



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗΣ
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΔΕΚΤΗ**

υπό
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΚΛΕΙΣΙΑΡΗ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021

© 2021 Κωνσταντίνος Κλεισιάρης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Δημήτριος Βαλουγεώργης Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Παναγιώτης Τσιακάρας Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Αλέξανδρος Τσιμπούκης Μεταδιδακτορικός ερευνητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΔΕΚΤΗ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΛΕΙΣΙΑΡΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Δημήτριος Βαλουγεώργης,
Καθηγητής Αναλυτικών και Υπολογιστικών Μεθόδων Μεσοκλίμακας σε Φαινόμενα
Ροής και Μεταφοράς

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών και η προσομοίωση της λειτουργίας μια ηλιοθερμικής εγκατάστασης κεντρικού δέκτη. Την σύντομη αναφορά στις βασικές αιτίες που προωθούν την υιοθέτηση των ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα της ηλιακής ενέργειας ως αντίδοτο στην κλιματική κρίση, ακολουθεί μια επιγραμματική επεξήγηση των βασικών κατηγοριών ηλιακών συστημάτων συγκεντρωτικής τεχνολογίας. Έπειτα παρουσιάζεται μια διεξοδική περιγραφή των λογισμικών πακέτων SAM και SolarPILOT, στη χρήση των οποίων στηρίζεται η υλοποίηση των προσομοιώσεων. Δίδεται ιδιαίτερη μνεία στο SAM, επισημαίνοντας τον τρόπο ορθής συνδυαστικής του τελευταίου με το SolarPILOT. Στην ίδια κατεύθυνση, παρατίθεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επίτευξη του σκοπού της προσομοίωσης της λειτουργίας ενός σταθμού κεντρικού δέκτη με συνδυαστική χρήση των Google Earth Pro, SolarPILOT και SAM (εισαγωγή της τοπογραφίας του ηλιοστατικού πεδίου μέσω του Google Earth Pro, σχεδίαση του ηλιοστατικού πεδίου μέσω του SolarPILOT και προσέγγιση της λειτουργίας της ηλιοθερμικής εγκατάστασης μέσω του SAM).

Μέσω της συνδυαστικής χρήσης των Google Earth Pro, SolarPILOT και SAM ελέγχεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων που εξάγονται για λογαριασμό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με αντίστοιχα άλλων διπλωματικών εργασιών ή επιστημονικών συγγραμμάτων αλλά και με πραγματικά δεδομένα εγκαταστάσεων υπό καθεστώς κανονικής λειτουργίας. Η αξιοπιστία των λογισμικών πακέτων που προκύπτει μέσω της συγκριτικής διαδικασίας που αναφέρθηκε στην προηγούμενη

περίοδο, επιτρέπει την προσομοίωση της ηλιοθερμικής εγκατάστασης MINOS, ισχύος 50 MW, που πρόκειται να κατασκευαστεί στον Αθρινόλακκο της Κρήτης και ουσιαστικά να αποτελέσει την πρώτη διάταξη κεντρικού δέκτη στην ελληνική επικράτεια. Για τον ηλιοθερμικό σταθμό MINOS πραγματοποιείται μελέτη η οποία επικεντρώνεται κυρίως στο ηλιοστατικό του πεδίο αλλά και στην συνολικότερη συμπεριφορά της διάταξης, μέσω ελέγχου δεικτών που σχετίζονται με την ενεργειακή αποδοτικότητα και την οικονομική βιωσιμότητα του σταθμού.

Λέξεις-κλειδιά: Ηλιακός πύργος, κεντρικός δέκτης, ηλιοστατικό πεδίο, αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς, σχεδιασμός ηλιοστατικού πεδίου, απώλειες ηλιοστατικού πεδίου, προσομοίωση ηλιοθερμικής εγκατάστασης, SAM, SolarPILOT

SIMULATION OF HELIOSTAT FIELD FOR CENTRAL RECEIVER SYSTEM POWER PLANT

KONSTANTINOS KLEISIARIS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2021

Supervisor: Dr Dimitrios Valougeorgis

Professor of analytical and computational methods in thermal-fluid sciences

Abstract

The subject of the present diploma thesis is the study of the basic characteristics and the simulation of the central receiver systems as well. A small reference to the main reasons that impose the use of renewable energy sources and specifically solar energy as an antidote to the climate crisis, will be followed by a short presentation of the main categories of concentrated solar power technologies. For the purpose of simulating the operation of central receiver systems, software SAM and SolarPILOT are going to be used. Under this condition, both of them are going to be reviewed, focusing mainly on SAM and of course on their combined use. In the same direction, the basic methodology that is followed for simulating the operation of central receiver systems, by compounding Google Earth Pro, SolarPILOT and SAM is going to be presented (integration of the topography of the heliostat field through Google Earth Pro, construction of the heliostat field through SolarPILOT, simulation of the performance of the power plant through SAM)

The results that are being extracted via combined use of Google Earth Pro, SolarPILOT and SAM, are compared with the results of equivalent diploma thesis or scientific papers or real data from power plants on operation. The credibility of the software that is proved due to the process described in the last period, allows the simulation of the 50 MW net capacity solar power plant MINOS, that is going to be constructed in Crete and more specifically in a place called Atherinolakkos. MINOS is going to be the first central receiver system in Greece. Studying MINOS will be focused

on examining its heliostat field and generally its total performance. This purpose is achieved by checking factors as far as energy efficiency and financial sustainability is concerned.

Key words: Solar tower, central receiver, heliostat field, electric power to the grid, heliostat field design, heliostat field losses, simulation of solar power plant, SAM, SolarPILOT

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος συγκεντρωτικής τεχνολογίας	16
1.1 Εισαγωγή.....	16
1.2 Είδη συγκεντρωτικής τεχνολογίας	17
1.2.1 Συστήματα παραβολικών συλλεκτών (PTC).....	17
1.2.2 Συστήματα συλλεκτών γραμμικών ανακλαστήρων Frensel (Linear Frensel)	18
1.2.3 Συστήματα παραβολικού δίσκου μηχανής (Dish Engine).....	18
1.2.4 Συστήματα κεντρικού δέκτη (CRS)	19
1.2.5 Σύγκριση κατηγοριών συγκεντρωτικής τεχνολογίας	20
1.3 Στόχος παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Ανάλυση λογισμικών πακέτων SAM και SolarPILOT	28
2.1 Εισαγωγή.....	28
2.2 Θεωρητική προσέγγιση της διάταξης κεντρικού δέκτη	28
2.3 Λεπτομερής ανάλυση του λογισμικού SAM	29
2.4 Απώλειες ηλιοστατικού πεδίου	38
2.5 Απώλειες δέκτη	42
2.6 Αρχείο καιρού	45
2.7 Μεθοδολογία συνδυαστικής χρήσης Google Earth Pro-SolarPILOT-SAM.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων	53
3.1 Εισαγωγή.....	53
3.2 Ηλιοθερμικός σταθμός I.S.E.G.S.....	53
3.2.1 Χαρακτηριστικά εγκατάστασης Η/Θ.....	53
3.2.2 Συγκρίσεις ανάμεσα σε λογισμικά και πραγματικά δεδομένα για τον ISEGS	54
3.2.3 Επίδραση αρχείων καιρού στην συμπεριφορά της προσομοιούμενης διάταξης .	56
3.3 Ηλιοθερμικός σταθμός CRESCENT DUNES.....	57
3.3.1 Χαρακτηριστικά ηλιοθερμικής εγκατάστασης.....	57
3.3.2 Συγκρίσεις ανάμεσα σε λογισμικά και πραγματικά δεδομένα για τον Crescent Dunes.....	58
3.4 Σύγκριση με [36].....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Ηλιοθερμική εγκατάσταση MINOS.....	72
4.1 Εισαγωγή και επιλογή συντεταγμένων εγκατάστασης πύργου στον Αθρινόλακκο ...	72
4.2 Προσομοίωση για βέλτιστα χαρακτηριστικά.....	73
4.3 Παραμετρική ανάλυση για ύψος πύργου για ίδιο ηλιοστατικό πεδίο	75
4.4 Παραμετρική ανάλυση για ύψος πύργου για καινούριο ηλιοστατικό πεδίο.....	77
4.5 Επίδραση γεωμετρικών χαρακτηριστικών δέκτη στην ηλιοθερμική εγκατάσταση	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	91
Βιβλιογραφική ανασκόπηση	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1- 1. Βασικά χαρακτηριστικά Ήλιου.	22
Πίνακας 1- 2. Σύγκριση κατηγοριών συγκεντρωτικής τεχνολογίας [11].	22
Πίνακας 3- 1. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον IVANPAH 1. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν υποτεθεί με βάση τη βιβλιογραφική γνώση. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών. 61	61
Πίνακας 3- 2. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον IVANPAH 2. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν υποτεθεί με βάση τη βιβλιογραφική γνώση. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών.	61
Πίνακας 3- 3. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον IVANPAH 3. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν υποτεθεί με βάση τη βιβλιογραφική γνώση. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών.	62
Πίνακας 3- 4. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς (MWe) και ενεργειακό κόστος (\$/kWh) με ηλιακό πολλαπλάσιο 1 και 1.13793 για τον IVANPAH 1.	62
Πίνακας 3- 5. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς (MWe) και ενεργειακό κόστος (\$/kWh) με ηλιακό πολλαπλάσιο 1 και 1.13793 για τον IVANPAH 2.	62
Πίνακας 3- 6. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς (MWe) και ενεργειακό κόστος (\$/kWh) με ηλιακό πολλαπλάσιο 1 και 1.13793 για τον IVANPAH 3.	62
Πίνακας 3- 7. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS (πρώτη γραμμή) και πραγματική ετήσια ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2018, 2019, 2020.	63
Πίνακας 3- 8. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο (MWe) για το σταθμό ISEGS για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.	63
Πίνακας 3- 9. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον CRESCENT DUNES. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν οριστεί με βάση προγενέστερη ερευνητική διαδικασία. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών.	63
Πίνακας 3- 10. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για την διάταξη στον Αθερινόλακκο. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν οριστεί από τον συγγραφέα της παρούσας εργασίας. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών.	64
Πίνακας 3- 11. Η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο (MWe), η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και ο αριθμός ηλιοστατών του πεδίου για το θερινό ηλιοστάσιο και ώρα 12 το μεσημέρι, ανά τοποθεσία [36].	64
Πίνακας 3- 12: Η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο (MWe), η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και ο αριθμός ηλιοστατών του πεδίου για το θερινό ηλιοστάσιο και ώρα 12 το μεσημέρι, ανά τοποθεσία. (Google Earth Pro- SolarPILOT- SAM).	65

Πίνακας 4- 1. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον σταθμό MINOS. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν υποτεθεί με βάση τη βιβλιογραφική γνώση.	80
Πίνακας 4- 2. Συντεταγμένες των υπό εξέταση σημείων εγκατάστασης ηλιακού πύργου. ...	80
Πίνακας 4- 3. Πλήθος ηλιοστατών ανά σημείο εγκατάστασης και αντίστοιχη θερμική ισχύς δέκτη, το θερινό ηλιοστάσιο (21/6). Οι υπολογισμοί γίνονται για ώρα 12 το μεσημέρι.	80
Πίνακας 4- 4. Συνολική ετήσια ισχύς [kWh] που αποδίδεται στο δίκτυο ανά περίπτωση.	81
Πίνακας 4- 5. Η ετήσια αποδιδόμενη ισχύς στο δίκτυο (kWh), ο παράγοντας χωρητικότητας (capacity factor) και το ενεργειακό κόστος.	81
Πίνακας 4- 6. Ετήσια ισχύς [kWh], Capacity factor [%], LCOE [\$/kWh] για όλες τις περιπτώσεις.	81
Πίνακας 4- 7. Πλήθος ηλιοστατών για όλες τις περιπτώσεις.	81
Πίνακας 4- 8. Ετήσια ισχύς [kWh], Capacity factor [%], LCOE [\$/kWh] για όλες τις περιπτώσεις.	82
Πίνακας 4- 9. Ετήσια αποδιδόμενη ισχύς [kWh], ενεργειακό κόστος για τιμές λόγου ύψους διαμέτρου [H/D] δέκτη 0.5, 1, 2.	82
Πίνακας 4- 10. Ετήσια αποδιδόμενη ισχύς [kWh] και ενεργειακό κόστος για λόγο ύψους διαμέτρου [H/D] δέκτη 1.4 (πραγματική γεωμετρία δέκτη).	82

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1- 1. Επενδύσεις στις ΑΠΕ 20 οικονομιών παγκοσμίως για την χρονική περίοδο 2010-2019 [7].	22
Σχήμα 1- 2. Διαμοιρασμός κεφαλαίων που επενδύθηκαν παγκοσμίως στις ΑΠΕ για την χρονική περίοδο 2010-2019 [7].	23
Σχήμα 1- 3. Συμμετοχή των ΑΠΕ στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση για τις ευρωπαϊκές χώρες για το έτος 2019 και σύγκριση με τον αντίστοιχο στόχο για το έτος 2020[8].	23
Σχήμα 1- 4. Κατά κεφαλήν κατανάλωση πετρελαίου ανά περιοχή για το 2019[9].	24
Σχήμα 1- 5. Συστήματα παραβολικών συλλεκτών[10].	24
Σχήμα 1- 6. Συστήματα συλλεκτών γραμμικών ανακλαστήρων Frensel [16].	25
Σχήμα 1- 7. Συστήματα συλλεκτών γραμμικών ανακλαστήρων Frensel [17].	25
Σχήμα 1- 8. Συστήματα παραβολικού δίσκου μηχανής [18].	26
Σχήμα 1- 9. Συστήματα παραβολικού δίσκου μηχανής [19].	26
Σχήμα 1- 10. Συστήματα κεντρικού δέκτη [20].	27
Σχήμα 2- 1. Η σελίδα System Design [21].	47
Σχήμα 2- 2. Η σελίδα Heliostat Field [21].	48
Σχήμα 2- 3. Η σελίδα Heliostat Field [21].	48
Σχήμα 2- 4. Η σελίδα Tower and Receiver [21].	49
Σχήμα 2- 5: Ροή ρευστού με τη μέθοδο της σερπαντίνας [23].	49
Σχήμα 2- 6. Πιθανή διαδρομή που ακολουθεί το ρευστό μεταφοράς θερμότητας εντός των σωληνώσεων του δέκτη [23].	50
Σχήμα 2- 7. Η σελίδα Power Cycle [21].	50
Σχήμα 2- 8. Η σελίδα Thermal Storage [21].	51
Σχήμα 2- 9. Το φαινόμενο του συνημιτόνου [23].	51
Σχήμα 2- 10. Ατμοσφαιρική διαπερατότητα σε συνάρτηση με την απόσταση του ηλιοστάτη από τον δέκτη, για ορατότητα 23 km και 5 km [23].	52
Σχήμα 3- 1. Η ηλιοθερμική εγκατάσταση ISEGS. Κατά σειρά φαίνονται οι μονάδες IVANPAH 3, IVANPAH 2 και IVANPAH 3 [29].	65
Σχήμα 3- 2. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για τη μονάδα IVANPAH 1 και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2020, 2019 και 2018.	66
Σχήμα 3- 3. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για τη μονάδα IVANPAH 2 και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2020, 2019 και 2018.	66
Σχήμα 3- 4. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για τη μονάδα IVANPAH 3 και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2020, 2019 και 2018.	67
Σχήμα 3- 5. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για το 2020. ...	67
Σχήμα 3- 6. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για το 2019. ...	68

Σχήμα 3- 7. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για το 2018. ...	68
Σχήμα 3- 8. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο για ένα έτος από τον IVANPAH 1 για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.	69
Σχήμα 3- 9. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο για ένα έτος από τον IVANPAH 2 για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.	69
Σχήμα 3- 10. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο για ένα έτος από τον IVANPAH 3 για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.	70
Σχήμα 3- 11. Η ηλιοθερμική εγκατάσταση CRESCENT DUNES [30].	70
Σχήμα 3- 12. Μηνιαίος capacity factor για το σταθμό Crescent Dunes για ένα έτος. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στο άρθρο [35], το πορτοκαλί αντιστοιχεί σε αποκλειστική χρήση του SAM και το γκρι αντιστοιχεί σε χρήση Google Earth Pro- SolarPILOT- SAM.	71

Σχήμα 4- 1. Κατανομή της μέσης συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας (Καγκαράκης 1992). Πολλαπλασιάζεται με 3.6sec/hr και προκύπτουν MJ/m ²	83
Σχήμα 4- 2. Η άμεση προσπίπτουσα διαθέσιμη ακτινοβολία για την 21η Ιουνίου.	84
Σχήμα 4- 3. Η άμεση προσπίπτουσα διαθέσιμη ακτινοβολία για τον Αθρινόλακκο για κάθε ώρα ενός ολόκληρου έτους.....	84
Σχήμα 4- 4. Οικόπεδο του ηλιοθερμικού σταθμού, μέσω του Google Earth Pro.	85
Σχήμα 4- 5. Υπό διερεύνηση σημεία εγκατάστασης του ηλιακού πύργου, μέσω του Google Earth Pro.....	85
Σχήμα 4- 6. Υπό διερεύνηση σημεία εγκατάστασης του ηλιακού πύργου, μέσω του Google Earth Pro.....	86
Σχήμα 4- 7. Η μέση ετήσια προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο ηλιοστατικό πεδίο(MWt), η μέση ετήσια προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο δέκτη (MWt), η μέση ετήσια θερμική ενέργεια απορροφόμενη από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt) και η μέση ετήσια θερμική ενέργεια εισόδου του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος (MWt) για την μέση ημέρα ενός έτους	86
Σχήμα 4- 8. Η μέση ετήσια θερμική ενέργεια απορροφόμενη από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt), η μέση ετήσια θερμική ενέργεια εισόδου του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος (MWt), η μέση ετήσια φόρτιση θερμικής ισχύος του δοχείου αποθήκευσης (MWt) και η μέση ετήσια αποφόρτιση θερμικής ισχύος του δοχείου αποθήκευσης (MWt) για την μέση ημέρα ενός έτους.	87
Σχήμα 4- 9. Ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του δέκτη, ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου και ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου για την μέση ημέρα ενός έτους.....	88
Σχήμα 4- 10. Ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, ο βαθμός απόδοσης του δέκτη και ο βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου για τις 8760 ώρες ενός έτους.	88
Σχήμα 4- 11. Η προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο ηλιοστατικό πεδίο (MWt), η προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο δέκτη (MWt), η απορροφόμενη θερμική ενέργεια από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt) και η θερμική ενέργεια εισόδου του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος (MWt) για τις 8760 ώρες ενός έτους.	89
Σχήμα 4- 12. Μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης συνημιτόνου, ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, σκίασης, παρεμπόδισης, διαρροής για όλες τις περιπτώσεις.	89

Σχήμα 4- 13. Μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης συνημιτόνου, ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, σκίασης, παρεμπόδισης, διαρροής για όλες τις περιπτώσεις. 90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος συγκεντρωτικής τεχνολογίας

1.1 Εισαγωγή

Είναι γεγονός πως η ενσωμάτωση των ορυκτών καυσίμων στην παραγωγή, οδήγησε σε άνθιση της βιομηχανικής δραστηριότητας. Η αντίστοιχη αύξηση του ετήσιου παραγόμενου πλούτου που επήλθε, οδήγησε τις χώρες της Δύσης σε σημαντική βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των πολιτών τους καθώς και σε μία σχετική οικονομική και κοινωνική πρόοδο. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ανερχόμενες οικονομικές υπερδυνάμεις στηρίζουν την αλματώδη αύξηση της γεωπολιτικής τους ισχύς στην εκμετάλλευση ορυκτών.

Τα ορυκτά καύσιμα στις διάφορες μορφές τους (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, λιγνίτης κλπ) αποτελούν το κυρίαρχο μέσο κάλυψης της βιομηχανικής δραστηριότητας παγκοσμίως [1]. Το ίδιο ισχύει για τις μεταφορές. Κατά την καύση τους, ο άνθρακας που βρίσκεται στο καύσιμο αντιδρά με το οξυγόνο και εκλύεται διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Η αύξηση της συγκέντρωσης CO_2 στην ατμόσφαιρα προκαλεί αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας, οδηγώντας στην κλιματική αλλαγή. Επίσης απελευθερώνονται ατμοσφαιρικοί ρύποι (διοξείδιο του θείου, διοξείδιο του αζώτου και σωματίδια), με επακόλουθες επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα.

Μέχρι σήμερα στην Ευρωπαϊκή Ένωση καταγράφονται 400.000 πρόωροι θάνατοι ετησίως λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ενώ λόγω της ζέστης και της ξηρασίας που οφείλεται στην υπερθέρμανση του πλανήτη σημειώνονται 90.000 θάνατοι ετησίως [2]. Όσον αφορά το οικονομικό σκέλος της υπόθεσης, η πρόβλεψη για αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 3°C μεταφράζεται σε ετήσιες ζημιές της τάξης των 190 δισεκατομμυρίων ευρώ [3]. Επιπρόσθετα, η κλιματική αλλαγή δύναται να προκαλέσει αύξηση των τιμών των τροφίμων κατά 20% έως το 2050 [4], με ανυπολόγιστες κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις.

Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη αφενός για την κάλυψη της ολοένα και αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης, και αφετέρου για τον περιορισμό της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Έχοντας ως δεδομένο πως περίπου το 77% των ενεργειακών αναγκών του μέσου ευρωπαίου καλύπτεται από πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακα και ότι ο μέσος ευρωπαίος χρησιμοποιεί 27 megawatt ανά ώρα (MWh) ετησίως, η υιοθέτηση των ΑΠΕ συνιστά μονόδρομο [1].

Παρότι η πανδημία του covid-19 οδήγησε σε πτώση της ζήτησης άνθρακα κατά 5% για το 2020 [5], οι κυβερνήσεις των προηγμένων χωρών ιεραρχούν ψηλά στην ατζέντα το ενεργειακό ζήτημα και λαμβάνουν μια σειρά από πρωτοβουλίες για την σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Φράσεις όπως πράσινη μετάβαση ή πράσινη ενέργεια τίθενται ολοένα και πιο επιτακτικά στη δημόσια σφαίρα. Η δέσμευση των χωρών για την «ευρωπαϊκή πράσινη συμφωνία» (Green New Deal) θέτει ουσιαστικές υποχρεώσεις στα κράτη μέλη της ΕΕ για πιο εκτεταμένη υιοθέτηση

των φιλικών προς το περιβάλλον ΑΠΕ, δίνοντας έτσι πρόσφορο έδαφος για επενδυτική και κοινωνική δραστηριότητα γύρω από αυτόν τον κλάδο. Η ηλιακή ενέργεια αναμένεται να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο σε αυτό το εγχείρημα τόσο για την άενη διαθεσιμότητα που τη συνοδεύει όσο και για τα αρκετά συγκριτικά πλεονεκτήματα που προσφέρει ως προς τις άλλες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας.

Η Ε.Ε. είναι κοντά στην επίτευξη του στόχου για 20% [6] της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας να προέρχεται από τις Α.Π.Ε., όμως η πρόοδος σε εθνικό επίπεδο είναι ανισόμερη. Η κατανάλωση ενέργειας προερχόμενη από ανανεώσιμες μορφές αυξήθηκε από 18.9% το 2018 σε 19.7% το 2019, ενώ 14 κράτη μέλη ήδη πέτυχαν τους στόχους του 2020 από το 2019. Βέβαια όσων αφορά τη Γαλλία, την Ιρλανδία και την Ολλανδία οφείλουν να γίνουν σημαντικά βήματα. Αναμφίβολα ο στόχος για 32% ενέργεια προερχόμενη αποκλειστικά από ΑΠΕ μέχρι το 2030, απαιτεί θεμελιακές αλλαγές στο ενεργειακό σύστημα των κρατών μελών της ΕΕ [6].

Ο Ήλιος αποτελεί μια αστείρευτη πηγή ενέργειας για την Γη. Βρίσκεται στο κέντρο του ηλιακού μας συστήματος και εκπέμπει διαρκώς ενέργεια με τη μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η σύστασή της μάζας του αποτελείται κυρίως από υδρογόνο(78%), ήλιο(20%) και περίπου 80 ακόμα στοιχεία εκ των οποίων τα περισσότερα απαντώνται και στη Γη. Η ενέργεια που παράγεται εντός του Ήλιου οφείλεται σε θερμοπυρηνική σύντηξη, όπου ισότοπα Η₂ κατόπιν αλυσιδωτών αντιδράσεων παράγουν He και μεγάλα ποσά ενέργεια, σε θερμοκρασίες περίπου 15 εκατομμυρίων °C και πιέσεις 100 δισεκατομμυρίων bar. Η θερμοκρασία στο κέντρο του κυμαίνεται σε επίπεδα της τάξης των 10-20 x 10⁶ K. Η ενέργεια που παράγεται στον πυρήνα μεταφέρεται στην επιφάνειά του, στη ζώνη της φωτόσφαιρας που βρίσκεται περίπου στους 6000K και αποτελεί τη πηγή της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

1.2 Είδη συγκεντρωτικής τεχνολογίας

1.2.1 Συστήματα παραβολικών συλλεκτών (PTC)

Τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων συνιστούν την πιο διαδεδομένη κατηγορία συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, μέχρι το 2018 το 90% των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων σε λειτουργία εμπορικής χρήσης ανήκουν στην κατηγορία των παραβολικών συλλεκτών [10]. Η βασική αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο γεγονός ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται στην κυρτή επιφάνεια των παραβολικών συλλεκτών και συγκεντρώνεται στον δέκτη. Ουσιαστικά ο δέκτης συνίσταται ως ένας σωλήνας, επικαλυμμένος με απορροφητική βαφή ο οποίος διατρέχει γραμμικά την παραβολική διάταξη. Οι σωληνώσεις του δέκτη ή απορροφητή διαρρέονται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Στην υπό

μελέτη τεχνολογία, το ρόλο του ρευστού μεταφοράς θερμότητας αναλαμβάνει κάποιο θερμικό έλαιο, η θερμοκρασία του οποίου αγγίζει τους 393°C [10]. Ακολουθώντας την βασική αρχή λειτουργίας των ηλιοθερμικών σταθμών, το νερό απάγει τη θερμότητα του ρευστού μεταφοράς θερμότητας μέσω ενός εναλλάκτη και μετατρέπεται σε ατμό, ο οποίος έπειτα εκτονώνεται σε ένα στρόβιλο (εκτελώντας ένα τυπικό θερμοδυναμικό κύκλο) με σκοπό την ολοκλήρωση της διαδικασίας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Βεβαίως να σημειωθεί πως υπάρχουν και διατάξεις παραβολικών συλλεκτών άμεσης ατμοπαραγωγής, στις οποίες το νερό μετατρέπεται σε ατμό εντός του απορροφητή και εκτονώνεται απευθείας στο στρόβιλο, δίχως τη μεσολάβηση του επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας. Οι σειρές των παραβολικών συλλεκτών παρατάσσονται κατά τη διεύθυνση του άξονα Βορρά-Νότου, ενώ εκτελούν κίνηση στις δύο διαστάσεις. Να σημειωθεί πως μια τυπική διάταξη παραβολικών κατόπτρων αγγίζει σε ετήσια βάση ένα βαθμό απόδοσης της τάξης του 15% με 16% [11]. Ένα τυπικό σύστημα παραβολικών συλλεκτών απεικονίζεται στο Σχήμα 1-5.

1.2.2 Συστήματα συλλεκτών γραμμικών ανακλαστήρων Frensel (Linear Frensel)

Οι συλλέκτες γραμμικών ανακλαστήρων FRENSEL (Linear Frensel) αποτελούν μια κατηγορία με παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με αυτήν των παραβολικών κατόπτρων. Η ειδοποιός διαφορά τους έγκειται στο ότι στην τεχνολογία αυτή, πέραν του γεγονότος ότι οι συλλέκτες είναι επίπεδοι κατά βάση, ο απορροφητής δεν διατρέχει την κάθε συστοιχία συλλεκτών ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα οι σωλήνες εγκαθίστανται επάνω από τις σειρές συλλεκτών με κατάλληλο τρόπο ώστε να απορροφούν την ανακλώμενη από τους γραμμικούς συλλέκτες ηλιακή ακτινοβολία. Ο ετήσιος βαθμός απόδοσης μιας τυπικής διάταξης με συλλέκτες γραμμικών ανακλαστήρων κυμαίνεται στο 8% με 10% [11]. Παρότι η δομή τους είναι σχετικά πιο απλή και το κόστος κατασκευής τους παρουσιάζεται ως πιο περιορισμένο, η πρακτική εφαρμογή τους εγείρει ερωτηματικά. Ως εκ τούτου δεν προτιμώνται. Ένα τυπικό σύστημα συλλεκτών γραμμικών ανακλαστήρων απεικονίζεται στα Σχήματα 1-6, 1-7.

1.2.3 Συστήματα παραβολικού δίσκου μηχανής (Dish Engine)

Σε αυτή την κατηγορία συγκεντρωτικών ηλιακών διατάξεων διαπιστώνεται μια διαφοροποίηση της φιλοσοφίας σε σχέση με αυτήν που κυριάρχησε στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις. Ένα σύστημα παραβολικού «πιάτου» απαρτίζεται από ένα αυτοτελή παραβολικού σχήματος συλλέκτη ο οποίος ανακλά την ηλιακή ακτινοβολία στον δέκτη. Ο δέκτης είναι στερεωμένος σε ένα συγκεκριμένο σημείο εστίασης, ενώ στο δέκτη έχει προσδεθεί μια θερμική μηχανή παραγωγής ισχύος. Καθώς ο εντοπισμός του Ηλίου πραγματοποιείται στους δύο άξονες, ολόκληρη η κατασκευή(συλλέκτης, δέκτης, μηχανή) μετακινείται ταυτόχρονα. Αυτού του είδους

η τεχνολογία προκρίνεται για χρήση σε ηλιακούς αντιδραστήρες, καθώς είναι εφικτή η επίτευξη ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών. Επίσης στους θετικούς παράγοντες που συνοδεύουν τα συστήματα παραβολικού δίσκου μηχανής συγκαταλέγεται ο πάρα πολύ υψηλός λόγος συγκέντρωσης που σημειώνουν, άνω του 1300 [11]. Ο ετήσιος βαθμός απόδοσης μια διάταξης παραβολικού δίσκου μηχανής αγγίζει το 25% [11]. Απεναντίας το ιδιαίτερα αυξημένο κόστος μιας τέτοιας διάταξης συνιστά απαγορευτική την τελική επιλογή της. Ένα τυπικό σύστημα παραβολικού δίσκου μηχανής απεικονίζεται στα Σχήματα 1-8, 1-9.

1.2.4 Συστήματα κεντρικού δέκτη (CRS)

Την τελευταία κατηγορία διατάξεων συγκεντρωτικής τεχνολογίας αποτελούν τα συστήματα κεντρικού δέκτη (CRS) ή αλλιώς οι ηλιακοί πύργοι. Μια διάταξη κεντρικού δέκτη αποτελείται από τρία υποσυστήματα: i) Το ηλιοστατικό πεδίο, ii) Το δέκτη iii) Το σύστημα μετατροπής ισχύος. Ένα τυπικό σύστημα κεντρικού δέκτη απεικονίζεται στο Σχήμα 1-10.

Σε αυτήν την περίπτωση, το ηλιοστατικό πεδίο αποτελείται από το σύνολο των κατοπτρικών επιφανειών (ηλιοστάτες) της διάταξης. Η προσπίπτουσα στο πεδίο ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται και συγκεντρώνεται στον δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στην κορυφή του πύργου. Έπειτα, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που διαρρέει τις σωληνώσεις του δέκτη απάγει τη θερμότητα, η οποία αξιοποιείται για την υλοποίηση ενός θερμοδυναμικού κύκλου στο σύστημα μετατροπής ισχύος, από όπου θα προκύψει ηλεκτρική ισχύς. Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται τετηγμένο άλας ενώ υπάρχουν περιπτώσεις διατάξεων νερού-ατμού. Βέβαια ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας δύναται να χρησιμοποιηθούν διάφορα συνθετικά έλαια, όμως αντίστοιχες επιλογές συναντώνται σπάνια στην πράξη. Στην περίπτωση της χρήσης τετηγμένου άλατος προκύπτει η διαδικασία της έμμεσης ατμοπαραγωγής, καθώς ο ατμός ο οποίος πρόκειται να εκτονωθεί στον στρόβιλο του συστήματος μετατροπής ισχύος προκύπτει μέσω ενός επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας. Αντίθετα στην περίπτωση που το νερό διαδραματίζει το ρόλο του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, ο ατμός που παράγεται στον δέκτη εκτονώνεται απευθείας δίχως τη μεσολάβηση κάποιου επιπρόσθετου εναλλάκτη θερμότητας, ορίζοντας κατ'αυτόν τον τρόπο την διεργασία της άμεσης ατμοπαραγωγής. Αναλόγως το είδος του δέκτη και του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, δύναται να επιτευχθούν θερμοκρασίες από 250°C έως 1000°C [11]. Για τη χρήση τετηγμένου άλατος, μια τυπική θερμοκρασία λειτουργίας προσεγγίζει τους 600°C [10].

Το γεγονός ότι ο εντοπισμός του Ηλίου κατά τη διάρκεια της ημέρα γίνεται στις 3 διαστάσεις, συνιστά συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των παραβολικών κατόπτρων. Επίσης, συνηθίζεται η χρήση δοχείου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, κυρίως για διατάξεις στις οποίες η λειτουργία τους στηρίζεται στο τετηγμένο άλας. Ακόμη αρκετά συχνά, η λειτουργία ενός ηλιοθερμικού σταθμού κεντρικού δέκτη υποστηρίζεται από ένα σύστημα εφεδρικής καύσης.

1.2.5 Σύγκριση κατηγοριών συγκεντρωτικής τεχνολογίας

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζεται ο Πίνακας 1-2 στον οποίο παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων κατηγοριών συγκεντρωτικής τεχνολογίας.

