλέγουμε «absorption in solids» από τη στιγμή που έχουμε απορρόφηση ακτινοβολίας από τον απορροφητικό σωλήνα. [Εικόνα 5.3]

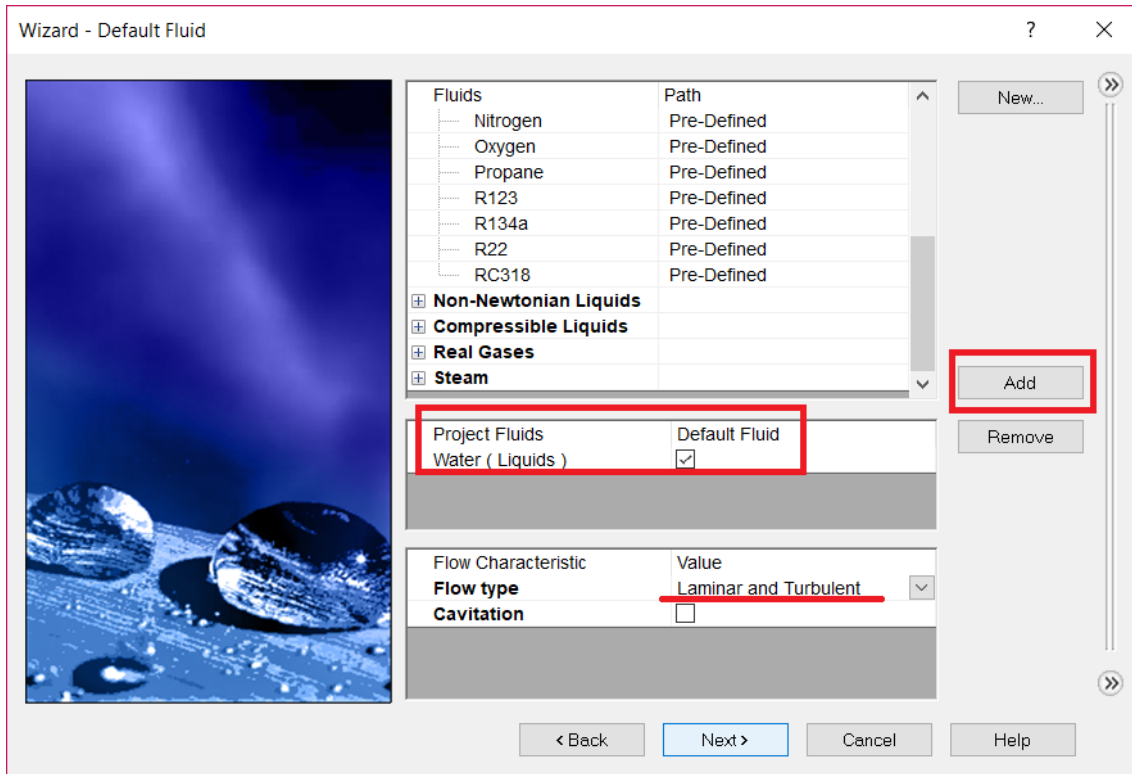
Στη συνέχεια ορίζουμε το νερό «Water» σαν εργαζόμενο ρευστό [Εικόνα 5.4] και «Copper» το υλικό του χαλκοσωλήνα που μεταφέρει το εργαζόμενο μέσο. [Εικόνα 5.5]



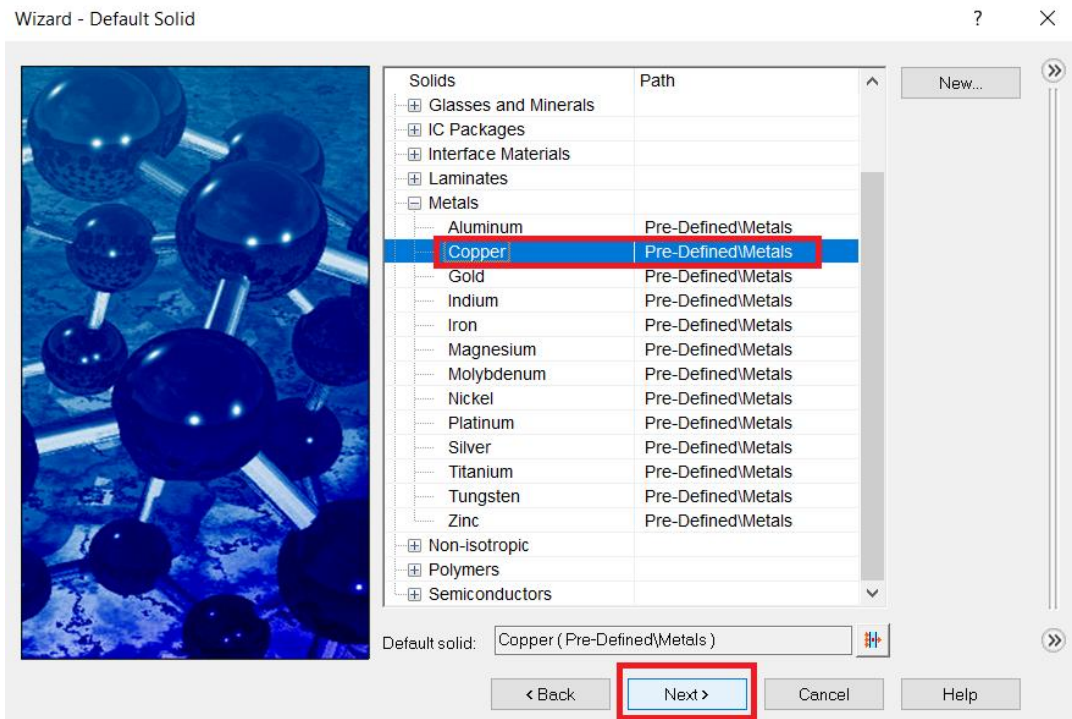
Εικόνα 5.2. Επιλογή μονάδων μέτρησης



Εικόνα 5.3. Ορισμός της ροής θερμότητας και ακτινοβολίας



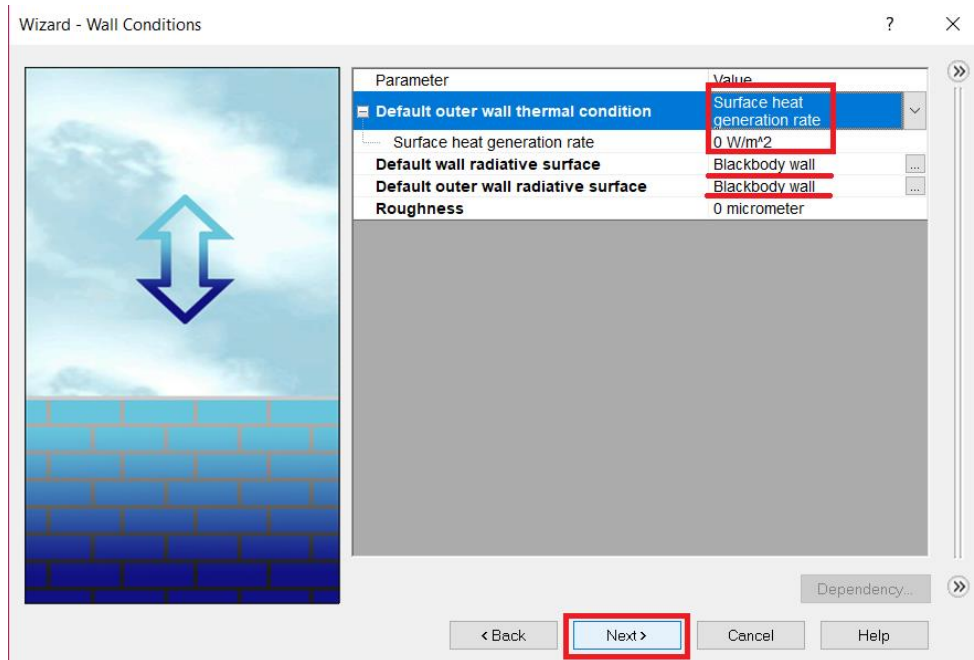
Εικόνα 5.4. Ορισμός του εργαζόμενου μέσου



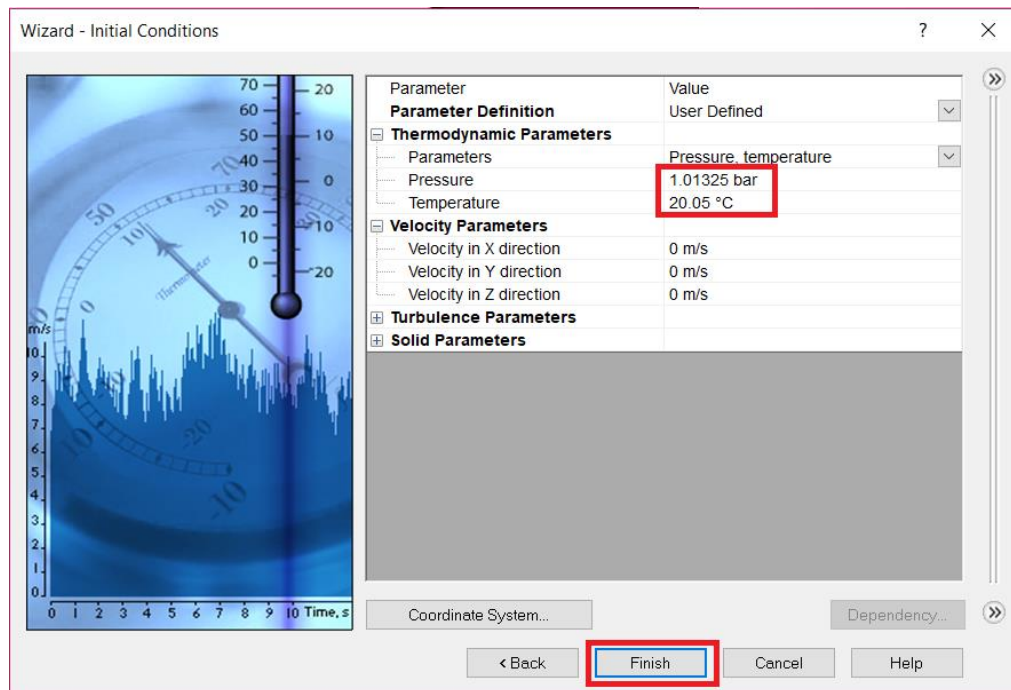
Εικόνα 5.5. Ορισμός του υλικού του αγωγού μεταφοράς του εργαζόμενου μέσου



Στο επόμενο παράθυρο στο «Default outer wall thermal condition» επιλέγουμε «Surface Heat Generation Rate» και  $0 \text{ W/m}^2$  και «Blackbody Wall» [Εικόνα 5.6] Τέλος, ορίζουμε τις συνθήκες αναφοράς. [Εικόνα 5.7]

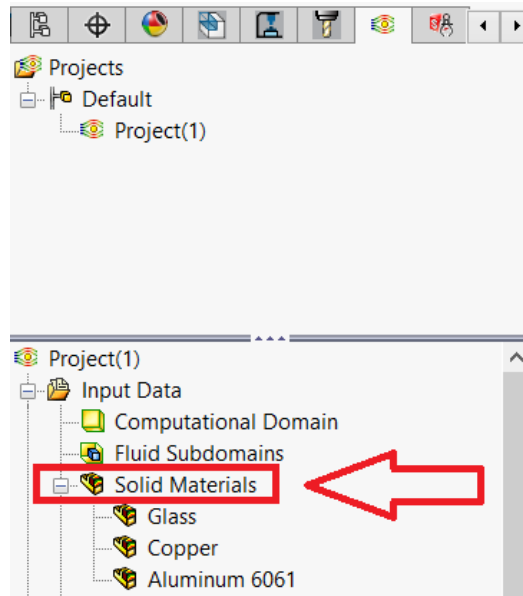


Εικόνα 5.6 Δήλωση των default συνθηκών τοιχωμάτων

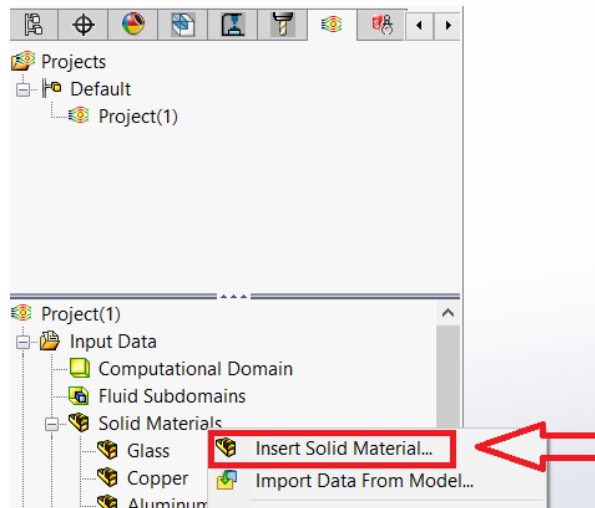


Εικόνα 5.7. Συνθήκες Αναφοράς

Έπειτα δηλώνουμε τα στερεά υλικά του συλλέκτη με δεξί κλικ στο «Solid Materials» και πατώντας «Insert Solid Materials».

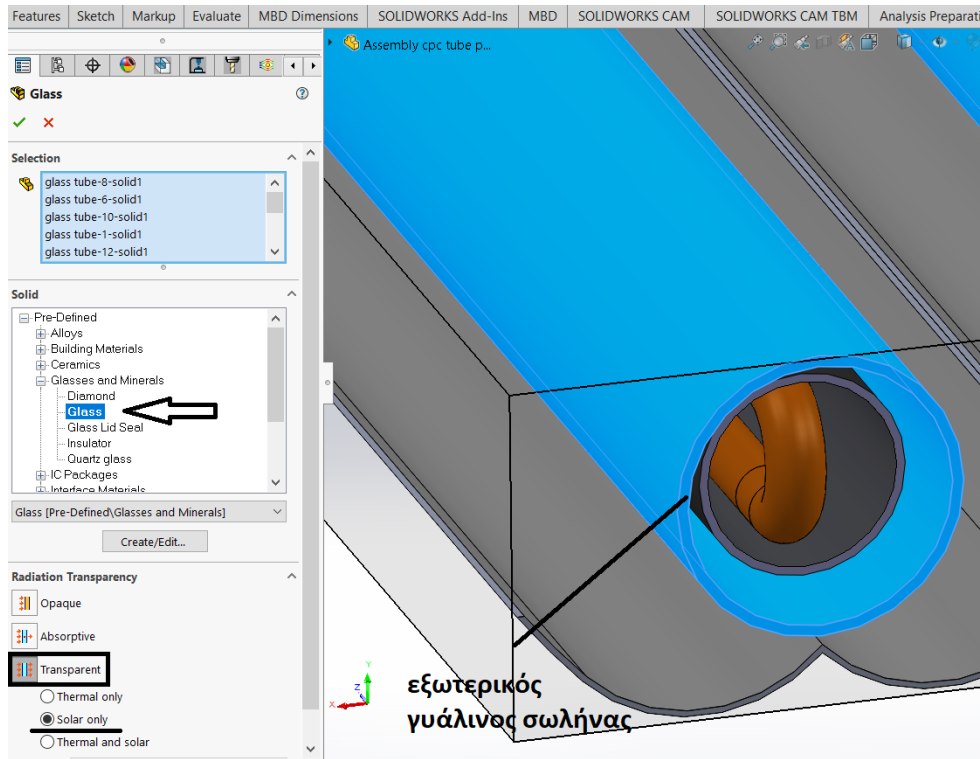


Εικόνα 5.9. Εντολή Solid Materials

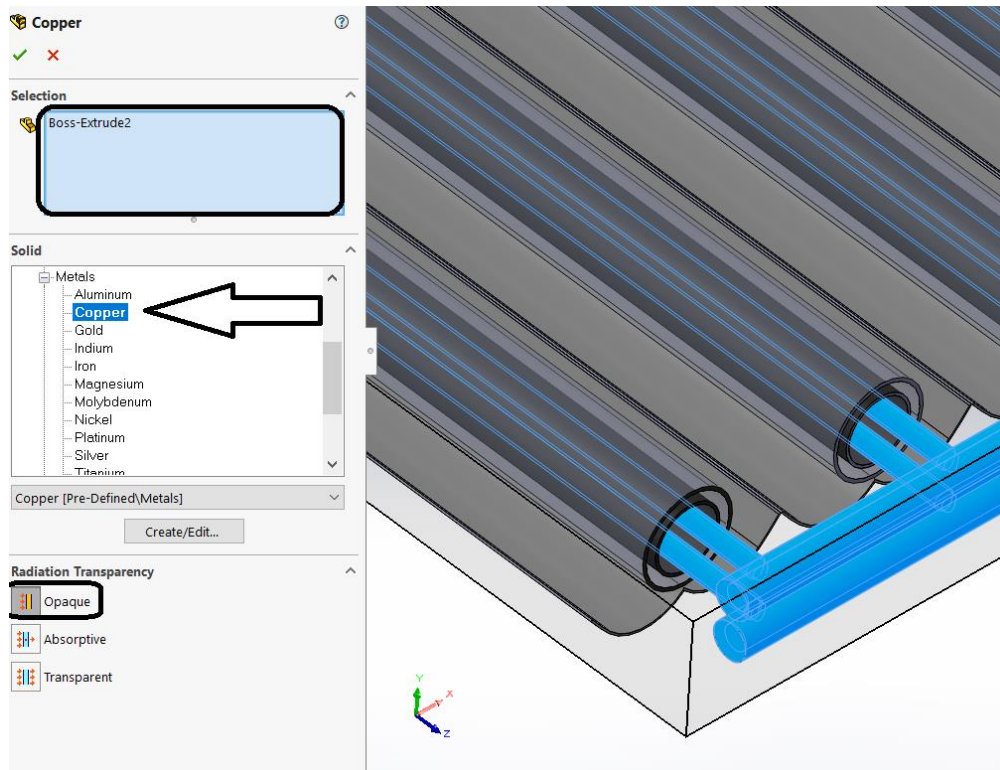


Εικόνα 5.10. Insert Solid Materials

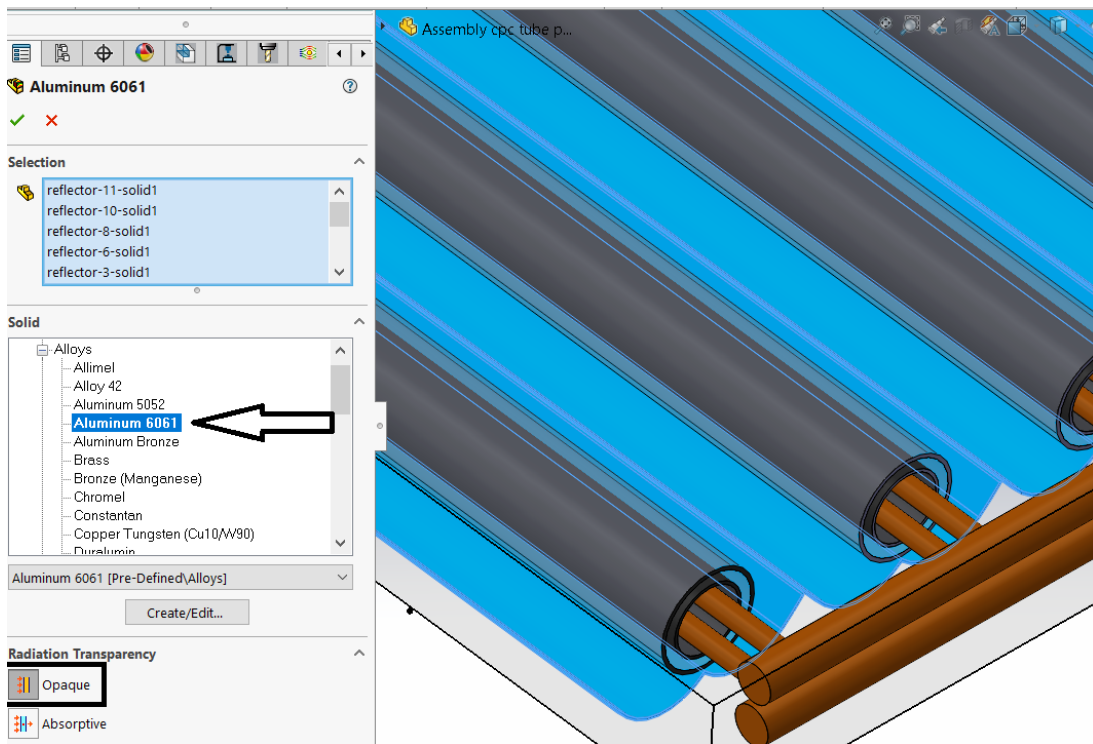
Στη δήλωση του γυαλιού επιλέγουμε αρχικά μόνο τους εξωτερικούς γυάλινους σωλήνες και τους ορίζουμε «Transparent» και «Solar Only» [Εικόνα 5.11]. Έπειτα προχωράμε στη δήλωση του χαλκοσωλήνα με υλικό χαλκό «Copper» και αδιαφανές «Opaque» [Εικόνα 5.13]. Τέλος, δηλώνουμε τα κάτοπτρα με αλουμίνιο «Aluminum 6061» και «Opaque» [Εικόνα 5.14].



Εικόνα 5.11 Δήλωση υλικού γυάλινων εξωτερικών σωλήνων



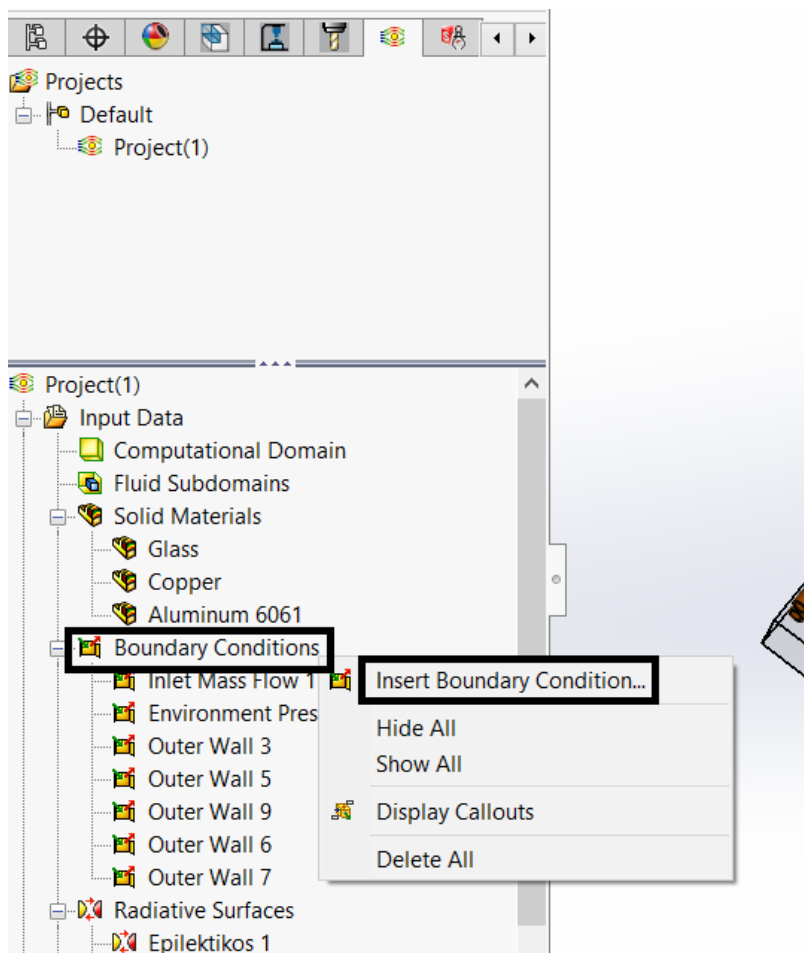
Εικόνα 5.13 Δήλωση υλικού χαλκοσωλήνα U



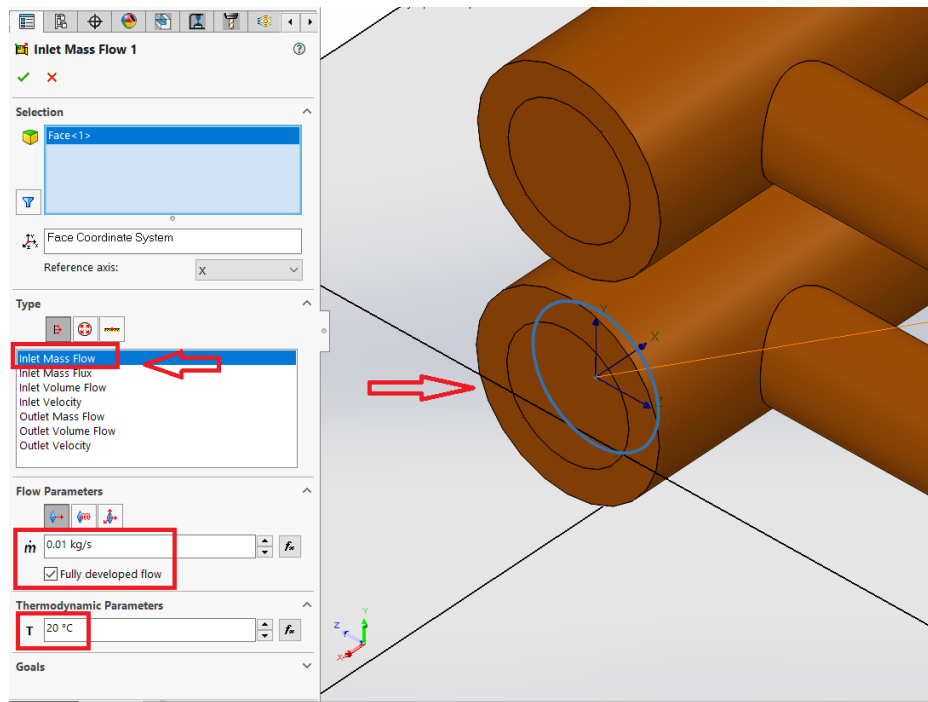
Εικόνα 5.14 Δήλωση αλουμινίου για τα κάτοπτρα

Μετά την δήλωση υλικών προχωράμε στον καθορισμό των οριακών συνθηκών επιλέγοντας Boundary Conditions και Insert Boundary Conditions. [Εικόνα 5.15]

Αρχικά επιλέγουμε Inlet Mass Flow για την παροχή μάζας του ρευστου, όπου επιλέγουμε την εσωτερική πλευρά της τάπας εισόδου του νερού στον χαλκοσωλήνα. Επιλέγουμε παροχή ίση με 0.01 kg/s (όπως μας συστήνει ο κατασκευαστής), πλήρως ανεπτυγμένη ροή – Fully developed flow μιάς και δε θέλουμε να μελετήσουμε τυρβώδη ροή σε ασταθή κατάσταση, και θερμοκρασία εισερχόμενου υγρού  $T=20^{\circ}\text{C}$ . Η θερμοκρασία νερού της παροχής ενός σπιτιού συνήθως κυμαίνεται μεταξύ  $5-25^{\circ}\text{C}$ . Με συστοιχίες ηλιακών συλλεκτών συνήθως συνδεδεμένων σε σειρά η θερμοκρασία εισερχόμενου ρευστού μπορεί να είναι μεγαλύτερη. [Εικόνα 5.16]

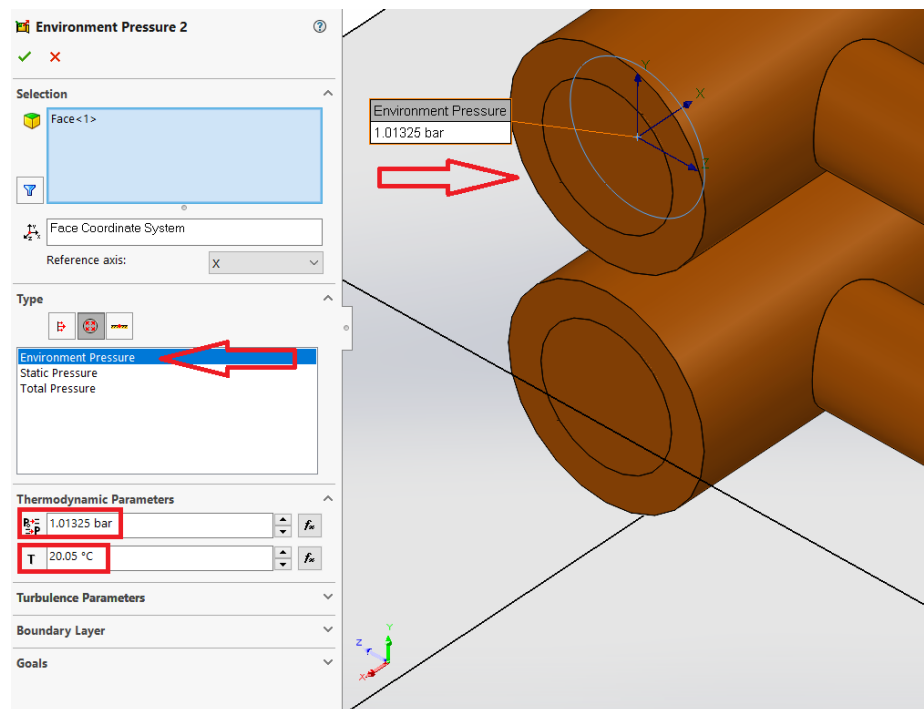


Εικόνα 5.15. Insert Boundary Conditions



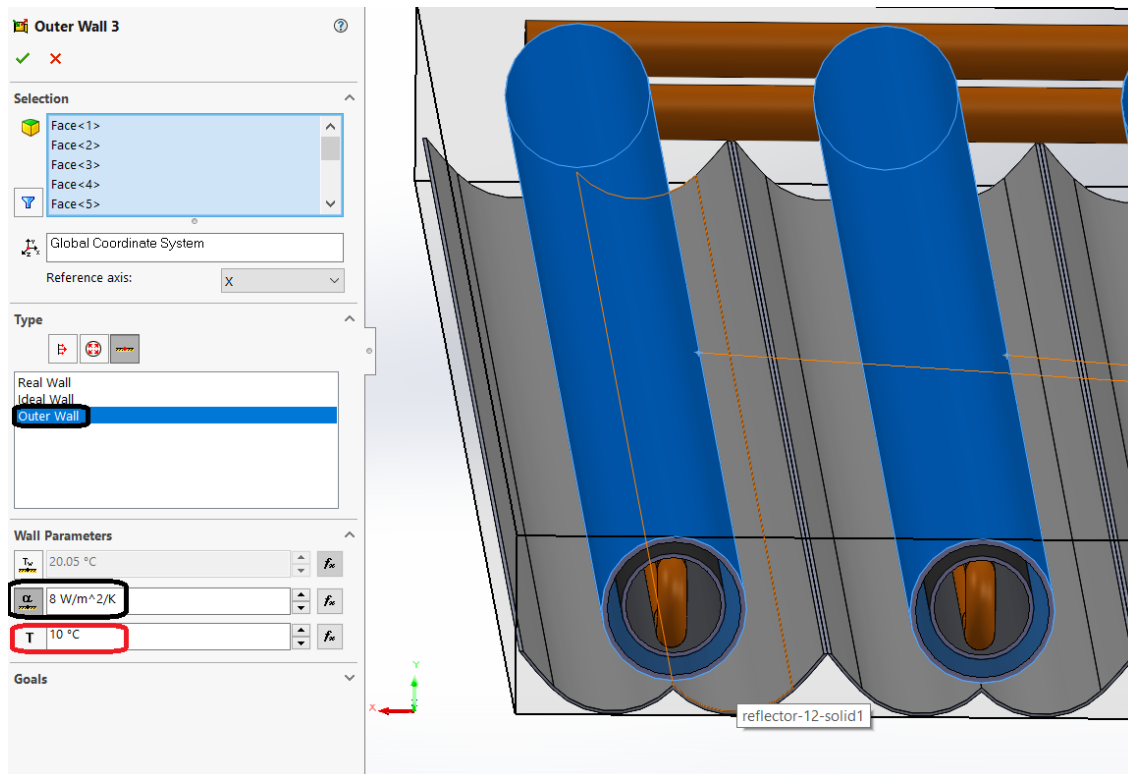
Εικόνα 5.16. Inlet Mass Flow

Επόμενη οριακή συνθήκη είναι η έξοδος του ρευστού Environment Pressure όπου επιλέγουμε την εσωτερική πλευρά της τάπας εξόδου του ρευστού, πίεση περιβάλλοντος 1.01325 bar και θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T=20.05^{\circ}\text{C}$ . [Εικόνα 5.17]



Εικόνα 5.17 Environment Pressure

Στη συνέχεια ξεκινάμε να ορίζουμε τις συνθήκες θερμικής ροής στα τοιχώματα του συλλέκτη. Ως πρώτο τοίχωμα «Outer Wall» ορίζουμε τους 12 εξωτερικούς γυάλινους σωλήνες και επιλέγουμε τις εξωτερικές τους επιφάνειες όπου η συναγωγή θερμότητας μεταξύ του τοιχώματος και του αέρα του περιβάλλοντος με θερμοκρασία  $T=10^{\circ}\text{C}$  πραγματοποιείται με συντελεστή  $h_{\text{glass}}=8 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . [Εικόνα 5.18]

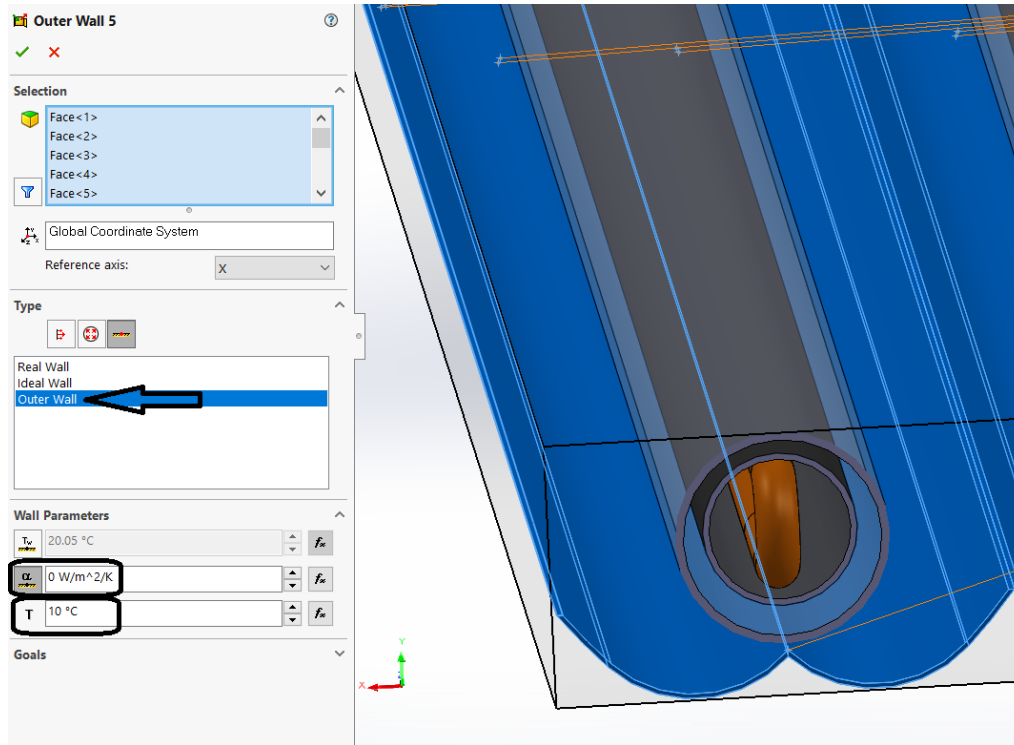


Εικόνα 5.18. Outer Wall – Εξωτερικοί γυάλινοι σωλήνες

Ορίζουμε δεύτερο τοίχωμα για τις επιφάνειες των ανακλαστήρων όπου επειδή δεν μας ενδιαφέρει η θερμική τους συμπεριφορά θα θεωρήσουμε συντελεστή συναγωγής  $h=0 \text{ W/m}^2/\text{K}$  και ομοίως θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T=10^{\circ}\text{C}$ . [Εικόνα 5.19]

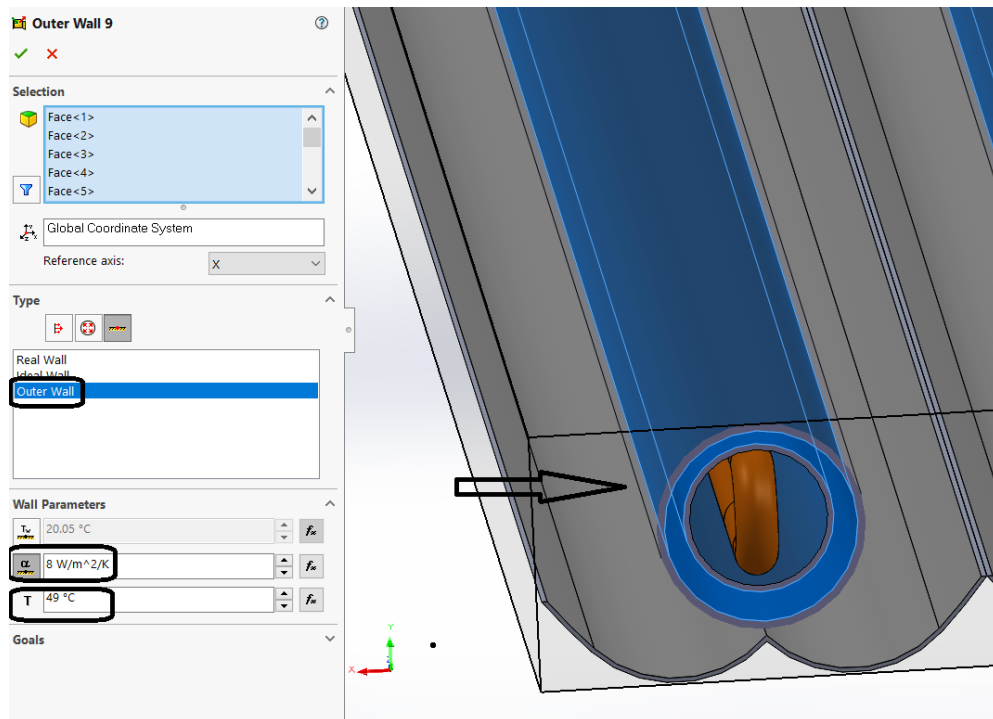
Στη συνέχεια, με Outer Wall δηλώνουμε το κενό μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού γυάλινου σωλήνα. Επιλέγουμε την εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού σωλήνα και την εξωτερική του εσωτερικού, συντελεστή συναγωγής κενού  $h=8 \text{ W/m}^2/\text{K}$  και θερμοκρασία  $T=48^{\circ}\text{C}$  η οποία προέκυψε μετά από δοκιμές ως μέση τιμή των αποτελεσμάτων του Flow

Simulation για την Μέση θερμοκρασία εξωτερικού σωλήνα και του σωλήνα απορρόφησης.  
 [Εικόνα 5.20].



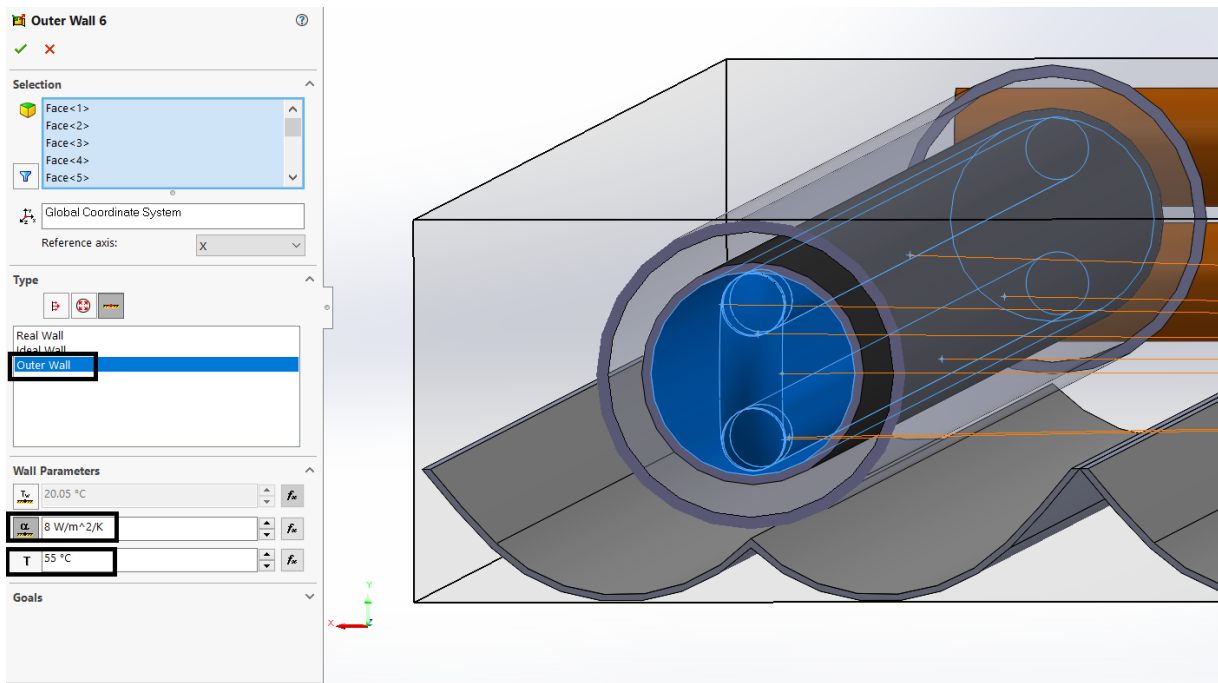
Εικόνα 5.19. Outer Wall-Ανακλαστήρες





Εικόνα 5.20. Outer Wall-Κενό μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού γυάλινου σωλήνα

Ομοίως ορίζουμε και το δεύτερο κενό μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του απορροφητικού σωλήνα και της εξωτερικής επιφάνειας του χαλκοσωλήνα όπου ορίζουμε  $h=8 \text{ W/m}^2/\text{K}$  και θερμοκρασία ίση με τον μέσο όρο της θερμοκρασίας του απορροφητικού σωλήνα και της εξωτερικής επιφάνειας του χαλκοσωλήνα η οποία μετά από δοκιμές προκύπτει ίση με  $T=55^\circ\text{C}$ . [Εικόνα 5.21]

