

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Προσομοίωση πρότυπου ηλιακού συλλέκτη με ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα»



Της Φοιτήτριας

Κατερίνα Παπάζογλου

Επιβλέπων

Χρήστος Τζιβανίδης, Επίκουρος Καθηγητής Τομέας Θερμότητας

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

<u>Ευχαριστίες</u>

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Τζιβανίδη, λέκτορα του ΕΜΠ, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας καθώς και την επιστημονική του συμβολή κατά τη διεκπεραίωσή της. Επίσης ευχαριστώ θερμά τον διδάκτορα Δημήτριο Ξεύγενο για την συνεχή επίβλεψη και άριστη συνεργασία σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Χρήστο Καλαθάκη για την πολύ χρήσιμη βοήθεια σχετικά με την προσομοίωση.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου Μιχάλη Γεωργίου, Αλέξανδρο Κολιάτο και Κωνσταντίνο Λύρα για τη βοήθεια και τη στήριξη κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και προσομοίωση ενός πρότυπου ηλιακού συλλέκτη που κατασκευάζεται από ελληνική εταιρία. Ο συλλέκτης αυτός διαθέτει σύνθετο παραβολικό ανακλαστήρα χαμηλής συγκέντρωσης (τύπου CPC) και κυλινδρικό δέκτη όπου συγκεντρώνεται η ακτινοβολία. Παράλληλα εξετάζεται η απόδοση ενός εγκατεστημένου συστήματος 17 πρότυπων ηλιακών συλλεκτών. Το σύστημα αυτό βρίσκεται σε μια πιλοτική μονάδα αφαλάτωσης στην περιοχή του Αγίου Φωκά στην Τήνο. Στόχος του ηλιακού πεδίου είναι η κάλυψη των θερμικών αναγκών της μονάδας.

Για την προσομοίωση του πρότυπου ηλιακού συλλέκτη αλλά και του συστήματος των ηλιακών συλλεκτών που είναι εγκατεστημένο στην πιλοτική μονάδα αναπτύχθηκαν δύο κώδικες σε γλώσσα Fortran. Οι κώδικες αυτοί προσομοιώνουν τη λειτουργία του πρότυπου συλλέκτη και του συστήματος αντίστοιχα ανά τακτά χρονικά διαστήματα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας .Σε καθένα από αυτά τα διαστήματα η ακτινοβολία και η ατμοσφαιρική θερμοκρασία θεωρούνται σταθερά. Και στις δύο προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής του Αγίου Φωκά όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα των συλλεκτών.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια γενική εισαγωγή για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με έμφαση στην ηλιακή ενέργεια. Παράλληλα, σχολιάζεται η στάση της Ελλάδας σε ενεργειακά θέματα καθώς και οι προοπτικές στην ανάπτυξη ενεργειακών λύσεων με στόχο την εξοικονόμηση των συμβατικών καυσίμων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται οι βασικές έννοιες για την ηλιακή ακτινοβολία και οι μέθοδοι υπολογισμού της σε σχέση με την ηλιακή γεωμετρία και την ατμόσφαιρα. Εν συνεχεία γίνεται μια σύντομη αναφορά στο πρόγραμμα PVGIS και τις βάσεις δεδομένων από τα οποία προέκυψαν τα απαραίτητα μετεωρολογικά στοιχεία για την προσομοίωση του συλλέκτη. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει την ακτινοβολία (ολική και διάχυτη) και την ατμοσφαιρική θερμοκρασία ανά διαστήματα 15 λεπτών από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου για τη μέση ημέρα κάθε μήνα του έτους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες σύγχρονων ηλιακών συλλεκτών καθώς και μια αντίστοιχη αναφορά στην αρχή λειτουργίας και τις εφαρμογές κάθε κατηγορίας. Ειδικότερα για τους σύνθετους παραβολικούς συλλέκτες πραγματοποιείται μια εκτενέστερη ανάλυση καθώς ο υπό μελέτη ηλιακός συλλέκτης εντάσσεται στη συγκεκριμένη κατηγορία. Η τελευταία ενότητα του κεφαλαίου αφορά τον πρότυπο ηλιακό συλλέκτη. Αρχικά εξηγούνται τα μέρη από τα οποία αποτελείται ο συλλέκτης και δίνονται φωτογραφίες από το εργαστήριο σε διάφορες φάσεις κατασκευής του. Στην ίδια ενότητα εκτίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δόθηκαν από τον κατασκευαστή. Στη συνέχεια, για τα στοιχεία που δεν ήταν διαθέσιμα από τον κατασκευαστή πραγματοποιήθηκε μια προσέγγιση βάσει της θεωρίας των σύνθετων παραβολικών συλλέκτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μελέτη των τρόπων μετάδοσης θερμότητας όπως απαιτείται για τη θερμική ανάλυση ενός ηλιακού συλλέκτη. Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφονται όσες

μαθηματικές σχέσεις βρέθηκαν στη βιβλιογραφία και αφορούν μεταφορά θερμότητας από και προς τις επιφάνειες του συλλέκτη. Η ανάλυση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας γίνεται στα πλαίσια του μαθηματικού μοντέλου που επιλέχθηκε για την προσομοίωση του συλλέκτη γι' αυτό και περιορίζεται στη μόνιμη και μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του συλλέκτη. Αρχικά, εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο ο κώδικας αξιοποιεί τα μετεωρολογικά δεδομένα που διαβάζει υπο μορφή αρχείου κειμένου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός όλων των θερμορροών που συναλλάσουν οι επιφάνειες του συλλέκτη αλλά και των ισολογισμών που διαμορφώνουν το σύστημα των εξισώσεων προς επίλυση. Έπειτα γίνεται αναφορά στη μέθοδο σύγκλισης που χρησιμοποιείται για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων. Στο ίδιο κεφάλαιο περιλαμβάνεται και μια σύνοψη όλων των παραδοχών και απλοποιήσεων που έγιναν κατά τη μοντελοποίηση του πρότυπου συλλέκτη.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του ηλιακού συλλέκτη. Στην αρχή γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων που υπολογίζονται από τον κώδικα. Μέσω των αποτελεσμάτων, διερευνώνται παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συλλέκτη και συγκρίνονται διαφορετικές σχέσεις υπολογισμού των θερμορροών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Έπειτα, δίνονται διαγραμματικά η αποδιδόμενη ισχύς, η θερμοκρασία εξόδου του νερού και ο βαθμός απόδοσης του πρότυπου συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας όλων των μηνών του έτους.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κώδικα προσομοίωσης του συστήματος των ηλιακών συλλεκτών. Αρχικά γίνεται μια σύντομη αναφορά στη θέση και τη διάταξη που έχει το εγκατεστημένο ηλιακό πεδίο στην πιλοτική μονάδα. Στη συνέχεια δίνεται διαγραμματικά η αποδιδόμενη ισχύς και η θερμοκρασία εξόδου του συστήματος των συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας όλων των μηνών του έτους.

Summary

The objective of this thesis is the study and simulation of a prototype solar collector which is manufactured by a greek company. The prototype collector consists of a low concentration compound parabolic reflector (cpc-type) which concentrates solar energy on a cylindrical absorber. Additionally, this study deals with the efficiency of an existing solar system which comprises 17 prototype collectors. The system is installed at an existing desalination unit in the region of Agios Fokas in Tinos island.

The collector as well as the solar system were simulated developing computational codes in Fortran 77. Both codes use the meteorological data of the region of Agios Fokas, where the desalination plant is located.

The first chapter is an introduction to renewable energy sources emphasized on solar energy. Moreover, the current energy regime is pointed out, as well as the prospects of developing energy solutions aiming at reducing the consumption of fossil fuels.

In the second chapter there is a presentation of the basic concepts of solar radiation and its calculation concerning solar geometry and ambient conditions. Furthermore, there is a brief reference to the PVGIS program and its database for the meteorological data used in the simulation. The program provides the values of solar radiation and ambient temperature per 15 minutes from the sunrise to the sunset of the mean day of every month.

The third chapter deals with the basic types of commonly used solar collectors as well as their mode of operation and applications. Especially for the compound parabolic collectors there is a more extensive analysis, since the prototype collector belongs to this category. In the last section of this chapter, the prototype collector is presented together with the technical information provided by the manufacturer. Additionally, for the data which were not given, an approximation was made based on theory of cpc-type collectors.

Chapter four provides the main heat transfer theoretical basis as it is required for the thermal analysis of any heat exchanger. In this chapter all the mathematical correlations describing heat transfer between the surfaces of the collector found in bibliography were registered. However, thermal analysis is done in terms of the mathematical model chosen for the simulation of the collector. That's why the study is limited to constant, one-dimensional heat transfer analysis.

In the fifth chapter the mathematical model used for the simulation of the solar collector is given. Initially, it is explained how the code makes use of the meteorological data that reads as a text document. Next, there is an analytical calculation of the heat fluxes exchanged between the surfaces of the collector as well as the equations that form the system to be resolved. Also, there is a reference to the convergence method used for the resolution of the equation system. Additionally, there is an overview of all the assumptions and simplifications taken for the modelization of the prototype collector.

Chapter six comprises the results obtained from the simulation of the prototype collector. At first, there is an analytical presentation of the data calculated from the code. In regard to the results of the code, there is an examination of the effect of some factors on the efficiency of the collector. Also, there is a comparison between different correlations found in bibliography, which were used for the calculation of the heat fluxes. The chapter also includes diagrams for (i) the useful heat, (ii) the exit temperature of the water, (iii) as well as collector efficiency during the mean day of every month.

Chapter seven comprises the results obtained from the simulation of the solar system. Initially the configuration and the position of the solar field in the desalination plant are given. The chapter also includes diagrams for useful heat and exit temperature of water during the mean day of every month.

Περιεχόμενα

| 1 | ΕΙΣΑ | ΓΩΓΗ | 1 | 17 |
|---|-------|------------------------|---|----|
| | 1.1 | Το ενεργειακό πρόβλημα | | 17 |
| | 1.2 | Ηηλ | ιιακή ακτινοβολία ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας | 18 |
| | 1.3 | Η εν | έργεια και οι ΑΠΕ στην Ελλάδα | 19 |
| | 1.3. | 1 | Η παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα | 19 |
| | 1.3. | 2 | Πολιτεία και Θεσμικό Πλαίσιο | 21 |
| | 1.4 | Αντι | κείμενο της εργασίας | 23 |
| 2 | ΗΛL | AKH A | ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ | 25 |
| | 2.1 | Γενι | κά | 25 |
| | 2.2 | Ηλια | ακή γεωμετρία | 29 |
| | 2.3 | Προ | σανατολισμός και κίνηση συλλεκτών | 33 |
| | 2.4 | Μέτ | ρηση ηλιακής ακτινοβολίας | 35 |
| | 2.4. | 1 | Γενικά | 35 |
| | 2.4. | 2 | Ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας | 36 |
| | 2.4. | 3 | Ακτινοβολία αιθρίας ατμόσφαιρας | 36 |
| | 2.4. | 4 | Συχνότητα εμφάνισης νέφωσης | 38 |
| | 2.4. | 5 | Ανάλυση ολικής ακτινοβολίας σε άμεση και διάχυτη | 38 |
| | 2.4. | 6 | Υπολογισμός προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφανειες | 40 |
| | 2.5 | Σύσ | τημα PVGIS | 41 |
| | 2.5. | 1 | Το πρόγραμμα και οι βάσεις δεδομένων | 41 |
| | 2.5. | 2 | Μοντέλο υπολογισμού της ακτινοβολίας | 42 |
| | 2.5. | 3 | Τρέχουσα εφαρμογή | 43 |
| 3 | EIΔŀ | Н НЛІ | ΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ | 47 |
| | 3.1 | Μη | συγκεντρωτικοί συλλέκτες | 50 |
| | 3.1. | 1 | Επίπεδοι συλλέκτες | 50 |
| | 3.1.2 | | Συλλέκτες κενού | 51 |
| | 3.2 | Συγι | κεντρωτικοί συλλέκτες | 57 |
| | 3.2. | 1 | Γενικά | 57 |
| | 3.2. | 2 | Λόγος συγκέντρωσης | 57 |
| | 3.2.3 | | Συγκεντρωτές με είδωλο | 59 |
| | 3.2.4 | | Συγκεντρωτές χωρίς είδωλο | 65 |

| | 3.2. | 5 | Ηλιακά συστήματα με μη συνεχείς συγκεντρωτές | 84 |
|---|--------------|------------|---|-------|
| | 3.3 | Πρά | ότυποι συλλέκτες | 87 |
| | 3.3. | 1 | Παρουσίαση πρότυπου συλλέκτη | 87 |
| | 3.3. | 2 | Τεχνικά χαρακτηριστικά πρότυπου συλλέκτη | 89 |
| | 3.3. | 3 | Οπτικά χαρακτηριστικά πρότυπου συλλέκτη | 91 |
| 4 | MET | ΓΑΦ | ΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ | 95 |
| | 4.1 | Με | ταφορά Θερμότητας με αγωγή | 95 |
| | 4.2 | Mε | ταφορά Θερμότητας με συναγωγή | 96 |
| | 4.2. | 1 | Παράγοντες που επηρεάζουν τη συναγωγή | 96 |
| | 4.2. | 2 | Νόμος Newton – Χαρακτηριστικοί Αδιάστατοι αριθμοί της ροής | 96 |
| | 4.2. | 3 | Υπολογισμός αριθμού Nusselt | 100 |
| | 4.2. | 4 | Ροή σε δακτύλιο | 104 |
| | 4.2. | 5 | Φυσική συναγωγή σε κλειστούς χώρους υπό χαμηλή πίεση | 107 |
| | 4.3 | Mε | τάδοση θερμότητας με ακτινοβολία | 109 |
| | 4.3. | 1 | Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία-Μέλαν σώμα | 109 |
| | 4.3. | 2 | Ιδιότητες της ακτινοβολίας | 111 |
| | 4.3. | 3 | Τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης (ΙΑΜ) | 118 |
| | 4.3. | 4 | Ροή θερμότητας με ακτινοβολία | 123 |
| 5 | ПРС | δον | ΙΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ | 127 |
| | 5.1 | Mε | τεωρολογικά δεδομένα | 127 |
| | 5.2 | Υπο | ολογισμός ακτινοβολίας που λαμβάνεται από το συλλέκτη | 128 |
| | 5.3 | Υπο | ολογισμός ακτινοβολιών που δεσμεύονται από τις επιφάνειες του δέκτη | 132 |
| | 5.4 δέκτη | Υπс 134 | ολογισμός θερμικών ροών που συναλλάσσονται μεταξύ των επιφανειώ | ν του |
| | 5.5 | Ισοί | λογισμοί θερμικών ροών στο δέκτη | 142 |
| | 5.6 | Υπο | ολογισμός θερμοκρασίας εξόδου του συλλέκτη | 144 |
| | 5.7 | Εκτ | ίμηση της απόδοσης του συλλέκτη | 145 |
| | 5.8 | Μέ | θοδος επίλυσης των εξισώσεων | 149 |
| | 5.9 | Μέ | θοδος σύγκλισης | 149 |
| 6 | АПС | ΟΤΕΛ | ΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ | 153 |
| | 6.1 | Εισ | αγωγή | 153 |
| | 6.2 | Διε | ρεύνηση/επεξήγηση αποτελεσμάτων | 154 |
| | 6.3 | Απο | οδιδόμενη ισχύς του ηλιακού συλλέκτη για τη μέση ημέρα κάθε μήνα | 162 |
| | 6.4 | Βαθ | θμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη για τη μέση ημέρα κάθε μήνα | 163 |

| | 6.5 κάθε μ | Θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον ηλιακό συλλέκτη για τη μέση ημέρα ήνα168 |
|---|---------------|--|
| | 6.6 | Συμπεράσματα172 |
| 7 | АПС | ΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ |
| | 7.1 | Περιγραφή συστήματος175 |
| | 7.2 | Αποδιδόμενη ισχύς συστήματος177 |
| | 7.3 | θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών 178 |
| | 7.4 συστή | Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κώδικα προσομοίωσης του ηλιακού ματος |

Λίστα Εικόνων

| Εικόνα 1-1: Μέσες ετήσιες τιμές ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου (χωρίς βέλτιστη κλίση) |
|---|
| σε kWh/m ² |
| Εικόνα 1-2 : Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ στην Ελλάδα, στόχος έτους 2020 |
| Εικόνα 2-1: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας |
| Εικόνα 2-2 : Τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο |
| Εικόνα 2-3 : Το μήκος L που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα πάχους Η |
| καθορίζει την ολική ελάττωση της έντασης της |
| Εικόνα 2-4 : Ύψος ηλίου α, Αζιμούθιο ηλίου γ_s , Αζιμούθιο επιφάνειας γ , γωνία ζενίθ ϑ_z για |
| επίπεδο με κλίση β (α.) γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας για επίπεδο με κλίση β |
| (b.) |
| Εικόνα 2-5: Βασικοί προσανατολισμοί ηλιακών συλλεκτών |
| Εικόνα 2-6 : Άμεση ακτινοβολία οριζόντιας και κεκλιμένης επιφάνειας |
| Εικόνα 2-7 : Σύστημα PVGIS,ο χάρτης επιλογής της περιοχής(αριστερά), οι επιλογές που |
| αφορούν τις μετρήσεις ακτινοβολίας (δεξιά) |
| Εικόνα 3-1 : Τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης 50 |
| Εικόνα 3-2: Γυάλινος αεροστεγής σωλήνας τύπου dewar |
| Εικόνα 3-3: Συστοιχία σωλήνων κενού |
| Εικόνα 3-4 : Τομή σωλήνα κενού άμεσης ροής με αγωγό U53 |
| Εικόνα 3-5 : Τομή συλλέκτη με σωλήνες κενού άμεσης ροής με αγωγούς U |
| Εικόνα 3-6 : Σωλήνας κενού με ομόκεντρο σωλήνα ροής |
| Εικόνα 3-7 : Τομή θερμικού σωλήνα |
| Εικόνα 3-8 : Θερμικός σωλήνας του εμπορίου55 |
| Εικόνα 3-9 : Θερμικοί σωλήνες υγρής σύνδεσης (α.), Θερμικοί σωλήνες ξηρής σύνδεσης (b.) |
| |
| Εικόνα 3-10 : Συγκεντρωτικός συλλέκτης με επιφάνεια ανοίγματος Αα και επιφάνεια δέκτη |
| Ar που βλέπει ήλιο ακτίνας r σε απόσταση R58 |
| Εικόνα 3-11 : Παραβολικός συγκεντρωτικός συλλέκτης (PTC)60 |
| Εικόνα 3-12 : Ημιτομή παραβολικού συλλέκτη (α.), Ανάκλαση κάθετα προσπίπτουσας |
| ακτινοβολίας από παραβολική επιφάνεια (b.) 61 |

| Εικόνα 3-13 : Παραβολικοί δίσκοι με μηχανές Stirling σε λειτουργία στο ερευνητικό κέντρο |
|--|
| Plataforma Solar de Almeria της Ισπανίας. Κάθε δίσκος παράγει 10kW ηλεκτιρκής ισχύος. 64 |
| Εικόνα 3-14 : Ανάκλαση άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας από σύνθετο παραβολικό |
| συλλέκτη65 |
| Εικόνα 3-15 : Τομές σύνθετων συμμετρικών διδιάστατων παραβολικών συγκεντρωτών (α.) |
| με επίπεδο οριζόντιο δέκτη (b.)με επίπεδο κατακόρυφο δέκτη (c.) με δέκτη τύπου κορυφής |
| (wedge-type), (d .) με κυλινδρικό δέκτη (όλοι οι δέκτες έχουν συνολική περίμετρο α) 66 |
| Εικόνα 3-16 : τυπική μονάδα ηλιακού θερμοσίφωνα FPTU (α.), πλήρης μονάδα συλλέκτη |
| αποθήκευσης ICS με κυλινδρικό δέκτη (b.)66 |
| Εικόνα 3-17 : Συστοιχία σωλήνων κενού με ανακλαστήρες CPC (α.), Τομή συλλέκτη τύπου |
| CPC με κυλινδρικό δέκτη κενού και αγωγό τύπου U (b.) |
| Εικόνα 3-18 : Εφαρμογή μεθόδου των χορδών για τη σχεδίαση σύνθετων παραβολικών |
| συγκεντρωτών με επίπεδο δέκτη (α.) με κυλινδρικό δεκτη (b.) |
| Εικόνα 3-19 : Τομή συγκεντρωτή CPC69 |
| Εικόνα 3-20 : Συλλέκτης CPC με κυλινδρικό δέκτη (α.), Ημιτομή συγκεντρωτή CPC με |
| κυλινδρικό δέκτη - παραγωγή επιφάνειας εξειλιγμένης καμπύλης (b.) |
| Εικόνα 3-21 : Εύρος γωνιών αποδοχής για συλλέκτη CPC με κλίση β |
| Εικόνα 3-22 : Αποκοπή άκρων cpc συγκεντρωτή με επίπεδο δέκτη (α.), Αποκοπή άκρων cpc |
| συγκεντρωτή με επίπεδο δέκτη (b.) |
| Εικόνα 3-23 : :Αποκομμένος συλλέκτης cpc λόγο συγκέντρωσης C= 1 |
| Εικόνα 3-24 : Σύστημα κατόπτρων Fresnel της εταιρίας Kimberlina στην Καλιφόρνια 85 |
| Εικόνα 3-25 : Πύργος ισχύος στην έρημο της Καλιφόρνια |
| Εικόνα 3-26 : Συγκεντρωτικός συλλέκτης της εταιρίας MAG |
| Εικόνα 3-27 : Ανακλαστήρας πρότυπου συλλέκτη μετά την τοποθέτησή του πάνω στο |
| σκελετό |
| Εικόνα 3-28 : δέκτης του πρότυπου συλλέκτη πριν την τοποθέτηση του γυάλινου |
| καλύμματος |
| Εικόνα 3-29 : Άκρο δέκτη απο το οποίο εισέρχεται το ρευστό (α.), άκρο δέκτη από το οποίο |
| εξέρχεται το ρευστό (b.) |
| Εικόνα 3-30 : Σκελετός πρίν (α.) και μετά (b.) την τοποθέτηση του ανακλαστήρα |
| Εικόνα 3-31 : Τομή του συλλέκτη που δόθηκε από τον κατασκευαστή |
| Εικόνα 3-32 : Σύγκριση της τομή του συλλέκτη mag με τομές cpc συλλεκτών για διάφορες |
| γωνίες αποδοχής |
| Εικόνα 3-33 : Προσδιορισμός των γωνιών αποδοχής πριν και μετά την αποκοπή των άκρων |
| του συγκεντρωτή |
| Εικόνα 4-1 : μέλαν σώμα |
| Εικόνα 4-2 : Πορεία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια |
| Εικόνα 4-3 : κατοπτρική ανάκλαση (α.) διάχυτη ανάκλαση (b.) πραγματική ανάκλαση (c.)113 |
| Εικόνα 4-4 : Γωνίες θΙ και θt στους συλλέκτες σωλήνων κενού(α.), Μεταβολή της |
| ακτινοβολίας που δέχονται οι σωλήνες κενού στη διάρκεια της ημέρας (b.) |
| Εικόνα 4-5 : Σχηματική απεικόνιση των γωνιών θt και θl σε συλλέκτη CPC |
| Εικόνα 4-6 : Σχηματική απεικόνιση των απωλειών από την ακτινοβολία που δε φτάνει στο |
| άκρο δέκτη (end losses) |
| Εικόνα 5-1: σχηματική απεικόνιση θερμορροών από και προς τις επιφάνειες του δέκτη στον |
| πρότυπο ηλιακό συλλέκτη |

| Εικόνα 5-2 :θερμοκρασίες στις επιφάνειες του δέκτη T_2, T_3, T_4, T_5 , ατμοσφαιρική θερμα | οκρασία |
|--|----------|
| T ₆ , θερμοκρασία ουρανού T ₇ , θερμοκρασία ρευστού T _{fluid} | 142 |
| Εικόνα 5-3 : Δίκτυο θερμορροών για τον πρότυπο ηλιακό συλλέκη | 142 |
| Εικόνα 7-1 : Σύστημα πρότυπων ηλαικών συλλεκτών που έχει εγκατασταθεί στην π | πιλοτική |
| μονάδα αφαλάτωσης στην Τήνο | 175 |
| Εικόνα 7-2 : Σχηματική απεικόνιση του συστήματος των πρότυπων ηλιακών συλλεκ | τών που |
| έχει εγκατασταθεί στην πιλοτική μονάδα αφαλάτωσης στην Τήνο | 176 |

Λίστα Πινάκων

| Πίνακας 2-1: Τυπικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης albedo | 28 |
|--|-------|
| Πίνακας 2-2: Αύξων αριθμός n ημέρας του έτους, μέση ημέρα μήνα,αριθμός n της μ | ιέσης |
| ημέρας κάθε μήνα, ηλιακή απόκλιση δ μέση ημέρας | 30 |
| Πίνακας 2-3: Διορθωτικοί συντελεστές τύπου κλίματος | 37 |
| Πίνακας 3-1 : Συντελεστής συγκέντρωσης και θερμοκρασιακό εύρος για όλους τους τύ | πους |
| ηλιακών συλλεκτών και ηλιακών συστημάτων του κεφαλαίου | 60 |
| Πίνακας 3-2 : Αριθμός ανακλάσεων για διαφορετικά ποσοστά αποκοπής cpc συλλεκτώ | ών με |
| αρχική γωνία αποδοχής θc=35° | 83 |
| Πίνακας 3-3 : : Τεχνικά χαρακτηριστικά πρότυπου συλλέκτη | 89 |
| Πίνακας 4-1 : Τυπικές τιμές συντελεστή συναγωγής h για διάφορες συνθήκες μεταφ | οράς |
| θερμότητας και τύπους ρευστού | 97 |
| Πίνακας 4-2 : Παράμετροι C,m σε σχέση με το εύρος του Reynolds για την εξωτε | ερική |
| συναγωγή σε κυλινδρική επιφάνεια | . 102 |
| Πίνακας 4-3 : Αριθμοί Nusselt για στρωτή ροή σε δακτύλιο με μία ισοθερμική κα | ι μία |
| αδιαβατική επιφανεια | . 105 |
| Πίνακας 4-4 : Σχέσεις υπολογισμού Nusselt για δακτυλιοειδή ροή | . 106 |
| Πίνακας 4-5 : Συντελεστής εκπομπής και απορρόφησης επιστρώσεων απορροφητών | . 118 |
| Πίνακας 5-1 : Συντελεστές οπτικού βαθμού απόδοσης συλλέκτη | . 132 |
| Πίνακας 5-2 : Σύνοψη παραδοχών και απλοποιήσεων που έγιναν στην παρα | ούσα |
| προσομοίωση του πρότυπου ηλιακού συλλέκτη | . 147 |
| Πίνακας 6-1 : Αναλυτικά αποτελέσματα από τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που φ | τάνει |
| στο δέκτη του πρότυπου ηλιακού συλλέκτη με τον κώδικα COLLECTOR_CODE_daily.for. | . 155 |
| Πίνακας 6-2 : Αναλυτικά αποτελέσματα από τον υπολογισμό της απόδοσης του πρότι | υπου |
| ηλιακού συλλέκτη με τον κώδικα COLLECTOR_CODE_daily.for | . 156 |

<u>Λίστα διαγραμμάτων</u>

 Διάγραμμα 3-3 : Οπτική απόδοση και γωνιακή αποδοχή συλλέκτη cpc με κυλινδρικό δέκτη Διάγραμμα 3-4 : Ποσοστό ακτινοβολίας που φτάνει στον απορροφητή για τέλειο Διάγραμμα 3-5 : Συνάρτηση F(θ) για cpc με κυλινδρικό δέκτη αρχικής γωνίας αποδοχής 35° Διάγραμμα 3-6 : Μέσος αριθμός ανακλάσεων που υφίσταται η ακτινοβολία που προσπίπτει Διάγραμμα 4-1 : Οριακές συνθήκες: σταθερής θερμοκρασίας επιφάνειας (αριστερά), Διάγραμμα 4-2 : Μήκος κύματος-εκπεμπόμενης ενέργειας μέλανος σώματος για διάφορες Διαγράμματα 4-3 : Συντελεστής εκπομπής για μέλαν, φαιό και πραγματικό σώμα σε σχέση με το μήκος κύματος (α.), Ένταση εκπομπής για μέλαν,φαιό και πραγματικό σώμα σε σχέση Διάγραμμα 4-4 : Συντελεστής απορροφητικότητας στην ορατή περιοχή του μήκους κύματος Διάγραμμα 4-5 : Συντελεστής διαπερατότητας βοριοπυριτικού γυαλιού Schott της εταιρίας Διάγραμμα 4-6 : Διαπερατότητα γυαλιού σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης για διάφορους Διάγραμμα 4-7 : Συντελεστής εκπομπής επιλεκτικής επιφάνειας (φαιή επιφάνεια)......... 117 Διάγραμμα 4-8 : Τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης ΙΑΜ για τυπικό επίπεδο συλλέκτη του Διάγραμμα 4-9 : Τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης ΙΑΜ σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης και αντίστοιχή συνάρτηση για ένα συλλέκτη PTC120 Διάγραμμα 4-11 : Τυπικές καμπύλες ΙΑΜ για ηλιακούς συλλέκτες CPC με κυλινδρικό δέκτη Διάγραμμα 6-1 : Γωνιακή αποδοχή και οπτικός βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλικαού Διάγραμμα 6-2 : Θερμότητα που προσδίδεται στο ρευστό σε σχέση με την ακτινοβολία που Διάγραμμα 6-3 :βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με το βαθμό απόδοσης αν δεν είχει αφαιρεθεί ο αέρας μεταξύ απορροφητή και γυάλινου καλύμματος Διάγραμμα 6-4 : βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (οι απώλειες συναγωγής από το γυάλινο κάλυμμα υπολογισμένες με τη σχέση Churcill-Zhukauskas)... 160 Διάγραμμα 6-5 : βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (οι απώλειες συναγωγής από το γυάλινο κάλυμμα υπολογισμένες με την απλοποιημένη σχέση 5.4.26)

Διάγραμμα 6-6 : βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (οι απώλειες συναγωγής από το γυάλινο κάλυμμα υπολογισμένες με τη σχέση Churcill-Bernstein) 160 Διάγραμμα 6-7 : Θερμότητα που προσδίδεται στο νερό από τον πρότυπο ηλιακό συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου (ο αριθμός Nusselt υπολογισμένος με Διάγραμμα 6-8 : Θερμότητα που προσδίδεται στο νερό κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-9 : Θερμότητα που προσδίδεται στο νερό κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-10 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-11 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-12 :Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τηδιάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-13 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της ημέρας του Διάγραμμα 6-14 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-15 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-16 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-17 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-18 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-19 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-20 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-21 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Διάγραμμα 6-22 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της Διάγραμμα 6-23 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της Διάγραμμα 6-24 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της Διάγραμμα 6-25 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της Διάγραμμα 6-26 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της

| Διάγραμμα 6-27 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της |
|--|
| μέσης ημέρας Ιουνίου |
| Διάγραμμα 6-28 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της |
| μέσης ημέρας Ιουλίου |
| Διάγραμμα 6-29 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της |
| μέσης ημέρας Αυγούστου |
| Διάγραμμα 6-30 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της |
| μέσης ημέρας Σεπτεμβρίου |
| Διάγραμμα 6-31 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της |
| μέσης ημέρας Οκτωβρίου |
| Διάγραμμα 6-32: Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της |
| μέσης ημέρας Νοεμβρίου |
| Διάγραμμα 6-33 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της |
| μέσης ημέρας Δεκεμβρίου |
| Διάγραμμα 7-1 : Αποδιδόμενη ισχύς συστήματος συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης |
| ημέρας των μηνών τοτ χειμώνα και του φθινοπώρου |
| Διάγραμμα 7-2 : Αποδιδόμενη ισχύς συστήματος συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης |
| ημέρας των μηνών του καλοκαιριού και της άνοιξης |
| Διάγραμμα 7-3 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιανουαρίου |
| Διάγραμμα 7-4 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Φεβρουαρίου |
| Διάγραμμα 7-5 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Μαρτίου |
| Διάγραμμα 7-6 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Απριλίου |
| Διάγραμμα 7-7 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Μαίου180 |
| Διάγραμμα 7-8 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου |
| Διάγραμμα 7-9 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουλίου |
| Διάγραμμα 7-10 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Αυγούστου |
| Διάγραμμα 7-11 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Σεπτεμβρίου |
| Διάγραμμα 7-12 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Οκτωβρίου |
| Διάγραμμα 7-13 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας τουΝοεμβρίου |
| Διάγραμμα 7-14 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών |
| κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Δεκεμβρίου |

<u>Ακρωνύμια</u>

| ΑΠΕ | Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας |
|-------|--|
| CMSAF | Satellite Application Facility on Climate Monitoring |
| CPC | Compound Parabolic Collector |
| СТС | Cylindrical Trough Collector |
| ETC | Evacuated Tube Collector |
| FPC | Flat Plate Collector |
| FPTU | Flat Plate Thermosiphonic Units |
| IAM | Incident Angle Modifier |
| HFC | Heliostat Field Collector |
| ICS | Integrated Collector Storage |
| LFR | Linear Fresnel Reflector |
| ORC | Organic Rankine Cycle |
| PDR | Parabolic Dish Reflector |
| PTC | Parabolic Trough Collector |
| PVGIS | Photovoltaic Geographical Information Systems |
| SRTM | Shuttle Radar Toography Mission |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

Η σημασία της ενέργειας στην οικονομική ανάπτυξη αναγνωρίζεται παγκοσμίως και ιστορικά αποδεικνύεται πως η ενεργειακή ζήτηση μιας χώρας είναι ανάλογη με την ποιότητα διαβίωσης των πολιτών της. Οι έννοιες ανάπτυξη και ζήτηση ενέργειας στις σύγχρονες κοινωνίες τείνουν να γίνουν ταυτόσημες. Η αύξηση του πληθυσμού αλλά και η ανάγκη βελτίωσης του βιοτικού του επιπέδου έχει οδηγήσει, σήμερα, στην ραγδαία αύξηση της ενεργειακής ζήτησης.

Μέχρι πρόσφατα τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, λιγνίτης, άνθρακας) αποτελούσαν παγκοσμίως την κύρια πηγή ενέργειας για τις μεταφορές, τη βιομηχανία, την ηλεκτροπαραγωγή, τη θέρμανση. Τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων είναι περιορισμένα και προχωρούν με σταθερό ρυθμό στην εξάντλησή τους και κατ' επέκταση στη συνεχή άνοδο της τιμής τους. Οι περιορισμένες ποσότητες ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με τον αυξανόμενο ρυθμό του πληθυσμού της γης έχει δημιουργήσει ένα παγκόσμιας έκτασης πρόβλημα γνωστό ως ενεργειακό πρόβλημα. Στις αρχές του 70 μετά την κρίση του πετρελαίου, το ενδιαφέρον των κρατών επικεντρωνόταν στο κόστος της ενέργειας .Όμως, κατά τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, όπου έγινε εμφανής η καταστροφική επίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον, το ενεργειακό ζήτημα άρχισε να αντιμετωπίζεται παράλληλα με το περιβαλλοντικό. Η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλείται από τις εκπομπές των προϊόντων της καύσης των ορυκτών καυσίμων ευθύνεται για πολλά από τα σοβαρότερα περιβαλλοντικά προβλήματα του πλανήτη μας, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας της γης, η τρύπα του όζοντος, η άνοδος της στάθμης των ωκεανών, η όξινη βροχή. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, οι οποίες είναι υπεύθυνες περίπου κατά ποσοστό 50% για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αυξήθηκαν από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης έως σήμερα κατά 100ppm (από 280ppm σε 380ppm). Ακόμα, η θερμοκρασία της γης εκτιμάται ότι ανέβηκε τον τελευταίο αιώνα κατά 0,6°C και η στάθμη της θάλασσας περίπου κατά 20cm [28].

Όλα τα παραπάνω στοιχεία υποδεικνύουν την ανάγκη αλλαγής του ενεργειακού πλάνου σε όλο τον κόσμο και την προσπάθεια εξεύρεσης άλλων ενεργειακών λύσεων. Οι μορφές ενέργειας που δεν απαιτούν παρεμβάσεις όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως τα συμβατικά και πυρηνικά καύσιμα και βρίσκονται ανεξάντλητες στη φύση είναι γνωστές με τον όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Η χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών ρυπογόνων ουσιών στην ατμόσφαιρα όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και θείου (SO_x),τους χλωροφθοράνθρακες (CFC) [<u>http://www.wikipedia.org/</u>]. Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια αλλά και τις άμεσες και έμμεσες επιδράσεις στη γη (ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος,βιομάζα), τις δυνάμεις της βαρύτητας (πτώση του νερού,κύματα) καθώς και τη θερμότητα στο εσωτερικό της γης (γεωθερμία) ως πηγές ενέργειας. Οι πηγές αυτές μπορεί να έχουν τεράστιο ενεργειακό δυναμικό ωστόσο είναι διασκορπισμένες και δύσκολα προσβάσιμες ενώ οι περισσότερες από αυτές παρουσιάζουν έντονες χρονικές και τοπικές διακυμάνσεις. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες σημειώνεται σημαντική επιστημονική έρευνα στο πεδίο των ΑΠΕ με στόχο τη βελτίωση της συλλογής και μετατροπής της ενέργειας, τη μείωση του επενδυτικού και λειτουργικού κόστους επενδύσεων, την πρακτικότητα και την αξιοπιστία τους.

Τα σύγχρονα συστήματα μετατροπής ενέργειας που βασίζονται σε ΑΠΕ εμφανίζονται σε πολλές περιπτώσεις οικονομικότερα σε σχέση με τις αντίστοιχες μονάδες συμβατικών καυσίμων ενώ παράλληλα έχουν ευεργετική επιρροή σε οικονομικά, περιβαλλοντικά και πολιτικά θέματα ενός κράτους. Η εξοικονόμηση ενέργειας, που προκύπτει από τη μειωμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ή συμβατικών καυσίμων, συνεπάγεται μείωση εξαγωγής συναλλάγματος από την αγορά εισαγώμενων καυσίμων. Παράλληλα η εγκατάσταση και λειτουργία συστημάτων ΑΠΕ μπορεί να προσφέρει νέες θέσεις εργασίας [28].

1.2 Η ηλιακή ακτινοβολία ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας

Μόλις από τον 18° αιώνα κατασκευάστηκαν στην Ευρώπη και τη Μέση Ανατολή ηλιακοί φούρνοι ικανοί να λιώνουν σίδηρο, μέταλλο και χαλκό. Οι φούρνοι αυτοί αποτελούν και την πρώτη επίσημη προσπάθεια συγκέντρωσης της ακτινοβολίας καθώς διέθεταν κάτοπτρα από λείο σίδηρο ,γυάλινους φακούς ή καθρέπτες τα οποία εστίαζαν σε συγκεκριμένο σημείο όπου αναπτύσσονταν υψηλές θερμοκρασίες. Κατά τον 19° αιώνα επιχειρήθηκαν τρόποι μετατροπής της ενέργειας σε άλλες μορφές και βασίστηκαν στη δημιουργία ατμού χαμηλής πίεσης για τη λειτουργία ατμομηχανών και αντλιών. Κατά τα τελευταία 50 χρόνια κατασκευάστηκαν διάφορες εκδοχές συγκεντρωτικών συλλεκτών οι οποίοι με τη θέρμανση κάποιου εργαζόμενου ρευστού έθεταν σε λειτουργία κάποιο μηχανολογικό εξοπλισμό. Τα τελευταία 15 έτη βρίσκονται ήδη στο στάδιο της εμπορευματικοποίησης συστήματα Ηλεκτροπαραγωγής με Ηλιακή Συγκέντρωση (ΗΗΣ) και μονάδες ισχύος πολλών MW παράγουν τη φθηνότερη ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως. Τα τελικά στάδια ηλεκτροπαραγωγής με χρήση συστημάτων ΗΗΣ είναι όμοια με αυτά της συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής, καθώς η τελική διεργασία ενεργειακής μετατροπής βασίζεται στη χρήση ατμού ή αερίου για την περιστροφή στροβίλων ή την κίνηση ενός εμβόλου σε μια μηχανή Stirling [43].

Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας είναι η θέρμανση του χώρου και του νερού που εμφανίστηκε τα μέσα του 1930 ενώ μέχρι τότε οι οικιακές ανάγκες σε θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης καλύπτονταν από boiler που θερμαίνονταν με την καύση του άνθρακα. Η βιομηχανία των ηλιακών συλλεκτών νερού ξεκίνησε στις αρχές του 60 ενώ πριν από μερικά χρόνια εμφανίστηκαν και μεγάλης κλίμακας εφαρμογές φωτοβολταικών συστημάτων[28].

Σήμερα η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται για τη θέρμανση ή ψύξη των κτιρίων (ενεργητική ή παθητική), για τη θέρμανση νερού σε οικιακή ή βιομηχανική χρήση, τη λειτουργία μηχανών/αντλιών/ηλιακών ψυγείων, την αφαλάτωση του νερού,την ηλεκτροπαραγωγή είτε με ηλιοθερμικά είτε με φωτοβολταικά συστήματα και πολλές άλλες εφαρμογές. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της ηλιακής ενέργειας σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μορφές είναι το μηδενικό κόστος της και ότι μπορεί να παρέχεται χωρίς περιβαλλοντική μόλυνση και χωρίς καμία προεπεξεργασία [28].

Η δυσκολία της καθιέρωσης των Α.Π.Ε. παγκοσμίως, έγκειται κυρίως στο δισταγμό των πολιτικών αρχών κάθε χώρας να εμπιστευτούν την αξιοπιστία τους τόσο στον λειτουργικό τομέα, όσο και στον οικονομικό.

1.3 Η ενέργεια και οι ΑΠΕ στην Ελλάδα

1.3.1 Η παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα

Στο χώρο της Ελλάδας η αύξηση των ενεργειακών αναγκών καλυπτόταν μέχρι και τα πολύ πρόσφατα χρόνια αποκλειστικά με την καύση ορυκτών καυσίμων και συγκεκριμένα κυρίως του λιγνίτη ,ο οποίος αν και αποτελεί μια φθηνή εγχώρια λύση, έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και είναι έντονα ρυπογόνο καύσιμο. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας παράγεται περίπου το 50% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκέντρωση των θερμοηλεκτρικών σταθμών στο Βορρά της χώρας δημιουργεί αυξημένες απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης και ανισορροπία στη λειτουργία. Ωστόσο ο σχεδιασμός τους βασίστηκε στην εγγύτητά τους στις περιοχές που υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη. Στη χώρα μας υπάρχουν τέσσερεις περιοχές με σημαντικά αποθέματα λιγνίτη, στη Δράμα, στη Δυτική Μακεδονία, στην Ελασσόνα και στη Μεγαλόπολη. Σύμφωνα με στοιχεία του 2011 για το Διασυνδεδεμένο Σύστημα (National Report PAE 2012), το 66.5% της εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων είναι θερμικοί σταθμοί, εκ των οποίων με λιγνίτη 4930 MW, με πετρέλαιο 730 MW και με φυσικό αέριο 4579 MW. Το 19.6% είναι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και το 13.9% είναι μονάδες ΑΠΕ (www.rae.gr).

Ωστόσο, η Ελλάδα έχει την τύχη να βρίσκεται σε ένα στρατηγικό σημείο του παγκόσμιου χάρτη,όσον αφορά την ενέργεια. Λόγω της έντονης παρουσίας της θάλασσας και του γεωγραφικού πλάτους (κοντά στον ισημερινό) ο ελλαδικός χώρος έχει πλούσιο αιολικό και ηλιακό δυναμικό αντίστοιχα [42]. Όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 1-1) οι μέσες ετήσιες τιμές ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου (χωρίς βέλτιστη κλίση) σε kWh/m² είναι αρκετά υψηλές ιδιαίτερα στο νοτιότερο τμήμα της Ελλάδας.



Πηγή: <u>http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eur.htm</u>

Εικόνα 1-1: Μέσες ετήσιες τιμές ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου (χωρίς βέλτιστη κλίση) σε kWh/ m^2

Αν και ο τομέας των μικρών οικιακών συστημάτων εμφανίζει κάποια σημάδια κορεσμού, δε συμβαίνει το ίδιο με τις μεγάλες θερμικές ηλιακές εγκαταστάσεις. Παρά το ότι οι τεχνολογίες μπορούν να θεωρηθούν ώριμες, οι εφαρμογές είναι εξαιρετικά περιορισμένες. Υπάρχουν πολλές δυνητικές εφαρμογές με σημαντικές ανεκμετάλλευτες δυνατότητες εξοικονόμησης μεγάλων ποσών ενέργειας, όπως για παράδειγμα σε ξενοδοχεία, δημόσια κτίρια, κολυμβητήρια, βιομηχανικές μονάδες κλπ. Γενική εξάλλου είναι η εκτίμηση ότι ο τομέας αυτός είναι ο πλέον ελπιδοφόρος για να αυξηθεί η διείσδυση των θερμικών ηλιακών.

Ο κύριος λόγος για την καθυστέρηση στον τομέα αυτό είναι η συχνά αρνητική εμπειρία από υφιστάμενες εγκαταστάσεις, λόγω κακού σχεδιασμού και χρήσης χαμηλής ποιότητας

προϊόντων. Για το λόγο αυτό υπάρχει συγκεκριμένη και άμεση ανάγκη για προτυποτεχνικά εργαλεία και μεθόδους σχεδιασμού, τα οποία θα επιτρέπουν την εκπόνηση ολοκληρωμένων μελετών για συνολικές ενεργειακές λύσεις, βασισμένων σε ρεαλιστική εκτίμηση του αναμενόμενου ενεργειακού οφέλους με βάση τα δεδομένα της κάθε εφαρμογής.

Μια επιπλέον παράμετρος που συνηγορεί υπέρ της προώθησης των μεγάλων θερμικών ηλιακών εγκαταστάσεων είναι το ότι δεν περιορίζονται στην παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, αλλά επιτρέπουν την ενσωμάτωση νέων τεχνολογικών λύσεων και το συνδυασμό με άλλες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα η εποχιακή - διεποχιακή αποθήκευση θερμότητας, η αφαλάτωση ή η ηλιακή ψύξη [39].

1.3.2 Πολιτεία και Θεσμικό Πλαίσιο

Το θεσμικό πλαίσιο που ισχύει σήμερα δεν είναι αρκετά φιλικό προς τις ΑΠΕ γενικά και τα θερμικά ηλιακά ειδικότερα. Είναι πολλές οι περιπτώσεις που, είτε λόγω αρνητικών προβλέψεων, είτε λόγω ασαφειών στις σχετικές ρυθμίσεις και διατάξεις, είτε τέλος λόγω αυθαίρετης ερμηνείας τους, ακυρώνονται στην πράξη εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης της θερμικής ηλιακής ενέργειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα εμπόδια στην τοποθέτηση συλλεκτών σε ταράτσες κτιρίων ή ακόμα η παρεμπόδιση δημιουργίας στεγάστρων χώρων στάθμευσης με ηλιακούς συλλέκτες.

Στην πραγματικότητα αυτό που απαιτείται δεν είναι απλά η άρση των εμποδίων, αλλά η θέσπιση διατάξεων που θα οδηγούσαν στην υποχρεωτική εγκατάσταση θερμικών ηλιακών, όπου αυτό είναι δυνατό. Το παράδειγμα της Ισπανίας είναι από την άποψη αυτή χαρακτηριστικό: με τον νέο «Τεχνικού Κώδικα κτιρίων» που ψηφίστηκε πρόσφατα, επιβάλλονται μια σειρά μέτρα που μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

- Θέσπιση υποχρέωσης να καλυφθεί 30-70% των απαιτήσεων σε θέρμανση νερού από ηλιακή ενέργεια, ανάλογα με τα κλιματολογικά δεδομένα της κάθε περιοχής και το προς κάλυψη φορτίο.
- Η υποχρέωση αυτή ισχύει για νέα και υπό ανακαίνιση κτίρια, ανεξάρτητα από τη χρήση τους. Εξαιρέσεις γίνονται αποδεκτές μόνο για σκιασμένα κτίρια, άλλες ΑΠΕ, συμπαραγωγή.
- Οι όποιες τοπικές ρυθμίσεις υπερισχύουν μόνο εάν είναι ευνοϊκότερες, όπως για παράδειγμα στην περιοχή της Βαρκελώνης όπου επιβάλλεται κάλυψη κατά τουλάχιστον 60% από θερμικά ηλιακά, ποσοστό που γίνεται 100% για τις πισίνες.

Εκτός όμως από τον εκσυγχρονισμό του συχνά εχθρικού κανονιστικού πλαισίου (πολεοδομικές ρυθμίσεις, κανονισμοί κλπ), απαιτείται μια ουσιαστική πολιτική κινήτρων και ενισχύσεων. Μια τέτοια πολιτική δεν πρέπει να περιορίζεται στις επιδοτήσεις μεγάλων εγκαταστάσεων μέσω των κοινοτικών πλαισίων στήριξης, αλλά να περιλαμβάνει ευρύτερες και μονιμότερες σε διάρκεια παρεμβάσεις [39].

<u>Στόχοι για την Ελλάδα:</u>

Βασικός σκοπός για την Ελλάδα είναι η συμμετοχή των Α.Π.Ε. σε ένα μεγάλο ποσοστό στο ενεργειακό μείγμα της. Για τον λόγο αυτό, και καθώς η οικονομική κρίση σε συνάρτηση με τη σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων προβάλει σαν τεράστια απειλή, η χώρα μας δεσμεύεται, με τον Ν. 3851/Άρθρο 1, να πετύχει τον εθνικό στόχο των Α.Π.Ε. που θέσπισε για αυτήν η Ευρωπαϊκή Ένωση. Σύμφωνα με αυτό τον στόχο, προβλέπεται συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% μέχρι το 2020 και συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% μέχρι το 2020 και συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. της τάξεως του 20% στην τελική κατανάλωση ενέργειας για μεταφορές ,και πάλι ως το 2020 [40]. Στο παρακάτω ραβδόγραμμα φαίνεται η εγκατεστημένη ισχύς για κάθε κατηγορία ανανεώσιμης ενέργειας και τα αντίστοιχα προσδοκώμενα επίπεδα για το 2020.



Εικόνα 1-2 : Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ στην Ελλάδα, στόχος έτους 2020

Η επίτευξη αυτών των στόχων απαιτεί τον συντονισμό σε δράσεις και μέτρα, την υποστήριξη από τους φορείς της αγοράς καθώς και την έγκαιρη υλοποίηση έργων ανάπτυξης του ηλεκτρικού δικτύου ώστε να υπάρχει η δυνατότητα απορρόφησης της παραγόμενης ενέργειας από τους σταθμούς ΑΠΕ [43].

1.4 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και προσομοίωση ενός πρότυπου ηλιακού συλλέκτη. Για την προσομοίωση αυτή, αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα Fortran.

Ο πρότυπος συλλέκτης κατασκευάζεται από ελληνική εταιρία και έχει χρησιμοποιηθεί έως τώρα σε αρκετές κατοικίες και ξενοδοχειακές μονάδες, κυρίως για την κάλυψη αναγκών ζεστού νερού χρήσης. Διαθέτει σύνθετο παραβολικό ανακλαστήρα χαμηλής συγκέντρωσης (τύπου CPC) και κυλινδρικό δέκτη όπου συγκεντρώνεται η ακτινοβολία.

Στην παρούσα διπλωματική επιχειρείται αρχικά η προσομοίωση της λειτουργίας του πρότυπου ηλιακού συλλέκτη με βάση τα στοιχεία που δόθηκαν από τον κατασκευαστή αλλά και ορισμένες προσεγγίσεις που έγιναν για τα υπόλοιπα μη διαθέσιμα δεδομένα που ήταν απαραίτητα για τη μοντελοποίηση. Για την εξαγωγή συγκεκριμένων συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκε ως περίπτωση μελέτης ένα σύστημα εγκατεστημένο στην περιοχή του Αγίου Φωκά, στην Τήνο. Η προσομοίωση του συλλέκτη γίνεται με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής. Το σύστημα αυτό (ονομαστικής ισχύος: 10 kW) αποτελεί μέρος ενός πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια Ευρωπαϊκού Προγράμματος LIFE+ με ακρωνύμιο SOL-BRINE (LIFE09 ENV/GR/000299). Το πεδίο των ηλιακών συλλεκτών έχει ως στόχο την κάλυψη των θερμικών αναγκών της πιλοτικής μονάδας, με την τροφοδοσία ζεστού νερού (θερμοκρασία σχεδιασμού: 80°C).

Τέλος, μελετάται και η απόδιδόμενη ισχύς και θερμοκρασία εξόδου του συστήματος των συλλεκτών της μονάδας και παράλληλα επιχειρείται μια συγκριτική αναφορά σε πειραματικά δεδομένα που καταγράφηκαν από μετρήσεις τους πρόσφατους θερινούς μήνες.

2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1 Γενικά

<u>Ο ήλιος:</u>

Ο ήλιος είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος με μάζα 2·10³⁰ kg. Το σχήμα του είναι σχεδόν σφαιρικό με μέση διάμετρο 1,39·10⁹m και βρίσκεται σε απόσταση 1,5·10¹¹ m από τη γη. Η επιφανειακή θερμοκρασία του ως μέλαν σώμα εκτιμάται στους 5780 βαθμούς Kelvin ενώ η θερμοκρασία του πυρήνα του εκτιμάται από 8·10⁶ με 40·10⁶ βαθμούς Kelvin. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κατά τις οποίες μετατρέπεται το υδρογόνο σε ήλιο. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η πυρηνική αντίδραση:

4 11H —> 42He + Ενέργεια δικαιολογεί, με το έλλειμμα μάζας, την εκλυόμενη ενέργεια με βάση τη γνωστή σχέση Ε=Δm·c², από την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν, κυρίως με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και με σωματιδιακή μορφή [1],[<u>http://www.wikipedia.org/</u>].

Ηλιακή ακτινοβολία:

Είναι η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως αποτέλεσμα των αλλαγών στους ηλεκτρονικούς σχηματισμούς των μορίων του. Τα ηλεκτρομαγνητικά όπως και όλα τα κύματα στη φύση μεταφέρουν ενέργεια και ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός $c_0=2,9979.10^8$ m/s και με ταχύτητα $c=c_0/n$ (όπου n ο δείκτης διάθλασης) στα υπόλοιπα μέσα. Η ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από τη συχνότητα ν και το μήκος κύματος λ που συνδέονται με τη σχέση $\lambda=c/v$. Όλα τα σώματα στη φύση απορροφούν,ανακλούν και επανεκπέμπουν την ακτινοβολία σε διαφορετικό βαθμό που εξαρτάται από τη φύση τους και τις ιδιότητες της ακτινοβολίας [3].

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα:

Ονομάζεται το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (Εικόνα 2-1). Η ορατή ακτινοβολία βρίσκεται σε μήκη κύματος μεταξύ 0,4 και 0,76μm ενώ η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο καλύπτει την περιοχή από 0,3μm έως 3μm.



Πηγή : <u>http://www.cynfra.eu/thermo.htm</u>

Εικόνα 2-1: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

<u>Θερμική ακτινοβολία:</u>

Είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος όταν η θερμοκρασία του είναι μεγαλύτερη από το απόλυτο 0. Η θερμοκρασία αποτελεί μέτρο της δραστηριότητας αυτής καθώς ο ρυθμός εκπομπής θερμικής ατινοβολίας αυξάνεται όσο αυξάνεται και η θερμοκρασία. Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα η θερμική ακτινοβολία ορίζεται ως το κομμάτι που εκτείνεται από 0,1 έως 100μm καθώς η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα σώματα εξαιτίας της θερμοκρασίας τους πέφτει σχεδόν σε αυτό το εύρος μήκους κύματος. Συνεπώς, η θερμική ακτινοβολία περιλαμβάνει όλη την ορατή, υπέρυθρη και ένα κομμάτι της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης:

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα επίπεδο στην επιφάνεια της γης καθορίζεται σε γενικές γραμμές από τους εξής παράγοντες :

την ηλιακή γεωμετρία σε σχέση με τη γη

Η γεωμετρία αυτή καθορίζει την ακινοβολία εκτός ατμόσφαιρας με βάση τη θέση του ηλίου για δεδομένη στιγμή του έτους και υπολογίζεται με ακρίβεια από τύπους αστρονομίας (ενότητα 2.2)

τα χαρακτηριστικά του εδάφους

Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης επηρεάζεται από το υψόμετρο και τη μορφολογία του εδάφους όπως η σκίαση από γειτονικά στοιχεία (π.χ. λόφους,βουνά,βλάστηση). Οι παράγοντες αυτοί είναι δυνατόν να καθοριστούν με αρκετά υψηλό βαθμό ακρίβειας [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solmod1.htm].

την ατμόσφαιρα

Η ηλιακή ακτινοβολία μετά από τη διέλευση της από τη γήινη ατμόσφαιρα φτάνει στην επιφάνεια της γης μειωμένη. Τα βυθίσματα που εμφανίζονται στην κατανομή του φάσματος (Διάγραμμα 2-1) οφείλονται στην απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα αέρια O₂, O₃ (όζον), CO₂, NO_x και από υδρατμούς. Το οξυγόνο απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα στενό εύρος μήκους κύματος γύρω από το λ=0,76μm ενώ το όζον απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία με μήκη κύματος 0,3-0,4μm (περιορίζοντας την καρκινογόνο δράση της). Η απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας γίνεται κυρίως από μόρια CO₂ και H₂O. Ως αποτέλεσμα των απορροφήσεων η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει τελικά στο έδαφος είναι μειωμένη στα 950 W/m² περίπου για μια καθαρή μέρα χωρίς συννεφιά. Περαιτέρω ελάττωση της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλείται από τη σκέδαση αφενός στα μόρια της ατμόσφαιρας και στα πολύ μικρής διαμέτρου d, σωματίδια (d≤λ, σκέδαση Rayleigh), αφετέρου στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματα της, δηλαδή, τους υδρατμούς, τη σκόνη και τον καπνό (Σκέδαση Mie ή Tyndall) [3].



Πηγή : [3]

Διάγραμμα 2-1 : Φάσμα ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μέλαν σώμα 5780Κ (προσέγγιση για τον ήλιο) σε σχέση με την ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης

Η ελάττωση της ακτινοβολίας που προκαλείται από αέρια (μόρια αέρα, όζον, CO₂, O₂) εξαρτάται από τη μάζα αέρα και το οπτικό βάθος (ορατότητα) της ατμόσφαιρας. Η εξασθένιση της ακτινοβολίας από σωματίδια, παράλο που δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με ακρίβεια, παρουσιάζει περιοδικές εποχιακές μεταβολές (χαμηλή το χειμώνα και υψηλότερη το καλοκαίρι). Επίσης μεταβάλλεται σε σχέση με το υψόμετρο και αυξάνεται από την ένταση της αστικοποίησης. Όσον αφορά τη μείωση της ακτινοβολίας από τα σύννεφα, η θεωρητική ανάλυση του φαινομένου απαιτεί πολύ μεγάλο όγκο πληροφοριών (στιγμιαίο πάχος, θέση και στρώματα σύννεφων και οπτικά χαρακτηριστικά τους). Γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση της επίδρασης της

νέφωσης [<u>http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solmod1.htm</u>] κάποιες από τις οποίες θα παρουσιαστούν στην ενότητα 2.4.

Η αλλεπίδραση της ακτινοβολίας με τα στοιχεία της ατμόσφαιρας έχει ως αποτέλεσμα σε κάθε τόπο της επιφάνειας της γης να φτάνουν δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός:

- η άμεση (Beam) η οποία φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς να υποστεί απορρόφηση ή ανάκλαση και έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση που εξαρτάται από το σημείο της γης, την ώρα και την ημέρα του έτους. Η στιγμιαία άμεση ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας συμβολίζεται με Gb.
- η διάχυτη (Diffuse) η οποία αποτελεί την ακτινοβολία που μετά από τη σκέδαση της στα μόρια του αέρα επιστρέφει στην επιφάνεια της γης και δεν έχει καθορισμένη διεύθυνση. Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο (πάνω από το φυσικό ορίζοντα) και σε πρώτη εκτίμηση, μπορεί να θεωρηθεί ισότροπη. Η στιγμιαία άμεση ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας συμβολίζεται με Gd.

Το σύνολο άμεσης και διάχυτης στιγμιαίας ακτινοβολίας που φθάνει στη επιφάνεια της γης ονομάζεται **ολική ακτινοβολία** και συμβολίζεται με **G** [1].

Η προσπίπτουσα ακτινοβολία που δέχεται ένας αισθητήρας ή ένας συλλέκτης αποτελείται από την άμεση, τη διάχυτη και τη διάχυτα ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία. Η διάχυτα ανακλώμενη εξαρτάται από τη μορφολογία και το χρώμα του εδάφους ή της επικάλυψής του (γρασίδι ή χιόνι) και την πυκνότητα των νεφών. Η διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός συλλέκτη ή αισθητήρα καθορίζεται από τη φύση της επιφάνειας όπου ανακλάται διάχυτα. Το φως ανακλάται στα σύννεφα, το γυμνό έδαφος, τα φυτά, το χιόνι, το νερό (θάλασσες, λίμνες), τις ανθρώπινες κατασκευές κ.α. Η διάχυτη ανακλαστικότητα, δηλαδή, το ποσοστό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης και ό,τι την καλύπτει, αναφέρεται, στη βιβλιογραφία, ως albedo[44]. Τιμές του albedo σε διάφορες περιπτώσεις, αναφέρονται στον Πίνακας 2-1.

| Είδος επιφάνειας | Συντελεστής διάχυτης ανάκλασης ή albedo | |
|--------------------------|--|--|
| Επιφάνεια νερού, θάλασσα | 0,05 | |
| Ασφαλτόστρωμα | 0,07 | |
| Αγρός σκοτεινόχρωμος | 0,08 | |
| Αγρός πράσινος | 0,15 | |
| Βραχώδης επιφάνεια | 0,20 | |
| Επιφάνεια τσιμέντου | 0,24 - 0,30 | |
| Χιόνι | 0,60 | |
| | Πηγή : [44] | |

Πίνακας 2-1: Τυπικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης albedo

Όπως θα αναλυθεί και σε επόμενο κεφάλαιο η άμεση ακτινοβολία μπορεί να διακριθεί από τη διάχυτη, με βάση το οπτικό αποτέλεσμα της διέλευσης τους από συγκεντρωτικό φακό ή την ανάκλαση τους σε κοίλο κάτοπτρο. Η άμεση ακτινοβολία μπορεί, μετά την ανάκλασή της σε κατοπτρική επιφάνεια, να σχηματίζει σε αρκετά μεγάλη απόσταση είδωλο πάνω στην εστία ενός οπτικού οργάνου (συγκεντρωτή). Αντίθετα η διάχυτη ακτινοβολία, προερχόμενη από όλο τον ουρανό, δεν εστιάζεται και συνεπώς δε δίνει είδωλο.

2.2 Ηλιακή γεωμετρία

Η ηλιακή γεωμετρία συνδέεται με δύο κύριες κινήσεις της γης :

- την ημερήσια περιστροφή γύρω από τον άξονα Βορρά-Νότου από τα δυτικά προς τα ανατολικά η οποία διαρκεί 24ώρες
- την ετήσια κίνηση γύρω από τον 'Ηλιο, που γίνεται με μέση ωριαία ταχύτητα 106.000km/h και διαρκεί 365 μέρες 5 ώρες 48' και 46'' Το διάστημα αυτό αποτελεί το έτος.

Η γη κινείται γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά επομένως η απόσταση γης – ηλίου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους (Εικόνα 2-2). Το σημείο της τροχιάς της γης που βρίσκεται στη μέγιστη απόσταση από τον ήλιο (περίπου 152·10⁶km) ονομάζεται αφήλιο. Αντίστοιχα, το σημείο της τροχιάς που βρίσκεται στην ελάχιστη απόσταση από τον ήλιο (περίπου 147·10⁶ km) ονομάζεται περιήλιο.



Πηγή : <u>http://quarksplanet.blogspot.gr</u>

Εικόνα 2-2 : Τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο

Ο άξονας Βορρά-Νότου της γης αποκλίνει από την κάθετο στο επίπεδο της ελλειπτικής τροχιάς κατά σταθερή γωνία 23,45° περίπου. Έτσι η γωνία μεταξύ του άξονα της γης και των

ηλιακών ακτίνων μεταβάλλεται στη διάρκεια του έτους από $90^{\circ}+23,45^{\circ}=113,45^{\circ}$ έως $90^{\circ}-23,45^{\circ}=66,55^{\circ}$.

Ορισμένες στιγμές του έτους η απόκλιση της γης λαμβάνει ειδικές τιμές :

- στις 21/12 έχει τη μέγιστη τιμή 113,45 (Χειμερινό ηλιοστάσιο)
- στις 21/6 έχει την ελάχιστη τιμή της 66,55° (Καλοκαιρινό ηλιοστάσιο)
- στις 21/3 και 23/9 έχει τιμή 90° (Εαρινή και Φθινοπωρινή Ισημερία) [45]

Έτσι, καθώς η γη αλλάζει θέση στην ετήσια τροχιά της περί τον ήλιο, αλλάζει το ύψος μεσουράνησης του ήλιου σε κάθε τόπο στην επιφάνεια της. Για τόπο στο βόρειο ημισφαίριο, η θέση μεσουράνησης παίρνει τη μικρότερη τιμή της το χειμώνα (21 Δεκεμβρίου) και τη μέγιστη το καλοκαίρι (21 Ιουνίου). Το αντίθετο ισχύει για τόπους του νοτίου ημισφαιρίου. Στις 21 Μαρτίου και 23 Σεπτεμβρίου, η ημέρα έχει ίση διάρκεια με τη νύκτα (Ισημερίες).

Η αυξομείωση της απόκλισης μεταβάλλει την κατανομή της ηλιακής πρόσπτωσης στην επιφάνεια της γης με αποτέλεσμα την εναλλαγή των εποχών που εμφανίζονται στο βόρειο και το νότιο ημισφαίριο κατά αντίστροφο τρόπο και τη διακύμανση των χρονικών διαστημάτων μέρας και νύχτας εντός του έτους. Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Η απόκλιση του ηλίου ή ηλιακή απόκλιση δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360 \cdot (284+n)}{365}\right)$$
 (2.2.1)

όπου $n = 1 \div 365$ είναι η μέρα του ετους η οποία μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τον παρακάτω πίνακα [1].

| Μήνας | Αριθμός n για τη ημέρα κάθε μήνα | Μέση ημέρα μήνα | Αριθμός n της μέσης ημέρας κάθε μήνα | Ηλιακή απόκλιση δ μέση ημέρας (deg) |
|-------------|--|--------------------|--|--|
| Ιανουάριος | i | 17 | 17 | -20,9 |
| Φεβρουάριος | 31 + i | 16 | 47 | -13,0 |
| Μάρτιος | 59 + i | 16 | 75 | -2,4 |
| Απρίλιος | 90 + i | 15 | 105 | 9,4 |
| Μάιος | 120 +i | 15 | 135 | 18,8 |
| Ιούνιος | 151 + i | 11 | 162 | 23,1 |
| Ιούλιος | 181 + i | 17 | 198 | 21,2 |
| Αύγουστος | 212 + i | 16 | 228 | 13,5 |
| Σεπτέμβριος | 243 + i | 15 | 258 | 2,2 |
| Οκτώβριος | 273 + i | 15 | 288 | -9,6 |
| Νοέμβριος | 304 + i | 14 | 318 | -18,9 |
| Δεκέμβριος | 334 + i | 10 | 344 | -23,0 |

Πίνακας 2-2: Αύξων αριθμός **n** ημέρας του έτους, μέση ημέρα μήνα,αριθμός **n** της μέσης ημέρας κάθε μήνα, ηλιακή απόκλιση **δ** μέση ημέρας

Πηγή : [4]

Λόγω της μεγάλης ακτίνας της ελλειπτικής τροχιάς οι ηλιακές ακτίνες που φθάνουν στη γη θεωρούνται παράλληλες (στην πραγματικότητα σχηματίζουν γωνία μικρότερη από 0,5°). Η μεταβολή της απόστασης γης-ηλίου προκαλεί μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά ±3% περί τη μέση τιμή της. Η ακτινοβολία G_{on} που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας κάθετο στις ακτίνες δίνεται από τη σχέση :

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right)$$
 (2.2.2)

όπου :

Gsc: η ηλιακή σταθερά δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας όταν η απόσταση γης –ηλίου λαμβάνει τη μέση τιμή της. Το 1970 προτάθηκε ως πρότυπη τιμή της ηλιακής σταθεράς, η τιμή (1353±21) W/m². Μεταγενέστερες, περισσότερο ακριβείς, μετρήσεις από δορυφόρους έδωσαν, τιμές για την ηλιακή σταθερά, στην περιοχή 1363-1375 W/m². Η μέση τιμή τους = 1367 W/m², χρησιμοποιείται πλέον διεθνώς, ως πρότυπη τιμή [1].

Εκτός από την ηλιακή απόκλιση **δ**, που αναλύθηκε παραπάνω, τα στοιχεία που καθορίζουν την ηλιακή γεωμετρία σε σχέση με τον τόπο και το χρόνο είναι τα εξής :

Γεωγραφικό πλάτος φ (latitude) ενός σημείου στην επιφάνεια της γης: είναι η γωνία που σχηματίζει η κατακόρυφος του τόπου με το επίπεδο του ισημερινού. Το γεωγραφικό πλάτος μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών πρώτα και δεύτερα από 0° - 90° βόρεια ή από 0° - 90° νότια (αρχής γενομένης της μέτρησης από τον ισημερινό του οποίου το γεωγραφικό πλάτος πλάτος είναι 0°.

Γωγραφικό μήκος λ (longitude) ενός σημείου στην επιφάνεια της γης : είναι η γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού που διέρχεται από το εν λόγω σημείο με το επίπεδο του πρώτου μεσημβρινού. Το γεωγραφικό μήκος μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών πρώτα και δεύτερα από 0° - 180° ανατολικά ή από 0° - 180° δυτικά (αρχής γενομένης της μέτρησης από τον πρώτο μεσημβρινό με γεωγραφικό μήκος 0° - μεσημβρινός του Greenwich)[45].

Ύψος ηλίου α : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.

Αζιμούθιο ηλίου γ_s : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της ευθείας οράσεως του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.Το αζιμούθιο ηλίου υπολογίζεται από τη σχέση

$$sin\gamma_s = \frac{cos\delta \cdot sin\omega}{sin\theta_z}$$
 (2.2.3)

Γωνία ζενίθ θz: αντί για το ηλιακό ύψος χρησιμοποιείται συχνά η συμπληρωματική του γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην ευθεία οράσεως του ηλίου και την κατακόρυφο. Το συνημίτονο της γωνίας ζενίθ υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega$$
 (2.2.4)

Αζιμούθιο επιφάνειας γ : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση.

Για το αζιμούθιο επιφάνειας ισχύει :

- γ=0 για νότιο προσανατολισμό
- γ>0 για γωνίες δυτικά από το νότο
- γ<0 για γωνίες ανατολικά από το νότο

Ωριαία γωνία ω : είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης γύρω από τον άξονά της με ρυθμό 15°/h = 0,25°/min. Η ωριαία γωνία υπολογίζεται από τη σχέση :

$$ω = 0,25 \times (λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι)$$
 (2.2.5)

όπου το + λαμβάνεται για τις ώρες προ μεσημβρίας και το – για τις ώρες μετά μεσημβρίας.

Ωριαία γωνία δύσης ηλίου ωs: υπολογίζεται για $\theta_z=90^\circ$ από την παρακάτω εξίσωση

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} = -\tan \varphi \cdot \tan \delta \quad [4] \qquad (2.2.6)$$

Αέριος μάζα m :

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος επηρεάζεται από το μήκος της ατμόσφαιρας που διαπερνά. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή αυτή τόσο μειώνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μεγαλύτερη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας για να φτάσει στην επιφάνεια της γης είναι νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα. Για τη μείωση της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ο όρος της σχετικής μάζας του αέρα m η απλά όπως συνηθίζεται μάζα του αέρα m η οποία ορίζεται ως ο λόγος της μάζας της αερίου στήλης της διαδρομής των ηλιακών ακτίνων για ανέφελο ουρανό, προς την αντίστοιχη μάζα για κατακόρυφο ήλιο. Όπως είναι φανερό, ο λόγος m, εξαρτάται από τη ζενίθ γωνία θz μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της διεύθυνσης του ζενίθ του τόπου. Όταν η ζενίθια γωνία του ηλίου βρίσκεται μεταξύ των ορίων $0 \le θ_z \le 70^\circ$ η αέριος μάζα δίνεται από τη σχέση:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad \textbf{(2.2.7)}$$



Πηγή : [44]

Εικόνα 2-3 : Το μήκος L που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα πάχους Η καθορίζει την ολική ελάττωση της έντασης της

Η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, κάθετα στην επιφάνεια συλλογής αντιστοιχεί σε μάζα αέρα ίση με τη μονάδα (Air mass 1, AM1). Εκτός ατμόσφαιρας η μάζα αέρα λαμβάνεται μηδενική (Air Mass zero, AMO) στην οποία αντιστοιχεί και η τιμή της ηλιακής σταθεράς. Για γωνίες θ_Z>70° η επίδραση της καμπυλότητας της γης πρέπει να ληφθεί υπ'όψη.

Γωνία πρόσπτωσης θ :

Γωνία πρόσπτωσης θ της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια. Το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης θ υπολογίζεται από τη σχέση :

 $\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad [4]$ (2.2.8)

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται σχηματικά οι γωνίες που αναλύθηκαν παραπάνω για επίπεδο με κλίση β ως προς το οριζόντιο επίπεδο



Πηγή: [<u>http://www.teachengineering.org/</u>] Εικόνα 2-4 : Ύψος ηλίου α, Αζιμούθιο ηλίου γ_s , Αζιμούθιο επιφάνειας γ, γωνία ζενίθ ϑ_z για επίπεδο με κλίση β **(α.)** γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας για επίπεδο με κλίση β **(b.)**

2.3 Προσανατολισμός και κίνηση συλλεκτών

Ο προσανατολισμός και η κλίση του συλλέκτη επηρεάζουν σε αρκετό βαθμό την απόδοσή του επί μηνιαίας, εποχιακής ή ετήσιας βάσης. Η επιλογή του βέλτιστου προσανατολισμού εξαρτάται από την εποχή του έτους που απαιτείται συλλογή περισσότερης ηλιακής ενέργειας ή από το αν επιθυμείται ομοιόμορφη διανομή κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Εάν απαιτείται περισσότερη ενέργεια το καλοκαίρι απ' ό,τι το χειμώνα, ο καταλληλότερος προσανατολισμός είναι βορρά-νότου. Αν επιδιώκεται ομοιόμορφη διανομή κατά τη διάρκεια όλου του έτους, παρόλο που το χειμώνα η παραγωγή είναι σημαντικά μικρότερη απ' ότι το καλοκαίρι ο καλύτερος προσανατολισμός είναι ανατολής-δύσης.

Στον προσανατολισμό ανατολής – δύσης, ο εστιακός άξονας είναι οριζόντιος, ενώ στον προσανατολισμό βόρεια – νότια, ο εστιακός άξονας μπορεί να είναι οριζόντιος ή να έχει κάποια κλίση. Οι βασικότεροι κανόνες για αποδοτική τοποθέτηση των συλλεκτών συνοψίζονται στα εξής :

- για μέγιστη ετήσια ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος β=φ
- για μέγιστη ενέργεια θέρους απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά 15° μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους β=φ-15°
- για μέγιστη ενέργεια χειμώνα απιτείται κλίση συλλέκτη κατά 15° μεγαλύτερη του γεωγραφικού πλάτους β=φ+15° (αποκλίσεις του β κατά ±15° από τις παραπάνω τιμές προκαλούν μικρές μειώσεις της ενέργειας περίπου κατά 5%)
- ο βέλτιστος προσανατολισμός συλλέκτη είναι ο νότιος (γ=0°) για το βόρειο ημισφαίριο και ο βόρειος (γ=180°) για το νότιο ημισφαίριο, δηλαδή ο συλλέκτης θα πρέπει να είναι στραμμένος προς τον ισημερινό (αποκλίσεις μέχρι 20° προκαλούν μικρές μειώσεις της προσπίπτουσας ενέργειας) [4].



Πηγή : [46]

Εικόνα 2-5: Βασικοί προσανατολισμοί ηλιακών συλλεκτών

<u>Γωνία πρόσπτωσης σε κινούμενα επίπεδα :</u>

Τα στοιχεία που αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια όπως οι ηλιακοί συλλέκτες και τα φωτοβολταικά φέρουν συχνά μηχανισμούς κίνησης ώστε να παρακολουθούν τη θέση του ηλίου. Διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες ηλιακών συλλεκτών με βάση τον μηχανισμό κίνησης :

- κίνηση περί έναν άξονα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι επιμήκεις παραβολικοί συλλέκτες (PTC), οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel (LFR)
- κίνηση περί δύο άξονες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα παραβολικά πιάτα (PDR)

Από το συνδυασμό προσανατολισμού με διάφορους τρόπους ρύθμισης προκύπτουν οι παρακάτω περιπτώσεις :

A) Ο συλλέκτης διαθέτει οριζόντιο άξονα περιστροφής με διεύθυνση ανατολής – δύσης και πραγματοποιείται μία μόνο ημερήσια ρύθμιση έτσι ώστε οι ακτίνες του ηλίου να είναι κάθετες στο δέκτη του συλλέκτη το ηλιακό μεσημέρι της συγκεκριμένης ημέρας. Η γωνία της πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας λαμβάνεται από τη σχέση :

$$\cos\theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cdot \cos \omega$$
 (2.3.1)

B) Ο συλλέκτης διαθέτει οριζόντιο άξονα περιστροφής με διεύθυνση ανατολής – δύσης και ρυθμίζεται συνεχώς έτσι ώστε οι ακτίνες του ηλίου να έχουν πάντα την ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης. Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας λαμβάνεται από τη σχέση :

$cosθ = (1 - cos^2 \delta \cdot sin^2 ω)^{1/2}$ (2.3.2)

Γ) Ο συλλέκτης διαθέτει οριζόντιο άξονα περιστροφής με διεύθυνση βορρά– νότου και ρυθμίζεται συνεχώς έτσι ώστε να ελάχιστοποιείται η γωνία πρόσπτωσης. Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας λαμβάνεται από τη σχέση :

$\cos\theta = [(\sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega)^2 + \cos^2\delta \cdot \sin^2\omega]^{\frac{1}{2}}$ (2.3.3)

Δ) Ο συλλέκτης διαθέτει άξονα περιστροφής που βλέπει προς βορρά – νότο και έχει σταθερή γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος. Κατά συνέπεια, είναι παράλληλος στον άξονα της γης. Αυτός ο προσανατολισμός αναφέρεται κάποιες φορές και ως 'πολικό υποστήριγμα'. Ο συλλέκτης περιστρέφεται κατά άξονα παράλληλο στον άξονα της γης με γωνιακή ταχύτητα ίση και αντίθετη με τη διεύθυνση περιστροφής της γης (15° ανά ώρα). Στην περίπτωση αυτή η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας λαμβάνεται από τη σχέση :

$\cos\theta = \cos\delta$ (2.3.4)

E) Ο συλλέκτης διαθέτει δύο άξονες περιστροφής και ρυθμίζεται συνεχώς έτσι ώστε να εξασφαλίζεται κάθετη πρόσπτωση στο επίπεδο του συλλέκτη :

 $\cos\theta = 1$ [4],[41] (2.3.5)

2.4 Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας

2.4.1 Γενικά

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στα όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και στους τρόπους υπολογισμού των ηλιακών μεγεθών με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις. Οι πιο λεπτομερείς πληροφορίες που δίνονται από τα όργανα μέτρησης είναι η άμεση και η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο ανά ώρα. Η γνώση της ακτινοβολίας που δέχεται μια ηλιακή συσκευή σε μια περιοχή και γενικότερα η προσομοίωση της λειτουργίας της προυποθέτει τη χρήση στοιχείων από παλαιότερες μετρήσεις που έχουν γίνει στη συγκεκριμένη ή σε κάποια κοντινή περιοχή.

Τα μετρητικά όργανα ηλιακής ακτινοβολίας διακρίνονται κυρίως σε δύο τύπους :

Πυρανόμετρο : όργανο μέτρησης της ολικής ακτινοβολίας συνήθως σε οριζόντιο επίπεδο. Το πυρανόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μέτρηση της διάχυτης ακτινοβολίας αν σκιαστεί με ένα δίσκο.

Πυρηλιόμετρο : όργανο που χρησιμοποιεί έναν εστιασμένο ανιχνευτή για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας που προέρχεται απευθείας από τον ήλιο και από μια μικρή περιοχή του ουρανού γύρω από τον ήλιο σε κάθετη πρόσπτωση [1].

2.4.2 Ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας

Η ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας Go συνδέεται με την κάθετο ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας με τη σχέση :

$$G_o = G_{on} \cos \theta_z = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cdot \left(\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \right)$$
 (2.4.1)

Με ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης για χρονικό διάστημα μιας ώρας, που καθορίζεται από τις ωριαίες γωνίες $ω_1$ και $ω_2$ ($ω_1 < ω_2$), δίνεται η ενέργεια I_o που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια μιας ώρας.

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cdot \left[\cos \varphi \cos \delta \left(\sin \omega_2 - \sin \omega_1 \right) + \frac{2\pi (\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \varphi \sin \delta \right]$$
(2.4.2)

Θέτοντας σαν όρια τις ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης του ηλίου δηλαδή $ω_1$ =-ωs και $ω_2$ = $ω_s$ προκύπτει η ημερήσια ακτινοβολία H_o που δέχεται οριζόντια επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρας.

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cdot \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta \right]$$
(2.4.3)

Σε πολλές περιπτώσεις είναι χρήσιμη και η μηνιαίως μέση τιμή ημέρας \overline{H}_o η οποία υπολογίζεται από την τελευταία εξίσωση θέτοντας τα n και δ της μέσης ημέρας του συγκεκριμένου μήνα [4].

2.4.3 Ακτινοβολία αιθρίας ατμόσφαιρας

Η επίδραση της ατμόσφαιρας στη σκέδαση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας μεταβάλλεται καθώς οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και η μάζα αέρα αλλάζουν. Είναι χρήσιμο να οριστεί ένας τυπικός καθαρός ουρανός και να υπολογίζονται οι ωριαίες και ημερήσιες τιμές της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο κάτω από αυτές τις τυπικές συνθήκες. Ο Hottel ανέπτυξε μια μέθοδο εκτίμησης της άμεσης ακτινοβολίας τυπικής αιθρίας ατμόσφαιρας η οποία λαμβάνει υπ' όψη τη γωνία ζενίθ, το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας και τον τύπο του κλίματος. Η ατμοσφαιρική διαπερατότητα για την άμεση ακτινοβολία τ_b υπολογίζεται από τη σχέση :
$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{-k/\cos\theta_z}$$
 (2.4.4)

Οι συντελεστές α_0 , α_1 και k για τυπική ατμόσφαιρα ορατότητας 23km υπολογίζονται σε σχέση με τους συντελεστές α_o^* , a_1^* , k^* και εξαρτώνται από το κλίμα (παράγοντες r_0 , r_1 , r_k του πίνακα 2.3) και το υψόμετρο A (km) κάθε περιοχής :

$$a_o = r_o \cdot \alpha_o^*$$
 (2.4.5 α)
 $a_1 = r_1 \cdot \alpha_1^*$ (2.4.5 β)
 $a_k = r_k \cdot k^*$ (2.4.5 γ)

| Τύπος κλίματος | r _o | r ₁ | r _k |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Τροπικό | 0,95 | 0,98 | 1,02 |
| Καλοκαίρι εύκρατης ζώνης | 0,97 | 0,99 | 1,02 |
| Υποαρκτικό καλοκαίρι | 0,99 | 0,99 | 1,01 |
| Χειμώνας εύκρατης ζώνης | 1,03 | 1,01 | 1,00 |
| | | | Πηγή :[1] |

Πίνακας 2-3: Διορθωτικοί συντελεστές τύπου κλίματος

Οι συντελεστές a_o^* , a_1^* , k^* για υψόμετρα χαμηλότερα από 2,5km υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις :

 $\alpha_{0}^{*} = 0,4237 - 0,00821(6 - A)^{2}$ (2.4.5 α) $\alpha_{1}^{*} = 0,5055 - 0,00595(6,5 - A)^{2}$ (2.4.5 β) $k^{*} = 0,2711 - 0,01858(2,5 - A)^{2}$ (2.4.5 γ)

Για την ατμοσφαιρική διαπερατότητα της διάχυτης ακτινοβολίας τ_d οι Liu Jordan ανέπτυξαν την παρακάτω εμπειρική σχέση :

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939\tau_b$$
 (2.4.6)

Η στιγμιαία ακτινοβολία καθαρού ουρανού σε κάθετο και οριζόντιο επίπεδο Gcn_b και Gc_b αντίστοιχα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$G_{cnb} = G_{on} \cdot \tau_b \quad (2.4.7)$$
$$G_{cb} = G_{on} \tau_b \cos \theta_z \quad (2.4.8)$$

Η άμεση και διάχυτη ακτινοβολία αιθρίας ατμόσφαιρας για το διάστημα μιας ώρας υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_{cb} = I_{on}\tau_b \cos\theta_z = I_o\tau_b$$
(2.4.9)
$$I_{cd} = I_{on}\tau_d \cos\theta_z = I_o\tau_d$$
(2.4.10)

Η ολική ακτινοβολία αιθρίας ημέρας για οριζόντια επιφάνεια *Η_c* μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας τις ωριάιες τιμές *Ι_c* όλων των ωρών της ημέρας [4].

2.4.4 Συχνότητα εμφάνισης νέφωσης

Παρουσιάζει ενδιαφέρον να είναι γνωστή για έναν τόπο η συχνότητα εμφάνισης αίθριων ημερών και ημερών με νέφωση. Οι δείκτες αιθριότητας χαρακτηρίζουν τη διαύγεια της ατμόσφαιρας επί ωριαίας, ημερήσιας και μηνιαίας βάσης και ορίζονται παρακάτω :

| Ωριαίος δείκτης αιθριότητας : | $k_T = \frac{I}{I_o}$ | (2.4.11) |
|--------------------------------------|--|----------|
| Ημερήσιος δείκτης αιθριότητας : | $K_T = \frac{H}{H_o}$ | (2.4.12) |
| Μηνιαίως μέσος δείκτης αιθριότητας : | $\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_o}$ | (2.4.13) |

Οι τιμές *I*, *H*, \overline{H} προέρχονται από μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (συνήθως από πυρανόμετρο) και οι αντίστοιχες I_o, H_o, \overline{H}_o υπολογίζονται από τις παραπάνω σχέσεις (2.4.2 και 2.4.3) [4].

2.4.5 Ανάλυση ολικής ακτινοβολίας σε άμεση και διάχυτη

Οι μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας που διατίθενται αναφέρονται συνήθως σε τιμές της ολικής ακτινοβολίας οριζόντιας επιφάνειας. Ωστόσο η συμπεριφορά των ηλιακών συλλεκτών είναι διαφορετική για τη συνιστώσα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας. Για τους περισσότερους από αυτούς ο υπολογισμός της απόδοσης βασίζεται στην άμεση ακτινοβολία αλλά σε ορισμένους τύπους όπως οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες και η διάχυτη ακτινοβολία συνεισφέρει σημαντικά. Η ανάλυση της ολικής ακτινοβολίας σε άμεση και διάχυτη αποδεικνύεται πολύ σημαντική για τις ηλιακές εφαρμογές και έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι από αρκετούς ερευνητές. Παρακάτω παρουσιάζονται οι επικρατέστερες από αυτές για την ωριαία , ημερήσια και μηνιαίως μέση ακτινοβολία ημέρας : <u>Ωριαία ακτινοβολία (Stauter & Klein) :</u>

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,00 - 0,1\left(\frac{I}{I_c}\right) & 0 \le \frac{I}{I_c} < 0,48\\ 1,11 + 0,0396\left(\frac{I}{I_c}\right) - 0,789\left(\frac{I}{I_c}\right)^2 & 0 \le \frac{I}{I_c} < 1,10 \\ 0,201,10 \le \frac{I}{I_c} \end{cases}$$
(2.4.14)

όπου : Ι_d : ωριαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

Ι: ωριαία ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

I_c: ωριαία ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου τυπικής διαυγούς ατμόσφαιρας Η ωριαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου I_b υπολογίζεται από την αφαίρεση ολικής και διάχυτης :

 $I_b = I - I_d$

Ημερήσια ακτινοβολία (Collares & Pereira Rabl):

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99 & K_T \le 0.17 \\ 1.188 - 2.272K_T + 9.473{K_T}^2 - 21.865K_T^3 + 14.648K_T^4 & 0.17 < K_T \le 0.75 \\ 0.54K_T + 0.632 & 0.75 < K_T < 0.80 \\ 0.2 & K_T \ge 0.80 \end{cases}$$

(2.4.15)

όπου : Η_d : ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

Η : ημερήσια ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

 K_{T} : ο ημερήσιος δείκτης αιθριότητας

Μηνιαίως μέση ακτινοβολία ημέρας (Collares & Pereira Rabl) :

 $\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 0,775 + 0,00653 \cdot (\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_s - 90)] \cdot \cos(115\overline{K}_T - 103)$ (2.4.16)

όπου :

 \overline{H}_d : ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου \overline{H} : ημερήσια ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου \overline{K}_T : μηνιαίως μέσος δείκτης αιθριότητας ω_s : ωριαία γωνία δύσης ηλίου

2.4.6 Υπολογισμός προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφανειες

Για το σχεδιασμό των ηλιακών συστημάτων αλλά και την αξιολόγηση της απόδοσης τους απαιτείται συχνά ο υπολογισμός της ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο ενός συλλέκτη με βάση τη μετρούμενη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο. Ο γεωμετρικός παράγοντας R_b εκφράζει την αναλογία της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο σε σχέση με την άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και υπολογίζεται όπως φαίνεται παρακάτω :

 $R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n}\cos\theta}{G_{b,n}\cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$ (2.4.17)



Πηγή : [4]

Εικόνα 2-6 : Άμεση ακτινοβολία οριζόντιας και κεκλιμένης επιφάνειας

Όπου :

Gb,T : η άμεση ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο Gb : η άμεση ακτινοβολία που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο Gb,n : η άμεση ακτινοβολία που δέχεται το κάθετο στις ηλιακές ακτίνες επίπεδο

Η ολική ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο δίνεται από τη σχέση :

 $G_{bT} = G_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$ (2.4.18)

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με δεδομένη ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου πρέπει να είναι γνωστή η διεύθυνση κατά την οποία φθάνει και η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία. Η κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας πάνω στον ουράνιο θόλο εξαρτάται από τη νέφωση και από την ατμοσφαιρική διαύγεια. Έχει παρατηρηθεί συγκέντρωση της διάχυτης γύρω από τον ήλιο και κοντά στον ορίζοντα. Σε πρακτικές εφαρμογές γίνεται η υπόθεση της ισότροπης διάχυτης ακτινοβολίας η οποία είναι περισσότερο ακριβής στην περίπτωση ομοιόμορφης νέφωσης και θαμπής ατμόσφαιρας. Αντίθετα, στην περίπτωση καθαρού ουρανού είναι πιο ακριβές να θεωρηθεί ότι η διάχυτη ακτινοβολίας που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα. Το επικρατέστερο από αυτά είναι αυτό των Liu Jordan που

θεωρεί ότι η ακτινοβολία που δέχεται μια επιφάνεια που σχηματίζει κλίση β με το οριζόντο επίπεδο αποτελείται από τρεις συνιστώσες :

- 1. την άμεση ακτινοβολία : $I_b R_b$
- 2. τη διάχυτη ακτινοβολία προερχόμενη από τον ουρανό : $I_d\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)$
- 3. τη διάχυτη ακτινοβολία προερχόμενη από ανάκλαση της ολικής στο έδαφος :

$$(I_b+I_d)\rho\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)$$

όπου ρ ο συντελεστής ανάκλσης (albedo) για τον οποίο έγινε λόγος στην ενότητα 2.1. Προσθέτοντας τις τρεις παραπάνω συνιστώσες προκύπτει η ολική ωριαία ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου :

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$$
 (2.4.19)

2.5 Σύστημα PVGIS

2.5.1 Το πρόγραμμα και οι βάσεις δεδομένων

Προκειμένου να ληφθούν υπ' όψη οι διακυμάνσεις των παραγόντων που επηρεάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε μεγάλης έκτασης περιοχές χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων που συνδυάζουν μοντέλα υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας ολοκληρωμένα με συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών GIS (Geographical Information Systems). Τα μοντέλα αυτά μπορούν να παρέχουν γρήγορες, οικονομικές και ικανοποιητικής ακρίβειας εκτιμήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας, που αφορούν μικρές περιοχές,σε σχέση με τα τοπικά χαρακτηριστικά τους. Ένα τέτοιο σύστημα είναι και το PVGIS (Photovoltaic Geographical Information Systems) το οποίο παρέχει δεδομένα για την ακτινοβολία και την αξιολόγηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταικά συστήματα στην Ευρώπη, Αφρική και Νοτιοδυτική Ασία. Αποτελεί μέρος της δράσης SOLAREC η οποία συμβάλλει στην ανάπτυξη και εφαρμογή των ΑΠΕ στην Ευρωπαική Ένωση.

Χρησιμοποιεί δύο βάσεις δεδομένων την Classic PVGIS και την πιο σύγχρονη Climate-SAF PVGIS. Η παλαιότερη έκδοση βασίζεται στην παρεμβολή μεταξύ τιμών που έχουν καταγραφεί από επίγειους μετρητικούς σταθμούς. Οι μετρήσεις αυτές, που αρχικά ήταν μέρος ευρωπαικού άτλα της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι μηνιαίες μέσες τιμές στιγμιαίας και διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο για τη χρονική περίοδο 10 ετών από 1981 έως το 1990. Η νεότερη έκδοση βασίζεται και σε υπολογισμούς από φωτογραφίες δορυφόρων που παρέχονται από το τμήμα CMSAF¹ για την περίοδο 12 χρόνων. Από την πρώτη γεννιά δορυφόρων της Meteosat γνωστοί ως MFG υπάρχουν δεδομένα από το 1998 έως το και από τους δεύτερης γεννιάς γνωστούς ως MSG δεδομένα από τον Ιούνιο του2006 έως το Δεκέμβριο του 2011. Η βάση δεδομένων Climate-SAF PVGIS είναι αυτή που χρησιμοποείται πιο πολύ καθώς στηρίζεται σε πιο πρόσφατες μετρήσεις ωστόσο για κάποιες περιοχές η παλαιότερη έκδοση αποτελεί τη μόνη επιλογή.

Η βάση δεδομένων αποτελείται από ψηφιοποιημένους χάρτες που αντιστοιχούν σε δώδεκα μηνιαίες μέσες τιμές και μία μέση ετήσια τιμή των ημερήσιων αθροισμάτων της ολικής ακτινοβολίας για οριζόντια επιφάνεια αλλά και για επιφάνεια με κλίση 15,25,40 μοίρες από το οριζόντιο επίπεδο. Με βάση τα δεδομένα αυτά δημιουργούνται επίσης ψηφιοποιημένοι χάρτες για την ακτινοβολία καθαρού ουρανού, τους δείκτες αιθριότητας, την αναλογία διάχυτης ολικής ακτινοβολίας.

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται το μοντέλο r.sun το οποίο εκτελείται στο σε περιβάλλον πηγαίου κώδικα GRASS GIS χρησιμοποιώντας γλώσσα προγραμματισμού C, σε συνδυασμό με μεθόδους παρεμβολής. Ο αλγόριθμος του μοντέλου εκτιμά την άμεση,διάχυτη και ανακλώμενη συνιστώσα της ολικής ακτινοβολίας καθαρού ουρανού και αιθρίας ατμόσφαιρας σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο. Η ολική ημερήσια ακτινοβολία προκύπτει από την ολοκλήρωση των τιμών της ακτινοβολίας που έχουν υπολογισθεί σε συχνά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για κάθε χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της ημέρας από τοπικά χαρακτηριστικά (λόφοι, βουνά) που έχουν καταγραφεί από ψηφιακό μοντέλο υπολογισμού του υψόμετρου SRTM.

2.5.2 Μοντέλο υπολογισμού της ακτινοβολίας

Τα βήματα που ακολουθεί το πρόγραμμα για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι:

1. Υπολογισμός της ολικής ακτινοβολίας καθαρού ουρανού σε οριζόντιο επίπεδο

Με βάση τους χάρτες για το υψόμετρο και τη θολερότητα Linke² υπολογίζονται από το μοντέλο r.sun ξεχωριστά η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία καθαρού ουρανού για το οριζόντιο επίπεδο. Από το άθροισμα των δύο συνιστωσών Bhc και Dhc αντίστοιχα προκύπτει η ολική ακτινοβολία καθαρού ουρανού για το οριζόντιο επίπεδο Ghc.

¹ CMSAF (Satellite Application Facility on Climate Monitoring): είναι τμήμα του δορυφορικού δικτύου EMETSAT και αποτελεί σύνδεσμο έξι Ευρωπαικών Εθικών Μετεωρολογικών και Υδρολογικών Υπηρεσιών. Στοχεύει στη διάθεση συνόλων γεωφυσικών δεδομένων που προέρχονται από δορυφόρους και αξιοποιούνται στην παρακολούθηση των κλιματολογικών συνθηκών.

² συντελεστής θολερότητας Linke (TL): ο συντελεστής αυτός αποτελεί μια προσέγγιση για την απορρόφηση και σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα σε αίθριο ουρανό. Πιο συγκεκριμένα περιγράφει το οπτικό βάθος (ορατότητα) της ατμόσφαιρας ,εξαιτίας της απορρόφησης από υδρατμούς αλλά και σκέδασης από αέρια μόρια, σε σχέση με το οπτικό βάθος για ξηρή και καθαρή ατμόσφαιρα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής TL τόσο μεγαλύτερη είναι και η εξασθένιση της άμεσης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και σκόδαση της αλλά και σκέδασης από αέρια μόρια, σε σχέση με το οπτικό βάθος για ξηρή και καθαρή ατμόσφαιρα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής TL τόσο μεγαλύτερη είναι και η εξασθένιση της άμεσης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Για πλήρως ξηρό και καθαρό ουρανό ο συντελεστής TL θα ήταν ίσος με τη μονάδα. Στην Ευρώπη, κατά τους θερινούς μήνες η ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα είναι αρκετά μεγάλη και ο συντελεστής TL ξεπερνά το 3 ενώ σε έντονα αστικοποιημένη περιοχή που η ατμόσφαιρα επιβαρύνεται από τα καυσαέρια και τους διάφορους ρύπους ο TL παίρνει τιμές 6-7 [http://www.helioclim.org/linke/].

2. Εκτίμηση δείκτη αιθριότητας και υπολογισμός ολικής ακτινοβολίας για μη-αίθρια ατμόσφαιρα σε οριζόντιο επίπεδο

Για ένα σύνολο μετεωρολογικών σταθμών, που διαθέτουν μετρήσεις της ολικής ατινοβολίας καθαρού ουρανού G_{hs}, μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης καθαρού ουρανού k_c από τη σχέση : $k_c = \frac{G_{hs}}{G_{hc}}$. Με μεθόδους παρεμβολής προκύπτει και ο ψηφιοποιημένος χάρτης για τον δείκτη k_c και βάσει αυτού να υπολογίζεται και η ολική ακτινοβολία μη-αίθριας ατμόσφαιρας G_h από τη σχέση : $G_h = k_c \cdot G_{hc}$.

3. Υπολογισμός της άμεσης και διάχυτης συνιστώσας της ολικής ακτινοβολίας σε μηαίθρια ατμόσφαιρα για κεκλιμένες επιφάνειες

Για τον υπολογισμό της ολικής ακτινοβολίας αιθρίας ατμόσφαιρας για κεκλιμένες επιφάνειες G_i η διάχυτη Dh και η άμεση συνιστώσα B_h εξετάζονται ξεχωριστά. Σε ορισμένους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι διαθέσιμες εκτός από τις τιμές της ολικής G_{hs} και οι τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για μη-αίθρια ατμόσφαιρα D_{hs} . Εφαρμόζοντας μεθόδους παρεμβολής κατασκευάστηκε ο ψηφιοποιημένος χάρτης με τις τιμές D_{hs}/G_{hs} . Με βάση αυτές τις τιμές υπολογίζονται η διάχυτη και άμεση ακτινοβολία για πραγματικές καιρικές συνθήκες από τις σχέσεις :

$$D_h = G_h \frac{D_{hs}}{G_{hs}}$$
$$B_h = G_h - D_h$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη γωνία πρόσπτωσης ,το αζιμούθιο του ηλίου και την κλίση του επιπέδου αλλά και το συντελεστή ανάκλασης εδάφους (albedo) το υπλογιστικό μοντέλο δίνει τις τρεις συνιστώσες για κεκλιμένη επιφάνεια : άμεση Βi, διάχυτη Di, και διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία Ri.

2.5.3 Τρέχουσα εφαρμογή

Η καρτέλα που φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 2-7) είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική για τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων. Ο χρήστης μπορεί είτε να πατήσει κατευθείαν πάνω στο χάρτη μια συγκεκριμένη περιοχή είτε να εισάγει τις ακριβείς συντεταγμένες της στο πλαίσιο αναζήτησης.



Πηγή : [<u>http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php</u>]

Εικόνα 2-7 : Σύστημα PVGIS,ο χάρτης επιλογής της περιοχής(αριστερά), οι επιλογές που αφορούν τις μετρήσεις ακτινοβολίας (δεξιά)

Έπειτα εισάγονται τα εξής στοιχεία :

- η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται στην τρέχουσα εφαρμογή (Radiation database)
- ο μήνας (select month)
- η κλίση της επιφάνειας του ηλιακού συλλέκτη/ φωτοβολταικού (Inclination)
- ο προσανατολισμός της επιφάνειας (Orientation)

Το PVGIS περιλαμβάνει βάση δεδομένων για το ύψος του ορίζοντα γύρω από κάθε επιλεγμένη περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο συνυπολογίζεται και η επίδραση γειτονικών λόφων, βουνών και σκίασης. Επειδή όμως η ανάλυση των πληροφοριών αυτών είναι γύρω στα 90m, τα στοιχεία που βρίσκονται πολύ κοντά όπως σπίτια ή δέντρα δε συμπεριλαμβάνονται. Για το λόγο αυτό, το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει τα στοιχεία για το ύψος του ορίζοντα στη συγκεκριμένη περιοχή. Το σχετικό αρχείο θα πρέπει να έχει τη μορφή κειμένου (.txt) ή υπολογιστικού φύλλου με τιμές χωρισμένες με κόμμα (.csv) Ανάλογα με τις παραπάνω επιλογές μπορούν να ληφθούν αποτελέσματα ανά 15 λεπτά από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου για τη μέση μέρα του επιλεγμένου μήνα και αφορούν τις εξής τιμές:

ολική και διάχυτη ακτινοβολία μη-αίθριας ατμόσφαιρας σε κεκλιμένο επιπέδο W/m² (Average global irradiance)

ολική ακτινοβολία αίθριας ατμόσφαιρας σε κεκλιμένο επιπέδο σε W/m² (Clear-sky global irradiance)

> άμεση ακτινοβολία για επίπεδο με έναν άξονα παρακολούθησης του ηλίου σε W/m^2 (Direct normal irradiance)

ολική και διάχυτη ακτινοβολία μη-αίθριας ατμόσφαιρας για επίπεδο με δύο άξονες παρακολούθησης του ηλίου σε W/m² (Average global irradiance, 2-axis tracking)

> ολική ακτινοβολία αίθριας ατμόσφαιρας για επίπεδο με δύο άξονες παρακολούθησης του ηλίου σε W/m² (Clear-sky global irradiance, 2-axis tracking)

> θερμοκρασία της ατμόσφαιρας σε °C (Daytime temperatures)

Τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν είτε σε μορφή web που περιλαμβάνει και σχετικά γραφήματα, είτε σε μορφή κειμένου, είτε σε μορφή PDF.

3 ΕΙΔΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι ένας ειδικής μορφής εναλλάκτης που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Η ιδιαιτερότητά του σε σχέση με τους κλασικούς εναλλάκτες έγκειται στο ότι μεταφέρει ενέργεια μορφής ακτινοβολίας από πολύ μακρινή πηγή –τον ήλιο- σε ένα εργαζόμενο μέσο (νερό, αέρας ή λάδι). Αντίθετα στους συμβατικούς εναλλάκτες η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται από ρευστό σε ρευστό κυρίως με συναγωγή και η ακτινοβολία δεν παίζει σημαντικό ρόλο [1].

Οι ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται αρχικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες : τους μη συγκεντρωτικούς και τους συγκεντρωτικούς.

Οι μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούν την ίδια επιφάνεια για τη συλλογή και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούν ανακλαστικές επιφάνειες ή διαθλαστικούς φακούς με σκοπό τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρότερη επιφάνεια απορρόφησης (δέκτης) αυξάνοντας έτσι τη ροή ενέργειας [13].Στο παρακάτω οργανωτικό διάγραμμα παρουσιάζονται τα βασικά είδη ηλιακών συλλεκτών με έμφαση στις κατηγορίες που αφορούν την παρούσα διπλωματική. Στο ίδιο διάγραμμα σημειώνεται με μπλε χρώμα η κατηγορία στην οποία ανήκει ο υπο μελέτη συλλέκτης.





3.1 Μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες

Στην κατηγορία των μη συγκεντρωτικών συλλεκτών υπάγονται οι επίπεδοι συλλέκτες και οι συλλέκτες κενού.

3.1.1 Επίπεδοι συλλέκτες

Ένας τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται τα εξής βασικά μέρη :

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



Πηγή : <u>http://www.ambienteco.gr/epilektikoi.html</u>

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες αξιοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και δεν απαιτούν μηχανισμούς παρακολούθησης του ηλίου, γι'αυτό και έχουν χαμηλό κόστος

Εικόνα 3-1 : Τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

συντήρησης. Τοποθετούνται με προσανατολισμό προς τον ισημερινό με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο β ώστε να μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά την περίοδο που ενδιαφέρει η χρήση του συλλέκτη. [4]

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται απόδοση της ενέργειας σε μέσες θερμοκρασίες περίπου 100°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνήθως συναντώνται σε εφαρμογές όπως η θέρμανση ζεστού νερού χρήσης,η θέρμανση κτιρίων ενώ σπανιότερα ο κλιματισμός και η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανική χρήση. Οι συμβατικοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες κατασκευάζονται για να είναι αποδοτικοί κυρίως σε σε ηλιόλουστα και θερμά κλίματα. [1]

3.1.2 Συλλέκτες κενού

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

Ο αεροστεγής γυάλινος σωλήνας αποτελείται από δύο γυάλινους σωλήνες κατασκευασμένους από διαφανές γυαλί υψηλής αντοχής μεταξύ των οποίων επικρατούν συνθήκες κενού έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες συναγωγής. Ο εσωτερικός γυάλινος σωλήνας καλύπτεται συνήθως με ειδική συλλεκτική επίστρωση με υψηλό συντελεστή απορρόφησης και χαμηλό συντελεστή θερμικής αντανάκλασης.



Πηγή : <u>http://cnskylight.en.made-in-china.com</u>

Πηγή : <u>www.thermatica.gr</u>

Εικόνα 3-2: Γυάλινος αεροστεγής σωλήνας τύπου dewar



Πηγή : http://heatwisesouthwestrenewables.co.uk/solar-thermal-birmingham/

Εικόνα 3-3: Συστοιχία σωλήνων κενού

Η μία άκρη του αυλού βρίσκεται μέσα στο υαλοσωλήνα ενώ το άλλο άκρο του καταλήγει στον κύλινδρο αποθήκευσης ζεστού νερού όπου γίνεται η συναλλαγή θερμότητας.

Αυτό το είδος συλλέκτη λειτουργεί σε εύρος θερμοκρασιών 77 – 177°C και χρησιμοποιείται για θέρμανση – ψύξη βιομηχανικών χώρων ή ακόμα και κατοικιών σε περιοχές που επικρατούν νεφοσκεπείς συνθήκες. Ωστόσο, το κόστος τους είναι σχεδόν διπλάσιο από αυτό των συμβατικών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.[32]

Για τη διατήρηση του κενού αέρος μεταξύ των δύο γυάλινων σωλήνων χρησιμοποιείται συχνά υλικό απορρόφησης αερίων σε κενό (getter) από βάριο. Το στρώμα βαρίου απορροφά ενεργά κάθε CO, CO₂,N₂,O₂,H₂O,H₂ που εκλύεται στο σωλήνα κατά την αποθήκευση και λειτουργία βοηθώντας έτσι στη διατήρηση του κενού. Ακόμα , το στρώμα βαρίου παρέχει μια καθαρή ένδειξη της κατάστασης του κενού καθώς η εισχώρηση αέρα αλλάζει το χρώμα του από λευκό σε ασημί.

Η χαμηλή υποπίεση στο γυάλινο αγωγό ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες συναγωγής και προστατεύει την απορροφητική πλάκα και το θερμοσωλήνα από τις εξωτερικές συνθήκες. Οι αποστάσεις μεταξύ των γυάλινων καλυμμάτων επιλέγονται με βάση την αποφυγή σκίασης [http://www.green-solar.net/].

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

• Συλλέκτες άμεσης ροής

• Συλλέκτες θερμικών σωλήνων οι οποίοι με τη σειρά τους διακρίνονται σε συλλέκτες ξηρής σύνδεσης και υγρής σύνδεσης.[30]

Σωλήνες κενού άμεσης ροής :

Στους σωλήνες άμεσης ροής το εργαζόμενο μέσο είναι συνήθως νερό και ο χάλκινος σωλήνας που περιέχεται σε κάθε σωλήνα κενού έχει σχήμα U με τα άκρα του συγκολλημένα πάνω σε δύο διαφορετικούς αγωγούς (κρύου και ζεστού νερού αντίστοιχα). Το ψυχρό

ρεύμα που εισέρχεται στον έναν αγωγό περνάει μέσα από κάθε χάλκινο σωλήνα U, θερμαίνεται και εξέρχεται από την άλλη άκρη του στον αγωγό του θερμού ρεύματος.



Πηγή : <u>http://www.sciencedirect.com/</u>



Εικόνα 3-4 : Τομή σωλήνα κενού άμεσης ροής με αγωγό U

Πηγή : <u>http://www.cerbos.ee/</u>

Εικόνα 3-5 : Τομή συλλέκτη με σωλήνες κενού άμεσης ροής με αγωγούς U

Συνήθως, πάνω στο χάλκινο αγωγό υπάρχει προσκολλημένο ένα επίπεδο ή κοίλο αλουμινένιο πτερύγιο. Το πτερύγιο αυτό είναι επικαλυμμένο έτσι ώστε να απορροφάται όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Συχνά επιτρέπεται και η περιστροφή κάθε σωλήνα έτσι ώστε το απορροφητικό πτερύγιο να βρίσκεται στην επιθυμητή κλίση, ακόμα και όταν ο συλλέκτης έχει τοποθετηθεί οριζόντια. Στην κατηγορία των συλλεκτών κενού άμεσης ροής αντί για αγωγούς σχήματος U χρησιμοποιούνται εναλλακτικά ομόκεντροι σωλήνες. Αν και ο σχεδιασμός αυτός είναι αποτελεσματικός, δεν είναι πάντα αξιόπιστος, καθώς η κατανομή θερμοκρασιών μεταξύ του γυάλινου και του μεταλλικού σωλήνα διαφέρουν, συνέπεια του οποίου είναι το κενό μεταξύ τους να εξασθενεί και να αστοχεί, καθιστώντας ανύπαρκτη τη λειτουργία εν κενώ και συμβάλλοντας στην κατακόρυφη ελάττωση του βαθμού απόδοσής του.[32]



Πηγή: <u>www.powerfromthesun.net</u>

Εικόνα 3-6 : Σωλήνας κενού με ομόκεντρο σωλήνα ροής.

Συλλέκτες θερμικών σωλήνων :

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

Ο χάλκινος θερμαντικός αυλός ξεκινά μέσα από τον αεροστεγή σωλήνα καταλήγοντας στην άκρη του (συμπυκνωτής), η οποία είναι ταπωμένη μέσα σε ένα μονωμένο αυλό. Η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται διαμέσου του εξωτερικού γυάλινου αγωγού, προσπίπτει στον απορροφητικό σωλήνα και θερμαίνει το ρευστό το οποίο φτάνει σε κατάσταση βρασμού και μετατρέπεται σε ατμό. Ο ατμός ανεβαίνει στο υψηλότερο σημείο του χαλκοσωλήνα (συμπυκνωτής) όπου έρχεται σε επαφή με το ψυχρό νερό του εναλλάκτη (που βρίσκεται στο πάνω μέρος του συλλέκτη), αποδίδει την ενέργειά του, ψύχεται, υγροποιείται και κινείται πάλι προς τα κάτω. Όσο οι θερμικοί σωλήνες δέχονται ακτινοβολία το φαινόμενο αυτό επαναλαμβάνεται με συνεχόμενο τρόπο [<u>www.green-solar.net</u>].



Πηγή : <u>http://www.jinyi-solar.com/</u>

Εικόνα 3-7 : Τομή θερμικού σωλήνα



Πηγή : <u>www.tcevacuatedtube.com</u>

Εικόνα 3-8 : Θερμικός σωλήνας του εμπορίου

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

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

<u>Υγρής σύνδεσης:</u>

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

<u>Ξηρής σύνδεσης:</u>

Σε αυτόν τον τύπο οι συμπυκνωτές των θερμικών σωλήνων βρίσκονται εξωτερικά σε επαφή με τον αγωγό του προς θέρμανση νερού. Επομένως αν κάποιος σωλήνας κενού πρέπει να αντικατασταθεί δεν απαιτείται άδειασμα του κυκλώματος του εναλλάκτη [30].



Πηγή : <u>www.enforce-een.eu</u>

Πηγή : <u>www.ecobuilding-club.net</u>

Εικόνα 3-9 : Θερμικοί σωλήνες υγρής σύνδεσης (α.), Θερμικοί σωλήνες ξηρής σύνδεσης (b.)

Οι συλλέκτες κενού που συχνά συνδυάζονται με ανακλαστικές επιφάνειες συγκέντρωσης του ηλίου ,όπως θα αναλυθεί στην ενότητα 3.2.2, αποτελούν μια ιδιαίτερα ανταγωνιστική τεχνολογία έναντι των κλασικών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους συνοψίζονται παρακάτω :

- Οι συνθήκες κενού στο εξωτερικό τμήμα κάθε σωλήνα ελαχιστοποιούν τις θερμικές απώλειες συναγωγής και προστατεύουν την απορροφητική πλάκα και το θερμοσωλήνα από τις εξωτερικές συνθήκες υγρασίας που προκαλούν αλλοίωση των εσωτερικών υλικών του συλλέκτη [15].
- Οι σωλήνες κενού είναι κυλινδρικοί με αποτέλεσμα οι ακτίνες του ηλίου να πέφτουν κάθετα καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας και όχι μόνο το μεσημέρι όπως συμβαίνει στους επίπεδους συμβατικούς συλλέκτες.
- Η κλίση των σωλήνων κενού μπορεί να είναι από 20 έως 80μοίρες, λύνοντας έτσι προβλήματα αισθητικής ή δυσκολίας τοποθέτησης όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς συλλέκτες.
- Λόγω του κλειστού κυκλώματος και της μικρής ποσότητας νερού που περνάει μέσα από τον εναλλάκτη μειώνουμε την ισχύ τον κυκλοφορητών με αποτέλεσμα χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.
- Κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι παρουσιάζουν κατασκευαστικές δυσκολίες λόγω της υποπίεσης που πρέπει να δημιουργηθεί και της συνεργασίας που πρέπει να επιτευχθεί μεταξύ διαφορετικών υλικών στη θέρμανση και ψύξη. Αυτό εξηγεί και το υψηλότερο κόστος κατασκευής τους.

Ωστόσο, οι συλλέκτες κενού βρίσκουν σημαντική εφαρμογή σε Βόρειες χώρες με μικρή ηλιοφάνεια και χαμηλές θερμοκρασίες καθώς η αποδοτικότητα των επίπεδων συλλεκτών μειώνεται ραγδαία όταν δεν επικρατούν ιδανικές συνθήκες. Διεθνείς μετρήσεις ενεργειακής απόδοσης του συλλέκτη δείχνουν ότι αποδίδει περίπου 35% περισσότερη ενέργεια από καλού επιπέδου συμβατικούς συλλέκτες [33].

3.2 Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

3.2.1 Γενικά

Η ανάγκη για απόδοση ενέργειας σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που επιτυγχάνονται από τους συνήθεις επίπεδους συλλέκτες αλλά και για την αύξηση του βαθμού απόδοσης των ηλιακών συστημάτων γενικότερα έστρεψε το ενδιαφέρον στην κατασκευή συγκεντρωτικών συλλεκτών [4].

Θεωρητικά, η θερμοκρασία που αποδίδει ένας συλλέκτης είναι δυνατόν να αυξηθεί μειώνοντας την επιφάνεια στην οποία λαμβάνουν χώρα οι θερμικές απώλειες. Πρακτικά αυτό επιτυγχάνεται με παρεμβολή μιας ανακλαστικής ή διαθλαστικής επιφάνειας μεταξύ της πηγής ακτινοβολίας (ήλιος) και της επιφάνειας απορρόφησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η επιφάνεια απορρόφησης είναι μικρότερη (έως και κατά πολύ μικρότερη) σε σχέση με την επιφάνεια του συγκεντρωτή ώστε η ροή ακτινοβολίας προς τον απορροφητή να είναι σημαντικά αυξημένη [1].

Η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητη όταν επιδιώκονται υψηλές θερμοκρασίες ή όταν το κόστος του απορροφητή είναι αρκετά υψηλότερο από το κόστος του ανακλαστήρα. Οι θερμικές απώλειες είναι ανάλογες του απορροφητή και συνεπώς αντιστρόφως ανάλογες του λόγου συγκέντρωσης [17].Μέχρι σήμερα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί πολυάριθμοι τύποι συγκεντρωτικών συλλεκτών.

3.2.2 Λόγος συγκέντρωσης

Βασικό στοιχείο των συγκεντρωτικών συλλεκτών αποτελεί ο λόγος συγκέντρωσης. Ο θεωρητικός λόγος συγκέντρωσης ορίζεται ως η επιφάνεια ανοίγματος ή παραθύρου δηλαδή η επιφάνεια από την οποία εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία προς την επιφάνεια του δέκτη δηλαδή την επιφάνεια που απορροφά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία.[4]

$$C = \frac{A_a}{A_r}$$
(3.2.1)

Ο συντελεστής συγκέντρωσης για ένα συλλέκτη κυμαίνεται από τιμές μικρότερες της μονάδας έως και της τάξεως του 10⁵. Αυξανόμενου του λόγου συγκέντωσης αυξάνεται η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αλλά ταυτόχρονα και οι απαιτήσεις ακρίβειας και ποιότητας

του οπτικού συστήματος που συνεπάγονται υψηλό κόστος. Στις ανώτατες τιμές της κλίμακας του λόγου συγκέντρωσης συναντάμε μόνο εργαστηριακά όργανα για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Από τη σκοπιά του μηχανικού ενδιαφέρουν οι χαμηλές και μέσες συγκεντρώσεις.[4]

Ο λόγος συγκέντρωσης παρουσιάζει μέγιστο το οποίο εξαρτάται από το εάν η συγκέντρωση γίνεται σε τρισδιάστατο συγκεντρωτή, όπως ένα παραβολικό κάτοπτρο σημειακής εστίασης, ή σε ένα δισδιάστατο (γραμμικό) συγκεντρωτή, όπως ένα παραβολικό κάτοπτρο γραμμικής εστίασης. Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3-10) παρουσιάζεται ένας τρισδιάστατος συγκεντρωτικός συλλέκτης με επιφάνεια ανοίγματος *Αα* και επιφάνεια δέκτη *Ar* που βλέπει ήλιο ακτίνας r σε απόσταση R.



Εικόνα 3-10 : Συγκεντρωτικός συλλέκτης με επιφάνεια ανοίγματος Αα και επιφάνεια δέκτη Ar που βλέπει ήλιο ακτίνας r σε απόσταση R.

Αποδεικνύεται ότι ο μέγιστος λόγος συγκέντρωσης για έναν συγκεντρωτικό συλλέκτη σημειακής εστίασης είναι :

$$\left(\frac{A_a}{A_r}\right)_{circular,max} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin\theta_s^2}$$
(3.2.2)

Μία παρόμοια ανάλυση για συγκεντρωτικούς συλλέκτες γραμμικής εστίασης οδηγεί στην ακόλουθη σχέση:

$$\left(\frac{A_a}{A_r}\right)_{linear,max} = \frac{1}{\sin\theta_s}$$
 (3.2.3)

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες αποτελούνται βασικά από τα εξής κύρια μέρη:

- Τον συγκεντρωτή (concentrator)
- Το δέκτη (receiver) ή απορροφητή (absorber) ο οποίος περιλαμβάνει την επιφάνεια απορρόφησης, το σύστημα μετατροπής της ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας καθώς και τα διάφορα καλύμματα για τη μόνωση του συστήματος.

Ο δέκτης μπορεί να είναι επίπεδος, κοίλος ή κυρτός, σημειακός ή γραμμικός, καλυμμένος ή χωρίς κάλυμμα.Ο συγκεντρωτής μπορεί να είναι :

- Ανακλαστικός (reflector) ή διαθλαστικός (refractor) δηλαδή κάτοπτρο ή φακός
- Επιμήκης ή κυκλικός
- Συνεχής ή αποτελούμενος από τμήματα
- Με είδωλο (imaging) ή χωρίς είδωλο (non-imaging)[1]

3.2.3 Συγκεντρωτές με είδωλο

Οι συγκεντρωτές αυτοί κατά την αντανάκλαση των ηλιακών ακτίνων σχηματίζουν καθορισμένο είδωλο του ηλίου πάνω στον απορροφητήρα όπως και οι φακοί που χρησιμοποιούνται στις κάμερες. Ο σχηματισμός του ειδώλου αλλά και η μορφή του(έλλειψη /κύκλος/σφαίρα) εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη γεωμετρία του συγκεντρωτή. Οι συγκεντρωτές με είδωλο μπορούν να επιτύχουν υψηλούς λόγους συγκέντρωσης. Ωστόσο, το είδωλο που διαμορφώνεται είναι χαμηλής ποιότητας.

Στην κατηγορία των συγκεντρωτικών συλλεκτών με είδωλο ανήκουν :

- Οι επιμήκεις παραβολικοί συλλέκτες γνωστοί και ως PTC (Parabolic Trough Collectors).
- Οι συλλέκτες με παραβολοειδείς συγκεντρωτές [1]

Για έναν τέλειο συγκεντρωτή με τέλεια ακριβές σύστημα παρακολούθησης του ηλίου ο μέγιστος λόγος συγκέντρωσης εξαρτάται από το γωνιακό εύρος της ηλιακής ακτίνας που θεωρείται ίσο με 0,53° (32'). Θεωρητικά, για συστήματα παρακολούθησης ενός άξονα ο θεωρητικός μέγιστος λόγος συγκέντρωσης ισούται με :

$$C_{max} = \frac{1}{\sin(16')} = 216$$
 (3.2.4)

Ενώ για συλλέκτες με συστήματα παρακολούθησης δύο αξόνων ο θεωρητικός μέγιστος λόγος συγκέντρωσης ισούται με :

$$C_{max} = \frac{1}{\sin 2(16')} = 46,747$$
 (3.2.5)

Στην πραγματικότητα οι μέγιστες και πολύ υψηλές τιμές του λόγου συγκέντρωσης δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν στην πράξη. Αυτό οφείλεται αφ΄ενός στα γεωμετρικά σφάλματα των επιφανειών και των συστημάτων παρακολούθησης του ηλίου και αφετέρου στο όριο αντοχής των υλικών του δέκτη στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που συνεπάγονται οι τιμές αυτές. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τυπικές τιμές του λόγου συγκέντρωσης και οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται για όλες τις κατηγορίες συλλεκτών και ηλιακών συστημάτων που αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο. Πίνακας 3-1 : Συντελεστής συγκέντρωσης και θερμοκρασιακό εύρος για όλους τους τύπους ηλιακών συλλεκτών και ηλιακών συστημάτων του κεφαλαίου.

| Σύστημα παρακολούθησης ηλίου | Τύπος ηλιακού συλλέκτη/συστήματος | Τύπος απορροφητή | Συντελεστής συγκέντρωσης | Ενδεικτικό θερμοκρασιακό εύρος (°C) |
|------------------------------------|---|---------------------|-----------------------------|---|
| (Σταθεροί) 1-άξονα | Επίπεδος συλλέκτης (FPC) | Επίπεδος | 1 | 30-80 |
| | Συλλέκτης κενού (ETC) | Επίπεδος | 1 | 50-200 |
| | Σύνθετος παραβολικός | Σωληνοειδής | 1-5 | 60-240 |
| | συλλέκτης (CPC) | | 5-15 | 60-300 |
| | Γραμμικός Fresnel (LFR) | Σωληνοειδής | 10-40 | 60-250 |
| | Παραβολικός σλλέκτης (PTC) | Σωληνοειδής | 15-45 | 60-300 |
| | Κυλινδρικός σλλέκτης (CTC) | Σωληνοειδής | 10-50 | 60-300 |
| 2-αξόνων | Παραβολικός δίσκος (PDR) | Σημειακός | 100-1000 | 100-500 |
| | Σύστημα κατόπτρων με κεντρικό δέκτη (HFC) | Σημειακός | 100-1500 | 150-2000 |

Πηγή : [18]

3.2.3.1 Επιμήκεις παραβολικοί συλλέκτες (ΡΤC)



Πηγή : <u>www.solarnovus.com</u>

Εικόνα 3-11 : Παραβολικός συγκεντρωτικός συλλέκτης (PTC)

Πρόκειται για επιμήκεις συλλέκτες με επιφάνεια «τύπου σκάφης» στην οποία οφείλεται η ονομασία τους Parabolic Trough Collectors (PTC). Η τομή τους είναι είτε κυλινδρική (CTC)

είτε παραβολική αν και γενικότερα αναφέρονται ως PTC. Ο δέκτης είναι συνήθως κυλινδρικός και περιβάλλεται από γυάλινο κάλυμμα και σπανιότερα επίπεδος.Οι επιμήκεις παραβολικοί συλλέκτες έχουν ερευνηθεί αρκετά αναλυτικά και πειραματικά τα τελευταία χρόνια και έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτούνται μέσοι συντελεστές συγκέντρωσης και εύρος θερμοκρασιών από 100 έως και 500°C.

Για την κατανόηση της λειτουργίας αυτού του τύπου συλλεκτών κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν τα οπτικά χαρακτηριστικά του συγκεντρωτή και τα είδωλα που αποδίδουν. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η τομή του παραβολικού συγκεντρωτή με εξίσωση y²=4fx στο καρτεσιανό σύστημα αξόνων.



Εικόνα 3-12 : Ημιτομή παραβολικού συλλέκτη **(α.)**, Ανάκλαση κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας από παραβολική επιφάνεια **(b.)**

Όπου

α : το άνοιγμα του συλλέκτη

f : το εστιακό μήκος (απόσταση από την κορυφή της παραβολής έως την εστία)

 r_r, φ_r : η ακτίνα και η γωνία χείλους του κατόπτρου

r,φ : η ακτίνα και η γωνία σε τυχαίο σημείο της παραβολής

Τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τις σχέσεις :

$$r = \frac{2f}{1 + \cos\varphi} \qquad (3.2.6) \qquad \qquad \varphi_r = \tan^{-1} \left[\frac{8(f/a)}{16(f/a)^2 - 1} \right] = \sin^{-1} \left(\frac{a}{2r_r} \right) \qquad (3.2.7)$$

Όπως φαίνεται από το δεύτερο σχήμα στην Εικόνα 3-12 η παραβολή έχει την εξής πολύ σημαντική ιδότητα που εκμεταλλεύονται οι εν λόγω συλλέκτες : σε οποιοδήποτε σημείο της παραβολής οι ηλιακές ακτίνες που προσπίπτουν κάθετα ανακλώνται στο ίδιο σημείο που αποτελεί την εστία της παραβολής. Με αυτόν τον τρόπο όλες οι κάθετες στο επίπεδο του ανοίγματος ακτίνες προσπίπτουν τελικά πάνω στην επιφάνεια του απορροφητή. Αυτός είναι

άλλωστε και ο λόγος για τον οποίο οι επιμήκεις παραβολικοί συλλέκτες θα πρέπει να διαθέτουν σύστημα παρακολούθησης του ήλιου ώστε να εξασφαλίζεται συνεχώς κάθετη πρόσπτωση.

Κάθε δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κώνος γωνιακού εύρους 0,53° όπως φαίνεται στο σχήμα. Η ανακλώμενη ακτινοβολία καθορίζει το πλάτος της εστιακής ζώνης για επίπεδο,κυλινδρικό και ημικυλινδρικό δέκτη αντίστοιχα. Όσο μεγαλώνει η γωνία χείλους του κατόπτρου τόσο αυξάνεται και το πλάτος του σχηματιζόμενου ειδώλου. Με βάση τις διαστάσεις του σχηματιζόμενου ειδώλου καθορίζονται και οι διαστάσεις του δέκτη. Για τέλειο θεωρητικά σχήμα συγκεντρωτή και τέλεια ευθυγραμμισμένο η διάμετρος του κυλινδρικό να περιλάβει ολόκληρο το είδωλο είναι :

$$D = 2r_r sin 16'$$
 (3.2.8)

Ενώ αν πρόκειται για επίπεδο δέκτη κάθετο στον άξονα συμμετρίας της παραβολής το πλάτος του θα πρέπει να είναι :

$$W = \frac{2r_r \sin 16t}{\cos(\varphi_r + 16t)}$$
 (3.2.9)

Είναι φανερό και από το παραπάνω σχήμα ότι το είδωλο παρουσιάζει εξάπλωση ακόμα και στους τέλειους συγκεντρωτές.

Το εστιακό μήκος είναι καθοριστικός παράγοντας για το μέγεθος του ειδώλου ενώ το πλάτος ανοίγματος α είναι καθοριστικός παράγοντας για τη συλλεγόμενη ακτινοβολία. Επομένως, η ροή ακτινοβολίας που συγκεντρώνεται υπο τη μορφή ειδώλου αποτελεί συνάρτηση του λόγου α/f.

Στην πραγματικότητα όμως, το μέγεθος του ειδώλου είναι μεγαλύτερο από τις τιμές που δίνουν οι παραπάνω εξισώσεις για τους εξής λόγους :

- a) Λόγω ατελειών στο σχήμα της παραβολικής διατομής, παρατηρείται διασπορά του ειδώλου.
- b) Λόγω του προσανατολισμού του συλλέκτη. Οι επιμήκεις παραβολικοί συλλέκτες συνήθως τοποθετούνται με τον διαμήκη άξονα οριζόντιο και προσανατολισμένο κατά Δύση-Ανατολή ή Βορρά-Νότο και με δυνατότητα περιστροφής περί τον άξονα αυτόν, έτσι ώστε η άμεση ακτινβολία να προσπίπτει παραλλήλως προς το επίπεδο συμμετρίας του συγκεντρωτή. Κάτω από αυτές τις συνθήκες παρατηρείται μεγένθυση του ειδώλου κατά τον παράγοντα 1/cosθ όπου η γωνία θ υπολογίζεται από τη γνωστή σχέση. Αυτό σημαίνει ότι αν ο συλλέκτης είναι προσανατολισμένος κατά τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης θα παρατηρηθεί μεγένθυση του ειδώλου κατά τος παρατηρηθεί μεγένθυση του ειδώλου κατά τος διαμάνει ότι αν ο συλλέκτης είναι προσανατολισμένος κατά το διεύθυνση Ανατολής-Δύσης θα παρατηρηθεί μεγένθυση του ειδώλου κατά τος διαρι τος είδωλο βα έχει το ελάχιστο μέγεθος [4].

Οι συλλέκτες ειδώλου σχεδιάζονται με δέκτες αρκετά μεγάλους ώστε να απορροφούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό από την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία που συνεπάγεται λιγότερες οπτικές απώλειες. Από την άλλη πλευρά όμως, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του δέκτη τόσο αυξάνονται οι θερμικές απώλειες. Το βέλτιστο μέγεθος του δέκτη έχει μελετηθεί από τους Lof και Duffie οι οποίοι καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών το βέλτιστο μέγεθος του δέκτη είναι αυτό που συλλαμβάνει περίπου το 90-95% της ανακλώμενης ακτινοβολίας.Αυτό σημαίνει ότι οι αντίστοιχες οπτικές απώλειες θα κυμαίνονται από 5-10% οι οποίες εκφράζονται από την τιμή του παράγοντα σύλληψης γ. Ο παράγοντας αυτός εκφράζει το κλάσμα της ανακλώμενης ακτινοβολίας που προσλαμβάνεται από το δέκτη :

$$\gamma = \frac{\int_{A}^{B} I(y) dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(y) dy}$$
(3.2.10)

Όπου Ι(γ) η ανακλώμενη ακτινοβολία, γ η απόσταση από τον άξονα συμμετρίας του συγκεντρωτή και ΑΒ το πλάτος ή η διάμετρος του δέκτη.

Συνηθισμένες τιμές για τον παράγοντα σύλληψης είναι από 0,9 και πάνω [1].

3.2.3.2 <u>Παραβολοειδείς συλλέκτες</u>

Ο παραβολοειδής συγκεντρωτής είναι μία επιφάνεια που σχηματίζεται εκ περιστροφής. Η τομή που περιέχει τον άξονα συμμετρίας είναι μια παραβολή με τα χαρακτηριστικά a,f,φ_r,r_r και δ που ορίστηκαν και στους επιμήκεις παραβολικούς συγκεντρωτές.

Οι παραβολοειδής συγκεντρωτής είναι σημειακής εστίασης και χρησιμοποιείται με δέκτη σφαιρικό, επίπεδο ή κοίλο τοποθετημένο στην κυρία εστία του πιάτου. Αξιοποιεί μόνο την άμεση ακτινοβολία και μπορεί να πετύχει πολύ υψηλό λόγο συγκέντρωσης [4]. Η τιμή του λόγου συγκέντρωσης στην κατηγορία των εν λόγω συλλεκτών κυμαίνεται μεταξύ 600 – 2.000 γι' αυτό και είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί σε συστήματα θερμικής απορρόφησης και μετατροπής ενέργειας [http://www.green-solar.net/]

Ο μέγιστος λόγος συγκέντρωσης c_m που αντιστοιχεί σε μέγεθος δέκτη επαρκές ώστε να συλλάβει ολόκληρο το είδωλο του ηλίου είναι :

$$C_m = \frac{\sin^2 \varphi_r}{4\sin^2(\frac{\delta}{2} + 0.267)} - 1$$
 για σφαιρικό δέκτη (3.2.11)

$$C_m = \frac{\sin^2 \varphi_r \cos^2(\varphi_r + \frac{\delta}{2} + 0.267)}{\sin^2(\frac{\delta}{2} + 0.267)} - 1$$
για επίπεδο δέκτη **(3.2.12)**

Όπως και οι υπόλοιποι συγκεντρωτές που σχηματίζουν είδωλο έτσι και ο παραβολικός δίσκος πρέπει να παρακολουθεί ακριβώς τον ήλιο γι' αυτό διαθέτει δύο άξονες κίνησης έτσι ώστε να αντανακλά τις ακτίνες του στον θερμικό δέκτη. Ο δέκτης απορροφά την ακτινοβολία του ήλιου και τη μετατρέπει σε θερμική ενέργεια του κυκλοφορούντος μέσου.Το μέσο αυτό μπορεί να είναι υγρό ή αέριο (συνήθως ήλιο ή υδρογόνο). Η θερμική ενέργεια μπορεί είτε να μετατραπεί

σε ηλεκτρική χρησιμοποιώντας μια διάταξη μηχανής – γεννήτριας συνδεδεμένη απευθείας στο δέκτη, συνήθως μηχανή Stirling ή αεριοστρόβιλο, είτε να μεταφερθεί μέσω σωληνώσεων σε ένα κεντρικό σύστημα μετατροπής ισχύος [31].

Οι μηχανές Stirling που χρησιμοποιούνται παράγουν ως και 25kW. Οι μικροί αεριοστρόβιλοι μπορούν να παράγουν μεγαλύτερη ισχύ αλλά με σημαντικά μικρότερη απόδοση από τις μηχανές Stirling.



Πηγή : <u>www.swensonandsons.com</u>

Εικόνα 3-13 : Παραβολικοί δίσκοι με μηχανές Stirling σε λειτουργία στο ερευνητικό κέντρο Plataforma Solar de Almeria της Ισπανίας. Κάθε δίσκος παράγει 10kW ηλεκτιρκής ισχύος.

Κάθε μονάδα παραβολικού δίσκου είναι ένα ξεχωριστό σύστημα με δική του θερμική μηχανή και αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρισμού. Ως εκ τούτου η εν λόγω τεχνολογία είναι κατάλληλη για αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος και για απομονωμένα, αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα παραβολικού δίσκου μπορούν να δημιουργήσουν θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 1500 °C και καθώς είναι συνεχώς απέναντι από τον ήλιο, έχουν την μεγαλύτερη απόδοση μεταξύ όλων των συλλεκτών[31].

Η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του ανοίγματος S υπολογίζεται από την ίδια προηγούμενη εξίσωση. Στους παραβολοειδείς συλλέκτες με μεγάλους λόγους συγκέντρωσης αποφεύγεται η χρήση καλύμματος λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται και γι' αυτό θα πρέπει να μη λαμβάνεται υπ'όψη η διαπερατότητα του καλύμματος τ [4].

3.2.4 Συγκεντρωτές χωρίς είδωλο

3.2.4.1 Σύθετοι παραβολικοί συλλέκτες CPC

Οι συγκεντρωτές χωρίς είδωλο δεν αποδίδουν σαφώς καθορισμένο είδωλο του ηλίου στον απορροφητή και δίνουν χαμηλό λόγο συγκέντρωσης συνήθως κάτω από 10. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες γνωστοί και ως CPC (Compound Parabolic Collectors) που συναντώνται συνήθως υπό επιμήκη (διδιάστατη) μορφή. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των συλλεκτών αυτού του τύπου έναντι των απλών παραβολικών συγκεντρωτών είναι ότι αντανακλούν προς τον δέκτη την άμεση και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία για ένα μεγάλο εύρος γωνιών πρόσπτωσης (από θc έως –θc) και όχι μόνο την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα στο συγκεντρωτή. Αυτό σημαίνει ότι σε αντίθεση με τους PTC έχουν ελάχιστες έως και καθόλου ανάγκες για συστήματα παρακολούθησης του ηλίου που συνεπάγονται υψηλό κόστος.



Πηγή : <u>http://www.rayotec.com/solar-thermal/how-it-works</u>

Εικόνα 3-14 : Ανάκλαση άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας από σύνθετο παραβολικό συλλέκτη

Οι σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές χρησιμοποιούνται σε ηλιακές εφαρμογές για τη θέρμανση νερού σε κατοικίες, μονάδες αφαλάτωσης ακόμα και μονάδες φωτοχημικού καθαρισμού του νερού. Συναντώνται επίσης και σε συνδυασμό με φωτοβολταικά στοιχεία αλλά και σε πολλά συστήματα φωτισμού ως συγκεντρωτές του φωτός.

Μέχρι σήμερα έχουν σχεδιαστεί πάρα πολλοί τύποι σύνθετων παραβολικών συγκεντρωτών διδιάστατοι ή τρισδιάστατοι. Ως διδιάστατοι χαρακτηρίζονται οι επιμήκεις συλλέκτες που πραγματοποιούν γραμμική εστίαση ενώ τρισδιάστατοι αυτοί που πραγματοποιούν σημειακή εστίαση. Οι συγκεντρωτές τύπου cpc που αφορούν ηλιακές εφαρμογές συνδυάζονται με διάφορους τύπους δέκτη όπως επίπεδους (οριζόντιους ή κάθετους), κυλινδρικούς (κενού ή όχι) και έτσι προκύπτουν πολλές παραλλαγές ηλιακών συλλέκτων.



Πηγή : [19]

Εικόνα 3-15 : Τομές σύνθετων συμμετρικών διδιάστατων παραβολικών συγκεντρωτών (**α.)** με επίπεδο οριζόντιο δέκτη (**b**.)με επίπεδο κατακόρυφο δέκτη (**c**.) με δέκτη τύπου κορυφής (wedge-type), (**d**.) με κυλινδρικό δέκτη (όλοι οι δέκτες έχουν συνολική περίμετρο α)

Οι ηλιακοί συλλέκτες cpc που συναντώνται στο εμπόριο είναι μονάδες πλήρων συλλεκτών αποθήκευσης ICS (Integrated Collector Storage)(Εικόνα 3-16 b) ή συστοιχίες σωλήνων κενού με cpc ανακλαστήρες (Εικόνα 3-17 α). Τα συστήματα ICS μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί για τις συνηθισμένες μονάδες ηλιακών θερμοσιφώνων FPTU (Flat Plate Thermosiphonic Units) (Εικόνα 3-17 α) για τη θέρμανση νερού σε θερμοκρασίες μεταξύ 40 – 70 °C καλύπτοντας οικιακές ανάγκες 100-2001. Τα συστήματα αυτά έχουν απλή κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία και χαμηλότερο κόστος από τα FPTU το μικρό τους ύψος καθιστά τα συστήματα αυτά πιο εναρμονισμένα με την περιβάλλουσα αρχιτεκτονική. Το κύριο πρόβλημα των συστημάτων ICS είναι οι αυξημένες θερμικές απώλειες του αποθηκευμένου νερού, το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι σημαντική επιφάνεια της αποθηκευτικής δεξαμενής εκτίθεται στην ατμόσφαιρα για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας [32].



Πηγή : [47]

Εικόνα 3-16 : τυπική μονάδα ηλιακού θερμοσίφωνα FPTU (**α**.), πλήρης μονάδα συλλέκτη αποθήκευσης ICS με κυλινδρικό δέκτη (**b**.)

Η πιο διαδεδομένη εκδοχή των συλλεκτών τύπου cpc συνδυάζει τους σύνθετους παραβολικούς συγκεντρωτές με σωλήνες κενού τύπου U (Ενότητα 3.1.2). Οι συλλέκτες αυτοί συνδυάζουν τα

πλεονεκτήματα της οπτικής απόδοσης των συγκεντρωτών cpc και παράλληλα έχουν μειωμένες θερμικές απώλειες χάρη στην τεχνολογία κενού. Ορισμένοι κατασκευαστές εισήγαγαν το συγκεκριμένο τύπο ηλιακών συλλεκτών σε συστήματα ψύξης με απορρόφηση και κύκλου οργανικού μέσου (ORC) [20].

Εμπορικά, οι συλλέκτες CPC συναντώνται συχνότερα σε συστοιχίες (Εικόνα 3-17 α) και αποτελούν ανταγωνιστική τεχνολογία για τους συλλέκτες κενού και ιδιαίτερα για τους επίπεδους συλλέκτες. Μπορούν να παρέχουν θερμότητα σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τους επίπεδους συλλέκτες, διατηρώντας το πλεονέκτημα της σταθερής τοποθέτησης. Πολλές φορές πάνω από τη συστοιχία τοποθετείται γυάλινο κάλυμμα που προστατεύει τις ανακλαστικές και απορροφητικές επιφάνειες ενώ ταυτόχρονα συμβάλει στη μείωση των θερμικών απωλειών απο τον απορροφητή. Ωστόσο η προσθήκη καλύμματος πάνω από τη σειρά των CPC συλλεκτών έχει ως αποτέλεσμα η εισερχόμενη ακτινοβολία να είναι μειωμένη κατά το συντελεστή διαπερατότητας του καλύμματος [1].



Εικόνα 3-17 : Συστοιχία σωλήνων κενού με ανακλαστήρες CPC **(α.)**, Τομή συλλέκτη τύπου CPC με κυλινδρικό δέκτη κενού και αγωγό τύπου U **(b.)**

Οι συλλέκτες τύπου cpc με κυλινδρικό δέκτη πλεονεκτούν έναντι αυτών με επίπεδο δέκτη (με εξαίρεση τον κάθετο επίπεδο δέκτη) διότι "φωτίζουν" όλη την επιφάνεια του απορροφητή περιφερειακά και κατ'επέκταση απαιτούν λιγότερο υλικό απορροφητή. Ως αποτέλεσμα, ελαχιστοποιούνται απώλειες αγωγής προς την υπόλοιπη επιφάνεια του συλλέκτη (back losses),εξοικονομείται υλικό απορροφητικής επιφάνειας και παράλληλα παρουσιάζεται βελτίωση της χρονικής απόκρισης του συλλέκτη [24]. Ωστόσο , η οπτική απόδοση των σύνθετων παραβολικών συλλεκτών διαμορφώνεται και από άλλους παράγοντες που παρουσιάζονται αναλυτικά στην παρακάτω σχετική ενότητα.

Οι σύνθετοι παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες cpc τοποθετούνται με τον διαμήκη άξονά τους στη διεύθυνση βορρά-νότου ή ανατολής-δύσης με το επίπεδο του ανοίγματος στραμμένο προς τον ισημερινό υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής τοποθέτησης. Συνήθως υπάρχει και η δυνατότητα ρύθμισης (περιστροφής) περί τον διαμήκη άξονα ώστε η άμεση ακτινοβολία να

προσπίπτει εντός των ορίων που επιβάλει η γωνία αποδοχής.Για τον προσανατολισμό βορράνότου θα πρέπει να διαθέτουν σύστημα κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε η επιφάνεια ανοίγματος να είναι συνεχώς στραμμένη στον ήλιο. Στην περίπτωση αυτή, αν η γωνία αποδοχής του συγκεντρωτή είναι αρκετά μεγάλη, η εποχιακή ρύθμιση δεν είναι απαραίτητη[4][28]. Πιο συχνά επιλέγεται ο προσανατολισμός ανατολής-δύσης σε συνδυασμό με μικρή εποχιακή ρύθμιση όπου η σύλληψη της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από τα όρια της γωνίας αποδοχής. Για τους σταθερούς cpc συλλέκτες η ελάχιστη γωνία αποδοχής ισούται με 47° και καλύπτει την απόκλιση του ηλίου από το καλοκαιρινό μέχρι και το χειμερινό ηλιοστάσιο. Στην πράξη,οι περισσότεροι ηλιακοί συλλέκτες cpc διαθέτουν μεγαλύτερες γωνίες αποδοχής και κατ' επέκταση μικρότερους λόγους συγκέντρωσης. Για τιμές του λόγου συγκέντρωσης κάτω του 3 απαιτείται ρύθμιση δύο φορές το χρόνο ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 10 απαιτείται καθημερινή ρύθμιση[28]. Γενικότερα η μείωση της γωνίας αποδοχής οδηγεί σε αύξηση των αναγκαίων ρυθμίσεων του συλλέκτη κατά τη διάρκεια του έτους [4].

3.2.4.2 Σχεδιασμός και γεωμετρία σύνθετων παραβολικών συλλεκτών:

Η πιο γνωστή τεχνική σχεδιασμού σύνθετων παραβολικών συγκεντρωτών ονομάζεται string method και χρησιμοποιεί χορδές οι οποίες ,όπως θα αναλυθεί παρακάτω, σχηματίζουν κατά την κίνησή τους το παραβολικό προφίλ των cpc. Ο σχεδιασμός βασίζεται κατα κύριο λόγο στην «αρχή των οριακών ακτίνων » (edge ray principle) και την αρχή του Fermat. Σύμφωνα με την πρώτη, αν μία ακτίνα προσπίπτουσα στο χείλος του ανοίγματος του ανακλαστήρα υπό γωνία θ ανακλαστεί στην απέναντι άκρη του ανοίγματος του δέκτη τότε κάθε ακτίνα που προσπίπτει υπό γωνία θ φτάνει στο δέκτη. Σύμφωνα με την αρχή του Fermat το μήκος της οπτικής διαδρομής είναι το ίδιο για όλες τις ακτίνες.



Πηγή :[5]

Εικόνα 3-18 : Εφαρμογή μεθόδου των χορδών για τη σχεδίαση σύνθετων παραβολικών συγκεντρωτών με επίπεδο δέκτη **(a.)** με κυλινδρικό δεκτη **(b.)**

Θεωρούμε μια ράβδο CA που σχηματίζει γωνία θ_{max} με το άνοιγμα και μια χορδή σταθερού μήκους δεμένη σε έναν κρίκο περασμένο στη ράβδο (Εικόνα 3-18 α) Αρχικά, το ένα άκρο της χορδής

βρίσκεται στο σημείο Α και τεντώνεται έτσι ώστε να περνά από το σημείο a και να καταλήγει στο σημείο d. Κρατώντας το σημείο d σταθερό, η χορδή σύρεται μαζί με τον κρίκο παράλληλα στην προηγούμενη διεύθυνση του τμήματος AC μέχρι να φτάσει το σημείο C (συμμετρικό του a ως προς τη μεσοκάθετο του BA). Τα σημεία που τσακίζει κάθε φορά η χορδή δημιουργούν το όριο abc το οποίο αποτελεί το προφίλ του CPC από τη μία πλευρά. Ομοίως παράγεται και το προφίλ της απέναντι πλευράς. Η γωνία θ_{max} ονομάζεται ημιγωνία αποδοχής και η τιμή της είναι αυτή που καθορίζει το εύρος των γωνιών της ακτινοβολίας που προσλαμβάνονται από το δέκτη[5]. Πιο συχνά συμβολίζεται ως θ_c και είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μέγιστο λόγο συγκέντρωσης του συγκεντρωτή.

Η ίδια μέθοδος μπορεί να επεκταθεί και για συλλέκτες με διαφορετκά σχήματα δέκτη. Οι Winston και Hinterberger απέδειξαν ότι μπορεί να δημιουργηθεί σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτής με δέκτη οποιουδήποτε σχήματος με πλάτος ανοίγματος Ι και περιφέρεια δέκτη Isinθ_c [1] Συνεπώς, κατά αντίστοιχο τρόπο μπορεί να σχεδιαστεί και η τομή της επιφάνειας του cpc με κυλινδρικό δέκτη με σταθερό σημείο το c (Εικόνα 3-18 b) [5].

Ο μέγιστος θεωρητικός λόγος συγκέντρωσης που μπορεί να πετύχει ένας διδιάστατος παραβολικός συλλέκτης ορίζεται ως 1/sinθ_c. Οι σύνθετοι διδάστατοι παραβολικοί συγκεντρωτές πλησιάζουν σε μεγάλο βαθμό τον μέγιστο λόγο συγέντρωσης που αντιστοιχεί στη γωνία θc. Σε αντίθεση, οι συγκεντρωτές με είδωλο όπως οι PTC πετυχαίνουν λόγο συγκέντρωσης μειωμένο τουλάχιστον κατά τον παράγοντα 2 σε σχέση με τον ιδανικό [22].

<u>Γεωμετρία cpc με επίπεδο δέκτη :</u>

Γεωμετρικά, κάθε πλευρά του CPC είναι τμήμα παραβολής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι εστίες και οι αντίστοιχες παραβολές οι οποίες εκτείνονται μέχρι να γίνουν παράλληλες προς τον άξονα συμμετρίας του CPC. [5] Η ημιγωνία αποδοχής θς είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που συνδέει την εστία της μιας παραβολής με το απέναντι άκρο της και τον άξονα της παραβολής [4].



Πηγή : <u>www.powerfromthesun.net</u>



Η γεωμετρία που απεικονίζεται παραπάνω αφορά επίπεδους δέκτες τοποθετημένους στο επίπεδο μεταξύ των δύο εστιών κάθετα στον άξονα συμμετρίας του CPC. Οι συντεταγμένες του μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [13].

<u>Γεωμετρία cpc με κυλινδρικό δέκτη :</u>

Οι σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές με κυλινδρικό δέκτη μελετήθηκαν πρώτα από τους Winston και Welford. Γεωμετρικά, οι επιφάνειες τους αποτελούνται από το συνδυασμό μιας παραβολικής και μιας εξειλιγμένης καμπύλης.



Εικόνα 3-20 : Συλλέκτης CPC με κυλινδρικό δέκτη **(α.)**, Ημιτομή συγκεντρωτή CPC με κυλινδρικό δέκτη - παραγωγή επιφάνειας εξειλιγμένης καμπύλης **(b.)**

Συγκεκριμένα, τα τμήματα AB και AC αποτελούν εξειλιγμένες καμπύλες των τμημάτων του δέκτη AF και AG αντίστοιχα. Για το υπόλοιπο προφίλ του συγκεντρωτή ισχύει ότι σε κάθε σημείο P της επιφάνειας η κάθετη σε αυτό ευθεία πρέπει να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στον απορροφητή PT και η ευθεία που διέρχεται από το P και σχηματίζει γωνία θς με τον άξονα του CPC (*Εικόνα 3-20* α)

Έχει αποδειχτεί ότι το σχήμα του συγκεντρωτή που οδηγεί σε μέγιστη απορρόφηση της ακτινοβολίας είναι αυτό που φαίνεται Εικόνα 3-20 b[1].

Το σχήμα αυτό έχει και ο συγκεντρωτής του υπό μελέτη συλλέκτη γι'αυτό παρακάτω παρατίθενται οι συντεταγμένες του.

Εντός των εφαπτομένων που ορίζονται από τις γωνίες θε του παραπάνω σχήματος
οι συντεταγμένες του ανακλαστήρα (θ <θ_c+π/2) ανήκουν στην απλή εξειλιγμένη :

$$\rho = \alpha \cdot \theta$$
 (3.2.13)

όπου α η ακτίνα του απορροφητή ρ μήκος της εφαπτόμενης στον απορροφητή μέχρι το συγκεντρωτή και θ η γωνία από το σημείο επαφής του δέκτη με το συγκεντρωτή.

 Εκτός των των εφαπτομένων που ορίζονται από τις γωνίες θc (θ>θ_c +π/2) η λύση των Winston και Hinterberg δίνει :

$$\rho = \frac{a[(\theta + \theta_{max} + \pi/2) - \cos(\theta - \theta_c)]}{[1 + \sin(\theta - \theta_c)]}$$
(3.2.14)

Ενώ οι συντεταγμένες που δίνουν ολόκληρη την καμπύλη του ανακλαστήρα είναι :

$$x = \pm \alpha \sin \theta \mp \rho \sin \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)$$
 (3.2.15)
$$y = -\alpha \cos \theta + \rho \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)$$
 (3.2.16)

Στη σχέση 3.2.15 τα πρόσημα της πρώτης σειράς αναφέρονται στη δεξιά καμπύλη της τομής του CPC και τα πρόσημα της δεύτερης σειράς στην αριστερή καμπύλη αντίστοιχα. Οι καμπύλες αυτές για έναν πλήρες (μη αποκομμένο) CPC με γωνία αποδοχής θε και απορροφητή ακτίνας α παράγονται εφαρμόζοντας τις παραπάνω εξισώσεις ξεκινώντας από το θ=0 και αυξάνοντας κατά μικρές τιμές τη γωνία θε στο εύρος $0 \le \theta \le \pi + \theta c$ [23]

Βάσει των παραπάνω εξισώσεων σχεδιάστηκε η τομή ενός συλλέκτη cpc με κυλινδρικό δέκτη για τρεις διαφορετικές γωνίες αποδοχής (Διάγραμμα 3-1). Όπως φαίνεται, το τμήμα της εξειλιγμένης είναι ακριβώς όμοιο και στις τρεις περιπτώσεις καθώς εξαρτάται μόνο από την ακτίνα του δέκτη. Αντίθετα, το τμήμα της παραβολικής επιφάνειας διαφέρει καθώς εξαρτάται και από τη γωνία αποδοχής.



Διάγραμμα 3-1 : Σχεδίαση συλλέκτη cpc με κυλινδρικό δέκτη στο excel σύμφωνα με το μοντέλο του Winston

Η σχεδίαση ιδανικών συγκεντρωτών σύμφωνα με το πρότυπο του Winston (Εικόνα 3-20) δείχνει το δέκτη να βρίσκεται σε επαφή με τον ανακλαστήρα . Σε πολλές ηλιακές εφαρμογές αφήνεται κενό μεταξύ τους ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί το γυάλινο κάλυμμα αλλά και για να περιοριστούν οι απώλειες αγωγής από το δέκτη προς το συγκεντρωτή. Δεδομένου ότι το κενό αυτό οδηγεί σε οπτικές απώλειες θα πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ αυτών και των αντίστοιχων θερμικών απωλειών. Κρατώντας σταθερή τη γεωμετρία του συγκεντρωτή το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται συνήθως με τρεις τρόπους :

- Μείωση του μεγέθους του απορροφητή
- Αποκοπή τμήματος του συγκεντρωτή στο σημείο επαφής
- Τροποποίηση του σχήματος του απορροφητή ώστε να σχηματίζει εσωτερική κοιλότητα γύρω από το σημείο επαφής σε μικρή απόσταση από αυτό [24].

Οι οπτικές απώλειες που προκύπτουν από τις παραπάνω τροποποιήσεις εκφράζονται στον οπτικό βαθμό απόδοσης του συλλέκτη με το συντελεστή p :

$$p=1-rac{g}{2\pi r_{r,0}}$$
 (3.2.17) $g=clearance+r_e-r_{r,0}$ (3.2.18)

όπου :

clearance : το κενό μεταξύ του συγκεντρωτή και του γυάλινου καλύμματος

r_e : η ακτίνα του γυάλινου καλύμματος

r_{r,0}: η ακτίνα του απορροφητή [21]

3.2.4.3 <u>Οπτική απόδοση σύνθετων παραβολικών συλλεκτών</u>

Στους μη συγκεντρωτικούς συλλέκτες η οπτική απόδοση εξαρτάται από το διαφανές κάλυμμα και την απορροφητική επιφάνεια και σχετίζεται αντίστοιχα με τη μεταβολή του ολικού συντελεστή διαπερατότητας και απορροφητικότητας (τα) σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ανοίγματος. Στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες η οπτική απόδοση εξαρτάται ,εκτός των δύο αυτών παραγόντων, από τον τύπο, την ανακλαστικότητα και τη γωνία αποδοχής της κατοπτρικής διάταξης. Η οπτική απόδοση των σύνθετων παραβολικών ηλιακών συλλεκτών μπορεί αρχικά να αναλυθεί σε δύο βασικά προβλήματα :

- a) Τον καθορισμό του ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας (άμεσης και διάχυτης) που βρίσκεται εντός των ορίων της γωνίας αποδοχής σε σχέση με αυτό που εισέρχεται από το άνοιγμα του συγκεντρωτή.
- b) Τον καθορισμό του ποσοστού της ακτινοβολίας που δεσμεύεται από τον απορροφητή σε σχέση με αυτό που βρίσκεται εντός των ορίων της γωνίας αποδοχής

a) <u>Καθορισμός της ηλιακής ακτινοβολίας που βρίσκεται εντός των ορίων της γωνίας</u> <u>αποδοχής :</u>

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ακτινοβολία που φτάνει στο δέκτη ενός συλλέκτη τύπου cpc θα πρέπει κατ'αρχήν να καθοριστεί αν η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας βρίσκεται εντός των ορίων που ορίζει η γωνία απόδοχής. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα
3-21), για έναν CPC με προσανατολισμό ανατολής-δύσης με γωνία κλίσης β τα όρια των γωνιών αποδοχής είναι β-θς, β+θς.



Πηγή : [1]

Εικόνα 3-21 : Εύρος γωνιών αποδοχής για συλλέκτη CPC με κλίση β

<u>Άμεση ακτινοβολία :</u>

Έχει αποδειχθεί από τον Mitchell ότι η άμεση ακτινοβολία συναντά το δέκτη αν πληρούται η συνθήκη:

$$(\beta - \theta_c) \le \tan^{-1}(\tan \theta_z \cos \gamma_s) \le (\beta + \theta_c)$$
 (3.2.19)

όπου θ_z η γωνία ζενίθ και γ_s το αζιμούθιο του ηλίου που υπολογίζονται συναρτήσει της ηλιακής απόκλισης δ, του γεωγραφικού πλάτους φ και της ωριαίας γωνίας ω από τις σχέσεις 2.2.3 και 2.2.4.

Η άμεση ακτινοβολία θα υπολογίζεται από τη σχέση :

$$Gb_{CPC} = F \cdot G_{bn} \cdot \cos \theta \qquad (3.2.20)$$

όπου :

F: μία συνάρτηση ελάγχου που λαμβάνει την τιμή 1 ή 0 αν ικανοποιείται ή όχι η συνθήκη

Gbn : η άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου (w/m²)

θ: η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας στο άνοιγμα η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 2.2.8.

Διάχυτη ακτινοβολία :

Υποθέτοντας ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ισότροπη υπολογίζεται η αξιοποιούμενη διάχυτη ακτινοβολία. Η εκτίμηση της διάχυτης ακτινοβολίας **Gd**cPC αλλά και της διάχυτα ανακλώμενης

από το έδαφος **Gg**_{CPC} ανά μονάδα επιφάνειας του ανοίγματος που λαμβάνεται από το δέκτη γίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{cases} Gd_{CPC} = \frac{Gd}{C} & (3.2.21 \,\alpha) \\ Gg_{CPC} = 0 & (3.2.22 \,\beta) \end{cases} \qquad \alpha \nu \qquad (\beta + \theta c) < 90^{\alpha} \end{cases}$$

$$Gd_{CPC} = \frac{Gd}{2} \left(\frac{1}{C} + \cos\beta \right) \quad (3.2.21 \,\alpha)$$

$$Gg_{CPC} = \frac{G}{2} \left(\frac{1}{C} - \cos\beta \right) \quad (3.2.22 \,\beta)$$

$$\alpha \nu \quad (\beta + \theta c) > 90^{\circ}$$

όπου :

Gd: η διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου (w/m²)

G : η ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου (w/m²)

θ: η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας στο άνοιγμα η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 2.2.8.

Έτσι η συνολική ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας που μπορεί να αξιοποιηθεί από το συλλέκτη είναι ίση με το άθροισμα :

$$G_{total} = Gb_{CPC} + Gd_{CPC} + Gg_{CPC}$$
 [1] (3.2.24)

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις ο συντελεστής συγκέντρωσης C επιδρά στο ποσοστό της ωφέλιμης ακτινοβολίας που λαμβάνεται από το συλλέκτη όπως απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα όπου :

$$D = \frac{G_{diff}}{G} = \frac{\delta \iota \dot{\alpha} \chi \upsilon \tau \eta \, \alpha \pi o \rho \rho o \phi o \dot{\omega} \mu \varepsilon \upsilon \eta \, \alpha \kappa \tau \iota \upsilon o \beta o \lambda \dot{\alpha}}{\pi \rho o \sigma \pi \dot{\alpha} \pi \tau o \upsilon \sigma \alpha \, \alpha \kappa \tau \iota \upsilon o \beta o \lambda \dot{\alpha}}$$

$$N = \frac{G_{total}}{G} = \frac{o \lambda ι \kappa ή \, \alpha \pi o \rho \rho o \phi o ύ μενη \, \alpha \kappa \tau ι ν o \beta o \lambda (\alpha)}{\pi \rho o \sigma \pi (\pi \tau o v \sigma \alpha \, \alpha \kappa \tau ι v o \beta o \lambda) (\alpha)}$$
[11]



Πηγή :[11]

Διάγραμμα 3-2:Ποσοστό ωφέλιμης ακτινοβολίας Ν σε σχέση με το συντελεστή συγκέντρωσης για διάφορα ποσοστά διάχυτης ακτινοβολίας D

Όπως φαίνεται, για ένα σταθερό ποσοστό διάχυτης/ολικής ακτινοβολίας η μείωση του συντελεστή συγκέντρωσης συνεπάγεται αύξηση της δεσμευόμενης διάχυτης ακτινοβολίας άρα και της συνολικής ωφέλιμης ακτινοβολίας που αξιοποιείται από το συλλέκτη cpc.

b) Καθορισμός του ποσοστού της ακτινοβολίας που δεσμεύεται από τον απορροφητή :

Στην πραγματικότητα η ακτινοβολία που δεσμεύεται από τον απορροφητή προκύπει ελαφρώς μειωμένη σε σχέση με την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει εντός των ορίων αποδοχής. Η μείωση αυτή καθορίζεται από τους συντελεστές του οπτικού βαθμού απόδοσης του συλλέκτη

Ο οπτικός βαθμός απόδοσης ενός cpc συλλέκτη με κυλινδρικό δέκτη δίνεται από τον τύπο

$$\eta_o = K_{\tau \alpha} \cdot \tau(\theta)_1 \cdot \tau(\theta)_2 \cdot a(\theta) \cdot \rho^{} \cdot p \cdot \frac{G_{total}}{C} \quad [21] \quad \textbf{(3.2.25)}$$

όπου :

 $K_{t\alpha}$: ο συντελεστής τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης που εξαρτάται από τις ιδιότητες της ακτινοβολίας γι' αυτό θα αναλυθεί στην ενότητα 4.3.3.

τ(θ)₁: ο ολικός συντελεστής διαπερατότητας του γυάλινου καλύμματος που βρίσκεται στην επιφάνεια του ανοίγματος (αν υπάρχει) και η τιμή του είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης θ της ακτινοβολίας

τ(θ)₂: ο ολικός συντελεστής διαπερατότητας του γυάλινου καλύμματος του απορροφητή και η τιμή του είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης θ της ακτινοβολίας

α(θ): ο ολικός συντελεστής απορροφητικότητας του απορροφητή και η τιμή του είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης θ της ακτινοβολίας

p : ο συντελεστής μείωσης του οπτικού βαθμού απόδοσης εξαιτίας του διαστήματος μεταξύ απορροφητή και ανακλαστήρα

 $p^{<N>}$: ο συντελεστής ανακλαστικότητας του συλλέκτη που αναλύεται εκτενώς παρακάτω [13]

G_{total} : το ποσοστό της ακτινοβολίας που βρίσκεται εντός των ορίων της γωνίας αποδοχής σε
 σχέση με αυτό που εισέρχεται από το άνοιγμα του συγκεντρωτή το οποίο αναλύθηκε
 προηγουμένως

(Η εξάρτηση των συντελεστών διαπερατότητας και απορροφητικότητας από τη γωνία πρόσπτωσης εκφράζεται από το συντελεστή τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης ΙΑΜ για τον οποίο γίνεται αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο)

Ο ακριβής υπολογισμός της οπτικής απόδοσης των συγκεντρωτικών ηλιακών συσκευών αποτελεί μια χρονοβόρο διαδικασία διότι απαιτεί αρχικά τον καθορισμό της πυκνότητας της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά μήκος του απορροφητή. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων πορείας ακτίνων (ray-tracing methods) μέσω των οποίων καθορίζεται ο αριθμός των ηλιακών ακτίνων που προσπίπτουν στην απορροφητική επιφάνεια είτε άμεσα είτε μέσω ανάκλασης στην κατοπτρική επιφάνεια του συλλέκτη. Παρόλο που τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μέσω της υπολογιστικής μεθόδου πορείας ακτίνων είναι ακριβή, η μέθοδος θεωρείται δύσχρηστη και παράλληλα απαιτείται αρκετός χρόνος για την ανάπτυξη του μοντέλου. Ακόμα, επειδή οι μεταβολές της οπτικής απόδοσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης δεν είναι σημαντικές (αρκεί η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να βρίσκεται εντός των ορίων της γωνίας υποδοχής της κατοπτρικής διάταξης), το πλεονέκτημα της μεθόδου πορείας ακτίνων περιορίζεται στον ακριβή καθορισμό της κατανομής της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας τόσο στον απορροφητή όσο και κατά μήκος των κατοπτρικών επιφανειών [17],[26].

<u>Αριθμός ανακλάσεων (N):</u>

Ο Rabl το 1977 πρότεινε μια νέα τεχνική υπολογισμού της οπτικής απόδοσης των συγκεντρωτικών συσκευών, σύμφωνα με την οποία λαμβάνεται υπόψη ο μέσος αριθμός ανακλάσεων της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διέλευσή της μέσω της κατοπτρικής επιφάνειας και την τελική απορρόφησή της από τον δέκτη. Η βασική θεώρηση είναι ότι το ποσοστό της ακτινοβολίας που δύναται να απορροφηθεί εξαρτάται από την ανακλαστικότητα της κατοπτρικής επιφάνειας από την οποία διέρχεται και μπορεί να εκφραστεί προσεγγιστικά μέσω της σχέσης $\tau = \rho^{\langle N \rangle}$ [22][26]. Αυτό σημαίνει ότι η οπτική απόδοση του συγκεντρωτικού μέσου λαμβάνεται ως ένας συντελεστής διαπερατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διέλευσή της μέσω αυτού. Η ποσότητα <N> ονομάζεται μέσος αριθμός ανακλάσεων του συγκεντρωτή και εκφράζει το μέσο αριθμό ανακλάσεων του συνόλου των ηλιακών ακτίνων

που διέρχονται μέσω της κατοπτρικής επιφάνειας και απορροφούνται τελικά από το δέκτη του συλλέκτη όταν προσπίπτουν με γωνία που βρίσκεται εντός της γωνίας αποδοχής της κατοπτρικής διάταξης. Ο αριθμός των ανακλάσεων ποικίλει ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης αλλά και από το σημείο του ανοίγματος από όπου εισέρχεται κάθε ακτίνα. Γι'αυτό και ο ακριβής υπολογισμός απαιτεί το μέσο αριθμό ανακλάσεων της ακτινοβολίας προσπίπτουσας υπό γωνία θin για όλα τα σημεία του ανοίγματος $\langle N(\theta in) \rangle$ αλλά και το μέσο αριθμό ανακλάσεων $\langle N \rangle$ για όλες της γωνίες θin εντός των ορίων αποδοχής [17].

Τα παραβολικά κατοπτρικά τμήματα έχουν μικρότερο μέσο αριθμό ανακλάσεων και κατ' επέκταση συντελούν στην αύξηση της οπτικής απόδοσης των συγκεντρωτών. Αυτός είναι και λόγος που οι cpc με κυλινδρικό δέκτη που περιλαμβάνουν γεωμετρία εξειλιγμένης καμπύλης έχουν μεγαλύτερο (N) από τους cpc με επίπεδο δέκτη που αποτελούνται μόνο από παραβολική κατοπτρική επιφάνεια [25],[26].

Η οπτική απόδοση των cpc συλλεκτών μεταβάλλεται σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας όπως αναλύθηκε παραπάνω. Η γωνίας πρόσπτωσης μεβάλλεται συμμετρικά γύρω από το ηλιακό μεσημέρι κατά τη διάρκεια της ίδιας ημέρας. Το ίδιο συμβαίνει και με την γωνιακή αποδοχή της άμεσης ακτινοβολίας και τον οπτικό βαθμό απόδοσης (Διάγραμμα 3-3)



Πηγή : [48]

Διάγραμμα 3-3 : Οπτική απόδοση και γωνιακή αποδοχή συλλέκτη cpc με κυλινδρικό δέκτη κενού με αρχική γωνία αποδοχής 20° σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης

Το διάγραμμα αυτό αναφέρεται σε αποκομμένο συλλέκτη cpc κυλινδρικού δέκτη κενού με αρχική γωνία αποδοχής 20° (πριν την αποκοπή των άκρων η οποία αναλύεται στην ενότητα 3.2.4.4). Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η γωνιακή αποδοχή του συλλέκτη είναι αρκετά υψηλή (λίγο μικρότερη από 100% εξαιτίας ορισμένων γεωμετρικών σφαλμάτων) για γωνίες πρόσπτωσης εντός των ορίων αποδοχής (-20° έως 20°) ενώ πέρα από τα όρια αυτά

παρουσιάζει μια απότομη πτώση. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από τη συνάρτηση F που εκφράζει την αποδοχή της άμεσης ακτινοβολίας η οποία από την τιμή 1 μετά από κάποιο όριο (συνθήκη του Mitchell) πέφτει απότομα στο 0. Ως σύνθετος παραβολικός συλλέκτης συνεχίζει να λαμβάνει κάποιο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας που όμως είναι σχετικά μικρό. Στη μέση του διαγράμματος εμφανίζεται ένα μικρό 'βύθισμα' το οποίο οφείλεται στις απώλειες διακένου μεταξύ απορροφητή-καλύμματος (συντελεστής p). Όπως αποδεικνύεται από την ανάλυση της πορείας ακτίνων, κατά την κάθετη πρόσπτωση της άμεσης ακτινοβολίας που διάκενο, χτυπάει ξανά το συγκεντρωτή περνάει μέσα από το διάκενο, χτυπάει ξανά το συγκεντρωτή και χάνεται χωρίς να απορροφηθεί από το δέκτη. Για λίγο μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης το φαινόμενο αυτό ελαχιστοποιείται και η γωνιακή απόδοχή αυξάνεται σε ένα μικρό βαθμό.

Ο οπτικός βαθμός απόδοσης επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες (ανακλαστικότητα συγκεντρωτή τ,αριθμό ανακλάσεων (Ν),συντελεστή τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης Κ, ιδιότητες καλύμματος και απορροφητή) οι οποίοι όμως δεν παρουσιάζουν τόσο έντονη μεταβολή όσο η συνάρτηση F. Γι' αυτό και η μορφή του είναι παρόμοια με αυτή της γωνιακή αποδοχής.

3.2.4.4 <u>Μερική Αποκοπή άκρων σύνθετων παραβολικών συγκεντρωτών</u> <u>(Truncation)</u>

Τα άκρα των παραβολικών πλευρών των CPC έχουν πολύ μεγάλο ύψος και συνεισφέρουν ελάχιστα στην ανάκλιση της ακτινοβολίας προς το δέκτη. Για το λόγο αυτό τα άκρα συνήθως αποκόπτονται και το ύψος μειώνεται από h_{max} σε h με ελάχιστη μείωση στην απόδοση αλλά σημαντική μείωση στο κόστος παραγωγής [4].

Η περιορισμένη αποκοπή των άκρων επηρεάζει ελάχιστα τη γωνία αποδοχής αλλά μεταβάλλει σημαντικά το λόγο ύψους-ανοίγματος, το λόγο συγκέντρωσης και το μέσο αριθμό ανακλάσεων που υφίσταται η ακτινοβολία μέχρι να φθάσει στον απορροφητή [1].Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3-4, η αποκοπή των άκρων έχει σαν αποτέλεσμα κάποιο μικρό ποσό ακτινοβολίας που προσπίπτει εκτός των ορίων –θc,+θc να φτάνει στον απορροφητή αυξάνοντας κατά ένα μικρό ποσοστό τον οπτικό βαθμό απόδοσης [17]. Επίσης, στην πραγματικότητα ένα μέρος της ακτινοβολίας που εισέρχεται από το άνοιγμα δε φτάνει στο δέκτη (σφάλμα Δ). Αυτό σημαίνει ότι για πραγματικούς συγκεντρωτές με γεωμετρικά σφάλματα μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει υπο γωνία μικρότερη από θc δε φτάνει στο δέκτη.



Διάγραμμα 3-4 : Ποσοστό ακτινοβολίας που φτάνει στον απορροφητή για τέλειο ανακλαστήρα, Δ το σφάλμα στη γεωμετρία της επιφάνειας

Η αποκοπή των άκρων επηρεάζει το οπτικό πεδίο του CPC επιτρέποντας σε ακτίνες έξω από το όριο της γωνίας αποδοχής να φτάσουν στο δέκτη. Η επίδραση της αποκοπής στη συλλογή της διάχυτης ακτινοβολίας είναι εύκολο να εκτιμηθεί καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογη του συντελεστή συγκέντρωσης C. Για τον υπολογισμό της άμεσης ακτινοβολίας ορίζεται εκ νέου η συνάρτηση F η οποία εκφράζει το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας που φτάνει στο δέκτη. Η συνάρτηση F όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2.4.3 παίρνει την τιμή 1 για $|\theta| < \theta_c$ και την τιμή 0 για $|\theta| > \theta_c$. Για την περίπτωση των αποκομμένων cpc η συνάρτηση F εξαρτάται και από το σχήμα του δέκτη.

Για μια πιο εμπεριστατωμένη ανάλυση του φαινομένου της αποκοπής θεωρούμε αρχικά ένα συλλέκτη cpc με επίπεδο δέκτη (Εικόνα 3-22 α) ο οποίος μετά την αποκοπή των άκρων αποκτά άνοιγμα PD, ύψος h και γωνία αποδοχής θ_D.



Εικόνα 3-22 : Αποκοπή άκρων cpc συγκεντρωτή με επίπεδο δέκτη **(α.)**, Αποκοπή άκρων cpc συγκεντρωτή με κυλινδρικό δέκτη **(b.)**

Όλες οι ακτίνες που προσπίπτουν εντός του αρχικού εύρους αποδοχής – θ_{α} ,+ θ_{α} λαμβάνονται από τον απορροφητή και προφανώς αυτές που προσπίπτουν εκτός του νέου εύρους γωνιών αποδοχής – θ_D , + θ_D απορρίπτονται. Μεταξύ των γωνιών θ_{α} και θ_D μόνο οι ακτίνες που χτυπούν απευθείας το δέκτη αξιοποιούνται ενώ όσες χτυπούν το συγκεντρωτή απορρίπονται. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, για τις ακτίνες που προσπίπτουν στη διεύθυνση ΗΑ μόνο όσες περνούν από το τμήμα HD της επιφάνειας ανοίγματος αξιοποιούνται ενώ οι υπόλοιπες απορρίπτονται. Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση F(θ) για αποκομμένο συλλέκτη cpc με επίπεδο δέκτη δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta \le \theta_{\alpha} \\ \frac{(1+C)}{2C} \left[1 - \frac{\tan \theta}{\tan \theta_{D}} \right] & \theta_{\alpha} < \theta \le \theta_{D} \end{cases}$$
(3.2.26)

Όπου C=EF/AB ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης

Για τους συλλέκτες cpc με κυλινδρικό δέκτη η συνάρτηση F διαφέρει αφενός γιατί ο δέκτης βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια και αφ' ετέρου γιατί οι ακραίες ακτίνες στις διευθύνσεις GA και DA είναι εφαπτόμενες σε διαφορετικά σημεία της περιφέρειας του δέκτη (Εικόνα 3-22 b) Έτσι η συνάρτηση F γίνεται :

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta \le \theta_{\alpha} \\ F_{S}(\theta) = \frac{1}{2} + \left[\frac{1 - \left[\frac{\sin \theta}{\sin \theta_{D}} (1 + \pi C \cos \theta_{D}) \right]}{2\pi C \cos \theta} \right] & \theta_{\alpha} < \theta \le \theta_{D} \end{cases}$$
(3.2.27)
$$0 & \theta > \theta_{D} \end{cases}$$

Ενώ για μεγάλο ποσοστό αποκοπής ($\theta_D > 90^\circ$)οι παραπάνω σχέσεις γίνονται :

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta \leq \theta_{\alpha} \\ F_{s}(\theta) & \theta_{\alpha} < \theta \leq \pi - \theta_{D} \\ 1 & \pi - \theta_{D} < \theta < \pi/2 \\ 0 & \theta \geq \pi/2 \end{cases}$$
(3.2.28)

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η συνάρτηση F(θ) σύνθετου παραβολικού συλλέκτη με κυλινδρικό δέκτη με αρχική γωνία αποδοχής θ_{α} =35° για διάφορα ποσοστά αποκοπής που αντιστοιχούν σε γωνίες θ_{D} .



Πηγή :[25]

Διάγραμμα 3-5 : Συνάρτηση F(ϑ) για cpc με κυλινδρικό δέκτη αρχικής γωνίας αποδοχής 35°

Αποδεικνύεται ότι η αποκοπή των άκρων στους cpc με επίπεδους δέκτες συνεισφέρει περισσότερο στην αύξηση του οπτικού βαθμού απόδοσης από ότι στους cpc σωληνοειδή δέκτη.[25]

Με την αποκοπή των άκρων ο μέσος αριθμός ανακλάσεων που υφίσταται η προσπίπτουσα ακτινοβολία μειώνεται με αποτέλεσμα να βελτιώνεται σε κάποιο βαθμό η οπτική απόδοση του συγκεντρωτή. Για τους cpc με επίπεδο δέκτη, αν η αποκοπή είναι τέτοια που ο μέσος μέσος αριθμός ανακλάσεων

αριθμός ανακλάσεων είναι κάτω από την καμπύλη Nmin του παρακάτω διαγράμματος τότε ο μέσος ελάχιστος αριθμός ανακλάσεων δίνεται από τη σχέση [16] :

$$N_{min} = 1 - \frac{1}{C}$$





12

Διάγραμμα 3-6 : Μέσος αριθμός ανακλάσεων που υφίσταται η ακτινοβολία που προσπίπτει εντός των ορίων της γωνίας αποδοχής για πλήρες και αποκομμένο ανακλαστήρα

λόγος συγκέντρωσης

Ο μέσος αριθμός ανακλάσεων, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο διαφοροποιείται ανάλογα από τη γωνία και το σημείο πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Ωστόσο, με την αποκοπή των cpc η διαφοροποίηση αυτή μειώνεται και αρκεί η θεώρηση μιας μέσης τιμής για το $\langle N \rangle$ [17],[22].

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-2) δίνεται ο αριθμός ανακλάσεων σε αποκομμένο συλλέκτη cpc αρχικής γωνίας αποδοχής θ_{α} =35° με επίπεδο και κυλινδρικό δέκτη αντίστοιχα για διάφορα ποσοστά αποκοπής των άκρων h/hmax. Στον πίνακα φαίνονται ακόμα η γωνία αποδοχής θ_D, ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης C και ο λόγος πλήρους-αποκομμένης επιφάνειας του ανακλαστήρα $A_{refl}^{max}/A_{refl}^{trunc}$.

Flat Absorber:

Πίνακας 3-2 : Αριθμός ανακλάσεων για διαφορετικά ποσοστά αποκοπής cpc συλλεκτών με αρχική γωνία αποδοχής θc=35°

| h/h _{max} | θ_D (deg) | С | $\langle n \rangle$ | $A_{ m refl}^{ m max}/A_{ m refl}^{ m trunc}$ |
|--------------------|------------------|-------|---------------------|---|
| 1.0 | 35.00 | 1.743 | 0.621 | 1.000 |
| 0.9 | 37.84 | 1.739 | 0.584 | 1.108 |
| 0.8 | 40.99 | 1.724 | 0.544 | 1.242 |
| 0.7 | 44.52 | 1.697 | 0.501 | 1.413 |
| 0.6 | 48.51 | 1.658 | 0.453 | 1.640 |
| 0.5 | 53.04 | 1.604 | 0.400 | 1.955 |
| 0.4 | 58.25 | 1.533 | 0.341 | 2.424 |
| 0.3 | 64.29 | 1.441 | 0.274 | 3.199 |
| 0.2 | 71.38 | 1.326 | 0.198 | 4.736 |
| 0.1 | 79.82 | 1.182 | 0.108 | 9.315 |
| Tubular A | bsorber: | | | |
| | θ_D (deg) | С | $\langle n \rangle$ | $A_{ m refl}^{ m max}/A_{ m refl}^{ m trunc}$ |
| | 35 | 1.743 | 1.145 | 1.000 |
| | 50 | 1.670 | 1.011 | 1.379 |
| | 60 | 1.576 | 0.931 | 1.659 |
| | 70 | 1.468 | 0.857 | 1.963 |
| | 80 | 1.356 | 0.786 | 2.296 |
| | 90 | 1.242 | 0.719 | 2.664 |

Table 1. Characteristics of truncated CPC with $\theta_a = 35^\circ$

Όπως φαίνεται η μερική αποκοπή των άκρων των συγκεντρωτών cpc επηρεάζει αισθητά την ετήσια συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας άρα και της αποδιδόμενης ενέργειας για αρκετούς λόγους. Σύμφωνα με ανάλυση που προηγήθηκε, η αποδοχή της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας ενισχύεται στους αποκομμένους cpc ενώ παράλληλα η μείωση του μέσου αριθμού ανακλάσεων αυξάνει τον οπτικό βαθμό απόδοσης. Την ίδια στιγμή όμως οι θερμικές απώλειες ανά μονάδα επιφάνειας ανοίγματος αυξάνονται. Με βάση τους παράγοντες αυτούς καθώς και τη μείωση του κόστους επιλέγεται ο βαθμός αποκοπής των cpc.





Εικόνα 3-23 : :Αποκομμένος συλλέκτης cpc λόγο συγκέντρωσης C= 1

Πηγή : [25]

Όπως προαναφέρθηκε, οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες διαθέτουν λόγο συγκέντρωσης CR κάτω από 10. Ωστόσο το εύρος 5 <CR < 10 είναι αρκετά υψηλό και όχι τόσο πρακτικό για την κατηγορία των cpc συλλεκτών. Σε υψηλούς λόγους συγκέντρωσης η αναλογία $\frac{A_r}{A_a}$ που προκύπτει συνεπάγεται σχετικά ογκώδη και αντιοικονομικά μεγέθη συγκεντρωτών. Η αναζήτηση του βέλτιστου λόγου συγκέντρωσης για σταθερούς συλλέκτες CPC υποδεικνύει τελικούς λόγους συγκέντρωσης (αυτούς που προκύπτουν με ποσοστό αποκοπής των άκρων) πολύ κοντά στη μονάδα που για τις ηλιακές εφαρμογές κυμαίνονται από 1 έως 3 [9]. Οι περισσότεροι συλλέκτες CPC που υπάρχουν στο εμπόριο διαθέτουν 1 < C < 2. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η μέχρι τώρα εφαρμογές τους αφορούν κυρίως οικιακή χρήση που δεν απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες.

3.2.5 Ηλιακά συστήματα με μη συνεχείς συγκεντρωτές

Όλοι συγκεντρωτικοί συλλέκτες που αναλύθηκαν παραπάνω διέθεταν συνεχείς συγκεντρωτές. Τα ηλιακά συστήματα μη συνεχών συγκεντρωτών σχηματίζουν καθορισμένο είδωλο στην επιφάνεια του δέκτη (μέσω γραμμικής ή σημειακής εστίασης)αλλά λόγω της ιδιομορφίας τους παρουσιάζονται σαν ξεχωριστή ενότητα. Τα βασικότερα από αυτά είναι :

- το σύστημα κατόπτρων Freshnel
- το σύστημα κατόπτρων με κεντρικό δέκτη ή πύργος ισχύος

3.2.5.1 <u>Σύστημα κατόπτρων Fresnel (Linear Fresnel Reflector)</u>

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν σειρές από μακρόστενα κάτοπτρα, είτε επίπεδα είτε με πολύ μικρή καμπυλότητα, τα οποία εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν ή περισσότερους γραμμικούς δέκτες που είναι τοποθετημένοι σε σταθερή θέση πάνω από τα κάτοπτρα. Συνήθως, πάνω από το δέκτη εγκαθίσταται ένας μικρός παραβολικός καθρέφτης για επιπλέον συγκέντρωση του φωτός.

Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι η χρήση των αντανακλαστικών κατόπτρων Fresnel. Τα κάτοπτρα αυτά κάνουν χρήση του φαινομένου του φακού Fresnel, το οποίο επιτρέπει την κατασκευή συγκεντρωτικών κατόπτρων με μεγάλο διάφραγμα και μικρή εστιακή απόσταση μειώνοντας ταυτόχρονα τον απαιτούμενο όγκο υλικού. Αυτό μειώνει το κόστος του συστήματος αφού τα καμπυλωτά παραβολικά κάτοπτρα είναι αρκετά ακριβότερα. Τα συστήματα LFR στοχεύουν στη μείωση του συνολικού κόστους με το να μοιράζεται ένας δέκτης μεταξύ πολλών κατόπτρων σε αντίθεση με τα συστήματα απλή γεωμετρία της γραμμικής εστίασης με το σύστημα ιχνηλάτησης ενός άξονα όπως και στα παραβολικά κάτοπτρα. Τα κάτοπτρα είναι στοιχισμένα με προσανατολισμό βορά-νότου ώστε με το ελεγχόμενο σύστημα ιχνηλάτησης να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου από την ανατολή ως τη δύση [19].

Επιπλέον, τα κάτοπτρα δε χρειάζεται να στηρίζουν το δέκτη και ως εκ τούτου είναι κατασκευαστικά απλούστερα. Όταν χρησιμοποιούνται κατάλληλες τεχνικές στόχευσης της ακτινοβολίας, όπως για παράδειγμα τα κάτοπτρα να στοχεύουν σε διαφορετικούς δέκτες σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, γίνεται εφικτή η πυκνότερη τοποθέτηση κατόπτρων στη διαθέσιμη έκταση εδάφους.

Μια βασική δυσκολία που προκύπτει στα συστήματα LFR είναι η αποφυγή αφενός της σκίασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και αφετέρου του μπλοκαρίσματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας από τα παρακείμενα κάτοπτρα. Η σκίαση και το μπλοκάρισμα μπορούν να μειωθούν τοποθετώντας υψηλότερα το σωλήνα απορρόφησης θερμότητας ή αυξάνοντας το μέγεθός του, κάτι που θα επιτρέψει μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των κατόπτρων μακριά από το σωλήνα απορρόφησης. Και οι δύο αυτές λύσεις αυξάνουν το κόστος, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη έκταση γης.

Όπως και στα συστήματα παραβολικών κατόπτρων και σε αυτούς τους σταθμούς χρησιμοποιείται κάποιο ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, όπως για παράδειγμα συνθετικό έλαιο, μείγμα νερού-ατμού ή υγροποιημένο άλας. Η πιο διαδομένη εφαρμογή είναι με χρήση μείγματος νερού-ατμού [19].



Πηγή : <u>www.csp-world.com</u>

Εικόνα 3-24 : Σύστημα κατόπτρων Fresnel της εταιρίας Kimberlina στην Καλιφόρνια

3.2.5.2 Σύστημα κατόπτρων με κεντρικό δέκτη

Πρόκειται για μεγάλο σύστημα που συνήθως καταλαμβάνει σημαντική έκταση εδάφους. Η συγκέντρωση της ακτινοβολίας επιτυγχάνεται από μεγάλο αριθμό κατόπτρων που ανακλούν την άμεση ακτινοβολία προς ένα κεντρικό δέκτη ο οποίος βρίσκεται στην κορυφή πύργου μεγάλου ύψους [4]. Τα κάτοπτρα μπορεί να είναι επίπεδα ή ελαφρώς κυρτά και διαθέτουν συστήματα παρακολούθησης του ηλίου σε δύο άξονες ώστε να εξασφαλίζεται βέλτιστη συγκέντρωση της ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας οδηγούνται σε μία κοιλότητα μιας μηχανής για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

Τα συστήματα αυτά πετυχαίνουν λόγους συγκέντρωσης μεταξύ 300-1500 και έτσι είναι αρκετά αποδοτικοί στην συλλογή θερμικής ενέργειας και στη μετέπειτα μετατροπή της σε ηλεκτρική. Η ισχύς τους είναι αρκετά μεγάλη (γενικά πάνω από 10MW) και έτσι επωφελούνται από οικονομίες κλίμακας [31].Τα κάτοπτρα είναι διατεταγμένα κατά τέτοιον τρόπο ώστε να μη σκιάζονται μεταξύ τους αλλά ούτε και να παρεμβάλονται στην πορεία της ανακλώμενης ακτινοβολίας εμποδίζοντάς την να φθάσει στο δέκτη.

Οι μη συνεχείς συγκεντρωτές μπορούν να μελετηθούν κατά τρόπο ανάλογο των συνεχών συγκεντρωτών, δηλαδή σαν πολύ μεγάλοι παραβολοειδείς συγκεντρωτές με γωνία χείλους φr και γωνία διασποράς δ. Έτσι για ένα τρισδιάστατο σύστημα συγκέντρωσης αποδεικνύεται ότι ο μέγιστος λόγος συγκέντρωσης Cm που αντιστοιχεί σε σύλληψη όλης της ανακλώμενης ακτινοβολίας είναι :

$$C_{max} = \frac{\psi \cdot \sin^2 \varphi_r}{4 \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} + 0.267\right)} - 1$$
για σφαιρικό δέκτη
$$C_{max} = \psi \left[\frac{\sin \varphi_r \cdot \cos \left(\varphi_r + \frac{\delta}{2} + 0.267\right)}{\sin \left(\frac{\delta}{2} + 0.267\right)}\right]^2 - 1$$
για επίπεδο δέκτη

όπου ψ το κλάσμα του διατιθέμενου εδάφους που καλύπτει κάθε κάτοπτρο το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 0,3-0,5.[4]

Οι πύργοι ισχύος έχουν πολύ υψηλότερη οπτική απόδοση και θερμική παραγωγή από ότι η τεχνολογία LFR αλλά και πολύ υψηλότερα κόστη επένδυσης, συντήρησης και λειτουργίας.[21]



Πηγή : <u>www.globalgreenhousewarning.com</u>



3.3 Πρότυποι συλλέκτες

3.3.1 Παρουσίαση πρότυπου συλλέκτη

Οι συλλέκτες που εγκαταστήθηκαν στην πιλοτική μονάδα αφαλάτωσης και πρόκειται να μελετηθούν στην παρούσα διπλωματική κατασκευάζονται από την ελληνική εταιρία MAG. Πρόκειται για συγκεντρωτικούς συλλέκτες με παραβολικό ανακλαστήρα τύπου cpc και κυλινδρικό δέκτη. Κάθε συλλέκτες είναι στερεωμένος πάνω σε βάση με σταθερή κλίση 45° και η ενεργή του επιφάνεια είναι περίπου 0,87 m².



Πηγή : <u>www.enertechnic.gr</u>

Εικόνα 3-26 : Συγκεντρωτικός συλλέκτης της εταιρίας MAG

Ο πρότυπος συλλέκτης αποτελείται από τρία βασικά μέρη :

Ανακλαστήρας :

Ο ανακλαστήρας είναι ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου τσακισμένο στη μέση έτσι ώστε κατά την τοποθέτησή του πάνω στο σκελετό να παίρνει το παραβολικό σχήμα που φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 3-27 : Ανακλαστήρας πρότυπου συλλέκτη μετά την τοποθέτησή του πάνω στο σκελετό

Κυλινδρικός δέκτης:

Ο δέκτης αποτελείται βασικά από δύο ομόκεντρους μεταλλικούς σωλήνες μεταξύ των οποίων ρέει το εργαζόμενο μέσο. Τα άκρα του εσωτερικού σωλήνα (που έχει λίγο μικρότερο μήκος σε σχέση με τον εξωτερικό) ταπώνονται τελείως ενώ τα άκρα του εξωτερικού καταλήγουν σε σωλήνες μικρότερης διαμέτρου από όπου διέρχεται το εργαζόμενο μέσο. Πάνω στην επιφάνεια του εξωτερικού μεταλλικού σωλήνα τυλίγεται φύλλο τιτανίου για την αύξηση της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στα άκρα του δέκτη το κενό μεταξύ υαλοσωλήνα και μεταλλικού σωλήνα σφραγγίζεται με σιλικόνη ενώ ταυτόχρονα αναρροφάται με ειδικό τρόπο ο αέρας μεταξύ τους ώστε να εξασφαλίζονται συνθήκες κενού. Τα άκρα του δέκτη καλύπτονται τελικά από αλουμινένια καπάκια πληρωμένα με πολυουρεθάνη ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές απώλειες.



Εικόνα 3-28 : δέκτης του πρότυπου συλλέκτη πριν την τοποθέτηση του γυάλινου καλύμματος



Εικόνα 3-29 : Άκρο δέκτη απο το οποίο εισέρχεται το ρευστό **(α.)**, άκρο δέκτη από το οποίο εξέρχεται το ρευστό **(b.)**

Σκελετός :

Κατά πλάτος του σκελετού βρίσκονται δύο λάμες αλουμινίου κουρμπαρισμένες και κατά μήκος του σκελετού δύο ίσιες λάμες που ενώνουν τα άκρα των προηγούμενων. Στην κοιλότητα που σχηματίζουν οι κουρμπαρισμένες λάμες στηρίζεται έλασμα αλουμινίου

μορφής ω πάνω στο οποίο τοποθετείται ο ανακλαστήρας. Στα κουρμπαρισμένα άκρα του σκελετού τοποθετούνται μικρότερες λάμες που συνδέονται με τα καπάκια του δέκτη για τη συγκράτηση και ευθυγράμμισή του. Όλος ο σκελετός είναι στερεωμένος σε βάση που δίνει 45° κλίση στο συλλέκτη.



Εικόνα 3-30 : Σκελετός πρίν (α.) και μετά (b.) την τοποθέτηση του ανακλαστήρα

3.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά πρότυπου συλλέκτη

Τα περισσότερα από τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη mag δόθηκαν από τον κατασκευαστή του. Όσα από αυτά έχουν αστερίσκο* στον παρακάτω πίνακα αποτελούν εκτιμήσεις με βάση τυπικές τιμές που αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία :

| Τεχνικά χαρακτηριστικά παραβολικού συλλέκτη MAG | | | |
|---|---------------------------------|--|--|
| Ανακλαστήρας | | | |
| Υλικό | αλουμίνιο | | |
| Μήκος | 1,95 m | | |
| Πλάτος | 0,50 m | | |
| Ανακλαστικότητα | 92,5% | | |
| Γυάλινο κάλυμμα | | | |
| Υλικό | γυαλί χωρίς Pb (εταιρία Schott) | | |
| Διάμετρος | 150mm | | |
| Μήκος | 1,80m | | |
| Πάχος | 3 mm | | |

| Πίνακας 3-3 : : Τεχνικά χαρακτηρ | οιστικά πρότυπου | συλλέκτη |
|----------------------------------|------------------|----------|
|----------------------------------|------------------|----------|

| Τεχνικά χαρακτηριστικά παραβολικού συλλέκτη MAG | | | | |
|---|----------------------|--|--|--|
| Απορροφητικότητα | 0,02 * | | | |
| Διαπερατότητα | 0,96 * | | | |
| Συντελεστής εκπομπής | 0,86 * | | | |
| Εξωτερικός μεταλλικός αγωγός | | | | |
| Υλικό | σιδηροσωλήνας | | | |
| Διάμετρος | 120 mm | | | |
| Μήκος | 1,87 m | | | |
| Πάχος | 1 mm | | | |
| Επίστρωση | μαύρο τιτάνιο | | | |
| Απορροφητικότητα | 95 % | | | |
| Επανεκπομπή | 3,5 % | | | |
| Εσωτερικός μεταλλικός αγωγός | | | | |
| Υλικό | σιδηροσωλήνας | | | |
| Διάμετρος | 100 mm | | | |
| Μήκος | 1,80 m | | | |
| Πάχος | 1mm | | | |
| πίεση μεταξύ γυάλινου-μεταλλικού σωλήνα | 10 ⁻⁴ bar | | | |







Εικόνα : Σχεδίαση του πρότυπου συλλέκτη σε Autocad

Ο πρότυπος συλλέκτης διαθέτει μεγάλης διαμέτρου δέκτη σε σχέση με τις συνηθισμένες τεχνολογίες σύνθετων παραβολικών συλλεκτών. Η αύξηση της διαμέτρου του δέκτη, οπως σχολιάστηκε και σε προηγούμενη παράγραφου, συνεπάγεται μεγαλύτερες θερμικές απώλεις αλλά και λιγότερες οπτικές απώλειες ταυτόχρονα. Ωστόσο, η μείωση των θερμικών απωλειών συναγωγής αντιμετωπίζεται σε ένα βαθμό από την πολύ χαμηλή πίεση που εξασφαλίζεται μεταξύ καλύμματος και απορροφητή.

3.3.3 Οπτικά χαρακτηριστικά πρότυπου συλλέκτη

Από τον κατασκευαστή δόθηκε το σχέδιο της τομής του συλλέκτη αλλά η τιμή της γωνίας αποδοχής δεν ήταν διαθέσιμη (Εικόνα 3-31) Όπως είναι φανερό τα άκρα του συγκεντρωτή δεν έχουν τη μορφή παράλληλων ευθειών. Αυτό σημαίνει ότι έχει γίνει αποκοπή των άκρων σε αρκετό βαθμό. Όπως φάνηκε και από τις σχέσεις της ενότητας 3.2.4.3 για τον προσδιορισμό της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που λαμβάνεται από έναν αποκομμένο συλλέκτη cpc πρέπει να είναι γνωστή και η αρχική γωνία αποδοχής και η γωνία αποδοχής μετά την αποκοπή των άκρων.



Εικόνα 3-31 : Τομή του συλλέκτη που δόθηκε από τον κατασκευαστή

Προκειμένου να γίνει μια προσέγγιση των γωνιών αυτών σχεδιάστηκε στο excel η τομή του συλλέκτη cpc με κυλινδρικό δέκτη για διάφορες γωνίες αποδοχής και συγκρίθηκε με την τομή που δόθηκε από τον κατασκευαστή. Συγκρίνοντας τα προφίλ των παραβολών καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο συγκεντρωτής του συλλέκτη mag σχεδιάστηκε με βάση τη διάμετρο του δέκτη για γωνία αποδοχής περίπου θ_{α} =40°.



Εικόνα 3-32 : Σύγκριση της τομή του συλλέκτη mag με τομές cpc συλλεκτών για διάφορες γωνίες αποδοχής

Για τον προσδιορισμό της γωνίας αποδοχής που προκύπτει μετά την αποκοπή των άκρων του συγκεντρωτή φέρεται ευθεία εφαπτόμενη στην περιφέρεια του δέκτη από το ένα αποκομμένο άκρο του μέχρι την απέναντι πλευρά του cpc. Η γωνία που σχηματίζει η ευθεία με τον άξονα του cpc εκτιμάται στις $\theta_{\rm D}$ =80°.



Εικόνα 3-33 : Προσδιορισμός των γωνιών αποδοχής πριν και μετά την αποκοπή των άκρων του συγκεντρωτή.

Κατά τη μοντελοποίηση θεωρείται ότι ο συντελεστής συγκέντρωσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του (δεν υπάρχουν κατασκευαστικά σφάλματα στη γεωμετρία του) άρα θα είναι ίσος με $C_{max}=1/si\theta_c=1/sin80^\circ=1,015$.

Για τον προσδιορισμό του μέσου αριθμό ανακλάσεων λαμβάνεται μια μέση τιμή καθώς όπως προαναφέρθηκε,με την αποκοπή των άκρων η διαφοροποίησή του σε σχέση με τη γωνία και το σημείο πρόσπτωσης εξασθενεί [17],[22]. Η εκτίμηση του $\langle N \rangle$ γίνεται με βάση τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία (Πίνακας 3-2) και αναφέρονται σε αρχική γωνία αποδοχής θ_α=35° που βρίσκεται κοντά σε αυτή του συγκεντρωτή του συλλέκτη mag (θ_α=40°). Για γωνία θ_D=80° ο πίνακας δίνει $\langle N \rangle = 0,738$. Επομένως ο συντελεστής ανακλαστικότητας τ για το συλλέκτη υπολογίζεται :

$$\tau = \rho^n = 0,925^{0,786} \approx 0,94$$

Όπως διαπιστώθηκε, το προφίλ του συγκεντρωτή έχει σχεδιαστεί με βάση τη ακτίνα του απορροφητή. Επομένως εκτιμάται ότι για να υπάρχει χώρος για το γυάλινο κάλυμμα η αιχμή στο κέντρο του συγκεντρωτή περιορίστηκε κατά $r_e - r_{r,0}$. Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει κενό μεταξύ αιχμής και γυάλινου καλύμματος (clearance = 0) υπολογίζεται ο σχετικός συντελεστής οπτικών απωλειών p:

$$g = clearance + r_e - r_{r,0} = 0 + 0,075 - 0,060 = 0,015$$

$$p = 1 - \frac{g}{2\pi r_{r,0}} = 1 - \frac{0,015}{2\pi \cdot 0,06} = 1 - 0,0398 \approx 0,96$$

4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η θερμική ανάλυση ενός ηλιακού συλλέκτη, όπως και κάθε εναλλάκτη θερμότητας, απαιτεί τον προσδιορισμό της μετάδοσης θερμότητας από και προς τις επιφάνειές του.Η ανάλυση των φαινομένων της αγωγής,συναγωγής και ακτινοβολίας που ακολουθούν έγινε στα πλαίσια του μαθηματικού μοντέλου που επιλέχθηκε για τη μελέτη της λειτουργίας του πρότυπου συλλέκτη. Για το λόγο αυτό οι σχετικές σχέσεις που θα παρουσιαστούν παρακάτω αφορούν τη μόνιμη κατάσταση και τη μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας.

4.1 Μεταφορά Θερμότητας με αγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή στα ρευστά οφείλεται κυρίως στη μοριακή διάχυση των σωματιδίων τα οποία μεταφέρουν ενέργεια κατά την κίνησή τους. Στα στερεά οφείλεται στη ροή ηλεκτρονίων και στις ταλαντώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος.Η μόνιμη μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής που πραγματοπιείται μεταξύ δύο επιφανειών με σταθερές θερμοκρασίες περιγράφεται από το νόμο του Fourrier :

$$Q = A \cdot k \cdot \frac{\Delta T}{L} \qquad (W) \tag{4.1.1}$$

όπου

k : η θερμική αγωγιμότητα (conductivity) που εκφράζεται σε W/mK αποτελεί χαρακτηριστικήδιότητα κάθε υλικού και εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Α: η κάθετη στη διεύθυνση μετφοράς θερμότητας επιφάνεια (m²)

L: η απόσταση των επιφανειών (m)

ΔΤ : η θερμοκρασιακή διαφορά των επιφανειών (Κ)

Για κυλινδρικές επιφάνειες και μόνιμη μονοδιάστατη (κατά την ακτινική διεύθυνση) μεταφορά θερμότητας ο νόμος του Fourier λαμβάνει τη μορφή :

$$Q = \frac{2\pi \cdot L \cdot k \cdot \Delta T}{\ln(\frac{r_2}{r_1})} \qquad (W) \qquad (4.1.2)$$

(όπου r_1, r_2 η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου αντίστοιχα)

4.2 Μεταφορά Θερμότητας με συναγωγή

4.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συναγωγή

Η συναγωγή αποτελεί τον κύριο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας στα ρευστά όπου η ύλη μπορεί να μετακινηθεί ελεύθερα. Καθώς τα στοιχεία του ρευστού μετακινούνται από μια περιοχή σε μία άλλη μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και τις ιδιότητές τους (ορμή, θερμική ενέργεια).

Η συναγωγή πραγματοποιείται ανάμεσα σε ένα στερεό και ένα ρευστό και ειδικότερα όταν ένα ρευστό κινείται πάνω σε μια επιφάνεια στερεού. Η θερμότητα, αφού μεταφερθεί στο ρευστό, διαχέεται σε μεγαλύτερη έκταση του ρευστού και έτσι οι θερμοκρασιακές διαφορές επιφάνειας-ρευστού μένουν αυξημένες. Έτσι γενικά η συναγωγή είναι ένας τρόπος μετάδοσης που περιλαμβάνει και το φαινόμενο της αγωγής και τα φαινόμενα της διάχυσης ορμής του ρευστού. Αυτό σημαίνει ότι αν το ρευστό παρέμενε ακίνητο η θερμότητα θα μεταφέρονταν σε αυτό μόνο με αγωγή.

Η συναγωγή είναι εκείνος ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας που μπορεί να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες θερμότητας σε μικρό χρονικό διάστημα σε αντίθεση με την αγωγή και την ακτινοβολία. Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή αποτελεί γενικά ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Κατά την ανάλυσή του για την εξαγωγή εξισώσεων θα πρέπει, παράλληλα με τη μεταφορά θερμότητας, να ληφθεί υπόψη και το πρόβλημα μηχανικής των ρευστών.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή εξαρτάται κυρίως από τους εξής παράγοντες :

- τις ιδιότητες του ρευστού όπως : πυκνότητα ρ, δυναμική συνεκτικότητα μ, θερμική αγωγιμότητα k, ειδική θερμοχωρητικότητα Cp.
- την ταχύτητα του ρευστού u
- τη γεωμετρία και την τραχύτητα της στερεής επιφάνειας που συναλλάσσει
 θερμότητα με το ρευστό
- τον τύπο της ροής. Η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί ως συνεκτική ή μη συνεκτική ,εσωτερική ή εξωτερική,συμπιεστή ή ασυμπίεστη, στρωτή ή τυρβώδης, φυσική ή εξαναγκασμένη,σταθερή ή χρονικά μεταβαλλόμενη μονοδιάστατη,δισδιάστατη ή τρισδιάστατη.

4.2.2 Νόμος Newton - Χαρακτηριστικοί Αδιάστατοι αριθμοί της ροής

Παρά την πολυπλοκότητα της συναγωγής, έχει αποδειχτεί ότι η θερμότητα που μεταφέρεται είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς ρευστού-επιφάνειας. Για

μόνιμη, μονοδιάστατη συναγωγή η θερμότητα που μεταφέρεται από μια επιφένεια στο ρευστό εκφράζεται από το νόμο του Newton ως:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty})$$
 (*W*) (4.2.1)

όπου:

h: ο συντελεστής συναγωγής ($W/m^2 \cdot K$)

Α: το εμβαδόν της επιφάνειας (m)

Ts: η θερμοκρασία της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με το ρευστό (K)

 T_{∞} : η θερμοκρασία του ρευστού σε αρκετή απόσταση από την επιφάνεια (K)

Για κυλινδρική επιφάνεια διαμέτρου D και μήκους L ο νόμος Newton λαμβάνεια τη μορφή :

$$Q = h \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (W) \quad (4.2.2)$$

Ο συντελεστής συναγωγής, εξαρτάται από όλους τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω και προκύπτει από πειραματικά δεδομένα για διάφορες περιπτώσεις και διαφορετικές γεωμετρίες προβλημάτων συναγωγής. Ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας **h** γίνεται σε σχέση με την αδιάστατη μορφή του που είναι ο αριθμός Nusselt (Nu)

$$h = Nu \frac{k}{D}$$
 (4.2.3)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τυπικές τιμές του h για διάφορες περιπτώσεις ροών που συναντώνται σε ηλιακούς συλλέκτες :

| Συνθήκες μεταφοράς θερμότητας | Συντελεστής συναγωγής h (W/m²K) | | |
|-------------------------------|---------------------------------|--|--|
| Ελεύθερη συναγωγή για αέρια | 5-37 | | |
| Ελεύθερη συναγωγή για νερό | 100-1200 | | |
| Ελεύθερη συναγωγή για έλαια | 50-350 | | |
| Ροή αερίων σε αγωγούς | 10-350 | | |
| Ροή νερού σε αγωγούς | 500-1200 | | |
| Ροή ελαίων σε αγωγούς | 300-1700 | | |

Πίνακας 4-1 : Τυπικές τιμές συντελεστή συναγωγής h για διάφορες συνθήκες μεταφοράς θερμότητας και τύπους ρευστού

Πηγή : <u>www.thermaopedia.com</u>

<u>Αριθμός Nusselt :</u>

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η μετάδοση της θερμότητας από μια επιφάνεια σε ένα κινούμενο ρευστό πραγματοποιείται με συναγωγή και αγωγή ταυτόχρονα. Ο αριθμός Nusselt εκφράζει τη θερμότητα που μεταφέρεται με συναγωγή σε ένα στρώμα ρευστού σε σχέση με αυτή που μεταφέρεται με αγωγή στο ίδιο στρώμα ρευστού.

$$Nu = \frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h \cdot \Delta T}{\frac{k \cdot \Delta T}{L}} = \frac{h \cdot L}{k}$$
 (4.2.4)

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται ανάλογα με το είδος της συναγωγής και τον τύπο της ροής συναρτήσει των αριθμών Reynolds (Re) , Prandtl (Pr) και Grashof (Gr) .

<u>Αριθμός Prandtl :</u>

Το σχετικό πάχος του υδροδυναμικού και θερμικού οριακού στρώματος περιγράφεται από τον αδιάστατο αριθμό Prandtl

$$Pr = \frac{Mοριακή διάχυση της ορμής}{Mοριακή διάχυση της θερμότητας} = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu \cdot Cp}{k}$$
(4.2.5)

Οι τιμές των αριθμών Prandtl για τα υγρά κυμαίνονται από 0,01 για τα υγρά μέταλλα έως 100.000 για βαριά έλαια. Για το νερό ο αριθμός Prandtl παίρνει τιμές γύρω από το 10 και για τον αέρα γύρω από τη μονάδα.

<u>Αριθμός Reynolds :</u>

Η μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή εξαρτάται από τη γεωμετρία και την τραχύτητα της επιφάνειας,τη θερμοκρασία της επιφάνειας,την ταχύτητα και το είδος του ρευστού. Έχει όμως αποδειχτεί ότι το είδος της ροής εξαρτάται κυρίως από την αναλογία δυνάμεων τριβής και δυνάμεων συνεκτικότητας :

$$Re = \frac{\delta v \nu \dot{\alpha} \mu \varepsilon_{l\varsigma} \tau \rho_{l} \beta \dot{\eta} \varsigma}{\delta v \nu \dot{\alpha} \mu \varepsilon_{l\varsigma} \sigma v \nu \varepsilon \kappa \tau_{l} \kappa \dot{\sigma} \tau_{\eta} \tau_{\alpha\varsigma}} = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} = \frac{u \cdot L}{v}$$
(4.2.6)

Η τιμή του αριθμού Reynolds είναι αυτή που καθορίζει το είδος της ροής στην εξαναγκασμένη συναγωγή. Ο αριθμός Reynolds για τον οποίο η ροή μεταβαίνει στην τυρβώδη περιοχή καλείται κρίσιμος αριθμός Reynols και διαφέρει για κάθε γεωμετρία.Για τη ροή σε αγωγό με κυκλική διατομή διαμέτρου D ο Reynolds ορίζεται ως :

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} = \frac{u \cdot D}{v}$$
(4.2.7)

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η ροή σε κυκλικό αγωγό θεωρείται στρωτή για Re < 2300 ,τυρβώδης για Re > 10.000 και μεταβατική στην ενδιάμεση περιοχή.

Η τιμή του αριθμού Reynolds επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το συντελεστή τριβής και τον τρόπο υπολογισμού του.

<u>Συντελεστής τριβής f :</u>

Οποιαδήποτε ανωμαλία στην επιφάνεια που ρέει το ρευστό παραμορφώνει το στρωτό υπόστρωμα και επηρεάζει τη ροή. Ιδιαίτερα στην τυρβώδη ροή ο συντελεστής τριβής και ο συντελεστής συναγωγής αποτελούν συναρτήσεις της τραχύτητας της επιφάνειας. Στην πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται βάσει του αριθμού Reynolds και της σχετικής τραχύτητας ε/D μέσω της σχέσης Colebrook στην οποία βασίζεται και το διάγραμμα Moody :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \qquad (\text{Re} > 2300) \qquad (4.2.8)$$

Αντίθετα, στη στρωτή ροή ο συντελεστής τριβής είναι ανεξάρτητος από την τραχύτητα της επιφάνειας και υπολογίζεται από τη σχέση :

$$f = \frac{64\mu}{\rho \cdot D \cdot u} = \frac{64}{Re}$$
 (Re < 2300) (4.2.9)

<u>Αριθμός Grashof :</u>

Ο αριθμός Grashof εκφράζει την αναλογία δυνάμεων άνωσης και δυνάμεων συνεκτικότητας που αναπτύσσονται στο ρευστό εξαιτίας της μεταφοράς θερμότητας

Για κυλινδρκές επιφάνειες ο αριθμός grashof δίνεται από τον τύπο :

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2}$$
(4.2.10)

όπου :

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

β: ο συντελεστής θερμικής διαστολής

Ts: η θερμοκρασία της επιφάνειας

 T_∞ : η θερμοκρασία του ρευστού σε αρκετή απόσταση από την επιφάνεια

Lc : το χαρακτηριστικό μήκος της γεωμετρίας της επιφάνειας

ν: η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής β εκφράζει τη μεταβολή της πυκνότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία υπο σταθερή πίεση και για ιδανικό αέριο (p=pRT) δίνεται από τη σχέση :

$$\beta = \frac{1}{T} (K^{-1})$$
 (4.2.11)

Σε αντιστοιχία με τον αριθμό Reynolds ο αριθμός Grashof είναι αυτός που χαρακτηρίζει τη ροή στην περίπτωση της φυσικης συναγωγής.

<u> Αριθμός Rayleigh :</u>

Ο αριθμός Rayleigh συναντάται στις σχέσεις που αφορούν φυσική συναγωγή και αποτελεί συνδυασμό των αριθμών Prandtl και Grashof Rα=Gr·Pr [3]

4.2.3 Υπολογισμός αριθμού Nusselt

4.2.3.1 Οριακές συνθήκες

Κατά τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή οι θερμικές οριακές συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια μπορούν να προσεγγισθούν συχνά από δύο περιπτώσεις :

•σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας (Ts = constant)

Η περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας εμφανίζεται συχνά στην εξωτερική επιφάνεια σωλήνα όταν το ρευστό που ρέει μέσα σε αυτό αλλάζει φάση κατά το βρασμό ή τη συμπύκνωση.

•σταθερή θερμορροή από ή προς την επιφάνεια (qs=constant)

η περίπτωση σταθερής θερμορροής συμβαίνει όταν η εξωτερική επιφάνεια ενός αγωγού υπόκεινται σε ακτινοβολία ή ηλεκτρική αντίσταση ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις.

Αυτή είναι η οριακή συνθήκη που λαμβάνουμε κατά τη μοντελοποίηση του συλλέκτη στην παρούσα διπλωματική. Ολόκληρη η εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή μέσα στον οποίο ρέει το ρευστό δέχεται ακτινοβολία.Θεωρούμε ακόμα ότι η ακτινοβολία αυτή κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την περιφέρεια και καθ' όλο το μήκος του απορροφητή και είναι σταθερή για ένα μικρό χρονικό διάστημα (Διάγραμμα 4-1) [3].



Διάγραμμα 4-1 : Οριακές συνθήκες: σταθερής θερμοκρασίας επιφάνειας (αριστερά), σταθερής θερμορροήςαπό την επιφάνεια (δεξιά)

4.2.3.2 <u>Εξωτερική φυσική συναγωγή</u>

Το φαινόμενο της φυσικής συναγωγής (εσωτερικής και εξωτερικής) μελετάται συχνά για την εκτίμηση των απωλειών από τις εξωτερικές επιφάνειες όλων των εναλλακτών.

Για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt στην περίπτωση της φυσικής συναγωγής υπάρχουν διάφορες εμπειρικές σχέσεις στη βιβλιογραφία. Για επιφάνειες οριζοντίων κυλίνδρων που αφορούν την παρούσα διπλωματική ο αριθμός Nusselt μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση των Churchill & Chu :

Nu =
$$\left\{ 0,60 + \frac{0,387 \text{Ra}^{1/6}}{\left[1 + (0,559/\text{Pr})^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}$$
 (4.2.12)

Η σχέση συτή ισχύει για αριθμούς Rayleigh μεγαλύτερους από 10¹² [2],[3].

4.2.3.3 <u>Εξωτερική εξαναγκασμένη συναγωγή</u>

Κατά τη εξαναγκασμένη συναγωγή στην εξωτερική επιφάνεια κυκλικών αγωγών η ροή διαχωρίζεται και αποκτά περίπλοκη διάταξη. Η διάταξη αυτή έχει ως αποτέλεσμα την έντονη διαφοροποίηση του τοπικού αριθμού Nusselt γύρω από την περιφέρεια του κυλίνδρου.Ωστόσο, στη βιβλιογραφία υπάρχουν σχέσεις για το μέσο αριθμό Nusselt που απλοποιούν τον υπολογισμό του:

<u>Σχέση Zhukauska's :</u>

$$\overline{Nu}_{D} = C \cdot Re_{D}^{m} \cdot Pr^{n} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{s}}\right)^{1/4}$$
(4.2.13)

Όλες οι ιδιότητες του ρευστού που που υπεισέρχονται στους τύπους υπολογίζονται στη θερμοκρασία T_{∞} εκτός από τον Pr_s που υπολογίζεται στη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος T_s.

Οι παράμετροι C, m της παραπάνω σχέσης υπολογίζονται με βάση τον αριθμό Re_D όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί :

| Re _D | С | М |
|-----------------|-------|------------|
| 1-40 | 0,75 | 0,4 |
| | | |
| 40-100 | 0,51 | 0,5 |
| 1000-200000 | 0,26 | 0,6 |
| 200000-1000000 | 0,076 | 0,7 |
| | | Πηγή : [7] |

Πίνακας 4-2 : Παράμετροι C,m σε σχέση με το εύρος του Reynolds για την εξωτερική συναγωγή σε κυλινδρική επιφάνεια

Η παράμετρος η παίρνει την τιμή n=0,37 για Pr≤10 και n=0,36 για Pr>10

H σχέση Zhukauska's ισχύει για 0,7 <Pr₆ <500 και 1< Re_D<10⁶ [2],[3]

<u>Σχέση Churchill & Bernstein :</u>

$$\overline{Nu}_{D} = 0.3 + \frac{0.62Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$
(4.2.14)

Η σχέση αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για Peclet (Peclet=Reynolds•Prandtl) Pe>0,2 αλλά υποεκτιμά τα δεδομένα έως και 20% για την περιοχή 20000 < Re_D <400.000

Μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούν να δώσουν παραλλαγές της σχέσης Churchill & Bernstein που αναφέρονται σε πιο περιορισμένο εύρος Ρε και Reynolds :

• Re < 4000

$$\overline{Nu}_D = 0.3 + \frac{0.62Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}}$$
(4.2.15)

• Pe=0,2

$$\overline{Nu}_D = \frac{1}{0.8237 - \ln(Pe^{1/2})}$$
 (4.2.16)

• 20000 < Re_D <400000

$$\overline{Nu}_{D} = 0.3 + \frac{0.62Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{1/2}\right]$$
(4.2.17)

(Όλες οι ιδιότητες του ρευστού στη σχέση Churchill & Bernstein με βάση τη θερμοκρασία $T_f=(T_s+T_\infty)/2$) [7]

4.2.3.4 <u>Εσωτερική εξαναγκασμένη συναγωγή</u>

Στην περίπτωση της εξαναγκασμένης συναγωγής οι παράγοντες που επηρεάζουν τον αριθμό Nusselt διαφέρουν για τη στρωτή και την τυρβώδη ροή αντίστοιχα.

<u>Στρωτή ροή :</u>

Για πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε κυκλικό αγωγό που υπόκεινται σε σταθερή θερμορροή ο αριθμός Nusselt είναι σταθερός και ανεξάρτητος από τους αριθμούς Reynolds και Prandtl. Για αγωγό κυκλικής διατομής ο Nusselt έχει βρεθεί ίσος με 4,36.

<u>Τυρβώδης ροή :</u>

Αναφέρθηκε παραπάνω ότι για επίπεδους αγωγούς κυκλικής διατομής η ροή γίνεται πλήρως τυρβώδης για Re>10.000. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές σχέσεις που δημιουργήθηκαν βάσει πειραματικών δεδομένων και δίνουν μια εκτίμηση του αριθμού Nusselt και του συντελεστή τριβής. Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται συχνά σε ένα εύρος του αριθμού Reynolds και σε ροές με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Μία από αυτές είναι και η σχέση Gnielinski η οποία εμφανίζει αρκετή ακρίβεια και σε μικρούς αριθμούς Reynolds και περιέχει διορθωτικό παράγοντα που λαμβάνει υπ' όψη τις διαφορετικές τιμές της συνεκτικότητας από το τοίχωμα έως το κέντρο του αγωγού.

$$Nu = \frac{f_2/8 \cdot (Re - 1000)}{1 + 12, 7 \cdot \sqrt{f_2/8} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_2}\right)^{0,11}$$
(4.2.18)
$$\begin{pmatrix} 0.5 \le Pr \le 2000\\ 3 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^6 \end{pmatrix}$$

(Οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται με βάση τη μέση θερμοκρασία του ρευστού)

Ο συντελεστής τριβής μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση :

$$f_2 = (1,82 \cdot \log_{10} Re - 1,64)^{-2}$$
 (4.2.19)

Η σχέση Gnielinski μπορεί να εφαρμοστεί και για τις δύο περιπτώσεις θερμικών οριακών συνθηκών (Ts=const, qs=const). Ακόμα, μπορεί να δώσει αποτελέσματα με ικανοποιητική ακρίβεια και στη μεταβατική περιοχή 2300<Re<10.000 [2],[3].

<u>Πτώση πίεσης :</u>

Για όλες τις περιπτώσεις ροών σε κλειστούς αγωγούς (στρωτή/τυρβώδης, κυκλική/ μη κυκλική, λείες/τραχειές επιφάνειες) η πτώση πίεσης μπορεί να εκφραστεί από την

παρακάτω σχέση υποθέτοντας ότι η ροή είναι οριζόντια και δεν περιλαμβάνει υδροστατικά και βαρυτικά φαινόμενα.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \qquad [2] \qquad (4.2.20)$$

(όπου um η μέση ταχύτητα του ρευστού)

4.2.4 Ροή σε δακτύλιο

Στον πρότυπο συλλέκτη που μελετάμε το ρευστό ρέει μέσα σε δακτύλιο που σχηματίζεται από δύο ομόκεντρους αγωγούς. Ο εξωτερικός αγωγός (απορροφητής) απορροφά την ακτινοβολία, θερμαίνεται και μεταφέρει τη θερμότητα στο ρευστό.

Για αγωγούς που δεν έχουν κυκλική διατομή οι αριθμοί Reynolds, Nusselt, f υπολογίζονται από τους ίδιους τύπους (4.2.7, 4.2.8-4.2.9, 4.2.18-4.2.19) με μόνη διαφορά ότι η διάμετρος D αντικαθίσταται από την υδραυλική διάμετρο Dh :

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \tag{4.2.21}$$

Ας : η ενεργός διατομή

Ρ : η βρεχόμενη περίμετρος

Για ένα δακτύλιο εσωτερικής διαμέτρου Di και εξωτερικής διαμέτρου Do η υδραυλική διάμετρος δίνεται αναλυτικά :



$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4\pi (D_o^2 - D_i^2)/4}{\pi (D_o + D_i)} = D_o - D_i \qquad [2], [3] \qquad (4.2.22)$$

Η ροή σε δακτύλιο σχετίζεται με δύο αριθμούς Nusselt Nu_i και Nu_o καθώς μπορεί να υπάρχει ροή θερμότητας και στις δύο επιφάνειες. Και εδώ όμως, το πρόβλημα υπολογισμού του Nusselt άρα και του συντελεστή συναγωγής h αντιμετωπίζεται διαφορετικά για τη στρωτή και την τυρβώδη ροή [3].

<u>Στρωτή ροή σε δακτύλιο :</u>

Όπως και στους αγωγούς κυκλική διατομής έτσι και στους δακτυλιοειδής ο Nusselt είναι σταθερός και δεν επηρεάζεται από τους αριθμούς Reynolds και Prandtl. Εξαρτάται όμως από το λόγο των διαμέτρων του δακτυλίου Di/Do.Στην πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε δακτύλιο με μια επιφάνεια ισοθερμική και την άλλη αδιαβατική οι αριθμοί Nusselt δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-3) για ένα εύρος τιμών του λόγου Di/Do :

$$Nu_i = \frac{h_i \cdot D_h}{k} \qquad \qquad Nu_o = \frac{h_o \cdot D_h}{k} \qquad (4.2.23)$$

| D_i/D_o | Nu _i | Nu _o |
|-----------|-----------------|-----------------|
| 0 | | 3.66 |
| 0.05 | 17.46 | 4.06 |
| 0.10 | 11.56 | 4.11 |
| 0.25 | 7.37 | 4.23 |
| 0.50 | 5.74 | 4.43 |
| 1.00 | 4.86 | 4.86 |
| | | Πηγή : [3] |

Πίνακας 4-3 : Αριθμοί Nusselt για στρωτή ροή σε δακτύλιο με μία ισοθερμική και μία αδιαβατική επιφανεια

<u>Τυρβώδης ροή σε δακτύλιο :</u>

Στην πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή οι συντελεστές συναγωγής στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια συναλλαγής είναι περίπου ίσοι. Έτσι ο δακτυλιοειδής αγωγός μπορεί να αντιμετωπιστεί ως κυκλικός αγωγός με υδραυλική διάμετρο Do-Di και ο Nusselt να υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια από τη σχέση Gnielinski (4.2.18-4.2.19). Για μεγαλύτερη ακρίβεια οι Petukhov Roizen πρότειναν τον πολλαπλασιασμό της σχέσης με διορθωτικούς παράγοντες στην περίπτωση που ο δακτύλιος έχει μια ισοθερμική και μια αδιαβατική επιφάνεια [3].

$$F_{i} = 0.86 \cdot \left(\frac{D_{i}}{D_{o}}\right)^{-0.16}$$
 (εξωτερικό τοίχωμα αδιαβατικό) (4.2.24)
$$F_{o} = 0.86 \cdot \left(\frac{D_{i}}{D_{o}}\right)^{-0.16}$$
 (εσωτερικό τοίχωμα αδιαβατικό) (4.2.25)

Η ροή σε δακτύλιο συναντάται σε αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές όπως ατμοπαραγωγούς, εναλλάκτες θερμότητας και πυρηνικούς αντιδραστήρες. Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται κάποιες από τις εμπειρικές σχέσεις που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία.

| Ερευνητής | Προτεινόμενη εξίσωση | Αναλογία διαμέτρων δακτυλίου α | Εύρος Αριθμού Reynolds | Είδος ρευστού |
|---|---|--------------------------------------|------------------------------------|---|
| Davis (1943) | $Nu_{Dh} = 0.038a^{0.15}(a-1)^{0.2}Re_{Dh}^{0.8}Pr^{1/3}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$ | 1.18-6800 | Δεν έχει καθοριστεί | Όλα τα ρευστά |
| McAdams (με αναφορά στην εξίσωση Davis) (1954) | $Nu_{Dh} = 0,03105a^{0,15}(a - 1)^{0,2} Re_{Dh}^{0,8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$ | 1.18-6800 | Δεν έχει καθοριστεί | Όλα τα ρευστά |
| Foust & Christian (1940) | $Nu_{Dh} = \frac{0.04\alpha}{(\alpha+1)^{0.2}} Re_{Dh}^{0.8} Pr^{0.4}$ | 1.2-1.84 | 3000-60000 | Νερό |
| McAdams (1954) | $Nu_{Dh} = 0.023 Re_{Dh}^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$ | Δεν έχει καθοριστεί | Δεν έχει καθοριστεί | Δεν έχει καθοριστεί |
| Monrad &Pelton (1942) | $Nu_{Dh} = 0.023 \left[\frac{2lna - a^2 + 1}{a - \frac{1}{a} - 2alna} \right] Re_{Dh}^{0.8} Pr^n$ | 1.65, 2.45,17 | 12000- 220000 | Νερό, αέρας |
| Wiegand (1945) | $Nu_{Dh} = 0.023a^{0.45}Re_{Dh}^{0.8}Pr^n \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$ | 1-10 | Δεν έχει καθοριστεί | μ _{μέσου} ≤2μ _{water} |
| Petukhov & Roizen (1964) | $Nu_{Dh} = \frac{0.06759a^{0.16}}{(a+1)^{0.2}} \zeta \cdot Re_{Dh}^{0.8}$ $\zeta = 1 + 7.5 \left(\frac{\alpha - 5}{(a+1)Re_{Dh}}\right)^{0.6} \gamma \iota \alpha \ \alpha \ge 5$ $\zeta = 1 \ \gamma \iota \alpha \ \alpha \le 5$ | 1-14.3 | 10 ⁴ -3•10 ⁵ | Αέρας |
| Dittus & Boelter (1930) | $Nu_{Dh} = 0,023 Re_{Dh}{}^{0,8} Pr^n$ n = 0,4 για θέρμανση n = 0,3 για ψύξη | Δεν έχει καθοριστεί | Δεν έχει καθοριστεί | Δεν έχει καθοριστεί |
| Stein &Begell (1958) | $Nu_{Dh} = 0,0200a^{0,5}Re_{Dh}^{0,8}Pr^{\frac{1}{3}}$ | 1.232,1.463, 1.694 | 30000- 390000 | νερό |
| Crookston (1968) | $Nu_{Dh} = 0.023a^{\frac{1}{4}}Re_{Dh}^{\frac{3}{4}}Pr^{\frac{1}{3}}$ | 10,16,31 | 17000- 100000 | αέρας |

Πίνακας 4-4 : Σχέσεις υπολογισμού Nusselt για δακτυλιοειδή ροή

Πηγή : [50]

4.2.5 Φυσική συναγωγή σε κλειστούς χώρους υπό χαμηλή πίεση

Σε πολλούς τύπους ηλιακών συλλεκτών εφαρμόζεται η τεχνική της εκκένωσης του αέρα μεταξύ του απορροφητή και του καλύμματος με στόχο τη μείωση των απωλειών συναγωγής. Οι συνθήκες κενού σε συνδυασμό με χαμηλούς συντελεστές εκπομπής του απορροφητή (ε < 0,1) δίνουν έναν πολύ ικανοποιητικό θερμικό βαθμό απόδοσης 0,65-0,70 για τους χαμηλής συγκέντρωσης και σταθερούς cpc συλλέκτες. Αν το κενό είναι μικρότερο από 10^{-6} torr (1,33· 10^{-4} Pa) οι απώλειες αγωγής και συναγωγής μειώνονται σημαντικά ώστε η θερμότητα από την επιφάνεια του απορροφητή να μεταδίδεται μόνο μέσω ακτινοβολίας [13]. Για πιέσεις μικρότερες από 0,01mmHg οι απώλειες συναγωγής μπορούν να μειωθούν ως και 50% [27].

Κατά την ανάλυση προβλημάτων ρευστομηχανικής υιοθετούμε συχνά τη μακροσκοπική περιγραφή της ύλης στη μελέτη φαινομένων αγωγής και συναγωγής στη μετάδοση θερμότητας. Στη μακροσκοπική θεώρηση αυτών των φαινομένων θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν κενά και ασυνέχειες στην κατανομή της μάζας του υπό μελέτη υλικού σώματος στο χώρο (υπόθεση συνεχούς μέσου). Το υποθετικό αυτό μέσο περιγράφεται μακροσκοπικά από ιδιότητες όπως η δυναμική συνεκτικότητα μ, η θερμική αγωγιμότητα k και η κινητική συνεκτικότητα v. Όμως, όταν η ύλη βρίσκεται σε πολύ αραιή κατάσταση (τεχνολογία κενού) ή όταν οι διαστάσεις του συστήατος είναι πολύ μικρές (νανοτεχνολογία) η υπόθεση της συνέχειας δεν ισχύει. Οι συνθήκες υπό τις οποίες η θεωρία του συνεχούς μέσου παύει να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα καθορίζονται από τον αριθμό Knudsen ο οποίος ορίζεται ως :

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{\mu \acute{\epsilon} \sigma \eta \, \epsilon \lambda \epsilon \acute{\upsilon} \theta \epsilon \rho \eta \, \delta i \alpha \delta \rho \rho \mu \acute{\eta} \, \mu \rho \rho \acute{\omega} \nu}{\chi \alpha \rho \alpha \kappa \tau \eta \rho i \sigma \tau i \kappa \acute{\eta} \, \delta i \dot{\alpha} \sigma \tau \alpha \sigma \eta \, \tau o \upsilon \, \upsilon \pi \acute{\upsilon} \, \mu \epsilon \lambda \acute{\epsilon} \tau \eta \, \pi \epsilon \delta \acute{\iota} o \upsilon$$
(4.2.26)

Στην περίπτωση που το πεδίο αυτό είναι ο χώρος μεταξύ ομόκεντρων κυλίνδρων η διάσταση L ισούται με την υδραυλική διατομή Dh δηλαδή τη διαφορά διαμέτρων του δακτυλίου.

Η μέση ελεύθερη διαδρομή του μορίου είναι ο μέσος όρος της διαδρομής που διανύει μεταξύ δύο διαδοχικών συγκρούσεων με άλλα κινούμενα σωματίδια

$$\lambda = \frac{R \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \delta^2 \cdot N_A \cdot P} \qquad \dot{\eta} \qquad \lambda = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot P \cdot \delta^2} \qquad (4.2.27)$$

όπου :

δ : η μέση διάμετρος του μορίου (για τα μόρια του αέρα δ $\approx 4\cdot 10^{-10}m)$

 N_A : ο αριθμός Avogadro 6,0221367·10²² mol⁻¹

Ρ : η μέση πίεση του αερίου

Τ : η μέση θερμοκρασία του αερίου

R : η σταθερά των αερίων 8,3144621 J/(K·mol)

k_B : η σταθερά Boltzman 1,3806488·10⁻²³ J/K

Η πίεση των αερίων οφείλεται στις συγκρούσεις των μορίων με τα τοιχώματα του χώρου όπου περιέχονται. Είναι φανερό από τον παραπάνω τύπο ότι όσο μειώνεται η πίεση τόσο αυξάνεται η ελεύθερη διαδρομή του αερίου. Όσο πιο μεγάλο γίνεται το λ τόσο πιο μεγάλη απόσταση απαιτείται για να έχουμε μεταφορά θερμότητας από μια θερμή επιφάνεια σε ένα αέριο που είναι σε επαφή με αυτή.

Καθώς ο αριθμός Knudsen αυξάνει, τα φαινόμενα αραιοποίησης γίνονται σημαντικότερα και τα μεγέθη όπως η πτώση πίεσης, οι διατμητικές τάσεις, η θερμκή συναγωγιμότητα και η παροχή μάζας δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν από τα μοντέλα μεταφοράς μάζας και θερμότητας που βασίζονται στην υπόθεση του συνεχούς μέσου. Από την άλλη πλευρά, τα υπολογιστικά μοντέλα που βασίζονται στην κινητική θεωρία των αερίων είναι κατάλληλα μόνο για ροές με πολύ υψηλό αριθμό Knudsen που αντιστοιχούν σχεδόν σε συνθήκες κενού.

Το μοντέλο που περιγράφει κάθε φορά με καταλληλότερο τρόπο τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας εξαρτάται από το μέγεθος του αριθμού Knudsen σύμφωνα με τον οποίο οριοθετούνται οι διαφορετικές περιοχές της ροής :

- Kn $\leq 10^{-2}$ το ρευστό μπορεί να θεωρηθεί συνεχές (continuum flow)
- $10^{-2} \le Kn \le 0,1$ περιοχή όπου ισχύει η συνθήκη ολίσθησης (slip flow)
- 0,1 \leq Kn \leq 10 περιοχή μετάβασης στην ελεύθερη μοριακή ροή (transition flow)
- Kn ≥ 10 ελεύθερη μοριακή ροή (free molecular flow)

Οι παραπάνω διαχωρισμοί προέκυψαν από εμπειρικά δεδομένα και γι' αυτό τα όρια μεταξύ των διαφορετικών περιοχών εξαρτώνται συχνά από την εκάστοτε γεωμετρία.

Για χώρους όπου επικρατεί χαμηλή πίεση μπορεί γενικά να θεωρηθεί ότι η θερμότητα μεταδίδεται μόνο με αγωγή. Ειδικότερα για δακτυλιοειδή χώρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση :

$$Q = \frac{2\pi \cdot k_{eff} \cdot L}{\ln(D_i/D_o)} (T_2 - T_1) \quad [1] \qquad \textbf{(4.2.28)}$$

όπου:

L: το μήκος του δακτυλιοειδούς αγωγού (m)

 $D_{\rm o}$: η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου (m)

D_i : η εξωτερική διάμετρος του δακτυλίου (m)

keff : η θερμική αγωγιμότητα keff του αερίου που υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{k_{eff}}{k} = \left[1 + \frac{(2-a)(9\gamma-5)\lambda}{a(\gamma+1)\ln(D_o/D_i)} \left(\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i}\right)\right]^{-1} \quad [1], [27] \quad (4.2.29)$$

όπου :

λ : η μέση ελεύθερη διαδρομή του αερίου (m)

α : ο συντελεστής accommodation που λαμβάνεται 0,95
γ : ο λόγος θερμοχωρητικοτήτων για ιδανικά αέρια που λαμβάνεται 1,4

Όταν η αφαίρεση του αέρα από το χώρο του δακτυλίου γίνεται σε βαθμό που η συναγωγή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η θερμική αγωγιμότητα keff πλησιάζει το 0 [1].

4.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

4.3.1 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία-Μέλαν σώμα

Στο κεφάλαιο 2 έγινε αναφορά στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και το φάσμα της. Ως γνωστόν όλα τα σώματα απορροφούν,ανακλούν και εκπέμπουν ακτινοβολία σε διαφορετικό βαθμό και με ιδιαίτερο τρόπο που εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων. Οι κυριότερες από αυτές είναι :

- το υλικό της επιφάνειας
- η φύση της επιφάνειας
- η θερμοκρασία της επιφάνειας
- το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
- το πάχος της επιφάνειας

Ένα σώμα που βρίσκεται σε ορισμένη θερμοκρασία ακτινοβολεί σε διάφορα μήκη κύματος με διαφορετική ένταση. Η ισχύς της ακτινοβολίας σε κάθε μήκος κύματος δίνεται από τον νόμο του Max Planck :

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k_B \cdot T}} - 1}$$
 [3] (4.3.1)

h : η σταθερά του Max Planck ίση με 6,62606957 \cdot 10⁻³⁴ J \cdot s

c : η ταχύτητα της ακτινοβολίας (m/s)

λ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (m)

Τ: η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας (Κ)

 k_B : η σταθερά Boltzman 1,3806488·10⁻²³ J·K

Κάθε σώμα ακτινοβολεί σε διάφορες κατευθύνσεις με διαφορετική ένταση σε κάθε κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι στην πραγματικότητα η χωρική κατανομή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ένα σώμα δεν είναι ομοιόμορφη [3]

Πριν αναφερθούμε στις ιδιότητες της ακτινοβολίας κρίνεται αναγκαίο να ορίσουμε την έννοια του μέλανος σώματος η οποία είναι πολύ χρήσιμη στην ανάλυση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία.

Μέλαν σώμα (blackbody) :

Ο όρος μέλαν σώμα περιγράφει ένα ιδανικό σώμα το οποίο απορροφά όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του . Αυτό σημαίνει ότι ένα τέτοιο σώμα δεν ανακλά ούτε διαχέει την προσπίπτουσα σε αυτό ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ούτε επιτρέπει σε αυτήν να το διαπεράσει. Ωστόσο, σε αντίθεση με την εικόνα που δίνεται από την ονομασία του, το ίδιο το σώμα εκπέμπει κάποια ακτινοβολία, το φάσμα της οποίας εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία του. Στην ουσία το μέλαν σώμα αποτελεί ένα εξιδανικευμένο μοντέλο της ύλης, που επινοήθηκε για να διευκολυνθεί η μελέτη της θερμικής ακτινοβολίας των πραγματικών σωμάτων και εισήχθη από τον *Kirchhoff* το 1860.



Πηγή : <u>www.wikipedia.com</u> Εικόνα 4-1 : Μέλαν σώμα

Το φυσικό «αντικείμενο» που προσεγγίζει καλύτερα το μέλαν σώμα, δεν είναι καν σώμα, αλλά μια μικρή οπή σε ένα κοίλο σώμα (όπως π.χ. η είσοδος μιας σπηλιάς). Το φως που μπαίνει μέσα στην κοιλότητα από την οπή θα ανακλαστεί πολλές φορές πάνω στα τοιχώματα της κοιλότητας και κάθε φορά ένα μέρος του θα απορροφάται από αυτά. Η πιθανότητα για ένα τμήμα της ακτινοβολίας που μπήκε μέσα στην κοιλότητα από την οπή να ξαναβγεί από αυτήν είναι πολύ μικρή, αν η οπή είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την κοιλότητα, πράγμα που σημαίνει ότι μόνο ένα πολύ μικρό μέρος από το προσπίπτον φως «ανακλάται» από την οπή, ενώ το υπόλοιπο έχει απορροφηθεί (Εικόνα 4-1). Αυτό συμβαίνει ανεξάρτητα από το υλικό των τοιχωμάτων και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, διότι, καθώς τα στερεά σώματα έχουν συνεχές φάσμα εκπομπής και απορρόφησης, όλα τα μήκη κύματος σταδιακά θα απορροφηθούν. Δεδομένου ότι το φως που παίρνουμε πίσω είναι αμελητέο, η μόνη ακτινοβολία που θα παίρνουμε από την οπή είναι η θερμική ακτινοβολία που παράγεται στο εσωτερικό της κοιλότητας και εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία της, υπό την προϋπόθεση ότι αυτή βρίσκεται σε θερμική ισορροπία. Έτσι για δεδομένη θερμοκρασία το μέλαν σώμα θα εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολά σε όλα τα μήκη κύματος. Ακόμα, θεωρείται ότι το μέλαν σώμα εκπέμπει ακτινοβολία ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις [<u>www.wikipedia.com</u>].



Διάγραμμα 4-2 : Μήκος κύματος-εκπεμπόμενης ενέργειας μέλανος σώματος για διάφορες θερμοκρασίες

4.3.2 Ιδιότητες της ακτινοβολίας

4.3.2.1 Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας

Ως συντελεστής εκπομπής (emissivity) ορίζεται ο λόγος της ακτινοβολούμενης ενέργειας από το σώμα σε σχέση με την ακτινοβολούμενη ενέργεια ενός μελανού σώματος που βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία.

Προφανώς, για είναι τέλειο μέλαν σώμα, ο συντελεστής εκπομπής του θα είναι ίσος με τη μονάδα. Έτσι, το μέλαν σώμα αποτελεί ένα όριο το οποίο μπορούν να προσεγγίσουν σε κάποιο βαθμό τα φυσικά σώματα. Για κάθε πραγματικό σώμα όμως ο συντελεστής εκπομπής είναι μικρότερος από την μονάδα και μάλιστα μεταβάλλεται, για δεδομένο υλικό επιφάνειας και δεδομένη θερμοκρασία, με την κατεύθυνση της ακτινοβολίας (γωνία εκπομπής) και το εξεταζόμενο μήκος κύματος [8].

Πολλές φορές, χρησιμοποιούνται οι έννοιες φαιό και διάχυτο σώμα προκειμένου να μειωθεί η περιπλοκότητα των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας.

<u>φαιό σώμα (graybody)</u> είναι το σώμα του οποίου ο συντελεστής εκπομπής ενός είναι σταθερός για όλα τα μήκη κύματος (Διαγράμματα 4-3).

διάχυτο σώμα (diffuse body) : είναι το σώμα του οποίου ο συντελεστής εκπομπής ενός σταθερός για όλες τις γωνίες εκπομπής. Στο διάχυτο σώμα η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι ομοιόμορφη [3].



Διαγράμματα 4-3 : Συντελεστής εκπομπής για μέλαν,φαιό και πραγματικό σώμα σε σχέση με το μήκος κύματος (a.), Ένταση εκπομπής για μέλαν,φαιό και πραγματικό σώμα σε σχέση με το μήκος κύματος (b.)

Οι πιο πολλές επιφάνειες αμετάλλων έχουν υψηλό συντελεστή εκπομπής και συνήθως θεωρούνται φαιές. Από την άλλη πλευρά, η ακτινοβολία από καλούς αγωγούς του ηλεκτρισμού, και ιδιαίτερα από στιλβωμένα μέταλλα, διαφέρει σημαντικά. Οι συντελεστές εκπομπής είναι πολύ χαμηλότεροι και μεταβάλλονται σημαντικά με το μήκος κύματος. Ακόμα,ο συντελεστής εκπομπής επηρεάζεται αρκετά και από την κατάσταση της επιφάνειας καθώς οι ακαθαρσίες και η οξείδωση πάντα αυξάνουν το ε μιας επιφάνειας εφόσον αποτελούν κακούς αγωγούς του ηλεκτρισμού [3].

4.3.2.2 <u>Ανακλαστικότητα, Απορροφητικότητα, Διαπερατότητα ακτινοβολίας</u>

Όταν η ακτινοβολία προσπίπτει πάνω σε ένα σώμα, ένα ποσοστό της ανακλάται, ένα άλλο κλάσμα της απορροφάται και το υπόλοιπο (αν υπάρχει) διαπερνά το υλικό (Εικόνα 4-2)



Εικόνα 4-2 : Πορεία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια

Τα κλάσματα αυτά της ακτινοβολίας ονομάζονται ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα και διαπερατότητα αντίστοιχα και ορίζονται ως εξής :

| $oldsymbol{ ho}=rac{lpha 	au lpha \kappa \lambda \dot{\omega} \mu \dot{\epsilon} v \eta lpha \kappa 	au v v ho eta o \lambda \dot{\iota} lpha}{\pi ho o \sigma \pi i \pi 	au v v \sigma lpha lpha \kappa 	au v v ho eta o \lambda \dot{\iota} lpha}=rac{G_{refl}}{G}$ | 0 < ρ < 1 | (4.3.2) |
|--|-----------|---------|
| $a = rac{lpha \pi o ho ho o \phi o \dot{u} arepsilon v \eta}{\pi ho o \sigma \pi i \pi 	heta v o \sigma \alpha} lpha \kappa 	heta v o eta o \lambda i lpha} = rac{G_{lpha bs}}{G}$ | 0<α<1 | (4.3.3) |
| $oldsymbol{	au}=rac{lpha \pi o ho ho o \phi o \dot{u} \mu arepsilon \eta lpha \kappa 	au 	imes o eta o \delta \lambda \dot{l} lpha}{\pi ho o \sigma \pi \dot{l} \pi 	au ho v \sigma lpha lpha \kappa 	au 	imes o eta o \lambda \dot{l} lpha}=rac{G_{tr}}{G}$ | 0<τ<1 | (4.3.4) |

όπου :

G : η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια

Gref : η ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνεια

Gabs: η ακτινοβολία που απορροφάται από την επιφάνεια

Gtr: η ακτινοβολία που διαπερνά την επιφάνεια

Ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση για καθεμία από τις παραπάνω ιδιότητες

• ανακλαστικότητα (reflectivity)

Η ανακλαστικότητα διαφέρει κατά κάποιον τρόπο από τις υπόλοιπες ιδιότητες της ακτινοβολίας καθώς εξαρτάται και από την κατεύθυνση της προσπίπτουσας αλλά και από την κατεύθυνση της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Ωστόσο, η πληροφορία αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά περίπλοκη ανάλυση με μικρή αξία για τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Έτσι, για λόγους απλότητας συνήθως θεωρείται ότι οι επιφάνειες ανακλούν ομοιόμορφα την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Υπάρχουν δύο γενικές περιπτώσεις ανάκλασης της ακτινοβολία που χρησιμοποιούμε για να προσεγγίσουμε την ανάκλαση:

Κατοπτρική ανάκλαση : προσεγγίζει την ανάκλαση σε επίπεδες, γυαλισμένες επιφάνειες όπου σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης η γωνία ανάκλασης ισούται με τη γωνία πρόσπτωσης.

Διάχυτη ανάκλαση : προσεγγίζει την ανάκλαση σε πιο τραχείες επιφάνειες όπου η ανακλώμενη ακτινοβολία διαχέεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις [3].

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4-3) απεικονίζεται η κατοπτρική, η διάχυτη και η πραγματική ανάκλαση της ακτινοβολίας.



Εικόνα 4-3 : κατοπτρική ανάκλαση (α.) διάχυτη ανάκλαση (b.) πραγματική ανάκλαση (c.)

Σε όλους τους τύπους ηλιακών συλλεκτών η ανακλαστικότητα του γυάλινου καλύμματος και του απορροφητή επηρεάζει την απόδοσή τους γι'αυτό επιλέγονται υλικά με χαμηλό συντελεστή ανάκλασης. Συχνά, τα καλύμματα των συλλεκτών ενισχύονται με αντιανακλαστικές επενδύσεις και επιφανειακές υφές οι οποίες βελτιώνουν τη διαπερατότητα του γυαλιού [1].

Ιδιαίτερα για τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες η ανακλαστικότητα του κατόπτρου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην οπτική απόδοσή τους. Οι κατοπτρικές επιφάνειες θα πρέπει να διαθέτουν υψηλό συντελεστή ανάκλασης και είναι συνήθως μέταλλα ή μεταλλικές επιστρώσεις σε λεία υποστρώματα άλλων υλικών ακόμα και διάφανων όπως γυαλί ή πλαστικό. Παραδείγματα τέτοιων επιφανειών αποτελούν το ανοδιωμένο αλουμίνιο και ο επιστρωμένος με ρόδιο χαλκός [1].

• απορροφητικότητα (absorptivity)

Η τιμή της απορροφητικότητας επηρεάζεται από το υλικό της επιφάνειας, το μήκος κύματος και την κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία της επιφάνειας. Όμως, σε αντίθεση με το συντελεστή εκπομπής, η απορροφητικότητα δεν επηρεάζεται μόνο από τη θερμοκρασία της επιφάνειας αλλά από τη θερμοκρασία της πηγής από την οποία προέρχεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία. Στο Διάγραμμα 4-4 του σχήματος φαίνεται ο συντελεστής απορροφητικότητας για δύο είδη επιστρώσεων αποροφητή που χρησιμοποιούνται σε ηλιακούς συλλέκτες σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται, στην ορατή περιοχή του μήκους κύματος η απορροφητικότητα των δύο υλικών είναι αρκετά υψηλή και ιδιαίτερα για το σιδηρούχο σμάλτο παρουσιάζει πολύ μικρή μεταβολή.



Πηγή : [49]

Διάγραμμα 4-4 : Συντελεστής απορροφητικότητας στην ορατή περιοχή του μήκους κύματος για δύο είδη επιστρώσεων αποροφητή

• διαπερατότητα (transmissivity)

Με βάση τη διαπερατότητα τα υλικά μπορούν να διακριθούν σε αδιαφανή (opaque) και ημιδιαφανή (semitransparrent) :

Αδιαφανή υλικά θεωρούνται το μέταλλο,το ξύλο,η πέτρα. Η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σώμα τέτοιου υλικού απορροφάται σε πολύ μικρή απόσταση από την επιφάνεια (μερικά μm). Αντίστοιχα, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το εσωτερικό του δεν είναι δυνατόν να φτάσει στην επιφάνεια. Επομένως, θα μπορούσαμε να πούμε ότι σε αυτά τα υλικά η ακτινοβολία αποτελεί επιφανειακό φαινόμενο και η διαπερατότητα τους μπορεί να θεωρηθεί μηδενική τ=0.

Ημιδιαφανή υλικά θεωρούνται το γυαλί και το νερό τα οποία επιτρέπουν στην ακτινοβολία ορισμένου μήκους κύματος να διεισδύσει σε σημαντικό βάθος πριν απορροφηθεί από το υλικό [3].

Όπως και οι υπόλοιπες ιδιότητες της ακτινοβολίας, η διαπερατότητα εξαρτάται αφενός από το υλικό της επιφάνειας, το μήκος κύματος και την κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία της επιφάνειας αλλά και από το πάχος της. Στο Διάγραμμα 4-5 που ακολουθεί φαίνεται η διαπερατότητα του βοριοπυριτικού γυαλιού της εταιρίας Schott (που χρησιμοποιείται και ως κάλυμμα σε ηλιακούς συλλέκτες) σε σχέση με το μήκος κύματος για τρία διαφορετικά πάχη. Ο συγκεκριμένος τύπος γυαλιού χρησιμοποιείται συχνά ως υλικό καλύμματος των ηλιακών συλλεκτών καθώς ,όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, παρουσιάζει υψηλό συντελεστή διαπερατότητας (γύρω στο 90%) για μεγάλη περιοχή του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Διάγραμμα 4-5 : Συντελεστής διαπερατότητας βοριοπυριτικού γυαλιού Schott της εταιρίας σε σχέση με το μήκος κύμματος για τρία διαφορετικά πάχη επιφάνειας

Το γυαλί είναι μεν διάφανο για τη χαμηλού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας αλλά εμφανίζεται σχεδόν αδιαφανές για τη μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από το απορροφητικό στοιχείο του συλλέκτη. Με τον τρόπο αυτό περιορίζονται σημαντικά οι απώλειες ακτινοβολίας από τον απορροφητή προς το περιβάλλον. Όμως, παρόλο που το γυαλί είναι σχεδόν αδιάφανο στη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, η απορρόφηση ενός

μέρους αυτής οδηγεί σε μερική ανύψωση της θερμοκρασίας του άρα και απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής.

Στο ακόλουθο Διάγραμμα 4-6 φαίνεται ο συντελεστής διαπερατότητας διάφορων τύπων γυαλιού σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται, ο συντελεστής τ παραμένει σχεδόν σταθερός μέχρι τις 30° μοίρες. Το γυαλί με πορώδες Si που διαθέτει αντιανακλαστική επίστρωση έχει εμφανώς αυξημένη διαπερατότητα ενώ για μικρές γωνίες πλησιάζει το 100%. Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες από 30° η διαπερατότητα αρχίζει να μειώνεται με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό και στους τέσσερεις τύπους γυαλιού.



Πηγή : <u>http://amper.ped.muni.cz/light/EuP/FS.htm</u>

Διάγραμμα 4-6 : Διαπερατότητα γυαλιού σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης για διάφορους τύπους γυαλιού(σε παρένθεση ο δέικτης διάθλασης)

Η μεταβολή της διαπερατότητας σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης επηρεάζει την οπτική απόδοση ενός συλλέκτη και επειδή εξαρτάται και από τη γεωμετρία κάθε συλλέκτη μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια μόνο πειραματικά. Όπως θα αναλυθεί παρακάτω (4.3.3) η σχέση διαπερατότητας του καλύμματος-γωνίας πρόσπτωσης εκφράζεται από τον τροποποιητή γωνίας πρόσπτωσης ΙΑΜ.

Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής θα πρέπει το σύνολο της ανακλώμενης, απορροφούμενης και ακτινοβολίας να ισούται με την ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια:

Διαιρώντας όλους τους όρους με G

$$\frac{G_{ref}}{G} + \frac{G_{abs}}{G} + \frac{G_{tr}}{G} = 1$$
 (4.3.6)

καταλήγουμε στη σχέση :

$$ρ + α + τ = 1$$
 (4.3.7α)

για τις αδιαφανείς επιφάνειες ισχύει τ = 0 οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$ρ + α = 1$$
 (4.3.7β)

Η ακτινοβολία G που προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια αναφέρεται σε όλες τις κατευθύνσεις και αποτελείται από διάφορα μήκη κύματος [3].

4.3.2.3 <u>Επιλεκτικές επιφάνειες</u>

Οι ιδιότητες των επιφανειών που σχετίζονται με την ακτινοβολία μπορούν να αλλάξουν σημαντικά με την τοποθέτηση λεπτών επιστρώσεων πάνω σε αυτές. Οι επιφάνειες αυτές ονομάζονται επιλεκτικές. Χαρακτηριστική εφαρμογή που αφορά και την παρούσα διπλωματική αποτελούν οι επιστρώσεις των απορροφητών ηλιακών συλλεκτών (επιλεκτικοί απορροφητές). Ένας ιδανικός απορροφητής θα πρέπει να διαθέτει μέγιστη απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία και ταυτόχρονα χαμηλό συντελεστή εκπομπής στη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (Διάγραμμα 4-7) ώστε να περιορίζονται οι απώλειες.



Διάγραμμα 4-7 : Συντελεστής εκπομπής επιλεκτικής επιφάνειας (φαιή επιφάνεια)

Οι επιλεκτικοί απορροφητές αποτελούνται από μία λεπτή ανώτερη επίστρωση υψηλά απορροφητική για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία επικαθίμενη σε ένα στρώμα με υψηλή απορροφητικότητα και χαμηλή εκπομπή για τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Πολλά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την επίστρωση των απορροφητών είναι οξείδια των μετάλλων. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι η μετάβαση από τις υψηλές στις χαμηλές τιμές του συντελεστή εκπομπής πραγματοποιείται σε μήκη κύματος από 1,5 έως 5 μm ενώ η αύξηση του πάχους της επίστρωσης αυξάνει το όριο αυτό [1].

| Υλικό απορροφητικής επιφάνειας | συντελεστής απορροφητικότητας | συντελεστής εκπομπής |
|---|----------------------------------|-------------------------|
| Μαύρο χρώμιο με επιμετάλλωση Νi σε χάλυβα | 0,95 | 0,09 |
| Κεραμική επίστρωση σε χάλυβα | 0,96 | 0,16 |
| Μαύρο νικέλιο σε γαλβανισμένο χάλυβα | 0,81 | 0,17 |
| Χαλκός επεξαργασμένος με διάλυμα NaOH NaClO2 | 0,89 | 0,17 |
| Χαλκός επεξεργασμένος με μαύρο οξείδιο χαλκού (Ebanol C) | 0,90 | 0,16 |

Πίνακας 4-5 : Συντελεστής εκπομπής και απορρόφησης επιστρώσεων απορροφητών

Πηγή :[1]

4.3.3 Τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης (IAM)

Η διαπερατότητα και η απορροφητικότητα του γυάλινου καλύμματος ως γινόμενο (τα) καθώς και η εξάρτηση του από τη γωνία πρόσπτωσης αποτελεί ενδεικτικό στοιχείο για τον οπτικό βαθμό απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών. Για το λόγο, κρίνεται χρήσιμη μια αναφορά στη διαφοροποίηση του (τα) σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης για τα βασικά είδη ηλιακών συλλεκτών.

Οι τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης γνωστός ως IAM (Incident Angle Modifier) αποτελεί συντελεστή που εκφράζει την εξάρτηση του οπτικού βαθμού απόδοσης του συλλέκτη από τη γωνία πρόσπτωσης και ορίζεται ως :

 $K_{\tau\alpha} = \frac{\eta(\theta)}{\eta(0)} = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \qquad (4.3.8)$

όπου (τα) , η(θ) το γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας και ο βαθμός απόδοσης σε μια γωνία θ και (τα)_n , η(0) αντίστοιχα για κάθετη πρόσπτωση (θ=0).

Ο συντελεστής ΙΑΜ αποτελεί ιδιαίτερο στοιχείο κάθε συλλέκτη και η μέτρηση του είναι απαραίτητη διαδικασία για την προτυποποίηση και την αξιολόγηση του. Η μέτρηση του ΙΑΜ γίνεται σε συνθήκες αιθρίας ατμόσφαιρας έτσι ώστε το ποσοστό διάχυτης-ολικής ακτινοβολίας να είναι μικρότρο από 15% και τα αποτελέσματα να εκφράζουν μόνο την επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας.Η ASHRAE 93-77 αναφέρει ότι ο πειραματικός προσδιορισμός του $K_{\tau\alpha}$ γίνεται τοποθετώντας το συλλέκτη σε εσωτερικό χώρο χρησιμοποιώντας ηλιακό προσομοιωτή ώστε η εξεταζόμενη γωνία πρόσπτωσης μεταξύ του συλλέκτη και της ακτινοβολίας να παίρνει τιμές 0°,30°,45°,60°. Η μέτρηση του $K_{\tau\alpha}$ μπορεί να γίνει και σε εξωτερικό χώρο με τη βοήθεια κινούμενης βάσης με ζευγάρια πειραμάτων για τις γωνίες 0°,30°,45°,60° συμμετρικά ως προς το ηλιακό μεσημέρι. Ο επίπεδος συλλέκτης προσανατολίζεται έτσι ώστε η εξεταζόμενη γωνία πρόσπτωσης μεταξύ του ακτινοβολίας να είναι 50° [1].

Για την ανάλυση της επίδρασης που έχει η διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας αναλύουμε το διάνυσμα της σε ένα τριαξονικό σύστημα. Ανάλογα με τον τύπο του συλλέκτη ο συντελεστής ΙΑΜ μπορεί να έχει μία ή δύο συνιστώσες K_ℓ και K_θ :

Kθ? (longitudinal) : τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης που αναφέρεται στη γωνία πρόσπτωσης μεταξύ της καθέτου στο συλλέκτη και τη διαμήκη διεύθυνση

Kθt (transversal): τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης που αναφέρεται στη γωνία πρόσπτωσης μεταξύ της καθέτου στο συλλέκτη και την εγκάρσια διεύθυνση

Σύμφωνα με την προσέγγιση του McIntire ο ολικός συντελεστής ΙΑΜ προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των δύο παραπάνω :

$$K_{\theta}(\theta_t, \theta_l) = \frac{\eta(\theta_t, \theta_l)}{\eta(0, 0)} \approx K_{\theta_t}(\theta_t, 0) \cdot K_{\theta_l}(0, \theta_l) \quad [12]$$
(4.3.9)

Όπου οι δύο συνιστώσες υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$K_{\theta_t}(\theta_t, 0) = \frac{\eta(\theta_t, 0)}{\eta(0, 0)} \qquad (4.3.10\alpha) \qquad K_{\theta_l}(0, \theta_l) = \frac{\eta(0, \theta_l)}{\eta(0, 0)} \qquad (4.3.10\beta)$$

(Κατά την προτυποποίηση, όσο γίνονται μετρήσεις για τη συνιστώσα της μίας γωνίας, η άλλη θα πρέπει να παραμένει μηδενική)

ΙΑΜ σε επίπεδους συλλέκτες :

Για τους επίπεδους συλλέκτες ο ΙΑΜ έχει μία μόνο συνιστώσα Κ (Τα K₁ και K_θ ταυτίζονται) που παίρνει τιμές μόνο K \leq 1. Όπως φαίνεται και από τη μορφή του παρακάτω διαγράμματος ο ΙΑΜ μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της γωνίας θ :



Πηγή : (<u>www.apricus.com</u>)

Διάγραμμα 4-8 : Τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης ΙΑΜ για τυπικό επίπεδο συλλέκτη του εμπορίου

ΙΑΜ σε παραβολικούς συγκεντρωτικούς συλλέκτες (ΡΤC):

Σε όλους τους συλλέκτες που διαθέτουν κυλινδρικό δέκτη (συγκεντρωτικοί ή μη) ο IAM ποτελείται από δύο συνιστώσες Κℓ (longitudinal) και K_θ (transversal).Επειδή οι PTC διαθέτουν σύστημα παρακολούθησης του ηλίου ενός αξόνα ο συντελεστής της εγκάρσιας γωνίας πρόσπτωσης K_θ είναι πολύ κοντά στη μονάδα K_θ≈1 (δεδομένου κάποιο μικρό σφάλμα στο σύστημα παρακολούθησης) [11]. Ο IAM για τη γωνία θℓ παίρνει τιμές Kℓ <1 και μπορεί να εκφραστεί από συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης η οποία μπορεί να προσδιοριστεί μόνο πειραματικά. Στο παρακάτω Διάγραμμα 4-9 φαίνεται ο συντελεστής Kℓ σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης και η αντίστοιχη συνάρτηση για κάποιον PTC συλλέκτη :



Πηγή : [28]

Διάγραμμα 4-9 : Τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης ΙΑΜ σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης και αντίστοιχή συνάρτηση για ένα συλλέκτη ΡΤC

Στους συλλέκτες που διαθέτουν συστήματα παρακολούθησης δύο αξόνων (π.χ παραβολικοί δίσκοι) εξασφαλίζεται συνεχώς κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας. Επομένως και οι δύο συνιστώσες είναι σχεδόν ίσες με τη μονάδα Κ_θ≈1 , Kℓ≈1 [11].

ΙΑΜ σε συλλέκτες σωλήνων κενού (ΕΤC) :

Στους επίπεδους συλλέκτες η οπτική απόδοση μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το ηλιακό μεσημέρι κυρίως λόγω των απωλειών ανάκλασης. Αντιθέτως στους συλλέκτες κενού οι απώλειες αυτές είναι μειωμένες λόγω της κυλινδρικής επιφάνειας του απορροφητή που μπορεί να είναι εκτεθειμένη στην κάθετη ακτινοβολία για μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας. Και σε αυτόν τον τύπο ο τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης έχει δύο συνιστώσες K_{θ} , $K\ell$ (Εικόνα 4-4). Είναι χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου τύπου ηλιακού συλλέκτη ότι για κάποιες γωνίες πρόσπτωσης ο συντελεστής ΙΑΜ παίρνει τιμές που ξεπερνούν τη μονάδα. Αυτό οφείλεται στα κενά που υπάρχουν μεταξύ των σωλήνων. Το μεσημέρι που οι ακτίνες προσπίπτουν κάθετα στο συλλέκτη (θ=0) τα κενά μεταξύ των σωλήνων δέχονται ακτινοβολία που δεν αξιοποιείται. Αντιθέτως, για μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης μεταξύ 40° και 80° η ακτινοβολία αξιοποιείται από μεγαλύτερο κομμάτι της περιφέρειας των σωλήνων χωρίς να φτάνει στα κενά μεταξύ τους . Ως αποτέλεσμα ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης για τις γωνίες αυτές προκύπτει μεγαλύτερος αναφορικά με αυτόν της κάθετης πρόσπτωσης].



Πηγή : <u>www.solar2all.com</u>

Πηγή : <u>www.apricus.com</u>

Εικόνα 4-4 : Γωνίες θΙ και θτ στους συλλέκτες σωλήνων κενού**(α.)**, Μεταβολή της ακτινοβολίας που δέχονται οι σωλήνες κενού στη διάρκεια της ημέρας **(b.)**

<u>ΙΑΜ σε σύνθετους παραβολικούς συλλέκτες (CPC) :</u>

Όπως και στους συλλέκτες σωλήνων κενού έτσι και και στους cpc συλλέκτες (που δεν περιέχουν σύστημα παρακολούθησης του ηλίου) και οι δύο συνιστώσες K_θ, Kℓ επηρεάζουν τον οπτικό βαθμό απόδοσης. Όμως, στην περίπτωση των σύνθετων παραβολικών συλλεκτών οι τροποποιητές γωνίας πρόσπτωσης εξαρτώνται εκτός από τις ιδιότητες απορροφητή –καλύμματος και από την ασύμμετρη γεωμετρία του δέκτη και του συγκεντρωτή. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται αναλυτικά οι γωνίες θ,θι,θt που σχηματίζει η διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας με τους άξονες ενός cpc συλλέκτη. Η άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει υπό γωνία θt στον ανακλαστήρα καθιστά ανενεργό ένα τμήμα του συγκεντρωτή στο ένα άκρο του συλλέκτη (Εικόνα 4-6). Οι αντίστοιχες οπτικές απώλειες που προκύπτουν (end losses) εξαρτώνται κυρίως από τη γωνία θt και σε πολύ μικρό βαθμό από τη γωνία θt στο γωνία θt και σε πολύ μικρό βαθμό



Πηγή : [10]

Εικόνα 4-5 : Σχηματική απεικόνιση των γωνιών θt και θl σε συλλέκτη CPC



Πηγή : [10]

Εικόνα 4-6 : Σχηματική απεικόνιση των απωλειών από την ακτινοβολία που δε φτάνει στο άκρο δέκτη (end losses)

Ο συντελεστής ΙΑΜ στους cpc συλλέκτες είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ιδιαίτερα για τις μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης που η προσέγγιση McIntire δίνει ανακριβή αποτελέσματα[29]. Τα πρότυπα αξιολόγησης των ηλιακών συλλεκτών που γίνονται σε σταθερές συνθήκες (steady state method) είναι ανεπαρκή για τον ακριβή υπολογισμό του ΙΑΜ. Αντίθετα, όταν η προτυποποίηση πραγματοποιείται υπό μεταβλητές συνθήκες (quasi-dynamic method) για να προσδιοριστεί ο τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης γίνεται διάκριση μεταξύ της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή οι μετρήσεις του βαθμού απόδοσης γίνονται για ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών της ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας και της θερμοκρασιακής διαφοράς συλλέκτη-περιβάλλοντος [12]. Ο συντελεστής για την άμεση ακτινοβολία Κθ_b μπορεί να προσδιοριστεί από την προσέγιση του McIntire ενώ ο συντελεστής για τη διάχυτη Κθ_d μετράται ως σταθερή τιμή για κάθε συλλέκτη και κυμαίνεται μεταξύ 1 < K_{θd} < 1,5 [11],[29].



 $\Pi\eta\gamma\dot\eta:[29]$

Διάγραμμα 4-10 : Τυπικές καμπύλες ΙΑΜ για ηλιακές συλλεκτες σωλήνων κενού



Πηγή : [29]

Διάγραμμα 4-11 : Τυπικές καμπύλες ΙΑΜ για ηλιακούς συλλέκτες CPC με κυλινδρικό δέκτη

4.3.4 Ροή θερμότητας με ακτινοβολία

Στην αγωγή και συναγωγή η μετάδοση θερμότητας γίνεται πάντοτε από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα. Ωστόσο, η μεταφορά θερμότητας δια ακτινοβολίας είναι δυνατόν να γίνεται και μεταξύ δύο σωμάτων που διαχωρίζονται από ένα μέσο ψυχρότερο από αυτά. Αυτός είναι και ο λόγος που το εσωτερικό ενός ηλιακού συλλέκτη μπορεί να φθάσει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες ακόμα και όταν το γυάλινο κάλυμμα μπορεί να παραμένει σχετικά ψυχρότερο. Σε αντίθεση με τους προαναφερθέντες τρόπους μεταφοράς θερμότητας, η μετάδοση της ακτινοβολίας δεν απαιτεί κάποιο ενδιάμεσο μέσο αλλά μπορεί να διαδίδεται και στο κενό [3].

Μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο επιφανειών :

Για τη λύση ενός τέτοιου προβλήματος θεωρούμε μια κοιλότητα που αποτελείται από δυο επιφάνειες με εμβαδά A_1 και A_2 . Οι επιφάνειες βρίσκονται σε θερμοκρασίες T_1 και T_2 και έχουν συντελεστές εκπομπής $ε_1$ και $ε_2$ αντίστοιχα. Οι παραδοχές που συναντάμε συνήθως στη βιβλιογραφία είναι οι εξής :

 οι επιφάνειες θεωρούνται φαιά και διάχυτα σώματα (οι συντελεστές εκπομπής θεωρούνται ανεξάρτητοι από το μήκος κύματος και τη γωνία εκπομπής)

- οι επιφάνειες θεωρούνται ισόθερμες
- η ακτινοβολία προσπίπτει ομοιόμορφα πάνω στις επιφάνειες

Η μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια 1 στην επιφάνεια 2

$$Q_1 = -Q_2 = \frac{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2}} \qquad (W) \quad \textbf{(4.3.12)}$$

όπου :

 Q_1 : η θερμότητα που συναλλάσσει η επιφάνεια 1 (W/m)

 Q_2 : η θερμότητα που συναλλάσσει η επιφάνεια 2 (W/m)

σ : η σταθερά Stefan Boltzman ίση με 5,67 $10^{-8}/m^2 K^4$

 $ε_1$: ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας 1

ε2: ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας 2

F₁₂ : παράγοντας που εξαρτάται από τη γεωμετρία των επιφανειών (σε κάποιες εξιδανικευμένες περιπτώσεις λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα)[1]

Στη συγκεκριμένη διπλωματική μελετάται ηλιακός συλλέκτη με κυλινδρικό δέκτη. Στον τύπο αυτό πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ ομόκεντρων κυλινδρικών επιφανειών. Στην περίπτωση αυτή η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$Q_{12} = \frac{A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1 \cdot 4 - T_2 \cdot 4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \cdot (\frac{r_1}{r_2})} \quad (W) \quad (4.3.13)$$

δεδομένου ότι : $\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2}$ $F_{12} = 1$ [3]

Μεταφορά θερμότητας μεταξύ σώματος και μέλανος σώματος :

Η περίπτωση αυτή αναφέρεται σε ένα σώμα που αλληλεπιδρά με ένα πολύ μεγαλύτερο (π.χ ήλιος) το οποίο προσεγγίζει το μέλαν σώμα.

Επομένως ο λόγος A_1/A_2 πλησιάζει το μηδέν και η προηγούμενη σχέση γίνεται :

$$Q_1 = \varepsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$
 (W) (4.3.14)

Όπως φαίνεται, η σχέση είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες του μεγαλύτερου σώματος καθώς η ακτινοβολία που εξέρχεται από μικρότερο σώμα είναι απίθανο να επιστρέψει σε αυτό ύστερα από ανάκλαση της στην πολύ μεγαλύτερη κοιλότητα [1].

Η μελέτη ενός ηλιακού συλλέκτη απαιτεί την εκτίμηση της μεταφερόμενης ακτινοβολίας από την εξωτερική του επιφάνεια στο περιβάλλον. Τα μόρια του αέρα και τα σωματίδια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα εκπέμπουν και απορροφούν θερμότητα. Παρόλο που η εκπομπή απέχει πολύ από το μοντέλο του μέλανος σώματος, έχει διαπιστωθεί ότι είναι πιο βολικό να θεωρούμε την ατμόσφαιρα ως μέλαν σώμα που βρίσκεται σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία που θα εκπέμπει ισοδύναμη ακτινοβολία. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται θερμοκρασία ουρανού και συμβολίζεται συνήθως με Tsky [3]. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις που συνδέουν τη θερμοκρασία του ουρανού με τα μετεωρολογικά δεδομένα. Έτσι η θερμοκρασία του ουρανού μπορεί να εκτιμάται βάσει της τοπικής θερμοκρασίας, της τάσης ατμών ή του σημείου υγροποίησης [1].Σύμφωνα με τα παραπάνω η προηγούμενη σχέση για την περίπτωση κυλινδρικού σώματος γίνεται :

$$Q = \varepsilon \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \sigma \cdot \left(T_s^4 - T_{sky}^4\right) \quad (W)$$
 (4.3.15)

όπου :

ε : ο συντελεστής εκπομπής του σώματος

D : η διάμετρος του κυλίνδρου (m)

L : το μήκος του κυλίνδρου (m)

T_s: η θερμοκρασία του σώματος (K)

T_{sky} : η θερμοκρασία ουρανού (K)

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Για τη μοντελοποίηση του πρότυπου ηλιακού συλλέκτη αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία προσομοιώσεις σύνθετων παραβολικών συλλεκτών παρόμοιας γεωμετρίας. Για την οπτική ανάλυση και τον ορισμό του οπτικού βαθμού απόδοσης του πρότυπου συλλέκτη χρησιμοποιήθηκαν οι πηγές [1],[2],[17],[21],[22],[25],[26],[48]. Όσον αφορά τη θερμική ανάλυση, τα σχετικά έγγραφα που είναι διαθέσιμα αφορούν συλλέκτες τύπου CPC με κυλινδρικό απορροφητή όπου το ρευστό ρέει σε αγωγό τύπου U[2], [21].Επειδή ο πρότυπος συλλέκτης διαθέτει έναν ιδιαίτερης μορφής απορροφητή, όπου το ρευστό ρέει σε δακτυλιοειδή αγωγό, χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα στοιχεία από τις πηγές [3], [6],[14] μόνο για το κομμάτι του δέκτη.

5.1 Μετεωρολογικά δεδομένα

Οι συλλέκτες που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική έχουν τοποθετηθεί σε μια πιλοτική μονάδα αφαλάτωσης στην περιοχή του Αγίου Φωκά της Τήνου για την κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων του συστήματος. Για το λόγο αυτό, η παρούσα μελέτη έγινε βάσει μετεωρολογικών δεδομένων που αφορούν τη δεδομένη τοποθεσία. Η ανάλυση που θα γίνει αρχικά αφορά τη μαθηματική μοντελοποίηση ενός συλλέκτη. Για τη διεξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων θεωρείται μόνιμη κατάσταση ανά κάποιο χρονικό διάστημα για το οποίο η εισερχόμενη ακτινοβολία θεωρείται σταθερή και η τιμή της δίνεται από το πρόγραμμα **Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps** το οποίο παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.5. Εισάγοντας τις συντεταγμένες μιας περιοχής και την κλίση του συλλέκτη το πρόγραμμα αυτό παρέχει για τη μέση μέρα κάθε μήνα τα εξής δεδομένα ανά 15 min :

- 1. Την ώρα
- 2. Τα λεπτά
- 3. Την ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου ανά μονάδα επιφάνειας G (W/m²)
- 4. Τη διάχυτη ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου ανά μονάδα επιφάνειας Gd (W/m²)
- 5. Την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (°C)

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα αυτό τυπώθηκαν αρχεία .txt για τη μέση μέρα κάθε μήνα τα οποία διαβάζονται από τον κώδικα που υπολογίζει το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου της ημέρας (ανά 15 λεπτά). Το μαθηματικό αυτό μοντέλο με δεδομένα τη θερμοκρασία εισόδου του νερού,την παροχή του,την ηλιακή ακτινοβολία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη υπολογίζει μέσω ισολογισμών τη θερμοκρασία εξόδου του νερού, την αποδιδόμενη ισχύ

και το βαθμό απόδοσης. Στους ισολογισμούς αυτούς έχουν συμπεριληφθεί οι διάφορες απώλειες που εμφανίζονται κατά τη ροή θερμότητας στο συλλέκτη αλλά έχουν γίνει και κάποιες παραδοχές που συγκεντρώνονται στην ενότητα 5.4.

5.2 Υπολογισμός ακτινοβολίας που λαμβάνεται από το συλλέκτη

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που λαμβάνεται από το συλλέκτη είναι απαραίτητος ο αναλυτικός υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης θ αλλά και των υπόλοιπων γωνιών που επηρεάζουν τα ποσά της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που λαμβάνονται από ένα σταθερό cpc συλλέκτη. Είναι σημαντικό να υπενθυμήσουμε ότι η τιμή της γωνίας αποδοχής θc και ο βαθμός αποκοπής των άκρων του συγκεντρωτή αποτελούν εκτιμήσεις καθώς οι τιμές τους δεν ήταν διαθέσιμες από τον κατασκευαστή.

Ηλιακή απόκλιση δ:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \frac{360 \cdot (n+284)}{365}$$
 (5.2.1)

Όπου η ημέση μέρα του μήνα

<u>Γεωγραφικό πλάτος φ</u> : σταθερό και ίσο με 37,529°

<u>Αζιμούθιο επιφάνειας γ</u>: Για τη μεγιστοποίηση της συλλεγόμενης ακτινοβολίας οι συλλέκτες της εγκατάστασης τοποθετήθηκαν με του άξονές τους παράλληλα σε δύση-ανατολή και τις επιφάνειες ανοίγματος στραμμένες προς το νότο. Αυτό σημαίνει ότι το αζιμούθιο επιφάνειας γ είναι σταθερό και ίσο με 0.

<u>Κλίση συλλέκτη β</u>: σταθερή και ίση με 45°

<u> Ωριαία γωνία ω :</u>

ω = ± 0,25·(min από το ηλιακό μεσημέρι) (5.2.2)

όπου το + λαμβάνεται για τις ώρες προ μεσημβρίας και το – για τις ώρες μετά μεσημβρίας

Τα λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι υπολογίζονται από τον τύπο (hours-12)·60+minutes όπου οι ώρες (hours) και τα λεπτά (minutes) τα οποία αντιστοιχούν στη χρονική στιγμή για την οποία δίνονται οι ακτινοβολίες G, Gd και η ατμοσφαιρική θερμοκρασία

<u>Γωνία πρόσπτωσης :</u>

Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και έχουν νότιο προσανατολισμό η γωνία πρόσπτωσης θ υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις (όλες οι γωνίες θα πρέπει να είναι σε rad ώστε να γίνουν σωστά οι υπολογισμοί στη fortran).

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega$$
 (5.2.3)
$$\theta = \cos^{-1}(\cos \theta)$$
 (5.2.4)

(η fortran δίνει τη γωνία σε rad)

<u>Γωνία ζενίθ :</u>

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega$$
(5.2.5)
$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos \theta_z)$$
(5.2.6)

Αζιμούθιο ηλίου:

$$\sin \gamma'_s = \sin \omega \cdot \cos \delta / \sin \theta_z$$
 (5.2.7)
$$\gamma'_s = \sin^{-1}(\gamma'_s)$$
 (5.2.8)

Το αζιμούθιο ηλίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\gamma_s = C_1 \cdot C_2 \cdot \gamma'_s + C_3 \cdot (1 - C_1 \cdot C_2) \cdot 90^o$$
 (5.2.9)

Όπου C_1, C_2, C_3 παράμετροι που παίρνουν τιμές 1 ή -1 σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια :

Παράμετρος C₁:

Αν ισχύει $\left|\frac{\tan \delta}{\tan \varphi}\right| > 1$ τότε C₁=1 (5.2.10α)

Σε άλλη περίπτωση:

- $C_1=1 \ \alpha v \ |\omega| < \omega_{ew}$ (5.2.10β)
- $C_1=-1 \ \alpha v \ |\omega| \ge \omega_{ew}$ (5.2.10 γ)

Όπου $\cos \omega_{ew} = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$ (5.2.11)

<u>Παράμετρος C₂ :</u>

• $C_2=1 \quad \alpha v \quad \varphi \cdot (\varphi - \delta) \ge 0$ (5.2.12 α)

•
$$C_2=-1 \alpha v \phi \cdot (\phi - \delta) < 0$$
 (5.2.12β)

<u>Παράμετρος C₃ :</u>

• C₃=1 αν ω≥0 **(5.2.13α)**

• C₃=-1 αν ω<0 **(5.2.13β)** [1]

Από το αρχείο του προγράμματος έχουμε την ολική και διάχυτη ακτινοβολία ανά μονάδα κεκλιμένης επιφάνειας. Από την αφαίρεση αυτών προκύπτει το ποσό της άμεσης ακτινοβολίας ανά μονάδα κεκλιμένης επιφάνειας Gb :

Gb= G – Gd

Το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφά τελικά ο δέκτης του συλλέκτη υπολογίζεται ως εξής :

Υπολογισμός άμεσης ακτινοβολίας :

Προκειμένου να εκτιμηθεί η απορροφούμενη ακτινοβολία από το δέκτη του συλλέκτη, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε αν η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας βρίσκεται μέσα στα όρια που καθορίζονται από τη γωνία αποδοχής 2θ_c του ανακλαστήρα.

Aν πληρούται η συνθήκη $(\beta - \theta_c) \le \tan^{-1}(\tan \theta_z \cos \gamma_s) \le (\beta + \theta_c)$ (5.2.14)

τότε η άμεση ακτινοβολία που αξιοποιείται από το συλλέκτη είναι:

$$Gb_{CPC} = F(\theta) \cdot Gb$$
 (5.2.15)

Η συνάρτηση F(θ) (όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.2.4.4) εξαρτάται από τη γωνία αποδοχής αλλά και από το βαθμό αποκοπής των άκρων του συγκεντρωτή. Έτσι, με βάση το εύρος των γωνιών στο οποίο βρίσκεται η γωνία πρόσπτωσης θ της ακτινοβολίας, η συνάρτηση F(θ) διαφοροποιείται ως εξής:

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta \le \theta_c \\ F_s(\theta) = \frac{1}{2} + \left[\frac{1 - \left[\frac{\sin \theta}{\sin \theta_D} (1 + \pi C \cos \theta_D) \right]}{2\pi C \cos \theta} \right] & \theta_c < \theta \le \theta_D \quad [25] \quad (5.2.16) \\ 0 & \theta > \theta_D \end{cases}$$

όπου :

 θ_c : η αρχική γωνία αποδοχής του συγκεντρωτή

 $\theta_{\rm D}$: η γωνία αποδοχής του συγκεντρωτή μετά τη μερική αποκοπή των άκρων

C: ο λόγος συγκέντρωσης του συγκεντρωτή

<u>Υπολογισμός διάχυτης ακτινοβολίας :</u>

$$Gd_{CPC} = \begin{cases} \frac{Gd}{c} & \alpha\nu & (\beta + \theta c) < 90^{\circ} \\ \frac{Gd}{2} \left(\frac{1}{c} + \cos\beta\right) & \alpha\nu & (\beta + \theta c) > 90^{\circ} \end{cases}$$
(5.2.17)

Υπολογισμός διάχυτης ακτινοβολίας ανακλώμενης από το έδαφος :

$$Gg_{CPC} = \begin{cases} 0 & \alpha\nu & (\beta + \theta c) < 90^{\circ} \\ \frac{\rho \cdot G}{2} \left(\frac{1}{c} - \cos\beta\right) & \alpha\nu & (\beta + \theta c) > 90^{\circ} \end{cases}$$
(5.2.18)

όπου ρ ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους (συντελεστής albedo). Επειδή στη μονάδα της αφαλάτωσης οι πρότυποι συλλέκτες έχουν τοποθετηθεί πάνω σε πλατφόρμα από τσιμέντο ο συντελεστής ρ λαμβάνεται ίσος με 0,3 (*Πίνακας 2-1*).

Αθροίζοντας όλους τους παραπάνω όρους κάθε φορά προκύπτει η ολική ηλιακή ακτινοβολία που βρίσκεται εντός των ορίων αποδοχής :

$$G_{CPC} = G_{b,CPC} + G_{d,CPC} + G_{g,CPC}$$
 [1] (5.2.19)

Από αυτήν την ποσότητα της ακτινοβολίας ένα μέρος φτάνει τελικά στην επιφάνεια του δέκτη. Αυτό το ποσό καθορίζεται από την ανακλαστικότητα του συγκεντρωτή ρ , το μέσο αριθμό ανακλάσεων $\langle N \rangle$,το γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας **(τα)** το λόγο συγκέντρωσης **C**, τις οπτικές απώλειες ρ που οφείλονται στο κενό μεταξύ απορροφητή και αιχμής του συγκεντρωτή, το συντελεστή τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης **IAM**, και τις οπτικές απώλειες από την άμεση ακτινοβολία που δε φτάνει στο άκρο δέκτη **end losses**.

Τα στοιχεία αυτά ,τα οποία αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 5.2.1.

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση υποθέτουμε ότι έχουμε το μέγιστο λόγο συγκέντρωσης (θεωρώντας αμελητέα τα γεωμετρικά σφάλματα της επιφάνειας του συγκεντρωτή και ευθυγράμμισης του δέκτη) που για διδιάστατο cpc συλλέκτη δίνεται από τον τύπο 1/sinθ_D

Ο συντελεστής ΙΑΜ δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί παρά μόνο εμπειρικά κατόπιν πειραματικών μετρήσεων που αφορούν συγκεκριμένο τύπο συλλέκτη σε δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα μοντελοποίηση ο συντελεστής δε λαμβάνεται υπ' όψη και έτσι θεωρείται ίσος με τη μονάδα. Ακόμα δε λαμβάνονται υπ' όψη οι οπτικές απώλειες end losses.

| Συντελεστές οπτικού βαθμού απόδοσης συλλέκτη | | |
|---|-------|--|
| ρ : ανακλαστικότητα καθαρού συγκεντρωτή | 0,98 | |
| (τα): γινομενο διαπερατότητας καλύμματος-απορροφητικότητας δέκτη | 0,91 | |
| C _{max} : ο λόγος συγκέντρωσης της ακτινοβολίας | 1,015 | |
| (Ν): μέσος αριθμός ανακλάσεων (θεωρείται σταθερός | 0,786 | |
| p : οπτικές απώλειες που οφείλονται στο κενό μεταξύ απορροφητή | | |
| και αιχμής του συγκεντρωτή | 0,96 | |
| Κ _{τα} : τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης | 1 | |
| End losses | 1 | |

Τελικά, η συνολική ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του ανοίγματος S (W/m²) που φτάνει στο δέκτη του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση :

$$S = K_{\tau \alpha} \cdot \rho^{} \cdot p \cdot end_losses \cdot G_{cpc} \quad (W/m^2) \quad (5.2.20)$$

Αν η ακτινοβολία αυτή πολλαπλασιαστεί με το πλάτος του συλλέκτη προκύπτει η αντίστοιχη ακτινοβολία ανά μονάδα μήκους του συλλέκτη \dot{q}_{in} :

$$\dot{q}_{in} = S \cdot \text{collector}_{width}$$
 (W/m) (5.2.21)

5.3 Υπολογισμός ακτινοβολιών που δεσμεύονται από τις επιφάνειες του δέκτη

Όλες οι ακτινοβολίες που αναφέρονται παρακάτω (και αναγράφονται με μία τελεία από πάνω) είναι ανηγμένες ανά μονάδα μήκους του συλλέκτη.

Πορεία της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο δέκτη :

Από την ακτινοβολία που φτάνει τελικά στο δέκτη, ένα μέρος q_{τ} διαπερνά το γυάλινο κάλυμμα, ένα μέρος q_{ssol} απορροφάται και ένα άλλο μέρος q_{srefl} ανακλάται :

$$\dot{q}_{\tau} = q_{in} \cdot \tau_{glass}$$
$$\dot{q}_{5sol} = q_{in} \cdot \alpha_{glass}$$
$$\dot{q}_{5refl} = q_{in} \cdot \rho_{glass}$$

Η ακτινοβολία q_τ που διαπερνά το γυάλινο κάλυμμα αφού διασχίσει το χώρο του κενού φτάνει στην εξωτερική επιφάνεια του μεταλλικού αγωγού. Από αυτή την ακτινοβολία ένα μέρος q_{3sol} απορροφάται και ένα άλλο q_{3refl} ανακλάται και προσπίπτει στην εσωτερική επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος (ο συντελεστής διαπερατότητας για αδιαφανή σώματα όπως ο μεταλλικός αγωγός είναι μηδέν τ=0)

$$\dot{q}_{3_{\text{sol}}(1)} = \dot{q}_{\text{in}} \cdot a_{absorber} = \dot{q}_{\text{in}} \cdot \tau_{glass} \cdot a_{absorber}$$
$$\dot{q}_{3_{\text{refl}}(1)} = \dot{q}_{\text{in}} \cdot \rho_{absorber} = \dot{q}_{\text{in}} \cdot \tau_{glass} \cdot \rho_{absorber}$$

Από την ακτινοβολία $q_{3refl(1)}$ που φτάνει στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος ένα μέρος $q_{4sol(1)}$ απορροφάται από αυτήν, ένα μέρος $q_{4t(1)}$ τη διαπερνά και ένα άλλο μέρος q_{4refl} ανακλάται και προσπίπτει στον απορροφητή:

$$\dot{q}_{4_{\tau}(1)} = \dot{q}_{3_{\text{refl}}(1)} \cdot \tau_{glass} = \dot{q}_{\text{in}} \cdot \tau_{glass}^{2} \cdot \rho_{absorber}$$
$$\dot{q}_{4_{sol}(1)} = \dot{q}_{3_{\text{refl}}(1)} \cdot a_{glass} = \dot{q}_{\text{in}} \cdot \tau_{glass} \cdot \rho_{absorber} \cdot \alpha_{glass}$$
$$\dot{q}_{4_{refl}(1)} = \dot{q}_{3_{\text{refl}}(1)} \cdot \rho_{glass} = \dot{q}_{\text{in}} \cdot \tau_{glass} \cdot \rho_{absorber} \cdot \rho_{glass}$$

Από την ακτινοβολία q_{4refl(1)} που προσπίπτει στον απορροφητή, ένα τμήμα της q_{3sol(2)} απορροφάται και το υπόλοιπο q_{3refl(2)} ανακλάται και πάλι με πορεία προς την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος :

$$\dot{q}_{3_{sol}(2)} = \dot{q}_{4_{refl}(1)} \cdot a_{\alpha b sorber} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \rho_{a b sorber} \cdot \rho_{glass} \cdot \alpha_{\alpha b sorber}$$
$$\dot{q}_{3_{refl}(2)} = \dot{q}_{4_{refl}(1)} \cdot \rho_{\alpha b sorber} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \rho_{a b sorber} \cdot \rho_{glass} \cdot \rho_{\alpha b sorber}$$
$$= \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \rho_{a lass} \cdot \rho_{\alpha b sorber}^{2}$$

Από την ακτινοβολία q_{3refl(2)} που φτάνει για δεύτερη φορά στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος ένα μέρος q_{4sol(2)} απορροφάται από αυτή, ένα μέρος q_{4τ(1)} τη διαπερνά και ένα άλλο μέρος q_{4refl(2)} ανακλάται και προσπίπτει στον απορροφητή.

$$\dot{\mathbf{q}}_{4_{\tau}(2)} = \dot{q}_{3_{refl}(2)} \cdot \tau_{glass} = \dot{\mathbf{q}}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \rho_{glass} \cdot \rho_{\alpha b \text{sorber}}^2 \cdot \tau_{glass}$$
$$= \dot{\mathbf{q}}_{in} \cdot \rho_{glass} \cdot \rho_{\alpha b \text{sorber}}^2 \cdot \tau_{glass}^2$$

$$\dot{q}_{4_{sol}(2)} = \dot{q}_{3_{refl}(2)} \cdot \alpha_{glass} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \rho_{glass} \cdot \rho_{\alpha bsorber}^2 \cdot \alpha_{glass}$$

$$\dot{q}_{4_{refl}(2)} = \dot{q}_{3_{refl}(2)} \cdot \rho_{glass} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \rho_{glass} \cdot \rho_{\alpha b \text{sorber}}^2 \cdot \alpha_{glass} \cdot \rho_{glass}$$
$$= \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{glass} \cdot \rho_{glass}^2 \cdot \rho_{\alpha b \text{sorber}}^2$$

Από την ακτινοβολία q4refi(2) που προσπίπτει στον απορροφητή ένα τμήμα της q3sol(3) απορροφάται q3refi(3) ανακλάται και πάλι με πορεία προς την εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος

$$\dot{q}_{3_{sol}(3)} = \dot{q}_{4_{refl}(2)} \cdot \alpha_{absorber} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{glass} \cdot \rho_{glass}^{2} \cdot \rho_{\alpha bsorber}^{2} \cdot \alpha_{\alpha bsorber}$$

$$\dot{q}_{3_{\text{refl}}(3)} = \dot{q}_{4_{refl}(2)} \cdot \alpha_{absorber} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{glass} \cdot \rho_{glass}^{2} \cdot \rho_{\alpha bsorber}^{2} \cdot \rho_{\alpha bsorber}^{2}$$
$$= \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{glass} \cdot \rho_{glass}^{2} \cdot \rho_{\alpha bsorber}^{3}$$

Όπως φαίνεται η πορεία αυτή της ακτινοβολίας μεταξύ του απορροφητή και του γυάλινου καλύμματος συνεχίζεται για Ν αριθμό ανακλάσεων. Έτσι η συνολική ακτινοβολία για κάθε περίπτωση μπορεί να εκφραστεί ως σειρά αθρίσματος Ν όρων.Οι όροι κάθε σειράς μετά από κάποιο αριθμό Ν γίνονται πολύ μικροί.

$$\dot{q}_{3_{sol}} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{absorber} \cdot \sum_{1}^{\infty} \rho_{glass}^{N} \cdot \rho_{absorber}^{N}$$
(5.3.1)

$$\dot{q}_{4_{sol}} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{glass} \cdot \sum_{1}^{\infty} \rho_{glass}^{N-1} \cdot \rho_{absorber}^{N}$$
(5.3.2)

$$\dot{q}_{3_{\text{refl}}} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{glass} \cdot \sum_{1}^{\infty} \rho_{glass}^{N-1} \cdot \rho_{absorber}^{N}$$
(5.3.3)

$$\dot{q}_{4_{refl}} = \dot{q}_{in} \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{glass} \cdot \sum_{1}^{\infty} \rho_{glass}^{N} \cdot \rho_{absorber}^{N}$$
(5.3.4)

$$\dot{q}_{4\tau} = \dot{q}_{in} \cdot \sum_{1}^{\infty} \rho_{glass}^{N-1} \cdot \rho_{absorber}^{N} \cdot \tau_{glass}^{N}$$
 (5.3.5)

Από τα παραπάνω ποσά ακτινοβολίας εκείνα που μπορούν να αξιοποιηθούν υπολογιστικά στους ισολογισμούς που ακολουθούν είναι:

- Το σύνολο της ακτινοβολίας που απορροφάται από την επιφάνεια του απορροφητή q_{3sol}
- Το σύνολο της ακτινοβολίας q_{4sol} που απορροφάται από την εσωτερική επιφάνεια του γυάλινου καλύμμματος
- Το σύνολο της ακτινοβολίας q_{5sol} που απορροφάται από την εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου καλύμμματος [14]

5.4 Υπολογισμός θερμικών ροών που συναλλάσσονται μεταξύ των επιφανειών του δέκτη

Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από τον απορροφητή προς το νερό:

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού και του νερού υπολογίζεται από το νόμο του Newton :

$$\dot{q}_{12_{conv}} = h_{12_{conv}} \cdot D_2 \cdot \pi \cdot (T_2 - T_1)$$
 (5.4.1)

 $h_{12_{conv}}$: ο συντελεστής συναγωγής στη θερμοκρασία T₁ του ρευστού (W/m²K) D₂: η εσωτερική διάμετρος του απορροφητή (m) T₁: η μέση θερμοκρασία του ρευστού (δηλαδή η (Tin+Tout)/2) (°C) T₂: η εσωτερική θερμοκρασία του απορροφητή (°C) Nu_{D2}: ο αριθμός Nusselt υπολογισμένος με βάση την διάμετρο D₂ Ο συντελεστής συναγωγής h₁ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_{12_{conv}} = \frac{k_1}{D_h} N u_{D_h}$$
 (5.4.2)

 k_1 : η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού στην θερμοκρασία T_1 (W/mK)

Ο αριθμός Nusselt (για τον οποίο έχει γίνει λόγος και στο κεφάλαιο 3) εξαρτάται από τη γεωμετρία του σώματος και από τον τύπο της ροής. Στο συγκεκριμένο δέκτη το νερό ρέει μέσα σε δακτύλιο με εξωτερική διάμετρο 0,119m και εσωτερική διάμετρο 0,100m. Ο τύπος ροής καθορίζεται από τον αριθμό Reynolds ο οποίος υπολογίζεται από τον τύπο :

$$Re_{D_h} = \frac{u \cdot D_h}{v}$$
 (5.4.3)

u : η ταχύτητα του ρευστού (m/s)

 D_h : η υδραυλική διάμετρος η οποία ισούται με τη διαφορά των δύο διαμέτρων που σχηματίζουν τον δακτύλιο $D_2\text{-}D_{\rho}\text{=}0,019~m$

ν : η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα στη θερμοκρασία του ρευστού $(T_{in}+T_{out})/2$ (m/s²)

Η ταχύτητα του ρευστού υπολογίζεται από τον τύπο u= \dot{V} /Ah

Όπου:

- *V* η παροχή όγκου (m³/s)
- Ah το εμβαδόν υδραυλικής διατομής (m²)

Το εμβαδόν υδραυλικής διατομής υπολογίζεται ως $A_h = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{\rho}^2}{4}$ (5.4.4)

Με βάση τον αριθμό Reynolds που καθορίζει τον τύπο της ροής υπολογίζεται για κάθε περίπτωση ο Nusselt :

Reynolds < 2300 Στρωτή ροή :</p>

Ο αριθμός Nusselt εξαρτάται από το λόγο των διαμέτρων που σχηματίζουν το δακτύλιο Dp/D₂=0,847. Από τον πίνακα που δόθηκε στο κεφάλαιο 4 (Πίνακας 4-3) υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή ο Nusselt = 4,93 για δεδομένο λόγο διαμέτρων που στην περίπτωσή μας είναι 0,847.

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τη σχέση :

$$Nu_{D_h} = \frac{f_2/8 \cdot (Re_{D_h} - 1000)}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{f_2/8} \cdot (Pr_1^{2/3} - 1)} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_2}\right)^{0,11}$$
(5.4.5)

Pr1: ο αριθμός Prandtl υπολογιζόμενος με βάση τη μέση θερμοκρασία του ρευστού
 T1 (δηλαδή την (Tin+Tout)/2)

Pr₁=μ₁·Cp₁/k₁ όπου:

μ₁: η δυναμική συνεκτικότητα του νερού στη θερμοκρασία T_1 (kg/m·s) Cp₁: η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού στη θερμοκρασία T_1 (J/kg·K) k₁: η θερμική αγωγιμότητα του νερού στη θερμοκρασία T_1 (W/m·K) Pr₂: ο αριθμός Prandtl υπολογιζόμενος με βάση τη μέση θερμοκρασία της εσωτερικής επιφ

επιφάνειας του απορροφητή T₂

Pr₂=μ₂·Cp₂/k₂ όπου:

μ₂: η δυναμική συνεκτικότητα του νερού στη θερμοκρασία T_2 (kg/m·s) Cp₂ : η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού στη θερμοκρασία T_2 (J/kg·K) k₂: η θερμική αγωγιμότητα του νερού στη θερμοκρασία T_2 (W/m·K)

f : ο συντελεστής τριβής της εσωτερικής επιφάνειας του απορροφητή ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση :

 $f_2 = (1,82 \cdot \log_{10} Re_{D_h} - 1,64)^{-2}$ [3], [6] (5.4.6)

Για λόγους σύγκρισης ο αριθμός Nusselt της σχέση 5.4.2 υπολογίστηκε εναλλακτικά και από άλλες σχέσεις που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία (Πίνακας 4-4) για τη ροή σε δακτύλιο.

Μεταφορά θερμότητας με αγωγή μεταξύ των τοιχωμάτων του μεταλλικού αγωγού :

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε κοίλο κύλινδρο εκφράζεται από το νόμο του Fourier :

$$\dot{q}_{23_{\text{cond}}} = 2 \pi k_{23} (T_2 - T_3) / ln (D_3 / D_2)$$
 [2],[6] (5.4.7)

 k_{23} : η θερμική αγωγιμότητα στη μέση θερμοκρασία ($T_2 + T_3$)/2 εσωτερικού και εξωτερικού τοιχώματος του απορροφητή (W/m·K). Θεωρούμε ότι έχει σταθερή τιμή 80 W/m·K και δε μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Η αγωγιμότητα της επιλεκτικής επίστρωσης αμελείται.

- T₂ : η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του απορροφητή (°C)
- T_3 : η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του απορροφητή (°C)
- D_2 : η εσωτερική διάμετρος του απορροφητή (m)
- D3 : η εξωτερική διάμετρος του απορροφητή (m)

Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα :

Ο μηχανισμός συναγωγής που πραγματοποιείται από την εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα εξαρτάται από την πίεση που επικρατεί στον ενδιάμεσο χώρο. Στο συλλέκτη που εξετάζεται, ο χώρος μεταξύ απορροφητή και γυάλινου καλύμματος εκκενώνεται ώστε η πίεση να μειώνεται στα 10⁻⁴bar (0,0750 torr). Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στην ενότητα 4.2.5 οι τιμές που λαμβάνει ο αριθμός Knudsen βρίσκονται στην περιοχή ολίσθησης (slip flow) $10^{-2} \leq \text{Kn} \leq 0,1$. Όμως, οι σχέσεις που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία για αυτήν την περιοχή είναι αρκετά πολύπλοκες. Γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε η απλοποιημένη σχέση :

$$\dot{q}_{34_{conv}} = \frac{2\pi \cdot k_{eff}}{\ln(D_4/D_3)} (T_4 - T_3)$$
 [1] (5.4.8)

όπου:

D₄ : η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου (m)

D₃ : η εξωτερική διάμετρος του δακτυλίου (m)

keff : η θερμική αγωγιμότητα keff του αερίου που υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{k_{eff}}{k} = \left[1 + \frac{(2-a)(9\gamma-5)\lambda}{a(\gamma+1)\ln(D_3/D_4)} \left(\frac{1}{D_3} + \frac{1}{D_4}\right)\right]^{-1} \quad [1], [27] \quad (5.4.9)$$

λ : η μέση ελεύθερη διαδρομή του αερίου (m)

α : ο συντελεστής accommodation που λαμβάνεται 0,95

γ : ο λόγος θερμοχωρητικοτήτων για ιδανικά αέρια που λαμβάνεται 1,4

λ: η μέση ελεύθερη διαδρομή του μορίου που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot P \cdot \delta^2}$$
 (5.4.10)

όπου :

δ : η μέση διάμετρος του μορίου (για τα μόρια του αέρα δ $\approx 4 \cdot 10^{-10}$ m)

- Ρ : η μέση πίεση του αερίου
- Τ : η μέση θερμοκρασία του αερίου
- R : η σταθερά των αερίων 8,3144621 J/(K·mol)
- k_{B} : η σταθερά Boltzman 1,3806488·10⁻²³ J/K

Ο αντίστοιχος συντελεστής απωλειών συναγωγής $h_{34_{conv}}$ υπολογίζεται από τη σχέση :

$$h_{34_{conv}} = \dot{q}_{34_{conv}} / (\pi \cdot D_3 \cdot (T_3 - T_4))$$
 (5.4.11)

Για λόγους σύγκρισης ο κώδικας περιλαμβάνει και τον υπολογισμό της θερμορροής q34conv σε περίπτωση που η πίεση μεταξύ απορροφητή και καλύμματος ξεπερνά το 1torr (δεν επικρατούν συνθήκες κενού). Στην περίπτωση αυτή η θερμορροή q34conv δίνεται από τον τύπο :

$$\dot{q}_{34_{conv}} = \frac{2,425 \cdot k_{34} \cdot (T_3 - T_4) \cdot \left(Pr_{34} \cdot Ra_{D_3} / (0,861 + Pr_{34})\right)^{1/4}}{\left(1 + (D_3 / D_4)^{3/5}\right)^{5/4}}$$
(5.4.12)

$$Ra_{D_3} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_3 - T_3) \cdot D_3{}^3}{a \cdot v}$$
 (5.4.13)

 T_{34} : η μέση θερμοκρασία (T_3+T_4)/2 (°C) K_{34} : η θερμική αγωγιμότητα του αέρα στη θερμοκρασία T_{34} (W/m·K) Pr_{34} : ο αριθμός Prandtl υπολογιζόμενος με βάση τη θερμοκρασία T_{34} $R\alpha_{D3}$: οαριθμός Rayleigh υπολογιζόμενος με βάση τη διάμετρο D₃ β: ο συντελεστής θερμικής διαστολής (°C)

$$eta = rac{1}{T_{34}}$$
 [6] **(5.4.14)**

Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα :

$$\dot{q}_{34_{rad}} = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot T_3 \cdot (T_3^{-4} - T_4^{-4})}{\left(\frac{1}{\epsilon_3} + \frac{(1 - \epsilon_4)D_3}{\epsilon_4 D_4}\right)} \quad [2], [6]$$
(5.4.15)

 σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann (5.67 × 10⁻⁸ W/m²K⁴)

D₃ : η εξωτερική διάμετρος του απορροφητή (m)

D₄ : η εσωτερική διάμετρος του γυάλινου καλύμματος (m)

Τ₃: η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του απορροφητή (Κ)

*Τ*₄ : η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος (K)

 $ε_3$: ο συντελεστής εκπομπής του απορροφητή

 ε_4 : ο συντελεστής εκπομπής του γυάλινου καλύμματος

Οι συντελεστές εκπομπής απορροφητή και καλύμματος έχουν δοθεί μαζί με τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη στο κεφάλαιο 3 (Πίνακας 3-3) και θεωρούνται σταθεροί και ανεξάρτητοι της θερμοκρασίας : ε₃= 3,5 % και ε₄=86 % .

Ο αντίστοιχος συντελεστής απωλειών ακτινοβολίας από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα δίνεται από τη σχέση :

$$h_{34_{rad}} = \frac{\sigma(T_3^2 + T_4^2)(T_3 + T_4)}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} + \frac{(1 - \varepsilon_4)A_3}{\varepsilon_4 A_4}}$$
[1] (5.4.16)

Μεταφορά θερμότητας με αγωγή μεταξύ των τοιχωμάτων του γυάλινου καλύμματος :

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε κοίλο κύλινδρο εκφράζεται από το νόμο του Fourier :

$$\dot{q}_{45_{\text{cond}}} = 2 \pi k_{45} (T_4 - T_5) / ln (D_5 / D_4)$$
 [2],[6] (5.4.17)

 k_{45} : η θερμική αγωγιμότητα στη μέση θερμοκρασία ($T_2 + T_3$)/2 εσωτερικού και εξωτερικού τοιχώματος του καλύμματος (W/m·K). Θεωρούμε ότι έχει σταθερή τιμή 1,05 W/m·K και δε μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

- T₄ : η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος (°C)
- T_5 : η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του απορροφητή (°C)
- D4 : η εσωτερική διάμετρος του γυάλινου καλύμματος (m)
- D₅ : η εξωτερική διάμετρος του γυάλινου καλύμματος (m)

Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από το γυάλινο κάλυμμα προς το περιβάλλον :

 $\dot{q}_{56_{\text{conv}}} = h_{56} \cdot \pi \cdot D_5 \cdot (T_5 - T_6)$ (5.4.18)

 $h_{56} = \frac{k_{56}}{D_5} N_{u_{D5}}$ (5.4.19)

 h_{56} : ο συντελεστής συναγωγής του αέρα στη μέση θερμοκρασία (T₅+T₆)/2 (W/m²K) D_5 : η εξωτερική διάμετρος του γυάλινου καλύμματος (m) T_5 : η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος (°C) T_6 : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (°C) Nu_{D5} : ο αριθμός Nusselt υπολογισμένος με βάση την διάμετρο D₅ k_{56} : η θερμική αγωγιμότητα του νερού στη μέση θερμοκρασία (T₅+T₆)/2 (W/m·K)

Ο αριθμός Nusselt για τη συγκεκριμένη θερμορροή εξαρτάται από το αν η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με ελεύθερη ή εξαναγκασμένη συναγωγή. Η ελεύθερη συναγωγή προκαλείται από δυνάμεις δημιουργούμενες από τη μεταβολή πυκνότητας όταν στο ρευστό υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές. Αντίθετα, εξαναγκασμένη συναγωγή εμφανίζεται όταν η κίνηση του ρευστού επιβάλλεται από εξωτερικά αίτια που στην περίπτωσή μας θα είναι ο άνεμος.

Για ταχύτητητα ανέμου που δεν ξεπερνά τα 0,1 m/s η συναγωγή μπορεί να θεωρηθεί ελεύθερη ενώ για τις μεγαλύτερες ταχύτητες εξαναγκασμένη [6].

<u>Περίπτωση άπνοιας (u<1m/s) :</u>

Στην περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από 0,1m/s θεωρούμε μεταφορά θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή και ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τη σχέση των Churchill και Chu:

$$Nu_{D_5} = \left\{ 0,60 + \frac{0,387Ra_{D_5}^{1/6}}{\left[1 + (0,559/Pr_{56})^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}$$
(5.4.20)

$$Ra_{D5} = \frac{g\beta(T_5 - T_6)D_5^3}{(\alpha_{56}\nu_{56})}$$
 (5.4.21)

$$\beta = \frac{1}{T_{56}}$$
 (5.4.22)

$$Pr_{56} = \frac{\nu_{56}}{\alpha_{56}} \qquad (5.4.23)$$

 Ra_{D5} : ο αριθμός Rayleigh υπολογισμένος με βάση τη διάμετρο D_5

D₅ : η εσωτερική διάμετρος του γυάλινου καλύμματος (m)

 $T_{5}: η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος (°C)$ $T_{6}: η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (°C)$ Pr₅₆: ο αριθμός Prandtl<math>β: συντελεστής θερμικής διαστολής (1/K) $T_{56}: η$ μέση θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος (T₅+T₆)/2 (°C) v: κινηματικό ιξώδες του αερίου στη μέση θερμοκρασία T₅₆ (m/s²)<math>a: θερμική διάχυση, k/(ρ ·Cp) (m/s²)g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81m/s²)

<u>Περίπτωση ανέμου (u ≥ 1 m/s):</u>

Στην περίπτωση που έχουμε άνεμο με ταχύτητα που ξεπερνά τα 0,1m/s ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τη σχέση Zhukauskas η οποία ισχύει για εξαναγκασμένη συναγωγή εξωτερικά ισόθερμου κυλίνδρου με άνεμο κάθετο στην επιφάνειά του.

$$N_{u_{D5}} = C \cdot Re_{D_5}{}^m \cdot Pr_6{}^n \cdot \left(\frac{Pr_6}{Pr_5}\right)^{1/4} \quad [2], [6] \quad (5.4.24)$$

Ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται από τη σχέση: $Re_{D5}=(u \cdot D_5)/v$ (5.4.25)

Οι παράμετροι C, m της παραπάνω σχέσης υπολογίζονται με βάση τον αριθμό Reds

σύμφωνα με τον πίνακα που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 (Πίνακας 4-2).

Η παράμετρος η υπολογίζεται με βάση τον αριθμό Pr₆:

- Για Pr ≤ 10 n=0,37
- Για Pr > 10 n=0,36

Η παραπάνω σχέση είναι αξιόπιστη για 0,7 < Pr_6 <500 και 1< Re_{D5} <10⁶. Όλες οι ιδιότητες του ρευστού που υπεισέρχονται στους τύπους υπολογίζονται στη θερμοκρασία T_6 εκτός από τον Pr_5 που υπολογίζεται στη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος T_5 .

Για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt της σχέσης 5.4.18 χρησιμοποιήθηκε εναλλακτικά η σχέση Churchill-Bernstein (σχέση 4.2.15).

Επίσης δοκιμάστηκε και η παρακάτω γραμμική σχέση που βρέθηκε σε πηγές για τη θερμική ανάλυση ηλιακών συλλεκτών cpc. Η σχέση αυτή υπολογίζει κατευθείαν το συντελεστή συναγωγής h₅₆ της σχέσης 5.4.18 συναρτήσει της ταχύτας του ανέμου :

$$h_{56} = 5,7 + 3,7 \cdot \upsilon$$
 [21] (5.4.26)

<u>Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από το γυάλινο κάλυμμα προς το περιβάλλον :</u>

$$\dot{q}_{57_{rad}} = \sigma \cdot D_5 \cdot \pi \cdot \varepsilon_5 \cdot (T_5^4 - T_7^4)$$
 [2],[6] (5.4.27)

σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann (5,67 × 10⁻⁸ W/m²K⁴) D_5 : η εξωτερική διάμετρος του γυάλινου καλύμματος (m) T_5 : η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος (K) T_7 : η θερμοκρασία του ουρανού (K) ε_5 : ο συντελεστής εκπομπής του γυάλινου καλύμματος ίσος με 0,86

Όσον αφορά τον ουρανό, ειδικά σε περιπτώσεις μη αιθριότητας, δε συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα.Ωστόσο, συνηθίζεται η μονελοποίηση του κατά αυτόν τον τρόπο που αντισταθμίζεται με παράλληλη χρήση συντελεστή όπως αναφέρουν οι Duffie & Beckman. Η θερμοκρασία ουρανού θα θεωρηθεί 6°C μικρότερη από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία όπως καθορίστηκε και σε άλλα μοντέλα θερμικών απωλειών ηλιακών συλλεκτών τύπου cpc[21].

Ο αντίστοιχος συντελεστής απωλειών ακτινοβολίας από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα δίνεται από τη σχέση :

$$h_{57_{rad}} = \sigma \varepsilon_5 \cdot (T_5 + T_7) \cdot (T_5^2 + T_7^2)$$
 [1] (5.4.28)

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται όλες οι θερμορροές και οι θερμοκρασίες στις επιφάνειες του δέκτη που περιγράφηκαν αναλυτικά παραπάνω.



Εικόνα 5-1: Σχηματική απεικόνιση των θερμορροών από και προς τις επιφάνειες του δέκτη στον πρότυπο ηλιακό συλλέκτη



Εικόνα 5-2 : Θερμοκρασίες στις επιφάνειες του δέκτη T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , ατμοσφαιρική θερμοκρασία T_6 , θερμοκρασία ουρανού T_7 , θερμοκρασία ρευστού T_{fluid}



Εικόνα 5-3 : Δίκτυο θερμορροών για το δέκτη του πρότυπου ηλιακού συλλέκη

5.5 Ισολογισμοί θερμικών ροών στο δέκτη

Αν σε κάθε επιφάνεια του δέκτη γίνει ένας ισολογισμός θερμορροών προκύπτει ένα σύστημα 4 εξισώσεων που παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω :

Από την ηλιακή ακτινοβολία q_{3sol} που απορροφάται από την εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή ένα τμήμα q_{23cond} μεταφέρεται δια αγωγής στην εσωτερική επιφάνεια του

μεταλλικού αγωγού ενώ οι θερμικές ροές q_{34conv} q_{34rad} μεταφέρονται ως απώλειες προς την εσωτερική επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος.

$$\dot{q}_{3_{sol}} = \dot{q}_{34_{conv}} + \dot{q}_{34_{rad}} + \dot{q}_{23_{cond}}$$
 (5.5.1)

Οι απώλειες συναγωγής q_{34conv} και ακτινοβολίας q_{34rad} από την εξωτερική επιφάνεια του μεταλλικού αγωγού προς το γυάλινο κάλυμμα καθώς και το τμήμα της ακτινοβολίας που απορροφάται από την εσωτερική επιφάνεια του γυάλινου καλύμματος q_{4sol} μεταφέρονται με αγωγή μέσω του γυάλινου καλύμματος :

$$\dot{q}_{34_{conv}} + \dot{q}_{34_{rad}} + \dot{q}_{4_{sol}} = \dot{q}_{45_{cond}}$$
 (5.5.2)

Οι προηγούμενες απώλειες q_{45cond} μαζί με το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που δε διαπερνά το γυάλινο κάλυμμα q_{5so} Ι μεταφέονται στο περιβάλλον ως απώλειες συναγωγής q_{56conv} και απώλειες ακτινοβολίας q_{57rad} :

$$\dot{q}_{45_{cond}} + \dot{q}_{5_{sol}} = \dot{q}_{56_{conv}} + \dot{q}_{57_{rad}}$$
 (5.5.3)

Το ποσό της ακτινοβολίας που μεταφέρεται με αγωγή στον εξωτερικό μεταλλικό αγωγό μεταφέρεται με συναγωγή στο νερό που κυκλοφορεί εντός του δακτυλίου :

$$\dot{q}_{23_{cond}} = \dot{q}_{12_{conv}}$$
 [2],[14] (5.5.4)

Στην παρούσα μοντελοποίηση θεωρούμε ότι δεν υπάρχει ροή θερμότητας από και προς το εσωτερικό κομμάτι του δέκτη. Έτσι, ο κλειστός εσωτερικός σιδηροσωλήνας με τον αέρα που περιέχει μπορεί να θεωρηθεί ως αδιαβατικό όριο που δε συναλλάσσει θερμότητα με το ρευστό. Η παραδοχή αυτή ισχύει περισσότερο σε ώρες κοντά στο ηλιακό μεσημέρι επειδή :

- ο εσωτερικός αγωγός και ο αέρας που περιέχει έχουν θερμανθεί αρκετά και δεν απορροφούν μεγάλο ποσό θερμότητας από το ρευστό
- η ακτινοβολία από τον ήλιο είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με αυτή που συναλλάσσεται μεταξύ του ρευστού και του εσωτερικού σιδηροσωλήνα

Αντίθετα, όσο απομακρυνόμαστε από το ηλιακό μεσημέρι η εγκυρότητα της παραδοχής του αδιαβατικού τοιχώματος μειώνεται. Συγκεκριμένα, τις πρωινές ώρες το εσωτερικό του δέκτη δεν έχει προλάβει να θερμανθεί και απορροφά θερμότητα από το ρευστό. Αντίστοιχα, τις απογευματινές ώρες ,μετά από κάποιο σημείο όπου η ακτινοβολία έχει ελαττωθεί αρκετά,το ρευστό θα απορροφά θερμότητα από τον εσωτερικό σιδηροσωλήνα και το θερμό αέρα στο εσωτερικό του.

5.6 Υπολογισμός θερμοκρασίας εξόδου του συλλέκτη

Οι ακτινικές θερμορροές θεωρούνται ομοιόμορφες και κάθετες στις επιφάνειες του δέκτη.Κατά μήκος του συλλέκτη η μεταβολή της θερμοκρασίας θεωρείται σχεδόν γραμμική και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σταθερός.

Ο ενεργειακός ισολογισμός για ολόκληρο το δέκτη στη μόνιμη κατάσταση εκφράζεται από τη σχέση:

$$\ddot{q}_{i}A_{i} + \acute{m}\left[\left(h + \frac{1}{2}v^{2}\right)_{in} - \left(h + \frac{1}{2}v^{2}\right)_{out}\right] = 0$$
 (5.6.1)

*q*_i: η ροή θερμότητας ανά μονάδα εμβαδού (W/m²)
 A : το εμβαδόν της περιφέρειας του απορροφητή (m²)
 m: η παροχή του ρευστού(kg/sec)
 h : η ενθαλπία του ρευστού (J/kg)
 v : η ταχύτητα του ρευστού (m/s)

Η ροή θερμότητας *q*_i είναι η θερμότητα ανά μονάδα εμβαδού (W/m²) που παραλαμβάνει το ρευστό δηλαδή η θερμότητα που μεταφέρεται σε αυτό με συναγωγή από το εσωτερικό τοίχωμα του απορροφητή ανά μονάδα μήκους (W/m). Επομένως, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί και ως :

$$\dot{q}_{12_{conv}}L + \dot{m} \cdot \left[\left(h + \frac{1}{2}v^2 \right)_{in} - \left(h + \frac{1}{2}v^2 \right)_{out} \right] = 0$$
 (5.6.2)

L : το μήκος του απορροφητή (m)

Θεωρώντας ότι η πυκνότητα του ρευστού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας (ασυμπίεστο ρευστό), η μεταβολή της ενθαλπίας κατά μήκος του δέκτη μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\Delta h \approx c_{ave} \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad \textbf{(5.6.3)}$$

 C_{ave} : η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού και υπολογίζεται με βάση τη μέση θερμοκρασία ($T_{in}+T_{out}$)/2

Θεωρώντας σταθερή παροχή, η μεταβολή της ταχύτητας από την είσοδο στην έξοδο του ρευστού οφείλεται στη μεταβολή της πυκνότητας. Επομένως οι ταχύτητες v_{in}, v_{out} υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$v_{in} = \frac{\dot{m}}{\rho_{in}A_i}$$
 (5.6.4)

$$v_{out} = \frac{\dot{m}}{\rho_{out}A_i} \qquad \textbf{(5.6.5)}$$

Λύνοντας τη σχέση 5.6.2 ως προς Tout υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου από το συλλέκτη :

$$T_{out} = T_{in} + \frac{(v_{in}^2 - v_{out}^2)}{2C_{average}} + \frac{\dot{q}_{12_{conv}} \cdot L}{\dot{m} \cdot C_{average}}$$
(5.6.6)

Διπλωματική εργασία
<u>Πτώση πίεσης :</u>

Οι πτώση πίεσης υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\Delta p = \frac{f \cdot L \cdot (\dot{m}/A_h)^2}{2 D_2 \cdot \rho_{ave}} \qquad \mbox{(5.6.7)} \label{eq:deltapprox}$$

Όπου ρ_{ανe} η πυκνότητα του νερού στη μέση θερμοκρασία Τ₁

Ο συντελεστής τριβής f υπολογίζεται για στρωτή ροή από τη σχέση :

$$f = \frac{64}{Re_{D2}}$$
 (5.6.8)

Και για τυρβώδη ροή από τη σχέση :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/D_2}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}_{D2}\sqrt{f}} \right)$$
 με επαναληπτική διαδικασία [2] (5.6.9)

5.7 Εκτίμηση της απόδοσης του συλλέκτη

Ο οπτικός βαθμός απόδοσης για τον πρότυπο συλλέκτη ορίζεται ως :

$$\eta_o = K_{\tau\alpha} \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{absorber} \cdot \sum_{1}^{\infty} \rho_{glass}^{N} \cdot \rho_{absorber}^{N} \cdot \rho^{} \cdot p \cdot \frac{G_{total}}{G} \quad [21] \quad (5.7.1)$$

και ο θερμικός βαθμός απόδοσης αντίστοιχα :

$$\eta = \eta_o - \frac{U_L}{G_{total} \cdot C} (T_3 - T_6)$$
 (5.7.2)

όπου :

G_{total} : η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου που εισέρχεται από το άνοιγμα του συλλέκτη

C: ο λόγος συγκέντρωσης της ακτινοβολίας στον πρότυπο συλλέκτη

Τ3: η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας

T₆ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

U_L : ο συντελεστής θερμικών απωλειών από την εξωτερική επιφάνεια του δέκτη προς το περιβάλλον

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a}) \cdot A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c,c}}\right]^{-1} [1]$$
 (5.7.3)

αν συμπεριληφθούν και οι απώλειες συναγωγής από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα ο παραπάνω τύπος για την τρέχουσα μοντελοποίηση γίνεται :

$$U_L = \left[\frac{A_r}{\left(h_{56_{conv}} + h_{57_{rad}}\right) \cdot A_c} + \frac{1}{h_{34_{conv}} + h_{34_{rad}}}\right]^{-1}$$
(5.7.4)

όπου :

 $h_{56_{conv}}$: ο συντελεστής απωλειών συναγωγής από το γυάλινο κάλυμμα στο περιβάλλον (W/m²·K) που υπολογίζεται από τη σχέση (5.4.19)

 $h_{57_{rad}}$: ο συντελεστής απωλειών ακτινοβολίας από το γυάλινο κάλυμμα στο περιβάλλον (W/m²·K) που υπολογίζεται από τη σχέση (5.4.28)

 $h_{34_{conv}}$: ο συντελεστής απωλειών συναγωγής από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα (W/m²·K) που υπολογίζεται από τη σχέση (5.4.11)

 $h_{34_{rad}}$: ο συντελεστής απωλειών ακτινοβολίας από τον απορροφητή προς το γυάλινο κάλυμμα (W/m²·K) που υπολογίζεται από τη σχέση (5.4.16)

 A_r : το εμβαδόν της εξωτερικής επιφάνειας του απορροφητή A_r =π·D₃·L (m²)

 A_c : το εμβαδόν της εξωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος A_c =π·D₅·L (m²)

(όπου L το μήκος του δέκτη)

<u>Ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας U₀:</u>

Ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας U_o από το ρευστό μέχρι το περιβάλλον εκφράζεται ως :

$$U_o = \left[\frac{D_2}{h_{12_{conv}} \cdot D_3} + \frac{D_2 \cdot \ln(D_2/D_3)}{2 \cdot k} + \frac{1}{U_L}\right]^{-1}$$
(5.7.5)

Παράγων απόδοσης:

$$F' = \frac{U_o}{U_L}$$
 (5.7.6)

Παράγων θερμικής απολαβής:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L} \cdot \left[1 - e^{-(A_c \cdot U_L \cdot F')/\dot{m}C_p} \right]$$
(5.7.7)

 \dot{m} : η παροχή μάζας στο συλλέκτη (kg/s)

 C_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού στη μέση θερμοκρασία (T₁+T_{out})/2 (J/kg·K)

<u>Παράγων ροής :</u>

$$F'' = \frac{F_R}{F'}$$
 (5.7.8)

<u>Αποδιδόμενη θερμική ισχύς :</u>

Η αποδιδόμενη θερμική ισχύς ανά μονάδα μήκους του συλλέκτη $\dot{q}_{12_{conv}}$ δίνεται από τη σχέση 5.4.1 ενώ η ισχύς σε W υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας με το μήκος του συλλέκτη :

 $Q_{12_{conv}} = \dot{q}_{12_{conv}} \cdot tube_length$ (5.7.9)

Πίνακας 5-2 : Σύνοψη παραδοχών και απλοποιήσεων που έγιναν στην παρούσα προσομοίωση του πρότυπου ηλιακού συλλέκτη

| Παραδοχές και απλοποιήσεις της μοντελοποίησης | | | |
|---|--|--|--|
| ġ₁₂ _{conv} | Μόνιμη,ασυμπίεστη, συνεκτική ροή εντός του δακτυλίου,πλήρως ανεπτυγμένες συνθήκες της ροής Ομοιόμορφη και μονοδιάστατη ροή θερμότητας κατά την ακτινική διεύθυνση Οι ιδιότητες k₁,ρ₁,ν₁,μ₁,Cp₁ έχουν υπολογιστεί στη μέση θερμοκρασία του ρευστού (T₁₊T_{out})/2 Ο κλειστός εσωτερικός αγωγός του δακτυλίου θεωρείται ότι δε συναλλάσσει θερμότητα με το ρευστό (παραδοχή αδιαβατικού τοιχώματος) | | |
| ॑q23 _{cond} | Γραμμική και συνεχής θερμορροή κατά την ακτινική κατεύθυνση Αμελητέα αγωγή περιφερειακά και κατά μήκος του δέκτη Η αγωγιμότητα της επιλεκτικής επίστρωσης αμελείται | | |
| ġ _{34conv} | Σταθερός συντελεστής συναγωγής Η θερμότητα συναλλάσσεται μεταξύ οριζόντιων , ομόκεντρων κυλίνδρων μεγάλου μήκους | | |
| <i>q</i> _{34rad} | Η θερμότητα συναλλάσσεται μεταξύ οριζόντιων , ομόκεντρων κυλίνδρων μεγάλου μήκους Οι δύο επιφάνειες που συναλλάσουν θερμότητα θεωρούνται φαιές και διάχυτες (βλέπε ενότητα 4.3.2) Το γυάλινο κάλυμμα είναι αδιαπέρατο από την υπέρυθρη ακτινοβολία | | |

| Παραδοχές και απλοποιήσεις της μοντελοποίησης | | | | |
|---|--|--|--|--|
| ॑q₄ _{5cond} | Γραμμική και συνεχής θερμορροή κατά την ακτινική κατεύθυνση Αμελητέα αγωγή περιφερειακά και κατά μήκος του δέκτη | | | |
| ġ₅ _{conv} | Ο άνεμος έχει κατεύθυνση κάθετη στον άξονα του δέκτη Η εξωτερική επιφένεια του γυάλινου καλύμματος είναι οριζόντιος κύλινδρος μεγάλου μήκους | | | |
| q _{57<i>rad</i>} | Το γυάλινο κάλυμμα θεωρείται ως φαιό και διάχυτο σώμα (βλέπε ενότητα 4.3.2) Η ατμόσφαιρα θεωρείται ως μέλαν σώμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία 6°C χαμηλότερα από την ατμοσφαιρική (βλέπε ενότητα 4.3.4) | | | |
| ανακλαστήρας | Οι θερμικές απώλειες από τον ανακλαστήρα θεωρούνται αμελητέες | | | |
| Οπτικός βαθμός απόδοσης | Οι οπτικές ιδιότητες του συλλέκτη είναι ανεξάρτητες της θερμοκρασίας Ο τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης Κ_{τα} του συλλέκτη δε λαμβάνεται υπ' όψη Οι οπτικές απώλειες από την άμεση ακτινοβολία που δε φτάνει στο ένα άκρο δέκτη end losses δε λαμβάνονται υπ' όψη Οι οπτικές ιδιότητες είναι ομοιόμορφες περιφερειακά και κατά μήκος του συλλέκτη Η τιμή της ημιγωνίας αποδοχής <i>θ_c</i> και του μέσου αριθμού ανακλάσεων <i>n</i> αποτελούν εκτιμήσεις (βλέπε ενότητα 3.3.3) Ο μέσος αριθμός ανακλάσεων <i>n</i> θεωρείται σταθερός και ανεξάρτητος από τη γωνία και το σημείο πρόσπτωσης της ακτινοβολίας Αγνοούνται τα γεωμετρικά σφάλματα της επιφάνειας του συγκεντρωτή και ευθυγράμμισης του δέκτη και έτσι λαμβάνεται ο θεωρητικός μέγιστος λόγος συγκέντρωσης C | | | |
| | Θεωρούνται θερμορροές | | | |
| | Ομοιόμορφη περιφερειακά και κατά μήκος του δέκτη Η σκίαση από τα στηρίγματα του συλλέκτη αμελείται | | | |

| Παραδο | οχές και απλοποιήσεις της μοντελοποίησης |
|--|--|
| | Οι ιδιότητες της ακτινοβολίας α,ρ,ε για το γυαλί και τον |
| $\alpha_{\alpha b sorber}, \rho_{\alpha b sorber}, \epsilon_{\alpha b sorber}$ | απορροφητή θεωρούνται ανεξάρτητες της θερμοκρασίας και |
| $\alpha_{glass}, \tau_{glass}, \rho_{glass}, \epsilon_{glass}$ | του μήκους κύματος της ακτινοβολίας |
| | Οι διαφοροποίηση των ιδιοτήτων τ,α του γυαλιού σε σχέση |
| | με τη γωνία πρόσπτωσης (συντελεστής Κ _{τα}) δε λαμβάνεται |
| | υπ' όψη |
| (όλες οι θερμο | ρροές θεωρούνται κάθετες στις επιφάνειες του συλλέκτη) |

5.8 Μέθοδος επίλυσης των εξισώσεων

Στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρούμε δεδομένα την παροχή και τη θερμοκρασία εισόδου στο συλλέκτη. Από τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω προκύπτει ένα σύστημα 5 εξισώσεων που αποτελείται από τους 4 ισολογισμούς των θερμορροών (εξισώσεις 5.5.1 έως 5.5.4) και την εξίσωση υπολογισμού της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από το συλλέκτη (εξίσωση 5.6.6). Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων αυτών με επαναληπτική διαδικασία λαμβάνονται οι 5 αγνώστοι που είναι :

- Η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού
- Η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του απορροφητή Τ₂
- Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του απορροφητή T_3
- Η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος Τ₄
- Η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος T_{5}

Η επίλυση ξεκινά με κάποιες αρχικές τιμές για τις θερμοκρασίες $T_2, T_3, T_4, T_5, T_{out}$. Μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας οι τιμές αυτές αλλάζουν συνεχώς έως ότου επαληθεύουν τις 5 εξισώσεις με κάποιο μικρό αριθμητικό σφάλμα.

5.9 Μέθοδος σύγκλισης

Για την επίλυση του συστήματος των 5 εξισώσεων που περιγράφηκαν παραπάνω αναζητήθηκε μια μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης για συστήματα μη-γραμμικών εξισώσεων. Η τροποποιημένη Newton Raphson είναι μία αρκετά διαδεδομένη μέθοδος και όπως έχει αποδειχτεί συγκλίνει σχεδόν πάντα ανεξάρτητα από την αρχική τιμή.

Στην απλή μέθοδο Newton- Raphson ο αναδρομικός τύπος για τη συνάρτηση f(x) = 0 είναι :

$$x_{new} = x_{m-1} - \frac{f(x_{old})}{f'(x_{old})} \qquad \qquad x_{new} = x_{old} + \delta x$$

όπου το δχ αμελώντας τους όρους δεύτερης τάξης και άνω του αναπτύγματος Taylor είναι :

$$\delta x \cong -f(x_{old})/f'(x_{old})$$

Επειδή, στην περίπτωση μας η παράγωγος της συνάρτησης δεν είναι δυνατόν ναβρεθεί αναλυτικά, υπολογίζεται με αριθμητικές μεθόδους. Αν το διάστημα δχ είναι σχετικά μικρό η παράγωγος της συνάρτησης f μπορεί να υπολογιστεί με σφάλμα δεύτερης τάξης 0(δx) από τη μέθοδο της πρόσω παραγώγισης :

$$f'(x) = \frac{f(x_{new}) - f(x_{old})}{\delta x} - \mathbf{0}(\delta x)$$

Πολλές φορές όμως η μέθοδος Newton-Raphson έχει την τάση να απομακρύνεται από τη λύση αν η αρχική τιμή δε βρίσκεται αρκετά κοντά στη ρίζα. Αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με κατάλληλη επιλογή του δx. Το κριτήριο για την επιλογή του δx είναι να μειώνεται η συνάρτηση $|F|^2 = F \cdot F$ ή κατά τον ίδιο τρόπο τη συνάρτηση $f = \frac{1}{2}F \cdot F$.

Η τροποποιημένη Newton Raphson δε μετακινείται κατά δχ αλλά κατά μήκος της κατεύθυνσης του βήματς χωρίς να κάνει ολόκληρη τη «διαδρομή» :

$$x_{new} = x_{old} + \lambda \cdot \delta x$$
 όπου $0 < \lambda \le 1$

Ο στόχος είναι να βρεθεί ένα λ ώστε το f(x_{old} +λ·δx) να έχει μειωθεί ικανοποιητικά. Αρχικά δοκιμάζεται η τιμή λ=1 (δηλαδή ολόκληρο το βήμα Newton) .Αν τυχαίνει να είμαστε κοντά στη ρίζα αυτό θα οδηγήσει σε τετραγωνική σύγκλιση. Αν όμως η f(x_{new}) που προκύπτει δεν ικανοποιεί τα κριτήρια ελαχιστοποίησης της f η μέθδος δοκιμάζει μικρότερο λ. Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για να αποφασιστεί αν η συνάρτηση f ελαχιστοποιείται είναι :

$$f(x_{new}) \le f(x_{old}) + a\nabla f(x_{new} - x_{old})$$

Για τον υπολογισμό του λ χρησιμοποιούνται οι σχέσεις :

$$g(\lambda) \equiv f(x_{old} + \lambda \cdot p)$$
$$g'(\lambda) = \nabla \cdot f \cdot p$$

Οι αρχικές τιμές g(0) και g'(0) και g(1) (για το πρώτο βήμα είναι πάντα λ =1) είναι διαθέσιμες άρα η συνάρτηση g(λ) γίνεται :

$$g(\lambda) \approx [g(1) - g(0) - g'(0)]\lambda^2 + g'(0)\lambda + g(0)$$

Παραγωγίζοντας τη g(λ) προκύπτει το λ που την ελαχιστοποιεί :

$$= -\frac{g'(0)}{2[g(1) - g(0) - g'(0)]}$$

Από το δεύτερο λ και μετά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κυβική συνάρτηση χρησιμοποιώντας τις δύο προηγούμενες τιμές λ_1 και λ_2 :

$$g(\lambda) = \alpha \lambda^3 + b\lambda^2 + g'(0)\lambda + g(0)$$
$$\begin{bmatrix} \alpha \\ b \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \begin{bmatrix} 1/\lambda_1^2 & -1/\lambda_2^2 \\ -\lambda_2/\lambda_1^2 & \lambda_1/\lambda_2^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g(\lambda_1) - g'(0)\lambda_1 - g(0) \\ g(\lambda_2) - g'(0)\lambda_2 - g(0) \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 3ag'(0)}}{3a}$$

To λ βρίσκεται μεταξύ των $λ_{max}$ =0.5 $λ_1$ και $λ_{min}$ =0.1 $λ_1$ [23]

Η τροποποιημένη μέθοδος Newton Raphson δίνεται υπό μορφή κώδικα σε γλώσσα fortran 77 στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ ως υπορουτίνα newt. Η υπορουτίνα αυτή περιλαμβάνει και άλλες υπορουτίνες που εκτελούν τους επιμέρους υπολογισμούς οι οποίες όμως δεν απαιτούν καμία τροποποίηση. Για τη σύνδεση της υπορουτίνας newt με τον υπόλοιπο κώδικα δημιουργήθηκαν:

- a) το διάνυσμα c(30) που περιλαμβάνει όλα τα ορίσματα που εισέρχονται /εξέρχονται στη/ από την υπορουτίνα newt
- **b)** η υπορουτίνα-συνάρτηση funcv η οποία περιλαμβάνει :
- όλες τις προς επίλυση εξισώσεις ως στοιχεία του διανύσματος fvec (5) όπως φαίνεται παρακάτω :

fvec(1)=q23cond-q12conv

fvec(2)=q3sol-q23cond-q34rad-q34conv

fvec(3)=q4sol+q34rad+q34conv-q45cond

fvec(4)=q45cond+q5sol-q56conv-q57rad

fvec(5)=Tout_C-Temp_fluid_in_C-q12conv*coll_length/(w_mass_flow*heat_cp_fluid_av)-

(velocity_fluid_in**2-velocity_fluid_out**2)/(2.d0*heat_cp_fluid_av)

τον αναλυτικό υπολογισμό των θερμορροών [†]_{12conv}, [†]_{23cond}, [†]_{34conv}, [†]_{34rad}, [†]_{45cond}, [†]_{56conv}, [†]_{57rad} που εμπεριέχουν οι εξισώσεις fvec. (οι θερμορροές [†]_{3sol}, [†]_{4sol}, [†]_{5sol} εισέρχονται μέσω του διανύσματος c(30))

Η funcv είναι η ίδια και για τον κώδικα προσομοίωσης του συλλέκτη (COLLECTOR_CODE_daily.for) και για τον κώδικα προρομοίωσης του συστήματος των συλλεκτών (SYSTEM_CODE_daily.for) και παρουσιάζεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση του κώδικα προσομοίωσης για τον πρότυπο ηλιακό συλλέκτη (COLLECTOR_CODE_daily.for). Ο κώδικας αυτός δίνεται στο Παράρτημα Α, ενώ στη συνέχεια δίνονται οδηγίες έτσι ώστε να διευκολυνθεί ο αναγνώστης/χρήστης στη χρήση του κώδικα.

Οδηγίες χρήσης του κώδικα :

Το τρέξιμο του κώδικα είναι φιλικό προς το χρήστη και απαιτεί στοιχειώδη πληροφορία εισαγωγής. Συγκεκριμένα, απαιτούνται οι ακόλουθες δύο πληροφορίες:

- <u>Εισαγωγή μήνα και ημέρα</u>

Στην οθόνη εμφανίζεται το μήνυμα: 'give month and number n for day'. Εδώ ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει συγκεκριμένο μήνα με την κατάληξη .txt και δίπλα τον αντίστοιχο αριθμό n για τη μέση ημέρα του μήνα (Πίνακας 2-2). Για παράδειγμα, υποθέτουμε πως ο χρήστης θέλει να τρέξει τον κώδικα για τη μέση ημέρα του μήνα Ιουνίου. Στην περίπτωση αυτή, από τον πίνακα 2.2 βλέπουμε πως η μέση μέρα του μήνα Ιουνίου είναι η 162ⁿ του έτους, οπότε ο χρήστης πληκτρολογεί: june.txt, 162. Έτσι, ο κώδικας διαβάζει τα μετεωρολογικά δεδομένα από το αντίστοιχο αρχείο του pvgis στο οποίο έχει δοθεί η ονομασία του συγκεκριμένου μήνα.

- <u>Εισαγωγή ταχύτητας ανέμου</u>

Στην οθόνη εμφανίζεται το μήνυμα: "give windspeed (m/s)" ο χρήστης εισάγει και την ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποθηκεύονται σε 4 αρχεία. Στο πρώτο αρχείο (COLLECTOR_CODE_daily_1.txt) τυπώνονται με τη σειρά τα δεδομένα από τον υπολογισμό των ακτινοβολιών που απορροφούνται από τις επιφάνειες του δέκτη q3sol, q4sol, q5sol. Στο δεύτερο αρχείο (COLLECTOR_CODE_daily_2.txt) τυπώνονται όλοι οι υπολογισμοί που γίνονται σε κάθε βήμα της μεθόδου Newton-Raphson. Στο τρίτο αρχείο (COLLECTOR_CODE_daily_3.txt) τυπώνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά από τη σύγκλιση της μεθόδου. Στο τέταρτο αρχείο (COLLECTOR_CODE_daily_4.txt) τυπώνονται σε στήλες η ώρα, τα λεπτά, ο βαθμός απόδοσης, η θερμοκρασία εξόδου του νερού και ορισμένες θερμορροές καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας. Με βάση τις στήλες αυτές δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Αποτελέσματα προσομοίωσης :

Από τα αρχεία που τυπώνει ο κώδικας COLLECTOR_CODE_daily.for προέκυψαν τα δεδομένα και τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις παρακάτω ενότητες. Σημειώνεται πως τα αποτελέσματα αυτά ισχύουν για σταθερή θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη ίση με 70° C και παροχή νερού 7lt/min. Αναλυτικότερα :

- Στη ενότητα 6.2 γίνεται μία πιο λεπτομερής έκθεση των αποτελεσμάτων του κώδικα αλλά και μία διερεύνηση ορισμένων από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συλλέκτη. Ακόμα, γίνονται ορισμένες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε διαφορετικές σχέσεις υπολογισμού των θερμορροών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών επιλέχθηκε ο μήνας Ιούνιος.
- Στις ενότητες 6.3, 6.4, 6.5 παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων η αποδιδόμενη ισχύς, ο βαθμός απόδοσης και η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα διαγράμματα αυτά αναφέρονται στη μέση ημέρα κάθε μήνα του έτους.

6.2 Διερεύνηση/επεξήγηση αποτελεσμάτων

Αναλυτικά αποτελέσματα του κώδικα :

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, στην ενότητα αυτή γίνεται μια αναλυτική έκθεση των δεδομένων που υπολογίζονται από τον κώδικα. Επειδή ο όγκος των δεδομένων αυτών είναι αρκετά μεγάλος η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων περιορίστηκε στο μήνα Ιούνιο. Για λόγους σύγκρισης η ίδια σειρά δεδομένων παρουσιάζεται για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές (12:07μμ, 13:52μμ και 16:07μμ) της μέσης ημέρας του Ιουνίου. Τα δεδομένα αυτά συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Όπως φαίνεται, σε κάθε ώρα αντιστοιχεί μια τιμή της ολικής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (gtotal) η οποία αποτελείται από την άμεση (gbeam) και τη διάχυτη (gdiff) συνιστώσα. Η άμεση ακτινοβολία που μπορεί να αξιοποιηθεί από το συλλέκτη (gb_cpc) σε σχέση με αυτή που εισέρχεται από το άνοιγμα του συλλέκτη (gbeam) υπολογίζεται με βάση τη θέση, την κλίση, τη γωνία αποδοχής, το ποσοστό αποκοπής των άκρων του ανακλαστήρα του συλλέκτη αλλά και από την ώρα και την ημέρα του έτους. Η συνάρτηση F ,που διαμορφώνεται από όλα τα παραπάνω στοιχεία, πολλαπλασιάζεται με την άμεση συνιστώσα(gbeam). Το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας (gdiff_cpc) και της διάχυτα ανακλώμενης από το έδαφος (ggrdiff_cpc) υπολογίζονται με βάση την κλίση, το λόγο συγκέντρωσης και τη γωνία αποδοχής του συλλέκτη. Το σύνολο άμεσης, διάχυτης και διάχυτα ανακλώμενης ακτινοβολίας που μπορεί να αξιοποιηθεί από το συλλέκτη (g_cpc) πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή ανάκλασης του συγκεντρωτή και το συντελεστή απωλειών διακένου για να δώσουν τελικά την ακτινοβολία που φτάνει στο δέκτη (s).

Η τιμή αυτή πολλαπλασιαζόμενη με τη πλάτος του ανοίγματος του συλλέκτη δίνει την ακτινοβολία ανα μονάδα μήκους (qin)και πολλαπλασιαζόμενη με την επιφάνεια ανοίγματος δίνει την ακτινοβολία σε Watt (Q_in)

| Στοιχεία από το PVGIS | | | |
|--|-------------------|----------------|--------|
| ihours (h) | 12 | 13 | 16 |
| minutes (min) | 7 | 52 | 7 |
| gtotal (W/m ²) | 926 | 827 | 424 |
| gbeam(W/m ²) | 759 | 665 | 301 |
| gdiff (W/m ²) | 167 | 162 | 123 |
| Temp_amb_C (°C) | 26,5 | 27 | 26,7 |
| | | | |
| Ταχύτητα ανέμου | | | |
| wind_speed (m/s) | 20 | 20 | 20 |
| | | | |
| | Παροχή νεροι | j | |
| system_flow_lt_min (lt/min) | 7 | 7 | 7 |
| | | | |
| θερμοκρα | σία εισόδου νεροι | ύ στο συλλέκτη | |
| Temp_fluid_in_C (°C) | 70 | 70 | 70 |
| Ακτινοβολία που φτάνει στο δέκτη σε σχέση με αυτή που εισέρχεται από την | | | |
| επιφάνε | ια ανοίγματος τοι | υ ανοίγματος | |
| F | 1 | 0,49 | 0,31 |
| gb_cpc (W/m ²) | 759 | 327,67 | 93,70 |
| gdiff_cpc (W/m ²) | 165,51 | 160,56 | 121,91 |
| ggrdiff_cpc (W/m ²) | 38,57 | 34,45 | 17,66 |
| g_cpc (W/m ²) | 963,09 | 522,69 | 233,26 |
| s (W/m²) | 794,04 | 430,95 | 192,32 |
| qin (W/m) | 397,02 | 215,47 | 96,16 |
| Q_ in(W) | 742,43 | 402,94 | 179,82 |

| Πίνακας 6-1 : Αναλυτικά αποτελέσματα από τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που φτάνει στο δέκ | τη |
|---|----|
| του πρότυπου ηλιακού συλλέκτη με τον κώδικα COLLECTOR_CODE_daily.for | |

Στη συνέχεια δίνονται τα υπόλοιπα αποτελέσματα που έδωσε η επίλυση των 5 μη-γραμμικών εξισώσεων με την τροποποιημένη επαναληπτική μέθοδο newton-raphson. Όπως φαίνεται στο τέλος του πίνακα τα σφάλματα προέκυψαν αρκετά μικρά που σημαίνει ικανοποιητική ακρίβεια των υπολογισμένων τιμών.

| Πίνακας 6-2 : Αναλυτικά αποτελέσματα από τον υπολογισμό της απόδοσης του πρότυπου ηλιακού |
|---|
| συλλέκτη με τον κώδικα COLLECTOR_CODE_daily.for |

| Ώρα | 12 :07 | 13 : 52 | 16 :07 |
|---|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Ποσά θερμότη | τας που συναλλό | ισουν οι επιφάνειες τ | ου δέκτη |
| Θερμότητα που μεταδίδεται με συναγωγή από τον απορροφητή στο ρευστό | | | |
| Q_12conv (W) | 595,19 | 156,85 | 50,25 |
| Θερμότητα που μεταδ | ίδεται με αγωγή με | εταξύ των τοιχωμάτων το | ου απορροφητή |
| Q_23cond (W) | 595,19 | 156,85 | 50,25 |
| Θερμότητα που μεταδίδετα | αι με συναγωγή απο | ό τον απορροφητή προς | το γυάλινο κάλυμμα |
| Q_34conv (W) | 68,47 | 33,14 | 31,27 |
| Θερμότητα που μεταδίδετα | ι με ακτινοβολία ατ | τό τον απορροφητή προφ | ς το γυάλινο κάλυμμα |
| Q_34rad (W) | 14,12 | 6,73 | 6,27 |
| Θερμότητα που μεταδίδετο | αι με αγωγή μεταξύ | των τοιχωμάτων του γι | υάλινου καλύμματος |
| Q_45cond (W) | 29,92 | 40,07 | 37,63 |
| Θερμότητα που μεταδίδ | δεται με συναγωγή | από το γυάλινο κάλυμμα | α στο περιβάλλον |
| Q_56conv (W) | 65,44 | 27,47 | 23,08 |
| Θερμότητα που μεταδίδ | εται με ακτινοβολία | α από το γυάλινο κάλυμμ | ια στο περιβάλλον |
| Q_57rad (W) | 32,71 | 16,91 | 16,47 |
| | | | |
| Ποσά θερμότητας | , που απορροφών | νται από τις επιφάνει | ες του δέκτη |
| Θερμότητα που απορρο | φάται από την εξωι | τερική επιφάνεια του γυα | άλινου καλύμμτος |
| Q_5sol (W) | 14,85 | 8,06 | 3,60 |
| Θερμότητα που απορρο | φάται από την εσω | τερική επιφάνεια του γυ | άλινου καλύμμτος |
| Q_4sol (W) | 0,71 | 0,39 | 0,17 |
| Θερμότητα που απο | ρροφάται από την ε | εξωτερική επιφάνεια τοι | ν απορροφητή |
| Q_3sol (W) | 677,77 | 367,85 | 164,16 |
| | | | |
| O | ερμοκρασίες επιφ | φανειών του δέκτη | |
| Θερμοκρασ | σία της εσωτερικής | επιφάνειας του απορρο | φητή |
| Temp_abs_in_C (°C) | 78,67 | 74,27 | 71,37 |
| Θερμοκραά | σία της εξωτερικής | επιφάνειας του απορροα | ϸητή |
| Temp_abs_out_C (°C) | 78,67 | 74,27 | 71,37 |
| Θερμοκρασία τι | ης εσωτερικής επιφ | άνειας του γυάλινου καλ | λύμματος |
| Temp env in C(°C) | 27,88 | 28,10 | 27,64 |
| Θερμοκρασία τ | ης εξωτερικής επιφ | άνειας του γυάλινου καλ | νύμματος |
| Temp env out C(°C) | 27,74 | 27,98 | 27,54 |
| | , , , , , , , , , , , , , , , , , , , | , | , |
| Πτώση πίεσης στον αγωγό όπου ρέει το νερό | | | |
| friction_coef | 0,23 | 0,23 | 0,24 |
| dpressure_Pascal (Pascal) | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| | - | | |
| Συντελεστής θερμικών απωλειών από τον απορροφητή προς το περιβάλλον | | | |
| UL (W/m ² K) | 2,26 | 2,24 | 2,23 |
| <u> </u> | | | |

| Ώρα | 12 :07 | 13 : 52 | 16 :07 | | |
|---|--|-----------------------|-----------|--|--|
| Συντελεστής | Συντελεστής θερμικών απωλειών από το ρευστό στο περιβάλλον | | | | |
| Uo (W/m²K) | 2,23 | 2,21 | 2,20 | | |
| | | | | | |
| | Παράγων απόδοση | ς ηλιακού συλλέκτη | | | |
| F_eff | 0,987 | 0,987 | 0,987 | | |
| | · | · | | | |
| Παρ | άγων θερμικής απολ | αβής ηλιακού συλλέκ | τη | | |
| FR | 0,975 | 0,975 | 0,976 | | |
| | | | | | |
| | Παράγων ροής η | λιακού συλλέκτη | | | |
| F_flow | 0,988 | 0,988 | 0,988 | | |
| | | | | | |
| θερμ | ιοκρασία εξόδου τοι | ν νερού από το συλλέκ | τη | | |
| T_fluid_out_C(° C) | 77,48 | 73,69 | 71,18 | | |
| | | | | | |
| Στιγμιαί | ος οπτικός βαθμός ο | ιπόδοσης ηλιακού συλ | λέκτη | | |
| eff_optical | 0,86 | 0,52 | 0,45 | | |
| | | | | | |
| Στιγμιαία | ος θερμικός βαθμός 🤅 | απόδοσης ηλιακού συ | λλέκτη | | |
| eff_thermal | 0,73 | 0,40 | 0,22 | | |
| | | | | | |
| Σφάλματα μεθόδου σύγκλισης Newton_Raphson | | | | | |
| error1 | -3,53E-10 | -6,12E-12 | 9,65E-10 | | |
| error2 | 3,54E-10 | 7,16E-12 | -9,63E-10 | | |
| error3 | -4,69E-13 | 3,88E-13 | -2,16E-12 | | |
| error4 | -3,19E-11 | -2,90E-11 | -3,83E-11 | | |
| error5 | 8 77F-15 | 7 51F-15 | 3 74F-14 | | |

• Επίδραση των ορίων αποδοχής στην απόδοση του συλλέκτη

Η γωνιακή αποδοχή εκφράζεται κατά κύριο λόγο από τη συνάρτηση F. Η συνάρτηση αυτή καθορίζει τα όρια των γωνιών πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας που φτάνει στο δέκτη ενός σύνθετου παραβολικού συλλέκτη. Η συνάρτηση F (όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 1) επηρεάζεται και απο την αποκοπή των άκρων του συγκεντρωτή που έχει γίνει σε σημαντικό βαθμό στον υπό μελέτη συλλέκτη. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η γωνιακή αποδοχή και ο οπτικός βαθμός απόδοσης του πρότυπου συλλέκτη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το διάγραμμα έχει αναμενόμενη μορφή ,παρόμοια με αυτή που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.4.3(Διάγραμμα 3-3).



Διάγραμμα 6-1 : Γωνιακή αποδοχή και οπτικός βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου

Όπως φαίνεται, η συνάρτηση F λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της (ίση με τη μονάδα) σε ώρες κοντά στο ηλιακό μεσημέρι όπου η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας είναι μικρότερη από τη γωνία αποδοχής (40°). Αυτό σημαίνει ότι όλη η εισερχόμενη άμεση ακτινοβολία φτάνει στο δέκτη. Όμως, όταν η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας ξεπεράσει τη γωνία αποδοχής η συνάρτηση F και κατ'επέκταση ο οπτικός βαθμός απόδοσης μειώνεται απότομα περίπου στο μισό. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι στην παρούσα προσομοίωση δε λαμβάνονται υπ' όψη ο τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης ΙΑΜ και οι απώλειες end_losses.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η θερμότητα που προσδίδεται στο ρευστό (Q12conv) σε σχέση με την ακτινοβολία που εισέρχεται από το άνοιγμα του συλλέκτη (Qtotal) κατά τη διάρκεια της ίδιας ημέρας. Όπως φαίνεται, η απότομη μεταβολή του οπτικού βαθμού απόδοσης χαρακτηρίζει γενικότερα την απόδοση των συλλεκτών cpc.



Διάγραμμα 6-2 : Θερμότητα που προσδίδεται στο ρευστό σε σχέση με την ακτινοβολία που εισέρχεται από το άνοιγμα του συλλέκτη

Επίδραση της μειωμένης πίεσης μεταξύ απορροφητή και καλύμματος στην απόδοση του συλλέκτη :

Ο κατασκευαστής του πρότυπου αναφέρει ότι μεταξύ απορροφητή και γυάλινου καλύμματος έχει αφαιρεθεί ο αέρας έτσι ώστε να επικρατεί χαμηλή πίεση 10⁻⁴bar=0,075 torr. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση των απωλειών συναγωγής οι οποίες σε συνδυασμό με τον πολύ χαμηλό συντελεστή εκπομπής του απορροφητή 3,5% οδηγούν σε σημαντικά μειωμένες θερμικές απώλειες. Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται μια σύγκριση του βαθμού απόδοσης του πρότυπου συλλέκτη με την πίεση που δίνει ο κατασκευαστής και με κανονική πίεση (αν δεν είχε αφαιρεθεί ο αέρας) μεταξύ απορροφητή και γυάλινου.



Διάγραμμα 6-3 :Βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με το βαθμό απόδοσης αν δεν είχει αφαιρεθεί ο αέρας μεταξύ απορροφητή και γυάλινου καλύμματος

Είναι φανερό ότι η μείωση της πίεσης μεταξύ απορροφητή και γυάλινου καλύμματος ,που έχει γίνει στον πρότυπο συλλέκτη, συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση του βαθμού απόδοσης. Κατά τις ώρες γύρω από το ηλιακό μεσημέρι (περίπου από 10:00 έως 14:00) ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται περίπου κατά 30% με τις συνθήκες χαμηλής πίεσης. Επίσης φαίνεται ότι η χαμηλή πίεση δίνει στο συλλέκτη τη δυνατότητα να λειτουργεί σε ώρες μακριά από το ηλιακή ακτινοβολία είναι μειωμένη.

Επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην απόδοση του συλλέκτη :

Για τη μελέτη της επίδρασης του ανέμου στην απόδοση του συλλέκτη παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμματα τα αποτελέσματα του κώδικα για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Για λόγους σύγκρισης χρησιμοποιήθηκαν για και οι τρεις σχέσεις που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό των απωλειών εξαναγκασμένης συναγωγής. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η σχέση Zhukauskas (5.4.24) και η σχέση Churchill Bernstein (4.2.15) που υπολογίζουν το αριθμό Nusselt αλλά και η απλοποιημένη σχέση (5.4.26) που υπολογίζει κατευθείαν το συντελεστή συναγωγής h₅₆. Όπως παρατηρείται και από τα τρία διαγράμματα οι τρεις σχέσεις δίνουν σχεδόν όμοια αποτελέσματα.



Διάγραμμα 6-4 : Βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (οι απώλειες συναγωγής από το γυάλινο κάλυμμα υπολογισμένες με τη σχέση Churcill-Zhukauskas)



Διάγραμμα 6-5 : Βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (οι απώλειες συναγωγής από το γυάλινο κάλυμμα υπολογισμένες με την απλοποιημένη σχέση 5.4.26)



Διάγραμμα 6-6 : Βαθμός απόδοσης πρότυπου ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (οι απώλειες συναγωγής από το γυάλινο κάλυμμα υπολογισμένες με τη σχέση Churcill-Bernstein) Όπως επιβεβαιώνεται από τα παραπάνω διαγράμματα η ταχύτητα του ανέμου έχει ελάχιστη επίδραση στην απόδοση του συλλέκτη. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί αφενός στο μικρό συντελεστή εκπομπής του απορροφητή και τις συνθήκες κενού που δημιουργούν ένα πρώτο 'φράγμα' στις θερμικές απώλειες του συλλέκτη και αφετέρου στο γυάλινο κάλυμμα. Όπως άλλωστε προκύπτει και από τα αναλυτικά αποτελέσματα (Πίνακας 6-2), η θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος (Temp_env_out_C) βρίσκεται πολύ κοντά στην ατμοσφαιρική (Temp_amb_C). Εφόσον η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ καλύμματος και περιβάλλοντος είναι σχετικά μικρή (περίπου 1°C), η ροή θερμότητας από το συλλέκτη προς το περιβάλλον άρα και οι αντίστοιχες απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας θα είναι μειωμένες ακόμα και για μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

Χρήση εναλλακτικών σχέσων για τη συναγωγή σε δακτυλιοειδή ροή :

Η ροή μέσα σε δακτύλιο που χαρακτηρίζει τον πρότυπο συλλέκτη δε συνηθίζεται σε εφαρμογές ηλιακών συλλεκτών. Γι' αυτό και στις μοντελοποιήσεις συλλεκτών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία δεν υπήρχαν ανάλογες σχέσεις υπολογισμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε δακτύλιο. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μια πιο εστιασμένη μελέτη του συγκεκριμένου φαινομένου.

Στην παρούσα μοντελοποίηση έχουμε υποθέσει ότι η μετάδοση θερμότητας γίνεται μόνο από την εξωτερική επιφάνεια ενώ η εσωτερική μπορεί να θεωρηθεί αδιαβατική. Στην περίπτωση αυτή, η ροή θερμότητας προς το ρευστό υπολογίζεται από τη σχέση 5.4.1 η οποία εφαρμόζεται και σε ροή σε κυκλικούς αγωγούς με μόνη διαφορά τον αριθμό Nusselt. Όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2.4, για τον υπολογιμό του αριθμού Nusselt μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μια σταθερή τιμή που εξαρτάται από το λόγο των διαμέτρων του δακτυλίου (Πίνακας 4-3) είτε αναλυτικές σχέσεις που συνδέουν το Nusselt με το λόγο των διαμέτρων και άλλους αδιάστατους αριθμούς της ροής (Πίνακας 4-4).

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η θερμότητα που αποδίδεται στο ρευστό Q12conv όπως υπολογίστηκε από τις διάφορες σχέσεις υπολογισμού του αριθμού Nusselt. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, κατά τη διεξαγωγή όλων των αποτελεσμέτων η παροχή όγκου νερού διατηρήθηκε σταθερή στα 7lt/min. Για τη δεδομένη παροχή και και την υδραυλική διατομή που διαθέτει ο πρότυπος συλλέκτης ο αριθμός Reynolds βρίσκεται πάντοτε στη στρωτή περιοχή. Γι'αυτό και στο παρακάτω διάγραμμα δε συμπεριλαμβάνονται όσες σχέσεις αφορούν την τυρβώδη περιοχή της ροής.



Διάγραμμα 6-7 : Θερμότητα που προσδίδεται στο νερό από τον πρότυπο ηλιακό συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου (ο αριθμός Nusselt υπολογισμένος με διαφορετικές σχέσεις που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία)

Όπως φαίνεται, οι διαφορετικές σχέσεις υπολογισμού του αριθμού Nusselt αλλά και η σταθερή τιμή 4,932 που προέκυψε από τον πίνακα 4.2.3 δίνουν πολύ παρόμοια αποτελέσματα για τη θερμότητα που προσδίδεται στο ρευστό.

6.3 Αποδιδόμενη ισχύς του ηλιακού συλλέκτη για τη μέση ημέρα κάθε μήνα

Στην ενότητα αυτή δίνεται διαγραμματικά ο η ισχύς που αποδίδεται στο νερό κατά τη διάρκεια της μέσης μέρας κάθε μήνα του έτους. Κατα τη διεξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων, η ταχύτητα του ανέμου διατηρήθηκε σταθερή στα 20 m/s.



Διάγραμμα 6-8 : Θερμότητα που προσδίδεται στο νερό κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας των θερινών μηνών



Διάγραμμα 6-9 : Θερμότητα που προσδίδεται στο νερό κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας των χειμερινών μηνών

Όλα τα αποτελέσματα προέκυψαν θέτοντας σταθερή κλίση συλλέκτη 45° και γεωγραφικό πλάτος της περιοχής του αγίου Φωκά της Τήνου 37,529°. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.3, για μέγιστη ενέργεια θέρους απαιτείται κλίση συλλέκτη φ-15° =22,529° ενώ για μέγιστη ενέργεια χειμώνος απαιτείται κλίση φ+15° =52,529°. Στην περίπτωσή μας ,όπου η κλίση του συλλέκτη παραμένει σταθερά ίση με 45°, ευνοείται περισσότερο η λειτουργία τους χειμερινούς μήνες. Αυτό αποδεικνύεται και από τα παραπάνω διαγράμματα όπου συγκρίνεται η αποδιδόμενη ισχύς κατά τη μέση ημέρα διαφορετικών μηνών. Τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες το χρονικό εύρος μέσα στην ημέρα όπου εμφανίζεαται υψηλή απόδοση είναι λίγο μεγαλύτερο σε σχέση με τους θερινούς μήνες. Έτσι, όσο πλησιάζουμε προς το χειμώνα τα διάγραμματα έμφανίζονται πιο 'πεπλατυσμένα' ενώ όσο απομακρυνόμεστε τα διαγράμματα 'στενεύουν'.

6.4 Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη για τη μέση ημέρα κάθε μήνα

Στην ενότητα αυτή δίνεται διαγραμματικά ο βαθμός απόδοσης του πρότυπου συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης μέρας κάθε μήνα του έτους ξεχωριστά. Κατα τη διεξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων, η ταχύτητα του ανέμου διατηρήθηκε σταθερή στα 20 m/s που αντιστοιχεί περίπου σε 8 μποφόρ.







Διάγραμμα 6-11 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Φεβρουαρίου



Διάγραμμα 6-12 :Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τηδιάρκεια της μέσης ημέρας του Μαρτίου



Διάγραμμα 6-13 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της ημέρας του Απριλίου



Διάγραμμα 6-14 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας τουΜαίου



Διάγραμμα 6-15 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου





Διάγραμμα 6-16 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουλίου



Διάγραμμα 6-17 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Αυγούστου

Διάγραμμα 6-18 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Σεπτεμβρίου



Διάγραμμα 6-19 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Οκτωβρίου







Διάγραμμα 6-21 : Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Δεκεμβρίου

Όπως αναμένεται ο μέγιστος ονομαστικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη εμφανίζεται τη μέση ημέρα Ιουλίου και Αυγούστου και φτάνει το 74%. Κατά τη μέση ημέρα Ιανουαρίου σημειώνεται ο μικρότερος ονομαστικός βαθμός απόδοσης που φτάνει το 62%. Και στα διαγράμματα του βαθμού απόδοσης φαίνεται ότι ευνοείται σε μικρό βαθμό η απόδοση του συλλέκτη κατά τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες όπως περιγράφηκε στην ενότητα 6.3.

6.5 Θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον ηλιακό συλλέκτη για τη μέση ημέρα κάθε μήνα

Στην ενότητα αυτή δίνεται η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον πρότυπο ηλιακό συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης μέρας κάθε μήνα του έτους. Οι τιμές των διαγραμμάτων αναφέρονται στο χρονικό διάστημα όπου ο συλλέκτης εμφανίζει θετικό βαθμό απόδοσης. Κατα τη διεξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων, η ταχύτητα του ανέμου διατηρήθηκε σταθερή στα 20 m/s.



Διάγραμμα 6-22 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Ιανουαρίου



Διάγραμμα 6-23 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Φεβρουαρίου



Διάγραμμα 6-24 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Μαρτίου



Διάγραμμα 6-25 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Απριλίου



Διάγραμμα 6-26 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Μαίου



Διάγραμμα 6-27 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Ιουνίου



Διάγραμμα 6-28 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Ιουλίου



Διάγραμμα 6-29 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Αυγούστου



Διάγραμμα 6-30 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Σεπτεμβρίου







Διάγραμμα 6-32: Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Νοεμβρίου



Διάγραμμα 6-33 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το συλλέκτη κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας Δεκεμβρίου

Η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας του νερού είναι 8°C και παρατηρείται τον Αύγουστο .Η ελάχιστη αύξηση της θερμοκρασίας του νερού είναι 4°C και σημειώνεται τον Ιανουάριο.

Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα των ενοτήτων 6.3,6.4,6.5 έτσι και εδώ φαίνεται ότι ευνοείται σε μικρό βαθμό η απόδοση του συλλέκτη όσο πλησιάζουμε στη χειμερινή περίοδο λόγω της κλίσης του συλλέκτη.

6.6 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις παραπάνω ενότητες συνοψίζονται εδώ οι σημαντικότερες παρατηρήσεις και συμπεράσματα από την προσομοίωση του πρότυπου ηλιακού συλλέκτη :

- Ο πρότυπος ηλιακός συλλέκτης παρουσιάζει υψηλή οπτική απόδοση για περίπου 4ώρες. Πέρα από το διάστημα αυτό ο οπτικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη πέφτει περίπου στο μισό και συνεχίζει να μειώνεται σταδιακά. Το εύρος του χρονικού διαστήματος όπου εμφανίζεται υψηλή απόδοση καθορίζεται από τη γωνία αποδοχής 2θc του συλλέκτη. Ωστόσο, η τιμή της γωνίας αποδοχής καθώς και του βαθμού αποκοπής των άκρων του συγκεντρωτή αποτελούν εκτιμήσεις βάσει της θεωρίας εφόσον δεν ήταν διαθέσιμες από τον κατασκευαστή.
- Στην παρούσα προσομοίωση δε λαμβάνονται υπ' όψη ο συντελεστής τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης ΙΑΜ και οι οπτικές απώλειες end_losses. Αυτό πιθανό να έχει οδηγήσει σε υπερεκτίμηση του οπτικού βαθμού απόδοσης
- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης διατηρεί την ονομαστική του τιμή για περίπου 4 ώρες όπως και ο οπτικός βαθμός απόδοσης. Ο μέγιστος ονομαστικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη εμφανίζεται κατά τον Ιούλιο και Αύγουστο και φτάνει το 74% ενώ ο ελάχιστος που είναι 62 % σημειώνεται τον Ιανουάριο.

- Το εύρος του χρονικού διαστήματος όπου ο πρότυπος ηλαικός συλλέκτης λειτουργεί στον ονομαστικό βαθμό απόδοσης παρουσιάζει μικρές αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του έτος. Όσο πλησιάζουμε τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες το χρονικό διάστημα προκύπτει ελαφρώς μεγαλύτερο.
- Στην παρούσα προσομοίωση δεν έχει ληφθεί υπ'όψη η συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του ρευστού και του εσωτερικού κλειστού σιδηροσωλήνα του δακτυλίου. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα του κώδικα δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματική κατάσταση για τις ώρες μακριά από το ηλιακό μεσημέρι. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.5 τις πρώτες πρωινές ώρες το εσωτερικό του δέκτη δεν έχει προλάβει να θερμανθεί και απορροφά θερμότητα από το ρευστό. Αντίστοιχα, τις απογευματινές ώρες ,μετά από κάποιο σημείο όπου η ακτινοβολία έχει ελαττωθεί αρκετά,το ρευστό θα απορροφά θερμότητα από τον εσωτερικό σιδηροσωλήνα και το θερμό αέρα στο εσωτερικό του.
- Η αφαίρεση του αέρα μεταξύ του απορροφητή και του γυάλινου καλύμματος που έχει γίνει κατά την κατασκευή του πρότυπου συλλέκτη, συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση απωλειών προς το περιβάλλον. Η μειωμένη πίεση στο χώρο μεταξύ απορροφητή και καλύμματος, σε σχέση με την κανονική πίεση που θα υπήρχε αν δεν είχει αφαιρεθεί ο αέρας, αυξάνει το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη τουλάχιστον κατά 30 %.
- Η ταχύτητα του ανέμου έχει ελάχιστη επίδραση στην απόδοση του συλλέκτη. Η μείωση της πίεσης μεταξύ απορροφητή και καλύμματος καθώς και ο πολύ μικρός συντελεστής εκπομπής του απορροφητή περιορίζουν τη ροή θερμότητας προς το κάλυμμα. Ως αποτέλεσμα, το γυάλινο καλύμμα διατηρείται σε θερμοκρασία κοντά στην ατμοσφαιρική. Έτσι, οι απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας παραμένουν χαμηλές για ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου (0-8 μποφόρ).

7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

7.1 Περιγραφή συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, οι πρότυποι συλλέκτες που προσομοιώθηκαν στην παρούσα εργασία, έχουν τοποθετηθεί σε μία πιλοτική μονάδα αφαλάτωσης με στόχο την κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων της. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα των πρότυπων συλλεκτών τροφοδοτεί με ζεστό νερό τον εξατμιστήρα της μονάδας. Περνώντας από τον εξατμιστήρα το ψυχρότερο ρεύμα της άλμης συναλλάσει σταδιακά θερμότητα με το νερό που θερμαίνεται από το σύστημα των συλλεκτών. Με τον τρόπο αυτό ,το ρεύμα της άλμης εξέρχεται από τον εξατμιστήρα με υψηλότερη συγκέντρωση άλατος και ταυτόχρονα ανακτάται ποσότητα καθαρού νερού.



Πηγή : <u>http://uest.ntua.gr/solbrine/</u>

Εικόνα 7-1 : Σύστημα πρότυπων ηλαικών συλλεκτών που έχει εγκατασταθεί στην πιλοτική μονάδα αφαλάτωσης στην Τήνο

Η διάταξη των 17 συλλεκτών ,που βρίσκονται στην εγκατάσταση, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 7-2). Όλοι οι συλλέκτες διαθέτουν σταθερή κλίση 45° και νότιο προσανατολισμό. Στην εγκατάσταση έχουν τοποθετηθεί ανακλαστήρες δίπλα στα κάτοπτρα των συλλεκτών με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο οι ανακλαστήρες αυτοί δε λαμβάνονται υπ' όψη στην συγκεκριμένη προσομοίωση του

συστήματος των συλλεκτών. Ακόμα, προκειμένου να αποφευχθούν απώλειες σκίασης, οι συλλέκτες τοποθετήθηκαν σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους.

Κατά την προσομοίωση θεωρήθηκε ότι η θερμοκρασία εξόδου του νερού από κάθε συλλέκτη είναι ακριβώς ίση με τη θερμοκρασία εισόδου στον επόμενο συλλέκτη της ίδιας σειράς. Επίσης, η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον πρώτο συλλέκτη κάθε σειράς διατηρείται σταθερή στους 70° C καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Ακόμα θεωρήθηκε ότι η παροχή του νερού είναι ίση με 7lt/min (αντλία συστήματος SOLBRINE) και για τις έξι σειρές συλλεκτών ³και ότι όλοι οι συλλέκτες παρουσιάζουν όμοια απόδοση.



Πηγή : <u>http://uest.ntua.gr/solbrine/</u>

Εικόνα 7-2 : Σχηματική απεικόνιση του συστήματος των πρότυπων ηλιακών συλλεκτών που έχει εγκατασταθεί στην πιλοτική μονάδα αφαλάτωσης στην Τήνο

Η διεξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στις ενότητες 7.2, 7.3 πραγματοποιήθηκε με τον κώδικα **SYSTEM_CODE_daily** (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β). Στο πρώτο μήνυμα που εμφανίζεται στην οθόνη 'give month and number n for day' ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει συγκεκριμένο μήνα με την κατάληξη txt και δίπλα τον αντίστοιχο αριθμό n γα τη μέση ημέρα του μήνα (Πίνακας 2-2) για παράδειγμα june.txt,162. Έτσι ο κώδικας διαβάζει τα μετεωρολογικά δεδομένα από το αντίστοιχο αρχείο του pvgis στο οποίο έχει δωθεί η ονομασία του συγκεκριμένου μήνα. Έπειτα, στο μήνυμα "give windspeed (m/s)" ο χρήστης εισάγει και την ταχύτητα του ανέμου σε m/s. Ουσιαστικά η διαδικασία επίλυσης είναι η ίδια με αυτή που ακολουθεί και ο **COLLECTOR_CODE_daily**. Η διαφορά

³ Στο πραγματικό σύστημα πραγματοποιήθηκε εξισορρόπηση της παροχής σε όλους τους κλάδους με χρήση βανών

είναι ότι για κάθε στιγμή της ημέρας που δίνεται από το αρχείο του pvgis η διαδικασία επίλυσης πραγματοποιείται τρεις φορές δηλαδή για τον πρώτο, τον δεύτερο και τον τρίτο συλλέκτη κάθε σειράς οι οποίοι δέχονται μεν την ίδια ακτινοβολία αλλά έχουν διαφορετική θερμοκρασία εισόδου του νερού.

7.2 Αποδιδόμενη ισχύς συστήματος

Επειδή η τελευταία σειρά διαθέτει δύο και όχι τρεις συλλέκτες ,όπως οι υπόλοιπες, η ισχύς που αποδίδει ολόκληρο το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών υπολογίστηκε από τον τύπο :

Quseful_system(j)=6.d0*(Q_collector_1+Q_collector_2)+5.d0*Q_collector_3

όπου :

Quseful_system(j) : αποδιδόμενη ισχύς του συστήματος των ηλιακών συλλεκτών

Q_collector_1 : αποδιδόμενη ισχύς από τον πρώτο συλλέκτη κάθε σειράς

Q_collector_2 : αποδιδόμενη ισχύς από τον δεύτερο συλλέκτη κάθε σειράς

Q_collector_3 : αποδιδόμενη ισχύς από τον τρίτο συλλέκτη κάθε σειράς



Διάγραμμα 7-1 : Αποδιδόμενη ισχύς συστήματος συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας των μηνών τοτ χειμώνα και του φθινοπώρου



Διάγραμμα 7-2 : Αποδιδόμενη ισχύς συστήματος συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας των μηνών του καλοκαιριού και της άνοιξης

Όπως σημειώθηκε και στην ενότητα 6.3, η σταθερή κλίση των 45° ευνοεί τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες όπου τα διαγράμματα εμφανίζονται πιο 'πεπλατυσμένα' .

Για τη μέση ημέρα του Αυγούστου η αποδιδόμενη ισχύς του συστήματος των συλλεκτών πλησιάζει τα 11 kW ενώ για τη μέση ημέρα του Ιανουαρίου αγγίζει μόλις τα 5,5kW.

7.3 θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών

Επειδή η τελευταία σειρά διαθέτει δύο και όχι τρεις συλλέκτες όπως οι υπόλοιπες η θερμοκρασία εξόδου υπολογίστηκε από τον τύπο :

T_fluid_out_system(j)=(5.d0*T_out_collector_3+T_out_collector_2)/6

όπου :

T_fluid_out_system(j) : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών

T_out_collector_2: θερμοκρασία εξόδου του νερού από το δεύτερο ηλιακό συλλέκτη της τελευταίας σειράς

T_out_collector_3: θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον τρίτο ηλιακό συλλέκτη κάθε σειράς



Διάγραμμα 7-3 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιανουαρίου







Διάγραμμα 7-5 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Μαρτίου







Διάγραμμα 7-7 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Μαίου



Διάγραμμα 7-8 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουνίου


Διάγραμμα 7-9 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Ιουλίου



Διάγραμμα 7-10 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Αυγούστου



Διάγραμμα 7-11 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Σεπτεμβρίου



Διάγραμμα 7-12 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Οκτωβρίου



Διάγραμμα 7-13 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας τουΝοεμβρίου



Διάγραμμα 7-14 : Θερμοκρασία εξόδου του νερού από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας του Δεκεμβρίου

7.4 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κώδικα προσομοίωσης του ηλιακού συστήματος

Στην ενότητα αυτή επιχειρείται σύγκριση των αποτελεσμάτων του κώδικα με την πραγματική λειτουργία του ηλιακού συστήματος. Συγκεκριμένα, εξετάζονται:

- Η χρονική διάρκεια σε ημερήσια βάση κατά την οποία το σύστημα παρουσιάζει τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης
- Το θερμοκρασιακό προφίλ εξόδου από το ηλιακό πεδίο.

Γενικά, σημειώνεται πως παρατηρήθηκε ικανοποιητική σύγκλιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ωστόσο, αξίζει να τονιστεί ότι δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί αυστηρή σύγκριση, καθώς το πιλοτικό σύστημα δεν λειτουργεί σε συνεχή βάση και σε πολλές περιπτώσεις ούτε καθ΄όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Αναφορικά με τη χρονική διάρκεια, από την προσομοίωση προκύπτει ότι το ηλιακό σύστημα λειτουργεί υπό σταθερό (υψηλό) βαθμό απόδοσης για περίπου 4 ώρες (από τις 10⁰⁰ μέχρι τις 14⁰⁰), σε αντίθεση με το πραγματικό σύστημα όπου παρουσιάζεται μεγαλύτερη χρονική διάρκεια, περίπου ίση με 6 ώρες. Αυτό εν μέρει δικαιολογείται από τη χρήση συστήματος αποθήκευσης (με δυνατότητα αποθήκευσης περίπου 2 ώρες) το οποίο δεν έχει προσομοιωθεί.Αναφορικά με τη θερμοκρασία εξόδου του ζεστού νερού από το ηλιακό πεδίο, σημειώνουμε ότι παρατηρήθηκε υψηλή σύγκλιση. Και στις δύο περιπτώσεις η θερμοκρασία εξόδου του νερού λαμβάνει τιμές εντός του εύρους 70-90°C ανάλογα με την ημέρα και τον μήνα του έτους και η σύγκλιση σε αντίστοιχους μήνες είναι της τάξης ± 5°C.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

Στον κώδικα το ηλιακό σύστημα δεν έχει προσομοιωθεί στο σύνολο της λεπτομέρειάς του, καθώς έχει γίνει μία σειρά από παραδοχές. Αξιοποιώντας, τα αποτελέσματα της διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί για την λεπτομερέστερη προσομοίωση του συστήματος. Ενδεικτικά, σημειώνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση:

- (α) Προσομοίωση των ανακλαστήρων του συστήματος και μελέτη του βαθμού βελτίωσης της απόδοσης του συστήματος,
- (β) Προσομοίωση του συστήματος αποθήκευσης. Προτείνεται η χρήση του υπολογιστικού πακέτου TRNSYS.
- (γ) Προσομοίωση της μεταβατικής κατάστασης. Προτείνεται η χρήση του υπολογιστικού πακέτου TRNSYS.
- (ε) Αναλυτική προσομοίωση των ηλιακών συλλεκτών με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Προτείνεται η χρήση του υπολογιστικού πακέτου COMSOL.

<u>Βιβλιογραφία :</u>

[1] Solar Engineering of thermal processes John A. Duffie, William A. Beckman

[2] Heat Transfer Analysis and Modeling of a parabolic Trough solar receiver implemented in engineering Equation solver R. Forristall

[3] Heat Tranfer Cengel

[4] Ηλιακή ενέργεια Αντωνόπουλος

[5] Non imaging Optics - Ronald Winston ,Juan C.Minano, Pablo G.Benitez

[6] Comparative study on two novel intermediate temperature CPC solar collectors with the U-shape evacuated tubular absorber –X. Li, ,Y.J.Dai,Y.Li,R.Z.Wang

[7] A Heat Tranfer Textbook (Third Edition) John H. Lienhard IV/ John H. Lienhard V

[8] Μεταφορά θερμότητας και μάζης Σαγιά

[9] Solar Collectors Energy Storage and Materials Francis de Winter

[10] Analysis of the incidence angle of the beam radiation on cpc- J.M.Pinazo, J.Canada, F.Arago

[11] Topic Report for WP2 solar thermal collectos-Quaist (Quality Assurance in Solar Heating and Cooling Technology

[12] Theoritical and experimental study of solar thermal collector systems and components Enrico Zambolin

[13] Non Imaging Optics in Solar Energy – Joseph O' Gallagher

[14] Χρήση παραβολικών για ψύξη θέρμανση κτιρίου – μοντελοποίηση λογισμικού με το λογισμικό TRNSYS - Φοίβος Κουκουβίνης

[15] The use of CPC collectors for detoxification of contaminated water : Design, construction and preliminary results J.I. Ajona, A.Vidal

[16] Advances in solar energy Technology Volume 1 : Collection & Storage systems H.P.Garg

[17] Comparison of solar concentrators Ari Rabl

[18] Effect of Acceptance angle on the design and performance of a heat pipe based compound parabolic collector at Kano, Nigeria

[19] Design and Test of non-evacuated solar collectors with compound parabolic concentrators A.Rabl, J.O'Gallagher, R.Winston

[20] High Collection Non Imaging Optics W.T Welford

[21] Thermal Analysis of cpc collectors C.K.Hsieh

[22] Optical and Thermal Properties of Compound Parabolic Concentrators

[23] A Compound Parabolic Concentrator Jose A. Manrique

[24] Practical Design Considerations for CPC Solar Collectors

[25] Truncation of Cpc Solar Collectors and its effect on energy collection M.J Carvallo M.Collares Pereira

[26] Οπτική ανάλυση ηλιακών συσκευών θέρμανσης νερού ICS με καμπύλα κάτοπτρα και κυλινδρικούς απορροφητές – Μ.Σουλιώτης, Ι Τρυπαναγνωστόπουλος

[27] Techniques for reducing thermal conduction and natural convection heat losses in annular receiver geometries A.C.Ratzel, C.E Hickox D.K. Gartling

[28] Solar Energy Engineering : Processes and Systems Soteris A. Kalogirou

[29] IAM factor for Sydney vacuum tube collectors with cpc reflectors

[30] Ένωση βιομηχανιών ηλιακής ενέργειας Σεμινάριο θερμικών ηλιακών συστημάτων, είδη συλλεκτών Χριστοδουλάκη Ρόζα

[31] Προσομοίωση ηλιοθερμικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων -Αντώνιος Α. Μαντήκος

[32] Επισκόπηση ηλιακών συλλεκτών- Ντάσκα Παναγιώτα

[33] Κατασκευή και πειραματική αξιολόγηση πρότυπου επίπεδου ηλιακού συλλέκτη βρασμού- Γεώργιος Ζωγράφος

[34] Ανάπτυξη ενός καινοτόμου και ενεργειακά αυτόνομου συστήματος επεξεργασίας της άλμης από μονάδες αφαλάτωσης Ξεύγενος Δημήτριος

[35] Numerical Recipes in Fortran 77-The art of scientific Computing –William H.Press, Saul A.Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P.Flannery

[36] Concentrated solar collector with black enameled receiver tube- Davide Fissi, Maurizio De Lucia, Silvano Pagliuca

[37] [Gas microflows in the Slip Flow Regime: A Critical Review on Convective Heat Transfer Stephane Colin]

[38] Slip flow Heat Transfer in Annular Microchannels with Constant heat flux Zhipeng Duan, Y.S. Muzycha]

[39] Θερμική ηλιακή ενέργεια - Παρούσα κατάσταση και εφαρμογές-Δρ. Ε. Μαθιουλάκης

[40] Νόμος υπ' αριθμόν 3851/2010 ΦΕΚ 85Α'/4.6.2010

[41] Είδη συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών και απαραμετρική μελέτη στην περιοχή της Αθήνας – Καπώνη Φωτεινή

[42] Μελέτη ηλιοθερμικής εγκατάστασης με πύργο ισχύος στην περιοχή του αθερινόλακκου - Σαατσάκης Γ. Ελευθέριος

[43] Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα και προώθηση εξοικονόμησης ενέργειας - Ευαγγελία Τ. Τζιάσιου

[44] Παραμετρική μελέτη θέρμανσης χώρων με εποχιακή αποθήκευση με χρήση του προγράμματος TRNSYS - Παναγιώτης Δ. Τσεκούρας

[45] Ηλιακή Ενέργεια, Ηλιακή Γεωμετρία -Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης

[46] Διαχείριση δεδομένων μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας – Παναγιώτης Κεραμιτζής

[47] Experimental study of CPC type ICS solar systems - M. Souliotis, Y. Tripanagnostopoulos

[48] Optical evaluation and analysis of an internal low-concentrated evacuated tube heat pipe solar collector for powering solar air-conditioning systems - Dan Nchelatebe Nkwetta*, Mervyn Smyth, Aggelos Zacharopoulos, Trevor Hyde

[49] Concentrated Solar Collector With Black Enameled Receiver Tube

Davide Fissi 1, Maurizio De Lucia 1, Silvano Pagliuca

[50] Heat Transfer Coefficients in concentric annuli - Jaco Dirker [January 2002]

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις :

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eur.htm

http://www.wikipedia.org/

http://www.cynfra.eu/thermo.htm

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solmod1.htm

http://quarksplanet.blogspot.gr

http://www.ambienteco.gr/epilektikoi.html

http://www.teachengineering.org/

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php

http://cnskylight.en.made-in-china.com

www.thermatica.gr

http://heatwisesouthwestrenewables.co.uk/solar-thermal-birmingham/

http://www.green-solar.net/

http://www.sciencedirect.com/

www.powerfromthesun.net

http://www.cerbos.ee/

www.enforce-een.eu

www.ecobuilding-club.net

www.graffitivirgin.net

www.solarnovus.com

www.swensonandsons.com

http://www.rayotec.com/solar-thermal/how-it-works

www.globalgreenhousewarning.com

www.csp-world.com

www.powerfromthesun.net

www.enertechnic.gr

www.thermaopedia.com

www.wikipedia.com

http://amper.ped.muni.cz/light/EuP/FS.htm

http://www.schott.com/tubing/english/product_selector/index.htm

www.apricus.com

www.andyschroder.com

www.solar2all.com

http://uest.ntua.gr/solbrine/

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

| Κώδικας | προσομοίωσης | πρότυπου | ηλιακού | συλλέκτη | |
|--|---------------------------|---------------------|---------|----------|--|
| (COLLECTOR | CODE daily.for): | | | | |
| program solarcollector | | | | | |
| implicit dou | uble precision (a-h,o-z) | | | | |
| dimension c(30),x(5) | | | | | |
| character*100 month | | | | | |
| logical lcheck | | | | | |
| external fu | ncv | | | | |
| | | | | | |
| dimension | ihours(60),minutes(60),gt | total(60),gdiff(60) | | | |
| dimension T_ambient_C(60),theta_deg(60),F(60),coll_eff(60) | | | | | |
| dimension T_water_out_C(60),opt_eff(60),ther_eff(60),gdiff_h(60) | | | | | |
| dimension qtotal_W(60),q3sol_W(60),q12conv_W(60) | | | | | |
| dimension | qin_W(60),eff_optical(60 |),eff_thermal(60) | | | |
| | | | | | |
| C | constants | | | | |
| pi=4*datan | (1.d0) | | | | |
| g_accelerat | tion=9.81 | | | | |
| stefan_bolt | tzman_coef=5.67e-8 | | | | |
| ground_ref | lection=0.3d0 | | | | |
| gas_consta | nt=8.3144621d0 | | | | |

avogadro_number=6.0221367e23

c-----collector properties and dimensions-----

coll_length=1.87d0 !m

coll_width=0.5d0 !m

envelope_length=1.80d0 !m

tube_length=1.87d0 !m

apert_window=coll_length*coll_width !m2

collslope_deg=45.d0

collslope_rad=pi*collslope_deg/180.d0

apert_window=coll_length*coll_width !m

tube_roughness=150e-6

d_absorber_in=0.119d0 !m

d_absorber_out=0.120d0 !m

d_envelope_in=0.147d0 !m

d_envelope_out=0.150d0 !m

d_instube_out=0.100d0 !m

emisscoef_glass=0.86d0

abscoef_glass=0.02d0

transcoef_glass=0.96d0

reflcoef_glass=1-abscoef_glass-transcoef_glass

therm_cond_glass=1.05d0

emisscoef_abscoat=0.05d0

abscoef_abscoat=0.95d0

reflcoef_abscoat=1-abscoef_abscoat

therm_cond_iron=80.d0

accangle_deg=40.d0

accangle_rad=pi*accangle_deg/180.d0

accangle_trunc_deg=80.d0

accangle_trunc_rad=pi*accangle_trunc_deg/180.d0

concratio_max=1/dsin(accangle_trunc_rad)

seiraq_3sol=0.d0

seiraq_4sol=0.d0

do n_exp=1,10

seiraq_3sol=seiraq_3sol+reflcoef_glass**(n_exp-1)*

*reflcoef_abscoat**(n_exp-1)

seiraq_4sol=seiraq_4sol+reflcoef_glass**(n_exp-1)*

*reflcoef_abscoat**(n_exp)

enddo

clean_mirror_reflectance=0.925d0

reflections_par=0.786d0

angle_modifier=1.d0

gap_losses=0.9602d0

end_losses=1.d0

optical_terms=clean_mirror_reflectance**reflections_par*

*angle_modifier*gap_losses*end_losses*seiraq_3sol*transcoef_glass*

*abscoef_abscoat

C-----

write(*,*) 'give month and number n for day'
read(*,*) month,n
write(*,*) "give windspeed (m/s)"
read(*,*) wind_speed

c(11)=wind_speed

anglen=360.d0*(284.d0+n)/365.d0 anglen_rad=pi*anglen/180.d0 delta=23.45d0*dsin(anglen_rad) delta_rad=pi*delta/180.d0 alatitude_deg=37.529d0 alatitude_rad=alatitude_deg*pi/180.d0

open(1,file=month)

open(2,file='COLLECTOR_CODE_daily_1.txt')

open(3,file='COLLECTOR_CODE_daily_2.txt')

open(4,file='COLLECTOR_CODE_daily_3.txt')

open(5,file='COLLECTOR_CODE_daily_4.txt')

do j=1,60

read(1,*) ihours(j),minutes(j),gtotal(j),gdiff(j),T_ambient_C(j)
Temp_amb_C=T_ambient_C(j)
minmidday=(ihours(j)-12)*60.d0+minutes(j)
gbeam=gtotal(j)-gdiff(j) !W/m2
gdiff_h(j)=gdiff(j)*2/(1+dcos(collslope_rad))

omega=0.25d0*minmidday omega_rad=pi*omega/180.d0 costheta=dsin(delta_rad)*dsin(alatitude_rad-collslope_rad)+ *dcos(delta_rad)*dcos(alatitude_rad-collslope_rad)*dcos(omega_rad) theta_rad=dacos(costheta)

theta_deg(j)=theta_rad*180.d0/pi

coszenith_rad=dsin(delta_rad)*dsin(alatitude_rad)+dcos(delta_rad)*

*dcos(alatitude_rad)*dcos(omega_rad)

zenith_rad=dacos(coszenith_rad)

singss=dcos(delta_rad)*dsin(omega_rad)/dsin(zenith_rad)

gss_rad=dasin(singss)

gss_deg=gss_rad*180.d0/pi

cosomega_ew=dtan(delta_rad)/dtan(alatitude_rad)

```
omega_ew_rad=dacos(cosomega_ew)
```

if (dabs(dtan(delta_rad)/dtan(alatitude_rad)) .gt. 1) then

mar_c1=1.d0

else

if (dabs(omega_rad).lt.omega_ew_rad) then

```
mar_c1=1.d0
```

else

```
mar_c1=-1.d0
```

endif

endif

if ((alatitude_rad*(alatitude_rad-delta_rad)).ge.0) then

mar_c2=1.d0

else

mar_c2=-1.d0

endif

if (omega_rad .ge. 0) then

mar_c3=1.d0

```
else
```

```
mar_c3=-1.d0
```

endif

```
gs_deg=90.d0*mar_c3*(1-mar_c1*mar_c2)+mar_c1*mar_c2*gss_deg
```

gs_rad=gs_deg*pi/180.d0

beamangle=datan(dtan(zenith_rad)*dcos(gs_rad))

beamangle_deg=180.d0*beamangle/pi

uplimangle=collslope_deg+accangle_trunc_deg

dlimangle=collslope_deg-accangle_trunc_deg

if ((beamangle_deg.le.uplimangle).AND.

*(beamangle_deg.ge.dlimangle)) then

if (theta_rad .le. accangle_rad) then F(j)=1

elseif (theta_rad .gt. accangle_rad .and.

*theta_rad .le. accangle_trunc_rad) then

F(j)=0.5d0+(1.d0-dsin(theta_rad)/dsin(accangle_trunc_rad)*

*(1.d0+pi*concratio_max*dcos(accangle_trunc_rad)))/(2.d0*pi*

*concratio_max*costheta)

```
elseif (theta_rad .ge. accangle_trunc_rad) then
F(j)=0
else
write(2,*) '------wrong------'
endif
else
F(j)=0
endif
gb_cpc= F(j)*gbeam
if ((collslope_deg+accangle_trunc_deg) .lt. 90.d0) then
gdiff_cpc=gdiff_h(j)/concratio_max
ggrdiff_cpc=0
else
gdiff_cpc=gdiff_h(j)*(1/concratio_max+dcos(collslope_rad))/2
ggrdiff_cpc=gtotal(j)*ground_reflection*
*(1/concratio_max-dcos(collslope_rad))/2
endif
g_cpc=gb_cpc+gdiff_cpc +ggrdiff_cpc !W/m2
s=optical_terms*g_cpc !W/m2
qin=s*coll_width !W/m
qtotal=gtotal(j)*coll_width
write(2,*)
write(2,*)
write(2,*) 'time=',ihours(j),':',minutes(j)
write(2,*)
```

- write(2,*) '-----optical terms------'
- write(2,*) 'clean_mirror_reflectance=',clean_mirror_reflectance
- write(2,*) 'reflections_par=',reflections_par
- write(2,*) 'angle_modifier',angle_modifier
- write(2,*) 'gap_losses',gap_losses
- write(2,*) 'optical_terms=',optical_terms
- write(2,*)
- write(2,*) '-----angles------'
- write(2,*) 'deglta=',delta
- write(2,*) 'latitude_moires=',alatitude_deg
- write(2,*) 'minmidday=',minmidday
- write(2,*) 'omega_rad=',omega_rad
- write(2,*) 'costheta=',costheta
- write(2,*) 'coszenith=',coszenith_rad
- write(2,*) 'zenith_rad=',zenith_rad
- write(2,*) 'gss_rad=',gss_rad
- write(2,*) 'gss_moires=',gss_deg
- write(2,*) 'omega_ew_rad=',omega_ew_rad
- write(2,*)
- write(2,*) 'mar_c1=',mar_c1
- write(2,*) 'mar_c2=',mar_c2
- write(2,*) 'mar_c3=',mar_c3
- write(2,*)
- write(2,*) 'gs_deg=',gs_deg
- write(2,*)
- write(2,*) 'uplimangle=',uplimangle

write(2,*) 'dlimangle=',dlimangle

write(2,*) 'F=',F(j)

write(2,*) 'beamangle=',beamangle_deg

write(2,*) 'theta_rad=',theta_rad

write(2,*) 'theta_deg(j)=',theta_deg(j)

- write(2,*) '-----radiation-----'
- write(2,*) 'gb_cpc=',gb_cpc,'W/m2'
- write(2,*) 'gdiff_cpc=',gdiff_cpc ,'W/m2'
- write(2,*) 'ggrdiff_cpc=',ggrdiff_cpc ,'W/m2'
- write(2,*) 'qtotal=',qtotal,'W/m'
- write(2,*) 'g_cpc=',g_cpc,'W/m2'
- write(2,*) 's=',s,'W/m2'
- write(2,*) 'qin=',qin,'W/m'

write(2,*) 'seiraq_3sol_sum=',seiraq_3sol

write(2,*) 'seiraq_4sol_sum=',seiraq_4sol

q3sol=qin*transcoef_glass*abscoef_abscoat*seiraq_3sol

q4sol=qin*transcoef_glass*abscoef_glass*seiraq_4sol

q5sol=qin*abscoef_glass

write(2,*) 'reflcoef_abscoat=',reflcoef_abscoat

write(2,*) 'reflcoef_glass=',reflcoef_glass

write(2,*) 'q3sol=',q3sol,'W/m'

write(2,*) 'q4sol=',q4sol,'W/m'

write(2,*) 'q5sol=',q5sol,'W/m'

c-----initial values of temperatures-----

Temp_fluid_in_C=70.d0 Tout_C=71.d0 T2_C=71.5d0

T3_C=71.6d0

T4_C=35.1d0

T5_C=34.9d0

c-----fluid flow through the collector-----

system_flow_lt_min=7.d0

system_flow_m3_s=system_flow_lt_min/(60.d0*1000.d0)

collector_rows=6.d0

w_vol_flow=system_flow_m3_s/collector_rows

write(2,*)

write(2,*) 'w_vol_flow=',w_vol_flow,'m3/s'

c-----variables for newton-raphson------variables

c(1)=q3sol c(2)=q4sol c(3)=q5sol c(4)=T2_C c(5)=T3_C c(6)=T4_C c(7)=T5_C c(8)=Tout_C

c(9)=Temp_fluid_in_C

c(10)=Temp_amb_C

c(11)=wind_speed

c(12)=q12conv

c(13)=q23cond

c(14)=q34conv

c(15)=q34rad

c(16)=q45cond

c(17)=q56conv

c(18)=q57rad

c(19)=Temp_abs_in_C

c(20)=Temp_abs_out_C

c(21)=Temp_env_in_C

c(22)=Temp_env_out_C

c(23)=Temp_fluid_out_C

c(24)=error1

c(25)=error2

c(26)=error3

c(27)=error4

c(28)=error5

c(29)=heat_transf_coef12

c(30)=UL

n=5

do i=1,n

x(i)=1.d0

enddo

write(3,*) 'time=',ihours(j),':',minutes(j)

call newt(x,n,c,lcheck,funcv,iError)

c-----pressure loss calculation-----pressure loss calculation------

T_fluid_av_C=(Temp_fluid_in_C+c(23))/2

density_fluid_av=density_water(T_fluid_av_C)

viskin_fluid_av=viskin_water(T_fluid_av_C)

d_hydraulic=d_absorber_in-d_instube_out

hydraulic_cross_section=pi*(d_absorber_in**2-d_instube_out**2)/4

w_mass_flow=w_vol_flow*density_fluid_av

velocity_fluid_av=w_mass_flow/(density_fluid_av*

*hydraulic_cross_section)

Reynolds_w=velocity_fluid_av*d_hydraulic/viskin_fluid_av

if (Reynolds_w.gt.2300) then

friction_coef=1/(-1.8d0*log(6.9d0/Reynolds_w+(tube_roughness/

*(3.7d0*d_hydraulic))**1.11d0))**2

do m=1,10000

friction_coef=1/(-2*log10(tube_roughness/d_hydraulic/3.7d0+2.51d0/

```
*(Reynolds_w*dsqrt(friction_coef))))**2
```

enddo

else

friction_coef=64/Reynolds_w

endif

dpressure_Pascal=friction_coef*tube_length*

*(w_mass_flow/hydraulic_cross_section)**2/

```
*(2*d_absorber_in*density_fluid_av)
```

c-----efficiency calculation-----

UL=c(30)

Uo=(1/c(30)+d_absorber_out/(c(29)*d_absorber_in)+d_absorber_out*

```
*log(d_absorber_out/d_absorber_in)/(2*therm_cond_iron))**(-1.d0)
```

F_eff=Uo/UL

 $Ac=pi^*d_envelope_out^*envelope_length$

```
heat_cp_water_av=heat_cp_water(T_fluid_av_C)
```

FR=w_mass_flow*heat_cp_water_av*(1-exp(-Ac*UL*F_eff/(w_mass_flow*

```
*heat_cp_water_av)))/(Ac*UL)
```

F_flow=FR/F_eff

eff_optical(j)=optical_terms*g_cpc/gtotal(j)

eff_thermal(j)=eff_optical(j)-c(30)*(c(20)-Temp_amb_C)/

*(gtotal(j)*concratio_max)

if (eff_thermal(j) .gt. 0.d0) then

write(4,*)

| write(4,*) '' | |
|---------------|--|
| write(4,*) '' | |
| write(4,*) '' | |

| write(4,*) 'time=',ihours(j),':',minutes(j) |
|--|
| write(4,*) '' |
| write(4,*) '' |
| write(4,*) '' |
| write(4,*) 'T_fluid_out_C=',c(23),'C' |
| write(4,*) |
| write(4,*) 'density_fluid_av=',density_fluid_av,'kg/m3' |
| write(4,*) 'w_mass_flow=',w_mass_flow,'kg/s' |
| write(4,*) 'velocity_fluid_av=',velocity_fluid_av,'m/s' |
| write(4,*) 'd_hydraulic=',d_hydraulic,'m' |
| write(4,*) 'viskin_fluid_av=',viskin_fluid_av,'m2/s' |
| write(4,*) 'Reynolds_w=',Reynolds_w |
| write(4,*) |
| write(4,*) 'friction_coef=',friction_coef |
| write(4,*) 'dpressure_Pascal=',dpressure_Pascal,'Pascal' |
| write(4,*) |
| write(4,*) 'wind_speed=',c(11),'m/s' |
| write(4,*) 'Temp_abs_in_C=',c(19),'C' |
| write(4,*) 'Temp_abs_out_C=',c(20),'C' |
| write(4,*) 'Temp_env_in_C=',c(21),'C' |
| write(4,*) 'Temp_env_out_C=',c(22),'C' |
| write(4,*) |
| write(4,*) 'q12conv=',c(12),'W/m' |
| write(4,*) 'q23cond=',c(13),'W/m' |
| write(4,*) 'q34conv=',c(14),'W/m' |
| write(4,*) 'q34rad=',c(15),'W/m' |
| write(4,*) 'q45cond=',c(16),'W/m' |

write(4,*) 'q56conv=',c(17),'W/m'

write(4,*) 'q57rad=',c(18),'W/m'

write(4*,**)

write(4,*) 'error1=',c(24)

write(4,*) 'error2=',c(25)

write(4,*) 'error3=',c(26)

write(4,*) 'error4=',c(27)

write(4,*) 'error5=',c(28)

write(4,*)

write(4,*) 'hconv_12=',c(29),'W/m2K'

write(4,*) 'UL=',c(30),'W/m2K'

write(4,*) 'Uo=',Uo,'W/m2K'

write(4,*) 'F_eff=',F_eff

write(4,*) 'FR=',FR

write(4,*) 'F_flow=',F_flow

write(4,*)

write(4,*) 'eff_optical(j)=',eff_optical(j)

write(4,*) 'eff_thermal=',eff_thermal(j)

qtotal_W(j)=qtotal*coll_length !W

qin_W(j)=qin*coll_length !W

q3sol_W(j)=q3sol*coll_length !W

q12conv_W(j)=c(12)*coll_length !W

T_water_out_C(j)=c(23)

write(5,*)ihours(j),minutes(j),eff_thermal(j)

35 format (I2,5X,I2,5X,F6.2)

| else | |
|------------|-----------------|
| write(4,*) | 'no efficiency' |
| endif | |
| enddo | |
| end | |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

<u>Κώδικας προσομοίωσης συστήματος ηλιακών συλλεκτών</u> (SYSTEM CODE daily.for) :

program solarsystem

implicit double precision (a-h,o-z)

dimension c(30),x(5)

character*100 month

logical lcheck

external funcv

dimension ihours(60),minutes(60),gtotal(60),gdiff(60) dimension T_ambient_C(60),theta_deg(60),F(60),coll_eff(60) dimension ther_eff(60),opt_eff(60),T_fluid_out_collector(3) dimension T_fluid_out_system(60),Quseful_collector(3) dimension Quseful_system(60),eff_optical(60),eff_thermal(60) dimension gdiff_h(60)

c-----constants-----

pi=4*datan(1.d0)
g_acceleration=9.81
stefan_boltzman_coef=5.67e-8
ground_reflection=0.3
gas_constant=8.3144621d0
avogadro_number=6.0221367e23

c-----collector properties and dimensions-----

```
coll_length=1.87 !m
```

```
coll_width=0.5 !m
```

envelope_length=1.80 !m

tube_length=1.87 !m

apert_window=coll_length*coll_width !m2

collslope_deg=45

collslope_rad=pi*collslope_deg/180

apert_window=coll_length*coll_width !m

tube_roughness=150e-6

d_absorber_in=0.119 !m

d_absorber_out=0.120 !m

d_envelope_in=0.147 !m

d_envelope_out=0.150 !m

d_instube_out=0.100 !m

emisscoef_glass=0.86

abscoef_glass=0.02

transcoef_glass=0.96

reflcoef_glass=1-abscoef_glass-transcoef_glass

therm_cond_glass=1.05

emisscoef_abscoat=0.05 abscoef_abscoat=0.95 reflcoef_abscoat=1-abscoef_abscoat therm_cond_iron=80

seiraq_3sol=0.d0

seiraq_4sol=0.d0

do n_exp=1,10

seiraq_3sol=seiraq_3sol+reflcoef_glass**(n_exp-1)*

*reflcoef_abscoat**(n_exp-1)

seiraq_4sol=seiraq_4sol+reflcoef_glass**(n_exp-1)*

*reflcoef_abscoat**(n_exp)

enddo

accangle_deg=40.d0

accangle_rad=pi*accangle_deg/180.d0

accangle_trunc_deg=80.d0

accangle_trunc_rad=pi*accangle_trunc_deg/180.d0

concratio_max=1/dsin(accangle_trunc_rad)

clean_mirror_reflectance=0.925

reflections_par=0.786

angle_modifier=1.d0

gap_losses=0.9602

end_losses=1.d0

optical_terms=clean_mirror_reflectance**reflections_par*

*angle_modifier*gap_losses*end_losses*seiraq_3sol*transcoef_glass*

*abscoef_abscoat

C-----

write(*,*) 'give month and number n for day'

read(*,*) month,n

write(*,*) "give windspeed (m/s)"

read(*,*) wind_speed

c(11)=wind_speed

anglen=360*(284+n)/365

anglen_rad=pi*anglen/180

delta=23.45*dsin(anglen_rad)

delta_rad=pi*delta/180

alatitude_deg=37.529

alatitude_rad=alatitude_deg*pi/180

write(*,*) 'ALFA'

open(1,file=month)

open(2,file='STSTEM_code_daily_1.txt')

open(3,file='SYSTEM_code_daily_2.txt')

open(4,file='SYSTEM_code_daily_3.txt')

open(5,file='SYSTEM_code_daily_4.txt')

do j=1,60

read(1,*) ihours(j),minutes(j),gtotal(j),gdiff(j),T_ambient_C(j)

Temp_amb_C=T_ambient_C(j)

```
minmidday=(ihours(j)-12)*60+minutes(j)
```

```
gbeam=gtotal(j)-gdiff(j) !W/m2
```

```
gdiff_h(j)=gdiff(j)*2/(1+dcos(collslope_rad))
```

omega=0.25*minmidday

omega_rad=pi*omega/180

costheta=dsin(delta_rad)*dsin(alatitude_rad-collslope_rad)+

*dcos(delta_rad)*dcos(alatitude_rad-collslope_rad)*dcos(omega_rad)

theta_rad=dacos(costheta)

theta_deg(j)=theta_rad*180.d0/pi

coszenith_rad=dsin(delta_rad)*dsin(alatitude_rad)+dcos(delta_rad)*

```
*dcos(alatitude_rad)*dcos(omega_rad)
```

```
zenith_rad=dacos(coszenith_rad)
```

singss=dcos(delta_rad)*dsin(omega_rad)/dsin(zenith_rad)

gss_rad=dasin(singss)

gss_deg=gss_rad*180/pi

cosomega_ew=dtan(delta_rad)/dtan(alatitude_rad)

omega_ew_rad=dacos(cosomega_ew)

if (dabs(dtan(delta_rad)/dtan(alatitude_rad)) .gt. 1) then

```
mar_c1=1.d0
```

else

if (dabs(omega_rad).lt.omega_ew_rad) then

mar_c1=1.d0

else

mar_c1=-1.d0

| endif |
|--|
| endif |
| if ((alatitude_rad*(alatitude_rad-delta_rad)).ge.0) then |
| mar_c2=1.d0 |
| else |
| mar_c2=-1.d0 |
| endif |
| if (omega_rad .ge. 0) then |
| mar_c3=1.d0 |
| else |
| mar_c3=-1.d0 |
| endif |
| |

```
gs_deg=90.d0*mar_c3*(1-mar_c1*mar_c2)+mar_c1*mar_c2*gss_deg
gs_rad=gs_deg*pi/180
beamangle=datan(dtan(zenith_rad)*dcos(gs_rad))
beamangle_deg=180*beamangle/pi
```

uplimangle=collslope_deg+accangle_trunc_deg

dlimangle=collslope_deg-accangle_trunc_deg

if ((beamangle_deg.le.uplimangle).AND.

*(beamangle_deg.ge.dlimangle)) then

if (theta_rad .le. accangle_rad) then

F(j)=1

elseif (theta_rad .gt. accangle_rad .and.

*theta_rad .le. accangle_trunc_rad) then

F(j)=0.5d0+(1.d0-dsin(theta_rad)/dsin(accangle_trunc_rad)*

*(1.d0+pi*concratio_max*dcos(accangle_trunc_rad)))/(2*pi*

```
*concratio_max*costheta)
```

```
elseif (theta_rad .ge. accangle_trunc_rad) then

F(j)=0

else

write(2,*) '------wrong------'

endif

else

F(j)=0

endif

write (*,*) 'DELTA-1-a'
```

```
gb_cpc= F(j)*gbeam
```

if ((collslope_deg+accangle_trunc_deg) .lt. 90.d0) then

```
gdiff_cpc=gdiff_h(j)/concratio_max
```

```
ggrdiff_cpc=0
```

else

gdiff_cpc=gdiff_h(j)*(1/concratio_max+dcos(collslope_rad))/2

```
ggrdiff_cpc=gtotal(j)*ground_reflection*
```

```
*(1/concratio_max-dcos(collslope_rad))/2
```

endif

g_cpc=gb_cpc+gdiff_cpc+ggrdiff_cpc !W/m2

qin=s*coll_width !W/m write (*,*) 'DELTA-1' write(2,*) write(2,*) write(2,*) 'time=',ihours(j),':',minutes(j) write(2,*) write(2,*) '-----optical terms------' write(2,*) 'clean mirror reflectance=',clean mirror reflectance write(2,*) 'reflections_par=',reflections_par write(2,*) 'angle_modifier',angle_modifier write(2,*) 'gap_losses',gap_losses write(2,*) 'end_losses',end_losses write(2,*) 'optical_terms=',optical_terms write(2,*) write(2,*) '-----angles------' write(2,*) 'deglta=',delta write(2,*) 'latitude_moires=',alatitude_deg write(2,*) 'minmidday=',minmidday write(2,*) 'omega_rad=',omega_rad

- write(2,*) 'costheta=',costheta
- write(2,*) 'coszenith=',coszenith_rad
- write(2,*) 'zenith_rad=',zenith_rad
- write(2,*) 'gss_rad=',gss_rad
- write(2,*) 'gss_moires=',gss_deg

write(2,*) 'omega_ew_rad=',omega_ew_rad

write(2,*)
write(2,*) 'mar_c1=',mar_c1
write(2,*) 'mar_c2=',mar_c2
write(2,*) 'mar_c3=',mar_c3
write(2,*)
write(2,*) 'gs_deg=',gs_deg
write(2,*)
write(2,*) 'uplimangle=',uplimangle
write(2,*) 'dlimangle=',dlimangle
write(2,*) 'F=',F(j)
write(2,*) 'beamangle=',beamangle_deg
write(2,*) 'theta_rad=',theta_rad
write(2,*) 'theta_deg(j)=',theta_deg(j)

write(2,*) '-----radiation-----'

- write(2,*) 'gb_cpc=',gb_cpc,'W/m2'
- write(2,*) 'gdiff_cpc=',gdiff_cpc ,'W/m2'

write(2,*) 'ggrdiff_cpc=',ggrdiff_cpc ,'W/m2'

- write(2,*) 'g_cpc=',g_cpc,'W/m2'
- write(2,*) 's=',s,'W/m2'
- write(2,*) 'qin=',qin,'W/m'
- write(2,*) 'seiraq_3sol_sum=',seiraq_3sol
- write(2,*) 'seiraq_4sol_sum=',seiraq_4sol
- q3sol=qin*transcoef_glass*abscoef_abscoat*seiraq_3sol

q4sol=qin*transcoef_glass*abscoef_glass*seiraq_4sol

q5sol=qin*abscoef_glass

write(2,*) 'reflcoef_abscoat=',reflcoef_abscoat

write(2,*) 'reflcoef_glass=',reflcoef_glass

write(2,*) 'q3sol=',q3sol,'W/m'

write(2,*) 'q4sol=',q4sol,'W/m'

write(2,*) 'q5sol=',q5sol,'W/m'

c-----temperatures and water flow of the system------

T_fluid_start_C=70.d0 do k=1,3 if (k .eq. 1) then Temp_fluid_in_C=T_fluid_start_C else Temp_fluid_in_C=T_fluid_out_collector(k-1) endif

c-----initial values of temperatures-----initial values

Tout_C=71.d0

T2_C=71.5d0

T3_C=71.6d0

T4_C=35.1d0

T5_C=34.9d0

c-----fluid flow through the collector-----

system_flow_lt_min=7.d0

system_flow_m3_s=system_flow_lt_min/(60*1000)

collector_rows=6.d0

w_vol_flow=system_flow_m3_s/collector_rows

write(2,*)

write(2,*) 'w_vol_flow=',w_vol_flow,'m3/s'

c-----variables for newton-raphson-----variables

c(1)=q3sol

c(2)=q4sol

c(3)=q5sol

c(4)=T2_C

c(5)=T3_C

c(6)=T4_C

c(7)=T5_C

c(8)=Tout_C

c(9)=Temp_fluid_in_C

c(10)=Temp_amb_C

c(11)=wind_speed

c(12)=q12conv

c(13)=q23cond

c(14)=q34conv

c(15)=q34rad

c(16)=q45cond

c(17)=q56conv

c(18)=q57rad

c(19)=Temp_abs_in_C

c(20)=Temp_abs_out_C

c(21)=Temp_env_in_C

c(22)=Temp_env_out_C

c(23)=Temp_fluid_out_C

c(24)=error1

c(25)=error2

c(26)=error3

c(27)=error4

c(28)=error5

c(29)=hconv_12

c(30)=UL

n=5

do i=1,n

x(i)=1.d0

enddo

write(3,*) 'time=',ihours(j),':',minutes(j)

```
write (*,*) 'EPSILON'
```

```
call newt(x,n,c,lcheck,funcv,iError)
```

T_fluid_out_collector(k)=c(23) Quseful_collector(k)=c(12)*coll_length enddo

T_out_collector_1=T_fluid_out_collector(1)

 $T_out_collector_2=T_fluid_out_collector(2)$

T_out_collector_3=T_fluid_out_collector(3)

Q_collector_1=Quseful_collector(1)

Q_collector_2=Quseful_collector(2)

Q_collector_3=Quseful_collector(3)

 $T_fluid_out_system(j)=(5.d0*T_out_collector_3+T_out_collector_2)/6$

Quseful_system(j)=6.d0*(Q_collector_1+Q_collector_2)+5.d0*

*Q_collector_3

c-----pressure loss calculation-----

T_fluid_av_C=(Temp_fluid_in_C+c(23))/2 density_fluid_av=density_water(T_fluid_av_C) viskin_fluid_av=viskin_water(T_fluid_av_C)

d_hydraulic=d_absorber_in-d_instube_out
hydraulic_cross_section=pi*(d_absorber_in**2-d_instube_out**2)/
*4

w_mass_flow=w_vol_flow*density_fluid_av

velocity_fluid_av=w_mass_flow/(density_fluid_av*

*hydraulic_cross_section)

Reynolds_w=velocity_fluid_av*d_hydraulic/viskin_fluid_av

if (Reynolds_w.gt.2300) then

friction_coef=1/(-1.8*log(6.9/Reynolds_w+(tube_roughness/

*(3.7*d_hydraulic))**1.11))**2

do m=1,10000

```
friction_coef=1/(-2*log10(tube_roughness/d_hydraulic/3.7+2.51/
*(Reynolds_w*dsqrt(friction_coef))))**2
enddo
else
friction_coef=64/Reynolds_w
endif
dpressure_Pascal=friction_coef*tube_length*
*(w_mass_flow/hydraulic_cross_section)**2/
*(2*d_absorber_in*density_fluid_av)
c-----efficiency calculation------
```

UL=c(30)

Uo=(1/c(30)+d_absorber_out/(c(29)*d_absorber_in)+d_absorber_out*

*log(d_absorber_out/d_absorber_in)/(2*therm_cond_iron))**(-1.d0)

```
F_eff=Uo/UL
```

```
Ac=pi*d_envelope_out*envelope_length
```

```
heat_cp_water_av=heat_cp_water(T_fluid_av_C)
```

FR=w_mass_flow*heat_cp_water_av*(1-exp(-Ac*UL*F_eff/(w_mass_flow*

```
*heat_cp_water_av)))/(Ac*UL)
```

```
F_flow=FR/F_eff
```

eff_optical(j)=optical_terms*g_cpc/gtotal(j)

eff_thermal(j)=eff_optical(j)-c(30)*(c(20)-Temp_amb_C)/

*(gtotal(j)*concratio_max)
if (eff_thermal(j) .gt. 0.d0) then

write(4,*)

| write $(1 *)$ | 'time-' ibours(i) '.' minutes(i) | |
|---------------|----------------------------------|--|
| write(4,) | time=,mours(j), . ,minutes(j) | |

- write(4,*) '------'
- write(4,*) '------'
- write(4,*) '------'
- write(4,*) 'T_out_collector_1=',T_out_collector_1,'C'
- write(4,*) 'T_out_collector_2=',T_out_collector_2,'c'
- write(4,*) 'T_out_collector_3=',T_out_collector_3,'c'
- write(4,*) 'Q_collector_1=',Q_collector_1,'W'
- write(4,*) 'Q_collector_2=',Q_collector_2,'W'
- write(4,*) 'Q_collector_3=',Q_collector_3,'W'
- write(4,*) 'T_fluid_out_system(j)=',T_fluid_out_system(j),'C'

write(4,*)

- write(4,*) 'eff_optical(j)=',eff_optical(j)
- write(4,*) 'eff_thermal(j)=',eff_thermal(j)
- write(4,*) '-----'
- write(4,*) '-----'
- write(4,*) '------'

write(4*,**)

- write(4,*) 'density_fluid_av=',density_fluid_av,'kg/m3'
- write(4,*) 'w_mass_flow=',w_mass_flow,'kg/s'
- write(4,*) 'velocity_fluid_av=',velocity_fluid_av,'m/s'
- write(4,*) 'd_hydraulic=',d_hydraulic,'m'
- write(4,*) 'viskin_fluid_av=',viskin_fluid_av,'m2/s'

- write(4,*) 'Reynolds_w=',Reynolds_w
- write(4,*)
- write(4,*) 'friction_coef=',friction_coef
- write(4,*) 'dpressure_Pascal=',dpressure_Pascal,'Pascal'

write(4,*)

- write(4,*) 'wind_speed=',c(11),'m/s'
- write(4,*) 'Temp_abs_in_C=',c(19),'C'
- write(4,*) 'Temp_abs_out_C=',c(20),'c'
- write(4,*) 'Temp_env_in_C=',c(21),'C'
- write(4,*) 'Temp_env_out_C=',c(22),'C'

write(4,*)

- write(4,*) 'q12conv=',c(12),'W/m'
- write(4,*) 'q23cond=',c(13),'W/m'
- write(4,*) 'q34conv=',c(14),'W/m'
- write(4,*) 'q34rad=',c(15),'W/m'
- write(4,*) 'q45cond=',c(16),'W/m'
- write(4,*) 'q56conv=',c(17),'W/m'
- write(4,*) 'q57rad=',c(18),'W/m'

write(4,*)

- write(4,*) 'error1=',c(24)
- write(4,*) 'error2=',c(25)
- write(4,*) 'error3=',c(26)
- write(4,*) 'error4=',c(27)
- write(4,*) 'error5=',c(28)

write(4,*) 'hconv_12=',c(29),'W/m2K'

```
write(4,*) 'UL=',c(30),'W/m2K'
```

write(4,*) 'Uo=',Uo,'W/m2K'
write(4,*) 'F_eff=',F_eff
write(4,*) 'FR=',FR
write(4,*) 'F_flow=',F_flow
write(4,*)

write(5,35) ihours(j),minutes(j),T_fluid_out_system(j)

35 format (I2,5X,I2,F6.2)

else

write(4,*) '------no efficiency------'

endif

enddo

end

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

<u>Συνάρτηση funcv :</u>

subroutine funcv(n,x,c,fvec,iError)

Implicit Double Precision (a-h,o-z)

dimension x(5),c(30),fvec(5)

C-----

c-----air properties-----

function density_air(T)

Implicit Double Precision (a-h,o-z)

density_air=-6.13e-9*T**3+8.08e-6*T**2-4.17e-3*T+1.3

end function

function heat_cp_air(T)

Implicit Double Precision (a-h,o-z)

```
heat_cp_air=(-4.78e-10*T**3+5.8e-7*T**2+3.95e-6*T+1.01)*1000
```

end function

```
function therm_cond_air(T)
Implicit Double Precision (a-h,o-z)
therm_cond_air=1.51e-11*T**3-3.78e-8*T**2+7.95e-5*T+2.41e-2
end function
```

```
function visdyn_air(T)
```

Implicit Double Precision (a-h,o-z)

visdyn_air=4.67e-14*T**3-5.91e-11*T**2+5.46e-8*T+1.7e-5

end function

c-----water properties-----water properties------

```
function density_water(T)
```

implicit Double Precision (a-h,o-z)

density_water=-0.0027*T**2-0.1944*T+1004.6

end function

function heat_cp_water(T)

Implicit Double Precision (a-h,o-z)

heat_cp_water=0.0124*T**2-1.0416*T+4201.7

end function

function therm_cond_water(T)

Implicit Double Precision (a-h,o-z)

therm_cond_water=(-0.0092*T**2+2.109*T+560.67)/1000

end function

function viskin_water(T)

Implicit Double Precision (a-h,o-z)

viskin_water=(-0.448*log(T)+2.3292)/1000000

end function

```
c-----constants-----
```

pi=4*datan(1.d0)

g_acceleration=9.81d0

stefan_boltzman_coef=5.670373e-8

gas_constant=8.3144621d0

avogadro_number=6.0221367e23

q3sol = c(1)

q4sol = c(2)

q5sol = c(3)

Tout_C=c(8)

Temp_fluid_in_C=c(9)

c-----collector properties and dimensions-----

coll_length=1.87d0 !m

coll_width=0.5d0 !m

envelope_length=1.80 !m

tube_length=1.87d0 !m

apert_window=coll_length*coll_width !m2

tube_roughness=150e-6

d_absorber_in=0.119d0 !m

d_absorber_out=0.120d0 !m

d_envelope_in=0.147d0 !m

d_envelope_out=0.150d0 !m

d_instube_out=0.1d0 !m

emisscoef_glass=0.86d0

abscoef_glass=0.02d0

transcoef_glass=0.96d0

reflcoef_glass=1-abscoef_glass-transcoef_glass

therm_cond_glass=1.05d0 !W/mK

emisscoef_abscoat=0.05d0

abscoef_abscoat=0.95d0

reflcoef_abscoat=1-abscoef_abscoat

therm_cond_iron=80.d0 !W/mK

c-----temperatures and water flow of the system------

T2_C=c(4)*x(1)

T3_C=c(5)*x(2)

T4_C=c(6)*x(3)

T5_C=c(7)*x(4)

Tout_C=c(8)*x(5)

write (3,*) 'x1=',x(1)

write (3,*) 'x2=',x(2)

write (3,*) 'x3=',x(3)

write (3,*) 'x4=',x(4)

write (3,*) 'x5=',x(5)

write (3,*) 'T2_C=',T2_C

write (3,*) 'T3_C=',T3_C

write (3,*) 'T4_C=',T4_C

write (3,*) 'T5_C=',T5_C

write (3,*) 'Tout_C=',Tout_C

system_flow_lt_min=7

system_flow_m3_s=system_flow_lt_min/(60*1000)

collector_rows=6.d0

w_vol_flow=system_flow_m3_s/collector_rows !m3/s

write(3,*) 'w_vol_flow=',w_vol_flow,'m3/s'

write(3,*)

c-----convection to the fluid-->q12conv

write (3,*) '------CHECK q12conv------'

T_fluid_av_C=(Temp_fluid_in_C+Tout_C)/2 density_fluid_av=density_water(T_fluid_av_C) !kg/m3 viskin_fluid_av=viskin_water(T_fluid_av_C) !m2/s visdyn_fluid_av=density_fluid_av*viskin_fluid_av !kg/ms

heat_cp_fluid_av=heat_cp_water(T_fluid_av_C) !J/kgK

therm_cond_fluid_av=therm_cond_water(T_fluid_av_C) !W/mK

- write (3,*) 'Temp_fluid_in_C=',Temp_fluid_in_C,'C'
- write (3,*) 'Tout_C=',Tout_C,'C'
- write (3,*) 'T_fluid_av_C=',T_fluid_av_C,'C'
- write (3,*) 'density_fluid_av=',density_fluid_av,'kg/m3'
- write (3,*) 'viskin_fluid_av=',viskin_fluid_av,'m2/s'
- write (3,*) 'visdyn_fluid_av=',visdyn_fluid_av,'kg/ms'
- write (3,*) 'heat_cp_fluid_av=',heat_cp_fluid_av,'J/kgK'
- write (3,*) 'therm_cond_fluid_av=',therm_cond_fluid_av,'W/mK'

density_fluid_abs=density_water(T2_C) !kg/m3
viskin_fluid_abs=viskin_water(T2_C) !m2/s
visdyn_fluid_abs=density_fluid_abs*viskin_fluid_abs !kg/ms
heat_cp_fluid_abs=heat_cp_water(T2_C) !J/kgK
therm_cond_fluid_abs=therm_cond_water(T2_C) !W/mK

d_hydraulic=d_absorber_in-d_instube_out !m
hydraulic_cross_section=pi*

*(d_absorber_in**2-d_instube_out**2)/4 !m2
velocity_fluid=w_vol_flow/hydraulic_cross_section !m/s
Reynolds_w=velocity_fluid*d_hydraulic/viskin_fluid_av

write (3,*) 'density_fluid_abs=',density_fluid_abs,'kg/m3'
write (3,*) 'viskin_fluid_abs=',viskin_fluid_abs,'m2/s'
write (3,*) 'visdyn_fluid_abs=',visdyn_fluid_abs,'kg/ms'
write (3,*) 'heat_cp_fluid_abs=',heat_cp_fluid_abs,'J/kgK'
write (3,*) 'therm_cond_fluid_abs=',therm_cond_fluid_abs,'W/mK'
write (3,*) 'w_vol_flow=',w_vol_flow,'m3/s'

write (3,*) 'd_hydraulic=',d_hydraulic,'m'

write (3,*) 'hydraul_cross_section=',hydraulic_cross_section,'m2'

write (3,*) 'velocity_fluid=',velocity_fluid,'m/s'
write (3,*) 'Reynolds_w=',Reynolds_w

if (Reynolds_w.gt.2300) then

Prandtl1=visdyn_fluid_in*heat_cp_fluid_in/therm_cond_fluid_av

Prandtl2=visdyn_fluid_abs*heat_cp_fluid_abs/therm_cond_fluid_abs

friction_f2=(1.82*log10(Reynolds_w)-1.64)**(-2.d0)

arithmitis=friction_f2/8.d0*(Reynolds_w-1000)*Prandtl1

paronomas=1+12.7*dsqrt(friction_f2/8.d0)*(Prandtl1**(2.d0/3.d0)-1)

aNusseltD2=arithmitis*(Prandtl1/Prandtl2)**0.11d0/paronomas

write (3,*) 'TURBULENT FLOW'

write (3,*) 'Prandtl1=',Prandtl1

write (3,*) 'Prandtl2=',Prandtl2

write (3,*) 'arithmitis=',arithmitis

write (3,*) 'paronomas=',paronomas

write (3,*) 'friction_f2=',friction_f2

write (3,*) 'aNusseltD2=',aNusseltD2

else

write (3,*) 'LAMINAR FLOW'

quotient_d=d_instube_out/d_absorber_in

slope=(5.085-4.86)/(0.50-1)

aNusseltD2=4.86+slope*(quotient_d-1)

write (3,*) 'quotient_d=',quotient_d

write (3,*) 'aNusseltD2=',aNusseltD2

endif

hconv_12=aNusseltD2*therm_cond_fluid_av/d_hydraulic !W/m2K

q12conv=hconv_12*d_absorber_in*pi*

*(T2_C-T_fluid_av_C) !W/m

c(29)=hconv_12

c(12)=q12conv

write (3,*) 'hconv_12=',hconv_12,'W/m2K'

write (3,*) 'q12conv=',q12conv,'W/m'
write (3,*) 'T_absorber_in_C=',T2_C,'C'
write (3,*)

c----->q23cond

write (3,*) '-----CHECK q23cond------'

write (3,*)

T_absorber_av_C=(T2_C+T3_C)/2

q23cond=2*pi*therm_cond_iron*(T3_C-T2_C)

*/log(d_absorber_out/d_absorber_in) !W/m

c(13)=q23cond

write (3,*) 'T_absorber_av_C=',T_absorber_av_C,'C'

write (3,*) 'q23cond=',q23cond,'W/m'

write (3,*)

c-----radiation between absorber and annulus----->q34conv

write (3,*) '-----CHECK q34conv-----'

write (3,*)

P_torr=0.075d0

P_Pascal=P_torr*133.322368d0

accom_coef=0.95

gamma_air=1.4

T_absenv_av_C=(T3_C+T4_C)/2.d0

delta_air=3.53e-10

alamda_air=gas_constant*(T_absenv_av_C+273.15d0)/(sqrt(2.d0)*pi* *delta_air**2*avogadro_number*P_Pascal)

```
quot_k=1/(1+(2-accom_coef)*(9*gamma_air-5.d0)*alamda_air*
*(1/d_absorber_out+1/d_envelope_in)/(accom_coef*(gamma_air+1)*
*log(d_envelope_in/d_absorber_out)))
```

therm_cond_eff=quot_k*therm_cond_air(T_absenv_av_C)

q34conv=2.d0*pi*therm_cond_eff*(T3_C-T4_C)/

*log(d_envelope_in/d_absorber_out)

hconv_34=q34conv/(pi*d_absorber_out*(T3_C-T4_C))

write(3,*) 'P_torr=',P_torr,'torr'

write(3,*) 'P_Pascal=',P_Pascal,'Pascal'

write(3,*) 'accom_coef=',accom_coef

write(3,*) 'gamma_air=',gamma_air

write(3,*) 'delta_air=',delta_air,'m'

write(3,*) 'alamda_air=',alamda_air,'m'

write(3,*) 'T_absenv_av_C=',T_absenv_av_C,'C'

write(3,*) 'quot_k=',quot_k

write(3,*) 'therm_cond_eff=',therm_cond_eff,'W/mK'

write(3,*) 'hconv_34=',hconv_34,'W/m2K'

write(3,*) 'q34conv=',q34conv, 'W/m'

c(14)=q34conv

c-----radiation between glass surface and absorber----->q34rad

write (3,*) '------CHECK q34rad------'

write (3,*)

T3_K=T3_C+273.15

T4_K=T4_C+273.15

q34rad=stefan_boltzman_coef*pi*d_absorber_out*(T3_K**4

*-T4_K**4)/(1/emisscoef_abscoat+(1-emisscoef_glass)*

hrad_34=stefan_boltzman_coef*(T4_K**2+T3_K**2)*(T4_K+T3_K)/
((1-emisscoef_abscoat)/emisscoef_abscoat+(1-emisscoef_glass)
*d_absorber_out/(emisscoef_glass*d_envelope_in)) !W/m2K

c(15)=q34rad

write(3,*) 'emisscoef_glass=',emisscoef_glass

write(3,*) 'emisscoef_abscoat=',emisscoef_abscoat

write (3,*) 'T_absorber_out_K=',T3_K,'K'

write (3,*) 'T_envelope_in_K=',T4_K,'K'

write(3,*) 'hrad_34=',hrad_34,'W/m2K'
write (3,*) 'q34rad=',q34rad,'W/m'
write (3,*)

c----->q45cond

write(3,*) '-----CHECK q45cond------'

write(3,*)

T_envelope_av_C=(T4_C+T5_C)/2

q45cond=2*pi*therm_cond_glass*(T4_C-T5_C)/

*log(d_envelope_out/d_envelope_in)

c(16)=q45cond

write(3,*) 'T_envelope_av_C=',T_envelope_av_C,'C'

write(3,*) 'q45cond=',q45cond,'W/m'

write(3,*)

c-----heat transfer between envelope and atmosphere---->q56conv

write(3,*) '------CHECK q56conv------'

write(3,*)

wind_speed=c(11) !m/s

write(3,*) 'visdyn_air(T_amb_C(j))=',visdyn_air(c(10))

write(3,*) 'density_air(T_amb_C(j))=',density_air(c(10))

```
Prandtl5=visdyn_air(T5_C)*
```

```
*heat_cp_air(T5_C)/therm_cond_air(T5_C)
```

Prandtl6=visdyn_air(c(10))*heat_cp_air(c(10))/

*therm_cond_air(c(10))

Reynolds_air=wind_speed*d_envelope_out/

*(visdyn_air(c(10))/

*density_air(c(10)))

write(3,*) 'Prandtl5=',Prandtl5
write(3,*) 'Prandtl6=',Prandtl6
write(3,*) 'Reynolds_air=',Reynolds_air

```
if (Prandtl6.le.10) then
```

coef_n=0.37

else

coef_n=0.36

endif

write(3,*) 'coef_n=',coef_n

if (Reynolds_air.le.40) then

coef_c=0.75

coef_m=0.4

write(3,*) '0<Reynolds_air<40'</pre>

write(3,*) 'coef_c=0.75'

write(3,*) 'coef_m=0.4'

else

if (Reynolds_air.le.1000) then

coef_c=0.51

coef_m=0.5

write(3,*) '40<Reynolds_air<1000'</pre>

write(3,*) 'coef_c=0.51'

write(3,*) 'coef_m=0.5'

else

if (Reynolds_air.le.200000) then

coef_c=0.26

coef_m=0.6

write(3,*) '1000<Reynolds_air<200000'

write(3,*) 'coef_c=0.26'

write(3,*) 'coef_m=0.6'

else

if (Reynolds_air.le.1e6) then coef_c=0.076

coef_m=0.7

write(3,*) '200000<Reynolds_air<10e6'

write(3,*) 'coef_c=0.076'

write(3,*) 'coef_m=0.7' else write(3,*) 'wrong' endif endif endif endif

```
aNusselt_wind=coef_c*Reynolds_air**coef_m*Prandtl6**coef_n*
```

```
*(Prandtl6/Prandtl5)**0.25
```

write(3,*) 'aNusselt_wind=',aNusselt_wind

 $T_envamb_av_C=(T5_C+c(10))/2$

therm_diff=therm_cond_air(T_envamb_av_C)/

*(density_air(T_envamb_av_C)*heat_cp_air(T_envamb_av_C)) !m2/s

```
beta=1/(T_envamb_av_C+273.15)
```

```
viskin_envamb=visdyn_air(T_envamb_av_C)/density_air(T_envamb_av_C) !m2/s
```

Prandtl56=viskin_envamb/therm_diff

dtemp=T5_C-c(10)

Rayleigh=g_acceleration*beta*dtemp*d_envelope_out**3/

*(therm_diff*viskin_envamb)

arith=0.387*Rayleigh**(1./6.)

paron=(1+(0.559/Prandtl56)**(9./16.))**(8./27.)

aNusselt_nat=(0.6+arith/paron)**2

write(3,*) 'T_envamb_av_C=',T_envamb_av_C,'C'

write(3,*) 'therm_diff=',therm_diff,'m2/s'

write(3,*) 'beta=',beta,'1/K'

write(3,*) 'viskin_envamb=',viskin_envamb,'m2/s'

write(3,*) 'Prandtl56=',Prandtl56

write(3,*) 'Rayleigh=',Rayleigh

write(3,*) 'aNusselt_nat=',aNusselt_nat

if (wind_speed.gt.0.1d0) then

write(3,*) 'WIND CASE'

aNusseltD5=aNusselt_wind

else

```
write(3,*) 'NO WIND CASE'
```

```
aNusseltD5=aNusselt_nat
```

endif

hconv_56=therm_cond_air(T_envamb_av_C)/d_envelope_out*

*aNusseltD5 !W/m2K

q56conv=hconv_56*pi*d_envelope_out*(T5_C-c(10)) !W/m

```
c(17)=q56conv
```

write(3,*) 'aNusseltD5=',aNusseltD5

write(3,*) 'hconv_56=',hconv_56,'W/m2K'

write(3,*) 'q56conv=',q56conv,'W/m'

write(3,*)

c-----radiation between glass surface and sky-->q57rad

write(3,*) '-----CHECK q57rad------'

write(3,*)

T_sky_C=c(10)-6.d0

T_sky_K=T_sky_C+273.15

T5_K=T5_C+273.15

q57rad=stefan_boltzman_coef*d_envelope_out*pi*emisscoef_glass*

*(T5_K**4-T_sky_K**4) !W/m

hrad_57=stefan_boltzman_coef*emisscoef_glass*(T5_K+T_sky_K)*

*(T5_K**2+T_sky_K**2) !W/m2K

c(18)=q57rad

write(3,*) 'emisscoef_glass=',emisscoef_glass

write(3,*) 'T_sky_K=',T_sky_K,'K'

write(3,*) 'T_envelope_out_K=',T5_K,'K'

write(3,*) 'h57rad=',hrad_57,'W/m2K'

write(3,*) 'q57rad=',q57rad,'W/m'

write(3,*)

c-----temperature of the fluid at the exit----->T_fluid_out

write(3,*) '-----CHECK T_fluid_out------'

w_mass_flow=w_vol_flow*density_fluid_av !kg/s

```
density_fluid_in=density_water(Temp_fluid_in_C) !kg/m3
density_fluid_out=density_water(Tout_C) !kg/m3
```

velocity_fluid_in=w_mass_flow/(density_fluid_in*
*hydraulic_cross_section) !m/s
velocity_fluid_out=w_mass_flow/(density_fluid_out*
*hydraulic_cross_section) !m/s
dv=(velocity_fluid_in**2-velocity_fluid_out**2)/
*(2.d0*heat_cp_fluid_av)

write(3,*) 'T_fluid_in_C=',Temp_fluid_in_C,'C'
write(3,*) 'T_fluid_out_C=',Tout_C,'C'

write(3,*) 'density_fluid_in=',density_fluid_in,'kg/m3'
write(3,*) 'density_fluid_in=',density_fluid_out,'kg/m3'

```
write(3,*) 'velocity_fluid_in=',velocity_fluid_in,'m/s'
write(3,*) 'velocity_fluid_in=',velocity_fluid_out,'m/s'
write(3,*) 'dv=',dv
write(3,*) 'w_mass_flow=',w_mass_flow,'kg/s'
write(3,*)
```

UL=((d_absorber_out*tube_length)/(d_envelope_out*envelope_length* *(hconv_56+hrad_57))+1/(hconv_34+hrad_34))**(-1.d0) c(30)=UL Temp_abs_in_C=T2_C

c(19)=Temp_abs_in_C

Temp_abs_out_C=T3_C

c(20)=Temp_abs_in_C

Temp_env_in_C=T4_C

```
c(21)=Temp_env_in_C
```

Temp_env_out_C=T5_C

c(22)=Temp_env_out_C

Temp_fluid_out_C=Tout_C

c(23)=Temp_fluid_out_C

```
fvec(1)=q23cond-q12conv
```

```
fvec(2)=q3sol-q23cond-q34rad-q34conv
```

```
fvec(3)=q4sol+q34rad+q34conv-q45cond
```

```
fvec(4)=q45cond+q5sol-q56conv-q57rad
```

fvec(5)=Tout_C-Temp_fluid_in_C-q12conv*

*coll_length/(w_mass_flow*heat_cp_fluid_av)-(velocity_fluid_in**2-

```
*velocity_fluid_out**2)/(2.d0*heat_cp_fluid_av)
```

error1=q23cond-q12conv

```
error2=q3sol-q23cond-q34rad-q34conv
```

```
error3=q4sol+q34rad+q34conv-q45cond
```

error4=q45cond+q5sol-q56conv-q57rad

error5=Tout_C-Temp_fluid_in_C-q12conv*

*coll_length/(w_mass_flow*heat_cp_fluid_av)-(velocity_fluid_in**2-

*velocity_fluid_out**2)/(2.d0*heat_cp_fluid_av)

c(24)=error1

c(25)=error2

c(26)=error3

c(27)=error4

c(28)=error5

write(3,*)'error1=',error1

write(3,*)'error2=',error2

write(3,*)'error3=',error3

write(3,*)'error4=',error4

write(3,*)'error5=',error5

return

end subroutine