1.3 Στόχος παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η τεχνολογία των ηλιακών πύργων παρά την σχετική πολυπλοκότητα που τη συνοδεύει, εκτιμάται ως μια ενδιαφέρουσα και ελπιδοφόρα λύση με μεγάλες προοπτικές εξέλιξης. Ως εκ τούτου η παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί στην προσομοίωση διατάξεων κεντρικού δέκτη μέσω των κατάλληλων λογισμικών προσομοίωσης, δίχως να εστιάζει σε τετριμμένη γνώση θεωρητικού-βιβλιογραφικού χαρακτήρα η οποία εξάλλου είναι εύκολα προσβάσιμη. Θα δοθεί ιδιαίτερη βάση στο τεχνικό επίπεδο μιας διάταξης κεντρικού δέκτη, ενώ οποιεσδήποτε οικονομικές παράμετροι θα αξιολογηθούν αποκλειστικά σε σχέση με την ενεργειακή αποδοτικότητα και οικονομική βιωσιμότητα του σταθμού στα πλαίσια περιγραφής κάποιας συγκριτικής διαδικασίας. Ως εκ τούτου, τονίζεται ότι στο σύνολο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι οικονομικές παράμετροι των λογισμικών διατηρούν τις προεπιλεγμένες τους τιμές.

Αρχικά θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή των λογισμικών που θα χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πρόκειται για τα λογισμικά SAM [12] και SolarPILOT [13] τα οποία έχουν δημιουργηθεί από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) των Η.Π.Α. Στο Κεφάλαιο 2 λοιπόν θα παρουσιαστούν οι βασικοί παράμετροι εισόδου κάθε σελίδας, εξηγώντας τους ορισμούς τους και διατυπώνοντας τις εξισώσεις υπολογισμού των παραμέτρων εξόδου στα σημεία που κρίνεται απαραίτητο. Η σωστή προσέγγιση του αντικείμενου προϋποθέτει την όσο το δυνατό καλύτερη γνώση των λογισμικών πακέτων και όχι την χρήση τους ως black box. Επιπρόσθετα θα προσδιοριστεί επακριβώς η διαδικασία συνδυαστικής χρήσης των SAM και SolarPILOT, κάνοντας αναφορά στον τρόπο εισαγωγής της πραγματικής τοπογραφίας του ηλιοστατικού πεδίου ενός ηλιοθερμικού σταθμού μέσω του Google Earth Pro [14].

Στο Κεφάλαιο 3 θα διεξαχθούν προσομοιώσεις ηλιοθερμικών σταθμών ηλιακού πύργου με σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου, εφαρμόζοντας συνδυαστική χρήση των λογισμικών SAM-SolarPILOT-Google Earth Pro. Θα ελεγχθούν αποτελέσματα αναφορικά με την αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο, σε ετήσια και μηνιαία βάση. Στόχος είναι ο έλεγχος της σύγκλισης ή απόκλισης των αποτελεσμάτων που εξάγονται μέσω των λογισμικών της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με αντίστοιχα προγενέστερων διπλωματικών εργασιών ή δημοσιευμένων επιστημονικών συγγραμμάτων ή ακόμα και πραγματικών αποτελεσμάτων ηλιοθερμικών σταθμών κεντρικού δέκτη που βρίσκονται σε λειτουργία.

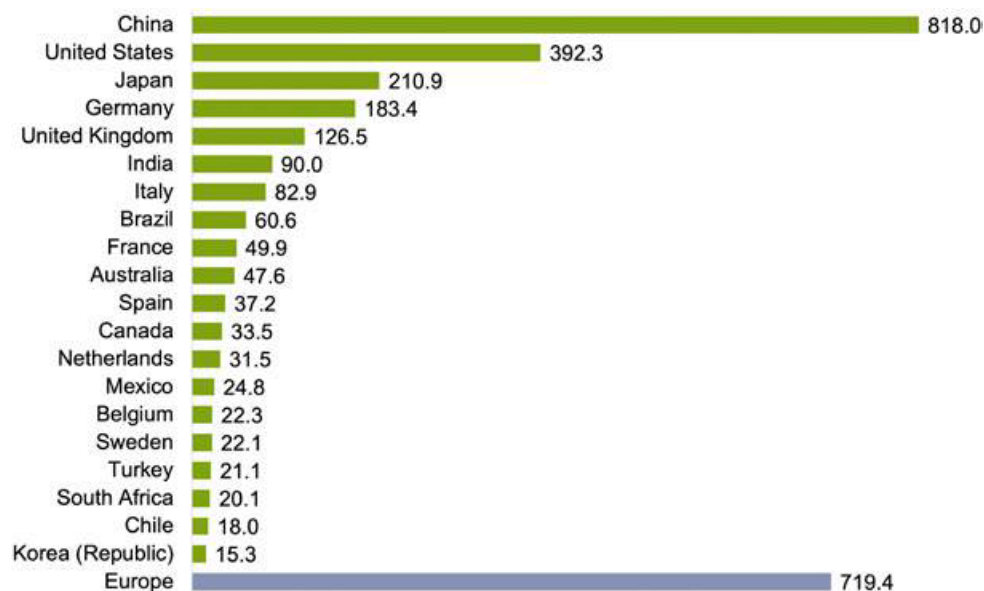
Τέλος, στο Κεφάλαιο 4 θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της ηλιοθερμικής εγκατάστασης MINOS [15], του πρώτου ηλιοθερμικού σταθμού κεντρικού δέκτη στην Ελλάδα και ο οποίος πρόκειται να εγκατασταθεί στον Αθρινόλακκο της Κρήτης. Με βάση τα πραγματικά δεδομένα της εγκατάστασης θα διαπιστωθεί το βέλτιστο σημείο εγκατάστασης του πύργου. Προφανέστατα θα υλοποιηθεί προσομοίωση της διάταξης με βάση τα πραγματικά χαρακτηριστικά της και θα εξαχθούν αποτελέσματα για τη μέση ημέρα ενός έτους αναφορικά με τα 3 βασικά υποσυστήματα της διάταξης αλλά και τη λειτουργία του δοχείου αποθήκευσης. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί μια παραμετρική ανάλυση για το ύψος πύργου με σταθερό ηλιοστατικό πεδίο και μια παραμετρική ανάλυση για το ύψος πύργου με καινούριο αυτή τη φορά ηλιοστατικό πεδίο. Το κεφάλαιο αυτό θα ολοκληρωθεί με την διερεύνηση της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δέκτη στην ηλιοθερμική εγκατάσταση. Στα σημεία που κρίνεται απαραίτητο, είτε για την βαθύτερη τεκμηρίωση των συμπερασμάτων που εξάγονται ή για την ισχυροποίηση των ισχυρισμών που πρόκειται να διατυπωθούν, θα παρατεθούν δεδομένα που συγκεράζουν την οικονομική βιωσιμότητα με την ενεργειακή απόδοση της μελετώμενης διάταξης.

Πίνακας 1- 1. Βασικά χαρακτηριστικά Ήλιου.

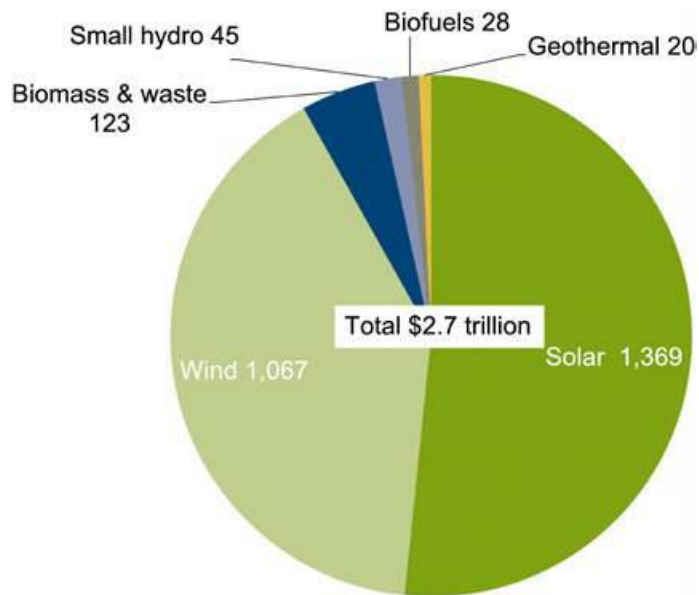
Διάμετρος	$D=2R=1.39 \times 10^9$ m
Μάζα	$M=2 \times 10^{30}$ Kg
Θερμοκρασία εντός του Ήλιου	$10-20 \times 10^6$ K
Θερμοκρασία στην επιφάνεια του Ήλιου	6000K
Μέση απόσταση από τη Γη	$L=1.5 \times 10^{11}$ m
Ισχύ εκπομπής	3.8×10^{26} W
Ισχύς ακτινοβολίας που φτάνει στην ατμόσφαιρα της Γης(σε 1 ώρα)	1.7×10^{17} W (5000 φορές περισσότερη από τις ανάγκες του πλανήτη)

Πίνακας 1- 2. Σύγκριση κατηγοριών συγκεντρωτικής τεχνολογίας [11].

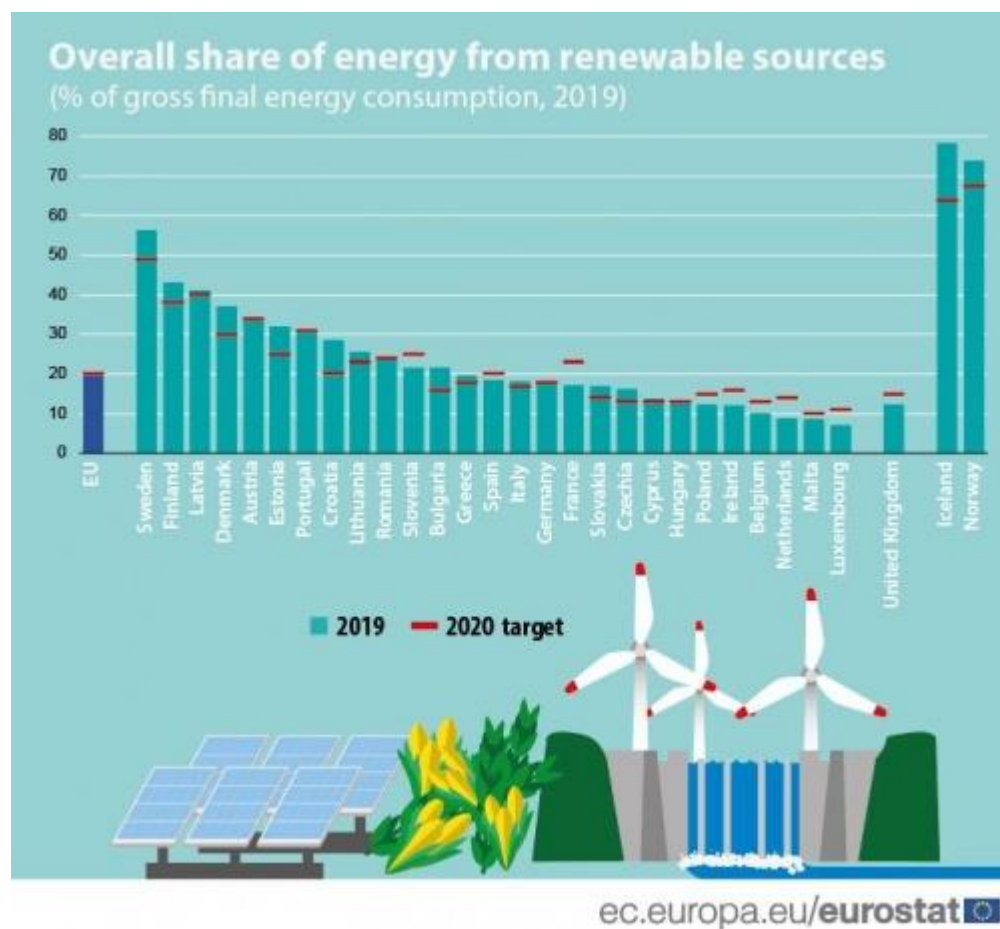
Όνομα επιστολής	PTC	CRS	Linear Frensel	Dish Engine
Τύπος εστίασης	Γραμμική	Σημειακή	Γραμμική	Σημειακή
Θερμοδυναμικός κύκλος	RC, CC	RC, BC, CC	RC	RC, SC
Λόγος συγκέντρωσης	70-80	>1000	>60	>1300
Θερμοκρασία λειτουργίας	Μέτρια	Υψηλότερη	Χαμηλή	Ιδιαίτερα υψηλή
Βαθμός απόδοσης(%)	15-16	16-17	8-10	20-25
Ισχύς διάταξης (MW)	10-300	10-200	10-200	0.01-0.025
Ρίσκο τεχνολογικής ανάπτυξης	Χαμηλό	Μέτριο	Μέτριο	Μέτριο
Ερευνητική δραστηριότητα	Περιορισμένη	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Μέσω της παραγωγής



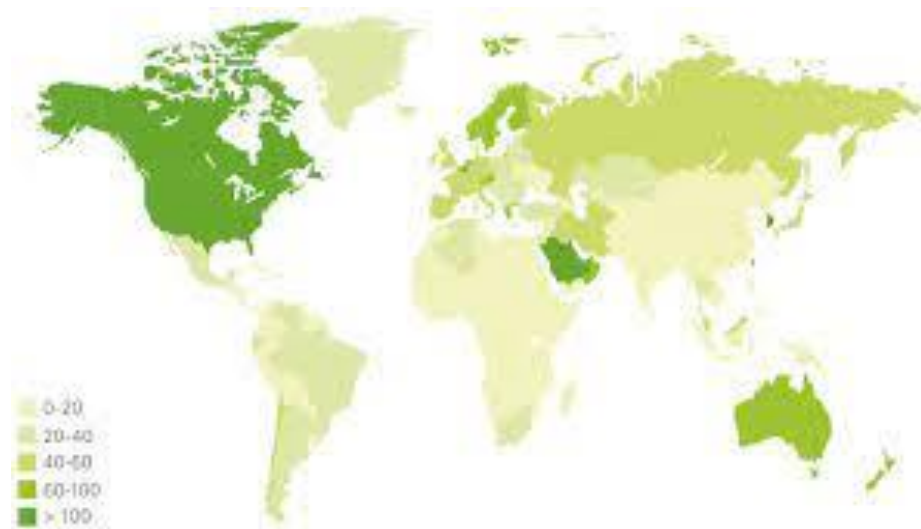
Σχήμα 1- 1. Επενδύσεις στις ΑΠΕ 20 οικονομιών παγκοσμίως για την χρονική περίοδο 2010-2019 [7].



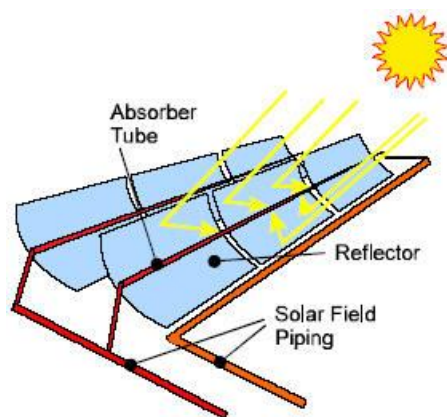
Σχήμα 1- 2. Διαμοιρασμός κεφαλαίων που επενδύθηκαν παγκοσμίως στις ΑΠΕ για την χρονική περίοδο 2010-2019 [7].



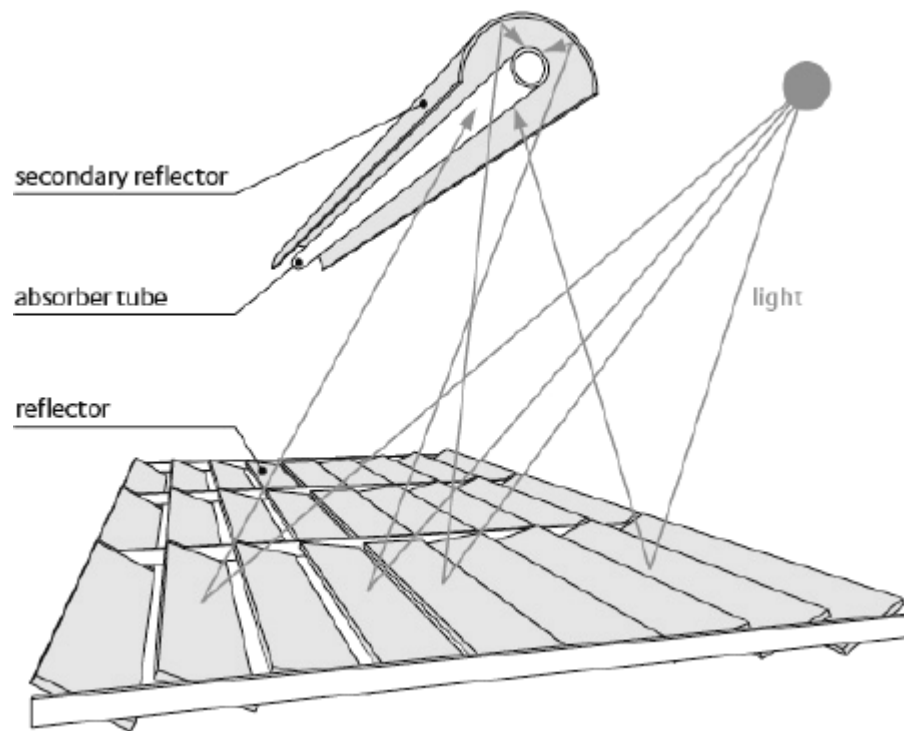
Σχήμα 1- 3. Συμμετοχή των ΑΠΕ στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση για τις ευρωπαϊκές χώρες για το έτος 2019 και σύγκριση με τον αντίστοιχο στόχο για το έτος 2020[8].



Σχήμα 1- 4. Κατά κεφαλήν κατανάλωση πετρελαίου ανά περιοχή για το 2019[9].



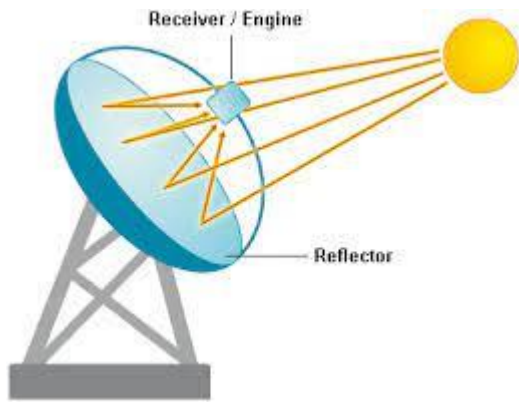
Σχήμα 1- 5. Συστήματα παραβολικών συλλεκτών[10].



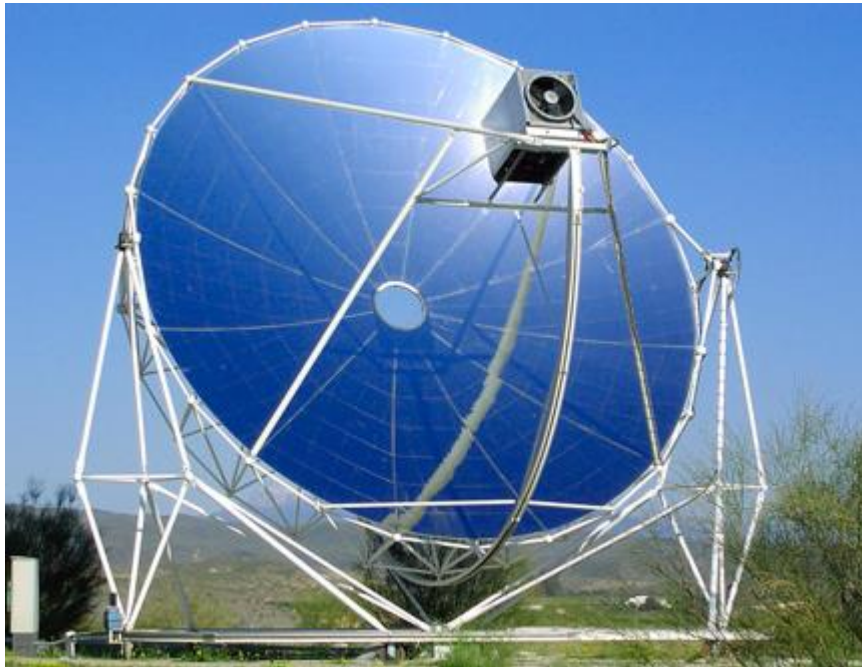
Σχήμα 1- 6. Συστήματα συλλεκτών γραμμικών ανακλαστήρων Fresnel [16].



Σχήμα 1- 7. Συστήματα συλλεκτών γραμμικών ανακλαστήρων Fresnel [17].



Σχήμα 1- 8. Συστήματα παραβολικού δίσκου μηχανής [18].



Σχήμα 1- 9. Συστήματα παραβολικού δίσκου μηχανής [19].



Σχήμα 1- 10. Συστήματα κεντρικού δέκτη [20].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Ανάλυση λογισμικών πακέτων SAM και SolarPILOT

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, όπως έχει σημειωθεί, θα επεξηγηθούν οι βασικοί άξονες των λογισμικών που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση της λειτουργίας των υποσυστημάτων μίας διάταξης κεντρικού δέκτη. Επιπρόσθετα, θα γίνει αναφορά στον τρόπο υπολογισμού των απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου και του δέκτη, διατυπώνοντας τους αντίστοιχους ορισμούς και εξισώσεις. Για την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης εικόνας προς τον αναγνώστη, θα αναλυθεί η μεθοδολογία που ακολουθείται για την συνδυαστική χρήση Google Earth Pro-SolarPILOT-SAM και η οποία υιοθετείται κατά κόρον στο υπόλοιπο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Προτού όμως γραφούν όσα επισημαίνονται στην παραπάνω παράγραφο, κρίνεται σκόπιμο να παρατεθεί εν συντομία μια θεωρητική προσέγγιση μιας τυπικής διάταξης κεντρικού δέκτη.

2.2 Θεωρητική προσέγγιση της διάταξης κεντρικού δέκτη

Η διαθέσιμη θερμική ενέργεια στο ηλιοστατικό πεδίο

$$Q_{useful} = N A_{Heliostat} DNI , [W]$$

όπου N είναι το πλήθος ηλιοστατών, $A_{Heliostat}$ [m^2] είναι το εμβαδόν ηλιοστάτη και DNI [W/m^2] είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμική ενέργεια στην είσοδο του δέκτη ορίζεται ως:

$$Q_{inc} = Q_{useful} \eta_{field} , [W]$$

όπου η_{field} είναι ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου. Η θερμική ενέργεια στην έξοδο του δέκτη ορίζεται ως:

$$Q_{net} = Q_{inc} \eta_{receiver} , [W]$$

όπου $\eta_{receiver}$ είναι ο βαθμός απόδοσης του δέκτη. Η ηλεκτρική (δίχως απώλειες) ισχύς ορίζεται ως

$$P_{el,gross} = Q_{net} \eta_{block} , [W]$$

όπου η_{block} είναι ο βαθμός απόδοσης μετατροπής θερμικής σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτό το σημείο, ενδεικτικά αναφέρεται πως για ένα τυπικό κύκλο Rankine $\eta_{block} = 0,4$. Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο κύκλωμα ορίζεται ως:

$$P_{el,net} = P_{el,gross} \eta_{el} \text{ [W]}$$

όπου η_{el} είναι βαθμός απόδοσης μεταφοράς ισχύος από τη γεννήτρια στο δίκτυο.

2.3 Λεπτομερής ανάλυση του λογισμικού SAM

Στο σημείο αυτό θα παρατεθούν οι βασικές σελίδες ή διαφορετικά το προγραμματιστικό περιβάλλον του SAM, όπου είναι διακριτές οι ανάλογες μεταβλητές εισόδου. Επίσης, παρουσιάζονται οι μεταβλητές εξόδου, τα αποτελέσματα των οποίων υπολογίζονται από το λογισμικό στη βάση των εξισώσεων που διατυπώνονται, καθοριζόμενες ουσιαστικά από τις παραμέτρους που εισάγονται από το χρήστη (με γαλάζιο χρώμα στις εικόνες που επίκειται να ακολουθήσουν).

▪ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (SYSTEM DESIGN) [21]

HELIOSTATIC FIELD

Design point DNI: Εκφράζει την άμεση διαθέσιμη ακτινοβολία στο σημείο σχεδιασμού [W/m^2]

Solar Multiple: Καθορίζει την ονομαστική θερμική ισχύ του δέκτη. Ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής θερμικής ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας προς την θερμική ισχύ που απαιτείται στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου μετατροπής ισχύος.

$$SM = \frac{\text{Receiver thermal power}}{\text{Cycle thermal power}}$$

Receiver thermal power: Η θερμική ισχύς που απαιτείται στην έξοδο του δέκτη για τη λειτουργία του κύκλου παραγωγής ισχύος στο σημείο σχεδιασμού [MWt]. Υπολογίζεται από το λογισμικό με βάση τον τύπο που ακολουθεί:

Receiver thermal power = Solar multiple * Cycle thermal power

TOWER AND RECEIVER

HTF hot temperature: Η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στην έξοδο του δέκτη, για λειτουργία της διάταξης στο σημείο σχεδιασμού [$^{\circ}\text{C}$].

HTF cold temperature: Η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στην είσοδο του δέκτη, για λειτουργία της διάταξης στο σημείο σχεδιασμού [$^{\circ}\text{C}$].

THERMAL STORAGE

Full hours of storage: Η ονομαστική θερμική χωρητικότητα του δοχείου αποθήκευσης για λειτουργία στο πλήρες φορτίο, εκφρασμένη σε ώρες. Με απλά λόγια εκφράζει, πόσες ώρες το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να καλύπτει τις απαιτήσεις του θερμοδυναμικού κύκλου για λειτουργία στο σημείο σχεδιασμού.

Solar field hours of storage: Η ονομαστική χωρητικότητα του δοχείου αποθήκευσης σε ώρες λειτουργίας του ηλιοστατικού πεδίου, για την παραγόμενη θερμική ισχύ του πεδίου. Υπολογίζεται από το λογισμικό με βάση τον τύπο που ακολουθεί:

Solar Field Hours of Storage = Full Load Hours of Storage ÷ Solar Multiple

POWER CYCLE

Design turbine gross output: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, δίχως συνυπολογισμό των απωλειών [MWe].

Estimated gross to net conversion factor: Βαθμός απόδοσης που ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο προς την ηλεκτρική ισχύ στην οποία δεν έχουν συνυπολογιστεί οι απώλειες.

Estimated net output at design (nameplate): Η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο κύκλωμα [MWe]. Υπολογίζεται από το λογισμικό με βάση τον τύπο που ακολουθεί:

Estimated net output at design(nameplate)= Design turbine gross output* Estimated gross to net conversion factor

όπου Cycle thermal efficiency είναι ο βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου.

Cycle thermal power: Η θερμική ισχύς που απαιτείται στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου ώστε να λειτουργεί στις συνθήκες σχεδιασμού [MWt]. Υπολογίζεται από το λογισμικό με βάση τον τύπο που ακολουθεί:

Cycle Thermal Power [MWt] = Design Turbine Gross Output [Mwe] ÷ Cycle Thermal Efficiency

▪ ΗΛΙΟΣΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ (HELIOSTATIC FIELD) [21]

Στην κατηγορία με τίτλο «Heliostat Properties» προσδιορίζονται οι βασικές παράμετροι των ηλιοστατών. Όπως είναι αναμενόμενο, η πλευρά του χρήστη οφείλει να ορίσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (μήκος, ύψος) του ηλιοστάτη αλλά και το λόγο της ανακλαστικής επιφάνειας του ηλιοστάτη προς την συνολική του επιφάνεια. Ως εκ τούτου η αξιοποιήσιμη επιφάνεια ενός ηλιοστάτη, η οποία ουσιαστικά αποτελεί την τιμή η οποία χρησιμοποιείται από το SAM για τους μετέπειτα υπολογισμούς, ισούται με:

Single heliostat area= heliostat width * heliostat height* ratio of ref. area profile

Από το λογισμικό επίσης, υπολογίζεται η τιμή «Reflected image conical error [mrad]», η οποία εκφράζει την ισοδύναμη κατανομή του κωνικού σφάλματος του διανύσματος της ανακλώμενης ακτίνας και ισούται με:

$\sigma_{c,tot} = \sqrt{2 (2\sigma_{1ax})^2}$, όπου σ_{1ax} αντιστοιχεί στη παράμετρο εισόδου «Image Error (slope, single axis)»

Στην κατηγορία «Solar Field Layout Constraints» ορίζονται οι παράμετροι που, όπως υποδηλώνεται από την ονομασία της, σχετίζονται με τους κατασκευαστικούς περιορισμούς του ηλιοστατικού πεδίου. Στην κατηγορία «Heliostat Operation» ορίζονται παράμετροι που αναφέρονται στην απαιτούμενη ισχύ για την εκκίνηση ενός ηλιοστάτη, στην δαπανώμενη ισχύ για την κίνηση ενός ηλιοστάτη και στη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ανέμου για την ασφαλή λειτουργία ενός ηλιοστάτη.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει μια ιδιαίτερη αναφορά στη βελτιστοποίηση του ηλιοστατικού πεδίου που υλοποιείται από το SAM και η οποία αντιστοιχεί στην επιλογή «Optimize heliostat layout and tower dimensions»

Μια από τις βασικές επιλογές που διαθέτει το SAM αποτελεί η διαδικασία βελτιστοποίησης του ηλιοστατικού πεδίου. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης στον οποίο στηρίζεται η εν λόγω διαδικασία ουσιαστικά υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές αναφορικά με το πλήθος των ηλιοστατών, τις συντεταγμένες τοποθέτησης των ηλιοστατών στο χώρο, το ύψος του πύργου και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη.

Για την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης, το λογισμικό υιοθετεί μία αντικειμενική συνάρτηση μέσω της οποίας συσχετίζονται παράγοντες σχεδιασμού και λειτουργίας της προσομοιωμένης διάταξης, με στόχο την συνολική βελτίωση της οικονομοτεχνικής βιωσιμότητας του υπό μελέτη εγχειρήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης του ηλιοστατικού πεδίου παρατίθεται παρακάτω [22].

$$\begin{aligned} \text{minimize } f(x) = Z \\ = F(\varepsilon(\bar{x}_\varepsilon)) + f(D(\bar{x}_D)) + E(f(M(\bar{x}_M, \xi))) + E(f(O(\bar{x}_O, \xi))) \\ - E[f(S(\bar{x}_S, M(\bar{x}_M, \xi), O(\bar{x}_O, \xi), C(\bar{x}_C, \xi)))] \end{aligned}$$

Ο όρος ε αντιστοιχεί σε ένα μοντέλο αναλυτικών όρων το οποίο περιλαμβάνει ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες σχετίζονται με το κόστος κατασκευής του πύργου, του δέκτη καθώς και διάφορα εργατικά έξοδα.

Ο όρος D αναφέρεται σε ένα ντετερμινιστικό μοντέλο black box, το οποίο υπολογίζει κόστη που έχουν άμεση συσχέτιση με την απόδοση και το κόστος του ηλιοστατικού πεδίου.

Ο όρος M ορίζεται ως ένα στοχαστικό μοντέλο black box το οποίο προσομοιώνει την αποτυχία λειτουργίας ενός ηλιοστάτη λόγω ζητημάτων που αποδίδονται είτε σε μηχανικές και ηλεκτρικές αιτίες ή σε προβλήματα χειρισμού.

Ο όρος O ορίζεται ως ένα στοχαστικό μοντέλο black box το οποίο προσομοιώνει την οπτική υποβάθμιση της κατοπτρικής επιφάνειας των ηλιοστατών σε ωριαία βάση. Σχετίζεται με το κόστος καθαρισμού των ανακλαστικών επιφανειών.

Ο όρος S συνιστά ένα μοντέλο black box, που σχετίζεται με την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος της διάταξης.

Ο όρος C σχετίζεται με αστοχίες που επιδρούν αρνητικά στον κύκλο παραγωγής ισχύος.

Ο όρος F συσχετίζει με την τιμή συμφωνίας αγοράς ισχύος (PPA-Power Purchase Agreement) και λαμβάνει υπόψη την ωριαία παραγωγή ισχύος συνδυάζοντας τις διάφορες οικονομικές παραμέτρους (υποσυστήματα σταθμού, φορολογικά κίνητρα κλπ.).

Σε αυτό το σημείο να τονιστεί πως ο συμβολισμός «ξ» της αντικειμενικής συνάρτησης, υποδηλώνει πως οι μεταβλητές τις οποίες συνοδεύει, παρότι διαδραματίζουν ενεργό ρόλο στη διαδικασία βελτιστοποίησης του πεδίου, οι ίδιες δεν επιδέχονται κανενός είδους βελτιστοποίηση.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του πεδίου αναζητεί το ελάχιστο ενεργειακό κόστος για τη διάταξη, σε σχέση με τους περιορισμούς ροής και ισχύος. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τις εκτιμώμενες απώλειες στο δέκτη και τις σωληνώσεις για τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος στην έξοδο του δέκτη, η οποία ορίζεται ως

$$q_{des} = p q_{inc} - q_{HL} A_{rec} - q_{pipe}$$

όπου p είναι η απορροφητικότητα της επιστρώσης του δέκτη, q_{HL} είναι οι εκτιμώμενες θερμικές απώλειες δέκτη και q_{pipe} είναι οι ολικές απώλειες σωληνώσεων.

Ο αλγόριθμος κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης διατηρεί σταθερές τις παρακάτω τιμές [21]:

- Solar Multiple, στη σελίδα «Tower and Receiver».
- Nameplate Capacity, στη σελίδα «Power Cycle».
- Heliostat Width, στη σελίδα «Heliostat Field».
- Heliostat Height, στη σελίδα «Heliostat Field».
- Maximum Receiver Flux, στη σελίδα «Tower and Receiver».

Ο αλγόριθμος κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης αναζητεί τις βέλτιστες τιμές για τις εξής μεταβλητές στη σελίδα «Tower and Receiver»:

- Receiver Diameter.
- Receiver Height (υπολογίζεται ως συνάρτηση του λόγου του ύψους προς τη διάμετρο του δέκτη).
- Tower Height.

Το λογισμικό αντικαθιστά με τις βέλτιστες τιμές που έχουν προκύψει τις εξής μεταβλητές στη σελίδα «Heliostat Field»:

- Field layout table.
- Total Reflective Area.
- Number of Heliostats.

Ο αλγόριθμος για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τις παρακάτω μεταβλητές εισόδου δίχως να μεταβάλλει τις τιμές τους:

1. Από τη σελίδα «Heliostat field»

- Heliostat Width.
- Heliostat Height.
- Ratio of Reflective Area to Profile.
- Mirror Reflectivity and Soiling.
- Max Distance from Tower.
- Min Distance from tower.
- Image Error.

2. Από τη σελίδα «Tower and Receiver»

- Coating Absorptivity.
- Max Receiver Flux.
- Estimated receiver heat loss.
- Receiver flux map resolution.

3. Από τη σελίδα «Power Cycle»

- Nameplate Capacity.
- Rated Cycle Conversion Efficiency.

Να τονιστεί πως η επιλογή κατάλληλων αρχικών τιμών παίζει σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή βέλτιστης λύσης

Κλείνοντας την υποενότητα της επεξήγησης του μηχανισμού λειτουργίας του αλγόριθμου βελτιστοποίησης του ηλιοστατικού πεδίου, σημειώνεται πως η κατηγορία «Optimization Settings» αναφέρεται στην διαδικασία βελτιστοποίησης του πεδίου. Συγκεκριμένα, στο εν λόγω χωρίο, τίθενται οι παράμετροι που σχετίζονται με την σύγκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας εύρεσης του βέλτιστου

ηλιοστατικού πεδίου, όπως το αρχικό βήμα, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων καθώς και το όριο σύγκλισης. Το αρχικό βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με τις αρχικές καταχωρήσεις, ορίζουν την «κατεύθυνση» διερεύνησης της βέλτιστης τιμής με τον εξής τρόπο:

$$\sqrt{(h_{tower} - h_{tower,0})^2 + (h_{rec} - h_{rec,0})^2 + (a - a_0)^2} < \text{initial opt. step}$$

Αναφορικά με τις απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας που εμφανίζονται στη σελίδα «Heliostat Field», όπως επίσης και για τις υπόλοιπες κατηγορίες απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου, θα γίνει ειδική μνεία στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

▪ ΠΥΡΓΟΣ ΚΑΙ ΔΕΚΤΗΣ (Tower and Receiver) [21]

Στην σελίδα «Tower and Receiver» εισάγονται τα σχετικά με τον πύργο και τον δέκτη δεδομένα. Στην κατηγορία «Tower and Receiver Dimensions» τίθενται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πύργου και του δέκτη.

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν ορισμένες παραδοχές σχετικά με την μοντελοποίηση του δέκτη από το λογισμικό. Περιληπτικά ισχύει πως:

- Η μοντελοποίηση μιας ηλιοθερμικής διάταξης κεντρικού δέκτη στο SAM πραγματοποιείται για εξωτερικό δέκτη.
- Ο δέκτης αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό πάνελ, τα οποία με τη σειρά τους απαρτίζονται από σωλήνες -εναλλάκτες θερμότητας- που βρίσκονται σε θερμική επαφή μεταξύ τους και διαρρέονται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας
- Οι σωληνώσεις των πάνελ τοποθετούνται κατακόρυφα και το ρευστό μεταφοράς θερμότητας διαρρέει τα διαδοχικά πάνελ κατά το πρότυπο της σερπαντίνας

Το Σχήμα 2-5, απεικονίζει τη ροή του ρευστού με τη μέθοδο της σερπαντίνας.

Η παροχή μάζας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται με τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η κατάλληλη θερμοκρασία εξόδου από το δέκτη. Η επιλογή flow pattern δίδει τη δυνατότητα επιλογής της διαδρομής που θα ακολουθήσει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας καθώς διαρρέει τις σωληνώσεις του δέκτη. Στο Σχήμα 2-6 απεικονίζονται οι πιθανές διαδρομές που δύναται να ακολουθήσει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας εντός των σωληνώσεων του δέκτη.

Στην κατηγορία «RECEIVER FLUX MODELING PARAMETERS» εισάγονται οι διαστάσεις των σωληνώσεων των πάνελ, όπως η εξωτερική τους διάμετρος («Tube outer diameter») το πάχος («Tube wall thickness») καθώς και οι συντελεστές εκπομπής («Coating emittance») και απορροφητικότητας της βαφής («Coating absorptance»).

Στην κατηγορία «Design and Operation» προσδιορίζονται παράμετροι που αφορούν το σχεδιασμό και τη λειτουργία του δέκτη. Τέτοιοι συνιστούν ο ελάχιστος επιτρεπτός λόγος του μέγιστου ρυθμού ροής στον δέκτη («Minimum receiver turndown

fraction») και ο μέγιστος επιτρεπτός λόγος του μέγιστου ρυθμού ροής στον δέκτη («Maximum receiver operation fraction»), όπου για ροή μάζας η οποία υπερβαίνει τον αντίστοιχο συντελεστή παύεται η λειτουργία ορισμένων ηλιοστατών της διάταξης. Επιπρόσθετα, καταχωρίζεται ο χρόνος που απαιτείται για την εκκίνηση της λειτουργίας του δέκτη («Receiver startup delay time») καθώς και η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την εκκίνηση της λειτουργίας του δέκτη («Receiver startup delay energy fraction»). Επιπλέον είναι απαραίτητο να δίδεται η ηλεκτρομηχανική αποδοτικότητα της αντλίας του δέκτη («Receiver HTF pump efficiency»). Τέλος από το λογισμικό, η μέγιστη ροή ρευστού μεταφοράς θερμότητας στην είσοδο του δέκτη («Maximum flow rate to receiver») υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Maximum Flow Rate to Receiver} = \text{Maximum Receiver Operation Fraction} \times \text{Receiver Thermal Power (MWt)} \times 1,000,000 \div \text{HTF Specific Heat} \times 1,000,000 \times (\text{HTF Hot Temperature } ^\circ\text{C} - \text{HTF Cold Temperature } ^\circ\text{C})$$

Στην κατηγορία « RECEIVER FLUX MODELING PARAMETERS» καθορίζονται βασικές παράμετροι που σχετίζονται με την προσπίπτουσα ροή της ακτινοβολίας στο δέκτη. Αρχικά ορίζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας («Maximum receiver flux»). Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται μονάχα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης του πεδίου ώστε να επιτυγχάνεται ο έλεγχος της γεωμετρίας του δέκτη συναρτήσει των περιορισμών ροής. Επιπρόσθετα, προσδιορίζονται οι εκτιμώμενες θερμικές απώλειες ανά μονάδα επιφάνειας του δέκτη στο σημείο σχεδιασμού, υπό το πρίσμα της επιπρόσθετης ισχύς που απαιτείται από το πεδίο για την κάλυψη των τελευταίων («Estimated receiver heat loss»). Ως εκ τούτου η τιμή αυτή συνυπολογίζεται αποκλειστικά για την εύρεση του μεγέθους του ηλιοστατικού πεδίου, δίχως να επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Αναφορικά με τις απώλειες σωληνώσεων («Piping Losses») που εμφανίζονται στη σελίδα «Tower and Receiver», όπως επίσης και για τις υπόλοιπες κατηγορίες απωλειών του δέκτη, θα δοθεί ειδική μνεία στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

▪ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ (POWER CYCLE) [21]

Σε αυτή τη σελίδα καταχωρούνται οι μεταβλητές εισόδου αναφορικά με το υποσύστημα μετατροπής ισχύος της διάταξης. Αξίζει να αναφερθεί πως το SAM προσφέρει δυο επιλογές αναφορικά με τον κύκλο ισχύος.

- Τον κύκλο Rankine: Αποτελείται από δυο ανοιχτούς θερμοαντλήρες νερού, ένα προθερμαντήρα, ένα θερμοαντλήρα και ένα υπερθερμαντήρα. Αποτελείται από ένα λεπτομερές μοντέλο βασικών αρχών του κύκλου Rankine και υπολογίζει την απόδοση κύκλου μοντελοποιώντας κάθε κομμάτι του κύκλου σε off-design συνθήκες.

- Τον κύκλο που ορίζει ο χρήστης ο οποίος αντιστοιχεί στην επιλογή «User Defined Power Cycle».

Στην κατηγορία των γενικών παραμέτρων σχεδιασμού «General Design Parameters» περιλαμβάνονται τα εξής μεγέθη:

- Pumping power for HTF through power block [kW/kg/s]: Συντελεστής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται από τις αντλίες για την κίνηση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας.
- Fraction of thermal power needed for standby: Ο λόγος της θερμικής ισχύος που απαιτείται στην είσοδο της τουρμπίνας από το δοχείο αποθήκευσης, για τη διατήρηση του κύκλου ισχύος σε κατάσταση αναμονής.
- Power block startup time [hours]: Ο χρόνος, σε ώρες, που το σύστημα λειτουργεί υποβοηθούμενο σε ενέργεια μέχρι να αρχίσει να παράγει ενέργεια. Η προτεινόμενη τιμή είναι 0.5.
- Fraction of thermal power needed for startup: Το κλάσμα της θερμικής ισχύος που απαιτείται στην είσοδο τουρμπίνας για την εκκίνηση του συστήματος. Η προτεινόμενη τιμή είναι 0.75.
- Minimum turbine operation: Το κλάσμα της ονομαστικής ηλεκτρικής χωρητικότητας κάτω από το οποίο το σύστημα μετατροπής ισχύος δεν παράγει ηλεκτρική ισχύ. Όταν η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς πέφτει κάτω από το ελάχιστο φορτίο, ακόμα και αν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια από το ηλιοστατικό πεδίο, η λειτουργία των ηλιοστατών παύεται. Η προτεινόμενη τιμή είναι 0.25.
- Maximum turbine over design operation: Η μέγιστη επιτρεπτή έξοδος από το μπλοκ ισχύος σαν κλάσμα της ονομαστικής ηλεκτρικής δυνατότητας. Αν αυτή ξεπεραστεί και δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης τότε μερικοί από τους συλλέκτες από-επικεντρώνονται. Η προτεινόμενη τιμή είναι 1.05.
- Cycle design HTF mass flow rate [kg/s]: Η μαζική παροχή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στο σημείο σχεδιασμού. Ορίζεται από τον τύπο:

$$\text{HTF mass flow rate} = \text{Cycle thermal power} \times 1000(\text{kW/MW}) \div \text{Average HTF Cp} (\text{HTF hot temperature} - \text{HTF cold temperature}).$$

Στην κατηγορία των παραμέτρων του κύκλου Rankine «Rankine cycle parameters» συμπεριλαμβάνονται τα εξής μεγέθη:

- Boiler operating pressure [Bar]: Η πίεση κορεσμού του ατμού καθώς το ρευστό μετατρέπεται σε ατμό. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας κορεσμού του ατμού και κατ' επέκταση την υπερθερμαντική ικανότητα των εναλλακτών θερμότητας.
 - Steam cycle blowdown fraction: Το κλάσμα της μαζικής παροχής του ατμού του κύκλου ισχύος, που αφαιρείται και πρέπει να αντικατασταθεί με νερό. Η προτεινόμενη τιμή είναι 0.013 για υδρόψυξη και 0.016 και αερόψυξη.
 - Condenser type: Το SAM προσφέρει ψύξη με αέρα, υδρόψυξη και ψύξη με συνεργασία των δυο πρώτων επιλογών. Κατά την αερόψυξη το πρόγραμμα κανονικοποιεί όλες τις χρήσιμες μεταβλητές.
 - Ambient temperature at design [°C]: Η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην οποία το υποσύστημα μετατροπής ισχύος επιτυγχάνει βαθμό απόδοσης αντίστοιχο με αυτόν ο οποίος έχει οριστεί για το σημείο σχεδιασμού.
 - ITD at design point [°C]: Αποκλειστικά για λειτουργία διάταξης με αερόψυξη. Η αρχική διαφορά θερμοκρασίας (ITD) είναι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στον ατμό που εξέρχεται της τουρμπίνας και στην θερμοκρασία ξηρού βολβού περιβάλλοντος.
 - Reference condenser water dT [°C]: Αποκλειστικά για λειτουργία διάταξης με υδρόψυξη. Ορίζεται ως η θερμοκρασιακή αύξηση του νερού ψύξης στον συμπυκνωτή σε συνθήκες σχεδιασμού.
 - Approach temperature [°C]: Αποκλειστικά για λειτουργία διάταξης με υδρόψυξη. Ορίζεται ως η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του ανακυκλοφορούμενου νερού στην είσοδο του συμπυκνωτή και της θερμοκρασίας υγρού βολβού περιβάλλοντος.
 - Condenser Pressure Ratio: Αποκλειστικά για λειτουργία διάταξης με αερόψυξη. Ορίζεται ως ο λόγος πτώσης πίεσης κατά μήκος των εναλλακτών θερμότητας του αερόψυκτου συμπυκνωτή.
- **ΔΟΧΕΙΟ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (Thermal Storage) [21]**

Ορίζονται οι βασικοί παράμετροι που αφορούν τις ιδιότητες του δοχείου αποθήκευσης

Στην κατηγορία του συστήματος αποθήκευσης «Storage System» συμπεριλαμβάνονται τα εξής μεγέθη:

- TES thermal capacity: Η ονομαστική θερμική χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, η οποία ορίζεται ως:

TES Thermal Capacity = Hours of Storage at Power Cycle Full Load × Cycle Thermal Input Power at Design

Να σημειωθεί πως για συστήματα έμμεσης ατμοπαραγωγής, όπως η διάταξη τετηγμένου άλατος που μελετάται εδώ, στην συγκεκριμένη τιμή δεν συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες στους εναλλάκτες θερμότητας.

- Available HTF volume [m³]: Ο συνολικός όγκος του αποθηκευμένου ρευστού στις δύο δεξαμενές. Ο υπολογισμός αυτής της παραμέτρου βασίζεται στην ονομαστική θερμική χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Καθορίζεται με βάση τις μεταβλητές TES thermal capacity, Hours of Storage at Power Cycle Full Load του SAM
- Tank height [m]: Το ύψος της κυλινδρικής δεξαμενής.
- Tank fluid minimum height [m]: Το ελάχιστο επιτρεπόμενο ύψος ρευστού στη δεξαμενή αποθήκευσης, το οποίο καθορίζεται από τις μηχανικές ιδιότητες της τελευταίας.
- Storage tank volume [m³]: Ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης.
- Parallel tank pairs: Ο αριθμός των ζευγών (ζεστού-κρύου) δοχείων αποθήκευσης. Περισσότερα δοχεία αποθήκευσης οδηγούν σε αυξημένα επίπεδα συνολικών απωλειών θερμότητας των δοχείων, διότι στην επιφάνεια των δοχείων εκτίθεται μεγαλύτερος όγκος ρευστού.
- Tank diameter [m]: η διάμετρος του δοχείου αποθήκευσης. Υπολογίζεται από τη σχέση που ακολουθεί:

$$D_{tank} = 2 * \sqrt{\frac{V_{TES}}{h_{tank} * \pi * N_{pairs}}}$$

όπου V_{TES} είναι η παράμετρος TES thermal capacity, h_{tank} είναι η παράμετρος Tank height και N_{pairs} είναι η παράμετρος Parallel tank pairs.

- Wetted loss coefficient [W/m²/K]: Συντελεστής απωλειών θερμότητας του αποθηκευμένου ρευστού, εντός του δοχείου.
- Estimated heat loss [MWt]: Απώλειες θερμότητας για το δοχείο αποθήκευσης, στο σημείο σχεδιασμού.

2.4 Απώλειες ηλιοστατικού πεδίου

Το ηλιοστατικό πεδίο συνιστά το βασικό υποσύστημα μιας διάταξης κεντρικού δέκτη. Απαρτίζει το 50% του συνολικού κόστους της ηλιοθερμικής εγκατάστασης, ενώ οι συνολικές ετήσιες απώλειες του πεδίου αγγίζουν το 47% [15]. Ως εκ τούτου η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου αποτελούν διαρκές ζητούμενο, με γνώμονα την αύξηση της αποδοτικότητας του πεδίου και κατ' επέκταση της αποδιδόμενης στο δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος.

Όπως έχει επισημανθεί στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου ορίζεται ως ο λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας που συγκεντρώνεται στο δέκτη προς την προσπίπτουσα στο πεδίο ηλιακή ακτινοβολία. Ο βαθμός απόδοσης του πεδίου διατυπώνεται ως το γινόμενο των βαθμών απόδοσης οι οποίοι εκφράζουν τις επιμέρους απώλειες του. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης που ακολουθεί:

Βαθμός απόδοσης ηλιοστατικού πεδίου

$$\eta_{field} = \eta_{cos} \times \eta_{refl} \times \eta_{atten} \times \eta_{shadow} \times \eta_{block} \times \eta_{spill}$$

όπου

- η_{cos} : ο βαθμός απόδοσης των απωλειών συνημίτονου (cosine losses)
- η_{refl} : ο βαθμός απόδοσης των απωλειών ανακλαστικότητας (reflectivity losses)
- η_{atten} : ο βαθμός απόδοσης των απωλειών ατμοσφαιρικής διαπερατότητας (atmospheric attenuation losses)
- $\eta_{shadow}, \eta_{block}$: ο βαθμός απόδοσης των απωλειών Σκίασης και Παρεμπόδισης (shadowing & blocking losses)
- η_{spill} : ο βαθμός απόδοσης των απωλειών διαρροής (spillage losses)

➤ Απώλειες συνημιτόνου (Cosine losses)

Οι απώλειες συνημιτόνου (καθορίζονται από τη σχετική θέση του Ηλίου, του κάθε ηλιοστάτη και του δέκτη) σχετίζονται τόσο με τη θέση του Ηλίου όσο και με τη θέση του κάθε ηλιοστάτη σε σχέση πάντα με το δέκτη [25]. Η επιφάνεια του κάθε ηλιοστάτη μετακινείται με κατάλληλο τρόπο ώστε η κάθετη στην επιφάνεια του να διχοτομεί τη γωνία που ορίζεται από την προσπίπτουσα και την ανακλώμενη ηλιακή ακτίνα. Η αύξηση της εν λόγω γωνίας οδηγεί σε αύξηση των απωλειών συνημιτόνου καθώς η μεταβολή των δύο μεγεθών συνδέεται με αναλογική σχέση. Καθότι οι απώλειες συνημιτόνου συνιστούν την πιο βασική μορφή απωλειών ηλιοστατικού πεδίου με ποσοστό 23.4% [24], η μείωση τους αυτονόητα αποτελεί βασικό στόχο. Με δεδομένες τις άνωθεν επισημάνσεις, η τοποθέτηση των ηλιοστατών απέναντι από το Ήλιο οδηγεί σε περιορισμό των απωλειών συνημιτόνου. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται με κατανοητό τρόπο το «φαινόμενο» του συνημιτόνου.

Οι απώλειες συνημιτόνου υπολογίζονται από την εξίσωση $Att_{cos} = \sin(a)$ όπου $a = \frac{1}{2} \left[180 - \frac{\hat{i}_S * \hat{i}_R + \hat{j}_S * \hat{j}_R + \hat{k}_S * \hat{k}_R}{R_{mag} * S_{mag}} \right]$ [16]. Οι συνιστώσες $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$, αναπαριστούν τις συνιστώσες του βαθμωτού διανύσματος στις κατευθύνσεις x,y,z. Ο δείκτης S αναφέρεται στο διάνυσμα που συνδέει την θέση του Ηλίου με την επιφάνεια του ηλιοστάτη. Ο δείκτης R αναφέρεται στο διάνυσμα που συνδέει την επιφάνεια του ηλιοστάτη με τον δέκτη [16]. Να σημειωθεί πως η κατασκευή ηλιοστατικού πεδίου με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών συνημιτόνου προκρίνει πεδίο βόρεια

του πύργου για διατάξεις στο Βόρειο Ημισφαίριο. Αντιθέτως η περιβάλλουσα διάταξη πεδίου προτιμάται για ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις κεντρικού δέκτη σε περιοχές κοντά στον Ισημερινό.

➤ Απώλειες ανακλαστικότητας (Reflectivity losses)

Οι απώλειες ανακλαστικότητας του ηλιοστατικού πεδίου εκφράζουν την αποτυχία των ηλιοστατών να ανακλούν την προσπίπτουσα στο πεδίο ηλιακή ακτινοβολία. Η συγκεκριμένη κατηγορία απωλειών οφείλεται στο είδος, στην ποιότητα και στον βαθμό καθαρότητας της κατοπτρικής επιφάνειας των ηλιοστατών. Ουσιαστικά η τιμή των απωλειών ανακλαστικότητας παραμένει σταθερή για το σύνολο των ηλιοστατών του πεδίου δίχως να επηρεάζεται από τη διάταξη των ηλιοστατών στο χώρο ή από παράγοντες σχετικούς με την τοποθεσία της ηλιοθερμικής εγκατάστασης, τη θέση του Ήλιου κλπ. Μια τυπική τιμή κινείται στα επίπεδα του 10% των συνολικών απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου [24]. Στο SAM εισάγεται μέσω της παραμέτρου εισόδου «Mirror reflectance and soiling» η οποία βρίσκεται στη σελίδα «Heliostat Field», στην κατηγορία «Heliostat Field Availability».

➤ Απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας (Atmospheric attenuation)

Οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας οφείλονται στη σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της από το ηλιοστατικό πεδίο προς τον δέκτη. Συνιστούν άμεση συνάρτηση της απόστασης του δέκτη από τον κάθε ηλιοστάτη και επηρεάζονται καθοριστικά από παράγοντες όπως η υγρασία του περιβάλλοντος και το γεωγραφικό υψόμετρο της διάταξης. Να σημειωθεί πως στις διάφορες εξισώσεις υπολογισμού των απωλειών ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, το γεωγραφικό υψόμετρο είτε δεν επιδρά καθόλου στο τελικό αποτέλεσμα είτε επηρεάζει σε ελάχιστο βαθμό. Να σημειωθεί πως αυτή η κατηγορία απωλειών αποτελεί το 6% των ετήσιων απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου [24].

Το SAM υπολογίζει τη μέση απώλεια ατμοσφαιρικής διαπερατότητας για το σύνολο των ηλιοστατών της διάταξης, ως εξής [21]:

$$\eta_{att}(s) = \sum_{i=0,1,2,3} c_i s^i$$

όπου $s = \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_{tower}^2} * \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}}$ και h_x, h_y οι συντεταγμένες x-y των ηλιοστατών και h_{tower} το ύψος του πύργου. Οι συντελεστές c_i προσδιορίζονται στο SAM μέσω της σελίδας «Heliostat Field» στην αντίστοιχη κατηγορία «Atmospheric Attenuation».

Λοιπές σχέσεις υπολογισμού των απωλειών ατμοσφαιρικής διαπερατότητας που συναντώνται στη βιβλιογραφία υποδηλώνουν άμεση εξάρτηση από την ορατότητα που επικρατεί στην ατμόσφαιρα την οιαδήποτε χρονική στιγμή.

Για ορατότητα 23 km ισχύει: $Loss_{atten}(\%) = 0.6739 + 10,46R - 1.7R^2 + 0.2845R^3$

Για ορατότητα 5 km ισχύει: $Loss_{atten}(\%) = 1.293 + 27.48R - 3.394R^2$

Στο Σχήμα 2-10 παρουσιάζεται η ατμοσφαιρική διαπερατότητα σε συνάρτηση με την απόσταση του ηλιοστάτη από τον δέκτη, για ορατότητα 23 km και 5 km.

➤ Απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης (Shadowing and blocking losses)

Οι απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης αποτελούν το 5.6% των συνολικών ετήσιων απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου [24]. Όπως υποδηλώνεται από την ονομασία της, η σκίαση προκαλείται λόγω του γεγονότος ότι η κατοπτρική επιφάνεια ενός ηλιοστάτη καλύπτεται από ένα γειτονικό ηλιοστάτη. Αντιστοίχως η παρεμπόδιση εμφανίζεται όταν ένας γειτονικός ηλιοστάτης ανακόπτει την πορεία της ακτίνας, η οποία έχει ανακλαστεί, προς το δέκτη. Η συγκεκριμένη κατηγορία απωλειών, επηρεάζεται τόσο από τη θέση του Ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, όσο και από την απόσταση μεταξύ των σειρών στις οποίες είναι εγκατεστημένοι οι ηλιοστάτες. Επίσης η εποχή κατά τη διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους διαδραματίζει βασικό ρόλο αναφορικά με τις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης, καθώς καθορίζει την απόσταση του Ήλιου από τη Γη και πιο συγκεκριμένα την απόσταση του Ήλιου από την τοποθεσία στην οποία βρίσκεται μια ηλιοθερμική εγκατάσταση κεντρικού δέκτη. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, ο υπολογισμός της επίδρασης της σκίασης και της παρεμπόδισης στην συνολική απόδοση ενός ηλιοστατικού πεδίου συνιστά μια πολυπαραγοντική και επίπονη διαδικασία. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού έχουν γραφεί αρκετοί κώδικες, οι οποίοι για προφανείς λόγους δεν δύναται να αναλυθούν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

➤ Απώλειες διαρροής (Spillage losses)

Στην τελευταία κατηγορία των απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου συγκαταλέγονται οι απώλειες διαρροής. Ουσιαστικά πρόκειται για την αποτυχία της ανακλώμενης ακτίνας να καταλήξει στην επιφάνεια του δέκτη. Προκαλείται από μια σειρά ποικίλων παραγόντων. Τέτοιοι είναι η έλλειψη ακρίβειας του συστήματος εντοπισμού της ηλιακής ακτινοβολίας, οι μικροταλαντώσεις του πύργου, η ομοιομορφία του υλικού της απορροφητικής επιφάνειας. Αξίζει να σημειωθεί πως οι απώλειες διαρροής αυξάνονται για δέκτες κοιλότητας, καθώς η διέλευση της ανακλώμενης ακτίνας μέσα από την κοιλότητα του δέκτη δεν καθίσταται πάντα εφικτή. Οι απώλειες διαρροής απαρτίζουν το 2% των συνολικών ετήσιων απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου [24]. Όπως στην περίπτωση των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης, η πολυπλοκότητα υπολογισμού των απωλειών διαρροής επέβαλε την δημιουργία μεγάλου αριθμού

κατάλληλων και εξειδικευμένων στον σκοπό αυτό αλγορίθμων, οι οποίοι για προφανείς λόγους δεν δύναται να αναλυθούν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.5 Απώλειες δέκτη

Ο δέκτης αποτελεί το δεύτερο εκ των τριών υποσυστημάτων μιας διάταξης κεντρικού δέκτη. Έχοντας αναλύσει τις βασικές κατευθύνσεις γύρω από τις απώλειες του ηλιοστατικού πεδίο, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί μια σύντομη αναφορά σχετικά με τις απώλειες του δέκτη. Είναι προφανές πως η μέγιστη δυνατή ελαχιστοποίηση τους, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του ηλιοθερμικού σταθμού, συνιστά διαρκή πρόκληση.

Όπως έχει επισημανθεί στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, ο βαθμός απόδοσης του δέκτη ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής ενέργειας που απάγεται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας προς τη θερμική ενέργεια που συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του. Ο βαθμός απόδοσης του δέκτη διατυπώνεται ως το γινόμενο των βαθμών απόδοσης οι οποίοι εκφράζουν τις επιμέρους απώλειες του. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης που ακολουθεί:

Βαθμός απόδοσης δέκτη: $\eta_{receiver} = \eta_{conv} \times \eta_{absorb} \times \eta_{cond} \times \eta_{rad}$

όπου

- η_{conv} : ο βαθμός απόδοσης των απωλειών συναγωγής (convection losses)
- η_{absorb} : ο βαθμός απόδοσης των απωλειών απορρόφησης (absorption losses)
- η_{cond} : ο βαθμός απόδοσης των απωλειών αγωγής (conduction losses)
- η_{rad} : ο βαθμός απόδοσης των απωλειών ακτινοβολίας (radiation losses)

➤ Απώλειες συναγωγής (Convection losses)

Αυτή η κατηγορία απωλειών έχει καθοριστική επίδραση στις συνολικές απώλειες δέκτη. Εντοπίζονται και οι δύο μηχανισμοί απωλειών συναγωγής. Η φυσική συναγωγή που προκαλείται λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς συνιστά την κυρίαρχη μορφή. Βεβαίως συνυπάρχει με την εξαναγκασμένη συναγωγή που προκαλείται λόγω της κίνησης του αέρα στα τοιχώματα του δέκτη. Οι βασικές αιτίες πρόκλησης των απωλειών συναγωγής συναντώνται στο είδος του δέκτη, στο μέγεθος της επιφάνειάς του (ή του ανοίγματός του αν πρόκειται για δέκτη κοιλότητας), στη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτόν και στη γωνία κλίσης του. Επίσης στο φαινόμενο της συναγωγής συντελούν και οι καιρικές συνθήκες της περιοχής στην οποία βρίσκεται εγκατεστημένος ο ηλιοθερμικός σταθμός (θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου κλπ.)

Ο υπολογισμός των απωλειών συναγωγής επιτυγχάνεται μέσω της μεθόδου των Siebers και Kraabel. Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εξισώσεις.

$$\dot{Q} = h \times A \times (T_w - T_a) \text{ όπου } h = \alpha \sqrt{h_{fc}^a + h_{nc}^a}$$

όπου

- A: το εμβαδόν της απορροφητικής επιφάνειας του δέκτη,
- T_w : η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων του
- T_a : η θερμοκρασία περιβάλλοντος
- h_{nc} : ο συντελεστής ελεύθερης συναγωγής
- h_{fc} : ο συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής
- h: ο γενικός συντελεστής συναγωγής.
- α: εμπειρικός εκθέτης, μεταβάλλεται αναλόγως με το σχεδιασμό του δέκτη (για δέκτη κοιλότητας προτείνεται η τιμή α=1).

Για τον συντελεστή ελεύθερης συναγωγής ισχύει: $h = 0.81 \times (T_w - T_a)^{0.426}$

Για τον συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής, για εξωτερικό κυλινδρικό δέκτη ισχύουν οι εκφράσεις:

- $h_{fc} = \left(\frac{1}{D}\right) \times \left[0.3 + 0.488 \times Re^{0.5} \times \left(1 + \left(\frac{Re}{282}\right)^{0.625}\right)^{0.8}\right] \times 0.04199$, για $D \leq 4m$
- $h_{fc} = 14$, για $4 \leq D \leq 125m$
- $h_{fc} = 33.75 \times D^{-0.19}$, για $D \geq 125m$

όπου D είναι η διάμετρος του δέκτη και Re είναι ο αριθμός Reynolds, με τιμή: $Re = (1.751 \times 10^5) \times D$. Για την κατηγορία του δέκτη κοιλότητας, η τιμή του συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής τίθεται ίση με αυτή του συντελεστή ελεύθερης συναγωγής. Διαφορετικά προτείνεται από τον Kistler μοντέλο απ' ευθείας υπολογισμού των απωλειών συναγωγής σε δέκτες κοιλότητας. Οι σχετικές εξισώσεις είναι οι εξής:

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{Q}_{fc} + \dot{Q}_{nc}, \quad \dot{Q}_{fc} = 7631 \times \frac{A_{ap}}{W_{ap}^{0.2}}, \quad \dot{Q}_{nc} = 5077 \times A_{cav}$$

Όπου A_{ap} είναι το εμβαδόν του ανοίγματος στην πρόσοψη του δέκτη, W_{ap} είναι το πλάτος του ανοίγματος και A_{cav} είναι η συνολική επιφάνεια στο εσωτερικό της κοιλότητας.

➤ Απώλειες ακτινοβολίας (Radiation losses)

Η ύπαρξη ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών στο δέκτη, λόγω της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας, οδηγεί στη διαφυγή ενός ποσοστού θερμικής ενέργειας υπό τη μορφή εκπεμπόμενου υπέρυθρου και ορατού φωτός. Στους βασικούς παράγοντες

πρόκλησης των απωλειών ακτινοβολίας συγκαταλέγονται το μέγεθος του δέκτη και η θερμοκρασία λειτουργίας του. Οι απώλειες ακτινοβολίας και συναγωγής αποτελούν τις κυρίαρχες κατηγορίες απωλειών του δέκτη μιας και αθροιστικά καταλαμβάνουν το 5-15% της μέγιστης εισερχόμενης ενέργειας από το ηλιοστατικό πεδίο [25].

Ο υπολογισμός των απωλειών ακτινοβολίας επιτυγχάνεται μέσω της εξίσωσης

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \times \varepsilon \times A \times (T_w^4 - T_a^4)$$

Όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann με τιμή $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, ε είναι ο συντελεστής εκπομπής, A είναι το εμβαδόν του δέκτη, T_w είναι η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων του δέκτη και T_a είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

➤ Απώλειες Απορρόφησης

Είναι γεγονός πως ένα μικρό ποσοστό της προσπίπτουσας στο δέκτη ηλιακής ακτινοβολίας δεν απορροφάται επιτυχώς και διαφεύγει ως ανακλώμενη. Οι απώλειες απορρόφησης εκφράζουν το προαναφερθέν φαινόμενο. Για την υπέρβαση και αντιμετώπιση του ζητήματος των απωλειών απορρόφησης υιοθετείται η πρακτική της επικάλυψης του δέκτη με βαφή υψηλής απορροφητικότητας. Οι απώλειες απορροφητικότητας συμμετέχουν σε ελάχιστο βαθμό στις συνολικές ετήσιες απώλειες του δέκτη. Συνίσταται όμως ο τακτικός έλεγχος της βαφής για την αποφυγή των συνεπειών της γήρανσης. Ο συντελεστής απόδοσης της απορροφητικής ικανότητας του δέκτη ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής ισχύος που απορροφά η επιφάνεια του ηλιακού δέκτη προς τη θερμική ισχύ που προσπίπτει στην επιφάνεια αυτή από το ηλιοστατικό πεδίο:

$$\eta_{absorb} = \frac{\dot{Q}_{absorb}}{\dot{Q}_{inc}}$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο συντελεστής απορρόφησης η_{absorb} εκτιμάται γύρω στο 0.95, ενώ για την περίπτωση του δέκτη κοιλότητας, δύναται να σκαρφαλώσει στο 0.98.

➤ Απώλειες Αγωγής

Η ενότητα των απωλειών θερμότητας του δέκτη ολοκληρώνεται με την σύντομη ανάλυση των απωλειών αγωγής. Μέσω της μόνωσης αλλά και των μηχανισμών στήριξης του δέκτη έχει διαπιστωθεί η διαφυγή ενός ουσιαστικά αμελητέου ποσοστού θερμότητας. Η, κατά μια έννοια, ελαχιστοποίηση τους προϋποθέτει την

καλή μόνωση των επιφανειών του δέκτη οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή θερμότητας καθώς και την ύπαρξη όσο το δυνατό λιγότερων σημείων επαφής του δέκτη με τον πύργο. Αναφορικά με το υλικό της στήριξης, προκρίνεται η επιλογή του ανοξειδωτού ατσαλιού. Η τήρηση των άνωθεν επισημάνσεων μπορεί να οδηγήσει την τιμή των απωλειών αγωγής στα επίπεδα του 1%, οδηγώντας πρακτικά στην ολοκληρωτική εξάλειψή τους.

2.6 Αρχείο καιρού

Είναι αυτονόητο πως ο σχεδιασμός του ηλιοστατικού πεδίου και η προσομοίωση μια διάταξης από τα λογισμικά επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής του αντίστοιχου για την εκάστοτε τοποθεσία καιρικού αρχείου. Ως εκ τούτου, σε αυτό το σημείο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί μια σύντομη αναφορά στα δεδομένα τα οποία εμπεριέχονται εντός των καιρικών αρχείων αλλά και στις διάφορες κατηγορίες των διαθέσιμων καιρικών αρχείων

Η χρήση καιρικών αρχείων τμγ συνιστά την πιο συνηθισμένη επιλογή. Σε αυτού του είδους τα αρχεία αντλούνται καιρικά δεδομένα για την εκάστοτε περιοχή τα οποία αφορούν ένα χρονικό διάστημα αρκετών ετών. Η τελική επιλογή των καταλληλότερων δεδομένων για την κάθε ώρα ενός έτους γίνεται στη βάση των πιο αντιπροσωπευτικών μεγεθών αναφορικά με την άμεση διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα των ανέμων, τη συννεφιά κλπ. Βεβαίως υπάρχει και η επιλογή του καιρικού αρχείου για ένα και μόνο ημερολογιακό έτος.

Κλείνοντας αυτή τη σύντομη αναφορά στα καιρικά αρχεία, παρουσιάζονται μια σειρά δεδομένων για τα οποία το SAM, μέσω των εισαγόμενων καιρικών αρχείων, υπολογίζει τη μέση ετήσια τιμή τους.

- Άμεση (beam) και διάχυτη (diffuse) ακτινοβολία: Το άθροισμα των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας [W/m^2] στα καιρικά αρχεία που έχει μετατραπεί σε κιλοβατώρες και διαιρεθεί με 365 μέρες τον χρόνο.
- Μέση θερμοκρασία: Το άθροισμα των δεδομένων της θερμοκρασίας [$^{\circ}C$] στα καιρικά αρχεία διαιρεμένο με τον αριθμό των αρχείων στον φάκελο (8760 για δεδομένα σε ώρες).
- Μέση ταχύτητα αέρα: Το άθροισμα των δεδομένων της ταχύτητας του αέρα [m/s] στα καιρικά αρχεία διαιρεμένο με τον αριθμό των αρχείων στον φάκελο (8760 για δεδομένα σε ώρες).
- Μέγιστο βάθος χιονιού: Τα αρχεία καιρού περιέχουν δεδομένα για βάθος χιονιού [cm]. Το NaN δείχνει πως δεν υπάρχουν δεδομένα για χιόνι στα αρχεία. Τα αρχεία χιονιού χρειάζονται για να μοντελοποιηθούν οι απώλειες χιονιού σε λεπτομερή φωτοβολταϊκά μοντέλα.

Να σημειωθεί ότι οι μέσες ετήσιες τιμές δεν χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με βήμα 1 ώρας για τις 8760 ώρες ενός έτους. Βέβαια για πιο εξεζητημένες επιλογές δίδεται μέσω των κατάλληλων καιρικών αρχείων η δυνατότητα βήματος μισής ώρας για τις 8760 ώρες ενός έτους.

2.7 Μεθοδολογία συνδυαστικής χρήσης Google Earth Pro-SolarPILOT-SAM

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί μια ενδεικτική αναφορά σχετικά με τη συνδυαστική χρήση των λογισμικών SAM, SolarPILOT και της εφαρμογής Google Earth Pro. Ως βασική αρχή περιγραφής της διαδικασίας λογίζεται η εξής:

- Σχεδιασμός της τοπογραφίας της διάταξης στο Google Earth Pro.
- Σχεδιασμός του ηλιοστατικού πεδίου στο SolarPILOT.
- Προσομοίωση της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού στο SAM, με ενσωμάτωση του ηλιοστατικού πεδίου το οποίο έχει προκύψει μέσω του SolarPILOT.

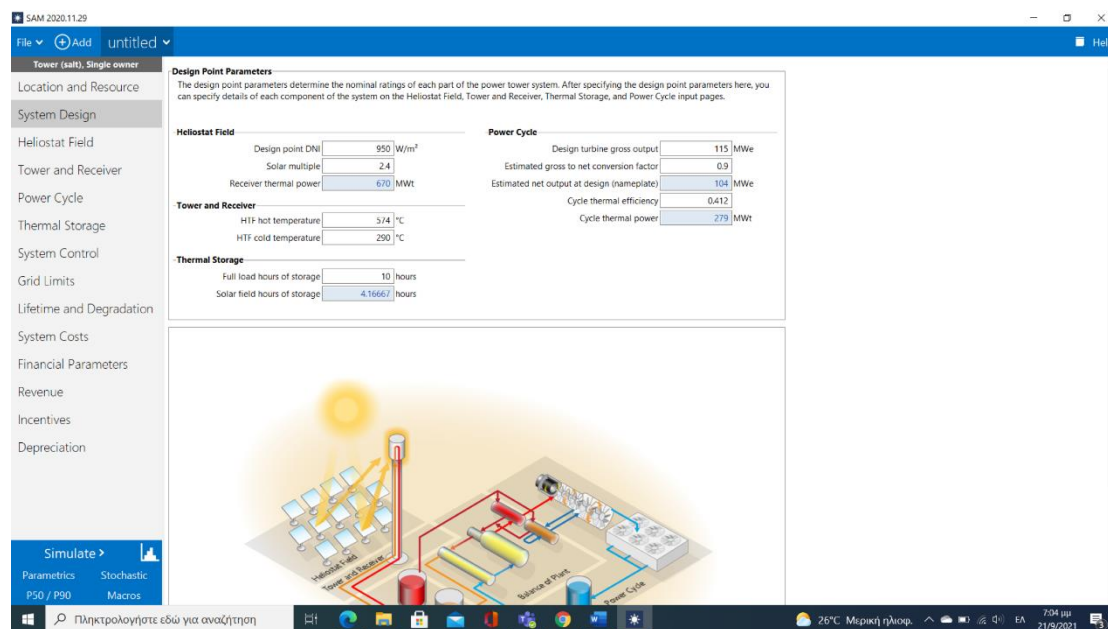
Εφόσον είναι γνωστή η τοποθεσία της έκτασης η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση του ηλιοστατικού πεδίου, «μαρκάρεται» στο Google Earth Pro δίδοντας την δυνατότητα της πληρέστερης μελέτης της διάταξης μέσω της προσομοίωσης για πεδίο που σχεδιάζεται στη βάση της πραγματικής τοπογραφίας. Η εισαγόμενη μέσω του Google Earth Pro τοπογραφία δε λαμβάνει υπόψη τυχόν υψομετρικές μεταβολές, στον κατακόρυφο άξονα z, εντός του πεδίου.

Ας υποθεθεί ενδεικτικά ένα αρχείο που αποθηκεύεται από το Google Earth Pro με όνομα «paradeigma». Τα σχετικά αρχεία που πρόκειται να εισαχθούν στο SolarPILOT αποθηκεύονται στη μορφή paradeigma.kml από το Google Earth Pro.

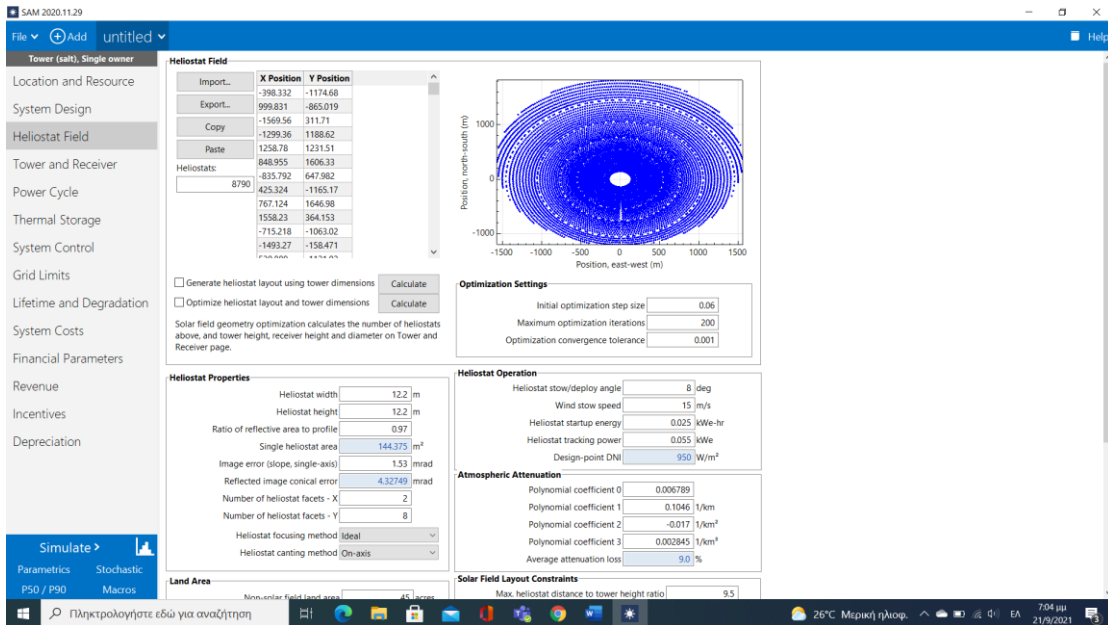
Εφόσον εισαχθεί επιτυχώς η τοπογραφία του ηλιοστατικού πεδίου, η πλευρά του χρήστη οφείλει να προχωρήσει στην καταχώρηση των κατάλληλων μεταβλητών εισόδου στο SolarPILOT. Σε αυτό το πλαίσιο μια σειρά παραμέτρων εισόδου, όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ηλιοστατών και του δέκτη, το ύψος του πύργου, η καθαρή θερμική ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας στο σημείο σχεδιασμού, η άμεση διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στο σημείο σχεδιασμού και ασφαλώς το καιρικό αρχείο, επιβάλλεται να βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία με αυτά που πρόκειται να εισαχθούν σε δεύτερο χρόνο στο SAM. Το ηλιοστατικό πεδίο που προκύπτει από το SolarPILOT εξάγεται σε μορφή .csv και εισάγεται στο SAM. Στο τελικό στάδιο, η προσομοίωση υλοποιείται μέσω του SAM λαμβάνοντας υπόψη την ορθή καταχώρηση των παραμέτρων που αφορούν τη διάταξη και οι οποίες έχουν περιγραφεί λεπτομερώς στις προηγούμενες σελίδες του παρόντος κεφαλαίου.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να παρατεθεί μια συνοπτική αλλά και συνάμα ενδεικτική περιγραφή μιας σειράς βασικών παραμέτρων εισόδου του SolarPILOT. Σαφέστατα δεν είναι δυνατό στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας να δοθεί στον αναγνώστη μια ολοκληρωμένη και σε βάθος ανάλυση του SolarPILOT καθότι η πληθώρα επιλογών του υπερβαίνει τη δυνατότητα επεξήγησης τους εντός λίγων σελίδων. Είναι σημαντικό όμως να υπογραμμιστούν οι πιο βασικές κατευθύνσεις του λογισμικού, έστω στο βαθμό που απαιτείται για τη συνδυαστική του χρήση με το SAM και το Google Earth Pro.

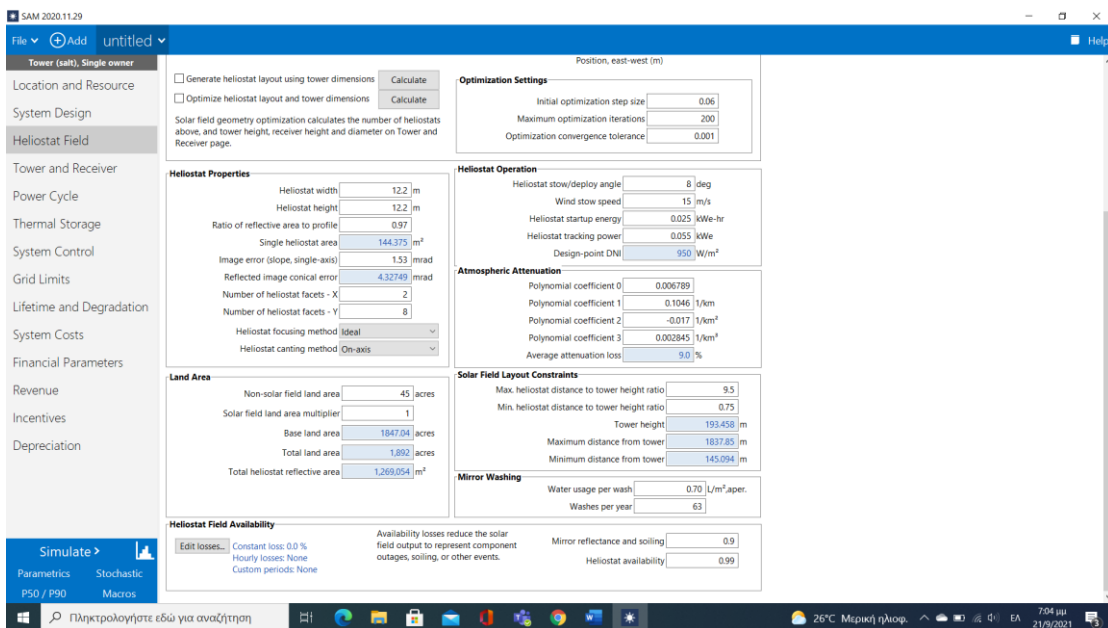
Στη σελίδα «Climate» εισάγεται το καιρικό αρχείο για το οποίο κατά γενικό κανόνα ισχύουν όσα έχουν γραφτεί στην Ενότητα 2.7. Στη σελίδα «Layout Setup» ορίζονται μια σειρά βασικών παραμέτρων αναφορικά με τα ενεργειακά και τεχνικά χαρακτηριστικά της διάταξης που πρόκειται να προσομοιωθεί. Πιο συγκεκριμένα εισάγονται για το σημείο σχεδιασμού, η θερμική ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας και η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης τίθεται από το χρήστη το ύψος του πύργου αλλά και διάφορα στοιχεία που αφορούν τη διάταξη (Radial staggered ή Cornfield) αλλά και το σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου (εισαγωγή τοπογραφίας, απόσταση πρώτης σειράς ηλιοστατών από τον πύργο κλπ). Ακόμη, στις καρτέλες «Template 1» και «Receiver 1» προσδιορίζονται τα γεωμετρικά και λοιπά των ηλιοστατών και του δέκτη αντίστοιχα. Τέλος, το ηλιοστατικό πεδίο εξάγεται από τη σελίδα «Field Layout».



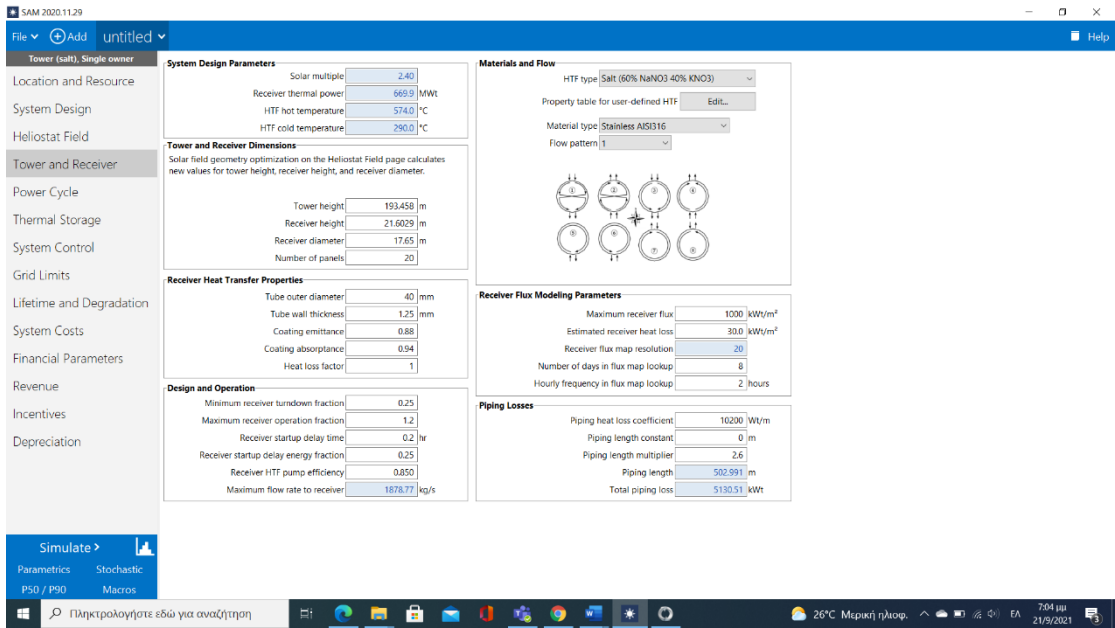
Σχήμα 2- 1. Η σελίδα System Design [21].



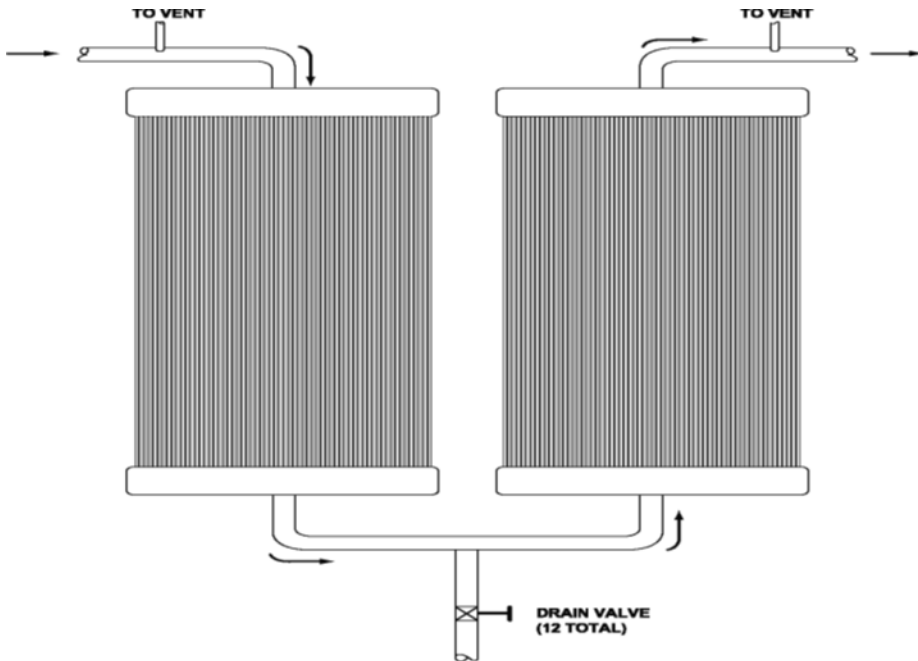
Σχήμα 2- 2. Η σελίδα Heliostat Field [21].



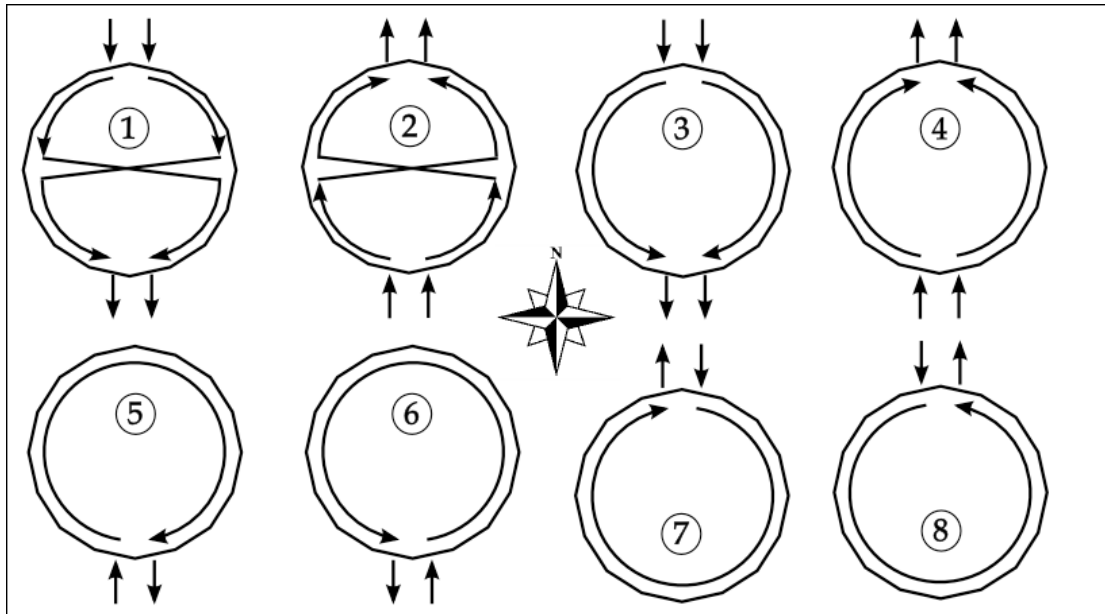
Σχήμα 2- 3. Η σελίδα Heliostat Field [21].



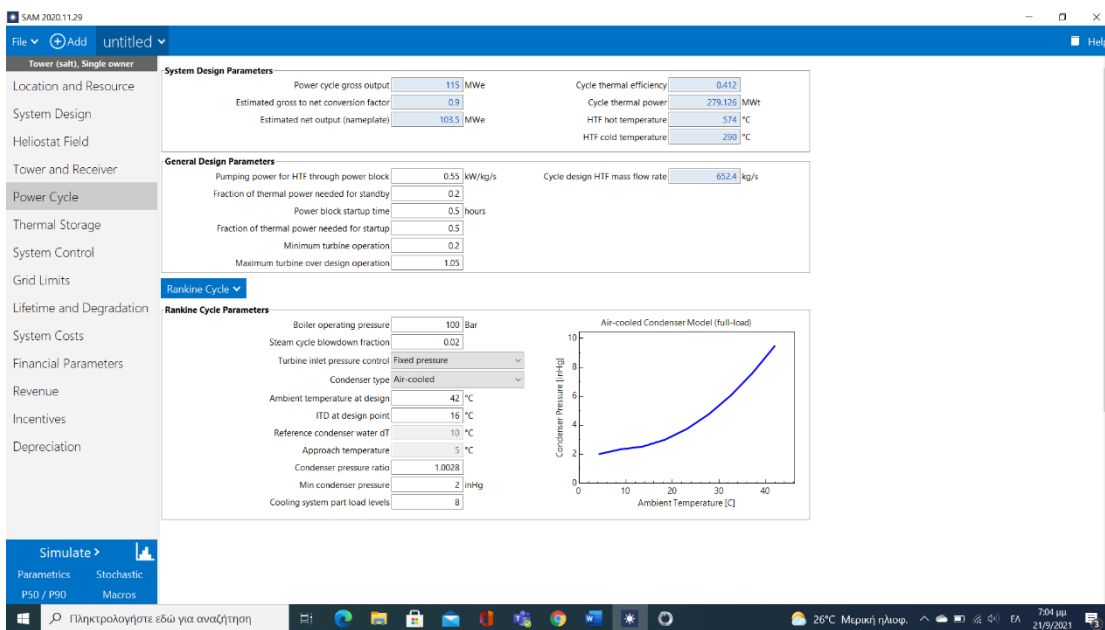
Σχήμα 2- 4. Η σελίδα Tower and Receiver [21].



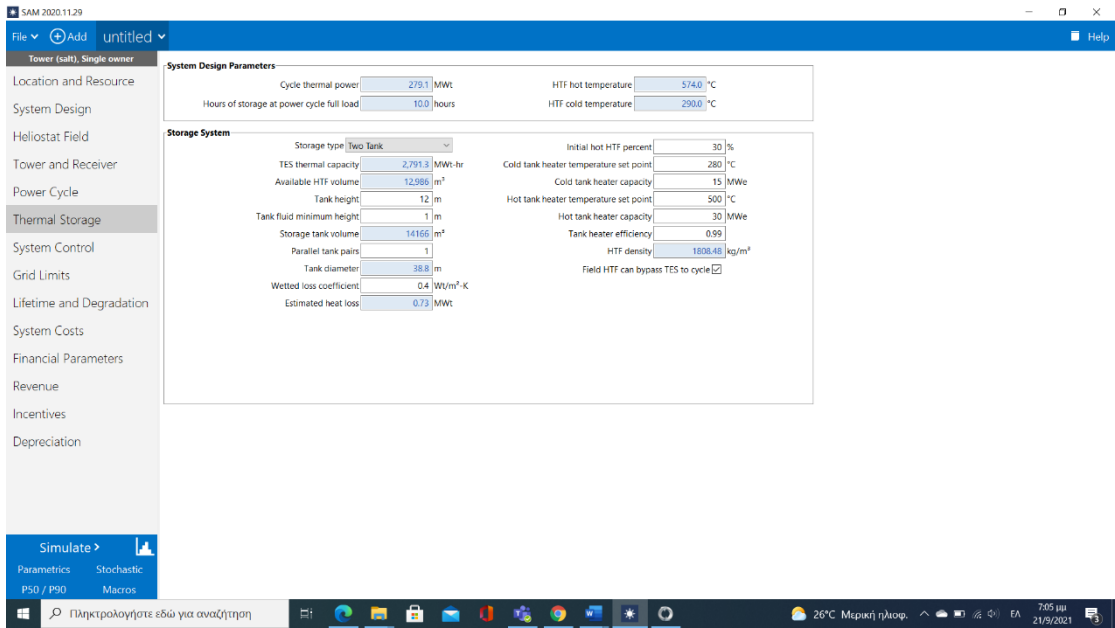
Σχήμα 2- 5: Ροή ρευστού με τη μέθοδο της σερπαντίνας [23].



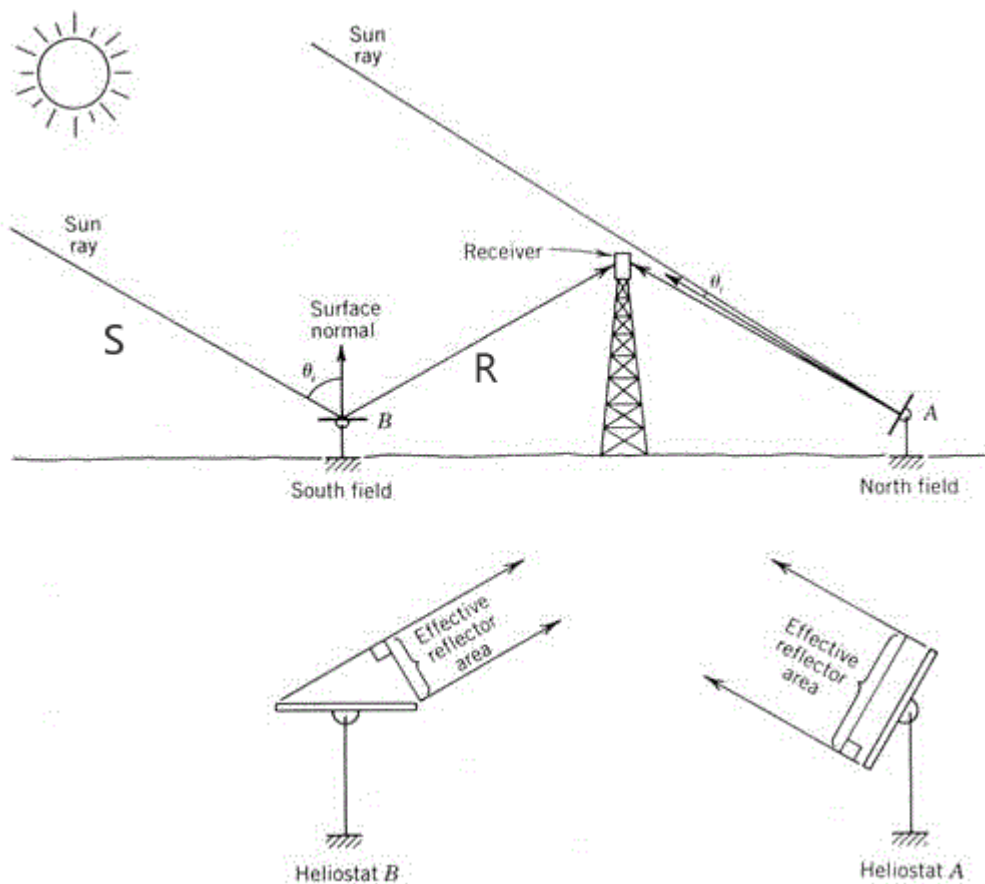
Σχήμα 2- 6. Πιθανή διαδρομή που ακολουθεί το ρευστό μεταφοράς θερμότητας εντός των σωληνώσεων του δέκτη [23].



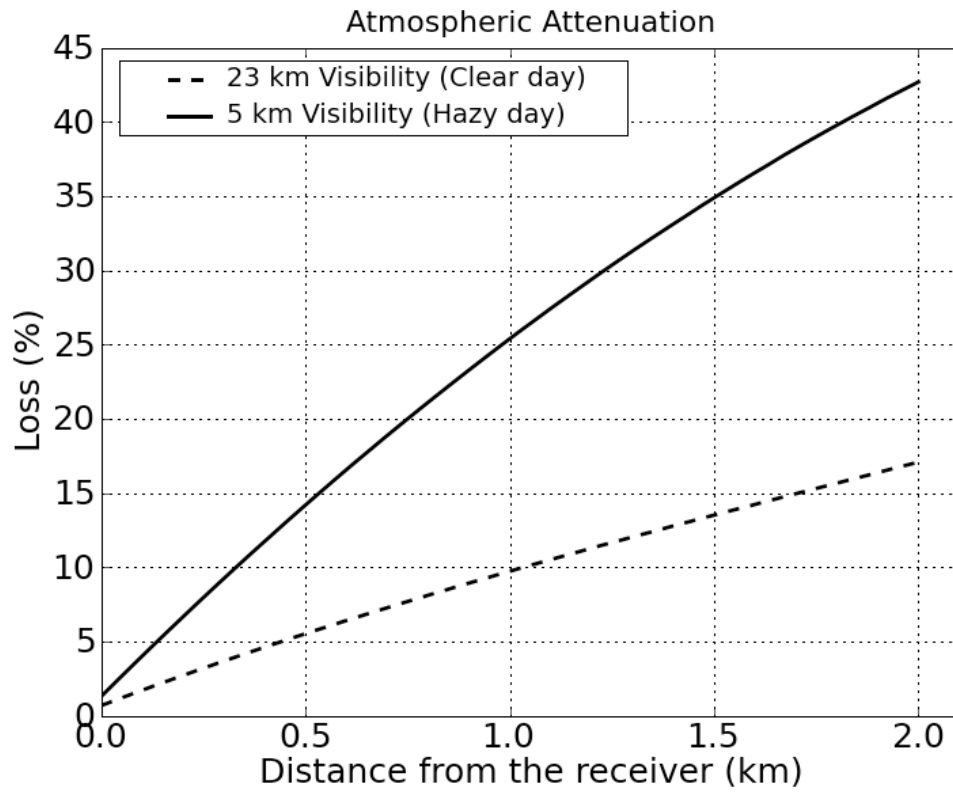
Σχήμα 2- 7. Η σελίδα Power Cycle [21].



Σχήμα 2- 8. Η σελίδα Thermal Storage [21].



Σχήμα 2- 9. Το φαινόμενο του συνημιτόνου [23].



Σχήμα 2- 10. Ατμοσφαιρική διαπερατότητα σε συνάρτηση με την απόσταση του ηλιοστάτη από τον δέκτη, για ορατότητα 23 km και 5 km [23].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστούν αποτελέσματα προσομοιώσεων που έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση των λογισμικών πακέτων SolarPILOT και SAM. Η βασική εν γένει μεθοδολογία που ακολουθείται περιγράφεται επακριβώς ως εξής. Αρχικά επιδιώκεται ο σχεδιασμός του ηλιοστατικού πεδίου, εισάγοντας την πραγματική τοπογραφία της εγκατάστασης μέσω του Google Earth Pro, στο SolarPILOT. Έπειτα, το ηλιοστατικό πεδίο που έχει προκύψει ενσωματώνεται στο SAM από το οποίο αντλούνται σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με την ισχύ που αποδίδεται στο δίκτυο και το κόστος. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται, τα ειδικότερα στοιχεία της εκάστοτε διάταξης αντλούνται με βάση τα επίσημα στοιχεία όπου αυτά βρίσκονται διαθέσιμα. Ειδικά γίνονται παραδοχές σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

Σκοπός είναι ο προσδιορισμός του βαθμού σύγκλισης ή απόκλισης των πραγματικών αποτελεσμάτων με αυτά των προσομοιώσεων σε επίπεδο ηλεκτρικής ισχύς. Όπως έχει σημειωθεί το κόστος μιας ηλιακής εγκατάστασης κεντρικού δέκτη σκαρφαλώνει σε ποσά αρκετών εκατομμυρίων ευρώ, ενώ για μεγαλύτερους σταθμούς απαιτούνται αρκετά δισεκατομμύρια ευρώ. Ως εκ τούτου η σωστή θεωρητική προσέγγιση αυτής της τεχνολογίας και κατ' επέκταση η όσο το δυνατόν αρτιότερη πρακτική εφαρμογή της, συνιστά θεμελιακό ζητούμενο. Είναι πολύ σημαντικό οι ερευνητές γύρω από τα ηλιακά συστήματα να έχουν γνώση σε βάθος των λογισμικών που χρησιμοποιούν και να αποφεύγουν τυχόν λάθη τα οποία κοστίζουν ακριβά. Όταν αυτό διασφαλίζεται, είναι ευθύνη των λογισμικών να αποτυπώνουν την πραγματικότητα μοντελοποιώντας με κατάλληλο τρόπο τα υποσυστήματα της διάταξης. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί πως οι περισσότερες εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο χώρο χρησιμοποιούν «in house» κώδικες, με στόχευση την ικανοποίηση των εκάστοτε συγκεκριμένων αναγκών τους.

Παράλληλα, η διαδικασία αξιολόγησης που θα παρουσιαστεί δίδει τη δυνατότητα διεξόδου σε λεπτομέρειες μερικών από τους μεγαλύτερους ηλιοθερμικούς σταθμούς ανά τον κόσμο.

3.2 Ηλιοθερμικός σταθμός I.S.E.G.S

3.2.1 Χαρακτηριστικά εγκατάστασης Η/Θ

Ο ηλιοθερμικός σταθμός ISEGS είναι η μεγαλύτερη ηλιοθερμική εγκατάσταση σε όλο τον κόσμο, με συνολική χωρητικότητα (δίχως τις απώλειες) 392 MW [26-27]. Αποτελείται από 3 μονάδες, τον IVANPAH 1 με ονομαστική ισχύ 126 MW και τους IVANPAH 2 και IVANPAH 3 με ονομαστική ισχύ 133 MW ο καθένας [26]. Ο σταθμός είναι εγκατεστημένος στην έρημο Μοχάβι της Καλιφόρνια ενώ το συνολικό κόστος

της διάταξης αγγίζει τα 2,4 δισεκατομμύρια δολάρια [27]. Η κατασκευή του σταθμού ξεκίνησε το 2010 και ολοκληρώθηκε το 2014, έτος κατά το οποίο τέθηκε σε λειτουργία. Η συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι σε θέση να καλύψει τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες 140.000 κατοικιών [28]. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων της διάταξης παρουσιάζονται στους κάτωθι Πίνακες 3-1, 3-2, 3-3.

Οι τιμές του Πίνακα 3-1 αποτελούν τις παραμέτρους εισόδου για την προσομοίωση του IVANPAH 1 μέσω SolarPILOT και SAM. Αναφορικά με το πλήθος ηλιοστατών το SolarPILOT υπολογίζει 53570 ηλιοστάτες (δεν δίδεται η δυνατότητα καθορισμού του πλήθους ηλιοστατών) ενώ στην πραγματικότητα στον IVANPAH 1 έχουν εγκατασταθεί 53527 [29]. Η επίπτωση αυτής της απόκλισης θεωρείται αμελητέα και δεν επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα.

Οι τιμές των Πινάκων 3-2 και 3-3 αποτελούν τις παραμέτρους εισόδου για την προσομοίωση των IVANPAH 2 και IVANPAH 3 μέσω SolarPILOT και SAM. Αναφορικά με το πλήθος ηλιοστατών το SolarPILOT υπολογίζει 60000 ηλιοστάτες (δεν δίδεται η δυνατότητα καθορισμού του πλήθους ηλιοστατών) αριθμός ο οποίος ταυτίζεται με τους εγκατεστημένους ηλιοστάτες στους IVANPAH 2 και IVANPAH 3 [29].

Όπως φαίνεται από τους Πίνακες 3-1, 3-2 και 3-3 ο σταθμός ISEGS πρόκειται για μια διάταξη άμεσης ατμοπαραγωγής δίχως δοχείο αποθήκευσης. Με βάση τη βιβλιογραφία το ηλιακό πολλαπλάσιο οφείλει να παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα. Έτσι προέκυψε η ανάγκη δοκιμών ώστε να διαπιστωθεί εάν υπάρχει τιμή του λόγου θερμικής ισχύος που πληροί τον παραπάνω περιορισμό και ταυτόχρονα οδηγεί σε βελτιωμένη ενεργειακή και οικονομική συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα σχετικά με την ετήσια ηλεκτρική ισχύ (MWe) και το ενεργειακό κόστος (\$/kWh) με ηλιακό πολλαπλάσιο 1 και 1.13793 για τις τρεις μονάδες του σταθμού παρατίθενται στους Πίνακες 3-4, 3-5, 3-6.

Παρατηρώντας του Πίνακες 3-4, 3-5, 3-6 διαπιστώνεται πως για ηλιακό πολλαπλάσιο 1.13793 και στις 3 μονάδες σημειώνεται αύξηση της ετήσιας ισχύος. Στο ίδιο μήκος κύματος το ενεργειακό κόστος εμφανίζει μικρότερες τιμές, άρα βέλτιστες. Συνεπώς η τιμή του λόγου ισχύος που προτιμάται, ορθώς ισούται με 1.13793.

3.2.2 Συγκρίσεις ανάμεσα σε λογισμικά και πραγματικά δεδομένα για τον ISEGS

Το επόμενο βήμα είναι η ενσωμάτωση του αντίστοιχου ηλιοστατικού πεδίου που έχει προκύψει μέσω του SolarPILOT για τις 3 μονάδες στο SAM. Καθώς πρόκειται για διάταξη άμεσης ατμοπαραγωγής θα χρησιμοποιηθεί η προτελευταία έκδοση του SAM (2020.2.29). Η ετήσια ηλεκτρική ισχύς που υπολογίζεται μέσω του SAM συγκριτικά με την πραγματική ετήσια ηλεκτρική ισχύ για τα έτη 2018, 2019, 2020 παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-7.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 3-7 είναι εμφανές πως για το έτος 2018 οι μονάδες 1 και 3 του σταθμού υπολειτουργούν. Η κατάσταση αυτή βελτιώνεται σχετικά για το 2019, ενώ για το 2020 σημειώνεται σημαντική αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ισχύος του σταθμού συνολικά. Μελετώντας την κάθε μονάδα του σταθμού ξεχωριστά φαίνεται

πως για τη μονάδα 2 τα πραγματικά δεδομένα για τα έτη 2018, 2019, 2020 προσεγγίζουν αυτά της προσομοίωσης. Όσον αφορά τη μονάδα 3 τα πραγματικά δεδομένα για το έτος 2020 συγκλίνουν σε αυτά της προσομοίωσης, ενώ υστερούν σημαντικά για τα έτη 2019 και 2018. Αναφορικά με τη μονάδα 1 τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπερτερούν των πραγματικών για τα έτη 2019, 2018 ενώ αντίθετα υστερούν των πραγματικών για το έτος 2020.

Σε αυτό το σημείο έχει ιδιαίτερη αξία η διερεύνηση της κάθε μονάδας του σταθμού ξεχωριστά για τα έτη 2020, 2019 και 2018. Για κάθε μονάδα υπολογίζεται η μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που προκύπτει από την προσομοίωση και συγκρίνεται με τα πραγματικά δεδομένα για τα έτη 2020, 2019 και 2018. Στο Σχήμα 3-2 παρουσιάζεται η μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για τη μονάδα IVANPAH 1 και η πραγματική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2020, 2019 και 2018.

Εξετάζοντας το Σχήμα 3-2 επιβεβαιώνονται σε γενικές γραμμές τα συμπεράσματα του Πίνακα 7. Αξιοσημείωτη είναι η πτώση ισχύος που σημειώνεται για τον IVANPAH 1 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες του 2018, την στιγμή που για το ίδιο χρονικό διάστημα τόσο η προσομοίωση όσο και τα δεδομένα για το 2020, 2019 βλέπουν τις καμπύλες τους να κινούνται στα μέγιστα επίπεδά τους. Στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζεται η μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για τη μονάδα IVANPAH 2 και η πραγματική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2020, 2019 και 2018.

Εξετάζοντας συνδυαστικά τον Πίνακα 3-7 με το Σχήμα 3-3, διαπιστώνεται για τον IVANPAH 2 ότι παρόλο που για τους μήνες Ιανουάριο-Φεβρουάριο του 2020 η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι ελάχιστη, εντέλει η κλιμακούμενη υπεροχή του στους μήνες που ακολουθούν τον οδηγεί να υπερτερεί τόσο σε σχέση με την προσομοίωση όσο σε σχέση με τις προηγούμενες χρονιές. Χαρακτηριστικά, τον Ιούνιο του 2020 επιτυγχάνεται συνολική ισχύς 10.000 MWe περισσότερο συγκριτικά με την προσομοίωση (κοινό μέγιστο σημείο).

Στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζεται η μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για τη μονάδα IVANPAH 3 και η πραγματική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2020, 2019 και 2018. Εξετάζοντας συνδυαστικά τον Πίνακα 3-7 με το Σχήμα 3-4 διαφαίνεται πως ο IVANPAH 3 ενώ για τον Μάιο του 2018 παρουσιάζει τη μέγιστη πρόσδοση ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο σε σχέση με όλες τις περιπτώσεις, εντούτοις η μεγάλη «ανεξήγητη» πτώση εντός της καλοκαιρινής περιόδου τον οδηγεί σε χαμηλότερη ετήσια ισχύ από την προσομοίωση. Επίσης η προσομοίωση του IVANPAH 3 υπερέχει ελάχιστα από την πραγματικότητα για το 2020 παρόλο την κατά 4000 MWe μικρότερη μέγιστη τιμή της.

Για την πιο λεπτομερή σύγκριση ανάμεσα στα πραγματικά δεδομένα και σε αυτά της προσομοιωμένης διάταξης κρίνεται χρήσιμη η παράθεση επιπρόσθετων αποτελεσμάτων σχετικά με τη μηνιαία ηλεκτρική ισχύ. Κατά αυτό τον τρόπο δίδεται η δυνατότητα εξέτασης και σύγκρισης της συμπεριφοράς των μονάδων του σταθμού στη διάρκεια ενός έτους. Η εξέταση σε μηνιαία βάση γίνεται για την ηλεκτρική ισχύ που υπολογίζεται μέσω των λογισμικών πακέτων σε σχέση με την πραγματική ηλεκτρική ισχύ ανά μήνα για τα έτη 2020, 2019, 2018. Στο Σχήμα 3-5 παρουσιάζονται

τα αποτελέσματα αναφορικά με τη μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS και η πραγματική ηλεκτρική ισχύς για το 2020.

Στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναφορικά με τη μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS και η πραγματική ηλεκτρική ισχύς για το 2019.

Στο Σχήμα 3-7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναφορικά με τη μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS και η πραγματική ηλεκτρική ισχύς για το 2018.

Συνδυάζοντας τα Σχήματα 3-5, 3-6, 3-7 με τα Σχήματα 3-2, 3-3, 3-4 διαπιστώνεται πως σε αρκετές περιπτώσεις η πραγματικότητα είναι συνυφασμένη με μεγάλες διακυμάνσεις οι οποίες δεν εμφανίζονται στις προσομοιώσεις των λογισμικών. Προφανέστατα οι αιτίες που τις προκαλούν χρήζουν διερεύνησης. Αναδιατυπώνοντας με αντίστροφη κατεύθυνση, οι καμπύλες που προκύπτουν μέσω των λογισμικών χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα ομοιομορφίας.

Είναι δεδομένο πως το 2020 αποτέλεσε το πιο παραγωγικό έτος για ολόκληρο το σταθμό αλλά και για κάθε μονάδα ξεχωριστά [Πίνακας 3-7]. Ελέγχοντας το Σχήμα 3-5 διαπιστώνεται ότι στην πιο επιτυχημένη χρονιά λειτουργίας αμφότερες, προσομοίωση και πραγματικότητα σημειώνουν μέγιστη τιμή τον Ιούνιο. Αυτό είναι κάτι το οποίο δεν πρέπει να αγνοηθεί.

3.2.3 Επίδραση αρχείων καιρού στην συμπεριφορά της προσομοιούμενης διάταξης

Όλες οι προσομοιώσεις που προηγήθηκαν μέσω των λογισμικών είχαν καιρικό αρχείο tmy, η φιλοσοφία του οποίου έχει εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 2. Ουσιαστικά ένα tmy αρχείο προκύπτει αντλώντας δεδομένα σχετικά με τις καιρικές συνθήκες και την άμεση διαθέσιμη ακτινοβολία μιας τοποθεσίας για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα αρκετών ετών, εκ των οποίων επιλέγονται τα πιο αντιπροσωπευτικά. Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί η επίδραση των καιρικών αρχείων στη συνολική συμπεριφορά του σταθμού. Για αυτό το σκοπό θα διεξαχθούν δοκιμές στο SAM με διαφορετικά μετεωρολογικά δεδομένα για τα έτη 2017, 2018 και 2019. Τα σχετικά αποτελέσματα με τη μηνιαία ηλεκτρική ισχύ που αποδίδεται στο δίκτυο για κάθε μονάδα του σταθμού παρατίθενται προς ανάλυση στα κάτωθι διαγράμματα. Στο Σχήμα 3-8 παρουσιάζεται η μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο για ένα έτος από τον IVANPAH 1 για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.

Στο Σχήμα 3-9 παρουσιάζεται η μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο για ένα έτος από τον IVANPAH 2 για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.

Στο Σχήμα 3-10 παρουσιάζεται η μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο για ένα έτος από τον IVANPAH 3 για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.

Από τα Σχήματα 3-8, 3-9, 3-10 διαπιστώνεται πως τα διαφορετικά είδη αρχείων καιρού δεν μεταβάλλουν σημαντικά τη συμπεριφορά της κάθε μονάδας και συνεπακόλουθα του σταθμού. Το μόνο που μπορεί να σημειωθεί ως διαφοροποίηση είναι μια ελαφριά πτώση της ισχύος κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο του 2017 και 2018, οποία αναμένεται να οδηγήσει σε μία ανάλογη μείωση της συνολικής ετήσιας ηλεκτρικής ισχύος. Πράγματι κάτι τέτοιο συμβαίνει, με τα αποτελέσματα του πίνακα που ακολουθεί, στον οποίον περιέχεται η ετήσια ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο (MWe) για το σταθμό ISEGS για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017, να επιβεβαιώνουν τον προαναφερθέντα ισχυρισμό.

3.3 Ηλιοθερμικός σταθμός CRESCENT DUNES

3.3.1 Χαρακτηριστικά ηλιοθερμικής εγκατάστασης

Ο ηλιοθερμικός σταθμός CRESCENT DUNES είναι εγκατεστημένος στο Τοποραh της Νεβάδα, περίπου 310 χιλιόμετρα βορειοδυτικά του Λας Βέγκας. Πρόκειται για μία διάταξη με ονομαστική καθαρή ηλεκτρική χωρητικότητα 110 MW [31], ικανή να καλύψει τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες 43.000 νοικοκυριών [32]. Ο σταθμός φέρει δοχείο αποθήκευσης 10 ωρών για λειτουργία σε πλήρες φορτίο. Ως εκ τούτου, τετηγμένο άλας χρησιμοποιείται ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Η κατασκευή του σταθμού ξεκίνησε το 2011 και ολοκληρώθηκε στα τέλη του 2013, ενώ ο Crescent Dunes τέθηκε σε λειτουργία το Σεπτέμβριο του 2015 [31]. Το κόστος κατασκευής του σταθμού ανήλθε στα 975 εκατομμύρια δολάρια. Όμως συνεχείς βλάβες -ενδεικτικά μια από τις κυριότερες σημειώθηκε στο δοχείο αποθήκευσης- και κατασκευαστικές αστοχίες, οδηγούσαν αλλεπάλληλες φορές το σταθμό σε αναγκαστική διακοπή της λειτουργίας του [33-34]. Ως αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης, η λειτουργία του σταθμού τερματίστηκε οριστικά τον Απρίλιο του 2019. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τα χαρακτηριστικά της ηλιοθερμικής εγκατάστασης παρατίθενται στον Πίνακα 3-9.

Οι τιμές του Πίνακα 3-9 αποτελούν τις παραμέτρους εισόδου για την προσομοίωση του CRESCENT DUNES μέσω SolarPILOT και SAM. Αναφορικά με το πλήθος ηλιοστατών το SolarPILOT υπολογίζει 10377 ηλιοστάτες (δεν δίδεται η δυνατότητα καθορισμού του πλήθους ηλιοστατών) ενώ στην πραγματικότητα στον CRESCENT DUNES έχουν εγκατασταθεί 10347. Η επίπτωση αυτής της απόκλισης θεωρείται αμελητέα και δεν επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα. Επίσης, έχει σημειωθεί ότι ορισμένα χαρακτηριστικά της διάταξης έχουν αντληθεί από προγενέστερη ερευνητική διαδικασία η οποία επισημαίνεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, δίχως περαιτέρω δυνατότητα διασταύρωσης της ορθότητας των δεδομένων.

3.3.2 Συγκρίσεις ανάμεσα σε λογισμικά και πραγματικά δεδομένα για τον Crescent Dunes

Πριν παρουσιαστεί η σύγκριση με τα πραγματικά αποτελέσματα λειτουργίας του σταθμού θα γίνει μια σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης που υλοποιείται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και σε αυτά του επιστημονικού άρθρου "Validation of SAM Modeling of Concentrated Solar Power Plant" των Alberto Boretti, Jamal Nayfeh and Wael Al-Kouz [35]. Στο συγκεκριμένο άρθρο, η εγκατάσταση CRESCENT DUNES προσομοιώνεται στο SAM με την ειδοποίηση διαφορά ότι το ηλιοστατικό πεδίο παράγεται απευθείας στο SAM. Δηλαδή, δε γίνεται χρήση του SolarPILOT ώστε να εισαχθεί η πραγματική τοπογραφία της εγκατάστασης μέσω του Google Earth Pro. Ως εκ τούτου στην παρούσα διπλωματική εργασία θα υλοποιηθούν και οι δύο εναλλακτικές περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, θα ακολουθηθεί τόσο η μεθοδολογία η οποία έχει περιγραφεί αναλυτικά στην εισαγωγή του Κεφαλαίου 2 (Google Earth Pro- SolarPILOT- SAM) όσο και η μεθοδολογία που επιλέγεται από τους ερευνητές-συγγραφείς του προαναφερθέντος άρθρου. Σαφέστατα ο σκοπός πλέον μετατρέπεται σε διττό· αφενός σύγκριση της παρούσας προσομοίωσης με προηγούμενη αντίστοιχη εργασία και αφετέρου διερεύνηση της απόκλισης που δημιουργείται λόγω της μη εισαγωγής της πραγματικής τοπογραφίας της εγκατάστασης.

Η βασική παράμετρος που ελέγχεται από το άρθρο είναι ο «παράγοντας χωρητικότητας» ή αλλιώς ο γνωστός capacity factor. Ως capacity factor ορίζεται ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την μέγιστη (ονομαστική) ηλεκτρική ισχύ. Για την παρούσα σύγκριση ο capacity factor υπολογίζεται σε μηνιαίο πλαίσιο για ένα έτος. Στο Σχήμα 3-12 παρουσιάζεται ο μηνιαίος capacity factor για το σταθμό Crescent Dunes για ένα έτος.

Από το Σχήμα 3-12 φαίνεται ότι και οι τρεις περιπτώσεις συγκλίνουν σε ικανοποιητικό βαθμό. Βεβαίως αναφορικά με τις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας ο συνδυασμός Google Earth Pro- SolarPILOT- SAM οδηγεί σε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα. Αντιθέτως ο παράγοντας χωρητικότητας που υπολογίζεται από το άρθρο υπερέρχει ελαφρώς κατά τους ανοιξιάτικους μήνες ενώ στη συνέχεια συμβαδίζει ή και πέφτει ελάχιστα σε σχέση με την καμπύλη που παραπέμπει στον capacity factor με χρήση Google Earth Pro- SolarPILOT- SAM.

Παρότι η απογοητευτική διαχείριση ενός καθ' όλα φιλόδοξου εγχειρήματος οδήγησε κατά το πιο παραγωγικό έτος λειτουργίας του -το 2018- στην επίτευξη capacity factor μόλις 20.3%, σχεδιάστηκε με αρχική πρόβλεψη για ετήσιο capacity factor 51.9%. Οι ερευνητές του άρθρου "Validation of SAM Modeling of Concentrated Solar Power Plant" κατέληξαν μέσω των υπολογισμών τους σε ετήσιο capacity factor 54%, ενώ μέσω της συνδυαστικής χρήσης Google Earth Pro- SolarPILOT- SAM για λογαριασμό της παρούσας διπλωματικής εργασίας ο ετήσιος capacity factor ισούται με 51.6%. Διαφαίνεται πως οι συγκρίσεις οδηγούν σε αποτελέσματα που βρίσκονται αρκετά κοντά. Επίσης ο ισχυρισμός του άρθρου "Validation of SAM Modeling of Concentrated Solar Power Plant", ότι για την απόκλιση ανάμεσα στον πραγματικό ετήσιο capacity factor και σε αυτόν που υπολογίζεται μέσω των λογισμικών πακέτων

ευθύνεται το SAM , καταρρίπτεται πλήρως καθώς έχει προαναφερθεί πως η εγκατάσταση CRESCENT DUNES αστόχησε για διαφορετικούς λόγους.

Σε κάθε περίπτωση η προσομοίωση με συνδυαστική χρήση Google Earth Pro-SolarPILOT- SAM είναι πάντοτε η πιο ρεαλιστική εναλλακτική λύση σε σχέση με την απλή χρήση του SAM, για αυτό και προτιμάται. Η βασική αιτία που οδηγεί σε αυτόν τον ισχυρισμό συνίσταται στη λεπτομερέστερη μοντελοποίηση του ηλιοστατικού πεδίου μέσω του SolarPILOT και ταυτόχρονα στην πιο πιστή απεικόνιση της πραγματικής τοπογραφίας.

3.4 Σύγκριση με [36]

Συνεχίζοντας στην κατεύθυνση της επαλήθευσης αποτελεσμάτων τα οποία εξάγονται μέσω των λογισμικών πακέτων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία με αντίστοιχα της ήδη υπάρχουσας ερευνητικής δραστηριότητας, παρουσιάζεται μια τελευταία σύγκριση. Στο Κεφάλαιο 5 της διπλωματικής εργασίας του Ελευθέριου Γ. Σαατσάκη με θέμα «ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΥΡΓΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ» διερευνήθηκε το σενάριο της εγκατάστασης ηλιοθερμικού σταθμού ισχύος 20MW με ηλιακό πύργο στην περιοχή του Αθερινόλακκου της Κρήτης. Σύμφωνα με τον Ελευθέριο Γ. Σαατσάκη «Για την προσομοίωση του πύργου ηλιακής ισχύος στην τοποθεσία του Αθερινόλακκου, χρησιμοποιήθηκαν, ως δεδομένα, κάποια από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σταθμού PS20 στη Σεβίλλη». Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διάταξης που προσομοιώνεται παρατίθενται στον Πίνακα 3-10.

Οι τιμές του Πίνακα 3-10 αποτελούν τις παραμέτρους εισόδου για την προσομοίωση της διάταξης στον Αθερινόλακκο μέσω SolarPILOT και SAM. Αναφορικά με το πλήθος ηλιοστατών το SolarPILOT υπολογίζει 1256 ηλιοστάτες (δεν δίδεται η δυνατότητα καθορισμού του πλήθους ηλιοστατών) ενώ στην πραγματικότητα στον PS20 έχουν εγκατασταθεί 1255. Η επίπτωση αυτής της απόκλισης θεωρείται αμελητέα και δεν επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα.

Για την σχεδίαση του ηλιοστατικού πεδίου στο SolarPILOT έχει εισαχθεί μέσω του Google Earth Pro η ακριβής τοπογραφία του σταθμού PS20 της Σεβίλλης. Το σχόλιο αυτό θα μπορούσε να παραληφθεί, καθώς η μεθοδολογία που ακολουθείται έχει προσδιοριστεί πλήρως στην αρχή του κεφαλαίου. Όμως επειδή σε αυτή την υποενότητα γίνεται σύγκριση και αντιπαραβολή αποτελεσμάτων που αφορούν μια υποτιθέμενη διάταξη (η οποία αντλεί αρκετά χαρακτηριστικά από μία υπάρχουσα ίδιας ισχύος) ο σχολιασμός γράφεται για λόγους πληρότητας.

Η διάταξη που προσομοιώνεται δεν διαθέτει δοχείο αποθήκευσης. Πρόκειται για εγκατάσταση άμεσης ατμοπαραγωγής. Όπως έχει σημειωθεί στο σκέλος των συγκρίσεων για τον ISEGS, η πιο πρόσφατη έκδοση του SAM (2020.11.29) προσομοιώνει μονάχα συστήματα τετηγμένου άλατος. Ως εκ τούτου για την μοντελοποίηση του ISEGS είχε χρησιμοποιηθεί η έκδοση SAM (2020.2.29) για σύστημα άμεσης ατμοπαραγωγής. Δυστυχώς όμως η συγκεκριμένη επιλογή δουλεύει

μόνο για σταθμούς με υψηλή ονομαστική ισχύ, «κρασάροντας» για μικρότερες διατάξεις πχ. της τάξης των 20 MW. Αναγκαστικά λοιπόν για να προχωρήσει η σύγκριση, η προσομοίωση έγινε στο SAM(2020.11.29) με τετηγμένο άλας και έμμεση ατμοπαραγωγή. Για την απόσβεση των απωλειών του επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας, το ηλιακό πολλαπλάσιο προτιμήθηκε να οριστεί με τιμή 1.071 αντί για 1.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-10, η προσομοίωση θα γίνει για κύκλο ισχύος με αναθέρμανση και χωρίς αναθέρμανση. Επίσης εφόσον το πεδίο σχεδιάζεται με βάση τον PS20, κατά την δημιουργία του θα χρησιμοποιηθούν μετεωρολογικά δεδομένα για τη Σεβίλλη. Κατά την προσομοίωση στο SAM, για την Κρήτη θα χρησιμοποιηθούν μετεωρολογικά δεδομένα Κρήτης, ενώ προφανώς για την περίπτωση της Σεβίλλης θα χρησιμοποιηθούν τα ίδια μετεωρολογικά δεδομένα που εισήχθησαν κατά τη σχεδίαση του πεδίου.

Στον Πίνακα 3-11, παρουσιάζονται από [32] ανά τοποθεσία, η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο (MWe), η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και ο αριθμός ηλιοστατών του πεδίου (σταθερό πεδίο για όλες τις περιπτώσεις). Τα δεδομένα αναφέρονται στις 21 Ιουνίου και ώρα 12 το μεσημέρι.

Στον Πίνακα 3-12, παρουσιάζονται υπολογισμένα από τα λογισμικά της παρούσας διπλωματικής εργασίας ανά τοποθεσία, η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο (MWe), η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και ο αριθμός ηλιοστατών του πεδίου (σταθερό πεδίο για όλες τις περιπτώσεις). Τα δεδομένα αναφέρονται στις 21 Ιουνίου και ώρα 12 το μεσημέρι.

Από τους Πίνακες 3-11 και 3-12 φαίνεται ότι παρότι η διαθέσιμη ακτινοβολία στην παρούσα εργασία είναι υψηλότερη και για τις δύο τοποθεσίες, η ηλεκτρική ισχύς για τη χρονική στιγμή που εξετάζεται είναι ελαφρώς χαμηλότερη για Κρήτη και Σεβίλλη. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στις απώλειες θερμότητας λόγω του επιπλέον εναλλάκτη ή σε ζητήματα που σχετίζονται με επιμέρους μικροδιαφορές στα λογισμικά. Σε κάθε περίπτωση καταδεικνύεται ότι τα αποτελέσματα των δύο εργασιών κινούνται σε παρόμοια επίπεδα.

Πίνακας 3- 1. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον IVANPAH 1. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν υποτεθεί με βάση τη βιβλιογραφική γνώση. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών.

Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου	IVANPAH 1
Ισχύς εγκατάστασης (MWe)	126
Βαθμός απόδοσης θερμοδυναμικού κύκλου (%)	33*
Θερμική ισχύς που απαιτείται στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου (MWt)	381.818
Ηλιακό πολλαπλάσιο	1.13793*
Θερμικής ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt)	434.482
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δέκτη(°C)	550
Ώρες λειτουργίας του δοχείου αποθήκευσης	-
Ύψος πύργου (m)	140
Ύψος δέκτη (m)	20
Διάμετρος δέκτη (m)	23.3
Μήκος ηλιοστάτη (m)	5.3
Ύψος ηλιοστάτη (m)	2.65
Βαθμός ανακλαστικότητας και καθαρότητας ηλιοστάτη	0.9
Πλήθος ηλιοστατών	53570**

Πίνακας 3- 2. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον IVANPAH 2. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν υποτεθεί με βάση τη βιβλιογραφική γνώση. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών.

Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου	IVANPAH 2
Ισχύς εγκατάστασης (MWe)	133
Βαθμός απόδοσης θερμοδυναμικού κύκλου (%)	33*
Θερμική ισχύς που απαιτείται στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου (MWt)	403.03
Ηλιακό πολλαπλάσιο	1.13793*
Θερμικής ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt)	458.62
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δέκτη(°C)	550
Ώρες λειτουργίας του δοχείου αποθήκευσης	-
Ύψος πύργου (m)	140
Ύψος δέκτη (m)	20
Διάμετρος δέκτη (m)	23.3
Μήκος ηλιοστάτη (m)	5.3
Ύψος ηλιοστάτη (m)	2.65
Βαθμός ανακλαστικότητας και καθαρότητας ηλιοστάτη	0.9
Πλήθος ηλιοστατών	60000**

Πίνακας 3- 3. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον IVANPAH 3. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν υποτεθεί με βάση τη βιβλιογραφική γνώση. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών.

Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου	IVANPA H 3
Ισχύς εγκατάστασης (MWe)	133
Βαθμός απόδοσης θερμοδυναμικού κύκλου (%)	33*
Θερμική ισχύς που απαιτείται στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου (MWt)	403.03
Ηλιακό πολλαπλάσιο	1.13793 *
Θερμικής ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt)	458.62
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δέκτη(°C)	550
Ώρες λειτουργίας του δοχείου αποθήκευσης	-
Ύψος πύργου (m)	140
Ύψος δέκτη (m)	20
Διάμετρος δέκτη (m)	23.3
Μήκος ηλιοστάτη (m)	5.3
Ύψος ηλιοστάτη (m)	2.65
Βαθμός ανακλαστικότητας και καθαρότητας ηλιοστάτη	0.9
Πλήθος ηλιοστατών	60000**

Πίνακας 3- 4. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς (MWe) και ενεργειακό κόστος (\$/kWh) με ηλιακό πολλαπλάσιο 1 και 1.13793 για τον IVANPAH 1.

IVANPAH 1		
Solar Multiple	Ετήσια ηλεκτρική ισχύς (MWe)	LCOE (\$/kWh)
1.13793	246758	14.73
1	217497	16.93

Πίνακας 3- 5. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς (MWe) και ενεργειακό κόστος (\$/kWh) με ηλιακό πολλαπλάσιο 1 και 1.13793 για τον IVANPAH 2.

IVANPAH 2		
Solar Multiple	Ετήσια ηλεκτρική ισχύς (Mwe)	LCOE (\$/kWh)
1.13793	277351	13.99
1	253417	15.51

Πίνακας 3- 6. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς (MWe) και ενεργειακό κόστος (\$/kWh) με ηλιακό πολλαπλάσιο 1 και 1.13793 για τον IVANPAH 3.

IVANPAH 3		
Solar Multiple	Ετήσια ηλεκτρική ισχύς (Mwe)	LCOE (\$/kWh)
1.13793	275645	14.13
1	249998	15.78

Πίνακας 3- 7. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS (πρώτη γραμμή) και πραγματική ετήσια ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2018, 2019, 2020.

	IVANPAH 1 (MWe)	IVANPAH 2 (MWe)	IVANPAH 3 (MWe)
SAM	246758	277351	275645
Πραγματική 2020	270983	280176	274379
Πραγματική 2019	232935	272737	247214
Πραγματική 2018	228519	278603	254932

Πίνακας 3- 8. Ετήσια ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο (MWe) για το σταθμό ISEGS για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.

	IVANPAH 1 (MWe)	IVANPAH 2 (MWe)	IVANPAH 3 (MWe)
TMY	246758.2	277351.4613	275645.2608
2019	246152.9439	276859.4403	274863.462
2018	241946.5024	272769.9337	270594.7518
2017	242914.5187	272911.09	270945.2694

Πίνακας 3- 9. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον CRESCENT DUNES. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν οριστεί με βάση προγενέστερη ερευνητική διαδικασία. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών.

Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης- παράμετροι εισόδου CRESCENT
DUNES

Καθαρή ισχύς εγκατάστασης (MWe)	110
Λόγος μετατροπής μικτής- καθαρής ισχύος	0.9*
Ισχύς εγκατάστασης (MWe)	122*
Βαθμός απόδοσης θερμοδυναμικού κύκλου (%)	41.2*
Θερμική ισχύς που απαιτείται στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου (MWt)	296*
Θερμικής ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt)	711*
Θερμοκρασία εισόδου ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δέκτη (°C)	566
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δέκτη(°C)	288
Ώρες λειτουργίας του δοχείου αποθήκευσης	10
Ύψος πύργου (m)	195
Ύψος δέκτη (m)	30.48*
Διάμετρος δέκτη (m)	17.65*
Μήκος ηλιοστάτη (m)	10.7564
Ύψος ηλιοστάτη (m)	10.7564
Βαθμός ανακλαστικότητας και καθαρότητας ηλιοστάτη	0.9
Πλήθος ηλιοστατών	10377**

Πίνακας 3- 10. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για την διάταξη στον Αθρινόλακκο. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν οριστεί από τον συγγραφέα της παρούσας εργασίας. Με ** είναι οι τιμές οι οποίες έχουν προκύψει από υπολογισμούς μέσω των λογισμικών.

Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης- παράμετροι εισόδου ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΟΝ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟ

Καθαρή ισχύς εγκατάστασης (MWe)	20
Λόγος μετατροπής μικτής- καθαρής ισχύος	0.884
Ισχύς εγκατάστασης (MWe)	23
Βαθμός απόδοσης θερμοδυναμικού κύκλου (%) με αναθέρμανση	37.5
Βαθμός απόδοσης θερμοδυναμικού κύκλου (%) δίχως αναθέρμανση	38.02
Θερμική ισχύς που απαιτείται στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου (MWt) με αναθέρμανση	61
Θερμική ισχύς που απαιτείται στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου (MWt) χωρίς αναθέρμανση	60
Ηλιακό πολλαπλάσιο	1.071*
Θερμικής ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt) για διάταξη με κύκλο αναθέρμανσης	66
Θερμικής ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt) για διάταξη με κύκλο χωρίς αναθέρμανση	65
Θερμοκρασία εισόδου ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δέκτη (°C)	255.7
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δέκτη(°C)	525.7
Ώρες λειτουργίας του δοχείου αποθήκευσης	-
Ύψος πύργου (m)	165
Ύψος δέκτη (m)	15
Διάμετρος δέκτη (m)	15
Μήκος ηλιοστάτη (m)	12.88
Ύψος ηλιοστάτη (m)	9.57
Βαθμός ανακλαστικότητας και καθαρότητας ηλιοστάτη	0.874
Πλήθος ηλιοστατών	1256**

Πίνακας 3- 11. Η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο (MWe), η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και ο αριθμός ηλιοστατών του πεδίου για το θερινό ηλιοστάσιο και ώρα 12 το μεσημέρι, ανά τοποθεσία [36].

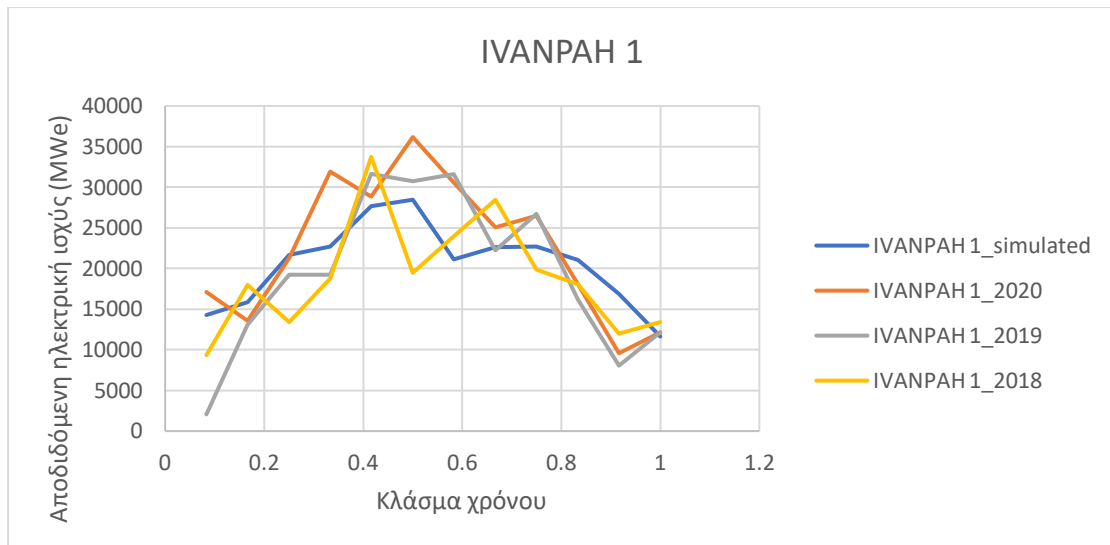
Τοποθεσία	Pel (MWe)	DNI (W/m ²)	Αριθμός ηλιοστατών	
Κρήτη	20.833	814	1255	Με αναθέρμανση
Σεβίλλη	20.739	842	1255	Με αναθέρμανση
Τοποθεσία	Pel (MWe)	DNI (W/m ²)	Αριθμός ηλιοστατών	
Κρήτη	21.544	814	1255	Χωρίς αναθέρμανση
Σεβίλλη	21.449	842	1255	Χωρίς αναθέρμανση

Πίνακας 3- 12: Η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο (MWe), η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και ο αριθμός ηλιοστατών του πεδίου για το θερινό ηλιοστάσιο και ώρα 12 το μεσημέρι, ανά τοποθεσία. (Google Earth Pro- SolarPILOT- SAM).

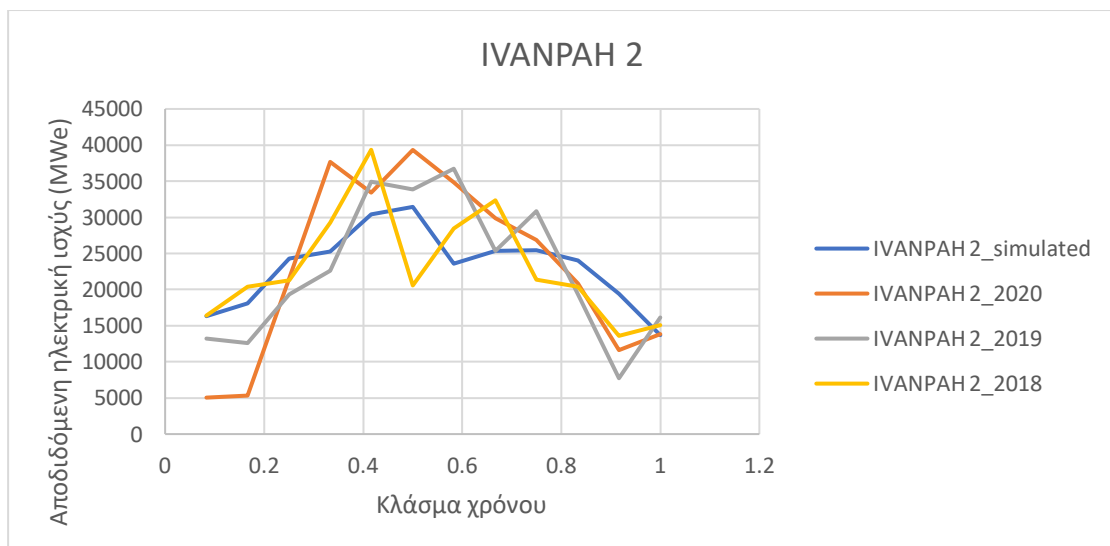
Τοποθεσία	Pel (MWe)	DNI (W/m ²)	Αριθμός ηλιοστατών	
Κρήτη	20.511	843.5	1256	Με αναθέρμανση
Σεβίλλη	20.541	859.5	1256	Με αναθέρμανση
Τοποθεσία	Pel (MWe)	DNI (W/m ²)	Αριθμός ηλιοστατών	
Κρήτη	20.848	843.5	1256	Χωρίς αναθέρμανση
Σεβίλλη	20.840	859.5	1256	Χωρίς αναθέρμανση



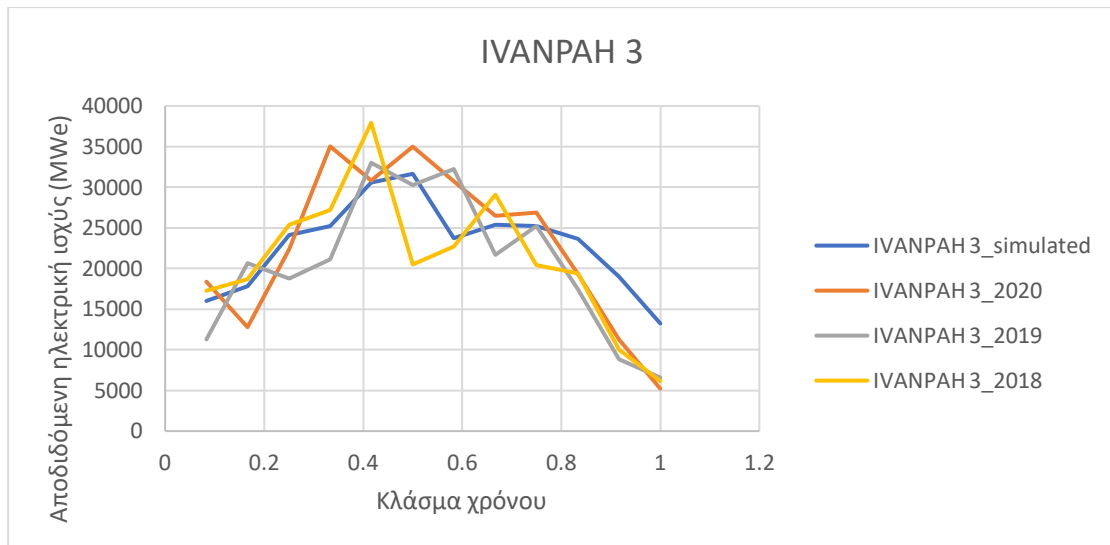
Σχήμα 3- 1. Η ηλιοθερμική εγκατάσταση ISEGS. Κατά σειρά φαίνονται οι μονάδες IVANPAH 3, IVANPAH 2 και IVANPAH 3 [29].



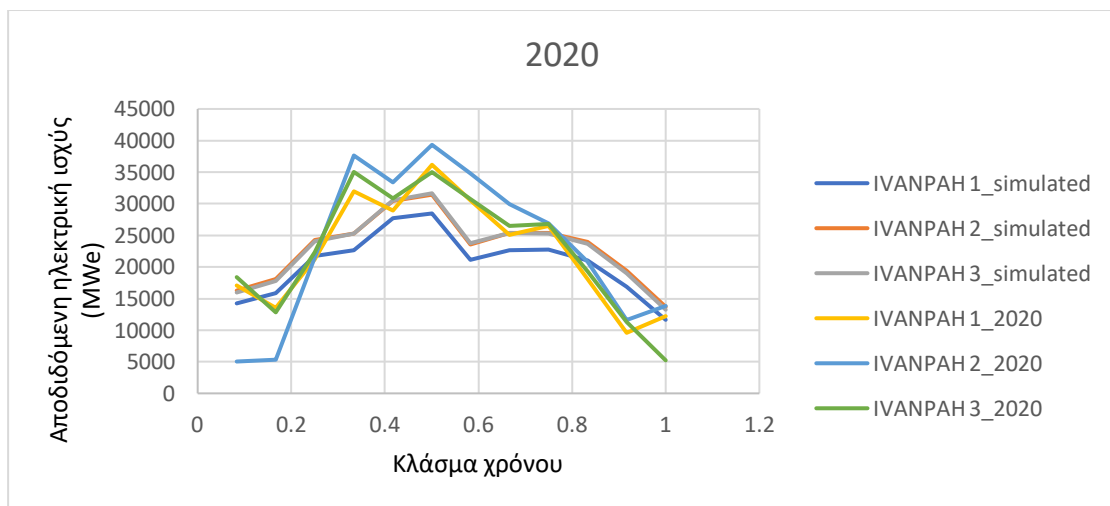
Σχήμα 3- 2. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για τη μονάδα IVANPAH 1 και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2020, 2019 και 2018.



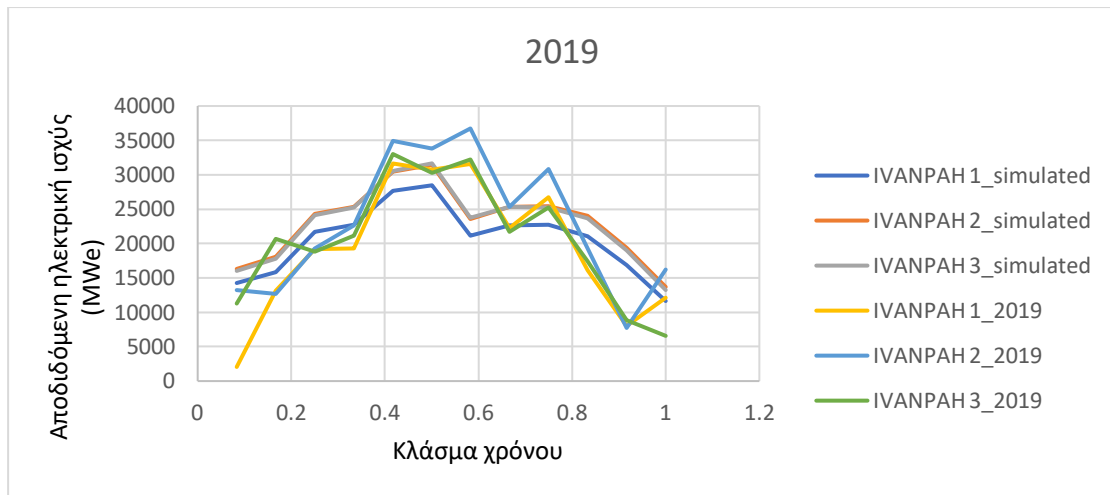
Σχήμα 3- 3. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για τη μονάδα IVANPAH 2 και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2020, 2019 και 2018.



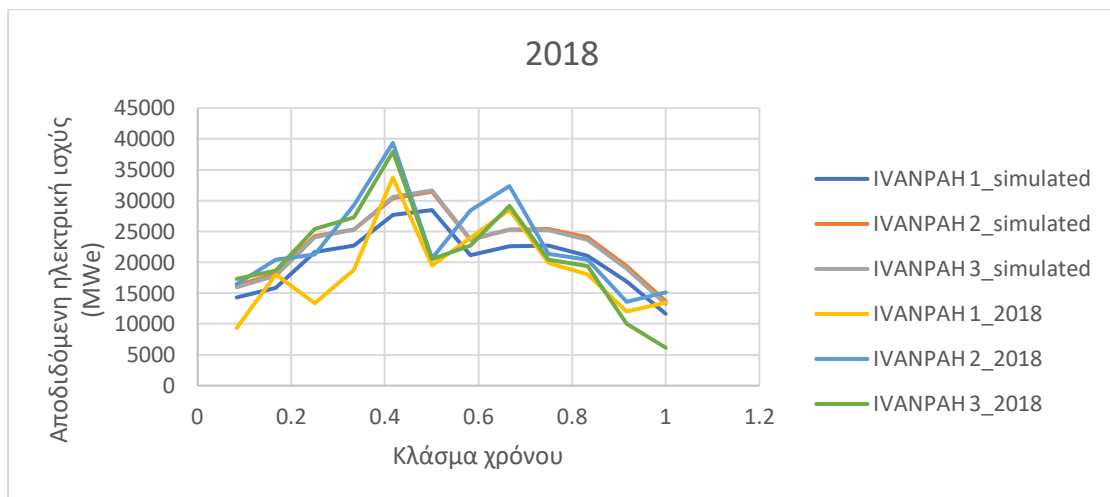
Σχήμα 3- 4. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για τη μονάδα IVANPAH 3 και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για τα έτη 2020, 2019 και 2018.



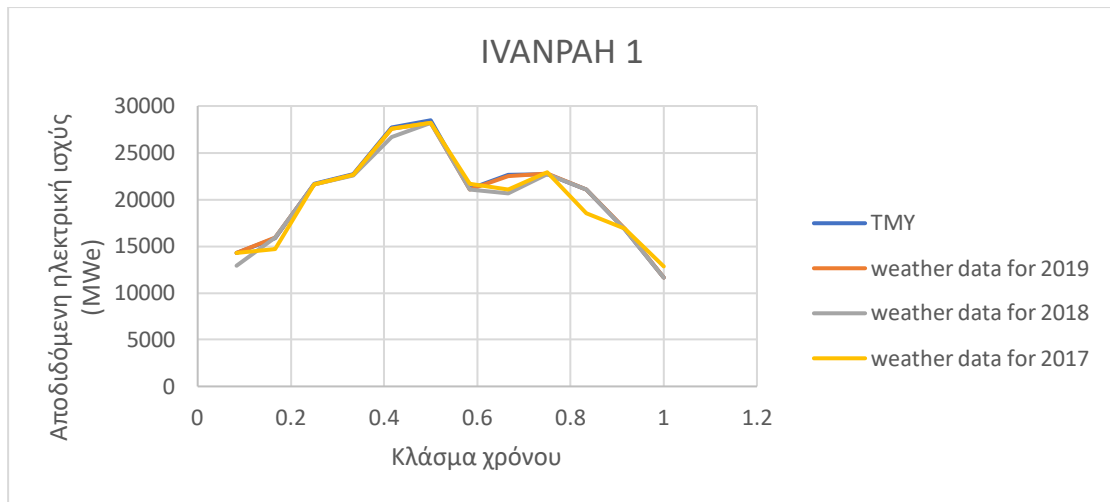
Σχήμα 3- 5. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για το 2020.



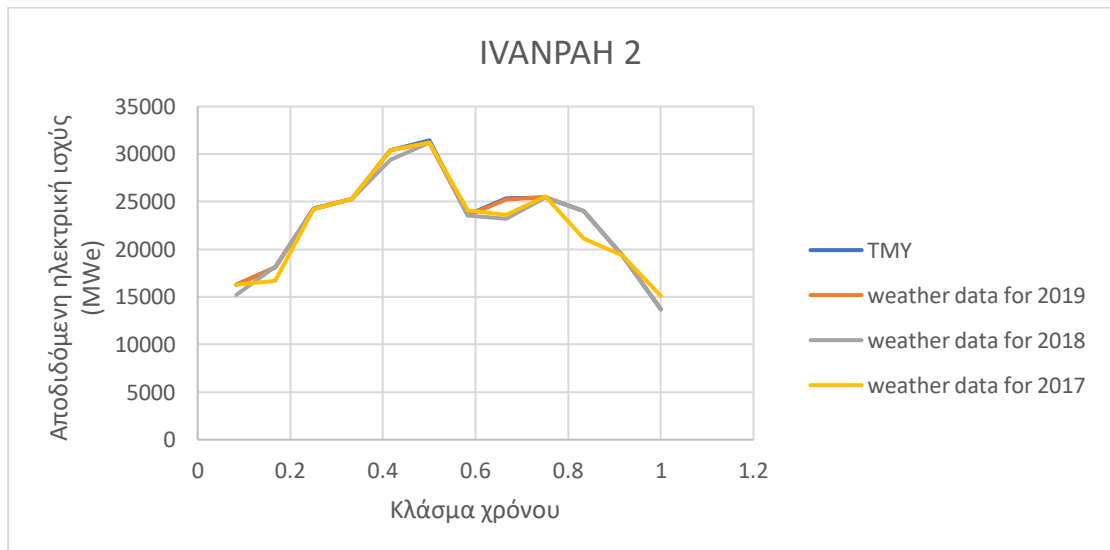
Σχήμα 3- 6. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για το 2019.



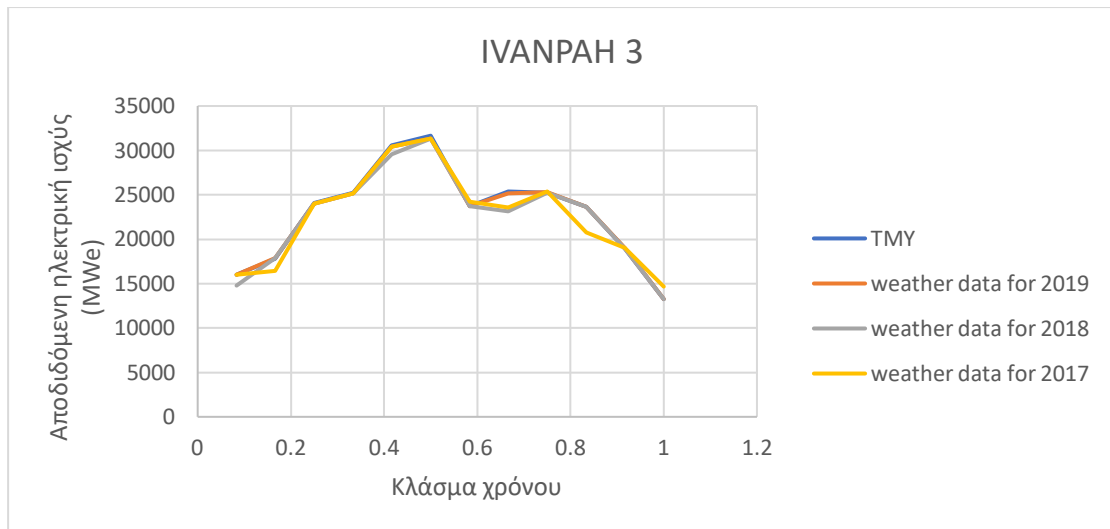
Σχήμα 3- 7. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο υπολογισμένη μέσω των λογισμικών πακέτων για το σταθμό ISEGS και πραγματική ηλεκτρική ισχύς για το 2018.



Σχήμα 3- 8. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο για ένα έτος από τον IVANPAH 1 για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.



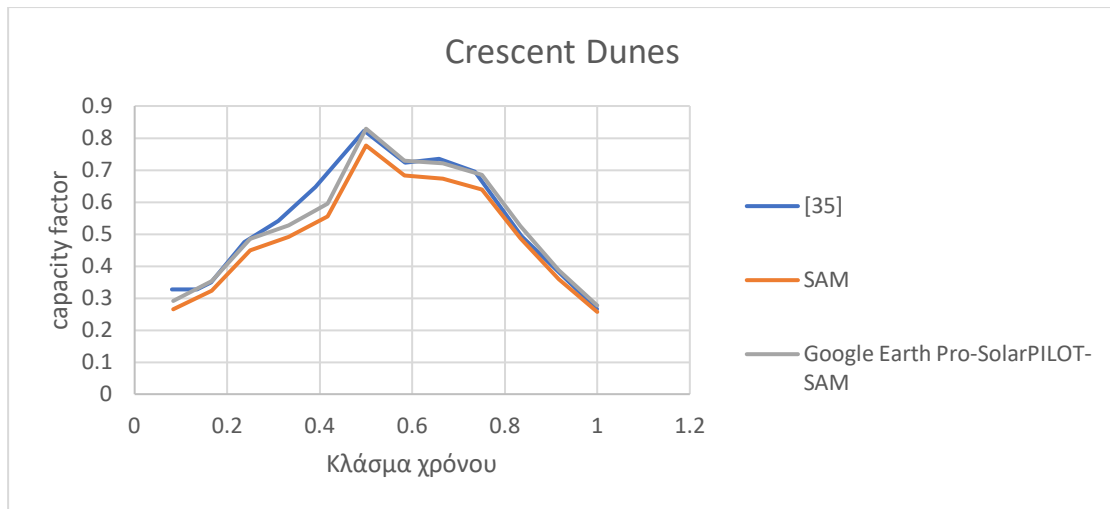
Σχήμα 3- 9. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο για ένα έτος από τον IVANPAH 2 για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.



Σχήμα 3- 10. Μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο για ένα έτος από τον IVANPAH 3 για προσομοίωση με μετεωρολογικά δεδομένα tmy, 2019, 2018, 2017.



Σχήμα 3- 11. Η ηλιοθερμική εγκατάσταση CRESCENT DUNES [30].



Σχήμα 3- 12. Μηνιαίος *capacity factor* για το σταθμό *Crescent Dunes* για ένα έτος. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στο άρθρο [35], το πορτοκαλί αντιστοιχεί σε αποκλειστική χρήση του *SAM* και το γκρι αντιστοιχεί σε χρήση *Google Earth Pro- SolarPILOT- SAM*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Ηλιοθερμική εγκατάσταση MINOS

4.1 Εισαγωγή και επιλογή συντεταγμένων εγκατάστασης πύργου στον Αθερινόλακκο

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στον Αθερινόλακκο της Κρήτης. Πρόκειται για την ηλιοθερμική εγκατάσταση MINOS [15], ισχύος 50MW με δοχείο αποθήκευσης 5 hr και χρήση τετηγμένου άλατος ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Ο ηλιοθερμικός σταθμός που πρόκειται να μελετηθεί θα αποτελέσει την πρώτη ηλιοθερμική εγκατάσταση κεντρικού δέκτη στην Ελλάδα.

Εισαγωγικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1 το ΝΑ κομμάτι της Κρήτης αποτελεί μια προνομιακή περιοχή για ηλιοθερμικές διατάξεις εξαιτίας των υψηλών επιπέδων άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Η επιλογή του σημείου εγκατάστασης ενός ηλιοθερμικού σταθμού εν πολλοίς καθορίζεται από την προσφερόμενη ηλιακή ακτινοβολία στη δεδομένη περιοχή. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας.

Αρχικά θα πραγματοποιηθεί ένας έλεγχος προκαταρκτικού χαρακτήρα, για τη διερεύνηση των ακριβών συντεταγμένων του σημείου εγκατάστασης του πύργου. Κριτήριο για την επιλογή του καταλληλότερου σημείου συνιστά η μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο. Οι δοκιμές υλοποιούνται έχοντας ως δεδομένο από τη βιβλιογραφία πως πρόκειται για ηλιοστατικό πεδίο με διάταξη βόρεια του πύργου.

Βασιζόμενοι σε ερευνητική διαδικασία που έχει προηγηθεί στο παρελθόν αλλά και με βάση τη βιβλιογραφική γνώση όπου απαιτείται, παρατίθεται Πίνακας 4-1 στον οποίο περιλαμβάνονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της ηλιοθερμικής εγκατάστασης.

Οι τιμές του Πίνακα 4-1 αποτελούν τις παραμέτρους εισόδου για την προσομοίωση της ηλιοθερμικής εγκατάστασης στον Αθερινόλακκο μέσω SolarPILOT και SAM.

Ως σημείο σχεδιασμού της διάταξης ορίζεται το χειμερινό ηλιοστάσιο (21/6) και ώρα 12 το μεσημέρι. Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζεται η άμεση προσπίπτουσα διαθέσιμη ακτινοβολία για την 21^η Ιουνίου. Οι πληροφορίες συλλέχθηκαν από το καιρικό αρχείο το οποίο εισήχθη στο SolarPILOT και στο SAM για τις προσομοιώσεις. Σύμφωνα με το Σχήμα 4-2 στις 21 Ιουνίου και ώρα 12 το μεσημέρι η άμεση διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία ισούται με 820 W/m^2 . Επιπρόσθετα στο Σχήμα 4-3 παρατίθεται η άμεση προσπίπτουσα διαθέσιμη ακτινοβολία για τον Αθερινόλακκο για κάθε ώρα ενός ολόκληρου έτους.

Οι πληροφορίες του Σχήματος 4-3 συλλέχθηκαν από το καιρικό αρχείο το οποίο εισήχθη στο SolarPILOT και στο SAM για τις προσομοιώσεις. Σε αυτό το σημείο η παράθεση του Σχήματος 4-3 κρίνεται σκόπιμη διότι οι προσομοιώσεις σε ετήσια κλίμακα μέσω του SAM διεξάγονται από το λογισμικό με βήμα 1 ώρας.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες εικόνες του οικοπέδου και των πιθανών σημείων εγκατάστασης του ηλιακού πύργου (Σχήμα 4-4, 4-5, 4-6).

Για την υλοποίηση του προκαταρκτικού ελέγχου, η τοπογραφία του οικοπέδου εισάγεται στο SolarPILOT μέσω του Google Earth Pro. Για την κάθε περίπτωση εξάγεται το αντίστοιχο ηλιοστατικό πεδίο [Πίνακας 4-2]. Μέσω του SolarPILOT θα προκύψει η θερμική ισχύς του δέκτη για το θερινό ηλιοστάσιο [Πίνακας 4-3]. Ως θερμική ισχύς δέκτη ορίζεται η θερμική ενέργεια που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων τόσο των οπτικών όσο και των θερμικών απωλειών του δέκτη. Με ενσωμάτωση του πεδίου στο SAM, προκύπτει η συνολική ετήσια ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο [Πίνακας 4-4].

Με προσομοίωση στο SolarPILOT για την ημέρα του θερινού ηλιοστασίου (21/06) και τοπική ώρα 12:00, προκύπτει πως οι διαφορές ως προς τη θερμική ισχύ του δέκτη στη βέλτιστη περιοχή είναι ελάχιστες. Διαπιστώνεται πως ο πύργος 9 υπερτερεί ελάχιστα έναντι του πύργου 7. Επιπρόσθετα προκύπτουν 42 περισσότεροι ηλιοστάτες, γεγονός που μεταφράζεται για την εν λόγω περίπτωση ως ελαφρώς αυξημένη συνολική ανακλαστική επιφάνεια έναντι του 7. Όμως, η επιλογή του πύργου 7 αποδίδει υψηλότερη ετήσια ηλεκτρική ισχύ. Για αυτό το λόγο επιλέγεται το σημείο 7 ως θέση εγκατάστασης του πύργου, με συντεταγμένες $35^{\circ} 0'44.38''\text{B}$, $26^{\circ} 8'14.61''\text{A}$. Σε κάθε περίπτωση οι αποκλίσεις είναι αμελητέες και ο έλεγχος θεωρείται επαρκής.

Να σημειωθεί πως παρότι υπήρχαν περιπτώσεις που απέδιδαν περισσότερους ηλιοστάτες άρα και υψηλότερη συνολική ανακλαστική επιφάνεια, η υπεροχή της περίπτωσης του πύργου 7, οφείλεται σε ευνοϊκότερη τοποθέτηση των ηλιοστατών στο πεδίο, με τρόπο που οδηγεί σε αυξημένη απόδοση του. Το ειδικό βάρος των απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου στην απόδοση του αλλά και στην συνολική συμπεριφορά της διάταξης θα εξεταστεί με ιδιαίτερη μνεία στις σελίδες του τρέχοντος κεφαλαίου που ακολουθούν.

4.2 Προσομοίωση για βέλτιστα χαρακτηριστικά

Στην παρούσα υποενότητα θα παρουσιαστούν ορισμένα βασικά αποτελέσματα για σχεδίαση και προσομοίωση της ηλιοθερμικής εγκατάστασης στη βάση των πραγματικών δεδομένων του Πίνακα 4-1. Προφανέστατα το σημείο εγκατάστασης του πύργου παραμένει ως έχει οριστεί στην προηγούμενη υποενότητα. Ακολουθώντας το πλήθος των ηλιοστατών του πεδίου έχει υπολογιστεί ως 20852. Η μεθοδολογία συνδυαστικής χρήσης Google Earth Pro- SolarPILOT- SAM που ακολουθείται έχει περιγραφεί αναλυτικά. Στον Πίνακα 4-5 παρουσιάζονται η ετήσια αποδιδόμενη ισχύς στο δίκτυο (kWh), ο παράγοντας χωρητικότητας (capacity factor) και το ενεργειακό κόστος.

Ικανοί και αναγκαίοι παράγοντες ως προς την διεισδυτικότερη διερεύνηση της συνολικής συμπεριφοράς του σταθμού και των επιμέρους υποσυστημάτων του συνιστούν μεγέθη που αντικατοπτρίζουν την μέση ετήσια ημέρα. Αυτό βέβαια δεν

αναιρεί το γεγονός πως η σχεδίαση της διάταξης συντελείται σε ένα επιλεγμένο σημείο, συνήθως - όπως έχει σημειωθεί- κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο.

Με χρήση του SAM υπολογίζονται για τον ηλιοθερμικό σταθμό για την μέση ημέρα ενός έτους τα εξής μεγέθη: η μέση ετήσια προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο ηλιοστατικό πεδίο (MWt), η μέση ετήσια προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο δέκτη (MWt), η μέση ετήσια θερμική ενέργεια απορροφόμενη από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt) και η μέση ετήσια θερμική ενέργεια εισόδου του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος (MWt). Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-7.

Επίσης με χρήση του SAM υπολογίζονται για τον ηλιοθερμικό σταθμό για την μέση ημέρα ενός έτους, η μέση ετήσια φόρτιση θερμικής ισχύος του δοχείου αποθήκευσης (MWt) και η μέση ετήσια αποφόρτιση θερμικής ισχύος του δοχείου αποθήκευσης (MWt). Στο Σχήμα 4-8 απεικονίζονται η μέση ετήσια θερμική ενέργεια απορροφόμενη από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt), η μέση ετήσια θερμική ενέργεια εισόδου του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος (MWt), η μέση ετήσια φόρτιση θερμικής ισχύος του δοχείου αποθήκευσης (MWt) και η μέση ετήσια αποφόρτιση θερμικής ισχύος του δοχείου αποθήκευσης (MWt).

Στο Σχήμα 4-7 παρατηρείται πως ο κύκλος παράγει ηλεκτρική ισχύ σε χρονικές στιγμές κατά τις οποίες το πεδίο δεν λειτουργεί και ως εκ τούτου δεν απορροφάται θερμότητα από το τετηγμένο άλας. Επίσης διαπιστώνεται πως σε ορισμένες χρονικές στιγμές, η θερμική ισχύς που εισέρχεται στον κύκλο υπερβαίνει την τιμή της θερμικής ισχύος που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας στον δέκτη. Αμφότερες οι δύο τελευταίες επισημάνσεις στηρίζονται στην ύπαρξη δοχείου αποθήκευσης. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο να συμβαίνει και αποδεικνύεται από το Σχήμα 4-8. Η επιπλέον πληροφορία που δίδεται μέσω του Σχήματος 4-8 είναι η πορεία φόρτισης και αποφόρτισης του δοχείου αποθήκευσης. Κατά τις χρονικές στιγμές που η προσπίπτουσα θερμική ισχύς του πεδίου- και συνεπακόλουθα η απορροφόμενη θερμότητα από το ρευστό- κινείται στα μέγιστα επίπεδα, η πλεονάζουσα θερμική ισχύς δεν απορρίπτεται αλλά αποθηκεύεται. Έτσι τις χρονικές στιγμές στις οποίες η διαθέσιμη ακτινοβολία είναι είτε ελάχιστη ή ανύπαρκτη, το δοχείο αποθήκευσης αποφορτίζεται συμμετέχοντας ενεργά και καθοριστικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Ένας ακόμα δείκτης που συντελεί στην αξιολόγηση της ηλιοθερμικής εγκατάστασης MINOS συνιστά ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης για τη μέση ημέρα ενός έτους των τριών βασικών υποσυστημάτων του. Στο Σχήμα 4-9 παρουσιάζονται κατά σειρά (από πάνω προς τα κάτω) ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του δέκτη, ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου και ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου. Τα σχετικά αποτελέσματα του Σχήματος 4-9 έχουν υπολογιστεί με χρήση του SAM.

Εξετάζοντας το Σχήμα 4-9 φαίνεται πως κατά τη μέση ετήσια ημέρα οι πρωινές ώρες είναι πιο «αποδοτικές» όσον αφορά τη λειτουργία του δέκτη και του ηλιοστατικού πεδίου. Καθώς η βαθμίδα του χρόνου προχωρεί προς τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες, παρατηρείται μια ολοένα και εντονότερη πτωτική τάση. Αναφορικά με το βαθμό απόδοσης του κύκλου ισχύος, διαπιστώνεται μια

μεγαλύτερη ομοιομορφία κατά την διάρκεια της μέσης ετήσιας ημέρας. Βεβαίως και σε αυτό το Σχήμα, αποτυπώνεται η λειτουργία του σταθμού με συμμετοχή του δοχείου αποθήκευσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Κλείνοντας την παρούσα υποενότητα και αφού έχουν παρουσιαστεί τα δεδομένα σχετικά με τη μέση ημέρα ενός έτους, μέσω του SAM υπολογίζονται ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, ο βαθμός απόδοσης του δέκτη και ο βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου για τις 8760 ώρες ενός έτους. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-10.

Τέλος, μέσω του SAM υπολογίζονται η προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο ηλιοστατικό πεδίο (MWt), η προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο δέκτη (MWt), η απορροφώμενη θερμική ενέργεια από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt) και η θερμική ενέργεια εισόδου του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος (MWt) για τις 8760 ώρες ενός έτους. Τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 4-11.

4.3 Παραμετρική ανάλυση για ύψος πύργου για ίδιο ηλιοστατικό πεδίο

Είναι γνωστό πως η κατασκευή του πύργου αποτελεί μια εκ των βασικότερων παραμέτρων αναφορικά με τη συνολική οικονομική δαπάνη μιας ηλιοθερμικής εγκατάστασης. Το κόστος του πύργου αυξάνεται εκθετικά με το ύψος του. Εύλογα λοιπόν προκύπτει ως αδήριτη η ανάγκη της ορθής διαστασιολόγησης του.

Στην παρούσα ενότητα θα εξεταστεί μέσω των διαθέσιμων λογισμικών πακέτων η επίδραση της μεταβολής του ύψους του πύργου στην απόδοση του ηλιοστατικού πεδίου και στην συνολική ετήσια ισχύ της ηλιοθερμικής εγκατάστασης. Η προσομοίωση θα υλοποιηθεί ξεκινώντας από ύψος πύργου 60m και φτάνοντας έως τα 260m , με βήμα 20m. Το ηλιοστατικό πεδίο όπως και όλες οι υπόλοιπες παράμετροι της διάταξης (διαστάσεις δέκτη κλπ) θα διατηρηθούν σταθερές, όπως ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Με χρήση του SAM, για κάθε περίπτωση θα εξαχθούν οι τιμές της ετήσιας αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο . Σημαντικοί δείκτες που λειτουργούν ως κριτήρια αξιολόγησης της κάθε περίπτωσης, πέραν της συνολικής ισχύος, συνιστούν τόσο ο capacity factor όσο και ο Levelized Cost of Energy (LCOE). Στον Πίνακα 4-6 παρουσιάζονται η ετήσια ισχύς [kWh], ο Capacity factor [%] και ο δείκτης LCOE [\$/kWh] για όλες τις περιπτώσεις.

Παρατηρείται πως για μικρό ύψος πύργου η ετήσια ηλεκτρική ισχύς είναι ιδιαίτερα χαμηλή, ενώ το ενεργειακό κόστος της διάταξης αρκετά υψηλό. Καθώς το ύψος αυξάνεται η κατάσταση βελτιώνεται αισθητά, τόσο από ενεργειακή όσο και από οικονομική σκοπιά. Για τις περιπτώσεις με ύψος 180m, 200m, 220m οι τιμές της συνολικής ετήσιας ισχύος, ο capacity factor και ο λόγος ενεργειακού κόστους κινούνται πολύ κοντά. Καθώς το ύψος του πύργου ξεπερνά τα 240 m, αρχίζει να σημειώνεται μία πτωτική τάση όσων αφορά την ισχύ καθώς και μια αυξητική τάση όσων αφορά το ενεργειακό κόστος. Αν η ανάλυση επεκταθεί για ακόμα μεγαλύτερα ύψη αναμένεται η κατακόρυφη πτώση της ισχύος με ταυτόχρονη εκτίναξη του ενεργειακού κόστους σε δυσθεώρητα επίπεδα [Πίνακες 4-6].

Από τη προηγούμενη συγκριτική διαδικασία προκύπτει εύλογα το ερώτημα. Ποιοι είναι οι λόγοι που για μικρό ύψος πύργου τα αποτελέσματα ήταν αποθαρρυντικά? Γιατί η κατάσταση εξισορροπούνταν σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών? Σε τελική ανάλυση τι είναι αυτό που καθορίζει -είτε θετικά είτε αρνητικά- την συμπεριφορά ενός ηλιοθερμικού σταθμού? Η απάντηση βρίσκεται στο ηλιοστατικό πεδίο -για το οποίο έχουμε ήδη προαναφέρει πως το κόστος κατασκευής του καταλαμβάνει άνω του 50% της συνολικής επένδυσης- και πιο συγκεκριμένα στις απώλειες του.

Με χρήση του SolarPILOT, υπολογίζονται οι απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου (συνημιτόνου, ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, παρεμπόδισης, διαρροής, σκίασης) για τις δώδεκα χαρακτηριστικές ημέρες του χρόνου, για κάθε ύψος. Ο μέσος όρος τους προσεγγίζει ικανοποιητικά τον μέσο ετήσιο βαθμό για τις άνωθεν απώλειες. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του πεδίου ορίζεται ως το γινόμενο των βαθμών απόδοσης τους. Να σημειωθεί πως ο υπολογισμός των απωλειών και κατ' επέκταση του συνολικού βαθμού απόδοσης, βρίσκει νοηματική πραγμάτωση κατά τις χρονικές στιγμές που το ηλιοστατικό πεδίο λειτουργεί (θετικές τιμές του ηλιακού ύψους). Στην διαδικασία που ακολουθεί οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για ώρα 12 το μεσημέρι κάθε χαρακτηριστικής ημέρας. Στο Σχήμα 4-12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναφορικά με το μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης συνημιτόνου, ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, σκίασης, παρεμπόδισης και διαρροής για όλες τις περιπτώσεις.

Αρχικά, παρατηρώντας το Σχήμα 4-12, διαπιστώνεται η ισχυρότατη εξάρτηση του συνολικού βαθμού απόδοσης από τις απώλειες παρεμπόδισης (blocking losses). Ο βαθμός παρεμπόδισης παρουσιάζει την μεγαλύτερη μεταβολή σε σχέση με τους υπόλοιπους. Για μικρό ύψος πύργου (60m) οι απώλειες παρεμπόδισης είναι ιδιαίτερα υψηλές, σε βαθμό απογοητευτικό για το ηλιοστατικό πεδίο. Καθώς όμως αυξάνεται το ύψος του πύργου η κατάσταση βελτιώνεται σημαντικά. Ουσιαστικά κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, διότι για μικρό ύψος πύργου οι ηλιοστάτες αναγκάζονται να φέρνουν την επιφάνεια τους σε θέση κάθετα στο επίπεδο (να αυξήσουν την κλίση της επιφάνειάς τους) για να στείλουν την ακτίνα στον δέκτη, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνθήκες έντονης παρεμπόδισης. Συν τοις άλλοις, το πρόβλημα αυτό ενισχύεται από το γεγονός πως την ώρα των προσομοιώσεων (12 το μεσημέρι) ο Ήλιος βρίσκεται από πάνω (ηλιακό ύψος $\alpha_s=90^\circ$).

Αν οι προσομοιώσεις διεξάγονταν και σε περισσότερες ώρες εντός των χαρακτηριστικών ημερών, οι απώλειες παρεμπόδισης δεν θα σημείωναν τόσο τρομακτική μεταβολή. Βεβαίως θα παρέμεναν αρκετά υψηλές για χαμηλότερα ύψη πύργου. Από την άλλη πλευρά, σε αυτό το σενάριο η καμπύλη του βαθμού απόδοσης σκίασης ποσοτικά θα κινούνταν σε χαμηλότερα επίπεδα, δίχως όμως να μεταβάλλεται ποιοτικά η συμπεριφορά της.

Ο βαθμός απόδοσης συνημιτόνου αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του ύψους του πύργου. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο διότι όσο αυξάνεται το ύψος του πύργου, η γωνία συνημιτόνου μειώνεται γεγονός που συνεπάγεται την μείωση των αντίστοιχων απωλειών συνημιτόνου (cosine). Αντίθετα οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας αυξάνονται με την αύξηση του ύψους του πύργου για τον απλούστατο λόγο πως η απόσταση που έχει να διανύσει η ανακλώμενη ακτίνα για να φτάσει στο δέκτη μεγαλώνει.

Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε εξάγεται το συμπέρασμα πως η επιλογή του ύψους του πύργου θα πρέπει να συνδυάζει την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος με την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής του. Αναδιατυπώνοντας ελαφρώς, η επιλογή του ύψους του πύργου θα πρέπει να συνδυάζει την μείωση των απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου με την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής του.

4.4 Παραμετρική ανάλυση για ύψος πύργου για καινούριο ηλιοστατικό πεδίο

Έχοντας πλέον κατανοήσει τη σημασία του ύψους στην απόδοση ενός συστήματος κεντρικού δέκτη σε αυτή την υποενότητα θα εξεταστεί η επίδραση του στο σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου. Η σύγκριση θα υλοποιηθεί ξεκινώντας από ύψος πύργου 60m και φτάνοντας έως τα 260m, με βήμα 20m. Η ειδοποιός διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη ενότητα έγκειται στο ότι για κάθε ύψος πύργου θα κατασκευάζεται καινούριο ηλιοστατικό πεδίο. Προφανέστατα γεωμετρικοί και λοιποί παράμετροι της διάταξης θα διατηρηθούν σταθεροί. Ακολουθώντας μια φαινομενικά αντίστροφη πορεία με αυτήν της ενότητας 4.3, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που έχει εξηγηθεί υπολογίζονται μέσω του SolarPILOT οι απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου και ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του για κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 4-13 παρουσιάζονται τα στοιχεία σχετικά με το μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης συνημιτόνου, ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, σκίασης, παρεμπόδισης και διαρροής για όλες τις περιπτώσεις.

Από την εξέταση του Σχήματος 4-13 και αντιπαραβάλλοντάς το με το Σχήμα 4-12 εύκολα διαπιστώνει κανείς την επίδραση του ύψους του πύργου στο σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου. Σε αυτή την περίπτωση αποφεύγονται πλήρως τα ζητήματα παρεμπόδισης, με τους βαθμούς απόδοσης σκίασης και παρεμπόδισης να αγγίζουν τη μονάδα για όλες τις υποθέσεις. Επιπρόσθετα, η ποιοτική διακύμανση των καμπυλών συνημιτόνου και συνολικής απόδοσης πεδίου συμβαδίζει, επιβεβαιώνοντας έτσι τη βιβλιογραφία σύμφωνα με την οποία οι απώλειες συνημιτόνου επιδρούν καθοριστικά στο συνολικό βαθμό απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου.

Στη συνέχεια, με ενσωμάτωση των αντίστοιχων ηλιοστατικών πεδίων στο SAM θα συγκριθούν η ετήσια ηλεκτρική ισχύς και το ενεργειακό κόστος για την κάθε περίπτωση. Τα σχετικά αποτελέσματα και το πλήθος των ηλιοστατών κάθε πεδίου παρατίθενται στους Πίνακες 4-7 και 4-8.

Στον Πίνακα 4-8 παρουσιάζονται η ετήσια ηλεκτρική ισχύς [kWh], ο Capacity factor[%] και ο δείκτης LCOE [\$/kWh] για όλες τις περιπτώσεις.

Στον Πίνακα 4-8, η ετήσια ισχύς κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα για μικρό ύψος πύργου, ενώ όσο το τελευταίο αυξάνεται η ετήσια ισχύς βελτιώνεται. Για ύψος πύργου 180m και 200m σημειώνεται η βέλτιστη τιμή αναφορικά με την ετήσια ισχύ. Το ίδιο ισχύει και για το ενεργειακό κόστος. Αυτό αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό συμπέρασμα, διότι ευθυγραμμίζεται με την αρχική εκτίμηση ότι το ύψος πύργου της διάταξης ισούται με 190 m.

Εξετάζοντας τους Πίνακες 4-7, 4-8 και το Σχήμα 4-13 διαπιστώνεται πως η αιτία όσων μόλις αναφέρθηκαν, αποτελεί το πλήθος των ηλιοστατών που προκύπτουν για κάθε πεδίο. Ενδεικτικά για ύψος πύργου 60m προκύπτουν μόλις 7892 ηλιοστάτες, ενώ για ύψος πύργου 180m προκύπτουν 20584 ηλιοστάτες. Η συνολική ανακλαστική επιφάνεια ενός πεδίου είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που οφείλουν οι μηχανικοί να λαμβάνουν σοβαρά υπόψιν. Για παράδειγμα, παρότι το πεδίο με ύψος πύργου 260m πετυχαίνει το βέλτιστο ετήσιο βαθμό απόδοσης πεδίου [Σχήμα 4-13], η μέγιστη ετήσια απόδοση ηλεκτρικής ισχύος επιτυγχάνεται για το πεδίο με ύψος πύργου 200m [Πίνακας 4-8]. Αυτό οφείλεται διότι για σχεδιασμό πεδίου με ύψος πύργου 200m προκύπτουν περίπου 900 παραπάνω ηλιοστάτες [Πίνακας 4-7].

Συμπερασματικά αποδείχθηκε πως, το ύψος του πύργου, ο βαθμός απόδοσης και η συνολική ανακλαστική επιφάνεια του ηλιοστατικού πεδίου και όλα αυτά σε συνδυασμό με το κόστος κατασκευής συνδέονται άρρηκτα και καθοριστικά με την βιωσιμότητα μια ηλιοθερμικής εγκατάστασης κεντρικού δέκτη.

4.5 Επίδραση γεωμετρικών χαρακτηριστικών δέκτη στην ηλιοθερμική εγκατάσταση

Μια πολύ σημαντική παράμετρος ενός ηλιοθερμικού σταθμού του είδους που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο δέκτης ή απορροφητής. Η βασική αρχή λειτουργίας του δέκτη έχει αναλυθεί διεξοδικά στο Κεφάλαιο 2. Ο σκοπός αυτής της ενότητας είναι η αναζήτηση του βαθμού επίδρασης των διαστάσεων του δέκτη στη συνολική παραγόμενη ισχύ και στο λόγο κόστους-ενέργειας. Λαμβάνεται υπόψιν ως δεδομένο πως ο λόγος ύψους διαμέτρου του δέκτη οφείλει να κινείται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών για κατασκευαστικούς λόγους κυρίως. Μέσω του SAM, διατηρώντας σταθερό το ηλιοστατικό πεδίο, θα συγκριθεί ο λόγος ύψους διαμέτρου για τιμές 0.5, 1, 2, μεταβάλλοντας την μία διάσταση και κρατώντας την άλλη σταθερή και το αντιστρόφως.

Στον Πίνακα 4-9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σχετικά με την ετήσια αποδιδόμενη ισχύ [kWh] και το ενεργειακό κόστος για τιμές λόγου ύψους διαμέτρου [H/D] δέκτη 0.5, 1, 2.

Στον Πίνακα 4-10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σχετικά με την ετήσια αποδιδόμενη ισχύ [kWh] και το ενεργειακό κόστος για λόγο ύψους διαμέτρου [H/D] δέκτη 1.4 (πραγματική γεωμετρία δέκτη).

Παρατηρείται πως για λόγο ύψους διαμέτρου 0.5 η ετήσια αποδιδόμενη ισχύς σημειώνει αξιοσημείωτη πτώση, της τάξης άνω του 25% συγκριτικά με την πραγματική γεωμετρία του δέκτη. Παρότι η μείωση των διαστάσεων συνεπάγεται μείωση κόστους, αποδεικνύεται πως δεν είναι αρκετή για να υπερκεραστούν οι απώλειες σε ενεργειακό επίπεδο. Ο ισχυρισμός αυτός προκύπτει συγκρίνοντας λόγω χάρη τους ενεργειακούς δείκτες του Πίνακα 4-9 για τις περιπτώσεις που ο λόγος ύψους διαμέτρου επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης μιας διάστασης, με το ενεργειακό κόστος της πραγματικής γεωμετρίας του δέκτη [Πίνακας 4-10]. Σε γενικές γραμμές, όσο αυξάνεται η απόκλιση από την πραγματική γεωμετρία του δέκτη τόσο μειώνεται

η ετήσια ηλεκτρική ισχύς του σταθμού . Αντιστοίχως, η απομάκρυνση από τις πραγματικές διαστάσεις οδηγεί σε αύξηση του ενεργειακού κόστους. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση με ύψος $H=10.23$ m και διάμετρο $D=10.23$ m που οδηγεί σε μικρή πτώση του ενεργειακού κόστους , με τιμή 16.88 έναντι 17.33 για πραγματικές διαστάσεις. Όμως ακόμα κι έτσι η υπεροχή σε ετήσια ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο που εκδηλώνεται για λόγο 1.4 έναντι όλων των υπόλοιπων περιπτώσεων, καθιστά βέλτιστη την πραγματική διαστασιολόγηση του δέκτη.

Πίνακας 4- 1. Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου στα λογισμικά για τον σταθμό MINOS. Με * είναι οι τιμές οι οποίες έχουν υποτεθεί με βάση τη βιβλιογραφική γνώση.

Βασικά χαρακτηριστικά εισόδου της διάταξης - παράμετροι εισόδου	MINOS
Ισχύς εγκατάστασης (MWe)	50
Βαθμός απόδοσης θερμοδυναμικού κύκλου (%)	33.85
Θερμική ισχύς που απαιτείται στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου (MWt)	130
Ηλιακό πολλαπλάσιο	1.46
Θερμικής ισχύς που απορροφάται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt)	190
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δέκτη(°C)	574*
Ώρες λειτουργίας του δοχείου αποθήκευσης	5
Ύψος πύργου (m)	190
Ύψος δέκτη (m)	14.32
Διάμετρος δέκτη (m)	10.23
Μήκος ηλιοστάτη (m)	5
Ύψος ηλιοστάτη (m)	3.8
Βαθμός ανακλαστικότητας και καθαρότητας ηλιοστάτη	0.9*

Πίνακας 4- 2. Συντεταγμένες των υπό εξέταση σημείων εγκατάστασης ηλιακού πύργου.

Σημεία εγκατάστασης πύργου	Συντεταγμένες
Πύργος 1	35° 0'44.27"B , 26° 8'16.57"A
Πύργος 2	35° 0'43.11"B, 26° 8'15.00"A
Πύργος 3	35° 0'42.00"B, 26° 8'13.52"A
Πύργος 4	35° 0'41.24"B, 26° 8'12.48"A
Πύργος 5	35° 0'44.90"B, 26° 8'17.84"A
Πύργος 6	35° 0'43.86"B, 26° 8'15.33"A
Πύργος 7	35° 0'44.38"B, 26° 8'14.61"A
Πύργος 8	35° 0'45.51"B, 26° 8'13.67"A
Πύργος 9	35° 0'45.37"B, 26° 8'16.38"A
Πύργος 10	35° 0'43.47"B, 26° 8'13.19"A

Πίνακας 4- 3. Πλήθος ηλιοστατών ανά σημείο εγκατάστασης και αντίστοιχη θερμική ισχύς δέκτη, το θερινό ηλιοστάσιο (21/6). Οι υπολογισμοί γίνονται για ώρα 12 το μεσημέρι.

Πύργος	Πλήθος ηλιοστατών	Θερμική ισχύς δέκτη [kW]
1	21026	185.557
2	21019	185.255
3	20930	184.008
4	20842	182.897
5	20939	184.514
6	21082	186.845
7	20852	186.930
8	20418	186.444
9	20894	186.942
10	20837	186.806

Πίνακας 4- 4. Συνολική ετήσια ισχύς [kWh] που αποδίδεται στο δίκτυο ανά περίπτωση.

Πύργος	Πλήθος ηλιοστατών	Συνολική ετήσια ισχύς [kWh]
1	21026	114274264
2	21019	114122064
3	20930	113249216
4	20842	112440280
5	20939	113306568
6	21082	115427840
7	20852	115557744
8	20418	115140440
9	20894	115455904
10	20837	115513752

Πίνακας 4- 5. Η ετήσια αποδιδόμενη ισχύς στο δίκτυο (kWh), ο παράγοντας χωρητικότητας (capacity factor) και το ενεργειακό κόστος.

Ετήσια αποδιδόμενη ισχύς στο δίκτυο (kWh)	115557744
Capacity factor (%)	30
LCOE (\$/kWh)	17.33

Πίνακας 4- 6. Ετήσια ισχύς [kWh], Capacity factor [%], LCOE [\$/kWh] για όλες τις περιπτώσεις.

Ύψος πύργου [m]	Ετήσια ισχύς [kWh]	Capacity factor [%]	LCOE [\$/kWh]
60	9044986	2.3	201.03
80	42080536	10.9	43.75
100	64399592	16.7	28.93
120	80800424	21	23.34
140	94416448	24.5	20.26
160	105584160	27.4	18.41
180	113418584	29.4	17.47
200	115495576	30	17.53
220	115247168	29.9	18.04
240	114759224	29.8	18.70
260	114026576	29.6	19.56

Πίνακας 4- 7. Πλήθος ηλιοστατών για όλες τις περιπτώσεις.

Ύψος πύργου [m]	Πλήθος ηλιοστατών
60	7892
80	10410
100	12590
120	14759
140	16832
160	18809
180	20584
200	20546

220	20052
240	19879
260	19666

Πίνακας 4- 8. Ετήσια ισχύς [kWh], Capacity factor [%], LCOE [\$/kWh] για όλες τις περιπτώσεις.

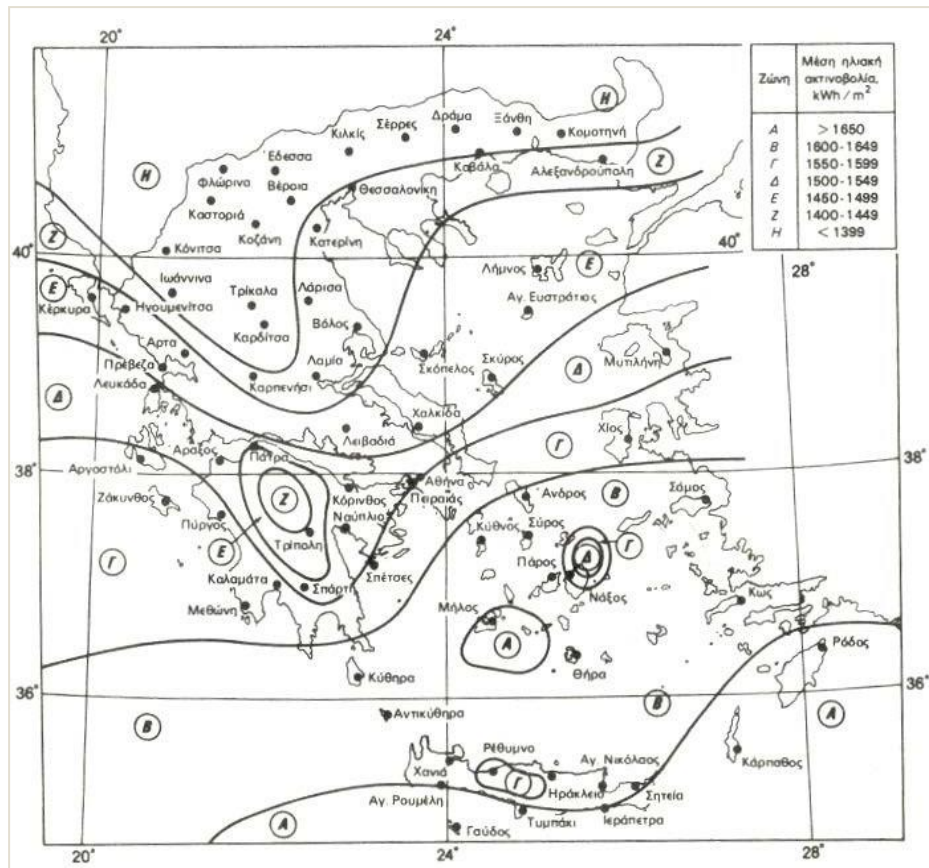
Ύψος πύργου [m]	Ετήσια ισχύς [kWh]	Capacity factor [%]	LCOE [\$/kWh]
60	11525478	3	132.52
80	30008620	7.8	53.39
100	47852396	12.4	34.93
120	66183148	17.2	26.36
140	83818208	21.7	21.71
160	99394168	25.8	19.08
180	112638688	29.2	17.54
200	114534232	29.7	17.59
220	111990240	29.1	18.33
240	110723256	28.7	19.10
260	108965752	28.3	20.12

Πίνακας 4- 9. Ετήσια αποδιδόμενη ισχύς [kWh], ενεργειακό κόστος για τιμές λόγου ύψους διαμέτρου [H/D] δέκτη 0.5, 1, 2.

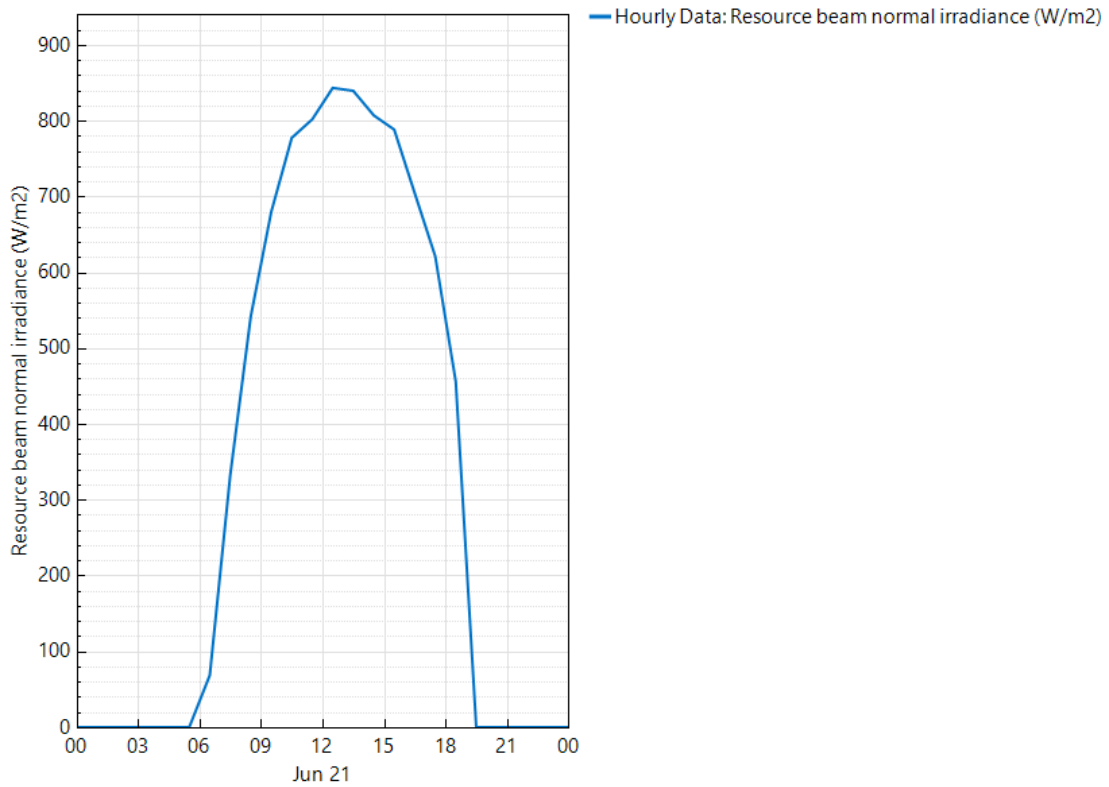
Λόγος ύψους διαμέτρου [H/D]	Μεταβαλλόμενη Διάσταση [m]	Ετήσια αποδιδόμενη ισχύς [kWh]	LCOE [\$/kWh]
0.5	H=5.115, D=10.23	81739288	22.32
0.5	D=28.64, H=14.32	84980256	27.69
1	H=10.23, D=10.23	114608104	16.88
1	D=14.32, H=14.32	113457936	18.44
2	H=20.46, D=10.23	108163360	19.32
2	D=7.16, H=14.32	106761616	18.01

Πίνακας 4- 10. Ετήσια αποδιδόμενη ισχύς [kWh] και ενεργειακό κόστος για λόγο ύψους διαμέτρου [H/D] δέκτη 1.4 (πραγματική γεωμετρία δέκτη).

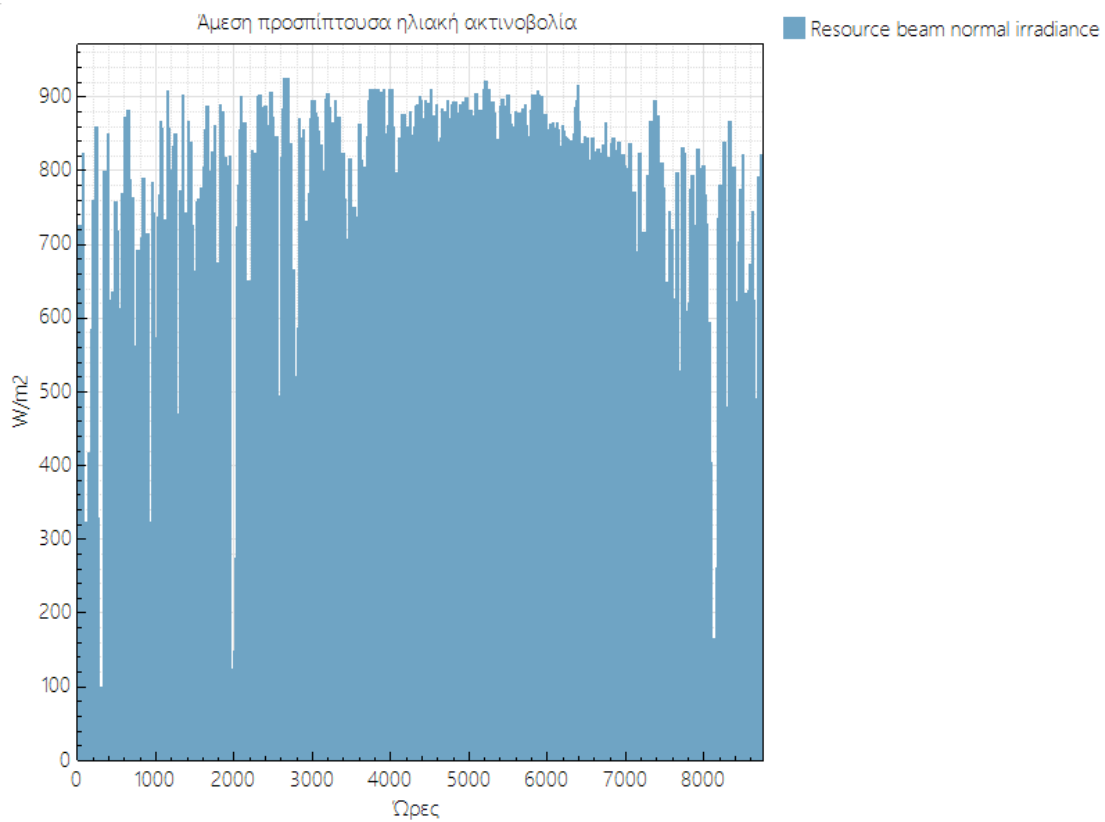
Λόγος ύψους διαμέτρου [H/D]	Διάσταση [m]	Ετήσια αποδιδόμενη ισχύς [kWh]	LCOE [\$/kWh]
1.4	H=14.32, D=10.23	115557744	17.33



Σχήμα 4- 1. Κατανομή της μέσης συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας (Καγκαράκης 1992). Πολλαπλασιάζεται με 3.6sec/hr και προκύπτουν MJ/m².



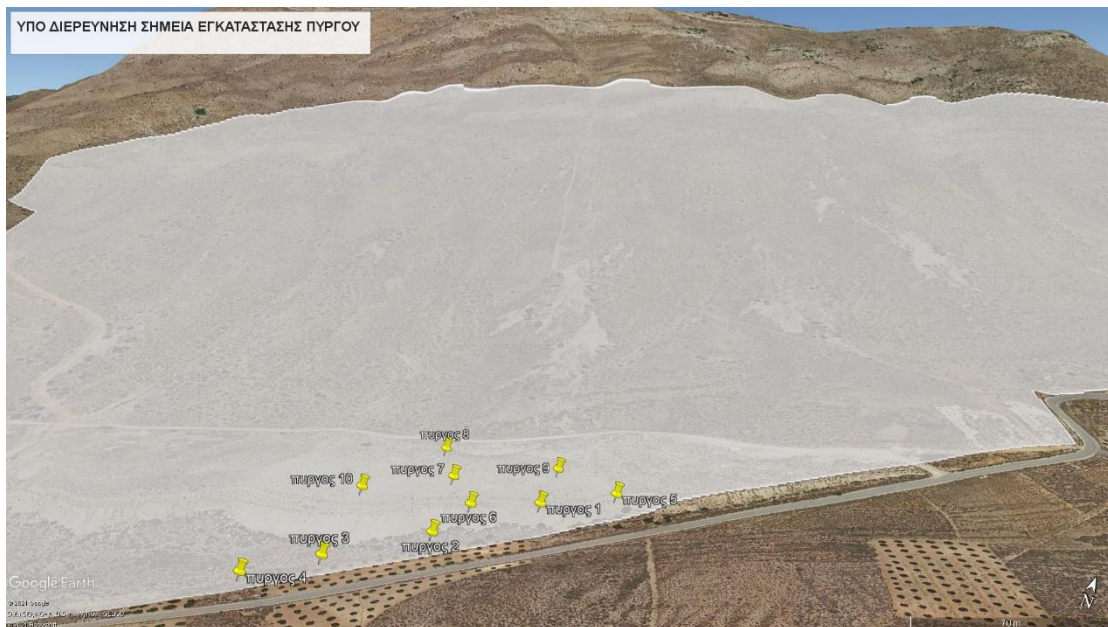
Σχήμα 4- 2. Η άμεση προσπίπτουσα διαθέσιμη ακτινοβολία για την 21η Ιουνίου.



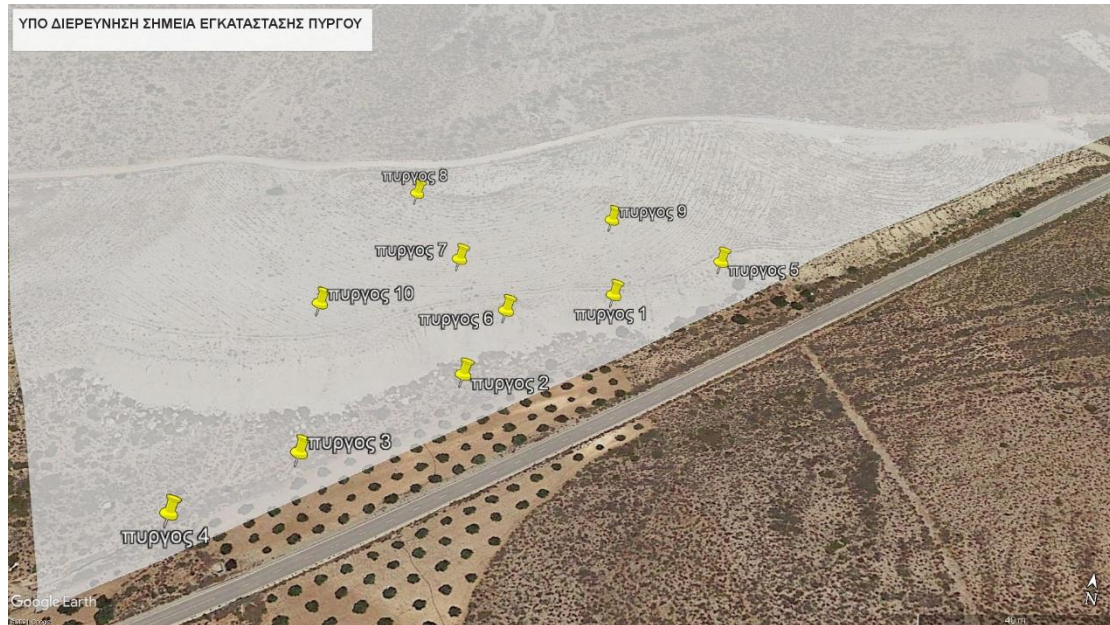
Σχήμα 4- 3. Η άμεση προσπίπτουσα διαθέσιμη ακτινοβολία για τον Αθρινόλακκο για κάθε ώρα ενός ολόκληρου έτους.



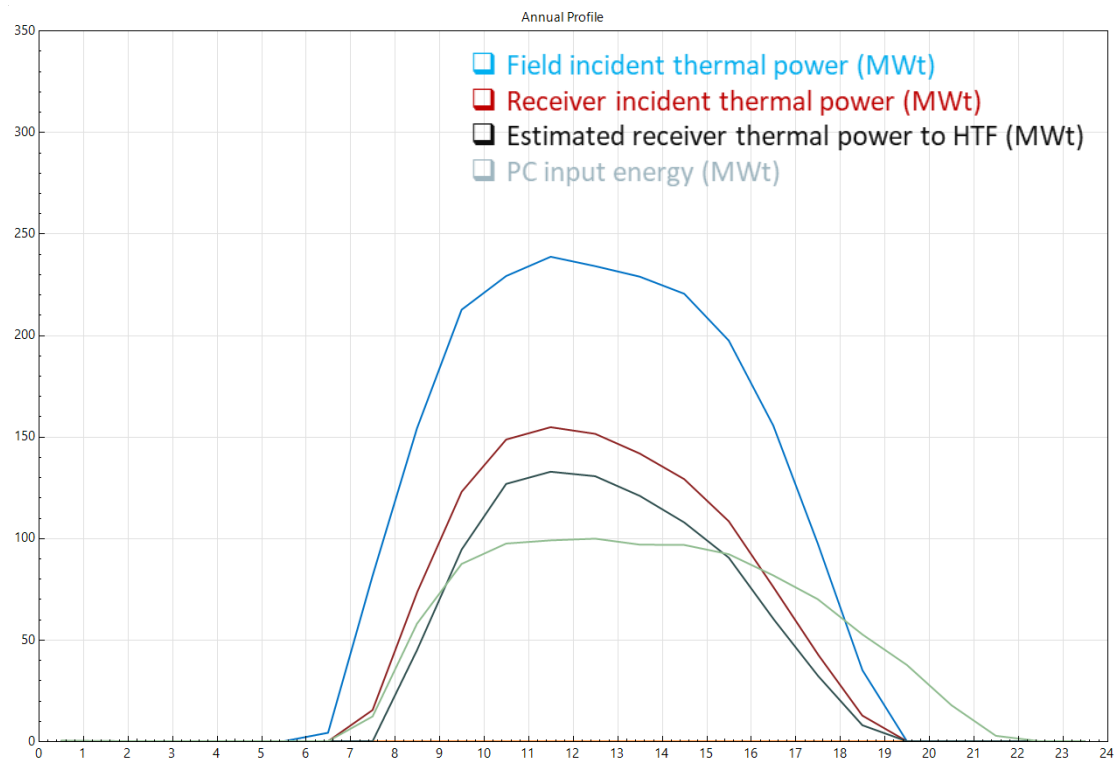
Σχήμα 4- 4. Οικόπεδο του ηλιοθερμικού σταθμού, μέσω του Google Earth Pro.



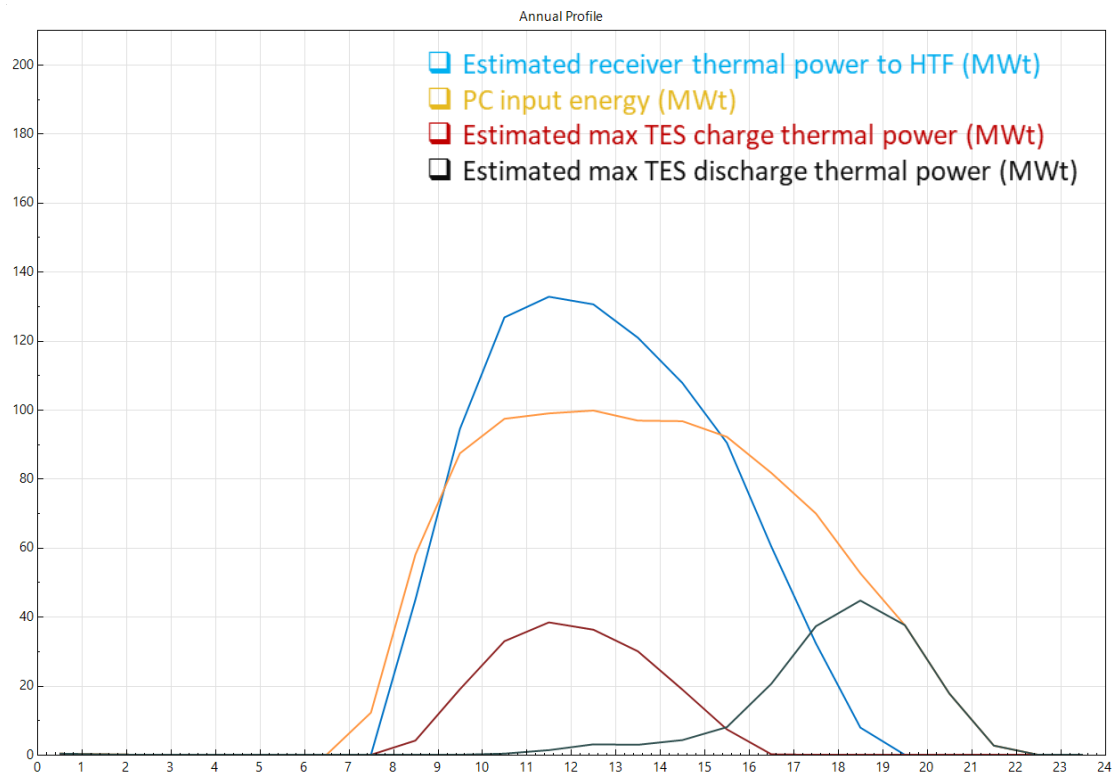
Σχήμα 4- 5. Υπό διερεύνηση σημεία εγκατάστασης του ηλιακού πύργου, μέσω του Google Earth Pro.



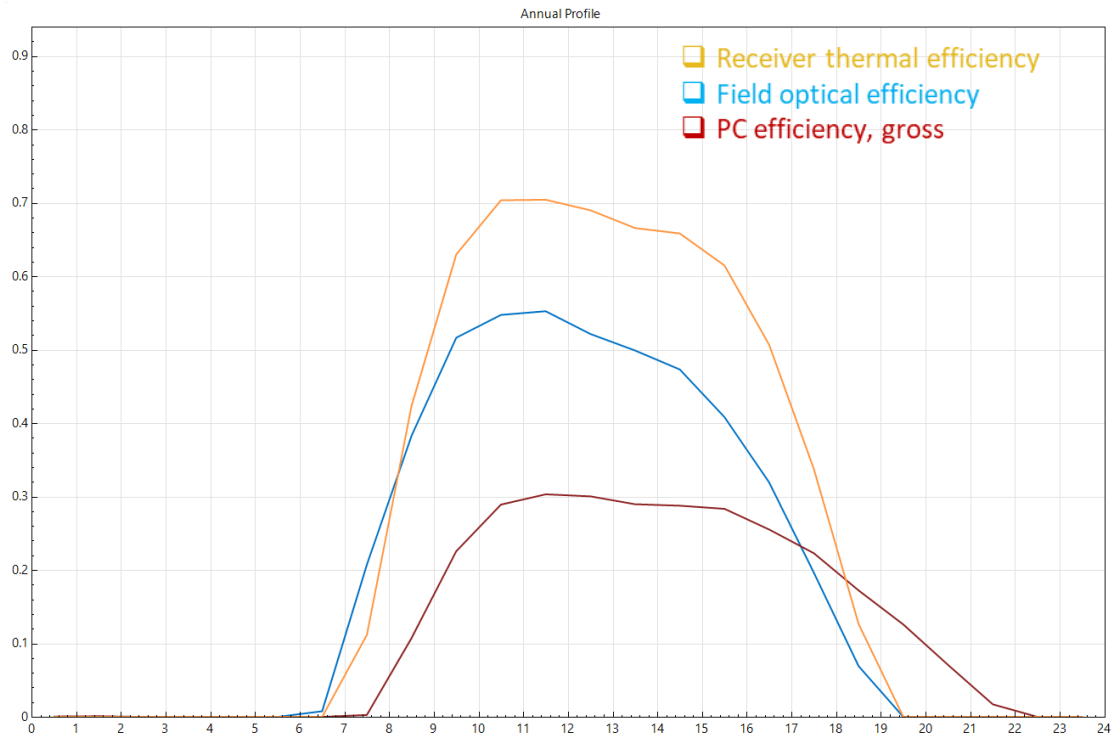
Σχήμα 4- 6. Υπό διερεύνηση σημεία εγκατάστασης του ηλιακού πύργου, μέσω του Google Earth Pro.



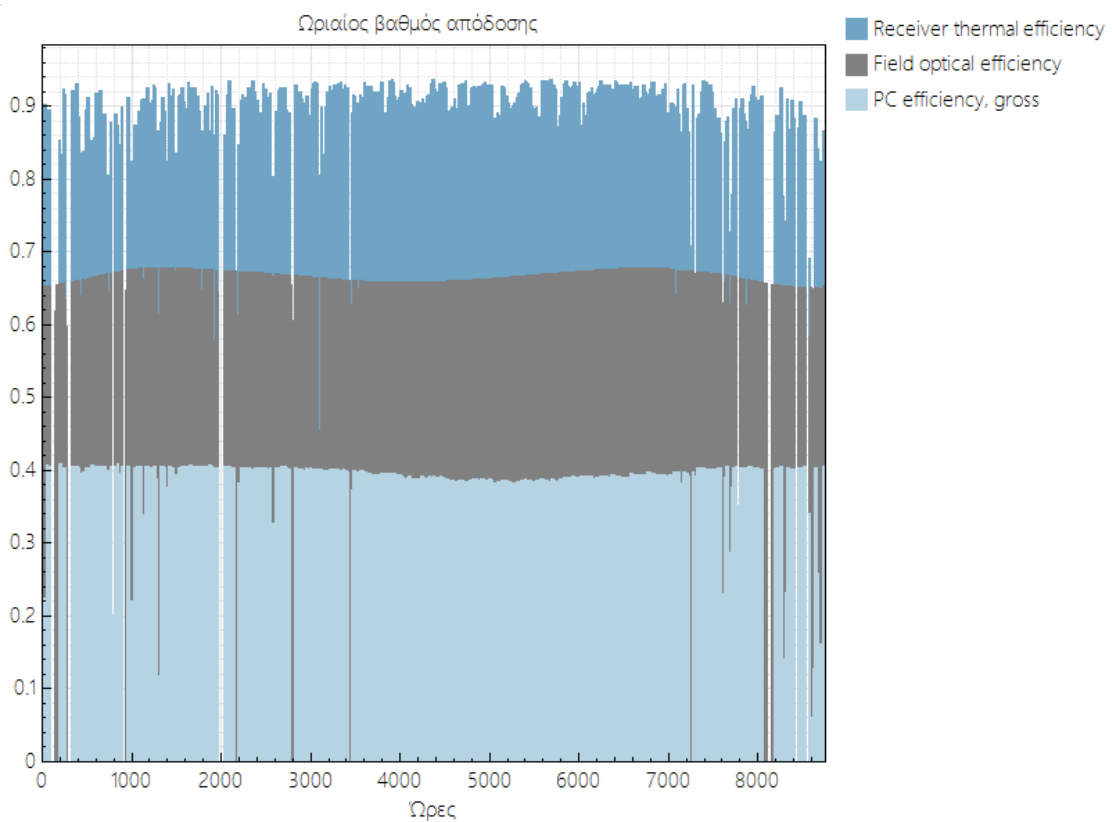
Σχήμα 4- 7. Η μέση ετήσια προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο ηλιοστατικό πεδίο(MWt), η μέση ετήσια προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο δέκτη (MWt), η μέση ετήσια θερμική ενέργεια απορροφώμενη από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt) και η μέση ετήσια θερμική ενέργεια εισόδου του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος (MWt) για την μέση ημέρα ενός έτους .



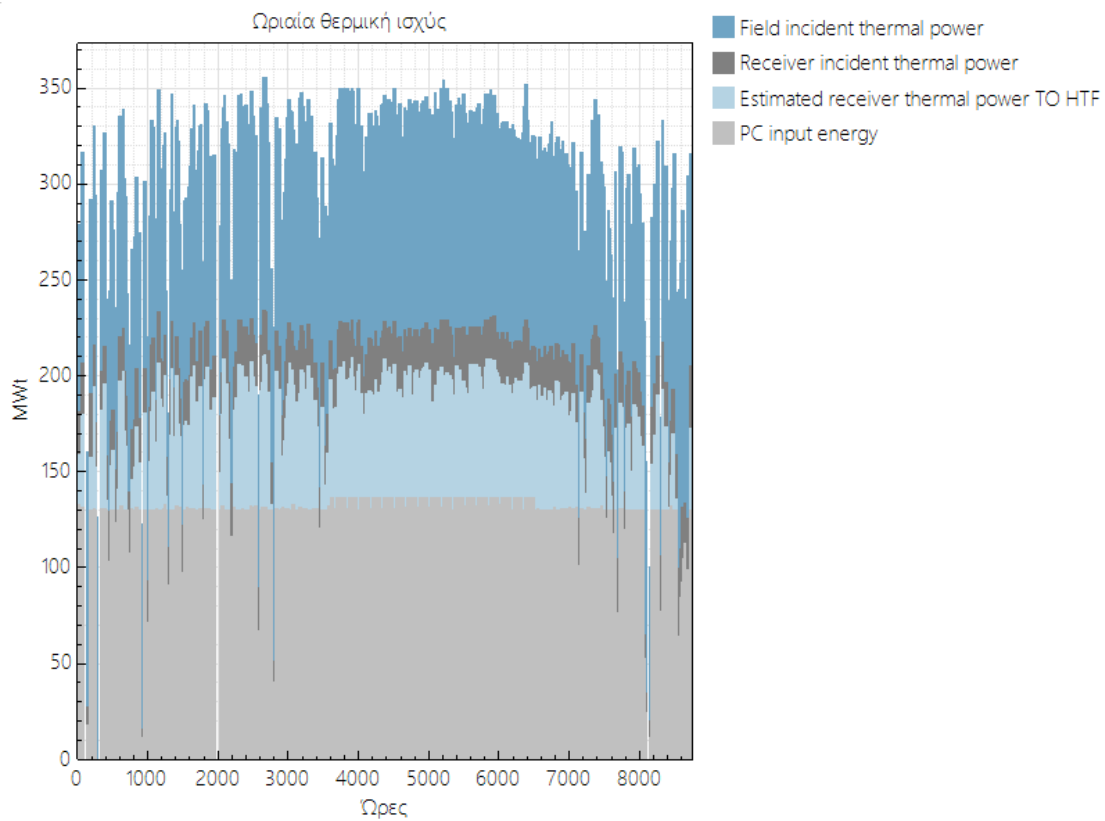
Σχήμα 4- 8. Η μέση ετήσια θερμική ενέργεια απορροφόμενη από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt), η μέση ετήσια θερμική ενέργεια εισόδου του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος (MWt), η μέση ετήσια φόρτιση θερμικής ισχύος του δοχείου αποθήκευσης (MWt) και η μέση ετήσια αποφόρτιση θερμικής ισχύος του δοχείου αποθήκευσης (MWt) για την μέση ημέρα ενός έτους.



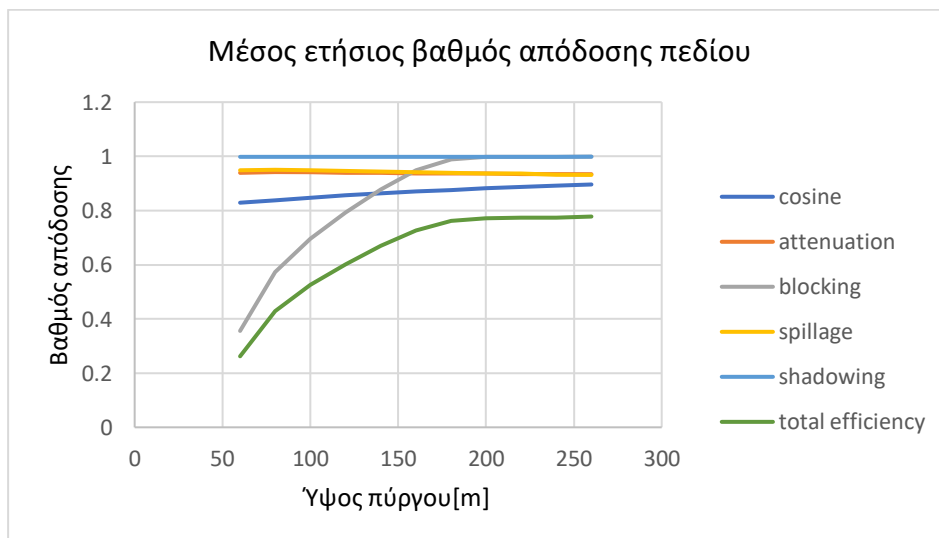
Σχήμα 4- 9. Ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του δέκτη, ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου και ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου για την μέση ημέρα ενός έτους.



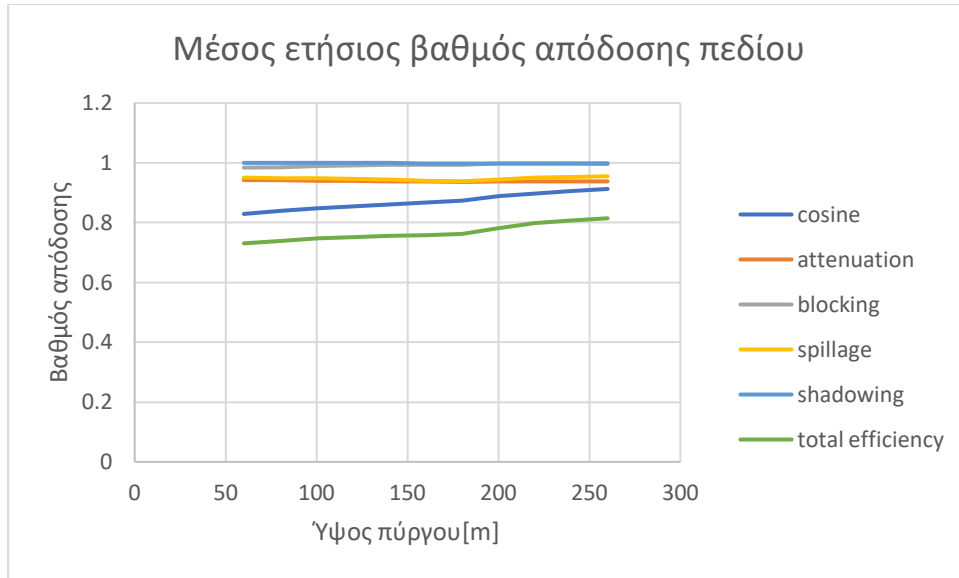
Σχήμα 4- 10. Ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, ο βαθμός απόδοσης του δέκτη και ο βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου για τις 8760 ώρες ενός έτους.



Σχήμα 4- 11. Η προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο ηλιοστατικό πεδίο (MWt), η προσπίπτουσα θερμική ενέργεια στο δέκτη (MWt), η απορροφόμενη θερμική ενέργεια από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (MWt) και η θερμική ενέργεια εισόδου του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος (MWt) για τις 8760 ώρες ενός έτους.



Σχήμα 4- 12. Μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης συνημιτόνου, ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, σκίασης, παρεμπόδισης, διαρροής για όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 4- 13. Μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης συνημιτόνου, ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, σκίασης, παρεμπόδισης, διαρροής για όλες τις περιπτώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρήθηκε εις βάθος διείσδυση στην «καρδιά» των ΑΠΕ, στα ηλιακά θερμικά συστήματα και πιο συγκεκριμένα στα συστήματα κεντρικού δέκτη. Αφού παρουσιάστηκε μια σύντομη αναφορά στα χαρακτηριστικά των τεσσάρων κατηγοριών συγκεντρωτικής τεχνολογίας ώστε να τεθεί το γενικό θεωρητικό πλαίσιο της υπόθεσης, στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα λογισμικά και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Η πολυπλοκότητα -σύμφωνα με τη βιβλιογραφία- που συνοδεύει μια διάταξη ηλιακού πύργου επιβεβαιώνεται σε απόλυτο βαθμό. Κάτι τέτοιο αποτυπώνεται όχι τόσο από την διαδικασία της προσομοίωσης αυτή κάθε αυτή αλλά κυρίως από την προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων, κατά την οποία παρατίθενται μια σειρά παραγόντων που επιδρούν ή δύναται να επιδράσουν στην αποδιδόμενη στο δίκτυο ηλεκτρική ισχύ. Οι απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην συνολική συμπεριφορά μια διάταξης κεντρικού δέκτη και όπως διαπιστώθηκε μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου επισφραγίζονται από την σχεδίαση του πεδίου. Η σωστή τοποθέτηση των ηλιοστατών εντός του πεδίου στην πυραμίδα ιεράρχησης προτεραιοτήτων καταλαμβάνει την κυρίαρχη θέση. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη, δίχως να επηρεάζουν δραματικά την ενεργειακή συνεισφορά ενός σταθμού κεντρικού δέκτη, οφείλουν να υπακούν σε συγκεκριμένα κατασκευαστικά πρότυπα αναφορικά με τις διαστάσεις του, στα οποία η πρωθύστερη ερευνητική δραστηριότητα έχει καταλήξει επιτυχώς.

Είναι γεγονός πως η ανάπτυξη οποιουδήποτε τεχνολογικού κλάδου προϋποθέτει την ύπαρξη λογισμικών ικανών να μοντελοποιήσουν σωστά και να προσομοιώσουν ικανοποιητικά τη λειτουργία της υπό διερεύνηση διάταξης. Η αιτία είναι προφανής και έχει άμεση σύνδεση με την οικονομική βιωσιμότητα του οποιοδήποτε εγχειρήματος. Ο γενικός αυτός κανόνας στην περίπτωση των ηλιακών πύργων ενισχύεται ακόμη περισσότερο εξ αιτίας του υψηλότατου κόστους κατασκευής μιας ηλιοθερμικής διάταξης κεντρικού δέκτη.

Η παρούσα εργασία επιβεβαίωσε την αξιοπιστία των λογισμικών του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμης Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory-NREL) των ΗΠΑ. Επιπρόσθετα η εισαγωγή της τοπογραφίας του ηλιοστατικού πεδίου και η λεπτομερέστερη δυνατή γνώση των παραμέτρων των τριών υποσυστημάτων οδηγεί σε αισθητή βελτίωση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Σαφέστατα όμως δεν παύει η ανάγκη ευκολότερης πρόσβασης στα χαρακτηριστικά των διαφόρων ηλιοθερμικών σταθμών που βρίσκονται σε λειτουργία, ώστε να υποβοηθείται η προσπάθεια μελέτης τους από τρίτους.

Η τεχνολογία των συστημάτων κεντρικού δέκτη παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Η ανάγκη αντικατάστασης της καύσης ορυκτών καυσίμων με τη χρήση

ΑΠΕ για την παραγωγή ισχύος συνιστά μονόδρομο. Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των συστημάτων κεντρικού δέκτη μπορούν να παίξουν καταλυτικό ρόλο σε αυτό το εγχείρημα. Αυτό όμως δε σημαίνει πως παύει να υπάρχει η υποχρέωση για περαιτέρω βελτιώσεις οι οποίες αφενός θα αυξήσουν την αξιοπιστία τους και αφετέρου θα μεγιστοποιήσουν την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.

Η βελτιστοποίηση του δέκτη και η συνεπακόλουθη μείωση τόσο των απωλειών του όσο και του κόστους του μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μελέτης. Με το παράδειγμα του Crescent Dunes ζωντανό, η ορθή ενσωμάτωση του δοχείου αποθήκευσης στη διαδικασία παραγωγής ισχύος οφείλει να βρεθεί στο επίκεντρο οιαδήποτε ερευνητικής δραστηριότητας. Το ίδιο ισχύει και για τον υβριδισμό των ηλιοθερμικών διατάξεων κεντρικού δέκτη. Η αντικατάσταση του κύκλου Rankine με κάποιον άλλο πιο αποδοτικό θερμοδυναμικό κύκλο είναι μια ακόμα πτυχή που επιδέχεται μελέτη. Για παράδειγμα το εγχείρημα χρήσης υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να οδηγήσει σε διπλασιασμό του βαθμού απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου με ότι και αν αυτό συνεπάγεται.

Είναι σημαντικό λοιπόν η έρευνα γύρω από την τεχνολογία των ηλιακών πύργων να ενταθεί στο ερχόμενο χρονικό διάστημα και με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος, την κοινωνική ευημερία και την αξιοποίηση της προνομιακής θέσης της Ελλάδας τα θεωρητικά επιτεύγματα να βρουν πρακτική εφαρμογή στην ελληνική επικράτεια.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

- [1] <https://www.eea.europa.eu/el/themes/energy/intro>
- [2] <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/56184f1e-1d89-11ea-95ab-01aa75ed71a1/language-en>
- [3] Ciscar, J.C., Feyen, L., Soria, A., Lavalle, C., Raes, F., Perry, M., Nemry, F., Demirel, H., Rozsai, M., Dosio, A., Donatelli, M., Srivastava, A., Fumagalli, D., Niemeyer, S., Shrestha, S., Ciaian P, Himics M, Van Doorslaer B, Barrios S, Ibáñez N, Forzieri G, Rojas R, Bianchi A, Dowling, P., Camia, A., Libertà, G., San Miguel, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Barredo, JI., Paci, D., Pycroft, J., Saveyn, B., Van Regemorter, D., Revesz, T., Vandyck, T., Vrontisi, Z., Baranzelli, C., Vandecasteele, I., Batista e Silva, F. and Ibarreta, D. (2014) Climate Impacts in Europe. The JRC PESETA II Project. JRC Scientific and Policy Reports, EUR 26586EN.
- [4] Watkiss, P., Troeltzsch, J. and McGlade, K. (2018) The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on State of Knowledge and Key Research Gaps. Policy brief by the COACCH project.
- [5] Quitzow, R., Bersalli, G., Eicke, L., Jahn, J., Lilliestam, J., Lira, F., Marian, A., Süsser, D., Thapar, S., Weko, S., Williams, S. and Xue, B. (2021) The COVID-19 crisis deepens the gulf between leaders and laggards in the global energy transition. Energy Research & Social Science, Volume 74, 101981, ISSN 2214-6296, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101981>.
- [6] https://www.eea.europa.eu/themes/energy/indicators#c7=all&c5=all&c10=&c13=20&b_start=0
- [7] <http://www.fs-unesp-centre.org>
- [8] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics
- [9] <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- [10] <https://www.solarpaces.org/how-csp-works/>
- [11] Behar, O., Khellaf, A. and Mohammedi, K. (2013) "[A review of studies on central receiver solar thermal power plants](#)," [Renewable and Sustainable Energy Reviews](#), Elsevier, vol. 23(C), pages 12-39.
- [12] <https://sam.nrel.gov/>
- [13] <https://www.nrel.gov/csp/solarpilot.html>

- [14] <https://www.google.com/intl/el/earth/versions/>
- [15] <http://www.nurenergie.com/index.php/english/projects/greece>
- [16] Suyanto, Hantoro, R., Suharto, A., Saleh, R. and Reynaldi, T. (2019) A review of linear Fresnel reflector technology for heating sulphur liquid in nickel processing industry. AIP Conference Proceedings. 2088. 020034. 10.1063/1.5095286.
<https://doi.org/10.1063/1.5095286>
- [17] <https://williampaulbell.wordpress.com/tag/linear-fresnel-reflector/>
- [18] <https://shaikmohasin.wordpress.com/tag/parabolic-dish-system/>
- [19] <http://anushreegreentech.com/Solar-Parabolic-Dish-Concentrator.html>
- [20] <https://www.golem.de/1110/86865.html>
- [21] System Advisor Model (SAM).
https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/sam-help-2020-11-29r2.pdf
- [22] Wagner, M. (2008) Simulation and predictive performance modeling of utility-scale central receiver system power plants.
- [23] Wagner, M.J., Newman, A., Morton, D. and Leyffer, S. (2021) Concurrent Optimization of Capital Cost and Expected O&M. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP- NREL/TP-5700-79093.
<https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79093.pdf>.
- [24] Wei, X., Lu, Z., Yu, W. and Wang, Z. (2010) A new code for the design and analysis of the heliostat field layout for power tower system. Solar Energy - SOLAR ENERG. 84. 10.1016/J.SOLENER.2010.01.020.
- [25] <https://www.powerfromthesun.net/book.html?fbclid=IwAR1iBen7JllvtfLvu1-lbLckNZ-6SzAmd2jYrLMMz2rKlrvxONlwturu-l>
- [26] <https://solarpaces.nrel.gov/project/ivanpah-solar-electric-generating-system>
- [27] https://en.wikipedia.org/wiki/Ivanpah_Solar_Power_Facility
- [28] <https://thetechjournal.com/green-tech/worlds-largest-solar-thermal-plant.shtml>
- [29] <http://www.brightsourceenergy.com/update-from-ivanpah---may-2013?fbclid=IwAR3ltDrkYjbHKufTm2zbrFULKoKaeODG4A2LffzGHvwLLSjZgV6cgAAfqrU#.YQQUsI4zZPZ>
- [30] https://www.researchgate.net/figure/110-MW-e-Crescent-Dunes-Solar-Energy-Project-in-Tonopah-Nevada-with-10-hours-of-thermal_fig5_331993959
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/Crescent_Dunes_Solar_Energy_Project

- [32] <https://www.reviewjournal.com/opinion/editorials/editorial-failed-solar-project-offers-warning-2091618/>
- [33] <https://jpt.spe.org/becoming-obsolete-how-high-tech-solar-plant-found-its-way-bankruptcy>
- [34] <https://pv-magazine-usa.com/2020/08/03/post-bankruptcy-and-doe-loan-owner-of-crescent-dunes-wants-csp-plant-online-by-years-end/>
- [35] Boretti, A., Nayfeh, J. and Al-Kouz, W. (2020) Validation of SAM Modeling of Concentrated Solar Power Plants, *Energies* 13, no. 8: 1949.
<https://doi.org/10.3390/en13081949>
- [36] Σαατσάκης, Γ.Ε. (2012) *ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΥΡΓΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο