



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ  
ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΠΑΡΑΒΟΛΟΕΙΔΕΣ ΚΑΤΟΠΤΡΟ»**

**Μπούσι Εριόν**

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης

Αθήνα, Ιούλιος 2019



## **Ευχαριστίες**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Χρήστο Τζιβανίδη για την βοήθειά του και την ανάθεση του παρόντος θέματος.

Επιπλέον ευχαριστώ θερμά τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Ευάγγελο Μπέλλο που συνέδραμε καθοριστικά για την περάτωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη και συμπαράστασή της καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Πίνακας περιεχομένων

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Περίληψη</b> .....   | <b>vii</b>  |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>viii</b> |
| <b>Επεξήγηση συμβόλων</b> .....   | <b>ix</b>   |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή</b> .....   | <b>1</b>    |
| 1.1 Η ενεργειακή κατάσταση σήμερα .....   | 1           |
| 1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....   | 3           |
| Βιβλιογραφία 1 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....                                    | 7           |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ηλιακή ενέργεια και εφαρμογή στους ηλιακούς συλλέκτες</b> .....  | <b>8</b>    |
| 2.1 Ο Ήλιος .....   | 8           |
| 2.2 Βασικοί ορισμοί .....   | 9           |
| 2.3 Γωνία πρόπτωσης σε κινούμενα επίπεδα .....                                  | 12          |
| 2.4 Είδη ηλιακής ακτινοβολίας .....   | 13          |
| 2.5 Εξασθένιση ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα .....                       | 13          |
| 2.6 Υπολογισμός της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας .....                           | 15          |
| 2.6.1 Μοντέλα βασιζόμενα σε μακροχρόνιες μετρήσεις της ολικής ακτινοβολίας .... | 16          |
| 2.6.2 Χρήση εμπειρικών σχέσεων .....  | 16          |
| 2.6.3 Μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας .....                             | 18          |
| 2.6.4 Υπολογισμός μέσω δορυφόρου .....  | 21          |
| 2.7 Ηλιακοί συλλέκτες .....   | 23          |
| 2.7.1 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες .....  | 23          |
| 2.7.2 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες .....                                    | 25          |
| 2.8 Είδη συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών .....                                 | 26          |
| 2.8.1 Σύνθετος παραβολικός συλλέκτης .....                                      | 26          |
| 2.8.2 Παραβολικός συλλέκτης με κάτοπτρο .....                                   | 28          |
| 2.8.3 Γραμμικός συλλέκτης Fresnel .....   | 30          |
| 2.8.4 Ηλιακός πύργος .....  | 33          |
| 2.8.5 Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο .....                                 | 35          |
| Βιβλιογραφία 2 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....                                    | 36          |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Συγκεντρωτικοί συλλέκτες με παραβολοειδές κάτοπτρο</b> .....     | <b>38</b>   |
| 3.1 Γενικά στοιχεία .....   | 38          |
| 3.1.1 Συγκεντρωτής .....  | 38          |
| 3.1.2 Δέκτης .....  | 40          |
| 3.1.3 Σύστημα παρακολούθησης ηλίου .....  | 41          |



|  |            |
|--|------------|
| 3.1.4 Στηρίγματα .....   | 42         |
| 3.2 Ιστορική εξέλιξη παραβολειδών συλλεκτών .....  | 43         |
| 3.3 Σύγχρονοι συλλέκτες με παραβολοειδές κάτοπτρο .....  | 48         |
| 3.3.1 Schlaich bergermann und partner (sbr) .....  | 48         |
| 3.3.2 Australian National University (ANU).....  | 48         |
| 3.3.3 Stirling Energy Systems (SES) .....  | 49         |
| 3.3.4 Infinia Corporation .....  | 50         |
| 3.3.5 HelioFocus .....   | 50         |
| 3.3.6 Ripasso Energy .....   | 51         |
| 3.4 Εφαρμογές παραβολοειδών συλλεκτών .....  | 52         |
| 3.5 Μελέτες δεκτών τύπου κοιλότητας .....  | 55         |
| 3.5.1 Μελέτες για το σχήμα του δέκτη .....   | 56         |
| 3.5.2 Μελέτες σύγκρισης σχημάτων .....   | 62         |
| 3.5.3 Μελέτες για τα εργαζόμενα μέσα .....   | 67         |
| 3.6 Μαθηματικό μοντέλο συλλέκτη με παραβολοειδές κάτοπτρο .....  | 68         |
| 3.6.1 Οπτική ανάλυση .....   | 68         |
| 3.6.2 Θερμική ανάλυση .....  | 71         |
| 3.6.3 Εξεργειακή ανάλυση .....   | 74         |
| 3.6.4 Υδραυλική ανάλυση .....  | 75         |
| Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....   | 77         |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχεδίαση παραβολοειδούς κατόπτρου, προσομοίωση της ροής και έλεγχος εγκυρότητας .....</b> | <b>80</b>  |
| 4.1 Εισαγωγή .....   | 80         |
| 4.2 Σχεδιασμός συγκεντρωτή .....   | 80         |
| 4.3 Προσομοίωση ροής και ορισμός στόχων .....  | 81         |
| 4.3.1 Ενημέρωση βιβλιοθήκης του Solidworks .....   | 82         |
| 4.3.2 Δημιουργία Project .....   | 85         |
| 4.3.3 Δεδομένα εισόδου .....   | 90         |
| 4.3.4 Ορισμός πλεγμάτων, πλήθους ακτινών και παραμετρικά τρεξίματα .....                                 | 96         |
| 4.4 Μέθοδος αξιολόγησης συλλέκτη με βάση τα αποτελέσματα του Solidworks .....                            | 98         |
| 4.5 Ανεξαρτησία πλέγματος και ηλιακών ακτινών .....  | 101        |
| 4.6 Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλου .....   | 102        |
| Βιβλιογραφία 4 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....   | 107        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα .....</b>  | <b>108</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>5.1 Σχεδίαση, μελέτη και βελτιστοποίηση δεκτών διάφορων σχημάτων .....</b>     | <b>108</b> |
| 5.1.1 Κύλινδρος .....   | 108        |
| 5.1.2 Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο .....   | 118        |
| 5.1.3 Σφαίρα .....  | 126        |
| 5.1.4 Κώνος .....   | 133        |
| 5.1.5 Συνδυασμός κωνικού-κυλινδρικού σχήματος .....                               | 145        |
| <b>5.2 Σύγκριση της απόδοσης μεταξύ των δεκτών διάφορων σχημάτων .....</b>        | <b>155</b> |
| 5.2.1 Σύγκριση οπτικής απόδοσης .....   | 155        |
| 5.2.2 Σύγκριση θερμικής απόδοσης .....  | 160        |
| 5.2.3 Σύγκριση εξεργειακής απόδοσης .....   | 162        |
| <b>5.3 Μελέτη εργαζόμενων μέσων και εύρεση βέλτιστης παροχής μάζας .....</b>      | <b>166</b> |
| 5.3.1 Θερμικό έλαιο (Therminol VP-1).....   | 166        |
| 5.3.2 Νερό .....  | 171        |
| 5.3.3 Τηγμένο άλας .....  | 175        |
| 5.3.4 Αέρας .....   | 180        |
| <b>5.4 Σύγκριση μεταξύ των εργαζόμενων μέσων .....</b>                            | <b>183</b> |
| <b>5.5 Μελέτη της επίδρασης προσθήκης νανοϋλικών στο έλαιο και στο νερό .....</b> | <b>191</b> |
| 5.5.1 Θερμοδυναμικές ιδιότητες νανορευστών .....                                  | 191        |
| 5.5.2 Μελέτη της επίδρασης προσθήκης νανοϋλικών στην θερμική απόδοση .....        | 196        |
| 5.5.3 Μελέτη της επίδρασης προσθήκης νανοϋλικών στην εξεργειακή απόδοση .....     | 200        |
| <b>5.6 Μελέτη της επίδρασης παραμέτρων περιβάλλοντος και υλικών .....</b>         | <b>204</b> |
| <b>5.7 Σύνοψη αποτελεσμάτων και συζήτηση .....</b>                                | <b>208</b> |
| <b>Βιβλιογραφία 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....</b>                                | <b>212</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικών ερευνών .....</b>           | <b>214</b> |
| 6.1 Βασικά συμπεράσματα παρούσας μελέτης .....                                    | 214        |
| 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....   | 216        |

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της οπτικής και θερμικής συμπεριφοράς ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη με παραβολειδές κάτοπτρο, με σκοπό την αύξηση της απόδοσής του. Για τον σχεδιασμό χρησιμοποιείται το λογισμικό Solidworks και για την προσομοίωση της λειτουργίας του συλλέκτη το Solidworks Flow Simulation. Εξετάζονται πέντε διαφορετικά σχήματα δέκτη (κυλινδρικό, ορθογωνικό, σφαιρικό, κωνικό και συνδυασμός κυλινδρικού-κωνικού), για τα οποία βρίσκεται η βέλτιστη γεωμετρία και η βέλτιστη απόσταση από τον δέκτη. Στην συνέχεια συγκρίνονται μεταξύ τους με βάση την θερμική, οπτική και εξεργειακή απόδοση, για να βρεθεί το καλύτερο. Όσον αφορά τα εργαζόμενα μέσα εξετάζεται η απόδοση του συλλέκτη για την χρήση τεσσάρων βασικών εργαζόμενων μέσων (Therminol VP-1, νερό, αέρας και τηγμένο άλας) για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη παροχή μάζας. Στην συνέχεια γίνεται σύγκριση, για να βρεθεί το κατάλληλο εργαζόμενο μέσο ανάλογα τη θερμοκρασία λειτουργίας. Επιπλέον εξετάζεται η προσθήκη νανοϋλικών (Cu, CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και TiO<sub>2</sub>) στο Therminol VP-1 και στο νερό, προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσο βελτιώνουν την απόδοση του συλλέκτη. Τέλος μελετάται η επίδραση περιβαλλοντικών και υλικών παραγόντων.

Πιο αναλυτικά στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται ανασκόπηση της παρούσας και μελλοντικής ενεργειακής κατάστασης, όπου τονίζεται η ανάγκη διεύθυνσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε όλους τους τομείς. Στο **δεύτερο κεφάλαιο** δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του ήλιου και της ηλιακής ενέργειας, με έμφαση στον τρόπο υπολογισμού της άμεσης ακτινοβολίας στο επίπεδο της γης. Επιπλέον παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές κατηγορίες ηλιακών συλλεκτών. Στο **τρίτο κεφάλαιο** γίνεται εκτενής αναφορά στους συλλέκτες με παραβολειδές κάτοπτρο. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι αρχές λειτουργίας, η ιστορική αναδρομή, οι σύγχρονες προσπάθειες εμπορικής χρήσης, οι τομείς εφαρμογής της τεχνολογίας, οι σύγχρονες έρευνες και τέλος το μαθηματικό μοντέλο για την οπτική, θερμική, εξεργειακή και υδραυλική συμπεριφορά του συλλέκτη. Στο **τέταρτο κεφάλαιο** γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου δημιουργίας του μοντέλου στο Solidworks Flow Simulation, δίνοντας έμφαση στα δεδομένα εισόδου και την μέθοδο αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του λογισμικού. Επιπλέον γίνεται ανεξαρτητοποίηση των ηλιακών ακτινών και του πλέγματος. Τέλος γίνεται έλεγχος της εγκυρότητας του μοντέλου, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν, με αποτελέσματα πειραματικών μελετών και με θεωρητικές σχέσεις υπολογισμού του αριθμού Nusselt και του συντελεστή τριβής.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν με την μορφή διαγραμμάτων και πινάκων και γίνεται σχολιασμός τους. Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι: Ο δέκτης κωνοκυλινδρικού σχήματος παρουσιάζει τον μέγιστο οπτικό, θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Για  $T_{in} \leq 350^{\circ}\text{C}$  βέλτιστη επιλογή εργαζόμενου μέσου το Therminol VP-1 και για  $T_{in} > 350^{\circ}\text{C}$  βέλτιστη επιλογή το τηγμένο άλας. Η προσθήκη νανοϋλικών στο νερό και στο λάδι βελτιώνει την εξεργειακή απόδοση του συλλέκτη. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία επηρεάζει σημαντικά την απόδοση, η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, του συντελεστή εκπομπής και της θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού υλικού οδηγεί σε μείωση της απόδοσης. Τέλος, στο **έκτο κεφάλαιο** δίνονται τα βασικά συμπεράσματα από την παρούσα μελέτη και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## Abstract

The subject of this diploma thesis is to study the optical and thermal behaviour of a solar dish collector, in order to achieve higher efficiencies. The Solidworks software is used to design the collector and the Solidworks Flow Simulation to simulate the operation. Five different receiver's shapes (cylindrical, rectangular, spherical, conical, and cylindrical-conical) are examined, for which optimal geometry and optimal distance from receiver is found. Then, they are compared to each other based on thermal, optical and exergetic efficiency of the collector. Additionally, four different basic working fluids (Therminol VP-1, water, air and molten salt) are examined, for a wide range of temperatures, in order to find the optimal mass flow. Then a comparison is made to find the optimum working fluid, according to the operating temperature. Moreover, the addition of nanoparticles (Cu, CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub>) to Therminol VP-1 and water is examined to determine whether they improve the efficiency of the collector. Finally, the influence on the performance of the collector of environmental and material factors is studied.

More specifically, the **first chapter** reviews the current and future energy situation, highlighting the need for penetration of renewable energy sources in all sectors. In the **second chapter** are given the basic characteristics of the sun and solar energy, with emphasis on the ways of calculating the direct normal solar irradiation. In addition, the basic categories of solar collectors are briefly presented. The **third chapter** deals extensively with solar dish collectors. In particular, the operational principles, the historical review, the modern commercial use efforts, the fields of application of technology, the modern research and finally the mathematical model for the optical, thermal, exergetic and hydraulic analysis of the collector, are examined. The **fourth chapter** provides a detailed description of model creation in Solidworks Flow Simulation, emphasizing on the input data and on the model's results evaluation method. Moreover a mesh and number of rays independence study is carried on. Finally, validation of the model is conducted, by comparing the results obtained by the model with experimental results from the literature and with theoretical correlations of the Nusselt number and the friction coefficient.

In the **fifth chapter**, the results are presented in the form of diagrams and tables and they are commented thoroughly. The main conclusions are: The conic-cylindrical receiver has the maximum optical, thermal and exergetic efficiency. Optimal working fluid for  $T_{in} \leq 350^{\circ}\text{C}$  is found Therminol-VP1 and for  $T_{in} > 350^{\circ}\text{C}$  molten salt. The addition of nanoparticles to water and oil improves the exergetic efficiency of the collector. The incident solar irradiation influences significantly the efficiency, the increase of wind velocity, emission coefficient and thermal conductivity of the insulating material leads to a decrease in the thermal and exergetic efficiency. Finally, the **sixth chapter** gives the main conclusions from the present study and makes proposals for future research.

## Επεξήγηση συμβόλων

### Μεγέθη

|                       |  |
|-----------------------|--|
| a                     | Πλευρά ανοίγματος ορθογωνικού δέκτη, m                                   |
| A                     | Επιφάνεια ανοίγματος, m <sup>2</sup>                                     |
| C                     | Λόγος συγκέντρωσης, -  |
| c <sub>p</sub>        | Θερμοχωρητικότητα, J/kgK   |
| D                     | Διάμετρος δέκτη, m   |
| D <sub>coil,in</sub>  | Εσωτερική διάμετρος σωλήνα, m  |
| D <sub>coil,out</sub> | Εξωτερική διάμετρος σωλήνα, m  |
| D <sub>col</sub>      | Διάμετρος συγκεντρωτή, m   |
| D <sub>s</sub>        | Διάμετρος κοιλότητας σφαιρικού δέκτη, m                                  |
| E                     | Ροή εξέργειας, W ή Εμβαδόν επιφάνειας, m <sup>2</sup>                    |
| f                     | Συντελεστής τριβής, - ή Εστιακή απόσταση, m                              |
| G                     | Ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου, W/m <sup>2</sup>                  |
| G <sub>sc</sub>       | Ηλιακή σταθερά, W/m <sup>2</sup>   |
| h                     | Συντελεστής συναγωγής μεταξύ ρευστού και σωλήνα, W/m <sup>2</sup> K      |
| H                     | Ροή ενθαλπίας, W   |
| h <sub>air</sub>      | Συντελεστής συναγωγής μεταξύ δέκτη και περιβάλλοντος, W/m <sup>2</sup> K |
| k                     | Θερμική αγωγιμότητα, W/mK  |
| L                     | Μήκος δέκτη, m   |
| L <sub>1</sub>        | Μήκος κυλίνδρου κωνοκυλινδρικού δέκτη, m                                 |
| L <sub>coil</sub>     | Μήκος σωλήνα, m  |
| m                     | Παροχή μάζας, kg/s ή σχετική μάζα αέρα, -                                |
| Nu                    | Αριθμός Nusselt, -   |
| ρ                     | Βήμα έλικας, m   |
| P                     | Πίεση, Pa  |
| Pr                    | Αριθμός Prandtl, -   |
| Q                     | Ροή θερμότητας, W  |
| q                     | Ένταση απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας, W/m <sup>2</sup>             |
| R                     | Ακτίνα, m  |
| Re                    | Αριθμός Reynolds, -  |
| T                     | Θερμοκρασία, K   |
| t                     | Πάχος, m   |
| T <sub>sun</sub>      | Θερμοκρασία ηλίου, K   |
| u                     | Μέση ταχύτητα ρευστού, m/s   |
| V <sub>wind</sub>     | Ταχύτητα ανέμου, m/s   |
| W <sub>p</sub>        | Κατανάλωση αντλίας, W  |

### Ελληνικά σύμβολα

|                |  |
|----------------|--|
| α              | Συντελεστής απορρόφησης, -                       |
| α <sub>s</sub> | Ηλιακό ύψος, °                                   |
| β              | Κλίση επιπέδου, °                                |
| γ              | Αζιμούθιο επιφάνειας, ° ή Παράγοντας σύλληψης, - |
| γ <sub>s</sub> | Αζιμούθιο ηλίου, °                               |
| δ              | Ηλιακή απόκλιση, °                               |
| ΔP             | Πτώση πίεσης, Pa                                 |
| ε              | Συντελεστής εκπομπής, -                          |

|                   |  |
|-------------------|--|
| $\eta_{el}$       | Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, -                                    |
| $\eta_{ex}$       | Εξεργειακός βαθμός απόδοσης, -                                   |
| $\eta_{opt,coil}$ | Οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα, -                                |
| $\eta_{opt,rec}$  | Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη, -                                 |
| $\eta_{ovr}$      | Ολικός βαθμός απόδοσης, -  |
| $\eta_p$          | Απόδοση αντλίας, -   |
| $\eta_{th}$       | Θερμικός βαθμός απόδοσης, -                                      |
| $\theta$          | Γωνία πρόσπτωσης, °  |
| $\theta_z$        | Γωνία ζενίθ, °   |
| $\lambda$         | Μήκος κύματος, $\mu m$   |
| $\mu$             | Δυναμική συνεκτικότητα, Pa·s                                     |
| $\rho$            | Ανακλαστικότητα, - ή Πυκνότητα, $kg/m^3$                         |
| $\sigma$          | Σταθερά Boltzman, $W/m^2 K^4$                                    |
| $\phi$            | Γεωγραφικό πλάτος, ° ή Ογκομετρική συγκέντρωση νανοσωματιδίου, - |
| $\Phi$            | Γωνία κώνου, °   |
| $\Phi_{rim}$      | Γωνία χείλους, °   |
| $\omega$          | Ωριαία γωνία, °  |
| $\omega_s$        | Ωριαία γωνία δύσης ηλίου, °                                      |

### Δείκτες

|          |                      |
|----------|----------------------|
| absorbed | Απορροφούμενη        |
| amb      | Περιβάλλον           |
| b        | Άμεση ακτινοβολία    |
| bf       | Βασικό ρευστό        |
| cav      | Κοιλότητα            |
| coil     | Σωλήνας              |
| col      | Συγκεντρωτής         |
| cond     | Συναγωγή             |
| conv     | Αγωγή                |
| d        | Διάχυτος ακτινοβολία |
| fm       | Μέσο ρευστό          |
| in       | Είσοδος ή Εσωτερική  |
| ins      | Μόνωση               |
| losses   | Απώλειες             |
| nf       | Νανορευστό           |
| np       | Νανοσωματίδιο        |
| out      | Έξοδος ή Εξωτερική   |
| rad      | Ακτινοβολία          |
| rec      | Δέκτης               |
| solar    | Ηλιακή               |
| usefull  | Ωφέλιμη              |
| w        | Τοίχωμα              |

### Αρκτικόλεξα

|     |  |
|-----|--|
| CPC | Σύνθετος παραβολικός συλλέκτης (Compound Parabolic Concetrators) |
| CSP | Ηλιακοί συγκεντρωτικοί σταθμοί (Solar Concetrating Plants)       |
| IEA | Παγκόσμιος οργανισμός ενέργειας (International Energy Agency)    |

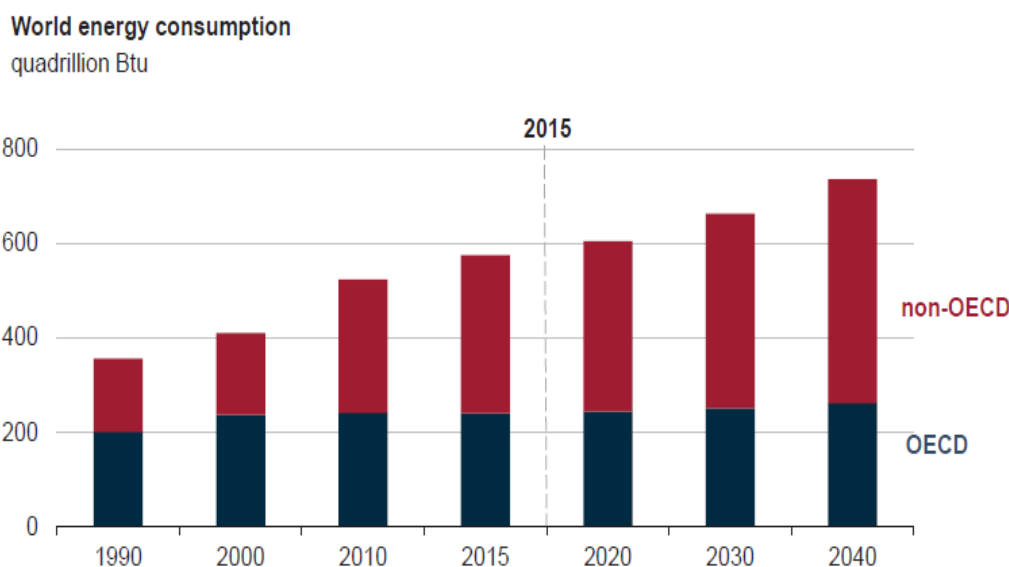
LFR  
PTC

Γραμμικοί συλλέκτες Fresnel (Linear Fresnel Reflector)  
Παραβολικός συλλέκτης με κάτοπτρο (Parabolic Through Collector)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

### 1.1 Η ενεργειακή κατάσταση σήμερα.

Οι σύγχρονες κοινωνίες καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας για τη θέρμανση-ψύξη χώρων, τα μέσα μεταφοράς, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων. Από την βιομηχανική επανάσταση και έπειτα έχουμε ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας (περίπου 20 φορές μεγαλύτερη από το 1850 [1.1]), λόγω της αύξησης του επιπέδου ζωής και του πληθυσμού του πλανήτη. Όλα τα μοντέλα πρόβλεψης δείχνουν ότι η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας θα συνεχιστεί και στο μέλλον, σύμφωνα με την υπηρεσία ενεργειακών πληροφοριών των Η.Π.Α (U.S Energy Information Administration), προβλέπεται μια αύξηση της τάξεως του 28% μεταξύ του 2015 και του 2040 [1.2]. Κύρια αιτία για αυτήν την αύξηση θα είναι η εξίσωση του επιπέδου ζωής μεταξύ των αναπτυσσόμενων χωρών, όπως η Κίνα και η Ινδία, με τις ανεπτυγμένες χώρες. Όπως δείχνει και το σχήμα 1.1.1 ο ρυθμός αύξησης της καταναλισκόμενης ενέργειας για χώρες μέλη του ΟΟΣΑ (OECD) είναι περίπου σταθερός σε αντίθεση με χώρες που δεν ανήκουν στον ΟΟΣΑ.



**Σχήμα 1.1.1: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας σε τετράκις-εκατομμύρια Btu για χώρες μέλη και μη μέλη του ΟΟΣΑ [1.2].**

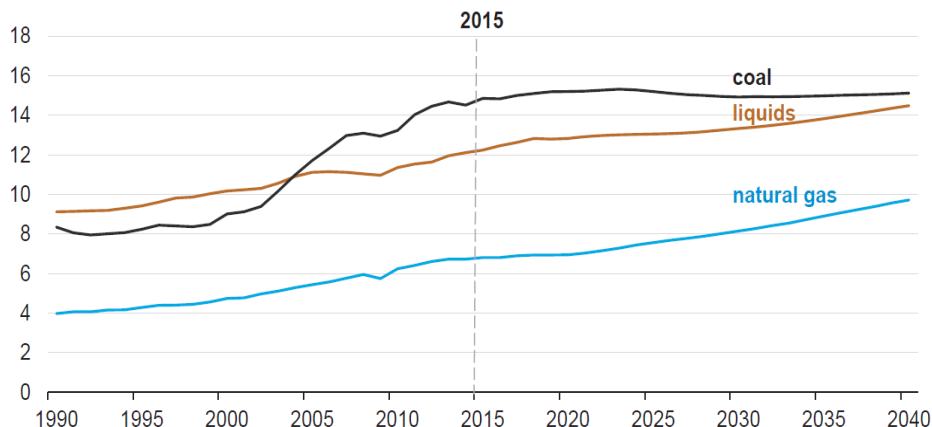
Σήμερα το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας προέρχεται από συμβατικές πηγές ενέργειας (πετρέλαιο, βενζίνη, γαιάνθρακες, φυσικό αέριο, πυρηνική ενέργεια). Ένα ενεργειακό μέλλον στηριζόμενο σε υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης και στην εντατική χρήση των ορυκτών καυσίμων παρουσιάζει μια σειρά από προβλήματα και προκλήσεις για την ανθρωπότητα. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Η ρύπανση του περιβάλλοντος από την χρήση ορυκτών καυσίμων υποβαθμίζει την ποιότητα ζωής και θέτει σε κίνδυνο την ύπαρξη του ίδιου του πλανήτη. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας λόγω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η όξινη βροχή και το αστικό νέφος λόγω της



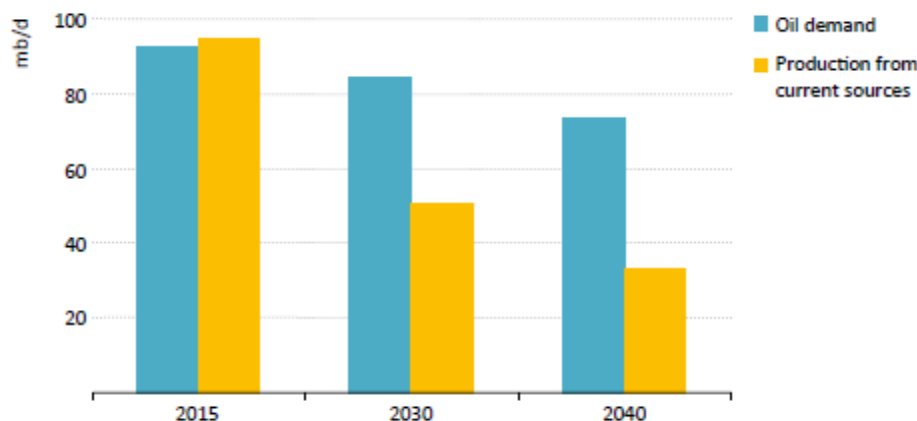
ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η ρύπανση των υδάτων. Χαρακτηριστικά στο σχήμα 1.1.2 φαίνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα(CO<sub>2</sub>) ανά ορυκτό καύσιμο και οι προβλέψεις για τα επόμενα χρόνια.

**Energy-related carbon dioxide emissions**  
billion metric tons



**Σχήμα 1.1.2: Εκπομπές CO<sub>2</sub> που σχετίζονται με την ενέργεια σε δις τόνους [1.2].**

- Μείωση και εξάντληση των ενεργειακών πηγών, καθώς τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα δεν είναι απεριόριστα. Όπως φαίνεται και από την πρόβλεψη του Παγκόσμιου Οργανισμού Ενέργειας (IEA) ήδη από το 2030 δεν θα επαρκεί η παραγωγή πετρελαίου για καλύψει την απαιτούμενη ζήτηση (σχήμα 1.1.3).



**Σχήμα 1.1.3: Οι ανάγκες σε πετρέλαιο και η αντίστοιχη παραγόμενη ποσότητα σε εκατομμύρια βαρέλια ανά ημέρα (mb/d) [1.3].**

- Υψηλά κόστη κατασκευής σταθμών παραγωγής ενέργειας αλλά και εξόρυξης-μεταφοράς των ορυκτών καυσίμων κάνουν την επένδυση στην παραγωγή ενέργειας δυσβάστακτη για φτωχά κράτη.
- Κίνδυνοι ασφάλειας που πηγάζουν από γεωπολιτικές πολιτικές και αφορούν τόσο τις χώρες που παράγουν τα ορυκτά καύσιμα όσο και τις χώρες που τα εισάγουν. Γενικά η ενεργειακή επάρκεια μιας χώρας είναι μείζονος σημασίας.
- Η άνιση κατανομή στην κατανάλωση ενέργειας, καθώς οι αναπτυγμένες χώρες καταναλώνουν κατά κεφαλήν πολύ μεγαλύτερη ενέργεια.

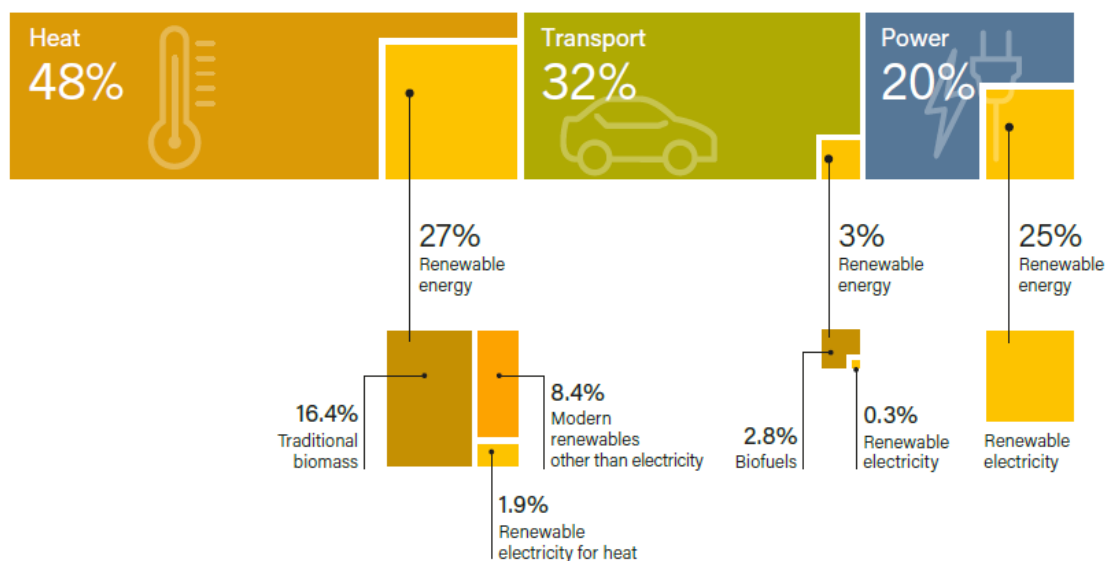
## 1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που σχετίζονται με την χρήση ορυκτών καυσίμων υπάρχουν δύο κύριοι μέθοδοι. Ένας τρόπος προσέγγισης είναι η συνεπής χρήση των ορυκτών καυσίμων που βασίζεται στην μείωση της σπατάλης ενέργειας, στην αύξηση του βαθμού απόδοσης υπαρχόντων σταθμών και στην λήψη μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος. Μια άλλη προσέγγιση, είναι η σταδιακή αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε). Οι βασικότερες μορφές Α.Π.Ε είναι η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική, η βιομάζα, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια και το υδρογόνο.

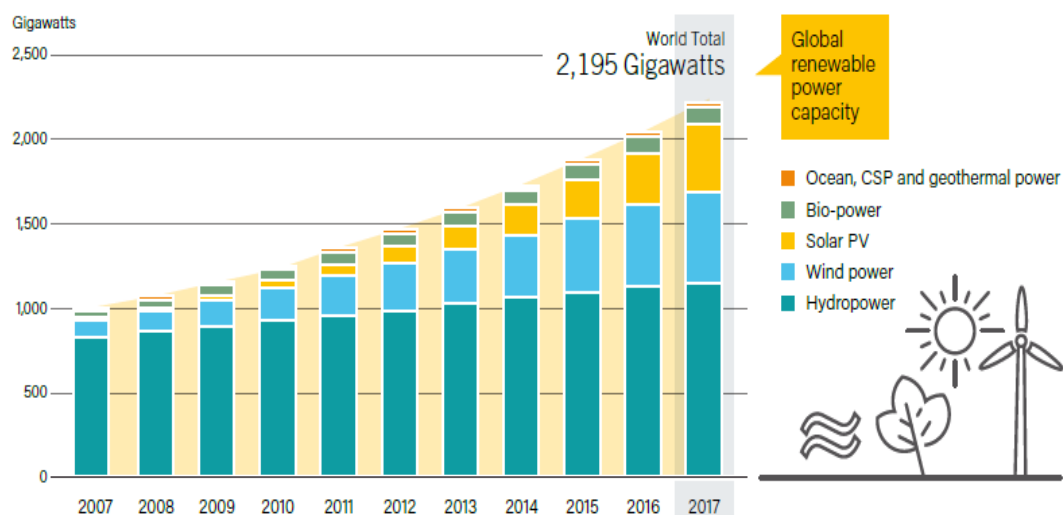
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των Α.Π.Ε, σύμφωνα με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) είναι [1.4]:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Απαντούν στο ενεργειακό πρόβλημα για τη σταθεροποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των υπόλοιπων αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, υποκαθιστώντας τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας από συμβατικές πηγές, οδηγούν σε ελάττωση εκπομπών από άλλους ρυπαντές .
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών .
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων.

Σύμφωνα με το σχήμα 1.2.1 για το έτος 2016 οι Α.Π.Ε κάλυψαν το 27% των αναγκών ενέργειας για θέρμανση, το 3% των αναγκών για μεταφορές και το 25% των αναγκών για παραγωγή ενέργειας [1.5]. Εδικά στον τομέα παραγωγής ενέργειας την τελευταία δεκαετία (2007-2017) η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ έχει υπερδιπλασιαστεί (σχήμα 1.2.2).

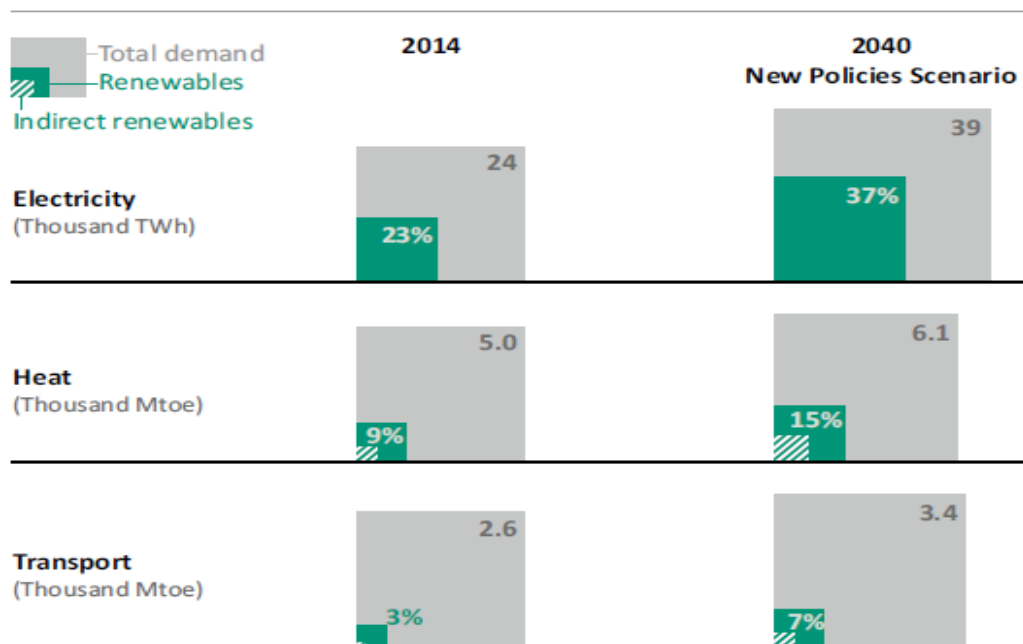


Σχήμα 1.2.1: Ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ ανά τομέα για το έτος 2016 [1.5].



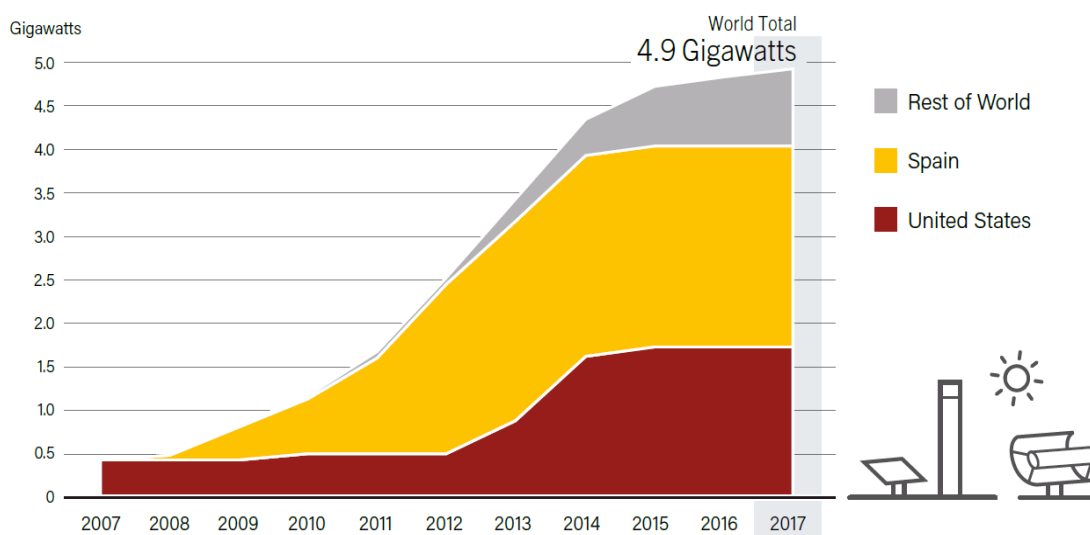
Σχήμα 1.2.2: Εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ (GW) στον κόσμο την περίοδο 2007-20017 [1.5].

Όμως τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι Α.Π.Ε, η διαρκής εξέλιξη της τεχνολογίας τους, η μείωση του κόστους παραγωγής τους, η λήψη πολιτικών αποφάσεων προς μια πιο πράσινη ενέργεια και η ευαισθητοποίηση των πολιτών οδηγούν στην πρόβλεψη για περαιτέρω αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ. Σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό ενέργειας [1.3] το 2040 προβλέπεται διείσδυση των ΑΠΕ κατά 37% στην παραγωγή ενέργειας, 15% στην θέρμανση (δεν συμπεριλαμβάνεται η βιομάζα) και κατά 7% στις μεταφορές (σχήμα 1.2.3).



Σχήμα 1.2.3: Πρόβλεψη διείσδυση των ΑΠΕ ανά τομέα [1.3].

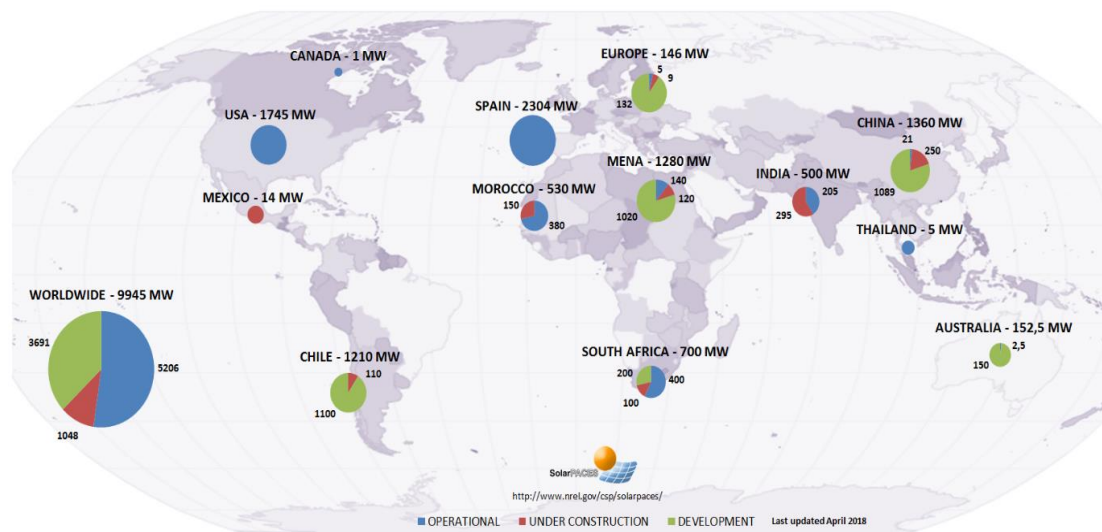
Όσον αφορά την διείσδυση των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων παραγωγής ενέργειας (Solar Concentrating Plants – CSP), αποτελούν κάτω από 0.1% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας [1.3]. Παρόλα αυτά και τα συστήματα αυτά έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Στο σχήμα 1.2.4 φαίνεται η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος την τελευταία δεκαετία, η οποία ξεπερνά το 90% [1.5]. Το 2017 υπήρχαν σε λειτουργία περίπου 4.9 GW σταθμών CSP, με την πλειοψηφία αυτών να είναι στις ΗΠΑ και την Ισπανία.



Σχήμα 1.2.4: Εγκατεστημένη ισχύς CSP (GW) ανά περιοχή [1.5].

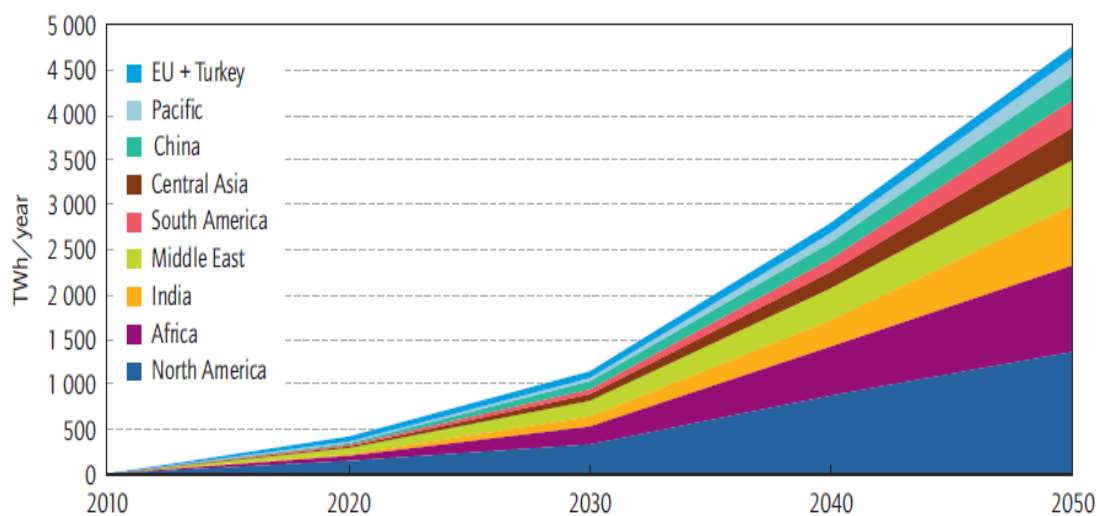
Πέρα όμως από τους σταθμούς που βρίσκονται σε λειτουργία και αξιοποιούνται εμπορικά υπάρχουν πολλοί πειραματικοί σταθμοί και ταυτόχρονα πολλοί σταθμοί που βρίσκονται στην διαδικασία της κατασκευής ή της μελέτης. Χαρακτηριστικά στο σχήμα 1.2.5

παρουσιάζονται σύμφωνα με το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των ΗΠΑ (NREL), οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας από συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα ανά τον κόσμο που βρίσκονται υπό λειτουργία (operational), υπό κατασκευή (under construction) και υπό μελέτη (development) [1.6].



**Σχήμα 1.2.5: Σταθμοί CSP λειτουργικοί, υπό κατασκευή και υπό μελέτη ανά τον κόσμο [1.6].**

Τέλος στο σχήμα 1.2.6 παρουσιάζονται οι προβλέψεις του παγκόσμιου οργανισμού ενέργειας για την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες μέχρι το 2050, ανά περιοχή. Η πρόβλεψη αυτή επιβεβαιώνει την ραγδαία αύξηση που θα έχουν στο άμεσο μέλλον τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας, αποτελώντας μια ταχύτατα αναπτυσσόμενη τεχνολογία των Α.Π.Ε.



**Σχήμα 1.2.6: Πρόβλεψη του IEA για την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά συγκεντρωτικά σε TWh/year [1.7]**

**Βιβλιογραφία 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου:**

[1.1] Α.Ζερβός. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2008.

[1.2] U.S Energy Information Administration: International Energy Outlook, 2017.

[1.3] International Energy Agency: World Energy Outlook, 2016.

[1.4] <http://www.cres.gr>

[1.5] Renewable Energy Policy Network for 21<sup>st</sup> Century: Renewables 2018-Global Status Report.

[1.6] <https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world>.

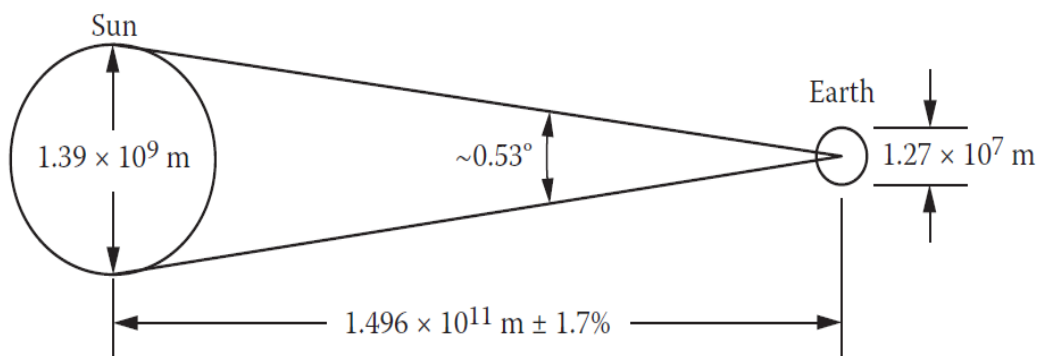
[1.7] International Energy Agency: Technology Roadmap-Concentrating Solar Power, 2010.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ηλιακή ενέργεια και εφαρμογή στους ηλιακούς συλλέκτες.

### 2.1 Ο Ήλιος.

Ο Ήλιος είναι αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και το λαμπρότερο σώμα του ουρανού. Όπως δείχνει η εικόνα 2.1.1 είναι σχεδόν τέλεια σφαίρα με διάμετρο  $1.39 \cdot 10^9$  m, μάζα  $2 \cdot 10^{30}$  kg και η μέση απόσταση του από την Γη είναι  $1.496 \cdot 10^{11}$  m, η οποία λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο μεταβάλλεται κατά  $\pm 1.7\%$ . Η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια του υπολογίζεται στα 5760 K [2.1].

Ο Ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ως αντιδραστήρας σύντηξης που μετατρέπει το υδρογόνο ( $H_2$ ) σε ήλιο ( $H_e$ ), ακτινοβολώντας ενέργεια. Ο ήλιος εκπέμπει  $3.8 \cdot 10^{23}$  KW από τα οποία στη γη φτάνει το 30% ( $1.7 \cdot 10^{14}$  KW). Η ενέργεια αυτή είναι τόσο μεγάλη που ισοδυναμεί με 5000 φορές των συνολικών πηγών ενέργειας πάνω στην γη.



Εικόνα 2.1.1: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά γης-ηλίου [1.2].

Ηλιακή σταθερά,  $G_{sc}$ , είναι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο μονάδα επιφανείας κάθετης στην διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, όταν η απόσταση γης-ηλίου λαμβάνει τη μέση τιμή της. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι  $G_{sc}=1353$  W/m<sup>2</sup> [2.2].

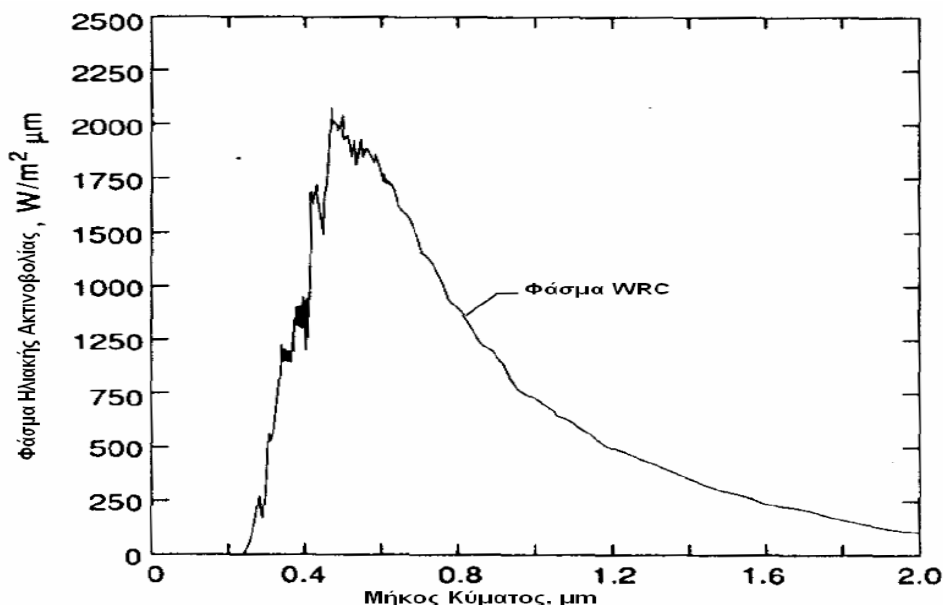
Η μεταβολή της απόστασης γης-ηλίου προκαλεί και μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά  $\pm 3\%$  περί την μέση τιμή της. Η ακτινοβολία  $G_{on}$ , που δέχεται κάθετο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας δίνεται από την σχέση [2.2]:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot (1 + 0.033 \cdot \cos(\frac{360 \cdot n}{365})) \quad (2.1)$$

Όπου  $n=1 \div 365$  είναι η μέρα του έτους (Πίνακας 2.2.1).

Τέλος στο σχήμα 2.1.2 παρουσιάζεται η φασματική κατανομή εκτός ατμόσφαιρας κατά την μέση απόσταση γης-ηλίου. Η υπεριώδης, η ορατή και η υπέρυθρος ακτινοβολία αντιστοιχούν στις περιοχές μηκών κύματος  $\lambda < 0.38 \mu\text{m}$ ,  $0.38 \mu\text{m} < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$  και  $\lambda > 0.78 \mu\text{m}$

με αντίστοιχη ενέργεια σε κάθε περιοχή  $95 \text{ W/m}^2$ ,  $640 \text{ W/m}^2$  και  $618 \text{ W/m}^2$ . Από το άθροισμα των ενεργειών προκύπτει η ηλιακή σταθερά  $G_{sc}$ .



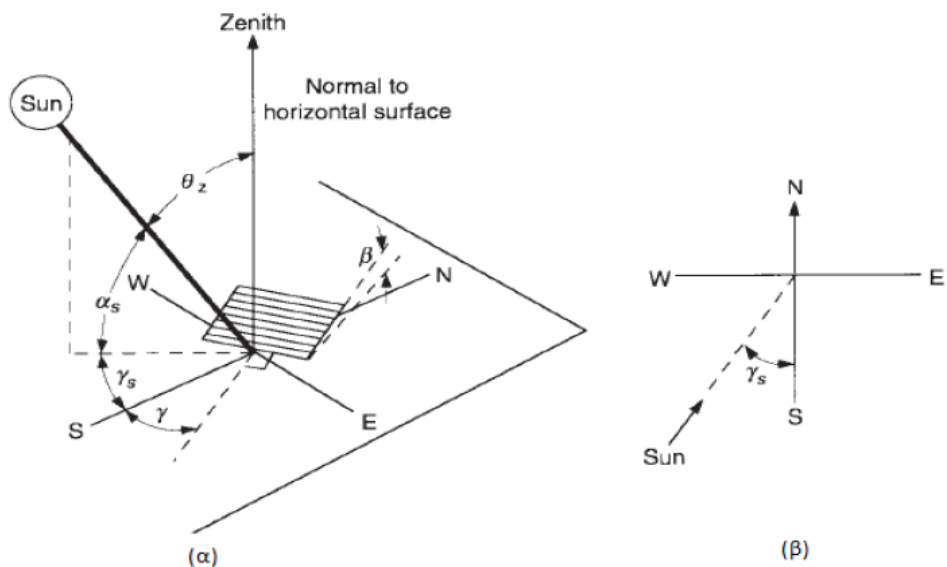
Σχήμα 2.1.2: Φασματική κατανομή εκτός ατμόσφαιρας [2.2].

## 2.2 Βασικοί ορισμοί.

Παρακάτω παρουσιάζονται βασικοί ορισμοί γωνιών και μεγεθών που αφορούν την ηλιακή ενέργεια [2.2].

- Γεωγραφικό πλάτος ( $\phi$ ): Η γωνιακή θέση μιας περιοχής βόρεια η νότια από τον ισημερινό, με τον βορρά να έχει θετικό πρόσημο ( $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ ).
- Γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ ), είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ηλίου (Σχήμα 2.2.1).
- Ηλιακό ύψος ( $a_s$ ), είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο (Σχήμα 2.2.1).
- Αζιμούθιο επιφάνειας ( $\gamma$ ), είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Είναι  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ , με  $\gamma=0^\circ$  στο νότο,  $\gamma=90^\circ$  στη δύση,  $\gamma=180^\circ$  στον βορρά και  $\gamma=-90^\circ$  στην ανατολή (Σχήμα 2.2.1).
- Αζιμούθιο ηλίου ( $\gamma_s$ ), είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης (Σχήμα 2.2.1).
- Κλίση επιπέδου ( $\beta$ ), είναι η γωνία που σχηματίζει μία επίπεδος επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο και βρίσκεται μεταξύ  $0^\circ$  και  $180^\circ$ , για το οριζόντιο επίπεδο  $\beta=0^\circ$  ενώ για το κατακόρυφο  $\beta=90^\circ$  (Σχήμα 2.2.1).





Σχήμα 2.2.1: Γραφική παράσταση των γωνιών  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\theta_z$  και  $\gamma_s$  [2.3].

- Ωριαία γωνία ( $\omega$ ), είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό  $15^\circ/h=0.25^\circ/\text{min}$ . Ισχύει

$$\omega = 0.25 \cdot (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (2.2)$$

με  $\omega > 0$  για μμ και  $\omega < 0$  για πμ.

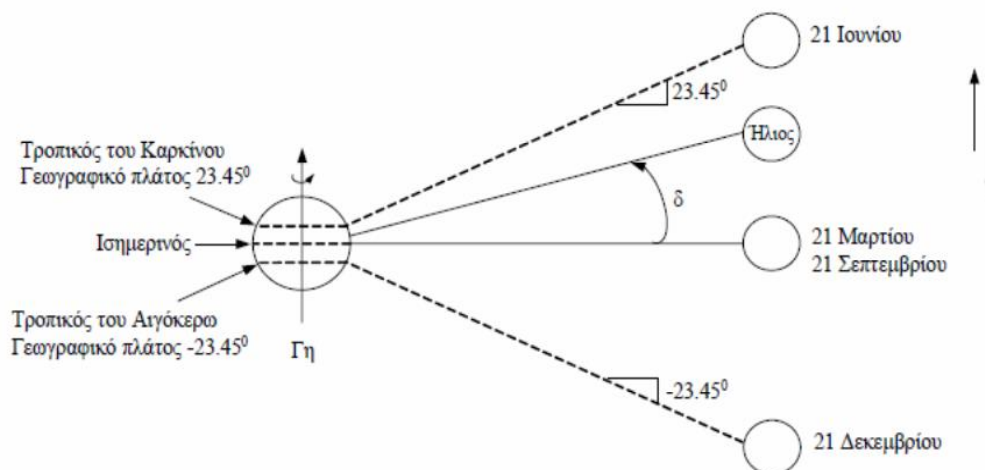
- Ηλιακή απόκλιση ( $\delta$ ), είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει  $-23.45^\circ < \gamma < 23.45^\circ$ , με θετικές τιμές προς τον βορρά (Σχήμα 2.2.2). Υπολογίζεται από την σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (2.3)$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  για την μέση μέρα κάθε μήνα, όπου μέση μέρα θεωρείται εκείνη που έχει ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας περίπου ίση με την μέση ημερήσια του μηνός [2.2].

| ΜΗΝΑΣ       | ΜΕΡΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ | ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | n   | ΗΛΙΑΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ δ (°) |
|-------------|-----------------|------------|-----|-----------------------|
| Ιανουάριος  | 1               | 17         | 17  | -20.9                 |
| Φεβρουάριος | 31+i            | 16         | 47  | -13.0                 |
| Μάρτιος     | 59+i            | 16         | 75  | -2.4                  |
| Απρίλιος    | 90+i            | 15         | 105 | 9.4                   |
| Μάιος       | 120+i           | 15         | 135 | 18.8                  |
| Ιούνιος     | 151+i           | 11         | 162 | 23.1                  |
| Ιούλιος     | 181+i           | 17         | 198 | 21.2                  |
| Αύγουστος   | 212+i           | 16         | 228 | 13.5                  |
| Σεπτέμβριος | 243+i           | 15         | 258 | 2.2                   |
| Οκτώβριος   | 273+i           | 15         | 288 | -9.6                  |
| Νοέμβριος   | 304+i           | 14         | 318 | -18.9                 |
| Δεκέμβριος  | 334+i           | 10         | 344 | -23.0                 |

Πίνακας 2.2.1: Αύξοντα αριθμός κάθε ημέρας του έτους, μέση ημέρα κάθε μήνα και ηλιακή απόκλιση δ [2.2].



Σχήμα 2.2.2: Σχηματική αναπαράσταση της ηλιακής απόκλισης δ [2.4].

- Ηλιακός χρόνος, είναι ο χρόνος που μετράται με βάση την φαινόμενη κίνηση του ηλίου στον ουρανό. Ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο  $t_{ρολ}$  που δείχνει το ρολόι. Η παρακάτω σχέση συνδέει τους δύο χρόνους:

$$\text{ηλιακός χρόνος} = t_{ρολ} \pm 4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.4)$$

Όπου:

- $L_{st}$ =γεωγραφικό μήκος μεσημβρινού (για Ελλάδα  $L_{st}=30^\circ$ ).

- $L_{loc}$ = γεωγραφικό μήκος παρατηρητή.

- $E=9.87 \cdot \sin(2 \cdot B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B)$  με  $B=360 \cdot (n-84)/364$ .

- Γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ), της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπίπτουσών ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια, υπολογίζεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} \cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \\ \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \\ \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \end{aligned} \quad (2.5)$$

Η παραπάνω σχέση απλοποιείται ανάλογα με την κάθε ειδική περίπτωση.

- Ωριαία γωνία δύσης ηλίου ( $\omega_s$ ), υπολογίζεται από την σχέση:

$$\cos\omega_s = -\tan\varphi \cdot \tan\delta \quad (2.6)$$

### 2.3 Γωνία πρόπτωσης σε κινούμενα επίπεδα.

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες συχνά φέρουν μηχανισμό για την παρακολούθηση της κίνησης του ηλίου. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις κίνησης, κίνηση περί έναν άξονα (κατεύθυνσης βορρά-νότου, ανατολής-δύσης ή παράλληλου προς τον άξονα της γης) ή περί δύο αξόνων. Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού της γωνίας πρόπτωσης ( $\theta$ ) για τις συχνότερες περιπτώσεις βασιζόμενοι στην σχέση 2.4 [2.2]:

Α) Για επίπεδο στρεπτό περί οριζόντιο άξονα διεύθυνσης ανατολής-δύσης με μία μόνο ημερήσια ρύθμιση έτσι ώστε οι ηλιακές ακτίνες να είναι κάθετες το μεσημέρι:

$$\cos\theta = \sin^2\delta + \cos^2\delta \cdot \cos\delta \quad (2.7)$$

Β) Όπως στην προηγούμενη, αλλά με συνεχή ρύθμιση ώστε να ελαχιστοποιείται η γωνία πρόπτωσης :

$$\cos\theta = (1 - \sin^2\omega \cdot \cos^2\delta)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Γ) Για επίπεδο στρεπτό περί οριζόντιο άξονα διεύθυνσης βορρά-νότου με συνεχή ρύθμιση για να ελαχιστοποιείται η γωνία πρόπτωσης.

$$\cos\theta = ((\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega)^2 + \sin^2\omega \cdot \cos^2\delta)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

Δ) Για επίπεδο στρεπτό περί άξονα παράλληλο προς τον άξονα της γης με συνεχή ρύθμιση:

$$\cos\theta = \cos\delta \quad (2.10)$$

Ε) Για επίπεδο στρεπτό περί δύο άξονες με συνεχή ρύθμιση ώστε να είναι συνεχώς κάθετο στις ηλιακές ακτίνες:

$$\cos\theta = 1 \quad (2.11)$$

## 2.4 Είδη ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, χωρίζεται στην άμεση και στη διάχυτη ακτινοβολία. Η στιγμιαία ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μετριέται σε  $W/m^2$ . Χρησιμοποιείται συνήθως το σύμβολο “G”, με κατάλληλους δείκτες σε περίπτωση που αναφερόμαστε στη άμεση (b, beam) ή στη διάχυτη (d, diffuse) ακτινοβολία. Η προσπίπτουσα ενέργεια σε μία επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας, για μια χρονική περίοδο (π.χ. μία ώρα ή μία ημέρα), μετριέται σε  $J/m^2$ . Χρησιμοποιείται συνήθως το σύμβολο “I” για τις ωριαίες τιμές και το σύμβολο “H” για ημερήσιες τιμές με κατάλληλους δείκτες.

-Άμεση ακτινοβολία ( $G_b$  ή  $I_b$  ή  $H_b$ ): Ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης με ελάχιστη ή χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια εξαρτάται από:

- την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα,
- το ύψος του ήλιου,
- το γεωγραφικό πλάτος του τόπου,
- το υψόμετρο του τόπου,
- την κλίση της επιφάνειας,
- την απόσταση ήλιου – Γης και
- την απόκλιση του ήλιου.

-Διάχυτη ακτινοβολία ( $G_d$  ή  $I_d$  ή  $H_d$ ) : Ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνσή της από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα, και από ανάκλαση στην επιφάνεια της Γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από:

- το ύψος του ήλιου,
- το υψόμετρο του τόπου,
- τη λευκαύγεια (δηλαδή το συντελεστή ανάκλασης της επιφάνειας) του εδάφους,
- το ποσό και το είδος των νεφών και
- το ποσό και ντο είδος των σωματιδίων και των αερίων της ατμόσφαιρας.

-Ολική ακτινοβολία ( $G$  ή  $I$  ή  $H$ ) : Ορίζουμε το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Για μία οριζόντια επιφάνεια ισχύει, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας ωριαίες τιμές της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας:

$$I = I_b + I_d \quad (2.12)$$

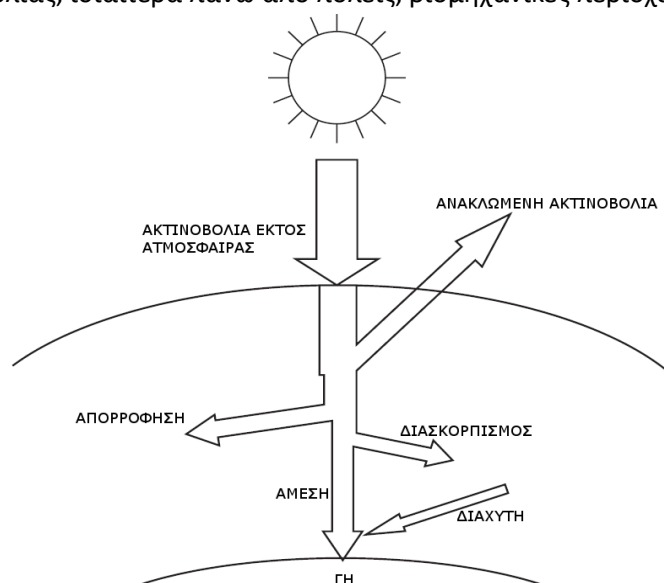
Το ίδιο ισοζύγιο ισχύει χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές και για άλλες χρονικές περιόδους, δηλαδή στιγμιαίες εντάσεις ή ημερήσιες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας.

## 2.5 Εξασθένιση ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς ταξιδεύει διαμέσου της ατμόσφαιρας υφίστανται μείωση κυρίως λόγω διασκορπισμού και απορρόφησης (σχήμα 2.5.1). Ο

διασκορπισμός (ή σκέδαση) προκαλείται από τα μόρια του αέρα, του υδρατμού και της σκόνης. Από αυτόν προκύπτει η διάχυτος ακτινοβολία. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται κυρίως από το οξυγόνο (O<sub>2</sub>), το όζον (O<sub>3</sub>), το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), τους υδρατμούς (H<sub>2</sub>O) και τα αερολύματα. Η απορρόφηση δεν γίνεται ομοιόμορφα αλλά εκλεκτικά κατά ζώνες φάσματος, πιο συγκεκριμένα [2.5]:

- Το οξυγόνο (O<sub>2</sub>) απορροφά ακτινοβολία στο υπεριώδες και στο ορατό τμήμα του φάσματος.
- Το όζον (O<sub>3</sub>) απορροφά κυρίως την υπεριώδη ακτινοβολία.
- Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) απορροφά στην υπέρυθρο περιοχή του φάσματος.
- Οι υδρατμοί την μεγαλύτερη απορρόφηση την εμφανίζουν στο υπέρυθρο.
- Τα αερολύματα ασκούν σημαντική επίδραση στην εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα πάνω από πόλεις, βιομηχανικές περιοχές και ερήμους.



**Σχήμα 2.5.1: Εξασθένηση της ακτινοβολίας διαμέσου της ατμόσφαιρας [2.6].**

Η εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα περιγράφεται από τον νόμο Beer Lambert [2.5].

$$G_b = G_o \cdot e^{-k \cdot m} \quad (2.13)$$

Όπου:

-  $G_b$  = ένταση της άμεσης ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες (W/m<sup>2</sup>).

-  $G_o$  = ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα (W/m<sup>2</sup>).

-  $k$  = συνολικός συντελεστής εξασθένησης.

-m=σχετική μάζα του αέρα.

Ο συνολικός συντελεστής εξασθένησης εξαρτάται από τις ιδιότητες της ατμόσφαιρας τοπικά και την περιεκτικότητα της σε καθένα από τους παράγοντες που εξασθενούν την ηλιακή ακτινοβολία. Ενώ η σχετική μάζα του αέρα δείχνει πόσες φορές η μάζα του αέρα που διατρέχει η ακτινοβολία με πλάγια πρόσπτωση είναι μεγαλύτερη από εκείνη με κάθετη πρόσπτωση (σχήμα 2.5.2) και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [2.6]:

$$m = \frac{BP}{AP} \approx \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (2.14)$$

Όπου:

- $\theta_z$  =γωνία ζενίθ.

-  $BP$  =απόσταση που διανύει η ακτίνα του ηλίου.

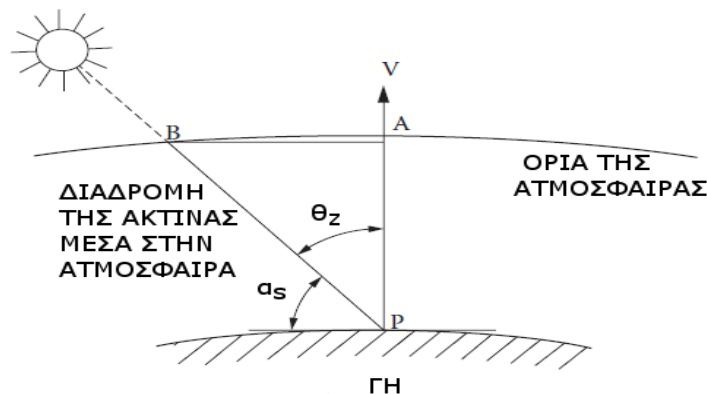
-  $AP$  =απόσταση που θα διένυε για μηδενική γωνία ζενίθ (ήλιος κατακόρυφα).

Μια πιο ακριβής σχέση υπολογισμού της αέριας μάζας προτάθηκε από τους Kasten and Young [2.6]:

$$m = \frac{1}{\sin(a_s) + 0.50572 \cdot (6.07995 + a_s)^{-1.6364}} \quad (2.15)$$

Όπου:

- $a_s$  =ηλιακό ύψος (μοίρες).



Σχήμα 2.5.2: Σχηματική εξήγηση αέριας μάζας [2.6].

## 2.6 Υπολογισμός της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ακτινοβολία που προσπίπτει έξω από την ατμόσφαιρα υπολογίζεται από την σχέση 2.1 με σχετικά μεγάλη ακρίβεια. Δεν ισχύει όμως το ίδιο για την ακτινοβολία που φθάνει στην γη καθώς υπεισέρχονται πολλοί τοπικοί κλιματικοί παράγοντες που κάνουν τον υπολογισμό της δύσκολο.

Ένας συγκεντρωτικός συλλέκτης που παρακολουθεί διαρκώς την κίνηση του ηλίου δέχεται την ακτινοβολία κάθετα στο επίπεδό του. Επιπλέον αξιοποιεί μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία ( $G_b$ ), η οποία στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως DNI (Direct Normal Irradiation). Η παρακολούθηση αυτή σημαίνει:

- Μεταβλητή γωνία συλλέκτη ( $\beta$ ).

- Γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) ίση με μηδέν.

- Μεταβλητή γωνία αζιμούθιου ( $\gamma$ ), αφού δεν βλέπει πάντα προς τον νότο.

Ο βασικότεροι τρόποι υπολογισμού της άμεσης ακτινοβολίας καθέτου επιπέδου είναι:

### 2.6.1 Μοντέλα βασιζόμενα σε μακροχρόνιες μετρήσεις της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.

Για πολλές περιοχές της γης υπάρχουν μακροχρόνιες μετρήσεις της ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου στην επιφάνεια της γης. Για την Ελλάδα τέτοιες μετρήσεις παρέχει το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ) όπου δίνει για διαφορές πόλεις της Ελλάδας την μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο [2.7]. Στην συνέχεια θα πρέπει να διαχωριστεί η ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου στις διάφορες συνιστώσες του (διάχυτη και άμεση) και η άμεση να αναχθεί σε ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου που είναι κάθετο στην ηλιακή ακτινοβολία.

Για τον διαχωρισμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- Παραμετρικά μοντέλα: Πρόκειται για υπολογιστικά μοντέλα τα οποία όμως απαιτούν την λεπτομερή γνώση διάφορων παραμέτρων της περιοχής, όπως το ανάγλυφο και οι ατμοσφαιρικές-περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Μοντέλα Κατάτμησης: Στα μοντέλα αυτά υπολογίζεται πρώτα η διάχυτη ακτινοβολία και στην συνέχεια προκύπτει, ως διαφορά της ολικής και της διάχυτης, η άμεση. Για τους υπολογισμούς στα μοντέλα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται διάφοροι αδιάστατοι δείκτες, που χαρακτηρίζουν ποσοτικά τον τρόπο διάχυσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Τέτοιοι δείκτες είναι ο δείκτης αιθριότητας  $k_t$ , το κλάσμα της διάχυσης  $k_d$ , ο συντελεστής διάχυσης  $k_D$ , και ο δείκτης άμεσης διάδοσης  $k_b$ . Οι δείκτες αυτοί αποτελούν αντικείμενο εντατικής μελέτης από πολλούς επιστήμονες με τους κυριότερους να είναι οι Liu and Jordan, Collars and Rabl και Duffie and Klein.

### 2.6.2 Χρήση εμπειρικών σχέσεων.

Υπό συνθήκες διαυγούς ατμόσφαιρας για τον υπολογισμό της ( $G_b$ ) μπορεί να γίνει χρήση της παρακάτω εμπειρικής σχέσης [2.8]:

$$G_b = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\cos\theta_z}\right)} \quad (2.16)$$

Όπου:

-A= φαινόμενη ηλιακή ακτινοβολία μηδενικής αερίου μάζας, m=0 σε W/m<sup>2</sup>.

-B= συντελεστής ατμοσφαιρικής απόσβεσης, αδιάστατος.

-θ<sub>z</sub>=γωνία ζενίθ

Τα μεγέθη A, B μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του έτους λόγω εποχιακών αλλαγών της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε σωματίδια και υδρατμό καθώς επίσης και λόγω της μεταβολής της απόστασης γης-ηλίου. Τιμές της για διάφορες περιοχές των ΗΠΑ και του κόσμου παρέχονται από την ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Για την περιοχή της Αθήνας έχουν αναπτυχθεί σχέσεις για τον υπολογισμό των συντελεστών αυτών από τον τομέα θερμότητας Ε.Μ.Π [2.8].

$$A = \sum_{i=0}^4 (a_i \cdot n^i) \quad (2.17)$$

$$B = \sum_{i=0}^4 (b_i \cdot n^i) \quad (2.18)$$

Όπου:

-n=ημέρα του έτους (Πίνακας 2.2.1)

-a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>=συντελεστές από πίνακα 2.6.1:

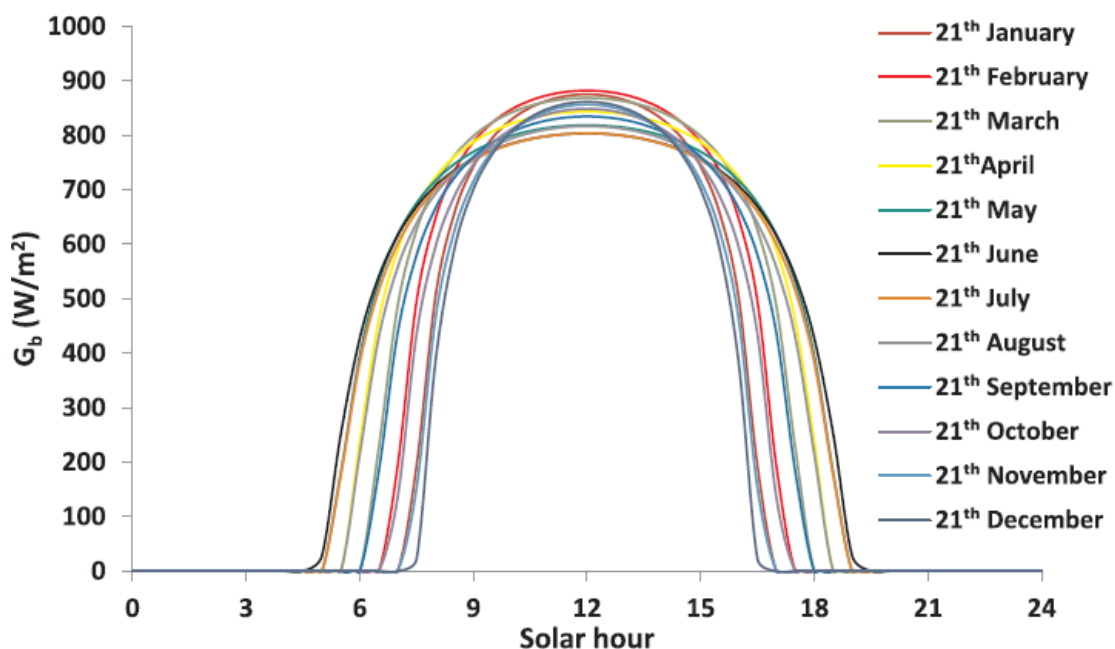
| i | a <sub>i</sub>               | b <sub>i</sub>               |
|---|------------------------------|------------------------------|
| 0 | 0.110448968·10 <sup>1</sup>  | 0.12321833·10 <sup>-2</sup>  |
| 1 | 0.62310300·10 <sup>-3</sup>  | -0.24593090·10 <sup>-4</sup> |
| 2 | -0.21655676·10 <sup>-4</sup> | 0.13219840·10 <sup>-5</sup>  |
| 3 | 0.10841363·10 <sup>-6</sup>  | -0.67643523·10 <sup>-8</sup> |
| 4 | -0.14720401·10 <sup>-9</sup> | 0.90926050·10 <sup>-11</sup> |

**Πίνακας 2.6.1: Συντελεστές α<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>.**

Για πολύ διαυγή ατμόσφαιρα η G<sub>b</sub> που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση πρέπει να αυξηθεί κατά περίπου 15%.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον υπολογισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθετο επίπεδο (G<sub>b</sub>) για την περιοχή των Αθηνών σύμφωνα με την σχέση 2.16 για την 21<sup>η</sup> μέρα του κάθε μήνα [2.9].





**Σχήμα 2.6.1: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε κάθετο επίπεδο για την περιοχή των Αθηνών [2.9].**

### 2.6.3 Μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα βασικότερα μηχανήματα μέτρησης της ηλιακής ενέργειας είναι το πυρανόμετρο και το πυρηλιόμετρο. Το πυρανόμετρο έχει οπτικό πεδίο  $180^\circ$  και χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ολικής, άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Αντίθετα το πυρηλιόμετρο έχει μικρό οπτικό πεδίο (συνήθως  $5^\circ$ ) και χρησιμοποιείται για την μέτρηση της άμεσης δέσμης της ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες, στρέφοντάς το προς τον ήλιο.

Το πυρανόμετρο αποτελεί το πιο διαδεδομένο όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (G). Το σύγχρονο πυρανόμετρο αποτελείται από μία μαύρη επιφάνεια με κεραμικό υπόστρωμα κάτω από την οποία υπάρχουν εκατοντάδες θερμοστοιχεία, λειτουργώντας έτσι σαν θερμικός αισθητήρας. Πέριξ αυτού υπάρχει ένας θόλος, μονός ή διπλός, που κατασκευάζεται από γυαλί ή ακρυλικό πλαστικό (σχήμα 2.6.2).

Τα πυρανόμετρα χρησιμοποιούν συνήθως αισθητήρες τύπου thermopile. Προδιαγράφονται και βαθμονομούνται από συγκεκριμένα πρότυπα ISO που υιοθετούνται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (WMO). Έτσι ανάλογα με την ποιότητά τους ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Την Secondary standard, που αντιστοιχεί στα καλύτερα όργανα και πρότυπα.
- Την First class, που αντιστοιχεί σε μεσαίας κατηγορίας όργανα.
- Την Second class, που αντιστοιχεί σε χαμηλού κόστους και ποιότητας όργανα.

Τυπικά, τα πυρανόμετρα τοποθετούνται σε οριζόντιο προσανατολισμό, παρέχοντας μέγιστη απόκριση όταν ο ήλιος βρίσκεται στο τοπικό ζενίθ, και μηδενική απόκριση κατά τις ώρες της αυγής και του σούρουπου. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται απόκριση συνημιτόνου. Επίσης, το πυρανόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την μέτρηση αμιγώς της διάχυτης συνιστώσας ( $G_b$ ) της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό γίνεται με την χρήση ενός δίσκου που τοποθετείται απέναντι από τον ήλιο, ρίχνοντας την σκιά του στον αισθητήρα και άρα μην αφήνοντας έτσι την άμεση ηλιακή δέσμη να θερμάνει τον αισθητήρα.



**Σχήμα 2.6.2: Πυρανόμετρο Secondary standard [2.10].**

Το πυρηλιόμετρο αποτελείται κατά κύριο λόγο από έναν επιμήκη κύλινδρο, στο βάθος του οποίου υπάρχει ένας αισθητήρας τύπου thermopile. Το ηλιακό φως εισέρχεται μέσω αυτού του κυλίνδρου και επιδρά στον αισθητήρα, ώστε ο τελευταίος να μετατρέψει την θερμότητα σε ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο μπορεί να μετρηθεί. Το μετρούμενο ηλεκτρικό σήμα αντιστοιχίζεται μέσω ενός κατάλληλου τύπου σε μια ορισμένη τιμή πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας ανά επιφάνεια. Η κατασκευή στηρίζεται σε σύστημα περιστροφής και σκόπευσης, ώστε ο κύλινδρος να προσανατολίζεται προς τον ήλιο, και να απομονώνει έτσι – συνυπολογιζομένου και του επιμήκους σχήματός του- την άμεση δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας από τις υπόλοιπες συνιστώσες της (σχήμα 2.6.3).



**Σχήμα 2.6.3: Πυρηλιόμετρο [2.11]**

Σε αντίθεση με το πυρανόμετρο που είναι σταθερό, το πυρηλιόμετρο θα πρέπει να παρακολουθεί διαρκώς την κίνηση του ηλίου. Για τον λόγο αυτό τοποθετείται πάνω σε

συσκευές παρακολούθησης του ηλίου οι οποίες έχουν την δυνατότητα να κινούνται σε 2 άξονες. Ο πρώτος άξονας έχει την ικανότητα να στρέφεται από την ανατολή προς την δύση και έτσι να ευθυγραμμίζεται με την αζιμούθια γωνία του ήλιου, ενώ ο δεύτερος εξισώνεται με την γωνία του ύψους του ηλίου. Οι δυναμικές κινήσεις φαίνονται με βέλη στο σχήμα 2.6.4.

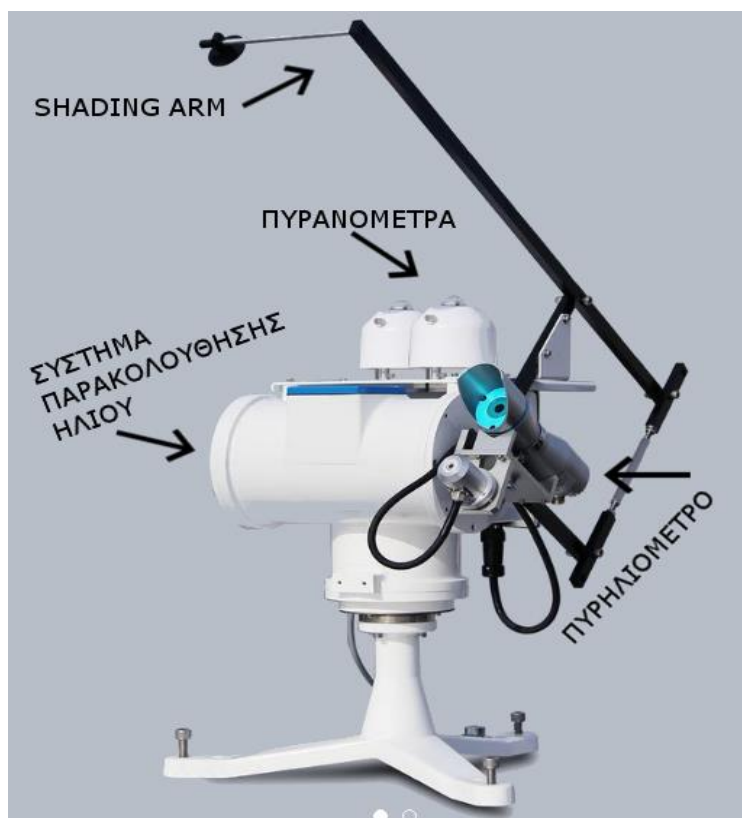


**Σχήμα 2.6.4: Συσσκευή παρακολούθησης ηλίου (δύο αξόνων) [2.12].**

Πολλές φορές για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένα συστήματα μέτρησης της ηλιακής ενέργειας (solar tracking systems) πολύ μεγάλης ακρίβειας. Τέτοια συστήματα αποτελούνται κυρίως από:

- Ένα πυρανόμετρο για την μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας.
- Ένα πυρανόμετρο για την μέτρηση της διάχυτης ακτινοβολίας.
- Ένα πυρηλιόμετρο για την μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολία.
- Σύστημα παρακολούθησης του ηλίου.
- Shading Arm για την δημιουργία σκιάς στο πυρανόμετρο διάχυτης ακτινοβολίας.

Από τις μετρήσεις των πυρανομέτρων μπορεί να υπολογιστεί η άμεση ακτινοβολία και έτσι μπορεί να γίνει έλεγχος της μετρηθείσας τιμής από το πυρηλιόμετρο. Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στο σχήμα 2.6.5 όπου το πυρηλιόμετρο έχει τοποθετηθεί πάνω σε σύστημα παρακολούθησης ηλίου ενώ τα δύο πυρανόμετρα στηρίζονται επίσης πάνω στο σύστημα αυτό. Πολλές φορές η τοποθέτηση τέτοιων συστημάτων περιλαμβάνει και όργανα για την μέτρηση των περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου κ.ά.) καθώς και άλλα όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας όπως πυργεόμετρα για την μέτρηση μεγάλου μήκους ακτινοβολίας. Με ένα τέτοιο σταθμό μετριοούνται κάθε χρονική στιγμή όλα τα απαιτούμενα περιβαλλοντικά μεγέθη.



Σχήμα 2.6.5: Ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης ηλιακής ενέργειας [2.12].

#### 2.6.4 Υπολογισμός μέσω δορυφόρου.

Λόγω μεγάλου κόστους δεν γίνεται οι μετρήσεις τις ηλιακής ενέργειας να καλύψουν μεγάλη γεωγραφική κλίμακα. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την χρήση των μετεωρολογικών δορυφόρων για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Συγκεκριμένα προτιμούνται για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας οι γεωσύγχρονοι δορυφόροι οι οποίοι βρίσκονται πάνω από τον ισημερινό και κινούνται με την ίδια ταχύτητα και τροχιά με τη γη. Οι δορυφόροι αυτοί δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της συννεφιάς και ταυτόχρονα παρέχουν εικόνες υψηλής ακρίβειας κάθε περίπου μισή ώρα για μεγάλο μέρος της επιφάνειας της γης [2.13]. Παράδειγμα τέτοιου δορυφόρου είναι ο METEOSAT της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Η χρήση δορυφόρων βασίζεται στο παρακάτω φυσικό μοντέλο που προκύπτει από την διατήρηση της ηλιακής ενέργειας (σχήμα 2.6.6) [2.6].

$$I_o = I_{space} + I_{atmosphere} + I_{earth} \quad (2.19)$$

Όπου:

- $I_o$  =συνολική ηλιακή ενέργεια που φτάνει έξω από την ατμόσφαιρα, προκύπτει από την σχέση 2.1.
- $I_{space}$  =συνολική ανακλώμενη ακτινοβολία που διαφεύγει προς το διάστημα. Ένα μέρος της προκύπτει από την ανάκλαση της  $I_o$  κατευθείαν στην ατμόσφαιρα και ένα άλλο μέρος της προκύπτει από την ανάκλαση στο έδαφος. Είναι η ακτινοβολία που μετριέται από τον δορυφόρο.
- $I_{atmosphere}$  =Η συνολική ενέργεια που απορροφάται από την ατμόσφαιρα.

- $I_{earth}$  = Η συνολική ενέργεια που απορροφάται από την γη. Υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$I_{earth} = I \cdot (1 - \rho) \quad (2.20)$$

Όπου:

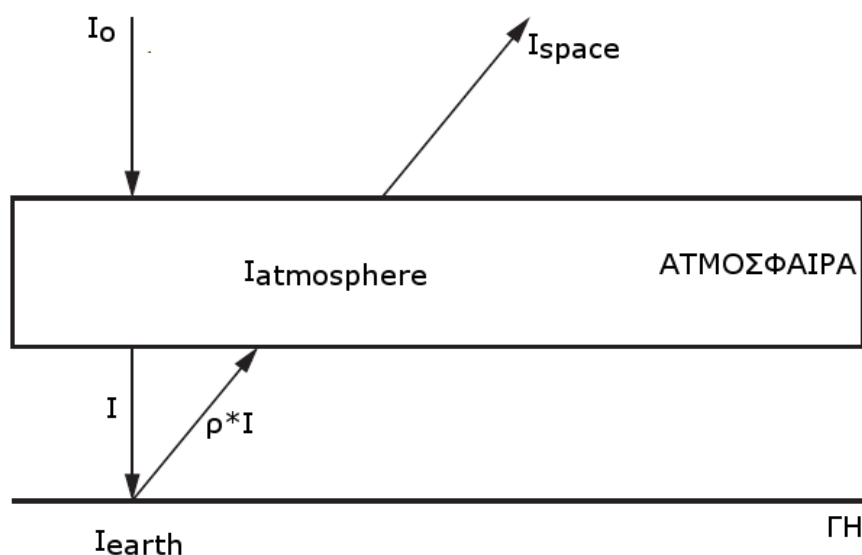
- $I$  = συνολική ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της γης.
- $\rho$  = ανακλαστικότητα εδάφους ή λευκαύγεια (albedo), ενδεικτικές τιμές παρέχονται στον πίνακα 2.6.1 [2.5].

Τελικά από τον συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων μπορεί να υπολογιστεί η ακτινοβολία που πέφτει στην επιφάνεια της γης ως εξής.

$$I = \frac{I_o - I_{space} - I_{atmosphere}}{(1 - \rho)} \quad (2.21)$$

Από την παραπάνω σχέση το μόνο πρόβλημα είναι ο υπολογισμός της ενέργειας που απορροφά η ατμόσφαιρα ( $I_{atmosphere}$ ). Ο υπολογισμός αυτός δεν είναι καθόλου εύκολος αφού όπως είδαμε και παραπάνω υπεισέρχονται πολλοί τοπικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες.

Έχουν αναπτυχθεί δύο εμπειρικοί μέθοδοι για τον υπολογισμό της  $I_{atmosphere}$ . Η πρώτη είναι στατιστική μέθοδος και βασίζεται στην σύγκριση και στατιστική επεξεργασία των τιμών που μετράει ο δορυφόρος με αυτές που μετριοούνται στην επιφάνεια της γης, ενώ η δεύτερη είναι φυσική μέθοδος και προσπαθεί να υπολογίσει την ενέργεια που απορροφά η ατμόσφαιρα εκτιμώντας την συνεισφορά των διάφορων παραγόντων εξασθένησης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως αναφέρονται στην ενότητα 2.5. Τα μοντέλα αυτά δίνουν αποτελέσματα τα οποία δεν αποκλίνουν παραπάνω από 10% από τις μετρηθείσες τιμές στην επιφάνεια της γης [2.6].



Σχήμα 2.6.6: Πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας [2.6].

| ΤΥΠΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ      | ΤΥΠΙΚΗ ΤΙΜΗ<br>ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ |
|-----------------------|---------------------------------|
| Φρέσκια άσφαλτος      | 0.04                            |
| Παλιά άσφαλτος        | 0.12                            |
| Κωνοφόρα δάση (θέρος) | 0.08, 0.09-0.15                 |
| Φυλλοβόλα δάση        | 0.15-0.18                       |
| Υγρό έδαφος           | 0.10                            |
| Γυμνό έδαφος          | 0.17                            |
| Πράσινη Χλόη          | 0.25                            |
| Άμμος ερήμου          | 0.40                            |
| Νέο σκυρόδεμα         | 0.55                            |
| Θαλάσσιος πάγος       | 0.50-0.70                       |
| Φρέσκο χιόνι          | 0.80-0.90                       |
| Παλιό χιόνι           | 0.55                            |
| Νέφη                  | 0.50-0.65                       |

**Πίνακας 2.6.1: Τυπικές τιμές ανακλαστικότητας (albedo) εδάφους [2.5].**

## 2.7 Ηλιακοί Συλλέκτες

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι ειδικής μορφής εναλλάκτης θερμότητας που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Αποτελεί ένα από τα βασικότερα μέρη ενός θερμικού ηλιακού συστήματος. Τα ιδιαίτερα προβλήματα που σχετίζονται με την ανάλυση των ηλιακών συλλεκτών σχετίζονται με την μεγάλη μεταβλητότητα της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συλλεκτών, η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και το φορτίο, δηλαδή την εφαρμογή και τις επιθυμητές θερμοκρασίες.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες συλλεκτών.

- Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες.
- Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες.

### 2.7.1 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες.

Η χρήση των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών για οικιακά συστήματα θέρμανσης είναι πολύ διαδεδομένη και αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία. Στην Ελλάδα η εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών εκτιμάται σε  $4.1 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  κάτι που μεταφράζεται σε  $2.9 \text{ GW}_{\text{th}}$  [2.14].

Τα κύρια χαρακτηριστικά των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών είναι [2.2]:

- Παραμένουν συνήθως σταθεροί και δεν παρακολουθούν την κίνηση του ήλιου.
- Τοποθετούνται με κατάλληλη κλίση και προσανατολισμό για να μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.
- Χρησιμοποιούνται για χαμηλές και μέσες θερμοκρασίες (έως  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- Αξιοποιούν την άμεση και την διάχυτη ακτινοβολία.
- Κύριες εφαρμογές τους είναι η θέρμανση κτιρίων και η θέρμανση ζεστού νερού χρήσης (ZNX).

- Είναι απλούστερης κατασκευής από τους συγκεντρωτικούς, γεγονός που τους κάνει και πιο οικονομικούς.

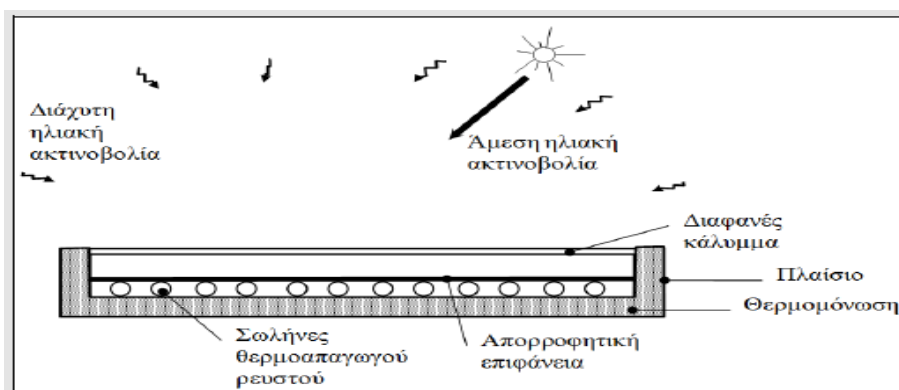
Οι πιο διαδεδομένοι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι ο κλασικός επίπεδος συλλέκτης και ο επίπεδος συλλέκτης κενού.

-Ο κλασικός επίπεδος συλλέκτης είναι ο πλέον συνηθισμένος τύπος συλλέκτη που συνήθως χρησιμοποιείται για θέρμανση ΖΝΧ (ηλιακός θερμοσίφωνας-σχήμα 2.7.1). Οι υψηλότερες αποδόσεις παρουσιάζονται όταν υπάρχουν υψηλά ποσοστά ακτινοβολίας, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν και σε μια συννεφιασμένη μέρα με χαμηλότερες όμως αποδόσεις. Τα βασικότερα τμήματα ενός επίπεδου συλλέκτη είναι (σχήμα 2.7.2) [2.14]:

- Απορροφητής: Περιλαμβάνει την απορροφητική επιφάνεια και τους σωλήνες μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το ρευστό.
- Κάλυμμα: Αποτελείται από μια διαφανή επιφάνεια και λειτουργεί σαν προστατευτικό κάλυμμα και μειώνει τις θερμικές απώλειες του απορροφητήρα προς το περιβάλλον από την κύρια πλευρά του συλλέκτη.
- Θερμομόνωση του απορροφητή: Μειώνει τις θερμικές απώλειες από την πίσω πλευρά του συλλέκτη.
- Πλαίσιο του συλλέκτη: Μειώνει τις θερμικές απώλειες από την πλάγια πλευρά του συλλέκτη.



Σχήμα 2.7.1: Τυπικός ηλιακός θερμοσίφωνας [2.15].



Σχήμα 2.7.2: Μέρη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [2.14].

-Ο συλλέκτης κενού αποτελείται από πολλούς επίπεδους σωλήνες, κάθε ένας από τους οποίους περιέχει μια μαύρη μεταλλική επιφάνεια από τους οποίους περνάει το θερμοαπαγωγό μέσο. Στον γυάλινο σωλήνα δημιουργείται κενό αέρος. Η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το γυαλί του σωλήνα, απορροφάται από την μαύρη επιφάνεια και η θερμότητα παγιδεύεται. Το θερμοαπαγωγό μέσο, νερό ή αέρας, που περνάει και έρχεται σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια, απάγει την θερμότητα που έχει συλλεχθεί. Το κενό είναι πολύ καλό μονωτικό, για αυτό υπάρχουν μόνο απώλειες λόγω ακτινοβολίας. Οι σωλήνες κενού έχουν γενικά υψηλότερες αποδόσεις αλλά μεγαλύτερο κόστος αγοράς. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούνται θερμοκρασίες άνω των 80 °C [2.14].



**Σχήμα 2.7.3:Τυπικοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτης κενού σε οροφή κατοικίας [2.16].**

### 2.7.2 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες.

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες συγκεντρώνουν μεγάλο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρή επιφάνεια. Η συγκέντρωση επιτυγχάνεται με παρεμβολή μιας οπτικής ανακλαστικής ή διαθλαστικής συσκευής μεταξύ της πηγής της ακτινοβολίας (ήλιος) και της επιφάνειας απορρόφησης.

Βασικό χαρακτηριστικό των συγκεντρωτικών είναι ο λόγος συγκέντρωσης[2.2] :

$$C = \frac{A_{col}}{A_{rec}} \quad (2.22)$$

Όπου:

- $A_{col}$  =επιφάνεια ανοίγματος, δηλαδή η επιφάνεια από την οποία εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία (m<sup>2</sup>).

- $A_{rec}$  =επιφάνεια του δέκτη, δηλαδή η επιφάνεια που απορροφά την συγκεντρωμένη ακτινοβολία (m<sup>2</sup>).

Ο λόγος συγκέντρωσης μπορεί να φτάσει θεωρητικά και την τιμή 45000, στην πράξη όμως κινείται σε ένα εύρος 1 έως 10000.



Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των συγκεντρωτικών σε σχέση με τους επίπεδους είναι [2.1]:

- Το εργαζόμενο μέσο αναπτύσσει υψηλές θερμοκρασίες.
- Υψηλότερη θερμική απόδοση λόγω μικρότερης επιφάνειας απορρόφησης που συνεπάγεται μικρότερες θερμικές απώλειες.
- Οι ανακλαστικές επιφάνειες χρειάζονται λιγότερο υλικό και είναι πιο απλά κατασκευαστικά από τους επίπεδους συλλέκτες. Έτσι το κόστος του συγκεντρωτικού ανά μονάδα όγκου είναι μικρότερο.
- Λόγω μικρότερων απαιτούμενων επιφανειών η μόνωση και η χρήση επιλεκτικών επιφανειών απορρόφησης είναι πιο οικονομικά εφικτοί.

Από την άλλη τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι [2.1]:

- Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες δεν αξιοποιούν την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία παρά μόνον την άμεση.
- Χρειάζεται κάποιος μηχανισμός παρακολούθησης του ηλίου.
- Η συλλεκτική επιφάνεια χρειάζεται συντήρηση ανά περιόδους για να μην χάνει την ανακλαστικότητά της.

Τα κύρια μέρη ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι ο συγκεντρωτής και ο δέκτης [2.2].

-Ο δέκτης περιλαμβάνει τον απορροφητήρα με το σύστημα μετατροπής της ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας, τα σχετικά καλλύματα και την μόνωση. Ο δέκτης μπορεί να είναι κυρτός επίπεδος, κοίλος, καλυμμένος ή ακάλυπτος.

-Ο συγκεντρωτής μπορεί να είναι:

- Ανακλαστικός ή διαθλαστικός (κάτοπτρο ή φακός).
- Επιμήκης ή κυκλικός. Ο επιμήκης χαρακτηρίζεται ως δισδιάστατος και εστιάζει σε ευθεία γραμμή, ενώ ο κυκλικός είναι επιφάνεια εκ περιστροφής, εστιάζει σε σημείο και χαρακτηρίζεται τρισδιάστατος.
- Συνεχής ή αποτελούμενος από τμήματα.
- Χωρίς είδωλο ή με είδωλο. Αυτοί χωρίς είδωλο δίνουν χαμηλό λόγο συγκέντρωσης και δεν σχηματίζουν σαφώς καθορισμένο είδωλο. Οι συγκεντρωτές με είδωλο δίδουν (χαμηλής ποιότητας) είδωλο πάνω στον απορροφητήρα και οι επιτυγχανόμενοι λόγοι συγκέντρωσης μπορούν να φτάσουν πολύ υψηλές τιμές.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα κυριότερα είδη συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.

## **2.8 Είδη συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.**

### **2.8.1 Σύνθετος παραβολικός συλλέκτης.**

Οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες (Compound Parabolic Concentrators, CPC) ανήκουν στην κατηγορία συγκεντρωτών χωρίς είδωλο, διότι έχουν πολύ μικρούς λόγους συγκέντρωσης. Αξιοποιούν τόσο την άμεση όσο και την διάχυτη ακτινοβολία. Την άμεση έχουν την δυνατότητα να την προσλάβουν από μια ευρεία γωνιών και για αυτό δεν έχουν απαίτηση κίνησης για την παρακολούθηση του ηλίου.

Όπως φαίνεται στην τομή του σχήματος 2.8.1, κάθε πλευρά του CPC είναι τμήμα παραβολής κάθε μία από τις οποίες περνά από το σημείο εστίασης της άλλης. Πολύ σημαντική είναι η γωνία αποδοχής  $\theta_c$ , η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο άνοιγμα υπό γωνία  $\theta$ , με  $-\theta_c < \theta < \theta_c$ , καταφέρνει με διαδοχικές ανακλάσεις τελικά να φτάσει στον δέκτη. Επιπλέον ο λόγος συγκέντρωσης για οπτικά τέλειο συλλέκτη δίνεται από την σχέση [2.2]:

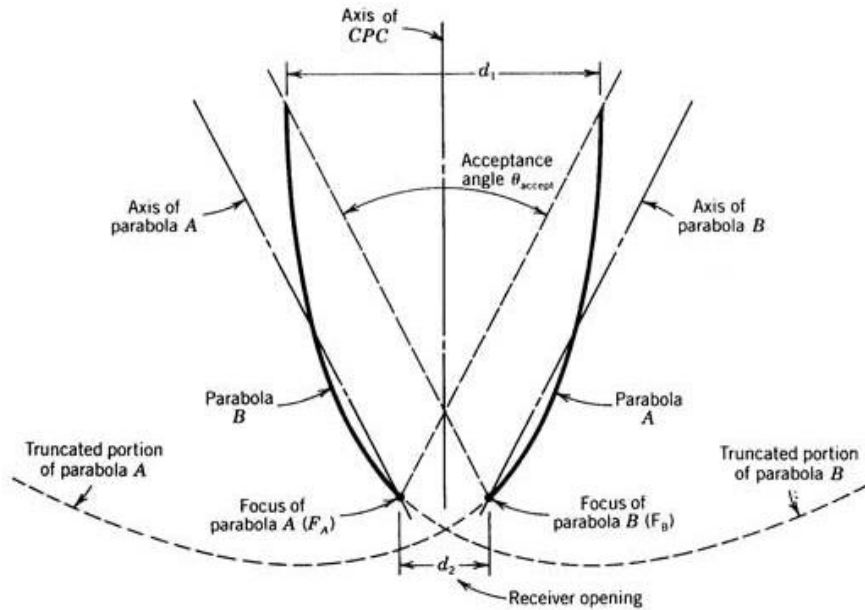
$$C = \frac{1}{\sin(\theta_c)} \quad (2.23)$$

Οι δύο παραβολικές επιφάνειες επεκτείνονται μέχρι να γίνουν παράλληλες. Όμως επειδή τα άνω άκρα των πλευρών του CPC συνεισφέρουν ελάχιστα στην συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, πολλές φορές αποκόπτονται για να μειωθεί το κόστος κατασκευής του συλλέκτη. Μια άλλη παραλλαγή του συλλέκτη θα μπορούσε να είναι οι ασύμμετρες παραβολικές επιφάνειες.

Ο δέκτης τοποθετείται στο κάτω μέρος του συλλέκτη και μπορεί να είναι κυλινδρικός ή επίπεδος. Η πιο συνηθισμένη επιλογή είναι χρήση δέκτη με σωλήνα κενού. Πολλές φορές οι CPC καλύπτονται από γυαλί προκειμένου να μην επηρεάζεται η ανακλαστική του επιφάνεια από την σκόνη και άλλα υλικά.

Οι συλλέκτες αυτοί συνήθως τοποθετούνται με τον διαμήκη άξονα στην κατεύθυνση ανατολή-δύση. Το επίπεδο του ανοίγματος είναι στραμμένο προς τον ισημερινό υπό γωνία  $\beta$  με το οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως υπάρχει η δυνατότητα για μικρή ρύθμιση της γωνίας  $\beta$  προκειμένου οι ακτίνες του ηλίου να προσπίπτουν εντός των περιορισμών που θέτει η γωνία αποδοχής. Με την αύξηση του λόγου συγκέντρωσης η γωνία αποδοχής μειώνεται (σχέση 2.23) και άρα χρειάζεται συχνότερη ρύθμιση.

Η πολυμορφία των συλλεκτών CPC έχει ως αποτέλεσμα την κάλυψη μεγάλου εύρους θερμοκρασιών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οικιακές εφαρμογές για την θέρμανση ΖΝΧ (έως 100 °C) ή για βιομηχανικές εφαρμογές με την χρήση σωλήνων κενού (έως 250 °C). Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δευτερεύοντα κάτοπτρα σε άλλους συλλέκτες ώστε να αυξάνεται ο λόγος συγκέντρωσης.



Σχήμα 2.8.1: Συμμετρικός CPC σε τομή [2.18].

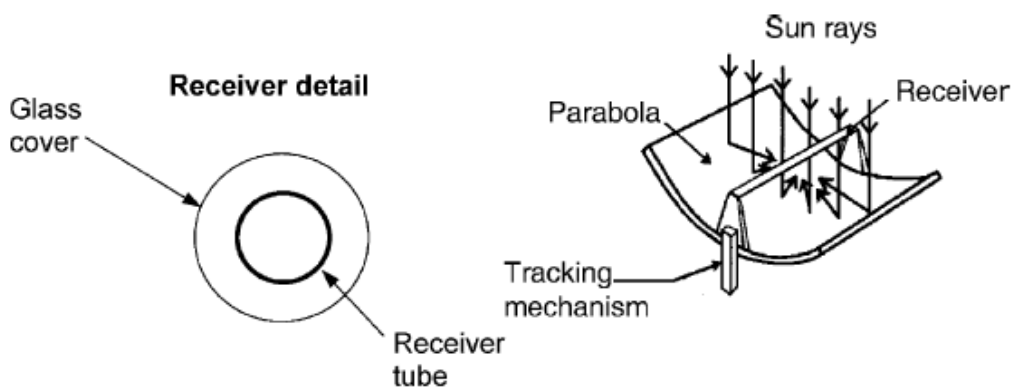
### 2.8.2: Παραβολικός συλλέκτης με κάτοπτρο.

Ο παραβολικός συλλέκτης με κάτοπτρο (Parabolic Through Collector, PTC) έχει τομή σχήματος παραβολής και ανήκει στην κατηγορία των συγκεντρωτών με είδωλο. Αξιοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία και χρησιμοποιούνται σε μια περιοχή μεσαίων λόγων συγκέντρωσης (από 10 έως 45) και θερμοκρασιών στην περιοχή 100 °C έως 500 °C [2.2].

Ο συγκεντρωτής κατασκευάζεται από ένα ανακλαστικό υλικό το οποίο κάμπτεται για να δημιουργηθεί το σχήμα της παραβολής. Ο συλλέκτης PTC αξιοποιεί μια γεωμετρική ιδιότητα της παραβολής σύμφωνα με την οποία οι ακτίνες του ήλιου οι οποίες πέφτουν κάθετα στο άνοιγμα της παραβολής, αφού ανακλαστούν στο κάτοπτρο, συγκεντρώνονται πάνω στην εστιακή γραμμή. Για τον λόγο αυτό πάνω στην εστιακή γραμμή τοποθετείται ο δέκτης. Ο δέκτης είναι ένας σωλήνας κενού ο οποίος αποτελείται από:

- Έναν επιλεκτικό απορροφητήρα ο οποίος έχει υψηλό συντελεστή απορρόφησης και χαμηλό συντελεστή εκπομπής.
- Ο απορροφητήρας περιβάλλεται από γυάλινο κάλυμμα. Ανάμεσα στον απορροφητήρα και το γυάλινο κάλυμμα δημιουργούνται συνθήκες κενού, ελαχιστοποιώντας έτσι τις απώλειες λόγω συναγωγής.

Επιπλέον επειδή οι ακτίνες του ηλίου πρέπει να εισέρχονται στο άνοιγμα του συλλέκτη κάθετα είναι αναγκαία η ύπαρξη μηχανισμού παρακολούθησης του ηλίου (tracking system) ενός άξονα.



**Σχήμα 2.8.2: Σχηματική παράσταση PTC [2.1].**

Οι PTC συλλέκτες είναι η πιο διαδεδομένη εμπορικά κατηγορία συγκεντρωτικών συλλεκτών με πλήθος εταιρειών να δραστηριοποιούνται στην κατασκευή τους (LUZ, EUROTHROUGH, IST, SKYFUEL). Βασική τους εφαρμογή είναι η ηλεκτροπαραγωγή στους ηλιακούς συγκεντρωτικούς σταθμούς (Solar Concentrating Plants, CSP) όπου αποτελούν το 90% [2.18]. Οι σταθμοί με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ και την αντίστοιχη χώρα φαίνονται στον πίνακα 2.8.1 [2.19].

| ΧΩΡΑ    | ΟΝΟΜΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ                     | ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW) |
|---------|--|--------------------------|
| ΗΠΑ     | Solar energy generating systems (SEGS) | 354                      |
| ΗΠΑ     | Solana generation station              | 280                      |
| Ισπανία | Solaben solar power station            | 200                      |
| Ισπανία | Solvona solar power station            | 150                      |
| Ισπανία | Andasol solar power station            | 150                      |
| Ισπανία | Extresol solar power station           | 150                      |
| Ισπανία | Palma del Rio solar power station      | 100                      |
| Ισπανία | Manchasol solar power station          | 100                      |
| Ισπανία | Valle solar power station              | 100                      |
| Ισπανία | Helioenergy solar power station        | 100                      |

**Πίνακας 2.8.1: Μεγαλύτεροι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με PTC [2.19].**

Επιπλέον σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μεταξύ 100 °C και 250°C οι συλλέκτες PTC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως:

- Παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση.
- Παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX).
- Θέρμανση χώρων.
- Κλιματισμός και ψύξη.
- Άντληση νερού άρδευσης.
- Αφαλάτωση.
- Ηλιακή χημεία.

Τέλος υπάρχουν υπό εξέλιξη πολλές έρευνες για την βελτίωση των συλλεκτών PTC. Κύριοι τομείς ενδιαφέροντος είναι η μείωση του κόστους παραγωγής, η αυτοματοποίηση της

παραγωγικής διαδικασίας, ελαφρύτεροι συλλέκτες, νέα υλικά για την στήριξη και νέα εργαζόμενα μέσα (τηγμένο άλας).



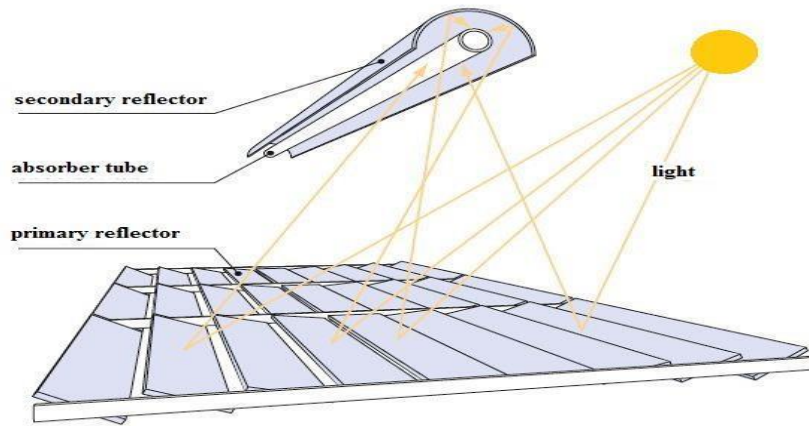
**Εικόνα 2.8.3: Μέρος από τον σταθμό παραγωγής ενέργειας SEGS με συλλέκτες PTC, Καλιφόρνια [2.20].**

### **2.8.3: Γραμμικός συλλέκτης Fresnel.**

Μία ακόμα διαφορετική τεχνολογία ηλιακών είναι οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel (Linear Fresnel Reflector ή και L.F.R.). Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες αποτελούνται όπως και όλα τα άλλα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, από τον συγκεντρωτή και το δέκτη. Αναλυτικότερα, ο συγκεντρωτής αποτελείται από μια συστοιχία επίπεδων ηλιακών ανακλαστήρων, σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, οι οποίοι συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία στο εστιακό ύψος.

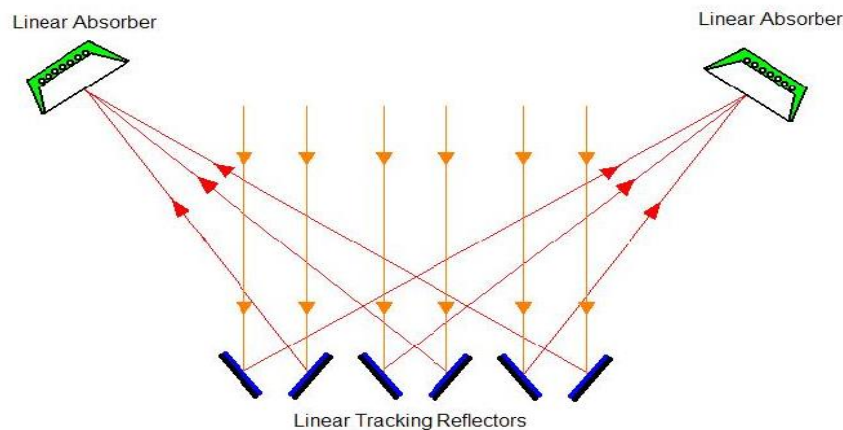
Στο εστιακό ύψος τοποθετείται ο δέκτης, ο οποίος συνήθως είναι ένας σωλήνας κενού με επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια, όπως και στους PTC. Εδώ πολλές φορές χρησιμοποιείται και ένα δευτερεύων κάτοπτρο (πχ CPC) το οποίο συλλέγει και στέλνει προς τον δέκτη τις ακτίνες που διαφεύγουν. Ο απορροφητής μπορεί να έχει έναν σωλήνα κενού ή πολλαπλούς σωλήνες κενού.

Οι ανακλαστήρες τοποθετούνται συνήθως στον άξονα βορρά-νότου και έχουν την δυνατότητα περιστροφής για την παρακολούθηση του ήλιου. Στον Fresnel όμως πέρα από την ρύθμιση για την διαρκεί παρακολούθηση του ηλίου σημαντική είναι και η απόσταση μεταξύ των ανακλαστήρων ώστε να μην σκιάζονται μεταξύ τους.



**Σχήμα 2.8.4: Σχηματική παράσταση γραμμικού συλλέκτη Fresnel [2.21].**

Τα μοντέλα συλλεκτών Fresnel με πολλούς απορροφητές ονομάζονται συμπαγής γραμμικός Fresnel (Compact Linear Fresnel Reflector ή C.L.F.R.). Ο συγκεκριμένος τρόπος διάταξης του απορροφητή παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την διάταξη του ενός απορροφητή. Πιο συγκεκριμένα, στους C.L.F.R. ο λόγος απορροφημένης ακτινοβολίας προς τα  $m^2$  συλλεκτικής επιφάνειας αυξάνεται σημαντικά καθώς αξιοποιείται καλύτερα η ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια απαιτείται μικρότερη συλλεκτική επιφάνεια και άρα λιγότερα κάτοπτρα. Επιπλέον, στην περίπτωση πολλαπλών απορροφητών, υπάρχει δυνατότητα για μεγαλύτερες αλλαγές στις κλίσεις των κατόπτρων, χωρίς να αλληλοσκοιάζονται γειτονικά κάτοπτρα μεταξύ τους. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να τοποθετούνται με μικρότερα κενά τα κάτοπτρα και κατά συνέπεια να μειώνεται το μήκος της εστιακής γραμμής, δηλαδή το μήκος των απορροφητών και κατά συνέπεια έχουμε μικρότερες θερμικές απώλειες στους απορροφητές λόγω του μικρότερου μήκους τους.



**Σχήμα 2.8.5: Σχηματική παράσταση συμπαγούς γραμμικού συλλέκτη Fresnel [2.22].**

Οι συλλέκτες Fresnel χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της άμεσης παραγωγής ατμού στον δέκτη ή μέσω της έμμεσης παραγωγής ατμού (όταν στον δέκτη ρέει κάποιο έλαιο). Παραδείγματα τέτοιων εγκαταστάσεων είναι:

- Kimberlina solar thermal plant, στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, ισχύος 5 MW. Έχει δέκτη πολλαπλού σωλήνα χωρίς δευτερεύον κάτοπτρο.



- Puerto Errado I και Puerto Errado II, στην Μούρθια της Ισπανίας, ισχύος 1.4 και 3 MW αντίστοιχα. Ο δέκτης τους είναι μονού σωλήνα με δευτερεύον κάτοπτρο.



Σχήμα 2.8.6: Θερμικός σταθμός Puerto Errado II , Ισπανία [2.23].



Σχήμα 2.8.7: Μέρος του σταθμού Kimberlina solar thermal plant, ΗΠΑ [2.24].

Μέχρι σήμερα οι συλλέκτες Fresnel έχουν μικρή διείσδυση στην αγορά. Όμως μία σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τους PTC, τους κάνει μία από τις πιο ανερχόμενες κατηγορίες συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι [2.25]:

- Απλούστερης γεωμετρίας κάτοπτρα και άρα πιο οικονομικά.
- Πολύ μικρότερα φορτία ανέμου κάτι που σημαίνει μικρότερη απαίτηση στήριξης δηλαδή οικονομία και γρήγορη εγκατάσταση.
- Δέκτης σταθερός, άρα ευκολότερο και οικονομικότερο σύστημα παρακολούθησης ηλίου και εύκολη διασύνδεση των διάφορων σωλήνων του συστήματος.
- Καταλαμβάνει λιγότερη γη.

Από την άλλη μειονεκτήματα όπως ο χαμηλός βαθμός απόδοσης, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες και το στενότερο πεδίο εφαρμογών κάνουν αναγκαία την ύπαρξη περισσότερων μελετών για την βελτίωση στους συγκεκριμένους τομείς.

#### **2.8.4 Ηλιακός πύργος.**

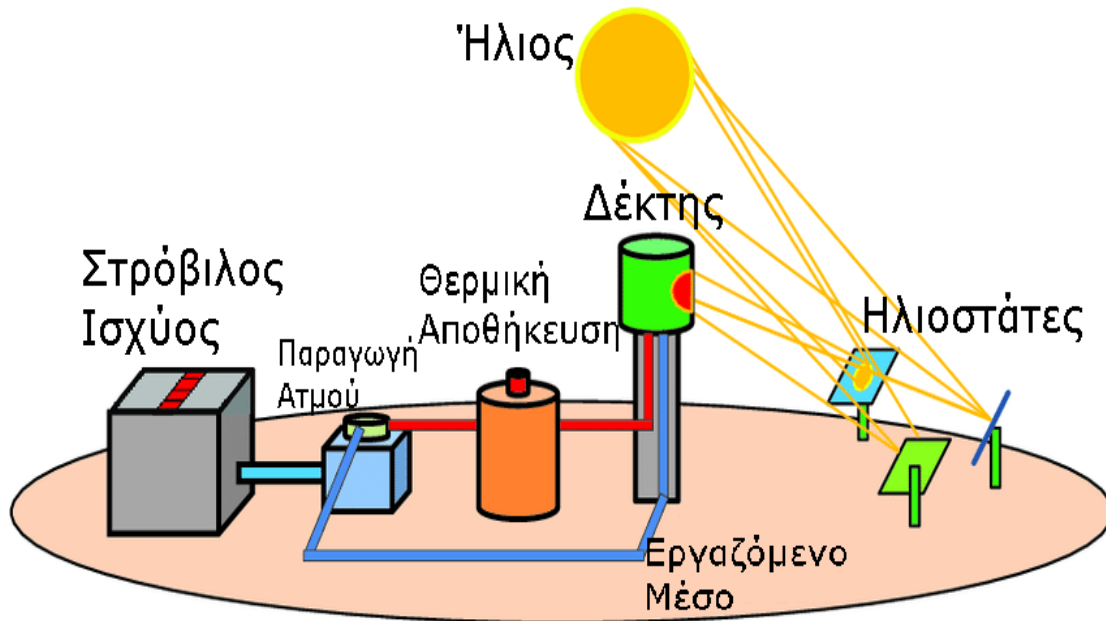
Οι ηλιακοί πύργοι (ή συλλέκτες με κεντρικό δέκτη) αποτελούν ένα σύστημα μεγάλου μεγέθους και συνήθως καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση. Ο συγκεντρωτής τους είναι μη συνεχής και αποτελείται από εκατοντάδες ή χιλιάδες κάτοπτρα τα οποία ονομάζονται ηλιοστάτες. Οι ηλιοστάτες συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία στον δέκτη που βρίσκεται τοποθετημένος πάνω σε ένα πύργο. Έτσι μεγάλη ποσότητα ηλιακής ενέργειας κατευθύνεται στον δέκτη και μπορεί να παραχθεί ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας για την παραγωγή μετέπειτα ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ηλιοστάτες έχουν σύστημα παρακολούθησης του ηλίου δύο αξόνων. Πολύ σημαντική για τον ηλιακό πύργο είναι η αποφυγή σκιάσεων και παρεμποδίσεων μεταξύ των ηλιοστατών. Μία λύση προς αυτή την κατεύθυνση θα ήταν η αύξηση της απόστασης μεταξύ των ηλιοστατών ή η αύξηση του ύψους του πύργου. Όμως και οι δύο λύσεις αυξάνουν το κόστος της εγκατάστασης και άρα υπάρχει ένα όριο τεchnοοικονομικό στην εφαρμογή τους. Ο δέκτης στην τυπική του μορφή έχει μαύρη επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια και πίσω από αυτήν συστοιχία σωληνώσεων στην οποία ρέει το εργαζόμενο μέσο το οποίο μπορεί να είναι πεπιεσμένο νερό, τηγμένο άλας ή υγρό νάτριο.

Λόγω του υψηλού λόγου συγκέντρωσης, 300 έως 1500 [2.18], το εργαζόμενο μέσο αναπτύσσει πολύ υψηλές θερμοκρασίες και μπορεί να παραχθεί ατμός για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός κύκλου Rankine. Οι εγκαταστάσεις με ηλιακό πύργο είναι κατάλληλες για εφαρμογές μέσα σε ένα εύρος 30-400 MW<sub>el</sub> [2.6]. Μονάδες κεντρικού δέκτη μπορούν να χρησιμοποιήσουν και ένα κύκλο Brayton και μπορούν να συνδυαστούν σε υβριδικές μονάδες με άλλα συμβατικά καύσιμα.

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, έτσι αν και η ηλιακή ενέργεια έχει μεγάλες διακυμάνσεις σε εγκαταστάσεις ηλιακού πύργου η παραγωγή ενέργειας είναι σταθερή και δύναται ακόμα και σε ώρες που δεν υπάρχει μεγάλη ηλιοφάνεια. Για τον λόγο αυτό σχεδιάζονται ώστε οι ηλιοστάτες να στέλνουν παραπάνω ηλιακή ενέργεια (έως και 3 φορές) από αυτήν που χρειάζεται ο στρόβιλος εκείνη την στιγμή. Έτσι τέτοια συστήματα μπορούν να φτάσουν ετήσιο συντελεστή δυναμικού έως και 65%, δηλαδή να λειτουργεί αυτόνομα χωρίς εφεδρικό καύσιμο για το 65% του έτους [2.6]. Σαν μέσο αποθήκευσης χρησιμοποιείται συνήθως το τηγμένο άλας. Από την άλλη μειονεκτήματα αποτελούν η ανάγκη για χρήση μεγάλης έκτασης γης και νερού.





Σχήμα 2.8.8: Σχηματική παράσταση ηλιακού πύργου με σύστημα αποθήκευσης [2.26].

Η τεχνολογία του ηλιακού πύργου δεν είναι τόσο ώριμη όσο του PTC αλλά τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται ραγδαία. Η πρώτη εμπορικά εκμεταλλεύσιμη μονάδα πύργου ισχύος ήταν η PS10 στην Σεβίλλη της Ισπανίας, με δυνατότητα παραγωγής 10 MW ισχύος από 624 ηλιοστάτες. Η πιο μεγάλη μονάδα είναι η PS20, ισχύος 20 MW με 1291 ηλιοστάτες (σχήμα 2.8.9). Υπάρχουν βέβαια και πολλές μονάδες οι οποίες βρίσκονται υπό κατασκευή ή μελέτη. Μια τέτοια μονάδα υπό κατασκευή βρίσκεται και στην Κρήτη από την εταιρεία NUR Energie και ονομάζεται ΜΙΝΟΣ. Θα είναι ισχύος 50 MW και θα καταλαμβάνει 160 εκτάρια γης [2.27].



Σχήμα 2.8.9: Οι σταθμοί με ηλιακό πύργο PS10 και PS20 στην Ισπανία [2.28].

### **2.8.5: Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο (πιάτο).**

Ο συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο (solar dish collector) αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- Παραβολοειδές κάτοπτρο.
- Σύστημα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική ή χημική (δέκτης).
- Σύστημα παρακολούθησης ηλίου δύο αξόνων.

Η ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται στο κάτοπτρο και συγκεντρώνεται σημειακά στον δέκτη, όπου η ηλιακή ενέργεια απορροφάται από κάποιο εργαζόμενο μέσο. Ο παραβολοειδής συγκεντρωτής χρειάζεται να παρακολουθεί διαρκώς την κίνηση του ηλίου και για αυτό το σύστημα παρακολούθησης του ηλίου είναι δύο αξόνων και μεγάλης ακρίβειας.

Η εμπορευματοποίηση των παραβολοειδών συλλεκτών βρίσκεται ακόμη σε πρώιμα στάδια αλλά μια σειρά από πλεονεκτήματα την καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία [2.1]:

- Επειδή παρακολουθούν διαρκώς τον ήλιο είναι οι πιο αποδοτικοί από όλους τους συλλέκτες.
- Έχουν λόγο συγκέντρωσης 600-2000 και μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες άνω των 1500 °C [2.1] με αποτέλεσμα να έχουν υψηλή θερμική και εξεργειακή απόδοση.
- Έχουν υψηλή αυτονομία ως σύστημα που τους επιτρέπει να λειτουργούν είτε μεμονωμένα (σε αποκεντρωμένες περιοχές) είτε ομαδοποιημένα (σε μεγάλους θερμικούς σταθμούς).

Οι παραβολοειδής συλλέκτες παρουσιάζονται εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.

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

- [2.1] S.A. Kalogirou. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science 2004;30(3):231-295.
- [2.2] Κ.Α. Αντωνόπουλος.Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα (Μέρος Πρώτο). Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2015.
- [2.3] J. A. Duffie, W. A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes, fourth edition. Wiley, 2013.
- [2.4] [http://ape.chania.teicrete.gr/gr/files/HPIESI\\_Pres\\_03\\_Solar\\_Geom.pdf](http://ape.chania.teicrete.gr/gr/files/HPIESI_Pres_03_Solar_Geom.pdf)
- [2.5] <https://eclass.upatras.gr/modules/document/document.php?course=ENV127>
- [2.6] D.Y. Goswami. Principles of Solar Engineering, third edition. CRC Press, 2015.
- [2.7] Τεχνική οδηγία Τ.Ε.Ε: ΤΟΤΕΕ 20701 - 3/2010. Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών.
- [2.8] Κ.Α. Αντωνόπουλος .Κλιματισμός (Μέρος Πρώτο). Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2015.
- [2.9] E.Bellos, C. Tzivanidis, V. Belessiotis. Daily performance of parabolic trough solar collectors. Solar Energy 2017;158:663-678.
- [2.10] <http://www.kippzonen.com/Product/14/CMP21-Pyranometer#.W9ZSI2gzaUk>.
- [2.11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Pyrheliometer>.
- [2.12] <http://www.kippzonen.com/ProductGroup/9/Sun-Trackers>.
- [2.13] M. Noia, C.F Ratto, R.Festa. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: II. Physical models. Solar Energy 1993;51:457-465.
- [2.14] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος. Κατάρτιση Ενεργειακών Επιθεωρητών Εκπαιδευτικό υλικό, Α Έκδοση. Αθήνα 2011.
- [2.15] <http://www.cres.gr>
- [2.16] <https://solartribune.com/evacuated-tube-solar-hot-water>
- [2.17] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter09/chapter09.html>
- [2.18] Ε.Α. Μπέλλος. Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συλλεκτών σε κτίρια. Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016.
- [2.19] V.K. Jebasingh, G.M. Joselin Herbert. A review of solar parabolic trough collector. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;54:1085-1091.

[2.20] [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_Energy\\_Generating\\_Systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems)

[2.21] D. Soroush, M.F. Rahimi. Introduction of solar collectors and energy and exergy analysis of a heliostat plant, The 3rd International Conference and Exhibition on Solar Energy. Tehran, 2016.

[2.22] [https://en.wikipedia.org/wiki/Compact\\_linear\\_Fresnel\\_reflector](https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_linear_Fresnel_reflector)

[2.23] <http://www.novatecsolar.com/56-1-PE-2.html>

[2.24] <https://www.protenders.com/projects/kimberlina-solar-thermal-energy-plant>

[2.25] [https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/ESMAP\\_MENA\\_Local\\_Manufacturing\\_Chapter\\_1.pdf](https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/ESMAP_MENA_Local_Manufacturing_Chapter_1.pdf)

[2.26] N. C. Cruz, J. D. Álvarez, J. L. Redondo, J. Fernández-Reche, M. Berenguel, R. Monterreal, P. M. Ortigosa. A New Methodology for Building-Up a Robust Model for Heliostat Field Flux Characterization. *Energies* 2017;10:730.

[2.27] <http://www.nurenergie.com/index.php/english/projects/greece>

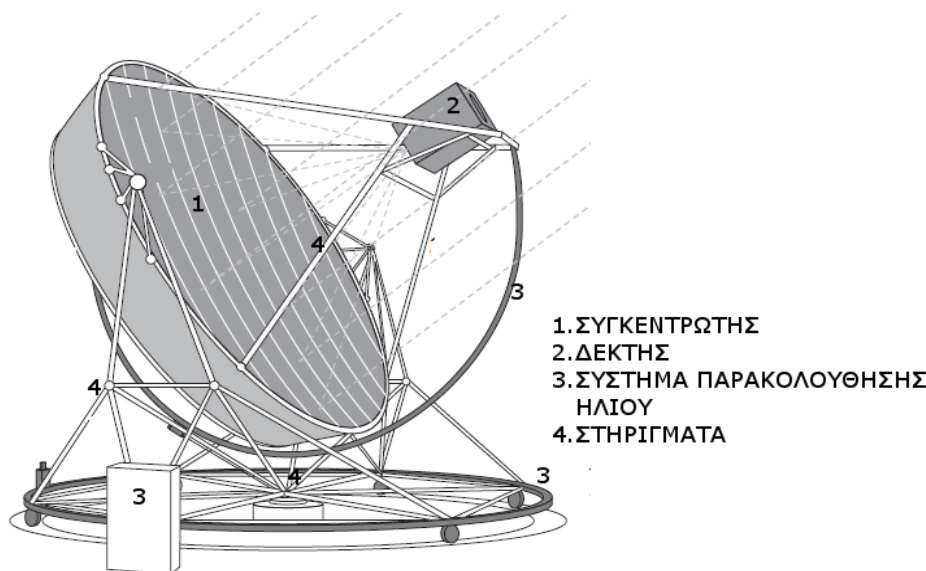
[2.28] [https://en.wikipedia.org/wiki/PS20\\_solar\\_power\\_plant](https://en.wikipedia.org/wiki/PS20_solar_power_plant)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Συγκεντρωτικοί συλλέκτες με παραβολοειδές κάτοπτρο.

### 3.1 Γενικά στοιχεία.

Ο παραβολοειδής συγκεντρωτής είναι μια τρισδιάστατη επιφάνεια και προκύπτει από την περιστροφή μιας παραβολής γύρω από τον άξονα συμμετρίας του. Ανήκει στην κατηγορία των συγκεντρωτών με είδωλο. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στο γεγονός ότι οι ακτίνες του ηλίου που εισέρχονται κάθετα στην επιφάνεια ανοίγματος θα ανακλαστούν και θα συγκεντρωθούν σε ένα σημείο, όπου εκεί κοντά τοποθετείται ο δέκτης. Λόγω της σημειακής συγκέντρωσης αναπτύσσονται υψηλοί λόγοι συγκέντρωσης (500-3000) [3.1] και κατά συνέπεια υψηλές θερμοκρασίες που μπορούν να ξεπεράσουν τους 1000 °C [3.2]. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών οι παραβολοειδής συλλέκτες εμφανίζουν τους υψηλότερους οπτικούς και θερμικούς βαθμούς απόδοσης.

Τα βασικά μέρη ενός παραβολοειδούς συλλέκτη είναι ο συγκεντρωτής, ο δέκτης, το σύστημα παρακολούθησης του ηλίου και τα στηρίγματα (σχήμα 3.1.1).



Σχήμα 3.1.1: Σχηματική παράσταση συλλέκτη με παραβολοειδές κάτοπτρο [3.3].

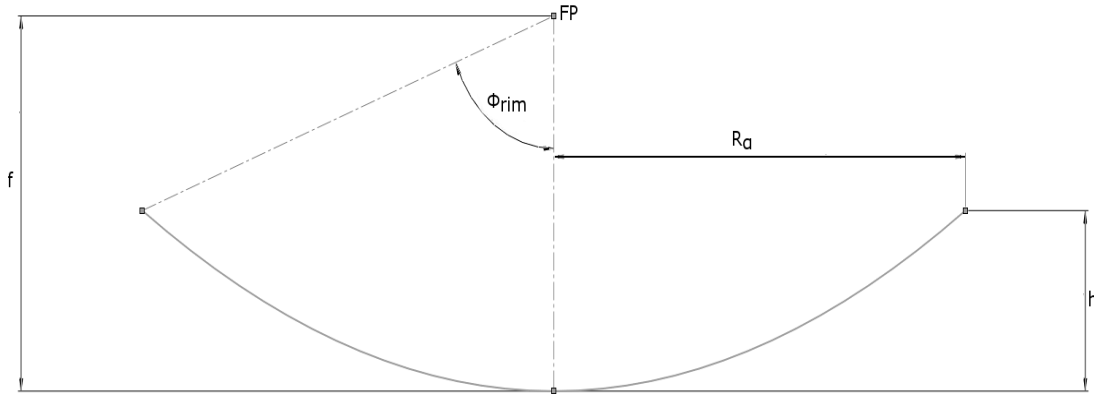
#### 3.1.1 Συγκεντρωτής.

Ο συγκεντρωτής είναι πολύ σημαντικός για κάθε συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη. Ο παραβολοειδής συγκεντρωτής προκύπτει από την περιστροφή μιας παραβολής γύρω από τον άξονα συμμετρίας του και σχηματίζει ένα τρισδιάστατο κάτοπτρο σχήματος που μοιάζει με “πίατο” (dish). Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι η εστία (FP –Focal Point) , η εστιακή απόσταση ( $f$ ), η γωνία χείλους ( $\Phi_{rim}$ ), το ύψος ( $h$ ) και η ακτίνα ανοίγματος ( $R_{col}$ ) (σχήμα 3.1.2). Στο σχήμα 3.1.3 φαίνεται η τρισδιάστατη μορφή ενός παραβολοειδούς κατόπτρου.

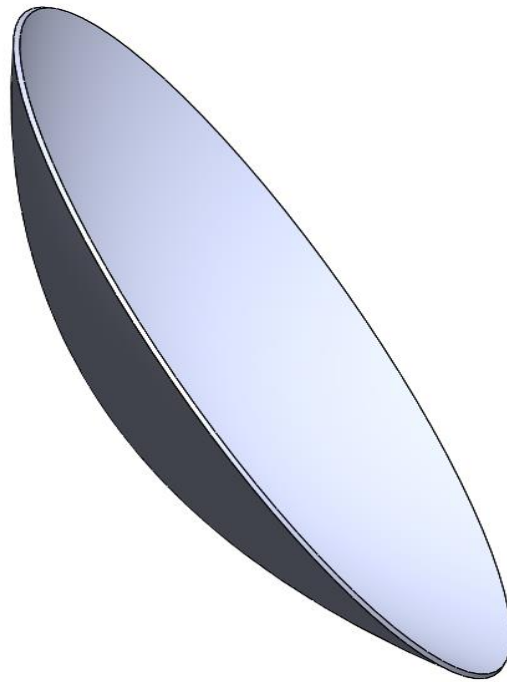
Η εστιακή απόσταση, η διάμετρος ανοίγματος και το ύψος συνδέονται μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$\frac{f}{D_{col}} = \frac{1}{4 \cdot \tan\left(\frac{\Phi_{rim}}{2}\right)} \quad (3.1)$$

$$h = \frac{D_{col}^2}{16 \cdot f} \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.1.2: Βασικά γεωμετρικά μεγέθη κατόπτρου.



Σχήμα 3.1.3: Τρισδιάστατη μορφή παραβολοειδούς κατόπτρου.

Βασικό χαρακτηριστικό των παραβολοειδών συλλεκτών είναι οι υψηλοί λόγοι συγκέντρωσης ενώ για τέλεια οπτική συμπεριφορά προκύπτει ο μέγιστος λόγος συγκέντρωσης  $C_{max}$ , ο οποίος αντιστοιχεί σε δέκτη με μέγεθος επαρκές ώστε να συλλάβει ολόκληρο το είδωλο του ηλίου, δηλαδή [3.4]:

$$C_{max} = \frac{\sin^2(\Phi_{rim})}{4 \cdot \sin^2\left(\frac{\delta}{2} + 0,267\right)} - 1, \quad \text{για σφαιρικό δέκτη} \quad (3.3)$$

$$C_{max} = \frac{\sin^2(\Phi_{rim}) \cdot \cos^2(\Phi_{rim} + \frac{\delta}{2} + 0.267)}{\sin^2(\frac{\delta}{2} + 0.267)} - 1, \quad \text{για επίπεδο δέκτη} \quad (3.4)$$

Όπου:

- $\delta$ = γωνία διασποράς

- $\Phi_{rim}$ = γωνία χείλους.

Υπάρχουν πολλοί σχεδιαστικοί παράμετροι που πρέπει να μελετηθούν για την κατασκευή του βέλτιστου κατόπτρου αναλόγως την εφαρμογή όπως το σχήμα του, το υλικό κατασκευής, η διάμετρος του ανοίγματος και η γωνία χείλους.

Για την κατασκευή του κατόπτρου αρχικά κατασκευάζεται μία μεταλλική βάση σχήματος παραβολοειδούς και στην συνέχεια τοποθετούνται πάνω στην βάση η ανακλαστική επιφάνεια (καθρέφτης) είτε ενιαία είτε τμηματικά (σχήμα 3.2.1). Η τμηματική τοποθέτηση των καθρεφτών έχει επικρατήσει λόγω της ευκολίας κατασκευής και μεταφοράς. Το πιο αποδοτικό σχήμα είναι αυτό της παραβολής όμως πολλές φορές το σχήμα αυτό προσεγγίζεται με πολλούς καθρέφτες σφαιρικού σχήματος (σχήμα 3.3.2). Μια άλλη προσέγγιση κατασκευής κατόπτρων είναι η χρήση πεπλατυσμένων μεμβρανών (stretched membranes) (σχήμα 3.2.7).

Η επιλογή του υλικού του ανακλαστήρα είναι πολύ σημαντική διότι επηρεάζει την ανακλαστικότητα και άρα την οπτική απόδοση του συλλέκτη. Μεγαλύτερη αντοχή έχουν οι καθρέφτες που αποτελούνται στο πίσω μέρος τους από αλουμίνιο ή αργυρό και στο μπροστινό από γυαλί. Μια βελτιωμένη έκδοση είναι η προσθήκη σιδήρου στο γυαλί για αύξηση της ανακλαστικότητας η οποία ανάλογα την περιεκτικότητα σε σίδηρο κυμαίνεται μεταξύ 90%-94% [3.5]. Τέλος δύναται να κατασκευαστούν ανακλαστικές επιφάνειες που στο μπροστινό μέρος τους έχουν λεπτά φιλμ πολυμερών τα οποία είναι επικαλυμμένα με αλουμίνιο ή αργυρό, η χρήση πολυμερών αποτελεί πιο οικονομική προσέγγιση.

Η διάμετρος του ανοίγματος κυμαίνεται από μερικά μέτρα έως και 25 μέτρα στα μεγάλα πιάτα. Όσο η διάμετρος του ανοίγματος (άρα και η επιφάνεια ανοίγματος) αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η ηλιακή ενέργεια που ανακλάται στο κάτοπτρο και άρα και η παραγόμενη ενέργεια στον δέκτη. Όμως αύξηση της διαμέτρου οδηγεί σε αύξηση της πολυπλοκότητας και του κόστους της κατασκευής. Η μελέτη από το Sandia National Laboratories έδειξε πως το κλάσμα κόστος/παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται τόσο στις πολύ μεγάλες διαμέτρους όσο και στις πολύ μικρές, κατέληξε πως το κλάσμα ελαχιστοποιείται για διάμετρο ανοίγματος 5-15 m [3.6].

Τέλος η γωνία χείλους επηρεάζει την ανακλώμενη ακτινοβολία αλλά και την κατασκευή του κατόπτρου. Η επιλογή της κατάλληλης γωνίας χείλους ποικίλει ανάλογα την εφαρμογή, πολλές όμως μελέτες έχουν δείξει πως η βέλτιστη γωνία χείλους βρίσκεται σε μια περιοχή κοντά στις 45° [3.7].

### 3.1.2 Δέκτης.

Ο δέκτης αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι ενός παραβολοειδούς συλλέκτη καθώς επιτελεί δύο βασικές λειτουργίες. Από την μια πρέπει να απορροφά όσο γίνεται μεγαλύτερο

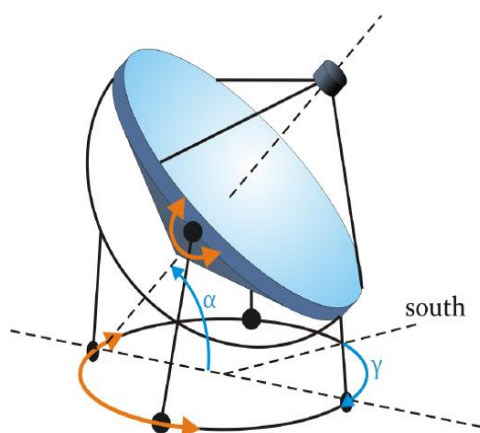
ποσοστό από την ηλιακή ενέργεια που στέλνει ο συγκεντρωτής και από την άλλη να μετατρέπει την ηλιακή σε θερμική ενέργεια ενός εργαζόμενου ρευστού με τις λιγότερο δυνατές απώλειες. Ανεξαρτήτως τύπου δέκτη οι μελέτες προσανατολίζονται στην μεγιστοποίηση του θερμικού και οπτικού βαθμού απόδοσης του δέκτη.

Έχει επικρατήσει οι δέκτες να είναι τύπου κοιλότητας, η οποία περιβάλλεται από μονωτικό υλικό και συνήθως τοποθετείται κοντά στην εστία της παραβολής. Υπάρχουν πάρα πολλές σχεδιαστικές παράμετροι που αφορούν τον δέκτη και θα αναλυθούν στο υποκεφάλαιο 3.4 ενώ οι βασικές σχέσεις που περιγράφουν τον δέκτη αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 3.5.

### 3.1.3 Σύστημα παρακολούθησης ηλίου.

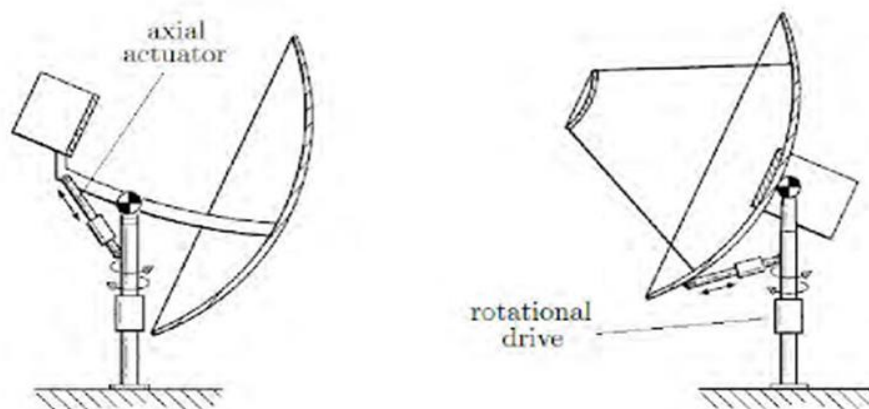
Βασικό μέρος ενός παραβολοειδούς συλλέκτη είναι το σύστημα παρακολούθησης του ηλίου ο οποίος λέγεται και ηλιακός ιχνηλάτης. Το σύστημα αυτό από την μια πρέπει να παρακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια διαρκώς τον ήλιο, ώστε οι ακτίνες να εισέρχονται κάθετα στο άνοιγμα, και από την άλλη να είναι κατάλληλα σχεδιασμένο για να μπορεί να περιστρέφει μια μεγάλη μάζα με σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η διάταξη περιλαμβάνει το μηχανολογικό μέρος (ρότορας, βάση, διάταξη για την κίνηση κτλ.) και το ηλεκτρονικό κομμάτι, όπου επί της ουσίας είναι οι διατάξεις που χρειάζονται ώστε να ελέγχεται η κίνηση του ιχνηλάτη, βάση προκαθορισμένων εντολών και αλγορίθμων.

Για μεγάλα κάτοπτρα προτιμάται η χρήση ιχνηλατών που παρακολουθούν τον ήλιο μέσω των γωνιών αζιμούθιου και ηλιακού ύψους, αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία ως “azimuth/elevation tracker”. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πιάτο περιστρέφεται σε ένα επίπεδο παράλληλο στο έδαφος (αζιμούθιο ηλίου) αλλά και σε ένα επίπεδο κάθετο στο έδαφος (ηλιακό ύψος). Η κίνηση αυτή πραγματοποιείται μέσω δύο ανεξάρτητων κινητήρων και υπάρχουν διάφορες εκδοχές με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί. Στο σχήμα 3.1.4 το κάτοπτρο στηρίζεται σε μια κυκλική βάση πάνω στην οποία μπορεί να περιστρέφεται ενώ στο σχήμα 3.1.5 το κάτοπτρο στηρίζεται σε άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφεται ενώ ο δευτερεύον άξονας προκαλεί την ανύψωση. Είναι φανερό πως η πρώτη διάταξη συνίσταται για πολύ μεγάλα κάτοπτρα, καθώς το βάρος κατανέμεται στην κυκλική διάταξη, ενώ η δεύτερη σε μικρότερου μεγέθους κάτοπτρα.



Σχήμα 3.1.4: Σύστημα παρακολούθησης azimuth/elevation με βάση κυκλική μορφής [3.7].





**Σχήμα 3.1.5: Σύστημα παρακολούθησης azimuth/elevation με βάση μορφής στύλου [3.8].**

Σε πολύ μικρά κάτοπτρα προτιμούνται πολικοί ιχνηλάτες (polar trackers ή tilt-roll trackers). Στην περίπτωση αυτή το κάτοπτρο περιστρέφεται περί άξονα που βρίσκεται παράλληλος στον άξονα περιστροφής της γης ενώ ο άλλος άξονας είναι κάθετος στον πολικό άξονα, στην ουσία τέτοια συστήματα έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται στην κατεύθυνση ανατολή-δύση και βορράς-νότος. Αντίστοιχα συστήματα χρησιμοποιούνται και σε δορυφορικά πιάτα. Η χρήση τους περιορίζεται σε πολύ μικρά πιάτα λόγω της σημειακής συγκέντρωσης του βάρους ενώ η ακρίβεια τους είναι πολύ μεγάλη [3.8].

Ένα άλλο σημαντικό κομμάτι του ιχνηλάτη είναι οι διατάξεις που ελέγχουν την κίνησή του. Για μεγαλύτερη ακρίβεια συνήθως προτιμούνται ενεργητικές διατάξεις ελέγχου (active driver), τα οποία παρακολουθούν την κίνηση του ηλίου μέσω ειδικών αισθητήρων. Εάν οι ακτίνες του ηλίου δεν είναι κάθετες στο επίπεδο του συλλέκτη τότε η ένταση τους θα είναι διαφορετική μεταξύ δύο αισθητήρων γεγονός που θα ενεργοποιήσει την κίνηση του συλλέκτη έως ότου η ένταση γίνει ίδια και στους δύο αισθητήρες. Το μειονέκτημα τέτοιων συστημάτων είναι η χαμηλή απόδοσή τους κατά την διάρκεια συνεφιασμένων ημερών [3.8].

### 3.1.4 Στηρίγματα.

Αν και τα στηρίγματα φαίνονται το πιο απλοϊκό μέρος του συλλέκτη εντούτοις η λειτουργία που επιτελούν είναι πολύ σημαντική. Λόγω των μεγάλων ανοιγμάτων που έχουν οι παραβολοειδής συλλέκτες μπορούν να αναπυχθούν από τους ανέμους πολύ ισχυρές δυνάμεις που θέτουν σε κίνδυνο τον συλλέκτη. Άρα πρωταρχικός στόχος των στηριγμάτων είναι να απορροφούν με ασφάλεια τα φορτία που αναπτύσσονται από τους ανέμους και το ίδιο το βάρος του συλλέκτη.

Κατευθυντήριες γραμμές βελτιστοποίησης θα μπορούσαν να ήταν:

- Η χρήση εξελιγμένων υλικών και διατάξεων ώστε να μειωθεί ο όγκος τους και άρα το συνολικό βάρος του συλλέκτη.
- Η κατάλληλη διάταξη για την αποφυγή σκιάσεων.
- Ο εναρμονισμός των στηρίξεων με το σύστημα παρακολούθησης του ηλίου.

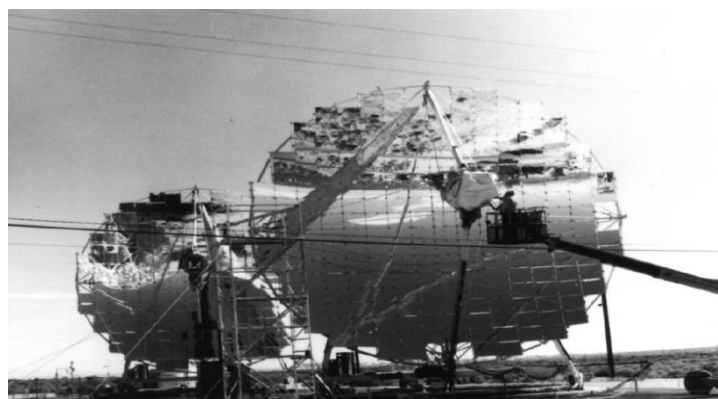
### 3.2 Ιστορική εξέλιξη παραβολειδών συλλεκτών.

Ο John Ericsson θεωρείται ότι είναι ο πρώτος που σύνδεσε ένα παραβολειδές κάτοπτρο με διάταξη μετατροπής ενέργειας (μηχανή Stirling) το 1880. Η πραγματική όμως αρχή στην μελέτη των CSP έγινε μετά την πετρελαϊκή κρίση το 1973 στις Η.Π.Α, καθώς αυξήθηκε ραγδαία η χρηματοδότηση της έρευνας του τομέα αυτού. Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα παραβολοειδών συλλεκτών τα οποία κατασκευάστηκαν είτε για ερευνητικούς είτε για εμπορικούς σκοπούς τα παλαιότερα χρόνια. Η εξέταση των παραδειγμάτων αυτών δείχνει και την πορεία της τεχνολογίας αυτής στα πρώτα χρόνια της ωρίμανσής της.

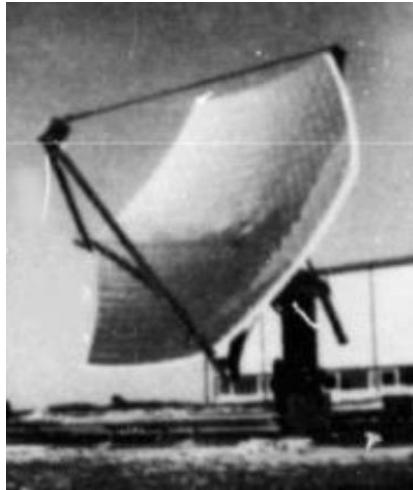
Ένα από τα αρχικά προγράμματα μελέτης των παραβολοειδών συλλεκτών ήταν το STEP (Solar Total Energy Project) το οποίο μελέτησε πολλές βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους. Στα τέλη του 1970 μια πειραματική εγκατάσταση αναπτύχθηκε από το εργαστήριο JPL (Jet Propulsion Laboratory) στην Καλιφόρνια όπου εγκαταστάθηκαν οι συλλέκτες Omnium-G (σχήμα 3.2.1) και TBC-1, TBC-2 με διάμετρο ανοίγματος 11 m (σχήμα 3.2.2). Επίσης την ίδια περίοδο έχουμε ανάπτυξη των συλλεκτών THEK-1 και THEK-2 στην Γαλλία μέσω του προγράμματος THEK (thermo-helio-electrical-KW). Ο THEK-1 είχε επιφάνεια ανοίγματος 50 m<sup>2</sup>, δέκτη από ελικοειδές σωλήνα που λειτουργούσε με εργαζόμενο μέσο έλαιο και θερμοκρασία εξόδου 325 °C. Ενώ ο THEK-2 σχεδιάστηκε για χαμηλότερες θερμοκρασίες (σχήμα 3.2.3).



Σχήμα 3.2.1: Συλλέκτης Omnium-G [3.9].



Σχήμα 3.2.2: Συλλέκτης TBC-1 και TBC-2 [3.9].

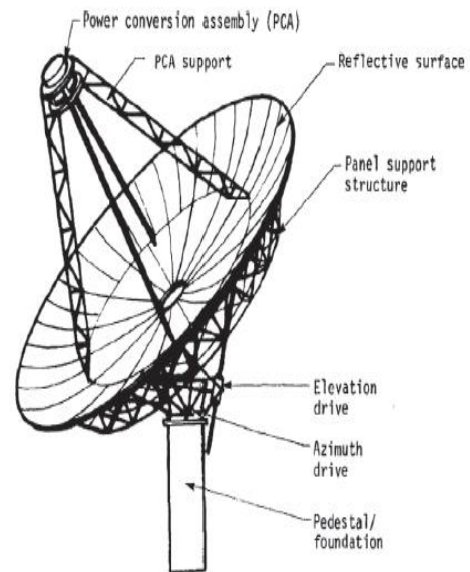


**Σχήμα 3.2.3: Συλλέκτης THEK-2 [3.9].**

Η πρώτη μεγάλη προσπάθεια για παραγωγή χαμηλού κόστους συλλεκτών έγινε από την JPL με την συνδρομή των εταιρειών Ford και General Electric με αποτέλεσμα να κατασκευαστούν οι συλλέκτες PDC-1 και PDC-2 (σχήμα 3.2.4). Με βάση αυτούς τους συλλέκτες κατασκευάστηκαν αργότερα και οι συλλέκτες Vanguard και McDonnell Douglas (σχήμα 3.2.5).



(a)



(b)

**Σχήμα 3.2.4: (a) Ο συλλέκτης PDC-1 (b) Σχηματική παράσταση του συλλέκτη PDC-2 [3.9].**





(a)



(b)

**Σχήμα 3.2.5: (a) Ο συλλέκτης Vanguard (b) Συλλέκτης McDonnell Douglas [3.9].**

Ένα άλλο σημαντικό πρόγραμμα ήταν το STEP (Solar Total Energy Project) που αναπτύχθηκε στο Shenandoah της Georgia στις Η.Π.Α, με την σύμπραξη διάφορων εταιρειών. Επρόκειτο για μια μεγάλη μονάδα παραγωγής ενέργειας που αποτελείτο από 114 συλλέκτες ανοίγματος 7 m. Οι δέκτες ήταν μορφής κοιλότητας και αποτελούνταν από ελικοειδές σωλήνα από ασάλι ενώ το εργαζόμενο μέσο ήταν συνθετικό έλαιο το οποίο θερμαινόταν έως τους 399 °C. Ο δέκτης χρησίμευε ως ένας εναλλάκτης θερμότητας για την παραγωγή ατμού ο οποίος στην συνέχεια παρήγαγε ρεύμα μέσω ενός κύκλου Rankine, ενώ παράλληλα προβλεπόταν και εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας. Λειτουργήσε με επιτυχία από το 1982 έως το 1991 (σχήμα 3.2.6). Ήταν ένα σημαντικό πρόγραμμα που έδειξε την ικανότητα των παραβολοειδών συλλεκτών για σύνθεση μεγάλης μονάδας παραγωγής ενέργειας με κεντρικό ατμοστρόβιλο.



**Σχήμα 3.2.6: Συλλέκτες της εγκατάστασης Shenandoah [3.5].**

Μέχρι τώρα τα κάτοπτρα κατασκευάστηκαν είτε από τμηματικές είτε από ενιαίες ανακλαστικές επιφάνειες (καθρέφτες). Η ανάληψη της μελέτης των παραβολοειδών από το εργαστήριο SNL (Sandia National Laboratories) το 1984 οδήγησε σε μια νέα τεχνική

κατασκευής του κατόπτρου με πεπλατυσμένες μεμβράνες (stretched membranes). Με βάση αυτήν την τεχνική κατασκευάστηκαν από την εταιρεία Lajet ο συλλέκτης LEC-460 (σχήμα 3.2.7), με επιφάνεια ανοίγματος 44 m<sup>2</sup>. Με την χρήση 700 τέτοιων συλλεκτών εγκαταστάθηκε η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Solar Plant 1 (4.9 MW<sub>el</sub>), η οποία λειτούργησε με επιτυχία μέχρι το 1990. Τα αρνητικά της μονάδας αυτής ήταν η γρήγορη φθορά των κατόπτρων αλλά και οι μεγάλοι χρόνοι εκκίνησης του συστήματος που παρατηρήθηκαν. Με την ίδια τεχνική κατασκευάστηκαν με συνεργασία των DOE (US department of energy), NREL και SNL οι συλλέκτες SKI και SAIC (σχήμα 3.2.8).



**Σχήμα 3.2.7: Οι συλλέκτες (LEC-460) της εγκατάστασης Solar Plant 1 στην Καλιφόρνια της εταιρείας Lajet [3.9].**



(a)



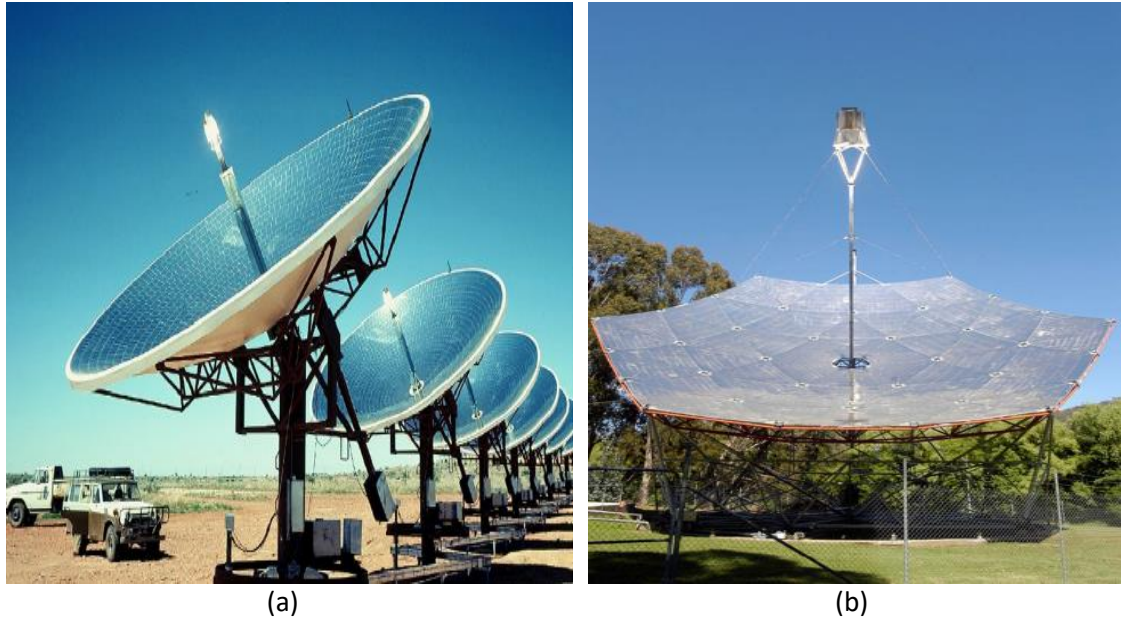
(b)

**Σχήμα 3.2.8: (a) Ο συλλέκτης SKI (b) Ο συλλέκτης SAIC [3.9].**

Μια χώρα με έντονο ενδιαφέρον προς τους παραβολοειδείς συγκεντρωτικούς συλλέκτες είναι η Αυστραλία μέσω του εθνικού της πανεπιστημίου (ANU-Australian National University). Η πρώτη προσπάθεια έγινε το 1980-81 μέσω του προγράμματος εγκατάστασης 14 συλλεκτών διαμέτρου ανοίγματος 5 m στην τοποθεσία White Cliffs, μια απομακρυσμένη κωμόπολη. Οι δέκτες ήταν τύπου κοιλότητας και παρήγαγαν άμεσα ατμό το οποίο στην συνέχεια οδηγούνταν σε μία μηχανή Diesel. Η απόδοση της μηχανής έφτανε το 22% ενώ για

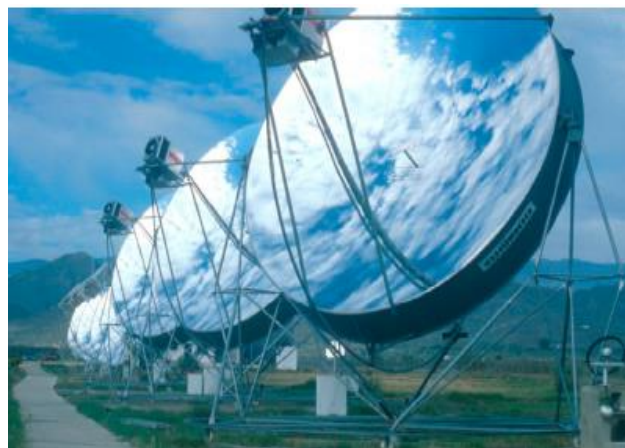


τον δέκτη το κλάσμα (ενέργεια ρευστού/ανακλώμενη ακτινοβολία στο άνοιγμα) έφτανε το 93% για θερμοκρασία εξόδου 500 °C (σχήμα 3.2.9a). Η προσπάθεια συνεχίστηκε με την κατασκευή του SG3 big dish το οποίο είχε ένα πολύ μεγάλο πιάτο ανοίγματος 400 m<sup>2</sup>, λειτούργησε περιοδικά από το 1995-2004. Ο δέκτης του ήταν παρόμοιος με αυτόν στο White Cliffs (σχήμα 3.2.9b).



**Σχήμα 3.2.9: (a) Συλλέκτες στο White Cliffs [3.9] (b) Συλλέκτης SG3 [3.9].**

Επίσης στην Ευρώπη εκδηλώθηκε ενδιαφέρον εξαρχής για την τεχνολογία των παραβολοειδών συλλεκτών. Πρωτοπόρος υπήρξε η γερμανική εταιρεία sbr (schlaich bergemann und partner) η οποία από τις αρχές του 1980 εστίασε στην παραγωγή συλλεκτών με το κάτοπτρο να είναι από πεπλατυσμένες μεμβράνες. Το πρώτο της μοντέλο είχε άνοιγμα 17 m και λειτούργουσε με μηχανή Stirling. Ο επόμενος συλλέκτης ονομάστηκε DISTAL I και είχε διάμετρο 7.5 m. Οι συλλέκτες αυτοί εγκαταστάθηκαν και δοκιμάστηκαν στην Αλμερία της Ισπανίας (PSA-Platforma Solar de Almeria) από το 1993 έως το 1997. Επόμενο μοντέλο ήταν το DISTAL II το οποίο λειτούργησε στην ίδια τοποθεσία (σχήμα 3.2.10).



**Σχήμα 3.2.10: Συλλέκτης DISTAL II [3.9].**

### 3.3 Σύγχρονοι συλλέκτες με παραβολοειδές κάτοπτρο.

Παρακάτω παρουσιάζονται εταιρείες και φορείς που δραστηριοποιήθηκαν στην μελέτη και κατασκευή παραβολοειδών συλλεκτών την σύγχρονη εποχή, για εμπορικούς ή ερευνητικούς σκοπούς, με πολλές από αυτές να συνεχίζουν την προσπάθεια και σήμερα.

#### 3.3.1 Schlaich bergermann und partner (sbp).

Με επικεφαλής την sbp και με την συμμετοχή πολλών εταιρειών και φορέων προέκυψε η σύμπραξη Eurodish, η οποία βασιζόμενη στον συλλέκτη DISTAL I σχεδίασε τον συλλέκτη Eurodish (σχήμα 3.3.1). Ο συγκεντρωτής του Eurodish, για να εξυπηρετηθεί η μεταφορά του, αποτελείται από 12 καθρέπτες που στο πίσω μέρος τους έχουν πλαστικό. Επιπλέον φέρει εξελιγμένο σύστημα παρακολούθησης του ηλίου με δυνατότητα ελέγχου εξ αποστάσεως. Τέλος φέρει πάνω του μια μηχανή Stirling SOLO V 161 ισχύος 10 kW<sub>el</sub>. Αρχικά εγκαταστάθηκε στην Αλμερία το 2001 ενώ στην συνέχεια, μέχρι και σήμερα, έχει λειτουργήσει με επιτυχία σε αρκετές χώρες όπως η Γερμανία, η Γαλλία, η Ιταλία και η Ινδία.



Σχήμα 3.3.1: Συλλέκτης Eurodish [3.10].

#### 3.3.2 Australian National University (ANU).

Εξέλιξη του συλλέκτη SG3 ήταν ο SG4 big dish ο οποίος ολοκληρώθηκε το 2009 από το Αυστραλιανό Εθνικό Πανεπιστήμιο (ANU) με την σύμπραξη της εταιρείας Wizard Power. Πρόκειται για ένα συλλέκτη με ακόμα μεγαλύτερο πιάτο (επιφάνεια ανοίγματος 489 m<sup>2</sup>). Ο συγκεντρωτής του αποτελείται από 380 τετραγωνικούς καθρέπτες οι οποίοι είναι ανταλλάξιμοι ενώ παράλληλα ο τρόπος τοποθέτησης τους στην βάση βοηθάει την στήριξη. Ο δέκτης για τον συλλέκτη αυτό ολοκληρώθηκε πρόσφατα και είναι τύπου κοιλότητας με ελικοειδές σωλήνα για άμεση παραγωγή ατμού. Γενικά ο συλλέκτης αυτός έχει επιδείξει κατά την πειραματική του λειτουργία πολύ υψηλούς οπτικούς και θερμικούς βαθμούς απόδοσης (σχήμα 3.3.2).



**Σχήμα 3.3.2: Συλλέκτης SG4 big dish [3.11].**

### 3.3.3 Stirling Energy Systems (SES).

Η εταιρεία Stirling Energy Systems (SES) ιδρύθηκε το 1996 και αγόρασε την εταιρεία MDAC/SCE η οποία επί 3 δεκαετίες ανέπτυξε συστήματα παραβολειδών συλλεκτών με μηχανή Stirling. Η εταιρεία αυτή σε συνεργασία με το εργαστήριο SNL και την κυβέρνηση των ΗΠΑ ανέπτυξε και εξέλιξε πολλούς παραβολειδής συλλέκτες με μηχανή Stirling. Ο τελευταίος τους συλλέκτης ήταν ο SunCatcher το έτος 2009 (σχήμα 3.3.3a). Ο συλλέκτης αυτός έφερε πάνω του μια μηχανή Stirling ισχύος  $25 \text{ kW}_{el}$  ενώ το κάτοπτρο αποτελούνταν από χάλυβα με επίστρωση πολύ λεπτού γυαλιού. Η μεγάλη καινοτομία του συλλέκτη αυτού ήταν το πολύ μικρό του βάρος αλλά και μια έξυπνη βάση από χάλυβα με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται μπετόν. Εξήντα συλλέκτες SunCatcher χρησιμοποιήθηκαν το 2010 για την κατασκευή μονάδας παραγωγής ενέργειας (Maricopa solar plant) ισχύος  $1.5 \text{ MW}_{el}$  στην Αριζόνα των ΗΠΑ (σχήμα 3.3.3b). Δυστυχώς η εταιρεία αυτή χρεοκόπησε το 2011 με αποτέλεσμα η μονάδα να κλείσει, πλέον οι μετοχές της ανήκουν σε διάφορες εταιρείες.



(a)



(b)

**Σχήμα 3.3.3: (a) Συλλέκτης SunCatcher [3.9] (b) Μονάδα ηλιακής ενέργειας Maricopa, Αριζόνα (ΗΠΑ) [3.12].**



### 3.3.4 Infinia Corporation.

Η αμερικάνικη εταιρεία Infinia Corporation ιδρύθηκε το 1985 και αρχικά ειδικευόταν στην παραγωγή μηχανών Stirling ενώ το 2006 σε συνεργασία με την sbr κατασκεύασε τον πρώτο παραβολοειδή συλλέκτη PowerDish με μηχανή Stirling. Στην συνέχεια εξέλιξε τον συλλέκτη αυτό και πρόεκυψαν οι PowerDish II και PowerDish III (σχήμα 3.3.4a) με διάμετρο ανοίγματος 4.7 m, σύστημα παρακολούθησης azimuth/elevation και ενσωματωμένη μια μηχανή Stirling 3 kW<sub>el</sub>, που σύμφωνα με την εταιρεία δεν χρειαζόταν συντήρηση για 25 χρόνια. Τέτοιοι συλλέκτες εγκαταστάθηκαν σε πολλές χώρες όπως οι ΗΠΑ και η Ισπανία. Τελευταίο μοντέλο της εταιρείας ήταν ο PowerDish IV (σχήμα 3.3.4b), με διαφοροποιημένο σχήμα, 180 τέτοιοι συλλέκτες εγκαταστάθηκαν στις ΗΠΑ (Tooele Army Depot). Η εταιρεία αυτή εξαγοράστηκε από την Qenergy το 2013.



(a)



(b)

Σχήμα 3.3.4: (a) Συλλέκτης PowerDish III [3.10]. (b) Συλλέκτης PowerDish IV [3.9]

### 3.3.5 HelioFocus.

Η HelioFocus είναι μια Ισραηλινή εταιρεία η οποία σε συνεργασία με την sbr κατασκεύασε τον συλλέκτη HelioFocus που εγκαταστάθηκε το 2012 στην Dimona του Ισραήλ. Πρόκειται για συλλέκτη με επιφάνεια ανοίγματος 500 m<sup>2</sup> με τον συγκεντρωτή του να αποτελείται από 219 τετραγωνικούς καθρέφτες (1.5mX1.5m). Το σύστημα παρακολούθησης του ήταν τύπου azimuth/elevation με την κίνηση να επιτυγχάνεται με υδραυλικά συστήματα. Τέλος ο συλλέκτης ήταν τύπου κοιλότητας με εργαζόμενο μέσω αέρα το οποίο μετά την θέρμανσή του τροφοδοτούσε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Εξέλιξή του ήταν ο συλλέκτης Orion, πέντε από τους οποίους εγκαταστάθηκαν σε πιλοτική μονάδα στην Εσωτερική Μογγολία της Κίνας (σχήμα 3.3.5).



**Σχήμα 3.3.5: Η πιλοτική μονάδα της HelioFocus στην Κίνα [3.10].**

### **3.3.6 Ripasso Energy.**

Μία ακόμα νέα εταιρεία στον χώρο των παραβολειδών συλλεκτών είναι η Ripasso Energy η οποία πρόσφατα ανέπτυξε και παρασκεύασε δικό της συλλέκτη (σχήμα 3.3.6). Ο συλλέκτης αυτός φέρει πάνω του μια μηχανή Stirling 33 kW<sub>el</sub> με βαθμό απόδοσης που ξεπερνά το 30%. Ο συγκεντρωτής του αποτελείται τυπικά από γυάλινους καθρέφτες, με κύριο χαρακτηριστικό του το πολύ μικρό του βάρος, ενώ το σύστημα παρακολούθησης του ηλίου είναι τύπου azimuth/elevation. Τέλος συλλέκτες της εταιρείας έχουν εγκατασταθεί στην Νότια Αφρική και στην Ιταλία.



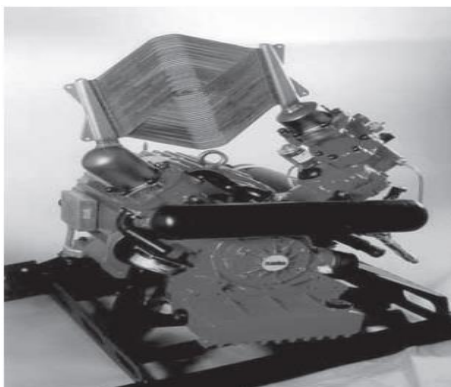
**Σχήμα 3.3.6: Συλλέκτης της εταιρείας Ripasso [3.13].**

### 3.4 Εφαρμογές παραβολοειδών συλλεκτών.

Κύρια εφαρμογή των παραβολοειδών συλλεκτών είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συλλέκτες αυτοί έχουν την δυνατότητα να φέρουν πάνω τους την γεννήτρια και επομένως να αποτελούν μια ηλιακή μηχανή, dish engine. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να λειτουργεί με ένα κύκλο Stirling, Brayton, οργανικό κύκλο Rankine (ORC) ή να φέρει πάνω του φωτοβολταϊκά στοιχεία. Μια άλλη επιλογή είναι η παραγωγή ατμού στον δέκτη και στην συνέχεια η χρήση του σε ένα κλασικό κύκλο Rankine. Άρα οι παραβολοειδής συλλέκτες μπορούν να συνδέονται στο υπάρχον δίκτυο ή να δουλεύουν ως μικρές ανεξάρτητες μονάδες.

Οι μηχανές Stirling έχουν επικρατήσει στην προσπάθεια εμπορευματοποίησης κυρίως λόγω του μεγάλου τους βαθμού απόδοσης, καθώς μπορούν να μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια το 30% της εισερχόμενης ακτινοβολίας [3.3]. Επιπλέον έχουν κόστος εγκατάστασης περί τις 3000 €/kW [3.2], ενώ η μεγάλη τους αξιοπιστία οδηγεί σε χαμηλά κόστη συντήρησης. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα να είναι ανεξάρτητες μηχανές ή σε σύζευξη με αποτέλεσμα η εγκατεστημένη ισχύς να κυμαίνεται από μερικά kW έως δεκάδες MW.

Μια τέτοια μηχανή λειτουργεί με βάση τον θερμοδυναμικό κύκλο Stirling, που περιλαμβάνει δύο ισόχωρες και δύο ισοθερμοκρασιακές μεταβολές. Το εργαζόμενο μέσο είναι πάντα αέριο (Ηλιο ή Υδρογόνο) καθώς αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες (600-800 °C) [3.3]. Παραδείγματα μηχανών Stirling που ενσωματώθηκαν σε συλλέκτες είναι: Mk II Stirling engine (25 kW της εταιρείας USAB), SOLO V-160 (10 kW της εταιρείας SPS) και STM 120 (22 kW από την εταιρεία STM) [3.9].

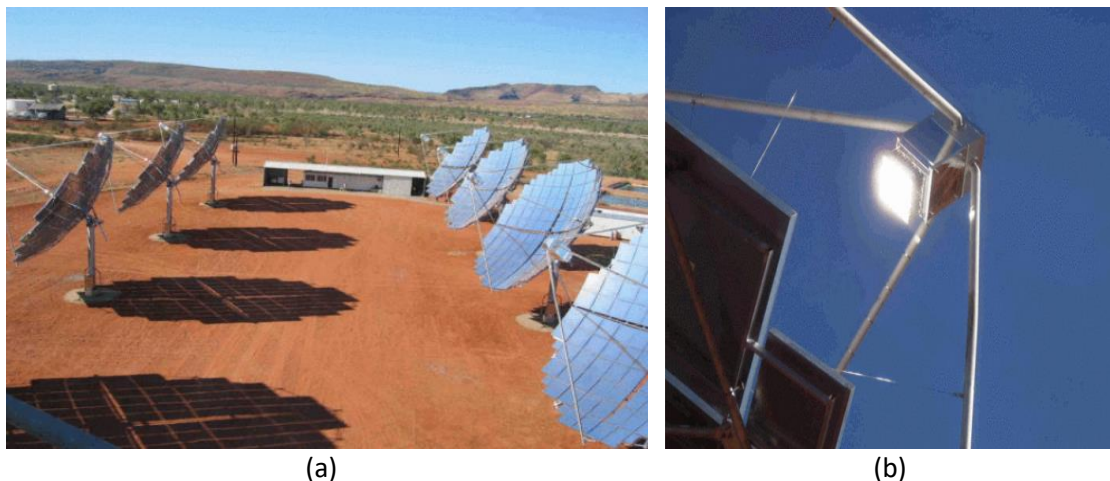


**Σχήμα 3.4.1: Μηχανή Stirling SOLO της εταιρείας SPS [3.3].**

Επιπλέον δύναται να χρησιμοποιηθεί και μια μηχανή εξωτερικής καύσης Brayton με εργαζόμενο μέσο τον αέρα (θερμοκρασία εισόδου τους 850 °C, λόγος πίεσης 2.5 [3.3]). Τέτοιες μηχανές δοκιμάστηκαν στους συλλέκτες Lajet 460 και TBC χωρίς όμως επιτυχία με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν αυτή την στιγμή ενεργές προσπάθειες [3.9]. Επίσης ένας οργανικός κύκλος Rankine δοκιμάστηκε πειραματικά στους συλλέκτες TBC και PDC-1 με εργαζόμενο μέσο Τολουόλιο και βαθμό απόδοσης 22.9 % [3.9].

Επίσης μπορούν να τοποθετηθούν στον δέκτη και φωτοβολταϊκά στοιχεία συγκέντρωσης (CPV-Concentrating photovoltaic). Συγκεντρώνοντας μεγάλης έντασης ηλιακή ακτινοβολία

στον δέκτη μειώνεται το υλικό ημιαγωγών πυριτίου που απαιτείται σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά. Σημαντικό σε τέτοια συστήματα είναι η απαγωγή θερμότητας από το φωτοβολταϊκό στοιχείο μέσω κατάλληλου συστήματος ψύξης. Μεγάλο ενδιαφέρον στα συστήματα αυτά έδειξε η εταιρεία Solar Systems η οποία ανέπτυξε τον συλλέκτη CS500 (σχήμα 3.4.2α) ο οποίος φέρει πάνω του δέκτη με συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό (σχήμα 3.4.2β). Το κλάσμα (ηλεκτρική ενέργεια/ηλιακή ενέργεια) του συλλέκτη αυτού κυμαίνεται γύρω στο 30% [3.14].



**Σχήμα 3.4.2: (α) Συλλέκτης CS500 [3.14]. (β) Δέκτης με συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό [3.14]**

Πολλές φορές οι παραβολοειδής συλλέκτες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού, ο οποίος στην συνέχεια τροφοδοτεί έναν κύκλο Rankine και παράγεται ενέργεια μέσω ενός ατμοστροβίλου. Υπάρχουν δύο τρόποι για να επιτευχθεί η παραγωγή ατμού, ο πρώτος είναι η παραγωγή ατμού απευθείας στον δέκτη του συλλέκτη (Direct Steam Generation) και ο δεύτερος είναι με την θέρμανση ενός εργαζόμενου μέσου στον δέκτη, το οποίο με την σειρά του χρησιμοποιείται αργότερα σε έναν εναλλάκτη θερμότητας για την παραγωγή ατμού (έμμεσος τρόπος). Τέτοια συστήματα απαιτούν επιπλέον κόστος για την μεταφορά του ατμού ενώ μπορούν να δημιουργηθούν και φάρμες συλλεκτών αυξάνοντας την εγκατεστημένη ισχύ.

Σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ατμού διαδραματίζει ο δέκτης, που στην προκειμένη περίπτωση είναι συνήθως ελικοειδής σωλήνας και σχηματίζει κοιλότητα. Παραδείγματα συλλεκτών με δέκτη άμεσης παραγωγής ατμού είναι οι SG3 και SG4 του Εθνικού Πανεπιστημίου της Αυστραλίας, ενώ έμμεση παραγωγή ατμού έχω στους συλλέκτες της εγκατάστασης στο Shenandoah και πιο πρόσφατα στον συλλέκτη της HelioFocus. Οι δέκτες για έμμεση παραγωγή ατμού τέτοιων συστημάτων καθώς και τα εργαζόμενα μέσα θα αναλυθούν πιο κάτω αναλυτικά καθώς αποτελούν κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

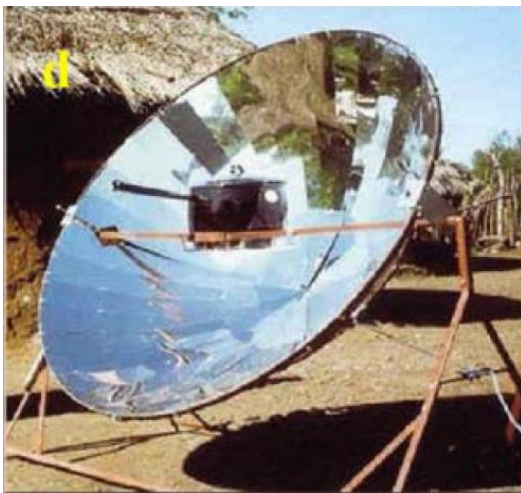
Μεγάλη ώθηση στην χρήση παραβολοειδών συλλεκτών για την παραγωγή ηλεκτρισμού θα μπορούσε να δώσει η ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας καθώς και η δυνατότητα για υβριδικά συστήματα με άλλα συμβατικά καύσιμα. Έτσι θα μπορούσε μέσω των ηλιακών συλλεκτών να παράγεται διαρκώς ηλεκτρική ενέργεια και όχι μόνο κατά την περίοδο ηλιοφάνειας. Επίσης μελέτες για την μείωση του κόστους τέτοιων



συστημάτων αλλά και αύξησης του βαθμού απόδοσης θα συνέβαλε στην περαιτέρω αύξηση της εμπορικής τους χρήσης για παραγωγή ηλεκτρισμού.

Πέρα όμως από την παραγωγή ρεύματος οι παραβολοειδής συλλέκτες αξιοποιούνται και σε άλλους τομείς όπως είναι αυτό του μαγειρέματος (solar cooking), εφαρμογή που μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη σε περιοχές που δεν υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε δύο κατηγορίες τέτοιων ηλιακών κουζινών, η άμεση και η έμμεση. Στην άμεση ηλιακή κουζίνα (σχήμα 3.4.3a) το μαγειρικό σκεύος τοποθετείται στην εστία του παραβολοειδούς κατόπτρου. Στην περίπτωση αυτή δύναται να αναπτυχθούν θερμοκρασίες έως και 300 °C ενώ ο λόγος συγκέντρωσης φτάνει το 50 [3.15].

Στην έμμεση ηλιακή κουζίνα ο ατμός που παράγεται στους συλλέκτες χρησιμοποιείται μετέπειτα για το μαγείρεμα. Τέτοια εγκατάσταση είναι εγκατεστημένη στο Tirumala Tirupathi Devasthanam της Ινδίας (σχήμα 3.4.3b), όπου 106 συλλέκτες στην σκεπή του κτιρίου παράγουν ατμό για μαγείρεμα 30000 γευμάτων ανά ημέρα [3.15]. Και στην εφαρμογή αυτή αποτελεί πρόκληση η ανάπτυξη αποδοτικών συστημάτων για την αποθήκευση ενέργειας με τα υλικά αλλαγής φάσης να αποτελούν πεδίο μελέτης .



(a)



(b)

**Σχήμα 3.4.3: (a) Άμεση ηλιακή κουζίνα [3.15] (b) Έμμεση ηλιακή κουζίνα (Tirumala Tirupathi Devasthanam) [3.15].**

Με την ίδια λογική με την ηλιακή κουζίνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παραβολοειδής συλλέκτες για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με την θερμοκρασία να φτάνει τους 100 °C. Επιπλέον παραβολοειδής συλλέκτες έχουν χρησιμοποιηθεί για την άντληση νερού. Η εφαρμογή αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η ηλιακή ενέργεια είναι άφθονη σε ξηρές περιοχές ενώ ταυτόχρονα δεν χρειάζεται αποθήκευση ενέργειας αφού η άρδευση γίνεται κατά την ημέρα.

Η διαρκής μείωση των αποθεμάτων πόσιμου νερού έχει ως αποτέλεσμα στην στροφή στην λύση της αφαλάτωσης. Η αφαλάτωση μπορεί να επιτευχθεί με μια σειρά από τεχνικές οι οποίες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, θερμικές διαδικασίες και διαδικασίες μεμβράνης. Και στις δύο περιπτώσεις απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας, στην πρώτη

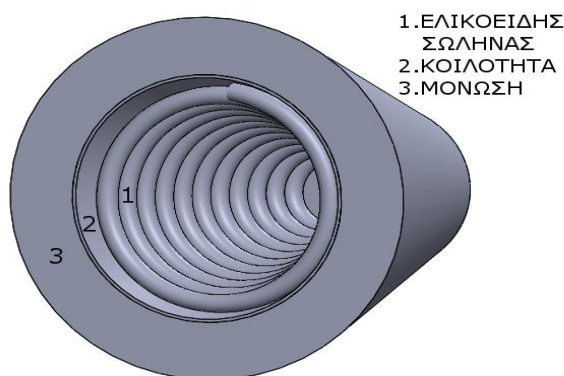
θερμική και στην δεύτερη ηλεκτρική. Υπολογίζεται πώς για την παραγωγή 25 εκατομμυρίων  $m^3$ /ημέρα νερού χρειάζονται 230 εκατομμύρια τόνοι πετρελαίου ανά έτος [3.1]. Την ενέργεια αυτή μπορεί να την παρέχουν οι παραβολοειδής συγκεντρωτικοί συλλέκτες είτε άμεσα ως θερμική είτε έμμεσα ως ηλεκτρική [3.16].

Τέλος παραβολοειδής συλλέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θερμοχημικές διεργασίες που απαιτούνται για την παραγωγή καυσίμων ή για την χημική αποθήκευση ενέργειας. Σε αυτές τις δύο διεργασίες απαιτείται να αναπτυχθούν υψηλές θερμοκρασίες τις οποίες μπορεί να παρέχει ένας τέτοιος συλλέκτης. Επιπλέον μπορούν να συνδράμουν στην επεξεργασία υλικών όπου απαιτούνται υψηλά ποσά ενέργειας.

### 3.5 Μελέτες δεκτών τύπου κοιλότητας.

Ο δέκτης αποτελεί πολύ σημαντικό μέρος ενός παραβολοειδούς συλλέκτη. Ανεξαρτήτως χρήσης του συλλέκτη στον δέκτη μετατρέπεται η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα. Έχει επικρατήσει λόγω υψηλότερων θερμικών και οπτικών αποδόσεων οι δέκτες να είναι τύπου κοιλότητας. Ειδικά για δέκτες έμμεσης παραγωγής ατμού η διάταξη τους είναι αρκετά απλή. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.1 ο δέκτης κοιλότητας, ανεξαρτήτως σχήματος, αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- Ελικοειδή σωλήνα (συνήθως χαλκού) όπου ρέει το εργαζόμενο μέσο.
- Μεταλλική κοιλότητα η οποία περιβάλλει τον σωλήνα και έχει άνοιγμα για την εισροή της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Μόνωση που περιβάλλει την κοιλότητα.



**Σχήμα 3.5.1: 3D αναπαράσταση δέκτη τύπου κοιλότητας κωνικού σχήματος και βασικά μέρη.**

Η ηλιακή ακτινοβολία μετά την ανάκλαση του στον συγκεντρωτή εισέρχεται στον δέκτη μέσω του ανοίγματος της κοιλότητας. Από εκεί η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τον σωλήνα είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω της κοιλότητας, με αποτέλεσμα το εργαζόμενο μέσο να θερμανθεί. Αν και ο δέκτης κοιλότητας είναι πολύ απλός στην κεντρική του ιδέα εντούτοις η βελτιστοποίησή του είναι μια πολύ επίπονη διαδικασία καθώς υπεισέρχονται πολλοί σχεδιαστικοί παράμετροι. Παρακάτω αναφέρονται βασικοί σχεδιαστικοί παράμετροι ανά κατηγορία.

**-ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΙ:** Σχήμα δέκτη, θέση δέκτη σε σχέση με τον συγκεντρωτή, διάμετρος ανοίγματος, μήκος δέκτη, πάχος μόνωσης, διάμετρος σωλήνα και στροφές έλικας.

**-ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ:** Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα και φορά του ανέμου.

**-ΥΛΙΚΑ:** Υλικά κατασκευής των τριών τμημάτων καθώς και οι οπτικές ιδιότητες των υλικών αυτών.

**-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΙ:** Είδος εργαζόμενου μέσου, συνθήκες λειτουργίας εργαζόμενου μέσου (παροχή, θερμοκρασία, πίεση).

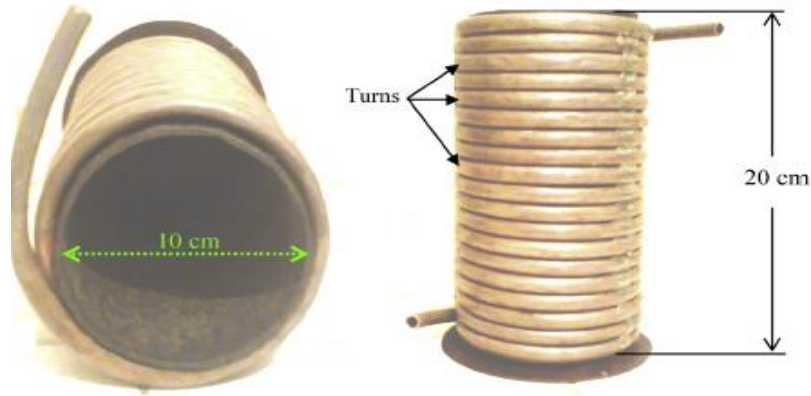
Αν στους παράγοντες αυτούς προσθέσουμε και μεταβολές που οφείλονται στην σύζευξη του δέκτη με τον συγκεντρωτή και με τον εκάστοτε θερμοδυναμικό κύκλο καθώς και οικονομικά κριτήρια γίνεται εύκολα κατανοητό πως η μελέτη (θερμική - οπτική) και κατασκευή ενός βέλτιστου δέκτη αποτελεί πρόκληση.

Πολλοί μελετητές έχουν επικεντρωθεί στην μελέτη δεκτών κοιλότητας, είτε πειραματικά είτε υπολογιστικά με την χρήση της θεωρίας και με την βοήθεια εμπορικού λογισμικού. Οι έρευνες αυτές συνήθως ασχολούνται με μερικές από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, συμβάλλοντας στην εν γένει κατανόηση της οπτικής και θερμικής συμπεριφοράς του δέκτη.

### 3.5.1 Μελέτες για το σχήμα του δέκτη.

Το σχήμα του δέκτη αποτελεί μια πολύ σημαντική σχεδιαστική επιλογή που επηρεάζει την θερμική και οπτική απόδοση του δέκτη καθώς και το κόστος-τρόπο κατασκευής του. Μια πολύ συνηθισμένη επιλογή, λόγω της απλότητάς του, είναι η χρήση δέκτη κυλινδρικού σχήματος. Οι Azzouzi et al. [3.17] σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα κυλινδρικό δέκτη με μήκος ( $L=20$  cm), διάμετρο ανοίγματος ( $D=10$  cm) με ένα ελικοειδές χάλκινο σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 7cm και πάχους 1cm το οποίο κάνει 19 στροφές (σχήμα 3.5.2). Ο δέκτης αυτός μελετήθηκε πειραματικά και παράλληλα αναπτύχθηκε και ένα υπολογιστικό μοντέλο. Τα πιο ενδιαφέροντα συμπεράσματα της έρευνας είναι:

- Ο θερμικός βαθμός μειώνεται με αύξηση του λόγου  $L/D$ , ενώ για  $L/D=2$  έχω μεγιστοποίηση των απωλειών λόγω συναγωγής.
- Ο θερμικός βαθμός επηρεάζεται σημαντικά από τον λόγο συγκέντρωσης αλλά ακόμη περισσότερο από το ποσό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η αύξηση της παροχής του νερού επηρεάζει σημαντικά την θερμοκρασία της εξόδου και τον θερμικό βαθμό απόδοσης έως την τιμή 15 l/min, από την τιμή αυτή και πάνω δεν υπάρχουν αισθητές μεταβολές.
- Τέλος ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση της γωνίας του δέκτη σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (inclination angle).

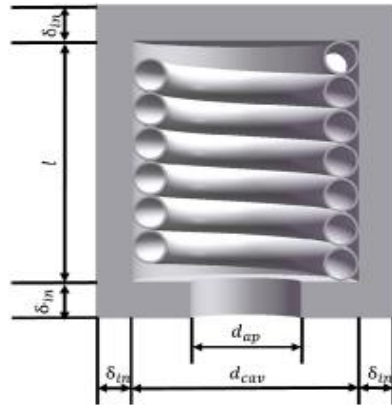


**Σχήμα 3.5.2: Όψη του δέκτη χωρίς την μόνωση [3.17].**

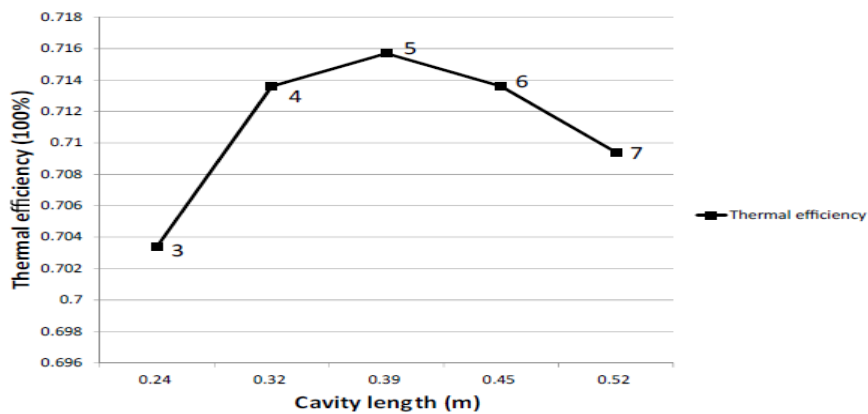
Οι Zou et al. [3.18] εξέτασαν υπολογιστικά την επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων κυλινδρικού δέκτη στη θερμική απόδοση. Οι βασικές γεωμετρικοί παράμετροι (σχήμα 3.5.3) είναι η διάμετρος ανοίγματος ( $d_{ap}$ ), η εσωτερική διάμετρος της κοιλότητας ( $d_{cav}$ ) και το μήκος του δέκτη ( $l$ ) και ο δέκτης προορίζεται να λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 1000 K), εργαζόμενο μέσο αέρα με ελάχιστη ωφέλιμη ισχύ 10 kW. Τα βασικά συμπεράσματα είναι:

- Αύξηση της διαμέτρου του ανοίγματος αυξάνει ραγδαία τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας, οι οποίες στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες είναι οι πιο σημαντικές. Για τον λόγο αυτό επιλέγεται βέλτιστη διάμετρος ανοίγματος η μικρότερη δυνατή ( $d_{ap, optimum}=0.184$  m).
- Αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου της κοιλότητας αυξάνει σημαντικά τις απώλειες λόγω συναγωγής ενώ μειώνει με μικρότερο ρυθμό τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας. Τελικά ο θερμικός βαθμός απόδοσης μειώνεται με αύξηση της  $d_{cav}$ , έτσι και εδώ επιλέγεται ως βέλτιστη τιμή η μικρότερη δυνατή ( $d_{cav, optimum}=0.35$  m).
- Αντίθετα με τις διαμέτρους όπου η βέλτιστη τιμή καθορίστηκε από ένα κάτω όριο που αφορά την επίτευξη μιας συγκεκριμένης ισχύος, οι στροφές της έλικας του σωλήνα ( $n$ ) και κατά συνέπεια το μήκος του δέκτη  $l$  εμφανίζει μια μέγιστη τιμή του θερμικού βαθμού απόδοσης (σχήμα 3.5.4), για  $n=5$  στροφές ( $l=0.403$  m).





Σχήμα 3.5.3: Σχηματική παράσταση κυλινδρικού δέκτη και βασικά γεωμετρικά μεγέθη [3.18].



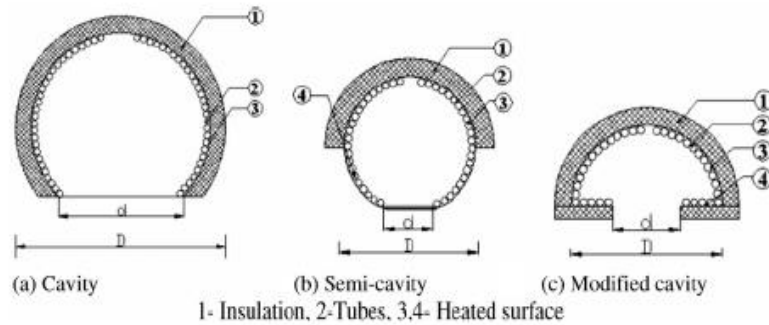
Σχήμα 3.5.4: Επίδραση του μήκους του δέκτη l στον θερμικό βαθμό απόδοσης [3.18].

Οι Loni et al. [3.19] μελέτησαν την επίδραση του λόγου  $L/D$ =(μήκος δέκτη/άνοιγμα δέκτη) υπολογιστικά σε έναν κυλινδρικό δέκτη (σχήμα 3.5.5) και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης παρατηρείται για  $L/D=1$ . Επιπλέον έδειξαν την ύπαρξη βέλτιστου λόγου συγκέντρωσης καθώς και την αύξηση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη με την μείωση της διαμέτρου του σωλήνα.



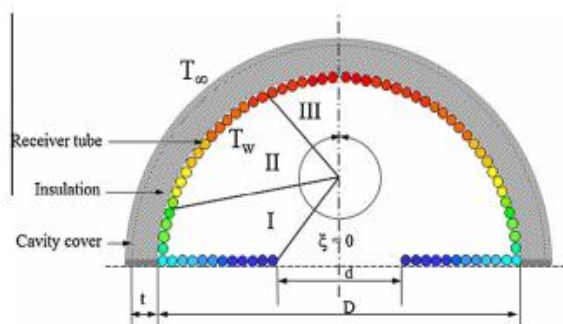
Σχήμα 3.5.5: 3D αναπαράσταση τομής της σωλήνωσης κυλινδρικού δέκτη [3.19].

Ένα άλλο σχήμα το οποίο έχει μελετηθεί είναι το σφαιρικό το οποίο είναι είτε ημισφαιρικό είτε μέρος σφαίρας. Οι Kumar and Reddy [3.20] μελέτησαν τις θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής για τρεις διαφορετικές μορφές ημισφαιρικών δεκτών, ενός τύπου κοιλότητας, ενός τύπου ημι-κοιλότητας και ενός τύπου τροποποιημένης κοιλότητας (σχήμα 3.5.6). Κατέληξαν στο συμπέρασμα πώς τις λιγότερες απώλειες λόγω συναγωγής τις εμφανίζει ο τύπος τροποποιημένης κοιλότητας.



**Σχήμα 3.5.6: Ημισφαιρική δέκτες τύπου κοιλότητας (a) , ημι-κοιλότητας (b) και τροποποιημένης κοιλότητας (c) [3.20].**

Οι Reddy et al. [3.21] μελέτησαν υπολογιστικά την επίδραση διάφορων παραγόντων όπως ο συντελεστής εκπομπής, κλίση του δέκτη, μόνωση δέκτη και θερμοκρασία στις απώλειες λόγω συναγωγής (ελεύθερης και εξαναγκασμένης) και ακτινοβολίας ενός τροποποιημένου ημισφαιρικού δέκτη (σχήμα 3.5.7). Οι απώλειες λόγω ελεύθερης συναγωγής επηρεάζονται κυρίως από την κλίση του δέκτη με τις μεγαλύτερες να εμφανίζονται όταν το άνοιγμα του δέκτη κοιτάζει κάθετα κάτω (γωνία=90°). Οι απώλειες λόγω εξαναγκασμένης συναγωγής επηρεάζονται από πλήθος παραμέτρων, όπως η ταχύτητα και φορά του ανέμου, το άνοιγμα του δέκτη και η κλίση του, και μεγιστοποιούνται όταν το άνοιγμα του δέκτη είναι κάθετο στην φορά του ανέμου. Τέλος προτείνονται από τους συγγραφείς σχέσεις υπολογισμού αριθμών Nusselt ανάλογα με την θερμοκρασιακή περιοχή του δέκτη.



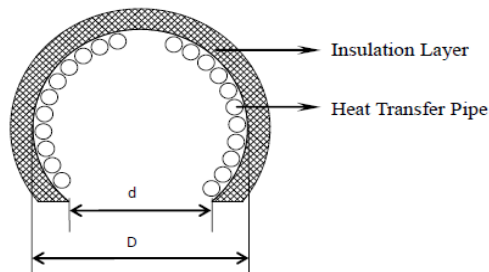
**Σχήμα 3.5.7 :Σχηματική παράσταση τροποποιημένου ημισφαιρικού δέκτη [3.21].**

Ο τροποποιημένος ημισφαιρικός δέκτης που προτάθηκε από τους Reddy et al. μελετήθηκε περαιτέρω από τους Le Roux et al. [3.22]. Πιο συγκεκριμένα βελτιστοποίησαν τις γεωμετρικούς παραμέτρους του δέκτη αυτού και εξέτασαν την λειτουργία σε κύκλο Brayton με την χρήση αναγεννητή. Ο κώδικας βελτιστοποίησης που έφτιαξαν έδειξε πώς για κάθε

συνδυασμό των περιβαλλοντικών συνθηκών υπάρχει μια συγκεκριμένη γεωμετρία του δέκτη και του αναγεννητή που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ.

Οι Si-Quan et al [3.23] μελέτησαν υπολογιστικά την οπτική και θερμική συμπεριφορά ενός σφαιρικού δέκτη (σχήμα 3.5.8) με τον λόγο  $d/D$  να κυμαίνεται από 1 έως 2.5. Τα βασικότερα συμπεράσματα της μελέτης είναι:

- Για  $d/D=1$  παρατηρείται ο μικρότερος οπτικός βαθμός απόδοσης καθώς στο ημισφαίριο είναι πιο εύκολη η διαφυγή των ακτινών που ανακλώνται στην κοιλότητα.
- Οι μεγαλύτερες απώλειες λόγω συναγωγής παρατηρούνται για γωνία κλίσης συλλέκτη  $0^\circ$  για σταθερό  $D/d$ , ενώ για σταθερή γωνία κλίσεις οι απώλειες μεγιστοποιούνται για  $D/d=1.2$ .
- Η μέγιστη θερμική απόδοση παρατηρείται για  $D/d$  μεταξύ 1 και 1.5.
- Οι συνολικές απώλειες αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου και μειώνονται με αύξηση της ταχύτητας του ρευστού από 0.2 m/s σε 1.2 m/s.



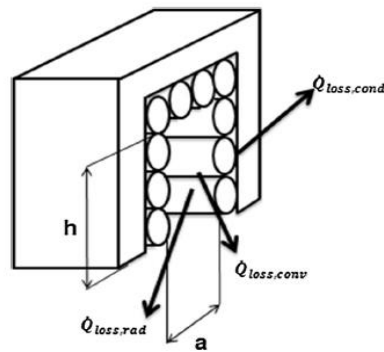
**Σχήμα 3.5.8: Σχηματική παράσταση σφαιρικού δέκτη [3.23].**

Η μελέτη κωνικού σχήματος είναι σε μικρότερη έκταση σε σχέση με το σφαιρικό ή κυλινδρικό σχήμα. Οι Turrini et al. [3.24] μελέτησαν πειραματικά ένα πρωτοποριακό συγκεντρωτικό συλλέκτη με δέκτη κωνικού σχήματος και εργαζόμενο μέσο τηγμένο άλας. Επιπλέον φέρει σύστημα αποθήκευσης 10kWh με χρήση του τηγμένου άλατος ως μέσου αποθήκευσης. Όσον αφορά τον δέκτη είναι κωνικού σχήματος και αποτελείται από χάλκινο σωλήνα διαμέτρου 6 mm (σχήμα 3.5.9). Η θερμική απόδοση του συστήματος κυμαίνεται από 58% (ελάχιστη ροή=0.19 l/min,  $T_{out}=415.8$  °C) έως 77% (μέγιστη ροή 0.48 l/min,  $T_{out}=360.2$  °C) ενώ η μέγιστη θερμοκρασία εξόδου ( $T_{outmax}=540.8$  °C) επετεύχθη για παροχή του τηγμένου άλατος 0.2 l/min.



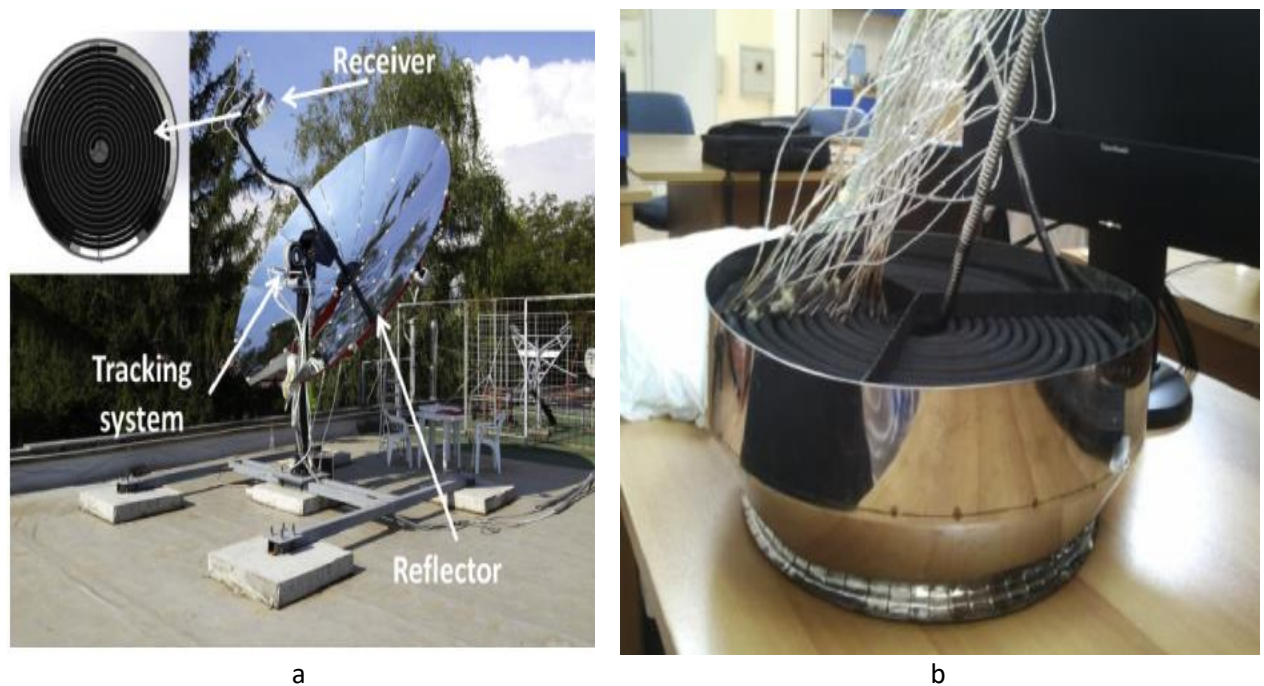
**Σχήμα 3.5.9: Σωλήνας δέκτη κωνικού σχήματος [3.24].**

Ένας δέκτης σχήματος ορθογωνίου μελετήθηκε από τους Loni et al. [3.25] (σχήμα 3.5.10). Πιο συγκεκριμένα ο δέκτης λειτουργούσε με εργαζόμενο μέσο έλαιο και σε σύζευξη με ένα οργανικό κύκλο Rankine. Βρέθηκε για διάφορες τιμές του μήκους  $h$  του δέκτη ( $h=0.5 \cdot a$ ,  $h=0.75 \cdot a$ ,  $h=1 \cdot a$ ,  $h=1.5 \cdot a$ ,  $h=2 \cdot a$ ) ο βέλτιστος λόγος συγκέντρωσης και ο οπτικός βαθμός απόδοσης (89%, 92%, 94%, 96% και 96% αντίστοιχα). Τέλος για την επίτευξη μέγιστων βαθμών απόδοσης απαιτούνται μικρότερες διαμέτροι σωλήνα, χαμηλότερες θερμοκρασίες εισόδου του ελαίου και μήκος κοιλότητας  $h=1 \cdot a$ .



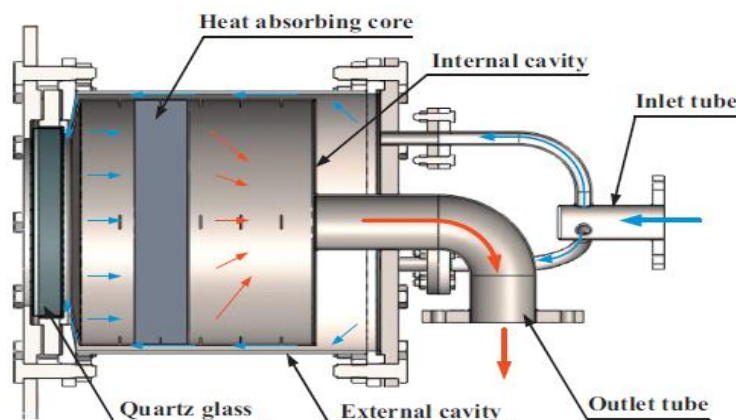
**Σχήμα 3.5.10: Σχηματική παράσταση και απώλειες σε δέκτη ορθογωνικού σχήματος [3.25].**

Οι Bellos et al. [3.26] σχεδίασαν και μελέτησαν πειραματικά και υπολογιστικά έναν δέκτη χαμηλού κόστους που αποτελούνταν από σωλήνα σχήματος έλικας με κατάλληλο περίβλημα (σχήμα 3.5.11). Ο δέκτης αυτός εμφάνισε θερμικό βαθμό απόδοσης 34% λόγω των υψηλών θερμικών-οπτικών απωλειών.



**Σχήμα 3.5.11 : (α) Πειραματική διάταξη του παραβολοειδούς συλλέκτη και (β) δέκτης με σπειροειδές σχήμα [3.26].**

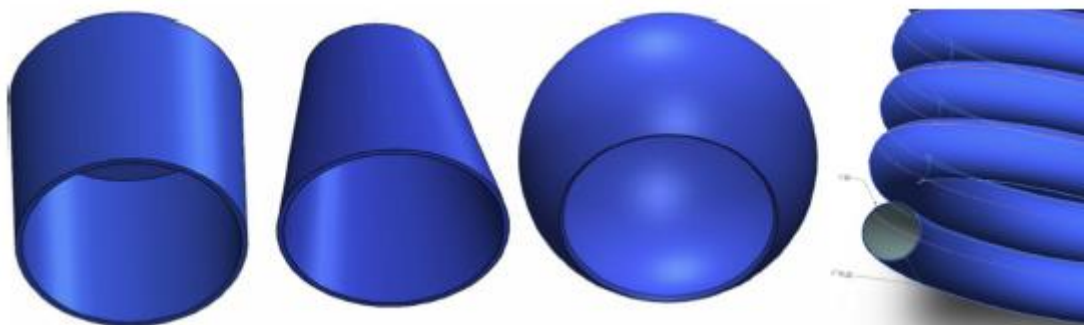
Τέλος οι Zhu et al. [3.27] μελέτησαν πειραματικά την ενεργειακή και εξεργειακή συμπεριφορά ενός πεπιεσμένου ογκομετρικού δέκτη (σχήμα 3.5.12) για διάφορες παροχές του εργαζόμενου μέσου (αέρας). Μέσος θερμικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη 30%, ενώ ο συντελεστής απωλειών ελαχιστοποιείται για μόνιμες συνθήκες λειτουργίας στην τιμή 0.014 kW/K.



Σχήμα 3.5.12: Τομή και βασικά μέρη ενός ογκομετρικού δέκτη [3.27].

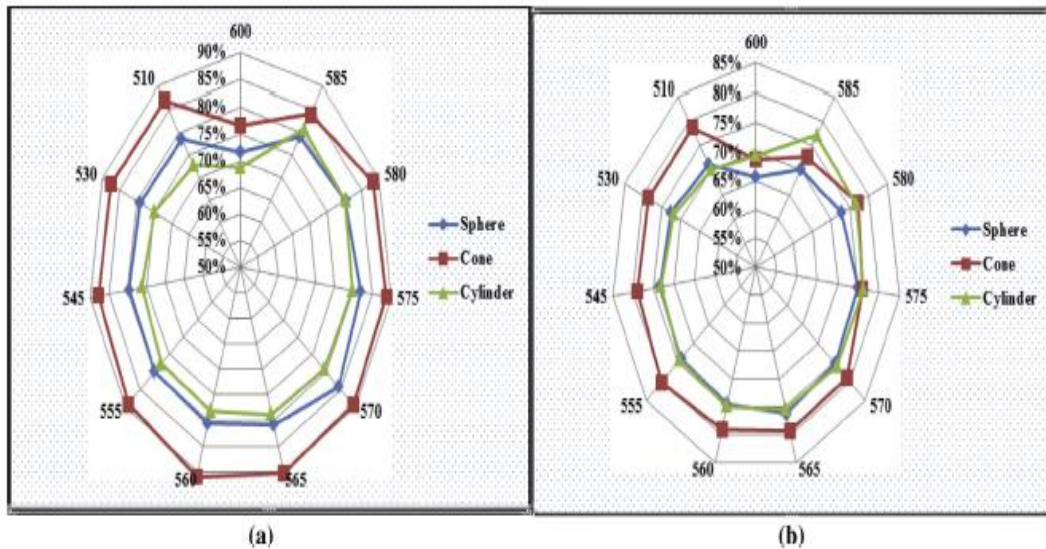
### 3.5.2 Μελέτες σύγκρισης σχημάτων.

Υπάρχουν πολλές μελέτες που συγκρίνουν την θερμική ή/και οπτική απόδοση των δεκτών δύο ή περισσότερων σχημάτων. Στόχος της σύγκρισης είναι η επιλογή του βέλτιστου σχήματος για τον δέκτη. Οι Daboo et al. [3.28] συνέκριναν την οπτική συμπεριφορά δεκτών κυλινδρικού, σφαιρικού και κωνικού σχήματος (σχήμα 3.5.13). Κατέληξαν στο συμπέρασμα πως για διάφορες τιμές απορροφητικότητας ο κωνικός δέκτης εμφανίζει τον μεγαλύτερο οπτικό βαθμό απόδοσης (σχήμα 3.5.14), για απορροφητικότητα 75% και 85% και διάφορες τιμές της απόστασης δέκτη-συγκεντρωτή. Επιπλέον έδειξαν πως η βέλτιστη θέση τοποθέτησης των δεκτών επηρεάζεται από πολλούς παραμέτρους όπως η απορροφητικότητα και το σχήμα. Τέλος έδειξαν πως το κωνικό σχήμα έχει και τον υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης αφού εμφανίζει τις λιγότερες θερμικές απώλειες.



Σχήμα 3.5.13: Οι κοιλότητες δεκτών κυλινδρικού , κωνικού και σφαιρικού σχήματος και ο ελικοειδής σωλήνας που τοποθετείτε στο εσωτερικό τους [3.28].

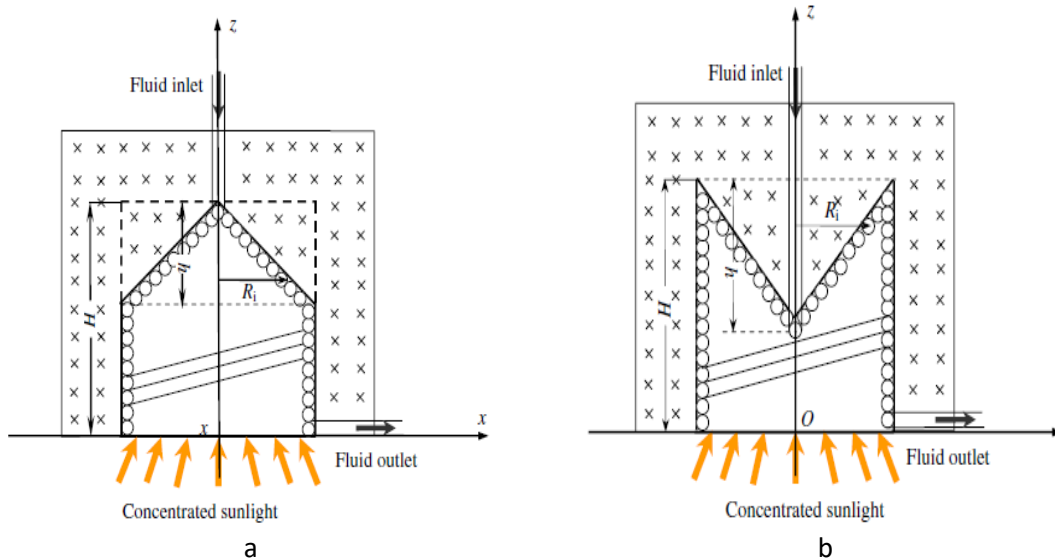




**Σχήμα 3.5.14: Ο οπτικός βαθμός απόδοσης των τριών σχημάτων για διάφορες θέσης του δέκτη και για απορροφητικότητα (a) 75% και (b) 85% [3.28].**

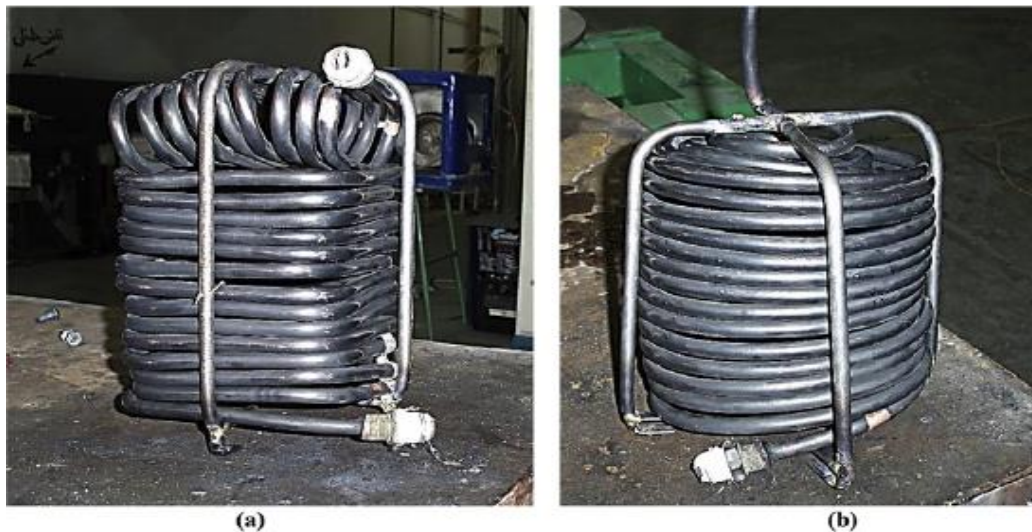
Ο συμβατικός κυλινδρικός δέκτης στο πίσω μέρος του δεν έχει σωλήνα με αποτέλεσμα η ακτινοβολία που φτάνει εκεί να μην αξιοποιείται (νεκρή ζώνη). Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι κατασκευαστικός καθώς είναι πολύ δύσκολο να καμφθεί ο σωλήνας χαλκού σε σπειροειδές σχήμα σε τόσο μικρό χώρο λόγω υψηλής καμπτικής τάσης (περίπου 700 MPa). Οι Wang et al. [3.29] πρότειναν δύο νέους δέκτες κυλινδρικούς με ελάχιστες νεκρές ζώνες και συνέκριναν τους δυο αυτούς δέκτες με τον συμβατικό κυλινδρικό. Ο πρώτος δέκτης εφαρμόζει στο πίσω μέρος του κυλίνδρου έναν κώνο (CCCR- σχήμα 3.5.15a) ενώ ο δεύτερος εφαρμόζει έναν αντεστραμμένο κώνο στο πίσω μέρος του κυλίνδρου (σχήμα 3.5.15b). Η κάμψη του σωλήνα στους κώνους είναι πολύ πιο εύκολη κατασκευαστικά από ότι σε οριζόντιο επίπεδο. Η σύγκριση γίνεται για το ίδιο άνοιγμα, ίδιο ύψος H του δέκτη και για διάφορες τιμές του λόγου  $h/H = (\text{ύψος κώνου})/(\text{ύψος δέκτη})$ . Κατέληξαν στα συμπεράσματα ότι:

- Ο κυλινδρικός δέκτης με κώνο στο πίσω μέρος (CCCR) του δεν βελτιώνει ουσιαστικά τον οπτικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με ένα συμβατικό κυλινδρικό δέκτη (με νεκρή ζώνη 10%) , με μέγιστη βελτίωση μόλις 2.46%, ενώ για κάποιες τιμές του λόγου  $h/H$  δεν υπάρχει καθόλου βελτίωση.
- Ο κυλινδρικός δέκτης με αντεστραμμένο κώνο στο πίσω μέρος (BSIC) του βελτιώνει αισθητά τον οπτικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με ένα συμβατικό κυλινδρικό δέκτη (με νεκρή ζώνη 10%) για οποιαδήποτε τιμή του λόγου  $h/H$ . Η βελτίωση μεγιστοποιείται για  $h/H=0.875$  και είναι της τάξεως του 7.67%.



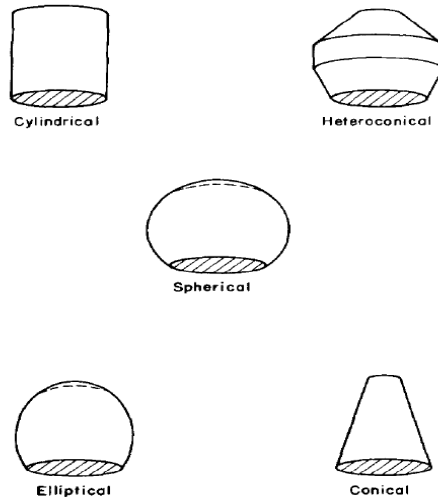
**Σχήμα 3.5.15: Σχηματική παράσταση κυλινδρικού δέκτη σε συνδυασμό στο πίσω μέρος του με (a) κώνο (b) αντεστραμμένο κώνο [3.29].**

Οι Loni et al. [3.30] συνέκριναν πειραματικά και υπολογιστικά ένα κυβικό δέκτη με έναν κυλινδρικό δέκτη (σχήμα 3.5.16) και κατέληξαν ότι ο κυβικός δέκτης έχει καλύτερο μέσο θερμικό βαθμό απόδοσης, 65.14% έναντι 56.44%, για μόνιμες συνθήκες.



**Σχήμα 3.5.16: (a) Σωλήνωση δέκτη κυβικού σχήματος (b) Σωλήνωση δέκτη κυλινδρικού σχήματος [3.30].**

Οι Harris και Lenz [3.31] συνέκριναν την θερμική απόδοση πέντε διαφορετικών σχημάτων (κυλινδρικό, ετεροκωνικό, σφαιρικό, ελλειπτικό και κωνικό-σχήμα 3.5.17) και κατέληξαν στο συμπέρασμα πώς το σχήμα του δέκτη επηρεάζει περισσότερο την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στον δέκτη και λιγότερο τον θερμικό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον έδειξαν ότι οι οπτικές απώλειες του συλλέκτη είναι πολύ μεγαλύτερες από τις θερμικές απώλειες του δέκτη, οι οποίες αποτελούν 10÷12% των συνολικών απωλειών. Τέλος η γωνία χείλους για ένα εύρος  $45^\circ \div 75^\circ$  δεν επηρεάζει σημαντικά τον θερμικό βαθμό απόδοσης αλλά την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 3.5.17: Σχηματική παράσταση πέντε διαφορετικών γεωμετριών δεκτών που εξετάζονται (κυλινδρικό, ετεροκωνικό, σφαιρικό, ελλειπτικό, κωνικό) [3.31].**

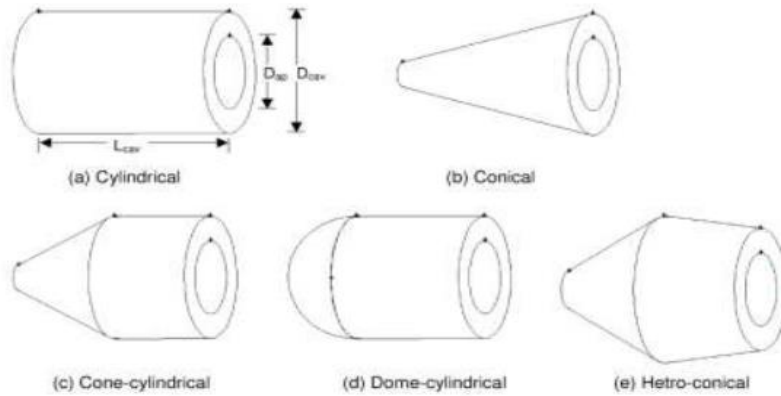
Οι Pavnovic et al. [3.32] συνέκριναν τον δέκτη σπειροειδούς σχήματος (σχήμα 3.5.11) με έναν κωνικό ίδιου ανοίγματος (σχήμα 3.5.18). Η μελέτη έδειξε πώς ο κωνικός έχει καλύτερη οπτική και θερμική συμπεριφορά, πιο συγκεκριμένα ο κωνικός έχει μεγαλύτερο οπτικό βαθμό κατά 1.38%, μεγαλύτερο θερμικό βαθμό κατά 5.63% στους 100 °C και 40.45% στους 200 °C, και μεγαλύτερο εξεργειακό κατά 6.67% στους 100 °C και 42.06% στους 200 °C. Ο δέκτης λειτούργησε με εργαζόμενο μέσο έλαιο και για το κωνικό σχήμα ο οπτικός βαθμός βρέθηκε 85.21% και ο μέγιστος θερμικός 79.4% για θερμοκρασία εισόδου 100 °C.



**Σχήμα 3.5.18: 3D αναπαράσταση δέκτη κωνικού σχήματος [3.32].**

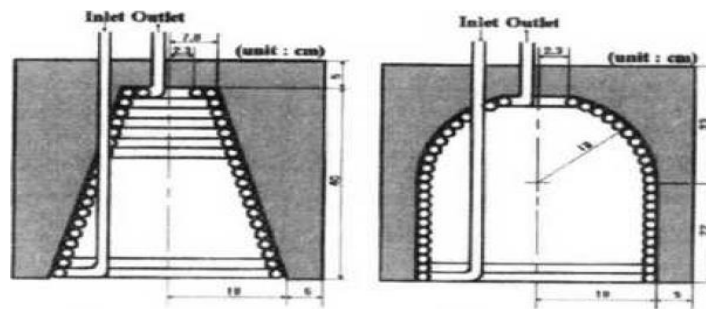
Οι Jiltea et al. [3.33] συνέκριναν με ένα 3D υπολογιστικό μοντέλο τις απώλειες λόγω συναγωγής μεταξύ 5 διαφορετικών σχημάτων (σχήμα 3.5.19) για διάφορες ταχύτητες-κατευθύνσεις ανέμου και γωνιών κλίσης των δεκτών. Η μελέτη έδειξε ότι τις μικρότερες απώλειες τις εμφανίζει το κωνικό σχήμα. Πρόταση βελτίωσης του σχήματος είναι να τοποθετηθεί στο άνοιγμα ένα μικρό φράγμα το οποίο μειώνει τις απώλειες συναγωγής για κάθε σχήμα, με την μεγαλύτερη βελτίωση να παρατηρείται στο κωνικό. Οι απώλειες λόγω συναγωγής αυξάνονται με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και όταν το άνοιγμα βρίσκεται κάθετα προς τον άνεμο σε αντίθετη κατεύθυνση. Τέλος προτείνονται σχέσεις υπολογισμού του αριθμού Nusselt.





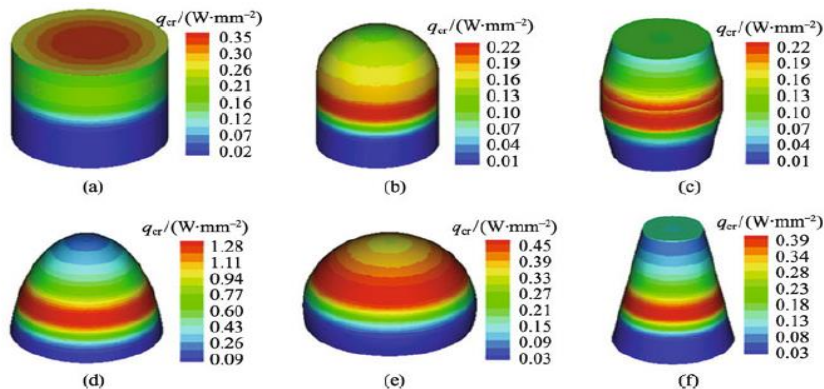
**Σχήμα 3.5.19: Σχηματική παράσταση σχημάτων ( (a)κυλινδρικό , (b)κωνικό , (c)κωνικό-κυλινδρικό ,(d)θόλος-κυλινδρικό , (e)ετεροκωνικό ) [3.33].**

Οι Seo et al. [3.34] πραγματοποίησαν οπτική και θερμική ανάλυση σε δύο δέκτες σχήματος κώνου και θόλου (συνδυασμός κυλινδρικού και ημισφαιρικού δέκτη) (σχήμα 3.5.20). Η σύγκριση έδειξε ότι ο θόλος έχει μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης στις χαμηλές θερμοκρασίες ενώ ο κώνος υπερτερεί στις υψηλότερες θερμοκρασίες.



**Σχήμα 3.5.20: Δέκτης σχήματος κώνου και θόλου [3.34].**

Οι Shuai et al.[3.35] μελέτησαν την οπτική συμπεριφορά έξι διαφορετικών σχημάτων επικεντρώνοντας την έρευνά τους στην κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των κοιλοτήτων (σχήμα 3.5.21).



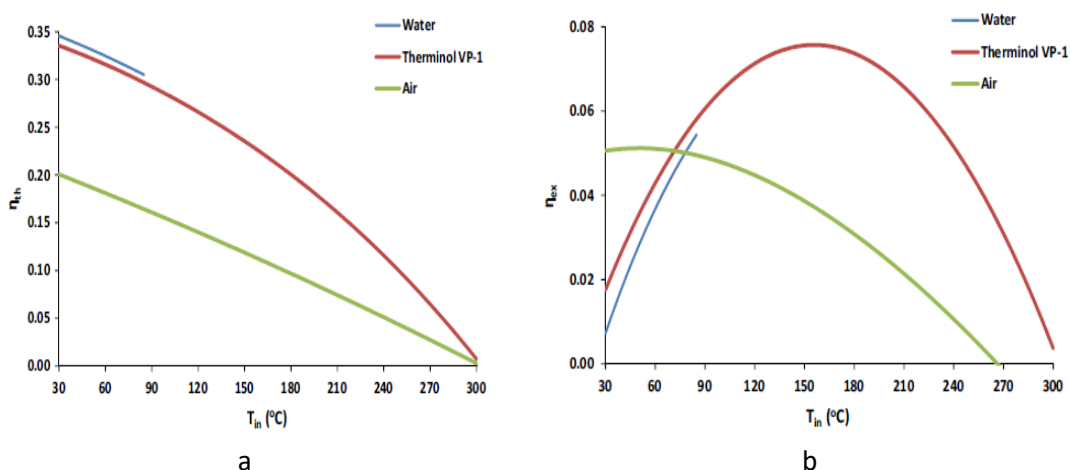
**Σχήμα 3.5.20: Κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/mm^2$ ) για διάφορα σχήματα του δέκτη [3.35].**

### 3.5.3 Μελέτες για τα εργαζόμενα μέσα.

Το εργαζόμενο μέσο που ρέει στους σωλήνες του δέκτη είναι ένα από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργία του συλλέκτη και την απόδοσή του. Βασική λειτουργία του εργαζόμενου μέσου είναι να απορροφά την ηλιακή ενέργεια και να την διοχετεύει υπό μορφή θερμότητας σε κάποιο θερμοδυναμικό κύκλο. Επιπλέον δύναται να χρησιμοποιηθεί και ως μέσο αποθήκευσης. Τα εργαζόμενα μέσα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε βασικές κατηγορίες [3.36]:

1. Αέρας και άλλα αέρια.
2. Νερό/ατμός.
3. Θερμικά έλαια.
4. Τηγμένα άλατα.
5. Υγρά μέταλλα.

Πολλές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην μελέτη της επίδρασης των εργαζόμενων μέσων στην λειτουργία του συλλέκτη. Όλες σχεδόν οι έρευνες που αναφέρθηκαν προηγουμένως ταυτόχρονα με την εξέταση του σχήματος γίνεται και μελέτη της συμπεριφοράς του εργαζόμενου μέσου, όπως το νερό [3.17], ο αέρας [3.18], το έλαιο [3.25] και το τηγμένο άλας [3.24]. Επιπλέον όμως υπάρχουν μελέτες που συγκρίνουν την χρήση διάφορων εργαζόμενων μέσων όπως οι Tzivanidis et al. [3.37] που μελέτησαν πειραματικά και υπολογιστικά την χρήση τριών διαφορετικών εργαζόμενων μέσων, σε δέκτη σπειροειδούς μορφής: νερού, ελαίου (Therminol VP-1) και αέρα. Κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το νερό παρουσιάζει τον μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης ακολουθούμενο από το λάδι και τέλος τον αέρα (σχήμα 3.5.21a). Εξεργειακά όμως στις χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου ο αέρας αποτελεί την καλύτερη επιλογή ενώ στις πιο υψηλές θερμοκρασίες επικρατεί το έλαιο (σχήμα 3.5.21b). Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεγιστοποίηση του εξεργειακού βαθμού στο έλαιο για  $T_{in}=155\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Σχήμα 3.5.21 : (α) Μεταβολή θερμικού βαθμού απόδοσης και (β) μεταβολή εξεργειακού βαθμού απόδοσης για τρία διαφορετικά εργαζόμενα μέσα [3.37].**

Τέλος άλλοι ερευνητές προτείνουν την προσθήκη νανοϋλικών στο εργαζόμενο μέσο (πχ νερό, έλαιο) για την βελτίωση των χαρακτηριστικών του. Οι Bellos et al. [3.38,3.39]

μελέτησαν την προσθήκη νανοϋλικών σε νερό και σε λάδι, με βασικά συμπεράσματα τα εξής:

- Για το νερό η προσθήκη  $Al_2O_3$  αποτελεί θερμικά την καλύτερη επιλογή, ενώ εξεργειακά η προσθήκη  $CuO$  είναι καλύτερη.
- Για το λάδι η προσθήκη  $CuO$  οδηγεί σε καλύτερη εξεργειακή συμπεριφορά.
- Η χρήση ελαίου με προσθήκη νανοϋλικών έχει καλύτερη εξεργειακή απόδοση ενώ η χρήση νερού με προσθήκη νανοϋλικών παρουσιάζει καλύτερη θερμική απόδοση.

### 3.6 Μαθηματικό μοντέλο συλλέκτη με παραβολοειδές κάτοπτρο.

Παρακάτω παρουσιάζονται βασικές σχέσεις που περιγράφουν την οπτική, θερμική, εξεργειακή και υδραυλική συμπεριφορά του συλλέκτη. Στο κεφάλαιο 5 θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα γεωμετρικά μεγέθη των σχεδιασμένων δεκτών, παρακάτω δίνονται βασικά γεωμετρικά μεγέθη που χρειάζονται για το μαθηματικό μοντέλο:

- Άνοιγμα συγκεντρωτή (collector):  $A_{col}$
- Άνοιγμα δέκτη (receiver):  $A_{rec}$
- Συνολική εξωτερική επιφάνεια κοιλότητας (cavity):  $E_{cav}$
- Συνολική εξωτερική επιφάνεια σωλήνα (coil):  $E_{coil,out}$
- Συνολική εσωτερική επιφάνεια σωλήνα (coil):  $E_{coil,in}$
- Εξωτερική διάμετρος σωλήνα:  $D_{coil,out}$
- Εσωτερική διάμετρος σωλήνα:  $D_{coil,in}$
- Μήκος σωλήνα:  $L_{coil}$
- Συνολική εξωτερική επιφάνεια μόνωσης:  $E_{ins,out}$

#### 3.6.1 Οπτική ανάλυση.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο επίπεδο του συγκεντρωτή ( $Q_{solar}$ ) υφίστανται διαδοχικές οπτικές απώλειες μέχρι να φτάσει στο άνοιγμα του δέκτη. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο άνοιγμα του δέκτη ( $Q_{rec}$ ) δίνεται από την σχέση:

$$Q_{rec} = \rho \cdot \gamma \cdot Q_{solar} \quad (3.5)$$

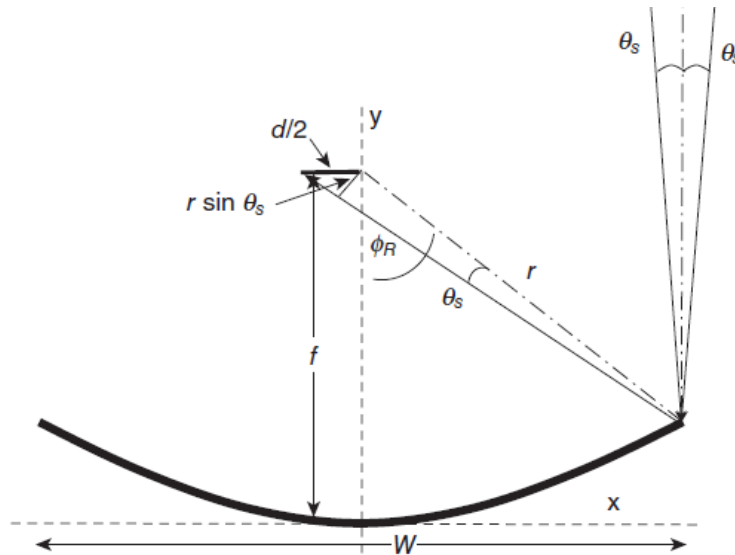
Όπου:

- $\rho$  = ανακλαστικότητα κατόπτρου:

Ορίζεται ως ο λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται κατοπτρικά στο κάτοπτρο προς την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο κάτοπτρο. Η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει σε μια επιφάνεια γίνεται με τρεις τρόπους. Ο πρώτος είναι η κατοπτρική ανάκλαση, ο δεύτερος είναι η διάχυτη ανάκλαση και ο τρίτος είναι η πραγματική ανάκλαση. Στην πράξη η ανάκλαση που γίνεται στο κάτοπτρο είναι πραγματική εφόσον συμβαίνει ένας συνδυασμός κατοπτρικής (κυρίως) και διάχυτης (δευτερεύοντος) ανάκλασης. Είναι επιθυμητό οι ανακλάσεις είναι όσο το δυνατόν περισσότερο κατοπτρικές, για να αυξάνεται η ανακλαστικότητα. Τα σύγχρονα κάτοπτρα το επιτυγχάνουν σε μεγάλο βαθμό αυτό με αποτέλεσμα η ανακλαστικότητά τους συνήθως να κυμαίνεται μεταξύ 90% και 94%, με δυνατότητες για ακόμη μεγαλύτερες τιμές. Η ανακλαστικότητα αποτελεί ιδιότητα των υλικών του κατόπτρου η οποία όμως μπορεί να μειωθεί με τον χρόνο λόγω φθοράς ή λόγω επικαθίσεων.

- $\gamma$ = παράγοντας σύλληψης (intercept factor):

Ο παράγοντας σύλληψης είναι το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλαμβάνει ο δέκτης προς την ηλιακή ακτινοβολία που φεύγει από τον συγκεντρωτή μετά την ανάκλαση. Ο παράγοντας σύλληψης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Αρχικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.1 η άμεση ακτινοβολία προσπίπτει με γωνιακό εύρος  $\theta_s=32'=0.53^\circ$ , λόγω της απόστασης γης-ηλίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το είδωλο του ηλίου που σχηματίζεται στην θέση της εστίας να έχει ένα άνοιγμα ακόμη και για τέλειο συγκεντρωτή.

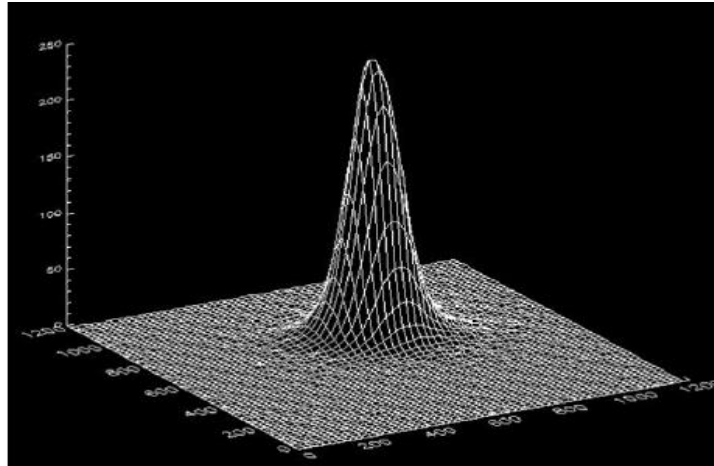


**Σχήμα 3.6.1:Εύρος ειδώλου εύρους πρόσπτωσης ηλιακών ακτίνων [3.3].**

Το άνοιγμα του ειδώλου στην εστία της παραβολής μεγαλώνει ακόμη περισσότερο λόγω και άλλων σφαλμάτων όπως [3.3]:

- Ατελειών στο σχήμα του παραβολοειδούς, το οποίο δεν έχει τέλεια μορφή λόγω σφαλμάτων στην κατασκευή του ή λόγω σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν με τον χρόνο από τις εδράσεις ή την παραμόρφωση από το βάρος του.
- Ειδικά σε συγκεντρωτές που αποτελούνται από ένωση τμημάτων σημαντικά σφάλματα μπορεί να προκύψουν από την μη ακριβή συνένωση κάποιων τμημάτων.
- Τέλος σφάλμα εισάγεται και από το σύστημα παρακολούθησης του ηλίου καθώς οι ακτίνες δεν πέφτουν ποτέ ακριβώς κάθετα.

Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην εστία να μην είναι ουσιαστικά σημειακή αλλά να έχει μια κατανομή γύρω από μια περιοχή (σχήμα 3.6.2). Έτσι για να συλλάβουμε όλη την ακτινοβολία χρειάζεται να μεγαλώσει το άνοιγμα του δέκτη. Επειδή όμως μεγάλος δέκτης σημαίνει μεγαλύτερες θερμικές απώλειες και υψηλότερο κόστος επιλέγεται ένας μικρότερος δέκτης με αποτέλεσμα ένα ποσοστό  $(1-\gamma)$  των ακτίνων να χάνεται.



**Σχήμα 3.6.2:** Πειραματική μέτρηση της κατανομής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της εστίας (οριζόντιοι άξονες σε mm κάθετος άξονας αδιάστατος) [3.11].

Η ηλιακή ακτινοβολία ( $Q_{rec}$ ) που εισέρχεται στο άνοιγμα του δέκτη ακολουθεί από εκεί και πέρα μια περίπλοκη πορεία με πολλές πιθανές καταλήξεις. Ένα μέρος της απορροφάται από την σωλήνωση ( $Q_{absorbed,coil}$ ), ένα άλλο μέρος της απορροφάται από την κοιλότητα ( $Q_{absorbed,cav}$ ), ένα μέρος βγαίνει από την κοιλότητα του δέκτη και διαφεύγει στο περιβάλλον ως απώλεια ( $Q_{reflected,out}$ ) και ένα τελευταίο μέρος της ανακλάται μέσα στην κοιλότητα ( $Q_{reflected,in}$ ). Το  $Q_{reflected,in}$  μπορεί να έχει τις ίδιες πιθανές καταλήξεις με το  $Q_{rec}$ , έτσι σε μια χρονική στιγμή ο σωλήνας μπορεί να απορροφήσει ακτινοβολία που φτάνει εκείνη την στιγμή από τον συγκεντρωτή και ταυτόχρονα να απορροφήσει κάποια μικρή ακτινοβολία που είχε φτάσει από τον συγκεντρωτή την προηγούμενη χρονική στιγμή. Αυτές οι δευτερεύουσες ανακλάσεις και η τυχαιότητα της πορείας τους κάνουν δύσκολο τον υπολογισμό τους.

$$Q_{rec} = Q_{absorbed,coil} + Q_{absorbed,cav} + Q_{reflected,out} + Q_{reflected,in} \quad (3.6)$$

Σε μεγάλο βαθμό οι ανακλάσεις-απορροφήσεις μέσα στην κοιλότητα του δέκτη επηρεάζονται από τις οπτικές ιδιότητες των υλικών του σωλήνα και της κοιλότητας και συγκεκριμένα από τους συντελεστές απορροφητικότητας ( $\alpha$ ) και εκπομπής ( $\epsilon$ ) των υλικών αυτών. Συνήθως γίνεται κατάλληλη επεξεργασία ώστε ο σωλήνας και η κοιλότητα του δέκτη να έχουν επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια, που σημαίνει υψηλός συντελεστής απορρόφησης ( $\alpha \approx 0.9$ ) και χαμηλός συντελεστής εκπομπής ( $\epsilon \approx 0.1$ ).

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία δύναται να υπολογίζει σε steady-state συνθήκες την απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία από τον σωλήνα και τον συλλέκτη, δηλαδή τις τιμές  $Q_{absorbed,coil}$  και  $Q_{absorbed,cav}$  αντίστοιχα της σχέσης 3.6, το άθροισμά τους δίνει την ηλιακή ενέργεια που απορροφά ο δέκτης  $Q_{absorbed,rec}$ .

$$Q_{absorbed,rec} = Q_{absorbed,coil} + Q_{absorbed,cav} \quad (3.7)$$

Με βάση αυτούς τους υπολογισμούς ορίζονται δύο οπτικοί βαθμοί απόδοσης:

-Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη,  $\eta_{optical,rec}$ :

$$\eta_{optical,rec} = \frac{Q_{absorbed,rec}}{Q_{solar}} \quad (3.8)$$

-Οπτικός βαθμός σωλήνα,  $\eta_{optical,coil}$ :

$$\eta_{optical,coil} = \frac{Q_{absorbed,coil}}{Q_{solar}} \quad (3.9)$$

### 3.6.2 Θερμική ανάλυση.

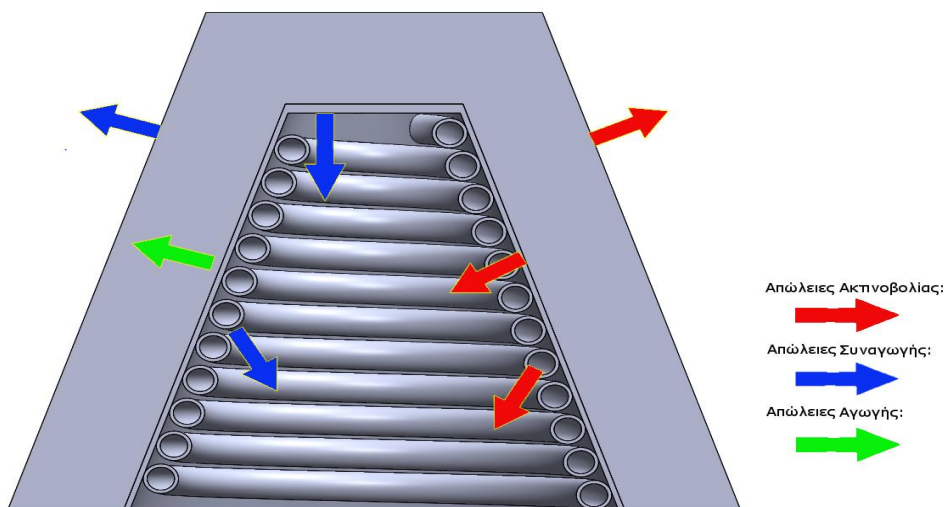
Ο παραβολοειδής συλλέκτης αξιοποιεί μόνο την άμεση ακτινοβολία ( $G_b$ ), επομένως η διαθέσιμη ακτινοβολία στο άνοιγμα του συγκεντρωτή  $Q_{solar}$  δίνεται από την σχέση:

$$Q_{solar} = G_b \cdot A_{col} \quad (3.10)$$

Από την διαθέσιμη ακτινοβολία ένα μέρος απορροφάται από το εργαζόμενο μέσο και γίνεται ωφέλιμο ( $Q_{useful}$ ) και ένα μέρος της χάνεται προς το περιβάλλον ( $Q_{losses}$ ). Οι απώλειες αυτές είναι συνδυασμός οπτικών απωλειών ( $Q_{optical,losses}$ ) και θερμικών απωλειών ( $Q_{thermal,losses}$ ) του δέκτη, δηλαδή ισχύει:

$$Q_{solar} = Q_{usefull} + Q_{losses} = Q_{usefull} + Q_{thermal,losses} + Q_{optical,losses} \quad (3.11)$$

Οι θερμικές απώλειες είναι το άθροισμα των απωλειών του δέκτη λόγω συναγωγής ( $Q_{conv}$ ), ακτινοβολίας ( $Q_{rad}$ ) και αγωγής ( $Q_{cond}$ ). Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.3 απώλειες ακτινοβολίας και συναγωγής έχω από όλες τις παράπλευρες επιφάνειες των τριών τμημάτων του δέκτη (κοιλότητα-σωλήνας-μόνωση) που έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον. Ενώ απώλειες συναγωγής υπάρχουν κυρίως από την κοιλότητα προς την μόνωση.



Σχήμα 3.6.3: Τομή κωνικού δέκτη με σχηματική παράσταση των απωλειών θερμότητας ανά τμήμα του δέκτη.

Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή στα τοιχώματα του σωλήνα της κοιλότητας και της μόνωσης, παρουσιάζονται παρακάτω απλές σχέσεις υπολογισμού των απωλειών αυτών [3.40].

- Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας του δέκτη δίνονται από την σχέση:

$$Q_{rad} = \varepsilon_{cav} \cdot \sigma \cdot E_{cav} \cdot (T_{cav}^4 - T_{amb}^4) + \varepsilon_{coil} \cdot \sigma \cdot E_{coil,out} \cdot (T_{coil}^4 - T_{amb}^4) + \varepsilon_{ins} \cdot \sigma \cdot E_{ins,out} \cdot (T_{ins}^4 - T_{amb}^4) \quad (3.12)$$

Όπου:

-  $\sigma$  =σταθερά του Stefan-Boltzman=  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

- $\varepsilon_{cav}, \varepsilon_{coil}, \varepsilon_{ins}$  =συντελεστές εκπομπής της κοιλότητας, του σωλήνα και της μόνωσης αντίστοιχα.

- $E_{cav}, E_{coil,out}, E_{ins,out}$  =Εξωτερική επιφάνεια της κοιλότητας, του σωλήνα και της μόνωσης.

- $T_{cav}, T_{coil}, T_{ins}$  =Θερμοκρασίες τοιχωμάτων.

- $T_{amb}$  =Θερμοκρασία περιβάλλοντος.

- Οι απώλειες λόγω συναγωγής του δέκτη δίνονται από την σχέση:

$$Q_{conv} = h_{air} \cdot E_{cav} \cdot (T_{cav} - T_{amb}) + h_{air} \cdot E_{coil,out} \cdot (T_{coil} - T_{amb}) + h_{air} \cdot E_{ins,out} \cdot (T_{ins} - T_{amb}) \quad (3.13)$$

Όπου:

- $h_{air}$  =συντελεστής συναγωγής από την κοιλότητα και τον σωλήνα προς το περιβάλλον, επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου ( $V_{wind}$ ) και προσεγγίζεται [3.41]:

$$h_{air} = 2.8 + 3 \cdot V_{wind} \quad (3.14)$$

- Οι απώλειες λόγω αγωγής του δέκτη δίνονται από την σχέση:

$$Q_{cond} = \frac{E_{cav} \cdot k_{ins}}{t_{ins}} \cdot (T_{cav} - T_{ins}) \quad (3.15)$$

Όπου:

- $k_{ins}$  =Ειδική θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης.

- $t_{ins}$  =πάχος της μόνωσης.

Η ωφέλιμη ισχύς ( $Q_{usefull}$ ) που απορροφά το εργαζόμενο μέσο μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Q_{usefull} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) = H_{out} - H_{in} \quad (3.16)$$

Όπου:

-  $\dot{m}$  =παροχή του ρευστού.

-  $c_p$  = ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού.

$-T_{out}$  =θερμοκρασία εξόδου ρευστού.

$-T_{in}$  =θερμοκρασία εισόδου ρευστού.

$-H_{out}$  = Ροή ενθαλπίας ρευστού στην έξοδο.

$-H_{in}$  =Ροή ενθαλπίας ρευστού στην είσοδο.

Μία άλλη προσέγγιση για τον υπολογισμό της ωφέλιμης ισχύος:

$$Q_{usefull} = h \cdot E_{coil,in} \cdot (T_{coil} - T_{fm}) \quad (3.17)$$

Όπου:

-  $h$  =συντελεστής συναγωγής μεταξύ του εργαζόμενου μέσου και του σωλήνα.

$-T_{coil}$ =θερμοκρασία τοιχώματος σωλήνα.

$-T_{fm}$ =μέση θερμοκρασία ρευστού στον σωλήνα, υπολογίζεται από την σχέση 3.18:

$$T_{fm} = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \quad (3.18)$$

Τελικά ορίζεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης ( $\eta_{th}$ ) του δέκτη ως ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος προς την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{usefull}}{Q_{solar}} \quad (3.19)$$

Τέλος παρακάτω παρουσιάζεται θεωρητική προσέγγιση του υπολογισμού του αδιάστατου αριθμού Nusselt. Πολύ σημαντικές σε όλες τις εξισώσεις που ακολουθούν είναι οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού, οι οποίες υπολογίζονται στην μέση θερμοκρασία ( $T_{fm}$ ). Πιο συγκεκριμένα:

- Συντελεστής αγωγιμότητας ρευστού:  $k$  (W/m K)
- Πυκνότητα ρευστού:  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)
- Δυναμική συνεκτικότητα ρευστού:  $\mu$  (Pa·s)
- Ειδική θερμοχωρητικότητα ρευστού:  $c_p$  (J/kg K)

Για την μέση τιμή του αδιάστατου αριθμού Nusselt ισχύει ότι:

$$Nu = \frac{h \cdot D_{coil,in}}{k} \quad (3.20)$$

Επιπλέον δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού των αριθμών Reynolds (Re) και Prandtl (Pr):

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_{coil,in} \cdot \mu} = \frac{\rho \cdot u \cdot D_{coil,in}}{\mu} \quad (3.21)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (3.22)$$

Όπου:  $u$ =μέση ταχύτητα του ρευστού στην διατομή του αγωγού:



$$u = \frac{\dot{m}}{\pi \cdot \frac{D_{coil,in}^2}{4} \cdot \rho} \quad (3.23)$$

Για τον προσδιορισμό του αριθμού Nusselt σε λείο σωλήνα και πλήρως υδροδυναμικά ανεπτυγμένη ροή υπάρχουν διάφορες εμπειρικές σχέσεις, αναλόγως την φύση της ροής (στρωτή η τυρβώδης) [3.40]:

- Για στρωτή ροή ( $Re < 2300$ ):

$$Nu = 3.66 \quad (3.24)$$

- Για τυρβώδη ροή ( $Re > 10000$ ) χρησιμοποιείται η σχέση Dittus-Boelter:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (3.25)$$

- Για την μεταβατική περιοχή ( $2300 < Re < 10000$ ):

$$Nu = 0,012 \cdot (Re^{0.87} - 280) \cdot Pr^{0.4} \cdot \left(1 + \left(\frac{D_{coil,in}}{L_{coil}}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \quad (3.26)$$

### 3.6.3 Εξεργειακή ανάλυση.

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στον συγκεντρωτή και χρησιμοποιείται σε μια διεργασία δεν χάνεται αλλά υποβαθμίζεται, δηλαδή χάνει την δυνατότητα να προκαλεί αλλαγές. Η δυνατότητα της ενέργειας να προκαλεί αλλαγές προσδιορίζεται από το μέγιστο έργο (ωφέλιμη ισχύς) που μπορεί να δώσει. Το μέγιστο έργο που μπορούμε να παραλάβουμε από ένα σύστημα έως ότου αυτό έρθει σε ισορροπία με το περιβάλλον ονομάζεται εξέργεια και μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση των ιδιοτήτων του συστήματος και του περιβάλλοντος.

Η θερμική ανάλυση μέσω του ισοζυγίου ενέργειας που εφαρμόστηκε πριν βοηθά στον εντοπισμό απωλειών ενέργειας και αποτελεί το πρώτο βήμα για την ενεργειακή ανάλυση μιας διεργασίας. Όμως το ενεργειακό ισοζύγιο αναφέρεται σε ποσότητες ενέργειας χωρίς να λαμβάνει υπόψη την ποιότητα της ενέργειας. Εκτός από τις εμφανείς απώλειες που προκύπτουν από την θερμική ανάλυση, υπάρχουν και αφανείς απώλειες που οφείλονται στην αναντιστρεψιμότητα των διεργασιών, δηλαδή στην ποιοτική υποβάθμιση της ενέργειας. Οι απώλειες αυτές γίνονται φανερές μέσω της εξεργειακής ανάλυσης.

Η ροή ενέργειας ( $E$ ) μιας θερμότητας ( $Q$ ) η οποία έχει θερμοκρασία ( $T$ ) σε ένα περιβάλλον θερμοκρασίας ( $T_{amb}$ ) ισούται με το έργο που θα μπορούσε να παράξει μια μηχανή Carnot η οποία θα λειτουργούσε στα παραπάνω θερμοκρασιακά όρια, δηλαδή:

$$E = Q \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}}{T}\right) \quad (3.27)$$

Όπου όλες οι θερμοκρασίες σε Kelvin.

Γενικά η εξέργεια μιας θερμότητας ( $Q$ ) ισούται με την θερμότητα αυτή μείον μια ποσότητα η οποία εκφράζεται μέσω της αύξησης της εντροπίας ( $\Delta S$ ) κατά την παραγωγή έργου:

$$E_{usefull} = Q - T_{amb} \cdot \Delta S \quad (3.28)$$

Για ένα θερμαινόμενο ρευστό η ροή εξέργειας υπολογίζεται με βάση την ωφέλιμη ισχύ, τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του εργαζόμενου μέσου (σε Kelvin), καθώς και την πτώσης πίεσης ( $\Delta P$ ), ως εξής [3.42]:

$$E_{usefull} = Q_{usefull} - \dot{m} \cdot C_p \cdot T_{amb} \cdot \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) - \dot{m} \cdot T_{amb} \cdot \frac{\Delta P}{\rho \cdot T_{fm}} \quad (3.29)$$

Για την εξέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας ο Petela [3.43] έχει διατυπώσει την παρακάτω σχέση:

$$E_{solar} = Q_{solar} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{T_{amb}}{T_{sun}} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)^4\right) \quad (3.30)$$

Όπου:  $T_{sun}$  =θερμοκρασία του ηλίου=5770 K.

Τελικά ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ( $\eta_{ex}$ ) ορίζεται ως:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{usefull}}{E_{solar}} \quad (3.31)$$

### 3.6.4 Υδραυλική ανάλυση.

Ο συντελεστής τριβής ( $f$ ) δίνεται από την σχέση:

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2} \cdot \frac{D_{coil,in}}{L_{coil}} \quad (3.32)$$

Όμως ο συντελεστής τριβής δύναται να υπολογιστεί και από διάφορες εμπειρικές σχέσεις αναλόγως την γεωμετρική μορφή του σωλήνα και τις ιδιότητες του ρευστού. Για ελικοειδή σωλήνα ο συντελεστής τριβής μπορεί να υπολογιστεί από σχέση που προτείνουν οι Mishra and Gurta για την τυρβώδη περιοχή [3.40]:

$$f = \left(\frac{0.3164}{Re^{0.25}} + 0.03 \cdot \left(\frac{D_{coil,in}}{D_{rec}}\right)^{0.5}\right) \cdot \left(\frac{\mu_w}{\mu}\right)^{0.27} \quad (3.33)$$

Όπου:  $\mu_w$  =δυναμική συνεκτικότητα ρευστού υπολογισμένη για θερμοκρασία  $T_{coil}$ .

Για να υπερνικηθούν οι απώλειες πίεσης και να μπορέσει το ρευστό να κυκλοφορήσει μέσα στον δέκτη χρειάζεται κάποια αντλία (κυκλοφορητής) να δώσει το απαιτούμενο έργο. Το έργο που χρειάζεται να καταναλώσει η αντλία ( $W_p$ ) για να κυκλοφορήσει το εργαζόμενο μέσο δίνεται από την σχέση [3.40]:

$$W_p = \frac{\dot{m} \cdot \Delta P}{\rho \cdot \eta_p} \quad (3.34)$$

Όπου:  $\eta_p$  =απόδοση της αντλίας=0.7 [3.40].

Το έργο που καταναλώνει η αντλία μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο ειδικά σε περίπτωση που το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας. Για να ληφθεί υπόψη η κατανάλωση της αντλίας εισάγουμε τον ολικό βαθμό απόδοσης ( $\eta_{ovr}$ ) που λαμβάνει υπόψη ότι η καθαρή ωφέλιμη ισχύς είναι η ωφέλιμη ισχύς του ρευστού μείον την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει η αντλία. Ο ολικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση [3.44]:

$$\eta_{ovr} = \frac{Q_{usefull} - \frac{W_p}{\eta_{el}}}{Q_{solar}} \quad (3.35)$$

Όπου:  $\eta_{el}$  =ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης=0.33 [3.32]

### Βιβλιογραφία 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.

- [3.1] S.A. Kalogirou. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science* 2004;30(3):231-295.
- [3.2] Ε.Α. Μπέλλος. Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συλλεκτών σε κτίρια. Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016.
- [3.3] W. Schiel, T. Keck, 2012. Parabolic dish concentrating solar power (CSP) systems. In: Stein, W., Lovegrove, K. (Eds.), *Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications*. Woodhead Publishing, Oxford.
- [3.4] Κ.Α. Αντωνόπουλος. Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα (Μέρος Πρώτο). Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2015..
- [3.5] F. Cavallaro. Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy* 2009;34(7):1678–85.
- [3.6] G.S. Kinoshita. The Shenandoah parabolic dish solar collector. Sandia Report 1985.
- [3.7] M.Gunther, R.Shahbazfar. Advanced CSP Teaching Materials-Chapter 7: Solar dish technology.DLR-EnerMENA project.
- [3.8] G.J Prinsloo, R.T Dobson. Solar Tracking. Stellenbosch: SolarBooks ,2015.
- [3.9] J. Coventry, C. Andraka . Dish systems for CSP . *Solar Energy* 2017;152:140-170.
- [3.10] <https://www.sbp.de/en/solar-energy/>
- [3.11] K. Lovegrove, G. Burgess, J. Pye . A new 500 m<sup>2</sup> paraboloidal dish solar concentrator. *Solar Energy* 2011;85:620-626.
- [3.12] [https://share-ng.sandia.gov/news/resources/news\\_releases/new-suncatcher-power-system-unveiled-at-national-solar-thermal-test-facility-july-7-2009/](https://share-ng.sandia.gov/news/resources/news_releases/new-suncatcher-power-system-unveiled-at-national-solar-thermal-test-facility-july-7-2009/)
- [3.13] <https://ripassoenergy.com/en/products/ripasso-stirling-hybrid/>
- [3.14] P. J. Verlinden, A. Lewandowski, C. Bingham, G. S. Kinsey, R. A. Sherif and J. B. Lasich. "Performance and Reliability of Multijunction III-V Modules for Concentrator Dish and Central Receiver Applications," 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, Waikoloa, HI, 2006, pp. 592-597.
- [3.15] R.M. Muthusivagami, R. Velraj, R. Sethumadhavan. Solar cookers with and without thermal storage—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:691-701.
- [3.16] S.A. Kalogirou. Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science* 2005;31:242–281.
- [3.17] D. Azzouzi, B.Boumeddane, A. Abene. Experimental and analytical thermal analysis of cylindrical cavity receiver for solar dish. *Renewable Energy* 2017;106:111-121.

- [3.18] C. Zou, Y. Zhang, Q. Falcoz, P. Neveu, C. Zhang, W. Shu, S. Huang. Design and optimization of a high-temperature cavity receiver for a solar energy cascade utilization system. *Renewable Energy* 2017;103:478-489.
- [3.19] R. Loni, A.B. Kasaeian, E. Askari Asli-Ardeh, B. Ghobadian. Optimizing the efficiency of a solar receiver with tubular cylindrical cavity for a solar-powered organic Rankine cycle. *Energy* 2016;112:1259-1272.
- [3.20] N. S. Kumar, K.S. Reddy. Comparison of receivers for solar dish collector system. *Energy Conversion and Management* 2008;49:812–819.
- [3.21] K.S. Reddy, T.S Vikram, G. Veershetty . Combined heat loss analysis of solar parabolic dish – modified cavity receiver for superheated steam generation. *Solar Energy* 2015;121:78–93.
- [3.22] W.G. Le Roux, T. Bello-Ochende, J.P. Meyer. Operating conditions of an open and direct solar thermal Brayton cycle with optimised cavity receiver and recuperator. *Energy* 2011;36:6027-6036.
- [3.23] Z. Si-Quan, L. Xin-Feng, D. Liu, M. Qing-Song. A numerical study on optical and thermodynamic characteristics of a spherical cavity receiver. *Applied Thermal Engineering* 2018.
- [3.24] S. Turrini, M. Bettonte, M. Eccher, M. Grigante, A. Miotello, R. S. Brusa. An innovative small-scale prototype plant integrating a solar dish concentrator with a molten salt storage system. *Renewable Energy* 2018;123:150-161.
- [3.25] R. Loni, A.B. Kasaeian, E. Askari Asli-Ardeh, B. Ghobadian, W.G. Le Roux. Performance study of a solar-assisted organic Rankine cycle using a dishmounted rectangular-cavity tubular solar receiver. *Applied Thermal Engineering* 2016;108:1298–1309.
- [3.26] S. Pavlovic , A. M. Daabo, E. Bellos, V. Stefanovic, S.Mahmoud, R.K. Al-Dadah. Experimental and numerical investigation on the optical and thermal performance of solar parabolic dish and corrugated spiral cavity receiver. *Journal of Cleaner Production* 2017;150:75-92.
- [3.27] J. Zhu, K. Wang, G. Li, H. Wuc, Z. Jiang, F. Lin, Y. Li . Experimental study of the energy and exergy performance for a pressurized volumetric solar receiver. *Applied Thermal Engineering* 2016;104:212–221.
- [3.28] A. M. Daabo, S. Mahmouda, R. K. Al-Dadah. The optical efficiency of three different geometries of a small scale cavity receiver for concentrated solar applications. *Applied Energy* 2016;179:1081–1096.
- [3.29] F. Wang, R. Lin, B. Liu, H. Tan, Y. Shuai . Optical efficiency analysis of cylindrical cavity receiver with bottom surface convex. *Solar Energy* 2013;90:195–204.

- [3.30] R. Loni, A.B. Kasaeian, E. Askari Asli-Ardeh, B. Ghobadian, Sh. Gorjian. Experimental and numerical study on dish concentrator with cubical and cylindrical cavity receivers using thermal oil. *Energy* 2018;154:168-181.
- [3.31] A Harris, T.G. Lenz . Thermal performance of solar concentrator/cavity receiver systems. *Solar Energy* 1985;34:135-142.
- [3.32] S. Pavlovic, R. Loni, E. Bellos, D. Vasiljević, G. Najafi, A. Kasaeian. Comparative study of spiral and conical cavity receivers for a solar dish collector. *Energy Conversion and Management* 2018;178:111–122.
- [3.33] R.D.Jiltea, S.B.Kedarea, J.K.Nayaka. Investigation on Convective Heat Losses from Solar Cavities under Wind Conditions. *Energy Procedia* 2014;57:437 – 446.
- [3.34] T.Seo, S.Ryu, Y.Kang. Heat Losses from the Receivers of a Multifaceted Parabolic Solar Energy Collecting System. *KSME International Journal* 2003;17:1185- 1195.
- [3.35] Y.Shuai, X. XIA, H. Tan. Numerical simulation and experiment research of radiation performance in a dish solar collector system. *Front. Energy Power Eng.* 2010;4(4):488–495.
- [3.36] K. Vignarooban, X. Xu, A. Arvay, K. Hsu, A.M. Kannan . Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review. *Applied Energy* 2015;146:383–396.
- [3.37] S. Pavlovic, E. Bellos, W. G. Le Roux, V. Stefanovic, C. Tzivanidis. Experimental investigation and parametric analysis of a solar thermal dish collector with spiral absorber. *Applied Thermal Engineering* 2017;121:126–135.
- [3.38] S. Pavlovic, E. Bellos, R.h Loni. Exergetic investigation of a solar dish collector with smooth and corrugated spiral absorber operating with various nanofluids. *Journal of Cleaner Production* 2018;174: 1147-1160.
- [3.39] R. Loni, S. Pavlovic, E. Bellos, C. Tzivanidis, E. A. Asli-Ardeha. Thermal and exergy performance of a nanofluid-based solar dish collector with spiral cavity receiver. *Applied Thermal Engineering* 2018;135:206–217.
- [3.40] VDI Heat Atlas-Second Edition. Springer, Dusseldorf 2010.
- [3.41] J. A. Duffie, W. A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*, fourth edition. Wiley, 2013.
- [3.42] Bellos E, Tzivanidis C. A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors. *Energy Convers Manage* 2017;149:275–92.
- [3.43] Petela R. Exergy of undiluted thermal radiation. *Sol Energy* 2003;74:469–88.
- [3.44] Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D. Enhancing the performance of parabolic trough collectors using nanofluids and turbulators. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;91:358.

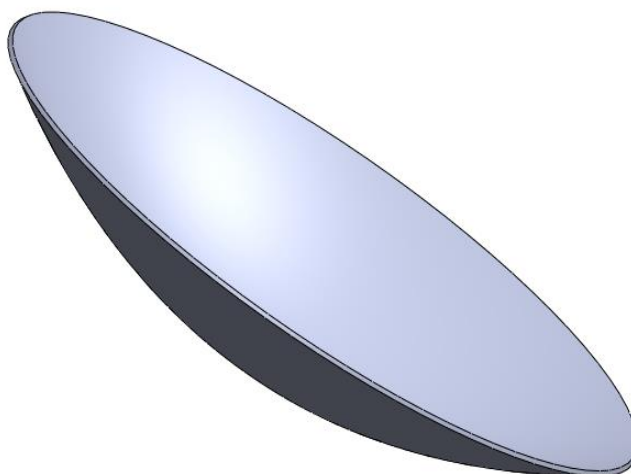
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχεδίαση παραβολοειδούς κατόπτρου, προσομοίωση της ροής και έλεγχος εγκυρότητας.

### 4.1 Εισαγωγή.

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συγκεντρωτή, όπως σχεδιάστηκε στο Solidworks. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος δημιουργίας του μοντέλου στο Solidworks Flow Simulation, για την προσομοίωση της ροής στον δέκτη και της οπτικής συμπεριφοράς του συλλέκτη. Αυτό είναι και το βασικότερο πλεονέκτημα του Solidworks, καθώς δίνει την δυνατότητα σε ένα πρόγραμμα να γίνεται ο σχεδιασμός, η οπτική ανάλυση και η προσομοίωση της ροής στον δέκτη. Έτσι μπορούμε να μεταβάλλουμε πολλές παραμέτρους που επηρεάζουν την συνολική συμπεριφορά του συλλέκτη. Επόμενο βήμα είναι η εύρεση του αριθμού ηλιακών ακτινών και του μεγέθους του πλέγματος που οδηγούν το μοντέλο σε σύγκλιση. Τέλος θα γίνει έλεγχος της εγκυρότητας του μοντέλου με βάση αποτελέσματα από την βιβλιογραφία και την θεωρία.

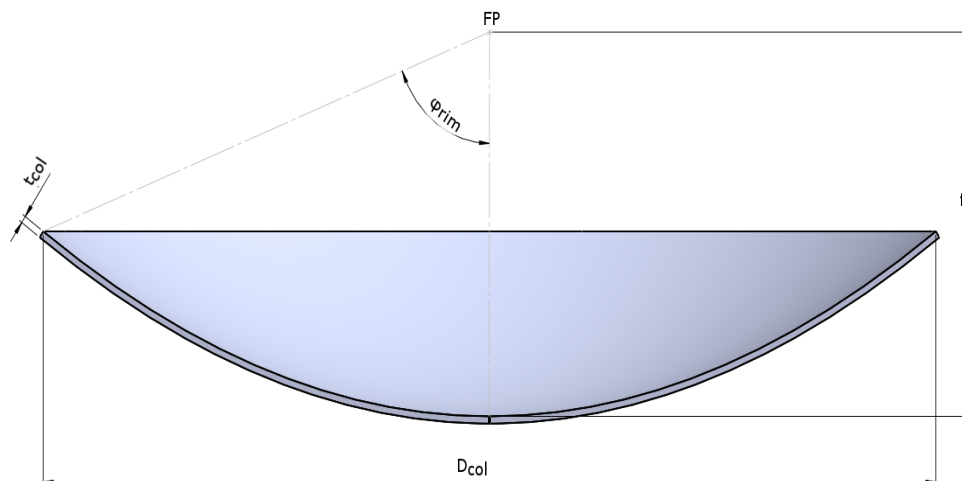
### 4.2 Σχεδιασμός συγκεντρωτή.

Για την σχεδίαση του συλλέκτη χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Solidworks, που είναι ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα σχεδίασης. Ο συγκεντρωτής του συλλέκτη σχεδιάστηκε στα πρότυπα του συγκεντρωτή όπως κατασκευάστηκε από τους Azzouzi et al. [4.1] για τις πειραματικές τους μετρήσεις, και προορίζεται για συλλέκτες μικρής κλίμακας. Στο σχήμα 4.2.1 φαίνεται ο σχεδιασμένος συγκεντρωτής σε τρισδιάστατη μορφή ενώ στον σχήμα 4.2.2 φαίνονται οι βασικές του γεωμετρικές διαστάσεις με τις τιμές τους να αναφέρονται στον πίνακα 4.2.1.



Σχήμα 4.2.1: 3D μορφή του συγκεντρωτή όπως σχεδιάστηκε στο Solidworks.





Σχήμα 4.2.1: Σχηματική παράσταση βασικών διαστάσεων συγκεντρωτή.

| Μέγεθος                          | Σύμβολο      | Τιμή         |
|----------------------------------|--------------|--------------|
| Διάμετρος ανοίγματος συγκεντρωτή | $D_{col}$    | 1461 mm      |
| Εστιακή απόσταση                 | $f$          | 526.5 mm     |
| Πάχος συγκεντρωτή                | $t_{col}$    | 10 mm        |
| Γωνία χείλους                    | $\Phi_{rim}$ | $69.5^\circ$ |
| Ανακλαστικότητα                  | $\rho$       | 0.93         |
| Λόγος συγκέντρωσης               | $C$          | 146          |

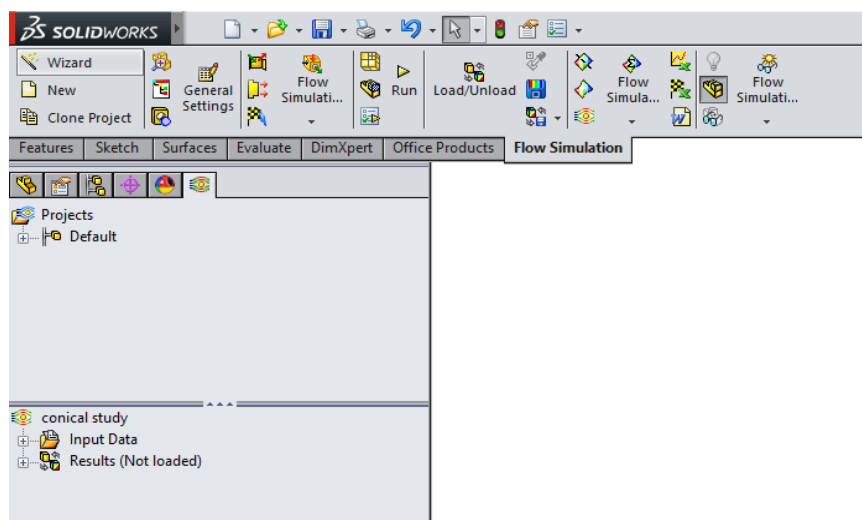
Πίνακας 4.2.1: Βασικά μεγέθη συγκεντρωτή [4.1].

Ο συγκεντρωτής αυτός θα χρησιμοποιηθεί σε όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις των δεκτών. Τα σχήματα των διάφορων δεκτών θα δοθούν στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο καθώς οι γεωμετρικές τους ιδιότητες είναι παραμετρικές και συνδέονται άμεσα με τα αποτελέσματα που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

### 4.3 Προσομοίωση ροής και ορισμός στόχων.

Μετά τον σχεδιασμό στόχος είναι η θερμική-οπτική ανάλυση του συλλέκτη. Αυτό πραγματοποιείται με την βοήθεια του Solidworks Flow Simulation το οποίο είναι ενσωματωμένο στο πρόγραμμα του Solidworks. Όπως υποδηλώνει το όνομά του η εφαρμογή κάνει προσομοίωση της ροής έχοντας ως δεδομένα εισόδου το 3D μοντέλο της κατασκευής και διάφορα στοιχεία για την ροή που εισάγονται από τον χρήστη. Για να εμφανιστεί η καρτέλα του flow simulation (σχήμα 4.3.1) στο Solidworks την επιλέγουμε από την επιλογή: **Options**→**Add-Ins**. Η καρτέλα αυτή έχει πάνω, τα βασικά της εργαλεία και αριστερά τις πληροφορίες για το τρέχον project μας.

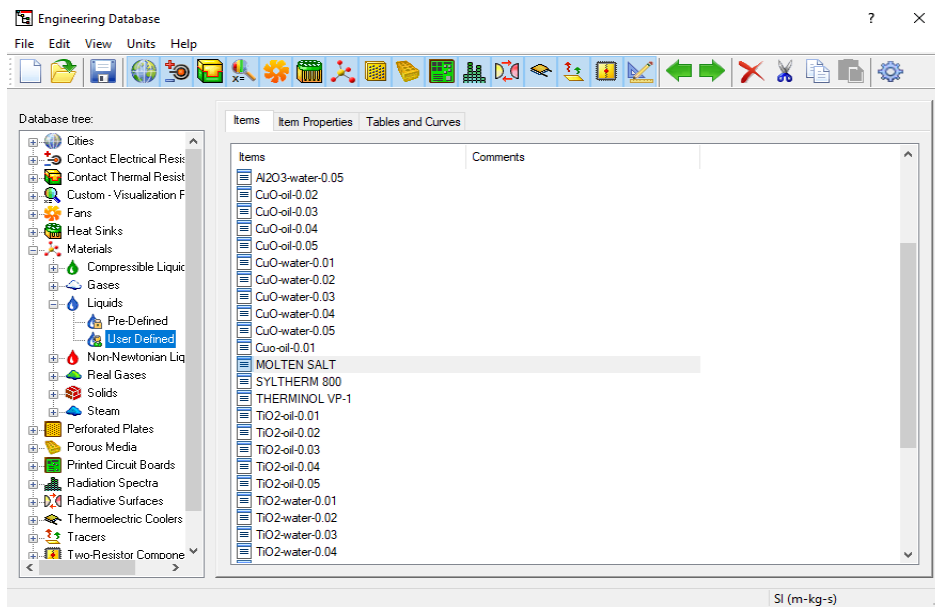
Αρχικά παρουσιάζεται ο τρόπος ενημέρωσης της βιβλιοθήκης του Solidworks και στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία δημιουργίας ενός project στο Solidworks flow simulation για την περίπτωση του κώνου. Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται και στα άλλα σχήματα.



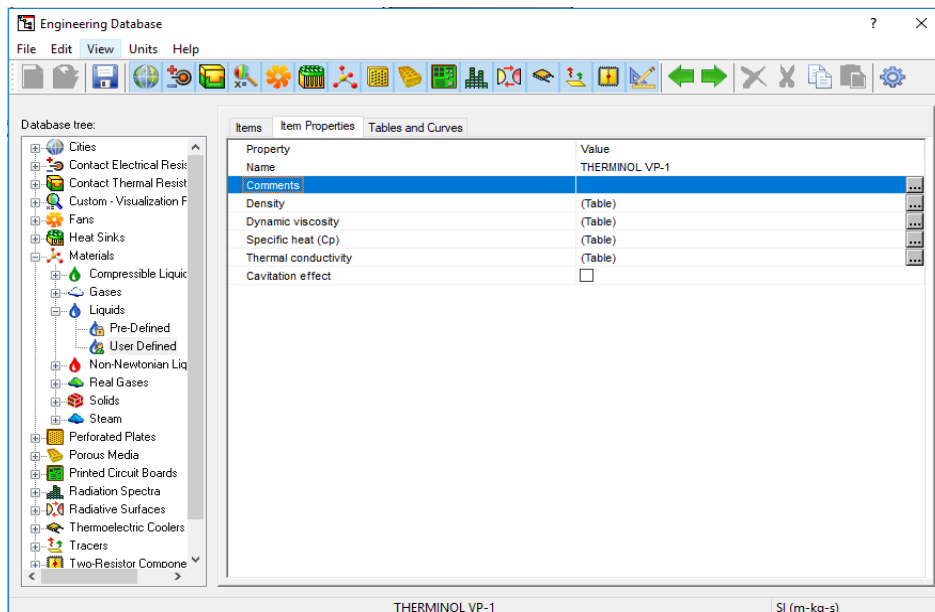
Σχήμα 4.3.1: Αρχική καρτέλα Flow Simulation.

#### 4.3.1 Ενημέρωση βιβλιοθήκης του Solidworks.

Η βιβλιοθήκη του Solidworks βρίσκεται στην καρτέλα **Engineering Database** όπου υπάρχουν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες πλήθους υλικών (στερεά, υγρά, αέρια) και επιφάνειες με προκαθορισμένες οπτικές ιδιότητες (**Radiative Surfaces**). Στην προσομοίωση όμως της ροής θα χρειαστούν εργαζόμενα μέσα και οπτικές ιδιότητες (συντελεστής εκπομπής, απορροφητικότητα) που δεν υπάρχουν στην βιβλιοθήκη του. Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να προσθέτει νέα υλικά τα οποία αναφέρονται ως **User defined**. Η διαδικασία που ακολουθούμε σε κάθε περίπτωση είναι η εξής (σχήμα 4.3.2): Αρχικά επιλέγουμε την κατηγορία που θέλουμε να προσθέσουμε υλικό (πχ **Materials**→**Liquids**), στην συνέχεια επιλέγουμε το **User Defined** και τέλος το **New Item**. Έτσι ανοίγει καρτέλα όπου μας ζητάει να εισάγουμε τις ιδιότητες (σχήμα 4.3.3).



Σχήμα 4.3.2: Βιβλιοθήκη (Engineering Database) του Flow Simulation στο Solidworks.



Σχήμα 4.3.3: Καρτέλα για εισαγωγή ιδιοτήτων νέου ρευστού στο Engineering Database.

Από τα εργαζόμενα μέσα που εξετάζονται στην παρούσα εργασία η βιβλιοθήκη του Solidworks περιέχει τις ιδιότητες του νερού και του αέρα. Επομένως πρέπει να προστεθούν οι ιδιότητες του θερμικού ελαίου (Therminol VP-1) και του τηγμένου άλατος (Molten Salt). Τις ιδιότητες τις προσθέτουμε υπό μορφή πινάκων με παράμετρο την θερμοκρασία και είναι οι:

- Density (πυκνότητα ρευστού):  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>).
- Dynamic viscosity (δυναμική συνεκτικότητα ρευστού):  $\mu$  (Pa·s)
- Specific heat (ειδική θερμοχωρητικότητα ρευστού):  $c_p$  (J/kg K)
- Thermal conductivity (συντελεστής αγωγιμότητας ρευστού) :  $k$  (W/m K)

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του Therminol-VP1 (υγρή φάση) δίνονται στον πίνακα 4.3.1.

| T (°C) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\mu$ (mPa·s) | $c_p$ (kJ/kgK) | k (W/mK) |
|--------|-----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 12     | 1071                        | 5.480         | 1523           | 0.137    |
| 20     | 1064                        | 4.290         | 1546           | 0.136    |
| 30     | 1056                        | 3.280         | 1575           | 0.135    |
| 40     | 1048                        | 2.600         | 1604           | 0.134    |
| 50     | 1040                        | 2.120         | 1633           | 0.133    |
| 60     | 1032                        | 1.761         | 1662           | 0.132    |
| 70     | 1015                        | 1.492         | 1690           | 0.131    |
| 80     | 1015                        | 1.284         | 1719           | 0.130    |
| 90     | 1007                        | 1.119         | 1747           | 0.129    |
| 100    | 999                         | 0.985         | 1775           | 0.128    |
| 110    | 991                         | 0.875         | 1803           | 0.126    |
| 120    | 982                         | 0.784         | 1831           | 0.125    |
| 130    | 974                         | 0.707         | 1858           | 0.124    |
| 140    | 965                         | 0.642         | 1886           | 0.123    |
| 150    | 957                         | 0.585         | 1913           | 0.121    |
| 160    | 948                         | 0.537         | 1940           | 0.120    |
| 170    | 940                         | 0.494         | 1968           | 0.118    |
| 180    | 931                         | 0.457         | 1995           | 0.117    |
| 190    | 922                         | 0.424         | 2021           | 0.115    |
| 200    | 913                         | 0.395         | 2048           | 0.114    |
| 210    | 904                         | 0.368         | 2075           | 0.112    |
| 220    | 895                         | 0.345         | 2101           | 0.111    |
| 230    | 886                         | 0.324         | 2128           | 0.109    |
| 240    | 877                         | 0.305         | 2154           | 0.107    |
| 250    | 867                         | 0.288         | 2181           | 0.106    |
| 260    | 857                         | 0.272         | 2207           | 0.104    |
| 270    | 848                         | 0.258         | 2234           | 0.102    |
| 280    | 838                         | 0.244         | 2260           | 0.100    |
| 290    | 828                         | 0.232         | 2287           | 0.098    |
| 300    | 817                         | 0.221         | 2314           | 0.096    |
| 310    | 806                         | 0.211         | 2341           | 0.095    |
| 320    | 796                         | 0.202         | 2369           | 0.093    |
| 330    | 784                         | 0.193         | 2397           | 0.091    |
| 340    | 773                         | 0.185         | 2425           | 0.089    |
| 350    | 761                         | 0.177         | 2454           | 0.086    |
| 360    | 749                         | 0.170         | 2485           | 0.084    |
| 370    | 736                         | 0.164         | 2517           | 0.082    |
| 380    | 723                         | 0.158         | 2551           | 0.080    |
| 390    | 709                         | 0.152         | 2588           | 0.078    |
| 400    | 694                         | 0.146         | 2628           | 0.076    |

**Πίνακας 4.3.1: Θερμοδυναμικές ιδιότητες Therminol VP-1 [4.2].**

Για το τηγμένο άλας οι θερμοδυναμικές ιδιότητες δίνονται υπό την μορφή εξισώσεων όπως προτάθηκαν από τον Ζανοίκο [4.3] με παράμετρο την θερμοκρασία σε (°C) . Να επισημανθεί

ότι οι εξισώσεις αφορούν τηγμένο άλας με κατά βάρος περιεκτικότητα 60%  $N_aNO_3$  και 40%  $KNO_3$ .

$$\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) = 2090 - 0.636 \cdot T \quad (4.1)$$

$$\mu(mPa \cdot s) = 22.714 - 0.12 \cdot T + 2.281 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 1.474 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \quad (4.2)$$

$$cp\left(\frac{J}{kg \cdot oC}\right) = 1443 + .0.172 \cdot T \quad (4.3)$$

$$k\left(\frac{W}{m \cdot oC}\right) = 0.443 + 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad (4.4)$$

Επιπλέον πολύ σημαντικός είναι ο ορισμός των οπτικών ιδιοτήτων του συλλέκτη. Για να γίνει αυτό προσθέτουμε στο **Radiative Surfaces** δύο νέες επιφάνειες με όνομα “sinithis” και “epilektikos”. Όταν δημιουργούμε Radiative Surfaces μας ζητά να εισάγουμε τις δύο βασικές οπτικές ιδιότητες (απορροφητικότητα και συντελεστής εκπομπής) με την μορφή πινάκων, με παράμετρο την θερμοκρασία.

Για την επιφάνεια sinithis εισάγουμε:

- Συντελεστής εκπομπής (Emissivity coefficient)= $\epsilon_{iso}=0.8$ .
- Απορροφητικότητα (Solar absorptance)= $\alpha_{iso}=0.8$ .

Για την επιφάνεια epilektikos εισάγουμε:

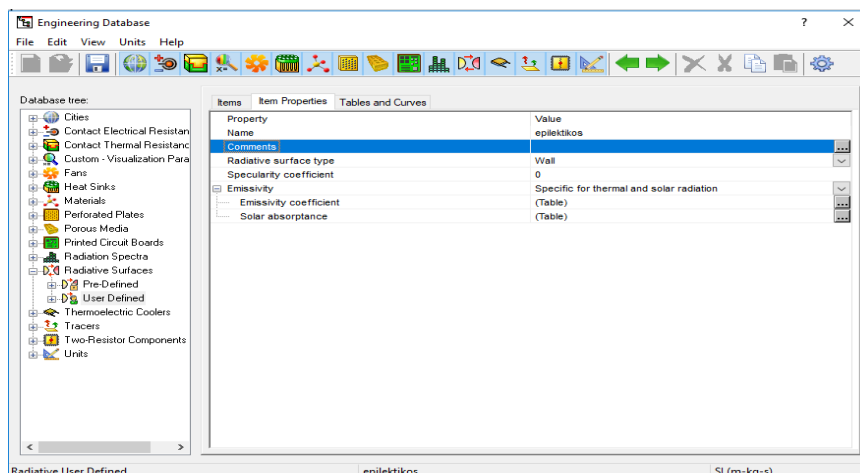
- Συντελεστής εκπομπής (Emissivity coefficient) από την σχέση [4.4]:

$$\epsilon_{rec} = 2.249 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 1.039 \cdot 10^{-4} \cdot T + 5.599 \cdot 10^{-2} \quad (4.5)$$

όπου T= θερμοκρασία σε °C.

- Απορροφητικότητα (Solar absorptance)=  $\alpha_{rec}=0.9$ .

Είναι σημαντικό ακόμα και όταν κάποιος συντελεστής επιλέγεται ανεξάρτητος της θερμοκρασίας να εισαχθεί στο πρόγραμμα υπό την μορφή πίνακα.

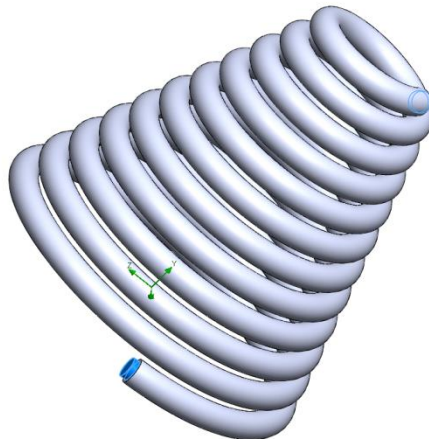


Σχήμα 4.3.4: Εισαγωγή οπτικών ιδιοτήτων στο Radiative Surfaces.

### 4.3.2 Δημιουργία Project.

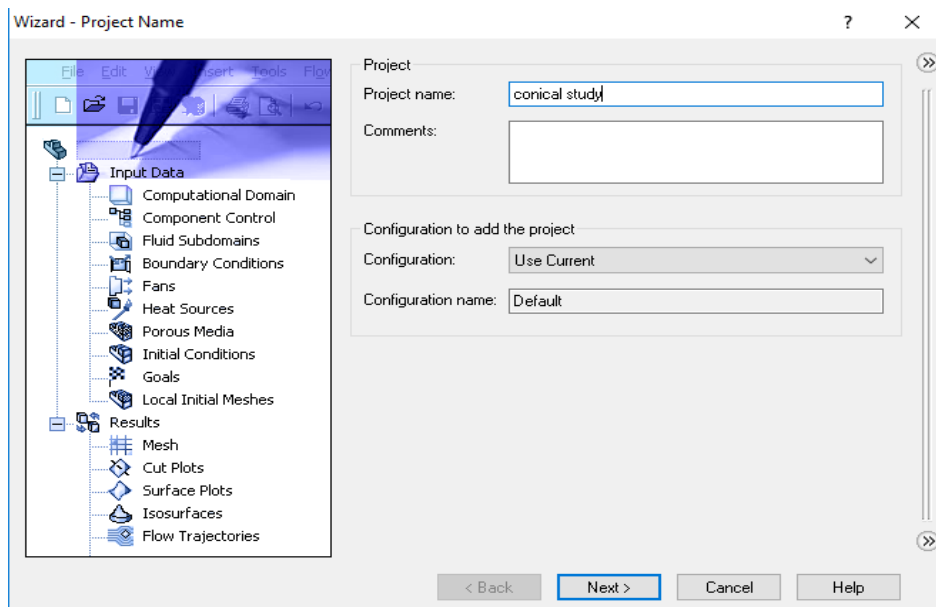
Η πρώτη βασική πληροφορία που χρειάζεται το πρόγραμμα είναι ο σωλήνας που ρέει το ρευστό. Για να το δηλώσουμε αυτό σχεδιάζουμε δύο τάπες στα άκρα του σωλήνα με

αποτέλεσμα να κλείσει ο σωλήνας (σχήμα 4.3.5), έτσι το πρόγραμμα καταλαβαίνει ότι στον σωλήνα ρέει ρευστό.



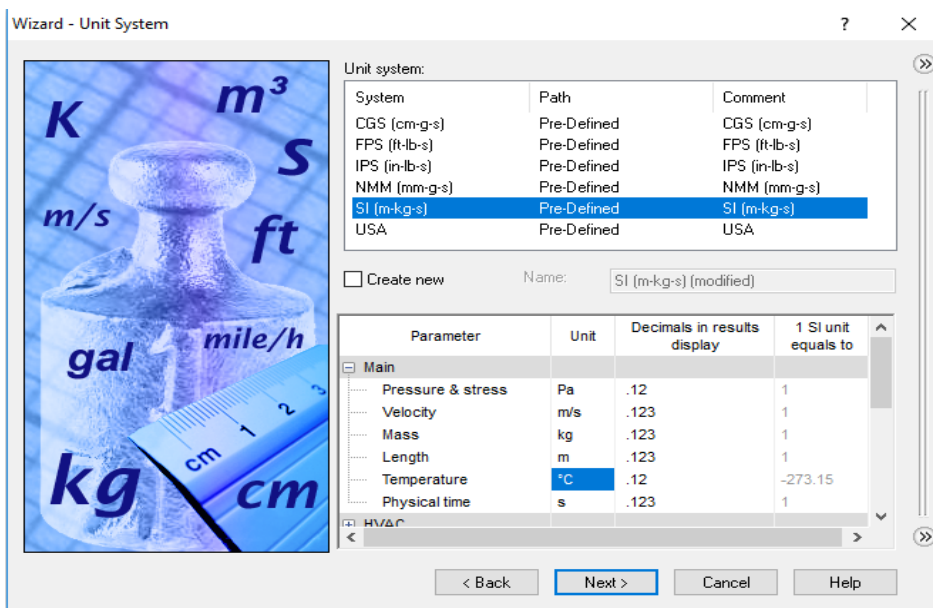
**Σχήμα 4.3.5: Σχεδιασμός ταπών στα άκρα το ελικοειδή σωλήνα.**

Τώρα δημιουργούμε το αρχείο προσομοίωσης (project) όπου θα ορίσουμε τις βασικές συνθήκες τις ροής. Επιλέγουμε στην γραμμή εντολών την εντολή **Wizard** και ανοίγει το πρώτο παράθυρο όπου εισάγουμε το όνομα του project.



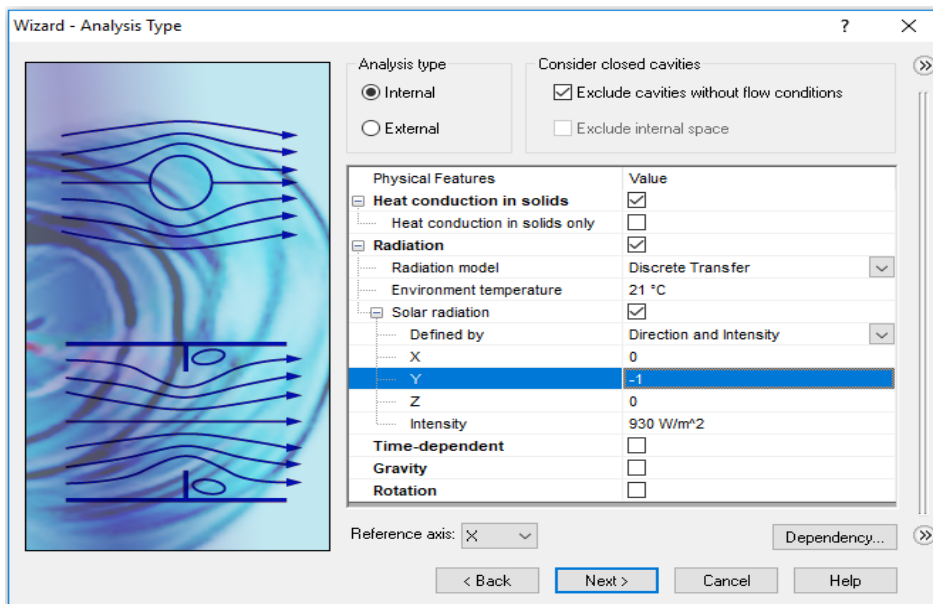
**Σχήμα 4.3.6: Δημιουργία νέου Project (πρώτο παράθυρο).**

Στην συνέχεια ορίζουμε τις μονάδες μέτρησης όπου επιλέγουμε στο σύστημα SI και αλλάζουμε την μονάδα της θερμοκρασίας σε °C.



Σχήμα 4.3.7: Ορισμός μονάδων μέτρησης (δεύτερο παράθυρο).

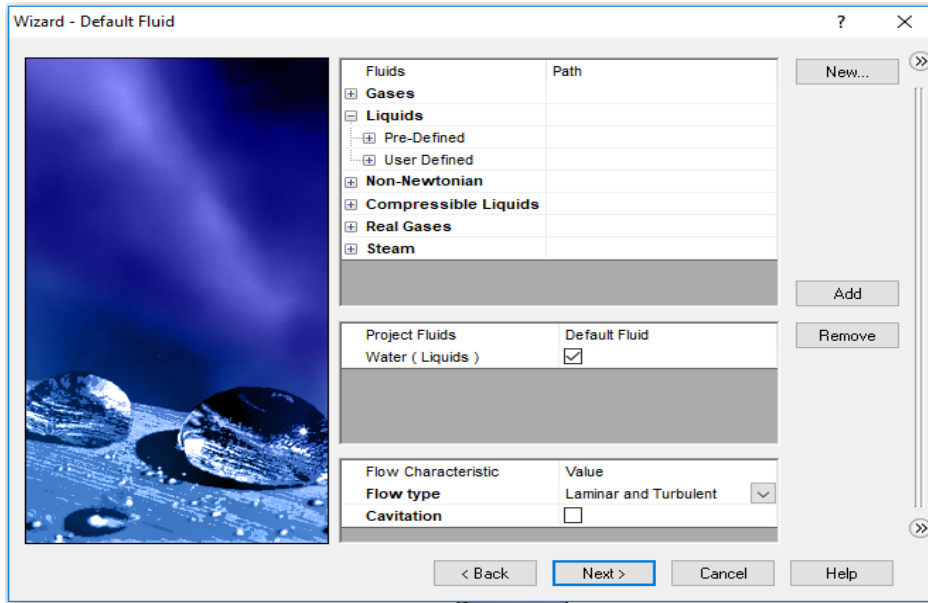
Υστερα δηλώνουμε ότι η ροή είναι εσωτερική, ότι έχω μετάδοση θερμότητας με αγωγή στα στερεά, την θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{amb}=21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας ( $X=0, Y=-1, Z=0$ ) και την ένταση της ακτινοβολίας ( $G_b'=\rho \cdot G_b =0.97 \cdot 1000=930\text{ W/m}^2$ ). Εισάγοντας το  $G_b'$  αντί του  $G_b$  προσομοιώνουμε τις απώλειες λόγω της ανακλαστικότητας ( $\rho$ ).



Σχήμα 4.3.8: Ορισμός συνθηκών μεταφοράς θερμότητας και ακτινοβολίας (τρίτο παράθυρο).

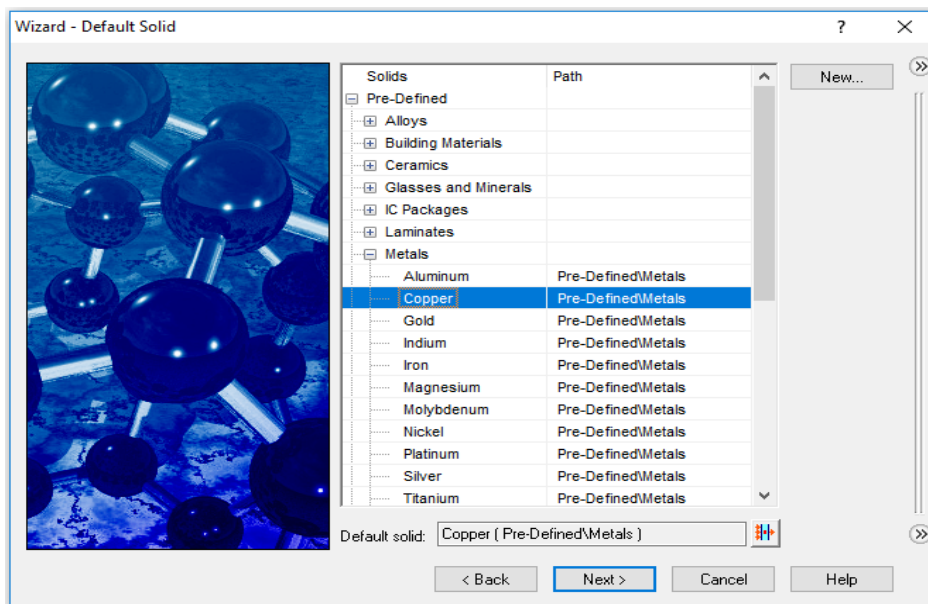
Στην επόμενη καρτέλα επιλέγουμε το εργαζόμενο μέσο, το οποίο είτε είναι από την βιβλιοθήκη του Solidworks (**Pre-Defined**) είτε έχει προστεθεί από τον χρήστη (**User defined**), όπως είδαμε παραπάνω.





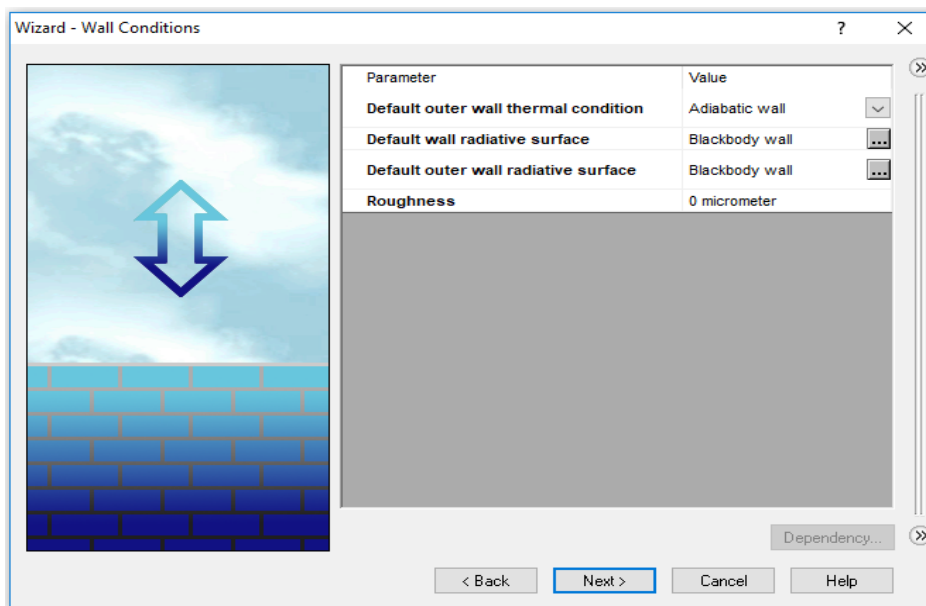
**Σχήμα 4.3.9: Εισαγωγή εργαζόμενου μέσου (τέταρτο παράθυρο).**

Μετά επιλέγεται το προεπιλεγμένο υλικό των τμημάτων του συλλέκτη. Το υλικό αυτό επιλέγεται να είναι ο χαλκός (Copper) , που είναι και το υλικό του σωλήνα.



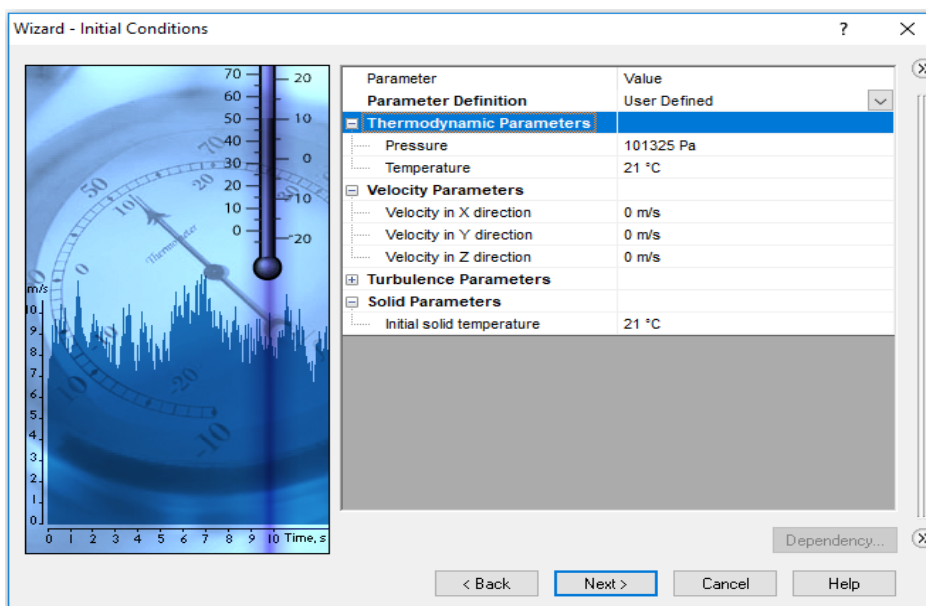
**Σχήμα 4.3.10: Ορισμός προεπιλεγμένου υλικού (πέμπτο παράθυρο).**

Στο επόμενο παράθυρο διατηρούνται οι αλλαγές, δηλαδή αδιαβατικά εξωτερικά τοιχώματα και απορροφητικές (blackbody) επιφάνειες.



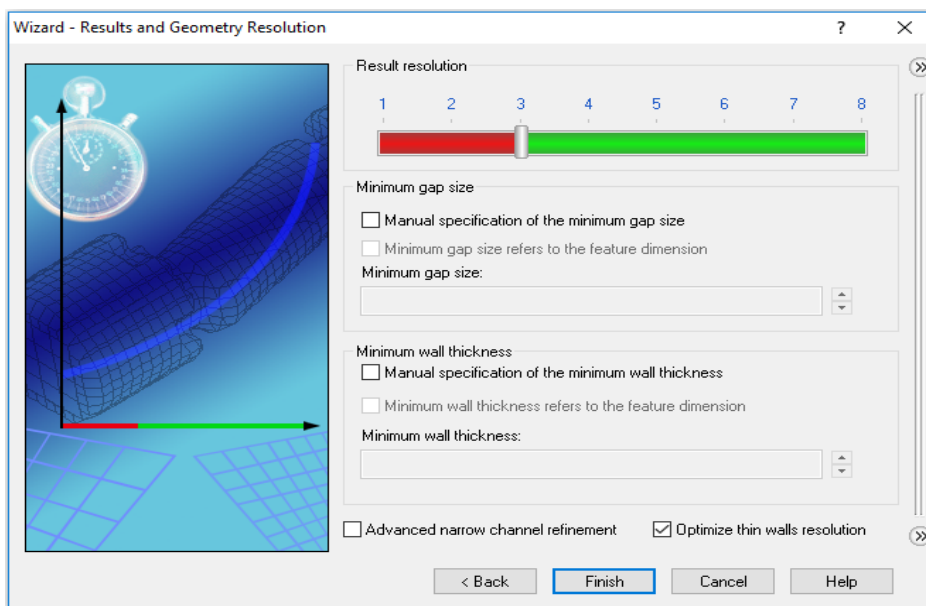
**Σχήμα 4.3.11: Προεπιλεγμένες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας (έκτο παράθυρο).**

Στο επόμενο βήμα ορίζεται θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{amb}=21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), πίεση περιβάλλοντος ( $P_{amb}=101325\text{ Pa}$ ) και αρχική θερμοκρασία των στερεών σωμάτων ( $T_{solid}=21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



**Σχήμα 4.3.12: Ορισμός θερμοκρασίας και πίεσης περιβάλλοντος (έβδομο παράθυρο).**

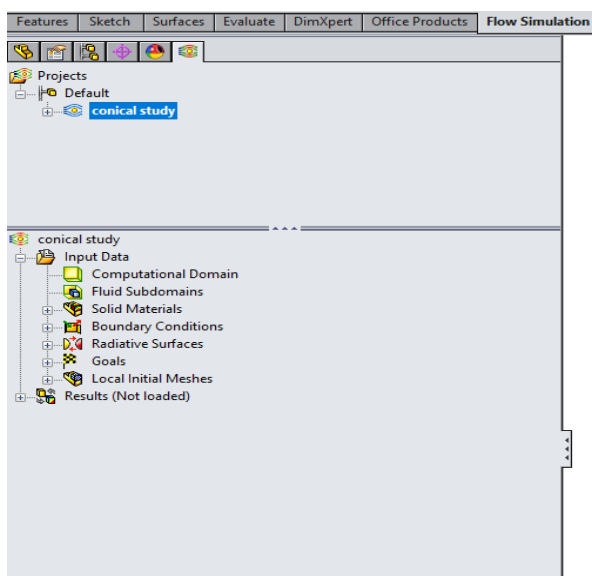
Τέλος το τελευταίο παράθυρο που αφορά το υπολογιστικό πλέγμα το αφήνουμε προς το παρόν ως έχει.



Σχήμα 4.3.13: Δημιουργία νέου Project (όγδο παράθυρο).

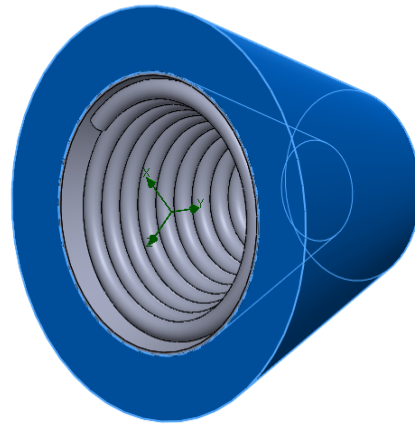
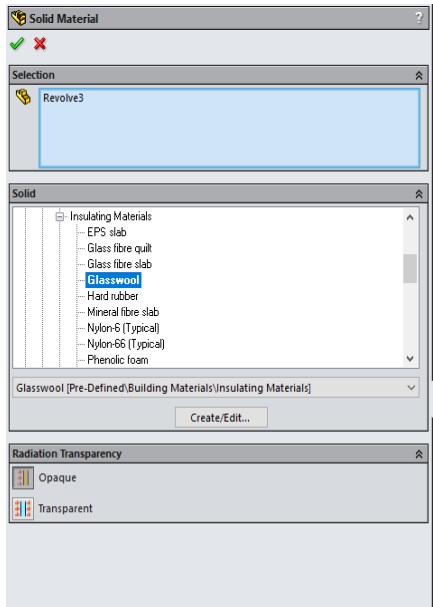
#### 4.3.3 Δεδομένα εισόδου.

Η δημιουργία του project ήταν ένα αρχικό βήμα. Στο σχήμα 4.3.11 φαίνεται ότι το πρόγραμμα ζητάει την εισαγωγή διάφορων επιπλέον πληροφοριών για το μοντέλο μας (δεδομένα εισόδου-input data).

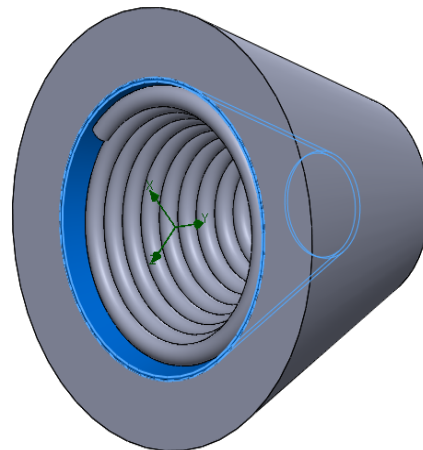
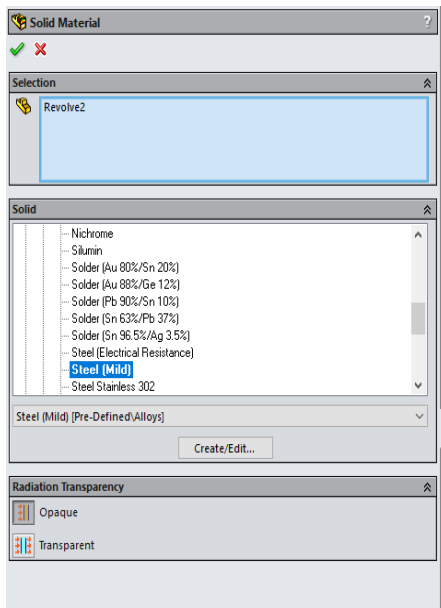


Σχήμα 4.3.14: Βασικές κατηγορίες δεδομένων εισόδου.

Το πρώτο δεδομένο που απαιτείται είναι τα υλικά (Solid Materials) από τα οποία αποτελούνται τα επιμέρους τμήματα του συλλέκτη. Για τον σωλήνα έχει ήδη οριστεί ως υλικό ο χαλκός. Για τα άλλα μέρη κάνουμε δεξί κλικ στο **Solid Materials** και μετά επιλέγουμε **Insert Solid Material**. Έτσι ανοίγει παράθυρο που μας ζητά να επιλέξουμε τμήμα, το υλικό που θα το αποτελεί και την διαπερατότητα του. Εμείς επιλέγουμε για την μόνωση το υλικό Glasswool (υαλοβάμβακας) και για την κοιλότητα Steel (Mild) (χάλυβας).

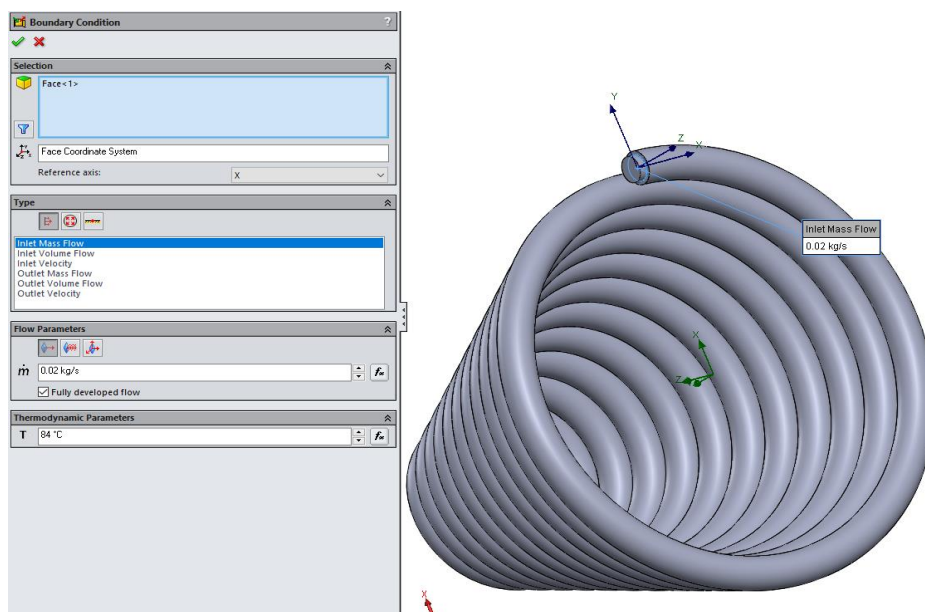


Σχήμα 4.3.15: Ορισμός υλικού μόνωσης.



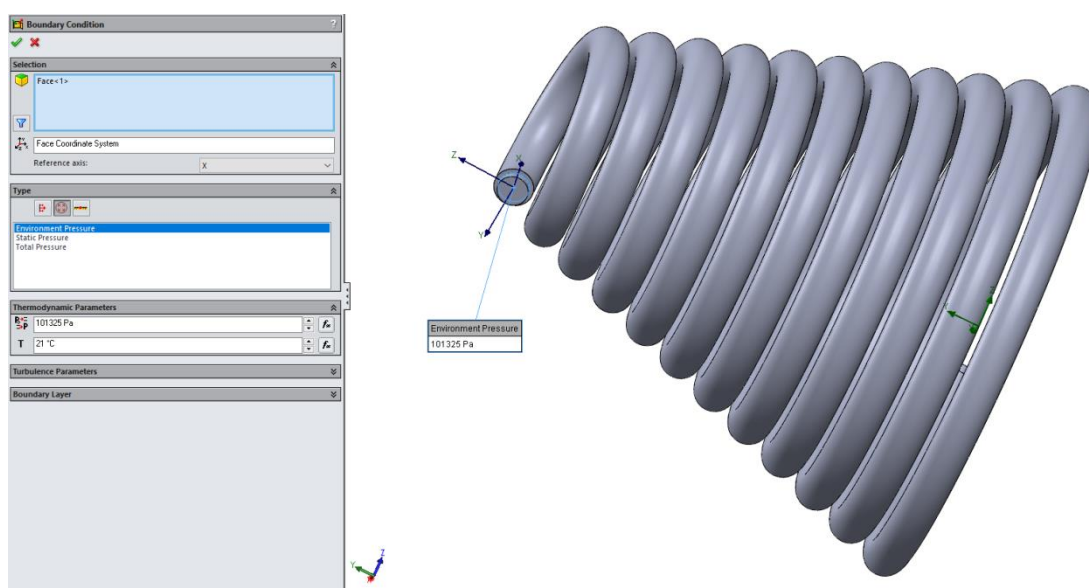
Σχήμα 4.3.16: Ορισμός υλικού κοιλότητας.

Επόμενο δεδομένο, οι οριακές συνθήκες της ροής (Boundary Conditions), θερμοκρασία εισόδου, παροχή ρευστού, πίεση εξόδου και συντελεστής συναγωγής. Στο δέντρο εντολών πατάμε δεξί κλικ στο **Boundary Conditions** και στη συνέχεια **Insert Boundary Conditions**. Στην επιφάνεια της τάπας εισόδου, πατάμε δεξί κλικ και επιλέγουμε **Select Other** και στη συνέχεια επιλέγουμε την εσωτερική της πλευρά. Έπειτα διαλέγουμε στο **Type** την επιλογή **Flow Openings** και **Inlet Mass Flow**, στα **Flow Parameters** την επιλογή **Normal to face** και ορίζουμε την αρχική παροχή μάζας ( $m=0.02 \text{ kg/sec}$ ) με **Fully developed flow**, ενώ στα **Thermodynamic Parameters** ορίζουμε αρχική θερμοκρασία εισόδου του ρευστού ( $T_{in}=84^{\circ}\text{C}$ ).



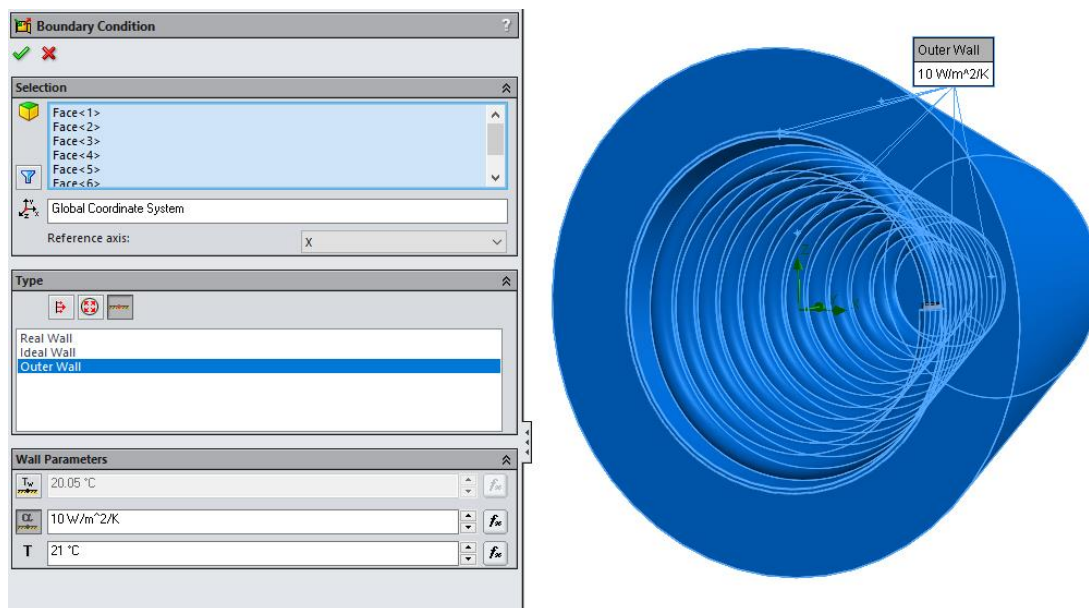
Σχήμα 4.3.17: Αρχικός ορισμός παροχής και θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για την τάπα εξόδου, διαλέγοντας στο **Type** το **Pressure Openings** και **Environment Pressure** εισάγουμε στην κατηγορία **Thermodynamic Parameters** την πίεση εξόδου ( $P_{\text{out}}=101325 \text{ Pa}$ ) και την θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_{\text{amb}}=21 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



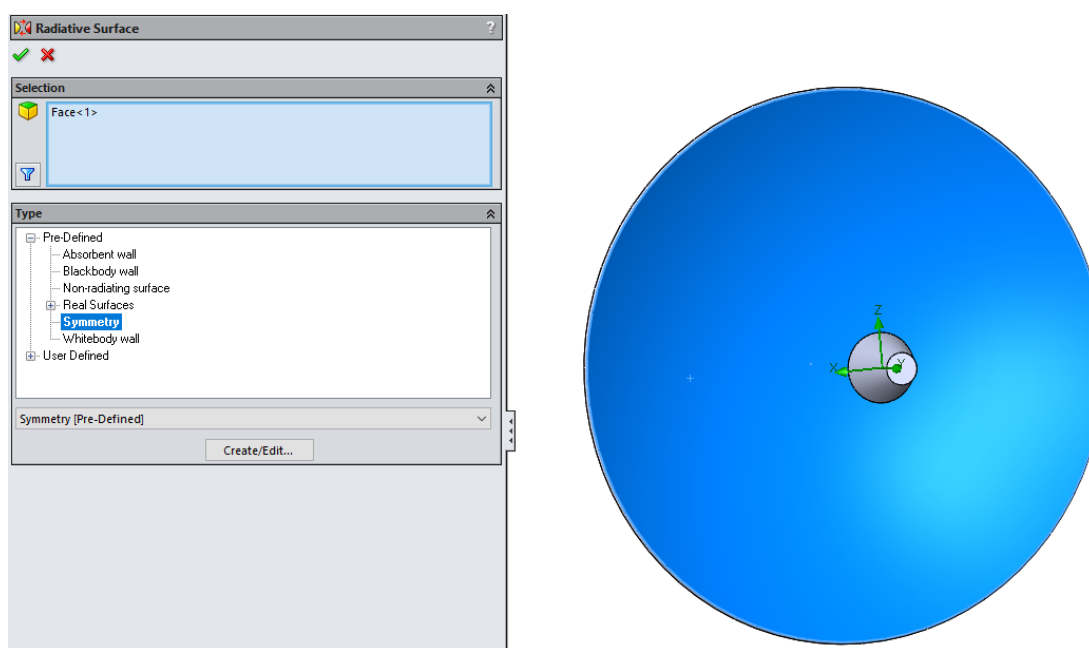
Σχήμα 4.3.18: Ορισμός πίεσης εξόδου του ρευστού.

Για την τελευταία συνθήκη επιλέγουμε όλες τις εξωτερικές επιφάνειες του δέκτη, επιλέγουμε στο **Type** την επιλογή **Wall** και **Outer Wall** και στα **Wall Parameters** βάζουμε συντελεστή συναγωγής ( $h_{\text{air}}=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).



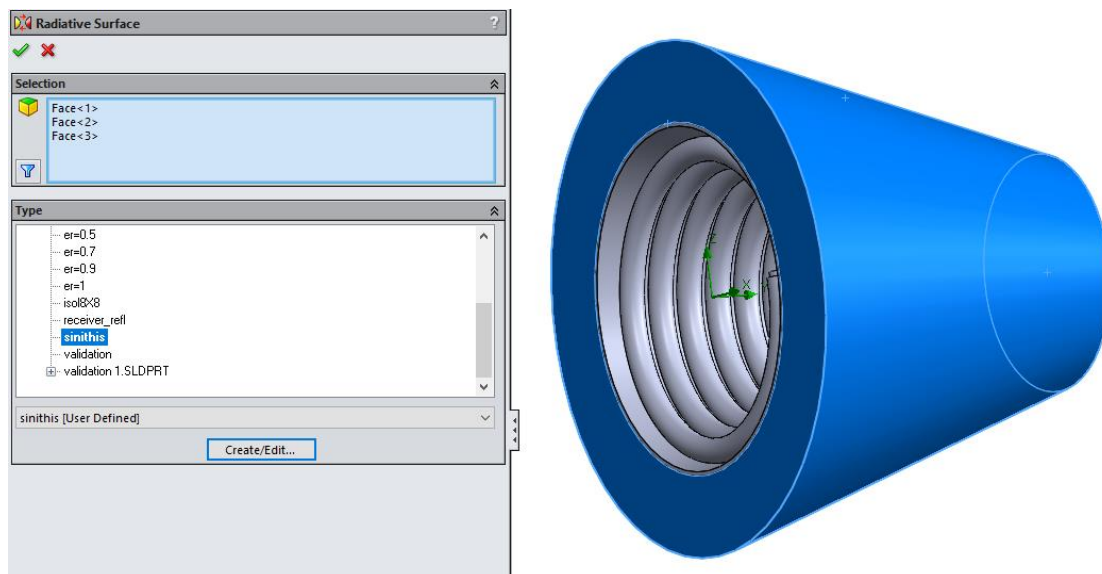
Σχήμα 4.3.19: Ορισμός συντελεστή συναγωγής του δέκτη με το περιβάλλον.

Ένα άλλο δεδομένο εισόδου είναι οι οπτικές ιδιότητες των επιφανειών του συλλέκτη (συντελεστής εκπομπής και απορροφητικότητα). Αρχικά θα προσθέσουμε τις ιδιότητες του κατόπτρου. Στο δέντρο εντολών, πατάμε δεξί κλικ στο **Radiative Surfaces** και μετά επιλέγουμε **Insert Radiative Surface**. Στη συνέχεια κάνουμε κλικ στην επιφάνεια του κατόπτρου και επιλέγουμε **Pre-Defined** → **Symmetry** (σχήμα 4.3.20). Το symmetry είναι στην βιβλιοθήκη του Solidworks και υποδηλώνει τέλεια ανάκλαση. Για τα υπόλοιπα μέρη έχουμε προσθέσει στην βιβλιοθήκη του Solidworks δύο νέα Radiative Surfaces, ένα για συνήθη υλικά (“sinithis”) και ένα για επιλεκτικά υλικά (“epilektikos”) που φέρουν τις οπτικές ιδιότητες. Έτσι προσθέτουμε στην μόνωση τις ιδιότητες της επιφάνειας “sinithis” (σχήμα 4.3.21) και στον σωλήνα και την κοιλότητα τις ιδιότητες της επιφάνειας “epilektikos” (σχήμα 4.3.22).

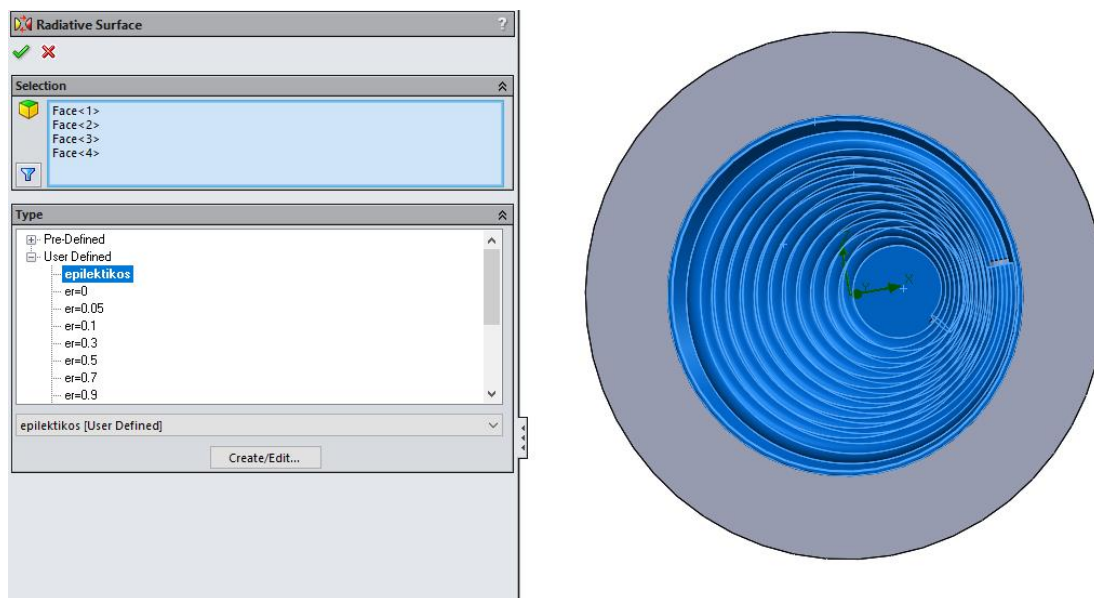




Σχήμα 4.3.20: Ορισμός ιδιοτήτων ανάκλασης του συγκεντρωτή.



Σχήμα 4.3.21: Ορισμός οπτικών ιδιοτήτων της μόνωσης.

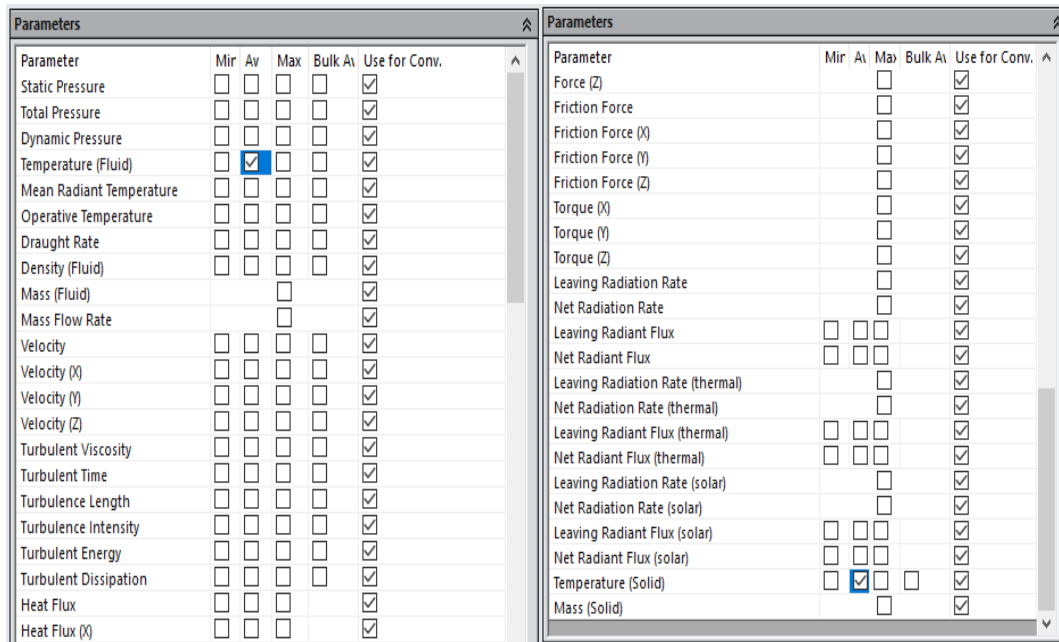


Σχήμα 4.3.22: Ορισμός οπτικών ιδιοτήτων του σωλήνα και της κοιλότητας.

Τέλος βασικά δεδομένα εισόδου είναι οι ορισμοί των στόχων (Goals). Οι στόχοι είναι πολύ σημαντικοί διότι στην ουσία μέσω των στόχων υποδηλώνουμε στο πρόγραμμα τα αποτελέσματα τα οποία θέλει να μας εμφανίσει μετά από κάθε τρέξιμο. Στο σχήμα 4.3.23 φαίνονται οι διάφοροι παράμετροι που μπορούν να επιλεγούν ως στόχοι. Πέρα από την παράμετρο πρέπει να επιλεγεί αν επιθυμούμε την ελάχιστη τιμή της (min), την μέση



(average/bulk average) και την μέγιστη τιμή, η επιφάνεια όπου υπολογίζεται ο στόχος καθώς και το είδος του στόχου (Global, Surface, Volume, Equation and Point).



Σχήμα 4.3.23: Σύνολο παραμέτρων που μπορούν να οριστούν ως στόχοι.

Στο μοντέλο μας αρχικά προσθέτουμε δύο **Global Goals** κάνοντας δεξί κλικ στο Goals. Μετά επιλέγουμε **Temperature(Fluid)(Av)** και **Temperature(Solid)(Av)**. Στην συνέχεια προσθέτουμε διάφορα **Surface Goals**. Αρχικά διαλέγοντας στη εσωτερική πλευρά της τάπας εισόδου προσθέτω:

- **Static Pressure (Av)**, που είναι η πίεση εισόδου ( $P_{in}$ ).
- **Mass Flow Rate**, που είναι η παροχή ( $m$ ).
- **Total Enthalpy Rate (Max)**, που είναι η ροή ενθαλπίας στην είσοδο ( $H_{in}$ ).

Στη τάπα εξόδου προσθέτω:

- **Static Pressure (Av)**, που είναι η πίεση εισόδου ( $P_{out}$ ).
- **Temperature Fluid (Bulk Av)**, που είναι η θερμοκρασία εξόδου ( $T_{out}$ ).
- **Total Enthalpy Rate (Max)**, που είναι η ροή ενθαλπίας στην έξοδο ( $H_{out}$ ).

Στην επιφάνεια του ελικοειδή σωλήνα προσθέτω:

- **Temperature Solid (Av)**, που είναι η θερμοκρασία του σωλήνα ( $T_{coil}$ ).
- **Net Radiation Rate (solar) (Max)**, η απορροφούμενη ακτινοβολία από τον σωλήνα ( $Q_{absorbed,coil}$ ).
- **Net Radiant Flux (solar) (Max)**, η ένταση της απορροφούμενης ακτινοβολίας από τον σωλήνα ( $q_{absorbed,coil}$ ).

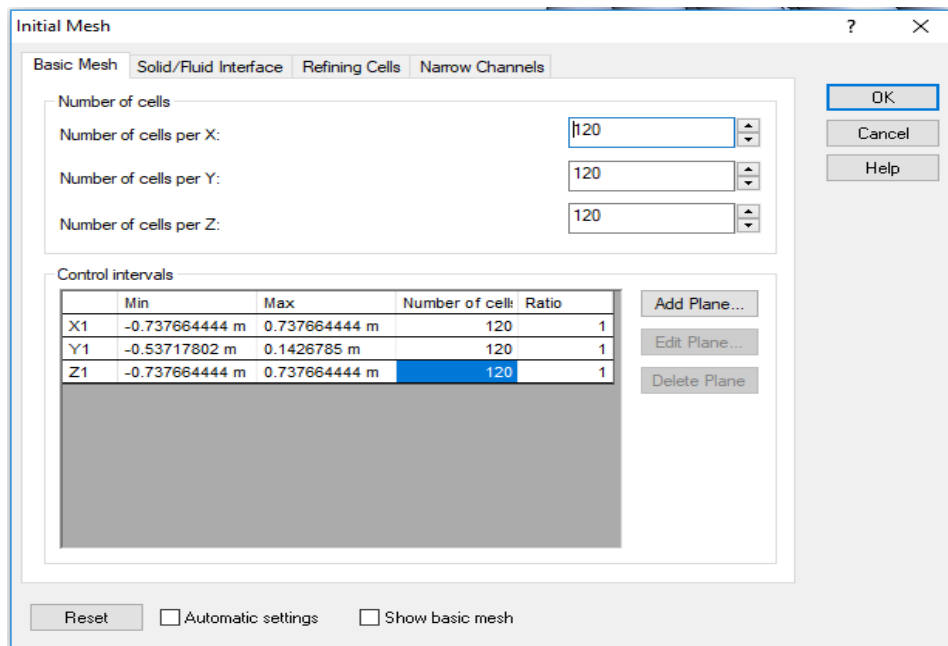
Επιπλέον το **Temperature Solid (Av)** το προσθέτουμε στην μόνωση και την κοιλότητα για να πάρουμε ως αποτέλεσμα τις αντίστοιχες θερμοκρασίες των τοιχωμάτων τους  $T_{iso}$  και  $T_{cav}$  αντίστοιχα.

Τέλος διαλέγοντας την επιφάνεια του σωλήνα και της κοιλότητας προσθέτω τους στόχους:

- **Net Radiation Rate (solar) (Max)**, η απορροφούμενη ακτινοβολία από τον δέκτη ( $Q_{\text{absorbed,rec}}$ ).
- **Net Radiant Flux (solar) (Max)**, η ένταση της απορροφούμενης ακτινοβολίας από τον δέκτη ( $q_{\text{absorbed,rec}}$ ).

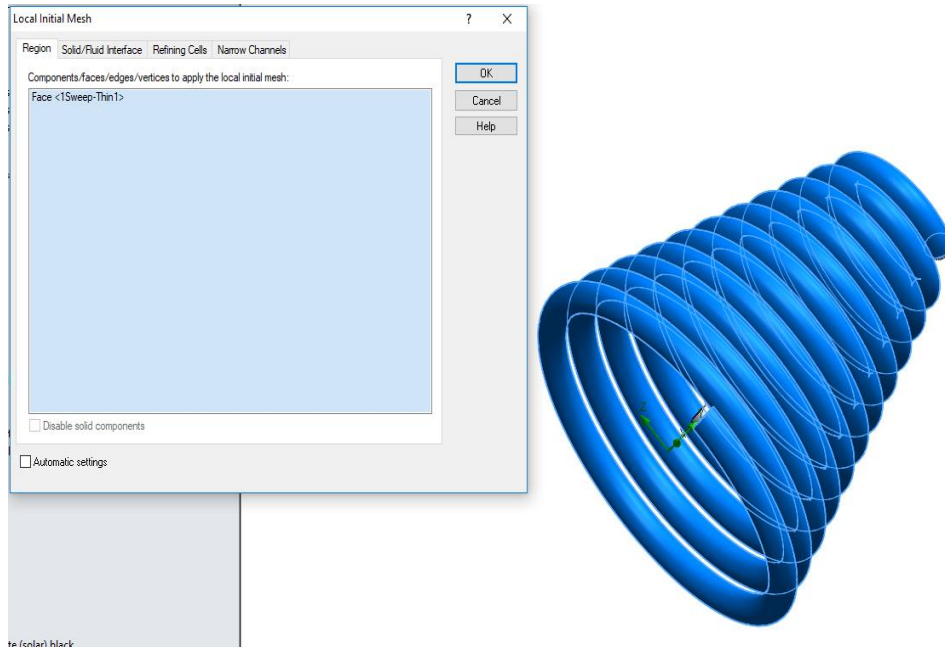
#### 4.3.4 Ορισμός πλεγμάτων, πλήθους ακτινών και παραμετρικά τρεξίματα.

Ο ορισμός του πλέγματος γίνεται σε δύο φάσεις. Πρώτα ορίζουμε ένα αρχικό υπολογιστικό πλέγμα που αφορά όλο τον συλλέκτη. Από την γραμμή εργαλείων επιλέγουμε **Initial Mesh** και εκεί ορίζουμε για κάθε άξονα 120 κελιά (120X120X120).

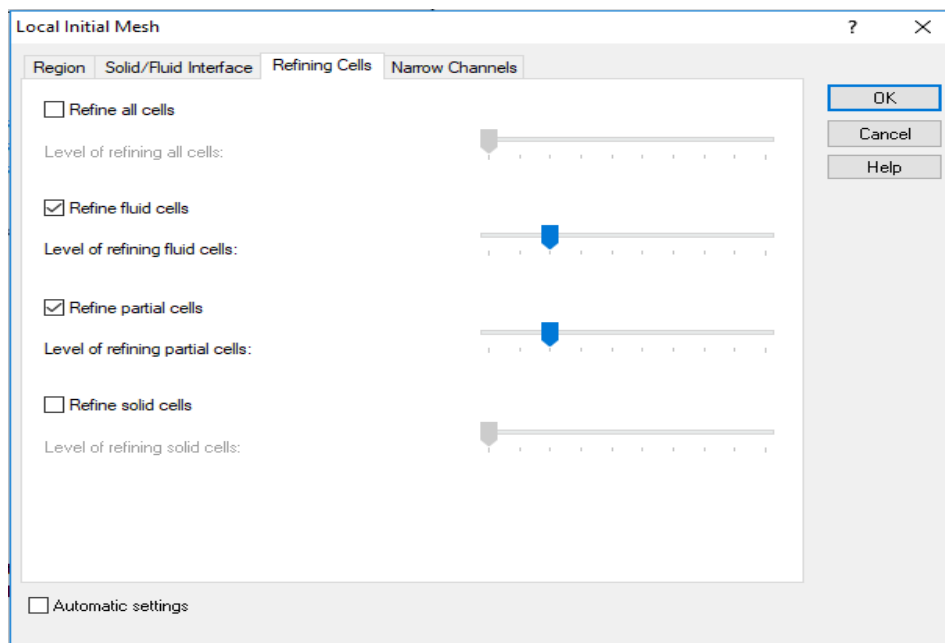


Σχήμα 4.3.24: Ορισμός αρχικού πλέγματος.

Στη συνέχεια έχοντας ως σκοπό να πυκνώσουμε το πλέγμα εντός του σωλήνα επιλέγουμε από την γραμμή εργαλείων το **Local Initial Mesh**. Στην καρτέλα Region επιλέγουμε την εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Έπειτα στην καρτέλα **Refining Cells** μαρκάρουμε τις επιλογές **Refine Fluid cells** και **Refine Partial cells** ορίζοντάς τες στο επίπεδο 2. Με αυτό τον τρόπο αυξήσαμε τα κελιά στον σωλήνα όπου ρέει το ρευστό.

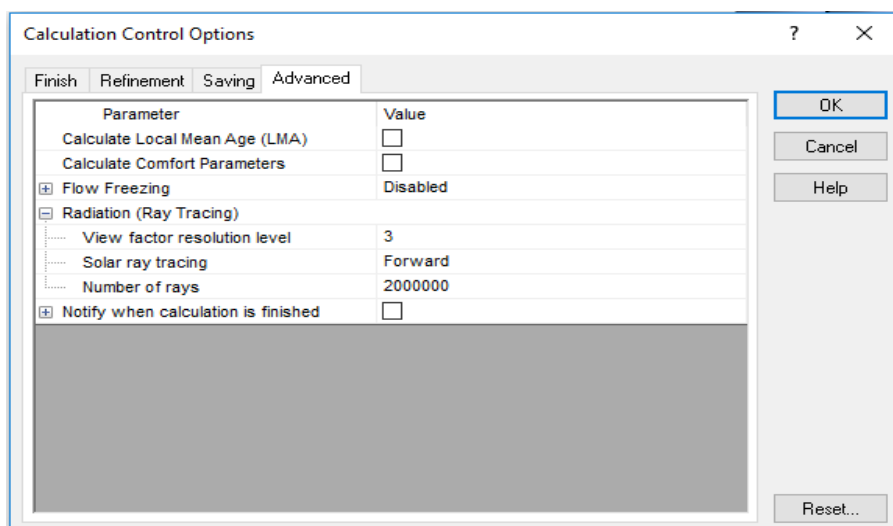


Σχήμα 4.3.25: Ορισμός επιφάνειας πύκνωσης πλέγματος.



Σχήμα 4.3.26: Ορισμός επιπέδου πύκνωσης.

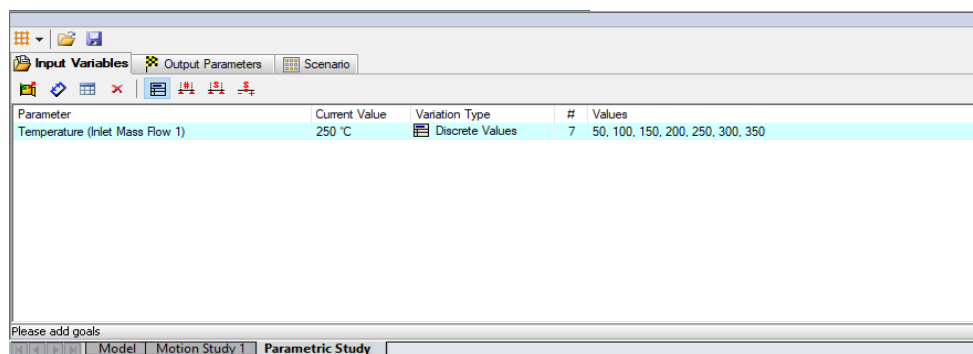
Επιπλέον χρειάζεται να οριστούν οι ακτίνες του ηλίου που θα χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση. Επιλέγοντας **Calculation Control Options** στην καρτέλα **Advanced** και στο **Solar ray tracing** διαλέγουμε **Forward**. Σχετικά με τον αριθμό των ακτινών ορίζουμε **Number of rays** ίσο με 2000000.



Σχήμα 4.3.27: Ορισμός πλήθους ηλιακών ακτινών.

Πλέον όλες οι ρυθμίσεις έχουν γίνει και πατώντας την εντολή **Run** τρέχει το πρόγραμμα της προσομοίωσης της ροής.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε μια χρήσιμη δυνατότητα που προσφέρει το Solidworks αυτό των παραμετρικών μελετών. Επιλέγοντας την εντολή **Flow Simulation**→**Solve**→**New Parametric Study** εμφανίζεται στο κάτω μέρος της οθόνης μια καρτέλα. Εκεί επιλέγουμε ποια μεταβλητή εισόδου θέλουμε να εξετάσουμε παραμετρικά μέσω του **Add Simulation Parameter**. Έτσι αν για παράδειγμα θέλουμε να τρέξουμε το πρόγραμμα για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου το **Parametric Study** μας δίνει την δυνατότητα να πατήσουμε μόνο μια φορά **Run**, εξοικονομώντας χρόνο.



Σχήμα 4.3.28: Καρτέλα παραμετρικής μελέτης.

#### 4.4 Μέθοδος αξιολόγησης συλλέκτη με βάση τα αποτελέσματα του Solidworks.

Στο υποκεφάλαιο 4.3 είδαμε ότι για την προσομοίωση της ροής και της λειτουργίας του συλλέκτη υπάρχουν πολλά δεδομένα που τα εισάγει ο χρήστης. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.1 ανά κατηγορία (γεωμετρία, περιβαλλοντικές συνθήκες, υλικά, συνθήκες ροής) όπου αναγράφονται το όνομα της παραμέτρου, το σύμβολο, η μονάδα μέτρησης και μια αρχική τιμή (αν υπάρχει). Κάποιες από αυτές τις αρχικές τιμές διατηρούνται καθόλη την διάρκεια της εργασίας ενώ άλλες αλλάζουν κατά περίπτωση.

| Όνομα                                    | Σύμβολο          | Μονάδα Μέτρησης | Αρχική Τιμή |
|--|------------------|-----------------|-------------|
| <b>ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ:</b>                        |                  |                 |             |
| Σχήμα δέκτη                              | -                | -               | Μεταβλητή   |
| Απόσταση δέκτη από συγκεντρωτή           | $d_{rec}$        | mm              | Μεταβλητή   |
| <b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ:</b>                       |                  |                 |             |
| Θερμοκρασία περιβάλλοντος                | $T_{amb}$        | °C              | 21          |
| Πίεση Περιβάλλοντος                      | $P_{amb}$        | Pa              | 101325      |
| Ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας        | $G_b$            | $W/m^2$         | 1000        |
| <b>ΥΛΙΚΑ:</b>                            |                  |                 |             |
| Υλικό σωλήνα                             | -                | -               | Copper      |
| Υλικό κοιλότητας                         | -                | -               | Steel(Mild) |
| Υλικό μόνωσης                            | -                | -               | Glasswool   |
| Απορροφητικότητα δέκτη                   | $\alpha_{rec}$   | -               | 0.9         |
| Συντ. εκπομπής δέκτη                     | $\epsilon_{rec}$ | -               | Σχέση 4.5   |
| Απορροφητικότητα μόνωσης                 | $\alpha_{iso}$   | -               | 0.8         |
| Συντ. εκπομπής μόνωσης.                  | $\epsilon_{iso}$ | -               | 0.8         |
| <b>ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ:</b>                    |                  |                 |             |
| Είδος εργαζόμενου Μέσου                  | -                | -               | Μεταβλητή   |
| Παροχή μάζας                             | $m$              | kg/s            | Μεταβλητή   |
| Θερμοκρασία εισόδου                      | $T_{in}$         | °C              | Μεταβλητή   |
| Πίεση εξόδου                             | $P_{out}$        | Pa              | 101325      |
| Συντελεστής συναγωγής (με το περιβάλλον) | $h_{air}$        | $W/m^2K$        | 10          |

**Πίνακας 4.4.1: Δεδομένα εισόδου προσομοίωσης.**

Από την άλλη, με την ολοκλήρωση του τρεξίματος της προσομοίωσης, το Flow Simulation δίνει πλήθος αποτελεσμάτων. Τα κύρια αποτελέσματα που δίνει εξαρτώνται από τους στόχους (Goals) που θέτουμε εμείς οι ίδιοι και παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4.4.2. Τα αποτελέσματα αυτά δεν δίνονται μόνο με την μορφή τιμών αλλά και με την μορφή διαγραμμάτων.

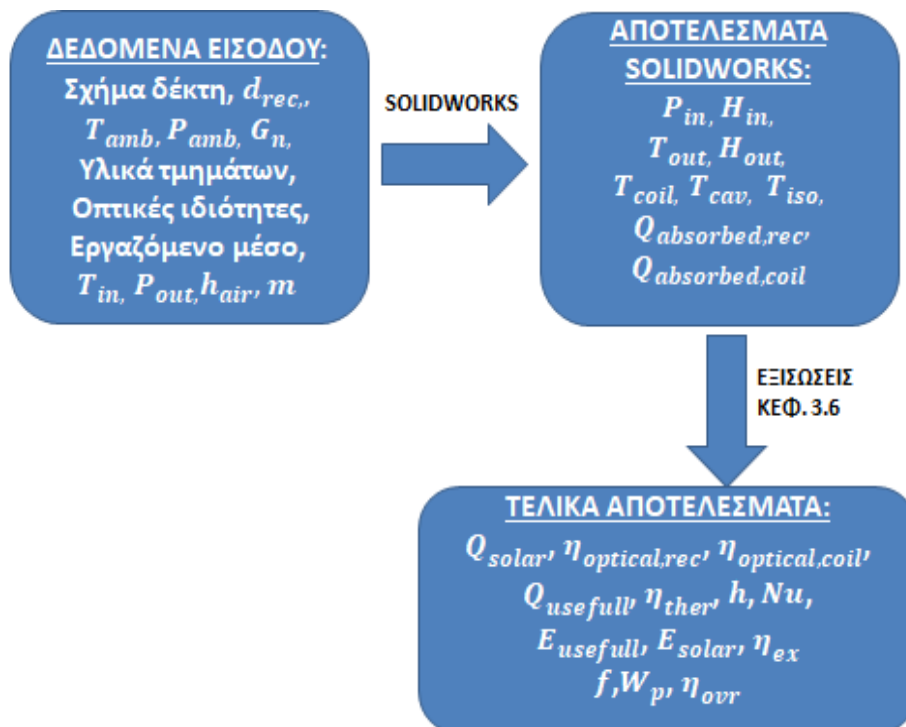
| Όνομα   | Σύμβολο             | Μονάδα Μέτρησης |
|---|---------------------|-----------------|
| Πίεση εισόδου   | $P_{in}$            | Pa              |
| Ροή ενθαλπίας του ρευστού στην είσοδο                 | $H_{in}$            | W               |
| Θερμοκρασία εξόδου                                    | $T_{out}$           | °C              |
| Ροή ενθαλπίας του ρευστού στην είσοδο                 | $H_{out}$           | W               |
| Θερμοκρασία του σωλήνα                                | $T_{coil}$          | °C              |
| Θερμοκρασία της κοιλότητας                            | $T_{cav}$           | °C              |
| Θερμοκρασία της μόνωσης                               | $T_{iso}$           | °C              |
| Απορροφούμενη ακτινοβολία από τον σωλήνα              | $Q_{absorbed,coil}$ | W               |
| Ένταση της απορροφούμενης ακτινοβολίας από τον σωλήνα | $q_{absorbed,coil}$ | $W/m^2$         |
| Απορροφούμενη ακτινοβολία από τον δέκτη               | $Q_{absorbed,rec}$  | W               |
| Ένταση της απορροφούμενης ακτινοβολίας από τον δέκτη  | $q_{absorbed,rec}$  | $W/m^2$         |

**Πίνακας 4.4.2: Άμεσα αποτελέσματα προσομοίωσης από το Solidworks.**

Τα αποτελέσματα του πίνακα 4.4.2 από μόνα τους παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον για την λειτουργία του συλλέκτη. Όμως χρησιμοποιώντας τις σχέσεις του υποκεφαλαίου 3.6 μπορούν να υπολογιστούν διάφορα χρήσιμα μεγέθη του συλλέκτη που θα βοηθήσουν στην κατανόηση της λειτουργίας του και στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του. Γνωρίζοντας τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του εκάστοτε εργαζόμενου μέσου για την μέση θερμοκρασία του ρευστού ( $T_{fm}$ ), τα βασικά μεγέθη που υπολογίζονται με την αντίστοιχη σχέση είναι:

- Διαθέσιμη ακτινοβολία στο άνοιγμα του συγκεντρωτή ( $Q_{solar}$ ) → **σχέση 3.10**
- Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη ( $\eta_{optical,rec}$ ) → **σχέση 3.8**
- Οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα ( $\eta_{optical,coil}$ ) → **σχέση 3.9**
- Ωφέλιμη ισχύς ( $Q_{usefull}$ ) → **σχέση 3.16** (ως διαφορά ροής ενθαλπιών).
- Θερμικός βαθμός απόδοσης ( $\eta_{th}$ ) → **σχέση 3.19**
- Συντελεστής συναγωγής μεταξύ του εργαζόμενου μέσου και του σωλήνα ( $h$ ) → **σχέση 3.17**
- Αριθμός Nusselt ( $Nu$ ) → **σχέση 3.20**
- Ροή εξέργειας ρευστού ( $E_{usefull}$ ) → **σχέση 3.29**
- Εξέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας ( $E_{solar}$ ) → **σχέση 3.30**
- Εξεργειακός βαθμός απόδοσης ( $\eta_{ex}$ ) → **σχέση 3.31**
- Συντελεστής τριβής ( $f$ ) → **σχέση 3.32**
- Έργο αντλίας ( $W_p$ ) → **σχέση 3.34**
- Ολικός βαθμός απόδοσης ( $\eta_{ovr}$ ) → **σχέση 3.35**

Συνολικά στο σχήμα 4.4.1 δίνονται υπό μορφή σχεδιαγράμματος η πορεία των υπολογισμών των βασικών μεγεθών του συλλέκτη.



Σχήμα 4.4.1: Σχεδιάγραμμα πορείας υπολογισμών βασικών μεγεθών.

#### 4.5 Ανεξαρτησία πλέγματος και ηλιακών ακτινών.

Η επιλογή του κατάλληλου αριθμού ηλιακών ακτινών ( $N_{rays}$ ) για το πρόγραμμα προσομοίωσης επηρεάζει την εγκυρότητα του μοντέλου, γιατί εάν είναι μικρότερος από όσο πρέπει θα υπάρξουν σφάλματα στην οπτική ανάλυσή του. Για να ορίσουμε τον κατάλληλο αριθμό τρέχουμε έναν κυλινδρικό δέκτη με εργαζόμενο μέσο νερό για διάφορες τιμές  $N_{rays}$ . Η σύγκλιση εξετάζεται ελέγχοντας την τιμή της απορροφούμενης ακτινοβολίας από τον δέκτη ( $Q_{absorbed,rec}$ ). Η επιλογή της  $Q_{absorbed,rec}$  έγινε διότι το μέγεθος αυτό δεν εξαρτάται από το υπολογιστικό πλέγμα και εξαρτάται άμεσα από το πλήθος των ακτινών.

| Αριθμός ηλιακών ακτινών ( $N_{rays}$ ) | Απορροφούμενη ακτινοβολία από τον δέκτη ( $Q_{absorbed,rec}$ ) |
|--|--|
| 5000                                   | 934.6  |
| 50000                                  | 950.1  |
| 500000                                 | 947.0  |
| 1000000                                | 948.9  |
| 2000000                                | 948.5  |
| 3000000                                | 948.5  |

**Πίνακας 4.5.1: Ανεξαρτησία πλήθους ηλιακών ακτινών.**

Από τον πίνακα 4.5.1 παρατηρώ ότι υπάρχει σύγκλιση για αριθμό ηλιακών ακτινών:  $N_{rays}=2000000$ . Η τιμή αυτή θα εφαρμοσθεί σε όλες τις προσομοιώσεις που ακολουθούν.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την ακρίβεια του μοντέλου είναι το υπολογιστικό πλέγμα. Η πυκνωση του πλέγματος επηρεάζει τόσο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων όσο και τον υπολογιστικό χρόνο, τον χρόνο δηλαδή που χρειάζεται για να ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί. Όσο πιο πυκνό το πλέγμα τόσο η λύση πλησιάζει στην πραγματική με ταυτόχρονη όμως αύξηση του υπολογιστικού κόστους. Άρα στόχος της ανεξαρτησίας πλέγματος είναι να βρεθεί η ελάχιστη πυκνωση ώστε η λύση να είναι ανεξάρτητη του πλέγματος και με τον ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό χρόνο. Τρέχουμε κυλινδρικό δέκτη με εργαζόμενο μέσο νερό μεταβάλλοντας τα κελιά του αρχικού πλέγματος (Initial Mesh) στους τρεις άξονες. Τα πλέγματα τα οποία δοκιμάστηκαν ήταν: 40x40x40, 60x60x60, 80x80x80, 100x100x100, 120x120x120 και 130x130x130. Σε όλες τις περιπτώσεις το τοπικό πλέγμα στον σωλήνα (Local Initial Mesh) ήταν το ίδιο με Refine Fluid cells και Refine partial cells στο επίπεδο 2. Τρέχοντας τις περιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5.2 οι υπολογισμοί βασικών παραμέτρων καθώς και ο συνολικός αριθμός των κελιών για κάθε περίπτωση.

| Πλέγμα→              | X=40<br>Y=40<br>Z=40 | X=60<br>Y=60<br>Z=60 | X=80<br>Y=80<br>Z=80 | X=100<br>Y=100<br>Z=100 | X=120<br>Y=120<br>Z=120 | X=130<br>Y=130<br>Z=130 |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Κελιά                | 71746                | 229314               | 543689               | 1050645                 | 1802921                 | 2281728                 |
| $T_{out}$ (K)        | 300.3                | 300.5                | 300.5                | 300.5                   | 300.5                   | 300.5                   |
| $T_{coil}$ (K)       | 300.7                | 299.3                | 299.1                | 299.1                   | 299.2                   | 299.3                   |
| $\eta_{optical,rec}$ | 56.4%                | 56.8%                | 56.5%                | 56.4%                   | 56.6%                   | 56.6%                   |
| $\eta_{ther}$        | 50.5%                | 52.2%                | 52.2%                | 52.3%                   | 52.6%                   | 52.5%                   |
| f                    | 0.71                 | 0.14                 | 0.08                 | 0.05                    | 0.04                    | 0.04                    |

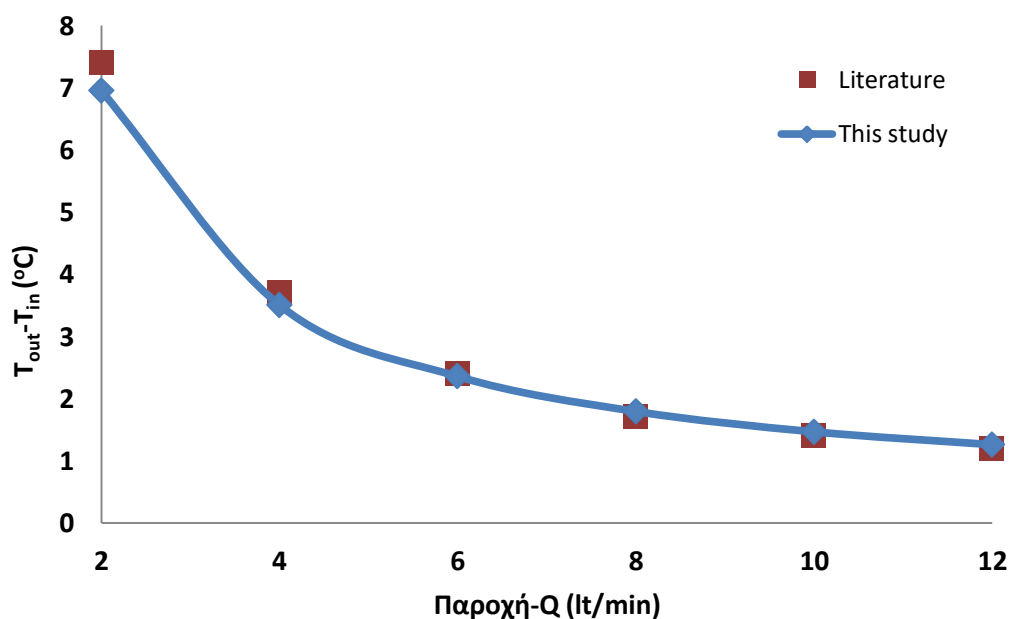
**Πίνακας 4.5.2: Ανεξαρτησία υπολογιστικού πλέγματος.**



Διαπιστώνεται πώς όλες οι παράμετροι συγκλίνουν απόλυτα ή με πολύ μικρό σφάλμα στο πλέγμα 120x120x120 με αριθμό κελιών ανά άξονα: X=120, Y=120, Z=120. Το πλέγμα αυτό μαζί με την πύκνωση στο τοπικό πλέγμα στο επίπεδο 2 διατηρείται σε όλες τις προσομοιώσεις που ακολουθούν.

#### 4.6 Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλου.

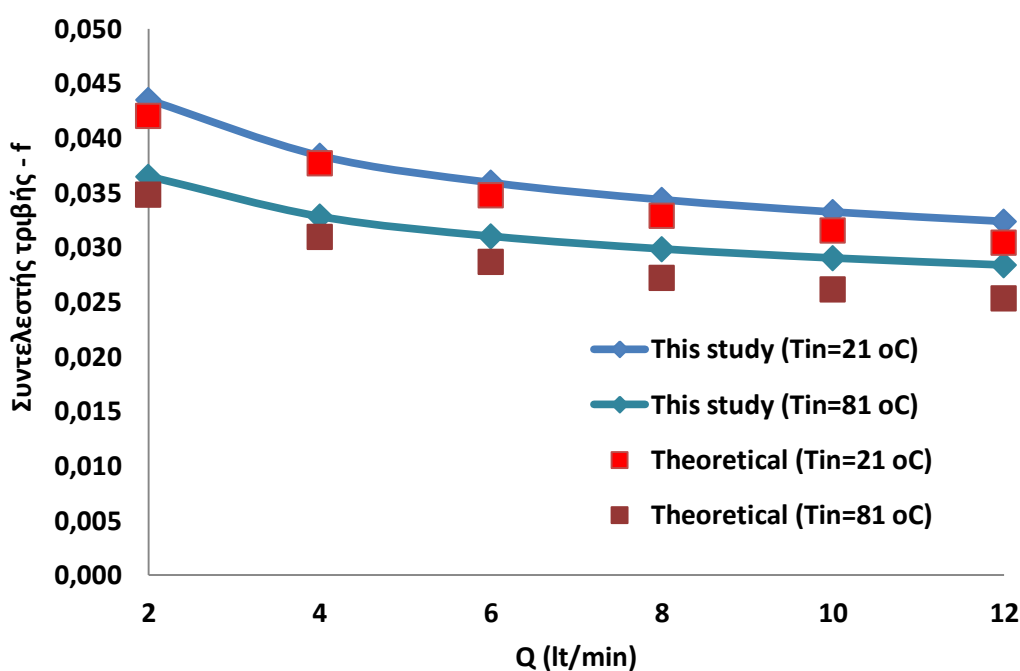
Σημαντική για την αξιοπιστία του μοντέλου είναι ο έλεγχος εγκυρότητας, δηλαδή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με αυτά άλλων ερευνητών. Στην παρούσα εργασία τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με την πειραματική μελέτη συλλέκτη με κυλινδρικό δέκτη από τους Azzouzi et al [4.1], διότι έχει τον ίδιο συγκεντρωτή με αυτόν της παρούσας μελέτης. Για να προσεγγίσουμε ακόμη περισσότερο τον συλλέκτη που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία δώσαμε στον κυλινδρικό δέκτη τις ίδιες διαστάσεις, δημιουργήσαμε στο Engineering Database υλικά και οπτικές ιδιότητες όμοιες με την μελέτη και εισάγαμε ως δεδομένα εισόδου τις ίδιες παραμέτρους. Αφού τρέξαμε για διάφορες τιμές της παροχής όγκου του νερού  $V$  (lt/min) και θερμοκρασία εισόδου ( $T_{in}=21$  °C), συγκρίναμε την αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού  $\Delta T$  ( $T_{out}-T_{in}$ ) σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα (σχήμα 4.6.1). Η μέση απόκλιση είναι 4.7%, κάτι που δείχνει ότι το μοντέλο μας είναι έγκυρο.



**Σχήμα 4.6.1: Σύγκριση της διαφοράς θερμοκρασίας του ρευστού ( $T_{out}-T_{in}$ ) αυτής της παρούσας μελέτης (This study) με πειραματικές τιμές από την βιβλιογραφία (Literature) [4.1], για κυλινδρικό δέκτη.**

Όμως είδαμε στην υποενότητα 3.5 οι παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία του παραβολοειδούς συλλέκτη είναι πάρα πολλοί και άρα είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν άλλες μελέτες (ιδίως πειραματικές) με συλλέκτες όμοιο με τον δικό μας για να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτό καταφεύγουμε στην βιβλιογραφία για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις τιμές που θα έπρεπε να προκύψουν σύμφωνα με την θεωρία.

Το πρώτο μέγεθος που εξετάζεται είναι ο συντελεστής τριβής  $f$ , ένα μέγεθος σημαντικό αφού μας δείχνει το μέγεθος των υδραυλικών απωλειών στην ροή. Συγκρίνουμε τον συντελεστή τριβής  $f$  της προσομοίωσης (This study) που προκύπτει από την σχέση 3.32, με τον συντελεστή τριβής σύμφωνα με την θεωρία (Theoretical) που προκύπτει από την σχέση 3.33 των Mishra and Gurta [4.5]. Συγκεκριμένα τρέχουμε την προσομοίωση σε κυλινδρικό δέκτη, με εργαζόμενο μέσο νερό, μεταβλητή παροχή όγκου και σε δύο θερμοκρασίες μια χαμηλή ( $T_{in}=21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) και μια υψηλή ( $T_{in}=81\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), (το νερό έχει ανώτερο όριο τους  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 4.6.2. Η μέση απόκλιση του συντελεστή τριβής από αυτόν της θεωρίας είναι 4.13% για  $T_{in}=21\text{ }^{\circ}\text{C}$  και 8.64 % για  $T_{in}=81\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Οι τιμές αυτές κρίνονται ικανοποιητικές αν λάβουμε υπόψη πώς η σχέση 3.33 είναι μια εμπειρική σχέση που αφορά κάθε ροή σε ελικοειδή σωλήνα.



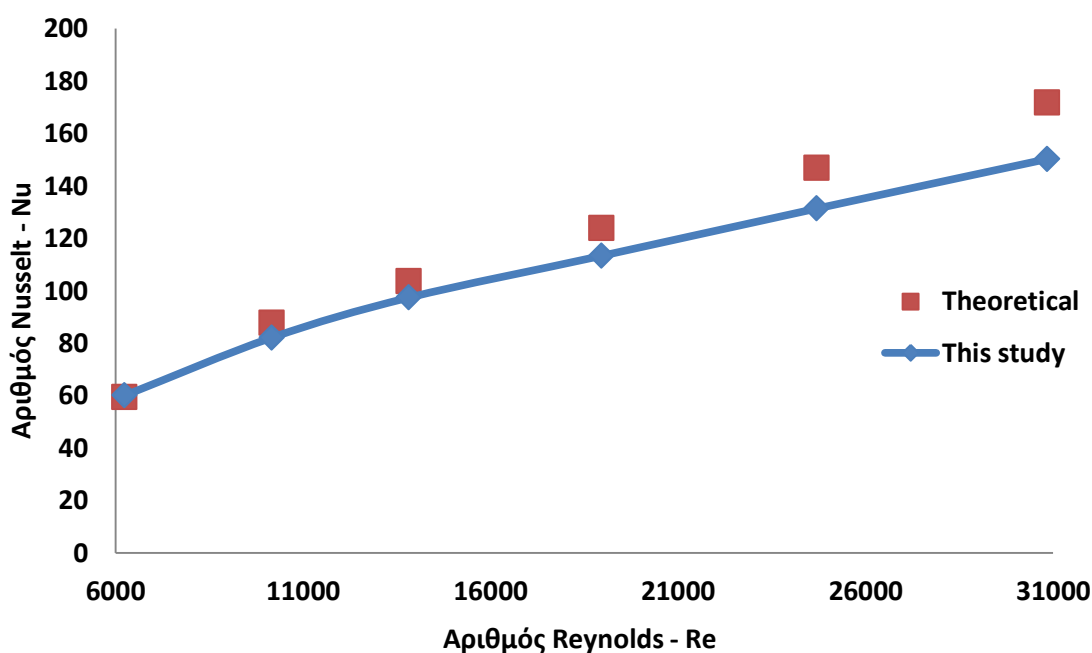
**Σχήμα 4.6.2:** Σύγκριση συντελεστή τριβής  $f$  αυτής της μελέτης (This study) με θεωρητικές τιμές (Theoretical) για κυλινδρικό δέκτη, διάφορες παροχές όγκου και θερμοκρασίες εισόδου.

Επόμενο μέγεθος που εξετάζεται είναι ο αριθμός Nusselt, ένας ακόμη σημαντικός αριθμός που εκφράζει τον λόγο των συντελεστών συναγωγής και αγωγής της ροής. Συγκρίνουμε τον αριθμό Nusselt ( $Nu$ ) αυτής της εργασίας (this study) από την σχέση 3.20 με τον αριθμό Nusselt σύμφωνα με την θεωρία (theoretical) από σχέσεις 3.24 για την στρωτή ροή ( $Re < 2300$ ), 3.25 για την πλήρως τυρβώδη ροή ( $Re > 10^4$ ) και 3.26 για την μεταβατική περιοχή ( $2300 < Re < 10^4$ ).

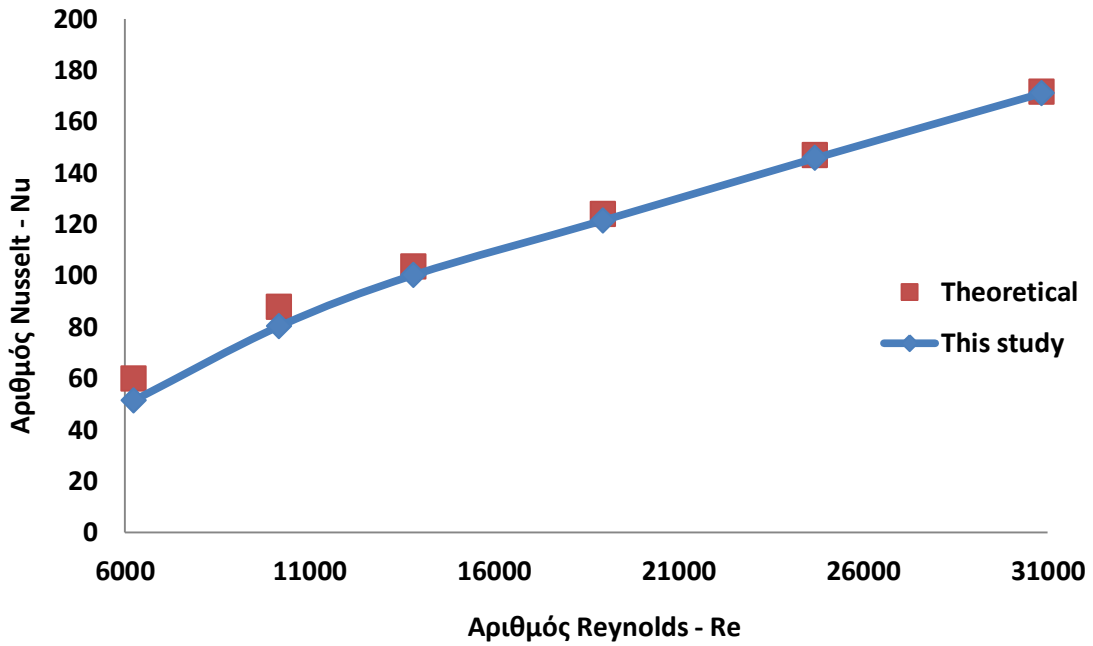
Μέχρι τώρα έχουμε κάνει τους ελέγχους για την περίπτωση του κυλινδρικού δέκτη με εργαζόμενο μέσο νερό, που έδειξαν την εγκυρότητα του μοντέλου. Για λόγους πληρότητας ο έλεγχος για τον αριθμό Nusselt θα γίνει για τέσσερις διαφορετικούς δέκτες με εργαζόμενο μέσο το έλαιο Therminol VP-1. Συγκεκριμένα τρέχουμε την προσομοίωση για τέσσερα σχήματα (κύλινδρος, κώνος, σφαίρα, ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο) με εργαζόμενο μέσο Therminol VP-1, παροχή μάζας  $m=0.03\text{ kg/s}$  και μεταβλητή θερμοκρασία εισόδου από  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

έως 350°C. Πρέπει να επισημανθεί πώς εξετάστηκαν οι βέλτιστοι δέκτες από κάθε σχήμα, όπως θα περιγραφτούν στην υποενότητα 5.1. Στα σχήματα που ακολουθούν επιλέγουμε τον αριθμό Reynolds ως παράγοντα στον οριζόντιο άξονα, καθώς αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό αδιάστατο αριθμό που μας δείχνει τον λόγο των αδρανειακών προς τις συνεκτικές δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό καθώς και το είδος της ροής.

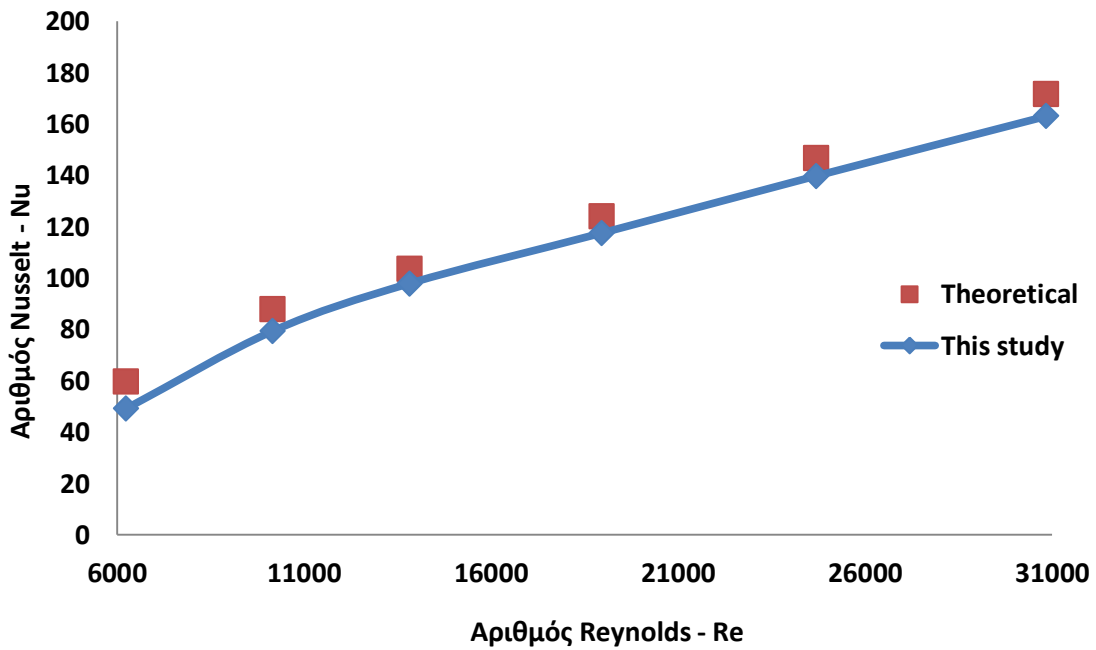
Το βασικότερο συμπέρασμα από τα σχήματα που ακολουθούν είναι πώς η μέση τυπική απόκλιση είναι 8.27% για τον κυλινδρικό δέκτη (σχήμα 4.6.3), 5.27% για τον κωνικό δέκτη (σχήμα 4.6.4), 8.91% για τον σφαιρικό δέκτη (σχήμα 4.6.5) και 9.47% για τον ορθογωνικό δέκτη (σχήμα 4.6.6). Επιπλέον παρατηρούμε πώς ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται από 6000 έως 31000 και άρα βρισκόμαστε είτε στην μεταβατική είτε στην τυρβώδη ροή. Με εξαίρεση το κυλινδρικό δέκτη, στα υπόλοιπα σχήματα η απόκλιση των τιμών στην μεταβατική περιοχή είναι μεγαλύτερη. Είναι σημαντικό πώς η μέση τιμή των αποκλίσεων είναι κάτω από 10%, δείχνοντας πώς το μοντέλο είναι έγκυρο για οποιοδήποτε σχήμα του δέκτη. Η διαφορά είναι αποδεκτή καθώς οι σχέσεις 3.25 και 3.26 είναι προσεγγίσεις και εμπεριέχουν σφάλμα.



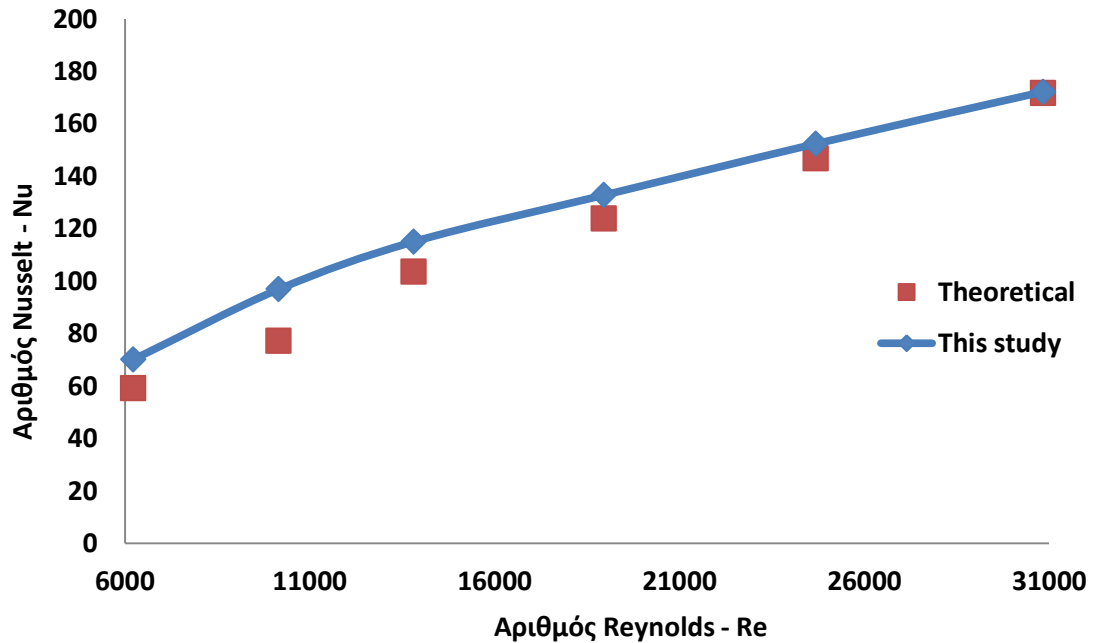
Σχήμα 4.6.3: Σύγκριση αριθμού Nusselt (Nu) αυτής της μελέτης (This study) με θεωρητικές τιμές (Theoretical) για ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ δέκτη.



Σχήμα 4.6.4: Σύγκριση αριθμού Nusselt (Nu) αυτής της μελέτης (This study) με θεωρητικές τιμές (Theoretical) για ΚΩΝΙΚΟ δέκτη.



Σχήμα 4.6.5: Σύγκριση αριθμού Nusselt (Nu) αυτής της μελέτης (This study) με θεωρητικές τιμές (Theoretical) για ΣΦΑΙΡΙΚΟ δέκτη.



**Σχήμα 4.6.6:** Σύγκριση αριθμού Nusselt (Nu) αυτής της μελέτης (This study) με θεωρητικές τιμές (Theoretical) για ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ δέκτη.

Τελικά η σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει το μοντέλο μας, είτε με πειραματικά αποτελέσματα από την βιβλιογραφία, είτε με αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή εξισώσεων της θεωρίας, έδειξε πώς οι αποκλίσεις είναι μέσα σε επιτρεπτά όρια. Αυτό σημαίνει πώς το μοντέλο κρίνεται έγκυρο και τα αποτελέσματα που θα δοθούν στο επόμενο κεφάλαιο ακριβή.

**Βιβλιογραφία 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου.**

[4.1] D. Azzouzi, B.Boumeddane, A. Abene. Experimental and analytical thermal analysis of cylindrical cavity receiver for solar dish. *Renewable Energy* 2017;106:111-121.

[4.2] <http://tw.t.mpei.ac.ru/tthb/hedh/htf-vp1.pdf>

[4.3] A.B. Zavoico. Solar Power Tower-Design Basis Document, Revision 0. Sandia National Laboratories, New Mexico 2001.

[4.4] R. Forristall. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado 2003.

[4.5] VDI Heat Atlas-Second Edition. Springer, Dusseldorf 2010.

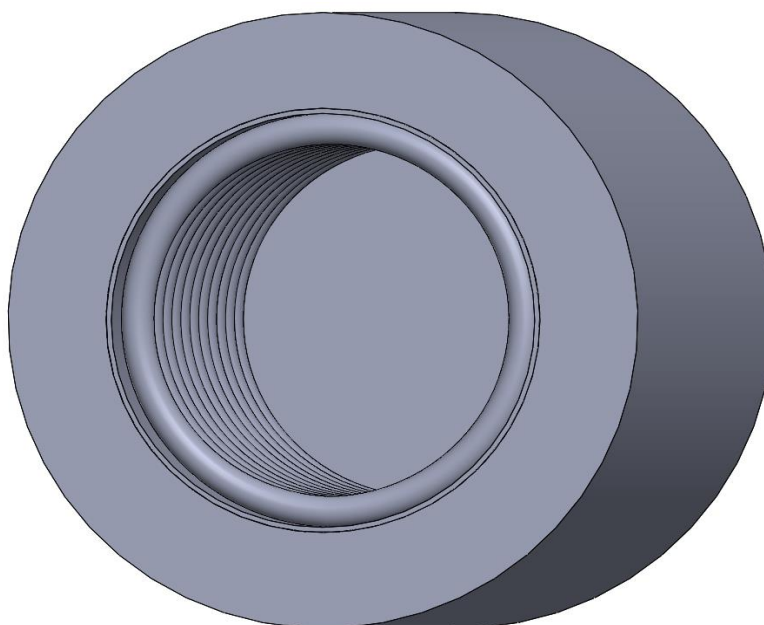
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα.

### 5.1 Σχεδίαση, μελέτη και βελτιστοποίηση δεκτών διάφορων σχημάτων.

Η βασικότερη παράμετρος σε ένα δέκτη τύπου κοιλότητας είναι το σχήμα του. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν δέκτες διάφορων σχημάτων στο Solidworks (κυλινδρικό, κωνικό, σφαιρικό, ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο και κωνοκυλινδρικού). Για το κάθε σχήμα βρέθηκαν οι βέλτιστες διαστάσεις και η βέλτιστη απόσταση από τον συγκεντρωτή ελέγχοντας την θερμική, οπτική και εξεργειακή απόδοση. Για να εξετάσουμε αυτές τις παραμέτρους τρέξαμε την προσομοίωση με εργαζόμενο μέσο το έλαιο Therminol-VP1, για μια τυπική παροχή μάζας ( $m=0.03 \text{ kg/s}$ ) και θερμοκρασίας εισόδου ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Μεταβλητές παράμετροι ήταν το σχήμα του δέκτη σε πρώτη φάση και η θέση του δέκτη σε δεύτερη.

#### 5.1.1 Κύλινδρος.

Ο πρώτος δέκτης που εξετάζεται είναι αυτός του κυλινδρικού σχήματος, που αποτελεί μία από τις πιο συνηθισμένες μορφές. Στα σχήματα 5.1.1 και 5.1.2 φαίνονται τα τρισδιάστατα σχήματα του δέκτη συνολικά και του σωλήνα αντίστοιχα, όπως σχεδιάστηκαν στο Solidworks.



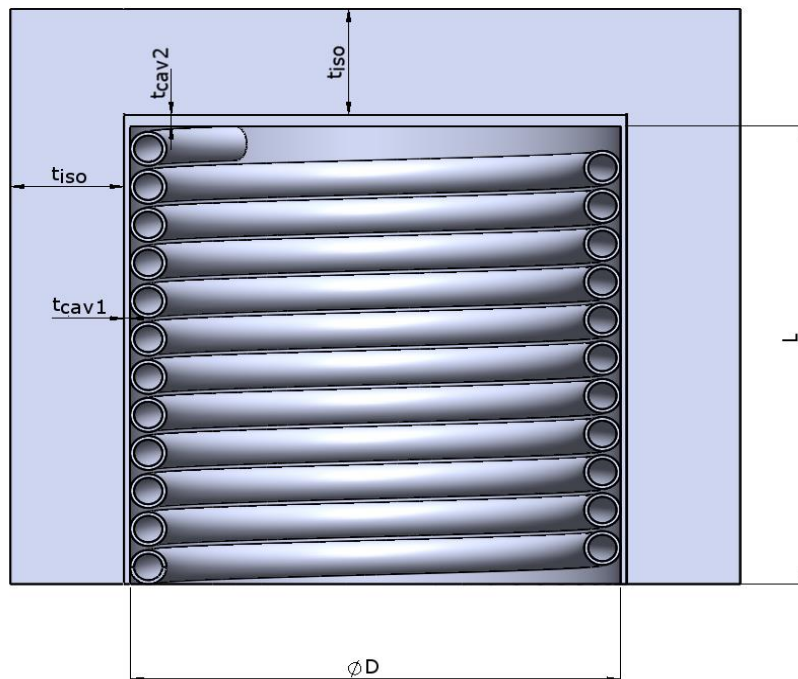
Σχήμα 5.1.1: 3D σχήμα δέκτη κυλινδρικής μορφής.





**Σχήμα 5.1.2: 3D σχήμα σωλήνα του κυλινδρικού δέκτη.**

Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη φαίνονται στο σχήμα 5.1.3 και οι αντίστοιχες τιμές τους στον πίνακα 5.1.1. Το άνοιγμα του δέκτη ( $D$ ), τα πάχη της κοιλότητας και της μόνωσης, η διάμετρος του σωλήνα και το βήμα της έλικας είναι ίδια με τον πειραματικό δέκτη των Azzouzi et al [5.1]. Τα μεγέθη αυτά διατηρούνται αμετάβλητα σε όλα τα είδη σχημάτων.



**Σχήμα 5.1.3: Τομή κυλινδρικού δέκτη και βασικές γεωμετρικές διαστάσεις.**

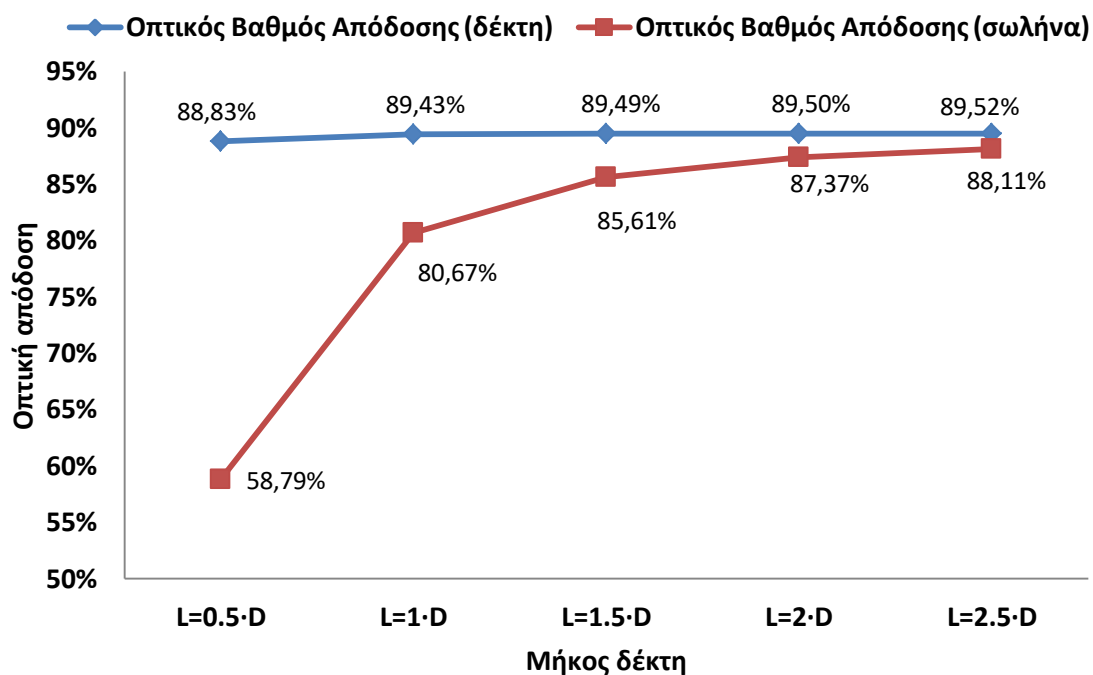
| Μέγεθος                    | Σύμβολο        | Τιμή (mm) |
|----------------------------|----------------|-----------|
| Μήκος δέκτη                | L              | Μεταβλητό |
| Διάμετρος δέκτη            | D              | 121       |
| Πάχος κοιλότητας (πλάγια)  | $t_{cav1}$     | 1.5       |
| Πάχος κοιλότητας (πίσω)    | $t_{cav2}$     | 3         |
| Πάχος μόνωσης              | $t_{iso}$      | 28        |
| Εσωτερική διάμετρος σωλήνα | $D_{coil,in}$  | 7         |
| Εξωτερική διάμετρος σωλήνα | $D_{coil,out}$ | 9         |
| Βήμα έλικας                | $p$            | 10.05     |

Πίνακας 5.1.1: Βασικές διαστάσεις κυλινδρικού δέκτη.

Κρατώντας σταθερό το άνοιγμα του δέκτη (D), μελετήσαμε την επίδραση του μήκους του δέκτη (L) στην απόδοση του συλλέκτη με στόχο να βρεθεί το βέλτιστο μήκος του. Η σχέση μεταξύ του μήκους και του ανοίγματος του δέκτη αποτελεί την βασικότερη γεωμετρική παράμετρο για έναν δέκτη τύπου κοιλότητας, καθώς επηρεάζει σημαντικά την απόδοση. Η επίδραση των άλλων γεωμετρικών μεγεθών στην οπτική και θερμική απόδοση δεν είναι τόσο σημαντική και για αυτό οι τιμές τους παραμένουν σταθερές και ίσες με τυπικές τιμές. Επίσης πρέπει να επισημανθεί ότι μεταβάλλοντας το μήκος του δέκτη μεταβάλλουμε και το μήκος του ελικοειδούς σωλήνα καθώς ο σωλήνας εφάπτεται της κοιλότητας. Τελικά συμπεραίνουμε πώς η εύρεση του βέλτιστου μήκους του δέκτη συνεπάγεται σε μεγάλο βαθμό και την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας συνολικά του δέκτη. Για τον λόγο αυτό κρατώντας σταθερά τα μεγέθη του πίνακα 5.1.1 τρέξαμε την προσομοίωση για πέντε διαφορετικές περιπτώσεις,  $L=0.5 \cdot D$ ,  $L=1 \cdot D$ ,  $L=1.5 \cdot D$ ,  $L=2 \cdot D$  και  $L=2.5 \cdot D$ , με τον δέκτη να βρίσκεται στην εστία της παραβολής. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την οπτική, θερμική και εξεργειακή απόδοση του συλλέκτη.

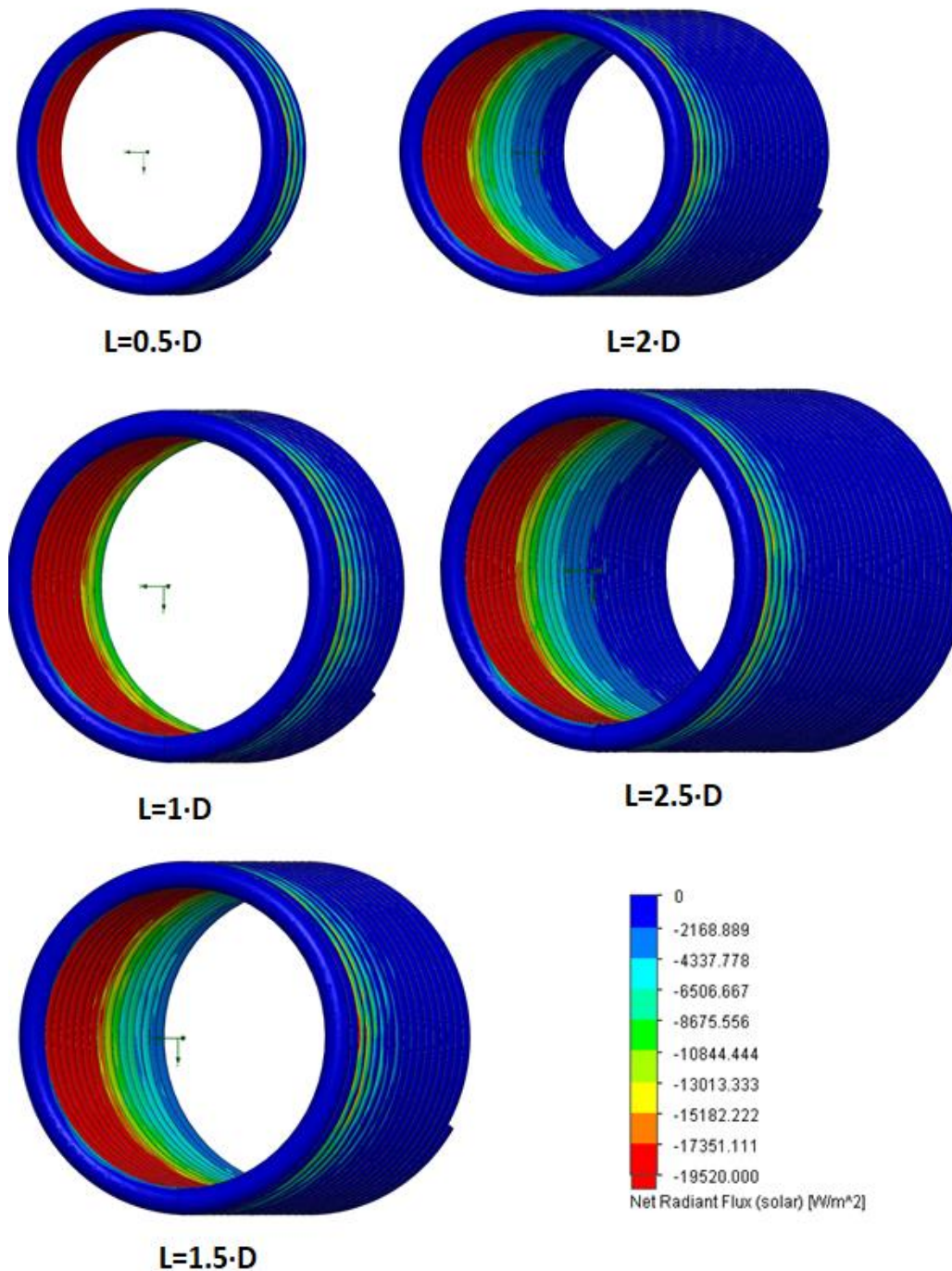
Από το σχήμα 5.1.4 φαίνεται πώς ο οπτικός βαθμός απόδοσης του δέκτη ( $\eta_{opt,rec}$ ) παραμένει σχεδόν αμετάβλητος με την αύξηση του μήκους του δέκτη. Αυτό δείχνει πώς το ποσό της συνολικής ακτινοβολίας που απορροφά ο δέκτης (κοιλότητα και σωλήνας μαζί) επηρεάζεται από το άνοιγμα του δέκτη αποκλειστικά, το οποίο παραμένει σταθερό. Η πολύ μικρή αύξηση οφείλεται στο γεγονός πώς όσο μεγαλώνει το μήκος του δέκτη τόσες περισσότερες πιθανότητες υπάρχουν οι δευτερεύουσες ανακλάσεις να μην εξέλθουν από τον δέκτη.

Από την άλλη πλευρά, ο οπτικός βαθμός απόδοσης του σωλήνα ( $\eta_{opt,coil}$ ) αυξάνεται αισθητά μέχρι  $L=1.5 \cdot D$  και στην συνέχεια τείνει να σταθεροποιηθεί. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην αύξηση της εξωτερικής επιφάνειας του σωλήνα με την αύξηση του L. Αρχικά ( $L=0.5 \cdot D$ ) η επιφάνεια δεν επαρκεί για να απορροφήσει την ακτινοβολία που εισέρχεται στον δέκτη και έτσι μεγάλο της ποσοστό απορροφάται από την κοιλότητα. Όσο η παράπλευρη επιφάνεια του σωλήνα μεγαλώνει τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας του δέκτη καταλήγει στον σωλήνα, με άνω όμως όριο που καθορίζεται από τον οπτικό βαθμό του δέκτη. Για αυτό ο  $\eta_{opt,coil}$  τείνει ασυμπτωτικά στον  $\eta_{opt,rec}$ .



**Σχήμα 5.1.4 :** Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη και οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα του δέκτη κυλινδρικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους  $L$ .

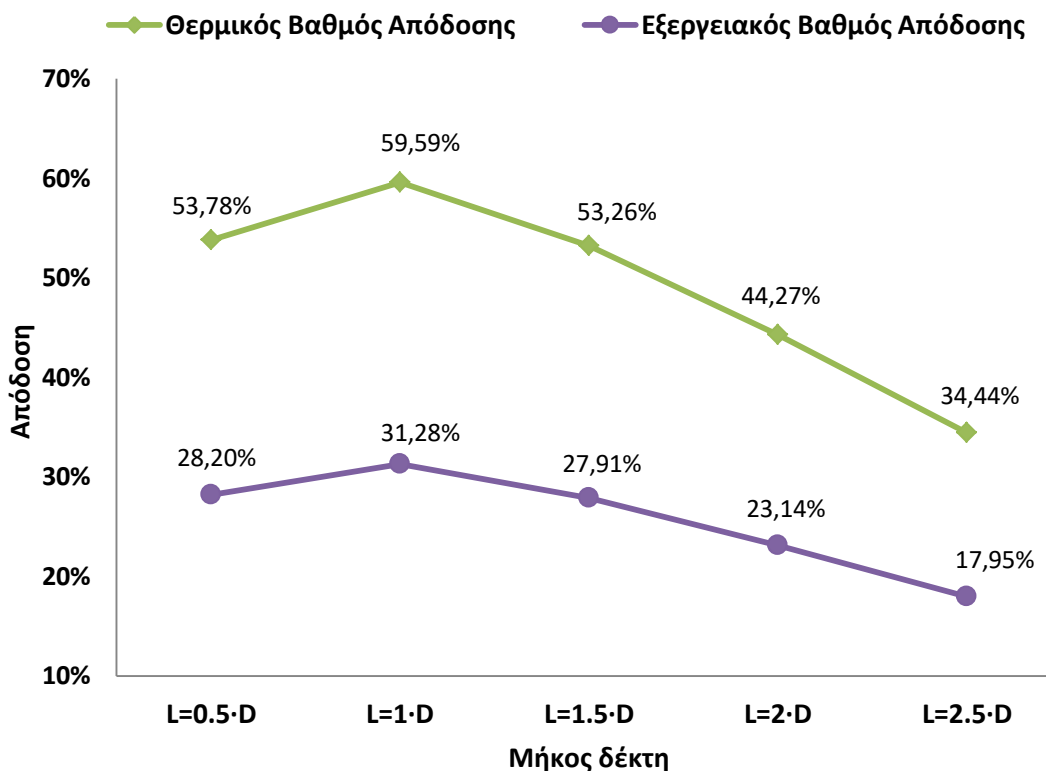
Για την οπτική μελέτη, πέρα από τον υπολογισμό της συνολικής απορροφούμενης ακτινοβολίας από τον σωλήνα είναι σημαντική και η κατανομή της ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Στο σχήμα 5.1.5 φαίνεται η κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα του κυλινδρικού δέκτη, για τα 5 διαφορετικά μήκη. Παρατηρείται πώς η ένταση της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη σε όλες της περιπτώσεις σε μια περιοχή κοντά στην είσοδο του δέκτη, κάτι που είναι λογικό αφού εκεί είναι η εστία της παραβολής, όπου συγκεντρώνεται η ακτινοβολία. Όσο απομακρυνόμαστε από την εστία η ένταση πέφτει. Αυτός είναι ο λόγος που για μεγάλα μήκη δεκτών η ένταση της ακτινοβολίας στο βάθος του δέκτη μειώνεται δραστικά. Μια τέτοια ανομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας δεν είναι επιθυμητή διότι μειώνει την θερμική απόδοση του δέκτη και ταυτόχρονα υπάρχει καταπόνηση των τοιχωμάτων, λόγω της ανάπτυξης θερμικών τάσεων. Ομοιόμορφη κατανομή στο μεγαλύτερο μήκος το δέκτη, φαίνεται να επιτυγχάνεται για  $L=0.5 \cdot D$  και για  $L=1 \cdot D$ .



**Σχήμα 5.1.5:** Κατανομή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα δεκτών κυλινδρικού σχήματος .

Στο σχήμα 5.1.6 παρατηρείται μεγιστοποίηση του θερμικού και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης για  $L=D$ . Είδαμε πριν ότι αύξηση της επιφάνειας του σωλήνα οδηγεί σε αύξηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας, ταυτόχρονα όμως αυξάνονται και οι θερμικές απώλειες. Για  $L>D$ , λόγω των μεγάλων επιφανειών, οι θερμικές απώλειες είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις οπτικές απώλειες με αποτέλεσμα να μειώνεται τελικά αισθητά ο θερμικός βαθμός απόδοσης. Για  $L<D$ , αν και οι θερμικές απώλειες είναι μικρές, εντούτοις ο θερμικός βαθμός μειώνεται λόγω της πολύ μικρής απορροφούμενης ακτινοβολίας, δηλαδή στην περιοχή αυτή υπερिσχύει η επίδραση των οπτικών απωλειών. Άρα στόχος είναι η

επιφάνεια του σωλήνα να είναι από την μια αρκετή για να συλλάβει την διαθέσιμη ακτινοβολία και από την άλλη όσο γίνεται μικρότερη για να μειωθούν οι θερμικές απώλειες, κάτι που συμβαίνει για  $L=1 \cdot D$ . Η μεγιστοποίηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης για  $L=1 \cdot D$  οφείλεται κυρίως στην μεγιστοποίηση της ωφέλιμης ισχύος. Δευτερεύον παράγοντας είναι η αύξηση της πτώσης πίεσης με την αύξηση του μήκους του δέκτη (σχήμα 5.1.7).

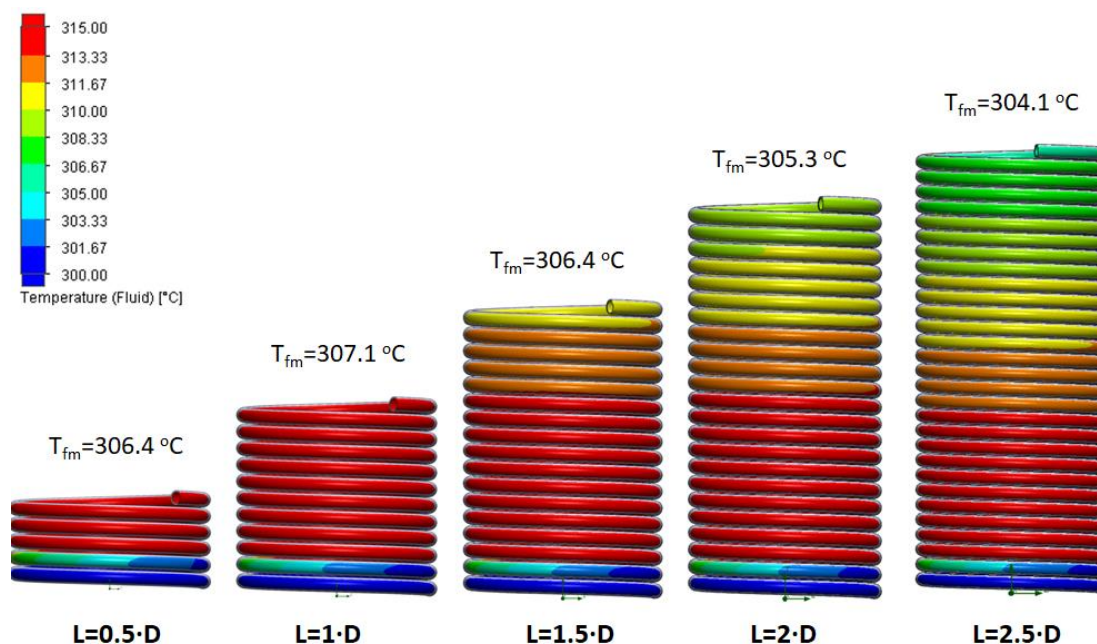


**Σχήμα 5.1.6 :** Θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης του δέκτη κυλινδρικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους  $L$  ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).

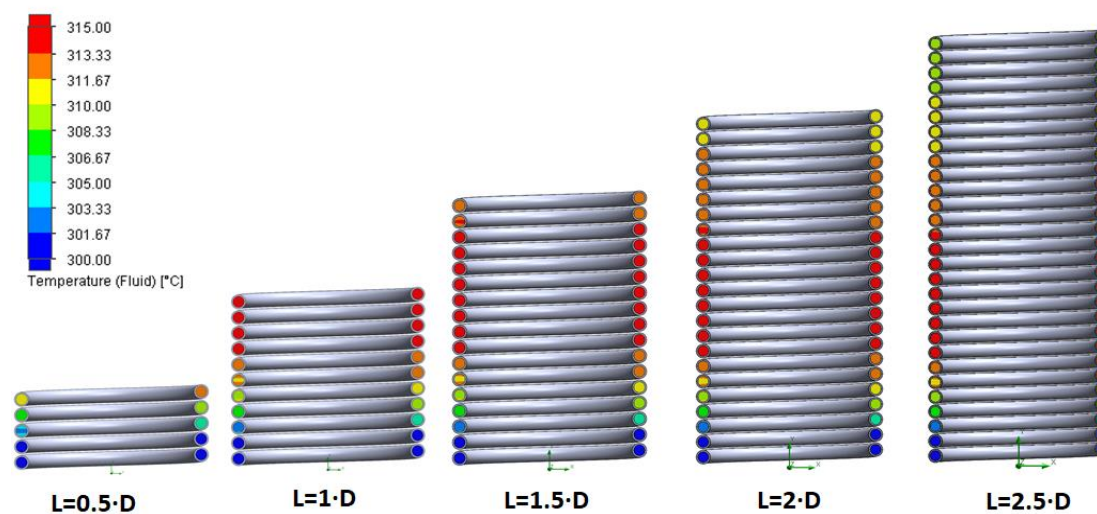
Παρακάτω θα παρουσιαστούν μεγέθη που εξηγούν την θερμική και εξεργειακή συμπεριφορά όπως οι θερμοκρασίες του ρευστού και του σωλήνα, η ωφέλιμη ισχύς, ο συντελεστής συναγωγής και η πτώση πίεσης.

Στα σχήματα 5.1.7 και 5.1.8 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας του ρευστού και η μέση τιμή της ( $T_{fm}$ ) κατά μήκος του σωλήνα και σε τομές του σωλήνα αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι για  $L=1 \cdot D$  ο σωλήνας έχει το κατάλληλο μήκος για να εξέλθει το ρευστό με την μεγαλύτερη θερμοκρασία εξόδου και την πιο ομοιόμορφη κατανομή. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με την μεγιστοποίηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.



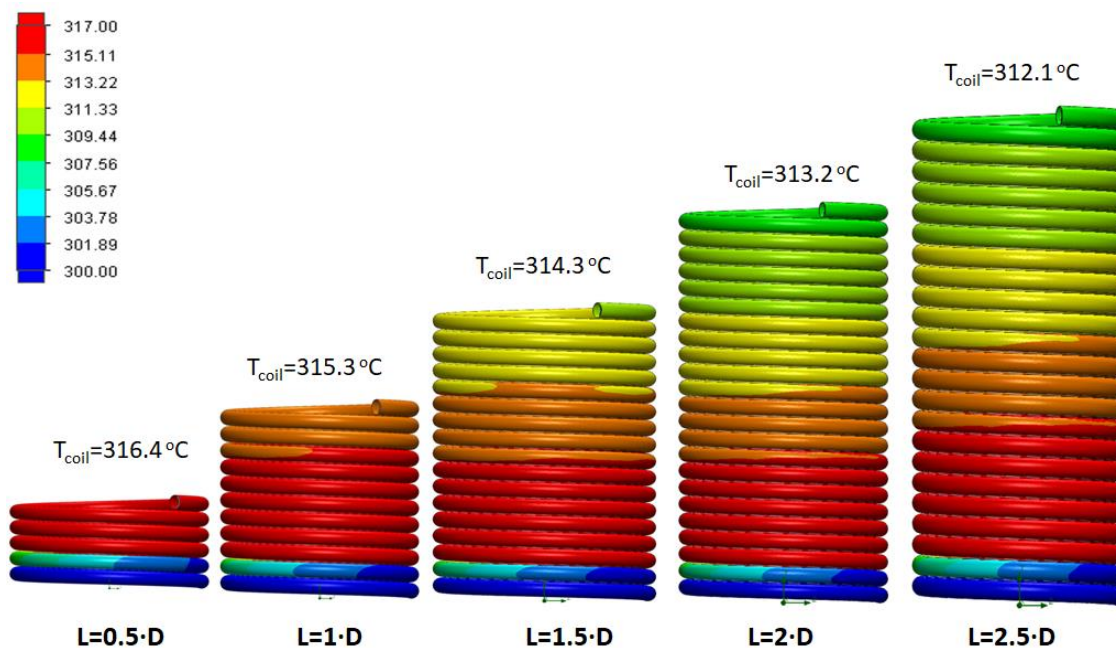


**Σχήμα 5.1.7:** Κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα κυλινδρικού δέκτη και μέση θερμοκρασία ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).



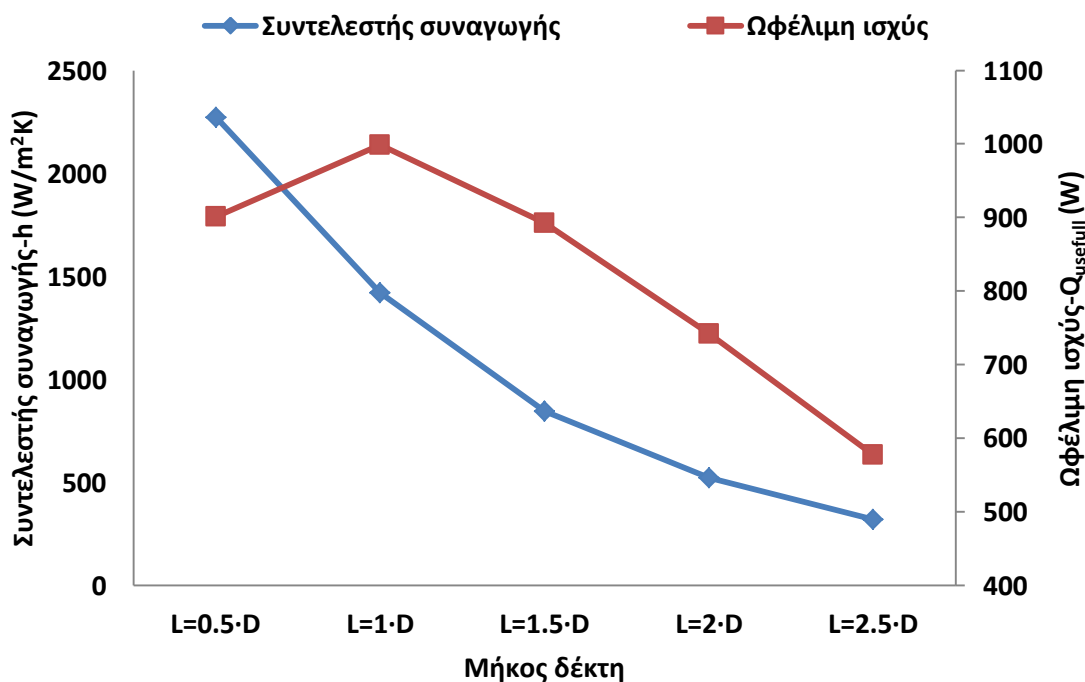
**Σχήμα 5.1.8:** Κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού σε τομές του σωλήνα κυλινδρικού δέκτη ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

Στο σχήμα 5.1.9 δίνεται η κατανομή και η μέση τιμή της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων του σωλήνα ( $T_{coil}$ ), η τιμή της οποίας φαίνεται να είναι αντίστροφη της επιφάνειας. Δηλαδή όσο μικρότερη επιφάνεια τόσο μεγαλύτερες θερμοκρασίες αναπτύσσονται στα τοιχώματα. Όσον αφορά την κατανομή είναι αντίστοιχη με αυτή της θερμοκρασίας του ρευστού. Επίσης πρέπει να τονιστεί πώς ο συνδυασμός μικρής επιφάνειας και μεγάλης ακτινοβολίας στο τοιχώματα της κοιλότητας έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών στα τοιχώματα της κοιλότητας για  $L=0.5\cdot D$ , ειδικά στο πίσω μέρος. Οι υψηλές θερμοκρασίες όμως μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού, λόγω υπερθέρμανσης.



Σχήμα 5.1.9: Κατανομή θερμοκρασίας του τοιχώματος του σωλήνα κυλινδρικού δέκτη ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

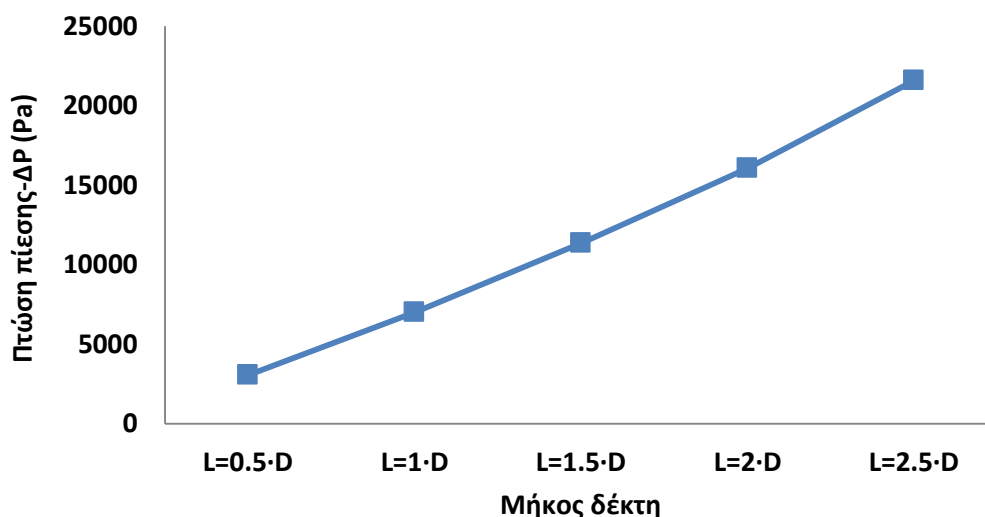
Το σχήμα 5.1.10 δείχνει την μεγιστοποίηση της ωφέλιμης ισχύος για  $L=1\cdot D$  και την μείωση του συντελεστή συναγωγής με την αύξηση του μήκους του σωλήνα. Για  $L>1\cdot D$  το  $h$  μειώνεται λόγω αύξησης της επιφάνειας και μείωσης της ωφέλιμης ισχύος που αντιτίθεται στην μείωση της διαφοράς  $T_{coil}-T_{fm}$  (σχέση 3.17). Το  $L=0.5\cdot D$  έχει μεγαλύτερο  $h$  από το  $L=1\cdot D$  λόγω της μικρότερης εσωτερικής επιφάνειας σωλήνα.



Σχήμα 5.1.10: Συντελεστής συναγωγής και ωφέλιμη ισχύς του δέκτη κυλινδρικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους  $L$  ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

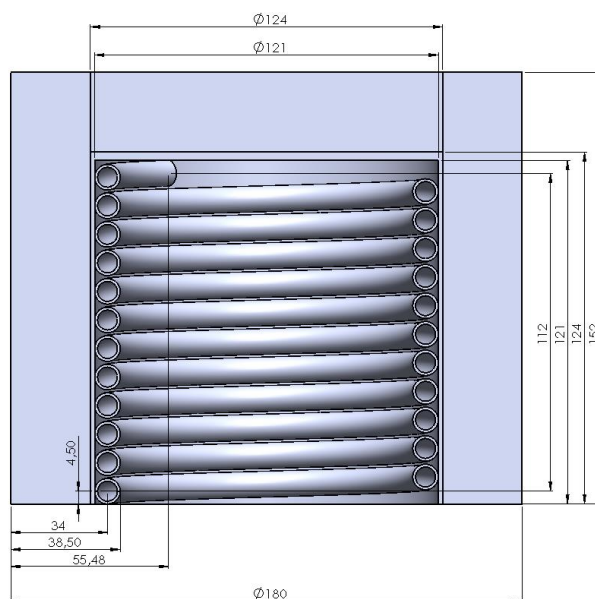


Τέλος στο σχήμα 5.1.11 φαίνεται η σχεδόν γραμμική αύξηση της πτώσης πίεσης, με αύξηση του μήκους του δέκτη. Η αύξηση του μήκους του δέκτη (συνεπώς και του μήκους του σωλήνα) οδηγεί το ρευστό σε μεγαλύτερες απώλειες πίεσης αφού έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Η γραμμικότητα οφείλεται στην γραμμική αύξηση του μήκους του σωλήνα. Οι μεγαλύτερες απώλειες πίεσης σημαίνουν και μεγαλύτερη κατανάλωση της αντλίας.



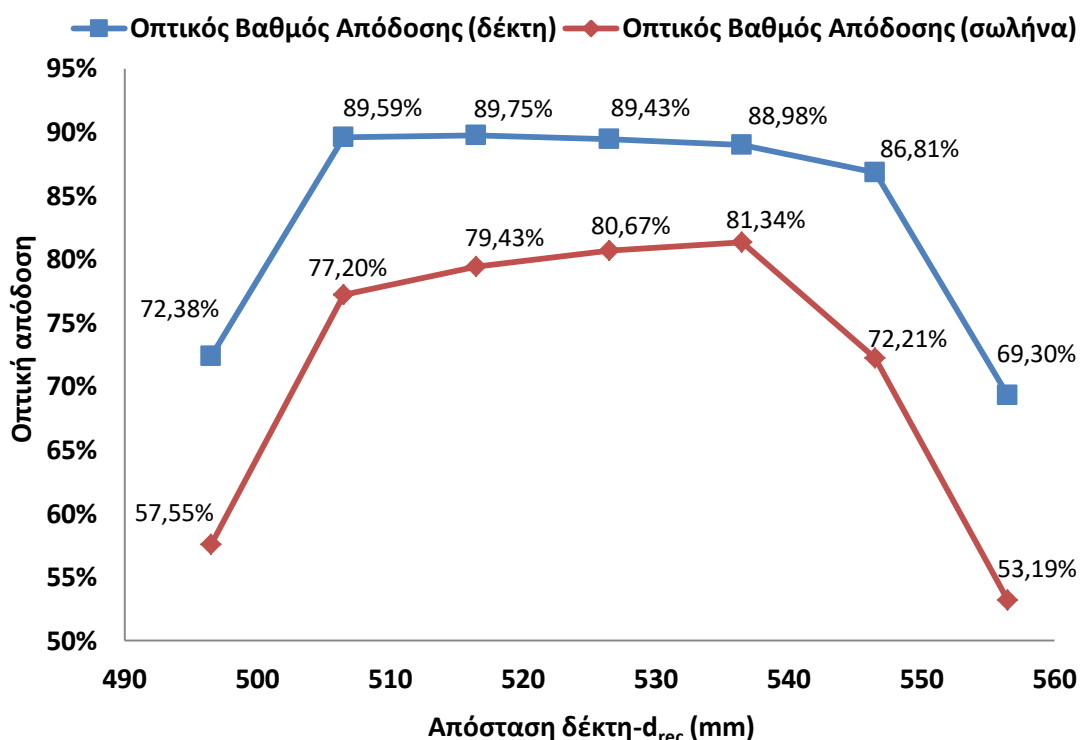
**Σχήμα 5.1.11 :** Πτώση πίεσης του δέκτη κυλινδρικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους  $L$  ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).

Τελικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα πώς ο βέλτιστος κυλινδρικός δέκτης έχει μήκος  $L=1 \cdot D=121 \text{ mm}$ . Ο δέκτης αυτός εμφάνισε τον μεγαλύτερο θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης και μεγάλους οπτικούς βαθμούς απόδοσης. Ταυτόχρονα είδαμε ότι παρουσιάζει και την καλύτερη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα αναλυτικά γεωμετρικά μεγέθη του δέκτη αυτού φαίνονται στο σχήμα 5.1.12.



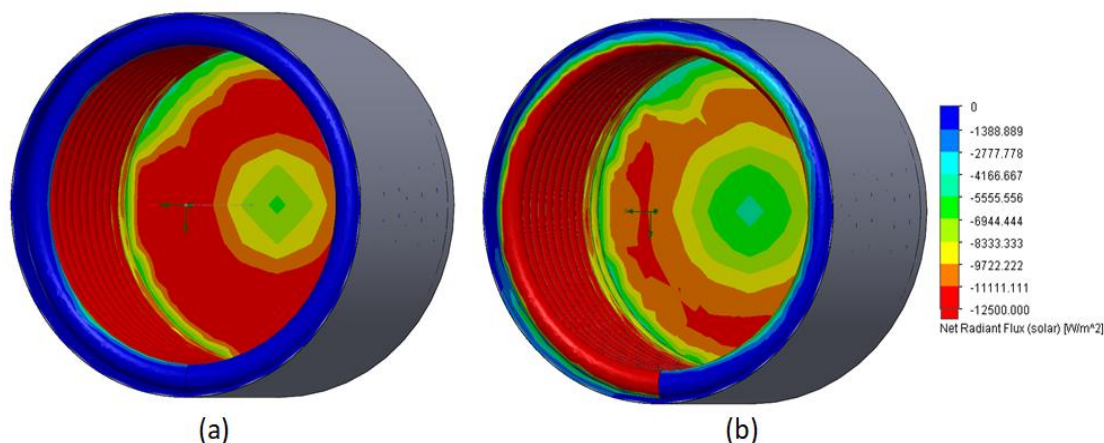
**Σχήμα 5.1.12 :** Γεωμετρικά μεγέθη βέλτιστου κυλινδρικού δέκτη (σε mm).

Επόμενο βήμα είναι η εύρεση της βέλτιστης θέσης του δέκτη που επιλέχθηκε πριν, δηλαδή η απόσταση του από τον συγκεντρωτή ( $d_{rec}$ ). Θυμίζουμε ότι η εστιακή απόσταση είναι  $f=526.5$  mm. Η εύρεση της βέλτιστης θέσης γίνεται με αποκλειστικό κριτήριο τον οπτικό βαθμό απόδοσης. Στο σχήμα 5.1.13 φαίνονται οι οπτικοί βαθμοί απόδοσης του δέκτη και του σωλήνα για διάφορες τιμές του  $d_{rec}$ . Παρατηρώ πώς για ένα εύρος  $\pm 20$  mm γύρω από την εστιακή απόσταση ( $506.5 \leq d_{rec} \leq 546.5$ ), ο οπτικός βαθμός απόδοσης του δέκτη παραμένει περίπου σταθερός, εκτός αυτού του εύρους έχουμε απότομη μείωση. Άρα οι πιθανές θέσεις τοποθέτησης του δέκτη περιορίζονται στο προηγούμενο εύρος. Ο οπτικός βαθμός απόδοσης του σωλήνα μεταβάλλεται και στο συγκεκριμένο εύρος παρουσιάζοντας όμως μέγιστο για  $d_{rec}=536.5$  mm, δηλαδή 10 mm μακριά από την εστία.



**Σχήμα 5.1.13: Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη και οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα, του δέκτη κυλινδρικού σχήματος, για διάφορες τιμές της απόστασης του δέκτη από τον συγκεντρωτή.**

Η μετατόπιση του δέκτη γύρω από την εστία, μεταβάλλει την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα. Φέρνοντάς το πιο κοντά ή πιο μακριά από την εστία καταφέρνουμε να έχουμε μια πιο διάσπαρτη ακτινοβολία πάνω στον σωλήνα και άρα πιο ομοιόμορφη κατανομή. Η επιλογή του εάν πρέπει να είναι πριν ή μετά την εστία επηρεάζεται κάθε φορά από το σχήμα. Εδώ στον κύλινδρο η βέλτιστη θέση βρέθηκε 10 mm μετά την εστία, κάτι που είναι λογικό διότι έτσι απομακρύνουμε την εστία από το πίσω μέρος της κοιλότητας, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ακτινοβολίας να απορροφάται από τον σωλήνα. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.1.14 όπου παρατηρώ την μείωση της έντασης της ακτινοβολίας στο πίσω μέρος της κοιλότητας για  $d_{rec}=536.5$  mm σε σχέση με την εστιακή απόσταση.



Σχήμα 5.1.14: Κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για απόσταση του δέκτη από τον συγκεντρωτή (a)  $d_{rec}=526.5 \text{ mm}=f$  και (b)  $d_{rec}=536.5 \text{ mm}$ .

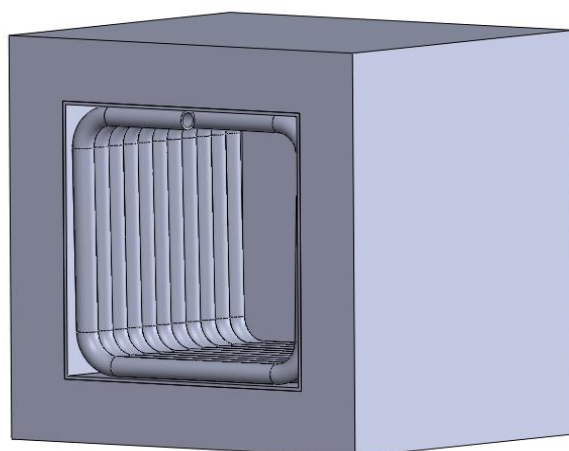
Στον πίνακα 5.1.2 δίνονται τα οι βαθμοί απόδοσης του βέλτιστου κυλινδρικού θέση τοποθετημένο στην βέλτιστη θέση, για παροχή μάζας  $m=0.03 \text{ kg/s}$ , θερμοκρασία εισόδου  $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$  και εργαζόμενο μέσο Therminol-VP1.

| Μέγεθος                          | Σύμβολο           | Τιμή   |
|----------------------------------|-------------------|--------|
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (δέκτη)  | $\eta_{opt,rec}$  | 88.98% |
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (σωλήνα) | $\eta_{opt,coil}$ | 81.34% |
| Θερμικός Βαθμός Απόδοσης         | $\eta_{th}$       | 60.00% |
| Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης      | $\eta_{ex}$       | 31.49% |

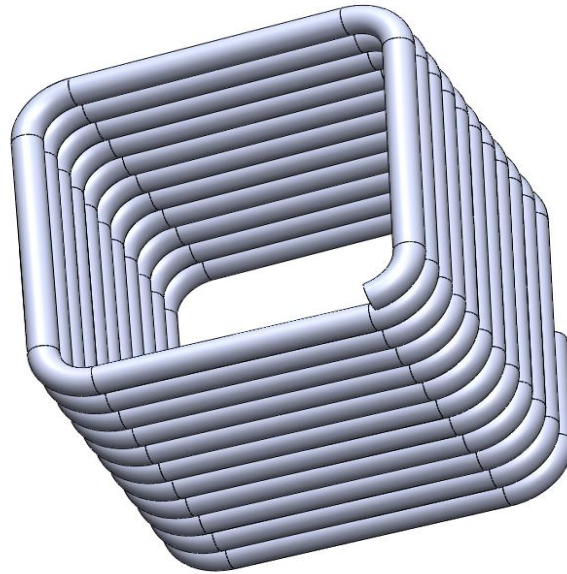
Πίνακας 5.1.2: Βαθμοί απόδοσης βέλτιστου κυλινδρικού δέκτη για  $d_{rec}=536.5 \text{ mm}$

### 5.1.2 Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο.

Επόμενο σχήμα που εξετάζεται είναι το ορθογωνικό. Το τρισδιάστατο σχήμα του ορθογωνικού δέκτη και του ελικοειδούς σωλήνα, όπως σχεδιάστηκαν στο Solidworks φαίνονται στα σχήματα 5.1.15 και 5.1.16.

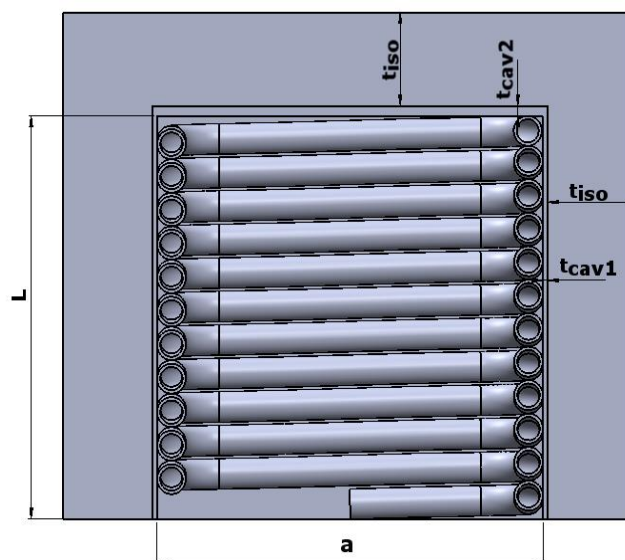


Σχήμα 5.1.15: 3D σχήμα δέκτη ορθογωνικής μορφής.



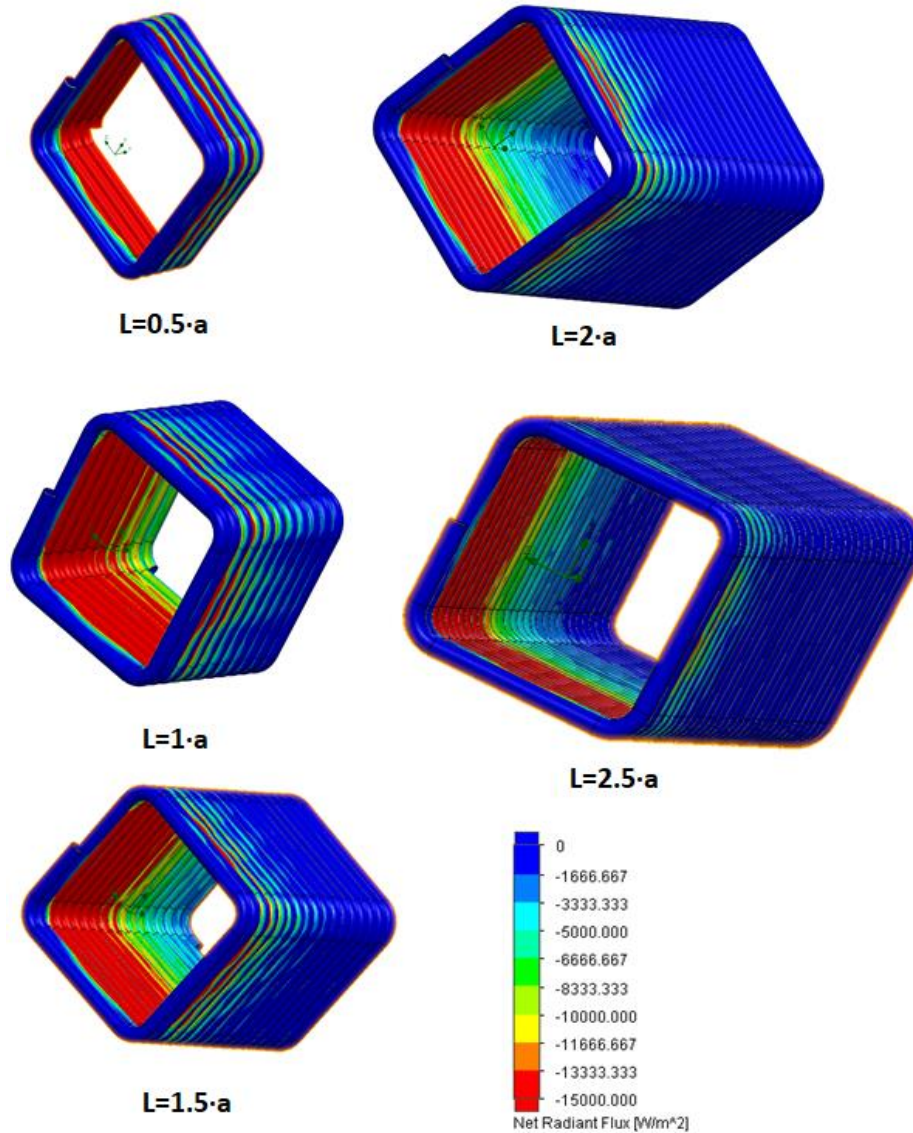
**Σχήμα 5.1.16: 3D σχήμα σωλήνα του ορθογωνικού δέκτη.**

Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη του ορθογωνικού δέκτη δίνονται στο σχήμα 5.1.17. Το άνοιγμα του δέκτη είναι τετραγωνικής μορφής με πλευρά  $a$ . Για να έχει ο ορθογωνικός δέκτης το ίδιο άνοιγμα με τον κυλινδρικό πρέπει να έχει υδραυλική διάμετρο ίση με 121 mm. Όμως για τετράγωνη διατομή η υδραυλική διάμετρος ισούται με το μήκος της πλευράς του, για αυτό  $a=121$  mm. Προφανώς το άνοιγμα του δέκτη πλέον είναι  $a^2$ . Τα πάχη της κοιλότητας και της μόνωσης, η διάμετρος και το βήμα της έλικας παραμένουν ίδια με του κυλινδρικού. Εξετάζονται η οπτική, θερμική και εξεργειακή απόδοση ορθογωνικών δεκτών με πέντε διαφορετικά μήκη ( $L=0.5 \cdot a$ ,  $L=1 \cdot a$ ,  $L=1.5 \cdot a$ ,  $L=2 \cdot a$  και  $L=2.5 \cdot a$ ), προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο. Πρέπει να επισημανθεί πως ο κυβικός δέκτης αποτελεί υποπερίπτωση του ορθογωνικού και προκύπτει για  $L=1 \cdot a$ .



**Σχήμα 5.1.17: Τομή ορθογωνικού δέκτη και βασικές γεωμετρικές διαστάσεις.**

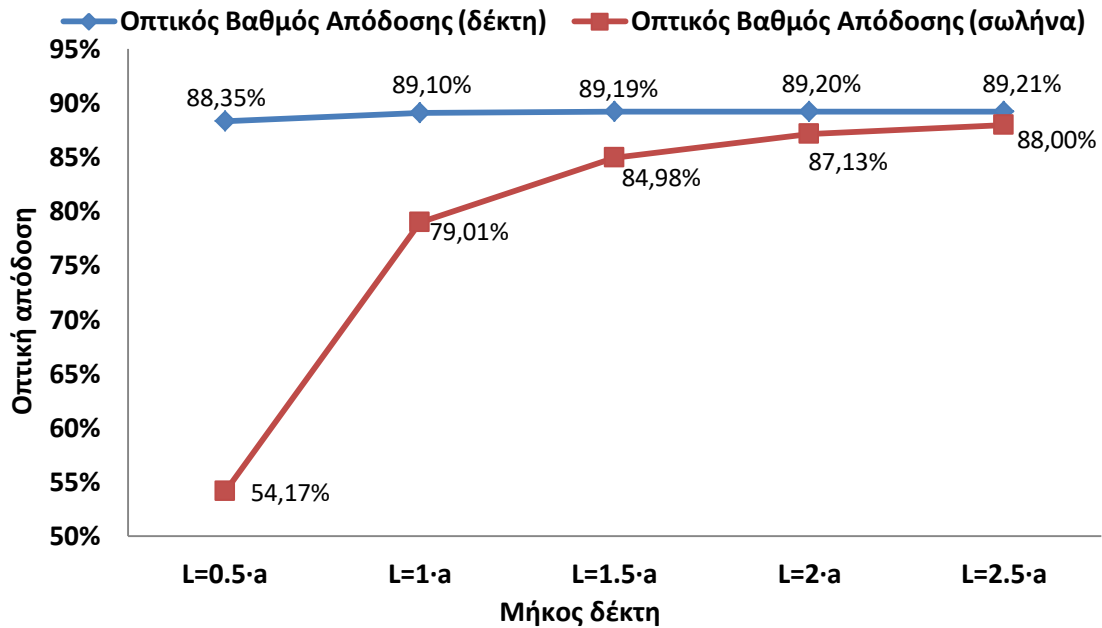
Το σχήμα 5.1.18 δείχνει την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα για τις πέντε περιπτώσεις μηκών. Τα συμπεράσματα από το σχήμα αυτό είναι ίδιες με αυτές του κυλίνδρου, δηλαδή μεγαλύτερη ένταση της ακτινοβολίας στην είσοδο του δέκτη και πιο ομοιόμορφη κατανομή στην περίπτωση  $L=1 \cdot a$ .



**Σχήμα 5.1.18: Κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα δεκτών κυλινδρικού σχήματος.**

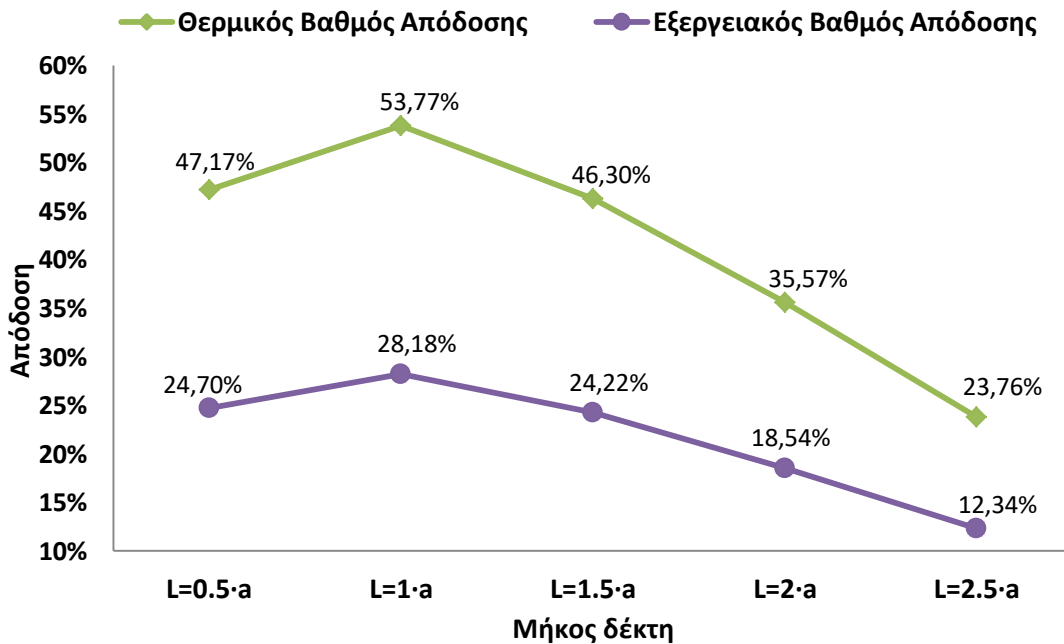
Από το σχήμα 5.1.19 φαίνεται πώς ο οπτικός βαθμός απόδοσης του δέκτη ( $\eta_{opt,rec}$ ) παραμένει σχεδόν αμετάβλητος με την αύξηση του μήκους του δέκτη, λόγω του σταθερού ανοίγματος. Αντιθέτως, ο οπτικός βαθμός απόδοσης του σωλήνα ( $\eta_{opt,coil}$ ) αυξάνεται αισθητά μέχρι  $L=1.5 \cdot a$  και στην συνέχεια τείνει να σταθεροποιηθεί. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην αύξηση της εξωτερικής επιφάνειας του σωλήνα με την αύξηση του  $L$ . Όσο η παράπλευρη επιφάνεια του σωλήνα μεγαλώνει τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας του δέκτη καταλήγει στον σωλήνα με άνω όμως όριο που καθορίζεται από τον οπτικό βαθμό του δέκτη. Για αυτό ο  $\eta_{opt,coil}$  τείνει ασυμπτωτικά στον  $\eta_{opt,rec}$ .





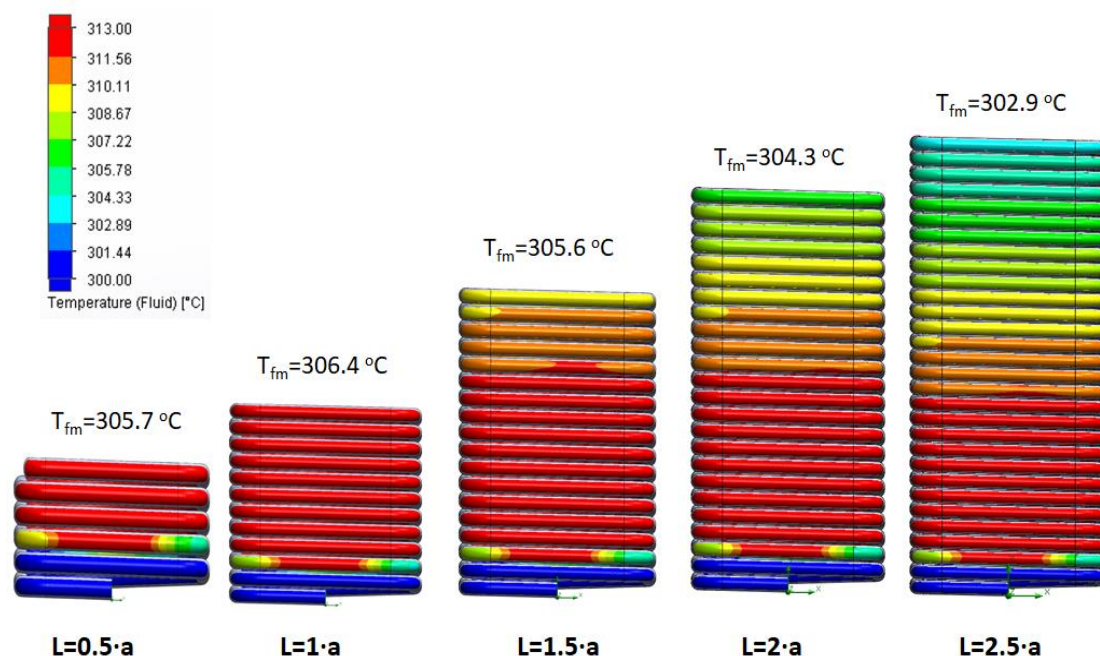
Σχήμα 5.1.19 : Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη και οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα του δέκτη ορθογωνικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους L.

Στο σχήμα 5.1.20 παρατηρείται μεγιστοποίηση του θερμικού βαθμού απόδοσης για  $L=1 \cdot a$ . Για  $L > 1 \cdot a$ , η αύξηση της επιφάνειας οδηγεί σε μεγαλύτερες θερμικές απώλειες, ενώ για  $L < 1 \cdot a$ , αν και οι θερμικές απώλειες πέφτουν εντούτοις ο πολύ μικρός οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα οδηγεί τελικά σε μείωση του  $\eta_{th}$ . Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ο οποίος επίσης μεγιστοποιείται για  $L=1 \cdot a$ , κυρίως λόγω της μεγιστοποίησης της ωφέλιμης ισχύος.

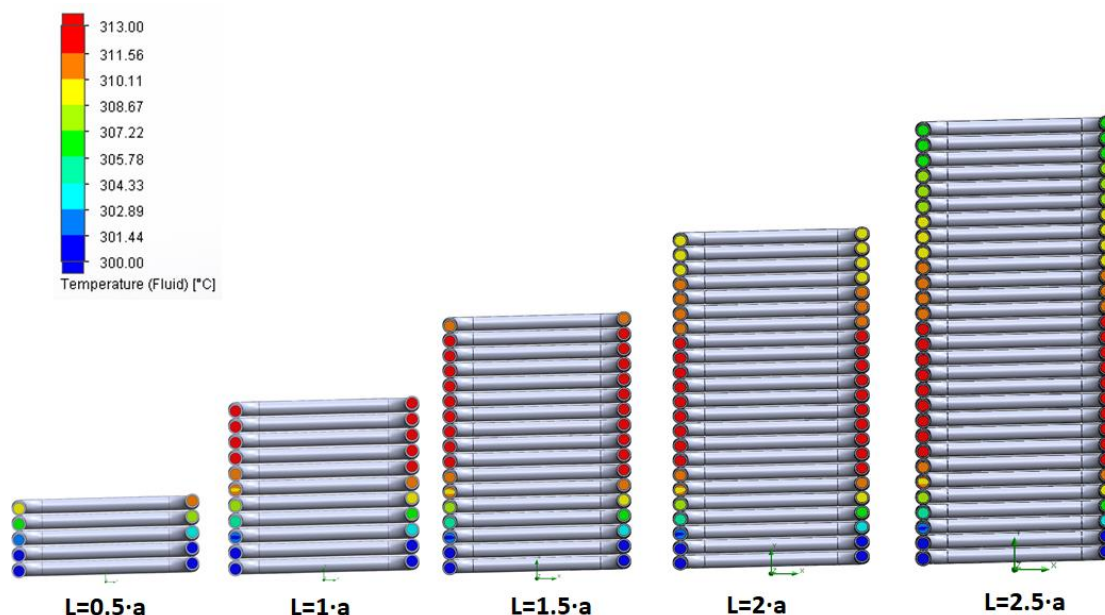


Σχήμα 5.1.20 : Θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης του δέκτη ορθογωνικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους L ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).

Τα σχήματα 5.1.21 και 5.1.22 δείχνουν την κατανομή της θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα και σε τομή καθώς και την μέση τιμή της. Για δέκτη με  $L=1 \cdot a$  η θερμοκρασία εξόδου και συνεπώς και η μέση τιμή παίρνει την μέγιστη τιμή. Ταυτόχρονα διακρίνεται η ανομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας του ρευστού στα μεγάλα μήκη.



**Σχήμα 5.1.21: Κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα ορθογωνικού δέκτη και μέση θερμοκρασία ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).**

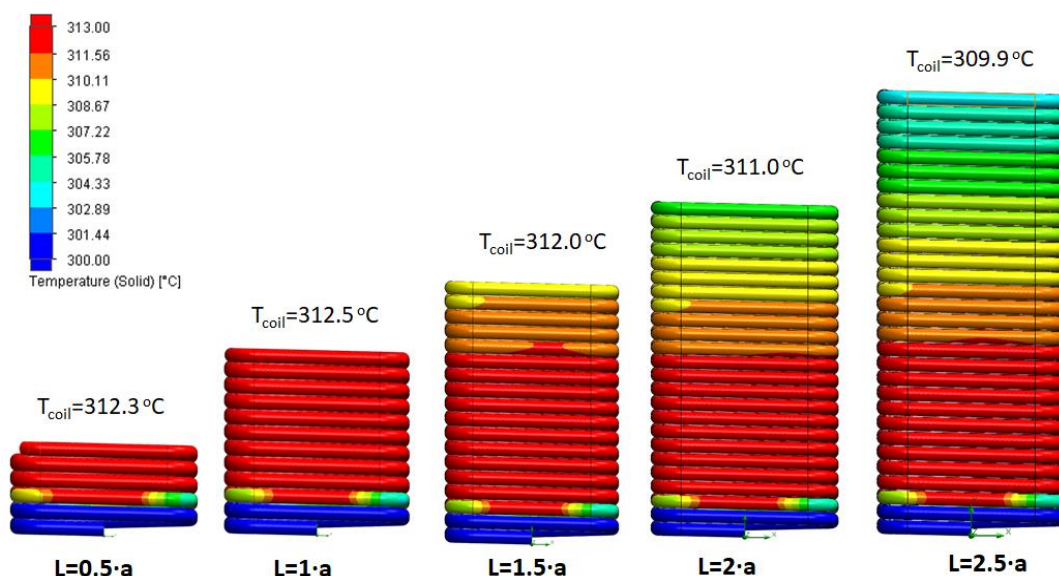


**Σχήμα 5.1.22: Κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού σε τομές του σωλήνα ορθογωνικού δέκτη ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).**

Στο σχήμα 5.1.23 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων του σωλήνα ( $T_{coil}$ ) καθώς μεγαλώνει το μήκος του δέκτη. Παρατηρώ ότι για  $L=1 \cdot a$  εμφανίζεται η

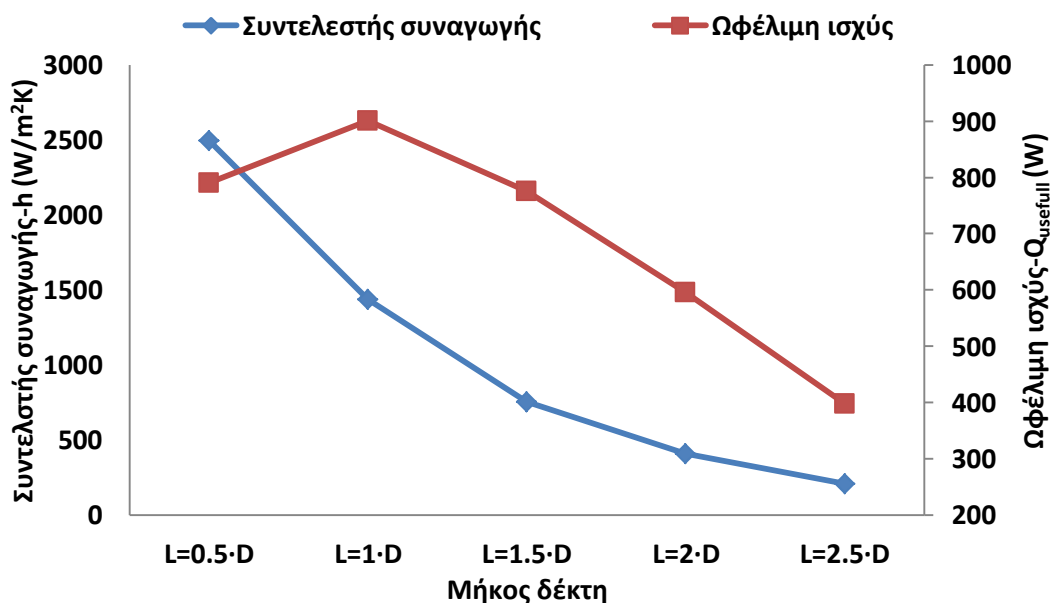


μεγαλύτερη θερμοκρασία και για το μήκος αυτό υπάρχει η πιο ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή. Επίσης, όπως και στον κύλινδρο, και στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο παρατηρούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στα τοιχώματα της κοιλότητας για  $L=0.5 \cdot a$ , λόγω της μικρής επιφάνειας και του χαμηλού  $\eta_{opt,coil}$  (που σημαίνει μεγάλο μέρος της εισερχόμενης ακτινοβολίας καταλήγει στην κοιλότητα).



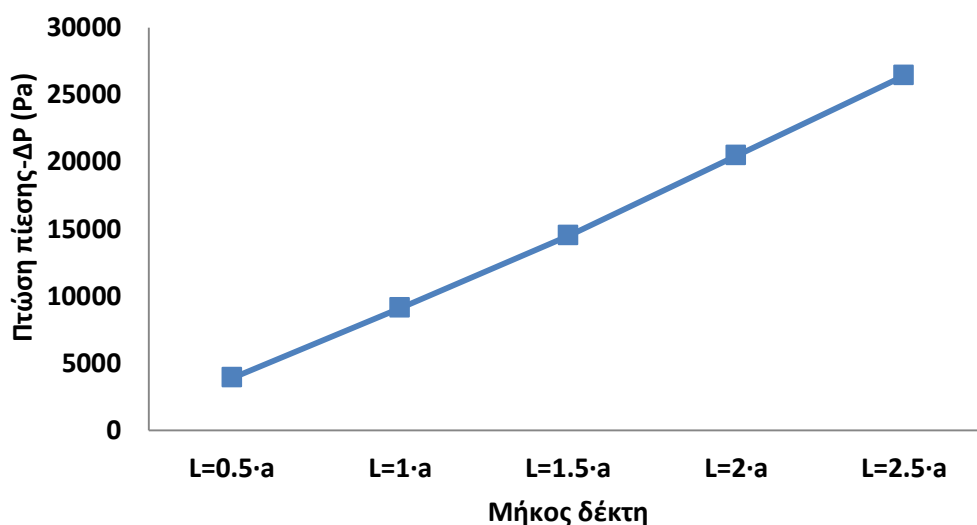
Σχήμα 5.1.23: Κατανομή θερμοκρασίας του τοιχώματος του σωλήνα ορθογωνικού δέκτη ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

Στο σχήμα 5.1.24 δίνονται δύο ακόμη μεγέθη που εξηγούν την θερμική συμπεριφορά του ορθογωνικού δέκτη. Από την μια όπως είναι λογικό η ωφέλιμη ισχύς μεγιστοποιείται για  $L=1 \cdot a$  και από την άλλη ο συντελεστής συναγωγής βαίνει διαρκώς μειούμενο με την αύξηση του μήκους του δέκτη, λόγω της αύξησης της εσωτερικής επιφάνειας του σωλήνα.



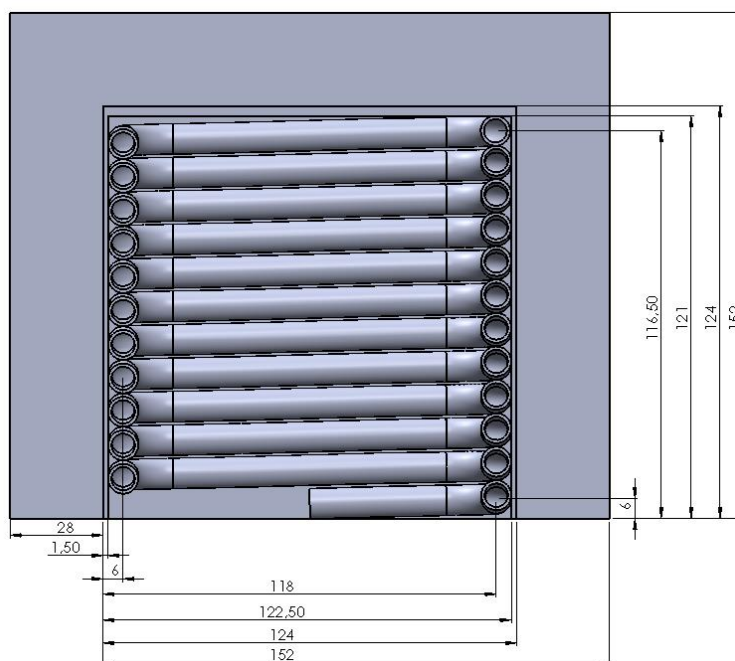
Σχήμα 5.1.24: Συντελεστής συναγωγής και ωφέλιμη ισχύς του δέκτη ορθογωνικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους  $L$  ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

Τέλος στο σχήμα 5.1.25 επιβεβαιώνεται και στον ορθογωνικό δέκτη η αύξηση της πτώσης πίεσης με την αύξηση του μήκους του δέκτη, η οποία μάλιστα είναι γραμμική λόγω της γραμμικής αύξησης του μήκους του σωλήνα.



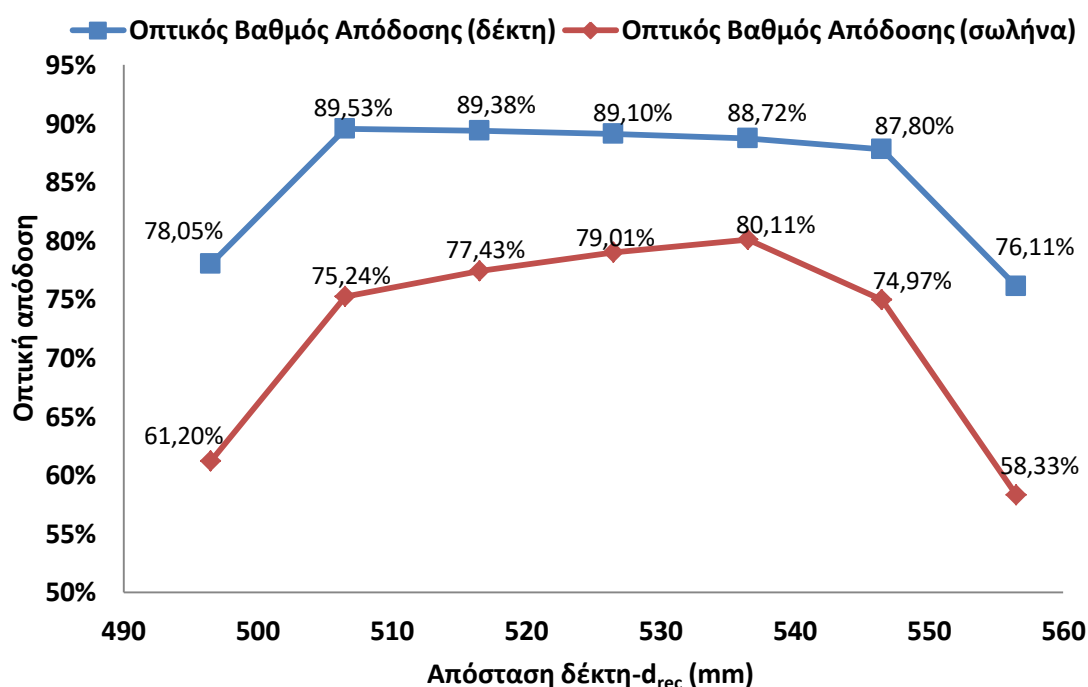
**Σχήμα 5.1.25 :** Πτώση πίεσης του δέκτη ορθογωνικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους  $L$  ( $T_{in}=300 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).

Τελικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα πώς για τον δέκτη με σχήμα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, το βέλτιστο μήκος του είναι:  $L=1 \cdot a=121 \text{ mm}$ , δηλαδή ένας δέκτης κυβικού σχήματος. Ο κυβικός δέκτης όπως είδαμε πιο πάνω παρουσίασε τον μεγαλύτερο θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης, καθώς και την πιο ομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ενέργειας. Επιπλέον είχε ικανοποιητικούς οπτικούς βαθμούς απόδοσης. Τα αναλυτικά γεωμετρικά μεγέθη του δέκτη αυτού φαίνονται στο σχήμα 5.1.26.

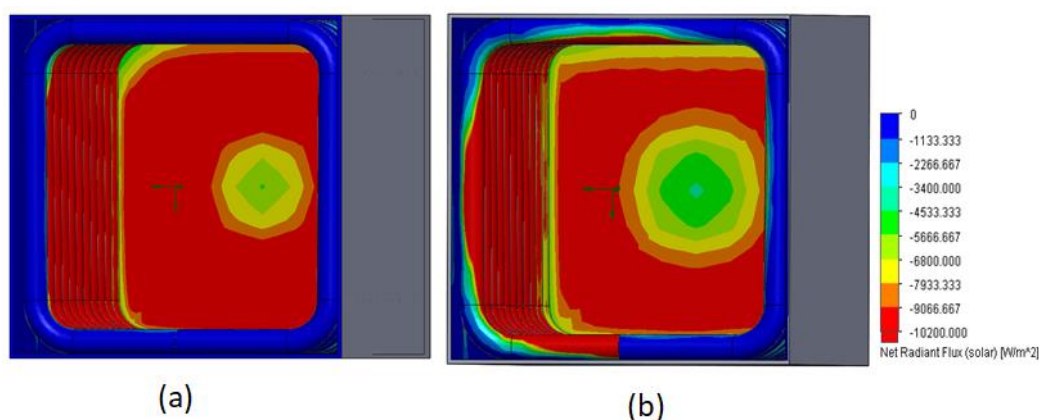


**Σχήμα 5.1.26 :** Γεωμετρικά μεγέθη βέλτιστου ορθογωνικού δέκτη (σε mm).

Κατά αντιστοιχία με τον κυλινδρικό δέκτη, θα βρεθεί η βέλτιστη θέση τοποθέτησης του ορθογωνικού δέκτη, δηλαδή η βέλτιστη απόστασή του από τον συγκεντρωτή ( $d_{rec}$ ). Στο σχήμα 5.1.27 παρατηρούμε πώς για μια περιοχή γύρω από την εστία ( $506.5 \leq d_{rec} \leq 546.5$ ) ο οπτικός βαθμός του δέκτη μεταβάλλεται λίγο, ενώ έξω από αυτή την περιοχή έχω απότομη μείωση. Στην προηγούμενη περιοχή παρατηρώ μεγιστοποίηση του οπτικού βαθμού του σωλήνα για  $d_{rec}=536.5$ , δηλαδή 10mm μακριά από την εστία. Στην θέση αυτή μεγιστοποιείται ο οπτικός βαθμός του σωλήνα διότι απομακρύνουμε το πίσω της κοιλότητας (που δεν φέρει σωλήνα) από την εστία και άρα απορροφά μικρότερη ακτινοβολία (σχήμα 5.1.28). Έτσι μεγαλύτερο ποσό της εισερχόμενης ακτινοβολίας καταλήγει στον σωλήνα.



Σχήμα 5.1.27: Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη και οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα, του δέκτη κυβικού σχήματος, για διάφορες τιμές της απόστασης του δέκτη από τον συγκεντρωτή.



Σχήμα 5.1.28: Κατανομή της ένταση ηλιακής ακτινοβολίας του κυβικού δέκτη για απόσταση του από τον συγκεντρωτή (a)  $d_{rec}=526.5 \text{ mm}=f$  και (b)  $d_{rec}=536.5 \text{ mm}$

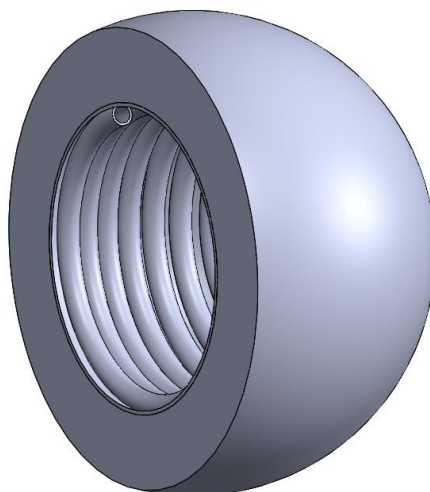
Στον πίνακα 5.1.3 δίνονται οι βαθμοί απόδοσης του βέλτιστου κυλινδρικού θέση τοποθετημένο στην βέλτιστη θέση, για παροχή μάζας  $m=0.03 \text{ kg/s}$ , θερμοκρασία εισόδου  $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$  και εργαζόμενο μέσο Therminol-VP1.

| Μέγεθος                          | Σύμβολο           | Τιμή   |
|----------------------------------|-------------------|--------|
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (δέκτη)  | $\eta_{opt,rec}$  | 88.72% |
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (σωλήνα) | $\eta_{opt,coil}$ | 80.11% |
| Θερμικός Βαθμός Απόδοσης         | $\eta_{th}$       | 54.58% |
| Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης      | $\eta_{ex}$       | 28.61% |

Πίνακας 5.1.3: Βαθμοί απόδοσης βέλτιστου ορθογωνικού δέκτη για  $d_{rec}=536.5 \text{ mm}$ .

### 5.1.3 Σφαίρα

Επόμενο σχήμα το οποίο μελετήθηκε είναι το σφαιρικό, το οποίο παρουσιάζει τις δικές του γεωμετρικές ιδιαιτερότητες και είναι ένα σχήμα που έχει μελετηθεί αρκετά. Στα σχήματα 5.1.29 και 5.1.30 παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα σχήματα του σχεδιασμένου σφαιρικού δέκτη στο Solidworks.



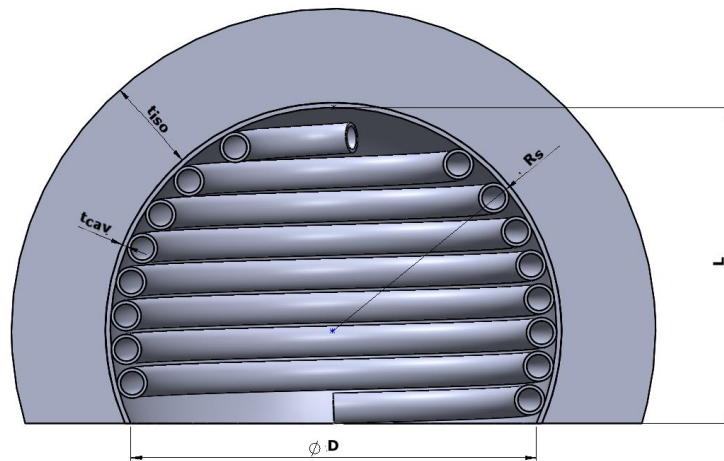
Σχήμα 5.1.29: 3D σχήμα δέκτη σφαιρικής μορφής.



Σχήμα 5.1.30: 3D σχήμα σωλήνα του σφαιρικού δέκτη.

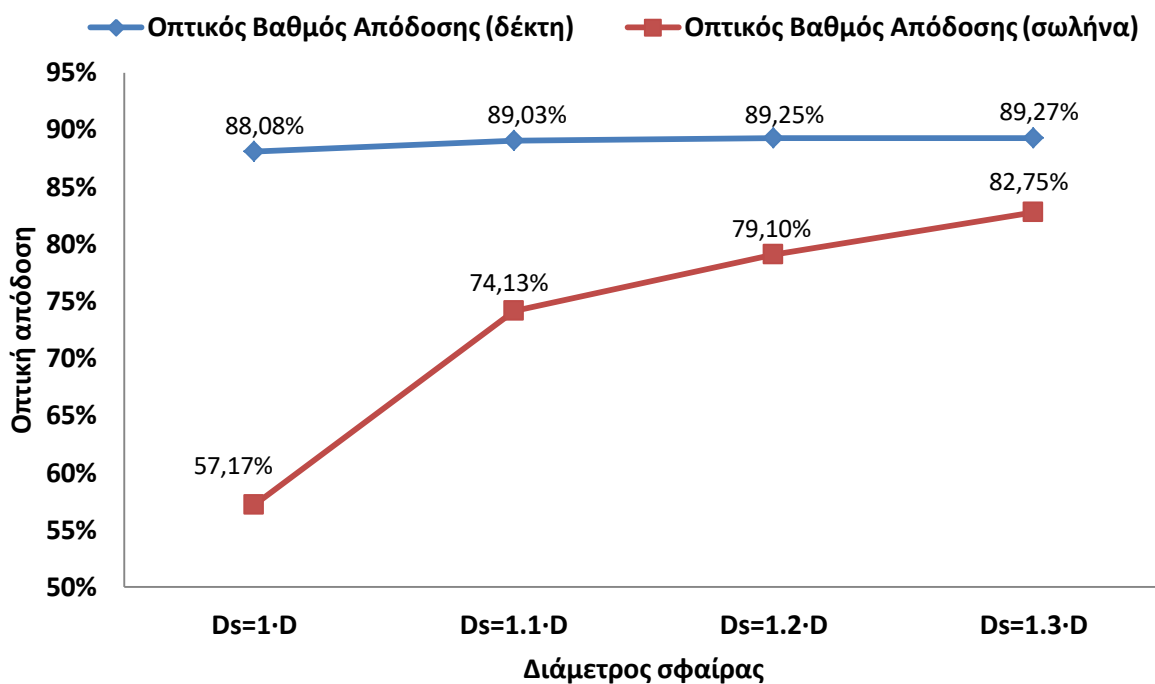
Επιπλέον στο σχήμα 5.1.31 δίνονται οι βασικές γεωμετρικές διαστάσεις του δέκτη σφαιρικής μορφής. Στην ουσία ο δέκτης αυτός έχει σχήμα ημι-σφαιρικό καθώς προκύπτει από την τομή σφαίρας ακτίνας  $R_s$  (διάμετρος  $D_s$ ) σε επίπεδο κατάλληλο ώστε το άνοιγμα ( $D$ ) να έχει την ίδια τιμή με τα προηγούμενα σχήματα. Δηλαδή στην περίπτωση της σφαίρας λαμβάνουμε ως παράμετρο σχεδίασης την διάμετρο της σφαίρας της εσωτερικής κοιλότητας  $D_s$ . Έτσι κρατώντας σταθερά τα υπόλοιπα μεγέθη εξετάσαμε τέσσερις διαφορετικούς δέκτες σφαιρικού σχήματος:  $D_s = 1 \cdot D$ ,  $D_s = 1.1 \cdot D$ ,  $D_s = 1.2 \cdot D$  και  $D_s = 1.3 \cdot D$ . Πρέπει να επισημάνουμε πως ο ημισφαιρικός δέκτης αποτελεί υποπερίπτωση και προκύπτει για  $D_s = 1 \cdot D$ . Τέλος το μήκος του δέκτη  $L$  μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης 5.1.

$$L = R_s + \sqrt{R_s^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (5.1)$$

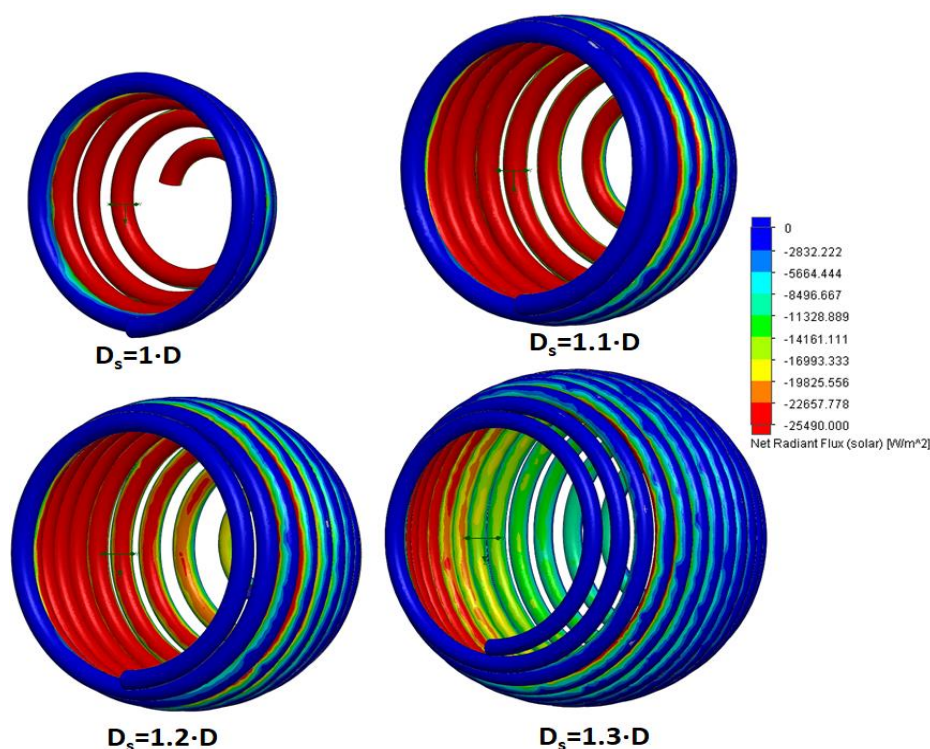


**Σχήμα 5.1.31: Τομή σφαιρικού δέκτη και βασικές γεωμετρικές διαστάσεις.**

Στο σχήμα 5.1.32 δίνονται οι διακυμάνσεις των οπτικών βαθμών απόδοσης. Οι τάσεις είναι όμοιες με τα προηγούμενα σχήματα και για την περίπτωση της σφαίρας. Δηλαδή, ο οπτικός βαθμός απόδοσης του δέκτη μεταβάλλεται πολύ λίγο με την αύξηση της διαμέτρου της σφαίρας, ενώ ο οπτικός βαθμός απόδοσης του σωλήνα αυξάνεται. Η αύξηση του τελευταίου οφείλεται στην αύξηση της επιφάνειας του σωλήνα και καθώς αυξάνεται το ποσοστό της εισερχόμενης ακτινοβολίας που απορροφά. Η κατανομή όμως της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, σχήμα 5.1.33, είναι πολύ πιο ομοιόμορφη στην περίπτωση των δεκτών  $D_s = 1 \cdot D$  και  $D_s = 1.1 \cdot D$ , λόγω του μικρού τους μήκους  $L$ . Στις μεγαλύτερες σφαίρες όσο απομακρυνόμαστε από το άνοιγμα του δέκτη, δηλαδή από την εστία, η ένταση της ακτινοβολίας βαίνει μειούμενη.



Σχήμα 5.1.32 : Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη και οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα του δέκτη σφαιρικού σχήματος για διάφορες τιμές της διαμέτρου  $D_s$ .

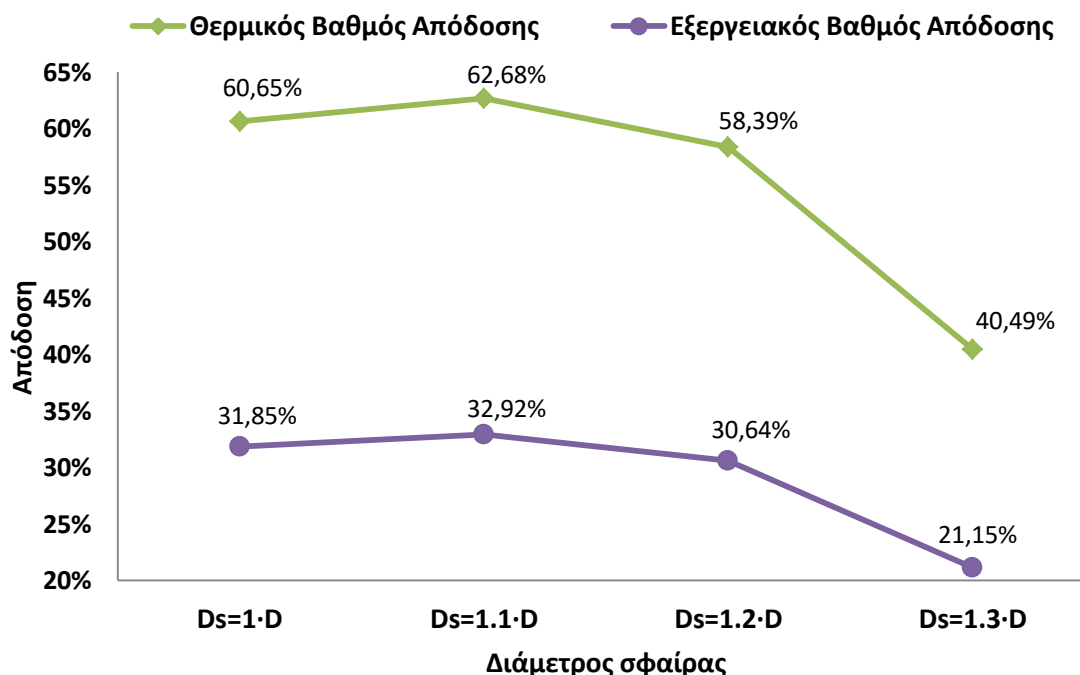


Σχήμα 5.1.33: Κατανομή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα δεκτών σφαιρικού σχήματος.

Στο σχήμα 5.1.34 παρατηρούμε την μεγιστοποίηση του θερμικού και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης για την περίπτωση όπου  $D_s = 1.0$ . Ο συνδυασμός του υψηλού οπτικού βαθμού απόδοσης σωλήνα και των μικρών θερμικών απωλειών λόγω μικρής επιφάνειας

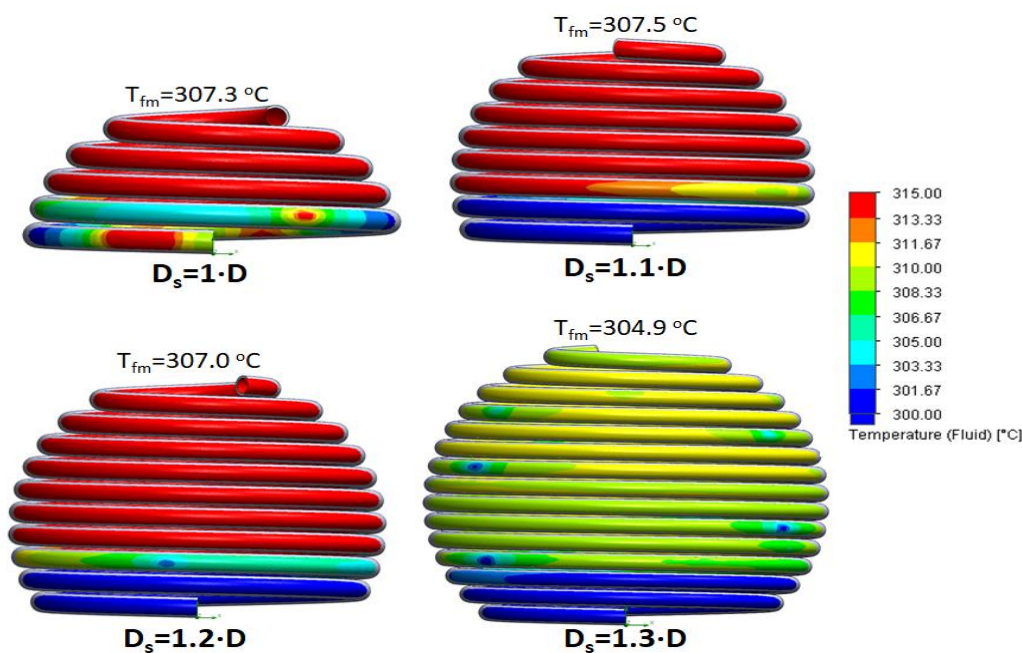


οδηγούν σε μεγιστοποίηση της θερμικής απόδοσης. Ο εξεργειακός βαθμός μεγιστοποιείται κυρίως λόγω της μεγιστοποίησης της ωφέλιμης ισχύος.



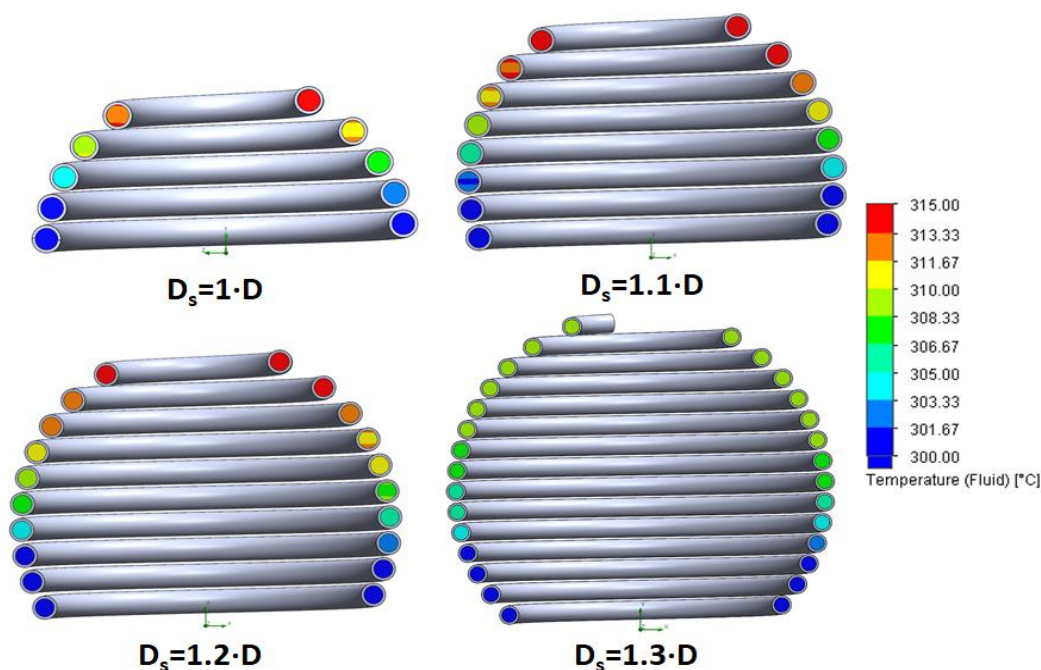
Σχήμα 5.1.34 : Θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης του δέκτη σφαιρικού σχήματος για διάφορες τιμές της διαμέτρου  $D_s$  ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).

Στα σχήματα 5.1.35 και 5.1.36 δίνονται οι κατανομές της θερμοκρασίας των εργαζόμενων μέσων, όπου παρατηρείται η μεγιστοποίηση της θερμοκρασίας εξόδου στην περίπτωση  $D_s=1.1 \cdot D$ . Επιπλέον η κατανομή είναι πιο ομοιόμορφη στην περίπτωση αυτή.



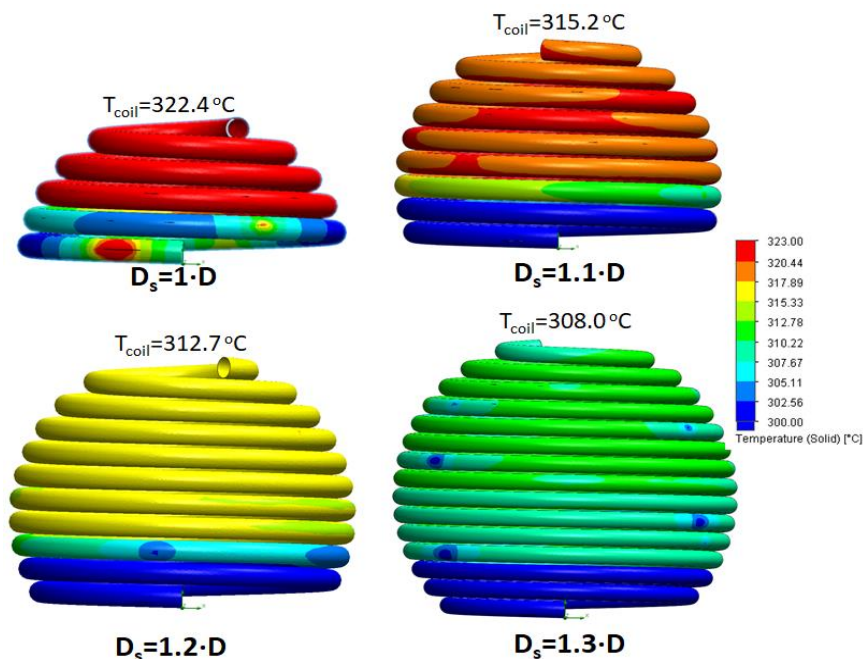
Σχήμα 5.1.35: Κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα σφαιρικού δέκτη και μέση θερμοκρασία ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).





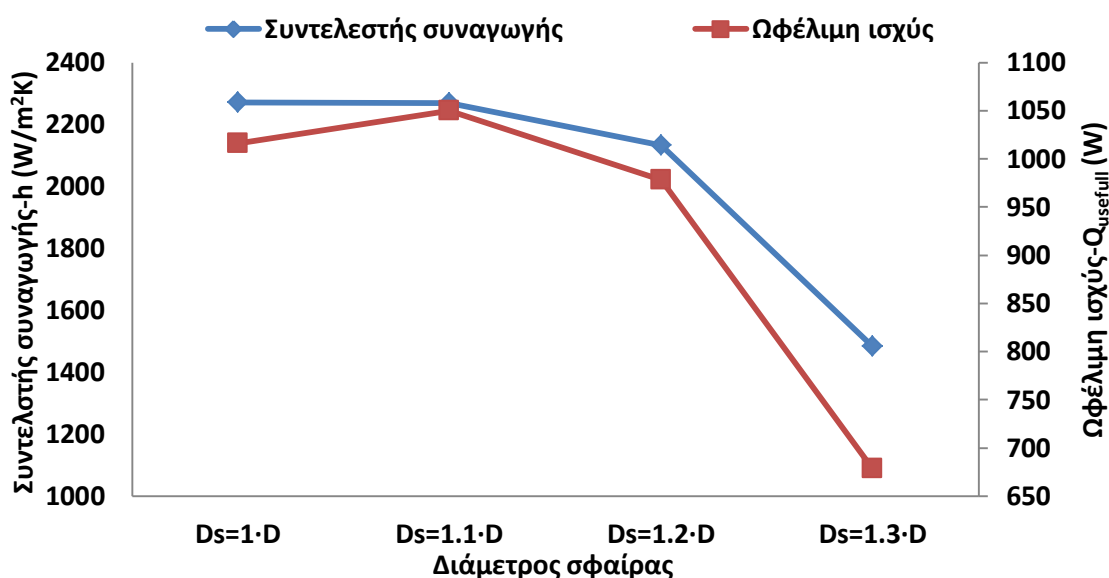
Σχήμα 5.1.36: Κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού σε τομές του σωλήνα σφαιρικού δέκτη ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

Στο σχήμα 5.1.37 δίνεται η κατανομή και η μέση τιμή της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων του ελικοειδούς σωλήνα. Πρώτη παρατήρηση είναι η μείωση της  $T_{coil}$  με την αύξηση της επιφάνειας και δεύτερη η μεγάλη θερμοκρασία τοιχώματος στην περίπτωση του ημισφαιρίου ( $D_s = 1.0D$ ). Επιπλέον για την περίπτωση του ημισφαιρίου ( $D_s = 1.0D$ ), αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στα τοιχώματα της κοιλότητας λόγω του χαμηλού  $\eta_{opt,coil}$ , γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού.

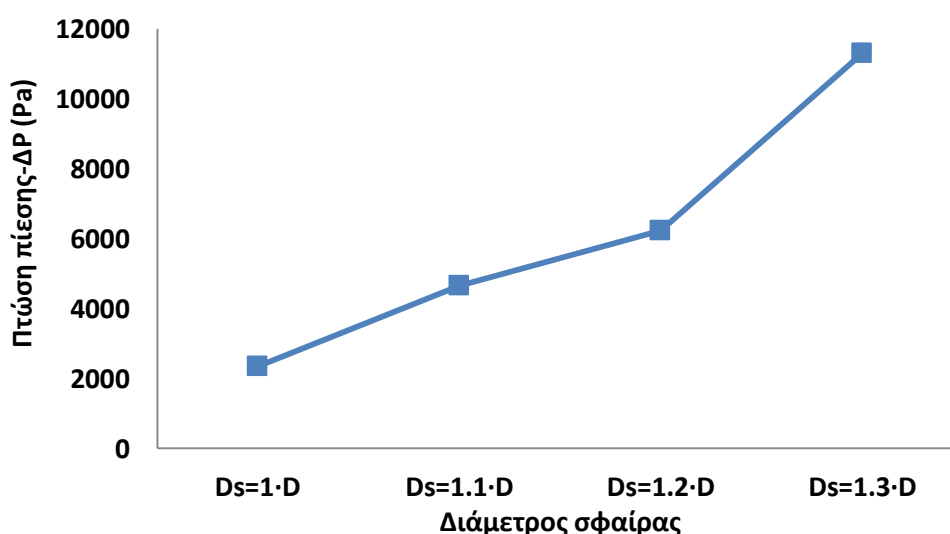


Σχήμα 5.1.37: Κατανομή θερμοκρασίας του τοιχώματος του σωλήνα σφαιρικού δέκτη ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

Το σχήμα 5.1.38 δείχνει την μεγιστοποίηση της ωφέλιμης ισχύος για  $D_s = 1.1 \cdot D$  και την μείωση του συντελεστή συναγωγής με την αύξηση του μήκους του σωλήνα. Για  $D_s > 1.1 \cdot D$  το  $h$  μειώνεται αρκετά λόγω αύξησης της επιφάνειας και μείωσης της ωφέλιμης ισχύος που αντιτίθεται στην μείωση της διαφοράς  $T_{coil} - T_{fm}$  (σχέση 3.17). Αντίθετα η περίπτωση  $D_s = 1.1 \cdot D$  με το  $D_s = 1 \cdot D$  έχουν περίπου ίδιους συντελεστές συναγωγής, που οφείλεται στην μεγαλύτερη ωφέλιμη ισχύς και μικρότερη διαφορά  $T_{coil} - T_{fm}$  της σφαίρας με  $D_s = 1.1 \cdot D$ . Τέλος στο σχήμα 5.1.39 φαίνεται η αύξηση της πτώσης πίεσης, και συνεπώς και της κατανάλωσης αντλίας, με αύξηση του μήκους του δέκτη. Η αύξηση του μήκους του δέκτη (συνεπώς και του σωλήνα) οδηγεί το ρευστό σε μεγαλύτερες απώλειες πίεσης αφού έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Εδώ αύξηση δεν είναι γραμμική διότι μεγαλώνοντας την διάμετρο της σφαίρας 10 % κάθε φορά σημαίνει πολύ μεγαλύτερη αύξηση της του μήκους του σωλήνα.

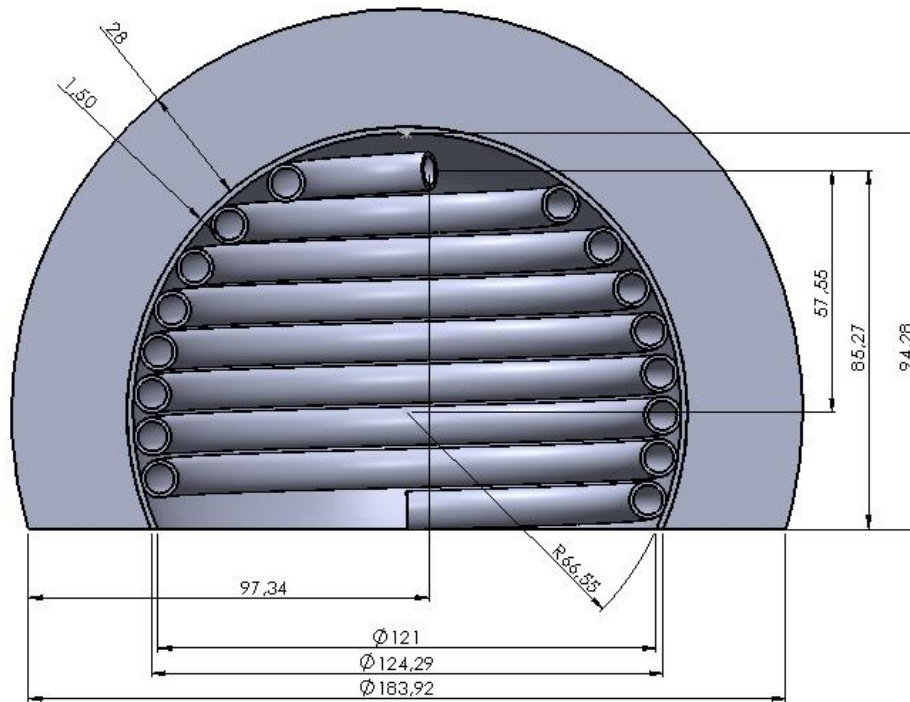


Σχήμα 5.1.38: Συντελεστής συναγωγής και ωφέλιμη ισχύς του δέκτη σφαιρικού σχήματος για διάφορες τιμές της διαμέτρου  $D_s$  ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).



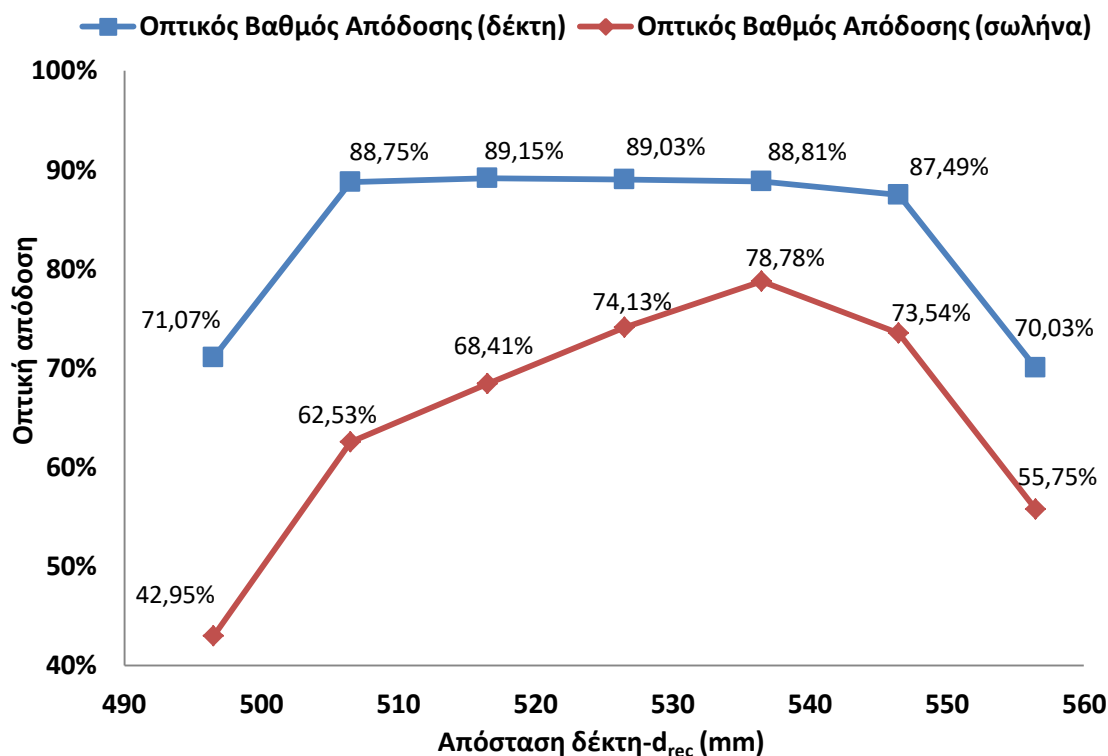
Σχήμα 5.1.39: Πτώση πίεσης του δέκτη σφαιρικού σχήματος για διάφορες τιμές της διαμέτρου  $D_s$  ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση που προηγήθηκε καταλήγουμε στο συμπέρασμα πώς για την περίπτωση της σφαίρας βέλτιστη θερμική και εξεργειακή απόδοση έχω για  $D_s = 1.1 \cdot D$ . Για την περίπτωση αυτή είδαμε ότι υπάρχει και ικανοποιητική οπτική απόδοση καθώς και ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας. Τα αναλυτικά γεωμετρικά μεγέθη του επιλεγμένου σφαιρικού δέκτη δίνονται στο σχήμα 5.1.40.



**Σχήμα 5.1.40: Γεωμετρικά μεγέθη βέλτιστου σφαιρικού δέκτη (σε mm).**

Όσον αφορά την βέλτιστη θέση τοποθέτησης του δέκτη, όπως δείχνει το σχήμα 5.1.41, αυτή είναι 10 mm μακριά από την εστία και συγκεκριμένα σε απόσταση από τον συγκεντρωτή  $d_{rec}=536.5$  mm. Αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η μεγάλη βελτίωση του οπτικού βαθμού απόδοσης του σωλήνα σε σχέση με την εστία ( $d_{rec}=536.5$  mm) και σε σχέση με την τοποθέτηση του δέκτη πιο κοντά στον συγκεντρωτή. Αυτό οφείλεται καθαρά στο σχήμα της σφαίρας. Φέροντας πιο μακριά από την εστία καταφέρνουμε όχι μόνο να πέσουν λιγότερες ακτίνες στο πίσω μέρος της κοιλότητας αλλά και να πέσουν ηλιακές ακτίνες στις αρχικές στροφές της έλικας. Η μεγάλη κλίση του οπτικού βαθμού απόδοσης σωλήνα δείχνει ότι για την περίπτωση της σφαίρας η θέση τοποθέτησης του δέκτη είναι πολύ σημαντική.



Σχήμα 5.1.41: Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη και οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα, του δέκτη σφαιρικού σχήματος, για διάφορες τιμές της απόστασης του δέκτη από τον συγκεντρωτή.

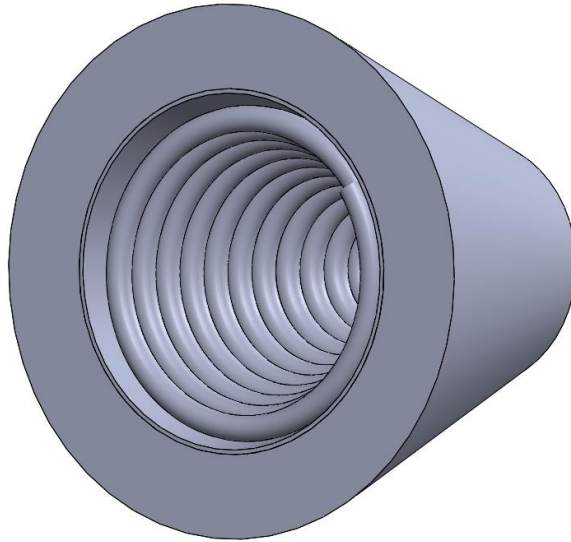
Τέλος στον πίνακα 5.1.4 δίνονται οι βαθμοί απόδοσης του βέλτιστου σφαιρικού δέκτη τοποθετημένο στην βέλτιστη θέση, για παροχή μάζας  $m=0.03$  kg/s, θερμοκρασία εισόδου  $T_{in}=300$  °C και εργαζόμενο μέσο Therminol-VP1.

| Μέγεθος                          | Σύμβολο           | Τιμή   |
|----------------------------------|-------------------|--------|
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (δέκτη)  | $\eta_{opt,rec}$  | 88.81% |
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (σωλήνα) | $\eta_{opt,coil}$ | 78.78% |
| Θερμικός Βαθμός Απόδοσης         | $\eta_{th}$       | 63.98% |
| Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης      | $\eta_{ex}$       | 33.61% |

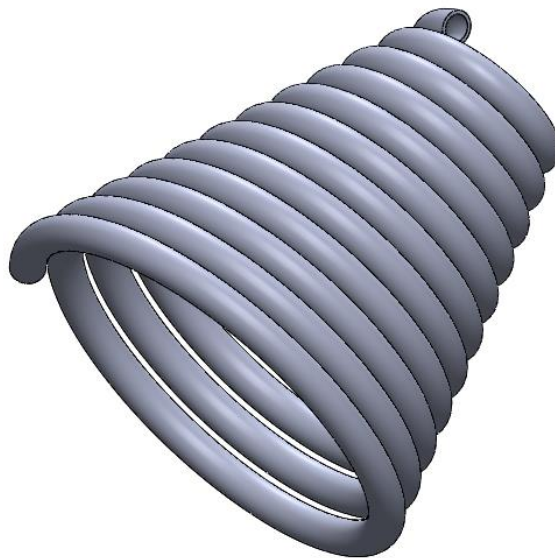
Πίνακας 5.1.4: Βαθμοί απόδοσης βέλτιστου σφαιρικού δέκτη για  $d_{rec}=536.5$  mm

#### 5.1.4 Κώνος

Επόμενο σχήμα που εξετάζεται είναι κώνος που αποτελεί όπως και τα προηγούμενα μία από τις βασικές γεωμετρίες. Στα σχήματα 5.1.42 και 5.1.43 δίνονται τα τρισδιάστατα σχήματα του κωνικού δέκτη συνολικά και του σωλήνα του, όπως σχεδιάστηκαν στο Solidworks.

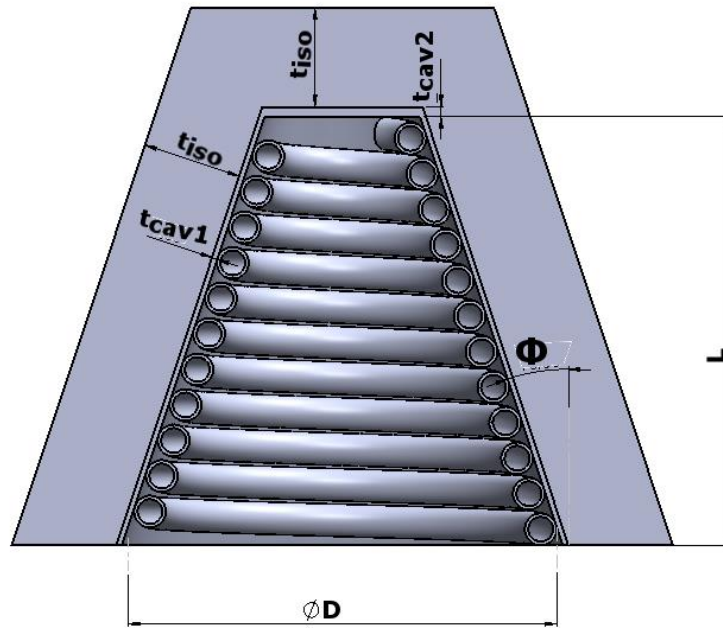


**Σχήμα 5.1.42: 3D σχήμα του κωνικού δέκτη.**



**Σχήμα 5.1.43: 3D σχήμα του σωλήνα δέκτη κωνικού σχήματος.**

Στο σχήμα 5.1.44 δίνεται η σχηματική παράσταση του σχεδιασμένου κωνικού δέκτη σε τομή. Και στον κώνο έχουμε διατηρήσει τα πάχη μόνωσης και κοιλότητας, το βήμα της έλικας και την διάμετρο του σωλήνα σταθερά (πίνακας 5.1.1). Επιπλέον το άνοιγμα του δέκτη  $D$  ισούται με 121 mm, όπως στα προηγούμενα σχήματα, με την διαφορά ότι στην περίπτωση του κώνου το άνοιγμα του δέκτη δεν ταυτίζεται με το άνοιγμα της κοιλότητας. Όπως δείχνει και το σχήμα ως διάμετρο του δέκτη  $D$  λαμβάνουμε την διάμετρο κύκλου στην διατομή εισόδου που εφάπτεται των εξωτερικών τοιχωμάτων του σωλήνα, η οποία βέβαια είναι πολύ κοντά στην διάμετρο της κοιλότητας. Μια ακόμη πιο σημαντική επισήμανση είναι η ύπαρξη δύο βασικών γεωμετρικών παραμέτρων τα οποία χρίζουν βελτιστοποίησης, το μήκος του δέκτη  $L$  και η γωνία του κώνου  $\Phi$ .



**Σχήμα 5.1.44: Τομή κωνικού δέκτη και βασικές γεωμετρικές διαστάσεις.**

Όπως είναι λογικό για σταθερό μήκος  $L$  όσο η γωνία του κώνου  $\Phi$  αυξάνεται τόσο μειώνεται η επιφάνεια του σωλήνα και το κενό στο πίσω μέρος της κοιλότητας. Το ζήτημα είναι να βρεθεί η μέγιστη γωνία κώνου,  $\Phi_{max}$ . Στο σχήμα 5.1.45 δίνεται το σχήμα μιας έλικας χωρίς πάχος. Από το σχήμα φαίνεται ότι λόγω ύπαρξης πάχους ίση με  $D_{coil,out}=9$  mm, έχει ως αποτέλεσμα η  $\Phi_{max}$  είναι μικρότερη από ότι θα ήταν σε μια έλικα χωρίς πάχος. Για τον υπολογισμό της καταφεύγουμε στις γεωμετρικές σχέσεις του σχήματος 5.1.45 και υπολογίζουμε αρχικά την γωνία  $\omega$  (σχέση 5.2) και στην συνέχεια την  $\Phi_{max}$ .

Η γωνία  $\omega$  προκύπτει από το τρίγωνο (AOC):

$$\omega = \tan^{-1}\left(\frac{H_{coil}}{\frac{D_{coil}}{2}}\right) \quad (5.2)$$

Όπου:  $H_{coil}, D_{coil}$  = το μήκος και η διάμετρος έλικας χωρίς πάχος.

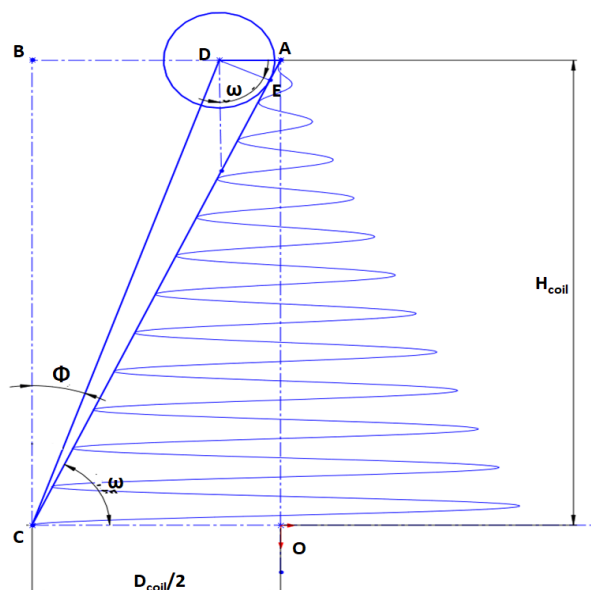
Η πλευρά  $BD=(D_{coil}/2)-AD$ , όπου η  $AD$  βγαίνει από το τρίγωνο (ADE):

$$AD = \frac{\frac{D_{coil,in}}{2}}{\sin(\omega)} \quad (5.3)$$

Τελικά μέσω του τριγώνου (BDC) υπολογίζεται η  $\Phi_{max}$ :

$$\Phi_{max} = \tan^{-1}\left(\frac{\frac{D_{coil}}{2} - \frac{D_{coil,in}}{2 \sin(\omega)}}{H_{coil}}\right) \quad (5.4)$$





**Σχήμα 5.1.45: Σχεδιαστική παράσταση κωνικής έλικας για τον προσδιορισμό της  $\Phi_{\max}$ .**

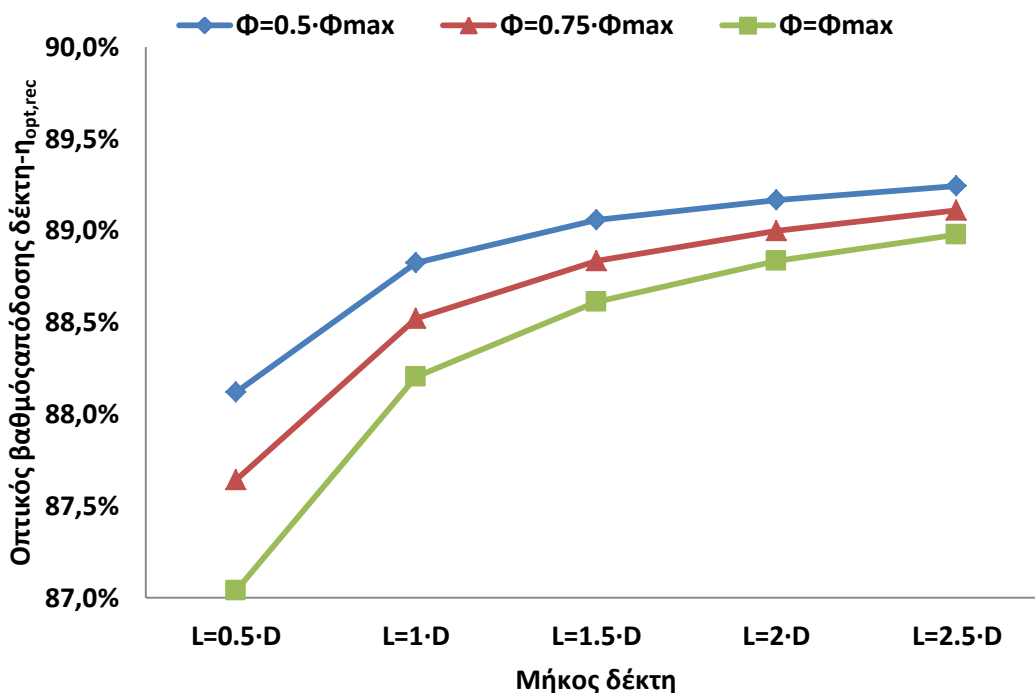
Στην περίπτωση του κώνου εξετάζεται παραμετρικά το μήκος  $L$  και η γωνία  $\Phi$  του κώνου. Συγκεκριμένα εξετάζονται πέντε διαφορετικά μήκη ( $L=0.5 \cdot D$ ,  $L=1 \cdot D$ ,  $L=1.5 \cdot D$ ,  $L=2 \cdot D$  και  $L=2.5 \cdot D$ ) και για κάθε μήκος τρεις διαφορετικές γωνίες ( $\Phi=0.5 \cdot \Phi_{\max}$ ,  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$ ,  $\Phi=1 \cdot \Phi_{\max}$ ). Οι γωνίες  $\Phi_{\max}$  για τα αντίστοιχα μήκη δίνονται στον πίνακα 5.1.5, όπως υπολογίστηκαν από την σχέση 5.4.

|                               | $L=0.5 \cdot D$ | $L=1 \cdot D$ | $L=1.5 \cdot D$ | $L=2 \cdot D$ | $L=2.5 \cdot D$ |
|-------------------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| $\Phi_{\max}(\text{degrees})$ | 43.8            | 24.5          | 16.6            | 12.4          | 9.9             |

**Πίνακας 5.1.5: Μέγιστες γωνίες του κώνου για τα αντίστοιχα μήκη του.**

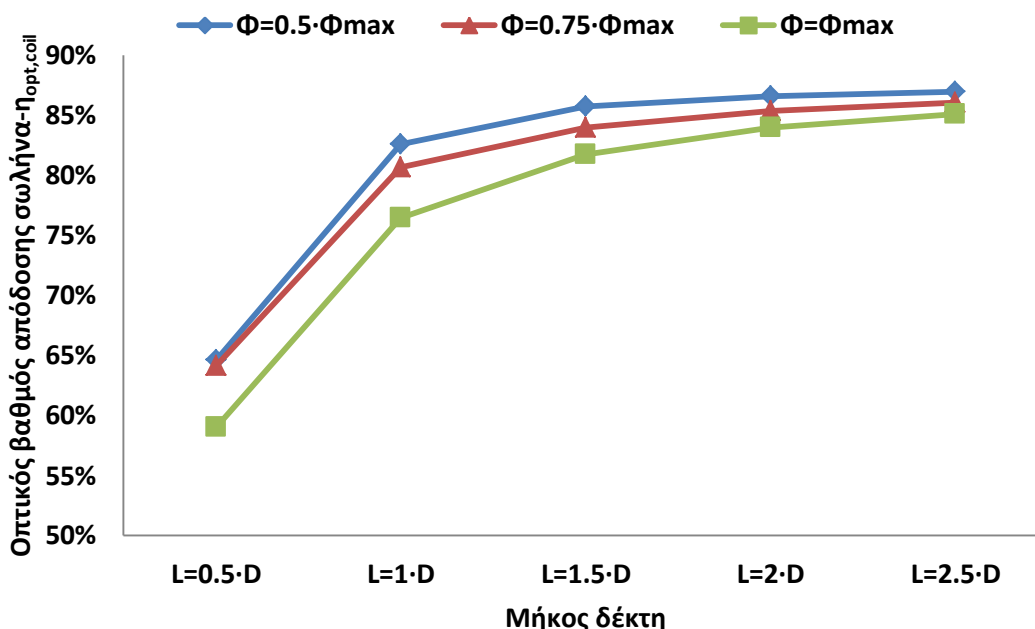
Το σχήμα 5.1.46 δείχνει την μεταβολή του οπτικού βαθμού απόδοσης του συλλέκτη, ο οποίος για σταθερή γωνία αυξάνεται με την αύξηση του μήκους  $L$ . Ο λόγος είναι η μειωμένη πιθανότητα των δευτερευουσών ανακλάσεων να εξέλθουν από τον δέκτη στα μεγάλα μήκη. Επιπλέον για σταθερό μήκος, ο οπτικός βαθμός απόδοσης του δέκτη αυξάνεται με την μείωση της γωνίας. Ο λόγος είναι ότι όσο μειώνεται η γωνία  $\Phi$  αυξάνονται οι πιθανότητες οι δευτερεύουσες ανακλάσεις να μην εξέλθουν από την κοιλότητα. Βέβαια και στις δύο περιπτώσεις οι αυξήσεις είναι μικρές λόγω της κοινής διατομής  $D$  και των μικρών απωλειών από δευτερεύουσες ανακλάσεις που εξέρχονται από την κοιλότητα.





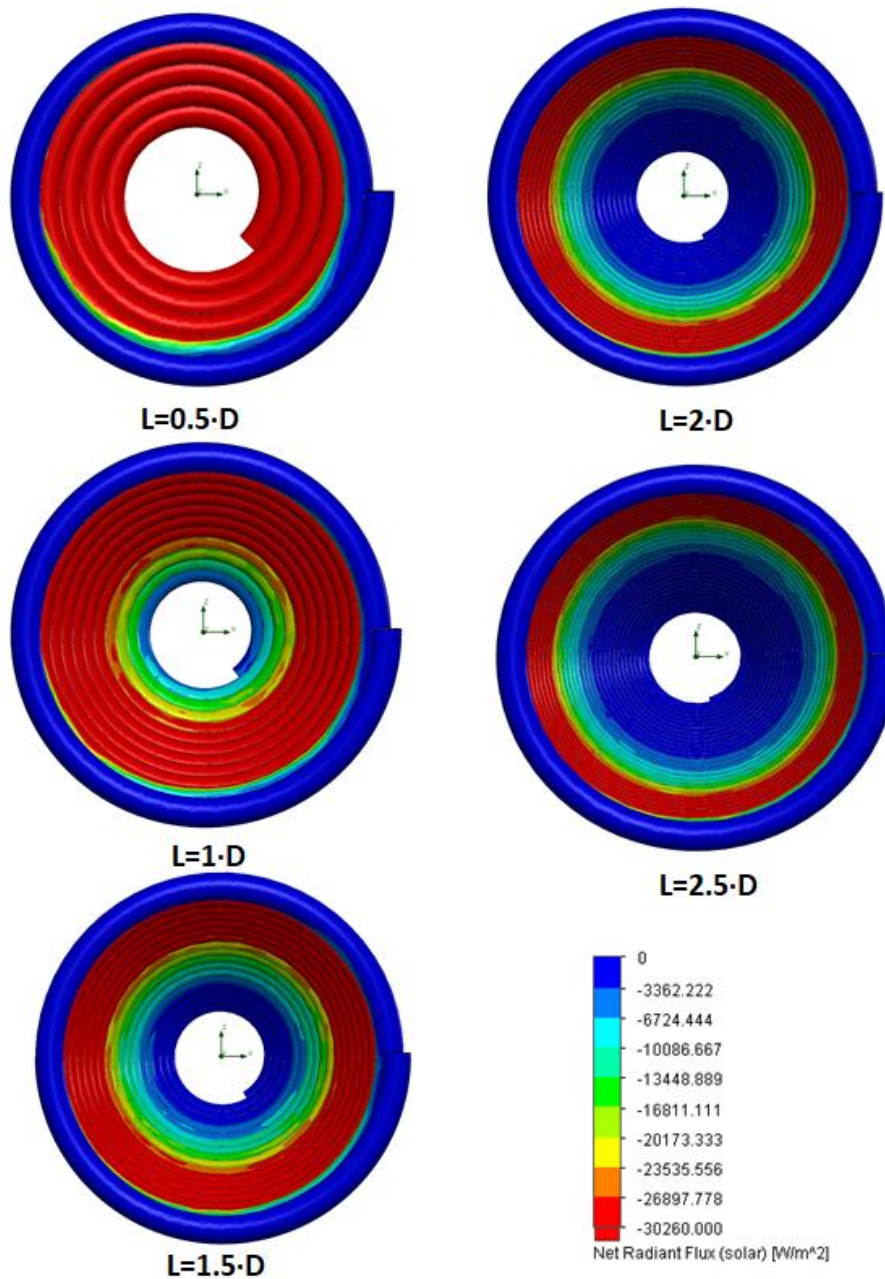
Σχήμα 5.1.46: Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη για διάφορα μήκη και γωνίες του κώνου.

Το σχήμα 5.1.47 δείχνει ότι ο οπτικός βαθμός απόδοσης του σωλήνα αυξάνεται τόσο με την αύξηση του μήκους του σωλήνα όσο και με την μείωση της γωνίας του κώνου. Ο λόγος είναι η αύξηση της επιφάνειας του σωλήνα και στις δύο περιπτώσεις. Τέλος βλέπω ότι ανεξαρτήτως γωνίας ο  $\eta_{opt,coil}$  αρχικά αυξάνεται πολύ και στη συνέχεια τείνει να σταθεροποιηθεί καθώς έχει ως άνω όριο τον οπτικό βαθμό απόδοσης του δέκτη.



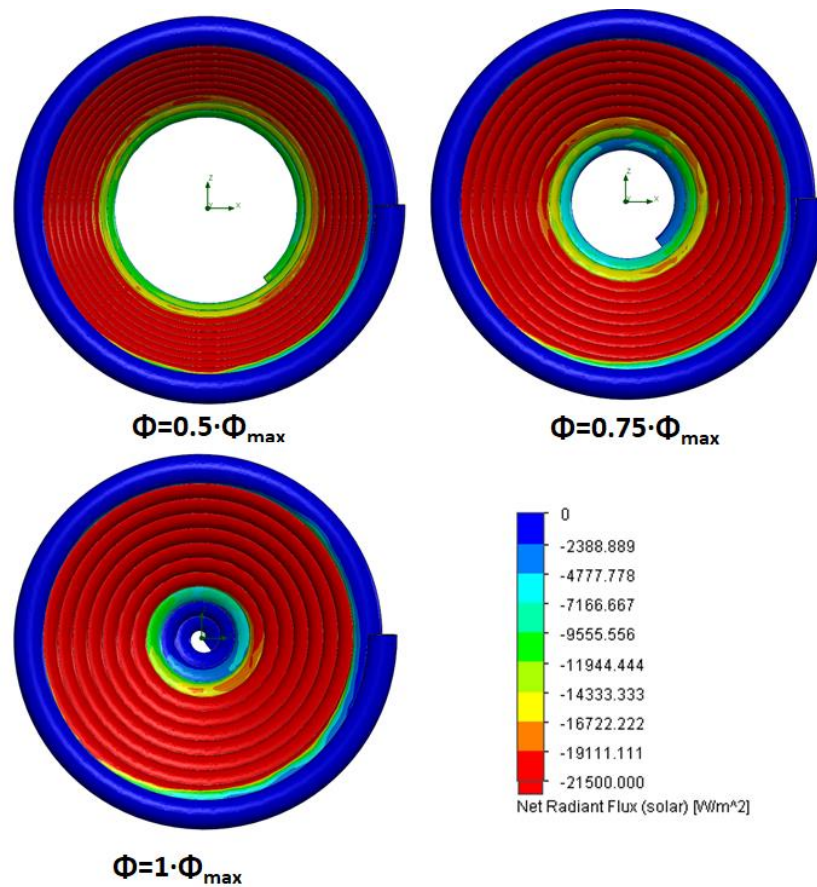
Σχήμα 5.1.47: Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη για διάφορα μήκη και γωνίες του κώνου.

Στο σχήμα 5.1.48 δίνεται η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του σωλήνα για σταθερή γωνία κώνου ( $\Phi=0.75\cdot\Phi_{\max}$ ). Παρατηρείται πώς βέλτιστη κατανομή παρουσιάζεται για  $L\leq 1\cdot D$ . Για  $L>D$ , μεγαλώνει η απόσταση από την εστία και έτσι στο βάθος η ακτινοβολία φτάνει με μειωμένη ένταση, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται άνισες κατανομές της ακτινοβολίας.



**Σχήμα 5.1.48: Κατανομή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα δεκτών κωνικού σχήματος για σταθερή γωνία κώνου ( $\Phi=0.75\cdot\Phi_{\max}$ ).**

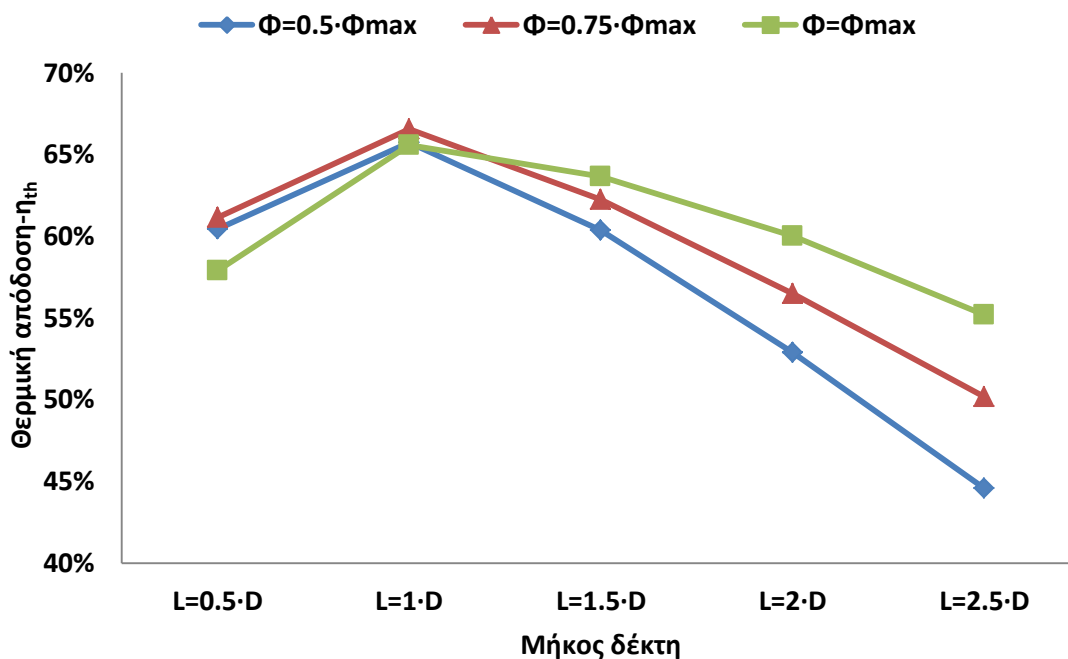
Όσον αφορά την επίδραση της γωνίας στην κατανομή της ακτινοβολίας, το σχήμα 5.1.49 δείχνει πώς για σταθερό μήκος δέκτη ( $L=1\cdot D$ ) η κατανομή της ακτινοβολίας επηρεάζεται πολύ λίγο. Αυτό δείχνει πώς η επίδραση της γωνίας κώνου στην κατανομή της ακτινοβολίας είναι υποδεέστερη από αυτή του μήκους.



**Σχήμα 5.1.49: Κατανομή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα δεκτών κωνικού σχήματος για σταθερό μήκος ( $L=1 \cdot D$ ).**

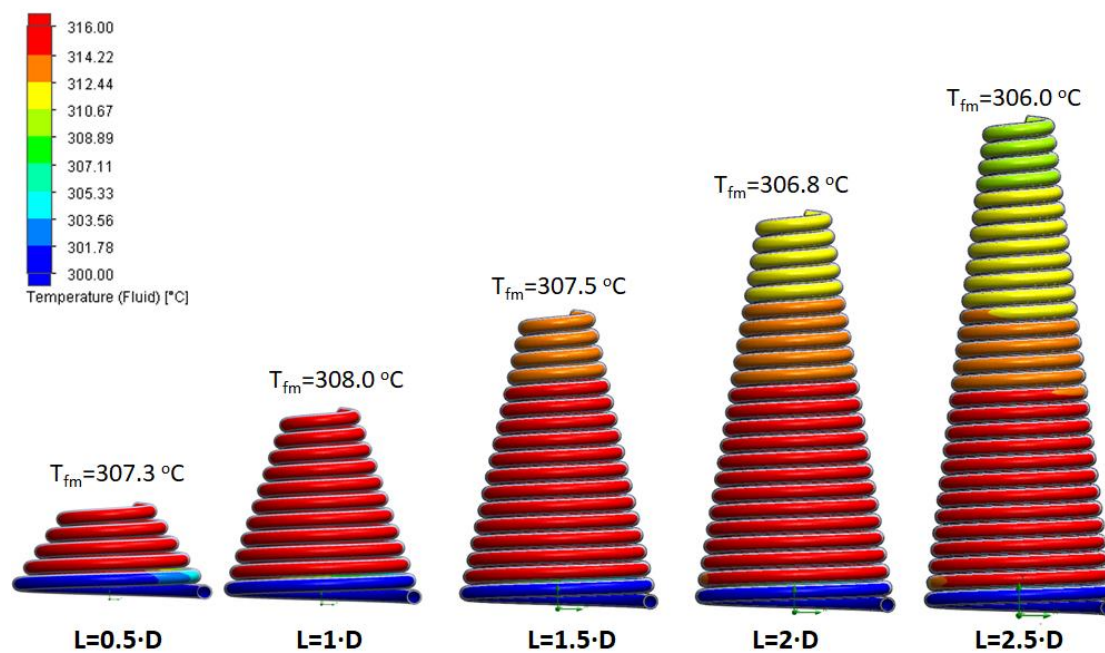
Ο θερμικός βαθμός απόδοσης επηρεάζεται αντίστροφα από την επιφάνεια του σωλήνα. Μεγάλη επιφάνεια σημαίνει μεγαλύτερη απορροφούμενη ακτινοβολία και ταυτόχρονα μεγαλύτερες θερμικές απώλειες. Εδώ μεταβάλλοντας την γωνία και το μήκος του κώνου, μεταβάλλουμε την επιφάνεια με στόχο να βρεθεί ο συνδυασμός ( $L, \Phi$ ) που δίνει τον μέγιστο θερμικό βαθμό απόδοσης. Η διακύμανση του θερμικού βαθμού απόδοσης δίνεται στο σχήμα 5.1.50 όπου παρατηρώ:

- Ανεξαρτήτως γωνίας κώνου, ο θερμικός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει μέγιστο για  $L=1 \cdot D$ . Για  $L < 1 \cdot D$ , ο θερμικός βαθμός μειώνεται λόγω χαμηλού  $\eta_{\text{opt,coil}}$ , ενώ για  $L > 1 \cdot D$  η θερμική απόδοση μειώνεται λόγω υψηλότερων θερμικών απωλειών. Για  $L=1 \cdot D$  ο  $\eta_{\text{th}}$  ισούται με 65.73% για  $\Phi=0.5 \cdot \Phi_{\max}$ , 66.56%  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$  και 65.57% για  $\Phi=1 \cdot \Phi_{\max}$ .
- Για σταθερό μήκος, στα χαμηλά  $L$ , καλύτερη θερμική απόδοση παρουσιάζεται για  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$  και στα υψηλά  $L$  καλύτερη θερμική απόδοση για  $\Phi=1 \cdot \Phi_{\max}$ . Αυτό όμως που έχει σημασία είναι ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται για  $L=1 \cdot D$  και για  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$ .



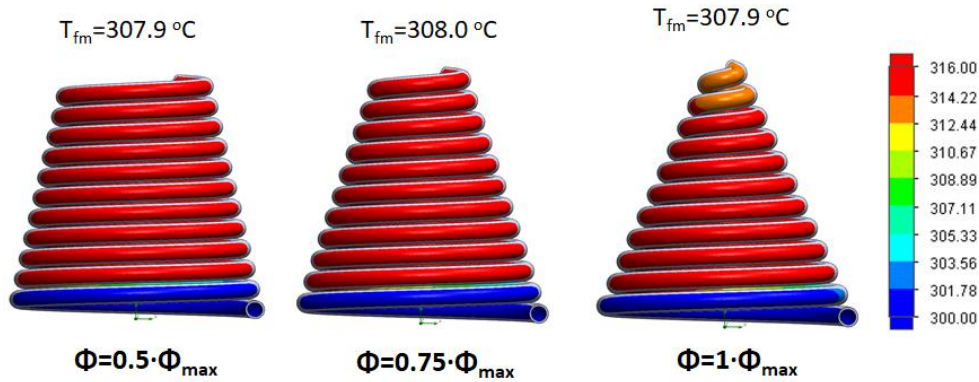
Σχήμα 5.1.50 : Θερμικός βαθμός απόδοσης του δέκτη κωνικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους L και της γωνίας Φ ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

Η μεγιστοποίηση του θερμικού βαθμού απόδοσης για  $L=1\cdot D$  και για  $\Phi=0.75\cdot\Phi_{max}$  επιβεβαιώνεται και από την μέση θερμοκρασία του ρευστού η οποία είναι μέγιστη για τον συνδυασμό αυτό (σχήματα 5.1.51 και 5.1.52). Όσον αφορά την κατανομή της φαίνεται και από τα δύο σχήματα πώς για τον προηγούμενο συνδυασμό έχω βέλτιστη κατανομή.



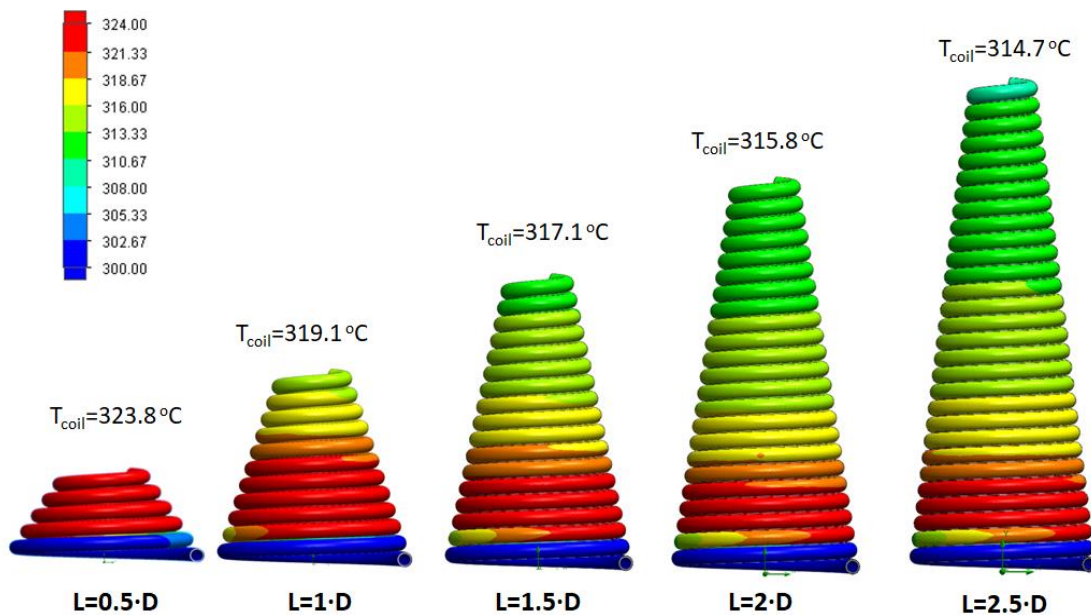
Σχήμα 5.1.51: Κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα κωνικού δέκτη και μέση θερμοκρασία για σταθερή γωνία κώνου ( $\Phi=0.75\cdot\Phi_{max}$ ).





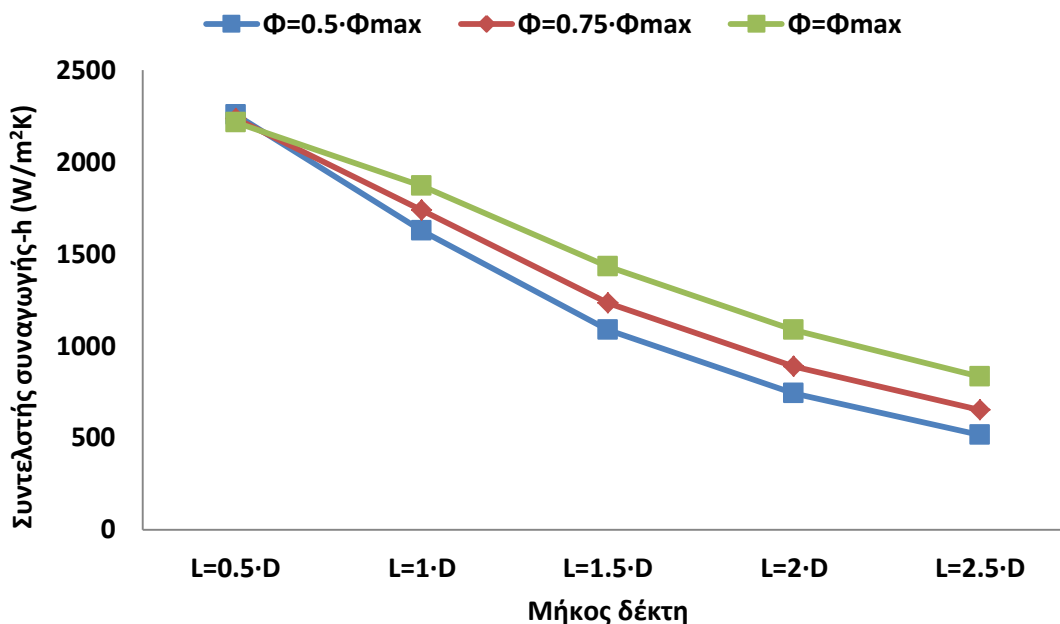
**Σχήμα 5.1.52:** Κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα κωνικού δέκτη και μέση θερμοκρασία για σταθερό μήκος ( $L=1 \cdot D$ ).

Επιπλέον στο σχήμα 5.1.53 δίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων του σωλήνα για τα διάφορα μήκη. Παρατηρώ πώς όσο μεγαλώνει το μήκος η  $T_{coil}$  μειώνεται λόγω μεγαλύτερων επιφανειών. Και στην περίπτωση του κωνικού σχήματος για  $L=0.5 \cdot D$ , ανεξαρτήτως γωνίας κώνου αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στα τοιχώματα της κοιλότητας, κάτι που δεν είναι επιθυμητό καθώς μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού.



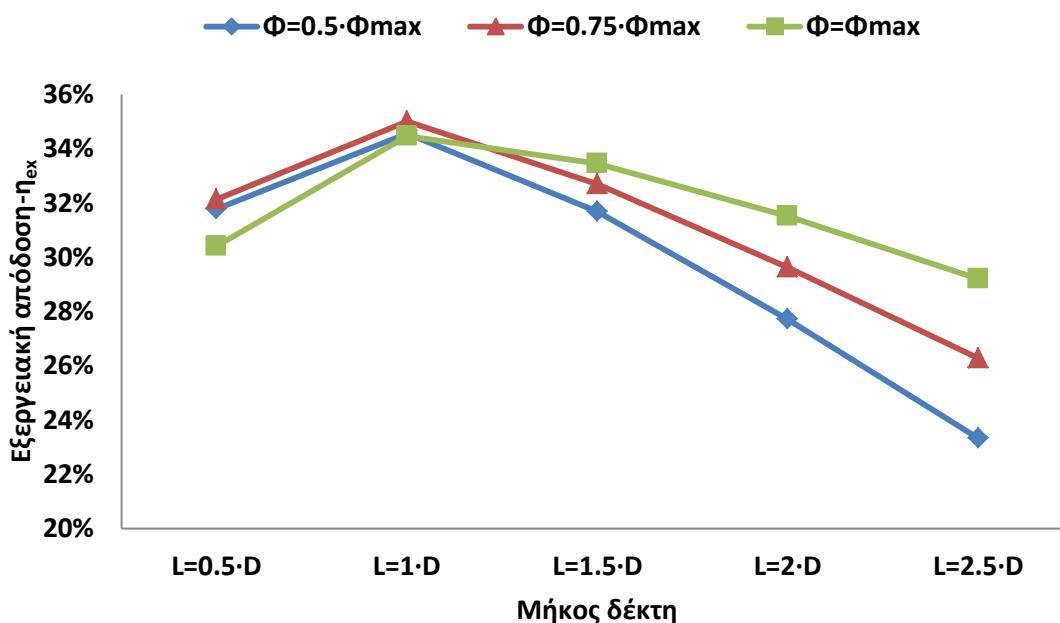
**Σχήμα 5.1.53:** Κατανομή θερμοκρασίας του τοιχώματος του σωλήνα κωνικού δέκτη για σταθερή γωνία κώνου ( $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{max}$ ).

Ο συντελεστής συναγωγής δίνεται στο σχήμα 5.1.54 και φαίνεται πώς η επίδραση της εσωτερικής επιφάνειας του σωλήνα να υπερισχύει των υπολοίπων παραγόντων και για αυτό βαίνει μειούμενο με αύξηση της επιφάνειας, είτε λόγω μεταβολής του μήκους είτε λόγω μεταβολής της γωνίας.



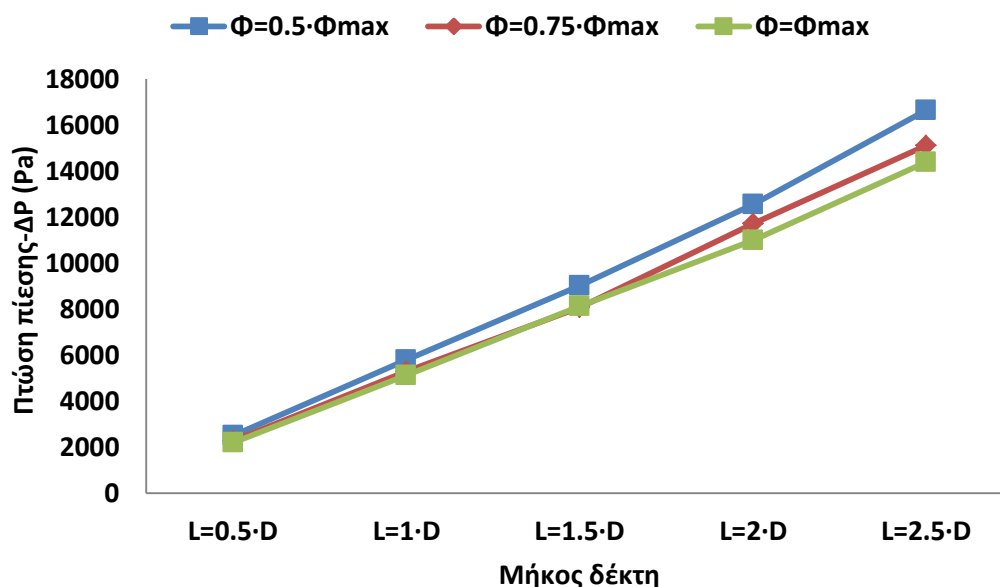
Σχήμα 5.1.54 : Συντελεστής συναγωγής του δέκτη κωνικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους L και της γωνίας  $\Phi$  ( $T_{in}=300$  °C,  $m=0.03$  kg/s).

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται και αυτός για  $L=1 \cdot D$  και για  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$ , όπως δείχνει το σχήμα 5.1.55. Γενικά παρατηρώ πώς η διακύμανση του μοιάζει πολύ με αυτή του θερμικού βαθμού απόδοσης καθώς στην παρούσα φάση επηρεάζεται κυρίως από την ωφέλιμη ισχύ.



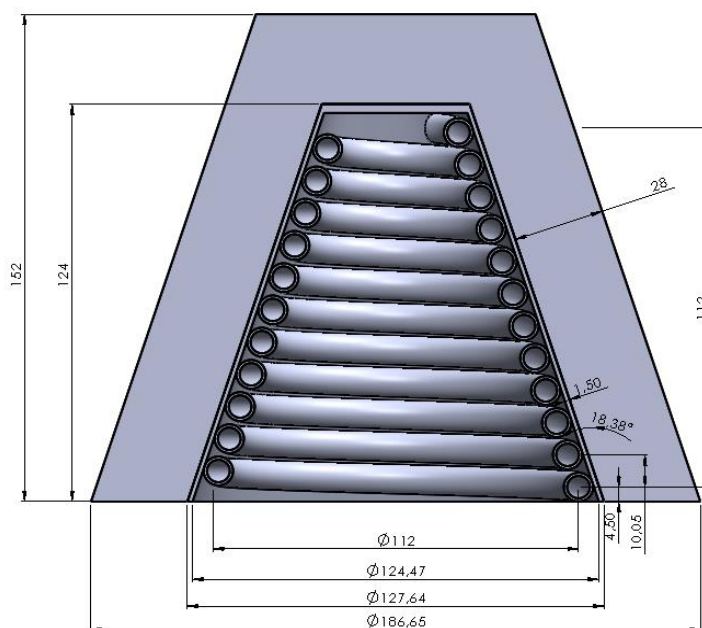
Σχήμα 5.1.55: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης του δέκτη κωνικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους L και της γωνίας  $\Phi$  ( $T_{in}=300$  °C,  $m=0.03$  kg/s).

Η πτώση πίεσης αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του μήκους του σωλήνα, ο οποίος είναι μεγαλύτερος όσο L αυξάνεται και όσο  $\Phi$  μειώνεται. Η διακύμανση της δίνεται στο σχήμα 5.1.56 όπου πράγματι οι απώλειες πιέσεις είναι μεγαλύτερες στα μεγάλα μήκη και για  $\Phi=0.5\cdot\Phi_{\max}$ .



Σχήμα 5.1.56 : Πτώση πίεσης του δέκτη κωνικού σχήματος για διάφορες τιμές του μήκους L και της γωνίας  $\Phi$  ( $T_{in}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

Τελικά η οπτική, θερμική και εξεργειακή μελέτη των δύο βασικών γεωμετρικών παραμέτρων του κώνου, έδειξε πώς η βέλτιστη γεωμετρία του κωνικού δέκτη είναι για μήκος κώνου  $L=1\cdot D=121\text{ mm}$  και γωνία κώνου  $\Phi=0.75\cdot\Phi_{\max}=18.38^{\circ}$ . Τα αναλυτικά γεωμετρικά μεγέθη του επιλεγμένου κωνικού δέκτη δίνονται στο σχήμα 5.1.57.

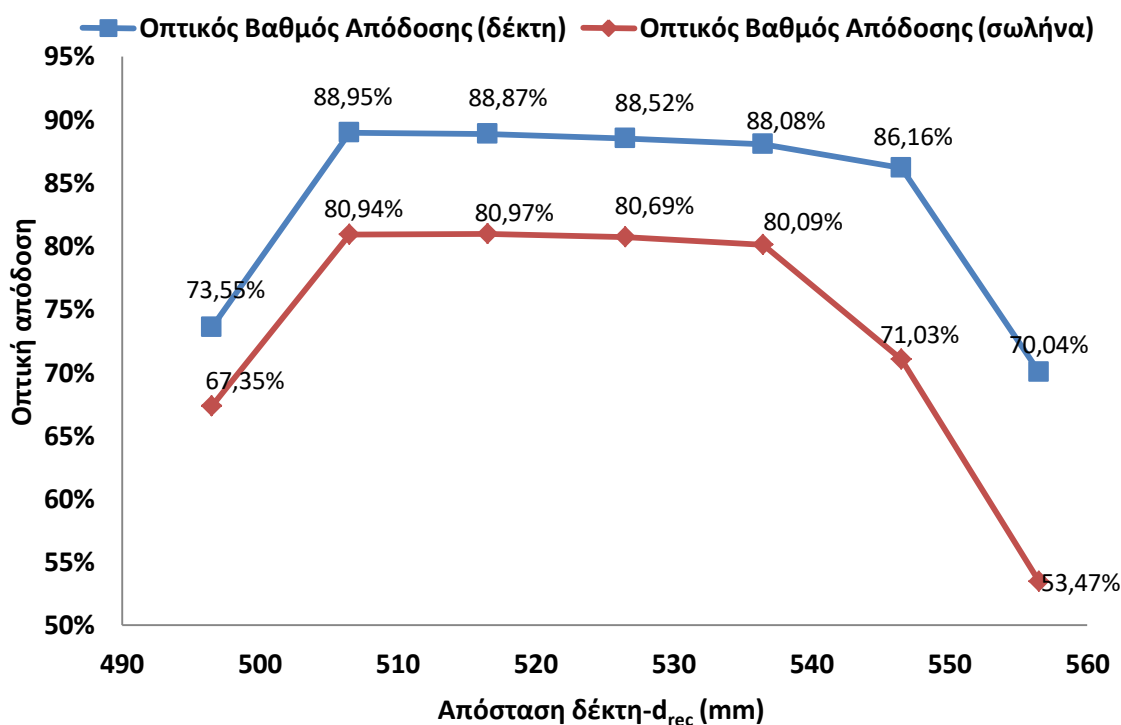


Σχήμα 5.1.57: Γεωμετρικά μεγέθη βέλτιστου κωνικού δέκτη.

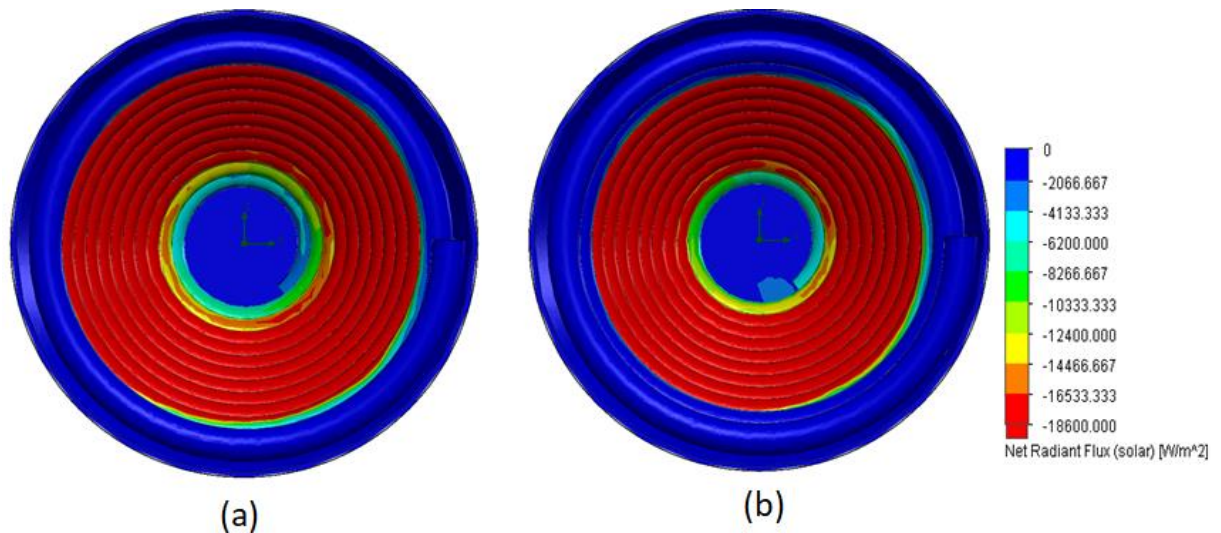


Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τα υπόλοιπα σχήματα υπολογίστηκαν οι οπτικοί βαθμοί για διάφορες θέσεις του δέκτη (σχήμα 5.1.58). Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σχήματα, στον κώνο όσο πιο κοντά φέρνω τον δέκτη στον συγκεντρωτή (για ορισμένο εύρος κοντά στη εστία), ο οπτικός βαθμός απόδοσης του δέκτη αυξάνεται λόγω μείωσης των οπτικών απωλειών από δευτερεύουσες ανακλάσεις που εξέρχονται από τον δέκτη. Αυτό γίνεται διότι η εστία με αυτό τον τρόπο βρίσκεται μέσα στην κοιλότητα και άρα η πιθανότητα διαφυγής των ακτινών μετά την ανάκλαση μειώνεται. Ο κώνος παρουσιάζει την ιδιομορφία ότι στο πίσω μέρος της κοιλότητας, η γυμνή επιφάνεια που δεν καλύπτεται από σωλήνα είναι πολύ μικρή. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι η μεταβολή της θέσης δεν επηρεάζει την ανακατανομή της εισερχόμενης ακτινοβολίας μεταξύ σωλήνα και κοιλότητας. Για αυτό οπτικός βαθμός απόδοσης του σωλήνα μεγιστοποιείται για  $d_{rec}=516.5$  mm, επηρεαζόμενο κυρίως από την αύξηση του  $\eta_{opt,rec}$ .

Η παραπάνω παρατήρηση φαίνεται και στο 5.1.59, όπου παρατηρώ πώς η κατανομή τόσο στο σωλήνα όσο και στο πίσω μέρος της κοιλότητας παρουσιάζει μικρές μεταβολές μεταξύ της εστίας ( $d_{rec}=526.5$  mm) και της βέλτιστης θέσης ( $d_{rec}=516.5$  mm). Μια επιπλέον εξήγηση της χαμηλής έντασης της ακτινοβολίας στο πίσω μέρος της κοιλότητας δίνεται από το γεγονός πώς ο κώνος στρέφει της επιφάνειες της κοιλότητας προς το άνοιγμα και άρα οι δευτερεύουσες ακτινοβολίες μετά από ανακλάσεις είναι λιγότερο πιθανό να φτάσουν στο πίσω μέρος της κοιλότητας.



**Σχήμα 5.1.58:** Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη και οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα, του δέκτη κωνικού σχήματος, για διάφορες τιμές της απόστασης του δέκτη από τον συγκεντρωτή.



**Σχήμα 5.1.59: Κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας για απόσταση του δέκτη από τον συγκεντρωτή (a)  $d_{rec}=526.5 \text{ mm}=f$  και (b)  $d_{rec}=516.5 \text{ mm}$**

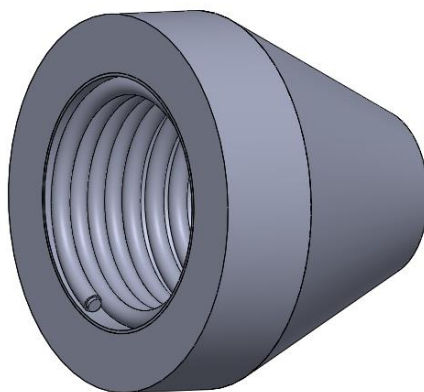
Στον πίνακα 5.1.6, δίνονται οι βαθμοί απόδοσης του βέλτιστου κωνικού δέκτη τοποθετημένο στην βέλτιστη θέση ( $d_{rec}=516.5 \text{ mm}$ ), για παροχή μάζας  $m=0.03 \text{ kg/s}$ , θερμοκρασία εισόδου  $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$  και εργαζόμενο μέσο Therminol-VP1.

| Μέγεθος                          | Σύμβολο           | Τιμή   |
|----------------------------------|-------------------|--------|
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (δέκτη)  | $\eta_{opt,rec}$  | 88.87% |
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (σωλήνα) | $\eta_{opt,coil}$ | 80.97% |
| Θερμικός Βαθμός Απόδοσης         | $\eta_{th}$       | 66.85% |
| Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης      | $\eta_{ex}$       | 35.14% |

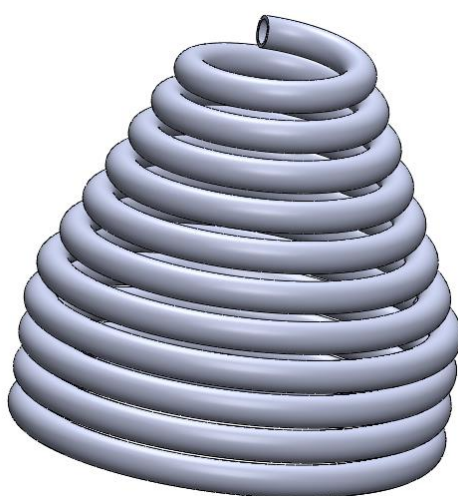
**Πίνακας 5.1.6: Βαθμοί απόδοσης βέλτιστου κωνικού δέκτη για  $d_{rec}=516.5 \text{ mm}$**

### 5.1.5 Συνδυασμός κωνικού-κυλινδρικού σχήματος.

Μέχρι τώρα εξετάστηκαν βασικά γεωμετρικά σχήματα. Από την οπτική ανάλυση φάνηκε πώς το κύριο μειονέκτημα του κυλίνδρου είναι η ύπαρξη γυμνής από σωλήνα επιφάνεια στο πίσω μέρος της κοιλότητας, με αποτέλεσμα να απορροφά μεγάλη ακτινοβολία η κοιλότητα. Από την άλλη στον κώνο κύριο οπτικό μειονέκτημα σε σχέση με τα άλλα σχήματα ήταν οι οπτικές απώλειες από διαφυγές ακτινών μετά από δευτερεύουσες ανακλάσεις. Με βάση αυτές τις δύο παρατηρήσεις σχεδιάστηκε ένας κωνοκυλινδρικός δέκτης που στο πίσω μέρος του έχει έναν κώνο και στο μπροστινό του μέρος ένα κύλινδρο. Τα τρισδιάστατα σχήματα του κωνοκυλινδρικού δέκτη και του σωλήνα του δίνονται παρακάτω:



Σχήμα 5.1.60: 3D σχήμα δέκτη κωνοκυλινδρικής μορφής.



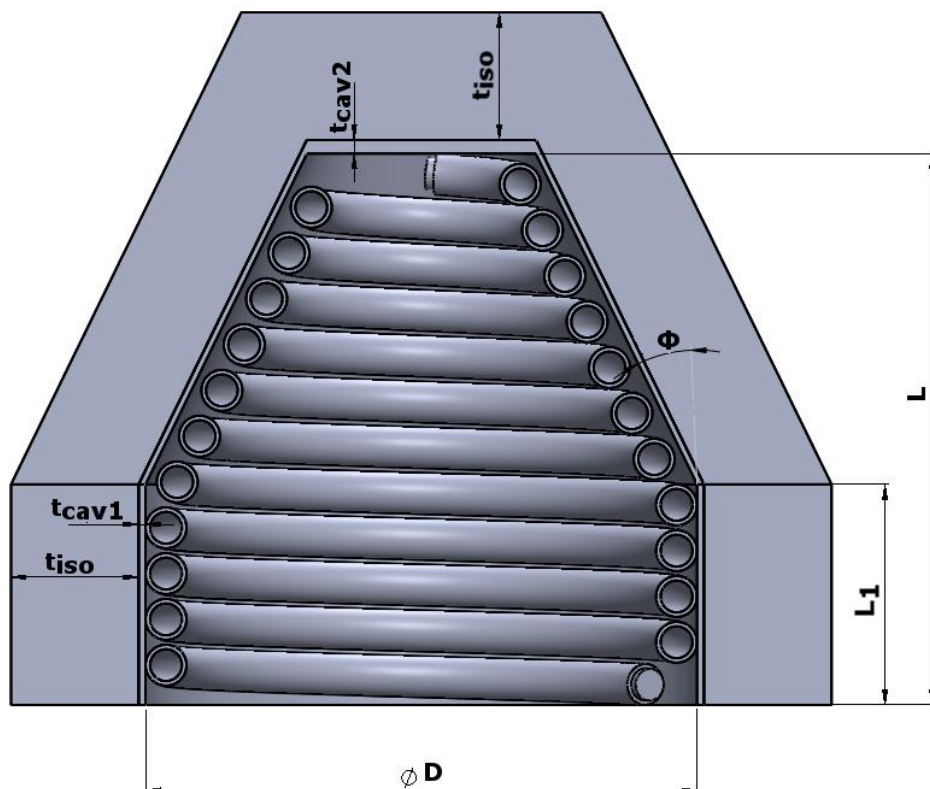
Σχήμα 5.1.61: 3D σχήμα σωλήνα του κωνοκυλινδρικού δέκτη.

Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη φαίνονται στο σχήμα 5.1.62. Για τον κύλινδρο και τον κώνο βρέθηκε βέλτιστο μήκος  $L=1 \cdot D=121$  mm. Το μήκος αυτό όπως και τα πάχη της μόνωσης και της κοιλότητας διατηρήθηκαν σταθερά σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Οι δύο βασικές γεωμετρικές παράμετροι είναι:

- Ο λόγος (μήκος κυλίνδρου)/(συνολικό μήκος δέκτη) =  $L_1/L$ , όπου στην ουσία εκφράζει τι ποσοστό του δέκτη θα είναι κύλινδρος και τι κώνος. Εξετάζονται πέντε διαφορετικές τιμές,  $L_1=0.3 \cdot L$ ,  $L_1=0.4 \cdot L$ ,  $L_1=0.5 \cdot L$ ,  $L_1=0.6 \cdot L$ ,  $L_1=0.7 \cdot L$ .
- Η γωνία του κώνου ( $\Phi$ ), για την οποία εξετάζονται τρεις τιμές,  $\Phi=0.5 \cdot \Phi_{\max}$ ,  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$ ,  $\Phi=1 \cdot \Phi_{\max}$ . Οι γωνίες  $\Phi_{\max}$  για τον ελικοειδή σωλήνα του κώνου στο πίσω μέρος του δέκτη υπολογίζονται από την σχέση 5.4 και δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

|                         | $L_1=0.3 \cdot L$ | $L_1=0.4 \cdot L$ | $L_1=0.5 \cdot L$ | $L_1=0.6 \cdot L$ | $L_1=0.7 \cdot L$ |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\Phi_{\max}$ (degrees) | 30.9              | 34.7              | 39.5              | 45.4              | 52.7              |

Πίνακας 5.1.7: Μέγιστες γωνίες του κώνου για τα αντίστοιχα μήκη του.

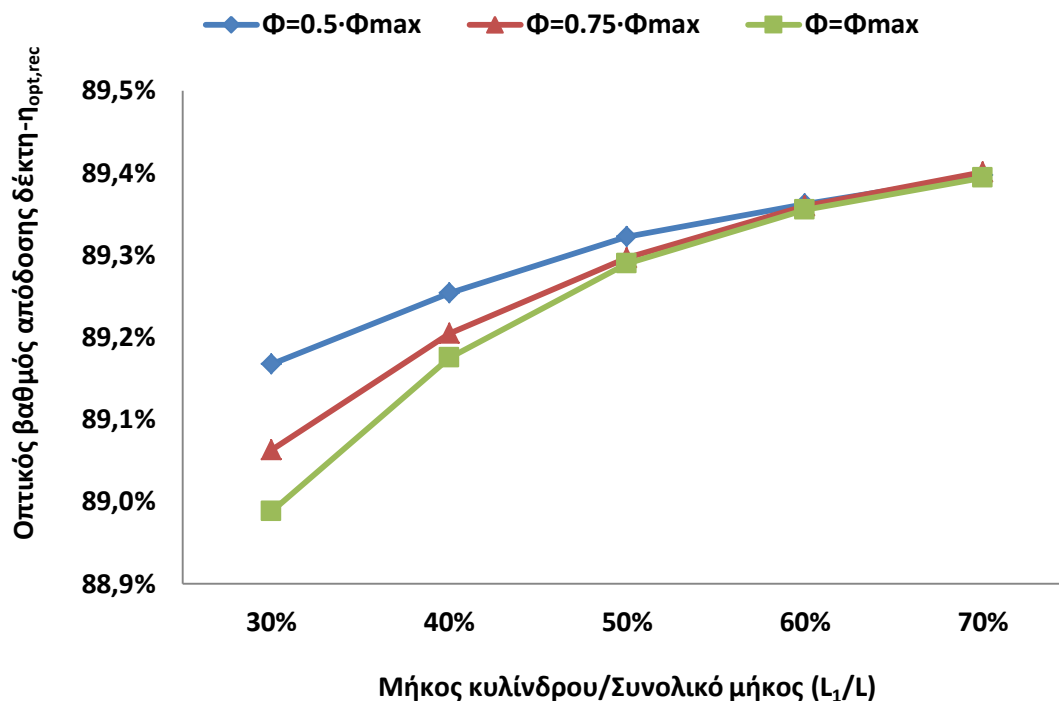


**Σχήμα 5.1.62: Τομή κωνοκυλινδρικού δέκτη και βασικές γεωμετρικές διαστάσεις.**

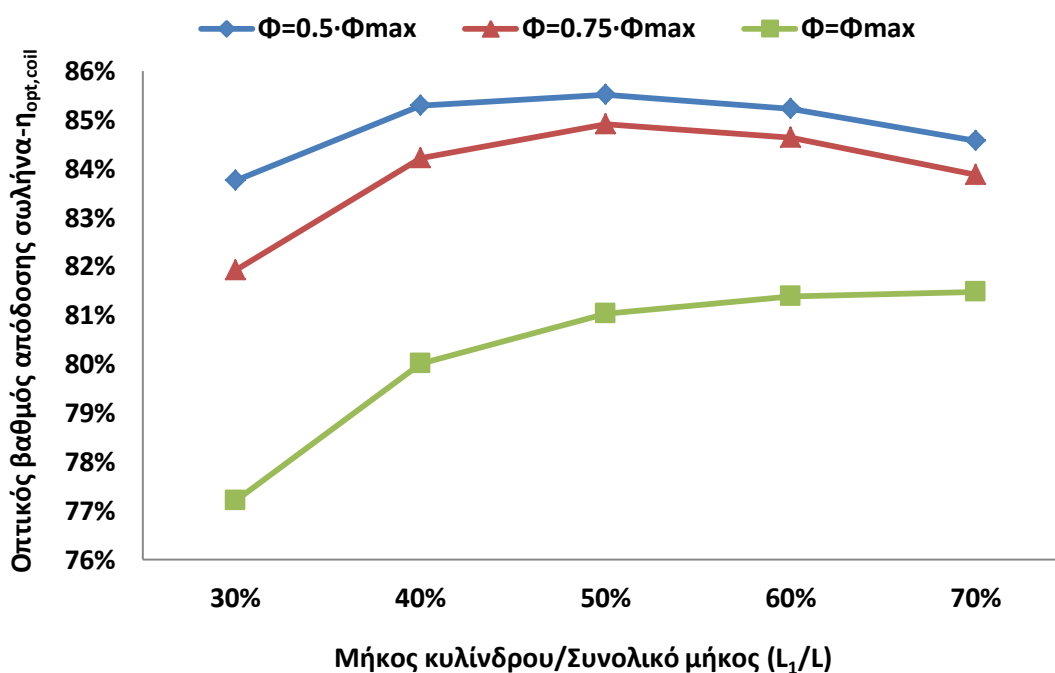
Τέλος όσο αφορά την γεωμετρία είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι η επιφάνεια του σωλήνα μεγαλώνει με αύξηση του  $L_1$ , για σταθερή γωνία  $\Phi$  καθώς ο κύλινδρος για το ίδιο μήκος καταλαμβάνει πιο πολύ χώρο. Επιπλέον για σταθερό  $L_1$ , η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα μεγαλώνει με μείωση της γωνίας  $\Phi$ .

Στο σχήμα 5.1.63 φαίνεται η αύξηση του οπτικού βαθμού απόδοσης του δέκτη τόσο με αύξηση του λόγου  $L_1/L$  όσο και με μείωση της γωνίας  $\Phi$ . Η μικρή αυτή αύξηση (κάτω του 1%) οφείλεται στην μείωση της πιθανότητας διαφυγής των ακτινών μετά από δευτερεύουσες ανακλάσεις όσο το κωνοκυλινδρικό σχήμα προσεγγίζει το κυλινδρικό.

Στο σχήμα 5.1.64 φαίνεται ότι για σταθερό λόγο  $L_1/L$ , ο οπτικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με μείωση της γωνίας  $\Phi$  λόγω κυρίως της αύξησης της επιφάνειας του σωλήνα. Από την άλλη η αύξηση του  $L_1/L$ , για  $\Phi = \Phi_{\max}$  οδηγεί σε αύξηση του  $\eta_{\text{opt,coil}}$ , ενώ για  $\Phi = 0.5 \cdot \Phi_{\max}$  και  $\Phi = 0.75 \cdot \Phi_{\max}$  παρουσιάζει μέγιστο για  $L_1/L = 0.5$ . Τελικά ο μέγιστος  $\eta_{\text{opt,coil}}$  για το υβριδικό σχήμα εμφανίζεται για  $L_1/L = 0.5$  και  $\Phi = 0.5 \cdot \Phi_{\max}$ .



Σχήμα 5.1.63: Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη για διάφορες τιμές του λόγου  $L_1/L$  και γωνίες  $\Phi$ .

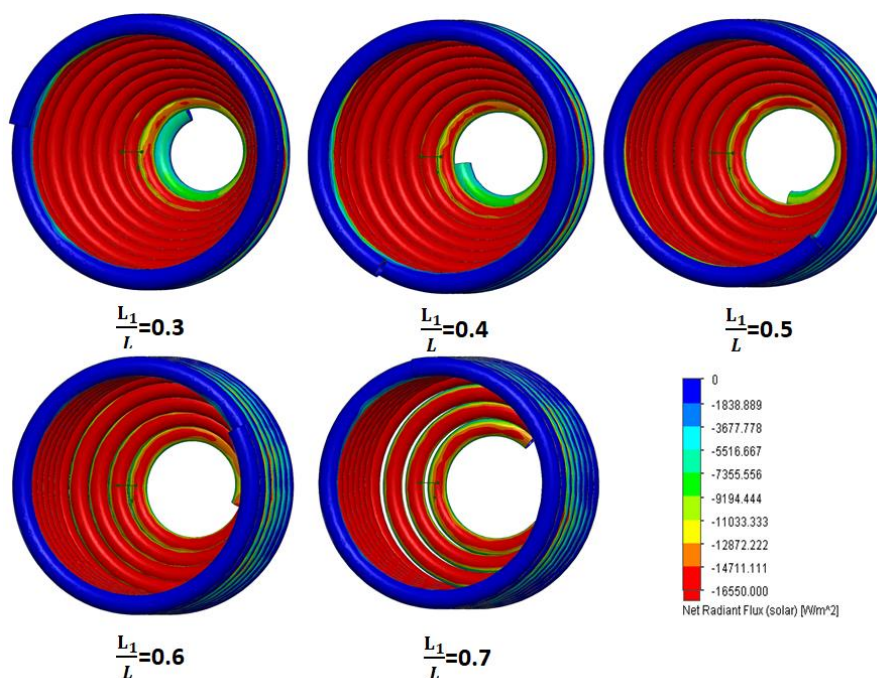


Σχήμα 5.1.64: Οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα για διάφορες τιμές του λόγου  $L_1/L$  και γωνίες  $\Phi$ .

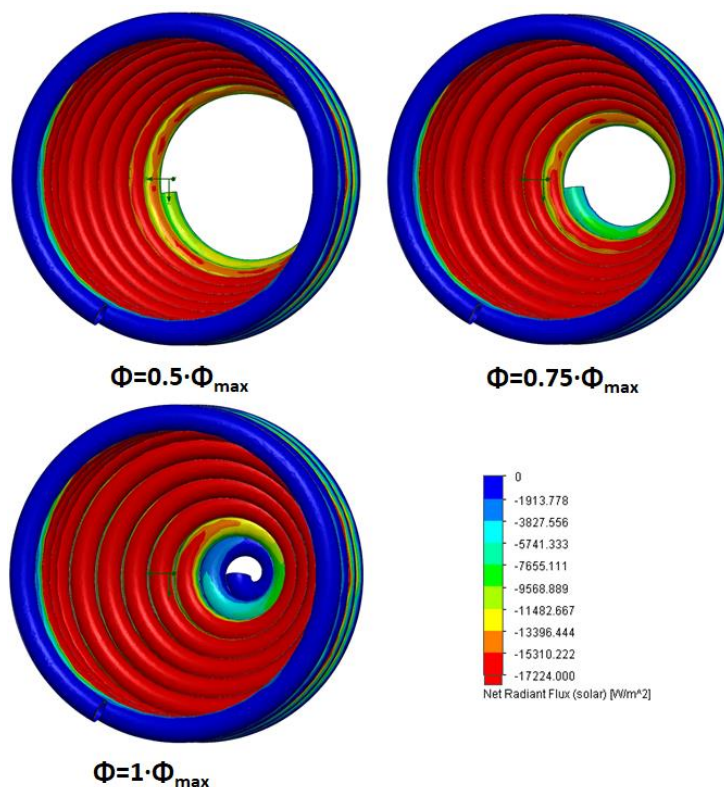
Για την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας καταφεύγουμε στα σχήματα 5.1.65 και 5.1.66. Το γεγονός ότι η κατανομή, όπως είδαμε στα προηγούμενα σχήματα, επηρεάζεται κυρίως από το συνολικό μήκος του δέκτη  $L$ , έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ουσιαστικές



μεταβολές με την μεταβολή των μεγεθών  $L_1/L$  και  $\Phi$ . Γενικά για όλες τιμές παρουσιάζονται αρκετά ομοιόμορφες κατανομές, επιβεβαιώνοντας ότι έχουμε το βέλτιστο μήκος  $L$ .



Σχήμα 5.1.65: Κατανομή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα δεκτών κωνοκυλινδρικού σχήματος για σταθερή γωνία κώνου ( $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{max}$ ).

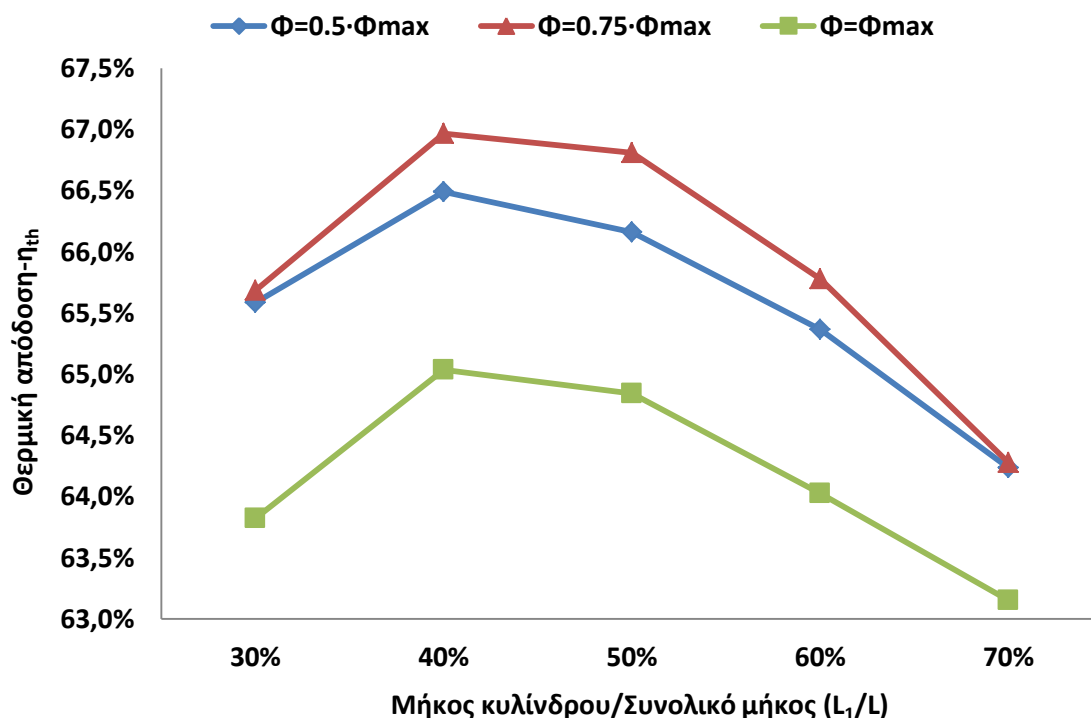


Σχήμα 5.1.66: Κατανομή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα δεκτών κωνοκυλινδρικού σχήματος για σταθερό λόγο  $L_1/L=0.4$ .

Η διακύμανση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κωνοκυλινδρικού δέκτη δίνεται στο σχήμα 5.1.67. όπου τα δύο βασικά συμπεράσματα είναι:

- Ανεξαρτήτως του λόγου  $L_1/L$ , ο  $\eta_{th}$  μεγιστοποιείται για  $\Phi=0.75\cdot\Phi_{max}$  όπου έχω υψηλό οπτικό βαθμό απόδοσης σωλήνα και χαμηλές θερμικές απώλειες. Ενδιαφέρον είναι και το γεγονός ότι το αποτέλεσμα είναι ίδιο με την περίπτωση του κωνικού σχήματος.
- Ανεξαρτήτως της γωνίας  $\Phi$ , ο  $\eta_{th}$  μεγιστοποιείται για  $L_1/L=0.4$ .

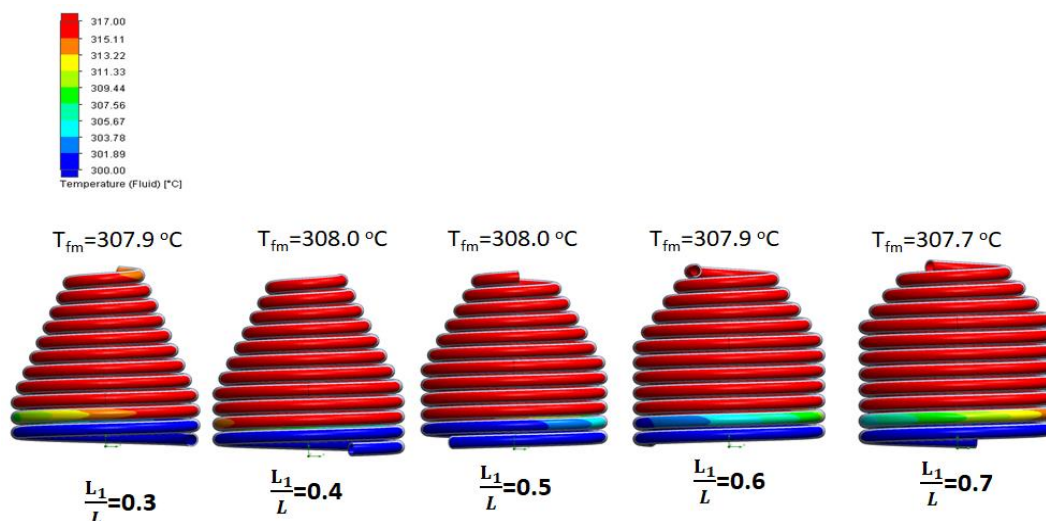
Άρα τελικά η βέλτιστη θερμική συμπεριφορά εμφανίζεται για  $L_1/L=0.4$  και  $\Phi=0.75\cdot\Phi_{max}$ .



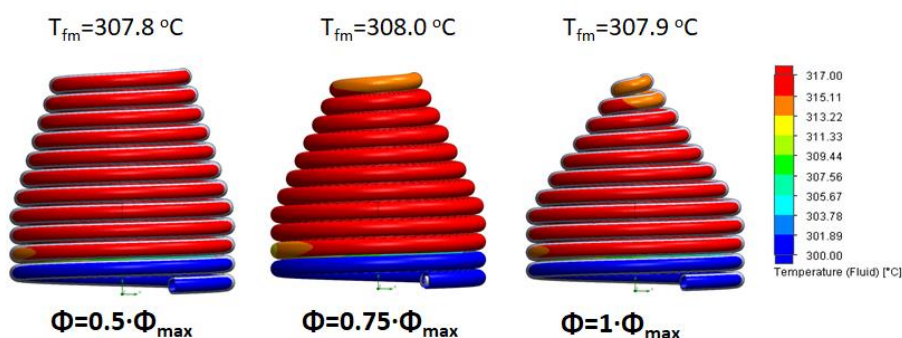
**Σχήμα 5.1.67 :** Θερμικός βαθμός απόδοσης του δέκτη κωνοκυλινδρικού σχήματος για διάφορες τιμές του λόγου  $L_1/L$  και γωνίες  $\Phi$  ( $T_{in}=300\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03\text{ kg/s}$ ).

Για να κατανοήσουμε το προηγούμενο αποτέλεσμα μελετάμε τις παραμέτρους της θερμοκρασίας του ρευστού και του τοιχώματος και τον συντελεστή συναγωγής. Βέβαια τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές λόγω του γεγονότος ότι έχουμε  $L$ =σταθερό. Στα σχήματα 5.1.68 και 5.1.69 παρατηρούμε την μεγιστοποίηση της μέσης θερμοκρασίας (άρα και της θερμοκρασίας εξόδου), στην περίπτωση  $L_1/L=0.4$  και  $\Phi=0.75\cdot\Phi_{max}$ . Η κατανομή δεν παρουσιάζει ουσιαστικές μεταβολές. Το σχήμα 5.1.70 δείχνει πώς η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα μειώνεται με αύξηση της επιφάνειας, τάση που είδαμε και σε προηγούμενα είδη δεκτών.

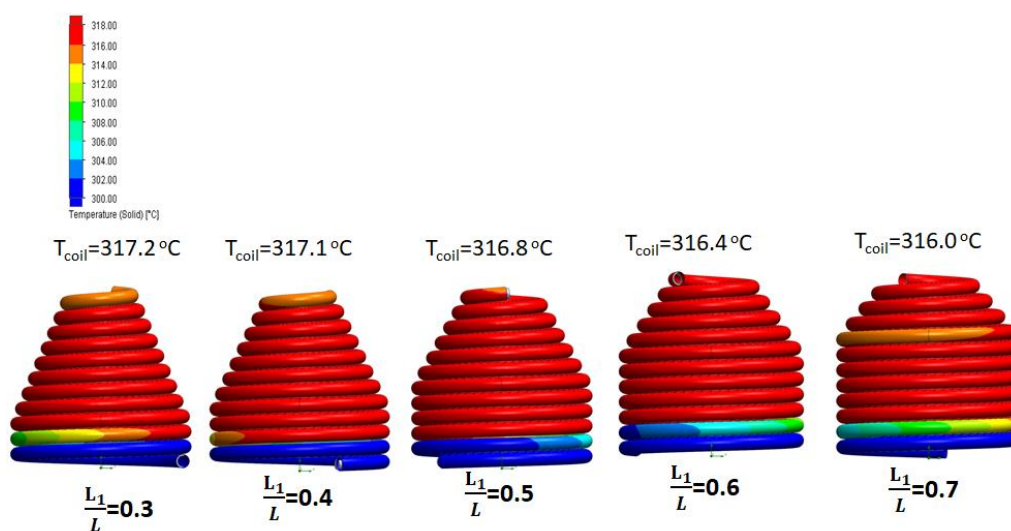




Σχήμα 5.1.68: Κατανομή και μέση θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα κωνοκυλινδρικού δέκτη για σταθερή γωνία κώνου ( $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{max}$ ).

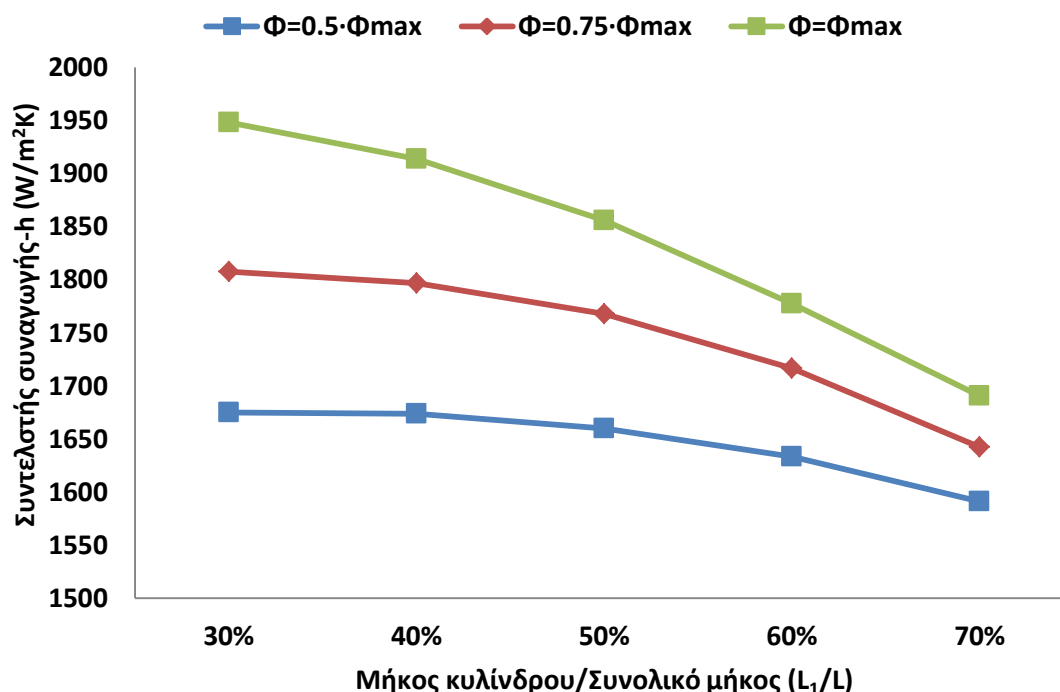


Σχήμα 5.1.69: Κατανομή και μέση θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του σωλήνα κωνοκυλινδρικού δέκτη για σταθερό λόγο  $L_1/L=0.4$ .



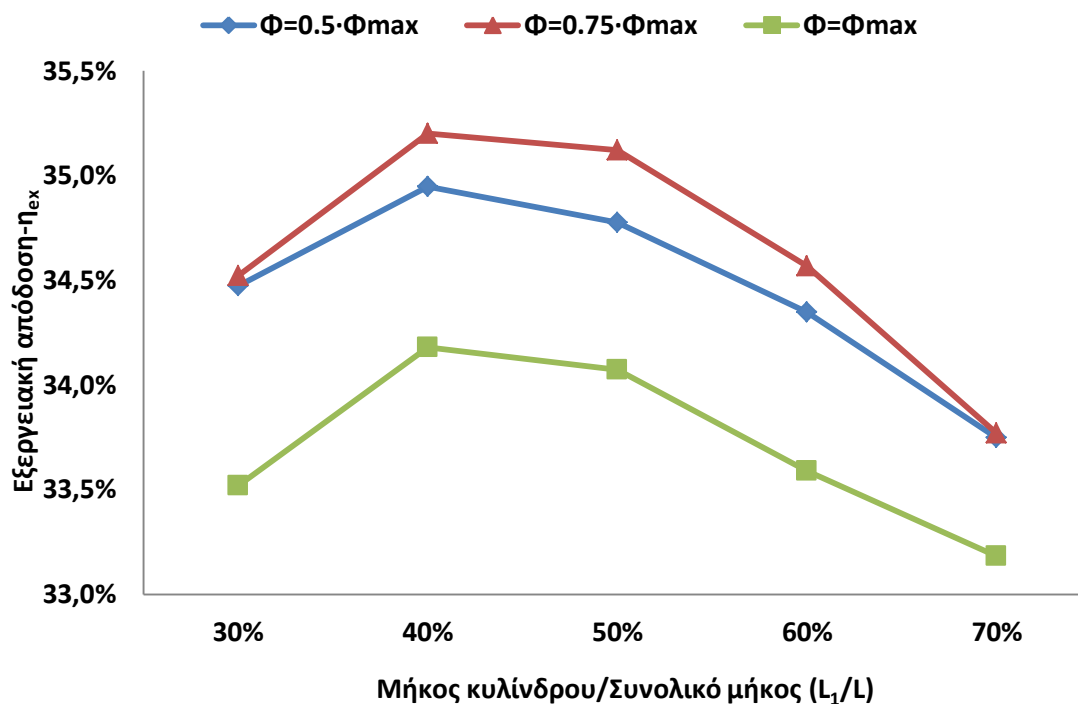
Σχήμα 5.1.70: Κατανομή θερμοκρασίας του τοιχώματος του σωλήνα κωνοκυλινδρικού δέκτη για σταθερή γωνία κώνου ( $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{max}$ ).

Ο συντελεστής συναγωγής (σχήμα 5.1.71) φαίνεται πώς μεγαλώνει με αύξηση της γωνίας  $\Phi$  και μείωση του  $L_1/L$ , δηλαδή με μείωση της επιφάνειας του σωλήνα. Φαίνεται η παράμετρος επιφάνεια να επικρατεί των παραμέτρων ωφέλιμη ισχύς και θερμοκρασιακή διαφορά  $T_{coil}-T_{fm}$ , που έχουν άλλες τάσεις.



Σχήμα 5.1.71 : Συντελεστής συναγωγής του δέκτη κωνοκυλινδρικού σχήματος για διάφορες τιμές του λόγου  $L_1/L$  και γωνίες  $\Phi$  ( $T_{in}=300$  °C,  $m=0.03$  kg/s).

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης, σχήμα 5.1.72, μεταβάλλεται παρόμοια με τον θερμικό βαθμό απόδοσης. Μέγιστος  $\eta_{ex}$  εμφανίζεται για  $L_1/L=0.4$  και  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{max}$ .

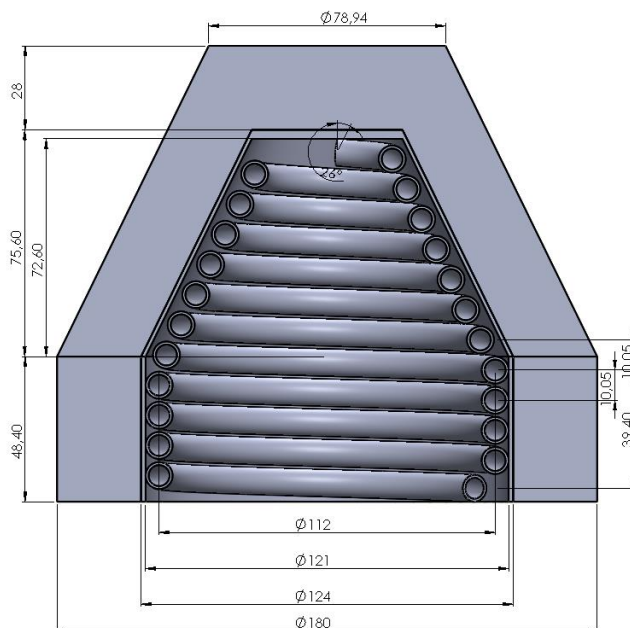


**Σχήμα 5.1.72 :** Εξεργειακός βαθμός απόδοσης του δέκτη κωνοκυλινδρικού σχήματος για διάφορες τιμές του λόγου  $L_1/L$  και γωνίες  $\Phi$  ( $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).

Τελικά βρέθηκε η θερμική και εξεργειακή απόδοση μεγιστοποιείται για την εξής γεωμετρία του κωνοκυλινδρικού δέκτη:

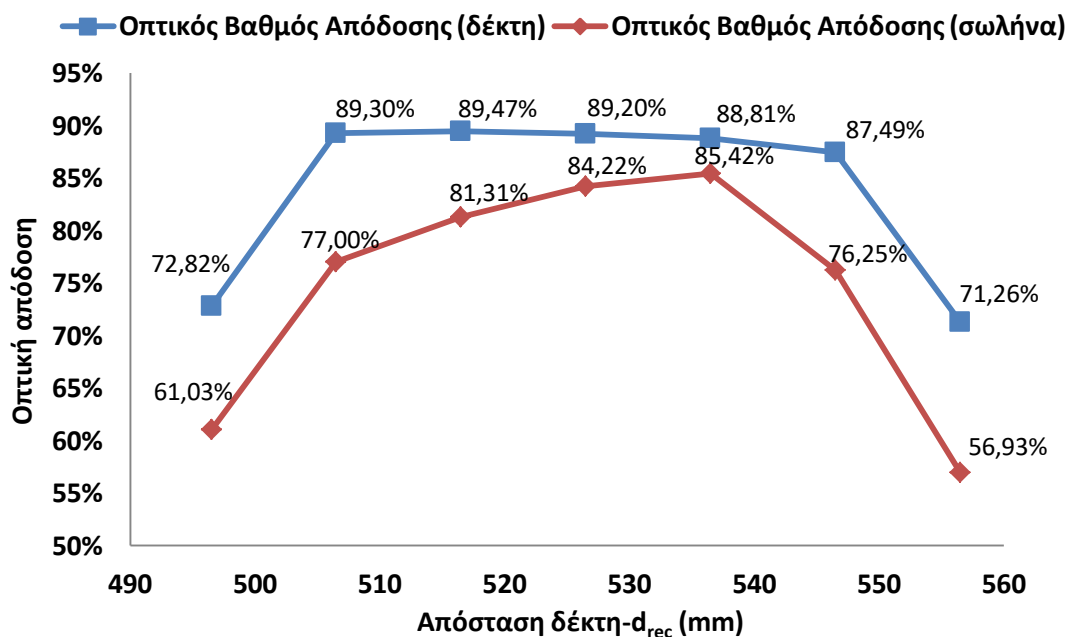
- Μήκος δέκτη  $L=1 \cdot D=121 \text{ mm}$
- Μήκος κυλίνδρου  $L_1=0.4 \cdot L=48.4 \text{ mm}$
- Μήκος κώνου  $L_2=0.6 \cdot L=72.6 \text{ mm}$
- Γωνία κώνου  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{max}=26.0^\circ$ .

Τα αναλυτικά μεγέθη του βέλτιστου κωνοκυλινδρικού δέκτη δίνονται στο παρακάτω σχήμα:

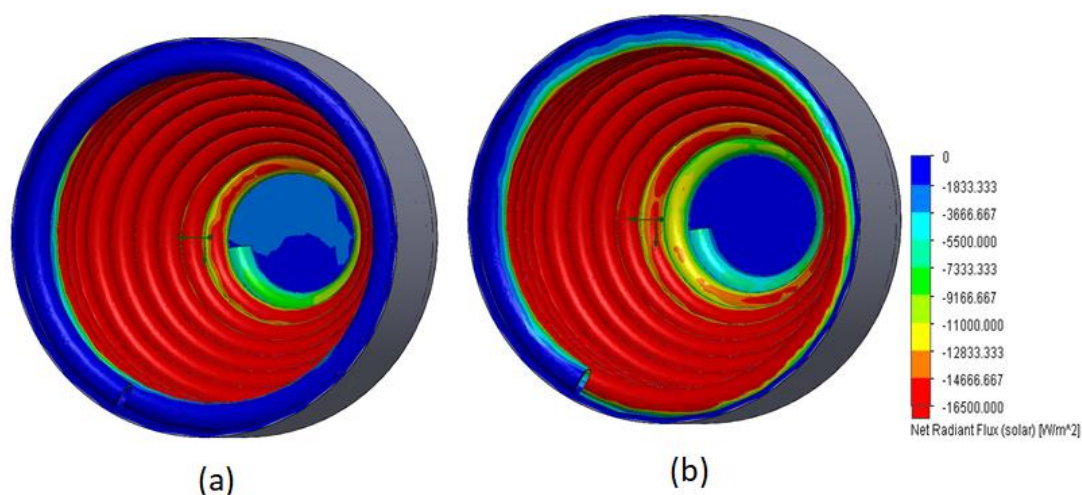


Σχήμα 5.1.73 :Γεωμετρικά μεγέθη βέλτιστου κωνοκυλινδρικού δέκτη (σε mm).

Για την βέλτιστη θέση τοποθέτησης του δέκτη, παρατηρούμε στο σχήμα 5.1.74, πώς ο  $\eta_{opt,coil}$  μεγιστοποιείται για  $d_{rec}=536.5$  mm, δηλαδή 10 mm μακριά από την εστία. Η θέση είναι ίδια με αυτή του κυλίνδρου, διότι ο κύλινδρος βρίσκεται πρώτος στο κωνοκυλινδρικό σχήμα και επηρεάζει πιο πολύ την θέση που πρέπει να βρίσκεται ο δέκτης. Ενώ, στο σχήμα 5.1.75 φαίνεται πώς για  $d_{rec}=536.5$  καταφέρνουμε να αυξήσουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στις αρχικές στροφές τις έλικας του δέκτη και ταυτόχρονα να την μειώσουμε στο κενό μέρος στο πίσω μέρος της κοιλότητας.



Σχήμα 5.1.74: Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη και οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα, του δέκτη κωνοκυλινδρικού σχήματος, για διάφορες τιμές της απόστασης του δέκτη από τον συγκεντρωτή.



**Σχήμα 5.1.75: Κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας για απόσταση του δέκτη από τον συγκεντρωτή (a)  $d_{rec}=526.5 \text{ mm}=f$  και (b)  $d_{rec}=536.5 \text{ mm}$**

Στον πίνακα 5.1.7 δίνονται τα οι βαθμοί απόδοσης του βέλτιστου κωνοκυλινδρικού δέκτη τοποθετημένο στην βέλτιστη θέση ( $d_{rec}=536.5 \text{ mm}$ ), για παροχή μάζας  $m=0.03 \text{ kg/s}$ , θερμοκρασία εισόδου  $T_{in}=300 \text{ }^\circ\text{C}$  και εργαζόμενο μέσο Therminol-VP1.

| Μέγεθος                          | Σύμβολο           | Τιμή   |
|----------------------------------|-------------------|--------|
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (δέκτη)  | $\eta_{opt,rec}$  | 88.81% |
| Οπτικός Βαθμός Απόδοσης (σωλήνα) | $\eta_{opt,coil}$ | 85.42% |
| Θερμικός Βαθμός Απόδοσης         | $\eta_{th}$       | 67.95% |
| Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης      | $\eta_{ex}$       | 35.73% |

**Πίνακας 5.1.7: Βαθμοί απόδοσης βέλτιστου κωνικού δέκτη για  $d_{rec}=536.5 \text{ mm}$**

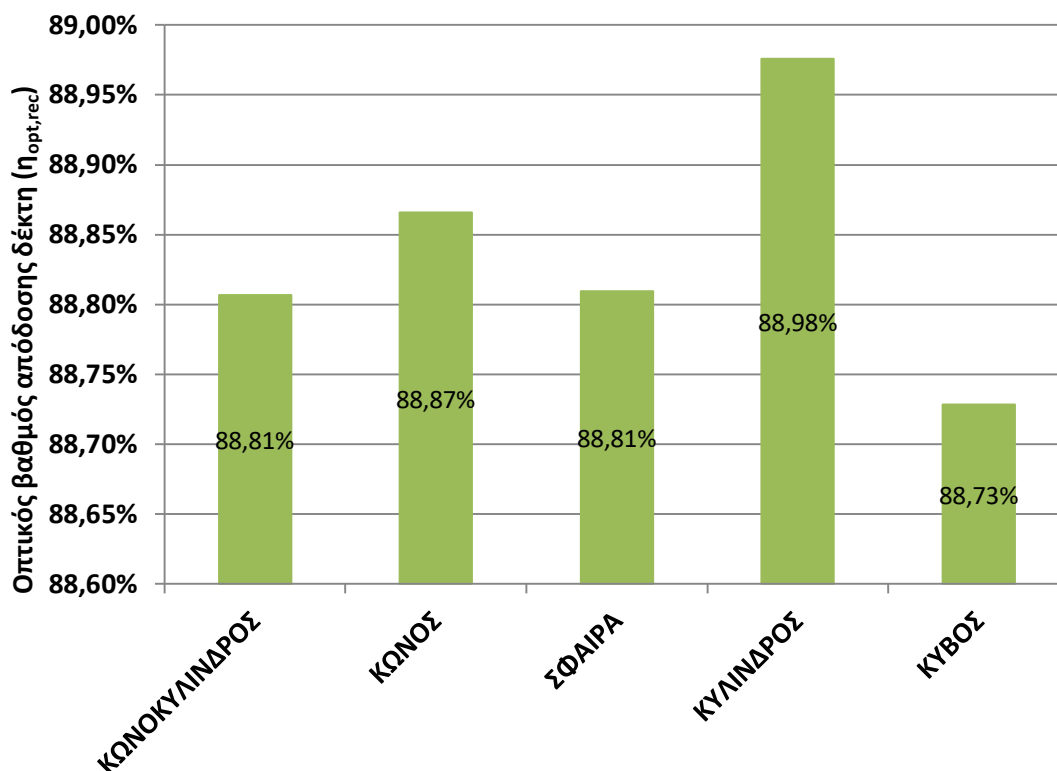
## 5.2 Σύγκριση της απόδοσης μεταξύ των δεκτών διάφορων σχημάτων.

Στην προηγούμενη ενότητα επιλέχθηκε για κάθε σχήμα η γεωμετρία και η απόσταση δέκτη-συγκεντρωτή που μεγιστοποιεί την θερμική και εξεργειακή απόδοση. Παρακάτω θα συγκρίνουμε την οπτική, θερμική και εξεργειακή συμπεριφορά όλων των σχημάτων μεταξύ τους (κωνοκυλινδρικό, κωνικό, σφαιρικό, κυλινδρικό, κυβικό). Για να γίνει η σύγκριση τρέξαμε την προσομοίωση της ροής για το κάθε σχήμα ξεχωριστά στην βέλτιστη θέση. Το εργαζόμενο μέσο είναι το Therminol VP-1, παροχή μάζας  $m=0.03 \text{ kg/s}$  και μεταβλητή θερμοκρασία εισόδου η οποία κυμαίνεται από  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  έως  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.2.1 Σύγκριση οπτικής απόδοσης.

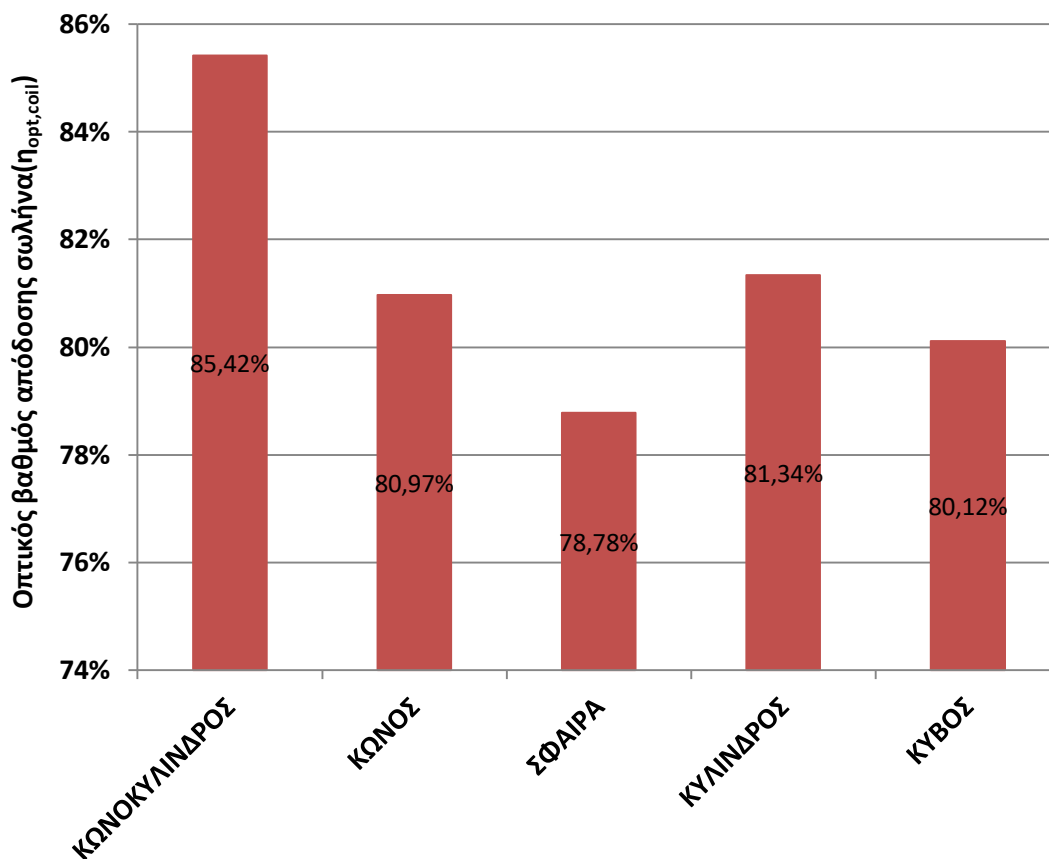
Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός δέκτη είναι η οπτική του συμπεριφορά, δηλαδή οι οπτικοί βαθμοί απόδοσης που επιτυγχάνει και η ομοιομορφία της κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του σωλήνα. Πρέπει να επισημανθεί πως η οπτική απόδοση δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία εισόδου.

Το σχήμα 5.2.1 δίνει τον οπτικό βαθμό απόδοσης του δέκτη για το κάθε σχήμα ξεχωριστά, όπου παρατηρώ πώς την μέγιστη τιμή έχει ο κύλινδρος ακολουθούμενος από την σφαίρα. Είδαμε και στην προηγούμενη ενότητα πώς ο βαθμός αυτός επηρεάζεται κυρίως από το άνοιγμα του δέκτη. Από την στιγμή που για όλα τα σχήματα το άνοιγμα είναι το ίδιο, παρατηρούμε πώς ο  $\eta_{opt,rec}$  δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές, με την διαφορά μεταξύ της μέγιστης (κύλινδρος) και της ελάχιστης (κύβος) τιμής να είναι μόλις 0.25%.

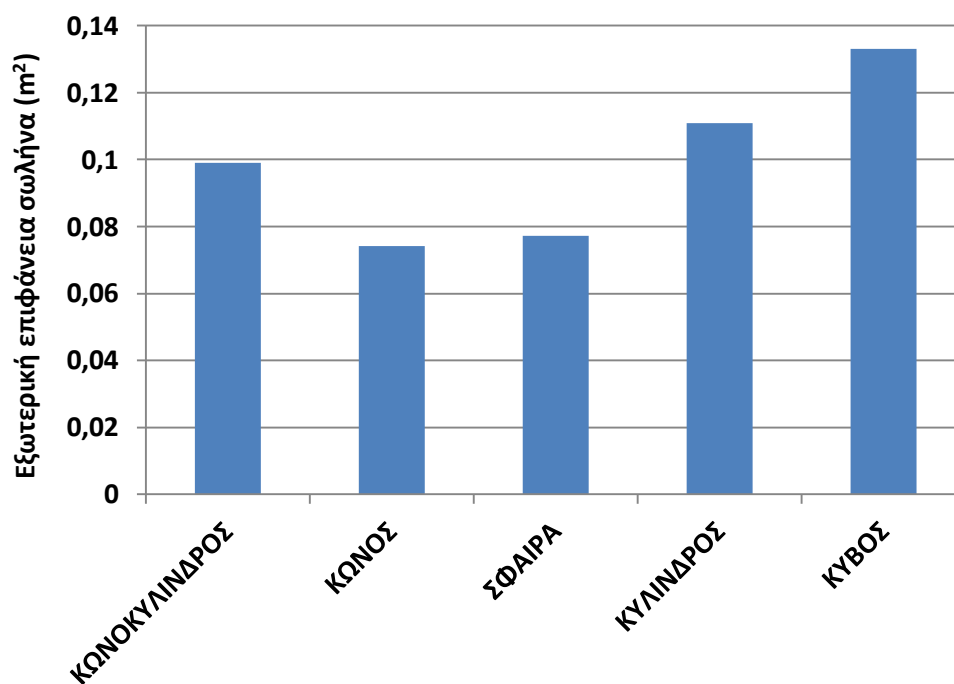


**Σχήμα 5.2.1: Οπτικός βαθμός απόδοσης δέκτη για διάφορα σχήματα.**

Από την άλλη, ο οπτικός βαθμός απόδοσης του σωλήνα, φαίνεται στο σχήμα 5.2.2 να παρουσιάζει την μέγιστη τιμή του στο κωνοκυλινδρικό σχήμα ακολουθούμενο κατά σειρά από τον κύλινδρο, τον κώνο, τον κύβο και τέλος την σφαίρα. Ο  $\eta_{opt,coil}$  επηρεάζεται από τον  $\eta_{opt,rec}$ , το σχήμα του δέκτη και την εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Για να καταλάβουμε την επίδραση του σχήματος πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη και την εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα (σχήμα 5.2.3). Εάν δεν έπαιζε ρόλο το σχήμα, θα έπρεπε από την στιγμή που η συνολική εισερχόμενη ακτινοβολία είναι περίπου ίδια για όλα τα σχήματα, όσο αυξάνεται η επιφάνεια του σωλήνα να αυξάνεται και ο  $\eta_{opt,coil}$ . Κάτι τέτοιο όμως δεν συμβαίνει καθώς το κωνοκυλινδρικό σχήμα παρουσιάζει τον μέγιστο  $\eta_{opt,coil}$ , ενώ η επιφάνειά του είναι τρίτη μεγαλύτερη, και ο κώνος με την μικρότερη εξωτερική επιφάνεια παρουσιάζει τον τρίτο μεγαλύτερο  $\eta_{opt,coil}$  με διαφορά 0.37% από τον κύλινδρο που έχει πολύ μεγαλύτερη εξωτερική επιφάνεια σωλήνα. Κοινό χαρακτηριστικό τόσο του κωνοκυλινδρικού όσο και του κωνικού σχήματος είναι η ύπαρξη σωλήνα στο πίσω μέρος της κοιλότητας, που μεγιστοποιεί την οπτική απόδοση.



Σχήμα 5.2.2: Οπτικός βαθμός απόδοσης σωλήνα για διάφορα σχήματα.



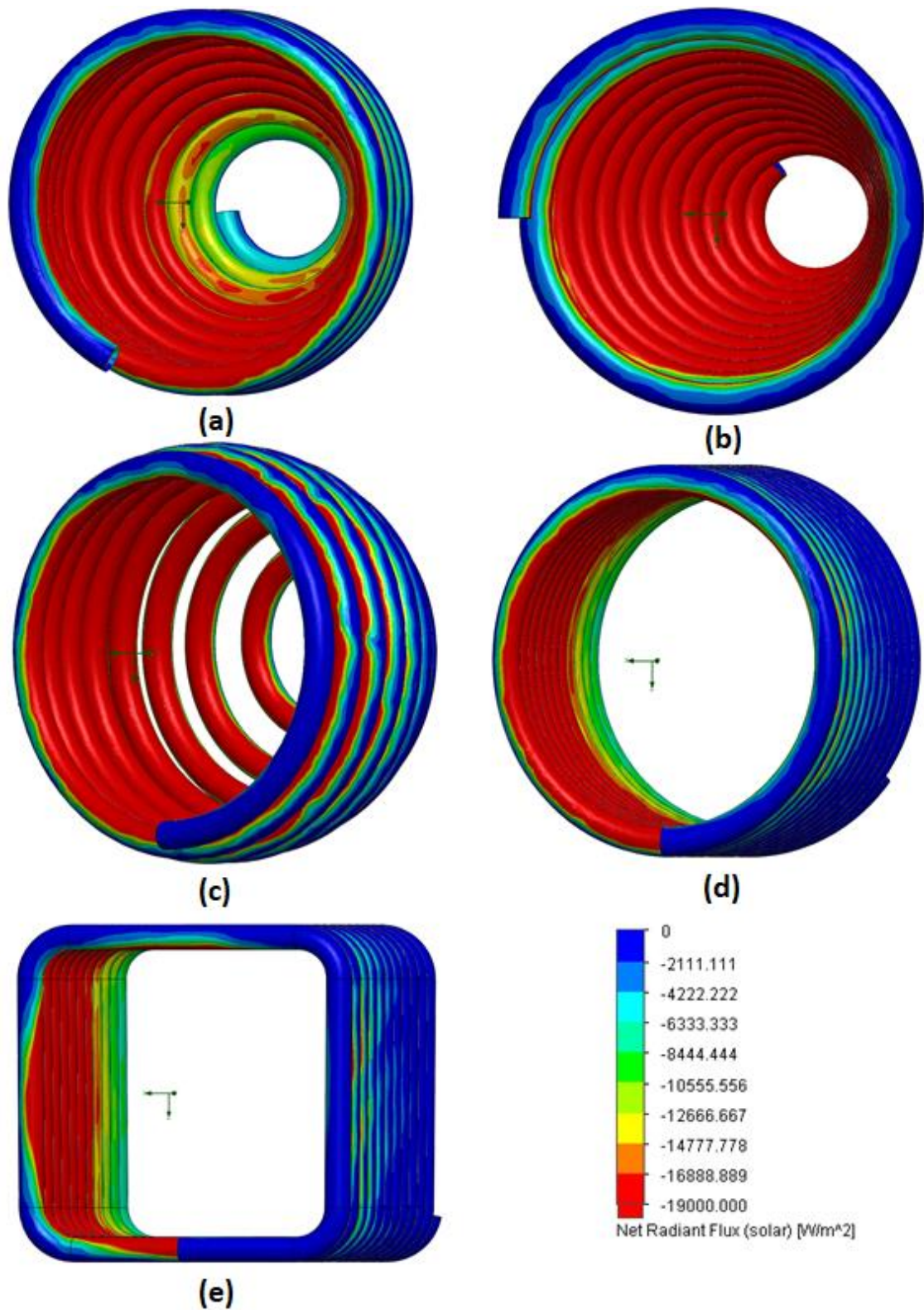
Σχήμα 5.2.3: Εξωτερική επιφάνεια σωλήνα των διάφορων σχημάτων.



Πέρα όμως από τις τιμές του  $\eta_{opt,coil}$  σημαντικός παράγοντας για την οπτική συμπεριφορά του δέκτη είναι η κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του σωλήνα. Στο σχήμα 5.2.4 φαίνεται πώς την πιο ομοιόμορφη κατανομή την παρουσιάζουν ο κώνος και η σφαίρα ακολουθούμενη από τον κωνοκύλινδρο, τον κύλινδρο και τέλος τον κύβο. Αυτό εξηγεί και τους υψηλούς  $\eta_{opt,coil}$  της σφαίρας και του κώνου, παρά την μικρή τους εξωτερική επιφάνεια.

Τελικά όσον αφορά την οπτική συμπεριφορά παρατηρώ πώς βέλτιστο σχήμα είναι το κωνοκυλινδρικό καθώς παρουσιάζει τον μεγαλύτερο οπτικό βαθμό απόδοσης του σωλήνα ( $\eta_{opt,coil}$ ) με μεγάλη διαφορά (4.08%) από τον δεύτερο και ικανοποιητική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Από τα συμβατικά σχήματα την καλύτερη οπτική απόδοση έχει το κωνικό βοηθούμενο κυρίως από την πολύ ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας στην εξωτερική του επιφάνεια.

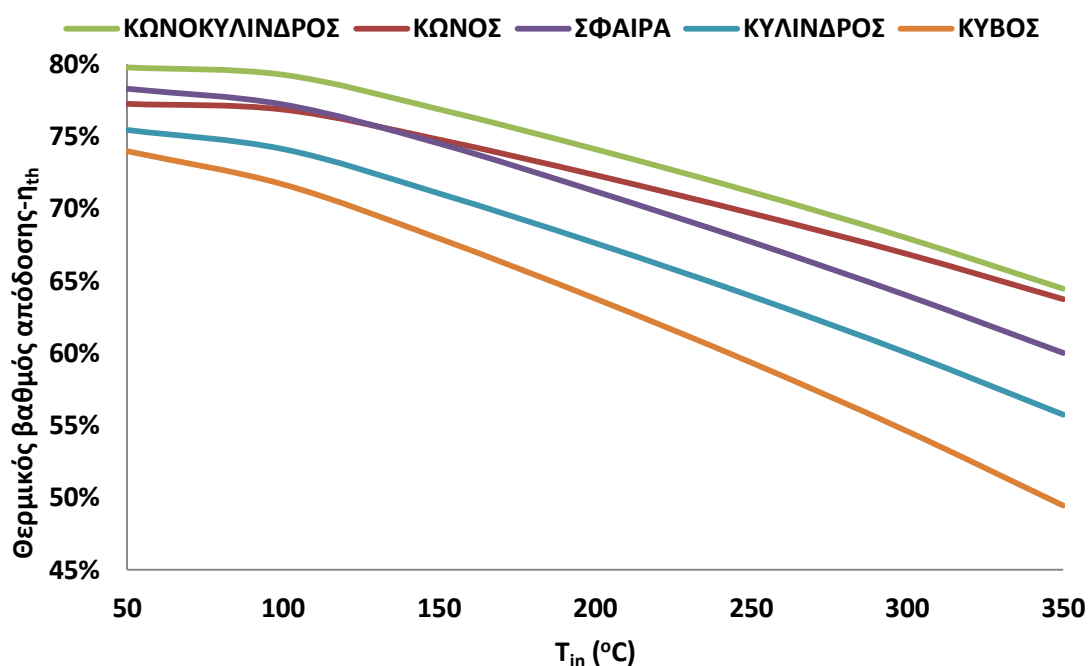


Σχήμα 5.2.4: Κατανομή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στον σωλήνα του δέκτη σχήματος: (a)Κωνοκυλινδρικό, (b)Κωνικό, (c)Σφαιρικό, (d)Κυλινδρικό και (e)Κυβικό.

### 5.2.2 Σύγκριση θερμικής απόδοσης.

Στο σχήμα 5.2.5 δίνεται η μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης για τα διάφορα σχήματα με παράμετρο την θερμοκρασία εισόδου. Ο  $\eta_{th}$  αποτελεί την βασικότερη παράμετρο σύγκρισης των σχημάτων μεταξύ τους. Οι κυριότερες παρατηρήσεις είναι:

- Ανεξαρτήτως σχήματος ο  $\eta_{th}$  μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, λόγω αύξησης των απωλειών θερμότητας. Επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και ο ρυθμός μείωσης του  $\eta_{th}$ , λόγω των απωλειών ακτινοβολίας οι οποίες έχουν την θερμοκρασία εις την τέταρτη δύναμη.
- Σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών εισόδου τον μεγαλύτερο  $\eta_{th}$  παρουσιάζει το κωνοκυλινδρικό σχήμα, με την διαφορά από το δεύτερο καλύτερο σχήμα να είναι 1.48% για  $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$  και 0.72% για  $T_{in}=350^{\circ}\text{C}$ . Η επικράτηση του κωνοκυλινδρικού σχήματος οφείλεται κυρίως στον υψηλό  $\eta_{opt,coil}$ , αν και έχει μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας από το σφαιρικό και το κωνικό σχήμα, λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας και μεγαλύτερης θερμοκρασίας στα τοιχώματα του σωλήνα- $T_{coil}$  (πίνακας 5.2.1). Οι μεγαλύτερες θερμικές απώλειες του κωνοκυλινδρικού σχήματος, οδηγούν τελικά σε μείωση της διαφοράς στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Από τα βασικά σχήματα στις χαμηλές θερμοκρασίες ( $T_{in}<150^{\circ}\text{C}$ ) υπερτερεί το σφαιρικό σχήμα ενώ στις υψηλές ( $T_{in}\geq 150^{\circ}\text{C}$ ) το κωνικό σχήμα. Η διαφορά έγκειται στον μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης του θερμικού βαθμού απόδοσης στο σφαιρικό σχήμα λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας, από την στιγμή που όπως δείχνει ο πίνακας 5.2.1 η  $T_{coil}$  είναι πανομοιότυπη στα δύο σχήματα.
- Σε κάθε περίπτωση το κυλινδρικό και το κυβικό σχήμα παρουσιάζουν τους χαμηλότερους θερμικούς βαθμούς απόδοσης, κάτι που αποτελεί συνδυασμό του χαμηλού  $\eta_{opt,coil}$  και της μεγάλης επιφάνειας σωλήνα παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν τις χαμηλότερες θερμοκρασίες  $T_{coil}$ .



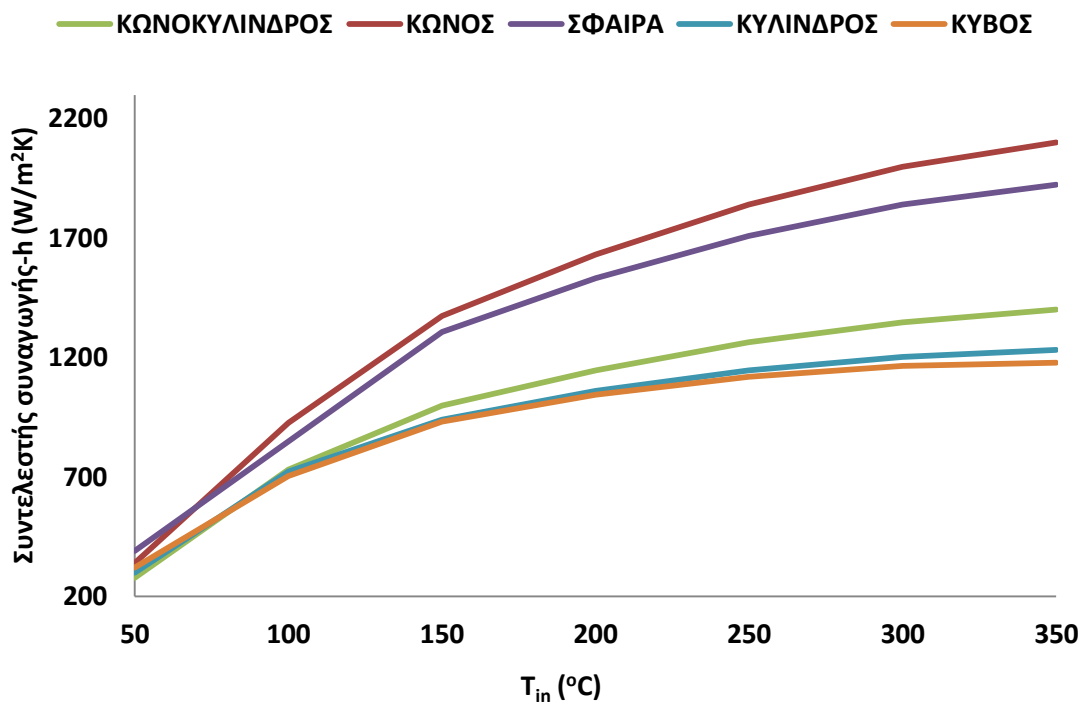
Σχήμα 5.2.5: Θερμικός βαθμός απόδοσης δέκτη για διάφορα σχήματα ( $m=0.03 \text{ kg/s}$ ).

Στον παρακάτω πίνακα μπορείτε να δείτε τις θερμοκρασίες εξόδου και τις μέσες θερμοκρασίες στα τοιχώματα του σωλήνα για το κάθε σχήμα ξεχωριστά. Πράγματι η  $T_{out}$  συμβαδίζει με τον θερμικό βαθμό απόδοσης, και ακολουθεί την ίδια διακύμανση. Όσον αφορά την  $T_{coil}$ , η επίδρασή της στον θερμικό βαθμό απόδοσης σχολιάστηκε πριν.

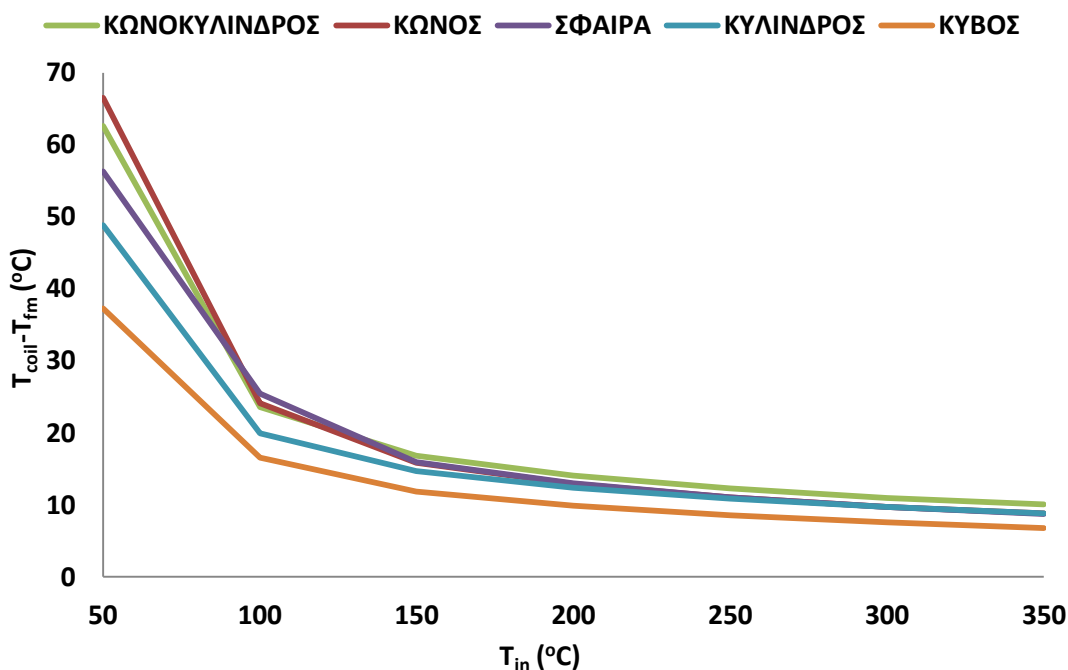
|                    | $T_{in}$ (°C) | 50    | 100   | 150   | 200   | 250   | 300   | 350   |
|--------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_{out}$<br>(°C)  | Κωνοκύλινδρος | 76.7  | 124.5 | 172.1 | 220.0 | 268.0 | 316.2 | 364.5 |
|                    | Κώνος         | 75.8  | 123.7 | 171.5 | 219.5 | 267.7 | 316.0 | 364.4 |
|                    | Σφαίρα        | 76.2  | 123.8 | 171.4 | 219.2 | 267.2 | 315.3 | 363.5 |
|                    | Κύλινδρος     | 75.2  | 122.9 | 170.4 | 218.2 | 266.2 | 314.4 | 362.6 |
|                    | Κύβος         | 74.8  | 122.2 | 169.6 | 217.2 | 265.1 | 313.1 | 361.2 |
| $T_{coil}$<br>(°C) | Κωνοκύλινδρος | 126.0 | 135.8 | 177.8 | 224.0 | 271.3 | 319.1 | 367.3 |
|                    | Κώνος         | 129.4 | 136.0 | 176.6 | 222.6 | 269.8 | 317.7 | 366.0 |
|                    | Σφαίρα        | 119.4 | 137.3 | 176.6 | 222.6 | 269.6 | 317.4 | 365.5 |
|                    | Κύλινδρος     | 111.5 | 131.4 | 174.9 | 221.5 | 268.9 | 316.9 | 365.1 |
|                    | Κύβος         | 99.7  | 127.6 | 171.6 | 218.5 | 266.1 | 314.1 | 362.4 |

**Πίνακας 5.2.1: Διακύμανση των θερμοκρασιών εξόδου και τοιχώματος σωλήνα για τα διάφορα σχήματα με παράμετρο την θερμοκρασία εισόδου ( $m=0.03$  kg/s).**

Επίσης ένας άλλος παράγοντας που ερμηνεύει την θερμική συμπεριφορά του δέκτη είναι ο συντελεστής συναγωγής ( $h$ ), ο οποίος όσο μεγαλύτερος είναι τόσο καλύτερες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας στο ρευστό έχουμε. Στο σχήμα 5.2.6 παρατηρώ ότι για το μεγαλύτερο εύρος των θερμοκρασιών εισόδου, τον καλύτερο συντελεστή συναγωγής τον παρουσιάζει το κωνικό σχήμα, λόγω κυρίως της μικρής εσωτερικής επιφάνειας του σωλήνα, ακολουθούμενο από το σφαιρικό. Αρκετά πιο χαμηλά, αν και έχει την μεγαλύτερη ωφέλιμη ισχύ, βρίσκεται το κωνοκυλινδρικό σχήμα λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας από τα δύο προηγούμενα. Τους χαμηλότερους συντελεστές συναγωγής παρουσιάζουν το κυλινδρικό και το κυβικό σχήμα λόγω χαμηλών ωφέλιμων ισχύων και μεγάλης επιφάνειας. Τέλος ανεξαρτήτως σχήματος, ο συντελεστής συναγωγής αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου λόγω της μείωσης του όρου  $T_{coil} - T_{fm}$  (σχήμα 5.2.7). Οι ρυθμοί αύξησης του  $h$  είναι παρόμοιοι με τους ρυθμούς μείωσης του  $T_{coil} - T_{fm}$ .



Σχήμα 5.2.6: Συντελεστής συναγωγής για διάφορα σχήματα ( $m=0.03$  kg/s).



Σχήμα 5.2.7: Θερμοκρασιακή διαφορά  $T_{coil} - T_{fm}$  για διάφορα σχήματα ( $m=0.03$  kg/s).

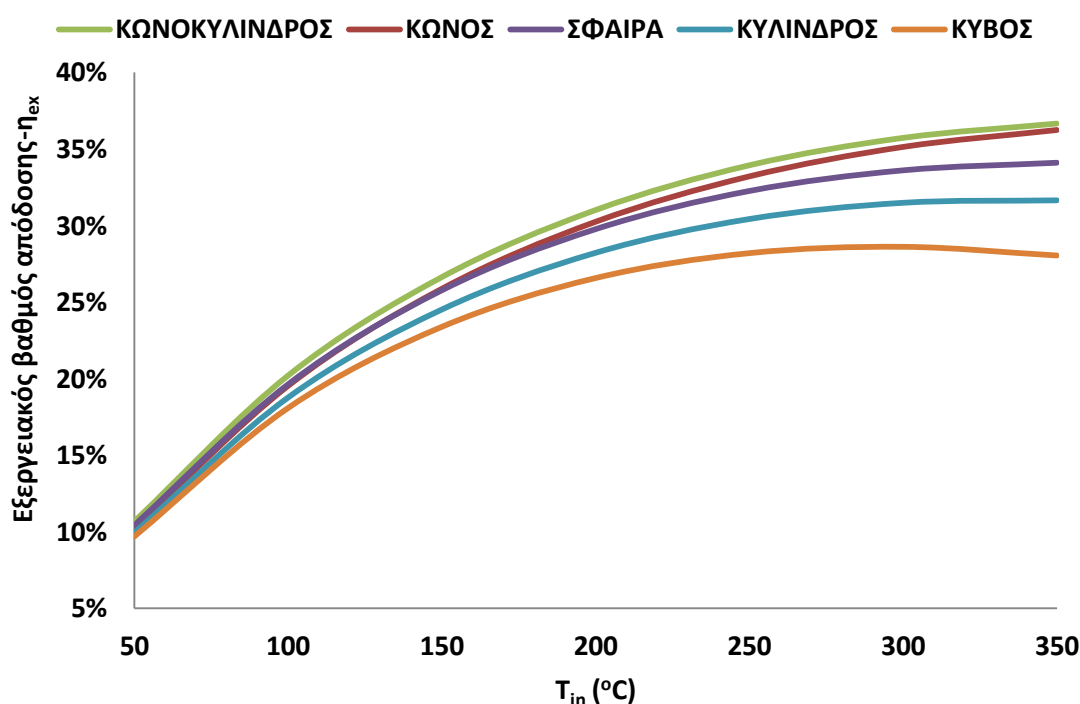
### 5.2.3 Σύγκριση εξεργειακής απόδοσης.

Στο σχήμα 5.2.8 παρατηρούμε:

- Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης έχει παρόμοια διακύμανση με τον θερμικό βαθμό απόδοσης, επηρεασμένος από την ωφέλιμη ισχύς. Έτσι τον μεγαλύτερο  $\eta_{ex}$  έχει το

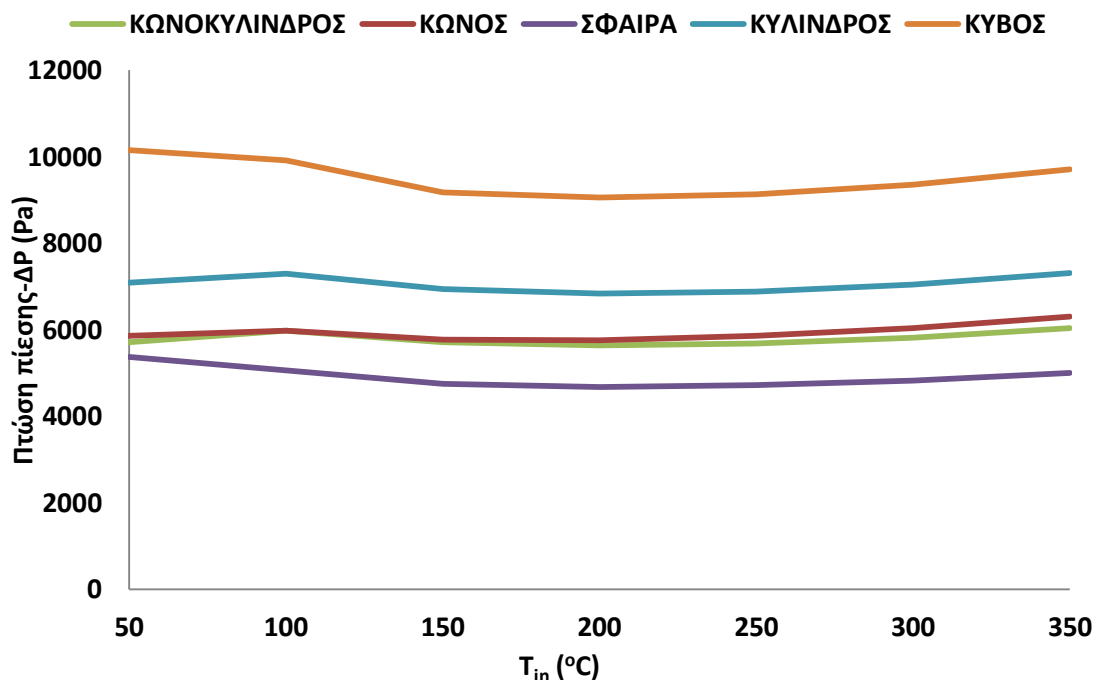
κωνοκυλινδρικό σχήμα ακολουθούμενο από την σφαίρα στις χαμηλές θερμοκρασίες και τον κώνο στις υψηλές θερμοκρασίες.

- Ανεξαρτήτως σχήματος ο εξεργειακός βαθμός αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, παρά την μείωση της ωφέλιμης ισχύος, κυρίως λόγω του μεγάλου ρυθμού μείωσης του λόγου  $T_{out}/T_{in}$  και συνεπώς και του όρου μείωσης της εξέργειας (σχέσης 3.29).
- Τέλος παρατηρώ πώς στις χαμηλές θερμοκρασίες οι εξεργειακοί βαθμοί βρίσκονται αρκετά κοντά με την διαφορά τους να μεγαλώνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Οι ρυθμοί αύξησης του  $\eta_{ex}$  συνδέονται με τους ρυθμούς μείωσης του θερμικού βαθμού απόδοσης. Για τον λόγο αυτό το κωνικό σχήμα έχει το μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης του εξεργειακού βαθμού απόδοσης και τείνει να πλησιάσει αυτόν του κωνοκυλινδρικού σχήματος.



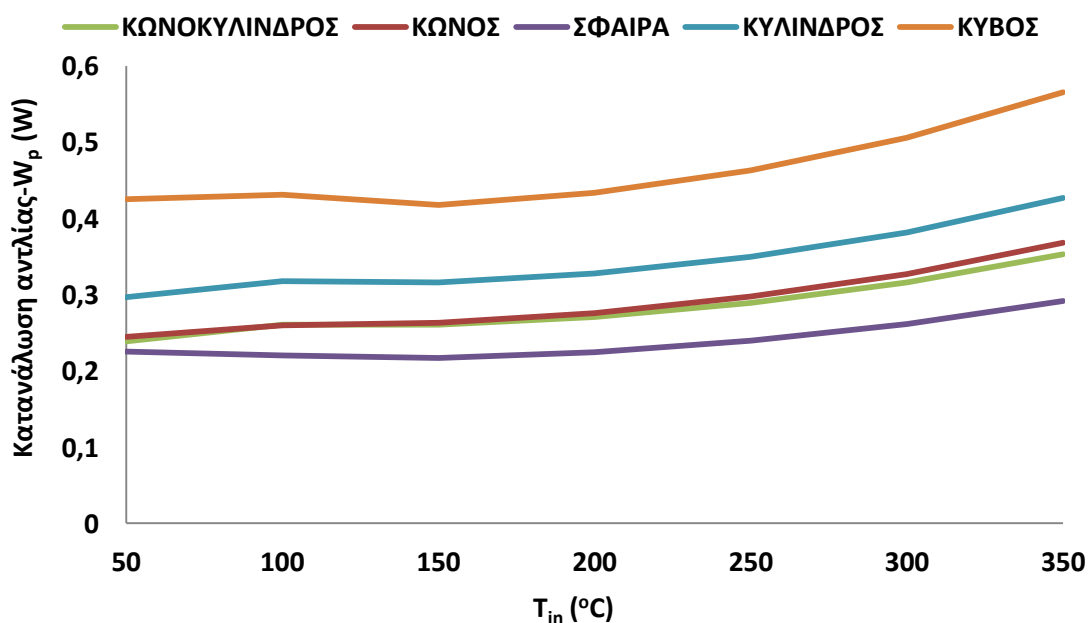
Σχήμα 5.2.8: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης δέκτη για διάφορα σχήματα ( $m=0.03$  kg/s).

Το σχήμα 5.2.9 δίνει την μεταβολή της πτώσης πίεσης του σωλήνα για το κάθε σχήμα ξεχωριστά. Τις υψηλότερες απώλειες πίεσης με διαφορά από τα υπόλοιπα τις παρουσιάζει το κυβικό σχήμα και λόγω μεγαλύτερου μήκους του σωλήνα αλλά και λόγω των απότομων γωνιών στροφής του σωλήνα. Ακολουθούν ο κύλινδρος λόγω μεγαλύτερου μήκους, ο κωνοκύλινδρος και ο κώνος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως τις μικρότερες απώλειες πίεσης τις παρουσιάζει το σφαιρικό σχήμα, αν και έχει μεγαλύτερο μήκος σωλήνα από το κωνικό. Αυτό οφείλεται στην μορφολογία του σφαιρικού σχήματος και στις μεγαλύτερες γωνίες στροφής της έλικας από το κωνικό. Τέλος παρατηρώ πώς με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου η πτώση πίεσης αυξομειώνεται, ο λόγος είναι ότι από την μια η πυκνότητα μειώνεται και από την άλλη η μέση ταχύτητα στην διατομή του ρευστού αυξάνεται, παράγοντες που έχουν αντίστροφη επίδραση στην πτώση πίεσης.



Σχήμα 5.2.9: Πτώση πίεσης του δέκτη για διάφορα σχήματα ( $m=0.03$  kg/s).

Στο σχήμα 5.2.9 παρατηρούμε πώς την μεγαλύτερη κατανάλωση αντλίας έχουν κατά σειρά ο κύβος, ο κύλινδρος, ο κώνος, ο κωνοκύλινδρος και τέλος η σφαίρα, κατά αντιστοιχία με την πτώση πίεσης. Από την άλλη οι ρυθμοί αύξησης με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτεροι στην κατανάλωση της αντλίας από ότι στην πτώση πίεσης, λόγω της μείωσης της πυκνότητας (σχέση 3.34). Επιπλέον πρέπει να επισημανθεί ότι η κατανάλωση της αντλίας είναι πολύ χαμηλή.



Σχήμα 5.2.9: Κατανάλωση της αντλίας για διάφορα σχήματα ( $m=0.03$  kg/s).



Στον πίνακα 5.2.2 δίνονται αναλυτικά ανά σχήμα και θερμοκρασία εισόδου τα βασικά μεγέθη που εξετάστηκαν στην παρούσα υποενότητα.

|                               | T <sub>in</sub> (°C) | 50    | 100   | 150   | 200   | 250   | 300   | 350   |
|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| η <sub>opt,rec</sub>          | Κωνοκύλινδρος        | 88.81 |       |       |       |       |       |       |
|                               | Κώνος                | 88.86 |       |       |       |       |       |       |
|                               | Σφαίρα               | 88.81 |       |       |       |       |       |       |
|                               | Κύλινδρος            | 88.97 |       |       |       |       |       |       |
|                               | Κύβος                | 88.73 |       |       |       |       |       |       |
| η <sub>opt,coil</sub>         | Κωνοκύλινδρος        | 85.42 |       |       |       |       |       |       |
|                               | Κώνος                | 80.96 |       |       |       |       |       |       |
|                               | Σφαίρα               | 78.78 |       |       |       |       |       |       |
|                               | Κύλινδρος            | 81.34 |       |       |       |       |       |       |
|                               | Κύβος                | 80.11 |       |       |       |       |       |       |
| η <sub>th</sub>               | Κωνοκύλινδρος        | 79.77 | 79.26 | 76.87 | 74.11 | 71.16 | 67.95 | 64.45 |
|                               | Κώνος                | 77.25 | 76.85 | 74.77 | 72.32 | 69.68 | 66.85 | 63.73 |
|                               | Σφαίρα               | 78.29 | 77.20 | 74.50 | 71.20 | 67.70 | 63.98 | 60.01 |
|                               | Κύλινδρος            | 75.44 | 74.12 | 71.04 | 67.61 | 63.94 | 60.00 | 55.74 |
|                               | Κύβος                | 73.97 | 71.67 | 67.93 | 63.77 | 59.34 | 54.59 | 49.45 |
| η <sub>ex</sub>               | Κωνοκύλινδρος        | 10.68 | 20.21 | 26.64 | 31.02 | 33.95 | 35.73 | 36.67 |
|                               | Κώνος                | 10.25 | 19.54 | 25.88 | 30.25 | 33.22 | 35.14 | 36.25 |
|                               | Σφαίρα               | 10.43 | 19.63 | 25.78 | 29.77 | 32.26 | 33.61 | 34.11 |
|                               | Κύλινδρος            | 9.95  | 18.77 | 24.52 | 28.23 | 30.43 | 31.49 | 31.66 |
|                               | Κύβος                | 9.69  | 18.09 | 23.39 | 26.58 | 28.20 | 28.62 | 28.05 |
| h<br>(W/<br>m <sup>2</sup> K) | Κωνοκύλινδρος        | 277   | 731   | 997   | 1147  | 1263  | 1348  | 1400  |
|                               | Κώνος                | 338   | 925   | 1375  | 1633  | 1840  | 1999  | 2101  |
|                               | Σφαίρα               | 388   | 849   | 1307  | 1531  | 1709  | 1841  | 1923  |
|                               | Κύλινδρος            | 300   | 721   | 940   | 1059  | 1146  | 1203  | 1233  |
|                               | Κύβος                | 321   | 703   | 933   | 1043  | 1120  | 1164  | 1178  |
| ΔP<br>(Pa)                    | Κωνοκύλινδρος        | 5706  | 5982  | 5717  | 5641  | 5687  | 5823  | 6043  |
|                               | Κώνος                | 5855  | 5973  | 5771  | 5760  | 5855  | 6035  | 6305  |
|                               | Σφαίρα               | 5376  | 5064  | 4756  | 4684  | 4716  | 4822  | 4998  |
|                               | Κύλινδρος            | 7088  | 7293  | 6935  | 6839  | 6889  | 7049  | 7312  |
|                               | Κύβος                | 10157 | 9913  | 9177  | 9060  | 9136  | 9356  | 9712  |

**Πίνακας 5.2.2: Διακύμανση των οπτικών βαθμών απόδοσης, του εξεργειακού και θερμικού βαθμού απόδοσης, του συντελεστή συναγωγής και της πτώσης πίεσης για τα διάφορα σχήματα με παράμετρο την θερμοκρασία εισόδου (m=0.03 kg/s).**

Στην ενότητα αυτή συγκρίναμε την οπτική, θερμική και εξεργειακή συμπεριφορά των βέλτιστων δεκτών ανά σχήμα. Φάνηκε ότι το κωνοκυλινδρικό σχήμα (συνδυασμός κυλίνδρου-κώνου) αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο σχήμα καθώς παρουσίασε με διαφορά τον μεγαλύτερο οπτικό βαθμό απόδοσης σωλήνα, τον μέγιστο θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης για όλες τις θερμοκρασίες εισόδου.

Από τα απλά σχήματα, ειδικά στις υψηλές θερμοκρασίες φάνηκε ο κώνος να έχει πολύ καλή οπτική συμπεριφορά (καλύτερη κατανομή ακτινοβολίας), δεύτερο καλύτερο θερμικό και

εξεργειακό βαθμό απόδοσης και την μικρότερη κλίση στον θερμικό βαθμό απόδοσης, κάτι που σημαίνει ότι για μεγαλύτερες θερμοκρασίες από τις εξεταζόμενες θα παρουσιάσει μέγιστο θερμικό βαθμό. Μάλιστα πρέπει να τονιστεί ότι στα συγκεντρωτικά συστήματα οι υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Τέλος ένα επίσης ικανοποιητικό σχήμα είναι η το σφαιρικό το οποίο παρουσιάζει στις χαμηλές θερμοκρασίες τον δεύτερο καλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης και τις χαμηλότερες απώλειες πίεσης. Οι χαμηλές απώλειες πίεσης μπορεί να το καθιστούν κατάλληλο για εργαζόμενο μέσο αέρα, που όπως θα δούμε παρακάτω έχει πολύ υψηλές απώλειες πίεσης.

Γενικά για να επιλεγεί το κατάλληλο σχήμα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και κατασκευαστικοί-οικονομικοί παράμετροι που έχουν να κάνουν με την πολυπλοκότητα του σχήματος, την δυσκολία και το κόστος κατασκευής του καθώς και την δυνατότητα για μαζική παραγωγή.

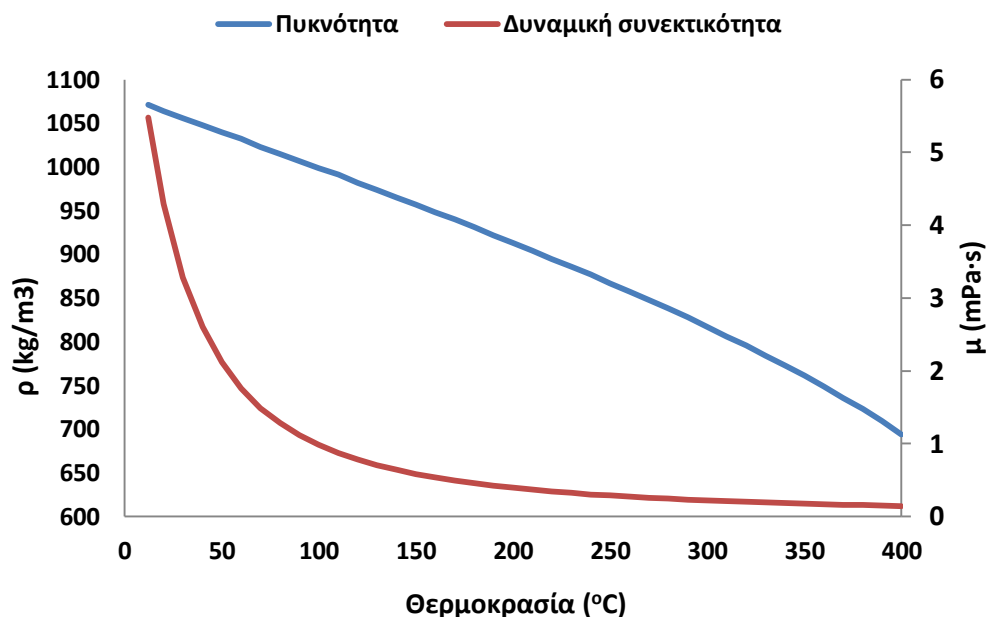
Από τους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία και για το εύρος θερμοκρασιών που εξετάζεται βέλτιστο σχήμα είναι το κωνοκυλινδρικό, ακολουθούμενο από το κωνικό.

### **5.3 Μελέτη εργαζόμενων μέσων και εύρεση βέλτιστης παροχής μάζας.**

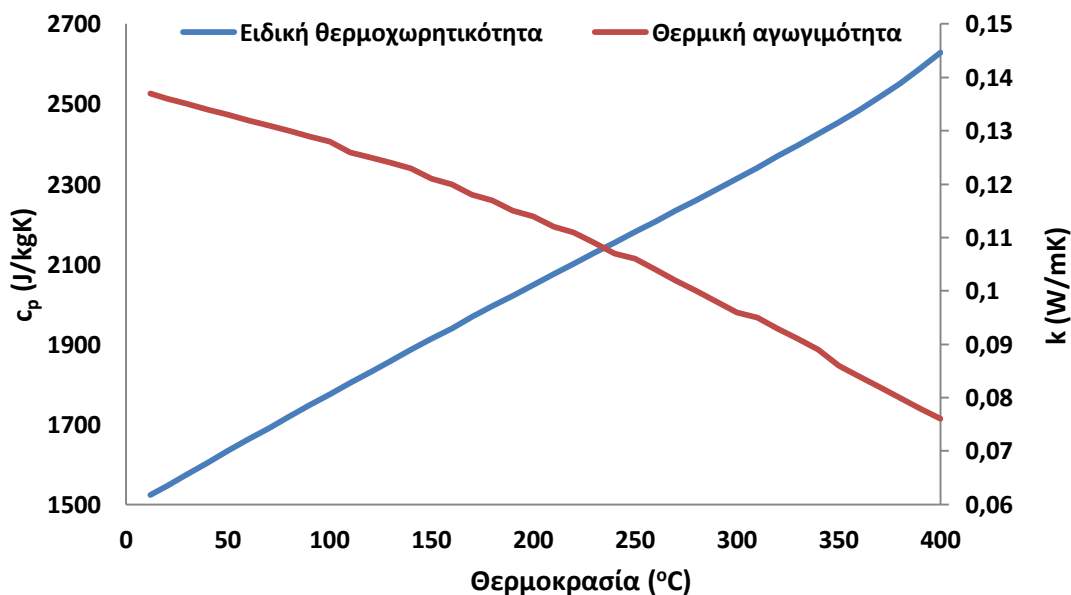
Στην ενότητα αυτή βασική παράμετρος μελέτης είναι το εργαζόμενο μέσο του δέκτη. Μελετάται η θερμική και εξεργειακή συμπεριφορά του δέκτη για τέσσερα διαφορετικά εργαζόμενα μέσα (έλαιο, νερό, τηγμένο άλας, αέρας), με στόχο να βρεθεί η βέλτιστη παροχή μάζας. Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται ο κωνικός δέκτης που επιλέχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και γίνονται τρεξίματα για κατάλληλο εύρος θερμοκρασιών και παροχής μάζας.

#### **5.3.1 Θερμικό έλαιο (Therminol VP-1).**

Το πρώτο εργαζόμενο μέσο που μελετάται είναι το θερμικό έλαιο, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά σε συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Παραδείγματα θερμικών ελαίων είναι τα Dowtherm A, Syltherm 800, Sandotherm και Therminol-VP1. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούμε το Therminol VP-1, το οποίο εξετάζεται μέχρι θερμοκρασία εισόδου  $T_{in}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$  για να μην ξεπεραστεί το ανώτερο όριο των  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Στα σχήματα 5.3.1 και 5.3.2 δίνονται με την μορφή διαγραμμάτων οι βασικές θερμοδυναμικές ιδιότητες του Therminol VP-1, με βάση τον πίνακα 4.3.1.



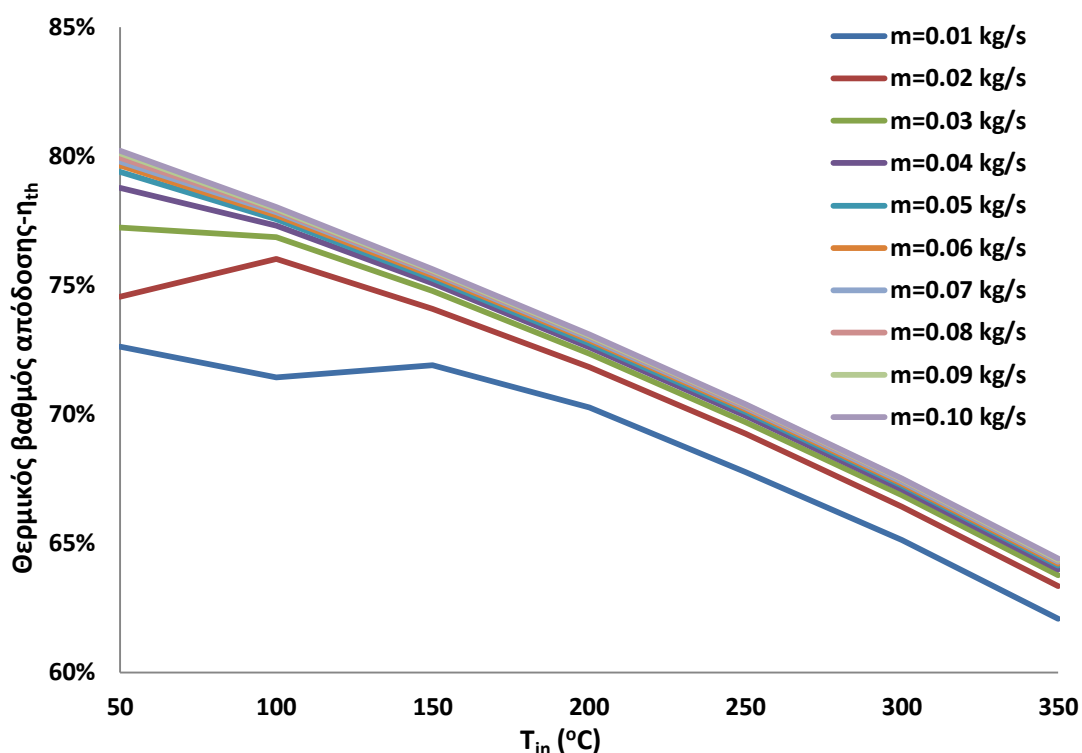
Σχήμα 5.3.1: Πυκνότητα και δυναμική συνεκτικότητα του ελαίου Therminol-VP1 [5.2].



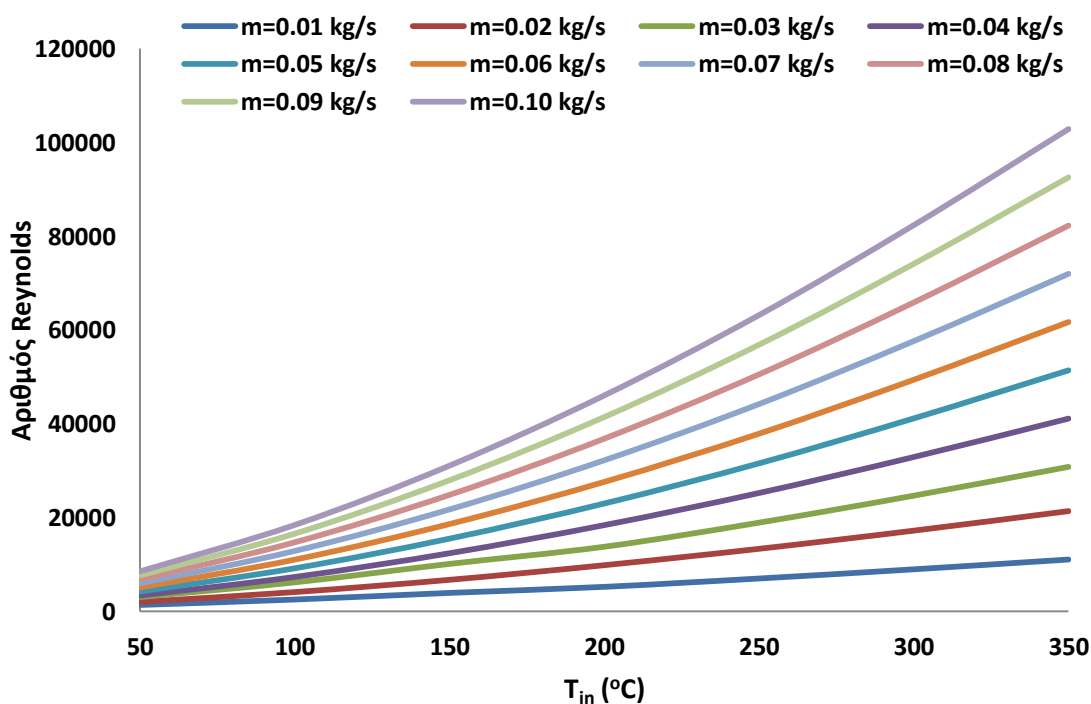
Σχήμα 5.3.2:Θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα του ελαίου Therminol-VP1 [5.2].

Το σχήμα 5.3.3 δείχνει την μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με την παροχή μάζας και την θερμοκρασία εισόδου. Για σταθερή θερμοκρασία εισόδου ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της παροχής, ο ρυθμός της αύξησης είναι μεγαλύτερος για  $m < 0.04$  kg/s και μικρότερος για  $m > 0.04$  kg/s. Η θερμική απόδοση μεγαλώνει με την αύξηση της παροχής διότι όπως δείχνει το σχήμα 5.3.4 η αύξηση της παροχής οδηγεί σε αύξηση του αριθμού Reynolds, κάτι που σημαίνει πιο τυρβώδη ροή, καλύτερη μετάδοση θερμότητας στο ρευστό και συνεπώς μεγαλύτεροι συντελεστές συναγωγής (σχήμα 5.3.5). Για σταθερή παροχή μάζας, ο θερμικός βαθμός απόδοσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση

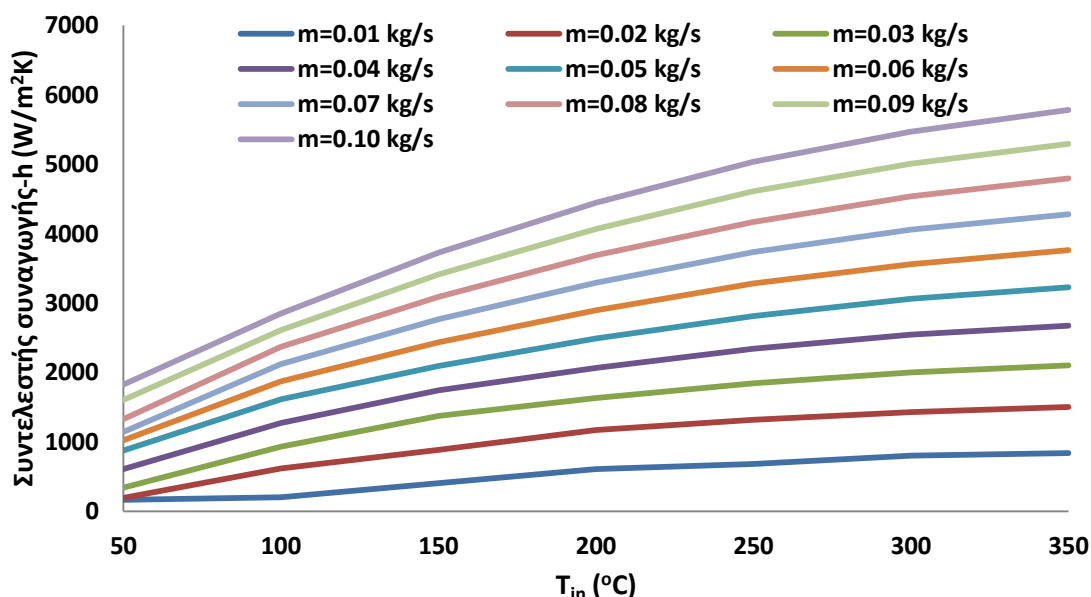
των απωλειών θερμότητας. Οι καμπύλες δεν είναι ομαλές στις χαμηλές παροχές και θερμοκρασίες εισόδου, διότι όπως δείχνει και το σχήμα 5.3.4, στις περιοχές αυτές είτε έχουμε στρωτή ροή είτε μετάβαση από την στρωτή στην τυρβώδη ροή.



Σχήμα 5.3.3: Θερμικός βαθμός απόδοσης Therminol VP-1 για διάφορες παροχές μάζας.



Σχήμα 5.3.4: Αριθμός Reynolds Therminol VP-1 για διάφορες παροχές μάζας.



Σχήμα 5.3.5: Συντελεστής συναγωγής Therminol VP-1 για διάφορες παροχές μάζας.

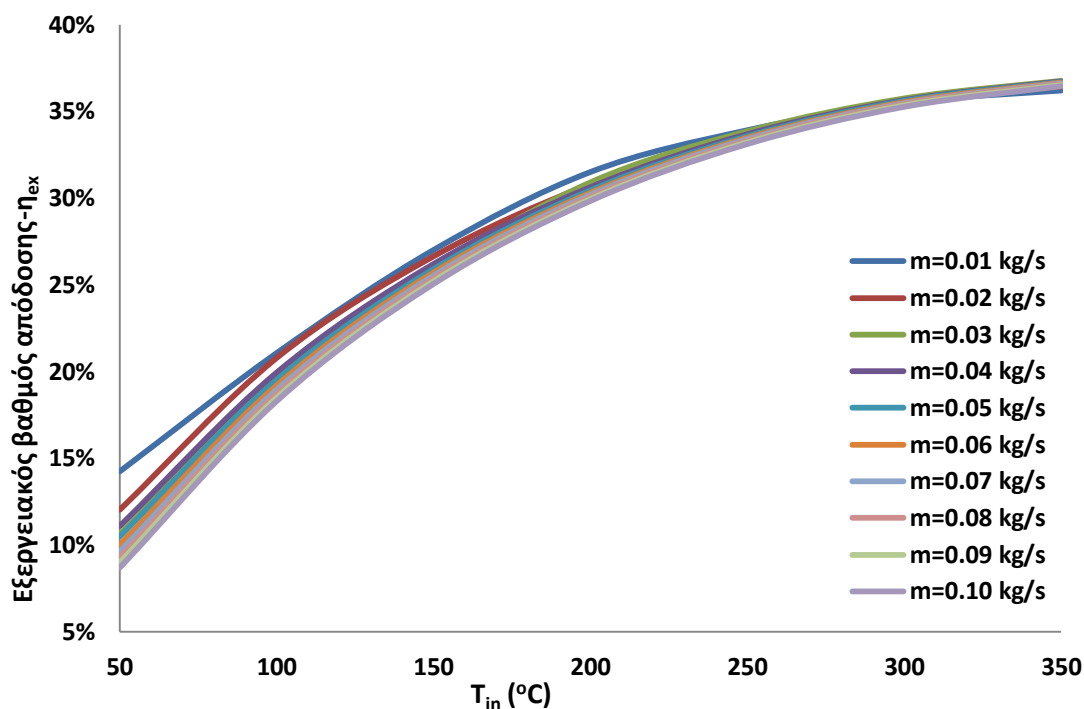
Για να κατανοήσουμε την εξεργειακή συμπεριφορά εκφράζουμε την ωφέλιμη εξέργεια της σχέσης 3.29, ως τη διαφορά μεταξύ της ωφέλιμης ισχύος και ενός παράγοντα μείωσης της εξέργειας ( $E_{destroyed}$ ):

$$E_{usefull} = Q_{usefull} - E_{destroyed} \quad (5.5)$$

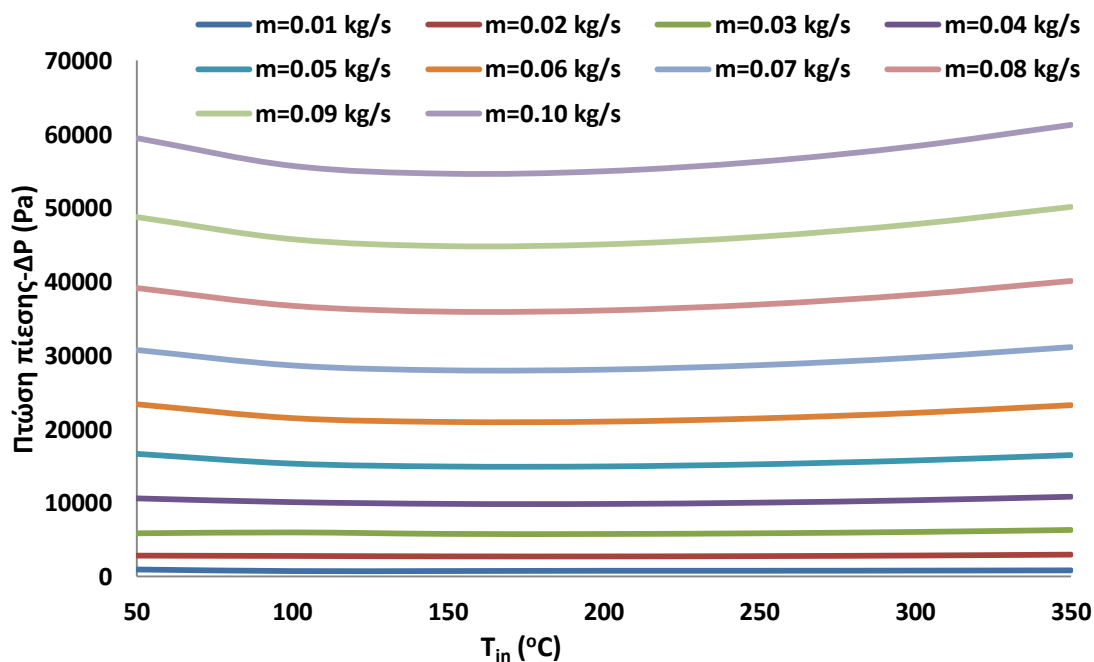
Όπου:

$$E_{destroyed} = \dot{m} \cdot c_p \cdot T_{amb} \cdot \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) + \dot{m} \cdot T_{amb} \cdot \frac{\Delta P}{\rho \cdot T_{fm}} \quad (5.6)$$

Το σχήμα 5.3.6 δείχνει ότι η αύξηση της παροχής, για σταθερή θερμοκρασία εισόδου, οδηγεί σε μείωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Με την αύξηση της παροχής αυξάνεται ο παράγοντας μείωσης εξέργειας λόγω της αύξησης των όρων παροχή και πτώση πίεσης της σχέσης 5.6. Το σχήμα 5.3.5 επιβεβαιώνει την μεγάλη αύξηση της πτώσης πίεσης με την αύξηση της παροχής, κάτι που οφείλεται κυρίως στην αύξηση της ταχύτητας του ρευστού (σχέση 3.23). Ταυτόχρονα με την αύξηση του  $E_{destroyed}$  υπάρχει και αύξηση του  $Q_{usefull}$ , η οποία όμως έχει μικρότερο ρυθμό με αποτέλεσμα τελικά ο εξεργειακός βαθμός να μειωθεί. Τέλος για σταθερή παροχή μάζας ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Παρατηρείται πώς για σταθερή παροχή και αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, μειώνονται το  $Q_{usefull}$  (λόγω μείωσης του θερμικού βαθμού) και το  $E_{destroyed}$  (λόγω κυρίως μείωσης του λόγου  $T_{out}/T_{in}$ ). Τελικά ο εξεργειακός βαθμός αυξάνεται λόγω του υψηλότερου ρυθμού μείωσης του παράγοντα μείωσης εξέργειας από αυτή της ωφέλιμης ισχύος.



Σχήμα 5.3.6: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης Therminol VP-1 για διάφορες παροχές μάζας.

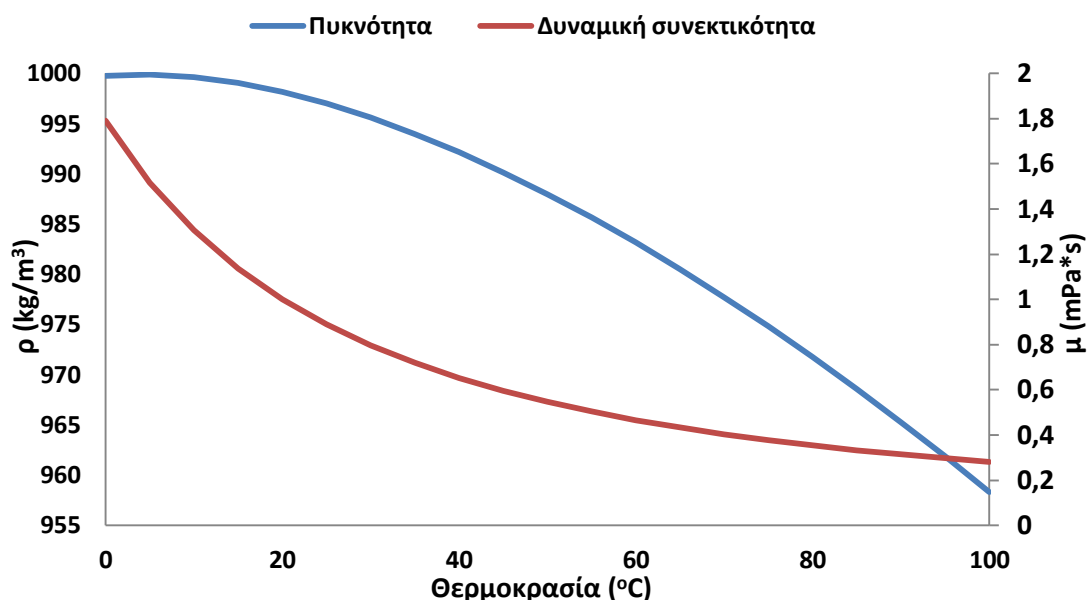


Σχήμα 5.3.7: Πτώση πίεσης Therminol VP-1 για διάφορες παροχές μάζας.

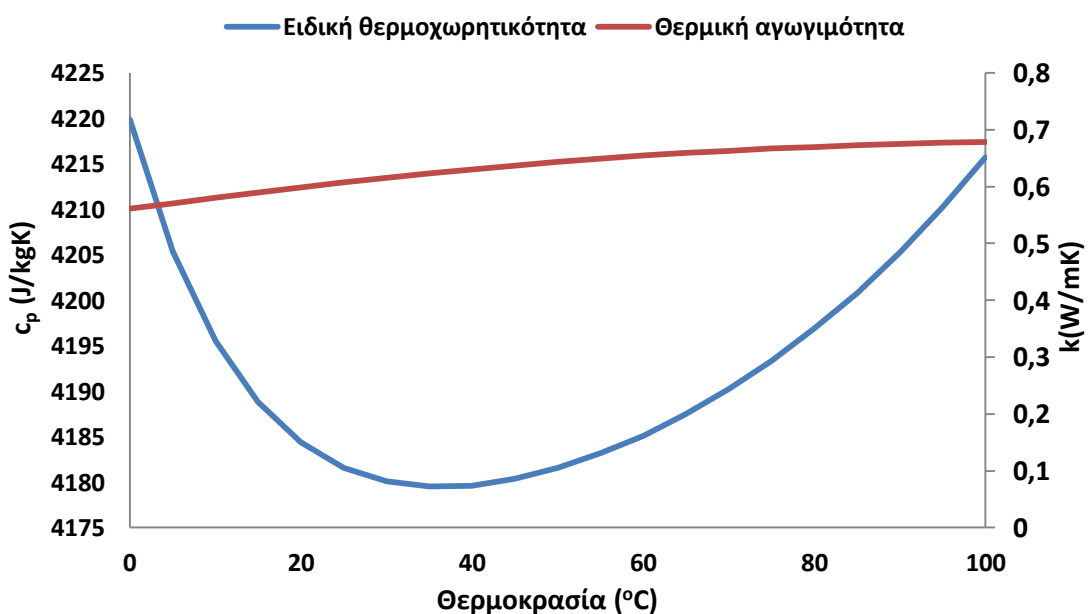
Τελικά συνδυάζοντας τα αποτελέσματα του θερμικού (σχήμα 5.3.2) και του εξεργειακού (σχήμα 5.3.4) βαθμού απόδοσης καταλήγουμε στο συμπέρασμα πώς για εργαζόμενο μέσο Therminol VP-1 η βέλτιστη παροχή μάζας είναι  $m=0.04$  kg/s. Πρόκειται για μια παροχή μάζας για την οποία ο συλλέκτης παρουσιάζει ικανοποιητική θερμική και εξεργειακή συμπεριφορά.

### 5.3.2 Νερό.

Επόμενο εργαζόμενο μέσο είναι το νερό. Το νερό εξετάζεται μέχρι θερμοκρασία εισόδου  $T_{in}=84\text{ }^{\circ}\text{C}$  για να μην ξεπεραστεί το ανώτερο όριο των  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Στα σχήματα 5.3.8 και 5.3.9 δίνονται με την μορφή διαγραμμάτων οι βασικές θερμοδυναμικές ιδιότητες του νερού.



Σχήμα 5.3.8: Πυκνότητα και δυναμική συνεκτικότητα του νερού [5.3].

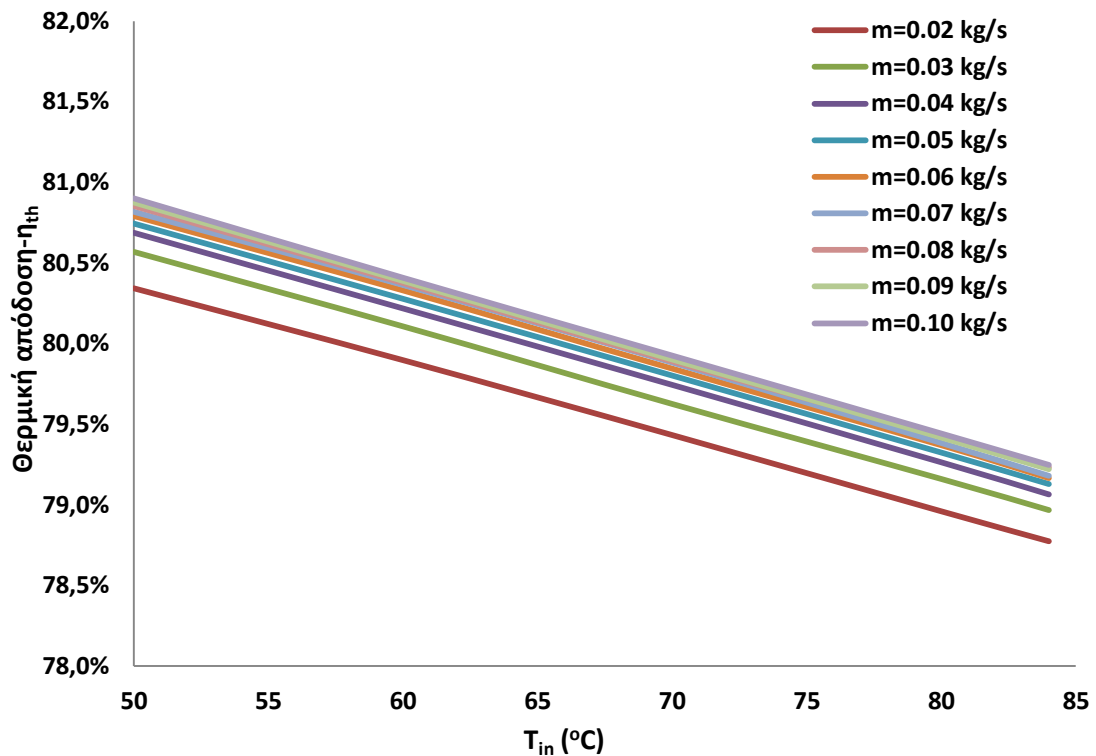


Σχήμα 5.3.9: Θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα του νερού [5.3].

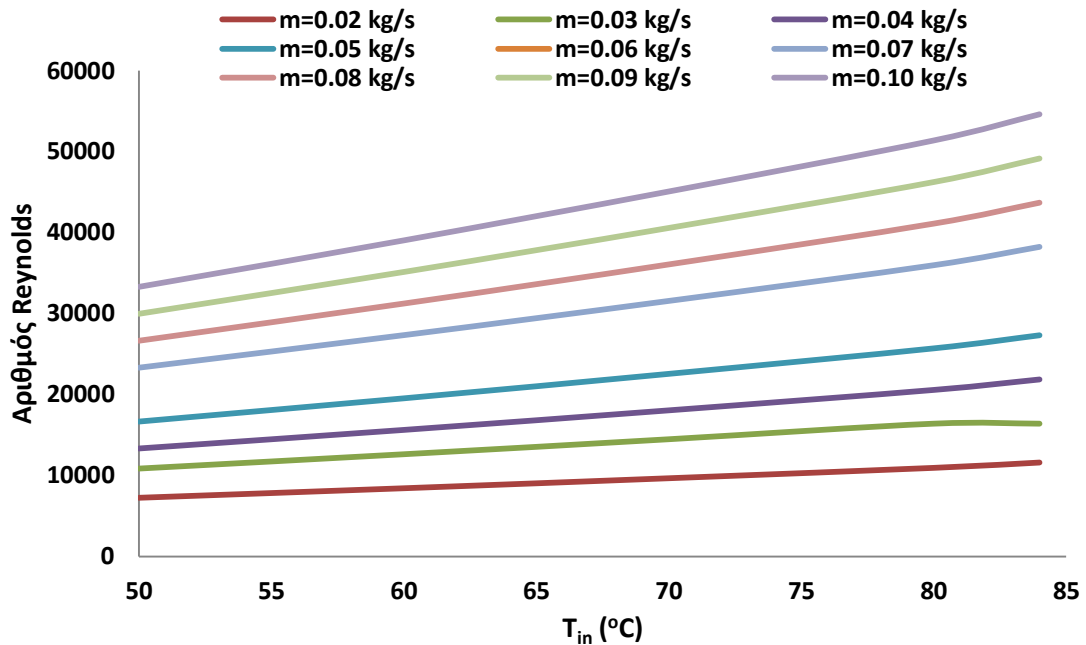
Το σχήμα 5.3.10 δείχνει πώς για εργαζόμενο μέσο το νερό ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της παροχής για σταθερή θερμοκρασία εισόδου, διότι αυξάνοντας την παροχή αυξάνεται ο αριθμός Reynolds (σχήμα 5.3.11), κάτι που σημαίνει καλύτερη μετάδοση θερμότητας στο ρευστό και άρα υψηλότεροι συντελεστές συναγωγής (σχήμα



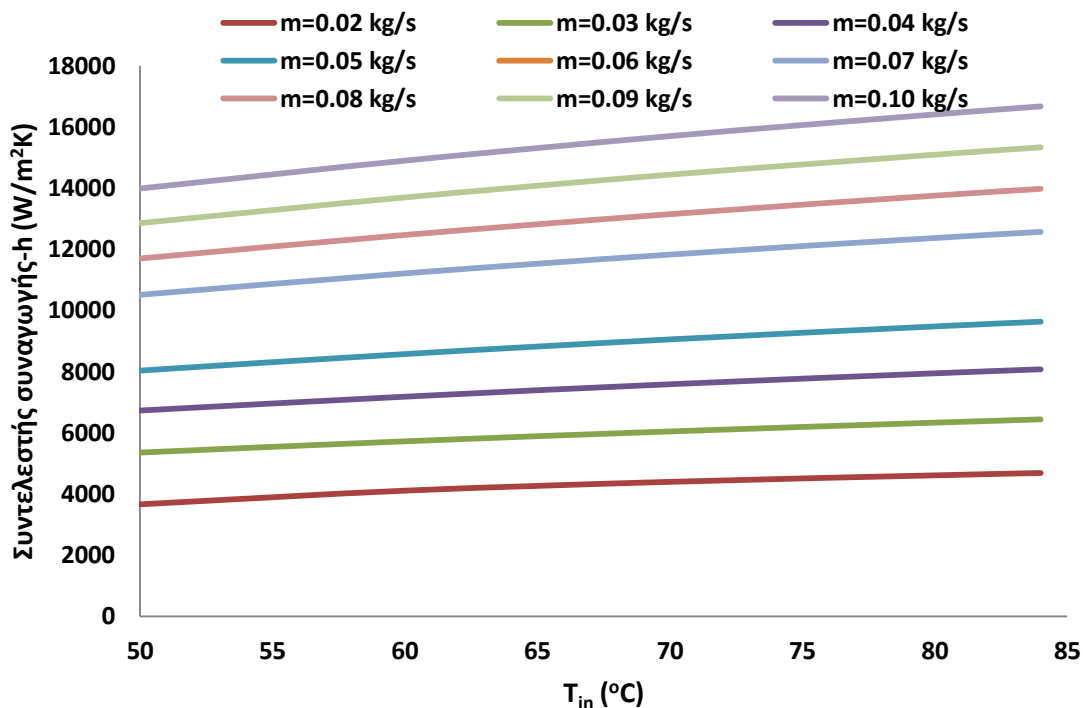
5.3.12). Ενώ για την ίδια παροχή η απόδοση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω αύξησης των απωλειών θερμότητας. Βέβαια στο νερό το εύρος θερμοκρασιών είναι χαμηλότερο, για αυτό και ο ρυθμός μείωσης με την θερμοκρασία είναι μικρός.



Σχήμα 5.3.10: Θερμικός βαθμός απόδοσης νερού για διάφορες παροχές μάζας.

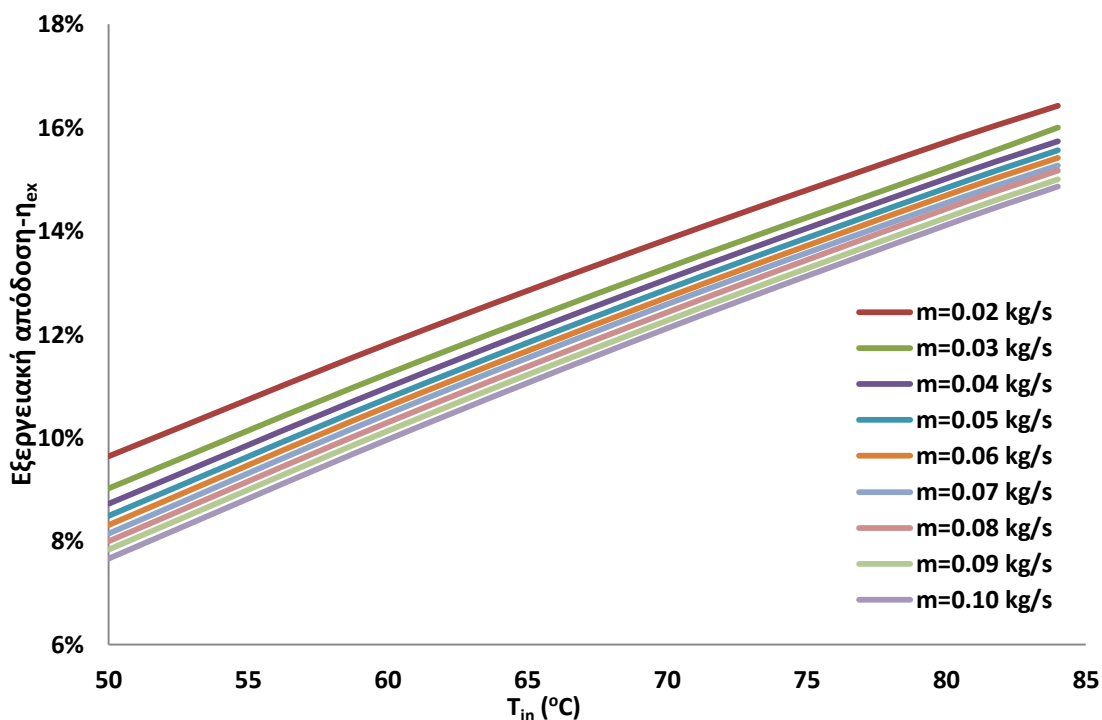


Σχήμα 5.3.11: Αριθμός Reynolds νερού για διάφορες παροχές μάζας.

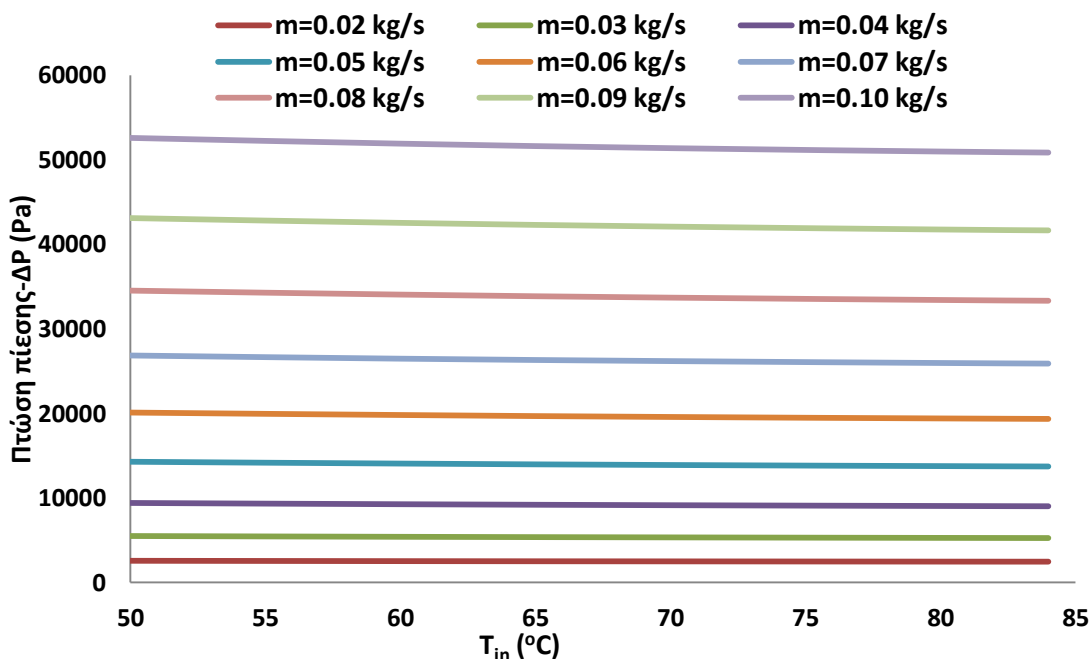


Σχήμα 5.3.12: Συντελεστής συναγωγής νερού για διάφορες παροχές μάζας.

Όσον αφορά την εξεργειακή συμπεριφορά δέκτη με εργαζόμενο μέσο το νερό, το σχήμα 5.3.13 δείχνει την μείωση της εξεργειακής απόδοσης με αύξηση της παροχής για σταθερή θερμοκρασία. Η αύξηση της παροχής καθ' αυτό και η αύξηση των απωλειών πίεσης (σχήμα 5.3.14) οδηγούν σε αύξηση του παράγοντα μείωσης της εξέργειας (σχέση 5.6), με αποτέλεσμα να υπερκαλυφθεί η αύξηση της ωφέλιμης ισχύος και τελικά ο  $\eta_{ex}$  να μειωθεί. Από την άλλη, με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυξάνεται (για σταθερή παροχή). Ο ρυθμός μείωσης του  $E_{destroyed}$  είναι μεγαλύτερος από αυτόν του  $Q_{usefull}$ , λόγω κυρίως μείωσης του λόγου (θερμοκρασία εξόδου/θερμοκρασία εισόδου), με αποτέλεσμα την αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 5.3.13: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης νερού για διάφορες παροχές μάζας.

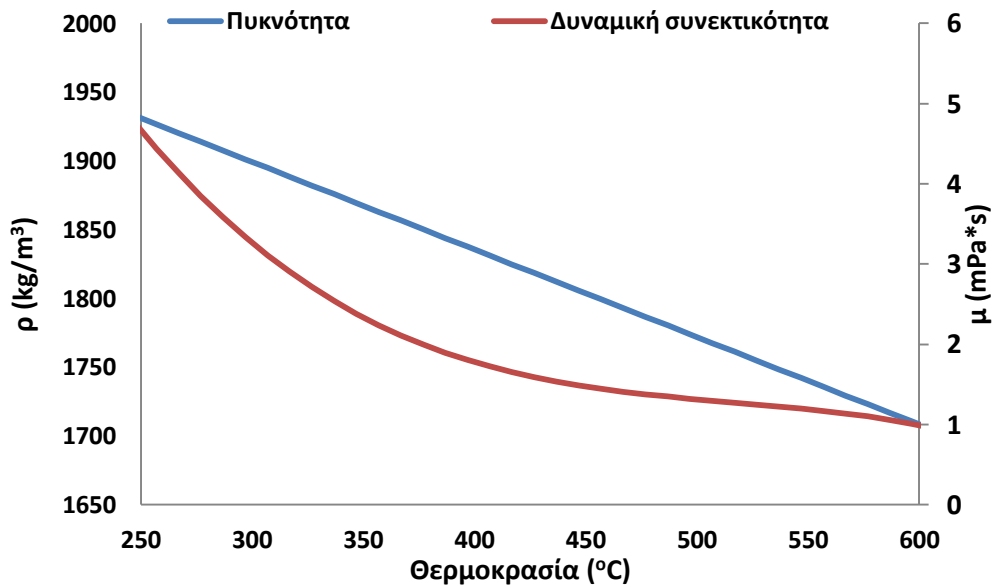


Σχήμα 5.3.14: Πτώση πίεσης νερού για διάφορες παροχές μάζας.

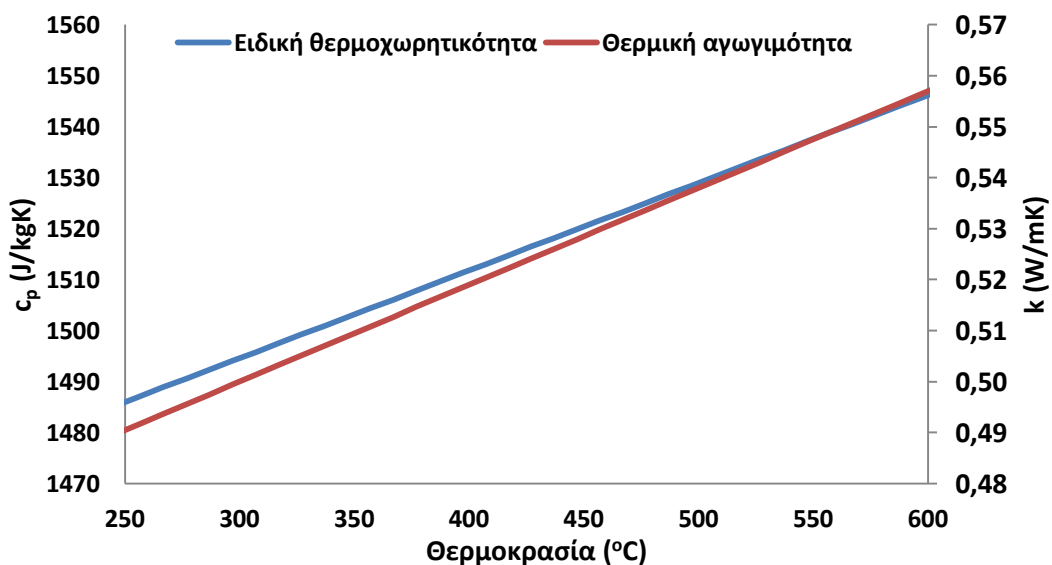
Τελικά λαμβάνοντας υπόψη την αντίστροφη επίδραση της παροχής μάζας στον θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης επιλέγεται ως βέλτιστη παροχή μάζας για το νερό  $m=0.02$  kg/s. Για την παροχή αυτή παρατηρείται ικανοποιητικός θερμικός βαθμός απόδοσης και μέγιστος εξεργειακός βαθμός απόδοσης.

### 5.3.3 Τηγμένο άλας.

Το τηγμένο άλας αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο εργαζόμενο μέσο το οποίο έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες από το θερμικό έλαιο. Επίσης λόγω της υψηλής του πυκνότητας, έχει την δυνατότητα να λειτουργήσει και ως αποθηκευτικό μέσο. Βασικό του μειονέκτημα είναι τα φαινόμενα κρυσταλοποίησης σε χαμηλές θερμοκρασίες, κάτι που μπορεί να προκαλέσει φθορές στην αντλία και στους σωλήνες. Παρακάτω παρουσιάζεται η μελέτη χρήσης τηγμένου άλατος με κατά βάρος περιεκτικότητα 60%  $N_3NO_3$  και 40%  $KNO_3$ , το οποίο σύμφωνα με τον Ζανόικο [5.4] έχει όρια λειτουργίας από 220 °C έως 600 °C. Για τον λόγο αυτό στο τηγμένο άλας οι θερμοκρασίες εισόδου κυμαίνονται από 250 °C έως 550 °C. Στα σχήματα 5.3.15 και 5.3.16 δίνονται οι βασικές θερμοδυναμικές ιδιότητες των τηγμένων αλάτων με βάση της εξισώσεις 4.1 - 4.4.

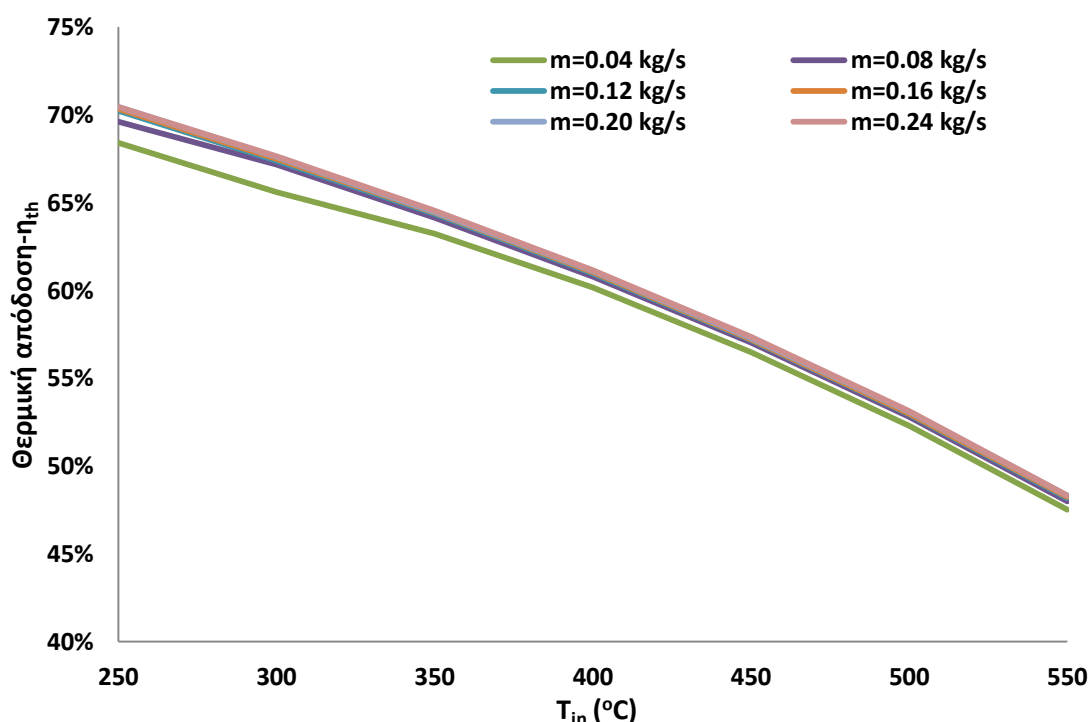


Σχήμα 5.3.15: Πυκνότητα και δυναμική συνεκτικότητα του τηγμένου άλατος [5.4].

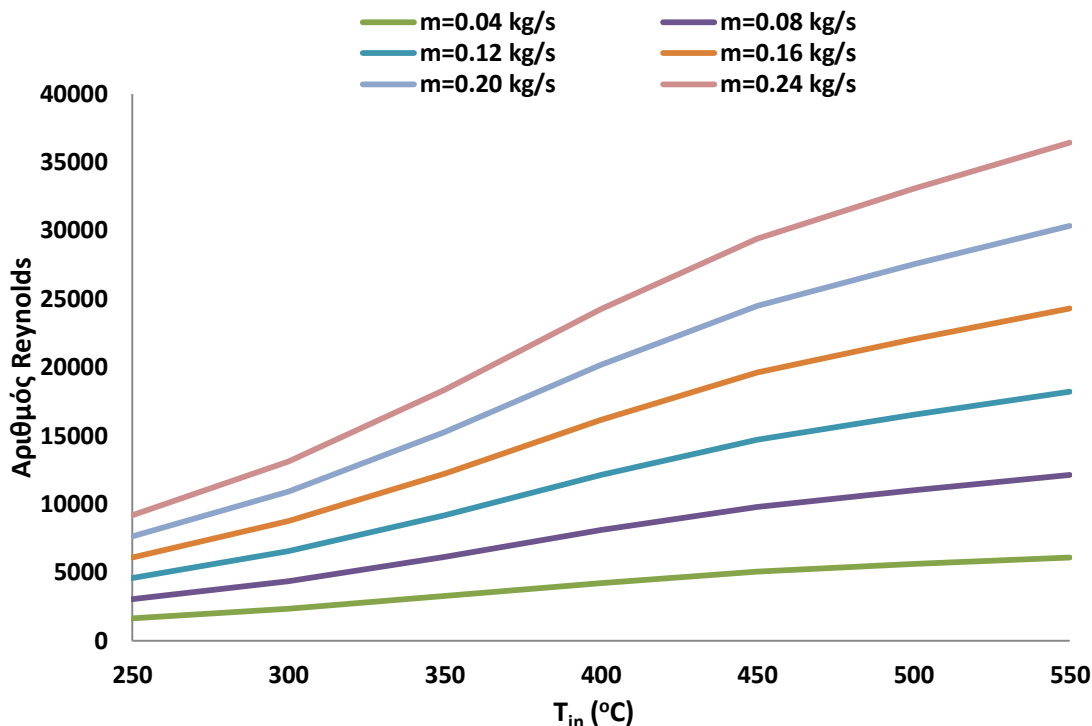


Σχήμα 5.3.16:Θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα του τηγμένου άλατος [5.4].

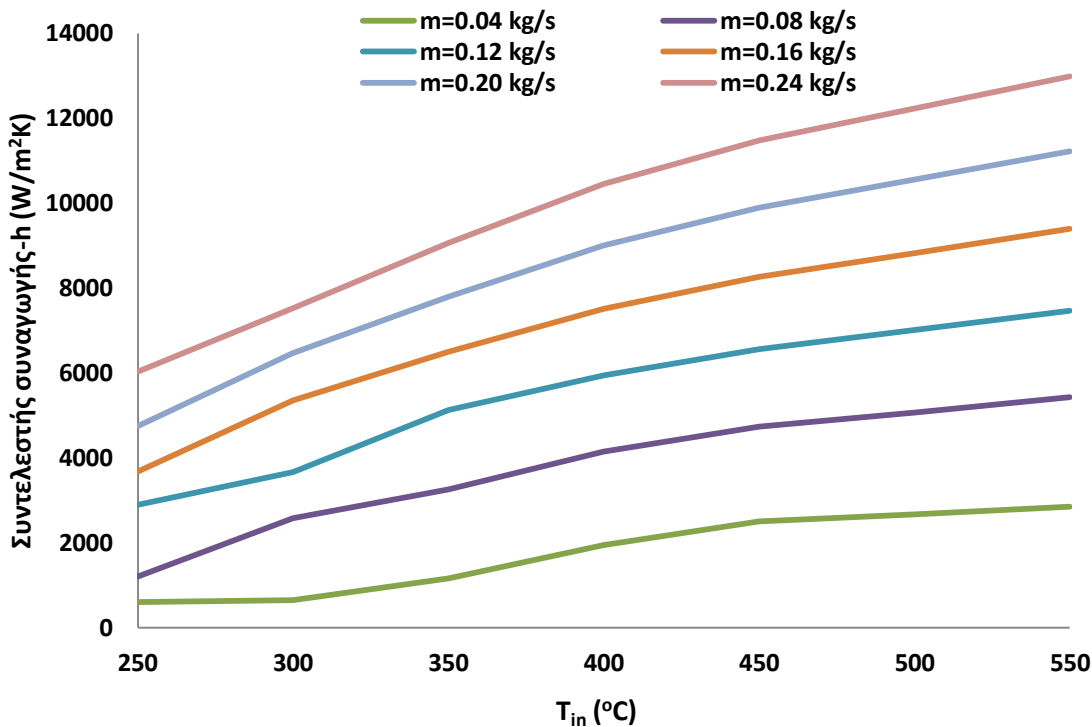
Η θερμική ανάλυση για το τηγμένο άλας επιβεβαίωσε το συμπέρασμα που προέκυψε στο νερό και στο έλαιο ότι με αύξηση της παροχής μάζας, για σταθερή θερμοκρασία εισόδου, ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται, σχήμα 5.3.17. Οι λόγοι είναι η αύξηση του αριθμού Reynolds (σχήμα 5.3.18) και του συντελεστή συναγωγής (σχήμα 5.3.19) με αύξηση της παροχής. Στο σχήμα 5.3.17 φαίνεται επιπλέον πως για σταθερή παροχή μάζας, με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου μειώνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης, λόγω αύξησης των απωλειών θερμότητας. Μάλιστα λόγω της λειτουργίας σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ο ρυθμός μείωσης με την θερμοκρασία είναι μεγαλύτερος στο τηγμένο άλας από τα άλλα υγρά. Τέλος παρατηρείται μια μικρή ανομοιομορφία των καμπύλων στις χαμηλές θερμοκρασίες και παροχές λόγω των χαμηλών αριθμών Reynolds και άρα μη ανάπτυξης τυρβώδους ροής.



Σχήμα 5.3.17: Θερμικός βαθμός απόδοσης τηγμένου άλατος για διάφορες παροχές μάζας.



Σχήμα 5.3.18: Αριθμός Reynolds τηγμένου άλατος για διάφορες παροχές μάζας.

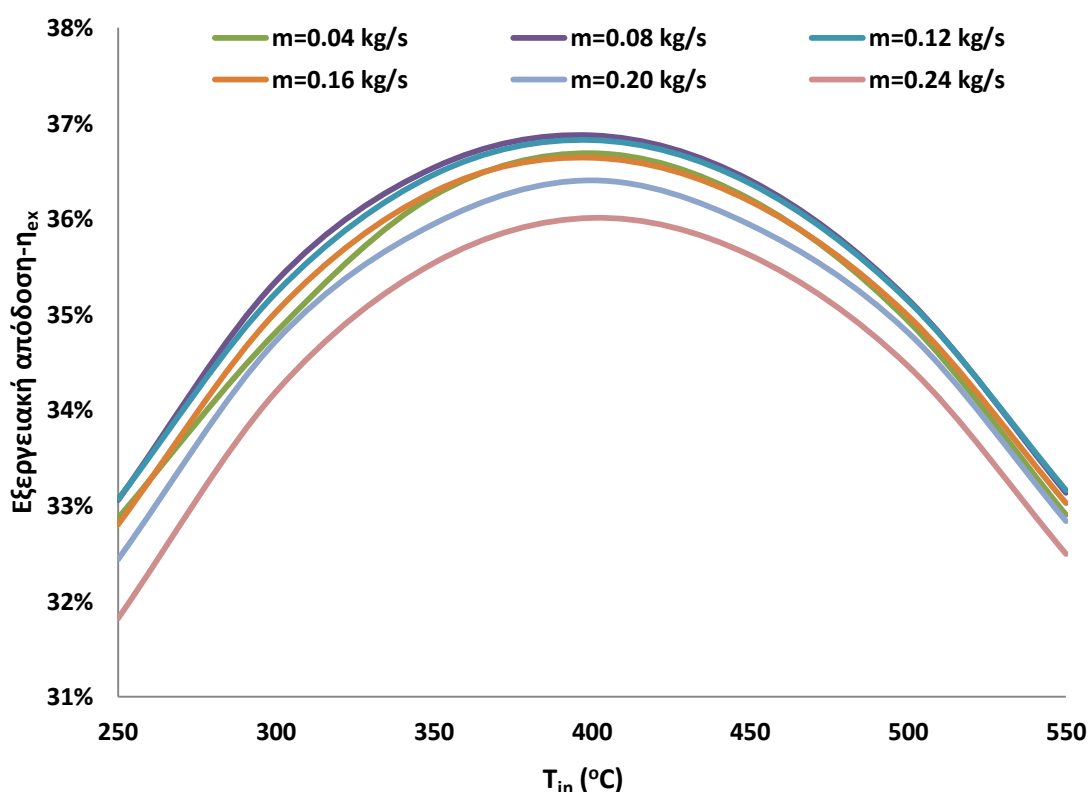


Σχήμα 5.3.19: Συντελεστής συναγωγής τηγμένου άλατος για διάφορες παροχές μάζας.

Όσον αφορά την εξεργειακή συμπεριφορά του δέκτη με εργαζόμενο μέσο το τηγμένο άλας, το σχήμα 5.3.20 δείχνει πώς για σταθερή θερμοκρασία εισόδου, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται για παροχή μάζας  $m=0.08$  kg/s. Όπως δείχνει και το σχήμα 5.3.21, με αύξηση της παροχής αυξάνεται η ωφέλιμη ισχύς, λόγω υψηλότερων θερμικών

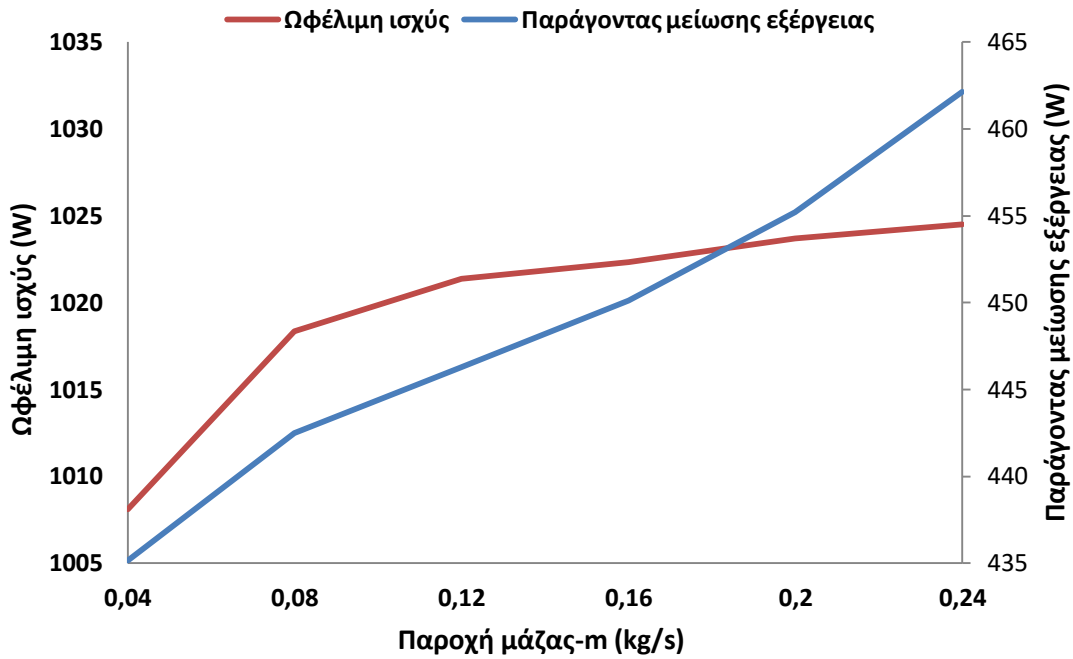
βαθμών, και ταυτόχρονα αυξάνεται και ο παράγοντας μείωσης της εξέργειας (σχέση 5.6), κυρίως λόγω αύξησης της παροχής και της πτώσης πίεσης. Η τάση της ωφέλιμης εξέργειας εξαρτάται από τους ρυθμούς αύξησης των παραπάνω όρων. Αν ο ρυθμός αύξησης της ωφέλιμης ισχύος είναι μεγαλύτερος από αυτόν του παράγοντα μείωσης της εξέργειας, τότε αυξάνεται και ο  $\eta_{ex}$  και το αντίστροφο. Στο σχήμα 5.3.21 φαίνεται πώς για  $m < 0.08$  kg/s ο ρυθμός αύξησης της ωφέλιμης ισχύος υπερτερεί αυτού του όρου μείωσης εξέργειας, άρα ο  $\eta_{ex}$  συνολικά αυξάνεται, και για  $m > 0.08$  το αντίστροφο, που σημαίνει ότι ο  $\eta_{ex}$  μειώνεται.

Επιπλέον στο σχήμα 5.3.20 φαίνεται πώς ανεξαρτήτως παροχής μάζας ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται για θερμοκρασία εισόδου  $T_{in} = 400$  °C. Το παραπάνω συμπέρασμα είναι πολύ σημαντικό καθώς δείχνει πώς για το τηγμένο άλας, σε αντίθεση με τα άλλα εργαζόμενα μέσα, υπάρχει μια βέλτιστη εξεργειακά θερμοκρασία λειτουργίας. Η εξήγηση αυτής της μεγιστοποίησης κρύβεται στην ισορροπία μεταξύ του ρυθμού μείωσης ωφέλιμης ισχύος και του ρυθμού μείωσης του παράγοντα μείωσης εξέργειας σε σχέση με την θερμοκρασία. Οι δύο αυτοί όροι φαίνονται στο σχήμα 5.3.22, όπου παρατηρώ πώς ο παράγοντας μείωσης έχει σταθερή σχεδόν κλίση ενώ η ωφέλιμη ισχύς μικρότερη κλίση από τον παράγοντα μείωσης της εξέργειας για  $T_{in} > 400$  °C και μεγαλύτερη κλίση για  $T_{in} < 400$  °C. Αυτό εξηγεί την μεγιστοποίηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης για  $T_{in} = 400$  °C.

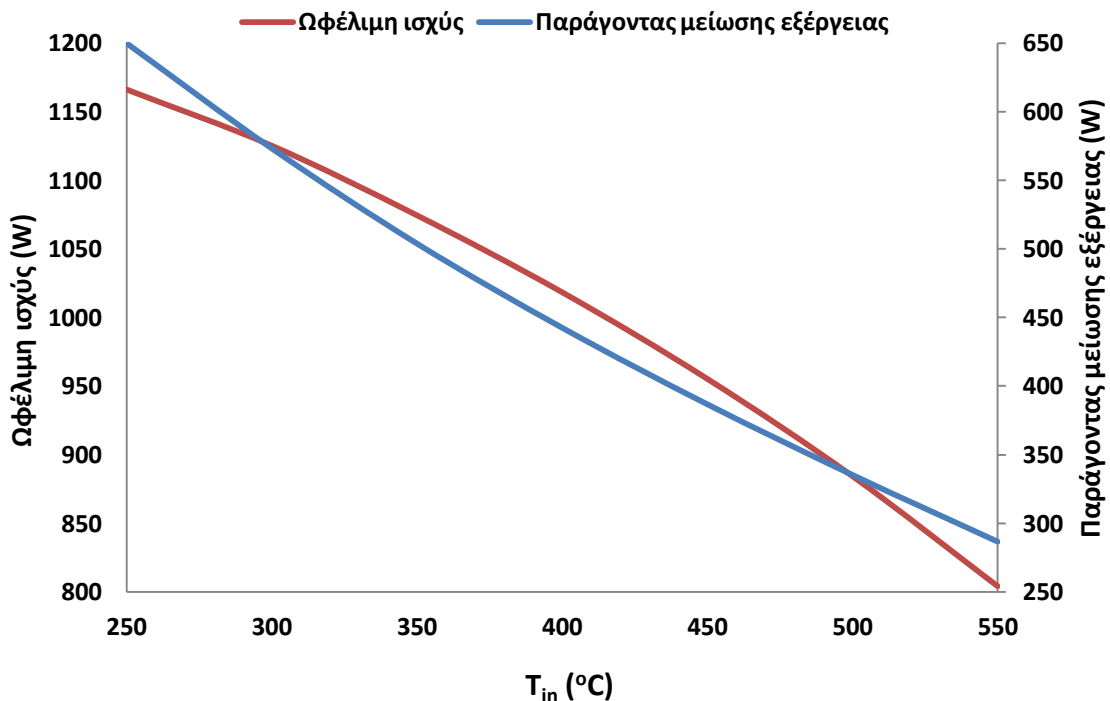


Σχήμα 5.3.20: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης τηγμένου άλατος για διάφορες παροχές μάζας.





Σχήμα 5.3.21:Ωφέλιμη ισχύς και παράγοντας μείωσης εξέργειας τηγμένου άλατος για  $T_{in}=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , με παράμετρο την παροχή.

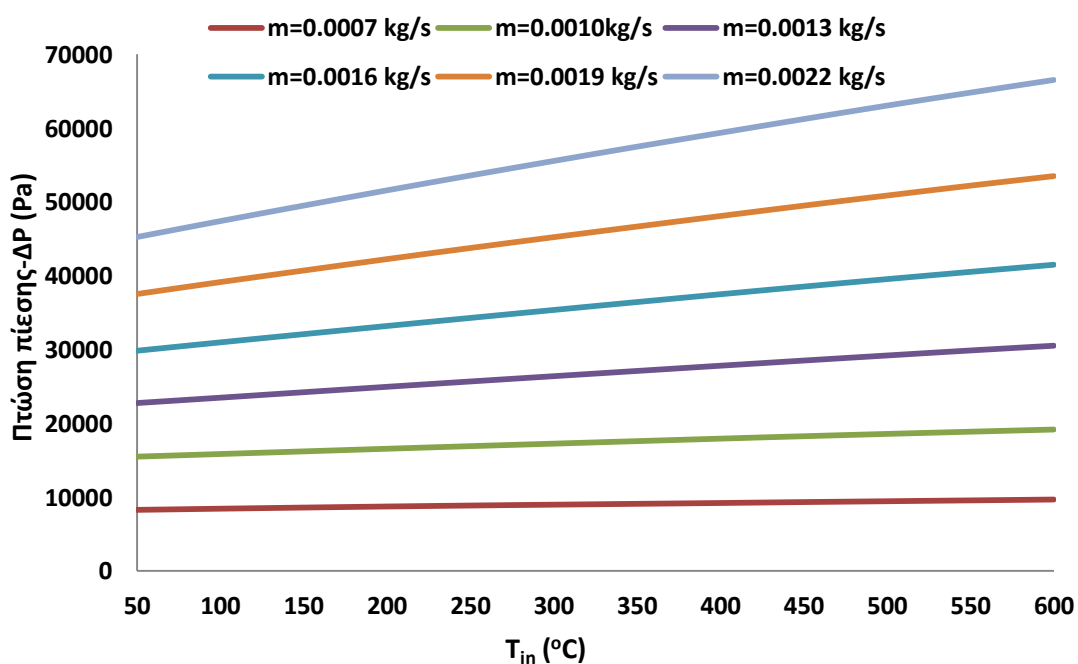


Σχήμα 5.3.22:Ωφέλιμη ισχύς και παράγοντας μείωσης εξέργειας τηγμένου άλατος για  $m=0.08\text{ kg/s}$ , με παράμετρο την θερμοκρασία εισόδου.

Τελικά για το τηγμένο άλας επιλέγεται ως βέλτιστη παροχή  $m=0.08\text{ kg/s}$ , για την οποία έχει τον μέγιστο εξεργειακό βαθμό απόδοσης και ταυτόχρονα ικανοποιητικό θερμικό βαθμό απόδοσης για όλο το εύρος των θερμοκρασιών.

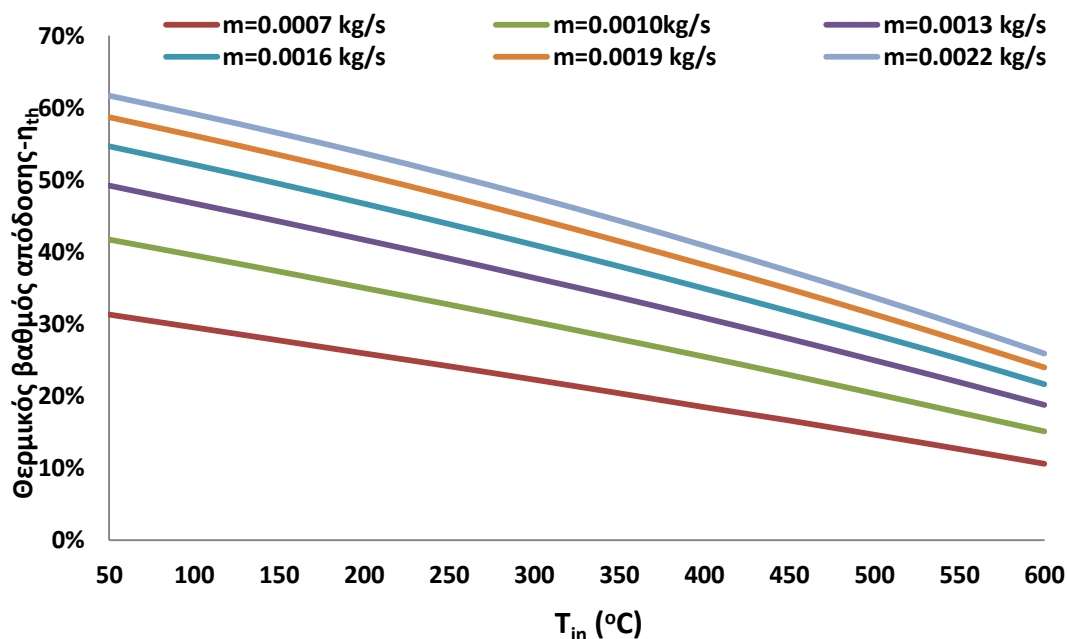
### 5.3.4 Αέρας.

Τελευταίο εργαζόμενο μέσο που εξετάζεται είναι ο αέρας, του οποίου το βασικά πλεονεκτήματα είναι η αφθονία του στην φύση και το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ ψηλές θερμοκρασίες (άνω των 1000 °C). Στην παρούσα μελέτη ο αέρας μελετάται μέχρι θερμοκρασία εισόδου  $T_{in} = 550$  °C. Από την άλλη το βασικότερο μειονέκτημα είναι οι υψηλές απώλειες πίεσης που οφείλονται στην πολύ μικρή πυκνότητα (σχέση 3.32). Πράγματι όπως δείχνει το σχήμα 5.3.23 οι απώλειες πίεσης αυξάνονται ραγδαία με την αύξηση της παροχής, για σταθερή θερμοκρασία. Λόγω της μικρής πυκνότητας ο αέρας εξετάζεται σε παροχές μάζας μικρότερης κλίμακας από τα άλλα μέσα.



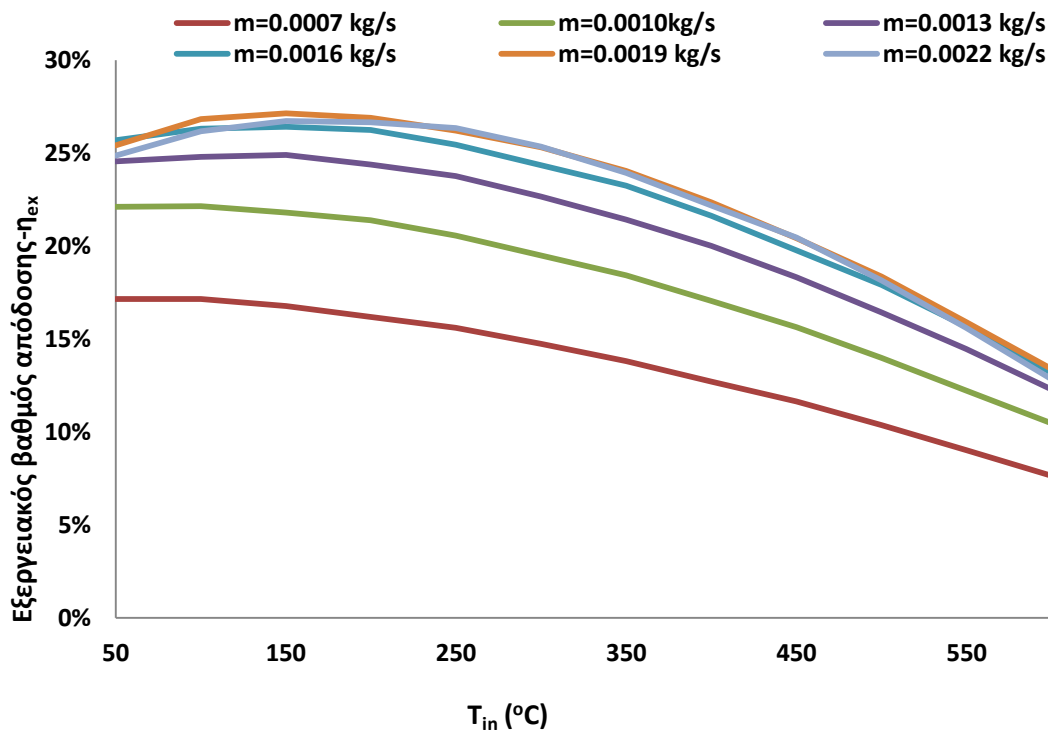
Σχήμα 5.3.23: Πτώση πίεσης αέρα για διάφορες παροχές μάζας.

Επιπλέον στο σχήμα 5.3.24 φαίνεται η αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης με την αύξηση της παροχής (για σταθερή θερμοκρασία) και η μείωση της θερμικής απόδοσης με την αύξηση της θερμοκρασίας (για σταθερή παροχή). Το πρώτο οφείλεται στην αύξηση του αριθμού Reynolds (πιο τυρβώδης ροή → καλύτερη μετάδοση θερμότητας) ενώ το δεύτερο στην αύξηση των απωλειών θερμότητας.



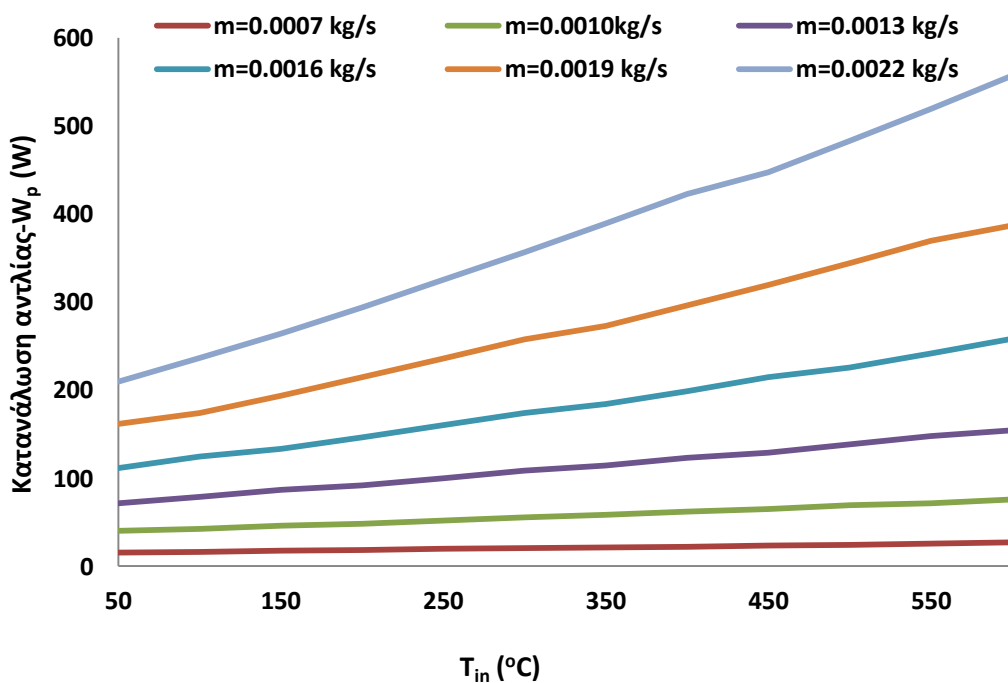
Σχήμα 5.3.24: Θερμικός βαθμός απόδοσης αέρα για διάφορες παροχές μάζας.

Για τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης το σχήμα 5.3.25 δείχνει πώς για σταθερή θερμοκρασία εισόδου ο εξεργειακός βαθμός αυξάνεται με την αύξηση της παροχής μάζας, αρχικά με μεγάλο ρυθμό και στην συνέχεια με χαμηλότερο. Η μείωση του ρυθμού αύξησης του εξεργειακού βαθμού οφείλεται στην ραγδαία αύξηση των απωλειών πίεσης. Επίσης για σταθερή παροχή μάζας, με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στις χαμηλές παροχές ο εξεργειακός μειώνεται διαρκώς ενώ στις υψηλές παροχές παρουσιάζει μέγιστο.

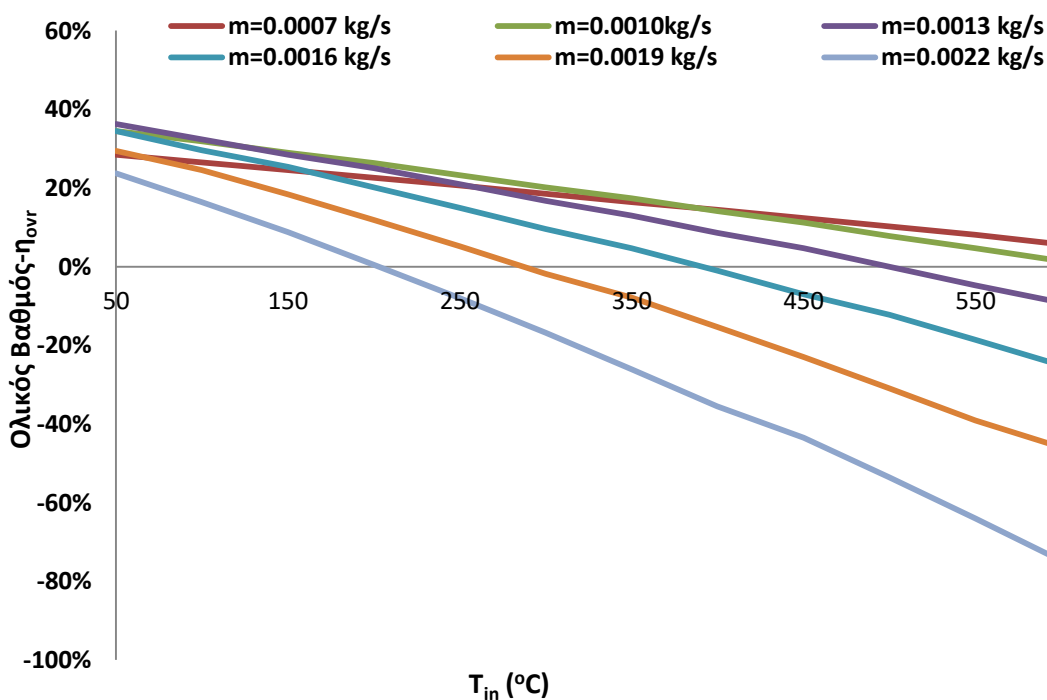


Σχήμα 5.3.25: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης αέρα για διάφορες παροχές μάζας.

Λόγω της μεγάλης μεταβολής στον θερμικό και εξεργειακό βαθμού απόδοσης και λόγω των πολύ μεγάλων απωλειών πίεσης, για την περίπτωση του αέρα η βέλτιστη παροχή θα βρεθεί σύμφωνα με τον ολικό βαθμό απόδοσης (σχέση 3.35), που λαμβάνει υπόψη την κατανάλωση της αντλίας. Η μεγάλη αύξηση της κατανάλωσης της αντλίας με την παροχή φαίνεται στο σχήμα 5.3.26. Το σχήμα 5.3.27 δείχνει την διακύμανση του ολικού βαθμού απόδοσης για διάφορες παροχές αέρα. Παρατηρώ ότι μέχρι  $T_{in}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$  μεγαλύτερος ολικός εμφανίζεται για  $m=0.0013\text{ kg/s}$ , για  $150\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{in} \leq 450\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέγιστος ολικός για  $m=0.0010\text{ kg/s}$  και  $T_{in} > 450\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέγιστος για  $m=0.007\text{ kg/s}$ . Επίσης παρατηρείται πώς στις μεγάλες παροχές ο ολικός βαθμός λαμβάνει αρνητικές τιμές, λόγω των απωλειών πίεσης, με αποτέλεσμα να αποκλείονται από την επιλογή. Τελικά για τον αέρα επιλέγεται βέλτιστη παροχή η  $m=0.0010\text{ kg/s}$ , για την οποία ο ολικός βαθμός είναι μέγιστος για  $150 < T_{in} < 450$  και αρκετά υψηλός στις άλλες θερμοκρασίες. Επιπλέον παρουσιάζει ικανοποιητικό θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 5.3.26: Κατανάλωση αντλίας αέρα για διάφορες παροχές μάζας.



Σχήμα 5.3.27: Ολικός βαθμός απόδοσης αέρα για διάφορες παροχές μάζας.

#### 5.4 Σύγκριση μεταξύ των εργαζόμενων μέσων.

Στην προηγούμενη ενότητα βρέθηκε για τα τέσσερα εργαζόμενα μέσα η βέλτιστη παροχή μάζας (πίνακας 5.4.1). Για τις βέλτιστες παροχές μάζας, με παράμετρο την θερμοκρασία εισόδου, συγκρίνεται η θερμική και εξεργειακή απόδοση του συλλέκτη, για λειτουργία με διάφορα εργαζόμενα μέσα.

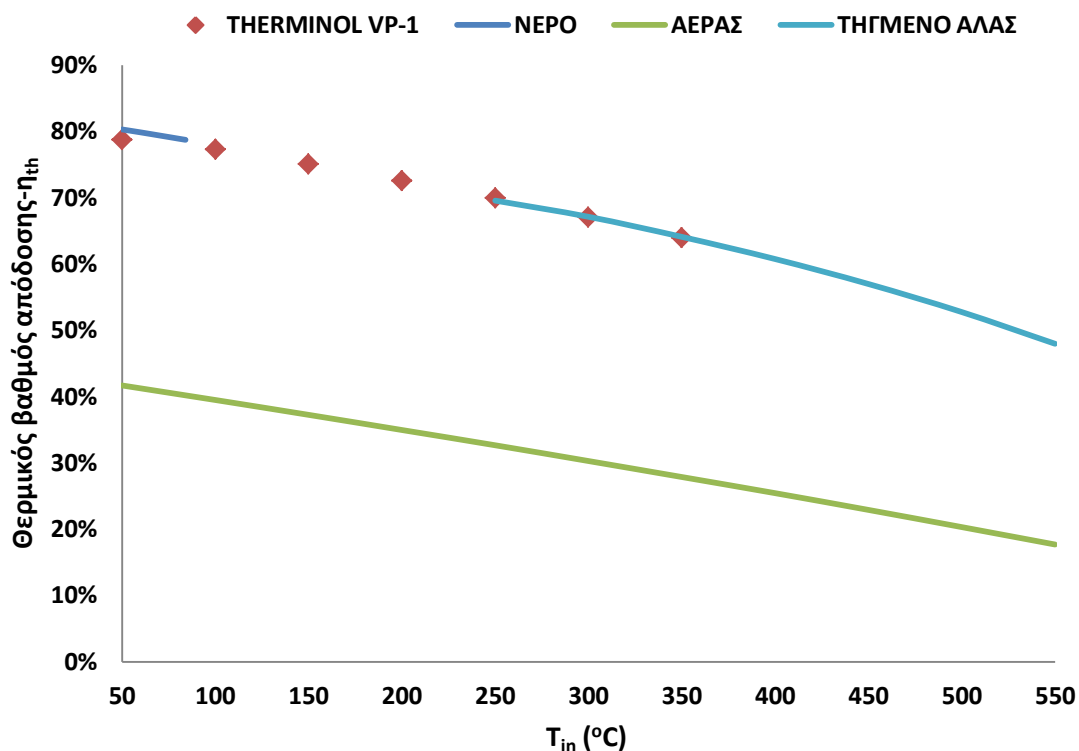
| Εργαζόμενο μέσο | Βέλτιστη παροχή | Εύρος θερμοκρασίας        |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| Therminol VP-1  | $m=0.04$ kg/s   | $T_{in}=50$ °C- $350$ °C  |
| Νερό            | $m=0.02$ kg/s   | $T_{in}=50$ °C- $84$ °C   |
| Τηγμένο άλας    | $m=0.08$ kg/s   | $T_{in}=250$ °C- $550$ °C |
| Αέρας           | $m=0.001$ kg/s  | $T_{in}=50$ °C- $550$ °C  |

Πίνακας 5.4.1: Βέλτιστες παροχές μάζας και εύρος θερμοκρασιών εισόδου για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα

Το σχήμα 5.4.1 δείχνει τον θερμικό βαθμό απόδοσης για τα τέσσερα εργαζόμενα μέσα. Τα βασικά συμπεράσματα από το διάγραμμα αυτό είναι:

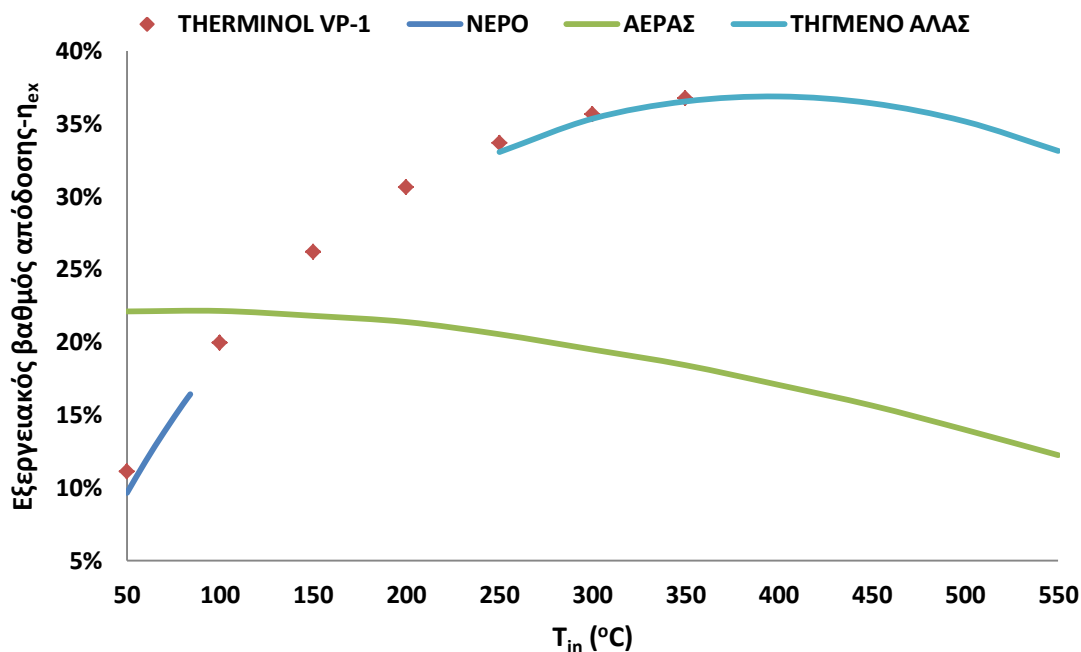
- Στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου, το νερό έχει τον μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης, χωρίς όμως μεγάλη διαφορά από το Therminol-VP1.
- Στην περιοχή θερμοκρασιών όπου συνυπάρχουν το έλαιο και το τηγμένο άλας οι θερμικοί βαθμοί είναι πολύ κοντά, πιο συγκεκριμένα για  $T_{in}=250$  °C το Therminol-VP1 έχει λίγο μεγαλύτερο  $\eta_{th}$ , ενώ για  $T_{in}=300$  °C και μετά υπερτερεί το τηγμένο άλας για λίγο.
- Σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών ο αέρας έχει πολύ μικρότερη θερμική απόδοση από τα άλλα τρία υγρά εργαζόμενα μέσα, λόγω των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων. Τα υγρά έχουν πολύ μεγαλύτερο συντελεστή συναγωγής, όπως θα δούμε παρακάτω.

Επιπλέον τα υγρά λειτουργούν με μεγαλύτερες παροχές μάζας κάτι που σημαίνει χαμηλότερη μέση θερμοκρασία και άρα μικρότερες απώλειες θερμότητας.



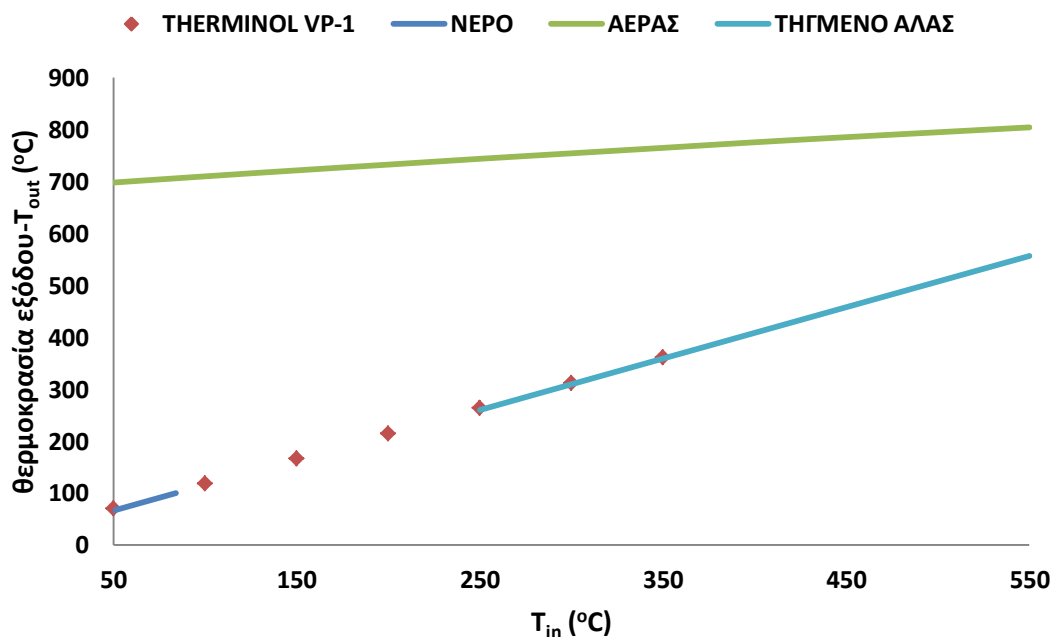
Σχήμα 5.4.1: Σύγκριση θερμικού βαθμού των εργαζόμενων μέσων.

Η διακύμανση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης φαίνεται στο σχήμα 5.4.2. Για θερμοκρασίες εισόδου κάτω των 100°C ο αέρας έχει την καλύτερη εξεργειακή συμπεριφορά ακολουθούμενο από το Therminol-VP1, με τελευταίο το νερό. Στις μεσαίες όμως θερμοκρασίες το Therminol-VP1 έχει καλύτερη εξεργειακή συμπεριφορά από τον αέρα, με την διαφορά τους μάλιστα να βαίνει αυξανόμενη. Ο αέρας στην αρχή λόγω της υψηλής θερμοκρασίας εξόδου (σχήμα 5.4.3) και της χαμηλής παροχής, υπερκαλύπτει τον χαμηλό θερμικό βαθμό απόδοσης και παρουσιάζει καλύτερη εξεργειακή συμπεριφορά. Όμως όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία ο θερμικός βαθμός απόδοσης γίνεται σημαντικός με αποτέλεσμα το Therminol-VP1 να παρουσιάζει καλύτερο  $\eta_{ex}$ . Στις υψηλές θερμοκρασίες το τηγμένο άλας έχει πολύ μεγαλύτερο εξεργειακό από τον αέρα, λόγω του υψηλού θερμικού βαθμού απόδοσης. Στην σύγκριση Therminol-VP1 και τηγμένου άλατος επικρατεί για λίγο το Therminol-VP1, κυρίως λόγω μικρότερων απωλειών πίεσης.



Σχήμα 5.4.2: Σύγκριση εξεργειακού βαθμού απόδοσης των εργαζόμενων μέσων.

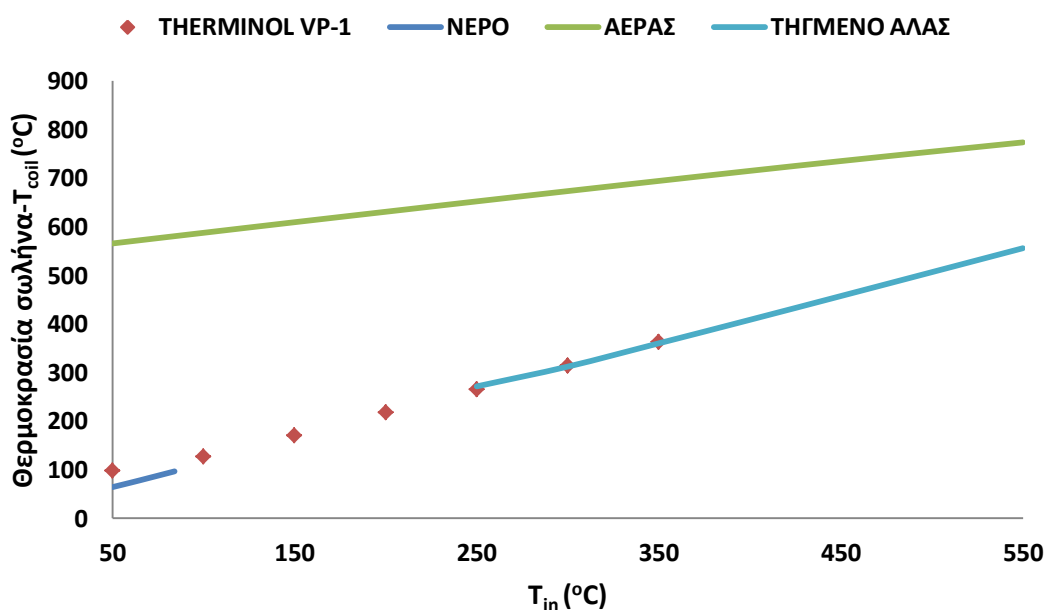
Το σχήμα 5.4.3 δείχνει την μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου. Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των υγρών, λόγω της μικρής θερμοχωρητικότητας και παροχής. Για τα υγρά οι θερμοκρασίες εξόδου βρίσκονται κοντά μεταξύ τους. Τέλος ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας εξόδου στον αέρα είναι μικρότερος από τα υγρά, κάτι που συνδέεται με την εξεργειακή συμπεριφορά που αναλύσαμε πριν.



Σχήμα 5.4.3: Σύγκριση θερμοκρασίας εξόδου των εργαζόμενων μέσων.

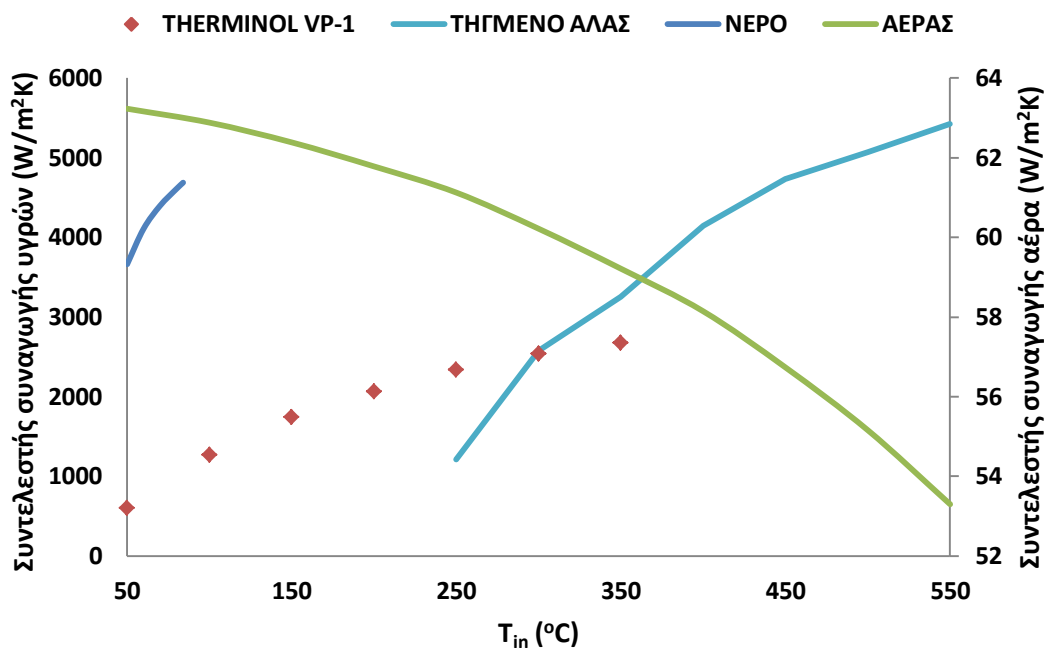


Το σχήμα 5.4.4 δείχνει την μεταβολή της θερμοκρασίας του τοιχώματος του σωλήνα ( $T_{coil}$ ). Η  $T_{coil}$  συνδέεται άμεσα με τον θερμικό βαθμό, αφού όσο μεγαλύτερη είναι τόσο αυξάνονται οι θερμικές απώλειες. Πράγματι στο σχήμα φαίνεται πώς για την περίπτωση του αέρα η  $T_{coil}$  είναι μέγιστη ακολουθούμενη από τα υγρά. Για τα υγρά στις χαμηλές θερμοκρασίες το Therminol-VP1 έχει μεγαλύτερη  $T_{coil}$  από το νερό, ενώ στις μεσαίες το Therminol-VP1 έχει αρχικά μικρότερη και στη συνέχεια μεγαλύτερη  $T_{coil}$  από το τηγμένο άλας, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την θερμική απόδοση.



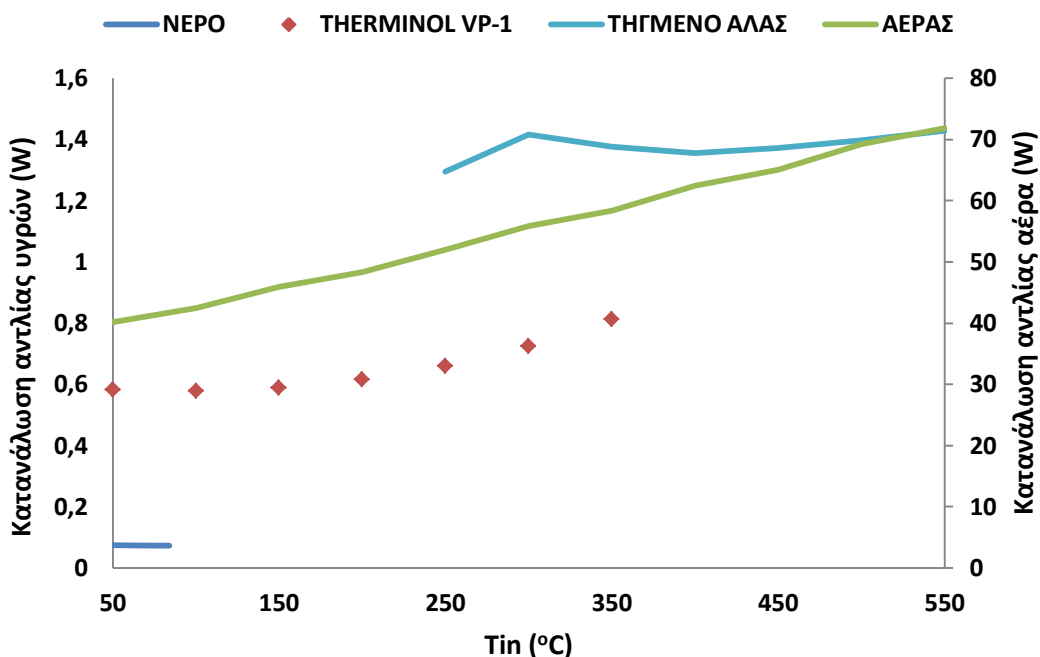
Σχήμα 5.4.4: Σύγκριση θερμοκρασίας τοιχώματος σωλήνα των εργαζόμενων μέσων.

Ένα ακόμη μέγεθος που συνδέεται άμεσα με την θερμική απόδοση και την θερμοκρασία του σωλήνα είναι ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του σωλήνα και του ρευστού. Όσο μεγαλύτερος είναι τόσο καλύτερες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας υπάρχουν και άρα καλύτερη θερμική απόδοση. Πράγματι στο σχήμα 5.4.5, φαίνεται πώς ο αέρας έχει τον μικρότερο συντελεστή συναγωγής για όλες τις θερμοκρασίες. Επιπλέον στις χαμηλές θερμοκρασίες το νερό έχει καλύτερο συντελεστή συναγωγής από το Therminol VP-1. Τέλος το έλαιο έχει αρχικά μεγαλύτερο συντελεστή από το τηγμένο άλας και στην συνέχεια μικρότερο, αντίστοιχα με την διακύμανση των θερμικών βαθμών απόδοσης.

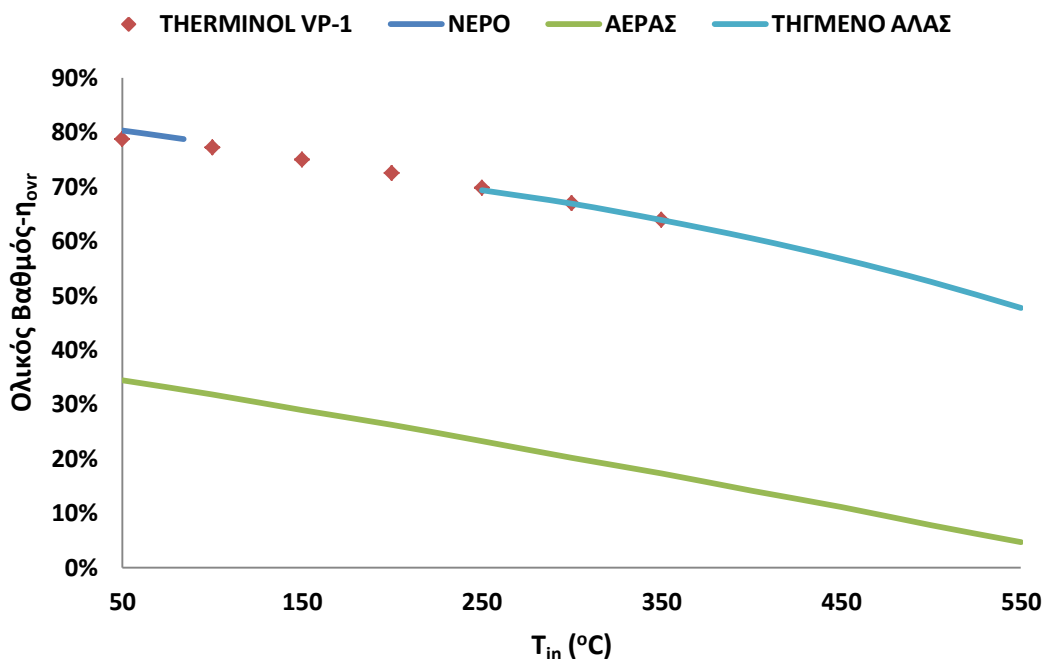


Σχήμα 5.4.5: Σύγκριση συντελεστή συναγωγής των εργαζόμενων μέσων.

Τέλος οι μεγάλες απώλειες πίεσης του αέρα σε συνδυασμό με την μικρή πυκνότητα έχουν ως αποτέλεσμα η κατανάλωση της αντλίας να είναι πολύ μεγαλύτερη στην περίπτωση του αέρα, όπως δείχνει το σχήμα 5.4.6. Με την κατανάλωση της αντλίας συνδέεται άμεσα ο ολικός βαθμός απόδοσης, που φαίνεται στο σχήμα 5.4.7. Το σχήμα αυτό δείχνει πώς για τα υγρά ο ολικός βαθμός παραμένει πολύ κοντά στον θερμικό και σε υψηλά επίπεδα, ενώ για τον αέρα υφίστανται μείωση σημαντική και είναι χαμηλός.



Σχήμα 5.4.6: Σύγκριση κατανάλωσης αντλίας των εργαζόμενων μέσων.



Σχήμα 5.4.7: Σύγκριση ολικού βαθμού απόδοσης των εργαζόμενων μέσων.

Επιπλέον με βάση το σχήμα 5.4.1 έγινε προσέγγιση των καμπυλών του θερμικού βαθμού απόδοσης με κατάλληλα πολυώνυμα, για τα οποία  $R^2=1$ , κάτι που σημαίνει πώς προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τα αποτελέσματα. Τα πολυώνυμα αυτά έχουν ως μεταβλητή τον λόγο  $\frac{T_{in}-T_{amb}}{G_b}$ , που χρησιμοποιείται συχνά στην βιβλιογραφία.

Για το Therminol VP-1 ( $50\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{in} \leq 350\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.04\text{ kg/s}$ ,  $R^2=1$ ):

$$\eta_{th} = -11.131 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^4 + 9.2197 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^3 - 3.099 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^2 - 0.0424 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right) + 0.7913 \quad (5.7)$$

Για το νερό ( $50\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{in} \leq 84\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.02\text{ kg/s}$ ,  $R^2=1$ ):

$$\eta_{th} = 733.76 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^4 - 111.93 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^3 + 5.3849 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^2 - 0.5386 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right) + 0.8167 \quad (5.8)$$

Για τον αέρα ( $50\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{in} \leq 550\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.001\text{ kg/s}$ ,  $R^2=1$ ):

$$\eta_{th} = -0.081 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^4 + 0.0412 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^3 - 0.0884 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^2 - 0.4305 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right) + 0.4295 \quad (5.9)$$

Για το τηγμένο άλας ( $250\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{in} \leq 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.08\text{ kg/s}$ ,  $R^2=1$ ):

$$\eta_{th} = -5.8375 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^4 + 8.5874 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^3 - 5.4782 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right)^2 + 1.0086 \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{amb}}{G_b}\right) + 0.6653 \quad (5.10)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την σύγκριση μεταξύ των εργαζόμενων μέσων και την ανάλυση τους στην προηγούμενη ενότητα καταλήγουμε στο συμπέρασμα πώς για την επιλογή του βέλτιστου εργαζόμενου μέσου πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράμετροι, με βασικότερη το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας του συλλέκτη, το οποίο όμως δεν είναι γνωστό καθώς καθορίζεται από την εκάστοτε χρήση του συλλέκτη.

Για το εύρος των θερμοκρασιών που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία καταλήγουμε, πώς ανάλογα την θερμοκρασία εισόδου, οι καλύτερες επιλογές με βάση την θερμική απόδοση είναι:

- Για  $T_{in} \leq 84\text{ }^{\circ}\text{C}$ , βέλτιστη επιλογή το νερό.
- Για  $84\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{in} < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , βέλτιστη επιλογή το Therminol VP-1.
- Για  $300\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{in} \leq 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , βέλτιστη επιλογή το τηγμένο άλας.

Από την άλλη με βάση την εξεργειακή απόδοση οι καλύτερες επιλογές ανάλογα το εύρος των θερμοκρασιών εισόδου είναι:

- Για  $T_{in} \leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , βέλτιστη επιλογή ο αέρας.
- Για  $100\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{in} \leq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , βέλτιστη επιλογή το Therminol VP-1.
- Για  $350\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{in} \leq 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , βέλτιστη επιλογή το τηγμένο άλας.

Τελικά λαμβάνοντας υπόψη την θερμική και εξεργειακή συμπεριφορά καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ρευστού επιλέγεται ως βέλτιστο εργαζόμενο μέσο:

- Για  $T_{in} \leq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , το Therminol VP-1 καθώς συνδυάζει στο μεγαλύτερο μέρος αυτού του εύρους τον υψηλότερο εξεργειακό και θερμικό βαθμό απόδοσης. Στις χαμηλές θερμοκρασίες ( $T_{in} \leq 84\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) προτιμάται έναντι του νερού λόγω καλύτερου εξεργειακού βαθμού απόδοσης και πολύ μικρής διαφοράς στον θερμικό βαθμό απόδοσης. Επίσης στις χαμηλές θερμοκρασίες είναι καλύτερο από τον αέρα λόγω μεγάλης διαφοράς στον θερμικό και ολικό βαθμό απόδοσης. Τέλος στις υψηλές θερμοκρασίες ( $T_{in} \geq 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) προτιμάται έναντι του τηγμένου άλατος λόγω της καλύτερης εξεργειακής απόδοσης και του κινδύνου κρυσταλοποίησης του τηγμένου άλατος.
- Για  $T_{in} > 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , το τηγμένο άλας αποτελεί την ενδεδειγμένη επιλογή λόγω της μεγάλης διαφοράς στον θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης από τον αέρα. Το τηγμένο άλας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Από την άλλη θέλει προσοχή ο κίνδυνος κρυσταλοποίησης στις χαμηλές θερμοκρασίες, για τον λόγο αυτό πριν την εκκίνηση του συλλέκτη πρέπει να προθερμαίνονται οι σωληνώσεις και να διατηρούνται σε υψηλή θερμοκρασία.

Τέλος για λόγους πληρότητας παρατίθενται στους πίνακες 5.4.2 και 5.4.3 τα αποτελέσματα των βασικών παραμέτρων που αναλύθηκαν πιο πάνω, για κάθε εργαζόμενο μέσο σε διάφορες θερμοκρασίες εισόδου  $T_{in}$ .

| $T_{in}$ (°C) | Μέγεθος                  | THERMINOL VP-1 | ΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ | ΑΕΡΑΣ  | ΝΕΡΟ   |
|---------------|--------------------------|----------------|--------------|--------|--------|
| 50            | $\eta_{th}$              | 78.77%         | -            | 41.69% | 80.34% |
|               | $\eta_{ex}$              | 11.10%         | -            | 22.11% | 9.65%  |
|               | $\eta_{ovr}$             | 78.66%         | -            | 34.43% | 80.33% |
|               | $T_{out}$ (°C)           | 69.9           | -            | 698.0  | 66.1   |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | 603            | -            | 63     | 3662   |
| 84            | $\eta_{th}$              | -              | -            | -      | 78.77% |
|               | $\eta_{ex}$              | -              | -            | -      | 16.42% |
|               | $\eta_{ovr}$             | -              | -            | -      | 78.76% |
|               | $T_{out}$ (°C)           | -              | -            | -      | 99.7   |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | -              | -            | -      | 4686   |
| 100           | $\eta_{th}$              | 77.30%         | -            | 39.50% | -      |
|               | $\eta_{ex}$              | 19.95%         | -            | 22.14% | -      |
|               | $\eta_{ovr}$             | 77.19%         | -            | 31.83% | -      |
|               | $T_{out}$ (°C)           | 118.0          | -            | 709.9  | -      |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | 1270           | -            | 63     | -      |
| 150           | $\eta_{th}$              | 75.07%         | -            | 37.26% | -      |
|               | $\eta_{ex}$              | 26.21%         | -            | 21.80% | -      |
|               | $\eta_{ovr}$             | 74.96%         | -            | 28.95% | -      |
|               | $T_{out}$ (°C)           | 166.3          | -            | 721.4  | -      |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | 1741           | -            | 62     | -      |
| 200           | $\eta_{th}$              | 72.59%         | -            | 34.97% | -      |
|               | $\eta_{ex}$              | 30.63%         | -            | 21.38% | -      |
|               | $\eta_{ovr}$             | 72.48%         | -            | 26.24% | -      |
|               | $T_{out}$ (°C)           | 214.7          | -            | 732.5  | -      |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | 2068           | -            | 62     | -      |
| 250           | $\eta_{th}$              | 69.95%         | 69.60%       | 32.67% | -      |
|               | $\eta_{ex}$              | 33.69%         | 33.06%       | 20.54% | -      |
|               | $\eta_{ovr}$             | 69.83%         | 69.36%       | 23.26% | -      |
|               | $T_{out}$ (°C)           | 263.3          | 259.8        | 743.7  | -      |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | 2337           | 1211.07306   | 61     | -      |

**Πίνακας 5.4.2: Αποτελέσματα βασικών παραμέτρων για κάθε εργαζόμενο μέσο και για  $T_{in} \leq 250$  °C.**

| $T_{in}$ (°C) | Μέγεθος                  | THERMINOL VP-1 | ΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ | ΑΕΡΑΣ  | ΝΕΡΟ |
|---------------|--------------------------|----------------|--------------|--------|------|
| 300           | $\eta_{th}$              | 67.08%         | 67.15%       | 30.29% | -    |
|               | $\eta_{ex}$              | 35.65%         | 35.35%       | 19.49% | -    |
|               | $\eta_{ovr}$             | 66.95%         | 66.90%       | 20.18% | -    |
|               | $T_{out}$ (°C)           | 312.1          | 309.4        | 754.3  | -    |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | 2539           | 2579         | 60     | -    |
| 350           | $\eta_{th}$              | 63.99%         | 64.12%       | 27.87% | -    |
|               | $\eta_{ex}$              | 36.73%         | 36.54%       | 18.41% | -    |
|               | $\eta_{ovr}$             | 63.84%         | 63.88%       | 17.31% | -    |
|               | $T_{out}$ (°C)           | 360.8          | 358.9        | 764.8  | -    |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | 2674           | 3255         | 59     | -    |
| 400           | $\eta_{th}$              | -              | 60.78%       | 25.44% | -    |
|               | $\eta_{ex}$              | -              | 36.87%       | 17.06% | -    |
|               | $\eta_{ovr}$             | -              | 60.53%       | 14.15% | -    |
|               | $T_{out}$ (°C)           | -              | 408.4        | 775.5  | -    |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | -              | 4146         | 58     | -    |
| 450           | $\eta_{th}$              | -              | 57.01%       | 20.32% | -    |
|               | $\eta_{ex}$              | -              | 36.40%       | 13.98% | -    |
|               | $\eta_{ovr}$             | -              | 56.76%       | 7.80%  | -    |
|               | $T_{out}$ (°C)           | -              | 457.9        | 794.8  | -    |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | -              | 4735         | 55     | -    |
| 500           | $\eta_{th}$              | -              | 52.78%       | 17.69% | -    |
|               | $\eta_{ex}$              | -              | 35.16%       | 12.24% | -    |
|               | $\eta_{ovr}$             | -              | 52.52%       | 4.69%  | -    |
|               | $T_{out}$ (°C)           | -              | 507.2        | 804.2  | -    |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | -              | 5070         | 53     | -    |
| 550           | $\eta_{th}$              | -              | 47.99%       | 15.07% | -    |
|               | $\eta_{ex}$              | -              | 33.13%       | 10.46% | -    |
|               | $\eta_{ovr}$             | -              | 47.73%       | 1.32%  | -    |
|               | $T_{out}$ (°C)           | -              | 556.5        | 814.4  | -    |
|               | $h$ (W/m <sup>2</sup> K) | -              | 5423         | 51     | -    |

Πίνακας 5.4.3: Αποτελέσματα βασικών παραμέτρων για κάθε εργαζόμενο μέσο και για  $T_{in} \geq 350$  °C.

## 5.5 Μελέτη της επίδρασης προσθήκης νανοϋλικών στο έλαιο και στο νερό.

### 5.5.1 Θερμοδυναμικές ιδιότητες νανορευστών.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συλλέκτη επηρεάζοντας καθοριστικά τις συνθήκες μετάδοσης θερμότητας, κάτι που φάνηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Η προσθήκη νανοϋλικών (μεταλλικών ή αμέταλλων) σε βασικά ρευστά (συνήθως έλαιο και νερό) αποσκοπεί στην μεταβολή των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των βασικών ρευστών. Συγκεκριμένα με την προσθήκη

νανοϋλικών αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού οδηγώντας σε καλύτερη θερμική συμπεριφορά.

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η επίδραση της προσθήκης των νανοϋλικών χαλκού (Cu), οξείδιο του χαλκού (CuO), διοξείδιο του τιτανίου (TiO<sub>2</sub>) και οξείδιο του αλουμινίου (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) στο έλαιο Therminol VP-1 και στο νερό. Τα νανοϋλικά αυτά αποτελούν από τα πιο συνήθη στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες [5.5]. Για να υπολογίσουμε τις βασικές θερμοδυναμικές ιδιότητες των νανορευστών (μίγματα βασικών ρευστών και νανοϋλικών) καταφεύγουμε σε εξισώσεις από την βιβλιογραφία. Οι εξισώσεις που ακολουθούν υπολογίζουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του νανορευστού (nanofluid-nf) ως συνδυασμό των ιδιοτήτων του βασικού ρευστού (base fluid-bf) και των νανοϋλικών (nanoparticles-np) συναρτήσει της περιεκτικότητας φ σε νανοϋλικά του νανορευστού.

Η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση που προτάθηκε από τους Yu and Choi [5.6]:

$$k_{nf} = k_{bf} \cdot \frac{k_{np} + 2 \cdot k_{bf} + 2 \cdot (k_{np} - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3 \cdot \varphi}{k_{np} + 2 \cdot k_{bf} - (k_{np} - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3 \cdot \varphi} \quad (5.11)$$

Όπου: β= ο λόγος της πάχους της στρώσης του νανοϋλικού προς την διάμετρό του, θεωρείται ίσος με 0.1 [5.7] στην παρούσα εργασία.

Η πυκνότητα και η θερμοχωρητικότητα δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις [5.8],[5.9]:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \cdot (1 - \varphi) + \rho_{np} \cdot \varphi \quad (5.12)$$

$$c_{p,nf} = c_{p,bf} \cdot \left( \frac{\rho_{bf} \cdot (1 - \varphi)}{\rho_{nf}} \right) + c_{p,np} \cdot \left( \frac{\rho_{np} \cdot \varphi}{\rho_{nf}} \right) \quad (5.13)$$

Τέλος η δυναμική συνεκτικότητα μπορεί να υπολογιστεί ανεξαρτήτως νανοϋλικού από την παρακάτω σχέση [5.10]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \cdot (1 + 2.5 \cdot \varphi + 6.5 \cdot \varphi^2) \quad (5.14)$$

Οι ιδιότητες του βασικού ρευστού έχουν δοθεί αναλυτικά στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Οι ιδιότητες των νανοϋλικών δίνονται στον πίνακα 5.5.1, όπου παρατηρώ πώς πρόκειται για υλικά με πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα, αλλά με χαμηλή θερμοχωρητικότητα.

| Νανοϋλικά              | Cu   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CuO  | TiO <sub>2</sub> |
|------------------------|------|--------------------------------|------|------------------|
| K (W/mK)               | 400  | 40                             | 77   | 8.9              |
| c <sub>p</sub> (J/kgK) | 385  | 765                            | 532  | 686              |
| ρ (kg/m <sup>3</sup> ) | 8933 | 3970                           | 6320 | 4250             |

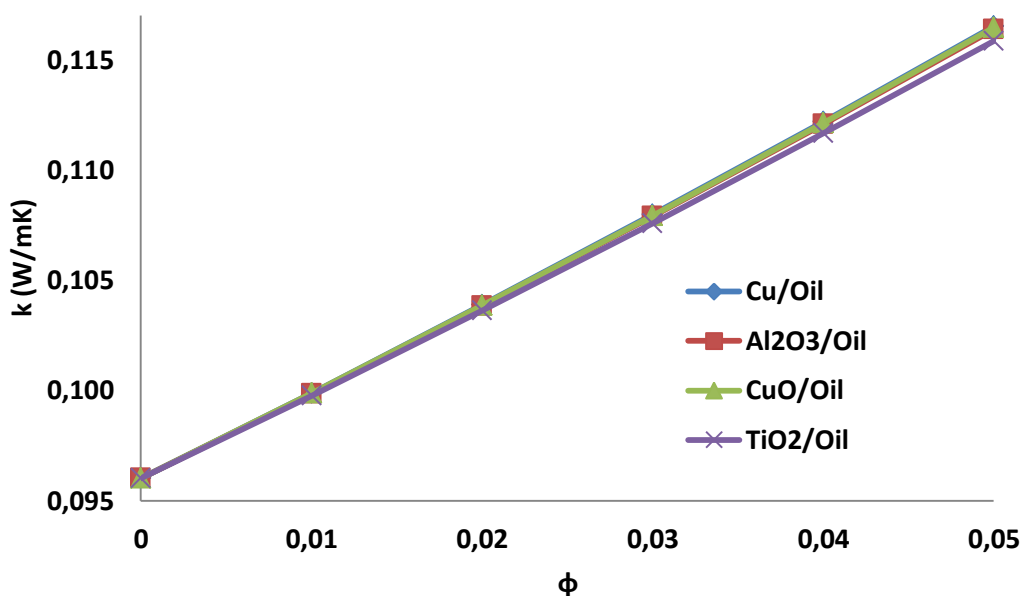
**Πίνακας 5.5.1: Θερμοδυναμικές ιδιότητες νανοϋλικών [5.5].**

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 5.11 έως 5.14 , τις ιδιότητες του πίνακα 5.5.1 και τις ιδιότητες του ελαίου Therminol VP-1 προκύπτουν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες για τα νανορευστά με



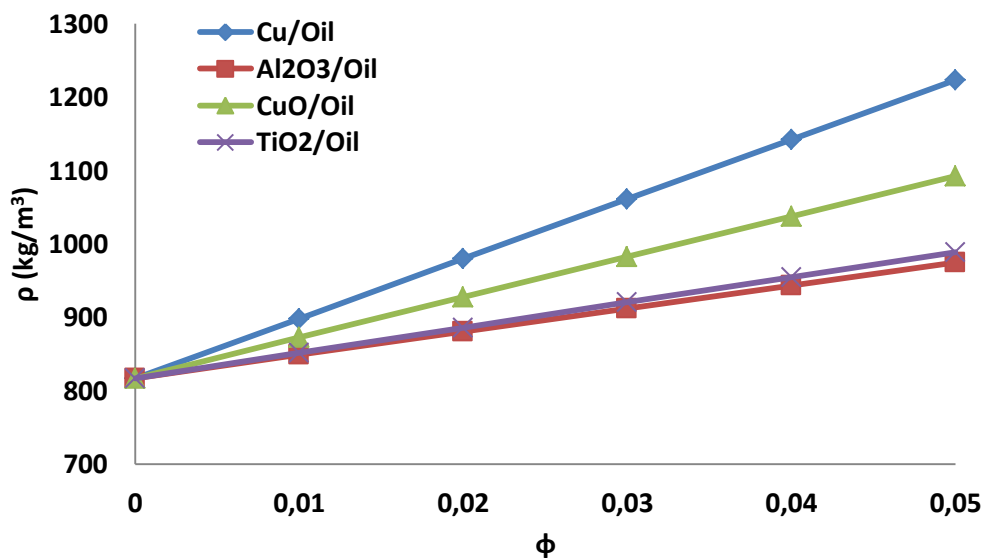
βάση το έλαιο (Cu/Oil, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Oil, CuO/Oil, και TiO<sub>2</sub>/Oil). Για φ=0 έχω τις ιδιότητες για το βασικό ρευστό. Παρακάτω παρουσιάζονται για λόγους σύγκρισης οι ιδιότητες για T=300 °C με παράμετρο την περιεκτικότητα φ.

Παρατηρούμε στο σχήμα 5.5.1 ότι η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με την προσθήκη νανοϋλικών όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα φ. Την μεγαλύτερη αύξηση επιφέρουν κατά σειρά το Cu, CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και TiO<sub>2</sub>, με μικρές όμως διαφορές μεταξύ τους. Από την άλλη η επίδραση του φ είναι αρκετά μεγαλύτερη.



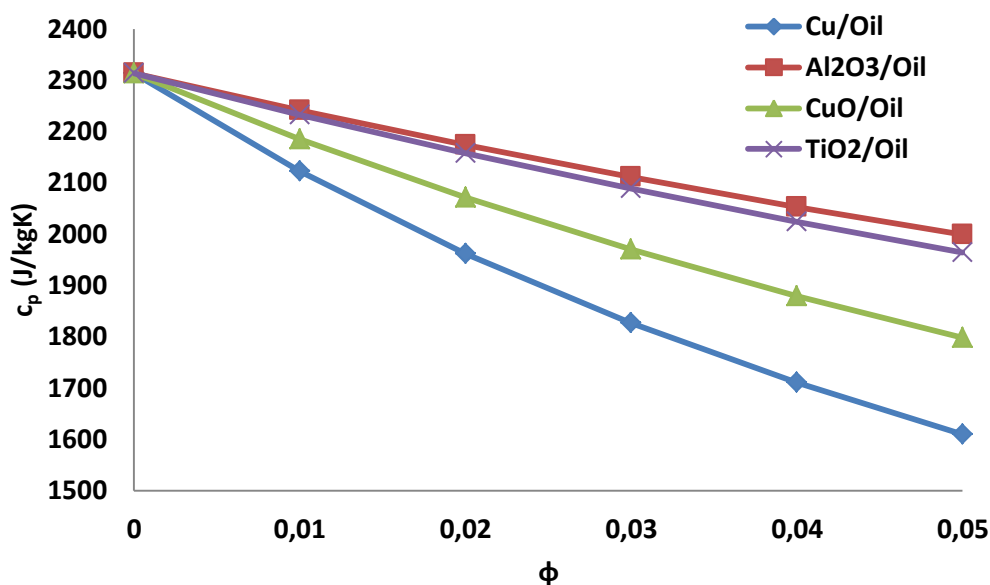
Σχήμα 5.5.1: Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας ελαίου με προσθήκη νανοϋλικών (T=300 °C).

Ίδια διακύμανση παρουσιάζει και η πυκνότητα των νανορευστών, σχήμα 5.5.2, καθώς αυξάνεται με την προσθήκη νανοϋλικών και με αύξηση της περιεκτικότητας φ. Την μεγαλύτερη επίδραση έχουν κατά σειρά το Cu, CuO, TiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



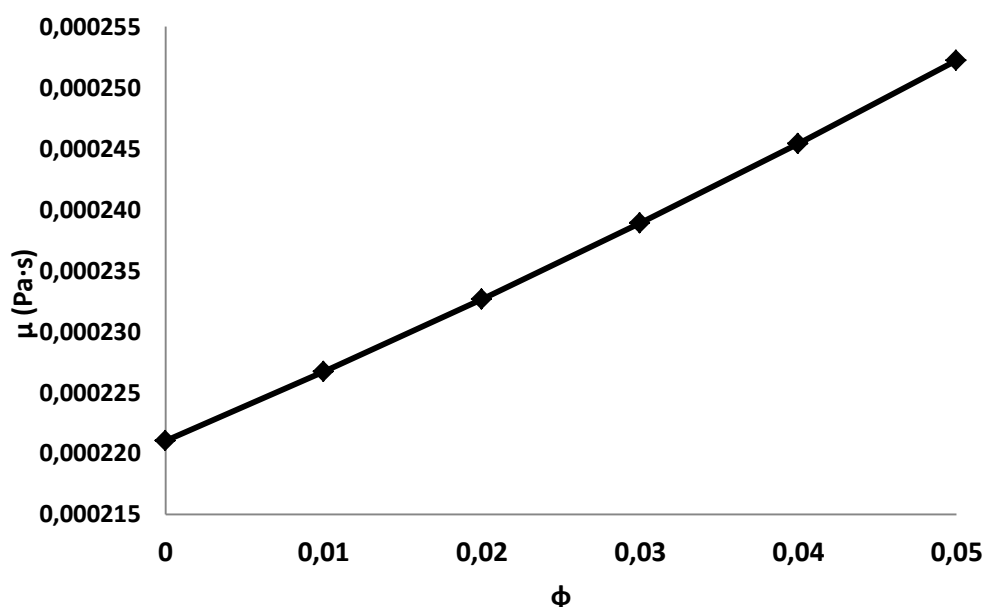
Σχήμα 5.5.2: Μεταβολή πυκνότητας ελαίου με προσθήκη νανοϋλικών (T=300 °C).

Αντιθέτως όπως ήταν αναμενόμενο η ειδική θερμοχωρητικότητα μειώνεται με την προσθήκη νανοϋλικών και όσο το  $\phi$  μεγαλώνει. Την μεγαλύτερη μείωση επιφέρουν κατά σειρά το Cu, CuO, TiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



Σχήμα 5.5.3: Μεταβολή ειδικής θερμοχωρητικότητας ελαίου με προσθήκη νανοϋλικών (T=300 °C).

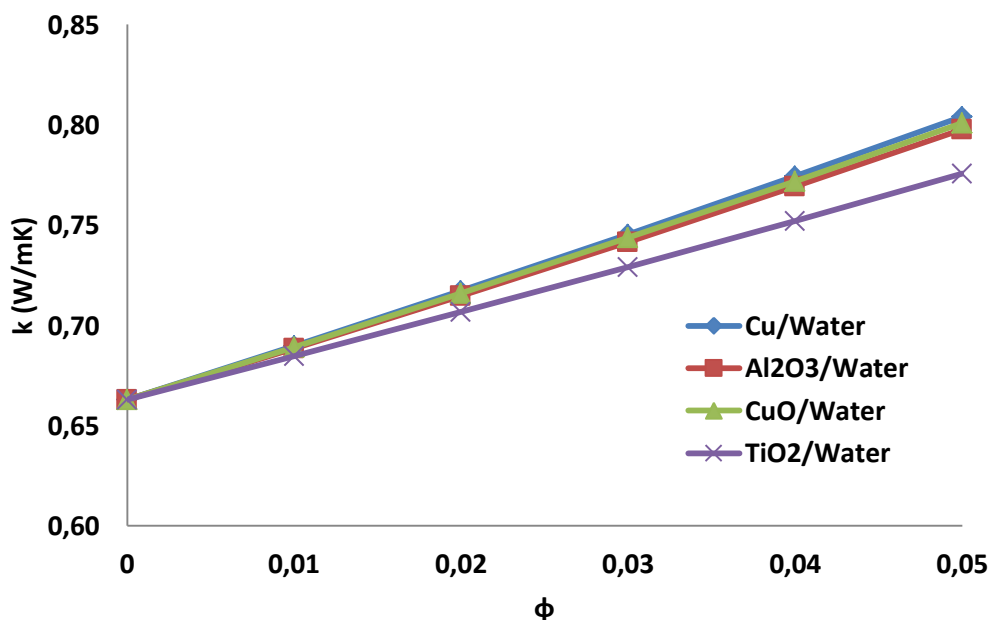
Τέλος όπως δείχνει και το σχήμα 5.5.4 η δυναμική συνεκτικότητα είναι ίδια ανεξαρτήτως νανοϋλικού. Όμως φαίνεται ότι με την αύξηση του  $\phi$  αυξάνεται σημαντικά.



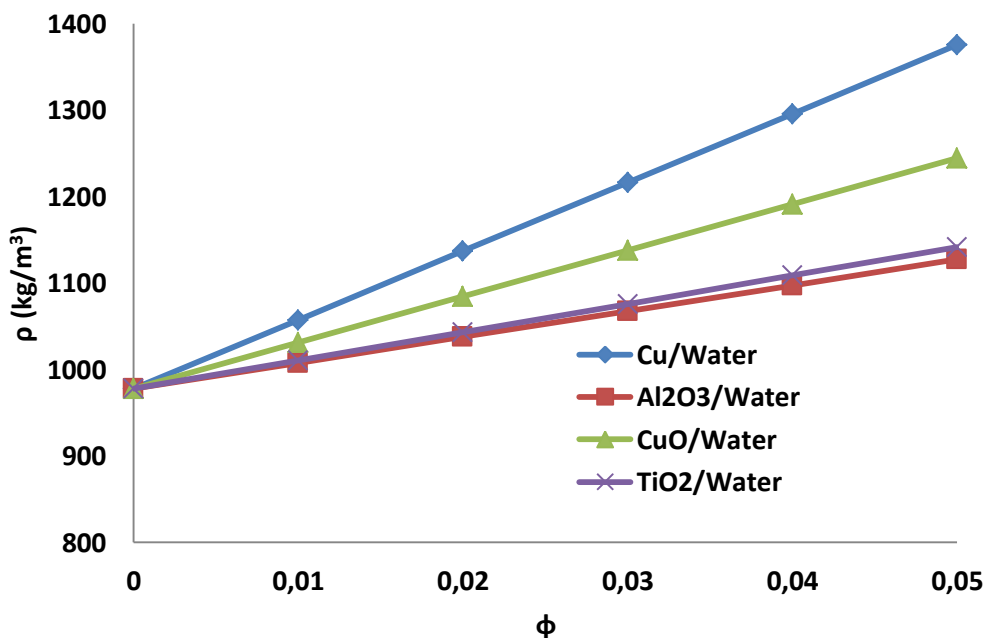
Σχήμα 5.5.4: Μεταβολή δυναμικής συνεκτικότητας ελαίου με προσθήκη νανοϋλικών (T=300 °C).

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία προκύπτουν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες για τα νανορευστά με βάση το νερό (Cu/Water, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Water, CuO/ Water, και TiO<sub>2</sub>/ Water),

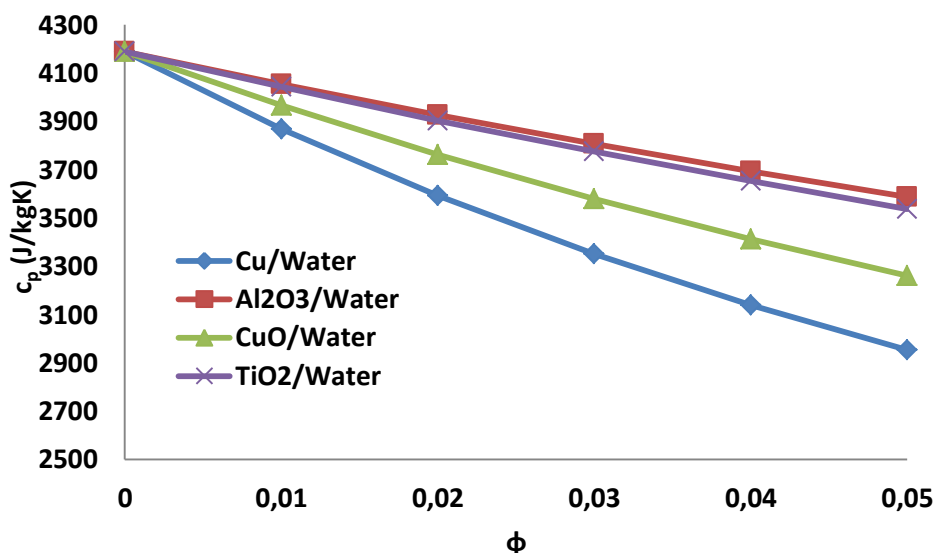
σχήματα 5.5.5 έως 5.5.8. Παρατηρούμε πώς η επίδραση της προσθήκης νανοϋλικών στις ιδιότητες είναι ίδια με αυτή του ελαίου που αναλύθηκε πριν, δηλαδή τα νανοϋλικά αυξάνουν την αγωγιμότητα, την πυκνότητα και την δυναμική συνεκτικότητα και μειώνουν την θερμοχωρητικότητα. Τα σχήματα που ακολουθούν είναι για  $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$  με παράμετρο την περιεκτικότητα  $\phi$ .



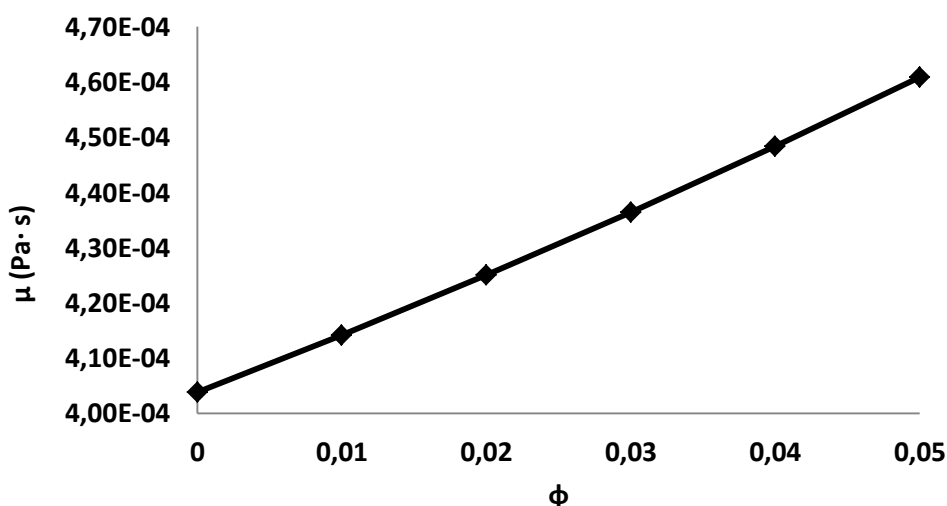
Σχήμα 5.5.5: Μεταβολή θερμική αγωγιμότητας νερού με προσθήκη νανοϋλικών ( $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



Σχήμα 5.5.6: Μεταβολή πυκνότητας νερού με προσθήκη νανοϋλικών ( $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



Σχήμα 5.5.6: Μεταβολή ειδικής θερμοχωρητικότητας νερού με προσθήκη νανοϋλικών (T=70 °C).



Σχήμα 5.5.7: Μεταβολή δυναμικής συνεκτικότητας νερού με προσθήκη νανοϋλικών (T=70 °C).

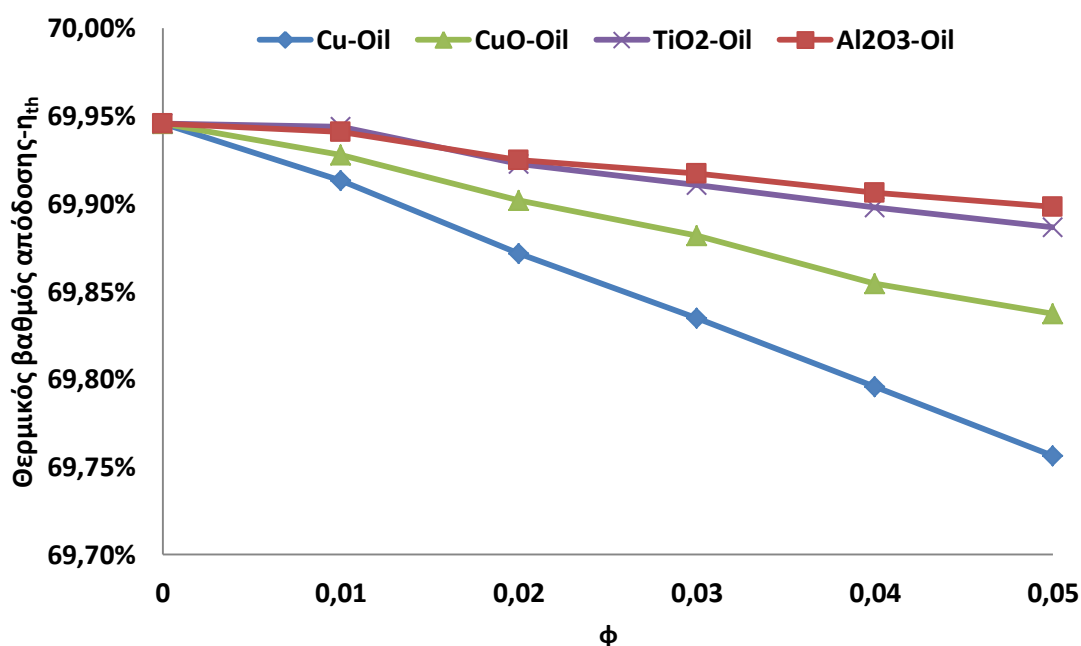
### 5.5.2 Μελέτη της επίδρασης προσθήκης νανοϋλικών στην θερμική απόδοση.

Για να εξετάσουμε την απόδοση των νανορευστών τρέχουμε το μοντέλο στο Flow Simulation για το βέλτιστο κωνικό σχήμα. Για την περίπτωση που το βασικό ρευστό είναι το έλαιο η σύγκριση γίνεται για θερμοκρασία εισόδου  $T_{in}=250$  °C, βέλτιστη παροχή μάζας  $m=0.04$  kg/s (όπως αυτή υπολογίστηκε στο υποκεφάλαιο 5.3) και πέντε διαφορετικές περιεκτικότητες ( $\phi=0.01$  , 0.02, 0.03, 0.04, 0.05). Εδώ πρέπει να τονιστεί πώς κάθε συνδυασμός νανοϋλικού και  $\phi$  αποτελεί στην ουσία διαφορετικό ρευστό που εισάγεται στο Engineering Database του Solidworks ως ξεχωριστό ρευστό. Δηλαδή για την περίπτωση των νανορευστών με βάση το έλαιο έχουμε (4 νανοϋλικά)Χ(5 περιεκτικότητες)=20 ρευστά σύνολο. Αντίστοιχα τρεξίματα έγιναν και για την περίπτωση που το βασικό ρευστό είναι το

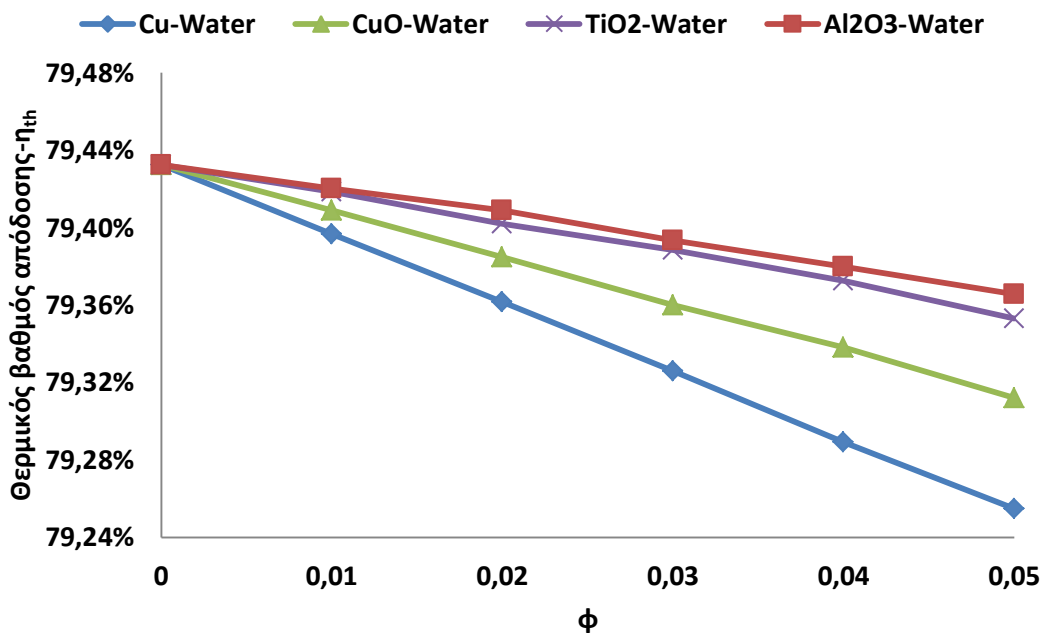
νερό με την διαφορά ότι η θερμοκρασία εισόδου είναι  $T_{in}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$  και η παροχή μάζας  $m=0.02\text{ kg/s}$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ταυτόχρονα για τα δύο ρευστά διότι οι διακυμάνσεις είναι παρόμοιες. Επιπλέον όλα τα σχήματα ξεκινούν από την τιμή  $\phi=0$ , που αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου δεν έχω προσθήκη νανοϋλικού.

Στα σχήματα 5.5.8 και 5.5.9 δίνονται οι μεταβολές του θερμικού βαθμού απόδοσης για διάφορα  $\phi$ , για το λάδι και το νερό αντίστοιχα. Οι βασικότερες παρατηρήσεις είναι:

- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μειώνεται και στις δύο περιπτώσεις με αύξηση της περιεκτικότητας των νανοϋλικών. Η μείωση αυτή οφείλεται στην θεώρηση για σταθερή παροχή μάζας. Η αύξηση του  $\phi$  οδηγεί σε αύξηση της δυναμικής συνεκτικότητας (σχήματα 5.5.4, 5.5.7) που με την σειρά του οδηγεί σε μείωση του αριθμού Reynolds. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή να γίνει λιγότερο τυρβώδης και οι συνθήκες μετάδοσης θερμότητας στο ρευστό δυσμενέστερες. Επίσης τα νανορευστά έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα και άρα για σταθερή παροχή παρουσιάζουν μικρότερες ταχύτητες του ρευστού, που δυσχεραίνει την μετάδοση θερμότητας.
- Η μείωση είναι μικρότερη για προσθήκη  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , με μικρή διαφορά από το  $\text{TiO}_2$ . Για προσθήκη  $\text{CuO}$  και  $\text{Cu}$  παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση του  $\eta_{th}$ .
- Η μέγιστη μείωση ( $\phi=0.05$ ,  $\text{Cu}$ ) στην περίπτωση του λαδιού είναι 0.27% ενώ σε αυτή του νερού 0.23%, οι οποίες είναι χαμηλές τιμές. Στο λάδι η μείωση είναι μεγαλύτερη διότι βρισκόμαστε σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

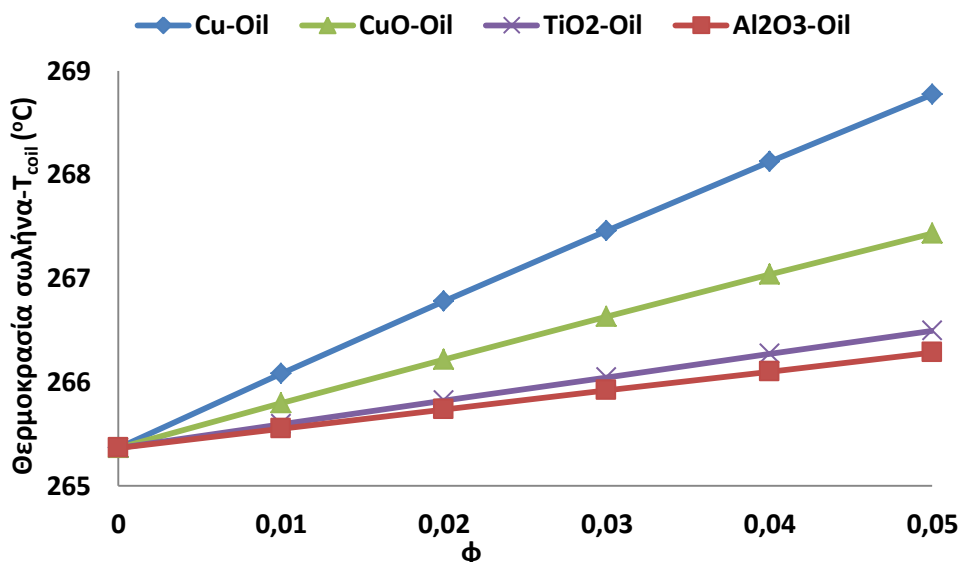


Σχήμα 5.5.8: Μεταβολή θερμικού βαθμού απόδοσης με την προσθήκη νανοϋλικών στο έλαιο για  $T_{in}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

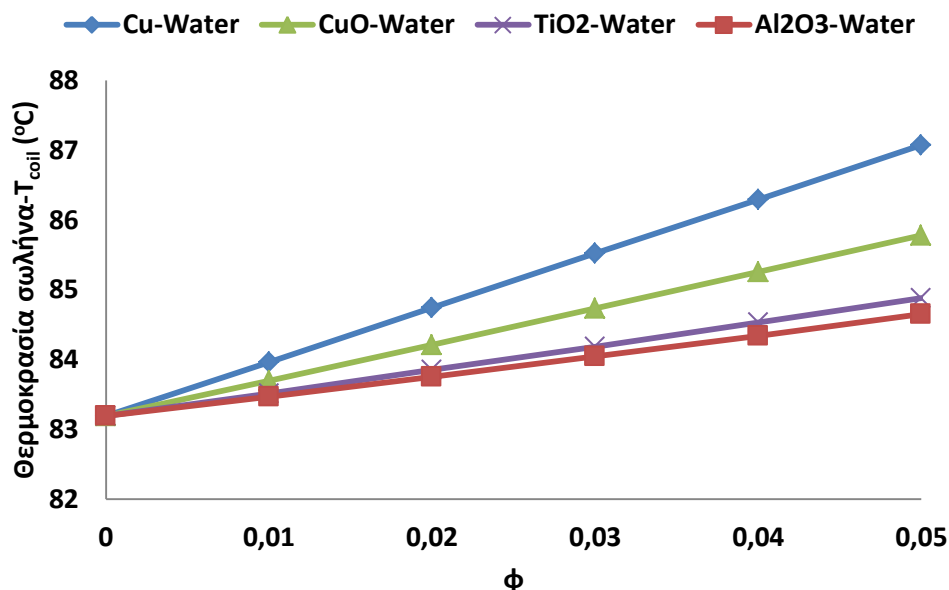


Σχήμα 5.5.9: Μεταβολή θερμικού βαθμού απόδοσης με την προσθήκη νανοϋλικών στο νερό για  $T_{in}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Στα σχήματα 5.5.10 και 5.5.11 παρατηρούμε πώς η θερμοκρασία στα τοιχώματα του σωλήνα ( $T_{coil}$ ), αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας των νανοϋλικών τόσο για ρευστό βάσης το λάδι όσο και για το νερό. Η αύξηση αυτή συνδέεται με την μείωση του  $\eta_{th}$  που είδαμε πριν καθώς μεγαλύτερη  $T_{coil}$  σημαίνει μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, και άρα μικρότεροι θερμικοί βαθμοί απόδοσης. Επιπλέον η αύξηση της  $T_{coil}$  είναι πιο έντονη κατά σειρά στο Cu, CuO, TiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, κατά αντίστροφη σειρά με τον  $\eta_{th}$ .

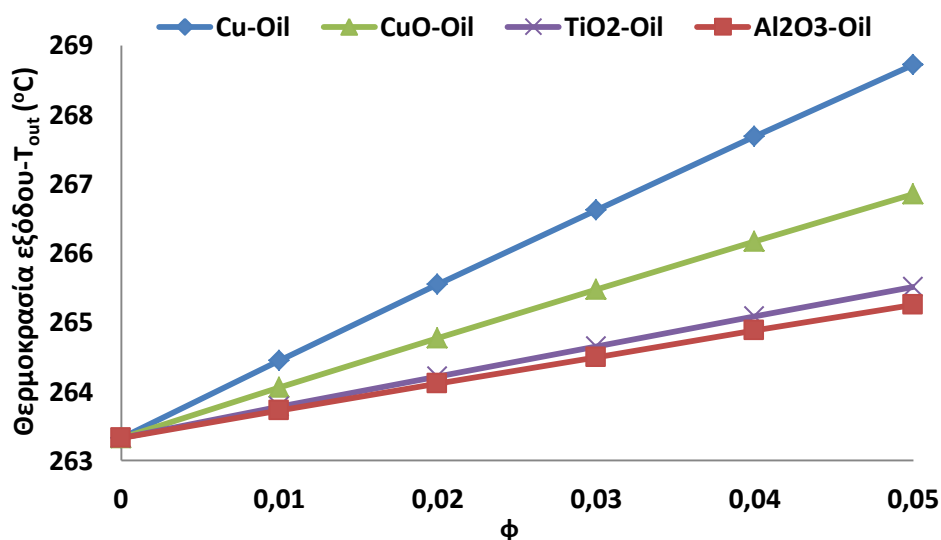


Σχήμα 5.5.10: Μεταβολή της θερμοκρασίας στα τοιχώματα του σωλήνα με την προσθήκη νανοϋλικών στο έλαιο για  $T_{in}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



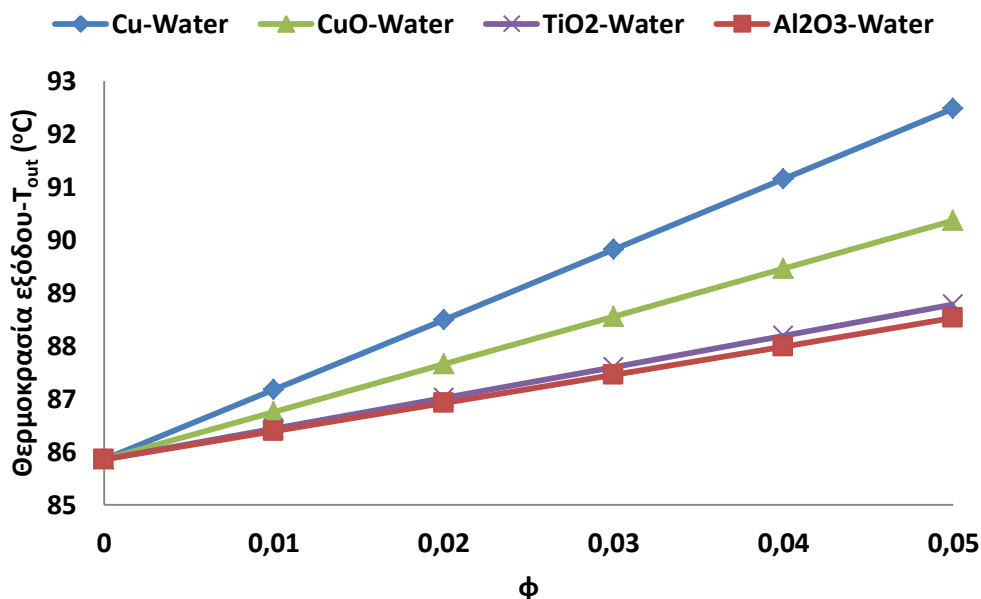
Σχήμα 5.5.11: Μεταβολή της θερμοκρασίας στα τοιχώματα του σωλήνα με την προσθήκη νανοϋλικών στο νερό για  $T_{in}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Επόμενο μέγεθος που εξετάζεται είναι η θερμοκρασία εξόδου ( $T_{out}$ ), η οποία δίνεται στα σχήματα 5.5.12 για το λάδι ως βάση και 5.5.13 για το νερό ως βάση. Και στα δύο σχήματα παρουσιάζει ενδιαφέρον η αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου με την προσθήκη νανοϋλικών όσο το  $\phi$  μεγαλώνει. Η αύξηση είναι μεγαλύτερη και στις δύο περιπτώσεις για προσθήκη Cu, ακολουθούμενο από το CuO,  $\text{TiO}_2$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$  κατά σειρά. Η αύξηση της  $T_{out}$  οφείλεται στην μείωση της θερμοχωρητικότητας ( $c_p$ ) με την προσθήκη νανοϋλικών (σχήματα 5.5.3 και 5.5.6). Μάλιστα η προσθήκη Cu οδηγεί στην μεγαλύτερη αύξηση της  $T_{out}$ , διότι παρουσιάζει την μεγαλύτερη μείωση του  $c_p$ , και η ίδια αντιστοιχία ισχύει και για τα άλλα νανοϋλικά. Τέλος οι υψηλές θερμοκρασίες εξόδου συνδέονται με τις υψηλές θερμοκρασίες στα τοιχώματα του σωλήνα.



Σχήμα 5.5.12: Μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού με την προσθήκη νανοϋλικών στο έλαιο για  $T_{in}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



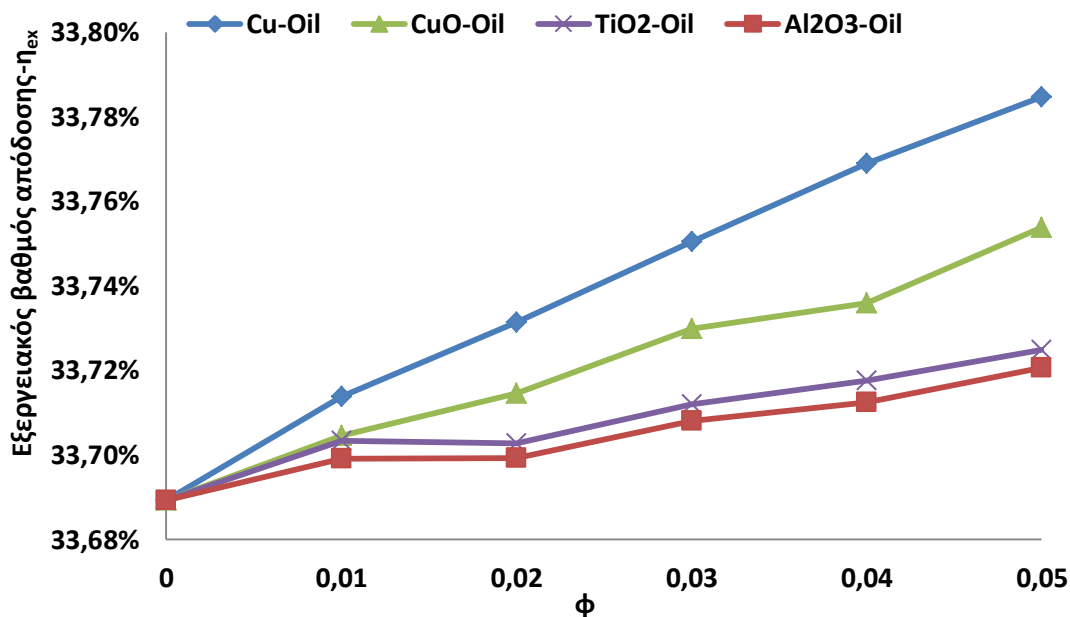


Σχήμα 5.5.13: Μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού με την προσθήκη νανοϋλικών στο νερό για  $T_{in}=70$  °C.

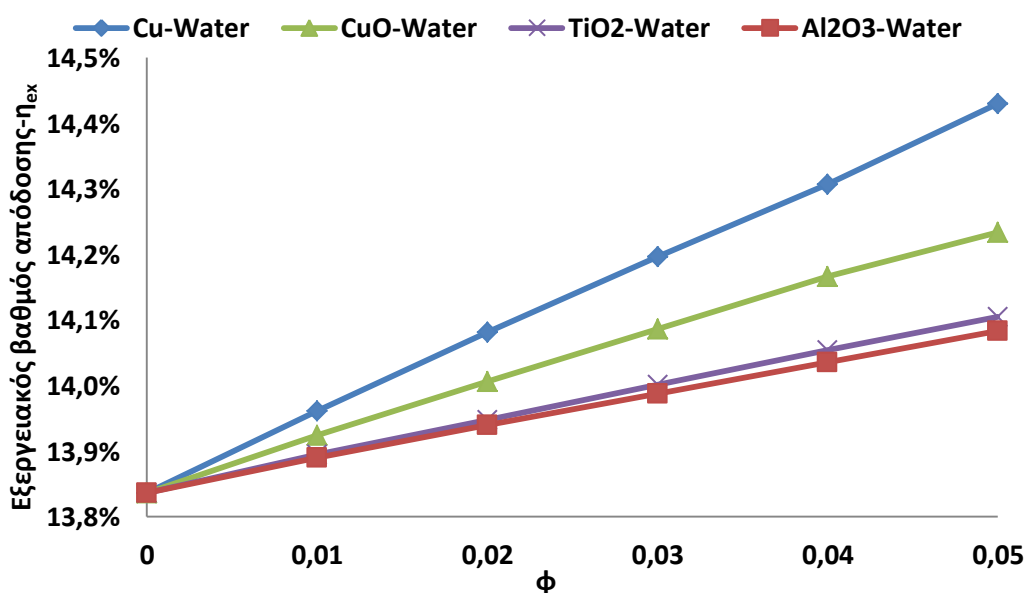
### 5.5.3 Μελέτη της επίδρασης προσθήκης νανοϋλικών στην εξεργειακή απόδοση.

Τα σχήματα 5.5.14 και 5.5.15 δίνουν την μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης για νανορευστά με βάση το λάδι και το νερό. Και για τις δύο περιπτώσεις οι βασικότερες παρατηρήσεις είναι:

- Ο εξεργειακός βαθμός αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας  $\phi$ , ανεξαρτήτως του νανοϋλικού, τόσο στο λάδι όσο και στο νερό. Για να κατανοήσουμε αυτή την μεταβολή καταφεύγουμε στην σχέση 5.6: η αύξηση του  $\phi$  οδηγεί σε μείωση του παράγοντα μείωσης της εξέργειας ( $E_{destroyed}$ ) λόγω μείωσης της θερμοχωρητικότητας και των απωλειών πίεσης και λόγω αύξησης της πυκνότητας και της μέσης θερμοκρασίας του ρευστού. Ο εξεργειακός βαθμός τελικά αυξάνεται διότι ο ρυθμός μείωσης του  $E_{destroyed}$  είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό μείωσης της ωφέλιμης ισχύος.
- Η καλύτερη εξεργειακή συμπεριφορά εμφανίζεται με χρήση Cu σε περιεκτικότητα  $\phi=0.05$ . Ο  $\eta_{ex}$  στην περίπτωση προσθήκης Cu για  $\phi=0.05$  είναι κατά 0.27% αυξημένος στην περίπτωση του λαδιού και κατά 4.09% στην περίπτωση του νερού.
- Μετά το Cu την μεγαλύτερη αύξηση παρουσιάζει το CuO και ακολουθούν το TiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> κατά σειρά. Παρατηρώ ότι η σειρά αύξησης του  $\eta_{ex}$  είναι ίδια με αυτή της αύξησης της θερμοκρασίας εξόδου.

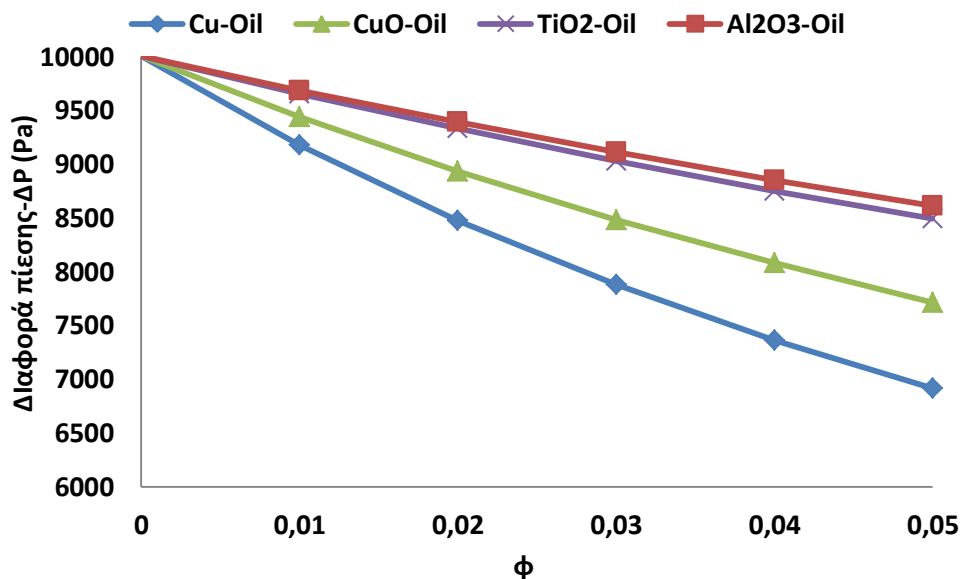


Σχήμα 5.5.14: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης με την προσθήκη νανοϋλικών στο λάδι για  $T_{in}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

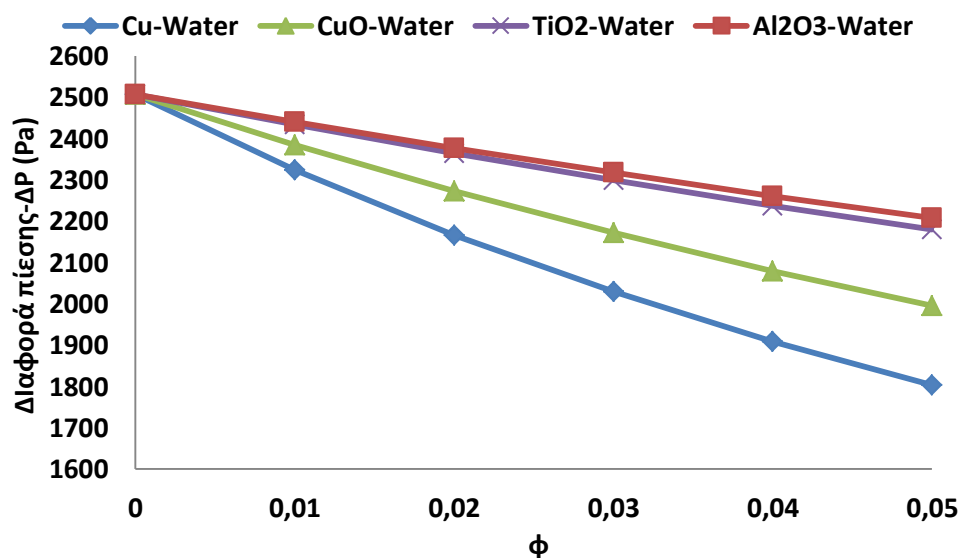


Σχήμα 5.5.15: Μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης με την προσθήκη νανοϋλικών στο νερό για  $T_{in}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μεταβολή της πτώσης πίεσης (σχήματα 5.5.16 και 5.5.17). Και στις δύο περιπτώσεις η πτώση πίεσης μικραίνει με αύξηση του  $\phi$ , με την μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται με προσθήκη Cu ακολουθούμενο από το CuO, το TiO<sub>2</sub> και το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> κατά σειρά. Τα παραπάνω συνδέονται άμεσα με την αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Η μείωση των απωλειών πίεσης σε συνδυασμό με την αύξηση της πυκνότητας οδηγούν σε χαμηλότερες καταναλώσεις της αντλίας με την προσθήκη νανοϋλικών. Βέβαια πρέπει να τονιστεί πώς οι καταναλώσεις της αντλίας είναι πολύ χαμηλές τόσο στο λάδι όσο και στο νερό.



Σχήμα 5.5.16: Μεταβολή της πτώσης πίεσης με την προσθήκη νανοϋλικών στο λάδι για  $T_{in}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 5.5.17: Μεταβολή της πτώσης πίεσης με την προσθήκη νανοϋλικών στο νερό για  $T_{in}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη νανοϋλικών τόσο στο λάδι όσο και στο νερό μειώνει τον θερμικό βαθμό απόδοσης αλλά αυξάνει τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, για ίδια παροχή μάζας. Η μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης οφείλεται στην παραδοχή για ίδια παροχή μάζας που συνεπάγεται χαμηλότερους αριθμούς Reynolds. Από τα νανορευστά, ο μεγαλύτερος  $\eta_{th}$  παρουσιάζεται για μίξη με το νανοϋλικό  $Al_2O_3$ . Από την άλλη, η αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης με την προσθήκη νανοϋλικών συνδέεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού, λόγω μικρότερης θερμοχωρητικότητας. Η αύξηση της  $T_{out}$ , από την μια είναι επιθυμητή στα περισσότερα συγκεντρωτικά συστήματα παραγωγής ενέργειας, από την άλλη οδηγεί σε υψηλότερες  $T_{coil}$

και άρα μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας. Η μεγαλύτερη βελτίωση του  $\eta_{ex}$  παρατηρήθηκε και στα δύο ρευστά για χρήση του νανοϋλικού Cu σε περιεκτικότητα  $\phi=0.05$ . Τέλος είδαμε πώς με την προσθήκη νανοϋλικών μειώνονται οι απώλειες πίεσης συμβάλλοντας στην αύξηση του  $\eta_{ex}$ .

Η προσθήκη των νανοϋλικών στο λάδι ή στο νερό, βελτιώνει την εξεργειακή απόδοση του συλλέκτη και αυξάνει την θερμοκρασία εξόδου του ρευστού. Βέβαια για την τελική απόφαση χρήσης ή όχι των νανοϋλικών θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η οικονομική επιβάρυνση, η απαιτούμενη προετοιμασία των νανορευστών και ο θερμοδυναμικός κύκλος λειτουργίας του συλλέκτη.

Τέλος για λόγους πληρότητας δίνονται στους πίνακες 5.5.2 και 5.5.3 τα βασικά μεγέθη που παρουσιάστηκαν.

|                 | $\phi$                         | 0      | 0.01   | 0.02   | 0.03   | 0.04   | 0.05   |
|-----------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\eta_{th}$     | Cu                             | 69.95% | 69.91% | 69.87% | 69.83% | 69.80% | 69.76% |
|                 | CuO                            |        | 69.93% | 69.90% | 69.88% | 69.85% | 69.84% |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 69.94% | 69.92% | 69.91% | 69.90% | 69.89% |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 69.94% | 69.92% | 69.92% | 69.91% | 69.90% |
| $\eta_{ex}$     | Cu                             | 33.69% | 33.71% | 33.73% | 33.75% | 33.77% | 33.78% |
|                 | CuO                            |        | 33.70% | 33.71% | 33.73% | 33.74% | 33.75% |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 33.70% | 33.70% | 33.71% | 33.72% | 33.72% |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 33.70% | 33.70% | 33.71% | 33.71% | 33.72% |
| $T_{out}$ (°C)  | Cu                             | 263.3  | 264.4  | 265.5  | 266.6  | 267.7  | 268.7  |
|                 | CuO                            |        | 264.1  | 264.8  | 265.5  | 266.2  | 266.8  |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 263.8  | 264.2  | 264.6  | 265.1  | 265.5  |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 263.7  | 264.1  | 264.5  | 264.9  | 265.3  |
| $T_{coil}$ (°C) | Cu                             | 265.4  | 266.1  | 266.8  | 267.5  | 268.1  | 268.8  |
|                 | CuO                            |        | 265.8  | 266.2  | 266.6  | 267.0  | 267.4  |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 265.6  | 265.8  | 266.0  | 266.3  | 266.5  |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 265.6  | 265.7  | 265.9  | 266.1  | 266.3  |
| $\Delta P$ (Pa) | Cu                             | 10008  | 9178   | 8478   | 7881   | 7366   | 6917   |
|                 | CuO                            |        | 9439   | 8936   | 8485   | 8081   | 7717   |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 9658   | 9335   | 9034   | 8754   | 8495   |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 9688   | 9392   | 9113   | 8854   | 8613   |

**Πίνακας 5.5.2: Αποτελέσματα βασικών μεγεθών της μελέτης προσθήκης νανοϋλικών στο λάδι.**

|                 | $\phi$                         | 0      | 0.01   | 0.02   | 0.03   | 0.04   | 0.05   |
|-----------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\eta_{th}$     | Cu                             | 79.43% | 79.40% | 79.36% | 79.33% | 79.29% | 79.25% |
|                 | CuO                            |        | 79.41% | 79.38% | 79.36% | 79.34% | 79.31% |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 79.42% | 79.40% | 79.39% | 79.37% | 79.35% |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 79.42% | 79.41% | 79.39% | 79.38% | 79.37% |
| $\eta_{ex}$     | Cu                             | 13.84% | 13.96% | 14.08% | 14.20% | 14.31% | 14.43% |
|                 | CuO                            |        | 13.92% | 14.01% | 14.09% | 14.17% | 14.23% |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 13.89% | 13.95% | 14.00% | 14.05% | 14.11% |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 13.89% | 13.94% | 13.99% | 14.04% | 14.08% |
| $T_{out}$ (°C)  | Cu                             | 85.9   | 87.2   | 88.5   | 89.8   | 91.1   | 92.5   |
|                 | CuO                            |        | 86.8   | 87.7   | 88.6   | 89.5   | 90.4   |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 86.4   | 87.0   | 87.6   | 88.2   | 88.8   |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 86.4   | 86.9   | 87.5   | 88.0   | 88.5   |
| $T_{coil}$ (°C) | Cu                             | 83.2   | 84.0   | 84.7   | 85.5   | 86.3   | 87.1   |
|                 | CuO                            |        | 83.7   | 84.2   | 84.7   | 85.3   | 85.8   |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 83.5   | 83.8   | 84.2   | 84.5   | 84.9   |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 83.5   | 83.8   | 84.0   | 84.3   | 84.6   |
| $\Delta P$ (Pa) | Cu                             | 2507   | 2324   | 2167   | 2029   | 1909   | 1803   |
|                 | CuO                            |        | 2384   | 2272   | 2172   | 2080   | 1996   |
|                 | TiO <sub>2</sub>               |        | 2434   | 2364   | 2299   | 2238   | 2180   |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |        | 2440   | 2377   | 2317   | 2261   | 2208   |

**Πίνακας 5.2.3: Αποτελέσματα βασικών μεγεθών της μελέτης προσθήκης νανοϋλικών στο νερό.**

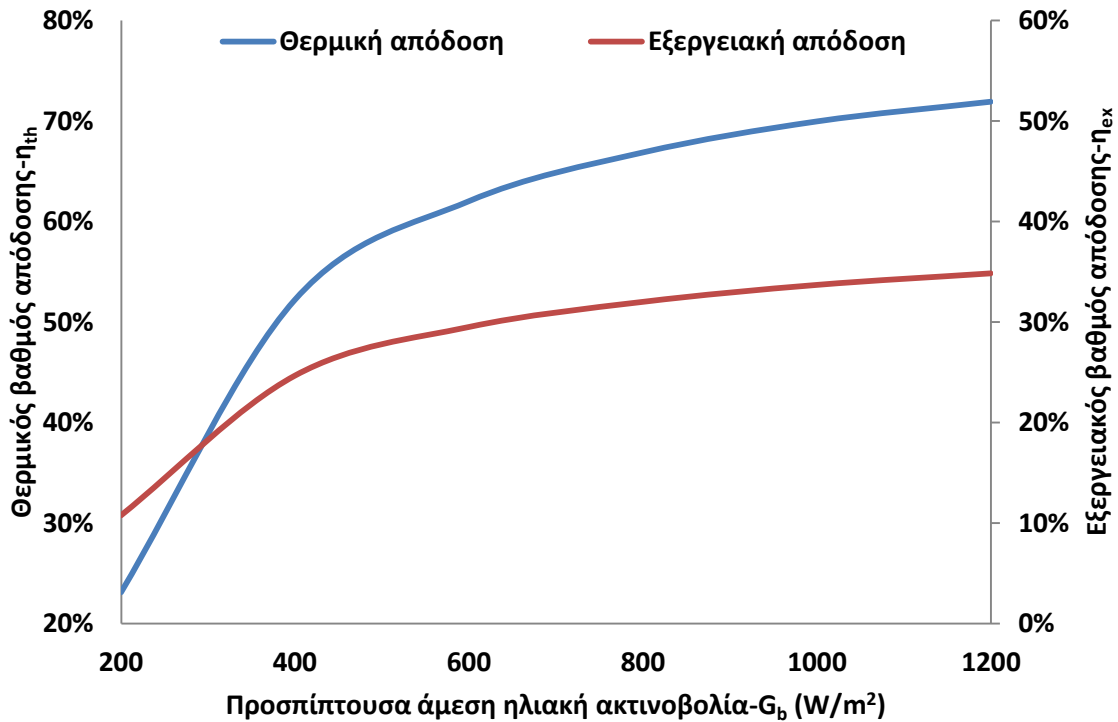
### 5.6 Μελέτη της επίδρασης παραμέτρων περιβάλλοντος και υλικών.

Στόχος του υποκεφαλαίου αυτού είναι η μελέτη της επίδρασης βασικών παραμέτρων που αφορούν είτε τις περιβαλλοντικές συνθήκες είτε τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής του δέκτη. Για να γίνει αυτό τρέχουμε τον βέλτιστο κωνικό δέκτη με εργαζόμενο μέσο το Therminol VP-1. Επιπλέον η παροχή μάζας είναι σταθερή και ίση με την βέλτιστη τιμή της ( $m=0.04$  kg/s) ενώ η θερμοκρασία εισόδου διατηρείται σταθερή σε μια μέση τιμή ( $T_{in}=250$  °C).

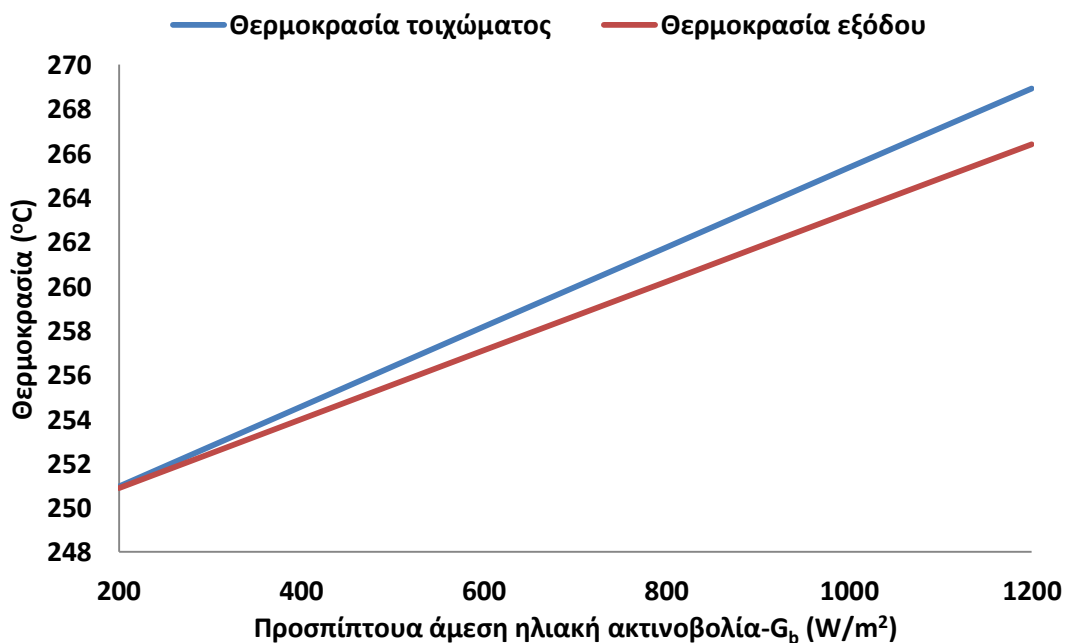
Η πρώτη παράμετρος που εξετάζεται είναι η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον συγκεντρωτή ( $G_b$ ). Μέχρι τώρα θεωρήσαμε την τιμή της ίση με  $1000$  W/m<sup>2</sup>, όμως όπως είδαμε στο υποκεφάλαιο 2.6 η τιμή της παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Για τον λόγο αυτό συγκρίνουμε την θερμική και εξεργειακή απόδοση του συλλέκτη με την  $G_b$  να κυμαίνεται από  $200$  W/m<sup>2</sup> έως  $1200$  W/m<sup>2</sup>.

Στο σχήμα 5.6.1 φαίνεται πώς η αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί σε αύξηση τόσο του θερμικού όσο και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Η αύξηση της εισερχόμενης ενέργειας στον δέκτη έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμοκρασία εξόδου (σχήμα 5.6.2), άρα και η ωφέλιμη ισχύς, οδηγώντας τελικά και σε αύξηση του  $\eta_{th}$ . Παρατηρούμε πώς στα χαμηλά  $G_b$  ο ρυθμός αύξηση είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι σε

υψηλότερες τιμές, αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το σχήμα 5.6.2, όπου παρατηρώ πώς ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας στα τοιχώματα του σωλήνα είναι μεγαλύτερος από αυτό της θερμοκρασίας εξόδου. Αυτό σημαίνει πώς όσο αυξάνεται το  $G_b$ , οι θερμικές απώλειες αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό από την ωφέλιμη ισχύ, περιορίζοντας την αύξηση του  $\eta_{th}$ . Ο εξεργειακός ακολουθεί την ίδια διακύμανση επηρεασμένος από την αύξηση της ωφέλιμης ισχύος.

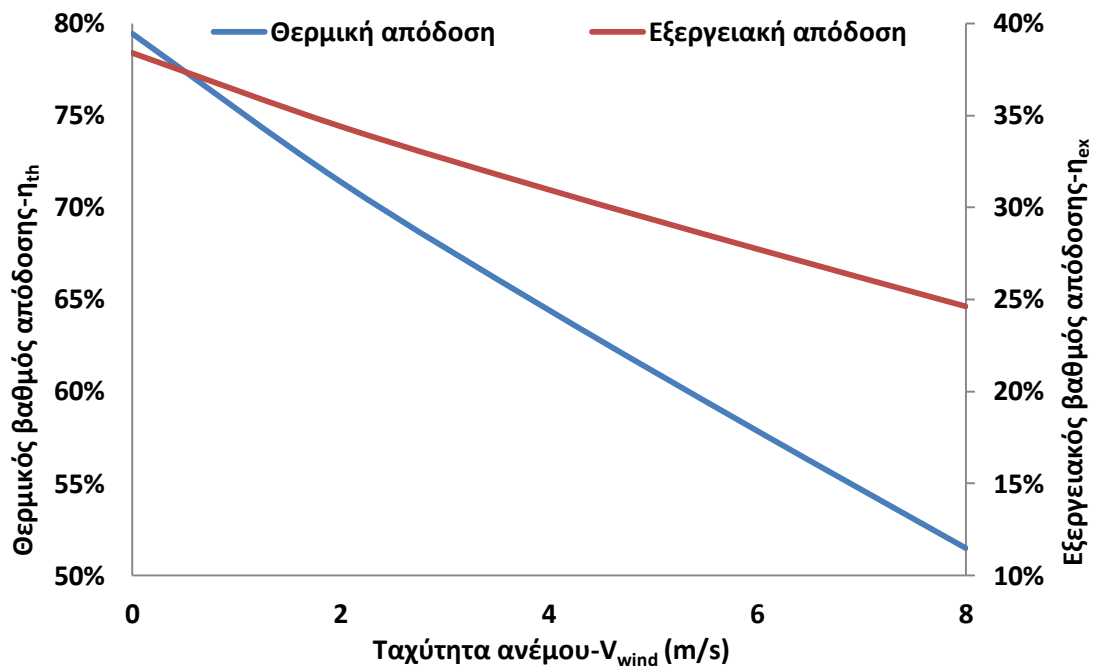


Σχήμα 5.6.1: Θερμική και εξεργειακή απόδοση για διάφορα  $G_b$  ( $T_{in}=250\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.04\text{ kg/s}$ ).



Σχήμα 5.6.2: Θερμοκρασία σωλήνα και εξόδου για διάφορα  $G_b$  ( $T_{in}=250\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m=0.04\text{ kg/s}$ ).

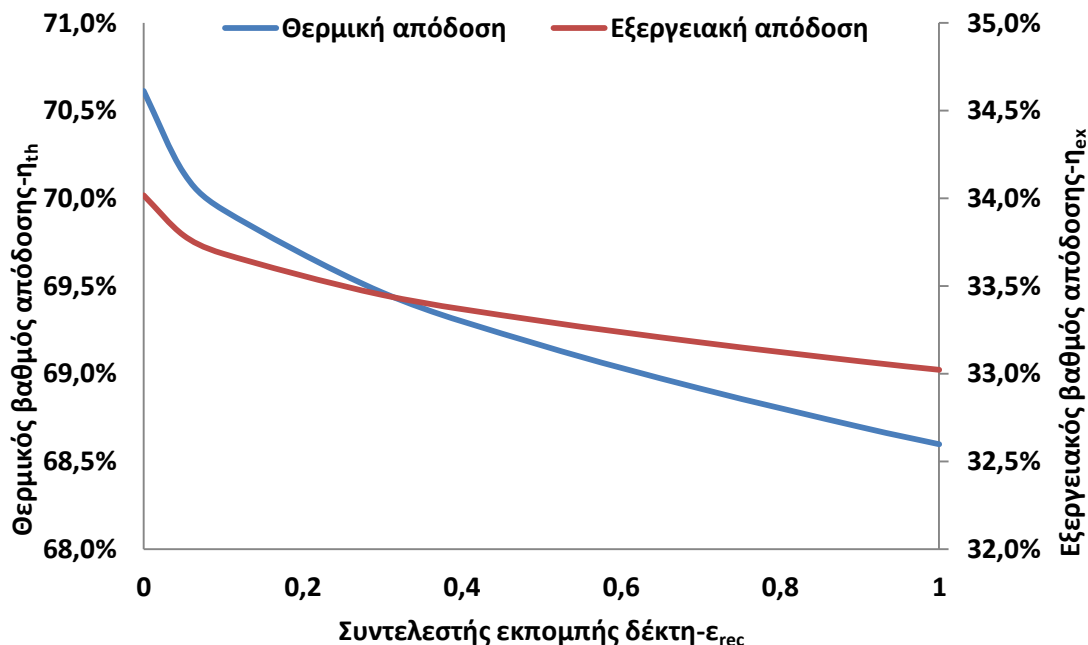
Επόμενη παράμετρος που εξετάζεται είναι η ταχύτητα του ανέμου ( $V_{wind}$ ). Όπως δείχνει η σχέση 3.14 η ταχύτητα του ανέμου καθορίζει τον συντελεστή συναγωγής μεταξύ του δέκτη και του ατμοσφαιρικού αέρα ( $h_{air}$ ), και άρα τις απώλειες λόγω συναγωγής. Πράγματι στο σχήμα 5.6.3 φαίνεται ότι αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε πτώση τόσο του θερμικού όσο και του ενεργειακού βαθμού απόδοσης. Για  $V_{wind}=8$  m/s, ο  $\eta_{th}$  είναι μειωμένος κατά 27.95% και ο  $\eta_{ex}$  κατά 13.76%, σε σχέση με την άπνοια. Φαίνεται λοιπόν ότι οι απώλειες λόγω συναγωγής είναι πολύ σημαντικές για τον δέκτη τύπου κοιλότητας.



**Σχήμα 5.6.3: Θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης για διάφορες ταχύτητες ανέμου ( $T_{in}=250$  °C,  $m=0.04$  kg/s).**

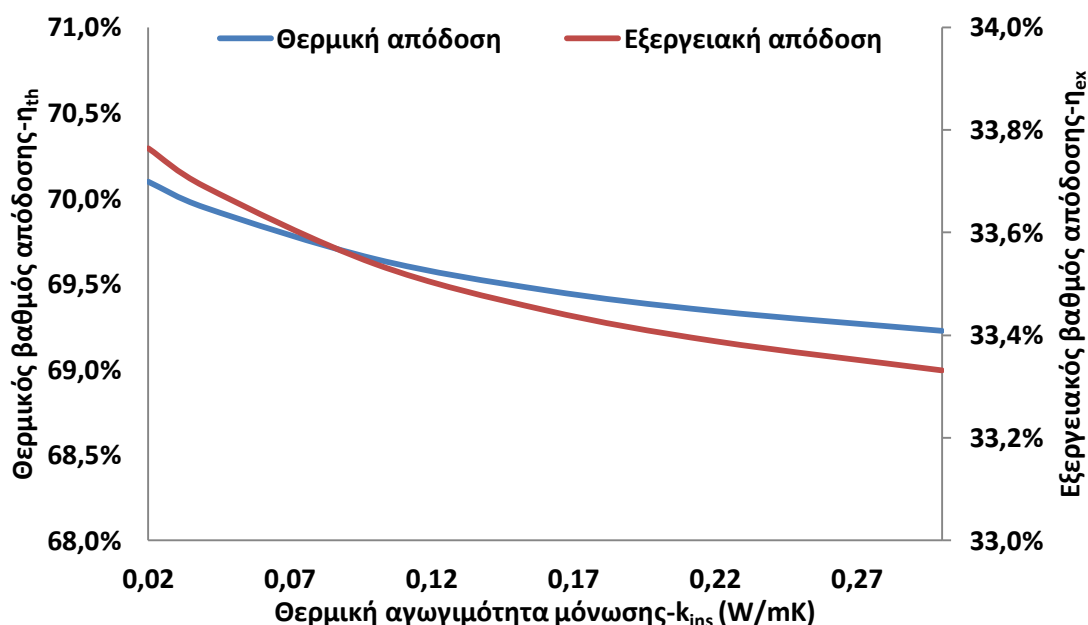
Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι ο συντελεστής εκπομπής του δέκτη  $\epsilon_{rec}$ . Ο δέκτης που σχεδιάστηκε έχει επιλεκτική επιφάνεια απορρόφησης κάτι που σημαίνει υψηλό συντελεστή απορρόφησης ( $\alpha_{rec}=0.9$ ) και ταυτόχρονα χαμηλό συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon_{rec}\approx 0.1$ -σχέση 4.5). Εδώ εξετάσαμε την απόδοση του δέκτη μεταβάλλοντας το  $\epsilon_{rec}$  από την ελάχιστη μέχρι την μέγιστη τιμή της, κρατώντας το  $\alpha_{rec}$  σταθερό. Στο σχήμα 5.6.4 φαίνεται πώς η αύξηση του  $\epsilon_{rec}$  οδηγεί σε σημαντική μείωση του θερμικού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης, της τάξεως του 2.01% και 0.79% αντίστοιχα. Ο λόγος είναι η αύξηση των απωλειών λόγω ακτινοβολίας (σχέση 3.12).





Σχήμα 5.6.4: Θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης για διάφορες τιμές του συντελεστή εκπομπής του δέκτη ( $T_{in}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.04\text{ kg/s}$ ).

Τέλος κατά την σχεδίαση του δέκτη επιλέξαμε ως μονωτικό υλικό τον υαλοβάμβακα, ο οποίος έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $k_{ins}=0.04\text{ W/mK}$ . Προφανώς όπως δείχνει και η σχέση 3.15 ο συντελεστής αγωγιμότητας επηρεάζει τις απώλειες λόγω αγωγής του δέκτη. Πράγματι, στο σχήμα 5.6.5 φαίνεται πως αύξηση του  $k_{ins}$  οδηγεί σε μείωση του θερμικής και εξεργειακής απόδοσης. Μεταξύ των ακραίων τιμών η μείωση είναι 0.87% και 0.43% αντίστοιχα. Παρατηρούμε πως η μείωση είναι αρκετά μικρότερη, κάτι που δείχνει ότι οι απώλειες λόγω αγωγής είναι μικρότερες από της συναγωγής και ακτινοβολίας.



Σχήμα 5.6.4: Θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης για διάφορες τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης ( $T_{in}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $m=0.04\text{ kg/s}$ ).

Συγκεντρωτικά στο υποκεφάλαιο αυτό είδαμε την επίδραση τεσσάρων βασικών παραμέτρων. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον συγκεντρωτή επηρεάζει σημαντικά τον θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Αυτό δείχνει πως για τα συγκεντρωτικά συστήματα είναι πολύ σημαντική η επιλογή της κατάλληλης θέσης τοποθέτησης του συλλέκτη, μια θέση με όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές της  $G_b$  και ταυτόχρονα μηδενικές σκιάσεις. Επιπλέον κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη αποτελεσματικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για να λειτουργήσουν ως αποκεντρωμένες μονάδες, λόγω της έντονης μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της μέρας συν βέβαια την μηδένισή της την νύχτα.

Επιπλέον η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει σημαντικά τις απώλειες λόγω συναγωγής και άρα και τον θερμικό βαθμό απόδοσης. Η μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου χρίζει περαιτέρω έρευνας για να εξεταστεί η επίδρασή τους στις απώλειες συναγωγής και στην καταπόνηση του συλλέκτη. Τέλος η επιλογή υλικού με χαμηλό συντελεστή εκπομπής και η χρήση μονωτικού υλικού με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, είναι πολύ σημαντικά στην κατεύθυνση αύξησης της απόδοσης του δέκτη, καθώς μειώνουν τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας και αγωγής αντίστοιχα.

### 5.7 Σύνοψη αποτελεσμάτων και συζήτηση.

Στόχος αυτού του υποκεφαλαίου είναι να γίνει σύνοψη των αποτελεσμάτων και αξιολόγησή τους μέσω της σύγκρισης με αντίστοιχες έρευνες στην βιβλιογραφία. Το πρώτο βήμα ήταν η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κάθε δέκτη ξεχωριστά, δηλαδή η εύρεση του μήκους που μεγιστοποιεί την απόδοση του συλλέκτη. Όσο το μήκος αυξάνεται, μεγαλώνει η απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια και ταυτόχρονα οι θερμικές απώλειες, αντίθεση που οδηγεί στην ύπαρξη βέλτιστου μήκους. Για την περίπτωση του κυλινδρικού δέκτη βρέθηκε βέλτιστο μήκος  $L=1 \cdot D$ , για τον ορθογωνικό βέλτιστο σχήμα το κυβικό για  $L=1 \cdot a$ , για το σφαιρικό βέλτιστη διάμετρος σφαίρας  $D_s=1.1 \cdot D$ , για το κωνικό βέλτιστο μήκος  $L=1 \cdot D$  και βέλτιστη γωνία κώνου  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$  και τέλος για το κωνοκυλινδρικό μήκος  $L=1 \cdot D$ , γωνία κώνου  $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$  και λόγος του μήκους του κυλίνδρου δια το συνολικό 0.4. Επιπλέον για κάθε σχήμα βρέθηκε η απόσταση από τον συγκεντρωτή που μεγιστοποιεί την οπτική απόδοση, για τον κώνο  $d_{\text{rec}}=516.5 \text{ mm}$  και όλα τα υπόλοιπα σχήματα  $d_{\text{rec}}=536.5 \text{ mm}$ . Συνοπτικά τα παραπάνω δίνονται στον πίνακα 5.7.1.

| Σχήμα         | Βέλτιστη γεωμετρία        | Βέλτιστη γωνία                | Βέλτιστη απόσταση                 |
|---------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Κύλινδρος     | $L=1 \cdot D$             | -                             | $d_{\text{rec}}=536.5 \text{ mm}$ |
| Κύβος         | $L=1 \cdot a$             | -                             | $d_{\text{rec}}=536.5 \text{ mm}$ |
| Σφαίρα        | $D_s=1.1 \cdot D$         | -                             | $d_{\text{rec}}=536.5 \text{ mm}$ |
| Κώνος         | $L=1 \cdot D$             | $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$ | $d_{\text{rec}}=516.5 \text{ mm}$ |
| Κωνοκύλινδρος | $L=1 \cdot D (L_1/L=0.4)$ | $\Phi=0.75 \cdot \Phi_{\max}$ | $d_{\text{rec}}=536.5 \text{ mm}$ |

**Πίνακας 5.7.1: Συνοπτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης δεκτών για το κάθε σχήμα ξεχωριστά.**

Σε αντίστοιχα συμπεράσματα κατέληξαν και άλλοι ερευνητές. Πιο συγκεκριμένα οι Lonj et al. [5.11] μελέτησαν την επίδραση του λόγου  $L/D$  υπολογιστικά σε έναν κυλινδρικό δέκτη και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης παρατηρείται για  $L = 1 \cdot D$ . Το μήκος του κυλινδρικού δέκτη εξετάστηκε και από τους Zou et al. [5.12], που

βρήκαν  $L=0.87 \cdot D$ . Επίσης οι Loni et al. [5.13] έκαναν την ίδια μελέτη για ορθογωνικό δέκτη και κατέληξαν πώς το βέλτιστο μήκος είναι το  $L=1 \cdot a$ . Επιπλέον η παραμετρική εξέταση σφαίρας από τους Si-Quan et al [5.14] έδειξε πώς η απόδοση μεγιστοποιείται για  $D_s=(1 \div 1.5) \cdot D$ , ένα εύρος που περιλαμβάνει και το δικό μας αποτέλεσμα ( $D_s=1.1 \cdot D$ ). Φαίνεται λοιπόν πώς αντίστοιχες έρευνες για την εύρεση του βέλτιστου μήκους του συλλέκτη κατέληξαν σε ίδια ή παρεμφερή συμπεράσματα.

Επόμενο βήμα ήταν η σύγκριση των αποδόσεων των διάφορων σχημάτων μεταξύ τους. Για θερμοκρασία εισόδου από  $50^\circ\text{C}$  έως  $350^\circ\text{C}$ . Το κωνοκυλινδρικό σχήμα εμφάνισε τον μεγαλύτερο θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης, βοηθούμενο κυρίως από την πολύ υψηλή οπτική απόδοση. Επιπλέον είδαμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση του  $\eta_{th}$  λόγω αύξησης των απωλειών θερμότητας. Την μικρότερη κλίση μείωσης του  $\eta_{th}$ , εμφάνισε το κωνικό σχήμα. Έτσι από τα απλά σχήματα για  $T_{in}<150^\circ\text{C}$  καλύτερη απόδοση εμφανίζει το σφαιρικό και για ανώτερες θερμοκρασίες το κωνικό. Τέλος τους χαμηλότερους  $\eta_{th}$  εμφανίζουν το κυλινδρικό και το κυβικό σχήμα αντίστοιχα. Όσον αφορά την οπτική απόδοση με διαφορά τον μεγαλύτερο  $\eta_{opt,coil}$  εμφάνισε το κωνοκυλινδρικό σχήμα ενώ την πιο ομοιόμορφη κατανομή το κωνικό σχήμα.

Υπάρχουν αρκετές έρευνες που κάνουν αντίστοιχα σύγκριση της απόδοσης δεκτών διάφορων σχημάτων.

- Οι Daboo et al. [5.15] συνέκριναν τρεις διαφορετικές γεωμετρίες (κωνικό, κυλινδρικό, σφαιρικό) υπολογιστικά με εργαζόμενο μέσο αέρα και κατέληξαν στο συμπέρασμα πώς την καλύτερη οπτική και θερμική απόδοση εμφανίζει το κωνικό, ακολουθούμενο από τον κύλινδρο και τελευταία την σφαίρα.
- Οι Ravnionic et al. [5.16] συνέκριναν τον δέκτη σπειροειδούς σχήματος με έναν κωνικό ίδιου ανοίγματος, με το κωνικό να εμφανίζει καλύτερη οπτική απόδοση και πολύ μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης, ιδίως στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Οι Seo et al. [5.17] πραγματοποίησαν οπτική και θερμική ανάλυση σε δύο δέκτες (κωνικός, σφαιροκυλινδρικός), και έδειξαν πώς στις χαμηλότερες θερμοκρασίες την καλύτερη απόδοση έχει ο σφαιροκύλινδρος και στις υψηλότερες ο κώνος.
- Οι Jiltea et al. [5.18] συνέκριναν με ένα 3D υπολογιστικό μοντέλο τις απώλειες λόγω συναγωγής μεταξύ 5 διαφορετικών σχημάτων και έδειξαν πώς τις μικρότερες απώλειες συναγωγής έχουν κατά σειρά ο κώνος, ο κωνοκύλινδρος, ο σφαιροκύλινδρος, ο κύλινδρος και τέλος το ετεροκωνικό.
- Οι Loni et al. [5.19] συνέκριναν πειραματικά και υπολογιστικά ένα κυβικό δέκτη με έναν κυλινδρικό δέκτη και κατέληξαν ότι ο κυβικός δέκτης έχει καλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης.

Από τα σχήματα που εξετάζονται και συγκρίνονται, φαίνεται το κωνικό να εμφανίζει την καλύτερη απόδοση, ιδίως στις υψηλές θερμοκρασίες. Για μια πιο ολοκληρωμένη εποπτεία καταγράφουμε τους θερμικούς βαθμούς απόδοσης για διάφορα σχήματα από έρευνες (πίνακας 5.7.20). Από τον πίνακα φαίνεται ότι τους μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης τους δύναται να επιτύχει το κωνικό σε σύγκριση με άλλα απλά σχήματα (κυλινδρικό, κυβικό, σφαιρικό, σπειροειδές). Πιο συγκεκριμένα 77.00% για λειτουργία με τηγμένο άλας και  $T_{in}=295^\circ\text{C}$  [5.20], 77.05% για λειτουργία με αέρα και  $T_{in}=100^\circ\text{C}$  [5.15] και 78.70% για λειτουργία με αέρα και  $T_{in}=200^\circ\text{C}$  [5.16]. Η μεγάλη θερμική απόδοση του κώνου, σε

σχέση με τις απλές γεωμετρίες, φάνηκε και στην παρούσα εργασία στις υψηλές θερμοκρασίες.

| Πηγή   | Σχήμα                    | $\eta_{th}$ | Εργαζόμενο μέσο | $T_{in}$ (°C) |
|--------|--------------------------|-------------|-----------------|---------------|
| [5.1]  | Κύλινδρος                | 75.00%      | Νερό            | 20            |
| [5.12] | Κύλινδρος                | 71.41%      | Αέρας           | 350           |
| [5.20] | Κώνος                    | 77.00%      | Τηγμένο άλας    | 295           |
| [5.15] | Κύλινδρος                | 69.00%      | Αέρας           | 100           |
|        | Σφαίρα                   | 63.00%      | Αέρας           | 100           |
|        | Κώνος                    | 77.05%      | Αέρας           | 100           |
| [5.19] | Κύλινδρος                | 48.50%      | Λάδι            | 100           |
|        | Κύβος                    | 60.65%      | Λάδι            | 100           |
| [5.16] | Κώνος                    | 78.70%      | Λάδι            | 200           |
|        | Σπειροειδές              | 56.00%      | Λάδι            | 200           |
| [5.21] | Πεπιεσμένος Ογκομετρικός | 60.00%      | Αέρας           | 350           |
| [5.22] | Ημισφαίριο               | 67.50%      | Λάδι            | 50            |

**Πίνακας 5.7.2: Βαθμοί απόδοσης δεκτών διάφορων σχημάτων από την βιβλιογραφία.**

Τέλος, είναι δύσκολο να συγκριθούν οι βαθμοί απόδοσης των δεκτών που προτείνονται στην παρούσα εργασία με αυτούς της βιβλιογραφίας, καθώς επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι διαφέρουν στις εκάστοτε μελέτες. Στον πίνακα 5.7.3 δίνονται οι θερμοκοί βαθμοί απόδοσης που επιτυγχάνονται για τα δύο καλύτερα σχήματα της παρούσας μελέτης, για βέλτιστο εργαζόμενο μέσο (Therminol VP-1), βέλτιστη παροχή μάζας ( $m=0.04$  kg/s) και τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ( $T_{in}=100^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$ ). Παρατηρούμε πώς επιτυγχάνονται πολύ υψηλοί θερμοκοί βαθμοί απόδοσης, κοντά στο 80% στην χαμηλή θερμοκρασία και κοντά στο 70% στην υψηλή θερμοκρασία. Επιπλέον δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ταυτόχρονη μεγιστοποίηση των εξεργειακών βαθμών απόδοσης του συλλέκτη. Πράγματι, όπως δείχνει και ο πίνακας 5.7.3, δύναται να επιτευχθούν πολύ υψηλοί εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης της τάξεως του 20% στις χαμηλές θερμοκρασίες και του 35% στις υψηλές.

|            | Σχήμα         | $\eta_{th}$ | $\eta_{ex}$ | Εργαζόμενο μέσο | $T_{in}$ (°C) |
|------------|---------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|
| This Study | Κωνοκύλινδρος | 79.77%      | 20.66%      | Λάδι            | 100           |
|            |               | 74.45%      | 31.45%      |                 | 200           |
|            |               | 68.25%      | 36.29%      |                 | 300           |
|            | Κώνος         | 77.30%      | 19.95%      |                 | 100           |
|            |               | 72.59%      | 30.63%      |                 | 200           |
|            |               | 67.08%      | 35.65%      |                 | 300           |

**Πίνακας 5.7.3: Βαθμοί απόδοσης κωνοκυλινδρικού και κωνικού δέκτη παρούσας εργασίας (This Study) για  $m=0.04$  kg/s.**

Συμπερασματικά στην παρούσα εργασία επιβεβαιώθηκε η καλύτερη απόδοση που επιτυγχάνεται με χρήση κωνικού δέκτη έναντι των άλλων απλών γεωμετριών και ταυτόχρονα προτείνεται και μια νέα γεωμετρία με ακόμη καλύτερη απόδοση

(κωνοκυλινδρικό). Επιπλέον για την βελτίωση της θερμικής και εξεργειακής απόδοσης του συλλέκτη:

- Βελτιστοποιήθηκαν οι γεωμετρικές διαστάσεις του δέκτη.
- Βρέθηκαν τα καλύτερα εργαζόμενα μέσα λειτουργίας (έλαιο στις χαμηλές και τηγμένο άλας στις υψηλές θερμοκρασίες).
- Για το κάθε εργαζόμενο μέσο βρέθηκε η βέλτιστη παροχή λειτουργίας.
- Όσον αφορά τα υλικά επιβεβαιώθηκε η ανάγκη για επιλεκτική επιφάνεια απορρόφησης και χρήσης καλού μονωτικού υλικού.
- Εξετάστηκαν πλήθος παραμέτρων που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση.
- Όλα τα παραπάνω για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών εισόδου για να χρησιμοποιηθούν ανάλογα την χρήση του συλλέκτη.

## Βιβλιογραφία 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

- [5.1] D. Azzouzi, B. Boumeddane, A. Abene. Experimental and analytical thermal analysis of cylindrical cavity receiver for solar dish. *Renewable Energy* 2017;106:111-121.
- [5.2] <http://tw.t.mpei.ac.ru/tthb/hedh/htf-vp1.pdf>
- [5.3] Βιβλιοθήκη του Solidworks (Data Engineering).
- [5.4] A.B. Zavoico. Solar Power Tower-Design Basis Document, Revision 0. Sandia National Laboratories, New Mexico 2001.
- [5.5] S. Pavlovic, E. Bellos, R. h Loni. Exergetic investigation of a solar dish collector with smooth and corrugated spiral absorber operating with various nanofluids. *Journal of Cleaner Production* 2018;174: 1147-1160.
- [5.6] W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, *J. Nanoparticle Res.* 5 (2003) 167.
- [5.7] R. Loni, S. Pavlovic, E. Bellos, C. Tzivanidis, E. A. Asli-Ardeha. Thermal and exergy performance of a nanofluid-based solar dish collector with spiral cavity receiver. *Applied Thermal Engineering* 2018;135:206–217.
- [5.8] M. Ayatollahi, S.H. Nasiri, A.B. Kasaeian, Convection heat transfer modeling of Ag nanofluid using different viscosity theories, *IJUM Eng. J.* 13 (1) (2012) 1–11.
- [5.9] K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer* 54 (2011) 4410–4428.
- [5.10] R. Loni, E. Askari Asli-ardeh, B. Ghobadian, A.B. Kasaeian, Sh. Gorjian, Thermodynamic analysis of a solar dish receiver using different nanofluids, *Energy* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.016>.
- [5.11] R. Loni, A.B. Kasaeian, E. Askari Asli-Ardeh, B. Ghobadian. Optimizing the efficiency of a solar receiver with tubular cylindrical cavity for a solar-powered organic Rankine cycle. *Energy* 2016;112:1259-1272.
- [5.12] C. Zou, Y. Zhang, Q. Falcoz, P. Neveu, C. Zhang, W. Shu, S. Huang. Design and optimization of a high-temperature cavity receiver for a solar energy cascade utilization system. *Renewable Energy* 2017;103:478-489.
- [5.13] R. Loni, A.B. Kasaeian, E. Askari Asli-Ardeh, B. Ghobadian, W.G. Le Roux. Performance study of a solar-assisted organic Rankine cycle using a dishmounted rectangular-cavity tubular solar receiver. *Applied Thermal Engineering* 2016;108:1298–1309.
- [5.14] Z. Si-Quan, L. Xin-Feng, D. Liu, M. Qing-Song. A numerical study on optical and thermodynamic characteristics of a spherical cavity receiver. *Applied Thermal Engineering* 2018.

- [5.15] A. M. Daabo, μS. Mahmouda, R. K. Al-Dadah. The optical efficiency of three different geometries of a small scale cavity receiver for concentrated solar applications. *Applied Energy* 2016;179:1081–1096.
- [5.16] S. Pavlovic, R. Loni, E. Bellos, D. Vasiljević, G. Najafi, A. Kasaeian. Comparative study of spiral and conical cavity receivers for a solar dish collector. *Energy Conversion and Management* 2018;178:111–122.
- [5.17] T.Seo, S.Ryu, Y.Kang. Heat Losses from the Receivers of a Multifaceted Parabolic Solar Energy Collecting System. *KSME International Journal* 2003;17:1185- 1195.
- [5.18] R.D.Jiltea, S.B.Kedarea, J.K.Nayaka. Investigation on Convective Heat Losses from Solar Cavities under Wind Conditions. *Energy Procedia* 2014;57:437 – 446.
- [5.19] R. Loni, A.B. Kasaeian, E. Askari Asli-Ardeh, B. Ghobadian, Sh Gorjian. Experimental and numerical study on dish concentrator with cubical and cylindrical cavity receivers using thermal oil. *Energy* 2018;154Q168-181.
- [5.20] S. Turrini, M. Bettonte, M. Eccher, M. Grigante, A. Miotello, R. S. Brusa. An innovative small-scale prototype plant integrating a solar dish concentrator with a molten salt storage system. *Renewable Energy* 2018;123:150-161.
- [5.21] J. Zhu, K. Wang, G. Li, H. Wuc, , Z. Jiang b, F. Lin, Y. Li . Experimental study of the energy and exergy performance for a pressurized volumetric solar receiver. *Applied Thermal Engineering* 2016;104:212–221.
- [5.22] Loni R, Askari Asli-Ardeh E, Ghobadian B, Ahmadi MH, Bellos E. GMDH modeling and experimental investigation of thermal performance enhancement of hemispherical cavity receiver using MWCNT/oil nanofluid. *Sol Energy* 2018;171:790–803.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικών ερευνών.

### 6.1 Βασικά συμπεράσματα παρούσας μελέτης.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η θερμική και οπτική συμπεριφορά ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη με παραβολοειδές κάτοπτρο και δέκτη τύπου κοιλότητας, με την βοήθεια του λογισμικού σχεδίασης και προσομοίωσης Solidworks. Στόχος τη εργασίας ήταν η βελτίωση της απόδοσης του συλλέκτη μέσω της εξέτασης παραμέτρων όπως: Σχήμα και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη, απόσταση δέκτη-συγκεντρωτή, είδος και παροχή εργαζόμενου μέσου, προσθήκη νανοϋλικών στο εργαζόμενο μέσο και παράμετροι του περιβάλλοντος και των υλικών.

Αρχικά μελετήθηκαν και βελτιστοποιήθηκαν δέκτες πέντε διαφορετικών σχημάτων (κυλινδρικό, ορθογωνικό, σφαιρικό, κωνικό και κωνοκυλινδρικό), για το ίδιο άνοιγμα  $D=121\text{mm}$ , με τα βασικότερα αποτελέσματα να είναι:

- Ανεξαρτήτως σχήματος, αύξηση του μήκους του δέκτη οδηγεί σε αύξηση των θερμικών απωλειών και ταυτόχρονα αύξηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας, η αντίθεση αυτή οδηγεί στην ύπαρξη βέλτιστης γεωμετρίας όπου ο  $\eta_{th}$  μεγιστοποιείται.
- Ο θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιούνται στον κύλινδρο για  $L=1\cdot D$ , στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο για  $L=1\cdot a$ , στην σφαίρα για διάμετρο κοιλότητας  $D_s=1.1\cdot D$  και στον κώνο για μήκος δέκτη  $L=1\cdot D$  και γωνία κώνου  $\Phi=0.75\cdot\Phi_{max}$ .
- Στην περίπτωση του κωνοκύλινδρου η μέγιστη απόδοση (θερμική και εξεργειακή) παρατηρήθηκε για συνολικό μήκος δέκτη  $L=1\cdot D$ , μήκος κυλίνδρου προς μήκος δέκτη  $L_1/L=0.4$  και γωνία κώνου  $\Phi=0.75\cdot\Phi_{max}$ .
- Η βέλτιστη απόσταση του δέκτη από τον συγκεντρωτή (εκεί δηλαδή όπου μεγιστοποιείται η οπτική απόδοση) βρέθηκε  $d_{rec}=536.5\text{ mm}$  για όλα τα σχήματα με εξαίρεση τον κώνο όπου  $d_{rec}=516.5\text{ mm}$ . Σε κάθε περίπτωση 10 mm μακριά από την θέση της εστίας.

Στην συνέχεια συγκρίθηκαν οι αποδόσεις των σχημάτων μεταξύ τους και προέκυψε:

- Τον μεγαλύτερο οπτικό βαθμό απόδοσης ( $\eta_{opt,coil}$ ) εμφανίζει το κωνοκυλινδρικό σχήμα με μεγάλη διαφορά (4.08%) από το δεύτερο. Ακολουθούν κατά σειρά ο κύλινδρος, ο κώνος, ο κύβος και τέλος η σφαίρα.
- Την καλύτερη κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας εμφανίζει το κωνικό και το σφαιρικό σχήμα.
- Ανεξαρτήτως σχήματος ο  $\eta_{th}$  μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, λόγω αύξησης των απωλειών θερμότητας. Επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και ο ρυθμός μείωσης του  $\eta_{th}$ , λόγω των απωλειών ακτινοβολίας οι οποίες έχουν την θερμοκρασία εις την τέταρτη δύναμη.
- Σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών εισόδου τον μεγαλύτερο  $\eta_{th}$  παρουσιάζει το κωνοκυλινδρικό σχήμα, με την διαφορά από το δεύτερο καλύτερο σχήμα να είναι 1.48% για  $T_{in}=50^\circ\text{C}$  και 0.72% για  $T_{in}=350^\circ\text{C}$ . Από τα βασικά σχήματα στις χαμηλές θερμοκρασίες ( $T_{in} < 150^\circ\text{C}$ ) υπερτερεί το σφαιρικό σχήμα ενώ στις υψηλές



( $T_{in} \geq 150^{\circ}\text{C}$ ) το κωνικό σχήμα. Σε κάθε περίπτωση το κυλινδρικό και το κυβικό σχήμα παρουσιάζουν τους χαμηλότερους θερμικούς βαθμούς απόδοσης.

- Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της  $T_{in}$ , σε όλα τα σχήματα.
- Τον μεγαλύτερο  $\eta_{ex}$  εμφανίζει το κωνοκυλινδρικό σχήμα, ακολουθούμενο από την σφαίρα στις χαμηλές θερμοκρασίες και τον κώνο στις υψηλότερες. Χαμηλότερους  $\eta_{ex}$  έχουν το κυλινδρικό και το κυβικό σχήμα.
- Ο κώνος παρουσιάζει τον μικρότερο ρυθμό μείωσης του  $\eta_{th}$  και τον μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης του  $\eta_{ex}$ , με αύξηση του  $T_{in}$ .
- Τελικά για μέγιστη θερμική και εξεργειακή απόδοση του συλλέκτη προτείνεται η χρήση κωνοκυλινδρικού δέκτη. Από τα απλά σχήματα υπερτερεί η σφαίρα και ο κώνος.

Επόμενο βήμα ήταν η εύρεση της βέλτιστης παροχής και η σύγκριση μεταξύ τεσσάρων βασικών εργαζόμενων μέσων (λάδι, νερό, αέρας και τηγμένο άλας) σε κατάλληλο εύρος θερμοκρασιών:

- Σε όλα τα εργαζόμενα μέσα για σταθερή παροχή, ο  $\eta_{th}$  μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου. Από την άλλη, ο  $\eta_{ex}$  με την αύξηση της  $T_{in}$ , αυξάνεται στην περίπτωση χρήσης λαδιού και νερού, μειώνεται για χρήση αέρα και παρουσιάζει μέγιστο για χρήση τηγμένου άλατος για  $T_{in}=400^{\circ}\text{C}$ .
- Ανεξαρτήτως εργαζόμενου μέσου για σταθερή θερμοκρασία εισόδου, με την αύξηση της παροχής από την μια αυξάνεται ο  $\eta_{th}$  και από την άλλη μειώνεται ο  $\eta_{ex}$ . Άρα η βέλτιστη παροχή μάζας είναι εκείνη που συνδυάζει ικανοποιητικό θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης.
- Για το Therminol VP-1 βέλτιστη παροχή μάζας  $m=0.04 \text{ kg/s}$ , για το νερό  $m=0.02 \text{ kg/s}$ , για τον αέρα  $m=0.001 \text{ kg/s}$  και για το τηγμένο άλας  $m=0.08 \text{ kg/s}$ .
- Στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου το νερό έχει τον μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης, χωρίς όμως μεγάλη διαφορά από το Therminol-VP1. Στην περιοχή θερμοκρασιών όπου συνυπάρχουν το έλαιο και το τηγμένο άλας οι θερμικοί βαθμοί είναι πολύ κοντά, πιο συγκεκριμένα για  $T_{in}=250^{\circ}\text{C}$  το Therminol-VP1 έχει λίγο μεγαλύτερο  $\eta_{th}$ , ενώ για  $T_{in}=300^{\circ}\text{C}$  και μετά υπερτερεί το τηγμένο άλας για λίγο. Σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών ο αέρας έχει πολύ μικρότερη θερμική απόδοση από τα άλλα τρία υγρά εργαζόμενα μέσα.
- Για θερμοκρασίες εισόδου κάτω των  $100^{\circ}\text{C}$  ο αέρας έχει την καλύτερη εξεργειακή συμπεριφορά ακολουθούμενο από το Therminol-VP1, με τελευταίο το νερό. Στις μεσαίες όμως θερμοκρασίες το Therminol-VP1 έχει καλύτερη εξεργειακή συμπεριφορά από τον αέρα, με την διαφορά τους μάλιστα να βαίνει αυξανόμενη. Στις υψηλές θερμοκρασίες το τηγμένο άλας έχει πολύ μεγαλύτερο εξεργειακό από τον αέρα. Στην σύγκριση Therminol-VP1 και τηγμένου άλατος επικρατεί για λίγο το Therminol-VP1.
- Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των υγρών, όπως και η κατανάλωση της αντλίας.
- Τελικά για  $T_{in} \leq 350^{\circ}\text{C}$ , βέλτιστη επιλογή το Therminol VP-1 και για  $T_{in} > 350^{\circ}\text{C}$ , βέλτιστη επιλογή το τηγμένο άλας.

Έπειτα εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης νανοϋλικών (Cu, CuO, TiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) στο λάδι και στο νερό, σε διάφορες περιεκτικότητες, για T<sub>in</sub>=250 °C και T<sub>in</sub>=70 °C αντίστοιχα. Προέκυψαν τα εξής:

- Ο  $\eta_{th}$  μειώνεται και στις δύο περιπτώσεις με αύξηση της περιεκτικότητας των νανοϋλικών. Η μείωση αυτή οφείλεται στην θεώρηση για σταθερή παροχή μάζας. Η αύξηση του  $\phi$  οδηγεί σε αύξηση της δυναμικής συνεκτικότητας που με την σειρά του οδηγεί σε μείωση του αριθμού Reynolds. Η μείωση είναι μικρότερη για προσθήκη Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, με μικρή διαφορά από το TiO<sub>2</sub>. Για προσθήκη CuO και Cu παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση του  $\eta_{th}$ .
- Ο εξεργειακός βαθμός αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας  $\phi$ , ανεξαρτήτως του νανοϋλικού, τόσο στο λάδι όσο και στο νερό. Η καλύτερη εξεργειακή συμπεριφορά εμφανίζεται με χρήση Cu σε περιεκτικότητα  $\phi=0.05$ . Ο  $\eta_{ex}$  στην περίπτωση προσθήκης Cu για  $\phi=0.05$  είναι κατά 0.27% αυξημένος στην περίπτωση του λαδιού και κατά 4.09% στην περίπτωση του νερού. Μετά το Cu την μεγαλύτερη αύξηση παρουσιάζει το CuO και ακολουθούν το TiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> κατά σειρά.
- Η προσθήκη νανοϋλικών αυξάνει την θερμοκρασία εξόδου, η αύξηση είναι μεγαλύτερη και στις δύο περιπτώσεις για προσθήκη Cu, ακολουθούμενο από το CuO, TiO<sub>2</sub> και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> κατά σειρά.

Τέλος από την μελέτη παραμέτρων του περιβάλλοντος και των υλικών προέκυψαν τα εξής:

- Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον συγκεντρωτή επηρεάζει σημαντικά τον θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης, οι οποίοι αυξάνονται με αύξηση της G<sub>b</sub>.
- Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε αύξηση των απωλειών λόγω συναγωγής και άρα στην μείωση των  $\eta_{th}$ ,  $\eta_{ex}$ .
- Η επιλογή επιλεκτικής επιφάνειας με μικρό συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon_{rec} \approx 0.1$ ) είναι πολύ σημαντική για την μείωση των απωλειών λόγω ακτινοβολίας, και συνεπώς την αύξηση των  $\eta_{th}$ ,  $\eta_{ex}$ .
- Η επιλογή υλικού μόνωσης με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{ins} \approx 0.04$  W/mK) είναι σημαντική για την μείωση των απωλειών λόγω αγωγής του δέκτη.

## 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Η μελέτη των ηλιακών συλλεκτών με παραβολειδές κάτοπτρο αποτελεί ένα ευρύ πεδίο έρευνας, από την στιγμή που δεν έχει ωριμάσει αρκετά ως τεχνολογία. Πιο συγκεκριμένα για τους δέκτες τύπου κοιλότητας κάποιες δυνατές μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να ήταν:

- Κατασκευή εργαστηριακού συλλέκτη για διενέργεια πειραματικών μετρήσεων.
- Οικονομοτεχνική μελέτη της κατασκευής του δέκτη, δηλαδή εξέταση του τρόπου και κόστους κατασκευής.
- Οικονομική μελέτη κόστους εργαζόμενων μέσων (με ή χωρίς νανοϋλικά).

- Μελέτη και άλλων εργαζόμενων μέσων (διάφορα αέρια, υγρά μέταλλα), ειδικά για υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας.
- Υπολογισμός διακύμανσης της παραγόμενης ενέργειας καθόλη την διάρκεια του έτους.
- Ανάπτυξη αποτελεσματικών μέσων αποθήκευσης ενέργειας.
- Σύζευξη του συλλέκτη με κάποιο θερμοδυναμικό κύκλο παραγωγής ενέργειας.