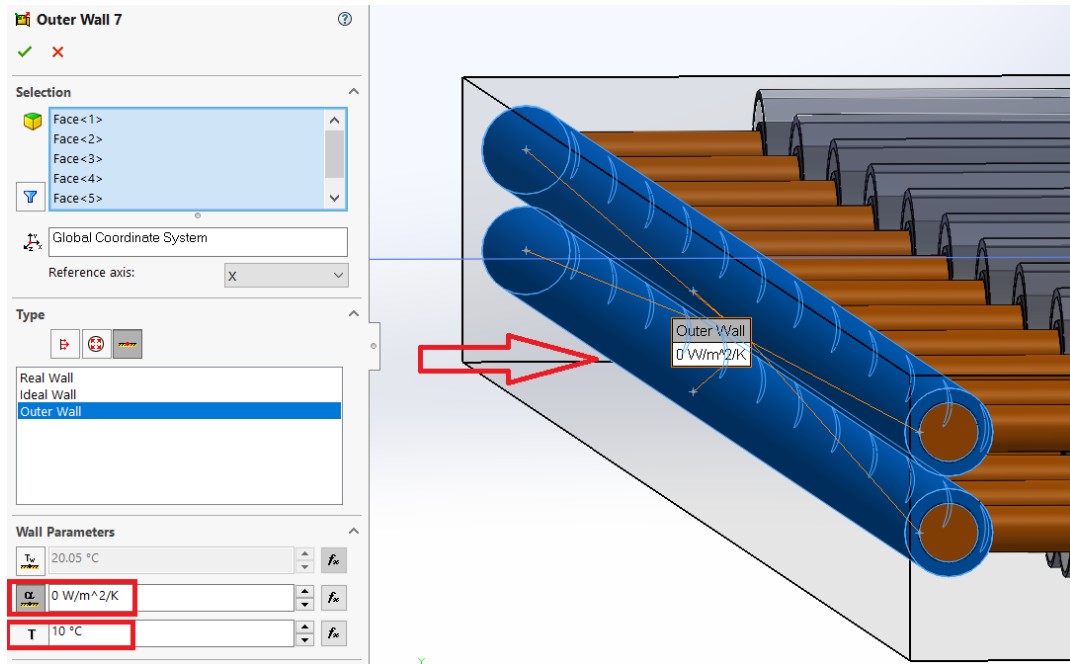


Εικόνα 5.21 Boundary Condition για το κενό μεταξύ απορροφητή και χαλκοσωλήνα

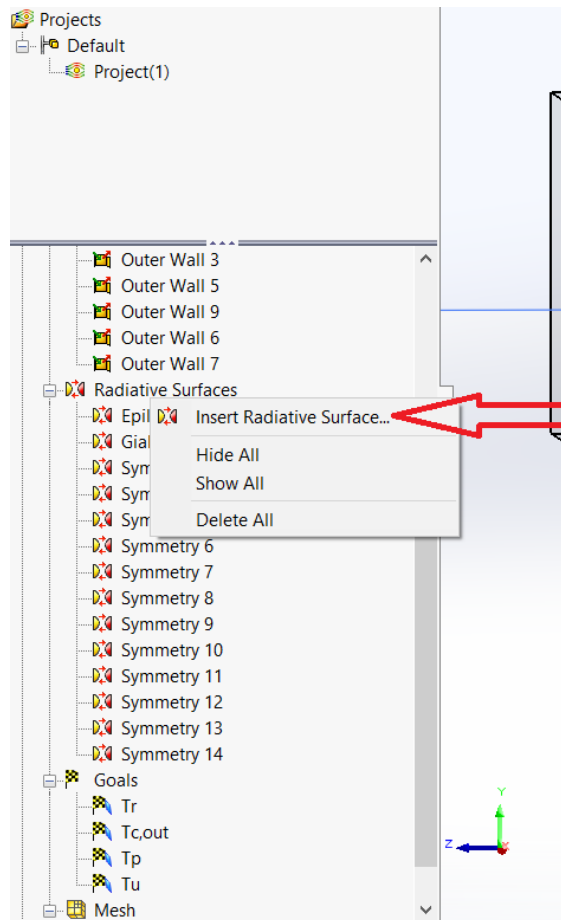
Τέλος, ορίζουμε την μόνωση που μπάινει γύρω από τον συλλεκτήρα του χαλκοσωλήνα (οι δύο κάθετοι σωλήνες στα U τμήματα του χαλκοσωλήνα) και η οποία κρίναμε ότι δεν χρειάζεται να σχεδιαστεί. [Εικόνα 5.22]

Επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε τις ακτινοβολούμενες επιφάνειες μέσω του Radiative Surfaces επιλέγοντας Insert Radiative Surface. [Εικόνα 5.23]

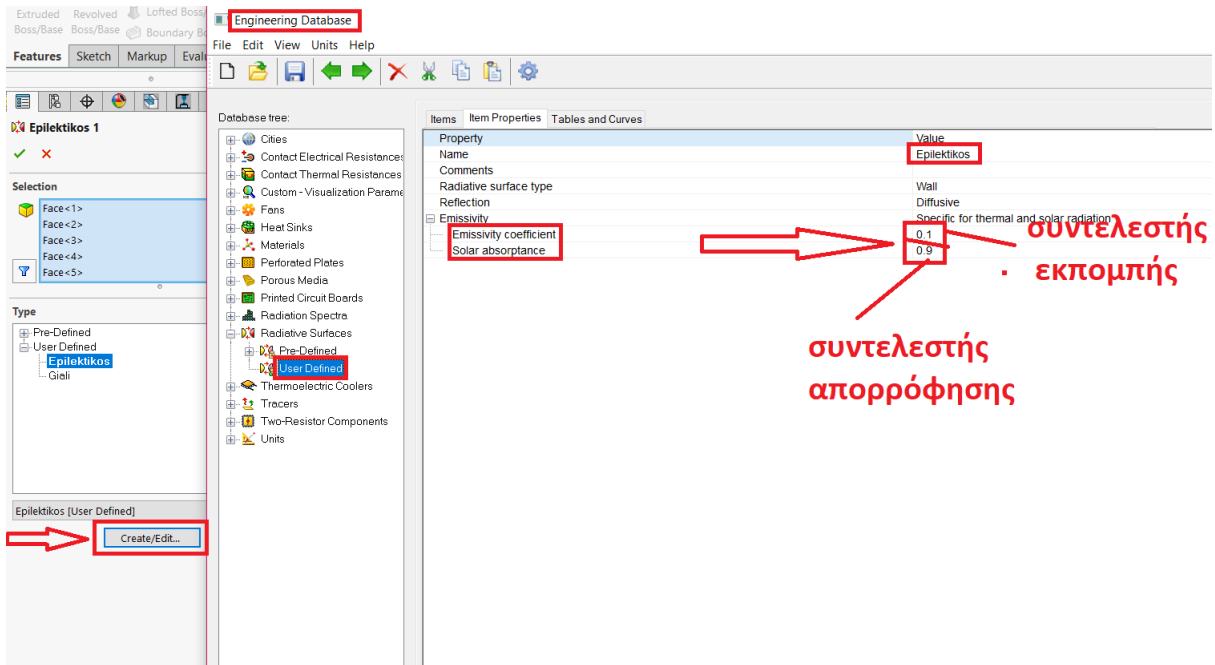
Αρχικά επιλέγουμε τους σωλήνες απορρόφησης και πατώντας User defined και Create/Edit ορίζουμε τα χαρακτηριστικά της επιλεκτικής επίστρωσης των σωλήνων. Για να το επιτύχουμε αυτό στο παράθυρο Engineering Database που εμφανίζει ορίζουμε όνομα “Epilektikos” , Emissivity coefficient=0.1 και Solar absorbance=0.9. [Εικόνα 5.24]



Εικόνα 5.22 Μόνωση χαλκοσωλήνα

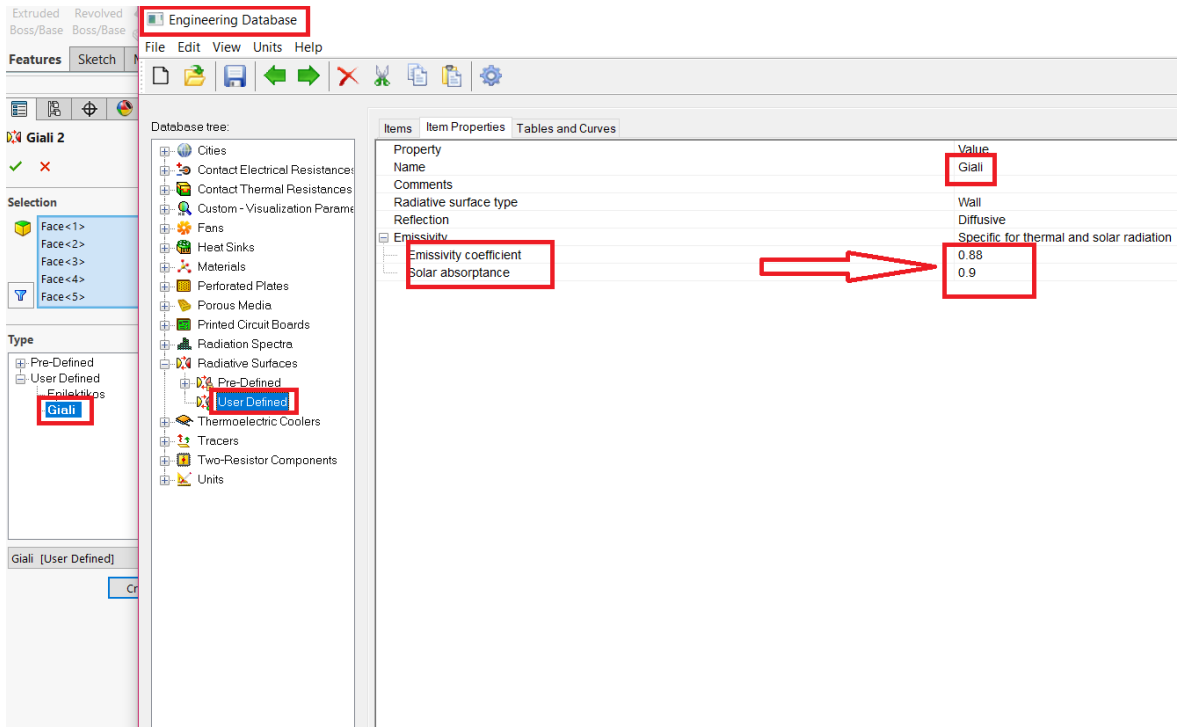


Εικόνα 5.23 Insert Radiative Surface



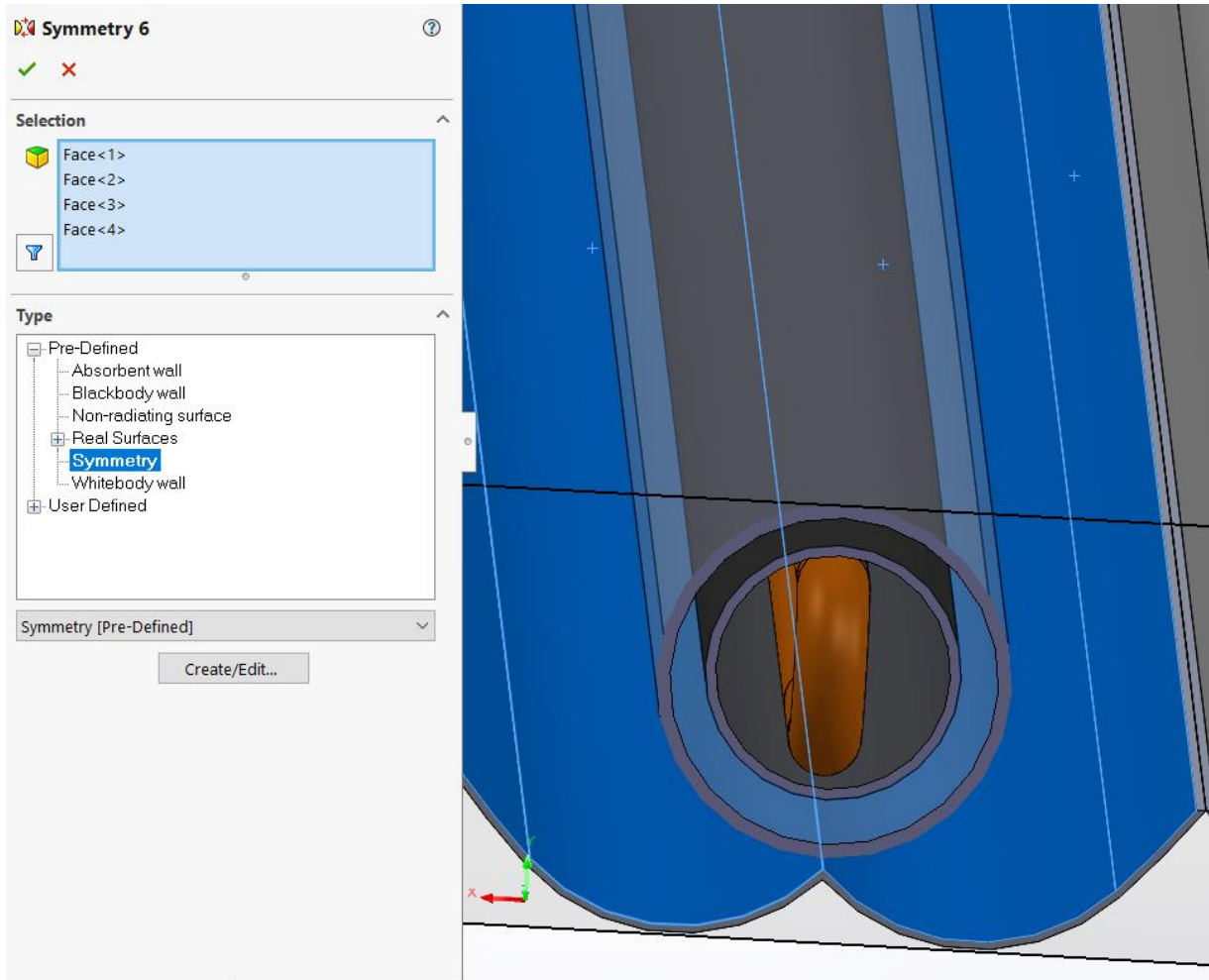
Εικόνα 5.24 Ορισμός επιλεκτικής επίστρωσης σωλήνων απορρόφησης

Επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας του γυαλιού. Με τον ίδιο τρόπο επιλέγουμε τους εξωτερικούς γυάλινους σωλήνες και ορίζουμε τον συντελεστή εκπομπής ίσο με 0.88 και τον συντελεστή απορρόφησης ίσο με 0.9. [Εικόνα 5.25]



Εικόνα 5.25 Ορισμός γυαλιού

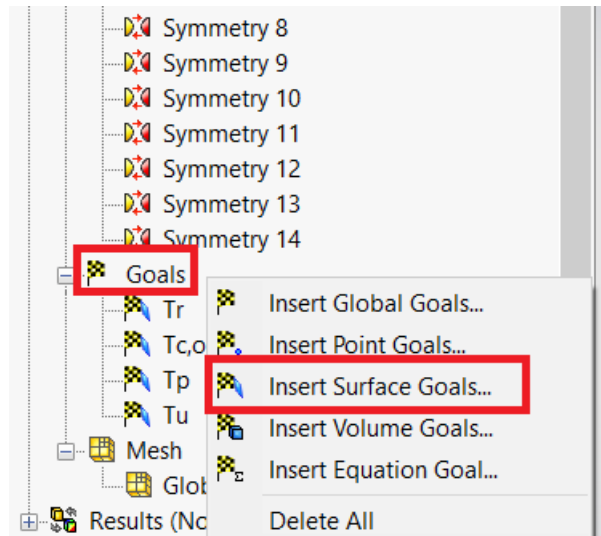
Τέλος, ορίζουμε όλες τις συμμετρικές ακτινοβολούμενες παραβολικές επιφάνειες των ανακλαστήρων με Insert Radiative Surface και επιλέγωντας Symmetry. [Εικόνα 5.26]



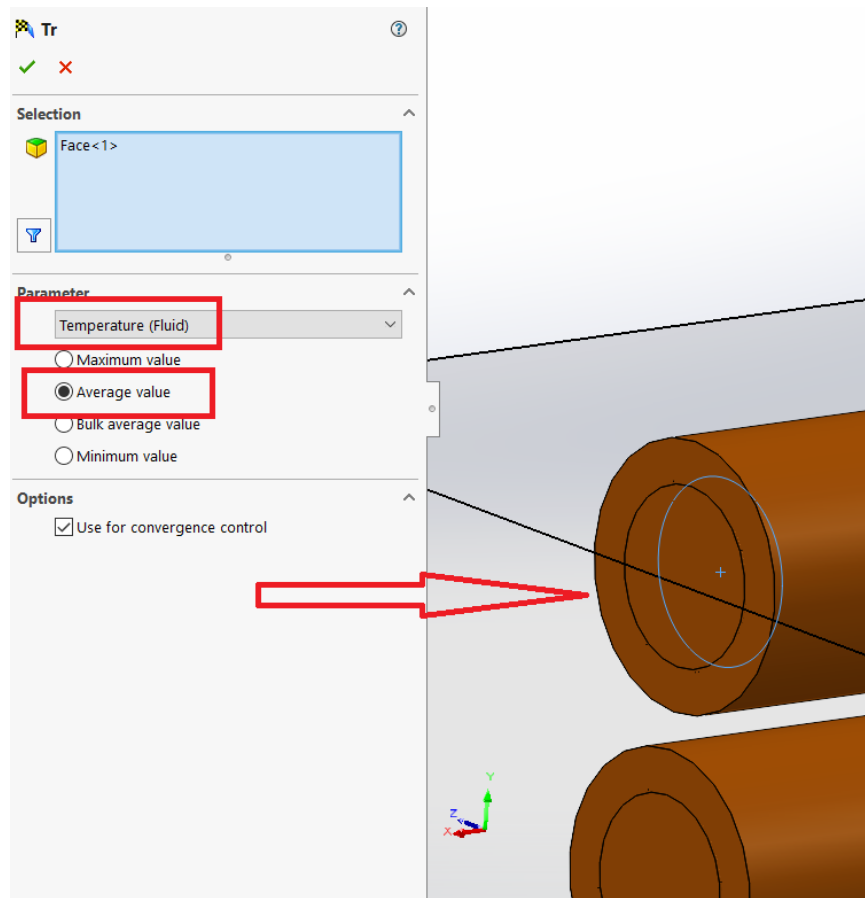
Εικόνα 5.26 Symmetry radiative surface – Ορισμός των ανακλαστικών επιφανειών

Τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση του Flow Simulation του συλλέκτη μας είναι να ορίσουμε τους στόχους, δηλαδή τα αποτελέσματα που θέλουμε να λάβουμε στο τέλος της ανάλυσής μας, επιλέγωντας Goals και Insert Surface Goals. [Εικόνα 5.27]

Αρχικά επιλέγουμε την εσωτερική πλευρά της τάπας εξόδου και επιλέγουμε Temperature Fluid – Average Value για να πάρουμε σαν αποτέλεσμα “Tr” τη μέση θερμοκρασία του εξερχόμενου ρευστού. [Εικόνα 5.28]

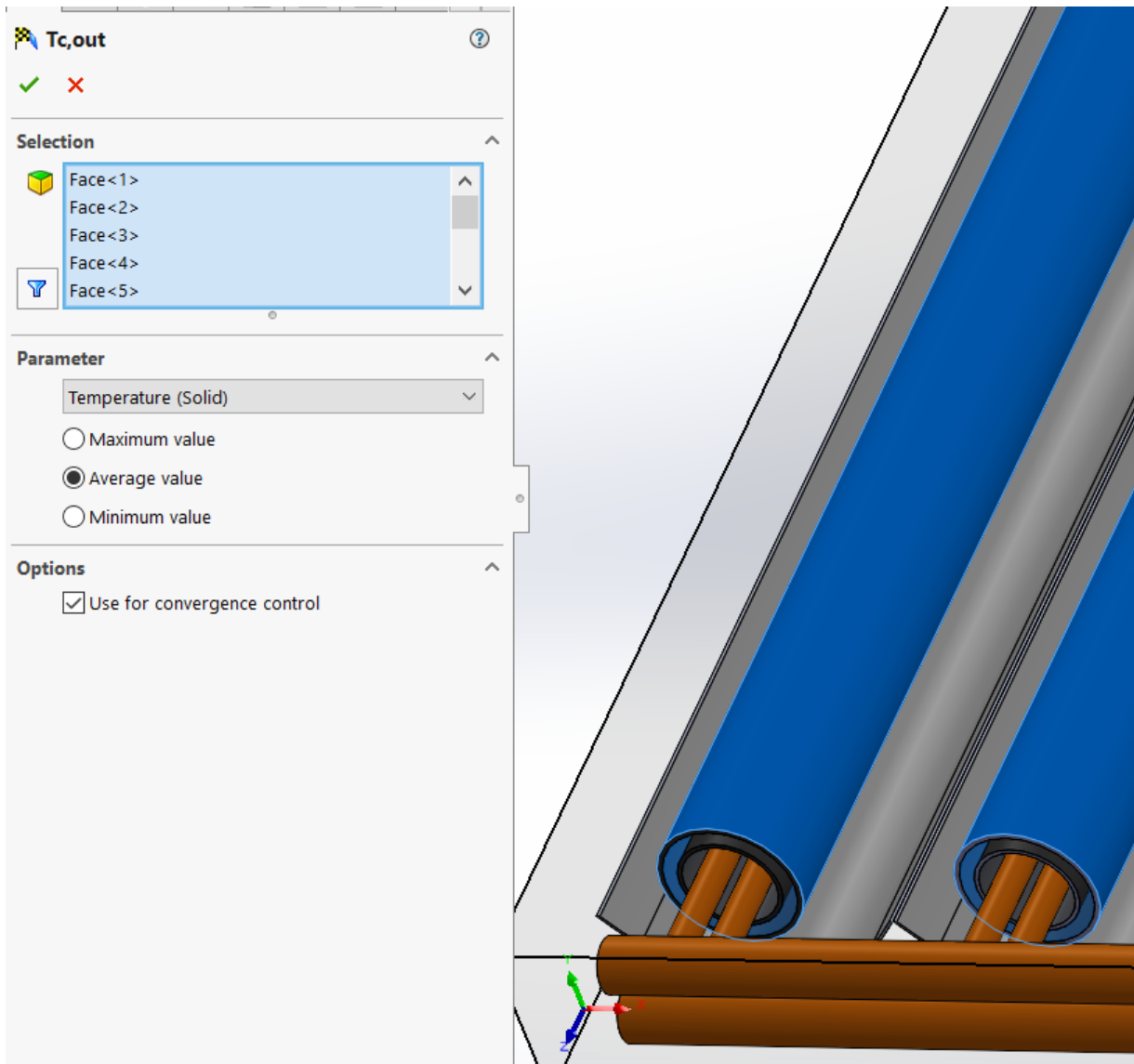


Εικόνα 5.27 Ορισμός των στόχων



Εικόνα 5.28 Θερμοκρασία Εξερχόμενου ρευστού Tr

Έπειτα δηλώνουμε σαν στόχο την θερμοκρασία του γυάλινου σωλήνα επιλέγωντας τις κυλινδρικές επιφάνειες όλων των σωλήνων, Temperature Solid και Average value.

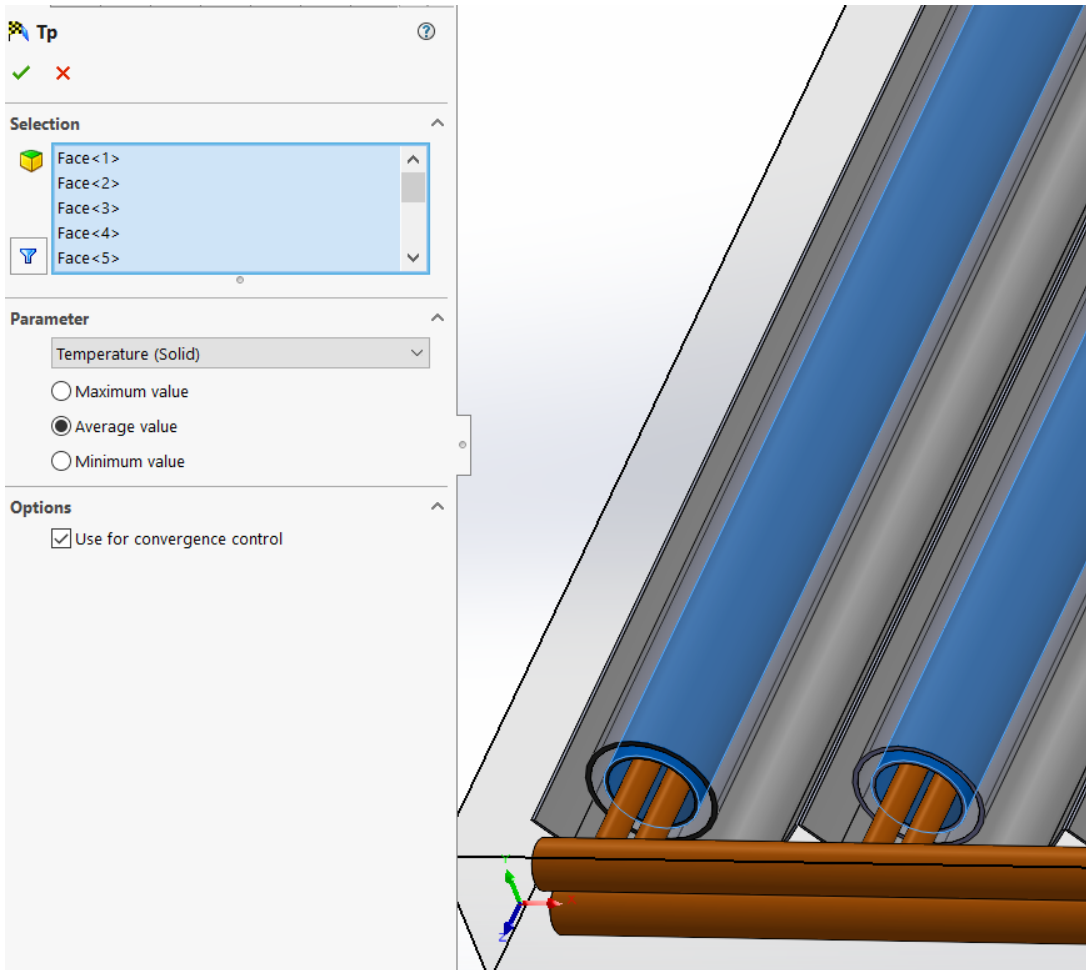


Εικόνα 5.29 Δήλωση της μέσης θερμοκρασίας των γυάλινων σωλήνων

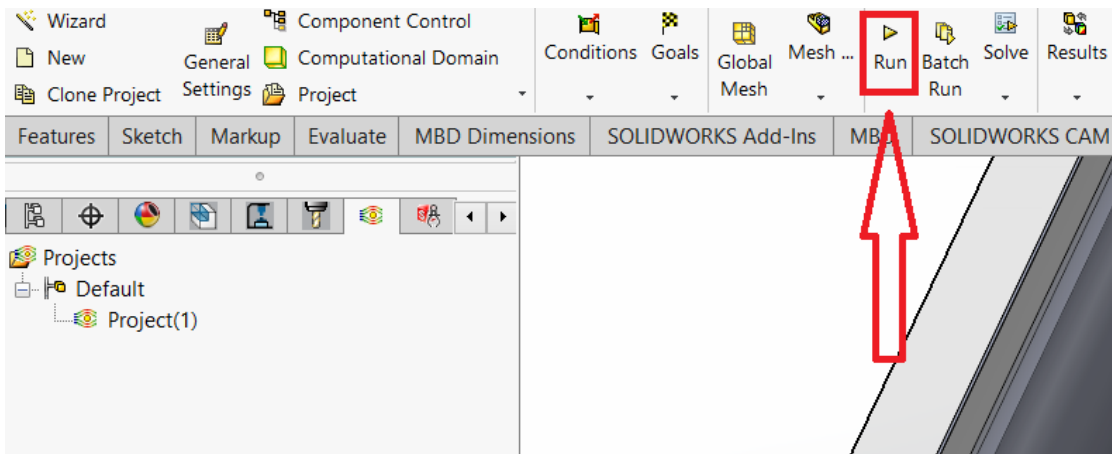
Και τέλος δηλώνουμε σαν στόχο τη μέση θερμοκρασία των σωλήνων απορρόφησης  $T_p$ .  
 [Εικόνα 5.30]

Για να τρέξουμε το Flow simulation project που πλέον έχουμε ορίσει πλήρως πατάμε την εντολή Run. [Εικόνα 5.31] [Εικόνα 5.32]

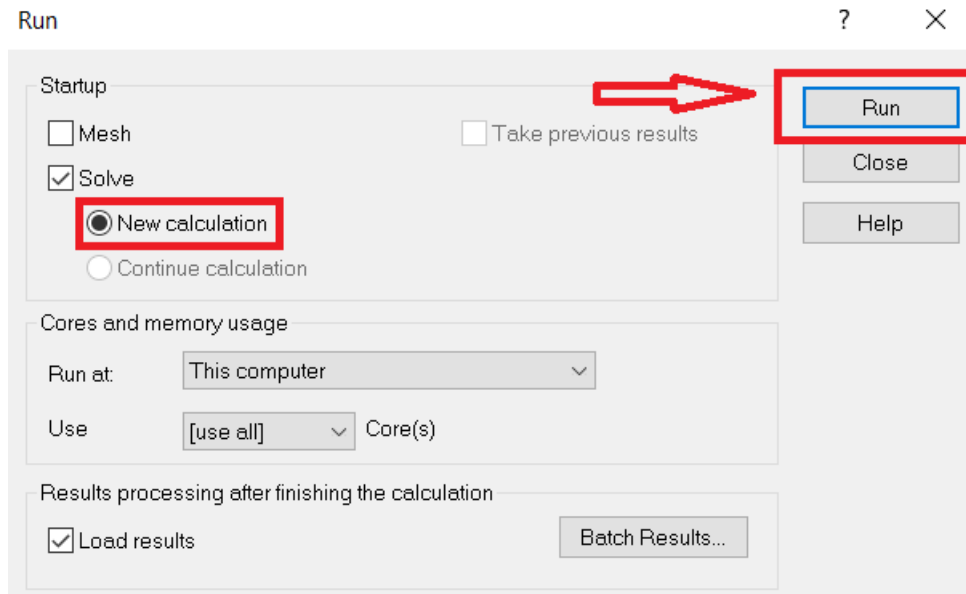




Εικόνα 5.30. Θερμοκρασία απορροφητών Tp



Εικόνα 5.31. Εντολή Run για εκτέλεση του Project



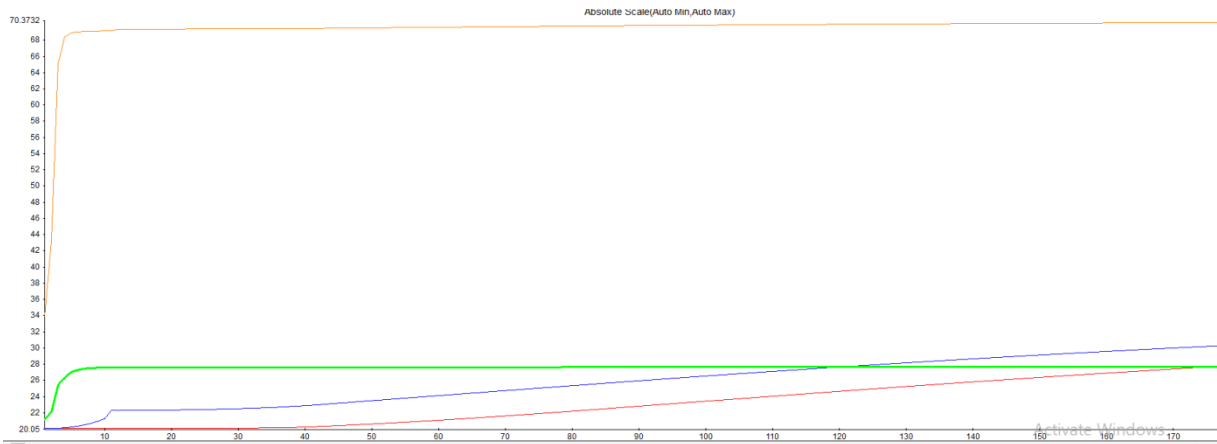
Εικόνα 5.32. Εντολή Run για εκτέλεση του Project

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα

Για θερμοκρασία εισερχόμενου ρευστού  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$  το Flow Simulation μας δίνει τα εξής αποτελέσματα:

Tc,out	27.6697 °C	Achieved (IT = 111)	0.1 °C	27.6697 °C
Tr	70.3732 °C	Achieved (IT = 234)	0.1 °C	70.3727 °C
Tr	32.5179 °C	Achieved (IT = 507)	0.1 °C	32.4757 °C

Εικόνα 6.1: Αποτελέσματα Flow Simulation για  $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$



Εικόνα 6.2: Εικόνα θερμοκρασιακών καμπυλών Flow Simulation

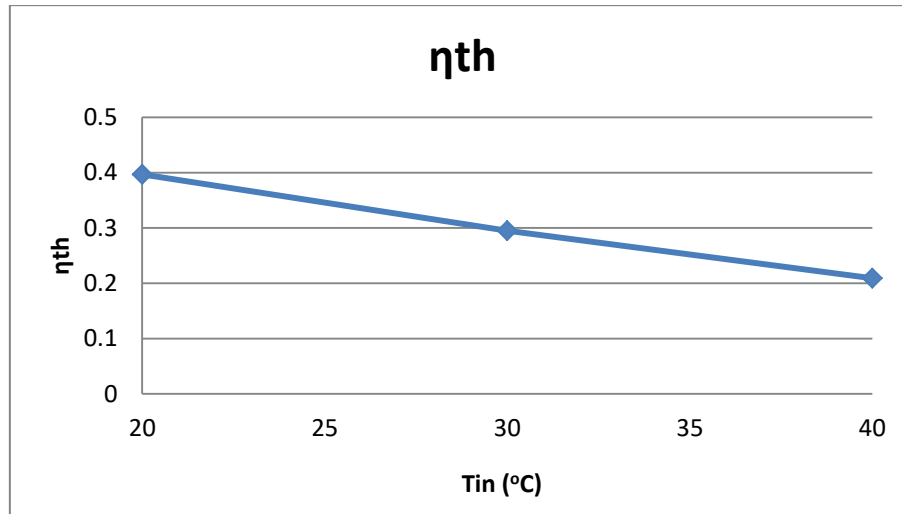
Όπου με βάση τον τύπο  $\eta_{th} = m \cdot C_p \cdot (T_r - T_{in}) / A_c \cdot G_T$  προκύπτει βαθμός απόδοσης  $\eta_{th} = 0.484$ .

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία και για άλλες θερμοκρασίες εισερχόμενου νερού προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

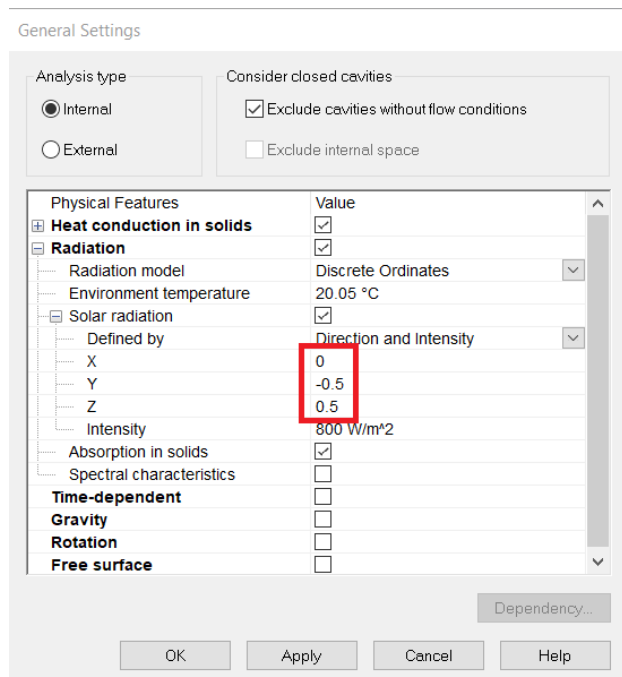
<b>T<sub>in</sub></b>	20	30	40
<b>Tr(=T<sub>out</sub>)</b>	32.518	39.308	46.581
<b>η<sub>th</sub></b>	0.397	0.295	0.209

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα

Και το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 6.1. Διάγραμμα του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου Σε δεύτερο χρόνο, για να εξετάσουμε την απόδοση του συλλέκτη και σε φάσεις που οι ακτίνες του ήλιου δεν προσπίπτουν απαραίτητα κάθετα σε αυτόν, δοκιμάσαμε να τρέξουμε το simulation και για άλλα ιδιοδυναίματα της ηλιακής ακτινοβολίας. Οπότε για ιδιοδύνασμα (0,-0.5,0.5) και άρα κλίση 135° [Εικόνα 6.4] και Tin=20°C η εικόνα των αποτελεσμάτων του simulation είναι:



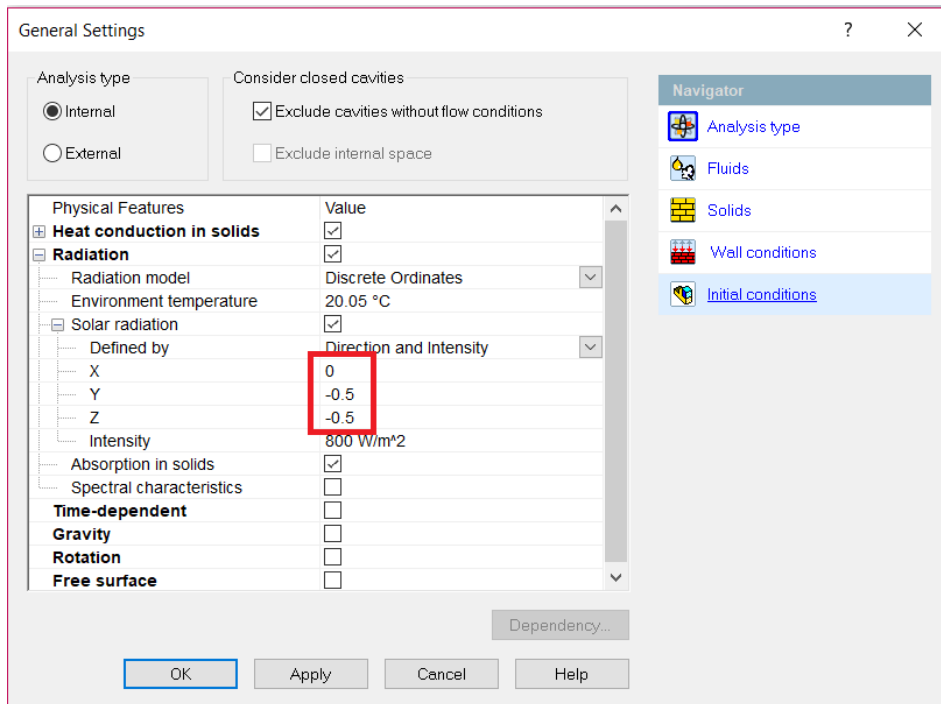
Εικόνα 6.3. General Settings Flow Simulation για θz=135°

T <sub>c,out</sub>	27.8439 °C	Achieved (IT = 111)	0.1 °C	27.8434 °C
T <sub>p</sub>	64.3891 °C	Achieved (IT = 236)	0.1 °C	64.3601 °C
T <sub>r</sub>	31.8167 °C	Achieved (IT = 505)	0.1 °C	31.7752 °C

Εικόνα 6.4 Αποτελέσματα για κλίση 135 deg



Εικόνα 6.4. Γωνία πρόσπτωσης 135 deg



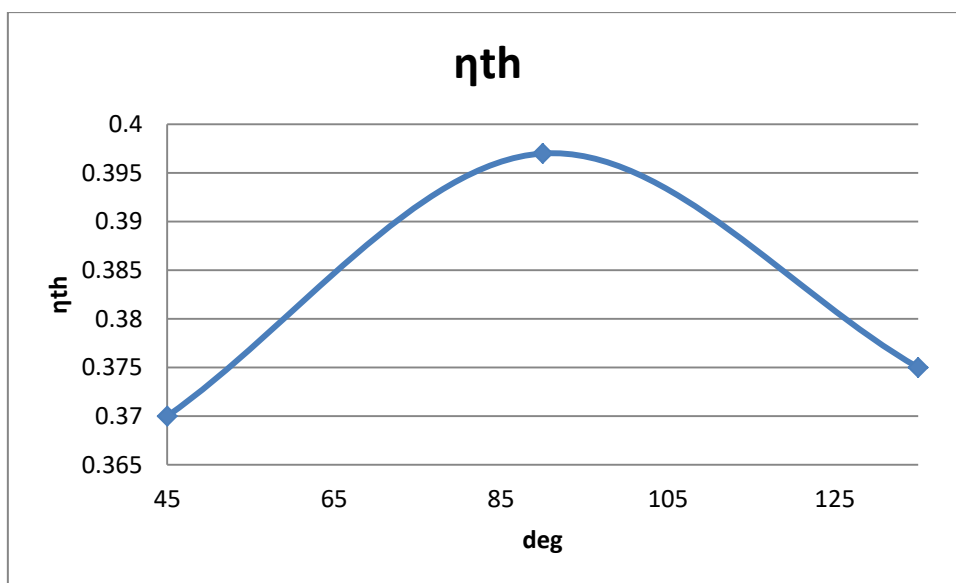
Εικόνα 6.5. General Settings Flow Simulation για γωνία πρόσπτωσης 45 deg



Εικόνα 6.6. Γωνία πρόσπτωσης 45 deg

$\theta_z$	45	90	135
Tr	31.65	32.518	31.82
$\eta_{th}$	0.37	0.397	0.375

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα Flow simulation για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης



Διάγραμμα 6.7. Θερμικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

## Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφέρουμε τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη εργασία.

Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, μελετήσαμε την θερμική συμπεριφορά ενός συλλέκτη κενού u-type με 12 κυλινδρικούς απορροφητές και 12 παραβολικά κάτοπτρα. Αυτό το πραγματοποιήσαμε με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου προσομοίωσης Flow Simulation του λογισμικού Solidworks. Με βάση έναν κατασκευαστικά πρότυπο συλλέκτη εμπορίου και αφότου σχεδιάστηκε ο αντίστοιχος συλλέκτης διερευνήσαμε την συμπεριφορά του θερμικού βαθμού απόδοσής του για διάφορες θερμοκρασίες.

Έτσι διαπιστώσαμε πως ο βαθμός απόδοσης του συστήματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού στον χαλκοσωλήνα, δεδομένου ότι η τελευταία προκαλεί έμμεσα αύξηση των θερμικών απωλειών και κατά συνέπεια μείωση της ωφέλιμης ισχύος. Σαν συμπέρασμα προκύπτει λοιπόν ότι ο συγκεκριμένος συλλέκτης αποδίδει καλύτερα για χαμηλές θερμοκρασίες πράγμα λογικό μιάς και είναι σχεδιασμένος για οικιακή χρήση.

Σε γενικές γραμμές ο βαθμός απόδοσης αν και είναι πολύ κοντά στις πληροφορίες που μας δίνει ο κατασκευαστής, δηλαδή κυμαίνεται πράγματι μεταξύ 0,3-0,5, δε μπορούμε να πούμε ότι η απόδοσή του φαίνεται να έχει τόση αξιοσημείωτη διαφορά, όπως αναφέρει και η βιβλιογραφία που παραθέσαμε, σε σχέση για παράδειγμα με έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη.

Στη συνέχεια προσπαθήσαμε να διερευνήσουμε αν όπως αναφέρει η βιβλιογραφία ο συγκεκριμένος συλλέκτης ενδείκνυται για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης λόγω των παραβολικών κατόπτρων του. Πράγματι, τρέχοντας το Flow simulation για γωνίες 90, 45 και 135 μοίρες παρατηρούμε ότι ο θερμικός βαθμός διαφοροποιείται ελάχιστα, πράγμα που σημαίνει ότι πρόκειται για έναν σχετικά το ίδιο αποδοτικό συλλέκτη καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας.