



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Προσομοίωση Ηλιοστάτη με Ray Trace
(Tonatiuh)”

ΟΝΟΜΑ: ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ ΑΓΓΕΛΟΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ :02114324

ΕΞΑΜΗΝΟ : 10^ο

ΚΥΚΛΟΣ : ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ , ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΤΟΜΕΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Αθήνα, 28/6/2019

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άτομα τα οποία με βοήθησαν τόσο στην διεκπεραίωση των σπουδών μου, αλλά και σε εκείνα τα οποία με βοήθησαν στην επιλογή και ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κύριο Χρήστο Τζιβανίδη για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την όλη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνεισέφεραν όλα αυτά τα χρόνια να αποκτήσω όλες τις επιστημονικές γνώσεις για την ολοκλήρωση των σπουδών μου και της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω, από τα βάθη της καρδιάς μου, την οικογένειά μου. Η διαρκής στήριξη και συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου ήταν μεγίστης σημασίας για μένα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	7
Abstract.....	9
Κατάλογος Σχημάτων.....	11
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	13
Κατάλογος Πινάκων.....	15
Ονοματολογία.....	17
<u>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</u>	
1.1 Ηλιακή ενέργεια.....	19
1.1.1 Γενικά περί ηλιακής ενέργειας.....	19
1.1.2 Ηλιακή ακτινοβολία.....	19
1.1.3 Ηλιακή απόκλιση δ	20
1.1.4 Ηλιακό ύψος 90-γωνία ζενίθ (Θ_z).....	20
1.1.5 Αζιμούθιο επιφάνειας γ	21
1.1.6 Κλίση επιπέδου β	21
1.2 Ηλιακό πάρκο.....	21
1.2.1 Ηλιοστάτες.....	22
1.2.2 Δέκτες.....	23
1.2.2.1 Εξωτερικοί δέκτες.....	23
1.2.2.2 Δέκτες κοιλότητας (εσωτερική).....	24
1.2.2.3 Ογκομετρικοί δέκτες.....	25
1.2.2.4 Ογκομετρικοί δέκτες υπό πίεση.....	26
1.2.3 Ηλιακός Πύργος.....	26
1.2.4 Διάταξη Πεδίου.....	27
1.2.5 Απώλειες Πεδίου.....	28
<u>Κεφάλαιο 2: Tonatiuh</u>	
2.1. Γενικά στοιχεία του ανοικτού λογισμικού.....	29
2.1.1 Σφαιρική εικόνα.....	29
2.1.2 Χαρακτηριστικά.....	29
2.1.3 Γενική δομή του προγράμματος.....	30
2.1.4 Αναλυτική περιγραφή σχεδιασμού του Tutorial στο Tonatiuh.....	32
2.1.4.1 Χαρακτηριστικά του συστήματος.....	32
2.1.4.2 Μοντελοποίηση του ανοίγματος εισόδου κεντρικού δέκτη.....	33
2.1.4.3 Μοντελοποίηση του πύργου.....	35
2.1.4.4 Μοντελοποίηση διάταξης ηλιοστατών.....	37
2.1.4.4.1 Διάταξη ηλιοστατών.....	37
2.1.4.4.2 Ηλιοστάτης.....	40
2.1.4.5 Μοντελοποίηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.....	43
2.1.4.6 Υπολογισμός της συγκεντρωμένης ηλιακής ροής στο άνοιγμα εισόδου του κεντρικού δέκτη.....	45

2.2 Συγκριτική μελέτη αποτελεσμάτων με ένα αντίστοιχο σύστημα στην Καλιφόρνια.....	47
2.3 Αποτελέσματα υπολογιστικής και θεωρητικής μελέτης για το ‘In House’ μοντέλο ηλιακού πάρκου στην περιοχή του Ελληνικού (CSP).....	50
<u>Κεφάλαιο 3: Κύκλος Rankine και ηλεκτροπαραγωγή</u>	
3.1 Θεωρία.....	64
3.1.1 Απλός κύκλος Rankine.....	64
3.2 Σύζευξη και αποτελέσματα.....	66
3.2.1 Υπολογισμοί κύκλου Rankine.....	66
<u>Κεφάλαιο 4: Οικονομική Ανάλυση</u>	
4.1 Levelized Cost of Energy (LCOE): Δείκτης σταθμισμένου κόστους ενέργειας.....	71
4.2 Νεκρό σημείο (Dead Point).....	71
4.3 Net Present Value (NPV) : Καθαρή παρούσα αξία.....	71
4.4 Internal Rate of Return (IRR) : Εσωτερική απόδοση μιας επένδυσης.....	71
<u>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα</u>	74
Βιβλιογραφία.....	76
Παράρτημα.....	77

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ηλιακού πάρκου στην περιοχή του Ελληνικού, στο οποίο θα επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας στο δέκτη. Η μοντελοποίηση του πάρκου έγινε με το ελεύθερο λογισμικό Tonnatiuh. Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε μια πρώτη προσπάθεια ανάπτυξης και σύγκρισης με μία ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση ηλιακού πάρκου στο χώρο ενός πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας με στόχο την εξακρίβωση σωστών αποτελεσμάτων του προγράμματος (Benchmarking). Στη συνέχεια σχεδιάστηκαν διάφορες διατάξεις (τυχαίες διασποράς και ακτινικές) ηλιοστατών στο χώρο του πάρκου διαστάσεων 260m x 170m για την εύρεση της βέλτιστης διάταξης ως προς την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλιακής και κατ' επέκταση ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης έγινε παραμετροποίηση ως προς το μέγεθος, τον αριθμό των ηλιοστατών καθώς και το μέγεθος του δέκτη στον πύργο. Μία καθοριστική παράμετρος του προγράμματος για εύρεση σταθερής λύσης χωρίς σημαντικά σφάλματα (0,113%) είναι η ανεξαρτησία της ως προς τον αριθμό των ακτινών που προσπίπτουν στους ηλιοστάτες. Η μελέτη αφορά την χρονική περίοδο ενός έτους του 2018 κατά την οποία παρουσιάζονται αποτελέσματα ηλιακής ισχύος (KW) σε συνάρτηση των ωρών της 15^{ης} ημέρας κάθε μηνός.

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας έγινε μοντελοποίηση μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του θεωρητικού κύκλου Rankine, κορεσμένου ατμού με προθερμάνσεις, με δεδομένα στοιχεία (υψηλή-χαμηλή πίεση και θερμοκρασία) μιας ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης ηλιακού πάρκου στην Σεβίλλη της Ισπανίας. Παρουσιάζονται αποτελέσματα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και της παροχής μάζας σε συνάρτηση των ωρών της 15^{ης} ημέρας κάθε μηνός. Τέλος υπολογίστηκε ο ηλεκτρικός και συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος έγινε μία στοιχειώδης οικονομική ανάλυση για τη βιωσιμότητα του έργου με βάση τους παρακάτω οικονομικούς δείκτες: το σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE), τη καθαρή παρούσα αξία (NPV) και την εσωτερική απόδοση της επένδυσης (IRR). Τα αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά και λογικά για την ανάπτυξη μιας τέτοιας εγκατάστασης.

Abstract

This thesis presents a simple model of a small scale Concentrated Solar Power plant (CSP) located at the Hellenic area in Southern Athens, at 38° (Latitude) and 23° (Longitude). The CSP is designed to produce approximately a maximum of 760 KW electrical power. Numerical experiments have been done used Tonatiuh, an open source free-to-use program that is based on Monte Carlo Ray Tracing analysis. In order to maximize the solar power and thus the electrical power produced, different optical simulations have been done to find the most efficient field layout of heliostats and optimal receiver size. This work concerns a comparison of flux distribution the 15th day of each month for a whole year.

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Σκαρίφημα Ήλιου-γης.....	20
Σχήμα 2. Γωνία ξενίθ θ_z , ηλιακό ύψος $90^\circ - \theta_z$, αζιμούθιο επιφάνειας γ , αζιμούθιο ήλιου γ_s και κλίση επιπέδου β	21
Σχήμα 3. Ηλιακό πάρκο στην Ισπανία.....	22
Σχήμα 4. Δομή και χαρακτηριστικά ηλιοστάτη.....	23
Σχήμα 5. Εξωτερικός δέκτης.....	24
Σχήμα 6. Δέκτης κοιλότητας.....	25
Σχήμα 7. Ογκομετρικός δέκτης πίεσης.....	26
Σχήμα 8. Δύο είδη πύργου.....	27
Σχήμα 9. Βέλτιστη διάταξη πεδίου (Ακτινική).....	28
Σχήμα 10. Γραφικό περιβάλλον Tonatiuh.....	30
Σχήμα 11. Προσδιορισμός Ήλιου.....	31
Σχήμα 12. Αριθμός ακτίνων.....	31
Σχήμα 13. 'Τρέξιμο' του Προγράμματος.....	32
Σχήμα 14. Διάταξη πεδίου tutorial.....	33
Σχήμα 15. Μοντελοποίηση πύργου και δέκτη.....	36
Σχήμα 16. Δημιουργία ηλιοστατών (1).....	42
Σχήμα 17. Δημιουργία ηλιοστατών (2).....	43
Σχήμα 18. 'Τεστάρω' το πρόγραμμα.....	45
Σχήμα 19. Διάταξη Tutorial.....	46
Σχήμα 20. Ray Traced Διάταξη Tutorial.....	46
Σχήμα 21. Κανονική διάταξη Καλιφόρνιας.....	47
Σχήμα 22. Ακτινική διάταξη Καλιφόρνιας.....	48
Σχήμα 23. Τυχαία Διάταξη 65 (Ηλιοστάτες) x 100 m ² (Επιφάνεια).....	50
Σχήμα 24. Τυχαία Διάταξη 65 (Ηλιοστάτες) x 81 m ² (Επιφάνεια).....	51
Σχήμα 25. Τυχαία Διάταξη 56 (Ηλιοστάτες) x 100 m ² (Επιφάνεια).....	52
Σχήμα 26. Ακτινική Διάταξη (1) 56 (Ηλιοστάτες) x 100 m ² (Επιφάνεια).....	53
Σχήμα 27. Ακτινική Διάταξη (1) 56 (Ηλιοστάτες) x 121 m ² (Επιφάνεια).....	54
Σχήμα 28. Ακτινική Διάταξη (2) 122 (Ηλιοστάτες) x 36 m ² (Επιφάνεια).....	56
Σχήμα 29. Ακτινική Διάταξη (2) 122 (Ηλιοστάτες) x 49 m ² (Επιφάνεια).....	56
Σχήμα 30. Ακτινική Διάταξη (3) 90 (Ηλιοστάτες) x 64 m ² (Επιφάνεια).....	57
Σχήμα 31. Ακτινική Διάταξη (3) 90 (Ηλιοστάτες) x 81 m ² (Επιφάνεια).....	57
Σχήμα 32. Ακτινική Διάταξη (3) 90 (Ηλιοστάτες) x 72,25 m ² (Επιφάνεια).....	58
Σχήμα 33. Ακτινική Διάταξη (3) Ray Traced (1) 90 (Ηλιοστάτες) x 81 m ² (Επιφάνεια).....	59
Σχήμα 34. Ακτινική Διάταξη (3) Ray Traced (2) 90 (Ηλιοστάτες) x 81 m ² (Επιφάνεια).....	59
Σχήμα 35. Ακτινική Διάταξη (3) Ray Traced (3) 90 (Ηλιοστάτες) x 81 m ² (Επιφάνεια).....	60
Σχήμα 36. Απλός κύκλος Rankine.....	65
Σχήμα 37. Διάγραμμα κύκλου Rankine σε περιβάλλον Gate Cycle.....	66

Σχήμα 38. Πρόχειρο σκαρίφημα τυχαίας διάταξης ηλιοστατών 65x100m ²	77
Σχήμα 39. Πρόχειρο σκαρίφημα ακτινικής διάταξης (1) ηλιοστατών 56x100m ²	78
Σχήμα 40. Πρόχειρο σκαρίφημα ακτινικής διάταξης (2) ηλιοστατών 122x36m ²	79
Σχήμα 41. Πρόχειρο σκαρίφημα ακτινικής διάταξης (3) ηλιοστατών 90x64m ²	80

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Ηλιακή ενέργεια στη διάταξη Καλιφόρνιας κατά τη διάρκεια της 15 ^{ης} Ιουνίου 2018.....	48
Διάγραμμα 2. Διάγραμμα απεικόνισης ανεξαρτησίας ακτινών σε σχέση με το σφάλμα.....	49
Διάγραμμα 3. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς το μέγεθος του δέκτη.....	51
Διάγραμμα 4. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς το μέγεθος του ηλιοστάτη.....	52
Διάγραμμα 5. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς τον αριθμό ηλιοστατών.....	53
Διάγραμμα 6. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Ακτινικής Διάταξης ως προς το μέγεθος του ηλιοστάτη.....	54
Διάγραμμα 7. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς την Ακτινική Διάταξη.....	55
Διάγραμμα 8. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς την Ακτινική Διάταξη με ίδια εργαζόμενη επιφάνεια.....	55
Διάγραμμα 9. Αποτελέσματα Ανάλυσης Ηλιακής ενέργειας για την 15 ^η Ιουνίου του 2018.....	58
Διάγραμμα 10. Μηνιαία πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (G σε W/m^2) στην Αθήνα.....	61
Διάγραμμα 11. Αποτελέσματα Ανάλυσης Ηλιακής ενέργειας Ιανουάριος-Ιούνιος.....	62
Διάγραμμα 12. Αποτελέσματα Ανάλυσης Ηλιακής ενέργειας Ιούλιος - Δεκέμβριος.....	62
Διάγραμμα 13. Απλό διάγραμμα T-s κύκλου Rankine με κορεσμένο ατμό.....	65
Διάγραμμα 14. Παραγόμενη Ηλεκτρική ενέργεια Ιανουάριος-Ιούνιος.....	69
Διάγραμμα 15. Παραγόμενη Ηλεκτρική ενέργεια Ιούλιος -Δεκέμβριος.....	70
Διάγραμμα 16. Παροχή μάζας νερού Ιανουάριος-Ιούνιος.....	70
Διάγραμμα 17. Παροχή μάζας νερού Ιούλιος-Δεκέμβριος.....	70

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Απώλειες Πεδίου.....	28
Πίνακας 2. Ιδιότητες Target Frame (1).....	34
Πίνακας 3. Ιδιότητες Target Frame (2).....	34
Πίνακας 4. Ιδιότητες Target Frame (3).....	35
Πίνακας 5. Ιδιότητες Tower Frame (1).....	35
Πίνακας 6. Ιδιότητες Tower Frame (2).....	36
Πίνακας 7. Ιδιότητες διάταξης ηλιοστατών (1).....	37
Πίνακας 8. Ιδιότητες διάταξης ηλιοστατών (2).....	38
Πίνακας 9. Ιδιότητες διάταξης ηλιοστατών (3).....	39
Πίνακας 10. Ιδιότητες Ηλιοστάτη.....	41
Πίνακας 11. Ιδιότητες Ήλιου (1).....	44
Πίνακας 12. Ιδιότητες Ήλιου (2).....	44
Πίνακας 13. Αποτελέσματα Ανάλυσης Tonatiuh 15 ^η Ιουνίου (13:00) του 2018.....	61
Πίνακας 14. Αποτελέσματα Ιουνίου Excel.....	63
Πίνακας 15. Αποτελέσματα Ανάλυσης 15 ^η Ιουλίου (14:00) του 2018.....	69
Πίνακας 16. Συγκεντρωτικός πίνακας υπολογισμών μηνιαίας ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και εσόδων σε € χωρίς το επιτόκιο αναγωγής	72
Πίνακας 17. Συγκεντρωτικός πίνακας υπολογισμού κόστους ηλιοστατών της εγκατάστασης.....	72
Πίνακας 18. Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών αποτελεσμάτων οικονομικής ανάλυσης.....	73
Πίνακας 19. Αποτελέσματα Ιουλίου Excel.....	81
Πίνακας 20. Αποτελέσματα Αυγούστου Excel.....	82
Πίνακας 21. Αποτελέσματα Μαρτίου Excel.....	83
Πίνακας 22. Αποτελέσματα Απριλίου Excel.....	84
Πίνακας 23. Αποτελέσματα Μαΐου Excel.....	85
Πίνακας 24. Αποτελέσματα Σεπτεμβρίου Excel.....	86
Πίνακας 25. Αποτελέσματα Οκτωβρίου Excel.....	87
Πίνακας 26. Αποτελέσματα Νοεμβρίου Excel.....	88
Πίνακας 27. Αποτελέσματα Δεκεμβρίου Excel.....	89
Πίνακας 28. Αποτελέσματα Ιανουαρίου Excel.....	90
Πίνακας 29. Αποτελέσματα Φεβρουαρίου Excel.....	91

Ονοματολογία (nomenclature)

H	υδρογόνο
He	ήλιο
Gsc	ηλιακή σταθερά
Θ_z	γωνία ζενίθ, °
φ_s	αζιμούθιο ηλίου, °
mph	μίλια ανά ώρα
g	γραμμάρια
m	μέτρα
G	μηνιαία πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, W/m ²
h	ενθαλπία, KJ/Kg
Δh	διαφορά ενθαλπίας, KJ/Kg
T	θερμοκρασία, °C
Q	θερμική ισχύς, KW
Pel	ηλεκτρική ισχύς, KW

Ελληνικά σύμβολα

δ	απόκλιση, °
γ	αζιμούθιο επιφάνειας, °
β	κλίση επιπέδου, °
η	βαθμός απόδοσης

Δείκτες

z	ζενίθ
is	ισεντροπική μεταβολή
gen	γεννήτρια
tot	συνολικό
T	στρόβιλος
P	αντλία
el	ηλεκτρική

Συντομογραφίες

AU	αστρονομική απόσταση = 149597871 χιλιόμετρα
HP	υψηλή πίεση
LP	χαμηλή πίεση
LCOE	Δείκτης σταθμισμένου κόστους ενέργειας
NPV	Καθαρή παρούσα αξία
IRR	Εσωτερική απόδοση μιας επένδυσης
Ext	απομάστευση
CSP	concentrated solar power

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ηλιακή ενέργεια

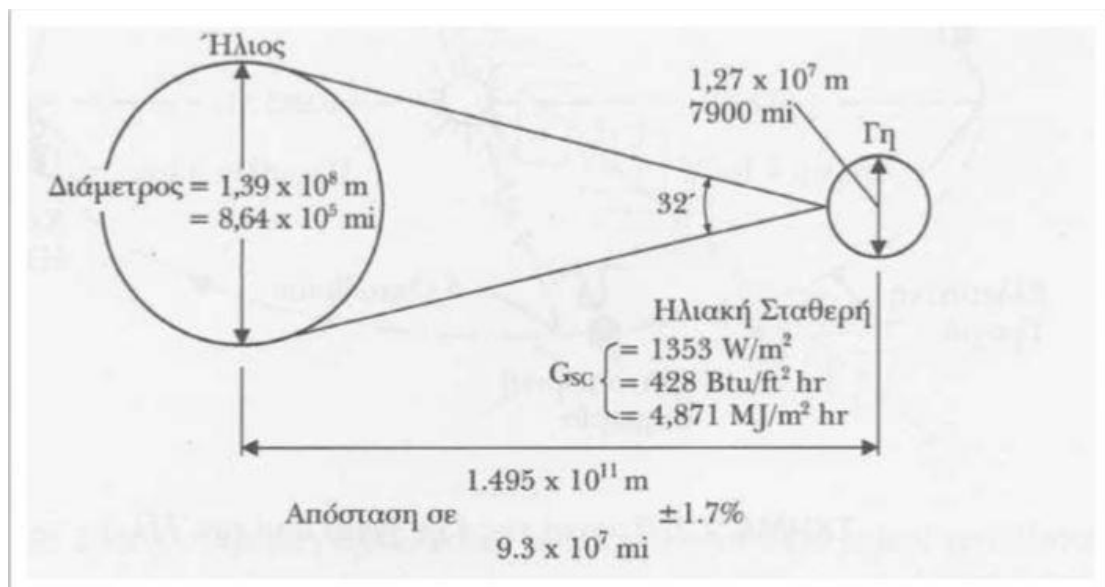
1.1.1 Γενικά περί ηλιακής ενέργειας

Ο Ήλιος είναι η βασική πηγή ενέργειας του πλανήτη μας. Ο Ήλιος είναι απλανής αστέρας μέσου μεγέθους που λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών των στοιχείων που τον συνθέτουν, μεταξύ των οποίων και το υδρογόνο, τα μόρια αλλά και τα άτομά τους βρίσκονται σε μια κατάσταση " νέφους " θετικών και αρνητικών φορτίων ή κατάσταση πλάσματος, όπως ονομάστηκε. Σ' αυτές τις θερμοκρασίες, μερικών εκατομμυρίων °C, οι ταχύτατα κινούμενοι πυρήνες υδρογόνου (H) συσσωματώνονται, υπερνικώντας τις μεταξύ τους απωστικές ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και δημιουργούν πυρήνες του στοιχείου ηλίου (He). Η πυρηνική αυτή αντίδραση σύντηξης πυρήνων είναι εξώθερμη και χαρακτηρίζεται από τη γνωστή μας έκλυση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας ή θερμότητας ή όπως συνηθίζεται να λέγεται, ηλιακής ενέργειας, που ακτινοβολείται προς όλες τις κατευθύνσεις στο διάστημα. Αν και αυτό συμβαίνει συνεχώς εδώ και 5 δισεκατομμύρια χρόνια περίπου, ο ήλιος διαθέτει τεράστιες ποσότητες υδρογόνου και δεν αναμένεται να υπάρξει μείωση της ενέργειας που ακτινοβολείται από αυτόν. Στο μεγαλύτερο τμήμα της χώρα μας η ηλιοφάνεια διαρκεί περισσότερες από 2700 ώρες το χρόνο. Στη Δυτική Μακεδονία και την Ήπειρο εμφανίζει τις μικρότερες τιμές κυμαινόμενη από 2200 ως 2300 ώρες, ενώ στη Ρόδο και τη νότια Κρήτη ξεπερνά τις 3100 ώρες ετησίως. Η κύρια και πρωταρχική πηγή ενέργειας για τη γη είναι ο Ήλιος μας [6].

1.1.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Με μια καλή προσέγγιση, ο ήλιος συμπεριφέρεται σαν μια τέλεια πηγή εκπομπής ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε μια θερμοκρασία κοντά στους 5800K. Το αποτέλεσμα της ενέργειας αυτής που εκπέμπει ο ήλιος κατακόρυφα πάνω σε μια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα της γης που απέχει 1 AU από τον ήλιο είναι γνωστή σαν ηλιακή σταθερά $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$. Η ακτινοβολία που πέφτει σε ένα συλλέκτη πάνω από την ατμόσφαιρα της γης, γνωστή σαν "extraterrestrial radiation", αποκλειστικά και μόνο από ακτινοβολία που ταξιδεύει σε μια ευθεία γραμμή από τον ήλιο. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης επιδέχεται κάποιες μετατροπές αλληλεπιδρώντας με διάφορα συστατικά της. Κάποια από αυτά, όπως τα σύννεφα, την αντανακλούν όμως το όζον, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα την απορροφούν. Οι σταγόνες του νερού και τα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης προκαλούν σκέδαση. Το αποτέλεσμα όλων αυτών των διαδικασιών είναι αποσύνθεση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα δέκτη στην επιφάνεια της γης σε καθαρά διαφοροποιούμενα συστατικά. Η "απευθείας" ή "ακτινική" ακτινοβολία (Direct or Beam radiation), προσπίπτει κατευθείαν στην επιφάνεια του

συλλέκτη χωρίς αντανάκλαση ή διασπορά. Η "διάχυτη" ακτινοβολία (Diffuse radiation), είναι όλη η υπόλοιπη ακτινοβολία που προέρχεται από αυτήν που διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Η ολική ακτινοβολία που πέφτει σε μια επιφάνεια είναι το άθροισμα των παραπάνω και είναι γνωστή σαν "συνολική" ακτινοβολία (Global radiation). Επί πλέον, όταν ο συλλέκτης εγκαθίσταται με κλίση προς το οριζόντιο επίπεδο, όπως και συνηθίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, προστίθεται και ένα μικρό σχετικά ποσοστό προερχόμενο από ανάκλαση σε παρακείμενα αντικείμενα (Albedo radiation). Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας, προέρχεται από την ακτινική ακτινοβολία, σημαντική είναι όμως και η συμβολή της διάχυτης[6].



Σχήμα 1. Σκαρίφημα Ήλιου-γης [6]

1.1.3 Ηλιακή απόκλιση δ

Είναι η γωνιακή θέση του Ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$, με θετικές τιμές προς το βορρά. Κατά τη διάρκεια ενός 24ωρου, η μέγιστη μεταβολή του (δ) είναι μικρότερη της $0,5^\circ$. Συνεπώς, εάν η ηλιακή απόκλιση θεωρηθεί σταθερή για 24 ώρες, προκύπτει μέγιστο σφάλμα στους υπολογισμούς των άλλων ηλιακών γωνιών, μεγέθους $0,5^\circ$ [6].

1.1.4 Ηλιακό ύψος 90-γωνία ζενίθ (Θ_z)

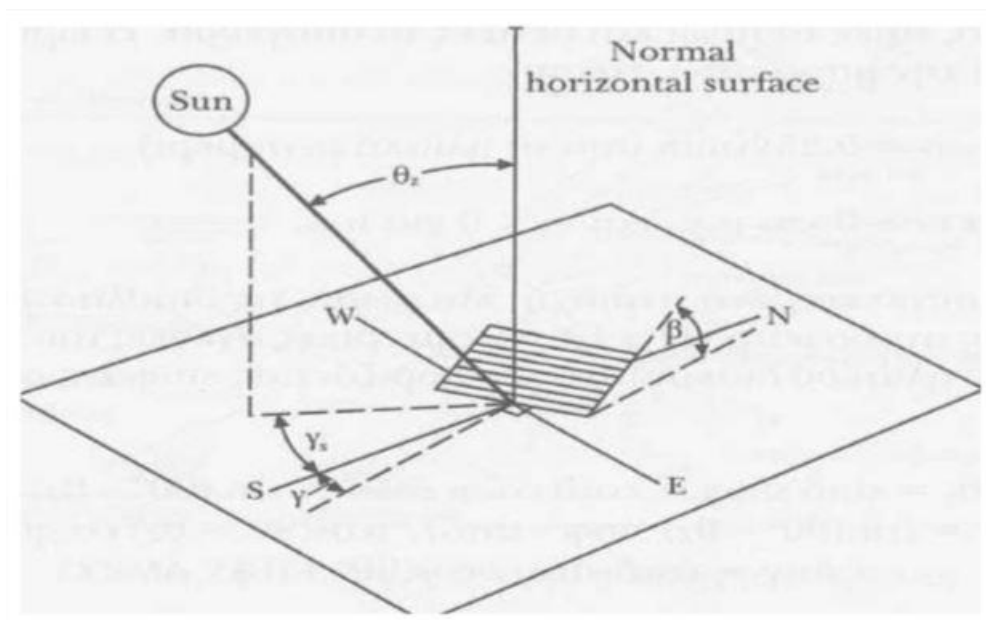
Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του Ήλιου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο [6].

1.1.5 Αζιμούθιο επιφάνειας γ

Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια, πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Η γωνία γ παίρνει τιμές εντός της περιοχής $0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$, με $\gamma = 0^\circ$ στο νότο, $\gamma = -90^\circ$ στη δύση, $\gamma = 180^\circ$ στο βορρά και $\gamma = 90^\circ$ στην ανατολή [6].

1.1.6 Κλίση επιπέδου β

Είναι η γωνία που σχηματίζει μία επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο. Η γωνία β παίρνει τιμές στην περιοχή $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$. Για το οριζόντιο επίπεδο είναι $\beta = 0^\circ$, για το κατακόρυφο $\beta = 90^\circ$. Για $\beta > 90^\circ$ το επίπεδο βλέπει προς τα κάτω [6].



Σχήμα 2. Γωνία ζενίθ θ_z , ηλιακό ύψος $90^\circ - \theta_z$, αζιμούθιο επιφάνειας γ , αζιμούθιο ήλιου γ_s και κλίση επιπέδου β [6]

1.2 Ηλιακό πάρκο

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

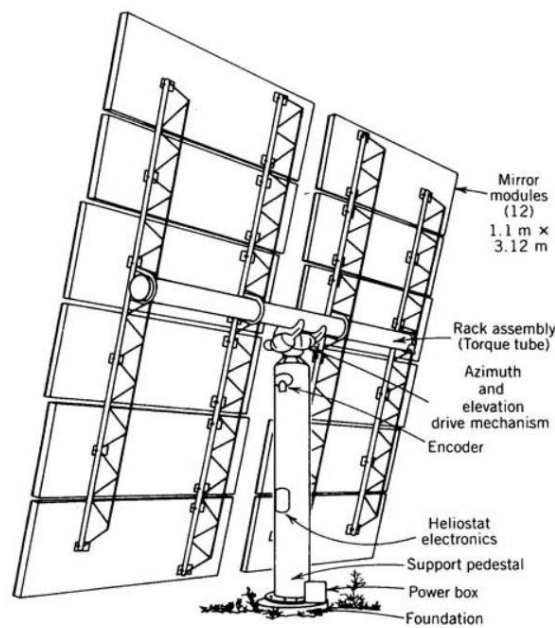
επίστρωση εσωτερικά των οποίων κυκλοφορεί το θερμικό μέσο. Μία άλλη τυπολογία απορροφητή είναι άμεσου ατμού και λειτουργεί ο δέκτης ως ατμοποιητής (evaporator).



Σχήμα 3. Ηλιακό πάρκο στην Ισπανία[13]

1.2.1 Ηλιοστάτες

Ένας ηλιοστάτης είναι ένας μεγάλος καθρέπτης ή ένα σύνολο καθρεφτών που είναι προσαρτημένο σε ένα σύστημα ελέγχου παρακολούθησης που κινείται περί δύο αξόνων καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας για να παρακολουθήσουν τον ήλιο και να διατηρήσουν την ανακλώμενη ακτινοβολία του ήλιου πάνω στο κέντρο του δέκτη. Η αντανάκλαστική επιφάνεια είναι συνήθως ένας λεπτός καθρέφτης από γυαλί χαμηλού σιδήρου. Ο ηλιοστάτης είναι ικανός να περιστρέφεται προς τα πάνω και προς τα κάτω (κλίση) και από αριστερά προς τα δεξιά (προσαρμογές επιφανείας αξιμούθιου). Ένας άλλος κύριος σκοπός του συστήματος ελέγχου παρακολούθησης είναι να αποθηκεύει τον ηλιοστάτη σε ασφαλή, προς τα κάτω θέση όταν δεν βρίσκεται χρήση. Το σύστημα παρακολούθησης χρησιμοποιεί κινητήρες που ελέγχονται από έναν κεντρικό υπολογιστή που δείχνει με ακρίβεια τους ηλιοστάτες με τέτοιο τρόπο ώστε να διχοτομεί τη γωνία μεταξύ του φορέα που προέρχεται από τον ήλιο και ενός διανυσματικού δείκτη από την προέλευση του ηλιοστάτη στον δέκτη. Αυτή η διχοτόμηση γίνεται με την ανάλυση των αστρονομικών εξισώσεων για την τοποθέτηση του ήλιου, καθώς και τις συντεταγμένες για τη γνωστή θέση του μεμονωμένου ηλιοστάτη και τον πύργο. Αυτή η διαδικασία ελαχιστοποιεί τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης ακτινοβολίας και έτσι μεγιστοποιεί την ανακλώμενη ακτινοβολία. Αν και οι περισσότεροι ηλιοστάτες λειτουργούν με τη χρήση κινητήρων που ελέγχονται από υπολογιστές, ορισμένοι χρησιμοποιούν αισθητήρες όπως οι φωτοαντιστάσεις για να παρακολουθήσουν τον προσανατολισμό του ήλιου, ενώ άλλοι λειτουργούν χειροκίνητα σε διάφορες χρονικές στιγμές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας [9].



Σχήμα 4. Δομή και χαρακτηριστικά ηλιοστάτη [9]

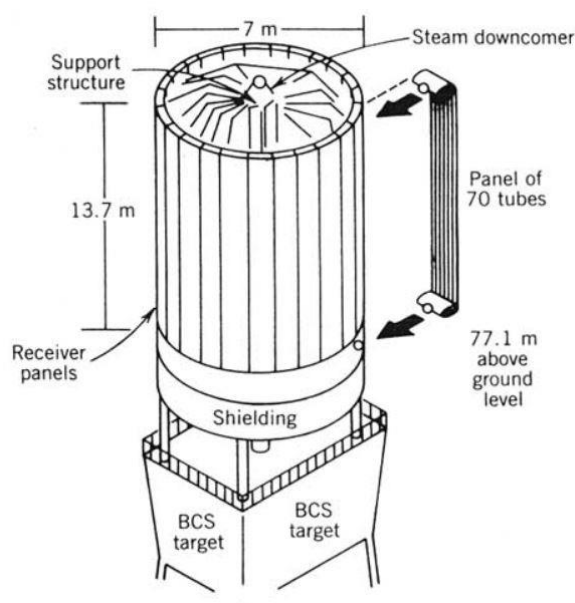
1.2.2 Δέκτες

Ο δέκτης μεταφέρει την ενέργεια από την εισερχόμενη ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία σε ρευστό που λειτουργεί με στρόβιλο. Οι δέκτες είναι τοποθετημένοι στην κορυφή του πύργου και πολύ πάνω από το επίπεδο του ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις της σκίασης και του μπλοκαρίσματος γειτονικών ηλιοστατών. Με αυτόν τον τρόπο, η ανακλώμενη ενέργεια από τους ηλιοστάτες συλλέγεται τόσο αποτελεσματικά όσο δυνατόν γίνεται. Τα ανοίγματα του δέκτη (απορροφητήρες) έχουν μέγεθος ώστε να προσεγγίζουν το μέγεθος της εικόνας του ήλιου από τον απομακρυσμένο ηλιοστάτη. Το μέγεθος ανοίγματος πρέπει επίσης να ελαχιστοποιηθεί, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια θερμότητας λόγω της μεταφοράς και της ακτινοβολίας, η οποία είναι άμεσα ανάλογη με την περιοχή του ανοίγματος. Σε γενικές γραμμές, δύο κύριοι τύποι δεκτών που χρησιμοποιούνται είναι: εξωτερικοί δέκτες και δέκτες κοιλοτήτων[5][9].

1.2.2.1 Εξωτερικοί δέκτες

Οι εξωτερικοί δέκτες αποτελούνται συνήθως από πλαίσια σωλήνων συγκολλημένων μεταξύ τους με κυλινδρικό τρόπο, όπως που φαίνεται στο σχήμα. Οι σωλήνες παρέχουν ρευστό που θερμαίνεται και συλλέγεται για χρήση σε στρόβιλο. Οι εξωτερικοί δέκτες συνήθως έχουν λόγο ύψους προς διάμετρο από 1:1 έως 2:1. Τα υγρά μεταφοράς θερμότητας έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως υγρό νάτριο, νερό / ατμό ή τετηγμένο νιτρικό άλας. Στην περίπτωση του υγρού νατρίου, η επιφάνεια του

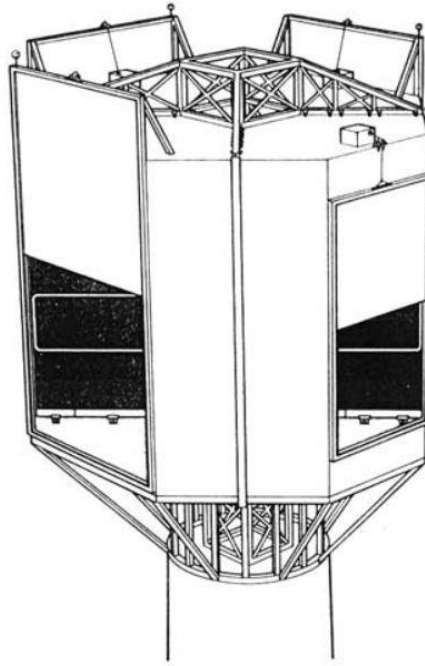
δέκτη μπορεί να ελαττωθεί ελαφρώς λόγω της υψηλής θερμικής ισχύος του υγρού. Για νερό / ατμό και τηγμένο νιτρικό άλας, η επιφάνεια πρέπει να είναι μεγαλύτερη για να αντισταθμιστεί η σχετικά χαμηλή θερμική ικανότητα αυτών των υγρών[5][9] .



Σχήμα 5. Εξωτερικός δέκτης[9]

1.2.2.2 Δέκτες κοιλοτήτας (εσωτερική)

Το κύριο πλεονέκτημα των δεκτών κοιλοτήτων είναι ότι η επιφάνεια απορρόφησης θερμότητας τοποθετείται μέσα σε ένα μονωμένη κοιλότητα ώστε να μειωθεί η απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον. Αυτό επιτρέπει επίσης τις απώλειες από τον αντανάκλαση να μειωθούν. Οι δέκτες κοιλοτήτων έχουν γενικά δομή μεταξύ του ανοίγματος και του περιβάλλοντος που ονομάζεται δευτερεύον συγκεντρωτής , το οποίο χρησιμεύει για την περαιτέρω συγκέντρωση της εισερχόμενης ανακλώμενης ακτινοβολίας από τους ηλιοστάτες [5][9].



Σχήμα 6. Δέκτης κοιλότητας[9]

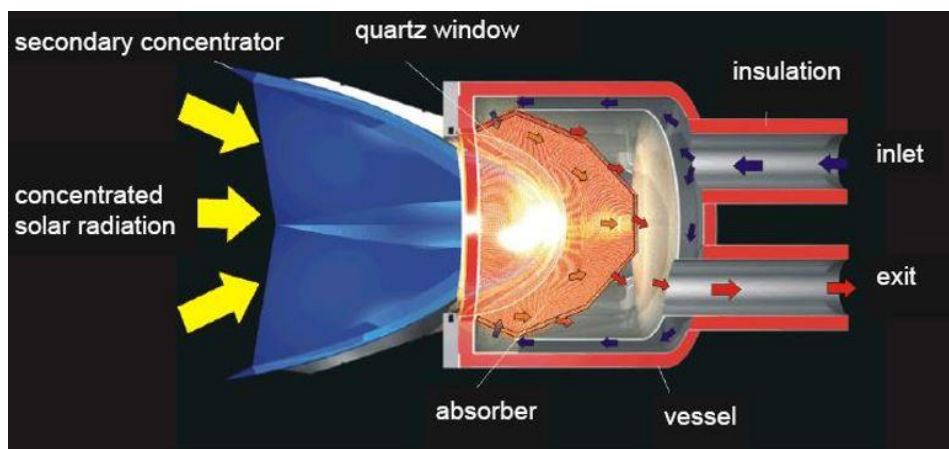
1.2.2.3 Ογκομετρικοί δέκτες

Πορώδη, ανθεκτικά στην υψηλή θερμοκρασία υλικά χρησιμοποιούνται συχνά σε δεκτές κοιλότητας. Ο ατμοσφαιρικός αέρας θερμαίνεται με ροή διαμέσου του πορώδους υλικού που βρίσκεται στο άνοιγμα. Οι δέκτες αυτοί καλούνται ογκομετρικοί δέκτες, επειδή λόγω του πορώδους τους, μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται στον όγκο του υλικού.

Η χρήση του αέρα ως υγρού μεταφοράς θερμότητας απλοποιεί το σύστημα, κάνοντας τους ογκομετρικούς δέκτες επωφελής. Οι διαρροές υγρών δεν προκαλούν ανησυχία και απαιτείται μικρός βοηθητικός εξοπλισμός. Τα έξοδα λειτουργίας, συντήρησης και κατασκευής μειώνονται λόγω της απλότητας των υλικών και των υλικών τους διαμόρφωση. Η χαμηλή θερμική αδράνεια των πορώδων υλικών επιτρέπει επίσης γρήγορους χρόνους εκκίνησης για την παροχή ρεύματος. Επιπλέον, επειδή αναρροφάται ψυχρός αέρας μέσω της ακτινοβολημένης πλευράς του υλικού, η επιφάνεια του υλικού διατηρείται σχετικά δροσερή, ελαχιστοποιώντας έτσι την απώλεια θερμότητας λόγω της ακτινοβολίας και της μεταφοράς. Ωστόσο, επειδή οι ογκομετρικοί δέκτες χρησιμοποιούν ατμοσφαιρικό αέρα, πρέπει να εγκατασταθεί εναλλάκτης θερμότητας για να διανεμηθεί θερμότητα στο πραγματικό ρευστό μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται στον κύκλο [5][9].

1.2.2.4 Ογκομετρικοί δέκτες υπό πίεση

Όταν η ηλιακή θέρμανση του πεπιεσμένου αέρα είναι επιθυμητή, όπως με εφαρμογές αεροστροβίλων, χρησιμοποιούνται ογκομετρικοί δέκτες υπό πίεση. Αυτοί οι δέκτες εφαρμόζουν παρόμοιους πορώδεις απορροφητές τοποθετημένους πίσω από ένα θολωτό παράθυρο χαλαζία. Το παράθυρο επιτρέπει τον πεπιεσμένο αέρα που προέρχεται από τον συμπιεστή του ο στρόβιλος να παραμείνει υπό πίεση καθώς θερμαίνεται. Ο απορροφητής αποτελείται από στρώματα οθονών συρμάτων πλεγμάτων. Αυτός ο δέκτης μπορεί να επιτύχει θερμοκρασίες αέρα περίπου 800°C (1472°F). Εάν είναι επιθυμητές υψηλότερες θερμοκρασίες, χρησιμοποιούνται κεραμικά απορροφητικά υλικά[5][9].



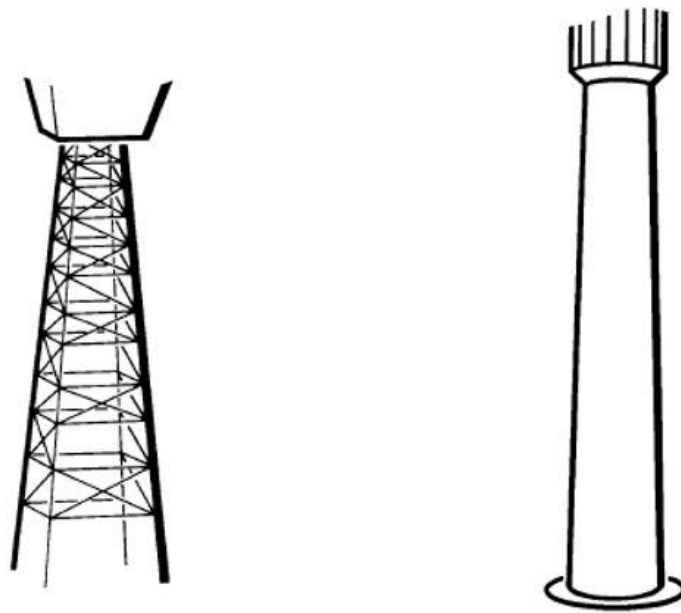
Σχήμα 7. Ογκομετρικός δέκτης πίεσης[1]

1.2.3 Ηλιακός Πύργος

Είναι επιθυμητό να κατασκευαστεί ο πύργος σχετικά υψηλός ώστε να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή μεταξύ γειτονικών ηλιοστατών. Ωστόσο, το ύψος του πύργου συνήθως περιορίζεται από το κόστος του. Αέρας, βάρος του δέκτη και τα σεισμικά φορτία είναι οι τρεις πιο σημαντικοί παράγοντες που εξετάζονται κατά το σχεδιασμό ενός πύργου. Τα φορτία του δέκτη είναι μεταβλητά, αλλά πολλοί πύργοι έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν στον άνεμο και τη σεισμική ενέργεια φορτία 90 mph και 0.25 g , αντίστοιχα. Συχνά φορές ο πύργος έχει δομές που βρίσκονται ακριβώς κάτω από τον δέκτη που ονομάζεται χαρακτηρισμός δέσμης στόχου. Αυτά χρησιμοποιούνται για μετρήσεις περιοδικής ακτινοβολίας δέσμης και βαθμονόμηση του ηλιοστάτη. Δεν προορίζονται να δέχονται την ακτινοβολία από περισσότερες από μία ή δύο ηλιοστάτες τη φορά. Οι πύργοι κατασκευάζονται κυρίως είτε από οπλισμένο

σκυρόδεμα είτε από ελεύθερο χάλυβα. Ελεύθεροι είναι οι πύργοι που ανήκουν σε χαλύβδινα σώματα είναι γενικά πιο αποδοτικοί σε ύψος πύργου κάτω από 120 μέτρα . Οι πύργοι από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν αποδειχθεί πιο αποδοτικοί σε ύψος πύργου μεγαλύτερο από 120 m . Η βάση του πύργου κατασκευάζεται πιο συχνά από οπλισμένο σκυρόδεμα για τη μεταφορά φορτίων στο υποκείμενο έδαφος[9].

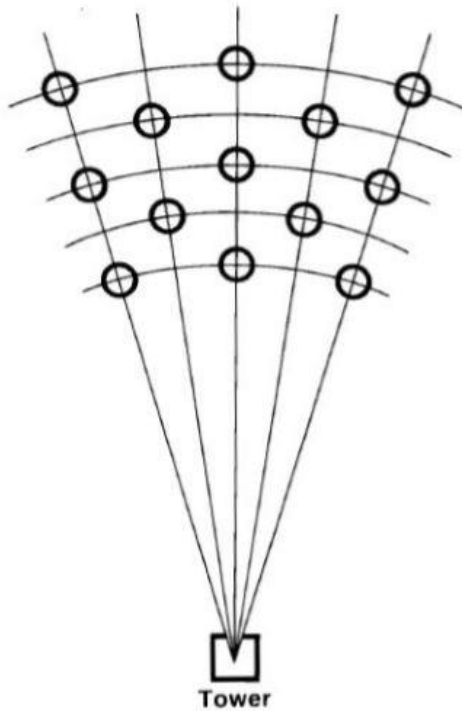
Το βέλτιστο ύψος του πύργου είναι γενικά περίπου το $1/6$ του μήκους του πλέον απομακρυσμένου ηλιοστάτη στο πεδίο .



Σχήμα 8. Δύο είδη πύργου[1]

1.2.4 Διάταξη Πεδίου

Θεωρείται γενικά ότι είναι καλύτερα να τοποθετηθούν οι ηλιοστάτες σε μια ακτινικά κλιμακωτή μορφή για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της σκίασης και του αποκλεισμού μεταξύ των γειτονικών ηλιοστατών.



Σχήμα 9. Βέλτιστη διάταξη πεδίου (Ακτινική)[9]

1.2.5 Απώλειες Πεδίου

Component	Source	Percentage Loss	
		Design Point, Noon (%)	Annual Average
Field losses:	Cosine	17.1	23.4
	Shadowing & blocking	0	5.6
	Reflectance	10.0	10.0
	Attenuation	5.4	6.0
Total field losses	Total	33.5	45.0
Receiver losses:	Spillage	1.2	2.0
	Absorptance	2.0	2.0
	Radiation	6.3	9.8
	Convection & conduction	0.2	0.2
Total receiver losses	Total	9.7	14.0
Total system losses		42.2	59.0
Total system efficiency		57.8	41.0

Πίνακας 1. Απώλειες Πεδίου[9]

Κεφάλαιο 2: Tonatiuh

2.1. Γενικά στοιχεία του ανοικτού λογισμικού

2.1.1 Σφαιρική εικόνα

Το λογισμικό πρόγραμμα Tonatiuh στοχεύει στη δημιουργία ενός ανοιχτού κώδικα, ακριβούς και εύχρηστου ιχνηθέτη ακτίνων Monte Carlo για την οπτική προσομοίωση συγκεντρωτικών συστημάτων ηλιακής ενέργειας. Προτίθεται να προωθήσει τα σύγχρονα εργαλεία προσομοίωσης που είναι διαθέσιμα για το σχεδιασμό και την ανάλυση των συστημάτων ηλιακής συγκέντρωσης και να τα διαθέσει ελεύθερα σε όσους ενδιαφέρονται να τα χρησιμοποιήσουν και να τα βελτιώσουν. Μερικοί από τους πιο σχετικούς σχεδιαστικούς στόχους του Tonatiuh είναι[10]:

- Να αναπτύξει ένα ισχυρό θεωρητικό υπόβαθρο που θα διευκολύνει την οπτική προσομοίωση σχεδόν οποιουδήποτε τύπου ηλιακού συστήματος συγκέντρωσης.
- Να παρουσιάσει μια καθαρή και ευέλικτη αρχιτεκτονική λογισμικού, που θα επιτρέψει στον χρήστη να προσαρμόζει, να επεκτείνει, να αυξάνει και να τροποποιεί τις λειτουργίες του με ευκολία.
- Να επιτυγχάνει ανεξαρτησία του λειτουργικού συστήματος σε επίπεδο πηγής και να εκτελείτε σε όλες τις μεγάλες πλατφόρμες χωρίς καμία ή ελάχιστη τροποποίηση στον πηγαίο κώδικα του.
- Να παρέχει στους χρήστες ένα προηγμένο και εύχρηστο γραφικό περιβάλλον (GUI).

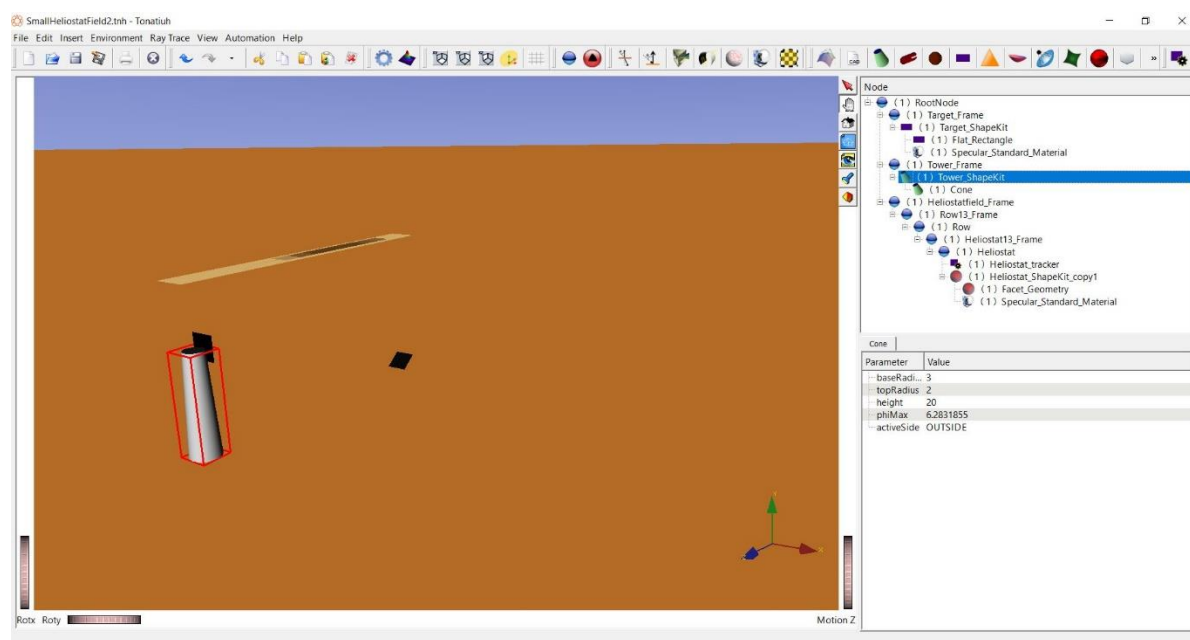
2.1.2 Χαρακτηριστικά

- Τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση της ‘σκηνής’ για την προσομοίωση σε Tree View.
- Στοιχεία “interface” για τη διαχείριση της αναίρεσης και της επαναφοράς των ενεργειών των χρηστών.
- Στοιχεία “interface” για τον ορισμό του τύπου ανίχνευσης ακτίνων Monte Carlo για εκτέλεση. Μια διαδεδομένη αρχιτεκτονική plug in που επιτρέπει το χρήστη να:
- Προσθέτει νέα μοντέλα ηλιακού φωτός.
- Προσθέτει νέες γεωμετρικές επιφάνειες.
- Προσθέτει νέα αντανакλαστικά υλικά.

2.1.3 Γενική δομή του προγράμματος

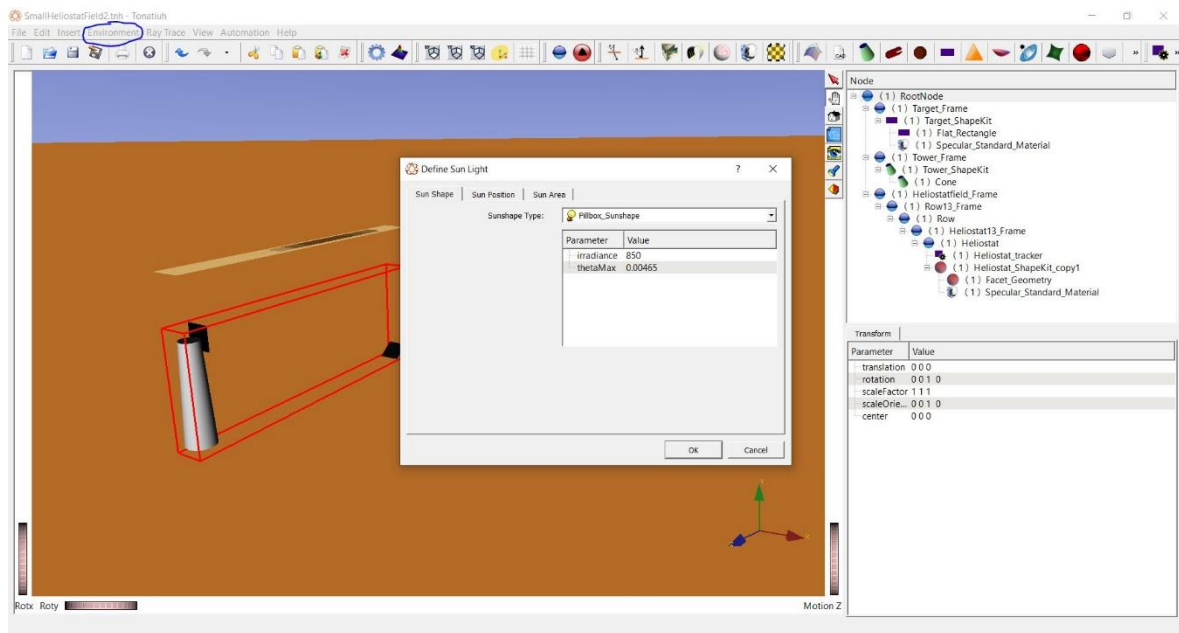
Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Tonatiuh είναι το παρακάτω. Το κύριο μέρος είναι το τετραγωνικό πλαίσιο δεξιά που περιέχει όλες τις πληροφορίες, σε μορφή ‘δέντρου’, που περιέχει η διάταξή μας. Στην δική μας περίπτωση χρειαζόμαστε τουλάχιστον τρία στοιχεία για να φτιάξουμε ένα ηλιακό πάρκο, τον πύργο, τον δέκτη και έναν ηλιοστάτη. Ο δέκτης και ο ηλιοστάτης έχουν πληθώρα σχημάτων και υλικών που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε.

Για να μπορέσουμε να τρέξουμε το πρόγραμμα και να βγάλουμε αποτελέσματα πρέπει να καθορίσουμε τον ήλιο και τον αριθμό των ακτινών που θα υπολογίσει το πρόγραμμα.

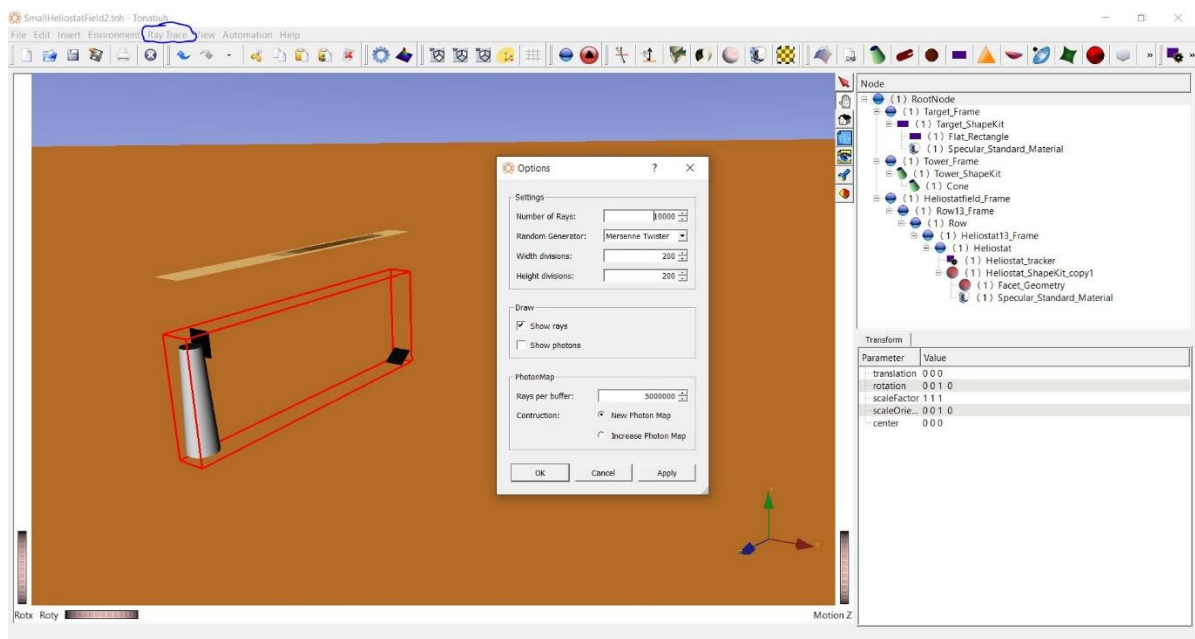


Σχήμα 10. Γραφικό περιβάλλον Tonatiuh

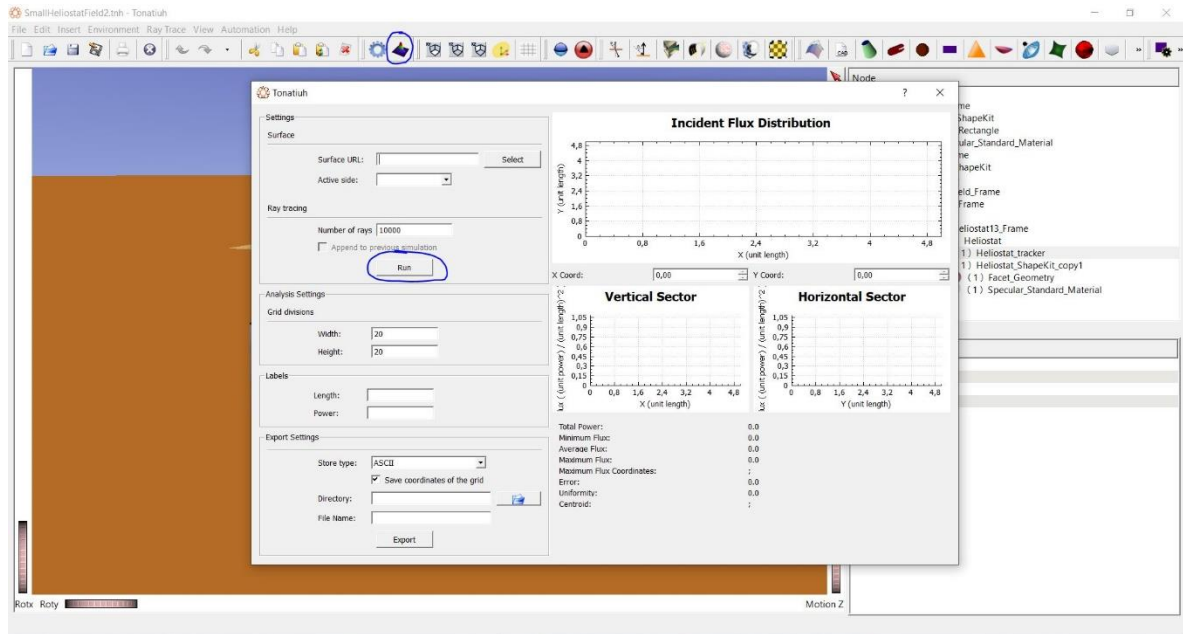
Για τον προσδιορισμό του ήλιου βάζουμε πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, γωνία αζιμουθίου, ηλιακό ύψος και επιφάνειες στις οποίες θέλουμε να πέφτουν οι ακτίνες του ήλιου.



Σχήμα 11. Προσδιορισμός Ήλιου



Σχήμα 12. Αριθμός ακτίνων



Σχήμα 13. 'Τρέξιμο' του Προγράμματος

2.1.4 Αναλυτική περιγραφή σχεδιασμού του Tutorial στο Tonatiuh

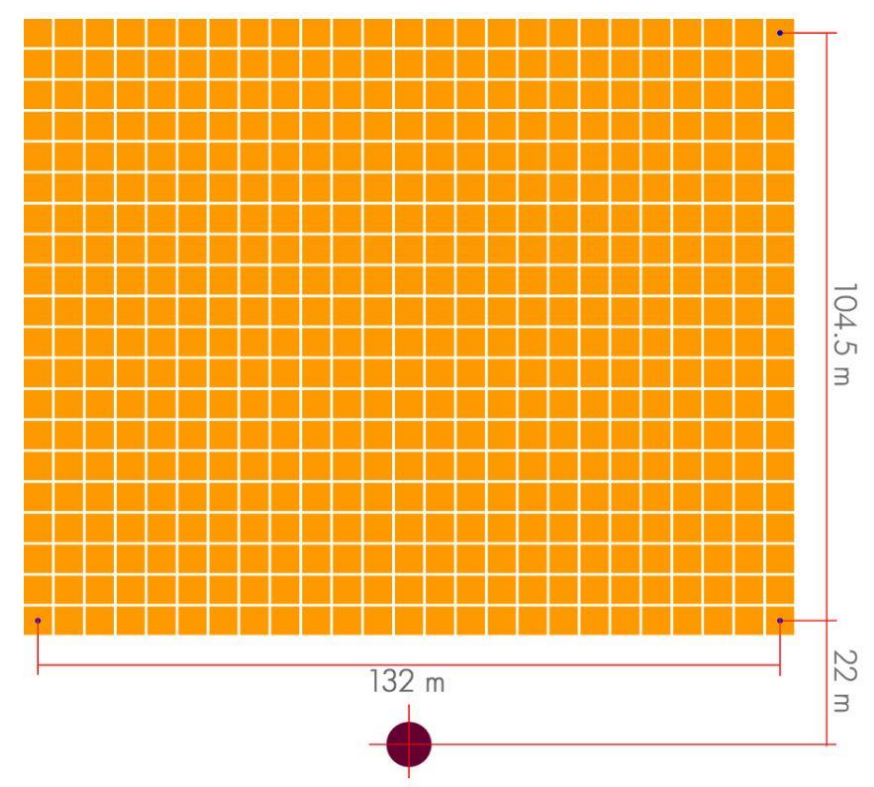
2.1.4.1 Χαρακτηριστικά του συστήματος

Το σύστημα με τον πύργο που θέλω να διαμορφώσω σε αυτό το tutorial αποτελείται από[11]:

- Ένα πυκνό ηλιοστατικό πεδίο 500 μικρών ηλιοστατών μιας επιφάνειας 5 m x 5 m,
- Ένας πύργος και
- Το άνοιγμα εισόδου του ηλιακού κεντρικού δέκτη.

Το σχήμα 14 δείχνει τη βασική διάταξη του πεδίου του ηλιοστάτη και τη σχετική θέση του πύργου. Όπως φαίνεται, οι ηλιοστάτες σχηματίζουν μια σειρά από 25 στήλες και 20 σειρές, σε κανονική απόσταση.

Από τις διαστάσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα, γνωρίζοντας ότι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των πλευρών δύο γειτονικών ηλιοστατών που βρίσκονται σε μια σειρά ή μια στήλη είναι 5,5 μέτρα, είναι εύκολο να υπολογιστούν οι σχετικές συντεταγμένες του κέντρου της επιφάνειας κάθε ηλιοστάτη στο πεδίο. Προφανώς, για να γίνει αυτό πρέπει να επιλέξουμε τη θέση προέλευσης των συντεταγμένων. Για ευκολία, διορθώνουμε αυτή την προέλευση στο κέντρο του πεδίου του ηλιοστάτη, με τον θετικό άξονα x προς την Ανατολή, τον θετικό άξονα y προς την ζενίθ και τον θετικό άξονα z προς το Βορρά.



Σχήμα 14. Διάταξη πεδίου tutorial [11]

Θα υποθέσω ότι όλοι οι ηλιοστάτες θα στοχεύσουν στο κέντρο του ανοίγματος εισόδου, το οποίο είναι στόχος 10 μέτρων επί 10 μέτρων με το κέντρο του 130 μέτρων πάνω από το επίπεδο που ορίζεται από τα κέντρα των πτυχών των ηλιοστατών [11].

2.1.4.2 Μοντελοποίηση του ανοίγματος εισόδου κεντρικού δέκτη

Για να μοντελοποιήσω το άνοιγμα εισόδου του κεντρικού δέκτη, έκανα τα εξής[11]:

1. Στο Tree View του Tonatiuh κάνω κλικ στο TSeparatorKit "RootNode".
2. Μεταβαίνω στη γραμμή μενού "plug-ins" και κάνω κλικ στο εικονίδιο TSeparatorKit, για να προσθέσω ένα νέο TSeparator ως νέα παιδιά του "RootNode".
3. Κάνω διπλό κλικ στον νεοδημιουργημένο κόμβο TSeparatorKit και αλλάζω το όνομά του στο "Target_Frame".
4. Με τον επιλεγμένο κόμβο "Target_Frame", μεταβαίνω στο παράθυρο διαλόγου "Transform", ακριβώς κάτω από την προβολή δέντρου και ορίζω τις ιδιότητες μετασχηματισμού ως εξής:

```
translation      0 130 74.25
rotation         -1 0 0 1.5707964
scaleFactor      1 1 1
scaleOrientation 0 0 1 0
center           0 0 0
```

Πίνακας 2. Ιδιότητες Target Frame (1) [11]

1. Με το "Target_Frame" TSeparatorKit που έχω επιλέξει στο Tree View, μεταβαίνω στη γραμμή μενού plug-ins και κάνω κλικ στο εικονίδιο TShapeKit για να δημιουργήσετε έναν κόμβο TShapeKit κάτω από τον κόμβο "Target_Frame".
2. Από προεπιλογή, αυτό το νέο TShapeKit θα φέρει την ετικέτα "TShapeKit1", κάνω διπλό κλικ στο όνομα και το αλλάζω σε "Target_ShapeKit".
3. Με τον επιλεγμένο κόμβο "Target_ShapeKit", μεταβαίνω στη γραμμή μενού plug-ins και κάνω κλικ στο εικονίδιο "Flat_rectangle" TShapeNode και προσθέτω ένα TShapeNode στο "Target_ShapeKit".
4. Από προεπιλογή, αυτό το νέο TShapeNode θα φέρει την ετικέτα "Flat_Rectangle", το οποίο διατηρεί το όνομα.
5. Κάνω κλικ στο "Flat_Rectangle" TShapeNode για να το επιλέξω. Μεταβαίνω στο παράθυρο διαλόγου "ShapeFlatRectangle" που θα εμφανιστεί κάτω από την προβολή δέντρου και ορίζω τις τιμές των παραμέτρων που ορίζουν αυτόν τον κόμβο σχήματος:

```
width      10
height     10
activeSide FRONT
```

Πίνακας 3. Ιδιότητες Target Frame (2) [11]

1. Στην περιοχή TSeparatorKit "Target_Frame", κάνω κλικ στον κόμβο TShapeKit με την ένδειξη "Target_ShapeKit" για να την επιλέξω.
2. Με το επιλεγμένο "Target_ShapeKit", μεταβαίνω στη γραμμή μενού plug-in Tonatiuh και επιλέγω το εικονίδιο Specular_Standard_Material.
3. Αφού δημιουργηθεί ο νέος κόμβος υλικού μέσα στον κόμβο "Target_ShapeKit", κάνω κλικ πάνω του για να τον επιλέξω.
4. Με τον επιλεγμένο κόμβο "Specular_Standard_Material" μεταβαίνω στο πλαίσιο διαλόγου ιδιότητες MaterialStandardSpecular που θα εμφανιστεί κάτω από την Tree View και ορίζω τις τιμές των παραμέτρων που καθορίζουν αυτόν τον κόμβο υλικού:

```

m_reflectivity    0
m_sigmaSlope      2
m_distribution     PILLBOX
m_ambientColor    0 0 0
m_diffuseColor    0 0 0
m_specularColor   0 0 0
m_emissiveColor   0 0 0
m_shininess       0
m_transparency    0

```

Πίνακας 4. Ιδιότητες Target Frame (3) [11]

2.1.4.3 Μοντελοποίηση του πύργου

Για να μοντελοποιήσω τον πύργο, έκανα τα εξής[11]:

1. Στο Tree View του Tonatiuh κάνω κλικ στο TSeparatorKit "RootNode".
2. Μεταβαίνω στη γραμμή μενού "plug-ins" και κάνω κλικ στο εικονίδιο TSeparatorKit, για να προσθέσω ένα νέο TSeparator ως νέα παιδιά του "RootNode".
3. Κάνω διπλό κλικ στον νεοδημιουργημένο κόμβο TSeparatorKit και αλλάζω το όνομα του σε "Tower_Frame".
4. Με τον επιλεγμένο κόμβο "Tower_Frame", μεταβαίνω στο παράθυρο διαλόγου "Transform", ακριβώς κάτω από το Tree View και ορίζω τις ιδιότητες μετασχηματισμού ως εξής:

```

translation      0 0 76.35
rotation          0 0 1 0
scaleFactor       1 1 1
scaleOrientation  0 0 1 0
center            0 0 0

```

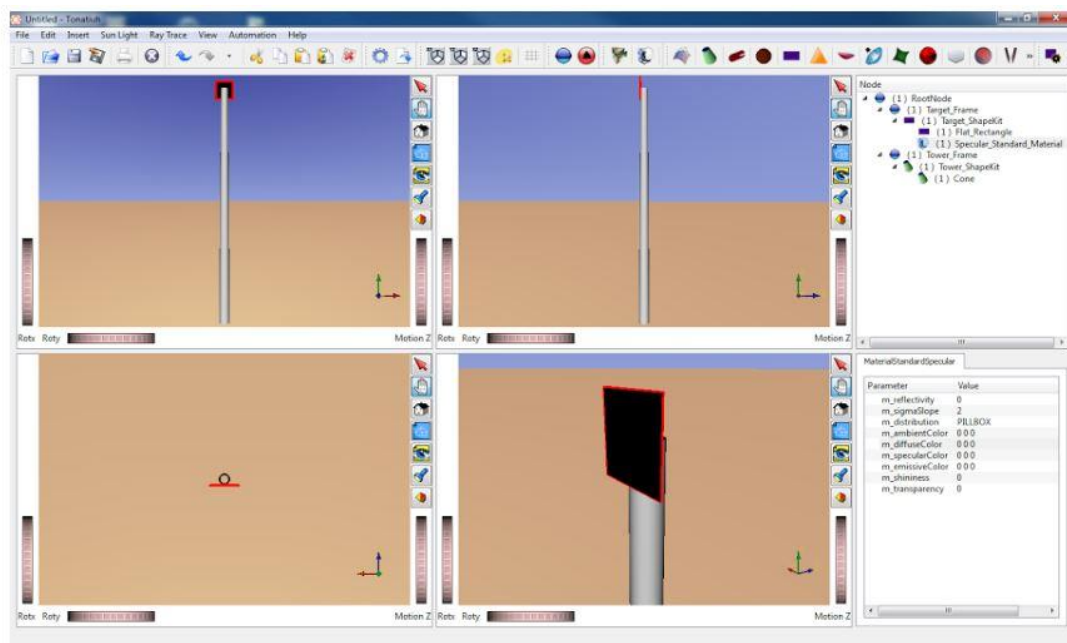
Πίνακας 5. Ιδιότητες Tower Frame (1) [11]

1. Με το "Tower_Frame" TSeparatorKit που έχω επιλέξει στο Tree View μεταβαίνω στη γραμμή μενού "plug-ins" και κάνω κλικ στο εικονίδιο TShapeKit για να δημιουργήσω έναν κόμβο TShapeKit κάτω από τον κόμβο "Tower_Frame".
2. Από προεπιλογή, αυτό το νέο TShapeKit θα φέρει την ετικέτα "TShapeKit1", κάνω διπλό κλικ στο όνομα και το αλλάζω σε "Tower_ShapeKit".
3. Με τον επιλεγμένο κόμβο "Tower_ShapeKit", μεταβαίνω στην γραμμή μενού "plug-ins" και κάνω κλικ στο εικονίδιο "Cone" TShapeNode για να προσθέσω ένα κώνο TShapeNode στο "Tower_ShapeKit".
4. Από προεπιλογή, αυτό το νεοδημιουργημένο TShapeNode θα φέρει την ένδειξη "Cone", του οποίου διατηρώ το όνομα.

5. Κάνω κλικ στο "Cone" TShapeNode για να το επιλέξω. Μεταβαίνω στο παράθυρο διαλόγου "ShapeCone" που θα εμφανιστεί κάτω από την Tree View και αλλάζω τις τιμές των παραμέτρων που ορίζουν αυτόν τον κόμβο σχήματος σε:

```
baseRadius 3
topRadius 2
height 130
phiMax 6.2831855
activeSide OUTSIDE
```

Πίνακας 6. Ιδιότητες Tower Frame (2) [11]



Σχήμα 15. Μοντελοποίηση πύργου και δέκτη [11]

Το σχήμα 15 δείχνει το GUI του Tonatiuh μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων. Σε τέσσερις διαφορετικές προβολές 3D μπορείτε να δείτε, από διαφορετική οπτική γωνία, το επίπεδο ορθογώνιο μεγέθους 10 m x 10 m που μοντελοποιεί το δέκτη και το 130 m ύψος κώνο που μοντελοποιεί τον πύργο. Επιπλέον, στο Tree View, μπορείτε να δείτε τη δομή του δέντρου-κόμβου που αποτελεί τον τρέχοντα ορισμό του συστήματος ηλιακής συμπύκνωσης, το οποίο μέχρι αυτό το σημείο αποτελείται μόνο από το μοντέλο κεντρικού ανοίγματος εισόδου του δέκτη ή το στόχο και το μοντέλο πύργου[11].

2.1.4.4 Μοντελοποίηση διάταξης ηλιοστατών

2.1.4.4.1 Διάταξη ηλιοστατών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πεδίο ηλιοστάτη που θέλω να μοντελοποιήσω αποτελείται από 500 μικρούς ηλιοστάτες μονόπλευρης επιφάνειας 5 m x 5 m, κατανομημένους σε ορθογώνια σειρά 20 γραμμών και 25 στηλών[11].

Για να μοντελοποιήσω τη διάταξη πεδίου του ηλιοστάτη, έκανα τα εξής:

1. Στο Tree View του Tonatiuh, κάνω κλικ στον κόμβο διαχωριστή "RootNode" για να τον επιλέξω.
2. Με την επιλογή "RootNode" μεταβαίνω στη γραμμή μενού και κάνω κλικ στο εικονίδιο TSeparatorKit, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή ενός νέου TSeparatorKit κάτω από τον κόμβο "RootNode".
3. Αλλάζω το όνομα του νεοσυσταθέντος TSeparatorKit από το "TSeparatorKit1" στο "HelioStatField_Frame".
4. Επαναλαμβάνω τα παραπάνω δύο βήματα 20 φορές, αντικαθιστώντας το "XX" στο όνομα "RowXX_Frame" με τον αριθμό της επανάληψης: * Επιλέγω τον κόμβο "HelioStatField_Frame" και μεταβαίνω στη γραμμή μενού για να εισάγω έναν άλλο κόμβο TSeparatorKit κάτω από αυτό. * Αλλάζω το όνομα του νεοσυστατού κόμβου TSeparatorKit στο "RowXX_Frame".
5. Αφού δημιουργηθούν οι 20 κόμβοι TSeparatorKit "RowXX_Frame", αλλάζω το "Transform" έτσι ώστε οι τιμές των παραμέτρων "translation" τους να είναι οι εξής:

```
Row01_Frame: translation    0 0 -52.3
Row02_Frame: translation    0 0 -46.8
Row03_Frame: translation    0 0 -41.3
Row04_Frame: translation    0 0 -35.8
Row05_Frame: translation    0 0 -30.3
Row06_Frame: translation    0 0 -24.8
Row07_Frame: translation    0 0 -19.3
Row08_Frame: translation    0 0 -13.8
Row09_Frame: translation    0 0 -8.3
Row10_Frame: translation    0 0 -2.8
Row11_Frame: translation    0 0 2.8
Row12_Frame: translation    0 0 8.3
Row13_Frame: translation    0 0 13.8
Row14_Frame: translation    0 0 19.3
Row15_Frame: translation    0 0 24.8
Row16_Frame: translation    0 0 30.3
Row17_Frame: translation    0 0 35.8
Row18_Frame: translation    0 0 41.3
Row19_Frame: translation    0 0 46.8
Row20_Frame: translation    0 0 52.33
```

Πίνακας 7. Ιδιότητες διάταξης ηλιοστατών (1) [11]

1. Αφού ενημερωθούν οι παράμετροι 'transform' των μετασχηματισμών των 20 κόμβων TSeparatorKit, κάνω κλικ στο TSeparatorKit "Row01_Frame" για να τον επιλέξω.
2. Με το "Row01_Frame" που έχω επιλέξει στο Tree View του Tonatiuh, μεταβαίνω στη γραμμή μενού και κάνω κλικ στο εικονίδιο TSeparatorKit, για να εισάγω έναν νέο κόμβο αυτού του είδους κάτω από το "Row01_Frame".
3. Μετονομάζω το TSeparatorKit που μόλις δημιουργήθηκε σε "Row".
4. Επιλέγω το "Row" TSeparatorKit και δημιουργώ κάτω από αυτό 25 κόμβους TSeparatorKit, με το όνομα "HeliostatXX_Frame", όπου το "XX" πηγαίνει από 1 έως 25.
5. Αφού δημιουργηθούν οι 25 κόμβοι TSeparatorKit "HeliostatXX_Frame", αλλάζω το "Transform" έτσι ώστε οι τιμές των παραμέτρων "translation" τους να είναι οι εξής:

```
Heliostat01_Frame: translation -66 0 0
Heliostat02_Frame: translation -60.5 0 0
Heliostat03_Frame: translation -55 0 0
Heliostat04_Frame: translation -49.5 0 0
Heliostat05_Frame: translation -44 0 0
Heliostat06_Frame: translation -38.5 0 0
Heliostat07_Frame: translation -33 0 0
Heliostat08_Frame: translation -27.5 0 0
Heliostat09_Frame: translation -22 0 0
Heliostat10_Frame: translation -16.5 0 0
Heliostat11_Frame: translation -11 0 0
Heliostat12_Frame: translation -5.5 0 0
Heliostat13_Frame: translation 0 0 0
Heliostat14_Frame: translation 5.5 0 0
Heliostat15_Frame: translation 11 0 0
Heliostat16_Frame: translation 16.5 0 0
Heliostat17_Frame: translation 22 0 0
Heliostat18_Frame: translation 27.5 0 0
Heliostat19_Frame: translation 33 0 0
Heliostat20_Frame: translation 38.5 0 0
Heliostat21_Frame: translation 44 0 0
Heliostat22_Frame: translation 49.5 0 0
Heliostat23_Frame: translation 55 0 0
Heliostat24_Frame: translation 60.5 0 0
Heliostat25_Frame: translation 66 0 0
```

Πίνακας 8. Ιδιότητες διάταξης ηλιοστατών (2) [11]

1. Αφού ενημερωθούν οι παράμετροι translation των μετασχηματισμών των 25 κόμβων TSeparatorKit, κάνω κλικ στο "Heliostat01_Frame" του TSeparatorKit για να το επιλέξω.
2. Με το "Heliostat01_Frame" που επέλεξα στο Tree View του Tonatiuh, μεταβαίνω στη γραμμή μενού και κάνω κλικ στο εικονίδιο TSeparatorKit, για να εισάγω έναν νέο κόμβο αυτού του είδους κάτω από το "Heliostat01_Frame".
3. Μετονομάζω το TSeparatorKit που μόλις δημιούργησα σε "Heliostat" , το επιλέγω με το ποντίκι στο μενού και κάνω κλικ στο εικονίδιο "Heliostat_tracker" για να εισάγω έναν κόμβο αυτού του τύπου κάτω από τον κόμβο "Heliostat" TSeparatorKit.
4. Αφού δημιουργήσω τον κόμβο Heliostat_tracker κάτω από τον κόμβο "Heliostat" TSeparatorKit, επιλέγω τον κόμβο Heliostat_tracker και στο παράθυρο διαλόγου "TrackerHeliostat" που εμφανίζεται ακριβώς κάτω από το Tree View, ορίζω την τιμή της παραμέτρου "targetingPoint" ως εξής:

Πίνακας 9. Ιδιότητες διάταξης ηλιοστατών (3) [11]

1. Τώρα, κάνω δεξί κλικ στο κόμβο "Heliostat" TSeparatorKit και στο αναδυόμενο μενού που θα εμφανιστεί ως αποτέλεσμα επιλέγω "copy" για να αντιγράψω τον κόμβο "Heliostat" και τα παιδιά του, που στην περίπτωση αυτή είναι μόνο ο κόμβος Heliostat_tracker . Εναλλακτικά, κάνω κλικ στον κόμβο "Heliostat" και με τον κόμβο που επιλέγω στο Tree View πατάω "Ctrl + c".
2. Αφού αντιγράψω τον κόμβο Heliostat και το παιδί του (τον κόμβο Heliostat_tracker) στον πίνακα κλιπ, επιλέγω ένα προς ένα τους υπόλοιπους 24 κόμβους "HeliostatXX_Frame", οι οποίοι είναι παιδιά του κόμβου "Row", και σε κάθε έναν από αυτούς κάνω "Ctrl + v" για να επικολλήσω ένα αντίγραφο του κόμβου "Heliostat" κάτω από κάθε έναν από αυτούς τους κόμβους TSeparatorKit.
3. Μετά την εκτέλεση του προηγούμενου βήματος, κάθε κόμβος TSeparatorKit "HeliostatXX_Frame", ο οποίος βρίσκεται κάτω από τον κόμβο TSeparatorKit "Row", θα πρέπει να έχει έναν κόμβο "Heliostat" ως παιδί. Μόλις επιτευχθεί αυτό, επιλέγω το "Row" TSeparatorKit και κάνω "Ctrl + c" για να το αντιγράψω στο clip-board.
4. Με το "Row" TSeparatorKit και τα 25 "HeliostatXX_Frame", καθώς τα παιδιά τους αντιγράφηκαν στο clip-board, επιλέγω καθένα από τους 19 εναπομείναντες κόμβους "RowXX_Frame" και κάνω "Ctrl + v" για να επικολλήσω αντίγραφο "Row" στον καθένα από αυτούς.

Μετά την εκτέλεση των παραπάνω βημάτων, θα προσδιοριστούν οι προελεύσεις των τοπικών πλαισίων συντεταγμένων κάθε ενός από τους ηλιοστάτες στο πεδίο. Επιπλέον, όλα αυτά τα πλαίσια θα έχουν έναν κόμβο "heliostat tracker" που θα αλλάξει τον προσανατολισμό τους έτσι ώστε μια κεντρική ακτίνα που προέρχεται από τον ήλιο και θα συμβεί από την προέλευσή τους θα αντανάκλαται προς το καθορισμένο σημείο στόχευσης, το οποίο στην περίπτωση αυτή είναι το κέντρο του δέκτη (0 130 74.25).

Ωστόσο, τα τοπικά πλαίσια ηλιοστατών που σχεδιάστηκαν στο Tonatiuh ως TSeparatorKits, δεν περιλαμβάνουν ακόμα το φυσικό μοντέλο του ηλιοστάτη, το οποίο σε αυτό το tutorial αποτελείται από έναν κόμβο TShapeKit, έναν κόμβο TShape και έναν κόμβο TMaterials. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο σε αυτό το στάδιο στη μοντελοποίηση του πεδίου του ηλιοστάτη δεν εμφανίζεται ηλιοστάτης στην 3D άποψη του Tonatiuh[11].

2.1.4.4.2 Ηλιοστάτης

Ο ηλιοστάτης σε μοντέλο είναι ένας μικρός ελλειψοειδής. Μόνο ο καθρέφτης πρέπει να μοντελοποιηθεί στο Tonatiuh, δεδομένου ότι για έναν δεδομένο ηλιοστάτη η υποστηρικτική δομή καθρεφτών και ο μηχανισμός παρακολούθησης δεν αναμένεται να ρίχνουν σχετικές σκιές σε κοντινούς ηλιοστάτες[11].

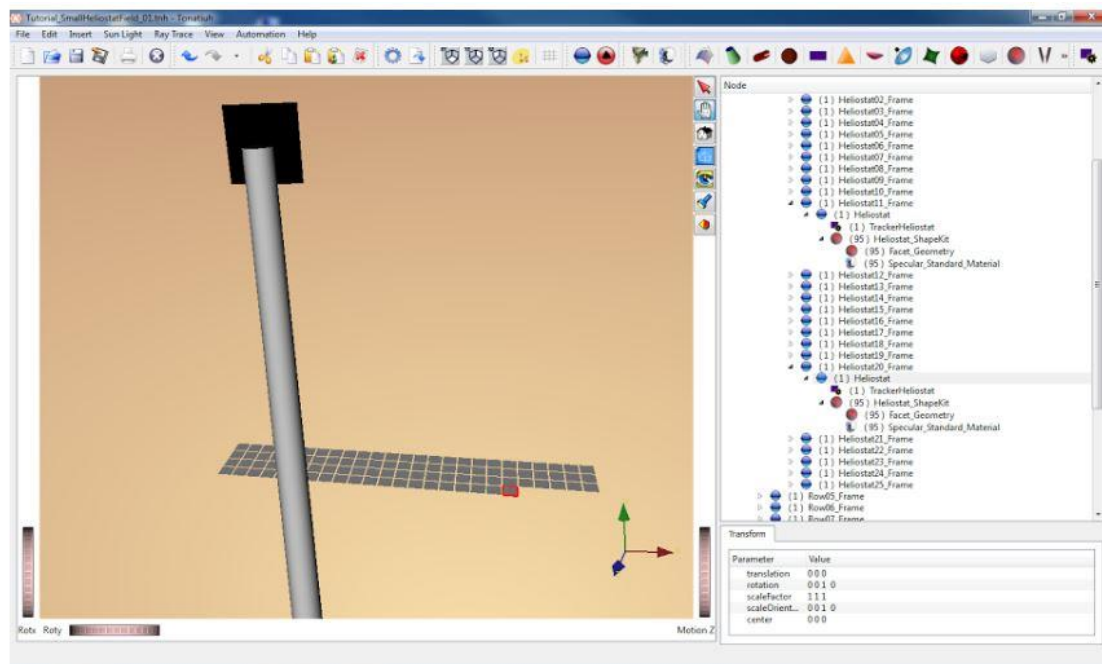
Ο καθρέφτης ηλιοστάτης υποτίθεται ότι είναι ένας σφαιρικός ορθογώνιος καθρέπτης 5 μέτρων με 5 μέτρα. Δεδομένου ότι για το ηλιοστατικό πεδίο η χαρακτηριστική κλίση ενός ηλιοστάτη είναι 150 m, η ακτίνα του σφαιρικού καθρέφτη θα είναι 300 m. Επομένως, για να μοντελοποιήσω τον ηλιοστάτη στο Tonatiuh, έκανα τα εξής:

1. Μεταβαίνω στο Tree View του Tonatiuh και επεκτείνω τον κόμβο TSeparatorKit "HeliostatField_Frame". Στη συνέχεια, αναπτύσσω τον κόμβο TSeparatorKit "Row01_Frame". Στη συνέχεια, αναπτύσσω τον κόμβο TSeparatorKit "Row". Στη συνέχεια, αναπτύσσω τον κόμβο "Heliostat01_Frame" TSeparatorKit και κάνω κλικ στον κόμβο "Heliostat" TSeparatorKit για να το επιλέξω.
2. Αφού επιλέξω τον κόμβο "Heliostat" με τη διαδρομή κόμβου "HeliostatField_Frame \ Row01_Frame \ Row \ Heliostat01_Frame", μεταβαίνω στην μπάρα μενού plug-in και κάνω κλικ στο εικονίδιο ShapeKit για να εισάγω ένα νέο αντικείμενο TShapeKit κάτω από το "Heliostat" TSeparatorKit.
3. Επεκτείνω τον κόμβο "Heliostat", εάν δεν έχει ήδη επεκταθεί, για να γίνει ο νέος TSeparatorKit ορατός στο Tree View. Μόλις είναι ορατό, κάνω διπλό κλικ για να αλλάξω το όνομά του από το "TShapeKit1" στο "Heliostat_ShapeKit".
4. Με το νέο "Heliostat_ShapeKit" TShapeKit που έχω επιλέξει, μεταβαίνω στη γραμμή μενού plug-in και κάνω κλικ στο εικονίδιο "Spherical_rectangle" για να εισάγω έναν νέο κόμβο σχήματος "Spherical_rectangle" κάτω από τον κόμβο "Heliostat_ShapeKit". Αυτός ο νέος κόμβος σχήματος θα δημιουργηθεί με το προεπιλεγμένο όνομα "Spherical_rectangle", αλλάζοντας το σε "Facet_Geometry".
5. Με τον κόμβο σχήματος "Facet_Geometry" που επέλεξα στο Tree View, μεταβαίνω στο παράθυρο διαλόγου "ShapeSphericalRectangle" που θα εμφανιστεί κάτω από την Tree View και ορίζω τις τιμές των παραμέτρων που ορίζουν αυτόν τον κόμβο σχήματος:

```
radius      300
width X     5
widthZ      5
activeSide  INSIDE
```

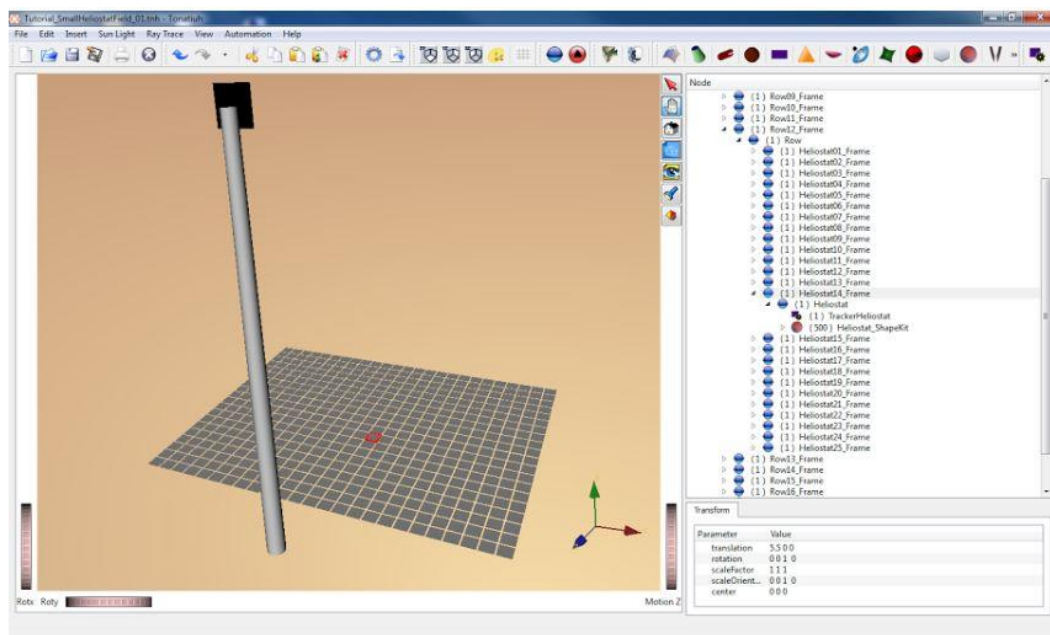
Πίνακας 10. Ιδιότητες Ηλιοστάτη [11]

1. Επιλέγω τον κόμβο "Heliostat_ShapeKit" TShapeKit και μεταβαίνω στη γραμμή μενού plug-in Tonatiuh και επιλέγω το εικονίδιο Specular_Standard_Material για να εισάγω έναν τυπικό κόμβο κατοπτρικού υλικού ως παιδί του κόμβου "Heliostat_ShapeKit".
2. Αφού δημιουργηθεί η νέα σημείωση υλικού στο TShapeKit του ηλιοστάτη, επιλέγω τον κόμβο υλικού για να αλλάξω τις ιδιότητες του προεπιλεγμένου υλικού.
3. Στο πλαίσιο διαλόγου ιδιότητες MaterialStandardSpecular που θα εμφανιστεί κάτω από το Tree View , για λόγους αυτού του tutorial, αλλάζω την τιμή της παραμέτρου "m_reflectivity" από 0 σε 1.
4. Μόλις ολοκληρωθεί ο πρώτος κόμβος "Heliostat_ShapeKit" με τους δύο κόμβους παιδιά : "Facet_Geometry" και "Specular_Standard_Material", αυτός ο ίδιος κόμβος πρέπει να "επικολληθεί" σε 499 εναπομείναντες κόμβους "Heliostat", οι οποίοι βρίσκονται κάτω από τις ακόλουθες διαδρομές "HeliostatField_Frame! RowXX_Frame \ Row! HeliostatYY_Frame", όπου το XX είναι ο αριθμός σειράς, που κυμαίνεται από 0 έως 20, και YY είναι ο αριθμός ηλιοστάτης σε μια δεδομένη σειρά, η οποία κυμαίνεται από 0 έως 25.
5. Για να "επικολλήσω" τον κόμβο "Heliostat_ShapeKit", πρώτα το αντιγράφω στον πίνακα κλιπ, τον επιλέγω και κάνω "Ctrl + c", κατόπιν κάνω δεξί κλικ στον κόμβο "Heliostat" στον οποίο θέλω να κάνω " link " και με τον κόμβο " Heliostat "που επέλεξα , στο μενού που θα εμφανιστεί επιλέγω την επιλογή" Επικόλληση σύνδεσης ", η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από την επιλογή" Επικόλληση ". Κάνοντας "Επικόλληση συνδέσμου" αντί για "Επικόλληση" αποκτώ σημαντική εξοικονόμηση μνήμης, αφού αντί να αντιγράψω 500 φορές τα αντικείμενα που συνθέτουν το "Heliostat_ShapeKit" προσθέτω μόνο 500 αναφορές (δηλ. Δείκτες) .



Σχήμα 16. Δημιουργία ηλιοστατών (1) [11]

Το Σχήμα 16 δείχνει το GUI του Tonatiuh κατά τη διάρκεια της διαδικασίας "Επικόλληση σύνδεσης" του "Heliostat_ShapeKit" σε κάθε έναν από τους 500 κόμβους που ονομάζονται "Heliostat" που ορίζονται στις διάφορες σειρές heliostats που σχηματίζουν το πεδίο ηλιοστατών. Το σχήμα δείχνει την στιγμή κατά την οποία ο κόμβος "Heliostat_ShapeKit" έχει "επικολληθεί" σε όλους τους κόμβους που ονομάζονται "Heliostat" των πρώτων τριών σειρών (πιο μακριά από τον πύργο) και σε 20 κόμβους "Heliostat" της τέταρτης σειράς. Αυτός είναι ο λόγος που ο αριθμός στις παρενθέσεις πριν από το όνομα "Heliostat_ShapeKit" υποδηλώνει 95, δεδομένου ότι ο αριθμός αυτός υποδεικνύει τον αριθμό των χρόνων που αναφέρεται ένα συγκεκριμένο αντικείμενο στο μοντέλο φυσικής περιγραφής του Tonatiuh[11].



Σχήμα 17. Δημιουργία ηλιοστατών (2) [11]

Το Σχήμα χ εμφανίζει το γραφικό περιβάλλον του Tonatiuh μετά τη διαδικασία του "Προηγούμενου συνδέσμου" του "Heliostat_ShapeKit" σε κάθε έναν από τους 500 κόμβους με το όνομα "Heliostat". Μπορείτε να δείτε τις 20 σειρές των 25 ηλιοστατών που ορίζουν το ηλιοστατικό πεδίο. Στο σχήμα, όλοι οι ηλιοστάτες στοχεύουν προς τα πάνω, αφού η θέση του ήλιου και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στους ηλιοστατικούς δεν έχουν ακόμα καθοριστεί[11].

2.1.4.5 Μοντελοποίηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας

Για να καθορίσω τα χαρακτηριστικά της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που επέρχεται στο ηλιακό σύστημα συγκέντρωσης, έκανα τα εξής:

1. Πηγαίνω στο κύριο μενού και κάνω κλικ στο "Sun Light".
2. Στη συνέχεια, στο μενού που θα εμφανιστεί, κάνω κλικ στην επιλογή "Καθορισμός του SunLight ...", η οποία θα πρέπει να είναι η μόνη διαθέσιμη επιλογή.
3. Κάνοντας κλικ στην επιλογή "Ορισμός SunLight" θα εμφανιστεί το αναδυόμενο μενού "Define Sun Light" στον χρήστη. Στην καρτέλα "Sun Shape" του διαλόγου ορίζω τις τιμές παραμέτρων της καρτέλας ως εξής:

Sunshape Type:	Pillbox_Sunshape
irradiance (W/m2):	920
thetaMax (rad):	0.00465
Shape Type:	Flat_Rectangle
width (m):	170
height (m):	150
activeSide:	FRONT

Πίνακας 11. Ιδιότητες Ήλιου (1) [11]

1. Στην καρτέλα "Sun Position" του παραθύρου διαλόγου ορίζω τις τιμές παραμέτρων της καρτέλας ως εξής:

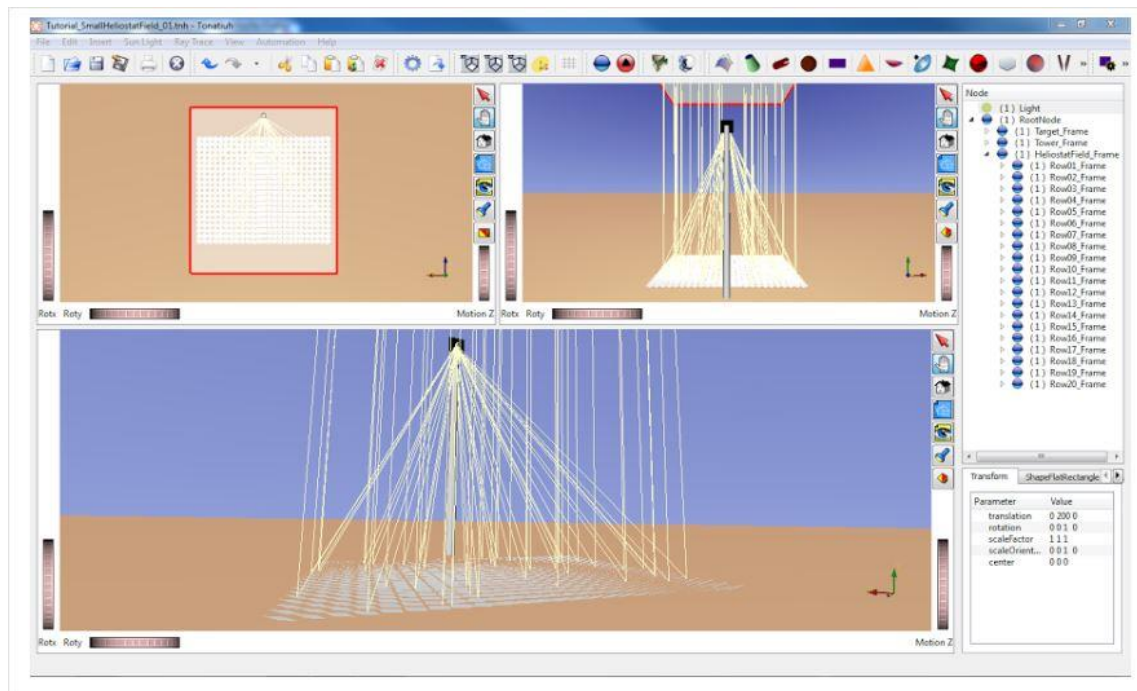
Azimuth (Degrees North towards East):	0.0
Elevation (Degrees from horizontal plane):	90.0
Distance (m)	: 200.0

Πίνακας 12. Ιδιότητες Ήλιου (2) [11]

1. Αφού ορίσω όλες τις κατάλληλες τιμές διαλόγου "Sun Shape", κάνω κλικ στο κουμπί "OK" του παραθύρου διαλόγου για να κλείσω το παράθυρο διαλόγου και να δημιουργήσω το αντίστοιχο αντικείμενο Light μέσα στο Tonatiuh.

Με βάση τα παραπάνω βήματα, ένας ειδικός κόμβος με την ένδειξη "Light" θα εμφανιστεί στην προβολή δέντρων του Tonatiuh. Επιπλέον, κάθε ένας από τους 500 ηλιόστατες που συνθέτουν το ηλιοστατικό πεδίο θα είναι προσανατολισμένος κατάλληλα έτσι ώστε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω τους να αντανακλάται προς το κέντρο του κεντρικού ανοίγματος δέκτη.

Προσοχή!!! Ο ειδικός κόμβος "Light" δεν υπάρχει στο τελευταίο update του προγράμματος.

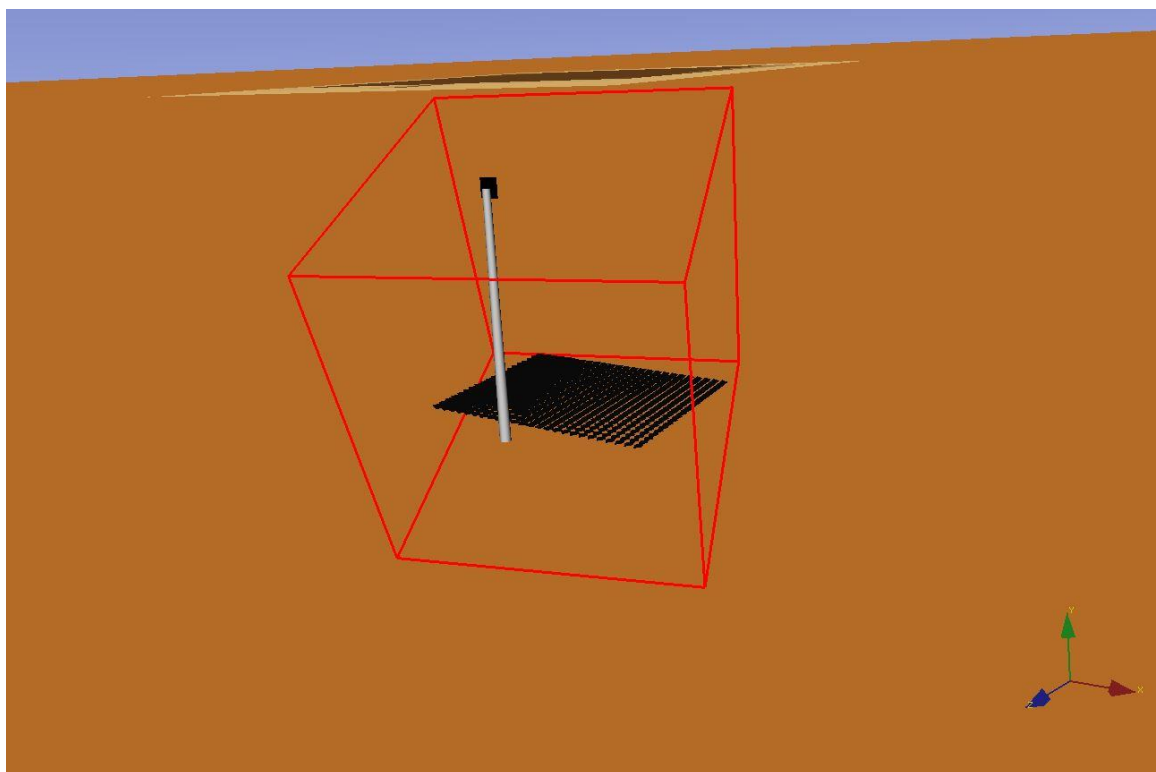


Σχήμα 18. 'Τεστάρω' το πρόγραμμα [11]

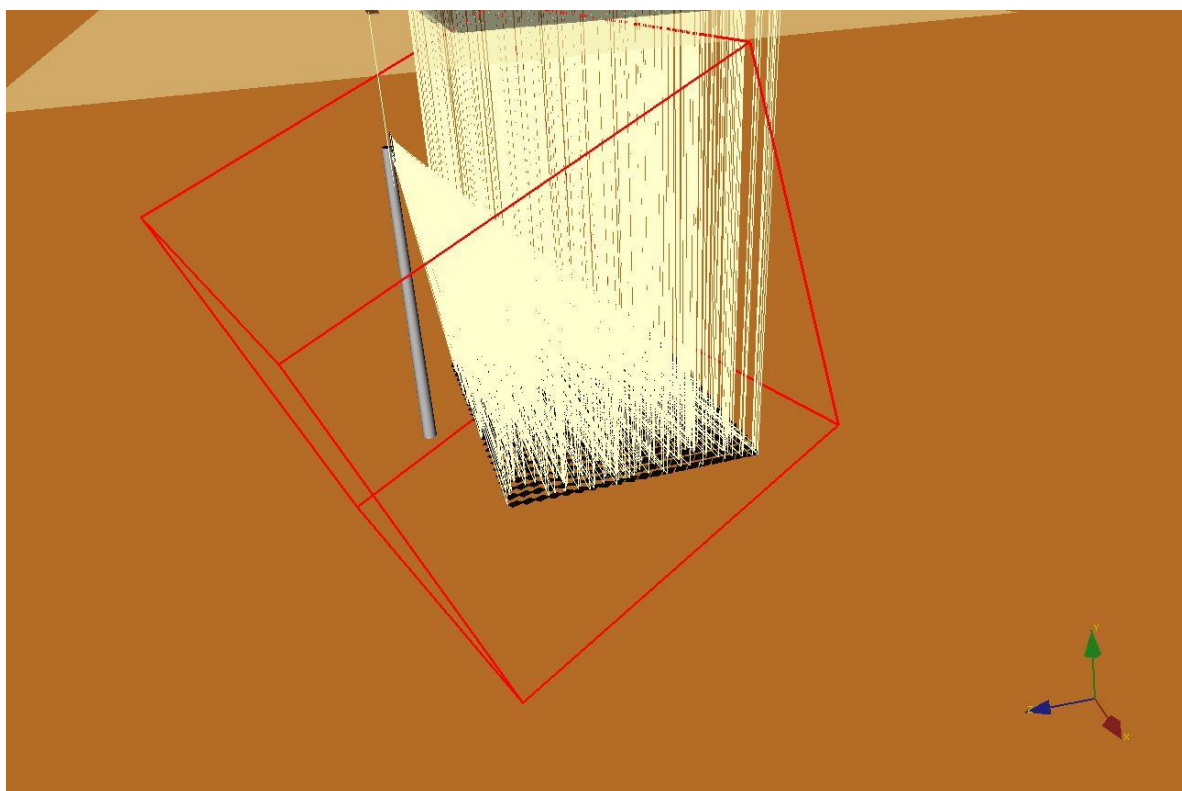
Για να βεβαιωθώ ότι όλοι οι ηλιοστάτες προσανατολίζονται σωστά από τους "trackers" τους, απλώς πατάω το πλήκτρο "Εκτέλεση" στη γραμμή μενού για να ρίξω μερικές ηλιακές ακτίνες πάνω από το πεδίο του ηλιοστάτη για να αναπαραστήσω τις αντανακλάσεις τους στους ηλιοστάτες στην προβολή 3D του Tonatiuh. Το σχήμα 18 δείχνει τα αποτελέσματα μιας τέτοιας δοκιμής. Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα, οι ηλιοστάτες αντικατοπτρίζουν κατάλληλα την άμεση ηλιακή ακτινοβολία προς το κέντρο του κεντρικού ανοίγματος του δέκτη. Με αυτήν την επαλήθευση τελειώνει η μοντελοποίηση του μικρού κεντρικού συστήματος δέκτη που εξετάστηκε για αυτό το tutorial[11].

2.1.4.6 Υπολογισμός της συγκεντρωμένης ηλιακής ροής στο άνοιγμα εισόδου του κεντρικού δέκτη

Μόλις διαμορφωθεί το σύστημα πύργου, το Tonatiuh μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της οπτικής συμπεριφοράς του συστήματος. Με το Tonatiuh μπορώ να προσομοιώσω τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος υπό διαφορετικές ηλιακές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές χαρακτηρίζονται από την ηλιακή θέση στον ουρανό, η οποία καθορίζει την κύρια κατεύθυνση της εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας η οποία καθορίζει την ποσότητα ακτινοβολούμενης ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας που είναι στην κύρια κατεύθυνση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και σχετίζεται με αυτή την ακτινοβολία[11].



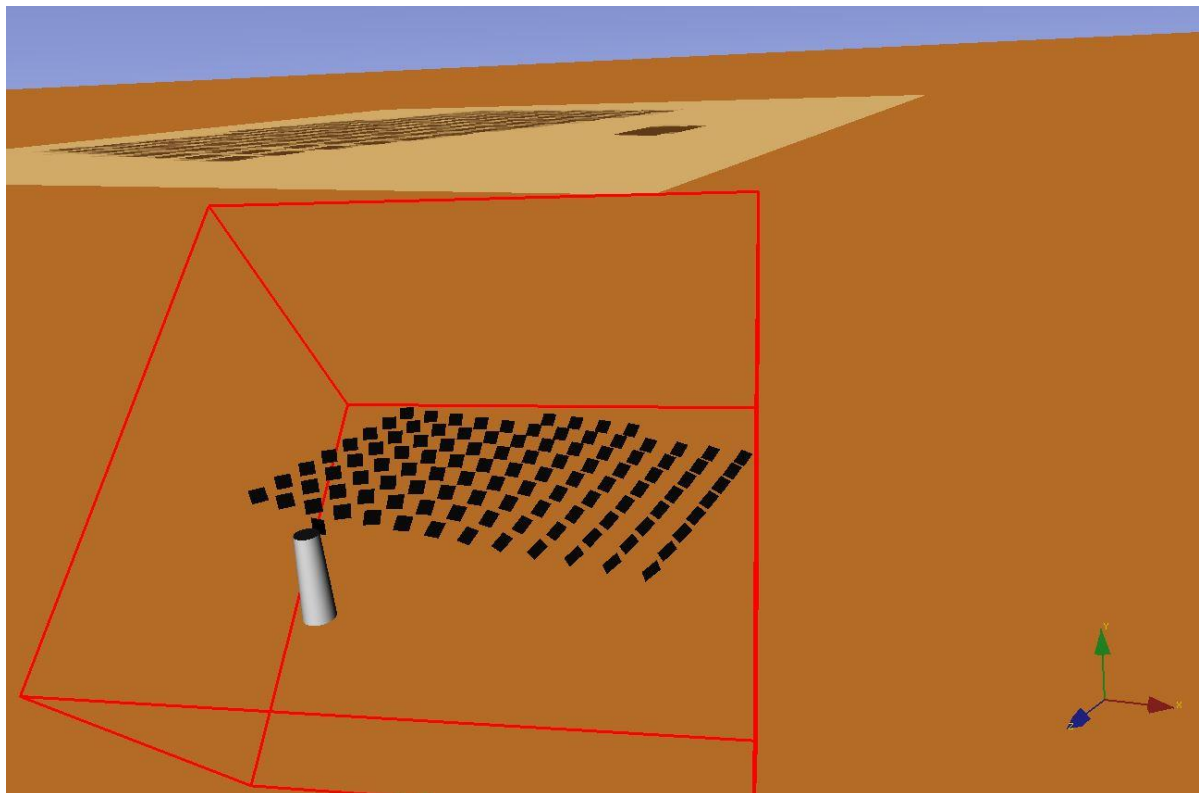
Σχήμα 19. Διάταξη Tutorial



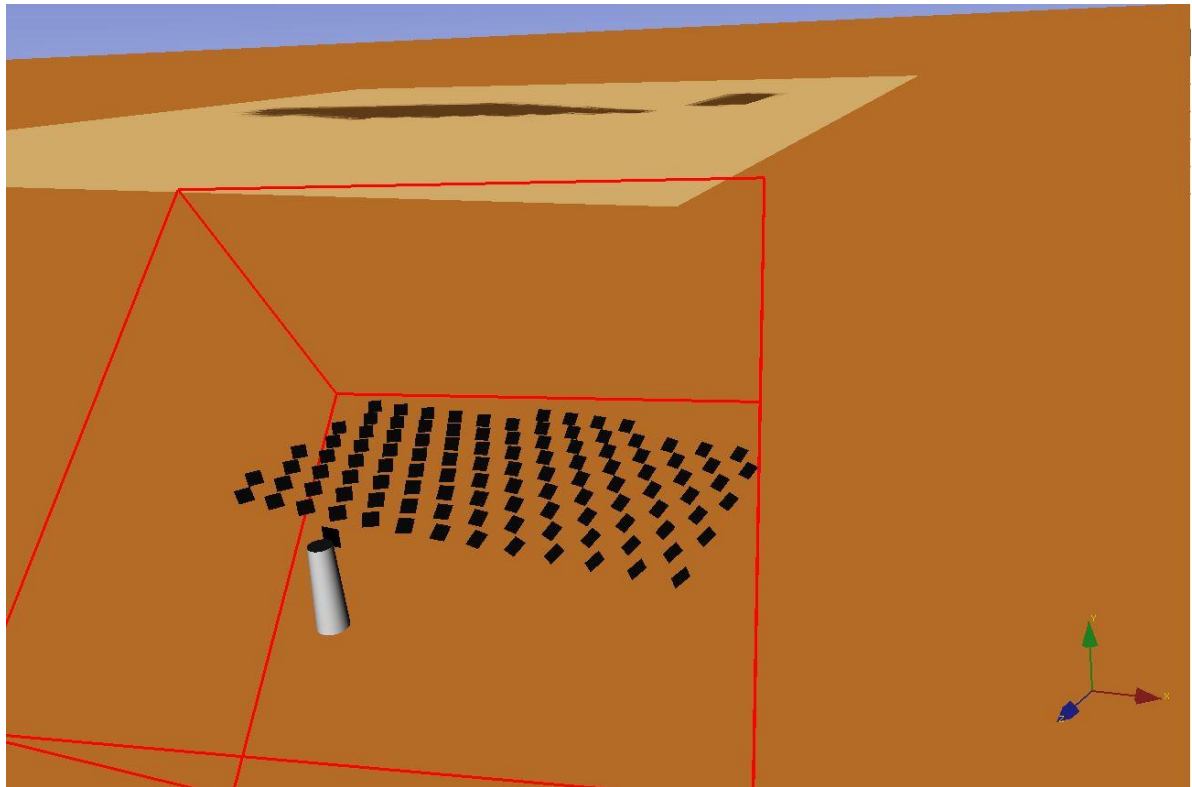
Σχήμα 20. Ray Traced Διάταξη Tutorial

2.2 Συγκριτική μελέτη αποτελεσμάτων με ένα αντίστοιχο σύστημα στην Καλιφόρνια

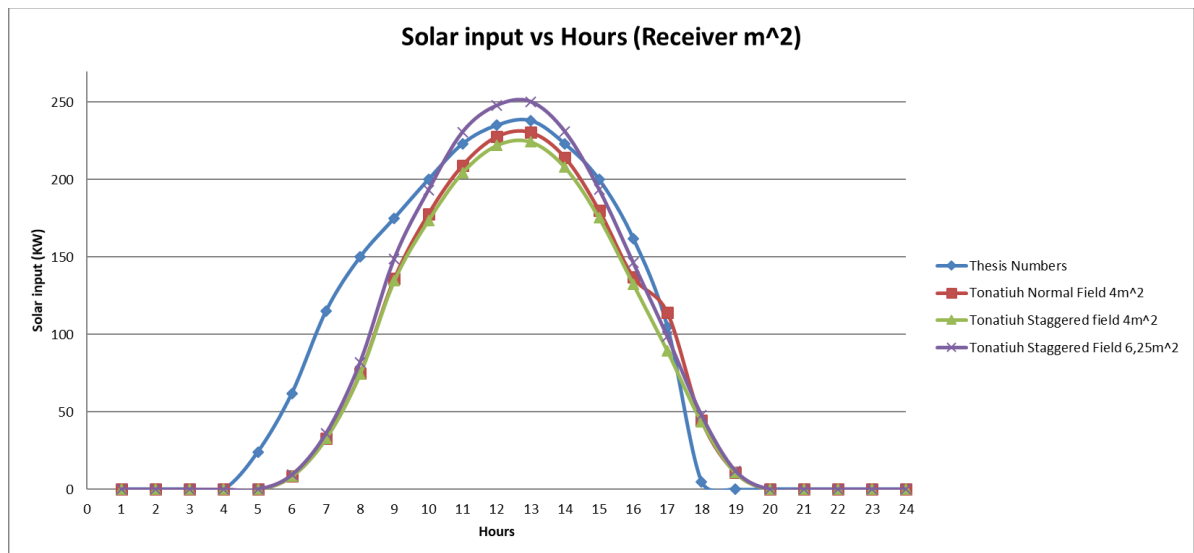
Για να μπορέσουμε να διακριβώσουμε τη σωστή λειτουργία του προγράμματος αλλά και για να έχουμε μία γενική εικόνα των αποτελεσμάτων του προγράμματος Tonatiuh μοντελοποιήσαμε ένα παρόμοιο ,μικρότερης κλίμακας , ηλιακό σύστημα το οποίο εδρεύει στην Καλιφόρνια. Τα στοιχεία που είχαμε διαθέσιμα για να γίνει η μοντελοποίηση είναι το ύψος του πύργου 11m, ο αριθμός ηλιοστατών (108) και τα διαθέσιμα κλιματολογικά δεδομένα της καλιφόρνιας. Δυστυχώς δεν είχαμε τις ακριβείς γεωμετρικές συντεταγμένες των ηλιοστατών και του εμβადού του δέκτη[1].



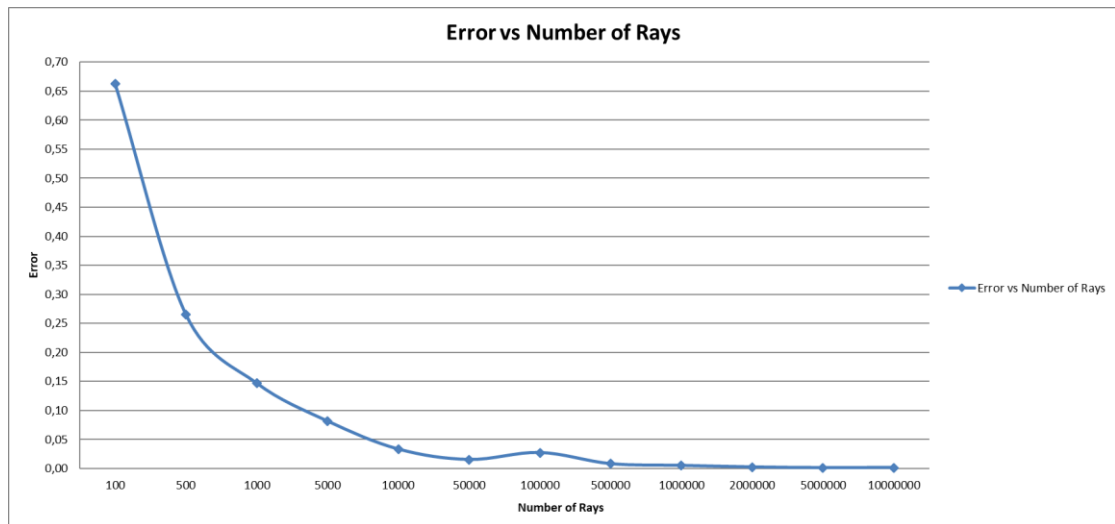
Σχήμα 21. Κανονική διάταξη Καλιφόρνιας



Σχήμα 22. Ακτινική διάταξη Καλιφόρνιας



Διάγραμμα 1. Ηλιακή ενέργεια στη διάταξη Καλιφόρνιας κατά τη διάρκεια της 15^{ης} Ιουνίου 2018



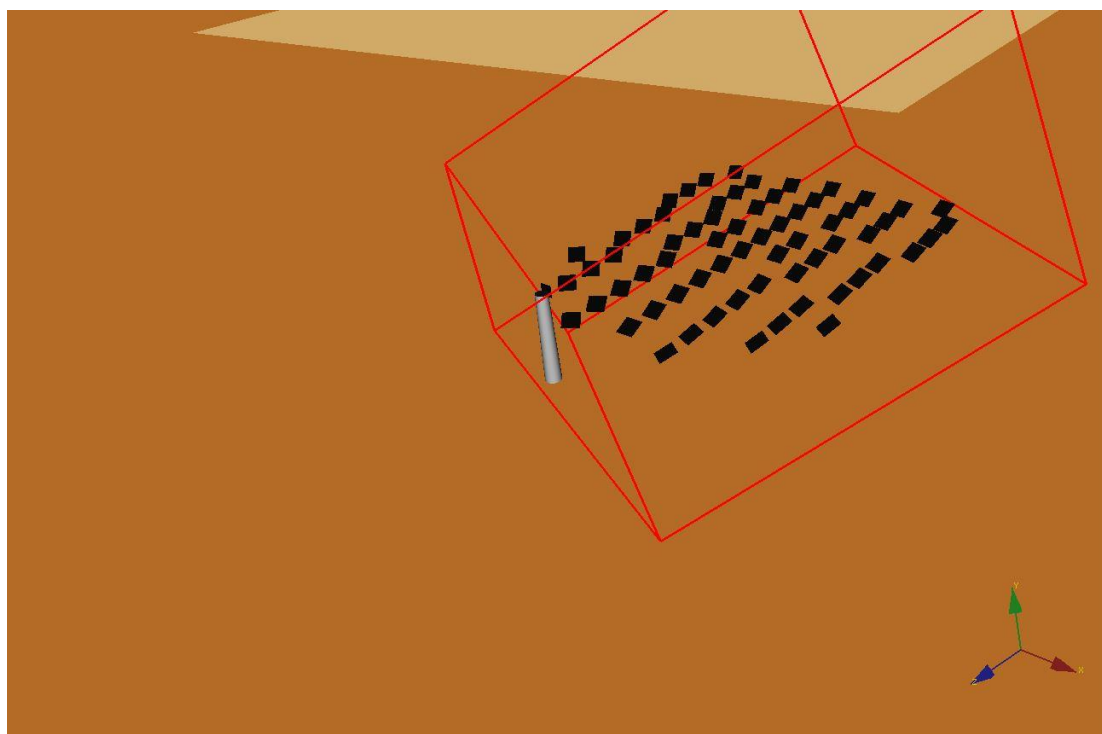
Διάγραμμα 2. Διάγραμμα απεικόνισης ανεξαρτησίας ακτινών σε σχέση με το σφάλμα

2.3 Αποτελέσματα υπολογιστικής και θεωρητικής μελέτης για το ‘In House’ μοντέλο ηλιακού πάρκου στην περιοχή του Ελληνικού (CSP)

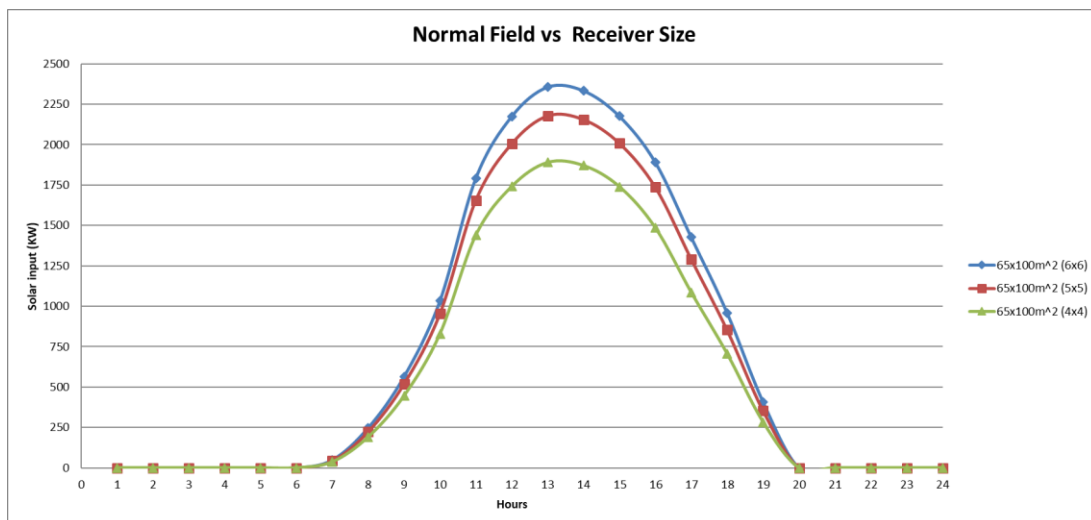
Η ανάλυση ξεκίνησε “δεσμεύοντας” μία συγκεκριμένη επιφάνεια στην περιοχή του Ελληνικού στην οποία αποτύπωσα διάφορες γεωμετρικές διατάξεις για το ηλιακό πάρκο με στόχο τη βέλτιστη λειτουργία του (μεγιστοποίηση ηλεκτρικής ισχύος). Το πάρκο έχει διαστάσεις ορθογωνικού τύπου 260x170 μέτρα επίπεδης επιφάνειας. Τα γεωμετρικά μοντέλα που σχεδιάστηκαν (βλέπε παράρτημα) είναι τα παρακάτω:

- Τυχαία Διάταξη 65 ηλιοστατών
- Ακτινική Διάταξη 56 ηλιοστατών
- Ακτινική Διάταξη 122 ηλιοστατών και
- Ακτινική Διάταξη 90 ηλιοστατών

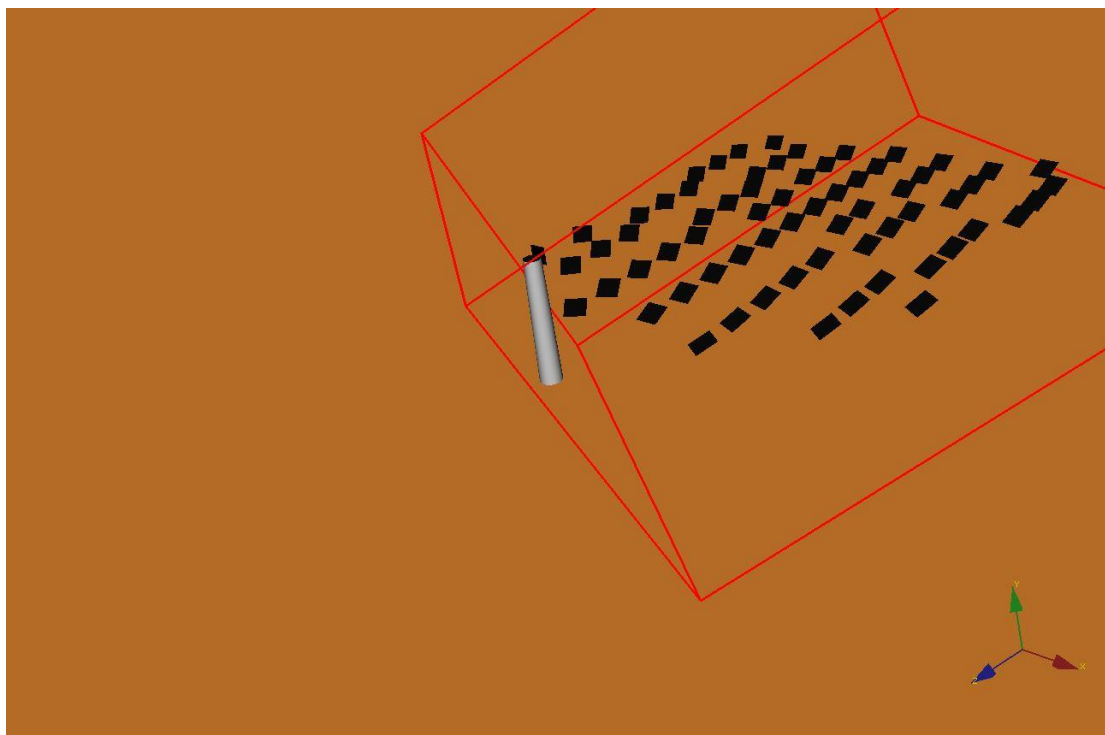
Οι παραπάνω διατάξεις όπως αποτυπώθηκαν στο ανοικτό λογισμικό Tonatiuh παρουσιάζονται στις παρακάτω σελίδες μαζί με τα αποτελέσματα που δείχνουν την παραγωγή ηλιακής ενέργειας στον δέκτη (receiver) του ηλιακού πύργου συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων (αριθμός ηλιοστατών , μέγεθος δέκτη κ.τ.λ.).



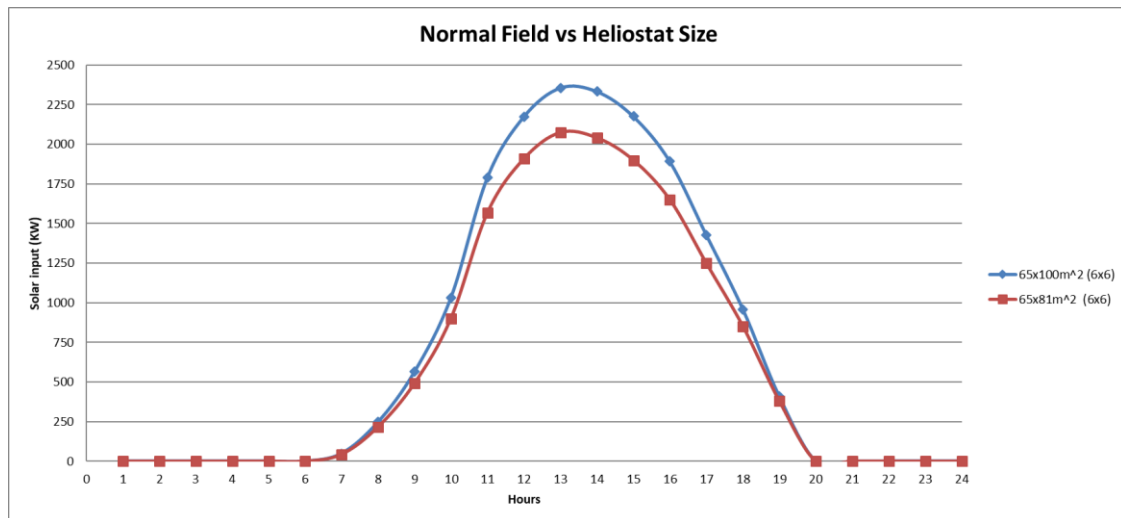
Σχήμα 23. Τυχαία Διάταξη 65 (Ηλιοστάτες) x 100 m² (Επιφάνεια)



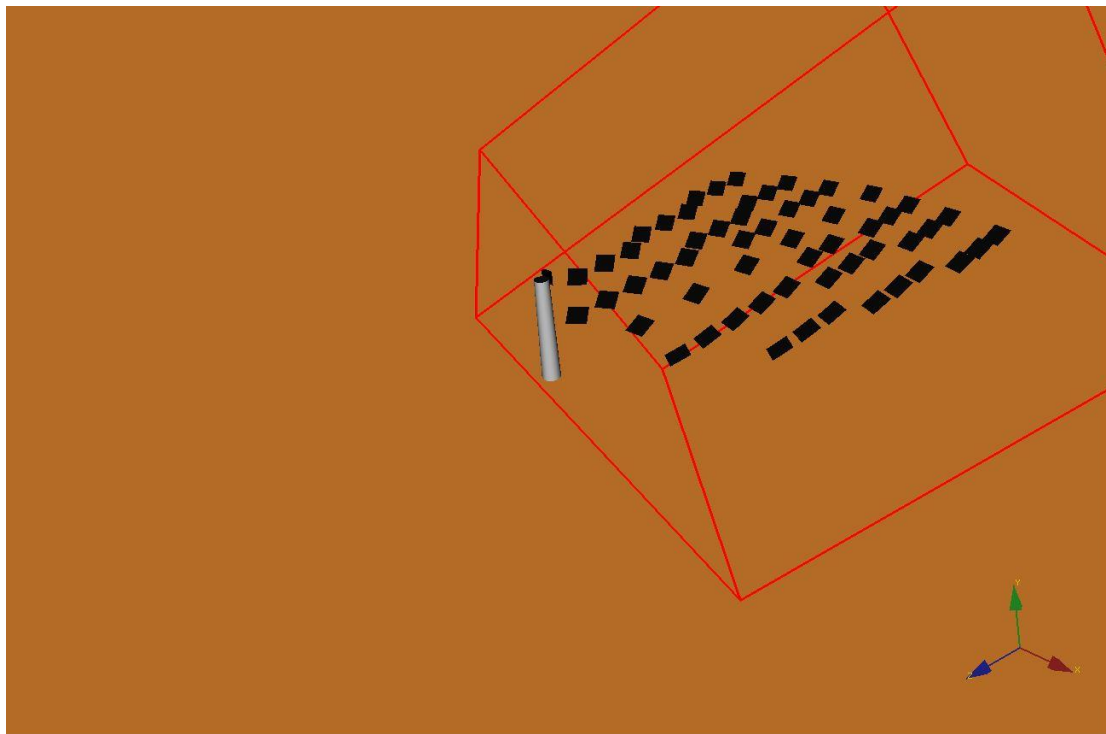
Διάγραμμα 3. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς το μέγεθος του δέκτη



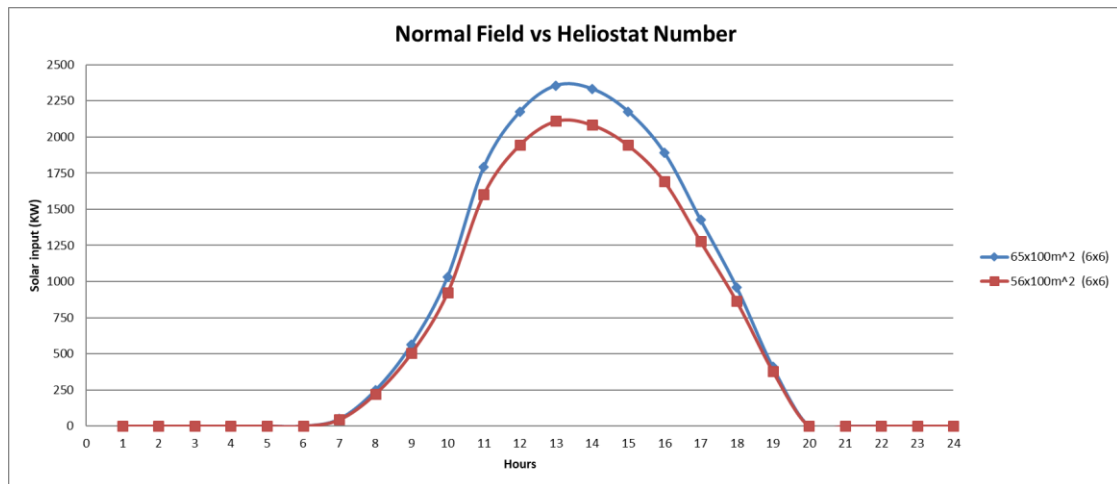
Σχήμα 24. Τυχαία Διάταξη 65 (Ηλιοστάτες) x 81 m² (Επιφάνεια)



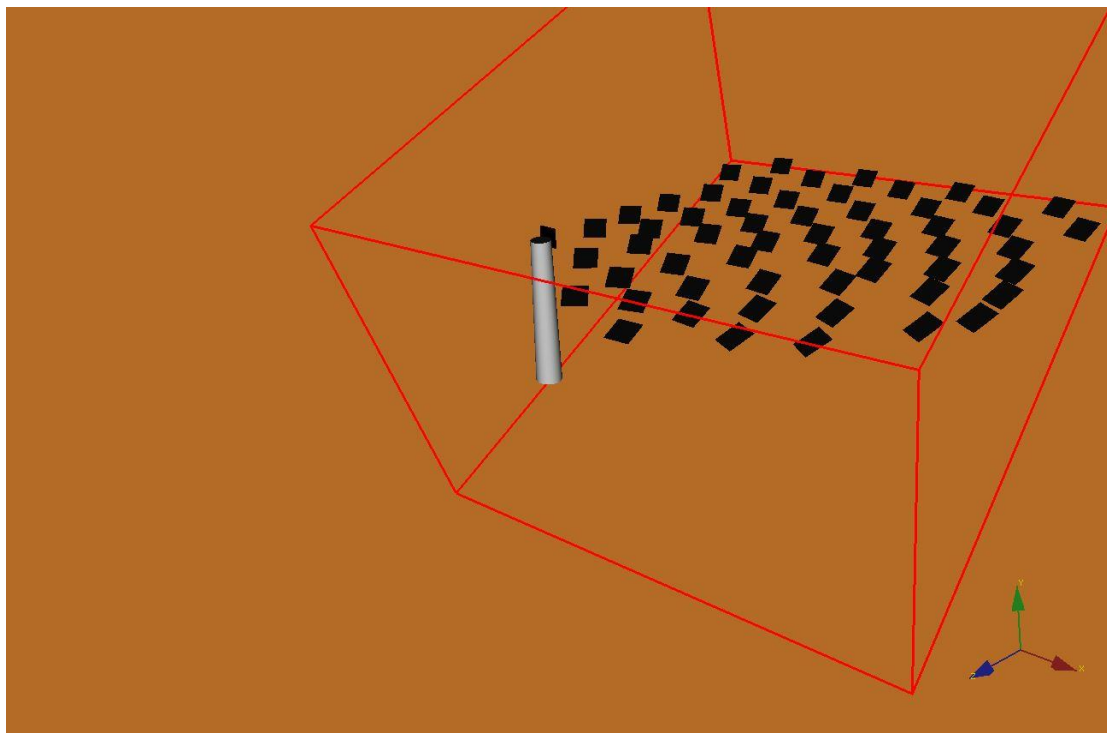
Διάγραμμα 4. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς το μέγεθος του ηλιοστάτη



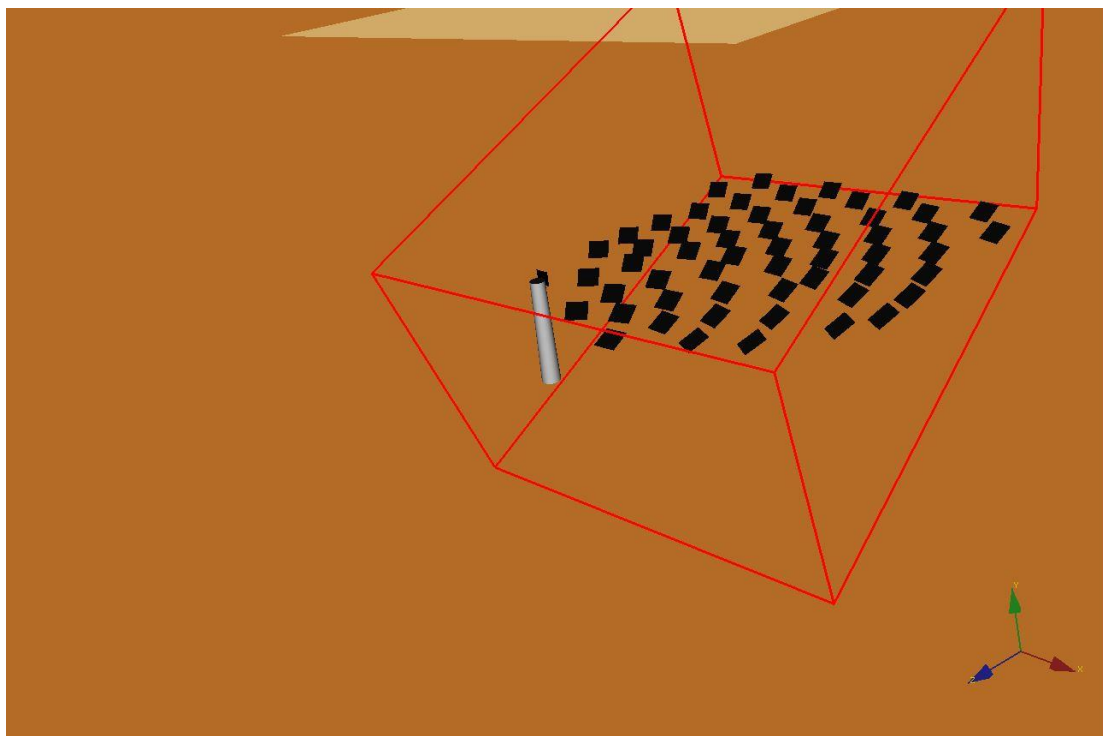
Σχήμα 25. Τυχαία Διάταξη 56 (Ηλιοστάτες) x 100 m² (Επιφάνεια)



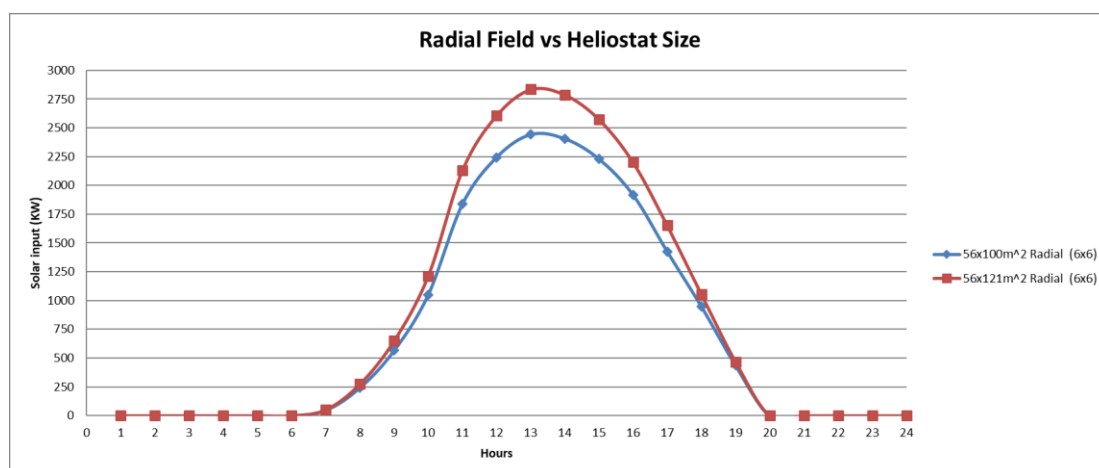
Διάγραμμα 5. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς τον αριθμό ηλαιοστατών



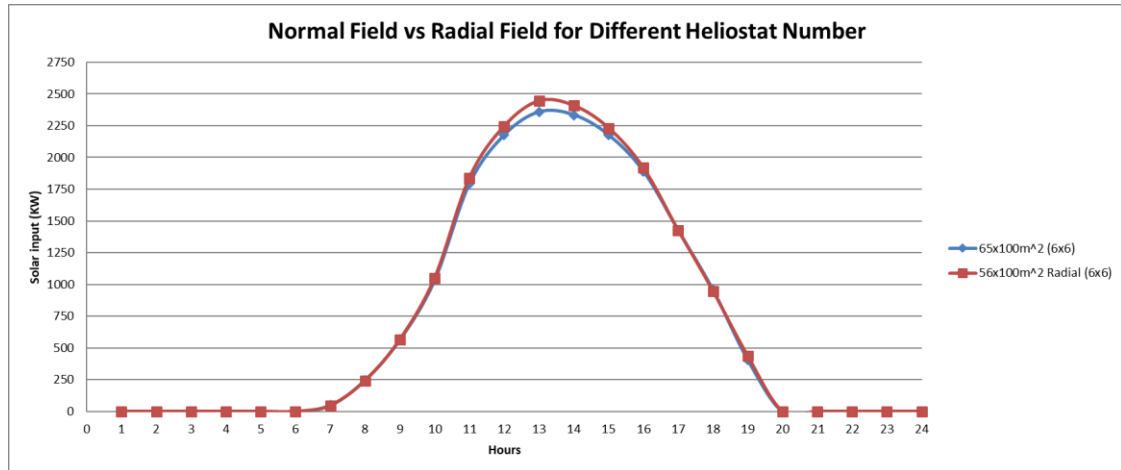
Σχήμα 26. Ακτινική Διάταξη (1) 56 (Ηλιοστάτες) x 100 m² (Επιφάνεια)



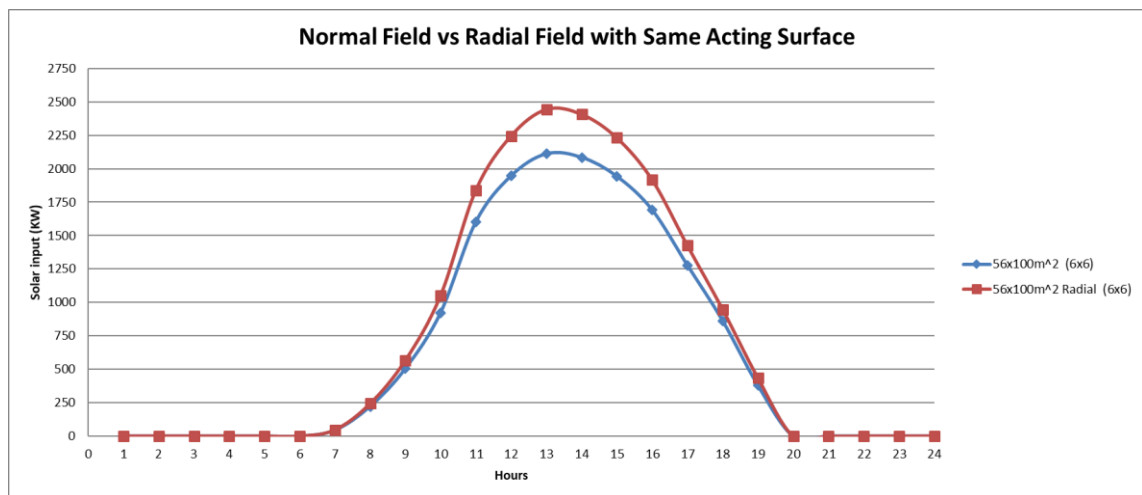
Σχήμα 27. Ακτινική Διάταξη (1) 56 (Ηλιοστάτες) x 121 m² (Επιφάνεια)



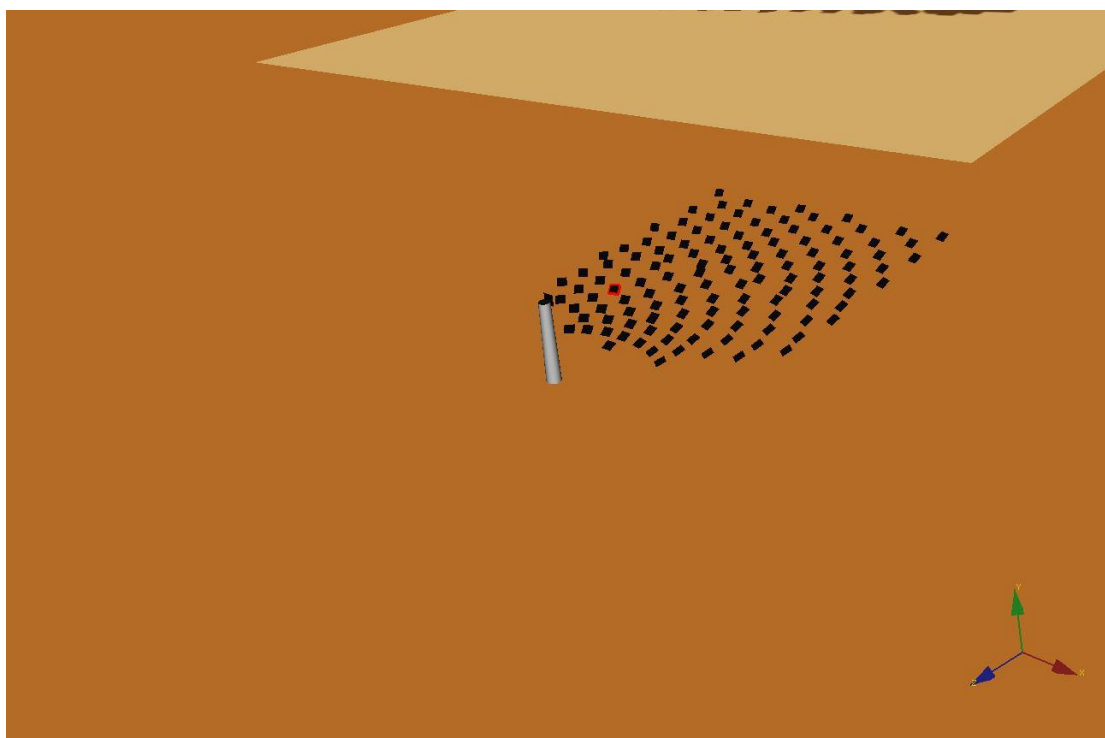
Διάγραμμα 6. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Ακτινικής Διάταξης ως προς το μέγεθος του ηλιοστάτη



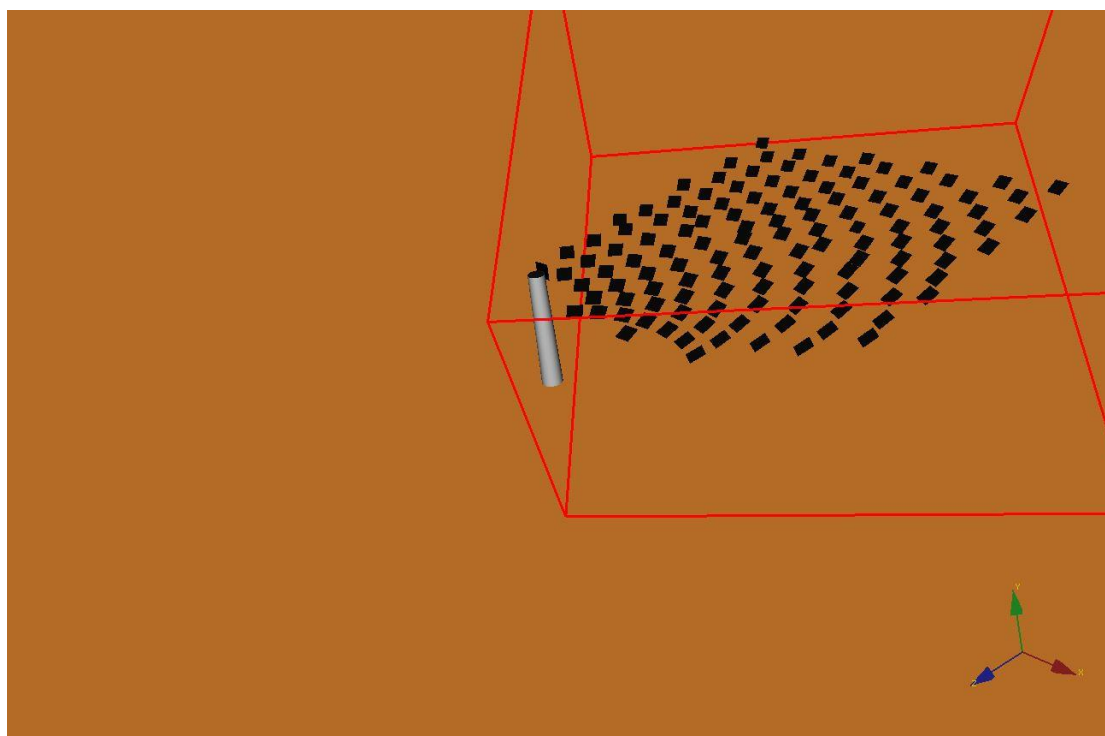
Διάγραμμα 7. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς την Ακτινική Διάταξη



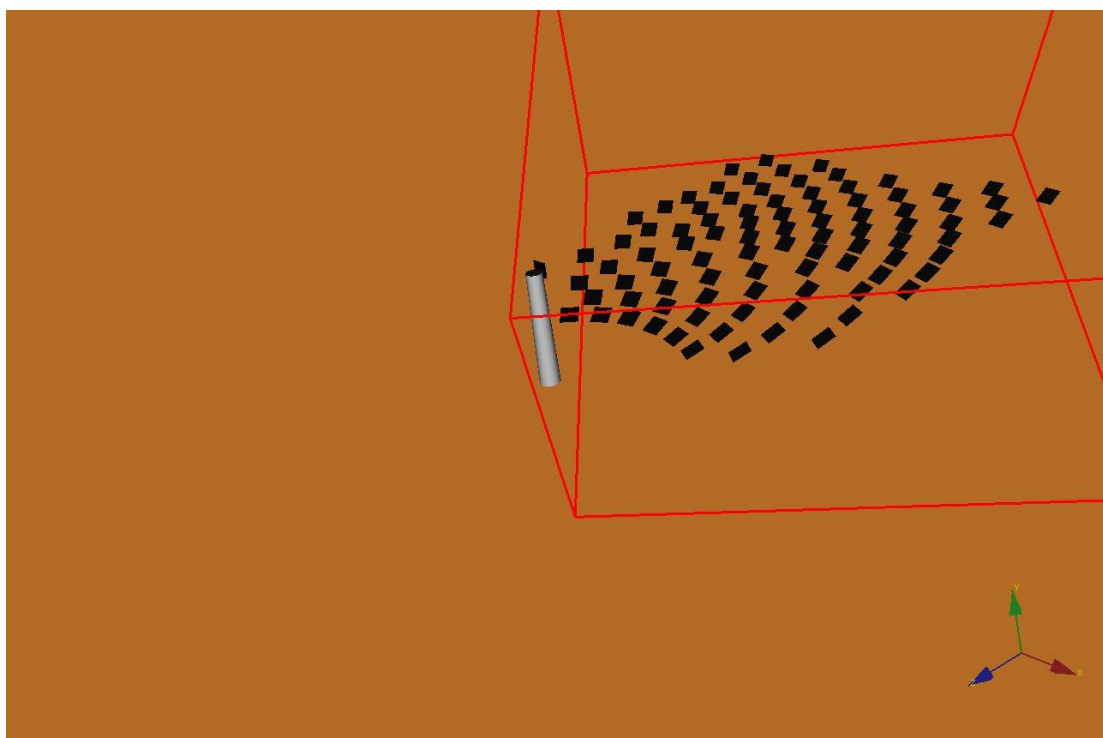
Διάγραμμα 8. Ηλιακή Ενέργεια σε KW Τυχαίας Διάταξης ως προς την Ακτινική Διάταξη με ίδια εργαζόμενη επιφάνεια



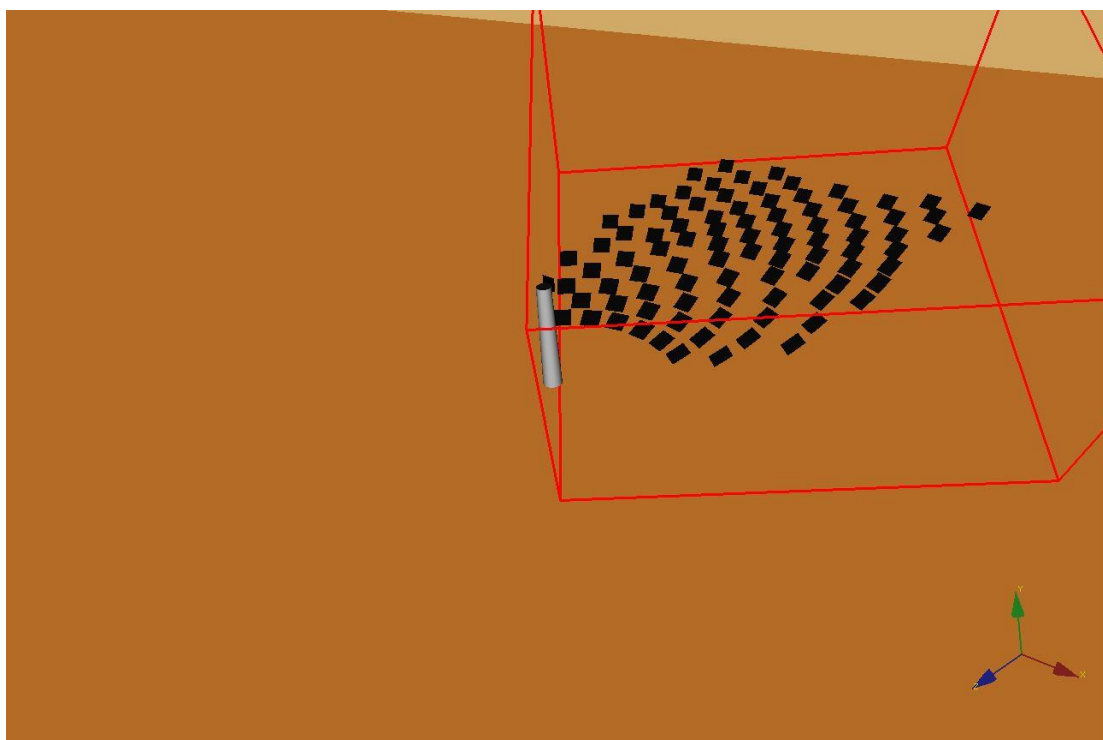
Σχήμα 28. Ακτινική Διάταξη (2) 122 (Ηλιοστάτες) x 36 m² (Επιφάνεια)



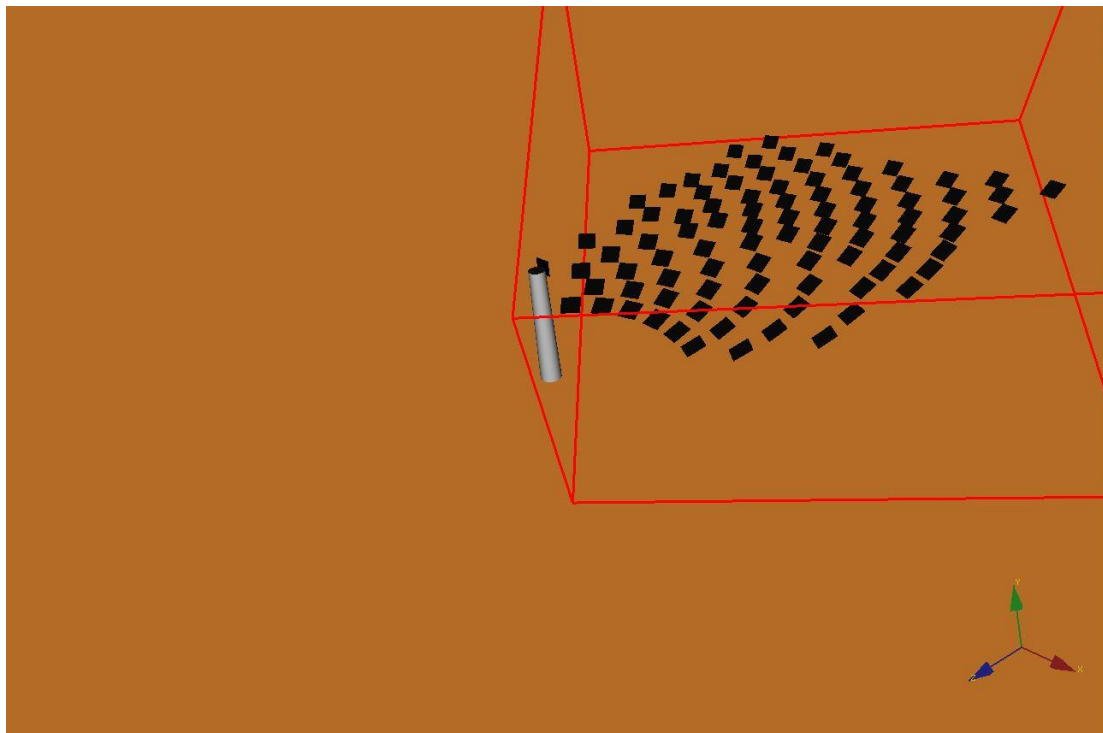
Σχήμα 29. Ακτινική Διάταξη (2) 122 (Ηλιοστάτες) x 49 m² (Επιφάνεια)



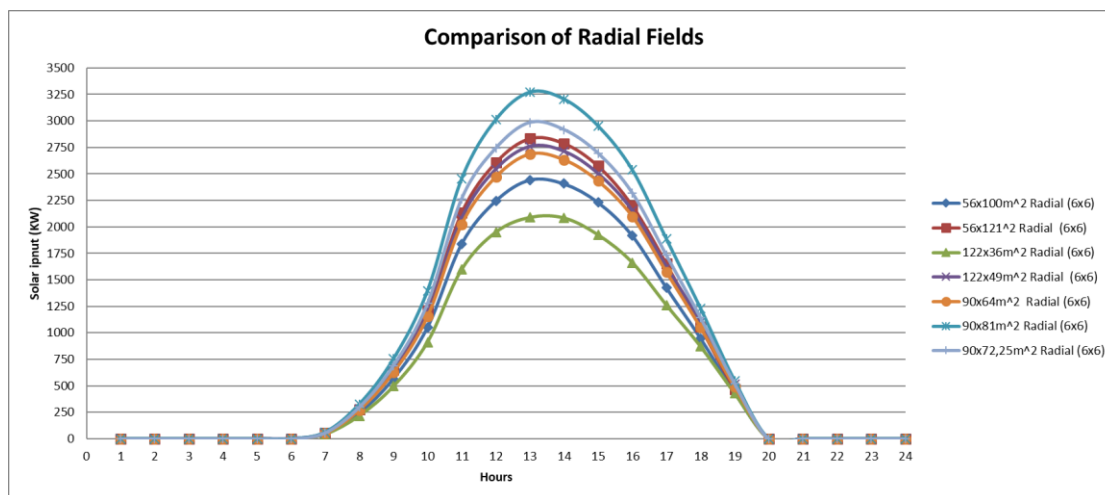
Σχήμα 30. Ακτινική Διάταξη (3) 90 (Ηλιοστάτες) x 64 m^2 (Επιφάνεια)



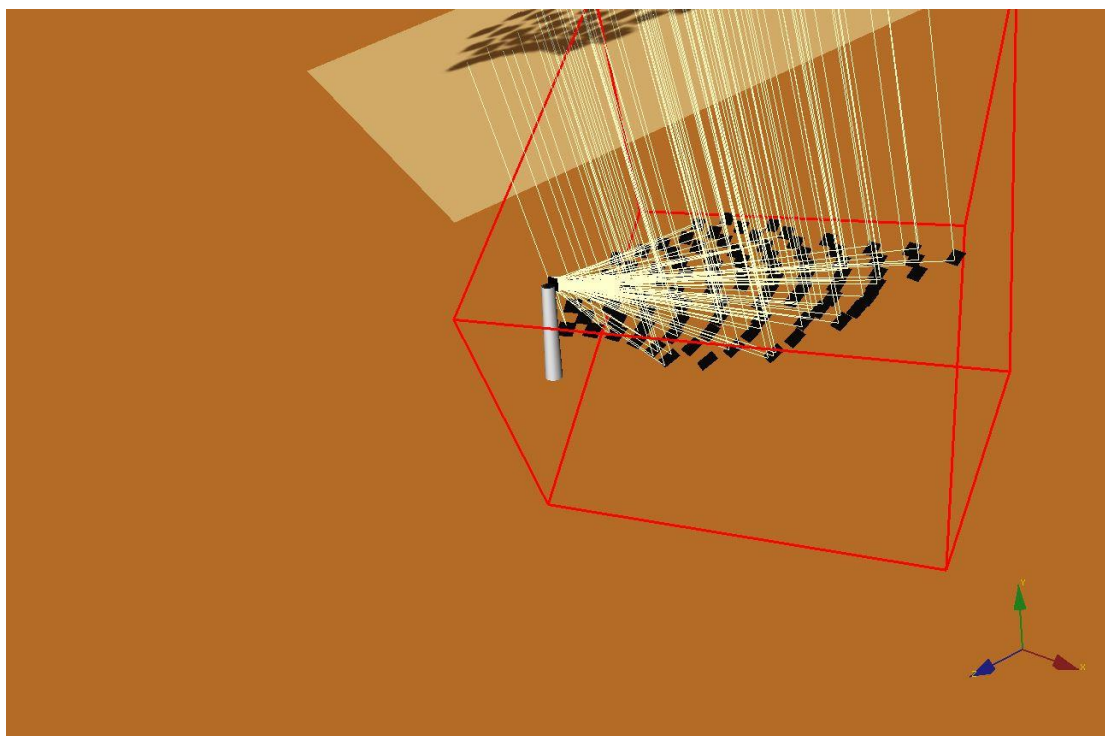
Σχήμα 31. Ακτινική Διάταξη (3) 90 (Ηλιοστάτες) x 81 m^2 (Επιφάνεια)



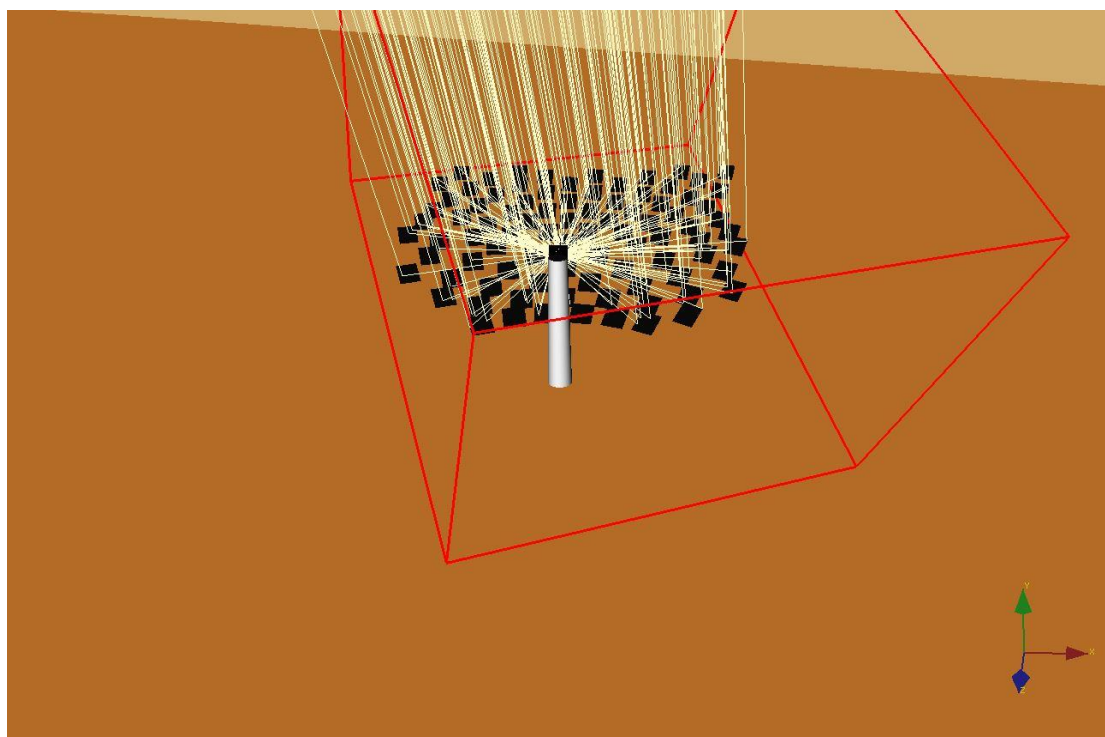
Σχήμα 32. Ακτινική Διάταξη (3) 90 (Ηλιοστάτες) x 72,25 m² (Επιφάνεια)



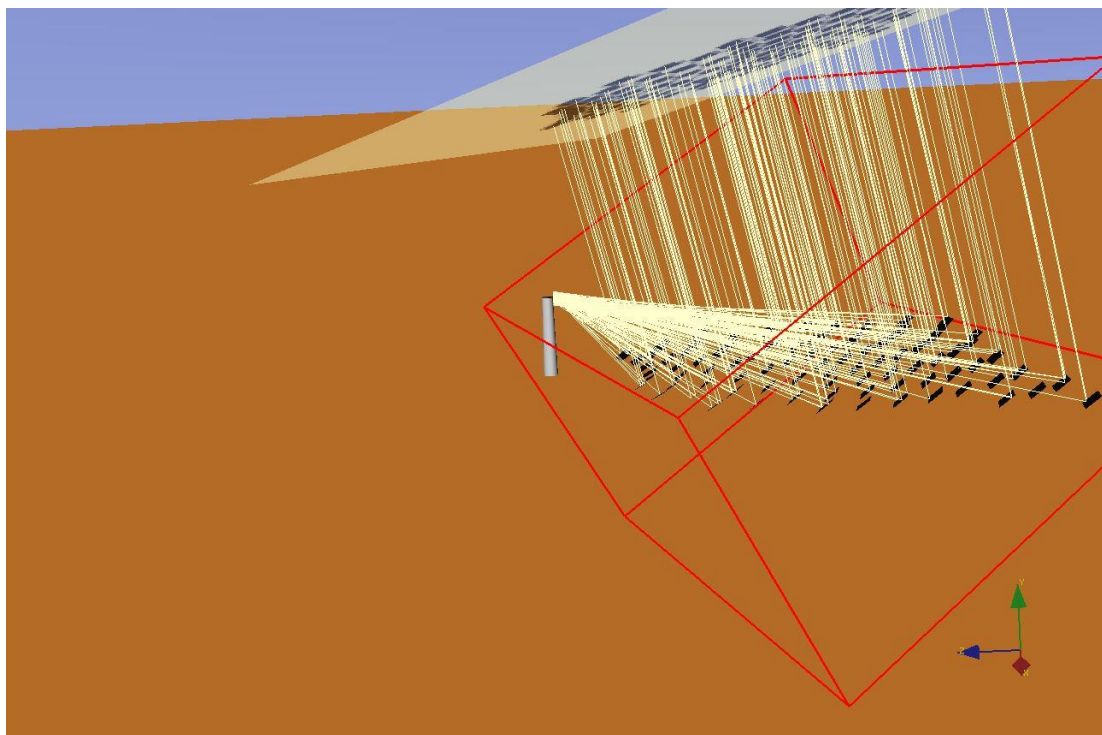
Διάγραμμα 9. Αποτελέσματα Ανάλυσης Ηλιακής ενέργειας για την 15^η Ιουνίου του 2018



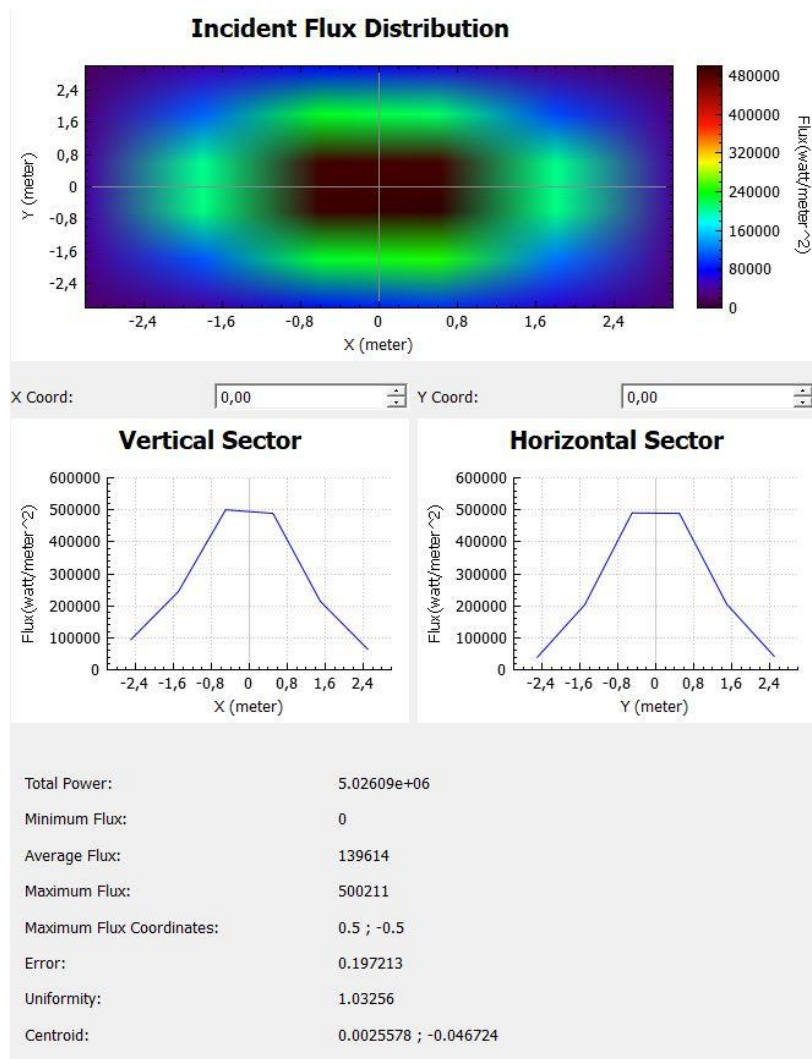
Σχήμα 33. Ακτινική Διάταξη (3) Ray Traced (1) 90 (Ηλιοστάτες) x 81 m²
(Επιφάνεια)



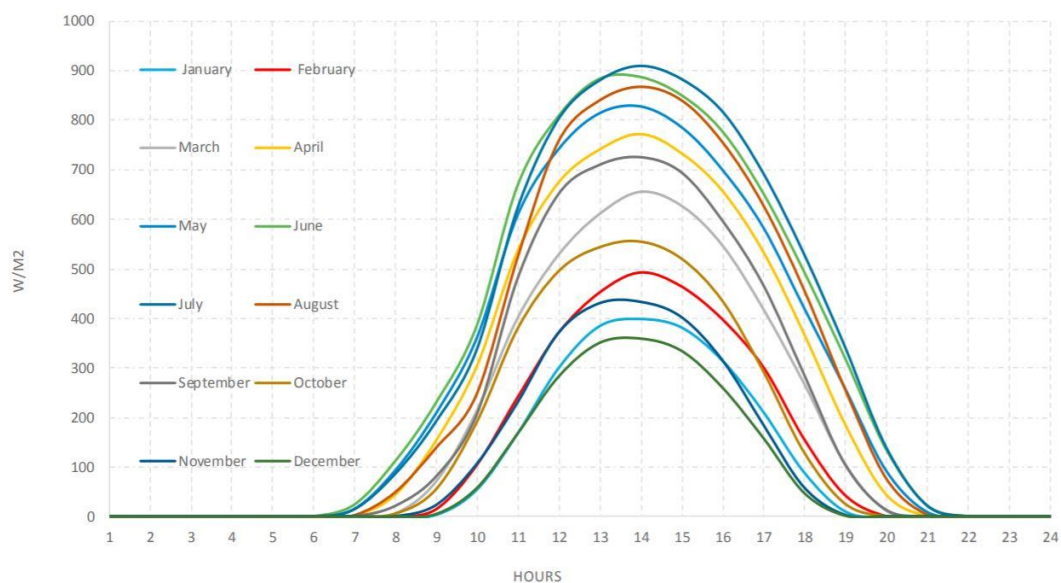
Σχήμα 34. Ακτινική Διάταξη (3) Ray Traced (2) 90 (Ηλιοστάτες) x 81 m²
(Επιφάνεια)



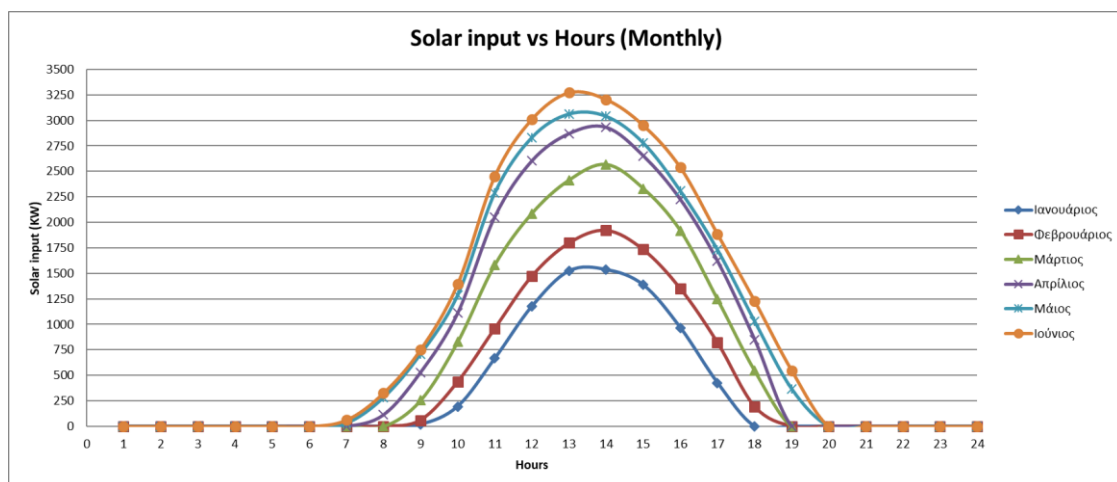
Σχήμα 35. Ακτινική Διάταξη (3) Ray Traced (3) 90 (Ηλιοστάτες) x 81 m²
(Επιφάνεια)



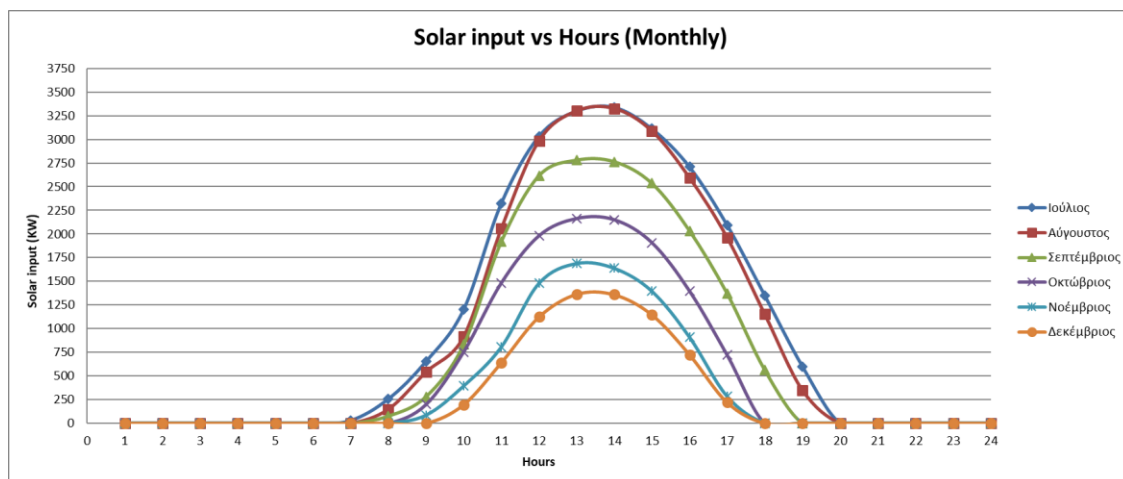
Πίνακας 13. Αποτελέσματα Ανάλυσης Tonatiuh 15^η Ιουνίου (13:00) του 2018



Διάγραμμα 10. Μηνιαία πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (G σε W/m^2) στην Αθήνα[3]



Διάγραμμα 11. Αποτελέσματα Ανάλυσης Ηλιακής ενέργειας Ιανουάριος-Ιούνιος



Διάγραμμα 12. Αποτελέσματα Ανάλυσης Ηλιακής ενέργειας Ιούλιος -Δεκέμβριος

Κεφάλαιο 3: Κύκλος Rankine και ηλεκτροπαραγωγή

3.1 Θεωρία

3.1.1 Απλός κύκλος Rankine

1. Λέβητας: Προσδίδει θερμότητα από την πηγή ενέργειας στο εργαζόμενο μέσο με τη βοήθεια κλειστού κυκλώματος θερμικού ελαίου ή με απευθείας καύση στο λέβητα ή στην δική μας περίπτωση με απευθείας έκθεση του λέβητα στον ήλιο. Ο λέβητας συνήθως αποτελείται από τους εξής εναλλάκτες θερμότητας:

- Προθερμαντήρας: Αύξηση της θερμοκρασίας του υγρού.
- Εξατμιστής: Το υγρό βρίσκεται σε θερμοκρασία κορεσμού και αρχίζει η ατμοποίησή του.
- Υπερθερμαντήρας: Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού.

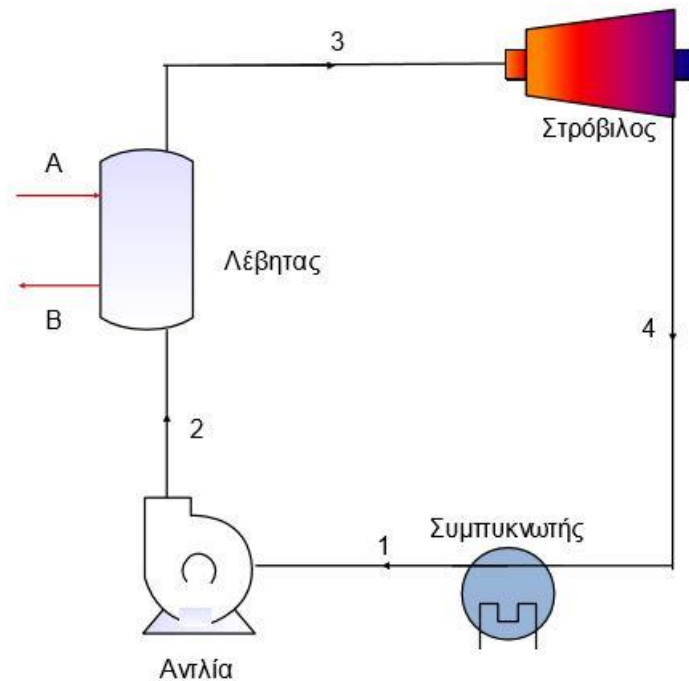
2. Στρόβιλος: Πραγματοποίηση της εκτόνωσης του εργαζόμενου μέσου κατά την έξοδο του από τον λέβητα, με αποτέλεσμα η ενθαλπική πτώση να μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Ο στρόβιλος κινεί το φορτίο (έλικα πλοίου, γεννήτρια, κλπ.).

3. Συμπυκνωτής: Εναλλάκτης επιφάνειας, στον οποίο συλλέγεται και συμπυκνώνεται ο ατμός κατά την έξοδο του από τον στρόβιλο, απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον.

4. Τροφοδοτική Αντλία: Άντληση του εργαζόμενου μέσου από τον συμπυκνωτή και τροφοδότησή του στον λέβητα

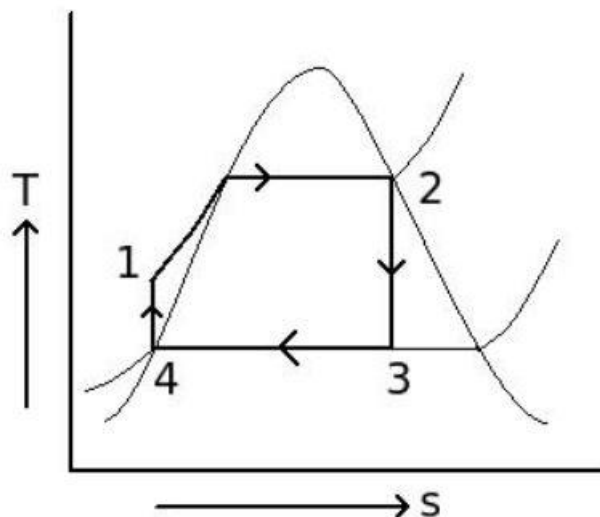
Οι κύκλοι Rankine, ανάλογα με την πίεση εισαγωγής στον στρόβιλο, ταξινομούνται σε δυο κατηγορίες, τους υποκρίσιμους και τους υπερκρίσιμους. Και οι δυο κατηγορίες αποτελούνται από τις εξής μεταβολές καταστάσεων του ρευστού[7]:

- ✓ Συμπίεση: Άντληση από το ψυγείο και τροφοδότηση στον λέβητα.
- ✓ Πρόσδοση θερμότητας στον λέβητα.
- ✓ Εκτόνωση στον στρόβιλο
- ✓ Αφαίρεση θερμότητας στο ψυγείο



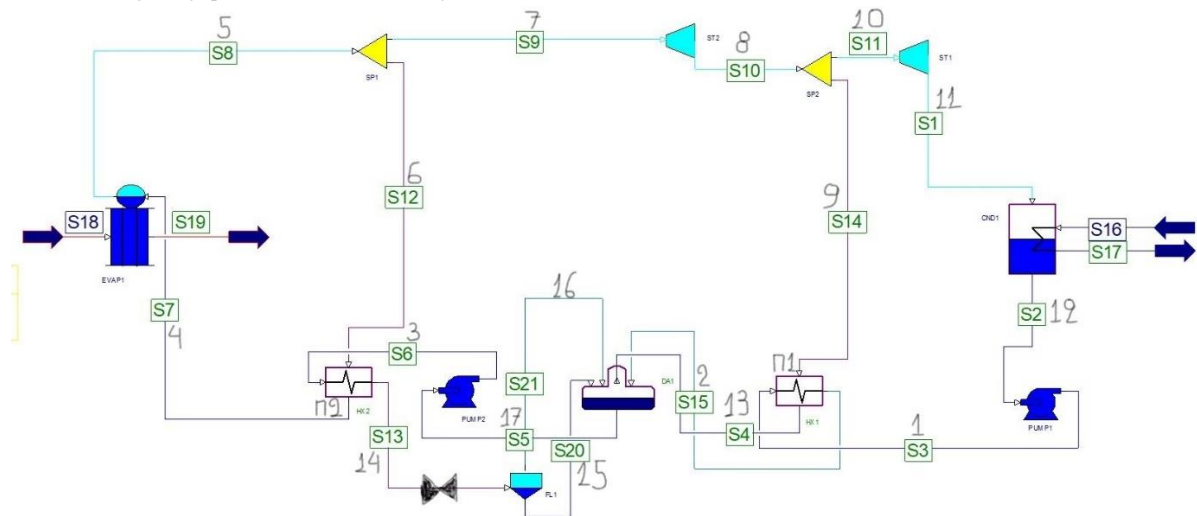
Σχήμα 36. Απλός κύκλος Rankine[7]

Για την βελτίωση του βαθμού απόδοσης χρησιμοποιούμε και προθερμαντές, απ'όπου απομαστεύουμε ποσοστό ατμού για να προθερμάνουμε το υπόψυκτο υγρό.



Διάγραμμα 13. Απλό διάγραμμα T-s κύκλου Rankine με κορεσμένο ατμό[12]

3.2 Σύζευξη και αποτελέσματα



Σχήμα 37. Διάγραμμα κύκλου Rankine σε περιβάλλον Gate Cycle

Οι παρακάτω υπολογισμοί του κύκλου Rankine έγιναν με[4]:

Συμπυκνωτής: Πίεση 0,06 bar με θερμοκρασία 38°C.

Κορεσμένος Ατμός: Πίεση 40 bar με θερμοκρασία 250°C.

Δύο απομαστεύσεις που είναι οι μεταβλητές του προβλήματος μας.

3.2.1 Υπολογισμοί κύκλου Rankine

Σημείο 8

Με τα εκάστοτε στοιχεία που έχουμε γνωρίζουμε την ισεντροπική ενθαλπία του σημείου 8, οπότε με βάση τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης στροβίλου θα υπολογίσουμε την ενθαλπία του σημείου 8.

$$\eta_{T,is} = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_{8,is}} \quad (1)$$

Άρα υπολογίζουμε και τη διαφορά ενθαλπίας για το κομμάτι του στροβίλου υψηλής πίεσης $\Delta h(HP)$.

Σημείο 11

Με τα εκάστοτε στοιχεία που έχουμε γνωρίζουμε την ισεντροπική ενθαλπία του σημείου 11 , οπότε με βάση τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης στροβίλου θα υπολογίσουμε την ενθαλπία του σημείου 11.

$$\eta_{T,is} = \frac{h_{10}-h_{11}}{h_{10}-h_{11,is}} \quad (2)$$

Άρα υπολογίζουμε και τη διαφορά ενθαλπίας για το κομμάτι του στροβίλου χαμηλής πίεση Δh(LP).

Σημείο 1

Με τα εκάστοτε στοιχεία που έχουμε γνωρίζουμε την ισεντροπική ενθαλπία του σημείου 1, οπότε με βάση τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης αντλίας θα υπολογίσουμε την ενθαλπία του σημείου 1.

$$\eta_{P,is} = \frac{h_{1,is}-h_{12}}{h_1-h_{12}} \quad (3)$$

Προθερμαντήρας 1 (Π1)

Ισολογισμός Ενέργειας

$$(1 - ExtHP - ExtLP) * (h_2 - h_1) = (ExtLP) * (h_9 - h_{13}) \quad (4)$$

Άρα από εδώ θα υπολογίσουμε την ενθαλπία του σημείου 2

$$h_2 = h_1 + (h_9 - h_{13}) * \frac{(ExtLP)}{(1-ExtHP-ExtLP)} \quad (5)$$

Τροφοδοτικό δοχείο

Με βάση τον παρακάτω ισολογισμό θα υπολογίσουμε την ενθαλπία του σημείου 17.

Ισολογισμός Ενέργειας

$$h_{17} = (1 - ExtHP - ExtLP) * h_2 + (ExtLP) * h_{13} + (ExtHP) * [x * h_{16} + (1 - x) * h_{15}] \quad (6)$$

Σημείο 3

Με τα εκάστοτε στοιχεία που έχουμε γνωρίζουμε την ισεντροπική ενθαλπία του σημείου 3 , οπότε με βάση τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης αντλίας θα υπολογίσουμε την ενθαλπία του σημείου 3.

$$\eta_{P,is} = \frac{h_{3,is}-h_{17}}{h_3-h_{17}} \quad (7)$$

Προθερμαντήρας 2 (Π2)

Ισολογισμός Ενέργειας

$$(h_4 - h_3) = (ExtHP) * (h_6 - h_{14}) \quad (8)$$

Άρα από εδώ θα υπολογίσουμε την ενθαλπία του σημείου 4

$$h_4 = h_3 + (ExtHP) * (h_6 - h_{14}) \quad (9)$$

Υπολογισμός παροχής μάζας

Ο βαθμός απόδοσης του ατμοποιητή στον ηλιακό πύργο υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση για νερό αλλά και για κορεσμένο ατμό [2] .

$$\eta(T) = -0,000186 * T^2 + 0,0313 * T + 69,563 , \text{ όπου } T \text{ η θερμοκρασία} \quad (10)$$

Άρα

$$Q_{water} = Q_{solar} * \eta(T) \quad (11)$$

$$Q_{water} = \dot{m} * \Delta h(boiler) \quad (12)$$

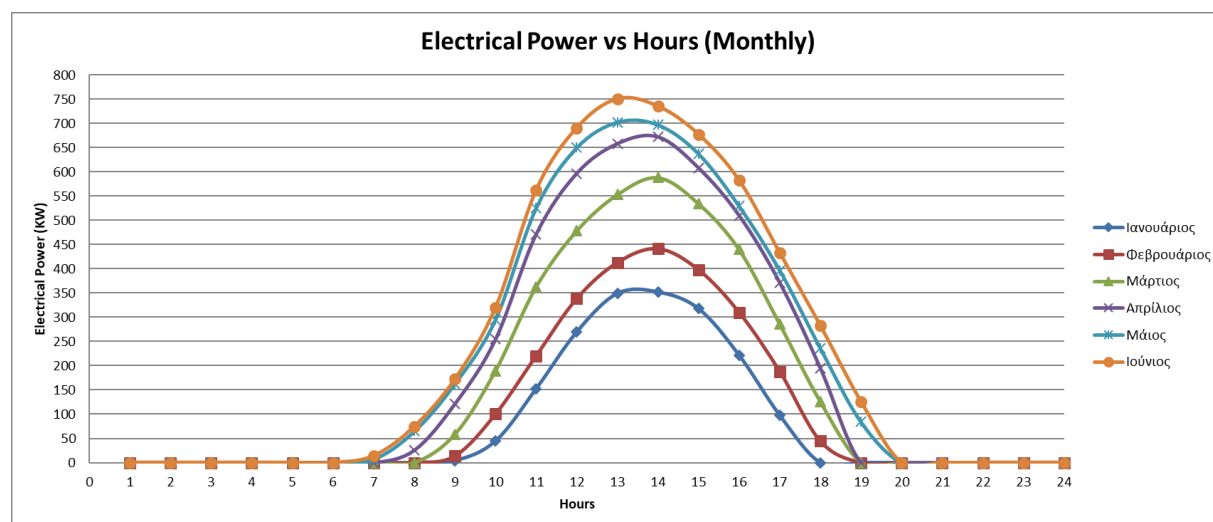
Υπολογισμός ηλεκτρικής ενέργειας

$$P_{el} = [(1 - ExtHP - ExtLP) * \dot{m} * \Delta h(LP) + (1 - ExtHP) * \dot{m} * \Delta h(HP)] * \eta_{gen} \quad (13)$$

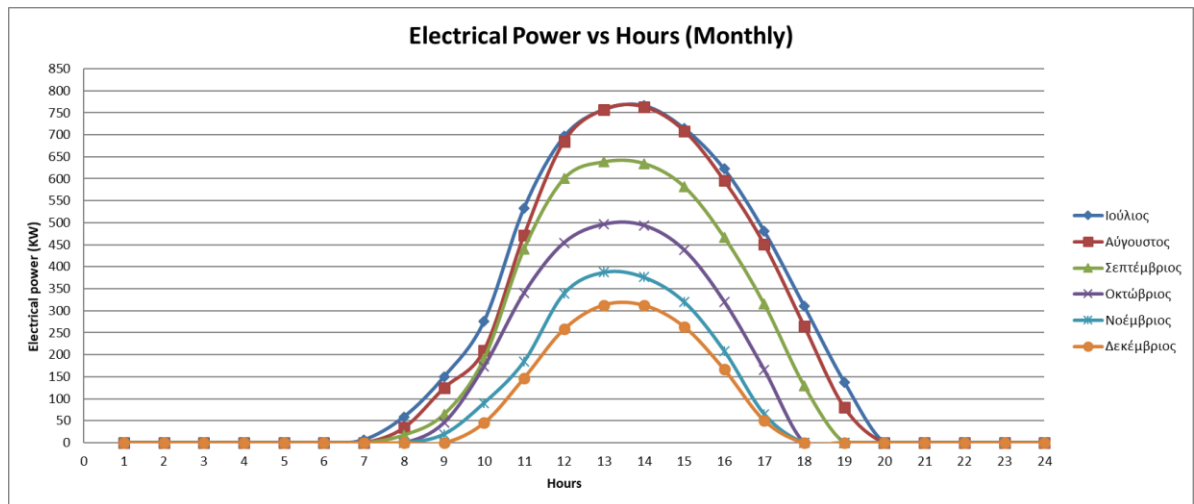
Τέλος υπολογίζουμε τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης και τον ολικό βαθμό απόδοσης του πάρκου

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{Q_{solar}} \quad (14)$$

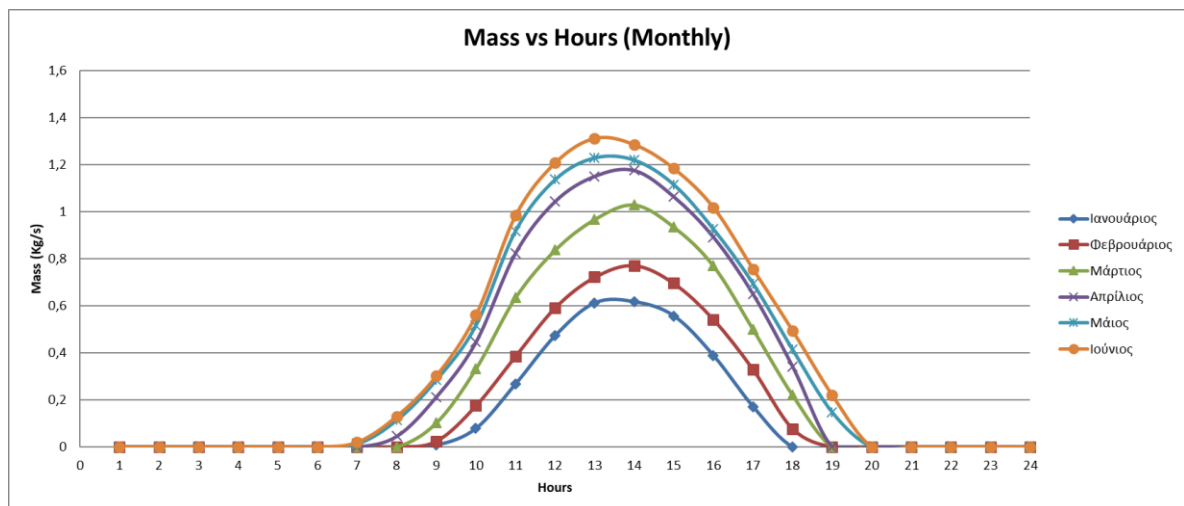
$$\eta_{tot} = \sum \eta_i \quad (15)$$

[illegible]Πίνακας 15. Αποτελέσματα Ανάλυσης 15^η Ιουλίου (14:00) του 2018

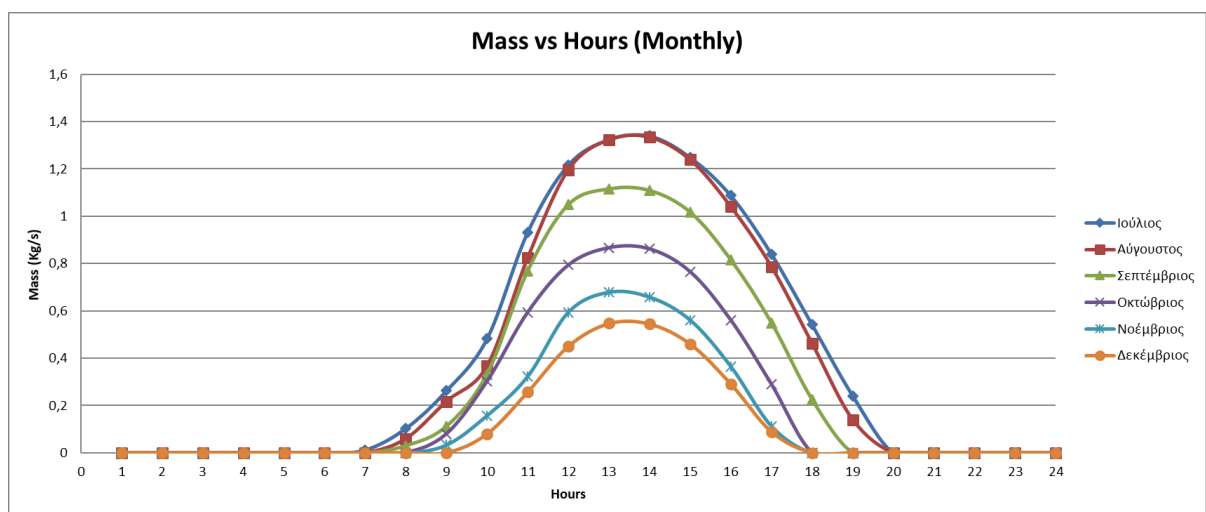
Διάγραμμα 14. Παραγόμενη Ηλεκτρική ενέργεια Ιανουάριος-Ιούνιος



Διάγραμμα 15. Παραγόμενη Ηλεκτρική ενέργεια Ιούλιος -Δεκέμβριος



Διάγραμμα 16. Παροχή μάζας νερού Ιανουάριος-Ιούνιος



Διάγραμμα 17. Παροχή μάζας νερού Ιούλιος-Δεκέμβριος

Κεφάλαιο 4: Οικονομική Ανάλυση

4.1 Levelized Cost of Energy (LCOE): Δείκτης σταθμισμένου κόστους ενέργειας

Είναι ο δείκτης που υπολογίζει το σταθμισμένο κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (€/MWh) κατά την διάρκεια ζωής μιας μονάδας παραγωγής, ενσωματώνοντας τα επί μέρη κόστη (κόστος επένδυσης , λειτουργίας , καυσίμου , ασφάλισης ,κ.τ.λ.) εκφρασμένα σε τιμές παρούσας αξίας. Το σταθμισμένο κόστος ενέργειας ορίζεται ως η τιμή που θα πρέπει να πληρώσει ο καταναλωτής ώστε να αποπληρώσει τον επενδυτή για το κόστος ενέργειας (κεφαλαίου, συντήρησης και λειτουργίας, κ.τ.λ.) όταν η απόδοση φυσικής επένδυσης ισούται με το προεξοφλητικό επιτόκιο. Είναι δηλαδή η ελάχιστη τιμή στην οποία θα πρέπει να πουληθεί η ηλεκτρική ενέργεια ώστε το ενεργειακό έργο να υπερβεί το νεκρό σημείο[8].

4.2 Νεκρό σημείο (Dead Point)

Ορίζεται ως το αναγκαίο ύψος πωλήσεων (τζίρου) το οποίο αν πραγματοποιήσει η επιχείρηση , καλύπτει όλα της τα έξοδα , δηλαδή δεν πραγματοποιεί ούτε κέρδος ούτε ζημία[8].

4.3 Net Present Value (NPV) : Καθαρή παρούσα αξία

Η καθαρή παρούσα αξία μιας επένδυσης εκφράζεται από τη διαφορά της παρούσας αξίας του αθροίσματος των εσόδων μείον την παρούσα αξία του αθροίσματος των εξόδων και δαπανών. Για να είναι η επένδυση οικονομικά βιώσιμη θα πρέπει να τιμή της καθαρής παρούσας αξίας να είναι θετική. Έργα με αρνητική παρούσα αξία θα πρέπει να απορρίπτονται. Η πλέον αποδοτική επένδυση είναι αυτή στην οποία αντιστοιχεί η υψηλότερη τιμή της καθαρής παρούσας αξίας. Μετράει το πλεόνασμα ή την έλλειψη ροών , σε όρους παρούσας αξίας, σε σχέση με το κόστος κεφαλαίων που χρησιμοποιήθηκαν για μια επένδυση. Η παρούσα αξία των αναμενόμενων ταμειακών ροών υπολογίζεται με την προεξόφληση τους χρησιμοποιώντας το κατάλληλο προεξοφλητικό επιτόκιο[8].

4.4 Internal Rate of Return (IRR) : Εσωτερική απόδοση μιας επένδυσης

Ως εσωτερική απόδοση μιας επένδυσης ορίζεται η τιμή του επιτοκίου IRR για την οποία η καθαρή παρούσα αξία γίνεται μηδενική . Εκφράζει δηλαδή το πόσο κινδυνεύει να ανατραπεί η οικονομική βιωσιμότητα ενός έργου λόγω μεταβολής των επιτοκίων[8].

	Ιούνιος				Οκτώβριος				Φεβρουάριος	
KW	594,0352606				KW	423,7138624			KW	379,9810265
KWh	4455,264455	day			KWh	2118,569312	day		KWh	1671,916517
	133657,9336	month				63557,07936	month			46813,66247
	40097,38009	euro				19067,12381	euro			14044,09874
	Ιούλιος				Νοέμβριος				Μάρτιος	
KW	572,9594384				KW	356,1430637			KW	463,3848922
KWh	4583,675507	day			KWh	1175,27211	day		KWh	3012,001799
	137510,2652	month				35258,16331	month			90360,05398
	41253,07957	euro				10577,44899	euro			27108,01619
	Αύγουστος				Δεκέμβριος				Απρίλιος	
KW	586,9821152				KW	312,4290958			KW	555,433979
KWh	4284,969441	day			KWh	374,914915	day		KWh	3999,124649
	128549,0832	month				11247,44745	month			119973,7395
	38564,72497	euro				3374,234235	euro			35992,12184
	Σεπτέμβριος				Ιανουάριος				Μάιος	
KW	525,0498767				KW	322,6371489			KW	554,3229108
KWh	3412,824198	day			KWh	903,3840169	day		KWh	4157,421831
	102384,726	month				27101,52051	month			124722,6549
	30715,41779	euro				8130,456152	euro			37416,79648
max KW	760									
min KW	300									
ποσοστό ηλιοφάνειας	0,578082192									
Τιμή πώλησης (€/KWh)	0,3									

Πίνακας 16. Συγκεντρωτικός πίνακας υπολογισμών μηνιαίας ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και εσόδων σε € χωρίς το επιτόκιο αναγωγής

Total Surface area m ²	Number of heliostats	m ²	Price	Mirrors (1,25x2,5)	m ²	Price	Total Price
		25	3534,43		1	11,44	
		30	4300				
4392	122	36	5512,104		36	411,84	722721,2
5978	122	49	7502,586		49	560,56	983703,8
5600	56	100	15311,4		100	1144	921502,4
6776	56	121	18526,79		121	1384,24	1115018
5760	90	64	9799,296		64	732,16	947831
7290	90	81	12402,23		81	926,64	1199599
6502,5	90	72,25	11062,49		72,25	826,54	1070012

Πίνακας 17. Συγκεντρωτικός πίνακας υπολογισμού κόστους ηλιοστατών της εγκατάστασης

	Κόστος (€)		Επιτόκιο		Παραγωγή (MWh)		Έσοδα (€)	
	Έτος	Κεφάλαιο	Ετήσιο	Παρούσα αξία	Αναγωγής 6%	Ετήσια	Παρούσα αξία	Παρούσα αξία
Εξοπλισμός Εγκατάσταση Επιπλέον		1199599						
		299899,7						
		59979,93						
	0			1559478,258	1			
	1		17993,98	16975,45274	0,943396226	1021,136	963,3361599	289000,848
	2		17993,98	16014,57805	0,88999644	1021,136	908,807698	272642,3094
	3		17993,98	15108,0925	0,839619283	1021,136	857,3657529	257209,7259
	4		17993,98	14252,91746	0,792093663	1021,136	808,8356159	242650,6848
	5		17993,98	13446,14854	0,747258173	1021,136	763,0524678	228915,7404
	6		17993,98	12685,04579	0,70496054	1021,136	719,8608187	215958,2456
	7		17993,98	11967,02433	0,665057114	1021,136	679,1139799	203734,194
	8		17993,98	11289,6456	0,627412371	1021,136	640,673566	192202,0698
	9		17993,98	10650,60906	0,591898464	1021,136	604,4090245	181322,7073
	10		17993,98	10047,74439	0,558394777	1021,136	570,1971929	171059,1579
	11		17993,98	9479,004143	0,526787525	1021,136	537,9218801	161376,564
	12		17993,98	8942,456739	0,496969364	1021,136	507,4734718	152242,0415
	13		17993,98	8436,279943	0,468839022	1021,136	478,7485583	143624,5675
	14		17993,98	7958,754663	0,442300964	1021,136	451,6495833	135494,875
	15		17993,98	7508,259116	0,417265061	1021,136	426,0845126	127825,3538
	16		17993,98	7083,263317	0,393646284	1021,136	401,9665213	120589,9564
	17		17993,98	6682,323884	0,371364419	1021,136	379,2136993	113764,1098
	18		17993,98	6304,079136	0,350343791	1021,136	357,7487729	107324,6319
	19		17993,98	5947,244468	0,33051301	1021,136	337,4988424	101249,6527
	20		17993,98	5610,607988	0,311804727	1021,136	318,3951343	95518,5403
Άθροισμα				1765867,79			6676,041354	2002812,406
Επιτόκιο	0,06							
Κόστος Πώλησης (€/MWh)	300							
LCOE (€/MWh)	264,5082							
NPV	236944,6							
IRR	7,8115							

Πίνακας 18. Συγκεντρωτικός πίνακας τελικών αποτελεσμάτων οικονομικής ανάλυσης

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια πρώτη προσπάθεια ανάπτυξης και σύγκρισης με μία ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση ηλιακού πάρκου στο χώρο ενός πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας με στόχο την εξακρίβωση σωστών αποτελεσμάτων του προγράμματος (Benchmarking). Παρ' όλο που είχαμε λίγα δεδομένα για μια τέτοια μοντελοποίηση, δηλαδή μόνο των αριθμό των ηλιοστατών (108), το ύψος του πύργου 11m, και εν μέρη τα κλιματολογικά δεδομένα της Καλιφόρνιας χωρίς τις ακριβείς γεωμετρικές συντεταγμένες των ηλιοστατών και του εμβადού του δέκτη, καταφέραμε να προσεγγίσουμε σε ικανοποιητικό βαθμό την αρχική καμπύλη που μας δινόταν. Με βάση το διάγραμμα 1 για πολύ μικρές εγκαταστάσεις μία κανονική διάταξη ηλιοστατών με μία ακτινική δεν έχει μεγάλη διαφορά αλλά υπήρξε μια σημαντική απόκλιση κατά τις πρωινές ώρες, κατά κύριο λόγο, εξαιτίας διαφορετικών κλιματολογικών συνθηκών.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκαν διάφορες διατάξεις (τυχαίας διασποράς $65 \times 100\text{m}^2$ και ακτινικές $56 \times 100\text{m}^2$, $122 \times 36\text{m}^2$ και $90 \times 64\text{m}^2$ κ.τ.λ.) ηλιοστατών στο χώρο του πάρκου διαστάσεων $260\text{m} \times 170\text{m}$ για την εύρεση της βέλτιστης διάταξης ως προς την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλιακής και κατ' επέκταση ηλεκτρικής ενέργειας. Δοκιμάστηκαν αρκετά είδη πάρκων, με σημαντικά υψηλότερο βαθμό απόδοσης αυτό της ακτινικής διασποράς, προτού κατασταλάξουμε στο πάρκο 90 ηλιοστατών με εμβადόν $9\text{m} \times 9\text{m}$ ο κάθε ηλιοστάτης, το οποίο με βάση το διάγραμμα 9 παράγει έως 250 KW περισσότερη θερμική ισχύ από τα άλλα είδη.

Έγινε παραμετροποίηση ως προς το μέγεθος, τον αριθμό των ηλιοστατών καθώς και το μέγεθος του δέκτη στον πύργο. Εδώ είναι λογικό όσο αυξάνουν τα παραπάνω μεγέθη εκτός του δέκτη να αυξάνεται η παραγωγή θερμικής ισχύος. Όσο αναφορά το δέκτη έχει ένα μέγιστο πέρα από το οποίο αρχίζει και μειώνεται η θερμική ισχύς. Επίσης το μέγεθος του δέκτη έχει και ένα άλλο όριο ως προς το μέγεθος του πύργου. Για παράδειγμα στην εγκατάσταση μας ο πύργος έχει ύψος 44 μέτρα, περίπου το 1/6 των 260 μέτρων που είναι η απόσταση του τελευταίου ηλιοστάτη. Για να μπορεί να στηριχθεί ο πύργος αυτού του ύψους τον μοντελοποιήσαμε στο Tonatiuh ως κώνο με ακτίνα βάσης 4 μέτρων και ακτίνα κορυφής 3 μέτρων, με αποτέλεσμα ο δέκτης να μπορεί τυπικά να πάρει μέγιστες διαστάσεις $6\text{m} \times 6\text{m}$. Αυτό επιτυγχάνεται καλύτερα αν ο πύργος είναι τετραγωνικού σχήματος, αλλά αυτό το μέγεθος δεν μας επηρεάζει καθόλου στην μοντελοποίηση μιας και ο πύργος είναι ξεχωριστή κατασκευή.

Μία καθοριστική παράμετρος του προγράμματος για εύρεση σταθερής λύσης χωρίς σημαντικά σφάλματα (0,113%) είναι η ανεξαρτησία της ως προς τον αριθμό των ακτινών που προσπίπτουν στους ηλιοστάτες. Με βάση το διάγραμμα 2 παρατηρούμε ότι από τις 500.000 ακτίνες και πάνω έχουμε ανεξαρτησία ακτινών ως προς το αποτέλεσμα μας. Η μελέτη αφορά την χρονική περίοδο ενός έτους του 2018 κατά την οποία παρουσιάζονται αποτελέσματα ηλιακής ισχύος (KW) σε συνάρτηση των ωρών της 15^{ης} ημέρας κάθε μηνός.

Επιπλέον έγινε μοντελοποίηση μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του θεωρητικού κύκλου Rankine, κορεσμένου ατμού με προθερμάνσεις, με δεδομένα στοιχεία (υψηλή-χαμηλή πίεση και θερμοκρασία) μιας

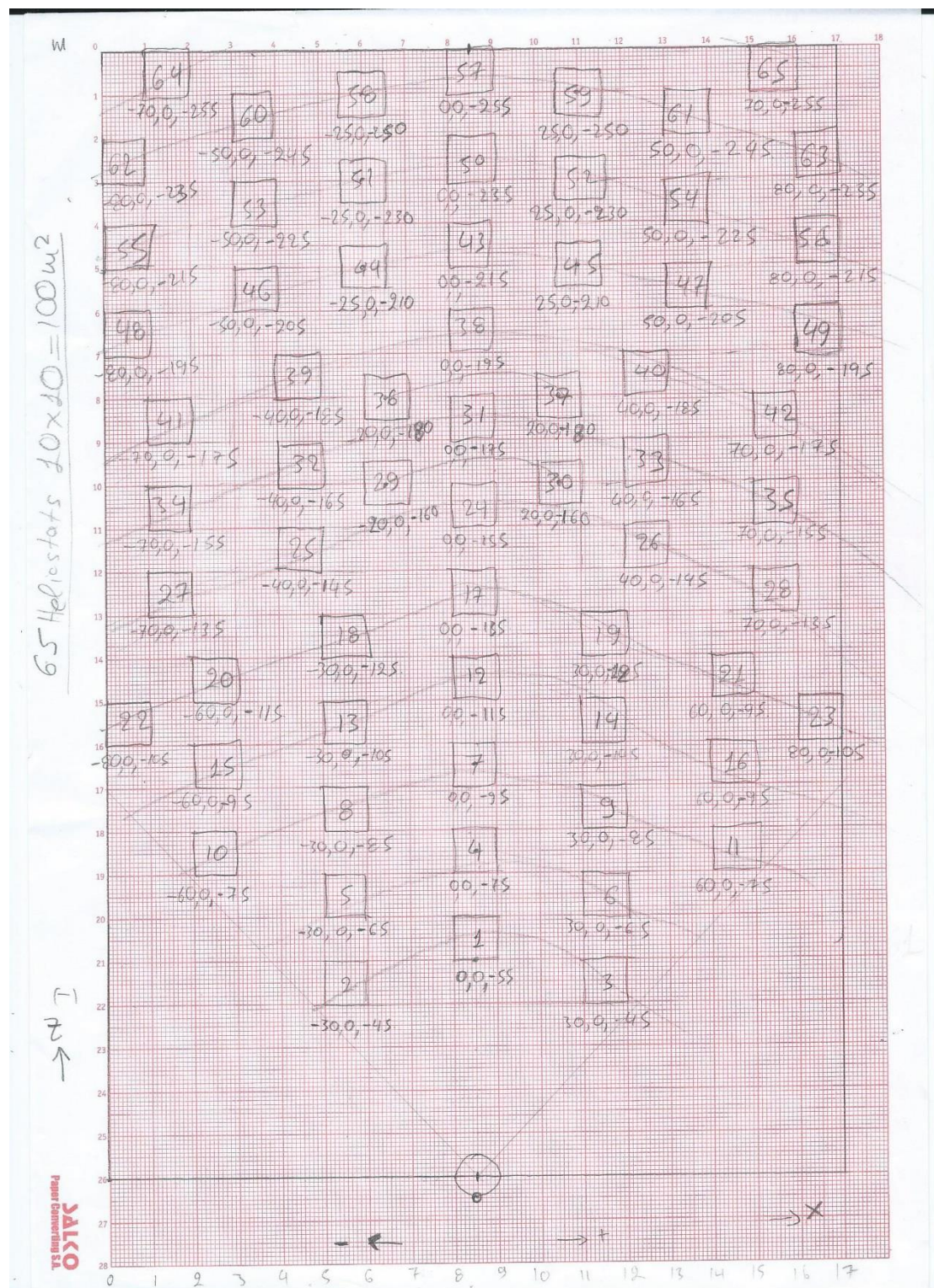
ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης ηλιακού πάρκου στην Σεβίλλη της Ισπανίας. Μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα Gate Cycle μόνο για απεικόνιση ως σχεδιαστικό πρόγραμμα. Η εγκατάσταση λειτουργεί με υψηλή πίεση 40 bar και κορεσμένο ατμό 250 °C και χαμηλή πίεση 0,06 bar 38 °C με δύο απομαστεύσεις 25% υψηλής και 12% χαμηλής. Παράγουμε μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 766,4 KW με παροχή ατμού 1,339 Kg/s τη 15^η Ιουλίου 14:00 και τεχνικό ελάχιστο τα 300KW. Με βάση το παραπάνω τεχνικό ελάχιστο από το διάγραμμα 15 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μήνα Δεκέμβριο κατά τις μεσημβρινές ώρες και αν έχουμε ήλιο η παραγωγή είναι ελάχιστα πάνω από τα 300 KW με αποτέλεσμα η εγκατάσταση να μην λειτουργεί καθόλου. Μετά υπολογίστηκε ο ηλεκτρικός και συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης και προκύπτουν αντίστοιχα 0,229 και 0,137. Ο συνολικός πραγματικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης στην Ισπανία είναι 17% και ο δικός μας κοντά στο 14% , πράγμα που μας επιβεβαιώνει σε ικανοποιητικό βαθμό τα νούμερά μας, μιας και η εγκατάσταση μας είναι μικρότερη. Γνωρίζουμε ότι όσο μικρότερη είναι μία εγκατάσταση , τόσο μικρότερο βαθμό απόδοσης θα έχει.

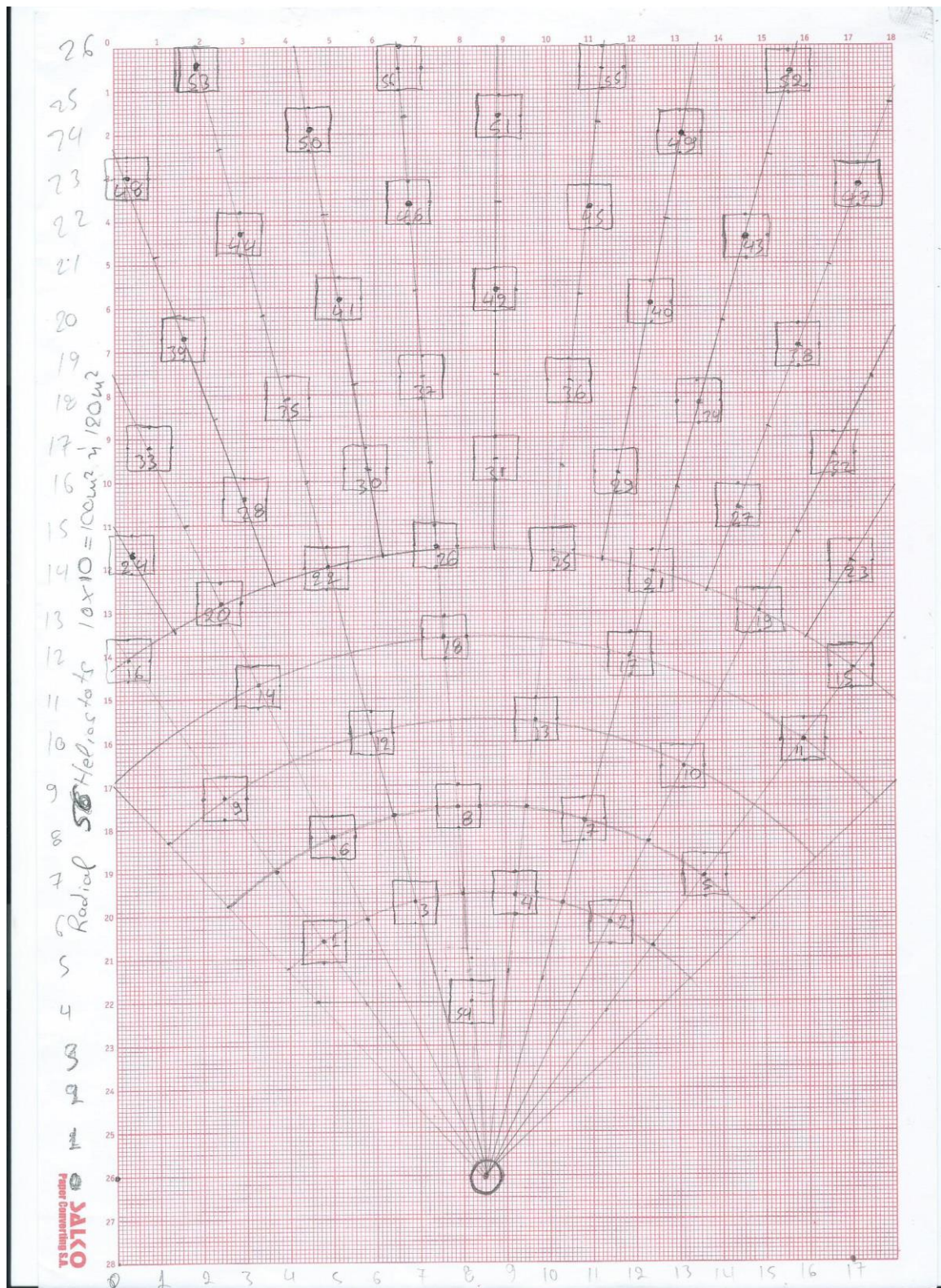
Τέλος για να μπορέσουμε να κάνουμε μία στοιχειώδη οικονομική ανάλυση για την βιωσιμότητα του έργου με βάση τους πίνακες αποτελεσμάτων Excel δημιουργήσαμε τον βοηθητικό πίνακα 16. Σε αυτό αρχικά υπολογίζεται ο μέσος όρος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά μέρα και ύστερα πολλαπλασιάζεται με τις πραγματικές ώρες που έχουμε ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια της ημέρας επί τις ημέρες του εκάστοτε μήνα. Με βάση τιμών που βρέθηκαν στο διαδίκτυο ο πίνακας 17 μας εξηγεί το κόστος όλων των ηλιοστατών μαζί με την βάση στήριξής τους. Επιπρόσθετα αναλογικά με κάποια ποσοστά βρέθηκαν τα κόστη της εγκατάστασης και τα επιπλέον που είναι το 25% και 5% αντίστοιχα αυτού των ηλιοστατών. Η στοιχειώδης οικονομική ανάλυση για τη βιωσιμότητα του έργου έγινε με βάση τους παρακάτω οικονομικούς δείκτες: το σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE)=0,2645 €/KWh, τη καθαρή παρούσα αξία (NPV)=236944,6 € και την εσωτερική απόδοση της επένδυσης (IRR)=7,81. Τα αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά και λογικά για την ανάπτυξη μιας τέτοιας εγκατάστασης παρ' όλο που το κέρδος είναι σχετικά μικρό και η εσωτερική απόδοση είναι αρκετά κοντά στο νεκρό σημείο.

Βιβλιογραφία

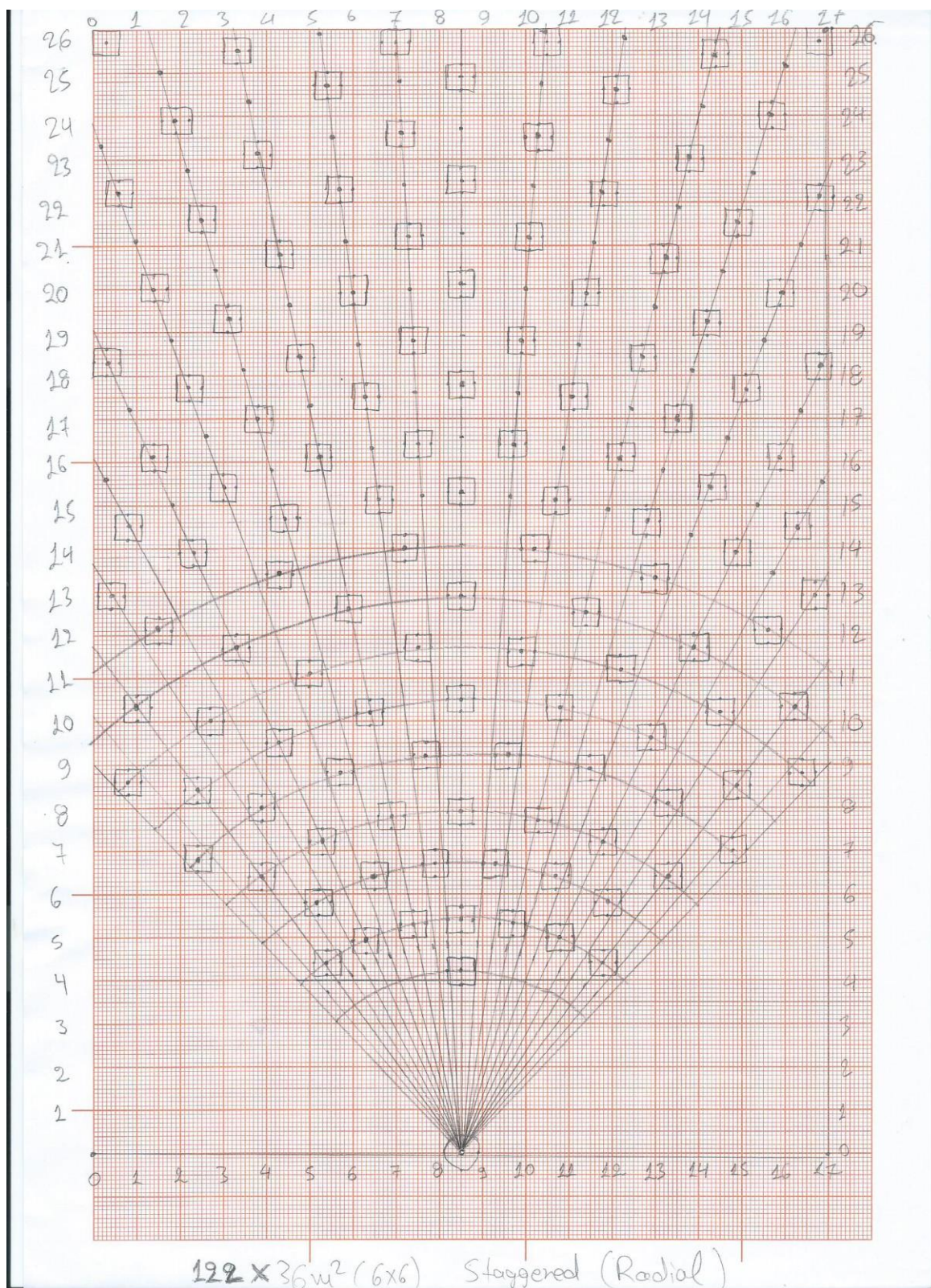
- [1] Murray, D., J., “Small-Scale Solar Central Receiver System Design and Analysis”, A Thesis presented to the Faculty at California Polytechnic State University, San Luis Obispo, June 2012
- [2] Rovira, A., Montes, M., J., Varela, F., “Comparison of Heat Transfer Fluid and Direct Steam Generation technologies for Integrated Solar Combined Cycles”, Research Gate, Applied Thermal Engineering 52(2):264-274, April 2013
- [3] Koudouris, G., Dimitriadis, P., Iliopoulou, T., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D., “Investigation on the stochastic nature of the solar radiation process”, Science Direct, European Geosciences Union General Assembly, Energy Procedia (2017) 398-404
- [4] Osuna, R., Olavarria, R., Morillo, R., Sanchez, M., Cantero, F., Fernandez-Quero, V., Robles, P., Lopez del Cerro, T., Esteban, A., Ceron, F., Talegon, J., Romero, M., Tellez, F., Marcos, MJ., Martinez, D., Valverde, A., Monterreal, R., Pitz-Paal, R., Brakmann, G., Ruiz, V., Silva, M., Menna, P., “ PS10, Construction of a 11MW Solar Thermal Tower Plant in Seville,Spain” , Research Gate , Conference Paper, January 2006
- [5] Hoffschmidt, B., “Receivers for Solar Tower Systems” Font Romeu, France, June 25-27, 2014
- [6] Αναστασοπούλου, Α., “Μεγιστοποίηση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλιακούς συλλέκτες για διαφορετικά χρονικά διαστήματα εντός του έτους με σκοπό χρονικά αντιστοιχες εφαρμογές” , DSpace, Αθήνα 2016
- [7] Καλικάτσαράκη, Μ., “Εκμετάλλευση Απορριπτόμενης Θερμότητας Χαμηλών Θερμοκρασιών Ναυτικών Κινητήρων Diesel με Χρήση Οργανικού Κύκλου Rankine”, Αθήνα , Οκτώβριος 2013
- [8] Παπαντώνης, Δ., “Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα”, Εκδόσεις Τσότρας, Αθήνα 2016
- [9] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter10/chapter10.html>
- [10] https://download.cnet.com/Tonatiuh-64-Bit/3000-2383_4-75904885.html
- [11] <https://github.com/iat-cener/tonatiuh/wiki/TutorialSmallHeliostatsTower>
- [12] <https://nptel.ac.in/courses/112107216/1%20assignment%20solution.pdf>
- [13] https://www.reddit.com/r/InfrastructurePorn/comments/3ga71e/the_ps10_ps20_solar_power_plants_andalusia_spain/

Παράρτημα

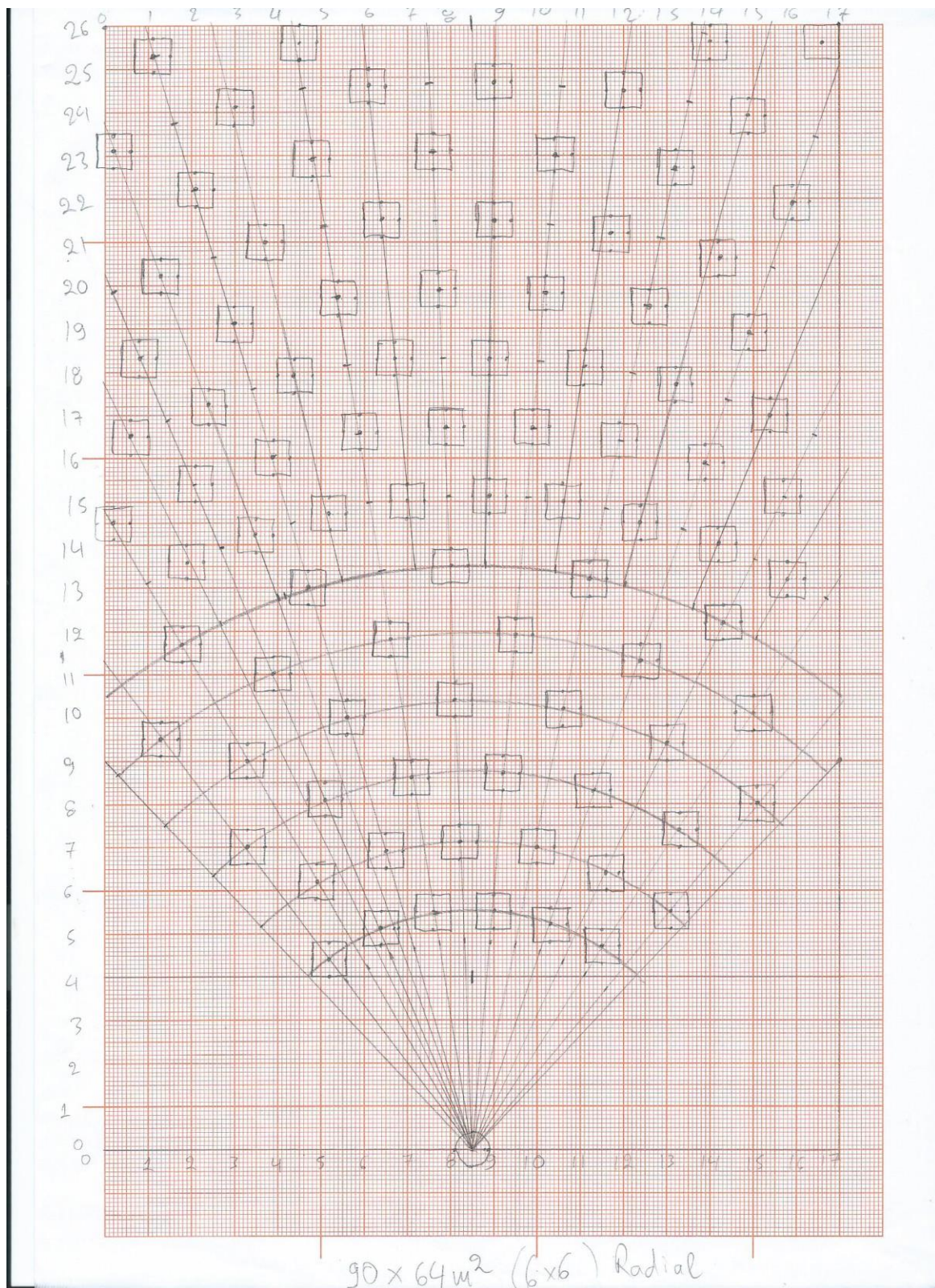




Σχήμα 39. Πρόχειρο σκαρίφημα ακτινικής διάταξης (1) ηλιοστατών $56 \times 100 \text{m}^2$



Σχήμα 40. Πρόχειρο σκαρίφημα ακτινικής διάταξης (2) ηλιοστατών 122x36m²



Σχήμα 41. Πρόχειρο σκαρίφημα ακτινικής διάταξης (3) ηλιοστατών 90x64m²

6x6	15.0x10x10																
		Irradiance	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Hours	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000	10.0000	11.0000	12.0000	13.0000	14.0000	15.0000
		Azimuth	7.0000	22.5300	36.4400	48.4300	58.7600	67.8900	76.3600	84.7800	93.9500	105.3900	112.5300	133.6800	200.5000	234.3800	252.7400
		Zenith	120.2800	117.1000	111.2700	103.3000	93.7900	83.7400	72.0000	60.3500	48.5500	36.9100	26.1000	18.0600	17.4400	24.8100	35.4300
LATITUDE	38.0000	Elevation	-30.2800	-27.1000	-21.2700	-13.3000	-3.7900	6.7600	18.0000	29.6500	41.4500	53.0900	63.9000	71.9400	72.5600	65.1900	54.2700
LONGITUDE	23.0000																
		Total Power(W)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30276.7726	556966.3835	653234.9430	1201287.5917	2325158.2998	3034441.3158	3340134.6727	3114158.9158
		Average Power(W/m²)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1295.6000	10979.1000	27910.0000	51326.0000	99344.3000	139649.0000	141055.0000	133055.0000
		Total Power(KW)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.2768	256.9664	653.2349	1201.2876	2325.1583	3034.4413	3340.1393	3114.1589
Field losses																	
cosine	0.8000	Electrical Power(KW)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.9471	58.9621	149.8878	275.6411	533.5185	696.2668	757.5215	714.5583
shadowing and blocking	1.0000																
reflectance	0.9200	Mass(kg/s)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0121	0.1030	0.2619	0.4817	0.9324	1.1168	1.3339	1.2488
attenuation	0.9400																
Receiver losses																	
Spillage	0.9800																
Absorptance	0.9800																
Radiation	0.9020																
Convection and conduction	0.9980																
	0.1700																
m²	36.0000																

Πίνακας 19. Αποτελέσματα Ιουλίου Excel

Πίνακας 21. Αποτελέσματα Μαρτίου Excel

[illegible]

Πίνακας 22. Αποτελέσματα Απριλίου Excel

666	15 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ																
		Irradiance	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		Hours	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000	7,0000	8,0000	9,0000	10,0000	11,0000	12,0000	13,0000	14,0000	15,0000
		Azimuth	13,9000	34,1000	50,5000	63,5000	74,4000	84,0000	93,3000	103,0000	114,1000	128,0000	146,4000	170,0000	195,7000	218,2000	235,3000
		Zenith	138,4000	133,3000	125,2000	115,3000	104,3000	92,7000	80,9000	69,2000	58,0000	47,9000	39,9000	35,4000	36,0000	41,5000	50,1000
		Elevation	-48,4000	-43,3000	-35,2000	-25,3000	-14,3000	-7,7000	9,1000	20,8000	32,0000	42,1000	50,1000	54,6000	54,0000	48,5000	39,9000
LATITUDE	38,0000																
LONGITUDE	23,0000																
		Total Power(W)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		Average Power(W/m²)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		Total Power(KW)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Field losses																	
cosine	0,8000																
shadowing and blocking	1,0000																
reflectance	0,9200																
attenuation	0,9400																
Receiver losses																	
Spillage	0,9800																
Absorptance	0,9800																
Radiation	0,9020																
Convection and conduction	0,9980																
	0,1700																
m²	36,0000																

Πίνακας 24. Αποτελέσματα Σεπτεμβρίου Excel

[illegible]

Πίνακας 26. Αποτελέσματα Νοεμβρίου Excel

[illegible]

Πίνακας 27. Αποτελέσματα Δεκεμβρίου Excel

66	15. ΟΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ	Irradiance															
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Hours	Hours															
		1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000	10.0000	11.0000	12.0000	13.0000	14.0000	15.0000	16.0000
	Azimuth	Azimuth															
		10.1000	39.7000	59.8000	75.7000	84.5000	93.8000	102.7000	112.1000	122.5000	134.8000	149.5000	166.8000	185.6000	203.8000	219.6000	231.8000
	Zenith	Zenith															
		154.1000	149.4000	140.3000	129.4400	117.8000	106.0000	94.3000	83.0000	72.5000	63.3000	56.0000	51.6000	50.8000	53.8000	60.0000	68.5000
LATITUDE	Elevation	Elevation															
		-64.1000	-59.4000	-50.3000	-39.4400	-27.8000	-16.0000	-4.3000	7.0000	17.5000	26.7000	34.0000	38.4000	39.2000	36.2000	30.0000	21.5000
LONGITUDE																	
		23.0000															
	Total Power(W)	Total Power(W)															
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6029.7491	437166.5437	960522.1838	1475192.2698	1798752.9817	1922696.7540	1733143.9458	1350302.8634
	Average Power(W/m²)	Average Power(W/m²)															
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2576.1000	18678.3000	41039.1000	63028.8000	76853.2000	82148.8000	74050.0000	57692.8000
	Total Power(KW)	Total Power(KW)															
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	60.297	437.1665	960.5222	1475.1922	1798.7530	1922.6968	1733.1439	1350.3029
Field losses	cosine	cosine															
		0.8000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.8347	100.3099	220.3963	338.4898	442.7323	441.1718	397.6780	309.8333
shadowing and blocking	reflectance	reflectance															
		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
attenuation	Receiver losses	Receiver losses															
		0.9200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Spillage	Absorptance	Absorptance															
		0.9800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Radiation	Conversion and conduction	Conversion and conduction															
		0.9980	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
m²																	
		0.1700															
		36.0000															

Πίνακας 29. Αποτελέσματα Φεβρουαρίου Excel