



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

Παπανικόλας Αλέξανδρος

Τίτλος : *Θερμική Μοντελοποίηση  
&  
Προσομοίωση Ηλιακού Συλλέκτη*

Επιβλέπων:

Αραμπατζής Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά, 2019





Technical University of Crete  
School of Production Engineering and Management

Diploma Thesis  
**Papanikolas Alexandros**

Title: *Thermal Modeling  
&  
Simulation of Solar Collector*

Supervisor:  
**Arampatzis George, Assistant Professor**

Chania, 2019



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί προϊόν της έντονης επιθυμίας μου για μάθηση, της προσπάθειας που κατέβαλλα και μιας ακαδημαϊκής πορείας γεμάτη προκλήσεις και υψηλούς στόχους. Στον αγώνα αυτό συνέβαλλαν άνθρωποι τους οποίους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ.

Θα ήθελα μέσα από την καρδιά μου, να ευχαριστήσω τα πρόσωπα που στάθηκαν δίπλα μου και μου παρείχαν στήριξη για να πετύχω το στόχο μου. Τους υπέροχους φίλους που στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια, Αγγελόπουλο Αλέξανδρο, Γκέλμπουρα Ευάγγελο, Κλαδά Ιάσωνα, Μάμη Κωσταντίνο, Στεφανάκη Κωσταντίνο, Χασάπη Γεώργιο, Κουμαλάτσου Χρυσανγή, Μήλα Ζωή και Μπαντή Αθηνά. Αλλά και την οικογένεια μου που στήριξε κάθε βήμα, τους γονείς μου και τον αδελφό μου Χρήστο, που βρίσκονταν πάντα ένα τηλέφωνο μακριά σε οποιαδήποτε δυσκολία.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ, οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Αραμπατζή, για την καθοδήγηση και την πολύτιμη συνδρομή του, στην εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στους καθηγητές κ. Σπύρο Παπαευθυμίου και κ. Μιχαήλ Κονσολάκη, οι οποίοι αποτέλεσαν μέλη της τριμελούς επιτροπής. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους καθηγητές μου στο Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη συνεισφορά τους στην επιτυχή ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

## Περίληψη

Οι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να δώσουν μία χρήσιμη και εύκολη λύση στις θερμικές απαιτήσεις των κτιρίων, όπως η θέρμανση οικιακού νερού. Εκτός από εφαρμογές στη θέρμανση, υπάρχει επίσης η ανάγκη να ικανοποιηθεί η αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας, λόγω του κλιματισμού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι συλλέκτες έρχονται να καλύψουν αυτή την ανάγκη, εκμεταλλευόμενοι την πράσινη ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η μαθηματική, υπολογιστική μοντελοποίηση και η προσομοίωση ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη. Κύριος στόχος είναι η παραμετρική ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς ενός συλλέκτη από τις παραμέτρους που τον επηρεάζουν, καθώς και η ανάλυση ρίσκου/αβεβαιότητας σχετικά με τις αβέβαιες μεταβλητές.

Ξεκινώντας με το 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, γίνεται εισαγωγή των δύο κατηγοριών ηλιακού συλλέκτη, των συγκεντρωτικών και των μη συγκεντρωτικών. Αναλυτικότερα, αναφέρονται οι πέντε κατηγορίες συγκεντρωτικών, με μια σύντομη περιγραφή τους και στη συνέχεια γίνεται εκτενέστερη αναφορά, στα δύο είδη μη συγκεντρωτικών, τους επίπεδους συλλέκτες και τους συλλέκτες κενού. Τέλος παρουσιάζονται τα είδη μοντέλων, επεξηγώντας την χρησιμότητα της κάθε μοντελοποίησης.

Στη συνέχεια, στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρατίθεται η μαθηματική μοντελοποίηση του ηλιακού συλλέκτη. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι μαθηματικές εξισώσεις και διαδικασίες εύρεσης, του συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών, των παραγόντων απόδοσης, θερμικής απολαβής και ροής, καθώς και τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάζεται και επεξηγείται ο υπολογιστικός κώδικας που προγραμματίστηκε στο πρόγραμμα Matlab. Ο κώδικας δέχεται σαν είσοδο δεδομένα (χαρακτηριστικά του συλλέκτη και καιρικές μεταβλητές) και επιστρέφει σαν αποτελέσματα, μεταβλητές που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο με πιο σημαντικό τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη. Επιπρόσθετα στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο έλεγχος εγκυρότητας του προγράμματος. Με απλά λόγια, για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του προγράμματος, χρησιμοποιούνται δεδομένα και αποτελέσματα έγκυρης πηγής, όπου τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα της διπλωματικής και τα αποτελέσματα που επιστρέφονται, συγκρίνονται με αυτά της πηγής.

Το προτελευταίο, 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, εστιάζει στην βελτιστοποίηση παραμέτρων του συλλέκτη. Αρχικά, παρουσιάζονται διαγράμματα συμπεριφοράς, των παραμέτρων που μας ενδιαφέρουν, σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης. Στη συνέχεια, διεξάγεται ανάλυση παλινδρόμησης, με σκοπό να παρουσιαστεί αριθμητικά, η σειρά κατάταξης των παραμέτρων, ως προς την μεταβολή που προκαλούν στον βαθμό απόδοσης. Στο τέλος του κεφαλαίου, γίνεται ανάλυση ρίσκου στις αβέβαιες καιρικές μεταβλητές, με εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo. Αυτό επιτυγχάνεται, εισάγοντας γεννήτριες τυχαίων μεταβλητών, που ακολουθούν κατανομές σχετικές με την κάθε μεταβλητή, και επαναλαμβάνοντας τον κώδικα πολλές φορές. Τα αποτελέσματα, συλλέγονται, εξετάζονται και ομαδοποιούνται σε συστάδες. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η μέση τιμή τους, η κατανομή τους, καθώς και η πιθανότητα της κάθε συστάδας. Τέλος παρουσιάζεται διάγραμμα σύγκλισης, για την εξακρίβωση της σύγκλισης της τιμής, ανάλογα με τον αριθμό των επαναλήψεων του κώδικα.

Εν κατακλείδι, στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις παραπάνω ενότητες, συνοψίζονται εδώ, οι σημαντικότερες παρατηρήσεις και συμπεράσματα, που εξήχθησαν από αυτές.

## Abstract

Solar panels, can provide a useful and easy solution, to the thermal requirements of a building, such as home water heating. In addition to heating applications, there is also a need, to satisfy the increasing energy consumption, due to air conditioning during the summer months. Collectors fulfill this need, taking advantage of the green energy of solar radiation.

The main focus of this thesis, is the mathematical and computational modeling and simulation of a flat plate solar collector, for the purpose of parametric analysis as well as risk analysis of uncertain weather variables.

Starting with Chapter 1, the two categories of solar collectors, are introduced (concentrated and non-concentrated solar collectors). The five categories of concentrated solar collectors are listed with a brief description of them, and then a more extensive reference is made to the two types of non-concentrated solar collectors, the flat plate collectors and the vacuum collectors. Finally, the different types of models are listed, illustrating the utility of each modeling.

In Chapter 2, the mathematical modeling of the solar collector is presented. More specifically, the mathematical equations and procedures of finding, the coefficient of total heat loss, the factors of efficiency, heat gain and flow, as well as the efficiency of the collector are analyzed here.

Chapter 3, presents and explains the computational code, programmed in the program Matlab. The program code, accepts data as input (collector characteristics and weather variables) and returns, the results mentioned in the previous chapter, most importantly the efficiency of the collector. In addition, to this chapter, the validation of the program is checked. In order to verify that the program is working properly, valid source data and results are used, where the data is entered into the thesis program and the returned results, are compared with the results from the source.



The penultimate Chapter 4, focuses on collector parameter optimization. Initially diagrams of behavior, of the parameters we are interested in, regarding the degree of performance are presented. A regression analysis, is then carried out, in order to give a numerical order, of the parameters causing change in the efficiency. At the end of the chapter, risk analysis is performed, on uncertain weather variables, using the Monte Carlo method. This is achieved, by introducing random variable generators, that follow distributions related to each variable, and repeating the code multiple times. The results are collected, examined and grouped into clusters, then their average value, distribution and probability of each cluster, are calculated. Finally, a diagram is presented, to determine the convergence of the value according to the number of code repeats.

In conclusion in Chapter 5, are summarized the most important observations and conclusions drawn from the results presented in the sections above.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	5
Περίληψη .....	6
Abstract.....	8
Λίστα Εικόνων.....	11
Λίστα Διαγραμμάτων.....	12
Λίστα Πινάκων .....	12
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	13
1.1 Είδη Συλλεκτών .....	13
1.2 Κατηγορίες Συγκεντρωτικών Συστημάτων.....	15
1.2.1 Παραβολικό Κάτοπτρο .....	16
1.2.2 Ηλιακός Πύργος.....	17
1.2.3 Γραμμικό Κάτοπτρο (Frenzel).....	18
1.2.4 Παραβολικός Δίσκος.....	20
1.3 Μη Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες.....	22
1.3.1 Επίπεδοι Συλλέκτες.....	22
1.3.2 Συλλέκτες με Σωλήνες Κενού.....	24
1.4 Μοντελοποίηση Ηλιακών Συλλεκτών .....	30
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> Μαθηματικό Μοντέλο Επίπεδου Συλλέκτη.....	36
2.1 Γενικά για το Μοντέλο .....	36
2.2 Συντελεστής Ολικών Θερμικών Απωλειών .....	38
2.3 Παράγοντας Απόδοσης Συλλέκτη.....	44
2.4 Παράγοντας Θερμικής Απολαβής, Εξίσωση Συλλέκτη και Παράγοντας Ροής.....	47
2.5 Βαθμός Απόδοσης.....	48
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> Υπολογιστική Υλοποίηση - Εφαρμογή .....	49
3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Εφαρμογής .....	49
3.2 Επεξήγηση Λειτουργίας Εφαρμογής .....	49
3.3 Έλεγχος Εγκυρότητας.....	55
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> Επίδραση Τεχνικών και Περιβαλλοντικών Παραμέτρων.....	57
4.1 Γενικά.....	57
4.2 Παραμετρική Ανάλυση.....	57
4.3 Ανάλυση Παλινδρόμησης.....	62
4.4 Ανάλυση Ρίσκου .....	66
4.4.1 Μέθοδος Monte Carlo.....	66
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες .....	70

Παράρτημα Α .....	72
Κυρίως Πρόγραμμα (main) .....	72
Συνάρτηση υπολογισμού του συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών ( <b>UL</b> ).....	73
Συνάρτηση υπολογισμού της μέσης θερμοκρασίας του ρευστού ( <b>T<sub>fm</sub></b> ) .....	74
Συνάρτηση ελέγχου μη αρνητικότητας .....	74
Συνάρτηση γραμμικής παρεμβολής .....	74
Παράρτημα Β .....	75
Πίνακας Θερμικών Ιδιοτήτων Αέρα.....	75
Πίνακας Θερμικών Ιδιοτήτων Νερού.....	76
Βιβλιογραφία.....	77

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1 Παραβολικό Κάτοπτρο .....	16
Εικόνα 1.2 Παραβολικό Κάτοπτρο .....	16
Εικόνα 1.3 Ηλιακός Πύργος.....	17
Εικόνα 1.4 Γραμμικό Κάτοπτρο Frenzel.....	18
Εικόνα 1.5 Γραμμικό Κάτοπτρο Frenzel.....	18
Εικόνα 1.6 Γραμμικό Κάτοπτρο Frenzel.....	19
Εικόνα 1.7 Παραβολικός Δίσκος.....	20
Εικόνα 1.8 Παραβολικός Δίσκος.....	21
Εικόνα 1.9 Επίπεδος Συλλέκτης.....	22
Εικόνα 1.10 Συλλέκτης Κενού .....	24
Εικόνα 1.11 Συλλέκτης Κενού .....	24
Εικόνα 1.12 Κυκλοφορία Ρευστού σε Συλλέκτη Κενού Τύπου U.....	26
Εικόνα 1.13 Εσωτερικό Συλλέκτη Κενού Τύπου U.....	26
Εικόνα 1.14 Συλλέκτης Κενού με Ομόκεντρους Σωλήνες.....	27
Εικόνα 1.15 Θερμικός Σωλήνας.....	28
Εικόνα 1.16 Τομή Θερμικού Σωλήνα .....	28
Εικόνα 1.17 α) Θερμικός Σωλήνας Υγρής Σύνδεσης β) Θερμικός Σωλήνας Ξηρής Σύνδεσης .....	29
Εικόνα 2.1 Γεωμετρική διάταξη συλλέκτη .....	36
Εικόνα 2.2 Θερμικές αντιστάσεις συλλέκτη .....	38
Εικόνα 2.2 Θερμικές αντιστάσεις σε τοίχωμα.....	39

## Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1 Οργανωτικό διάγραμμα .....	13
Διάγραμμα 1.2 Οργανωτικό διάγραμμα Συνέχεια_1 .....	14
Διάγραμμα 1.3 Οργανωτικό διάγραμμα Συνέχεια_2 .....	14
Διάγραμμα 1.4 Συστήματα και Μοντέλα.....	31
Διάγραμμα 1.5 Τύποι Μοντέλων .....	32
Διάγραμμα 4.1 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης.....	58
Διάγραμμα 4.2 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης.....	58
Διάγραμμα 4.3 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης.....	59
Διάγραμμα 4.4 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης.....	59
Διάγραμμα 4.5 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης.....	60
Διάγραμμα 4.6 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης.....	60
Διάγραμμα 4.7 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης.....	61
Διάγραμμα 4.8 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης.....	61
Διάγραμμα 4.9 Διάγραμμα Σύγκλισης.....	68
Διάγραμμα 4.10 Ιστόγραμμα Αποδόσεων .....	69

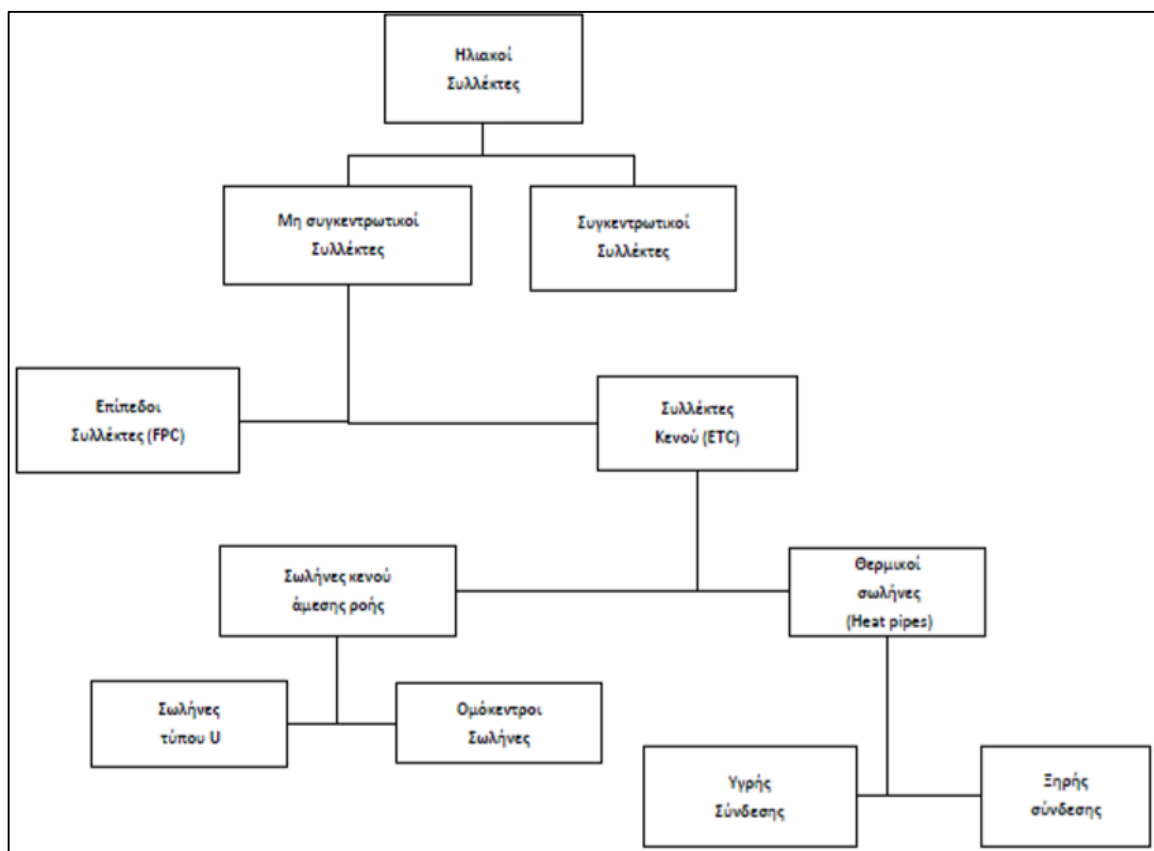
## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Απλά και Πολύπλοκα Μοντέλα .....	34
Πίνακας 3.1 Δεδομένα Πηγής [13] .....	55
Πίνακας 3.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων .....	56
Πίνακας 4.1 Σενάρια.....	63
Πίνακας 4.2 Γραμμική Παλινδρόμηση .....	63
Πίνακας 4.3 Σταθμισμένοι Συντελεστές.....	65
Πίνακας 5.1 Πιθανότητες Απόδοσης.....	70
Πίνακας Β.1 Θερμικές Ιδιότητες Αέρα από Πηγή [1] .....	75
Πίνακας Β.2 Θερμικές Ιδιότητες Νερού από Πηγή [10] .....	76

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 1.1 Είδη Συλλεκτών

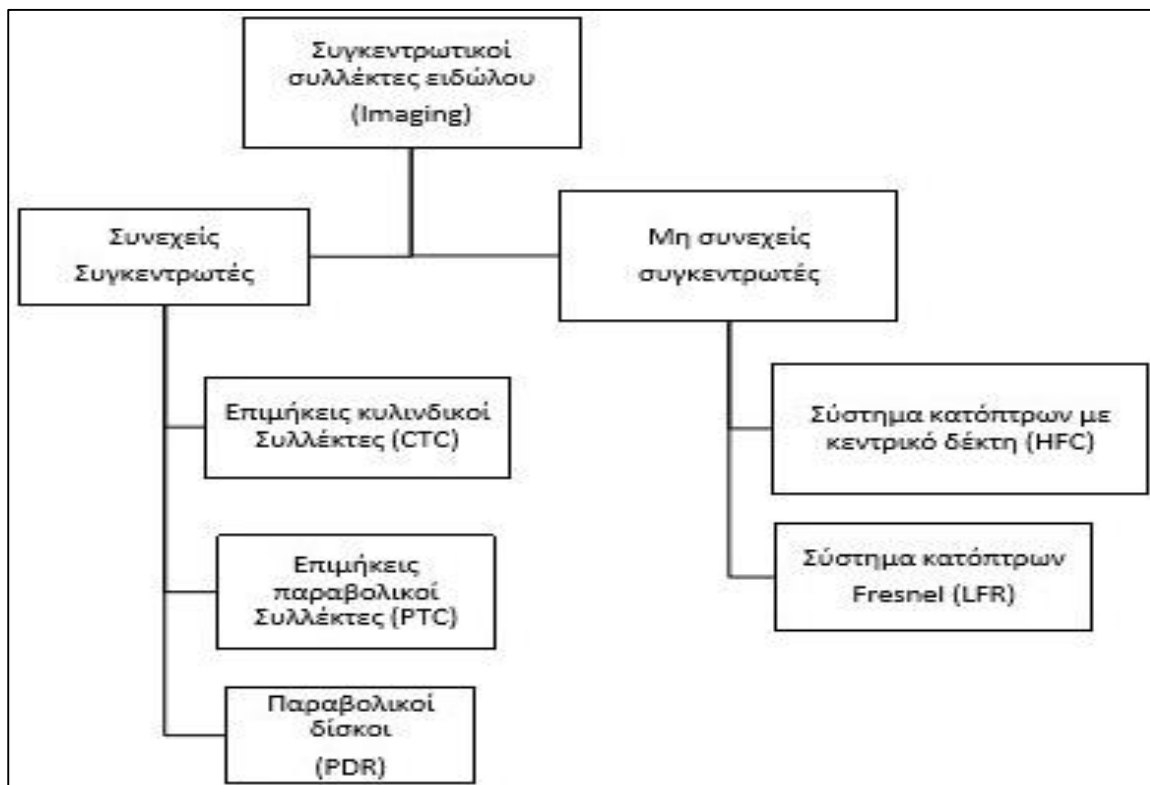
Ο ηλιακός συλλέκτης, αποτελεί έναν εναλλάκτη, ο οποίος μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Η ιδιαιτερότητά του σε σχέση με τους συμβατικούς εναλλάκτες, έγκειται στο ότι μεταφέρει ενέργεια με τη μορφής ακτινοβολίας, από μία πολύ μακρινή πηγή (ήλιο), σε ένα εργαζόμενο μέσο (νερό, αέρας, λάδι και άλλα). Αντίθετα, στους συμβατικούς εναλλάκτες, η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται, από ρευστό σε ρευστό, κυρίως με συναγωγή, ενώ η ακτινοβολία, δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Οι ηλιακοί συλλέκτες, διακρίνονται αρχικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες : τους μη συγκεντρωτικούς και τους συγκεντρωτικούς. Οι μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες, χρησιμοποιούν την ίδια επιφάνεια για τη συλλογή και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες, χρησιμοποιούν ανακλαστικές επιφάνειες ή διαθλαστικούς φακούς, με σκοπό τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, σε μικρότερη επιφάνεια απορρόφησης (δέκτης), αυξάνοντας έτσι τη ροή ενέργειας. Στα παρακάτω οργανωτικά διαγράμματα, παρουσιάζονται τα βασικά είδη ηλιακών συλλεκτών : [14],[9]



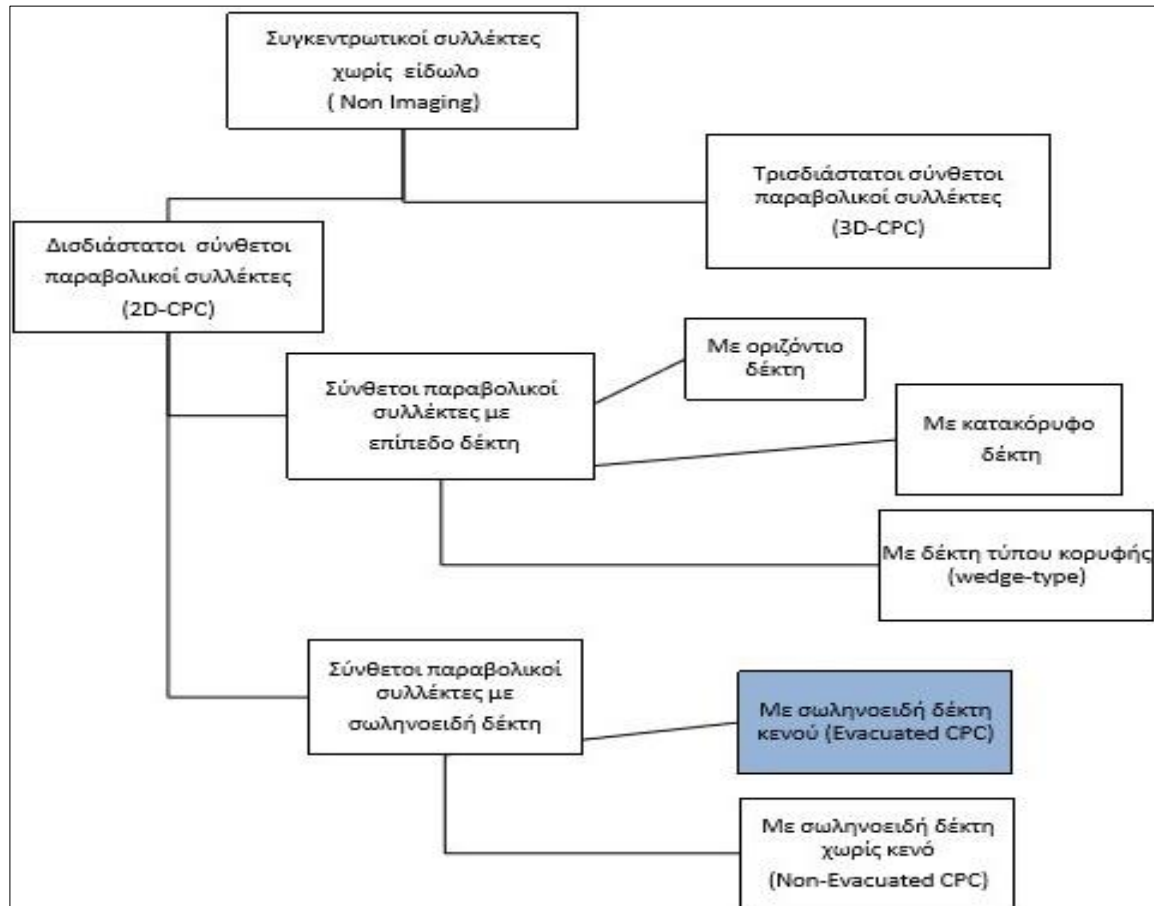
Διάγραμμα 1.1 Οργανωτικό διάγραμμα

-

Διάγραμμα 1.2 Οργανωτικό διάγραμμα Συνέχεια\_1



Διάγραμμα 1.3 Οργανωτικό διάγραμμα Συνέχεια\_2



## 1.2 Κατηγορίες Συγκεντρωτικών Συστημάτων

Οι πέντε βασικές κατηγορίες τεχνολογιών Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συλλεκτών, είναι οι εξής :

- Παραβολικό Κάτοπτρο (Parabolic Trough Collector – PTC)
- Σύνθετοι Παραβολικοί Συλλέκτες CPC (Compound Parabolic Concentrator )
- Ηλιακός Πύργος (Solar Power Tower – SPT ή Central Receiver System CRS)
- Γραμμικό Κάτοπτρο τύπου Fresnel (Linear Fresnel Reflector – LFR)
- Παραβολικό Πιάτο (Parabolic Dish – PD)

Οι παραπάνω συλλέκτες, χρησιμοποιούν δύο τύπους εστίασης, τη γραμμική και τη σημειακή, καθώς και δύο τύπους δεκτών, τους σταθερούς και τους κινητούς. Άλλα σημαντικά κατασκευαστικά και λειτουργικά σημεία, που διαφοροποιούν τις παραπάνω τεχνολογίες, είναι η θερμοκρασία λειτουργίας, η αποδιδόμενη ισχύς ή ο βαθμός απόδοσης, το λειτουργικό υγρό μεταφοράς της θερμότητας, αλλά και το μέγεθος, η πολυπλοκότητα και το κόστος του συστήματος.

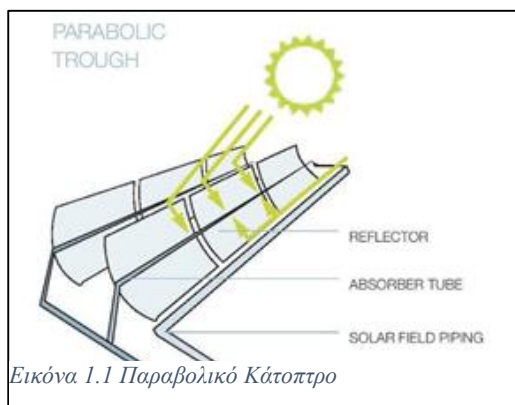
Τα υποσυστήματα ενός Ηλιοθερμικού Σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, περιλαμβάνουν:

- Τους συλλέκτες (Collectors)
- Το δέκτη (Receiver)
- Το μέσο μεταφοράς και αποθήκευσης της θερμότητας (Heat Transfer Fluid)
- Το σύστημα μετατροπής της ενέργειας (Power Conversion System)
- Την αποθήκη θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage)

Οι συλλέκτες, μαζί με το δέκτη και το μέσο μεταφοράς της θερμότητας, απαρτίζουν το ηλιακό πεδίο του σταθμού, όπου γίνεται η συγκέντρωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και η συλλογή της θερμικής ενέργειας. Το σύστημα μετατροπής ενέργειας είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος ισχύος, που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η αποθήκη ενέργειας αποθηκεύει τη θερμική ενέργεια για χρήση σε ώρες μη επαρκούς ή καθόλου ακτινοβολίας. [6],[12],[13],[14]

### 1.2.1 Παραβολικό Κάτοπτρο

Ένα από τα πιο απλά παραδείγματα εφαρμογής των συγκεντρωτικών συλλεκτών, είναι η τεχνολογία παραβολικού κατόπτρου. Το ηλιακό πεδίο των συλλεκτών, αποτελείται από σειρές με κοίλα ηλιακά στοιχεία, τα κάτοπτρα, με ενσωματωμένο σωλήνα δέκτη και γεννήτρια ατμού. Σε αυτού του τύπου συλλέκτες, η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιείται σε έναν υπαίθριο χώρο μεγάλης έκτασης, από το ηλιακό πεδίο, το οποίο αποτελείται από συστοιχίες κοίλων ηλιακών κατόπτρων, με μήκος έως και 100 μέτρα και καμπύλο άνοιγμα από πέντε έως έξι μέτρα. Οι παράλληλες σειρές των

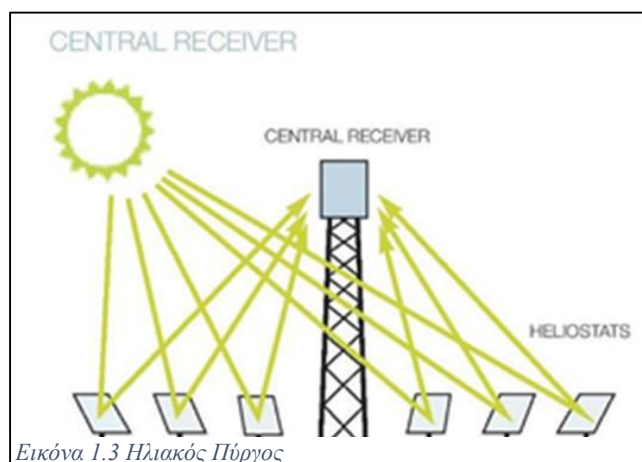




κατόπτρων, είναι διατεταγμένες με προσανατολισμό βορρά-νότου, όπου λειτουργεί σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, έτσι ώστε οι ακτίνες του να εστιάζονται συνεχώς στο γραμμικό δέκτη. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στα επιμήκη παραβολικά κάτοπτρα (συλλέκτες), συγκεντρώνεται σε ένα κεντρικό σωλήνα απορρόφησης (δέκτη θερμότητας), που βρίσκεται κατά μήκος της εστιακής γραμμής των κατόπτρων. Στους δέκτες, αλλά και σε ένα γενικευμένο δίκτυο σωληνώσεων, κυκλοφορεί ένα θερμοαγωγό υγρό, το οποίο απορροφά τη θερμότητα, τη μεταφέρει με τη βοήθεια αντλιών και την αποδίδει μέσα από εναλλάκτες θερμότητας στο θερμοδυναμικό κύκλο λειτουργίας, ενός τυπικού αμοστροβίλου. Στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων, ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνθετικό έλαιο, μείγμα νερού-ατμού, υγροποιημένο άλας, κ.α. Κατόπιν, ο υπέρθερμος ατμός θερμοκρασίας  $370-375\text{ }^{\circ}\text{C}$ , εκτονώνεται σε στροβιλογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια συμπυκνώνεται μέσω κατάλληλων συστημάτων ψύξης, οδηγούμενος εκ νέου στους εναλλάκτες (κύκλος Rankine). [12],[13],[18]

### 1.2.2 Ηλιακός Πύργος

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί τεχνολογίας Ηλιακού Πύργου, ή εναλλακτικά Κεντρικού Δέκτη λειτουργούν χρησιμοποιώντας, ένα μεγάλο αριθμό επίπεδων κατόπτρων, τοποθετημένων σε κυκλική διάταξη, που ονομάζονται ηλιοστάτες και αποτελούν το ηλιακό πεδίο του σταθμού. Οι ηλιοστάτες, η επιφάνεια των οποίων ενδέχεται να ξεπερνάει ακόμη και τα 100τ.μ., αντανακλούν την αντανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία σε έναν κεντρικό δέκτη, που είναι ενσωματωμένος στην κορυφή ενός πύργου. Κάθε ηλιοστάτης, είναι εφοδιασμένος με σύστημα δύο αξόνων, με σκοπό την παρακολούθηση της τροχιάς του ηλίου. Η ηλιακή ενέργεια, απορροφάται υπό μορφή θερμότητας από το θερμικό μέσο



μεταφοράς και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω μιας συμβατικής τουρμπίνας ατμού. Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, χρησιμοποιείται τηγμένο άλας, ενώ σε περίπτωση χρήσης νερού/ατμού δεν χρησιμοποιούνται εναλλάκτες, αλλά ο παραγόμενος ατμός από το συλλέκτη οδηγείται απ' ευθείας στο στρόβιλο.

Η τεχνολογία Ηλιακού Πύργου, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την αποδοτικότητα κατά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική. Αυτό συμβαίνει γιατί επιτυγχάνει εξαιρετικά υψηλές τιμές συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και συνεπώς υψηλές θερμοκρασίες, για το θερμοδυναμικό κύκλο. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας, προσεγγίζει τους  $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ενώ πειραματικά έχει παρατηρηθεί, ότι μπορεί να αγγίζει ακόμη και τους  $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Επιπρόσθετα, όλη η διαδικασία μετατροπής της ενέργειας λαμβάνει χώρα σε ένα συγκεκριμένο σταθερό σημείο, αποφεύγοντας έτσι τις περιττές μεταφορές της θερμότητας και μειώνοντας τις απώλειες. [7],[12],[13],[16]

### 1.2.3 Γραμμικό Κάτοπτρο (Frenzel)



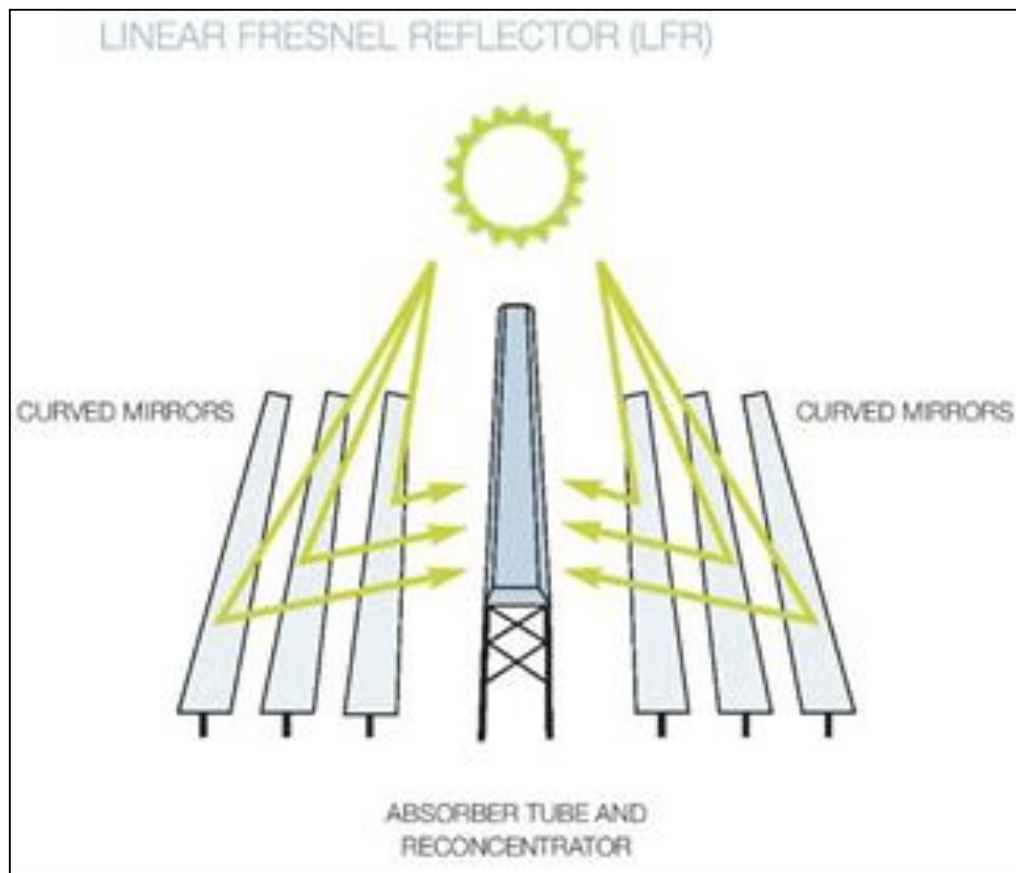
Εικόνα 1.4 Γραμμικό Κάτοπτρο Frenzel



Εικόνα 1.5 Γραμμικό Κάτοπτρο Frenzel

Τα συστήματα γραμμικού κατόπτρου τύπου Fresnel, συνιστούν την πιο καινοτόμα τεχνολογία και χαρακτηρίζονται από χαμηλή διεξόδωση και περιορισμένη εγκατεστημένη ισχύ παγκοσμίως, εν συγκρίσει με τις υπόλοιπες τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών. Πρόκειται για τεχνολογία ηλιοθερμικών συστημάτων, που εφαρμόζει γραμμική εστίαση. Τα συστήματα αυτού του τύπου, χρησιμοποιούν σειρές από μακρόστενα, ελαφρώς καμπύλα κάτοπτρα, τα οποία εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία, σε έναν ή περισσότερους γραμμικούς δέκτες, που είναι τοποθετημένοι πάνω από τους συλλέκτες. Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων, είναι η χρήση των αντανάκλαστικών κατόπτρων

τύπου Fresnel. Τα κάτοπτρα διαθέτουν ελεγχόμενο σύστημα ιχνηλάτησης ενός άξονα, για να παρακολουθούν την τροχιά του ηλίου, από την ανατολή ως τη δύση. Το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας που χρησιμοποιείται, συνήθως αποτελεί συνθετικό έλαιο, μείγμα νερού-ατμού, ή υγροποιημένο άλας το οποίο μετατρέπεται σε ατμό θερμοκρασίας  $280^{\circ}\text{C}$ . Ο ατμός που παράγεται στο δέκτη μέσω μιας τουρμπίνας, μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και εν συνεχεία σε ηλεκτρική, χάρη σε μια γεννήτρια που συνδέεται με τον άξονα του στροβίλου.



Εικόνα 1.6 Γραμμικό Κάτοπτρο Frenzel

Η τεχνολογία (LFR), έχει χαμηλότερη οπτική απόδοση και θερμική παραγωγή. Ο μικρός βαθμός απόδοσης ηλεκτρικής ενέργειας, προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, αντισταθμίζεται από τα χαμηλότερα κόστη κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης,

συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Μια μονάδα συστήματος, κοστίζει περίπου 3,1 εκατομμύρια € ανά εγκατεστημένο MW. Εν κατακλείδι, θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, λόγω της σχετικής απλότητας των μονάδων και του χαμηλού κόστους της. [7],[12],[13],[16]

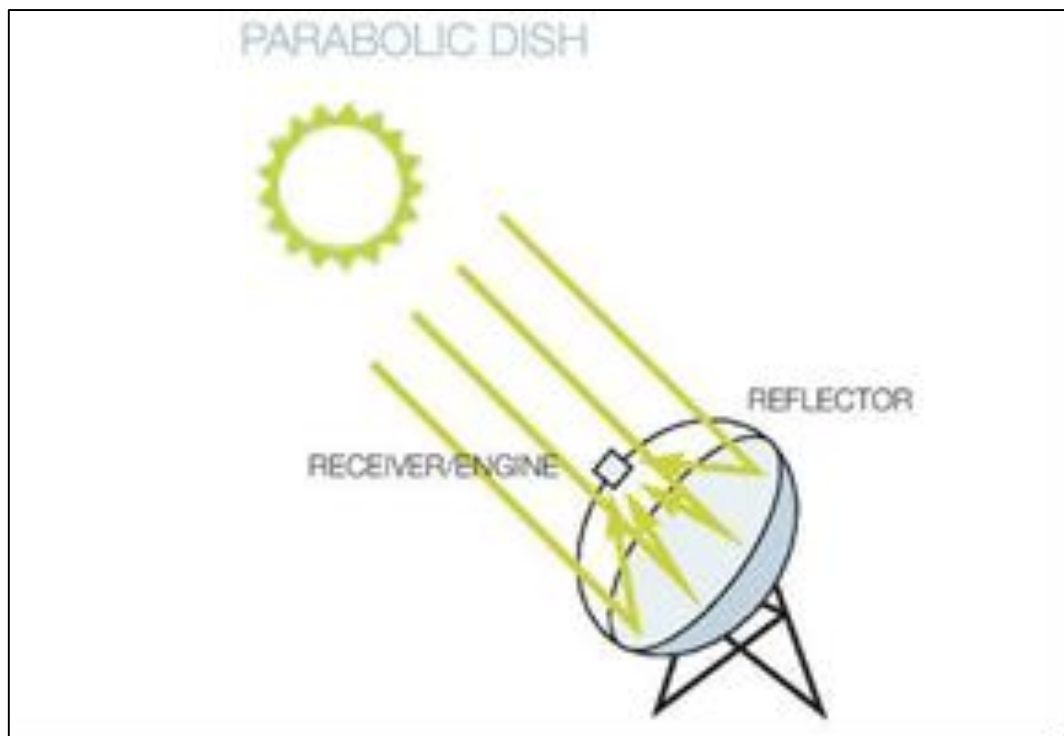


Εικόνα 1.7 Παραβολικός Δίσκος

#### 1.2.4 Παραβολικός Δίσκος

Οι σταθμοί που εφαρμόζουν συστήματα Παραβολικού Δίσκου, χρησιμοποιούν για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, ένα μεγάλο, αντανάκλαστικό, παραβολικό πιάτο. Ο ηλιακός αυτός δίσκος, έχει διάμετρο από 5 έως 15 μέτρα και αντανάκλα την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη, που βρίσκεται στο σημείο εστίασης του. Ο παραβολικός αυτός δίσκος, έχει ευχέρεια κίνησης δύο αξόνων. Ακολουθώντας έτσι την τροχιά του ηλίου, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, επιτυγχάνονται πολύ υψηλές συγκεντρώσεις και άρα μέγιστη

απόδοση. Η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία, απορροφάται από το δέκτη, προκειμένου να θερμάνει ένα ρευστό ή ένα αέριο, σε θερμοκρασία περίπου  $750^{\circ}\text{C}$ . Μια θερμική μηχανή, εκμεταλλεύεται αυτή τη θερμότητα για να παρέχει μηχανική κίνηση, σε μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Στην περίπτωση του παραβολικού δίσκου, η θερμική μηχανή είναι τύπου Stirling και έχει ιδιαίτερα υψηλή απόδοση. Μια τέτοια μηχανή, μπορεί να επιτύχει βαθμό μετατροπής ενέργειας, που θεωρητικά φτάνει το 40%, αλλά στην πράξη βρίσκεται κοντά στο 30%.



Εικόνα 1.8 Παραβολικός Δίσκος

Αυτό το είδος της τεχνολογίας, εμφανίζει μικρή εγκαταστημένη ισχύ ανά παραβολικό δίσκο και είναι ακριβότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα, λόγω της πολυπλοκότητας του. Ωστόσο, παραμένει ελκυστικό λόγω, της υψηλής απόδοσης και του σπονδυλωτού του σχεδιασμού, που προσδίδουν στα συγκεκριμένα συστήματα αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα. [7],[12],[13],[14],[16]



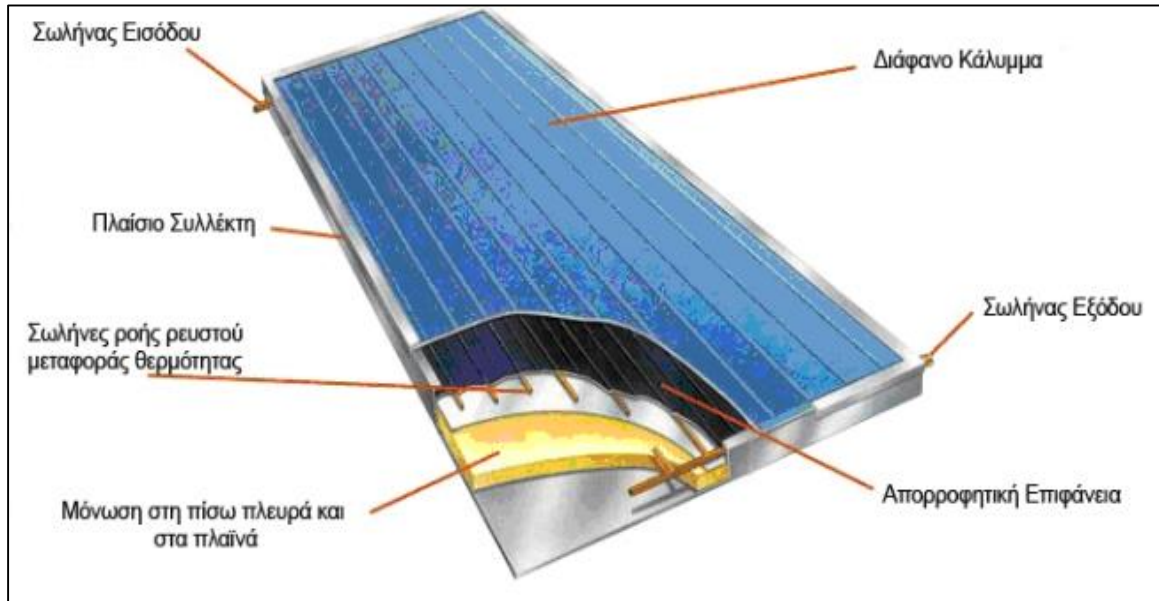
### 1.3 Μη Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται συλλέκτες που δεν συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα ειδώλιο, αλλά χρησιμοποιούν την επιφάνεια τους, για την συλλογή και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι δύο υποκατηγορίες αυτής της τεχνολογίας, είναι οι επίπεδοι συλλέκτες και οι συλλέκτες με σωλήνες κενού. [9],[13],[14],[18]

#### 1.3.1 Επίπεδοι Συλλέκτες

Ένας τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, αποτελείται τα εξής βασικά μέρη :

- Μια μαύρη απορροφητική πλάκα (απορροφητήρας), που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και ένα σύστημα κυκλοφορίας του εργαζόμενου μέσου. Το σύστημα κυκλοφορίας, αποτελείται κυρίως από σωλήνες αν πρόκειται για νερό και κανάλια αν πρόκειται για αέρα.
- Ένα ή περισσότερα διαφανή καλύμματα, που βρίσκονται πάνω από τον απορροφητήρα, ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον.
- Ένα πλαίσιο με μεταλλική βάση, μονωμένο πίσω και πλευρικά, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες.



Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, αξιοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και δεν απαιτούν μηχανισμούς παρακολούθησης του ηλίου, γι' αυτό και έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης. Τοποθετούνται με προσανατολισμό προς τον ισημερινό, με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ώστε να μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά την περίοδο που ενδιαφέρει η χρήση του συλλέκτη.

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται απόδοση ενέργειας, περίπου  $100^{\circ}\text{C}$  πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνήθως συναντώνται σε εφαρμογές όπως η θέρμανση ζεστού νερού, η θέρμανση κτιρίων, ενώ σπανιότερα ο κλιματισμός και η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση. Οι συμβατικοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, κατασκευάζονται για να είναι αποδοτικοί κυρίως σε ηλιόλουστα και θερμά κλίματα. [9],[13],[14],[18]

### 1.3.2 Συλλέκτες με Σωλήνες Κενού



Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού, αποτελούνται από συστοιχία παράλληλων σωλήνων κενού, τα άκρα των οποίων συνδέονται με έναν κεντρικό αγωγό (ή δύο αγωγούς σε ορισμένους τύπους), όπου γίνεται η συναλλαγή θερμότητας. Κάθε σωλήνας κενού, αποτελείται συνήθως από ένα γυάλινο αεροστεγή σωλήνα τύπου Dewar, που περιέχει ένα χάλκινο θερμαντικό αυλό,

Εικόνα 1.10 Συλλέκτης Κενού



Εικόνα 1.11 Συλλέκτης Κενού



στο εσωτερικό του οποίου βρίσκεται το εργαζόμενο μέσο μεταφοράς θερμότητας. Ο αεροστεγής γυάλινος σωλήνας, αποτελείται από δύο επιμέρους σωλήνες, κατασκευασμένους από διαφανές γυαλί υψηλής αντοχής, μεταξύ των οποίων επικρατούν συνθήκες κενού, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες συναγωγής. Ο εσωτερικός γυάλινος σωλήνας, καλύπτεται συνήθως με ειδική συλλεκτική επίστρωση, με υψηλό συντελεστή απορρόφησης και χαμηλό συντελεστή θερμικής αντανάκλασης. Η μία άκρη του αυλού βρίσκεται μέσα στο υαλοσωλήνα, ενώ το άλλο άκρο του καταλήγει στον κύλινδρο αποθήκευσης ζεστού νερού, όπου γίνεται η συναλλαγή θερμότητας.

Αυτό το είδος συλλέκτη, λειτουργεί σε εύρος θερμοκρασιών  $77 - 177^{\circ}\text{C}$  και χρησιμοποιείται για θέρμανση/ψύξη βιομηχανικών χώρων, ή ακόμα και κατοικιών, σε περιοχές που επικρατούν νεφοσκεπείς συνθήκες. Ωστόσο, το κόστος τους είναι σχεδόν διπλάσιο από αυτό των συμβατικών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.

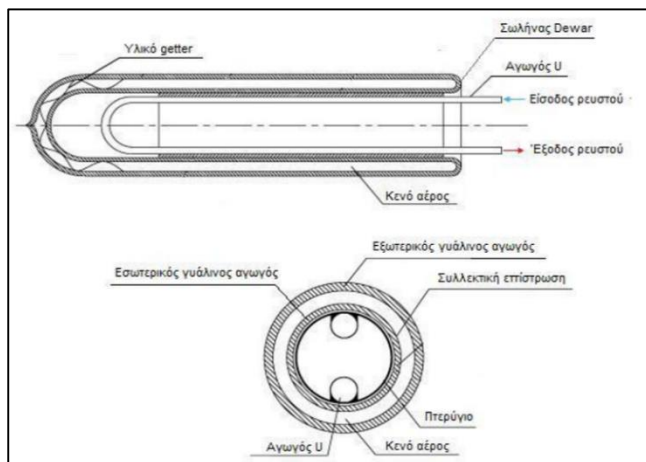
Για τη διατήρηση του κενού αέρος μεταξύ των δύο γυάλινων σωλήνων, χρησιμοποιείται συχνά υλικό απορρόφησης αερίων σε κενό (getter) από βάριο. Το στρώμα βαρίου, απορροφά ενεργά κάθε  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  που εκλύεται στο σωλήνα κατά την αποθήκευση και λειτουργία, βοηθώντας έτσι στη διατήρηση του κενού. Ακόμα, το στρώμα βαρίου παρέχει μια καθαρή ένδειξη της κατάστασης του κενού, καθώς η εισχώρηση αέρα αλλάζει το χρώμα του, από λευκό σε ασημί. Η χαμηλή υποπίεση στο γυάλινο αγωγό, ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες συναγωγής και προστατεύει την απορροφητική πλάκα και το θερμοσωλήνα από τις εξωτερικές συνθήκες. Οι αποστάσεις μεταξύ των γυάλινων καλυμμάτων, επιλέγονται με βάση την αποφυγή σκίασης.

Με βάση τον τρόπο σύνδεσης των θερμαντικών αυλών με τον κεντρικό αγωγό, αλλά και τον τρόπο συναλλαγής θερμότητας μεταξύ αυτών, οι συλλέκτες κενού μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

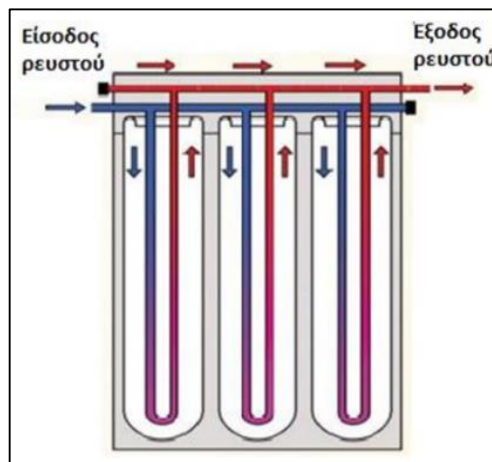
- Συλλέκτες άμεσης ροής
- Συλλέκτες θερμικών σωλήνων, οι οποίοι με τη σειρά τους διακρίνονται, σε :
  - συλλέκτες ξηρής σύνδεσης
  - υγρής σύνδεσης.

### Σωλήνες κενού άμεσης ροής :

Στους σωλήνες άμεσης ροής, το εργαζόμενο μέσο είναι συνήθως νερό και ο χάλκινος σωλήνας που περιέχεται σε κάθε σωλήνα κενού έχει σχήμα U, με τα άκρα του συγκολλημένα πάνω σε δύο διαφορετικούς αγωγούς (κρύου και ζεστού νερού αντίστοιχα). Το ψυχρό ρεύμα που εισέρχεται στον έναν αγωγό, περνάει μέσα από κάθε χάλκινο σωλήνα U, θερμαίνεται και εξέρχεται από την άλλη άκρη του, στον αγωγό του θερμού ρεύματος.



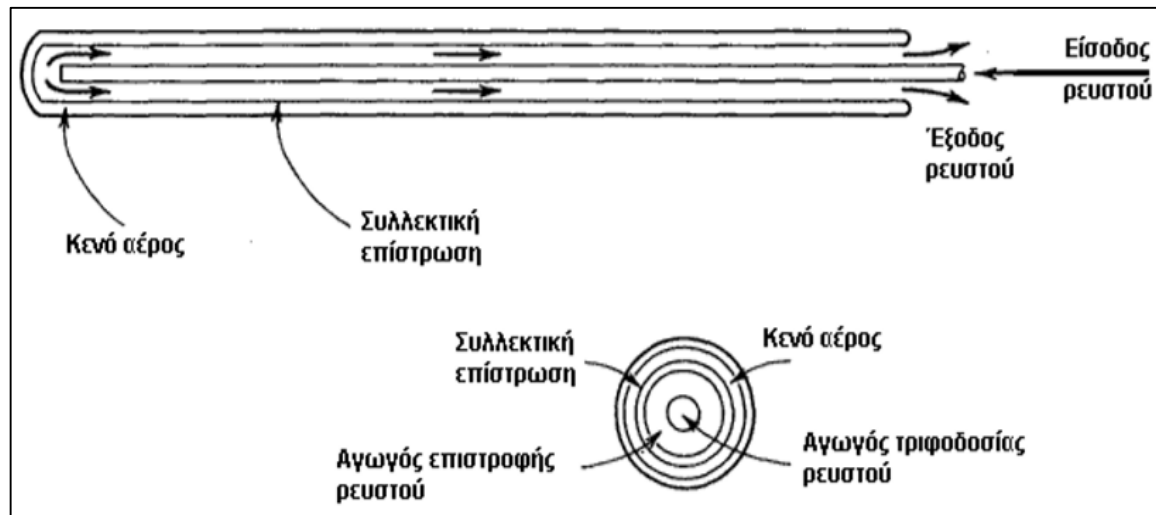
Εικόνα 1.12 Εσωτερικό Συλλέκτη Κενού Τύπου U



Εικόνα 1.13 Κυκλοφορία Ρευστού σε Συλλέκτη Κενού Τύπου U

Συνήθως, πάνω στο χάλκινο αγωγό, υπάρχει προσκολλημένο ένα επίπεδο ή κοίλο αλουμινένιο πτερύγιο. Το πτερύγιο αυτό είναι επικαλυμμένο με ειδική επίστρωση, έτσι ώστε να απορροφάται όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Συχνά, επιτρέπεται και η περιστροφή κάθε σωλήνα, έτσι ώστε το απορροφητικό πτερύγιο να βρίσκεται στην επιθυμητή κλίση, ακόμα και όταν ο συλλέκτης έχει τοποθετηθεί οριζόντια.

Στην κατηγορία των συλλεκτών κενού άμεσης ροής, αντί για αγωγούς σχήματος U, χρησιμοποιούνται εναλλακτικά ομόκεντροι σωλήνες. Αν και ο σχεδιασμός αυτός είναι αποτελεσματικός, δεν είναι πάντα αξιόπιστος. Αυτό συμβαίνει διότι η κατανομή θερμοκρασιών μεταξύ του γυάλινου και του μεταλλικού σωλήνα διαφέρουν, συνέπεια του οποίου είναι, το κενό μεταξύ τους να εξασθενεί και να αστοχεί, καθιστώντας ανύπαρκτη τη λειτουργία εν κενό και συμβάλλοντας στην κατακόρυφη ελάττωση του βαθμού απόδοσής του.



Εικόνα 1.14 Συλλέκτης Κενού με Ομόκεντρους Σωλήνες

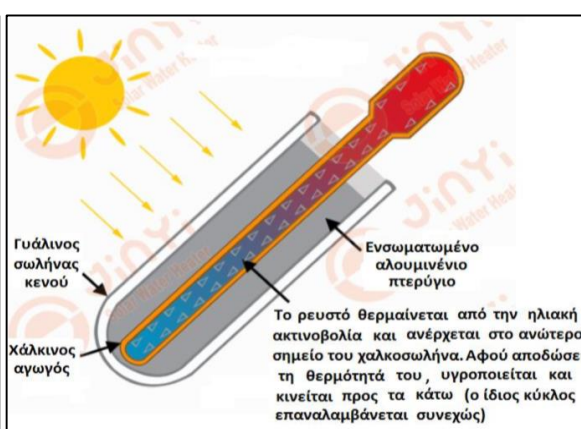
### Συλλέκτες θερμικών σωλήνων :

Στους ηλιακούς συλλέκτες αυτού του τύπου, καθένας από τους σωλήνες περιέχει κλειστό, χάλκινο απορροφητικό σωλήνα, επικαλυμμένο με επιλεκτική βαφή, μέσα στον οποίο περιέχεται συνήθως ποσότητα ανόργανου μίγματος με χαμηλό σημείο ζέσεως (συνήθως γλυκόλη ή ακετόλη), που έχει τη δυνατότητα να εξατμίζεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες 25-30°C. Ορισμένες φορές χρησιμοποιείται και νερό, ως εργαζόμενο μέσο. Ωστόσο, η γλυκόλη όπως και η ακετόνη, δίνουν στο σύστημα τη δυνατότητα να λειτουργεί σε ψυχρά κλίματα, χωρίς κίνδυνο φραξίματος ή σπασίματος, από τη δημιουργία πάγου.

Ο χάλκινος θερμαντικός αυλός, ξεκινά μέσα από τον αεροστεγή σωλήνα, καταλήγοντας στον συμπυκνωτή, ο οποίος είναι σφραγισμένος, μέσα σε ένα μονωμένο αυλό. Η ηλιακή ακτινοβολία, εισέρχεται διαμέσου του εξωτερικού γυάλινου αγωγού, προσπίπτει στον απορροφητικό σωλήνα και θερμαίνει το ρευστό, το οποίο φτάνει σε κατάσταση βρασμού και μετατρέπεται σε ατμό. Ο ατμός, ανεβαίνει στο υψηλότερο σημείο του χαλκοσωλήνα (συμπυκνωτής), όπου έρχεται σε επαφή με το ψυχρό νερό του εναλλάκτη (που βρίσκεται στο πάνω μέρος του συλλέκτη), αποδίδει την ενέργειά του, ψύχεται, υγροποιείται και κινείται πάλι προς τα κάτω. Όσο οι θερμικοί σωλήνες, συνεχίζουν να δέχονται ηλιακή ακτινοβολία, το φαινόμενο αυτό επαναλαμβάνεται συνεχόμενα.



Εικόνα 1.15 Θερμικός Σωλήνας



Εικόνα 1.16 Τομή Θερμικού Σωλήνα

Οι συλλέκτες κενού θερμικών σωλήνων, πλεονεκτούν έναντι των άμεσης ροής, κυρίως επειδή ο κάθε σωλήνας κενού, είναι ένα κλειστό ανεξάρτητο κύκλωμα. Αυτό σημαίνει, ότι σε περίπτωση βλάβης ενός σωλήνα, υπάρχει δυνατότητα εύκολης αντικατάστασής του.

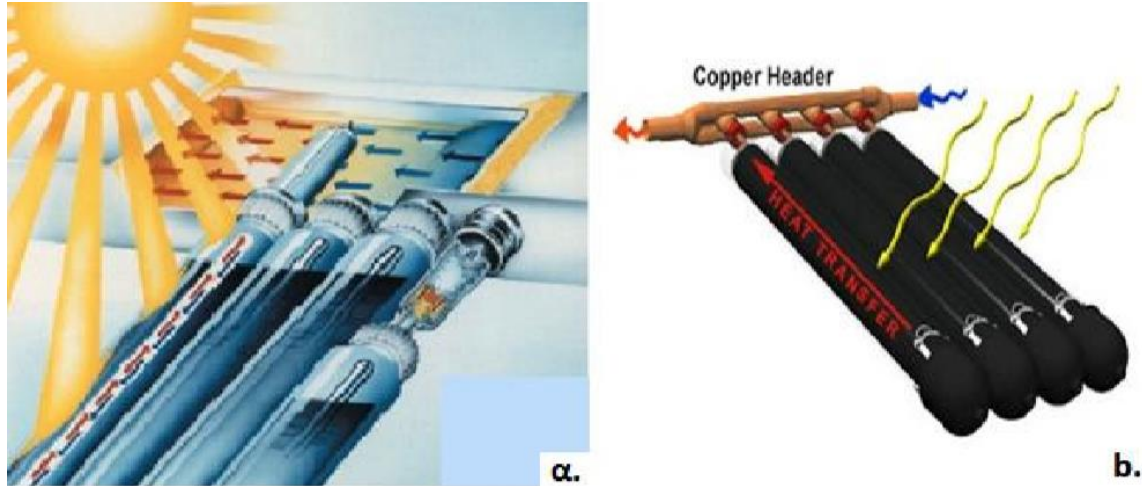
Με κριτήριο τη σύνδεση των θερμικών σωλήνων με τον εναλλάκτη, διακρίνουμε τους συλλέκτες θερμικών σωλήνων σε :

### Υγρής σύνδεσης:

Σε αυτόν τον τύπο, οι συμπυκνωτές των θερμικών σωλήνων, βρίσκονται μέσα στον αγωγό που κυκλοφορεί το προς θέρμανση νερό. Αυτό σημαίνει ότι αν κάποιος σωλήνας κενού πρέπει να αντικατασταθεί απαιτείται άδειασμα του κυκλώματος του εναλλάκτη.

### Ξηρής σύνδεσης:

Σε αυτόν τον τύπο, οι συμπυκνωτές των θερμικών σωλήνων, βρίσκονται εξωτερικά σε επαφή με τον αγωγό του προς θέρμανση νερού. Επομένως, αν κάποιος σωλήνας κενού πρέπει να αντικατασταθεί, δεν απαιτείται άδειασμα του κυκλώματος του εναλλάκτη.



Εικόνα 1.17 α) Θερμικός Σωλήνας Υγρής Σύνδεσης β) Θερμικός Σωλήνας Ξηρής Σύνδεσης

Οι συλλέκτες κενού, που συχνά συνδυάζονται με ανακλαστικές επιφάνειες συγκέντρωσης του ηλίου, αποτελούν μια ιδιαίτερα ανταγωνιστική τεχνολογία έναντι των κλασικών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών. Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους συνοψίζονται παρακάτω :

- Οι συνθήκες κενού στο εξωτερικό τμήμα κάθε σωλήνα, ελαχιστοποιούν τις θερμικές απώλειες συναγωγής και προστατεύουν την απορροφητική πλάκα και το θερμοσωλήνα, από τις εξωτερικές συνθήκες υγρασίας, που προκαλούν αλλοίωση των εσωτερικών υλικών του συλλέκτη.
- Οι σωλήνες κενού είναι κυλινδρικοί, με αποτέλεσμα οι ακτίνες του ηλίου να πέφτουν κάθετα καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας και όχι μόνο το μεσημέρι, όπως συμβαίνει στους επίπεδους συμβατικούς συλλέκτες.
- Η κλίση των σωλήνων κενού, μπορεί να είναι από 20 έως 80 μοίρες, λύνοντας έτσι προβλήματα αισθητικής ή δυσκολίας τοποθέτησης, όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς συλλέκτες.
- Λόγω του κλειστού κυκλώματος και της μικρής ποσότητας νερού, που περνάει μέσα από τον εναλλάκτη, μειώνεται η ισχύς των κυκλοφορητών, με αποτέλεσμα χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.
- Κύριο μειονέκτημα τους, είναι ότι παρουσιάζουν κατασκευαστικές δυσκολίες λόγω της υποπίεση, που πρέπει να δημιουργηθεί και της συνεργασίας που πρέπει να

επιτευχθεί, μεταξύ διαφορετικών υλικών στη θέρμανση και ψύξη. Αυτό, εξηγεί και το υψηλότερο κόστος κατασκευής τους.

Ωστόσο, οι συλλέκτες κενού βρίσκουν σημαντική εφαρμογή σε βόρειες χώρες με μικρή ηλιοφάνεια και χαμηλές θερμοκρασίες, καθώς η αποδοτικότητα των επίπεδων συλλεκτών μειώνεται ραγδαία, όταν δεν επικρατούν ιδανικές συνθήκες. Διεθνείς μετρήσεις ενεργειακής απόδοσης του συλλέκτη, δείχνουν ότι αποδίδει περίπου 35% περισσότερη ενέργεια από καλού επιπέδου συμβατικούς συλλέκτες. [9],[13],[14],[18]

#### **1.4 Μοντελοποίηση Ηλιακών Συλλεκτών**

Μοντέλο, είναι η αναπαράσταση ενός συστήματος, με σκοπό τη διερεύνηση και κατανόηση της λειτουργίας και της τρέχουσας συμπεριφοράς του, τη σύγκριση εναλλακτικών σχημάτων λειτουργίας και την εκτίμηση και πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του, κάτω από διαφορετικές συνθήκες. [5]

Μαθηματική μοντελοποίηση (Mathematical Modeling), είναι η ανάπτυξη μαθηματικής περιγραφής ενός φαινομένου, ενός συστήματος ή μιας διαδικασίας και η μελέτη τους με

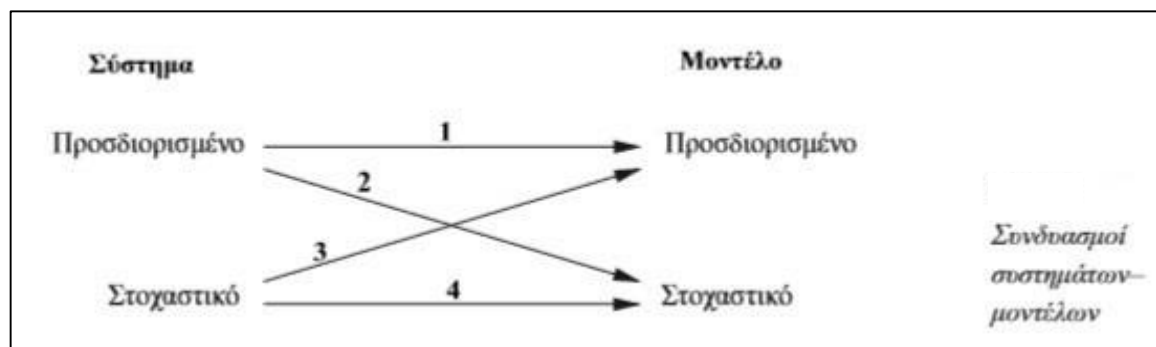


χρήση μαθηματικών εργαλείων. Τα εργαλεία αυτά μπορεί να είναι ένα σύστημα εξισώσεων, ένα σύνολο αριθμών, ένας αλγόριθμος, μια στοχαστική διαδικασία κλπ.

Με άλλα λόγια θα λέγαμε ότι, Μαθηματική Μοντελοποίηση, είναι η διαδικασία ανάπτυξης και μελέτης ενός Μαθηματικού Μοντέλου.

Όπου, Μαθηματικό Μοντέλο (Mathematical Model), είναι η περιγραφή ενός φαινομένου, ενός συστήματος ή μιας διαδικασίας χρησιμοποιώντας μαθηματικές έννοιες και σύμβολα. [11]

Προσδιορισμένα συστήματα, ονομάζονται συστήματα των οποίων οι δραστηριότητες είναι κυρίως προσδιορισμένες, δηλαδή μη εξαρτώμενες από τυχαίους παράγοντες. Αντίστοιχα, στοχαστικά ονομάζονται τα συστήματα των οποίων οι δραστηριότητες είναι κυρίως στοχαστικές. Με τον ίδιο τρόπο διακρίνονται και τα μοντέλα σε προσδιορισμένα και στοχαστικά σε αναλογία, όμως, με τις δραστηριότητες που περιλαμβάνουν και όχι με το σύστημα το οποίο αντιπροσωπεύουν.



Διάγραμμα 1.4 Συστήματα και Μοντέλα

Μπορεί, επομένως, να υπάρξει οποιοσδήποτε συνδυασμός συστήματος μοντέλου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.4.

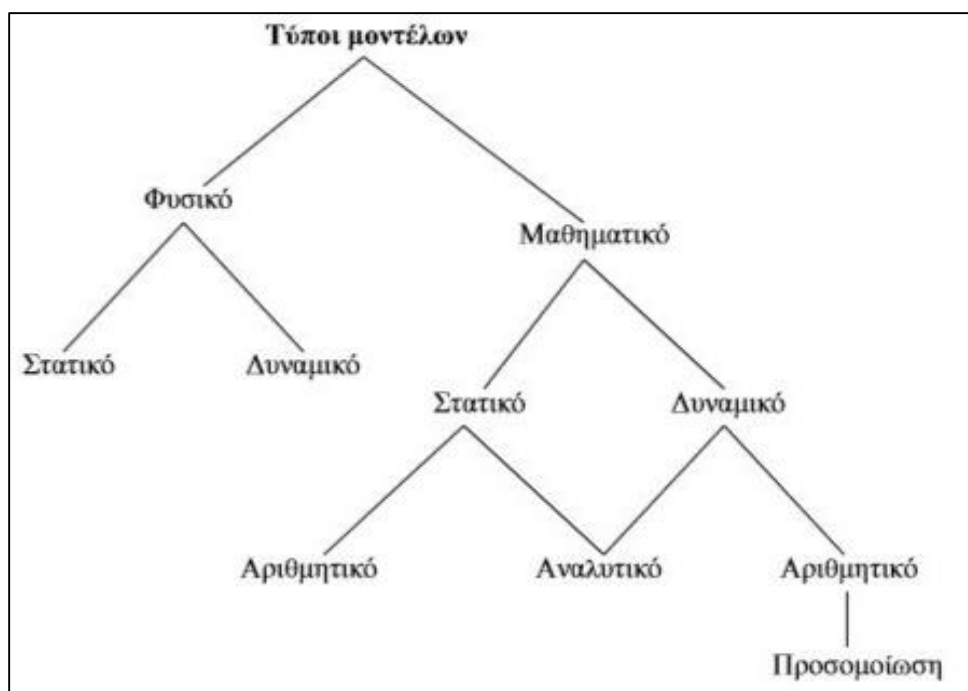
1. Προσδιορισμένο μοντέλο, για προσδιορισμένο σύστημα. Παράδειγμα αποτελεί, ο προσδιορισμός της κίνησης των πλανητών με μαθηματικές εξισώσεις. Το σύστημα (πλανητικό σύστημα), είναι προσδιορισμένο, γιατί οι κινήσεις των πλανητών δεν εξαρτώνται από τυχαίους παράγοντες. Το σύνολο των μαθηματικών εξισώσεων κίνησης, που αποτελεί το μοντέλο, είναι επίσης προσδιορισμένο, γιατί είναι δυνατό να λυθεί αναλυτικά και να προβλέψει, τη συμπεριφορά του συστήματος.

2. Στοχαστικό μοντέλο, για προσδιορισμένο σύστημα. Παράδειγμα αποτελεί, ο υπολογισμός ενός ορισμένου ολοκληρώματος με τη μέθοδο Μόντε Κάρλο. Το ορισμένο ολοκλήρωμα (σύστημα) είναι προσδιορισμένο γιατί έχει συγκεκριμένη τιμή. Η μέθοδος Μόντε Κάρλο (επίλυση μοντέλου) αποτελεί μια στοχαστική μέθοδο που βασίζεται στην παραγωγή και χρήση τυχαίων αριθμών.

3. Προσδιορισμένο μοντέλο, για στοχαστικό σύστημα. Παράδειγμα αποτελεί, η παραγωγή τυχαίων αριθμών με υπολογιστή. Το σύνολο των τυχαίων αριθμών (σύστημα) είναι στοχαστικό εξ ορισμού. Η μέθοδος παραγωγής των αριθμών με υπολογιστή (μοντέλο) είναι προσδιορισμένη, βασιζόμενη συνήθως σε μια συγκεκριμένη επαναληπτική διαδικασία.

4. Στοχαστικό μοντέλο, για στοχαστικό σύστημα. Στην περίπτωση κατά την οποία, τόσο το σύστημα, όσο και το μοντέλο του συστήματος, είναι στοχαστικά, χρησιμοποιείται η προσομοίωση. Παράδειγμα αποτελεί, το σύστημα ενός συνεργείου αυτοκινήτων και η μελέτη του συστήματος με την προσομοίωση του μοντέλου του.

Η ταξινόμηση των μοντέλων μπορεί να γίνει με βάση διάφορα κριτήρια. Οι βασικοί τύποι μοντέλων δίνονται στο διάγραμμα 1.5.



Διάγραμμα 1.5 Τύποι Μοντέλων



Το φυσικό μοντέλο, που ονομάζεται επίσης και παράθυρο εικονικό, είναι μια φυσική αναπαράσταση του αντικειμένου, που αντιπροσωπεύει και μοιάζει με αυτό. Μπορεί, να είναι σε κλίμακα μικρότερη του αντικειμένου, όπως το μοντέλο ενός αεροπλάνου, ή μεγαλύτερη του αντικειμένου, όπως το μοντέλο ενός ατόμου. Τα φυσικά μοντέλα, διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά. Το ξύλινο μοντέλο, ενός αυτοκινήτου είναι στατικό μοντέλο, γιατί απλώς αναπαριστά το σχήμα του πραγματικού αντικειμένου. Αντίθετα, το μοντέλο ενός αυτοκινήτου σε μικρογραφία, που περιλαμβάνει κινητήρα βενζίνης, αναρτήσεις, φρένα, κ.λπ., σε μικρογραφία, είναι ένα δυναμικό μοντέλο, γιατί εκτός από την αναπαράσταση του αντικειμένου, απεικονίζει και αντίγραφο της λειτουργίας του αυτοκινήτου.

Ο δεύτερος βασικός τύπος μοντέλου, είναι το μαθηματικό μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται μαθηματικές έννοιες για να περιγράψουν είτε τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος (σχήμα, μέγεθος, χρώμα, κ.λπ.), είτε τις λειτουργίες του (κίνηση, αλλαγή σχήματος, αλλαγές της κατάστασης, κ.λπ.), είτε ακόμη τις σχέσεις ανάμεσα στα στοιχεία του συστήματος.

Τα μαθηματικά μοντέλα, διακρίνονται επίσης σε στατικά και δυναμικά. Παράδειγμα στατικού μοντέλου αποτελεί, η ισορροπία προσφοράς/ζήτησης σε ένα οικονομικό σύστημα. Παράδειγμα δυναμικού μοντέλου, αποτελούν οι μαθηματικές εξισώσεις, που περιγράφουν την κίνηση ενός συστήματος ταλάντωσης με απόσβεση.

Τέλος, τα μαθηματικά μοντέλα, μπορούν να διακριθούν σε αναλυτικά και αριθμητικά. Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει ένα πλήρες σύνολο εξισώσεων που περιγράφει το μοντέλο. Αντίθετα, όταν οι μαθηματικές εξισώσεις, περιγραφής του συστήματος είναι αδύνατο να ευρεθούν, ή δεν υπάρχουν, το σύστημα περιγράφεται από αριθμητικά δεδομένα, που έχουν συλλεχθεί με εμπειρικό τρόπο. Το σύνολο των δεδομένων και οι συσχετίσεις τους, αποτελούν το αριθμητικό μοντέλο του συστήματος. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 1.5, η προσομοίωση χρησιμοποιείται κυρίως για τη μελέτη αριθμητικών, δυναμικών, μαθηματικών μοντέλων.

Τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, καθορίζουν και την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Τα απλά μοντέλα, περιγράφονται συνήθως, από μαθηματικές εξισώσεις και είναι δυνατόν, να επιλυθούν αναλυτικά. Αντίθετα, τα πολύπλοκα μοντέλα, δεν είναι συνήθως δυνατό να περιγράφουν με μαθηματικές εξισώσεις και έτσι μελετώνται με προσομοίωση. Στον πίνακα 1.1, δίνονται σε αντιδιαστολή τα χαρακτηριστικά, των απλών και πολύπλοκων μοντέλων.

Μοντέλα	
Απλά	Πολύπλοκα
Στατικά	Δυναμικά
Γραμμικά	Μη γραμμικά
Προσδιοριστικά	Στοχαστικά
Συνεχή	Διακριτά
Σταθερής κατάστασης	Μεταβατικά
Περίληπτικά	Λεπτομερή

Πίνακας 1.1 Απλά και Πολύπλοκα Μοντέλα

Τα χαρακτηριστικά, που δίνονται στον πίνακα αυτό, είναι ενδεικτικά. Δεν προσδιορίζουν δηλαδή κατ' αποκλειστικότητα τα μοντέλα. Για παράδειγμα, ένα γραμμικό μοντέλο δεν είναι απαραίτητα απλό, όπως και ένα στοχαστικό μοντέλο δεν είναι απαραίτητα πολύπλοκο. Ο πίνακας αυτός δίνει, τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά, ενός απλού ή ενός πολύπλοκου μοντέλου.

Έτσι, αν ένα μοντέλο είναι στοχαστικό, μη γραμμικό, διακριτό και δυναμικό, αναμένεται να είναι πολύπλοκο. Αντιστοίχως, ένα απλό μοντέλο, αναμένεται να είναι στις περισσότερες περιπτώσεις στατικό αντί δυναμικού, γραμμικό αντί μη-γραμμικού, κ.ο.κ.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία μοντέλων, αποτελούν τα μηχανολογικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και το σχεδιασμό μηχανολογικών συστημάτων. Τα μοντέλα αυτά, αποτελούνται από τρεις συγκεκριμένες ομάδες στοιχείων:

1. Παραμέτρους και μεταβλητές. Παράμετροι, είναι οι γνωστές οντότητες του συστήματος, ή χαρακτηριστικά οντοτήτων με προκαθορισμένες τιμές. Μεταβλητές, είναι οι άγνωστες οντότητες του συστήματος, ή τα χαρακτηριστικά οντοτήτων με άγνωστες τιμές.
2. Συσχετίσεις και περιοριστικές συνθήκες. Οι συσχετίσεις, περιγράφουν τον τρόπο αλληλεπίδρασης των οντοτήτων, ή τις μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν, μία μεταβλητή, ή παράμετρο με μία άλλη μεταβλητή, ή παράμετρο. Οι περιοριστικές συνθήκες,

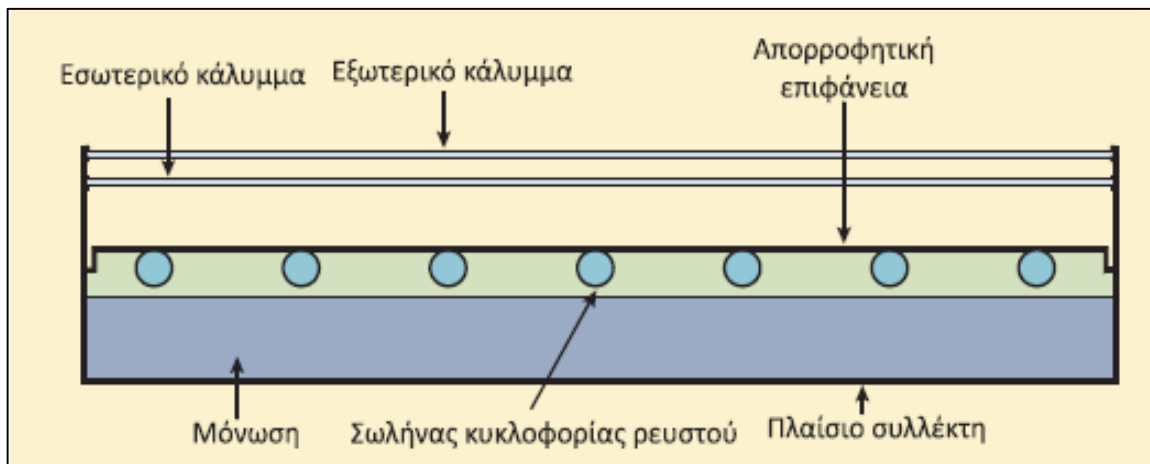
προσδιορίζουν τις μέγιστες ή ελάχιστες τιμές, που μπορούν να λαμβάνουν οι άγνωστες μεταβλητές.

3. Κριτήρια. Τα κριτήρια, που εκφράζονται συνήθως με τη μορφή συνάρτησης, αποτελούν τους σκοπούς ή στόχους του συστήματος, καθώς επίσης και τον τρόπο εκτίμησής του. [17]

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> Μαθηματικό Μοντέλο Επίπεδου Συλλέκτη

### 2.1 Γενικά για το Μοντέλο

Στο Κεφάλαιο αυτό, γίνεται καταγραφή των εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση του επίπεδου συλλέκτη. Η λογική σειρά που θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις, είναι όμοια με αυτή του προγραμματιστικού μέρους (Παράρτημα Α) για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης. Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζεται η γεωμετρική διάταξη του επίπεδου συλλέκτη που θα εξετάσουμε.



Εικόνα 2.1 Γεωμετρική διάταξη συλλέκτη

Θεωρώντας μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η συμπεριφορά του συλλέκτη περιγράφεται, από το ισοζύγιο ενέργειας, που εκφράζει το διαχωρισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ωφέλιμη ενέργεια και θερμικές απώλειες.

$$\dot{q}_U = A_c (S - U_L \cdot (T_{pm} - T_a)) \quad (2.1)$$

- $\dot{q}_U$  : Ωφέλιμη αποδιδόμενη Ισχύς [W]
- $A_c$  : Επιφάνεια του απορροφητή [ $m^2$ ]
- $S$  : Απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία [ $W/m^2$ ]
- $U_L$  : Συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ]
- $T_{pm}$  : Μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του απορροφητή [ $^\circ C$ ]
- $T_a$  : Θερμοκρασία περιβάλλοντος [ $^\circ C$ ]

Η σχέση (2.1) δεν βοηθά στον υπολογισμό της αποδιδόμενης ισχύος ( $\dot{q}_U$ ) αφού περιλαμβάνει την μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του απορροφητή ( $T_{pm}$ ). Για το λόγο αυτό, ο τύπος μετασχηματίζεται, ώστε να εξαρτάται από τα δεδομένα εισόδου του ρευστού, που αποτελούν ευκολότερα μετρήσιμες τιμές.

Ο βαθμός απόδοσης ενός συλλέκτη εκφράζει τη θερμική συμπεριφορά του. Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης ( $n_i$ ), αποτελεί το λόγο της ωφέλιμης αποδιδόμενης ισχύος ( $\dot{q}_U$ ), προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $A_c \cdot G_T$ ). [1]

$$n_i = \frac{\dot{q}_U}{A_c \cdot G_T} \quad (2.2)$$

- $G_T$  : Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [ $W/m^2$ ]

## 2.2 Συντελεστής Ολικών Θερμικών Απωλειών

Ο συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών ( $U_L$ ) που θα αναλυθεί στο παρακάτω κεφάλαιο υπολογίζεται από την σχέση 2.3 και εξαρτάται από τρεις επιμέρους συντελεστές.

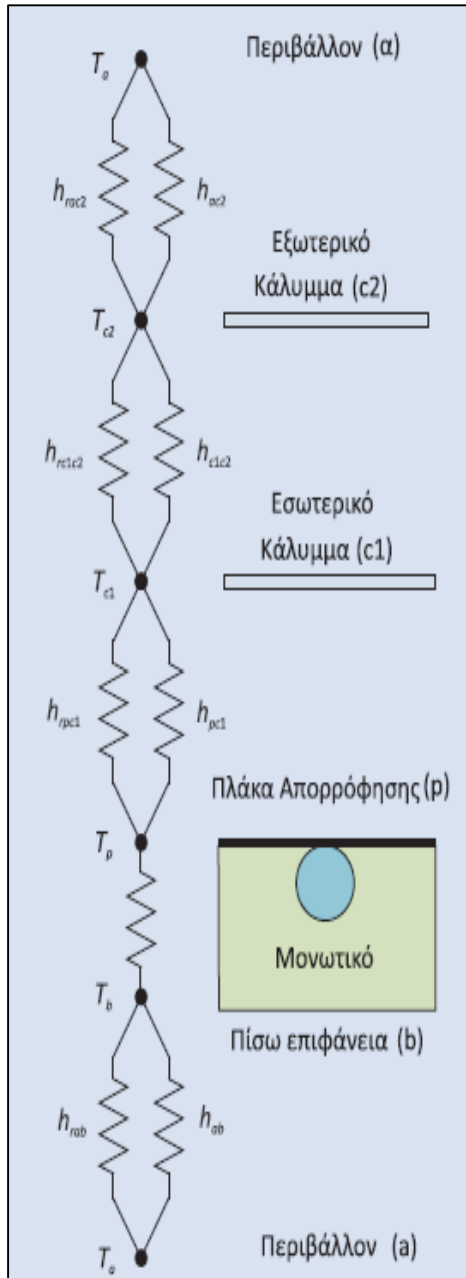
$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.3)$$

Όπου:

- $U_t$  : Συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής με μονάδες  $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$
- $U_b$  : Συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένα με μονάδες  $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$
- $U_e$  : Συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών με μονάδες  $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$

Για τον υπολογισμό των παραπάνω συντελεστών, χρειάζεται να παρουσιαστεί το ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα του επίπεδου συλλέκτη, το οποίο οπτικοποιείται με την Εικόνα 2.2. [1]

Η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία , κατανέμεται σε ωφέλιμη θερμική ισχύ και σε θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον, μέσω των καλυμμάτων και της μόνωσης (πλευρική και πυθμένα). [1]



Εικόνα 2.2 Θερμικές αντιστάσεις σε τοίχωμα

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 2.2, οι πρώτες τρεις αντιστάσεις από το περιβάλλον προς την απορροφητική πλάκα, βρίσκονται σε σειρά και είναι σύνθετες με παράλληλη σύνδεση των θερμικών αντιστάσεων συναγωγής και ακτινοβολίας. Ισχύουν τα παρακάτω [1] :

$$\dot{q}_t'' = \frac{T_p - T_a}{r_t} = \frac{T_p - T_{c1}}{r_{pc1}} = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{r_{c1c2}} = \frac{T_{c2} - T_a}{r_{ac2}} \quad (2.4)$$

$$\text{με } r_t = r_{pc1} + r_{c1c2} + r_{ac2}$$

$$r_{pc1} = \frac{1}{h_{pc1} + h_{r_{pc1}}} \quad (2.5)$$

$$r_{c1c2} = \frac{1}{h_{c1c2} + h_{r_{c1c2}}} \quad (2.6)$$

$$r_{ac2} = \frac{1}{h_{ac2} + h_{r_{ac2}}} \quad (2.7)$$

- $r$  : Σύνθετη αντίσταση  $[(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$
- $h$  : Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή  $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$
- $h_r$  : Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία  $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπό μορφή ακτινοβολίας, ανάμεσα από την πλάκα απορρόφησης και του εσωτερικού καλύμματος, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [1] :

$$h_{rpc1} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_{c1}^2)(T_p + T_{c1})}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (2.8)$$

- $\sigma$  : Σταθερά Stefan-Boltzmann [–]
- $\varepsilon_p$  : Συντελεστής εκπομπής απορροφητικής πλάκας [–]
- $\varepsilon_c$  : Συντελεστής εκπομπής καλύμματος [–]

Αντίστοιχος είναι και ο τύπος, για τον συντελεστή ακτινοβολίας ανάμεσα στα καλύμματα:

$$h_{rc1c2} = \frac{\sigma(T_{c1}^2 + T_{c2}^2)(T_{c1} + T_{c2})}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (2.9)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ακτινοβολίας από το εξωτερικό κάλυμμα προς το περιβάλλον, χρησιμοποιείτε ο παρακάτω τύπος :

$$h_{rac2} = \varepsilon_c \sigma (T_{c2}^2 + T_a^2)(T_{c2} + T_a) \quad (2.10)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής, ανάμεσα στο κάλυμμα και την πλάκα απορρόφησης, γίνεται χρήση της εξίσωσης του Hollands, ώστε να προσεγγιστεί ο αριθμός Nusselt (για τιμές 0-75° μοίρες της γωνίας κλίσης του συλλέκτη) [1],[4]:

$$Nu = 1 + 1.446 \left(1 - \frac{1708}{Ra \cos(\beta)}\right)^+ \left(1 - \frac{1708(\sin(1.8 \beta))^{1.6}}{Ra \cos(\beta)}\right) + \left(\left(\frac{Ra \cos(\beta)}{5830}\right)^{1/3} - 1\right)^+ \quad (2.11)$$

- $\beta$  : Η γωνία κλίσης του ηλιακού συλλέκτη [°]
- $Ra$  : Αριθμός Rayleigh [–]

*\* Αξίζει να σημειωθεί, πως αν στην περίπτωση όπου οι όροι με το σύμβολο + στον εκθέτη, στην παραπάνω σχέση, προκύψουν αρνητικοί, μπορούν να παραλειφθούν. [4]*

Ο αδιάστατος αριθμός Nusselt, αντιπροσωπεύει το λόγο του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, προς το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, σε ακίνητο ρευστό ορισμένου πάχους. Όσο αυξάνεται ο αριθμός, επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη



μεταφορά μέσω συναγωγής, ενώ στην περίπτωση όπου  $Nu = 1$  γίνεται μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή . [3]

Ο αριθμός Rayleigh για τον συντελεστή συναγωγής, ανάμεσα στο κάλυμμα και την πλάκα απορρόφησης, δίνεται από την εξίσωση : [1],[4]

$$Ra = \frac{g \beta' Pr}{\nu^2} (T_p + T_{c1}) L_{pc1}^3 \quad (2.12)$$

Και για τον συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στα καλύμματα :

$$Ra = \frac{g \beta' Pr}{\nu^2} (T_{c1} + T_{c2}) L_{c1c2}^3 \quad (2.13)$$

- $g$  : Η επιτάχυνση της βαρύτητα [ $m/s^2$ ]
- $\beta'$  : Ο συντελεστής κυβικής διαστολής για ιδανικό αέριο [—]
- $Pr$  : Ο αριθμός Prantdl [—]
- $\nu$  : Το κινηματικό ιξώδες [ $m^2/s$ ]
- $L_{pc1}$  : Η απόσταση μεταξύ πλάκας απορρόφησης και καλύμματος [ $m$ ]
- $L_{c1c2}$  : Η απόσταση μεταξύ των καλυμμάτων [ $m$ ]

Ο αριθμός Rayleigh έχει την φυσική ιδιότητα, να καθορίζει τη θέση μετάβασης από τη στρωτή ροή, στην τυρβώδη. [3]

Οι θερμικές ιδιότητες του αέρα, υπολογίζονται για τη μέση θερμοκρασία, ανάμεσα στις επιφάνειες που εξετάζονται (π.χ.  $T_{pc1} = (T_p + T_{c1})/2$ ) και μπορούν να βρεθούν σε πίνακες δεδομένων. [1]

Ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται από τον αριθμό Nusselt ως :

$$h_{pc1} = \frac{k Nu_{pc1}}{L_{pc1}} \quad (2.14)$$

Και αντίστοιχα για τον συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στα δύο καλύμματα :

$$h_{c1c2} = \frac{k Nu_{c1c2}}{L_{c1c2}} \quad (2.15)$$

$k$  : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για τη μέση θερμοκρασία του αέρα [ $W/mK$ ]

Ο συντελεστής συναγωγής ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος και το περιβάλλον, προσεγγίζεται από την εξίσωση :

$$h_{ac2} = \frac{8.6 V^{0.6}}{L_c^{0.4}} \quad (2.16)$$

- $V$  : Η ταχύτητα του ανέμου [ $m/s$ ]
- $L_c$  : Το μήκος του συλλέκτη [ $m$ ]

Έχοντας υπολογίσει όλα τα παραπάνω, μπορούμε πλέον να βρούμε την τιμή του συντελεστή θερμικών απωλειών κορυφής, από την σχέση :

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{h_{pc1} + h_{rpc1}} + \frac{1}{h_{c1c2} + h_{rc1c2}} + \frac{1}{h_{ac2} + h_{rac2}}} \quad (2.17)$$

Συνήθως οι μόνες γνωστές θερμοκρασίες, είναι αυτή του περιβάλλοντος ( $T_a$ ) και η θερμοκρασία με την οποία εισέρχεται το ρευστό από τους εσωτερικούς σωλήνες ( $T_{fin}$ ). Έτσι, γίνεται η αρχική θεώρηση πως η θερμοκρασία της απορροφητικής πλάκας, είναι ίση με αυτή που εισέρχεται το ρευστό ( $T_p = T_{fin}$ ). Για τον ακριβή υπολογισμό του συντελεστή θερμικών απωλειών κορυφής, απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία με τα εξής βήματα [1] :

**Βήμα 1<sup>ο</sup>** : Εκτιμώνται οι τιμές των θερμοκρασιών των καλυμμάτων ( $T_{c1}, T_{c2}$ ) ανάμεσα στο πεδίο [ $T_a, T_p$ ] (δηλαδή ανάμεσα στην τιμή της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και της θερμοκρασίας της πλάκας).

**Βήμα 2<sup>ο</sup>** : Υπολογίζονται όλοι οι συντελεστές  $h$ ,  $U_t$  και οι απώλειες κορυφής  $\dot{q}_t''$ , με χρήση των παραπάνω εξισώσεων.

**Βήμα 3<sup>ο</sup>** : Υπολογίζονται νέες τιμές των θερμοκρασιών ( $T_{c1}, T_{c2}$ ) μέσω της εξίσωσης (2.4), γνωρίζοντας πως η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δυο παράλληλων επιφανειών, είναι ίση με τις απώλειες κορυφής ( $\dot{q}_t''$ ).

**Βήμα 4<sup>ο</sup>** : Η επανάληψη συνεχίζει, έως ότου καταλήξει για δεύτερη φορά, στο ίδιο αποτέλεσμα τιμών, αλλιώς επιστρέφει στο Βήμα 2<sup>ο</sup>.

Έπειτα, για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικών απωλειών από τον πυθμένα του συλλέκτη, γίνεται χρήση της εξίσωσης :

$$U_b = \frac{k_{ins}}{L_b} \quad (2.18)$$

- $k_{ins}$  : Θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης [ $W/mK$ ]
- $L_b$  : Πάχος της μόνωσης [ $m$ ]

*Σημειώνεται, πως επειδή η θερμική αντίσταση ακτινοβολίας προς το περιβάλλον, είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή της αντίστασης αγωγής του μονωτή, για το λόγο αυτό παραλείπεται από την εξίσωση. [1]*

Ο τελευταίος συντελεστής θερμικών απωλειών που ζητείται για τον υπολογισμό του ολικού συντελεστή, είναι αυτός των πλευρικών θερμικών απωλειών και δίνεται από την σχέση :

$$U_e = \frac{k_{ins} A_e}{L_e A_c} \quad (2.19)$$

- $A_e$  : Η πλευρική επιφάνεια του συλλέκτη [ $m^2$ ]
- $L_e$  : Πάχος πλευρικής μόνωσης του συλλέκτη [ $m$ ]

### 2.3 Παράγοντας Απόδοσης Συλλέκτη

Ο παράγοντας απόδοσης του συλλέκτη, συμβολίζεται με  $F'$  και αναπαριστά τον λόγο της πραγματικά αποδιδόμενης θερμικής ισχύος, προς τη θερμική ισχύ που θα απέδιδε, αν κάθε σημείο της πλάκας απορρόφησης είχε την αντίστοιχη θερμοκρασία του ρευστού. Ακόμα, εκφράζει τον λόγο της ολικής θερμικής αντίστασης, από το ρευστό μέχρι τον αέρα του περιβάλλοντος ( $U_o$ ) προς τον συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη ( $U_L$ ).

$$F' = \frac{1/U_L}{W(\frac{1}{U_L(D+F(W-D))} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} + \frac{\gamma}{bk_b})} = \frac{1/U_L}{1/U_o} \quad (2.20)$$

- $W$  : Απόσταση μεταξύ σωλήνων [ $m$ ]
- $D$  : Εξωτερική διάμετρος σωλήνα [ $m$ ]
- $D_i$  : Εσωτερική διάμετρος σωλήνα [ $m$ ]
- $h_{fi}$  : Συντελεστής συναγωγής μεταξύ ρευστού και εσωτερικής επιφάνειας του σωλήνα [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
- $\frac{\gamma}{bk_b}$  : Ολική θερμική αγωγιμότητα συνδέσμου [ $W/m^2$ ]

**Σημείωση:** ο παραπάνω όρος, πρέπει να είναι μεγαλύτερος των  $30 [W/m^2]$  για να λειτουργεί ικανοποιητικά ο συλλέκτης.

- $\gamma$  : Πάχος συνδέσμου [ $m$ ]
- $b$  : Εύρος συνδέσμου [ $m$ ]
- $k_b$  : Θερμική αγωγιμότητα συνδέσμου [ $W/mK$ ]

$$\text{Όπου : } F = \frac{\tanh(\sqrt{U_L/k_p \delta} \frac{W-D}{2})}{\sqrt{U_L/k_p \delta} \frac{W-D}{2}} \text{ για την θέση } x = \frac{W-D}{2} \text{ της διεύθυνσης } x \text{ για μια τομή}$$

του συλλέκτη

- $k_p$  : Θερμική αγωγιμότητα της πλάκας απορρόφησης [ $W/mK$ ]
- $\delta$  : Πάχος της πλάκας απορρόφησης [ $m$ ]

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος :

$$h_{fi} = Nu_w \frac{k_w}{D_i} \quad (2.21)$$

- $k_w$  : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του νερού  $[W/mK]$

Ο αριθμός Nusselt ( $Nu_w$ ), εντός των σωλήνων που περιέχουν το ρευστό (νερό), για την περίπτωση όπου υπάρχει υδροδυναμικά ανεπτυγμένη στρωτή ροή, σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος και αριθμός Prandtl  $Pr \gg 1$ , δίνεται από την σχέση [3],[8]:

$$Nu_w = 3.66 + \frac{0.0668 \frac{D_i}{L} Re_{Di} Pr_w}{1 + 0.04 \left[ \frac{D_i}{L} Re_{Di} Pr_w \right]^{2/3}} \quad (2.22)$$

- $L$  : Μήκος συλλέκτη  $[m]$

Ο αριθμός Reynolds, που χρησιμοποιείται στην παραπάνω σχέση, εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας, προς τις δυνάμεις ιξώδους του ρευστού. Στην περίπτωση υψηλού μεγέθους του αριθμού Reynolds οι δυνάμεις αδράνειας υπερिशύουν των δυνάμεων ιξώδους, με αποτέλεσμα να μην εμποδίζονται οι τυχαίες και γρήγορες διακυμάνσεις του ρευστού, που οδηγεί σε τυρβώδη ροή. Αντίθετα, αν υπερिशύουν οι δυνάμεις ιξώδους, το ρευστό παραμένει σε στρωτή ροή. Η σχέση που αντιστοιχεί, είναι η εξής [3] :

$$Re_{Di} = \frac{4 \frac{\dot{m}}{n}}{\pi D_i \mu_w} \quad (2.23)$$

- $\dot{m}$  : Συνολική παροχή μάζας  $[kg/s]$
- $n$  : Αριθμός σωλήνων συλλέκτη  $[-]$
- $\mu_w$  : Δυναμικό ιξώδες νερού  $[kg/(m \cdot s)]$

Στην σχέση (2.22), γίνεται παράλληλα και η χρήση του αριθμού Prandtl ( $Pr$ ), που καθορίζει το σχετικό πάχος μεταξύ των οριακών στρωμάτων ταχύτητας και θερμοκρασίας. Για  $Pr = 1$ , η θερμότητα καθώς και η θερμοκρασία, μεταφέρονται στο ρευστό με παρόμοιο τρόπο, ενώ τα οριακά τους στρώματα έχουν το ίδιο πάχος. Στην περίπτωση όπου ο αριθμός είναι μικρός ( $Pr \ll 1$ ), η θερμότητα είναι αυτή που διαχέεται πολύ γρηγορότερα, σε σχέση με την ορμή, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε υψηλές τιμές. Οι τιμές του αριθμού Prandtl κυμαίνονται από 0.01 έως και  $10^5$ , ενώ ο τύπος του δίνεται [3] :

$$Pr_w = \frac{\mu_w c_{p_w}}{k_w} \quad (2.24)$$

- $C_{p_w}$  : Ειδική θερμοχωρητικότητα ρευστού  $[kJ/(kg \cdot K)]$

Για την ορθή εκτίμηση του συντελεστή συναγωγής ( $h_{fi}$ ) κρίνεται απαραίτητη η γνώση της μέσης θερμοκρασίας του ρευστού ( $T_{fm}$ ). [1]

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{\dot{q}_u}{A_c U_L F_R} \cdot (1 - F'') \quad (2.25)$$

- $F_R$  : Ο παράγοντας θερμικής απολαβής  $[-]$
- $F''$  : Ο παράγοντας ροής  $[-]$

## 2.4 Παράγοντας Θερμικής Απολαβής, Εξίσωση Συλλέκτη και Παράγοντας Ροής

Παράγοντας θερμικής απολαβής ( $F_R$ ) ενός συλλέκτη, ονομάζεται ο λόγος της πραγματικής αποδιδόμενης θερμικής ισχύος ( $\dot{q}_u$ ) προς τη θερμική ισχύ, όταν ολόκληρη η απορροφητική επιφάνεια, έχει τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού ( $T_{fi}$ ). [1]

$$F_R = \frac{\dot{q}_u}{A_c(S - U_L(T_{fi} - T_a))} = \frac{\dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi})}{A_c(S - U_L(T_{fi} - T_a))} \quad (2.26)$$

Όπου :

$$A_c = nWL \quad (\text{Επιφάνεια του συλλέκτη})$$

$$S = (\tau a)G_T \quad (\text{Στιγμιαία απορρόφηση του συλλέκτη})$$

- $\tau$  : Η διαπερατότητα του καλύμματος  $[-]$
- $a$  : Η απορροφητικότητα της πλάκας  $[-]$

Από την εξίσωση ορισμού του παράγοντα θερμικής απολαβής, προκύπτει η εξίσωση του επίπεδου συλλέκτη, από την οποία υπολογίζεται και η πραγματικά αποδιδόμενη ισχύς. Η εξίσωση αυτή είναι χρήσιμη, επειδή περιέχει τη γνωστή θερμοκρασία της εισόδου του ρευστού. [1] :

$$\dot{q}_u = A_c F_R (S - U_L(T_{fi} - T_a)) \quad (2.27)$$

Η εξίσωση 2.26 με κατάλληλο μετασχηματισμό γίνεται :

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} (1 - \exp(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p})) \quad (2.28)$$

Με χρήση της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει η εξίσωση του παράγοντα ροής ( $F''$ ) ο οποίος αποτελεί συνάρτηση μόνο της αδιάστατης ανηγμένης παροχής. [1] :

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'} (1 - \exp(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p})) \quad (2.29)$$

## 2.5 Βαθμός Απόδοσης

Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη ( $n_i$ ), που ορίζεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύος ( $\dot{q}_u$ ), προς την αντίστοιχη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $A_c G_T$ ) περιγράφεται από τη σχέση [1] :

$$n_i = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T} = \frac{\dot{q}_u}{A_c G_T} \quad (2.30)$$

Μπορεί επίσης να εκφραστεί και σαν συνάρτηση των θερμοκρασιών εισόδου ( $T_{fi}$ ) και εξόδου ( $T_{fo}$ ) του ρευστού [1] :

$$n_i = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c G_T} \quad (2.31)$$

*Σημείωση: για την εξίσωση 2.30, μπορεί να παρατηρηθεί πως οι δύο όροι  $F_R(\tau\alpha)$  και  $F_R U_L$  αποτελούν σταθερά χαρακτηριστικά του βαθμού απόδοσης, πράγμα που σημαίνει, πως ο βαθμός απόδοσης αποτελεί γραμμική συνάρτηση της μεταβλητής  $\frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T}$ .*

*Οι τιμές για τις δύο σταθερές παραμέτρους, προσδιορίζονται πειραματικά και είναι ενδεικτικές για κάθε συλλέκτη [1].*

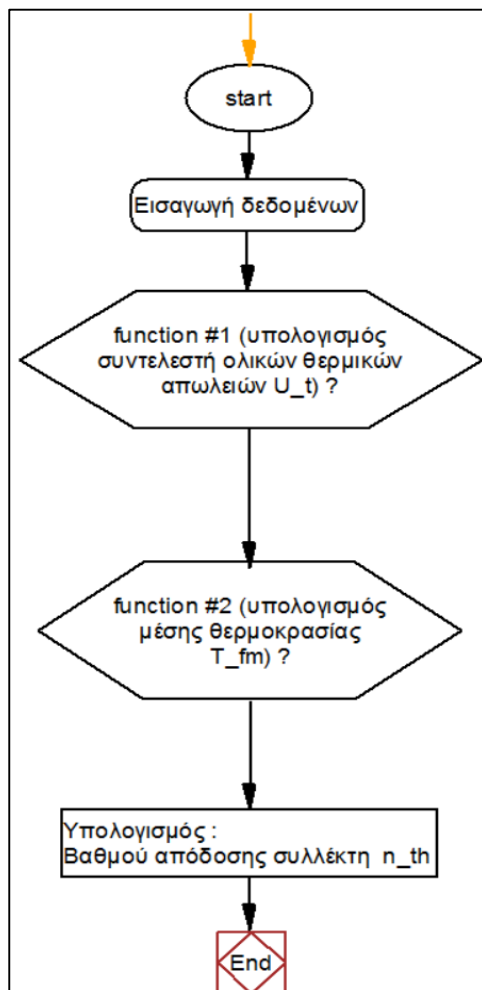


## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Υπολογιστική Υλοποίηση - Εφαρμογή

### 3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Εφαρμογής

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξηγηθεί η μετατροπή-μετάβαση από το μαθηματικό μοντέλο, που παρουσιάστηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, σε προγραμματιστικό περιβάλλον με στόχο την αριθμητική προσομοίωση και την περαιτέρω διερεύνηση του μοντέλου. Το πρόγραμμα, δημιουργήθηκε εξολοκλήρου μέσω του λογισμικού Matlab και με χρήση της γλώσσας Matlab, η οποία έχει αρκετές ομοιότητες με αυτή της C++. Ακόμα, θα παρουσιαστεί η δομή του προγράμματος, καθώς και ο έλεγχος εγκυρότητας και σωστής λειτουργίας. Ο έλεγχος του κώδικα, πραγματοποιείται εφαρμόζοντας δεδομένα, που έχουν προέλθει από έγκυρη πηγή και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτής, με τα αποτελέσματα που θα επιστραφούν από το εν λόγω πρόγραμμα.

### 3.2 Επεξήγηση Λειτουργίας Εφαρμογής



Διάγραμμα 3.1 Κυρίως Πρόγραμμα

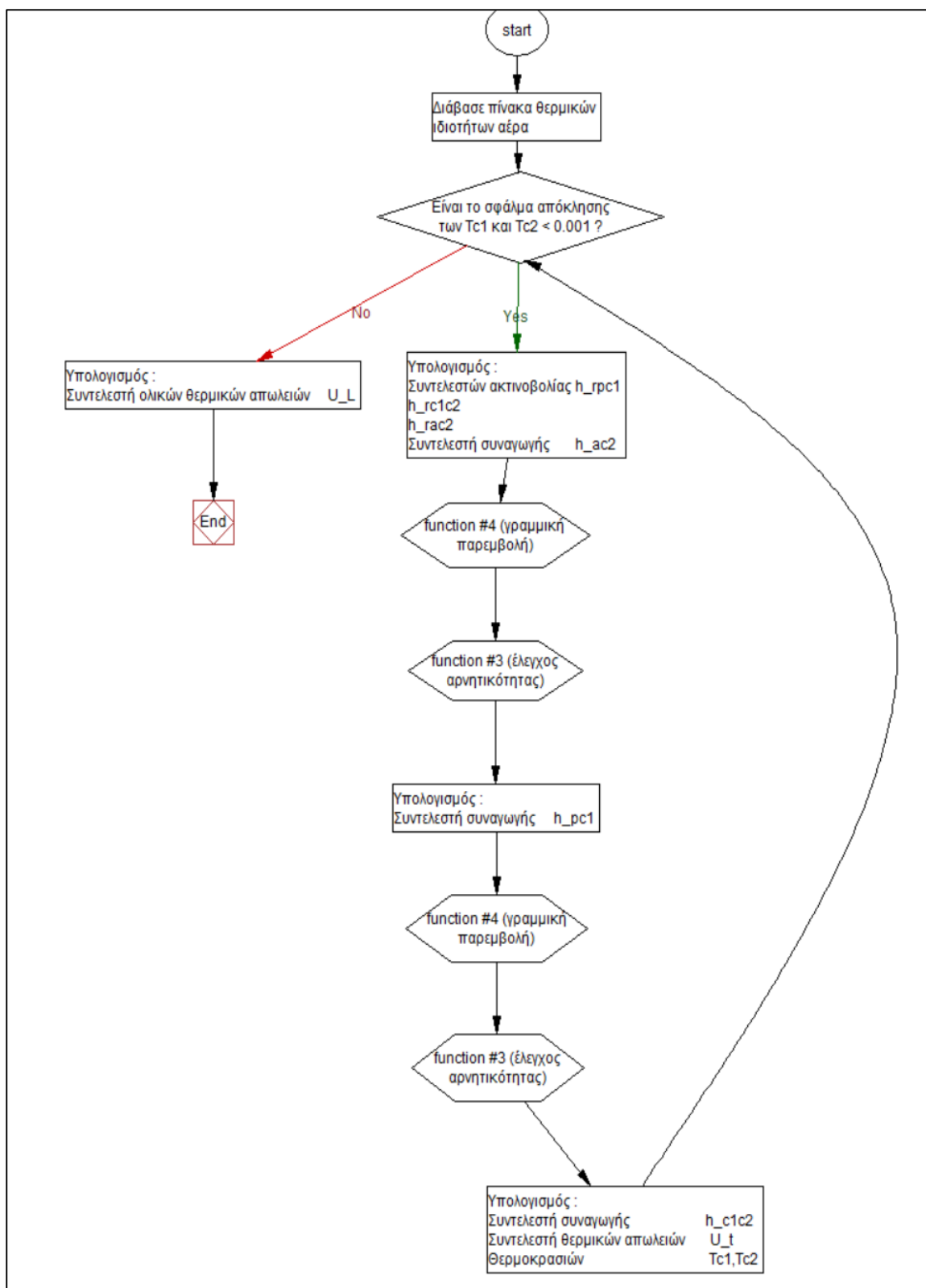
Η δομή του προγραμματιστικού κώδικα που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α, απαρτίζεται από 5 μέρη :

- 1 κυρίως πρόγραμμα (main) και
- 4 υποπρογράμματα (function)

#### Κυρίως πρόγραμμα (main) #0

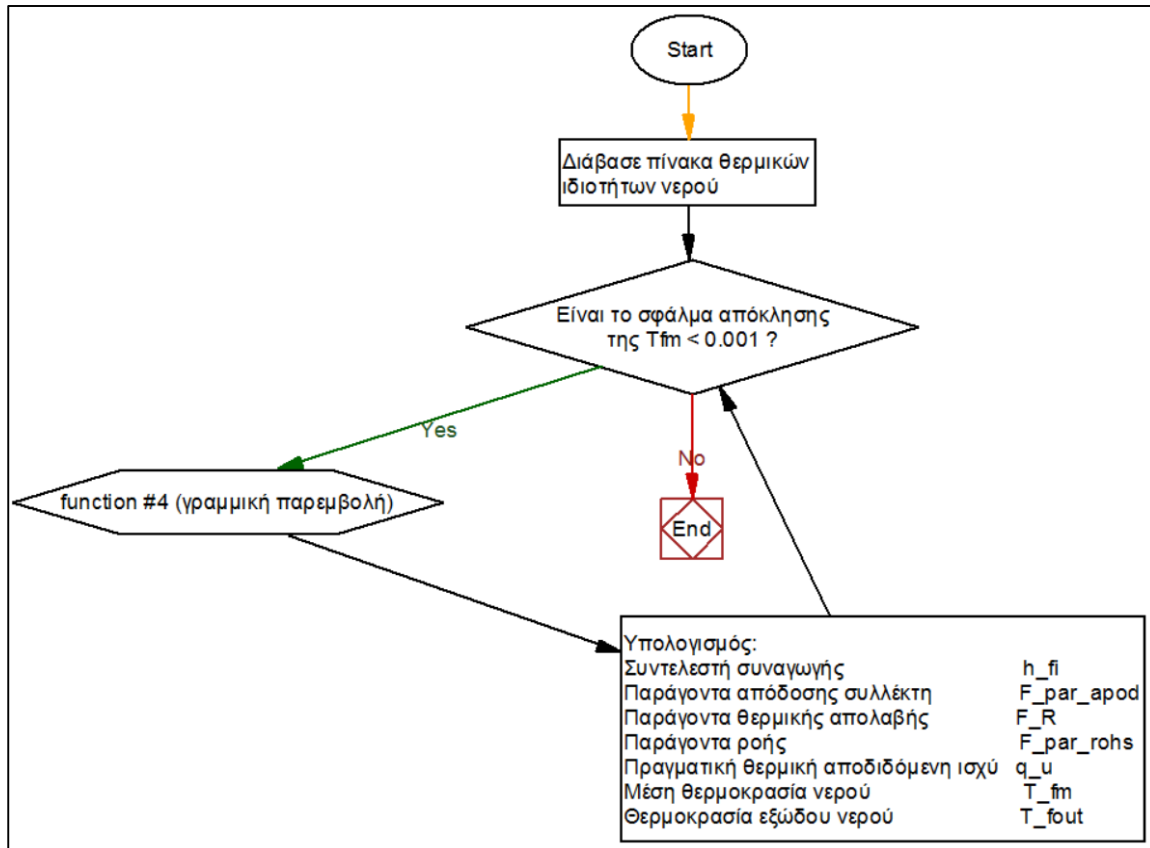
Στο πρώτο κομμάτι του κώδικα, γίνεται η εισαγωγή δεδομένων και τεχνητών προσωρινών μεταβλητών, τα οποία θα χρειαστούν για τους μετέπειτα υπολογισμούς. Στη συνέχεια, καλούνται τα υποπρογράμματα #1 και #2, για τον υπολογισμό του συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών ( $U_L$ ) και της μέσης θερμοκρασίας του ρευστού ( $T_{fm}$ ). Τέλος, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που επιστρέφουν οι δύο function, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη ( $n_{th}$ ).

Υποπρόγραμμα (function) #1



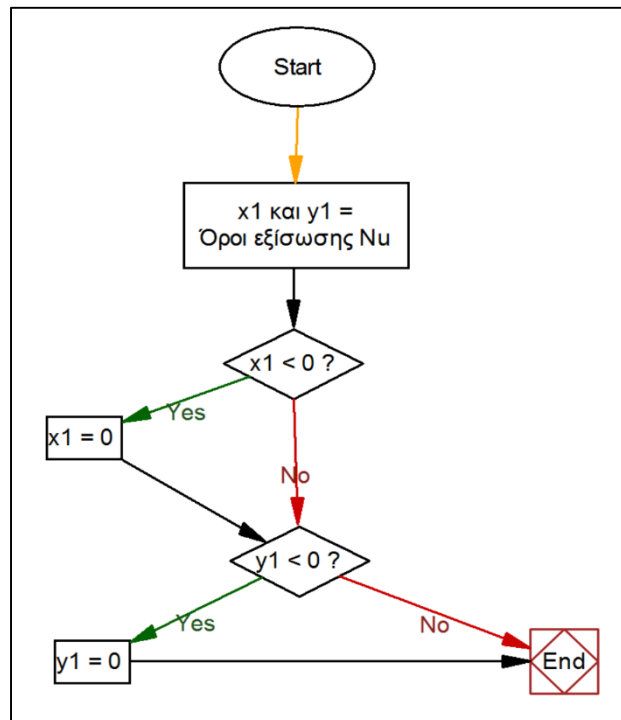
Διάγραμμα 3.2 Υποπρόγραμμα\_1

Σε αυτό το σημείο, στόχο αποτελεί, ο υπολογισμός του συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών, ο οποίος για να υπολογιστεί όπως έχει αναφερθεί και στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, χρειάζεται μια επαναληπτική διαδικασία, όπου οι ενδιαμέσες θερμοκρασίες ( $T_{c1}, T_{c2}$ ) δίνονται από υπόθεση και τελικά προσεγγίζονται. Οι τιμές των θερμοκρασιών έχουν δοθεί στο κυρίως πρόγραμμα, με την προϋπόθεση πως ακολουθούν κλιμακωτές τιμές, από την θερμοκρασία περιβάλλοντος έως την θερμοκρασία εισόδου του νερού (έχει γίνει η θεώρηση πως η θερμοκρασία εισόδου του νερού είναι ίση με αυτή της πλάκας απορρόφησης). Το υποπρόγραμμα αυτό, ξεκινά διαβάζοντας και αποθηκεύοντας τα δεδομένα του πίνακα θερμικών ιδιοτήτων αέρα, ο οποίος παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β. Στη συνέχεια, ξεκινάει ο βρόχος επανάληψης ο οποίος και θα τερματίσει, όταν η τιμή και των δύο θερμοκρασιών ( $T_{c1}, T_{c2}$ ) έχει σφάλμα απόκλισης μικρότερο από 0.001. Μέσα στην επανάληψη, υπολογίζονται συντελεστές ακτινοβολίας και συναγωγής, ο συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής και οι τιμές των θερμοκρασιών ( $T_{c1}, T_{c2}$ ). Ακόμα καλούνται τα υποπρογράμματα #3 και #4 μία φορά για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt, ανάμεσα στην πλάκα απορρόφησης και το εσωτερικό κάλυμμα και μία ακόμη για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt ανάμεσα στα δύο καλύμματα. Τέλος υπολογίζονται οι υπόλοιποι συντελεστές θερμικών απωλειών και ο αριθμός F.

Υποπρόγραμμα (function) #2

Διάγραμμα 3.3 Υποπρόγραμμα\_2

Το δεύτερο υποπρόγραμμα, έχει σαν σκοπό τον υπολογισμό των υπολοίπων στοιχείων, που χρειάζονται για την εύρεση του βαθμού απόδοσης. Αρχικά, διαβάζονται και αποθηκεύονται, τα δεδομένα του πίνακα θερμικών ιδιοτήτων του νερού, που βρίσκεται στο Παράρτημα Β. Στη συνέχεια, ξεκινά επανάληψη με τερματικό έλεγχο, αν η μέση θερμοκρασία ( $T_{fm}$ ) έχει σφάλμα απόκλισης μικρότερο από 0.001. Στο κυρίως πρόγραμμα έχει δοθεί αρχική τιμή για τη μέση θερμοκρασία, για την οποία στην πρώτη επανάληψη καλείται το υποπρόγραμμα #4, το οποίο επιστρέφει τα κατάλληλα δεδομένα, για την εύρεση του αριθμού Nusselt ( $Nu_w$ ) για νερό και κατά συνέπεια του συντελεστή συναγωγής μεταξύ ρευστού και εσωτερικής επιφάνειας του σωλήνα ( $h_{fi}$ ). Ακόμα, υπολογίζονται: ο παράγοντας απόδοσης του συλλέκτη ( $F'$ ), ο παράγοντας θερμικής απολαβής ( $F_R$ ), ο παράγοντας ροής ( $F''$ ), η πραγματική θερμική αποδιδόμενη ισχύς ( $\dot{q}_u$ ), η μέση θερμοκρασία νερού ( $T_{fm}$ ) και η θερμοκρασία εξόδου νερού ( $T_{fout}$ ).

Υποπρόγραμμα (function) #3

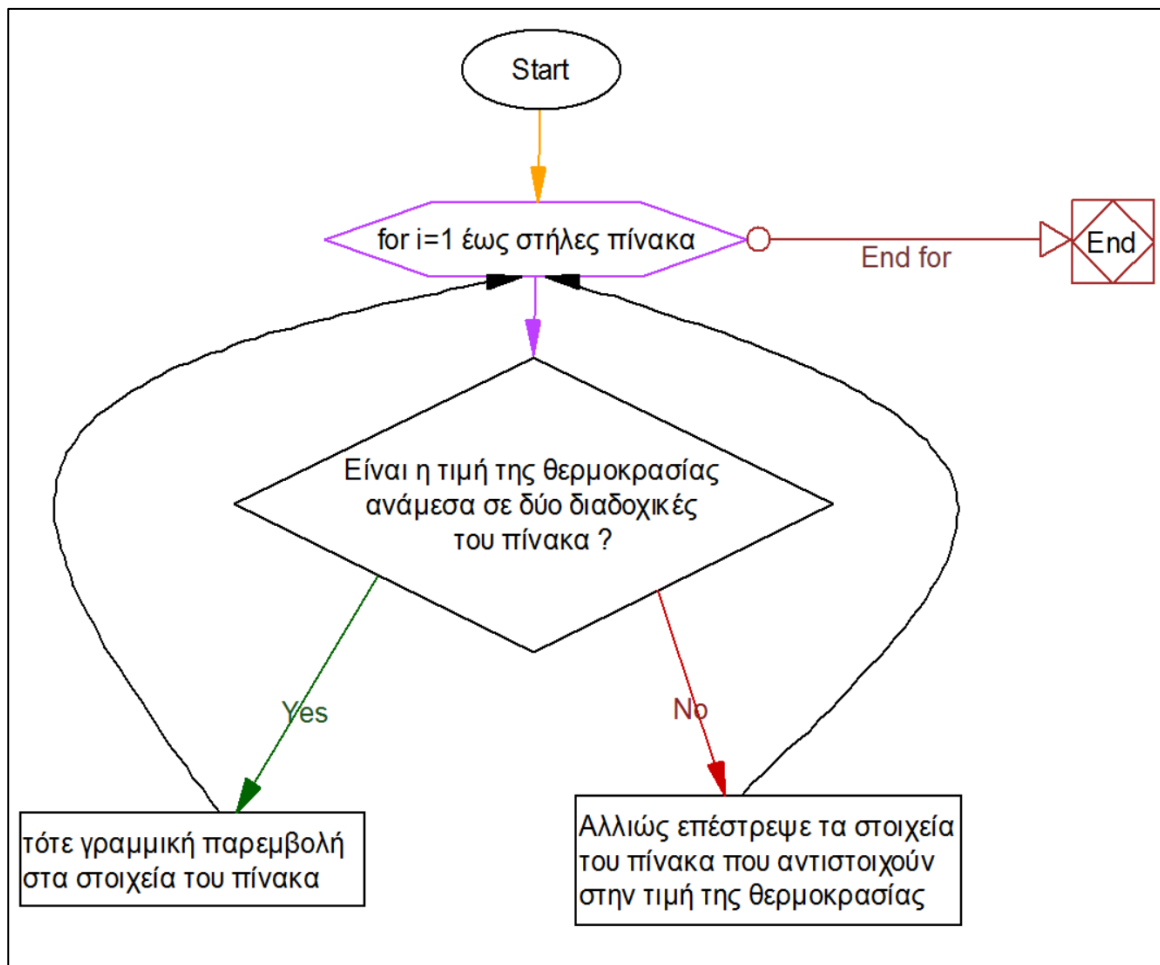
Διάγραμμα 3.4 Υποπρόγραμμα\_3

Όπως αναφέρθηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt, χρειάζεται να ελεγχθεί αν κάποιοι όροι τις εξίσωσης έχουν αρνητικό αποτέλεσμα και να παραλειφθούν στην περίπτωση αυτή.

Το υποπρόγραμμα αυτό, θέτει με μεταβλητές  $x1$  και  $y1$  τους όρους και εξετάζει την αρνητικότητά τους, επιστρέφοντας θετικό αριθμό ή 0.

Υποπρόγραμμα (function) #4

Το τελευταίο κομμάτι του κώδικα, λειτουργεί εφαρμόζοντας αν χρειάζεται, γραμμική παρεμβολή στα στοιχεία ενός πίνακα, για την εύρεση τιμών, που μπορεί να μην βρίσκονται σε αυτόν, αλλά ανάμεσα στα στοιχεία του. Έχοντας τα δεδομένα του πίνακα, το υποπρόγραμμα διαβάζει κάθε γραμμή και ελέγχει αν η τιμή της θερμοκρασίας που αναζητούμε, βρίσκεται ανάμεσα σε δύο τιμές του πίνακα. Αν βρίσκεται, εφαρμόζει γραμμική παρεμβολή, για την προσέγγιση της τιμής που αναζητείται από τον πίνακα.



Διάγραμμα 3.4 Υποπρόγραμμα\_4

### 3.3 Έλεγχος Εγκυρότητας

Για την διερεύνηση της σωστής λειτουργίας των παραπάνω προγραμμάτων, που έχουν σαν στόχο την στατική προσομοίωση ενός επίπεδου συλλέκτη, γίνεται προσαρμογή και εφαρμογή των παρακάτω δεδομένων.

Πίνακας Δεδομένων Πηγής

Συμβολισμοί	Τιμές	Μονάδες	Συμβολισμοί	Τιμές	Μονάδες
$T_{f,in}$	313,2	K	$L_{pc1}$	0,025	m
$T_a$	283,2	K	$V$	2.5	m/s
$T_{f,m}$	316,2	K	$W$	0,1	m
$T_p$	326,2	K	$D, D_i$	0,01 , 0,008	m
$\varepsilon_c$	0,88	-	$\delta_c$	0,005	m
$\varepsilon_p$	0,1	-	$\delta$	0,0005	m
$\tau \cdot a$	0,81	-	$G_T$	1000	W/m <sup>2</sup>
$\dot{m}$	0,04	kg/s	$\beta$	0	°
$A_c$	2	m <sup>2</sup>	$N$	10	-
$A_e$	0,543	m <sup>2</sup>	$k_w$	0,63	W/(m · K)
$L$	2	m	$k_{cop}$	400	W/(m · K)
$L_e$	0,025	m	$k_{air}$	0,0262	W/(m · K)
$L_b$	0,05	m	$k_{ins}$	0,045	W/(m · K)

Πίνακας 3.1 Δεδομένα Πηγής [13]

Τα δεδομένα με τα οποία θα γίνει ο έλεγχος, αντιστοιχούν σε επίπεδο συλλέκτη, με μια γυάλινη επιφάνεια (κάλυμμα) αντί για δύο, όπως εξετάσαμε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Η μόνη προσαρμογή στο τυπολόγιο που πρέπει να πραγματοποιηθεί, αφορά τον συντελεστή θερμικών απωλειών κορυφής. Πιο συγκεκριμένα ο τύπος (2.17) μετασχηματίζεται σε :

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{h_{pc1} + h_{rpc1}} + \frac{1}{h_{ac1} + h_{rac1}}} \quad (3.1)$$

Συγχρόνως, με την αλλαγή αυτή αγνοούνται τύποι όπως οι (2.6), (2.9), (2.15), οι οποίοι περιλαμβάνουν, όρους με δείκτη c1c2 που δηλώνουν την ενδιάμεση περιοχή των δύο καλυμμάτων.

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω αλλαγές των εξισώσεων, στον υπολογιστικό κώδικα προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα που παραθέτονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας Αποτελεσμάτων – Ποσοστιαίων Μεταβολών

Αποτελέσματα Πηγής			Μεταβολή %	Αποτελέσματα Διπλωματ.		
Συμβολ.	Τιμές	Μονάδες		Συμβολ.	Τιμές	Μονάδες
$h_{fi}$	358,6000	$W/(m^2 \cdot K)$	0,18	$h_{fi}$	359,2514	$W/(m^2 \cdot K)$
$h_{ac1}$	10,3000	$W/(m^2 \cdot K)$	-4,10	$h_{ac1}$	9,8788	$W/(m^2 \cdot K)$
$h_{rpc1}$	0,6579	$W/(m^2 \cdot K)$	0,06	$h_{rpc1}$	0,6583	$W/(m^2 \cdot K)$
$h_{pc1}$	2,5130	$W/(m^2 \cdot K)$	2,19	$h_{pc1}$	2,5681	$W/(m^2 \cdot K)$
$h_{rac1}$	4,6640	$W/(m^2 \cdot K)$	1,05	$h_{rac1}$	4,7129	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_L$	4,0050	$W/(m^2 \cdot K)$	0,65	$U_L$	4,0309	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_b, U_e$	0,9 , 0,4887	$W/(m^2 \cdot K)$	0 , 0	$U_b, U_e$	0,9 , 0,4887	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_t$	2,6170	$W/(m^2 \cdot K)$	0,96	$U_t$	2,6422	$W/(m^2 \cdot K)$
$k_w$	0,6300	$W/(m \cdot K)$	0,20	$k_w$	0,6314	$W/(m \cdot K)$
$T_{f,out}$	320,8	$K$	-0,05	$T_{f,out}$	320,6253	$K$
$T_{pc}$	308,3	$K$	0,30	$T_{pc}$	309,1155	$K$
$q_U'$	1277	$W$	-0,18	$q_U'$	1274,7	$W$
$\eta_i$	0,6383	-	-0,14	$\eta_i$	0,6374	-
$F_R$	0,9253	-	-0,03	$F_R$	0,9250	-
$F'$	0,9465	-	-0,03	$F'$	0,9462	-
$F$	0,9867	-	-0,01	$F$	0,9866	-
$Ra_{pc1}$	58887	-	-26,55	$Ra_{pc1}$	43254	-
$Nu_{pc1}$	2,3980	-	-0,40	$Nu_{pc1}$	2,3889	-
$Nu_w$	4,5540	-	-0,06	$Nu_w$	4,5514	-
$Re_{Di}$	1030	-	-1,40	$Re_{Di}$	1015,5	-
$Pr_w$	4,1030	-	1,10	$Pr_w$	4,1494	-
$Pr_{air}$	0,6812	-	9,80	$Pr_{air}$	0,7482	-

Πίνακας 3.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής, με αυτά της πηγής, παρατηρείται μια μικρή απόκλιση της τάξεως 2,2% κατά μέσο όρο. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην ακριβέστερη εφαρμογή των θερμικών ιδιοτήτων του αέρα και του νερού, που χρησιμοποιήθηκαν στα αποτελέσματα της πηγής. Η απόκλιση είναι αναμενόμενη, αφού για την εύρεση των ιδιοτήτων σε θερμοκρασίες ανάμεσα σε αυτές που παρουσιάζονται στους πίνακες του Παραρτήματος Β, χρησιμοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή, μέθοδος που φέρει σφάλμα απόκλισης από την πραγματική τιμή. Επιπροσθέτως, οι πίνακες αυτοί έχουν μεγάλα διαστήματα τιμών (ανά 50 για τον αέρα και ανά 10 για το νερό), όπου σε συνδυασμό με την χρήση γραμμικής παρεμβολής, δικαιολογούν μια μικρή απόκλιση από την πραγματική τιμή.



## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Επίδραση Τεχνικών και Περιβαλλοντικών Παραμέτρων**

### **4.1 Γενικά**

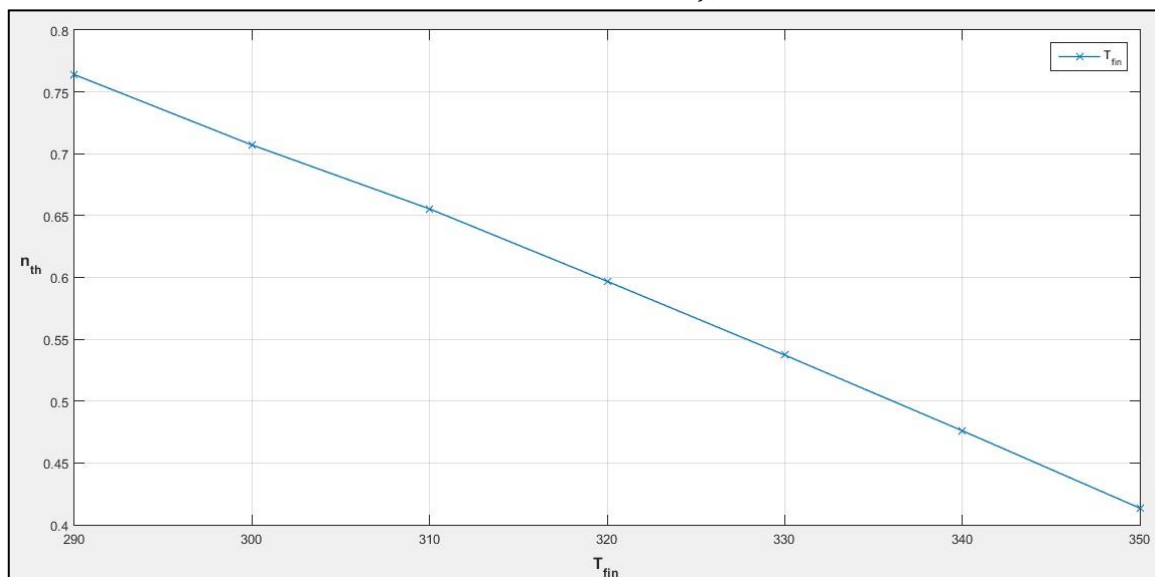
Κύριος άξονας, του συγκεκριμένου κεφαλαίου, είναι να διερευνηθούν περαιτέρω κάποιες από τις παραμέτρους του συλλέκτη, με στόχο την ανάλυση των επιδράσεων τους στον συλλέκτη. Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί παραμετρική ανάλυση, όπου θα εξεταστεί κάθε παράμετρος ξεχωριστά και ανάλυση παλινδρόμησης, όπου θα γίνει έλεγχος της μεταβολής του βαθμού απόδοσης σε ταυτόχρονες αλλαγές των παραμέτρων. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση ρίσκου, με χρήση της μεθόδου Monte Carlo, η οποία εστιάζει στις αβέβαιες μεταβλητές που έχουν να κάνουν με καιρικά φαινόμενα και παρουσιάζουν υψηλότερο ποσοστό ρίσκου.

### **4.2 Παραμετρική Ανάλυση**

Στο σημείο αυτό θα αναλυθούν παράμετροι, που επιλέχθηκαν μεταξύ άλλων από τον επίπεδο συλλέκτη, με σκοπό τον έλεγχο της μεταβολής που επιφέρει η κάθε μια ξεχωριστά στην απόδοση αυτού. Ο τρόπος που επιτυγχάνεται ο έλεγχος, είναι εισάγοντας στο πρόγραμμα, αντί μιας τιμής, για την κάθε μεταβλητή, ένα εύρος τιμών και παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα του υπολογιστικού κώδικα γραφικά. Οι υπόλοιπες τιμές παραμένουν σταθερές ενώ μεταβάλλεται μόνο μια από τις παραμέτρους που εισάγονται στον κώδικα.

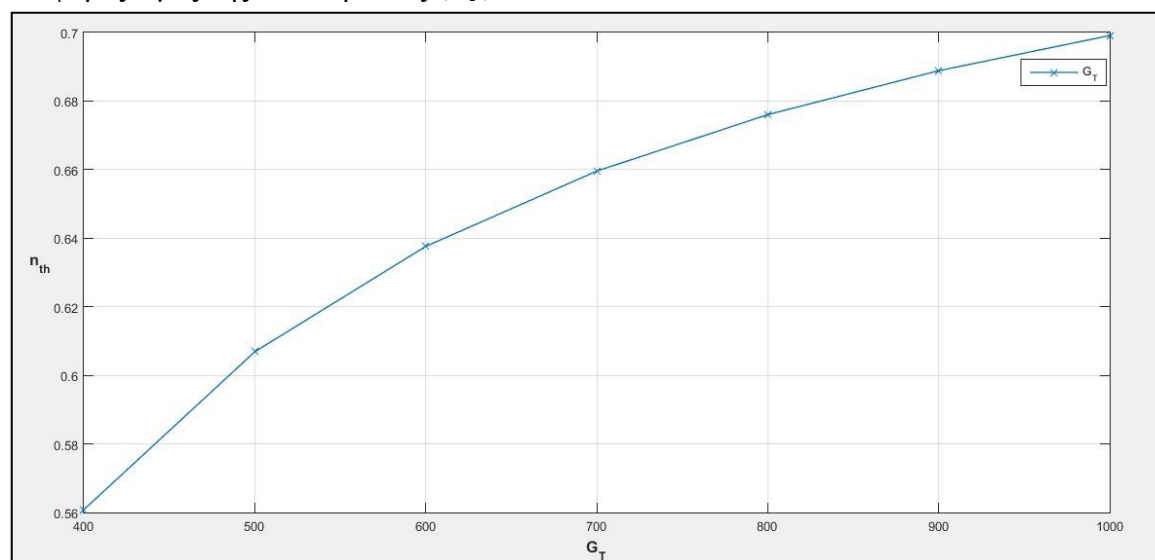
Παρουσιάζονται στη συνέχεια, τα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή της κάθε μεταβλητής, σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης, με σκοπό την οπτικοποίηση των αλλαγών που επιφέρουν και την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Διάγραμμα 4.1: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_i$ ) για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας εισόδου ρευστού ( $T_{f,in}$ )



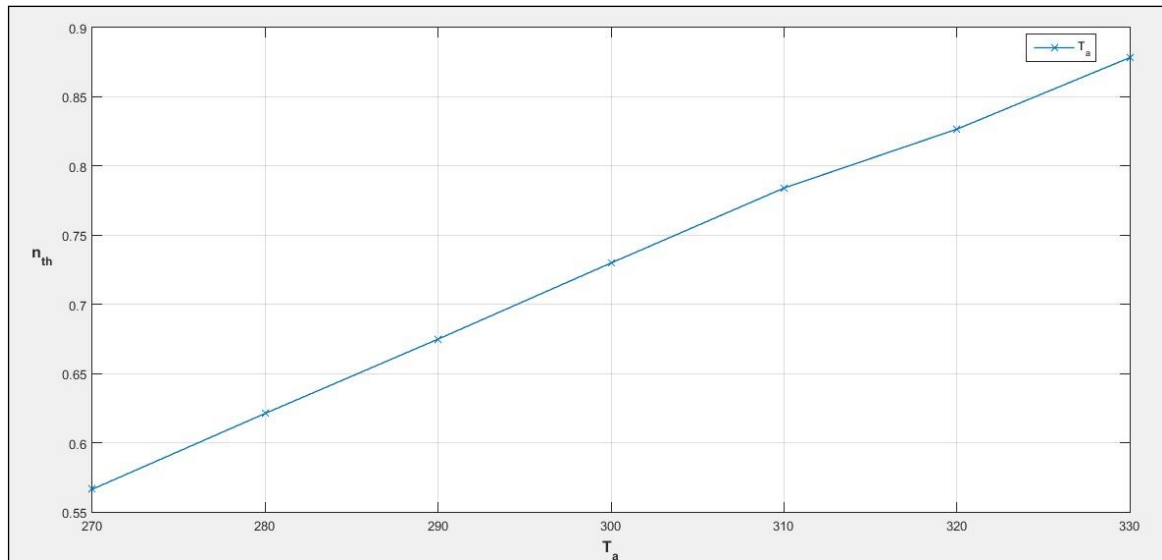
Διάγραμμα 4.1 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης

Διάγραμμα 4.2: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_i$ ) για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας ( $G_T$ )



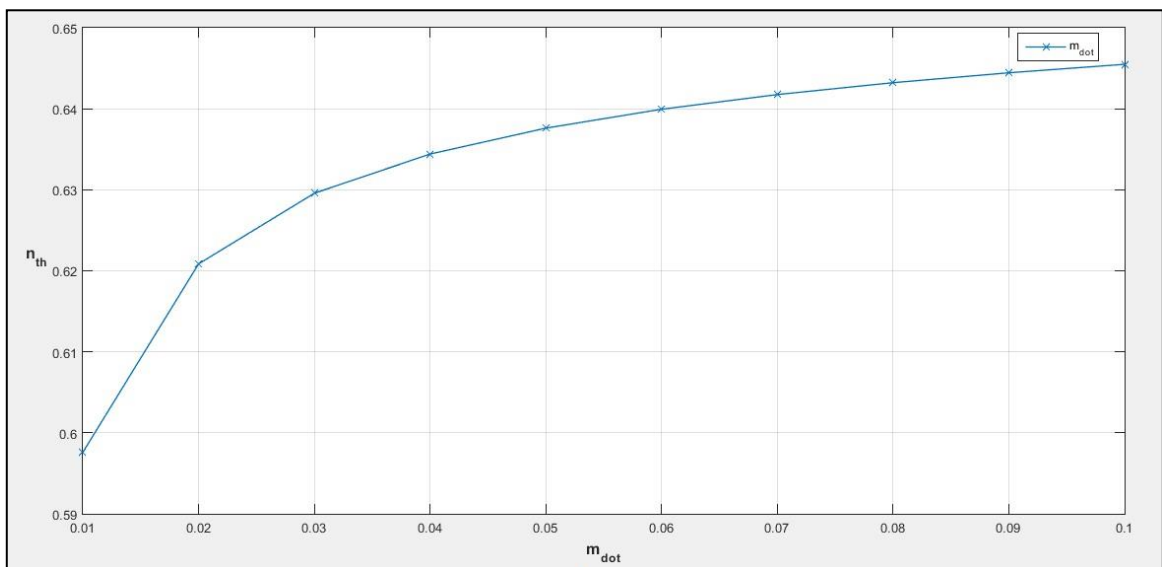
Διάγραμμα 4.2 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης

Διάγραμμα 4.3: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_i$ ) για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_a$ )



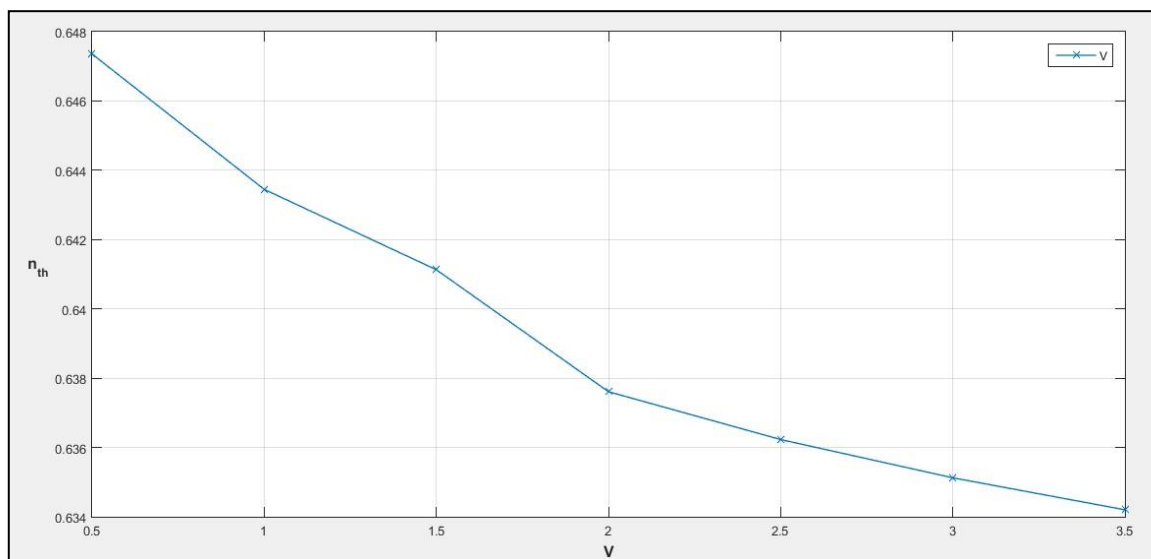
Διάγραμμα 4.3 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης

Διάγραμμα 4.4: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_i$ ) για διάφορες τιμές της παροχής μάζας ρευστού ( $\dot{m}$ )



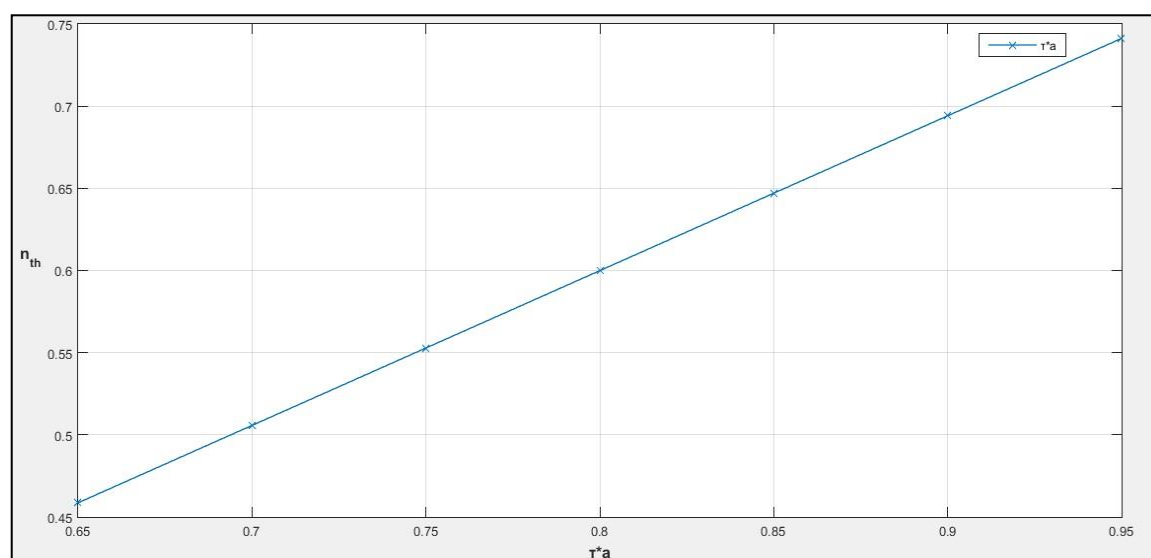
Διάγραμμα 4.4 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης

Διάγραμμα 4.5: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_i$ ) για διάφορες τιμές της ταχύτητας ανέμου ( $V$ )



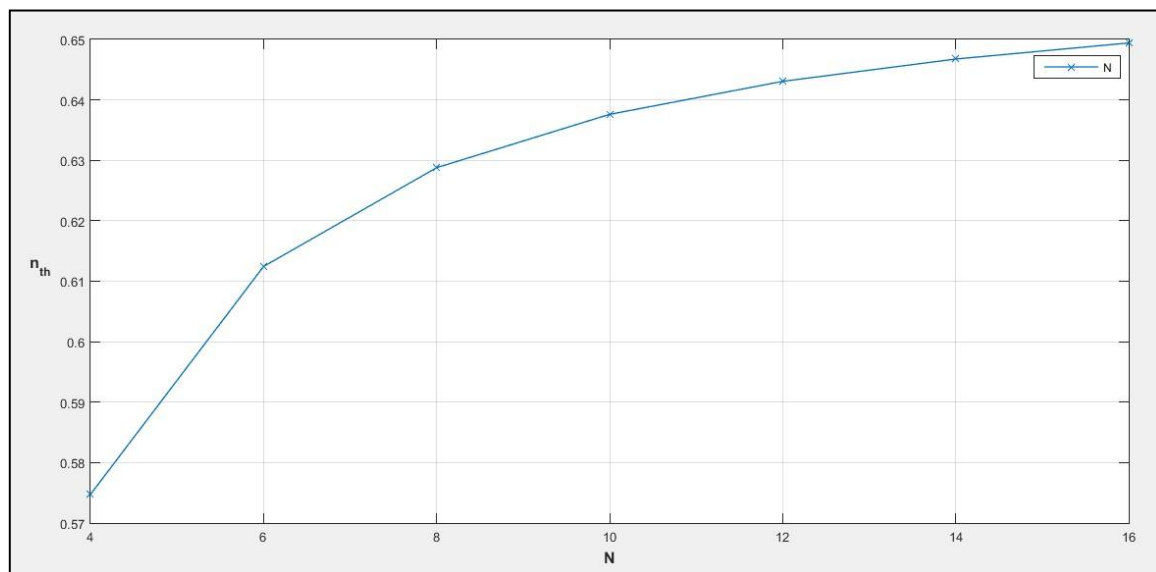
Διάγραμμα 4.5 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης

Διάγραμμα 4.6: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_i$ ) για διάφορες τιμές της διαπερατότητας ( $\tau \cdot a$ )



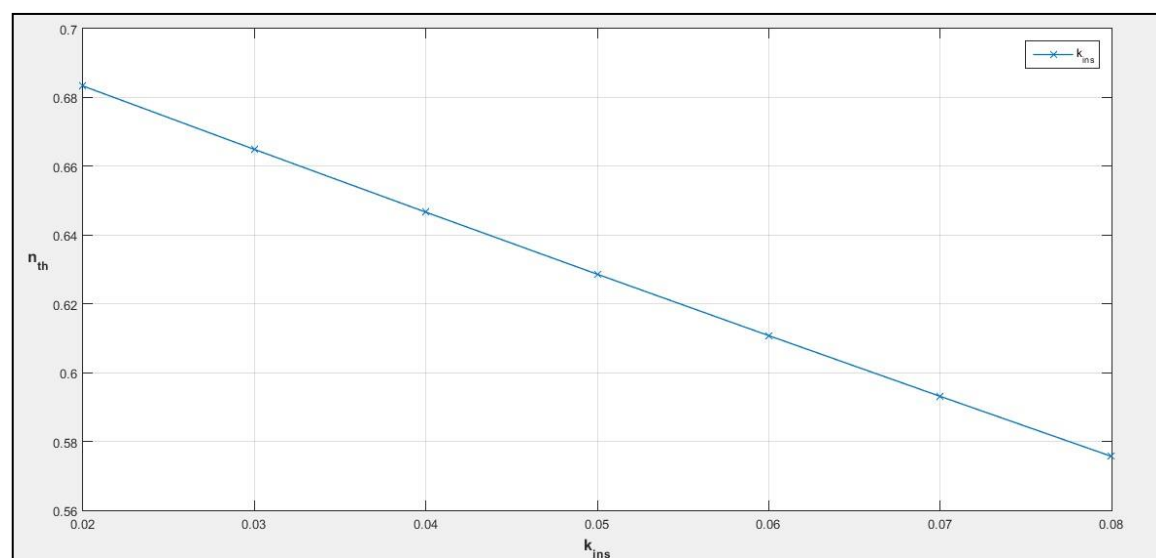
Διάγραμμα 4.6 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης

Διάγραμμα 4.7: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_i$ ) για διάφορες τιμές του αριθμού σωλήνων ( $N$ )



Διάγραμμα 4.7 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης

Διάγραμμα 4.8: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη ( $\eta_i$ ) για διάφορες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας μόνωσης ( $k_{ins}$ )



Διάγραμμα 4.8 Καμπύλη Μεταβολής του Βαθμού Απόδοσης

### 4.3 Ανάλυση Παλινδρόμησης

Ανάλυση Παλινδρόμησης ή αλλιώς Regression Analysis, ονομάζεται ο κλάδος της στατιστικής, ο οποίος εξετάζει τη σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών, με σκοπό την πρόβλεψη μιας από τις υπόλοιπες. Εξαρτημένη μεταβλητή, θεωρείται εκείνη της οποίας η τιμή πρόκειται να προβλεφθεί, ενώ ανεξάρτητη, εκείνη η οποία χρησιμοποιείται, για την πρόβλεψη της εξαρτημένης. Η ανεξάρτητη μεταβλητή, δεν θεωρείται τυχαία, αλλά παίρνει καθορισμένες τιμές. Αντίθετα, η εξαρτημένη μεταβλητή, θεωρείται τυχαία και «οδηγείται» από την ανεξάρτητη.

Στην παρούσα διπλωματική, η εξαρτημένη μεταβλητή ( $n_i$  την οποία θα θέσουμε  $Y$ ) αποτελεί συνεχές μέγεθος και ακολουθεί κανονική κατανομή. Στην περίπτωση που η τυχαία μεταβλητή  $Y$ , εξαρτάται γραμμικά από περισσότερες από μία μεταβλητές  $X$  ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ ), γίνεται αναφορά στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, ή αλλιώς Multiple Linear Regression. Η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητων μεταβλητών είναι η εξής:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (4.1)$$

Το πρόβλημα της παλινδρόμησης, είναι η εύρεση των παραμέτρων  $\beta_i$  που εκφράζουν καλύτερα τη γραμμική συνάρτηση της  $Y$  από τη  $X$ .

Για την ανάλυση της γραμμικής παλινδρόμησης, γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η μεταβλητές  $X$  είναι ελεγχόμενες για το πρόβλημα υπό μελέτη, δηλαδή είναι γνωστές οι τιμές τους.
- Η εξάρτηση της  $Y$  από τις  $X$  είναι γραμμική. [15]

Για την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου, δημιουργήθηκαν τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Στο μηδενικό σενάριο, παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές των μεταβλητών που θα εξετάσουμε, ενώ στα υπόλοιπα γίνεται αλλαγή, μίας μόνο μεταβλητής. Στην τελευταία στήλη, παραθέτονται τα αποτελέσματα του προγράμματος, για τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη.

Πίνακας Σεναρίων

		$T_{f,in}$	$T_a$	$G_T$	$\dot{m}$	$V$	$\tau \cdot a$	$N$	$k_{ins}$	$\eta_i$
	0	313	283	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.6376
Σενάριο 1°	1	290	283	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.7639
	2	310	283	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.6554
	3	330	283	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.5372
	4	350	283	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.4135
Σενάριο 2°	5	313	270	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.5664
	6	313	290	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.6749
	7	313	310	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.7840
	8	313	330	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.8783
Σενάριο 3°	9	313	283	400	0.05	2	0.84	10	0.045	0.5608
	10	313	283	600	0.05	2	0.84	10	0.045	0.6376
	11	313	283	800	0.05	2	0.84	10	0.045	0.6760
	12	313	283	1000	0.05	2	0.84	10	0.045	0.6991
Σενάριο 4°	13	313	283	600	0.01	2	0.84	10	0.045	0.5976
	14	313	283	600	0.04	2	0.84	10	0.045	0.6344
	15	313	283	600	0.07	2	0.84	10	0.045	0.6418
	16	313	283	600	0.10	2	0.84	10	0.045	0.6455
Σενάριο 5°	17	313	283	600	0.05	0.5	0.84	10	0.045	0.6474
	18	313	283	600	0.05	1.5	0.84	10	0.045	0.6411
	19	313	283	600	0.05	2.5	0.84	10	0.045	0.6362
	20	313	283	600	0.05	3.5	0.84	10	0.045	0.6342
Σενάριο 6°	21	313	283	600	0.05	2	0.65	10	0.045	0.4586
	22	313	283	600	0.05	2	0.75	10	0.045	0.5528
	23	313	283	600	0.05	2	0.85	10	0.045	0.6470
	24	313	283	600	0.05	2	0.95	10	0.045	0.7412
Σενάριο 7°	25	313	283	600	0.05	2	0.84	4	0.045	0.5744
	26	313	283	600	0.05	2	0.84	8	0.045	0.6288
	27	313	283	600	0.05	2	0.84	12	0.045	0.6431
	28	313	283	600	0.05	2	0.84	16	0.045	0.6494
Σενάριο 8°	29	313	283	600	0.05	2	0.84	10	0.020	0.6833
	30	313	283	600	0.05	2	0.84	10	0.040	0.6467
	31	313	283	600	0.05	2	0.84	10	0.060	0.6108
	32	313	283	600	0.05	2	0.84	10	0.080	0.5757

Πίνακας 4.1 Σενάρια

Όπως γίνεται φανερό και από τον παραπάνω πίνακα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές που θα εξεταστούν είναι αυτές που προαναφέρθηκαν στην παραμετρική ανάλυση.:

Η γραμμική παλινδρόμηση εφαρμόστηκε με χρήση του προγράμματος EXCEL. Τα δεδομένα του Πίνακα 4.1, εισήχθησαν στο πρόγραμμα και στην συνέχεια υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση για κάθε στήλη (ανεξάρτητη μεταβλητή) με χρήση της εντολής STDEV. Δεδομένου πως τα παραπάνω μεγέθη εκφράζονται από διαφορετικές μονάδες, οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης, δεν θα είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικής βαρύτητας, της κάθε παραμέτρου, στην μεταβολή του βαθμού απόδοσης. Για τον λόγο αυτό, υπολογίζονται οι αντίστοιχοι σταθμισμένοι συντελεστές παλινδρόμησης, με χρήση του παρακάτω τύπου :

$$\frac{\text{Συντελεστής παλινδρόμησης μεταβλητής (i) \cdot Τυπική απόκλιση της (i)}}{\text{τυπική απόκλιση του βαθμού απόδοσης}} \quad (4.2)$$

Η γραμμική παλινδρόμηση, εφαρμόστηκε μέσω της εντολής regression, όπου επεστράφησαν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας αποτελεσμάτων γραμμικής παλινδρόμησης

ΕΞΟΔΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΣ								
Στατιστικά παλινδρόμησης								
Πολλαπλό R	0,993258358							
R Τετράγωνο	0,986562166							
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο	0,982082888							
Τυπικό σφάλμα	0,011501249							
Μέγεθος δείγματος	33							
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ								
	βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F			
Παλινδρόμηση	8	0,23307542	0,029134427	220,2502684	1,5195E-20			
Υπόλοιπο	24	0,00317469	0,000132279					
Σύνολο	32	0,23625011						
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%	Κατώτερο 95,0%	Υψηλότερο 95,0%
Τεταγμένη επί την αρχή	0,050529164	0,109808802	0,460155861	0,649546211	-0,176105065	0,277163392	-0,176105065	0,277163392
T_fin	-0,005832766	0,000246897	-23,62424629	3,96513E-18	-0,006342338	-0,005323195	-0,006342338	-0,005323195
T_a	0,005326977	0,000209703	25,40243057	7,4103E-19	0,00489417	0,005759783	0,00489417	0,005759783
G_T	0,000207312	2,37382E-05	8,733290585	6,45753E-09	0,000158319	0,000256305	0,000158319	0,000256305
m_dot	0,481901398	0,169824071	2,83765073	0,009095926	0,131401743	0,832401053	0,131401743	0,832401053
V	-0,00445	0,005143515	-0,865167092	0,395513023	-0,015065693	0,006165693	-0,015065693	0,006165693
τ*a	0,927057244	0,048796675	18,99836909	5,72838E-16	0,826345856	1,027768631	0,826345856	1,027768631
N	0,0059825	0,001285879	4,65246034	0,00010049	0,003328577	0,008636423	0,003328577	0,008636423
k_ins	-1,73845408	0,251779204	-6,904677007	3,85426E-07	-2,258100817	-1,218807343	-2,258100817	-1,218807343

Πίνακας 4.2 Γραμμική Παλινδρόμηση



Με χρήση των παραπάνω, σε συνδυασμό με τον τύπο 4.2 υπολογίζονται οι εξής σταθμισμένους συντελεστές :

Πίνακας Σταθμισμένων συντελεστών

Ανεξάρτητες μεταβλητές	Σταθμισμένοι συντελεστές
$T_{f,in}$	55,93%
$T_a$	60,19%
$G_T$	20,68%
$\dot{m}$	6,72%
$V$	2,05%
$\tau \cdot a$	44,98%
$N$	11,01%
$k_{ins}$	16,34%

Πίνακας 4.3 Σταθμισμένοι Συντελεστές

Τα ποσοστά, δείχνουν την βαρύτητα που έχουν οι αντίστοιχες μεταβλητές, ως προς τον βαθμό απόδοσης. Καταλήγοντας, προκύπτει το συμπέρασμα πως η πιο σημαντική μεταβλητή, που φέρει μεγαλύτερη μεταβολή στον βαθμό απόδοσης, είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η θερμοκρασία με την οποία εισέρχεται το ρευστό στον συλλέκτη, ενώ αυτές που επιφέρουν την μικρότερη μεταβολή, είναι η ταχύτητα του ανέμου και η παροχή μάζας του ρευστού.

#### 4.4 Ανάλυση Ρίσκου

Ο υπολογισμός ρίσκου για έναν επίπεδο συλλέκτη, βασίζεται στις αβέβαιες μεταβλητές του προβλήματος οι οποίες συνδέονται με το υψηλότερο ποσοστό κινδύνου. Ως αβέβαιες μεταβλητές χαρακτηρίζονται οι :

- 1) Θερμοκρασία Περιβάλλοντος ( $T_a$ )
- 2) Ηλιακή Ακτινοβολία ( $G_T$ )
- 3) Ένταση ανέμου ( $V$ )

Οι τιμές αυτές δεν είναι διακριτές, αλλά στοχαστικές, αφού δεν μπορούν να καθοριστούν από ανθρώπινο παράγοντα, διότι αποτελούν φυσικά φαινόμενα κατά την ευρεία έννοια. Για τον υπολογισμό και την παρουσίαση του ρίσκου, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Monte Carlo.

##### 4.4.1 Μέθοδος Monte Carlo

Η Monte Carlo, αποτελεί μία πειραματική μέθοδο υπολογισμού αριθμητικών τιμών. Η μέθοδος λειτουργεί, επαναλαμβάνοντας ένα τυχαίο γεγονός πολλές φορές και παρατηρώντας το αποτέλεσμα πειραματικά. Τα στοχαστικά μοντέλα, τα οποία αποτελούν συνήθως το αντικείμενο μιας προσομοίωσης, περιλαμβάνουν τυχαίες μεταβλητές. Οι τιμές αυτών των μεταβλητών, θα πρέπει να καθορισθούν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, πράγμα που επιτυγχάνεται με την παραγωγή και χρήση τυχαίων αριθμών. Οι τυχαίες μεταβλητές του μοντέλου, ακολουθούν κάποιες στατιστικές κατανομές, τις οποίες θα πρέπει φυσικά, να ακολουθούν και τα τυχαία δείγματα αυτών των μεταβλητών.[17]

Στην προκειμένη περίπτωση, η τιμή που θέλουμε να προσεγγίσουμε με την μέθοδο Monte Carlo, είναι ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη που εξετάζουμε. Ενώ σαν τυχαίες μεταβλητές του προβλήματος, θεωρούνται οι αβέβαιες μεταβλητές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ηλιακή ακτινοβολία, ακολουθούν κανονική κατανομή, ενώ η ένταση του ανέμου ακολουθεί κατανομή Weibull.

Για τον προσδιορισμό των μεταβλητών που θα χρειαστούν για τις κατανομές, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μετεωρολογικές υπηρεσίες (Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και Meteo). Τα δεδομένα σχετικά με την θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ηλιακή ακτινοβολία, εισήχθησαν στο πρόγραμμα Excel, όπου υπολογίστηκε η μέση τιμή

και η διασπορά τους, με τις ανάλογες εντολές (AVERAGE και STDEV αντίστοιχα). Οι εντολές στο πρόγραμμα Matlab για τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που ακολουθούν κανονική κατανομή είναι οι εξής :

1) normrnd(18.7333,6.427703), για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

2) normrnd(670.0833,204.1989), για την ηλιακή ακτινοβολία

Η πρώτη μεταβλητή των εντολών, αναφέρεται στην μέση τιμή, ενώ η δεύτερη στην διασπορά του δείγματος.

Για την περίπτωση της έντασης του ανέμου, που ακολουθεί την κατανομή Weibull, κρίνεται αναγκαία μια πιο εκτενής διαδικασία για την εύρεση των απαραίτητων τιμών. Η κατανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά, στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100m από το έδαφος.

$$f(V) = \frac{k}{c} \cdot \left[\frac{V}{c}\right]^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (4.3)$$

Οι δύο τιμές που χρειάζεται να υπολογιστούν, είναι το c και το k. Η παράμετρος c ονομάζεται παράμετρος κλίμακας και συνδέεται με την μέση ταχύτητα του ανέμου. Ενώ η παράμετρος k, ή παράμετρος «μορφής» είναι αντιστρόφως ανάλογη της διακύμανσης  $\sigma^2$  των ταχυτήτων του ανέμου, ως προς την μέση ταχύτητα.

Αρχικά, γίνεται η υπόθεση πως τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι 12, ένα για κάθε μήνα του χρόνου. Τα δεδομένα, εισάγονται στο excel, ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά και αριθμούνται από το 1 έως το 12. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η συνάρτηση ολικής πιθανότητας, όπου :

$$F = \frac{\text{αριθμός ταξινόμησης}-0,5}{\text{μέγεθος δεδομένων}} \quad (4.4)$$

Έπειτα υπολογίζονται τα ζεύγη x,y, όπου :

$$x = \ln(V) \quad (4.5)$$

$$y = \ln(-\ln(1 - F)) \quad (4.6)$$

Έχοντας υπολογίσει τις τιμές των x,y αναζητούμε τα A,B της εξίσωσης :

$$y = A + B \cdot x \quad (4.7)$$

Για τον υπολογισμό των A,B, εφαρμόζεται μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Διαφορετικά, φτιάχνοντας το διάγραμμα των τιμών του x και y στο Excel, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης της γραμμής τάσης και της εξίσωσής της, από την οποία εξάγουμε τις παραμέτρους A,B.

Τέλος, για τον υπολογισμό των c, k ισχύουν οι εξής τύποι :

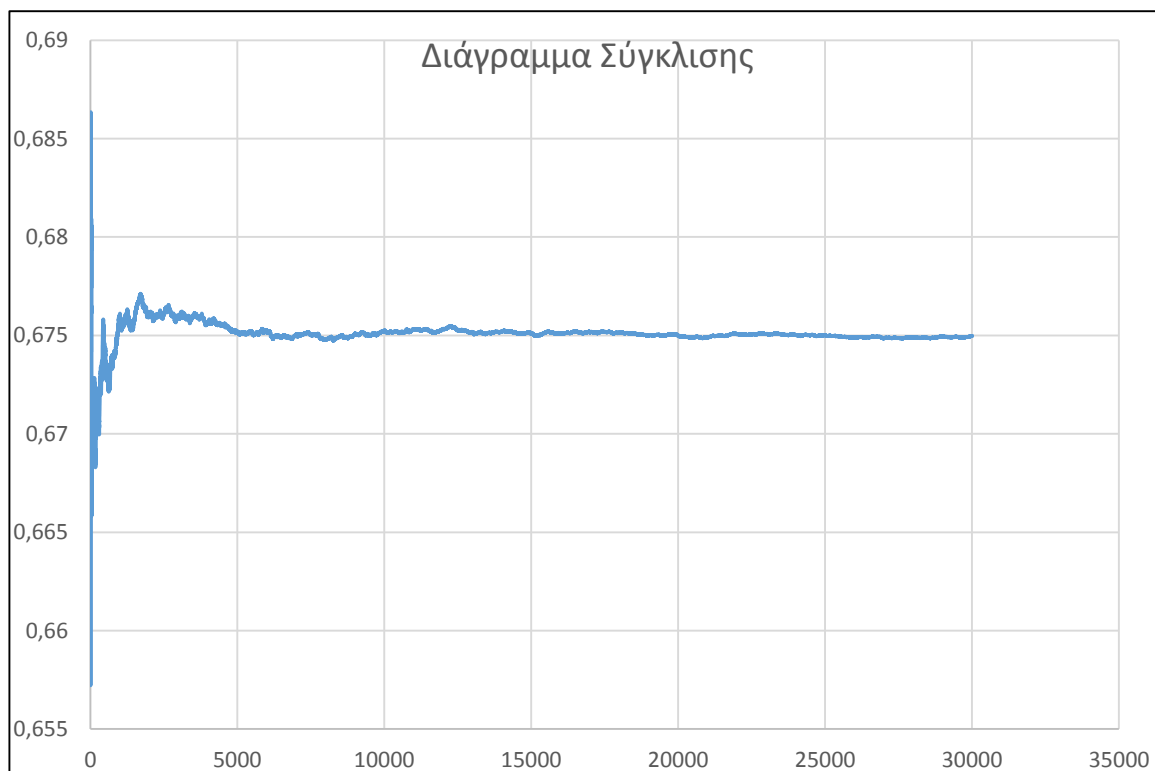
$$k = B \quad (4.8)$$

$$c = e^{-\frac{A}{B}} \quad (4.9)$$

Η εντολή στο πρόγραμμα Matlab, για τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών που ακολουθεί κατανομή Weibull, είναι η εξής :

wblrnd(3.8662,9.7104), όπου ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στην παράμετρο c, ενώ ο δεύτερος στην k

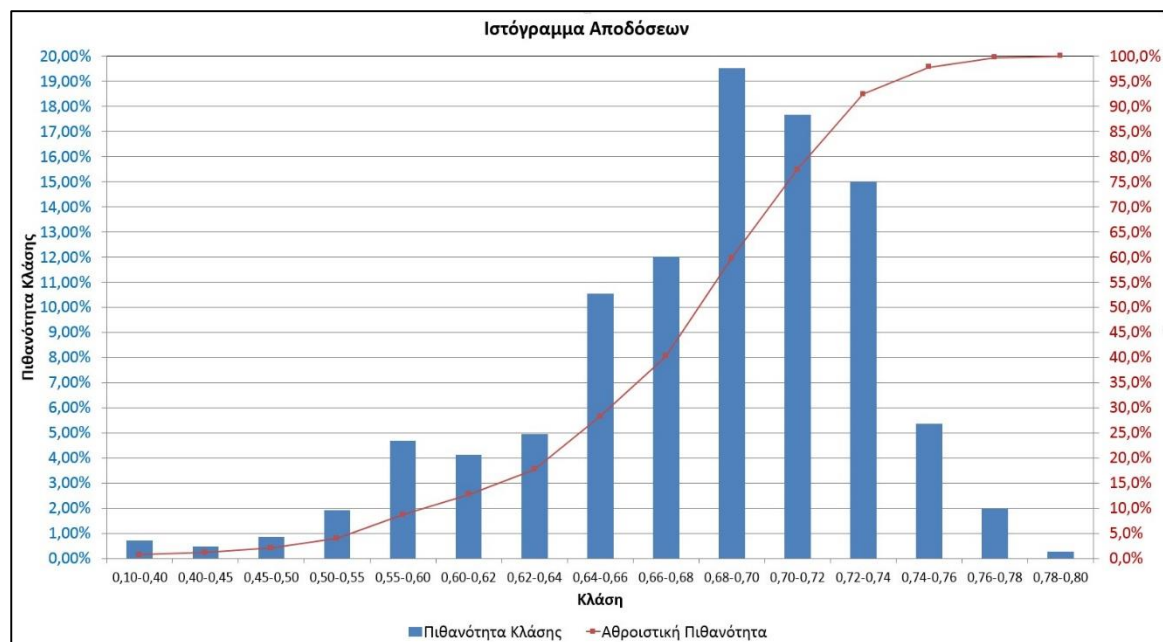
Με χρήση των παραπάνω εντολών, εφαρμόζεται ο κώδικας 30 χιλιάδες φορές. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα, κατασκευάζεται το διάγραμμα σύγκλισης, το οποίο μας δείχνει μετά από πόσες επαναλήψεις, η μέση τιμή των αποτελεσμάτων συγκλίνει.



Διάγραμμα 4.9 Διάγραμμα Σύγκλισης

Για την δημιουργία του διαγράμματος, έγινε εισαγωγή των αποτελεσμάτων του κώδικα σε αρχείο Excel, όπου υπολογίστηκε η μέση τιμή για κάθε στοιχείο, μέχρι και αυτό που εξετάζεται. Δηλαδή, το πρώτο στοιχείο παραμένει ίδιο, για το δεύτερο υπολογίζεται η μέση τιμή από τα πρώτα δύο, για το τρίτο στοιχείο υπολογίζεται η μέση τιμή από τα πρώτα τρία στοιχεία και ούτω καθεξής, μέχρι και το τελευταίο στοιχείο. Παρατηρώντας το διάγραμμα, γίνεται φανερό, πως από τις 15 χιλιάδες επαναλήψεις τα αποτελέσματα συγκλίνουν στην τιμή 0,675, δηλ. σε απόδοση συλλέκτη με 67,5% απόδοση.

Στη συνέχεια, δημιουργείται το ιστόγραμμα με χρήση των αποτελεσμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται, με χρήση του πρόσθετου «ανάλυση δεδομένων» του προγράμματος Excel, το οποίο δημιουργεί μια στήλη κλάσης και μια συχνοτήτων. Με πιο απλά λόγια, χωρίζει το διάστημα τιμών των αποτελεσμάτων σε κλάσεις και υπολογίζει την συχνότητα με την οποία τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε κάθε κλάση.[2]



Διάγραμμα 4.10 Ιστόγραμμα Αποδόσεων

Παρατηρώντας το ιστόγραμμα, συμπεραίνουμε πως οι τιμές ακολουθούν αρνητική ασύμμετρη κατανομή, αφού οι περισσότερες από τις τιμές βρίσκονται αριστερά από την κορυφή της καμπύλης. Ακόμα διαπιστώνεται πως η πιο συχνή τιμή, βρίσκεται κοντά στο 0,703.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

Εστιάζοντας στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, επιλέχθηκαν κάποιες μεταβλητές και παρουσιάστηκαν διαγράμματα μεταβολής τους, σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης του συλλέκτη. Από τα διαγράμματα γίνεται φανερό, πως όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού, η ταχύτητα ανέμου και η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης, η απόδοση μειώνεται, αντίθετα με τις υπόλοιπες μεταβλητές. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται πως στα διαγράμματα των δύο θερμοκρασιών, η μεταβολή τους επιφέρει μεγάλη αλλαγή στην απόδοση του συλλέκτη, αντίθετα από τα διαγράμματα της παροχής μάζας και ταχύτητας του ανέμου. Με την ανάλυση παλινδρόμησης, επιβεβαιώνεται αυτή η σχέση των μεταβλητών με την απόδοση. Παρουσιάζοντας πια αριθμητικά μεγέθη για την σχέση αλληλεπίδρασης, δίνεται το αποτέλεσμα πως η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι η μεταβλητή με την μεγαλύτερη μεταβολή της απόδοσης και η ταχύτητα ανέμου αυτή με την μικρότερη μεταβολή.

Συνεχίζοντας, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo, για την διερεύνηση ρίσκου στις αβέβαιες καιρικές μεταβλητές. Με την εισαγωγή των τυχαίων αριθμών στον κώδικα, γίνονται 30 χιλιάδες επαναλήψεις. Το διάγραμμα σύγκλισης, μας επιβεβαιώνει πως είναι αρκετές, αφού η μέση τιμή συγκλίνει από τις 15 χιλιάδες επαναλήψεις. Τέλος, παρουσιάζεται το ιστόγραμμα αποδόσεων, από το οποίο διαπιστώνεται το εξής :

Αποδόσεις	Πιθανότητα
Μικρότερη του 0,6	8,627%
Από 0,6 έως 0,69	51,127%
Μεγαλύτερη από 0,7	40,247%

Πίνακας 5.1 Πιθανότητες Απόδοσης

Έτσι συμπεραίνεται, πως από πλευράς πιθανοτήτων είναι εξαιρετικά σπάνιο η απόδοση να πέσει κάτω του 0,6. Πράγμα που σημαίνει, πως ο συλλέκτης θα λειτουργεί σε αποδεκτά επίπεδα βαθμού απόδοσης, δηλαδή κοντά στο 0,7.

Μελλοντικές προτάσεις για εργασίες :

1. Προτείνεται να μοντελοποιηθούν και να αναλυθούν με παρόμοιοι τρόπο και άλλες τεχνολογίες ηλιακών συλλεκτών όπως του συλλέκτη κενού τύπου U με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των τεχνολογιών αλλά και την σύγκριση τους.
2. Ακόμη θα μπορούσε να γίνει οικονομοτεχνική μελέτη σχετικά με τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη ή και πάνω σε διαφορετική τεχνολογία ηλιακού συλλέκτη, με σκοπό να ενταχθεί και ο οικονομικός παράγοντας των παραμέτρων.

## Παράρτημα Α

### Κυρίως Πρόγραμμα (main)

```

1. T_a=283;                %% Θερμοκρασία περιβάλλοντος
2. T_p=313;                %% Θερμοκρασία πλάκας απορρόφησης
3. T_fin=313;              %% Θερμοκρασία εισερχόμενου ρευστού
4. T_fout=321;             %% Υπόθεση #1 Θερμοκρασία εξερχ. ρευστού
5. T_fm=(T_fin+T_fout)/2;  %% Μέση θερμοκρασία ρευστού
6. T_c2=290;               %% Υπόθεση #2 Θερμοκρασία εξωτ. καλύμ.
7. T_c1=300;               %% Υπόθεση #3 Θερμοκρασία εσωτ. καλύμ.
8. G_T=600; ta=0.84; S=ta*G_T; %% Ακτινοβολία , Διαπερατότητα
9. e_c=0.88; e_p=0.1;      %% Συντελ. εκπομπής καλύμ. , πλάκας απορρόφ.
10. A_c=2; A_e=0.543;      %% Επιφάνεια συλλέκτη, πλευρική επιφάνεια
11. W=0.1;                 %% Απόσταση μεταξύ σωλήνων
12. d=0.0004;              %% Πάχος απορροφητή
13. D=0.015;               %% Εξωτερική διάμετρος σωλήνα
14. D_i=0.0135;            %% Εσωτερική διάμετρος σωλήνα
15. L=2;                    %% Μήκος συλλέκτη
16. L_b=0.05;              %% Μήκος κάτω πλευράς
17. L_e=0.025;             %% Πλευρικό μήκος
18. L_pc1=0.040;           %% Απόσταση εσωτ. καλύμ. και απορροφ. επιφ.
19. L_c1c2=0.020;          %% Απόσταση εξωτερικού και εσωτ. καλύμ.
20. V=2;                    %% Ταχύτητα ανέμου
21. sb=5.67*10^(-8);        %% Σταθερά Boltzmann
22. n=10; g=9.82;          %% Αριθμός σωλήνων, σταθερά βαρύτητας
23. k_bond=35;              %% Θερμική αγωγιμότητα συνδέσμου
24. k_p=372.15;             %% Θερμική αγωγιμότητα χαλκού
25. k_ins=0.045;            %% Θερμική αγωγιμότητα μόνωσης
26. m_par=0.05;             %% Παροχή μάζας
27. b=degtorad(30);         %% Κλίση συλλέκτη

28. [F,m_abs,U_L,U_e,U_b,h_rpc1,h_rc1c2,h_rac2,h_ac2,T_pc1,k_pc1,v_pc1,Pr_pc1,
    b_kyb_pc1,Ra_pc1,Nu_pc1,h_pc1,T_c1c2,k_c1c2,v_c1c2,Pr_c1c2,b_kyb_c1c2,
    Ra_c1c2,Nu_c1c2,h_c1c2,U_t,T_c1,T_c2]=epanaliptikh_gia_U_t(sb,T_c1,T_c2,
    T_p,e_p,e_c,T_a,V,L,g,b,L_pc1,L_c1c2,L_b,k_ins,A_e,A_c,L_e,k_p,d,W,D);
29. [Pr_w,Re_Di,Nu_w,h_fi,F_par_apod,F_R,F_par_rohs,q_u,T_fm,T_fout]=epanalip-
    ptikh_gia_T_fm(T_fm,m_par,n,D_i,L,U_L,W,D,F,k_bond,A_c,S,T_fin,T_a);
30. n_th=F_R*ta-F_R*U_L*(T_fin-T_a)/G_T;

```



## Συνάρτηση υπολογισμού του συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών ( $U_L$ )

```

1. function [F,m_abs,U_L,U_e,U_b,h_rpc1,h_rc1c2,h_rac2,h_ac2,T_pc1,k_pc1,
   v_pc1,Pr_pc1,b_kyb_pc1,Ra_pc1,Nu_pc1,h_pc1,T_c1c2,k_c1c2,v_c1c2,Pr_c1c2,
   b_kyb_c1c2,Ra_c1c2,Nu_c1c2,h_c1c2,U_t,T_c1,T_c2]=epanalptikh_gia_U_t(sb,
   T_c1,T_c2,T_p,e_p,e_c,T_a,V,L,g,b,L_pc1,L_c1c2,L_b,k_ins,A_e,A_c,L_e,k_p,
   d,W,D)
2. filename = 'Thermikes_idiothtes_aera.xlsx';
3. A = xlsread(filename);
4. rowsA=19;
5. temp=1; temp1=1;
6. while abs(T_c1-temp)/temp>=0.001 && abs(T_c2-temp1)/temp1>=0.001
7.     h_rpc1=(sb*(T_p^2+T_c1^2)*(T_p+T_c1))/((1/e_p)+(1/e_c)-1);
8.     h_rc1c2=(sb*(T_c1^2+T_c2^2)*(T_c1+T_c2))/((1/e_c)+(1/e_c)-1);
9.     h_rac2=e_c*sb*(T_c2^2+T_a^2)*(T_c2+T_a);
10.    h_ac2=(8.6*(V^0.6))/(L^0.4);
11.    T_pc1=(T_p+T_c1)/2;
12.    [k_air_pc1,m_pc1,Cp_pc1,p_pc1]=grammikh_parembolh(rowsA,T_pc1,A);
13.    k_pc1=k_air_pc1;
14.    v_pc1=m_pc1/p_pc1;
15.    Pr_pc1=m_pc1*Cp_pc1/k_pc1;
16.    b_kyb_pc1=((T_p+T_c1)/2)^-1;
17.    Ra_pc1=(g*b_kyb_pc1*Pr_pc1*(T_p-T_c1)*L_pc1^3)/(v_pc1^2);
18.    [x,y]=nonegativ(Ra_pc1,b);
19.    Nu_pc1=1+1.446*x*(1-(1708*(sin(1.8*b)^1.6))/(Ra_pc1*cos(b)))+y;
20.    h_pc1=k_pc1*Nu_pc1/L_pc1;
21.    T_c1c2=(T_c2+T_c1)[k_air_c1c2,m_c1c2,Cp_c1c2,p_c1c2]=grammikh_
       parembolh(rowsA,T_c1c2,A);
22.    k_c1c2=k_air_c1c2;
23.    v_c1c2=m_c1c2/p_c1c2;
24.    Pr_c1c2=m_c1c2*Cp_c1c2/k_c1c2;
25.    b_kyb_c1c2=((T_c1+T_c2)/2)^-1;
26.    Ra_c1c2=(g*b_kyb_c1c2*Pr_c1c2*(T_c1-T_c2)*L_c1c2^3)/(v_c1c2^2);
27.    [x1,y1]=nonegativ(Ra_c1c2,b);
28.    Nu_c1c2=1+1.446*x1*(1-(1708*(sin(1.8*b)^1.6))/(Ra_c1c2*cos(b)))+y1;
29.    h_c1c2=k_c1c2*Nu_c1c2/L_c1c2;
30.    U_t=((1/(h_rpc1+h_pc1))+1/(h_rc1c2+h_c1c2))+1/(h_ac2+h_rac2))^(-1);
31.    temp=T_c1;
32.    temp1=T_c2;
33.    T_c1=T_p-(U_t*(T_p-T_a)/(h_rpc1+h_pc1));
34.    T_c2=T_a+(U_t*(T_p-T_a)/(h_rac2+h_ac2));
35. end
36. U_b=k_ins/L_b;
37. U_e=k_ins*A_e/(L_e*A_c);
38. U_L=U_t+U_b+U_e;
39. m_abs=sqrt(U_L/(k_p*d));
40. F=tanh(sqrt(U_L/(k_p*d))*(W-D)/2)/(sqrt(U_L/(k_p*d))*(W-D)/2);

```

**Συνάρτηση υπολογισμού της μέσης θερμοκρασίας του ρευστού ( $T_{fm}$ )**

```

1. function [Pr_w,Re_Di,Nu_w,h_fi,F_par_apod,F_R,F_par_rohs,q_u,T_fm,T_fout]
   =epanalitikh_gia_T_fm(T_fm,m_par,n,D_i,L,U_L,W,D,F,k_bond,A_c,S,T_fin,T
   _a)
2. filename1 = 'Thermikes_idiothtes_nerou.xlsx';
3. B = xlsread(filename1);
4. rowsB=16;
5. temp2=1;
6. while abs(T_fm-temp2)/temp2>=0.001
7.     [k_w,m_w,Cp_w,p_w]=grammikh_parembolh(rowsB,T_fm,B);
8.     Pr_w=m_w*Cp_w/k_w;
9.     Re_Di=(4*m_par/n)/(pi*D_i*m_w);
10.    Nu_w=3.66+(0.0668*(D_i/L)*Re_Di*Pr_w)/(1+0.04*((D_i/L)*Re_Di*Pr_w)
        ^2/3));
11.    h_fi=Nu_w*k_w/D_i;
12.    F_par_apod=(1/U_L)/(W*((1/(U_L*(D+F*(W-D))))+(1/(pi*D_i*h_fi))+0));
13.    F_R=(m_par*Cp_w/(A_c*U_L))*(1-exp(-
        A_c*U_L*F_par_apod/(m_par*Cp_w)));
14.    F_par_rohs=F_R/F_par_apod;
15.    q_u=A_c*F_R*(S-U_L*(T_fin-T_a));
16.    temp2=T_fm;
17.    T_fm=T_fin+q_u*(1-F_par_rohs)/(A_c*U_L*F_R);
18.    T_fout=T_fin+q_u/(m_par*Cp_w);
19. end

```

**Συνάρτηση ελέγχου μη αρνητικότητας**

```

1. function [x1 y1]=nonegativ(Ra_c1c2,b)
2.    x1=(1-1708/(Ra_c1c2*cos(b)));
3.    y1=((Ra_c1c2*cos(b)/5830)^(1/3)-1);
4.    if x1<0
5.        x1=0;
6.    end
7.    if y1<0
8.        y1=0;
9.    end
10. end

```

**Συνάρτηση γραμμικής παρεμβολής**

```

1. function [k_air_pc1,m_pc1,Cp_pc1,p_pc1]=grammikh_parembolh(m,T_pc1,A)
2.    for i=1:m-1
3.        if (T_pc1>=A(i,1))&&(T_pc1<=A(i+1,1))
4.            k_air_pc1=A(i,5)+(A(i+1,5)-A(i,5))*(T_pc1-A(i,1))/(A(i+1,1)-A(i,1));
5.            m_pc1=A(i,4)+(A(i+1,4)-A(i,4))*(T_pc1-A(i,1))/(A(i+1,1)-A(i,1));
6.            Cp_pc1=A(i,3)+(A(i+1,3)-A(i,3))*(T_pc1-A(i,1))/(A(i+1,1)-A(i,1));
7.            p_pc1=A(i,2)+(A(i+1,2)-A(i,2))*(T_pc1-A(i,1))/(A(i+1,1)-A(i,1));
8.        end
9.    end
10. End

```

## Παράρτημα Β

### Πίνακας Θερμικών Ιδιοτήτων Αέρα

Θερμοκρασία (K)	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Ειδική Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg · K) * 10 <sup>3</sup>	Δυναμικό Ιξώδες (kg/m · s)	Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/m · K)
100	3,6010	1026,6	0,00000692	0,00925
150	2,3675	1009,9	0,00001028	0,01374
200	1,7684	1006,1	0,00001329	0,01809
250	1,4128	1005,3	0,00001488	0,02227
300	1,1774	1005,7	0,00001983	0,02624
350	0,9980	1009,0	0,00002075	0,03003
400	0,8826	1014,0	0,00002286	0,03365
450	0,7833	1020,7	0,00002484	0,03707
500	0,7048	1029,5	0,00002671	0,04038
550	0,6423	1039,2	0,00002848	0,04360
600	0,5879	1055,1	0,00003018	0,04659
650	0,5430	1063,5	0,00003177	0,04953
700	0,5030	1075,2	0,00003332	0,05230
750	0,4709	1085,6	0,00003481	0,05509
800	0,4405	1097,8	0,00003625	0,05779
850	0,4149	1109,5	0,00003765	0,06028
900	0,3925	1121,2	0,00003899	0,06279
950	0,3716	1132,1	0,00004023	0,06225
1000	0,3524	1141,7	0,00004152	0,06752

Πίνακας Β.1 Θερμικές Ιδιότητες Αέρα από Πηγή [1]

## Πίνακας Θερμικών Ιδιοτήτων Νερού

Θερμοκρασία (K)	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Ειδική Θερμοχωρητικ. (kJ/kg · K) * 10 <sup>3</sup>	Δυναμικό Ιξώδες (kg/m · s)	Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/m · K)	Κινηματικό Ιξώδες (m <sup>2</sup> /s) * 10 <sup>-6</sup>
274	1002,28	4217,8	0,00179207664	0,552	1,788
294	1000,52	4181,8	0,00100652312	0,597	1,006
314	994,59	4178,4	0,00065444022	0,628	0,658
334	985,46	4184,3	0,00047104988	0,651	0,478
354	974,08	4196,4	0,00035456512	0,668	0,364
374	960,63	4216,1	0,00028242522	0,680	0,294
394	945,25	4250,0	0,00023347675	0,685	0,247
414	928,27	4283,0	0,00019864978	0,684	0,214
434	909,69	4342,0	0,00017284110	0,680	0,190
454	889,03	4417,0	0,00015380219	0,675	0,173
474	866,76	4505,0	0,00013868160	0,665	0,160
494	842,41	4610,0	0,00012636150	0,652	0,150
514	815,66	4756,0	0,00011663938	0,635	0,143
534	785,87	4949,0	0,00010766419	0,611	0,137
554	752,55	5208,0	0,00010159425	0,580	0,135
574	714,26	5728,0	0,00009642510	0,540	0,135

Πίνακας Β.2 Θερμικές Ιδιότητες Νερού από Πηγή [10]

## Βιβλιογραφία

- [1] Αραμπατζής, Γ. & Ασημακόπουλος, Δ. Κ. (2015) *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Σοφία
- [2] Αραμπατζής, Γ. & Ασημακόπουλος, Δ. Κ. (2002) *Τεχνικές Ανάλυσης Δεδομένων &*
- [3] Αραμπατζής, Γ., Ασημακόπουλος, Δ. Κ. & Λυγερού, Β. Ι. (2012) *Μεταφορά θερμότητας και μάζας*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [4] Beckman, William A. & Duffie, John A. (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Γεωργίου, Α., Κωνσταντάρας, Ι., Καπάρης, Κ. (2015) *Εισαγωγή στα Μοντέλα Προσομοίωσης* [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2489>
- [6] Δάρλας, Α. (2012) *Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα* (Διπλωματική Εργασία), Σχολή ΕΜΠ, Αθήνα
- [7] Κωνσταντίνος, Ι. (2010) *Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί Συλλέκτες* (Διπλωματική Εργασία), Σχολή ΕΜΠ, Αθήνα
- [8] Κακάτσιος, Ξ. (2006) *Αρχές μεταφοράς θερμότητας και μάζας* Εκδόσεις : Συμεών
- [9] Καλαντζής, Α. (2017) *Μοντελοποίηση και Υπολογιστική Ανάλυση Ηλιακού Συλλέκτη με Κενό Αέρος* (Διπλωματική Εργασία), Σχολή ΕΜΠ, Αθήνα
- [10] Καλογήρου, Σ. Α. (2019) *Solar Energy Engineering* Ανακτήθηκε 30 Σεπτεμβρίου 2019, από ιστοσελίδα <https://www.oreilly.com/library/view/solar-energy-engineering/9780123745019/xhtml/APP005.html>
- [11] Κομηνέας, Σ. & Χαρμανδάρης, Ε. (2015) *Μαθηματική Μοντελοποίηση*, ΕΜΠ, Αθήνα
- [12] Κονταξάκη, Ν. (2015) *Οικονομική Βιωσιμότητα Ηλιοθερμικού Σταθμού μικρής Ισχύος Τεχνολογίας Fresnel. Η περίπτωση επένδυσης στην Κρήτη* (Διπλωματική Εργασία), Σχολή ΠΑΠΕΙ, Αθήνα

- [13] Μιχαλάκη, Ι. (2015) *Βελτιστοποίηση Σχεδιαστικών Παραμέτρων Επίπεδου Ηλιακού Συλλέκτη με τη βοήθεια του Λογισμικού Engineering Equation Solver* (Διπλωματική Εργασία), Σχολή ΕΜΠ, Αθήνα
- [14] Παπάζογλου, Κ. (2013) *Προσομοίωση Πρότυπου Ηλιακού Συλλέκτη με Ανάπτυξη Υπολογιστικού Κώδικα* (Διπλωματική Εργασία), Σχολή ΕΜΠ, Αθήνα
- [15] Πετρίδης, Δ. (2015) *Ανάλυση πολυμεταβλητών τεχνικών*. (ηλεκτρ. βιβλ.) Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Ανακτήθηκε στις 14 Οκτωβρίου 2019 Διαθέσιμο στο: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/2126>
- [16] Πούλιος, Κ. (2016) *Σχεδίαση και Προσομοίωση Συγκεντρωτικού Ηλιακού Συλλέκτη Fresnel στο Solidworks* (Διπλωματική Εργασία), Σχολή ΕΜΠ, Αθήνα
- [17] Ρουμελιώτης, Μ. (2001) *Μοντελοποίηση και Προσομοίωση*, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Πάτρα
- [18] Σφοντούρη, Α. (2010) *Αναλυτική Μοντελοποίηση Παραβολικού Συγκεντρωτικού Συλλέκτη για εφαρμογές παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας* (Διπλωματική Εργασία), Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά