

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ  
ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ  
ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

ΚΑΞΗΡΗ ΡΑΛΛΟΥ, ΑΕΜ 1400

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΝΑΡΑΣ



## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Γεώργιο Πανάρα για την βοήθειά του και την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ με το Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον Δρ. Βασίλη Μπελεσιώτη, προϊστάμενο του εργαστηρίου Ηλιακών και Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, ο οποίος μου πρότεινε την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και πραγματοποίησε την επιθυμία μου να εργαστώ για αυτήν στο χώρο του εργαστηρίου. Και τέλος οφείλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Εμμανουήλ Μαθιουλάκη για την πολύτιμη βοήθεια, υπομονή και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης αλλά και για την υπομονή του κατά την διόρθωση των κειμένων.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απονείμω στην αδερφή μου και τους γονείς μου, αλλά και στους φίλους μου, που με στήριξαν όλα τα χρόνια της φοιτητικής μου ζωής και συνεχίζουν να με στηρίζουν σαν δεύτερη οικογένεια.

*Ραλλού Καξηρή*

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλιακών και Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» στην περιοχή Αγίας Παρασκευής, Αττικής για το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας κατά το διάστημα Νοέμβριος 2016 έως Μάρτιος 2017. Η εργασία αυτή έχει σκοπό την μελέτη και ανάλυση των θερμικών ηλιακών συστημάτων και πιο συγκεκριμένα την πειραματική διάταξη ενός κοίλου συγκεντρωτικού παραβολικού ηλιακού συλλέκτη χαμηλής ενθαλπίας (PTC).

Στο πρώτο μέρος της εργασίας (κεφάλαια 1 και 2) γίνεται μια εισαγωγή στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή θερμότητας και στις τεχνολογίες των ηλιακών συλλεκτών μέχρι σήμερα. Επιπλέον γίνεται εισαγωγή στις βασικές έννοιες και εξισώσεις για την μελέτη των θερμικών ηλιακών συστημάτων, ενώ παρουσιάζονται συνοπτικά οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στον παραπάνω τομέα.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας (κεφάλαια 3 και 4) γίνεται αναλυτικότερη μελέτη των ηλιακών θερμικών κοίλων παραβολικών συλλεκτών. Μελετάται η γεωμετρία και τα προβλήματα που αυτή δημιουργεί, ενώ ταυτόχρονα δίνονται με σαφήνεια οι τύποι για τον υπολογισμό της θερμικής απόδοσης των PTC, σύμφωνα με εκτενή βιβλιογραφική μελέτη.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας υπολογίζονται θεωρητικά και με την βοήθεια των σχέσεων που παρατέθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, ο οπτικός και ο θερμικός βαθμός απόδοσης για την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη PTC που μελετήθηκε στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος». Το μοντέλο αποτελείται από υφιστάμενες σχέσεις στη βιβλιογραφία που περιγράφουν τα φαινόμενα και τη λειτουργία των διαφορετικών φάσεων της συνολικής διεργασίας. Στη βάση του μοντέλου που αναπτύχθηκε πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση της απόδοσης του συλλέκτη για τυπικές συνθήκες λειτουργίας

Με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης εξάγεται το συμπέρασμα ότι η απόδοση ενός PTC εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής του και από την γεωμετρία της ανακλαστικής επιφάνειας. Επιπλέον, είναι σημαντική η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας, όπου οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος δεν παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια της ημέρας και υπάρχουν άφθονες ώρες ηλιοφάνειας.

## **Abstract**

This Diploma Thesis has been elaborated at the “Solar and other Energy Systems Laboratory”, part of National Center For Scientific Research “Demokritos”, Agia Paraskeui, Greece, on behalf of the department of Mechanical Engineering of University of Western Macedonia commencing on November 2016- March 2017. The project aims to study and analyze the solar thermal systems and particularly, the experimental configuration of a pilot parabolic trough collector of low enthalpy.

The first section of the thesis (chapters 1 and 2) introduces solar thermal technology for heat production and presents all the up-to date technologies of solar thermal troughs. Moreover, the basic principles and equations are explained for studying solar thermal systems as well as all the current progress on solar thermal sector.

At the second part (chapters 3 and 4), a detailed study of parabolic trough collector is presented. Focus is given on the geometry and the issues that arise during design and on the same time, the equations of thermal efficiency are indicated according to extensive literature research.

On the last part of the thesis, the optical and thermal efficiency of the pilot configuration studied in NSCR “Demokritos” is calculated theoretically using a software. The model consists of existing relations from the literature that describe the phenomena and operation of the total process under different stages. On the basis of the developed model, a parametric analysis of the performance of the collector for typical operation conditions takes place.

After the assessment of the above results, it is concluded that the performance of a PTC depends mainly to the characteristics of the construction material and the geometry of the reflective surface. Additionally, it is very important to mention that the location of the installed plant should be carefully selected to agree with the most favorable criteria as small ambient temperature fluctuations and abundant solar radiation.

## Περιεχόμενα

|  |    |
|--|----|
| Ευχαριστίες.....   | 3  |
| Περίληψη .....   | 4  |
| Abstract .....   | 5  |
| Περιεχόμενα.....   | 6  |
| Ονοματολογία Συμβόλων.....   | 7  |
| Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....  | 8  |
| Κεφάλαιο 2: Ήλιος και ηλιοθερμική τεχνολογία .....                               | 10 |
| 2.1.Ιστορική Αναδρομή.....   | 10 |
| 2.2.Ηλιακή ακτινοβολία.....  | 16 |
| 2.3.Συστήματα Αξιοποίησης Θερμικής Ηλιακής Ενέργειας .....                       | 20 |
| 2.3.1.Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης.....  | 22 |
| 2.3.2.Ηλιακοί συλλέκτες με σωλήνες κενού .....                                   | 27 |
| 2.3.3.Παραβολικοί Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες .....                                 | 28 |
| Κεφάλαιο 3: Μελέτη κοίλων παραβολικών ηλιακών συλλεκτών.....                     | 31 |
| 3.1.Γεωμετρικά στοιχεία παραβολικών συλλεκτών .....                              | 31 |
| 3.2.Σωλήνας-Δέκτης.....  | 35 |
| 3.3.Εργαζόμενο ρευστό.....   | 36 |
| 3.4.Σύστημα εντοπισμού θέσης.....  | 37 |
| 3.5.Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις .....   | 38 |
| Κεφάλαιο 4: Θερμική Ανάλυση Παραβολικών Ηλιακών Συλλεκτών .....                  | 40 |
| 4.1.Οπτική Απόδοση .....   | 40 |
| 4.2.Θερμική Απόδοση .....  | 44 |
| Κεφάλαιο 5: Μελέτη Πειραματικής Διάταξης Παραβολικού Ηλιακού Συλλέκτη .....      | 53 |
| 5.1.Θεωρητικός Υπολογισμός Οπτικού Βαθμού Απόδοσης.....                          | 56 |
| 5.2.Προσέγγιση Θερμικών Απωλειών Δέκτη.....                                      | 58 |
| 5.3.Θεωρητικός Υπολογισμός Θερμικού Βαθμού Απόδοσης.....                         | 62 |
| 5.4.Παραμετρική Διερεύνηση Απόδοσης Για Διαφορετικές Περιπτώσεις Λειτουργίας ... | 65 |
| Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....  | 71 |
| Βιβλιογραφία.....  | 73 |

## Ονοματολογία Συμβόλων

|                |   |              |   |
|----------------|---|--------------|---|
| $G_{sc}$       | Ηλιακή σταθερά (W/m <sup>2</sup> )                            | $I_T$        | Ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m <sup>2</sup> )      |
| $G_{on}$       | Προσπίπτουσα ακτινοβολία σε επίπεδη πλάκα (W/m <sup>2</sup> ) | $T$          | Θερμοκρασία (K)   |
| $f$            | Εστιακή απόσταση (m)  | $\alpha$     | Άνοιγμα συλλέκτη (m)  |
| $L$            | Μήκος (m)   | $S$          | Απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )             |
| $F_R$          | Συντελεστής θερμικής απολαβής                                 | $Q_u$        | Παραγόμενη θερμότητα (W/m <sup>2</sup> )                        |
| $C$            | Λόγος συγκέντρωσης  | $D$          | Διάμετρος σωλήνα (m)  |
| $U_L$          | Συντελεστής θερμικών απωλειών (W/m <sup>2</sup> K)            | $A$          | Επιφάνεια (m <sup>2</sup> )                                     |
| $h$            | Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (W/m <sup>2</sup> K)         | $m$          | Μάζα παροχής ρευστού μεταφοράς θερμότητας (m <sup>3</sup> /sec) |
| $C_p$          | Ειδική θερμοχωρητικότητα νερού (kJ/kgK)                       | $r$          | Ακτίνα (°)  |
| $k$            | Θερμική αγωγιμότητα   | $Ra$         | Αριθμός Rayleigh  |
| $Pr$           | Αριθμός Prandtl   | $g$          | Επιτάχυνση της βαρύτητας (m/sec <sup>2</sup> )                  |
| $Nu$           | Αριθμός Nusselt   | $Re$         | Αριθμός Reynolds  |
|                |   |              | <b>Ελληνικά σύμβολα</b>   |
| $\gamma_{sur}$ | Αζιμούθια γωνία επιφάνειας                                    | $\varphi_r$  | Οριακή γωνία  |
| $\varphi$      | Γεωμετρικό πλάτος   | $\gamma_s$   | Αζιμούθια γωνία ήλιου   |
| $\delta$       | Γωνία απόκλισης   | $\beta$      | Κλίση επιπέδου  |
| $\theta_z$     | Γωνία ζενίθ   | $\omega$     | Ωριαία γωνία  |
| $\theta$       | Γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας                                 | $\alpha_s$   | Ηλιακό ύψος   |
| $\eta$         | Θερμική απόδοση   | $\eta_{opt}$ | Οπτική απόδοση  |
| $\alpha$       | απορροφητικότητα  | $\tau$       | διαπερατότητα   |
| $\rho_d$       | πυκνότητα   | $\rho$       | ανακλαστικότητα   |
| $\nu$          | Κινηματικό ιξώδες   | $K_\theta$   | Συντελεστής διόρθωσης γωνίας πρόσπτωσης                         |
| $\varepsilon$  | Εκπομπή ακτινοβολίας  | $\sigma$     | Σταθερά Stefan-Boltzmann (W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )     |

# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η σημερινή εποχή δίκαια χαρακτηρίζεται ως εποχή της πληροφορίας. Οι τεχνολογικές εξελίξεις τρέχουν με ραγδαίους ρυθμούς και η ανθρωπότητα αγγίζει καινούρια μονοπάτια γνώσης και εξέλιξης. Ταυτόχρονα, η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού αλλά και οι αυξημένες ανάγκες του ατόμου για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οδηγούν τους σύγχρονους επιχειρηματίες σε καταστροφικές για τον πλανήτη λύσεις. Για τον σκοπό αυτό, άπειρες εκτάσεις δάσους έχουν κατακερματιστεί και μεγάλοι πληθυσμοί έχουν λεηλατηθεί ή μεταναστεύσει λόγω πολέμων για την διαχείριση των πετρελαϊκών πόρων, κυρίως στην περιοχή της Μέσης Ανατολής.

Μέχρι σήμερα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικές μεθόδους είναι κυρίαρχη, πολλαπλασιάζοντας την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα, μικροσωματιδίων και άλλων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, περιοχές σε κοντινή απόσταση από εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας και η Κοζάνη, κρίνονται ως ανθυγιεινές για τον ανθρώπινο οργανισμό και ο πληθυσμός τους υποφέρει σε πολύ μεγάλο ποσοστό από απλά αναπνευστικά προβλήματα, χρόνιο άσθμα ή και θανατηφόρες ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος. Τέλος, στην ρυπογόνο αυτή διεργασία οφείλεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας της Γης λόγω αυτού, με εντονότερο το πρόβλημα σε μεγάλες βιομηχανικές χώρες, όπως η Κίνα.

Η καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την μείωση των αποθεμάτων πετρελαίου, η οποία προβλέπεται δραματική μετά το 2030, κάνει αναγκαία την στροφή σε πηγές φιλικές προς το περιβάλλον και όσο το δυνατόν πιο ακίνδυνες για αυτό. Η επιστημονική κοινότητα έχει ήδη κάνει τεράστια άλματα στον τεχνολογική ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.) και τα Ηνωμένα Έθνη, με την συμπαράσταση μη κυβερνητικών οργανώσεων, προωθούν νομοθεσίες για την προώθησή τους.

Οι Α.Π.Ε. σε σχέση με την χρονική κλίμακα του ανθρώπινου είδους μπορούν να θεωρηθούν ανεξάντλητες καθώς εξαρτώνται άμεσα από τη ζωή του Ήλιου. Υπάρχουν μόνο τρεις κατηγορίες ενέργειας που είναι ανανεώσιμες: η ηλιακή, η γεωθερμία και η παλιρροϊκή, ενώ οι υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές σχετίζονται άμεσα με την ηλιακή ακτινοβολία.

Για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας διακρίνονται δύο κύρια είδη τεχνολογιών: τα φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα και τα θερμικά ηλιακά συστήματα, όπως αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια. Στην αξιοποίηση της παλιρροϊκής ενέργειας συναντώνται γιγαντώδεις κυματοθραύστες και πλωτήρες, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια των παλιρροιών και των κυμάτων, καθώς και το ενεργειακό δυναμικό λόγω της θερμοκρασιακής



διαφοράς των ωκεανών. Επιπρόσθετα, η γεωθερμία αποτελεί έναν ακόμη μεγάλο κλάδο στην αξιοποίηση της ενέργειας, όπου η φυσική θερμική ενέργεια του εδάφους, που προέρχεται από τον πυρήνα της Γης αξιοποιείται κατάλληλα με την χρήση αντλιών και εναλλακτών θερμότητας.

Τέλος, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλούνται δύο ακόμα πόροι ενέργειας στον πλανήτη. Η αύξηση της θερμοκρασίας των αέριων μαζών οδηγεί στην κίνησή τους και στην αιολική ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε μηχανική μέσω ανεμογεννητριών ξηράς και θαλάσσης. Η ηλιακή ακτινοβολία ευθύνεται και για τον μεγαλύτερο μηχανισμό δημιουργίας και συντήρησης της ζωής, την φωτοσύνθεση. Οι φυτικοί οργανισμοί μέσω αυτού του μηχανισμού κατέχουν ένα μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο, το οποίο αξιοποιείται ως καύσιμο με την μορφή βιομάζας.

Στην Ελλάδα τα ποσοστά Α.Π.Ε. είναι σημαντικά, με το μεγαλύτερο ποσοστό ρεύματος από Α.Π.Ε. να παράγεται από την αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού, όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω πίνακα. Ωστόσο υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης αυτών των μεγεθών, καθώς οι τεχνολογικές εξελίξεις διευκολύνουν την τοποθέτηση σταθμών και εργοστασίων ακόμα και σε δυσπρόσιτες περιοχές. Επιπλέον, οι γραφειοκρατικοί μηχανισμοί και οι ευρωπαϊκοί νόμοι εξυγιαίνονται δίνοντας ευκαιρίες σε ιδιώτες για αυτονομία από το ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά και σε μικρούς επενδυτές να έχουν ένα αξιοπρεπές εισόδημα από μια μονάδα Α.Π.Ε

*Πίνακας 1.1 : Μονάδες Α.Π.Ε. στην Ελλάδα για το 2016. [πηγή: διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «Εργαστήριο Α.Π.Ε.»]*

| <b>Πηγή</b>                | <b>Ισχύς</b>             |
|----------------------------|--------------------------|
| Αιολικά πάρκα              | 1100 MW                  |
| Υδροηλεκτρικά πάρκα        | 3170 MW                  |
| Βιομάζα                    | 50 MW                    |
| Φωτοβολταϊκά πάρκα         | 50 MW                    |
| Ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες | 3,5 εκατ. m <sup>2</sup> |

## Κεφάλαιο 2: Ήλιος και ηλιοθερμική τεχνολογία

### 2.1. Ιστορική Αναδρομή

Από τα αρχέγονα χρόνια ο Ήλιος αποτέλεσε την πηγή ζωής και δημιουργίας του πλανήτη Γη. Μέσα στον Ήλιο γεννήθηκαν οι πυρήνες του άνθρακα και του σιδήρου, οι οποίοι έβαλαν τα θεμέλια για το πλούσιο έδαφος της Γης. Παράλληλα, χάρη στον Ήλιο γεννήθηκαν και εξελίσσονται οι ζωντανό οργανισμοί μέσω της φωτοσύνθεσης, συνεχίζοντας τον κύκλο ζωής του πλανήτη. Στη συνέχεια, με την εμφάνιση του ανθρώπινου είδους, και όσο αυτό αναπτύσσεται νοηματικά, αυξάνονται ταυτόχρονα και οι ανάγκες του για ενέργεια. Την ενέργεια αυτή, παραλαμβάνει εξ' ολοκλήρου από τον Ήλιο, είτε έμμεσα, μέσω της τροφής του και του φωτός, είτε άμεσα εφευρίσκοντας τεχνικές, εργαλεία αλλά και ανεπτυγμένες μηχανές για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

Τα πρώτα σημάδια χρήσης της ηλιοθερμικής ενέργειας σε πρωτόγονες αποικίες συναντώνται ήδη από τον 7<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. Έχουν βρεθεί σε πολυάριθμες ανασκαφές μεγεθυντικά κρύσταλλα που χρησιμοποιούνταν για την έναυση φλόγας με σκοπό την θέρμανση και την προστασία από τα άγρια ζώα. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε αργότερα σε θρησκευτικές τελετές Ελλήνων και Ρωμαίων, με την χρήση κοίλων κατόπτρων, με τον ίδιο τρόπο που πραγματοποιείται και σήμερα η έναυση της Ολυμπιακής φλόγας. Την ίδια εποχή περίπου, κατά την διάρκεια της Πολιορκίας των Συρακουσών (214-212 π.Χ.) έγινε η πρώτη καταγεγραμμένη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μεγάλη έκταση. Τότε, ο Αρχιμήδης ο Συρακούσιος έβαλε φωτιά σε εχθρικά πλοία Ρωμαίων, χρησιμοποιώντας ένα τεράστιο παραβολικό κάτοπτρο φτιαγμένο από ασπίδες, ανακλώντας τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες προς τα πανιά των Ρωμαϊκών πλοίων. Αργότερα, περί τον 1<sup>ο</sup> αι. μ.Χ. κατασκευάζονται ρωμαϊκά λουτρά με εκμετάλλευση του φωτός και της θερμότητάς του, όπως ακριβώς συμβαίνει και σε ένα σύγχρονο θερμοκήπιο.

Τους επόμενους αιώνες, και κατά την βιομηχανική επανάσταση, παρακολουθούμε μια ραγδαία ανάπτυξη στον τεχνολογικό τομέα της ενέργειας. Το 1816, ο Robert Stirling κατασκευάζει στη Σκωτία την πρώτη θερμική μηχανή "Stirling", ενώ μια γενιά αργότερα, το 1866 ο Auguste Mouchout κατασκευάζει την πρώτη ηλιακή διάταξη παραγωγής ατμού σε κλειστό γυάλινο δοχείο με μεταλλικό λέβητα. Λίγα χρόνια αργότερα, στην Χιλή η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για εξάτμιση αλμυρού νερού (αφαλάτωση) και το 1900 κατασκευάζεται εμπορικά η πρώτη ηλιακή μηχανή στην Καλιφόρνια από τον Audrey Enea. Από το 1913 έγιναν οι πρώτες εμπορικές προσπάθειες εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας σε μεγαλύτερη κλίμακα και ο Frank Shuman εγκαίνιασε στο Maadi της Αιγύπτου

το πρώτο ηλιακό πάρκο των 55hr με παραβολικούς συλλέκτες και σύστημα εντοπισμού του ήλιου, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το 1958 εισέρχεται μία καινούρια τεχνολογία στον χώρο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), μέσω ενός καθοριστικού γεγονότος. Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα προσαρτάται στον δορυφόρο Vanguard I και λειτουργεί επιτυχώς για 8 χρόνια, κάνοντας παγκοσμίως γνωστή την καινούρια τεχνολογία. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είχε ήδη κάνει την εμφάνισή του από το 1839 και την ανακάλυψή του από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel. Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες είναι η πλέον κερδοφόρα τεχνολογία εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας και στη χώρα μας γνώρισε μεγάλη άνθιση κυρίως την περίοδο 2012-2015, όταν δόθηκε η ευκαιρία σε μικρούς και μεγάλους επενδυτές να συμβάλλουν στην διάθεση ρεύματος στο ηλεκτρικό δίκτυο σε αρκετά υψηλή τιμή ανά kWh.



*Εικόνα 2.1: Φωτοβολταϊκό Πάρκο [πηγή: προσωπικό αρχείο]*

Από το 1960 ξεκινάει μία εποχή άνθησης ενός ακόμα μεγάλου κλάδου στον τομέα των Α.Π.Ε, των ηλιακών θερμαντών νερού τύπου θερμοσίφωνου, λύνοντας το πρόβλημα του ζεστού νερού χρήσης στις περισσότερες οικίες. Τα ηλιακά θερμοσιφωνικά συστήματα εκμεταλλεύονται δύο φαινόμενα, την θέρμανση ρευστού στις σωληνώσεις με την βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας και την κυκλοφορία του νερού με φυσικό τρόπο χωρίς μηχανικά μέρη. Αποτελούν ένα θερμοδυναμικό σύστημα, όπου απορροφάται ηλιοθερμική ενέργεια από μία επιφάνεια και μεταφέρεται σε ένα ρευστό απολαβής, που βρίσκεται σε επαφή με αυτήν. Στην συνέχεια, το ρευστό κινείται προς έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπου η θερμική ενέργεια μεταφέρεται με τους νόμους της συναγωγής στο νερό χρήσης, αν πρόκειται για

κλειστό κύκλωμα, ενώ αν πρόκειται για ανοικτό, τότε το ρευστό απολαβής είναι απευθείας το νερό. Σημαντική είναι η αναφορά στην αρχή του θερμοσιφώνου, σύμφωνα με την οποία γίνεται εκμετάλλευση της φυσικής ροής των ρευστών, λόγω διαφορετικής πυκνότητας (διαφορετική θερμοκρασία) και οδηγεί το θερμότερο ρευστό ανοδικά, όπου και τοποθετείται ο εναλλάκτης θερμότητας ή η δεξαμενή αποθήκευσης στην περίπτωση ανοιχτού κυκλώματος.



*Εικόνα 2.2: Θερμοσιφωνικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης [πηγή: [www.bosch-climate.gr](http://www.bosch-climate.gr)]*

Οι επίπεδοι θερμοσιφωνικοί συλλέκτες αποτέλεσαν για χρόνια την κυρίαρχη τεχνολογία στους ηλιακούς συλλέκτες, αλλά και μία μεγάλη εμπορική επένδυση, κυρίως στις χώρες της Μεσογείου. Στον ελλαδικό χώρο βρίσκονται σε λειτουργία μέχρι σήμερα 3,5 εκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα θερμικών συλλεκτών. Ωστόσο, λόγω της υψηλής τεχνολογικής τους εξέλιξης, είναι διαθέσιμοι σήμερα και σε χώρες με λιγότερη ηλιοφάνεια και χαμηλότερες θερμοκρασίες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την Γερμανία.

Η ανάγκη για περαιτέρω εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας με υψηλότερες θερμοκρασιακές απολαβές οδήγησε στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες. Στην επιστημονική κοινότητα είναι ευρέως γνωστοί και σχετικά εύκολοι στην λειτουργία οι μικροί συλλέκτες παραγωγής μερικών watt, που χρησιμοποιούνται κυρίως για την μελέτη και τεχνολογική εξέλιξη, αλλά και για ιδιωτική χρήση. Σε μεγάλη κλίμακα, με πολυάριθμους συλλέκτες και πολλές φορές σε συνδυασμένα συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, συναντώνται τα μεγάλα ηλιακά πάρκα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στα

συνδυασμένα συστήματα προστίθεται μία επιπλέον πηγή ενέργειας με συμβατικά ή μη συμβατικά καύσιμα για την συμπαραγωγή ενέργειας, καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας ή μόνο στις περιόδους μεγάλης ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος από το δίκτυο. Το 1982 στην Καλιφόρνια εγκαινιάζεται το Solar One, ο μεγαλύτερος ηλιοθερμικός παραγωγικός σταθμός με συγκεντρωτικούς συλλέκτες, όπου η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρωνόταν σε έναν ηλιακό πύργο. Άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα μεγάλα πάρκα είναι αυτές των φακών Fresnel και των κοίλων παραβολικών συλλεκτών, όπως αναλύεται παρακάτω. Πολλές ιδιωτικές εταιρίες αλλά και χώρες ακολούθησαν και εξέλιξαν την τεχνολογία του Solar One μέχρι σήμερα με τα παρακάτω πάρκα να ξεχωρίζουν λόγω μεγέθους:

- “ Ivanpah Solar Electric Generating Systems ”

Τοποθεσία: California Mojave Desert.

Ημερομηνία Λειτουργίας: Φεβρουάριος 2013

Το πάρκο αποτελείται από 173500 ηλιοστάτες με 2 καθρέφτες τύπου “BrightSource Energy’s Luz Power Tower 550” που στέλνουν την ακτινοβολία σε 3 ηλιακούς πύργους παράγοντας ισχύ 392MW. Οι κινητήρες λειτουργούν με ατμό που θερμαίνεται και οδηγείται σε στρόβιλο Siemens SST-900 μονής αναθέρμανσης.

- “Solar Energy Generating Systems (SEGS)”

Τοποθεσία: California Mojave Desert.

Ημερομηνία Λειτουργίας: 2014

Η εγκατάσταση βρίσκεται σε τρεις διαφορετικές περιοχές και αποτελείται από 9 διαφορετικά πάρκα. Τα 936384 κοίλα παραβολικά κάτοπτρα τύπου μισού σωλήνα οδηγούν τον ατμό σε κινητήρα όπου γίνεται συμπαραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με την βοήθεια φυσικού αερίου παράγοντας ισχύ 354MW

- “Mojave Solar Project”

Τοποθεσία: California Mojave Desert

Ημερομηνία Λειτουργίας: Δεκέμβριος 2014

Το πάρκο είναι μέρος των Harper Lake και SEGS VIII-IX. Λειτουργεί αποκλειστικά με ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας 1128 σειρές ηλιακών συλλεκτών τύπου “Luz’s LS-3” για να θερμαίνουν ρευστό μεταφοράς που οδηγείται σε κύκλο Rankine και παράγει 280MW.

- “Solana Generating Station”

Τοποθεσία: Gila Bend, Arizona

Ημερομηνία Λειτουργίας: 2013

Η ισπανική εταιρία “Abengoa” εγκατέστησε σε αυτό το πάρκο συγκεντρωτικούς παραβολικούς κοίλους συλλέκτες δικής της τεχνολογίας με εργαζόμενο μέσο τηγμένο άλας. Το πάρκο μέχρι σήμερα έχει δυναμικότητα 280MW.

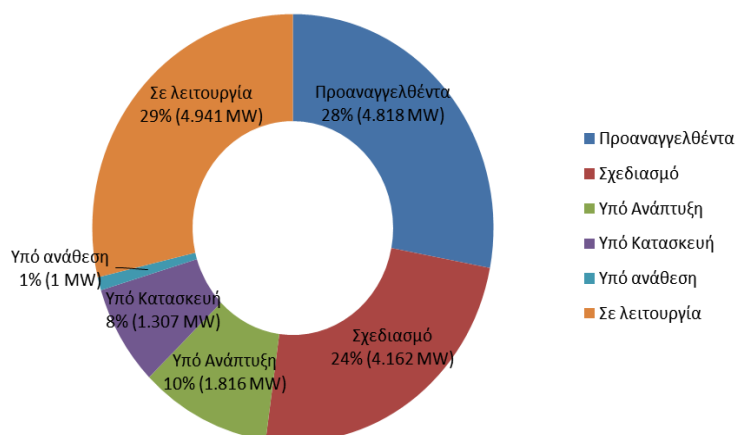
Άλλα πάρκα σημαντικής ισχύος μέχρι σήμερα παρατίθενται στον πίνακα 2.1.:

Πίνακας 2.1: Ηλιοθερμικά πάρκα

| Ηλιοθερμικό Πάρκο            | Τοποθεσία Εγκατάστασης         | Ισχύς | Έτος Λειτουργίας |
|------------------------------|--------------------------------|-------|------------------|
| Genesis Solar Energy Project | Mojave Desert, Colorado Desert | 250MW | 2013             |
| Solaben Solar Power Station  | Logrosán, Spain                | 200MW | 2012             |
| Noor 1                       | Ouarzazate, Morocco            | 160MW | 2015             |

Όπως αναγράφεται και στο παρακάτω διάγραμμα τα πάρκα συγκεντρωτικών συλλεκτών που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία παράγουν ισχύ ίση με 4,941 MW κατατάσσοντας αυτήν την τεχνολογία σε μία από τις πλέον αναπτυσσόμενες. Για αυτόν τον λόγο και η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην τεχνολογία των συγκεντρωτικών συλλεκτών και πιο ειδικά στους κοίλους παραβολικούς συγκεντρωτικούς συλλέκτες ( Parabolic Trough Collector, PTC).

### Συγκεντρωτικά συστήματα παραγωγής σε παγκόσμια κλίμακα για το 2016



Διάγραμμα 2.1.: Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα παγκοσμίως [πηγή: CSPtoday [5] ]

Τέλος, έχει ήδη ανακοινωθεί η μελλοντική εγκατάσταση πολλών ηλιακών πάρκων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς όλο και περισσότερες εταιρίες αλλά και χώρες εισέρχονται σε αυτόν τον επιχειρηματικό κλάδο. Αιτία είναι όχι μόνο η ραγδαία εξέλιξη στον τεχνολογικό τομέα, αλλά και η επείγουσα ανάγκη για στροφή προς τις Α.Π.Ε. Μερικές από τις μελλοντικές εγκαταστάσεις παρατίθενται στον πίνακα 2.2, με αξιοσημείωτη την είσοδο της Κίνας, μία από τις πλέον ρυπογόνες παραγωγικές χώρες στον κόσμο, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας.

*Πίνακας 2.2.: Μελλοντικές εγκαταστάσεις*

| <b>Ηλιοθερμικό Πάρκο</b>                        | <b>Τοποθεσία Εγκατάστασης</b> | <b>Ισχύς</b> |
|---|-------------------------------|--------------|
| Noor 2  | Ouarzazate, Morocco           | 200MW        |
| Ashalim power station 1                         | Israel                        | 121 MW       |
| Cerro Dominador Solar Thermal Plant (Atacama-1) | Chile                         | 110MW        |
| Redstone Solar Thermal Power                    | South Africa                  | 100MW        |



## 2.2. Ηλιακή ακτινοβολία

Ο Ήλιος είναι το μοναδικό σώμα του διαστήματος που επηρεάζει φανερά τη ζωή μας, καθώς χωρίς αυτόν δεν θα υπήρχε η Ζωή. Παρέχει σχεδόν όλη την ενέργεια που χρησιμοποιείται στην Γη, από την φωτοσύνθεση μικρών πολυκύτταρων οργανισμών έως την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και την μετακίνηση ογκώδους μηχανημάτων.

Ο Ήλιος είναι ένας αστέρας νάνος και αποτελείται από 73,5% υδρογόνο, 24,8% ήλιο και 1,7% από οξυγόνο, άνθρακα, σίδηρο, νέον, άζωτο, πυρίτιο, μαγνήσιο και θείο. Χαρακτηρίζεται συχνά ως ένας τεράστιος αντιδραστήρας σύντηξης ελαφρών πυρήνων σε βαρύτερους, με πιο σημαντική την σύντηξη του υδρογόνου σε ήλιο. Κατά την διάρκειά της εκτοξεύονται τεράστια ποσά ενέργειας, τα οποία φτάνουν στην γήινη ατμόσφαιρα με την μορφή φωτονίων και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ενέργεια ενός φωτονίου έχει υπολογιστεί ως  $E = h \cdot \nu$ , όπου  $h=6,6256 \cdot 10^{-34}$  Js η σταθερά του Planck και  $\nu$  η συχνότητα. Ωστόσο, μόνο ένα ποσοστό 98% της ηλιακής ακτινοβολίας είναι κατάλληλο για μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε άλλη χρήσιμη μορφή και αυτό το ποσοστό βρίσκεται μεταξύ του πεδίου των 250-300 nm

Οι διαστάσεις του Ήλιου είναι αρκετά δύσκολο να υπολογιστούν με ακρίβεια λόγω της ιδιαίτερης μορφολογίας του και για αυτό έχουν καθιερωθεί παγκόσμια ορισμένες σταθερές τιμές, όπως η διάμετρος  $1,39 \cdot 10^9$  m και η μάζα του  $2 \cdot 10^{30}$  kg. Επιπλέον, θεωρείται ότι είναι μέλαν σώμα και τότε η θερμοκρασία του θεωρείται ίση με 5777 K. Επιπρόσθετα μεγέθη που είναι χρήσιμα για τους υπολογισμούς της ηλιακής ενέργειας αναλύονται παρακάτω:

Ηλιακή σταθερά ( $G_{sc}$ ): η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που δέχεται 1 cm<sup>2</sup> επιφάνειας που βρίσκεται κάθετα στην διεύθυνση της ακτινοβολίας, σε μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο επί 1 min και ισούται με 1367 W/m<sup>2</sup>. Καθώς αυτή η απόσταση μεταβάλλεται, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος [1]:

$$G_{on} = \left( \begin{array}{c} G_{sc} (1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}) \\ G_{sc} (1.000110 + 0.034221 \cos B + 0.001280 \sin B + 0.000719 \cos 2B + 0.000077 \sin 2B) \end{array} \right) \quad (2.1)$$

Όπου  $G_{on}$  είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε επίπεδη πλάκα που βρίσκεται έξω από την γήινη ατμόσφαιρα στην n-ισοστή ημέρα του χρόνου και B συντελεστής που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:



$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.2)$$

Ένταση της ολικής ακτινοβολίας που περνάει μέσα από ένα επίπεδο σώμα με επιφάνεια  $\Delta A$  στην επιφάνεια της Γης και παραμένει για διάρκεια  $\Delta \omega$  είναι ίση με [1]:

$$I = \lim_{\substack{\Delta A \rightarrow 0 \\ \Delta \omega \rightarrow 0}} \frac{\Delta E}{\Delta A \Delta \omega} \quad (2.3)$$

Επειδή όμως η γήινη ατμόσφαιρα περιέχει υδρατμούς κι άλλα σωματίδια, τα φωτόνια σκεδάζονται και η ηλιακή ακτινοβολία αποσυντίθεται μερικώς σε 3 μέρη: την άμεση, την διάχυτη και την ανακλώμενη:

$$I_t = I_b + I_d + I_r \quad (2.4)$$

Χρήσιμο μέγεθος στις μετρήσεις είναι η *Ηλιακή ώρα*: η ώρα που προκύπτει από την παρατήρηση της κίνησης του ήλιου στον ουράνιο θόλο κατά  $1^\circ / 4 \text{ min}$  [2].

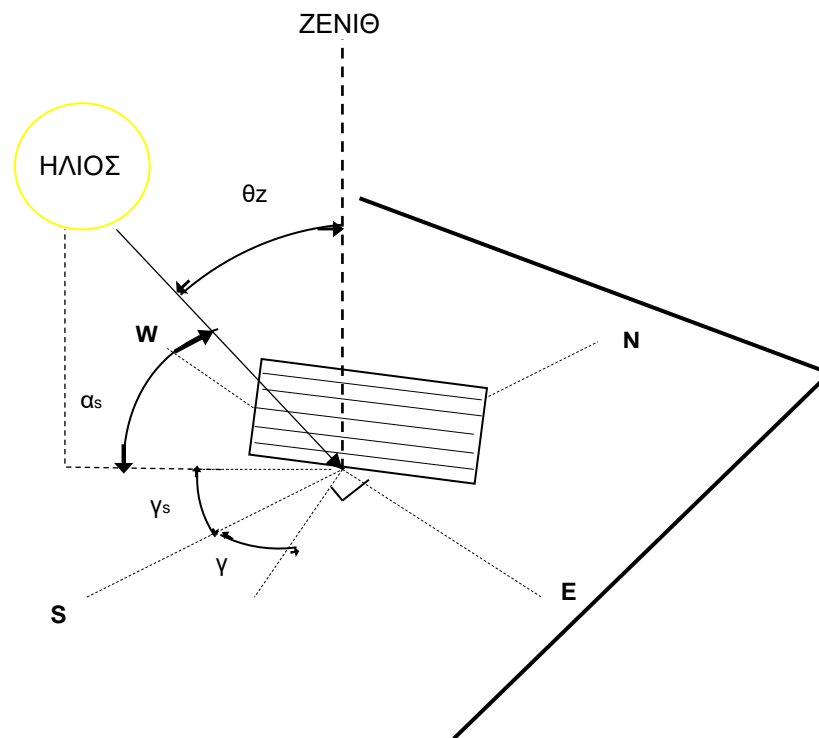
$$\text{Αληθής Ηλιακός Χρόνος} - \text{Τοπικός Ωρολογιακός Χρόνος} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.5)$$

Όπου  $L_{st}$  είναι ο μεσημβρινός υπό μελέτη ( $30^\circ$  για την περιοχή εντός Ελλάδος),  $L_{loc}$  ο τοπικός μεσημβρινός και η ποσότητα  $E$  από τον τύπο:

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868\cos B - 0,032077\sin B - 0,014615\cos 2B - 0,04089\sin 2B) \quad (2.6)$$

Όπου το  $B$  ως υπολογίστηκε από την εξίσωση 2.2

Ενώ, σε αυτό το σημείο, είναι χρήσιμο να οριστούν οι παρακάτω γωνίες μεταξύ των ηλιακών ακτινών, του επιπέδου αναφοράς και της επιφάνειας, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.3 [1].



Εικόνα 2.3: Ηλιακές γωνίες

$\gamma_{sur}$  αζιμούθιο επιφάνειας: γωνία μεταξύ της προβολής της καθέτου στην εξεταζόμενη επιφάνεια στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης. ( $-180^\circ < \gamma < 180^\circ$ )

$\gamma_s$  αζιμούθιο ήλιου: γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

$\varphi$  γεωγραφικό πλάτος: γωνία θέσης της εξεταζόμενης περιοχής βόρεια ή νότια του ισημερινού. ( $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$ )

$\beta$  κλίση επιπέδου: γωνία μεταξύ της εξεταζόμενης επίπεδης επιφάνειας και του οριζόντιου επιπέδου. ( $0^\circ < \beta < 180^\circ$ )

$\delta$  ηλιακή απόκλιση: γωνία μεταξύ της θέσης του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι της η-ιοστής ημέρας του έτους και του επιπέδου του ισημερινού [3]. ( $-23,45 < \delta < 23,45$ )

$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360 * (284 + n)}{365}\right) \quad (2.7)$$

**ω** ωριαία γωνία: γωνία μετατόπισης του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονά της ανά 15°/h

**θ<sub>z</sub>** γωνία ζενίθ: γωνία μεταξύ της κατακόρυφου και της ευθείας του ήλιου. Για οριζόντιες επιφάνειες θα είναι

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (2.8)$$

**α<sub>s</sub>** ηλιακό ύψος: γωνία μεταξύ του ήλιου και την προβολή του στο οριζόντιο επίπεδο. (90° - θ<sub>z</sub>)

**θ** γωνία πρόσπτωσης: γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών και της κάθετης επιφάνειας.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.9)$$

ή

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.10)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω γωνίες, η ηλιακή σταθερά εκτιμάται και από τον τύπο [1]:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \cos \theta_z \quad (2.11)$$

Και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας θα είναι [1]:

$$I_o = I_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right] \cos \theta_z \quad (2.12)$$

## 2.3.Συστήματα Αξιοποίησης Θερμικής Ηλιακής Ενέργειας

Για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας σήμερα υπάρχουν δύο κύριες τεχνολογίες όπως αναφέρθηκε παραπάνω: τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι θερμικοί συλλέκτες. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στο δεύτερο και δίνει έμφαση στην ανάλυση των βασικών ορισμών που τα διέπουν.

Μετά την συγκομιδή της ηλιακής ακτινοβολίας τα θερμικά συστήματα την μετατρέπουν σε θερμότητα, με ή χωρίς αποθήκευση. Πρακτικά, η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες από τους ανθρώπους για την θέρμανση χώρων, ωστόσο τα σύγχρονα επιτεύγματα δίνουν την δυνατότητα καλύτερης αποθήκευσης, αλλά και περαιτέρω εκμετάλλευσής της, που φτάνει ακόμα και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλο ποσοστό απόδοσης. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν ηλιακοί συλλέκτες χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται.

Το συνηθέστερο θερμικό ηλιακό σύστημα, που χρησιμοποιείται στις οικίες, είναι η άμεση αξιοποίηση των ηλιακών ακτινών με τον κατάλληλο προσανατολισμό των δωματίων και των ανοιγμάτων τους, σε συνδυασμό με κατάλληλα υλικά κατασκευής που απορροφούν και συγκρατούν μεγαλύτερα ποσά ακτινοβολίας και για μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως οι πέτρινοι τοίχοι των κτηρίων. Επιπροσθέτως, έχουν γίνει γνωστοί οι ηλιακοί τοίχοι, ηλιακοί χώροι (θερμοκήπια) και τα ηλιακά αίθρια στο εσωτερικό των κτηρίων, που ταυτόχρονα προσδίδουν και μια καλαισθητή πινελιά στο κτήριο.

Το πιο ενδιαφέρον από όλα τα συστήματα, ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί ο θερμικός συλλέκτης με στόχο την θέρμανση κάποιου ρευστού. Στην αγορά, σήμερα, υπάρχουν πολυάριθμες γεωμετρίες με διαφορετικά υλικά κατασκευής για κάθε χρήση και είναι εύκολα διαθέσιμοι τόσο σε οικιακό όσο και σε βιομηχανικό. Χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την επιφάνεια και την μορφολογία τους και η πιο συνηθισμένη ταξινόμηση είναι:

- Συγκεντρωτικοί
  - Παραβολικά
  - Fresnel
  - Πύργοι ισχύος με ηλιοστάτες
- Μη Συγκεντρωτικοί
  - Επίπεδοι
    - Με αέρα
    - Με υγρό
  - Σωλήνες κενού

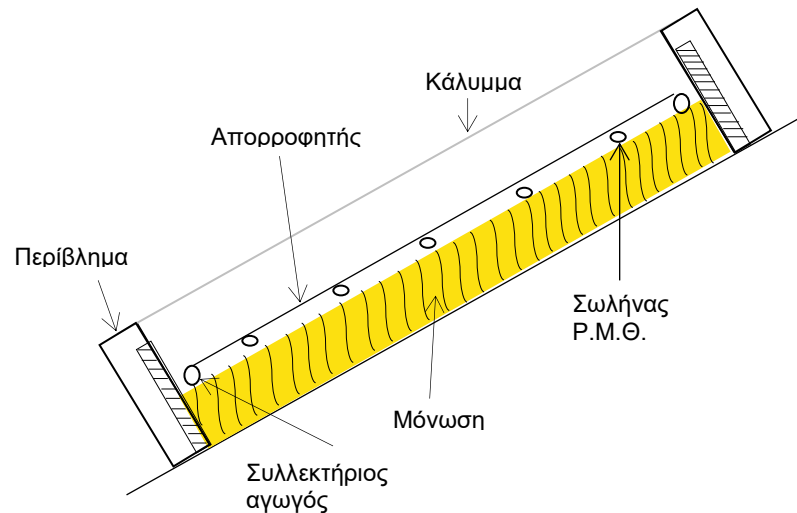
Ανάλογα με την μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει το ρευστό του συλλέκτη ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες, τους συλλέκτες χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας. Ανάλογα με το θερμοκρασιακό εύρος τα ηλιοθερμικά συστήματα έχουν ποικίλες χρήσεις μερικές εκ των οποίων παρατίθενται παρακάτω:

- Παραγωγή ζεστού νερού χρήσης σε κτήρια και βιομηχανίες
- Κλιματισμός χώρων
- Θέρμανση νερού σε κολυμβητικές πισίνες
- Θέρμανση εδάφους
- Αφαλάτωση νερού
- Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος
- Ηλιακή αφύγρανση

Η χρήση των ηλιακών συλλεκτών για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική και αποτελεί μία από τις πιο καθαρές μορφές παραγωγής ρεύματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πάρκο “Ivanpah Solar Electric Generating Systems” στο California, Mojave Desert με ισχύ 392MW, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 2.1. Για την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος οι συλλέκτες συνδέονται με στρόβιλο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η μετατροπή της θερμικής ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ενέργεια στην άτρακτο και στην συνέχεια σε ηλεκτρική.

### 2.3.1.Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης

Η πιο γνωστή τεχνολογία σήμερα είναι αυτή των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών με εργαζόμενο μέσο νερό και παράλληλων σωλήνων. Έγιναν γνωστοί κυρίως με την εμπορευματοποίηση των ηλιακών θερμοσίφωνών συστημάτων για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης κατά την δεκαετία του '60. Η γεωμετρία τους παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 2.4: Τομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

- Περίβλημα συλλέκτη: συνήθως από γυαλί ή διάφανο πλαστικό και μεταλλικό πλαίσιο στην πίσω πλευρά
- Μόνωση: από ελαστικά υλικά για στεγανοποίηση και θερμομόνωση
- Δίκτυο σωληνώσεων όπου κυκλοφορεί το εργαζόμενο μέσο
- Απορροφητική επιφάνεια: από χαλκό ή αλουμίνιο. Συνήθως ενσωματωμένη στους σωλήνες
- Διαφανές κάλυμμα: στην εκτεθειμένη πλευρά. Επιτρέπει την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας και αποτρέπει την έξοδο της παραγόμενης υπέρυθρης

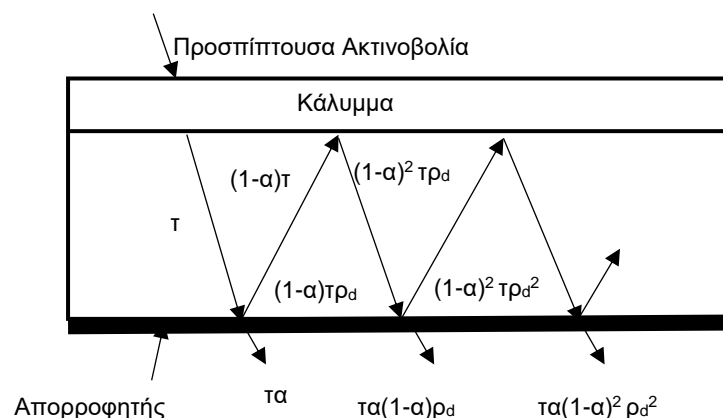
Η λειτουργία των επίπεδων συλλεκτών είναι σχετικά απλή και βασίζεται εξ' ολοκλήρου στην μεταφορά θερμότητας. Η ηλιακή ακτινοβολία συναντά το διαφανές κάλυμμα και προσπίπτει στην απορροφητική επιφάνεια και έπειτα στους σωλήνες. Μέσα στους σωλήνες κυκλοφορεί υγρό μεταφοράς θερμότητας, στο οποίο μεταφέρεται η ηλιακή ενέργεια με την μορφή

θερμικής. Θα πρέπει οι σωλήνες να έχουν πολύ καλή επαφή με το στρώμα απορρόφησης για βέλτιστη μετάδοση θερμότητας στο υγρό μεταφοράς. Στη συνέχεια, αυτό οδηγείται προς δεξαμενή αποθήκευσης ή προς εναλλάκτη θερμότητας, όπου μεταφέρεται η ενέργειά του σε άλλο εργαζόμενο μέσο για την περαιτέρω εκμετάλλευσή του. Το ρευστό μπορεί να είναι νερό, υγρό άλας ή έλαιο. Για καλύτερη απόδοση οι επίπεδοι συλλέκτες τοποθετούνται με νότια κατεύθυνση, προς τον Ισημερινό ώστε να αυξάνονται οι ώρες ηλιοφάνειας.

Η ενεργειακή ανάλυση του συλλέκτη βασίζεται στην εκτίμηση των εισερχόμενων και εξερχόμενων ενεργειακών ροών.

Η ακτινοβολία  $I_T$  που προσπίπτει πάνω στο κάλυμμα του συλλέκτη ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μονοπάτι μερικής απορρόφησης και ανάκλασης. [1] Το μονοπάτι, αυτό, εξαρτάται απόλυτα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά του τζαμιού και της απορροφητικής επιφάνειας, όπως διακρίνεται στην εικόνα 2.5. Οι οπτικές απώλειες σχετίζονται με τέσσερις παραμέτρους, οι οποίες είναι:

- Διαπερατότητα  $\tau$  (transmissivity): η ακτινοβολία που περνά μέσα από το γυάλινο κάλυμμα προς τη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- Απορροφητικότητα  $\alpha$  (absorptivity): το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από την επιφάνεια προς τη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- Ανακλαστικότητα  $\rho$  (reflectivity): το ποσό της ακτινοβολίας που επιστρέφει από την επιφάνεια προς τη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- Στιγμαίος παράγοντας ανάσχεσης  $\gamma$  (intercept factor), ο οποίος περιλαμβάνει τις απώλειες που προκαλούνται στην απορροφούμενη ακτινοβολία. Αυτές συμβαίνουν λόγω των μικρο-σωματιδίων της ατμόσφαιρας μεταξύ της απόστασης από την ανακλαστική επιφάνεια έως τον δέκτη, λόγω της μηχανικής παραμόρφωσης του συλλέκτη αλλά και του συστήματος στήριξης.



Εικόνα 2.5: Ανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κάλυμμα επίπεδου συλλέκτη

Πολλαπλασιασμός των τεσσάρων αυτών παραμέτρων ( ανακλαστικότητα, ανάσχεση, διαπερατότητα και απορροφητικότητα) δίνει την μέγιστη οπτική απόδοση για μηδενική γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια [1]

$$\eta_{opt,0^\circ} = \rho * \gamma * \tau * \alpha \quad (2.13)$$

Από την προσπίπτουσα ακτινοβολία  $I_T$  στον συλλέκτη ένα ποσοστό  $(\tau\alpha)$  απορροφάται και ένα ποσοστό  $(1-\alpha)\tau\alpha$  ανακλάται πίσω προς το κάλυμμα, ώσπου τελικά προκύπτει η παρακάτω τιμή :

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha)\rho_d} \quad (2.14)$$

Τότε ορίζεται η απορροφημένη ηλιακή ακτινοβολία ως:

$$S = (\tau\alpha)_{ave} I_T \quad (2.15)$$

Οι Beckmann & Duffie [1] μελέτησαν αναλυτικά τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και υποστηρίζουν ότι υπό σταθερές συνθήκες η θερμότητα που παράγεται από έναν επίπεδο συλλέκτη επιφάνειας  $A_c$  με θερμοκρασία απορροφητή  $T_{pm}$  βρισκόμενος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_a$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (2.16)$$

Ενώ ορίζεται ο συντελεστή απωλειών που εκφράζει το σύνολο των απωλειών από πάνω ( $U_t$ ), από πίσω ( $U_b$ ) και από το πλάι ( $U_e$ ).

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.17)$$



Τότε, η απόδοση του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη θεωρείται ίση με την ωφέλιμη ενέργεια σε κάποιο χρόνο προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στον ίδιο χρόνο:

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (2.18)$$

Ωστόσο, ο συντελεστής απωλειών  $U_L$  εξαρτάται απόλυτα από τα υλικά και την θερμοκρασία. Λαμβάνοντας αυτό το γεγονός υπόψιν, τότε η απόδοση ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη ορίζεται ως μία δευτεροβάθμια εξίσωση με την εξής μορφή:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - \alpha \frac{(T_i - T_a)}{G_T} - b \left[ \frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right]^2 \quad (2.19)$$

όπου α, b σταθερές για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου και συγκεκριμένη παροχή.

Ακόμη ορίζεται  $F_R$  ο συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη επιφάνειας  $A_c$  με ροή ρευστού  $\dot{m}$  σε θερμοκρασία εισόδου  $T_{fi}$  και θερμοκρασία εξόδου  $T_{fo}$ :

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c [S - U_L (T_{fi} - T_a)]} \quad (2.20)$$

ο οποίος εκφράζει την πραγματική ωφέλιμη ενέργεια που προκύπτει προς ωφέλιμη ενέργεια που θα πρόκυπτε αν όλος ο συλλέκτης βρισκόταν σε θερμοκρασία εισόδου του ρευστού. Στην τελευταία περίπτωση προκύπτει η μέγιστη απόδοση του συλλέκτη ίση με την οπτική του απόδοση, όπως προκύπτει και από τον τύπο (2.19) μηδενίζοντας τους όρους  $(T_i - T_a)$

Για την απόδοση των επίπεδων συλλεκτών σημαντικό ρόλο έχουν η γωνία τοποθέτησης, το ρευστό απολαβής θερμότητας, το υλικό της απορροφητικής επιφάνειας αλλά και το σύνολο των υλικών της κατασκευής. Οι συλλέκτες αυτοί, χρησιμοποιούν την άμεση και τη

διάχυτη ακτινοβολία και συνήθως τοποθετούνται με σταθερή κλίση, ώστε να «κοιτούν» τον ισημερινό. Η κλίση τους επηρεάζει την απόδοσή τους, καθώς κατά την διάρκεια λειτουργίας τους αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και συνεπώς η πυκνότητά της. Επιπλέον, ως ρευστό απολαβής επιλέγεται κάποιο με υψηλή θερμοχωρητικότητα, με πιο διαδεδομένη την χρήση του νερού.

Για την απορροφητική επιφάνεια του συλλέκτη συνήθως επιλογή είναι υλικά μαύρου χρώματος με σκοπό την προσομοίωση της λειτουργίας ενός μέλανος σώματος. Όμως όταν η χρήση τους προορίζεται για εφαρμογές που αναζητείται και το βέλτιστο αισθητικό αποτέλεσμα, τότε χρησιμοποιούνται «έγχρωμοι» απορροφητικοί δέκτες. Σε πολλές περιπτώσεις η απόδοσή τους είναι μικρότερη από αυτή των μαύρων επιφανειών, ωστόσο είναι ικανή να καλύψει το απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο για τις εγκαταστάσεις που προορίζονται. Τέλος, μελέτη γίνεται και για την βελτιστοποίηση των οπτικών ιδιοτήτων των υλικών τις άνω επιφάνειας, με αύξηση του βαθμού διαπερατότητας του καλύμματος αλλά και μείωση των θερμικών απωλειών της μόνωσης και της επιφάνειας του περιβλήματος.

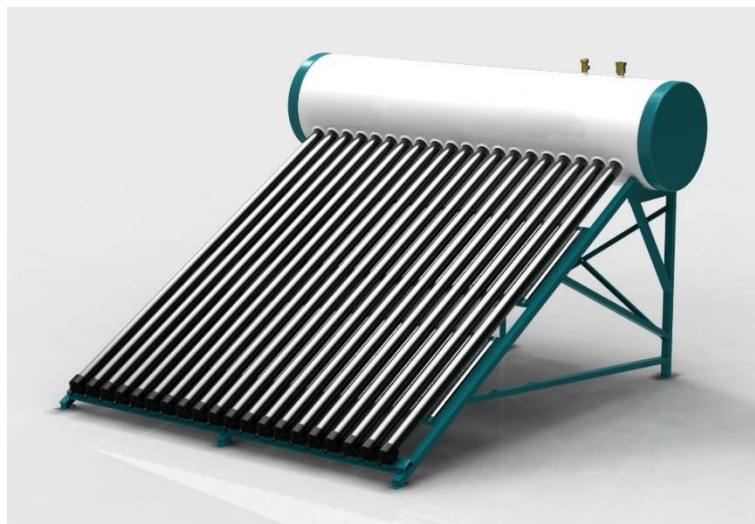
Οι επίπεδοι συλλέκτες αποτελούσαν την κύρια τεχνολογία για αρκετά χρόνια λόγω της απλούστερης κατασκευής τους. Επιπλέον είναι ιδανικοί για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης σε οικίες και μικρές βιομηχανίες λόγω των μικρών θερμοκρασιών που μπορούν να φτάσουν με λιγότερο κόστος, είναι εύκολοι στην εγκατάσταση και συχνά γίνεται εντοιχισμός τους. Ωστόσο έχουν σημαντικές απώλειες και το όριο της μέγιστης θερμοκρασίας δεν επιτρέπει κάποια άλλη χρήση τους

### 2.3.2. Ηλιακοί συλλέκτες με σωλήνες κενού

Οι συλλέκτες κενού είναι βιομηχανικής αλλά και οικιακής χρήσης με προηγμένα τεχνολογικά χαρακτηριστικά. Η συλλεκτική επιφάνεια αποτελείται από μία σύνδεση σωλήνων ειδικής κατασκευής και γεωμετρίας, ανάλογα με το είδος του συλλέκτη. Ανάλογα τις ενεργειακές απαιτήσεις επιλέγεται ο αριθμός και το είδος των σωλήνων. Στην αγορά υπάρχει η εξής ταξινόμηση:

- Άμεσης ροής
  - ✓ Ομόκεντροι σωλήνες
  - ✓ Χωριστοί σωλήνες
  - ✓ Τύπου Σύδνεϋ
- Θερμοσωλήνες

Οι συλλέκτες κενού χρησιμοποιούνται, κυρίως, για τις μεγάλες αποδόσεις στις υψηλές θερμοκρασίες που μπορούν να επιτύχουν σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες και τις μικρότερες απώλειες λόγω του κενού αέρος. Παρ' όλα αυτά, το κόστος της επένδυσης είναι αρκετά υψηλό λόγω των ακριβών υλικών των σωληνώσεων και για αυτό τον λόγο δεν προτείνεται η επένδυση σε αυτήν την τεχνολογία, παρά μόνο σε περιπτώσεις λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος, η γυάλινη κατασκευή τους προκαλεί δυσκολία στην εγκατάσταση, διότι είναι εξαιρετικά εύθραυστη και απαιτεί μεγάλη προσοχή και μετά την εγκατάσταση.



Εικόνα 2.6: Συλλέκτης κενού [πηγή: <https://www.solartubs.com>]

### 2.3.3. Παραβολικοί Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και σε εφαρμογές μεσαίων και υψηλών θερμοκρασιών, καθώς το εργαζόμενο μέσο μπορεί να αγγίξει υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι σε έναν επίπεδο συλλέκτη. Η υψηλότερη συγκέντρωση των ηλιακών ακτινών στον συγκεντρωτικό ανακλαστή οδηγείται απευθείας σε έναν μικρότερο δέκτη με μεγάλη απορροφητική επιφάνεια. Μέσα στον δέκτη κυκλοφορεί το εργαζόμενο μέσο, το οποίο λαμβάνει την θερμότητα και την μεταφέρει. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες συμπεριφέρονται βέλτιστα κατά την υψηλή ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η διάχυτη ακτινοβολία έχει αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοσή τους. Οι κυριότερες διατάξεις συγκεντρωτικών θερμικών ηλιακών συλλεκτών είναι οι εξής:

- Παραβολικά κάτοπτρα
  - Σκάφης
  - CPC (compound parabolic collector)
    - ✓ Συμμετρικό τύπου ICS
    - ✓ Ασύμμετρο τύπου ICS
- Παραβολικά πιάτα
  - Τυπικό παραβολικό
- Fresnel
- Πύργοι ισχύος με ηλιοστάτες

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες απαιτούν την συνεχή παρακολούθηση του ήλιου, ώστε να βρίσκονται σε ορθή λειτουργία. Για τον σκοπό αυτό προσαρτώνται απλά συστήματα ρύθμισης προσανατολισμού, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την ηλιακή γωνία. Επιπλέον έχουν υψηλό εμπορικό κόστος λόγω της τεχνικής τους πολυπλοκότητας και των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Τα παραβολικά πιάτα αποτελούνται από μεταλλικές επιφάνειες σε σχήμα παραβολής ενωμένες σε μορφή δορυφορικού πιάτου. Οι ανακλώμενες ακτίνες οδηγούνται προς το εστιακό σημείο της γεωμετρίας του πιάτου, όπου προσαρμόζεται ο δέκτης. Συνηθισμένη μορφή είναι το σύστημα «Stirling», όπου προσαρμόζεται ένας κινητήρας «Stirling» στο εστιακό σημείο για απευθείας μετατροπή της ενέργειας.

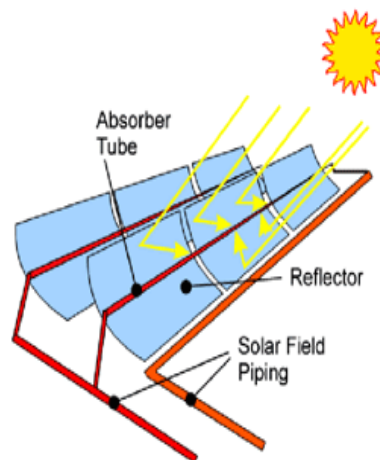
Τέλος, αρκετά γνωστά είναι και τα συστήματα «Fresnel», τα οποία αποτελούνται από κάτοπτρα ή φακούς τύπου «Fresnel». Αυτοί συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε έναν δέκτη σύμφωνα με τις αρχές της γεωμετρίας των φακών «Fresnel» που εφηύρε ο Γάλλος Φυσικός Augustin-Jean Fresnel.

Οι πύργοι ισχύος τοποθετούνται συνήθως σε μεγάλες εκτάσεις με πλήθος ηλιοστατών, προσανατολισμένους ώστε η προσπίπτουσα ακτινοβολία να οδηγείται στον κορυφή του πύργου. Εκεί βρίσκεται δέκτης που παραλαμβάνει την θερμότητα του ήλιου και την μεταφέρει σε κάποιο ρευστό μέσο.

Το πιο διαδεδομένο είδος των συγκεντρωτικών θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι τα παραβολικά κοίλα κάτοπτρα (Parabolic Trough Collectors, PTC). Αυτά αποτελούνται από μία ή περισσότερες σειρές κοίλων κάτοπτρων, φτιαγμένα από μεταλλικά, συνήθως, φύλλα που έχουν κατεργαστεί κατάλληλα, ώστε να ενώνονται στο σχήμα της παραβολής. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει σε αυτά ανακλάται σε σωληνοειδή δέκτη. Ο δέκτης βρίσκεται στην εστιακή γραμμή της παραβολής και μέσα από αυτόν κυκλοφορεί το ρευστό μεταφοράς θερμότητας.

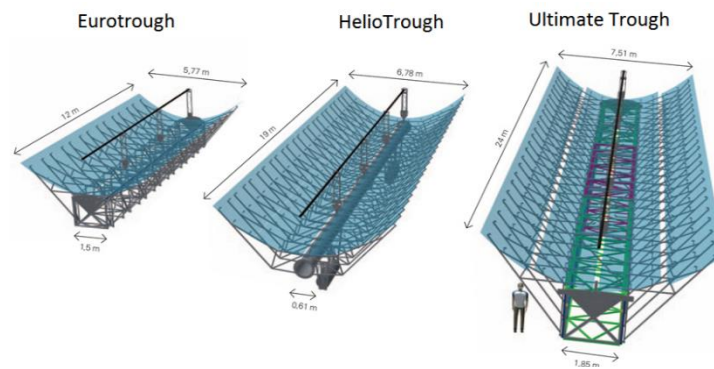
Οι διαθέσιμοι εμπορικοί παραβολικοί συλλέκτες σήμερα που χρησιμοποιούνται κυρίως στις διατάξεις των μεγάλων ηλεκτροπαραγωγικών πάρκων είναι οι παρακάτω:

- Τύπου Luz: Συλλέκτες από γαλβανισμένο ασάλι. Χρησιμοποιούνται σε πολλά από τα πάρκα SEGS, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2.1.



Εικόνα 2.7:: Συλλέκτες τύπου LUZ, ( πηγή:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic\\_trough](https://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_trough))

- EuroTrough: βελτιστοποιήθηκαν οι αρχές των συλλεκτών Luz χρησιμοποιώντας πιο ελαφρύ σκελετό προκειμένου να γίνει οικονομικότερη και μαζικότερη η παραγωγή τους



Εικόνα 2.8: Συλλέκτες τύπου EuroTrough, (πηγή: [22] )

- Solargenix: κατασκευασμένοι από αλουμίνιο με σκοπό την ελάφρυνση της κατασκευής και την εύκολη τοποθέτηση και συναρμολόγηση

Οι παραβολικοί συλλέκτες και η υπεροχή τους έναντι των επίπεδων έχει αναλυθεί ευρέως καθώς επίσης και ο βέλτιστος σχεδιασμός τους για καλύτερη απόδοση [4] Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σήμερα το 90% περίπου των ηλιακών πάρκων παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούν την τεχνολογία των παραβολικών κοίλων συγκεντρωτικών συλλεκτών, όπως αναφέρεται στο συνέδριο CSP TODAY [5].

## Κεφάλαιο 3: Μελέτη κοίλων παραβολικών ηλιακών συλλεκτών

Οι κοίλοι παραβολικοί συλλέκτες (PTC) είναι μέχρι σήμερα η κύρια τεχνολογία στα πάρκα παραγωγής ισχύος μεγάλης κλίμακας. Το σημαντικό πλεονέκτημά τους είναι οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται στο ρευστό απολαβής, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ακτινοβολίας που προκαλείται. Ωστόσο, πλήθος συστημάτων που αποτελούνται από έναν μόνο συλλέκτη χρησιμοποιούνται για ιδιωτική χρήση αλλά και για εργαστηριακές μελέτες, όπως και ο υπό μελέτη PTC που περιγράφεται στα παρακάτω κεφάλαια.

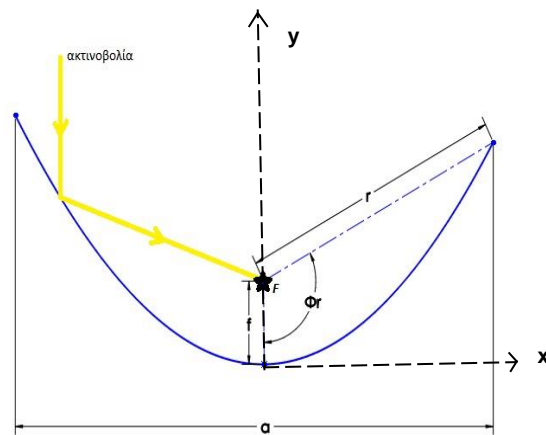
Για την εκμετάλλευση της ενέργειας που δεσμεύουν οι ηλιακοί συλλέκτες απαιτούνται διάφορες μηχανολογικές διατάξεις που βοηθούν στην διανομή και μεταφορά της ηλιακής ενέργειας. Η επιφάνεια συλλογής αποτελείται από παραβολικά μεταλλικά φύλλα, η γεωμετρία των οποίων καθορίζει το ποσό ανάκλασης της ακτινοβολίας προς τον δέκτη. Ο δέκτης δέχεται πολλαπλασιασμένη την ηλιακή ακτινοβολία και μέσω μιας απορροφητικής επιφάνειας μεταφέρει την ενέργεια στο ρευστό που οδηγείται μέσα από αυτόν.

### 3.1.Γεωμετρικά στοιχεία παραβολικών συλλεκτών

Κρίσιμη παράμετρος στη συγκεκριμένη τεχνολογία συλλεκτών είναι η παραβολική γεωμετρία του συλλέκτη. Υπάρχουν αρκετές μελέτες πάνω στις γεωμετρίες ανακλαστών και παραβολών, ώστε να βελτιστοποιηθεί η οπτική απόδοση του συλλέκτη. Οι Tsung-You et al. [6] χρησιμοποίησαν το υπολογιστικό πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης “SolidWorks” για την προσομοίωση διάφορων ειδών παραβολικής γεωμετρίας ως συνάρτηση της εστιακής απόστασης, ενώ οι Tzivanidis et al. [7] ανέλυσαν την απόδοση συγκεκριμένων συλλεκτών σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας μέσω “SolidWorks”.

Όσον αφορά την βασική γεωμετρία της παραβολής, μπορεί να χαρακτηριστεί από την εξίσωση ( 3.1 ) σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ορίζοντας τους άξονες όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1. με εστιακή απόσταση  $f$  και εστιακό σημείο  $F(f, 0)$ .

$$y^2 = 4fx \quad (3.1)$$



Εικόνα 3.1: Γραφική απεικόνιση παραβολικής γεωμετρίας σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

Η παραβολή σε κάθε σημείο της με γωνία  $0 < \varphi < \varphi_r$  έχει ακτίνα

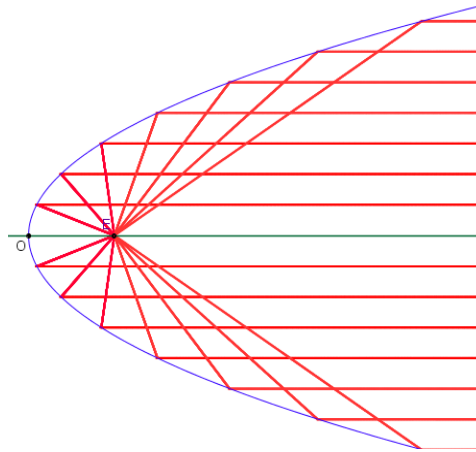
$$r = \frac{2f}{1 + \cos\varphi}$$

( 3.2 )

όπου  $a$  το πλάτος του συλλέκτη

Η γεωμετρία της παραβολής χρησιμοποιείται στους ηλιακούς συλλέκτες, όπως και στους φακούς εστίασης και φωτογραφίας, στα τηλεσκόπια και τα ραντάρ, λόγω των ιδιαίτερων γεωμετρικών της ιδιοτήτων. Αν μια ανακλαστική επιφάνεια προσαρμοστεί σε παραβολικό σχήμα τότε οι προσπίπτουσες ακτίνες φωτός που είναι παράλληλες προς τον άξονα του παραβολικού κάτοπτρου ανακλώνται συγκεντρωμένες στην εστία του. Όσο πιο επίπεδη είναι η παραβολή τόσο πιο μακριά είναι η εστία της, ενώ όσο κι αν περιστρέφει η παραβολή η εστία της παραμένει στο ίδιο σημείο. Η ιδιότητα αυτή της παραβολικής γεωμετρίας είναι ο λόγος που χρησιμοποιούνται οι παραβολικοί συλλέκτες, καθώς στο σημείο της εστίας τοποθετείται ένας δέκτης πάνω στον οποίο προσπίπτουν συγκεντρωμένες οι ηλιακές ακτίνες που ανακλώνται από την παραβολική ανακλαστική επιφάνεια. Για την αυτή την λειτουργία επιλέγονται υλικά με υψηλή κατοπτρική ανακλαστικότητα, όπως επαργυρωμένοι καθρέπτες από γυαλί, γυαλισμένο αλουμίνιο και επιμεταλλωμένα ακρυλικά κάτοπτρα.





Εικόνα 3.2 : Ανακλαστική ικανότητα παραβολής

Το στοιχείο που διαφοροποιεί τις υπάρχουσες γεωμετρίες είναι ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης  $C$ , ο οποίος ορίζεται σαν τον λόγο της επιφάνειας του ανοίγματος της παραβολής ( $A_a$ ) ως προς την επιφάνεια απορρόφησης ( $A_{abs}$ ):

$$C = \frac{A_a}{A_{abs}} \quad (3.3)$$

Εκτιμάται ότι η μέγιστη τιμή του λόγου συγκέντρωσης ενός ιδανικού PTC με σύστημα πλήρους προσανατολισμού και σωληνοειδούς δέκτη είναι ίση με  $C_{max} = \frac{1}{\sin(0.27)} = 212$ .

[1]. Ωστόσο λόγω της πληθώρας των απωλειών, που αναλύονται στο κεφάλαιο 4, η τιμή αυτή δεν είναι προσιτή στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

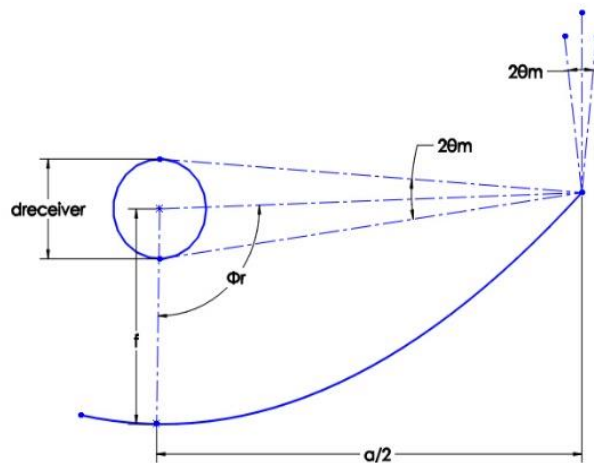
Άλλο σημαντικό στοιχείο υπολογισμού της γεωμετρίας είναι η οριακή γωνία (rim angle)  $\varphi_r$ . Η οριακή γωνία ορίζεται όπως στο σχήμα, από το ακραίο σημείο του ανοίγματος της παραβολής έως την κάθετη προβολή του συλλέκτη ορίζοντας το άνοιγμα του συλλέκτη και καθορίζει άμεσα την γεωμετρία. Υπολογίζεται άμεσα από τον τύπο:

$$\varphi_r = \tan^{-1} \left[ \frac{8 \left( \frac{f}{a} \right)}{16 \left( \frac{f}{a} \right)^2 - 1} \right] = \sin^{-1} \left( \frac{a}{2r_r} \right) \quad (3.4)$$

Έχει υπολογιστεί ότι η απόδοση του συλλέκτη μειώνεται για σημαντική μείωση της επιφάνειάς του, καθώς ανακλάται μικρότερο ποσοστό ακτίνων, αλλά και για σημαντική αύξηση της επιφάνειας, αφού τότε υπάρχουν προβλήματα σκιασμού. Η βέλτιστη οριακή γωνία θεωρείται στις σημερινές κατασκευές η γωνία  $90^\circ$  [4]

### 3.2.Σωλήνας-Δέκτης

Ο δέκτης σε ένα τυπικό συγκεντρωτικό παραβολικό έχει σκοπό να μεταφέρει το ποσό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας υπό την μορφή θερμότητας στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Συνήθως χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι σωλήνες τοποθετημένοι μέσα σε γυάλινο περίβλημα. Ενδιάμεσα επικρατούν συνθήκες κενού, για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες μεταφοράς, ενώ υπάρχει επιλεκτική (απορροφητική και αντι-ανακλαστική) επίστρωση, ώστε να αποφεύγεται η μεταφορά από το θερμότερο απορροφητή προς το ψυχρότερο γυάλινο κάλυμμα. Όταν το ρευστό διασχίζει τον μεταλλικό σωλήνα προκαλείται μικρή διαστολή η οποία απορροφάται από ευλύγιστους μεταλλικούς συνδέσμους που τον συνδέουν με τον γυάλινο σωλήνα για να μην υπάρξει θραύση του τελευταίου.



Εικόνα 3.3: Θέση δέκτη ως προς παραβολική γεωμετρία

Έχει υπολογιστεί [1] ότι οι διαστάσεις του δέκτη εξαρτώνται από το εύρος της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στον συλλέκτη. Με την θεώρηση ότι η βέλτιστη αυτή γωνία είναι ίση με την τιμή  $0,267^\circ$  τότε η ελάχιστη διάμετρος του απορροφητή στον δέκτη θεωρείται ίση με:

$$D = 2r_r \sin 0.267 = \frac{a * \sin(0.267)}{\sin \phi_r}$$

( 3.5 )

Ο εξωτερικός γυάλινος σωλήνας θα πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικός στις εξωτερικές επιδράσεις κυρίως των καιρικών φαινομένων. Ένα μεγάλο μειονέκτημα ωστόσο είναι οι απώλειες που δημιουργούνται στην ακτινοβολία, η οποία θα πρέπει να διαπεράσει το γυαλί για να φθάσει στον απορροφητή.

Τόσο η γεωμετρία όσο και οι φυσικές ιδιότητες των υλικών του δέκτη και του απορροφητή παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ομαλή ροή του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας. Οι Ταο & He [8] παραθέτουν μια σειρά από πίνακες και διαγράμματα, όπου μελετώνται η επίδραση του αριθμού Reynolds, του λόγου των διαμέτρων και η θερμική αγωγιμότητα των τοιχωμάτων του δέκτη.

Επιπλέον μελετήθηκε το υλικό του απορροφητή από τους Akbarimoosavi & Yaghoubi [9], οι οποίοι με την βοήθεια προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία συμπέραναν ότι τα υλικά του απορροφητή με υψηλή θερμική αγωγιμότητα μειώνουν την μέγιστη περιφερειακή θερμοκρασιακή διαφορά αυξάνοντας την θερμική απόδοση.

### 3.3.Εργαζόμενο ρευστό

Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας διασχίζει τον δέκτη και παραλαμβάνει την θερμότητα που συγκεντρώνεται στον απορροφητή λόγω της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, οδηγείται μέσα σε δεξαμενή αποθήκευσης, για μεγάλο ή μικρό χρονικό διάστημα, με την χρήση εναλλάκτη θερμότητας, όπου μεταφέρει την θερμική του ενέργεια σε ένα άλλο εργαζόμενο μέσο και μετά οδηγείται ξανά στις σωληνώσεις του δέκτη.

Συνηθισμένα ρευστά είναι τα θερμικά έλαια (π.χ. Therminol VP-1, D-12) ή έλαια σιλικόνης για υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Ωστόσο, τα έλαια χρειάζονται επιπρόσθετα συστήματα ασφάλειας κατά την εγκατάσταση καθώς υπάρχει αυξημένος κίνδυνος ανάφλεξης σε περίπτωση διαρροής. Στις ίδιες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται και υλικά αλλαγής φάσης –άλατα (υγρό χλωριούχο νάτριο,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KOH}$ ), κυρίως στις περιπτώσεις όπου υπάρχει ανάγκη για μεγάλο χρόνο αποθήκευσης. Αλλά και αυτά τα συστήματα χρειάζονται ενισχυμένα συστήματα ασφαλείας. Σε μικρότερες θερμοκρασίες λειτουργίας επιλέγεται νερό (αφαλατωμένο ή με αντιπηκτικό πρόσθετο -προπυλενογλυκόλη ή αιθυλένιο ή αιθυλική γλυκόζη- ή πεπιοσμένο υγρό) ή αέρας.

Το πιο διαδεδομένο ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι το νερό. Είναι διαθέσιμο εύκολα, σε μεγάλες ποσότητες και με αρκετά μικρό κόστος. Επιπλέον έχει πυκνότητα  $1000 \text{ kg/m}^3$  στους  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ , σημείο τήξης στους  $0^\circ\text{C}$ , σημείο βρασμού στους  $100^\circ\text{C}$  και πολύ μεγάλη θερμοχωρητικότητα, που το καθιστούν ιδιαίτερα εύκολο για χρήση στους συλλέκτες. Για

μερική βελτιστοποίηση κάποιων ιδιοτήτων του γίνεται προσθήκη μικρών ποσοστών αντιπηκτικών. Οι Marif et al. [10] χρησιμοποιώντας μονοδιάστατη ανάλυση της ροής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας έφθασαν στο συμπέρασμα ότι το υγρό νερό συμπεριφέρεται καλύτερα από το συνθετικό έλαιο (TherminolVP-1), που χρησιμοποιείται στα μεγάλα ηλιακά πάρκα σήμερα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Τελευταία εξέλιξη όσον αφορά το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι η χρήση νανορευστών. Αυτά περιέχουν νανοσωματίδια μεταλλικών ή άλλων υλικών που αυξάνουν την θερμοχωρητικότητα του ρευστού και συνεπώς την απόδοση του συλλέκτη.

Αν το ρευστό δεν κατευθύνεται απ' ευθείας στην χρήση, τότε οδηγείται προς μία διάταξη αποθήκευση. Η ενέργεια που αποθηκεύεται μπορεί να είναι με μορφή αισθητής θερμότητας, όταν πρόκειται για υγρό ή στερεό μέσο αποθήκευσης ή με χημική μορφή, εάν αποθηκεύεται σε μπαταρίες. Για την επιλογή του κατάλληλου μέσου λαμβάνεται υπόψιν η θερμοκρασία στην οποία θα γίνει η αποθήκευση, ο διάρκειά της, το κόστος του υλικού καθώς και το απαιτούμενο τελικό φορτίο ενέργειας. Θα πρέπει να έχει υψηλή θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα, παράλληλα με χαμηλό ιξώδες για να αντέχει τις αυξομειώσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας. Κατά την αποθήκευση για μεγάλο χρονικό διάστημα χρησιμοποιούνται υλικά αλλαγής φάσης, τα οποία όμως πέραν του υψηλού κόστους προσθέτουν και μία επιπλέον απώλεια ενέργειας λόγω της μετατροπής φάσης. Οι δεξαμενές αποθήκευσης, εκτός από την πρακτική λειτουργία της αποθήκευσης για χρήση αργότερα, βοηθούν και στην αύξηση του συντελεστή απόδοσης και ισορροπούν τα φορτία παροχής και ζήτησης.

### **3.4.Σύστημα εντοπισμού θέσης**

Ανεπτυγμένες συσκευές και προγράμματα εντοπισμού της θέσης του Ήλιου στον ουράνιο θόλο χρησιμοποιούνται για την μετακίνηση των συλλεκτών ως προς αυτόν. Σήμερα διατίθενται εμπορικά μονάδες ελέγχου με αισθητήρες ήλιου και μονάδες με αστρονομικούς αλγορίθμους. Οι πρώτοι ανιχνεύουν την θέση του ήλιου με φωτοκύτταρα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τα συστήματα εντοπισμού τύπου σκιάς και τύπου γραμμής ροής. Ωστόσο πλέον είναι πιο διαδεδομένο το δεύτερο είδος με την διευκόλυνση των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σε αυτά χρησιμοποιείται λογισμικό, το οποίο προγραμματίζεται, ώστε να αναγνωρίζει την ακριβή θέση του ήλιου σε κάθε χρονική στιγμή με βάση τους παγκόσμιους αστρονομικούς αλγορίθμους και τις εξισώσεις του ήλιου. Έπειτα, δίνει εντολές, ώστε να προσαρμόζεται η θέση του συλλέκτη στη βέλτιστη γωνία ως προς τον ήλιο.

Στους συγκεντρωτικούς παραβολικούς συλλέκτες συνήθως επιλέγεται ο προσανατολισμός Βορρά-Νότου, με έναν άξονα ελευθερίας, ο οποίος επιτρέπει την παρακολούθηση του ήλιου κατά το ύψος του. Σε αυτόν προκύπτουν μικρότερες απώλειες λόγω του φαινομένου του συνημίτονου κατά τις πρωινές ώρες και τα απογεύματα, όταν ο ήλιος βρίσκεται στις ακραίες του θέσεις στον ουράνιο θόλο και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

### 3.5. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν παρατηρηθεί ορισμένες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κυρίως σε ότι αφορά τα μεγάλα ηλιακά πάρκα παραγωγής ενέργειας.

Ένα από τα ζητήματα που τίθεται είναι η δυσανάλογη αισθητική εικόνα στο φυσικό τοπίο σε συνδυασμό με τον θόρυβο, σε περίπτωση συνδυασμένου πάρκου και η μεγάλη έκταση γης που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός ηλιακού πάρκου. Έκταση, η οποία θα μπορούσε υπό άλλες συνθήκες να χρησιμοποιηθεί για την καλλιέργεια τροφής ή ζώων. Ωστόσο το πρόβλημα αυτό λύνεται με εγκαταστάσεις σε απομονωμένες ή απρόσιτες περιοχές με δυσκολία στην εκμετάλλευση για την ανθρώπινη επιβίωση, όπως σε ερήμους. Παράλληλα, η λύση αυτή οδηγεί και στο επόμενο πρόβλημα το οποίο είναι η μεγάλη απαίτηση σε παροχή νερού, το οποίο είναι σχεδόν αδύνατο σε ερημικές περιοχές και περιοχές με λειψυδρία. Σημαντική πρόοδος σε αυτό το κομμάτι έχει γίνει στο Cranfield University στο Ηνωμένο Βασίλειο με μία μεγάλη μελέτη για την μείωση του νερού για το καθάρισμα των συλλεκτών και για την ψύξη των εξαρτημάτων. [11]

Τέλος, προβλήματα έχουν παρατηρηθεί στην εναέρια κυκλοφορία τόσο των αεροπλάνων και ελικοπτέρων όσο και των πτηνών. Η αυξημένη αντανάκλαση μεγάλης πυκνότητας ηλιακών ακτινών μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην εναέρια κυκλοφορία αν αποπροσανατολιστεί από τον δέκτη, κυρίως στα ηλιακά πάρκα μεγάλης κλίμακας. Αυτή η αντανάκλαση προκαλεί προβλήματα και στα διερχόμενα πτηνά ή και έντομα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση του πάρκου Ivanpah Solar Electric Generating Systems στην περιοχή California Mojave Desert όπου κατά την πρώτη δοκιμή λειτουργίας του σκοτώθηκε ένας μεγάλος αριθμός πτηνών που πετούσαν εκείνες τις ώρες στην περιοχή λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας που δημιουργήθηκε στο θερμικό πεδίο πάνω από τους ηλιοστάτες. Το πρόβλημα λύθηκε προσανατολίζοντας τους συλλέκτες σε μικρότερες κατά τόπους εστίες κατά την ώρα του stand-by ώστε να μειωθεί η πυκνότητα της ροής της θερμότητας και συνεπώς η θερμοκρασία.

Η συγκεκριμένη περιοχή αποτελεί και πάρκο προστασίας άγριας ζωής καθώς είναι καταφύγιο για χιλιάδες χελώνες. Για την δημιουργία του πάρκου και για να προστατευτεί η άγρια φύση οι φωλιές όλων των άγριων ζώων μεταφέρθηκαν σε διπλανές περιοχές μακριά από την περιοχή του πάρκου. [12]

Τέλος, συμπεραίνεται ότι τα περισσότερα περιβαλλοντικά προβλήματα μπορούν να αποφευχθούν με σωστή μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για τον λόγο αυτό, σε μία εγκατάσταση ΡΤC οφείλει να παρίσταται έμπειρο τεχνικό προσωπικό και να τηρούνται αυστηρά οι κανόνες ασφαλείας.

## Κεφάλαιο 4: Θερμική Ανάλυση Παραβολικών Ηλιακών Συλλεκτών

Το μείζον ζήτημα που τέθηκαν να λύσουν τα PTC είναι η αύξηση της απόδοσης των συγκεντρωτικών συστημάτων με αύξηση των θερμοκρασιών λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό αναλύεται στη συνέχεια η θερμική και οπτική τους απόδοση.

Η απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη μπορεί να εκφραστεί ως το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται από τον συλλέκτη στο ρευστό ως προς την συνολική ενέργεια που λαμβάνει ο συλλέκτης από τον ήλιο.

Αν εφαρμοστεί το ισοζύγιο ενέργειας για ολόκληρη την διάταξη του συλλέκτη, τότε ιδανικά η ενέργεια της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη θα ήταν ίση με το σύνολο της θερμότητας που προκύπτει στο τέλος της διεργασίας, μετρούμενη από την μεταβολή στην ενθαλπία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, διαμέσου του συλλέκτη. Ωστόσο, στην πραγματικότητα το τελικό ποσό ενέργειας διαφέρει αρκετά λόγω των πολυάριθμων απωλειών που υπάρχουν στο σύστημα του συλλέκτη.

Οι απώλειες σε έναν ηλιακό συλλέκτη μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις οπτικές και τις θερμικές, όπως αναλύεται παρακάτω, και ανάλογα ορίζεται και ο βαθμός απόδοσής του.

### 4.1.Οπτική Απόδοση

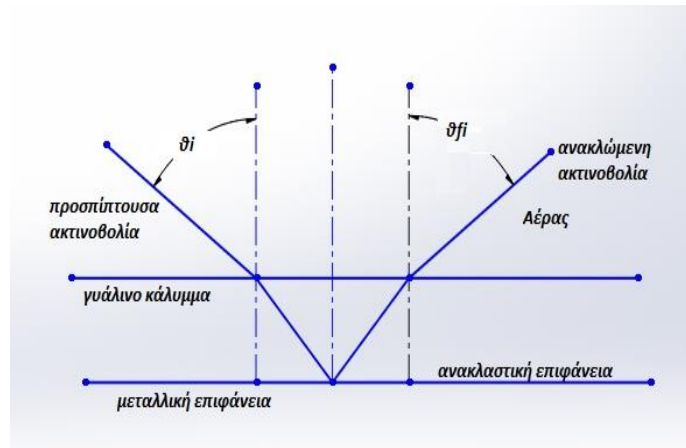
Η οπτική απόδοση του συλλέκτη ορίζεται ως τον λόγο της ενέργειας που απορροφάται από τον δέκτη προς την προσπίπτουσα ενέργεια στο άνοιγμα του συλλέκτη. Καθορίζεται επαρκώς λαμβάνοντας υπόψιν τα οπτικά χαρακτηριστικά του ανακλαστή και του απορροφητή, αλλά και τις οπτικές απώλειες, από τον παρακάτω τύπο [13]

$$\eta_{opt} = \rho\gamma\tau\alpha[(1-A_r\tan\theta)\cos\theta] \quad (4.1)$$

Όπου τα σύμβολα αναλύονται παρακάτω.



Η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ανοίγματος του συλλέκτη μετράται ανάλογα με το σύστημα προσανατολισμού που επιλέχθηκε για τον συλλέκτη, σύμφωνα με την σχέση 2.9-10.



Εικόνα 4.1: Γραφική απεικόνιση μηχανισμού ανάκλασης ακτινοβολίας

Οι οπτικές απώλειες ενός παραβολικού συλλέκτη μοιάζουν αρκετά στις αρχές τους με αυτές των επίπεδων συλλεκτών. Αντίστοιχα ορίζονται η ανακλαστικότητα  $\rho$  (*reflectivity*) της επιφάνειας ανάκλασης, ο παράγοντας ανάσχεσης  $\gamma$  (*intercept factor*) με τιμές μεγαλύτερες του 0,9 [1], η διαπερατότητα του γυάλινου σωλήνα  $\tau_a$  (*transmissivity of glass cover*) και η απορροφητικότητα του δέκτη  $\alpha$  (*absorptivity of receiver*).

Οι Jeter et al [14] ανέλυσαν την μείωση της οπτικής απόδοσης λόγω τριών γεωμετρικών-οπτικών φαινομένων, όπως περιγράφεται στη συνέχεια, και όρισαν  $A_f$  τον γεωμετρικό παράγοντα του συλλέκτη:

$$A_f = \frac{A_1}{A_\alpha} \quad (4.2)$$

όπου

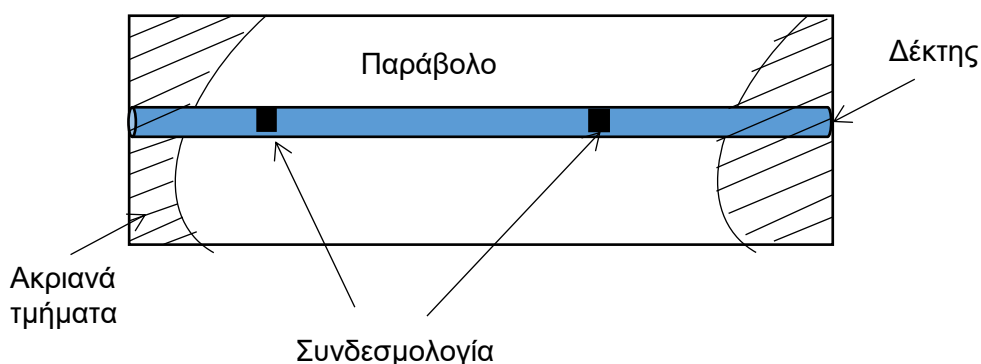
$$A_1 = \frac{2}{3} \alpha H_p + f \alpha \left[ 1 + \frac{\alpha^2}{48 f^2} \right] \quad (4.3)$$

όπου  $A_\alpha$  η συνολική επιφάνεια ανοίγματος και

$$H_p = 4ftan\left(\frac{90}{2}\right) \quad (4.4)$$

το ύψος του παράβολου για γωνία ανοίγματος ίση με 90° [1]

Όταν το κάτοπτρο του συλλέκτη δεν βρίσκεται στην βέλτιστη κλίση ή όταν η ακτινοβολία προσπίπτει με διαφορετική κλίση, τότε παρατηρείται το φαινόμενο «End effect», το οποίο εξηγεί την μείωση της γεωμετρίας του απορροφητή στα ακριανά τμήματα του δέκτη. Εκεί δεν προσπίπτει ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, διότι ο δέκτης συνηθίζεται να είναι λίγο πιο μικρός ή πιο μεγάλος από ότι το άνοιγμα του κατόπτρου ή λόγω λανθασμένης κλίσης του συλλέκτη. Με την ίδια σχεδόν συχνότητα εμφανίζεται και το φαινόμενο “bulkhead blocking”, όπου οι επιμέρους συνδεσμολογίες του δέκτη προκαλούν μερική σκίαση. Τέλος, αναλύεται το φαινόμενο “intraarray shading” στις περιπτώσεις ηλιακών πάρκων, όταν η μία σειρά ηλιακών συλλεκτών σκιάζεται από την επόμενη. [14]



Εικόνα 4.2: Σχηματική κάτοψη συστήματος δέκτη-συλλέκτη με End effect

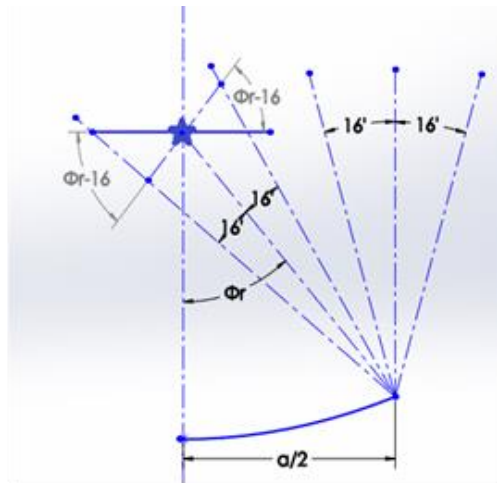
Τα οπτικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη υπολογίζονται επαρκώς από τον τύπο για την απορροφημένη ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας ακάλυπτου ανοίγματος συλλέκτη [1]:

$$S = I_b \rho(\gamma\tau\alpha)_n K_\theta \quad (4.5)$$

όπου  $I_b$  η αποτελεσματική προσπίπτουσα άμεση ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανοίγματος και  $K_\theta$  συντελεστής διόρθωσης της προσπίπτουσας γωνίας, όπου ορίζεται από τον Rabl(1985) ίσος με :

$$K(\theta) = 1 - \frac{f}{l} \left( 1 + \frac{a^2}{48f^2} \right) \tan\theta \quad (4.6)$$

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.1 η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να εξομοιωθεί με έναν κώνο με γωνιακό βάθος  $0,53^\circ$  (ή το ήμισυ  $16'$ ). Η γωνία αυτή σε μία δισδιάστατη ανάλυση θα ανακλάται από κάθε σημείο της παραβολής ομοιόμορφα προς το εστιακό σημείο F με αντίστοιχη μισή γωνία βάθους  $16'$ .



Σχήμα 4.1.: Θέση κυλινδρικού δέκτη ως προς παραβολική επιφάνεια

Από αυτήν την θέωση μπορεί να υπολογιστεί η βέλτιστη διάμετρος του κυλινδρικού δέκτη που τοποθετείται στην εστία συμπεριλαμβάνοντας και μία γωνία απόκλισης  $\delta$ :

$$D = 2r_r \sin\left(0.267 + \frac{\delta}{2}\right) = \frac{a \sin\left(0.267 + \frac{\delta}{2}\right)}{\sin\varphi_r} \quad (4.7)$$

## 4.2.Θερμική Απόδοση

Η θερμική απόδοση ενός θερμικού ηλιακού συστήματος εξαρτάται άμεσα από το ρευστό λειτουργίας και από τις απώλειες που προστίθενται στο σύστημα. Οι απώλειες περιλαμβάνουν πρώτον, τις θερμικές απώλειες από τον δέκτη, οι οποίες συνοψίζονται μέσω του συντελεστή απωλειών (loss coefficient)  $U_L$  και εξαρτώνται άμεσα από την επιφάνεια του δέκτη. Και δεύτερον, από τις απώλειες στην ροή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας οι οποίες αναλύονται μέσω του συντελεστή θερμικής απολαβής ( collector heat removal factor)  $F_R$ .

Σύμφωνα με τις αρχές που εφαρμόστηκαν στον επίπεδο συλλέκτη, ορίζεται ένας γενικός συντελεστής θερμικών απωλειών [1]:

$$U_L = h_w + h_r + h_c \quad (4.8)$$

ο οποίος εκφράζει το σύνολο των απωλειών του παραβολικού συλλέκτη λόγω μετάδοσης ( $h_w$ ) και ακτινοβολίας ( $h_r$ ) από την επιφάνειά του προς το περιβάλλον και τις απώλειες λόγω αγωγής μέσω της υποστηρικτικής κατασκευής του ( $h_c$ ).

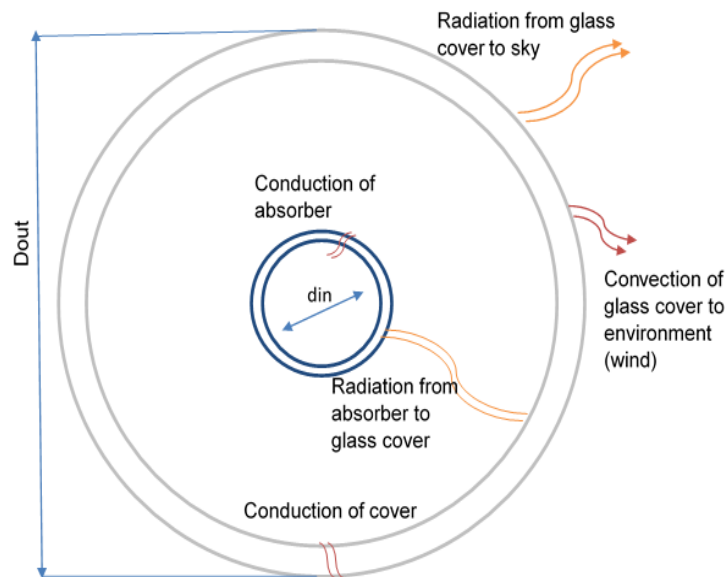
Για τον υπολογισμό αυτού του συντελεστή πραγματοποιείται μονοδιάστατη ανάλυση, ως προς την διατομή του συλλέκτη, όπου παρατηρείται μεγαλύτερη θερμοκρασιακή μεταβολή λόγω των διαφορετικών υλικών, αλλά και της θερμοκρασιακής διαφοράς εντός και εκτός του σωλήνα. Γίνεται ανάλυση μεταφοράς θερμότητας με μηχανισμούς μετάδοσης μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας, λόγω της συνεχόμενης εξαναγκασμένης ροής στο εσωτερικό του απορροφητικού σωλήνα.

Θεωρείται ότι

- ο δέκτης αποτελείται από ομοιογενές απορροφητικό μεταλλικό σωλήνα στο εσωτερικό ομοιογενούς γυάλινου σωλήνα
- υπάρχει ασυμπίεστη εξαναγκασμένη εσωτερική ροή υγρού ρευστού στον απορροφητικό σωλήνα σε κλειστό κύκλωμα
- εξωτερική ροή αέρα γύρω από τον εξωτερικό γυάλινο σωλήνα σε ανοιχτό σύστημα
- υπάρχουν συνθήκες κενού μεταξύ του απορροφητή και του εξωτερικού καλύμματος

- αγνοούνται τα φαινόμενα εσωτερικής τριβής και περιστροφής (zero internal rotation)
- σταθερές συνθήκες λειτουργίας

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια ανάλυση των απωλειών από το εσωτερικό του σωλήνα προς το εξωτερικό περιβάλλον, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.1.



Εικόνα 4.3:: Απώλειες σε κυλινδρικό απορροφητή με κυλινδρικό γυάλινο κάλυμμα

Σύμφωνα με τον νόμο του J. Fourier [15] το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται μέσω αγωγής μέσα από μία ομαλή επιφάνεια είναι ανάλογο με την θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος της επιφάνειας και του μεγέθους της επιφάνειας αυτής, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πάχος του στρώματος της επιφάνειας. Αυτό εκφράζεται μαθηματικά μέσω της σχέσης:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} (W)$$

( 4.9 )

όπου  $k$  η θερμική αγωγιμότητα του υλικού της επιφάνειας, η οποία εκφράζει την ικανότητα του υλικού να άγει την θερμότητα και ο λόγος  $\frac{dT}{dx}$  εκφράζει την θερμοκρασιακή διαφορά κατά τον άξονα του πάχους του στρώματος της επιφάνειας.

Στην περίπτωση εγκάρσιας μεταφοράς θερμότητας σε τοιχώματα της κυλινδρικής επιφάνειας του απορροφητή με θερμοκρασία  $T_{abs}$  και θερμοκρασία στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος  $T_{ci}$  είναι:

$$Q_{loss} = \frac{2\pi k_{eff} L}{\ln\left(\frac{D_{abs,i}}{D_{abs,o}}\right)} (T_{abs} - T_{ci}) \quad (4.10)$$

Όπου  $k_{eff}$  ορίζεται ένας συντελεστής αγωγιμότητας του υλικού του δέκτη για μετάδοση μέσω του καλύμματος ορισμένη από τον τύπο [15]:

$$\frac{k_{eff}}{k} = \max\left[1, 0.386 \left(\frac{Pr * Ra^*}{0.861 + Pr}\right)^{1/4}\right] \quad (4.11)$$

Και

$$Ra^* = \frac{\left[\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)\right]^4}{L^3 \left(D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5}\right)^5} Ra_L \quad (4.12)$$

Και  $Ra$  ο αριθμός Rayleigh

$$Ra = \frac{g\beta' \Delta T L^3}{\nu \alpha} \quad (4.13)$$

Στην περίπτωση που η περιοχή μεταξύ του απορροφητή και του καλύμματος είναι καλά μονωμένη ή βρίσκεται σε απόλυτο κενό, τότε το μέγεθος  $k_{eff}$  θεωρείται ίσο με μηδέν και η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο μέσω του μηχανισμού της ακτινοβολίας.

Σύμφωνα με τον νόμο Stefan Boltzmann το μέγιστο ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα σώμα με θερμοδυναμική θερμοκρασία  $T_s$  δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (4.14)$$

όπου  $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και το σώμα αυτό θεωρείται ως μέλαν σώμα. Συνεπώς ένα μη- μέλαν κυλινδρικό σώμα (απορροφητής) βρισκόμενο μέσα σε κυλινδρική επιφάνεια (γυάλινος σωλήνας) και για συγκεκριμένη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσά τους, η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_{loss} = \frac{\pi D_{abs} L \sigma (T_{abs}^4 - T_{ci}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \left(\frac{D_{abs}}{D_{ci}}\right)} \quad (4.15)$$

Όπου τα χαρακτηριστικά εκπομπής ακτινοβολίας δίνονται για τα υπό μελέτη υλικά από τους κατασκευαστές και από τον τύπο 4.15 εκτιμάται η μεταξύ τους μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας.

Σύμφωνα με τον νόμο του Fourier στην περίπτωση μεταφοράς με αγωγή στην εγκάρσια διατομή τοιχωμάτων κυλινδρικής επιφάνειας (του γυάλινου σωλήνα) θα είναι:

$$Q_{loss} = \frac{2\pi k_c L (T_{ci} - T_{co})}{\ln\left(\frac{D_{co}}{D_{ci}}\right)} \quad (4.16)$$

Σύμφωνα με τον νόμο Stefan-Boltzmann η μεταφορά με ακτινοβολία μεταξύ του εξωτερικού σωλήνα και του περιβάλλοντος θα είναι:

$$Q_{loss} = \varepsilon_c \pi D_{co} L \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4) \quad (4.17)$$

Όπου τα χαρακτηριστικά εκπομπής δίνονται για τα υπό μελέτη υλικά από τους κατασκευαστές και η  $T_{sky}$  ορίζεται πειραματικά ή μέσω μετρήσεων.

Σύμφωνα με τον νόμο του Newton σε μια επιφάνεια  $A_s$  με θερμοκρασία  $T_s$  επάνω στην οποία συντελείται μεταφορά θερμότητας μέσω ρευστού με θερμοκρασία  $T_\infty$  μεταφέρεται ποσό ίσο με:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W) \quad (4.18)$$

όπου  $h$  η συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε  $W/m^2K$

Οπότε από τον εξωτερικό σωλήνα του δέκτη προς τον εξωτερικό αέρα του περιβάλλοντος, σε περίπτωση μη άπνοιας, θα μεταφέρεται:

$$Q_{loss} = \pi D_{co} L h_w (T_{co} - T_a) \quad (4.19)$$

Όπου ο  $h_w$  συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του αέρα.

Σημαντικό πρόβλημα στο πεδίο της εγκατάστασης προκαλεί και η ταχύτητα και ένταση του ανέμου, καθώς μπορεί είτε να μεταβάλλει την θέση του παράβολου είτε ακόμα και να μεταβάλλει την γεωμετρία του με λυγισμό ή θραύση. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του αέρα καθορίζεται ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα και την κατεύθυνση με τον αντίστοιχο τύπο που προτείνεται σε εγχειρίδια μεταφοράς θερμότητας για εξωτερική εξαναγκασμένη μετάδοση θερμότητας πάνω από κυλινδρικό σωλήνα. Οι συνήθεις αριθμοί Nusselt που χρησιμοποιούνται για εξωτερική ροή αέρα σε κυλινδρικό αγωγό προκύπτουν από τις εξής εξισώσεις:

Πίνακας 4.1: Μαθηματικές σχέσεις υπολογισμού αριθμού  $Nu$

| Re             | Αριθμός Nusselt                |
|----------------|--------------------------------|
| 0,4-4          | $Nu = 0.989Re^{0.33}Pr^{1/3}$  |
| 4-40           | $Nu = 0.911Re^{0.385}Pr^{1/3}$ |
| 40-4000        | $Nu = 0.683Re^{0.466}Pr^{1/3}$ |
| 4000-40.000    | $Nu = 0.193Re^{0.618}Pr^{1/3}$ |
| 40.000-400.000 | $Nu = 0.027Re^{0.805}Pr^{1/3}$ |



Ή καθώς προτείνεται από τους Beckmann & Duffie [1] από τον τύπο McAdams [16] :

$$Nu = 0.30Re^{0.6} \quad (4.20)$$

Το άθροισμα των απωλειών του δέκτη οδηγεί σε έναν συντελεστή απωλειών:

$$U_L = \frac{Q_{loss}}{A_r(T_r - T_a)} \quad (4.21)$$

Τέλος, ορίζεται ο συντελεστής ολικών απωλειών μεταξύ εξωτερικού καλύμματος και εργαζόμενου μέσου μέσω του οποίου ορίζονται οι απώλειες που προκαλούνται από την εσωτερική ροή του εργαζόμενου μέσου μέσα στον σωλήνα δέκτη με  $D_o$  και  $D_i$  εξωτερική και εσωτερική διάμετρο αντίστοιχα:

$$U_o = \left( \frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi}D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} \right)^{-1} \quad (4.22)$$

Όπου  $k$  η θερμική αγωγιμότητα του σωλήνα.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h_{fi}$  εκτιμάται από τον αντίστοιχο προτεινόμενο τύπο για ροή υγρού στο εσωτερικό σωλήνα με σταθερή επιφανειακή πρόσδοση θερμότητας με συντελεστή Reynolds:

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

Όπου  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του ρευστού και  $v$  η ταχύτητά του σε m/sec

$$(4.23)$$

και αριθμό Prandtl

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

( 4.24 )

Όπου  $\alpha$  η θερμική διαχυτότητα του ρευστού που αναπαριστά το πόσο γρήγορα η θερμότητα διαχέεται μέσω αυτού

Από την μηχανική των ρευστών [17] είναι γνωστό ότι:

|                          |                |
|--------------------------|----------------|
| $Re \leq 2300$           | Στρωτή ροή     |
| $2300 \leq Re \leq 4000$ | Μεταβατική ροή |
| $Re \geq 4000$           | Τυρβώδης ροή   |

Έπειτα υπολογίζεται ο αριθμός

$$F' = \frac{U_o}{U_L}$$

( 4.25 )

ώστε ορίζεται η ωφέλιμη ενέργεια που παραλαμβάνουμε από το ρευστό:

$$q'_{u} = F' \frac{A_a}{L} \left[ S - \frac{A_r}{A_a} U_L \right] (T_f - T_a)$$

( 4.26 )

Ή εφαρμόζοντας θερμοδυναμική ανάλυση μέσω της διαφοράς της θερμοκρασίας που προκαλείται στο ρευστό, κάτω από σταθερές συνθήκες, τότε η θερμότητα που παράγεται από έναν παραβολικό συγκεντρωτικό συλλέκτη με επιφάνεια ανοίγματος  $A_a$  και επιφάνεια δέκτη  $A_r$  μετράται από τον τύπο:

$$Q_u = F_R A_a \left[ S - \frac{U_L}{C} (T_i - T_a) \right]$$

( 4.27 )

Παρόμοια με έναν επίπεδο συλλέκτη η θερμότητα που παραλαμβάνεται από το ρευστό θα είναι:

$$Q_u = \dot{m}\Delta h = \dot{m}C_p(T_o - T_{fi}) \quad (4.28)$$

και  $F_R$  ορίζεται ο συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη επιφάνειας  $A_\alpha$  με ροή ρευστού  $\dot{m}$  σε θερμοκρασία εισόδου  $T_{fi}$  και θερμοκρασία εξόδου  $T_{fo}$ :

$$F_R = F' * F'' \quad (4.29)$$

και

$$F'' = \frac{mC_p}{A_r U_L F'} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_r U_L F'}{mC_p}\right) \right] \quad (4.30)$$

Και η θερμική του απόδοση μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\eta = \frac{\text{ενέργεια από τον συλλέκτη προς το ρευστό}}{\text{ενέργεια από τον ήλιο προς τον συλλέκτη}} = \frac{mC_p(T_{fo} - T_{fi})}{A * I_T} \quad (4.31)$$

Ή χρησιμοποιώντας τους όρους που αναλύθηκαν παραπάνω:

$$\eta = F_R \left[ \eta_o - \frac{U_L}{G_T C} (T_{fi} - T_a) \right] \quad (4.32)$$

Εδώ παρατηρείται ότι για σταθερές τιμές των επί μέρους παραμέτρων, η θερμική απόδοση ενός PTC μπορεί να εκφραστεί ως μια πρωτοβάθμια γραμμική εξίσωση της μορφής:

$$y = b + ax$$

Επειδή στους παραβολικούς συλλέκτες έχουμε υψηλότερη συγκέντρωση της ακτινοβολίας σε σχέση με τους επίπεδους, προκύπτουν και υψηλότερες θερμοκρασίες. Τότε ο συντελεστής  $U_L$  συνδέεται άμεσα και από την θερμοκρασία και οι τύποι 4.27 και 4.31 εκφράζονται συναρτήσει της θερμοκρασίας με τις παρακάτω δευτεροβάθμιες εξισώσεις:

$$Q_u = F_R [G_B \eta_o A_a - A_r c_1 (T_i - T_a) - A_r c_2 (T_i - T_a)^2] \quad (4.33)$$

Και

$$\eta = F_R \eta_o - \frac{c_1 (T_i - T_a)}{CG_B} - \frac{c_2 (T_i - T_a)^2}{CG_B} \quad (4.34)$$

## Κεφάλαιο 5: Μελέτη Πειραματικής Διάταξης Παραβολικού Ηλιακού Συλλέκτη

Το Εργαστήριο Ηλιακών και Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του «Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος» δραστηριοποιείται στον τομέα της έρευνας από το 1980. Εστιάζει κυρίως στην εφαρμοσμένη έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών σχετικών με την εκμετάλλευση της Θερμικής Ηλιακής Ενέργειας και την Εξοικονόμηση Ενέργειας. Το εργαστήριο έχει συμβάλει στην επιστημονική κοινότητα, τόσο με τις πολυάριθμες δημοσιεύσεις του, όσο και με τις συνεργασίες του με άλλα ερευνητικά κέντρα, αλλά και Πανεπιστήμια, δίνοντας ευκαιρίες στους νέους φοιτητές να εισέλθουν και να γνωρίσουν την ελληνική επιστημονική κοινότητα του τομέα. Στο χώρο του εργαστηρίου υπάρχει σύγχρονος εξοπλισμός και άριστα εκπαιδευμένο τεχνικό προσωπικό για τις ανάγκες αυτές.

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την ανάλυση και μελέτη της πειραματικής διάταξης του κοίλου συγκεντρωτικού παραβολικού συλλέκτη της εικόνας 5.1 που βρίσκεται στον χώρο του εργαστηρίου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη δίνονται σε επόμενη ενότητα.



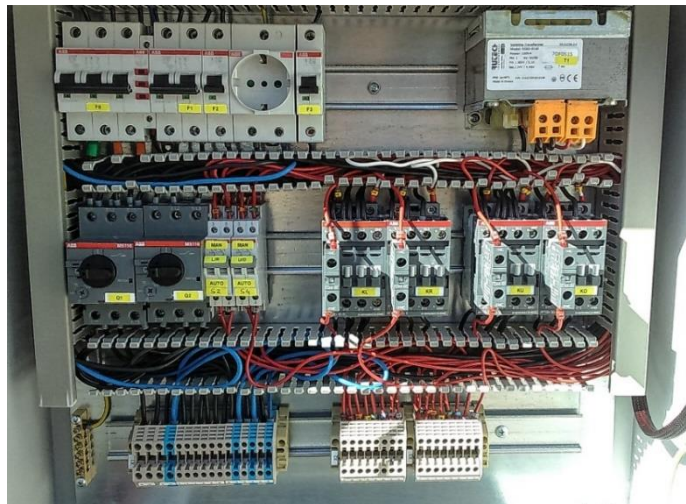
Εικόνα 5.1 :Παραβολικός Συλλέκτης, [πηγή: προσωπικό αρχείο ]

Ο συλλέκτης βρισκόταν αρχικά σε μη λειτουργική κατάσταση στον χώρο του Εργαστηρίου και πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες για την έναρξη της λειτουργίας του συλλέκτη:

1. Αλλαγή εξαρτημάτων:
  - Μεταλλικές επιφάνειες ανάκλασης
  - Σωλήνας-δέκτης
  - Διαβρωμένοι κοχλίες και περικόχλια
  - Ιμάντας μετάδοσης κίνησης
2. Σύνδεση συστήματος παρακολούθησης ήλιου
3. Σχεδιασμός υδραυλικού συστήματος

Στην παρούσα εγκατάσταση τοποθετήθηκε σύστημα παρακολούθησης ήλιου (tracking) που αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους στοιχεία:

- Δύο τριφασικούς κινητήρες ισχύος 150W καθένας. Οι κινητήρες χρησιμοποιούνται ξεχωριστά για την περιστροφή ανατολή- δύση και βορράς-νότος.
- Μετάδοση κίνησης από τους κινητήρες στη διάταξη με μειωτήρα στροφών
- Ποτανομετρικοί αισθητήρες γωνιακής απόκλισης για τον προσδιορισμό της θέσης του συλλέκτη (ανατολή- δύση και βορράς – νότος)
- Τερματικοί διακόπτες για τον ορισμό του εύρους περιστροφής
- Ηλεκτρολογικός πίνακας ισχύος
- Πίνακας αυτοματισμού με έλεγχο από μονάδα μικροεπεξεργαστή τύπου ARDUINO



Εικόνα 5.2: Ηλεκτρολογικός πίνακας εγκατάστασης [πηγή: προσωπικό αρχείο]

Η λογική που ακολουθείται από τον αυτοματισμό για το Tracking βασίζεται σε τρία στοιχεία. Πρώτον, στον υπολογισμό της ακριβούς θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο με μέτρηση του ύψους και του αζιμούθιου. Δεύτερον, γίνεται σύγκριση με την τρέχουσα θέση του κατόπτρου, όπως αυτή καταγράφεται από τους αισθητήρες γωνιακής απόκλισης. Και τέλος, πραγματοποιείται ενδεχόμενη διόρθωση της θέσης του συλλέκτη ενεργοποιώντας τους κινητήρες στο βαθμό που αυτό κριθεί αναγκαίο.

Τέλος, ο συλλέκτης συνδέθηκε με υδραυλικό σύστημα αποτελούμενο από σωληνώσεις, αντλία κυκλοφορίας και δεξαμενή αποθήκευσης. Ως δεξαμενή αποθήκευσης χρησιμοποιείται boiler βεβιασμένης κυκλοφορίας 500 lt με εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας, ενσωματωμένο στο κάτω μέρος του δοχείου. Στην δεξαμενή υπάρχει σύστημα θερμικής μόνωσης που καθιστά ελάχιστες τις θερμικές απώλειες διατηρώντας τη θερμοκρασία του ζεστού νερού. Η θερμοκρασία μετράται στην είσοδο της δεξαμενής με ενσωματωμένο θερμόμετρο. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της δίνονται στον πίνακα 5.1.

*Πίνακας 5.1. : Boiler Βεβιασμένης κυκλοφορίας FC1, [πηγή: φυλλάδιο κατασκευαστικής εταιρίας]*

| <b>Παράμετρος</b>                         | <b>Τιμή</b> |
|---|-------------|
| Συνολική χωρητικότητα                     | 500 lt      |
| χωρητικότητα εναλλάκτη θερμότητας         | 13.7 lt     |
| Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας           | 95 °C       |
| Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας εναλλάκτη | 110 °C      |
| Μέγιστη πίεση δεξαμενής νερού             | 0.8 MPa     |
| Μέγιστη πίεση εναλλάκτη                   | 0.6 MPa     |

## 5.1.Θεωρητικός Υπολογισμός Οπτικού Βαθμού Απόδοσης

Ο οπτικός βαθμός απόδοσης ενός συγκεντρωτικού παραβολικού συλλέκτη ορίζεται ως τον λόγο της ενέργειας που απορροφάται από τον δέκτη προς την συνολική προσπίπτουσα ενέργεια στο άνοιγμα του συλλέκτη. Για την εκτίμηση του μεγέθους του αρκεί να είναι γνωστές οι οπτικές ιδιότητες των υλικών του ανακλαστή και του απορροφητή, η επιφάνεια της παραβολής αλλά και η γωνία πρόσπτωσης.

Για την συγκεκριμένη διάταξη επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ως δέκτης 2 σωλήνες της εταιρίας SunFlower με εργαζόμενο μέσο νερό με τα χαρακτηριστικά του πίνακα 5.2: Οι σωλήνες ενώθηκαν μεταξύ τους με ανοξειδωτο συγκολλητικό υλικό στον χώρο του εργαστηρίου.

Πίνακας 5.2: Γεωμετρικά στοιχεία δέκτη, [πηγή: φυλλάδιο κατασκευαστή]

| <b>Δέκτης SUN FLOWER</b>              | <b>Value</b> |
|---------------------------------------|--------------|
| Εξωτερική Διάμετρος Γυάλινου Σωλήνα   | 100±2 mm     |
| Εξωτερική Διάμετρος Σωλήνα Απορροφητή | 42±0.5 mm    |
| Πάχος Σωλήνα Απορροφητή               | 1.8±0.2 mm   |
| Μήκος Σωλήνα Απορροφητή               | 2000±5 mm    |
| Μήκος Ανοίγματος Δέκτη                | ≥1865 mm     |
| Απορροφητικότητα                      | 0.93         |
| Θερμικές Απώλειες (250oC)             | ≤65 W/m      |
| Υλικό Απορροφητικού Σωλήνα            | SS304        |
| Υλικό Γυάλινου Σωλήνα                 | Borosilicate |

Κατόπιν, ως ανακλαστικές επιφάνειες επιλέχθηκαν οι μεταλλικές πλάκες MIRO reflective 90 της εταιρίας Alanod-solar με χαρακτηριστικά που δίνονται στον πίνακα 5.3, όπως παρέχονται από την κατασκευαστική εταιρία [18]:



Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά μεταλλικών πλακών MIRO reflective 90

| Ανακλαστικές Επιφάνειες             | Συμβολισμός | Τιμή      |
|-------------------------------------|-------------|-----------|
| Ολική ανάκλαση ηλιακής ακτινοβολίας | $\rho$      | 0.9       |
| Θερμική Αγωγιμότητα                 | $k$         | 16.2 W/mK |

\*Σημείωση: Για το υλικό Borosilicate η διαπερατότητα  $\tau$  θεωρείται ίση με 0.91, σύμφωνα με βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Ακόμη, ο στιγμιαίος παράγοντας ανάσχεσης  $\gamma$  λαμβάνεται ίσος με 0.93 για την υπάρχουσα γεωμετρία, σύμφωνα με βιβλιογραφική ανασκόπηση. Τέλος, για μία επιφάνεια με αδιάκοπο σύστημα προσανατολισμού ισχύει ότι [1]:

$$\cos\theta = 1$$

$$\beta = \theta_z$$

$$\gamma = \gamma_s$$

( 5.1 )

όπου οι παραπάνω γωνίες αναλύονται στο κεφάλαιο 2.2.

Συνεπώς για μηδενική γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  εκτιμάται ο οπτικός βαθμός απόδοσης, σύμφωνα με την εξίσωση 4.1:

$$\eta_{opt} = \rho\gamma\tau[(1-A_f\tan\theta)\cos\theta]$$

Όπου στην υπό μελέτη περίπτωση ο όρος της παρένθεσης είναι ίσος με την μονάδα και η τιμή της απόδοσης είναι ίση με **70.8%**

Η τιμή αυτή είναι χαρακτηριστική για τον συλλέκτη και εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά των υλικών του και την γωνία πρόσπτωσης, συνεπώς θεωρείται αμετάβλητη για το συγκεκριμένο μοντέλο. Στη συνέχεια αναζητούνται και τα επόμενα χαρακτηριστικά του.

## 5.2. Προσέγγιση Θερμικών Απωλειών Δέκτη

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι από τον κατασκευαστή παρέχεται ότι η θερμικές απώλειες του δέκτη ανερχονται στην τιμή των 65 W/m για την θερμοκρασία των 250 °C . Στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι του κεφαλαίου 4 για να εκτιμηθεί η απόκλιση αυτής της τιμής από την θεωρητική τιμή που προκύπτει, έπειτα από την εφαρμογή των εξισώσεων που προτείνουν οι Beckmann & Duffie [1] για τις θερμικές απώλειες σε παραβολικό συλλέκτη.



Εικόνα 5.3: Σωλήνες δέκτη SunFlower, [πηγή: φυλλάδιο κατασκευαστή]

Από το φυλλάδιο της κατασκευαστικής εταιρίας παρέχονται τα χαρακτηριστικά του δέκτη που αναγράφονται στον πίνακα 5.2. Για την παρούσα μελέτη απαιτούνται επιπλέον πληροφορίες για τις ιδιότητες των υλικών, οι οποίες παρέχονται στον πίνακα 5.4.

Για την παρακάτω ανάλυση γίνεται η θεώρηση ότι ο δέκτης λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C και δέχεται ηλιακή ακτινοβολία 1000W κατά μήκος της συνολικής του επιφάνειας και με την προϋπόθεση ύπαρξης ενός συγκεντρωτικού ανακλαστή. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούνται οι δέκτες abs και g για την απορροφητική επιφάνεια και το γυάλινο κάλυμμα αντίστοιχα.

Πίνακας 5.4: Ιδιότητες επιμέρους υλικών δέκτη [19]

| Παράμετρος          | Συμβολισμός | Τιμή                   |
|---------------------|-------------|------------------------|
| <b>BOROSILICATE</b> |             |                        |
| Πυκνότητα           | $\rho_d$    | 2.2 g/cm <sup>3</sup>  |
| Θερμική αγωγιμότητα | k           | 1.2 W/mK               |
| Διαπερατότητα       | $\tau$      | 0.91                   |
| Ανάκλαση            | $\rho$      | 0,06                   |
| Εκπομπή             | $\epsilon$  | 0.92                   |
| <b>SS304</b>        |             |                        |
| Πυκνότητα           | $\rho_d$    | 8000 kg/m <sup>3</sup> |
| Θερμική αγωγιμότητα | k           | 16.2 W/mK              |
| Εκπομπή             | $\epsilon$  | 0.05                   |

Η ανάλυση πραγματοποιείται με διεύθυνση από το εξωτερικό του (περιβάλλον χώρος) προς το εσωτερικό του δέκτη (ρευστό). Για καλύτερη κατανόηση ανατρέχουμε στην εικόνα 4.3. Πρόβλημα στην θεωρητική μελέτη προκαλείται από τα λίγα δεδομένα που παρέχονται από τον κατασκευαστή. Συνεπώς θα πρέπει να γίνει μελέτη θεωρώντας σταθερή θερμότητα  $Q_{\text{loss}}$  ίση με την ακτινοβολία που δέχεται ο δέκτης με σκοπό να βρεθούν οι θερμοκρασίες στις διαφορετικές στρώσεις του δέκτη.

Η μεταβολή θερμοκρασίας στο εξωτερικό κάλυμμα λόγω του φαινομένου της αγωγής προς το εσωτερικό υπολογίζονται από τον τύπο 4.10 τροποποιημένο για την παρούσα περίπτωση:

$$Q = 2\pi kL \frac{T_{gin} - T_{gout}}{\ln\left(\frac{D_{gout}}{D_{gin}}\right)}$$

Για την δοθείσα ακτινοβολία προκύπτει θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του γυάλινου καλύμματος  $T_{gin} - T_{gout}$  ίση με 0.84 °C

Έπειτα αναζητείται η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο γυάλινο περίβλημα  $T_{\infty}$  και το περιβάλλον  $T_a$  από τους τύπους 4.17 και 4.19:

$$Q_{loss} = \pi D_{co} L h_w (T_{co} - T_a) + \varepsilon_c \pi D_{co} L \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4)$$

Στο πρώτο μέρος της εξίσωσης υπολογίζεται η μεταφορά θερμότητας προς τον περιβάλλοντα αέρα, μόνο στην περίπτωση που υπάρχει υπολογίσιμη μεταφορά μάζας αέρα πάνω από την επιφάνεια του δέκτη. Θεωρώντας μια μέση ταχύτητα ανέμου ίση με 5m/s προκύπτει συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h_w$  ίσος με 105.65 W/ mK για εξωτερική εξαναγκασμένη μεταφορά αέρα, σύμφωνα με τον τύπο από τον πίνακα 4.1 για τον αντίστοιχο αριθμό Reynolds. Για τον υπολογισμό του αριθμού Re παρέχονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του νερού για την θερμοκρασία 250 °C από τους Cengel & Ghajar [15].

Στο δεύτερο μέρος της εξίσωσης υπολογίζεται η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία προς τον ουράνιο θόλο. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του ουρανού χρησιμοποιήθηκε ο τύπος που προτείνεται από τον Fuentes(1987) [20] :

$$T_{sky} = 0.037536T_{amb}^{1.5} + 0.32T_{amb} \quad (5.2)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ποσό της θερμότητας που χάνεται μεταξύ του γυάλινου καλύμματος και της απορροφητικής επιφάνειας. Ο χώρος ανάμεσά τους βρίσκεται σε συνθήκες κενού συνεπώς η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μόνο μέσω του μηχανισμού της ακτινοβολίας και η εξίσωση 4.17 θα γίνει:

$$Q_{loss} = \frac{\pi D_r L \sigma (T_{abs}^4 - T_{gi}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \left( \frac{D_{abs}}{D_{gi}} \right)}$$

Η θερμοκρασία του απορροφητή μπορεί ικανοποιητικά να προσεγγιστεί με την θερμοκρασία του ρευστού.

Στο σημείο αυτό οι εξισώσεις είναι πλήρεις και υπολογίζεται ο συντελεστής θερμικών απωλειών από τον τύπο 4.21:

$$U_L = \frac{Q_{loss}}{A_{abs}(T_{abs} - T_a)}$$

Όπου καταλήγει σε έναν μέσο συντελεστή απωλειών  $U_L=0.82 \text{ W / m}^2\text{K}$  .

Η τιμή αυτή απέχει από την δοθείσα τιμή από τον κατασκευαστή ανηγμένη προς την θερμοκρασία και την επιφάνεια (  $2.19 \text{ W / m}^2\text{K}$  ). Το γεγονός αυτό αποδίδεται σε ποικίλους παράγοντες. Αρχικά να αναφερθεί ότι αναμένεται, η εταιρία κατασκευής του δέκτη να παρέχει κάποια επιπλέον κατεργασία στα υλικά για την βελτίωση των μηχανικών και οπτικών τους ιδιοτήτων, συνεπώς οι τιμές τους θα διαφέρουν. Μία δεύτερη σκέψη αποδίδει αυτή την μικρή απόκλιση στην μεταλλική συνδεσμολογία του δέκτη στα δύο άκρα του, η οποία για την παρούσα μελέτη αμελήθηκε, λόγω της δυσκολίας εύρεσης των αντίστοιχων μεγεθών για τα υλικά της σύνδεσης. Τέλος, η τιμή των θερμικών απωλειών που παρέχει η κατασκευαστική εταιρία βασίζεται σε ακριβή πειράματα, όπου καταγράφονται τα λάθη και οι αποκλίσεις των υλικών στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και δεν βασίζεται μόνο σε θεωρητικές εξισώσεις.

Καταλήγουμε ότι για την παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής θερμικών απωλειών που προτείνεται από τον κατασκευαστή και με τιμή ίση με  $2.19 \text{ W / m}^2\text{K}$ . Η τιμή αυτή βρέθηκε έπειτα από αναγωγή της τιμής των  $65 \text{ W/m}$  ως προς την υπό μελέτη επιφάνεια και για χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

### 5.3.Θεωρητικός Υπολογισμός Θερμικού Βαθμού Απόδοσης

Η θερμική απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4, μπορεί να εκφραστεί ως το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται από τον συλλέκτη στο ρευστό ως προς την συνολική ενέργεια που λαμβάνει αυτός από τον ήλιο. Σε αυτόν τον ορισμό οφείλουν να ληφθούν υπόψιν οι απώλειες του συστήματος, αφού αυτό σχεδιαστεί σύμφωνα με τις θερμοδυναμικές αρχές που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο 4.

Για τον θεωρητικό υπολογισμό του θερμικού βαθμού απόδοσης γίνεται η θεώρηση μιας ηλιόλουστης μέρας με πλήρη ηλιοφάνεια στην περιοχή της διάταξης και θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C. Η υπό μελέτη διάταξη βρίσκεται στο Εργαστήριο Ηλιακών και Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» στην περιοχή Αγίας Παρασκευής, Αττικής με συντεταγμένες 37.996327, 23.815127. Η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας σε εκείνη την περιοχή θεωρείται για την παρούσα εργασία ίση με 1000 W/m<sup>2</sup>, τα οποία προσπίπτουν στην επιφάνεια ανοίγματος A<sub>a</sub>. Η γωνία πρόσπτωσης θ της ακτινοβολίας στην επιφάνεια A<sub>a</sub> είναι μηδέν, εξαιτίας του συστήματος προσανατολισμού του PTC σε δύο άξονες: Βορράς - Νότος και Ανατολή - Δύση, με την βοήθεια συστήματος αυτοματισμού με μονάδα μικροεπεξεργαστή.

Στον πίνακα 5.5 αναγράφονται επιπλέον μεγέθη, τα οποία υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις εξισώσεις του κεφαλαίου 2 αλλά και με την βοήθεια της εξίσωσης 5.3 για την επιφάνεια κυλινδρικού σωλήνα.

$$A_{\text{κυλ}} = \pi * D_{\text{κυλ}} * L_{\text{κυλ}}$$

( 5.3 )

Πίνακας 5.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

| Παράμετρος                                 | Συμβολισμός      | Τιμή                |
|--|------------------|---------------------|
| Μήκος δέκτη                                | L <sub>rec</sub> | 4m                  |
| Μήκος απορροφητή                           | L <sub>abs</sub> | 3.74m               |
| Επιφάνεια ανοίγματος συλλέκτη              | A <sub>a</sub>   | 6.94 m <sup>2</sup> |
| Επιφάνεια απορροφητή                       | A <sub>abs</sub> | 0.49                |
| Επιφάνεια δέκτη                            | A <sub>rec</sub> | 1.26                |
| Συντελεστής συγκέντρωσης                   | C                | 14                  |
| Συντελεστής διόρθωσης προσπίπτουσας γωνίας | K(θ)             | 1                   |

Συνεπώς μπορεί να εκτιμηθεί το ποσό της προσπίπτουσα ακτινοβολίας, το οποίο απορροφάται από τον δέκτη ανά μονάδα επιφάνειας και θα μεταφερθεί στο ρευστό που διαπερνά τον δέκτη:

$$S = I_b \rho(\gamma\tau)_n K_\theta = 708.35 \text{ W/m}^2 \quad (5.4)$$

Το ρευστό λειτουργίας κινείται μέσα στον δέκτη με την βοήθεια κυκλοφορητή, ο οποίος προσδίδει συγκεκριμένες τιμές παροχής και ταχύτητας στο δίκτυο των σωληνώσεων. Για την κατάλληλη επιλογή παροχής και συνεπώς κυκλοφορητή από το εμπόριο υλοποιείται η παρακάτω λογική.

Από την μηχανική των ρευστών είναι γνωστό ότι η ταχύτητα της ροής στο εσωτερικό διαμήκη σωλήνα με εξωτερική πρόσδοση θερμότητας είναι βέλτιστη όταν βρίσκεται σε εύρος ταχυτήτων  $0 < V < 1 \text{ m/sec}$  [17]. Σε αυτό το εύρος μειώνονται τα φαινόμενα της καθίζησης και της δημιουργίας δινών στο εσωτερικό της ροής. Επιπλέον, συνήθως πρακτική σε πειραματικά μοντέλα αυτής της κλίμακας είναι η αυθαίρετη τιμή παροχής των  $50 \text{ lt/m}^2/\text{hr}$ . Η παροχή της μάζας του ρευστού στο εσωτερικό του δέκτη θα δίνεται από τον τύπο:

$$\dot{m} = \rho A_c V_{ave} \quad (5.5)$$

Έπειτα από υπολογιστικές δοκιμές, για τον σωλήνα του PTC του δεδομένου συστήματος με εγκάρσια διατομή  $A_c$  ίση με  $0.00116 \text{ m}^2$  θα είναι η μέση ταχύτητα ροής ίση με  $0.44 \text{ m/sec}$  και η ροή μάζας ίση με  $0.5 \text{ kg/sec}$ .

Αν υποθέσουμε απλή μεταφορά θερμότητας όπου όλο το ποσό  $S$  της ακτινοβολίας απορροφάται από το ρευστό με παροχή μάζας  $\dot{m}$ , τότε σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (5.6)$$

η διαφορά της θερμοκρασίας που προκαλείται είναι ίση με **2.35 °C** με την θεώρηση ότι η θερμοκρασία νερού στην είσοδο του δέκτη είναι 50 °C. Η θεώρηση αυτή είναι δόκιμη για την παρούσα μελέτη έπειτα από βιβλιογραφική ανασκόπηση σε παρόμοιες μελέτες που έχουν ήδη γίνει για PTC μικρής κλίμακας και χαμηλής ενθαλπίας. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας είναι η μέγιστη που μπορεί να επιτύχει το μοντέλο της μελέτης, καθώς μέχρι αυτό το σημείο δεν έχουν συμπεριληφθεί οι απώλειες της διάταξης.

Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται στο ρευστό θα είναι μικρότερο από αυτό που υπολογίστηκε προηγουμένως, λόγω του συντελεστή απωλειών, και συνεπώς θα προκαλείται μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά αλλά και μικρότερη απόδοση του συστήματος. Για την εκτίμηση των απωλειών αλλά και του θερμικού βαθμού απόδοσης χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις 4.21 έως 4.31 του κεφαλαίου 4, για σταθερή τιμή ακτινοβολίας 1000 W/m<sup>2</sup>, σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C και σταθερή θερμοκρασία εισόδου του νερού 50 °C. Τα αποτελέσματα των εξισώσεων δίνονται στον πίνακα 5.6.

*Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα εξισώσεων*

| <b>Παράμετρος</b>             | <b>Συμβολισμός</b> | <b>Τιμή</b>             |
|-------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Απορροφούμενη ακτινοβολία     | S                  | 708.35 W/m <sup>2</sup> |
| Συντελεστής θερμικών απωλειών | U <sub>L</sub>     | 2.19 W/m <sup>2</sup>   |
| Ολικός συντελεστής απωλειών   | U <sub>o</sub>     | 2.18 W/m <sup>2</sup>   |
| Παραγόμενη θερμότητα          | Q <sub>u</sub>     | 4883.78 W               |
| <b>Απόδοση</b>                | <b>η</b>           | <b>70.38%</b>           |

Σε αυτήν την περίπτωση σταθερής κατάστασης ο συλλέκτης λειτουργεί με οπτική απόδοση 70.8% και θερμική απόδοση 70.38% ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου ρευστού είναι κατά 2.34 °C, έπειτα από την επίδραση των απωλειών του συστήματος. Γίνεται εύκολα σαφές ότι ο συντελεστής απωλειών έχει πολύ μικρή επίδραση στην απόδοση του συγκεκριμένου συστήματος και η θερμική απόδοση είναι σχεδόν ίση με την οπτική. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς για έναν παραβολικό συγκεντρωτικό συλλέκτη οι οπτικές ιδιότητες των υλικών είναι αυτές που καθορίζουν την απόδοση.

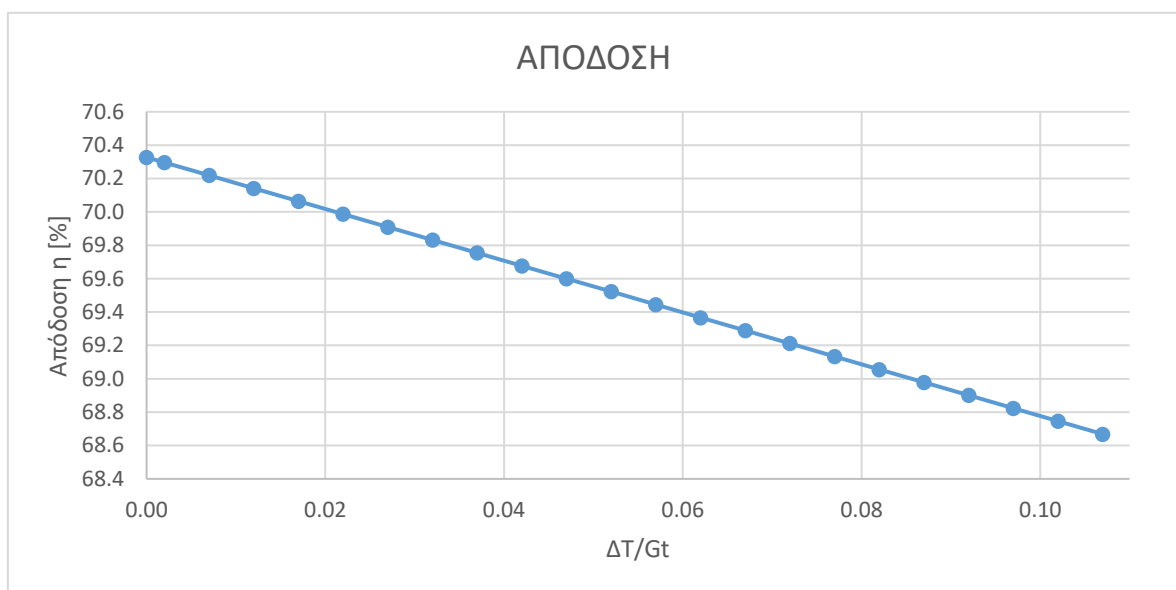


## 5.4. Παραμετρική Διερεύνηση Απόδοσης Για Διαφορετικές Περιπτώσεις Λειτουργίας

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την παραμετρική διερεύνηση της απόδοσης σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναλύθηκαν μέχρι εδώ για τον PTC του εργαστηρίου. Μελετώνται δύο περιπτώσεις για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων λειτουργίας για την ίδια διεργασία. Τα γραφήματα κατασκευάστηκαν σε υπολογιστικά φύλλα του λογισμικού "Microsoft Excel".

### Περίπτωση 1: Μεταβλητές τιμές θερμοκρασιών εισόδου για σταθερή τιμή ακτινοβολίας

Θεωρείται ότι ο συλλέκτης λειτουργεί υπό συνεχόμενη σταθερή προσπίπτουσα ακτινοβολία  $G_i$  στην επιφάνειά του και γίνεται μεταβολή της θερμοκρασίας  $T_{in}$  εισόδου του νερού στον δέκτη. Σκοπός είναι η καταγραφή της ροής της θερμότητας που παράγεται και της θερμικής απόδοσης του συλλέκτη σε σχέση με την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της εισόδου του ρευστού στον δέκτη και του εξωτερικού περιβάλλοντος.



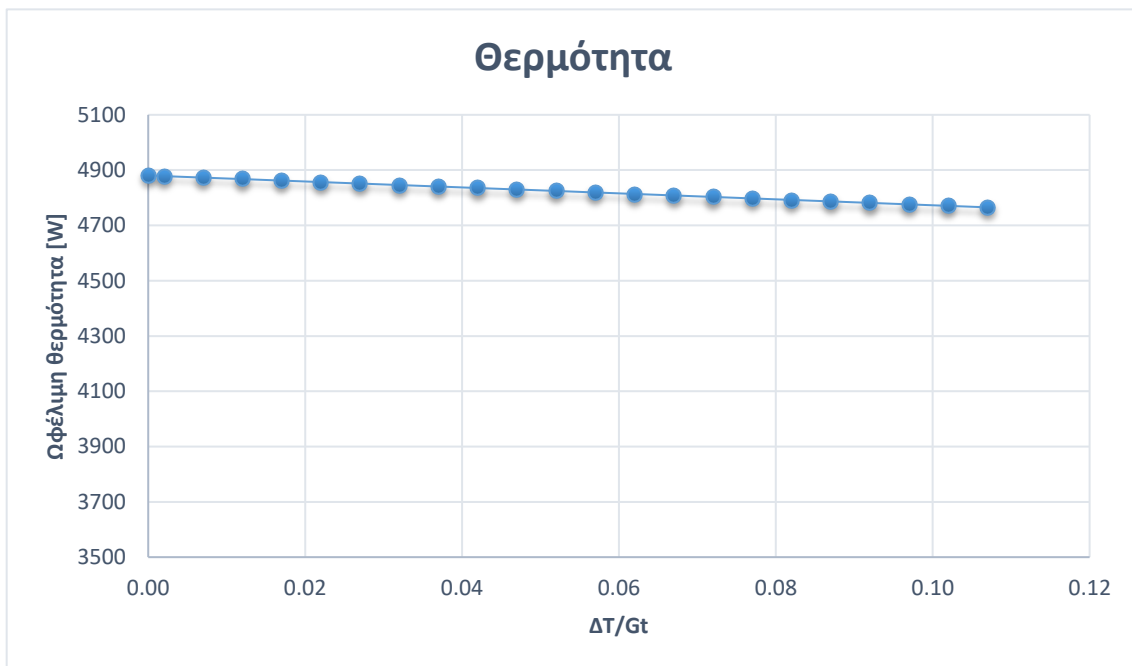
Διάγραμμα 5.2: Αποτύπωση της θερμικής απόδοσης ως προς το μέγεθος  $\Delta T/G_t$

Η δευτεροβάθμια εξίσωση που χαρακτηρίζει αυτήν την καμπύλη με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων δίνεται μέσω της σχέσης 4.34 :

$$\eta = 0.703 + 0.15 \frac{(T_i - T_a)}{G_t} + 3.21 \frac{(T_i - T_a)^2}{G_t}$$

Από την ανάλυση αυτή γίνεται φανερό ότι όσο η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον δέκτη απομακρύνεται από την τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (25 °C) τόσο μικρότερη απόδοση προκύπτει. Στην περίπτωση που αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά είναι αρκετά υψηλή, αυξάνονται σημαντικά οι απώλειες από τον δέκτη προς το περιβάλλον και ο συλλέκτης λειτουργεί με χαμηλότερη απόδοση. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι μηδενική, δηλαδή όταν το ρευστό εισέρχεται στον δέκτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε το μοντέλο λειτουργεί με την βέλτιστη θερμική απόδοση 70.38%. Εφόσον στο μοντέλο μένει σταθερή η τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και η γωνία πρόσπτωσης, τότε μένει αμετάβλητη και η οπτική απόδοση με την τιμή 70.8%.

Σχεδόν αμετάβλητη μένει και η θερμότητα που μεταφέρεται στο ρευστό στην περίπτωση της μεταβλητής θερμοκρασίας εισόδου του, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.3.



Διάγραμμα 5.3: Αποτύπωση της ωφέλιμης θερμότητας ως προς το μέγεθος  $\Delta T/G_t$

Η δευτεροβάθμια εξίσωση που χαρακτηρίζει αυτήν την καμπύλη με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων δίνεται μέσω της σχέσης 4.33 και δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές ως προς το μέγεθος  $\Delta T/G_t$ :

$$Q_u = 4880.427 + 1.07(T_i - T_a) + 0.000022(T_i - T_a)^2$$

Ή εναλλακτικά

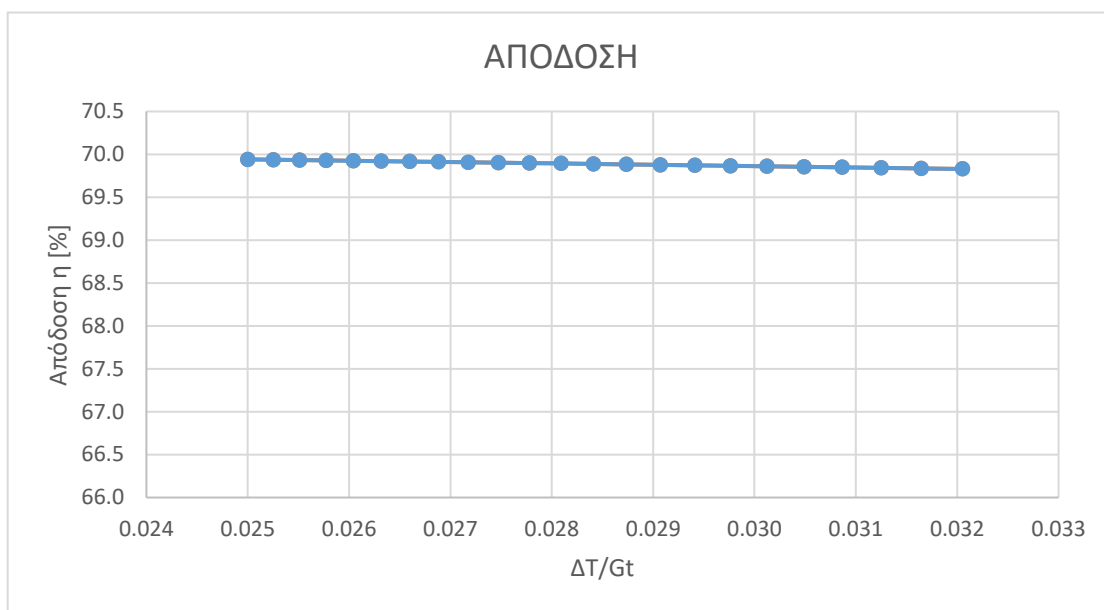
$$Q_u = 4880.427 + 1073 \frac{(T_i - T_a)}{G_t} + 0.022 \frac{(T_i - T_a)^2}{G_t}$$

Το αποτέλεσμα αυτό ήταν προβλεπόμενο, καθώς δεν μεταβάλλεται η ακτινοβολία που προσπίπτει στο κάτοπτρο, οπότε πρακτικά ο δέκτης λαμβάνει το ίδιο ποσό ενέργειας, ενώ ο δεύτερος και ο τρίτος όρος της εξίσωσης προσθέτει μία μικρή διακύμανση του μεγέθους.

Τέλος, να σημειωθεί ότι σε αυτήν την περίπτωση διαφορετικών θερμοκρασιών λαμβάνεται υπ' όψη η αλλαγή της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του νερού, οπότε υπολογίζεται διαφορετικός αριθμός Reynolds για κάθε θερμοκρασία.

#### Περίπτωση 2: Μεταβλητή τιμή ακτινοβολίας για σταθερή θερμοκρασιακή διαφορά

Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται η θεώρηση ότι το νερό επιστρέφει στον συλλέκτη από την δεξαμενή αποθήκευσης σε μία μόνιμα σταθερή θερμοκρασία των 50 °C και δέχεται διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας. Η περίπτωση αυτή θα μπορούσε να προσομοιώσει ιδανικά μια περίπτωση ανοιξιάτικης ημέρας, χωρίς μεγάλη εναλλαγή θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπου ο συλλέκτης λειτουργεί για μεγάλη χρονική διάρκεια και συνεπώς η ακτινοβολία που δέχεται μεταβάλλεται. Τότε συναντώνται τα παρακάτω γραφήματα:



Διάγραμμα 5.4: Αποτύπωση της θερμικής απόδοσης ως προς το μέγεθος  $\Delta T/G_t$

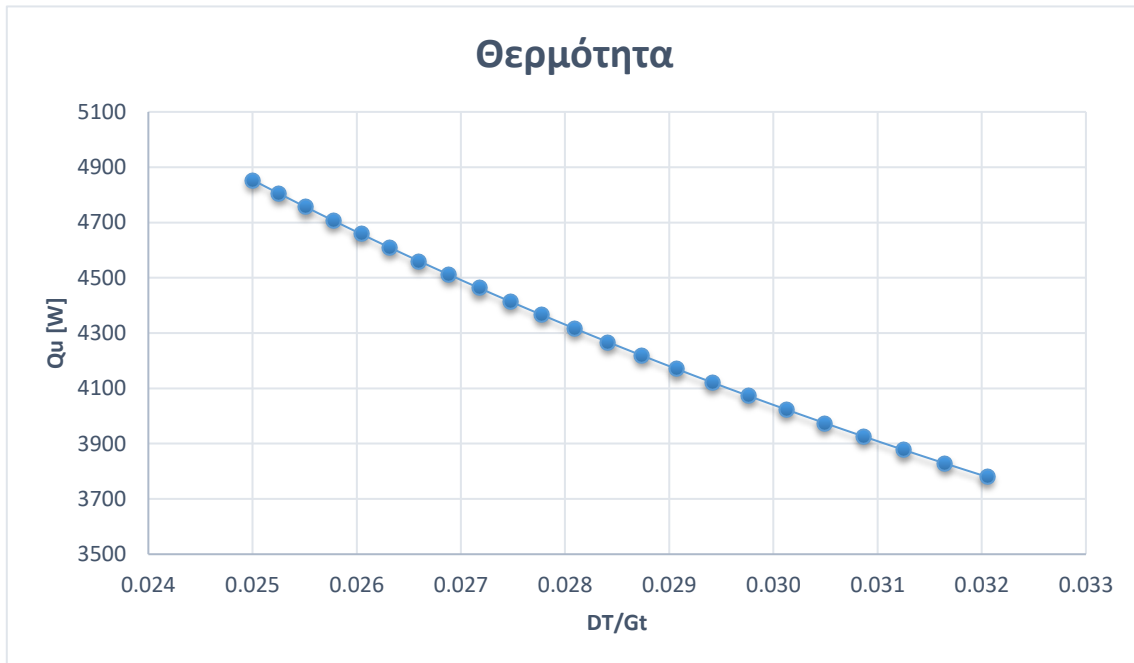
Είναι φανερό τόσο από το διάγραμμα όσο και από την εξίσωση της απόδοσης (4.31) η άμεση συσχέτιση της απόδοσης με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η εξίσωση που προκύπτει σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$\eta = 0.703 + 0.0063 \frac{(T_i - T_a)^2}{G_t}$$

Ή ως συνάρτηση του μεγέθους  $T_{in}-T_a$ :

$$\eta = 0.69$$

Το αποτέλεσμα αυτό είναι φανερό αν γίνει η παρατήρηση του κάθετου άξονα του διαγράμματος 5.4. Πράγματι, οι τιμές της απόδοσης κυμαίνονται γύρω από μία σταθερή τιμή με μία μικρή απόκλιση στο δεύτερο δεκαδικό της ποσοστιαίας μονάδας και η απόδοση μπορεί να θεωρηθεί σταθερή κατά την μεταβολή της ακτινοβολίας. Η τιμή της σε αυτή την περίπτωση δεν πρόκειται να αγγίξει την τιμή της ιδανικής θερμικής απόδοσης 70.38 % όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 5.5, καθώς σε αυτή την ανάλυση αναλύονται επιπλέον απωλειών και φαινομένων μεταφοράς θερμότητας κατά την λειτουργία σε μεγάλο χρονικό διάστημα.

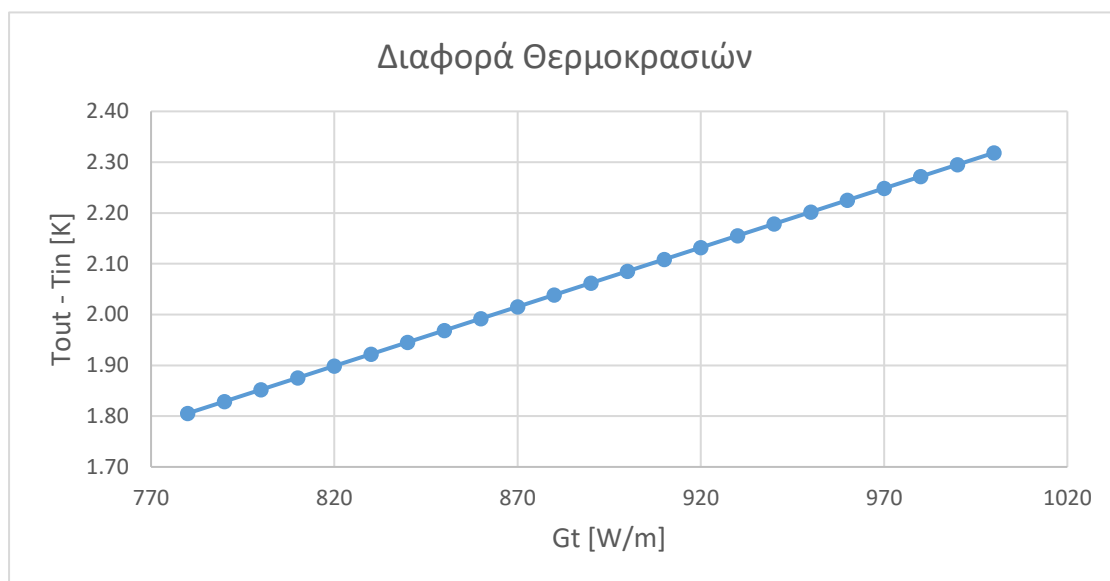


Διάγραμμα 5.5: Αποτύπωση της ωφέλιμης θερμότητας ως προς το μέγεθος  $\Delta T/G_t$

Για την ωφέλιμη θερμότητα παρατηρείται σημαντική μείωση της τιμής της με την αύξηση της τιμής  $\Delta T/G_t$ , δηλαδή την μείωση της ακτινοβολίας, στην περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού, όπως φαίνεται στο διαγραμμα 5.5. Σε αντίθεση με την περίπτωση 1, εδώ συναντάται υψηλή μεταβολή της θερμότητας, όπως θα περίμενε κανείς λόγω της άμεσης εξάρτησης των δύο μεγεθών. Με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων εξάγεται η εξίσωση που χαρακτηρίζει την παρακάτω καμπύλη του διαγράμματος 5.5.

$$Q_u = 8622.45 + 6097.11 \frac{(T_i - T_a)^2}{G_t}$$

Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί ότι όσο η προσπίπτουσα ακτινοβολία αυξάνεται τόσο θα αυξηθεί και η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του νερού από τον δέκτη, [διάγραμμα 5.6]. Έτσι, αν και ο συλλέκτης λειτουργεί με σταθερή απόδοση, η τελική θερμοκρασία που αγγίζει το ρευστό αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας της ακτινοβολίας που συναντά το κάτοπτρο.



*Διάγραμμα 5.6: Αποτύπωση της διαφοράς των θερμοκρασιών εξόδου και εισόδου ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία*

Το συμπέρασμα αυτό οδηγεί στην αναζήτηση τεχνολογιών που θα συγκεντρώνουν μεγαλύτερο ποσοστό των ηλιακών ακτίνων με την βελτιστοποίηση τόσο της γεωμετρίας όσο και των υλικών της ανακλαστικής επιφάνειας. Τέλος, για μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις προτιμώνται περιοχές κοντά στον ισημερινό της Γης, όπου η απόσταση από τον Ήλιο ελαχιστοποιείται και η ηλιακή ακτινοβολία είναι εκ φύσεως μεγαλύτερη σε πυκνότητα και σε χρονική διάρκεια.

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη ενός συγκεντρωτικού παραβολικού ηλιακού συλλέκτη χαμηλής ενθαλπίας και έγινε ανάλυση των βασικών εξισώσεων που διέπουν την λειτουργία του. Για τις ανάγκες της μελέτης, αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο εξισώσεων που δίνει την δυνατότητα χαρακτηρισμού της δευτεροβάθμιας εξίσωσης για την απόδοση και την ωφέλιμη θερμότητα του συγκεκριμένου συλλέκτη υπό διαφορετικές τιμές λειτουργίας.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα, που σχετίζονται με την δυνατότητα πολλαπλασιασμού της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον δέκτη. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη πυκνότητα απορροφούμενης ακτινοβολίας και, συνεπώς, μεταφέρεται υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο προς το ρευστό λειτουργίας, σε σύγκριση με τον αντίστοιχο επίπεδο συλλέκτη. Ο πολλαπλασιασμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας γίνεται λόγω της παραβολικής γεωμετρίας του ανακλαστήρα και της υψηλής ανακλαστικής ικανότητας της παραβολικής επιφάνειας, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.

Σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη, για μία διάταξη PTC πρωτίστως θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην επιλογή της γεωμετρίας του παραβολικού κατόπτρου, ώστε οι ανακλαστικές επιφάνειες να βρίσκονται τοποθετημένες ικανοποιητικά ως προς την εστία του συλλέκτη. Ο δέκτης θα τοποθετηθεί στο σημείο που η καμπύλη της γεωμετρίας ορίζει την εστία της παραβολής.

Στη συνέχεια, ορίζεται το ρευστό απολαβής της θερμότητας, ανάλογα με το επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Σε αυτήν την μελέτη η λειτουργία γίνεται σε συνθήκες χαμηλής ενθαλπίας και ως εργαζόμενο μέσο ορίζεται το νερό. Αυτό παρέχεται στο δίκτυο με συγκεκριμένη παροχή και λαμβάνει την θερμότητα που απορροφάται από τον δέκτη.

Τέλος, στο μοντέλο προσαρτάται ένα αποδοτικό σύστημα εντοπισμού του ήλιου και διόρθωσης της θέσης του κατόπτρου. Στο μοντέλο προς μελέτη επιλέγεται σύστημα προσανατολισμού σε δύο άξονες, οριοθετώντας την γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας στο κάτοπτρο στις μηδέν μοίρες.

Παράλληλα, μέσω της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρείται ότι για σταθερή προσπίπτουσα ακτινοβολία, η απόδοση μειώνεται όσο αυξάνεται η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού στον δέκτη και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η ωφέλιμη θερμότητα, σε

αυτή την περίπτωση υπόκειται σε αρκετά μικρές διακυμάνσεις, καθώς εξαρτάται κυρίως από την ενέργεια που δέχεται ο συλλέκτης.

Στη συνέχεια, μεταβάλλοντας την τιμή της ακτινοβολίας που δέχεται το κάτοπτρο, αλλά διατηρώντας σταθερή την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού, προκύπτει μία σχεδόν σταθερή τιμή απόδοσης, λίγο μικρότερη από την ιδανική, λόγω των απωλειών του συστήματος. Η ωφέλιμη θερμότητα, όπως ήταν αναμενόμενο, ακολουθεί την αύξηση της ακτινοβολίας, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας στην έξοδο του δέκτη. Το αποτέλεσμα αυτό αξιοποιείται βελτιώνοντας τον λόγο συγκέντρωσης σε μία διάταξη ή μεταβάλλοντας τις ανακλαστικές ιδιότητες των υλικών των ανακλαστικών επιφανειών, ώστε ο δέκτης να προσλαμβάνει περισσότερη ηλιακή ενέργεια.

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης, συμπεραίνεται ότι η εγκατάσταση παραβολικών συλλεκτών είναι περισσότερο ενδιαφέρουσα για περιοχές με πλούσια απευθείας ηλιακή ακτινοβολία και μεγάλα διαστήματα ηλιοφάνειας, ώστε να αποφεύγεται η μη ομαλή λειτουργία και οι επιπλέον απώλειες προς το περιβάλλον.

Για την μείωση των απωλειών προς το περιβάλλον χρησιμοποιείται ήδη η τεχνική του κενού ανάμεσα στον απορροφητικό σωλήνα και το γυάλινο εξωτερικό περίβλημα στο οποίο ενσωματώνεται. Στον τομέα βελτιστοποίησης των υλικών του δέκτη γίνεται μεγάλη πρόοδος, κυρίως στο επίπεδο αξιοποίησης επιλεκτικών απορροφητικών επιφανειών με στόχο την μείωση των οπτικών και θερμικών απωλειών. Παραμένουν, όμως αρκετά θέματα προς διερεύνηση με στόχο την περαιτέρω βελτιστοποίηση της απόδοσής τους.



## Βιβλιογραφία

- [1] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, NY: Wiley: Hoboken, 2013.
- [2] J. W. Spencer, *Fourier Series Representation of the Position of the Sun*, 1971.
- [3] P. I. Cooper, «The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills,» *Solar Energy*, τόμ. 12, αρ. 3, 1969.
- [4] S. A. Kalogirou, S. Lloys, J. Ward και P. Elegtheriou, *Design and Performance Characteristics of a Parabolic Trough Solar Collector System*.
- [5] «csptoday,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [www.csptoday.com/csp/](http://www.csptoday.com/csp/).
- [6] T. Chung-Yu και D. L. Psang, «Optimized variable focus parabolic trough reflector for solar thermal concentrator system,» *Sol. Ebergry 86(5)*, pp. 1164-1172, 2012.
- [7] C. Tzivanidis, E. Bellos, Korres D, K. A. Antonopoulos και G. Mitsopoulos, «Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector».
- [8] Y. B. Tao και Y. L. He, «Numerical Study On Coupled Fluid Flow and Heat Transfer Process in Parabolic Trough Solar Collector Tube,» *State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Solar Energy 84*, p. 1863–1872, 2010.
- [9] S. M. Akbarimoosavi και M. Yaghoubi, «3D Thermal-Structural Analysis of an Absorber Tube of a Parabolic Trough Collector and the Effect of Tube Deflection on Optical Efficiency,» *Energy Proc 49*, pp. 2433-2443, 2014.
- [10] A. Marif, H. Benmoussa, H. Bouguettaia, M. M. Belhadj και M. Zerrouki, «Numerical simulation of solar parabolic trough collector performance in the Algeria Sahara region,» *Energy Convers. Manag. 85*, pp. 521-529, 2014.
- [11] WASCOP, «Cranfield University,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [www.cranfield.ac.uk/som/sitecore/content/university/home/research-projects/wascop](http://www.cranfield.ac.uk/som/sitecore/content/university/home/research-projects/wascop).
- [12] «Bright Source Energy,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.brightsourceenergy.com/species-protection>.
- [13] M. S. Sodha, S. S. Mathur και M. S. Malik, *Reviews of Renewable Energy Resources*, Indian Institute of Technology, Delhi: New York : J Wiley, c984.
- [14] S. M. Jeter, D. I. Jarrar και S. A. Moustafa, «Geometrical Effects on the performance of trough collectors,» *Solar Energy, Vol. 30*, pp. 109-113, 1983.
- [15] Y. A. Cengel και A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications (Fifth Edition)*, New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [16] W. H. McAdams, *Heat Transmission*, New York: McGraw-Hill, 1954.
- [17] Y. A. Cengel και J. M. Cimbala, *Μηχανική Ρευστών, Θεωρία και Εφαρμογές*, Fountas, 3η έκδοση.
- [18] «Alanod Solar,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://www.alanod-solar.com/en/Reflection/Technical\\_Information](http://www.alanod-solar.com/en/Reflection/Technical_Information) .

- [19] H. J. H., Solar Absorptance and Thermal Emittance of Some Common Spacecraft Thermal Control Coatings, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland: NASA Reference Publication 1121, 1984.
- [20] M. K. Fuentes, «A simplified thermal model for flat plate photovoltaic arrays,» Albuquerque: Sandia National Labs, 1987.
- [21] «My NASA data,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [mynasadata.larc.nasa.gov/latitudelongitude-finder/](http://mynasadata.larc.nasa.gov/latitudelongitude-finder/).
- [22] «Renewables made in Germany,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.renewables-made-in-germany.com/en/renewables-made-in-germany/corporate-news/detail/article/ultimate-troughR-the-next-generation-collector-for-parabolic-trough-power-plants-first-demonstra.html>.

