



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ  
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥΣ ΗΛΙΑΚΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Δ. ΤΣΕΚΟΥΡΑ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

Κ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2018





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ  
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥΣ ΗΛΙΑΚΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Δ. ΤΣΕΚΟΥΡΑ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

1. Κ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.  
(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
2. Ε. ΡΟΓΔΑΚΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Χ. ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.

**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

1. Κ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.  
(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
2. Ε. ΡΟΓΔΑΚΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Χ. ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Α. ΣΤΕΓΓΟΥ - ΣΑΓΙΑ, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Δ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Ε. ΠΙΑΚΟΥΜΗΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Ε. ΚΟΡΩΝΑΚΗ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2018



*Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).*



Στην οικογένειά μου  
&  
Στη μνήμη του πατέρα μου





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η εκπόνηση της παρούσας διατριβής έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κίωνα Αντωνόπουλου.

Η εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής αποτέλεσε σημαντική εμπειρία ζωής που επηρέασε τη θεώρηση των πραγμάτων τόσο σε προσωπικό όσο και επαγγελματικό επίπεδο. Για την ολοκλήρωση της διατριβής απαιτήθηκε προσωπική προσπάθεια αλλά και συμβολή αρκετών ανθρώπων στους οποίους μεταφέρω τις ευχαριστίες μου.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε δύο ανθρώπους για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν. Τον κ. Κίωνα Αντωνόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντα της διατριβής, και τον Δρ. Άρη Αϊδώνη, τέως ερευνητή του ΚΑΠΕ. Δίπλα τους μαθήτευσα και έκανα τα πρώτα μου βήματα στον τομέα της ηλιοθερμίας. Η δημιουργική συνεργασία με αξίες, ιδανικά και οράματα ήταν πάντα δεδομένη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, Καθηγητή Ε. Ρογδάκη και Αν. Καθηγητή Χ. Τζιβανίδη, για την καθοδήγηση και στήριξη που έλαβα σε διαφορετικά κρίσιμα στάδια αυτής της διαδρομής. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια Α. Στέγγου – Σαγιά, τον Καθηγητή Δ. Χουντάλα, τον Αν. Καθηγητή Ε. Γιακουμή και την Αν. Καθηγήτρια Ε. Κορωνάκη για τη συμμετοχή τους στην επταμελή επιτροπή της διατριβής.

Ιδιαίτερη μνεία αξίζει στους κ. Π. Λαμάρη και κ. Β. Λαμάρη από τη βιομηχανία SOLE για τη συνεργασία μας με κοινό σκοπό την ανάπτυξη ενός εγχώριου συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη. Η πολυετής τους εμπειρία, η διαρκής αναζήτηση νέων προϊόντων και η τεχνογνωσία τους σε θέματα παραγωγής και αγοράς κατέστησαν εφικτή τη σύνδεση της εφαρμοσμένης έρευνας με την επιχειρηματικότητα.

Θερμές ευχαριστίες προς το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), το οποίο με υποστήριξε οικονομικά στα πρώτα χρόνια της πορείας μου και εξασφάλισε πρόσβαση στην πειραματική διάταξη του Ινστιτούτου Κύπρου, με ιδιαίτερη αναφορά στους Δρ. Κ. Καρύτσα και Δρ. Β. Δρόσου.

Θερμές ευχαριστίες επίσης προς το Ινστιτούτο Κύπρου που παρείχε πρόσβαση στην υψηλών προδιαγραφών ερευνητική υποδομή του. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει στους Dr. Alaric Montenon και κ. Γ. Κίρκο για την εξαιρετική συνεργασία και υποδειγματική φιλοξενία κατά την περίοδο της παραμονής μου στην Κύπρο.

Τα λόγια είναι περιττά για τη συνεργάτιδα και σύντροφό μου, Δρ. Ρόζυ Χριστοδουλάκη. Η αμέριστη υποστήριξη, οι ατελείωτες τεχνικές συζητήσεις, η καθημερινή ανοχή σε υπερβολές και θυσίες που συνεπάγεται η διατριβή ήταν παραπάνω από καθοριστικά για την ολοκλήρωση της διατριβής. Τα παιδιά μου, Δημήτρης και Γιάννης, έδειξαν κατανόηση στα ωράρια εργασίας του τελευταίου έτους και τους ευχαριστώ.

Η στήριξη από την οικογένειά μου ήταν καταλυτική. Ο πατέρας μου, Δημήτρης, ήταν πάντα στο πλευρό μου. Η μητέρα μου, Χαρούλα, και ο αδερφός μου, Γιώργος, σε ιδιαίτερα απαιτητικές περιστάσεις κουβάλησαν βαρύ φορτίο που μου αντιστοιχούσε, για να μου παρέχουν το χρόνο και την ηρεμία ώστε να ολοκληρώσω τη διατριβή.

Σας ευχαριστώ όλους

Παναγιώτης

Αθήνα, Μάιος 2018

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες τεχνολογίας Fresnel. Οι ηλιακοί αυτοί συλλέκτες χρησιμοποιούν κινούμενες ανακλαστικές επιφάνειες ώστε να συγκεντρώσουν την ακτινοβολία γραμμικά σε έναν υπερυψωμένο δέκτη, εσωτερικά του οποίου κυκλοφορεί θερμικό μέσο, παράγοντας έτσι θερμότητα σε μέση θερμοκρασία. Οι βασικές εφαρμογές αφορούν παραγωγή θερμότητας για βιομηχανικές διεργασίες, ηλεκτροπαραγωγή, ψύξη και αφαλάτωση. Σήμερα, η τεχνολογία βρίσκεται ακόμα σε στάδιο χαμηλής ωρίμανσης διατηρώντας αρκετά περιθώρια βελτίωσης.

Η διδακτορική διατριβή πραγματεύεται τη βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών Fresnel, την ανάπτυξη αξιόπιστων εργαλείων υπολογισμού της απόδοσής τους καθώς και την ανάπτυξη καινοτόμων βελτιωτικών προτάσεων. Η επιστημονική προσέγγιση περιλαμβάνει δραστηριότητες που εστιάζουν στην οπτική και θερμική διερεύνηση του αντικειμένου, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο.

Διερευνάται η οπτική συμπεριφορά ηλιακών συλλεκτών Fresnel με πρωτεύοντες ανακλαστήρες επίπεδου και παραβολικού σχήματος, και δευτερεύοντα δέκτη επίπεδου, παραβολικού και CPC σχήματος. Αναπτύσσονται μαθηματικά μοντέλα οπτικής ανάλυσης και μοντέλα σε πρόγραμμα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα τους συγκρίνονται μεταξύ τους, καθώς και με δημοσιευμένα δεδομένα. Τέλος, αναλύονται διεξοδικά οι κρίσιμοι παράγοντες που επιδρούν στην οπτική απόδοση, όπως η γωνία πρόσπτωσης, τα οπτικά σφάλματα και η καμπυλότητα των ανακλαστήρων.

Αντίστοιχα, διερευνάται η θερμική συμπεριφορά γραμμικών δεκτών συγκέντρωσης ακτινοβολίας απλού απορροφητή, απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό και απορροφητή με μόνωση και γυάλινο κάλυμμα. Αναπτύσσονται μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και μοντέλα σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Τα αποτελέσματα τους συγκρίνονται μεταξύ τους και με δημοσιευμένα στοιχεία, όπου είναι διαθέσιμα. Επιπλέον, σχεδιάζεται και μελετάται καινοτόμος δέκτης διπλής διαδρομής με γυάλινο περίβλημα και κενό. Τέλος, αναλύονται διεξοδικά οι κρίσιμοι παράγοντες που επιδρούν στη θερμική απόδοση, όπως η θερμοκρασία, η παροχή μάζας και η διάμετρος και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

Το πειραματικό σκέλος της διατριβής περιλαμβάνει εργασίες σχεδιασμού και ανάπτυξης πρωτοτύπου του ηλιακού συλλεκτή Fresnel στην Αθήνα, σε συνεργασία με εγχώρια βιομηχανία. Η ανακλαστική επιφάνεια του πρωτοτύπου ανέρχεται σε  $56 \text{ m}^2$ , αποτελούμενο από 14 σειρές

ανακλαστήρων, με δέκτη σχήματος CPC και απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό. Σχεδιάζεται και αναπτύσσεται πειραματική διάταξη με θερμικό λάδι, συμπεριλαμβανομένου του μετρητικού εξοπλισμού. Σχεδιάζεται η μεθοδολογία των πειραμάτων και της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων και λαμβάνονται δοκιμαστικές μετρήσεις. Η έλλειψη πόρων για την επαναλειτουργία της διάταξης καθιστά ανέφικτη τη διεξαγωγή επαρκούς δείγματος μετρήσεων στη συγκεκριμένη διάταξη.

Για την ολοκλήρωση των πειραματικών δραστηριοτήτων ο συγγραφέας της διατριβής μεταβαίνει στην Κύπρο, σε αντίστοιχης τεχνολογίας πειραματική διάταξη με ανακλαστική επιφάνεια 184 m<sup>2</sup>. Για το σκοπό αυτόν αναπτύσσεται επιπρόσθετος φορητός μετρητικός εξοπλισμός, ο οποίος λειτουργεί παράλληλα με τον εγκατεστημένο εξοπλισμό της διάταξης, ενισχύοντας την αξιοπιστία των μετρήσεων. Η θεωρητική προσέγγιση επικυρώνεται με χρήση μετρήσεων μεγάλων χρονικών διαστημάτων, υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων κρίνεται καλή και κατά συνέπεια η ενεργειακή απόδοση των ηλιακών συλλεκτών Fresnel προσεγγίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια.

## **ABSTRACT**

The subject of this Doctoral Research is the linear Fresnel solar collectors. This type of concentrating solar collectors utilise tracking reflective surfaces to concentrate the solar radiation in an elevated linear receiver. Inside the receiver, a thermal fluid circulates and heat is produced in medium temperature level. Common applications of this type of solar collector are heat production for industrial processes, electricity production, cooling and desalination. Currently, the technology is in the first development stage having potential for further improvement.

This Doctoral Research aims at the in-depth understanding of the operation of these collectors, the development of reliable tools for the calculation of their efficiency, as well as the development of innovative technical solutions. The scientific approach includes optical and thermal analysis, both at theoretical and at experimental level.

The optical performance of the linear Fresnel collectors is investigated. To this end, mathematical and ray-tracing models are developed. The results of both models are compared with each other and with published data. The critical factors that affect the optical performance, such as the incidence angle, the optical errors and the curvature of the primary reflectors, are discussed in details and useful results are extracted.

The analysis of the thermal performance of three types of absorbers then follows; single tube absorber, absorber with glass tube and vacuum, and absorber with insulation and glass cover are studied. Mathematical heat transfer and CFD models are developed and their results are compared with each other and with published data. Additionally, an innovative double pass absorber with glass tube and vacuum is designed and investigated. The critical factors that affect the thermal performance, such as the inlet temperature, the mass flow rate and the absorber diameter are discussed in details and useful results are extracted.

The experimental part of this Doctorate initiates with the design and the development of a Fresnel prototype in Athens, in collaboration with a local solar industry. The prototype consists of 56 m<sup>2</sup> reflective surface area, with 14 rows of reflectors, a CPC receiver and an absorber with glass envelope and vacuum. An experimental facility with thermal oil, along with the monitoring system is designed and developed. The methodology of the experimental and the data analysis procedure are then determined and sample data is acquired. However, the lack of

resources for the continuous system operation deterred the acquisition of sufficient amount of data.

The author acquires the necessary experimental data from a test facility in Cyprus, with 184 m<sup>2</sup> reflective surface. A portable measurement facility that operates in parallel to the installed monitoring system is developed, with the view to enhance the credibility of the measurements. The theoretical approach for the prediction of the energy performance of the solar collector is validated with the experimental data, for long periods of time and under different operational conditions. The comparison proved that the models can sufficiently approach the energy performance of the linear Fresnel solar collectors.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	2
1.1	Πρόλογος .....	2
1.2	Σκοπός της διατριβής .....	4
1.3	Δομή της διατριβής .....	5
2	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ της ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	7
2.1	Εισαγωγή .....	7
2.2	Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες .....	11
2.2.1	Κοιλοπαραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες.....	11
2.2.2	Ηλιακοί συλλέκτες Fresnel.....	13
2.2.3	Ηλιακός πύργος.....	15
2.2.4	Παραβολικό πιάτο .....	16
2.3	Επισκόπηση των ηλιακών συλλεκτών Fresnel.....	17
3	ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL ΜΕ ΕΠΙΠΕΔΟΥΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΕΚΤΗ.....	25
3.1	Εισαγωγή .....	25
3.2	Θεωρητικές εξισώσεις.....	26
3.2.1	Γωνίες Ηλίου και επιφανειών .....	26
3.2.2	Οπτικές απώλειες .....	29
3.2.3	Ηλιακός συλλέκτης .....	31
3.3	Περιγραφή ηλιακού συλλέκτη .....	33
3.4	Μοντέλο γεωμετρικής ανάλυσης (GBOM) .....	34
3.4.1	Μεθοδολογία .....	34
3.4.2	Αποτελέσματα .....	35
3.5	Μοντέλο Ιχνηλάτησης Ακτινοβολίας (RTM) .....	45
3.5.1	Μεθοδολογία .....	45
3.5.2	Αποτελέσματα .....	46
3.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλων.....	50
3.7	Συμπεράσματα .....	51
4	ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL ΜΕ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ και ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ CPC .....	52
4.1	Εισαγωγή .....	52
4.2	Περιγραφή ηλιακού συλλέκτη .....	53
4.3	Υπολογιστική ανάλυση .....	54
4.3.1	Περιγραφή μοντέλου .....	54
4.3.2	Επικύρωση μοντέλου.....	55
4.4	Αποτελέσματα .....	58

4.5	Ανάλυση σφάλματος παρακολούθησης .....	60
4.6	Ανάλυση καμπυλότητας ανακλαστήρων .....	62
4.7	Συμπεράσματα .....	66
5	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΚΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΟΝΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ .....	67
5.1	Εισαγωγή .....	67
5.2	Θεωρητικές εξισώσεις.....	68
5.3	Δέκτης απορροφητή σωλήνα.....	76
5.3.1	Περιγραφή δέκτη .....	76
5.3.2	Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας .....	77
5.3.3	Μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	78
5.3.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλων .....	79
5.4	Δέκτης απορροφητή σωλήνα με γυάλινο περίβλημα και κενό.....	81
5.4.1	Περιγραφή δέκτη .....	81
5.4.2	Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας .....	83
5.4.3	Μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	84
5.4.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλων με δεδομένα βιβλιογραφίας	84
5.4.5	Αποτελέσματα .....	86
5.5	Δέκτης απορροφητή σωλήνα με γυάλινο κάλυμμα και δευτερεύοντα ανακλαστήρα με μόνωση.....	91
5.5.1	Περιγραφή δέκτη .....	91
5.5.2	Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας .....	93
5.5.3	Μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	94
5.5.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλων με δεδομένα βιβλιογραφίας	95
5.6	Συγκριτική αξιολόγηση δεκτών .....	99
5.7	Συμπεράσματα .....	101
6	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΚΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ .....	102
6.1	Εισαγωγή .....	102
6.2	Αρχή λειτουργίας.....	105
6.3	Μοντελοποίηση.....	107
6.4	Αποτελέσματα .....	112
6.5	Συμπεράσματα .....	121
7	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ.....	122
7.1	Εισαγωγή .....	122
7.2	Ο ηλιακός συλλέκτης.....	123
7.3	Πειραματική διάταξη.....	126



7.4	Μετρητικός εξοπλισμός.....	128
7.5	Σύστημα SCADA .....	131
7.6	Διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων .....	134
7.7	Συμπεράσματα .....	136
8	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	137
8.1	Εισαγωγή .....	137
8.2	Πειραματική διάταξη.....	138
8.3	Μετρητικός εξοπλισμός.....	141
8.3.1	Μετρητικός εξοπλισμός διάταξης.....	141
8.3.2	Φορητός μετρητικός εξοπλισμός.....	142
8.4	Μοντελοποίηση ηλιακού συλλέκτη .....	145
8.5	Διενέργεια πειραμάτων.....	151
8.5.1	Ιστορικό πειραμάτων .....	151
8.5.2	Έλεγχος μετρητικού εξοπλισμού .....	152
8.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με μετρήσεις.....	157
8.6.1	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα .....	157
8.6.2	Ημέρα με καλή ηλιοφάνεια.....	158
8.6.3	Ημέρα με αραιή συννεφιά .....	160
8.6.4	Ημέρα με μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας .....	161
8.6.5	Παραδοχή μεταβλητού σφάλματος .....	164
8.7	Συμπεράσματα .....	168
9	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	170
9.1	Συμπεράσματα .....	170
9.2	Στοιχεία πρωτοτυπίας .....	173
9.3	Δημοσιεύσεις .....	175
9.4	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	176
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	177
	Παράρτημα Α - Σύμβολα .....	177
	Παράρτημα Β - Λίστα Σχημάτων.....	181
	Παράρτημα Γ - Λίστα Πινάκων.....	187
	Παράρτημα Δ - Ωρίμανση κατασκευών ηλιακού συλλέκτη Fresnel.....	189
	Παράρτημα Δ - Σύντομο Βιογραφικό.....	190
	Παράρτημα Ε - Λογισμικά .....	192
	Παράρτημα ΣΤ - Αναφορές.....	193



## **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Πρόλογος**

Καθώς η παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) παρουσιάζει αυξητική τάση παγκοσμίως, η έρευνα για τη διεύρυνση των εφαρμογών ΑΠΕ αποκτά ιδιαίτερη επιστημονική και κοινωνική αξία. Μία τέτοια εφαρμογή είναι η παραγωγή θερμότητας για την ενεργειακή κάλυψη βιομηχανικών διεργασιών.

Δεδομένου ότι η ενέργεια που καταναλώνεται από τις βιομηχανίες αποτελεί το 25.9% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρώπη για το 2014 [1,2] και ότι οι βιομηχανίες κατέχουν το 40% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρισμού [3], η διείδυση των ΑΠΕ στη βιομηχανία θα είχε σημαντικό αντίκτυπο.

Για την παραγωγή θερμότητας βιομηχανικών διεργασιών, ο ανταγωνισμός μεταξύ τεχνολογιών ΑΠΕ είναι περιορισμένος. Οι ηλιοθερμικές τεχνολογίες παρουσιάζουν τεχνο-οικονομικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό [4, 5]. Μία πρόσφατη έρευνα [6] έδειξε ότι οι ηλιοθερμικές τεχνολογίες μπορούν να συνεισφέρουν κατά 5.6 EJ ετησίως έως το 2050.

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες αποτελούνται από ανακλαστήρες που ακολουθούν την κίνηση του Ηλίου και συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε έναν γραμμικό ή σημειακό δέκτη. Ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας, ενδείκνυνται διαφορετικές τεχνολογίες συγκέντρωσης ακτινοβολίας. Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών: κοιλοπαραβολικοί, Fresnel, ηλιακός πύργος και ηλιακός δίσκος [7].

Οι τεχνολογίες γραμμικής συγκέντρωσης είναι προτιμότερες για την παραγωγή θερμότητας βιομηχανικών διεργασιών, ιδιαίτερα στο θερμοκρασιακό επίπεδο 100-400°C [8].

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες γραμμικής εστίασης Fresnel αποτελούνται κυρίως από τους πρωτεύοντες ανακλαστήρες, το δευτερεύοντα ανακλαστήρα και τον απορροφητή. Οι πρωτεύοντες ανακλαστήρες παρακολουθούν τον Ήλιο και κατευθύνουν την ακτινοβολία προς τον απορροφητή. Ο δευτερεύον ανακλαστήρας ενισχύει περαιτέρω τη συγκέντρωση ακτινοβολίας στον απορροφητή. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται στην επιλεκτική επιφάνεια του απορροφητή και μετατρέπεται σε θερμότητα. Εσωτερικά του απορροφητή, ρέει το θερμικό ρευστό στο οποίο τελικά μεταφέρεται το μεγαλύτερο μέρος της παραχθείσας θερμότητας.

Οι εργασίες των Moghimi et al [8], Zhu et al [9] και Singh et al [10] αποτυπώνουν τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας ηλιακών των συλλεκτών Fresnel. Μερικά από αυτά αναφέρονται: το φορτίο ανέμου στο συλλέκτη είναι περιορισμένο εξαιτίας της οριζόντιας τοποθέτησής του οδηγώντας σε οικονομικότερη κατασκευή, οι ανακλαστές περιστρέφονται με την ίδια γωνία οδηγώντας σε δυνατότητα χρήσης κοινού μηχανισμού κίνησης, ο κίνδυνος διαρροής του θερμικού ρευστού είναι περιορισμένος καθώς ο απορροφητής είναι σταθερός και η ανάπτυξη του ηλιακού συλλέκτη στο πεδίο οδηγεί σε καλή αξιοποίηση του εδάφους.

Παρά τις αρχικές εφαρμογές ανά τον κόσμο, η τεχνολογία βρίσκεται ακόμα σε στάδιο ωρίμανσης. Πράγματι, σύμφωνα με την πρόσφατη μελέτη του Ευρωπαϊκού Οργανισμού παραγωγής ηλεκτρισμού από θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες ESTELA [5], οι συλλέκτες Fresnel χρήζουν περαιτέρω τεχνο-οικονομικής βελτίωσης. Η διδακτορική αυτή διατριβή κινείται προς αυτήν την κατεύθυνση, μελετώντας την οπτική και θερμική τους απόδοση, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο.

## 1.2 Σκοπός της διατριβής

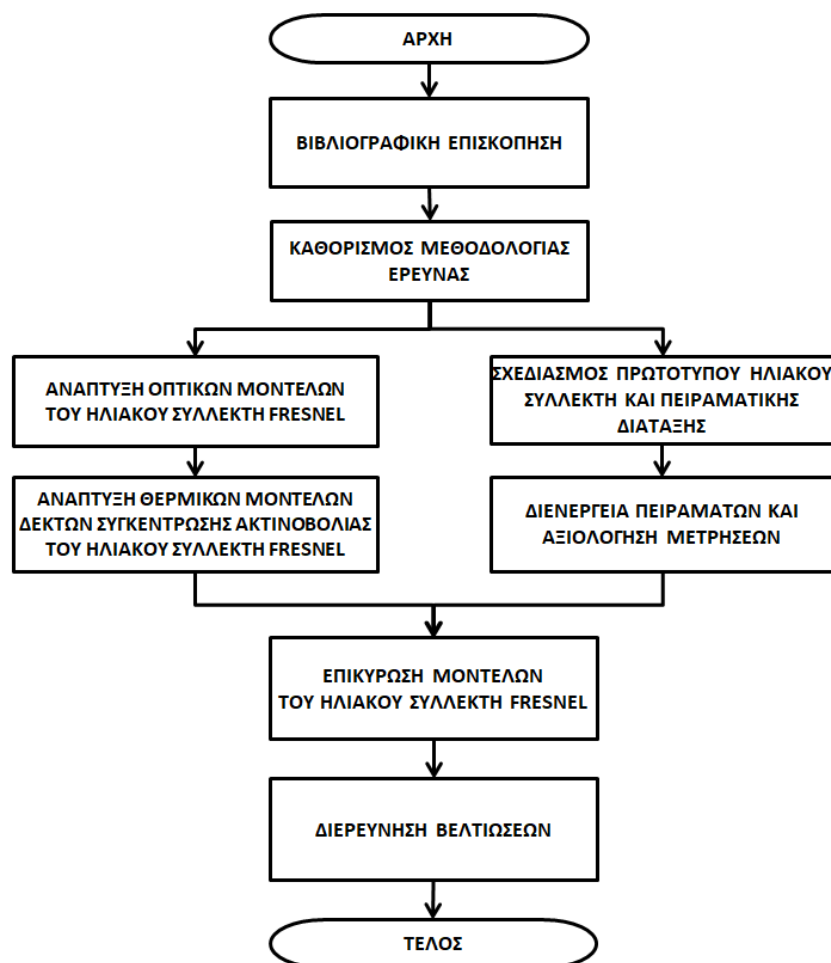
Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες γραμμικής εστίασης τεχνολογίας Fresnel. Η επιστημονική προσέγγιση περιλαμβάνει δραστηριότητες που εστιάζουν στην οπτική και θερμική διερεύνηση του αντικειμένου, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο.

Απώτερος σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας αυτών των καινοτόμων ηλιακών συλλεκτών, η ανάπτυξη αξιόπιστων εργαλείων για τον υπολογισμό της απόδοσής τους, η εξαγωγή ωφέλιμων συμπερασμάτων, η ανάπτυξη καινοτόμων βελτιωτικών προτάσεων καθώς και η αποτύπωση της τεχνογνωσίας που αποκτήθηκε προς χρήση από επόμενους ερευνητές.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τις θεωρητικές εργασίες, έγινε συστηματική προσπάθεια ώστε το σύνθετο πρόβλημα να αναλύεται σε επιμέρους, να αναπτύσσονται ένα με δύο υπολογιστικά μοντέλα σε κάθε κεφάλαιο της διατριβής και παράλληλα, τα μοντέλα να επικυρώνονται σταδιακά μέσω σύγκρισης με αξιόπιστα δημοσιευμένα αποτελέσματα. Επιπλέον, κατά τις πειραματικές εργασίες, έγινε συστηματική προσπάθεια σε πρώτη φάση για την ανάπτυξη ηλιακού συλλέκτη και πειραματικής διάταξης στην Αθήνα και σε δεύτερη φάση, για την εύρεση πειραματικής υποδομής που να συνδυάζει προσβασιμότητα, καλή κατάσταση λειτουργίας και ικανοποιητικό μέγεθος ηλιακού πεδίου ώστε να οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα. Οι προσπάθειες αυτές ευοδώθηκαν καθώς διενεργήθηκαν τα πειράματα στην πειραματική υποδομή του Ινστιτούτου Κύπρου. Τέλος, για τη διενέργεια των πειραμάτων έγινε χρήση δύο παράλληλων συστημάτων λήψης και καταγραφής μετρήσεων.

### 1.3 Δομή της διατριβής

Το διάγραμμα ροής της διδακτορικής διατριβής φαίνεται στο Σχήμα 1-1.



Σχήμα 1-1: Διάγραμμα ροής της διδακτορικής διατριβής.

Η αποτύπωση των δραστηριοτήτων της διατριβής οδήγησε στα παρακάτω κεφάλαια.

Το κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει την επισκόπηση της βιβλιογραφίας.

Το κεφάλαιο 3 πραγματεύεται την οπτική ανάλυση ηλιακού συλλέκτη τεχνολογίας Fresnel. Πρωταρχικός σκοπός του υπολογιστικού μοντέλου είναι η οπτική ανάλυση ενός συλλέκτη με επίπεδους ανακλαστήρες και επίπεδο δέκτη. Τα αποτελέσματα εξάγονται ανά τύπο οπτικής απώλειας και ανά σειρά. Για τη έλεγχο των αποτελεσμάτων αναπτύσσεται δεύτερο υπολογιστικό μοντέλο σε πρόγραμμα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας και τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους.

Το κεφάλαιο 4 πραγματεύεται την οπτική ανάλυση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη με πρωτεύοντες ανακλαστήρες παραβολικού σχήματος, δευτερεύοντα ανακλαστήρα σχήματος CP και απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό. Αναπτύσσεται νέο μοντέλο σε πρόγραμμα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας το οποίο επικυρώνεται με

δεδομένα βιβλιογραφίας. Η οπτική συμπεριφορά του δέκτη αναλύεται διεξοδικά συναρτήσσει οπτικών σφαλμάτων. Τέλος, διερευνάται η επίδραση της εφαρμογής κοινής καμπυλότητας παραβολικού σχήματος σε όλες τις σειρές των ανακλαστήρων του ηλιακού συλλέκτη.

Το κεφάλαιο 5 πραγματεύεται τη θερμική ανάλυση τριών διαφορετικών τυπολογιών απορροφητών. Αναλύεται απορροφητής σωλήνα, απορροφητής με γυάλινο περίβλημα και κενό και απορροφητής σε κοιλότητα με γυάλινο κάλυμμα και μόνωση. Σε κάθε περίπτωση αναπτύσσεται μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και δεύτερο μοντέλο σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με δεδομένα βιβλιογραφίας όπου είναι διαθέσιμα.

Στο κεφάλαιο 6 διερευνάται η θερμική συμπεριφορά ενός δέκτη διπλής διαδρομής με απορροφητή σωλήνα και γυάλινο περίβλημα και κενό. Ο δέκτης διπλής διαδρομής μοντελοποιείται σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και συγκρίνεται με δέκτη μονής διαδρομής όμοιων χαρακτηριστικών. Τέλος, διερευνάται η επίδραση κρίσιμων παραμέτρων στην απόδοση του δέκτη.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται οι εργασίες ανάπτυξης του ηλιακού συλλέκτη Fresnel και της μετρητικής διάταξης στην Αθήνα. Περιγράφεται ο μετρητικός εξοπλισμός, το σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης καθώς και η διαδικασία λήψης και αξιολόγησης των μετρήσεων. Η αδυναμία ολοκλήρωσης των μετρήσεων σε αυτή τη διάταξη εξαιτίας τεχνικών και χρονικών ζητημάτων, οδήγησαν το συγγραφέα σε ταξίδι στο εξωτερικό για τη λήψη μετρήσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Στο κεφάλαιο 8 γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με τη διεξαγωγή μετρήσεων από τον συγγραφέα στην Κύπρο και με την επικύρωση των υπολογιστικών μοντέλων. Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από ανακλαστήρες παραβολικού σχήματος και σωλήνα κενού. Παρουσιάζεται αναλυτικά ο φορητός εξοπλισμός λήψης μετρήσεων, η προετοιμασία και η διαδικασία των πειραμάτων. Ακολουθεί ο έλεγχος της αξιοπιστίας των μετρήσεων με σύγκριση των δεδομένων από τα δύο μετρητικά συστήματα. Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία επικύρωσης των υπολογιστικών μοντέλων, όπου εξαγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο 9 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της διατριβής και αποτυπώνονται οι μελλοντικές προτάσεις έρευνας.

## **2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ**

### **2.1 Εισαγωγή**

Σημαντικές βελτιώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα παρατηρούνται σήμερα σε όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σχεδιάζονται και εφαρμόζονται πολιτικές εξοικονόμησης ενέργειας που έχουν ως στόχο να μειώσουν την τελική κατανάλωση ενέργειας, να ενισχύσουν την ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης, να μειώσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, να δημιουργήσουν νέες θέσεις εργασίας και να εξοικονομήσουν χρήματα οι καταναλωτές [11].

Πράγματι, η Ευρωπαϊκή Ένωση δεσμεύθηκε να μειώσει την τελική κατανάλωση ενέργειας κατά 20% μέχρι το 2020 [12]. Μεταφράζοντάς το σε απόλυτα νούμερα, η Ευρώπη δεσμεύθηκε να κρατήσει την κατανάλωση της πρωτογενούς ενέργειας κάτω από 1483 Mtoe και την τελική κατανάλωση ενέργειας κάτω από 1086 Mtoe το 2020. Η πρακτική αυτή είχε θετικά αποτελέσματα, καθώς το 2016 η τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ευρώπη ήταν 1108 Mtoe και απείχε μόνο 2% από τον τελικό στόχο [13].

Η κατανάλωση ενέργειας στον βιομηχανικό τομέα αντιστοιχεί στο ένα τρίτο της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, έχοντας συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις 128 EJ/έτος. Επιπλέον, η σημερινή βιομηχανική παραγωγή αναμένεται να τετραπλασιαστεί μέχρι το 2050 [14,15].

Ανάλογα με τη χρήση της ενέργειας, οι απαιτήσεις αυτές κατανέμονται ως εξής: 78 EJ/έτος για παραγωγή θερμότητας, 9 EJ/έτος για θέρμανση δοχείων και φούρνων, 16 EJ/έτος για παραγωγή χημικών προϊόντων και πολυμερών και 24EJ/έτος για ηλεκτρισμό [16].

Καταμερίζοντας τις απαιτήσεις αυτές σε τρία θερμοκρασιακά επίπεδα, το 50% (44 EJ) χρησιμοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες, 27% (23 EJ) σε μεσαίες θερμοκρασίες και το υπόλοιπο 23% (19 EJ) σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο καταμερισμός αυτός δεν αναμένεται να αλλάξει έως το 2030 [16].

Από γεωγραφικής πλευράς, περίπου το 64% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας (81 EJ/έτος) των βιομηχανιών προέρχεται από κράτη μη-μέλη του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης Ο.Ο.Σ.Α., δηλαδή κράτη υπό ανάπτυξη με μεταβατικές οικονομίες. Τα κράτη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., δηλαδή οι ανεπτυγμένες χώρες, καταναλώνουν το υπόλοιπο 36% (47 EJ/έτος). Αναφορικά με την προέλευση του καυσίμου, το 91% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας στις βιομηχανίες προέρχεται από συμβατικές πηγές, όπως ορυκτά καύσιμα, άνθρακας, πετρελαϊκά προϊόντα και φυσικό αέριο. Το υπόλοιπο 9% προέρχεται από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.



Ειδικά για τις βιομηχανίες, η λειτουργία της Ευρωπαϊκής αγοράς άνθρακα [17] φαίνεται ότι προσέφερε κίνητρα ώστε οι βιομηχανίες να χρησιμοποιούν καθαρότερα καύσιμα και να επενδύουν σε ενεργειακά αποδοτικά συστήματα. Όμως, το 2009 η ενεργειακή ανάγκη στις βιομηχανίες ανέκαμψε από την παγκόσμια οικονομική κρίση και από τότε, παρουσιάζει αύξηση κατά 2.7% ετησίως. Επιπλέον, η παγκόσμια βιομηχανική παραγωγή αυξάνεται κατά 1.7% ανά έτος κατά μέσο όρο και έτσι, η παγκόσμια κατανάλωση ορυκτών καυσίμων αναμένεται να φτάσει τα 113 EJ/έτος μέχρι το 2030 [16].

Στις περισσότερες χώρες, η βιομηχανία αποτελεί και θα παραμείνει ένας σημαντικός οικονομικός παράγοντας, καθώς η ανάγκη για υλικά και προϊόντα θα αυξάνεται, ως αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού και της οικονομικής ανάπτυξης. Συνεπώς, υπάρχει τεράστιο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στις βιομηχανίες το οποίο είναι μέχρι στιγμής ανεκμετάλλευτο. Το δυναμικό αυτό υπολογίζεται ότι θα μπορούσε να μειώσει τα λειτουργικά κόστη των βιομηχανιών έως και 10% [11].

Έντονες ανησυχίες σχετικά με την επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής δημιούργησαν την πρωτοβουλία Sustainable Energy for All [18] από τη Γενική Γραμματεία Ηνωμένων Εθνών. Η πρωτοβουλία αυτή δεσμεύει τις εμπλεκόμενες χώρες να πετύχουν τρεις στόχους έως το 2030: πρόσβαση σε σύγχρονες υπηρεσίες ενέργειας, διπλασιασμός της ενεργειακής αποδοτικότητας των συστημάτων και διπλασιασμός του ποσοστού των Α.Π.Ε. στο μίγμα καυσίμων.

Ο βιομηχανικός τομέας, ως σημαντικός καταναλωτής ενέργειας, έχει πολλά να συνεισφέρει στην επίτευξη των παραπάνω στόχων. Μία σειρά από μέτρα μπορούν να υιοθετηθούν, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και συνεπώς, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Το πρώτο και σημαντικότερο μέτρο είναι βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων και των τεχνολογιών. Το δεύτερο μέτρο θα μπορούσε να ήταν η χρήση της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, όμως δεν έχει αποδειχθεί ακόμη σε περιβάλλον λειτουργίας και το κόστος είναι μέχρι στιγμής απαγορευτικό για τις βιομηχανίες. Το τρίτο μέτρο είναι η χρήση των Α.Π.Ε. στη βιομηχανία, η οποία μέχρι στιγμής δεν απολαμβάνει το ενδιαφέρον της κοινότητας, σε αντίθεση με την ευρέως διαδομένη χρήση Α.Π.Ε. στην ηλεκτροπαραγωγή, στις κατοικίες και στις μεταφορές [16].

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Α.Π.Ε. έχουν αυξήσει το μερίδιό τους στην τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ευρώπη, από 4.3% το 1990, σε 5.7% το 2000 και σε 13.0% το 2015. Ειδικά για την κατανάλωση ηλεκτρισμού στην Ευρώπη, οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. καταλάμβαναν το 16.7% το 2015, ενώ το ποσοστό αυτό ήταν μόλις 8.5% το 2004 [19].

Αναφορικά με τη συνολική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη στην Ευρώπη, οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. καταλάμβαναν το 18.6% το 2015 [20].

Ειδικά για τις βιομηχανίες, οι Α.Π.Ε. έχουν ευρεία εφαρμογή και μπορούν να διαδραματίσουν κυρίαρχο ρόλο στην παραγωγή θερμότητας. Υπό το σενάριο ότι το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για βιομηχανίες το 2050 θα προέρχεται από Α.Π.Ε., η ένταξη των ΑΠΕ στη βιομηχανία αναμένεται να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά 10% παγκοσμίως.

Παρόλα αυτά, οι Α.Π.Ε. έχουν πολύ μικρό ρόλο στη βιομηχανία σήμερα. Το 48% της παραγωγής ηλεκτρισμού στην Ευρώπη προέρχεται από ορυκτά καύσιμα (φυσικό αέριο, λιγνίτη και πετρέλαιο), το 26.4% προέρχεται από πυρηνική ενέργεια και το υπόλοιπο 25.3% προέρχεται από τις Α.Π.Ε. [20].

Μεταξύ των διαθέσιμων τεχνολογιών Α.Π.Ε., τα θερμικά ηλιακά συστήματα παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την παραγωγή βιομηχανικής θερμότητας. Η ικανότητα των συστημάτων αυτών να λειτουργούν αποδοτικά στο χαμηλό και μεσαίο θερμοκρασιακό επίπεδο ( $100^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$ ) τα καθιστά κατάλληλα για βιομηχανικές εφαρμογές, είτε παράγοντας θερμότητα για βιομηχανικές διεργασίες είτε ενσωματώνοντάς τα σε συστήματα συμπαραγωγής.

Το δυναμικό των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι αξιοσημείωτο, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα 2/3 της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στην Ευρώπη αφορά θερμότητα παρά ηλεκτρισμό [15]. Το δυναμικό αυτό ενισχύεται ακόμα περισσότερο από το γεγονός ότι το 28% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρώπη αντιστοιχεί στη θερμότητα που απαιτούν οι βιομηχανίες, με το μεγαλύτερο μέρος της να βρίσκεται σε θερμοκρασίες κάτω των  $250^{\circ}\text{C}$ .

Για το λόγο αυτόν, τα θερμικά ηλιακά συστήματα έχουν το δυναμικό να συνεισφέρουν στη παγκόσμια βιομηχανία κατά 5.6 EJ/ετησίως μέχρι το 2050.

Το μεγαλύτερο μερίδιο, 46%, αυτής της ενέργειας προβλέπεται να καταναλωθεί από τις βιομηχανίες τροφίμων και καπνού. Το υπόλοιπο ποσοστό μοιράζεται στις βιομηχανίες συσκευών και εξοπλισμού 20%, στις βιομηχανίες δέρματος και υφασμάτων 13%, στις βιομηχανίες εξόρυξης 16% και στις μεταφορές 5%. Οι επιμέρους βιομηχανικές διεργασίες στις οποίες συνεισφέρουν τα θερμικά ηλιακά συστήματα και περιλαμβάνονται στις περισσότερες βιομηχανίες είναι η ξήρανση, η παστερίωση, η προθέρμανση συστημάτων ατμού και ο καθαρισμός.

Σχετικά με τη γεωγραφική κατανομή της ενέργειας αυτής, το μεγαλύτερο ποσοστό, 35%, αναμένεται να προέρχεται από τις χώρες του Ο.Ο.Σ.Α.. Δεύτερη έρχεται η Κίνα με 32% και έπονται η Λατινική Αμερική με 15% και η Ασία με 13%.

Σήμερα, οι περισσότερες εφαρμογές στον βιομηχανικό τομέα αφορούν παραγωγή θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών, κάνοντας χρήση απλών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και συλλεκτών κενού. Στις αρχές του 2014, υπήρχαν περίπου 130 θερμικά ηλιακά συστήματα εγκατεστημένα σε βιομηχανίες, που παρήγαγαν συνολικά 93 MWth [21].

Παρόλη τη δυναμικότητα που παρουσιάζουν τα θερμικά ηλιακά συστήματα για τις βιομηχανίες, αντιμετωπίζουν σημαντικές δυσκολίες, όπως έλλειψη ανταγωνιστικότητας, έλλειψη εκπαίδευσης και περιορισμένη δημοτικότητα της ίδιας της τεχνολογίας. Για το λόγο αυτόν, οι βιομηχανικές εφαρμογές βρίσκονται περισσότερο σε στάδιο έρευνας και ανάπτυξης παρά σε εμπορική διαθεσιμότητα.

Για παραγωγή θερμότητας υψηλότερων θερμοκρασιών, χρησιμοποιούνται οι τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, όπως κοιλοπαραβολικοί συλλέκτες, παραβολικά πιάτα ή συλλέκτες κενού με παραβολικά κάτοπτρα. Οι τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών παρείχαν 0.5 Mtoe ηλεκτρισμού το 2014. Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα που παράγουν θερμότητα στο μεσαίο θερμοκρασιακό εύρος, 150 - 400°C, είναι τα ιδανικά για ενσωματωθούν σε μία βιομηχανική διεργασία.

Στη μελέτη του IEA Task 49 [22] βρίσκονται τεχνικές οδηγίες για την κατάλληλη ενσωμάτωση των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων στις βιομηχανικές διεργασίες. Η καταλληλότητα των βιομηχανικών διεργασιών έχει άμεση σχέση με το θερμοκρασιακό τους επίπεδο. Η ανάλυση των επιμέρους τομέων της βιομηχανίας δείχνει ότι τρεις διεργασίες, που συναντώνται σχεδόν σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας, είναι κατάλληλες για την ενσωμάτωση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Οι διεργασίες αυτές είναι η θέρμανση ρευστού, η θέρμανση δοχείων και η ξήρανση.

## 2.2 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες

### 2.2.1 Κοιλοπαραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες

Οι κοιλοπαραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες (Parabolic trough) αποτελούν τη πιο διαδεδομένη τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιακών γραμμικής εστίασης [5]. Στη βασική τους μορφή, αποτελούνται από τους ανακλαστήρες, τον δέκτη συγκέντρωσης ακτινοβολίας, το σκελετό στήριξης και τον μηχανισμό κίνησης. Οι ανακλαστήρες παραβολικού σχήματος παρακολουθούν τον Ήλιο, με κίνηση σε έναν άξονα, και συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία γραμμικά στο δέκτη που κινείται μαζί με τους ανακλαστήρες. Ο δέκτης αποτελείται από έναν απορροφητή μεταλλικού σωλήνα με επιλεκτική επίστρωση στην εξωτερική του επιφάνεια, ο οποίος περιβάλλεται από γυάλινο περίβλημα με κενό ενδιάμεσα [23]. Εσωτερικά του δέκτη κυκλοφορεί θερμικό μέσο, όπως θερμικό λάδι ή τηγμένο άλας [24], το οποίο θερμαίνεται από την απορροφηθείσα θερμότητα.



Σχήμα 2-1: Κοιλοπαραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες, DLR/Ernsting

Ανάλογα με την κλίμακα της εφαρμογής ενδείκνυται διαφορετικό μέγεθος ηλιακού συλλέκτη. Οι μικρού μεγέθους συλλέκτες με πλάτος έως 2 m [25,26,27] στοχεύουν σε μικρής κλίμακας εφαρμογές συνήθως μέχρι 1,000 m<sup>2</sup> καθαρής επιφάνειας συλλέκτη [28,29,30]. Ο Πίνακας 2-1 συγκεντρώνει ενδεικτικές εφαρμογές παραγωγής θερμότητας για βιομηχανική χρήση [31].

Πίνακας 2-1 : Έργα μικρής κλίμακας με κοιλοπαραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες

Χρήστης	Επιφάνεια συλλεκτών	Θερμοκρασία	Χώρα	Έτος
Alanod solar	108 m <sup>2</sup>	143°C	Γερμανία	2010
Emmi Dairy Saignelegier	627 m <sup>2</sup>	180°C	Ελβετία	2012
Iberotel Sargerme Parke	180 m <sup>2</sup>	180°C	Τουρκία	2003
Crema	581 m <sup>2</sup>	170°C	Ελβετία	2013
Aviary food pellet el paisa	264 m <sup>2</sup>	95°C	Μεξικό	2015

Οι μεγάλοι μεγέθους ηλιακοί συλλέκτες με πλάτος μεγαλύτερο των 4 m [32,33] στοχεύουν σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές και συνήθως έχουν συλλεκτική επιφάνεια της τάξης των εκατοντάδων χιλιάδων τετραγωνικών μέτρων [34]. Ο Πίνακας 2-2 συγκεντρώνει ενδεικτικά πάρκα ηλεκτροπαραγωγής με κοιλοπαραβολικούς συλλέκτες [35].

Πίνακας 2-2 : Έργα μεγάλης κλίμακας με κοιλοπαραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες

Όνομα	Επ. συλλεκτών	Θερμικό μέσο	Ισχύς πάρκου	Χώρα	Έτος
SEGS V	250,500 m <sup>2</sup>	Θερμικό λάδι	30 MW <sub>el</sub>	ΗΠΑ	1989
Extresol 1	510,120 m <sup>2</sup>	Θερμικό λάδι	50 MW <sub>el</sub>	Ισπανία	2010
Andasol 3	510,120 m <sup>2</sup>	Θερμικό λάδι	50 MW <sub>el</sub>	Ισπανία	2013
ISCC Ain Beni Mathar	183,120 m <sup>2</sup>	Θερμικό λάδι	20 MW <sub>el</sub>	Μαρόκο	2010
Termosol 1	523,200 m <sup>2</sup>	Θερμικό λάδι	50 MW <sub>el</sub>	Ισπανία	2013

Όσον αφορά τις ερευνητικές υποδομές των κοιλοπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών, στα πλαίσια του προγράμματος EU-SOLARIS [36] αποτυπώθηκαν οι υποδομές ευρωπαϊκών ερευνητικών φορέων (Πίνακας 2-3).

Πίνακας 2-3 : Ερευνητικές υποδομές κοιλοπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών στην Ευρώπη

Φορέας	Όνομα	Θερμική ισχύς	Μήκος	Θερμικό μέσο	Μέγιστη θερμοκρασία
PSA	DISS	2300 kW <sub>th</sub>	700 m	Νερό	400°C
PSA	HTF	500 kW <sub>th</sub>	75 m	Θερμικό λάδι	420°C
PSA	CAPSOL	-	-	Νερό	230°C
PSA	KONTAS	-	20 m	Θερμικό λάδι	-
CNRS	-	180 kW <sub>th</sub>	36 m	Θερμικό λάδι	350°C

DLR	SOPRAN	140 kW <sub>th</sub>	13.8 m	Νερό	200°C
ENEA	-	400 kW <sub>th</sub>	100 m	Τηγμένο άλας	550°C

Το Σχήμα 2-2 απεικονίζει τις ερευνητικές υποδομές φυσικού περιβάλλοντος του κέντρου Plataforma Solar De Almeria στην Ισπανία. Μεταξύ των πειραματικών διατάξεων των διαφόρων συγκεντρωτικών τεχνολογιών που διακρίνονται στην αεροφωτογραφία, υπάρχουν οι ανεξάρτητες διατάξεις κοιλοπαραβολικών συλλεκτών HTF, DISS, CAPSOL και KONTAS και FRESDEMO για τους ηλιακούς συλλέκτες Fresnel.



Σχήμα 2-2: Αεροφωτογραφία ερευνητικών υποδομών συγκεντρωτικών ηλιακών τεχνολογιών, PSA

### 2.2.2 Ηλιακοί συλλέκτες Fresnel

Οι ηλιακοί συλλέκτες τεχνολογίας Fresnel είναι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες γραμμικής εστίασης που βρίσκονται σε χαμηλότερο στάδιο ωρίμανσης, σε σχέση με τους κοιλοπαραβολικούς συλλέκτες. Στη βασική τους μορφή αποτελούνται από επίπεδους (ή ελαφρώς καμπυλομένους) ανακλαστήρες, παράλληλα τοποθετημένους στο οριζόντιο επίπεδο, που παρακολουθούν τον Ήλιο με κίνηση σε έναν άξονα και συγκεντρώνουν την ακτινοβολία γραμμικά σε σταθερό υπερυψωμένο δέκτη.



Σχήμα 2-3: Ηλιακοί συλλέκτες Fresnel, Novatec Solar PE1

Όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή, το μερίδιο που κατέχουν οι ηλιακοί συλλέκτες Fresnel είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με τους κοιλοπαραβολικούς. Η εγκατεστημένη ισχύς των ηλιακών συλλεκτών Fresnel είναι 179 MW<sub>el</sub> ενώ των κοιλοπαραβολικών είναι 4,115 MW<sub>el</sub> [34].

Πίνακας 2-4 : Εγκατεστημένη ισχύς συγκεντρωτικών τεχνολογιών για ηλεκτροπαραγωγή

Τεχνολογία	Αριθμός έργων	Εγκατεστημένη ισχύς	Ετήσια παραγωγή	Ισχύς νέων έργων
Κοιλοπαραβολικοί	73	4,115 MW <sub>el</sub>	10,000 GWh	719 MW <sub>el</sub>
Ηλιακός πύργος	10	497 MW <sub>el</sub>	1,300 GWh	410 MW <sub>el</sub>
Fresnel	8	179 MW <sub>el</sub>	350 GWh	180 MW <sub>s</sub>

Ο Πίνακας 2-5 συγκεντρώνει ενδεικτικά πάρκα ηλεκτροπαραγωγής με τη συγκεκριμένη τεχνολογία [37]. Παρατηρείται ότι το μέγεθος των πάρκων είναι μικρότερο σε σχέση με των κοιλοπαραβολικών, καθώς και ότι το θερμικό μέσο που χρησιμοποιείται πέραν του θερμικού λαδιού είναι το νερό, λόγω σταθερού δέκτη.

Πίνακας 2-5 : Έργα μεγάλης κλίμακας με ηλιακούς συλλέκτες Fresnel

Όνομα	Επιφάνεια συλλεκτών	Θερμικό μέσο	Ισχύς πάρκου	Χώρα	Έτος
Kimberlina	25,988 m <sup>2</sup>	Νερό	5 MW <sub>el</sub>	ΗΠΑ	2008
Puerto Errado 1	21,567 m <sup>2</sup>	Νερό	1.4 MW <sub>el</sub>	Ισπανία	2009
Puerto Errado 2	302,000 m <sup>2</sup>	Νερό	30 MW <sub>el</sub>	Ισπανία	2012
Liddell	18,490 m <sup>2</sup>	Νερό	3 MW <sub>el</sub>	Αυστραλία	2012
Rende	9,780 m <sup>2</sup>	Θερμικό λάδι	1 MW <sub>el</sub>	Ιταλία	2014

Αντίστοιχα με τους κοιλοπαραβολικούς συλλέκτες, ανάλογα με την κλίμακα της εφαρμογής ενδείκνυται διαφορετικό μέγεθος ηλιακού συλλέκτη. Ο Πίνακας 2-6 συγκεντρώνει τα βασικά στοιχεία ηλιακών συλλεκτών Fresnel που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικές, πιλοτικές ή εμπορικές εφαρμογές.

Πίνακας 2-6 : Βασικά στοιχεία ηλιακών συλλεκτών Fresnel

Κατασκευαστής / φορέας	Πλάτος ανακλαστήρων	Πλάτος συλλέκτη	Ύψος δέκτη	Χώρα
Novatec [38]	0.71 m	16.6 m	8.4 m	Γερμανία
Soltigua [39]	0.6 m	4.75 m	3.65 m	Ιταλία
PSA [40]	0.6 m	21 m	8 m	Ισπανία
Cyl [41]	0.32 m	8.2 m	3.56 m	Κύπρος
Fresnex [42]	< 0.1m	4.65 m	< 4 m	Αυστρία

### 2.2.3 Ηλιακός πύργος

Ο ηλιακός πύργος αποτελεί σημειακή τεχνολογία συγκέντρωσης ακτινοβολίας. Οι ηλιοστάτες με επίπεδες ή ελαφρώς καμπυλομένες ανακλαστικές επιφάνειες παρακολουθούν τον Ήλιο με κίνηση σε δύο άξονες και κατευθύνουν την ακτινοβολία σε έναν υπερυψωμένο δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στην κορυφή του πύργου. Υπάρχουν διάφορες τυπολογίες δεκτών συγκέντρωσης ακτινοβολίας, ανάλογα με το εργαζόμενο μέσο. Μια τυπολογία απορροφητή με υγρό ρευστό, όπως το τηγμένο άλας, αφορά μία επιφάνεια που σχηματίζεται από παράλληλες μεταλλικές σωλήνες με επιλεκτική επίστρωση εσωτερικά των οποίων κυκλοφορεί το θερμικό μέσο.



Σχήμα 2-4: Ηλιακός πύργος, Proteas Cyl

Ο Πίνακας 2-7 συγκεντρώνει ενδεικτικά πάρκα ηλεκτροπαραγωγής με τη τεχνολογία του ηλιακού πύργου [35].



Πίνακας 2-7 : Έργα μεγάλης κλίμακας με ηλιακό πύργο

Όνομα	Επιφάνεια συλλεκτών	Θερμικό μέσο	Ισχύς πάρκου	Χώρα	Έτος
PS10	75,000 m <sup>2</sup>	Νερό	11 MW <sub>el</sub>	Ισπανία	2007
Julich	17,650 m <sup>2</sup>	Αέρας	1.5 MW <sub>el</sub>	Γερμανία	2008
PS20	150,000 m <sup>2</sup>	Νερό	20 MW <sub>el</sub>	Ισπανία	2009
Gemasolar	304,750 m <sup>2</sup>	Τηγμένο άλας	19.9 MW <sub>el</sub>	Ισπανία	2011
IVANPAH	2,600,000 m <sup>2</sup>	Νερό	377 MW <sub>el</sub>	ΗΠΑ	2014

### 2.2.4 Παραβολικό πιάτο

Τα παραβολικά πιάτα αποτελούν τεχνολογία σημειακής συγκέντρωσης ακτινοβολίας. Οι παραβολικού σχήματος επιφάνειες παρακολουθούν τον Ήλιο σε δύο άξονες. Στην εστία συγκέντρωσης βρίσκεται τοποθετημένη μία εργομηχανή (Stirling) που χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή.



Σχήμα 2-5: Παραβολικά πιάτα, Maricopa ΗΠΑ

Ο Πίνακας 2-8 συγκεντρώνει ενδεικτικά πάρκα ηλεκτροπαραγωγής με τη τεχνολογία του παραβολικού πιάτου [35].

Πίνακας 2-8 : Έργα μεγάλης κλίμακας παραβολικά πιάτα

Όνομα	Επιφάνεια συλλέκτη	Αριθμός συλλεκτών	Ισχύς πάρκου	Χώρα	Έτος
Maricopa	105 m <sup>2</sup>	60	1.5 MW <sub>el</sub>	ΗΠΑ	2010
Tooele Army Depot	35 m <sup>2</sup>	429	1.5 MW <sub>el</sub>	ΗΠΑ	2013

### 2.3 Επισκόπηση των ηλιακών συλλεκτών Fresnel

Ο ηλιακός συλλέκτης τεχνολογίας Fresnel στη κλασική του μορφή αποτελείται από τους πρωτεύοντες ανακλαστήρες, ένα δέκτη με δευτερεύοντα ανακλαστήρα και απορροφητή. Στην εργασία των Zhu et al [9] αποτυπώνονται στοιχεία της τεχνολογικής ωρίμανσης των ηλιακών συλλεκτών Fresnel και φαίνεται η γενική διάταξη των συλλεκτών (Σχήμα 2-6) καθώς και οι κύριες παραλλαγές της.

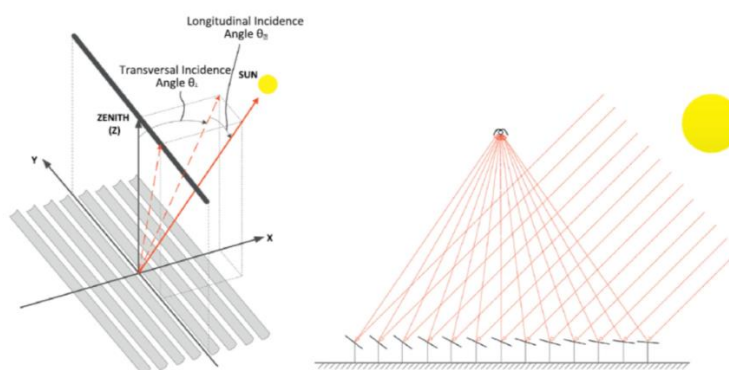
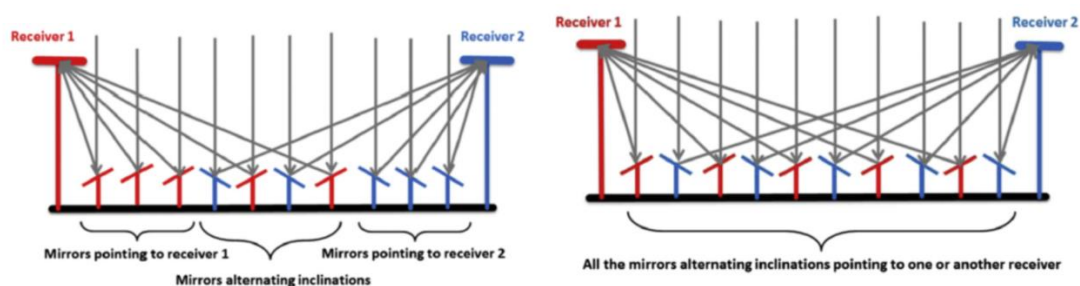


Fig. 1. Schematics of a generic linear Fresnel collector.

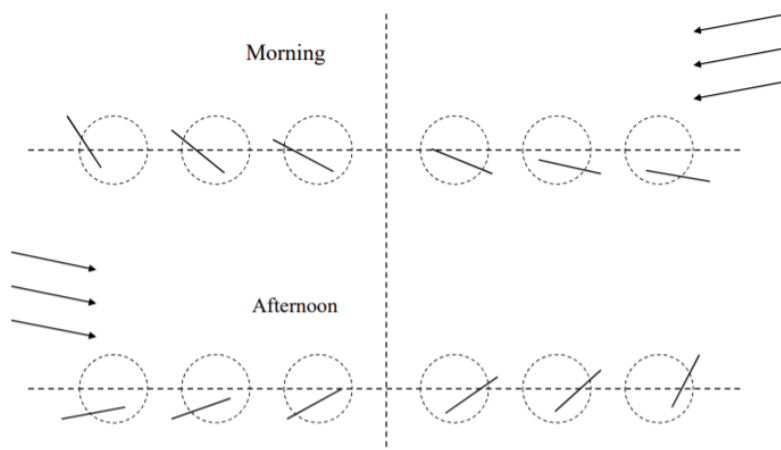
Σχήμα 2-6: Γενική διάταξη ηλιακού συλλέκτη Fresnel [9]

Οι Mills και Morrison [43] παρουσίασαν μία τυπολογία όπου υπάρχουν δύο δέκτες συγκέντρωσης ακτινοβολίας. Οι πρωτεύοντες ανακλαστήρες έχουν τη δυνατότητα να κατευθύνουν την ακτινοβολία και στους δύο δέκτες, μειώνοντας έτσι τις απώλειες συνημιτόνου και σκίασης μεταξύ των σειρών. Οι Montes et al [44] διερεύνησαν συγκριτικά τρεις τυπολογίες ηλιακών συλλεκτών Fresnel. Η πρώτη τυπολογία περιλαμβάνει ένα δέκτη (LFC). Η δεύτερη είναι υβριδική (CLFC-Hybrid) και περιλαμβάνει δύο δέκτες, όπου οι κεντρικές σειρές κατευθύνουν την ακτινοβολία στον πλησιέστερο δέκτη, ενώ οι ακριανές εναλλάσσουν τον προσανατολισμό τους. Η τρίτη τυπολογία περιλαμβάνει δύο δέκτες στους οποίους όλοι οι ανακλαστήρες εναλλάσσουν τον προσανατολισμό τους (CLFC-Complete). Κατά το ηλιακό μεσημέρι, η τυπολογία LFC παρουσιάζει την υψηλότερη απόδοση με 74.23%, ακολουθεί η CLFC-Hybrid με 64.82% και έπειτα, η CLFC-Complete με 50.56%.



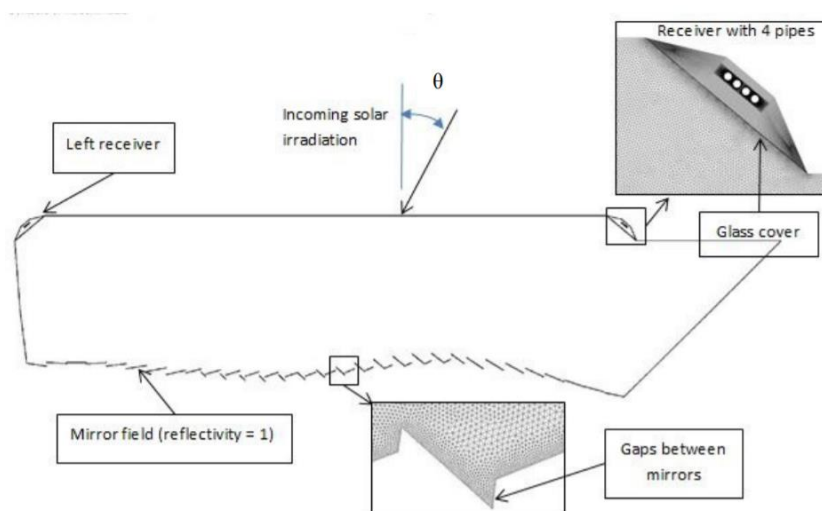
Σχήμα 2-7: Τυπολογίες ηλιακών συλλεκτών Fresnel με εναλλαγή προσανατολισμού (αριστερά CLFC- Hybrid και δεξιά CLFC – Complete)

Οι Walker et al [45] διερεύνησαν βελτίωση της γεωμετρίας με στόχο τη μείωση των οπτικών απωλειών στους πρωτεύοντες ανακλαστήρες αυξάνοντας την ενεργό επιφάνεια. Οι ανακλαστήρες περιστρέφονται με τέτοιο τρόπο ώστε το κέντρο των ανακλαστήρων των μπροστινών σειρών να βρίσκεται πιο χαμηλά από το οριζόντιο επίπεδο αρχικής τοποθέτησης, ενώ το κέντρο των υπόλοιπων σειρών βρίσκεται σε υψηλότερο σημείο.



Σχήμα 2-8 : Θέσεις πρωτεύοντων ανακλαστήρων

Οι Chaves et al [46] μελέτησαν γεωμετρία (etendue) με μεταβλητό σχήμα ανακλαστήρων και θέση ανακλαστήρων συναρτήσει της θέσης του ανακλαστήρα. Οι Rungasamy et al [47] μελέτησαν στο ANSYS ηλιακό συλλέκτη (etendue) με δύο δέκτες αποτελούμενους από πολλαπλούς σωλήνες μέσα σε κοιλότητα αέρα. Παρατηρήθηκε διαφορετική κατανομή της ακτινοβολίας στους δύο δέκτες, καθώς και στους σωλήνες του κάθε δέκτη ιδιαίτερα για γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη των  $40^\circ$ .



Σχήμα 2-9 : Ηλιακός συλλέκτης Fresnel τύπου etendue [47]

Αλληλένδετη με τη γεωμετρία του ηλιακού συλλέκτη είναι η γεωμετρία του δευτερεύοντα ανακλαστήρα. Ο ρόλος του δευτερεύοντα ανακλαστήρα είναι πολλαπλός, καθώς συγκεντρώνει περαιτέρω την ηλιακή ακτινοβολία, ενισχύει την οπτική απόδοση και παράλληλα, μειώνει τις θερμικές απώλειες του απορροφητή.

Στη βιβλιογραφία έχουν αποτυπωθεί διάφορες γεωμετρίες αναφορικά με τον δευτερεύοντα ανακλαστήρα [9]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προσελκύει το τραπεζοειδές σχήμα του δέκτη, αλλά και η γεωμετρία τύπου CPC με διάφορες παραλλαγές ως προς την αρχή σχεδιασμού της καμπύλης [48,49].

Πρόσφατες εργασίες προτείνουν νέες γεωμετρίες. Οι Canavarro et al [50] παρουσίασαν έναν ελλειπτικού τύπου δευτερεύοντα ανακλαστήρα για απορροφητή σωλήνα. Οι Hack et al [51] παρουσίασαν μία νέα μεθοδολογία για το σχεδιασμό του δευτερεύοντα ανακλαστήρα (adaptive method). Διατηρώντας σταθερό το σχεδιασμό του ηλιακού συλλέκτη διενέργησαν συγκριτική αξιολόγηση της νέας γεωμετρίας σε σχέση με άλλες γεωμετρίες (CPC, τραπεζοειδής, πεταλούδα). Η προτεινόμενη γεωμετρία παρουσίασε ελαφρώς υψηλότερη απόδοση από τη γεωμετρία τύπου CPC.

Όσον αφορά τις μεθόδους οπτικής ανάλυσης των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών και συστημάτων, αυτές έχουν περιγραφεί σε διάφορες εργασίες [52,53,54]. Η μέθοδος ιχνηλάτησης ακτινοβολίας Monte Carlo Ray Tracing χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σε εφαρμογές με πολλαπλές κινούμενες επιφάνειες, όπως ο ηλιακός πύργος [55]. Στους συλλέκτες γραμμικής εστίασης, οι Osorio et al [56] παρουσίασαν τα αποτελέσματα διαφόρων ray-tracing μοντέλων για κοιλοπαραβολικούς συλλέκτες και συλλέκτες Fresnel υπό κοινή παραμετροποίηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ τους.

Πέραν της συγκεκριμένης μεθόδου, ο Zhu [57] πρόσφατα παρουσίασε μία αναλυτική μέθοδο για την οπτική ανάλυση των ηλιακών συλλεκτών Fresnel και συνέκρινε τα αποτελέσματά του με μοντέλο Ray-tracing (Soltrace). Τα αποτελέσματα έδειξαν ικανοποιητική σύγκλιση.

Επιπλέον, ομάδες ερευνητών αξιοποιούν τα CFD λογισμικά, λόγω της ταυτόχρονης επίλυσης του οπτικού και θερμικού αντικειμένου. Οι Moghimi et al παρουσίασαν τη μοντελοποίηση του ηλιακού συλλέκτη Fresnel στο Ansys Fluent [8]. Οι Craig et al [58] συνέκριναν τα αποτελέσματα του CFD μοντέλου στο ANSYS με το ray-tracing μοντέλο στο Soltrace. Υπό συγκεκριμένες παραδοχές, η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, με κυρίαρχο την ικανότητα παραμετροποίησης και βελτιστοποίησης του αντικειμένου σε

ενοποιημένο περιβάλλον. Ωστόσο, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτήθηκε για την προσομοίωση ήταν σημαντικά αυξημένος· η χρονική διάρκεια που απαιτήθηκε για το CFD ήταν 7700 s, έναντι της διάρκειας του Ray-tracing μοντέλου 12 s.

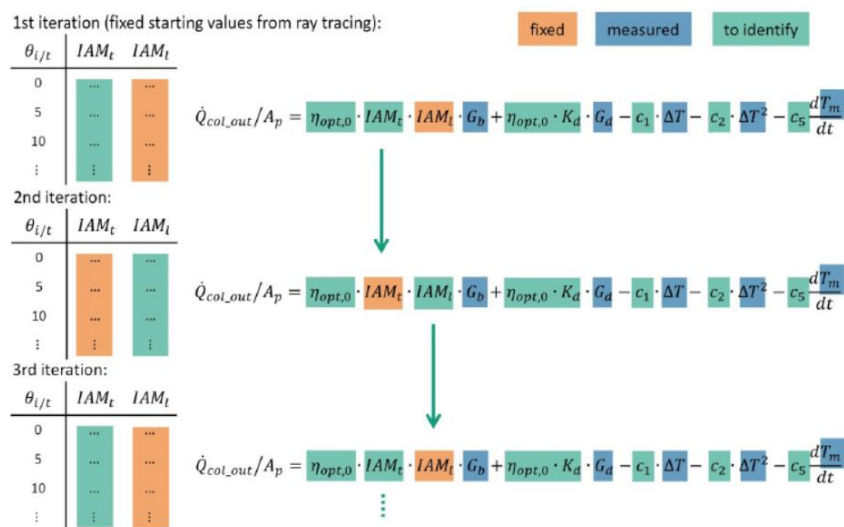
Ωστόσο, η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών Fresnel εξαρτάται τόσο από την οπτική συμπεριφορά του μηχανισμού συγκέντρωσης ακτινοβολίας, όσο και από τη θερμική συμπεριφορά του δέκτη. Στη βιβλιογραφία έχουν αποτυπωθεί διάφορες τυπολογίες δεκτών που διαφοροποιούνται κυρίως ως προς τον αριθμό των σωλήνων, τη χρήση γυάλινου καλύμματος ή περιβλήματος και τη χρήση αέρα ή κενού.

Η πρώτη περίπτωση δέκτη αφορά τον σωλήνα κενού, ο οποίος αποτελείται από μεταλλική σωλήνα με κενό και γυάλινο περίβλημα. Η τυπολογία αυτή αποτελεί ώριμη τεχνολογία με πολυάριθμες εφαρμογές στους κοιλοπαραβολικούς συλλέκτες. Οι Salgado Conrado et al [59] παρουσίασαν μία σύνοψη των θεωρητικών και πειραματικών εργασιών. Η θεωρητική προσέγγιση περιλαμβάνει κυρίως μαθηματικά μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και αριθμητικά μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Μελέτες του ερευνητικού κέντρου NREL παρέχουν δημοσιευμένα στοιχεία μετρήσεων σωλήνων κενού [60,61, 62]. Για το συγκεκριμένο δέκτη, η ύπαρξη και η ποιότητα του κενού αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης [63], καθώς επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του απορροφητή.

Οι Pino et al [64] παρουσίασαν πειραματικά αποτελέσματα από συλλέκτη επιφάνειας 352m<sup>2</sup>. Ο συλλέκτης λειτούργησε στους 150°C και τροφοδότησε διβάθμιο ψύκτη απορρόφησης ισχύος 174kW. Το μέσο σφάλμα παρακολούθησης εκτιμήθηκε 0.17%. Το μαθηματικό μοντέλο περιελάμβανε την οπτική ανάλυση και τη θερμική ανάλυση του δέκτη και επικυρώθηκε σε σχέση με τις μετρήσεις.

Η δεύτερη κύρια τυπολογία απορροφητή για συλλέκτες Fresnel είναι ο σωλήνας σε κοιλότητα που περικλείεται από γυάλινο κάλυμμα και μόνωση, για τη μείωση των θερμικών απωλειών. Οι Bernhard et al [65] παρουσίασαν το σχεδιασμό, την κατασκευή και τον ποιοτικό έλεγχο της πειραματικής εγκατάστασης Fresdemo στην Ισπανία με CPC δευτερεύοντα ανακλαστήρα. Οι Itskholine et al [66] παρουσίασαν τα στάδια κατασκευής και τη μεθοδολογία αξιολόγησης της λειτουργίας ενός ηλιακού συλλέκτη 400 m<sup>2</sup> στα Πυρηναία. Ο οπτικός σχεδιασμός έγινε με το Ray-tracing λογισμικό Tonatiuh και ο δέκτης μοντελοποιήθηκε στο CFD πρόγραμμα Comsol. Το 2017 οι Beltagy et al [67] διερεύνησαν πειραματικά έναν ηλιακό συλλέκτη Fresnel για άμεση ατμοπαραγωγή.

Οι Zheng et al [68] μελέτησαν την επίδραση κατασκευαστικών παραγόντων στην οπτική απόδοση, όπως σφάλματα τοποθέτησης του δέκτη, απόκλιση από το προσανατολισμό Νότου Βορρά, έκκεντρη περιστροφή των ανακλαστήρων και απόκλιση των γωνιών γεωγραφικού πλάτους και μήκους. Βρέθηκε ότι οι παράγοντες αυτοί επιδρούν διαφορετικά, ανάλογα με την ημέρα του έτους και την ώρα της ημέρας. Σχετικές εργασίες αξιολόγησης των μετρήσεων και χαρακτηρισμού των συλλεκτών Fresnel έχουν δημοσιευτεί από ομάδες ερευνητών [69,70,71]. Οι εργασίες κυρίως στηρίζονται στη χρήση του διακριτοποιημένου συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης και στο συνδυασμό οπτικών μοντέλων και μετρήσεων. Οι Yang et al [72] παρουσίασαν μία μεθοδολογία για την αξιολόγηση της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών Fresnel με απευθείας ατμοπαραγωγή. Οι Hofer et al [73] παρουσίασαν τα αποτελέσματα αξιολόγησης των μετρήσεων και χαρακτηρισμού ενός μικρής κλίμακας συλλέκτη Fresnel μέσω δύο μεθόδων ανάλυσης (dynamic και quasi-dynamic).



Σχήμα 2-10 : Μεθοδολογία χαρακτηρισμού ηλιακών συλλεκτών Fresnel με συνδυασμό θεωρητικών αποτελεσμάτων και μετρήσεων [74]

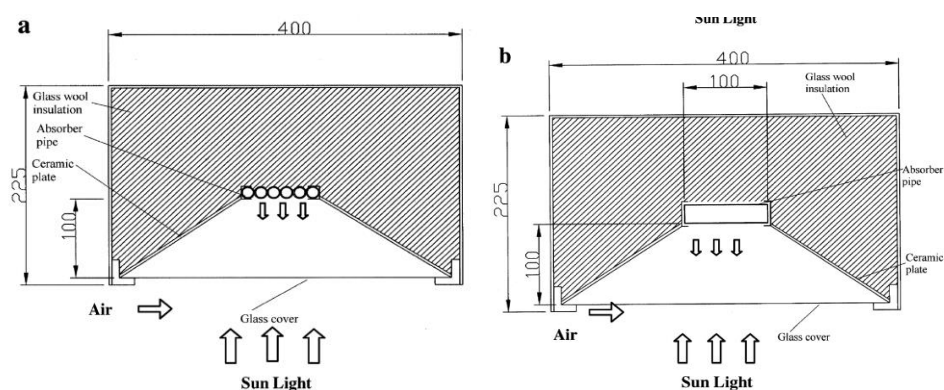
Η τρίτη τυπολογία αφορά απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες μέσα σε κοιλότητα. Οι Larsen et al μελέτησαν [75] τον απορροφητή σε εργαστηριακό περιβάλλον σε μήκος 1.4m. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό EnergyPlus, μοντελοποιήθηκε η ενεργειακή του συμπεριφορά και υπολογίστηκαν οι απώλειες θερμότητας. Βρέθηκε ότι το 91% των απωλειών θερμότητας προέρχεται από την επιφάνεια του γυαλιού. Ο συντελεστής θερμικών απωλειών ανηγμένος στην επιφάνεια των σωλήνων βρέθηκε ότι έχει αναλογική εξάρτηση με τη θερμοκρασία των σωλήνων και υπολογίστηκε μεταξύ 3.39-6.35 W/m<sup>2</sup>K.



Σχήμα 2-11 : Δέκτης με πολλαπλούς σωλήνες σε κοιλότητα σε εργαστήριο [75]

Οι Lin et al [76] παρουσίασαν τη θεωρητική (Ray-tracing και CFD) και πειραματική διερεύνηση ενός συλλέκτη Fresnel με δέκτη τύπου V σε κοιλότητα για παραγωγή θερμοκρασίας στο εύρος 90-150°C.

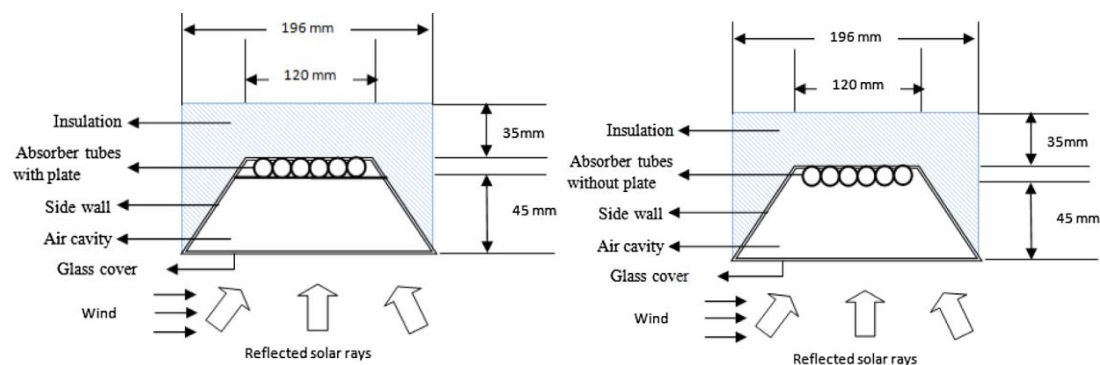
Μία πρόσφατη μελέτη [10] συνέκρινε πειραματικά την απόδοση του απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες σε κοιλότητα με τον επίπεδο απορροφητή σε κοιλότητα. Βρέθηκε ότι η θερμική απόδοση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα από τον λόγο συγκέντρωσης και αυξάνεται σημαντικά με την ύπαρξη επιλεκτικής επίστρωσης στην επιφάνεια του απορροφητή. Υπολογίστηκε επίσης ότι η θερμική απόδοση του απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες είναι κατά 8% μεγαλύτερη από εκείνη του επίπεδου απορροφητή.



Σχήμα 2-12 : Συγκριτική μελέτη απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες μέσα σε κοιλότητα και επίπεδου απορροφητή [10]

Μία διαφορετική τυπολογία δέκτη επίπεδου σχήματος μελετήθηκε θεωρητικά και πειραματικά από τους Mathioulakis et al [77]. Στην ίδια πειραματική εγκατάσταση, οι Bellos et al [78] επικύρωσαν CFD μοντέλο του ηλιακού συλλέκτη.

Μία συγκριτική μελέτη πραγματοποιήθηκε πρόσφατα από τους Manikumar και Arasu [79], σε θεωρητικό επίπεδο με το λογισμικό ANSYS και σε πειραματικό επίπεδο με κατασκευή και μέτρηση πρωτοτύπου απορροφητή 4m<sup>2</sup>. Βρέθηκε ότι οι πολλαπλοί σωλήνες που ενώνονται με μεταλλική πλάκα εμφανίζουν λιγότερες απώλειες θερμότητας από τους πολλαπλούς σωλήνες χωρίς την πλάκα.



Σχήμα 2-13 : Συγκριτική μελέτη απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες μέσα σε κοιλότητα ενωμένους με μεταλλική πλάκα (αριστερά) και πολλαπλούς σωλήνες χωρίς πλάκα (δεξιά) [79].

Οι Facão και Oliveira [80] μελέτησαν θεωρητικά έναν απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες σε κοιλότητα. Έλεγξαν και βελτιστοποίησαν τόσο τον αριθμό των σωλήνων όσο και την κλίση των πλευρικών τοιχωμάτων της κοιλότητας μέσω λογισμικού ιχνηλάτησης ακτινοβολίας. Μελέτησαν το βέλτιστο βάθος της κοιλότητας και το πάχος της πλευρικής μόνωσης μέσω CFD λογισμικού. Τέλος, παρουσίασαν μία εμπειρική εξίσωση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με την επιφάνεια των πρωτεύοντων ανακλαστήρων.

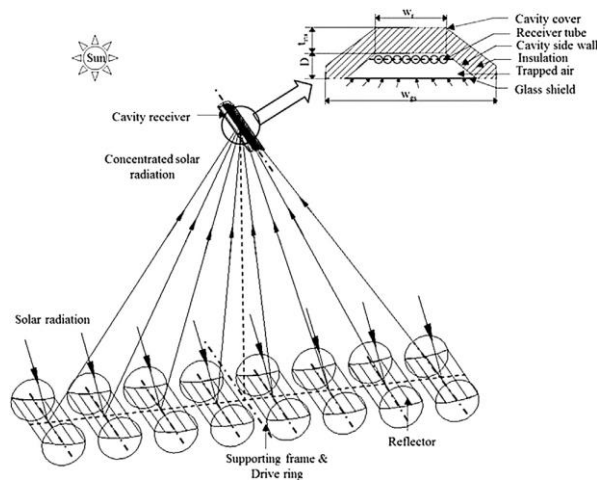
Παρόμοια διάταξη μελετήθηκε θεωρητικά από τους Natarajan et al [81] με μοντελοποίηση στο ANSYS. Το μοντέλο προβλέπει τους συντελεστές απωλειών θερμότητας για διάφορες παραμέτρους, όπως τα γεωμετρικά στοιχεία, τον αριθμό Grashof και το συντελεστή εκπομπής των επιφανειών. Μεταξύ άλλων, βρέθηκε ότι όταν ο λόγος της βάσης προς το ύψος τραπέζιου είναι μεγαλύτερος του 2.5 και ο λόγος θερμοκρασιών είναι μεγαλύτερος του 0.6, οι απώλειες θερμότητας ελαχιστοποιούνται.

Οι Sahoo et al [82] ερεύνησαν τις απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και τη συναγωγή με φυσική ροή, συγκρίνοντας το θεωρητικό τους μοντέλο με πειραματικά δεδομένα. Βρέθηκε ότι οι απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας αποτελούν το 80-90% των συνολικών απωλειών. Προτάθηκε η χρήση επιλεκτικής επίστρωσης στην επιφάνεια των σωλήνων και στην εσωτερική επιφάνεια της κοιλότητας για να ελαχιστοποιηθούν οι συνολικές απώλειες. Οι απώλειες από τη συναγωγή με φυσική ροή υπολογίστηκαν στο 8-13% των συνολικών απωλειών και προτάθηκε η χρήση κενού για την ελαχιστοποίησή τους.

Οι απώλειες θερμότητας σε έναν απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες ήταν το αντικείμενο της έρευνας των Reddy και Kumar [83]. Μελετήθηκε η επίδραση της γεωμετρικών και λειτουργικών παραγόντων, όπως πάχος μόνωσης, ύψος τραπέζιου, λόγος βάσης προς ύψος τραπέζιου, θερμοκρασία λειτουργίας, συντελεστές εκπομπής επιφανειών και ταχύτητα ανέμου. Οι προσομοιώσεις ανέδειξαν μία διάταξη που



ελαχιστοποιεί τις απώλειες, οι οποίες κυμαίνονται από 663 έως 1046 W/m.



Σχήμα 2-14 : Διάταξη του απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες των Reddy και Kumar [83]

Η πρόσφατη έρευνα των Moghimi et al [84] ασχολήθηκε με την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών από τη διάταξη των πολλαπλών σωλήνων. Για το σκοπό αυτόν, μελετήθηκαν επτά γεωμετρικές παράμετροι και μοντελοποιήθηκαν στο πρόγραμμα ANSYS. Βρέθηκε ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο τη θερμική απόδοση του απορροφητή είναι το πάχος της μόνωσης και το ύψος του τραπέζιου. Επίσης, οι απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των απωλειών.

Η επόμενη μελέτη αφορά τη σύζευξη των μεθόδων ιχνηλάτησης ακτινοβολίας και των πεπερασμένων όγκων για την προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας των πολλαπλών σωλήνων σε κοιλότητα [85]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ετήσια οπτική απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 44.7% και 60.1%. Η ανάλυση έδειξε ότι η επιλεκτική επίστρωση μπορεί να μειώσει σημαντικά τις απώλειες θερμότητας.

### **3 ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL ΜΕ ΕΠΙΠΕΔΟΥΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΕΚΤΗ**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την οπτική ανάλυση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη τύπου Fresnel. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της αρχής λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη και η ανάδειξη των κρίσιμων παραγόντων που επηρεάζουν την οπτική απόδοσή του.

Αρχικά περιγράφεται ο υπό διερεύνηση ηλιακός συλλέκτης ο οποίος αποτελείται από επίπεδους ανακλαστήρες και επίπεδο δέκτη. Για την οπτική ανάλυση του ηλιακού συλλέκτη αναπτύχθηκαν δύο υπολογιστικά μοντέλα.

Το πρώτο αφορά μοντέλο οπτικής ανάλυσης με γεωμετρικές εξισώσεις (Geometry Based Optical Model - GBOM) σε περιβάλλον επίλυσης μαθηματικών εξισώσεων. Αρχικά, αναπτύσσεται η μεθοδολογία υπολογισμού και οι θεωρητικές εξισώσεις. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αναλύονται διεξοδικά, παρέχοντας αναλυτικές πληροφορίες για την αρχή λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη. Οι οπτικές απώλειες παρουσιάζονται αναλυτικά ανά σειρά ανακλαστήρων, ανά τύπο οπτικής απώλειας και ανά γωνία πρόσπτωσης. Τέλος, υπολογίζονται οι συντελεστές οπτικής απόδοσης.

Το δεύτερο αφορά μοντέλο οπτικής ανάλυσης με ιχνηλάτηση ακτινοβολίας (Ray-tracing - RT). Αρχικά, περιγράφεται η μεθοδολογία μοντελοποίησης. Τα αποτελέσματα αφορούν τους συντελεστές οπτικής απόδοσης καθώς και το προφίλ της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας στο δέκτη.

Τέλος, τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων συγκρίνονται μεταξύ τους και προκύπτει ικανοποιητική σύγκλιση.

### 3.2 Θεωρητικές εξισώσεις

Στην παρούσα ενότητα αναφέρονται οι εξισώσεις για την οπτική ανάλυση του ηλιακού συλλέκτη Fresnel.

#### 3.2.1 Γωνίες Ηλίου και επιφανειών

Η θέση του Ηλίου έχει σημαντική επίδραση στην οπτική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Για τον υπολογισμό των γωνιών που προσδιορίζουν τη θέση συναρτήσει του χρόνου και του γεωγραφικού τόπου, αναλύονται οι ακόλουθες μεταβλητές και εξισώσεις [86,87]:

Η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  (declination) είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει το κέντρο της Γης με το κέντρο του Ηλίου και το επίπεδο του ισημερινού. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$  και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \frac{360 \cdot (284 + N)}{365} \quad (3-1)$$

Η ημέρα του έτους  $N$  λαμβάνει τιμές στο εύρος  $1 \leq N \leq 365$  και ορίζεται ως  $N=1$  για την πρώτη ημέρα του έτους.

Το γεωγραφικό πλάτος  $\Phi$  (latitude) είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ακτίνα της Γης που διέρχεται από τον εν λόγω τόπο με το επίπεδο του ισημερινού. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $-90^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$ .

Η ωριαία γωνία  $\omega$  (hour angle) είναι η γωνιακή μετατόπιση του Ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονά της κατά  $15^\circ$  ανά ώρα. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $-180^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$  με  $\omega > 0$  για μ.μ. και  $\omega < 0$  για π.μ..

$$\omega = 0.25 \cdot (t - 12) \cdot 60 \quad (3-2)$$

Η ώρα της ημέρας  $t$  αναφέρεται στον ηλιακό χρόνο και λαμβάνει τιμές στο εύρος  $0 \leq t < 24$ .

Το αζιμούθιο επιφάνειας  $\gamma$  (azimuth) είναι η γωνία μεταξύ της προβολής στο οριζόντιο επίπεδο της καθέτου στην επιφάνεια και της νότιας κατεύθυνσης. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  (angle of incidence) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία σειρά και της κάθετης προς την επιφάνεια αυτή. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\Phi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\Phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\Phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\Phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (3-3)$$

Η γωνία ζενιθ  $\theta_z$  (zenith angle) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια και της κάθετης προς το οριζόντιο επίπεδο του τόπου. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$  και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\Phi + \cos\delta \cdot \cos\Phi \cdot \cos\omega \quad (3-4)$$

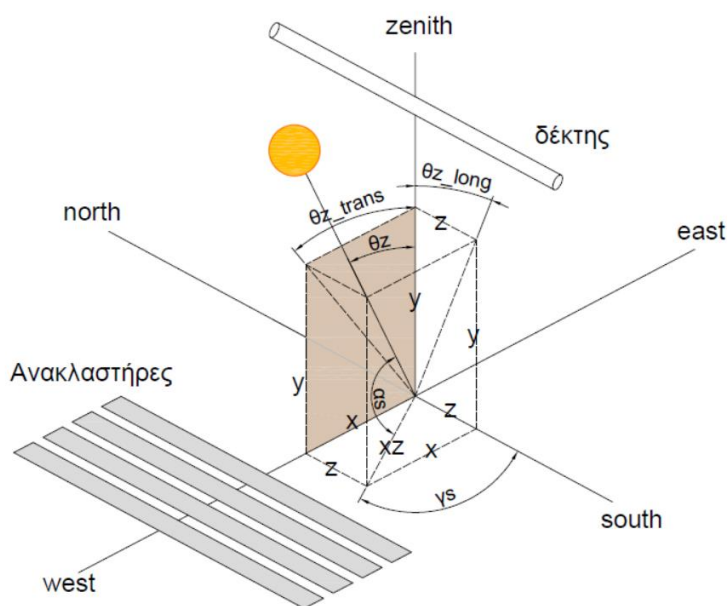
Το ηλιακό ύψος  $\alpha_s$  (solar elevation) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια και του οριζόντιου επιπέδου του τόπου. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $0^\circ \leq \alpha_s \leq 90^\circ$  και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_s = 90 - \theta_z \quad (3-5)$$

Το αζιμούθιο Ηλίου  $\gamma_s$  (solar azimuth angle) είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$ . Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \cdot \left| \cos^{-1} \left( \frac{\sin\theta_z \cdot \sin\Phi - \sin\delta}{\sin\theta_z \cdot \cos\Phi} \right) \right| \quad (3-6)$$

Για την οπτική ανάλυση του ηλιακού συλλέκτη απαιτείται η ανάλυση των συνιστωσών της γωνίας πρόσπτωσης σε δύο επίπεδα: στο εγκάρσιο επίπεδο (transversal), που θεωρείται το επίπεδο Ανατολής – Δύσης, και στο επίμηκες επίπεδο (longitudinal), που θεωρείται το επίπεδο Βορρά – Νότου.



Σχήμα 3-1: Συνιστώσες γωνιών Ηλίου στο εγκάρσιο και επίμηκες επίπεδο

Η συνιστώσα της γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ) είναι:

$$\tan\theta_{trans} = \frac{\sin\gamma_s}{\tan\alpha_s} \quad (3-7)$$

Η συνιστώσα της γωνίας πρόσπτωσης στο επίμηκες επίπεδο ( $\theta_{long}$ ) είναι:

$$\tan\theta_{long} = \frac{\cos\gamma_s}{\tan\alpha_s} \quad (3-8)$$

Ο αριθμός σειράς  $i$  λαμβάνει τιμές στο εύρος  $1 \leq i \leq \text{series}$ , όπου  $\text{series}$  ο αριθμός των συνολικών σειρών του ηλιακού συλλέκτη.

Η απόσταση του κέντρου της κάθε σειράς ανακλαστήρων από τον άξονα συμμετρίας ( $x_{pm}$ ) λαμβάνει αρνητικές τιμές ( $x_{pm}<0$ ) για σειρές που βρίσκονται ανατολικά του δέκτη και θετικές τιμές ( $x_{pm}>0$ ) για σειρές που βρίσκονται δυτικά του δέκτη. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$x_{pm}(i) = \left(i - 0.5 - \frac{\text{series}}{2}\right) \cdot (W_{pm} + M_{pm}) \quad (3-9)$$

Όπου  $W_{pm}$  είναι το πλάτος του ανακλαστήρα και  $M_{pm}$  είναι το διάκενο μεταξύ των ανακλαστήρων.

Η γωνία πρόσπτωσης στο άνοιγμα του δέκτη συγκέντρωσης ακτινοβολίας ( $\theta_{rec}$ ) από κάθε σειρά  $i$ , λαμβάνει τιμές στο εύρος  $-90^\circ \leq \theta_{rec} \leq 90^\circ$  με  $\theta_{rec}<0$  για ακτινοβολία που προέρχεται από τις ανατολικές σειρές και  $\theta_{rec}>0$  για τις δυτικές σειρές. Υπολογίζεται από τη σχέση

$$\tan(\theta_{rec}(i)) = \frac{x_{pm}(i)}{H_{rec}} \quad (3-10)$$

όπου  $H_{rec}$  είναι η απόσταση του δέκτη από το οριζόντιο επίπεδο των ανακλαστήρων.

Η κλίση της κάθε σειράς ( $\beta_{pm}$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας και του οριζοντίου επιπέδου και μεταβάλλεται συναρτησί του χρόνου και της θέσης του Ηλίου. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $-90^\circ \leq \beta_{pm} \leq 90^\circ$ , με  $\beta_{pm}=0$  για οριζόντια θέση,  $\beta_{pm}>0$  όταν ο ανακλαστήρας είναι στραμμένος προς τη Δύση και  $\beta_{pm}<0$  όταν ο ανακλαστήρας είναι στραμμένος προς την Ανατολή και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\beta_{pm}(i) = \frac{\theta_{rec}(i) - \theta_{trans}}{2} \quad (3-11)$$

Το αζιμούθιο κάθε σειράς ( $\gamma_{pm}$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο με το νότιο προσανατολισμό. Λαμβάνει τιμές στο εύρος  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ , με  $\gamma_{pm}=0^\circ$  όταν η επιφάνεια είναι στραμμένη στο Νότο,  $\gamma_{pm}=90^\circ$  για Δύση και  $\gamma_{pm}=-90^\circ$  για Ανατολή. Υπολογίζεται από τη σχέση

$$\gamma_{pm}(i) = \begin{cases} 90, & (\theta_{trans} - \theta_{rec}) > 0 \\ -90 & \end{cases} \quad (3-12)$$

Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_{pm}$  (angle of incidence) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία σειρά και της κάθετης προς την επιφάνεια αυτή.

### 3.2.2 Οπτικές απώλειες

Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλιακού συλλέκτη, τον τόπο και το χρόνο. Ο ηλιακός συλλέκτης υπόκειται σε μείωση της απόδοσης λόγω διαφόρων τύπων απωλειών, οι οποίες μπορεί να είναι:

- Οπτικές απώλειες ανακλαστήρων ( $OL_{ref}$ )
- Οπτικές απώλειες συνημίτονου της κάθε σειράς ( $OL_{cos}$ )
- Οπτικές απώλειες διάχυσης στο άνοιγμα του δέκτη ( $OL_{spill}$ )
- Οπτικές απώλειες σκίασης μεταξύ των σειρών ( $OL_{shad}$ )
- Οπτικές απώλειες σκίασης του δέκτη στις σειρές ( $OL_{shad\_rec}$ )
- Οπτικές απώλειες άκρων ( $OL_{end}$ )
- Οπτικές απώλειες blocking μεταξύ των σειρών ( $OL_{block}$ )

Οι οπτικές απώλειες ανακλαστικότητας ( $OL_{ref}$ ) των πρωτευόντων ανακλαστήρων υπολογίζονται από τη σχέση:

$$OL_{ref} = 1 - \rho_{pm} \quad (3-13)$$

Οι οπτικές απώλειες συνημίτονου ( $OL_{cos}$ ) πηγάζουν από τη μη καθετότητα του ανακλαστήρα ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Για κάθε σειρά και χρονική στιγμή υπάρχει διαφοροποίηση των οπτικών απωλειών.

$$OL_{cos}(i) = 1 - \cos \theta_{pm}(i) \quad (3-14)$$

Οι οπτικές απώλειες διάχυσης στο δέκτη ( $OL_{spill}$ ) πηγάζουν από τη μη καθετότητα του δέκτη ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Το πλάτος της δέσμης της ακτινοβολίας που φθάνει στο δέκτη ( $W_{rec\_beam}$ ) μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του δέκτη ( $W_{rec}$ ), με αποτέλεσμα μέρος της ακτινοβολίας να μην εισέρχεται τελικά στο δέκτη. Οι οπτικές απώλειες είναι διαφορετικές για κάθε σειρά και κάθε χρονική στιγμή. Δίνονται από την εξίσωση:

$$OL_{spill}(i) = \begin{cases} 0, & W_{rec} > W_{rec\_beam}(i) \\ 1 - \frac{W_{rec}}{W_{rec\_beam}(i)}, & otherwise \end{cases} \quad (3-15)$$

Όπου

$$W_{rec\_beam}(i) = \frac{W_{beam}(i)}{\cos \theta_{rec}(i)} \quad (3-16)$$

$$W_{beam}(i) = W_{pm} \cdot \sin(\theta_{rec}(i) + 90^\circ - \beta_{pm}(i)) \quad (3-17)$$

Οι οπτικές απώλειες άκρων ( $OL_{end}$ ) πηγάζουν από τη μη καθετότητα του Ηλίου ως προς το οριζόντιο επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη. Η απόκλιση ως προς το επίμηκες επίπεδο δημιουργεί ένα τμήμα ανακλαστήρων (και

αντίστοιχο μήκος του δέκτη) που μένει ανενεργό. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία που ανακλάται στους ανακλαστήρες δεν φτάνει τελικά στο δέκτη. Οι απώλειες υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$OL_{end} = \frac{H_{rec} \cdot \tan \theta_{long}}{L} \quad (3-18)$$

Οι οπτικές απώλειες σκίασης μεταξύ των σειρών ( $OL_{shad}$ ) αναφέρονται στη μεταβλητή σκίαση που μπορεί να έχει κατά τη διάρκεια μίας ημέρας μία σειρά από τη διπλανή της.

$$OL_{shad}(i) = \begin{cases} 0 & A_2(i) > A_1(i) \\ \frac{A_1(i) - A_2(i)}{2 \cdot A_2(i)} & A_2(i) \leq A_1(i) \end{cases} \quad (3-19)$$

Όπου,

$$A_1(i) = \cos(\theta_{trans} + \beta_{pm}(i)) \cdot \frac{W_{pm}}{2} \quad (3-20)$$

$$A_2(i) = \sin(90^\circ - \theta_{trans}) \cdot L_2(i) \quad (3-21)$$

$$L_2(i) = W_{pm} + M_{pm} - L_1(i) - \frac{W_{pm}}{2} \cdot \cos \beta_{pm}(i + 1) \quad (3-22)$$

$$L_1(i) = \tan \theta_{trans} \left( \frac{W_{pm}}{2} \cdot \sin \beta_{pm}(i + 1) \right) \quad (3-23)$$

Οι οπτικές απώλειες blocking μεταξύ των σειρών ( $OL_{block}$ ) αναφέρονται στην παρεμπόδιση (blocking) της ακτινοβολίας που ανακλάται από μία σειρά με κατεύθυνση το δέκτη από την διπλανή σειρά. Η παρεμπόδιση αυτή είναι μεταβαλλόμενη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Υπολογίζεται:

$$OL_{block}(i) = \begin{cases} 0 & A_2(i) > A_1(i) \\ \frac{A_1(i) - A_2(i)}{2 \cdot A_1(i)} & A_2(i) \leq A_1(i) \end{cases} \quad (3-24)$$

Όπου,

$$A_1(i) = \sin(90 - \theta_{rec}(i) + \beta_{pm}(i)) \cdot \frac{W_{pm}}{2} \quad (3-25)$$

$$A_2(i) = \sin(90^\circ - \theta_{rec}(i)) \cdot L_2(i) \quad (3-26)$$

$$L_2(i) = W_{pm} + M_{pm} - L_1(i) - \frac{W_{pm}}{2} \cdot \cos \beta_{pm}(i + 1) \quad (3-27)$$

$$L_1(i) = \tan \theta_{rec}(i) \left( \frac{W_{pm}}{2} \cdot \sin \beta_{pm}(i + 1) \right) \quad (3-28)$$

Οι οπτικές απώλειες σκίασης του δέκτη στις σειρές ( $OL_{shad\_rec}$ ) αναφέρονται στη μεταβλητή σκίαση που μπορεί να έχουν κατά τη διάρκεια της ημέρας οι σειρές από το δέκτη. Η σκίαση που δημιουργείται από το δέκτη στο επίπεδο των σειρών έχει το ίδιο πλάτος με το δέκτη. Οι οπτικές απώλειες δίνονται από τις εξισώσεις:

$$O_{L_{shad\_rec}}(i) = \begin{cases} \left| \frac{x_{pm\_east}(i) - w_{west}}{W_{pm}} \right| & \text{if } x_{pm\_east}(i) \leq x_{west} < x_{pm\_west}(i) \\ \left| \frac{x_{pm\_west}(i) - w_{east}}{W_{pm}} \right| & \text{if } x_{pm\_east}(i) \leq x_{east} < x_{pm\_west}(i) \\ 1 & \text{if } x_{east} < x_{pm\_east}(i) \wedge x_{pm\_west}(i) < x_{west} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-29)$$

Όπου,

$$x_{pm\_east}(i) = x_{pm}(i) - \frac{W_{pm}}{2}, x_{pm\_west}(i) = x_{pm}(i) + \frac{W_{pm}}{2} \quad (3-30)$$

$$x_{mean} = -\frac{H_{rec}}{\tan(90^\circ - \theta_{trans})}, x_{east} = x_{mean} - \frac{W_{rec}}{2}, x_{west} = x_{mean} + \frac{W_{rec}}{2} \quad (3-31)$$

### 3.2.3 Ηλιακός συλλέκτης

Η επιφάνεια των ανακλαστήρων ( $A_{pm}$ ) είναι η επιφάνεια που αντιστοιχεί στη συνολική επιφάνεια των επίπεδων ανακλαστήρων. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A_{pm} = series \cdot W_{pm} \cdot L \quad (3-32)$$

Το συνολικό πλάτος του ηλιακού συλλέκτη ( $W_{sc}$ ) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$W_{sc} = series \cdot W_{pm} + (series - 1) \cdot M_{pm} \quad (3-33)$$

Όπου  $L$  είναι το μήκος του ηλιακού συλλέκτη.

Η ολική επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη που καταλαμβάνει ο ηλιακός συλλέκτης ( $A_{sc}$ ) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A_{sc} = W_{sc} \cdot L \quad (3-34)$$

Η κάλυψη του εδάφους ( $GC$ ) που επιτυγχάνει ο ηλιακός συλλέκτης ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας των ανακλαστήρων προς την ολική επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$GC = \frac{A_{pm}}{A_{sc}} \quad (3-35)$$

Ο λόγος συγκέντρωσης ακτινοβολίας ( $CR$ ) ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας των ανακλαστήρων ( $A_{pm}$ ) προς την επιφάνεια του δέκτη.

$$CR = \frac{A_{pm}}{A_{rec}} \quad (3-36)$$

Η άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου ( $DNI$ ) δίνεται ως αρχική παράμετρος. Η άμεση ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου ( $G_{bT}$ ) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_{bT} = DNI \cdot \cos\theta \quad (3-37)$$

Η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των ανακλαστήρων υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q_{irr} = A_{pm} \cdot DNI \quad (3-38)$$



Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια υπολογίζεται από τον αριθμό των ακτινών που προσπίπτουν στην επιφάνεια επί την ισχύ που μεταφέρει η κάθε ακτίνα.

$$Q = N_{beams} \cdot P_{beam} \quad (3-39)$$

Ο στιγμιαίος οπτικός βαθμός απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$n = \frac{Q_{rec}}{Q_{irr}} \quad (3-40)$$

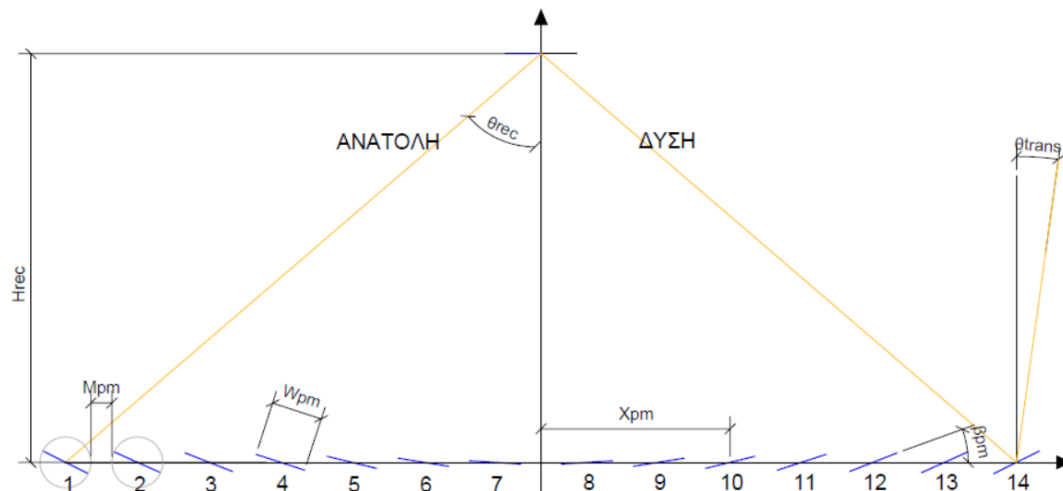
Ο συντελεστής μέγιστης οπτικής απόδοσης ( $n_0$ ) προκύπτει από τον υπολογισμό της απόδοσης με τον Ήλιο στο ζενίθ ( $\theta=0^\circ$ ).

Ο συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης IAM υπολογίζεται από την ισχύ της ακτινοβολίας του δέκτη για τη συγκεκριμένη θέση Ηλίου προς την αντίστοιχη ισχύ με τον Ήλιο στο ζενίθ.

$$IAM = \frac{Q_{rec}(\theta)}{Q_{irr}(\theta=0^\circ)} \quad (3-41)$$

### 3.3 Περιγραφή ηλιακού συλλέκτη

Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από τους ανακλαστήρες που παρακολουθούν τον Ήλιο και κατευθύνουν την ακτινοβολία σε έναν υπερυψωμένο δέκτη, ο οποίος για τους σκοπούς του κεφαλαίου είναι μία επίπεδη επιφάνεια.



Σχήμα 3-2: Σχηματικό διάγραμμα ηλιακού συλλέκτη

Ο Πίνακας 3-1 συγκεντρώνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των υλικών του υπό διερεύνηση ηλιακού συλλέκτη. Ο μηχανισμός παρακολούθησης θεωρείται ιδανικός με μηδενικό σφάλμα παρακολούθησης.

Πίνακας 3-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες των υλικών του ηλιακού συλλέκτη

	Περιγραφή	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Ηλιακός συλλέκτης	Επιφάνεια ανακλαστήρων	$A_{pr}$	$m^2$	210
	Ολική επιφάνεια	$A_{sc}$	$m^2$	288
	Πλάτος	$W_{sc}$	$m$	9.6
	Μήκος	$L$	$m$	30
	Λόγος συγκέντρωσης	$CR$	-	10
	Κάλυψη εδάφους	$GC$	-	72.9%
Ανακλαστήρες	Αριθμός	series	-	14
	Πλάτος	$W_{pr}$	$m$	0.5
	Διάκενο διαδοχικών σειρών	$M_{pr}$	$m$	0.2
	Ανακλαστικότητα	$\rho_{pr}$	-	0.93
Δέκτης	Απόσταση από επίπεδο ανακλαστήρων	$H_{rec}$	$m$	4
	Πλάτος	$W_{rec}$	$m$	0.7

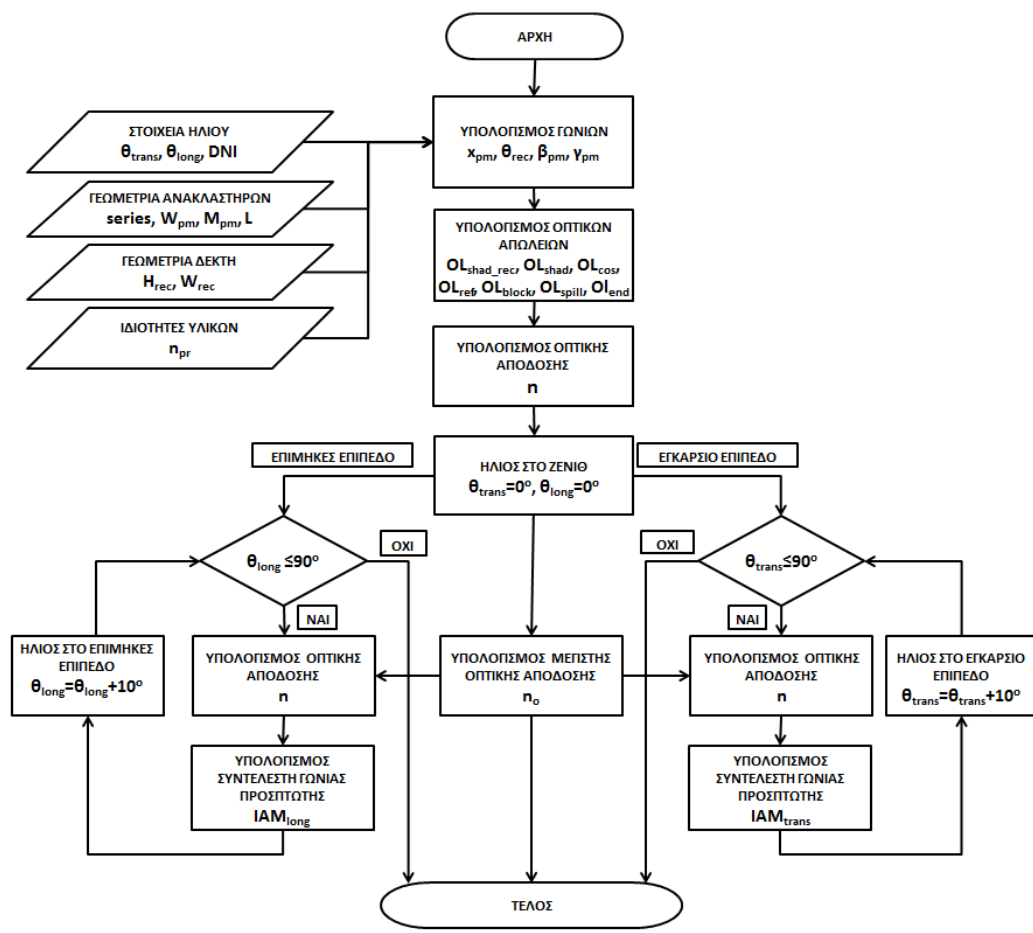
### 3.4 Μοντέλο γεωμετρικής ανάλυσης (GBOM)

#### 3.4.1 Μεθοδολογία

Η οπτική και κατ'επέκταση ενεργειακή απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται από τη θέση του Ηλίου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι δύο αυτές παράμετροι μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια του έτους.

Για την διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας του ηλιακού συλλέκτη στην οπτική απόδοσή του αναπτύχθηκε σχετική μεθοδολογία. Τα οπτικά σφάλματα θεωρούνται μηδενικά.

Αρχικά, εισάγονται τα στοιχεία που προσδιορίζουν τη γεωμετρία του ηλιακού συλλέκτη και τις οπτικές ιδιότητες των υλικών. Έπειτα, εισάγονται στοιχεία για τον προσδιορισμό της θέσης του Ηλίου. Βάσει των παραπάνω, υπολογίζονται οι σταθερές και μεταβλητές γωνίες του ηλιακού συλλέκτη για κάθε σειρά. Ακολουθεί ο υπολογισμός των οπτικών απωλειών για κάθε σειρά και ανά τύπο απώλειας. Για τη δεδομένη θέση Ηλίου προκύπτει στιγμιαίος οπτικός βαθμός απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη.



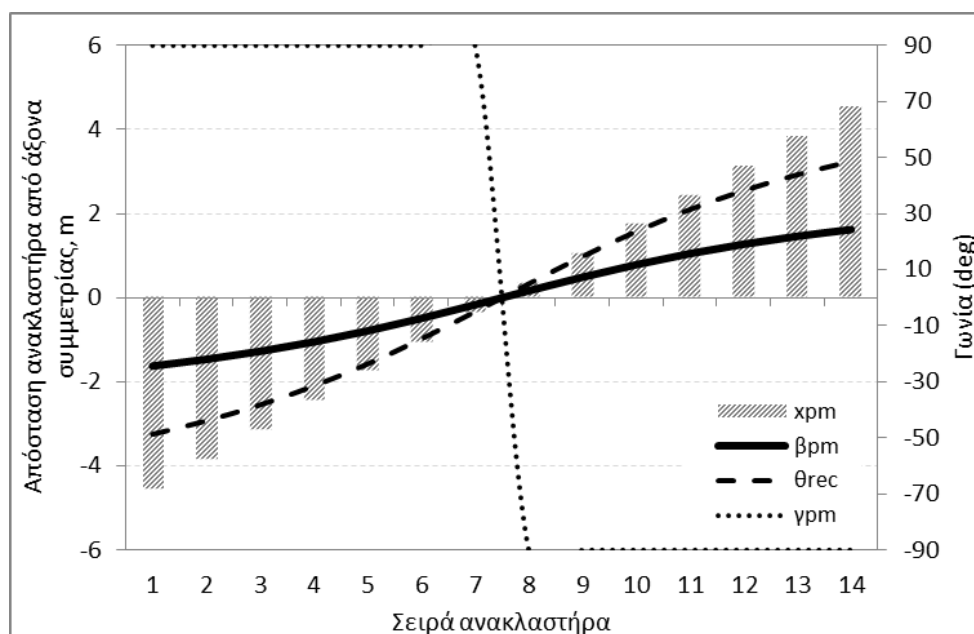
Σχήμα 3-3: Μεθοδολογία οπτικής ανάλυσης

Τέλος, διενεργούνται παραμετρικές προσομοιώσεις για συγκεκριμένες θέσεις Ηλίου με σκοπό τον καθορισμό του συντελεστή μέγιστης οπτικής απόδοσης ( $n_o$ ), και των συντελεστών διόρθωσης γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $IAM_{trans}$ ) και στο επίμηκες επίπεδο ( $IAM_{long}$ ).

### 3.4.2 Αποτελέσματα

#### 3.4.2.1 Ανάλυση γωνιών ηλιακού συλλέκτη

Ο μηχανισμός αναφοράς αποτελείται από 14 σειρές. Όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ, παρατηρείται απόλυτη συμμετρία των γωνιών του μηχανισμού ως προς τον άξονα Νότου – Βορρά (Σχήμα 3-4). Οι σειρές 1 έως 7 (ανατολικές) είναι στραμμένες προς τη Δύση ( $\gamma_{pm} = 90^\circ$ ) και οι σειρές 8 έως 14 (δυτικές) είναι στραμμένες προς την Ανατολή ( $\gamma_{pm} = -90^\circ$ ).

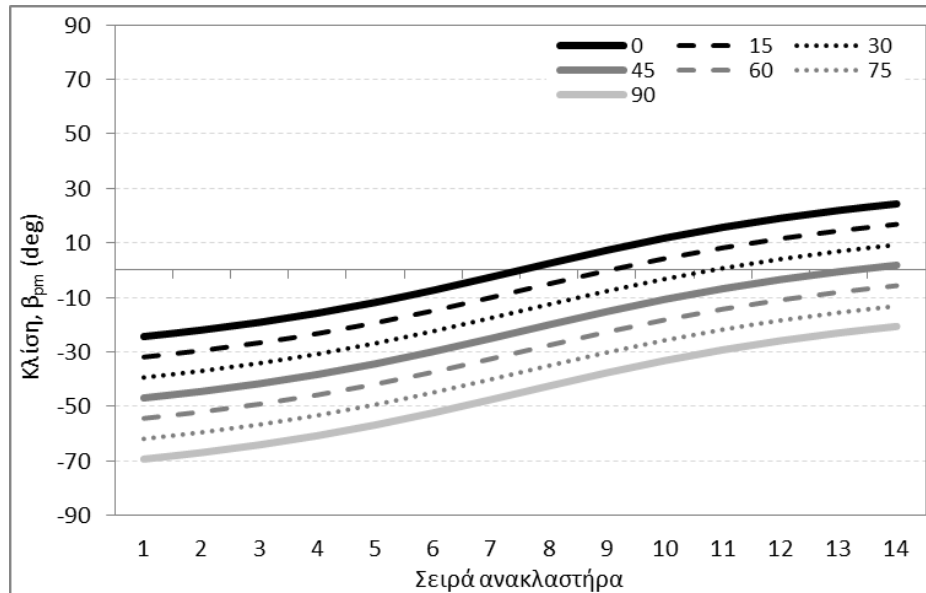


Σχήμα 3-4: Γωνίες ηλιακού συλλέκτη για Ήλιο στο ζενίθ

Παρατηρείται ότι η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο δέκτη ( $\theta_{rec}$ ) για κάθε σειρά είναι διπλάσια της κλίσης των ανακλαστήρων ( $\beta_{pm}$ ). Δεδομένου του προσανατολισμού του ηλιακού συλλέκτη σε Βορρά – Νότο και της συμμετρικής γεωμετρίας των ανακλαστήρων εκατέρωθεν του δέκτη, προκύπτει συμμετρία στην κίνηση των ανακλαστήρων στο ηλιακό μεσημέρι.

Στο Σχήμα 3-5 μεταβάλλεται η θέση του Ηλίου ως προς το εγκάρσιο επίπεδο με γωνίες πρόσπτωσης από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$ . Παρατηρείται ότι οι σειρές υπόκειται στην ίδια γωνιακή μετατόπιση κατά την παρακολούθηση του Ηλίου. Η διαφορά των γωνιών μεταξύ τους παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της κίνησής τους, γεγονός που επιτρέπει τη μηχανική σύζευξή τους. Επίσης, παρατηρείται ότι σε κάθε γωνιακή μετατόπιση του Ηλίου, οι σειρές μετατοπίζονται κατά το ήμισυ

της γωνιακής μετατόπισης του Ηλίου. Δηλαδή για  $\Delta\theta_{\text{trans}}=90^\circ$  παρατηρείται  $\Delta\beta_{\text{pm}}=45^\circ$ . Επομένως, η παρακολούθηση του Ηλίου από Ανατολή ( $\theta_{\text{trans}}=-90^\circ$ ) σε Δύση ( $\theta_{\text{trans}}=90^\circ$ ) οδηγεί σε ημερήσια περιστροφή των σειρών κατά  $\Delta\beta_{\text{pm}}=90^\circ$ .

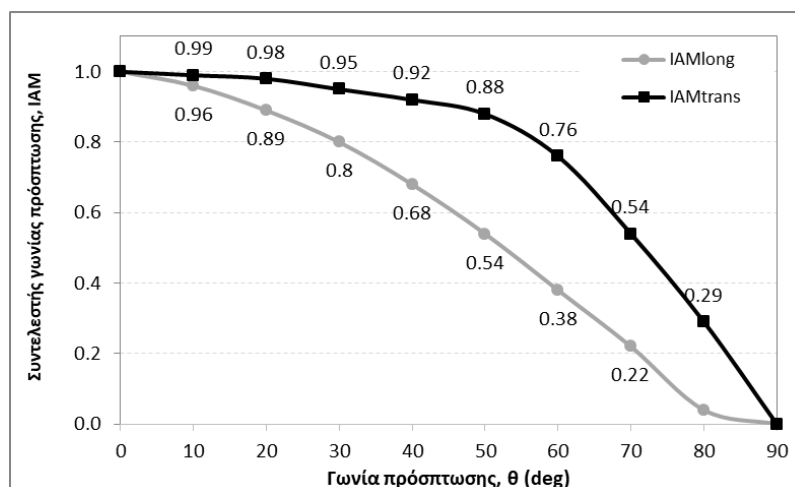


Σχήμα 3-5: Κλίση ανακλαστήρων συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{\text{trans}}$ ) από  $0^\circ$  μέχρι  $90^\circ$

### 3.4.2.2 Αποτελέσματα ηλιακού συλλέκτη

Με τον Ήλιο στο ζενίθ προκύπτει από την προσομοίωση ότι ο συντελεστής μέγιστης οπτικής απόδοσης είναι  $\eta_0 = 0.826$ .

Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $IAM_{\text{trans}}$  και  $IAM_{\text{long}}$  διενεργείται παραμετρική ανάλυση, μεταβάλλοντας τη θέση του Ηλίου στο εγκάρσιο και στο επίμηκες επίπεδο. Τα αποτελέσματα των συντελεστών  $IAM_{\text{trans}}$  και  $IAM_{\text{long}}$  απεικονίζονται στο Σχήμα 3-6.

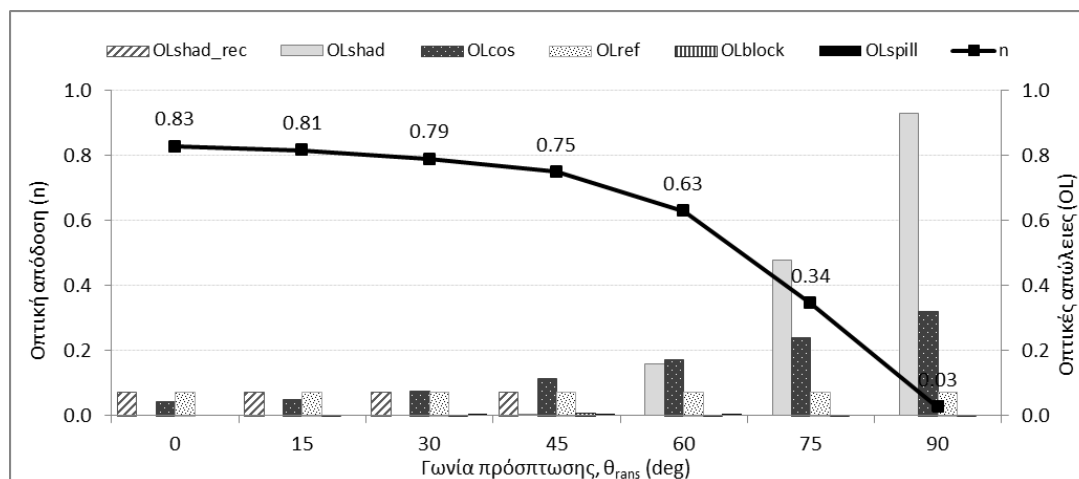


Σχήμα 3-6: Συντελεστές γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $IAM_{\text{trans}}$ ) και στο επίμηκες επίπεδο ( $IAM_{\text{long}}$ )

Παρατηρείται ότι η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης οδηγεί σε μείωση των συντελεστών  $IAM_{trans}$  και  $IAM_{long}$ , καθώς αυξάνονται οι οπτικές απώλειες λόγω της γεωμετρίας και της τοποθέτησης του συλλέκτη.

Κατά το εγκάρσιο επίπεδο, οι αλλαγές στη θέση του Ηλίου επιφέρουν μικρότερη μείωση στην οπτική απόδοση. Για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι  $30^\circ$ , ο συντελεστής  $IAM_{trans}$  είναι μεγαλύτερος του 0.95. Για μεγαλύτερες γωνίες των  $50^\circ$ , ο συντελεστής μειώνεται σημαντικά. Κατά το επίμηκες επίπεδο, το συγκεκριμένο μήκος του ηλιακού συλλέκτη οδηγεί σε σταδιακή μείωση της οπτικής απόδοσης. Για γωνία πρόσπτωσης μέχρι  $10^\circ$ , ο συντελεστής  $IAM_{long}$  είναι 0.96, ενώ για γωνία  $30^\circ$  είναι 0.8.

Για την περαιτέρω ανάλυση των οπτικών συντελεστών είναι απαραίτητη η ανάλυση συναρτήσεων των σειρών αλλά και συναρτήσεων της γωνίας πρόσπτωσης. Το Σχήμα 3-7 δείχνει συνολικά σε επίπεδο ηλιακού συλλέκτη, το βαθμό απόδοσης και τις οπτικές απώλειες ανά τύπο για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ). Η οπτική απόδοση ( $\eta$ ) λαμβάνει την υψηλότερη τιμή για Ήλιο στο ζενίθ και διατηρείται σχεδόν σταθερή για γωνίες μέχρι  $30^\circ$ . Η καμπύλη ουσιαστικά διαμορφώνεται από την καμπύλη του  $IAM_{trans}$ . Η οπτική απόδοση ( $\eta$ ) μειώνεται για γωνία μεγαλύτερη των  $45^\circ$ . Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στη σημαντική αύξηση των απωλειών σκίασης μεταξύ των ( $OL_{shad}$ ) καθώς και των απωλειών συνημίτονου ( $OL_{cos}$ ).

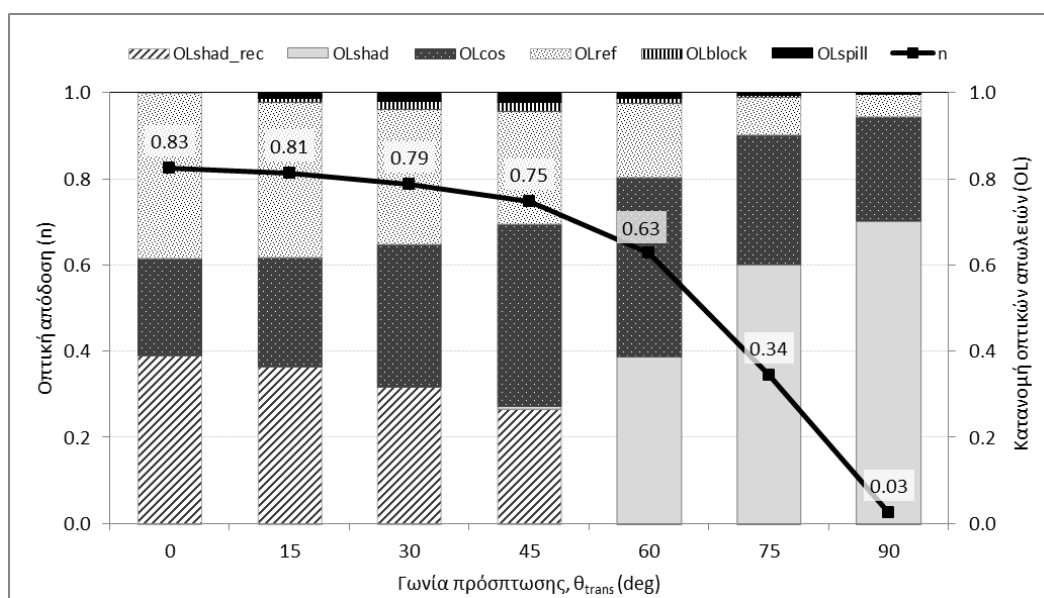


Σχήμα 3-7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα απωλειών του μηχανισμού για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ )

Οι απώλειες συνημίτονου ( $OL_{cos}$ ) λαμβάνουν τιμές από 4% για τον Ήλιο στο ζενίθ μέχρι 32% για τον Ήλιο στη Δύση. Οι απώλειες σκίασης ( $OL_{shad}$ ) φαίνεται ότι είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας στη μείωση της οπτικής απόδοσης. Είναι μηδενικές για θέσεις Ηλίου κοντά στην κατακόρυφο και αυξάνονται σημαντικά για γωνίες μεγαλύτερες των  $45^\circ$ . Οι απώλειες σκίασης του δέκτη στις σειρές ( $OL_{shad\_rec}$ ) είναι περίπου 7% για γωνίες μέχρι  $45^\circ$  και αμελητέες για μεγαλύτερες γωνίες, καθώς η σκίαση που

δημιουργεί ο δέκτης στο οριζόντιο επίπεδο μετατοπίζεται πλέον εκτός του πλάτους των μηχανισμού. Οι απώλειες διάχυσης στο δέκτη ( $OL_{spill}$ ) είναι σχεδόν μηδενικές για όλες τις γωνίες, γεγονός που εξηγείται κυρίως από το γεγονός ότι το πλάτος του δέκτη (0.7m) είναι κατά 40% μεγαλύτερο από το πλάτος των ανακλαστήρων (0.5m). Η μείωση του πλάτους του δέκτη αναμένεται να οδηγή σε αύξηση του συγκεκριμένου τύπου απωλειών. Οι απώλειες blocking ( $OL_{block}$ ) είναι σχεδόν μηδενικές για όλες τις γωνίες. Οι απώλειες αυτές θα ήταν πιο έντονες σε περίπτωση που η απόσταση μεταξύ των σειρών ήταν μικρότερη ή ο δέκτης βρισκόταν χαμηλότερα.

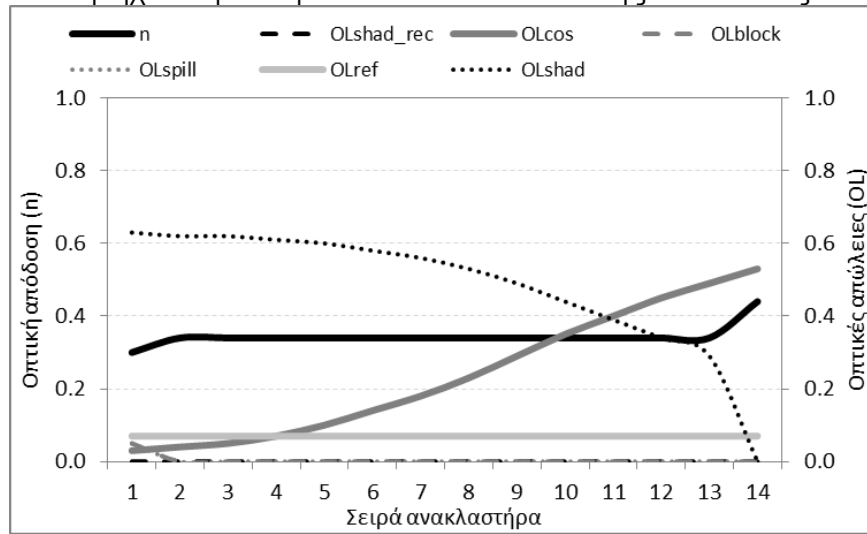
Το Σχήμα 3-8 παρουσιάζει την κατανομή μεταξύ των οπτικών απωλειών για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ).



Σχήμα 3-8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της κατανομής των απωλειών του μηχανισμού για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ )

### 3.4.2.3 Αποτελέσματα οπτικών απωλειών ανά σειρά

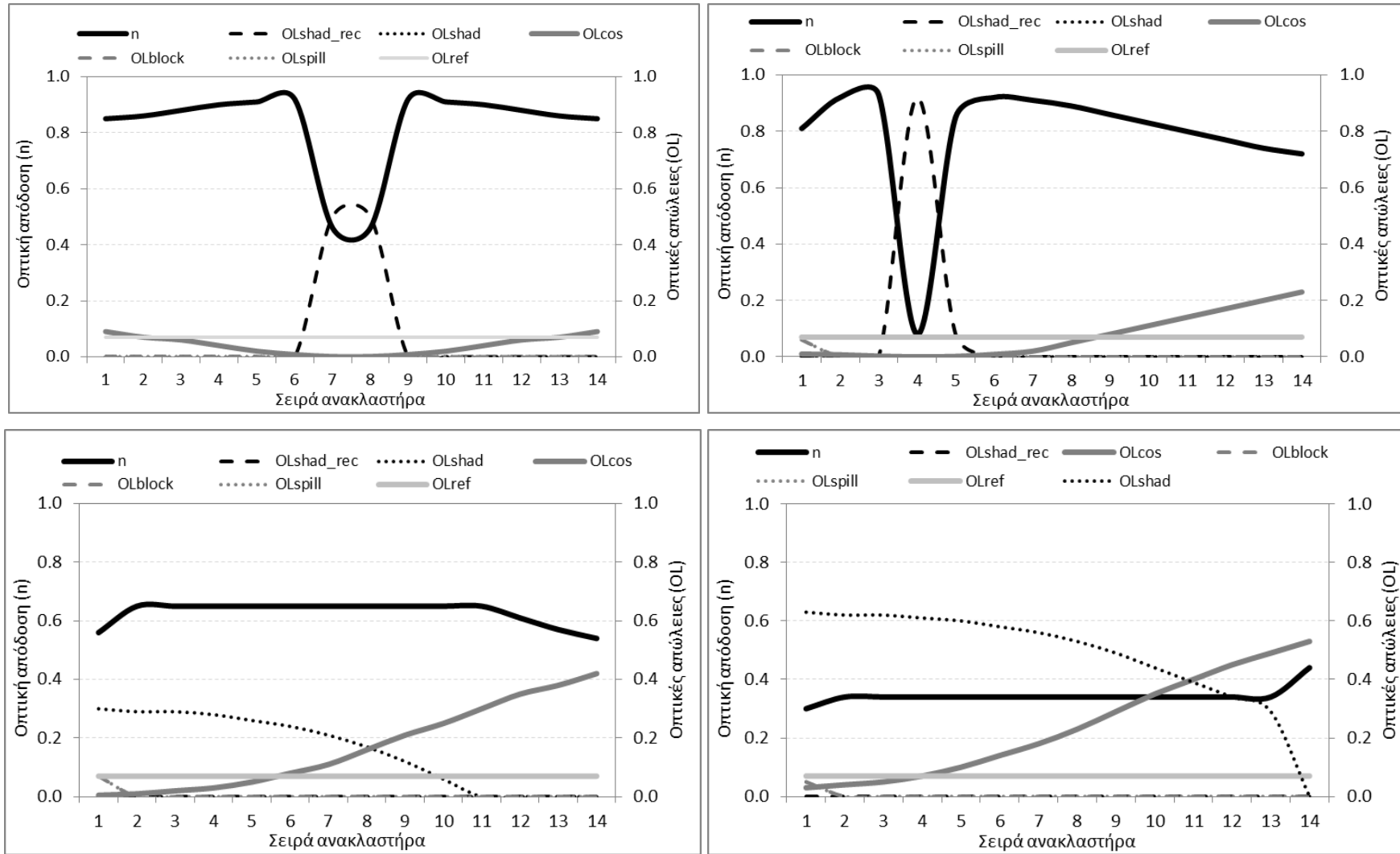
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η ανάλυση των οπτικών απωλειών του μηχανισμού για κάθε τύπο οπτικής απώλειας και κάθε



σειρά. Το

Σχήμα 3-9 αφορά τέσσερις ενδεικτικές περιπτώσεις για απόκλιση από την κατακόρυφο ως προς το εγκάρσιο επίπεδο κατά  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $75^\circ$ , δείχνοντας έτσι την εξέλιξη της απόδοσης και των επιμέρους οπτικών απωλειών ανά σειρά. Στον αριστερό άξονα αντιστοιχεί η συνολική απόδοση του μηχανισμού αναφοράς ( $n$ ), ενώ στο δεξιό άξονα αντιστοιχούν οι επιμέρους οπτικές απώλειες (OL).





Σχήμα 3-9: Οπτική απόδοση ( $n$ ) και οπτικές απώλειες ( $OL$ ) ανά σειρά για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο (αριστερά πάνω  $\theta_{trans}=0^\circ$ , δεξιά πάνω  $\theta_{trans}=30^\circ$ , αριστερά κάτω  $\theta_{trans}=60^\circ$  και δεξιά κάτω  $\theta_{trans}=75^\circ$ )

Για  $\theta_{\text{trans}}=0^\circ$  (Σχήμα 3-9) η συνολική οπτική απόδοση είναι  $n=0.826$ . Ωστόσο, η κάθε σειρά έχει το δικό της βαθμό απόδοσης, που κυμαίνεται από 0.46 για τις ακριανές μέχρι 0.92 για τις κεντρικές σειρές. Ο Πίνακας 3-2 παραθέτει τα στοιχεία των οπτικών απωλειών ανά σειρά για τον Ήλιο στο ζενίθ.

Όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ, φαίνεται έντονα η διαφορά της απόδοσης που έχουν μεταξύ τους οι σειρές. Οι κεντρικές σειρές που σκιάζονται από το δέκτη έχουν απόδοση περίπου 46%, οι ενδιάμεσες σειρές υψηλότερη απόδοση 90% περίπου, ενώ οι ακριανές έχουν μικρότερη απόδοση, περίπου 85%.

Αντίστοιχη διαφοροποίηση της απόδοσης μεταξύ των σειρών παρουσιάζεται μέχρι τις  $60^\circ$ , ενώ μετά φαίνεται ότι εξομαλύνεται η διαφορά στην απόδοσή τους.

Όσο ο Ήλιος αποκλίνει περισσότερο από την κατακόρυφο μειώνεται η οπτική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη, γεγονός που συνδέεται κυρίως με τη σημαντική αύξηση των οπτικών απωλειών σκίασης ( $OL_{\text{shad}}$ ) και συνημίτονου ( $OL_{\text{cos}}$ ).

Ο δέκτης δημιουργεί σκίαση σε μία ή δύο γειτονικές σειρές μειώνοντας σημαντικά την οπτική απόδοσή τους. Για  $\theta_{\text{trans}} = 30^\circ$  η 4<sup>η</sup> σειρά που βρίσκεται προς την Ανατολή έχει οπτική απόδοση μόλις 8%, όταν οι γειτονικές της κυμαίνονται στο 90%.

Οι σειρές που σκιάζονται από το δέκτη έχουν σχεδόν μηδενικές απώλειες λόγω συνημίτονου. Γεγονός που εξηγείται από την καθετότητα της επιφάνειας, ώστε να ανακλαστεί η ακτινοβολία προς το δέκτη.

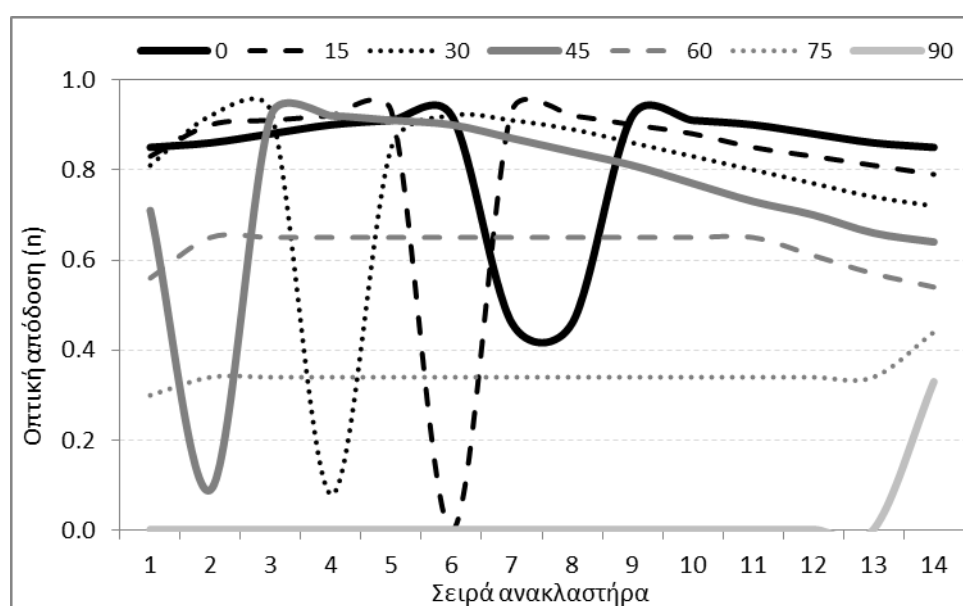
Πίνακας 3-2: Οπτικές απώλειες ανά σειρά για  $\theta_{\text{trans}}=0^\circ$

Σειρά	$\beta_{\text{pm}}$	n	$OL_{\text{shad\_rec}}$	$OL_{\text{shad}}$	$OL_{\text{cos}}$	$OL_{\text{block}}$	$OL_{\text{spill}}$	$OL_{\text{ref}}$
1	-24.34	0.85	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.07
2	-21.95	0.86	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.07
3	-19.11	0.88	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.07
4	-15.74	0.90	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.07
5	-11.81	0.91	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.07
6	-7.35	0.92	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07
7	-2.50	0.46	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
8	2.50	0.46	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
9	7.35	0.92	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07
10	11.81	0.91	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.07
11	15.74	0.90	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.07

12	19.11	0.88	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.07
13	21.95	0.86	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.07
14	24.34	0.85	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.07

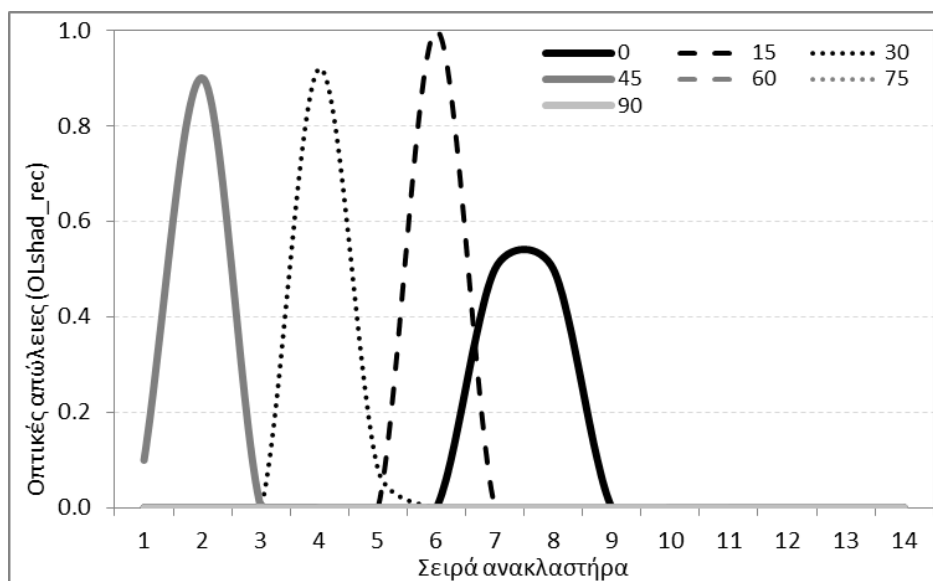
#### 3.4.2.4 Αποτελέσματα ανά τύπο οπτικών απωλειών

Το Σχήμα 3-10 δείχνει την οπτική απόδοση της κάθε σειράς για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ). Το φαινόμενο της σκίασης από το δέκτη προκαλεί απότομη μείωση της απόδοσης συγκεκριμένων σειρών κάθε φορά. Για γωνίες  $\theta_{trans}$  μέχρι  $45^\circ$  υπάρχει μικρή διαφορά της απόδοσης των κεντρικών σειρών που δεν σκιάζονται από το δέκτη, σε σχέση με τις ακριανές.



Σχήμα 3-10: Συνολικές οπτικές απώλειες ανά σειρά για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ )

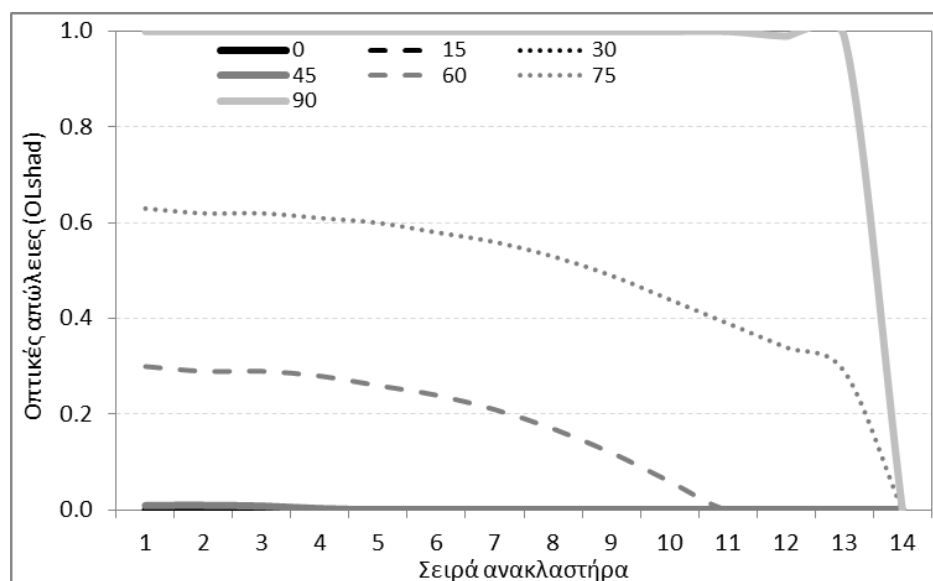
Το Σχήμα 3-11 δείχνει τις οπτικές απώλειες σκίασης του δέκτη ( $OL_{shad\_rec}$ ) στις σειρές ανά σειρά για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ). Οι σειρές σκιάζονται μέχρι τη γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$ . Για μεγαλύτερες γωνίες, η σκιά του δέκτη είναι έξω από την περιοχή των ανακλαστήρων και για το λόγο αυτόν, δεν παρατηρείται καθόλου σκίαση στις σειρές. Συνεπώς, η επιλογή του πλάτους του δέκτη είναι εξαιρετικά σημαντική, ώστε να μειωθούν οι απώλειες σκίασης.



Σχήμα 3-11: Απώλειες σκίασης του δέκτη για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ )

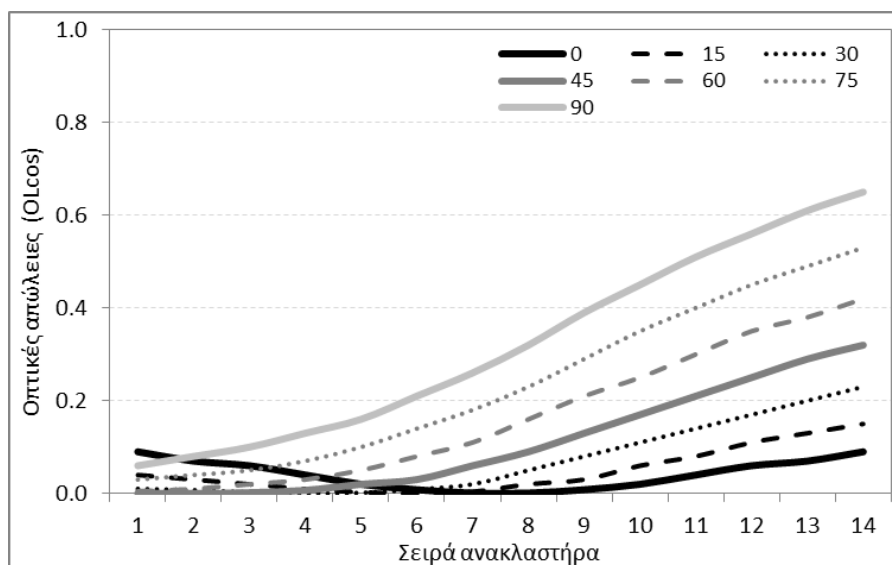
Το Σχήμα 3-12 δείχνει τις οπτικές απώλειες σκίασης μεταξύ διαδοχικών σειρών ( $OL_{shad}$ ) ανά σειρά για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ).

Για μικρές γωνίες πρόσπτωσης, οι οπτικές απώλειες είναι αμελητέες. Οι οπτικές απώλειες σκίασης είναι μεγαλύτερες στις ανατολικές σειρές λόγω μεγαλύτερης καθετότητας των επιφανειών στις ακτίνες. Όταν ο Ήλιος είναι στη Δύση, για όλες τις σειρές εκτός της πλησιέστερης στον Ήλιο, οι απώλειες σκίασης είναι 100%. Για γωνία πρόσπτωσης  $60^\circ$  οι απώλειες καταλαμβάνουν σημαντικό ποσοστό της τάξης του 16%, ενώ για  $75^\circ$  οι απώλειες φτάνουν το 48%.



Σχήμα 3-12: Απώλειες σκίασης μεταξύ των σειρών για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ )

Το Σχήμα 3-13 δείχνει τις οπτικές απώλειες συνημίτονου ( $OL_{cos}$ ) ανά σειρά για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ). Οι οπτικές απώλειες συνημίτονου αποτελούν τον βασικότερο τύπο οπτικών απωλειών. Οι οπτικές απώλειες παρατηρούνται από την πλευρά που βρίσκεται ο Ήλιος. Γεγονός που εξηγείται από τις επιφάνειες που έχουν μικρότερη καθετότητα με τις ακτίνες του Ηλίου. Οι οπτικές απώλειες συνημίτονου εμφανίζονται σε όλες τις σειρές ταυτόχρονα, αλλά με διαφορετική τιμή. Όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ, οι απώλειες συνημίτονου στις ακριανές σειρές είναι 10%, ενώ στις κεντρικές σειρές οι απώλειες είναι αμελητέες.



Σχήμα 3-13: Απώλειες συνημίτονου των σειρών για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ )

Τέλος, οι οπτικές απώλειες διάχυσης και παρεμπόδισης εμφανίζονται κυρίως στις ακριανές σειρές και για τη συγκεκριμένη διαστασιολόγηση του ηλιακού συλλέκτη είναι αμελητέες.

### 3.5 Μοντέλο Ιχνηλάτησης Ακτινοβολίας (RTM)

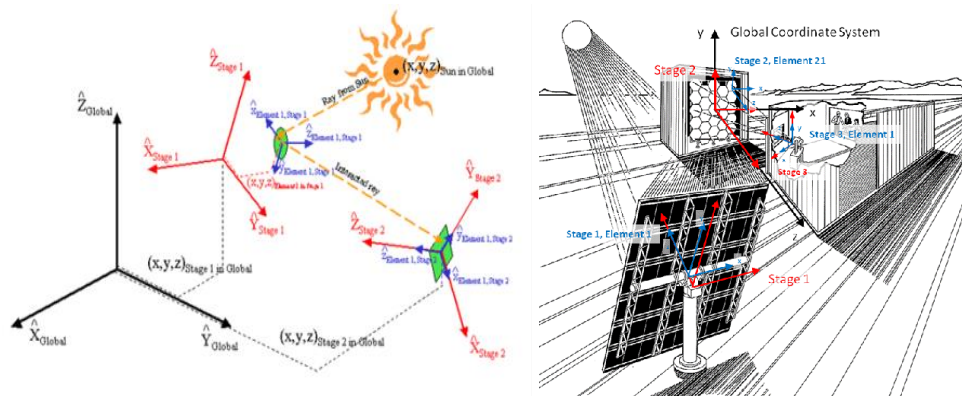
#### 3.5.1 Μεθοδολογία

Για την ανάλυση του ηλιακού συλλέκτη αναπτύχθηκε μοντέλο (Ray-Tracing Model RTM) στο λογισμικό Soltrace [88]. Ο κώδικας χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία ιχνηλάτησης ακτινοβολίας Monte-Carlo [89]. Αρχικά, ο χρήστης επιλέγει συγκεκριμένο αριθμό ακτίνων φωτός προς ιχνηλάτηση. Η διαδρομή κάθε ακτίνας ιχνηλατείται, καθώς αυτή υπόκειται σε πολλαπλές οπτικές αλληλεπιδράσεις.

Ένα οπτικό σύστημα αποτελείται από διαδοχικά στάδια μέσα σε ένα σύστημα απόλυτων συντεταγμένων. Ως στάδιο ορίζεται εκείνο το τμήμα της οπτικής γεωμετρίας, από το οποίο μόλις η ακτίνα εξέλθει, δεν θα επανεισαχθεί. Ένα οπτικό σύστημα μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα στάδια. Ένα στάδιο αποτελείται από επιμέρους «στοιχεία». Κάθε στοιχείο περιέχει μία επιφάνεια, ένα είδος οπτικής αλληλεπίδρασης, μία γεωμετρία και όπου απαιτείται, μία ομάδα οπτικών ιδιοτήτων. Η θέση και ο προσανατολισμός των σταδίων καθορίζεται μέσα στο σύστημα απόλυτων συντεταγμένων, ενώ η θέση και ο προσανατολισμός των στοιχείων καθορίζεται μέσα στο σύστημα σχετικών συντεταγμένων του συγκεκριμένου σταδίου μέσα στο οποίο βρίσκονται.

Χρησιμοποιούνται τρία συστήματα συντεταγμένων: το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων, το σύστημα συντεταγμένων των σταδίων και το σύστημα συντεταγμένων των στοιχείων. Κάθε στοιχείο μέσα σε ένα στάδιο έχει το δικό του σύστημα τοπικών συντεταγμένων (θέση και προσανατολισμός), που καθορίζεται σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων του σταδίου μέσα στο οποίο βρίσκεται. Κάθε στάδιο έχει ένα σύστημα συντεταγμένων που καθορίζεται σε σχέση με το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων. Τα συστήματα συντεταγμένων των σταδίων και των στοιχείων σχετίζονται με τα συστήματα απόλυτων συντεταγμένων και συντεταγμένων σταδίων αντίστοιχα, μέσω των εξισώσεων περιστροφής Euler.

Ο προσανατολισμός του Ηλίου καθορίζεται σε σχέση με το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων. Η κατεύθυνση του Ηλίου αποτελεί δεδομένο εισόδου στο πρόγραμμα. Οι ακτίνες του Ηλίου δημιουργούνται από τη θέση του Ηλίου και ιχνηλατούνται διαδοχικά καθώς περνάνε μέσα από κάθε στάδιο του συστήματος. Μία ακτίνα μπορεί να έχει πολλαπλές αλληλεπιδράσεις με μία ή περισσότερες επιφάνειες.



Σχήμα 3-14: Συστήματα συντεταγμένων στο πρόγραμμα SolTrace

Τα δεδομένα εισόδου αφορούν στοιχεία του συλλέκτη (γεωμετρία, θέση και κίνηση), στοιχεία του Ηλίου (θέση, σχήμα, κατανομή και ένταση ακτινοβολίας), ιδιότητες των επιφανειών (ανακλαστικότητα, σφάλμα παρακολούθησης) και δεδομένα προσομοίωσης (αριθμός ακτίνων και διασταυρώσεων). Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, παράγονται διαγράμματα διασταυρώσεων ακτίνων, χάρτες ροής ακτινοβολίας και δεδομένα ακτίνων, από τα οποία προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Η ισχύς της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια υπολογίζεται από τον αριθμό των ακτίνων που προσπίπτουν στην επιφάνεια επί την ισχύ της κάθε ακτίνας.

### 3.5.2 Αποτελέσματα

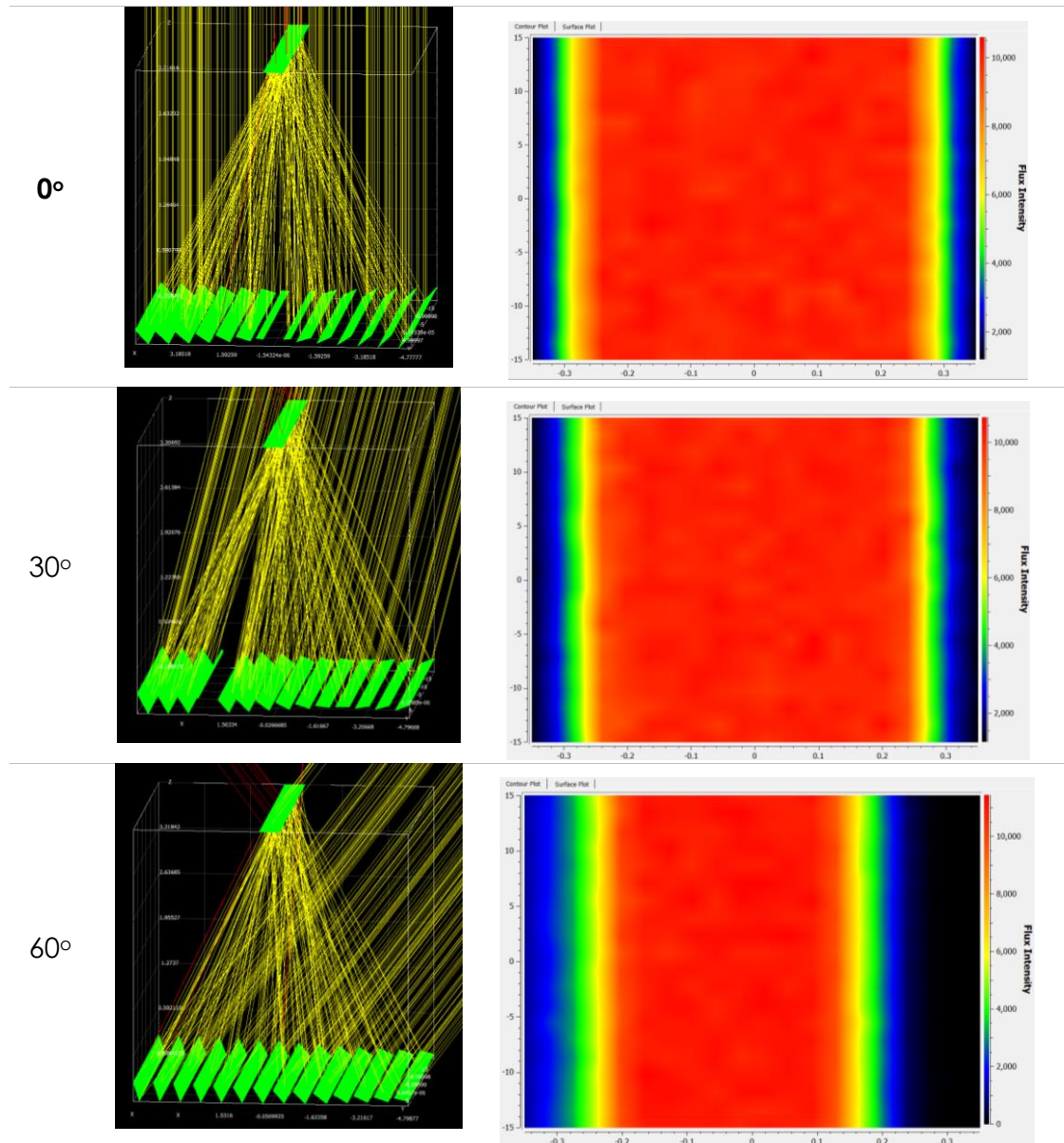
Για τον υπολογισμό του συντελεστή μέγιστης απόδοσης ( $\eta_0$ ) διενεργήθηκε προσομοίωση με τον Ήλιο στο ζηνίθ. Με αριθμό ακτίνων 1,000,000 η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο δέκτη είναι 172.2 kW και ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται  $\eta_0=0.82$ . Μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης ως προς το εγκάρσιο επίπεδο, υπολογίζεται ο συντελεστής  $IAM_{trans}$ . Ο Πίνακας 3-3 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης.

Πίνακας 3-3 : Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή  $IAM_{trans}$

$\theta$	Αρ. ακτίνων	Ισχύς (W/ ακτίνα)	Ισχύς (kW)	$IAM_{trans}$
0	832,030	0.2069	172.2	1.000
10	832,050	0.2066	171.9	0.998
20	830,440	0.2030	168.6	0.979
30	828,890	0.1981	164.2	0.954
40	830,500	0.1917	159.2	0.925
50	850,100	0.1793	152.4	0.885
60	825,510	0.1561	128.9	0.748

70	788,210	0.1115	87.9	0.510
80	738,220	0.0613	45.3	0.263
90	0	0	0.0	0.000

Το Σχήμα 3-15 παρουσιάζει συγκριτικά τα αποτελέσματα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας και της κατανομής ισχύος στο δέκτη, για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο.



Σχήμα 3-15: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για απόκλιση του Ηλίου 0°, 30°, 60° στο εγκάρσιο επίπεδο

Από το Σχήμα 3-15 φαίνεται ότι όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ ( $\theta=0^\circ$ ), η κατανομή της ισχύος στο δέκτη είναι συμμετρική, με συγκέντρωση της ακτινοβολίας  $\pm 25$  cm ως προς τον άξονα συμμετρίας. Αντίθετα, η μετακίνηση του Ηλίου επιδρά στο προφίλ συγκέντρωσης ακτινοβολίας στο δέκτη.

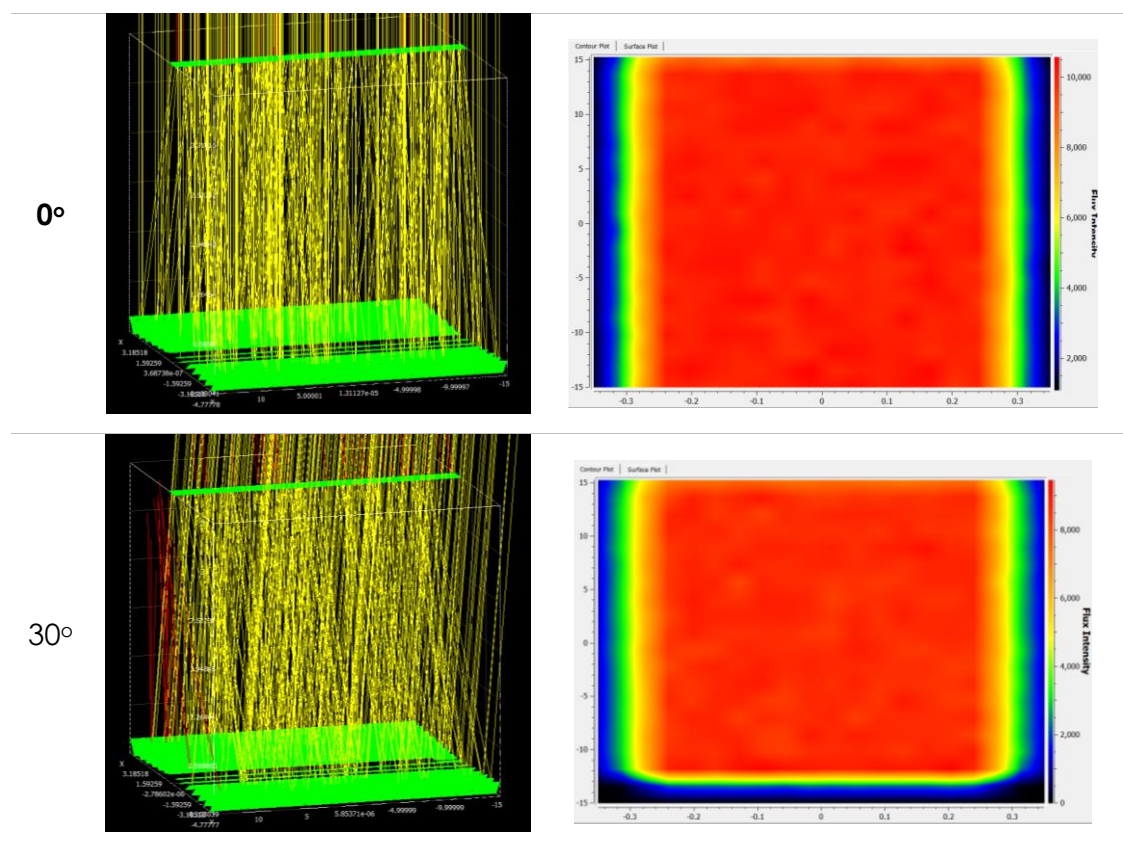


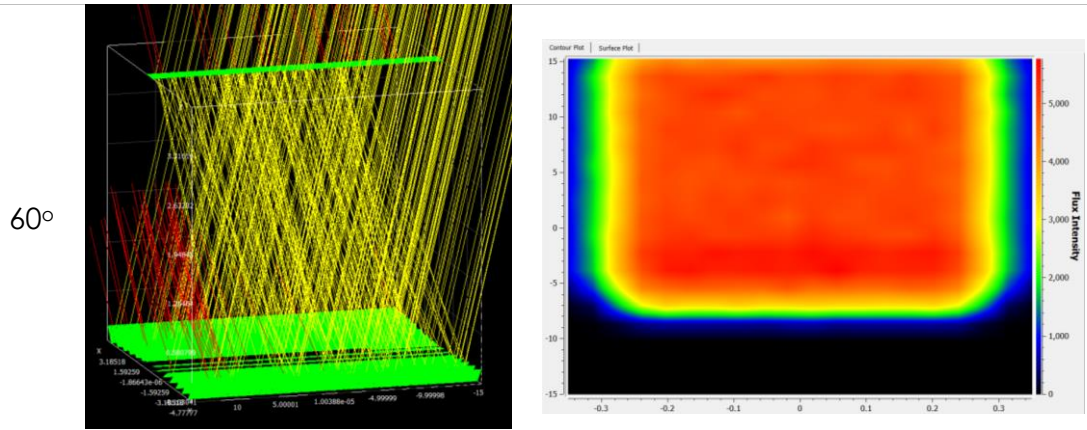
Μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης ως προς το επίμηκες επίπεδο, υπολογίζεται ο συντελεστής  $IAM_{long}$ . Ο Πίνακας 3-4 παραθέτει τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης.

Πίνακας 3-4 : Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή  $IAM_{long}$

$\theta$	Αρ. ακτίνων	Ισχύς (W/ακτίνα)	Ισχύς (kW)	$IAM_{long}$
0	829630	0.208	172.2	1.000
10	807650	0.205	165.4	0.960
20	780770	0.195	152.2	0.884
30	751910	0.181	135.9	0.789
40	716360	0.159	113.7	0.660
50	671500	0.135	90.5	0.526
60	597450	0.106	63.4	0.368
70	469250	0.073	34.3	0.199
80	99200	0.038	3.8	0.022
90	0	0	0.0	0.000

Στο Σχήμα 3-16 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας και της κατανομής ισχύος στον δέκτη, για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο επίμηκες επίπεδο.





Σχήμα 3-16: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για απόκλιση του Ηλίου 0°, 30°, 60° στο επίμηκες επίπεδο

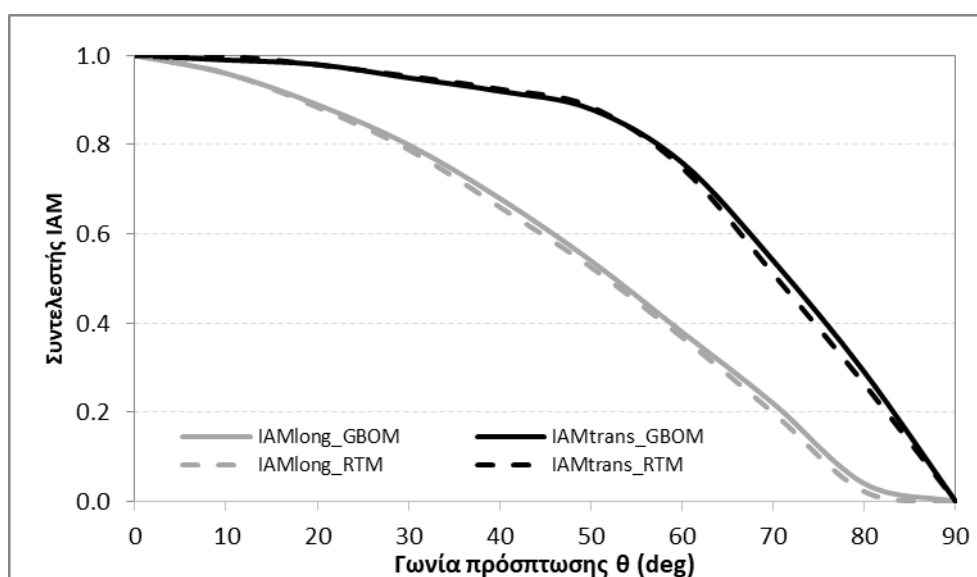
### 3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων οπτικής ανάλυσης του ηλιακού συλλέκτη υπό την ίδια παραμετροποίηση.

Αρχικά, ελέγχεται ο συντελεστής μέγιστης οπτικής απόδοσης ( $\eta_0$ ). Το μοντέλο GBOM υπολογίζει συντελεστή  $\eta_0=0.826$  ενώ το μοντέλο RTM υπολογίζει 0.82. Η απόκλιση των δύο αποτελεσμάτων είναι 0.7%, που κρίνεται αρκετά ικανοποιητική.

Σχετικά με το συντελεστή  $IAM_{trans}$ , για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι  $60^\circ$  η απόκλιση των δύο υπολογιστικών μοντέλων είναι μικρότερη του 1.5%. Αντίστοιχα για το συντελεστή  $IAM_{long}$ , για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι  $60^\circ$  η απόκλιση είναι μικρότερη του 3.1%. Σε όλες τις περιπτώσεις, η απόκλιση κρίνεται ικανοποιητική.

Η καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο υπολογιστικών μοντέλων απεικονίζεται στο Σχήμα 3-17. Παρατηρείται ότι για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν, η απόκλιση των δύο υπολογιστικών μοντέλων είναι εξαιρετική μικρή.



Σχήμα 3-17: Συγκριτικά αποτελέσματα των συντελεστών  $IAM_{trans}$  και  $IAM_{long}$  από τα μοντέλα GBOM και RTM

### 3.7 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου διερευνήθηκε η αρχή λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη τύπου Fresnel και αναδείχθηκαν οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν την οπτική απόδοσή του. Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από επίπεδους ανακλαστήρες που συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε έναν υπερυψωμένο επίπεδο δέκτη.

Τα κύρια συμπεράσματα του κεφαλαίου συνοψίζονται ως εξής:

- Η αρχή λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη αναλύθηκε διεξοδικά με υπολογισμό των γωνιών, των τύπων οπτικών απωλειών για τον ηλιακό συλλέκτη, για κάθε σειρά μεμονωμένα συναρτήσεως της γωνίας πρόσπτωσης.
- Αναπτύχθηκαν δύο υπολογιστικά μοντέλα: Το πρώτο μοντέλο αφορά οπτική ανάλυση με γεωμετρικές εξισώσεις (Geometry Based Optical Model - GBOM) σε περιβάλλον επίλυσης μαθηματικών εξισώσεων, ενώ το δεύτερο μοντέλο αφορά οπτική ανάλυση με ιχνηλάτηση ακτινοβολίας (Ray-tracing RT).
- Αναπτύχθηκε μεθοδολογία που περιλαμβάνει τις οπτικές απώλειες ανά σειρά και τύπο απώλειας. Η επίδραση του κάθε τύπου απώλειας αναλύθηκε διεξοδικά ανά σειρά και για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.
- Από την ανάλυση των τύπων οπτικών απωλειών, προέκυψε ότι οι απώλειες συνημίτονου ( $O_{L_{\cos}}$ ) αποτελούν την κύρια αιτία μείωσης της απόδοσης σε όλες τις γωνίες πρόσπτωσης. Οι απώλειες σκίασης μεταξύ των σειρών ( $O_{L_{\text{shad}}}$ ) είναι μηδενικές σε γωνίες πρόσπτωσης  $<45^\circ$  ενώ είναι πιο έντονες σε μεγαλύτερες γωνίες.
- Παρατηρείται διαφοροποίηση της οπτικής απόδοσης των σειρών μεταξύ τους, ως αποτέλεσμα των διαφόρων τύπων οπτικών απωλειών.
- Τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίθηκαν για διάφορες θέσεις του Ηλίου. Ο συντελεστής μέγιστης απόδοσης υπολογίστηκε 0.826 από το μοντέλο GBOM και 0.82 από το RTM. Η απόκλιση είναι 0.7% και κρίνεται ικανοποιητική.
- Σχετικά με το συντελεστή  $IAM_{\text{trans}}$ , για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι  $60^\circ$  η απόκλιση των δύο υπολογιστικών μοντέλων είναι μικρότερη του 1.5%. Αντίστοιχα για το συντελεστή  $IAM_{\text{long}}$ , για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι  $60^\circ$  η απόκλιση είναι μικρότερη του 3.1%.

## **4 ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL ΜΕ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΥΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ ΣΧΗΜΑΤΟΣ CPC**

### **4.1 Εισαγωγή**

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την οπτική ανάλυση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη τύπου Fresnel. Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από πρωτεύοντες ανακλαστήρες παραβολικού σχήματος, δευτερεύοντα ανακλαστήρα σχήματος CPC και απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό.

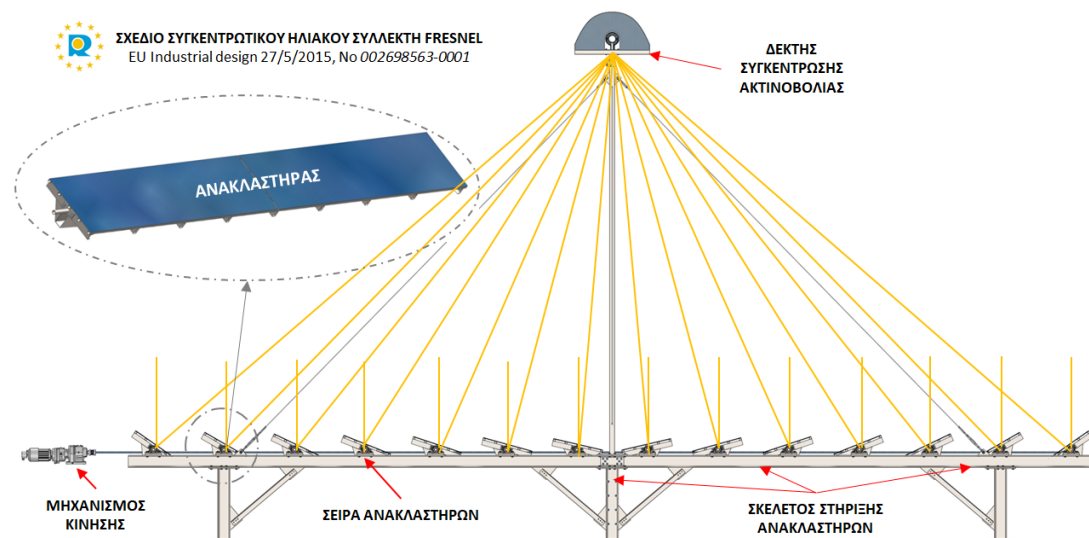
Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι αφενός ο υπολογισμός των συντελεστών οπτικής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη και αφετέρου, η διερεύνηση της επίδρασης κρίσιμων παραγόντων στην απόδοσή του.

Για το σκοπό αυτόν, αρχικά γίνεται περιγραφή του ηλιακού συλλέκτη, κατόπιν αναπτύσσεται μοντέλο ιχνηλάτησης ακτινοβολίας, το οποίο στη συνέχεια επικυρώνεται μέσω δεδομένων της βιβλιογραφίας.

Ακολουθεί η οπτική ανάλυση του υπό διερεύνηση ηλιακού συλλέκτη και παρουσιάζονται χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για τον απορροφητή όσο και για το δευτερεύοντα ανακλαστήρα. Διερευνάται η επίδραση της εφαρμογής κοινής καμπυλότητας σε όλες τις σειρές των ανακλαστήρων και η επίδραση των οπτικών σφαλμάτων.

## 4.2 Περιγραφή ηλιακού συλλέκτη

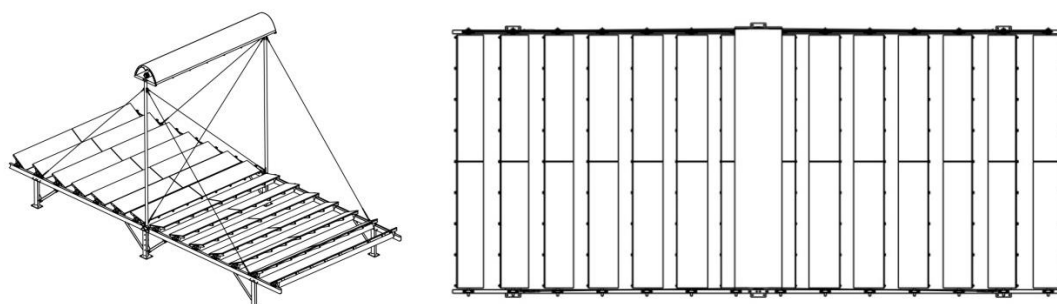
Ο υπό διερεύνηση ηλιακός συλλέκτης αφορά προσέγγιση βιομηχανικού σχεδίου κατοχυρωμένου σε Ευρωπαϊκό επίπεδο [90], συνιδιοκτησίας του συγγραφέα της διατριβής. Το Σχήμα 4-1 απεικονίζει την τομή του ηλιακού συλλέκτη.



Σχήμα 4-1: Τομή κατοχυρωμένου βιομηχανικού σχεδίου

Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται 14 σειρές πρωτεύοντων ανακλαστήρων παραβολικού σχήματος και πλάτους 0.5m που παρακολουθούν τον Ήλιο και κατευθύνουν την ακτινοβολία στον υπερυψωμένο δέκτη κατά 4m από το επίπεδο των ανακλαστήρων. Στο δέκτη, η ακτινοβολία συγκεντρώνεται περαιτέρω μέσω του δευτερεύοντα ανακλαστήρα σχήματος CPC, με γωνία ημι-αποδοχής 50°. Στη γραμμή εστίασης της ακτινοβολίας υπάρχει απορροφητής 0.07 m με γυάλινο περίβλημα και ενδιάμεσο κενό.

Ο ηλιακός συλλέκτης απεικονίζεται στο Σχήμα 4-2 σε όψη και κάτοψη.



Σχήμα 4-2: Όψεις του κατοχυρωμένου βιομηχανικού σχεδίου

### 4.3 Υπολογιστική ανάλυση

#### 4.3.1 Περιγραφή μοντέλου

Ο ηλιακός συλλέκτης του κεφαλαίου μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας Tonatiuh [91,92]. Το συγκεκριμένο λογισμικό προτιμήθηκε για την ανάλυση του ηλιακού συλλέκτη λόγω της διατήρησης των γεωμετρικών αναλογιών κατά την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, της δυνατότητας χρήσης αυτοματοποιημένου μηχανισμού παρακολούθησης Ηλίου, της ενσωματωμένης βιβλιοθήκης γεωμετρικών επιφανειών και της οπτικοποίησης των επιφανειών του αντικειμένου κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού. Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των υλικών συγκεντρώνει ο Πίνακας 4-1.

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά του ηλιακού συλλέκτη

	Περιγραφή	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Ηλιακός συλλέκτης	Επιφάνεια ανακλαστήρων	$A_{pr}$	$m^2$	84
	Ολική επιφάνεια	$A_{sc}$	$m^2$	115.2
	Πλάτος	$W_{sc}$	m	9.6
	Μήκος	L	m	12
	Λόγος συγκέντρωσης	CR	-	31.8
	Κάλυψη εδάφους	GC	-	72.9%
Πρωτεύοντες ανακλαστήρες	Σχήμα	-	-	Παραβολή
	Αριθμός	series	-	14
	Πλάτος	$W_{pr}$	m	0.5
	Διάκενο διαδοχικών σειρών	$M_{pr}$	m	0.2
	Ανακλαστικότητα	$\rho_{pr}$	-	0.935
	Σφάλμα παρακολούθησης	$\sigma_{track}$	°	0.25
Δευτερεύον ανακλαστήρας	Σχήμα	-	-	CPC
	Γωνία ημι-αποδοχής	$\theta_{acc}$	°	50
	Απόσταση κοπής από απορροφητή CPC	$H_{trunc}$	m	0.038
	Ανακλαστικότητα	$\rho_{sr}$	-	0.93
Απορροφητής	Απόσταση από επίπεδο ανακλαστήρων	$H_{rec}$	m	4

Κεφ. 4: Οπτική ανάλυση ηλιακού συλλέκτη Fresnel με παραβολικούς ανακλαστήρες και δευτερεύοντα ανακλαστήρα σχήματος CPC

	Εξωτερική διάμετρος	$D_{abs\_o}$	m	0.07
	Απορροφητικότητα	$\alpha_{abs}$	-	0.956
Γυάλινο περίβλημα	Εξωτερική διάμετρος	$D_{gt\_o}$	m	0.125
	Πάχος	$TH_{gt}$	m	5
	Διαπερατότητα	$T_{gt}$	-	0.965
	Δείκτης διάθλασης	n	-	1.52

#### 4.3.2 Επικύρωση μοντέλου

Για την επικύρωση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βιβλιογραφίας από πρόσφατη ερευνητική εργασία [56]. Στα πλαίσια προγράμματος του IEA SHC Task 49 διενεργήθηκε σύγκριση διαδεδομένων λογισμικών οπτικής ανάλυσης. Μελετήθηκαν υπό κοινή παραμετροποίηση δύο συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες γραμμικής εστίασης (parabolic trough και Linear Fresnel collectors). Σκοπός της εργασίας ήταν ο έλεγχος της αξιοπιστίας των μοντέλων. Το πανεπιστήμιο UEnora προσέγγισε το αντικείμενο με το λογισμικό Tonatiuh, το πανεπιστήμιο UIB με το OTSun, το ερευνητικό κέντρο Fraunhofer ISE με το Raytrace3D και το πανεπιστήμιο POLIMI με το SolTrace. Ο Πίνακας 4-2 συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά των μοντέλων σχετικά με το μοντέλο του Ηλίου, την κατανομή των σφαλμάτων και των οπτικών ιδιοτήτων.

Πίνακας 4-2 : Λογισμικά μοντελοποίησης βιβλιογραφίας

Λογισμικό	Μοντέλο Ηλίου	Κατανομή οπτικών σφαλμάτων επιφάνειας	Οπτικές ιδιότητες συναρτήσεως γωνίας
Tonatiuh	Ideal; Pillbox; Buie	Normal; Pillbox	Όχι
OTSun	Ideal; Buie; Diffuse (isotropic sky)	Normal	Ναι
Raytrace3D	Ideal; Pillbox; Buie	Normal; Pillbox	Ναι
SolTrace	Pillbox; Gaussian; User defined	Gauss; Pillbox	Ναι

Τα αποτελέσματα των μοντέλων για την οπτική απόδοση παρουσίασαν ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ τους με τιμές από 0.721 (Raytrace3D) μέχρι 0.756 (OTSun). Η μέση τιμή υπολογίστηκε 0.737 με τα μοντέλα σε Tonatiuh και SolTrace να παρουσιάζουν τις μικρότερες αποκλίσεις από τη μέση τιμή.



Πίνακας 4-3 : Αποτελέσματα ray-tracing μοντέλων για τον ηλιακό συλλέκτη της βιβλιογραφίας

Λογισμικό	Tonatiuh	Raytrace3D	OTSun	SolTrace	Mean
Οπτική απόδοση	0.734	0.721	0.756	0.738	0.737

Όσον αφορά τη διερεύνηση της οπτικής απόδοσης σε διάφορες γωνίες πρόσπτωσης, τα τέσσερα λογισμικά παρουσίασαν επίσης ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων τους. Για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι 15°, οι αποκλίσεις είναι σχεδόν αμελητέες ενώ για γωνίες μέχρι 70° οι αποκλίσεις είναι μικρότερες του 0.01 κατ' απόλυτη τιμή.

Ο ηλιακός συλλέκτης της βιβλιογραφίας αποτελείται από 16 σειρές πλάτους 0.75 m που συγκεντρώνουν σε δέκτη που βρίσκεται σε απόσταση 7.4 m από το επίπεδο των ανακλαστήρων. Ο απορροφητής έχει διάμετρο 0.07 m και το γυάλινο περίβλημα 0.125 m με πάχος 5 mm. Το σχήμα του δευτερεύοντα ανακλαστήρα είναι γεωμετρίας CPC με γωνία ημι-αποδοχής 48.39°. Ο λόγος συγκέντρωσης είναι 54.6.

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, ο ηλιακός συλλέκτης μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα Tonatiuh. Από την οπτική ανάλυση, με τον Ήλιο στο ζενίθ προέκυψε συντελεστής οπτικής απόδοσης ίσος με 0.735. Η απόκλιση της τιμής αυτής από τη μέση τιμή των μοντέλων της βιβλιογραφίας 0.737, είναι 0.3% που θεωρείται ικανοποιητική.

Πίνακας 4-4: Σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή οπτικής απόδοσης με τιμές βιβλιογραφίας

$\theta$	Αποτελέσματα μοντέλου	Δεδομένα βιβλιογραφίας	Απόκλιση
0°	0.735	0.737	-0.002

Στη συνέχεια, διενεργήθηκε παραμετρική ανάλυση για διάφορες θέσεις του Ηλίου στο εγκάρσιο επίπεδο. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας (Πίνακας 4-5). Για γωνία πρόσπτωσης μικρότερη των 60°, οι αποκλίσεις του συντελεστή  $IAM_{trans}$  δεν ξεπερνούν το 0.005.

Πίνακας 4-5: Σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή  $IAM_{trans}$  με τιμές βιβλιογραφίας

$\theta$	Αποτελέσματα μοντέλου	Δεδομένα βιβλιογραφίας	Απόκλιση
0°	1.000	1.000	0.000
10°	0.970	0.973	-0.003
20°	0.953	0.955	-0.002

Κεφ. 4: Οπτική ανάλυση ηλιακού συλλέκτη Fresnel με παραβολικούς ανακλαστήρες και δευτερεύοντα ανακλαστήρα σχήματος CPC

30°	0.943	0.946	-0.003
40°	0.898	0.903	-0.005
50°	0.838	0.840	-0.002
60°	0.672	0.676	-0.004
70°	0.454	0.464	-0.010
80°	0.204	0.222	-0.018
90°	0.022	0.000	0.022

Από την παραμετρική ανάλυση για διάφορες θέσεις του Ηλίου στο επίμηκες επίπεδο, προκύπτει ότι για γωνία πρόσπτωσης μικρότερη των 50°, οι αποκλίσεις του συντελεστή  $IAM_{long}$  δεν ξεπερνούν το 0.024.

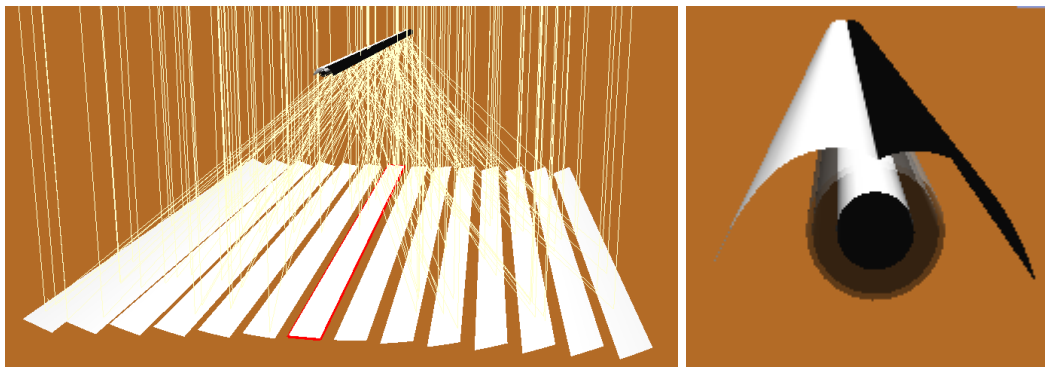
Πίνακας 4-6: Σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή  $IAM_{long}$  με τιμές βιβλιογραφίας

$\theta$	Αποτελέσματα μοντέλου	Δεδομένα βιβλιογραφίας	Απόκλιση
0°	1.000	1.000	0.000
10°	0.878	0.874	0.004
20°	0.729	0.740	-0.011
30°	0.558	0.580	-0.022
40°	0.370	0.388	-0.018
50°	0.170	0.146	0.024
60°	0.000	0.000	0.000
70°	0.000	0.000	0.000
80°	0.000	0.000	0.000
90°	0.000	0.000	0.000

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι το μοντέλο του ηλιακού συλλέκτη Fresnel με δευτερεύοντα ανακλαστήρα γεωμετρίας CPC παρουσιάζει ικανοποιητική σύγκλιση με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας και επομένως θεωρείται επικυρωμένο.

#### 4.4 Αποτελέσματα

Ο υπό διερεύνηση ηλιακός συλλέκτης προσομοιώθηκε σύμφωνα με τα στοιχεία που συγκεντρώνει ο Πίνακας 4-1. Στο Σχήμα 4-3 απεικονίζεται ο συλλέκτης με το Ήλιο στο ζενίθ για αριθμό ακτινών 250 (αριστερά) και ο δέκτης σχήματος CPC με απορροφητή και γυάλινο περιβλήμα.

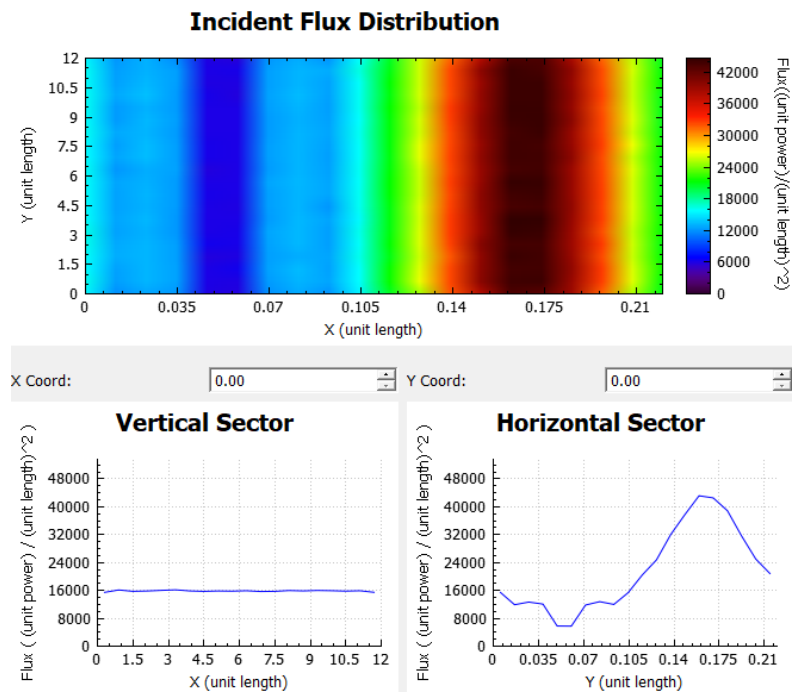


Σχήμα 4-3: Όψη μοντέλου του ηλιακού συλλέκτη (αριστερά) και του δέκτη (δεξιά)

Με πυκνότητα 120,000 ακτίνες ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας ανακλαστήρα και με σφάλμα παρακολούθησης  $0.25^\circ$ , ο συντελεστής οπτικής απόδοσης υπολογίστηκε στο 0.697. Οι τιμές των σφαλμάτων αναφέρονται στη τυπική απόκλιση.

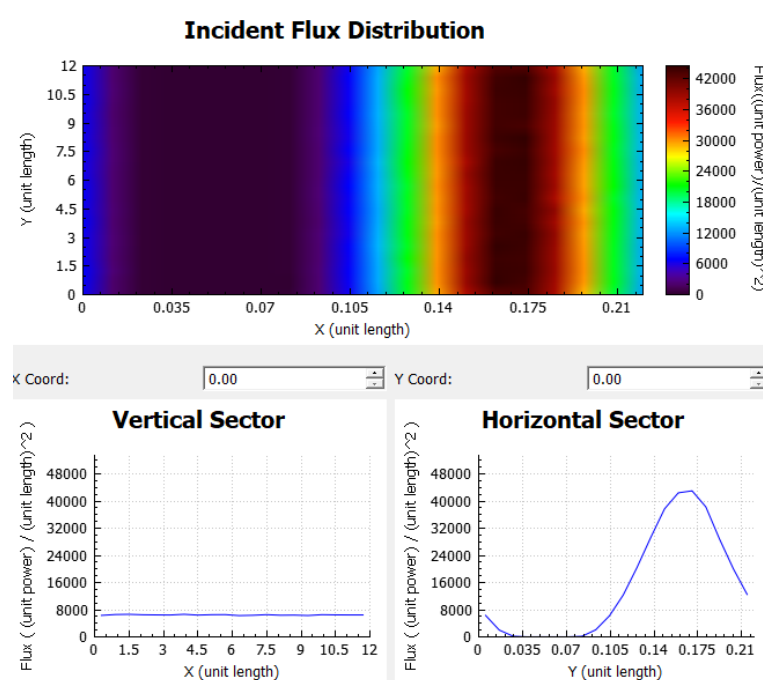
Από την ανάλυση της κατανομής ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή (Σχήμα 4-4), προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτει στο κάτω μισό της περιφέρειας του απορροφητή, με μεγαλύτερη συγκέντρωση στο κάτω τεταρτημόριο. Με διάμετρο 0.07 m, η περιφέρεια του απορροφητή είναι περίπου 0.22 m. Το προφίλ της συγκέντρωσης είναι εύλογο δεδομένου ότι οι ανακλαστήρες είναι παραβολικού σχήματος και έχουν διαφορετική εστίαση, ανάλογα με την απόσταση της κάθε σειράς από το δέκτη.

Η κατανομή της ακτινοβολίας κατά μήκος του ηλιακού συλλέκτη είναι σταθερή. Η αιχμή της ισχύος παρουσιάζεται στο 0.165m της περιφέρειας, που αντιστοιχεί στο κάτω μέρος του απορροφητή. Η διασπορά της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο επάνω μέρος της περιφέρειας του απορροφητή, πηγάζει από την ύπαρξη οπτικών σφαλμάτων που οδηγούν σε διασπορά της ηλιακής ακτινοβολίας στο δέκτη.



Σχήμα 4-4: Κατανομή ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή

Για να αναδειχθεί η συμμετοχή του δευτερεύοντα ανακλαστήρα στην οπτική απόδοση, διενεργήθηκε προσομοίωση χωρίς τον ανακλαστήρα. Η προσπίπτουσα ισχύς στον απορροφητή μειώθηκε κατά 30.1%. Σε αυτή την περίπτωση, η ισχύς στο κάτω τεταρτημόριο του απορροφητή παρέμεινε σταθερή, στο επάνω μηδενίστηκε και στα πλαϊνά μειώθηκε. Το αντίστοιχο προφίλ της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4-5.

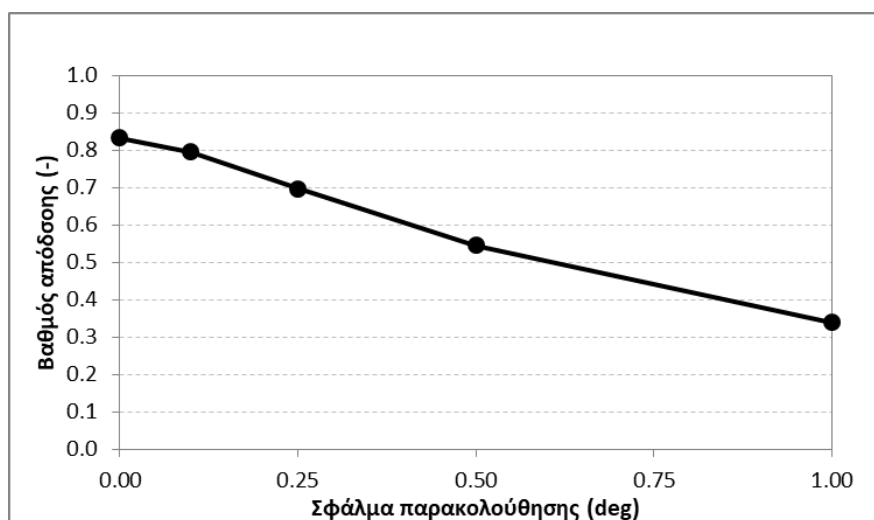


Σχήμα 4-5: Κατανομή ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή χωρίς το δευτερεύοντα ανακλαστήρα

#### 4.5 Ανάλυση σφάλματος παρακολούθησης

Στην ενότητα αυτή διερευνάται η επίδραση του σφάλματος παρακολούθησης στην οπτική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Αναλύθηκε εύρος σφάλματος από 0° έως 1°, που αναφέρεται αντίστοιχα σε ιδανικό μηχανισμό παρακολούθησης και σε μηχανισμό παρακολούθησης χαμηλής ακρίβειας.

Με τον Ήλιο στο ζενίθ, ο ιδανικός μηχανισμός οδηγεί στη μέγιστη τιμή της οπτικής απόδοσης 0.834. Το σφάλμα 0.25° οδηγεί σε απόδοση 0.697, ενώ σφάλμα μεγαλύτερο του 0.5° μειώνει σημαντικά την οπτική απόδοση. Ενδεικτικά, το σφάλμα 1° μειώνει την οπτική απόδοση στο 0.339. Συνεπώς, το σφάλμα παρακολούθησης αποδεικνύεται καθοριστικής σημασίας για την απόδοση του ηλιακού συλλέκτη.



Σχήμα 4-6: Βαθμός απόδοσης συναρτήσεως του σφάλματος παρακολούθησης

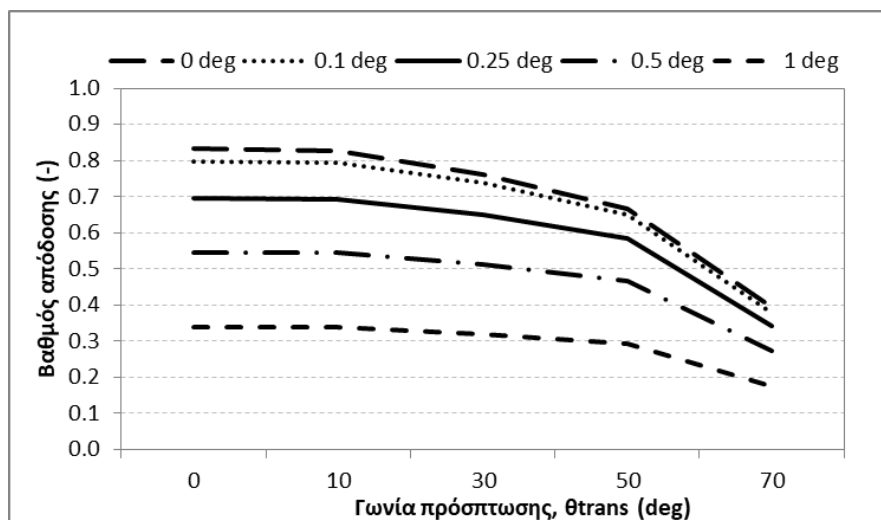
Σε συνέχεια της προηγούμενης ανάλυσης ο Ήλιος απέκλινε από το ζενίθ κατά 10°, 30°, 50° και 70° ως προς το εγκάρσιο επίπεδο. Ο βαθμός απόδοσης για κάθε γωνία υπολογίστηκε και τα αποτελέσματα συγκεντρώνει ο Πίνακας 4-7 και οπτικοποιούνται στο Σχήμα 4-7.

Πίνακας 4-7 : Βαθμός απόδοσης συναρτήσεως του σφάλματος παρακολούθησης για διάφορες γωνίες Ηλίου

	0°	0.1°	0.25°	0.5°	1°
0°	0.834	0.796	0.697	0.545	0.339
10°	0.827	0.795	0.691	0.545	0.338
30°	0.762	0.737	0.650	0.512	0.318
50°	0.668	0.650	0.586	0.467	0.294
70°	0.394	0.380	0.341	0.273	0.174

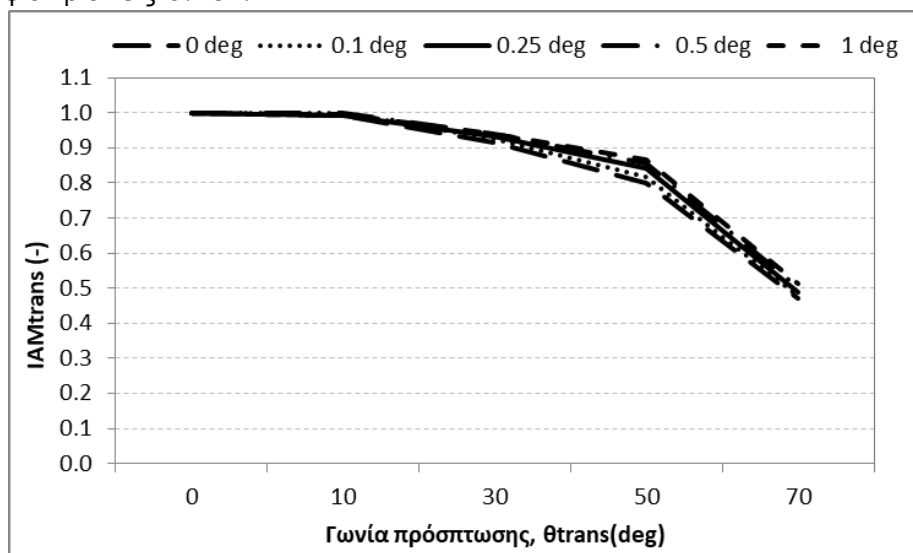
Παρατηρείται ότι η αρχική τιμή της κάθε καμπύλης αντιστοιχεί στη μέγιστη απόδοση με τον Ήλιο στο ζενίθ. Για διαφορετική θέση του Ηλίου

η απόδοση μειώνεται εξαιτίας των οπτικών απωλειών. Παρατηρείται ότι ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η οπτική απόδοση όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης, φαίνεται να είναι ίδιος για όλες τις καμπύλες.



Σχήμα 4-7: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για διάφορα σφάλματα παρακολούθησης

Το Σχήμα 4-8 απεικονίζει το συντελεστή  $IAM_{trans}$  συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης και του σφάλματος. Ο συντελεστής  $IAM_{trans}$  φαίνεται ότι λαμβάνει τιμές σχεδόν σταθερές για τα εξεταζόμενα σφάλματα παρακολούθησης. Οι αποκλίσεις για γωνίες μέχρι  $30^\circ$  είναι αμελητέες ενώ στο εύρος  $30 - 70^\circ$  είναι μικρότερες του 5% σε σχέση με την καμπύλη του σφάλματος  $0.25^\circ$ .



Σχήμα 4-8: Συντελεστής  $IAM_{trans}$  συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για διάφορα σφάλματα παρακολούθησης

Από τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι παρά τη σημαντική επίδραση του σφάλματος παρακολούθησης στην οπτική απόδοση του

ηλιακού συλλέκτη, η επίδραση του σφάλματος παρακολούθησης στον αδιάστατο συντελεστή  $IAM_{trans}$  είναι αμελητέα.

#### 4.6 Ανάλυση καμπυλότητας ανακλαστήρων

Σε αυτή την ενότητα διερευνάται η επίδραση της καμπυλότητας των πρωτεύοντων ανακλαστήρων στην οπτική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Στην ανάλυση συμπεριλαμβάνονται το σφάλμα παρακολούθησης και οι διάφορες θέσεις του Ηλίου.

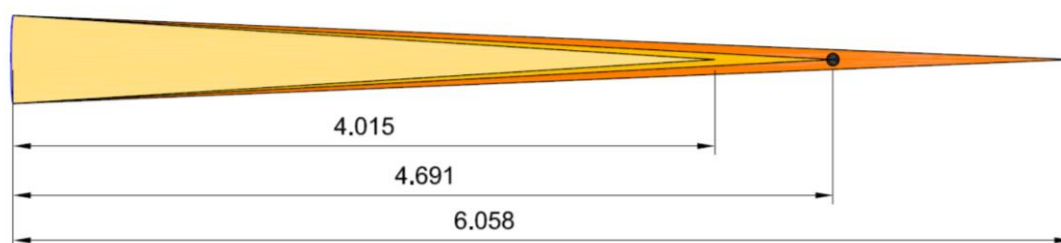
Αρχικά, επιλέγεται ένα σενάριο αναφοράς (Base Case - BC). Στο σενάριο BC οι πρωτεύοντες ανακλαστήρες έχουν διαφορετικό σχήμα παραβολής, με εστιακή απόσταση που ισούται με την απόσταση του κέντρου του ανακλαστήρα από το κέντρο του απορροφητή.

Έπειτα, επιλέγονται 7 επιπλέον σενάρια (C1 – C7). Σε κάθε σενάριο, εφαρμόζεται κοινή καμπυλότητα για όλες τις σειρές του ηλιακού συλλέκτη. Η καμπυλότητα αυτή προκύπτει από τη θέση που έχει η καθεμία από τις 7 σειρές του ηλιακού συλλέκτη. Ενδεικτικά, στο σενάριο C4, η καμπυλότητα της 4<sup>ης</sup> σειράς (μετρούμενης από τον άξονα συμμετρίας) εφαρμόζεται σε όλες τις υπόλοιπες σειρές. Ο Πίνακας 4-8 συγκεντρώνει την εστιακή απόσταση των παραβολών για κάθε σενάριο.

Πίνακας 4-8: Εστιακή απόσταση σεναρίων καμπυλότητας

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	BC
4.015	4.136	4.366	4.691	5.091	5.552	6.058	Μεταβλητή

Πλέον, οι ανακλαστήρες συγκεντρώνουν την ακτινοβολία πριν ή μετά τον απορροφητή και το πλάτος της δέσμης της ακτινοβολίας από κάθε ανακλαστήρα στον απορροφητή είναι μεγαλύτερο, σε σχέση με την ιδανική περίπτωση. Για την ενδεικτική σειρά (4<sup>η</sup> σειρά), αναλύονται σχηματικά οι νέες εστιακές αποστάσεις και το πλάτος της δέσμης στο επίπεδο του απορροφητή.



Σχήμα 4-9: Σχηματική ανάλυση συγκέντρωσης ακτινοβολίας της 4<sup>ης</sup> σειράς με εφαρμογή καμπυλότητας σεναρίων C1, C4 και C7

Παρατηρείται ότι η καμπυλότητα C4 είναι η ιδανική για τη συγκεκριμένη σειρά, καθώς ο απορροφητής βρίσκεται στην εστία της παραβολής. Εφαρμόζοντας την καμπυλότητα C1 με μικρότερη εστιακή απόσταση, το πλάτος της δέσμης της ακτινοβολίας ανοίγει στο επίπεδο του

απορροφητή και μέρος της ακτινοβολίας, οδηγείται στο δευτερεύοντα ανακλαστήρα. Αντίστοιχα, με εφαρμογή της καμπυλότητας C7, η εστία βρίσκεται τώρα μακρύτερα από τον απορροφητή και το πλάτος της δέσμης στο επίπεδο του απορροφητή είναι μεγαλύτερο από τη διάμετρο του απορροφητή. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, το φαινόμενο είναι πιο έντονο αν ληφθούν υπόψη τα οπτικά σφάλματα.

Με τον Ήλιο στο ζενίθ και για σφάλμα παρακολούθησης 0.25°, διενεργήθηκαν προσομοιώσεις μεταβάλλοντας την καμπυλότητα. Στο σενάριο BC, η απόδοση είναι 0.697 και αποτελεί την υψηλότερη απόδοση καθώς η εστιακή απόσταση της κάθε σειράς είναι η ιδανική.

Στα σενάρια C1 έως C7, όπου έχει εφαρμοστεί κοινή καμπυλότητα για όλες τις σειρές, παρατηρείται μείωση της απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται από 0.633 (C1) έως 0.673 (C6) με αντίστοιχη μείωση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με το σενάριο BC από 3.5% (C6) έως 9.2% (C1).

Πίνακας 4-9: Βαθμός απόδοσης και απόκλιση αποτελεσμάτων από BC σενάριο

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	BC
n	0.633	0.640	0.656	0.668	0.672	0.673	0.662	<b>0.697</b>
Απόκλιση	-9.2%	-8.2%	-6.0%	-4.3%	-3.6%	-3.5%	-5.0%	<b>0%</b>

Αντίστοιχα, με τον Ήλιο στο ζενίθ διενεργήθηκε παραμετρική ανάλυση μεταβάλλοντας το σφάλμα παρακολούθησης από 0° έως 1° (Πίνακας 4-10). Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει μείωση της απόδοσης σε σχέση με το σενάριο BC. Ανά σειρά και για συγκεκριμένο σφάλμα παρακολούθησης, η καμπυλότητα της εσωτερικής σειράς (C1) φαίνεται ότι παρουσιάζει το μικρότερο βαθμό απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται εφαρμόζοντας καμπυλότητες των εξωτερικών σειρών.

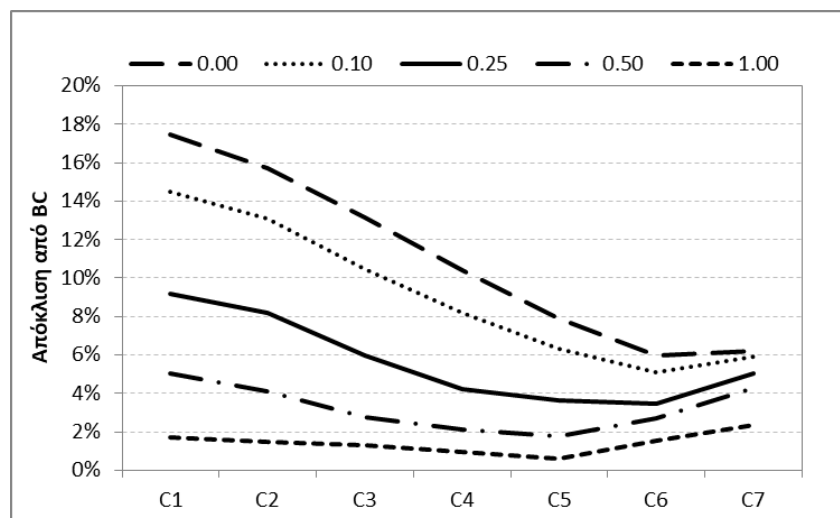
Πίνακας 4-10: Βαθμός απόδοσης για διάφορα σφάλματα

$\sigma_{\text{track}}$	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	BC
0.00	0.688	0.703	0.725	0.747	0.768	0.784	0.782	<b>0.834</b>
0.10	0.681	0.692	0.713	0.731	0.746	0.756	0.750	<b>0.796</b>
0.25	0.633	0.640	0.656	0.668	0.672	0.673	0.662	<b>0.697</b>
0.50	0.518	0.523	0.530	0.534	0.535	0.530	0.522	<b>0.545</b>
1.00	0.334	0.334	0.335	0.336	0.337	0.334	0.331	<b>0.339</b>

Το Σχήμα 4-10 απεικονίζει τη διαφορά απόδοσης της κάθε περίπτωσης σε σχέση με το σενάριο BC. Παρατηρείται ότι η αλλαγή της καμπυλότητας επιφέρει τη μεγαλύτερη μείωση στην απόδοση για σφάλμα 0°. Η μείωση κυμαίνεται από 6.0% (C6) έως 17.5% (C1).



Αντίστοιχα, τη μικρότερη μείωση επιφέρει για σφάλμα 1°, η οποία κυμαίνεται από 0.6% έως 2.4%.



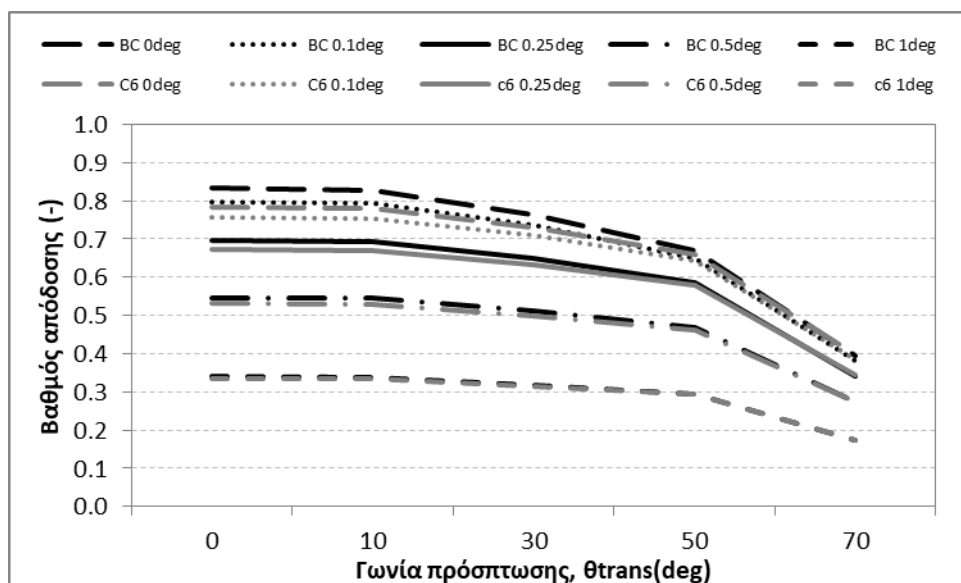
Σχήμα 4-10: Μείωση βαθμού απόδοσης σε σχέση με το σενάριο BC

Σε όλες τις περιπτώσεις προκύπτει ότι η καμπυλότητα των σεναρίων C5 και C6 επιφέρει τη μικρότερη μείωση της απόδοσης. Κατά μέσο όρο, η μείωση της απόδοσης ανά σενάριο από το σενάριο C1 προς το C7 είναι 9.6%, 8.5%, 6.7%, 5.2%, 4% 3.8% και 4.8%. Προκύπτει ότι η καμπυλότητα C6 επιφέρει κατά μέσο όρο τη μικρότερη μείωση στο βαθμό απόδοσης για όλα τα εξεταζόμενα σφάλματα παρακολούθησης.

Η παραπάνω ανάλυση οδηγεί στην επιλογή της καμπυλότητας της 6ης σειράς για περαιτέρω ανάλυση. Για αυτή την περίπτωση διενεργούνται προσομοιώσεις για διάφορες θέσεις του Ηλίου στο εγκάρσιο επίπεδο. Σκοπός είναι πλέον η διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης στο παραπάνω αποτέλεσμα. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με το BC σενάριο.

Για τον Ήλιο στο ζενίθ, παρατηρείται μείωση της απόδοσης από 1.5% για σφάλμα 1° έως 6% για σφάλμα 0°. Για σφάλμα 0.25° η μείωση της απόδοσης είναι 3.5%.

Σε όλες τις περιπτώσεις, η μέγιστη διαφορά παρατηρείται με τον Ήλιο στο ζενίθ. Για γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη του 0°, η διαφορά της απόδοσης μεταξύ των σεναρίων BC και C6 μειώνεται. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή κοινής καμπυλότητας επιφέρει μέγιστη μείωση της απόδοσης για τον Ήλιο στο ζενίθ, ενώ κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους η διαφορά της απόδοσης είναι μικρότερη.



Σχήμα 4-11: Ανάλυση του βαθμού απόδοσης για το σενάριο C6

Συμπερασματικά, για τον ηλιακό συλλέκτη με σφάλμα  $0.25^\circ$  η εφαρμογή της καμπυλότητας της 6ης σειράς από τον άξονα συμμετρίας σε όλες τις υπόλοιπες σειρές, οδηγεί σε μείωση του μέγιστου βαθμού απόδοσης κατά 3.5% ενώ ταυτόχρονα, η ετήσια παραγωγή θερμότητας είναι μειωμένη λιγότερο από αυτό το ποσοστό.

#### 4.7 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου διερευνήθηκε ηλιακός συλλέκτης Fresnel με παραβολικούς πρωτεύοντες ανακλαστήρες, δευτερεύοντα ανακλαστήρα σχήματος CPC και απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό.

Τα κύρια συμπεράσματα του κεφαλαίου συνοψίζονται ως εξής:

- Ο ηλιακός συλλέκτης μοντελοποιήθηκε σε πρόγραμμα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας. Με σφάλμα παρακολούθησης  $0.25^\circ$ , ο συντελεστής μέγιστης οπτικής απόδοσης υπολογίστηκε στο 0.697.
- Η αξιοπιστία του μοντέλου επικυρώθηκε με δεδομένα βιβλιογραφίας, παρουσιάζοντας απόκλιση κατά 0.3% με τον Ήλιο στο ζενίθ.
- Με σφάλμα παρακολούθησης  $0.25^\circ$ , η απουσία του δευτερεύοντα δέκτη από τον ηλιακό συλλέκτη οδηγεί σε μείωση της οπτικής απόδοσης κατά 30.1%.
- Το σφάλμα παρακολούθησης αποδείχθηκε καθοριστικός παράγοντας για την απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Ειδικότερα, ο ιδανικός μηχανισμός παρουσιάζει τη μέγιστη οπτική απόδοση, 0.834. Σφάλμα  $0.25^\circ$  οδηγεί σε απόδοση 0.697, ενώ σφάλμα μεγαλύτερο του  $0.5^\circ$  μειώνει σημαντικά την οπτική απόδοση.
- Το σφάλμα παρακολούθησης έχει μικρή επίδραση στο συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $IAM_{trans}$ ). Οι αποκλίσεις του  $IAM_{trans}$  για γωνίες μέχρι  $30^\circ$  είναι αμελητέες, ενώ στο εύρος  $30-70^\circ$  είναι μικρότερες του 5% σε σχέση με την καμπύλη του σφάλματος  $0.25^\circ$ .
- Η χρήση μίας κοινής καμπυλότητας παραβολικού σχήματος στους πρωτεύοντες ανακλαστήρες οδηγεί σε μείωση της οπτικής απόδοσης, σε σχέση με τη χρήση διαφορετικής καμπυλότητας ανά σειρά ανάλογα με την απόσταση της σειράς από τον απορροφητή.
- Στα σενάρια κοινής καμπυλότητας, ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται από 0.633 (C1) έως 0.673 (C6), με αντίστοιχη μείωση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με το σενάριο BC από -9.2% (C1) έως -3.5% (C6).
- Η καμπυλότητα C6 επιφέρει κατά μέσο όρο τη μικρότερη μείωση (3.5%) στο βαθμό απόδοσης, για όλα τα εξεταζόμενα σφάλματα παρακολούθησης.
- Η εφαρμογή κοινής καμπυλότητας επιφέρει μέγιστη μείωση της απόδοσης για γωνία πρόσπτωσης  $0^\circ$ , ενώ κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους η διαφορά της απόδοσης θα είναι μικρότερη.

## **5 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΚΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΟΝΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ**

### **5.1 Εισαγωγή**

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται τη θερμική ανάλυση τριών γραμμικών δεκτών συγκέντρωσης ακτινοβολίας μονής διαδρομής για ηλιακούς συλλέκτες Fresnel. Αναλύονται οι εξής τυπολογίες δεκτών:

- ο Δέκτης απορροφητή σωλήνα (Single Tube Receiver – STR)
- ο Δέκτης απορροφητή σωλήνα που περικλείεται από γυάλινο περίβλημα με ενδιάμεσα κενό (Vacuum Tube Receiver – VTR)
- ο Δέκτης απορροφητή σωλήνα τοποθετημένο σε κοιλότητα με αέρα που περικλείεται από γυάλινο κάλυμμα και δευτερεύοντα ανακλαστήρα με μόνωση (Cavity Tube Receiver – CTR).

Για τη θερμική ανάλυση του κάθε δέκτη αναπτύχθηκαν δύο υπολογιστικά μοντέλα. Το πρώτο αφορά μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Model - HTM) σε περιβάλλον επίλυσης μαθηματικών εξισώσεων [93] και το δεύτερο αφορά μοντέλο σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) [94]. Για κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων συγκρίνονται μεταξύ τους καθώς και με δεδομένα βιβλιογραφίας για τους δέκτες VTR και CTR.

Για το δέκτη VTR εξετάστηκε παραμετρικά η επίδραση κρίσιμων μεγεθών στις θερμικές απώλειες, όπως είναι η διάμετρος του απορροφητή, η ταχύτητα του θερμικού μέσου και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το δέκτη CTR εξετάστηκε παραμετρικά η επίδραση της διαμέτρου του απορροφητή. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύγκρισης των τριών δεκτών.

## 5.2 Θεωρητικές εξισώσεις

Η αγωγή θερμότητας αποτελεί το μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό των υλικών. Λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα σώμα στερεό, υγρό ή αέριο χωρίς να συνοδεύεται από αλλαγή φάσης.

Η μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας υπό σταθερές συνθήκες δίνεται από την εξίσωση του Fourier [95].

$$q_{cond} = k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5-1)$$

Όπου

$k$     θερμική αγωγιμότητα του υλικού,  $W/(m \cdot K)$

$A$     εμβαδόν της επίπεδης επιφάνειας,  $m^2$

Για επίπεδη επιφάνεια, η αγωγή θερμότητας προκύπτει από τη σχέση:

$$q_{cond} = k \cdot A \cdot \frac{(T_i - T_o)}{TH} \quad (5-2)$$

Όπου

$TH$    πάχος της επίπεδης επιφάνειας,  $m$

$T_o$    θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της επίπεδης επιφάνειας,  $^{\circ}C$

$T_i$    θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια της επίπεδης επιφάνειας,  $^{\circ}C$

Για σωλήνα κυλινδρικής διατομής, η αγωγή θερμότητας δίνεται από τη σχέση:

$$q_{cond} = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot L \cdot \frac{(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (5-3)$$

Όπου

$L$     μήκος του σωλήνα,  $m$

$D_o$    εξωτερική διάμετρος του σωλήνα,  $m$

$D_i$    εσωτερική διάμετρος του σωλήνα,  $m$

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή συμβαίνει μεταξύ μίας επιφάνειας ενός στερεού σώματος και ενός ρευστού (υγρού ή αέριου σώματος) που έρχονται σε επαφή και έχουν διαφορετική θερμοκρασία.

Η γενική εξίσωση της μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής προκύπτει από το νόμο του Newton [96].

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (5-4)$$

Όπου

$h$     ειδική συναγωγιμότητα του ρευστού,  $W/(m^2 \cdot K)$

A εμβαδόν της στερεής επιφάνειας, m<sup>2</sup>

T<sub>s</sub> θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας, °C

T<sub>∞</sub> θερμοκρασία του ρευστού, °C

Όταν ένα ρευστό ρέει εσωτερικά σε σωλήνα κυλινδρικής διατομής, η ειδική συναγωγιμότητα του ρευστού δίνεται από την εξίσωση:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (5-5)$$

Για να υπολογιστεί ο αριθμός Nusselt (Nu), πρέπει πρώτα να υπολογιστεί ο αριθμός Reynolds ο οποίος χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό του είδους της ροής και εκφράζεται ως:

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (5-6)$$

Όπου

u ταχύτητα του ρευστού, m/s

D εσωτερική διάμετρος του σωλήνα, m

ν κινηματικό ιξώδες του ρευστού, m<sup>2</sup>/s

Όταν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος του 2300, η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή. Όταν κυμαίνεται μεταξύ 2300 και 4000 η ροή θεωρείται ως μεταβατική, ενώ όταν ο αριθμός Re είναι μεγαλύτερος του 4000, η ροή είναι τυρβώδης. Για στρωτή ροή, ο αριθμός Nusselt θεωρείται σταθερός και ίσος με 4.36 [95]. Για μεταβατική και τυρβώδη ροή, ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται συναρτήσει των αριθμών Reynolds (Re) και Prandtl (Pr) από την εξίσωση Gnielinsky:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} Pr \cdot (Re - 1000)}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5-7)$$

Όπου

$$f = [1.82 \cdot \log_{10}(Re) - 1.64]^{-2} \quad (5-8)$$

Ο αριθμός Prandtl δίνεται από τη σχέση:

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{k} \quad (5-9)$$

Για ελεύθερη συναγωγή εξωτερικά σε σωλήνα κυλινδρικής διατομής με L/D > 10, ο αριθμός Nusselt του ρευστού δίνεται από την εξίσωση:

$$Nu = \left( 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{(1 + (0.559/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right) \quad (5-10)$$

Ο αριθμός Rayleigh (Ra) για τον αέρα στην εξωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και ο αριθμός Prandtl (Pr) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$Ra_D = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot D^3}{diff \cdot \nu} \quad (5-11)$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{T_s + T_\infty}{2} + 273.15} \quad (5-12)$$

$$Pr = \frac{\nu}{diff} \quad (5-13)$$

Όπου

g επιτάχυνση της βαρύτητας, 9.81 m/s<sup>2</sup>

β συντελεστής θερμικής διαστολής, 1/K

diff θερμική διάχυση, m<sup>2</sup>/s

ν κινηματική συνεκτικότητα του αέρα στην επιφάνεια, m<sup>2</sup>/s

Για την κάτω επιφάνεια της οριζόντιας πλάκας ο αριθμός Nusselt δίνεται από τη σχέση:

$$Nu = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad (5-14)$$

Ενώ για την επάνω επιφάνεια της οριζόντιας πλάκας, ο αριθμός Nusselt είναι:

$$Nu = \begin{cases} 0.54 Ra_L^{1/4}, & \text{if } 10^4 \leq Ra_L < 10^7 \\ 0.15 Ra_L^{1/3}, & \text{if } 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11} \end{cases} \quad (5-15)$$

Το χαρακτηριστικό μήκος του αριθμού Rayleigh (Ra<sub>L</sub>) δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{A}{P} \quad (5-16)$$

Όπου

A εμβαδόν της οριζόντιας πλάκας, m<sup>2</sup>

P περίμετρος της διατομής της οριζόντιας πλάκας, m

Για μεταφορά θερμότητας μεταξύ ομόκεντρων κυλίνδρων μεταξύ των οποίων υπάρχει αέρας με πίεση μεγαλύτερη των 133Pa, μεταφέρεται θερμότητα μέσω συναγωγής. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται η εξίσωση της ελεύθερης συναγωγής:

$$q_{conv} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{eff} \cdot (T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (5-17)$$

Όπου

$$k_{eff} = k_{air} \cdot 0.386 \cdot \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr}\right)^{0.25} \cdot Ra_c^{0.25} \quad (5-18)$$

Ο αριθμός Prandtl του αέρα λαμβάνεται ίσος με 0.79.

Ο αριθμός Rayleigh δίνεται από την εξίσωση:

$$Ra_c = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_i - T_o) \cdot L_c^3}{a \cdot \nu} \quad (5-19)$$

Όπου

g επιτάχυνση της βαρύτητας, 9.81 m/s<sup>2</sup>

β συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα, 1/K

ν κινηματική συνεκτικότητα του αέρα στην επιφάνεια, m<sup>2</sup>/s

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα δίνεται:

$$\beta = \frac{1}{T(K)} \quad (5-20)$$

Το χαρακτηριστικό μήκος  $L_c$  του αριθμού Rayleigh δίνεται από την εξίσωση:

$$L_c = \frac{2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{D_o}{D_i} \right) \right]^{4/3}}{\left[ \left( \frac{D_o}{2} \right)^{-3/5} + \left( \frac{D_i}{2} \right)^{-3/5} \right]^{5/3}} \quad (5-21)$$

Κάθε σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν ακτινοβολεί θερμότητα. Η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η θερμότητα που ακτινοβολείται από ένα στερεό σώμα προκύπτει από το νόμο Stefan – Boltzmann και δίνεται από τη σχέση:

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5-22)$$

Όπου

σ Σταθερά Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 5.6710 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$

ε Συντελεστής εκπομπής του σώματος, -

T Θερμοκρασίας της επιφάνειας του σώματος, K

Μεταξύ δύο επιφανειών που ανταλλάσσουν θερμότητα μέσω ακτινοβολίας ισχύει η γενική σχέση:

$$q_{12} = \frac{\sigma [T_1^4 - T_2^4]}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (5-23)$$

Όπου

ε<sub>1</sub> συντελεστής εκπομπής της πρώτης επιφάνειας

ε<sub>2</sub> συντελεστής εκπομπής της δεύτερης επιφάνειας

A<sub>1</sub> εμβαδόν πρώτης επιφάνειας, m<sup>2</sup>

A<sub>2</sub> εμβαδόν δεύτερης επιφάνειας, m<sup>2</sup>

F<sub>12</sub> συντελεστής θέασης

T<sub>1</sub> θερμοκρασία πρώτης επιφάνειας, K



$T_2$  Θερμοκρασία δεύτερης επιφάνειας, Κ

Για δύο επιφάνειες ισχύει η ανταποδοτική σχέση [95]

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (5-24)$$

Επιπλέον, το άθροισμα των συντελεστών θέασης από κάθε επιφάνεια ισούται με τη μονάδα.

$$\sum_{i=1} F_{ij} = 1 \quad (5-25)$$

Για παράλληλες πλάκες άπειρου μήκους, ο συντελεστής θέασης είναι  $F_{12} = 1$  και η ακτινοβολία που ανταλλάσσουν οι επιφάνειες δίνεται από την εξίσωση:

$$q_{12} = \frac{W \cdot \sigma [T_1^4 - T_2^4]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (5-26)$$

Για ομόκεντρους κυλίνδρους, όπως συμβαίνει μεταξύ του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος, η ακτινοβολία που ανταλλάσσουν οι επιφάνειες δίνεται από την εξίσωση:

$$q_{12} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \sigma [T_1^4 - T_2^4]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2 \cdot D_1}{\varepsilon_2 \cdot D_2}} \quad (5-27)$$

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από έναν κύλινδρο προς το περιβάλλον δίνεται από την εξίσωση:

$$q_{rad} = \pi \cdot \sigma \cdot D \cdot \varepsilon \cdot [T^4 - T_{sky}^4] \quad (5-28)$$

Όπου

$T_{sky}$  Θερμοκρασία ουρανού, °C

Στην περίπτωση ενός δέκτη με γυάλινο κάλυμμα και δευτερεύοντα ανακλαστήρα, εσωτερικά στην κοιλότητα υπάρχουν τρεις επιφάνειες που ανταλλάσσουν θερμική ακτινοβολία. Αυτές είναι ο απορροφητής (επιφάνεια 1), ο δευτερεύον ανακλαστήρας (επιφάνεια 2) και το γυάλινο κάλυμμα (επιφάνεια 3). Ο Πίνακας 5-1 συγκεντρώνει τους συντελεστές θέασης που απαιτούνται για τον υπολογισμό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

*Πίνακας 5-1: Συντελεστές θέασης της κοιλότητας του δέκτη με γυάλινο κάλυμμα και δευτερεύοντα ανακλαστήρα*

$F_{ij}$	$F_{i1}$	$F_{i2}$	$F_{i3}$
$F_{1j}$	0	$1 - F_{11} - F_{13}$	$\arctan((W_{gc}/2)/H_{abs})/\pi$
$F_{2j}$	$(A_1 \cdot F_{12})/A_2$	$1 - F_{21} - F_{23}$	$(A_3 \cdot F_{32})/A_2$
$F_{3j}$	$(A_1 \cdot F_{13})/A_3$	$1 - F_{31} - F_{33}$	0

Η ηλιακή ακτινοβολία που συγκεντρώνεται από το μηχανισμό Fresnel και προσπίπτει στον απορροφητή όπου μετατρέπεται σε θερμότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q = n_0 \cdot DNI \cdot A_{net} \cdot IAM \quad (5-29)$$

όπου

$n_0$  συντελεστής μέγιστης οπτικής απόδοσης

$IAM$  συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο

$DNI$  άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου,  $W/m^2$

$A_{net}$  επιφάνεια ανακλαστήρων ανά τρέχον μήκος,  $m^2/m$

Ο συντελεστής οπτικών απωλειών ( $n_0$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$n_0 = n_{pm} \cdot \tau_g \cdot n_{sm} \cdot \alpha_{abs} \quad (5-30)$$

Όπου

$n_{pm}$  οπτική απόδοση του πρωτεύοντος μηχανισμού συγκέντρωσης ακτινοβολίας

$\tau_g$  συντελεστής διαπερατότητας του γυάλινου περιβλήματος ή καλύμματος (αν υπάρχει)

$n_{sm}$  οπτική απόδοση του δευτερεύοντος μηχανισμού συγκέντρωσης ακτινοβολίας

$\alpha_{abs}$  συντελεστής απορροφητικότητας του απορροφητή

Για κάθε επιφάνεια το άθροισμα των συντελεστών ανάκλασης ( $\rho$ ), διαπερατότητας ( $\tau$ ) και απορροφητικότητας ( $\alpha$ ) ισούται με τη μονάδα.

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (5-31)$$

Κατά τη διέλευση της ακτινοβολίας μέσα από το γυάλινο περίβλημα, ένα μέρος της απορροφάται από το ίδιο το γυαλί, το οποίο δίνεται από την εξίσωση:

$$q = DNI \cdot A \cdot n_{pm} \cdot n_{sm} \cdot a_g \quad (5-32)$$

Όπου  $a_g$  ο συντελεστής απορροφητικότητας του γυαλιού.

Όταν ο δέκτης διαθέτει γυάλινο κάλυμμα, ο οπτικός συντελεστής της γεωμετρίας του δευτερεύοντος μηχανισμού ( $n_{sm}$ ) δεν χρειάζεται να υπολογιστεί, καθώς η ακτινοβολία συναντά πρώτα το κάλυμμα.

Τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις μοντελοποιήσεις των δεκτών είναι το νερό, ο αέρας και το θερμικό λάδι που μεταφέρει τη θερμότητα από τον απορροφητή. Σημειώνεται ότι στα τελικά αποτελέσματα του κεφαλαίου δεν χρησιμοποιήθηκε το νερό.

Για σταθερή πίεση 1bar, οι ιδιότητες του νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι οι ακόλουθες [97].

Πυκνότητα νερού, kg/m<sup>3</sup>

$$d_w(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 \quad (5-33)$$

όπου

$$a_0 = 999.85, a_1 = 6.187 \cdot 10^{-2}, a_2 = -7.654 \cdot 10^{-3}, a_3 = 3.974 \cdot 10^{-5}, a_4 = -1.110 \cdot 10^{-7}$$

Ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού, kJ/(kg ·K)

$$C_p = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5 \quad (5-34)$$

όπου

$$a_0 = 4.217, a_1 = -3.358 \cdot 10^{-3}, a_2 = 1.089 \cdot 10^{-4}, a_3 = -1.675 \cdot 10^{-6}, a_4 = 1.309 \cdot 10^{-8}, a_5 = -3.3884 \cdot 10^{-11}$$

Για πίεση 1 έως 12 bar, οι ιδιότητες του νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι:

Πυκνότητα νερού, kg/m<sup>3</sup>

$$d = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5 \quad (5-35)$$

όπου

$$a_0 = 999.85, a_1 = 5.332 \cdot 10^{-2}, a_2 = -7.564 \cdot 10^{-3}, a_3 = 4.323 \cdot 10^{-5}, a_4 = -1.673 \cdot 10^{-7}, a_5 = -2.447 \cdot 10^{-10}$$

Ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού, kJ/(kg ·K)

$$C_p = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5 + a_6 \cdot T^6 \quad (5-36)$$

όπου

$$a_0 = 4.2184, a_1 = -2.8218 \cdot 10^{-3}, a_2 = 7.3478 \cdot 10^{-5}, a_3 = -9.4712 \cdot 10^{-7}, a_4 = 7.2869 \cdot 10^{-9}, a_5 = -2.8098 \cdot 10^{-11}, a_6 = -4.4008 \cdot 10^{-14}$$

Η ανάλυση των ιδιοτήτων του αέρα είναι απαραίτητη καθώς αφενός περιβάλλει το δέκτη υπό ατμοσφαιρική πίεση και αφετέρου βρίσκεται εσωτερικά της κοιλότητας του δέκτη επίσης υπό ατμοσφαιρική πίεση.

Οι ιδιότητες του αέρα σε σχέση με τη θερμοκρασία και την πίεση δίνονται από τις εξισώσεις.

Πυκνότητα αέρα, kg/m<sup>3</sup>

$$d = \frac{P \cdot M_{B_{air}}}{R \cdot T} \quad (5-37)$$

Όπου  $M_{B_{air}}$  είναι το μοριακό βάρος του αέρα:  $28.96 \cdot 10^{-3}$  kg/mol, R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων: 8.314 J/(mol ·K).

Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα σε kJ/(kg ·K)

$$C_p = 3 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 8.58 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1.0096 \quad (5-38)$$

Θερμική αγωγιμότητα αέρα σε W/(m·K)

$$k = -2 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0.0027 \quad (5-39)$$

Δυναμική συνεκτικότητα αέρα σε kg/(m·s)

$$\mu = -2 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 6 \cdot 10^{-8} \cdot T + 2 \cdot 10^{-6} \quad (5-40)$$

Το θερμικό λάδι κυκλοφορεί εσωτερικά του απορροφητή με σκοπό να μεταφέρει τη θερμότητα από το ηλιακό συλλέκτη προς την αποθήκευση ή κατανάλωση. Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται το συνθετικό θερμικό λάδι Therminol VP1 [98] ως το πιο κοινά χρησιμοποιούμενο ρευστό στις εν λειτουργία εγκαταστάσεις. Οι ιδιότητες του δίνονται από τις εξής εξισώσεις:

Πυκνότητα του θερμικού ρευστού σε kg/m<sup>3</sup>

$$d = -0.9080 \cdot T + 0.00078116 \cdot T^2 - 2.367 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 1083.2 \quad (5-41)$$

Ειδική θερμοχωρητικότητα θερμικού ρευστού σε kJ/(kg·K)

$$C_p = 0.002414 \cdot T + 5.9591 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 2.9879 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 4.4172 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 + 1.498 \quad (5-42)$$

Θερμική αγωγιμότητα θερμικού ρευστού σε W/(m·K)

$$k = -8.1948 \cdot 10^{-5} \cdot T - 1.9226 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 2.5034 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 - 7.2974 \cdot 10^{-15} \cdot T^4 + 0.1377 \quad (5-43)$$

Κινηματική συνεκτικότητα σε mm<sup>2</sup>/s

$$\nu_f = e^{\left(\frac{544.149}{T+114.43} - 2.5958\right)} \cdot 10^{-6} \quad (5-44)$$

Ο Πίνακας 5-2 συγκεντρώνει ενδεικτικές τιμές των ιδιοτήτων του ρευστού σε σχέση με τη θερμοκρασία σε ατμοσφαιρική πίεση.

Πίνακας 5-2: Τιμές θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του θερμικού ρευστού

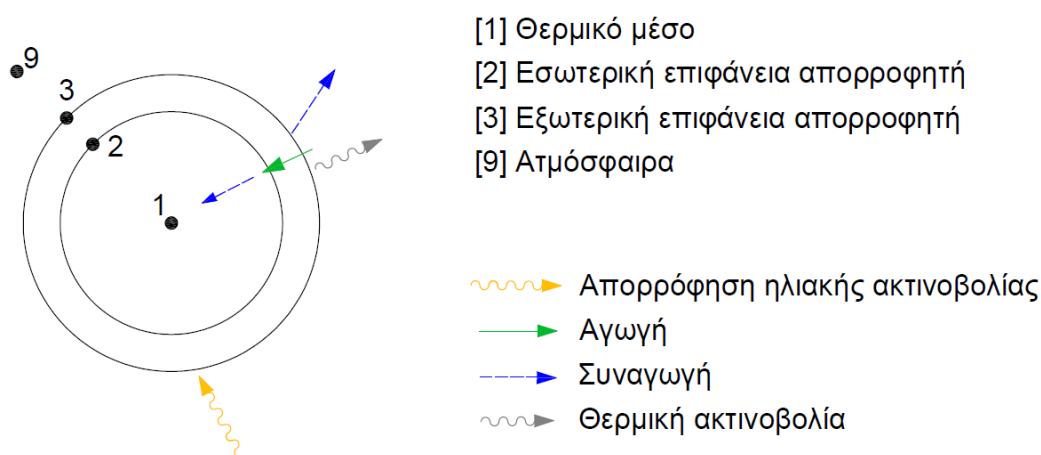
<b>T</b> °C	<b>d</b> kg/m <sup>3</sup>	<b>Cp</b> kJ/(kg·K)	<b>k</b> W/(m·K)	<b>v</b> mm <sup>2</sup> /s
100	997.94	1.77	0.13	0.94
150	956.64	1.92	0.12	0.58
200	913.97	2.05	0.11	0.42
250	868.10	2.18	0.11	0.33
300	817.25	2.31	0.10	0.27
350	759.67	2.45	0.09	0.24
400	693.56	2.64	0.08	0.21

### 5.3 Δέκτης απορροφητή σωλήνα

#### 5.3.1 Περιγραφή δέκτη

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται δέκτης που αποτελείται από απορροφητή σωλήνα (Single Tube Receiver – STR).

Στο Σχήμα 5-1 απεικονίζεται σχηματικά ο μηχανισμός θερμότητας του δέκτη STR. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την επιλεκτική επιφάνεια που βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή και μετατρέπεται σε θερμότητα ( $q_{3solabs}$ ). Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας μεταφέρεται μέσω αγωγής ( $q_{32cond}$ ) στο σωλήνα και έπειτα, μέσω συναγωγής στο θερμικό μέσο που κυκλοφορεί εσωτερικά του σωλήνα ( $q_{21conv}$ ). Η θερμότητα που μεταφέρεται στο θερμικό μέσο είναι η ωφέλιμη θερμότητα που παράγεται από το δέκτη. Το υπόλοιπο μέρος της θερμότητας του απορροφητή μεταφέρεται στο περιβάλλον, είτε μέσω συναγωγής ( $q_{39conv}$ ) είτε μέσω ακτινοβολίας ( $q_{39rad}$ ). Το άθροισμα των δύο αποτελεί τις θερμικές απώλειες του δέκτη ( $q_{loss}$ ).



Σχήμα 5-1: Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας του δέκτη STR

Ο Πίνακας 5-3 συνοψίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη και οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση. Στα εξαρτώμενα μεγέθη από τη θερμοκρασία, οι τιμές με αστερίσκο αναφέρονται σε ενδεικτική θερμοκρασία 250°C.

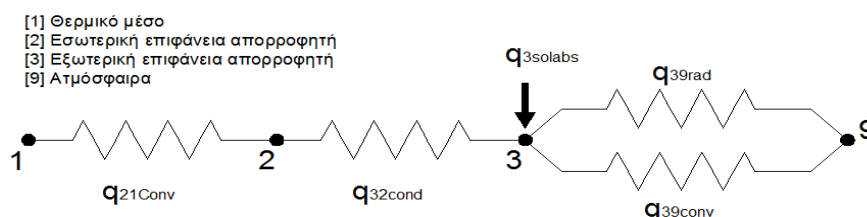
Πίνακας 5-3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών του δέκτη STR

Μέρος	Περιγραφή	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Εξωτερικές συνθήκες	Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	$T_{air}$	°C	22
	Θερμοκρασία ουρανού	$T_{sky}$	°C	14
	Ταχύτητα ανέμου	$V_{wind}$	m/s	2
	Απορρόφηση ηλιακής	$q_{3solabs}$	W/m	3521

		ακτινοβολίας από απορροφητή		
Θερμικό μέσο Therminol VPI	Παροχή μάζας	$m_f$	Kg/s	7.5
	Πυκνότητα	$d_f$	Kg/m <sup>3</sup>	868.1 *
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_f$	W/(m.K)	0.11 *
	Ειδική θερμοχωρητικότητα	$C_{p_f}$	kJ/(kg.K)	2.18 *
	Κινηματική συνεκτικότητα	$\nu_f$	cm <sup>2</sup> /s	0.33 *
Απορροφητής 316L	Εξωτερική διάμετρος	$D_{abs_o}$	m	0.070
	Εσωτερική διάμετρος	$D_{abs_i}$	m	0.066
	Πάχος	$T_{H_{abs}}$	m	0.002
	Συντελεστής εκπομπής	$\epsilon_{abs}$	-	0.105 *
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_{abs}$	W/(m.K)	18.45 *
	Απορροφητικότητα	$\alpha_{abs}$	-	0.965

### 5.3.2 Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας

Για τη θερμική ανάλυση του δέκτη αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας (HTM). Στο Σχήμα 5-2 απεικονίζεται το δίκτυο θερμικών αντιστάσεων του δέκτη.



Σχήμα 5-2: Δίκτυο θερμικών αντιστάσεων του δέκτη STR

Για τους κόμβους 2 και 3 που αντιστοιχούν στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή αντίστοιχα ισχύουν οι εξισώσεις:

$$\text{Κόμβος 2: } q_{21conv} = q_{32cond} \quad (5-45)$$

$$\text{Κόμβος 3: } q_{3solabs} = q_{32cond} + q_{34rad} + q_{34conv} \quad (5-46)$$

Οι θερμικές απώλειες από τον απορροφητή υπολογίζονται από τη διαφορά της ακτινοβολίας που απορροφάται από τον απορροφητή ( $q_{3solabs}$ ) και της θερμότητας που μεταφέρεται στο θερμικό μέσο ( $q_{21conv}$ ) ή εναλλακτικά από τη μεταφορά θερμότητας του απορροφητή προς το γυάλινο περίβλημα ( $q_{34}$ ).

$$q_{loss} = q_{3solabs} - q_{21conv} = q_{39rad} + q_{39conv} \quad (5-47)$$

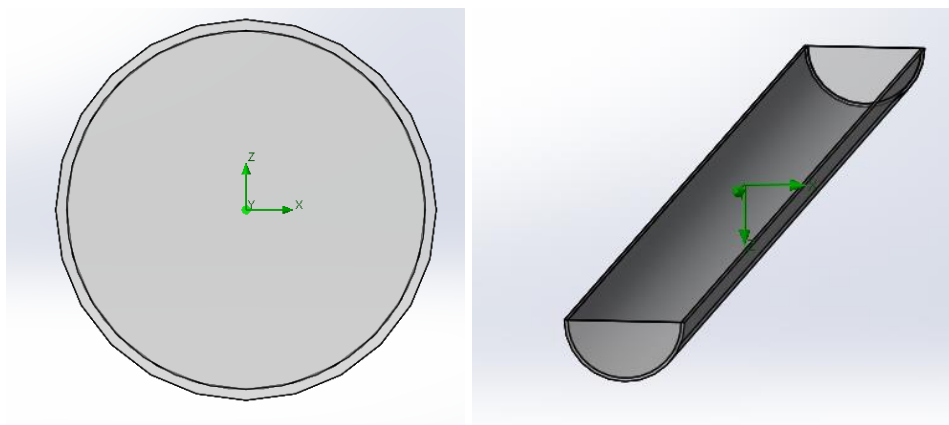
Οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας αναλύονται στην αρχή του κεφαλαίου.

Για τη μοντελοποίηση του δέκτη θεωρούνται οι εξής παραδοχές:

- ο Μονοδιάστατη μοντελοποίηση σε κατάσταση ισορροπίας.
- ο Ομοιόμορφη κατανομή της απορροφηθείσας ηλιακής ακτινοβολίας ως πηγής θερμότητας στον όγκο του απορροφητή.
- ο Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στον απορροφητή και στο γυάλινο περίβλημα.
- ο Σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος με ομοιόμορφη κατανομή στην εξωτερική επιφάνεια του δέκτη.

### 5.3.3 Μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Επιπλέον του μαθηματικού μοντέλου ΗΤΜ, για τη θερμική ανάλυση του δέκτη αναπτύχθηκε μοντέλο σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Η όψη του δέκτη φαίνεται στο Σχήμα 5-3.



Σχήμα 5-3: 3D όψη του δέκτη STR από το CFD μοντέλο

Για τη μοντελοποίηση του δέκτη θεωρούνται οι εξής παραδοχές.

- ο Τρισδιάστατη μοντελοποίηση σε κατάσταση ισορροπίας.
- ο Οριακή συνθήκη του θερμικού λαδιού στην είσοδο του δέκτη με προσδιορισμό θερμοκρασίας, παροχή μάζας και προφίλ ροής.
- ο Οριακή συνθήκη του θερμικού λαδιού στην έξοδο του δέκτη με προσδιορισμό πίεσης εξόδου.
- ο Οριακή συνθήκη εξωτερικής επιφάνειας του απορροφητή με προσδιορισμό θερμοκρασίας και συναγωγής του αέρα περιβάλλοντος.
- ο Εισαγωγή σταθερής πηγής θερμότητας στον όγκο του απορροφητή για την αντίστοιχη απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία.
- ο Διάχυτη εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια του απορροφητή (γκρι σώμα).

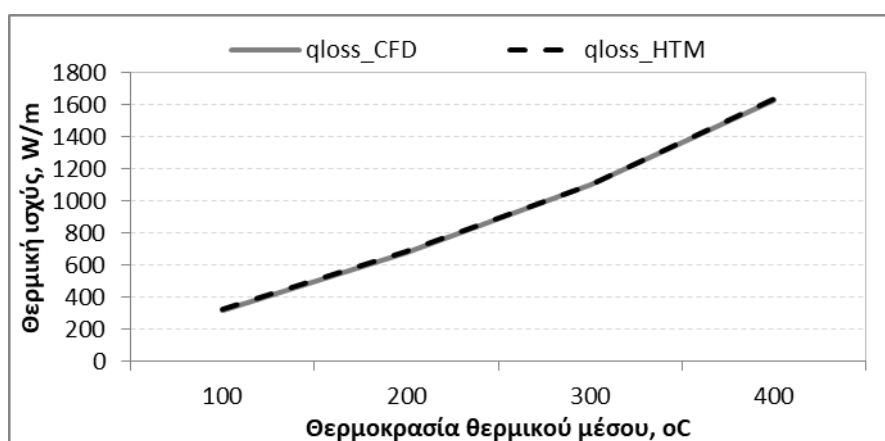
### 5.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλων

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων διενεργήθηκε, υπό τις ίδιες συνθήκες, παραμετρική ανάλυση συναρτήσεως της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου, από 100°C σε 400°C με βήμα 100°C. Ο Πίνακας 5-4 αποδίδει τη σύγκριση των μοντέλων, τα οποία παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ τους.

Πίνακας 5-4: Θερμικές απώλειες των μοντέλων HTM και CFD για το δέκτη STR

$T_{f\_in}$	°C	100	200	300	400
$q_{loss\_HTM}$	W/m	323.3	682.9	1104.6	1635.7
$q_{loss\_CFD}$	W/m	320.0	678.3	1101.9	1632.5
Απόκλιση	-	-1.0%	-0.7%	-0.2%	-0.2%

Η απόκλιση των δύο μοντέλων κυμαίνεται από -1.0% σε θερμοκρασία μέσου 100°C έως -0.2% σε θερμοκρασία μέσου 400°C. Η ικανοποιητική σύγκλιση των υπολογιστικών μοντέλων μεταξύ τους απεικονίζεται επιπλέον στο Σχήμα 5-4.

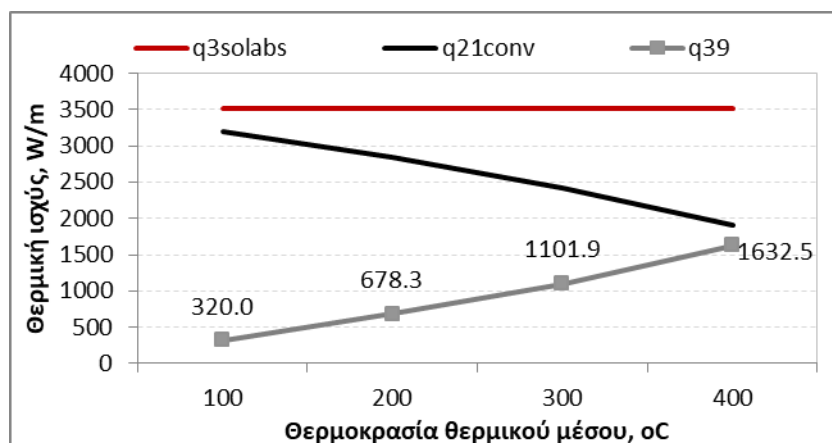


Σχήμα 5-4: Θερμικές απώλειες των μοντέλων HTM και CFD για το δέκτη STR

Οι θερμικές απώλειες του δέκτη προέρχονται κυρίως από μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Για παράδειγμα, για θερμοκρασία 300°C οι θερμικές απώλειες είναι 1120.8 W/m, εκ των οποίων το 86% είναι μέσω συναγωγής.

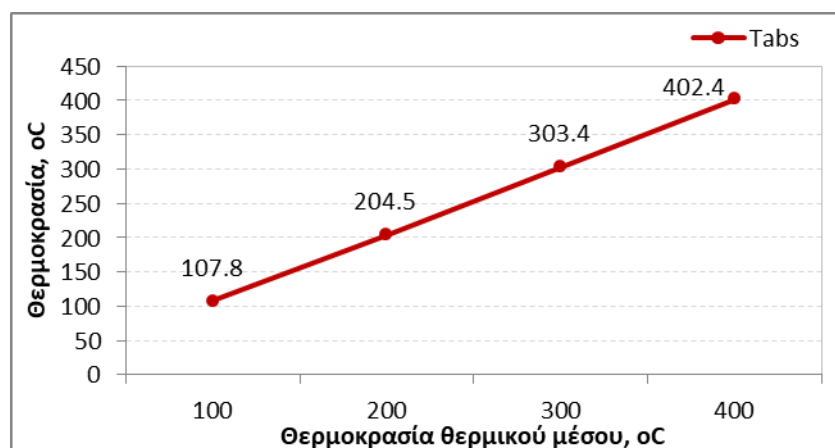
Οι θερμοροές του δέκτη απεικονίζονται στο Σχήμα 5-5 όπου παρατηρείται η σημαντική μείωση των θερμικών απολαβών σε υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας του θερμικού μέσου. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη θερμικής θωράκισης του απορροφητή, όπως θα παρουσιαστεί στις επόμενες ενότητες.





Σχήμα 5-5: Θερμορροές του δέκτη STR συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου.

Η μέση θερμοκρασία του απορροφητή, του θερμικού μέσου και του γυάλινου περιβλήματος απεικονίζονται στο Σχήμα 5-6. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του απορροφητή και του θερμικού μέσου έχουν μικρή διαφορά μεταξύ τους και κυμαίνεται από 2.4 K έως 7.8 K.



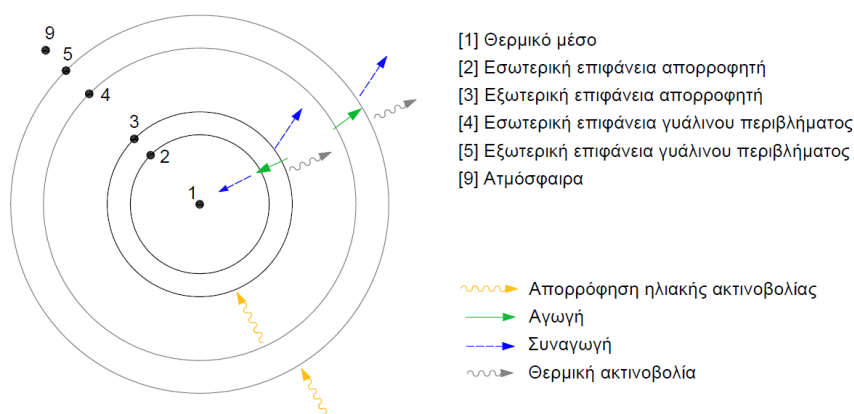
Σχήμα 5-6: Μέση θερμοκρασία απορροφητή και του θερμικού μέσου του δέκτη STR συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου

## 5.4 Δέκτης απορροφητή σωλήνα με γυάλινο περίβλημα και κενό

### 5.4.1 Περιγραφή δέκτη

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται δέκτης που αποτελείται από απορροφητή σωλήνα που περικλείεται από γυάλινο περίβλημα με ενδιάμεσα κενό (Vacuum Tube Receiver – VTR).

Στο Σχήμα 5-7 απεικονίζεται σχηματικά ο μηχανισμός θερμότητας του δέκτη VTR. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο δέκτη, ένα μικρό μέρος της απορροφάται από το γυάλινο περίβλημα του απορροφητή ( $q_{5solabs}$ ), ενώ το μεγαλύτερο μέρος της διαπερνά το γυάλινο περίβλημα και προσπίπτει στο σωλήνα (απορροφητής). Στην εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή, όπου υπάρχει επιλεκτική επίστρωση, απορροφάται η ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέπεται σε θερμότητα ( $q_{3solabs}$ ). Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας αυτής μεταφέρεται μέσω αγωγής ( $q_{32cond}$ ) στο σωλήνα και έπειτα, μέσω συναγωγής στο θερμικό μέσο που κυκλοφορεί εσωτερικά του σωλήνα ( $q_{21conv}$ ). Η θερμότητα που μεταφέρεται στο θερμικό μέσο είναι η ωφέλιμη θερμότητα που παράγεται από το δέκτη. Το υπόλοιπο μέρος της θερμότητας, μεταδίδεται στο γυάλινο περίβλημα μέσω ακτινοβολίας ( $q_{34rad}$ ) και μέσω συναγωγής ( $q_{34conv}$ ). Η μεταφορά μέσω συναγωγής είναι σημαντικά περιορισμένη, λόγω της ύπαρξης του κενού ανάμεσα στον απορροφητή και το γυάλινο περίβλημα. Το άθροισμα των δύο αποτελεί τις θερμικές απώλειες του δέκτη ( $q_{loss}$ ). Στο γυάλινο περίβλημα, η θερμότητα που μεταφέρεται από τον απορροφητή μεταφέρεται με αγωγή μέσω του περιβλήματος ( $q_{45cond}$ ) και μαζί με την απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία ( $q_{5solabs}$ ) μεταφέρεται στο περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας ( $q_{59rad}$ ) και συναγωγής ( $q_{59conv}$ ).



Σχήμα 5-7: Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας του δέκτη VTR

Ο Πίνακας 5-5 συνοψίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη και τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση. Στα

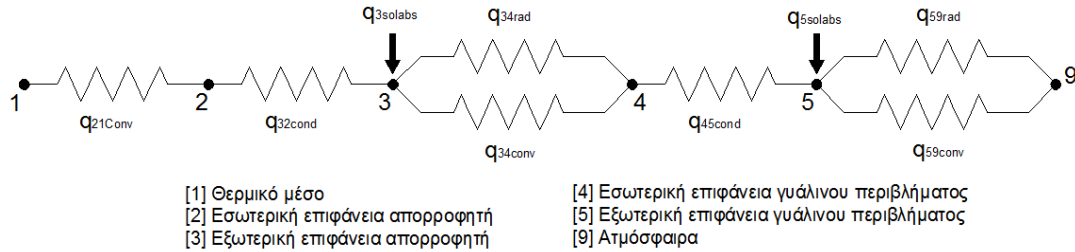
εξαρτώμενα μεγέθη από τη θερμοκρασία οι τιμές με αστερίσκο αναφέρονται σε ενδεικτική θερμοκρασία 250°C.

Πίνακας 5-5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών του δέκτη VTR

Μέρος	Περιγραφή	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Περιβάλλον	Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	$T_{air}$	°C	22
	Θερμοκρασία ουρανού	$T_{sky}$	°C	14
	Ταχύτητα ανέμου	$V_{wind}$	m/s	2
	Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από απορροφητή	$q_{3solabs}$	W/m	3521
	Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από γυάλινο περίβλημα	$q_{5solabs}$	W/m	74
Θερμικό μέσο Therminol VP1	Παροχή μάζας	$m_f$	kg/s	7.5
	Πυκνότητα	$d_f$	Kg/m <sup>3</sup>	868.1 *
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_f$	W/(m.K)	0.11 *
	Ειδική θερμοχωρητικότητα	$C_{p_f}$	kJ/(kg.K)	2.18 *
	Κινηματική συνεκτικότητα	$\nu_f$	cm <sup>2</sup> /s	0.33 *
Απορροφητής 316L	Εξωτερική διάμετρος	$D_{abs\_o}$	m	0.070
	Εσωτερική διάμετρος	$D_{abs\_i}$	m	0.066
	Πάχος απορροφητή	$TH_{abs}$	mm	0.002
	Συντελεστής εκπομπής	$\epsilon_{abs}$	-	0.105 *
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_{abs}$	W/(m.K)	18.45 *
	Απορροφητικότητα	$\alpha_{abs}$	-	0.965
Γυάλινο περίβλημα Borosilicate glass	Εξωτερική διάμετρος	$D_{gt\_o}$	m	0.115
	Εσωτερική διάμετρος	$D_{gt\_i}$	m	0.109
	Πάχος	$TH_{gt}$	m	0.003
	Διαπερατότητα	$T_{gt}$	-	0.97
	Συντελεστής εκπομπής	$\epsilon_{gt}$	-	0.86
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_{gt}$	W/(m.K)	1.14
	Απορροφητικότητα	$\alpha_{gt}$	-	0.02

### 5.4.2 Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας

Για τη θερμική ανάλυση του δέκτη VTR αναπτύχθηκε νέο μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας (HTM). Στο Σχήμα 5-8 απεικονίζεται το δίκτυο θερμικών αντιστάσεων του δέκτη.



Σχήμα 5-8: Δίκτυο θερμικών αντιστάσεων του δέκτη VTR

Για τους κόμβους 2, 3, 4 και 5 που αντιστοιχούν στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του δέκτη, ισχύουν οι εξισώσεις:

$$\text{Κόμβος 2: } q_{21conv} = q_{32cond} \quad (5-48)$$

$$\text{Κόμβος 3: } q_{3solabs} = q_{32cond} + q_{34rad} + q_{34conv} \quad (5-49)$$

$$\text{Κόμβος 4: } q_{34rad} + q_{34conv} = q_{45cond} \quad (5-50)$$

$$\text{Κόμβος 5: } q_{45cond} + q_{5solabs} = q_{59rad} + q_{59conv} \quad (5-51)$$

Οι θερμικές απώλειες από τον απορροφητή υπολογίζονται από τη διαφορά της ακτινοβολίας που απορροφάται από τον απορροφητή ( $q_{3solabs}$ ) και της θερμότητας που μεταφέρεται στο θερμικό μέσο ( $q_{21conv}$ ) ή εναλλακτικά από τη μεταφορά θερμότητας του απορροφητή προς το γυάλινο περίβλημα ( $q_{34}$ ).

$$q_{loss} = q_{3solabs} - q_{21conv} = q_{34rad} + q_{34conv} = q_{34rad} \quad (5-52)$$

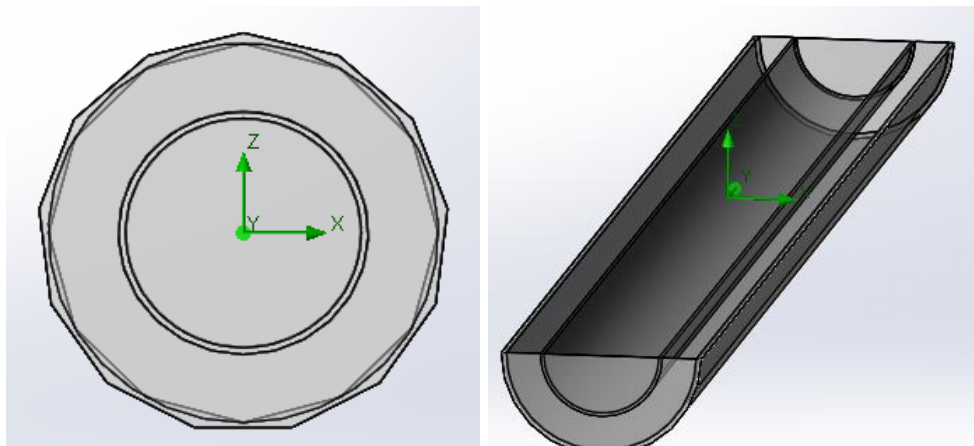
Οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας αναλύονται στην αρχή του κεφαλαίου.

Για τη μοντελοποίηση του δέκτη θεωρούνται οι εξής παραδοχές.

- Μονοδιάστατη μοντελοποίηση σε κατάσταση ισορροπίας.
- Ομοιόμορφη κατανομή της απορροφηθείσας ηλιακής ακτινοβολίας ως πηγής θερμότητας στην επιφάνεια / όγκο του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος.
- Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στον απορροφητή και στο γυάλινο περίβλημα.
- Αμελητέα μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος.
- Σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος με ομοιόμορφη κατανομή στην εξωτερική επιφάνεια του δέκτη.

### 5.4.3 Μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Επιπλέον του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (HTM), για τη θερμική ανάλυση του δέκτη αναπτύχθηκε μοντέλο σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Η όψη του μοναδιαίου μήκους δέκτη φαίνεται στο Σχήμα 5-9.



Σχήμα 5-9: 3D όψη του δέκτη VTR από το CFD μοντέλο

Για τη μοντελοποίηση του δέκτη θεωρούνται οι εξής παραδοχές.

- ο Τρισδιάστατη μοντελοποίηση σε κατάσταση ισορροπίας.
- ο Οριακή συνθήκη του θερμικού λαδιού στην είσοδο του δέκτη με προσδιορισμό θερμοκρασίας, παροχή μάζας και προφίλ ροής.
- ο Οριακή συνθήκη του θερμικού λαδιού στην έξοδο του δέκτη με προσδιορισμό πίεσης εξόδου.
- ο Οριακή συνθήκη εξωτερικής επιφάνειας του γυάλινου περιβλήματος με προσδιορισμό θερμοκρασίας και συναγωγής του αέρα περιβάλλοντος.
- ο Εισαγωγή σταθερής πηγής θερμότητας στον όγκο του γυάλινου περιβλήματος για την απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία.
- ο Εισαγωγή σταθερής πηγής θερμότητας στον όγκο του απορροφητή για την αντίστοιχη απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία.
- ο Διάχυτη εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από τις επιφάνειες του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος (γκρι σώμα).
- ο Πλήρης απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας από το γυαλί.

### 5.4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλων με δεδομένα βιβλιογραφίας

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων διενεργήθηκε, υπό τις ίδιες συνθήκες, παραμετρική ανάλυση συναρτήσεως της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου από 100°C σε 400°C με

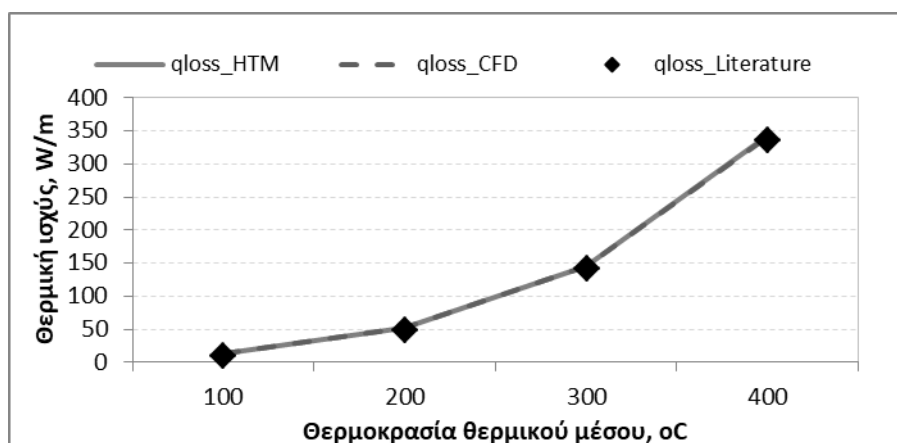
βήμα 100°C. Ο Πίνακας 5-6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίνονται παράλληλα με τιμές βιβλιογραφίας [99] παρουσιάζοντας ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ τους.

Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων HTM και CFD και τιμές βιβλιογραφίας για το δέκτη VTR

$T_{f,in}$	°C	100	200	300	400
$q_{loss\_HTM}$	W/m	12.7	51.8	145.7	342.5
$q_{loss\_CFD}$	W/m	12.8	51.4	145.7	342.0
$q_{loss\_literature}$	W/m	11.03	49.83	142.8	337.3

Η απόκλιση των δυο μοντέλων μεταξύ CFD και HTM κυμαίνεται από -0.7% σε θερμοκρασία μέσου 200°C έως 0.5% σε θερμοκρασία μέσου 100°C. Αντίστοιχα, η απόκλιση του μοντέλου CFD με τις τιμές της βιβλιογραφίας κυμαίνεται από 1.4% στους 400°C έως 15.8% στους 100°C.

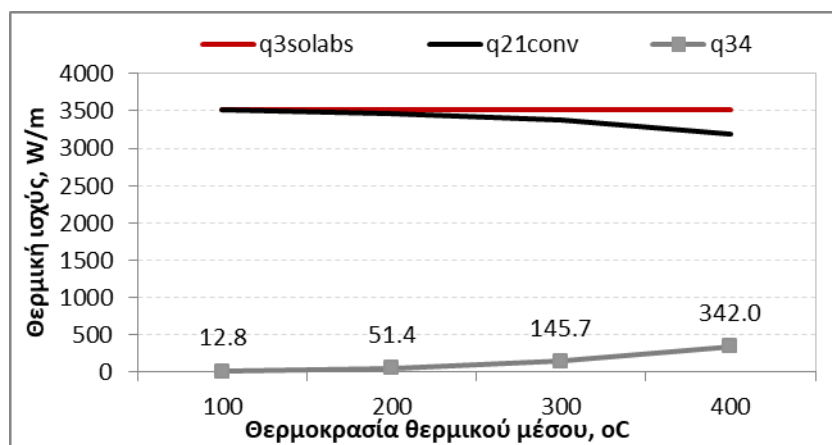
Τα αποτελέσματα των δύο υπολογιστικών μοντέλων HTM και CFD για το δέκτη VTR παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ τους αλλά και με τιμές της βιβλιογραφίας (Σχήμα 5-10).



Σχήμα 5-10: Θερμικές απώλειες των μοντέλων HTM και CFD και τιμές βιβλιογραφίας για το δέκτη VTR

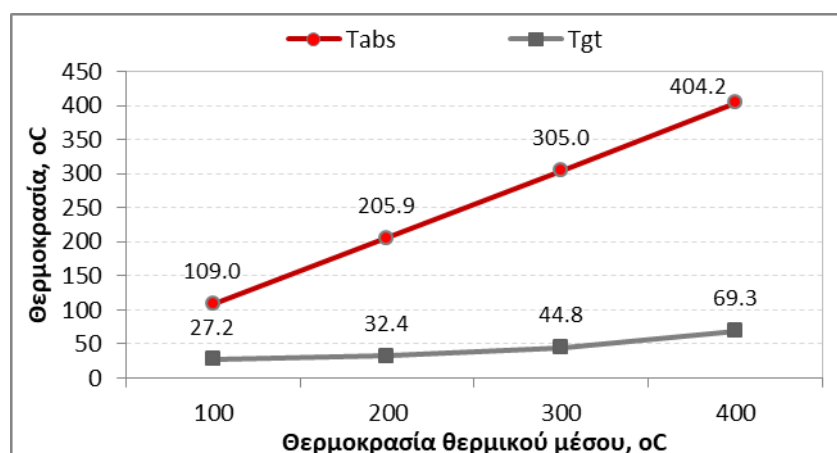
Σε σχέση με το δέκτη STR, παρατηρείται ότι οι θερμικές απώλειες έχουν περιοριστεί σημαντικά, εξαιτίας της ύπαρξης κενού μεταξύ του γυάλινου περιβλήματος και του απορροφητή. Για θερμοκρασία μέσου 300°C, οι θερμικές απώλειες ισούνται με 145.7 W/m, όταν η απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία είναι 3521 W/m, δηλαδή μόλις το 4.1%, ενώ για 400°C ισούνται με 342 W/m, αντιστοιχώντας στο 9.7%.

Οι θερμορροές του δέκτη απεικονίζονται στο Σχήμα 5-11, όπου σε αντίθεση με το δέκτη STR παρατηρείται σημαντικά χαμηλότερες θερμικές απώλειες ακόμα και σε θερμοκρασία 400°C.



Σχήμα 5-11: Θερμορροές του δέκτη VTR συναρτήσεως της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου

Η μέση θερμοκρασία του απορροφητή, θερμικού μέσου και του γυάλινου περιβλήματος απεικονίζονται στο Σχήμα 5-12. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του απορροφητή και του θερμικού μέσου έχουν μικρή διαφορά μεταξύ τους μέχρι 9°C σε όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες. Η μέση θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος διαφοροποιείται σημαντικά, κυμαίνοντας από 27.2°C έως 69.3°C.



Σχήμα 5-12: Μέση θερμοκρασία απορροφητή, θερμικού μέσου και γυάλινου περιβλήματος του δέκτη VTR συναρτήσεως της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου

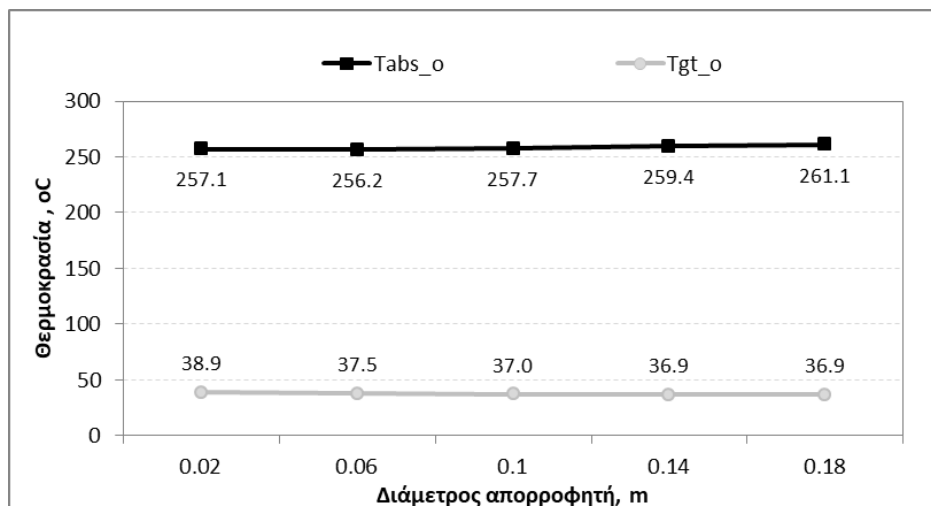
#### 5.4.5 Αποτελέσματα

Για τη θερμική μελέτη του δέκτη διενεργήθηκαν επιπλέον παραμετρικές προσομοιώσεις, με σκοπό να εντοπιστούν οι μεταβλητές που είναι κρίσιμες για την ενεργειακή απόδοση του δέκτη, αλλά και για να υπολογιστεί η επίδραση της κάθε μίας μεταβλητής. Για κάθε σετ προσομοιώσεων, όλα τα βασικά χαρακτηριστικά του δέκτη αναφοράς διατηρούνται σταθερά, εκτός από την υπό εξέταση μεταβλητή.

Για το δέκτη εξετάστηκε παραμετρικά η επίδραση της διαμέτρου του απορροφητή, και κατ' επέκταση του γυάλινου περιβλήματος, στην

ενεργειακή συμπεριφορά του δέκτη. Συνολικά εξετάστηκαν 5 περιπτώσεις, από 0.02 m έως 0.18 m, με βήμα 0.04 m. Το πάχος του απορροφητή, του γυάλινου περιβλήματος καθώς και η απόσταση μεταξύ γυάλινου περιβλήματος και απορροφητή θεωρούνται σταθερές.

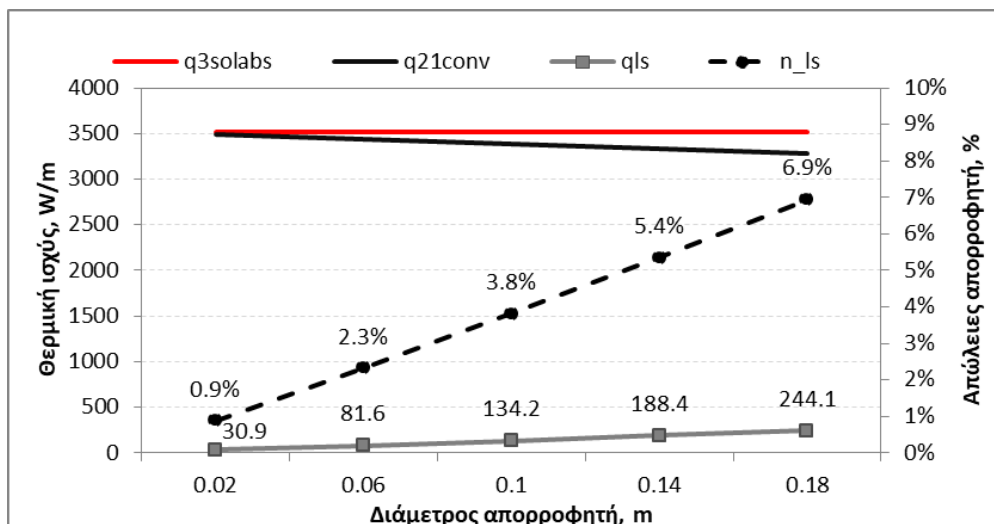
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-13, για διάμετρο μεγαλύτερη των 0.06 m, η θερμοκρασία του απορροφητή μεταβάλλεται λιγότερο από 4K. Η θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος παρουσιάζει μικρή διακύμανση σε όλες τις περιπτώσεις και κυμαίνεται μεταξύ 36.9°C και 38.9°C.



Σχήμα 5-13: Μέση θερμοκρασία απορροφητή και γυάλινου περιβλήματος συναρτησει της διαμέτρου του απορροφητή για το δέκτη VTR

Η αύξηση της διαμέτρου του απορροφητή επιφέρει όμως σημαντική αύξηση στις θερμικές απώλειες (Σχήμα 5-14), γεγονός που εξηγείται κυρίως από τη αύξηση της επιφάνειας ανταλλαγής θερμότητας. Η εσωτερική διάμετρος των 0.02 m οδηγεί σε θερμικές απώλειες 30.9 W/m, που αντιστοιχεί στο 0.9% της απορροφηθείσας ακτινοβολίας. Η αύξηση της διαμέτρου σε 0.18 m συνεπάγεται αύξηση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και συνεπώς, αύξηση των θερμικών απωλειών στα 244.1 W/m (6.9% της απορροφηθείσας ακτινοβολίας). Η εξάρτηση των θερμικών απωλειών του απορροφητή σε σχέση με τη διάμετρο του απορροφητή οφείλεται να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό της οπτικής του δευτερεύοντος δέκτη, καθώς η αύξηση της διαμέτρου μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της οπτικής απόδοσης, όμως ταυτόχρονα μειώνει τη θερμική απόδοση.

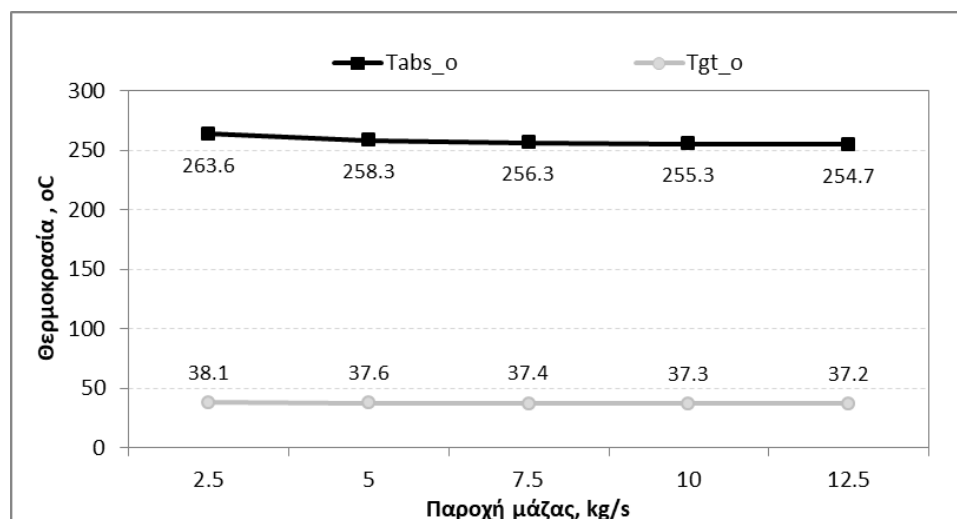




Σχήμα 5-14: Θερμορροές συναρτήσει της διαμέτρου του απορροφητή για το δέκτη VTR

Επιπλέον, εξετάστηκε παραμετρικά η επίδραση της παροχής μάζας του θερμικού μέσου στην ενεργειακή συμπεριφορά του δέκτη. Συνολικά εξετάστηκαν 5 περιπτώσεις με τιμές 2.5, 5, 7.5, 10 και 12.5 kg/s.

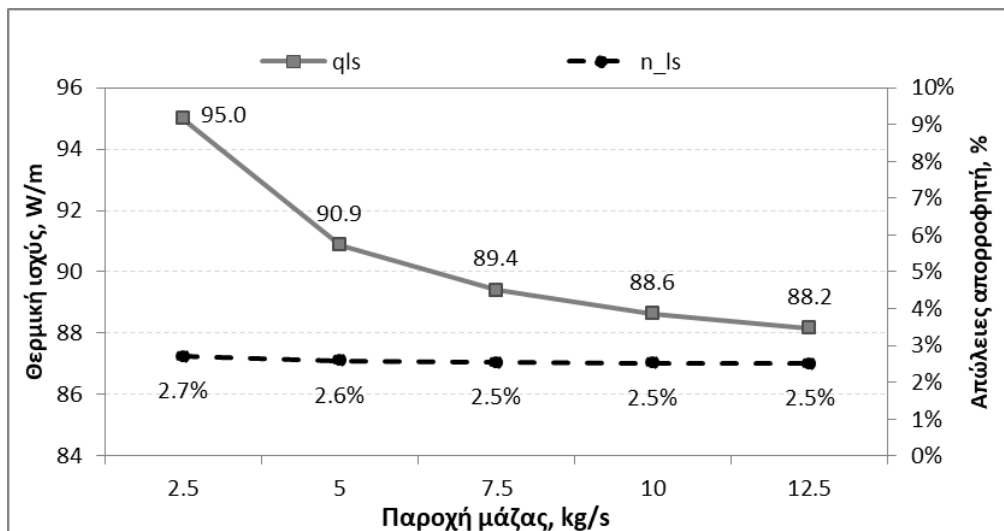
Για αυτό το εύρος παρατηρείται ελάχιστη μεταβολή στη θερμοκρασία του απορροφητή ( $T_{abs\_o}$ ) και του γυάλινου περιβλήματος ( $T_{gt\_o}$ ) στην εξωτερική τους επιφάνεια (Σχήμα 5-15). Η θερμοκρασία του απορροφητή είναι περίπου σταθερή και κυμαίνεται μεταξύ 254.7°C και 263.6°C. Αντίστοιχα η επίδραση στη θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος είναι επίσης αμελητέα στο εξεταζόμενο εύρος.



Σχήμα 5-15: Μέση θερμοκρασία απορροφητή και γυάλινου περιβλήματος συναρτήσει της παροχής μάζας του θερμικού μέσου για το δέκτη VTR

Η παροχή μάζας 7.5 kg/s οδηγεί σε θερμικές απώλειες 89.4 W/m που αντιστοιχεί σε 2.5% απώλειες της απορροφηθείσας ηλιακής ακτινοβολίας. Το ποσοστό απωλειών σε όλες τις περιπτώσεις κυμαίνεται από 2.5% έως 2.7%. Η μείωση της παροχής μάζας σε 2.5 kg/s (μείωση

κατά 66.7%) οδηγεί σε μικρή αύξηση των θερμικών απωλειών κατά 6.2%. Αντίστοιχα η αύξηση της παροχής μάζας σε 12.5 kg/s (αύξηση κατά 66.7%) οδηγεί σε μείωση των απωλειών κατά μόλις 1.4%. Επομένως, η μεταβολή της παροχής σε αυτό το εύρος επιφέρει αμελητέα μεταβολή των θερμικών απωλειών.

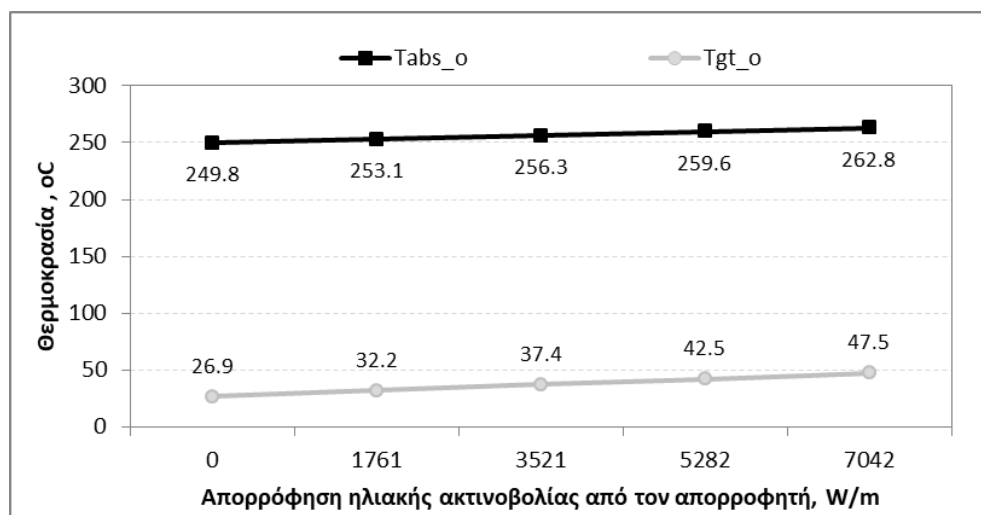


Σχήμα 5-16: Θερμικές απώλειες συναρτήσει της παροχής μάζας του θερμικού μέσου για το δέκτη VTR

Τέλος, εξετάστηκε παραμετρικά η επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην ενεργειακή συμπεριφορά του δέκτη.

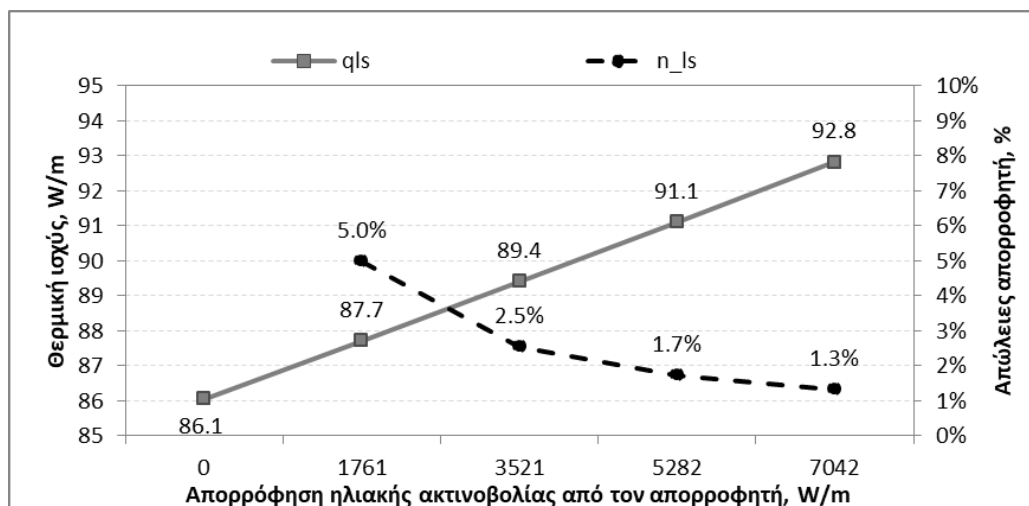
Συνολικά εξετάστηκαν 5 περιπτώσεις, με πολλαπλασιαστές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνουν τιμές 0, 0.5, 1, 1.5 και 2.

Παρατηρείται ότι για μηδενική ένταση ακτινοβολίας, η εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή λαμβάνει χαμηλότερη τιμή από τη θερμοκρασία του θερμικού μέσου ( $T_f=250^{\circ}\text{C}$ ), ενώ για τις υπόλοιπες τιμές λαμβάνει υψηλότερη γεγονός που οφείλεται στην απορρόφηση της ακτινοβολίας. Επίσης, φαίνεται ότι η ένταση της ακτινοβολίας έχει επιδρά στη θερμοκρασία του απορροφητή. Για ένταση ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή 0W/m προκύπτει θερμοκρασία του απορροφητή ίση με  $249.8^{\circ}\text{C}$ , ενώ αντίστοιχα για 7042 W/m προκύπτει  $262.8^{\circ}\text{C}$  και παράλληλα αύξηση των θερμικών απωλειών από 86.1W/m σε 92.8 W/m δηλαδή 21%. Η ένταση της ακτινοβολίας επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος εξωτερικά, καθώς μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται επίσης από το περίβλημα. Παρατηρείται η θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος κυμαίνεται μεταξύ  $26.9$  και  $47.5^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 5-17: Θερμοκρασία του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος στην εξωτερική τους επιφάνεια συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή για το δέκτη VTR

Όσον αφορά τις θερμικές απώλειες (Σχήμα 5-18), παρατηρείται ότι η αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή αυξάνει τις θερμικές απώλειες σε απόλυτο νούμερο, όμως παράλληλα βελτιώνει την απόδοση του απορροφητή. Επομένως, για τον ίδιο απορροφητή, η αύξηση της ανακλαστικής επιφάνειας θα οδηγούσε σε καλύτερη απόδοση του απορροφητή.



Σχήμα 5-18: Θερμικές απώλειες συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή για το δέκτη VTR

## 5.5 Δέκτης απορροφητή σωλήνα με γυάλινο κάλυμμα και δευτερεύοντα ανακλαστήρα με μόνωση

### 5.5.1 Περιγραφή δέκτη

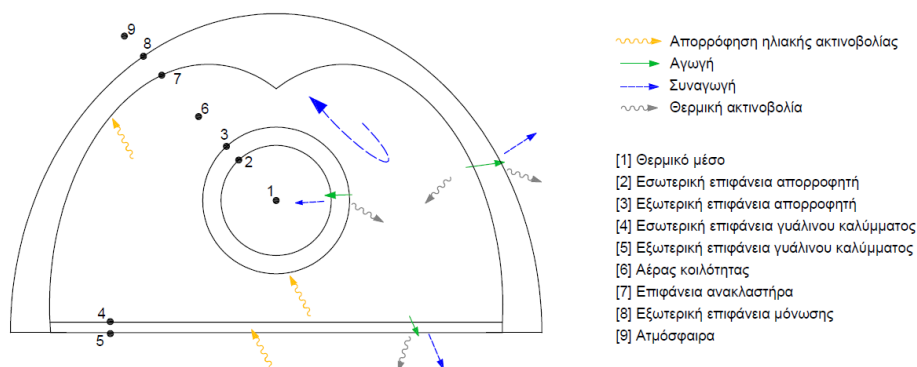
Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται δέκτης που αποτελείται από απορροφητή σωλήνα τοποθετημένο σε κοιλότητα με αέρα, όπου περικλείεται από γυάλινο κάλυμμα, δευτερεύοντα ανακλαστήρα με μόνωση εξωτερικά του (Cavity Tube Receiver – CTR).

Στο Σχήμα 5-19 απεικονίζεται σχηματικά ο μηχανισμός θερμότητας του δέκτη VTR. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την επιλεκτική επιφάνεια του απορροφητή και μετατρέπεται σε θερμότητα ( $q_{3solabs}$ ). Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας του απορροφητή μεταφέρεται μέσω αγωγής ( $q_{32cond}$ ) στο σωλήνα και έπειτα, μέσω συναγωγής στο θερμικό μέσο που κυκλοφορεί εσωτερικά της σωλήνας ( $q_{21conv}$ ). Η θερμότητα που μεταφέρεται στο θερμικό μέσο είναι η ωφέλιμη θερμότητα που παράγεται από το δέκτη.

Τώρα πίσω στον απορροφητή, ο απορροφητής μεταφέρει θερμότητα προς το περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας ( $q_{3rad}$ ) και μέσω συναγωγής ( $q_{3conv}$ ). Το άθροισμα των δύο θερμορροών αποτελεί τις θερμικές απώλειες του δέκτη. Η συναγωγή από τον απορροφητή προς τον ανακλαστήρα ( $q_{37conv}$ ) και το γυάλινο κάλυμμα ( $q_{34conv}$ ) επιτυγχάνεται μέσω του εγκλωβισμένου αέρα εσωτερικά της κοιλότητας. Αντίστοιχα, ο απορροφητής ακτινοβολεί θερμότητα προς τον ανακλαστήρα ( $q_{37rad}$ ) και το γυάλινο κάλυμμα ( $q_{34rad}$ ).

Όσον αφορά τον ανακλαστήρα, στην επιφάνειά του προσπίπτει η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία από τους πρωτεύοντες ανακλαστήρες και μέρος της απορροφάται από τον ανακλαστήρα ( $q_{7solabs}$ ). Παράλληλα, μεταφέρεται θερμότητα από τον απορροφητή προς τον ανακλαστήρα μέσω συναγωγής ( $q_{37conv}$ ) και ακτινοβολίας ( $q_{37rad}$ ) και προς το γυάλινο κάλυμμα μέσω ακτινοβολίας ( $q_{74rad}$ ). Από τον ανακλαστήρα και προς το περιβάλλοντα αέρα μεταφέρεται η θερμότητα μέσω αγωγής στη μόνωση ( $q_{78cond}$ ) και έπειτα από την εξωτερική επιφάνεια της μόνωσης (κάλυμμα μόνωσης) προς το περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας ( $q_{89rad}$ ) και συναγωγής ( $q_{89conv}$ ).

Όσον αφορά το γυάλινο κάλυμμα, μέρος της διερχόμενης συγκεντρωμένης ακτινοβολίας απορροφάται ( $q_{5solabs}$ ). Η εσωτερική επιφάνεια ανταλλάσει θερμότητα με τον απορροφητή ( $q_{34rad}$ ) και τον ανακλαστήρα ( $q_{74rad}$ ). Επίσης, στο γυάλινο κάλυμμα μεταφέρεται θερμότητα από τον απορροφητή μέσω συναγωγής μέσω του εγκλωβισμένου αέρα ( $q_{34conv}$ ). Η θερμότητα μέσω αγωγής μεταφέρεται στην εξωτερική επιφάνεια από όπου τελικά μεταφέρεται στο περιβάλλον μέσω συναγωγής ( $q_{59conv}$ ) και ακτινοβολίας ( $q_{59rad}$ ).



Σχήμα 5-19: Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας του δέκτη CTR

Ο Πίνακας 5-7 συνοψίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη και οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση. Στα εξαρτώμενα μεγέθη από τη θερμοκρασία οι τιμές με αστερίσκο αναφέρονται σε ενδεικτική θερμοκρασία 250°C.

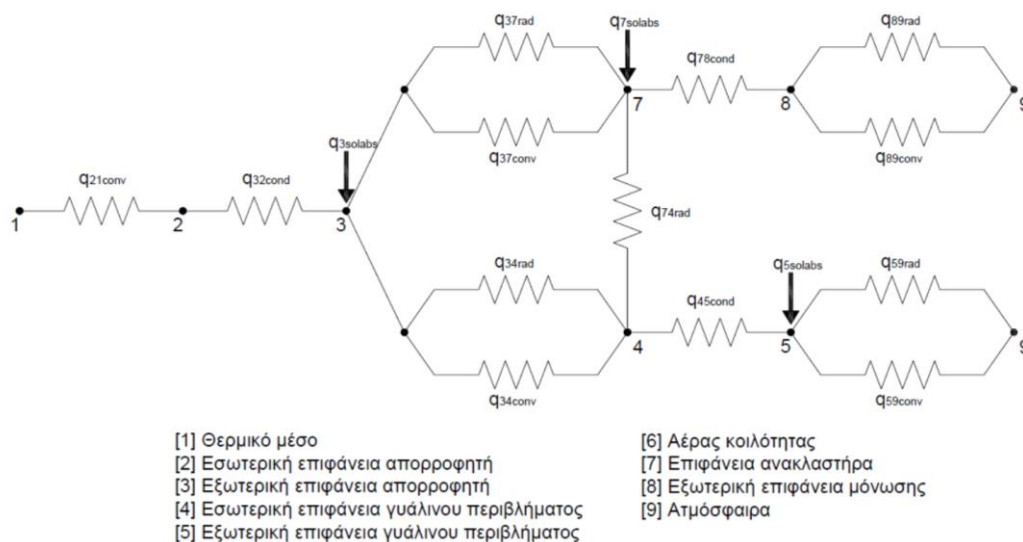
Πίνακας 5-7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών του δέκτη CTR

Μέρος	Περιγραφή	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Περιβάλλον	Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	$T_{amb}$	°C	22
	Θερμοκρασία ουρανού	$T_{sky}$	°C	14
	Ταχύτητα ανέμου	$V_{wind}$	m/s	2
	Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από απορροφητή	$q_{3solabs}$	W/m	3521
	Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από γυάλινο κάλυμμα	$q_{5solabs}$	W/m	86
	Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από δευτερεύοντα ανακλαστήρα	$q_{7solabs}$	W/m	124
Θερμικό μέσο (Therminol VP1)	Παροχή μάζας	$m_f$	kg/s	7.5
	Πυκνότητα	$D_f$	Kg/m <sup>3</sup>	868.1 *
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_f$	W/(m.K)	0.11 *
	Ειδική θερμοχωρητικότητα	$C_{p_f}$	kJ/(kg.K)	2.18 *
Απορροφητής (316L)	Κινηματική συνεκτικότητα	$\nu_f$	cm <sup>2</sup> /s	0.33 *
	Εξωτερική διάμετρος	$D_{abs_o}$	m	0.140
	Εσωτερική διάμετρος	$D_{abs_i}$	m	0.125
	Απόσταση απορροφητή από το γυάλινο κάλυμμα	$H_{abs}$	m	0.15
	Πάχος	$TH_{abs}$	m	0.0075

	Συντελεστής εκπομπής	$\epsilon_{abs}$	-	0.1164
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_{abs}$	W/(m.K)	18.45 *
	Απορροφητικότητα	$\alpha_{abs}$	-	0.94
Γυάλινο κάλυμμα	Πλάτος	$W_{gt}$	m	0.6
	Πάχος	$TH_{gt}$	m	0.006
	Διαπερατότητα	$T_{gt}$	-	0.965
	Συντελεστής εκπομπής	$\epsilon_{gt}$	-	0.86
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_{gt}$	W/(m.K)	1.04
	Απορροφητικότητα	$\alpha_{gt}$	-	0.02
	Μόνωση	Πάχος	$TH_{ins}$	m
Θερμική αγωγιμότητα		$k_{ins}$	W/(m.K)	0.05
Δευτερεύον ανακλαστήρας	Πλάτος CPC	$W_{rec}$		0.6
	Συντελεστής εκπομπής	$\epsilon_{sref}$	-	0.105 *
	Ανακλαστικότητα	$\rho_{sref}$	-	0.97
	Απορροφητικότητα	$\alpha_{sref}$	-	0.03

### 5.5.2 Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας

Για τη θερμική ανάλυση του δέκτη CTR αναπτύχθηκε τρίτο μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς θερμότητας (HTM). Στο Σχήμα 5-20 απεικονίζεται το δίκτυο θερμικών αντιστάσεων του δέκτη.



Σχήμα 5-20: Δίκτυο θερμικών αντιστάσεων του δέκτη CTR

Για τους κόμβους 2, 3, 4, 5, 7 και 8 που αντιστοιχούν στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του δέκτη, ισχύουν οι εξισώσεις:

$$\text{Κόμβος 2: } q_{21conv} = q_{32cond} \quad (5-53)$$

$$\text{Κόμβος 3: } q_{3solabs} = q_{32cond} + q_{34rad} + q_{37rad} + q_{34conv} + q_{37conv} \quad (5-54)$$

$$\text{Κόμβος 4: } q_{34rad} + q_{34conv} + q_{74rad} = q_{45cond} \quad (5-55)$$

$$\text{Κόμβος 5: } q_{5solabs} + q_{45cond} = q_{59rad} + q_{59conv} \quad (5-56)$$

$$\text{Κόμβος 7: } q_{7solabs} + q_{37rad} + q_{37conv} = q_{78cond} + q_{74rad} \quad (5-57)$$

$$\text{Κόμβος 8: } q_{78cond} = q_{89rad} + q_{89conv} \quad (5-58)$$

Οι θερμικές απώλειες από τον απορροφητή υπολογίζονται από τη διαφορά της ακτινοβολίας που απορροφάται από τον απορροφητή ( $q_{3solabs}$ ) και της θερμότητας που μεταφέρεται στο θερμικό μέσο ( $q_{21conv}$ ) ή εναλλακτικά από τη μεταφορά θερμότητας του απορροφητή προς το γυάλινο περίβλημα και το δευτερεύοντα ανακλαστήρα ( $q_3$ ).

$$q_{loss} = q_{3solabs} - q_{21conv} = q_{3rad} + q_{3conv} \quad (5-59)$$

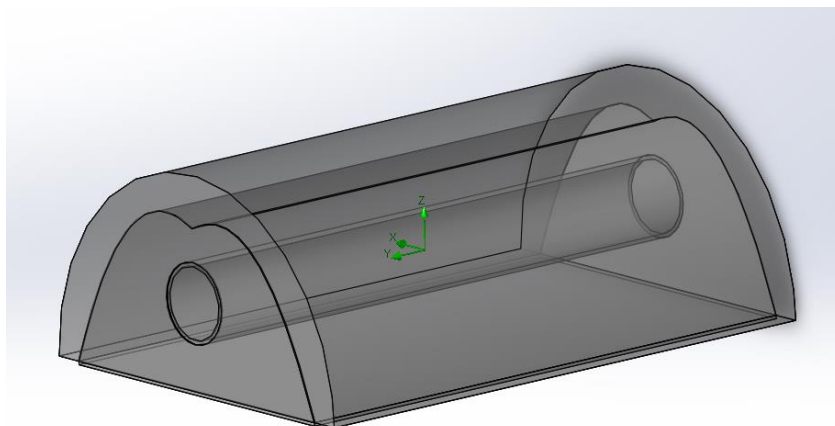
Οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας αναλύονται στην αρχή του κεφαλαίου.

Για τη μοντελοποίηση του δέκτη θεωρούνται οι εξής παραδοχές.

- ο Μοντελοποίηση σε κατάσταση ισορροπίας.
- ο Ομοιόμορφη κατανομή της απορροφηθείσας ηλιακής ακτινοβολίας ως πηγής θερμότητας στην επιφάνεια/ όγκο του απορροφητή, του δευτερεύοντος ανακλαστήρα και του γυάλινου καλύμματος.
- ο Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στον απορροφητή, στο δευτερεύοντα ανακλαστήρα και στο γυάλινο περίβλημα.
- ο Σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος με ομοιόμορφη κατανομή στην εξωτερική επιφάνεια του δέκτη.
- ο Αμελητέα διείσδυση φρέσκου αέρα στην κοιλότητα.

### 5.5.3 Μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Επιπλέον του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας (HTM), για τη θερμική ανάλυση του δέκτη αναπτύχθηκε μοντέλο σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Η όψη του μοναδιαίου μήκους δέκτη φαίνεται στο Σχήμα 5-21.



Σχήμα 5-21: 3D όψη του δέκτη CTR από το CFD μοντέλο

Για τη μοντελοποίηση του δέκτη θεωρούνται οι εξής παραδοχές.

- Τρισδιάστατη μοντελοποίηση σε κατάσταση ισορροπίας
- Οριακή συνθήκη του θερμικού λαδιού στην είσοδο του δέκτη με προσδιορισμό θερμοκρασίας, παροχής μάζας και προφίλ ροής
- Οριακή συνθήκη του θερμικού λαδιού στην έξοδο του δέκτη με προσδιορισμό πίεσης εξόδου.
- Οριακή συνθήκη εξωτερικής επιφάνειας του γυάλινου καλύμματος και του καλύμματος της μόνωσης με προσδιορισμό θερμοκρασίας και συναγωγής του αέρα περιβάλλοντος
- Εισαγωγή σταθερής πηγής θερμότητας στον όγκο του γυάλινου περιβλήματος για την απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία
- Εισαγωγή σταθερής πηγής θερμότητας στον όγκο του απορροφητή για την αντίστοιχη απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία
- Εισαγωγή σταθερής πηγής θερμότητας στην επιφάνεια του απορροφητή για την αντίστοιχη απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία
- Διάχυτη εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από τις επιφάνειες του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος (γκρι σώμα)
- Μοντελοποίηση αέρα ως ιδανικό αέριο με βαρύτητα
- Πλήρης απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας από το γυαλί

#### 5.5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλων με δεδομένα βιβλιογραφίας

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων διενεργήθηκε, υπό τις ίδιες συνθήκες, παραμετρική ανάλυση συναρτήσεως της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου, από 100°C σε 400°C με βήμα 100°C.



Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων έγινε σύγκριση με επικυρωμένο μοντέλο της βιβλιογραφίας [100]. Η διάμετρος σε αυτή την περίπτωση για την επικύρωση του μοντέλου είναι 0.14m και για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων οι ανακλαστήρες είναι στραμμένοι προς άλλη κατεύθυνση. Έτσι, η απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία από το γυάλινο κάλυμμα, τον απορροφητή και το δευτερεύοντα ανακλαστήρα για τον αρχικό έλεγχο των υπολογιστικών μοντέλων είναι μηδενική. Οι θερμικές απώλειες συναρτήσεως της εξωτερικής διαμέτρου του απορροφητή ( $D_{abs\_o}$ ), του συντελεστή εκπομπής του απορροφητή ( $\epsilon_{abs}$ ) και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του απορροφητή ( $T_{abs\_o}$ ) και του αέρα περιβάλλοντος ( $T_{amb}$ ) δίνονται από την εξίσωση:

$$q_{loss} = \frac{d_{abs\_o}}{0.219} \cdot \left( \left( 1.945 - 0.2428 \cdot \frac{\epsilon_{abs}}{0.08} \right) \cdot \Delta T + \left( 0.001226 + 0.004568 \cdot \frac{\epsilon_{abs}}{0.08} \right) \Delta T^2 \right) \quad (5-60)$$

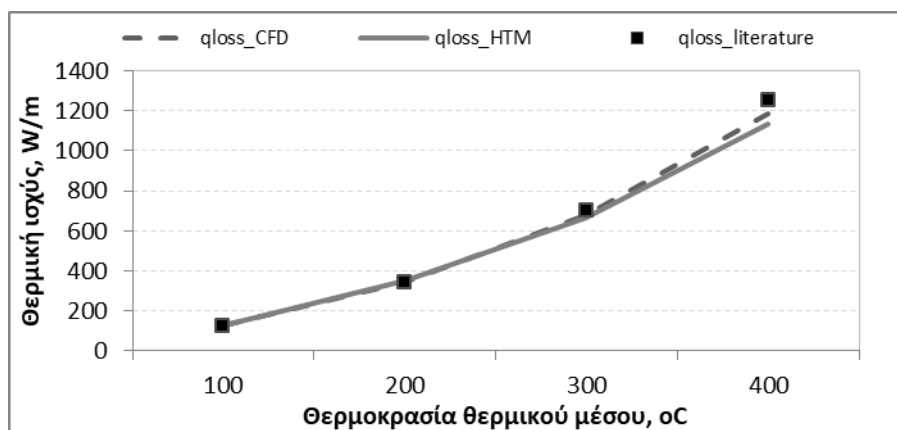
Ο Πίνακας 5-8 συνοψίζει τα αποτελέσματα των μοντέλων HTM και CFD μαζί με τις τιμές της βιβλιογραφίας. Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων έγινε σύγκριση με τιμές της βιβλιογραφίας από αντίστοιχες μελέτες δεκτών CTR [101,102].

Πίνακας 5-8: Αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων HTM και CFD και τιμές βιβλιογραφίας για το δέκτη CTR

$T_{f\_in}$	°C	100	200	300	400
$q_{loss\_HTM}$	W/m	127	349.3	665.6	1133.5
$q_{loss\_CFD}$	W/m	123.6	345.0	675.5	1187.0
$q_{loss\_literature}$	W/m	118.9	340.9	697.6	1253.5

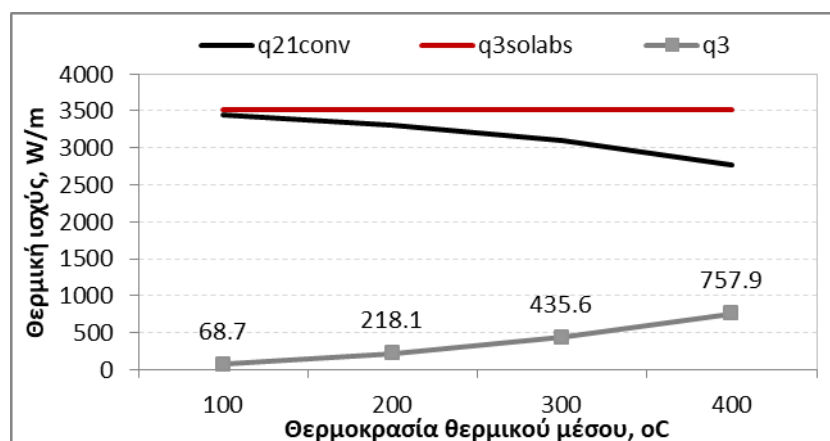
Τα αποτελέσματα των δύο υπολογιστικών μοντέλων HTM και CFD για το δέκτη CTR παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ τους αλλά και με τιμές της βιβλιογραφίας. Η απόκλιση των δυο μοντέλων μεταξύ CFD και HTM κυμαίνεται από -2.7% έως 4.5%. Αντίστοιχα η απόκλιση του μοντέλου CFD από τις τιμές της βιβλιογραφίας κυμαίνεται από -3.9% έως 5.3%.

Η ικανοποιητική σύγκλιση των υπολογιστικών μοντέλων μεταξύ τους και σε σχέση με τιμές βιβλιογραφίας απεικονίζεται στο Σχήμα 5-22.



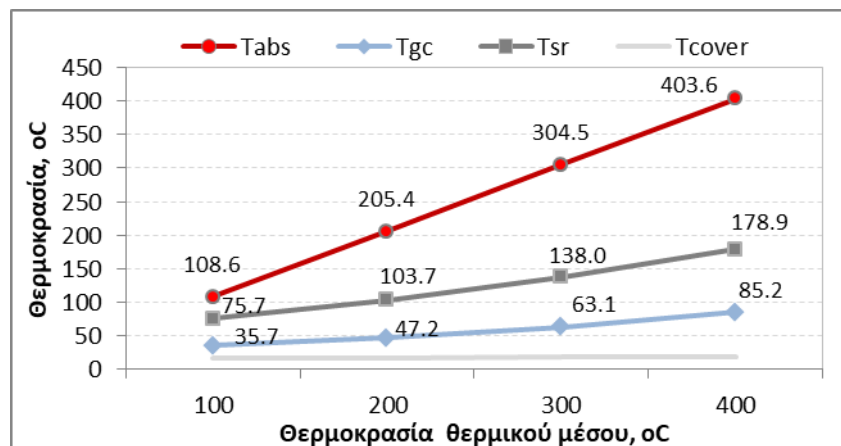
Σχήμα 5-22: Αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων HTM και CFD και τιμές βιβλιογραφίας για το δέκτη CTR

Δεδομένης της σύγκρισης των υπολογιστικών μοντέλων, για λόγους ομοιομορφίας των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου CFD για απορροφητή διαμέτρου 0.07 m, με την ίδια παραμετροποίηση των δεκτών STR και VTR. Οι θερμορροές του δέκτη απεικονίζονται στο Σχήμα 5-23.



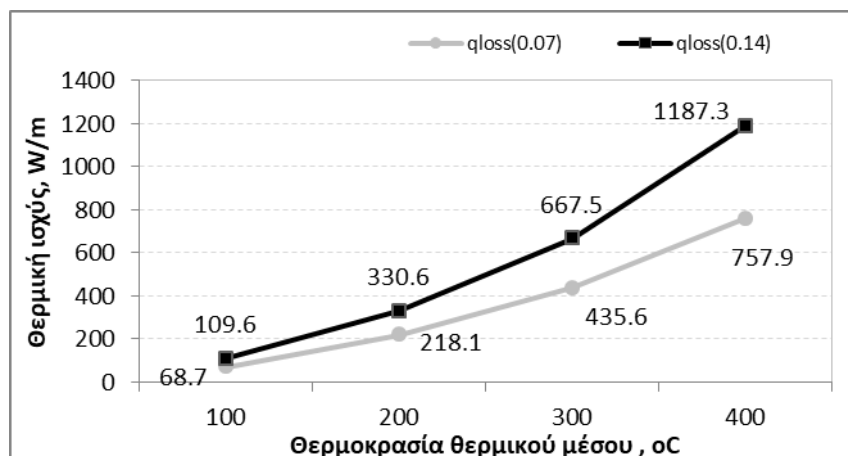
Σχήμα 5-23: Θερμορροές συναρτήσει της θερμοκρασίας του θερμικού μέσου του δέκτη CTR.

Η μέση θερμοκρασία του απορροφητή, του θερμικού μέσου, του δευτερεύοντος ανακλαστήρα και του γυάλινου καλύμματος απεικονίζονται στο Σχήμα 5-24. Παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία του καλύμματος της μόνωσης παραμένει σχεδόν σταθερή σε όλες τις περιπτώσεις. Η μέση θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος κυμαίνεται από 35.7°C έως 85.2°C. Αντίστοιχα, η μέση θερμοκρασία του ανακλαστήρα κυμαίνεται μεταξύ 75.7°C και 178.9°C.



Σχήμα 5-24: Μέση θερμοκρασία απορροφητή, δευτερεύοντος ανακλαστήρα, θερμικού μέσου και γυάλινου καλύμματος συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου για το δέκτη CTR.

Για το δέκτη CTR εξετάστηκε συγκριτικά η επίδραση της διαμέτρου του απορροφητή στις θερμικές απώλειες. Υπό την ίδια παραμετροποίηση, τα αποτελέσματα από το CFD μοντέλο απεικονίζονται στο Σχήμα 5-25 για διάμετρο απορροφητή 0.07 m και 0.14 m.



Σχήμα 5-25: Θερμικές απώλειες του δέκτη CTR για διάμετρο 0.07 m και 0.14 m απορροφητή.

Η μείωση της διαμέτρου από 0.14 m σε 0.07 m οδηγεί σε μέση μείωση των θερμικών απωλειών κατά 36% για το εξεταζόμενο εύρος. Για θερμοκρασία 200°C, οι θερμικές απώλειες του απορροφητή 0.14 m είναι 330.6 W/m ενώ για τον απορροφητή 0.07 m είναι 218.1 W/m. Αντίστοιχα, ο συντελεστής απωλειών σε σχέση με την απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία από τον απορροφητή (3521 W/m) είναι 9.4% και 6.2%. Ο συντελεστής απωλειών και στις δύο περιπτώσεις διατηρείται σε χαμηλό επίπεδο κάτω του 10%. Η μείωση της διαμέτρου του απορροφητή επιφέρει μείωση των θερμικών απωλειών ωστόσο αναμένεται να επιδρά αρνητικά στις οπτικές απώλειες του ηλιακού συλλέκτη.

### 5.6 Συγκριτική αξιολόγηση δεκτών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα της θερμικής απόδοσης των τριών δεκτών συναρτήσει της θερμοκρασίας του μέσου. Η διάμετρος του απορροφητή και οι ιδιότητες των υλικών και επιφανειών παραμένουν σταθερές και στις τρεις περιπτώσεις, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συγκριτικά αποτελέσματα.

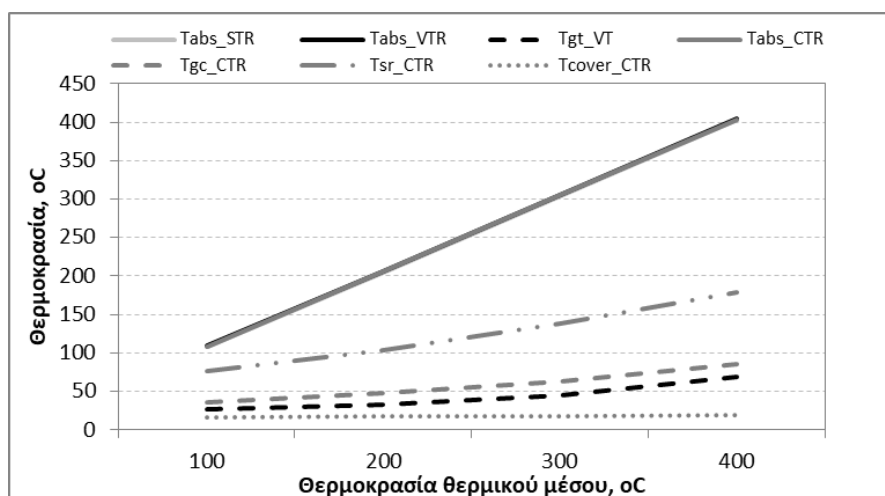
Όσον αφορά τη θερμοκρασία του απορροφητή παρατηρείται ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του απορροφητή και του θερμικού μέσου είναι μικρότερη των 10K σε όλες τις περιπτώσεις. Στην περίπτωση του δέκτη STR ο απορροφητής αναπτύσσει τη χαμηλότερη θερμοκρασία, ενώ η υψηλότερη παρατηρείται στον απορροφητή VTR.

Το γυάλινο κάλυμμα αναπτύσσει υψηλότερη θερμοκρασία από το γυάλινο περίβλημα, καθώς στο δέκτη CTR μεταξύ απορροφητή και γυαλιού μεταφέρεται θερμότητα και μέσω συναγωγής.

Πίνακας 5-9: Μέσες τιμές της θερμοκρασίας των υλικών των δεκτών STR, VTR και CTR.

	STR		VTR		CTR		
$T_{f\_in}$	$T_{abs}$	$T_{abs}$	$T_{gt}$	$T_{abs}$	$T_{gc}$	$T_{sref}$	$T_{cover}$
100	107.8	109.0	27.2	108.6	35.7	75.7	16.4
200	204.5	205.9	32.4	205.4	47.2	103.7	17.1
300	303.4	305.0	44.8	304.5	63.1	138.0	17.9
400	402.4	404.2	69.3	403.6	85.2	178.9	18.9

Το Σχήμα 5-26 απεικονίζει συγκριτικά τα αποτελέσματα για τους τρεις δέκτες. Συνολικά, η χαμηλότερη θερμοκρασία παρατηρείται στο κάλυμμα της μόνωσης. Ακολουθούν με υψηλότερη θερμοκρασία το γυάλινο περίβλημα και κάλυμμα, ο δευτερεύον ανακλαστήρας και τέλος οι απορροφητές των δεκτών STR, CTR και VTR.



Σχήμα 5-26: Μέση θερμοκρασία των υλικών για τους δέκτες STR, VTR και CTR.

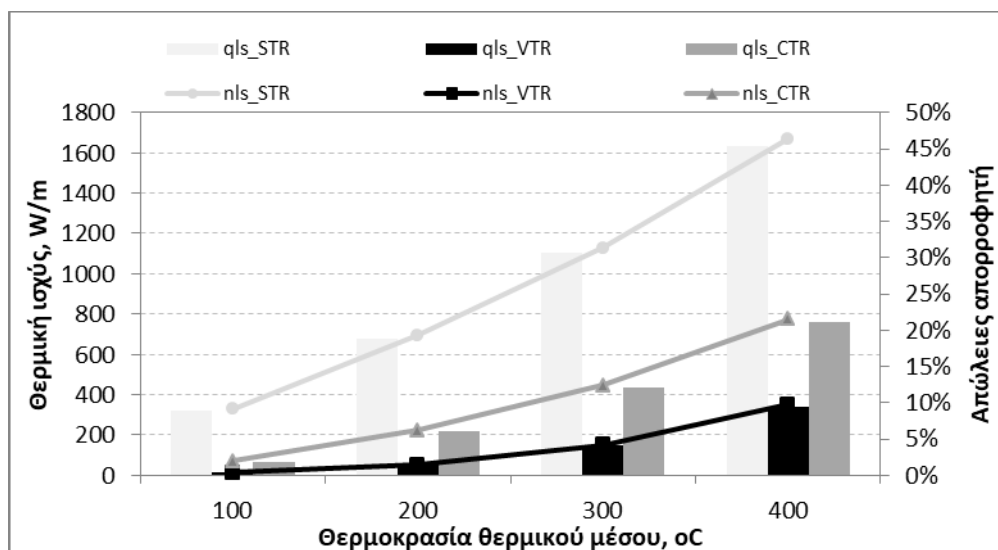
Όσον αφορά τις θερμικές απώλειες, τις χαμηλότερες απώλειες παρουσιάζει ο δέκτης VTR και τις υψηλότερες ο δέκτης STR. Για θερμοκρασία θερμικού μέσου στους 200°C, οι θερμικές απώλειες των τριών δεκτών είναι 51.4, 218.1 και 678.3 W/m (VTR, STR και STR) με αντίστοιχους συντελεστές απωλειών 1.5%, 6.2% και 19.3%.

Παρατηρείται ότι ο δέκτης VTR διατηρεί τις θερμικές απώλειες σε όλο το εύρος της θερμοκρασίας του μέσου κάτω από το 10%. Ο δέκτης CTR παρόλο που παρουσιάζει υπερδιπλάσιες θερμικές απώλειες σε σχέση με το δέκτη VTR. Αντίστοιχα, ο συντελεστής απωλειών του CTR κυμαίνεται στο εύρος 2 έως 21.5%. Ο δέκτης STR παρουσιάζει τις υψηλότερες απώλειες που αγγίζουν μέχρι το 46.4% στους 400°C.

Πίνακας 5-10: Συγκεντρωτικά στοιχεία θερμορροών των δεκτών STR, VTR και CTR.

T <sub>f</sub>	STR		VTR		CTR	
	q <sub>loss</sub>	η <sub>loss</sub>	q <sub>loss</sub>	η <sub>loss</sub>	q <sub>loss</sub>	η <sub>loss</sub>
100	320.0	9.1%	12.8	0.4%	68.7	2.0%
200	678.3	19.3%	51.4	1.5%	218.1	6.2%
300	1101.9	31.3%	145.7	4.1%	435.6	12.4%
400	1632.5	46.4%	342.0	9.7%	757.9	21.5%

Στο Σχήμα 5-27 απεικονίζονται συγκριτικά οι θερμικές απώλειες για τους τρεις δέκτες.



Σχήμα 5-27: Θερμικές απώλειες των δεκτών STR, VTR και CTR συναρτήσει της θερμοκρασίας του θερμικού μέσου.

## 5.7 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου διερευνήθηκε η θερμική συμπεριφορά τριών γραμμικών δεκτών συγκέντρωσης ακτινοβολίας. Για κάθε δέκτη αναπτύχθηκαν δύο υπολογιστικά μοντέλα (HTM και CFD).

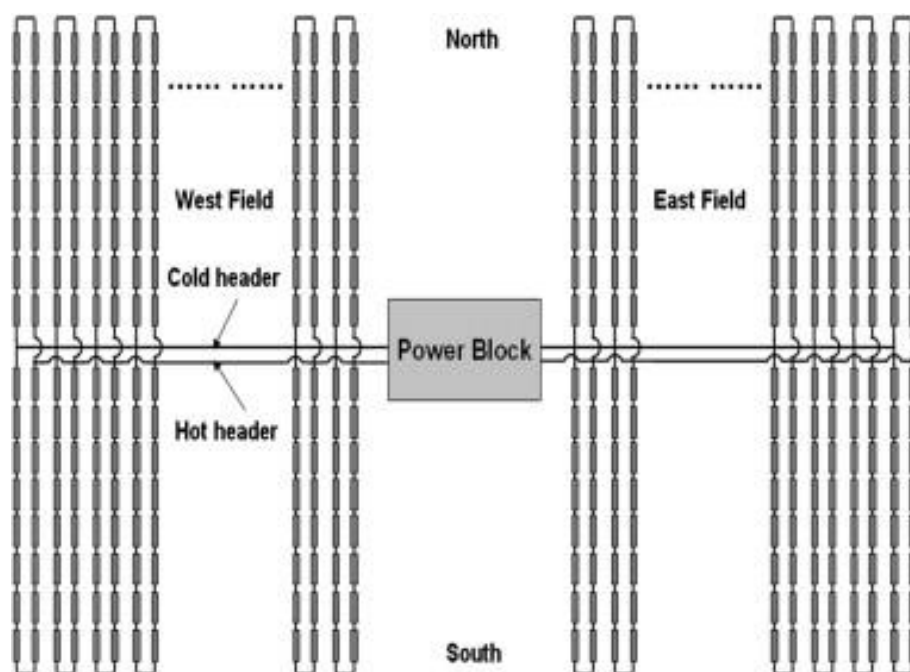
- ο Για το δέκτη STR τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίνονται μεταξύ τους. Η σύγκλιση των μοντέλων είναι ικανοποιητική. Οι θερμικές απώλειες υπολογίστηκαν 678.3, 1101.9 και 1632.5 W/m για θερμοκρασία μέσου 200, 300 και 400°C αντίστοιχα. Η απόκλιση των μοντέλων κυμαίνεται από -1.0% έως -0.2%.
- ο Για το δέκτη VTR τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με τιμές βιβλιογραφίας. Η σύγκλιση των μοντέλων είναι επίσης ικανοποιητική. Οι θερμικές απώλειες υπολογίστηκαν 51.4, 145.7 και 342.0 W/m για θερμοκρασία μέσου 200, 300 και 400°C αντίστοιχα. Η απόκλιση των δυο μοντέλων μεταξύ CFD και HTM κυμαίνεται από -0.7% έως 0.5%. Αντίστοιχα, η απόκλιση του μοντέλου CFD με τις τιμές της βιβλιογραφίας κυμαίνεται από 1.4% έως 15.8%.
- ο Για το δέκτη VTR διερευνήθηκε η επίδραση κρίσιμων παραμέτρων στην απόδοση του δέκτη, όπως η διάμετρος του απορροφητή, η ταχύτητα του θερμικού μέσου και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- ο Για το δέκτη CTR τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με τιμές βιβλιογραφίας. Η σύγκλιση των μοντέλων είναι επίσης ικανοποιητική. Η απόκλιση των δυο μοντέλων μεταξύ CFD και HTM κυμαίνεται από -2.7% έως 4.5%. Αντίστοιχα η απόκλιση του μοντέλου CFD από τις τιμές της βιβλιογραφίας κυμαίνεται από -3.9% έως 5.3%.
- ο Για το δέκτη CTR διερευνήθηκε η επίδραση της διαμέτρου του απορροφητή στις θερμικές απώλειες. Η μείωση της διαμέτρου από 0.14 m σε 0.7 m οδηγεί σε μέση μείωση των θερμικών απωλειών κατά 36% για το εξεταζόμενο εύρος. Για θερμοκρασία 200°C, οι θερμικές απώλειες του απορροφητή 0.14 m είναι 330.6 W/m ενώ για τον απορροφητή 0.7 m είναι 218.1 W/m.
- ο Με κοινή παραμετροποίηση διερευνήθηκε συγκριτικά η απόδοση των δεκτών. Ο δέκτης VTR παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση λόγω της ύπαρξης κενού. Για θερμοκρασία μέσου 200°C οι θερμικές απώλειες είναι 51.4 W/m ενώ στο δέκτη CTR ανέρχονται σε 218.1 W/m. Ο συντελεστής απωλειών του απορροφητή είναι 1.5% για το δέκτη VTR και 6.2% για το CTR.

## 6 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΚΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Ο απορροφητής με γυάλινο περίβλημα και κενό αποτελεί ίσως τον πιο διαδεδομένο δέκτη για συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες κενού. Πρόκειται για δέκτη μονής διαδρομής (Single Pass – SP), στον οποίο το θερμικό μέσο εισέρχεται από τη μία πλευρά και εξέρχεται από τη δεύτερη πλευρά.

Όσον αφορά τη συνδεσμολογία των ηλιακών συλλεκτών, ανάλογα με την τοπολογία της εγκατάστασης και όπου αυτό είναι εφικτό, η επιστροφή του θερμικού μέσου επιδιώκεται να γίνεται από παράλληλο κλάδο ηλιακών συλλεκτών. Με αυτό τον τρόπο, μειώνεται το μήκος του εξωτερικού υδραυλικού δικτύου του ηλιακού κυκλώματος (Σχήμα 6-1).



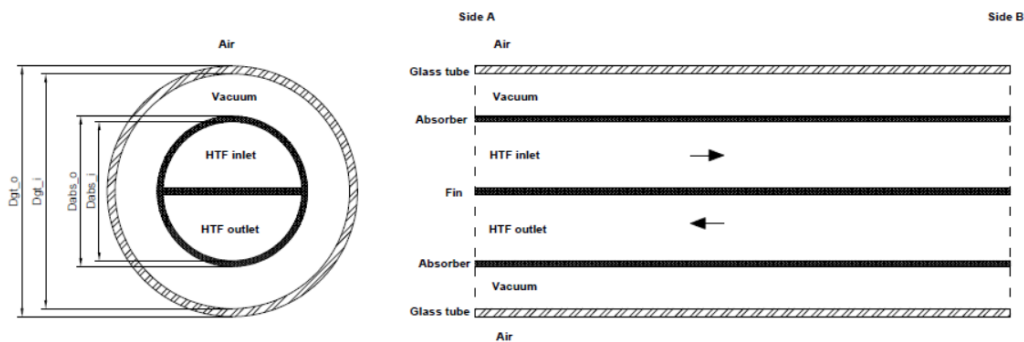
Σχήμα 6-1: Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας ηλιακών συλλεκτών σε πάρκο ηλεκτροπαραγωγής

Η συγκεκριμένη συνδεσμολογία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε μεγάλα συστήματα ηλιακών συλλεκτών, ωστόσο συναντά δυσκολίες εφαρμογής σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως τα μικρά συστήματα χωρίς παράλληλο κλάδο ή με παράλληλους κλάδους μονού αριθμού.

Ο δέκτης διπλής διαδρομής (Double Pass – DP) που προτείνεται στο κεφάλαιο αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντική βελτίωση στη συνδεσμολογία. Ο δέκτης DP προκύπτει από τον δέκτη SP, ο οποίος τροποποιείται κατάλληλα με την προσθήκη ενός οριζόντιου μεταλλικού χωρίσματος εσωτερικά του απορροφητή. Έτσι, δημιουργούνται δύο

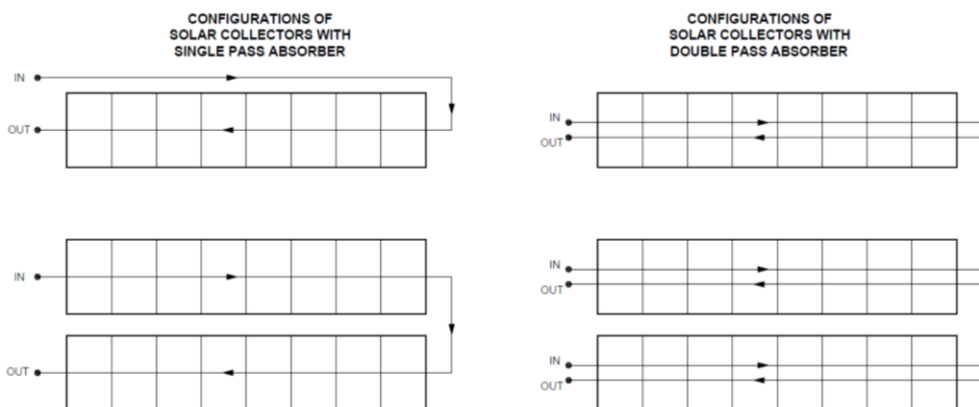
κανάλια. Το θερμικό μέσο εισέρχεται από την πλευρά A από το επάνω κανάλι και κατευθύνεται προς την πλευρά B (Σχήμα 6-2). Στην πλευρά B το θερμικό μέσο αλλάζει κατεύθυνση, εισέρχεται στο κάτω κανάλι και τελικά εξάγεται από το κάτω κανάλι της πλευράς A.

Το θερμικό μέσο, τόσο κατά τη πρώτη όσο και κατά τη δεύτερη διαδρομή του, απορροφά θερμότητα από τον απορροφητή. Λαμβάνοντας υπόψη το προφίλ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο δέκτη καθώς και την ενεργειακή αποδοτικότητα του συλλέκτη, η πρώτη διαδρομή (διαδρομή εισόδου) γίνεται από το επάνω κανάλι και η δεύτερη διαδρομή (διαδρομή εξόδου) από το κάτω κανάλι. Αυτό συμβαίνει γιατί το κάτω κανάλι είναι αυτό που λαμβάνει την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο το θερμικό μέσο στην έξοδό του από το δέκτη έχει την υψηλότερη θερμοκρασία.



Σχήμα 6-2: Σχηματικό διάγραμμα δέκτη διπλής διαδρομής

Σε επίπεδο ηλιακού κυκλώματος, ο δέκτης DP μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση του μήκους του εξωτερικού υδραυλικού δικτύου. Στο Σχήμα 6-3 απεικονίζονται σκαριφήματα συνδεσμολογίας ηλιακών κυκλωμάτων για την περίπτωση του ηλιακού κυκλώματος με δέκτη μονής διαδρομής (αριστερά) και με δέκτη διπλής διαδρομής (δεξιά).



Σχήμα 6-3: Συνδεσμολογίες ηλιακών συλλεκτών για δέκτη SP (αριστερά) και δέκτη DP (δεξιά)



Τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου δέκτη διπλής διαδρομής (DP) είναι σημαντικά και σε πολλά επίπεδα:

- Μειωμένο αρχικό κόστος του ηλιακού πεδίου που απορρέει από την εξοικονόμηση υλικών (σωλήνωση, θερμικό λάδι, βάση στήριξης, μόνωση, κάλυμμα μόνωσης, δοχείο διαστολής)
- Μειωμένο αρχικό κόστος του ηλιακού πεδίου που απορρέει από την εξοικονόμηση υδραυλικών και κατασκευαστικών εργασιών
- Μειωμένες θερμικές απώλειες από το υδραυλικό δίκτυο
- Μειωμένη θερμική αδράνεια του ηλιακού κυκλώματος
- Λιγότερες ενώσεις, άρα και λιγότερες πιθανότητες διαρροών του θερμικού λαδιού
- Συνολική αύξηση των ενεργειακών απολαβών και αύξηση της απόδοσης του ηλιακού συστήματος

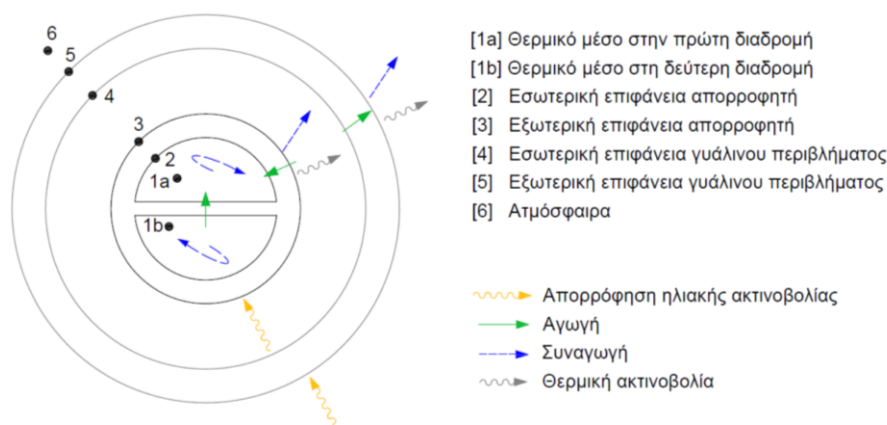
Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του δέκτη διπλής διαδρομής. Για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, ο δέκτης διπλής DP διαδρομής συγκρίνεται με αντίστοιχο δέκτη όμοιων χαρακτηριστικών μονής διαδρομής SP. Στη συνέχεια, ο δέκτης DP διερευνάται παραμετρικά, συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας και της παροχής μάζας.

Στη συνέχεια, απομονώνεται ένα μοναδιαίο μήκος του δέκτη DP για την περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς του, με έμφαση στη θερμοκρασιακή αύξηση του ρευστού που υπόκειται ανάλογα με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του θερμού ρευστού (κάτω κανάλι) και του ψυχρού ρευστού (επάνω κανάλι). Τέλος, μελετάται η επίδραση της αύξησης της θερμικής αντίστασης του χωρίσματος και παρουσιάζονται χρήσιμα συμπεράσματα.

## 6.2 Αρχή λειτουργίας

Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας στο δέκτη διπλής διαδρομής DP (Σχήμα 6-4) είναι ανάλογος με εκείνον ενός δέκτη μονής διαδρομής SP. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο δέκτη, ένα μικρό μέρος της απορροφάται από το γυάλινο περίβλημα του απορροφητή ( $q_{5solabs}$ ), ενώ το μεγαλύτερο μέρος της διαπερνά το γυάλινο περίβλημα και προσπίπτει στον σωλήνα (απορροφητής). Στην εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή, όπου υπάρχει επιλεκτική επίστρωση, απορροφάται η ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέπεται σε θερμότητα ( $q_{3solabs}$ ). Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας αυτής μεταφέρεται μέσω αγωγής ( $q_{32cond}$ ) στον σωλήνα.

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή στον απορροφητή γίνεται από την εξωτερική περιφέρεια του απορροφητή προς την εσωτερική και επιπλέον, προς το μεταλλικό χώρισμα. Έπειτα, μέσω συναγωγής από την εσωτερική επιφάνεια του απορροφητή και το μεταλλικό χώρισμα μεταφέρεται θερμότητα προς το θερμικό μέσο στο επάνω κανάλι ( $q_{21aconv}$ ) και στο κάτω κανάλι ( $q_{21bconv}$ ). Η θερμότητα που μεταφέρεται στο θερμικό μέσο είναι η ωφέλιμη θερμότητα που παράγεται από το δέκτη. Επιπλέον, εσωτερικά του απορροφητή υπάρχει μεταφορά θερμότητας από το θερμό μέσο που κινείται στο κάτω κανάλι προς το ψυχρό μέσο που κινείται στο επάνω κανάλι.



Σχήμα 6-4: Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας του δέκτη διπλής διαδρομής

Το υπόλοιπο μέρος της θερμότητας, μεταδίδεται στο γυάλινο περίβλημα μέσω ακτινοβολίας ( $q_{34rad}$ ) και μέσω συναγωγής ( $q_{34conv}$ ). Η μεταφορά μέσω συναγωγής είναι σημαντικά περιορισμένη, λόγω της ύπαρξης του κενού ανάμεσα στον απορροφητή και το γυάλινο περίβλημα. Το άθροισμα των δύο αποτελεί τις θερμικές απώλειες του δέκτη ( $q_{loss}$ ). Στο γυάλινο περίβλημα, η θερμότητα που μεταφέρεται από τον απορροφητή μεταφέρεται με αγωγή μέσω του περιβλήματος ( $q_{45cond}$ ) και μαζί με την απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία ( $q_{5solabs}$ ) μεταφέρεται στο περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας ( $q_{56rad}$ ) και συναγωγής ( $q_{56conv}$ ).

Για τους κόμβους 2, 3, 4 και 5 που αντιστοιχούν στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του δέκτη, ισχύουν οι εξισώσεις:

$$\text{Κόμβος 2: } q_{32cond} = q_{21conv} = q_{21aconv} + q_{21bconv} \quad (6-1)$$

$$\text{Κόμβος 3: } q_{3solabs} = q_{32cond} + q_{34rad} + q_{34conv} \quad (6-2)$$

$$\text{Κόμβος 4: } q_{34rad} + q_{34conv} = q_{45cond} \quad (6-3)$$

$$\text{Κόμβος 5: } q_{45cond} + q_{5solabs} = q_{56rad} + q_{56conv} \quad (6-4)$$

Οι θερμικές απώλειες από τον απορροφητή υπολογίζονται από τη διαφορά της ακτινοβολίας που απορροφάται από τον απορροφητή ( $q_{3solabs}$ ) και της θερμότητας που μεταφέρεται στο θερμικό μέσο ( $q_{21conv}$ ) ή εναλλακτικά από τη μεταφορά θερμότητας του απορροφητή προς το γυάλινο περίβλημα ( $q_{34}$ ).

$$q_{loss} = q_{3solabs} - q_{21conv} = q_{34rad} + q_{34conv} = q_{34rad} \quad (6-5)$$

Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από το γυάλινο περίβλημα ( $q_{3solabs}$ ) δίνεται από την ηλιακή επιφάνεια που προσπίπτει στην επιφάνεια του γυάλινου περιβλήματος επί την απορροφητικότητα του υλικού.

$$q_{5solabs} = q_{DNI\_gt} \cdot \alpha_{gt} \quad (6-6)$$

Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τον απορροφητή ( $q_{3solabs}$ ) δίνεται από την ηλιακή επιφάνεια που προσπίπτει στην επιφάνεια του απορροφητή επί την απορροφητικότητα του υλικού.

$$q_{3solabs} = q_{DNI\_abs} \cdot \alpha_{abs} \quad (6-7)$$

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας που αναλύονται στο κεφάλαιο 5.

### 6.3 Μοντελοποίηση

Ο δέκτης μοντελοποιήθηκε σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής [103] και η επίλυση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων.

Το θερμικό μέσο στην είσοδο του δέκτη προσδιορίζεται από τη θερμοκρασία, την παροχή μάζας και το προφίλ ροής. Η ροή στην είσοδο θεωρείται πλήρως ανεπτυγμένη. Το θερμικό μέσο στην έξοδο του δέκτη προσδιορίζεται από την πίεση εξόδου. Η μεταφορά θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου περιβλήματος προς τον αέρα περιβάλλοντος γίνεται με σταθερό συντελεστή συναγωγής και υπό σταθερή θερμοκρασία αέρα. Η εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας από τις επιφάνειες του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος είναι διάχυτη προς όλες τις κατευθύνσεις. Το γυάλινο περίβλημα είναι διαπερατό μόνο στην ηλιακή ακτινοβολία. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον απορροφητή και το γυάλινο περίβλημα προσδιορίζονται ως πηγή θερμότητας στον όγκο του υλικού με ομοιόμορφη παραγωγή.

Ο υπολογιστικός χώρος είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που περικλείει το δέκτη. Τα κελιά του πλέγματος είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα με επιφάνειες κάθετες στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Τα κελιά που βρίσκονται κοντά σε επιφάνειες αποκόπτονται σχηματίζοντας πολυέδρα. Το πλέγμα επιλέχθηκε να είναι πιο πυκνό στην καμπυλότητα των επιφανειών και στην τομή των υλικών του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος.

Ο δέκτης αποτελείται από απορροφητή εξωτερικής διαμέτρου 0.070m που περικλείεται από γυάλινο περίβλημα 0.125 m με κενό ενδιάμεσα. Το μεταλλικό χάρισμα είναι πάχους 0.004 m. Η απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία από το γυάλινο περίβλημα και τον απορροφητή είναι αντίστοιχα 4,523 W/m και 176 W/m. Οι τιμές έχουν προκύψει από την οπτική ανάλυση του ηλιακού συλλέκτη Fresnel όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 4. Το μήκος του απορροφητή είναι 12 m.

Ο Πίνακας 6-1 συνοψίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη και τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση. Στα εξαρτώμενα μεγέθη από τη θερμοκρασία οι τιμές με αστερίσκο αναφέρονται σε ενδεικτική θερμοκρασία 250°C.

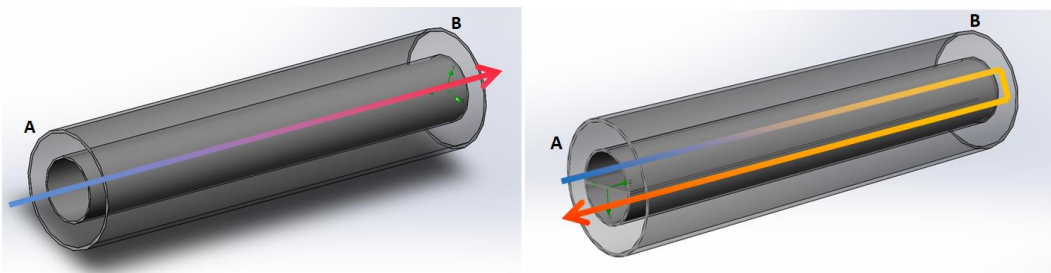
Πίνακας 6-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών του δέκτη VTR

Μέρος	Περιγραφή	Σύμβολο	Μονάδα	Τιμή
Περιβάλλον	Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	$T_{air}$	°C	22
	Θερμοκρασία ουρανού	$T_{sky}$	°C	14

	Συναγωγή αέρα	$h_{air}$	W/(m <sup>2</sup> K)	15
	Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από απορροφητή	$q_{3solabs}$	W/m	4523
	Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από γυάλινο περίβλημα	$q_{5solabs}$	W/m	176
Θερμικό μέσο Therminol VP1	Πυκνότητα	$d_f$	Kg/m <sup>3</sup>	868.1 *
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_f$	W/(m.K)	0.11 *
	Ειδική θερμοχωρητικότητα	$C_{p_f}$	kJ/(kg.K)	2.18 *
	Κινηματική συνεκτικότητα	$\nu_f$	cm <sup>2</sup> /s	0.33 *
Απορροφητής 316L	Εξωτερική διάμετρος	$D_{abs_o}$	m	0.070
	Εσωτερική διάμετρος	$D_{abs_i}$	m	0.066
	Πάχος απορροφητή	$TH_{abs}$	`m	0.002
	Συντελεστής εκπομπής	$\epsilon_{abs}$	-	0.105 *
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_{abs}$	W/(m.K)	18.45 *
	Απορροφητικότητα	$\alpha_{abs}$	-	0.96
Γυάλινο περίβλημα	Εξωτερική διάμετρος	$D_{gt_o}$	m	0.125
	Εσωτερική διάμετρος	$D_{gt_i}$	m	0.119
	Πάχος	$TH_{gt}$	m	0.003
	Διαπερατότητα	$T_{gt}$	-	0.97
	Συντελεστής εκπομπής	$\epsilon_{gt}$	-	0.86
	Θερμική αγωγιμότητα	$k_{gt}$	W/(m.K)	1.14
	Απορροφητικότητα	$\alpha_{gt}$	-	0.02

Η εξίσωση που προσδιορίζει το συντελεστή εκπομπής του απορροφητή βασίζεται σε τιμή από το φύλλο κατασκευαστή για τους 400°C και προσεγγιστική εξίσωση συναρτήσεως της θερμοκρασίας.

$$\epsilon_{abs} = 1.666 \cdot 10^{-4} \cdot T_f + 1.8375 \cdot 10^{-2} \quad (6-8)$$



Σχήμα 6-5: Σχηματικό διάγραμμα απορροφητών μονής διαδρομής (αριστερά) και διπλής διαδρομής (δεξιά)

Η επικύρωση του υπολογιστικού μοντέλου για τον δέκτη διπλής διαδρομής είναι σημαντική για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά, μέχρι τη στιγμή της συγγραφής της διατριβής, δεν βρέθηκαν διαθέσιμα θεωρητικά ή πειραματικά δεδομένα στη βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο δέκτη. Έτσι, δεδομένου ότι το προτεινόμενο σχέδιο αποτελεί εξέλιξη του δέκτη SP, η επικύρωσή του δέκτη SP που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5 θεωρείται ικανοποιητική (Σχήμα 5-10) για το σκοπό του κεφαλαίου.

Σε αυτό το σημείο η διερεύνηση της πτώσης πίεσης κατά μήκος του δέκτη DP είναι σημαντική. Το χώρισμα εσωτερικά του δέκτη μειώνει την ενεργό διατομή ανά διαδρομή του θερμικού μέσου. Για την επίτευξη σταθερής θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ εισόδου και εξόδου του θερμικού μέσου στο δέκτη, η παροχή μάζας λαμβάνεται ίση με την αντίστοιχη του δέκτη SP.

Η υδραυλική διάμετρος ( $D_h$ ) λαμβάνεται από την εξίσωση:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (6-9)$$

Ο συντελεστής τριβής ( $f$ ) δίνεται από την εξίσωση Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon_{rough}}{3.7D_h} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6-10)$$

Η πτώση πίεσης ( $\Delta h$ ) προκύπτει από την εξίσωση:

$$\Delta h = f \frac{L}{D_h} \frac{u^2}{2g} \quad (6-11)$$

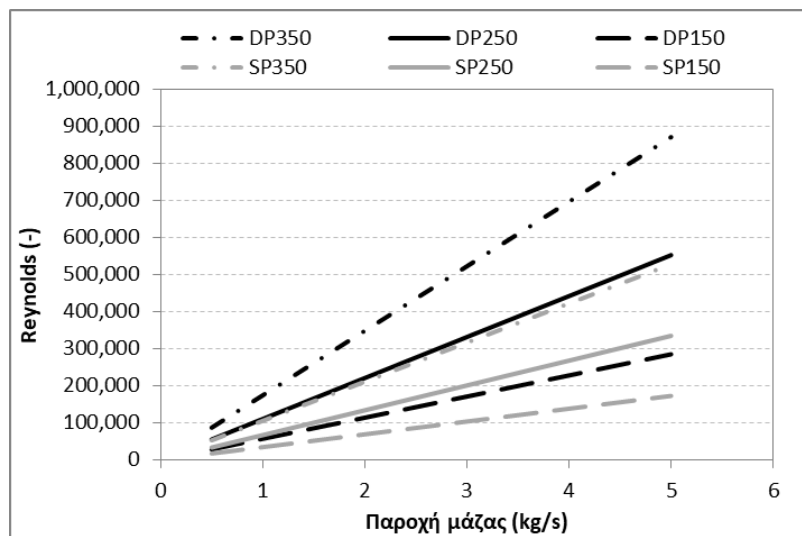
Ο Πίνακας 6-2 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα της πτώσης πίεσης για μία διαδρομή του θερμικού μέσου για 150, 250 και 350°C και παροχή μάζας 0.5, 1, 2.5 και 5kg/s.

Πίνακας 6-2: Πτώση πίεσης των δεκτών DP και SP

		Δέκτης DP			Δέκτης SP		
$T_f$	$m_f$	$u_{DP}$	$Re_{DP}$	$\Delta h_{DP}$	$u_{SP}$	$Re_{SP}$	$\Delta h_{SP}$
°C	Kg/s	m/s	-	mm H <sub>2</sub> O	m/s	-	mm H <sub>2</sub> O
150	0.5	0.4	28,505	5.5	0.2	17,276	0.5
150	1	0.8	57,010	19.1	0.3	34,552	1.7
150	2.5	2.1	142,526	104.1	0.8	86,379	8.8
150	5	4.2	285,052	387.1	1.5	172,759	31.8
250	0.5	0.4	55,251	5.8	0.17	33,485	0.5
250	1	0.9	110,502	20.9	0.3	66,971	1.8
250	2.5	2.3	276,254	117.8	0.8	167,427	9.7
250	5	4.6	552,508	448.5	1.7	334,853	35.6
350	0.5	0.5	87,078	7.1	0.20	52,775	0.6
350	1	1.0	174,156	25.8	0.4	105,549	2.2
350	2.5	2.6	435,391	148.6	1.0	263,873	11.9

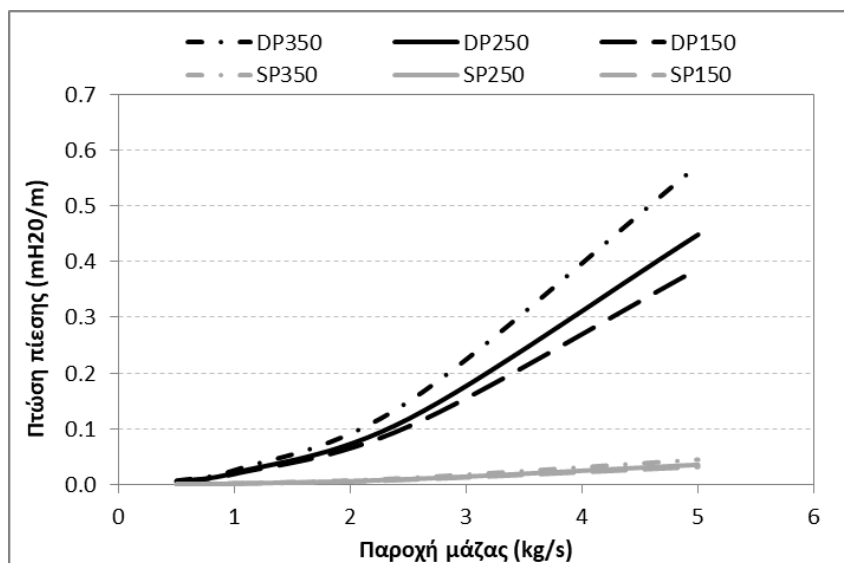
350      5      5.2      870,781      573.1      1.9      527,746      44.7

Η υδραυλική διάμετρος του δέκτη DP είναι ίση με 0.0403 m. Η ταχύτητα του θερμικού μέσου για το δέκτη DP κυμαίνεται στο εύρος 0.4 έως 5.2 m/s ενώ για το δέκτη SP 0.2 έως 1.9 m/s. Ο αριθμός Reynolds για το δέκτη DP λαμβάνει υψηλότερες τιμές κατά περίπου 1.72 σε σχέση με το δέκτη SP. Το υπό διερεύνηση εύρος παροχής μάζας οδηγεί σε τυρβώδη ροή και στους δύο δέκτες.



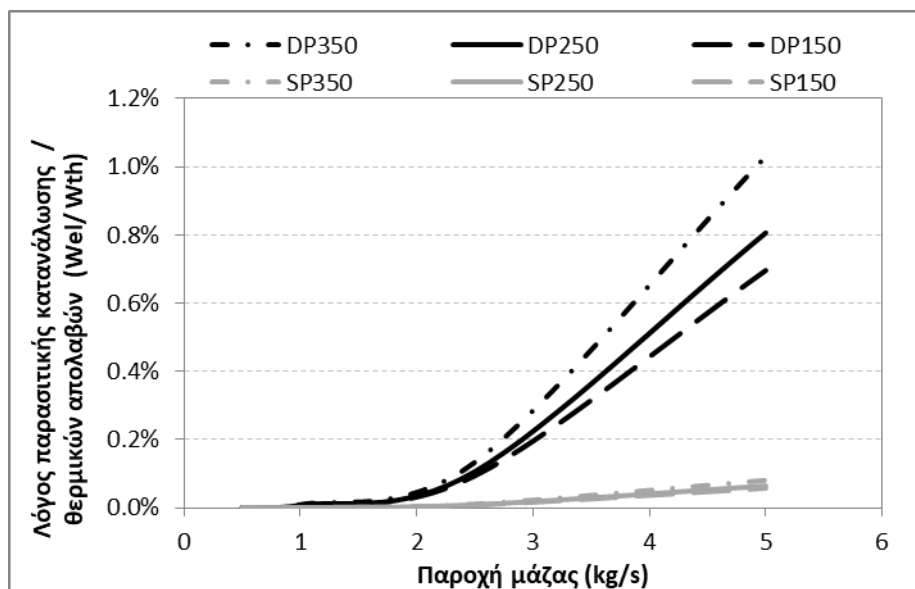
Σχήμα 6-6: Αριθμός Reynolds για τους δέκτης SP και DP

Αναλύοντας την πτώση πίεσης για το δέκτη SP, παρατηρείται ότι λαμβάνει τιμές μικρότερες των 50 mm H<sub>2</sub>O/m σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Σχετικά με το δέκτη DP, η πτώση πίεσης είναι υψηλότερη. Συγκεκριμένα, για παροχή μάζας 1 kg/s και 250°C, η πτώση πίεσης υπολογίζεται 20.9 mm H<sub>2</sub>O/m ενώ η αντίστοιχη του δέκτη SP είναι 1.8 mm H<sub>2</sub>O/m.



Σχήμα 6-7: Πτώση πίεσης για τους δέκτες SP και DP

Τέλος, διερευνάται ο λόγος της ηλεκτρικής κατανάλωσης που απαιτείται για τη κυκλοφορία του θερμικού μέσου προς τις θερμικές απολαβές του ηλιακού συλλέκτη κατά το αντίστοιχο μήκος. Θεωρούνται βαθμός απόδοσης της αντλίας ίσος με 0.62 και θερμικές απολαβές του υπό διερεύνηση ηλιακού συλλέκτη ίσες με 4.5 kW/m. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο λόγος λαμβάνει τιμές μικρότερες του 1%. Ιδιαίτερα για παροχή μικρότερη των 2.5 kg/s ο λόγος είναι σημαντικά μικρότερος του 0.1% και κρίνεται αμελητέος.



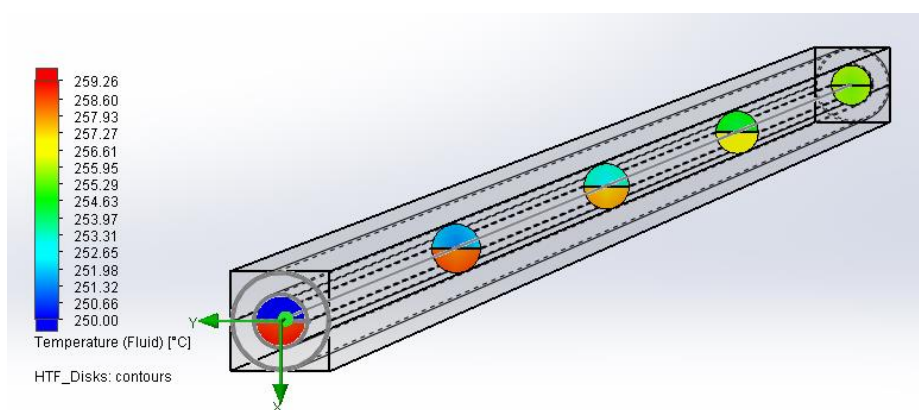
Σχήμα 6-8: Λόγος παρασιτικής κατανάλωσης προς θερμικές απολαβές του ηλιακού συλλέκτη

Συμπερασματικά, οι τιμές της πτώσης πίεσης που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση κυμαίνονται σε εύλογο εύρος για παροχή μάζας έως 5 kg/s και κρίνονται κατάλληλες για περαιτέρω διερεύνηση. Οι προτεινόμενες τιμές της βιβλιογραφίας για το δέκτη SP έως 12 kg/s θα οδηγούσαν σε σημαντικά υψηλές τιμές πτώσης πίεσης και κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος.



### 6.4 Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 6-9 απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας του δέκτη DP με θερμοκρασία εισόδου του θερμικού λαδιού 250°C. Στο δέκτη μήκους 12m τοποθετούνται 5 θεωρητικές επιφάνειες - δίσκοι, με σκοπό να εξαχθούν πληροφορίες της κατάστασης του θερμικού μέσου. Η θέση του πρώτου δίσκου βρίσκεται στην πλευρά A (0 m), οι επόμενοι τρεις δίσκοι σε ενδιάμεσες θέσεις του δέκτη (3, 6 και 9 m) και ο τελευταίος δίσκος βρίσκεται στην πλευρά B του δέκτη (12 m). Το θερμικό μέσο εισέρχεται από την πλευρά A στο επάνω κανάλι (0 m) με θερμοκρασία 250°C (μπλε χρώμα). Καθώς το μέσο οδεύει προς την πλευρά B, θερμαίνεται απορροφώντας θερμότητα από τον απορροφητή. Στην πλευρά B το ρευστό (πράσινο χρώμα) αλλάζει κατεύθυνση και επιστρέφει στην πλευρά A από το κάτω κανάλι όπου προθερμαίνεται περαιτέρω (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 6-9: Διάγραμμα θερμοκρασίας του δέκτη DP για θερμοκρασία εισόδου 250°C

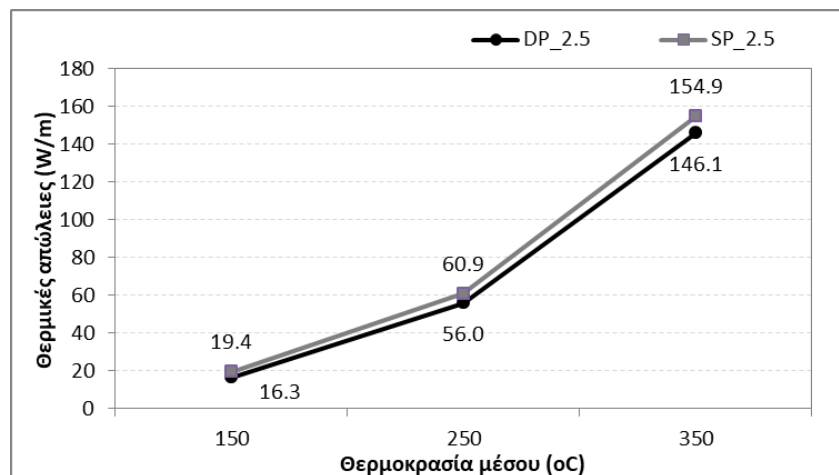
Διερευνήθηκε η συμπεριφορά του δέκτη για θερμοκρασίες εισόδου του θερμικού μέσου 150, 250 και 350°C και παροχή μάζας 1, 2.5, και 5 kg/s. Τα αποτελέσματα των θερμικών απωλειών του δέκτη συγκεντρώνει ο Πίνακας 6-3. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε θερμικές απώλειες ανά τρέχον μέτρο του δέκτη.

Παρατηρείται ότι η αύξηση της παροχής μάζας οδηγεί σε μείωση των θερμικών απωλειών του δέκτη. Για 250°C και 2.5 kg/s, οι θερμικές απώλειες είναι 56 W/m ενώ για παροχή 5 kg/s οι θερμικές απώλειες μειώνονται κατά 6.8%. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του συντελεστή συναγωγής του θερμικού μέσου.

Πίνακας 6-3: Θερμικές απώλειες του δέκτη DP συναρτήσεως της θερμοκρασίας εισόδου και της παροχής μάζας

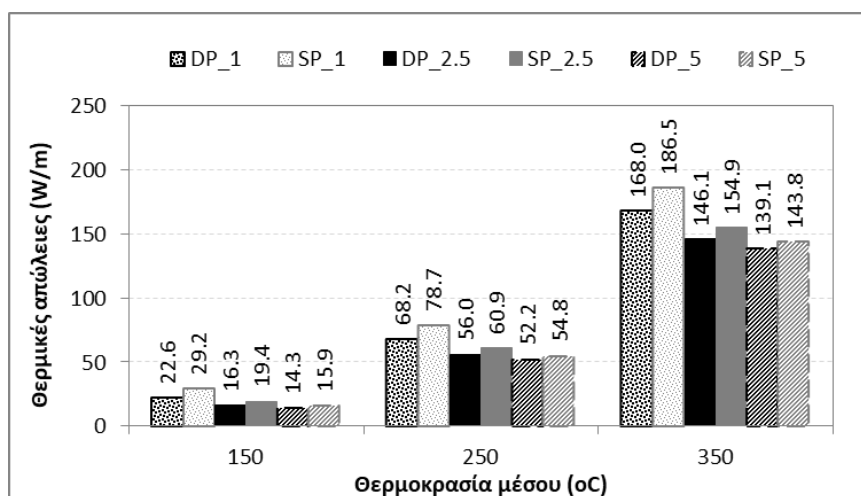
Παροχή μάζας (kg/s)	1			2.5			5		
Θερμοκρασία εισόδου (°C)	150	250	350	150	250	350	150	250	350
Θερμικές απώλειες (W/m)	22.6	68.2	168	16.3	56.0	146.1	14.3	52.2	139.1

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης του δέκτη DP σε σχέση με το δέκτη SP διατηρώντας κοινά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των υλικών, αλλά χωρίς το εσωτερικό χώρισμα. Στο Σχήμα 6-10 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για παροχή μάζας 2.5 kg/s. Για τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες, ο δέκτης DP παρουσιάζει μειωμένες θερμικές απώλειες σε σχέση με το δέκτη SP. Για παράδειγμα στους 250°C, οι θερμικές απώλειες του δέκτη DP υπολογίζονται 56 W/m, ενώ του δέκτη SP είναι 60.9 W/m, οδηγώντας σε μείωση των θερμικών απωλειών κατά 8%.



Σχήμα 6-10: Συγκριτική ανάλυση των θερμικών απωλειών των δέκτη SP και DP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου

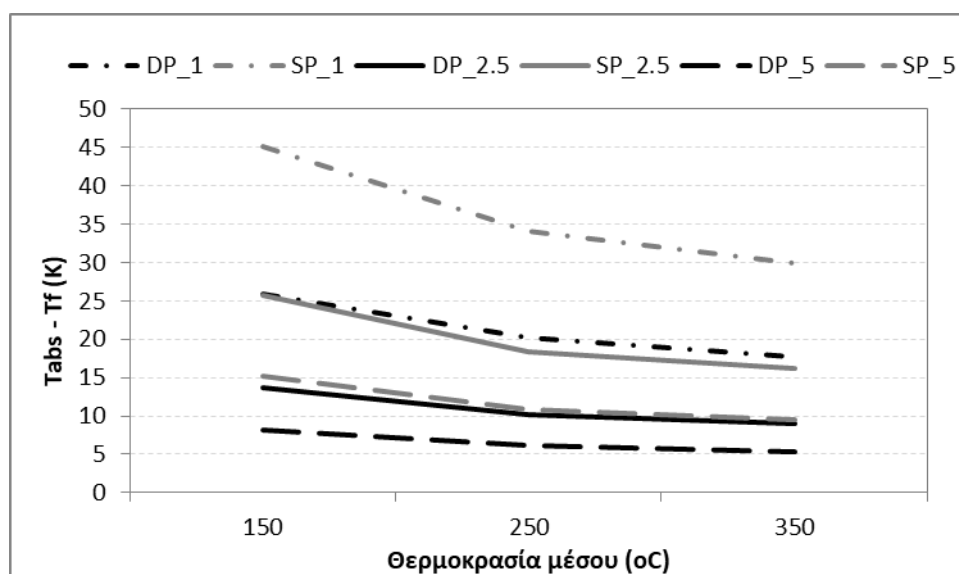
Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα έχουν σημαντική σημασία καθώς αποδεικνύουν ότι ο δέκτης DP αποδίδει καλύτερα σε σχέση με αντίστοιχο δέκτη SP. Καθώς οι θερμικές απώλειες είναι σημαντικός παράγοντας, η ανάλυση επεκτάθηκε και για τις παροχές μάζας 1 και 5 kg/s. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο δέκτης DP αποδίδει καλύτερα με 10.4% μέση μείωση των θερμικών απωλειών.



Σχήμα 6-11: Θερμικές απώλειες των δεκτών SP και DP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου για παροχή μάζας 1, 2.5 και 5 kg/s

Η βελτίωση της συμπεριφοράς του δέκτη DP πηγάζει κυρίως από τον αυξημένο συντελεστή συναγωγής του θερμικού μέσου. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή και επομένως, σε μειωμένες θερμικές απώλειες.

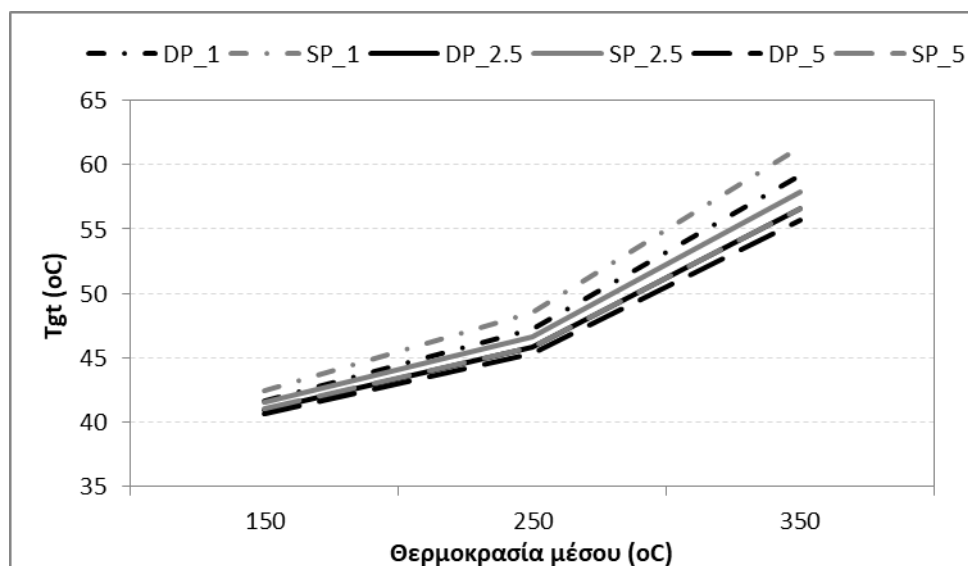
Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του απορροφητή και του θερμικού μέσου φαίνεται στο Σχήμα 6-12. Η θερμοκρασιακή διαφορά μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου. Επιπλέον, μειώνεται με την αύξηση της παροχής μάζας. Για παροχή μάζας 2.5 kg/s και θερμοκρασία εισόδου 250°C, στο δέκτη DP η θερμοκρασιακή διαφορά είναι 10.2 °C ενώ στο δέκτη SP 18.4 °C. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι ο δέκτης DP παρουσιάζει μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά σε σχέση με το δέκτη SP.



Σχήμα 6-12: Μέση θερμοκρασιακή διαφορά του απορροφητή από το θερμικό μέσο για τους δέκτες SP και DP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου για παροχή μάζας 1, 2.5 και 5 kg/s

Η θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος φαίνεται στο Σχήμα 6-13. Η θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του θερμικού μέσου και λιγότερο από την παροχή μάζας.

Και σε αυτή την περίπτωση ο δέκτης DP, παρουσιάζει στο γυάλινο περίβλημα χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το δέκτη SP. Ωστόσο, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο δεκτών είναι μικρή. Ενδεικτικά, για 250°C θερμοκρασία εισόδου του θερμικού μέσου και παροχή μάζας 2.5 kg/s, η θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος είναι 45.8°C για το δέκτη DP και 46.6°C για το δέκτη SP.

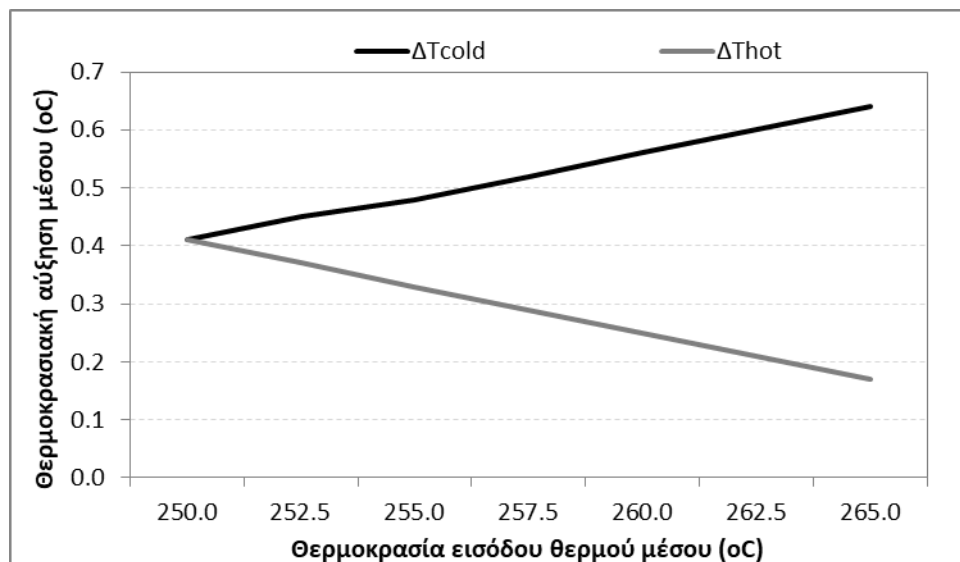


Σχήμα 6-13: Μέση θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος για τους δέκτες SP και DP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου για παροχή μάζας 2.5, 5 και 7.5kg/s

Για την περαιτέρω ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του δέκτη DP απομονώνεται μέρος του δέκτη με μοναδιαίο μήκος. Στόχος είναι η διερεύνηση της κατανομής της θερμότητας στο θερμικό ρευστό και της θερμοκρασιακής αύξησης του ρευστού στις δύο διαδρομές.

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση επιλέγεται παροχή μάζας 2.5 kg/s και θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού ρευστού σταθερή και ίση με 250°C. Κατά τη λειτουργία του δέκτη σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, η θερμοκρασία μεταβάλλεται διαρκώς. Επομένως, επιλέγεται ένα αντιπροσωπευτικό για την ανάλυση εύρος, με τη θερμοκρασία του θερμού ρευστού να κυμαίνεται από 250°C έως 265°C με βήμα 2.5°C.

Στο Σχήμα 6-14 απεικονίζεται η θερμοκρασιακή αύξηση του ψυχρού ρευστού (μαύρη γραμμή) και του θερμού ρευστού (γκρι γραμμή). Παρατηρείται ότι όταν οι θερμοκρασίες εισόδου των δύο ρευστών εξισώνονται, η θερμοκρασιακή τους αύξηση είναι κοινή και ίση με 0.41°C.



Σχήμα 6-14: Θερμοκρασιακή αύξηση του θερμού και ψυχρού ρευστού

Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, όταν το θερμό ρευστό εισέρχεται σε υψηλότερη θερμοκρασία, τότε η θερμοκρασιακή αύξηση των δύο ρευστών είναι διαφορετική. Το ψυχρό ρευστό παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση, καθώς λαμβάνει την απορροφηθείσα θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία και λαμβάνει επιπλέον θερμότητα από το θερμό ρευστό, μέσω του μεταλλικού χωρίσματος. Αντίστοιχα, το θερμό ρευστό λόγω της μεταφοράς θερμότητας προς το ψυχρό παρουσιάζει μικρότερη θερμοκρασιακή αύξηση. Ενδεικτικά, σε θερμοκρασία εισόδου 260°C, το ψυχρό εξέρχεται στους 250.56°C (αύξηση 0.56°C) ενώ το θερμό στους 260.25°C (αύξηση 0.25°C).

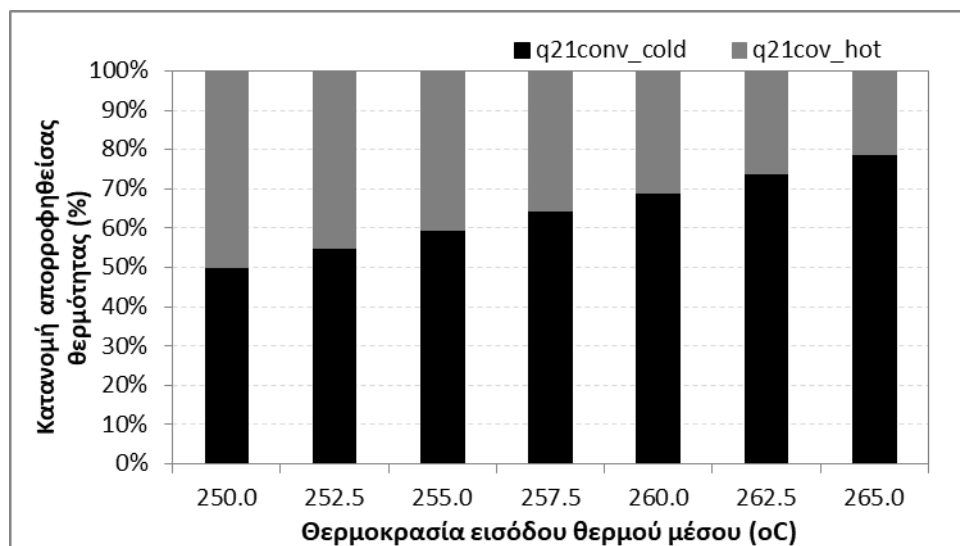
Ωστόσο, η θερμότητα που μεταφέρεται στο ρευστό ( $q_{21conv}$ ) σε όλες τις περιπτώσεις παραμένει σχεδόν σταθερή. Η διαφορά της απορροφηθείσας θερμότητας για τις ακραίες θερμοκρασίες 250°C και 265°C είναι της τάξης του 0.1%. Η μικρή μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι το θερμό ρευστό ρέει σε υψηλότερη θερμοκρασία και συνεπώς, οι θερμικές απώλειες είναι αυξημένες. Η θερμοκρασιακή αύξηση των ρευστών καθορίζεται κυρίως από τη μεταφορά θερμότητας μέσω του μεταλλικού χωρίσματος.

Πίνακας 6-4: Απορροφηθείσα θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμού ρευστού

$T_{hot,i}$	°C	250	252.5	255	257.5	260	262.5	265
$q_{3solabs}$	W/m	4523.0	4523.0	4523.0	4523.0	4523.0	4523.0	4523.0
$q_{5solabs}$	W/m	176.0	176.0	176.0	176.0	176.0	176.0	176.0
$q_{21conv}$	W/m	4468.8	4468.4	4467.2	4467.2	4465.5	4465.5	4464.3

Όσον αφορά την απορροφηθείσα θερμότητα από το θερμό ρευστό ( $q_{21conv\_hot}$ ) και το ψυχρό ρευστό ( $q_{21conv\_cold}$ ) υπάρχει ισοκατανομή όταν

τα δύο ρευστά εισέρχονται με την ίδια θερμοκρασία (250°C). Όταν η θερμοκρασία του θερμού ρευστού αυξάνεται, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών ενισχύεται και έτσι, η κατανομή της απορροφηθείσας θερμότητας μεταβάλλεται. Ενδεικτικά, για θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρευστού 260°C, το 69.1% της συνολικής απορροφηθείσας θερμότητας απορροφάται από το ψυχρό ρευστό και το 30.9% από το θερμό, γεγονός που εξηγεί τη θερμοκρασιακή αύξηση στο Σχήμα 6-15.



Σχήμα 6-15: Κατανομή απορροφηθείσας θερμότητας μεταξύ θερμού και ψυχρού ρευστού

Από τη συγκεκριμένη ανάλυση συμπεραίνεται ότι η κατανομή της απορροφηθείσας θερμότητας μεταβάλλεται κατά μήκος του δέκτη. Η ελάχιστη διαφορά παρατηρείται στην πλευρά Β, όπου η ροή αλλάζει κατεύθυνση και κανάλι. Η θερμοκρασιακή διαφορά των ρευστών κοντά στην πλευρά Β είναι σχεδόν αμελητέα, οπότε η θερμότητα ισοκατανέμεται μεταξύ των δύο ρευστών. Αντίθετα, στην πλευρά Α παρατηρείται υψηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευστών, αφού το ψυχρό ρευστό (επάνω κανάλι) εισέρχεται σε χαμηλή θερμοκρασία, ενώ το θερμό ρευστό (κάτω κανάλι) εξέρχεται σε υψηλή θερμοκρασία.

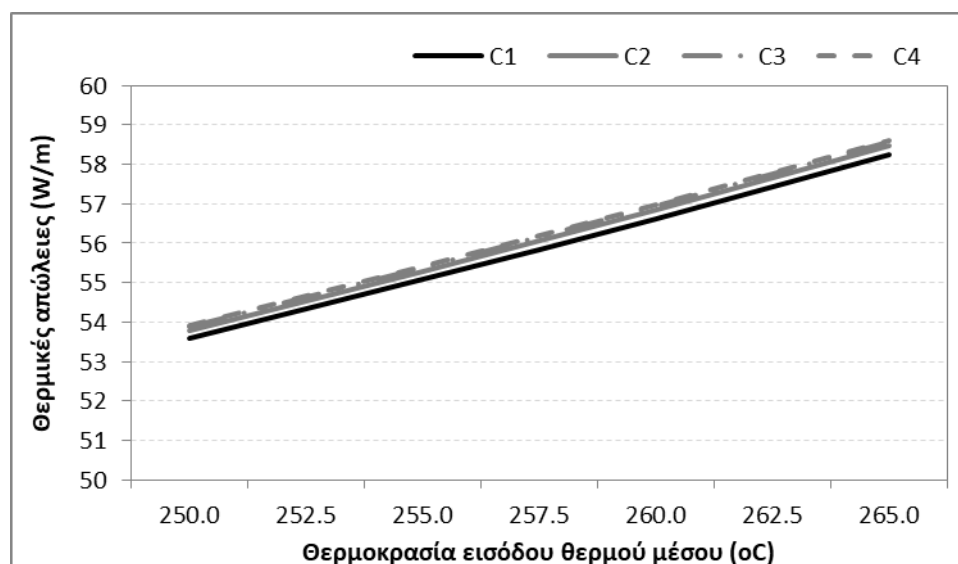
Στο σημείο αυτό, διερευνάται η χρήση μεθόδων θερμικής θωράκισης του χωρίσματος με σκοπό τη μείωση της ανταλλαγής θερμότητας των δύο ρευστών. Οι ενδεικτικές μέθοδοι αύξησης της θερμικής αντίστασης του χωρίσματος είναι η αύξηση του πάχους του χωρίσματος, η εφαρμογή μονωτικής κεραμικής επίστρωσης στις επιφάνειες του μεταλλικού χωρίσματος ή η αντικατάσταση του μετάλλου από άλλο υλικό χαμηλότερου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Η επίδραση της αύξησης της θερμικής αντίστασης στη θερμική συμπεριφορά του δέκτη διερευνάται για τέσσερις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις, το πάχος του χωρίσματος διατηρείται σταθερό και ίσο με 0.002m. Η πρώτη περίπτωση αφορά μεταλλικό χωρίσμα με θερμική αγωγιμότητα 16 W/(m.K), η δεύτερη περίπτωση κεραμικό υλικό με θερμική αγωγιμότητα 2 W/(m.K) και η τρίτη περίπτωση πολυμερές πλαστικό με 0.25 W/(m.K). Η τέταρτη περίπτωση αποτελεί την ιδανική περίπτωση θερμικής θωράκισης, αφού πρόκειται για αδιαβατικό τοίχωμα. Ο Πίνακας 6-5 συγκεντρώνει τις θερμικές αντιστάσεις των τεσσάρων περιπτώσεων που προσομοιώνονται.

Πίνακας 6-5: Εξεταζόμενες περιπτώσεις θερμικής αντίστασης του χωρίσματος

Περίπτωση	Μονάδα	C1	C2	C3	C4
Πάχος	m	0.002	0.002	0.002	0.002
Θερμική αγωγιμότητα	W/m.K	16	2	0.25	0
Θερμική αντίσταση	K/W	0.000125	0.001	0.008	$\infty$

Για τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις, οι θερμικές απώλειες του απορροφητή ( $q_{34}$ ) μεταβάλλονται κυρίως συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμού μέσου. Παρατηρείται ότι η επίδραση της θερμικής αντίστασης του χωρίσματος στις θερμικές απώλειες είναι αμελητέα και μικρότερη του 0.6% σε όλες τις περιπτώσεις.

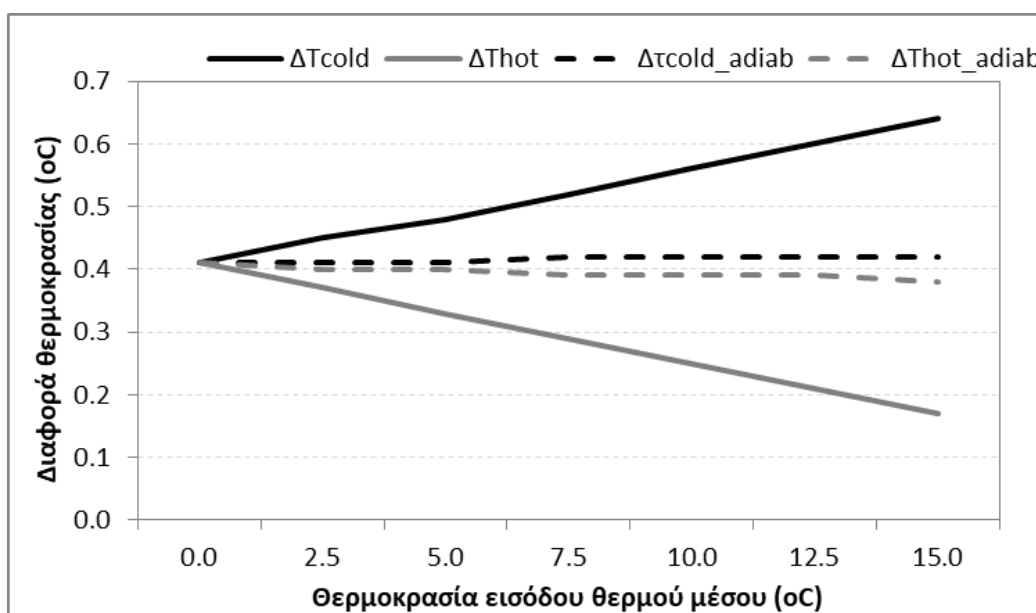


Σχήμα 6-16: Θερμικές απώλειες του απορροφητή

Όσον αφορά την επίδραση της θερμικής αντίστασης του χωρίσματος στη θερμοκρασιακή αύξηση του θερμού και του ψυχρού ρευστού αυτή αποτυπώνεται στο Σχήμα 6-17. Παρατηρείται ότι η αύξηση της αντίστασης μειώνει τη θερμοροή μέσω του χωρίσματος από το θερμό προς το ψυχρό ρευστό. Κατ'επέκταση, μειώνεται η διαφορά της θερμοκρασιακής αύξησης των δύο ρευστών. Στην περίπτωση του

ιδανικού αδιαβατικού χωρίσματος C4, η θερμοκρασιακή αύξηση στα δύο ρευστά είναι σχεδόν κοινή.

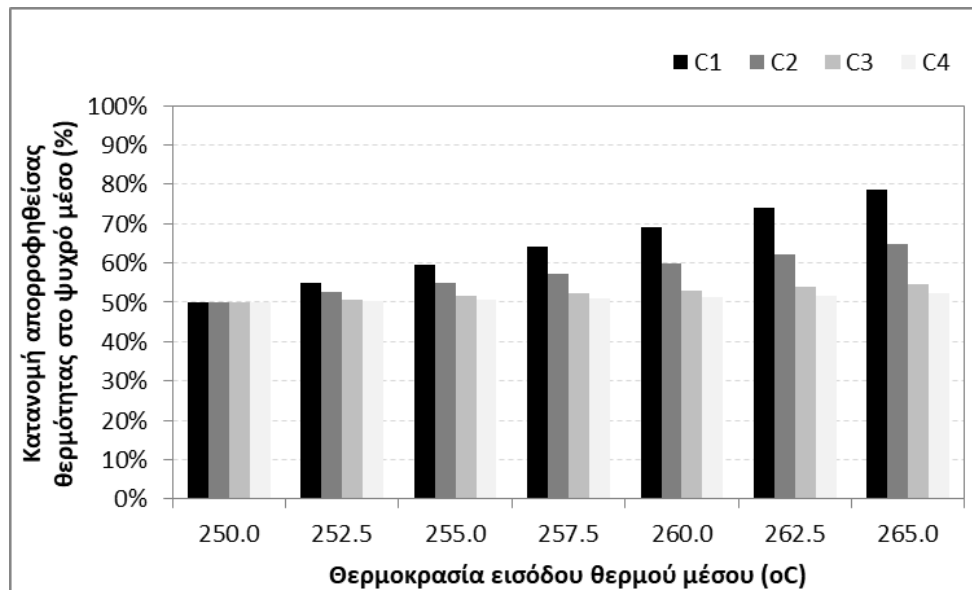
Για θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρευστού 260°C, η θερμοκρασιακή αύξηση του θερμού ρευστού από 0.25°C (C1) γίνεται 0.32°C (C2), 0.38°C (C3) και 0.39°C (C4). Παρατηρείται ότι η θερμική αντίσταση της περίπτωσης C3 οδηγεί σε αποτελέσματα που προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα αποτελέσματα του αδιαβατικού τοιχώματος.



Σχήμα 6-17: Θερμοκρασιακή αύξηση του θερμού και ψυχρού ρευστού για τις 4 εξεταζόμενες περιπτώσεις (C1 – C4)

Οι θερμοκρασιακές διαφορές εξηγούνται από την κατανομή της απορροφηθείσας θερμότητας στο ψυχρό μέσο (Σχήμα 6-18). Στην περίπτωση του αδιαβατικού χωρίσματος C4, το ψυχρό μέσο απορροφά περίπου το 50% της συνολικής απορροφηθείσας θερμότητας, σε όλες τις περιπτώσεις. Η θερμική αντίσταση της περίπτωσης C3 οδηγεί σε αρκετά ικανοποιητική εξισορρόπηση της κατανομής της θερμότητας. Ενδεικτικά, στους 260°C, το ψυχρό ρευστό απορροφά το 69.1% (C1), 59.8% (C2), 53.1% (C3) και 51.4% (C4) της συνολικής απορροφηθείσας θερμότητας.





Σχήμα 6-18: Κατανομή απορροφηθείσας θερμότητας στο ψυχρό ρευστό για τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις, C1 – C4

Από την παραπάνω ανάλυση συμπεραίνεται ότι το μεταλλικό χώρισμα έχει μικρή επίδραση στις θερμικές απώλειες του απορροφητή. Ωστόσο, επιδρά σημαντικά στην κατανομή της απορροφηθείσας θερμότητας στο θερμό και ψυχρό ρευστό. Η αύξηση της θερμικής αντίστασης του χωρίσματος περιορίζει σημαντικά τη θερμοροή μέσω του χωρίσματος και μειώνει τη διαφορά της θερμοκρασιακής αύξησης των ρευστών.

### 6.5 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου διερευνήθηκε καινοτόμος δέκτης με απορροφητή διπλής διαδρομής (DP) με γυάλινο περίβλημα και κενό. Ο δέκτης είναι κατάλληλος για συστήματα γραμμικής εστίασης. Η ανάλυση της θερμικής του συμπεριφοράς βασίστηκε σε επικυρωμένο μοντέλο μονής διαδρομής του κεφαλαίου 5. Τα βασικά συμπεράσματα από τη θερμική ανάλυση του καινοτόμου δέκτη DP συνοψίζονται ως εξής:

- Οι θερμικές απώλειες του δέκτη για σταθερή παροχή μάζας 2.5 kg/s και θερμοκρασία εισόδου του θερμικού μέσου 150, 250 και 350°C είναι 16.3, 56.0 και 146.1 W/m.
- Η αύξηση της παροχής μάζας οδηγεί σε μείωση των θερμικών απωλειών. Συγκεκριμένα, για τους 250°C, ο διπλασιασμός της παροχής μάζας σε 5kg/s, οδηγεί σε μείωση των θερμικών απωλειών κατά 6.8% αντίστοιχα.
- Η σύγκριση του δέκτη DP με το δέκτη μονής διαδρομής SP έδειξε ότι ο δέκτης DP αποδίδει καλύτερα, σε όλες τις περιπτώσεις. Πράγματι, ο δέκτης DP εμφανίζει μείωση των θερμικών απωλειών κατά μέσο όρο 10.4% έναντι του δέκτη SP.
- Για το δέκτη DP μοναδιαίου μήκους διερευνήθηκε η επίδραση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θερμού και του ψυχρού ρευστού. Η θερμότητα που μεταφέρεται στο ρευστό σε όλες τις περιπτώσεις παραμένει σχεδόν σταθερή με διαφορά της τάξης του 0.1%.
- Για το δέκτη μοναδιαίου μήκους, το ψυχρό ρευστό απορροφά μεγαλύτερο ποσό θερμότητας, σε σχέση με το θερμό, λόγω της θερμορροής από το χώρισμα. Για 260°C θερμοκρασία του θερμού ρευστού, το 69.1% απορροφάται από το ψυχρό ρευστό και το υπόλοιπο από το θερμό.
- Αντίστοιχα, για τους 260°C η θερμοκρασιακή αύξηση του ψυχρού ρευστού είναι μεγαλύτερη (0.56°C) σε σχέση με την αντίστοιχη του θερμού ρευστού (0.25°C).
- Η αύξηση της θερμικής αντίστασης έχει αμελητέα επίδραση (<0.6%) στις θερμικές απώλειες του δέκτη.
- Η αύξηση της θερμικής αντίστασης μεταβάλλει την κατανομή της απορροφηθείσας θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών. Για παράδειγμα στους 260°C, το ψυχρό ρευστό απορροφά το 69.1%(C1), 59.8% (C2), 53.1% (C3) και 51.4% (C4) της συνολικής απορροφηθείσας θερμότητας.

## **7 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ**

### **7.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ερευνητικών δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την ανάπτυξη συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη Fresnel και πειραματικής διάταξης στην Αθήνα.

Οι εργασίες υλοποιήθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού έργου SOLECON [104] με συντονιστή τη βιομηχανία ηλιακών συσκευών SOLE [105]. Το έργο χρηματοδοτήθηκε μέσω του προγράμματος ΕΣΠΑ 2007-2013, στα πλαίσια της πράξης Πρόγραμμα Ανάπτυξης Βιομηχανικής Έρευνας & Τεχνολογίας (ΠΑΒΕΤ) με φορέα διαχείρισης τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ).

Οι δραστηριότητες του συγγραφέα της διατριβής αφορούν τον ενεργειακό σχεδιασμό του ηλιακού συλλέκτη, το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης και του μετρητικού εξοπλισμού. Ενεργός συμμετοχή και συντονισμός των εργασιών, υπήρξε στην ανάπτυξη του ηλιακού συλλέκτη, στην ανάπτυξη της διάταξης και τέλος στη δοκιμαστική λειτουργία της διάταξης.

Ωστόσο, ο συνδυασμός των στρατιωτικών υποχρεώσεων του συγγραφέα και της έλλειψης πόρων για την επαναλειτουργία της διάταξης σε δεύτερο χρόνο, κατέστησαν ανέφικτη την ολοκλήρωση των πειραματικών δραστηριοτήτων στη συγκεκριμένη διάταξη. Παρόλ' αυτά οι εργασίες που υλοποιήθηκαν και η εμπειρία που αποκτήθηκε και είναι άξιες προς αναφορά.

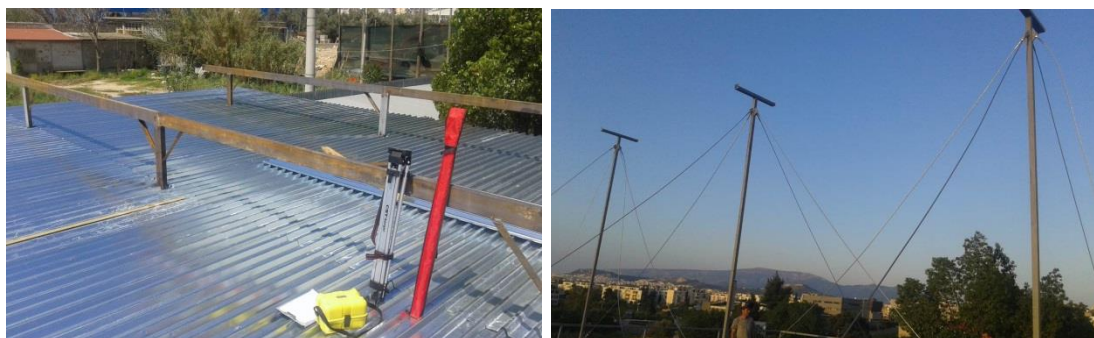
## 7.2 Ο ηλιακός συλλέκτης

Το πρωτότυπο του ηλιακού συλλέκτη αποτελείται από 2 υπομονάδες (modules) με προσανατολισμό Νότου-Βορρά. Η κάθε υπομονάδα έχει μήκος περίπου 4m και αποτελείται από 14 σειρές επίπεδων ανακλαστήρων πλάτους 0.5m με διάκενο 0.2m μεταξύ τους. Ο δέκτης βρίσκεται 4m πάνω από το επίπεδο των ανακλαστήρων. Η ανακλαστική επιφάνεια είναι 56 m<sup>2</sup>. Η όψη του πρωτοτύπου φαίνεται στο Σχήμα 7-1.



Σχήμα 7-1: 3D όψη του πρωτοτύπου του ηλιακού συλλέκτη

Σχετικά με τα στάδια κατασκευής του ηλιακού συλλέκτη, αρχικά διαμορφώθηκε ο χώρος εγκατάστασης, ακολούθησε η κατασκευή και τοποθέτηση των βάσεων του ηλιακού συλλέκτη πάνω στις οποίες στηρίζονται οι σειρές των ανακλαστήρων και οι κολώνες του δέκτη.



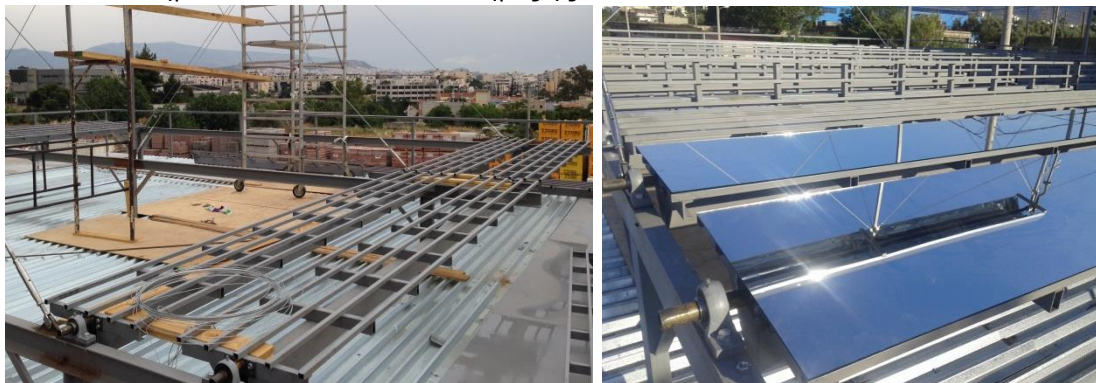
Σχήμα 7-2: Βάσεις στήριξης και κολώνες στήριξης του δέκτη

Στη συνέχεια ακολούθησε η συγκόλληση των δύο απορροφητών μεταξύ τους, η δοκιμή πίεσης στο χώρο του εργοστασίου και η ανύψωση στις κολώνες. Η κατασκευή του δευτερεύοντος ανακλαστήρα έγινε στο εργοστάσιο. Αρχικά διαμορφώθηκε το πλαίσιο στήριξης του ανακλαστήρα, κατόπιν, τοποθετήθηκε η ανακλαστική επιφάνεια (εύκαμπτο φύλλο αλουμινίου) και στη συνέχεια, προστέθηκε το προστατευτικό φύλλο στην εξωτερική επιφάνεια. Τέλος, ο δέκτης τοποθετήθηκε στις κολώνες στήριξης.



Σχήμα 7-3: Τοποθέτηση σωλήνων κενού και δευτερεύοντος ανακλαστήρα

Η κατασκευή των πλαισίων στήριξης των ανακλαστήρων έγινε στο εργοστάσιο και κατόπιν, μεταφέρθηκαν στο ηλιακό πεδίο. Τοποθετήθηκαν στα κατάλληλα σημεία και συνδέθηκαν με τα εξαρτήματα του μηχανισμού κίνησης. Τέλος, αφού ολοκληρώθηκαν οι εργασίες στον ηλιακό συλλέκτη, τοποθετήθηκαν τα φύλλα των δίμετρων ανακλαστήρων στα πλαίσια στήριξης.



Σχήμα 7-4: Πλαίσια στήριξης ανακλαστήρων

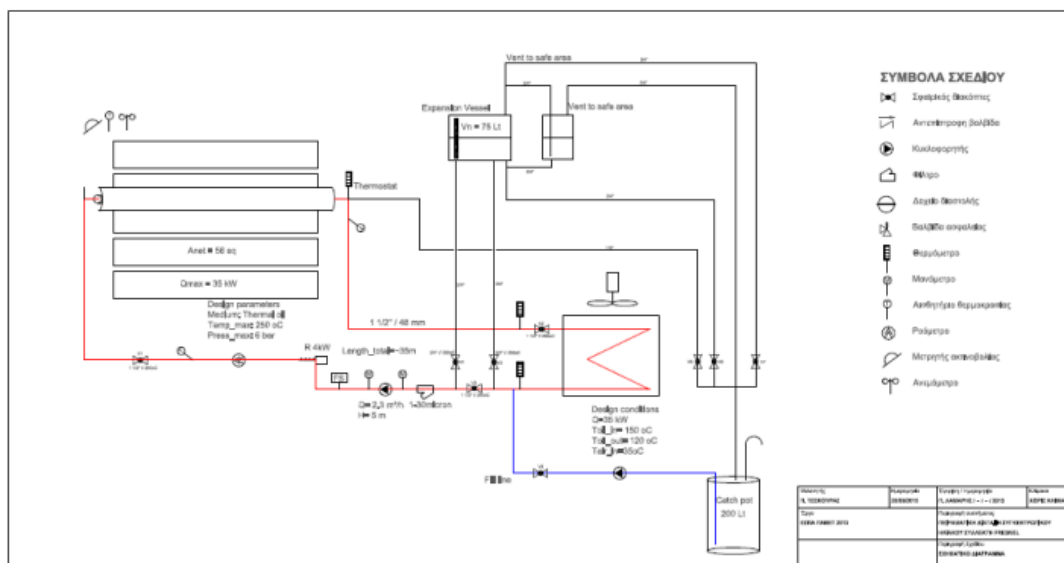
Το πρωτότυπο συνολικής ανακλαστικής επιφάνειας 56m<sup>2</sup> απεικονίζεται στο Σχήμα 7-5.



Σχήμα 7-5: Φωτογραφία του ηλιακού συλλέκτη Fresnel

### 7.3 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνει τη διεξαγωγή πειραμάτων σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, θερμοκρασίας και ροής. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των εξαρτημάτων της πειραματικής διάταξης είναι 250°C. Η παραχθείσα θερμότητα του ηλιακού συλλέκτη απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω ψύκτη θερμικού λαδιού. Για το χαρακτηρισμό του ηλιακού συλλέκτη, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μετρήσεων σε συγκεκριμένα θερμοκρασιακά επίπεδα όπου λαμβάνονται σετ μετρήσεων [97].



Σχήμα 7-6: Σχεδιάγραμμα της πειραματικής εγκατάστασης

Στο υδραυλικό κύκλωμα υπάρχουν τρεις συνολικά επενεργητές: ο ψύκτης θερμικού λαδιού, ο κυκλοφορητής και η ηλεκτρική αντίσταση. Και οι τρεις επενεργητές ελέγχονται αναλογικά, ώστε να ρυθμίζεται κατάλληλα η ροή και η θερμοκρασία εισόδου στον απορροφητή. Η ρύθμιση των στροφών του ψύκτη λαδιού επιτυγχάνεται μέσω ελεγκτή PID. Η ηλεκτρική αντίσταση ενεργοποιείται για να μειώσει το χρόνο αναμονής για τη διεξαγωγή πειραμάτων σε υψηλή θερμοκρασία και παράλληλα, για να επιτευχθεί πιο ακριβής ρύθμιση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 7-7: Ψύκτης θερμικού λαδιού



Σχήμα 7-8: Κυκλοφορητής, ηλεκτρική αντίσταση και δοχείο διαστολής θερμικού λαδιού

Στο υδραυλικό δίκτυο κυκλοφορεί το θερμικό λάδι Therminol SP με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας 315°C [106], ωστόσο ο σχεδιασμός των υπόλοιπων εξαρτημάτων είναι για χαμηλότερη θερμοκρασία. Για τη θερμική διαστολή του λαδιού τοποθετήθηκε δοχείο διαστολής σε υψηλότερο σημείο από το δέκτη για να εξασφαλιστεί θετική πίεση σε κρίσιμα σημεία της εγκατάστασης.



## 7.4 Μετρητικός εξοπλισμός

Ο μετρητικός εξοπλισμός του ηλιακού συλλέκτη περιλαμβάνει μέτρηση των βασικών παραμέτρων που επιδρούν στην ενεργειακή απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Αυτές αφορούν τις συνθήκες περιβάλλοντος με μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος ( $T_{amb}$ ), της ταχύτητας ανέμου ( $U_{wind}$ ), της ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου ( $G$ ), της διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου ( $G_d$ ), του θερμικού λαδιού με μέτρηση των θερμοκρασιών εισόδου ( $T_{sc\_in}$ ) και εξόδου ( $T_{sc\_out}$ ) στον ηλιακό συλλέκτη και της ροής μάζας ( $m_f$ ).

Τα βασικά χαρακτηριστικά των μετρητικών οργάνων συνοψίζει ο Πίνακας 7-1.

Πίνακας 7-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητηρίων μέτρησης πειραματικής διάταξης

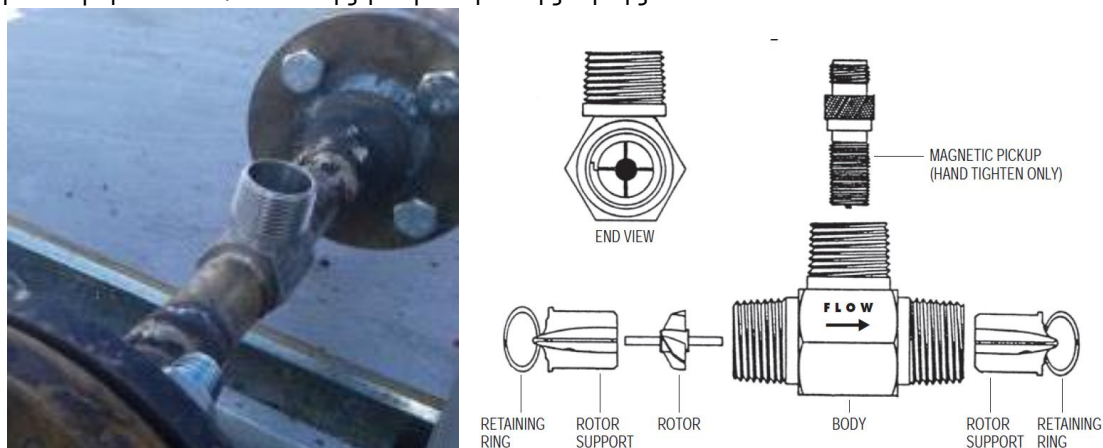
Σύμβολο	Περιγραφή	Αισθητήριο	Ακρίβεια
$G$	Ολική ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου	$\Delta T$ BF5	$\pm 12\%$ MV
$G_d$	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου	$\Delta T$ BF5	$\pm 15\%$ MV
$T_{amb}$	Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	PT100, Class A	$\pm (0.15 + 0.002  t )$
$T_{sc\_in}$	Θερμοκρασία θερμικού λαδιού στην είσοδο του ηλιακού συλλέκτη	PT1000, Class A	$\pm (0.15 + 0.002  t )$
$T_{sc\_out}$	Θερμοκρασία θερμικού λαδιού στην έξοδο του ηλιακού συλλέκτη	PT1000, Class A	$\pm (0.15 + 0.002  t )$
$m_f$	Ροή μάζας	GBT75	$\pm 0.5\%$ MV
$U_{wind}$	Ταχύτητα ανέμου	Thies 4.3515	$\pm 5\%$ MR

Για την καλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων, επιλέχθηκαν αισθητήρια θερμοκρασίας PT1000, 3 καλωδίων, άμεσης επαφής με το θερμικό λάδι με τοποθέτηση σε γωνία  $45^\circ$  ως προς τη ροή του θερμικού μέσου. Τα αισθητήρια τοποθετήθηκαν σε σχετικά μικρή απόσταση από τον απορροφητή.



Σχήμα 7-9: Αισθητήρες θερμοκρασίας του θερμικού λαδιού

Για τη μέτρηση της ροής του θερμικού λαδιού τοποθετήθηκε ροόμετρο με ακρίβεια 0.5% επί της μετρούμενης τιμής.



Σχήμα 7-10: Υδραυλικό μέρος ροόμετρου θερμικού λαδιού

Στη νότια πλευρά του ηλιακού συλλέκτη τοποθετήθηκε μετρητικός εξοπλισμός για τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος (αισθητήρας PT100 με σκίαση) και για την ακτινοβολία. Ο μετρητής ακτινοβολίας εξάγει τιμές ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου. Δεδομένου του χρόνου και του τόπου των μετρήσεων, υπολογιστικά προκύπτει η άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου (DNI).



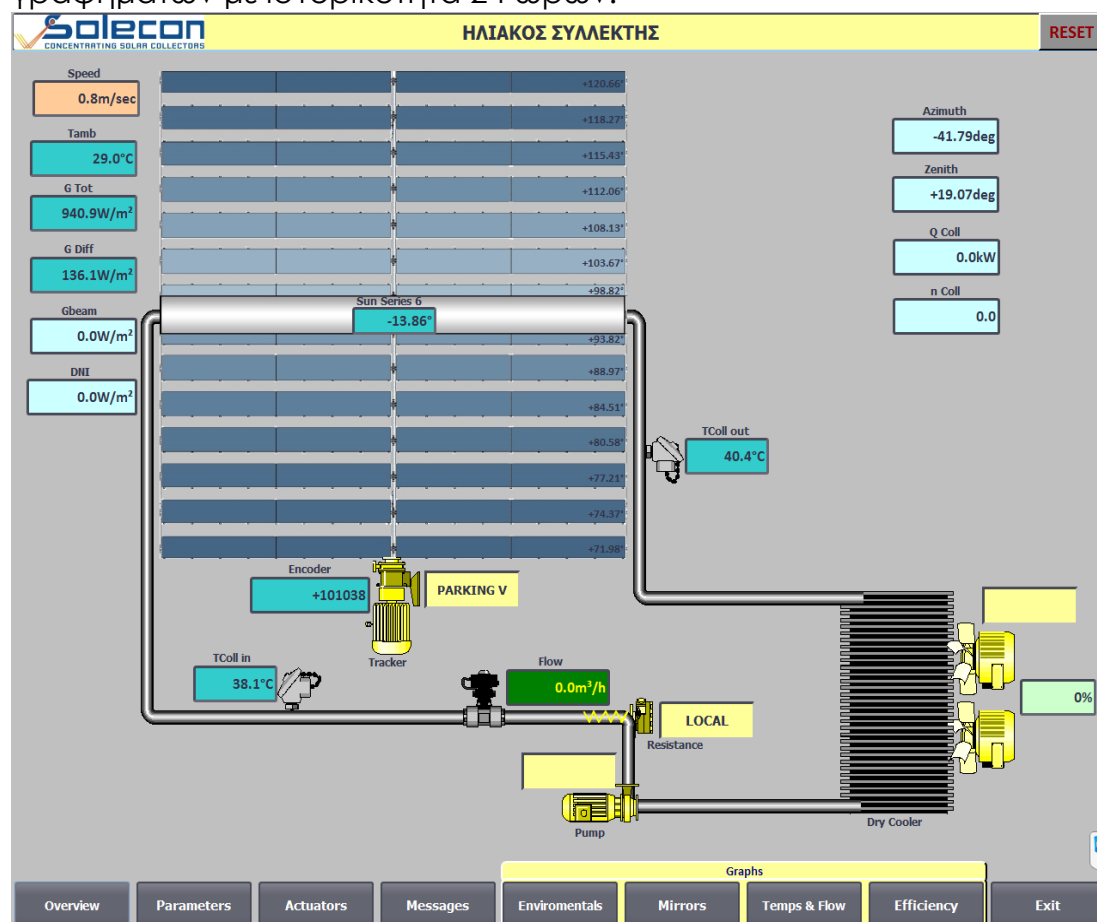
Σχήμα 7-11: Αισθητήρας ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμου και θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος (αριστερά). Έλεγχος μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας (δεξιά)

Το όργανο μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί εναλλακτική πρόταση του πυρηλιόμετρου με κίνηση σε 2 άξονες ή τη χρήση δύο πυρανόμετρων (με και χωρίς σκίαση). Η ακρίβεια του μετρητή ακτινοβολίας ελέγχθηκε μέσω φορητού εξοπλισμού πυρανόμετρου με στιγμιαίες μετρήσεις ολικής ακτινοβολίας και διάχυτης ακτινοβολίας με τεχνητή σκίαση από μικρό αντικείμενο. Η απόκλιση του οργάνου κρίθηκε ικανοποιητική, καθώς οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν για διάφορες στιγμές της ημέρας δεν ξεπερνούσαν το 5% από το φορητό πυρανόμετρο.

## 7.5 Σύστημα SCADA

Το σύστημα ελέγχου και λήψης δεδομένων (SCADA) του συστήματος αναπτύχθηκε σε προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC). Οι τιμές των μετρητικών οργάνων μαζί καθώς και οι αναδράσεις των επενεργητών διαβάζονται από το PLC και γίνεται ο έλεγχος της κίνησης των ανακλαστήρων, της λειτουργίας του κυκλοφορητή και της ηλεκτρικής αντίστασης.

Η οπτικοποίηση της λειτουργίας του συστήματος γίνεται μέσω μιμικών διαγραμμάτων όπου απεικονίζονται οι στιγμιαίες τιμές, αλλά και μέσω γραφημάτων με ιστορικότητα 24 ωρών.



Σχήμα 7-12: Μιμικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

Κεφ. 7: Σχεδιασμός και ανάπτυξη ηλιακού συλλέκτη Fresnel και πειραματικής διάταξης στην Αθήνα



Σχήμα 7-13: Γραφήματα μεταβλητών

Η καταγραφή των μετρήσεων γίνεται με χρονικό βήμα 30s σε βάση δεδομένων. Οι καταγραφές αφορούν μέσες τιμές του χρονικού διαστήματος. Επιπλέον, καταγράφεται και άλλα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς αλλά και της λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη και της πειραματικής διάταξης. Ο Πίνακας 7-2 συγκεντρώνει τα δεδομένα και τον τύπο προέλευσής τους (μέτρηση ή υπολογισμός).

Πίνακας 7-2: Μεταβλητές μεγεθών που καταγράφονται ή υπολογίζονται

Μεταβλητή	Σύμβολο	Μέτρηση	Υπολογισμός
<b>Χρόνος</b>			
Ημέρα	YYMMDD	x	
Τοπικός χρόνος	LT	x	
Ηλιακός χρόνος	ST		x
<b>Θέση Ηλίου</b>			
Αζιμούθιο Ηλίου	$\gamma_s$		x
Ύψος Ηλίου	$\alpha_s$		x
Γωνία ζενιθ Ηλίου	$\theta_z$		x
<b>Ηλιακή ακτινοβολία</b>			
Ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου	G	x	
Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου	$G_d$	x	
Άμεση ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου	$G_b$		x
Άμεση ηλιακή ακτινοβολία καθέτου επιπέδου	DNI		x
<b>Συνθήκες περιβάλλοντος</b>			

Κεφ. 7: Σχεδιασμός και ανάπτυξη ηλιακού συλλέκτη Fresnel και πειραματικής διάταξης στην Αθήνα

Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	$T_{amb}$	x	
Ταχύτητα ανέμου	$U_{wind}$	x	
<b>Θερμικό λάδι</b>			
Ροή μάζας	$m_f$	x	
Θερμοκρασία εισόδου στον ηλιακό συλλέκτη	$T_{sc\_in}$		x
Θερμοκρασία εξόδου στον ηλιακό συλλέκτη	$T_{sc\_out}$		x
Ειδική θερμότητα	$C_{pf}$		x
Θερμική αγωγιμότητα	$k_f$		x
Δυναμική συνεκτικότητα	$\mu_f$		x
Πυκνότητα	$d_f$		x
<b>Σύστημα και επενεργητές</b>			
Κατάσταση συστήματος	$S_{System}$	x	
Κατάσταση παρακολούθησης	$S_{Tracker}$	x	
Κατάσταση κυκλοφορητή	$S_{Pump}$	x	
Κατάσταση ψύκτη λαδιού	$S_{Cooler}$	x	
Κατάσταση ηλεκτρικής αντίστασης	$S_{Res}$	x	
<b>Σειρά ανακλαστήρα υπό παρακολούθηση</b>			
Τιμή encoder	Encoder	x	
Γωνία θέσης σειράς (set angle)	$\theta_{set}$		x
Πραγματική γωνία θέσης	$\theta_{real}$		x
Απόκλιση γωνίας	$\Delta\theta$		x
<b>Συντελεστές γωνίας πρόσπτωσης</b>			
Συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης	IAM		x
Συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο	$IAM_{trans}$		x
Συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης στο επίμηκες επίπεδο	$IAM_{long}$		x
<b>Απόδοση ηλιακού συλλέκτη</b>			
Ωφέλιμη θερμότητα ηλιακού συλλέκτη	$Q_{use}$		x
Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη	$Q_{irr}$		x
Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη	$\eta$		x

## 7.6 Διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ηλιακού συλλέκτη σχεδιάστηκαν συγκεκριμένα τεστ μετρήσεων, από τα οποία είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόδοσης. Σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο του τεστ απόδοσης ηλιακών συλλεκτών, η γενικευμένη εξίσωση της στιγμιαίας απόδοσης απλοποιείται για τους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες Fresnel και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση για μεταβατική κατάσταση:

$$n = n_o \cdot IAM_{trans} \cdot IAM_{long} - c_1 \cdot \frac{(T_f - T_{amb})}{DNI} - c_2 \cdot \frac{(T_f - T_{amb})^2}{DNI} - c_5 \cdot \frac{(T_f - T_f^{old})}{dt \cdot DNI} \quad (7-1)$$

Ενώ για μόνιμη κατάσταση απαλείφεται ο τελευταίος όρος της εξίσωσης και έτσι, ισχύει:

$$n = n_o \cdot IAM_{trans} \cdot IAM_{long} - c_1 \cdot \frac{(T_f - T_{amb})}{DNI} - c_2 \cdot \frac{(T_f - T_{amb})^2}{DNI} \quad (7-2)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $n_o$ ,  $c_1$  και  $c_2$  προτείνεται η διεξαγωγή τεστ μετρήσεων σε μόνιμη κατάσταση με τέσσερα θερμοκρασιακά επίπεδα του θερμικού λαδιού. Είναι σκόπιμο οι θερμοκρασίες να καλύπτουν το εύρος λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη. Η ελάχιστη θερμοκρασία θα πρέπει να προσεγγίζει τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος (ιδανικά  $T_{amb} \pm 3K$ ). Η μέγιστη θερμοκρασία του θερμικού λαδιού θα πρέπει να προσεγγίζει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη. Εν προκειμένω, η μέγιστη θερμοκρασία λαμβάνεται από τις προδιαγραφές του εξοπλισμού της πειραματικής διάταξης ( $250^\circ C$ ). Οι άλλες δύο θερμοκρασίες λαμβάνονται περίπου σε ίσα διαστήματα στο θερμοκρασιακό εύρος. Σε κάθε θερμοκρασία λαμβάνονται μετρήσεις 15 λεπτών σε μόνιμη κατάσταση, όπως αυτή ορίζεται παρακάτω. Συνολικά λαμβάνονται τέσσερα τεστ στην ίδια θερμοκρασία.

Ο ηλιακός συλλέκτης θεωρείται ότι λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, αν τα μετρούμενα μεγέθη λαμβάνουν τιμές εντός των εξής ορίων: θερμοκρασία εισόδου του θερμικού λαδιού  $\pm 0.1 K$ , θερμοκρασία εξόδου του θερμικού λαδιού  $\pm 0.5 K$ , ροή μάζας του θερμικού λαδιού  $\pm 1\%$ , θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος  $\pm 1.5 K$  και ηλιακή ακτινοβολία  $\pm 50 W/m^2$ . Σε κάθε περίπτωση, η ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να λαμβάνει τιμές άνω των  $650 W/m^2$ .

Τα 16 σετ πειραμάτων αφορούν μέσες τιμές του κάθε χρονικού διαστήματος των μεγεθών που μετρώνται ( $DNI$ ,  $T_{amb}$ ,  $T_{sc\_in}$ ,  $T_{sc\_out}$ ,  $m_f$ ) και των μεγεθών που υπολογίζονται ( $T_{sc\_m}$ ,  $C_p$ ,  $Q_{use}$ ,  $DT/DNI$ ,  $n$ ,  $IAM$ ). Για τον υπολογισμό των τιμών των συντελεστών  $n_o$ ,  $c_1$  και  $c_2$ , χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

Αξιζει να αναφερθεί ότι η διαδικασία του προτύπου εφαρμόζει σε ηλιακούς συλλέκτες που παρουσιάζουν καθετότητα με τον ήλιο, ώστε να μηδενίσουν οι συντελεστές διόρθωσης της γωνίας πρόσπτωσης. Αυτό είναι εφικτό στους περισσότερους ηλιακούς συλλέκτες συμπεριλαμβανομένων και των κοιλοπαραβολικών συλλεκτών (parabolic troughs). Όμως, οι ηλιακοί συλλέκτες τεχνολογίας Fresnel με οριζόντια τοποθέτηση είναι σχεδόν αδύνατο να παρουσιάσουν καθετότητα. Έτσι, στη συγκεκριμένη περίπτωση, προτείνεται η διεξαγωγή πειραμάτων σε χρόνο ηλιακού μεσημεριού για όλες τις διαδοχικές μέρες πειραμάτων, ώστε να εξασφαλίζεται η κατά το δυνατόν ίδια τιμή των συντελεστών IAM, οι οποίοι θα προκύψουν υπολογιστικά από το οπτικό μοντέλο και θα ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό του συντελεστή μέγιστης οπτικής απόδοσης ( $\eta_o$ ).

Ο συντελεστής  $c_5$  σχετίζεται τη θερμοχωρητικότητα των υλικών που απαρτίζουν τον απορροφητή. Υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους γινομένων της μάζας του κάθε υλικού ( $m_i$ ) επί τη ειδική θερμότητα ( $C_{p_i}$ ) και επί έναν συντελεστή βαρύτητας ( $\rho_i$ ). Ο συντελεστής βαρύτητας για το θερμικό λάδι και τον απορροφητή λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα, ενώ του γυάλινου περιβλήματος ίσος με 0.01. Ωστόσο, για τον έλεγχο της θεωρητικής τιμής μπορεί να πραγματοποιηθεί τεστ μετρήσεων μεταξύ δύο μόνιμων καταστάσεων.

$$c_5 = \sum_i m_i \cdot C_{p_i} \cdot \rho_i \quad (7-3)$$

Όσον αφορά το συντελεστή IAM, οι τιμές του προκύπτουν υπολογιστικά από το μοντέλο της οπτικής ανάλυσης. Ωστόσο, θα μπορούσε να γίνει σύγκριση των θεωρητικών τιμών με τις μετρήσεις θέτοντας τον ηλιακό συλλέκτη σε λειτουργία παρακολούθησης με σταθερή παροχή ( $\pm 1\%$ ) και με σταθερή μέση θερμοκρασία του ρευστού ( $T_{amb} \pm 3K$ ). Με ολόημερα τεστ μετρήσεων λαμβάνεται ο αριθμητικός μέσος των συμμετρικών τιμών ως προς το ηλιακό μεσημέρι για σύγκριση των αποτελεσμάτων.



### 7.7 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα εργασιών που σχετίζονται με το πειραματικό σκέλος της διδακτορικής διατριβής. Τα κύρια συμπεράσματα του κεφαλαίου συνοψίζονται στα εξής:

- Αναπτύχθηκε πρωτότυπο ηλιακού συλλέκτη καθαρής επιφάνειας 56m<sup>2</sup> στην Αθήνα. Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από επίπεδους ανακλαστήρες, δευτερεύον δέκτη γεωμετρίας CPC και απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό.
- Αναπτύχθηκε πειραματική διάταξη μέγιστης θερμοκρασίας 250°C με θερμικό λάδι για τη μέτρηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του ηλιακού συλλέκτη. Η παραχθείσα θερμότητα από τους ηλιακούς συλλέκτες απορρίπτεται ελεγχόμενα μέσω ψύκτη λαδιού στον αέρα περιβάλλοντος.
- Σχεδιάστηκε συγκεκριμένη διαδικασία διενέργειας πειραμάτων σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο μέτρησης των ηλιακών συλλεκτών. Η διαδικασία του προτύπου προσαρμόστηκε στους ηλιακούς συλλέκτες τεχνολογίας Fresnel, όπου λόγω οριζόντιας τοποθέτησης δεν είναι εφικτή η καθετότητα της επιφάνειας του ηλιακού συλλέκτη με τον Ήλιο.
- Αναπτύχθηκαν φύλλα ελέγχου της λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη και της πειραματικής διάταξης. Επιπλέον, σχεδιάστηκε η διαδικασία αξιολόγησης των μετρήσεων και χαρακτηρισμού του ηλιακού συλλέκτη.

Οι πειραματικές εργασίες στη συγκεκριμένη διάταξη ολοκληρώθηκαν με δοκιμαστικές μετρήσεις για τον ποιοτικό έλεγχο της λειτουργίας του συλλέκτη και της διάταξης, για τους λόγους που αναφέρονται στην εισαγωγή του κεφαλαίου. Για την ολοκλήρωση των πειραματικών δραστηριοτήτων, ο συγγραφέας της διατριβής μετέβη στο εξωτερικό σε αντίστοιχη υποδομή ηλιακών συλλεκτών Fresnel. Οι σχετικές εργασίες παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 8.

## **8 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ FRESNEL ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ**

### **8.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ερευνητικών δραστηριοτήτων που σχετίζονται με τη διεξαγωγή μετρήσεων ηλιακού συλλέκτη και την επικύρωση των υπολογιστικών μοντέλων.

Σε συνέχεια των πειραματικών δραστηριοτήτων του προηγούμενου κεφαλαίου ο συγγραφέας μετέβη στην Κύπρο, σε ερευνητική υποδομή του Ινστιτούτου Κύπρου [107], με στόχο τη διεξαγωγή πειραμάτων σε ηλιακό συλλέκτη τεχνολογίας Fresnel. Το ταξίδι υλοποιήθηκε στα πλαίσια ανταλλαγής ερευνητών του ερευνητικού έργου INSHIP [108] μεταξύ του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) και του Ινστιτούτου Κύπρου (Cyl).

Ο ηλιακός συλλέκτης ανακλαστικής επιφάνειας  $184.32\text{m}^2$ , αποτελείται από ανακλαστές παραβολικού σχήματος που συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό εσωτερικά του οποίου κυκλοφορεί θερμικό λάδι. Πάνω από τον απορροφητή υπάρχει δευτερεύον ανακλαστήρας παραβολικού σχήματος.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι έλεγχοι που διενεργήθηκαν για την αποτύπωση των τεχνικών χαρακτηριστικών του ηλιακού συλλέκτη. Αναλύεται ο υφιστάμενος μετρητικός εξοπλισμός της εγκατάστασης καθώς και ο φορητός μετρητικός εξοπλισμός που αναπτύχθηκε για το συγκεκριμένο σκοπό. Η σύγκριση των μετρήσεων από τα δύο μετρητικά συστήματα ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Κατόπιν, παρουσιάζεται το υπολογιστικό μοντέλο του ηλιακού συλλέκτη το οποίο παραμετροποιήθηκε βάσει των κατασκευαστικών στοιχείων. Ακολουθεί σύγκριση των μετρήσεων με τις εκτιμήσεις του μοντέλου για ενδεικτικές ημέρες. Η σύγκριση αφορά μεγάλα χρονικά διαστήματα με λειτουργία σε διαφορετικές συνθήκες. Η καλή κατάσταση της υποδομής διευκολύνει τις ερευνητικές εργασίες επιτρέποντας την εξαγωγή ωφέλιμων συμπερασμάτων.

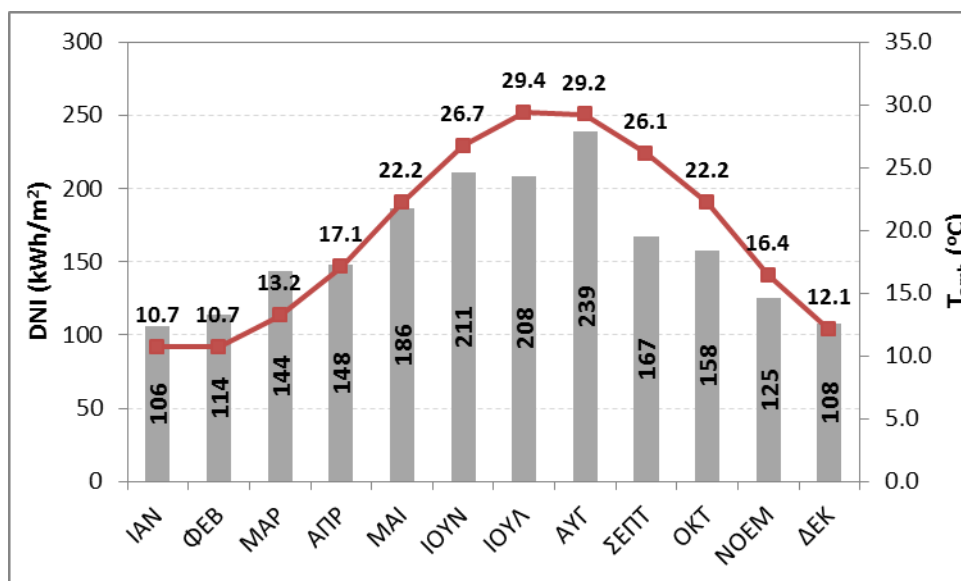
## 8.2 Πειραματική διάταξη

Το ηλιακό σύστημα βρίσκεται στη Λευκωσία, στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου Κύπρου, με γεωγραφικό στίγμα  $35.160^{\circ}$  N /  $33.377^{\circ}$  E. Ο ηλιακός συλλέκτης είναι εγκατεστημένος σε ταράτσα κτιρίου γραφείων, με προσανατολισμό Νότου – Βορρά.

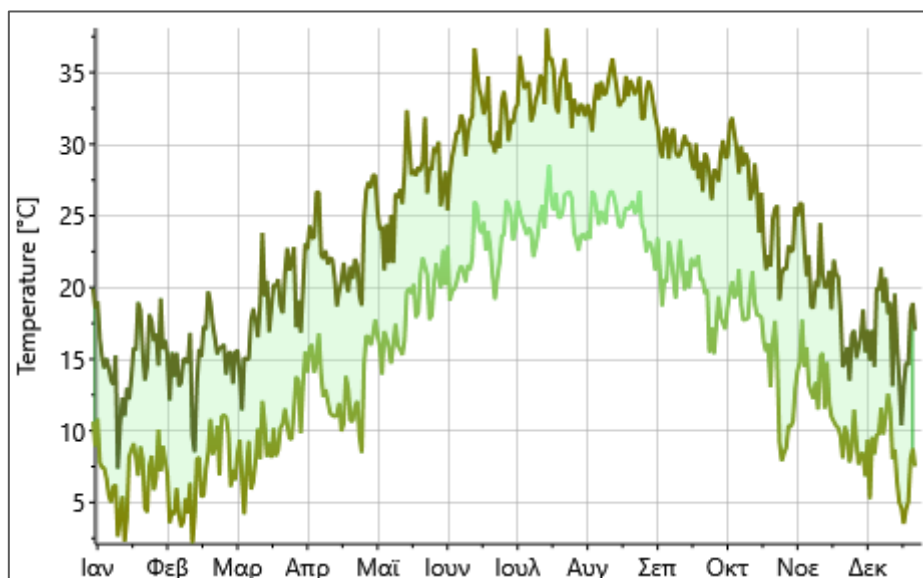


Σχήμα 8-1: Όψη του ηλιακού συστήματος [107]

Για τη Λευκωσία, το ετήσιο ηλιακό δυναμικό της DNI ακτινοβολίας ανέρχεται σε  $1,913 \text{ kWh/m}^2$ , σύμφωνα με στοιχεία από λογισμικό Meteonorm [109]. Η μέση ημερήσια προσπίπτουσα DNI ακτινοβολία είναι  $5.3 \text{ kWh/m}^2$ . Η διακύμανση της DNI ακτινοβολίας φαίνεται στο παρακάτω γράφημα, μαζί με τη διακύμανση της μέσης μηνιαίας 24ώρης θερμοκρασίας του αέρα.

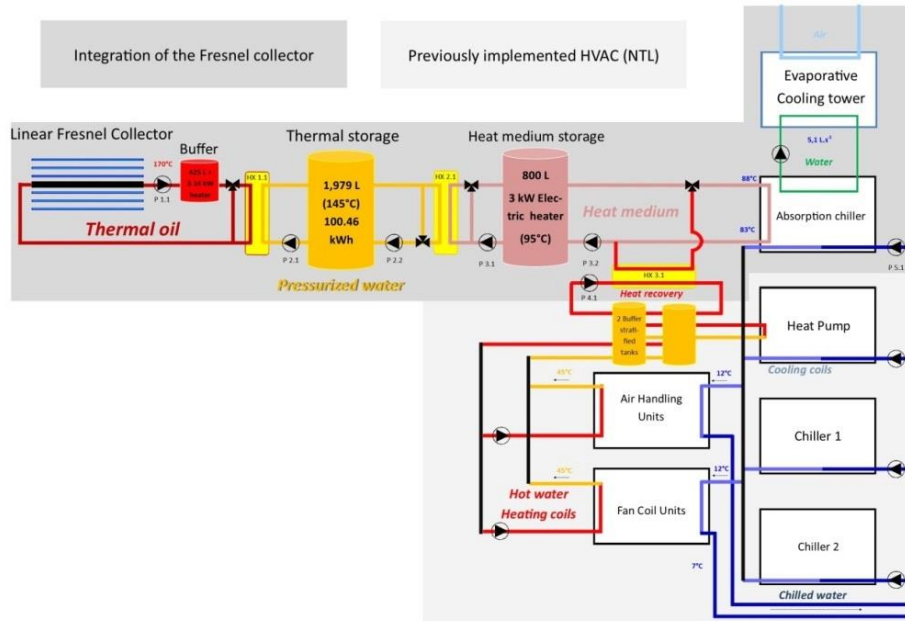


Σχήμα 8-2: Μετεωρολογικά δεδομένα ακτινοβολίας DNI και μέσης θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος, Λευκωσία



Σχήμα 8-3: Μέγιστη μέση ημερήσια (πράσινο σκούρο) και ελάχιστη μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, Λευκωσία

Το ηλιακό σύστημα ανάλογα με την εποχή παρέχει ψύξη και θέρμανση σε κτίριο γραφείων. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι 180°C. Το θερμικό λάδι μεταφέρει, μέσω πλακοειδούς εναλλάκτη, τη θερμότητα στο δευτερεύον κύκλωμα με νερό υψηλής πίεσης. Στο κύκλωμα αυτό υπάρχει αποθήκη θερμότητας χωρητικότητας 2 m<sup>3</sup>. Έπειτα, μέσω δεύτερου πλακοειδούς εναλλάκτη, μεταφέρεται η θερμότητα σε κύκλωμα νερού χαμηλής πίεσης. Τους χειμερινούς μήνες, η παραχθείσα θερμότητα αξιοποιείται για θέρμανση, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες για ηλιακή ψύξη μέσω μονοβάθμιου ψύκτη απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου (LiBr).



Σχήμα 8-4: Σχηματικό διάγραμμα του ηλιακού συστήματος [107]

Το ηλιακό πεδίο Fresnel αποτελείται από 184.32 m<sup>2</sup> ανακλαστικής επιφάνειας με μήκος 32 m και συνολικό πλάτος 8.2 m. Η απόσταση του δέκτη από το επίπεδο των ανακλαστήρων είναι 3.56 m. Αποτελείται από 18 σειρές ανακλαστήρων, πλάτους 0.32 m με μέσο ενδιάμεσο κενό 0.14 m. Το σχήμα των σειρών είναι παραβολικό και το σημείο εστίασης κυμαίνεται από 3.8 m έως 5.9 m ανάλογα με την απόσταση της κάθε σειράς από το δέκτη. Στη γραμμή εστίασης υπάρχουν 8 διαδοχικοί σωλήνες κενού, με 0.070 m εξωτερική διάμετρο του απορροφητή και 0.125 m εξωτερική διάμετρο του γυάλινου περιβλήματος. Πάνω από τον απορροφητή έχει τοποθετηθεί δευτερεύον ανακλαστήρας παραβολικού σχήματος. Η κίνηση των ανακλαστήρων επιτυγχάνεται με 72 DC κινητήρες και οι ανακλαστήρες ελέγχονται μέσω PLC σύμφωνα με τη θέση του Ηλίου.



Σχήμα 8-5: Ηλιακός συλλέκτης Fresnel [110]

### 8.3 Μετρητικός εξοπλισμός

Για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του ηλιακού συλλέκτη χρησιμοποιήθηκαν δύο παράλληλα συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής των μετρήσεων. Το πρώτο σύστημα αφορά τον εγκατεστημένο μετρητικό εξοπλισμό της εγκατάστασης, ενώ το δεύτερο αφορά το φορητό μετρητικό εξοπλισμό που αναπτύχθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

#### 8.3.1 Μετρητικός εξοπλισμός διάταξης

Για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος και την ενεργειακή αξιολόγηση του συστήματος έχει εγκατασταθεί εκτενές σύστημα ελέγχου και εποπτείας με μετρητικά όργανα τοποθετημένα σε διάφορα σημεία. Όσον αφορά το ηλιακό κύκλωμα, υπάρχουν αισθητήρια θερμοκρασίας στην είσοδο και έξοδο του ηλιακού συλλέκτη ( $T_{sc\_in}$  και  $T_{sc\_out}$ ), πυρηλιόμετρο με κίνηση 2 αξόνων για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας καθέτου επιπέδου (DNI), αισθητήριο θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος ( $T_{amb}$ ) και μετρητής ροής μάζας ( $m_f$ ). Τα βασικά χαρακτηριστικά των οργάνων συγκεντρώνει ο Πίνακας 8-1.

Πίνακας 8-1: Μετρητικά όργανα του ηλιακού πεδίου

Σύμβολο	Περιγραφή	Αισθητήρας	Ακρίβεια
DNI	Άμεση ηλιακή ακτινοβολία καθέτου επιπέδου	EKO STR21G – LP PYRHE16	$\pm 1\% MV$
$T_{amb}$	Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	Vantage Pro 2	$\pm 0.3^{\circ}C$
$T_{sc\_in}$	Θερμοκρασία θερμικού λαδιού στην είσοδο του ηλιακού συλλέκτη	PT100, Class 1/3	$\pm (0.1+0.015 t )$
$T_{sc\_out}$	Θερμοκρασία θερμικού λαδιού στην έξοδο του ηλιακού συλλέκτη	PT100, Class 1/3	$\pm (0.1+0.015 t )$
$m_f$	Ροή μάζας θερμικού λαδιού	ProWirl F200	$\pm 1\% MV$

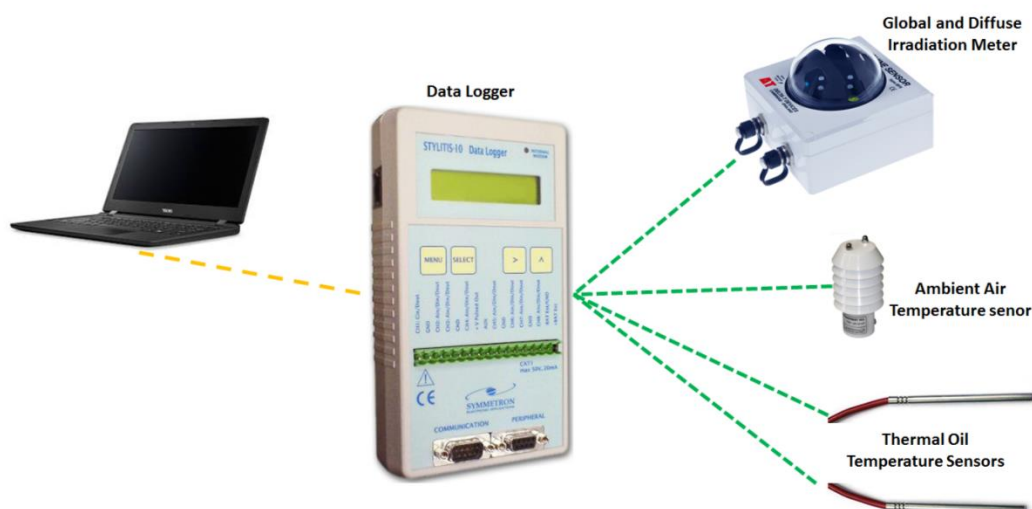
Οι θερμοκρασίες του θερμικού λαδιού λαμβάνονται στην είσοδο και έξοδο του ηλιακού συλλέκτη από αισθητήρια άμεσης επαφής. Η ροή μάζας λαμβάνεται από ροόμετρο στην έξοδο του ηλιακού συλλέκτη. Τα σήματα των αισθητηρίων διαβάζονται από το PLC, απεικονίζονται σε οθόνη εποπτείας και καταγράφονται με χρονικό βήμα 30 s.



Σχήμα 8-6: Αισθητήρα θερμοκρασίας θερμικού λαδιού στην έξοδο (αριστερά) και είσοδο του ηλιακού συλλέκτη (κέντρο) και ροόμετρο (δεξιά)

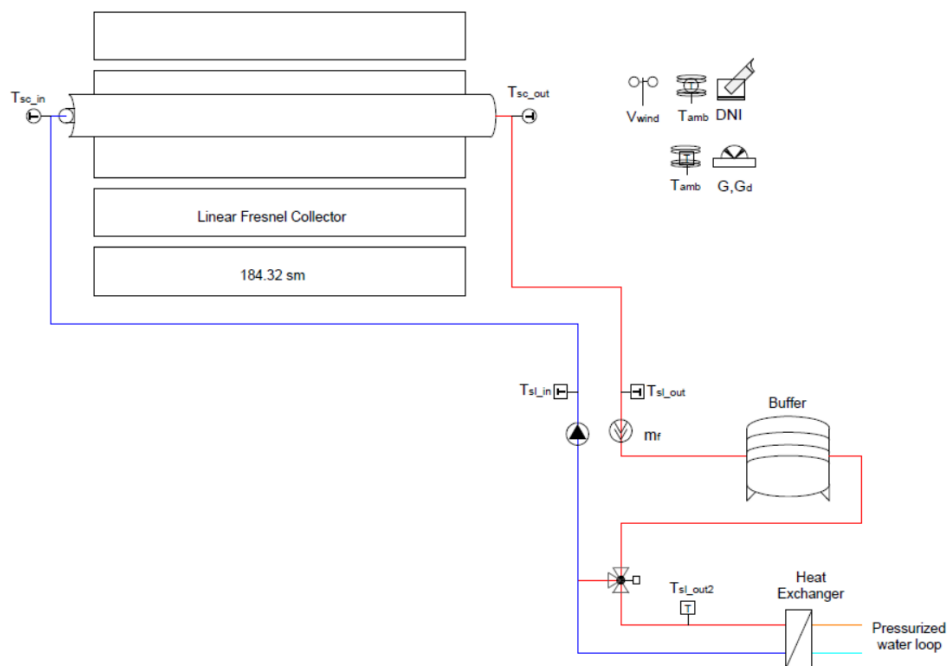
### 8.3.2 Φορητός μετρητικός εξοπλισμός

Για τις μετρήσεις του ηλιακού συλλέκτη αναπτύχθηκε φορητός μετρητικός εξοπλισμός. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός μπορεί να αξιοποιηθεί σε εφαρμογές παρακολούθησης της ενεργειακής συμπεριφοράς ηλιακών συλλεκτών και συστημάτων. Αποτελείται από δύο αισθητήρια θερμοκρασίας λαδιού έμμεσης επαφής, ένα αισθητήριο θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος, έναν υβριδικό μετρητή ακτινοβολίας και το καταγραφικό.



Σχήμα 8-7: Βασικός εξοπλισμός φορητού συστήματος

Στο Σχήμα 8-8 απεικονίζονται οι θέσεις των μετρητικών οργάνων της εγκατάστασης και του φορητού εξοπλισμού στο ηλιακό κύκλωμα.



Σχήμα 8-8: Σχέδιο ηλιακού κυκλώματος και μετρητικού εξοπλισμού

Ο Πίνακας 8-2 συγκεντρώνει τα μετρητικά όργανα που απαρτίζουν το φορητό εξοπλισμό.

Πίνακας 8-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητηρίων φορητού εξοπλισμού

Σύμβολο	Περιγραφή	Αισθητήρας	Ακρίβεια
$G$	Ολική ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου	$\Delta T$ BF5	$\pm 12\% MV$
$G_d$	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου	$\Delta T$ BF5	$\pm 15\% MV$
$T_{amb}$	Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος	PT1000, Class B	$\pm (0.3 + 0.005  t )$
$T_{sl\_in}$	Θερμοκρασία θερμικού λαδιού στην προσαγωγή του ηλιακού συλλέκτη	PT1000, Class A	$\pm (0.15 + 0.002  t )$
$T_{sl\_out}$	Θερμοκρασία θερμικού λαδιού στην επιστροφή από τον ηλιακό συλλέκτη	PT1000, Class A	$\pm (0.15 + 0.002  t )$

Στο Σχήμα 8-9 απεικονίζονται τα σημεία τοποθέτησης των αισθητηρίων του φορητού εξοπλισμού. Τα αισθητήρια θερμοκρασίας ενσωματώθηκαν με περιέλιξη χάλκινων συρμάτων σε κυάθια στα οποία ήταν εγκατεστημένα οπτικά θερμόμετρα. Το καταγραφικό μετρήσεων, ο αισθητήρας αέρα περιβάλλοντος και ο μετρητής ηλιακής ακτινοβολίας



τοποθετήθηκαν κοντά στα σημεία λήψης των θερμοκρασιών του λαδιού.



Σχήμα 8-9: Σημεία τοποθέτησης αισθητηρίου ακτινοβολίας (αριστερά) και αισθητηρίων θερμοκρασίας λαδιού (δεξιά) του φορητού εξοπλισμού

Το καταγραφικό διαβάζει τις τιμές των αισθητηρίων και τις καταγράφει σε εσωτερική μνήμη με χρονικό βήμα 30 s. Οι καταγραφές αφορούν μέσες τιμές του χρονικού διαστήματος. Οι μετρήσεις απεικονίζονται σε πραγματικό χρόνο και σε διαγράμματα με ιστορικότητα.



Σχήμα 8-10: Δειγματοληψία στο πεδίο και απεικόνιση δεδομένων μέσω υπολογιστή (αριστερά) και μετρητικά όργανα πριν την τοποθέτησή τους στο ηλιακό πεδίο (δεξιά)

#### 8.4 Μοντελοποίηση ηλιακού συλλέκτη

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι της διάταξης με σκοπό τη μέτρηση των βασικών χαρακτηριστικών του ηλιακού συλλέκτη και του κυκλώματος (Πίνακας 8-3).

Πίνακας 8-3: Σειρά ενεργειών προετοιμασίας μοντέλου και διενέργειας πειραμάτων

Έλεγχος	Πράξη	Σχόλια
Έλεγχος καθαριότητας ανακλαστήρων	Καθαρισμός	-
Έλεγχος προσανατολισμού	Υλοποιήθηκε προσεγγιστικά από εικόνες δορυφόρων	-
Δειγματοληπτικός έλεγχος πλάτους, πάχους και μήκους ανακλαστήρων	Μέτρηση με μέτρο, αποστασιόμετρο laser και παχύμετρο	-
Μέτρηση αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών σειρών, ύψους και ανοίγματος δέκτη	Μέτρηση με μέτρο / αποστασιόμετρο laser	-
Έλεγχος των παραβολικών σχημάτων της κάθε σειράς	Σύγκριση τιμών σχεδίων με σημειώσεις στην πίσω πλευρά των ανακλαστήρων	Απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός φωτογραμμετρίας για να αποτυπωθεί με ακρίβεια η καμπυλότητα των ανακλαστήρων.
Έλεγχος ποιότητας ανακλαστήρων	Οπτικός έλεγχος	Δεν παρατηρήθηκαν αλλοιώσεις
Έλεγχος ανακλαστικότητας πρωτεύοντων και δευτερευόντος ανακλαστήρων	N/A	Απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός (reflectometer)
Έλεγχος ανωμαλιών επιφάνειας ανακλαστήρων	Οπτικός έλεγχος πρωινής ώρας με ευθυγράμμιση Ηλίου – παρατηρητή (απέναντι κτίριο)– ηλιακού συλλέκτη	Απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός φωτογραμμετρίας για ακριβή αποτύπωση
Έλεγχος απόκλισης γωνίας σειρών ανακλαστήρων από τις μετρούμενες τιμές	Έλεγχος με ηλεκτρονικά αλφάδια	Δειγματοληπτικός έλεγχος Δυτικών σειρών. Παρατηρήθηκε διακύμανση αποκλίσεων
Έλεγχος σφάλματος τοποθέτησης ανακλαστήρων	Έλεγχος μεταξύ διαδοχικών σειρών	Παρατηρήθηκαν αποκλίσεις χιλιοστών σε μεμονωμένες σειρές
Αποτύπωση υδραυλικού δικτύου	Μέτρηση με μέτρο / αποστασιόμετρο laser	Παραγωγή σχηματικού διαγράμματος ηλιακού κυκλώματος

Από την παραπάνω σειρά ελέγχων, αποτυπώθηκαν αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του ηλιακού συλλέκτη και του ηλιακού κυκλώματος. Όπου δεν ήταν εφικτές οι επιτόπιες μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες από τα φύλλα προδιαγραφών και σχεδίων των κατασκευαστών.

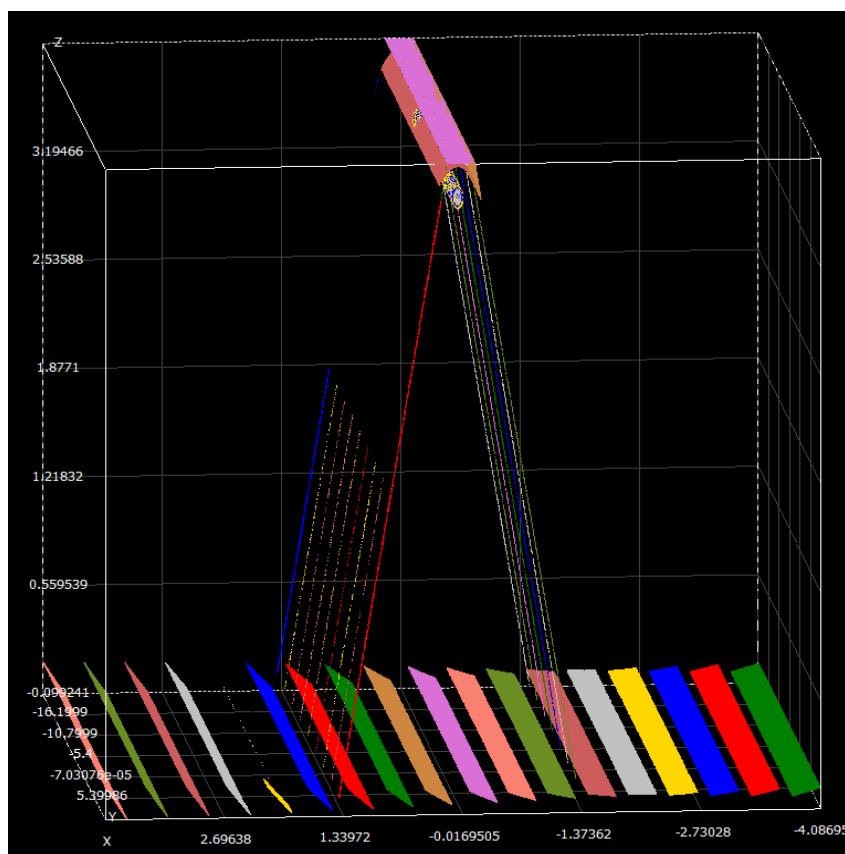
Ο εγκατεστημένος ηλιακός συλλέκτης μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με τα στοιχεία που προέκυψαν από τον επιτόπου έλεγχο και τα διαθέσιμα κατασκευαστικά στοιχεία. Δεδομένων των μετρήσεων, αρχικά υπολογίζονται οι συντελεστές μέγιστης απόδοσης ( $\eta_0$ ) και οι συντελεστές γωνίας πρόσπτωσης (IAM), η εκτιμώμενη θερμοκρασία εξόδου του θερμικού λαδιού ( $T_{sc\_out}$ ), η παραχθείσα θερμότητα ( $Q_{use}$ ) και οι θερμικές απώλειες ( $Q_{loss}$ ).

Για την οπτική ανάλυση του ηλιακού συλλέκτη αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο σε πρόγραμμα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας [88]. Περισσότερα στοιχεία της μοντελοποίησης υπάρχουν στα κεφάλαια 5 και 6.

Στο νέο μοντέλο δηλώθηκαν τα ακριβή κατασκευαστικά στοιχεία του ηλιακού συλλέκτη, που αφορούν τους πρωτεύοντες ανακλαστήρες παραβολικού σχήματος με διαφορετική καμπύλη η κάθε σειρά, ο δευτερεύον ανακλαστήρας παραβολικού σχήματος, οι κολώνες στήριξης του δέκτη, τα κάθετα τμήματα των σωλήνων προσαγωγής και επιστροφής του θερμικού λαδιού, τα ανενεργά τμήματα των απορροφητών και οι σύνδεσμοι των απορροφητών (φλάντζες).

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η προσθήκη των σκιάσεων και των ανενεργών τμημάτων στο οπτικό μοντέλο οδηγεί σε μείωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον απορροφητή κατά 4.7%, όταν ο Ήλιος έχει 30° αζιμούθιο και 30° γωνία ζενίθ. Το Σχήμα 8-11 παρουσιάζει την εικόνα από τη μοντελοποίηση του ηλιακού συλλέκτη.

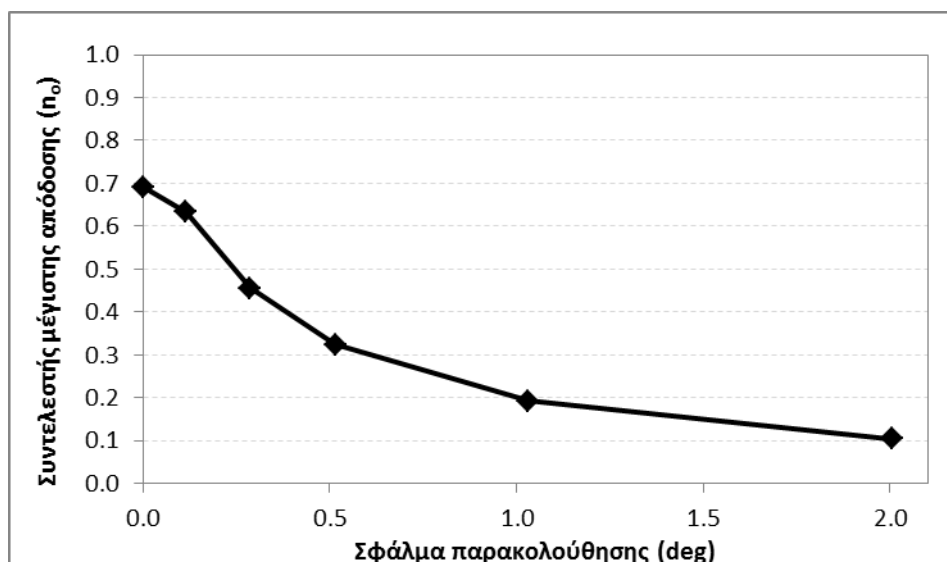
Η ανακλαστικότητα των πρωτευόντων ανακλαστήρων είναι  $\rho_{pr}=0.924$ , η ανακλαστικότητα του δευτερεύοντα ανακλαστήρα είναι  $\rho_{sr}=0.883$  [111], η διαπερατότητα του γυάλινου περιβλήματος  $\tau_{gl}=0.964$  και ο δείκτης διάθλασης  $n=1.52$ .



Σχήμα 8-11: Οπτική ανάλυση ηλιακού μοντέλου με προσθήκη σκιάσεων στους ανακλαστήρες και ανενεργών τμημάτων

Έπειτα, διενεργήθηκε παραμετρική ανάλυση ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση του σφάλματος παρακολούθησης στο συντελεστή μέγιστης οπτικής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη ( $\eta_0$ ).

Λόγω του παραβολικού σχήματος των πρωτευόντων ανακλαστήρων, ο ιδανικός μηχανισμός παρακολούθησης οδηγεί σε συγκέντρωση της ακτινοβολίας στο κάτω μέρος του απορροφητή με προφίλ συγκέντρωσης που προσεγγίζει το αντίστοιχο των παραβολικών συλλεκτών. Από την παραμετρική ανάλυση, διαπιστώνεται ότι αύξηση του σφάλματος παρακολούθησης οδηγεί σε διάχυση της ακτινοβολίας στο δέκτη και ο δευτερεύον δέκτης αποκτά πλέον καθοριστικό ρόλο στην οπτική απόδοση. Στο Σχήμα 8-12 απεικονίζεται η επίδραση του σφάλματος παρακολούθησης στο συντελεστή οπτικών απωλειών. Ο ιδανικός μηχανισμός παρακολούθησης οδηγεί σε συντελεστή οπτικών απωλειών 0.69, ενώ σφάλμα  $0.1^\circ$  μειώνει το συντελεστή στο 0.63. Η αύξηση του σφάλματος πέραν του  $0.1^\circ$  παρατηρείται ότι μειώνει σημαντικά την οπτική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη.

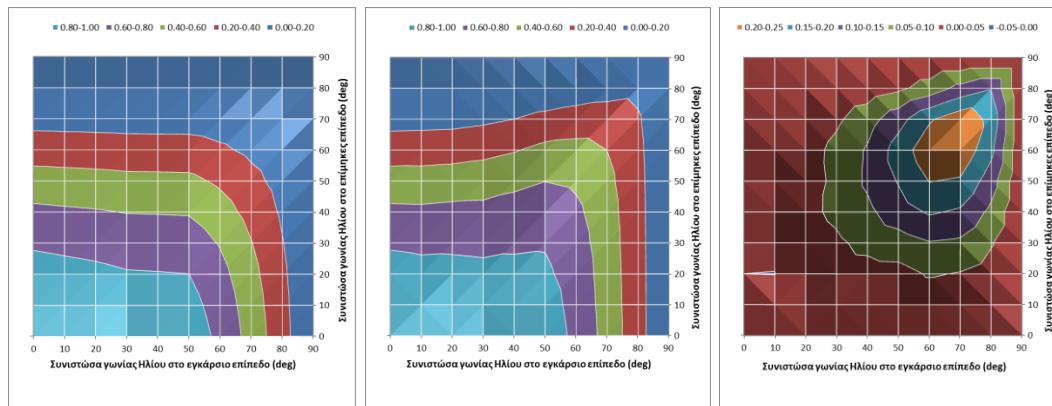


Σχήμα 8-12: Επίδραση σφάλματος παρακολούθησης στο συντελεστή οπτικής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη

Για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης γωνίας πρόσπτωσης (IAM), έγινε σύγκριση δύο μεθόδων υπολογισμού: του αληθινού IAM ( $IAM_{true}$ ), όπως υπολογίζεται για τη θέση του Ηλίου και του διακριτοποιημένου IAM ( $IAM_F$ ). Ο διακριτοποιημένος  $IAM_F$  προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των επιμέρους δύο συντελεστών και δίνεται από την εξίσωση:

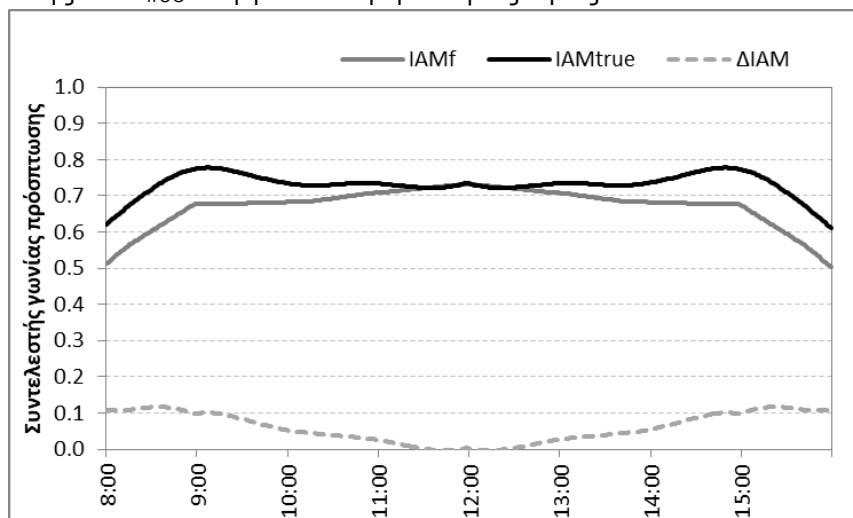
$$IAM_F = IAM_{trans} \cdot IAM_{long} \quad (8-1)$$

Η σύγκριση έδειξε ότι η διαφορά του IAM των δύο μεθόδων είναι αμελητέα (0-0.05 σε απόλυτο νούμερο) όταν η συνιστώσα του Ηλίου στο εγκάρσιο ή στο επίμηκες επίπεδο έχει απόκλιση από το ζενίθ μικρότερη από 20°. Για διαφορετικές θέσεις του Ηλίου, οι αποκλίσεις μεγαλώνουν και φτάνουν μέχρι 0.25. Γενικά, ο διακριτοποιημένος  $IAM_F$  οδηγεί σε ελαφρώς χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τη μέθοδο του αληθινού συντελεστή  $IAM_{true}$ , οδηγώντας σε μικρότερη παραγωγή θερμότητας κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες. Αντίθετα, η μέθοδος του συντελεστή  $IAM_{true}$  προσεγγίζει καλύτερα το προφίλ των μετρήσεων καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας. Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η διαφορά του συντελεστή IAM, όπως προκύπτει από τις δύο μεθόδους υπολογισμού.



Σχήμα 8-13: Διακριτοποιημένος  $IAM_F$  (αριστερά), αληθινός  $IAM_{true}$  (μέση) και απόκλιση των συντελεστών IAM (δεξιά)

Σε επίπεδο ημέρας, η επίδραση των συντελεστών IAM φαίνεται στο Σχήμα 8-14 για μία ενδεικτική μέρα μετρήσεων. Παρατηρείται συμμετρία των συντελεστών ως προς το ηλιακό μεσημέρι. Για τη συγκεκριμένη ημέρα, η μέγιστη τιμή του συντελεστή  $IAM_{true}$  παρατηρείται τρεις ώρες πριν και μετά το ηλιακό μεσημέρι. Οι αποκλίσεις των συντελεστών είναι αμελητέες γύρω από το ηλιακό μεσημέρι και αγγίζουν απόλυτη διαφορά της τάξης 0.1 τις πρωινές και απογευματινές ώρες, κατά τις οποίες ο συντελεστής  $IAM_{true}$  λαμβάνει υψηλότερες τιμές.



Σχήμα 8-14: Σύγκριση συντελεστές IAM για ενδεικτική ημέρα, 16/9/2017

Ο δέκτης αποτελείται από το μεταλλικό απορροφητή με επιλεκτική επιφάνεια, γυάλινο περίβλημα και κενό μεταξύ τους. Η μοντελοποίηση του συγκεκριμένου απορροφητή έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 5 και έχει συγκριθεί με δεδομένα της βιβλιογραφίας καθώς και με δεύτερο υπολογιστικό μοντέλο (CFD) που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Το μοντέλο προσαρμόστηκε στα δεδομένα του συγκεκριμένου ηλιακού συλλέκτη. Η απορροφητικότητα του απορροφητή είναι  $\alpha_{abs}=0.958$ . Το θερμικό μέσο που κυκλοφορεί στον απορροφητή είναι το Duratherm 450.

Δεδομένων των εξωτερικών συνθηκών λειτουργίας, της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού λαδιού, της παροχής μάζας, και της ακτινοβολίας, το μοντέλο υπολογίζει τις θερμορροές του ηλιακού συλλέκτη και τη θερμοκρασία εξόδου.

Κατά τον έλεγχο στο ηλιακό πεδίο εντοπίστηκαν αυξημένες θερμικές απώλειες από τους συνδέσμους των σωλήνων κενού (φλάντζες). Οι σύνδεσμοι λειτουργούν ως θερμογέφυρες, μεταφέροντας θερμότητα από τον απορροφητή προς τον αέρα περιβάλλοντος. Στους υπολογισμούς προστέθηκε η θερμορροή από τις φλάντζες σύμφωνα με την εξίσωση [112]:

$$Q_{39\text{cond}} = \eta_{fl} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{flange} \cdot \pi \cdot D_{fl} \cdot T_{\text{abs\_out}}^4 \quad (8-2)$$

Επιπλέον, για την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του ηλιακού συλλέκτη απαιτείται υπολογισμός της θερμοχωρητικότητας του απορροφητή. Η θερμοχωρητικότητα του απορροφητή υπολογίζεται από τη θερμοχωρητικότητα των επιμέρους υλικών που τον απαρτίζουν. Έτσι, υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους γινομένων της μάζας του κάθε υλικού ( $m_i$ ) επί την ειδική θερμότητα ( $C_{pi}$ ) και επί έναν συντελεστή βαρύτητας ( $\rho_i$ ) [97]. Ο συντελεστής λαμβάνει τιμή ίση με  $c_{sc} = 300.7 \text{ kJ/K}$ . Η τιμή του επηρεάζεται από το θερμικό μέσο κατά 73%, από το μεταλλικό απορροφητή κατά 17%, από τη φλάντζα κατά 10% ενώ η επιρροή του γυάλινου περιβλήματος είναι αμελητέα.

Πίνακας 8-4: Ανάλυση της θερμοχωρητικότητας του ηλιακού συλλέκτη

	<b>m</b>	<b>C<sub>p</sub></b>	<b>ρ</b>	<b>m C<sub>p</sub> ρ</b>	<b>Κατανομή</b>
	kg	kJ/kg.K	-	KJ/K	-
Απορροφητής	107.3	0.49	1	52.6	17%
Θερμικό μέσο	87.5	2.5	1	218.8	73%
Γυάλινο περιβλήμα	88.5	0.753	0.01	0.7	0%
Φλάντζα	58.4	0.49	1	28.6	10%
Σύνολο	283.1	-	-	300.7	100%

## 8.5 Διενέργεια πειραμάτων

### 8.5.1 Ιστορικό πειραμάτων

Ο συγγραφέας της διατριβής μετέβη στο Ινστιτούτο Κύπρου για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, που έλαβε χώρα κατά τη χρονική περίοδο 11 έως 22 Σεπτεμβρίου 2017. Ο Πίνακας 8-5 αποτυπώνει το ιστορικό των μετρήσεων.

Πίνακας 8-5: Ιστορικό μετρήσεων

Ημερομηνία	Ενέργειες
Δ 11/9/2017	Αποτύπωση χαρακτηριστικών ηλιακού συλλέκτη και πειραματικής διάταξης. Καθαρισμός ανακλαστήρων
Τ 12/9/2017	Σύνδεση φορητού μετρητικού εξοπλισμού. Λειτουργία ηλιακού συλλέκτη με απαγωγή θερμότητας από το ηλιακό κύκλωμα
Τ 13/9/2017	Λειτουργία ηλιακού συλλέκτη χωρίς απαγωγή θερμότητας με αύξηση θερμοκρασίας στους 180°C και έπειτα απενεργοποίηση της παρακολούθησης Ηλίου
Π 14/9/2017	Δοκιμαστική λειτουργία ηλιακού συλλέκτη με τις 10 εσωτερικές σειρές με απαγωγή φορτίου. Έλεγχος μετρητικού εξοπλισμού
Π 15/9/2017	Δοκιμαστική λειτουργία ηλιακού συλλέκτη με τις 8 εξωτερικές σειρές με απαγωγή φορτίου. Έλεγχος μετρητικού εξοπλισμού
Σ 16/9/2017	Λειτουργία ηλιακού συλλέκτη με απαγωγή θερμότητας από το ηλιακό κύκλωμα
Κ 17/9/2017	Λειτουργία ηλιακού συλλέκτη με απαγωγή θερμότητας από το ηλιακό κύκλωμα
Δ 18/9/2017	Καθαρισμός ανακλαστήρων. Λειτουργία με νεφοκάλυψη
Τ 19/9/2017	Μεταβατικές καταστάσεις σε χειροκίνητη λειτουργία
Τ 20/9/2017	Χειροκίνητη λειτουργία και δοκιμές. Έλεγχος ηλιακής ακτινοβολίας
Π 21/9/2017	Λειτουργία ηλιακού συλλέκτη με απαγωγή θερμότητας από το ηλιακό κύκλωμα.

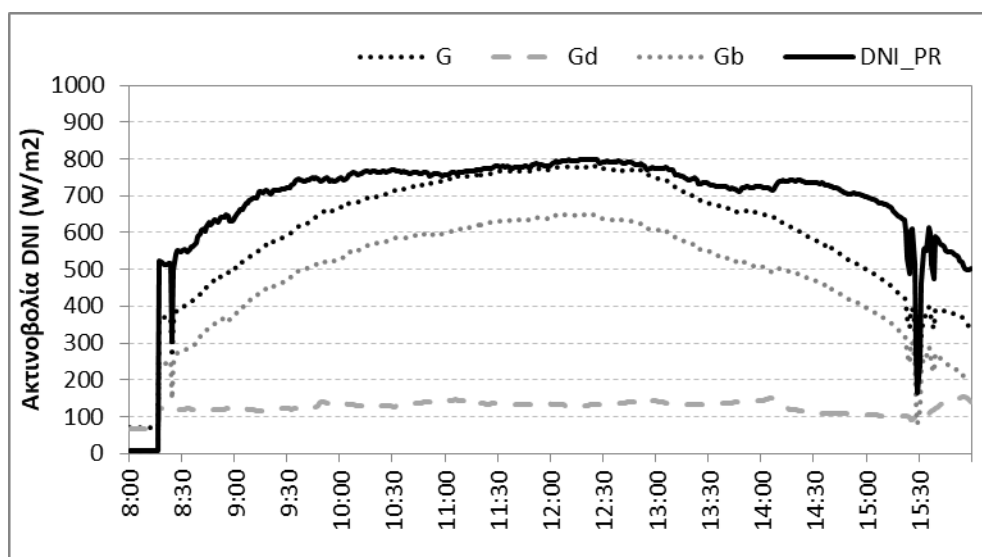


### 8.5.2 Έλεγχος μετρητικού εξοπλισμού

Πριν την αξιολόγηση των μετρήσεων του ηλιακού συλλέκτη διενεργήθηκε διεξοδικός έλεγχος της αξιοπιστίας των μετρήσεων, με σκοπό να εντοπισθούν πιθανά συστηματικά σφάλματα. Ο έλεγχος κατέστη δυνατός με συγκρίσεις μεταξύ του εξοπλισμού της διάταξης και του φορητού εξοπλισμού καθώς και με παράλληλες επιτόπιες μετρήσεις. Οι επιτόπιες μετρήσεις έγιναν και με χρήση μετρητικών ηλεκτρικών οργάνων, όπως πολύμετρο, αμπεροτσιμπίδα, θερμομέτρο laser και ακίδας και θερμοκάμερα. Η αξιοπιστία των μετρήσεων κρίθηκε κατάλληλη για το σκοπό της παρούσας έρευνας και για την εξαγωγή ωφέλιμων συμπερασμάτων.

#### 8.5.2.1 Έλεγχος μετρητών ηλιακής ακτινοβολίας

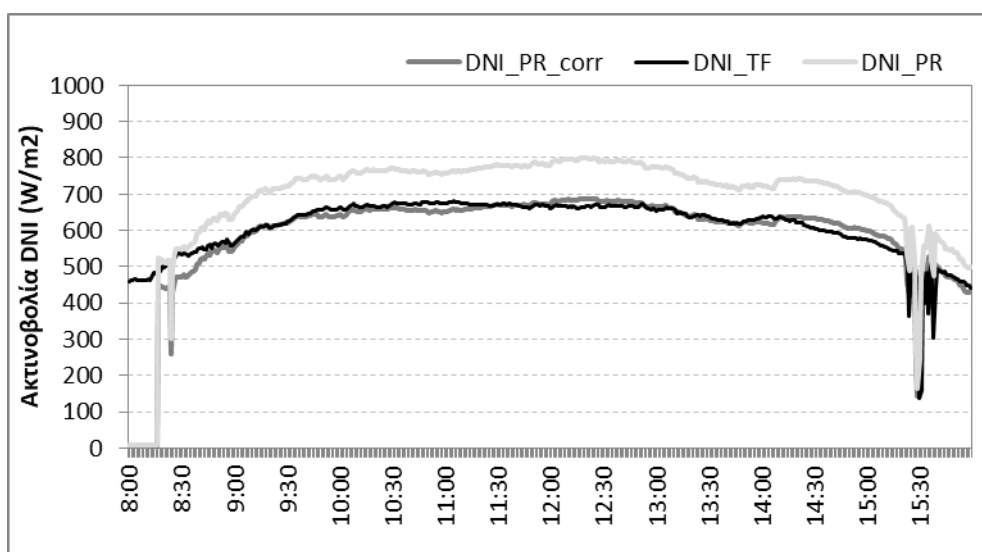
Για την ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη υπολογίζεται η άμεση ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (DNI). Για την DNI ακτινοβολία λαμβάνονται μετρήσεις από το πυρηλιόμετρο της εγκατάστασης και από το μετρητή ακτινοβολίας του φορητού εξοπλισμού. Για τον τελευταίο απαιτείται επεξεργασία των μετρήσεων για τον υπολογισμό της DNI. Συγκεκριμένα, από τις μετρήσεις ολικής ( $G$ ) και διάχυτης ακτινοβολίας ( $G_d$ ) οριζοντίου επιπέδου, υπολογίζεται η άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου ( $G_b$ ). Στη συνέχεια, βάσει του χρόνου και της θέσης Ηλίου, υπολογίζεται η άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου (DNI). Η ανάλυση των μετρήσεων και των υπολογισμένων μεγεθών για μία ημέρα με σχετικά καλή ηλιοφάνεια φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα.



Σχήμα 8-15: Ανάλυση μετρήσεων μετρητή ακτινοβολίας φορητού εξοπλισμού

Για την ίδια ημέρα, στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται συγκριτικά οι μετρήσεις της DNI ακτινοβολίας από τα δύο όργανα. Παρατηρείται ότι

ο μετρητής ακτινοβολίας του φορητού εξοπλισμού (DNI) έχει διαφορά (θετικό offset) καταγράφοντας υψηλότερες τιμές σε σχέση με το πυρηλιόμετρο (DNI\_TF) της εγκατάστασης. Για επιβεβαίωση της μέτρησης, πραγματοποιήθηκε δεύτερη σύγκριση του φορητού μετρητή με άλλο πυρηλιόμετρο ολικής ακτινοβολίας και αποδείχθηκε ότι ο μετρητής του φορητού εξοπλισμού εξάγει υψηλότερες τιμές. Θεωρώντας το πυρηλιόμετρο ως πρότυπο όργανο, λόγω της ακρίβειας του και της παλαιότητάς του, ο φορητός μετρητής βαθμονομήθηκε. Πλέον παρατηρείται καλή σύγκλιση των δύο οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας DNI. Μάλιστα η καλή σύγκλιση παρατηρείται κατά το ηλιακό μεσημέρι αλλά και στις υπόλοιπες ώρες της ημέρας. Η μέση απόκλιση είναι  $17.1 \text{ W/m}^2$ .



Σχήμα 8-16: Συγκριτικές μετρήσεις της ακτινοβολίας DNI

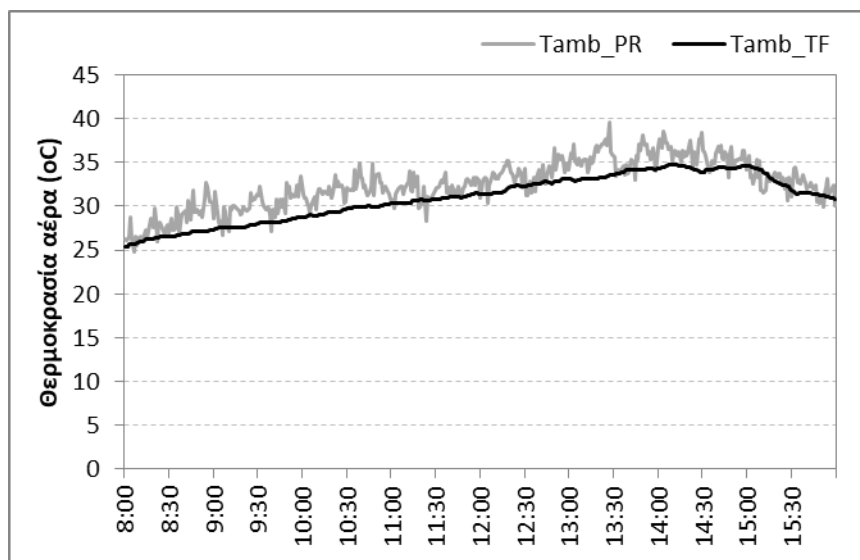
Αντίστοιχη μελέτη εργαστηρίου δοκιμών ηλιακών συλλεκτών συνέκρινε τρεις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης DNI ακτινοβολίας και αποτύπωσε τις αποκλίσεις των συγκεκριμένων οργάνων. Βρέθηκε ότι η συγκεκριμένη μέθοδος με αντίστοιχο υβριδικό όργανο μπορεί να αποτελέσει πρακτική, αξιόπιστη και οικονομική εναλλακτική για τη μέτρηση της ακτινοβολίας DNI [113].

Από την παρούσα ανάλυση ελέγχθηκε η αξιοπιστία των μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας. Για την ενεργειακή ανάλυση του ηλιακού συλλέκτη, αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις του πυρηλιόμετρου της εγκατάστασης, λόγω της υψηλότερης ακρίβειας του οργάνου.

### 8.5.2.2 Έλεγχος αισθητηρίων θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος

Ο έλεγχος του αισθητηρίου θερμοκρασίας αέρα υλοποιήθηκε με συγκριτική αξιολόγηση των στιγμιαίων μετρήσεων του αισθητηρίου της εγκατάστασης με φορητό όργανο θερμοκρασίας (PR). Παράλληλα, υλοποιήθηκε σύγκριση των μετρήσεων σε επίπεδο ημέρας του

αισθητηρίου της εγκατάστασης (TF) και του αισθητηρίου του φορητού εξοπλισμού (PR). Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία αέρα όπως καταγράφεται από το φορητό εξοπλισμό παρουσιάζει εντονότερη διακύμανση και αποδίδει ελαφρώς υψηλότερες τιμές εξαιτίας του διαφορετικού σημείου τοποθέτησης του αισθητηρίου. Η μέση απόκλιση των μετρήσεων είναι  $1.74^{\circ}\text{C}$ .

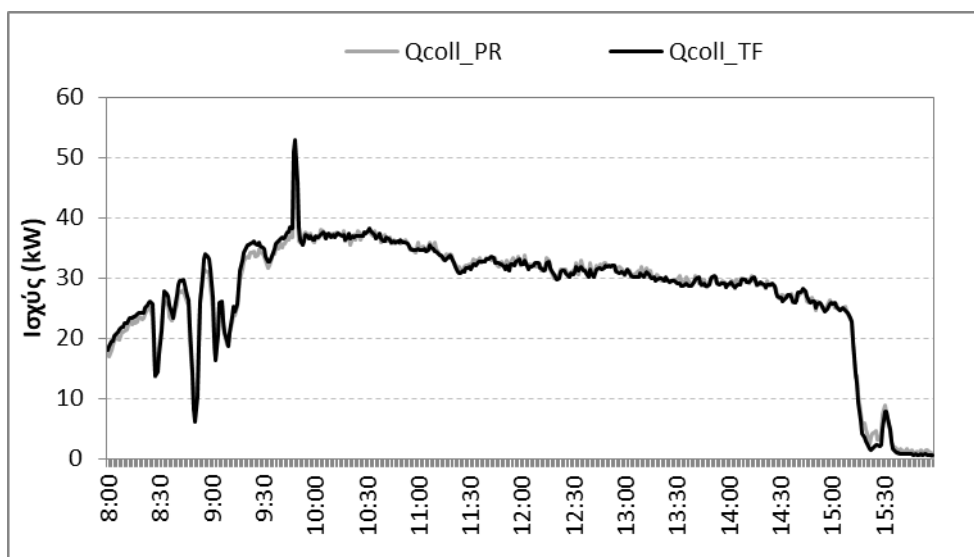


Σχήμα 8-17: Συγκριτικές μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος

### 8.5.2.3 Έλεγχος αισθητηρίων θερμοκρασίας θερμικού λαδιού

Ο έλεγχος των αισθητηρίων θερμοκρασίας του θερμικού λαδιού πραγματοποιήθηκε με συγκριτική αξιολόγηση των μετρήσεων από διαφορετικά ζεύγη αισθητηρίων. Το πρώτο ζεύγος αφορά τα αισθητήρια της διάταξης που βρίσκονται στην είσοδο και έξοδο του ηλιακού συλλέκτη. Το δεύτερο ζεύγος αφορά τα αισθητήρια του φορητού εξοπλισμού που εγκαταστάθηκαν σε κυάθια σε κοντινή απόσταση από τον ηλιακό συλλέκτη.

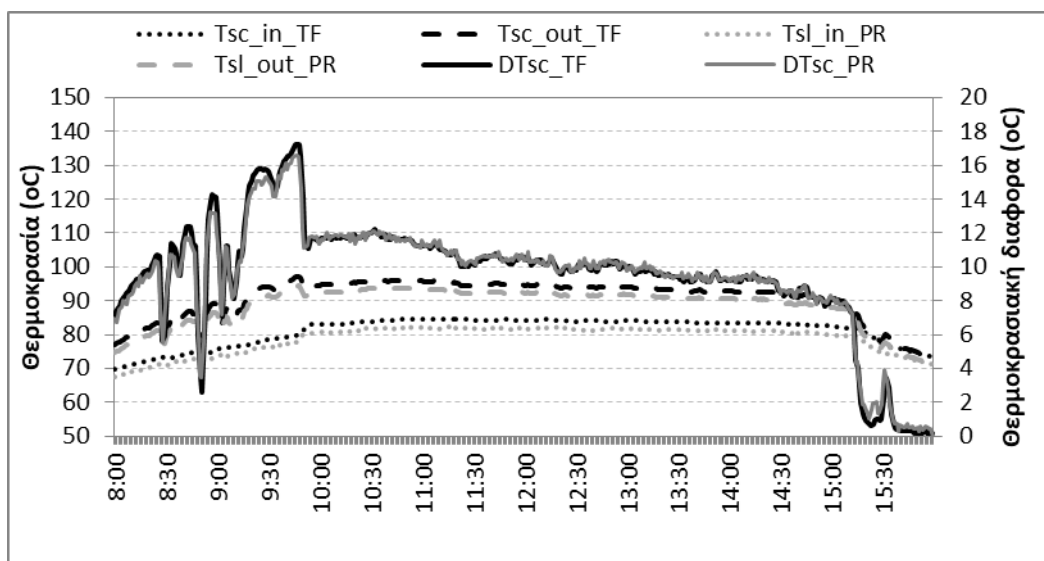
Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η παραγωγή θερμότητας από τον ηλιακό συλλέκτη για μία ενδεικτική ημέρα. Απεικονίζεται συγκριτικά η θερμοροή, όπως προέκυψε αφενός από τα αισθητήρια της εγκατάστασης (TF) και αφετέρου, από τα αισθητήρια του φορητού εξοπλισμού (PR) με κοινή ροή μάζας. Παρατηρείται πολύ μικρή διαφοροποίηση καθ'όλη της διάρκειας της ημέρας με μέση απόκλιση 0.63 kW.



Σχήμα 8-18: Συγκριτικές μετρήσεις της παραγωγής θερμότητας

Αναλύοντας τις μετρήσεις των θερμοκρασιών, παρατηρείται ότι τα αισθητήρια της πειραματικής διάταξης παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας από τα αντίστοιχα του φορητού εξοπλισμού, τόσο στην προσαγωγή όσο και στην επιστροφή. Οι μικρές αποκλίσεις ενδεχομένως να οφείλονται στα διαφορετικά σημεία μέτρησης στο πεδίο και στη μέθοδο μέτρησης (αισθητήρια άμεσης / έμμεσης επαφής).

Ωστόσο, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ζευγαριών είναι αμελητέα. Η διαφορά θερμοκρασίας αποτελεί κρίσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος του ηλιακού συλλέκτη, ιδιαίτερα σε χαμηλές θερμοκρασιακές διαφορές (<10 K).



Σχήμα 8-19: Συγκριτικές μετρήσεις θερμοκρασιών του θερμικού λαδιού

#### **8.5.2.4 Έλεγχος αισθητηρίου ροής θερμικού λαδιού**

Στο υδραυλικό δίκτυο της πειραματικής εγκατάστασης υπάρχει εγκατεστημένο ροόμετρο υψηλής ακρίβειας. Σε προσπάθεια ελέγχου της μέτρησης της ροής, η άμεση σύγκριση με δεύτερο ροόμετρο ήταν αδύνατη. Αυτό θα απαιτούσε αφενός εξοπλισμό υψηλής ακρίβειας και αντοχής σε υψηλή θερμοκρασία και αφετέρου, θα έπρεπε να ενσωματωθεί στο υδραυλικό δίκτυο με κοπή σωλήνας και προσθήκης εξαρτημάτων σύνδεσης. Έτσι, έγινε προσεγγιστικός έλεγχος της ροής μέσω των καμπυλών απόδοσης του κυκλοφορητή. Ο κυκλοφορητής μέσω ρυθμιστή στροφών τέθηκε σε πλήρη ισχύ και ο ηλιακός συλλέκτης τέθηκε σε θέση αναμονής για να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του κυκλώματος. Ακολούθησε μέτρηση της κατανάλωσης ρεύματος του μοτέρ του κυκλοφορητή μετά το ρυθμιστή στροφών και υπολογίστηκε ότι η παροχή ήταν 13.2 m<sup>3</sup>/hr. Η αντίστοιχη μέτρηση από το ροόμετρο της εγκατάστασης έδειχνε 12 m<sup>3</sup>/hr, γεγονός που αποδεικνύει το εύλογο της μέτρησης.

Από αναζήτηση της βιβλιογραφίας σχετικά με την αξιοπιστία του εγκατεστημένου ροόμετρου, βρέθηκε μία πρόσφατη εργασία που πραγματοποιήθηκε από εργαστήριο συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών στην Ευρώπη, στο PSA Αλμερίας [114]. Τοποθετήθηκαν τρία ροόμετρα, εκ των οποίων το ένα ήταν του ιδίου οίκου με αυτό της πειραματικής διάταξης, σε σειρά και ελέγχθηκαν ως προς τις μετρήσεις τους με θερμικό λάδι μέχρι τη θερμοκρασία των 340°C. Τα ροόμετρα παρουσίασαν ικανοποιητική συμπεριφορά, έχοντας αποκλίσεις έως 2.5% [115]. Από τους παραπάνω ελέγχους θεωρήθηκε ότι το ροόμετρο και αντίστοιχα η καταγραφή των δεδομένων της ροής κρίνονται ικανοποιητικής ακρίβειας.

## 8.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με μετρήσεις

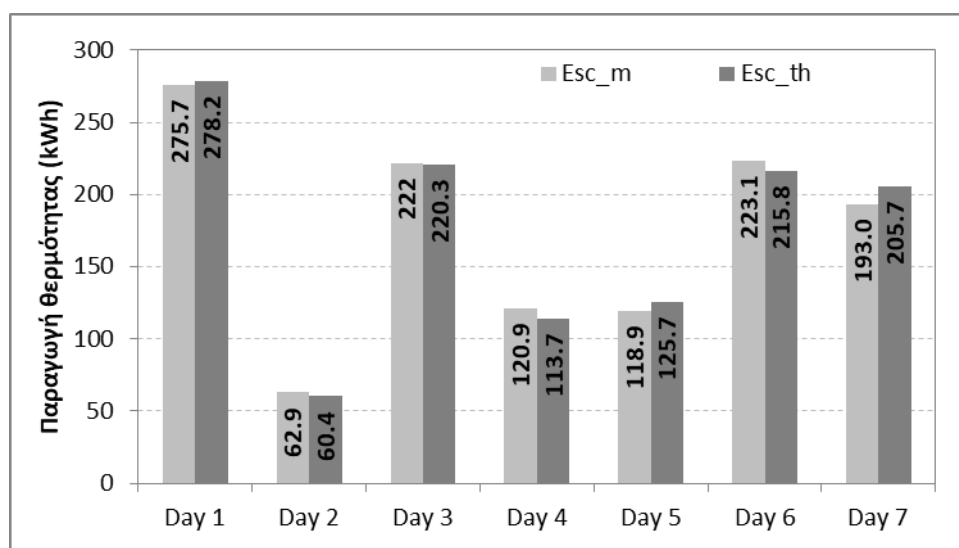
### 8.6.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι μετρήσεις του ηλιακού συλλέκτη καθώς και η σύγκρισή τους με τις εκτιμήσεις του θεωρητικού μοντέλου.

Η μεθοδολογία διεξαγωγής των πειραμάτων και ανάλυσης των μετρήσεων που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 7 αφορά λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη σε ελεγχόμενο θερμοκρασιακό περιβάλλον, με δημιουργία μόνιμων καταστάσεων λειτουργίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως, ο ηλιακός συλλέκτης αποτελεί μέρος ενός συστήματος ηλιακής θέρμανσης και ψύξης σε κτίριο γραφείων και αυτό επηρεάζει την επίτευξη μόνιμων καταστάσεων λειτουργίας.

Έτσι, για την εξαγωγή συμπερασμάτων γίνεται αξιοποίηση μετρήσεων από μεγάλα χρονικά διαστήματα που αφορούν σχεδόν ολόημερη λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη, με μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες όσον αφορά τη θέση του Ηλίου, τη θερμοκρασία και τη ροή του θερμικού λαδιού και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι ημέρες που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι συνολικά επτά. Συγκεκριμένα αφορούν τις 12, 13, 16, 17, 18, 19 και 21 Σεπτεμβρίου 2017. Το χρονικό διάστημα ανάλυσης των μετρήσεων είναι από τις 08:00 έως τις 16:00 ηλιακού χρόνου. Το Σχήμα 8-20 δείχνει την ημερήσια παραγωγή θερμότητας από τον ηλιακό συλλέκτη ( $E_{sc\_m}$ ) σε αντιπαραβολή με την εκτιμώμενη παραγωγή θερμότητας από το υπολογιστικό μοντέλο ( $E_{sc\_th}$ ). Για όλες τις ημέρες, παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων που κυμαίνεται στο εύρος  $\pm 6.6\%$ .



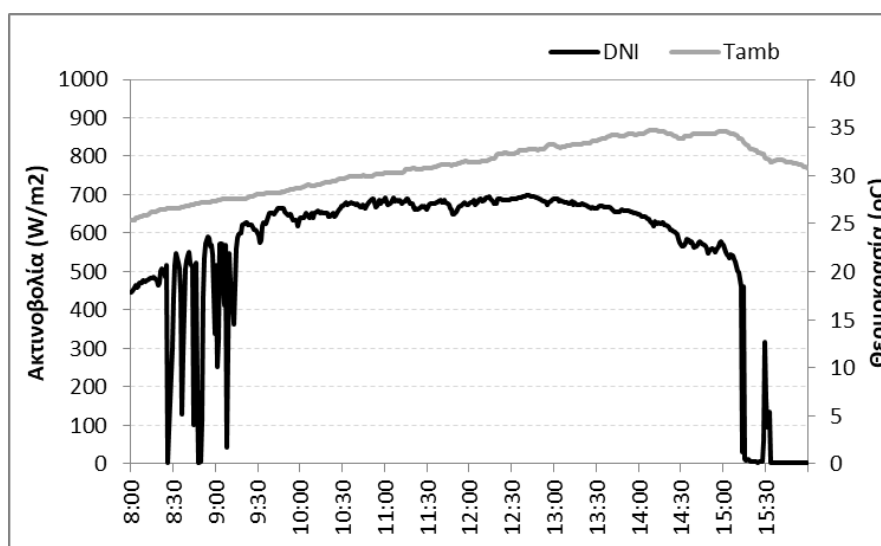
Σχήμα 8-20: Ημερήσια παραγωγή θερμότητας από μετρήσεις ( $E_{sc\_m}$ ) και από εκτιμήσεις μοντέλου ( $E_{sc\_th}$ )

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η ικανοποιητική σύγκλιση των εκτιμήσεων του μοντέλου με τις μετρήσεις επιβεβαιώνεται αφενός από την ανάλυση των μετρήσεων σε μεγάλα χρονικά διαστήματα και αφετέρου από την αξιολόγηση ημερών διαφορετικής ηλιοφάνειας και λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη.

### 8.6.2 Ημέρα με καλή ηλιοφάνεια

Η πρώτη ημέρα παρουσίασης των πειραματικών μετρήσεων επιλέχθηκε το Σάββατο στις 16/9/2017, ως ενδεικτική ημέρα καλής ηλιοφάνειας. Το σύστημα τέθηκε σε αυτόματη λειτουργία με απαγωγή της θερμότητας από το ηλιακό πεδίο μέσω της λειτουργίας του θερμικού ψύκτη.

Παρατηρείται ότι τις πρωινές ώρες η ακτινοβολία DNI παρουσιάζει έντονη διακύμανση εξαιτίας αραιής συννεφιάς, κατά το ηλιακό μεσημέρι η ακτινοβολία είναι σχετικά σταθερή χωρίς διακυμάνσεις με ένταση περίπου  $660 \text{ W/m}^2$ , ενώ τις απογευματινές ώρες η έντονη συννεφιά οδηγεί σχεδόν σε μηδενισμό της ακτινοβολίας.

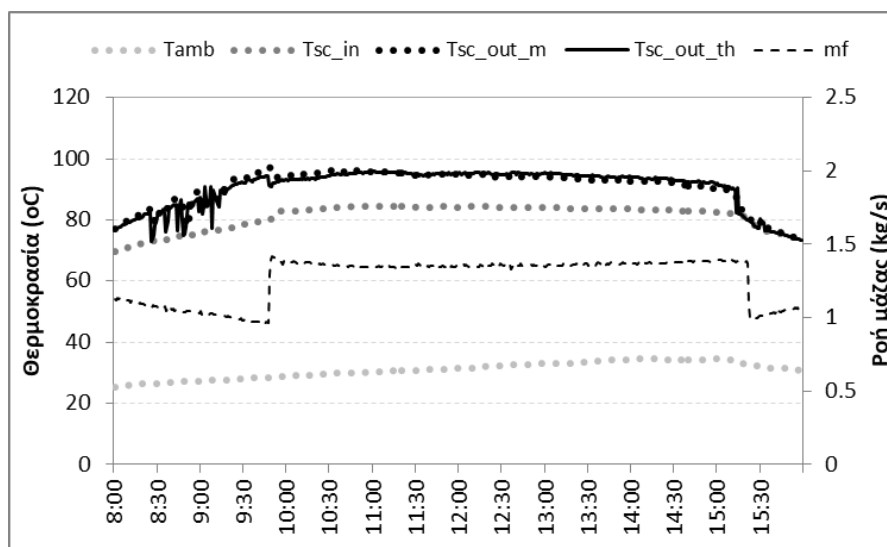


Σχήμα 8-21: Μετρήσεις ακτινοβολίας DNI και θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος, 16/9/2017

Όσον αφορά τη ροή μάζας του θερμικού λαδιού, αυτή κυμαίνεται μεταξύ 1 και  $1.37 \text{ kg/s}$  καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας. Για τις ώρες γύρω από το ηλιακό μεσημέρι και με σταθερή παροχή παρατηρείται σταθερή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εξόδου και εισόδου στον ηλιακό συλλέκτη. Κατά το ηλιακό μεσημέρι, η θερμοκρασία εισόδου του θερμικού λαδιού στον ηλιακό συλλέκτη είναι  $84.2^\circ\text{C}$  και η θερμοκρασία εξόδου από τον ηλιακό συλλέκτη είναι  $94.6^\circ\text{C}$ . Η εκτιμώμενη θερμοκρασία από το θεωρητικό μοντέλο είναι  $95.1^\circ\text{C}$ .

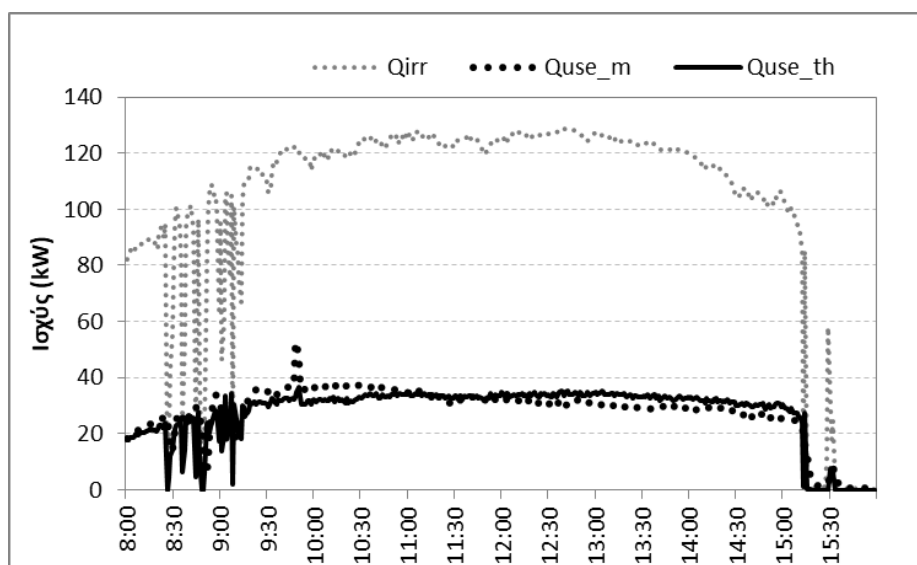
Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στη θερμοκρασία λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 8-22. Κατά τις πρωινές ώρες, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου

παρουσιάζει μικρή διακύμανση, κατά το ηλιακό μεσημέρι είναι σταθερή και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της ενώ κατά τις απογευματινές ώρες έντονης συννεφιάς, οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου από τον ηλιακό συλλέκτη εξισώνονται.



Σχήμα 8-22: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού και εκτίμηση θερμοκρασίας εξόδου, 16/9/2017

Στο παρουσιάζεται η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμική ισχύος. Παρατηρείται ότι το προφίλ της θερμικής ισχύος ακολουθεί επηρεάζεται άμεσα από το προφίλ της ηλιακής ακτινοβολίας. Κατά το ηλιακό μεσημέρι, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι 125.3 kW και η θερμική ισχύς του ηλιακού συλλέκτη είναι 32.3 kW. Η εκτιμώμενη θερμική ισχύς από το θεωρητικό μοντέλο είναι 33.8 kW. Η μέση απόκλιση της ισχύος σε απόλυτες τιμές είναι 1.8, 2.8 και 3.5 kW για χρονικά διαστήματα  $\pm 1$ , 2 και 4 ώρες από το ηλιακό μεσημέρι.



Σχήμα 8-23: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτιμώμενη θερμικής ισχύος, 16/9/2017

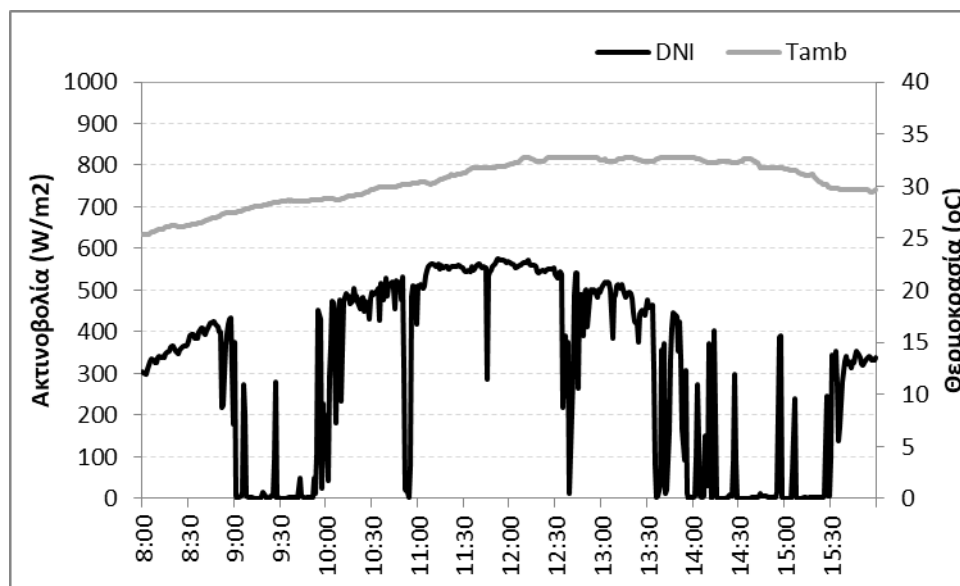


Συνολικά, για τη συγκεκριμένη ημέρα, η ηλιακή ακτινοβολία ήταν 818kWh, η παραχθείσα θερμότητα 222 kWh και ο ημερήσιος βαθμός απόδοσης του ηλιακού πεδίου ήταν 27.1%. Αντίστοιχα, η εκτιμώμενη παραγωγή θερμότητας από το θεωρητικό μοντέλο είναι 220.3 kWh οδηγώντας σε ημερήσιο βαθμό απόδοσης 26.9%.

### 8.6.3 Ημέρα με αραιή συννεφιά

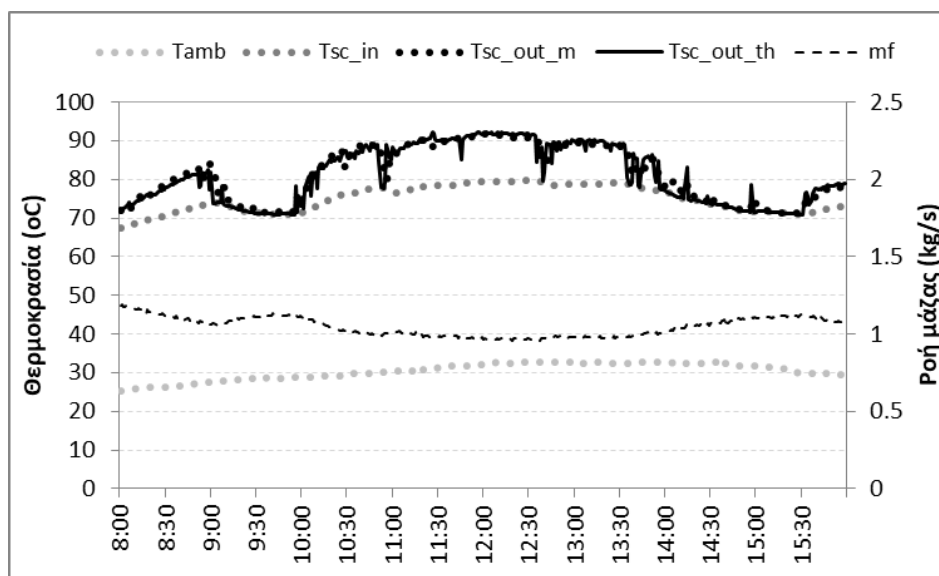
Η δεύτερη ημέρα παρουσίασης πειραματικών μετρήσεων που επιλέχθηκε είναι η Κυριακή 17/9/2017, ως ενδεικτική ημέρα με αραιή συννεφιά.

Το σύστημα επίσης τέθηκε σε αυτόματη λειτουργία με απαγωγή της θερμότητας από το ηλιακό πεδίο για τη λειτουργία θερμικού ψύκτη. Επιπλέον, υπάρχει εντονότερη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας επηρεάζοντας αντίστοιχα τη λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη.



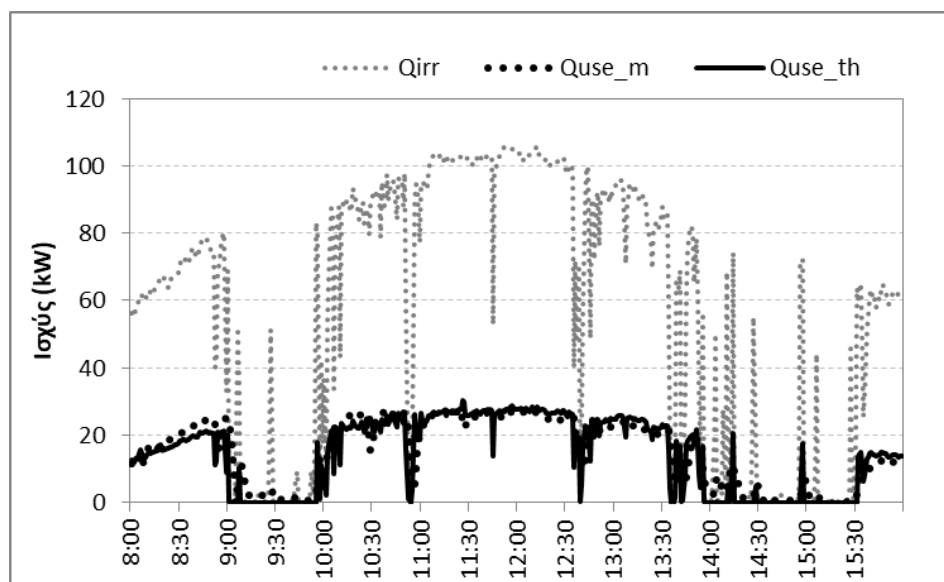
Σχήμα 8-24: Μετρήσεις ακτινοβολίας DNI και θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος, 17/9/2017

Και σε αυτή την ημέρα, παρά τη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, οι εκτιμήσεις του θεωρητικού μοντέλου της θερμοκρασίας εξόδου και της θερμικής ισχύς ακολουθούν με καλή σύγκλιση τις αντίστοιχες μετρήσεις (Σχήμα 8-25 και Σχήμα 8-26).



Σχήμα 8-25: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού και εκτίμηση θερμοκρασίας εξόδου, 17/9/2017

Συνολικά, για τη συγκεκριμένη ημέρα, η ηλιακή ακτινοβολία ήταν 452 kWh, η παραχθείσα θερμότητα 120.9 kWh και ο ημερήσιος βαθμός απόδοσης του ηλιακού πεδίου ήταν 26.8%. Αντίστοιχα, η εκτιμώμενη παραγωγή θερμότητας από το θεωρητικό μοντέλο είναι 113.7 kWh οδηγώντας σε ημερήσιο βαθμό απόδοσης 25.2%. Η μέση απόκλιση της ισχύος σε απόλυτες τιμές είναι 2, 3.1 και 2.9 kW για χρονικά διαστήματα  $\pm 1$ , 2 και 4 ώρες από το ηλιακό μεσημέρι.

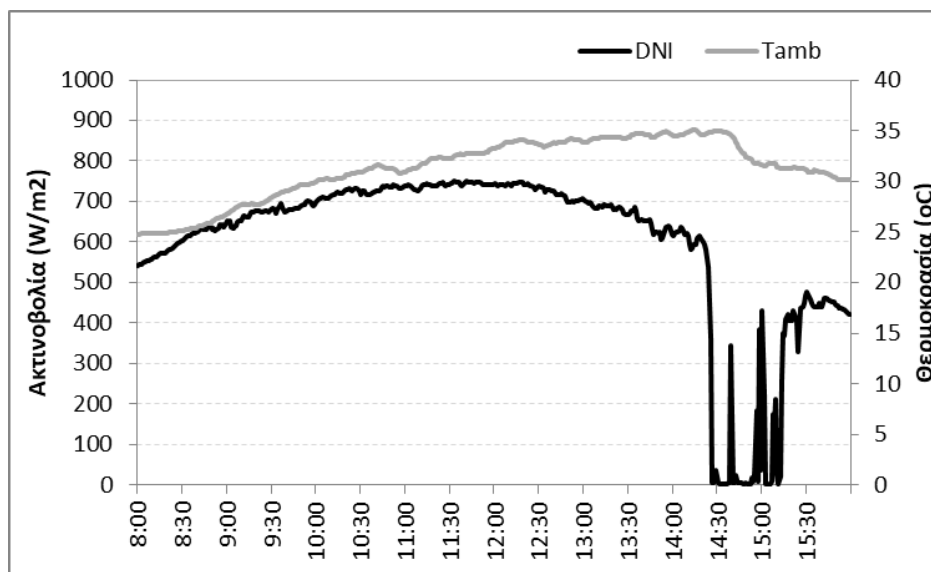


Σχήμα 8-26: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος, 17/9/2017

#### 8.6.4 Ημέρα με μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας

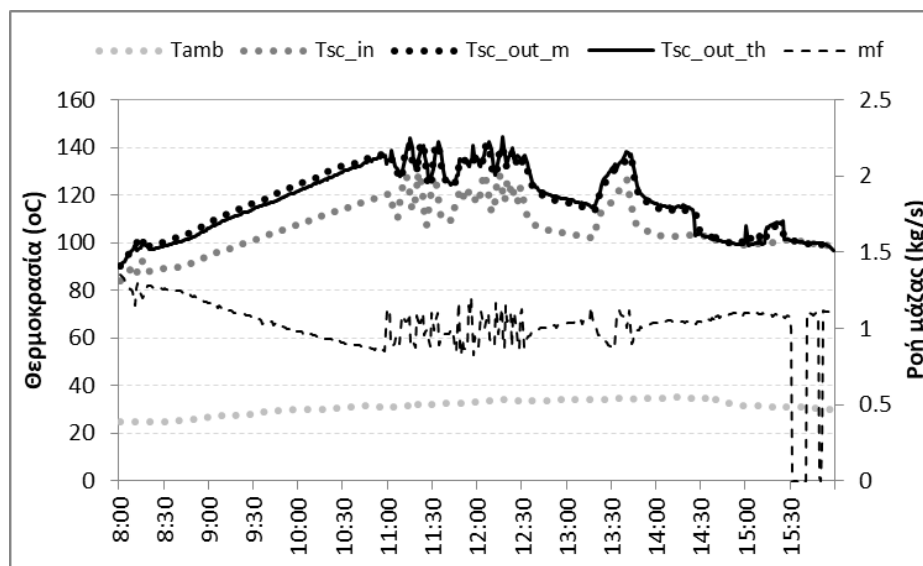
Η Δευτέρα 19/9/2017, επιλέχθηκε ως ενδεικτική ημέρα με έντονα μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Σκοπός είναι η ανάδειξη της

σημασίας της θερμοχωρητικότητας του ηλιακού συλλέκτη κατά τη μοντελοποίηση. Κατά τη συγκεκριμένη ημέρα, υπήρξε καλή ηλιοφάνεια γύρω από το ηλιακό μεσημέρι.



Σχήμα 8-27: Μετρήσεις ακτινοβολίας DNI και θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος, 19/9/2017

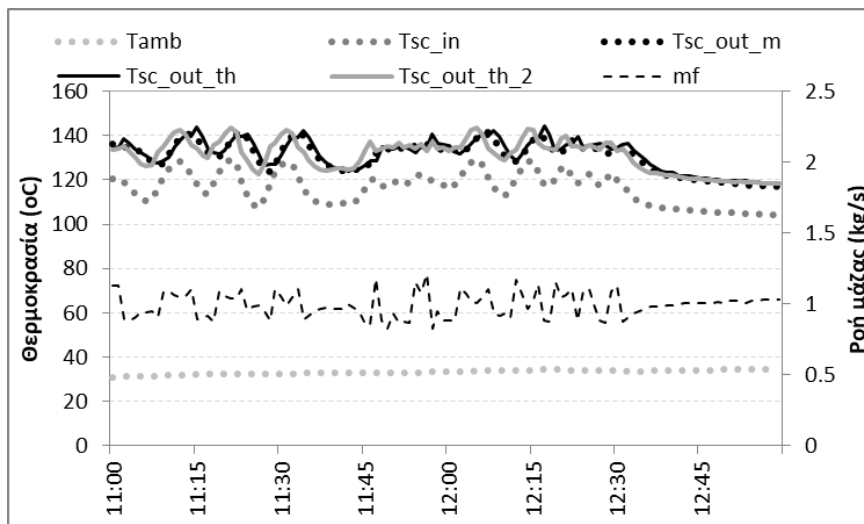
Το σύστημα τέθηκε σε χειροκίνητο έλεγχο οδηγώντας σε έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Στο Σχήμα 8-28 φαίνονται οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της ροής μάζας, όπου ο ηλιακός συλλέκτης λειτουργούσε σε διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες, κατά το χρονικό διάστημα 11:0 με 13:00.



Σχήμα 8-28: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού και εκτίμηση θερμοκρασίας εξόδου, 19/9/2017

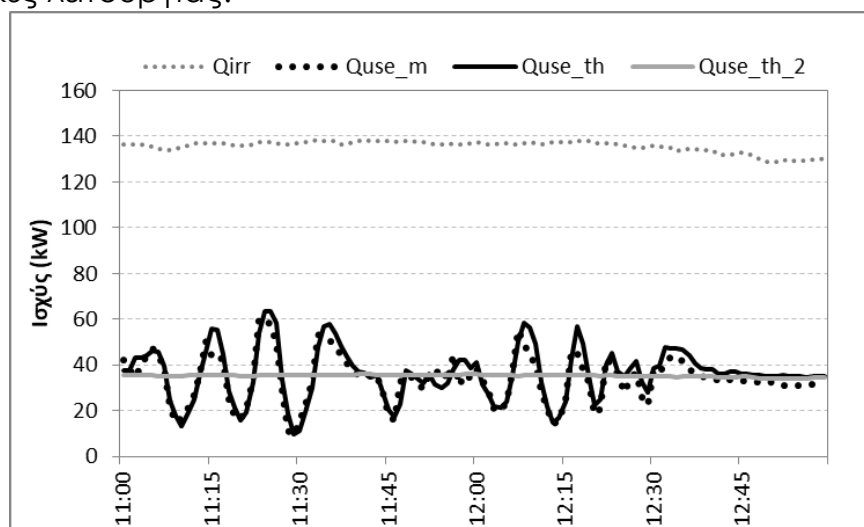
Εστιάζοντας στο υπό διερεύνηση χρονικό διάστημα, οι εκτιμήσεις της θερμοκρασίας εξόδου φαίνονται με μεγαλύτερη ανάλυση στο Σχήμα 8-29. Η σύγκλιση των εκτιμήσεων κρίνεται ακόμα και σε αυτή την ακραία

περίπτωση πολύ καλή. Στο ίδιο σχήμα αποτυπώνονται οι εκτιμήσεις του μοντέλου έχοντας μηδενίσει τη θερμοχωρητικότητα του ηλιακού συλλέκτη. Η καμπύλη των εκτιμήσεων φαίνεται μετατοπισμένη προς τα αριστερά, δηλαδή σε προγενέστερο χρόνο καθώς έχει αφαιρεθεί η θερμική αδράνεια του συστήματος.



Σχήμα 8-29: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού και εκτίμηση θερμοκρασίας εξόδου με και χωρίς θερμοχωρητικότητα, 19/9/2017

Αντίστοιχα για το ίδιο χρονικό διάστημα, αναλύεται η επίδραση της θερμοχωρητικότητας στις εκτιμήσεις του μοντέλου σε επίπεδο θερμικής ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση η διαφοροποίηση είναι περισσότερο εμφανής. Η ενσωμάτωση της θερμοχωρητικότητας οδηγεί σε πολύ καλή σύγκλιση των εκτιμήσεων με τις μετρήσεις. Αντίθετα, ο μηδενισμός της θερμοχωρητικότητας οδηγεί σε εκτίμηση σταθερής παραγωγής σταθερής ισχύος. Συμπεριφορά που διαφοροποιείται από την πραγματική λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη σε έντονα μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας.



*Σχήμα 8-30: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος με και χωρίς θερμοχωρητικότητα, 19/9/2017*

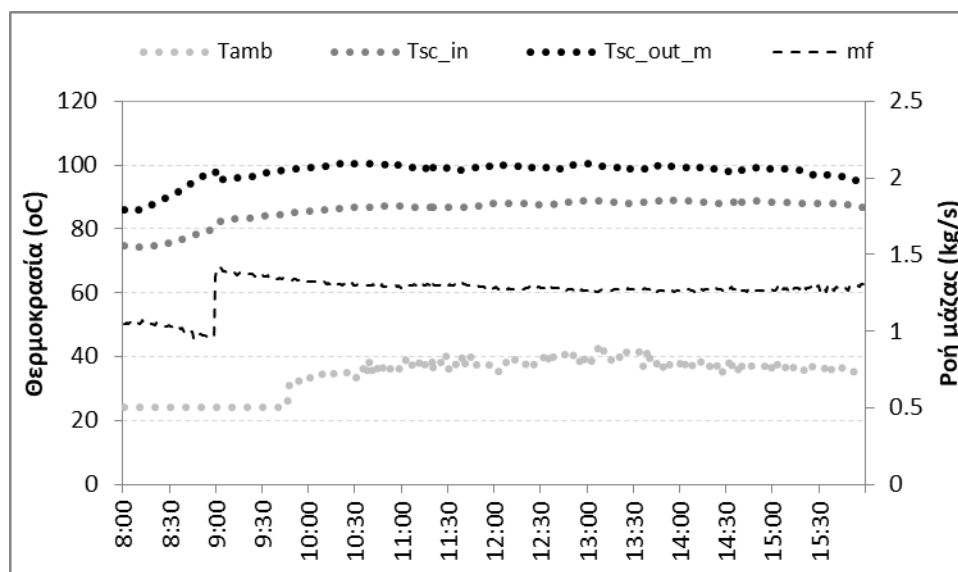
Συνολικά, για τη συγκεκριμένη ημέρα, η ηλιακή ακτινοβολία ήταν 879kWh, η παραχθείσα θερμότητα 223.1 kWh και ο ημερήσιος βαθμός απόδοσης του ηλιακού πεδίου ήταν 25.4%. Αντίστοιχα, η εκτιμώμενη παραγωγή θερμότητας από το θεωρητικό μοντέλο είναι 215.8 kWh οδηγώντας σε ημερήσιο βαθμό απόδοσης 24.6%. Αν δεν συμπεριληφθεί η θερμοχωρητικότητα του ηλιακού συλλέκτη οι εκτιμήσεις γίνονται 217.5 kWh με απόδοση 24.7%. Η διαφορά των δύο μεθόδων υπολογισμού οδηγεί σε απόκλιση μόλις 0.8% σε ημερήσιο επίπεδο. Ωστόσο, οι εκτιμήσεις του μοντέλου με τη θερμοχωρητικότητα τείνουν προσεγγίζουν καλύτερα τις μετρήσεις σε επίπεδο θερμοκρασίας και θερμικής ισχύος.

### **8.6.5 Παραδοχή μεταβλητού σφάλματος**

Η αξιολόγηση των μετρήσεων στις προηγούμενες ενότητες έγινε στη βάση της παραδοχής ότι ο ηλιακός συλλέκτης λειτουργεί με σταθερό σφάλμα παρακολούθησης. Σταθερό σφάλμα παρακολούθησης οδηγεί σε συγκεκριμένους συντελεστής οπτικής απόδοσης οπότε είναι εφικτή η μοντελοποίηση του. Η παραπάνω προσέγγιση έδωσε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για μεγάλα χρονικά διαστήματα και για έντονα μεταβαλλόμενες συνθήκες.

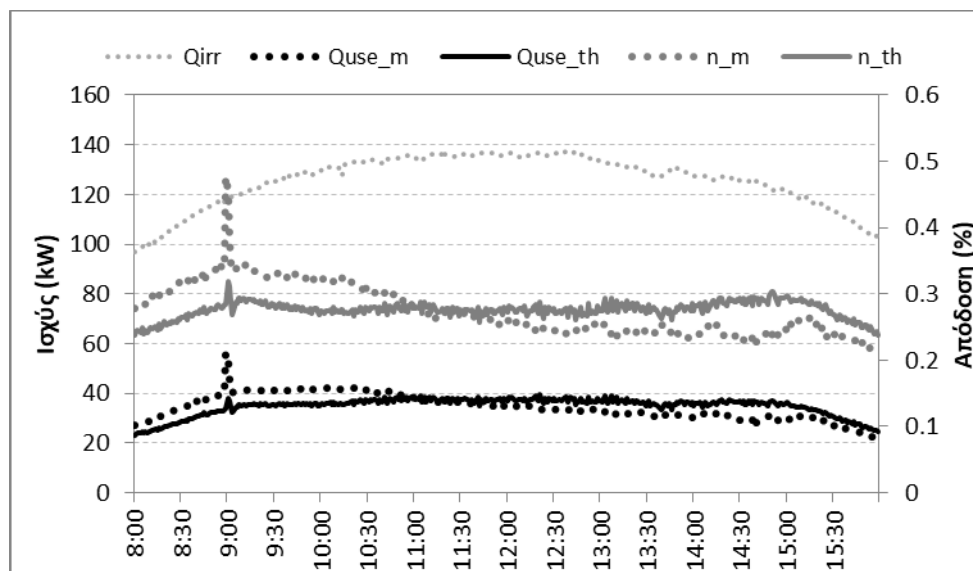
Σε περίπτωση όμως που δεν υιοθετηθεί η κοινά αποδεκτή παραδοχή του σταθερού σφάλματος αλλά γίνει παραδοχή μεταβλητού σφάλματος, τότε τροποποιείται κάποιο δομικό χαρακτηριστικό του ηλιακού συλλέκτη, το οποίο μάλιστα αποδείχθηκε ότι αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ενεργειακή απόδοση του συλλέκτη. Πλέον, με μεταβαλλόμενο σφάλμα παρακολούθησης είναι σχεδόν αδύνατο να προσδιοριστεί και να υπολογιστεί με ακρίβεια η οπτική απόδοση. Ωστόσο, ο εντοπισμός του μεταβλητού σφάλματος και τα συμπεράσματα που εξαγονται κρίνονται ωφέλιμα.

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση επιλέχθηκε η Τρίτη 12/9/2017 ως κατάλληλη ημέρα καθώς υπήρχε καλή ηλιοφάνεια και οι συνθήκες λειτουργίας σε επίπεδο θερμοκρασιών και ροής ήταν σχετικά σταθερές εκατέρωθεν του ηλιακού μεσημεριού.



Σχήμα 8-31: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού, 12/9/2017

Η θερμική ισχύς του ηλιακού συλλέκτη και ο βαθμός απόδοσης αποτυπώνεται στο Σχήμα 8-32. Παρατηρείται διακύμανση του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης χωρίς την αναμενόμενη συμμετρία γύρω από το ηλιακό μεσημέρι. Η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι 1005.9 kWh, η παραγωγή θερμότητας 275.7 kWh και ο βαθμός απόδοσης 27.4%.

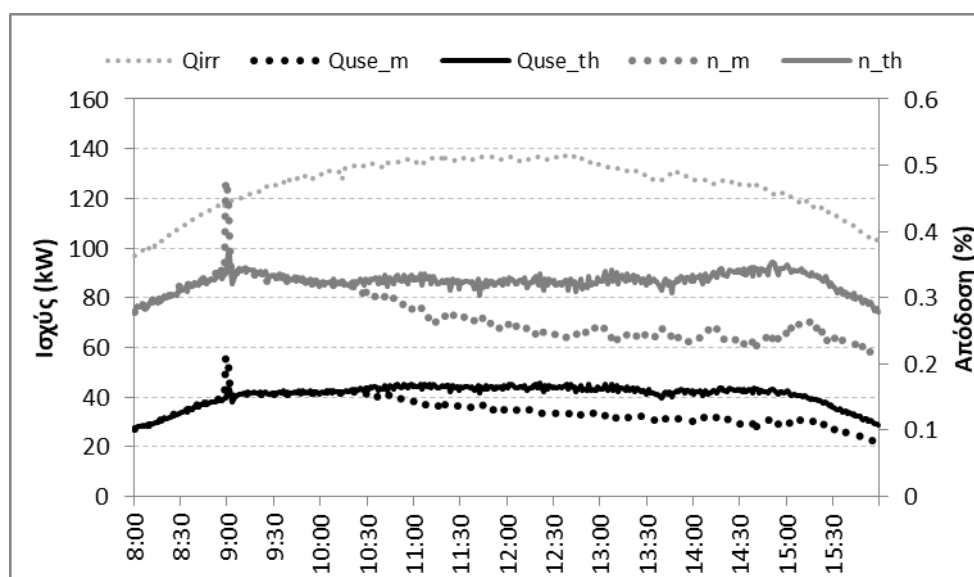


Σχήμα 8-32: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος, 12/9/2017

Αντιπαραβάλλοντας τις μετρήσεις με τις εκτιμήσεις του μοντέλου παρατηρήθηκε ότι οι εκτιμήσεις δίνουν χαμηλότερες τιμές τις πρωινές ώρες και υψηλότερες τις απογευματινές ώρες.

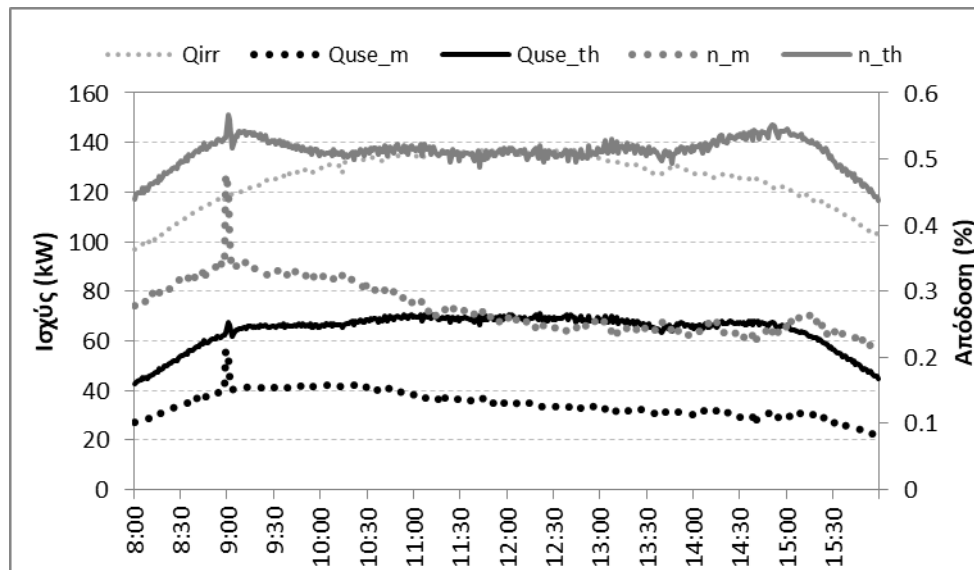
Θεωρώντας ότι ο ηλιακός συλλέκτης έχει εγκατασταθεί χωρίς απόκλιση από τον άξονα Νότου – Βορρά, δεν υπάρχει σκίαση από γειτονικά αντικείμενα, οι συνθήκες λειτουργίας είναι σχεδόν σταθερές εκατέρωθεν του ηλιακού μεσημεριού, οι μετρήσεις δεν επηρεάζονται από κάποιο συστηματικό σφάλμα, ότι κατά τους ελέγχους εντοπίστηκαν οπτικά σφάλματα τοποθέτησης και παρακολούθησης και λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντική επίδραση του σφάλματος παρακολούθησης στο βαθμό απόδοσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-33, η συγκεκριμένη συμπεριφορά θα μπορούσε να εξηγηθεί από την ύπαρξη του μεταβλητού σφάλματος παρακολούθησης. Πρακτικά, η αιτία του μεταβλητού σφάλματος θα μπορούσε να εντοπισθεί στο σύστημα παρακολούθησης Ηλίου που αποτελείται από τα μοτέρ κίνησης, τις συσκευές ανάγνωσης θέσης των ανακλαστήρων και το λογισμικό ελέγχου που βρίσκεται στο PLC.

Σε περίπτωση διατήρησης του σφάλματος που παρουσιάζεται κατά τις πρωινές ώρες, καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας, η προβλεπόμενη παραγωγή θερμότητας θα ήταν 327 kWh με βαθμό απόδοσης 32.5%. Η αύξηση σε σχέση με τις μετρήσεις είναι 18.6%.



Σχήμα 8-33: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος με διατήρηση του πρωινού σφάλματος, 12/9/2017

Σε περίπτωση λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη με σφάλμα παρακολούθησης 0.1°, η προβλεπόμενη παραγωγή θερμότητας θα ήταν 515 kWh με βαθμό απόδοσης 51.2%. Η αύξηση σε σχέση με τις μετρήσεις είναι 86.8%. Η προτεινόμενη βελτίωση ενδεχομένως θα μπορούσε να γίνει προγραμματιστικά μέσω του PLC σε κάποιο βαθμό και έπειτα μέσω βελτιώσεων του μηχανισμού παρακολούθησης.



Σχήμα 8-34: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος με σφάλμα σχεδιασμού, 12/9/2017

Τέλος, παρατηρείται αύξηση της οπτικής απόδοσης σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (09:00 και 15:00) που συμπίπτουν με την εκτιμώμενη αντίστοιχη αύξηση της απόδοσης που αναλύθηκε για τον αληθινό IAM (Σχήμα 8-14).



### 8.7 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν από το συγγραφέα την περίοδο 11 με 22 Σεπτεμβρίου του 2017, σε σύστημα ηλιακών συλλεκτών Fresnel στο Ινστιτούτο Κύπρου. Τα κύρια συμπεράσματα του κεφαλαίου συνοψίζονται στα εξής:

- Αναπτύχθηκε ακριβές υπολογιστικό μοντέλο του εγκατεστημένου ηλιακού συλλέκτη με παραβολικούς ανακλαστήρες και σωλήνα κενού. Η παραμετροποίηση του μοντέλου ακολούθησε την ενδελεχή αποτύπωση των λειτουργικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του συλλέκτη από επιτόπου μετρήσεις και στοιχεία κατασκευαστών. Παρατηρήθηκε μείωση της οπτικής απόδοσης κατά 4.7% από την επίδραση κατασκευαστικών στοιχείων του ηλιακού συλλέκτη, όπως οι κολώνες στήριξης του δέκτη, τα ανενεργά τμήματα του απορροφητή και οι σωλήνες μεταφοράς του θερμικού λαδιού.
- Διερευνήθηκε παραμετρικά η επίδραση του σφάλματος παρακολούθησης στο συντελεστή μέγιστης οπτικής απόδοσης. Ο ιδανικός μηχανισμός παρακολούθησης οδηγεί σε συντελεστή οπτικών απωλειών 0.69, ενώ σφάλμα  $0.1^\circ$  μειώνει το συντελεστή στο 0.63. Η αύξηση του σφάλματος πέραν του  $0.1^\circ$  παρατηρείται ότι μειώνει σημαντικά την οπτική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη.
- Διερευνήθηκε η διαφορά δύο μεθόδων υπολογισμού του συντελεστή IAM. Όταν ο Ήλιος κινείται σε απόκλιση μικρότερη των  $20^\circ$  από το εγκάρσιο ή επίμηκες επίπεδο, η διαφορά των δύο είναι μικρότερη από 0.05 σε απόλυτη τιμή. Σε διαφορετική περίπτωση η απόκλιση αγγίζει το 0.25 σε απόλυτο νούμερο. Για ενδεικτική ημέρα αναλύθηκαν οι συντελεστές και υπάρχει ταύτιση τιμών στο ηλιακό μεσημέρι και απόκλιση κατά 12.8% στις 09:00.
- Αναπτύχθηκε φορητός μετρητικός εξοπλισμός για την καταγραφή των μετρήσεων. Η παράλληλη χρήση του φορητού εξοπλισμού με του μετρητικού εξοπλισμού της διάταξης ενίσχυσε την αξιοπιστία των μετρήσεων.
- Αξιολογήθηκαν ενεργειακά συνολικά 7 ημέρες από τις 08:00 έως τις 16:00 ηλιακού χρόνου. Η σύγκριση των μετρήσεων της παραγωγής θερμότητας με τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου έδειξε καλή σύγκλιση που κυμαίνεται στο εύρος  $\pm 6.6\%$ .
- Αναλύθηκαν τρεις ενδεικτικές ημέρες; ημέρα καλής ηλιοφάνειας, ημέρα αραιής συννεφιάς και ημέρα μεταβαλλόμενων συνθηκών λειτουργίας. Παρά τις συνεχείς μεταβολές της θέσης του Ηλίου, της

έντασης της ακτινοβολίας, της ροής μάζας και της θερμοκρασίας του θερμικού λαδιού στα υπό διερεύνηση χρονικά διαστήματα, οι εκτιμήσεις του μοντέλου της θερμοκρασίας εξόδου και της παραγωγής θερμότητας είναι ικανοποιητικές.

- ο Αναδείχθηκε η σημασία υπολογισμού της θερμοχωρητικότητας του ηλιακού συλλέκτη για την επίτευξη καλής σύγκλισης των στιγμιαίων τιμών της θερμοκρασίας εξόδου. Ωστόσο, σε επίπεδο ημερήσιας παραγωγής θερμότητας, η επίδραση της θερμοχωρητικότητας ήταν μόλις 0.8%.
- ο Εντοπίστηκε μεταβλητό σφάλμα παρακολούθησης που οδηγεί σε μείωση των ενεργειακών απολαβών του ηλιακού συλλέκτη.
- ο Η διατήρηση του σφάλματος που εμφανίζεται τις πρωινές ώρες οδηγεί σε αύξηση κατά 18.6% της παραχθείσας θερμότητας, ενώ η λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη με σφάλμα 0.1° οδηγεί σε αύξηση κατά 86.8%.

## 9 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

### 9.1 Συμπεράσματα

Στη διατριβή αρχικά διερευνήθηκε διεξοδικά η αρχή λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη Fresnel με επίπεδους ανακλαστήρες που συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε έναν υπερυψωμένο επίπεδο δέκτη. Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από κινούμενες επιφάνειες που αλληλεπιδρούν οπτικά μεταξύ τους και υπόκειται σε οπτικά σφάλματα που μειώνουν την απόδοση των σειρών. Παρατηρήθηκε διαφοροποίηση της οπτικής απόδοσης των σειρών μεταξύ τους, ως αποτέλεσμα των διαφόρων τύπων οπτικών απωλειών. Προέκυψε ότι η κύρια αιτία μείωσης της οπτικής απόδοσης είναι οι απώλειες συνημιτόνου. Οι απώλειες σκίασης του δέκτη στους ανακλαστήρες είναι έντονες για μικρές γωνίες πρόσπτωσης αλλά αμελητέες για μεγαλύτερες γωνίες, σε αντίθεση με τις απώλειες σκίασης μεταξύ των σειρών. Η μείωση της συνολικής οπτικής απόδοσης επέρχεται ως αποτέλεσμα της αύξησης των απωλειών συνημιτόνου και της σκίασης μεταξύ των σειρών. Τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου (GBOM) επικυρώθηκαν μέσω της σύγκρισης με αποτελέσματα δεύτερου μοντέλου που αναπτύχθηκε σε πρόγραμμα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας (RTM).

Στη συνέχεια, διερευνήθηκε οπτικά ο ηλιακός συλλέκτης Fresnel με παραβολικούς πρωτεύοντες ανακλαστήρες, δευτερεύοντα δέκτη σχήματος CPC και απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό (προσέγγιση κατοχυρωμένου βιομηχανικού σχεδίου). Για την ανάλυση αυτήν, χρησιμοποιήθηκε υπολογιστικό μοντέλο σε πρόγραμμα ιχνηλάτησης ακτινοβολίας, το οποίο επικυρώθηκε με δεδομένα της βιβλιογραφίας. Το σφάλμα παρακολούθησης αποδείχθηκε καθοριστικός παράγοντας για τη μέγιστη οπτική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Ωστόσο, το σφάλμα παρακολούθησης έχει αμελητέα επίδραση στο συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο για γωνίες μέχρι 30° και μικρή επίδραση μέχρι 5% για γωνίες στο εύρος 30-70°. Επιπλέον, διερευνήθηκε παραμετρικά η χρήση ανακλαστήρων κοινής καμπυλότητας παραβολικού σχήματος σε όλες τις σειρές, συναρτήσει του σφάλματος παρακολούθησης και της γωνίας πρόσπτωσης. Η καμπυλότητα της προτελευταίας εξωτερικής σειράς C6 βρέθηκε ότι επέφερε κατά μέσο όρο τη μικρότερη μείωση (3.6%) για τα εξεταζόμενα σφάλματα παρακολούθησης.

Ολοκληρώνοντας την οπτική ανάλυση του συλλέκτη, ακολούθησε η θερμική του ανάλυση μέσω ανάπτυξης μαθηματικών μοντέλων μεταφοράς θερμότητας (HTM) και μοντέλων σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Η σύγκριση των

αποτελεσμάτων των μοντέλων μεταξύ τους καθώς και με τιμές της βιβλιογραφίας βρέθηκε ικανοποιητική. Διερευνήθηκαν θερμικά τρεις διαφορετικοί γραμμικοί δέκτες συγκέντρωσης ακτινοβολίας ηλιακών συλλεκτών Fresnel. Ο πρώτος αφορά δέκτη απορροφητή σωλήνα (Single Tube Receiver – STR), ο δεύτερος απορροφητή σωλήνα που περικλείεται από γυάλινο περίβλημα με ενδιάμεσα κενό (Vacuum Tube Receiver – VTR) και ο τρίτος απορροφητή σωλήνα τοποθετημένο σε κοιλότητα με αέρα που περικλείεται από γυάλινο κάλυμμα και δευτερεύοντα ανακλαστήρα με μόνωση (Cavity Tube Receiver – CTR). Η θερμοκρασία του θερμικού μέσου που κυκλοφορεί εσωτερικά του απορροφητή αποδείχθηκε ότι είναι καθοριστικός παράγοντας των θερμικών απωλειών. Για το δέκτη VTR, η διάμετρος του απορροφητή επιδρά σημαντικά στις θερμικές απώλειες σε αντίθεση με την παροχή μάζας. Η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή, οδήγησε σε αύξηση των θερμικών απωλειών, λόγω της υψηλότερης επιφανειακής θερμοκρασίας, ωστόσο ο συντελεστής απωλειών του απορροφητή μειώθηκε. Για το δέκτη CTR και για θερμοκρασία μέσου 400°C, υπολογίστηκε ότι το γυάλινο κάλυμμα αναπτύσσει μέση θερμοκρασία υλικού μέχρι 85°C ενώ ο δευτερεύον ανακλαστήρας 178.9°C. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε συγκριτικά η απόδοση των δεκτών. Αποδείχθηκε ότι ο δέκτης VTR παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση, λόγω της ύπαρξης κενού γύρω από τον απορροφητή. Για θερμοκρασία μέσου 200°C οι θερμικές του απώλειες είναι 51.4 W/m, ενώ του δέκτη CTR ανέρχονται σε 218.1 W/m. Ο συντελεστής απωλειών του απορροφητή είναι μόλις 1.5% για το δέκτη VTR ενώ 6.2% για το CTR.

Στη συνέχεια, διερευνήθηκε καινοτόμο σχέδιο δέκτη διπλής διαδρομής (Double Pass – DP), ο οποίος αποτελείται από τον απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό. Η καινοτομία έγκειται στο σχεδιασμό του απορροφητή, αφού εσωτερικά του οποίου υπάρχει χωρίσμα που δημιουργεί δύο διακριτά κανάλια ροής. Το θερμικό μέσο εισέρχεται στο επάνω κανάλι (1<sup>η</sup> διαδρομή) και επιστρέφει από το κάτω κανάλι (2<sup>η</sup> διαδρομή). Ο προτεινόμενος, σχεδιασμός διπλής διαδρομής απλοποιεί την εγκατάσταση του συστήματος, έχοντας τεχνικά, ενεργειακά και οικονομικά πλεονεκτήματα. Ο δέκτης DP συγκρίθηκε με αντίστοιχο δέκτη μονής διαδρομής SP. Η θερμική αυτή ανάλυση βασίστηκε στο ήδη επικυρωμένο μοντέλο CFD, το οποίο τροποποιήθηκε κατάλληλα με την ενσωμάτωση του χωρίσματος. Βρέθηκε ότι οι θερμικές απώλειες του δέκτη DP είναι κατά μέσο όρο 10.4% μειωμένες σε σχέση με το δέκτη SP. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι θερμικές απώλειες έχουν καθοριστική σημασία για την επιλογή του δέκτη. Διερευνήθηκε επιπλέον η επίδραση της αύξησης της θερμικής

αντίστασης του χωρίσματος. Η αύξηση της θερμικής αντίστασης από υλικό αγωγιμότητας 2 ή 0.25 W/m.K βρέθηκε ότι εξισορροπεί την κατανομή της απορροφηθείσας θερμότητας από τα δύο ρευστά, καθώς και την αύξηση της θερμοκρασίας τους.

Για το πειραματικό μέρος της διατριβής, σχεδιάσθηκε και αναπτύχθηκε πρωτότυπο ηλιακού συλλέκτη Fresnel καθαρής επιφάνειας 56m<sup>2</sup>. Αποτελείται από 14 σειρές πρωτευόντων ανακλαστήρων, δευτερεύον δέκτη σχήματος CPC και απορροφητή με γυάλινο περίβλημα και κενό. Για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς σχεδιάσθηκε και αναπτύχθηκε πειραματική διάταξη με θερμικό λάδι μέγιστης θερμοκρασίας 250°C και ψύκτη λαδιού για την ελεγχόμενη απόρριψη της παραχθείσας θερμότητας. Σχεδιάστηκε ο μετρητικός εξοπλισμός, η μεθοδολογία των πειραμάτων και αναπτύχθηκε το σύστημα SCADA. Οι πειραματικές εργασίες στη συγκεκριμένη διάταξη ολοκληρώθηκαν με τις δοκιμαστικές μετρήσεις για τον ποιοτικό έλεγχο λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη.

Στη συνέχεια ο συγγραφέας της διατριβής μετέβη σε ανάλογη μονάδα στην Κύπρο για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Ο ηλιακός συλλέκτης καθαρής επιφάνειας 184.32 m<sup>2</sup>, αποτελείται από ανακλαστήρες παραβολικού σχήματος που συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε σωλήνα κενού. Πάνω από το σωλήνα κενού, υπάρχει δευτερεύον ανακλαστήρας παραβολικού σχήματος. Για τη λήψη των πειραματικών δεδομένων της διάταξης, αναπτύχθηκε παράλληλο μετρητικό σύστημα το οποίο ενίσχυσε συνολικά την αξιοπιστία των μετρήσεων. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης (IAM) με τις δύο διαθέσιμες μεθόδους και αποτυπώθηκαν οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων. Στη συνέχεια, συγκρίθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις με τα υπολογιστικά μοντέλα. Τόσο για μεγάλα χρονικά διαστήματα λειτουργίας της διάταξης όσο και για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, βρέθηκε ικανοποιητική σύγκλιση των δεδομένων που κυμαίνεται στο εύρος  $\pm 6.6\%$ . Συνεπώς, τα υπολογιστικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής κρίνονται ως αξιόπιστα και μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια την ενεργειακή απόδοση των ηλιακών συλλεκτών Fresnel. Από την ανάλυση των μετρήσεων, προέκυψε ότι η αύξηση του σφάλματος παρακολούθησης μεγαλύτερου του 0.1° επιδρά σημαντικά στην οπτική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Επιπλέον, διερευνήθηκε η παραδοχή λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη με μεταβλητό σφάλμα παρακολούθησης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αποδείχθηκε ότι είτε η σταθεροποίηση του σφάλματος κατά τη διάρκεια της ημέρας είτε η μείωσή του, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της παραγωγής θερμότητας.

## 9.2 Στοιχεία πρωτοτυπίας

Τα κύρια στοιχεία πρωτοτυπίας της διδακτορικής διατριβής συνοψίζονται στα παρακάτω:

- ο Εύρεση βέλτιστης καμπυλότητας των πρωτευόντων ανακλαστήρων

Στα πλαίσια της οπτικής ανάλυσης, διερευνήθηκε η επίδραση της καμπυλότητας των ανακλαστήρων στην απόδοση του ηλιακού συλλέκτη. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε παραμετρικά η εφαρμογή κοινής καμπυλότητας σε όλες τις σειρές των ανακλαστήρων, συμπληρώνοντας προηγούμενες ερευνητικές εργασίες της βιβλιογραφίας.

- ο Συγκριτική ανάλυση θερμικών δεκτών συγκέντρωσης ακτινοβολίας μονής διαδρομής

Συγκρίθηκαν θερμικοί δέκτες υπό κοινές συνθήκες λειτουργίας και δεδομένων μοντελοποίησης. Η ενδελεχής διερεύνηση και η ανάπτυξη των αντίστοιχων μοντέλων μεταφοράς θερμότητας και μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής οδήγησε στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Οι τυπολογίες που διερευνήθηκαν αφορούσαν δέκτη με μονοσωλήνιο απορροφητή, με απορροφητή μέσα σε κενό με γυάλινο περίβλημα, καθώς και απορροφητή με γυάλινο κάλυμμα και μόνωση.

- ο Σχεδιασμός και διερεύνηση θερμικού δέκτη συγκέντρωσης ακτινοβολίας διπλής διαδρομής

Καινοτόμος απορροφητής διπλής διαδρομής επινοήθηκε και μελετήθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Η θερμική ανάλυση έδειξε ότι το συγκεκριμένο σχέδιο παρουσιάζει θετικά στοιχεία έναντι του συμβατικού μονής διαδρομής. Η προτεινόμενη λύση έχει το δυναμικό να επιφέρει σημαντικά ενεργειακά, λειτουργικά και οικονομικά οφέλη σε επίπεδο συστήματος.

- ο Σχεδιασμός και ανάπτυξη εγχώριου συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη Fresnel και πειραματικής διάταξης

Υλοποιήθηκε ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη εγχώριου συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη Fresnel και αναπτύχθηκε πρωτότυπο επιφάνειας ανακλαστήρων 56 m<sup>2</sup>. Το σχέδιο του συλλέκτη κατοχυρώθηκε ως βιομηχανικό σχέδιο σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Παράλληλα αναπτύχθηκε πειραματική διάταξη με θερμικό λάδι για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του ηλιακού συλλέκτη.

- ο Συνεισφορά σε υφιστάμενη πειραματική υποδομή

Η διενέργεια πειραμάτων στο Ινστιτούτο Κύπρου είχε ως στόχο την επικύρωση των υπολογιστικών μοντέλων της διατριβής. Οι ερευνητικές υποδομές με συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες Fresnel σε λειτουργία

είναι λιγοστές ανά τον κόσμο και συνεπώς η βελτίωση αυτών είναι πολύτιμη για την ίδια την τεχνολογία. Ο συγγραφέας συνεισέφερε δημιουργικά στον έλεγχο των μετρητικών οργάνων της διάταξης, στη διενέργεια πειραμάτων και στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ηλιακού συλλέκτη.

- ο Πειραματική επικύρωση υπολογιστικών μοντέλων

Οι ερευνητικές εργασίες της βιβλιογραφίας αναφορικά με πειραματικές δραστηριότητες σε ηλιακούς συλλέκτες Fresnel είναι ελάχιστες. Συνεπώς, η πειραματική επικύρωση των υπολογιστικών μοντέλων προσθέτει σημαντικά στοιχεία στη βιβλιογραφία. Τόσο το μέγεθος του ηλιακού συλλέκτη όσο και η διαδικασία που υιοθετήθηκε, επιτρέπουν την εξαγωγή αξιόπιστων και πολύτιμων συμπερασμάτων.

### 9.3 Δημοσιεύσεις

Στα πλαίσια της διατριβής, προέκυψαν οι παρακάτω εργασίες σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια.

1. Tsekouras P., Tzivanidis C., Antonopoulos K., Optical and thermal investigation of a linear Fresnel collector with trapezoidal cavity receiver. *Applied Thermal Engineering*, 135, 379-388, 2018
2. Tsekouras P., Tzivanidis C., Antonopoulos K., Optical analysis on the curvature of the primary reflectors in a Linear Fresnel Collector, Submitted to Journal, Under review
3. Tsekouras P., Tzivanidis C., Antonopoulos K., Thermal investigation of a double pass vacuum tube absorber for linear concentrating solar collectors, Submitted to journal, Under review
4. Tsekouras P., Christodoulaki R., Koronaki I., Tsekouras G., Lamaris V., Lamaris P., Techno-economic assessment of linear concentrating solar collectors for steam production, Institute of Solar Energy - 10th Conference for Renewable Energy Sources, Thessaloniki, Greece, 2014
5. Tsekouras P., Christodoulaki R., Tsekouras G., Lamaris V., Lamaris P., Techno-economic assessment of linear concentrating solar collectors for cooling production, ENVECON - 2nd National Conference for Natural Sources and Climate change, Volos, Greece, 2014

Στο ευρύτερο πλαίσιο της διατριβής προέκυψαν επιπλέον οι παρακάτω δημοσιεύσεις.

6. Tsekouras P., Drosou V., Tzivanidis C., Antonopoulos K., Experimental results of a solar absorption cooling plant in Greece, *International Journal of Sustainable Energy*, 35, 309-322, 2014
7. Tsekouras P., Drosou V., Tzivanidis C., Antonopoulos K., A solar thermal cooling plant in Athens – Experimental results and lessons learned, OTTI 5th International Conference, Solar Air Conditioning, Bad Krozingen, Germany, 2013
8. Tsekouras P., Drosou V., Antonopoulos K., Karytsas C., An innovative high solar fraction heating and cooling plant in Athens – Control strategy and initial measurements, ASME Summer heat transfer conference, Puerto Rico, USA, 2012



#### 9.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά την υλοποίηση της παρούσας διατριβής, προέκυψαν ορισμένα στοιχεία τα οποία δύνανται να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικών ενδεδειγμένων ερευνητικών δραστηριοτήτων. Η εμβάθυνση σε αυτά εκτιμάται ότι θα συνεισφέρει περαιτέρω στη τεχνολογική ωρίμανση των ηλιακών συλλεκτών Fresnel.

- Σχετικά με την ενεργειακή ανάλυση των ηλιακών συλλεκτών Fresnel, προτείνεται η ενίσχυση των ray-tracing λογισμικών ανοικτού κώδικα με προσθήκη νέων δυνατοτήτων, όπως η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας και η ταυτόχρονη θερμική ανάλυση του συλλέκτη. Η χρήση του ενισχυμένου λογισμικού εκτιμάται ότι θα αποτελέσει σημαντικό εργαλείο σε δυνητικούς ερευνητές και κατασκευαστές της συγκεκριμένης τεχνολογίας.
- Σχετικά με την εφαρμογή κοινής καμπυλότητας στους πρωτεύοντες ανακλαστήρες, προτείνεται η διερεύνηση της ανάπτυξης τυποποιημένων σειρών ανακλαστήρων με συγκεκριμένες καμπυλότητες λαμβάνοντας υπόψη ενεργειακές, μηχανολογικές και κατασκευαστικές παραμέτρους. Οι τυποποιημένοι ανακλαστήρες θα μπορούν να εφαρμόζονται σε διαφορετικές τυπολογίες, γεωμετρίες και μεγέθη ηλιακών συλλεκτών Fresnel. Η εν λόγω πρόταση εκτιμάται ότι θα οδηγήσει σε διατηρήσει τα οπτικά σφάλματα των ανακλαστήρων και της κίνησής τους σε χαμηλά επίπεδα μειώνοντας παράλληλα το κόστος παραγωγής.
- Σχετικά με τον απορροφητή διπλής διαδρομής, προτείνεται η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση δέκτη αποτελούμενου από δύο ή και περισσότερους ανεξάρτητους σωλήνες που περικλείονται από γυάλινο κάλυμμα και ανακλαστήρα με μόνωση. Η εν λόγω πρόταση εκτιμάται ότι θα διατηρήσει τα πλεονεκτήματα της διπλής διαδρομής και παράλληλα, θα οδηγήσει σε αύξηση της οπτικής απόδοσης.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### Παράρτημα Α - Σύμβολα

Στην παρούσα ενότητα δίνεται η βασική χρήση των συμβόλων. Σημειώνεται ότι κάποια σύμβολα σε συγκεκριμένες ενότητες μπορεί να ορίζονται διαφορετικά.

Λατινικά σύμβολα

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδα
A	Επιφάνεια	m <sup>2</sup>
A <sub>net</sub>	Επιφάνεια πρωτευόντων ανακλαστήρων ηλιακού συλλέκτη	m <sup>2</sup>
C	Ενεργός θερμοχωρητικότητα του ηλιακού συλλέκτη	J K <sup>-1</sup>
C <sub>p</sub>	Ειδική θερμοχωρητικότητα	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
CR	Λόγος συγκέντρωσης	-
d	Πυκνότητα	kg m <sup>-3</sup>
diff	Θερμική διάχυση	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
D	Διάμετρος	m
DNI	Άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου	W m <sup>-2</sup>
E	Ενέργεια	Wh
F	Συντελεστής θέασης	-
g	Επιτάχυνση βαρύτητας	m s <sup>-2</sup>
G	Στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία	W m <sup>-2</sup>
GC	Συντελεστής κάλυψης εδάφους	-
h	Συντελεστής συναγωγής	W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
H	Ύψος	m
IAM	Συντελεστής διόρθωσης γωνίας πρόσπτωσης	-
K	Θερμική αγωγιμότητα	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
L	Μήκος	m
m	Παροχή μάζας	kg s <sup>-1</sup>
M	Διάκενο διαδοχικών σειρών σε οριζόντια θέση	m
n	Βαθμός απόδοσης	-
n <sub>o</sub>	Μέγιστη οπτική απόδοση	-
N	Ημέρα έτους	-
Nu	Αριθμός Nusselt	-
P	Πίεση	mmHg
Pr	Αριθμός Prandtl	-
q	Θερμική ισχύς ανά τρέχον μέτρο ηλιακού συλλέκτη	W m <sup>-1</sup>
Q	Θερμική ισχύς	W
R	Παγκόσμια σταθερά των αερίων	J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

Παραρτήματα

Ra	Αριθμός Rayleigh	-
Re	Αριθμός Reynolds	-
series	Αριθμός σειρών πρωτευόντων ανακλαστήρων	-
t	Χρόνος	S
T	Θερμοκρασία	°]
TH	Πάχος	M
u	Ταχύτητα	m s <sup>-1</sup>
U	Συντελεστής θερμικών απωλειών	W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
V	Παροχή όγκου	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
W	Πλάτος	M

Ελληνικά σύμβολα

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδα
α	Απορροφητικότητα	-
α <sub>s</sub>	Ύψος Ηλίου	ο
β	Κλίση επιφάνειας	ο
γ	Αζιμούθιο επιφάνειας	ο
γ <sub>s</sub>	Αζιμούθιο Ηλίου	ο
ΔT	Διαφορά θερμοκρασίας	K
ε	Συντελεστής εκπομπής	-
θ	Γωνία	ο
λ	Γεωγραφικό μήκος	ο
μ	Δυναμική συνεκτικότητα	Kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
MB	Μοριακό Βάρος	kg mol <sup>-1</sup>
ν	Κινηματική συνεκτικότητα	cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
ρ	Ανακλαστικότητα	-
σ	Σταθερά Stephan – Boltzmann	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>
τ	Διαπερατότητα	-
φ	Γεωγραφικό πλάτος	ο
ω	Ωριαία γωνία	ο

Δείκτες

Σύμβολο	Περιγραφή
abs	Απορροφητής
air	Αέρας
amb	Αέρας περιβάλλοντος
b	Άμεση ηλιακή ακτινοβολία
block	Εμπόδιση ακτινοβολίας μεταξύ διαδοχικών σειρών
casing	Περιφερειακή επιφάνεια του δέκτη συγκέντρωσης

	απορροφητή
cond	Αγωγή
conV	Συναγωγή
cos	Απώλειες συνημιτόνου
cover	Κάλυμμα μόνωσης
d	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία
end	Απώλειες άκρων
f	Θερμικό ρευστό
fac	Πειραματικής διάταξης
gc	Γυάλινο κάλυμμα
gt	Γυάλινο περίβλημα
i	Εσωτερική επιφάνεια
in	Είσοδος ρευστού
ins	Μόνωση
irr	Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη
long	Επίμηκες επίπεδο
loss	Απώλειες
m	Μετρήσεις
n	Κάθετο επίπεδο στη διάδοση ακτινοβολίας
o	Εξωτερική επιφάνεια
out	Έξοδος ρευστού
port	Φορητός εξοπλισμός
pr	Πρωτεύοντες ανακλαστήρες
rad	Ακτινοβολία
rec	Δέκτης συγκέντρωσης ακτινοβολίας
sc	Ηλιακός συλλέκτης
sl	Ηλιακό πεδίο
shad	Σκίαση
solabs	Απορροφηθείσα ηλιακή ακτινοβολία
spillage	Διάχυση ακτινοβολίας
sr	Δευτερεύον ανακλαστήρας
T	Κεκλιμένο επίπεδο
th	Θεωρητικές προβλέψεις μοντέλου
trans	Εγκάρσιο επίπεδο
trap	Τραπεζοειδής
use	Ωφέλιμη παραγωγή ηλιακού συλλέκτη
w	Νερό
z	Ζενίθ

<b>Σύμβολο</b>	<b>Περιγραφή</b>
CTR	Γραμμικός δέκτης συγκέντρωσης ακτινοβολίας ο οποίος αποτελείται από απορροφητή σωλήνα σε κοιλότητα αέρος που περικλείεται γυάλινο κάλυμμα και δευτερεύοντα ανακλαστήρα με μόνωση
DP	Απορροφητής διπλής διαδρομής
HTF	Θερμικό μέσο
LFC	Συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης γραμμικής εστίασης τεχνολογίας Fresnel
LT	Τοπικός χρόνος
SP	Απορροφητής μονής διαδρομής
ST	Ηλιακός χρόνος
STR	Γραμμικός δέκτης συγκέντρωσης ακτινοβολίας ο οποίος αποτελείται από απορροφητή σωλήνα
VTR	Γραμμικός δέκτης συγκέντρωσης ακτινοβολίας ο οποίος αποτελείται από απορροφητή σωλήνα με γυάλινο περίβλημα και κενό

---

## Παράρτημα Β - Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Διάγραμμα ροής της διδακτορικής διατριβής. ....	5
Σχήμα 2-1: Κοιλοπαραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες, DLR/Ernsting .....	11
Σχήμα 2-2: Αεροφωτογραφία ερευνητικών υποδομών συγκεντρωτικών ηλιακών τεχνολογιών, PSA .....	13
Σχήμα 2-3: Ηλιακοί συλλέκτες Fresnel, Novatec Solar PE1 .....	14
Σχήμα 2-4: Ηλιακός πύργος, Proteas Cyl.....	15
Σχήμα 2-5: Παραβολικά πιάτα, Maricopa ΗΠΑ .....	16
Σχήμα 2-6: Γενική διάταξη ηλιακού συλλέκτη Fresnel [9] .....	17
Σχήμα 2-7: Τυπολογίες ηλιακών συλλεκτών Fresnel με εναλλαγή προσανατολισμού (αριστερά CLFC- Hybrid και δεξιά CLFC – Complete) .....	17
Σχήμα 2-8 : Θέσεις πρωτεύοντων ανακλαστήρων .....	18
Σχήμα 2-9 : Ηλιακός συλλέκτης Fresnel τύπου etendue [47] .....	18
Σχήμα 2-10 : Μεθοδολογία χαρακτηρισμού ηλιακών συλλεκτών Fresnel με συνδυασμό θεωρητικών αποτελεσμάτων και μετρήσεων [] .....	21
Σχήμα 2-11 : Δέκτης με πολλαπλούς σωλήνες σε κοιλότητα σε εργαστήριο [75] .....	22
Σχήμα 2-12 : Συγκριτική μελέτη απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες μέσα σε κοιλότητα και επίπεδου απορροφητή [10] .....	22
Σχήμα 2-13 : Συγκριτική μελέτη απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες μέσα σε κοιλότητα ενωμένους με μεταλλική πλάκα (αριστερά) και πολλαπλούς σωλήνες χωρίς πλάκα (δεξιά) [79].....	23
Σχήμα 2-14 : Διάταξη του απορροφητή με πολλαπλούς σωλήνες των Reddy και Kumar [83] .....	24
Σχήμα 3-1: Συνιστώσες γωνιών Ηλίου στο εγκάρσιο και επίμηκες επίπεδο.....	27
Σχήμα 3-2: Σχηματικό διάγραμμα ηλιακού συλλέκτη.....	33
Σχήμα 3-3: Μεθοδολογία οπτικής ανάλυσης .....	34
Σχήμα 3-4: Γωνίες ηλιακού συλλέκτη για 'Ηλιο στο ζενίθ.....	35
Σχήμα 3-5: Κλίση ανακλαστήρων συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ) από $0^\circ$ μέχρι $90^\circ$ .....	36
Σχήμα 3-6: Συντελεστές γωνίας πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $IAM_{trans}$ ) και στο επίμηκες επίπεδο ( $IAM_{long}$ ) .....	36
Σχήμα 3-7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα απωλειών του μηχανισμού για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ).....	37
Σχήμα 3-8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της κατανομής των απωλειών του μηχανισμού για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ )	38
Σχήμα 3-9: Οπτική απόδοση ( $\eta$ ) και οπτικές απώλειες (OL) ανά σειρά για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο (αριστερά πάνω $\theta_{trans}=0^\circ$ , δεξιά πάνω $\theta_{trans}=30^\circ$ , αριστερά κάτω $\theta_{trans}=60^\circ$ και δεξιά κάτω $\theta_{trans}=75^\circ$ ).....	40

Σχήμα 3-10: Συνολικές οπτικές απώλειες ανά σειρά για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ) .....	42
Σχήμα 3-11: Απώλειες σκίασης του δέκτη για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ) .....	43
Σχήμα 3-12: Απώλειες σκίασης μεταξύ των σειρών για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ) .....	43
Σχήμα 3-13: Απώλειες συνημίτονου των σειρών για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης στο εγκάρσιο επίπεδο ( $\theta_{trans}$ ) .....	44
Σχήμα 3-14: Συστήματα συντεταγμένων στο πρόγραμμα SolTrace .....	46
Σχήμα 3-15: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για απόκλιση του Ηλίου 0°, 30°, 60° στο εγκάρσιο επίπεδο .....	47
Σχήμα 3-16: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για απόκλιση του Ηλίου 0°, 30°, 60° στο επίμηκες επίπεδο .....	49
Σχήμα 3-17: Συγκριτικά αποτελέσματα των συντελεστών $IAM_{trans}$ και $IAM_{long}$ από τα μοντέλα GBOM και RTM .....	50
Σχήμα 4-1: Τομή κατοχυρωμένου βιομηχανικού σχεδίου .....	53
Σχήμα 4-2: Όψεις του κατοχυρωμένου βιομηχανικού σχεδίου .....	53
Σχήμα 4-3: Όψη μοντέλου του ηλιακού συλλέκτη (αριστερά) και του δέκτη (δεξιά) .....	58
Σχήμα 4-4: Κατανομή ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή .....	59
Σχήμα 4-5: Κατανομή ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή χωρίς το δευτερεύοντα ανακλαστήρα .....	59
Σχήμα 4-6: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει του σφάλματος παρακολούθησης .....	60
Σχήμα 4-7: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για διάφορα σφάλματα παρακολούθησης .....	61
Σχήμα 4-8: Συντελεστής $IAM_{trans}$ συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για διάφορα σφάλματα παρακολούθησης .....	61
Σχήμα 4-9: Σχηματική ανάλυση συγκέντρωσης ακτινοβολίας της 4 <sup>ης</sup> σειράς με εφαρμογή καμπυλότητας σεναρίων C1, C4 και C7 .....	62
Σχήμα 4-10: Μείωση βαθμού απόδοσης σε σχέση με το σενάριο BC .....	64
Σχήμα 4-11: Ανάλυση του βαθμού απόδοσης για το σενάριο C6 .....	65
Σχήμα 5-1: Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας του δέκτη STR .....	76
Σχήμα 5-2: Δίκτυο θερμικών αντιστάσεων του δέκτη STR .....	77
Σχήμα 5-3: 3D όψη του δέκτη STR από το CFD μοντέλο .....	78
Σχήμα 5-4: Θερμικές απώλειες των μοντέλων HTM και CFD για το δέκτη STR .....	79
Σχήμα 5-5: Θερμορροές του δέκτη STR συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου .....	80
Σχήμα 5-6: Μέση θερμοκρασία απορροφητή και του θερμικού μέσου του δέκτη STR συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου .....	80

Σχήμα 5-7: Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας του δέκτη VTR .....	81
Σχήμα 5-8: Δίκτυο θερμικών αντιστάσεων του δέκτη VTR .....	83
Σχήμα 5-9: 3D όψη του δέκτη VTR από το CFD μοντέλο .....	84
Σχήμα 5-10: Θερμικές απώλειες των μοντέλων HTM και CFD και τιμές βιβλιογραφίας για το δέκτη VTR .....	85
Σχήμα 5-11: Θερμορροές του δέκτη VTR συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου.....	86
Σχήμα 5-12: Μέση θερμοκρασία απορροφητή, θερμικού μέσου και γυάλινου περιβλήματος του δέκτη VTR συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου.....	86
Σχήμα 5-13: Μέση θερμοκρασία απορροφητή και γυάλινου περιβλήματος συναρτήσει της διαμέτρου του απορροφητή για το δέκτη VTR .....	87
Σχήμα 5-14: Θερμορροές συναρτήσει της διαμέτρου του απορροφητή για το δέκτη VTR.....	88
Σχήμα 5-15: Μέση θερμοκρασία απορροφητή και γυάλινου περιβλήματος συναρτήσει της παροχής μάζας του θερμικού μέσου για το δέκτη VTR.....	88
Σχήμα 5-16: Θερμικές απώλειες συναρτήσει της παροχής μάζας του θερμικού μέσου για το δέκτη VTR.....	89
Σχήμα 5-17: Θερμοκρασία του απορροφητή και του γυάλινου περιβλήματος στην εξωτερική τους επιφάνεια συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή για το δέκτη VTR .....	90
Σχήμα 5-18: Θερμικές απώλειες συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή για το δέκτη VTR.....	90
Σχήμα 5-19: Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας του δέκτη CTR.....	92
Σχήμα 5-20: Δίκτυο θερμικών αντιστάσεων του δέκτη CTR.....	93
Σχήμα 5-21: 3D όψη του δέκτη CTR από το CFD μοντέλο.....	95
Σχήμα 5-22: Αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων HTM και CFD και τιμές βιβλιογραφίας για το δέκτη CTR .....	97
Σχήμα 5-23: Θερμορροές συναρτήσει της θερμοκρασίας του θερμικού μέσου του δέκτη CTR. ....	97
Σχήμα 5-24: Μέση θερμοκρασία απορροφητή, δευτερεύοντος ανακλαστήρα, θερμικού μέσου και γυάλινου καλύμματος συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου για το δέκτη CTR. ....	98
Σχήμα 5-25: Θερμικές απώλειες του δέκτη CTR για διάμετρο 0.07 m και 0.14 m απορροφητή. ....	98
Σχήμα 5-26: Μέση θερμοκρασία των υλικών για τους δέκτες STR, VTR και CTR. ....	99
Σχήμα 5-27: Θερμικές απώλειες των δεκτών STR, VTR και CTR συναρτήσει της θερμοκρασίας του θερμικού μέσου.....	100
Σχήμα 6-1: Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας ηλιακών συλλεκτών σε πάρκο ηλεκτροπαραγωγής .....	102
Σχήμα 6-2: Σχηματικό διάγραμμα δέκτη διπλής διαδρομής.....	103



Σχήμα 6-3: Συνδεσμολογίες ηλιακών συλλεκτών για δέκτη SP (αριστερά) και δέκτη DP (δεξιά) .....	103
Σχήμα 6-4: Μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας του δέκτη διπλής διαδρομής .....	105
Σχήμα 6-5: Σχηματικό διάγραμμα απορροφητών μονής διαδρομής (αριστερά) και διπλής διαδρομής (δεξιά).....	108
Σχήμα 6-6: Αριθμός Reynolds για τους δέκτης SP και DP .....	110
Σχήμα 6-7: Πτώση πίεσης για τους δέκτες SP και DP .....	110
Σχήμα 6-8: Λόγος παρασιτικής κατανάλωσης προς θερμικές απολαβές του ηλιακού συλλέκτη.....	111
Σχήμα 6-9: Διάγραμμα θερμοκρασίας του δέκτη DP για θερμοκρασία εισόδου 250°C .....	112
Σχήμα 6-10: Συγκριτική ανάλυση των θερμικών απωλειών των δέκτη SP και DP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου.....	113
Σχήμα 6-11: Θερμικές απώλειες των δεκτών SP και DP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου για παροχή μάζας 1, 2.5 και 5 kg/s.....	113
Σχήμα 6-12: Μέση θερμοκρασιακή διαφορά του απορροφητή από το θερμικό μέσο για τους δέκτες SP και DP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου για παροχή μάζας 1, 2.5 και 5 kg/s.....	114
Σχήμα 6-13: Μέση θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος για τους δέκτες SP και DP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμικού μέσου για παροχή μάζας 2.5, 5 και 7.5kg/s.....	115
Σχήμα 6-14: Θερμοκρασιακή αύξηση του θερμού και ψυχρού ρευστού .....	116
Σχήμα 6-15: Κατανομή απορροφηθείσας θερμότητας μεταξύ θερμού και ψυχρού ρευστού .....	117
Σχήμα 6-16: Θερμικές απώλειες του απορροφητή .....	118
Σχήμα 6-17: Θερμοκρασιακή αύξηση του θερμού και ψυχρού ρευστού για τις 4 εξεταζόμενες περιπτώσεις (C1 – C4) .....	119
Σχήμα 6-18: Κατανομή απορροφηθείσας θερμότητας στο ψυχρό ρευστό για τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις, C1 – C4.....	120
Σχήμα 7-1: 3D όψη του πρωτοτύπου του ηλιακού συλλέκτη .....	123
Σχήμα 7-2: Βάσεις στήριξης και κολώνες στήριξης του δέκτη .....	123
Σχήμα 7-3: Τοποθέτηση σωλήνων κενού και δευτερευόντος ανακλαστήρα....	124
Σχήμα 7-4: Πλαίσια στήριξης ανακλαστήρων .....	124
Σχήμα 7-5: Φωτογραφία του ηλιακού συλλέκτη Fresnel.....	125
Σχήμα 7-6: Σχεδιάγραμμα της πειραματικής εγκατάστασης.....	126
Σχήμα 7-7: Ψύκτης θερμικού λαδιού .....	127
Σχήμα 7-8: Κυκλοφορητής, ηλεκτρική αντίσταση και δοχείο διαστολής θερμικού λαδιού.....	127
Σχήμα 7-9: Αισθητήρες θερμοκρασίας του θερμικού λαδιού .....	129
Σχήμα 7-10: Υδραυλικό μέρος ροόμετρου θερμικού λαδιού .....	129

Σχήμα 7-11: Αισθητήρας ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμου και θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος (αριστερά). Έλεγχος μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας (δεξιά) .....	130
Σχήμα 7-12: Μιμικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.....	131
Σχήμα 7-13: Γραφήματα μεταβλητών .....	132
Σχήμα 8-1: Όψη του ηλιακού συστήματος [107] .....	138
Σχήμα 8-2: Μετεωρολογικά δεδομένα ακτινοβολίας DNI και μέσης θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος, Λευκωσία .....	139
Σχήμα 8-3: Μέγιστη μέση ημερήσια (πράσινο σκούρο) και ελάχιστη μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, Λευκωσία.....	139
Σχήμα 8-4: Σχηματικό διάγραμμα του ηλιακού συστήματος[107].....	140
Σχήμα 8-5: Ηλιακός συλλέκτης Fresnel [] .....	140
Σχήμα 8-6: Αισθητήρα θερμοκρασίας θερμικού λαδιού στην έξοδο (αριστερά) και είσοδο του ηλιακού συλλέκτη (κέντρο) και ροόμετρο (δεξιά).....	142
Σχήμα 8-7: Βασικός εξοπλισμός φορητού συστήματος .....	142
Σχήμα 8-8: Σχέδιο ηλιακού κυκλώματος και μετρητικού εξοπλισμού.....	143
Σχήμα 8-9: Σημεία τοποθέτησης αισθητηρίου ακτινοβολίας (αριστερά) και αισθητηρίων θερμοκρασίας λαδιού (δεξιά)του φορητού εξοπλισμού.....	144
Σχήμα 8-10: Δειγματοληψία στο πεδίο και απεικόνιση δεδομένων μέσω υπολογιστή (αριστερά) και μετρητικά όργανα πριν την τοποθέτησή τους στο ηλιακό πεδίο (δεξιά) .....	144
Σχήμα 8-11: Οπτική ανάλυση ηλιακού μοντέλου με προσθήκη σκιάσεων στους ανακλαστήρες και ανενεργών τμημάτων .....	147
Σχήμα 8-12: Επίδραση σφάλματος παρακολούθησης στο συντελεστή οπτικής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη.....	148
Σχήμα 8-13: Διακριτοποιημένος $IAM_F$ (αριστερά), αληθινός $IAM_{true}$ (μέση) και απόκλιση των συντελεστών IAM (δεξιά).....	149
Σχήμα 8-14: Σύγκριση συντελεστές IAM για ενδεικτική ημέρα, 16/9/2017.....	149
Σχήμα 8-15: Ανάλυση μετρήσεων μετρητή ακτινοβολίας φορητού εξοπλισμού .....	152
Σχήμα 8-16: Συγκριτικές μετρήσεις της ακτινοβολίας DNI.....	153
Σχήμα 8-17: Συγκριτικές μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος .....	154
Σχήμα 8-18: Συγκριτικές μετρήσεις της παραγωγής θερμότητας.....	155
Σχήμα 8-19: Συγκριτικές μετρήσεις θερμοκρασιών του θερμικού λαδιού.....	155
Σχήμα 8-20: Ημερήσια παραγωγή θερμότητας από μετρήσεις ( $E_{sc,m}$ ) και από εκτιμήσεις μοντέλου ( $E_{sc,th}$ ) .....	157
Σχήμα 8-21: Μετρήσεις ακτινοβολίας DNI και θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος, 16/9/2017 .....	158
Σχήμα 8-22: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού και εκτίμηση θερμοκρασίας εξόδου, 16/9/2017 .....	159

Σχήμα 8-23: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτιμώμενη θερμικής ισχύος, 16/9/2017.....	159
Σχήμα 8-24: Μετρήσεις ακτινοβολίας DNI και θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος, 17/9/2017.....	160
Σχήμα 8-25: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού και εκτίμηση θερμοκρασίας εξόδου, 17/9/2017.....	161
Σχήμα 8-26: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος, 17/9/2017.....	161
Σχήμα 8-27: Μετρήσεις ακτινοβολίας DNI και θερμοκρασίας αέρα περιβάλλοντος, 19/9/2017.....	162
Σχήμα 8-28: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού και εκτίμηση θερμοκρασίας εξόδου, 19/9/2017.....	162
Σχήμα 8-29: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού και εκτίμηση θερμοκρασίας εξόδου με και χωρίς θερμοχωρητικότητα, 19/9/2017.....	163
Σχήμα 8-30: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος με και χωρίς θερμοχωρητικότητα, 19/9/2017.....	164
Σχήμα 8-31: Μετρήσεις θερμοκρασιών και ροής λαδιού, 12/9/2017.....	165
Σχήμα 8-32: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος, 12/9/2017.....	165
Σχήμα 8-33: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος με διατήρηση του πρωινού σφάλματος, 12/9/2017.....	166
Σχήμα 8-34: Μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος και εκτίμηση θερμικής ισχύος με σφάλμα σχεδιασμού, 12/9/2017.....	167

## Παράρτημα Γ - Λίστα Πινάκων

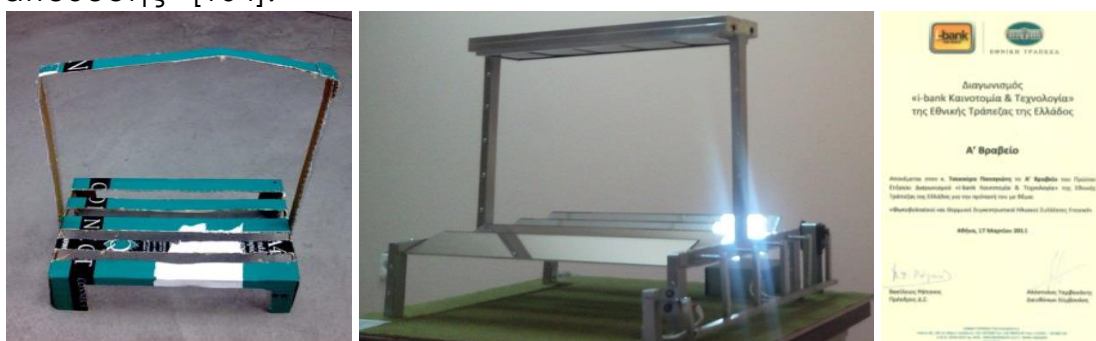
Πίνακας 2-1 : Έργα μικρής κλίμακας με κοιλοπαραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες .....	12
Πίνακας 2-2 : Έργα μεγάλης κλίμακας με κοιλοπαραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες .....	12
Πίνακας 2-3 : Ερευνητικές υποδομές κοιλοπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών στην Ευρώπη.....	12
Πίνακας 2-4 : Εγκατεστημένη ισχύς συγκεντρωτικών τεχνολογιών για ηλεκτροπαραγωγή .....	14
Πίνακας 2-5 : Έργα μεγάλης κλίμακας με ηλιακούς συλλέκτες Fresnel .....	14
Πίνακας 2-6 : Βασικά στοιχεία ηλιακών συλλεκτών Fresnel .....	15
Πίνακας 2-7 : Έργα μεγάλης κλίμακας με ηλιακό πύργο .....	16
Πίνακας 2-8 : Έργα μεγάλης κλίμακας παραβολικά πιάτα .....	16
<i>Πίνακας 3-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες των υλικών του ηλιακού συλλέκτη.....</i>	<i>33</i>
<i>Πίνακας 3-2: Οπτικές απώλειες ανά σειρά για <math>\theta_{trans}=0^\circ</math> .....</i>	<i>41</i>
Πίνακας 3-3 : Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή $IAM_{trans}$ .....	46
Πίνακας 3-4 : Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή $IAM_{long}$ .....	48
<i>Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά του ηλιακού συλλέκτη .....</i>	<i>54</i>
Πίνακας 4-2 : Λογισμικά μοντελοποίησης βιβλιογραφίας .....	55
Πίνακας 4-3 : Αποτελέσματα ray-tracing μοντέλων για τον ηλιακό συλλέκτη της βιβλιογραφίας .....	56
Πίνακας 4-4: Σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή οπτικής απόδοσης με τιμές βιβλιογραφίας .....	56
Πίνακας 4-5: Σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή $IAM_{trans}$ με τιμές βιβλιογραφίας .....	56
Πίνακας 4-6: Σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή $IAM_{long}$ με τιμές βιβλιογραφίας .....	57
Πίνακας 4-7 : Βαθμός απόδοσης συναρτήσει του σφάλματος παρακολούθησης για διάφορες γωνίες Ηλίου.....	60
Πίνακας 4-8: Εστιακή απόσταση σεναριών καμπυλότητας .....	62
Πίνακας 4-9: Βαθμός απόδοσης και απόκλιση αποτελεσμάτων από BC σενάριο .....	63
Πίνακας 4-10: Βαθμός απόδοσης για διάφορα σφάλματα .....	63
Πίνακας 5-1: Συντελεστές θέασης της κοιλότητας του δέκτη με γυάλινο κάλυμμα και δευτερεύοντα ανακλαστήρα .....	72
Πίνακας 5-2: Τιμές θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του θερμικού ρευστού.....	75
Πίνακας 5-3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών του δέκτη STR.....	76
Πίνακας 5-4: Θερμικές απώλειες των μοντέλων HTM και CFD για το δέκτη STR..	79
Πίνακας 5-5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών του δέκτη VTR ....	82

Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων ΗΤΜ και CFD και τιμές βιβλιογραφίας για το δέκτη VTR .....	85
Πίνακας 5-7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών του δέκτη CTR....	92
Πίνακας 5-8: Αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων ΗΤΜ και CFD και τιμές βιβλιογραφίας για το δέκτη CTR.....	96
Πίνακας 5-9: Μέσες τιμές της θερμοκρασίας των υλικών των δεκτών STR, VTR και CTR.....	99
Πίνακας 5-10: Συγκεντρωτικά στοιχεία θερμορροών των δεκτών STR, VTR και CTR.....	100
Πίνακας 6-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών του δέκτη VTR ..	107
Πίνακας 6-2: Πτώση πίεσης των δεκτών DP και SP .....	109
Πίνακας 6-3: Θερμικές απώλειες του δέκτη DP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου και της παροχής μάζας.....	112
Πίνακας 6-4: Απορροφηθείσα θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του θερμού ρευστού .....	116
Πίνακας 6-5: Εξεταζόμενες περιπτώσεις θερμικής αντίστασης του χωρίσματος .....	118
Πίνακας 7-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητηρίων μέτρησης πειραματικής διάταξης .....	128
Πίνακας 7-2: Μεταβλητές μεγεθών που καταγράφονται ή υπολογίζονται .....	132
Πίνακας 8-1: Μετρητικά όργανα του ηλιακού πεδίου .....	141
Πίνακας 8-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητηρίων φορητού εξοπλισμού.....	143
Πίνακας 8-3: Σειρά ενεργειών προετοιμασίας μοντέλου και διενέργειας πειραμάτων .....	145
Πίνακας 8-4: Ανάλυση της θερμοχωρητικότητας του ηλιακού συλλέκτη .....	150
Πίνακας 8-5: Ιστορικό μετρήσεων .....	151

## Παράρτημα Δ - Ωρίμανση κατασκευών ηλιακού συλλέκτη Fresnel

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται φωτογραφικά οι κατασκευές του ηλιακού συλλέκτη Fresnel που αναπτύχθηκαν κατά την ενασχόληση του συγγραφέα με το αντικείμενο των ηλιακών συλλεκτών Fresnel.

Οι πρώτες “βρεφικές” κατασκευές έγιναν στα πλαίσια υποστήριξης της πρότασης “Φωτοβολταϊκοί και θερμικοί συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες Fresnel” στον πρώτο διαγωνισμό i-bank Καινοτομία & Τεχνολογία της Εθνικής Τράπεζας της Ελλάδος το 2011. Η πρόταση απέσπασε το Α' Βραβείο στο διαγωνισμό. Σε συνέχεια των παραπάνω, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε πρωτότυπο ηλιακού συλλέκτη σε πραγματική κλίμακα στα πλαίσια του ερευνητικού έργου “Solecon - Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες Fresnel υψηλής θερμοκρασίας και απόδοσης” [104].



## Παράρτημα Δ - Σύντομο Βιογραφικό

### ΠΡΟΣΩΠΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Όνοματεπώνυμο	Παναγιώτης Δ. Τσεκούρας
Ημερομηνία Γέννησης	9/10/1984
Οικογενειακή κατάσταση	Παντρεμένος με 2 παιδιά
Κατοικία	Κάντζα, Αττική
E-mail	ptsek84@gmail.com

### ΣΥΝΟΨΗ

Ο κ. Παναγιώτης Τσεκούρας είναι διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός, ΕΜΠ. Από το 2007 είναι ενεργός στο τομέα των ηλιοθερμικών τεχνολογιών με εργασιακή εμπειρία που προέρχεται από μακροχρόνιες συνεργασίες με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) και με ελεύθερο επάγγελμα. Έχει ενεργό συμμετοχή στην υλοποίηση ερευνητικών έργων. Οι βασικές δραστηριότητες αφορούν υπολογιστική ανάλυση ηλιακών συλλεκτών και συστημάτων, μελέτη και σχεδιασμό εργαστηριακών, πιλοτικών και εμπορικών συστημάτων, ανάλυση αγοράς, προετοιμασία τεχνικών φακέλων, προετοιμασία και διεξαγωγή πειραμάτων, ανάλυση μετρήσεων, εκπαίδευση, συγγραφή τεχνικών εκθέσεων και προτάσεων.

### ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ / ΠΤΥΧΙΑ

2008 - σήμερα	ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ (ΕΜΠ) Υ.Δ. Μηχανολόγος Μηχανικός	ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ (ΕΜΠ) Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας Επιβλέπων καθηγητής, Κ. Αντωνόπουλος
2002 - 2008	Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός	ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ (ΕΜΠ) Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

### ΕΡΓΟΔΟΤΕΣ / ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΕΣ

2007 - 2018	Ερευνητικός συνεργάτης	ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΚΑΠΕ) Συνεργάτης τμήματος Θερμικών Ηλιακών Συστημάτων // Μελέτη, σχεδιασμός, προσομοιώσεις ενεργειακών συστημάτων // Σχεδιασμός και ανάπτυξη πειραματικών διατάξεων και πιλοτικών έργων // Συγγραφή τεχνικών εκθέσεων και προτάσεων // Δραστηριότητες διάδοσης και αξιοποίησης αποτελεσμάτων
2008 - 2018	Υπ. Διδάκτωρ	ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ (ΕΜΠ) Υπ. Διδάκτωρ Εργαστηρίου Ηλιακής Ενέργειας, Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών // Συνεργάτης εργ. Ηλιακής

Ενέργειας και εργ. Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής //  
Ερευνητικές δραστηριότητες στο τομέα της ηλιοθερμίας //  
Υποστήριξη δραστηριοτήτων εργαστηρίου

---

2007 - ΣΗΜΕΡΑ	ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΛΟΙΠΕΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΕΣ
Ελεύθερος επαγγελματίας	Ευρωπαϊκή Ένωση, Research Executive Agency (REA), 2016 – 2018 Ελληνο – Γερμανικό Εμπορικό και Βιομηχανικό Επιμελητήριο, 2015-2016 SOLE – Βιομηχανία Ηλιακών Συσκευών, 2012-2015

---

### **ΣΥΝΟΨΗ ΔΕΞΙΟΤΗΤΩΝ/ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ / ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΩΝ**

---

- Ενεργός συμμετοχή ως ερευνητής / μελετητής σε περισσότερα από 10 χρηματοδοτούμενα έργα στα πλαίσια εθνικών (ΕΣΠΑ), Ευρωπαϊκών (ΙΕΕ, FP6, FP7, H2020) και ιδιωτικών πλαισίων.
  - Ενεργειακός σχεδιασμός ηλιακών συλλεκτών χαμηλής θερμοκρασίας και συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών γραμμικής εστίασης
  - Μελέτη / σχεδιασμός/ ανάπτυξη εργαστηριακών διατάξεων και πιλοτικών εφαρμογών με ηλιακούς συλλέκτες, θερμική αφαλάτωση, αποθήκες PCM και θερμικό ψύκτη/ κλιματισμό
  - Μελέτη / σχεδιασμός ενεργειακών συστημάτων για παραγωγή θερμού νερού χρήσης, θέρμανσης, ψύξης, ατμοπαραγωγής και ηλεκτροπαραγωγής
  - Συγγραφική δραστηριότητα σε τουλάχιστον 18 δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά / συνέδρια και σε τουλάχιστον 50 τεχνικές εκθέσεις, μελέτες και παραδοτέα.
  - Συνιδιοκτήτης Βιομηχανικού Σχεδίου συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη (RCD 002698563-0001), 2015
  - 1<sup>ο</sup> Βραβείο σε Πανελλήνιο Διαγωνισμό Καινοτομίας i-bank Καινοτομία & Τεχνολογία, Εθνική Τράπεζα της Ελλάδος, 2011
  - Εμπειρογνώμονας σε αξιολογήσεις προτάσεων Ευρωπαϊκών ερευνητικών έργων
  - Υπολογιστικές δεξιότητες: MATHCAD, TONATIUH, SOLTRACE, SOLIDWORKS FLOW SIMULATION, TRNSYS, POLYSUN, GREENIUS, SAM, T-SOL, PVSYST, RETSCREEN, LADDER, AUTOCAD
-



## **Παράρτημα Ε - Λογισμικά**

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής.

### **ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ**

---

Το εμπορικό λογισμικό **MATCAD** [93] χρησιμοποιείται για την επίλυση τόσο απλών όσο και σύνθετων μαθηματικών εξισώσεων και συστημάτων εξισώσεων, για τον προγραμματισμό, για την επεξεργασία δεδομένων και για τη δημιουργία σύνθετων γραφημάτων. Απευθύνεται σε επιστήμονες που δραστηριοποιούνται στο τομέα της μηχανικής και των μαθηματικών. Χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη οπτικών και θερμικών μοντέλων του συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη και για την επεξεργασία των μετρήσεων.

### **ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΙΧΝΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

---

Το λογισμικό **SOLTRACE** [88] αναπτύχθηκε από το National Research Energy Laboratory (NREL) της Αμερικής. Το λογισμικό **TONATIUH** [92] αναπτύχθηκε από το National Renewable Energy Centre (CENER) της Ισπανίας.

Τα λογισμικά αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών και συστημάτων, με σκοπό την ακριβή ανάλυση της οπτικής συμπεριφοράς τους. Χρησιμοποιούν τη μεθοδολογία ιχνηλάτησης ακτινοβολίας Monte-Carlo. Στην αρχή της προσομοίωσης παράγεται σημαντικός αριθμός ακτίνων. Η διαδρομή της κάθε ακτίνας ιχνηλατείται, καθώς υπόκειται σε πολλαπλές αλληλεπιδράσεις με τα αντικείμενα του χώρου. Χρησιμοποιήθηκαν για την οπτική ανάλυση των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.

### **ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

---

Το λογισμικό SOLIDWORKS (FLOW SIMULATION) [94] αποτελεί σχεδιαστικό λογισμικό με ενσωματωμένες δυνατότητες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Χρησιμοποιείται, μεταξύ άλλων, για την ανάλυση φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Το σύστημα επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Χρησιμοποιήθηκε για τη θερμική ανάλυση των γραμμικών δεκτών συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας.

## Παράρτημα ΣΤ - Αναφορές

- [1] European Union, EU Energy markets in 2014, ISBN978-92-79-37962-8
- [2] Eurostat - European Environment Agency, Energy, transport and environment indicators, 2016 ed., ISBN 978-92-79-60138-5
- [3] European Commission, Market Observatory For Energy, Europe's Energy Position Annual Report 2010
- [4] Tzivanidis C., Bellos E., Korres D., Antonopoulos K.A., Mitsopoulos G., Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. Case Studies in Thermal Engineering 6, 226-237, 2015
- [5] Solar Thermal Electricity, Strategic Research agenda 2020-2025, European Solar Thermal Electricity Association – ESTELA, 2012
- [6] United Nations Industrial Development Organization, Renewable Energy In Industrial Applications - An assessment of the 2050 potential,  
[https://www.unido.org/fileadmin/user\\_media/Services/Energy\\_and\\_Climate\\_Change/Energy\\_Efficiency/Renewables\\_%20Industrial\\_%20Applications.pdf](https://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Energy_and_Climate_Change/Energy_Efficiency/Renewables_%20Industrial_%20Applications.pdf)
- [7] Kalogirou S., Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 30, 231–295, 2004
- [8] Moghimi, M.A., Craig, K.J., Meyer, J.P., A novel computational approach to combine the optical and thermal modelling of Linear Fresnel Collectors using the finite volume method, Solar Energy, 116, 407-427, 2015
- [9] Zhu G., Wendelin T., Wagner M., Kutscher C., History, current state and future of linear Fresnel concentrating solar collectors, Solar Energy, 103, 639-652, 2014
- [10] Singh P.L., Sarviya R.M., Bhagoria J.L., Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers, Applied Energy, 87, 541–550, 2010
- [11] European Commission, Directorate-General for Energy, Good Practice In Energy Efficiency: For a sustainable, safer and more competitive Europe, 2016
- [12] European Parliament, Directive 2012/27/EU, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1399375464230&uri=CELEX%3A32012L0027>
- [13] European Commission, Eurostat News Release 25/2018, Energy consumption in 2016: Consumption in the EU above the energy

- efficiency target, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-press-releases/-/8-25012018-AP>, 2018
- [14] United Nations Industrial Development Organization, Renewable Energy in Industrial Applications: An assessment of the 2050 potential, 2008
- [15] Scientific and Technological Alliance for Guaranteeing the European Excellence in Concentrating Solar Thermal Energy, Project Deliverable 11.2: Report on suitable Process heat and/or CHP systems for specific industries and integration guidelines, 2016
- [16] International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewable Energy Options For The Industry Sector: Global And Regional Potential Until 2030, 2015
- [17] European Commission, EU Emissions Trading System EU ETS, [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets\\_en#tab-0-0](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en#tab-0-0)
- [18] Sustainable Energy for All, SEforALL, <https://www.seforall.org/>
- [19] European Environment Agency EEA Report No 3/2017, Renewable energy in Europe: Recent growth and knock-on effects, 2017
- [20] European Commission, Eurostat, Energy, transport and environment indicators, ed. 2017, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-statistical-books/-/KS-DK-17-001>, 2017
- [21] International Energy Agency - Solar Heating and Cooling Programme IEA-SHC, Database for applications of solar heat integration in industrial processes, SHIP database, <http://ship-plants.info/>
- [22] International Energy Agency - Solar Heating and Cooling Programme IEA-SHC, Task 49 Solar Process Heat for Production and Advanced Applications, Deliverable B2: Integration Guideline, 2015
- [23] Burkholder F., Kutscher C., Heat loss testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver, Technical Report, NREL/ TP-550-45633, 2009
- [24] Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology, Innovative working fluids for parabolic trough collectors, Woodhead publishing, 1st edition, 2014
- [25] Horta P., Process Heat Collectors: State of the Art and available medium temperature collectors, Technical report A.1.3, IEA SHC Task 49, Solar Paces Annex IV

- [26] NEP Solar, Polytrough parabolic trough manufacturer, <http://www.nep-solar.com>, Australia, accessed 2018
- [27] Absolicon, Parabolic trough (T160) manufacturer, <http://www.absolicon.se>, Sweden, accessed 2018
- [28] P. Tsekouras, R.Christodoulaki, V.Drosou. Technical assesment of a concentrating solar thermal system for industrial process steam. International Solar Energy Society - Eurosun Conference proceedings, Spain, 2016
- [29] Horta P., Brunner C., Kramer K., Frank E., IEA/SHC T49 activities on process heat collectors: available technologies, technical-economic comparison tools, operation and standardization recommendations, Energy procedia, 91, 630 -637, 2016
- [30] Silva R., Cabrera F.J., Perez-Garcia M., Process heat generation with parabolic trough collectors for a vegetables preservation industry in Southern Spain, Energy procedia, 48, 1210-1216, 2014
- [31] Database for applications of solar heat integration in industrial processes, <http://ship-plants.info/>, IEA SHC Task 49, accessed 2018
- [32] Sbp, Large scale parabolic trough manufacturer, <https://www.sbp.de>, Germany, accessed 2018
- [33] TSK Flagsol, Large scale parabolic trough manufacturer, <http://www.flagsol.com>, Germany, accessed 2018
- [34] Solar Thermal Electricity, Global outlook 2016, Solarpaces, Greenpeace, ESTELA, 2016
- [35] Database of Concentrating Solar Power projects, <https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/index.cfm>, NREL, Solarpaces, accessed 2018
- [36] Status Report on Existing Capacities, Technological and Human Resources, EU-SOLARIS The European Research Infrastructure for Concentrated Solar Power, 2014
- [37] Database of Concentrating Solar Power projects, <https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/index.cfm>, NREL, Solarpaces, accessed 2018
- [38] Novatec Solar, Linear Fresnel manufacturer, <http://www.novatecsolar.com/40-1-Download-Centre.html>, Germany, accessed 2018
- [39] Soltigua, Linear Fresnel manufacturer, Italy, <http://www.soltigua.com/>, accessed 2017

- [40] Bernhard R., Laabs H.J, Eck M., Eickhoff M., Pottler K., Morin G., Heimsath A., Georg A., Habelre A., Linear Fresnel collector demonstration on the PSA, Part I –Design, construction and quality control, 14th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, USA 2008
- [41] The Cyprus Institute – Cyl, Research Test facilities, <https://www.cyi.ac.cy/index.php/eewrc/eewrc-research-projects/energy/facilities.html>
- [42] Fresnex, Linear Fresnel manufacture, Austria, <http://www.fresnex.com/index.php/contact.html>, accessed 2018
- [43] Mills, D., Morrison, G., Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants, *Solar Energy*, 68, 262–283, 2000
- [44] Montes M.J., Rubbia C., Abbas R., Matrinez-Val J., A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power, *Energy*, 73, 193-203, 2014
- [45] Walker G, Von Backström TW, Gauché P., A Method of Increasing Collector Aperture in Linear Fresnel Solar Concentrators at High Zenith Angles. Proceedings of the 1st annual Southern African Solar Energy Conference, Stellenbosch, 2012
- [46] Chaves J, Collares-Pereira M. Etendue-matched two-stage concentrator with multiple receivers, *Solar Energy*, 84, 196-207, 2010
- [47] Rungasamy, A.E., Craig K.J., Meyer J.P., 3-D CFD modeling of a slanted receiver in a compact linear Fresnel plant with etendue-matched mirror field, International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014, *Energy procedia*, 69, 188-197, 2015
- [48] Rabl A., Goodman N.B., Winston R., Practical design considerations for CPC solar collectors, *Solar Energy* 22, 373-381, 1979
- [49] Chaves J., Non imaging optics, CRC press, 2nd edition, 2016
- [50] Canavarro D., Chaves J., Collares-Pereira M., A novel Compound Elliptical-type Concentrator for parabolic primaries with tubular receiver, *Solar Energy*, 134, 383-391, 2016
- [51] Hack M., Zhu G., Wendelin E., Evaluation and comparison of an adaptive method technique for improved performance of linear Fresnel secondary designs, *Applied energy*, In press
- [52] Bode S.J., Gauche P, Review of optical software for use in concentrating solar power systems, SASEC 1st Southern African

- Solar Energy Conference, 21-23 May 2012, Stellenbosch, South Africa
- [53] Garcia P., Ferriere A., Beziau J.-J., Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review, *Solar Energy*, 82, 189-197, 2008
- [54] Clifford K.H., *Software and Codes for Analysis of Concentrating Solar Power Technologies*, Sandia National Laboratories, Report SAND 2008-8053, 2008
- [55] Li L., Coventry J., Bader R., Pye J., Lipinski W., Optics of solar central receiver systems: a review, *Optics express*, 24, In press
- [56] Osório T., Horta P., Larcher M., Pujol-Nadal R., Hertel J., De Wet van Rooyen, Heimsath A., Schneider S., Benitez D., Frein A., Denarie A., Ray-Tracing Software Comparison for Linear Focusing Solar Collectors, *SolarPACES 2015*, AIP Conf. Proc. 1734, 020017-1–020017-8; doi: 10.1063/1.4949041
- [57] Zhu G., Development of an analytical optical method for linear Fresnel collectors, *Solar energy*, 94, 240-252, 2013
- [58] Craig K.J., Moghimi M.A., Rungasamy A.E., Marsberg J., Meyer J.P., Finite-volume ray tracing using Computational Fluid Dynamics in linear focus CSP applications, *Applied energy*, 183, 241-256, 2016
- [59] Salgado Conrado L., Rodriguez-Pulido A., Calderón G., Thermal performance of parabolic trough solar collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1345–1359, 2017
- [60] Price H., Forristall R., Wendelin T., A. Lewandowski, Moss T., Gummo C., Field Survey of Parabolic Trough Receiver Thermal Performance, Conference Paper NREL/CP-550-39459 April 2006
- [61] Burkholder F., Kutscher C., Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-550-45633, 2009
- [62] Forristall, R., Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in Engineering Equation Solver, NREL/ TP-550-34169, 2003
- [63] Espinosa-Rueda G., Hermoso J., Martinez Sans N., Gallas –Torreira M., Vacuum evaluation of parabolic trough receiver tubes in a 50 MW concentrated solar power plant, *Solar energy*, 139, 36-46, 2016
- [64] Pino F.J., Caro R., Rosa F., Guerra J., Experimental validation of an optical and thermal model of a linear Fresnel collector system, *Applied Thermal Engineering*, 50, 1463-1471, 2013

- [65] Bernhard R., Lalaing J., Kistner R., Eck M., Eickhoff, M., Feldhoff J.F., Heimsath A., Hulse H., Morin G., Linear Fresnel Collector demonstration at the PSA – operation and investigation. In: 15th International SolarPACES Conference, Germany 2009
- [66] Itskhokine, D., Lecuillier, P., Benmarraze, S., Guillier, L. and Rabut, Q., Augustin Fresnel project - design, construction and testing of a linear Fresnel pilot plant in the Pyrenees, presented at the 18th International SolarPACES Symposium, 11-14 September, Marrakech 2012
- [67] Beltagy H., Semmar D., Lehaut C., Said N., Theoretical and experimental performance analysis of a Fresnel type solar concentrator, *Renewable Energy*, 101, 782-793, 2017
- [68] Zheng J., Yan J., Pei J., Liu G., Solar tracking error analysis of Fresnel Reflector, *The scientific world journal*, Volume 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/834392>
- [69] Osório T., Carvalho M. J., SHC 2012: Testing of solar thermal collectors under transient conditions, *Energy Procedia*, 30, 1344 – 1353, 2012
- [70] Horta P., Osório T., Optical characterization parameters for line-focusing solar concentrators: measurement procedures and extended simulation results, *Energy Procedia*, 49, 98–108, 2014
- [71] International Standard ISO/FDIS 9806:2013, Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods, First edition 2013-11-15
- [72] Yang F., Itskhokine D., Benmarraze S., Hofer A., Lecat F., Ferriere A., Acceptance testing procedure for Linear Fresnel Reflector solar systems in utility-scale solar thermal power plants, *Energy procedia*, 69, 1479-1487, 2015
- [73] Hofer A., Buchner D., Kramer K., Fahr S., Heimsath A., Platzer W.J., Scholl S., Comparison of two different (quasi-) dynamic testing methods for the performance evaluation of a Linear Process Heat Collector, *International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPaces 2014, Energy Procedia* 69, 84-95, 2015
- [74] Platzer W., Heimsath A., Hülsey H., Parameter Identification Technique for the Determination of Optical Efficiency of Concentrating Collectors, *Proceedings SolarPACES Conference, Berlin, 2009.*

- [75] Larsen S.F., Altamirano M., Hernández A., Heat loss of a trapezoidal cavity absorber for a linear Fresnel reflecting solar concentrator, *Renewable Energy*, 39, 198-206, 2012
- [76] Lin M., Sumath K., Dai Y.J., Wang R.Z., Chen Y., Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver, *Applied Thermal Engineering* 51, 963-972, 2013
- [77] Mathioulakis, E., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., Optical performance and instantaneous efficiency calculation of linear Fresnel solar collectors, *International Journal of Energy Research*, 42, 1247-1261, 2018
- [78] Bellos E., Mathioulakis E., Tzivanidis C., Belessiotis V., Antonopoulos K.A., Experimental and numerical investigation of a linear Fresnel solar collector with flat plate receiver, *Energy Conversion and Management*, 130, 44–59, 2016
- [79] Manikumar R., Arasu A.V., Heat loss characteristics study of a trapezoidal cavity absorber with and without plate for a linear Fresnel reflector solar concentrator system *Renewable Energy* 63, 98-108, 2014
- [80] Facão J., Oliveira A.C., Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator, *Renewable Energy*, 36, 90-96, 2011
- [81] Natarajan S.K., Reddy K.S., Mallick T.K., Heat loss characteristics of trapezoidal cavity receiver for solar linear concentrating system, *Applied Energy*, 93, 523–531, 2012
- [82] Sahoo S.S., Singh S., Banerjee R., Analysis of heat losses from a trapezoidal cavity used for Linear, Fresnel Reflector system, *Solar Energy* 86, 1313–1322, 2012
- [83] Reddy K.S., Kumar K.R., Estimation of convective and radiative heat losses from an inverted trapezoidal cavity receiver of solar linear Fresnel reflector system, *International Journal of Thermal Sciences* 80, 48-57, 2014
- [84] Moghimi M.A., Craig K.J., Meyer J.P., Optimization of a trapezoidal cavity absorber for the Linear Fresnel Reflector, *Solar Energy*, 119, 343-361, 2015
- [85] Qiu Y., He Y.L., Wu M., Zheng Z.J., A comprehensive model for optical and thermal characterization of a linear Fresnel solar reflector with a trapezoidal cavity receiver, *Renewable Energy* 97, 129-144, 2016



- [86] Duffie J.A., Beckman W.A., Solar Engineering Of Thermal Processes, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2006
- [87] Αντωνόπουλος Κ. Α., Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα, Μέρος Πρώτο, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2004
- [88] SolTrace-Raytracing software tool, V2012.7.9, [www.nrel.gov/csp/SolTrace](http://www.nrel.gov/csp/SolTrace), National Renewable Energy Laboratory, USA
- [89] Spencer G.H, Murty M.V.R.K., General Ray Tracing Procedure, Journal of the Optical Society of America, 52, 672-678, 1962
- [90] Βιομηχανικό σχέδιο συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη, Κατοχύρωση σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, Office For Harmonization In The Internal Market Trade Marks And Design RCD 002698563-0001, Ιδιοκτήτες: Π. Τσεκούρας – SOLE, 2015
- [91] Tonatiuh website, <https://github.com/iat-cener/tonatiuh> (accessed Jan 2018)
- [92] Blanco, M. J., Amieva, J. M., Mancillas, A., The Tonatiuh Software Development Project: An open source approach to the simulation of solar concentrating systems, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 157-164, ASME, 2005
- [93] Matchcad, Engineering Math Software, PTC, <https://www.ptc.com/en/products/mathcad>
- [94] Solidworks Flow Simulation, Computational Fluid Dynamics Software, Dassault Systems, [www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm](http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm)
- [95] Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., Lavine, A., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed., New York, Wiley and Sons, 2005
- [96] Κακάτσιος Ξ., Αρχές μεταφοράς θερμότητας και μάζης, Εκδόσεις Συμεών, 2006
- [97] International Standard 9806, Solar energy – Solar Thermal collectors – Test methods, ISO 2013
- [98] Eastman Chemical Company, Therminol® VP-1 Heat Transfer Fluid, [www.therminol.com/products/Therminol-VP1](http://www.therminol.com/products/Therminol-VP1)
- [99] Forristall, R., 2003. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in Engineering Equation Solver, NREL/ TP-550-34169

- [100] Mertins M., Technische und wirtschaftliche Analyse von horizontalen Fresnel-Kollektoren, Ph.D. thesis, University of Karlsruhe, Germany, 2009
- [101] Montes M.J., Barbero R., Abbas R., Rovira A., Performance model and thermal comparison of different alternatives for the Fresnel single-tube receiver, Applied Thermal Engineering, 104, 162-175, 2016
- [102] Heimsath A., Cuevas F., Hofer, A., Nitz P., Platzer W.J., Linear Fresnel collector receiver: heat loss and temperatures, Energy Procedia, 49, 386-397, 2014
- [103] SOLIDWORKS, Dassault Systèmes S.A.  
<http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm>
- [104] Solecon – Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί Συλλέκτες υψηλής θερμοκρασίας και απόδοσης, κωδ. Ερευνητικού έργου 674-BET-2013, ΕΣΠΑ ΠΑΒΕΤ 2013
- [105] SOLE S.A., Βιομηχανία Ηλιακών Συστημάτων, [www.eurostar-solar.com](http://www.eurostar-solar.com)
- [106] Solutia Therminol SP, Technical datasheet, [www.therminol.com/products/Therminol-SP](http://www.therminol.com/products/Therminol-SP)
- [107] The Cyprus Institute – Cyl, Research Test facilities, <https://www.cyi.ac.cy/index.php/eewrc/eewrc-research-projects/energy/facilities.html>
- [108] INSHIP, Integrating National Research Agendas on Solar Heat for Industrial Processes, EU H2020 project, <http://www.inship.eu>
- [109] Meteonorm, Λογισμικό μετεωρολογικών δεδομένων, <http://www.meteonorm.com>
- [110] The Cyprus Institute, Solar Energy System for the Build Environment, Linear Fresnel Facility Brochure, [https://www.cyi.ac.cy/images/facilities/pdfs/LIFE\\_Linear\\_Fresnel\\_Facility.pdf](https://www.cyi.ac.cy/images/facilities/pdfs/LIFE_Linear_Fresnel_Facility.pdf)
- [111] Kennedy C.E., Advances in Concentrating Solar Power Collectors: Mirrors and Solar Selective Coatings. 21st International Vacuum Web Coating Conference, Association of Industrial Metallizers, Coaters and Laminators (AIMCAL) 2007 Fall Technical Conference, Arizona, 2007
- [112] Kraus A. D., Aziz A., Welty J., Fins with Radiation, Extended Surface Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2000

- [113] Rommel M., Larcher M., Experimental investigation on the accuracy of alternative devices to measure DNI in comparison to tracking pyrhelimeters, AIP Conference Proceedings 1734, 2016
- [114] Plataforma Solar de Almeria (PSA), Research center, [www.psa.es](http://www.psa.es)
- [115] Lopez-Martin R., Valenzuela L., On-site comparison of flowmeters installed in a parabolic-trough solar collector test facility, Measurement, 92, 271–278, 2016