



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΚΑΙ  
ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΑΤΟΠΤΡΟΥ ΣΤΙΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ ΤΑΣΙΟΠΟΥΛΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ

**ΧΑΝΙΑ,  
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2015**

## **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Καθηγητής ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΤΣΟΥΤΣΟΣ**

(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

**Καθηγητής ΜΙΧΑΗΛ ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ**

**Καθηγητής ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ**



"Copyright © Τασιόπουλος Αναστάσιος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

## *Ευχαριστίες*

Για την εκπόνηση της εργασίας αυτής θα ήθελα πρώτα από 'λα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Τσούτσο, για την άριστη συνεργασία που είχαμε πριν αλλά και κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και η καθοδήγηση του έπαιξαν τον καθοριστικότερο ρόλο για την περάτωση της. Η εμπειρία του και το ενδιαφέρον του, ήταν επίσης δυο πολύτιμα συστατικά για την αντιμετώπιση μιας πληθώρας προβλημάτων που παρουσιαζόντουσαν ανά πάσα στιγμή. Επίσης, οι ανοιχτές πόρτες για περαιτέρω συνεργασία και μετά το πέρας της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας που μου άφησε ο ίδιος, αποτέλεσαν την απόδειξη της εμπιστοσύνης του στο άτομο μου, και είμαι αρκετά ευγνώμων και γ'αυτό.

Πολύ σημαντική ήταν επίσης η βοήθεια της βοηθού Μαρίας Φράγκου, η οποία ήταν δίπλα μου για όποια απορία είχα, και υπό την καθοδήγησή της κατάφερα να μάθω το πρόγραμμα το οποίο χρειάστηκε για την εκπόνηση της εργασίας. Παρόμοιο ενδιαφέρον και όρεξη για βοήθεια στον κυκλώνα των πληροφοριών που έπρεπε να διαχειριστώ για να ξεπεράσω συγκεκριμένα εμπόδια, μου παρεχόταν από τον Νίκο Σαββάκη. Επίσης σημαντική βοήθεια παροχής δεδομένων σχετιζόμενων με τον μετεωρολογικό σταθμό του Πολυτεχνείου, μας παρείχε ο κ.Γλυτσός, βοηθός του καθηγητή κ.Λαζαρίδη.

Τέλος, πρέπει να ευχαριστήσω τους "αφανείς ήρωες" της όλης υπόθεσης οι οποίοι δεν είναι άλλοι από τους γονείς μου και τον αδερφό μου που ήταν δίπλα μου ανά πάσα στιγμή, ενθαρρύνοντας με για να συνεχίσω με αμείωτο πάθος και ενδιαφέρον. Επίσης το γεγονός ότι γνώριζα το πως γίνεται μια κατασκευή, πέρα από τα εργαλεία και την τεχνογνωσία που μου παρεχόταν ανά πάσα στιγμή, οφείλεται καθαρά στον πατέρα μου, του οποίου το μεράκι και ο ζήλος για την χαρά της δημιουργίας, αποτελούν πηγή έμπνευσής στην πορεία της ζωής μου.

# Περιεχόμενα:

---

Περιεχόμενα . . . . .	3
Περίληψη . . . . .	5
Abstract . . . . .	6
Κατάλογος Συντομογραφιών . . . . .	9
Κατάλογος Πινάκων . . . . .	10
Κατάλογος Διαγραμμάτων . . . . .	11
<b>1. Εισαγωγή</b>	
1.1. Η αναγκαιότητα των ΑΠΕ . . . . .	12
1.2. Συστήματα Συλλογής Ηλιακής Ακτινοβολίας . . . . .	12
1.3. Συγκεντρωτικά Συστήματα . . . . .	13
1.3.1. Συγκεντρωτικά Φ/β (CPV) . . . . .	13
1.3.2. Συγκεντρωτικά Κάτοπτρα Ηλιακής Ενέργειας (CSP) . . . . .	14
1.4. Σκοπός Εργασίας . . . . .	15
<b>2. Ιστορική αναδρομή Ηλιακών Συγκεντρωτικών Τεχνολογιών</b>	
2.1. CSP	
2.1.1 Parabolic Trough . . . . .	16
2.1.2 Linear Fresnel Collector . . . . .	18
2.1.3 Tower Solar Power . . . . .	20
2.1.4 Stirling Dish Technology . . . . .	23
2.1.5 Παρούσα Κατάσταση & Συμπεράσματα. . . . .	25
2.2 CPV . . . . .	25
2.2.1 Αναδρομή στην εξέλιξη των τεχνολογιών CPV . . . . .	26
2.2.2 Παρούσα Κατάσταση και συμπεράσματα . . . . .	28
<b>3. Κατασκευή Κατόπτρου &amp; Πειραματική Διαδικασία</b>	
3.1. Γενικά η Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε . . . . .	29
3.2 Κατασκευή κατόπτρου . . . . .	29
3.2.1 Σχεδιασμός και Υλικά . . . . .	30
3.2.2 Διαδικασία Κατασκευής . . . . .	31
3.3. Εισαγωγή στη Πειραματική Διαδικασία/Μεθοδολογία . . . . .	33
3.3.1 Κατηγορίες Πειραμάτων που εκτελέστηκαν . . . . .	34
3.3.2 Όργανα Λήψης Μετρήσεων . . . . .	37
3.4 Προσομοίωση σε πρόγραμμα τύπου Ray Tracing . . . . .	38
3.4.1 TracePro . . . . .	38
3.4.2 Ray Tracing . . . . .	39
3.4.3 Διαδικασία Προσομοίωσης στο TracePro . . . . .	40
3.5 Συσχετισμός παραμέτρων . . . . .	44
<b>4. Αποτελέσματα</b>	
4.1. Μετρήσεις Πειράματος Κατηγορίας 1 . . . . .	45

4.2 Μετρήσεις Πειράματος Κατηγορίας 2 . . . . .	51
4.3 Εμπειρική σχέση από συσχέτιση Δεδομένων . . . . .	54
4.4 Θερμική Απόδοση . . . . .	55
4.5 Γραφική απεικόνιση μοντέλου στο TracePro . . . . .	55
4.6 Διαγράμματα Απορρόφησης Ακτινοβολίας . . . . .	61
<b>5. Συζήτηση . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>6. Συμπεράσματα</b>	
6.1. Συμπεράσματα από τη Δ.Ε. . . . .	68
6.2. Προτάσεις για συνέχιση . . . . .	69
<b>7. Βιβλιογραφία . . . . .</b>	<b>70</b>
<b>8. Παράρτημα . . . . .</b>	<b>72</b>

# Περίληψη

---

Μια σχετικά καινούρια τεχνολογία όπως αυτή των συγκεντρωτικών κατόπτρων που ως στόχο έχουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο είναι πολλά υποσχόμενη όσο αφορά στο μέλλον των ΑΠΕ. Αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω της άμεσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από την συγκέντρωση των ακτίνων σε μια φ/β κυψέλη, είτε έμμεσα μέσω της παραγωγής θερμότητας και χρήση θερμικής μηχανής για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία εκτελέσαμε μια σειρά ενεργειών οι οποίες σαν αποτέλεσμα είχαν την κατασκευή ενός παραβολικού κατόπτρου, την χρησιμοποίησή του για λήψη μετρήσεων σε πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες, την προσομοίωση της διάταξης που κατασκευάσαμε σε πρόγραμμα τύπου Ray Tracing αλλά και την εξομοίωση παρόμοιων συνθηκών (ώρας και θέσης του ήλιου), σε ιδανικό όμως μετεωρολογικό περιβάλλον.

Οι παραπάνω ενέργειες είχαν ως τελικό στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων και από τις μετρήσεις που εκτελέσαμε, αλλά και από την θεωρητική προσομοίωση, με απώτερο στόχο την σύγκρισή τους. Επίσης σκοπός ήταν να διαπιστώσουμε το πόσο απέκλιναν μεταξύ τους οι δυο προσεγγίσεις, αλλά και να βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με την κατασκευή, τις παραλείψεις, και τρόπους συνέχισης της παρούσας εργασίας. Τέλος, στην μελέτη συμπεριλάβαμε πειραματικές μετρήσεις για να μπορέσουμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την θερμική απόδοση του παραβολικού κατόπτρου ως θερμική μηχανή.

# Abstract

---

A relatively new technology, such as Concentrated Solar Power capable of producing electricity with the use of solar radiation, is much promising for the future of renewable energy. Electricity can be produced either directly, by concentrating the solar radiation onto a photovoltaic cell or indirectly by producing heat and using a thermal machine to produce electricity.

In this study, we manufactured a parabolic mirror and tested it, taking measurements under real environmental conditions. The mirror was also simulated in a ray-tracing software, where we recreated the same conditions of the experiment, when it comes to solar position and irradiation.

Both the experiments and the simulations gave us useful conclusions to compare. Furthermore, one of the goals was to understand how the two approaches diverged from each other, but also to draw conclusions about the structure, the omissions, and make suggestions for further research. Finally, the study includes experimental measurements, in order to draw conclusions for the thermal efficiency of the parabolic mirror as a thermal engine.

# Κατάλογος Συντομογραφιών

---

ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
φ/β	φωτοβολταϊκά
CSP	Συγκεντρωτικά Κάτοπτρα Ηλιακής Ενέργειας (Concentrated Solar Power)
CPV	Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά (Concentrating PhotoVoltaics)
SDC	Stirling Dish Systems



# Κατάλογος Πινάκων

---

Πίνακας 3.1 (σελίδα 26)	Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή.
Πίνακας 3.2 (σελίδα 26)	Αναλώσιμα και λοιπά εξαρτήματα που απαιτήθηκαν για την κατασκευή.
Πίνακας 3.4 (σελίδα 31)	Παροχές για τις 3 διαφορετικές ημέρες λήψης μετρήσεων.
Πίνακας 3.8 (σελίδα 39)	Κλίσεις που υπολογίστηκαν βάσει χαρακτηριστικής ημέρας για κάθε μήνα.
Πίνακας 4.1 (σελίδα 41)	1 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.2 (σελίδα 41)	2 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.3 (σελίδα 41)	3 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.4 (σελίδα 42)	4 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.5 (σελίδα 42)	5 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.6 (σελίδα 43)	6 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.7 (σελίδα 43)	7 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.8 (σελίδα 44)	8 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.9 (σελίδα 44)	9 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.10 (σελίδα 44)	10 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.11 (σελίδα 45)	11 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.12 (σελίδα 45)	12 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.13 (σελίδα 45)	13 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.14 (σελίδα 46)	14 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.
Πίνακας 4.15 (σελίδα 47)	1 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 2.
Πίνακας 4.16 (σελίδα 48)	16 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 2.
Πίνακας 4.17 (σελίδα 49)	17 <sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 2.
Πίνακας 4.18 (σελίδα 50)	Τελικός πίνακας συσχέτισης μεταβλητών και η παραγόμενη γραμμική σχέση (πάνω δεξιά).
Πίνακας 4.34 (Σελίδα 60)	Λόγοι συγκέντρωσης των αντιπροσωπευτικών ημερών από κάθε μήνα.

# Κατάλογος Διαγραμμάτων

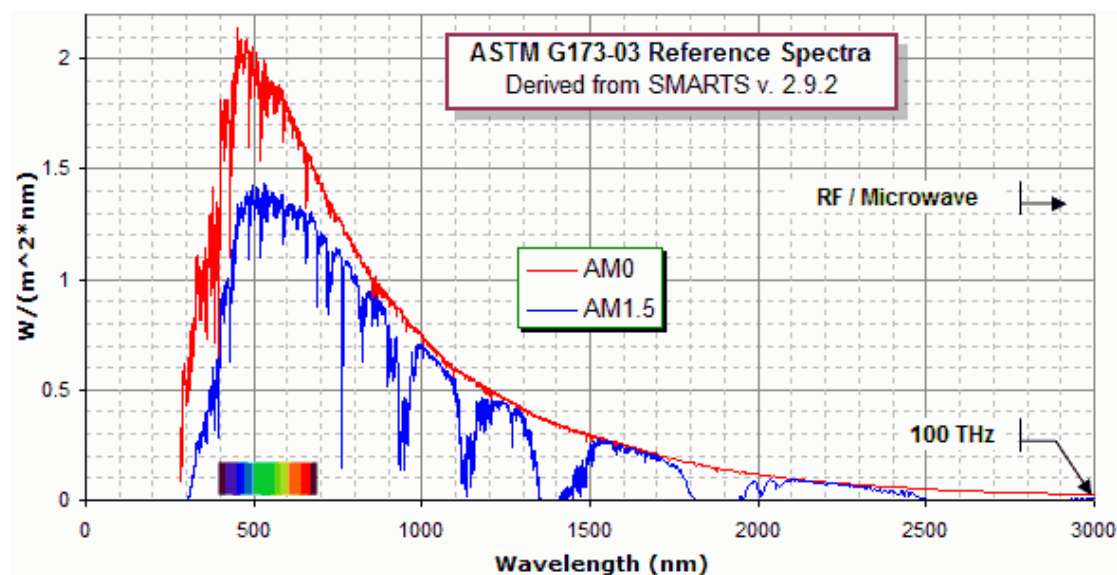
---

Screenshot 4.19 (σελίδα 52)	Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 11:30 (13/5).
Screenshot 4.20 (σελίδα 52)	Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 11:30 (13/5).
Screenshot 4.21 (σελίδα 53)	Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 12:30 (13/5).
Screenshot 4.22 (σελίδα 53)	Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 12:30 (13/5).
Screenshot 4.23 (σελίδα 54)	Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 13:30 (13/5).
Screenshot 4.24 (σελίδα 54)	Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 13:30 (13/5).
Screenshot 4.25 (σελίδα 55)	Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 14:30 (13/5).
Screenshot 4.26 (σελίδα 55)	Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 14:30 (13/5).
Screenshot 4.27 (σελίδα 56)	Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 15:30 (13/5).
Screenshot 4.28 (σελίδα 56)	Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 15:30 (13/5).
Διάγραμμα 4.29 (σελίδα 57)	Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 11:30 (13/5).
Διάγραμμα 4.30 (σελίδα 58)	Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 12:30 (13/5).
Διάγραμμα 4.31 (σελίδα 58)	Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 13:30 (13/5).
Διάγραμμα 4.32 (σελίδα 59)	Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 14:30 (13/5).
Διάγραμμα 4.33 (σελίδα 59)	Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 15:30 (13/5).
Διάγραμμα 6.1 (σελίδα 63)	Συσχέτιση λόγων συγκέντρωσης (concentration ratio) – Θερμοκρασίας Απορροφητή (Receiver temp.) [Duffie et al., 1962].

# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Η αναγκαιότητα των ΑΠΕ:

Δεδομένου ότι τα ορυκτά καύσιμα μειώνονται σταδιακά στον πλανήτη, και συναρτήσει της ανάγκης απεξάρτησης των Κρατών από καύσιμα που ρυπαίνουν, η στροφή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι αναπόφευκτη. Καθοριστική σημασία στον τομέα αυτό, αποτελούν τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα καθώς η τεχνολογία γύρω από αυτά είναι ολοένα και περισσότερα υποσχόμενη. Για να ποσοτικοποιήσουμε τις δυνατότητες της ηλιακής ενέργειας και το κατά πόσο αυτή δύναται να προσφέρει στην ηλεκτροπαραγωγή, αρκεί να αναλογιστούμε πως η ηλιακή ισχύς που φθάνει στην γη είναι περίπου 85 PW ( $10^{12}$  W) . Πιο συγκεκριμένα αυτό δείχνει πως η ηλιακή ισχύς όχι μόνο ξεπερνάει την παγκόσμια κατανάλωση των 15 TW κατά 500 φορές, αλλά και ότι όλες οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας δεν ξεπερνούν το 1% της αντίστοιχης ηλιακής [Mehrdad et al., 2014]. Το ερώτημα που τίθεται στο σημείο αυτό είναι το πως μπορούμε να δεσμεύσουμε μέρος της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ρεύματος. Συγκεκριμένα η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1 παρακάτω:



Σχήμα 1.1: Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία (AM0) και οι αλλοιώσεις κατά την είσοδό της στην ατμόσφαιρα (AM1.5) [Τσούτσος et al., 2013]

## 1.2. Συστήματα συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας:

Η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στη γη μπορεί να είναι είτε άμεση είτε διάχυτη. Οι τρόποι για την αξιοποίησή της είναι α) τα συμβατικά φ/β στοιχεία β) τα συγκεντρωτικά συστήματα.

Τα συμβατικά φ/β στοιχεία στηρίζονται στις βασικές αρχές της φ/β τεχνολογίας, συλλέγοντας την ηλιακή ακτινοβολία σε μια επίπεδη επιφάνεια και μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρικό ρεύμα, αρχικά συνεχές και στη συνέχεια σε εναλλασσόμενο χάρη σε μετατροπείς (inverters).

Τα συγκεντρωτικά συστήματα από την άλλη, χρησιμοποιούν κατοπτρικές ή διαθλαστικές γεωμετρίες προκειμένου να συγκεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία είτε σε ένα σημείο (σημειακή εστίαση) είτε σε μια μακρόστενη επιφάνεια (γραμμική εστίαση). Επίσης τα συγκεντρωτικά συστήματα διαχωρίζονται και με βάση τον τρόπο μετατροπής της ενέργειας σε ηλεκτρική δηλαδή είτε εστιάζοντας άμεσα σε σημειακά φ/β στοιχεία μετατρέποντας την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική (Concentrating Photovoltaics ή CPV), είτε παράγοντας πρώτα θερμική και στη συνέχεια μετατρέποντας αυτή σε ηλεκτρική (Concentrated Solar Power ή CSP).

### **1.3 Συγκεντρωτικά συστήματα**

Η τεχνολογία των συγκεντρωτικών συστημάτων χρησιμοποιεί ένα συγκεντρωτικό οπτικό σύστημα, το οποίο μπορεί να αποτελείται είτε από φακούς, είτε από καμπύλα κάτοπτρα με στόχο τη συγκέντρωση μεγάλου ποσού ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μια μικρή περιοχή για την παραγωγή είτε θερμότητας είτε ηλεκτρισμού.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύχθηκε και συνεχίζει να χρηματοδοτείται η ανάπτυξή της θέτοντας ως κύριο στόχο τη μείωση του κόστους πρώτων υλών (πυριτίου, σπάνιων γαιών) αλλά και της έκτασης που απαιτείται για την παραγωγή ενέργειας από τον ήλιο. Έτσι η ιδέα της συγκέντρωσης των ηλιακών ακτίνων σε μια μικρή επιφάνεια έχει πολλά πλεονεκτήματα που συνδυάζονται με την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής.

Όμως για την συγκέντρωση των ηλιακών ακτίνων απαιτείται επιπλέον κόστος το οποίο αφορά τα οπτικά συγκεντρωτικά συστήματα (φακοί ή κάτοπτρα), το αντίστοιχο σύστημα ψύξης που πιθανώς να απαιτείται (στα CPV κυρίως) καθώς και τη χρήση ηλιακών ιχνηλατών (tracking systems). Τα συστήματα CPVs δεν είναι τόσο διαδεδομένα έναντι των συμβατικών φ/β συστημάτων, λόγω των προαναφερθέντων επιπλέον εξόδων. Τα CSPs αντίθετα, όπως διαπιστώνεται και παρακάτω από την ιστορική αναδρομή, είναι αρκετά διαδεδομένα χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι η κατασκευή, η εγκατάσταση αλλά και η αποδοτικότητά τους δεν αντιμετωπίζει προβλήματα.

#### **1.3.1. Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά (CPV)**

Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα CPV αποτελούνται από τα συγκεντρωτικά οπτικά, αλλά και από ένα φ/β στοιχείο. Οι ιδιότητες των ημιαγωγών είναι αυτές που επιτρέπουν στα φ/β στοιχεία να λειτουργούν πιο αποτελεσματικά σε αυξημένη πυκνότητα ηλιακών ακτίνων, με την προϋπόθεση όμως ότι η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός που επιτυγχάνεται με τις κατάλληλες ψύκτρες. Η αποδοτικότητα των φ/β αυτών στοιχείων βρίσκεται στο 44%

σήμερα με τη δυνατότητα όμως να προσεγγίσει έως και το 50% τα προσεχή έτη [P. Pirez-Higuera et al., 2011]. Επίσης, ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα (και το κόστος) ενός συστήματος CPV είναι η διάταξη και η ποιότητα των οπτικών συστημάτων συγκέντρωσης, αφού είναι αυτά που συλλέγουν και συγκεντρώνουν το φως του ήλιου πάνω στο φ/β στοιχείο. Οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν χαρακτηριστεί από τα οπτικά χαρακτηριστικά τους, όπως ο παράγοντας συγκέντρωσης, διανομής φωτισμού, το εστιακό σχήμα και το οπτικό πρότυπο. Καθώς λοιπόν οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση τέτοιων συστημάτων είναι πολλοί, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες γύρω από τον συγκεκριμένο κλάδο. Άλλες είναι σε πειραματικό στάδιο ακόμη και άλλες είναι ήδη σε εμπορικό στάδιο παραγωγής.

Οι τεχνολογίες που υπάρχουν μπορούν αρχικά να κατηγοριοποιηθούν σε δυο ευρύτερες κατηγορίες, βάσει του τρόπου εστίασης. Οι δυο κατηγορίες που διακρίνονται λοιπόν, όσο αφορά το οπτικό σύστημα, είναι α) τα CPV που εστιάζουν με την χρήση κατόπτρων (βασίζονται δηλαδή στην ανάκλαση), και β) τα CPV που εστιάζουν με την βοήθεια φακών (βασίζονται στην διάθλαση).

Την τελευταία δεκαετία, ένα πολύ μεγάλο κομμάτι της έρευνας εστίασε στον επανασχεδιασμό και στις αλλαγές πάνω στα ήδη υπάρχοντα και διαδεδομένα μοντέλα. Παρακάτω θα παρουσιαστούν αναφορικά οι διάφορες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί γύρω από τον τομέα των συγκεντρωτικών φ/β (CPV) 2009 [Sarah Kurtz, 2009].

#### ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ CPV:

- Εστιακοί φακοί τύπου Fresnel (Fresnel Lens)
- Κβαντικοί Συγκεντρωτές (Quantum dot Concentrators)
- Παραβολικά κάτοπτρα γραμμικής εστίασης (Parabolic through)
- Παραβολικοί Συγκεντρωτές (Compound parabolic Concentrators)
- Διηλεκτρικοί συγκεντρωτές ολικής εσωτερικής ανάκλασης (Dielectric totally internally reflecting concentrators)
- Υπερβολοειδείς συγκεντρωτές (Hyperboloid concentrators)

#### **1.3.2. Συγκεντρωτικά Κάτοπτρα Ηλιακής Ενέργειας (CSP)**

Τα CSP από την άλλη είναι συστήματα τα οποία εκμεταλλεύονται την θερμότητα που συλλέγεται χάρη στην συγκέντρωση των ηλιακών ακτίνων, είτε για την παραγωγή ατμού είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Έχουν επίσης την δυνατότητα αποθήκευσης μέρους της παραγόμενης θερμότητας για παραγωγή ενέργειας κατά τις βραδινές ώρες όπου δεν υπάρχει ήλιος. Αυτό το γεγονός τις καθιστά τις πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εφάμιλλες των αντίστοιχων συμβατικών.

Η βασική κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών αυτών είναι:

- τα παραβολικά κάτοπτρα γραμμικής εστίασης (parabolic trough),
- οι γραμμικοί συλλέκτες τύπου Fresnel (linear Fresnel collector),
- τα παραβολικά κατοπτρικά πιάτα που παράγουν ενέργεια χάρη σε θερμική μηχανή Stirling (Stirling dish systems)
- οι ηλιακοί πύργοι (Tower Solar Power).

Τα συστήματα αυτά περιγράφονται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

#### **1.4. Σκοπός της εργασίας:**

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να κατανοήσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας των συγκεντρωτικών κατόπτρων, και να διερευνήσουμε στην συνέχεια από ποιές μετεωρολογικές παραμέτρους επηρεάζεται η λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα μας ενδιαφέρει να δούμε πως αυτό συμπεριφέρεται στις μετεωρολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής της Κρήτης προκειμένου να δούμε κατά πόσο θα ήταν συμφέρουσα επιλογή από τεχνοοικονομικής απόψεως η δυνητική εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Επιπλέον μέσα από την διαδικασία και μεθοδολογία που έχουμε επιλέξει να ακολουθήσουμε και που περιγράφεται παρακάτω, θα αποκτήσουμε μια αρκετά καλή ιδέα για το πως κατασκευάζονται τέτοια συστήματα, τι ρόλο παίζει η επιλογή των υλικών ως προς την απόδοσή τους, αλλά και πως γίνεται εν τέλει η προσομοίωση τέτοιων συστημάτων σε υπολογιστικό περιβάλλον.

## 2. Ιστορική αναδρομή ηλιακών συγκεντρωτικών τεχνολογιών

---

### 2.1 CSP

Οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί και αφορούν καθαρά τεχνολογίες συγκεντρωτικών κατόπτρων που έχουν ως στόχο την παραγωγή ρεύματος εκμεταλλευόμενα την θερμότητα του ήλιου, έχουν μια μεγάλη ιστορία που ξεκίνησε από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα και συνεχίζεται έως και στις μέρες μας.

#### 2.1.1 Parabolic Trough

Πιο συγκεκριμένα η πρώτη χρονολογικά τεχνολογία που αναπτύχθηκε ήταν τα παραβολικά κάτοπτρα, και η πρώτη περιοχή όπου έγινε μεγάλης κλίμακας εφαρμογή ήταν στο Maadi της Αιγύπτου το 1913.

Βέβαια η ιδέα για την κατασκευή της εν λόγω διάταξης ήταν προγενέστερη και



*Εικόνα 2.1: Το πρώτο εγκατεστημένο παραβολικό σύστημα στο Maadi της Αιγύπτου [Dhyia Aidroos et al., 2015]*

προήλθε από τον επιτυχημένο μηχανικό Σουηδό John Ericsson το 1864 ο οποίος θεωρείται ότι ήταν ο πρώτος που κατασκεύασε το πρώτο παραβολικό κάτοπτρο χρησιμοποιώντας θερμό νερό για την παραγωγή ατμού που χρησιμοποιήσε για να θέσει σε κίνηση μια μηχανή Stirling ισχύος 373 W. Από το 1872 μέχρι το 1875

κατασκεύασε 7 όμοια συστήματα με το ίδιο θερμικό ρευστό δηλαδή τον αέρα [Μπαρκιτζόγλου et al., 2012]. Ο Ericsson μέχρι τον θάνατό του το 1889 κατασκεύασε επίσης ένα ηλιακό μοτέρ πάλι με χρήση παραβολικού ηλιακού συλλέκτη και του οποίου ο τρόπος “παρακολούθησης” της κατεύθυνσης του ήλιου γινόταν χειροκίνητα. Η προσπάθεια του συνεχίστηκε το 1886 πειραματιζόμενος με μια ηλιακή μηχανή ισχύος 1.86 kW. Είχε αρνηθεί να δημοσιοποιήσει τα σχέδια των εφευρέσεων επικαλούμενος την προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας [Dhyia Aidroos et al., 2015].

Η επόμενη αναφορά σε παραβολικό συλλέκτη έγινε το έτος 1907 από τον Wilhelm Maier από το Aalen της Γερμανίας και τον Adolf Remshardt από τη Στουτγάρδη της Γερμανίας, οι οποίοι κατοχύρωσαν πρώτοι την πνευματική ιδιοκτησία ενός αντίστοιχου συλλέκτη.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, η πρώτη εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας πραγματοποιήθηκε στο Maadi νότια του Καΐρου. Την επίβλεψη του έργου ανέλαβε ο Αμερικανός μηχανικός Frank Shuman και ο Άγγλος σύμβουλος Charles Vernon Boys ο οποίος και πρότεινε στον Shuman κάποιες ουσιαστικές αλλαγές οι οποίες ως στόχο είχαν την αύξηση της απόδοσης της ηλιακής διάταξης. Τέτοιες προτάσεις ήταν και η επικάλυψη περιμετρικά του σωλήνα απορρόφησης από γυάλινο κάλυμμα για την μείωση των θερμικών απωλειών, καθώς η τοποθέτηση του επίσης για πρώτη φορά κατά μήκος της γραμμής εστίασης των παραβολικών κατόπτρων. Ενδεικτικά ο λόγος συγκέντρωσης έφθασε το 4,6.

Στην συνέχεια και για 40 περίπου χρόνια δεν υπήρξε κάποια ουσιαστική προσπάθεια γύρω από τη συγκεκριμένη τεχνολογία καθώς η τιμή των ορυκτών καυσίμων ήταν πολύ χαμηλή και καθιστούσε έτσι μη βιώσιμη την οποιαδήποτε εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας ηλιακών τεχνολογιών. Ωστόσο η πετρελαϊκή κρίση τη δεκαετία του '70 προσέλκυσε το παγκόσμιο ενδιαφέρον για πρώτη φορά γύρω από τις εναλλακτικές ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Αποτέλεσμα αυτού ήταν το γεγονός ότι η κυβέρνηση των Ηνωμένων Πολιτειών χρηματοδότησε τις εταιρίες Sandia National Laboratories, Honeywell International Inc και Westinghouse οι οποίες σε συνεργασία μεταξύ τους ανέπτυξαν τρία πρωτότυπα παραβολικών συλλεκτών τα οποία και δοκιμάστηκαν μέχρι το 1975 [Μπαρκιτζόγλου *et al.*, 2012]. Έτσι τη δεκαετία του '80 η τεχνολογία κατάφερε να εισέλθει ενεργά στην αγορά με 6 εταιρίες να δραστηριοποιούνται στον τομέα και η κάθε μια να κατασκευάζει και να εμπορεύεται τα δικά της συστήματα. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα παραπάνω συστήματα είχαν εφαρμογές κυρίως σε βιομηχανικές διεργασίες για θερμικές εφαρμογές.

Το 1979 ιδρύεται η αμερικανο-ισραηλινή Luz International η οποία ανέπτυξε τρεις γενιές συλλεκτών, τις LS-1, LS-2 και LS-3 οι οποίες εγκαταστάθηκαν σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας αποκλειστικά την ηλιακή ακτινοβολία (Solar Electric Generation Systems - SEGS). Ήταν η πρώτη εφαρμογή τέτοιου τύπου, δηλαδή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κάνοντας



Εικόνα 2.2: Εγκατεστημένο πάρκο τύπου SEGS στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α [Dhyia Aidroos *et al.*, 2015].

χρήση ηλιακών κατόπτρων και για τον λόγο αυτό, η χρονιά αυτή θεωρείται ορόσημο για την ηλεκτρική ενέργεια.

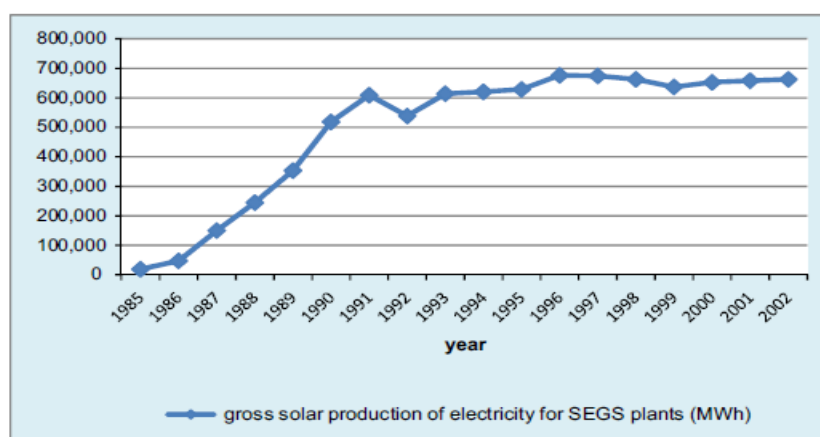
Οι τεχνολογικές καινοτομίες της Luz ήταν αρκετές. Ενδεικτικά μια από αυτές ήταν η κατασκευή του απορροφητή από ανοξείδωτο ατσάλι με ειδικό αντιανακλαστικό επίχρισμα και περικλειόμενο από γυάλινο κάλυμμα μεταξύ των οποίων υπήρχε κενό αέρος. Τα κάτοπτρα που χρησιμοποιούσε η εταιρία στα μοντέλα της κατασκεύαζε η Flabeg Solar, αποτελούμενα από γυαλί χαμηλής ανακλαστικότητας, με ασημένια



επίστρωση στην πίσω όψη, η οποία προστατευόταν από 5 επιστρώσεις, μια χάλκινη και 4 από βερνίκι. Αυτές όπως και μια σειρά ακόμη καινοτομιών επέτρεψαν στην Luz να είναι πρωτοπόρα στον τομέα μέχρι το 1992 οπότε και πτώχευσε.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από τη δεκαετία του '80 και μετά υπήρξαν αρκετές μελέτες και δημοσιεύσεις που ως στόχο είχαν την βελτιστοποίηση τέτοιων συστημάτων. Αυτό επιτεύχθηκε με την μοντελοποίηση των παραβολικών κατόπτρων και της συμπεριφοράς του απορροφητή με χρήση διάφορων μαθηματικών μεθόδων. Τα αποτελέσματα επικεντρώθηκαν στην μείωση του κόστους, κάνοντας χρήση απλούστερων υλικών σε συνδυασμό με αύξηση της απόδοσής τους.

Η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος που βασιζόταν αποκλειστικά στις προαναφερθείσες τεχνολογίες από το 1986 έως το 2002 φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Έτσι από την βιομηχανοποίηση της τεχνολογίας και μέχρι το 1990 περίπου, υπήρξε μια γραμμική αύξηση της παραγωγής ενέργειας της τάξης των 100.000 MWh το χρόνο, φθάνοντας το 1990 τις 518.487 MWh και το 2002 τα 662.542 MWh αντίστοιχα. [Dhyia Aidroos et al., 2015].



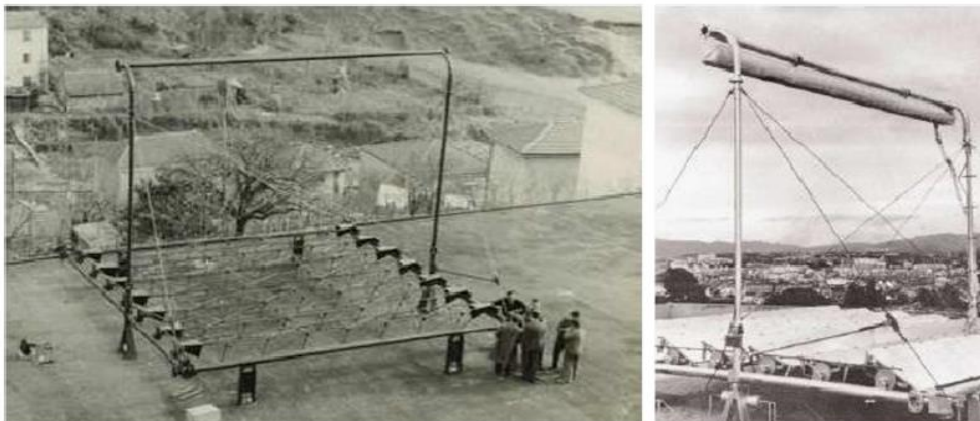
Σχήμα 2.3: Τάση αύξησης της ηλεκτροπαραγωγής σε MWh για τα έτη 1985-2002 [Dhyia Aidroos et al., 2015].

Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει αποδειχτεί μια δοκιμασμένη και εμπορικά εφαρμόσιμη τεχνολογία. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι εδώ και 3 δεκαετίες υπάρχουν έργα εν εξελίξει. Παρ' όλα αυτά έχει προκύψει σαν εφαρμογή η υβριδοποίηση της τεχνολογίας με υπάρχοντα ορυκτά καύσιμα ή με αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας.

### 2.1.2 Linear Fresnel Collector (LFC)

Η τεχνολογία αυτή άργησε να κάνει την εμφάνισή της σε σχέση με αυτή των παραβολικών κατόπτρων. Έτσι η πρώτη αναφορά έρχεται το 1957 από τον Baum ο οποίος ανέπτυξε τις βασικές αρχές γύρω από τα συστήματα γραμμικής εστιακής τύπου Fresnel. Στην συνέχεια, το 1961 ο Ιταλός μαθηματικός Giorgio Francia ήταν αυτός που σχεδίασε και το γραμμικό αλλά και το δι-αξονικό σύστημα

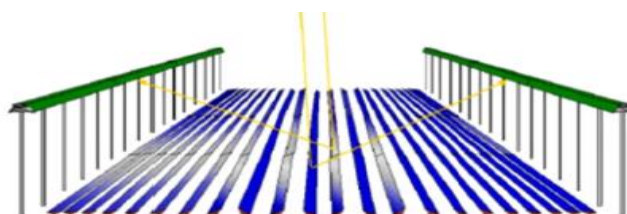
παρακολούθησης συγκεντρωτικών συστημάτων Fresnel εφαρμόζοντας έτσι τις παραπάνω αρχές. Μετά από δύο χρόνια σχεδίασε και κατασκεύασε το πρώτο πρωτότυπο LFC στον ηλιακό σταθμό Lacedemone της Μασσαλίας, καταφέροντας να παράγει ωριαία ατμό πίεσης 100 atm και θερμοκρασία 450 °C.



*Εικόνα 2.4: Φωτογραφία από το πρώτο εγκατεστημένο πρωτότυπο LFC στην Lacedemone της Μασσαλίας [Dhyia Aidroos et al., 2015]*

Η Αμερικάνικη εταιρία FMC εν μέσω της πετρελαϊκής κρίσης ανέπτυξε στα τέλη της δεκαετίας του '70 συστήματα LFC προορισμένα για βιομηχανική παραγωγή, κάνοντας προσπάθεια έτσι να δημιουργήσει τους πρώτους σταθμούς εγκατεστημένης ισχύος 10 MWe και 100 MWe [Dhyia Aidroos et al., 2015]. Ενώ τα πρώτα εξαρτήματα και διατάξεις δοκιμάστηκαν σε πραγματικές συνθήκες, οι προσπάθειες δεν καρποφόρησαν καθώς η απαιτούμενη χρηματοδότηση διεκόπη.

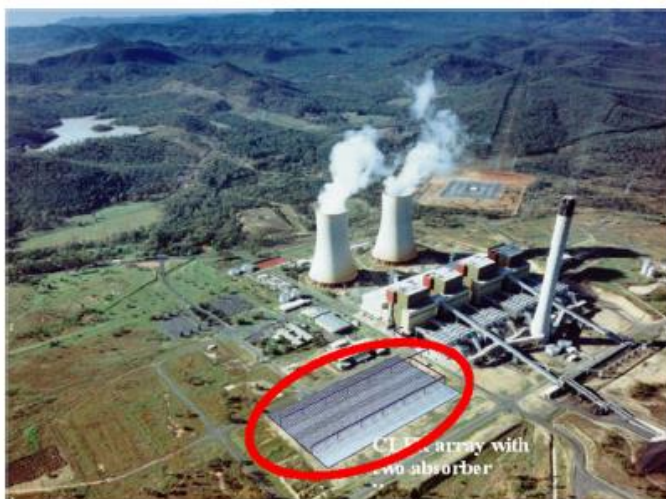
Το 1991 η Ισραηλινή εταιρία Israeli Paz Company κατασκεύασε ένα σύστημα LFC στο Ben Gurion Solar Electricity Technologies Test Center προκειμένου να κάνει μια σειρά δοκιμών οι οποίες όμως δεν απέδωσαν καθώς η διάταξη παρουσίαζε χαμηλή οπτική απόδοση και το ισοζύγιο σε σχέση με τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν κατά την κατασκευή ήταν δυσανάλογο. Για να ξεπεραστούν οι εν λόγω δυσκολίες απαιτούνταν μεγαλύτερο κεφάλαιο. Στο πανεπιστήμιο του Σύδνεϋ το 1993 κατασκευάστηκε εκ νέου ένα πρωτότυπο Linear Fresnel Collector το οποίο ονομάστηκε Compact Linear Fresnel Collector (CLFC ή LFCR) το οποίο όμως έλυσε τα προβλήματα σκίασης και κατοπτρικής εστίασης χωρίς όμως ταυτόχρονα να αυξάνεται το κόστος. Η νέα ανεπτυγμένη διάταξη LFC πατενταρίστηκε το 1995 και απεικονίζεται γραφικά παρακάτω.



*Εικόνα 2.5: Αναβαθμισμένος σχεδιασμός συστήματος LFC [Dhyia Aidroos et al., 2015]*

Έτσι το 1999 η Austa Energy και η Stanwell Corporation συμφώνησαν να κατασκευάσουν το πρώτο ηλιοθερμικό πάρκο χρησιμοποιώντας την τεχνολογία

CLFC στο Stanwell Power Station κοντά στο Rockhampton του Queensland της Αυστραλίας προκειμένου να μειώσει την χρήση άνθρακα για την παραγωγή ενέργειας. Όμως στην πορεία η Austa Energy ακύρωσε την συμφωνία, την οποία και



*Εικόνα 2.6: Η μονάδα παραγωγής ενέργειας Stanwell κοντά στο Rockhampton του Queensland, Αυστραλία [Dhyia Aidroos et al., 2015]*

υλοποίησαν στην συνέχεια η Stanwell Corporation σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Σύδνεϋ, εμπορευματοποιώντας την παραπάνω τεχνολογία και κατασκεύασε έτσι ηλιοθερμικό πάρκο ισχύος 14 MWe δίπλα στο 1440 MWe εργοστάσιο άνθρακα. Το ηλιοθερμικό πάρκο έφθανε θερμοκρασία 265 °C και πίεση 5 MPa.

Η επόμενη εγκατάσταση ηλιοθερμικού πάρκου έλαβε χώρα στην Λιέγη του

Βελγίου από την αντίστοιχη Βέλγικη εταιρία Solarmundo το 2001 και καταλάμβανε έκταση 2500 m<sup>2</sup>. Η ίδια εταιρία το 2004 σε σύμπραξη με την γερμανική Solar Power Group κατασκεύασαν σε μεγάλη κλίμακα πιλοτικά συστήματα τεχνολογιών LFC στην Plataforma Solar de Almeria (PSA) στην Ισπανία και τα οποία ονομάστηκαν Fresdemo [Dhyia Aidroos et al., 2015].

### **2.1.3 Tower Solar Power (TSP)**

Η Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια της αναγκαιότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από “καθαρές” μορφές ενέργειας, στα μέσα της δεκαετίας του '70 αποφάσισε την κατασκευή ενός ηλιακού πύργου για εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Το ηλιακό πάρκο κατασκευάστηκε στο Adrano στην Σικελία της Ιταλίας και ονομάστηκε EURELIOS. Η κατασκευή και οι δοκιμές ολοκληρώθηκαν το 1980 όταν και συνδέθηκε με το δίκτυο ηλεκτροδότησης της Ιταλίας. Τα κάτοπτρα της εγκατάστασης καταλάμβαναν έκταση 6200 m<sup>2</sup> και αποτελούνταν από 182 δι-αξονικές βάσεις με την δυνατότητα να “ακολουθούν” τον ήλιο χάρη σε σύστημα tracking. Ο πύργος εστίασης είχε ύψος 55 m. Η παραγωγή ενέργειας γινόταν μέσω υπέρθερμου ατμού ο οποίος έθετε σε κίνηση την τουρμπίνα της θερμικής μηχανής.



*Εικόνα 2.7: Φωτογραφία της εγκατάστασης Eurelios στο Adrano της Σικελίας, Ιταλία [Dhyia Aidroos et al., 2015]*

Το πάρκο έφθανε μέγιστη ισχύ λειτουργίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες κοντά στα 7 kWe το οποίο αντιστοιχούσε σε 16% απόδοση. Το κόστος σε σχέση με την απόδοση ήταν απαγορευτικό. Οι προσπάθειες ελαχιστοποίησης του κόστους επικεντρώθηκαν στην μείωση του μεγέθους των κατόπτρων οι οποίοι αντιπροσώπευαν το 30-50% του συνολικού κόστους, αλλά και στην υβριδοποίηση του ηλιακού πύργου με ορυκτά καύσιμα. Υπολογίστηκε έτσι ότι με τις αλλαγές η απόδοση μπορεί να έφθανε το 35%.

Τις αλλαγές αυτές εφάρμοσε η DOE (Department of Energy) στην νότια Καλιφόρνια των Η.Π.Α. κατασκευάζοντας έτσι το πρώτο μεγάλης κλίμακας ηλιακό πύργο ονομαστικής ισχύος 10 MWe. Το εν λόγω πάρκο περιλάμβανε 1818 ηλιοστάτες, 40 m<sup>2</sup> έκαστος, και με συνολική κατοπτρική επιφάνεια 72.650 m<sup>2</sup> [Dhyia Aidroos et al., 2015]. Με την χρήση ορυκτών καυσίμων κατάφερε να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση παρέχοντας ταυτόχρονα ατμό σε χαμηλή θερμοκρασία διατηρώντας έτσι τα απαραίτητα μέρη του πύργου θερμά κατά την διάρκεια της νύχτας ή των συννεφιασμένων ημερών. Το πάρκο ονομάστηκε Solar One.

Το 1988 το Solar One τερμάτισε την λειτουργία του, παρέχοντας όμως στους ερευνητές σημαντικές πληροφορίες για την λειτουργία του, τις αδυναμίες αλλά και για τις δυσλειτουργίες που προέκυψαν στις διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η γνώση αυτή οδήγησε στην κατασκευή του Solar Two το 1996 από την σύμπραξη εταιριών αλλά και ερευνητικών ιδρυμάτων τα οποία στο μεσοδιάστημα μελέτησαν μια



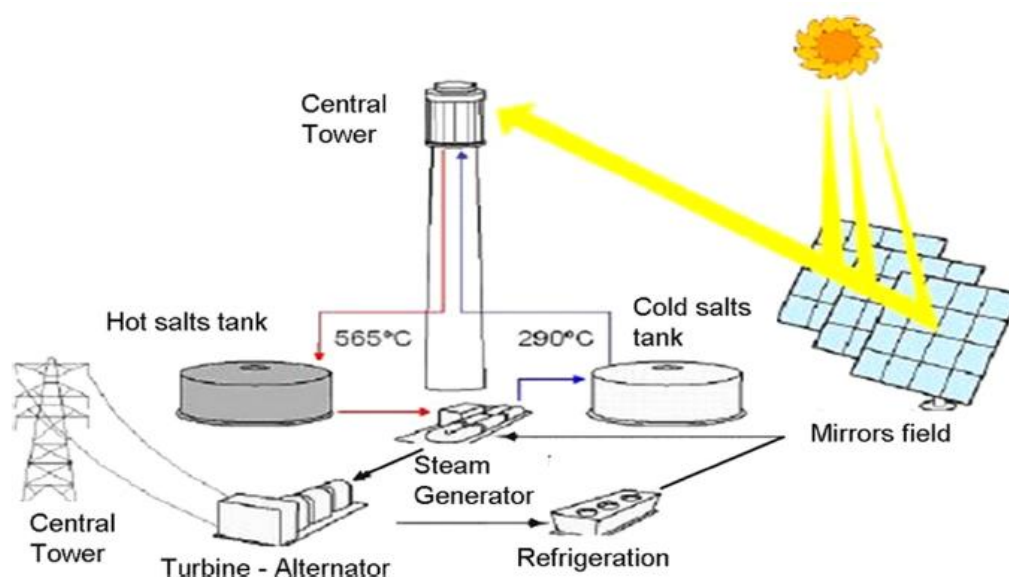
*Εικόνα 2.8: Φωτογραφία του Solar Two κοντά στο Barstow της Καλιφόρνια [Dhyia Aidroos et al., 2015]*

σειρά αλλαγών όπως την αντικατάσταση του θερμικού ρευστού με ένα μίγμα 60% νιτρικού άλατος (sodium nitrate) και 40% νιτρικού καλίου το οποίο έχει την δυνατότητα να αποδίδει σε μικρότερη πίεση και υψηλότερη ταχύτητα ροής. Οι εταιρίες και οργανισμοί που συνέβαλαν στον σχεδιασμό και την κατασκευή είναι οι Arizona Public Service Company, Bechtel Corporation, California Energy Commission, Electric Power Research Institute, Idaho Power Company,

Sacramento Municipal Utility District, Salt River Project και Southern Edison



Company. Η κατασκευή ήταν ουσιαστικά η ανακατασκευή του Solar One κάνοντας προσθήκες και άλλων ηλιοστατών αλλά και αλλαγές όπως αυτές που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 2.9: Βασικές αρχές λειτουργίας της εγκατάστασης του Solar Two [Dhyia Aidroos et al., 2015].

Το Solar Two λειτούργησε 3 χρόνια. Αν και τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά, δυστυχώς το κέρδος από την ενέργεια που παρήγαγε το πάρκο στη περιοχή της Καλιφόρνια δεν ήταν το αναμενόμενο, λόγω των οπτικών αλλά και θερμικών απωλειών του δέκτη, με αποτέλεσμα το 1999 να τερματισθεί η λειτουργία του. Η επιτυχία όμως του Solar Two ενθάρρυνε δυο από τους συντελεστές της προηγούμενης προσπάθειας να δοκιμάσουν την νέα αυτή μεθοδολογία στην περιοχή της Σεβίλλης στην Ισπανία [Dhyia Aidroos et al., 2015]. Το αντίστοιχο πάρκο ονομάστηκε Solar Three ή 'Solar Tres' και αυτό λόγω του γεγονότος ότι ήταν 3 φορές μεγαλύτερο από το Solar Two. Το εγχείρημα αν και ξεκίνησε από τις GHERSA και NEXANT, εν τέλει περατώθηκε από την SENER η οποία συνεργάστηκε με τις άλλες δυο, λίγο πριν αυτές αποχωρήσουν.



Εικόνα 2.10: Φωτογραφίες του Solar Tres (GEMASOLAR) στη Σεβίλλη της Ισπανίας [Dhyia Aidroos et al., 2015]

Από το 2005 έως το 2007 οι εταιρίες SENER και CIEMAT συνεργάστηκαν σε μια προσπάθεια για να μηδενιστούν οι οπτικο-θερμικές απώλειες στον δέκτη αλλά και να βελτιστοποιήσουν τον σχεδιασμό του. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στην αναδιαμόρφωση του Solar Three το 2009, και τέθηκε εκ νέου σε λειτουργία το 2011.

Στην παρούσα φάση, η εν λόγω τεχνολογία είναι πιο πρόσφατη από αυτή των παραβολικών κατόπτρων και ως εκ τούτου υπάρχουν μόνο μερικά μεγάλης κλίμακας σχετικά προγράμματα εν ενεργεία τα οποία κατά κύριο λόγο υπάρχουν στις Η.Π.Α. Το μέγιστο της απόδοσης που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής είναι: 20-27% για ηλεκτρική απόδοση παραγωγής και 3-4 m<sup>3</sup> ανά 0,2 παραγόμενες MWh είναι η χρήση νερού για ψυκτικούς σκοπούς αντίστοιχα [Dhyia Aidroos et al., 2015].

#### **2.1.4 Stirling Dish Technology (SDC)**

Η ιστορία των παραβολικών κατόπτρων έχει τις απαρχές της στην αρχαιότητα καθώς με αυτά ασχολήθηκαν πρώτοι ο Διοκλής αλλά και ο Αρχιμήδης, ο οποίος και τα χρησιμοποίησε προκειμένου να βάλει φωτιά στα ξύλινα Ρωμαϊκά πλοία κατά την Πολιορκία των Συρακουσών, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ηλιακών ακτίνων.

Ωστόσο οι πρώτες ενεργειακής εκμετάλλευσης αναφορές ξεκινούν στα τέλη της δεκαετίας του '70 έως και τις αρχές της δεκαετίας του '80 όπου διάφορες εταιρίες πειραματίστηκαν πάνω σε ηλιακές εφαρμογές με κύκλους ατμού Rankine αλλά και συστήματα Stirling. Οι εταιρίες αυτές ονομαστικά, ήταν οι United Stirling AB, Advanco Corporation, McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA), NASA's Propulsion Laboratory και DOE.

Η Advanco στο διάστημα μεταξύ 1982-1985 ανέπτυξε ένα σύστημα επονομαζόμενο Advanco's Vanguard System το οποίο αποτελούταν από μηχανή United Stirling 4-95 και από ένα γυάλινο ηλιακό συγκεντρωτικό πιάτο διαμέτρου 10,4 m, ονομαστικής ισχύος 25 kW<sub>e</sub>. Το σύστημα τοποθετήθηκε στην Νότια Καλιφόρνια όπου και δοκιμάστηκε για 18 μήνες κατά τους οποίους κατάφερε να επιτύχει απόδοση της τάξης του 29,4% αλλά ταυτόχρονα εμφάνισε αρκετά τεχνικά προβλήματα. Το 1984 η γερμανική Schlaich-Bergermann und Partner ανέπτυξε δυο SDC στο Riyadh της Σαουδικής Αραβίας χρησιμοποιώντας μηχανή United Stirling 4-275 και ηλιακά πιάτα διαμέτρου 17 m το κάθε ένα, και ισχύος 53 kW. Η απόδοσή τους έφθανε το 23%.

Η McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA), στα μέσα της δεκαετίας του '80 κατασκεύασε 8 πρωτότυπα SDC με σκοπό να τα εισάγει στην αγορά, ακυρώνοντας όμως κάθε προσπάθεια σύντομα, καθώς δεν το επέτρεψαν οι συνθήκες στην αγορά ενέργειας. Πούλησε τα δικαιώματά τους στην εταιρία Southern California Edison (SCE) η οποία και κάνοντας κάποιες δοκιμές μέχρι το 1988 κατάφερε να επιτύχει απόδοση της τάξης του 30%.

Τη δεκαετία του '90 έγιναν αρκετές προσπάθειες εκ νέου για την αναδιαμόρφωση των τεχνολογικών αποτυχιών των προηγούμενων ετών, χωρίς όμως ιδιαίτερα αποτελέσματα. Η όποια προσπάθεια επικεντρώθηκε στην βελτίωση της τεχνολογίας που διέπει τον συγκεντρωτή και την διαδικασία μετατροπής της

θερμότητας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η όποια τεχνολογική πρόοδος σημειώθηκε, αποτυπώθηκε το '98 με το νέας γενιάς μοντέλο της κοινοπραξίας των Science Applications International Corporation (SAIC) και Stirling and Thermal Motors (STM). Το Project ονομάστηκε Utility Scale Joint Venture Program και αφορούσε σε 1MWe dish/Stirling engine System.



*Εικόνα 2.11: Φωτογραφία από την εγκατάσταση Serial#3 της Sandia National Laboratories [Dhyia Aidroos et al., 2015]*

Το 2005 η Stirling Energy Systems (SES) εγκατέστησε 6 πρωτότυπα της τεχνολογίας Stirling/dish power συνολικής ισχύος 150kW (6 x 25kW) στην περιοχή Sandia's National Solar Thermal Test Facility. Με δεδομένο το γεγονός ότι την πρώτη χρονιά λειτουργίας της εγκατάστασης οι καιρικές συνθήκες ήταν 10% καλύτερες (αυξημένη φωτεινότητα) σε σχέση με άλλες χρονιές, επιτεύχθηκε απόδοση στο 31,25%. Η εν λόγω εγκατάσταση ονομάστηκε Serial#3. Από εκείνη την χρονιά, η SES σε συνεργασία με την Sandia's CSP team ανέπτυξαν την επόμενη γενιά Stirling/dish systems ονομάζοντας την SunCatcher [Dhyia Aidroos et al., 2015]. Το νέο πρωτότυπο περιλάμβανε αναβαθμίσεις που αφορούσαν το οπτικό κομμάτι, καθώς και μείωση του βάρους κατασκευής, αλλαγές στο σχήμα (στρογγυλό αντί για ορθογώνιο) αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα της ατσάλινης βάσης και μειώνοντας κατά 60% τα μηχανικά μέρη. Έτσι το 2009 η SES κατασκεύασε στην Αριζόνα της Αμερικής πάρκο δυναμικότητας 1,5 MWe με μηδενική κατανάλωση νερού για σκοπούς ψύξης, με απόδοση ίση με 26%. Το πάρκο ξεκίνησε να παράγει το 2010, τερμάτισε όμως την λειτουργία του το 2011 γιατί η εταιρία χρεοκόπησε.

Σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογικές βελτιώσεις με σκοπό κατά κύριο λόγο την μείωση του κόστους όσο αφορά στα υλικά και την διάταξη της



*Εικόνα 2.12: Φωτογραφία συγκεντρωτικών ηλιακών πιάτων τύπου SunCatcher της Sandia National Laboratories [Dhyia Aidroos et al., 2015]*

κατασκευής βάσης των συγκεκριμένων κατόπτρων. Παρ' όλα αυτά δεν είναι εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία αν και η αποδοτικότητα της ηλεκτρικής παραγωγής ανέρχεται σε 29,4-31,25%, ποσοστά που θεωρούνται αρκετά υψηλά για τις τεχνολογίες των συγκεντρωτικών κατόπτρων στο σύνολό τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος θερμοκρασίας που δύναται να αναπτυχθεί είναι από 250° -700°.

κατασκευής βάσης των συγκεκριμένων κατόπτρων. Παρ' όλα αυτά δεν είναι εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία αν και η αποδοτικότητα της ηλεκτρικής παραγωγής ανέρχεται σε 29,4-31,25%, ποσοστά που θεωρούνται αρκετά υψηλά για τις τεχνολογίες των συγκεντρωτικών κατόπτρων στο σύνολό τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος θερμοκρασίας που δύναται να αναπτυχθεί είναι από 250° -700°.

### 2.1.5 Παρούσα κατάσταση & Συμπεράσματα

Από την ιστορική αναδρομή των τεχνολογιών αλλά και λαμβάνοντας υπόψη την παρούσα κατάσταση προκύπτει ότι τα πιο ανταγωνιστικά κάτοπτρα είναι τα parabolic trough καθώς είναι τα πιο επιτυχημένα σε τεχνικό και εμπορικό επίπεδο. Αυτή η τεχνολογία θεωρείται η πιο εφαρμόσιμη και εφαρμοσμένη ταυτόχρονα τεχνολογία αφού έχει την δυνατότητα να παρέχει την απαιτούμενη θερμική ενέργεια είτε λειτουργώντας αυτόνομα είτε με υβριδοποίηση, με το χαμηλότερο ταυτόχρονα οικονομικό κόστος και ρίσκο.

Η τεχνολογία των LFC είναι ο βασικός ανταγωνιστής της PTC όσο αφορά στην παραγωγή χαμηλού κόστους ηλεκτρικού ρεύματος. Η τεχνολογία των TPC αποτελεί επίσης ανταγωνιστή στην παραγωγή χαμηλού κόστους ηλεκτρικού ρεύμα με την προϋπόθεση όμως να μειωθεί το κόστος των ηλιοστατών και του θερμικού αποδέκτη. Όμως προτιμάται σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές μόνο. Τέλος όσο αφορά στα SDC είναι η παλαιότερη τεχνολογία έχοντας ταυτόχρονα την μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με τις παραπάνω τεχνολογίες ενώ συνδυάζει μηδενική κατανάλωση νερού για ψύξη. Δυστυχώς όμως θεωρείται ακόμη εμπορικώς μη διαθέσιμη λόγω του υψηλού της κόστους και λόγω του γεγονότος ότι η απόδοση των συγκεκριμένων τεχνολογιών είναι κατά βάση χαμηλότερη των CPV καθώς κυμαίνεται από 20% - 31% [Dhyia Aidroos et al., 2015].

## 2.2. CPV

Όταν το 1974 ξέσπασε η κρίση πετρελαίου στις ΗΠΑ, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η τιμή των φ/β ήταν ακόμη στα ύψη, παρουσιάστηκε η λύση των συγκεντρωτικών φ/β συστημάτων, που χρησιμοποιούν πολύ λιγότερη φωτοβολταϊκή επιφάνεια, ως η λύση για παραγωγή ενέργειας με σχετικά χαμηλό κόστος.

### 2.2.1. Αναδρομή στην εξέλιξη των τεχνολογιών CPV

Η ανάπτυξη των CPVs ξεκίνησε ουσιαστικά το 1976 στο National Sandia Laboratories με την κατασκευή συστήματος 1 kW, που στην συνέχεια ονομάστηκε Sandia I και Sandia II. Τα πρώτα χαρακτηριστικά πρωτότυπα της φ/β τεχνολογίας που κατασκευάστηκαν, βασίστηκαν στα συγκεντρωτικά Fresnel Lenses, στα δι-αξονικής βάσης συγκεντρωτικά με φ/β συστήματα πυριτίου (40x), αλλά και στα αναλογικά κλειστού βρόγχου συγκεντρωτικά συστήματα [Luque et al., 2007].



**Εικόνα 2.13:** Εγκατάσταση δυναμικότητας 1-kWp που αναπτύχθηκε από το Πολυτεχνείο της Μαδρίτης, στην Ισπανία το 1980 [Luque et al., 2007]



Ορισμένες αναπαραγωγές τους, συνοδευόμενες από βελτιώσεις ανταγωνιστών, σύντομα εμφανίστηκαν σε Γαλλία, Ιταλία και Ισπανία, δυναμικότητας από 500 W έως 1 kW.

Το 1981 κατασκευάστηκε η Τρίτη έκδοση της Sandia Technology από τον Martin Marietta, ο οποίος εγκατέστησε ένα πάρκο 350 kW στη Σαουδική Αραβία, που ονομάστηκε SOLERAS.



*Εικόνα 2.14: Το πρώτο μεγαλύτερο εγκατεστημένο πάρκο συγκεντρωτικών φ/β συστημάτων δυναμικότητας 350 kW εν ονόματι SOLERAS, στην Σαουδική Αραβία [Luque et al., 2007]*

Δεδομένου ότι δεν υπήρχε πίεση από την αγορά, ο Nasby και οι συνεργάτες του στη Sandia Labs το 1980 ανέπτυξαν συγκεντρωτικό με φ/β στοιχεία πυριτίου, αποδοτικότητας έως 20%, αυξάνοντας έτσι τις προσδοκίες για ταυτόχρονη μείωση του συγκεντρωτικού αλλά και του φωτοβολταϊκού. Μετά από λειτουργία 6 ετών, παρατηρήθηκε ότι σε συνθήκες ερημικού περιβάλλοντος λειτουργούσε πολύ

καλά. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήθηκε μείωση 20%, εξαιτίας της υπερθέρμανσης των συνδετικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν γεγονός όμως που δεν το εμπόδισε να λειτουργήσει για 18 χρόνια.

Η τεχνογνωσία που αποκομίστηκε από τα παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε από την Swanson et al. και επέτρεψε την ανάπτυξη των point contact (PC) κελιών φ/β στοιχείων πυριτίου, τα οποία και χαρακτηρίστηκαν ως τα καλύτερα φ/β στοιχεία που κατασκευάστηκαν ποτέ για υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης (>150x).

Παρόλο που αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνολογίες CPV ανά τον κόσμο, με αποδοτικότητες από 19,6% έως 27%, η δυναμικότητα παραγωγής ήταν φτωχή, καθιστώντας δύσκολη την εύρεση συγκεντρωτικών φ/β στοιχείων για 25 χρόνια. Το 1990, η πιο σημαντική πράξη βιομηχανοποίησης προέκυψε από την Entech, η οποία εγκατέστησε μερικές εκατοντάδες kW, χρησιμοποιώντας καμπυλωτά συγκεντρωτικά Fresnel Lenses [Luque et al., 2007].

Με τη μαζική παραγωγή των συμβατικών επίπεδων φ/β πλαισίων, των οποίων η τιμή έτεινε να μειώνεται συνέχεια, προέκυψε ευκαιρία βιομηχανοποίησης, η οποία οδήγησε στην Laser Grooved Buried Contact Cell Technology (LGBG), μια βιομηχανική προσέγγιση του Πανεπιστημίου της Νότιας Ουαλίας που αφορά στα κρυσταλλικά φ/β στοιχεία πυριτίου. Τα συγκεντρωτικά LGBG χαρακτηρίστηκαν από ομοιόμορφη κατανομή της τάσης σε όλο το μεταλλικό πλέγμα, επιτυγχάνοντας έτσι 18,5% αποδοτικότητα στα 30x και πάνω από 20% σε μικρά κελιά (1 cm<sup>2</sup>) στα 100x.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω τεχνολογία, το 1995 ένα πρωτότυπο εν ονόματι EUCLIDES αναπτύχθηκε από την IES/UPM και την BP Solar και εγκαταστάθηκε στη Μαδρίτη. Πέτυχε απόδοση ισχύος 14% και 10% ετήσιο ρυθμό ενεργειακής μετατροπής με χαμηλότερο κόστος απ' ότι τα επίπεδα φ/β πλαίσια.

Βάσει του παραπάνω πρωτότυπου, κατασκευάστηκε ακόμη ένα πάρκο, δυναμικότητας 480 kW στην Τενερίφη. Η εφεύρεση του πρωτότυπου EUCLIDES πυροδότησε ένα κύμα δραστηριότητας γύρω από το πεδίο αυτό που είναι αμείωτο μέχρι και στις μέρες μας.



**Εικόνα 2.15:** Το πρωτότυπο της IES/UPM και της BP Solar με το εμπορικό όνομα EUCLIDES που εγκαταστάθηκε το 1998 στην Tenerife της Μαδρίτης [Luque et al., 2007]

### **2.2.2 Παρούσα κατάσταση & Συμπεράσματα**

Από τότε αρκετές δράσεις έχουν λάβει χώρα γύρω από την ανάπτυξη των συγκεντρωτικών φ/β με αποτέλεσμα πλέον να μιλάμε για αποδόσεις άνω του 40% μετατροπής [Παπαδόπουλος *et al.*, 2015]. Πολλές εταιρίες ήδη εισέρχονται στην αγορά και άλλες ήδη έχουν καταλάβει μεγάλο μερίδιο της, όπως η Sharp η οποία παράγει το 25% των ηλιακών φ/β στοιχείων παγκοσμίως (κυρίως πυριτίου) και η οποία πλέον βασίζει την στρατηγική της στους πολύ υψηλής απόδοσης συγκεντρωτές. Παραπάνω από 1 MW έχει πουληθεί σε Ισπανούς επενδυτές [Luque *et al.*, 2007].

Η πρωτοποριακή αυτή βιομηχανοποίηση και εμπορευματοποίηση των εταιριών που δραστηριοποιούνται στον εν λόγω τομέα, είναι αξιοσημείωτη και πρέπει να στηριχθεί από νέες επενδύσεις. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε και στην Ισπανία ένα νέο Ινστιτούτο (Spanish Institute of CPV Systems of Puertollano) που σκοπός του είναι η πιστοποίηση των εταιριών αλλά και των υποψήφιων παραγωγών προκειμένου να προχωρήσει ο επενδυτικός τομέας αλλά και η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα νέα συστήματα, κυρίως τα πολύ υψηλής συγκέντρωσης, δεν χρησιμοποιούνται πλέον απλά φ/β στοιχείου πυριτίου, αλλά φ/β Multijunction [Luque *et al.*, 2007], τα οποία εκμεταλλεύονται μεγαλύτερο μέρος του ηλιακού φάσματος, εξού και είναι πιο αποδοτικά.

Η έρευνα αυτή την στιγμή επικεντρώνεται στη μείωση του κόστους των επιπλέον εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για την στήριξη και την περιστροφή των συστημάτων με προσανατολισμό τον ήλιο [Mehrdad *et al.*, 2014], αλλά και στην βελτιστοποίηση της απόδοσης των φ/β στοιχείων όπου γίνεται η συγκέντρωση της ακτινοβολίας αλλά και των υλικών τους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

## 3. Μεθοδολογία

---

### **3.1. Γενικά η Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε**

Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε για την περάτωση της εργασίας, περιλάμβανε τα εξής γενικά βήματα:

Αρχικά έγινε μια μελέτη στο διαδίκτυο και στην διεθνή βιβλιογραφία, για τα συγκεντρωτικά κάτοπτρα και πως αυτά εξελίχθηκαν, σε τι σημείο έχει φθάσει η έρευνα αυτή τη στιγμή αλλά ποια χαρακτηριστικά επηρεάζουν την απόδοσή τους. Στην συνέχεια με κριτήριο τα παραπάνω επιλέξαμε ποιο συγκεντρωτικό κάτοπτρο θα ήταν ευκολότερο να κατασκευασθεί, αλλά ταυτόχρονα συνυπολογίζοντας το κόστος αλλά και τα διαθέσιμα εργαλεία.

Έπειτα ακολούθησε η κατασκευή, κάνοντας έρευνα ταυτόχρονα για το ποια προγράμματα είναι σχετικά με το αντικείμενο και θα μας παρέχουν την δυνατότητα προσομοίωσης της κατασκευής μας σε θεωρητικό μοντέλο. Αυτό μας ήταν απαραίτητο για να μπορέσουμε να δούμε κάποια στοιχεία που θα ήταν απαραίτητα και για την κατασκευή (π.χ. θέση εστίασης) αλλά και για περαιτέρω συγκρίσεις στο τέλος, για εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στην συνέχεια, και αφού τελείωσε η κατασκευή του κατόπτρου αλλά και του μοντέλου, έλαβε χώρα η πειραματική διαδικασία, όπου και γινόταν λήψη μετρήσεων για μια σειρά μετεωρολογικών παραμέτρων που ήταν δυνατόν να μετρηθούν με τα διαθέσιμα όργανα του εργαστηρίου, αλλά και που σχετίζονταν με την ανάπτυξη της θερμοκρασίας επάνω στον απορροφητή, που ήταν και το τελικό ζητούμενο.

Τέλος, για τις μετρήσεις που λήφθηκαν, έγινε προσομοίωση στο πρόγραμμα που επιλέχθηκε τελικώς, εξάγοντας αποτελέσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του κατόπτρου υπό τις ίδιες κλίσεις προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ιδανικές όμως συνθήκες. Τα παραπάνω βήματα της μεθοδολογίας, περιγράφονται αναλυτικότερα στην συνέχεια, με την σειρά που αναφέρθηκαν.

### **3.2. Κατασκευή Κατόπτρου**

Η κατασκευή του κατόπτρου αποτέλεσε την βάση της παρούσας εργασίας, καθώς σε αυτή βασίστηκαν οι όποιες μετρήσεις έλαβαν χώρα, η προσομοίωση στο πρόγραμμα και κατά συνέπεια η εξαγωγή συμπερασμάτων. Επίσης πέραν των παραπάνω, έδωσε την δυνατότητα ουσιαστικής ενασχόλησης με το αντικείμενο το οποίο δεν περιορίστηκε στο θεωρητικό σκέλος, αλλά και περαιτέρω μελέτη και ενασχόληση γύρω από το τεχνοοικονομικό κομμάτι που αφορά τις τεχνολογίες αυτές.

Πιο συγκεκριμένα όσο αφορά στην κατασκευή, εξετάσαμε όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες προσπαθώντας να εντοπίσουμε ποια από αυτές θα ήταν ρεαλιστικό να φτιαχτεί συμψηφίζοντας χαμηλό κόστος αλλά και ευκολία κατασκευής δηλαδή η μη απαίτηση κάποιου πολύ εξειδικευμένου εργαλείου το οποίο θα ανέβαζε

το κόστος κατακόρυφα, σε συνδυασμό με την ζητούμενη λειτουργικότητα για την λήψη πειραματικών μετρήσεων. Στην συνέχεια προχωρήσαμε με την κατασκευή.

### 3.2.1. Σχεδιασμός και Υλικά

Για την κατασκευή του συγκεντρωτικού κατόπτρου τύπου Parabolic Trough, απαιτήθηκε αρχικά η μελέτη των βασικών αρχών που διέπουν την λειτουργία του καθώς και η ανάγνωση σχετικών δημοσιεύσεων που περιλάμβαναν παρόμοιες ιδιοκατασκευές [Gaitan, 2012].

Έτσι μπορέσαμε να αποκτήσουμε μια πιο συγκεκριμένη εικόνα για το τι είδους υλικά θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να επιτύχουμε τα ανάλογα αποτελέσματα. Επιλέξαμε έτσι να κατασκευάσουμε τον σκελετό καθώς και την βάση από ξύλο (ούτως ώστε να επιτύχουμε συμφέρουσα συσχέτιση κόστους – στιβαρότητας κατασκευής), και το κάτοπτρο από INOX το οποίο έχει τις ιδιότητες ευκαμψίας και αντοχής ανοξείδωτου μετάλλου και ταυτόχρονα την ανακλαστικότητα καθρέπτη. Για απορροφητή επιλέξαμε χαλκοσωλήνα, ο οποίος έχει μεγάλη θερμοχωρητικότητα.

Παρακάτω στους Πίνακες 3.1 & 3.2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα υλικά τα οποία επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε καθώς και το αντίστοιχο κόστος τους.

**Πίνακας 3.1:** Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΜΕΡΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΥΛΙΚΑ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ
Κάτοπτρο	INOX	Πάχος: 0,5 mm	37 €
		Πλάτος: 90 cm	
		Μήκος: 125 cm	
Σκελετός κατόπτρου	Κόντρα Πλακέ θαλάσσης	Πάχος: 1,5 cm	44 €
Βάση στήριξης		Πλάτος: 125 cm	
		Μήκος: 250 cm	
Απορροφητής	Χαλκοσωλήνας	Διάμετρος: 22 mm	9 €
		Μήκος: 125 cm	

**Πίνακας 3.2:** Αναλώσιμα και λοιπά εξαρτήματα που απαιτήθηκαν για την κατασκευή

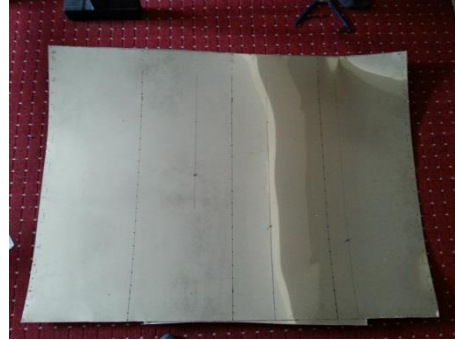
	ΕΙΔΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΚΟΣΤΟΣ
Αναλώσιμα	Βίδες	X 200	12 €
	Υαλόχαρτα	X 4	2 €
	Βερνίκι Ξύλου	X 1	9 €
	Μεταλλικές Γωνίες, Μεταλλικοί Συνδετήρες	X 20	7 €
Λοιπά εξαρτήματα	Τρυπάνια Κοβαλτίου, Ξύλου	X 3, X 1	9 €

Το τελικό κόστος της κατασκευής ανήλθε στα 129 €.

### 3.2.2 Διαδικασία Κατασκευής

Παρακάτω παρατίθεται αναλυτικά η διαδικασία και τα αντίστοιχα βήματα που ακολουθήθηκαν προκειμένου να κατασκευαστεί το κάτοπτρο.

- 1) Αγορά των προαπαιτούμενων υλικών που αναφέρονται παραπάνω.



- 2) Με βάση τις διαστάσεις του μεταλλικού φύλλου υπολογίστηκε ένας ευρύτερος κύκλος, με ακτίνα  $R = 41,5 \text{ cm}$ . Το μεταλλικό φύλλο που χρησιμοποιήσαμε είχε πλάτος  $90 \text{ cm}$ . Επομένως το αντίστοιχο τόξο που δημιουργήθηκε, έχει και αυτό μήκος τόξου  $90 \text{ cm}$ . Ο νοητός κύκλος μέρος του οποίου είναι και το προαναφερθέν τόξο έχει μήκος περιμέτρου  $2 \cdot \pi \cdot R = 2 \cdot 3,14 \cdot 41,5 \text{ cm} = 260,62 \text{ cm}$ .



- 3) Αφού επιλέχθηκε το μήκος του τόξου κατασκευάστηκαν (5) όμοια τοξοειδή κοίλα μέρη ως σκελετός, τα οποία και στην συνέχεια τρίφτηκαν και βάφτηκαν.





- 4) Στην συνέχεια αυτά ενώθηκαν με μικρά κομμάτια ξύλου μεταξύ τους, για να γίνει πιο στιβαρή η κατασκευή. Τέλος βιδώθηκε πάνω στον σκελετό ανά 4 cm το φύλλο INOX. Συνολικά απαιτήθηκαν

$$(90\text{cm}/4\text{cm}) \cdot 5 = 110 \text{ περίπου βίδες.}$$

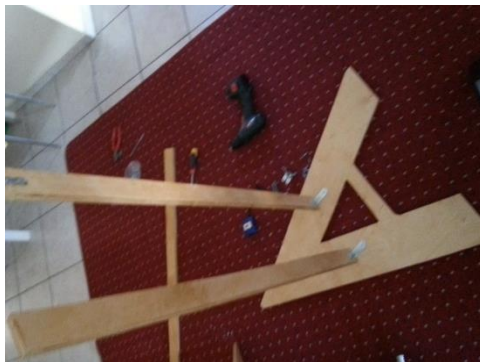
Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η επιλογή για την απόσταση μεταξύ των βιδών έγινε με κριτήρια

α) την όσο δυνατόν καλύτερη διεπαφή και σταθερότητα μεταξύ του σκελετού και του φύλλου μετάλλου με στόχο την ζητούμενη κυρτότητα και

β) ταυτόχρονα όμως την αποφυγή δημιουργίας πολλών “βαθουλωμάτων” από το βίδωμα. Η ανακλαστική επιφάνεια η οποία “χάνεται” για τον δεύτερο λόγο, υπολογίζεται σε 2-3% της συνολικής ανακλαστικής επιφάνειας.



- 5) Μετά τη κατασκευή του κατόπτρου κατασκευάστηκε η βάση στήριξης. Για να αντέξει το βάρος του κατόπτρου, η βάση σχεδιάστηκε να έχει άνοιγμα κάτω βάσης ίσο περίπου με το μήκος της χορδής του τόξου, δηλαδή 75 cm. Η μορφή της κατασκευής είναι τύπου **Λ** με ένα μικρό ξύλο στην μέση για χρήση ως λαβή μεταφοράς. Το ύψος της βάσης φθάνει τα 85 cm περίπου. Για την ένωση των δύο στηρίξεων τύπου **Λ** χρειάστηκαν 3 τάβλες πλάτους 6 cm με μήκος 125 cm δηλαδή ίδιο με αυτό του μήκους του κατόπτρου.



- 6) Για την ένωση του κατόπτρου με την βάση, χρησιμοποιήθηκαν δυο βίδες διαμέτρου 1 cm προκειμένου να προσδώσουν την δυνατότητα κίνησης του κατόπτρου στον οριζόντιο άξονα.
- 7) Για το σύστημα βαθμονόμησης της κλίσης του κατόπτρου, σχεδιάστηκε ένα ξύλο το οποίο τοποθετήθηκε στην δεξιά μεριά της βάσης, και στο οποίο, με την βοήθεια μοιρογνωμονίου υπολογίστηκαν οι μοίρες για εύρος κλίσης από 15° - 50° ανά πέντε (5) εκατοστά. Η εναλλαγή της θέσης της κλίσης, επιλέχθηκε να γίνεται με την αλλαγή θέσης μιας βίδας πάχους 0,8 cm.



- 8) Τέλος τοποθετήθηκε ο χαλκοσωλήνας πάχους 22 mm και μήκους 125 cm, ο οποίος στηρίχθηκε σε δύο κομμάτια ξύλου πλάτους 5 cm και μήκους 50 cm. Η κάθετη απόσταση μεταξύ κάθε σημείου του κατόπτρου με τον χαλκοσωλήνα υπολογίστηκε να είναι ίση με 16 cm, πράγμα που προέκυψε βάσει της προσομοίωσης στο πρόγραμμα TRACEPRO.



*Εικόνα 3.3: Φωτογραφία της τελικής κατασκευής που προέκυψε, εγκατεστημένη στο εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών του Τ.Υ.Σ. στα Χανιά*

### **3.3. Εισαγωγή στη Πειραματική Διαδικασία/Μεθοδολογία**

Με βάση την πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε, μπορούν να γίνουν μια σειρά λήψης πειραματικών μετρήσεων για μια πληθώρα παραμέτρων. Ο συσχετισμός των παραμέτρων αυτών, θα μας βοηθήσει στην εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν στην εν λόγω τεχνολογία, αλλά και για την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης κατοπτρικής διάταξης σε μια ενδεχόμενη αντικατάσταση του απορροφητή με αντίστοιχο φωτοβολταϊκό σύστημα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παράμετροι που μπορούν να μετρηθούν είναι:

- A) Θερμοκρασία περιβάλλοντος
- B) Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας
- Γ) Μετεωρολογικές συνθήκες (ποσοστό νεφοκάλυψης, ταχύτητα ανέμου, καθαρότητα ατμόσφαιρας κλπ)
- Δ) Η κλίση του κατόπτρου σε σχέση με την ώρα της ημέρας προκειμένου να έχουμε την απαιτούμενη καθετότητα για μεγιστοποίηση απόδοσης [3]
- Ε) Ογκομετρική παροχή
- Ζ) Ώρα ημέρας λήψης μέτρησης
- Η) Θερμοκρασία χαλκοσωλήνα πριν και κατά τη διέλευση νερού

Στις παραπάνω μετρήσεις, για να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα, πρέπει να γίνει συσχετισμός τους και με σταθερές παραμέτρους όπως την περιοχή στην οποία έγινε η λήψη των μετρήσεων καθώς και την χρονική περίοδο του έτους.



Τέλος με τις μετρήσεις που θα λάβουμε, θα γίνει σύγκριση με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές μοντέλου σε πρόγραμμα εξομοίωσης, για τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Έτσι θα καταστεί δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για βελτιώσεις, όχι μόνο της πειραματικής διαδικασίας, αλλά και της ίδιας της διάταξης, καθώς και η βελτιστοποίηση της τεχνολογίας με στόχο την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής με αντικατάσταση του απορροφητή με αντίστοιχο φ/β.

Προσανατολισμός κατόπτρου καθ' όλη την περίοδο λήψης μετρήσεων: **Νότιος**

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που απαιτήθηκαν και για τις δύο περιπτώσεις των κατηγοριών των μετρήσεων προήλθαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Πολυτεχνείου Κρήτης, ο οποίος λαμβάνει μετρήσεις όλων των κλιματολογικών παραμέτρων που μας ενδιαφέρουν (πυκνότητα ολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητα ανέμου, υγρασία, θερμοκρασία ατμόσφαιρας) κάθε δέκα λεπτά.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε πως παράλληλα με την πειραματική διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω, τρέξαμε παράλληλα ένα θεωρητικό μοντέλο της διάταξης, σε αντίστοιχο υπολογιστικό πρόγραμμα τύπου RayTracing, για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τις πειραματικές τιμές με τις αντίστοιχες θεωρητικές προκειμένου να εξάγουμε πιο ακριβή συμπεράσματα. Βέβαια στο υπολογιστικό περιβάλλον δεν υπήρχε η δυνατότητα εισαγωγής μετεωρολογικών παραμέτρων. Το πρόγραμμα και η διαδικασία την προσομοίωσης αναφέρονται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

### ***3.3.1 Κατηγορίες Πειραμάτων που εκτελέστηκαν***

Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε δύο επιμέρους κατηγορίες μετρήσεων, η κάθε μια έχοντας διαφορετικό σκοπό.

#### **Κατηγορία μετρήσεων 1: Μέτρηση θερμοκρασίας Απορροφητή.**

Στην ομάδα αυτή των μετρήσεων, μετρούσαμε την θερμοκρασία που αναπτυσσόταν πάνω στον χαλκοσωλήνα σε τρία σημεία. Στα αριστερά του σωλήνα, στο κέντρο και στα δεξιά. Η απόσταση από τα άκρα στα οποία γινόταν κάθε φορά η μέτρηση ήταν γύρω στα 10 cm. Ταυτόχρονα για κάθε μια λήψη των παραπάνω μετρήσεων, γινόταν και μια μέτρηση του ίδιου υλικού με τον συσσωρευτή (χαλκοσωλήνα βαμμένου μαύρου χρώματος) αλλά σε κανονικές συνθήκες, δηλαδή σε μη συγκεντρωτική επιφάνεια, για να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης.

Η λήψη των μετρήσεων αποφασίστηκε να γίνεται κάθε μια ώρα από τις 11:30 το πρωί, μέχρι και τις 15:30 το μεσημέρι, για τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούνιο. Οι ημέρες οι οποίες επιλέχθηκαν για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις για την περίοδο που διεξαγόταν το πείραμα, έγινε η προσπάθεια να διαφέρουν μεταξύ τους κλιματολογικά προκειμένου να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος μετεωρολογικών συνθηκών, και κατά συνέπεια να μπορέσουμε να εξάγουμε ευκολότερα συμπεράσματα για παρόμοιου τύπου συγκεντρωτικές διατάξεις σε ενδεχόμενη λειτουργία τους στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης.

### Κατηγορία μετρήσεων 2: Αξιολόγηση θερμικής απόδοσης Συγκεντρωτικού.

Στην κατηγορία αυτή λήψης μετρήσεων έγινε προσπάθεια να αξιολογηθεί η απόδοση της εν λόγω συγκεντρωτικής διάταξης, κάνοντας χρήση ενός θερμικού ρευστού (στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε νερό) όπου διέρχεται κατά μήκος του σωλήνα. Η αξιολόγηση έγινε για τρεις διαφορετικές πιέσεις.

Για την συγκεκριμένη κατηγορία μετρήσεων δεν επιλέχθηκαν όπως προηγουμένως διαφορετικών μετεωρολογικών χαρακτηριστικών ημέρες, αλλά τρεις ημέρες με αρκετή ηλιοφάνεια και υψηλή θερμοκρασία.

Για την περάτωση των δειγματοληψιών χρειάστηκε να προσαρμόσουμε στα άκρα του σωλήνα βαλβίδες ελέγχου πίεσης του νερού της βρύσης (μπεκ ποτίσματος), προκειμένου να πετύχουμε τις διαφορετικές πιέσεις που απαιτούνται.

Για τον έλεγχο της ογκομετρικής παροχής, και κατά συνέπεια την μέτρηση της πίεσης, χρησιμοποιήσαμε έναν κουβά χωρητικότητας 1,5 λίτρων καθώς και ένα χρονόμετρο.

Η πειραματική διαδικασία αποφασίστηκε να χωριστεί σε τρεις ημέρες, για κάθε μια παροχή κατά αντιστοιχία. Οι τρεις αυτές μέρες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να έχουν όμοια χαρακτηριστικά μεταξύ τους (υψηλή θερμοκρασία, αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία, λίγο αέρα, αίθριο ουρανό). Για κάθε μια μέρα επιλέχθηκε να μετριέται και μια διαφορετική παροχή. Οι παροχές που επιλέχθηκαν, φαίνονται παρακάτω.

*Πίνακας 3.4: Παροχές για τις 3 διαφορετικές ημέρες λήψης μετρήσεων*

	Χωρητικότητα V (L)	Χρόνος t (s)	Παροχή Q (m <sup>3</sup> /h)
Ήμερα 1	1,5	35-40	0,144
Ήμερα 2	1,5	15-20	0,306
Ήμερα 3	1,5	50-60	0,097

\* Για να υπολογίσουμε την παροχή, χρησιμοποιήσαμε τις μέσες τιμές του χρόνου t.

Για κάθε μια μέτρηση, ανοίγαμε την βρύση για να ρυθμίσουμε την παροχή και στην συνέχεια περιμέναμε να απαχθεί η θερμότητα που είχε αναπτυχθεί προηγουμένως επάνω στον σωλήνα. Αφού αυτή σταθεροποιούνταν σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, όπως αναγράφεται και στους πίνακες των μετρήσεων παρακάτω, ενεργοποιούσαμε το χρονόμετρο για να υπολογίσουμε τον όγκο του νερού που θα διέλθει κατά μήκος του σωλήνα.

Στη κατηγορία αυτή, με βάση τα αποτελέσματα που καταγράψαμε, μπορούμε να βγάλουμε τον συντελεστή θερμικής απόδοσης του κατόπτρου από την παρακάτω σχέση [Skouri et al., 2013]:

$$n_{en} = \frac{Q_u}{I_h^*}$$

Όπου:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{outlet} - T_{inlet}) \quad \text{και} \quad I_h^* = A_\alpha \cdot E$$

Και:

- $n_{en}$  = θερμική απόδοση ενός CSP
- $Q_u$  = η ροή θερμότητας που εξάγεται από τον απορροφητή
- $\dot{m}$  = ο ρυθμός ροής μάζας του νερού [ kg/s ]
- $I_h^*$  = άμεση ακτινοβολία [ W ]
- $T_{outlet}$  = θερμοκρασία νερού εξόδου [ °C ]
- $T_{inlet}$  = θερμοκρασία νερού εισόδου [ °C ]
- $C_p$  = η θερμοχωρητικότητα του νερού σε σταθερή πίεση [ J/(kg·K) ]
- $A_\alpha$  = η επιφάνεια ανοίγματος του συλλέκτη [ m<sup>2</sup> ]
- $E$  = η πυκνότητα της άμεσης ακτινοβολίας [ W/m<sup>2</sup> ]

Τα αποτελέσματα από την χρήση της εξίσωσης περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 με τα αποτελέσματα.

### 3.3.2 Όργανα λήψης Μετρήσεων

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη των μετρήσεων και στις δυο κατηγορίες μετρήσεων, εκτός του μετεωρολογικού σταθμού που αναφέραμε παραπάνω, περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω:

#### 1. Θερμόμετρο (Data logger Thermometer HH309A)

- Εταιρίας κατασκευής: OMEGA
- Range: -200 °C έως 1370 °C
- Δυνατότητα καταγραφής 4 τιμών ταυτόχρονα
- Rate of measurement: 3 sec.
- Ακρίβεια:  $\pm (0,2\% + 1\text{ }^{\circ}\text{C})$



#### 2. Πυρανόμετρο 3670I.

- Εύρος καταγραφόμενης ακτινοβολίας:  
 $0-1250\text{ W/m}^2$
- Ακρίβεια:  $\pm 5\%$
- Δυνατότητα καταγραφής ανά  
1,5,10,15,30,60,120 min
- Αυτονομία: συνεχής καταγραφή 8 μήνες /  
7000 μετρήσεις
- Ρυθμός λήψης μετρήσεων: 3 s



Λοιπά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν:

3. Κλισιόμετρο (για την σωστή βαθμονόμηση της απαιτούμενης κλίσης του κατόπτρου)
4. Πυξίδα χάρτου
5. Ο μετεωρολογικός σταθμός του Πολυτεχνείου της Κρήτης που αφορούσε σε μετρήσεις: α) ταχύτητας ανέμου, β) θερμοκρασίας περιβάλλοντος, γ) πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας (για επιβεβαίωση των δεδομένων του εργαστηριακού πυρανομέτρου). Όσο αφορά στην τελευταία παράμετρο, οι μετρήσεις δεν απήχαν σημαντικά μεταξύ τους, και επομένως δεν έγινε κάποια περαιτέρω καταγραφή δεδομένων, πλην αυτών που αναγράφονται στις μετρήσεις του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.

### 3.4 Προσομοίωση σε πρόγραμμα τύπου Ray Tracing

Για να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη άποψη για το πείραμα που εκτελέσαμε, και κατά πόσο αυτό αποκλίνει από αντίστοιχες θεωρητικές ή βιομηχανικές διατάξεις, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας τρέξαμε ένα σχετικό πρόγραμμα τύπου Ray Tracing.

Για να βρούμε το καταλληλότερο πρόγραμμα, έγινε μια ανασκόπηση σε αντίστοιχα προγράμματα ίδιου τύπου, προσπαθώντας να αξιολογήσουμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά, όπως αυτά φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

	Trace PRO	FRED software	ASAP	OPTICS LAB SOFTWARE
Κόστος	4.125 \$ - 12.750 \$	6.000\$ - 10.000 \$	12.400 \$	599 \$
Ευελιξία (συμβατότητα με σχεδιαστικά προγρ.)	NAI	NAI	NAI	NAI
Χρηστικότητα (σχεδίαση εντός προγράμματος)	NAI	-	NAI	-
Χρηστικότητα (υπολογισμός οπτικής απόδοσης)	NAI	NAI	NAI	NAI
Χρηστικότητα (γραφικές απεικονίσεις)	NAI	NAI	NAI	NAI
Δυνατότητα βελτιστοποίησης	NAI	NAI	NAI	NAI
Ευρεία χρήση (papers, projects βασισμένα στο προγρ.)	NAI	OXI	OXI	OXI
Technical support	NAI (not free)	NAI (not free)	NAI (not free)	NAI (free)

Αξιολογώντας τα χαρακτηριστικά του κάθε προγράμματος και αναγνωρίζοντας τις απαιτήσεις για την δικιά μας περίπτωση, καταλήξαμε στο TracePro καθώς βάσει των παραπάνω χαρακτηριστικών (ευελιξία, χρηστικότητα, δυνατότητα βελτιστοποίησης, ευρεία χρήση και τεχνική υποστήριξη) είναι το πληρέστερο. Επειδή όλα τα διαθέσιμα προγράμματα, με τα χαρακτηριστικά που θέλουμε κοστίζουν αρκετά, αποφασίσαμε πως για όποιο πρόγραμμα και αν επιλέξουμε να χρησιμοποιήσουμε, θα κατεβάσουμε την trial έκδοση διάρκειας 30 ημερών, και σ' αυτή θα γίνει η όποια προσομοίωση.

#### 3.4.1. TracePro

Το *TracePro* είναι ένα πρόγραμμα ευρέως διαδεδομένο σε αντίστοιχες επιστημονικές εφαρμογές, και αυτό προκύπτει από τις δυνατότητες του, καθώς πέραν των ηλιακών εφαρμογών που έχει, χρησιμοποιείται και σε οπτικές εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα προσφέρει μια πληθώρα δυνατοτήτων για δισδιάστατο και τρισδιάστατο σχεδιασμό σε εικονικό περιβάλλον δίνοντας παράλληλα την δυνατότητα για [1]:

- συμβατότητα μεταξύ άλλων σχετικών σχεδιαστικών προγραμμάτων π.χ. autoCAD
- καθορισμό φωτεινών πηγών και των χαρακτηριστικών τους (μήκος κύματος, είδος πηγής)
- οπτικοποίηση
- εξαγωγή αποτελεσμάτων για την πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας, γωνίας ακτίνων πρόσπτωσης, συμπεριφορά ακτίνων, απορρόφηση ή ανάκλαση διαφόρων επιφανειών κλπ.

Όσο αφορά στην μοντελοποίηση, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων – γεωμετριών εντός του προγράμματος αλλά και κάνοντας εισαγωγή αρχείων από άλλα. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα της επεξεργασίας μοντέλων που μπορεί να έχουν εισαχθεί από άλλα σχεδιαστικά προγράμματα αλλά και η αλλαγή θέσης, η περιστροφή τους καθώς και η αυξομείωση του μεγέθους ή λοιπών χαρακτηριστικών τους.

Στο κομμάτι που αφορά στις οπτικές ιδιότητες δύναται να καθοριστεί το είδος της επιφάνειας αλλά και το υλικό της, που θα καθορίσει την αντίστοιχη συμπεριφορά των ακτίνων κατά την πρόσπτωσή τους. Επίσης περιλαμβάνει την δυνατότητα καθορισμού του δείκτη διάθλασης, το συντελεστή απορρόφησης, το άνοιγμα της σκέδασης, του δείκτη ανάκλασης, της απορροφητικότητας της επιφάνειας, της πόλωσης και του φθορισμού, καθώς και η κατανομή της θερμοκρασίας στις αντίστοιχες επιφάνειες.

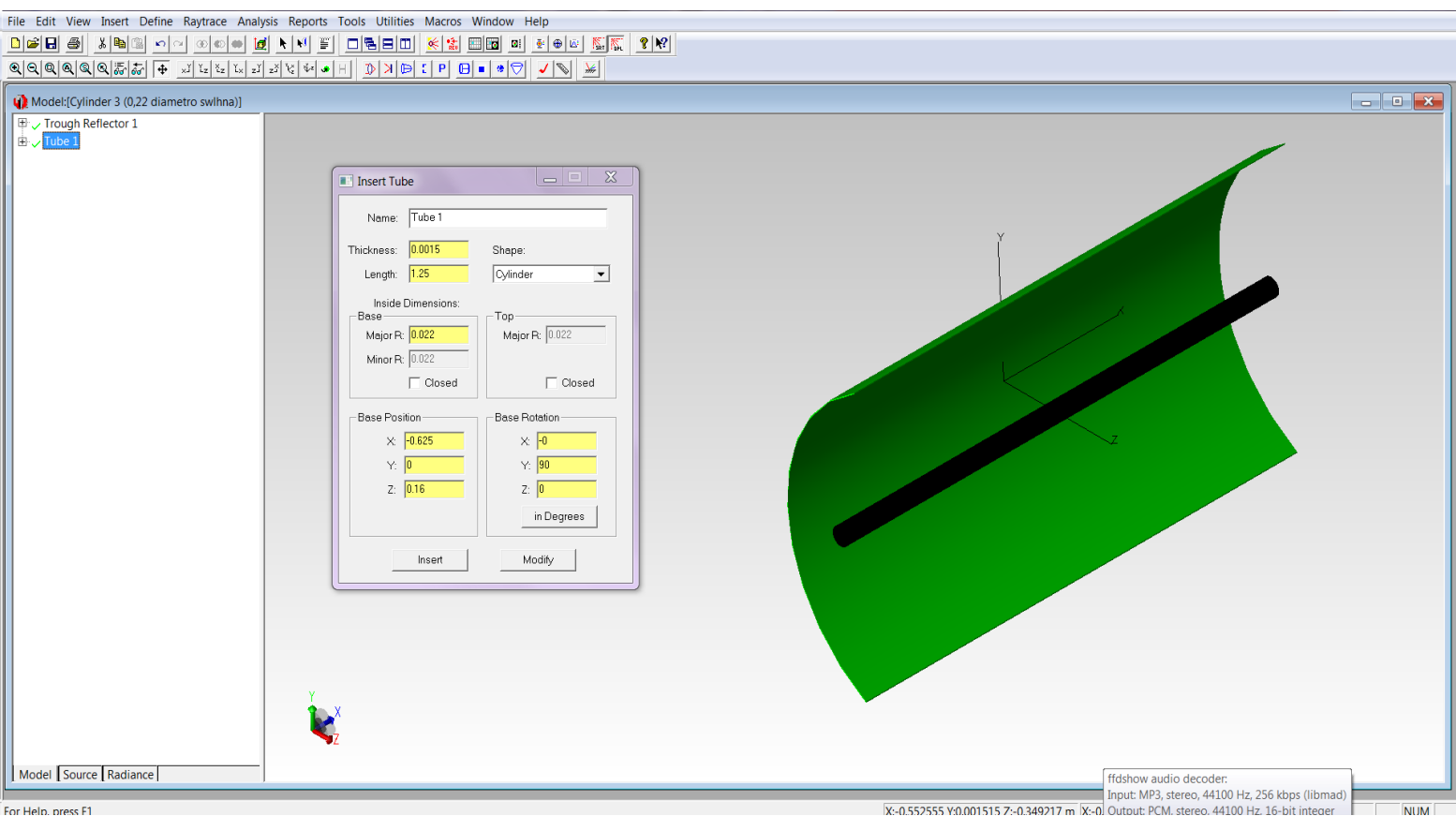
Τέλος, το TracePro όσο αφορά στο Ray Tracing, είναι γνωστό τόσο για τις επιδόσεις του, όσο και για την ακρίβεια του. Το Ray Tracing ως μέθοδος παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο παρακάτω κεφάλαιο.

### **3.4.2. Ray Tracing**

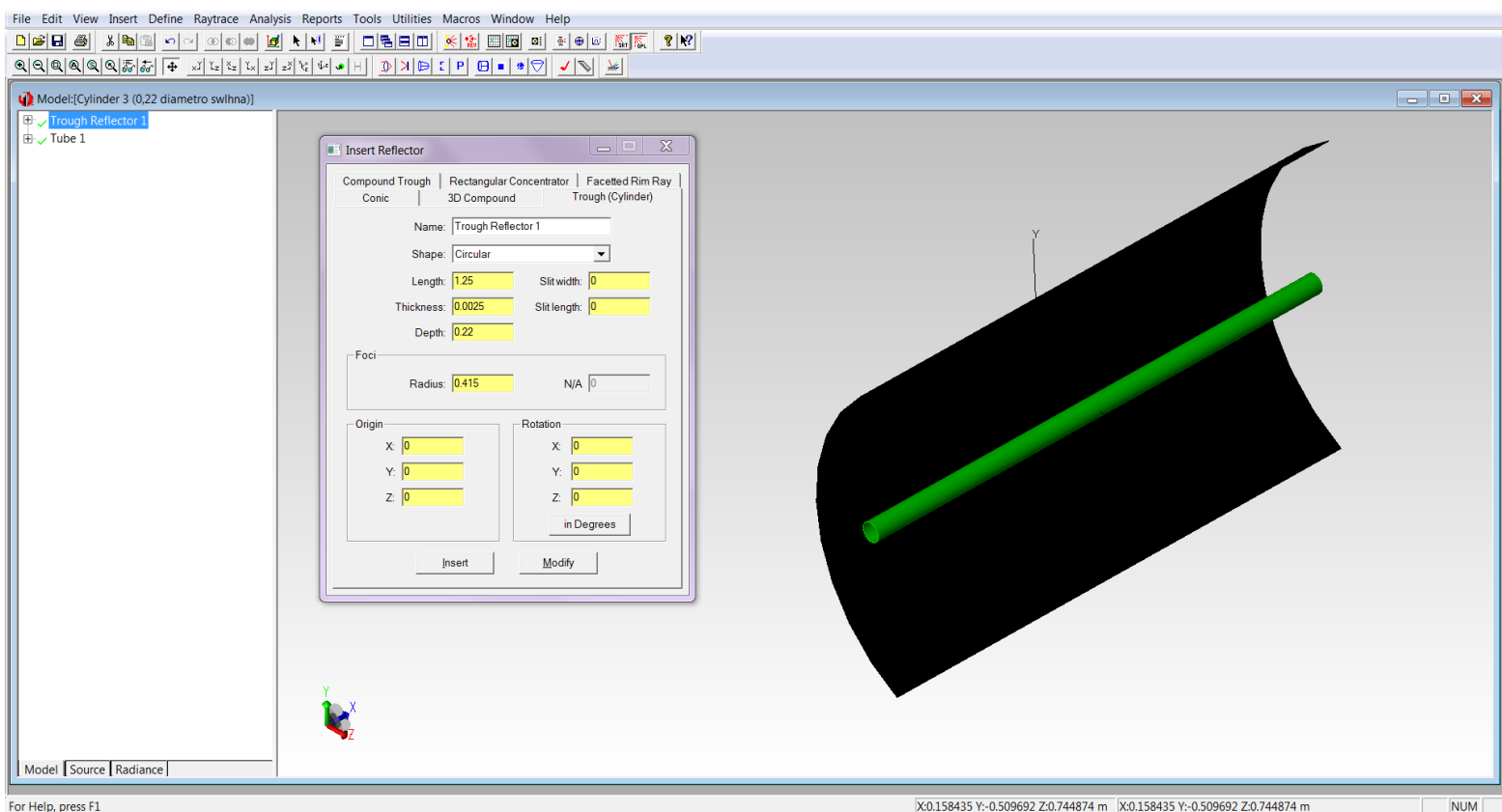
Το Ray Tracing είναι μια μέθοδος για τον υπολογισμό της διαδρομής των κυμάτων ή των σωματιδίων μέσα σε ένα σύστημα. Στην δικιά μας περίπτωση η τεχνική χρησιμοποιείται για την δημιουργία μιας εικόνας στην οποία διαφαίνεται η διαδρομή του φωτός μέσα από ένα πίξελ (pixel) σε μια επιφάνεια, και προσομοιώνει την τύχη της μετά την επαφή τους. Η τεχνική είναι ικανή να παράγει έναν πολύ υψηλό βαθμό οπτικού ρεαλισμού, που συνήθως είναι υψηλότερη από εκείνη των τυπικών μεθόδων, αλλά σε ανάλογα μεγαλύτερο κόστος [2].

### 3.4.3. Διαδικασία Προσομοίωσης στο TracePro

Αρχικά δημιουργήσαμε στο πρόγραμμα το θεωρητικό μοντέλο του παραβολικού κατόπτρου που έχουμε κατασκευάσει καθώς και του αντίστοιχου απορροφητή (χαλκοσωλήνα). Στη συνέχεια εισάγαμε τις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του μοντέλου κατ' αντιστοιχία με αυτά του πειραματικού. Τα χαρακτηριστικά όπως αυτά εισήχθησαν φαίνονται στα παρακάτω screenshots:



**Screenshot 3.5:** Χαρακτηριστικά – Διαστάσεις Απορροφητή (Χαλκοσωλήνα)



**Screenshot 3.6:** Χαρακτηριστικά – Διαστάσεις Ανακλαστικής επιφάνειας

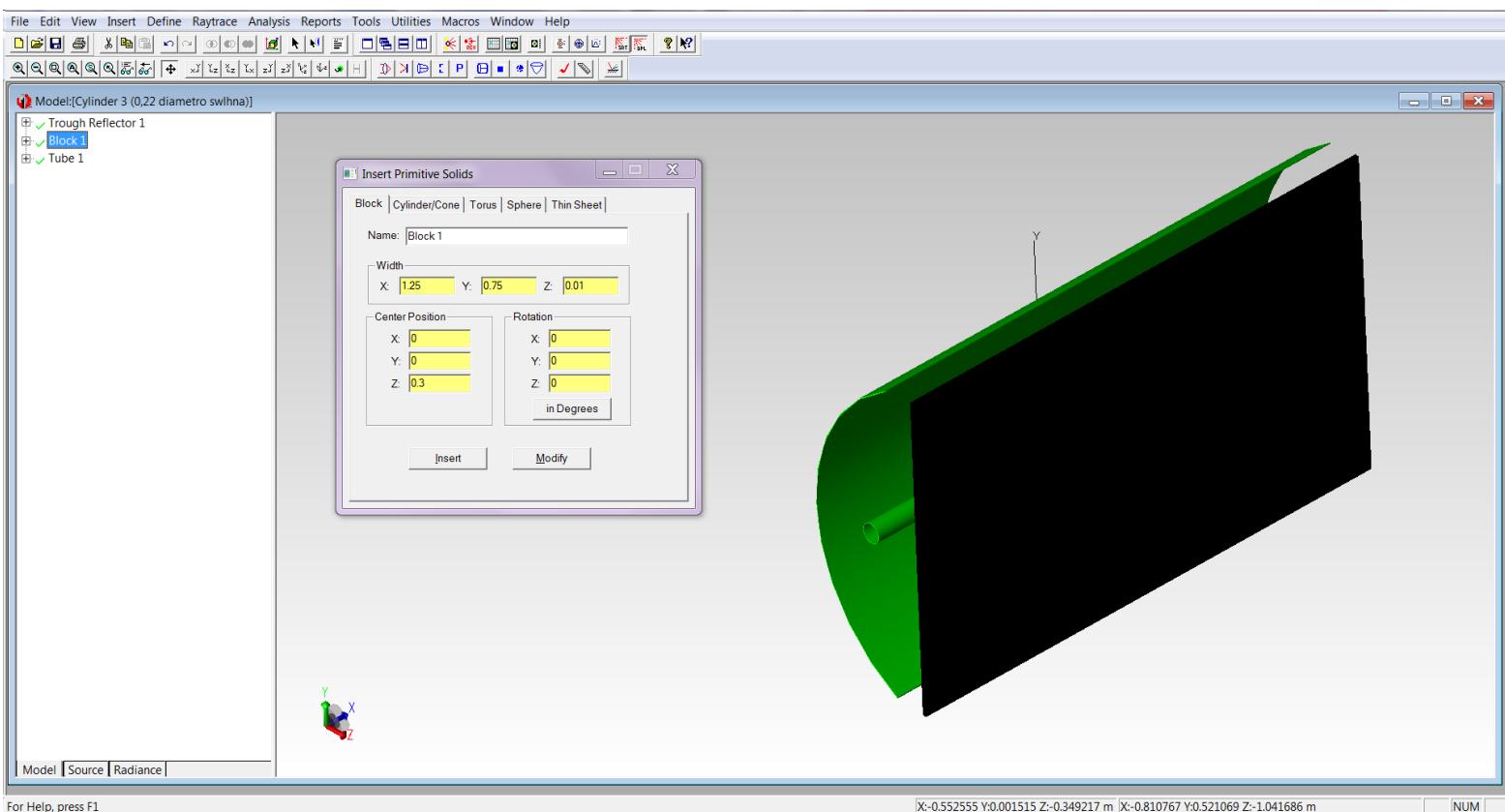
Μετά την εισαγωγή στο πρόγραμμα των διαστάσεων του μοντέλου, εισάγαμε τα χαρακτηριστικά των διαφόρων επιφανειών. Έτσι, για το κάτοπτρο επιλέξαμε στις ρυθμίσεις 'συντελεστής ανακλαστικότητας = 1' δηλαδή τέλεια ανακλαστική επιφάνεια, και για τον χαλκοσωλήνα – απορροφητή επιλέξαμε 'τέλειος απορροφητής'. Επομένως οι τιμές της ισχύος που θα εξάγουμε θα είναι οι ιδανικές για την συγκεκριμένη γεωμετρία κατόπτρου.

Στη συνέχεια εισάγαμε μια φωτεινή πηγή, η οποία προσπαθήσαμε να προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα τα χαρακτηριστικά του ήλιου. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι στο πρόγραμμα δεν ήταν δυνατή η εισαγωγή κάποια άλλης μετεωρολογικής παραμέτρου, και επομένως τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε αφορούν ιδανικές συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση, εξασφαλίσουμε ότι η προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας πάνω στο άνοιγμα του συλλέκτη θα αντιστοιχεί στις πραγματικές πειραματικές συνθήκες, κάνοντας όμως την παραδοχή ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία που εισάγαμε στο πρόγραμμα είναι η ολική και όχι η άμεση. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο.

Στη συνέχεια τοποθετήσαμε μια βοηθητική επιφάνεια στοιχειώδους πάχους μπροστά από το κάτοπτρο, πάνω στην οποία η προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) από την φωτεινή (ηλιακή) πηγή του προγράμματος ρυθμίστηκε ώστε να συμπίπτει με την πραγματική πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας στο άνοιγμα του κατόπτρου που παρατηρούσαμε στο πείραμα. Την βοηθητική αυτή επιφάνεια απενεργοποιούσαμε κάθε φορά που εκτελούσαμε την προσομοίωση, ώστε να μην εμποδίζει τη δίοδο των φωτεινών ακτίνων. Μπορούσαμε έτσι να πάρουμε την πυκνότητα της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) πάνω στον απορροφητή.

Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας αυτής φαίνονται παρακάτω:





**Screenshot 3.7:** Χαρακτηριστικά – Διαστάσεις βοηθητικής επιφάνειας

Επειδή η πειραματική διάταξη έχει την δυνατότητα να “ακολουθεί” τον ήλιο μόνο στην διεύθυνση Βορρά - Νότου (με το χειροκίνητο σύστημα αλλαγής κλίσης), και όχι στην διεύθυνση Ανατολής – Δύσης, (δηλαδή η ακτινοβολία δεν έπεφτε συνεχώς κάθετα στο άνοιγμα του κυλινδρικού κατόπτρου) έπρεπε να βρεθεί τρόπος να προσομοιωθεί η πραγματική κλίση του ήλιου ως προς το κάτοπτρο για κάθε μια από τις ώρες λήψης μετρήσεων (δηλαδή και στον δεύτερο άξονα). Αυτό επιτεύχθηκε κάνοντας χρήση των χρονοσειρών ενός αρχείου EXCEL από την διπλωματική εργασία του διδακτορικού του εργαστηρίου ΑΠΕ, Νικόλαου Σαββάκη, του οποίου η μεθοδολογία [Σαββάκης *et al.*, 2014] είχε στηριχθεί στην μεθοδολογία των Liou & Jordan [S. A. Klein, 1976]. Στη σχετική δημοσίευση υπάρχουν αναλυτικά η μεθοδολογία, καθώς και το σχετικό τυπολόγιο. Υπό την καθοδήγησή του, έγινε εισαγωγή ως δεδομένη την πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, την οποία και λάβαμε από τον μετεωρολογικό σταθμό του πολυτεχνείου. Ως αποτέλεσμα εξήχθη η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο (η κλίση για κάθε ώρα ήταν διαφορετική και ανάλογη της χρονοσειράς δεδομένων βάσει του οποίου προσαρμόζαμε την κλίση του κατόπτρου βάσει της ώρας λήψης μέτρησης) [Φράγκου *et al.*, 2012].

Εισάγοντας κάθε φορά δεδομένα που αφορούσαν την γεωγραφική θέση λήψης μετρήσεων, το έτος και τον μήνα, προέκυπτε η κλίση της θέσης του ήλιου για μια αντιπροσωπευτική ημέρα του υπό εξέταση μήνα, για τις αντίστοιχες ώρες. Πιο συγκεκριμένα οι ηλιακές αυτές θέσεις για τις οποίες έγινε η προσομοίωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4 παρακάτω:

**Πίνακας 3.8:** Κλίσεις που υπολογίστηκαν βάσει χαρακτηριστικής ημέρας για κάθε μήνα

Ώρες λήψης μέτρησης	Μήνες λήψης μετρήσεων		
	Μέση κλίση για μήνα Απρίλιο	Μέση κλίση για μήνα Μάιο	Μέση κλίση για μήνα Ιούνιο
<b>11:30</b>	128°	120°	108°
<b>12:30</b>	158°	154°	147°
<b>13:30</b>	186°	185°	183°
<b>14:30</b>	204°	203°	201°
<b>15:30</b>	217°	214°	211°

Για κάθε μια από τις ώρες λήψης μέτρησης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπολογίσαμε έναν θεωρητικό λόγο συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία στην περίπτωση μας συγκεντρώνεται πάνω στον απορροφητή.

Ο λόγος αυτός στην περίπτωση μας είναι:

$$C_{theor} = \frac{\text{προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας στο άνοιγμα του κατόπτρου}}{\text{προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του απορροφητή}}$$

Επομένως η τιμή του λόγου C εξαρτάται από:

- Την κλίση του κατόπτρου σε σχέση με την ιδανική κλίση για καθετότητα
- Την θέση του ήλιου την στιγμή όπου λαμβάνουμε την μέτρηση
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατόπτρου
- Την γεωμετρία της διάταξης

**Δεν εξαρτάται** από την πυκνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και γ' αυτό τον λόγο δεν χρειάστηκε να επαναλάβουμε την διαδικασία για κάθε μια μέτρηση.

### **3.5. Συσχετισμός παραμέτρων**

Καταγράφοντας και ομαδοποιώντας τα αποτελέσματα της πρώτης πειραματικής κατηγορίας, μπορέσαμε στην συνέχεια να τα επεξεργαστούμε με κάποια στατιστικά εργαλεία που διαθέτει το EXCEL. Χρησιμοποιώντας λοιπόν την στατιστική παλινδρόμηση, προσπαθήσαμε να δούμε ποιες από τις παραμέτρους που υπολογίσαμε επηρεάζουν περισσότερο την ανάπτυξη της θερμοκρασίας επάνω στον σωλήνα – απορροφητή. Έτσι αφού εισάγαμε τις μετρήσεις μας σε στήλες στο EXCEL, θέσαμε ως τεταγμένη (y) την μέση θερμοκρασία επάνω στον σωλήνα, και ως μεταβλητές (Variables x) τις παραμέτρους για τις οποίες είχαμε μετρήσεις.

Σκοπός μας είναι η εξαγωγή κάποιας εμπειρικής σχέσης, στην οποία εισάγοντας τιμές για τις παραμέτρους που τελικώς θα αποφασίσουμε ότι επηρεάζουν, θα παίρνουμε μια προσεγγιστική τιμή για την θερμοκρασία του απορροφητή. Για να αποφασίσουμε ποια σχέση εν τέλει θα επιλέξουμε, θα κάνουμε δοκιμές, και κάθε φορά θα ελέγχουμε το  $R^2$  να είναι πάνω από 0,6 αλλά και το  $t_{\text{statistics}}$  της κάθε μεταβλητής να είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερο του 1,96. Όποια από τις δοκιμές που θα κάνουμε μας δώσει την καλύτερη προσαρμογή των παραπάνω παραμέτρων, θα είναι και αυτή που θα επιλέξουμε.

Η εμπειρική σχέση που προέκυψε περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο με τα αποτελέσματα.

## 4. Αποτελέσματα

### 4.1 Μετρήσεις Πειράματος Κατηγορίας 1

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις για την κατηγορία πειράματος 1

Πίνακας 4.1: 1<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

31/03/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας*	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
14:30	Συννεφιά	4,92	30°	31°	17°C	16,7°C	140	17,0	20,1	21,0

\* Είναι η κλίση για μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας

Πίνακας 4.2: 2<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

24/04/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια	1,51	20°	22°	33,1	19	730	61,4	53,5	47,0
12:30	Ηλιοφάνεια	2,22	20°	22°	35,4	20	855	52,0	51,4	39,9
13:30	Ηλιοφάνεια	1,78	20°	21°	34,8	21	905	54,8	60,9	47,9
14:30	Ηλιοφάνεια	2,69	20°	20°	33,2	21	900	51,0	57,1	48,7
15:30	Αραιή συννεφιά	3,14	20°	17°	31,9	21	805	35,4	46,6	44,2

Πίνακας 4.3: 3<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

27/04/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια	2,69	20°	21°	35,8	22,1	725	30,5	45,7	48,6
12:30	Ηλιοφάνεια	2,72	20°	21°	38,3	23,0	865	59,1	51,1	39,2
13:30	Ηλιοφάνεια	3,91	20°	21°	33,4	23,1	920	50,4	46,5	43,1
14:30	Ηλιοφάνεια	4,15	20°	20°	35,6	23,4	900	39,2	48,0	41,7
15:30	Ηλιοφάνεια	4,53	20°	15°	34,2	22,3	785	37,7	46,8	43,5

Στις μετρήσεις από τις **30/4** και έπειτα, βάψαμε μαύρη την επιφάνεια του συλλέκτη προσπαθώντας να αυξήσουμε την απορροφητικότητα του (προηγουμένως είχε το χρώμα του χαλκοσωλήνα, δηλαδή χάλκινο, επιστρωμένο με βερνίκι για την μη οξειδωσή του από την υγρασία → μείωση απόδοσης απορρόφησης λόγω γυαλιστερής επιφάνειας και μεταλλικού χρώματος). Μαύρη επίσης βάφτηκε και η μη συγκεντρωτική επιφάνεια. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας επομένως αναμένεται να είναι πιο αυξημένες για τον λόγο αυτόν.

*Πίνακας 4.4: 4<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.*

30/04/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξιό άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια	2,22	20°	20°	38,6	22,2	730	62,3	61,8	51,9
12:30	Ηλιοφάνεια	3,14	20°	21°	35,9	23,1	900	59,6	55,4	55,2
13:30	Ηλιοφάνεια	2,69	20°	20°	40,2	22,7	945	61,9	63,0	62,2
14:30	Ηλιοφάνεια	4,03	20°	18°	33,8	22,5	885	54,6	48,1	41,7
15:30	Ηλιοφάνεια	6,25	15°	13°	34,5	21,8	825	52,2	50,1	32,6

*Πίνακας 4.5: 5<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.*

04/05/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξιό άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια	1,78	20°	18°	38,1	24,3	775	69,4	69,9	62,1
12:30	Ηλιοφάνεια	1,33	20°	19°	42,7	26,4	905	68,1	67,2	63,2
13:30	Ηλιοφάνεια	1,35	20°	19°	43,4	27,4	935	70,2	62,4	71,4
14:30	Ηλιοφάνεια	1,78	20°	16°	40,1	27,2	850	56,4	60,2	67,2
15:30	Ηλιοφάνεια	1,33	15°	12°	47,6	28,4	805	60,8	100,3	101,7

Πίνακας 4.6: 6<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

06/05/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια	1,78	20°	18 °	42,3	28,4	740	76,2	66,8	62,1
12:30	Ηλιοφάνεια	2,22	20°	19 °	44,0	28,3	855	70,8	69,4	69,6
13:30	Ηλιοφάνεια	2,20	20°	18 °	47,1	29,0	965	68,5	71,9	74,5
14:30	Ηλιοφάνεια	2,22	20°	15 °	45,2	29,9	885	67,8	72,1	70,2
15:30	Ηλιοφάνεια	2,22	15°	11 °	41,3	29,2	790	56,5	94,5	86,7

Πίνακας 4.7: 7<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

08/05/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια	2,20	20°	18 °	35,0	23,7	755	66,7	65,9	48,5
12:30	Ηλιοφάνεια	2,47	20°	19 °	35,2	24,2	840	76,9	73,2	53,8
13:30	Ηλιοφάνεια	3,14	15°	18 °	40,2	25,3	920	83,4	88,6	73,8
14:30	Ηλιοφάνεια	2,51	15°	15 °	38,4	26,4	885	68,3	79,8	75,3
15:30	Ηλιοφάνεια	2,17	20°	10 °	43,2	26,3	805	66,7*	93,3*	84,5*

\* Όσο αφορά στην τελευταία μέτρηση, παρατηρήθηκε ότι παρόλο που η απαιτούμενη κλίση για καθετότητα για την συγκεκριμένη ώρα ήταν 10, οι τιμές που λάβαμε για την συγκεκριμένη κλίση είναι αριστ.: 49,6 δεξ.: 65,3 κέντρο: 67,8 ενώ την ίδια ώρα για κλίση 20, οι αντίστοιχες τιμές είναι αυτές που αναγράφονται στον πίνακα μετρήσεων παραπάνω, η οποία είναι σαφώς αυξημένη.



**Πίνακας 4.8:** 8<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

11/05/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφία	3,14	20°	17 °	37,1	22,8	810	68,7	66,4	42,9
12:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφία	3,14	20°	17 °	40,4	23,4	900	75,3	75,0	70,1
13:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφία	4,03	15°	17 °	41,1	22,9	970	87,9	96,3	72,5
14:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφία	3,14	15°	13 °	42,9	23,3	865	85,2	10,9	89,2
15:30	Μερική συννεφία	3,58	15°	9 °	40,6	22,5	795	50,9*	76,4*	78,5*

\*Η παραπάνω παρατήρηση ισχύει και για την περίπτωση της τελευταίας μέτρησης για τις 11/5 όπως φαίνεται στον πίνακα.

**Πίνακας 4.9:** 9<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

13/05/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφία	4,03	20°	16 °	33,3	22,2	725	59,8	58,8	37,7
12:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφία	4,03	15°	17 °	33,4	23,1	865	74,9	70,1	60,6
13:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφία	3,42	15°	16 °	30,5	23,5	930	86,8	82,4	66,6
14:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφία	2,96	15°	13 °	37,4	23,3	870	74,2	76,7	69,2
15:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφία	3,14	15°	8 °	35,7	23,4	815	62,5	88,6	75,5

**Πίνακας 4.10:** 10<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

14/05/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια	3,14	15°	16 °	30,4	24,6	745	62,0	61,3	47,6
12:30	Ηλιοφάνεια	4,25	15°	16 °	37,5	25,3	850	69,1	69,3	65,1
13:30	Ηλιοφάνεια	4,92	15°	15 °	37,1	25,9	920	62,7	65,4	68,7
14:30	Ηλιοφάνεια	5,36	15°	12 °	38,0	26,0	915	72,6	71,4	60,2
15:30	Ηλιοφάνεια	4,92	10°	7 °	36,8	25,8	820	44,5	65,5	67,9

**Πίνακας 4.11:** 11<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

19/05/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφιά	2,7	15 °	14 °	30,2	23,5	790	60,5	61,7	51,3
12:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφιά	2,7	15 °	15 °	35,6	23,7	855	61,4	62,7	57,8
13:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφιά	3,2	15 °	15 °	39,9	24,7	910	68,8	66,0	55,1
14:30	Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφιά	3,2	15 °	12 °	35,3	24,3	890	63,7	73,2	67,7
15:30	Μερική συννεφιά	3,2	10 °	7 °	34,1	24,2	790	49,9	64,7	58,5

**Πίνακας 4.12:** 12<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

21/05/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Μερική συννεφιά	1,8	15 °	14 °	40,2	27,5	560	57,4	58,6	48,3
12:30	Συννεφιά	3,2	15 °	15 °	33,0	24,9	655	34,2	35,3	36,4
13:30	Μερική συννεφιά	2,2	15 °	14 °	43,5	27,2	990	68,2	69,2	67,8
14:30	Μερική συννεφιά	2,2	15 °	12 °	39,7	27,1	610	44,0	47,8	50,3
15:30	Μερική συννεφιά	2,2	10 °	7 °	35,5	25,1	730	50,4	66,2	63,2

**Πίνακας 4.13:** 13<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

15/06/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια	1,8	15	16	50,2	32,7	805	76,3	82,5	59,9
12:30	Ηλιοφάνεια	1,8	15	16	52,5	33,7	895	71,7	75,2	73,1
13:30	Ηλιοφάνεια	2,7	10	13	49,6	33,7	920	89,2	102,1	75,9
14:30	Ηλιοφάνεια	2,2	10	8	50,1	32,9	860	65,2	90,4	89,1
15:30	Ηλιοφάνεια	1,8	10	7	48,1	31,4	795	60,8	82,5	78,5

**Πίνακας 4.14:** 14<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 1.

26/06/2015										
Ώρα μέτρησης	Συνθήκες ατμόσφαιρας (Νεφοκάλυψη ή Ηλιοφάνεια)	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Κλίση κατόπτρου	Βέλτιστη κλίση καθετότητας	Θερμοκρ. μη συγκεντρωτικής επιφάνειας (°C)	Θερμοκρ. Περιβάλλοντος (°C)	Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβ. σε κεκλ. Επιπ. (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Αρισ. άκρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Κέντρο) (°C)	Θερμοκρ. Σωλήνα: (Δεξί άκρο) (°C)
11:30	Ηλιοφάνεια	1,3	10	7	41,7	28,9	815	79,6	78,0	67,2
12:30	Ηλιοφάνεια	2,2	10	8	43,6	28,6	880	71,3	86,9	81,8
13:30	Ηλιοφάνεια	1,3	5	8	37,3	30,0	905	84,4	83,7	64,3
14:30	Ηλιοφάνεια	1,3	5	5	39,2	28,9	860	93,2	92,7	70,8
15:30	Ηλιοφάνεια	1,3	5	2	41,3	28,2	790	81,0	87,1	60,3

## 4.2. Μετρήσεις Κατηγορίας Πειράματος 2

Παρακάτω παρατίθενται οι μετρήσεις για τη δεύτερη σειρά πειραμάτων που αφορούν στην απόδοση του συγκεντρωτικού παραβολικού κατόπτρου που κατασκευάσαμε, ως θερμικό συγκεντρωτικό.

*Πίνακας 4.15: 1<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 2.*

19/05/2015					
	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30
Θερμ. Σωλήνα πριν (αριστ.) (°C)	60,5	61,4	68,8	63,7	49,9
Θερμ. Σωλήνα πριν (κέντρο) (°C)	61,7	61,7	66,0	73,2	64,7
Θερμ. Σωλήνα πριν (δεξιά) (°C)	51,3	51,3	55,1	67,7	58,5
<b>Θερμ. Νερού Εισόδου (°C)</b>	<b>29,5</b>	<b>29,3</b>	<b>29,4</b>	<b>29,1</b>	<b>31,0</b>
Θερμ. Σωλήνα μετά (αριστ.) (°C)	30,1	30,8	29,9	29,7	27,5
Θερμ. Σωλήνα μετά (κέντρο) (°C)	28,9	31,0	30,1	31,2	28,9
Θερμ. Σωλήνα μετά (δεξιά) (°C)	29,8	27,8	29,7	33,4	29,5
<b>Θερμ. Νερού Εξόδου (°C)</b>	<b>35,1</b>	<b>34,9</b>	<b>34,2</b>	<b>34,9</b>	<b>34,5</b>
Κλίση κατόπτρου (°)	15	15	15	10	10
Θεωρ. Κλίση κατόπτρου (°)	14	15	14	12	7
<b>Όγκος νερού ελέγχου (L)</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>
<b>Χρόνος t (s)</b>	<b>35</b>	<b>41</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>35</b>
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C)	23,5	23,7	24,7	24,3	24,2
Πυκν. ηλιακής ακτινοβ. (W/m <sup>2</sup> )	790	855	910	890	790

**Πίνακας 4.16:** 16<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 2.

15/06/2015					
	<b>11:30</b>	<b>12:30</b>	<b>13:30</b>	<b>14:30</b>	<b>15:30</b>
Θερμ. Σωλήνα πριν (αριστ.) (°C)	76,3	71,7	89,2	65,2	60,8
Θερμ. Σωλήνα πριν (κέντρο) (°C)	82,8	75,2	102,1	90,4	82,5
Θερμ. Σωλήνα πριν (δεξιά) (°C)	59,9	73,1	75,9	89,1	78,5
<b>Θερμ. Νερού Εισόδου (°C)</b>	<b>31,5</b>	<b>31,5</b>	<b>26,9</b>	<b>27,1</b>	<b>28,1</b>
Θερμ. Σωλήνα μετά (αριστ.) (°C)	40,4	56,2	34,5	37,0	31,5
Θερμ. Σωλήνα μετά (κέντρο) (°C)	37,2	50,6	36,3	33,1	32,1
Θερμ. Σωλήνα μετά (δεξιά) (°C)	34,5	47,5	33,7	32,4	33,0
<b>Θερμ. Νερού Εξόδου (°C)</b>	<b>36,4</b>	<b>35,6</b>	<b>31,6</b>	<b>32,6</b>	<b>33,1</b>
Κλίση κατόπτρου (°)	10	10	10	10	10
Θεωρ. Κλίση κατόπτρου (°)	16	16	13	8	7
<b>Όγκος νερού ελέγχου (L)</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>
<b>Χρόνος t (s)</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>15</b>
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C)	32,7	33,7	33,7	32,9	31,4
Πυκν. ηλιακής ακτινοβ. (W/m <sup>2</sup> )	805	895	920	860	795

**Πίνακας 4.17:** 17<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης πειράματος κατηγορίας 2.

<b>26/06/2015</b>					
	<b>11:30</b>	<b>12:30</b>	<b>13:30</b>	<b>14:30</b>	<b>15:30</b>
Θερμ. Σωλήνα πριν (αριστ.) (°C)	79,6	71,3	84,4	93,2	81,0
Θερμ. Σωλήνα πριν (κέντρο) (°C)	78,0	86,9	83,7	92,7	87,1
Θερμ. Σωλήνα πριν (δεξιά) (°C)	67,2	81,8	64,3	70,8	60,3
<b>Θερμ. Νερού Εισόδου (°C)</b>	<b>27,6</b>	<b>26,0</b>	<b>26,9</b>	<b>27,9</b>	<b>27,8</b>
Θερμ. Σωλήνα μετά (αριστ.) (°C)	31,0	40,1	33,8	32,1	32,8
Θερμ. Σωλήνα μετά (κέντρο) (°C)	32,1	44,1	35,9	32,2	35,2
Θερμ. Σωλήνα μετά (δεξιά) (°C)	32,8	44,8	37,3	35,1	36,2
<b>Θερμ. Νερού Εξόδου (°C)</b>	<b>29,9</b>	<b>30,1</b>	<b>32,7</b>	<b>31,6</b>	<b>31,0</b>
Κλίση κατόπτρου (°)	10	10	5	5	5
Θεωρ. Κλίση κατόπτρου (°)	7	8	8	5	2
<b>Όγκος νερού ελέγχου (L)</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>
<b>Χρόνος t (s)</b>	<b>55</b>	<b>53</b>	<b>60</b>	<b>58</b>	<b>51</b>
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C)	28,9	28,6	30,0	28,9	28,2
Πυκν. ηλιακής ακτινοβ. (W/m <sup>2</sup> )	815	880	905	860	790



### 4.3. Εμπειρική σχέση από συσχέτιση Δεδομένων

Μετά από μια σειρά δοκιμών και αφού ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, καταλήξαμε στον παρακάτω τελικό πίνακα:

**Πίνακας 4.18:** Τελικός πίνακας συσχέτισης μεταβλητών και η παραγόμενη γραμμική σχέση (πάνω δεξιά).

SUMMARY OUTPUT								
Regression Statistics								
Multiple R	0,7821185							
R Square	0,6117094							
Adjusted R Square	0,5858233			$y = X1*0,071 + X2*1,14 - X3*1,01 - X4*2,93$				
Standard Error	8,2040969							
Observations	65							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	4	6362,1076	1590,5269	23,63085591	9,14993E-12			
Residual	60	4038,4324	67,307206					
Total	64	10400,54						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	-1,184997	15,148626	-0,0782247	0,937909594	-31,4867612	29,11676713	-31,4867612	29,11676713
X Variable 1	0,0711349	0,0130696	5,4427984	1,02337E-06	0,044991936	0,097277922	0,04499194	0,097277922
X Variable 2	1,1393384	0,405482	2,8098374	0,006682741	0,328253707	1,950423091	0,32825371	1,950423091
X Variable 3	-1,0077078	0,2571835	-3,918244	0,000231207	-1,52215138	-0,493264137	-1,52215138	-0,49326414
X Variable 4	-2,9365681	1,1022628	-2,6641269	0,009898613	-5,14142211	-0,731714173	-5,14142211	-0,73171417

Όπου η αντιστοιχία των μεταβλητών X1,X2,X3,X4, είναι η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η θεωρητική κλίση του κατόπτρου για καθετότητα ανάλογα με την θέση του ήλιου και η ταχύτητα του ανέμου, αντίστοιχα. Επομένως η παραπάνω σχέση του πίνακα, αντικαθιστώντας τις μεταβλητές αυτές, θα μας δώσει την ακόλουθη γραμμική σχέση:

$$t_{abs} = 0,071 \cdot C_{exp} + 1,14 \cdot t_{amb} - 1,01 \cdot sl_{theor} - 2,93 \cdot u_w$$

Όπου:

- $t_{abs}$  : η θερμοκρασία του απορροφητή [ °C ]
- $C_{exp}$  = η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας [ W/m<sup>2</sup> ]
- $t_{amb}$  = η θερμοκρασία του περιβάλλοντος [ °C ]
- $sl_{theor}$  = η θεωρητική κλίση του κατόπτρου για καθετότητα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία [ degrees ]
- $u_w$  = η ταχύτητα του ανέμου [ m/s ]

#### 4.4 Θερμική απόδοση κατόπτρου

Με βάση τον τύπο που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 3, βρήκαμε τον μέσο όρο για όλα τα δεδομένα για κάθε μια ημέρα από τις 3 συνολικά, και αντικαθιστώντας πήραμε 3 διαφορετικούς συντελεστές απόδοσης. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε σε υπολογιστικό φύλλο του EXCEL, και παρουσιάζεται στο παράρτημα (Πίνακας 1). Το τελικό αποτέλεσμα που προέκυψε για κάθε μια ημέρα λήψης μετρήσεων της 2<sup>ης</sup> κατηγορίας πειραμάτων, είναι:

Για την πρώτη ημέρα η απόδοση ήταν  $n_{en,1} = 0,1\%$

Για την δεύτερη ημέρα η απόδοση ήταν  $n_{en,2} = 0,2\%$

Για την τρίτη ημέρα η απόδοση ήταν  $n_{en,3} = 0,06\%$

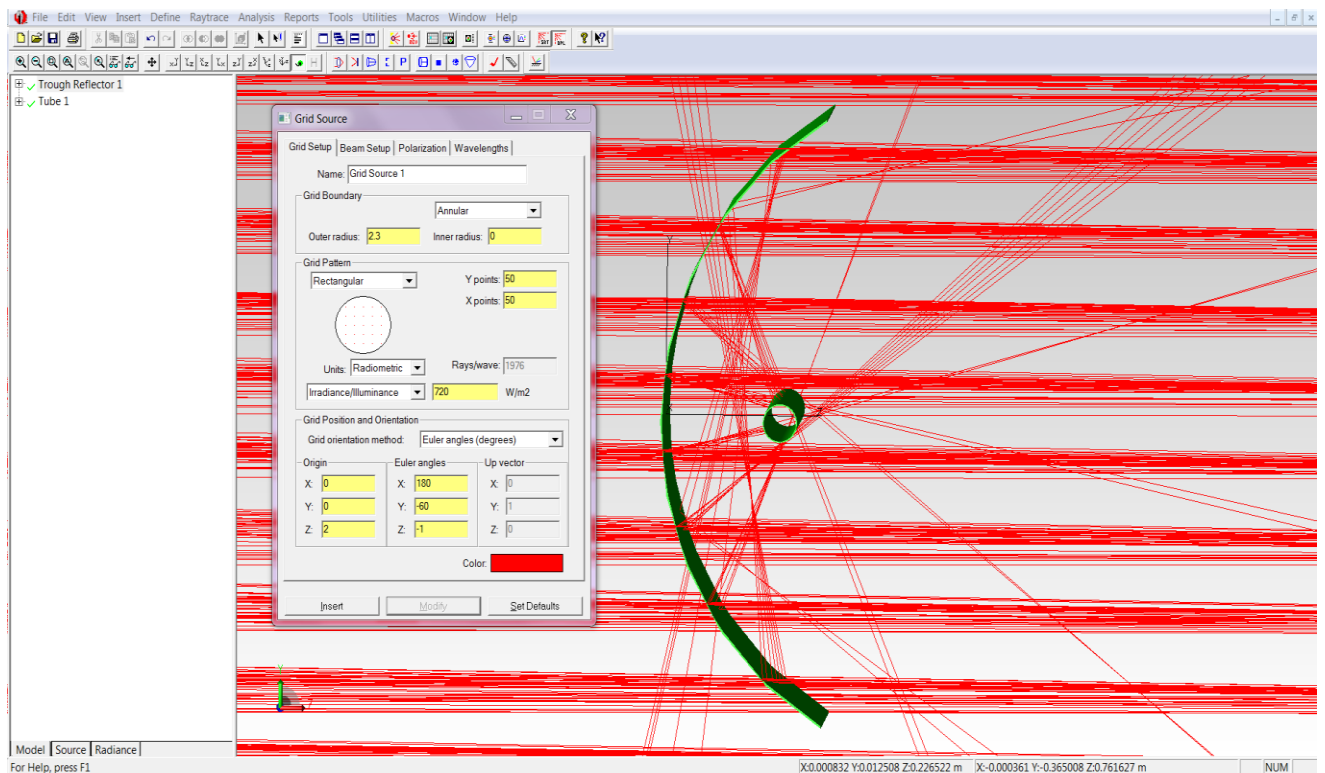
Η θερμική απόδοση ήταν μικρότερη του 1% καθώς το μήκος του σωλήνα ήταν πολύ μικρό και δεν προλάβαινε να θερμάνει το νερό για τις παροχές που επιλέχθηκαν. Πιο λεπτομερής αναφορά στους λόγους για τους οποίους παρατηρήθηκε τόσο μικρή θερμική απόδοση γίνεται στο κεφάλαιο 5.

#### 4.5 Γραφική απεικόνιση μοντέλου στο TracePro

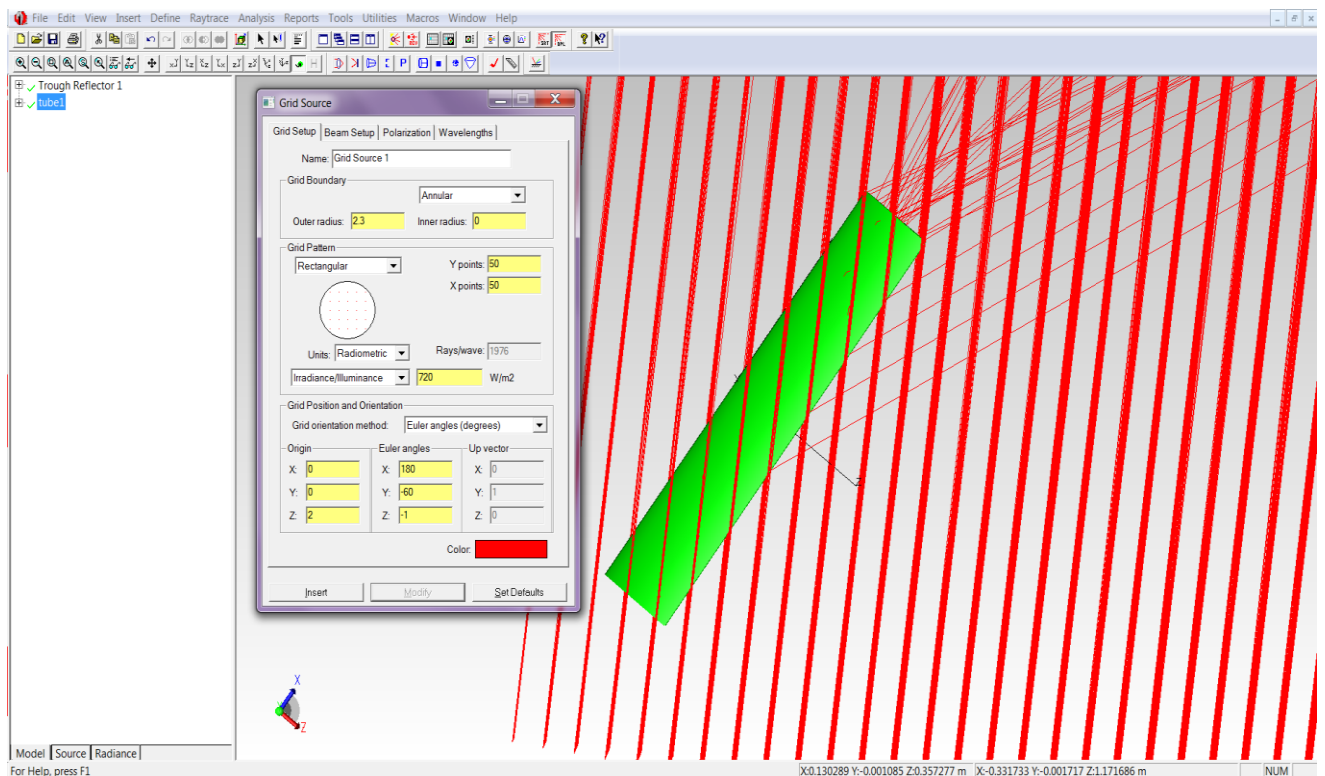
Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα screenshots, όπως αυτά προέκυψαν από το πρόγραμμα προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του προγράμματος και ο τρόπος εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Αρχικά παρουσιάζονται screenshots που αφορούν στην αζιμούθια γωνία της επιφάνειας του κατόπτρου για τις διαφορετικές ώρες που κάναμε τις μετρήσεις. Καθώς έχουμε μικρή μεταβολή των μοιρών για κάθε μια ώρα λήψης μέτρησης ανάμεσα στις τρεις αντιπροσωπευτικές τιμές για κάθε μήνα, θα παραθέσουμε μόνο την απεικόνιση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας για τον μήνα Μάιο για κάθε μια ώρα, καθώς η οπτική μεταβολή είναι ουσιαστικά ανεπαίσθητη.

Ως μεσημβρία έχουμε τις 180°, επομένως οι μοίρες έχουν γραφεί και με τους δυο τρόπους, όπως φαίνεται παρακάτω.

- Για κλίση  $120^\circ$  ( $-60^\circ$ ) που αντιστοιχεί στις 11:30, θα έχουμε:

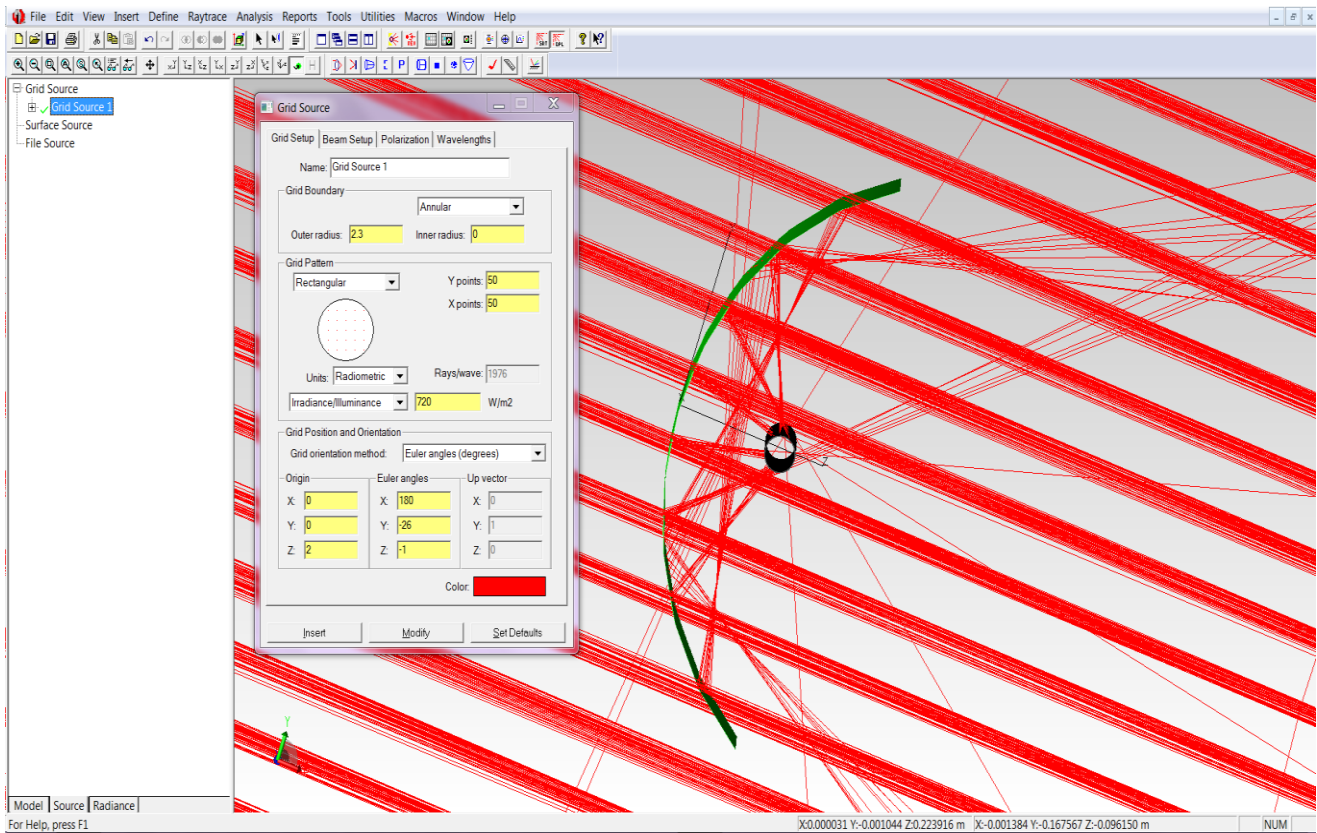


**Screenshot 4.19:** Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 11:30 (13/5).

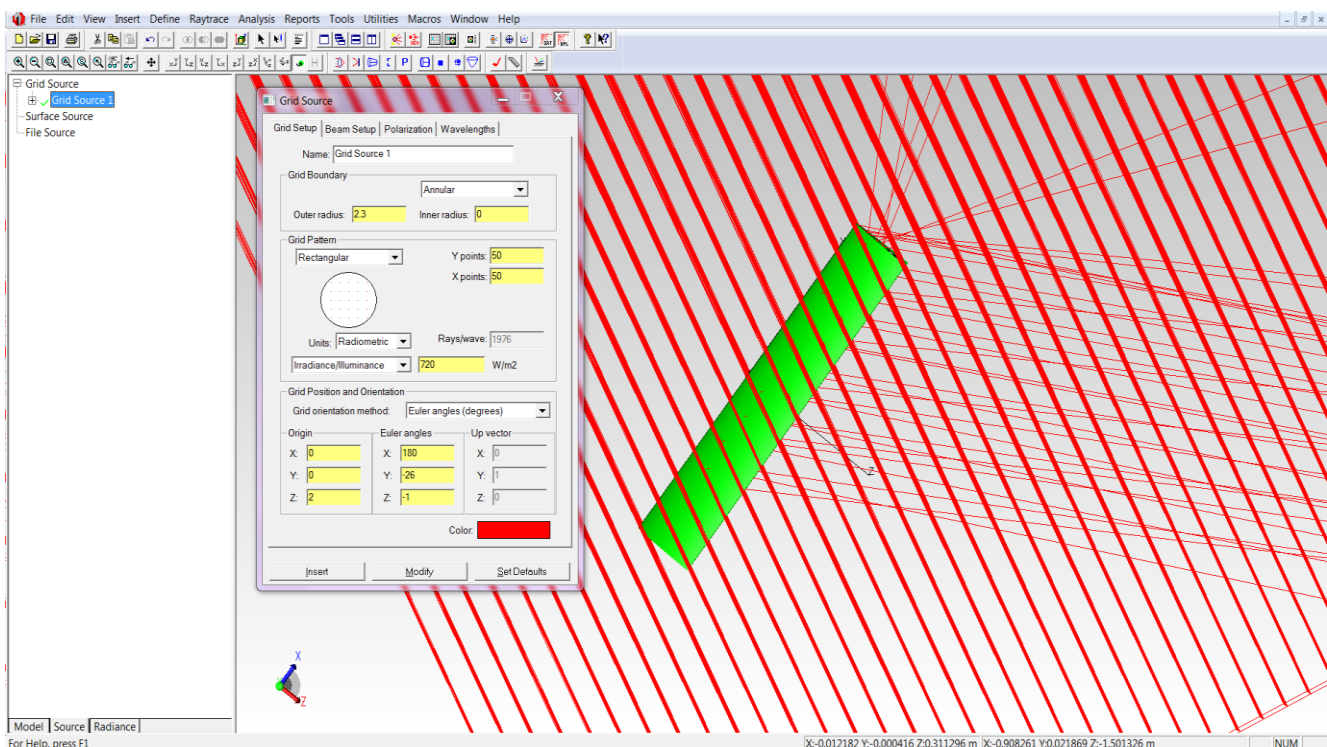


**Screenshot 4.20:** Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 11:30 (13/5).

- Για κλίση  $154^\circ$  ( $-26^\circ$ ) που αντιστοιχεί στις 12:30, θα έχουμε:



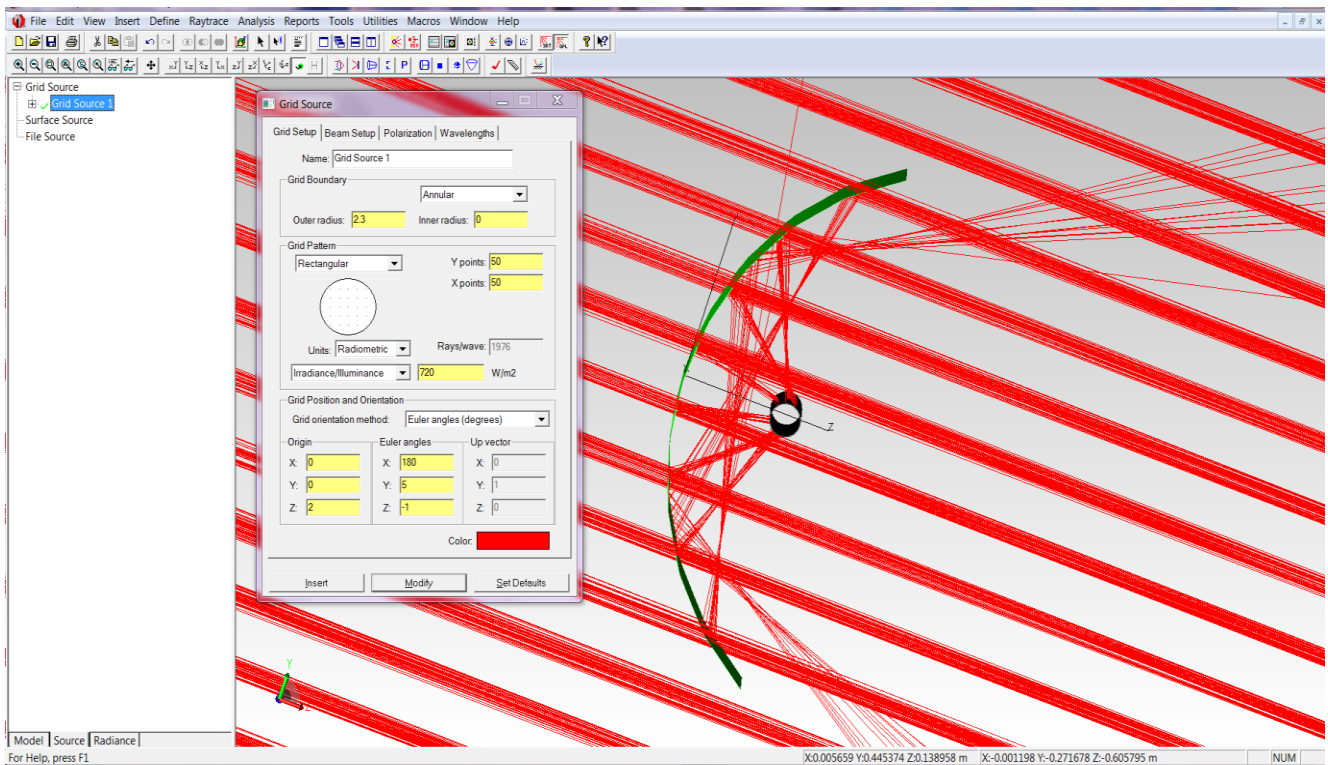
**Screenshot 4.21:** Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 12:30 (13/5).



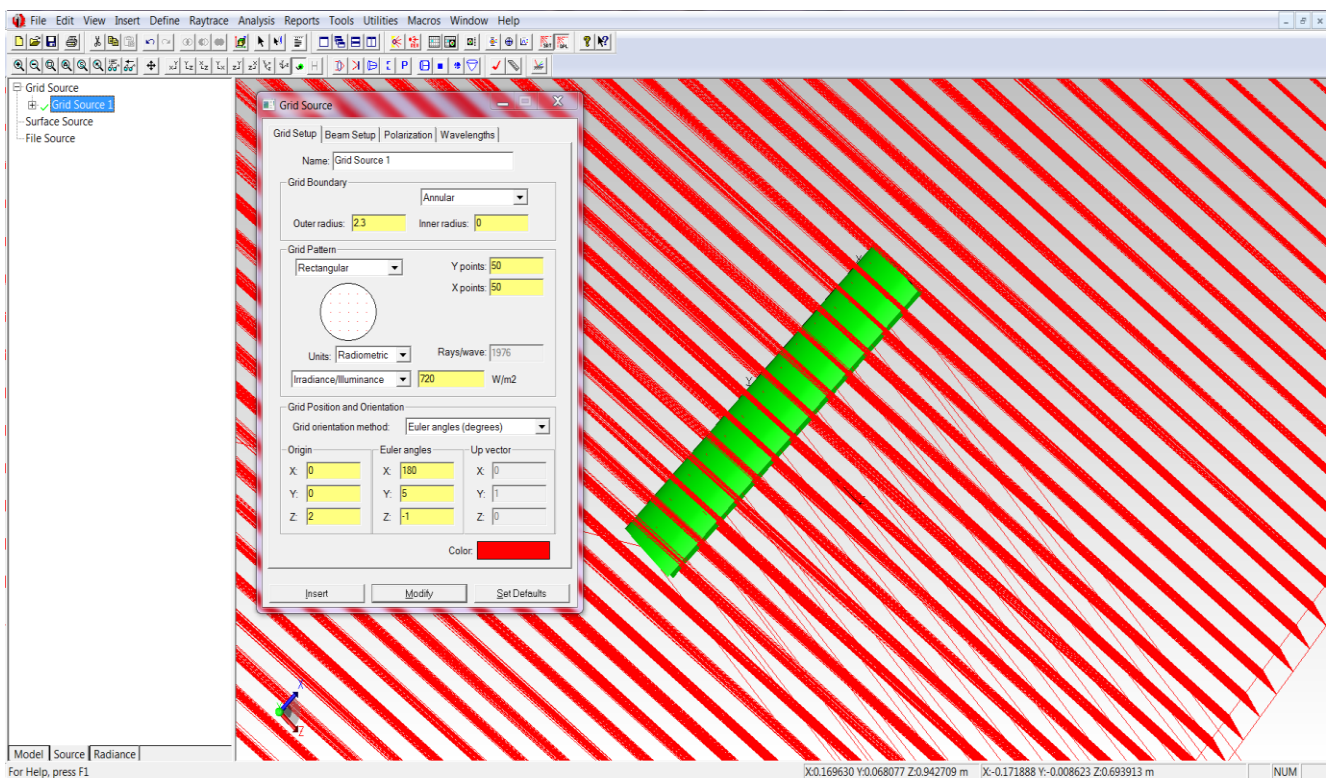
**Screenshot 4.22:** Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 12:30 (13/5).



- Για κλίση  $185^\circ (+5^\circ)$  που αντιστοιχεί στις 13:30, θα έχουμε:

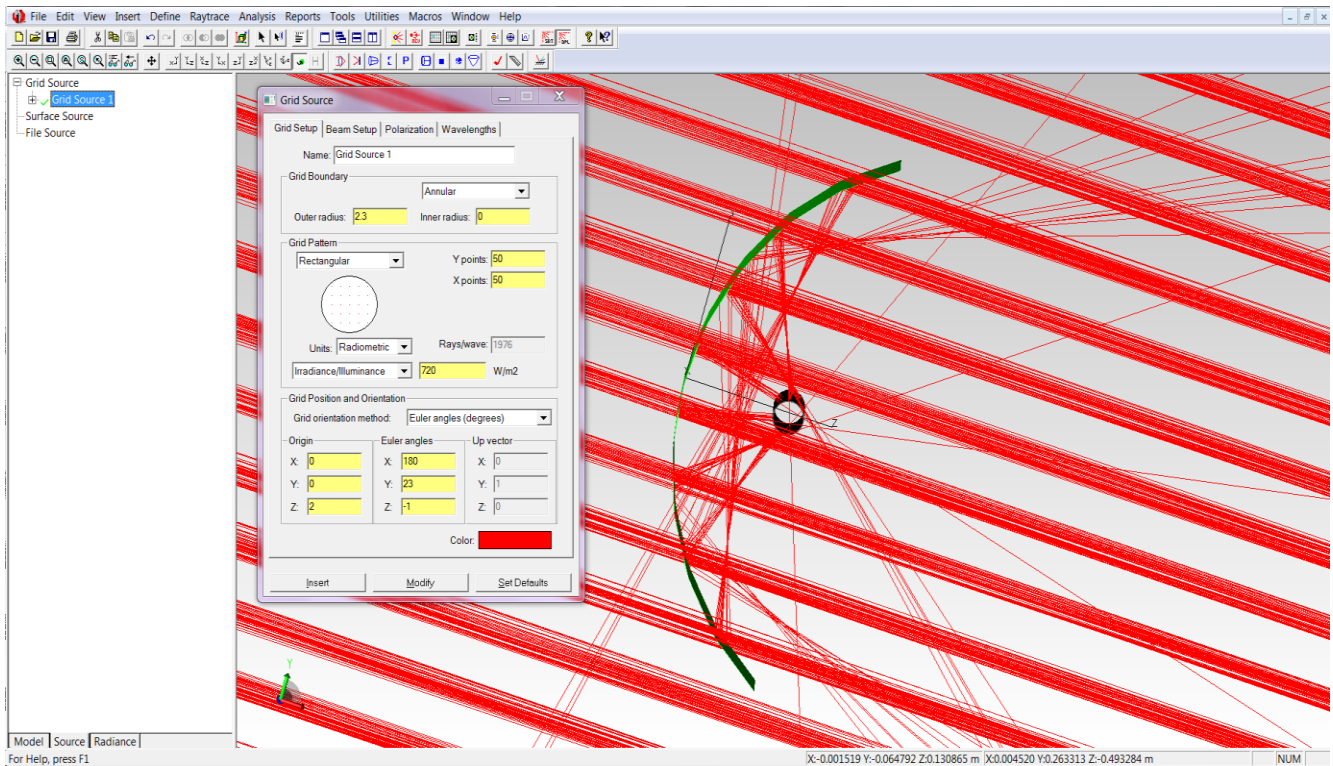


**Screenshot 4.23:** Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 13:30 (13/5).

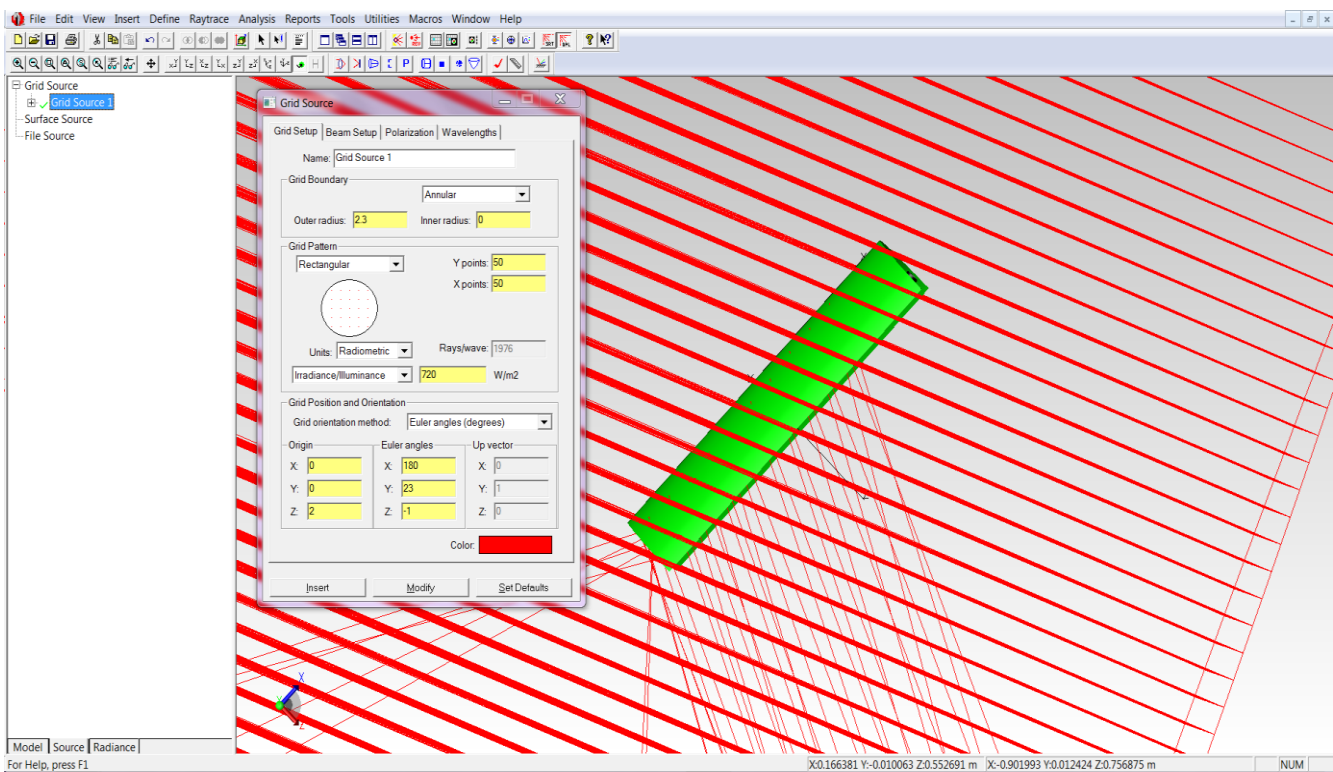


**Screenshot 4.24:** Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 13:30 (13/5).

- Για κλίση  $203^{\circ}$  ( $+23^{\circ}$ ) που αντιστοιχεί στις 14:30, θα έχουμε:



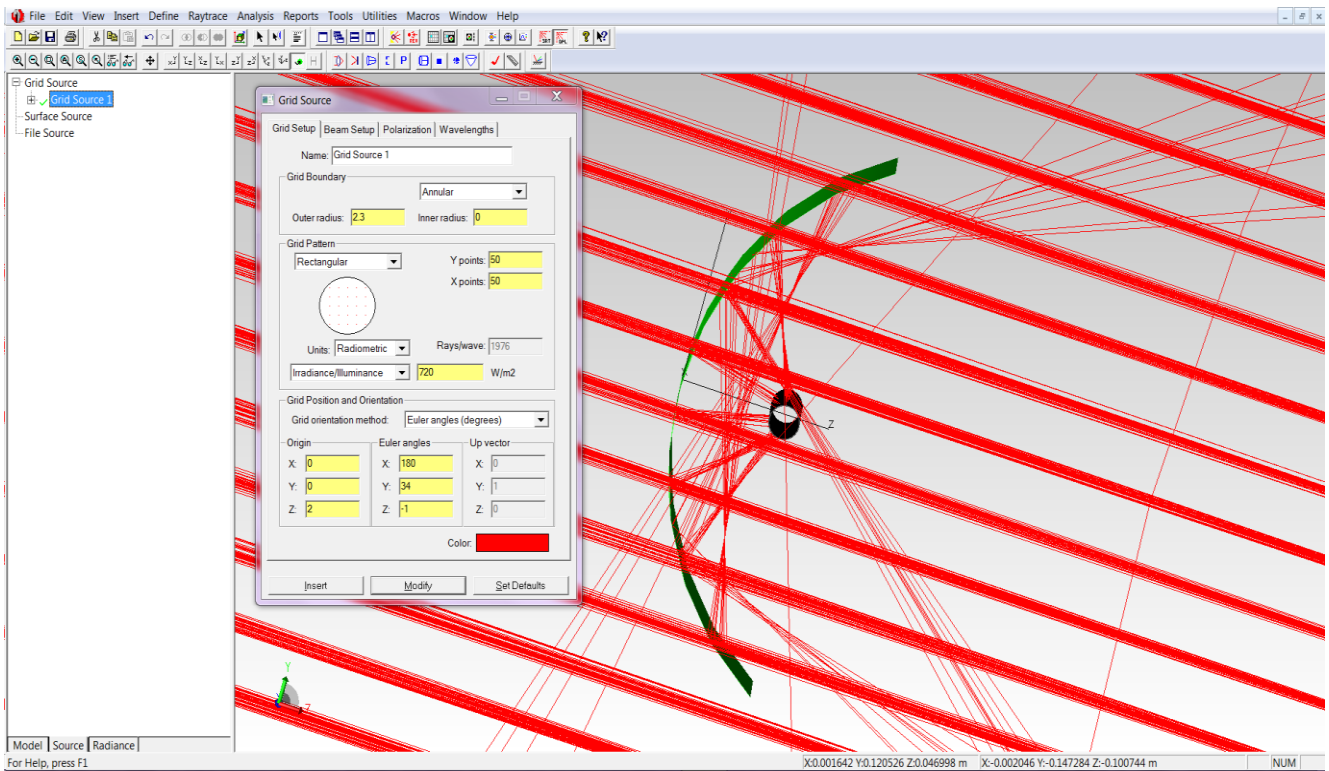
*Screenshot 4.25: Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 14:30 (13/5).*



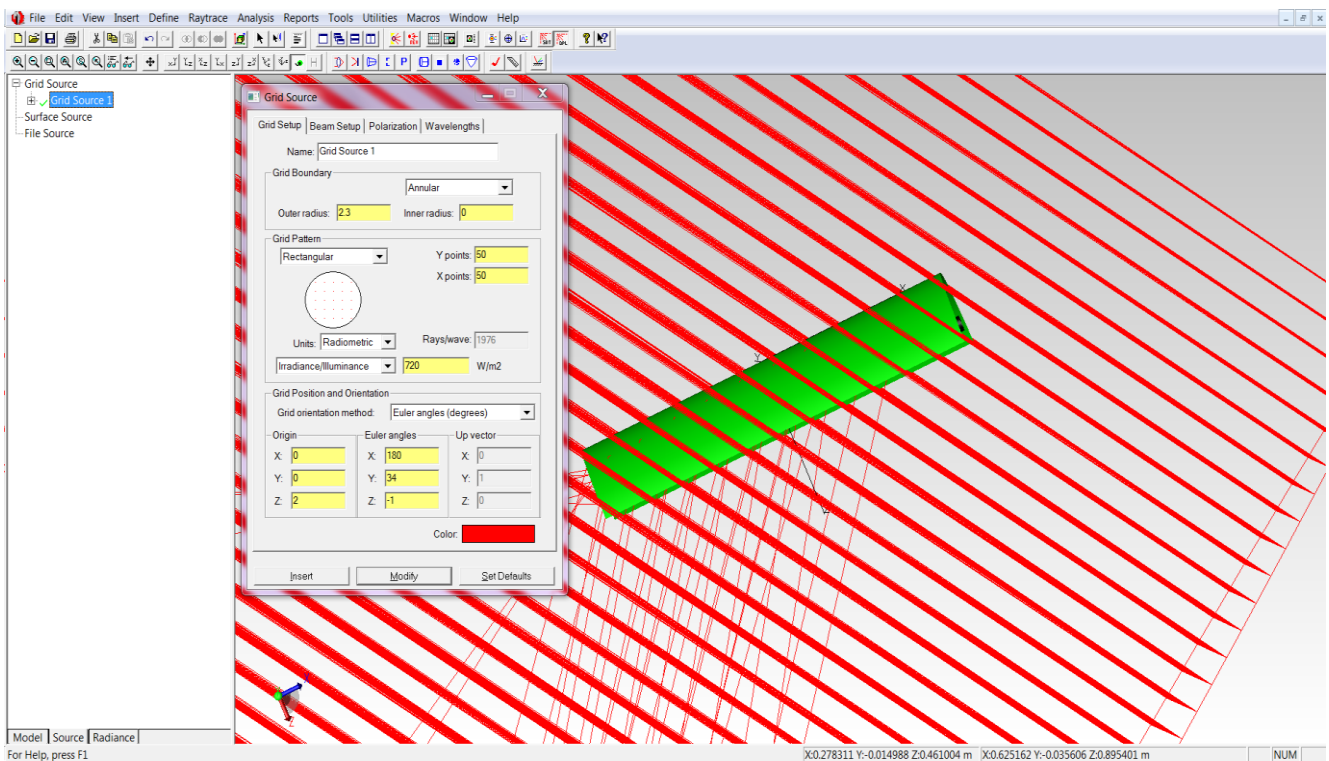
*Screenshot 4.26: Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 14:30 (13/5).*



- Για κλίση  $214^\circ$  ( $+34^\circ$ ) που αντιστοιχεί στις 15:30, θα έχουμε:



*Screenshot 4.27: Πλάγια όψη του συγκεντρωτικού στις 15:30 (13/5).*

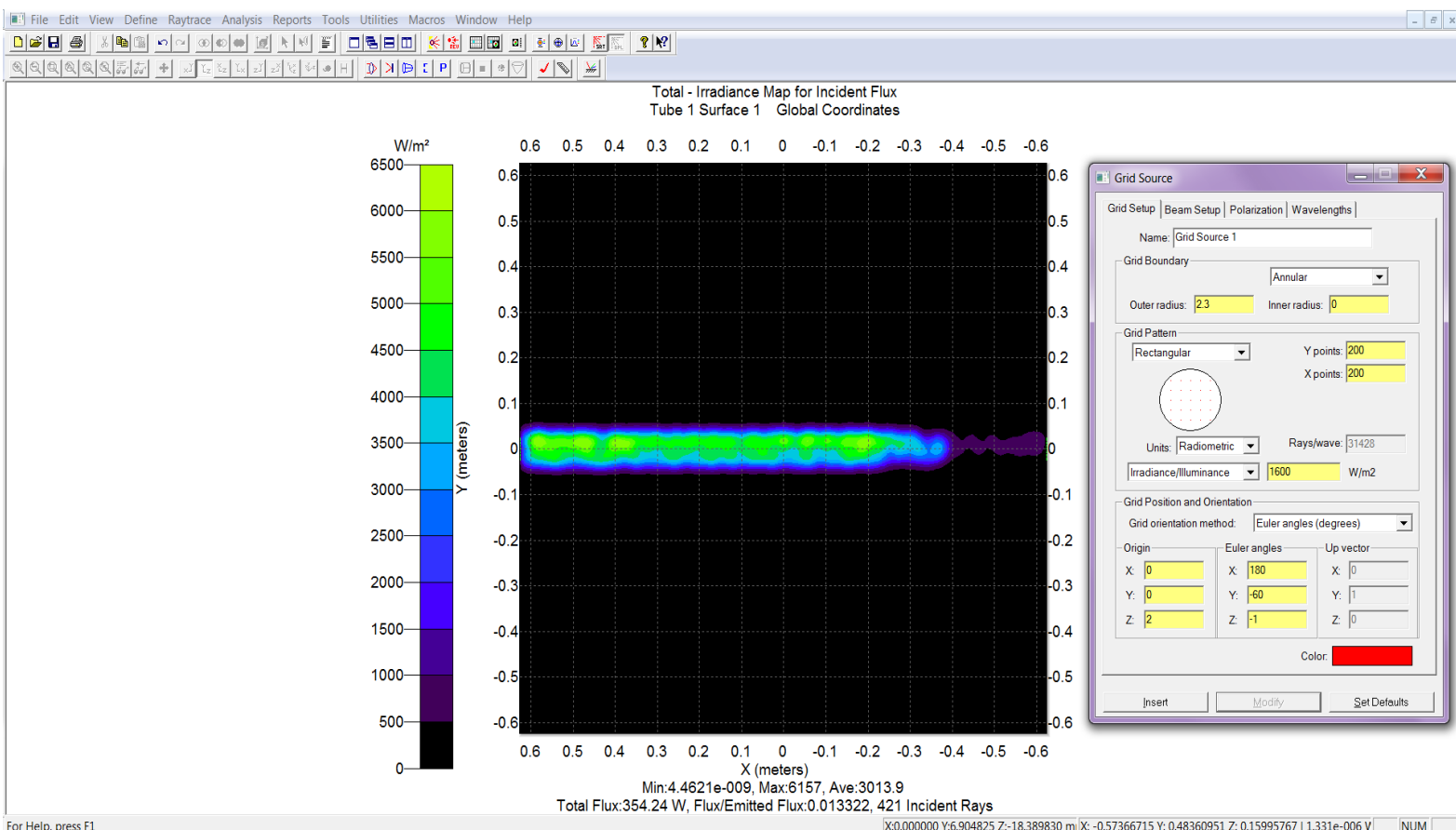


*Screenshot 4.28: Κάτοψη του συγκεντρωτικού στις 15:30 (13/5).*

## 4.6 Διαγράμματα απορρόφησης ακτινοβολίας

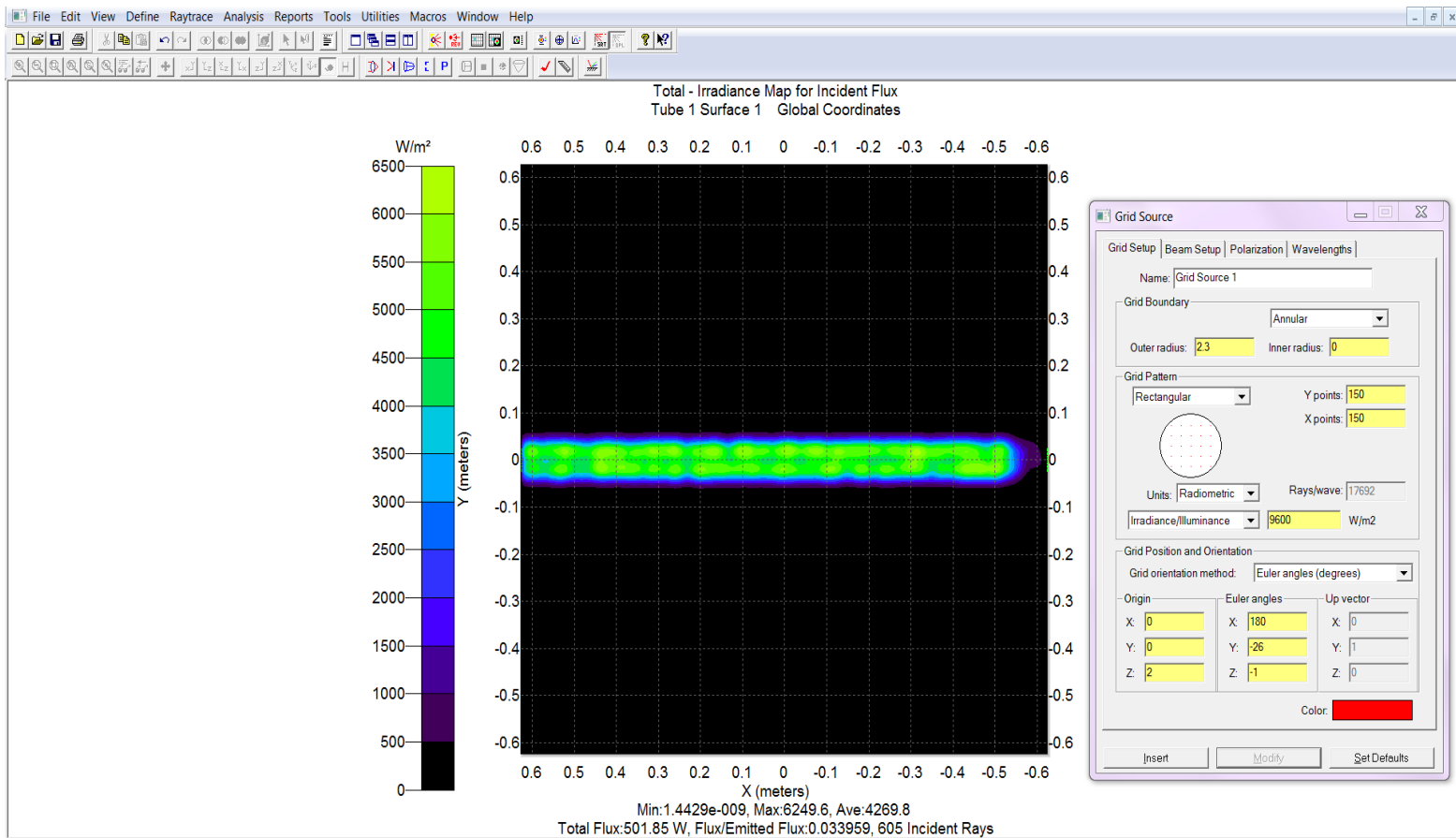
Παρακάτω παρουσιάζεται σε γραφική απεικόνιση για τις αντίστοιχες ώρες του αντίστοιχου μήνα (Μάιος) που έγινε και η προσομοίωση, η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει πάνω στον σωλήνα – απορροφητή. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται επάνω στον σωλήνα.

- Για ώρα 11:30 και για (μέσο) λόγο συγκέντρωσης 1,84 :



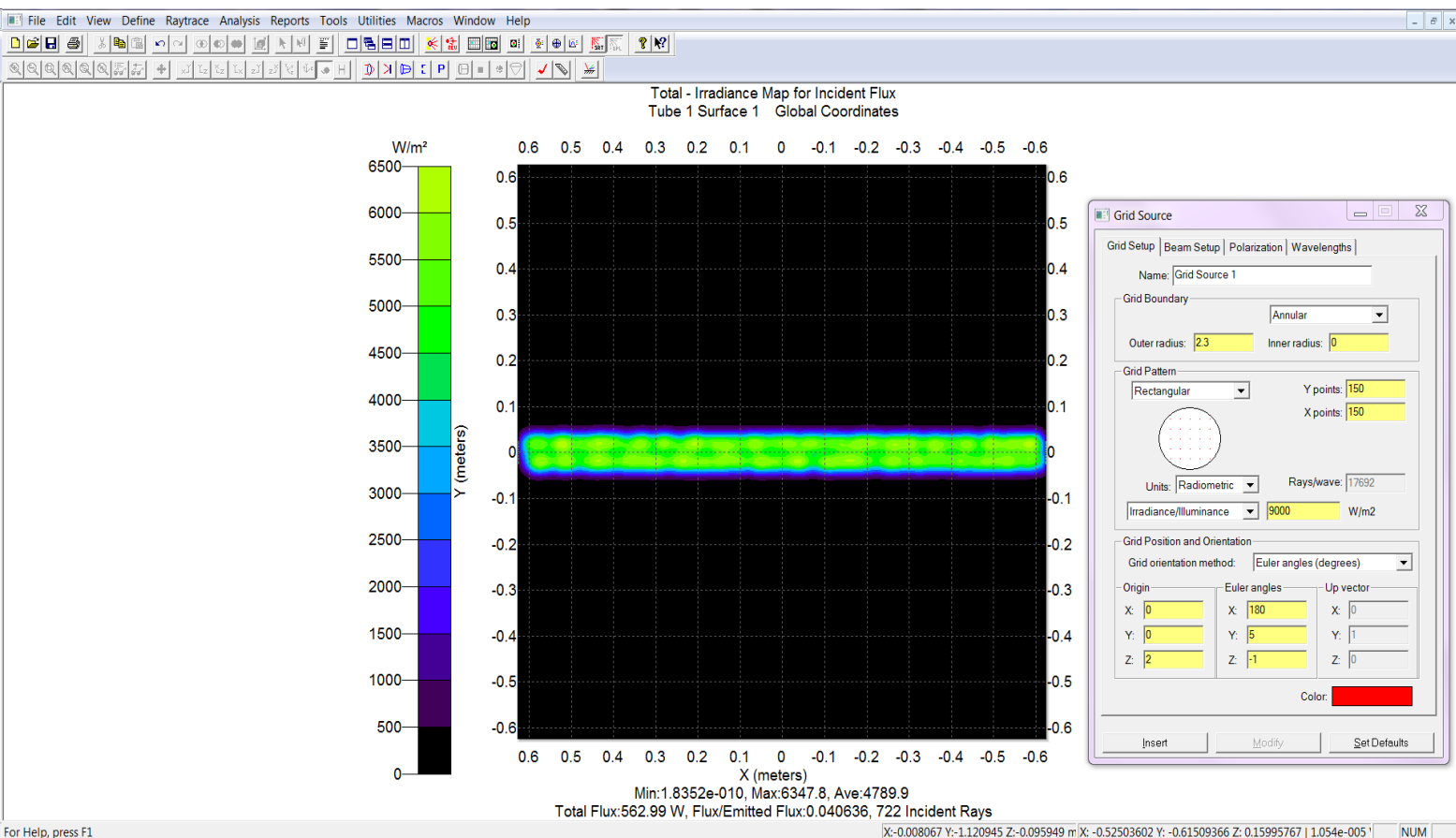
Διάγραμμα 4.29: Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 11:30 (13/5).

- Για ώρα 12:30 και για (μέσο) λόγο συγκέντρωσης 2,35:



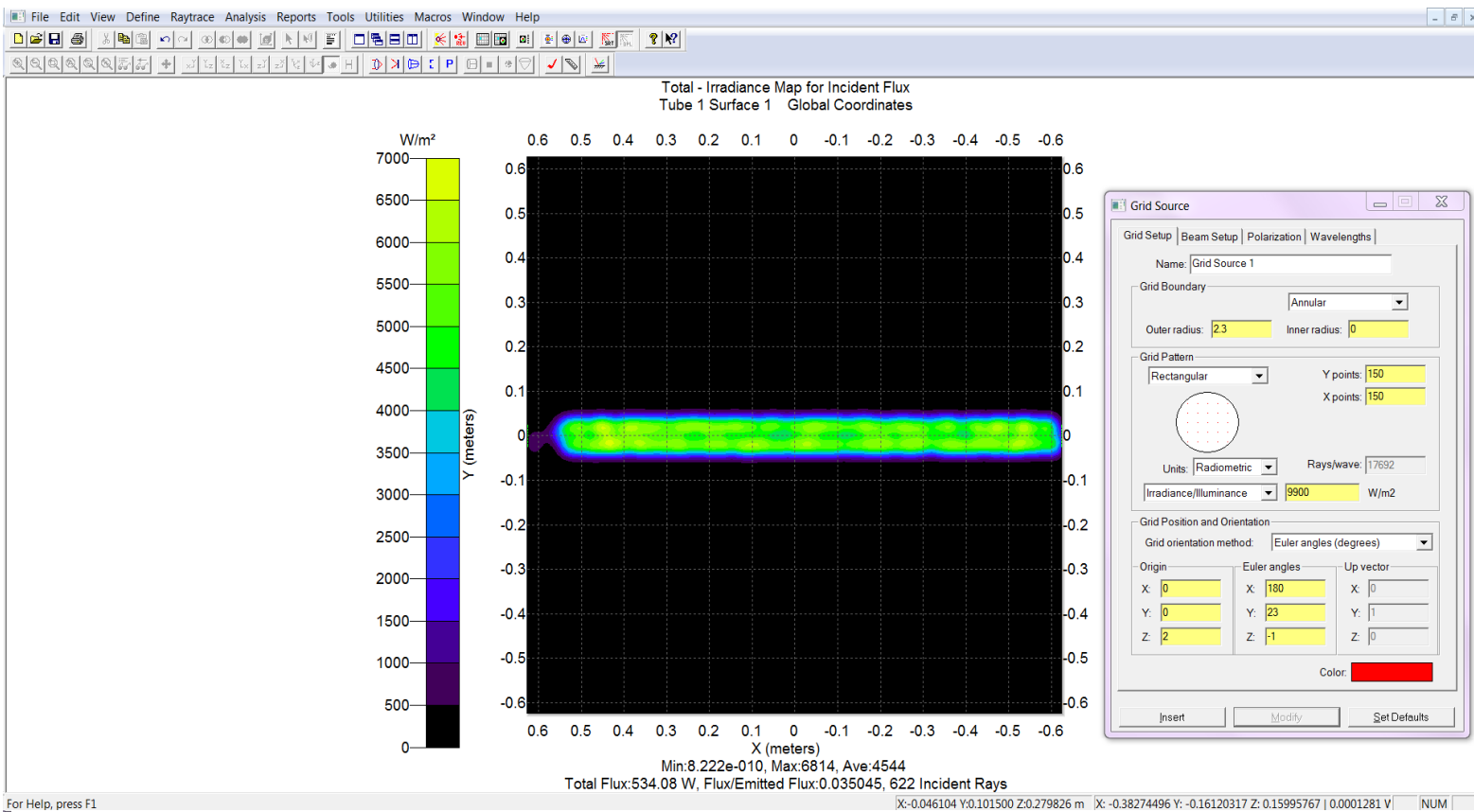
Διάγραμμα 4.30: Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 12:30 (13/5).

- Για ώρα 13:30 και για (μέσο) λόγο συγκέντρωσης 3,06



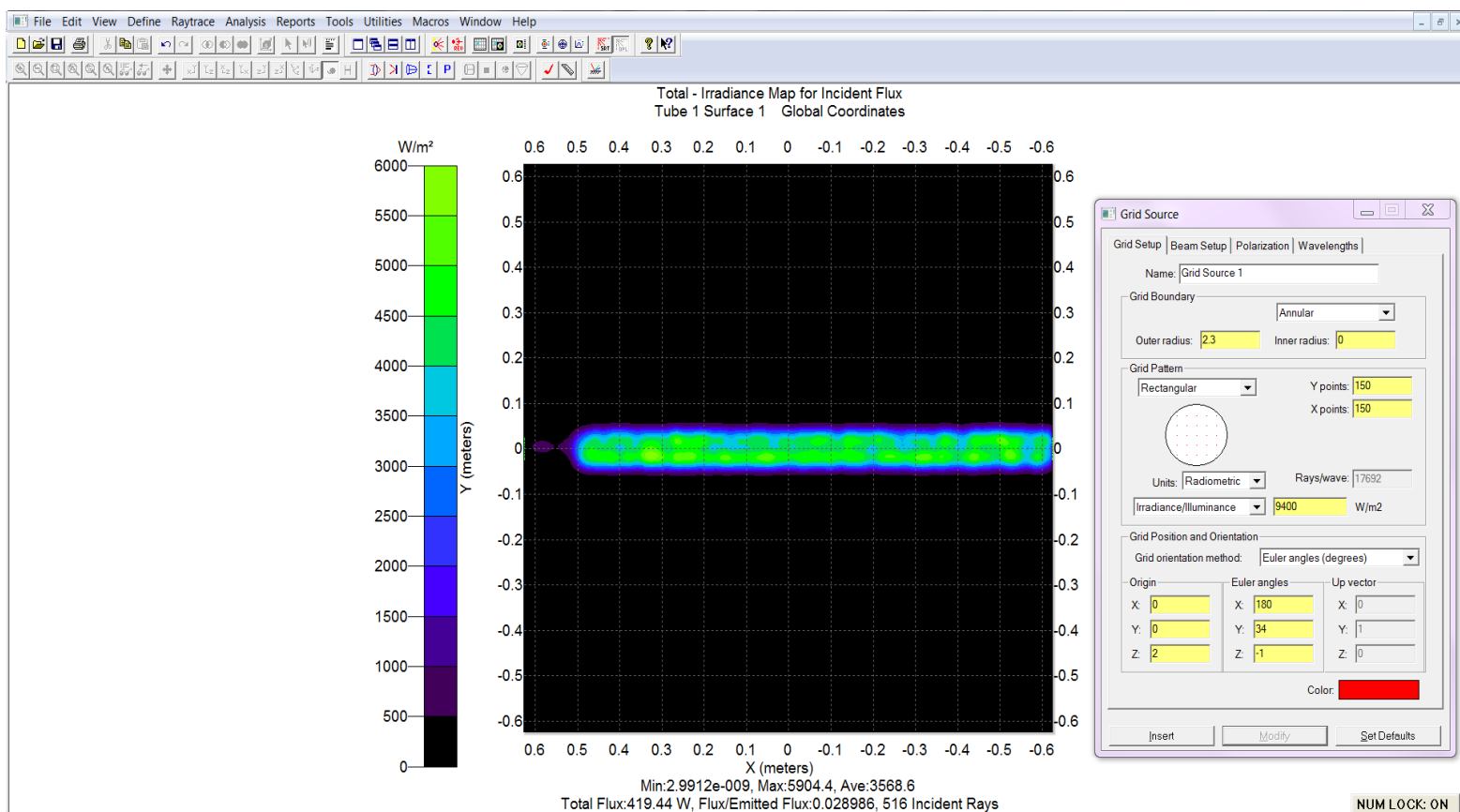
Διάγραμμα 4.31: Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 13:30 (13/5).

- Για ώρα 14:30 και για (μέσο) λόγο συγκέντρωσης 2,80:



Διάγραμμα 4.32: Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 14:30 (13/5).

- Για ώρα 15:30 και για (μέσο) λόγο συγκέντρωσης 2,71:



Διάγραμμα 4.33: Σχεδιαγραμματική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή στις 15:30 (13/5).

Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία με τα παραπάνω, και για τις υπόλοιπες χαρακτηριστικές τιμές για τον κάθε μήνα που υπήρχαν μετρήσεις, συμπληρώθηκε ο Πίνακας 4.17 όπως φαίνεται παρακάτω, με τους λόγους συγκέντρωσης.

*Πίνακας 4.34: Λόγοι συγκέντρωσης των αντιπροσωπευτικών ημερών από κάθε μήνα.*

<b>Ώρες λήψης μέτρησης</b>	<b>Απρίλιος (27/4)</b>	<b>Μάιος (13/5)</b>	<b>Ιούνιος (20/6)</b>
<b>11:30</b>	2,22	2,42	1,84
<b>12:30</b>	2,84	2,73	2,35
<b>13:30</b>	2,87	3,28	3,06
<b>14:30</b>	2,72	2,79	2,80
<b>15:30</b>	2,26	2,53	2,71

## 5. Συζήτηση

---

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την συσχέτιση των δεδομένων αλλά και από την προσομοίωση στο πρόγραμμα, μπορούν να μας οδηγήσουν σε κάποια πρώτα συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα της κατασκευής, την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αλλά και για το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε.

Αρχικά όσο αφορά στην κατασκευή, πρέπει να αναφέρουμε ότι τα χρήματα και ο χρόνος που διατέθηκαν, σε συνδυασμό με την μικρή προηγούμενη εμπειρία στον τομέα, απέφεραν ένα καλό αποτέλεσμα. Σίγουρα υπήρξαν παραλείψεις, οι οποίες οφείλονται σε έλλειψη κατάλληλων εργαλείων ακριβείας, σε έλλειψη προηγούμενης εμπειρίας γύρω από τα συγκεντρωτικά κάτοπτρα, (χαρακτηριστικά, ιδιομορφίες κλπ), αλλά και σε περιορισμένο όγκο κατασκευαστικών πληροφοριών στο διαδίκτυο και στην βιβλιογραφία. Παρ' όλα αυτά, καταφέραμε να φτιάξουμε ένα γραμμικό κάτοπτρο στο οποίο μετρήσαμε μέχρι και θερμοκρασία 110 °C (θερμοκρασία σωλήνα χωρίς κάποιο θερμικό ρευστό εσωτερικά, και χωρίς βουλώματα στα άκρα). Η θερμοκρασία αυτή αναλογεί σε λόγους συγκέντρωσης περίπου 3,5 – 4 [Τσούτσος *et al.*, 2013]. Από την διεθνή εμπειρία, αντίστοιχου τύπου βιομηχανικά γραμμικής εστίασης κάτοπτρα, φθάνουν θερμοκρασία ρευστού εντός του σωλήνα απορρόφησης έως και 400 °C (Οι λόγοι συγκέντρωσης στις περιπτώσεις αυτές φθάνουν μέχρι και 20). Η τιμή αυτή βέβαια αφορά σε βιομηχανικές εφαρμογές, και σε θερμικό ρευστό με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, υπό υψηλές πιέσεις.

Κάποιες από τις παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν επομένως ως προς το κατασκευαστικό κομμάτι συγκρίνοντας το με αντίστοιχες βιομηχανικές εφαρμογές:

- είναι το γεγονός ότι δεν είχαμε κάποια προστατευτική γυάλινη επιφάνεια που να υπερκαλύπτει τον απορροφητή, αφήνοντας μεταξύ αυτής και του σωλήνα κενό αέρος. Αυτό θα προστάτευε το σύστημά μας από τις εξωτερικές μετεωρολογικές συνθήκες (κυρίως τον αέρα). Όντας εκτεθειμένο σε αυτές, απάγεται πολύ γρήγορα θερμότητα από τον σωλήνα. Επίσης το κενό αέρος λειτουργεί ως μονωτής.
- αφορούν στις ιδιότητες του υλικού κατασκευής του απορροφητή, αλλά και στις ιδιότητες του υλικού από το οποίο κατασκευάσαμε την ανακλαστική επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα στην βιομηχανία χρησιμοποιούνται μέταλλα και βαφές με πολύ υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και απορροφητικότητα αντίστοιχα. Όσο αφορά στην ανακλαστική επιφάνεια, εμείς επιλέξαμε φύλλο INOX λόγω του βέλτιστου συνδυασμού του χαμηλού κόστους και του δείκτη ανακλαστικότητας που φθάνει περίπου στο 0,9. Επειδή δεν ήταν εφικτό να κολλήσουμε το INOX επάνω στον ξύλινο σκελετό, το βιδώσαμε με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν μικρές κοιλότητες επάνω στην επιφάνεια που με την σειρά τους ανακατεύθυναν ποσοστό της τάξης του 2-3% της ακτινοβολίας. Επίσης μια παράμετρος που έπαιξε σημαντικό ρόλο είναι το γεγονός ότι δεν είχαμε κάποιο είδος τάπας στον σωλήνα και αυτό επομένως επέτρεπε και την διόδο του ανέμου στο εσωτερικό → μείωση περαιτέρω της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας.

- έχουν να κάνουν και με τη λειτουργία του συγκεντρωτή ως θερμική μηχανή, αφού παρατηρήσαμε πολύ χαμηλές τιμές θερμικής απόδοσης. Αυτό οφείλεται σε μια σειρά παραμέτρων που αφορούν i) το θερμικό ρευστό (χρησιμοποιήσαμε νερό αντί για λάδι, άρα χαμηλότερη θερμοχωρητικότητα) ii) την πίεση στο εσωτερικό του σωλήνα (ήταν ίδια με αυτή του περιβάλλοντος, αντί να είναι αυξημένη όπως συμβαίνει στις βιομηχανικές εφαρμογές) iii) το μέγεθος του σωλήνα το οποίο ήταν μεγάλο σε σχέση με τις παροχές που επιλέξαμε να μετρήσουμε (όσο μεγαλύτερη η διάμετρος του σωλήνα, τόσο λιγότερη η πλήρωση του, επομένως τόσο μικρότερη η διεπιφάνεια επαφής του απορροφητή με το θερμικό ρευστό που είχε ως συνέπεια να μη γίνεται σωστά η απαγωγή της θερμότητας → μικρότερη απόδοση), και τέλος iv) το μικρό μήκος που είχε ο σωλήνας μέσω του οποίου διερχόταν το ρευστό. Σε θερμικές εφαρμογές, οι σωλήνες απορρόφησης έχουν αρκετά μεγάλο μήκος [Τσούτσος *et al.*, 2013].

Όσο αφορά στο πρόγραμμα, μπορούμε να πούμε ότι βάσει των δυνατοτήτων του, και για το επίπεδο της εργασίας, ήταν απόλυτα χρήσιμο και κατανοητό, παρόλο που δεν υπήρχε κάποιο εγχειρίδιο βοήθημα στα ελληνικά. Το μόνο πρόβλημα που μπορούμε να πούμε ότι παρουσιάστηκε είναι το γεγονός ότι δεν υπήρχε κάποια επιλογή που να προσομοιάζει σαν φωτεινή πηγή τον ήλιο, και την αντίστοιχη συμπεριφορά των ακτίνων του, και για να το αντιμετωπίσουμε έπρεπε να κάνουμε κάποιες παραδοχές. Αυτές αναφέρονται αναλυτικότερα στο σχετικό κεφάλαιο (4).

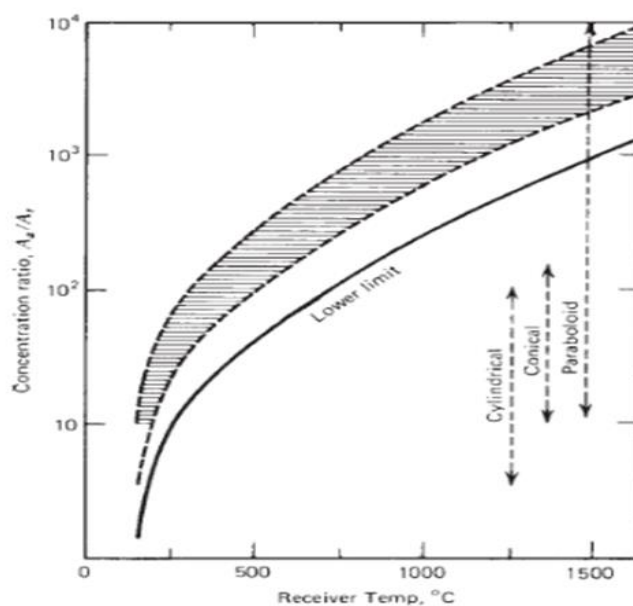
Επίσης για τις διαφορετικές ώρες που κάναμε τις μετρήσεις έπρεπε να προσαρμόσουμε και την φωτεινή πηγή ως προς το κάτοπτρο ανάλογα την κλίση που είχε εκείνη την ώρα. Επειδή οι τιμές για την κλίση στην αντίστοιχη ώρα με βάση τις οποίες προσαρμόζαμε κάθε φορά το κάτοπτρο, είναι θεωρητικές, είναι λογικό να αποκλίνουν από τις πραγματικές και έτσι να μην είναι σωστή ίσως η όποια σύγκριση ίσως προέκυπτε των πειραματικών με θεωρητικούς λόγους συγκέντρωσης.

Επιπλέον αναφορικά με την μεθοδολογία, πρέπει να πούμε πως το βασικό μεθοδολογικό λάθος που έγινε, είναι το γεγονός ότι η κατασκευή του κατόπτρου δεν έπρεπε να προηγηθεί της προσομοίωσης στο πρόγραμμα. Δηλαδή θα έπρεπε πρώτα να κάνουμε μελέτη που θα αφορούσε στην βέλτιστη γεωμετρία, το είδος του κατόπτρου, τον τρόπο εστίασης, αλλά και στο μέγεθος των επιμέρους κομματιών που χρησιμοποιήθηκαν. Για παράδειγμα, όταν έγινε η προσομοίωση του κατόπτρου, σε ιδανικές συνθήκες (απόλυτη καθετότητα φωτεινής πηγής - κατόπτρου) διαπιστώσαμε ότι λόγω της γεωμετρίας της διάταξης, δεν ήταν δυνατόν να απορροφηθούν όλες οι ακτίνες από τον απορροφητή της διαμέτρου (22mm) που είχαμε. Βέβαια, διαπιστώσαμε ότι απορροφητής μεγαλύτερου μεγέθους, θα είχε μεγαλύτερο όγκο για πλήρωση από το θερμικό ρευστό → θα είχαμε ακόμη μικρότερη θερμική απόδοση, ενώ μικρότερης διαμέτρου παρατηρήσαμε ότι θα είχαμε μεγαλύτερη απώλεια ακτινοβολίας, καθώς η επιφάνεια της δεν θα επαρκούσε. Πάντως, η τοποθέτηση του σωλήνα στο κατάλληλο ύψος έγινε αφού κάναμε την προσομοίωση και αφού είδαμε σε ποια απόσταση συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας.

Εδώ πρέπει να συμπεριλάβουμε και τα όποια σφάλματα μπορούν να λάβουν χώρα κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Ενδεχόμενα σφάλματα στα πειραματικά αποτελέσματα μπορεί να προέκυψαν είτε από αρχική έλλειψη εμπειρίας



Τέλος όσο αφορά στη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών λόγων συγκέντρωσης (που θα προέκυπταν από το *Διάγραμμα 6.1* παρακάτω) με τους αντίστοιχους θεωρητικούς (που προέκυψαν από την εξομοίωση και παρουσιάζονται στον *Πίνακα 4.5*) δεν κατέστη δυνατή. Αυτό συνέβη επειδή είχαμε μικρούς θεωρητικούς λόγους συγκέντρωσης ( $C_{\text{theor}} < 3,5$ ) αλλά και επειδή οι πειραματικοί λόγοι συγκέντρωσης εκ των πραγμάτων δεν μπορούν να υπερβαίνουν τους θεωρητικούς ( $\text{λόγος}_{\text{theor}} \geq \text{λόγος}_{\text{exp}}$ ) γιατί οι μεν κάνουν προσομοίωση της διάταξης σε ιδανικές συνθήκες ενώ οι δε περιλαμβάνουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Το μόνο ασφαλές συμπέρασμα που μπορούμε να βγάλουμε είναι ότι στην πειραματική διάταξη είχαμε σίγουρα λόγους συγκέντρωσης  $>1$ , καθώς η θερμοκρασία στην μη συγκεντρωτική επιφάνεια ήταν τις περισσότερες φορές πάνω από  $2x$ . Όπως φαίνεται και στο *Διάγραμμα 6.1* (όχι όμως με μεγάλη ακρίβεια) μπορούμε να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν όσο αφορά στους λόγους συγκέντρωσης.



Από τα παραπάνω, το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι οι προοπτικές για κατασκευή κάποιου κατόπτρου με καλύτερες αποδόσεις είναι αρκετά καλές αρκεί να δοθεί βάση στην νεοαποκτηθείσα τεχνογνωσία στον εν λόγω τομέα, μέσω της εργασίας αυτής, έτσι ώστε να γίνουν κατανοητά τα λάθη και οι παραλείψεις, και να μην επαναληφθούν. Επομένως με την κατάλληλη τεχνική και οικονομική υποστήριξη είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ένα αντίστοιχο κάτοπτρο πολύ πιο κοντά στα βιομηχανικά πρότυπα.

## 6. Συμπεράσματα

---

### 6.1. Συμπεράσματα από τη ΔΕ

Από την παρούσα εργασία, πέρα από την όποια απόκτηση εμπειρίας και τεχνογνωσίας γύρω από το αντικείμενο, καταφέραμε να βγάλουμε μια εμπειρική σχέση η οποία στηρίζεται στα αποτελέσματα που βρήκαμε κάνοντας τις μετρήσεις που αναφέρουμε παραπάνω. Στην εμπειρική αυτή σχέση, εισάγοντας ως δεδομένα την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την ταχύτητα του ανέμου αλλά και την κλίση που θεωρητικά θα έπρεπε να έχουμε στραμμένο το κάτοπτρο στην διεύθυνση Ανατολής – Δύσης για να είναι κάθετο στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, μπορούμε να πάρουμε σαν αποτέλεσμα την μέση θερμοκρασία που αναπτύσσεται επάνω στον απορροφητή. Επίσης στην κατεύθυνση Βορρά - Νότου, το κάτοπτρο πρέπει να έχει κατεύθυνση Νότια.

Για να είχαμε μεγαλύτερη και απόδοση αλλά και ακρίβεια, το σύστημά μας θα έπρεπε να είχε σύστημα Tracking (κατεύθυνση κατόπτρου πάντα κάθετη με την ακτινοβολία και στον άξονα Βορρά – Νότου και Ανατολής - Δύσης). Η απόδοση φαίνεται σχεδιαγραμματικά στα *Διαγράμματα 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7*. Εάν είχαμε το προαναφερθέν σύστημα, τα παραπάνω διαγράμματα θα ήταν σχεδόν όλα σαν το *Διάγραμμα 5.5* όπου και παρατηρείται ο μεγαλύτερος λόγος συγκέντρωσης (3,26).

Όσο αφορά στην θερμική απόδοση του συστήματος, επειδή παρατηρήσαμε πολύ μικρό συντελεστή απόδοσης προτιμότερο θα ήταν να μην χρησιμοποιηθούν τα συγκεκριμένα συστήματα με μικρούς λόγους συγκέντρωσης και μεγέθη όπως αυτά που επιλέξαμε (μήκος σωλήνα  $l = 1,25\text{ m}$  και κατοπτρική επιφάνεια  $A = 0,94\text{ m}^2$ ) σε θερμικές εφαρμογές. Από την κατανόηση του μηχανισμού μιας σωστής βιομηχανικής θερμικής εφαρμογής τέτοιων συστημάτων απαιτούνται μεγάλες κατοπτρικές επιφάνειες, αλλά και σίγουρα μεγαλύτερο μήκος σωλήνα απορροφητή προκειμένου το θερμικό υγρό που θα χρησιμοποιηθεί να έχει μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στον σωλήνα, και μεγαλύτερο μήκος διαδρομής προκειμένου να απάγει περισσότερη θερμότητα.

Ως προς την μεθοδολογία, προτείνεται να γίνει πρώτα ο όποιος σχεδιασμός κατόπτρου με χρήση σχετικού προγράμματος, η κατανόηση όσο το δυνατόν περισσότερων παραμέτρων και εννοιών που διέπουν την λειτουργία του, και στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί η όποια αγορά ή κατασκευή διάταξης είτε για μετρήσεις είτε για περαιτέρω εφαρμογές.

## **6.2. Προτάσεις για συνέχιση της εργασίας**

Από όλα τα παραπάνω συμπεράσματα που εξήχθησαν, αυτό που προτείνεται είναι είτε η διόρθωση των αστοχιών που έχουν αναφερθεί παραπάνω, στην ήδη υπάρχουσα κατασκευή και εκ νέου λήψη μετρήσεων, καλύπτοντας μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, στον βαθμό που αυτό μπορεί να καταστεί δυνατόν. Επίσης, για περαιτέρω μελέτη επάνω στον τομέα, ενδιαφέρουσα επιλογή θα ήταν η αγορά ή η κατασκευή ενός συγκεντρωτικού κατόπτρου τύπου Stirling Dish System, και η εκ νέου εκτέλεση πειραμάτων. Αυτό προτείνεται, καθώς το Parabolic Trough είναι πιο δύσκολο στο να μελετηθεί, και πειραματικά αλλά και προσομοιώνοντας το σε πρόγραμμα. Το SDC είναι σημειακής εστίασης, μπορεί να φθάσει πολύ υψηλούς λόγους συγκέντρωσης μέχρι και 1000, και ενώ είναι δυσκολότερη η κατασκευή του, είναι πολύ ευκολότερο στο να μελετηθεί, αλλά και δεν απαιτεί μεγάλη έκταση η εγκατάσταση του.

Επίσης τα συγκεκριμένα συστήματα μπορούν να αποτελέσουν την βάση για πολλές εφαρμογές πέραν της παραγωγής ενέργειας με τους τρόπους που αποσαφηνίστηκαν παραπάνω. Τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να αποτελέσουν ακόμη και διατάξεις που θα περιλαμβάνουν τα εν λόγω συστήματα με στόχο την αφαλάτωση είτε θαλασσινού είτε υφάλμυρου νερού, σε περιοχές με τα χαρακτηριστικά, αλλά και τις ανάγκες του Ελλαδικού νησιωτικού χώρου.

## 7. Βιβλιογραφία - Πηγές

---

“High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, P. Pirez-Higueras, E. Munoz, G. Almonacid, P.G. Vidal , 2011 [P. Pirez-Higueras et al., 2011]

“Intro to CPV Technology, Opportunities and Challenges”, Solar Power International Anaheim, CANREL, Sarah Kurtz , 2009 [Sarah Kurtz, 2009]

“Concentrator Photovoltaics”, Springer Series in Optical Sciences 130, Antonio Luque, Viacheslav Andreev, 2007 [Luque et al., 2007]

“A Review of Solar Photovoltaic Concentrators”, *Review Article*, Mehrdad Khamooshi, Hana Salati, Fuat Egelioglu, Ali Hooshyar Faghiri, Judy Tarabishi and Saeed Babadi, 2014 [Mehrdad et al., 2014]

“Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015) 996–1027, Dhyia Aidroos Baharoon, Hasimah Abdul Rahman, Wan Zaidi Wan Omar, Saeed Obaid Fadhl. [Dhyia Aidroos et al., 2015]

“Design, Construction, and Test of a Miniature Parabolic Trough Solar Concentrator” Donald Jeremy Gaitan, 2012 [Gaitan, 2012]

“Μοντελοποίηση κυλινδροπαραβολικών Συλλεκτών”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Βάγιος Α. Μπαρκιτζόγλου, Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος, 2012 [Μπαρκιτζόγλου et al., 2012]

“CALCULATION OF MONTHLY AVERAGE INSOLATION ON TILTED SURFACES A REVIEW PAPER” Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, U.S.A. , S. A. KLEIN, 1976 [S. A. KLEIN, 1976]

“ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας Πολυτεχνείου Κρήτης, Νικόλαος Σαββάκης, Θεοχάρης Τσούτσος, 2014 [Σαββάκης et al., 2014]

“Optical, geometric and thermal study for solar parabolic concentrator efficiency improvement under Tunisia environment: A case study”, *Energy Conversion and*

Management 75 (2013) 366–373, Safa Skouri, Mohieddine Ben Salah, Salwa Bouadila, Moncef Balghouthi, Sassi Ben Nasrallah, 2013 [Skouri et al., 2013]

*“Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Τεχνολογίες και περιβάλλον”*, Θεοχάρης Τσούτσος, Ιωάννης Κανάκης, 2013 [Τσούτσος et al., 2013]

*“Technical and economical evaluation of solar thermal power generation”*, Renewable Energy 28(6), 873-886, Τσούτσος Θ., Μαркеτάκη Κ. και Γκέκας Β., 2003 [Τσούτσος et al., 2013]

*“Sustainable assessment of a solar thermal power project in Mediterranean. Application in the island of Crete”*, Ecological Indicators, 18, 379-386, Φράγκου Μαρία, Τσούτσος Θεοχάρης, Σακελλαρίου Νικόλαος, July 2012 [Φράγκου et al., 2012]

*“Innovative optics for Concentrating Photovoltaic/Thermal (CPVT) systems. The case of PROTEAS Solar Polygeneration System”*, International Journal of Sustainable Energy, Παπαδόπουλος Αλέξανδρος, Τσούτσος Θεοχάρης, Φράγκου Μαρία, Καλαιτζάκης Κωνσταντίνος, Στεφανάκης Νικόλαος, Μπουντούβης Αντρέας, Σεπτέμβριος 2015 [Παπαδόπουλος et al., 2015]

Επίσης από το διαδίκτυο χρησιμοποιήσαμε και κάποιες διευθύνσεις, εκ των οποίων οι πιο βασικές αναφέρονται παρακάτω, αλλά και μέσα στο κείμενο με σχετική αρίθμηση:

[1] <http://www.lambdares.com/features>

[2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ray\\_tracing](https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing)

[3] <http://www.nrel.gov/midc/solpos/solpos.html>

# Παράρτημα

---

Πίνακας 1:

	1	2	3
$n_{en}$	0,00106	0,00217	0,00055
$Q_u$	0,00020	0,00041	0,00011
$m$	0,00004	0,00009	0,00003
$I_h$	796,18	803,7	799
$T_{in}$	29,66	29,02	27,2
$T_{out}$	34,72	33,86	31,06
$C_p$	4186	4186	4186
$A_a$	0,94	0,94	0,94
$E$	847	855	850