



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική εργασία με θέμα:

«ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ  
ΠΥΡΓΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ  
ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ»

Σαατσάκης Γ. Ελευθέριος



Επιβλέπων Καθηγητής: Καρέλλας Σωτήριος

Αθήνα, 2012

*I have no doubt that we will be successful in harnessing the sun's energy....  
If sunbeams were weapons of war, we would have had solar energy  
centuries ago.*

*Sir George Porter, 26 August 1973*

(Υπογραφή)

.....  
Σαατσάκης Ελευθέριος

**Copyright © ΣΑΑΤΣΑΚΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ, 2012.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

## *Ευχαριστίες...*

Η παρούσα διπλωματική εργασία, που ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των θερμικών ηλιακών συστημάτων ενέργειας, πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ατμοκινητήρων και λεβήτων του Ε.Μ.Π., υπό την επίβλεψη του επίκουρου καθηγητή κ. Σωτήριου Καρέλλα και αποτελεί την πρώτη εις βάθος ενασχόληση μου ,ως φοιτητή μηχανολόγου μηχανικού, με κάποιο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Θα ήθελα, λοιπόν, να ευχαριστήσω αρχικά τον κ. Καρέλλα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα, αλλά και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Σημαντική η πρωτοβουλία του, μεταξύ άλλων, να μου επιτρέψει την μελέτη της διπλωματικής μου εργασίας στο εργαστήριο καθημερινά, με τα πλεονεκτήματα που αυτό συνεπάγεται.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στο εξαιρετικό προσωπικό του εργαστηρίου για το άριστο και πραγματικά ευχάριστο κλίμα συνεργασίας. Συγκεκριμένα, ευχαριστώ πολύ τον διπλωματούχο μηχανολόγο μηχανικό Πανούση Γεώργιο που συνεισέφερε στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας με καταλυτικής σημασίας συμβουλές αλλά και ιδέες, καθώς και τον διπλωματούχο μηχανολόγο μηχανικό Κουρκούμπα Δημήτριο για τις πολύτιμες υποδείξεις πάσης φύσεως σχετικά με την εργασία. Χωρίς την συμβολή των προαναφερθέντων η περάτωση της διπλωματικής μου θα ήταν πολύ δυσκολότερη.

Ξεχωριστή αναφορά θα ήθελα να κάνω στον διπλωματούχο φοιτητή Iia Krivoruk, απόφοιτο μηχανολόγο μηχανικό του Technion Israel Institute of Technology, για την βοήθεια που μου παρείχε στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της εφαρμογής CSPsim ,που ο ίδιος δημιούργησε σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του, την οποία και χρησιμοποίησα.

Σε καμία περίπτωση δεν μπορώ να ξεχάσω τους φίλους μου αλλά και την κοπέλα μου που ήταν μαζί μου σε κάθε ευχάριστη αλλά και δύσκολη στιγμή.

Τελευταίοι αλλά ίσως και οι πιο σημαντικοί, οι γονείς μου, με την ακούραστη πνευματική αλλά και υλική υποστήριξή τους σε κάθε τομέα της ζωής μου μέχρι σήμερα. Πραγματικά τους ευχαριστώ.

Σαατσάκης Ελευθέριος

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	3
Περιεχόμενα .....	4
Περίληψη .....	6
Summary .....	8
<b>1. Εισαγωγή στην Ηλιακή Ενέργεια και τις Τεχνολογίες Εκμετάλλευσής της .....</b>	<b>10</b>
1.1 Ηλιακή ενέργεια .....	10
1.1.1 Ενεργειακό Πρόβλημα- Εθνικός Στόχος Α.Π.Ε. ....	12
1.1.2 Ηλιακές Γωνίες .....	15
1.1.3 Ηλιακή Ακτινοβολία .....	17
1.1.4 Ηλιακό Δυναμικό .....	18
1.2 Εκμετάλλευση Ηλιακής Ενέργειας .....	20
1.2.1 Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Εκμετάλλευσης Ηλιακής Ενέργειας .....	20
1.2.2 Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα .....	23
1.2.3 Νομοθεσία για Θερμικά Ηλιακά Συστήματα (ΘΗΣ) .....	28
<b>2. Πύργοι Ηλιακής Ισχύος .....</b>	<b>29</b>
2.1 Αρχή Λειτουργίας .....	29
2.2 Πλεονεκτήματα έναντι άλλων Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων .....	30
2.3 Υποσυστήματα του Πύργου Ηλιακής Ισχύος .....	31
2.3.1 Ηλιοστατικό Πεδίο .....	32
2.3.2 Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης .....	34
2.3.3 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	39
2.3.4 Σύστημα Αποθήκευσης .....	42
2.3.5 Σύστημα Εφεδρικής Καύσης .....	47
2.4 Πύργοι Ηλιακής Ισχύος ανά τον Κόσμο .....	49
<b>3. Απόδοση Εγκατάστασης Πύργου Ηλιακής Ισχύος .....</b>	<b>53</b>
3.1 Αξιολόγηση Εγκαταστάσεων σύμφωνα με τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) .....	53
3.2 Απώλειες Πεδίου Ηλιοστατών .....	54
3.3 Απώλειες Κεντρικού Δέκτη .....	65
3.4 Λοιπές Απώλειες .....	69

3.5 Απόδοση Θερμοδυναμικού Κύκλου και Γεννήτριας .....	71
<b>4. Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Ηλιοστατικού Πεδίου .....</b>	<b>73</b>
4.1 Σημασία σωστού Σχεδιασμού και Βελτιστοποίησης του Ηλιοστατικού Πεδίου .....	73
4.2 Επιλογή κατάλληλης Διάταξης Ηλιοστατών .....	73
4.3 Πεδίο Ηλιοστατών με κεντρικό Ανακλαστήρα (Beam Down Optics) .....	76
4.4 Τύποι Βόρειου Ηλιοστατικού Πεδίου .....	77
4.5 Παράμετροι Σχεδιασμού και Επίδραση αυτών στην Απόδοση του Πεδίου .....	79
4.6 Σχεδιασμός ενός τυπικού Πεδίου Ηλιοστατών Βόρεια του Πύργου .....	88
4.7 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Ηλιοστατικού Πεδίου .....	97
<b>5. Μοντελοποίηση εγκατάστασης Πύργου Ηλιακής Ισχύος 20 MW στην περιοχή του Αθρινόλακκου –Κρήτης .....</b>	<b>100</b>
5.1 Κατάστρωση του Πλάνου Μοντελοποίησης της Εγκατάστασης .....	100
5.2 Δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας της Περιοχής .....	102
5.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Ηλιοθερμικού Σταθμού .....	104
5.4 Περιγραφή των Κυκλωμάτων Νερού-Ατμού της Εγκατάστασης μέσω του Προγράμματος IPSEpro® και της Εφαρμογής MDK® .....	105
5.4.1 Κύκλωμα χωρίς Αναθέρμανση .....	106
5.4.2 Κύκλωμα με Αναθέρμανση .....	110
5.5 Χρήση της Εφαρμογής CSPsim® για τη Δημιουργία του Ηλιοστατικού Πεδίου .....	113
5.6 Χρήση του Προγράμματος Tonatiuh® για την Προσομοίωση της Λειτουργίας του Ηλιοστατικού Πεδίου .....	115
5.7 Έλεγχος Σύγκλισης των Αποτελεσμάτων και Ολοκλήρωση του Μοντέλου .....	120
5.8 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος κατά τη Διάρκεια της Τυπικής Θερινής και Χειμερινής Ημέρας .....	125
5.9 Σύγκριση Αποτελεσμάτων με την υπάρχουσα Εγκατάσταση Πύργου Ηλιακής Ισχύος PS20 στην Ισπανία .....	133
5.10 Ενεργειακή Σύγκριση Υδρόψυκτου με Αερόψυκτο Συμπυκνωτή στην Εγκατάσταση του Αθρινόλακκου .....	137
<b>6. Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....</b>	<b>155</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>157</b>

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εις βάθος κατανόηση της λειτουργίας των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη ή αλλιώς πύργων ηλιακής ισχύος. Συγκεκριμένα, ερευνάται η συμπεριφορά τέτοιων εγκαταστάσεων από τη στιγμή που οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν σε αυτές ,έως τη στιγμή που αποδίδεται στο δίκτυο καθαρή ηλεκτρική ενέργεια. Επιπροσθέτως, μελετώνται οι παράγοντες ,από τους οποίους εξαρτάται η παραγόμενη ισχύς, κυρίως σε ότι αφορά στη διάταξη των ηλιοστατών στο πεδίο αλλά και στα κυκλώματα νερού-ατμού. Γίνεται τέλος μια προσπάθεια προσομοίωσης μίας εγκατάστασης ηλιακού πύργου ισχύος 20MW στην Κρήτη ,στην περιοχή του Αθρινόλακκου, η οποία και συγκρίνεται με την ήδη εν λειτουργία ηλιοθερμική μονάδα κεντρικού δέκτη PS20 στην Σεβίλλη προς εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αξιοπιστία της. Αναλυτικά η εργασία διαρθρώνεται στα ακόλουθα κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες γύρω από την ηλιακή ενέργεια και αναφέρεται ο εθνικός στόχος των Α.Π.Ε.. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρόποι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας με τα διαφορετικά ήδη συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων καθώς και η νομοθεσία σχετικά με αυτά.

Στο δεύτερο κεφάλαιο προσεγγίζεται και ουσιαστικά το αντικείμενο της παρούσας εργασίας ,δηλαδή οι πύργοι ηλιακής ισχύος και τα τμήματα από τα οποία αποτελούνται. Γίνεται ,επίσης, αναφορά στα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας έναντι των υπολοίπων τεχνολογιών συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας καθώς και παρουσιάζονται οι ήδη εγκατεστημένες εγκαταστάσεις πύργων ηλιακής ενέργειας ανά τον κόσμο.

Το τρίτο κεφάλαιο έχει σκοπό να αναδείξει τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος κεντρικού ηλιακού δέκτη, δηλαδή αναφέρεται στις απώλειες και τους βαθμούς απόδοσης κάθε τμήματος μιας τέτοιας ηλιοθερμικής εγκατάστασης. Στην αρχή του κεφαλαίου παρουσιάζεται απόσπασμα από τον οδηγό αξιολόγησης της P.A.E. για την απόδοση των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.

Προχωρώντας, συναντάμε στο τέταρτο κεφάλαιο την περιγραφή του τρόπου σχεδιασμού και βελτιστοποίησης της διάταξης του πεδίου ηλιοστατών του πύργου. Γίνεται εμβάθυνση στο συγκεκριμένο τμήμα της εγκατάστασης και απαντώνται πολλές ερωτήσεις σχετικά με τις παραμέτρους που επιδρούν στο σχεδιασμό ενός τέτοιου πεδίου. Τέλος παρατίθεται ένα παράδειγμα σχεδιασμού ενός τυπικού βόρειου ηλιοστατικού πεδίου βήμα προς βήμα για την καλύτερη κατανόηση του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, που αποτελεί και τον πυρήνα της εν λόγω εργασίας, γίνεται προσομοίωση της λειτουργίας ενός ηλιοθερμικού σταθμού 20MWe με πύργο ηλιακής ισχύος στην περιοχή του Αθρινόλακκου στην Κρήτη. Μέρος των τεχνικών χαρακτηριστικών της εγκατάστασης ,εκτός των κυκλωμάτων νερού-ατμού, επιλέγονται σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλιακού πύργου ισχύος PS20 στην Σεβίλλη της Ισπανίας, με τον οποίο και γίνεται τελικά η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας για τη συγκεκριμένη τοποθεσία, τα κυκλώματα νερού-ατμού της εγκατάστασης με τη βοήθεια του προγράμματος IPSEpro® και της εφαρμογής MDK®, ο τρόπος προσομοίωσης του ηλιοστατικού πεδίου αλλά και οι παράμετροι που τέθηκαν με την εφαρμογή CSPsim® και το πρόγραμμα Tonatiuh®.

Επιπρόσθετα, σχεδιάζονται τα διαγράμματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (Pel-t) κατά τη διάρκεια της τυπικής καλοκαιρινής και χειμωνιάτικης μέρας. Τέλος εξετάζεται, από την ενεργειακή σκοπιά, η επιλογή χρήσης υδρόψυκτου ή αερόψυκτου συμπυκνωτή για την εγκατάσταση στην συγκεκριμένη τοποθεσία.

Τελευταίο βρίσκεται το έκτο κεφάλαιο ,στο οποίο παρατίθενται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται θέματα ,που προκύπτουν από αυτή, για μελλοντική διερεύνηση.

**Λέξεις-κλειδιά:** Ηλιακή Ενέργεια, Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα, Ηλιοθερμικές Εγκαταστάσεις, Πύργοι Ηλιακής Ισχύος, Πεδίο Ηλιοστατών, Ηλιοστάτης, Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης, PS20, κύκλος Rankine, Σύστημα Αποθήκευσης, Σύστημα Εφεδρικής Καύσης, Επίδραση Συνημιτόνου, Ατμοσφαιρική Διαπερατότητα, Σκίαση και Παρεμπόδιση.



## *Summary*

The main purpose of this thesis is an in-depth understanding of the functioning of central solar receiver systems also referred to as solar tower power plants. Specifically, the behavior of such plants from the moment that the incident sunbeams hit them until pure electric power is provided to the network is dealt with. Additionally the factors which determine the power output are examined, mainly concerning the arrangement of heliostats in the field but also the water-steam circuits. Finally, an attempt is made to simulate a solar power tower plant of 20MW in Crete, at the location Atherinolakkos, which is compared with the already operating central solar receiver power plant PS20 in Seville, in order to draw conclusions about its reliability. In detail this thesis is arranged in the following way:

In the first chapter an introduction is made to the basic concepts of solar energy, and the national target of RAE (Regulatory Authority for Energy) is mentioned. After that, the ways of harnessing solar energy by different concentrating solar power systems (CSP) is presented, as well as the legislation regarding them.

The second chapter basically approaches the subject of this work, namely solar power towers and their subsystems. There is also reference to the advantages of this technology over other technologies of concentrating solar power. A table with the already existing solar tower power plants worldwide is also presented.

The third chapter is intended to highlight the factors that influence the performance of a central solar receiver system. Consequently, it refers to losses and efficiencies of each part of such a solar power plant. At the beginning of the chapter, a part of RAE's evaluation guide is presented regarding the concentrating solar systems.

Moving to the fourth chapter, one comes across the description of the designing and optimization patterns of a heliostat field's layout. This chapter goes further in this part of the solar tower power plant and answers many questions about the parameters that affect its design. Finally, an example of designing a typical north heliostat field is given, step by step, for its better understanding.

In the fifth chapter, which is the core of this work, the operation of a solar-thermal power station of 20MWe with solar power tower is simulated at the location Atherinolakkos in Crete. Parts of the technical characteristics of the plant, except for water-steam circuit, are selected according to the technical characteristics of the solar tower PS20 in Seville, Spain, with which its results are eventually compared. Moreover, solar irradiation data for this location is presented, as well as the water-steam circuits of the plant, thanks to the software IPSEpro® and its application MDK®. Simulation of the heliostat field during the day is done with the program Tonatiuh® and the help of the application CSPsim®. The parameters set at them are also mentioned. Additionally, the electric output power diagrams (Pel-t) are plotted for a typical summer and winter day. Finally the choice of using water-cooled or air-cooled condenser for the solar-thermal power plant at this location is examined, from the energy point of view.

Last is the sixth chapter, which refers to the conclusions of the thesis and the suggested issues that arise from it for future investigation.

**Key-words:** Solar Energy, Concentrating Solar Power Systems (CSP), Solar Thermal Power Plants, Solar Power Towers, Heliostat Field, Heliostats, Central Solar Receiver, PS20, Rankine cycle, Storage System, Backup Combustion System, Cosine Effect, Atmospheric Attenuation, Shadowing and Blocking.

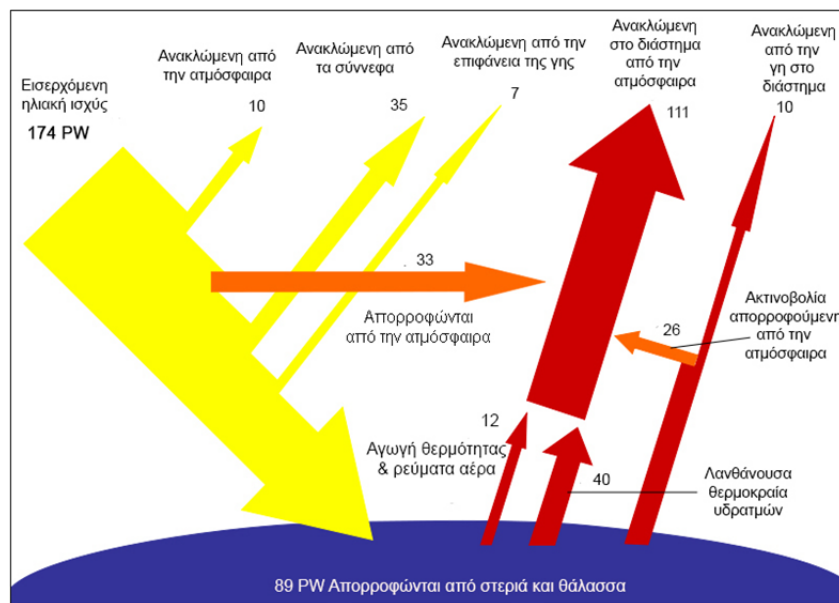
## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

# Εισαγωγή στην Ηλιακή Ενέργεια και τις Τεχνολογίες Εκμετάλλευσής της

### 1.1 Ηλιακή ενέργεια

Ο ήλιος είναι το αστέρι στο κέντρο του ηλιακού μας συστήματος, με σχεδόν τέλεια σφαιρικό σχήμα. Αποτελείται από καυτό πλάσμα, με θερμοκρασία μέλανου σώματος 5777K, συνυφασμένο με μαγνητικά πεδία και έχει διάμετρο 1.392.000 χιλιόμετρα, περίπου 109 φορές αυτή της Γης. Η μάζα του (περίπου  $2 \times 10^{30}$  κιλά, 330.000 φορές αυτή της Γης) αντιπροσωπεύει περίπου το 99,86% της συνολικής μάζας του ηλιακού συστήματος. Η απόσταση του από τη γη υπολογίζεται περίπου στα 149,6 εκατομμύρια χιλιόμετρα, γεγονός που σημαίνει ότι το φως του, και επακόλουθα η ενέργεια του, κάνει σχεδόν 8 λεπτά και 19 δευτερόλεπτα να φτάσει στην επιφάνεια της γης. Όσο αφορά στη χημική του σύσταση, περίπου τα τρία τέταρτα της μάζας του ηλίου αποτελούνται από υδρογόνο, ενώ το υπόλοιπο είναι κυρίως ήλιο. Σε πολύ μικρότερες περιεκτικότητες περιέχει βαρύτερα στοιχεία όπως οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, νέον, σίδηρο και άλλα. [1]

Η ενέργεια που παράγεται από τον ήλιο ονομάζεται ηλιακή ενέργεια και είναι ουσιαστικά το προϊόν της ακατάπαυστης πυρηνικής σύντηξης του υδρογόνου σε ήλιο, η οποία λαμβάνει χώρα στον πυρήνα του. Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται προς κάθε κατεύθυνση με τη μορφή ακτινοβολίας. Μονάδα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το  $W/m^2$ . Στην επιφάνεια του ήλιου παράγεται ενέργεια ίση με  $3,846 \times 10^{20}$  MW, ωστόσο λόγω της τεράστιας απόστασης, στην επιφάνεια της ανώτερης ατμόσφαιρας της γης φτάνουν μόνο περίπου  $1,74 \times 10^{14}$  KW ( $\sim 1368 W/m^2$ ). Από αυτή την ποσότητα ενέργειας, σχεδόν το 30% αντανακλάται πίσω στο διάστημα, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από τους ωκεανούς, τα σύννεφα, και την ξηρά. Αναλυτικά οι απορροφήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στην πορεία της προς την επιφάνεια της γης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



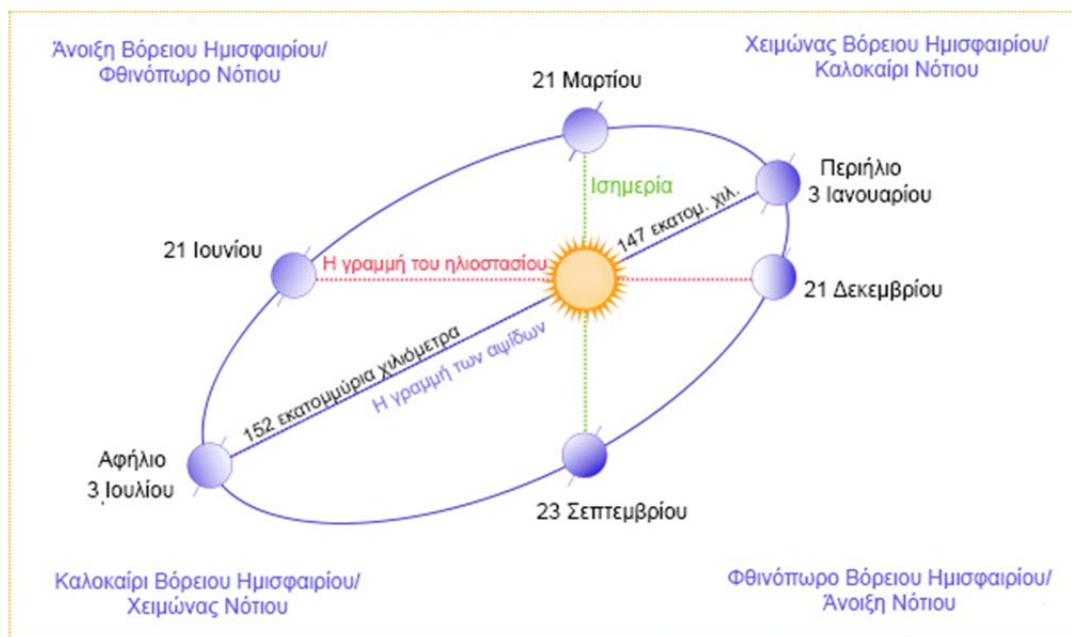
Σχήμα 1.1 Προσπίπτουσα Ηλιακή Ακτινοβολία. [2]

Παρατηρούμε, ότι τελικά στην επιφάνεια της γης φτάνουν  $0,89 \times 10^{14}$  KW ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή περίπου η μισή από αυτή που προσπίπτει στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Ωστόσο, αρκεί να αναφέρουμε ότι αυτή η ποσότητα ενέργειας είναι περίπου διπλάσια από αυτή που μπορεί να παραχθεί από όλες τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας του άνθρακα, του πετρελαίου, του φυσικού αερίου, και του εξορυγμένου ουρανού μαζί, σε ολόκληρο τον κόσμο ετησίως.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί ανά τη γη σε διάφορα γεωγραφικά μήκη και πλάτη, παρ' όλα αυτά οι τοποθεσίες κοντά στον ισημερινό έχουν σαφές προβάδισμα. [2]

Η ελλειπτική τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο, καθώς και η κλίση  $23,45^\circ$  του άξονα περιστροφής της σε σχέση με την κάθετο στην τροχιά της, παίζουν κυρίαρχο ρόλο στη θέση που βλέπει τον ήλιο ένας παρατηρητής πάνω στη γη ανά πάσα στιγμή και κατ' επέκταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της. Αυτοί οι δύο παράγοντες είναι υπεύθυνοι και για την ύπαρξη των εποχών στον πλανήτη μας. Η θέση του ηλίου είναι ένα δεδομένο που πάντα πρέπει να είναι γνωστό για τη σωστή εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την ελλειπτική τροχιά (με υπερβολική εκκεντρότητα χάριν κατανόησης) που ακολουθεί η γη γύρω από τον ήλιο, καθώς και τις διάφορες φάσεις της: περιήλιο (2-5 Ιανουαρίου), ανοιξιάτικη ισημερία (20-21 Μαρτίου), θερινό ηλιοστάσιο (20-21 Ιουνίου), το αφήλιο (4-7 Ιουλίου), φθινοπωρινή ισημερία (22-23 Σεπτεμβρίου) και χειμερινό ηλιοστάσιο (21-22 Δεκεμβρίου).



Σχήμα 1.2 Τροχιά της γης σε σχέση με τον ήλιο. [3]

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι κατά το περιήλιο παρατηρείται η μικρότερη απόσταση γης-ήλιου (147098290 χιλιόμετρα), ενώ κατά το αφήλιο η μεγαλύτερη (152098232 χιλιόμετρα). Επίσης, το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου) επιλέγεται ως επί το πλείστον ως ονομαστικό σημείο σχεδιασμού των συγκεντρωτικών ηλιακών εγκαταστάσεων για τον υπολογισμό των διαφορών μεγεθών τους. [3]

### 1.1.1 Ενεργειακό Πρόβλημα- Εθνικός Στόχος Α.Π.Ε

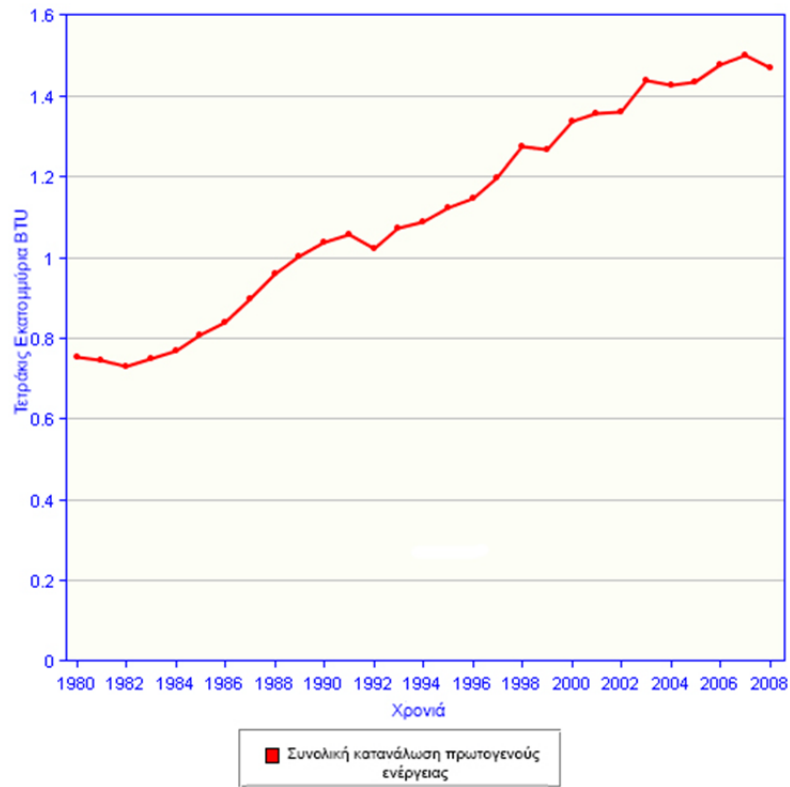
Στις μέρες μας, αλλά και γενικότερα τις τελευταίες δεκαετίες, είναι κοινή αλήθεια πως η ενεργειακή ζήτηση μιας χώρας είναι ανάλογη με την ποιότητα διαβίωσης των πολιτών της. Οι έννοιες ανάπτυξη και ζήτηση ενέργειας στις σύγχρονες κοινωνίες τείνουν να γίνουν ταυτόσημες. Δεν είναι τυχαίο που χώρες με μεγάλη ζήτηση, και συνεπακόλουθα παραγωγή ενέργειας, έχουν εξασφαλίσει σταθερότητα και ευμάρεια στον τομέα της οικονομίας.

Η αύξηση του πληθυσμού αλλά και η ανάγκη βελτίωσης του βιοτικού του επιπέδου έχει οδηγήσει, σήμερα, στην ραγδαία αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Μόνο και μόνο να αναλογιστεί κανείς τις δικές του ενεργειακές ανάγκες καθημερινά, σε σχέση με κάποια χρόνια παλαιότερα θα καταλάβει την έκταση αυτής της αλλαγής των καιρών μας.

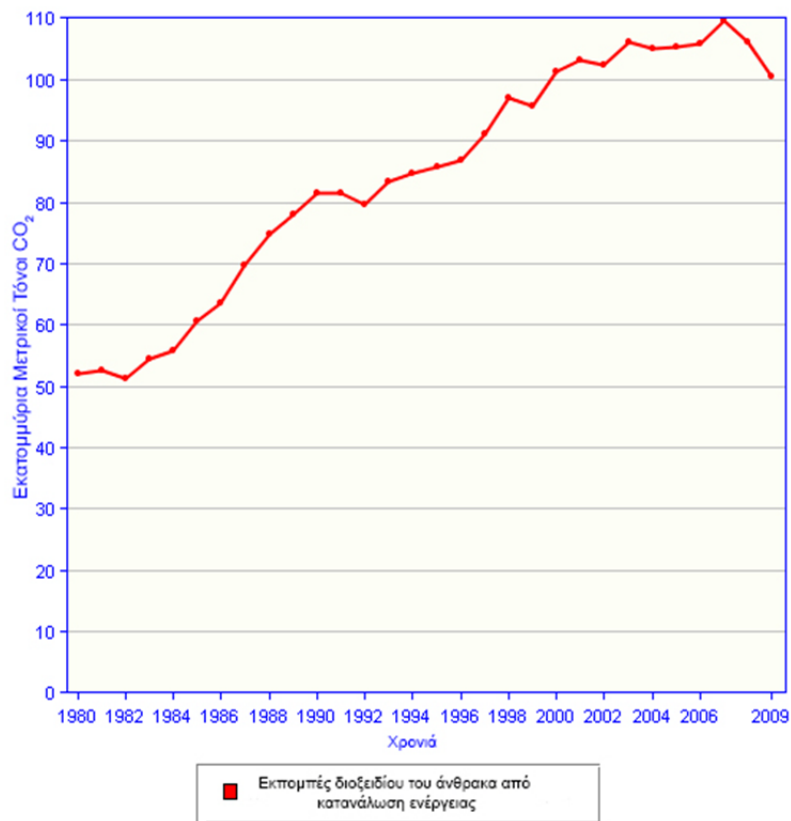
Η παραπάνω κατάσταση αρχίζει να αποτελεί ένα παγκόσμιας έκτασης πρόβλημα, αν σκεφτούμε πως τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, που αποτελούσαν μέχρι σήμερα την κύρια πηγή παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως, είναι περιορισμένα και προχωρούν με σταθερό ρυθμό στην εξάντληση τους. Ουσιαστικά, το ενεργειακό πρόβλημα, δηλαδή, οφείλεται στη σύγκρουση του αυξανόμενου ρυθμού ζήτησης ενέργειας με την μειούμενη ποσότητα διαθέσιμων ορυκτών καυσίμων. Επιπρόσθετο στοιχείο, που προσδίδει ακόμα μεγαλύτερη έκταση στο πρόβλημα, είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλείται από τις εκπομπές των προϊόντων της καύσης των ορυκτών καυσίμων. Αποτέλεσμα αυτής είναι μερικά από τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα του πλανήτη μας, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας της γης, η τρύπα του όζοντος, η άνοδος της στάθμης των ωκεανών και πολλά άλλα. Στατιστικά στοιχεία αναφέρουν πως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, οι οποίες είναι υπεύθυνες περίπου κατά ποσοστό 50% για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αυξήθηκαν από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης έως σήμερα κατά 100ppm (280ppm → 380ppm). Ακόμα, η θερμοκρασία της γης εκτιμάται ότι ανέβηκε τον τελευταίο αιώνα κατά 0,6°C και η στάθμη της θάλασσας περίπου κατά 20cm. Από τα παραπάνω, γίνεται επομένως αντιληπτό πως η αμέριστη χρήση ορυκτών καυσίμων δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να εξασφαλίσει αειφόρο οικονομική ασφάλεια σε ένα κράτος. [4]

Στην Ελλάδα η κατάσταση δεν διαφέρει από την παραπάνω περιγραφή. Η κατανάλωση ενέργειας τις τελευταίες τρεις δεκαετίες παρουσίασε ραγδαία αύξηση, η οποία γίνεται αντιληπτή και από το στατιστικό διάγραμμα (Σχήμα 1.3) του αμερικάνικου οργανισμού διαχείρισης πληροφοριών ενέργειας, για την Ελλάδα.

Η αύξηση των ενεργειακών αναγκών καλυπτόταν μέχρι και τα πολύ πρόσφατα χρόνια αποκλειστικά με την καύση ορυκτών καυσίμων και συγκεκριμένα κυρίως του λιγνίτη, ο οποίος να μεν αποτελεί μια φθηνή εγχώρια λύση, αλλά πρόκειται δε για “φτωχό” ενεργειακό καύσιμο και έντονα ρυπογόνο. Το Σχήμα 1.4, που παρουσιάζει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα των τελευταίων ετών στην Ελλάδα είναι χαρακτηριστικό του μεγέθους του ενεργειακού προβλήματος στη χώρα μας. [5]



Σχήμα 1.3 Εξέλιξη της Συνολικής Κατανάλωσης Ενέργειας στην Ελλάδα. [6]



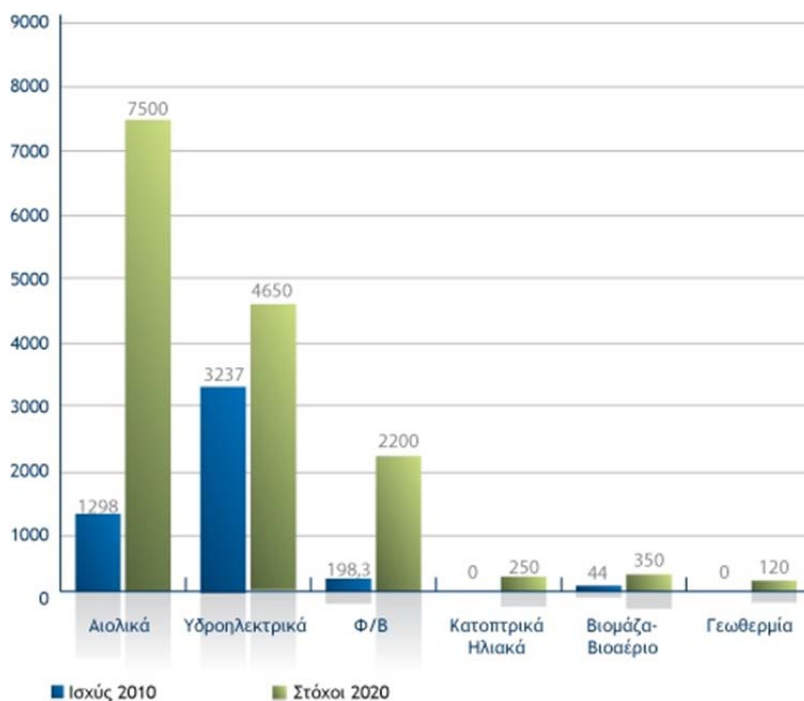
Σχήμα 1.4 Ετήσιες Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα στην Ελλάδα. [6]

Όλα τα παραπάνω στοιχεία υποδεικνύουν την ανάγκη αλλαγής του ενεργειακού πλάνου της χώρας, και την προσπάθεια εξεύρεσης άλλων μορφών ενέργειας οι οποίες δεν θα έχουν πεπερασμένα αποθέματα. Πρόκειται για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα, η υδροηλεκτρική ενέργεια και τα βιοκαύσιμα. Οι Α.Π.Ε έχουν το πολύ μεγάλο πλεονέκτημα ότι θα διαρκέσουν όσο θα υπάρχει και ο πλανήτης σε μορφή που να μπορούσε να ζει άνθρωπος, και επιπλέον η χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Η δυσκολία της καθιέρωσης των Α.Π.Ε. παγκοσμίως, έγκειται κυρίως στο δισταγμό των πολιτικών αρχών κάθε χώρας να εμπιστευτούν την αξιοπιστία τους τόσο στον λειτουργικό τομέα, όσο και στον οικονομικό. Χώρες που τόλμησαν να ενσωματώσουν τις Α.Π.Ε. στον ενεργειακό τους χάρτη σε μεγάλα ποσοστά, δεν είναι τυχαίο που παρουσίασαν μεγάλη άνθηση στους τομείς της οικονομίας και τις ανάπτυξης. Έτσι και αλλιώς, το ενεργειακό πρόβλημα αυτό καθ' αυτό καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση των Α.Π.Ε. .

Βασικός σκοπός και για την Ελλάδα είναι η συμμετοχή των Α.Π.Ε. σε ένα μεγάλο ποσοστό στο ενεργειακό μείγμα της. Για τον λόγο αυτό, και καθώς η οικονομική κρίση σε συνάρτηση με την σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων προβάλλει σαν τεράστια απειλή, η χώρα μας δεσμεύεται ,με τον νόμο 3851/Άρθρο 1, να πετύχει τον εθνικό στόχο των Α.Π.Ε. που θέσπισε για αυτήν η Ευρωπαϊκή Ένωση. Σύμφωνα με αυτό τον στόχο, προβλέπεται συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% μέχρι το 2020 και συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 40%. Επιπλέον, ζητείται συμβολή των Α.Π.Ε. της τάξεως του 20% στην τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, και του 10% στην τελική κατανάλωση ενέργειας για μεταφορές ,και πάλι ως το 2020. [7]

Χαρακτηριστικό είναι το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 1.5 Εξέλιξη Εγκατεστημένης Ισχύος Α.Π.Ε. ,Στόχος Έτους 2020. [8]

Η Ελλάδα έχει την τύχη να βρίσκεται σε ένα στρατηγικό σημείο του παγκόσμιου χάρτη, όσο αφορά στην ενέργεια. Πολλά μέρη της χαρακτηρίζονται από υψηλό αιολικό και ηλιακό δυναμικό, όπως θα δούμε και αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο. Αντιπροσωπευτική είναι η δήλωση του διευθυντή του Ινστιτούτου Τεχνικής Χημικών Διεργασιών του ΕΚΕΤΑ, με ευρωπαϊκό Νόμπελ έρευνας, Αθανάσιου Κωνσταντόπουλου σε συνέντευξη που παραχώρησε σχετικά με τα ηλιακά καύσιμα:

« Όπως η Δανία είναι συνώνυμη των ανεμογεννητριών και η Φινλανδία συνώνυμη της κινητής τηλεφωνίας, η Ελλάδα πρέπει να αποφασίσει ότι θα γίνει συνώνυμη της ηλιακής ενέργειας. Έχει τη δυνατότητα να γίνει όχι μόνο ενεργειακά αυτόνομη, αλλά ένας ενεργειακός κόμβος στη Μεσόγειο που θα εξάγει τεχνολογία, τεχνογνωσία και ενέργεια.»[9]

Από τα παραπάνω, συμπεραίνει εύκολα κανείς πως η συμβολή των Α.Π.Ε. στην χώρα μας μόνο ευεργετική και κερδοφόρα μπορεί να είναι.

### 1.1.2 Ηλιακές Γωνίες [10]

Από το εισαγωγικό κιάλας κεφάλαιο, έγινε αντιληπτή η σημασία της γνώσης των συντεταγμένων στις οποίες βρίσκεται σε κάθε στιγμή ο ήλιος για τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα. Κοινό χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι, ότι ακολουθούν την τροχιά του ηλίου στον ουρανό. Όσο καλύτερη παρακολούθηση της ηλιακής τροχιάς επιτευχθεί από το σύστημα ελέγχου-κίνησης τους, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχτούν στην επιφάνεια τους και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη και η τελική απόδοση τους.

Ας αναλύσουμε όμως την κίνηση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα με τις τέσσερις βασικές ηλιακές γωνίες που την περιγράφουν:

Ωριαία γωνία (hour angle),  $\omega$ : είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό  $15^\circ/\text{h} = 0,25^\circ/\text{min}$ .

Ισχύει:

$$\omega = 15 \cdot (\text{Ηλιακός Χρόνος} - 12)$$

,όπου  $\omega > 0$  για μ.μ. και  $\omega < 0$  για π.μ.

Ο ηλιακός χρόνος είναι ο χρόνος που μετράται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ηλίου στον ουρανό. Έτσι, ηλιακό μεσημέρι είναι η χρονική στιγμή που ο ήλιος τέμνει τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο  $t_{\text{ρολ}}$ , που δείχνει το ρολόι. Συνδέεται όμως με αυτόν σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{Ηλιακός Χρόνος} = t_{\text{ρολ}} \pm 4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + E$$

,όπου  $L_{st}$  είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος (για την Ελλάδα είναι π.χ.  $30^\circ$ ) και  $L_{loc}$  το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή. Η σχέση ισχύει με + για τα δυτικά μήκη και με - για τα ανατολικά. Ο συντελεστής 4 εκφράζει min/μοίρα. Τέλος, E(σε min.) είναι η εξίσωση του χρόνου που λαμβάνεται για κάθε ημέρα του έτους από τη σχέση:



$$E = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B)$$

$$\text{για } B = \frac{360 \cdot (n-81)}{364}, \text{ και}$$

$$n = \text{ημέρα του έτους} = 1 \div 365$$

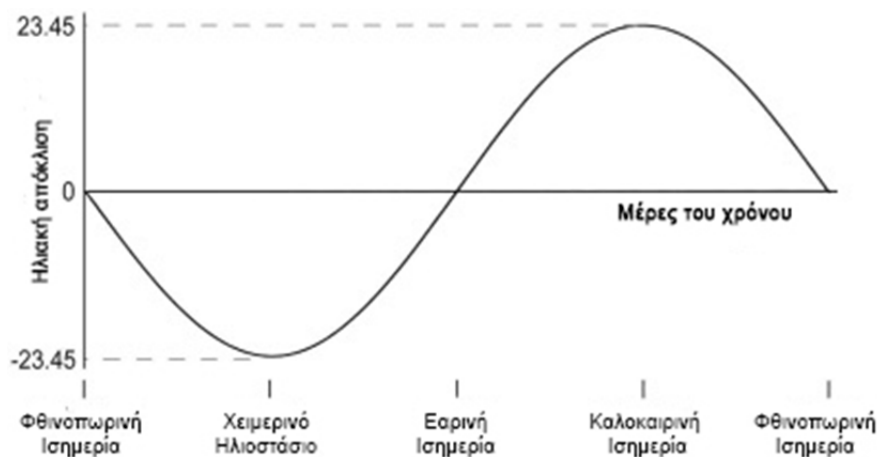
Ηλιακή απόκλιση (declination),  $\delta$ : είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Πρόκειται ,δηλαδή, για τη γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει τα κέντρα του ήλιου και της γης ,και από το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει ότι  $-23,45 \leq \delta \leq 23,45$  ,με θετικές τιμές προς τον βορρά.

Υπολογίζεται από τη σχέση:

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

,όπου n: ημέρα του έτους.

Ένα ενδιαφέρον διάγραμμα με την μεταβολή της ηλιακής απόκλισης  $\delta$ , κατά τη διάρκεια του έτους παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω:



Σχήμα 1.6 Μεταβολή της Ηλιακής Απόκλισης. [11]

Ηλιακό ύψος (elevation angle),  $a_s$ : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.

Δίνεται από τον τύπο:

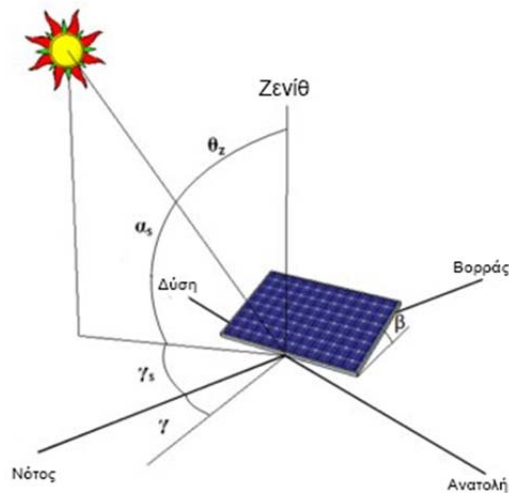
$$\sin(a_s) = \cos(\omega) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(L_{at}) + \sin(\delta) \cdot \sin(L_{at})$$

Ηλιακό αζιμούθιο (azimuth angle),  $\gamma_s$ : είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης (δεξιόστροφη φορά). Έχουμε ,δηλαδή  $\gamma_s=0^\circ$  στο νότο,  $\gamma_s=90^\circ$  στη δύση,  $\gamma_s=180^\circ$  στο βορρά και  $\gamma_s=-90^\circ$  στην ανατολή.

Ο τύπος που μπορεί να μας δώσει την παραπάνω γωνία είναι [11] :

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

Το ηλιακό ύψος και το ηλιακό αζιμούθιο μπορούν να κατανοηθούν ευκολότερα με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 1.7 Ηλιακό ύψος και ηλιακό αζιμούθιο. [12]

### 1.1.3 Ηλιακή Ακτινοβολία

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγική παράγραφο, η ηλιακή ακτινοβολία είναι ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται η ενέργεια του ήλιου. Η τροχιά κίνησης της γης γύρω από τον ήλιο, αλλά και η περιστροφή γύρω από τον άξονά της προκαλούν ανισοκατανομές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα μέρη του κόσμου. Επιπλέον, όπως είδαμε μεγάλο ποσοστό της ακτινοβολίας απορροφάται και αφότου εισέλθει εντός της ατμόσφαιρας από τα σύννεφα. Όλα τα παραπάνω, σε συνάρτηση με τις γρήγορες αλλαγές των μετεωρολογικών συνθηκών που μπορεί να συμβούν σε μία τοποθεσία που μελετάται η εγκατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, καθιστούν επιτακτική την γνώση των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Για την καλύτερη κατανόηση του όρου ηλιακή ακτινοβολία, αυτή χωρίζεται σε διάχυτη και άμεση.

Διάχυτη Ακτινοβολία (Diffuse Normal Irradiance): ονομάζεται το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα. Συμβολίζεται συνήθως ως  $I_d$ . Πρόκειται, ουσιαστικά, για την ακτινοβολία, η οποία κατά τη διάρκεια της ημέρας δίνει την αίσθηση της ηλιοφάνειας ακόμα και αν δεν μπορούμε να δούμε τον ήλιο.

Άμεση Ακτινοβολία (Direct Normal Irradiance): είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη κατ' ευθείαν από τον ήλιο, χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Συμβολίζεται συνήθως ως  $I_b$ . Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί πως τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα έχουν την δυνατότητα εκμετάλλευσης μόνο αυτής της μορφής της ηλιακής ακτινοβολίας και όχι της διάχυτης.

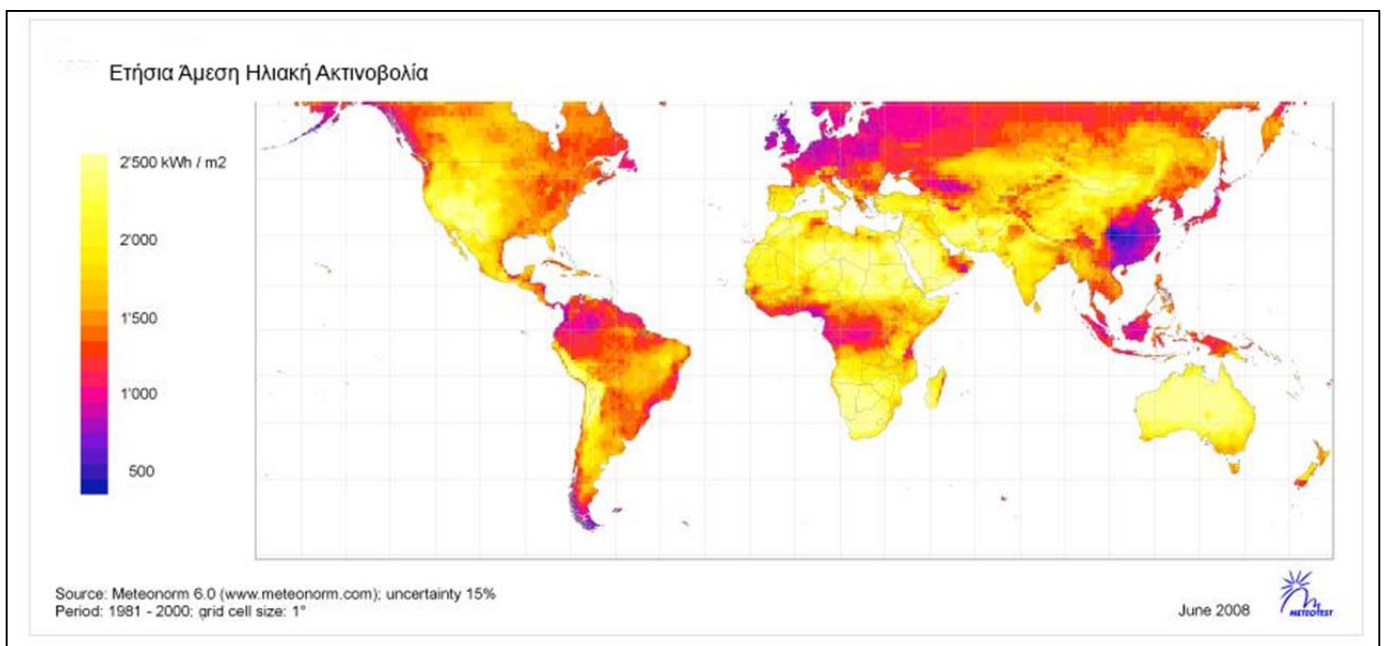
Έχει ,επομένως, μεγάλη αξία η γνώση των τιμών άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε συχνά χρονικά διαστήματα (π.χ. ανά ώρα) για τη μελέτη ηλιοθερμικών συστημάτων.

Το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες καλείται ολική ακτινοβολία (Global Normal Irradiance). Η μονάδα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας στο S.I. είναι το  $W/m^2$ . [10]

#### 1.1.4 Ηλιακό Δυναμικό

Μιλώντας για ηλιακό δυναμικό μίας τοποθεσίας ,αναφερόμαστε ουσιαστικά στις τιμές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτή κατά μέσο όρο στη διάρκεια ενός έτους. Το ηλιακό δυναμικό αποτελεί ,στην πραγματικότητα, το πρώτο και το πιο βασικό κριτήριο για τον χαρακτηρισμό ενός μέρους ως κατάλληλου ή ακατάλληλου για την εγκατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Όσο πιο υψηλό είναι το ηλιακό δυναμικό μιας περιοχής, τόσο περισσότερο ενδείκνυται ,προφανώς, σε αυτήν η κατασκευή ηλιοθερμικών εγκαταστάσεων.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο παγκόσμιος χάρτης με τις ετήσιες τιμές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας:



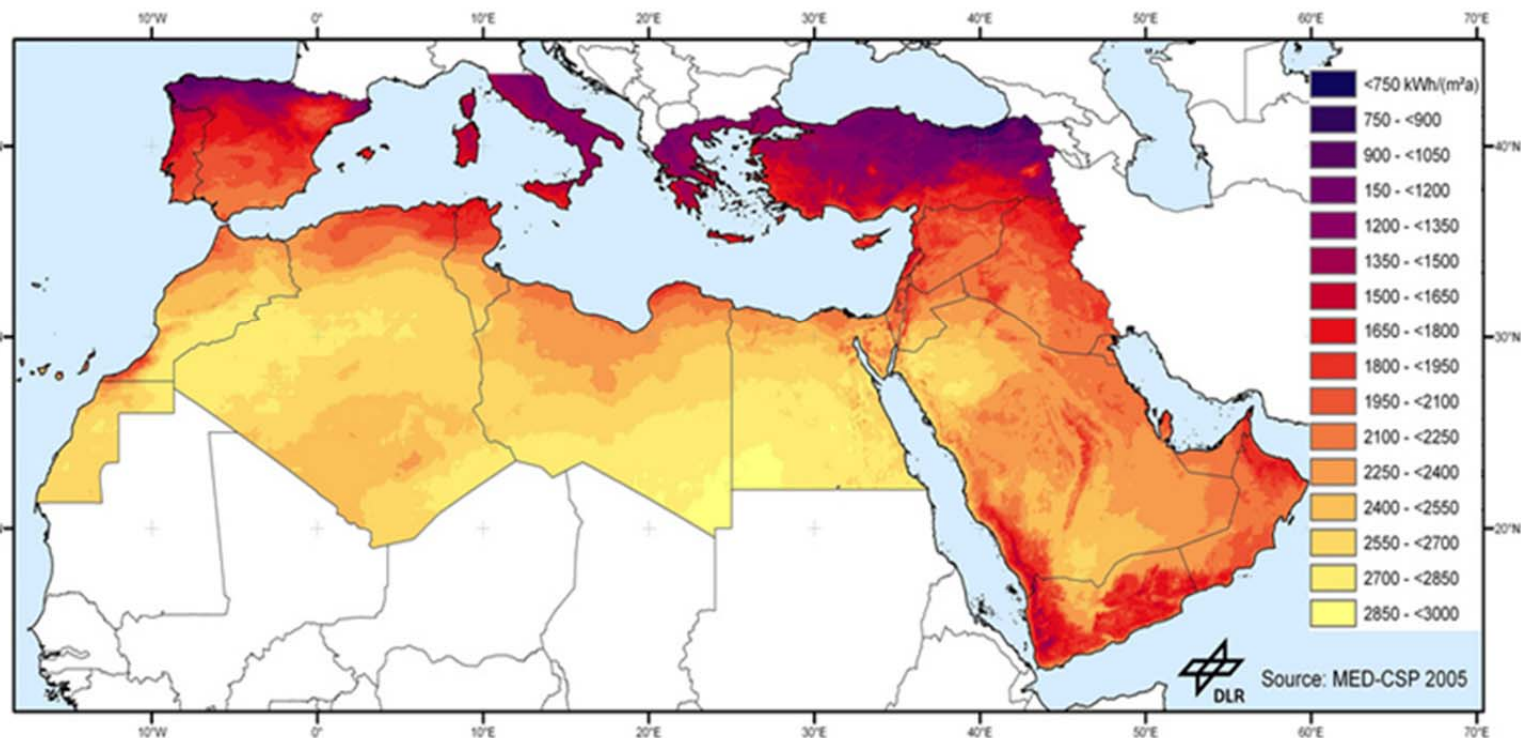
Σχήμα 1.8 Παγκόσμιος Χάρτης Άμεσης Προσπίπτουσας Ηλιακής Ακτινοβολίας (DNI). [13]

Βλέπουμε πως οι περιοχές κοντά στη γραμμή του ισημερινού, με γεωγραφικό πλάτος περίπου από  $-40^{\circ}$  έως  $+40^{\circ}$ , συγκεντρώνουν το υψηλότερο ηλιακό δυναμικό. Πρόκειται ,γενικώς, για ημιάγονες και άγονες περιοχές ,ερήμους και κάποια υψίπεδα. Η εγκατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων συστήνεται σε περιοχές με ετήσια άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία μεγαλύτερη των  $2000KWh/m^2$  ,ενώ σε περιοχές με άμεση ακτινοβολία μεγαλύτερη των  $2800KWh/m^2$  αποτελεί ιδανική επιλογή. Συνοπτικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ως περιοχές υψηλού ηλιακού δυναμικού τις Νοτιοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες, το Μεξικό, την Αυστραλία, την Ισπανία, το Ιράν, την Ινδία, το

Πακιστάν, την Χιλή, την Αργεντινή και τη Βραζιλία καθώς και τις περισσότερες χώρες της Μέσης Ανατολής και της Αφρικής. Κορυφαίες περιοχές, από άποψη ηλιακού δυναμικού χαρακτηρίζονται οι έρημοι στη βόρεια Χιλή, στη νότια Αφρική, στην Αίγυπτο, στη Λιβύη και στη δυτική Αυστραλία. [14],[15]

Ας εστιάσουμε όμως και στο χάρτη ηλιακού δυναμικού κοντά στην ελληνική επικράτεια:

### Ετήσια Άμεση Ηλιακή Ακτινοβολία [kWh/(m<sup>2</sup>a)]



Σχήμα 1.9 Χάρτης Άμεσης Προσπίπτουσας Ηλιακής Ακτινοβολίας (DNI) για την Μεσόγειο. [16]

Παρατηρεί κανείς στον παραπάνω χάρτη πως υπάρχουν περιοχές ,κυρίως στο νότιο τμήμα της Ελλάδας που παρουσιάζουν υψηλό ηλιακό δυναμικό. Ιδιαίτερα τα νότια νησιά όπως η Ρόδος και η Κρήτη ,αλλά και η Κύπρος βρίσκονται πολύ κοντά στο φράγμα των 2000kWh/m<sup>2</sup> ετησίως, ή και κάποιες φορές το ξεπερνούν. Το γεγονός αυτό δίνει μία αρχική εκτίμηση πως η εγκατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων εκεί θα ήταν συμφέρουσα επιλογή. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το ενδιαφέρον της εταιρείας Nur Energie ,που ασχολείται με την εγκατάσταση ηλιοθερμικών εγκαταστάσεων στη Μεσόγειο, για την λήψη άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως των 50 MWe τόσο στην περιοχή της νοτιοανατολικής Κρήτης ,όσο και στη Ρόδο. [17]

Για τους παραπάνω λόγους αποφασίστηκε ,για την παρούσα διπλωματική εργασία, ότι η προσομοίωση ενός πύργου ηλιακής ισχύος στην περιοχή της Κρήτης θα ήταν μια καλή ευκαιρία να εξάγουν χρήσιμα συμπεράσματα για την εισαγωγή της καινοτόμου τεχνολογίας των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων στην Ελλάδα.

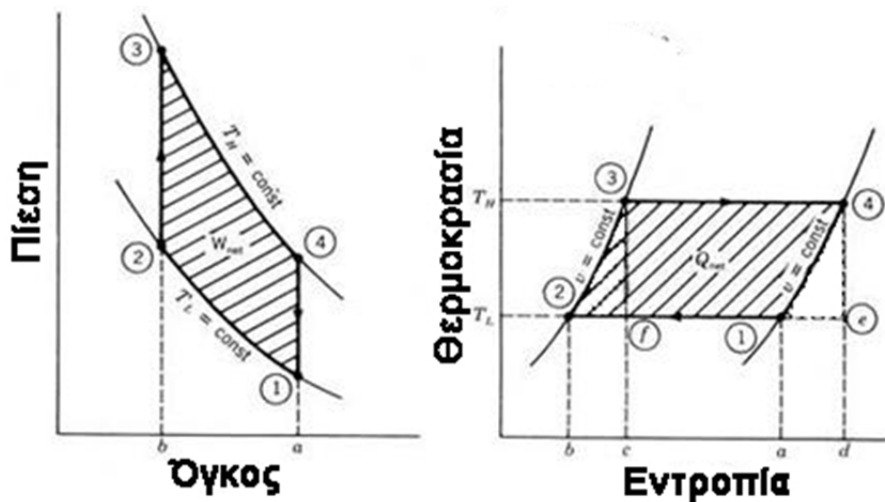
## 1.2 Εκμετάλλευση Ηλιακής Ενέργειας

Η αρχή της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στην θερμότητα που αυτή μπορεί να προσδώσει σε ένα εργαζόμενο μέσο όταν συγκεντρωθεί κατάλληλα πάνω του. Το εργαζόμενο μέσο, στη συνέχεια, μπορεί να εκτελέσει έναν θερμοδυναμικό κύκλο, αποδίδοντας την παραπάνω θερμότητα προς παραγωγή έργου.

### 1.2.1 Θερμοδυναμικοί κύκλοι εκμετάλλευσης Ηλιακής Ενέργειας

Ένας θερμοδυναμικός κύκλος αποτελείται από μια σειρά θερμοδυναμικών διεργασιών μεταφοράς θερμότητας και έργου. Οι κύκλοι που παρέχουν τη δυνατότητα εξωτερικής πρόσδοσης θερμότητας είναι ιδανικοί για ηλιακές εφαρμογές. Οι τρεις πιο βασικοί, που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι οι παρακάτω:

Θερμοδυναμικός Κύκλος Stirling [18]: Ο ιδανικός κύκλος Stirling αποτελείται από τέσσερις θερμοδυναμικές μεταβολές, δύο ισόχωρες και δύο ισόθερμες. Λόγω του ότι η μεταφορά θερμότητας γίνεται κατά τις ισόχωρες μεταβολές, οι οποίες είναι μη αντιστρεπτές, και ο κύκλος Stirling είναι μη αντιστρεπτός.

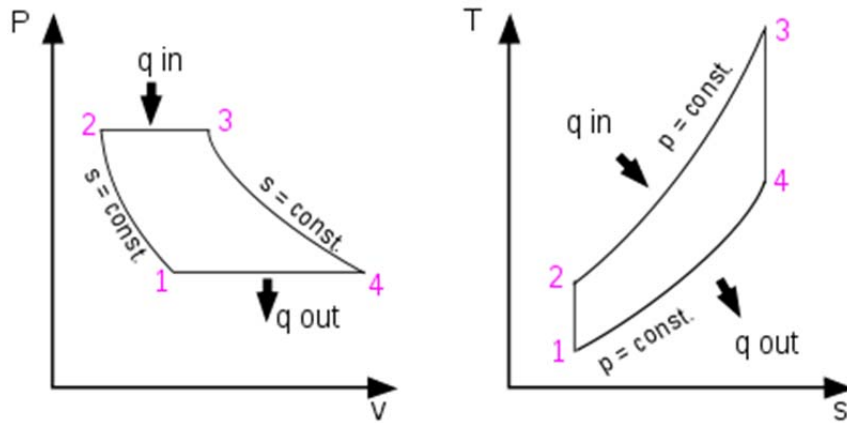


Σχήμα 1.10 Ιδανικός Κύκλος Stirling. [18]

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές αναλυτικά:

- 1→2: Ισόθερμη συμπίεση.
- 2→3: Ισόχωρη πρόσδοση θερμότητας.
- 3→4: Ισόθερμη αποτόνωση.
- 4→1: Ισόχωρη αποβολή θερμότητας.

Θερμοδυναμικός Κύκλος Joule-Brayton [19]: Πρόκειται για τον θερμοδυναμικό κύκλο που περιγράφει τη λειτουργία ενός αεριοστροβίλου. Αποτελείται από δύο αντιστρεπτές ισηντροπικές μεταβολές και δύο ισόθλιπτες. Για το λόγο αυτό είναι γνωστός και ως κύκλος σταθερής πίεσης.

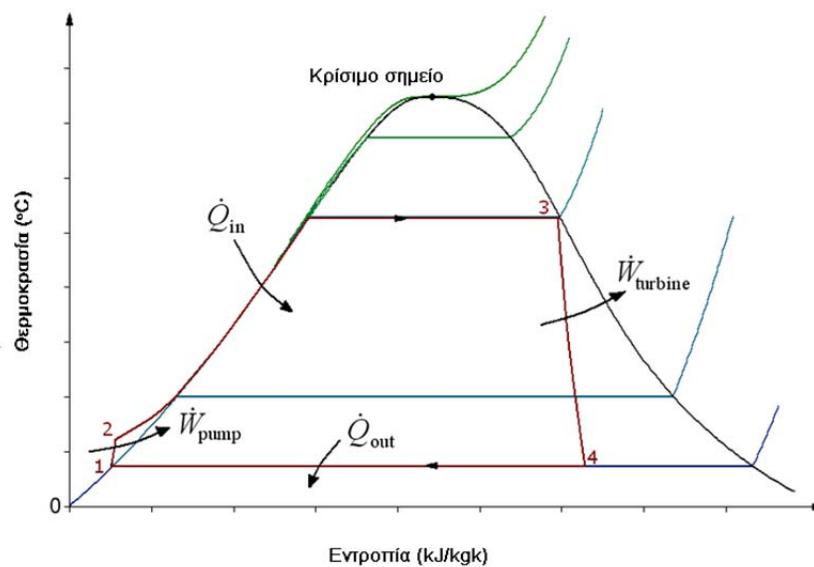


Σχήμα 1.11 Ιδανικός Κύκλος Joule-Brayton. [19]

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές αναλυτικά:

- 1→2: Ισεντροπική συμπίεση.
- 2→3: Ισοβαρής πρόσδοση θερμότητας.
- 3→4: Ισεντροπική αποτόνωση.
- 4→1: Ισοβαρής αποβολή θερμότητας.

Θερμοδυναμικός Κύκλος Rankine [20]: Πρόκειται για τον πιο διαδεδομένο κύκλο μετατροπής θερμότητας σε έργο ,καθώς χρησιμοποιείται στις μέρες μας για το 90% της ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως. Στην ιδανική του μορφή ,αποτελείται από μια ισεντροπική συμπίεση και μια αποτόνωση ,και από μία ισοθερμοκρασιακή πρόσδοση και μια αποβολή θερμότητας αντίστοιχα. Η λειτουργία του συγκεκριμένου κύκλου απαιτεί την ύπαρξη εργαζόμενου μέσου αλλαγής φάσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται το νερό ,το οποίο σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες μετατρέπεται σε ατμό. Για τον λόγο αυτό ,τα θερμοδυναμικά κυκλώματα που χρησιμοποιούμε παρακάτω στην ηλιοθερμική μας εγκατάσταση αποκαλούνται κυκλώματα νερού-ατμού ,κάνοντας χρήση του κύκλου αυτού.



Σχήμα 1.12 Τυπικός Θερμοδυναμικός κύκλος Rankine. [20]

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές αναλυτικά:

1→2: Συμπύεση.

2→3: Ισοβαρής πρόσδοση θερμότητας.

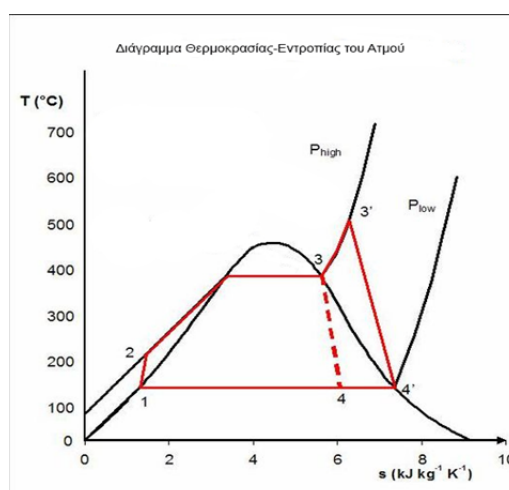
3→4: Αποτόνωση.

4→1: Ισόθερμη-(Ισοβαρής) αποβολή θερμότητας.

Παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα πως στην πραγματικότητα οι συμπύεση και η αποτόνωση του εργαζόμενου μέσου δεν είναι ισεντροπικές, αλλά χαρακτηρίζονται από έναν ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Στον ιδανικό κύκλο οι μεταβολές 1→2 και 3→4 θα σχεδιάζονταν κατακόρυφες.

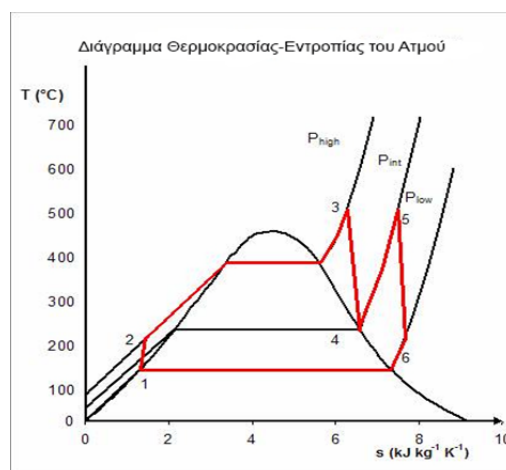
Σε αυτό το σημείο, ωστόσο, πρέπει να αναφέρουμε και τις παραλλαγές του κύκλου Rankine που έχουν δημιουργηθεί με γνώμονα την αύξηση του βαθμού απόδοσης του, και χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα.

Η πρώτη είναι ο κύκλος Rankine με υπερθέρμανση και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



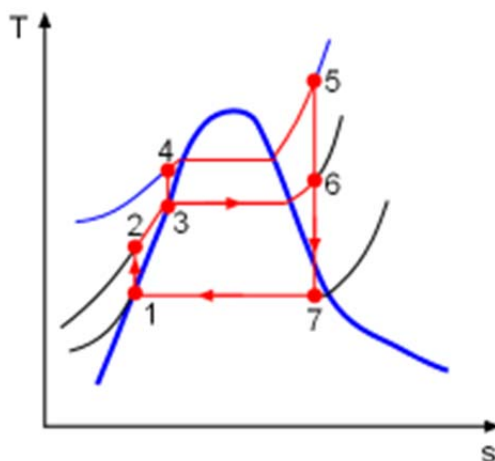
Σχήμα 1.13 Τυπικός Θερμοδυναμικός κύκλος Rankine με Υπερθέρμανση. [20]

Η δεύτερη είναι ο κύκλος Rankine με αναθέρμανση μετά την αρχική εκτόνωση, και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.14 Τυπικός Θερμοδυναμικός κύκλος Rankine με Αναθέρμανση. [20]

Η Τρίτη παραλλαγή, είναι ο κύκλος Rankine με απομάστευση ενός μέρους του αποτονομένου θερμού ατμού για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού, και παρουσιάζεται στην ιδανική του μορφή (ισεντροπικές μεταβολές) στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.15 Ιδανικός Θερμοδυναμικός κύκλος Rankine με Απομάστευση. [21]

Προφανώς, οι παραπάνω παραλλαγές του κύκλου Rankine μπορούν να συνδυαστούν και μεταξύ τους, για την καλύτερη απόδοση του κυκλώματος. Κάτι τέτοιο είναι αρκετά σύνηθες στα θερμοδυναμικά κυκλώματα των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.

### 1.2.2 Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα [14],[15],[22],[23]

Εδώ και αρκετές δεκαετίες, ο άνθρωπος είχε αναγνωρίσει την χρησιμότητα της ηλιακής ενέργειας. Αποτέλεσμα αυτού ήταν, να επιδιώκει, με το πέρασμα των χρόνων, την ολοένα και πιο αποτελεσματική συγκέντρωση της προσπίπτουσας στη γη ηλιακής ακτινοβολίας, εκμεταλλευόμενος την ιδιότητα της να προσδίδει θερμότητα σε ένα εργαζόμενο μέσο. Αυτή η μεταβολή της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου μπορούσε, στη συνέχεια, με τη βοήθεια ενός θερμοδυναμικού κύκλου να οδηγήσει στην παραγωγή μηχανικού έργου σε κάποιον άξονα και επακόλουθα και ηλεκτρικής ενέργειας. Για να γίνει κάτι τέτοιο συνήθως χρησιμοποιείται κάποιος αμοστρόβιλος ή μία μηχανή Stirling για παράδειγμα.

Ακολουθώντας τον παραπάνω συλλογισμό, οι ερευνητές οδηγήθηκαν σήμερα σε τεχνολογίες συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας πολύ συγκεκριμένες και με ανταγωνιστική απόδοση. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων είναι ότι αποτελούνται από τα τμήματα του ηλιακού συλλέκτη, του ηλιακού δέκτη, του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης του εργαζόμενου μέσου και του συστήματος μετατροπής της ισχύος. Σημαντικό μέγεθος για κάθε συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα είναι ο λόγος συγκέντρωσης, που ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας του ηλιακού συλλέκτη, στον οποίο προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία, προς την επιφάνεια του δέκτη, στον οποίο αυτή τελικά απορροφάται. Προφανώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος συγκέντρωσης, τόσο υψηλότερες είναι και οι θερμοκρασίες που μπορεί να φτάσει το εργαζόμενο μέσο και συνεπώς, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός απόδοσης της ηλιοθερμικής εγκατάστασης.



Ας δούμε όμως και πιο αναλυτικά ποιες είναι οι σύγχρονες τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας ,που χρησιμοποιούνται στις διάφορες ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις στις μέρες μας, και υπόσχονται να υποκαταστήσουν σημαντικό κομμάτι της ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως στο μέλλον:

➤ Συστήματα Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών (Parabolic Trough Collectors-PTC).

Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη και δοκιμασμένη από τις γνωστές τεχνολογίες σήμερα. Τα συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών είναι στην ουσία σειρές παραβολικών κατόπτρων μεγάλου μήκους ,στην εστιακή γραμμή των οποίων συγκεντρώνεται η ηλιακή ακτινοβολία μέσω ανάκλασης. Στο ύψος της εστιακής γραμμής, ως δέκτης υπάρχει κατάλληλη σωλήνωση ,υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, μέσα από την οποία ρέει το εργαζόμενο μέσο που θερμαίνεται. Το εργαζόμενο μέσο που μεταφέρει τη θερμότητα είναι συνήθως κάποιο συνθετικό έλαιο ,το οποίο στη συνέχεια μέσω εναλλάκτη θερμότητας ζεσταίνει νερό προς παραγωγή ατμού. Ο ατμός αυτός με τη σειρά του μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός συστήματος αμοστροβίλου-γεννήτριας, εκτελώντας κάποιο απλό ή συνδυασμένο θερμοδυναμικό κύκλο. Με τη συγκεκριμένη τεχνολογία μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες έως και 400°C στο εργαζόμενο μέσο και ο λόγος συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται σε τιμές 8-80. Ο ετήσιος βαθμός απόδοσης τους είναι στις περισσότερες περιπτώσεις της τάξεως του 15%. Είναι σημαντικό ,επίσης, το γεγονός ότι τα συστήματα παραβολικών συλλεκτών ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτικών συστημάτων δύο διαστάσεων, καθώς το σύστημα κίνησής τους για τον εντοπισμό των ηλιακών ακτίνων επιτρέπει την περιστροφή τους μόνο γύρω από έναν άξονα. Οι σειρές των κατόπτρων συνήθως παρατάσσονται κατά μήκος της κατεύθυνσης Βορρά-Νότου ,ακολουθώντας κατά αυτόν τον τρόπο ,με την περιστροφή τους, την πορεία του ήλιου από την ανατολή ως και τη δύση του.



Σχήμα 1.16 Τυπικό Σύστημα Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών. [24]

➤ Πύργοι Ηλιακής Ισχύος ή Συστήματα Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη (Solar Power Towers or Central Solar Receiver Systems-CRS).

Οι πύργοι ηλιακής ισχύος είναι συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα ,τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλη περιπλοκότητα. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε έναν κεντρικό δέκτη ,που βρίσκεται στην κορυφή ενός πύργου, μέσω της ανεξάρτητης κίνησης ενός αριθμού εκατοντάδων ή και χιλιάδων επίπεδων κατόπτρων (ηλιοστατών). Οι ηλιοστατές βρίσκονται σε μια μεγάλη έκταση κυκλικά ή βόρεια του πύργου ,που ονομάζεται ηλιοστατικό πεδίο. Με τη συγκεκριμένη τεχνολογία μπορούν να επιτευχθούν λόγοι συγκέντρωσης της τάξεως του 600-1000 και θερμοκρασίες εργαζόμενου μέσου από 300°C μέχρι ακόμα και 1000°C σε περιπτώσεις που το εργαζόμενο μέσο στον ηλιακό δέκτη είναι συμπιεσμένος αέρας ,με σκοπό τη χρήση του ως αέρα καύσης σε συνδυασμένο κύκλο. Ο ετήσιος βαθμός απόδοσης εγκαταστάσεων ηλιακού πύργου κυμαίνεται κοντά στο 20%. Βασική χαρακτηριστικό των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη είναι ότι εντοπίζουν τη θέση του ηλίου και στις τρεις διαστάσεις, καθώς το σύστημα κίνησης των ηλιοστατών επιτρέπει την περιστροφή τους τόσο γύρω από τον κατακόρυφο άξονα ,όσο και γύρω από τον οριζόντιο. Η περαιτέρω ανάλυση της τεχνολογίας του πύργου ηλιακής ισχύος αποφεύγεται στο παρόν κεφάλαιο καθώς παρακάτω αυτή εξετάζεται διεξοδικά.



Σχήμα 1.17 Τοπικό Σύστημα Πύργου Ηλιακής Ισχύος. [25]

➤ Συστήματα Δίσκου-Μηχανής (Dish-Engine Systems-DE ).

Είναι συνήθως αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας ,τα οποία χρησιμοποιούν ένα παραβολικό δίσκο ως συλλέκτη ,συγκεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία στο σημείο εστίασης του ,όπου βρίσκεται ως δέκτης στις περισσότερες περιπτώσεις μία μηχανή τύπου Stirling ή πιο σπάνια κάποιος μικροστρόβιλος. Σε κάποιες διατάξεις έχει δοκιμαστεί και η χρήση περισσότερων του ενός παραβολικού δίσκου με έναν κοινό δέκτη. Όπως και στα

συστήματα κεντρικού ηλιακού δέκτη, ο εντοπισμός της τροχιάς που διαγράφει ο ήλιος στην ουράνια σφαίρα γίνεται και στις τρεις διαστάσεις. Σκοπός του μηχανισμού κίνησης του παραβολικού δίσκου είναι η επιφάνεια του τελευταίου να είναι πάντα κάθετη στην νοητή ευθεία που συνδέει το κέντρο του με το κέντρο του ηλίου. Τα συστήματα δίσκου-μηχανής επιτυγχάνουν πολύ μεγάλους λόγους συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, από 1000 έως και 4000 φορές, όμως ακόμα χρησιμοποιούνται για μικρές ποσότητες παραγωγής ενέργειας της τάξεως των 5-25KW μόλις. Σημαντικό στοιχείο ,και φυσικό επακόλουθο του υψηλού λόγου συγκέντρωσης, είναι πως η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει αγγίξει το φράγμα του 30% στον ετήσιο βαθμό απόδοσης της. Από την άλλη πλευρά ,όμως, η αξιοπιστία της βρίσκεται ακόμα υπό αμφισβήτηση ,καθώς το κόστος τέτοιων συστημάτων αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τη μαζική παραγωγή τους.



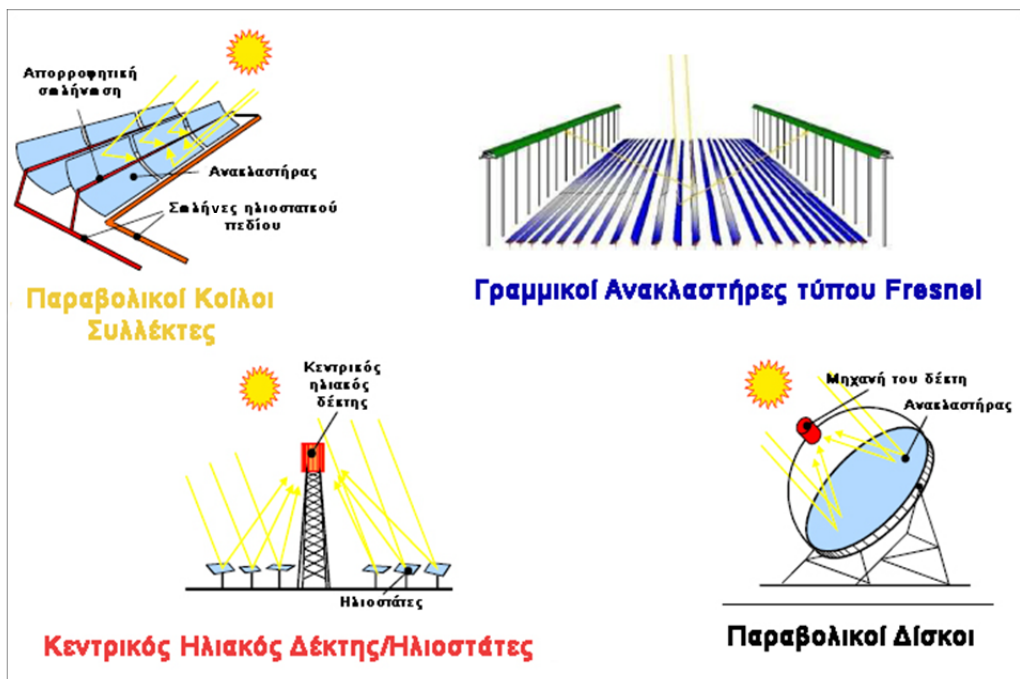
Σχήμα 1.18 Τυπικό Σύστημα Δίσκου-Μηχανής. [26]

- Συστήματα με Γραμμικούς Ανακλαστήρες τύπου Fresnel (Linear Fresnel Reflector Systems-LF).

Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πανομοιότυπος με τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων παραβολικών κοίλων συλλεκτών. Η βασική διαφορά είναι ότι αντί για παραβολικούς κοίλους συλλέκτες χρησιμοποιούνται γραμμικοί ,συγκεντρώνοντας και πάλι την ηλιακή ακτινοβολία σε μία εστιακή γραμμή. Τα συστήματα ,με γραμμικούς ανακλαστήρες τύπου Fresnel, χαρακτηρίζονται από σχετική απλότητα σε σχέση με τα συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών. Αυτό έχει σαν συνέπεια ,να θεωρούνται μια πιο οικονομική λύση σε σχέση με τα τελευταία ,εμφανίζοντας ωστόσο και μικρότερους βαθμούς απόδοσης. Η αξιοπιστία και αυτής της τεχνολογίας παρουσιάζει ερωτηματικά και εξετάζεται ακόμα, όσον αφορά σε εγκαταστάσεις που απαιτείται μεγάλη ισχύς και υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 1.19 Τοπικό Σύστημα με Γραμμικούς Ανακλαστήρες τύπου Fresnel. [27]



Σχήμα 1.20 Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα. [22]

Η επιλογή του κατάλληλου συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος ,για μία ηλιοθερμική εγκατάσταση, είναι δύσκολη διαδικασία καθώς εξαρτάται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους. Η επιτυχία έγκειται στην εύρεση της “χρυσής τομής” μεταξύ κόστους και απόδοσης για την εκάστοτε εξεταστέα περίπτωση. Η λήψη ευεργετικών πολιτικών αποφάσεων ,υπέρ της καινοτόμου τεχνολογίας των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων,

είναι σίγουρο πως θα βοηθήσει στην μείωση του κόστους τους και περαιτέρω στην εδραίωση τους στον τομέα της παραγωγής ενέργειας.

### 1.2.3 Νομοθεσία για Θερμικά Ηλιακά Συστήματα (ΘΗΣ)

Το παρόν κεφάλαιο θα μπορούσε να ήταν αρκετά εκτενές ,ωστόσο σκοπός μας είναι να τονίσουμε τα κύρια σημεία που αναφέρονται στο σχέδιο νόμου για τις Α.Π.Ε. ,σχετικά ηλιοθερμικούς σταθμούς.

Σύμφωνα ,λοιπόν, με το σχέδιο νόμου *«Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής»*, η τιμή πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος από ηλιοθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ανέρχεται στα 264,84 €/MWh ,ενώ αν υπάρχει στην εγκατάσταση και σύστημα αποθήκευσης ,που εξασφαλίζει τη λειτουργία του σταθμού για τουλάχιστον δύο ώρες στο ονομαστικό φορτίο, η τιμή γίνεται 284,84 €/MWh (Άρθρο 5, παρ.2).

Επιπλέον, η άδεια λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ισχύει για 25 έτη (Άρθρο 5, παρ.1), όπως και η σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από αυτόν (Άρθρο 3, παρ.2).

Πολύ σημαντικός είναι και ο κανονισμός ,στην παράγραφο 2 του άρθρου 5, για το σύστημα εφεδρικής καύσης ενός ηλιοθερμικού σταθμού. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ,ότι οι ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις επιτρέπεται να χρησιμοποιούν και ενέργεια που προέρχεται από φυσικό αέριο, LPG, ντίζελ, βιοντίζελ ή άλλα βιοκαύσιμα ,εφόσον η χρήση της ενέργειας αυτής κρίνεται αναγκαία για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Η χρησιμοποιούμενη ενέργεια που προέρχεται από φυσικό αέριο ,LPG, ή ντίζελ δεν μπορεί να υπερβαίνει το 15% της συνολικής ενέργειας που παράγεται σε ετήσια βάση ,από τις μονάδες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Το όριο αυτό μπορεί να προσαυξάνεται κατά 5% εάν χρησιμοποιείται βιοντίζελ ή άλλα βιοκαύσιμα. [28]

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### Πύργοι Ηλιακής Ισχύος

#### 2.1 Αρχή Λειτουργίας

Όπως διατυπώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι πύργοι ηλιακής ισχύος, ή αλλιώς συστήματα κεντρικού ηλιακού δέκτη, όπως τους εντοπίζουμε σε πολλές αναφορές, αποτελούν ένα από τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα. Η αρχή της λειτουργίας τους βασίζεται σε μια αλληλουχία μετατροπών της ηλιακής ενέργειας σε άλλες μορφές, μέχρι αυτή να γίνει, τελικά, ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα, η ηλιακή ενέργεια, μεταφερόμενη με τη μορφή άμεσης ακτινοβολίας, μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, η οποία απορροφάται από ένα ρευστό και στη συνέχεια σε μηχανική ενέργεια σε κάποια άτρακτο, μέσω της εκτέλεσης ενός θερμοδυναμικού κύκλου από το θερμό ρευστό. Η μηχανική ενέργεια, τέλος, με τη βοήθεια ηλεκτρικής γεννήτριας συνδεδεμένης με την περιστρεφόμενη άτρακτο, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Ας δούμε, όμως, την πορεία που ακολουθεί η άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία, μέχρι να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια, σε μια εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος:

Αρχικά, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, που προσπίπτει στη γη, ανακλάται από έναν μεγάλο αριθμό κατοπτρικών επιφανειών-ηλιοστατών που βρίσκονται σε πολύ καθορισμένη διάταξη μεταξύ τους, αλλά έχουν ανεξάρτητο σύστημα κίνησης, ώστε να εντοπίζει ο καθένας ξεχωριστά και με ακρίβεια την τροχιά του ηλίου. Με αυτό τον τρόπο η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε μία μικρή επιφάνεια στην κορυφή ενός πύργου, όπου είναι τοποθετημένος ο ηλιακός δέκτης, και απορροφάται από αυτόν. Πίσω από την επιφάνεια του δέκτη διέρχεται με πολλές μικρές σωληνώσεις το εργαζόμενο μέσο, το οποίο με αυτό τον τρόπο θερμαίνεται και ατμοποιείται άμεσα ή έμμεσα. Στη συνέχεια, ακολουθεί η εκτέλεση ενός θερμοδυναμικού κύκλου από το εργαζόμενο μέσο (στις περισσότερες περιπτώσεις συμβατικός κύκλος Rankine). Για την ακρίβεια, ο ατμός αποτονώνεται σε κάποιον αμοστρόβιλο και με αυτόν τον τρόπο παράγεται μηχανικό έργο στην άτρακτο του, η οποία συνδέεται με γεννήτρια προς παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Μετά την αποτόνωση του στο στρόβιλο, ο ατμός συμπυκνώνεται, μέσω αερόψυκτου ή υδρόψυκτου συμπυκνωτή, και γίνεται κορεσμένο νερό, το οποίο αντλείται στην κορυφή του πύργου για να ολοκληρώσει τον θερμοδυναμικό κύκλο και να ξεκινήσει έναν νέο.

Σε πολλούς από τους πύργους ηλιακής ισχύος χρησιμοποιούνται και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και συστήματα εφεδρικής καύσης συμβατικών καυσίμων, για την εξομάλυνση του παραγόμενου ενεργειακού προφίλ της εγκατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο η εγκατάσταση μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε περιπτώσεις που η άμεση ηλιακή ακτινοβολία έχει μη αποδεκτές, χαμηλές τιμές, είτε λόγω ώρας, είτε λόγω καιρικών συνθηκών.

## 2.2 Πλεονεκτήματα έναντι άλλων Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων

Η τεχνολογία των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη αποτελεί την πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, καθώς οι δυνατότητες βελτίωσής της στο μέλλον είναι πολύ μεγάλες. Σκοπός, στο παρόν κεφάλαιο, είναι να κατανοήσουμε τους λόγους, που οι πύργοι ηλιακής ισχύος παρουσιάζουν αυτό το προβάδισμα σε σχέση με τα υπόλοιπα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, και κυρίως σε σχέση με τις εγκαταστάσεις παραβολικών κοίλων συλλεκτών, οι οποίες έως σήμερα έχουν δοκιμαστεί και χρησιμοποιηθεί περισσότερο από όλες τις άλλες τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το κυριότερο πλεονέκτημα των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη, και ταυτόχρονα η αιτία για τις μεγάλες προσδοκίες που γεννά αυτή η τεχνολογία, είναι ότι ο εντοπισμός της τροχιάς του ηλίου γίνεται τρισδιάστατα, δηλαδή με περιστροφή των ηλιοστατών τόσο γύρω από τον κατακόρυφο, όσο και γύρω από τον οριζόντιο άξονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ακόμα και σε χαμηλές γωνίες ηλιακού ύψους, δηλαδή στην ανατολή ή δύση του ηλίου, να επιτυγχάνονται σημαντικά υψηλότεροι λόγοι συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στον δέκτη, σε σχέση με τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα που επιτρέπουν περιστροφή των συλλεκτών μόνο γύρω από έναν άξονα, όπως τα παραβολικά.

Ο υψηλός λόγος συγκέντρωσης, με τη σειρά του, επιτρέπει στο εργαζόμενο μέσο να αποκτά υψηλές θερμοκρασίες στον δέκτη, γεγονός που αυξάνει και τον συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Όπως φάνηκε και στο κεφάλαιο της παρουσίας των διαφόρων συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, οι θερμοκρασίες του εργαζόμενου μέσου και ο ετήσιος βαθμός απόδοσης στον πύργο ηλιακής ισχύος παίρνουν σχετικά μεγάλες τιμές, ειδικά σε σχέση με την τεχνολογία παραβολικών κοίλων συλλεκτών.

Ακόμα, πολύ βασικό πλεονέκτημα των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη αποτελεί το γεγονός, ότι παρέχουν τη δυνατότητα υβριδισμού τους. Σε κάποιες περιπτώσεις που το εργαζόμενο μέσο είναι προσυμπιεσμένος αέρας, η θερμοκρασία του μπορεί να φτάσει, ή και να ξεπεράσει, τους 1000°C, επιτρέποντας ουσιαστικά στον πύργο ηλιακής ισχύος να παράγει αέρα καύσης για κάποια μηχανή, λειτουργώντας έτσι σε έναν συνδυασμένο κύκλο. Γνωστές είναι και οι περιπτώσεις που οι πύργοι ηλιακής ισχύος χρησιμοποιούνται για την παραγωγή “ηλιακών” καυσίμων, όπως το υδρογόνο.

Σε σύγκριση με τα παραβολικά κοίλα συστήματα, οι πύργοι ηλιακής ισχύος παρουσιάζουν μικρότερες θερμικές απώλειες και ιδιοκαταναλώσεις. Αυτό εξηγείται αν αναλογιστεί κανείς το παρακάτω. Οι εγκαταστάσεις με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες διαρρέονται από ένα μεγάλο σύστημα σωληνώσεων σε όλο το μήκος των ηλιακών συλλεκτών, ενώ στους πύργους ηλιακής ισχύος το πεδίο των ηλιοστατών δεν περιλαμβάνει καν σωληνώσεις. Οι αντίστοιχες σωληνώσεις, για την περίπτωση του πύργου, βρίσκονται πίσω από την επιφάνεια του κεντρικού ηλιακού δέκτη και συνεπώς το μήκος τους είναι, σαφώς, πολύ μικρότερο. Για τον λόγο αυτό, οι απώλειες θερμότητας που συμβαίνουν στις επιμήκειες σωληνώσεις των εγκαταστάσεων παραβολικών κοίλων συλλεκτών είναι μεγαλύτερες. Είναι προφανές, ακόμα, ότι η αντλία, που χρησιμοποιείται για την διακίνηση του εργαζόμενου μέσου στο μεγάλο σύστημα σωληνώσεων των παραβολικών συλλεκτών, καταναλώνει πολύ περισσότερη ενέργεια, από αυτή που χρησιμοποιείται για να ανεβάσει απλά το εργαζόμενο μέσο στην κορυφή του πύργου, στον κεντρικό ηλιακό δέκτη. Συνέπεια είναι οι ιδιοκαταναλώσεις στα συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών να προκύπτουν σχεδόν διπλάσιες από αυτές στους πύργους ηλιακής ισχύος.

Σημαντικό είναι και το θέμα του κόστους μιας τέτοιας ηλιοθερμικής εγκατάστασης ,όπου τα συστήματα κεντρικού ηλιακού δέκτη υπερέχουν στους τομείς των ηλιοστατών και των σωληνώσεων. Συγκεκριμένα, τα παραβολικά κάτοπτρα είναι ακριβότερα από τα επίπεδα που χρησιμοποιούνται ως ηλιοστάτες στους πύργους ηλιακής ισχύος. Επιπροσθέτως, η μικρότερη αντίσταση των τελευταίων στον αέρα απαιτεί και μικρότερο κόστος για την στήριξή τους στο έδαφος. Το μήκος σωληνώσεων αναλύθηκε στην παραπάνω παράγραφο και είναι προφανές πως είναι ένα οικονομικό μειονέκτημα των εγκαταστάσεων παραβολικών κοίλων συλλεκτών.

Τελευταίο ,αλλά και μεγάλης σημασίας στοιχείο για τους πύργους ηλιακής ισχύος, είναι η καταλληλότητά τους ως προς την ενσωμάτωση τόσο συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, όσο και συστήματος εφεδρικής καύσης ,για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο και σε χρονικές στιγμές που οι τιμές της προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας δεν επαρκούν. [14],[29]

### **2.3 Υποσυστήματα του Πύργου Ηλιακής Ισχύος**

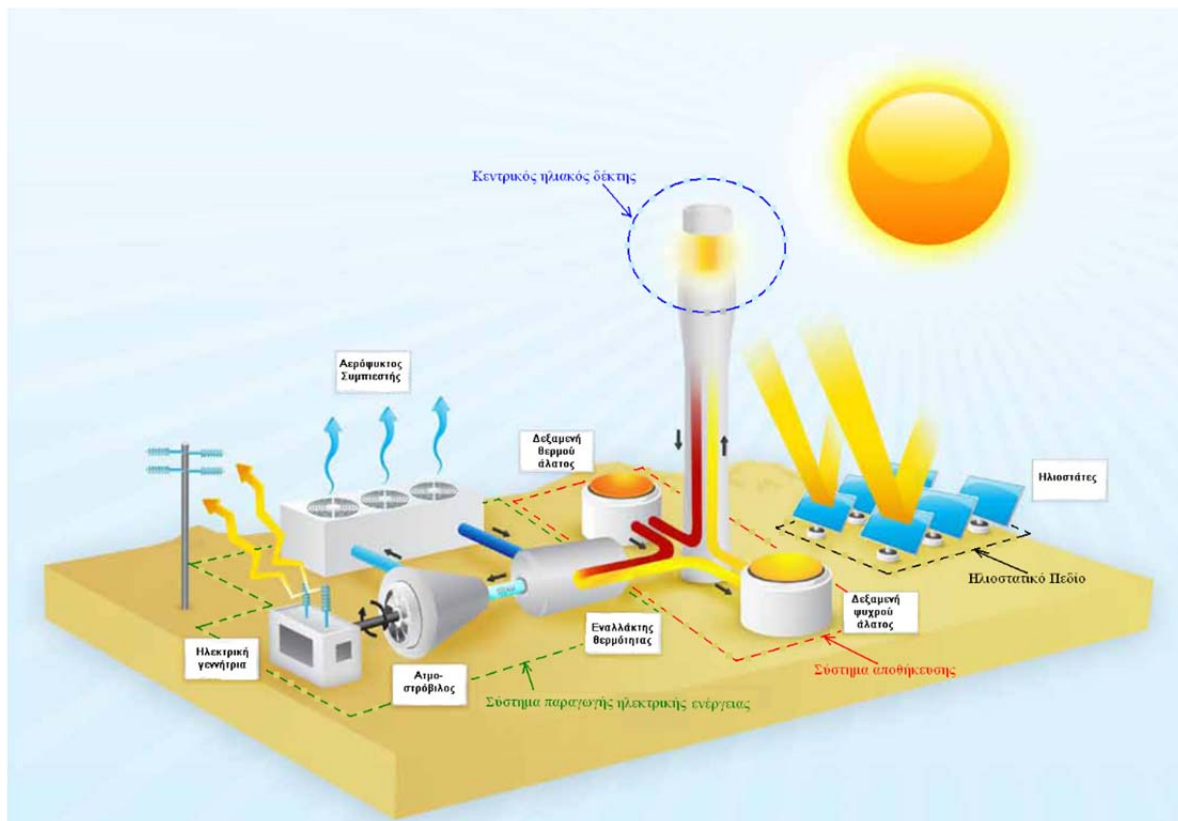
Μια εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος αποτελείται ,όπως θα δούμε και αναλυτικά σε αυτό το κεφάλαιο, από τα παρακάτω υποσυστήματα:

- Ηλιοστατικό Πεδίο (ή πεδίο Ηλιοστατών)
- Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης
- Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας
- Σύστημα Αποθήκευσης
- Σύστημα Εφεδρικής Καύσης

Το ηλιοστατικό πεδίο ,ο κεντρικός δέκτης και το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα απολύτως απαραίτητα τμήματα που κάθε εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος χρειάζεται. Τα συστήματα αποθήκευσης και εφεδρικής καύσης είναι προαιρετικά, ωστόσο χρησιμοποιούνται σε έναν μεγάλο αριθμό ηλιοθερμικών μονάδων ,καθώς βοηθούν σημαντικά στην τελικά παραγόμενη ποσότητα ενέργειας.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζεται ,σε ένα αρκετά διαφωτιστικό σχήμα, μια τυπική διάταξη ηλιοθερμικού σταθμού, με σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη:





Σχήμα 2.1 Ηλιοθερμική Εγκατάσταση με Σύστημα Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη. [30]

### 2.3.1 Ηλιοστατικό Πεδίο

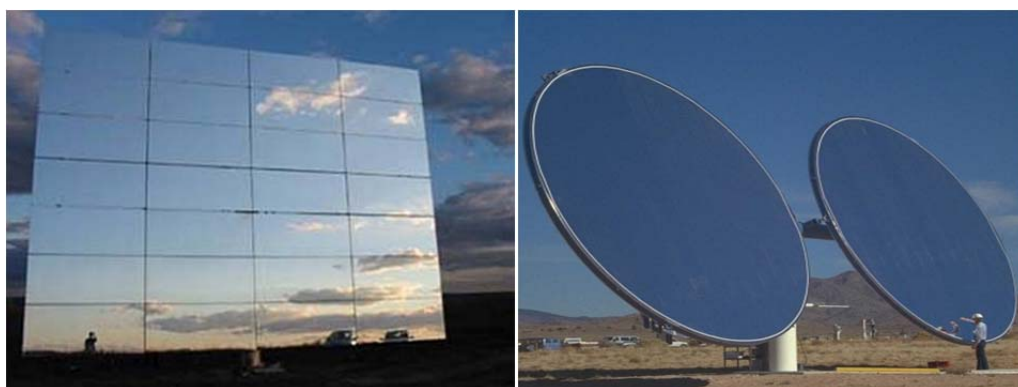
Το ηλιοστατικό πεδίο οριοθετείται από τους ηλιοστάτες και τον χώρο ,τον οποίο αυτοί καταλαμβάνουν στο έδαφος ,στη γειτονική περιοχή του πύργου.

Ο ηλιοστάτης είναι ,στην ουσία, μια ανακλαστική (κατοπτρική) επιφάνεια στερεωμένη στο έδαφος με ένα σύστημα στήριξης, της οποίας η κίνηση ρυθμίζεται βάσει ενός μηχανισμού ελέγχου. Σκοπός του κάθε ηλιοστάτη είναι, με την ανεξάρτητη κίνηση του σε σχέση με τους υπόλοιπους του πεδίου, να καταφέρνει να τοποθετεί την ανακλαστική του επιφάνεια ,κάθε στιγμή, με τέτοιο τρόπο , ώστε να επιτυγχάνει την όσο το δυνατόν καλύτερη συγκέντρωση της άμεσης προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον κεντρικό δέκτη, στην κορυφή του πύργου. Για να μπορέσει ,λοιπόν, η ανακλώμενη δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας να κατευθυνθεί ακριβώς προς τον δέκτη, πρέπει το διάνυσμα που είναι κάθετο στην επιφάνεια του κάθε ηλιοστάτη να διχοτομεί διαρκώς τη γωνία που σχηματίζουν η ευθεία που ενώνει το κέντρο του ηλιοστάτη με το κέντρο του ηλιακού δέκτη, και η ευθεία που ενώνει το κέντρο του ηλιοστάτη με το κέντρο του ήλιου.

Η ανακλαστική επιφάνεια ενός τυπικού ηλιοστάτη κατασκευάζεται συνήθως από μία χαλύβδινη βάση, ένα συγκολλητικό στρώμα, ένα προστατευτικό στρώμα χαλκού, μια επίστρωση από ασήμι υψηλής ανακλαστικότητας και ένα χοντρό στρώμα γυαλιού. Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί ηλιοστάτες σε πολλά διαφορετικά μεγέθη, ξεκινώντας από 1 m<sup>2</sup> και ξεπερνώντας σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλων εγκαταστάσεων μέχρι και τα 120 m<sup>2</sup>. Πολλές φορές, η συνολική ανακλαστική επιφάνεια ενός μεγάλου ηλιοστάτη διαιρείται σε έναν αριθμό από μικρότερες επιφάνειες ,ώστε να εξασφαλίζεται μια ελαφριά καμπυλότητα που επιτρέπει την καλύτερη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στον

δέκτη. Βασικό μέλημα ενός σωστά κατασκευασμένου ηλιοστάτη είναι να παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα στην επιφάνειά του, χαμηλό σχετικά βάρος και υψηλή αντοχή στη φθορά λόγω των διαφόρων καιρικών φαινομένων.

Μία σχετικά νέα τεχνολογία σχεδιασμού ηλιοστατών, με σκοπό τη μείωση του βάρους και του κόστους τους, είναι αυτή των τεντωμένων μεμβρανών. Ένας ηλιοστάτης τεντωμένης μεμβράνης κατασκευάζεται από ένα κυκλικού σχήματος πλαίσιο, το οποίο τεντώνει μια μεμβράνη από λεπτό, ανοξειδωτο ατσάλι, όπως γίνεται με τη μεμβράνη ενός τύμπανου. Στη συνέχεια, πάνω στην μεμβράνη κολλούνται καθρέφτες γυαλιού. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, χρησιμοποιούνται απ' ευθείας λεπτές μεμβράνες με ανακλαστική επιφάνεια, φτιαγμένες από πολυμερή υλικά. Η μικρή καμπυλότητα της μεμβράνης εξασφαλίζεται μέσω της χρήσης κενού στο εσωτερικό της κατασκευής.



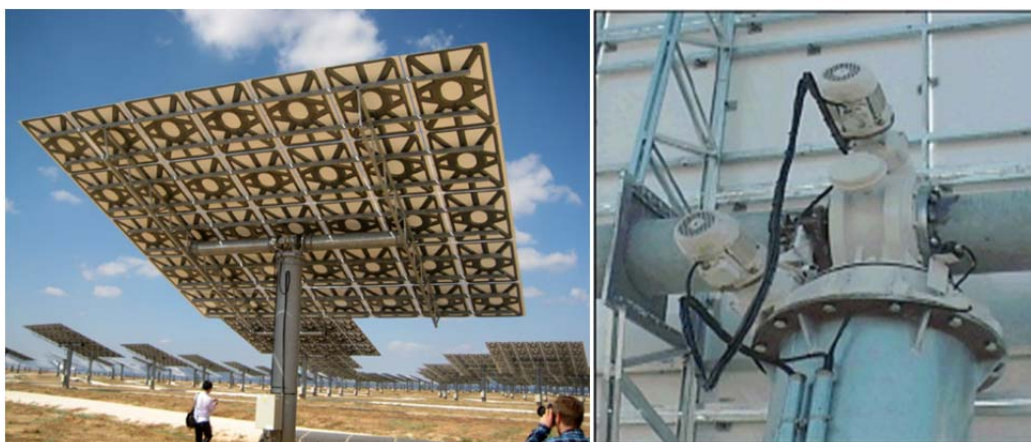
*Σχήμα 2.2 Τυπικός Ηλιοστάτης και Ηλιοστάτης Τεντωμένης Μεμβράνης αντίστοιχα. [31],[32]*

Ο κάθε ηλιοστάτης του ηλιοστατικού πεδίου στερεώνεται στο έδαφος με ένα σύστημα δύο πυλώνων, εγκάρσιων μεταξύ τους. Ο κατακόρυφος πυλώνας πακτώνεται σταθερά μέσα στη γη. Στην ουσία, πρόκειται για τους δύο άξονες, γύρω από τους οποίους πραγματοποιείται η κίνηση του ηλιοστάτη, για την δεδομένη γωνία ηλιακού ύψους και αζιμουθίου, κάθε στιγμή. Οι συντεταγμένες που τοποθετείται ο κάθε ηλιοστάτης στο πεδίο είναι αυστηρά καθορισμένες, και μάλιστα, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην τελική απόδοση της εγκατάστασης.

Το σύστημα στήριξης και ο μηχανισμός κίνησης ενός ηλιοστάτη πρέπει να παρουσιάζουν τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

- ❖ Μεγάλη στιβαρότητα, για να μπορούν να αντέξουν το βάρος των κινούμενων τμημάτων αλλά και τα δυνατά φορτία του ανέμου.
- ❖ Τεράστια ακρίβεια στην κίνηση, ακόμα και για πολύ μικρές μεταβολές της γωνιακής μετατόπισης.
- ❖ Ικανότητα εκτέλεσης πολύ αργών κινήσεων, με λόγους μείωσης της τάξης του 40000:1.
- ❖ Δυνατότητα σχετικά γρήγορης επαναφοράς του ηλιοστάτη στην ανενεργή οριζόντια θέση, σε περίπτωση ακατάλληλων καιρικών συνθηκών, ή λόγω ανάγκης απεστίασης του από τον κεντρικό ηλιακό δέκτη.
- ❖ Ανθεκτικότητα σε συνθήκες εξωτερικού χώρου.
- ❖ Εύκολη συντήρηση.
- ❖ Μικρό κόστος κατασκευής και λειτουργίας.

Ο μηχανισμός κίνησης ,που χρησιμοποιείται στους περισσότερους ηλιοστάτες σήμερα, και μπορεί να ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις, αποτελείται από έναν βηματικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος ,με δυνατότητα επίτευξης λόγω μετάδοσης κίνησης, στο κιβώτιο ταχυτήτων, της τάξεως πολλών χιλιάδων προς ένα.



Σχήμα 2.3 Σύστημα Στήριξης και Μηχανισμός Κίνησης Ηλιοστάτη. [33]

Όπως είδαμε και προηγουμένως ,η κίνηση ενός ηλιοστάτη πρέπει να χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη ακρίβεια, προκειμένου οι ανακλώμενες δέσμες ακτίνων να κατευθύνονται με επιτυχία στον κεντρικό ηλιακό δέκτη. Κάτι τέτοιο γίνεται αντιληπτό, αν αναλογιστεί κανείς πως ακόμα και μία μικρή γωνιακή απόκλιση στην κίνηση ενός απομακρυσμένου από τον πύργο ηλιοστάτη μπορεί να ισοδυναμεί με απόκλιση πολλών μέτρων του αποτυπώματος των ανακλώμενων ακτίνων στον δέκτη.

Για την εκτέλεση ,λοιπόν, της οποιασδήποτε κίνησης ,υπάρχει ξεχωριστά σε κάθε ηλιοστάτη ένα τοπικό σύστημα ελέγχου που συλλέγει πληροφορίες σχετικά με τη θέση του ηλίου και τα μετεωρολογικά δεδομένα και δίνει τις ανάλογες εντολές στον μηχανισμό κίνησης. Το σύστημα ελέγχου ,ουσιαστικά, υπολογίζει τη γωνία που πρέπει κάθε στιγμή να στραφεί η ανακλαστική επιφάνεια ,ή σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων δίνει εντολή για τοποθέτηση των ηλιοστατών στην οριζόντια θέση. Στην παραπάνω φωτογραφία ,το λευκό κιβώτιο που διακρίνεται στη βάση του κατακόρυφου πυλώνα στήριξης, είναι το σύστημα ελέγχου του ηλιοστάτη.

Τέλος ,το τοπικό σύστημα ελέγχου όλων των ηλιοστατών του πεδίου ελέγχεται από ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου το οποίο μπορεί να επεξεργαστεί κάποιος μέσω ενός κοινού υπολογιστή. Το τελευταίο παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις ενεργειακές ανάγκες του σταθμού, την θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου που επιτυγχάνεται με την παρούσα εστίαση των ανακλώμενων ακτίνων στον δέκτη και γενικότερα αποτελεί έναν μηχανισμό συνολικής εποπτείας του ηλιοθερμικού σταθμού. [22],[23],[34],[35]

### 2.3.2 Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης

Ο κεντρικός ηλιακός δέκτης είναι το τμήμα του πύργου ηλιακής ισχύος ,στο οποίο η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία από το ηλιοστατικό πεδίο μεταδίδεται σε ένα εργαζόμενο ρευστό ,με τη μορφή θερμικής ενέργειας.

Πρόκειται ,στην ουσία, για έναν ειδικά σχεδιασμένο εναλλάκτη θερμότητας ,που βρίσκεται τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου. Ένας τέτοιος εναλλάκτης θερμότητας δημιουργείται από έναν μεγάλο αριθμό πάνελ ,αποτελούμενων από παράλληλους ,κατακόρυφους λεπτούς σωλήνες (~20÷56 mm) συγκολλημένους μεταξύ τους με κοινή κεφαλή εισόδου και εξόδου. Οι σωλήνες συνήθως επικαλύπτονται εξωτερικά με μαύρη βαφή ,πολύ υψηλής απορροφητικότητας Pyromark®. Το εργαζόμενο ρευστό ρέει ,διαμέσου των σωλήνων, απάγοντας την ηλιακή ενέργεια που έχει απορροφηθεί από την εξωτερική τους επιφάνεια ,στη μορφή θερμότητας.

Τα βασικά μέρη ενός κεντρικού ηλιακού δέκτη είναι η απορροφητική επιφάνεια, αποτελούμενη από τα πάνελ σωληνώσεων, η κεντρική κατασκευή ,πάνω στην οποία αυτά είναι στερεωμένα, οι σωληνώσεις διασύνδεσης των πάνελ, οι σωληνώσεις εισόδου-εξόδου του εργαζόμενου μέσου και οι δεξαμενές ατμού ή τύμπανο ατμού ,ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση.

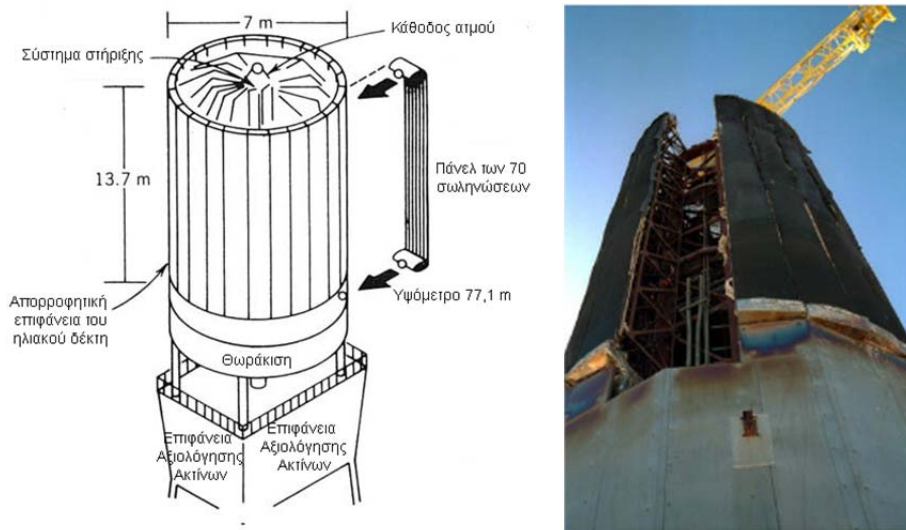
Το μέγεθος του ηλιακού δέκτη εξαρτάται από την ζητούμενη παραγόμενη ενέργεια από την εγκατάσταση ,και περιορίζεται από το μέγιστο όριο εισερχόμενης ροής θερμότητας , και τις απώλειες διαρροής. Πιο συγκεκριμένα ,όσο μικρότερη είναι η επιφάνεια του δέκτη ,τόσο μεγαλύτερη είναι και η θερμική ροή που εισέρχεται σε αυτήν. Επίσης μεγαλύτερες ,όμως, είναι και οι απώλειες διαρροής ,από τις ανακλώμενες ακτίνες που αστοχούν από την επιφάνεια του δέκτη. Η εισερχόμενη ροή θερμότητας είναι επιθυμητό να παίρνει μεγάλες τιμές ,καθώς αυξάνει την συνολική απόδοση του δέκτη, ωστόσο και αυτή περιορίζεται από κάποιο άνω όριο ,λόγω της περιορισμένης αντοχής των υλικών κατασκευής του δέκτη σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Τυπικές θερμοκρασίες ,στις οποίες λειτουργεί ένας κεντρικός ηλιακός δέκτης είναι 300-1200 °C , και τυπικές τιμές για την εισερχόμενη ροή θερμότητας στην απορροφητική επιφάνεια είναι 200-1200 KW/m<sup>2</sup>. Οι παραπάνω τιμές κάνουν επιτακτική την προσεκτική μελέτη των υλικών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή ενός δέκτη, καθώς αυτά καλούνται να ανταπεξέλθουν μεγάλων τάσεων και θερμικών φορτίων ,κατά τη λειτουργία του σταθμού. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ,που πρέπει να εμφανίζει ένας δέκτης είναι η υψηλή θερμική απόδοση και η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Στο σχεδιασμό ενός κεντρικού δέκτη, σημαντικό ρόλο παίζει και το ρευστό το οποίο θα επιλεγεί να διαρρέει τις σωληνώσεις του. Τα συνηθέστερα ρευστά απορρόφησης της θερμότητας ,για μία ηλιοθερμική εγκατάσταση βασισμένη στην εκτέλεση του κύκλου Rankine, είναι το νερό-ατμός, τα τετηγμένα νιτρικά άλατα ,το υγρό νάτριο και πολύ σπανιότερα ο αέρας.

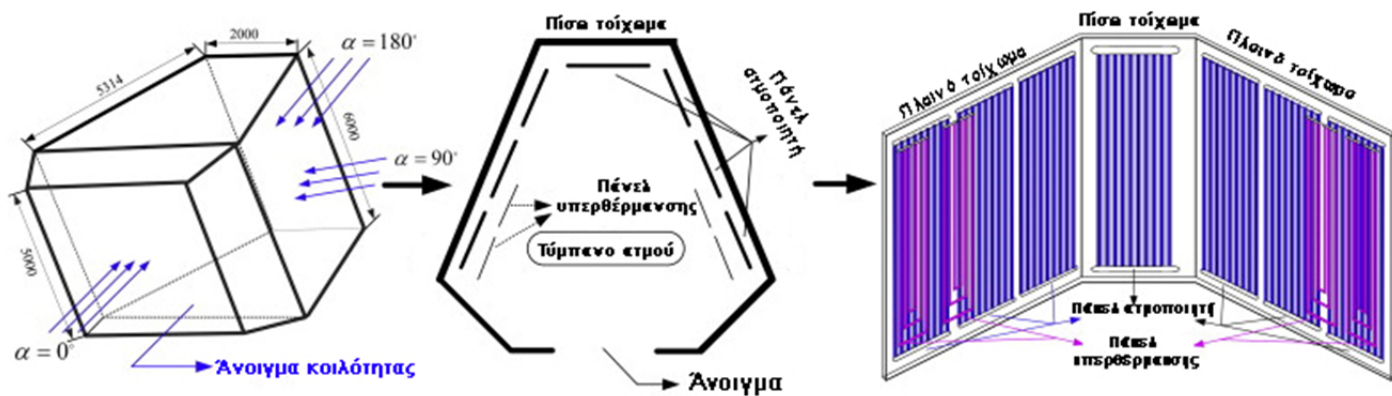
Οι κυριότεροι τύποι κεντρικού ηλιακού δέκτη ,που χρησιμοποιούνται σήμερα σε εγκαταστάσεις πύργων ηλιακής ισχύος, είναι ο εξωτερικός δέκτης, ο δέκτης κοιλότητας και σπανιότερα ο ογκομετρικός δέκτης.

Ο *εξωτερικός δέκτης (external receiver)* αποτελείται από επίπεδες ή κυλινδρικές επιφάνειες απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες βρίσκονται εκτεθειμένες στο περιβάλλον. Η περίπτωση κυλινδρικού δέκτη επιλέγεται σε εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος ,όπου το πεδίο των ηλιοστατών περικυκλώνει τον πύργο. Οι απορροφητικές επιφάνειες είναι ,όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, πάνελ αποτελούμενα από συγκολλημένες ,παράλληλες, λεπτές σωληνώσεις ,τις οποίες διαρρέει το εργαζόμενο μέσο. Ο λόγος ύψους-διαμέτρου ενός κυλινδρικού εξωτερικού δέκτη είναι συνήθως της τάξης του 1:1 με 2:1.



Σχήμα 2.4 Παράδειγμα Εξωτερικού Κυλινδρικού Ηλιακού Δέκτη της Εγκατάστασης Πύργου Ηλιακής Ισχύος Solar One. [37],[39]

Σε ένα δέκτη κοιλότητας (*cavity receiver*), η ακτινοβολία που αντανακλάται από τους ηλιοστάτες περνά μέσα από ένα άνοιγμα σε μία κατασκευή που μοιάζει με κουτί ,πριν να προσπέσει στα απορροφητικά τοιχώματα του δέκτη. Ο δέκτης κοιλότητας ,μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερα του ενός ανοίγματα, καθένα από τα οποία να κοιτάζει προς μία διαφορετική κατεύθυνση του ηλιοστατικού πεδίου. Ωστόσο ,πρόσφατες μελέτες πάνω στους δέκτες κοιλότητας αποδεικνύουν ,ότι η βέλτιστη λειτουργία τους προκύπτει για ένα μόνο άνοιγμα ,με βόρειο προσανατολισμό ,για ηλιοστατικά πεδία που εκτείνονται βόρεια του πύργου. Αυτού του τύπου οι δέκτες τοποθετούνται υπό γωνίες κλίσης  $60^{\circ}$  έως  $120^{\circ}$ . Οι ενεργές επιφάνειες απορρόφησης της ακτινοβολίας και μεταφοράς θερμότητας αποτελούνται ,όπως και στους εξωτερικούς δέκτες από πάνελ σωληνώσεων. Στην περίπτωση όμως των δεκτών κοιλότητας, τα πάνελ αυτά τοποθετούνται σε μία κοίλη διάταξη ,κοιτώντας προς τους ηλιοστάτες, στο εσωτερικό της κλειστής κατασκευής. Οι μη ενεργές επιφάνειες ,στο εσωτερικό της κοιλότητας, δηλαδή η οροφή και ο πυθμένας πρέπει να μονώνονται πολύ αποτελεσματικά για να περιορίζουν στο ελάχιστο τις απώλειες θερμότητας του δέκτη. Η δημιουργία του δέκτη κοιλότητας ,είχε ως σκοπό να παγιδέψει τη θερμότητα από την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην κοιλότητα. Για τον λόγο αυτό το μέγεθος του ανοίγματος ,απ' όπου εισέρχονται οι ανακλώμενες δέσμες ακτίνων στον δέκτη, παίζει μεγάλο ρόλο. Οι διαστάσεις του ,τελικά, επιλέγονται έτσι ,ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας ,αλλά και οι απώλειες διαρροής ,λόγω των ανακλώμενων δεσμών ακτίνων που θα αποτύχουν να περάσουν μέσα από το άνοιγμα. Συνήθως, το εμβαδό του ανοίγματος κατασκευάζεται υποδιπλάσιο ή υποτριπλάσιο από το συνολικό εμβαδό των επιφανειών, του εσωτερικού της κοιλότητας.



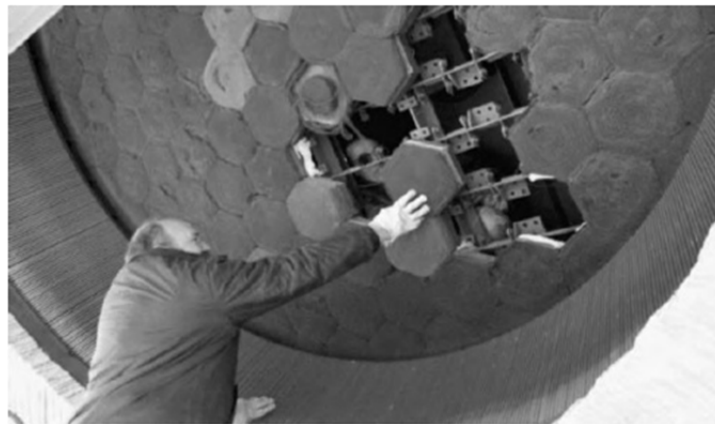
Σχήμα 2.5 Παράδειγμα Ηλιακού Δέκτη Κοιλότητας. [39],[40]

Εκτός του γεγονότος ότι ,συνήθως, ο εξωτερικός δέκτης χρησιμοποιείται για ηλιοστατικά πεδία κυκλικά του πύργου ,ενώ ο δέκτης κοιλότητας για ηλιοστατικά πεδία με διάταξη βόρεια του πύργου (για βόρεια γεωγραφικά πλάτη), σε μία πρώτη σύγκριση μεταξύ τους ,θα μπορούσε κανείς να πει ότι οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερες στους εκτεθειμένους στο περιβάλλον εξωτερικούς δέκτες απ' ότι στους δέκτες κοιλότητας, ενώ οι τελευταίοι παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες διαρροής, καθώς απαιτούν από τις ανακλώμενες ακτίνες να περνούν μέσα από το σχετικά μικρό άνοιγμα, πριν προσπέσουν στην απορροφητική επιφάνεια. Επιπρόσθετα, το εμβαδόν της απορροφητικής επιφάνειας ενός δέκτη κοιλότητας είναι περίπου κατά 25% μεγαλύτερο από αυτό για έναν εξωτερικό δέκτη για ίδια εισερχόμενη θερμική ισχύ και μέγιστο όριο ροής θερμότητας, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του. Το βάρος και το πλήθος των εξαρτημάτων είναι συνήθως μεγαλύτερα σε έναν δέκτη κοιλότητας απ' ότι σε έναν εξωτερικό δέκτη, ωστόσο οι σωληνώσεις του δέκτη κοιλότητας προστατεύονται πολύ περισσότερο από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. [36],[37],[38]

Ο ογκομετρικός δέκτης (volumetric receiver) βασίζεται σε εξαιρετικά πορώδεις δομές που λειτουργούν ως εναλλάκτες θερμότητας με συναγωγή ,απορροφώντας τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν απορροφάται σε μια εξωτερική επιφάνεια ,όπως στους άλλους τύπους ηλιακού δέκτη, αλλά στο εσωτερικό του όγκου. Το μέσο μεταφοράς θερμότητας ,που είναι είτε ατμοσφαιρικός ,είτε προσυμπιεσμένος αέρας, εξαναγκάζεται να περάσει από την πορώδη δομή και να θερμανθεί μέσω συναγωγής. Το απορροφητικό υλικό σε έναν ογκομετρικό δέκτη αποτελείται συνήθως από λεπτά, και ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες σύρματα ,ή από μεταλλικές ή κεραμικές κυψελοειδείς δομές. Οι ογκομετρικοί δέκτες συναντώνται σε δύο βασικές μορφές, είτε εκτεθειμένοι στο περιβάλλον ,είτε περιβαλλόμενοι από ένα διαφανές παράθυρο. Στην τελευταία μορφή ,ο ογκομετρικός δέκτης χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που καλείται να θερμάνει αέρα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (της τάξεως των 1200°C) ,ο οποίος έχει νωρίτερα συμπιεστεί και προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως αέρας καύσης πριν εισέλθει σε κάποιον

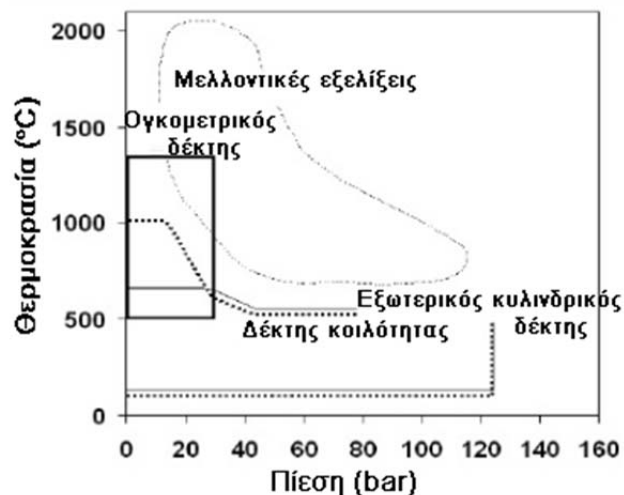
αεριοστρόβιλο. Βασικό χαρακτηριστικό όλων των ογκομετρικών δεκτών είναι τα ιδιαίτερα πορώδη υλικά κατασκευής τους, καθώς και οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται στο εσωτερικό τους. Τα πλεονεκτήματά τους συνοψίζονται, στο ότι ο αέρας είναι δωρεάν και πάντα διαθέσιμος, δεν υπάρχει αλλαγή φάσης του εργαζόμενου μέσου και ούτε κίνδυνος στερεοποίησής του, πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επιτυγχάνονται, επιτρέποντας στο εργαζόμενο μέσο να εκτελέσει αποδοτικότερους θερμοδυναμικούς κύκλους, η κατασκευή είναι σχετικά απλή, χωρίς μηχανισμούς ασφάλειας και με γρήγορη απόκριση στις αλλαγές της κατάστασης του αέρα στην είσοδο και δεν υπάρχει καμία αρνητική επίδραση στο περιβάλλον.

Παρ' όλα αυτά, οι ογκομετρικοί δέκτες χρειάζονται περεταίρω βελτίωση της θερμικής τους απόδοσης και της γενικότερης αξιοπιστίας που παρουσιάζουν. Οι απώλειες ακτινοβολίας πρέπει να μειωθούν και η αντοχή τους στο χρόνο να τεθεί υπό διερεύνηση. Τα οφέλη τους είναι προφανή, ωστόσο, μέχρι σήμερα, η χρήση τους βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό κυρίως στάδιο, με δοκιμές που έχουν δείξει θετικές προοπτικές. [22],[38]



Σχήμα 2.6 Παράδειγμα Ογκομετρικού Δέκτη, από το Πείραμα TSA στην Ηλιακή Πλατφόρμα της Αλμερίας. [22]

Ένα διαφωτιστικό διάγραμμα, με τις συνήθειες θερμοκρασίες και πιέσεις λειτουργίας των διαφορετικών τύπων κεντρικών ηλιακών δεκτών, παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 2.7 Τυπικές Τιμές Θερμοκρασίας και Πίεσης Λειτουργίας των Διαφόρων Τύπων Ηλιακών Δεκτών. [38]

### 2.3.3 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας [36],[38]

Τα βασικά εξαρτήματα που αποτελούν το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μίας εγκατάστασης πύργου ηλιακής ισχύος είναι οι σωληνώσεις, οι ατμοστρόβιλοι, οι αντλίες πίεσης, οι εναλλάκτες θερμότητας, ο συμπυκνωτής, ο απαεριωτής και η ηλεκτρική γεννήτρια. Πρόκειται, στην ουσία, για το σύστημα εκείνο, το οποίο διατρέχει το εκάστοτε εργαζόμενο μέσο, εκτελώντας ανελλιπώς έναν θερμοδυναμικό κύκλο και παράγοντας ενέργεια. Θα μπορούσε κανείς να χαρακτηρίσει τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ως συνήθη ατμοπαραγωγικά κυκλώματα, με τη μόνη διαφορά, ότι την θερμότητα που προσδίδει ο ατμοπαραγωγός στο ρευστό, στην περίπτωση των ηλιακών θερμικών σταθμών, την προσδίδει η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία μέσω του ηλιακού δέκτη. Ο ρόλος του ατμοπαραγωγού υποκαθίσταται, δηλαδή, από το σύστημα ηλιοστατών-κεντρικού δέκτη.

Η επιλογή του εργαζόμενου ρευστού που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία λειτουργίας του σταθμού, μετά την απορρόφηση θερμότητας στον κεντρικό ηλιακό δέκτη, και από το μέσο αποθήκευσης της ενέργειας, εφόσον υπάρχει σύστημα αποθήκευσης. Τα επικρατέστερα ρευστά για τη μεταφορά της θερμότητας σε τέτοιες εγκαταστάσεις είναι το νερό-ατμός, τα τετηγμένα άλατα και το υγρό νάτριο, ενώ πολύ πιο σπάνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά έλαια ή αέρας. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τις κατάλληλες θερμοκρασίες λειτουργίας για το κάθε διαφορετικό εργαζόμενο ρευστό:

<b>Ρευστό και Τυπική Θερμοκρασία Λειτουργίας</b>	
<b>Νερό/Ατμός</b>	0°C μέχρι 540°C (32°F μέχρι 1000°F)
<b>Λάδι Caroria HT-43</b>	έως 315°C (600°F)
<b>Τετηγμένο Άλας</b>	280°C μέχρι 565°C (530°F μέχρι 1050°F)
<b>Υγρό Νάτριο</b>	150°C μέχρι 590°C (300°F μέχρι 1100°F)

Πίνακας 2.1 Θερμοκρασίες Λειτουργίας Διαφόρων Εργαζόμενων Ρευστών. [36]

Το εργαζόμενο μέσον ωστόσο, με τη σειρά του, επηρεάζει την τελική διάταξη των κυκλωμάτων που θα αποτελέσουν το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης. Για τον λόγο αυτό, θα συνεχίσουμε την ανάπτυξη της παρούσας παραγράφου χωρίζοντας τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε *συστήματα άμεσης ατμοπαραγωγής και συστήματα έμμεσης ατμοπαραγωγής*.

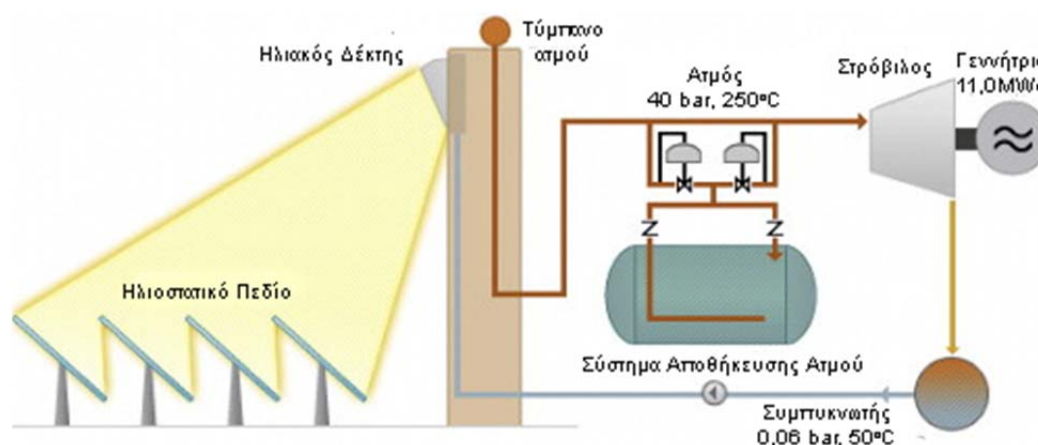
#### Συστήματα Άμεσης Ατμοπαραγωγής

Στα συστήματα άμεσης ατμοπαραγωγής, όλο το μήκος των σωληνώσεων διαρρέεται αποκλειστικά από νερό-ατμό. Ο ατμός παράγεται άμεσα στην έξοδο του ηλιακού δέκτη, καθώς το νερό που φτάνει στις σωληνώσεις του αλλάζει φάση, απορροφώντας τη θερμότητα που αναπτύσσεται εκεί από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία. Ο κορεσμένος, ή και σε πολλές περιπτώσεις υπέρθερμος, ατμός, στη συνέχεια, εκτονώνεται απ' ευθείας στο στρόβιλο, παράγοντας μηχανικό έργο και κατ' επέκταση ηλεκτρικό ρεύμα στη γεννήτρια. Αφότου αποτονωθεί, ο ατμός υφίσταται συμπύκνωση, σε έναν αερόψυκτο ή υδρόψυκτο συμπυκνωτή, και υγροποιείται ξανά. Το τροφοδοτικό νερό μπορεί να προθερμαίνεται έπειτα, μέσω ενός συστήματος απομαστεύσεων ατμού και εναλλακτών



θερμότητας ,πριν συμπιεστεί από αντλία ,στην πίεση λειτουργίας του σταθμού, για να ανέβει και πάλι προς τις σωληνώσεις του ηλιακού δέκτη.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ,με άμεση ατμοπαραγωγή, του εν λειτουργία πύργου ηλιακής ισχύος PS10 κοντά στη Σεβίλλη της Ισπανίας. Παρατηρούμε, πως στο κύκλωμα συμπεριλαμβάνεται και ένα σύστημα αποθήκευσης ατμού ,το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 2.8 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας της Εγκατάστασης Πύργου Ηλιακής Ισχύος PS10 με Άμεση Ατμοπαραγωγή. [41]

Η χρήση νερού ,ως μέσου μεταφοράς της θερμότητας στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός πύργου ηλιακής ισχύος, είναι αρκετά κοινή και ίσως η πιο δοκιμασμένη επιλογή στις μέχρι σήμερα εγκαταστάσεις. Το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλη εμπειρία σχετικά με τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του νερού-ατμού ,ως εργαζόμενου μέσου, σε κυκλώματα ατμοπαραγωγής ,αποτελεί σαφές πλεονέκτημα. Επιπροσθέτως, με την εξ' ολοκλήρου χρήση νερού-ατμού στο κύκλωμα του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποφεύγονται οι απώλειες από τη χρήση ενός επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας για την ατμοπαραγωγή, όπως θα δούμε και παρακάτω στα συστήματα έμμεσης ατμοπαραγωγής. Σημαντικό είναι ,ακόμα, το γεγονός ότι το νερό παρουσιάζει χαμηλότερο σημείο τήξης από άλλα εργαζόμενα ρευστά και ,όπως αναμένεται, είναι και το πιο φτηνό. Από την άλλη μεριά, το νερό ,ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας, επιβαρύνει σημαντικά τις σωληνώσεις ,καθώς αναπτύσσονται σε αυτές υψηλές πιέσεις λόγω της αλλαγής φάσης του. Ένα τελευταίο μειονέκτημα είναι πως το νερό-ατμός δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικό μέσο για αποθήκευση ενέργειας, καθώς τα συστήματα αποθήκευσης με χρήση ατμού εμφανίζουν ,γενικώς, υψηλές τιμές θερμικών απωλειών.

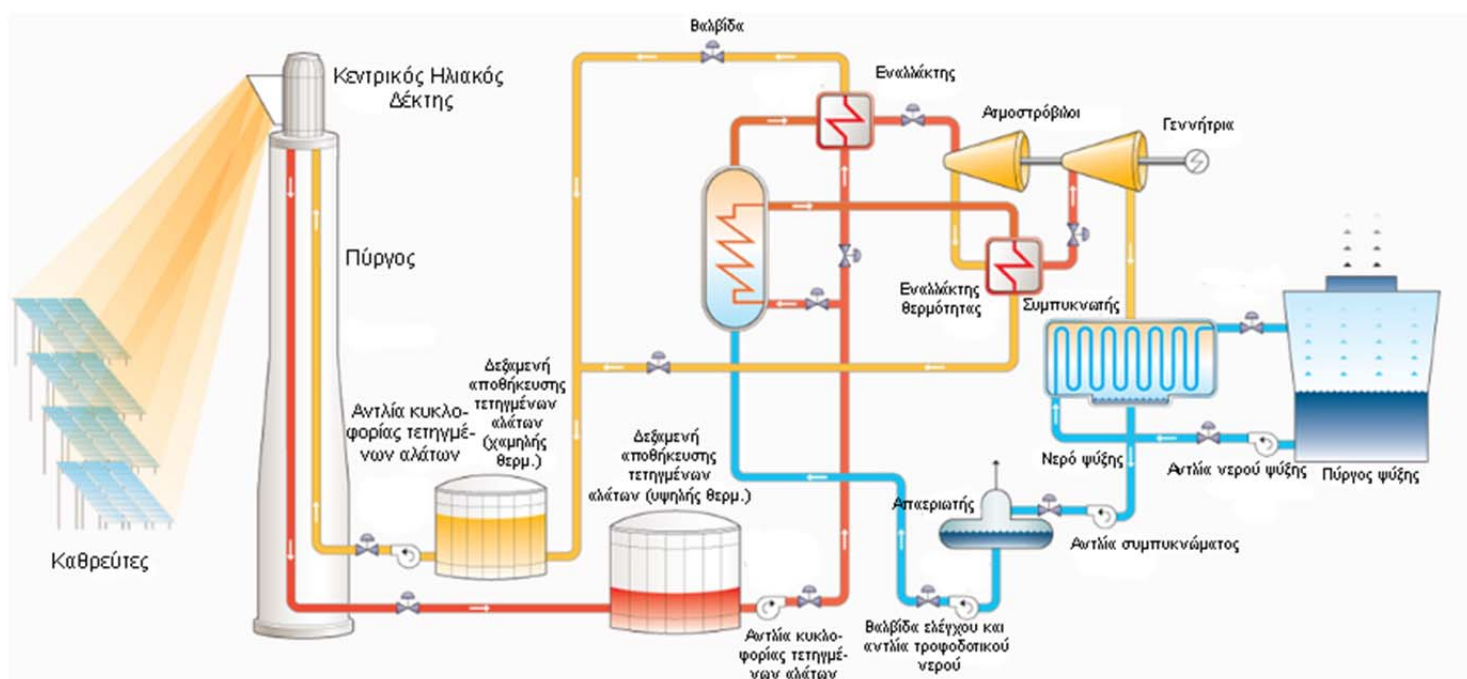
#### Συστήματα Έμμεσης Ατμοπαραγωγής

Τα συστήματα έμμεσης ατμοπαραγωγής αποτελούνται ,στην ουσία, από δύο ανεξάρτητα κυκλώματα ,με διαφορετικό εργαζόμενο μέσον το καθένα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με έναν εναλλάκτη θερμότητας υπεύθυνο για την ατμοπαραγωγή. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο κύκλωμα ,στο οποίο ρέει ένα ρευστό διαφορετικό από νερό, χρησιμοποιείται για την απαγωγή της θερμότητας από τις σωληνώσεις του κεντρικού ηλιακού δέκτη και την ,μετέπειτα, ενδεχόμενη αποθήκευσή της. Το θερμό ρεύμα ρευστού ,μετά την απορρόφηση θερμότητας στον ηλιακό δέκτη, διέρχεται από έναν εναλλάκτη θερμότητας ,ο οποίος δρα ως ατμοπαραγωγός ,καθώς από αυτόν διέρχεται και το δεύτερο κύκλωμα της

εγκατάστασης, το οποίο διαρρέεται από νερό-ατμό. Με αυτό τον τρόπο, η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό ρευστό στο ψυχρό νερό, το οποίο και ατμοποιείται.

Ο ατμός, στη συνέχεια, εκτελεί τις θερμοδυναμικές μεταβολές που περιγράφηκαν και στα συστήματα άμεσης ατμοπαραγωγής, με την ίδια σειρά, και αφότου συμπυκνωθεί και συμπιεστεί από αντλία διέρχεται εκ νέου από τον εναλλάκτη θερμότητας-ατμοπαραγωγό για να ξεκινήσει έναν νέο κύκλο. Αντίστοιχα, το ρευστό, που μεταβιβάζει τη θερμότητα του στο ρεύμα νερού, ψύχεται και αντλείται στην κορυφή του πύργου, στις σωληνώσεις του ηλιακού δέκτη για να θερμανθεί ξανά, απάγοντας τη θερμότητα της επιφάνειάς τους.

Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, γίνεται ακόμα πιο κατανοητή με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος, το οποίο απεικονίζει ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με έμμεση ατμοπαραγωγή, μιας εγκατάστασης πύργου ηλιακής ισχύος.



Σχήμα 2.9 Τυπικό Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Έμμεση Ατμοπαραγωγή για Πύργο Ηλιακής Ισχύος. [42]

Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση παρατηρείται και σύστημα αποθήκευσης τετηγμένων αλάτων, για το οποίο θα γίνει λόγος στην επόμενη παράγραφο.

Στα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμμεση ατμοπαραγωγή, τα ρευστά που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της θερμότητας από τις σωληνώσεις του δέκτη προς τον εναλλάκτη-ατμοπαραγωγό είναι τα τετηγμένα άλατα (molten salts), το υγρό νάτριο (liquid sodium) και πολύ πιο σπάνια τα έλαια (oils) και ο αέρας (air).

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός από τα προαναφερθέντα ρευστά παρουσιάζονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα:

	<b>Τετηγμένα Άλατα</b>	<b>Υγρό Νάτριο</b>	<b>Έλαια</b>	<b>Αέρας</b>
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> <li>- μη τοξικά</li> <li>- ιδιαίτερα ευσταθή</li> <li>- χαμηλή πίεση σε υψηλές θερμοκρασίες</li> <li>- υψηλή θερμική αγωγιμότητα</li> <li>- υψηλή θερμοχωρητικότητα</li> <li>- δεν αντιδρά με νερό και αέρα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα</li> <li>- επιτρέπει μεγάλες τιμές ροής θερμότητας στον ηλιακό δέκτη</li> </ul>	Περιορισμένη χρήση λόγω του περιορισμού της θερμοκρασίας τους κάτω από 315°C ,και της υψηλής αναφλεξιμότητας τους.	Αδύναμο ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας, παρά τις υψηλές θερμοκρασίες και τιμές ροής θερμότητας που επιτρέπει
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> <li>- υψηλό σημείο τήξης στους 245°C , που συνεπάγεται κίνδυνο στερεοποίησης ,αν δεν υπάρχει μόνιμο σύστημα θέρμανσης του ρευστού</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- αντιδρά με το νερό και τον αέρα και απαιτεί συστήματα ασφαλείας</li> <li>- σχετικά ακριβό</li> <li>- υψηλό σημείο τήξης (λίγο χαμηλότερο από τα τετηγμένα άλατα)</li> </ul>		

*Πίνακας 2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Χρησιμοποιούμενων Ρευστών Μεταφοράς Θερμότητας σε Συστήματα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Έμμεσης Ατμοπαραγωγής. [36],[38]*

Τέλος, σημαντικό είναι να αναφερθεί ,ότι τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ,είτε άμεσης είτε έμμεσης ατμοπαραγωγής, έχουν τη δυνατότητα αναθέρμανσης του αποτονομένου στο στρόβιλο ατμού.

### **2.3.4 Σύστημα Αποθήκευσης [36],[38]**

Στις εγκαταστάσεις πύργων ηλιακής ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί προαιρετικά ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Σε χρονικές περιόδους υψηλής ηλιακής διαθεσιμότητας ,όπου η θερμική ενέργεια που συγκεντρώνεται στον κεντρικό δέκτη, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, ξεπερνάει την θερμική ενέργεια που θα χρειαζόταν ο σταθμός για τη λειτουργία του σε συνθήκες πλήρους φορτίου, το σύστημα αποθήκευσης αποθηκεύει την περισσευούμενη θερμική ενέργεια ,με σκοπό να την προσδώσει πίσω στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ,όταν οι τιμές της προσπίπτουσας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας δεν θα είναι ιδιαίτερα μεγάλες.

Το σύστημα αποθήκευσης διαδραματίζει βασικό ρόλο για μια εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος, καθώς ενισχύει τη συνεχή λειτουργία της σε περιπτώσεις χαμηλής ή μεταβλητής ηλιοφάνειας, ή ακόμα και σε ώρες μηδενικής ακτινοβολίας. Σημαντικό ,επίσης, είναι και το γεγονός ,ότι εξ' αιτίας του συστήματος αποθήκευσης αποφεύγονται οι απότομες εκκινήσεις και διακοπές της λειτουργίας του σταθμού, που θα ήταν επιζήμιες για τα διάφορα εξαρτήματα που τον αποτελούν. Εν ολίγοις, το σύστημα αποθήκευσης επιτρέπει την αλλαγή του προφίλ της παραγόμενης ,από την εγκατάσταση, ηλεκτρικής ενέργειας με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσεγγίζει περισσότερο το εκάστοτε προφίλ της ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος και να μην εξαρτάται απόλυτα από την ηλιοφάνεια.

Οι τρεις βασικοί τύποι θερμικής αποθήκευσης ,που έχουν επινοηθεί μέχρι σήμερα για τους πύργους ηλιακής ισχύος, είναι αισθητής θερμότητας, λανθάνουσας θερμότητας και θερμοχημικής ενέργειας.

Στα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας η ενέργεια αποθηκεύεται ,με τη μορφή θερμικής ενέργειας, σε κάποιο αποθηκευτικό μέσον ,το οποίο για τις θερμοκρασίες λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης δεν αλλάζει φάση. Ένας μεγάλος αριθμός από υλικά έχουν δοκιμαστεί για το συγκεκριμένο τρόπο αποθήκευσης, περιλαμβάνοντας τα έλαια, τα μείγματα τετηγμένων αλάτων, τα υγρά μέταλλα αλλά και στερεής φύσεως υλικά ,όπως οι πέτρες ,η άμμος, τα κεραμικά τούβλα και οι μεταλλικές σφαίρες.

Ένας άλλος τρόπος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας είναι χρησιμοποιώντας τη λανθάνουσα θερμότητα που εκλύεται κατά την αλλαγή φάσης ενός υλικού. Οι αλλαγές φάσης από στερεή σε υγρή κατάσταση συμβαίνουν σε ένα σχετικά μικρό εύρος θερμοκρασιών, οι οποίες πρέπει να είναι συμβατές με τη θερμοκρασία που μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα αποθήκευσης της εγκατάστασης. Τα δύο βασικά μειονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι ότι τα υλικά αλλαγής φάσης είναι ακριβά ,σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, και ότι απαιτείται μεγάλη επιφάνεια για να γίνει η απαιτούμενη συναλλαγή θερμότητας.

Η θερμοχημική αποθήκευση στηρίζεται στην αποθήκευση της θερμικής ενέργειας που εκλύεται από την διαδικασία της αποσύνθεσης και επανασύνθεσης σε αντιστρεπτές χημικές αντιδράσεις. Σε αυτή τη μέθοδο αποθήκευσης έχουν δοκιμαστεί ένας μεγάλος αριθμός από καταλυτικές ή μη καταλυτικές αντιδράσεις. Ένα πολύ θετικό χαρακτηριστικό της θερμοχημικής αποθήκευσης είναι ότι τα συστατικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή, μπορούν να μεταφέρονται και να αποθηκεύονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Εμπόδιο ,ωστόσο, στην γρήγορη ανάπτυξη των συστημάτων αποθήκευσης θερμοχημικής ενέργειας είναι το πολύ υψηλό κόστος των υλικών ,καθώς και τα αέρια που παράγονται κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων υψηλής θερμοκρασίας.

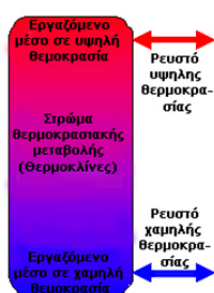
Από τους παραπάνω τύπους θερμικής αποθήκευσης ,αυτός που έχει δοκιμαστεί και χρησιμοποιηθεί περισσότερο στις ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις είναι η αποθήκευση της αισθητής θερμότητας. Θα μπορούσε κανείς να χωρίσει τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας ,σε συστήματα άμεσης αποθήκευσης ,όπου το εργαζόμενο ρευστό στις σωληνώσεις του ηλιακού δέκτη και στο σύστημα αποθήκευσης είναι κοινό, και σε συστήματα έμμεσης αποθήκευσης ,όπου το εργαζόμενο ρευστό είναι διαφορετικό στα δύο υποσυστήματα και για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης θερμότητας για τη φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης. Τα συστήματα έμμεσης αποθήκευσης απαιτούν μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας στον δέκτη ,άρα και υψηλότερη θερμοκρασία, καθώς ένα μέρος της χάνεται στη συνέχεια στον εναλλάκτη με το σύστημα αποθήκευσης.

Με βάση τη διάταξη των δεξαμενών ,τα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη συμπεριλαμβάνει συστήματα αποτελούμενα από ξεχωριστές θερμές και ψυχρές δεξαμενές, ενώ η δεύτερη από μία μόνο δεξαμενή με θερμοκλινές.

Η διάταξη ξεχωριστών θερμών και ψυχρών δεξαμενών αποτελείται συνήθως από δύο ή περισσότερες δεξαμενές. Το ρευστό μέσα στην εκάστοτε δεξαμενή έχει την ίδια θερμοκρασία σε κάθε σημείο, ωστόσο η ποσότητα του μεταβάλλεται κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης ,λόγω της διαρκούς φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης. Κατά τη φόρτιση ,η περισσότερη ποσότητα του ρευστού κατευθύνεται προς

την θερμή δεξαμενή ,ενώ κατά την αποφόρτιση το εργαζόμενο μέσον ρέει προς την ψυχρή δεξαμενή, έχοντας προσδώσει την αποθηκευμένη θερμότητά του στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η δεξαμενή θερμοκλινούς βασίζεται στη θερμική διαστρωμάτωση του μέσου αποθήκευσης, η οποία είναι αποτέλεσμα της διακύμανσης της πυκνότητας του ,ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Κατάλληλα μέσα αποθήκευσης σε δεξαμενή θερμοκλινούς είναι αυτά ,που παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και έχουν όριο θερμοκρασιακής μεταβολής. Σε συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης ,η ποσότητα του ρευστού μέσα στην δεξαμενή θερμοκλινούς παραμένει σχεδόν σταθερή. Αυτό που κινείται κατακόρυφα είναι το στρώμα θερμοκρασιακής μεταβολής (θερμοκλινές) ,ανάμεσα στις ζώνες υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας, φορτίζοντας και αποφορτίζοντας έτσι την αποθήκη θερμικής ενέργειας.



Σχήμα 2.10 Σύστημα Αποθήκευσης Μονής Δεξαμενής με Θερμοκλινές. [43]

Τα εργαζόμενα μέσα που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αποθήκευσης είναι τα τετηγμένα άλατα, το υγρό νάτριο, τα έλαια, το νερό-ατμός και διάφορα στερεά σε περιπτώσεις που ο ηλιακός δέκτης λειτουργεί με αέρα. Ας δούμε όμως ,πως αυτά συνδυάζονται με τις υπάρχουσες διατάξεις των συστημάτων θερμικής αποθήκευσης.

Τα τετηγμένα άλατα και το υγρό νάτριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα δύο ,τόσο ως εργαζόμενο μέσο μεταφοράς ,όσο και αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας του κεντρικού δέκτη. Η αποθήκευση μπορεί να γίνει σε θερμοκρασίες μέχρι και 565°C με χρήση τετηγμένων αλάτων και μέχρι 595°C με χρήση υγρού νατρίου. Η διάταξη που χρησιμοποιείται με αυτά τα μέσα αποθήκευσης είναι αυτή της ξεχωριστής ψυχρής και θερμής δεξαμενής. Το σύστημα αποθήκευσης δύο δεξαμενών με τετηγμένα άλατα (νιτρικό νάτριο 60% και νιτρικό κάλιο 40%) αποτελεί την πιο ώριμη και συνηθισμένη επιλογή στις μέρες μας, για τους πύργους ηλιακής ισχύος. Ένα τέτοιο σύστημα απεικονίζεται ακριβώς παρακάτω:



Σχήμα 2.11 Τυπικό Σύστημα Αποθήκευσης Θερμής και Ψυχρής Δεξαμενής Τετηγμένων Αλάτων του Σταθμού Solar Two. [44]

Τα έλαια μεταφοράς θερμότητας ,όπως Caloria, έχουν υψηλότερη ειδική θερμότητα και χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τα τετηγμένα άλατα και το υγρό νάτριο, ωστόσο ,όπως προαναφέρθηκε, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που φτάνουν μέχρι τους 315°C. Αυτό το θερμοκρασιακό όριο περιορίζει τη χρήση των ελαίων ,ως μέσων αποθήκευσης, σε εγκαταστάσεις ,όπου ο κεντρικός δέκτης χρησιμοποιεί νερό-ατμό ή έλαια. Στην περίπτωση που το μέσον αποθήκευσης είναι τα έλαια ,η συνήθης διάταξη του συστήματος αποθήκευσης αποτελείται από μία δεξαμενή με θερμοκλινές ,αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η διάταξη με τις δύο ξεχωριστές δεξαμενές. Το υψηλό κόστος των ελαίων μεταφοράς θερμότητας μπορεί να μετριαστεί με την προσθήκη λίθων στη δεξαμενή αποθήκευσης. Οι λίθοι μπορούν να αποθηκεύσουν ένα μέρος της θερμικής ενέργειας και να αντικαταστήσουν τον όγκο που θα καταλάμβανε η αντίστοιχη ποσότητα ελαίου.

Αρκετά συνηθισμένη είναι και η χρήση νερού-ατμού ,ως μέσου αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Η διάταξη του συστήματος αποθήκευσης περιλαμβάνει μονή δεξαμενή ,στην οποία αποθηκεύεται κορεσμένος ατμός υψηλής πίεσης. Πρόκειται ,ουσιαστικά, για εργαζόμενο μέσο αλλαγής φάσης, καθώς ο ατμός συμπυκνώνεται και ατμοποιείται και πάλι ,όταν η πίεση μειωθεί κατά την αποφόρτιση. Τα συστήματα αποθήκευσης νερού-ατμού έχουν το πλεονέκτημα ότι ,αν συνδυαστούν με κεντρικό ηλιακό δέκτη που λειτουργεί με νερό, μπορούν να συνθέσουν ένα κύκλωμα που θα διαρρέεται σε κάθε σημείο από ενιαίο ρευστό, ελαχιστοποιώντας έτσι τις απώλειες ενέργειας ,λόγω της απουσίας επιπλέον εναλλακτών. Ο πολύ γνωστός σταθμός με πύργο ηλιακής ισχύος PS10 ,που βρίσκεται σε λειτουργία σήμερα κοντά στην περιοχή της Σεβίλλης, χρησιμοποιεί σύστημα αποθήκευσης ατμού, το οποίο και απεικονίζεται παρακάτω. Παρ' όλα αυτά ,τέτοια συστήματα αποθήκευσης χάνουν ολοένα και περισσότερο έδαφος στον ανταγωνισμό με τα συστήματα αποθήκευσης τετηγμένων αλάτων, καθώς εξασφαλίζουν αποθήκευση θερμότητας για μικρή χρονική διάρκεια. [45]



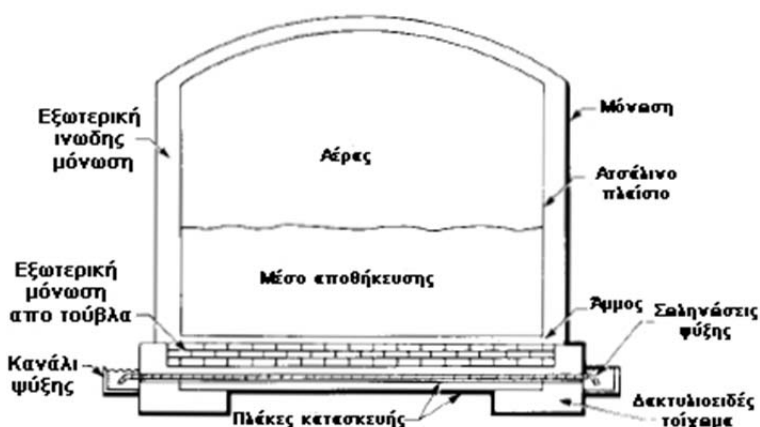
*Σχήμα 2.12 Σύστημα Αποθήκευσης Ατμού του Σταθμού PS10. [41]*

Μια τελευταία μέθοδος αποθήκευσης χρησιμοποιεί αέρα ,ο οποίος κυκλοφορεί ,μέσω ενός μεγάλου ανεμιστήρα, και μεταφέρει τη θερμότητα σε μια δεξαμενή που περιέχει χαλίκια ή πυρίμαχα τούβλα ,στα οποία και την αποθηκεύει. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση ακριβών ρευστών ,σε σύγκριση με τα φτηνότερα στερεά. Το γεγονός όμως, ότι ο αέρας δεν είναι το πιο κατάλληλο μέσον για τη μεταφορά και αποθήκευση θερμικής ενέργειας ,αλλά και η προϋπόθεση ύπαρξης μεγάλων σωληνώσεων, συμπιεστών και ανεμιστήρων ,κάνουν τον συγκεκριμένο τρόπο αποθήκευσης λιγότερο προσιτό.

Όσον αφορά στον σχεδιασμό των δεξαμενών, συναντώνται τρεις διαφορετικοί τύποι: οι κυλινδρικές κάθετες δεξαμενές με εξωτερική μόνωση για αποθήκευση είτε κρύου είτε θερμού ρευστού, οι κυλινδρικές κάθετες δεξαμενές με εσωτερική μόνωση για αποθήκευση θερμού ρευστού και οι κυλινδρικές οριζόντιες δεξαμενές για αποθήκευση είτε κρύου είτε θερμού ρευστού.

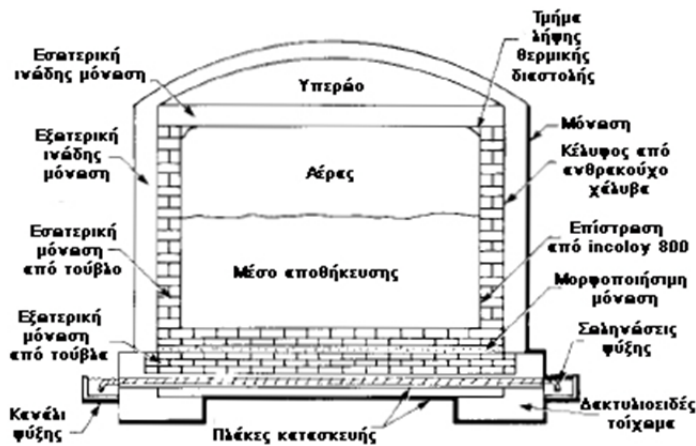
Στα συστήματα αποθήκευσης με ξεχωριστή θερμή και ψυχρή δεξαμενή, είτε μονώνονται εξωτερικά και οι δύο δεξαμενές, είτε μονώνεται εξωτερικά η ψυχρή δεξαμενή και εσωτερικά η θερμή.

Για θερμοκρασίες αποθήκευσης κάτω από 400°C χρησιμοποιούνται δεξαμενές κατασκευασμένες από ανθρακούχο χάλυβα. Αυτό το θερμοκρασιακό εύρος παρατηρείται όταν το μέσο αποθήκευσης είναι κάποιο έλαιο ή έλαιο σε συνδυασμό με λίθους, είτε για την περίπτωση ξεχωριστών δεξαμενών, είτε για την περίπτωση δεξαμενής θερμοκλινούς. Μία τέτοια δεξαμενή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.13 Δεξαμενή Αποθήκευσης Ψυχρού Ρευστού. [36]

Στα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας με τετηγμένα άλατα ή υγρό νάτριο, οι θερμοκρασίες ξεπερνούν τους 400°C και, όπως αναλύθηκε παραπάνω, η διάταξη περιλαμβάνει μία δεξαμενή θερμού και μία ψυχρού ρευστού. Η δεξαμενή ψυχρού ρευστού μπορεί να είναι σαν του παραπάνω σχήματος, ενώ αυτή για το θερμό ρευστό κατασκευάζεται από ανοξείδωτο ατσάλι με εξωτερική μόνωση. Μια άλλη προσέγγιση για την θερμή δεξαμενή χρησιμοποιεί ανθρακούχο χάλυβα για την κατασκευή της, με εσωτερική μόνωση και ένα επιπλέον επιφανειακό στρώμα στο εσωτερικό. Υπάρχουν δύο εναλλακτικοί τρόποι εσωτερικής μόνωσης της θερμής δεξαμενής. Ο πρώτος, που παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.13, περιλαμβάνει ένα λεπτό εσωτερικό επιφανειακό στρώμα Incoloy 800®, το οποίο αποτρέπει την επαφή των τετηγμένων αλάτων, ή του υγρού νατρίου αντίστοιχα, με την εσωτερική μόνωση και επιτρέπει την ανάπτυξη θερμικών φορτίων και φορτίων πίεσης.



Σχήμα 2.14 Δεξαμενή Αποθήκευσης Θερμού Ρευστού. [36]

Ο δεύτερος εναλλακτικός τρόπος χρησιμοποιεί ως εσωτερική μόνωση ένα στρώμα άλατος δακτυλιοειδούς μορφής. Σε αυτή την περίπτωση, το επιφανειακό στρώμα Incoloy 800® σχεδιάζεται με ανοίγματα κοντά στον πυθμένα της δεξαμενής, για να επιτρέπει στα τετηγμένα άλατα να γεμίζουν τον δακτύλιο. Έτσι, δημιουργείται μια ζώνη μεταβολής της θερμοκρασίας ανάμεσα στο εσωτερικό επιφανειακό στρώμα και στα τοιχώματα ,από ανθρακούχο χάλυβα, της δεξαμενής.

Ο σχεδιασμός μιας δεξαμενής με θερμοκλινές είναι παρόμοιος με αυτόν που περιγράφηκε για μία εξωτερικά ή εσωτερικά μονωμένη δεξαμενή θερμού ρευστού. Πολλαπλές σωληνώσεις χρησιμοποιούνται στον πυθμένα και την κορυφή δεξαμενών με θερμοκλινές για την είσοδο και έξοδο αντίστοιχα του μέσου αποθήκευσης. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται η διαταραχή του ρευστού και περιορίζεται η εξάπλωση της ζώνης μεταβολής της θερμοκρασίας (θερμοκλινούς) στο εσωτερικό της δεξαμενής.

Το σύστημα αποθήκευσης ενός πύργου ηλιακής ισχύος πρέπει να σχεδιάζεται με μεγάλη προσοχή και τηρώντας πλήρως τους κανονισμούς ασφαλείας, καθώς οι θερμικές και θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται εκεί είναι μεγάλες. Το ενδεχόμενο διαρροής πρέπει να ελέγχεται συχνά και οι πιθανές διαρροές να επιδιορθώνονται αμέσως ,ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης εύφλεκτα έλαια. Είναι προφανές ,ότι μια βλάβη στο σύστημα αποθήκευσης αν δεν εντοπιστεί εγκαίρως μπορεί να κοστίσει πολύ ακριβά και να οδηγήσει μέχρι και στην καταστροφή του.

### 2.3.5 Σύστημα Εφεδρικής Καύσης

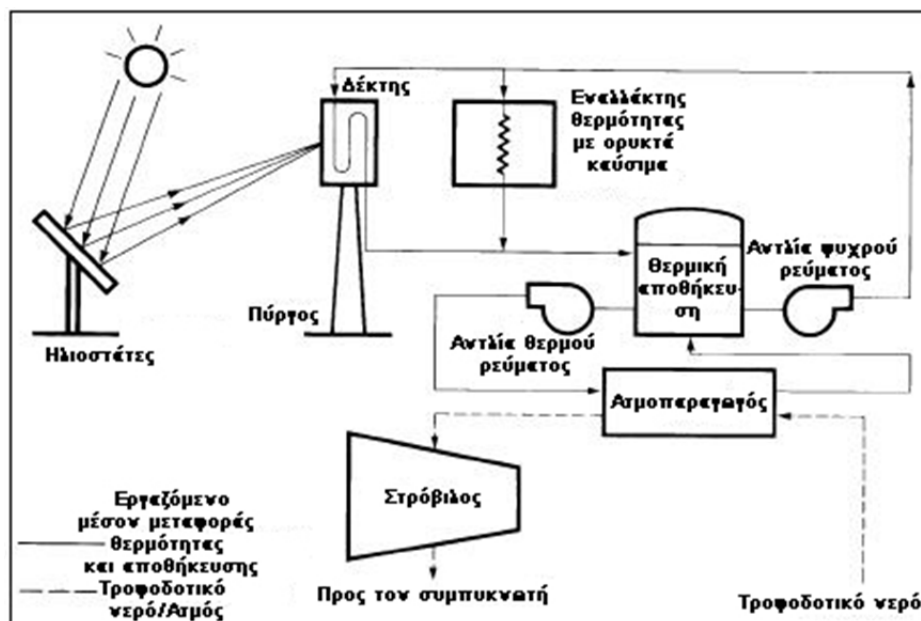
Οι εγκαταστάσεις πύργων ηλιακής ισχύος μπορούν σε κάποιες περιπτώσεις να υβριδιστούν με την ενσωμάτωση ενός συστήματος εφεδρικής καύσης ορυκτών καυσίμων. Όπως και το σύστημα αποθήκευσης ,έτσι και το σύστημα εφεδρικής καύσης είναι προαιρετικό για έναν σταθμό πύργου ηλιακής ισχύος. Βασικός σκοπός του είναι η άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ,από την εγκατάσταση, σε περιπτώσεις χαμηλής ή και μηδενικής ηλιοφάνειας. Στην ουσία, ένα σύστημα εφεδρικής καύσης λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας για τον ηλιοθερμικό σταθμό ,δίνοντας του τη δυνατότητα να προσδίδει ηλεκτρικό ρεύμα στο δίκτυο σε περιπτώσεις που το προφίλ της ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος δεν συμβαδίζει με το προφίλ της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους ηλιοστάτες. Γίνεται αντιληπτό, ότι ο ρόλος του συστήματος εφεδρικής καύσης είναι παραπλήσιος με αυτόν του



συστήματος αποθήκευσης για έναν πύργο ηλιακής ισχύος, με τη μόνη διαφορά ,ότι το σύστημα εφεδρικής καύσης αποτελεί μια ακόμα πιο άμεση λύση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ,καθώς δεν προϋποθέτει την πρωτύτερη φόρτιση του ,όπως το σύστημα αποθήκευσης. Σε μία εγκατάσταση τα συστήματα αποθήκευσης και εφεδρικής καύσης μπορούν να συνυπάρξουν. Προφανώς το μέγεθος του ενός είναι αντιστρόφως ανάλογο του άλλου, και η τελική επιλογή εξαρτάται από τον κατασκευαστή και το εκάστοτε προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας., για την περιοχή που ηλεκτροδοτεί ο σταθμός. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να τηρούνται οι περιορισμοί που ορίζει η νομοθεσία για το σύστημα εφεδρικής καύσης, όπως αναφέρονται στο κεφάλαιο 1.2.3.

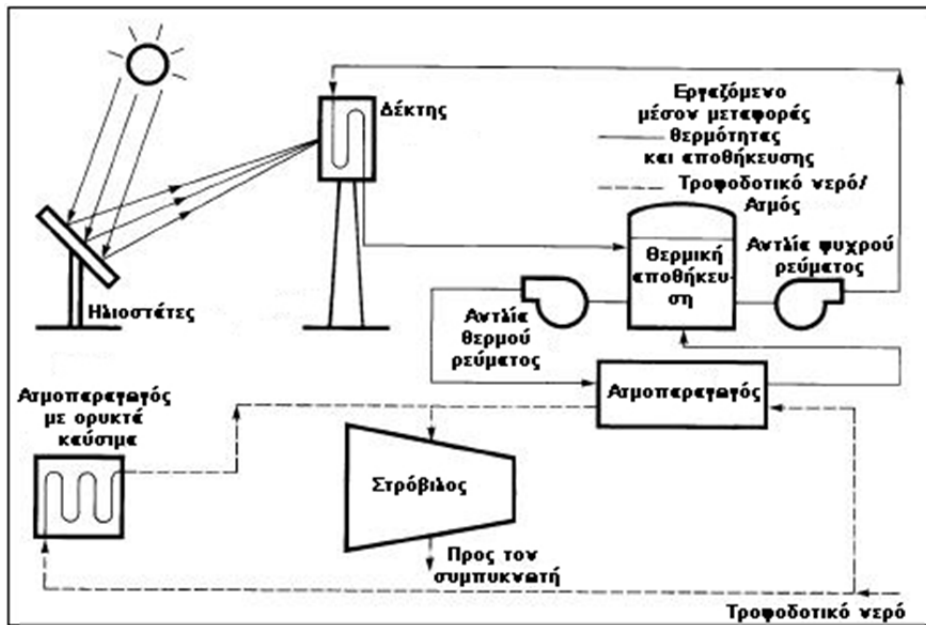
Ο υβριδισμός μιας εγκατάστασης πύργου ηλιακής ισχύος ,με εφεδρικό καυστήρα ορυκτών καυσίμων, μπορεί να γίνει με δύο βασικές διατάξεις.

Στην πρώτη , και πιο συνήθη διάταξη, ο εφεδρικός καυστήρας τοποθετείται στο θερμοδυναμικό κύκλωμα παράλληλα με τον ηλιακό δέκτη, θερμαίνοντας το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που διατρέχει τις σωληνώσεις του, όταν ο τελευταίος ,λόγω χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας δεν λειτουργεί. Αυτός ο τρόπος υβριδισμού μπορεί να εφαρμόζεται τόσο σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με άμεση αμοπααραγωγή ,όπου ο εφεδρικός καυστήρας θερμαίνει νερό προς παραγωγή ατμού, όσο και σε συστήματα με έμμεση αμοπααραγωγή ,όπου ο καυστήρας θερμαίνει το εργαζόμενο ρευστό μεταφοράς θερμότητας που κατευθύνεται προς τον εναλλάκτη-αμοπααραγωγό, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.15 Σύστημα Εφεδρικής Καύσης Παράλληλα στον Δέκτη για Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Έμμεση Αμοπααραγωγή. [36]

Στη δεύτερη διάταξη, η οποία συναντάται μόνο σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμμεση αμοπααραγωγή, ο εφεδρικός καυστήρας τοποθετείται στη σειρά με τον εναλλάκτη-αμοπααραγωγό. Έτσι ,σε περιπτώσεις που το εργαζόμενο ρευστό του κυκλώματος ,που περνάει από τον ηλιακό δέκτη, δεν μεταφέρει αρκετή θερμότητα ώστε να παραχθεί ατμός μέσω του εναλλάκτη στο κύκλωμα νερού-ατμού, τίθεται σε λειτουργία ο εφεδρικός καυστήρας και θερμαίνει το νερό του κυκλώματος ,παράγοντας ατμό με τα χαρακτηριστικά που απαιτεί η εγκατάσταση. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 2.16 Σύστημα Εφεδρικής Καύσης σε Σειρά με τον Εναλλάκτη-Ατμοπαραγωγό για Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Έμμεση Ατμοπαραγωγή. [36]

Για συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμμεση ατμοπαραγωγή, η δεύτερη διάταξη υβριδισμού που περιγράφηκε ,με τον εφεδρικό καυστήρα συνδεδεμένο σε σειρά με τον εναλλάκτη-ατμοπαραγωγό, είναι σαφώς πολυπλοκότερη και ακριβότερη από την πρώτη ,καθώς το εργαζόμενο μέσον στο κύκλωμα νερού ατμού είναι διπλής φάσης ,σε αντίθεση με το κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας, και μάλιστα απαιτείται η επίβλεψη και ρύθμιση πολλών θερμοδυναμικών παραμέτρων του ,όπως η θερμοκρασία ,η πίεση και η παροχή, για τη σωστή λειτουργία του στρόβιλου και την παραγωγή της ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος ,πρέπει να επισημανθεί ,ότι η κατασκευή του συστήματος εφεδρικής καύσης αλλά και οι εκπομπές καυσαερίων στην ατμόσφαιρα διαφέρουν από καύσιμο σε καύσιμο. Για παράδειγμα, η χρήση πετρελαίου προϋποθέτει αποθηκευτικές δεξαμενές, συστήματα άντλησης και θέρμανσης ,ενώ η χρήση των πιο φιλικών προς το περιβάλλον αερίων καυσίμων απαιτεί σωληνώσεις και συστήματα συμπίεσης. [36]

## 2.4 Πύργοι Ηλιακής Ισχύος ανά τον Κόσμο

Στο παρόν εδάφιο γίνεται ,μέσω του πίνακα που ακολουθεί, μία συνοπτική παρουσίαση των εγκαταστάσεων πύργων ηλιακής ισχύος σε όλο τον κόσμο, καθώς και κάποιων βασικών χαρακτηριστικών τους ,όπου αυτά είναι γνωστά.

Οι σταθμοί χωρίζονται ,με κριτήριο το στάδιο ολοκλήρωσης τους, στις κατηγορίες υπό λειτουργία ,υπό κατασκευή και υπό μελέτη. Σημαντικό είναι ,σε αυτό το σημείο, να αναφέρουμε και δύο σταθμούς με σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη οι οποίοι υπήρξαν πρόδρομοι της συγκεκριμένης τεχνολογίας ,αν και σήμερα δεν βρίσκονται πλέον σε λειτουργία. Πρόκειται για τον σταθμό SES-5 ονομαστικής ισχύος 5MW, με ηλιοστατικό πεδίο 1600 ηλιοστατών επιφάνειας 25m<sup>2</sup> ,στην Σοβιετική Σοσιαλιστική Δημοκρατία της

Ουκρανίας (1985-1989) και τον σταθμό Solar One ονομαστικής ισχύος 10MW ,με πεδίο 1818 ηλιοστατών επιφάνειας 40m<sup>2</sup> ,στο Barstow της Καλιφόρνιας (1982-1986). Ο τελευταίος αργότερα μετονομάστηκε σε Solar Two (1994-1999) ,με την προσθήκη συστήματος αποθήκευσης τετηγμένων αλάτων και 108 επιπλέον ηλιοστατών. [46],[47]

<b>Υπό Λειτουργία:</b>						
<i>Όνομασία Σταθμού</i>	<i>Περιοχή</i>	<i>Ισχύς (Mwe)</i>	<i>Αριθμός/Μέγεθος(m<sup>2</sup>) Ηλιοστατών</i>	<i>Συνολική Έκταση (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Αποθήκευση</i>	<i>Έναρξη Λειτουργίας</i>
Jülich Solar Tower *	Jülich,Germany	1,5	2153 / 8	80000	Θερμός αέρας σε κεραμικά στερεά	12/2008
Gemasolar Tower (Solar Tres)	Andalucía (Sevilla),Spain	19,9	2650 / 120	1950000	15 h / τετηγμένων αλάτων	04/2011
National Solar Energy Centre (NSEC) *	Newcastle, NSW, Australia	0,5	200 / -	-	όχι	2006
PS10	Sanlúcar la Mayor (Sevilla),Spain	11	624 / 120	550000	1 h/ ατμού	06/2007
PS20	Sanlúcar la Mayor (Sevilla),Spain	20	1255 / 120	800000	1 h/ ατμού	04/2009
Sierra SunTower	Lancaster,California, U.S.A.	5	24360 / 1,136	80937	όχι	07/2009
<b>Υπό κατασκευή:</b>						
<i>Όνομασία Σταθμού</i>	<i>Περιοχή</i>	<i>Ισχύς (MWe)</i>	<i>Αριθμός/Μέγεθος(m<sup>2</sup>) Ηλιοστατών</i>	<i>Συνολική Έκταση (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Αποθήκευση</i>	<i>Έναρξη Λειτουργίας</i>
Crescent Dunes Solar Energy Project (Tonopah)	Tonopah, Nevada, U.S.A.	110	17170 / 62,4	6474970	10 h/ τετηγμένων αλάτων	10/2013
Dahan Solar Project *	Yanqing, Beijing, China	1	100 / 100	-	1 h/ συνδυασμός ελαίου και ατμού	2010
Ivanpah Solar Electric Generating Station (ISEGS)	Primm,NV,California, U.S.A.	392	173500 / 14,08	14163997	όχι	10/2013
Lake Cargelligo Solar Thermal Project *	Lake Cargelligo, New South Wales, Australia	3	620 / -	-	χρήση γραφίτη	-
Solar Brayton Cycle demonstration field *	Newcastle, NSW, Australia	0,2	450 / ~4,32	4000	όχι	03/2011
Themis Solar Power Tower *	Pyrénées-Orientales (Targassonne),France	1,4	100 / 53,7	-	όχι	12/2008
<b>Υπό μελέτη:</b>						
<i>Όνομασία Σταθμού</i>	<i>Περιοχή</i>	<i>Ισχύς (Mwe)</i>	<i>Αριθμός/Μέγεθος(m<sup>2</sup>) Ηλιοστατών</i>	<i>Συνολική Έκταση (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Αποθήκευση</i>	<i>Έναρξη Λειτουργίας</i>
Acme Rajasthan Solar Power	Jodhpur, Rajasthan, India	10	-	-	-	-
Alcázar Solar Thermal Power Project	Alcázar de San Juan, Spain	50	~4300 / -	~1092651	Τετηγμένων αλάτων	-
Almaden Plant	Albacete, Spain	20	-	-	-	-

Alpine Power Tower Project	Lancaster, California (Antelope Valley), U.S.A.	92	-	-	-	2012
AZ20	Sanlúcar la Mayor (Sevilla), Spain	20	-	-	-	-
Black Rock Hill	La Paz, Arizona, U.S.A.	600	-	22662396	-	-
Brightsource PG&E 3	Coyote Springs, Nevada, U.S.A.	200	-	-	-	07/2014
Brightsource PG&E 4	Coyote Springs, Nevada, U.S.A.	200	-	-	-	07/2015
Brightsource PG&E 5	TBD, California, U.S.A.	200	-	-	-	07/2016
Brightsource PG&E 6	TBD, California, U.S.A.	200	-	-	-	12/2016
Brightsource PG&E 7	TBD, California, U.S.A.	200	-	-	-	07/2017
Crossroads Solar Energy Project	Maricopa County, Arizona, U.S.A.	150	-	10359952	10 h/ τετηγμένων αλάτων	2014
eSolar 1	Los Angeles County, California, U.S.A.	84	-	-	-	-
eSolar 2	Los Angeles County, California, U.S.A.	66	-	-	-	-
Gaskell Sun Tower	Lancaster, California (Antelope Valley), U.S.A.	245	-	4451542	όχι	04/2012
GD Energy	Geermu, China	100	-	-	-	-
Imperial Valley Solar Project	Imperial Country, California, U.S.A.	709	-	-	-	-
LSR Jackrabbit	Maricopa County, Arizona, U.S.A.	500	-	109410810	-	-
Quartzsite Solar Energy Project	La Paz, Arizona, U.S.A.	100	-	-	-	-
Rice Solar Energy Project (RSEP)	Rice, California U.S.A.	150	17170 / 62,4	5706068	7 h/ τετηγμένων αλάτων	10/2013
Rio Mesa	Riverside, California, U.S.A.	750	-	-	-	-
Saguache Solar Energy Project	Saguache County, Colorado, U.S.A.	200	-	-	τετηγμένων αλάτων	-
SolarGas	Queensland, Australia	4	-	-	-	-
Suntower	Doña Ana County, New Mexico, U.S.A.	92	-	-	-	-
Upington	Upington, South Africa	100	-	-	-	-
Wildcat Harcuvar South	La Paz, Arizona, U.S.A.	(4) 200	-	44300937	-	-
Wildcat Quartzsite	Yuma, Arizona, U.S.A.	800	-	48562277	-	-
SolarGas	Queensland, Australia	4	-	-	-	-

*Πίνακας 2.3 Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Πύργο Ηλιακής Ισχύος. [48],[49],[50],[51]*

\* Σταθμοί που χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς σκοπούς (πιλοτικοί σταθμοί).

Κοιτάζοντας προσεκτικά τον παραπάνω πίνακα, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ,πως οι Η.Π.Α. και η Ισπανία είναι δύο χώρες που πρωταγωνιστούν στον τομέα των εγκαταστάσεων πύργων ηλιακής ισχύος. Είναι επίσης φανερό ,από των αριθμό των υπό μελέτη και υπό κατασκευή σταθμών, ότι η τεχνολογία των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη αναμένεται στο μέλλον να καθιερωθεί και να συμβάλει δραστικά στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Απόδοση Εγκατάστασης Πύργου Ηλιακής Ισχύος

#### 3.1 Αξιολόγηση Εγκαταστάσεων σύμφωνα με τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (P.A.E.)

Η αξιολόγηση της απόδοσης μίας ηλιοθερμικής εγκατάστασης γίνεται μέσω του υπολογισμού των ενεργειακών απωλειών και των βαθμών απόδοσης κάθε υποσυστήματος που την αποτελεί. Σκοπός της αξιολόγησης είναι, στην ουσία, να προσδιοριστεί το ποσοστό της προσπίπτουσας στην εγκατάσταση ηλιακής ενέργειας, το οποίο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και προσδίδεται τελικά στο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Σε έναν πύργο ηλιακής ισχύος οι κύριες απώλειες είναι αυτές του ηλιοστατικού πεδίου και του κεντρικού δέκτη. Διάφορες άλλες απώλειες ενέργειας παρατηρούνται, επίσης, στα εξαρτήματα του κυκλώματος μεταφοράς της θερμότητας, όπως για παράδειγμα στις διάφορες σωληνώσεις, στους εναλλάκτες, στους στροβίλους και στη γεννήτρια, διαμορφώνοντας τον βαθμό απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου. Τέλος, το σύστημα αποθήκευσης, στην περίπτωση που συμπεριλαμβάνεται στην εγκατάσταση, προσθέτει και τις δικές του απώλειες στο σύνολο.

Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (P.A.E.), μέσω του οδηγού αξιολόγησης έργων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας, έχει δημοσιεύσει κάποια προτεινόμενα χαρακτηριστικά απόδοσης για την μοντελοποίηση ηλιοθερμικών σταθμών, τα οποία και παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω:

**Πίνακας Α - Χαρακτηριστικά απόδοσης**

Είδος απωλειών	Τύπος σταθμού	Παραβολικά κάτοπτρα	Πύργος
Διαθεσιμότητα ηλιακού πεδίου		0,990	0,990
Μη Διαθεσιμότητα ηλιακού πεδίου λόγω ανέμου <sup>1</sup>		1 [...]	1 [...]
Γωνία πρόσπτωσης (για πεδίο μονού άξονα)		0,873 <sup>2</sup>	-
Αποδοτικότητα επιφανειών ανάκλασης		0,694	0,56 <sup>3</sup> [...]
Αποδοτικότητα συλλεκτών		0,794	0,783
Απώλειες μέσου μεταφοράς		0,966	-
Απώλειες αποθήκης		0,993	0,993
Απόρριψη πλεονάσματος <sup>3</sup>		0,944 [...]	
Απόδοση στροβίλου <sup>4</sup> (Με / Χωρίς αναθέρμανση)		0,375 / 0,33 [...]	
Εκκινήσεις – κρατήσεις		0,983	
Ιδιοκατανάλωση <sup>4</sup>		0,884	
Διαθεσιμότητα		0,940	

*Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά Απόδοσης Συστημάτων Συγκέντρωσης της Ηλιακής Ακτινοβολίας σύμφωνα με τη P.A.E. [52]*

Από τον παραπάνω πίνακα ξεχωρίζουμε τον βαθμό απόδοσης 56% των επιφανειών ανάκλασης (ηλιοστατικού πεδίου) και τον βαθμό απόδοσης 78,3% του κεντρικού ηλιακού δέκτη για τον πύργο ηλιακής ισχύος. Οι ιδιοκαταναλώσεις της εγκατάστασης μπορούν να υποτεθούν ίσες με το 11,6% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.

Στις υποσημειώσεις του πίνακα, στον οδηγό αξιολόγησης, τονίζεται πως η τιμή 56% ,για τον βαθμό απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου του πύργου, είναι ενδεικτική και τεκμηριώνεται από τον αιτούντα αναλόγως του σχεδιασμού του σταθμού. Το γεγονός αυτό θα το διαπιστώσουμε και παρακάτω ,στο υπολογιστικό μέρος της παρούσας εργασίας, όπου θα υπολογίσουμε το βαθμό απόδοσης του πεδίου ηλιοστατών που εμείς έχουμε δημιουργήσει και θα παρατηρήσουμε τη διαφοροποίηση του από την προτεινόμενη αυτή τιμή.

Πολύ σημαντικό ,επίσης, στοιχείο για την προσομοίωση της λειτουργίας μίας εγκατάστασης ,που αναφέρεται στον οδηγό αξιολόγησης της P.A.E. ,είναι ότι σε ηλιακά πεδία δύο αξόνων (όπως είναι αυτό των πύργων ηλιακής ισχύος) μηδενίζονται οι τιμές της άμεσης προσπίπτουσας ακτινοβολίας, οι οποίες υπολείπονται του κατωφλίου που ορίζεται στα  $200 \text{ W/m}^2$  ,καθώς δεν επαρκούν για την λειτουργία του σταθμού. Οι τιμές κατά τις ώρες που η αποδιδόμενη ακτινοβολία στο δέκτη είναι χαμηλότερη του 20% της ονομαστικής (μέγιστης σχεδιαζόμενης) ακτινοβολίας επίσης μηδενίζονται. Ενδεχόμενη χρήση χαμηλότερης τιμής κατωφλίου αιτιολογείται επαρκώς, προκειμένου να γίνει δεκτή. [52]

### 3.2 Απώλειες Πεδίου Ηλιοστατών

Το ηλιοστατικό πεδίο ,όπως προαναφέρθηκε, είναι το πρώτο υποσύστημα ενός πύργου ηλιακής ισχύος με το οποίο έρχονται σε επαφή οι προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες. Στο υποσύστημα αυτό, παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες απώλειες ισχύος όλης της εγκατάστασης ,με ποσοστά που αγγίζουν το 40-47% των συνολικών απωλειών. [53],[54]

Οι απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- *Απώλειες Συνημιτόνου (cosine losses)*
- *Απώλειες Ανακλαστικότητας (reflectivity losses)*
- *Απώλειες Ατμοσφαιρικής Διαπερατότητας (atmospheric attenuation losses)*
- *Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδησης (shadowing & blocking losses)*
- *Απώλειες Διαρροής (spillage losses)*

Η σειρά που αναφέρονται οι παραπάνω απώλειες συμπίπτει ,στις περισσότερες περιπτώσεις, και με το μέγεθός τους ,ξεκινώντας από τις ισχυρότερες προς τις ασθενέστερες.

Ο ολικός βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου εκφράζεται ,συνήθως ετησίως ,ως ο μέσος όρος των βαθμών απόδοσης των ηλιοστατών που το αποτελούν, και υπολογίζεται από το γινόμενο:

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

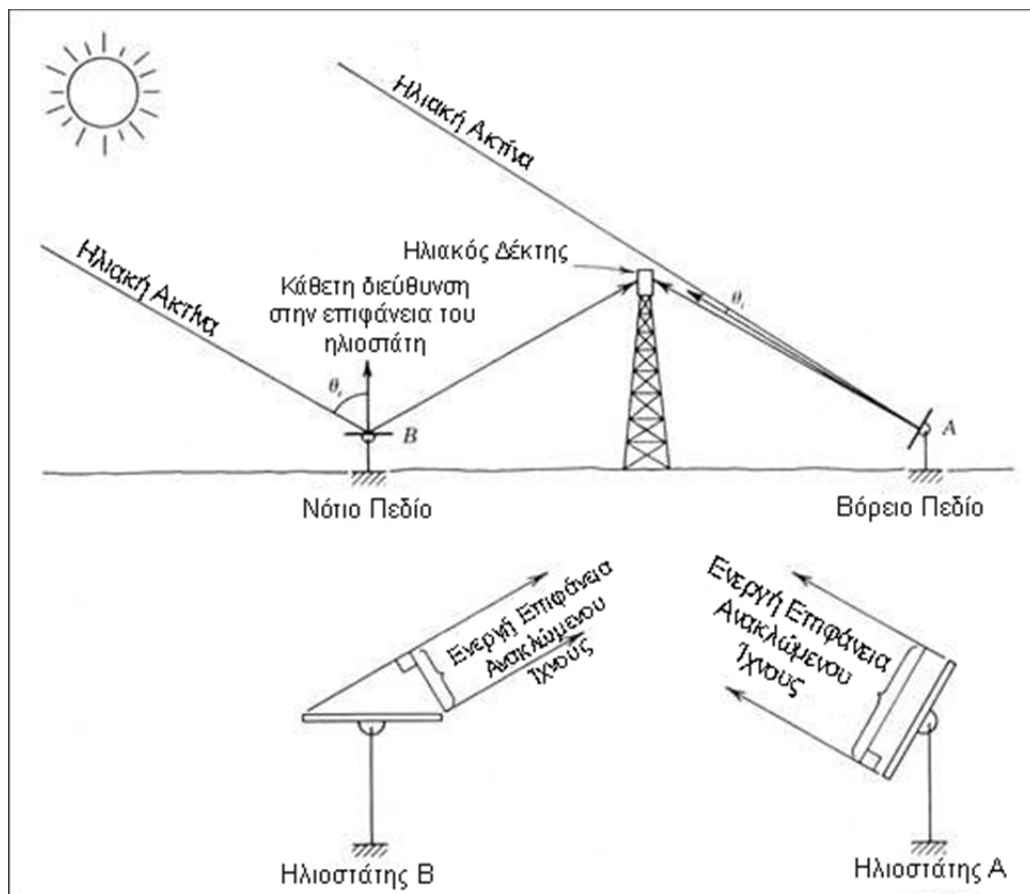
,όπου οι όροι του γινομένου είναι στην ουσία οι διάφορες απώλειες του πεδίου ,εκφρασμένες με τη μορφή συντελεστή.

Θα μπορούσε κανείς να ορίσει τον ολικό βαθμό απόδοσης ενός ηλιοστατικού πεδίου και ως τον λόγο της θερμικής ισχύος που συγκεντρώνεται στο άνοιγμα του κεντρικού ηλιακού δέκτη προς την ισχύ που προσπίπτει στη συνολική επιφάνεια των ηλιοστατών ,μέσω της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. [37]

Ας δούμε ,όμως, τις παραπάνω απώλειες πιο αναλυτικά:

### Απώλειες Συνημιτόνου (cosine losses)

Με τιμές που κυμαίνονται κοντά στο 23,4% , οι απώλειες συνημιτόνου είναι οι πιο σημαντικές για ένα πεδίο ηλιοστατών [54]. Η θέση που βρίσκεται ο κάθε ηλιοστάτης στο πεδίο ,σε σχέση με τη θέση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα και τη θέση του κεντρικού δέκτη στην κορυφή του πύργου, καθορίζει το μέγεθος των απωλειών συνημιτόνου του. Το γεγονός ,ότι ένας ηλιοστάτης τοποθετείται πάντα έτσι ,ώστε το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνειά του να διχοτομεί τη γωνία ,που σχηματίζεται μεταξύ προσπιπτουσών ακτίνων σε αυτόν και της ευθείας ηλιοστάτη-δέκτη, είναι και ο λόγος που δημιουργούνται οι απώλειες συνημιτόνου. Συγκεκριμένα, το ενεργό ανακλώμενο ίχνος ,από τη δέσμη προσπιπτουσών ακτίνων στην επιφάνεια του ηλιοστάτη, είναι αυτό που μειώνεται κατά το συνημίτονο του μισού της γωνίας που περιγράφηκε ανωτέρω. Για την καλύτερη κατανόηση των απωλειών συνημιτόνου παρατίθεται το ακόλουθο σχήμα, στο οποίο απεικονίζονται δύο ηλιοστάτες σε πολύ διαφορετικές θέσεις του πεδίου:



Σχήμα 3.1 Απώλειες Συνημιτόνου. [37]

Παρατηρούμε πως ο ηλιοστάτης A ,για τη δεδομένη θέση του ηλίου, έχει πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια ανακλώμενου ίχνους από τον ηλιοστάτη B ,παρόλο που οι διαστάσεις των κατοπτρικών επιφανειών τους είναι ίδιες. Αυτό σημαίνει πως το ηλιακό αποτύπωμα που θα φτάνει από τον ηλιοστάτη A στο άνοιγμα του κεντρικού δέκτη θα είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του ηλιοστάτη B, και συνεπώς ο τελευταίος θα παρουσιάζει υψηλότερες





Αξίζει να αναφερθεί ότι το χειμώνα ,που ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά στον ορίζοντα, οι απώλειες συνημιτόνου του ηλιοστατικού πεδίου είναι αρκετά μικρότερες, επηρεάζοντας και τον συνολικό βαθμό απόδοσης του. [53]

#### Απώλειες Ανακλαστικότητας (reflectivity losses)

Ένα σημαντικό είδος απωλειών για το ηλιοστατικό πεδίο είναι και οι απώλειες ανακλαστικότητας, με ποσοστό περίπου 10% ετησίως [54]. Αναφέρονται στην ικανότητα των ηλιοστατών να ανακλούν αποδοτικά τις προσπίπτουσες ακτίνες του ηλίου και είναι ,στην ουσία, το μόνο είδος απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου που μπορεί να υποτεθεί σταθερό και ίσο για όλους του ηλιοστάτες. Όπως κανείς μπορεί να φανταστεί, οι απώλειες ανακλαστικότητας εξαρτώνται κυρίως από την ποιότητα της κατοπτρικής, ανακλαστικής επιφάνειας. Η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται ,και στις μέρες μας οι κατασκευαστές ηλιοστατών έχουν καταφέρει να επιτύχουν λόγους ανάκλασης στις επιφάνειες αυτές ακόμα και 94%. Το ποσοστό αυτό ,φυσικά, μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου λόγω της γήρανσης. Ένας παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο ποσοστό τις απώλειες ανακλαστικότητας των ηλιοστατών είναι και ο βαθμός καθαρότητας τους. Στην πραγματικότητα ,οι απώλειες ανακλαστικότητας θα μπορούσαν να προσδιοριστούν από το γινόμενο του ονομαστικού λόγου ανάκλασης της κατοπτρικής επιφάνειας ,όπως δίνεται από τον κατασκευαστή, με τον βαθμό καθαρότητας ,που αποτελεί έναν ετήσιο μέσο όρο καθαρότητας των ηλιοστατών. Μια συνήθης τιμή για τον βαθμό καθαρότητας των ηλιοστατών είναι 95%. Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ,ότι η σύσταση του εδάφους, η ταχύτητα των ανέμων και οι βροχοπτώσεις για την τοποθεσία που βρίσκεται το εκάστοτε ηλιοστατικό πεδίο επηρεάζει σημαντικά τις απώλειες ανακλαστικότητας του. Για παράδειγμα ,σε ένα μέρος με σύσταση εδάφους πλούσια σε χώμα και υψηλές ταχύτητες ανέμων ,η ανακλαστικότητα των κατόπτρων θα μειωνόταν πολύ γρήγορα με το χρόνο. Έτσι, για τη λειτουργία του ηλιοστατικού πεδίου σε υψηλές τιμές απόδοσης, ο καθαρισμός των ηλιοστατών ανά τακτά χρονικά διαστήματα κρίνεται απαραίτητος. [36],[37],[55]

#### Απώλειες Ατμοσφαιρικής Διαπερατότητας (atmospheric attenuation losses)

Ένα μέρος της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας ,από τους ηλιοστάτες, δεν φτάνει στον ηλιακό δέκτη καθώς διαθλάται και απορροφάται από την ατμόσφαιρα στην πορεία του προς αυτόν. Το προαναφερθέν φαινόμενο προκαλεί τις απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας ,οι οποίες κυμαίνονται για ένα ηλιοστατικό πεδίο περίπου στο 6% ετησίως [54]. Παρόλο που κάποιοι παράγοντες ,όπως θα δούμε και παρακάτω, ευνοούν την τοποθέτηση των ηλιοστατών μακριά από την βάση του πύργου, οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας λειτουργούν περιοριστικά καθώς αυξάνονται όσο αυξάνεται και η απόσταση. Επίσης, ένας παράγοντας που επηρεάζει άμεσα τις παρούσες απώλειες είναι και τα καιρικά φαινόμενα. Γενικά, όσο πιο ομιχλώδης και γεμάτη υγρασία είναι η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας. Για ορατότητα 40km ,ο υπολογισμός των απωλειών αυτών ,εκφρασμένων με τη μορφή συντελεστή, για κάθε ηλιοστάτη, μπορεί να γίνει με τον τύπο:

$$\eta_{atten} = 0,99321 - 0,0001176 \cdot S_0 + 1,97 \cdot 10^{-8} \cdot S_0^2 , \text{για } (S_0 \leq 1000 \text{ m})$$

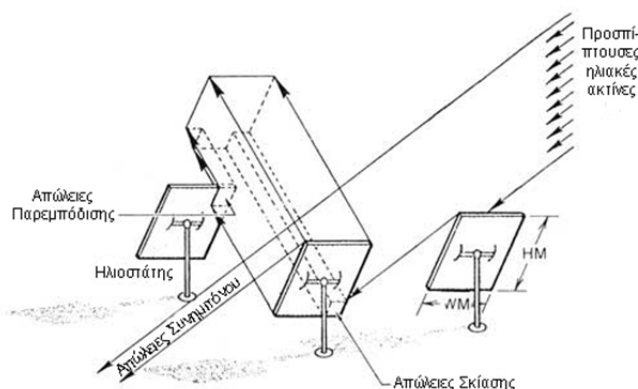
$$\eta_{atten} = e^{-0,0001106 \cdot S_0} , \text{για } (S_0 > 1000 \text{ m})$$

,όπου  $S_0$  η απόσταση μεταξύ ηλιοστάτη και κεντρικού ηλιακού δέκτη [53]. (βλ. Σχήμα 3.3)

Στο μέλλον ,που τα ηλιοστατικά πεδία έχουν την τάση να γίνουν ολοένα και μεγαλύτερα, οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας αναμένεται να παίξουν έναν ακόμη πιο σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό τους. [36],[37]

### Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδισης (shadowing & blocking losses)

Οι απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης είναι οι πιο σύνθετες για ένα ηλιοστατικό πεδίο, καθώς εξαρτώνται από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό παραγόντων ,οι οποίοι συν τοις άλλοις μεταβάλλονται διαρκώς με το χρόνο. Μια τυπική τιμή των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης ετησίως είναι περίπου 5,6% ,ωστόσο η τιμή αυτή ,αν και δείχνει μικρή ,σε σχέση με τις υπόλοιπες απώλειες, παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στη διαδικασία σχεδιασμού ενός ηλιοστατικού πεδίου με το βέλτιστο τρόπο [54]. Με τον όρο σκίαση ,εννοούμε το φαινόμενο ,κατά το οποίο η σκιά που δημιουργείται από έναν ηλιοστάτη καλύπτει μέρος της ανακλαστικής επιφάνειας κάποιου ηλιοστάτη από την πίσω σειρά ηλιοστατών του πεδίου, εμποδίζοντας έτσι κατά ένα ποσοστό την ανάκλαση των προσπίπτουσών δεσμών ακτίνων στον τελευταίο. Κατά αντιστοιχία, η παρεμπόδιση συμβαίνει ,όταν ένας ηλιοστάτης μπροστινής σειράς παρεμβάλλεται στην πορεία των ανακλώμενων ακτίνων ,από κάποιον από τους πίσω ηλιοστάτες, προς τον κεντρικό ηλιακό δέκτη. Διαφωτιστικό ,σχετικά με τον σχηματισμό των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης σε ένα ηλιοστατικό πεδίο, είναι και το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.4 Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδισης. [37]

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίδεται κατά τις ώρες ανατολής και δύσης του ηλίου ,και ιδιαίτερα το χειμώνα, όπου το ηλιακό ύψος είναι μικρό, καθώς τότε οι ηλιοστάτες είναι σε σχεδόν κατακόρυφη θέση ,και συνεπώς οι απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης του ηλιοστατικού πεδίου παίρνουν μεγάλες τιμές [37]. Επίσης, αν και δύσκολα υπολογίζεται, δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και η σκίαση που προκαλείται από τον πύργο στο πεδίο, όταν οι προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες έρχονται πίσω από αυτόν. Για αυτόν ακριβώς το λόγο ,οι σχεδιαστές των πύργων αφιερώνουν σημαντικό χρόνο στην εύρεση σχεδίων ,που εξασφαλίζουν όσο το δυνατόν λιγότερη σκίαση. Ύστερα από αρκετές μελέτες ηλιοστατικών πεδίων, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης είναι οι αποστάσεις μεταξύ γειτονικών ηλιοστατών, η θέση του ηλίου, το ύψος του πύργου, η κλίση του εδάφους, το μήκος των σειρών από ηλιοστάτες στο πεδίο, το γεωγραφικό πλάτος της εγκατάστασης, το σχήμα των ηλιοστατών και η εποχή που αναφερόμαστε. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ,πως ο υπολογισμός των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης για ένα ηλιοστατικό πεδίο δεν είναι απλή διαδικασία ,καθώς το αποτέλεσμα εξαρτάται από ένα σύνολο παραμέτρων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αν ορίζαμε ως  $A_{sh}$  το σκιασμένο

εμβαδόν πάνω στην ανακλαστική επιφάνεια  $A$  του ηλιοστάτη ,θα μπορούσαμε να εκφράσουμε τις απώλειες σκίασης του, με τη μορφή συντελεστή ως εξής [56]:

$$\eta_{sh} = \left(1 - \frac{A_{sh}}{A}\right) \cdot 100$$

Ομοίως μπορούμε να πράξουμε για τις απώλειες παρεμπόδισης.

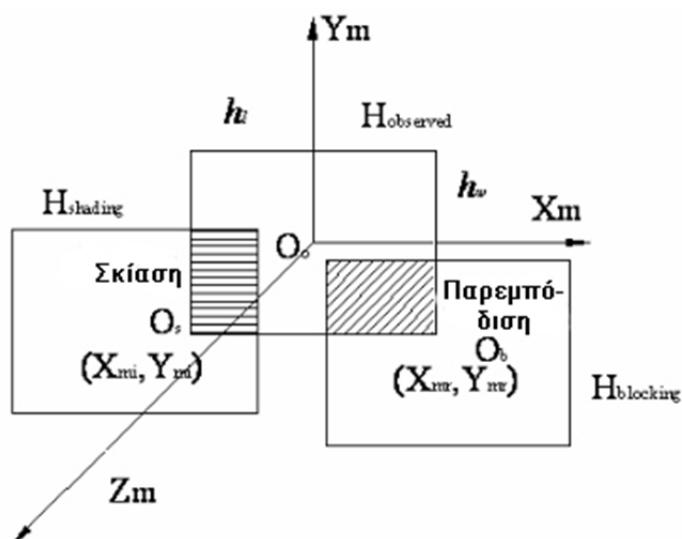
Ωστόσο, η μέτρηση των σκιασμένων εμβαδών στις επιφάνειες των ηλιοστατών δεν είναι χρηστική, και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μοντελοποίησης πύργων ηλιακής ισχύος ,όπου πριν την κατασκευή της εγκατάστασης πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής σκίασης και παρεμπόδισης και να αξιολογηθεί για διάφορες διατάξεις των ηλιοστατών στο πεδίο, κάτι τέτοιο φαντάζει ανέφικτο. Για το λόγο αυτό ,κατά το σχεδιασμό ηλιοστατικών πεδίων, χρησιμοποιούνται προγράμματα ανίχνευσης ηλιακών ακτίνων (ray tracing) ,για τον λεπτομερή υπολογισμό των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης και την αφαίρεση τους από τη συνολική θερμική ισχύ που εισέρχεται στο ηλιοστατικό πεδίο, μέσω του ηλίου. Ένα τέτοιο πρόγραμμα, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκε και στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. [37]

Ας εξετάσουμε όμως λίγο βαθύτερα τον τρόπο ,με τον οποίο υπολογίζονται οι απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης σε αυτού του είδους τα προγράμματα.

Σε κάθε ηλιοστάτη ανιχνεύονται  $m \cdot n$  σημεία ελέγχου. Οι συντεταγμένες των σημείων στην  $k^{\text{ση}}$  σειρά και στην  $l^{\text{ση}}$  στήλη ( $0 < k < m$ ,  $0 < l < n$ ) μπορούν να προσδιοριστούν:

$$X_{mkl} = \frac{h_l}{n} \cdot \left(l - \frac{n}{2} - 0,5\right), \quad Y_{mkl} = \frac{h_w}{m} \cdot \left(0,5 + \frac{m}{2} - k\right)$$

,όπου  $h_l$  , $h_w$  το μήκος και το πλάτος αντίστοιχα του ηλιοστάτη (βλ. Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 Σκιασμένη και Παρεμποδιζόμενη επιφάνεια Ηλιοστάτη. [57]

Η συνθήκη που υποδεικνύει ότι τα σημεία ,που έχουν ανιχνευθεί στην επιφάνεια του κατόπτρου, παρουσιάζουν σκίαση είναι:

$$Y_{mi} < 0 \ \& \ X_{mi} < 0 \left\{ \begin{array}{l} 0,5 - \frac{n \cdot Y_{mi}}{h_w} < k < n + 0,5 \\ 0,5 < l < n + 0,5 + \frac{n \cdot X_{mi}}{h_l} \end{array} \right\},$$

$$Y_{mi} > 0 \ \& \ X_{mi} < 0 \left\{ \begin{array}{l} 0,5 < k < n + 0,5 - \frac{n \cdot Y_{mi}}{h_w} \\ 0,5 < l < n + 0,5 + \frac{n \cdot X_{mi}}{h_l} \end{array} \right\},$$

$$Y_{mi} < 0 \ \& \ X_{mi} > 0 \left\{ \begin{array}{l} 0,5 - \frac{n \cdot Y_{mi}}{h_w} < k < n + 0,5 \\ 0,5 + \frac{n \cdot X_{mi}}{h_l} < l < n + 0,5 \end{array} \right\},$$

$$Y_{mi} > 0 \ \& \ X_{mi} > 0 \left\{ \begin{array}{l} 0,5 < k < n + 0,5 - \frac{n \cdot Y_{mi}}{h_w} \\ 0,5 + \frac{n \cdot X_{mi}}{h_l} < l < n + 0,5 \end{array} \right\}$$

και αντίστοιχα για την παρεμπόδιση:

$$Y_{mr} < 0 \ \& \ X_{mr} < 0 \left\{ \begin{array}{l} 0,5 - \frac{n \cdot Y_{mr}}{h_w} < k < n + 0,5 \\ 0,5 < l < n + 0,5 + \frac{n \cdot X_{mr}}{h_l} \end{array} \right\},$$

$$Y_{mr} > 0 \ \& \ X_{mr} < 0 \left\{ \begin{array}{l} 0,5 < k < n + 0,5 - \frac{n \cdot Y_{mr}}{h_w} \\ 0,5 < l < n + 0,5 + \frac{n \cdot X_{mr}}{h_l} \end{array} \right\},$$

$$Y_{mr} < 0 \ \& \ X_{mr} > 0 \left\{ \begin{array}{l} 0,5 - \frac{n \cdot Y_{mr}}{h_w} < k < n + 0,5 \\ 0,5 + \frac{n \cdot X_{mr}}{h_l} < l < n + 0,5 \end{array} \right\},$$

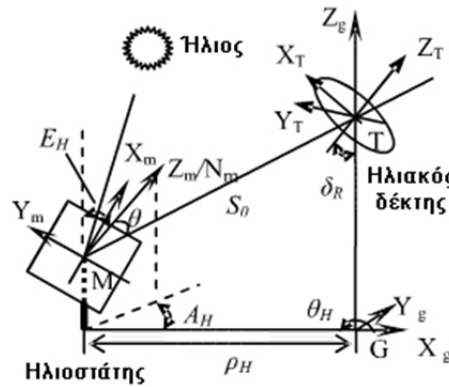
$$Y_{mr} > 0 \ \& \ X_{mr} > 0 \left\{ \begin{array}{l} 0,5 < k < n + 0,5 - \frac{n \cdot Y_{mr}}{h_w} \\ 0,5 + \frac{n \cdot X_{mr}}{h_l} < l < n + 0,5 \end{array} \right\}$$

,όπου  $X_{mi}, Y_{mi}$  είναι οι συντεταγμένες των προβολών των γειτονικών ηλιοστατών ,πάνω στον κεντρικό ηλιοστάτη που εξετάζουμε, κατά την διεύθυνση πρόσπτωσης των ακτίνων του ηλίου, και  $X_{mr}, Y_{mr}$  κατά τη διεύθυνση ανάκλασης τους.

Οι συντεταγμένες αυτές μπορούν να βρεθούν με τους τύπους:

- $X_{mi} = (Y_o \cdot \cos A - X_o \cdot \sin A) \cdot \cos(A_H - A) + [Z_o \cdot \cos a - \sin a \cdot (X_o \cdot \cos A + Y_o \cdot \sin A)] \cdot \sin A \cdot \sin(A_H - A) - [Z_i - \frac{\sin E_H \cdot (X_o \cdot \cos A_H + Y_o \cdot \sin A_H) + Z_o \cdot \cos E_H}{\cos \theta}] \cdot \cos a \cdot \sin(A_H - A)$
- $Y_{mi} = -(Y_o \cdot \cos A - X_o \cdot \sin A) \cdot \cos E_H \cdot \sin(A_H - A) + [Z_o \cdot \cos a - \sin a \cdot (X_o \cdot \cos A + Y_o \cdot \sin A)] \cdot [\cos E_H \cdot \sin \theta_s \cdot \cos(A_H - A) + \sin E_H \cdot \cos a] - [Z_i - \frac{\sin E_H \cdot (X_o \cdot \cos A_H + Y_o \cdot \sin A_H) + Z_o \cdot \cos E_H}{\cos \theta}] \cdot [\cos E_H \cdot \cos a \cdot \cos(A_H - A) - \sin E_H \cdot \sin a]$
- $X_{mr} = (Y_o \cdot \cos \theta_H - X_o \cdot \sin \theta_H) \cdot \cos(\theta_H - A_H) + [\cos \lambda \cdot (X_o \cdot \cos \theta_H + Y_o \cdot \sin \theta_H) + Z_o \cdot \sin \lambda] \cdot \cos \lambda \cdot \sin(\theta_H - A_H) - [Z_r - \frac{\sin E_H \cdot (X_o \cdot \cos A_H + Y_o \cdot \sin A_H) + Z_o \cdot \cos E_H}{\cos \theta}] \cdot \sin \lambda \cdot \sin(\theta_H - A_H)$
- $Y_{mr} = (Y_o \cdot \cos \theta_H - X_o \cdot \sin \theta_H) \cdot \cos E_H \cdot \sin(\theta_H - A_H) - [\cos \lambda \cdot (X_o \cdot \cos \theta_H + Y_o \cdot \sin \theta_H) + Z_o \cdot \sin \lambda] \cdot [\cos E_H \cdot \cos \lambda \cdot \cos(\theta_H - A_H) - \sin E_H \cdot \sin \lambda] + [Z_r - \frac{\sin E_H \cdot (X_o \cdot \cos A_H + Y_o \cdot \sin A_H) + Z_o \cdot \cos E_H}{\cos \theta}] \cdot [\cos E_H \cdot \sin \lambda \cdot \cos(\theta_H - A_H) + \sin E_H \cdot \cos \lambda]$

,όπου  $X_o, Y_o, Z_o$  οι συντεταγμένες της θέσης του κεντρικού ηλιοστάτη που εξετάζεται, στο σύστημα συντεταγμένων του εδάφους, το οποίο έχει ως αρχή των αξόνων τη βάση του πύργου, άξονα  $X_g$  με κατεύθυνση προς Νότο, άξονα  $Y_g$  με κατεύθυνση προς Ανατολή και άξονα  $Z_g$  με κατεύθυνση προς το ζενίθ. Οι απαραίτητες γωνίες για τους παραπάνω υπολογισμούς απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.6 Συστήματα Συντεταγμένων και Γωνίες στο Ηλιοστατικό Πεδίο. [57]

Οι περισσότερες από αυτές τις γωνίες ορίστηκαν ήδη στο Σχήμα 3.3, στο οποίο μπορεί να ανατρέξει ο αναγνώστης.

Η γωνία  $\delta_R$  είναι η γωνία κλίσης του κεντρικού δέκτη κοιλότητας, ενώ οι γωνίες  $E_H$  και  $A_H$  αναφέρονται στην ανύψωση και το αζιμούθιο αντίστοιχα του κάθετου στην επιφάνεια του ηλιοστάτη διανύσματος, που διέρχεται από το κέντρο του.

Ισχύει:

$$A_H = \arctan\left(\frac{\sin \theta_H \cdot \sin \lambda - \sin A \cdot \cos a}{\cos \theta_H \cdot \sin \lambda - \cos A \cdot \cos a}\right), \quad E_H = 61r \cos\left(\frac{\sin a + \cos \lambda}{2 \cdot \cos \theta}\right)$$

Κατά τη χρήση των προγραμμάτων ανίχνευσης ακτίνων ,ο υπολογιστής χρησιμοποιεί αλληλουχίες από 0 και 1, σύμφωνα με τον δυαδικό κώδικα. Τα σημεία ελέγχου που σκιάζονται ή παρεμποδίζονται παίρνουν την τιμή 0,σε αντίθεση με όλα τα υπόλοιπα στην επιφάνεια των ηλιοστατών που παίρνουν την τιμή 1. Ο αριθμός των ψηφίων με τιμή 1 αθροίζεται και διαιρείται με το σύνολο των σημείων που ανιχνεύονται, και με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται ο συντελεστής σκίασης και παρεμπόδησης. [57]

#### Απώλειες Διαρροής (spillage losses)

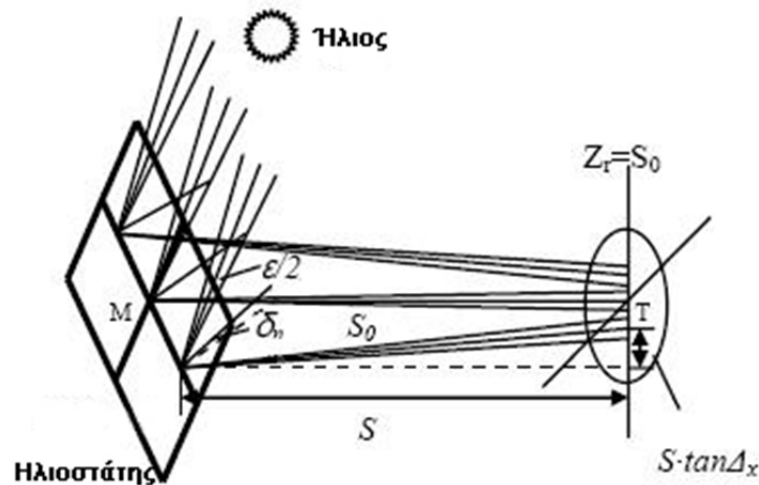
Οι απώλειες διαρροής αναφέρονται στις ανακλώμενες από το ηλιοστατικό πεδίο ηλιακές ακτίνες ,οι οποίες αποτυγχάνουν να φτάσουν στην απορροφητική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του κεντρικού δέκτη, λόγω αστοχίας. Ο όρος εμφανίζεται συχνότερα σε περιπτώσεις κεντρικού ηλιακού δέκτη με κοιλότητα, όταν οι ανακλώμενες ακτίνες δεν καταφέρνουν να περάσουν από το ειδικά διαμορφωμένο άνοιγμα. Συνήθως ,οι απώλειες διαρροής είναι από τις μικρότερες απώλειες ενός ηλιοστατικού πεδίου ,με τιμές που κυμαίνονται κοντά στο 2% [54]. Όπως και οι απώλειες σκίασης και παρεμπόδησης, οι απώλειες διαρροής εξαρτώνται από ένα αρκετά μεγάλο σύνολο μεταβλητών. Τόσο οι ηλιοστάτες, όσο και ο δέκτης αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για το μέγεθος τους. Συγκεκριμένα, όσο αφορά στους ηλιοστάτες ,κυρίαρχο ρόλο παίζει η τραχύτητα της ανακλαστικής επιφάνειας τους και η κυρτότητα της. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά επηρεάζουν άμεσα την γωνία εκτροπής των ανακλώμενων ακτίνων στους ηλιοστάτες. Επιπροσθέτως, οι μικρές αποκλίσεις του συστήματος εντοπισμού της ακριβούς θέσης του ηλίου και του μηχανισμού κίνησης του ηλιοστάτη ,από τις ιδανικές τιμές, συμβάλλουν στην αύξηση των απωλειών διαρροής. Μια γωνιακή απόκλιση των ανακλώμενων ακτίνων μερικών μόλις mrad σε έναν απομακρυσμένο από τον πύργο ηλιοστάτη ,μπορεί να οδηγήσει σε απόκλιση της τάξεως ακόμα και μερικών μέτρων ,του ηλιακού του αποτυπώματος ,στην επιφάνεια του δέκτη. Σημαντική επίδραση στην κατανομή της θερμικής ροής στην απορροφητική επιφάνεια του κεντρικού δέκτη έχει και η διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου στο χώρο. Όσον αφορά στον κεντρικό ηλιακό δέκτη ,όπως είναι λογικό, οι διαστάσεις του ανοίγματος του είναι αντιστρόφως ανάλογες με τις απώλειες διαρροής. Στην περίπτωση μεγαλύτερου ανοίγματος ,μία δέσμη ανακλώμενων ακτίνων έχει αυξημένες πιθανότητες να διέλθει μέσα από αυτό, σε σύγκριση με ένα πιο μικρό άνοιγμα. Ωστόσο ,όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 2.3.2 για τους κεντρικούς ηλιακούς δέκτες, όσο μεγαλώνει το άνοιγμα ,προ της απορροφητικής επιφάνειας, τόσο αυξάνονται και οι απώλειες θερμότητας ,λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτό ,το τελικό μέγεθος του ανοίγματος ενός κεντρικού δέκτη κοιλότητας πρέπει να είναι αποτέλεσμα κατάλληλης βελτιστοποίησης [37]. Σε μία πραγματική εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος, τα ηλιακά αποτυπώματα ,από τις αντανάκλασεις των ηλιοστατών ,στο επίπεδο του δέκτη δεν συγκεντρώνονται πάντα στο ίδιο κεντρικό σημείο της απορροφητικής επιφάνειας. Κάτι τέτοιο ,αν γινόταν, θα δημιουργούσε καταστροφικά υψηλές τιμές θερμικής ροής στο κέντρο και ανεπαρκείς για λειτουργία τιμές στα άκρα της. Έτσι, κάθε σταθμός επιλέγει μια στρατηγική διασποράς των ιχνών των ηλιοστατών του ,πάνω στο επίπεδο του κεντρικού ηλιακού δέκτη ,που θα ακολουθηθεί. Φυσικά, αναλόγως με την προαναφερθείσα στρατηγική διαμορφώνονται και κάποιες αυξομειώσεις στο μέγεθος των απωλειών διαρροής, για την εκάστοτε περίπτωση. [58]

Ο υπολογισμός των απωλειών διαρροής είναι αρκετά σύνθετη διαδικασία. Για την υλοποίηση του απαιτείται η γνώση της κατανομής της θερμικής ροής, λόγω της

ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το ηλιοστατικό πεδίο, πάνω στην επιφάνεια του κεντρικού δέκτη. Όπως και για τις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης, έτσι και στην περίπτωση των απωλειών διαρροής ο υπολογισμός γίνεται αυτόματα μέσω των προγραμμάτων ανίχνευσης ηλιακών ακτίνων, που αναφέραμε νωρίτερα, για κάθε διάταξη των ηλιοστατών στο πεδίο. Τα προγράμματα αυτά, κατά την μοντελοποίηση της εγκατάστασης, χρησιμοποιούν την υπόθεση, ότι η κατανομή της ροής θερμότητας από τον κάθε ηλιοστάτη υπακούει με καλή ακρίβεια στην γνωστή κατανομή του Gauss, και με τον τρόπο αυτό οδηγούνται στην εκτίμηση των απωλειών διαρροής. [58]

Ας δούμε όμως, με λίγη περισσότερη λεπτομέρεια, ένα γενικό παράδειγμα υπολογισμού της παρούσας κατηγορίας απωλειών:

Για τον υπολογισμό του συντελεστή διαρροής, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν η ακτινική κατανομή (sunshape) της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας και τα σφάλματα της επιφάνειας των ηλιοστατών. Η προσπίπτουσα δέσμη ακτίνων ηλιακού φωτός σε ένα σημείο του ηλιοστάτη μπορεί να θεωρηθεί ως ένας κώνος με γωνία  $\varepsilon=9,3mrad$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.7 Υπολογισμός Απωλειών Διαρροής. [57]

Σε κάθε κώνο ανιχνεύονται  $n$  ηλιακές ακτίνες, με τον άξονα συμμετρίας του να συμπίπτει με τη διεύθυνση πρόσπτωσης. Έτσι, η γωνία εκτροπής των ακτίνων από τον άξονα συμμετρίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\delta_{ix} = \rho_{sun} \cdot \cos \theta_{sun} \quad , \quad \delta_{iy} = \rho_{sun} \cdot \sin \theta_{sun} \quad (0 \leq \rho_{sun} \leq \varepsilon, 0 \leq \theta_{sun} \leq 2\pi)$$

Με αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων, σε αυτό του ηλιοστάτη έχουμε (βλ. Σχήμα 3.6):

$$\delta_{mix} = \delta_{ix} \cdot \cos(A_H - A) + \delta_{iy} \cdot \sin a \cdot \sin(A_H - A)$$

$$\delta_{miy} = -\delta_{ix} \cdot \cos E_H \cdot \sin(A_H - A) + \delta_{iy} \cdot [\cos E_H \cdot \sin a \cdot \cos(A_H - A) + \sin E_H \cdot \cos a]$$

Συμπεριλαμβάνοντας το σφάλμα της κατοπτρικής επιφάνειας και το σφάλμα παρακολούθησης της ακριβούς θέσης του ηλίου, οι γωνίες εκτροπής της ανακλώμενης ακτίνας, στο σύστημα συντεταγμένων ανάκλασης εκφράζονται ως εξής:



$$\Delta_{rx} = -[2 \cdot \cos \theta \cdot (C \cdot X_m + \delta_{nwx}) + \delta_{mix}] \cdot \cos(\theta_H - A_H) - [2 \cdot \cos \theta \cdot (C \cdot Y_m + \delta_{nwy}) + \delta_{miy}] \cdot \cos E_H \cdot \sin(\theta_H - A_H)$$

$$\Delta_{ry} = [2 \cdot \cos \theta \cdot (C \cdot X_m + \delta_{nwx}) + \delta_{mix}] \cdot \cos \lambda \cdot \sin(\theta_H - A_H) - [2 \cdot \cos \theta \cdot (C \cdot Y_m + \delta_{nwy}) + \delta_{miy}] \cdot [\cos E_H \cdot \cos \lambda \cdot \cos(\theta_H - A_H) - \sin E_H \cdot \sin \lambda]$$

,όπου C είναι η κυρτότητα σε ένα σημείο του ηλιοστάτη και τα  $\delta_{nwx}$  και  $\delta_{nwy}$  αναφέρονται στη γωνία εκτροπής από το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του ηλιοστάτη, λόγω των σφαλμάτων της επιφάνειας του.

Οι συντεταγμένες  $X_{t0}$ ,  $Y_{t0}$ ,  $Z_{t0}$  των σημείων τομής των ανακλώμενων ακτίνων με το επίπεδο  $Z_r=S_0$  (όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7), καθώς και τα συνημίτονα κατεύθυνσης του μοναδιαίου διανύσματος των ανακλώμενων ακτίνων, στο σύστημα συντεταγμένων του στόχου-δέκτη, δίνονται από τους τύπους:

$$X_{t0} = -X_r \cdot \cos \theta_H + Y_r \cdot \sin \theta_H \cdot \cos \lambda$$

$$Y_{t0} = -X_r \cdot \sin \theta_H \cdot \cos \delta_R - Y_r \cdot (\cos \theta_H \cdot \cos \delta_R \cdot \cos \lambda - \sin \delta_R \cdot \sin \lambda)$$

$$Z_{t0} = X_r \cdot \sin \theta_H \cdot \sin \delta_R + Y_r \cdot (\cos \theta_H \cdot \sin \delta_R \cdot \cos \lambda + \cos \delta_R \cdot \sin \lambda)$$

$$\cos \alpha_t = -\sin \Delta_{rx} \cdot \cos \theta_H + \sin \Delta_{ry} \cdot \sin \theta_H \cdot \cos \lambda - \cos(\sqrt{\Delta_{rx}^2 + \Delta_{ry}^2}) \cdot \sin \theta_H \cdot \sin \lambda$$

$$\cos \beta_t = -\sin \Delta_{rx} \cdot \sin \theta_H \cdot \cos \delta_R - \sin \Delta_{ry} \cdot (\cos \theta_H \cdot \cos \delta_R \cdot \cos \lambda - \sin \delta_R \cdot \sin \lambda) + \cos(\sqrt{\Delta_{rx}^2 + \Delta_{ry}^2}) \cdot (\cos \theta_H \cdot \cos \delta_R \cdot \sin \lambda + \sin \delta_R \cdot \cos \lambda)$$

$$\cos \gamma_t = \sin \Delta_{rx} \cdot \sin \theta_H \cdot \sin \delta_R + \sin \Delta_{ry} \cdot (\cos \theta_H \cdot \sin \delta_R \cdot \cos \lambda - \cos \delta_R \cdot \sin \lambda) - \cos(\sqrt{\Delta_{rx}^2 + \Delta_{ry}^2}) \cdot (\cos \theta_H \cdot \sin \delta_R \cdot \sin \lambda - \cos \delta_R \cdot \cos \lambda)$$

,όπου  $X_r$ ,  $Y_r$  είναι οι συντεταγμένες των σημείων τομής των ανακλώμενων ακτίνων με το επίπεδο  $Z_r=S_0$ , εκφρασμένες όμως στο σύστημα συντεταγμένων ανάκλασης, και δίνονται από τους τύπους:

$$X_r = -X_m \cdot \cos(\theta_H - A_H) - Y_m \cdot \cos E_H \cdot \sin(\theta_H - A_H) - S \cdot \tan \Delta_{rx} + S_0 \cdot \tan \Delta_{trx}$$

$$Y_r = X_m \cdot \cos \lambda \cdot \sin(\theta_H - A_H) + Y_m \cdot [-\cos E_H \cdot \cos \lambda \cdot \cos(\theta_H - A_H) + \sin E_H \cdot \sin \lambda] - S \cdot \tan \Delta_{ry} + S_0 \cdot \tan \Delta_{try}$$

Τελικά, οι συντεταγμένες  $X_T$ ,  $Y_T$  των σημείων τομής των ανακλώμενων ακτίνων με το επίπεδο που ορίζει το άνοιγμα του κεντρικού ηλιακού δέκτη υπολογίζονται ως:

$$X_T = -\frac{Z_{t0} \cdot \cos \alpha_t}{\cos \gamma_t} + X_{t0}, \quad Y_T = -\frac{Z_{t0} \cdot \cos \beta_t}{\cos \gamma_t} + Y_{t0}$$

Ο αριθμός των παραπάνω σημείων τομής διαιρείται με τον συνολικό αριθμό των ακτίνων που ανιχνεύονται από το πρόγραμμα, και έτσι προκύπτει ο συντελεστής διαρροής του ηλιοστατικού πεδίου. [57]

### 3.3 Απώλειες Κεντρικού Δέκτη

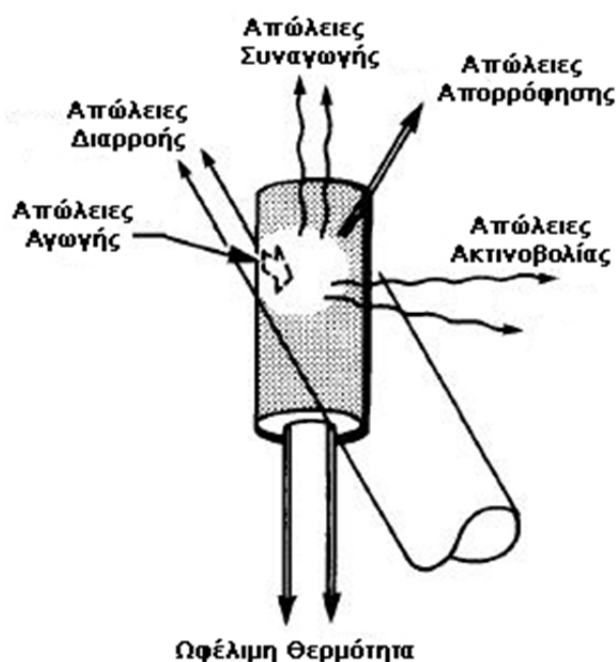
Το δεύτερο βασικό, υποσύστημα ενός πύργου ηλιακής ισχύος, το οποίο συναντούν οι ηλιακές ακτίνες, αφότου ανακλαστούν από το ηλιοστατικό πεδίο, είναι ο κεντρικός ηλιακός δέκτης. Εκεί εντοπίζεται ένα επίσης μεγάλο ποσοστό των απωλειών ισχύος της εγκατάστασης, το οποίο και θα αναλύσουμε στο παρόν κεφάλαιο.

Οι απώλειες που συμβαίνουν σε έναν κεντρικό ηλιακό δέκτη, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Απώλειες Συναγωγής (*convection losses*)
- Απώλειες Ακτινοβολίας (*radiation losses*)
- Απώλειες Απορρόφησης (*absorption losses*)
- Απώλειες Αγωγής (*conduction losses*)

Στις παραπάνω κατηγορίες απωλειών μπορούν να προστεθούν και οι απώλειες διαρροής, καθώς οφείλονται τόσο στο ηλιοστατικό πεδίο, όσο και στον δέκτη. Ωστόσο, στην ανάλυση της παρούσας εργασίας, επιλέξαμε να συμπεριλάβουμε τις απώλειες διαρροής στις απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου, οπότε στο παρόν κεφάλαιο θα παραληφθούν. [37]

Μια σχηματική αναπαράσταση των απωλειών στον κεντρικό δέκτη φαίνεται αμέσως παρακάτω:



Σχήμα 3.8 Απώλειες Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη. [36]

Κατ' αναλογία με το βαθμό απόδοσης του πεδίου ηλιοστατών, ο βαθμός απόδοσης του κεντρικού ηλιακού δέκτη μπορεί να οριστεί ως το γινόμενο των συντελεστών που εκφράζουν τις παραπάνω απώλειες του [37]. Δηλαδή:

$$\eta_{receiver} = \eta_{conv} \cdot \eta_{rad} \cdot \eta_{absorp} \cdot \eta_{cond}$$

Εναλλακτικά, θα μπορούσε κανείς να ορίσει το βαθμό απόδοσης του κεντρικού δέκτη, ως τον λόγο της καθαρής θερμικής ισχύος που προσδίδεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο διατρέχει τις σωληνώσεις του, προς την συνολική θερμική ισχύ, λόγω της συγκεντρωμένης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, που φτάνει στην εξωτερική του επιφάνεια (ή το άνοιγμα, αν αναφερόμαστε σε δέκτη κοιλότητας):

$$\eta_{receiver} = \frac{\dot{Q}_{net}}{\dot{Q}_{inc}} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta h}{\dot{Q}_{inc}} = \frac{\dot{m} \cdot (h_{out_{rec}} - h_{in_{rec}})}{\dot{Q}_{inc}}$$

,όπου  $\dot{m}$  η παροχή μάζας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στις σωληνώσεις του δέκτη και  $\Delta h$  η ενθαλπική αύξηση του από την είσοδο στην έξοδο.

Η εισερχόμενη θερμική ισχύς στην επιφάνεια του ηλιακού δέκτη, από τους ηλιοστάτες του πεδίου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\dot{Q}_{inc} = N \cdot A_{helio\,stat} \cdot I \cdot \eta_{field} \cdot \Gamma$$

,όπου  $N$  ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου,  $A_{helio\,stat}$  το εμβαδόν της επιφάνειας του ηλιοστάτη,  $I$  η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ηλιοστατικό πεδίο και  $\eta_{field}$  ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου. Ο συντελεστής  $\Gamma$  εκφράζει το ποσοστό των ηλιοστατών που είναι εστιασμένοι στον κεντρικό δέκτη (σε θέση λειτουργίας), και λαμβάνεται συνήθως ίσος με 1. [59]

Ας δούμε, όμως, τις προαναφερθείσες απώλειες πιο αναλυτικά:

#### Απώλειες Συναγωγής (convection losses)

Οι απώλειες λόγω συναγωγής είναι από τις σημαντικότερες για έναν ηλιακό δέκτη, διότι το μέγεθος τους μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο ποσοστό τον ολικό βαθμό απόδοσης του. Αναφέρονται στην θερμική ενέργεια που χάνεται από τις επιφάνειες του δέκτη, λόγω του ότι απάγεται από τον ψυχρότερο αέρα που κυκλοφορεί επαφτομενικά τους. Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να διαχωρίσουμε την ελεύθερη συναγωγή, που δημιουργείται από τη διαφορά θερμοκρασίας, από την εξαναγκασμένη συναγωγή, που δημιουργείται από την κίνηση του αέρα. Στην περίπτωση του κεντρικού δέκτη συναντώνται και τα δύο είδη, ωστόσο το ποσοστό της ελεύθερης συναγωγής είναι συνήθως μεγαλύτερο. Πολλοί είναι οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το μέγεθος των απωλειών συναγωγής, όπως το είδος του δέκτη, το μέγεθος της επιφάνειάς του (ή του ανοίγματός του αν πρόκειται για δέκτη κοιλότητας), η θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτόν και η γωνία κλίσης του. Σημαντικό ρόλο, επίσης, παίζουν και οι καιρικές συνθήκες της περιοχής, και για την ακρίβεια η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου. Ένας αριθμός πειραμάτων με δέκτες κοιλότητας, έχει δείξει πως η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου συνεπάγεται και αύξηση των απωλειών συναγωγής. Επιπροσθέτως, η αύξηση της γωνίας κλίσης  $\delta_R$  του κεντρικού δέκτη, όπως αυτή ορίστηκε στο Σχήμα 3.6, επιτρέπει σε όλο και μεγαλύτερες ποσότητες αέρα να εισέρχονται στην κοιλότητα και να απορροφούν τη θερμότητα των τοιχωμάτων του δέκτη. [36],[37],[60]

Με τον προσδιορισμό των απωλειών συναγωγής σε έναν κεντρικό δέκτη ασχολήθηκαν κατά καιρούς πολλοί ερευνητές, ωστόσο η μέθοδος υπολογισμού που έχει αναγνωριστεί

περισσότερο είναι αυτή των Siebers και kraabel. Σύμφωνα με την τελευταία, οι απώλειες συναγωγής σε έναν κεντρικό ηλιακό δέκτη δίνονται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_w - T_a)$$

$$, για h = (h_{fc}^a + h_{nc}^a)^{1/a}$$

,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 και h ο γενικός συντελεστής συναγωγής. Το a είναι ένας εκθέτης που επιλέγεται εμπειρικά αναλόγως με το σχεδιασμό του δέκτη (για δέκτη κοιλότητας προτείνεται η τιμή  $a=1$ ).

Για τον συντελεστή ελεύθερης συναγωγής ισχύει:

$$h_{nc} = 0,81 \cdot (T_w - T_a)^{0,426}$$

Ενώ για τον συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής ,για εξωτερικό κυλινδρικό δέκτη:

$$h_{fc} = \left(\frac{1}{D}\right) \cdot \left[0,3 + 0,488 \cdot Re^{0,5} \cdot \left(1 + \left(\frac{Re}{282}\right)^{0,625}\right)^{0,8}\right] \cdot 0,04199, για D \leq 4 m$$

$$h_{fc} = 14, για 4 \leq D \leq 125 m$$

$$h_{fc} = 33,75 \cdot D^{-0,19}, για D > 125 m$$

,όπου D η διάμετρος του δέκτη και Re ο αριθμός Reynolds με τιμή:  $Re = (1,751 \cdot 10^5) \cdot D$

Για την περίπτωση του δέκτη με κοιλότητα δεν έχουν βρεθεί κατάλληλες συσχετίσεις ,όσον αφορά στον συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής. Η τιμή του ,χάριν απλότητας, μπορεί να τίθεται ίση με αυτή του συντελεστή ελεύθερης συναγωγής. [22],[59]

Τέλος, ένα εναλλακτικό μοντέλο απ' ευθείας υπολογισμού των απωλειών συναγωγής σε δέκτες κοιλότητας ,που προτείνεται από τον Kistler είναι το εξής:

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{Q}_{fc} + \dot{Q}_{nc},$$

$$\dot{Q}_{fc} = 7631 \cdot \frac{A_{ap}}{W_{ap}^{0,2}},$$

$$\dot{Q}_{nc} = 5077 \cdot A_{cav}$$

,όπου  $A_{ap}$  το εμβαδόν του ανοίγματος ( $m^2$ ) στην πρόσοψη του δέκτη,  $W_{ap}$  το πλάτος του ανοίγματος και  $A_{cav}$  η συνολική επιφάνεια στο εσωτερικό της κοιλότητας ( $m^2$ ). [22]

### Απώλειες Ακτινοβολίας (radiation losses)

Οι απώλειες ακτινοβολίας αναφέρονται στη θερμική ενέργεια που διαφεύγει ,μέσω της εκπομπής υπέρυθρου και ορατού φωτός, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στον κεντρικό ηλιακό δέκτη. Μαζί με τις απώλειες συναγωγής, συγκαταλέγονται στις σημαντικότερες απώλειες του υποσυστήματος του κεντρικού δέκτη ,καθώς το άθροισμα και των δύο ισοδυναμεί περίπου με το 5-15% της μέγιστης εισερχόμενης ενέργειας ,από το ηλιοστατικό πεδίο, στον δέκτη. Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν το μέγεθος των απωλειών ακτινοβολίας είναι ,στην ουσία, τα ίδια ,που προαναφέρθηκαν για τις απώλειες συναγωγής, με κυριότερα εξ' αυτών ,το μέγεθος του δέκτη και τη θερμοκρασία λειτουργίας του [36],[37]. Για τον υπολογισμό τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_{ap} \cdot (T_w^4 - T_a^4)$$

,όπου  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$  , $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής,  $A_{ap}$  το εμβαδόν του ανοίγματος του δέκτη,  $T_w$  η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων του και  $T_a$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος. [59]

### Απώλειες Απορρόφησης (absorption losses)

Οι συγκεκριμένες απώλειες αναφέρονται στο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας ,το οποίο αντί να απορροφάται από την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του δέκτη ,αντανακλάται σε αυτήν και διαφεύγει. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου ,όπως είδαμε και στο κεφάλαιο για τους ηλιακούς κεντρικούς δέκτες, χρησιμοποιείται βαφή υψηλής απορροφητικότητας που επικαλύπτει την προαναφερθείσα επιφάνεια. Οι απώλειες απορρόφησης είναι γενικώς μικρές ,σε σύγκριση με τις απώλειες που εξετάσαμε ως τώρα, και εξαρτώνται μόνο από είδος της επικάλυψης της επιφάνειας του δέκτη. Πρέπει ,ωστόσο, να δίνεται προσοχή στην κατάσταση της βαφής με το πέρασμα του χρόνου, καθώς η γήρανση της μπορεί να αυξήσει τις απώλειες απορρόφησης.

Ο συντελεστής απορρόφησης είναι 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:

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

Μια συνήθης τιμή του συντελεστή απορρόφησης  $\eta_{absorp}$  είναι της τάξεως του 0,95 ,ενώ για δέκτη κοιλότητας ,στο εσωτερικό της οποίας γίνονται περισσότερες της μίας αντανακλάσεις, μπορεί να φτάσει και το 0,98. [36],[37]

### Απώλειες Αγωγής (conduction losses)

Οι απώλειες αγωγής αναφέρονται στη θερμότητα που διαφεύγει από τον κεντρικό ηλιακό δέκτη ,διαμέσου των μονωμένων επιφανειών του και των διατάξεων που τον στηρίζουν στην κορυφή του πύργου. Το μέγεθος των απωλειών αγωγής είναι συνήθως πολύ μικρό ,σε σύγκριση με τις υπόλοιπες απώλειες του ηλιακού δέκτη, και για τον λόγο αυτόν συχνά και

παραλείπονται. Για την ελαχιστοποίηση τους απαιτείται καλή μόνωση των επιφανειών που δεν χρησιμοποιούνται για συναλλαγή θερμότητας, και όσο το δυνατόν λιγότερα σημεία επαφής του δέκτη με τον υπόλοιπο πύργο. Επίσης, η στήριξη πρέπει να γίνεται με υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, όπως το ανοξείδωτο ατσάλι. Αν ο σχεδιασμός του δέκτη γίνει, τηρώντας τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις, οι απώλειες λόγω αγωγής μπορούν να πέσουν ακόμα και κάτω από το 1%. [36],[37]

Η σχέση

$$\eta_{receiver} = \eta_{conv} \cdot \eta_{rad} \cdot \eta_{absorp} \cdot \eta_{cond}$$

αν αμελήσουμε τις απώλειες αγωγής και υποθέσουμε για τους συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας αντίστοιχα:

$$\eta_{conv} = 1 - \frac{\dot{Q}_{conv}}{\eta_{absorp} \cdot \dot{Q}_{inc}},$$

$$\eta_{rad} = 1 - \frac{\dot{Q}_{rad}}{\eta_{absorp} \cdot \dot{Q}_{inc}}$$

γίνεται:

$$\eta_{receiver} = \left(1 - \frac{\dot{Q}_{conv}}{\eta_{absorp} \cdot \dot{Q}_{inc}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_{rad}}{\eta_{absorp} \cdot \dot{Q}_{inc}}\right) \cdot \eta_{absorp} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{Q}_{net}}{\dot{Q}_{inc}} = \left(1 - \frac{\dot{Q}_{conv}}{\eta_{absorp} \cdot \dot{Q}_{inc}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_{rad}}{\eta_{absorp} \cdot \dot{Q}_{inc}}\right) \cdot \eta_{absorp} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{net} = \eta_{absorp} \cdot \dot{Q}_{inc} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{rad} + \frac{\dot{Q}_{conv} \cdot \dot{Q}_{rad}}{\dot{Q}_{inc} \cdot \eta_{absorp}}$$

Όμως ο τελευταίος όρος στο δεξιό μέλος της παραπάνω ισότητας είναι πολύ μικρός ,σε σχέση με τους υπόλοιπους ,και μπορεί να διαγραφεί ,δίνοντας μας τελικά έναν χρήσιμο συσχετισμό των διαφόρων απωλειών του δέκτη [59]:

$$\dot{Q}_{net} = \eta_{absorp} \cdot \dot{Q}_{inc} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{rad}$$

Ο υπολογισμός των απωλειών στον κεντρικό ηλιακό δέκτη δεν είναι εύκολη διαδικασία στην πράξη. Η ελαχιστοποίηση τους ,για την αποδοτικότερη λειτουργία της εγκατάστασης ,είναι απαραίτητη και πρέπει να γίνεται μέσω διαδικασιών βελτιστοποίησης του σχήματος του δέκτη, με κατάλληλα προγράμματα.

### 3.4 Λοιπές Απώλειες

Από τη στιγμή που η συγκεντρωμένη στον ηλιακό δέκτη ακτινοβολία μεταφέρεται , με τη μορφή θερμικής ισχύος, στο ρευστό που ρέει στις σωληνώσεις του ,μέχρι τη στιγμή που

παράγεται ηλεκτρική ενέργεια στη συνδεδεμένη με την άτρακτο του στροβίλου γεννήτρια, μεσολαβεί μια διαδρομή του εργαζόμενου ρευστού στις σωληνώσεις του υποσυστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου παρατηρούνται ορισμένες απώλειες. Το μέγεθος των απωλειών αυτών εξαρτάται κυρίως από το είδος του ρευστού ,αλλά και από τη διάταξη των σωληνώσεων. Όπως θα δούμε και παρακάτω, στο κεφάλαιο σύγκρισης ενός αερόψυκτου με έναν υδρόψυκτο συμπυκνωτή, σε έναν αγωγό μπορούν να εμφανίζονται τόσο γραμμικές απώλειες κατά μήκος του, όσο και εντοπισμένες απώλειες σε διάφορα σημεία του, στα οποία παρουσιάζεται γωνίωση ή τοποθετείται κάποιο απαραίτητο εξάρτημα ,όπως βαλβίδα, βάννα κ.λ.π. Κάθε εξάρτημα που είναι συνδεδεμένο στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συμμετέχει ,πρακτικά, με το δικό του μικρό ή μεγαλύτερο ποσοστό στις συνολικές απώλειες της εγκατάστασης. Προφανώς, ένα μέρος της θερμικής ενέργειας που εισέρχεται ,από τον ηλιακό δέκτη, στο κύκλωμα, χάνεται κατά τη μετατροπή της σε μηχανική ενέργεια στους στροβίλους, αναλόγως του βαθμού απόδοσης τους. Απώλειες ισχύος παρουσιάζονται και κατά τις εκκινήσεις και διακοπές της λειτουργίας του σταθμού, καθώς τότε παρατηρείται μία χρονική καθυστέρηση ,μέχρι το κύκλωμα να αποκτήσει τα χαρακτηριστικά θερμοκρασίας και πίεσης ,με τα οποία έχει σχεδιαστεί. Σε περίπτωση που ,για την εξομάλυνση του παραπάνω φαινομένου, στην εγκατάσταση χρησιμοποιείται σύστημα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας, πρέπει να υπολογίζονται οι απώλειες που παρατηρούνται σε αυτό, αν και συνήθως είναι αρκετά μικρές. Χαρακτηριστικά, αναφέρουμε ,ότι ένας τυπικός βαθμός απόδοσης συστήματος αποθήκευσης τετηγμένων αλάτων μπορεί να είναι της τάξεως του 99% [55]. Από το παρόν εδάφιο δεν θα μπορούσαν να λείπουν και οι λεγόμενες ιδιοκαταναλώσεις του ηλιοθερμικού σταθμού. Όπως κάθε εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας, έτσι και οι πύργοι ηλιακής ισχύος χρησιμοποιούν ένα σύνολο από απαραίτητα για την λειτουργία τους εξαρτήματα, τα οποία καταναλώνουν ηλεκτρική ισχύ. Η ισχύς αυτή έχει παρασιτικό χαρακτήρα για την εγκατάσταση και πρέπει ,αφού υπολογιστεί, να αφαιρείται από την μεικτή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη γεννήτρια, ώστε να προκύπτει η καθαρή προσδιδόμενη ενέργεια στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, από τον σταθμό. Τα μεγαλύτερα παρασιτικά φορτία εντοπίζονται κυρίως σε περιστροφικά εξαρτήματα ,όπως αντλίες, ανεμιστήρες και συμπυκνωτές, αλλά και σε εξοπλισμό θέρμανσης ρευστού, μέσω ηλεκτρισμού. Ο τελευταίος χρησιμοποιείται ,ως επί το πλείστον, σε εγκαταστάσεις ,όπου το ρευστό μεταφοράς θερμότητας στις σωληνώσεις του δέκτη είναι διαφορετικό από το νερό και έχει υψηλό σημείο τήξης. Παράδειγμα τέτοιων ρευστών είναι τα τετηγμένα άλατα και το υγρό νάτριο ,τα οποία απαιτούν την ύπαρξη ενός μόνιμου μηχανισμού ,που θα τους προσδίδει θερμότητα, ώστε να αποφεύγεται η στερεοποίηση τους στις σωληνώσεις ,ιδιαίτερα σε χρονικά διαστήματα που η εγκατάσταση δεν θα λειτουργεί. Όσον αφορά στις αντλίες , η ισχύς που καταναλώνουν είναι άμεση συνάρτηση του είδους του ρευστού που αντλούν και των χαρακτηριστικών πίεσης που αυτό πρέπει να έχει στην έξοδό τους. Στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός πύργου ηλιακής ισχύος, δύο είναι οι κύριες αντλίες που χρησιμοποιούνται συνήθως, η αντλία του συμπυκνώματος και η αντλία τροφοδοσίας, που χρησιμοποιείται για να ανεβάσει το εργαζόμενο ρευστό με την επιθυμητή πίεση στον ηλιακό δέκτη ,στην κορυφή του πύργου. Η ιδιοκατανάλωση της αντλίας τροφοδοσίας είναι συγκριτικά μεγαλύτερη ,από αυτή της αντλίας συμπυκνώματος. Φυσικά, από την μεικτή ηλεκτρική ισχύ που παράγεται , πρέπει να αφαιρούνται και οι ιδιοκαταναλώσεις του συστήματος ψύξης του συμπυκνωτή, είτε πρόκειται για αερόψυκτό με χρήση ανεμιστήρων, είτε για υδρόψυκτο με χρήση αντλίας νερού. Περισσότερος λόγος για τις συγκεκριμένες ιδιοκαταναλώσεις θα γίνει και σε επόμενο κεφάλαιο, όπου συγκρίνονται οι δύο τύποι συμπυκνωτή. Τέλος, δεν πρέπει να παραλείψουμε και τις θερμικές απώλειες σε έναν σταθμό ,που οφείλονται σε κάποια διαρροή που μπορεί να παρουσιαστεί στο σύστημα σωληνώσεων. Τέτοιας μορφής βλάβες πρέπει να προλαμβάνονται ,με κατάλληλο σύστημα

ασφαλείας, και να επιδιορθώνονται έγκαιρα για την ομαλή λειτουργία και την αποδοτικότερη παραγωγή ενέργειας από την εγκατάσταση. [36]

### 3.5 Απόδοση Θερμοδυναμικού Κύκλου και Γεννήτριας

Το εργαζόμενο ρευστό ,αφότου απορροφήσει θερμότητα ,είτε απ' ευθείας στις σωληνώσεις του ηλιακού δέκτη (άμεση ατμοπαραγωγή), είτε στον ατμοποιητή-εναλλάκτη (έμμεση ατμοπαραγωγή), εκτελεί στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, έναν θερμοδυναμικό κύκλο Rankine, ή κάποια παραλλαγή του. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η θερμική ενέργεια ,που προσδόθηκε στο ρευστό, μετατρέπεται σε μηχανική ,μέσω της περιστροφής των στρόβιλων ,και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια στους ακροδέκτες της γεννήτριας. Ένα πολύ χαρακτηριστικό μέγεθος της απόδοσης μιας ηλιοθερμικής εγκατάστασης, και πιο συγκεκριμένα του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{el}$  ,ή αλλιώς βαθμός απόδοσης του μπλοκ ισχύος (power block)  $\eta_{powerblock}$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται στη γεννήτρια ,προς τη θερμική ισχύ που προσδίδεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας στις σωληνώσεις του ηλιακού δέκτη:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{net}} = \frac{P_{el}}{\dot{m} \cdot (h_{out_{rec}} - h_{in_{rec}})}$$

Ο παραπάνω βαθμός απόδοσης εκφράζει ,στην ουσία, το ποσοστό της εισερχόμενης στο κύκλωμα θερμικής ισχύος, που μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική ισχύ στη γεννήτρια. Βασικό μέλημα των σχεδιαστών ηλιοθερμικών σταθμών είναι η διάταξη των σωληνώσεων και των εξαρτημάτων του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και η επιλογή των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών τους, με τέτοιο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιείται ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης.

Ένας λίγο διαφορετικός από τον προηγούμενο βαθμός απόδοσης ,ενδεικτικός για τέτοιες εγκαταστάσεις, είναι και ο βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου. Στην περίπτωση μας ,δηλαδή τον κύκλο Rankine, αυτός ορίζεται ως εξής:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{turb} \cdot (h_{in_{turb}} - h_{out_{turb}}) - P_{pumps}}{\dot{Q}_{net}} = \frac{\dot{m}_{turb} \cdot (h_{in_{turb}} - h_{out_{turb}}) - P_{pumps}}{\dot{m} \cdot (h_{out_{rec}} - h_{in_{rec}})}$$

,όπου  $h_{in_{turb}} - h_{out_{turb}}$  η ενθαλπική πτώση του ατμού ,κατά την αποτόνωση του στο στρόβιλο και  $P_{pumps}$  η ισχύς που καταναλώνεται από τις αντλίες του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. [61]

Τα χαρακτηριστικά του ατμού που επιλέγονται πριν την είσοδο στο στρόβιλο, επηρεάζουν σημαντικά τους παραπάνω βαθμούς απόδοσης. Σε γενικότερες γραμμές, η αύξηση της θερμοκρασίας ή/και της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο προκαλεί αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης και του βαθμού απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου. Ωστόσο, τόσο η θερμοκρασία ,όσο και η πίεση περιορίζονται λόγω της πεπερασμένης αντοχής των υλικών του ηλιακού δέκτη και των σωληνώσεων αντίστοιχα. Εκτός αυτού, η αύξηση της



θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο ,πάνω από ένα ορισμένο όριο, θα συνεπαγόταν και μείωση του βαθμού απόδοσης του κεντρικού ηλιακού δέκτη ,λόγω των απωλειών του. [62]

Η ηλεκτρική γεννήτρια είναι ένα βασικό τμήμα της εγκατάστασης του πύργου ηλιακής ισχύος, καθώς μαζί με τον στρόβιλο στοιχίζουν περίπου το 50% της συνολικής αξίας του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για δεδομένη ονομαστική ισχύ του σταθμού, το κόστος τους επηρεάζεται από τις συνθήκες εισόδου και εξόδου του ατμού που επιλέγονται. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας ,εκφράζει τις ηλεκτρικές απώλειες που συμβαίνουν σε αυτή, και επηρεάζει άμεσα την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τον σταθμό. [36]

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Ηλιοστατικού Πεδίου

#### 4.1 Σημασία σωστού Σχεδιασμού και Βελτιστοποίησης του Ηλιοστατικού Πεδίου

Ο σωστός σχεδιασμός και η προσπάθεια βελτιστοποίησης του ηλιοστατικού πεδίου είναι διαδικασίες πολύ σημαντικές ,κατά την μοντελοποίηση ενός πύργου ηλιακής ισχύος. Ένα σωστά σχεδιασμένο πεδίο ηλιοστατών, που προέρχεται από κάποια μέθοδο βελτιστοποίησης, μπορεί να συμβάλει στην αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, κατά ένα μεγάλο ποσοστό. Όπως είδαμε και στο τρίτο κεφάλαιο, οι απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου αποτελούν τη μερίδα του λέοντος ,με υψηλά ποσοστά που αγγίζουν το 40-47% του συνόλου των απωλειών της εγκατάστασης. Η μεγαλύτερη δυνατή μείωση ,επομένως, των απωλειών αυτών είναι βασική προτεραιότητα ,κατά τη σχεδίαση ενός πύργου ηλιακής ισχύος. Εκτός αυτού, το κόστος του ηλιοστατικού πεδίου υπολογίζεται ,στις περισσότερες περιπτώσεις, ότι ισοδυναμεί με το 40-50% του συνολικού κόστους της εγκατάστασης [54],[55],[57]. Τα παραπάνω στοιχεία αποκαλύπτουν το πόσο σημαντικό κομμάτι ενός πύργου ηλιακής ισχύος είναι το ηλιοστατικό του πεδίο, τόσο από την ενεργειακή όσο και από την οικονομική σκοπιά. Γίνεται αντιληπτό ,λοιπόν, ότι αν κάποιος επέλεγε να παρέμβει και να βελτιστοποιήσει πρώτο ένα από τα υποσυστήματα του πύργου ηλιακής ισχύος ,αυτό αδιαμφισβήτητα θα ήταν το πεδίο ηλιοστατών. Φυσικά ο σωστός σχεδιασμός του ηλιοστατικού πεδίου και η βελτιστοποίηση του δεν είναι εύκολη διαδικασία, αν αναλογιστούμε ότι αποτελείται από εκατοντάδες και συχνά χιλιάδες ηλιοστάτες. Οι παράμετροι ,σύμφωνα με τις οποίες πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση, είναι αρκετές ,και πολλές φορές όχι μόνο αλληλοεξαρτώνται μεταξύ τους ,αλλά και αλληλοσυγκρούονται, δημιουργώντας ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα ,γύρω από τον σχεδιασμό ενός καλύτερου ηλιοστατικού πεδίου. Συνήθη κριτήρια ,με τα οποία σχεδιάζεται και βελτιστοποιείται ένα ηλιοστατικό πεδίο, είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας, η ελαχιστοποίηση του κόστους του πεδίου και η ελαχιστοποίηση του συνολικού χώρου που αυτό καταλαμβάνει. Η επιλογή μιας βέλτιστης λύσης ,για τις εκάστοτε συνθήκες, που να ικανοποιεί όσο το δυνατόν και τα τρία κριτήρια, είναι πάντα ο αντικειμενικός σκοπός του σχεδιαστή [63]. Περαιτέρω ανάλυση σχετικά με το θέμα του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης ενός ηλιοστατικού πεδίου ,που αποτελεί βασικό κομμάτι της παρούσας εργασίας, θα γίνει και στα ακόλουθα κεφάλαια.

#### 4.2 Επιλογή κατάλληλης Διάταξης Ηλιοστατών

Πριν ακόμα ξεκινήσει ο σχεδιασμός ενός ηλιοστατικού πεδίου, και ο προσδιορισμός των συντεταγμένων τοποθέτησης των ηλιοστατών του, ένα βασικό βήμα είναι να επιλεγεί η γενική διάταξη που αυτό θα έχει σε σχέση με τον πύργο. Στην μέχρι σήμερα ιστορία των πύργων ηλιακής ισχύος, συναντώνται δύο βασικές κατηγορίες διάταξης των ηλιοστατών, η διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου βόρεια του πύργου (*North Field Layout*) και η περιβάλλουσα διάταξη (*Surrounding Field Layout*) ,με τους ηλιοστάτες γύρω από τον πύργο.

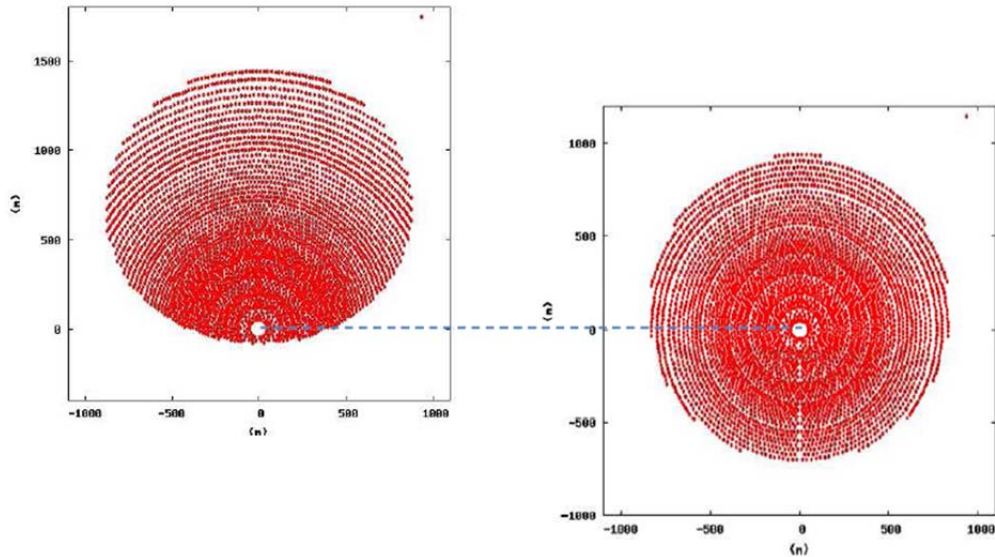


*Σχήμα 4.1 Διάταξη Ηλιοστατικού Πεδίου Βόρεια του Πύργου PS10. [49]*



*Σχήμα 4.2 Περιβάλλουσα Διάταξη Ηλιοστατικού Πεδίου του Πύργου Gemasolar. [64]*

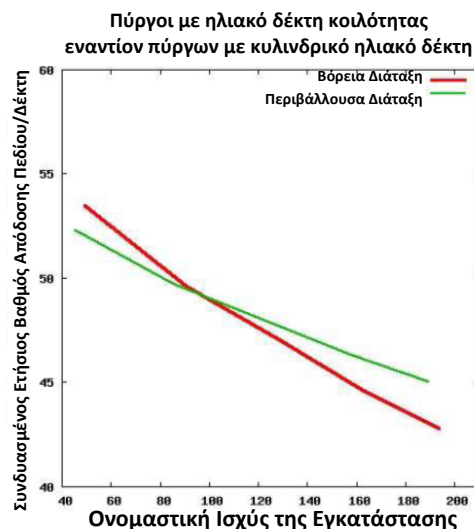
Στις εγκαταστάσεις με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η περιβάλλουσα διάταξη σε συνδυασμό με κυλινδρικό εξωτερικό ηλιακό δέκτη, ενώ για μικρότερη ισχύ προτιμάται, τις περισσότερες φορές, η διάταξη των ηλιοστατών βόρεια του πύργου σε συνδυασμό με δέκτη κοιλότητας. Η διαπίστωση αυτή έχει την ακόλουθη λογική εξήγηση: ξεκινώντας από ένα ηλιοστατικό πεδίο με διάταξη βόρεια του πύργου και αυξάνοντας διαρκώς την ονομαστική ισχύ της εγκατάστασης, θα απαιτούντο ολοένα και περισσότεροι ηλιοστάτες, οι οποίοι, όπως είναι φυσικό, θα έπρεπε να τοποθετηθούν όλο και μακρύτερα από τον πύργο. Κάτι τέτοιο θα αύξανε δραματικά τις απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, από ένα σημείο και πέρα. Στην προσπάθεια να περιορίσουν, λοιπόν, την ανεξέλεγκτη αύξηση των απωλειών αυτών, οι σχεδιαστές ηλιοστατικών πεδίων ξεκίνησαν να τοποθετούν τους ηλιοστάτες και προς τα ανατολικά και δυτικά του πύργου, σε κύκλους, ακόμα και αν αυτό αύξανε σε έναν βαθμό τις απώλειες συνημιτόνου. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε η περιβάλλουσα διάταξη. Οι δύο βασικές διατάξεις ηλιοστατικών πεδίων, για τις οποίες γίνεται λόγος, φαίνονται χαρακτηριστικά, για την ίδια ονομαστική ισχύ εγκατάστασης, στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.3 Διάταξη Ηλιοστατικού Πεδίου Βόρεια του Πύργου (αριστερά) και Περιβάλλουσα Διάταξη Ηλιοστατικού Πεδίου (δεξιά). [65]

Κάθε κόκκινο σημείο στις παραπάνω διατάξεις αντιπροσωπεύει έναν ηλιοστάτη, ενώ οι βάσεις των πύργων τοποθετήθηκαν, χάριν συγκρίσεως, στην ίδια ευθεία. Μπορεί κανείς, εύκολα, να παρατηρήσει ότι η διάταξη βόρεια του πύργου απαιτεί την τοποθέτηση ηλιοστατών σε μεγαλύτερες αποστάσεις από αυτόν, σε σύγκριση με την περιβάλλουσα διάταξη.

Ποια είναι όμως η τιμή της ονομαστικής ισχύος της εγκατάστασης, η οποία αποτελεί την διαχωριστική γραμμή ανάμεσα στην επιλογή βόρειας διάταξης ηλιοστατικού πεδίου και περιβάλλουσας διάταξης; Για να απαντήσουμε επαρκώς σε αυτό το ερώτημα, πρέπει να συγκρίνουμε τις δύο διαφορετικές διατάξεις, για ένα κοινό εύρος τιμών της ονομαστικής ισχύος του σταθμού, ως προς ένα χαρακτηριστικό τους, ενδεικτικό της θερμικής ισχύος που φτάνει τελικά στο ρευστό, μέσω του δέκτη. Το χαρακτηριστικό που επιλέγεται, για το σκοπό αυτό, είναι το γινόμενο των ετήσιων βαθμών απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου και του κεντρικού ηλιακού δέκτη. Τα αποτελέσματα της παραπάνω σύγκρισης παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.4 Σύγκριση Βόρειας Διάταξης Ηλιοστατικού Πεδίου με Περιβάλλουσα Διάταξη, συναρτήσει της Ονομαστικής Ισχύος της Εγκατάστασης. [65]

Παρατηρούμε, ότι η τιμή της ονομαστικής ισχύος της εγκατάστασης ,που αποτελεί τη διαχωριστική γραμμή για την επιλογή της μίας ή της άλλης διάταξης, είναι περίπου 90 MWe. Για σταθμούς ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 90 MWe ,χωρίς σύστημα αποθήκευσης, συνίσταται ,από τεχνικής απόψεως, η επιλογή της διάταξης των ηλιοστατών βόρεια του πύργου, ενώ για ονομαστική ισχύ σταθμού μεγαλύτερη των 90 MWe ,η διάταξη των ηλιοστατών γύρω από τον πύργο φαντάζει ως καλύτερη λύση. Πιο συγκεκριμένα, για ονομαστική ισχύ εγκατάστασης 50 MWe ,χωρίς σύστημα αποθήκευσης, το γινόμενο των βαθμών απόδοσης ηλιοστατικού πεδίου και δέκτη θα ήταν 3% υψηλότερο για τη βόρεια διάταξη πεδίου και δέκτη κοιλότητας, ενώ για εγκατάσταση των 150 MWe ,το γινόμενο θα ήταν 4% μεγαλύτερο για τη περιβάλλουσα διάταξη πεδίου και εξωτερικό κυλινδρικό δέκτη. Βέβαια ,εάν αναφερθούμε σε εγκαταστάσεις που περιλαμβάνουν σύστημα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας, η διαχωριστική γραμμή ,σχετικά με την επιλογή κατάλληλης διάταξης ηλιοστατικού πεδίου, μετακινείται αριστερά στο παραπάνω γράφημα. Παραδείγματος χάριν, για σταθμούς με σύστημα αποθήκευσης 6 ωρών, η ονομαστική ισχύς ,που αποτελεί τη διαχωριστική γραμμή για την επιλογή της μίας ή της άλλης διάταξης, προσεγγίζει τα 50 MWe.

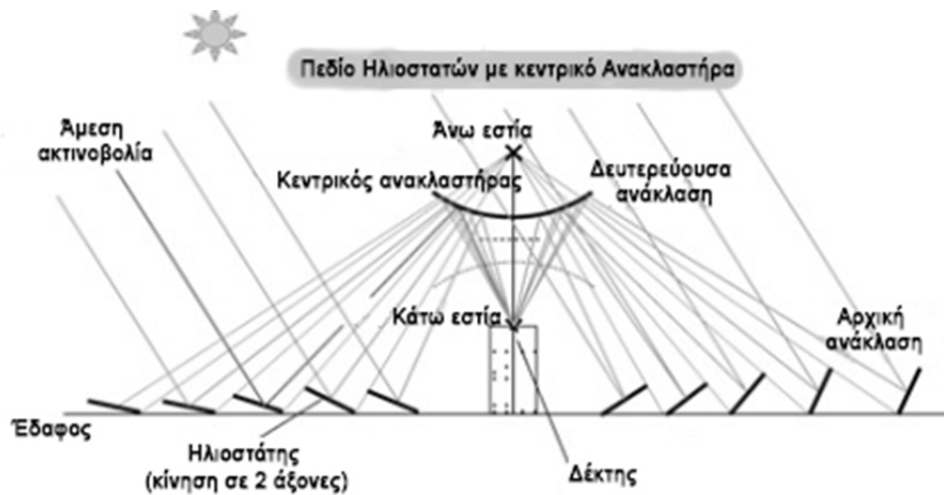
Φυσικά τα παραπάνω αποτελέσματα δεν πρέπει να γενικεύονται ,άνευ επανεξέτασης των χαρακτηριστικών της εκάστοτε εγκατάστασης. Τόσο οικονομικοί ,όσο και λειτουργικοί παράγοντες μπορεί να δημιουργούν αποκλίσεις από τις προαναφερθείσες τιμές. Ωστόσο ,για εγκαταστάσεις ονομαστικής ισχύος 50 MWe και κάτω, συστήνεται να εξετάζεται κυρίως η επιλογή της διάταξης των ηλιοστατών βόρεια του πύργου. [65]

Τέλος, σημαντική είναι η παρατήρηση ,ότι η διάταξη ηλιοστατικού πεδίου βόρεια του πύργου παρουσιάζει καλύτερη απόδοση κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ η περιβάλλουσα διάταξη εμφανίζει το μέγιστο της απόδοσης της το καλοκαίρι. [36]

### **4.3 Πεδίο Ηλιοστατών με κεντρικό Ανακλαστήρα (Beam Down Optics)**

Στην προσπάθεια αύξησης της παραγόμενης ισχύος από την εγκατάσταση, με όσο το δυνατόν λιγότερους ηλιοστάτες, δημιουργήθηκε ,σε θεωρητικό ακόμα επίπεδο, ένα διαφορετικό από τα συνηθισμένα ηλιοστατικό πεδίο. Τα βασικά μέρη ,που απαρτίζουν αυτή την καινοτόμο ιδέα, είναι το πεδίο των ηλιοστατών, ο κεντρικός ανακλαστήρας και ο κεντρικός ηλιακός δέκτης. Οι ηλιοστάτες ,στη συγκεκριμένη περίπτωση, συγκεντρώνουν τις ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες στην άνω εστία ενός κεντρικού κατοπτρικού ανακλαστήρα ,μονολιθικού ή υπερβολοειδούς σχήματος, που βρίσκεται τοποθετημένος σε κάποιο συγκεκριμένο ύψος ,πάνω από το πεδίο. Ο ανακλαστήρας ,με τη σειρά του, ανακλά για δεύτερη φορά τις ακτίνες και τις συγκεντρώνει στο κάτω σημείο εστίασης του, στο οποίο έχει τοποθετηθεί το άνοιγμα της κοιλότητας του κεντρικού ηλιακού δέκτη, κοντά στο έδαφος.

Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει αυτόν το διαφορετικό τρόπο συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στον δέκτη, που περιγράφηκε:



Σχήμα 4.5 Πεδίο Ηλιοστατών με κεντρικό ανακλαστήρα. [66]

Το μεγάλο πλεονέκτημα που παρουσιάζει το ηλιοστατικό πεδίο με κεντρικό ανακλαστήρα, είναι ότι επιτρέπει σε εξαρτήματα μεγάλης μάζας ,όπως ο ηλιακός δέκτης και οι σωληνώσεις των επιφανειών του, να βρίσκονται κοντά στο έδαφος. Έτσι, αυτή η τεχνολογία καλύπτει μία μεγαλύτερη κλίμακα ισχύος ,στην οποία μπορεί να εφαρμοστεί, σε σχέση με τα συνήθη συστήματα κεντρικού δέκτη στην κορυφή του πύργου. Επιπλέον, η τοποθέτηση του εξοπλισμού κοντά στο έδαφος, επιτρέπει την ευκολότερη συντήρηση ,αλλά και τον έλεγχο του κατά τακτά χρονικά διαστήματα. Από την άλλη πλευρά, τέτοια συστήματα με κεντρικό ανακλαστήρα, έχουν αρκετά περίπλοκη γεωμετρία και παρουσιάζουν αυξημένες απώλειες ηλιοστατικού πεδίου, καθώς οι ηλιακές ακτίνες υφίστανται δύο αντανάκλασεις και διανύουν συνολικά μεγαλύτερη απόσταση μέσα στην ατμόσφαιρα, ώσπου να απορροφηθούν τελικά στον δέκτη. Το γεγονός αυτό, λειτουργεί ως ανασταλτικός παράγοντας μέχρι σήμερα, για τη χρήση ηλιοστατικών πεδίων με κεντρικό ανακλαστήρα στην πράξη. [66]

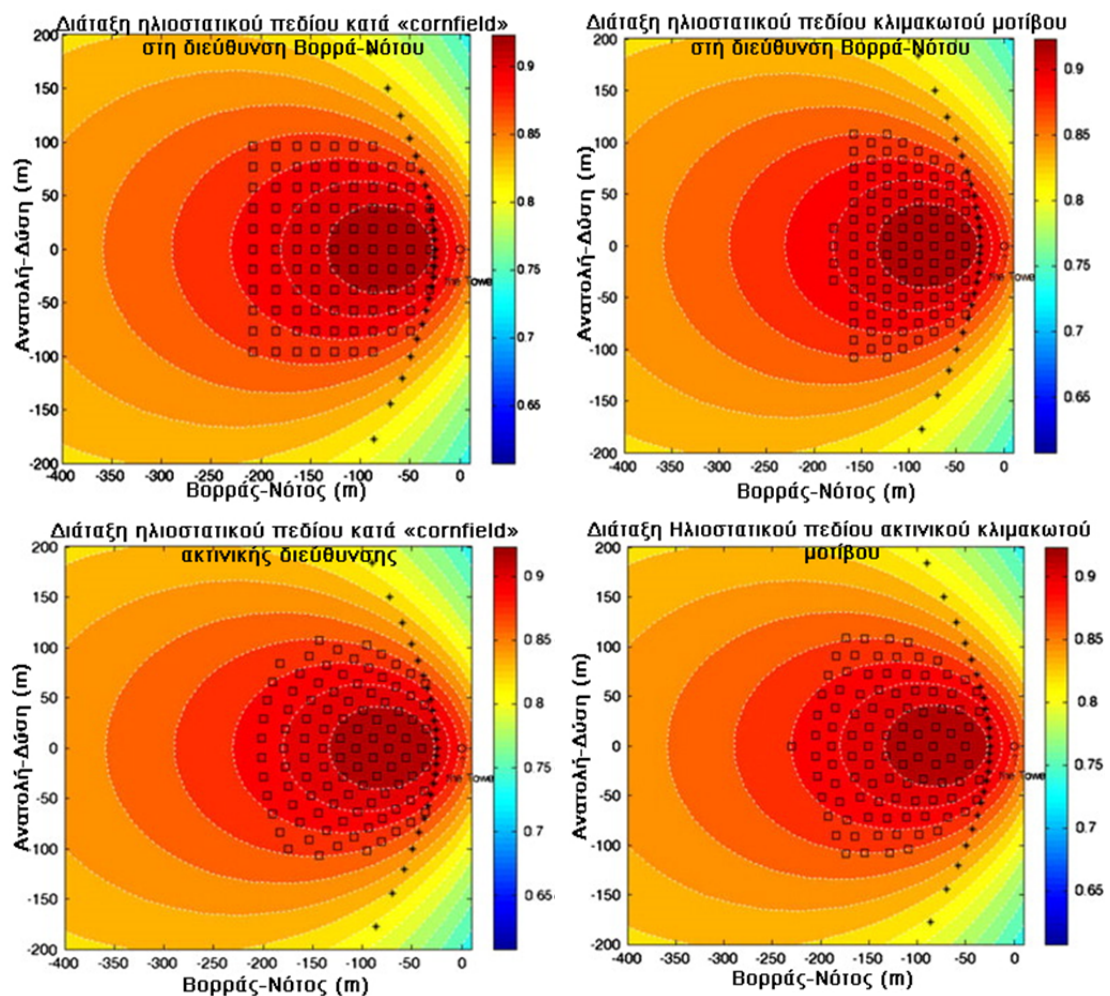
#### 4.4 Τύποι Βόρειου Ηλιοστατικού Πεδίου

Εστιάζοντας την προσοχή μας στη διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου βόρεια του πύργου, εντοπίζουμε τέσσερις διαφορετικούς τύπους πεδίων, τους οποίους θα παρουσιάσουμε παρακάτω. Οι τέσσερις αυτοί τύποι πηγάζουν από τις δύο βασικές διαφορετικές μεθοδολογίες τοποθέτησης των ηλιοστατών στο πεδίο, που έχουν μελετηθεί περισσότερο και καθιερωθεί στην επιστημονική κοινότητα. Η διαφορά των μεθοδολογιών έγκειται στον τρόπο ,με τον οποίο στοιχίζονται οι διαδοχικές σειρές ηλιοστατών στο πεδίο. Πιο συγκεκριμένα ,η μεθοδολογία κατά “cornfield” προτείνει τη στοιχίση των ηλιοστατών του πεδίου αυστηρά κατά τη διεύθυνση Βορρά-Νότου, με καθορισμένο κενό τετραγωνικού σχήματος ανάμεσα τους. Αντίθετα, η ,προερχόμενη από το πανεπιστήμιο του Χιούστον, μεθοδολογία τοποθέτησης των ηλιοστατών σε ακτινικό κλιμακωτό μοτίβο (radial stagger arrangement), προτείνει τη στοιχίση τους κατά τη διεύθυνση των ακτίνων ομόκεντρων κύκλων, με κέντρο τη βάση του πύργου. [36]

Έτσι, οι τέσσερις διαφορετικοί τύποι βόρειου ηλιοστατικού πεδίου που συναντώνται σε πύργους ηλιακής ισχύος είναι οι εξής [59]:

- Ηλιοστατικό πεδίο κατά “cornfield” στη διεύθυνση Βορρά-Νότου (North-South cornfield field).
- Ηλιοστατικό πεδίο κλιμακωτού μοτίβου στη διεύθυνση Βορρά-Νότου (North-South staggered field).
- Ηλιοστατικό πεδίο κατά “cornfield” ακτινικής διεύθυνσης (Radial cornfield field).
- Ηλιοστατικό πεδίο ακτινικού κλιμακωτού μοτίβου (Radial staggered field).

Καθένας από τους προαναφερθέντες τύπους βόρειου ηλιοστατικού πεδίου απεικονίζεται παρακάτω ,σε ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα με 100 ηλιοστάτες:



Σχήμα 4.6 Τύποι Βόρειου Ηλιοστατικού Πεδίου. [59]

Έρευνες ,πάνω στους διάφορους τύπους ηλιοστατικών πεδίων, έχουν δείξει ότι το ακτινικό κλιμακωτό μοτίβο είναι συνήθως το πιο αποδοτικό, για δεδομένη διαθέσιμη έκταση γης, και για αυτόν το λόγο συναντάται στους περισσότερους πύργους ηλιακής ισχύος σήμερα. Από τα πλεονεκτήματά του, ξεχωρίζουν η ελαχιστοποίηση της χερσαίας έκτασης που χρησιμοποιείται, και οι πολύ χαμηλές απώλειες λόγω σκίασης και παρεμπόδισης, που εξασφαλίζει. [37]

Παρ' όλα αυτά, πριν την τελική επιλογή του τύπου του βόρειου ηλιοστατικού πεδίου ,για έναν πύργο ηλιακής ισχύος, πρέπει να εξετάζονται και οι τέσσερις παραπάνω πιθανές επιλογές. Μέτρο σύγκρισης τους μπορεί να αποτελεί ο ετήσιος βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου ,που προκύπτει για κάθε τύπο, μέσω ηλιακών δεδομένων της εκάστοτε περιοχής και ύστερα από προσομοιώσεις με κατάλληλα προγράμματα. [59]

#### **4.5 Παράμετροι Σχεδιασμού και Επίδραση αυτών στην Απόδοση του Πεδίου**

Οι παράμετροι, που καθορίζουν πλήρως το σχεδιασμό ενός ηλιοστατικού πεδίου και επηρεάζουν το βαθμό απόδοσής του, μπορούν στην πραγματικότητα να είναι πολλές. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, την κατάσταση δυσχεραίνει η χαρακτηριστική αλληλεξάρτηση που υπάρχει μεταξύ των παραμέτρων. Το γεγονός αυτό σημαίνει, ότι κατά το σχεδιασμό του πεδίου, πολλές φορές, δεν μπορούμε να αλλάξουμε μονάχα μία παράμετρο ,κρατώντας όλες τις υπόλοιπες σταθερές.

Έχοντας υπ' όψιν τα παραπάνω, στο παρόν ουσιαστικό κεφάλαιο της εργασίας, προσπαθήσαμε να εντοπίσουμε τις σημαντικότερες εκ των παραμέτρων σχεδιασμού ενός ηλιοστατικού πεδίου, και να εστιάσουμε στην επίδρασή τους στο βαθμό απόδοσης του. Οι παράμετροι που τελικά επιλέχθηκαν, αναλύονται εκτενέστερα αμέσως παρακάτω:

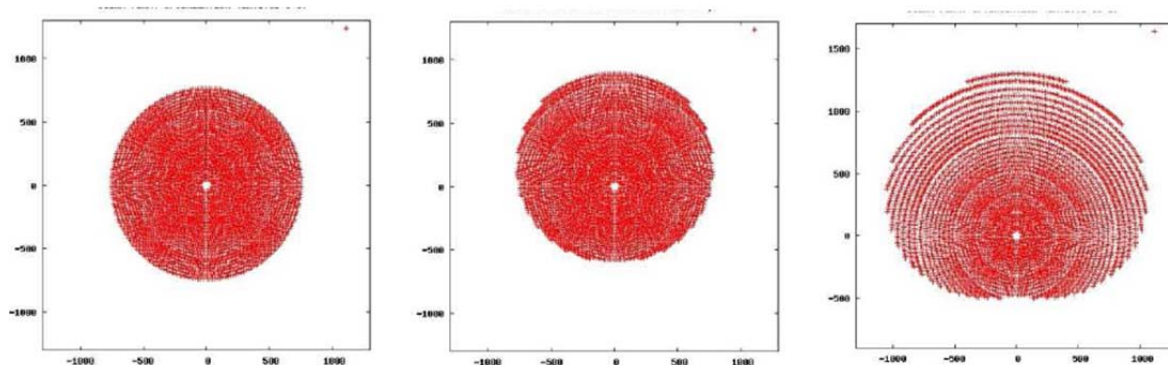
##### Γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας του σταθμού

Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο του ηλιακού δυναμικού, οι περιοχές κοντά στη γραμμή του ισημερινού, με γεωγραφικό πλάτος περίπου από  $-40^{\circ}$  έως  $+40^{\circ}$ , συγκεντρώνουν τις υψηλότερες τιμές άμεσης ακτινοβολίας. Για να γίνει ευδιάκριτη η επίδραση του γεωγραφικού πλάτους ,της τοποθεσίας της εγκατάστασης, στη μορφή και την απόδοση του ηλιοστατικού πεδίου, θα πρέπει να συγκρίνουμε περιπτώσεις διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους, αλλά για τοποθεσίες με ίδια τιμή άμεσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (DNI). Το ηλιοστατικό πεδίο θα πρέπει να αποτελείται κάθε φορά από τον ίδιο αριθμό ηλιοστατών ,με ίδιο εμβαδόν επιφάνειας. Δηλαδή, η συνολική ανακλαστική επιφάνεια του ηλιοστατικού πεδίου να παραμένει η ίδια σε κάθε περίπτωση, αλλά όχι και η διάταξη του.

Για τη σύγκριση που παρουσιάζεται παρακάτω ,από βιβλιογραφική αναφορά, λήφθηκαν ως σταθερά δεδομένα, η ονομαστική ισχύς 100 MWe της εγκατάστασης ,χωρίς σύστημα αποθήκευσης, και οι 4000 ηλιοστάτες επιφάνειας  $120 \text{ m}^2$  ο καθένας.

Το ηλιοστατικό πεδίο της εγκατάστασης προσομοιώθηκε για τρία διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη,  $0^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$  (βόρειο) και  $60^{\circ}$  (βόρειο) αντίστοιχα, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα και τον πίνακα που ακολουθούν:





Σχήμα 4.7 Διάταξη του Ηλιοστατικού Πεδίου για Γεωγραφικό πλάτος  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  (από αριστερά προς τα δεξιά). [65]

Γεωγραφικό Πλάτος	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$
Ύψος Πύργου	210	202	199	191	186	178
Απόσταση τελευταίας σειράς ηλιοστατών από τον πύργο	809	871	929	987	1158	1270
Βαθμός απόδοσης ηλιοστατικού πεδίου στο σημείο σχεδίασης	67,6%	67,2%	66,6%	65,3%	64,7%	62,4%
Ετήσιος βαθμός απόδοσης ηλιοστατικού πεδίου	57,5%	57,2%	57,0%	56,8%	55,9%	53,3%

Πίνακας 4.1 Επίδραση του Γεωγραφικού Πλάτους της Τοποθεσίας του Σταθμού. [65]

Παρατηρούμε ,χαρακτηριστικά στο σχήμα 4.7 ,την εξέλιξη της διάταξης του ηλιοστατικού πεδίου ,καθώς αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος. Η έκταση που καταλαμβάνει το ηλιοστατικό πεδίο διαρκώς μεγαλώνει, με αποτέλεσμα την πιο αραιή τοποθέτηση των ηλιοστατών σε αυτό. Επίσης, βλέπουμε πως η αρχική κυκλική μορφή του πεδίου στον ισημερινό αλλοιώνεται ,όσο προχωράμε προς βορειότερα πλάτη, και μάλιστα οι διατάξεις που σχηματίζονται έχουν ολοένα και μεγαλύτερη βαρύτητα προς τον Βορρά, με την πλειοψηφία των ηλιοστατών να τοποθετείται, δηλαδή, βόρεια του πύργου.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις εξηγούνται λογικά, αν σκεφτεί κανείς ,ότι σε μικρά γεωγραφικά πλάτη, όπου οι ηλιακές ακτίνες πέφτουν σχεδόν κατακόρυφα, τα ηλιοστατικά πεδία είναι πολύ πιο συμπιεσμένα στο χώρο, καθώς οι ηλιοστάτες ,στο μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας, βρίσκονται σχεδόν στην οριζόντια θέση. Το γεγονός αυτό, όπως είναι λογικό, μειώνει δραστικά τις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης. Η χρησιμοποιούμενη έκταση για το ηλιοστατικό πεδίο στην περίπτωση γεωγραφικού πλάτους  $0^\circ$  υπολογίζεται σε  $1,8 \text{ km}^2$  ,ενώ για την περίπτωση γεωγραφικού πλάτους  $60^\circ$  φτάνει τα  $3,4 \text{ km}^2$ . Επιπροσθέτως, η ολοένα και πιο κοντά στην οριζόντια διεύθυνση, θέση των ηλιοστατών, δικαιολογεί και την αύξηση στο ύψος του πύργου, που παρατηρείται στον πίνακα 4.1, όσο προχωράμε προς τον ισημερινό.

Τελευταίο, αλλά και ίσως το πιο σημαντικό συμπέρασμα ,που προκύπτει από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.1, είναι ότι η απόδοση του ηλιοστατικού πεδίου πέφτει όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας της εγκατάστασης. Μπορεί ,λόγο των μικρότερων γωνιών πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων, οι απώλειες συνημιτόνου να μειώνονται όσο απομακρυνόμαστε από τον ισημερινό, όμως αυτή η μείωση σίγουρα

αντισταθμίζεται από την αύξηση τόσο των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης όσο και των απωλειών ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, λόγω της τοποθέτησης ηλιοστατατών μακρύτερα από τον πύργο. [65]

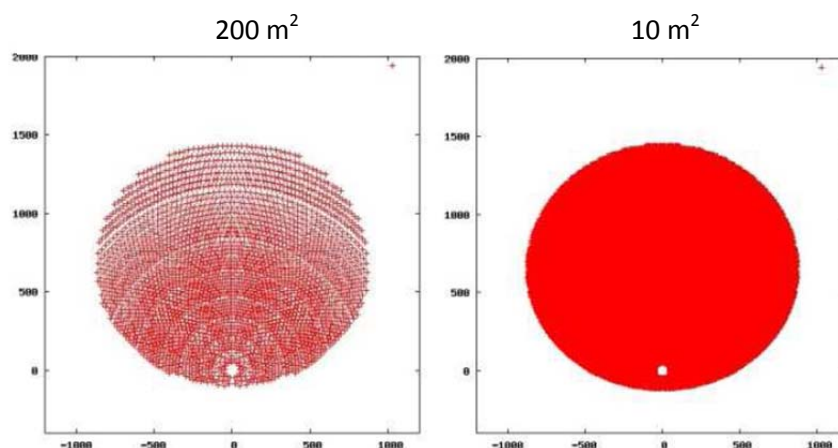
#### Αριθμός ηλιοστατών του πεδίου

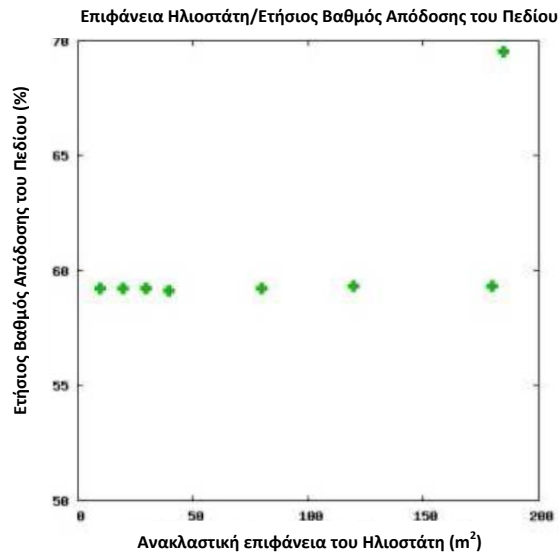
Σε γενικές γραμμές, η αύξηση του αριθμού των ηλιοστατών σε ένα πεδίο, ανάλογα και με τη διάταξη που χρησιμοποιείται φυσικά, λειτουργεί επιβαρυντικά στο βαθμό απόδοσης του [55]. Όσο μεγαλύτερο είναι ένα ηλιοστατικό πεδίο, προκειμένου ,για παράδειγμα, να καλύψει τις ανάγκες για μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ του σταθμού, τόσο περισσότεροι είναι και οι ηλιοστάτες ,που θα τοποθετηθούν σε απομακρυσμένες από τον πύργο ζώνες ,με χαμηλό ετήσιο βαθμό απόδοσης. Αντίθετα, σε μικρά ηλιοστατικά πεδία, το σύνολο των ηλιοστατών μπορεί να τοποθετηθεί σε περιοχές κοντά στον πύργο ,που εμφανίζουν τον υψηλότερο ετήσιο βαθμό απόδοσης. Παρ' όλα αυτά, όπως θα δούμε και παρακάτω ,από υπολογισμούς που έχουν γίνει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η μείωση στον βαθμό απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου ,συναρτήσει της αύξησης του αριθμού των ηλιοστατών που το αποτελούν, είναι αρκετά μικρή.

#### Εμβαδόν επιφάνειας του ηλιοστάτη

Στη μέχρι σήμερα εξέλιξη των πύργων ηλιακής ισχύος, έχουν κατασκευαστεί ηλιοστάτες σε ένα μεγάλο εύρος μεγεθών. Οι αρχικά μικρές ανακλαστικές επιφάνειες ,της τάξεως των  $40 \text{ m}^2$ , αντικαταστάθηκαν από ολοένα και μεγαλύτερες ,έως  $150 \text{ m}^2$ , με σκοπό τη μείωση του κόστους ,λόγω των λιγότερων μηχανισμών κίνησης και ελέγχου ,που θα χρειάζονταν για τους ηλιοστάτες του πεδίου. Όμως ,ακόμα και σήμερα, κατασκευάζονται πύργοι ηλιακής ισχύος, που χρησιμοποιούν για το ηλιοστατικό πεδίο τους ηλιοστάτες με πολύ μικρό εμβαδόν. Ένας από αυτούς είναι και ο σταθμός ISEGS, κοντά στην Καλιφόρνια, που ,όπως είδαμε στον πίνακα 2.3, χρησιμοποιεί ηλιοστάτες επιφάνειας μόλις  $14,08 \text{ m}^2$ .

Γεννιέται ,λοιπόν, φυσιολογικά το ερώτημα, ποια είναι τελικά η επίδραση του μεγέθους των ηλιοστατών στο σχεδιασμό και κυρίως την απόδοση ενός πύργου ηλιακής ισχύος; Για να δοθεί μια απάντηση στο συγκεκριμένο ερώτημα, παραθέτουμε τη σύγκριση, από βιβλιογραφική αναφορά, δύο ηλιοστατικών πεδίων ,αποτελούμενων από ηλιοστάτες επιφάνειας  $200$  και  $10 \text{ m}^2$  αντίστοιχα, για την ίδια εγκατάσταση, ονομαστικής ισχύος  $100\text{MWe}$ . Το ακόλουθο σχήμα είναι χαρακτηριστικό:





Σχήμα 4.8 Απόδοση Ηλιοστατικού Πεδίου συναρτήσει του Εμβαδού του Ηλιοστάτη. [65]

Παρατηρούμε, πως για μικρότερη επιφάνεια ηλιοστάτη, το ηλιοστατικό πεδίο έχει πιο συμπιεσμένη μορφή στο χώρο. Ωστόσο, το συμπέρασμα που έχει μεγάλη σημασία είναι, ότι ο ετήσιος βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου φαίνεται να μην επηρεάζεται από το μέγεθος των ηλιοστατών που επιλέγεται κάθε φορά. Για αυτόν το λόγο, κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους ηλιοστατών πρέπει να είναι κυρίως το σχετικό κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας. Στο κόστος αυτό πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν και η προετοιμασία του εδάφους για την τοποθέτηση των ηλιοστατών, αλλά και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας τους. Από τις έως τώρα μελέτες που έχουν διεξαχθεί, φαίνεται πως οι μεγαλύτεροι ηλιοστάτες έχουν ένα μικρό προβάδισμα στον τομέα του κόστους.

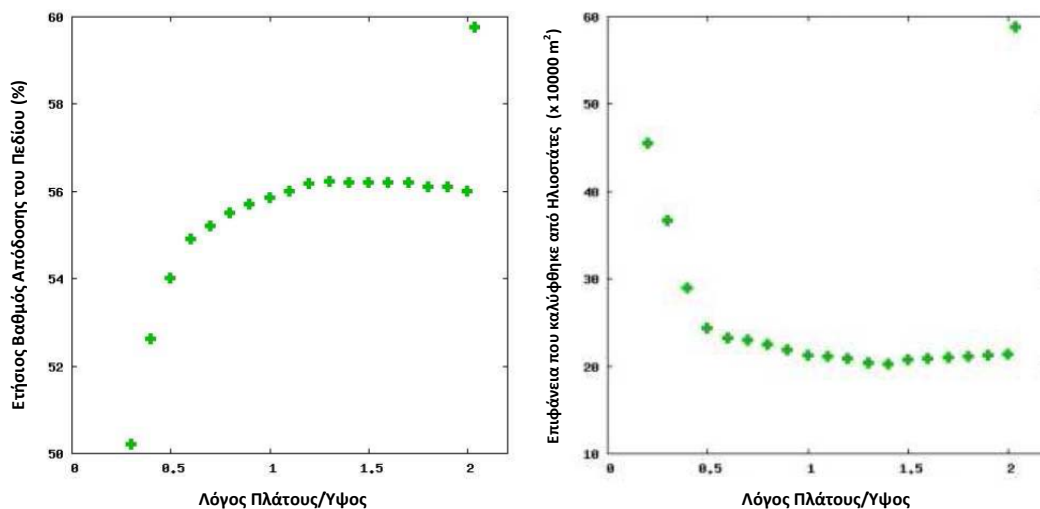
Από την άλλη πλευρά, οι ηλιοστάτες με μικρότερη επιφάνεια έχουν και μικρότερες απώλειες διαρροής, λόγω του μικρότερου και πιο ευέλικτου ενεργού ηλιακού ίχνους τους, και επομένως επιτρέπουν το σχεδιασμό της εγκατάστασης με μικρότερο κεντρικό δέκτη χαμηλότερου κόστους και υψηλότερης απόδοσης. Τέλος, η καλύτερη συμπεριφορά των μικρότερων ηλιοστατών στα φορτία του ανέμου, είναι και αυτή μια σημαντική παράμετρος στην τελική επιλογή, ανάλογα με τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες. [65]

#### Σχήμα και υλικό κατασκευής ηλιοστατών

Μία ακόμα παράμετρος σχεδιασμού του ηλιοστατικού πεδίου, με επίδραση στον βαθμό απόδοσης του, είναι το σχήμα των ηλιοστατών. Στη μεγάλη πλειοψηφία των μέχρι τώρα εγκαταστάσεων πύργων ηλιακής ισχύος, χρησιμοποιούνται τυπικοί ηλιοστάτες με σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, ενώ σπάνια είναι η περίπτωση ηλιοστατών τεντωμένης μεμβράνης, κυκλικού σχήματος. Οι τελευταίοι, σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει, έχουν την δυνατότητα να ξεπεράσουν σε απόδοση τους τυπικούς ηλιοστάτες γυαλιού-μετάλλου, αν η επιφάνεια τους κατασκευαστεί με σφάλματα το ίδιο μικρά. Κάτι τέτοιο, δικαιολογείται και από το κυκλικό τους σχήμα, το οποίο επιτρέπει την τοποθέτηση των ηλιοστατών στο πεδίο με πιο πυκνή διάταξη, και μειώνει τις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης. [67]

Όσον αφορά, τώρα, στους τυπικούς ηλιοστάτες σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου, θα είχε αρκετά μεγάλη αξία, να εξεταστεί το πώς ο λόγος του πλάτους προς το ύψος τους

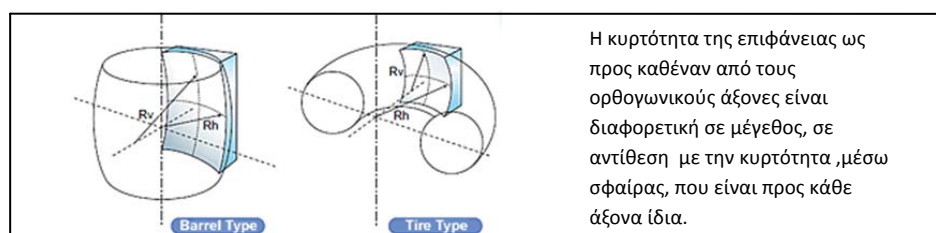
επιδρά στον βαθμό απόδοσης τους ,και και κατ' επέκταση του ηλιοστατικού πεδίου. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μελέτης ,κατά την οποία υπολογίστηκε ο ετήσιος βαθμός απόδοσης και το εμβαδόν του ηλιοστατικού πεδίου για ένα σύνολο από ηλιοστάτες διαφορετικού λόγου πλάτους προς ύψος κάθε φορά:



Σχήμα 4.9 Επίδραση του Λόγου Πλάτους προς Ύψος των Ηλιοστατών. [65]

Αν και στις περισσότερες εγκαταστάσεις πύργων ηλιακής ισχύος χρησιμοποιούνται ηλιοστάτες με σχήμα πολύ κοντά στο τετραγωνικό (λόγος πλάτους/ύψους κοντά στο 1), μπορεί κανείς ,από το παραπάνω γράφημα, να διαπιστώσει πως αυτή δεν είναι αναγκαστικά και η βέλτιστη λύση. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ύψος σε σχέση με το πλάτος των ηλιοστατών, η απόδοση του πεδίου πέφτει και μάλιστα το ηλιοστατικό πεδίο καταλαμβάνει και περισσότερο εμβαδόν. Αυτό οφείλεται ,προφανώς, στην αύξηση των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης που προκαλείται. Αντίθετα, όσο αυξάνεται το πλάτος της επιφάνειας των ηλιοστατών σε σχέση με το ύψος, ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου παρουσιάζει μία μικρή ,αλλά αισθητή, βελτίωση και το συνολικό εμβαδόν του μειώνεται. Θα μπορούσαμε να πούμε ,ότι για ηλιοστάτες με λόγο πλάτους προς ύψος 1,2 ,ο ετήσιος βαθμός απόδοσης του πεδίου είναι κατά σχεδόν 1% μεγαλύτερος απ' ότι θα ήταν για τετραγωνικούς ηλιοστάτες. [65]

Ένα τελευταίο ζήτημα ,σχετικά με το σχήμα των ηλιοστατών, που πρέπει να θιχτεί αφορά στην κυρτότητα της επιφάνειας τους. Μια σχετική με αυτό μελέτη ,που διεξήχθη με τη βοήθεια προγράμματος προσομοίωσης ηλιοστατικών πεδίων, απέδειξε ότι οι ηλιοστάτες ,των οποίων η κυρτότητα προέρχεται από τοροειδές σχήμα (βλέπε σχήμα 4.10), μπορούν να συγκεντρώσουν τις ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες σε πολύ μικρότερη επιφάνεια ,από ότι οι ηλιοστάτες, των οποίων η κυρτότητα προέρχεται από σφαιρικό σχήμα, εξασφαλίζοντας έτσι μικρότερες απώλειες διαρροής. [54]

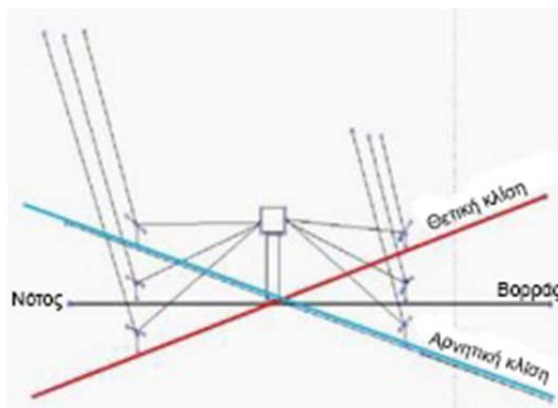


Σχήμα 4.10 Κυρτότητα Κατόπτρου από Τοροειδές Σχήμα. [68]

### Κλίση εδάφους του ηλιοστατικού πεδίου

Αν και γενικότερα ,για την κατασκευή ενός ηλιοστατικού πεδίου, συστήνονται τοποθεσίες με εντελώς επίπεδο έδαφος, εν τούτοις συναντώνται περιπτώσεις ,κατά τις οποίες μία μικρή κλίση εδάφους είναι αναπόφευκτη. Η κλίση αυτή μπορεί συνολικά να επιδρά τόσο θετικά ,όσο και αρνητικά στην απόδοση του πεδίου ,όπως θα δούμε παρακάτω, επηρεάζοντας τον συντελεστή των διάφορων απωλειών του.

Για την καλύτερη κατανόηση της περιγραφής που θα γίνει, ορίζουμε αρχικά την θετική και την αρνητική κλίση εδάφους ,για ένα ηλιοστατικό πεδίο ,όπως στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.11 Θετική και Αρνητική Κλίση του Εδάφους του Ηλιοστατικού Πεδίου. [65]

Με τη βοήθεια του σχήματος, παρατηρούμε ότι μία θετική κλίση εδάφους ,βόρεια του πύργου, θα επιδρούσε αρνητικά στις απώλειες συνημιτόνου, καθώς η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων πάνω στην επιφάνεια του κάθε ηλιοστάτη θα αυξανόταν. Από την άλλη μεριά όμως, η απόσταση μεταξύ ηλιοστάτη και κεντρικού ηλιακού δέκτη θα μειωνόταν ,με συνέπεια την μείωση των απωλειών ατμοσφαιρικής διαπερατότητας. Μείωση ,λόγω της θετικής κλίσης του εδάφους, θα παρατηρείτο επίσης και στις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης του πεδίου, καθώς οι προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες θα κατευθύνονταν σε αυτό με διεύθυνση πιο κοντά στην κατακόρυφο. Κάτι τέτοιο, θα επέτρεπε την τοποθέτηση των ηλιοστατών στο πεδίο σε μία πιο πυκνή διάταξη, που θα εξασφάλιζε υψηλότερη απόδοση. Αντίθετα, η θετική κλίση του εδάφους ,στην νότια πλευρά του πύργου, θα προκαλούσε μείωση των απωλειών συνημιτόνου, λόγω της μικρότερης γωνίας πρόσπτωσης, και αύξηση των απωλειών ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, καθώς η απόσταση ηλιοστάτη-κεντρικού δέκτη θα μεγάλωνε. Οι απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης θα ήταν μικρότερες, και για αυτό το τμήμα του ηλιοστατικού πεδίου, σε σχέση με την περίπτωση επίπεδου εδάφους, για τον ίδιο λόγο που περιγράφηκε και για το βόρειο τμήμα του πεδίου.

Στην περίπτωση αρνητικής κλίσης του εδάφους, θα ίσχυαν ,για τις απώλειες του βόρειου και του νότιου τμήματος του πεδίου, προφανώς τα αντίθετα με όσα περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Οι απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης θα ήταν μεγαλύτερες, απ' ό,τι για την περίπτωση επίπεδου εδάφους, και για τα δύο τμήματα του ηλιοστατικού πεδίου.

Για την επιβεβαίωση των ανωτέρω, παραθέτουμε τα αποτελέσματα μελέτης σχετικά με την κλίση του εδάφους του ηλιοστατικού πεδίου, που διεξήχθη με τη βοήθεια προγράμματος προσομοίωσης:

	Βόρειο Τμήμα Ηλιοστατικού Πεδίου				Νότιο Τμήμα Ηλιοστατικού Πεδίου			
	Επίπεδο έδαφος	5%	10%		Επίπεδο έδαφος	5%	10%	
$\eta_{cos}$	0,8114	0,8073	0,8031	-	0,6750	0,6803	0,6853	+
$\eta_{atten}$	0,9282	0,9288	0,9294	+	0,9432	0,9426	0,9419	-
$\eta_{spill}$	0,8809	0,8841	0,8877	+	0,9369	0,9355	0,9329	-
$\eta_{shad\&block}$	0,9360	0,9423	0,9474	+	0,9455	0,9502	0,9538	+
Ετήσιος Βαθμός Απόδοσης Ηλιοστατικού Πεδίου $\eta_{field}$ (%)	58,5	58,8	59,0	+	52,3	52,8	53,3	+
Μέση Ισχύς ανά Ηλιοστάτη (KW)	50,0	50,3	50,4	+	44,7	45,2	45,6	+
Αριθμός Ηλιοστατών	2498	2484	2464		1502	1516	1536	

Πίνακας 4.2 Επίδραση της Κλίσης του Εδάφους στις διάφορες Απώλειες του Βόρειου και Νότιου Τμήματος του Ηλιοστατικού Πεδίου. [65]

Κλίση	-10%	-5%	Επίπεδο έδαφος	5%	10%
Ετήσιος Βαθμός Απόδοσης Ηλιοστατικού Πεδίου	56,0%	56,6%	57,1%	58,1%	58,4%

Πίνακας 4.2 Επίδραση της Κλίσης του Εδάφους στον Ετήσιο Βαθμό Απόδοσης του Ηλιοστατικού Πεδίου. [65]

Συνοψίζοντας, θα μπορούσε κανείς να πει, ότι η θετική ,προς την κατεύθυνση του Βορρά, κλίση του εδάφους του ηλιοστατικού πεδίου αυξάνει την απόδοση του. Αντίθετα, η αρνητική κλίση την ρίχνει. Παρ' όλα αυτά, για αρνητικές κλίσεις ,μικρότερες του 5% οι συνέπειες στον βαθμό απόδοσης του πεδίου δεν είναι τόσο σημαντικές, ώστε να συμφέρει, από οικονομικής άποψης, η ισοπέδωση του εδάφους. [65]

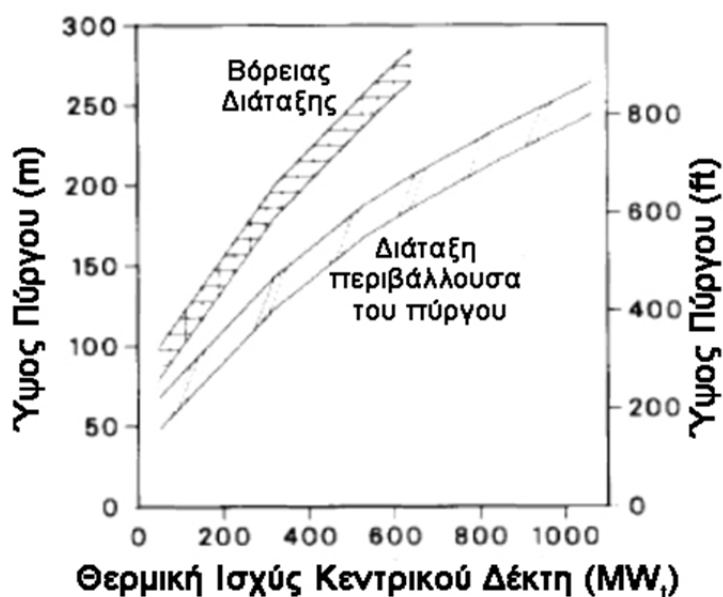
### Ύψος Πύργου

Κατά το σχεδιασμό μιας εγκατάστασης πύργου ηλιακής ισχύος, μία πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να επιλεγεί είναι το ύψος του πύργου. Παράγοντες ,όπως ο τύπος του κεντρικού ηλιακού δέκτη και η θερμική ισχύς του, αλλά και το είδος του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας, επηρεάζουν το ύψος του πύργου, το οποίο ,με τη σειρά του, επιδρά στη διάταξη και την απόδοση του ηλιοστατικού πεδίου. Η τελική απόφαση δεν είναι εύκολη, καθώς περιορισμοί τίθενται και από το κόστος του πύργου ,το οποίο μάλιστα αυξάνεται εκθετικά με το ύψος του.

Στην περίπτωση σταθμού με ηλιοστατικό πεδίο βόρεια του πύργου και δέκτη κοιλότητας, το ύψος του πύργου επιλέγεται συνήθως μεγαλύτερο ,απ' ότι στην περίπτωση σταθμού με εξωτερικό κυλινδρικό δέκτη και ηλιοστατικό πεδίο που περιβάλλει τον πύργο. Όσο ψηλότερος είναι ο πύργος, τόσο μικρότερες είναι και οι απώλειες λόγω συνημιτόνου του

ηλιοστατικού πεδίου, αφού η γωνία που σχηματίζεται από την προσπίπτουσα και την ανακλώμενη διεύθυνση των ακτίνων ,πάνω στον κάθε ηλιοστάτη, συνολικά μειώνεται. Επιπροσθέτως, η αύξηση του ύψους του πύργου συνεπάγεται και την μείωση των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης, λόγω του ότι οι ηλιοστάτες κατά μέσο όρο θα τοποθετούν την ανακλαστική επιφάνεια τους πιο κοντά στην οριζόντια θέση, για να στείλουν τις ανακλώμενες ακτίνες στον δέκτη. Δηλαδή, ένας ψηλότερος πύργος μπορεί ,στην ουσία, να εξασφαλίσει μια πυκνότερη διάταξη των ηλιοστατών στο πεδίο. Αυτό εξηγεί και το γεγονός ,ότι για βόρεια διάταξη πεδίου απαιτούνται συνήθως ψηλότεροι πύργοι, καθώς σε διαφορετική περίπτωση, προκειμένου να αποφευχθούν οι μεγάλες απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης για χαμηλό ηλιακό ύψος, οι σειρές ηλιοστατών του πεδίου θα έπρεπε να έχουν μεταξύ τους πολύ μεγάλα ακτινικά κενά, με αποτέλεσμα οι τελευταίοι ηλιοστάτες να βρίσκονται πολύ μακριά από τον πύργο. Βέβαια, πρέπει να αναφέρουμε ,ότι η αύξηση του ύψους του πύργου αυξάνει κατά ένα ποσοστό τις απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, μια και οι ανακλώμενες δέσμες ακτίνων χρειάζεται να διανύσουν μεγαλύτερη συνολικά απόσταση μέχρι να φτάσουν στον κεντρικό δέκτη. [36],[38]

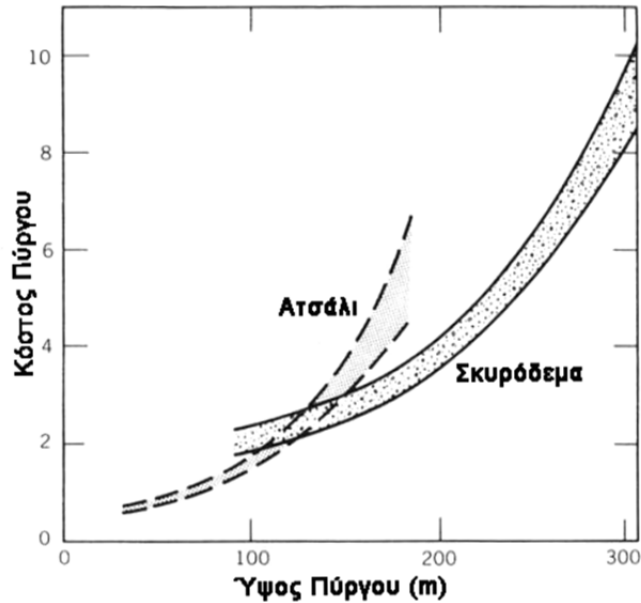
Ένας βασικός παράγοντας ,που επηρεάζει το ύψος που θα κατασκευαστεί ο πύργος, είναι και η θερμική ισχύς του κεντρικού ηλιακού δέκτη, όπως προαναφέραμε. Γενικότερα ισχύει, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη θερμική ισχύς στον δέκτη, τόσο μεγαλύτερο επιλέγεται και το ύψος του πύργου. Χαρακτηριστικό είναι το ακόλουθο διάγραμμα ,που παρουσιάζει αυτή ακριβώς τη συσχέτιση των δύο μεταβλητών:



Σχήμα 4.12 Ύψος Πύργου συναρτήσει της Θερμικής Ισχύος του Κεντρικού Δέκτη. [36]

Φυσικά, σημαντικό ρόλο ,σχετικά με το ύψος του πύργου και την κατασκευή του, παίζει και το είδος του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας στις σωληνώσεις του δέκτη. Ο πύργος σχεδιάζεται για να αντέχει ,ένα συγκεκριμένο βάρος κάθε φορά, το οποίο εξαρτάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από το ειδικό βάρος του ρευστού αυτού. Περιορισμοί, τίθενται ,τέλος, και ανάλογα με τα φορτία ανέμου και σεισμών της περιοχής. [36]

Τη συσχέτιση κόστους και ύψους ενός πύργου, η οποία και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τελική απόφαση πριν την κατασκευή του, παρουσιάζει διαφωτιστικά το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.13 Κόστος Πύργου συναρτήσει του Ύψους του. [37]

Οι πύργοι μπορούν να κατασκευαστούν είτε από ατσάλινους βραχίονες σε δικτύωμα, είτε από ενισχυμένο σκυρόδεμα. Όπως προκύπτει και από το παραπάνω διάγραμμα, η διαχωριστική γραμμή μεταξύ των δύο επιλογών βρίσκεται κοντά στα 120 m. Έτσι, για ύψος πύργου μικρότερο των 120 m, η χρήση ατσάλινων βραχιόνων φαίνεται να συμφέρει περισσότερο οικονομικά, ενώ για ύψος μεγαλύτερο των 120 m η επιλογή ενισχυμένου σκυροδέματος γίνεται όλο και πιο ελκυστική. [37]

#### Εμβαδό ανοίγματος και γωνία κλίσης κεντρικού ηλιακού δέκτη

Το εμβαδόν του ανοίγματος του κεντρικού δέκτη και η γωνία κλίσης του  $\delta_R$  αποτελούν δύο παραμέτρους, οι οποίες θέτουν τα γεωμετρικά όρια του ηλιοστατικού πεδίου. Όπως θα δούμε και πολύ πιο αναλυτικά στην παράγραφο 4.6, οι δύο αυτές παράμετροι ορίζουν την επιφάνεια, πάνω στο έδαφος, στην οποία θα απλωθεί το ηλιοστατικό πεδίο. Πέρα από τα όρια αυτής της επιφάνειας, ο δέκτης αδυνατεί στην ουσία να δεχτεί ανακλώμενες δέσμες ηλιακών ακτίνων. Ανάλογα με την περιοχή που οριοθετείται κάθε φορά για το ηλιοστατικό πεδίο, αλλάζει φυσικά και ο βαθμός απόδοσης του. Αν η οριοθετημένη περιοχή περιλαμβάνει ζώνες υψηλού ετήσιου βαθμού απόδοσης, δηλαδή με μικρές απώλειες, όπως για παράδειγμα οι ζώνες κοντά στον πύργο και πάνω στον άξονα συμμετρίας Βορρά-Νότου, τότε και ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου αναμένεται να είναι υψηλός. Το αντίθετο συμβαίνει σε περίπτωση που η κλίση και το εμβαδόν επιφάνειας του δέκτη επιλεγούν έτσι, ώστε να οριοθετούν στο έδαφος μια περιοχή που περιλαμβάνει ζώνες που εμφανίζουν μεγαλύτερες απώλειες. Στη γενική περίπτωση, όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα του κεντρικού ηλιακού δέκτη, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ηλιοστατικό πεδίο που οριοθετεί στο έδαφος, και αντίστροφα. Επίσης, συνήθως η αύξηση της γωνίας κλίσης  $\delta_R$  του δέκτη ( $0 \leq \delta_R \leq 90^\circ$ ) συνεπάγεται και την απομάκρυνση της οριοθετούμενης περιοχής από τη βάση του πύργου, με τις συνέπειες που αυτό επιφέρει. [36],[54]



## 4.6 Σχεδιασμός ενός τυπικού Πεδίου Ηλιοστατών Βόρεια του Πύργου

Στην προσπάθεια βαθύτερης κατανόησης των μηχανισμών και των προγραμμάτων σχεδιασμού ηλιοστατικών πεδίων, αποφασίσαμε ,στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και με τη βοήθεια του προγράμματος Excel®, να κατασκευάσουμε από την αρχή ένα τυπικό ηλιοστατικό πεδίο ,με διάταξη βόρεια του πύργου.

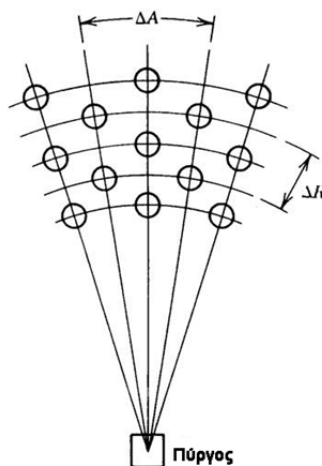
Για το σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκε το ακτινικό κλιμακωτό μοτίβο, όπως αυτό περιγράφηκε στην παράγραφο 4.4, λόγω των βασικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει και της μεγάλης συχνότητας με την οποία συναντάται στις εγκαταστάσεις πύργων ηλιακής ισχύος.

Όπως έγινε και παρακάτω ,στην περίπτωση του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου, με την προσομοίωση μίας ολόκληρης εγκατάστασης ηλιακού πύργου, ισχύος 20 MWe, στην τοποθεσία του Αθρινόλακκου, έτσι και στο παρόν εδάφιο αποφασίσαμε ,στη θέση των απαραίτητων δεδομένων, για τα οποία δεν είχαμε πληροφορίες, να χρησιμοποιήσουμε κάποια από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του γνωστού, υπό λειτουργία, σταθμού PS20 στη Σεβίλλη, με ονομαστική ισχύ επίσης 20 MWe.

Για το σχεδιασμό του τυπικού ηλιοστατικού πεδίου, βόρεια του πύργου, τα δεδομένα που επιλέχθηκαν ήταν τα εξής [49],[69],[70]:

- ❖ Ηλιοστάτες *Sanlucar-120* εμβαδού 120 m<sup>2</sup> και διαστάσεων 12,88 m × 9,57 m (πλάτος × ύψος)
- ❖ Ύψος πύργου: 165 m
- ❖ Κεντρικός ηλιακός δέκτης κοιλότητας, με κυκλικό άνοιγμα προς τον Βορρά.
- ❖ Ακτινική απόσταση της πρώτης σειράς ηλιοστατών από τη βάση του πύργου:  
 $R_{MIN} = 0,8 \cdot \text{Ύψος Πύργου} = 0,8 \cdot 165 = 132 \text{ m}$
- ❖ Ακτινική απόσταση της τελευταίας σειράς ηλιοστατών από τη βάση του πύργου:  
 $R_{MAX} = 7,15 \cdot \text{Ύψος Πύργου} = 7,15 \cdot 165 = 1179,75 \text{ m}$

Ξέροντας την ακτινική απόσταση της πρώτης και της τελευταίας σειράς ηλιοστατών του πεδίου από τη βάση του πύργου, όπως αυτές υπολογίζονται παραπάνω σύμφωνα με τον κώδικα βελτιστοποίησης ηλιοστατικών πεδίων DELSOL3, για να δημιουργήσουμε μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία εύρεσης των συντεταγμένων κάθε ηλιοστάτη στο πεδίο, αρκεί να γνωρίζουμε το ακτινικό διάκενο  $\Delta R$  μεταξύ των διαδοχικών σειρών ηλιοστατών, ίδιας ακτινικής στοίχισης, και το αζιμουθιακό διάκενο  $\Delta A$  μεταξύ διαδοχικών ηλιοστατών της ίδιας σειράς, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.14 Ακτινικό Κλιμακωτό Μοτίβο Διάταξης των Ηλιοστατών Βόρεια του Πύργου. [37]

Ύστερα από αρκετές μελέτες πάνω στο ακτινικό κλιμακωτό μοτίβο, το Πανεπιστήμιο του Χιούστον, πρότεινε για τον προσδιορισμό του ακτινικού και του αζιμουθιακού διακένου, μεταξύ ηλιοστατών υψηλής ανακλαστικότητας (~ 90%) σε μεγάλα πεδία, τους τύπους:

$$\Delta R = HM \cdot (1,44 \cdot \cot \theta_L - 1,094 + 3,068 \cdot \theta_L - 1,1256 \cdot \theta_L^2) \quad (m)$$

$$\Delta A = WM \cdot (1,749 + 0,6396 \cdot \theta_L) + \frac{0,2873}{\theta_L - 0,04902} \quad (m)$$

,όπου HM και WM το ύψος και το πλάτος του ηλιοστάτη αντίστοιχα, και  $\theta_L$  η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του εδάφους και της ευθείας που ενώνει τον εκάστοτε ηλιοστάτη με τον κεντρικό ηλιακό δέκτη (γωνία υψομέτρου του δέκτη).

Η γωνία  $\theta_L$  υπολογίζεται ως:

$$\theta_L = \tan^{-1}\left(\frac{THT}{R}\right) \quad (\text{deg})$$

,όπου THT το ύψος του πύργου, και R η απόσταση του ηλιοστάτη από τη βάση του πύργου. [37]

Προφανώς, για τους ηλιοστάτες της ίδιας σειράς η γωνία  $\theta_L$  θα έχει σταθερή τιμή, αφού κάθε σειρά ηλιοστατών βρίσκεται πάνω σε κύκλο με κέντρο τη βάση του πύργου και καθορισμένη ακτίνα R.

Τέλος, η αζιμουθιακή γωνία, που αντιστοιχεί στο διάκενο  $\Delta A$ , μπορεί να υπολογίζεται ως:

$$\theta_{\Delta A} = \frac{\Delta A}{R}$$

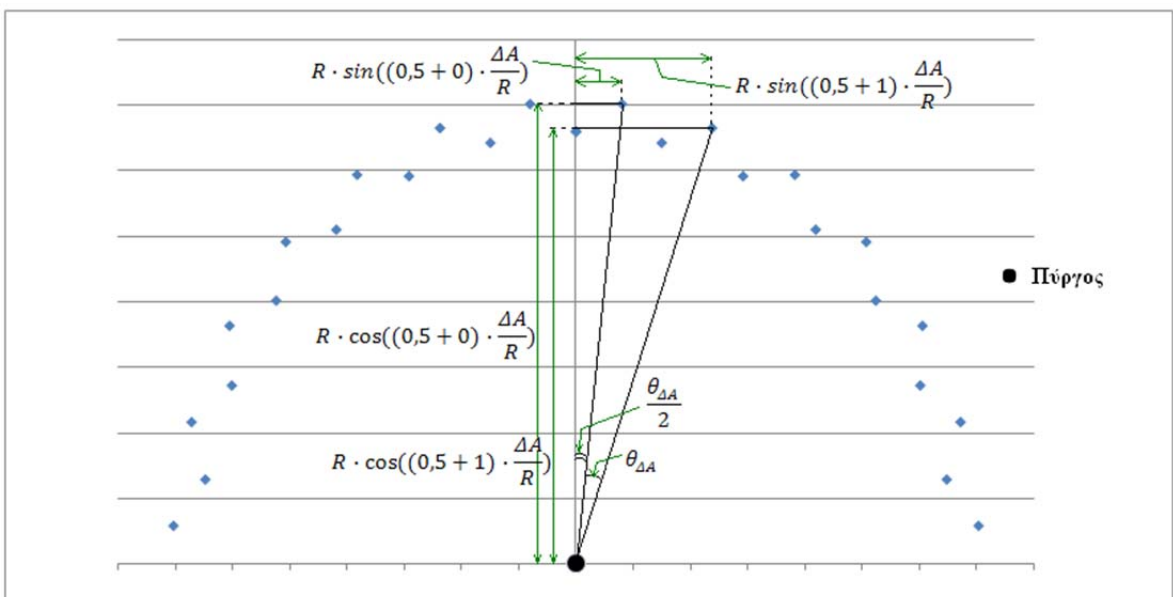
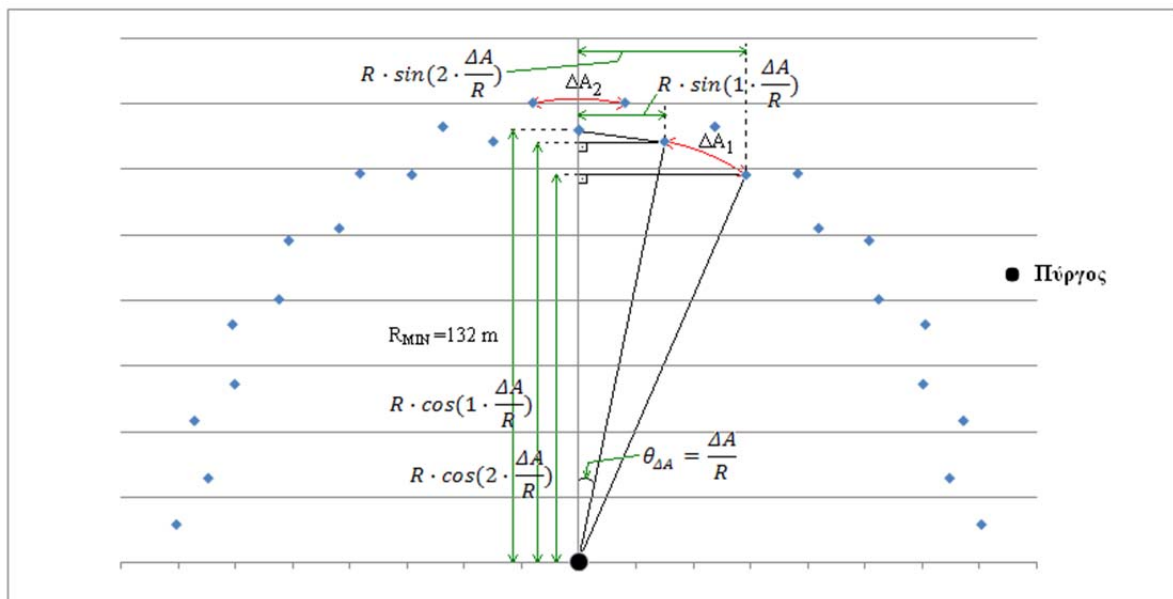
Στο σημείο αυτό, έχουμε πλέον τα απαραίτητα στοιχεία για να αρχίσουμε τον σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου βήμα προς βήμα. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας, ορίζουμε

ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων με σημείο (0,0) την βάση του πύργου και άξονες x και y προς την Ανατολή και τον Βορρά αντίστοιχα. Ο άξονας y είναι ,για το ηλιοστατικό πεδίο βόρειας διάταξης, άξονας συμμετρίας, και για αυτό το λόγο θα αρκούσε κανείς να υπολογίσει τις συντεταγμένες των ηλιοστατών από τη μία πλευρά του, αφού οι συντεταγμένες της άλλης πλευράς του πεδίου μπορούν να βρεθούν με μία απλή αντιστροφή του προσήμου της τετμημένης των ήδη υπολογισμένων ηλιοστατών.

Ξεκινώντας τη διαδικασία σχεδιασμού, γνωρίζουμε ότι η πρώτη σειρά ηλιοστατών του πεδίου θα τοποθετηθεί στην περιφέρεια κύκλου ακτίνας  $R_{MIN} = 132$  m. Για τη σειρά αυτή, υπολογίζουμε τα  $\Delta R$ ,  $\Delta A$  και  $\theta_{\Delta A}$ , από τους παραπάνω τύπους και τοποθετούμε τον πρώτο ηλιοστάτη πάνω στον άξονα των y σε απόσταση 132 m από τον πύργο. Οι συντεταγμένες του θα είναι (0,132). Η τεταγμένη του επόμενου ηλιοστάτη της ίδιας σειράς, έστω δεξιά από τον πρώτο, θα βρίσκεται από την πράξη  $R \cdot \cos(1 \cdot \frac{\Delta A}{R})$ , ενώ του δεύτερου από δεξιά από την πράξη  $R \cdot \cos(2 \cdot \frac{\Delta A}{R})$  και ούτο καθ' εξής, έως ότου προκύψει αρνητική τεταγμένη, που σημαίνει πως ξεπεράστηκε ο άξονας των x, δηλαδή ότι βρέθηκαν οι τεταγμένες της πρώτης σειράς των ηλιοστατών ,που ανήκουν στο πρώτο τεταρτημόριο του συστήματος συντεταγμένων. Φυσικά, οι τεταγμένες των ηλιοστατών στο τέταρτο τεταρτημόριο του συστήματος συντεταγμένων, συμμετρικά δηλαδή του άξονα y, είναι οι ίδιες με αυτές του πρώτου τεταρτημρίου. Αντίστοιχα με την ακολουθία που εφαρμόστηκε για τις τεταγμένες, η τετμημένη του επόμενου ηλιοστάτη της πρώτης σειράς, έστω δεξιά από τον πρώτο, θα βρίσκεται από την πράξη  $R \cdot \sin(1 \cdot \frac{\Delta A}{R})$ , ενώ του δεύτερου από δεξιά από την πράξη  $R \cdot \sin(2 \cdot \frac{\Delta A}{R})$  και ούτο καθ' εξής. Οι τετμημένες των ηλιοστατών αριστερά του άξονα y είναι οι ίδιες με αλλαγμένο ,όμως, το πρόσημο, λόγω συμμετρίας. Ολοκληρώνεται έτσι η εύρεση των συντεταγμένων της πρώτης σειράς του ηλιοστατικού πεδίου. Στην ακτίνα  $R_{MIN} = 132$  m, μπορούμε να προσθέσουμε τώρα την τιμή  $\Delta R$  που υπολογίσαμε για την πρώτη σειρά και να μεταφερθούμε στην επόμενη σειρά ηλιοστατών του πεδίου με ίδια ακτινική στοίχιση. Προσοχή! Η σειρά αυτή ,όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο σχήμα 4.14, είναι η Τρίτη υπ' αριθμόν, διότι η δεύτερη σειρά περιλαμβάνει ηλιοστάτες που τοποθετούνται σε διαφορετική ακτινική στοίχιση με την πρώτη. Η δεύτερη υπ' αριθμόν σειρά (όπως και η 4<sup>η</sup>, η 6<sup>η</sup> κ.ο.κ), περιλαμβάνει ηλιοστάτες ,οι οποίοι στοιχίζονται ακτινικά με το μέσο του αζιμουθιακού διακένου  $\Delta A$  της προηγούμενης σειράς. Για το λόγο αυτόν, πριν προχωρήσουμε στην Τρίτη υπ' αριθμόν σειρά, θα ασχοληθούμε πρώτα με την δεύτερη. Η δεύτερη ,λοιπόν, σειρά βρίσκεται πάνω στην περιφέρεια κύκλου με ακτίνα  $R_2 = R_{MIN} + \frac{R_3 - R_{MIN}}{2}$ , όπου  $R_3$  η ακτίνα του κύκλου ,πάνω στον οποίο βρίσκεται η Τρίτη υπ' αριθμόν σειρά του πεδίου. Ξέροντας την ακτίνα  $R_2$  της δεύτερης σειράς και για αζιμουθιακή γωνία διακένου  $\theta_{\Delta A}$  ίση με αυτή της πρώτης σειράς ηλιοστατών, μπορούμε να υπολογίσουμε το νέο αζιμουθιακό διάκενο ,της δεύτερης σειράς, ως  $\Delta A = R_2 \cdot \theta_{\Delta A}$ . Υπολογίζουμε ,επίσης, το νέο ακτινικό διάκενο  $\Delta R$  και τη γωνία  $\theta_L$  για τη δεύτερη σειρά. Τώρα, μπορούμε να προχωρήσουμε στην εύρεση των συντεταγμένων των ηλιοστατών αυτής της σειράς. Ο πρώτος ηλιοστάτης δεξιά του άξονα y έχει τεταγμένη ,που βρίσκεται από την πράξη  $R \cdot \cos((0,5 + 0) \cdot \frac{\Delta A}{R})$ , ενώ ο δεύτερος έχει τεταγμένη  $R \cdot \cos((0,5 + 1) \cdot \frac{\Delta A}{R})$ , ο τρίτος  $R \cdot \cos((0,5 + 2) \cdot \frac{\Delta A}{R})$  και ούτο καθ' εξής ,μέχρι να προκύψει αρνητική τιμή. Οι τεταγμένες των ηλιοστατών αριστερά του άξονα y είναι προφανώς οι ίδιες. Κατ' αντιστοιχία με τις τεταγμένες, η τετμημένη του πρώτου ηλιοστάτη δεξιά του άξονα y είναι  $R \cdot \sin((0,5 + 0) \cdot \frac{\Delta A}{R})$ , του δεύτερου  $R \cdot \sin((0,5 + 1) \cdot \frac{\Delta A}{R})$  και ούτο καθ' εξής. Οι τετμημένες των ηλιοστατών αριστερά του άξονα y είναι οι ίδιες με αλλαγμένο ,όμως, το πρόσημο, λόγω συμμετρίας. Προσθέτοντας τώρα την καινούργια τιμή του ακτινικού

διακένου  $\Delta R$  που υπολογίσαμε ,για τη δεύτερη σειρά ηλιοστατών, στην ακτίνα της  $R_2$ , μεταφερόμαστε στην επόμενη σειρά ίδιας ακτινικής στοίχισης, δηλαδή την τέταρτη υπ' αριθμόν σειρά του πεδίου, με σταθερή αζιμουθιακή γωνία διακένου  $\theta_{\Delta A}$  ,ίση με των προηγούμενων σειρών. Ολοκληρώνοντας αυτή τη διαδικασία, έχουμε υπολογίσει τις συντεταγμένες των ηλιοστατών των δύο πρώτων σειρών του πεδίου. Η διαδικασία ,που μόλις περιγράφηκε ,ξεκινάει εκ νέου από την Τρίτη σειρά και επαναλαμβάνεται διαρκώς ,έως ότου η ακτινική απόσταση  $R$  ,της νέας σειράς ηλιοστατών ,από τη βάση του πύργου να ξεπεράσει την τιμή  $R_{MAX} = 7,15 \cdot 165 = 1179,75 \text{ m}$ .

Όσα περιγράφηκαν παραπάνω, σχετικά με τη διαδικασία σχεδιασμού του ηλιοστατικού πεδίου με το ακτινικό κλιμακωτό μοτίβο, φαίνονται παραστατικά ,για τις δύο πρώτες σειρές ηλιοστατών, στο ακόλουθο σχήμα:



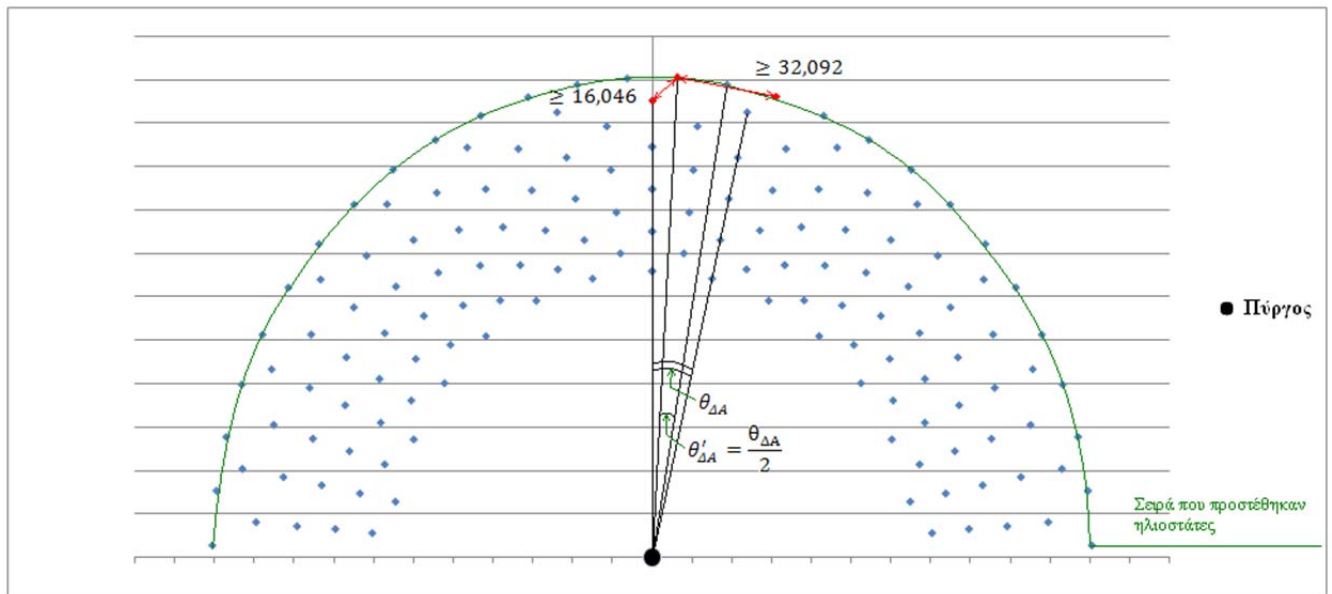
Σχήμα 4.15 Υπολογισμός των Συντεταγμένων των Ηλιοστατών για τις δύο πρώτες Σειρές του Πεδίου.

Πολύ σημαντική παρατήρηση ,για τον σωστό σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου, είναι ότι ,αν κρατάμε σταθερή την γωνία  $\theta_{\Delta A}$  του αζιμουθιακού διακένου, όσο προχωράμε προς σειρές του πεδίου με μεγαλύτερη ακτινική απόσταση από τη βάση του πύργου, τόσο το αζιμουθιακό διάκενο  $\Delta A$  ,μεταξύ των ηλιοστατών, θα αυξάνεται. Για το λόγο αυτόν ,προκειμένου να εκμεταλλευτούμε κατά ένα μεγαλύτερο ποσοστό το διαθέσιμο εμβαδόν για το ηλιοστατικό πεδίο, όταν το αζιμουθιακό διάκενο μιας σειράς ηλιοστατών ξεπερνάει κάποια τιμή, επιλέγουμε να τοποθετούμε σε αυτή τη σειρά έναν επιπλέον ηλιοστάτη στο μέσον του αζιμουθιακού διακένου που θα υπήρχε ,υπό κανονικές συνθήκες, ανάμεσα σε κάθε δύο γειτονικούς ηλιοστάτες. Δηλαδή, στη συγκεκριμένη σειρά του ηλιοστατικού πεδίου, τοποθετούνται ηλιοστάτες με αζιμουθιακή γωνία  $\theta_{\Delta A}$  μεταξύ τους ,ίση με το μισό της αζιμουθιακής γωνίας διακένου της προηγούμενης σειράς.

Η συνθήκη ,που υποδεικνύει ότι στη συγκεκριμένη σειρά υπάρχει δυνατότητα να τοποθετηθούν επιπλέον ηλιοστάτες, αφορά στην απόσταση μεταξύ των γειτονικών ηλιοστατών. Ο νοητός όγκος, μέσα στον οποίο περιλαμβάνεται κάθε πιθανή κίνηση της επιφάνειας του ηλιοστάτη, θα μπορούσε να περιγραφεί από μία σφαίρα με διάμετρο ίση με τη διαγώνιο του ηλιοστάτη. Στην περίπτωση του πεδίου που εξετάζουμε, η διαγώνιος είναι  $D = \sqrt{WM^2 + HM^2} = \sqrt{12,88^2 + 9,57^2} \approx 16,046 \text{ m}$ . Αυτό σημαίνει πως ,αν δύο γειτονικοί ηλιοστάτες της ίδιας σειράς απέχουν μεταξύ τους περισσότερο από  $2 \cdot D = 32,092 \text{ m}$ , τότε στο μέσον του διακένου τους χωράει άλλος ένας ηλιοστάτης, χωρίς να παρενοχλείται μηχανικά η κίνησή τους. Κάθε φορά ,ωστόσο, που αποφασίζουμε να προσθέσουμε επιπλέον ηλιοστάτες σε μία σειρά του πεδίου, πρέπει να ελέγχεται και η απόσταση του νέου ηλιοστάτη από τον κοντινότερο ηλιοστάτη της προηγούμενης σειράς, καθώς αυτή ενδέχεται να είναι μικρότερη και από την απόσταση μεταξύ των γειτονικών ηλιοστατών της ίδιας σειράς. Βέβαια, σε αυτή την περίπτωση, αρκεί η απόσταση να είναι μεγαλύτερη από μία διαγώνιο ηλιοστάτη  $D = 16,046 \text{ m}$ , ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι επιφάνειες των ηλιοστατών δεν θα ακουμπούν κατά την κίνησή τους. Η συνθήκη ,δηλαδή, που τελικά υποδεικνύει την προσθήκη επιπλέον ηλιοστατών σε μία σειρά του πεδίου, είναι η απόσταση μεταξύ των γειτονικών ηλιοστατών της σειράς να είναι μεγαλύτερη των  $32,092 \text{ m}$  ,και η απόσταση μεταξύ των νέων ηλιοστατών και των πλησιέστερων ηλιοστατών της προηγούμενης σειράς να παραμένει πάντα μεγαλύτερη από  $16,046 \text{ m}$ .

Κατά το σχεδιασμό ,λοιπόν, του ηλιοστατικού πεδίου ,μετά τον υπολογισμό των συντεταγμένων των ηλιοστατών της κάθε καινούργιας σειράς, εξετάζουμε ,με την παραπάνω συνθήκη, εάν θα ήταν δυνατή η προσθήκη επιπλέον ηλιοστατών στα μέσα των ακτινικών διακένων  $\Delta A$ , και αποφασίζαμε αναλόγως. Σε περίπτωση που τελικά τοποθετηθούν επιπλέον ηλιοστάτες, η γωνία αζιμουθίου του διακένου  $\theta_{\Delta A}$  μειώνεται στο μισό και η επαναληπτική διαδικασία ,που περιγράφηκε παραπάνω, ξεκινάει από την αρχή με το καινούργιο διάκενο  $\Delta A$ , κρατώντας σταθερή την νέα τιμή της γωνίας  $\theta_{\Delta A}$  ,έως ότου προκύψει και πάλι ανάγκη πρόσθετων ηλιοστατών σε κάποια από τις επόμενες σειρές.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το στιγμιότυπο του σχεδιασμού του ηλιοστατικού πεδίου, κατά το οποίο συναντάμε την πρώτη σειρά στην οποία ικανοποιείται η συνθήκη για προσθήκη επιπλέον ηλιοστατών:

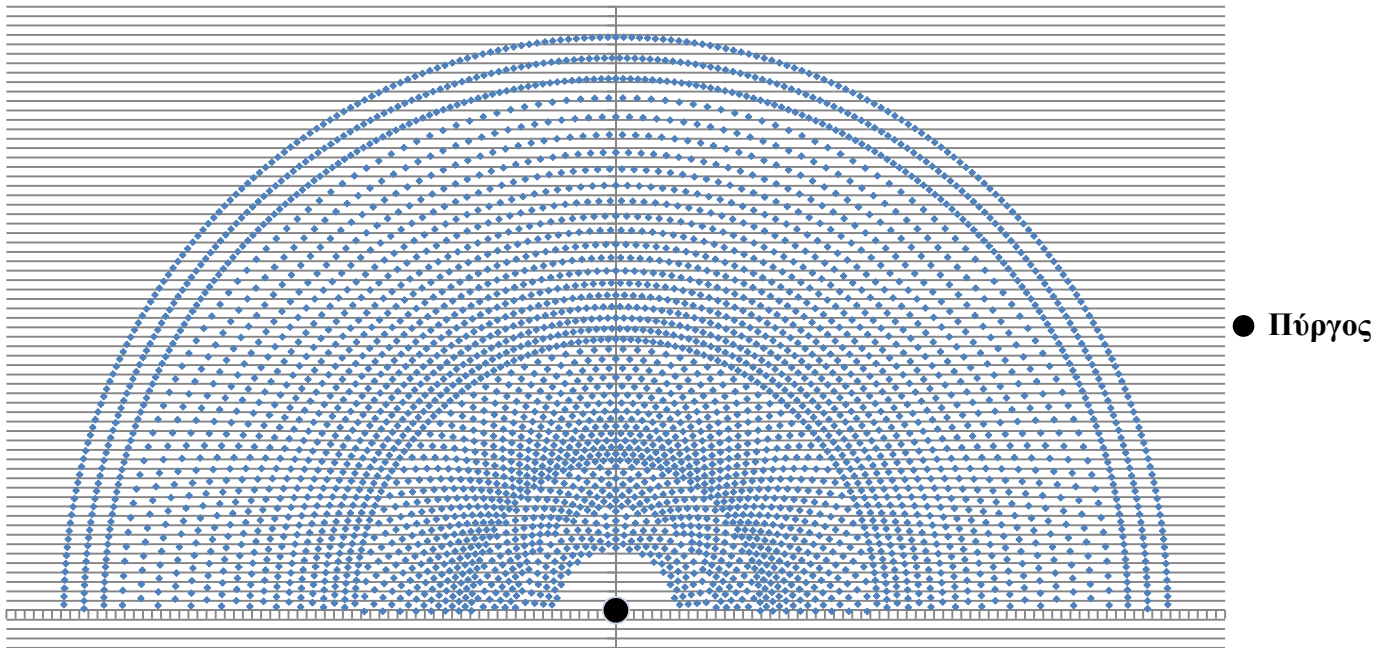


Σχήμα 4.16 Συνθήκη Προσθήκης επιπλέον Ηλιοστατών σε Σειρά του Πεδίου.

Παρατηρούμε πως η αρχική αζιμουθιακή γωνία διακένου  $\theta_{\Delta A}$  διαιρείται στη μέση για τη νέα σειρά του πεδίου με τους επιπλέον ηλιοστάτες.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι ο κώδικας σχεδιασμού και βελτιστοποίησης ηλιοστατικών πεδίων DELSOL3 προσεγγίζει το ζήτημα των σειρών με επιπλέον ηλιοστάτες λίγο διαφορετικά. Για την ακρίβεια, ο κώδικας ξεκινάει το σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου από την τελευταία σειρά του ,κινούμενος προς σειρές με μικρότερη ακτινική απόσταση από τη βάση του πύργου. Με αυτόν τον τρόπο, το αζιμουθιακό διάκενο  $\Delta A$  μεταξύ των ηλιοστατών της ίδιας σειράς διαρκώς και μικραίνει, μέχρι τη σειρά ,όπου οι ηλιοστάτες δεν μπορούν να τοποθετηθούν γιατί θα εμποδίζεται μηχανικά η κίνηση τους. Το πρόβλημα αυτό ξεπερνιέται με την αφαίρεση ενός συγκεκριμένου ποσοστού ηλιοστατών αυτής της σειράς ,το οποίο έχει ζητήσει ο κώδικας νωρίτερα από τον χρήστη να προσδιορίσει. Αφού αφαιρεθούν οι απαραίτητοι ηλιοστάτες, η διαδικασία σχεδιασμού ξεκινάει και πάλι ,βασισμένη στον νέο αριθμό ηλιοστατών της σειράς. [70]

Κλείνουμε, όμως, αυτή την παρένθεση και συνεχίζουμε με τη μεθοδολογία ,την οποία χρησιμοποιήσαμε και περιγράψαμε αναλυτικά παραπάνω. Αν τα βήματα της έχουν ακολουθηθεί με τη σωστή σειρά και την απαραίτητη προσοχή, από την πρώτη μέχρι την τελευταία σειρά ηλιοστατών, τότε το ηλιοστατικό πεδίο παίρνει την ακόλουθη ημικυκλική μορφή:

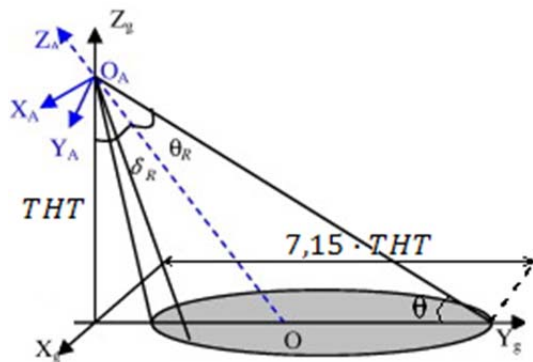


Σχήμα 4.17 Ηλιοστατικό Πεδίο Ημικυκλικής Μορφής Βόρεια του Πύργου.

Οι συντεταγμένες των ηλιοστατών του εικονιζόμενου πεδίου μπορεί να βρέθηκαν, ωστόσο ένα μεγάλο ποσοστό από αυτούς βρίσκεται ,σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας, υπό γωνίες τέτοιες ,που δεν επιτρέπουν στις ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες να φτάνουν με αξιόλογη απόδοση στην επιφάνεια του δέκτη. Έτσι, από το άνοιγμα της κοιλότητας του κεντρικού ηλιακού δέκτη, διέρχονται οι ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες ορισμένης μόνο μερίδας των παραπάνω ηλιοστατών.

Ποια είναι όμως τα μεγέθη αυτά, που υποδεικνύουν ποιοι από τους παραπάνω ηλιοστατές θα συμπεριληφθούν τελικά στο πεδίο βόρειας διάταξης που σχεδιάζεται;

Πρόκειται ,στην ουσία, για τα ίδια μεγέθη που οριοθετούν τα σύνορα του ηλιοστατικού πεδίου στο έδαφος, και δεν είναι άλλα από το ύψος του πύργου  $THT$ , το σχήμα του ανοίγματος του κεντρικού ηλιακού δέκτη, τη γωνία κλίσης του  $\delta_R$  και τη γωνία λήψης του  $\theta_R$ . Για περιπτώσεις, όπως αυτή που μελετάμε, όπου το άνοιγμα του κεντρικού ηλιακού δέκτη είναι κυκλικό, το ακόλουθο σχήμα είναι χαρακτηριστικό:



Σχήμα 4.18 Οριοθέτηση Συνόρων Ηλιοστατικού Πεδίου στο Έδαφος. [54]

Η σκιασμένη επιφάνεια ,που απεικονίζεται, είναι στην ουσία η προβολή του περιγράμματος του κυκλικού ανοίγματος του δέκτη, πάνω στο επίπεδο του εδάφους. Η επιφάνεια αυτή ορίζει τα σύνορα του ηλιοστατικού πεδίου που αναζητούμε, και το περίγραμμά της δίνεται από την εξίσωση [54]:

$$x^2 + (\cos \delta_R \cdot (-y) + \sin \delta_R \cdot THT)^2 - \tan^2 \theta_R \cdot (\sin \delta_R \cdot (-y) - \cos \delta_R \cdot THT)^2 = 0$$

,όπου εδώ  $THT = 165 \text{ m}$  .

Η γωνία λήψης  $\theta_R$  του κεντρικού ηλιακού δέκτη μπορεί να υπολογιστεί γεωμετρικά από το σχήμα 4.18 ως:

$$\theta_R = 90^\circ - \theta - \delta_R = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{THT}{7,15 \cdot THT}\right) - \delta_R = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{1}{7,15}\right) - \delta_R \Rightarrow$$

$$\theta_R = 82,038 - \delta_R$$

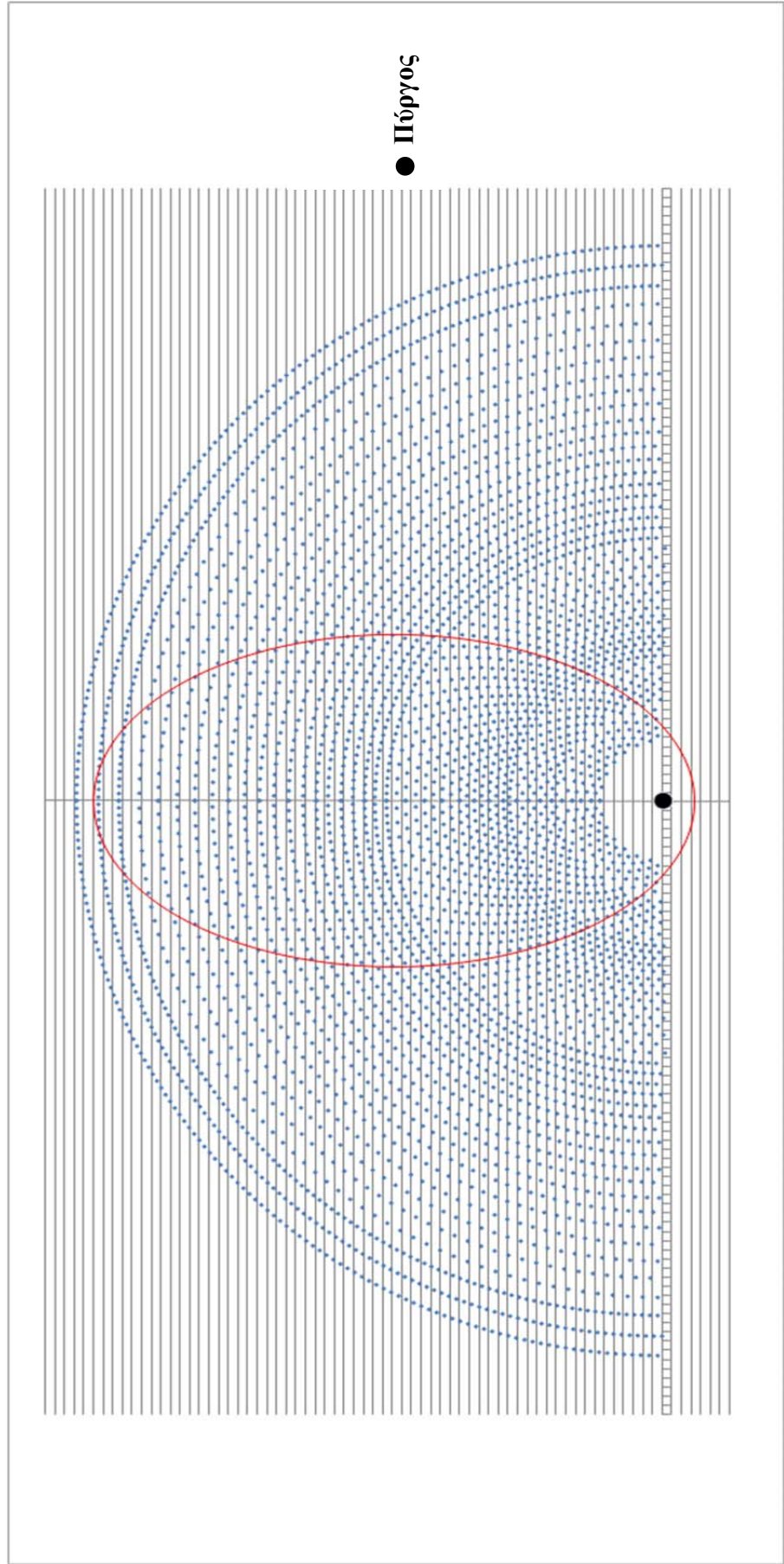
Επιλύοντας την εξίσωση του ελλειπτικού περιγράμματος του ηλιοστατικού πεδίου ως προς  $x$ , για ένα εύρος τιμών του  $y$ , σε ένα φύλλο εργασίας του Excel® ,και έχοντας κατά νου την παραπάνω συσχέτιση των γωνιών  $\theta_R$  και  $\delta_R$ , προκύπτει ,ότι το μεγαλύτερο δυνατόν εμβαδό του περιγράμματος του ηλιοστατικού πεδίου εμφανίζεται για τιμές  $\delta_R = 30^\circ$  και  $\theta_R = 52,038^\circ$  .

Αυτό που απομένει είναι να επιθέσουμε το ελλειπτικό περίγραμμα στο σύστημα συντεταγμένων του ηλιοστατικού πεδίου του σχήματος 4.17, και να διαπιστώσουμε ποιοι ηλιοστάτες αποτελούν το τελικό πεδίο που σχεδιάζουμε.

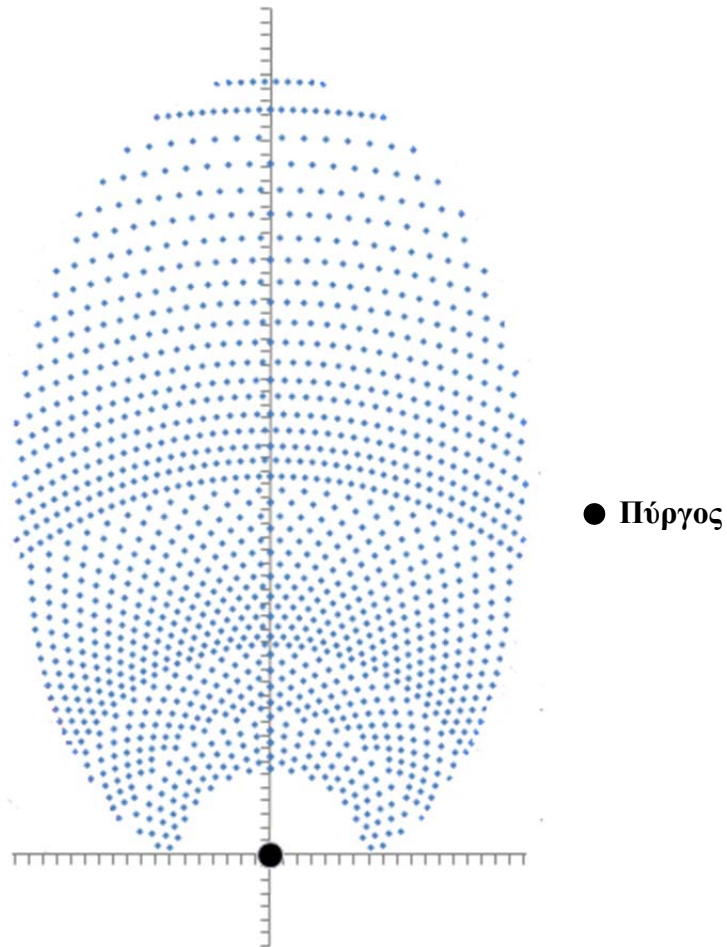
Με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός του ζητούμενου ηλιοστατικού πεδίου με διάταξη βόρεια του πύργου. Ο κεντρικός ηλιακός δέκτης κοιλότητας έχει κυκλικό άνοιγμα, και γωνίες κλίσης  $\delta_R$  και λήψης  $\theta_R$  ίσες με  $30^\circ$  και  $52,038^\circ$  αντίστοιχα.

Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται ,με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, στα σχήματα που ακολουθούν στις επόμενες σελίδες.





Σχήμα 4.19 Προσδιορισμός των Συνόρων του τελικού Ηλιοστασιακού Πεδίου Βόρειας Διάταξης.



Σχήμα 4.20 Τελική Μορφή Ηλιοστατικού Πεδίου με Διάταξη Βόρεια του Πύργου.

#### 4.7 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Ηλιοστατικού Πεδίου

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού ενός ηλιοστατικού πεδίου, όπως θα έγινε αντιληπτό και από τα παραπάνω, δεν αρκεί απλά να τοποθετηθούν οι ηλιοστάτες εντός των συνόρων μιας συγκεκριμένης έκτασης, αλλά πρέπει οι θέσεις τους μέσα σε αυτή να είναι και οι βέλτιστες. Βέβαια, οι θέσεις αυτές διαφοροποιούνται κάθε φορά, αναλόγως με το κριτήριο, ως προς το οποίο εφαρμόζεται η βελτιστοποίηση του πεδίου. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης μπορεί να είναι διαφορετικά για τον εκάστοτε σταθμό, ωστόσο τα πιο συνηθισμένα είναι η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια των ηλιοστατών για δεδομένο εμβαδόν πεδίου, η ελαχιστοποίηση της έκτασης του πεδίου για δεδομένη προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια, η μεγιστοποίηση της ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας του ηλιοστάτη για δεδομένο εμβαδόν πεδίου, η ελαχιστοποίηση του κόστους ανά μονάδα ενέργειας ή η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της εγκατάστασης. [63]

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης ηλιοστατικών πεδίων, που έχουν επικρατήσει σήμερα, μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζονται οι βέλτιστες θέσεις των ηλιοστατών στο πεδίο.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκει μια μέθοδος βελτιστοποίησης, που βασίζεται σε ετήσιες κανονικοποιημένες επιφάνειες ενέργειας (Yearly Normalized Energy Surfaces-YNES). Πιο

συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή ,εκμεταλλευόμενη την μεγάλη υπολογιστική ισχύ που προσφέρει η σύγχρονη τεχνολογία, υπολογίζει την ηλιακή ενέργεια ,που βρίσκεται διαθέσιμη ετησίως σε κάθε σημείο του επιπέδου του ηλιοστατικού πεδίου, για δεδομένο ύψος πύργου, πριν ακόμα τοποθετηθούν οι ηλιοστάτες. Έτσι, δημιουργούνται χάρτες ετήσιου βαθμού απόδοσης για την τοποθεσία, βασισμένοι στους συντελεστές συνημιτόνου, διαρροής και ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, όπως οι τελευταίοι προκύπτουν με τη χρήση δεδομένων άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) για το τυπικό μετεωρολογικό έτος. Για τους χάρτες αυτούς θα μπορούσε κανείς να πει ,ότι δίνουν μια πρώτη εντύπωση σχετικά με το ενεργειακό δυναμικό του πεδίου, για τον συγκεκριμένο κεντρικό δέκτη και τους ηλιοστάτες που εξετάζονται κάθε φορά. Μετά την ολοκλήρωση των χαρτών, τοποθετείται στο πεδίο ο πρώτος ηλιοστάτης ,στο σημείο που εμφανίζει την υψηλότερη διαθέσιμη ενέργεια ετησίως, στην πιο κοντινή ακτινική απόσταση από τη βάση του πύργου, την οποία έχει θέσει ο χρήστης (πρώτη σειρά ηλιοστατών). Αφού τοποθετηθεί ο πρώτος ηλιοστάτης, πρέπει να επανυπολογιστούν οι ετήσιες κανονικοποιημένες επιφάνειες ενέργειας, περιλαμβάνοντας αυτή τη φορά και τους συντελεστές σκίασης και παρεμπόδισης. Έχοντας ,λοιπόν, συμπεριλάβει και την επίδραση του πρώτου ηλιοστάτη στη σκίαση του επιπέδου του πεδίου, το επόμενο βήμα είναι να τοποθετηθεί ο δεύτερος ηλιοστάτης στην καλύτερη ,από ενεργειακής άποψης, θέση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, μέχρι να τοποθετηθούν όλοι οι διαθέσιμοι ηλιοστάτες του πεδίου. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου που μόλις περιγράφηκε είναι ότι οδηγεί στη δημιουργία ηλιοστατικών πεδίων υψηλού βαθμού απόδοσης. Ωστόσο, ο επαναλαμβανόμενος υπολογισμός των συντελεστών συνημιτόνου, ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, διαρροής, σκίασης και παρεμπόδισης ,που χρειάζεται για την αναπροσαρμογή των ετήσιων κανονικοποιημένων επιφανειών ενέργειας, κάθε φορά που τοποθετείται ένας ηλιοστάτης στο πεδίο, κοστίζει ακριβά σε χρόνο και υπολογιστική ισχύ. [71]

Την δεύτερη κατηγορία αποτελούν μέθοδοι, οι οποίες δημιουργήθηκαν δίνοντας βαρύτητα και στην ταχύτητα εκτέλεσης της βελτιστοποίησης. Κοινό χαρακτηριστικό τους, σε αντίθεση με την πρώτη κατηγορία, είναι ότι βελτιστοποιούν τις θέσεις των ηλιοστατών, αφού πρώτα τους έχουν τοποθετήσει σε μία αρχική διάταξη στο πεδίο. Θεωρώντας ως δεδομένα εισόδου ,από τον χρήστη, το ύψος του πύργου, το μέγεθος του ανοίγματος του κεντρικού ηλιακού δέκτη, το μέγεθος των ηλιοστατών και τον αριθμό τους, η διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου καθορίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων, όπως το περίγραμμα των συνόρων του, η κλίση του εδάφους, η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ηλιοστατών της ίδιας σειράς, η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σειρών, η απόσταση της πρώτης σειράς από τη βάση του πύργου και η γωνία κλίσης του δέκτη. Ο αλγόριθμος αναζήτησης παραμέτρων επιτρέπει στις παραπάνω μεταβλητές να μεταβάλλουν τις τιμές τους μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος και με ένα κατάλληλο βήμα, πραγματοποιώντας τη βελτιστοποίηση του πεδίου. Για κάθε πιθανό συνδυασμό των παραπάνω παραμέτρων, σχεδιάζεται η διάταξη των ηλιοστατών που προκύπτει και υπολογίζεται ο ετήσιος βαθμός απόδοσης  $\eta_{field}$  και η πυκνότητα  $\rho$  του πεδίου. Το μέγεθος που υποδεικνύει τη βέλτιστη διάταξη ,από αυτές, δίνεται από το κλάσμα:

$$F_{merit} = \frac{1}{\eta_{field} \cdot \rho}$$

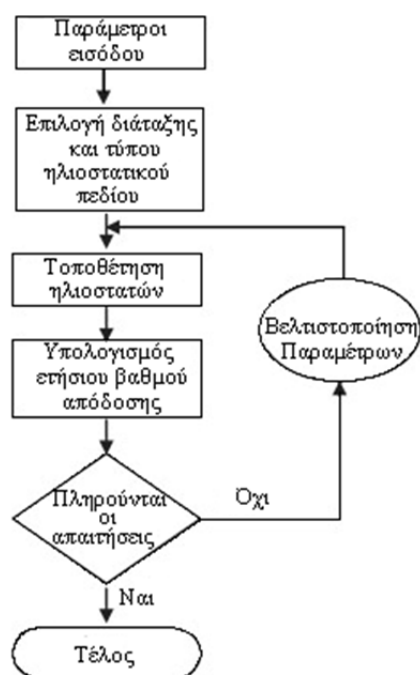
,το οποίο παίρνει την ελάχιστη τιμή του για τον μέγιστο ετήσιο βαθμό απόδοσης του πεδίου και τη μέγιστη πυκνότητα του, ή για τον καλύτερο δυνατόν συνδυασμό των δύο μεγεθών.

Προφανώς η πυκνότητα του ηλιοστατικού πεδίου ορίζεται ως:

$$\rho = \frac{\text{συνολική ανακλαστική επιφάνεια}}{\text{εμβαδόν ηλιοστατικού πεδίου}}$$

Για τον υπολογισμό των ετήσιων συντελεστών απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου χρησιμοποιείται η μέθοδος ανάχνευσης ηλιακών ακτίνων (ray tracing), όπως τη συναντήσαμε και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης ενός ηλιοστατικού πεδίου με τις μεθόδους αυτής της κατηγορίας, φαίνεται παραστατικά και στο ακόλουθο λογικό διάγραμμα:



Σχήμα 4.21 Διαδικασία Βελτιστοποίησης Ηλιοστατικού Πεδίου. [53]

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να τονίσουμε, ότι η διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου μπορεί να σχεδιάζεται με τη συνθήκη μηδενικών απωλειών παρεμπόδισης. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών ηλιοστατών του πεδίου μπορεί να υπολογιστεί από την αρχή, χωρίς να συμμετέχει σαν μεταβλητή στην βελτιστοποίηση του πεδίου. Πολλά από τα προγράμματα ,που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση ηλιοστατικών πεδίων, κάνουν χρήση της συνθήκης μηδενικών απωλειών παρεμπόδισης.

Τέλος, ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα τέτοιων μεθόδων βελτιστοποίησης είναι ότι ο υπολογισμός του ετήσιου συντελεστή απωλειών διαρροής των πιθανών βέλτιστων διατάξεων παραλείπεται από τη διαδικασία ,στην περίπτωση που το ηλιοστατικό πεδίο περιορίζεται γεωμετρικά από τα όρια που θέτει το σχήμα και το μέγεθος του ανοίγματος του κεντρικού δέκτη. Ένα παράδειγμα αποτελεί το ηλιοστατικό πεδίο που σχεδιάσαμε στο κεφάλαιο 4.6 ,με το ακτινικό κλιμακωτό μοτίβο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μειώνεται σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται, μέχρι τον προσδιορισμό της τελικής βέλτιστης διάταξης των ηλιοστατών. [53],[57]

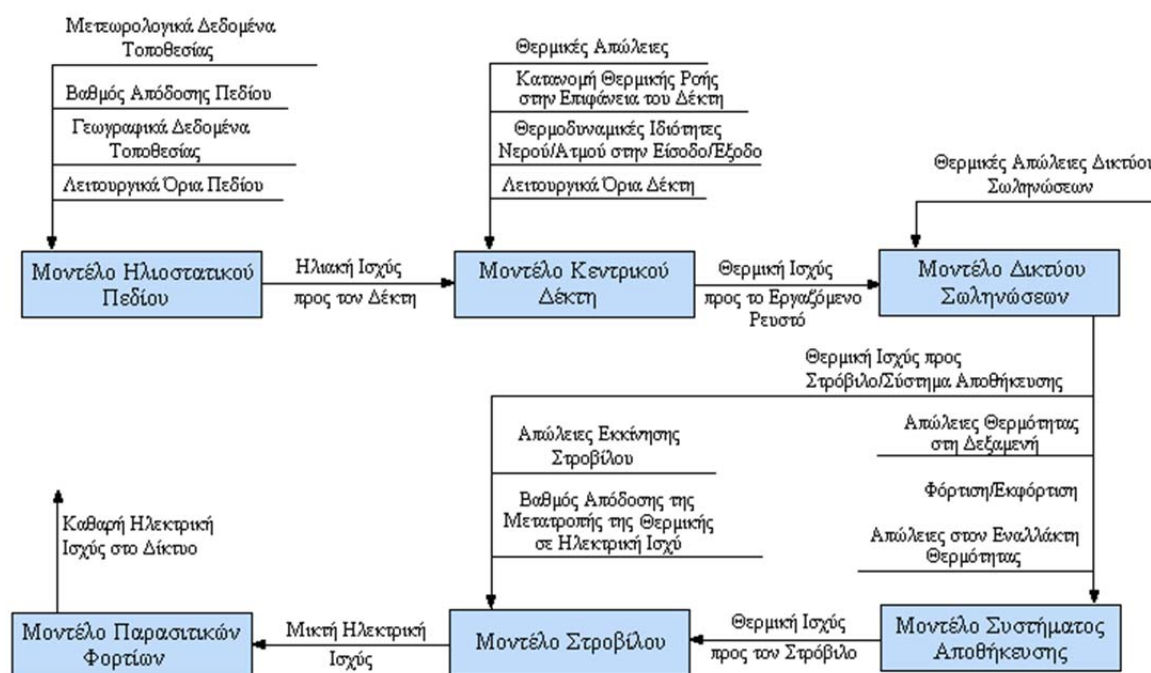
## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Μοντελοποίηση εγκατάστασης Πύργου Ηλιακής Ισχύος 20 MW στην περιοχή του Αθερινόλακκου –Κρήτης

#### 5.1 Κατάστρωση του Πλάνου Μοντελοποίησης της Εγκατάστασης

Αντικειμενικός σκοπός της μοντελοποίησης μιας εγκατάστασης πύργου ηλιακής ισχύος είναι να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ενέργεια που αυτή μπορεί να παράγει και να προσδίδει στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, να γίνουν συγκρίσεις με παρόμοιες εγκαταστάσεις που βρίσκονται ήδη εν λειτουργία, να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής των τιμών διαφόρων παραμέτρων στην απόδοσή της και τελικά να προκύψει μια ξεκάθαρη πρώτη εικόνα για το κατά πόσο η κατασκευή της συμφέρει.

Μια πλήρης μοντελοποίηση ενός σταθμού με πύργο ηλιακής ισχύος πρέπει να περιλαμβάνει την προσομοίωση της λειτουργίας όλων των υποσυστημάτων που τον αποτελούν, από την πρόσπτωση των ηλιακών ακτίνων στο ηλιοστατικό πεδίο μέχρι την πρόσδοση της καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Το ακόλουθο σχήμα, που παρουσιάζει τη ροή της ενέργειας σε έναν πύργο ηλιακής ισχύος, είναι ενδεικτικό αυτής της διαδικασίας:



Σχήμα 5.1 Μοντελοποίηση Εγκατάστασης Πύργου Ηλιακής Ισχύος. [59]

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δόθηκε μεγαλύτερη βαρύτητα στα τμήματα του ηλιοστατικού πεδίου και του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία και μοντελοποιήθηκαν. Η επιλογή έγινε με γνώμονα την υψηλή συνεισφορά των τμημάτων αυτών στην απόδοση του σταθμού, όπως φάνηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Εκτός των άλλων, η μοντελοποίηση όλων των υποσυστημάτων εγκατάστασης

θα απαιτούσε αρκετά μεγαλύτερη έκταση ,από αυτή της παρούσας εργασίας, για να καλυφθεί ικανοποιητικά.

Για την μοντελοποίηση της εγκατάστασης πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο, η οποία θα περιγραφεί παρακάτω, χρησιμοποιήθηκαν δύο υπολογιστικά προγράμματα και δύο εφαρμογές, που επίσης θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Πρόκειται για τα προγράμματα:

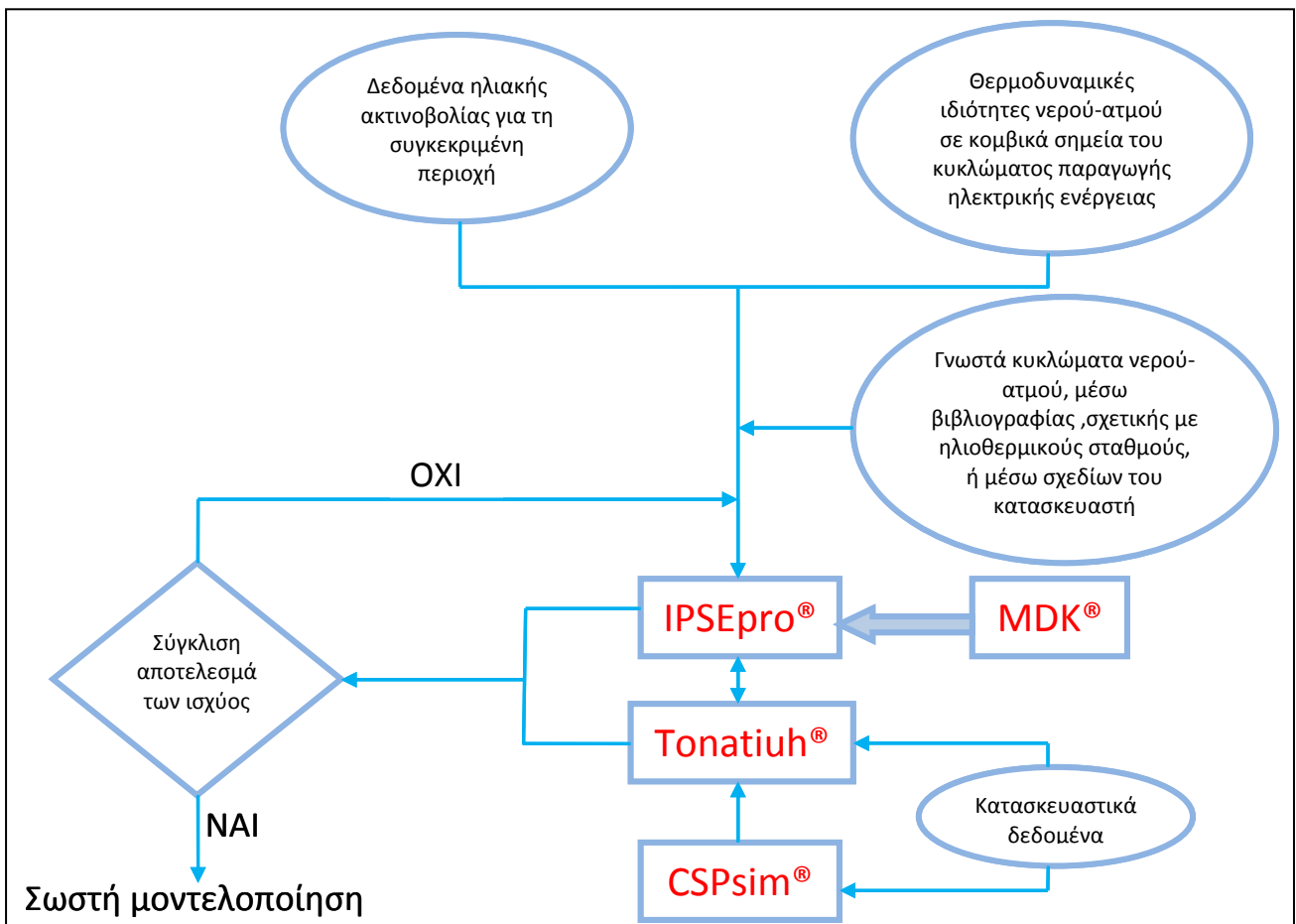
- **IPSEpro®**
- **Tonatiuh®**

και τις εφαρμογές:

- **CSPsim®**
- **MDK®** (Model Development Kit – εφαρμογή του IPSEpro®)

Βασική επιδίωξη ,η οποία αποτέλεσε και το ερέθισμα για τη μοντελοποίηση του σταθμού κατ' αυτόν τον τρόπο, ήταν τα αποτελέσματα των παραπάνω προγραμμάτων να παρουσιάζουν σύγκλιση, όταν θα τροφοδοτούνταν με τα κατάλληλα αντιπροσωπευτικά δεδομένα για τον σταθμό.

Ένα χαρακτηριστικό λογικό διάγραμμα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο παρόν υπολογιστικό μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω:



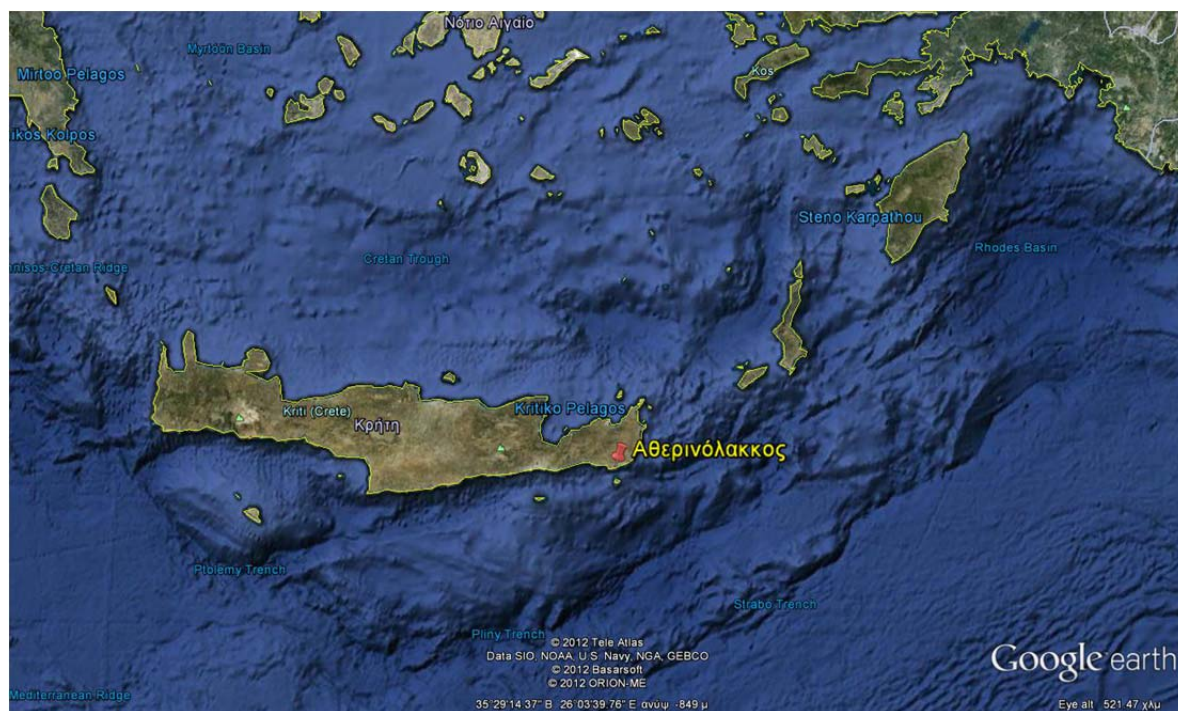
Σχήμα 5.2 Διαδικασία Μοντελοποίησης της Εγκατάστασης στον Αθρινόλακκο.

## 5.2 Δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας της Περιοχής

Ο Αθερινόλακκος είναι μια παραθαλάσσια τοποθεσία, που βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Κρήτης, βόρεια ενός μικρού νησιού με την ονομασία Κουφονήσι. Οι συντεταγμένες του είναι:

Γεωγραφικό Μήκος: **26,137° (Ανατολικά)**

Γεωγραφικό Πλάτος: **35,006° (Βόρεια)**



Σχήμα 5.3 Τοποθεσία Αθερινόλακκου.

Πριν καν αναφερθούμε στην εγκατάσταση του Αθερινόλακκου αυτή καθ' αυτή και τα χαρακτηριστικά της, πρέπει πρώτα να αποκτήσουμε τα απαραίτητα δεδομένα άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας της περιοχής. Αυτά είναι ,εξάλλου, που δίνουν τη βασική πληροφορία για την ποιότητα του ηλιακού δυναμικού της τοποθεσίας, βοηθώντας να σχηματίσει κανείς μια πρώτη άποψη για την καταλληλότητα της ως προς την εγκατάσταση ενός ηλιοθερμικού σταθμού.

Πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των τιμών της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, είναι η μεταβλητότητα που παρουσιάζουν σε μικρά χρονικά διαστήματα, καθώς εξαρτώνται από μετεωρολογικά φαινόμενα ,τα οποία πολλές φορές δεν είναι προβλέψιμα. Για παράδειγμα, η παρεμβολή ενός σύννεφου στην πορεία των προσπίπτουσών ηλιακών ακτίνων προς το ηλιοστατικό πεδίο, ακόμα και για λίγα λεπτά της ώρας, μπορεί να στοιχίσει σημαντικά στην παραγωγή ενέργειας της εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας ,που θα χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση, να χαρακτηρίζονται από μεγάλη συχνότητα, ώστε να προλαμβάνουν όσο το δυνατόν περισσότερες τέτοιες απότομες μεταβολές της ηλιοφάνειας που μπορεί να προκύψουν.

Τελικά, μέσω της ιστοσελίδας [72], με δεδομένα εισόδου το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της τοποθεσίας του Αθερινόλακκου, προσδιορίστηκαν οι τιμές της άμεσης προσπίπτουσας

σε επιφάνεια ηλιακής ακτινοβολίας (DNI), ανά χρονικά διαστήματα μίας ώρας, για ένα έτος. Οι τιμές της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας δίνονται σε  $W/m^2$  και χρησιμοποιείται ο μέσος χρόνος Γκρίνουιτς (GMT). Η σχέση της ώρας Ελλάδος με την ώρα Γκρίνουιτς είναι [73]:

$$\text{Ώρα Ελλάδος} = \begin{cases} GMT + 2, & (28 \text{ Οκτωβρίου} - 25 \text{ Μαρτίου}) \\ GMT + 3, & (25 \text{ Μαρτίου} - 28 \text{ Οκτωβρίου}) \end{cases}$$

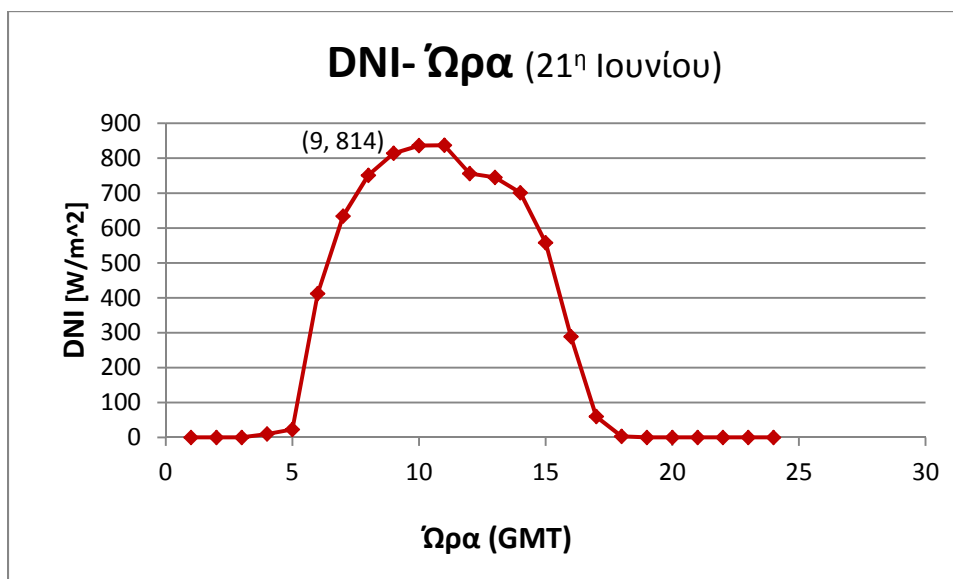
Από το άθροισμα των τιμών προέκυψε, ότι η ετήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή είναι **1864,587 KWh/m<sup>2</sup>**. Η τιμή αυτή είναι αρκετά υψηλή, και μάλιστα πληρεί τις προϋποθέσεις ικανοποιητικής απόδοσης που θέτει η P.A.E. ,στον οδηγό αξιολόγησης έργων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας.

Λόγω του γεγονότος, ότι η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας αλλάζει ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την εποχή του χρόνου ,στην οποία βρισκόμαστε, ο σχεδιασμός της εγκατάστασης του πύργου ηλιακής ισχύος πρέπει να βασίζεται σε μία συγκεκριμένη τιμή ώρας και ημερομηνίας, που είναι γνωστή ως σημείο σχεδιασμού. Ανάλογα με την ισχύ που παράγει ο σταθμός στο σημείο σχεδιασμού, μπορούν να διαστασιοποιηθούν τα υποσυστήματα που τον αποτελούν και να υπολογιστούν οι βαθμοί απόδοσής τους. Η σωστή επιλογή του σημείου σχεδίασης μιας εγκατάστασης είναι αρκετά σημαντική, καθώς αυτή επιδρά στο τελικό προφίλ της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει του χρόνου. Ένα σημείο σχεδιασμού, επιλεγμένο σε ημέρα με πολύ υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, επιτρέπει στα υποσυστήματα του σταθμού να λειτουργούν με μεγάλες ροές ενέργειας σε περιπτώσεις έντονης ηλιοφάνειας. Ωστόσο, παραμονεύει ο κίνδυνος υπερδιαστασιολόγησης των εξαρτημάτων ,όταν θα προκύπτουν μικρότερες τιμές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να υπάρχει ενδεχόμενη μείωση της ετήσιας απόδοσης του σταθμού ,εξαιτίας της λειτουργίας του ,κατά μεγάλα χρονικά διαστήματα, εκτός του σημείου σχεδίασης. Από την άλλη μεριά, η επιλογή του σημείου σχεδιασμού σε χρονική στιγμή, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι σχετικά μικρή, θα εξασφαλίσει μια πιο ομοιόμορφη παροχή ενέργειας ετησίως στο δίκτυο, αλλά θα έχει και σαν συνέπεια την απόρριψη ποσοτήτων περισευούμενης ενέργειας ,σε περιόδους έντονης ηλιοφάνειας. [36]

Για τον πύργο ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο, **το σημείο σχεδιασμού ορίστηκε στις 12:00 το μεσημέρι της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου** (θερινό ηλιοστάσιο). Η επιλογή αυτή οφείλεται στο γεγονός ,ότι οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή προσεγγίζουν ,στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους, καλοκαιρινές τιμές. Επιπρόσθετα, όπως θα δούμε και παρακάτω, για την εγκατάσταση του Αθερινόλακκου δεν προβλέπεται σύστημα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας ,και συνεπώς θα ήταν φρονιμότερο η διαστασιολόγηση της να γίνει για υψηλές τιμές προσπίπτουσας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να μην απορρίπτονται μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας ,που δεν μπορούν να απορροφηθούν από το δίκτυο, κατά τις μέρες με έντονη ηλιοφάνεια.

Ενδεικτικά, η μεταβολή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την ώρα Γκρίνουιτς ,στην περιοχή του Αθερινόλακκου για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου, παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα:





Σχήμα 5.4 Μεταβολή της Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας κατά τη Διάρκεια της Ημέρας Σχεδιασμού.

Στο σημείο σχεδιασμού (9:00 GMT=12:00 Ελλάδος) του σταθμού του Αθερινόλακκου παρατηρούμε ,ότι η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας είναι  $814 \text{ W/m}^2$ .

### 5.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Ηλιοθερμικού Σταθμού

Για την προσομοίωση του πύργου ηλιακής ισχύος στην τοποθεσία του Αθερινόλακκου, χρησιμοποιήθηκαν ,ως δεδομένα, κάποια από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σταθμού PS20 στη Σεβίλλη. Η ανάγκη αυτή προέκυψε ,στην προσπάθεια να βρεθούν κάποια τεχνικά στοιχεία για τον ηλιοθερμικό σταθμό του Αθερινόλακκου, όπου αυτά δεν ήταν διαθέσιμα, με το σκεπτικό η ονομαστική ισχύς του να είναι της τάξεως των 20 MWe. Συνεπώς, η περίπτωση του πύργου PS20, με επιτυχημένη λειτουργία σχεδόν τριών χρόνων, και ονομαστική ισχύ επίσης 20 MWe αποτελούσε κατάλληλη επιλογή για το σκοπό αυτό. Σημαντικό ρόλο στην τελική απόφαση έπαιξε και το γεγονός ,ότι ο σταθμός PS20 χρησιμοποιεί το νερό ,ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας του ηλιακού δέκτη, όπως θα θέλαμε να συμβαίνει και στην περίπτωση του σταθμού στον Αθερινόλακκο. Δηλαδή, το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του να χαρακτηρίζεται από άμεση ατμοπαραγωγή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, και σε συνδυασμό με κάποιες απλουστευτικές παραδοχές, τα τεχνικά χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν για τον ηλιοθερμικό σταθμό με σύστημα κεντρικού δέκτη στον Αθερινόλακκο είναι τα εξής [49],[55],[69]:

- **Ονομαστική ισχύς: 20 Mwe**
- **Ύψος πύργου: 165 m**
- **Τύπος ηλιοστατών: Sanlucar-120 εμβαδού  $120 \text{ m}^2$  και διαστάσεων  $12,88 \text{ m} \times 9,57 \text{ m}$  (πλάτος  $\times$  ύψος)**

- *Αριθμός ηλιοστατών στο πεδίο: 1255*
- *Ονομαστικός λόγος ανάκλασης κατοπτρικής επιφάνειας: 0,92*  
*Βαθμός καθαρότητας κατοπτρικής επιφάνειας: 0,95*  
*Συντελεστής Ανακλαστικότητας Ηλιοστατών:  $0,92 \times 0,95 = 0,874$*
- *Διάταξη ηλιοστατικού πεδίου βόρεια του πύργου*
- *Κλίση εδάφους ηλιοστατικού πεδίου: 0%*
- *Εξωτερικός ηλιακός δέκτης επίπεδης απορροφητικής επιφάνειας  $15 \times 15 = 225 \text{ m}^2$*
- *Ρευστό μεταφοράς της θερμότητας του δέκτη: Νερό-Ατμός*
- *Τύπος συμπυκνωτή: Αερόψυκτος*
- *Απουσία συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας*

#### **5.4 Περιγραφή των Κυκλωμάτων Νερού-Ατμού της Εγκατάστασης μέσω του Προγράμματος IPSEpro® και της Εφαρμογής MDK®**

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται και αναλύονται δύο διαφορετικές εκδοχές κυκλωμάτων νερού-ατμού του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ,που επιλέχθηκαν για την εγκατάσταση του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο. Η βασική διαφορά των δύο εκδοχών έγκειται στην αναθέρμανση ,ή μη, του αποτονούμενου στο στρόβιλο ατμού. Στα κυκλώματα ενσωματώνονται ,επίσης, τα μοντέλα του ηλιοστατικού πεδίου και του κεντρικού ηλιακού δέκτη, που αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία ενός ατμοπαραγωγού ,δηλαδή την πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο ρευστό.

Για τη σχεδίαση των παραπάνω κυκλωμάτων και την δημιουργία αντιπροσωπευτικών μοντέλων του ηλιοστατικού πεδίου και του κεντρικού δέκτη, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα IPSEpro® και η εφαρμογή του MDK®. Σκοπός ήταν ,με τον συνδυασμό τους, να δημιουργηθεί ένα συμπαγές μοντέλο του σταθμού του Αθρινόλακκου, που να περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα υποσυστήματα ενός πύργου ηλιακής ισχύος, όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.3.

Πριν προχωρήσουμε ,όμως, στην παρουσίαση του μοντέλου του σταθμού για την εκδοχή κυκλώματος νερού-ατμού με και χωρίς αναθέρμανση, ας δούμε πρώτα κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του προγράμματος IPSEpro® και της εφαρμογής MDK®:

##### IPSEpro®

Πρόκειται για ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης και επεξεργασίας κυκλωμάτων που διατρέχονται από ρευστά μεταφοράς θερμότητας, με σκοπό την παραγωγή ενέργειας. Το IPSEpro® περιλαμβάνει όλα τα πιθανά εξαρτήματα που μπορεί κανείς να συναντήσει στο

σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μιάς εγκατάστασης. Βασικό του γνώρισμα είναι η ικανότητα του να εκτελεί υπολογισμούς θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του ρευστού σε κάθε σημείο του κυκλώματος, αλλά και υπολογισμούς ισχύος, μέσα από έναν σύστημα εξισώσεων ,ίσο με τον αριθμό των αγνώστων μεγεθών. Για την εγκατάσταση του Αθερινόλακκου, χρησιμοποιήσαμε το IPSEpro® στο σχεδιασμό του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο για την περίπτωση απλού κυκλώματος χωρίς αναθέρμανση ,όσο και για την περίπτωση του πιο σύνθετου κυκλώματος νερού-ατμού με αναθέρμανση. Επιλέγοντας τις τιμές κάποιων θερμοδυναμικών μεγεθών σε κομβικά σημεία των κυκλωμάτων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του σταθμού, και χρησιμοποιώντας αυτές ως δεδομένα εισόδου για το πρόγραμμα, καταφέραμε να υπολογίσουμε τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του νερού-ατμού σε κάθε σημείο και τη συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στη γεννήτρια.

### MDK®

Το Model Development Kit-MDK είναι μια εφαρμογή του προγράμματος IPSEpro® ,που επιτρέπει το σχεδιασμό καινούργιων εξαρτημάτων-μοντέλων ,τα οποία δεν περιλαμβάνονται εξ' αρχής σε αυτό. Αφότου μοντελοποιηθούν τα νέα εξαρτήματα, μπορούν να ενσωματωθούν και να αποτελέσουν μέρος των κυκλωμάτων που σχεδιάζονται στο IPSEpro®. Στην περίπτωση της εγκατάστασης του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο, χρησιμοποιήσαμε την εφαρμογή MDK® για τη μοντελοποίηση του ηλιοστατικού πεδίου και του κεντρικού ηλιακού δέκτη. Θα δούμε παρακάτω ,με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, τις εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στα δύο αυτά μοντέλα ,σχετικά με τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και τους βαθμούς απόδοσης, για να περιγραφεί η λειτουργία τους. Φυσικά, τη μοντελοποίηση του ηλιοστατικού πεδίου και του κεντρικού δέκτη ακολούθησε και η ενσωμάτωση τους στα κυκλώματα νερού-ατμού του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να δημιουργηθεί ένα συνολικό μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του σταθμού.

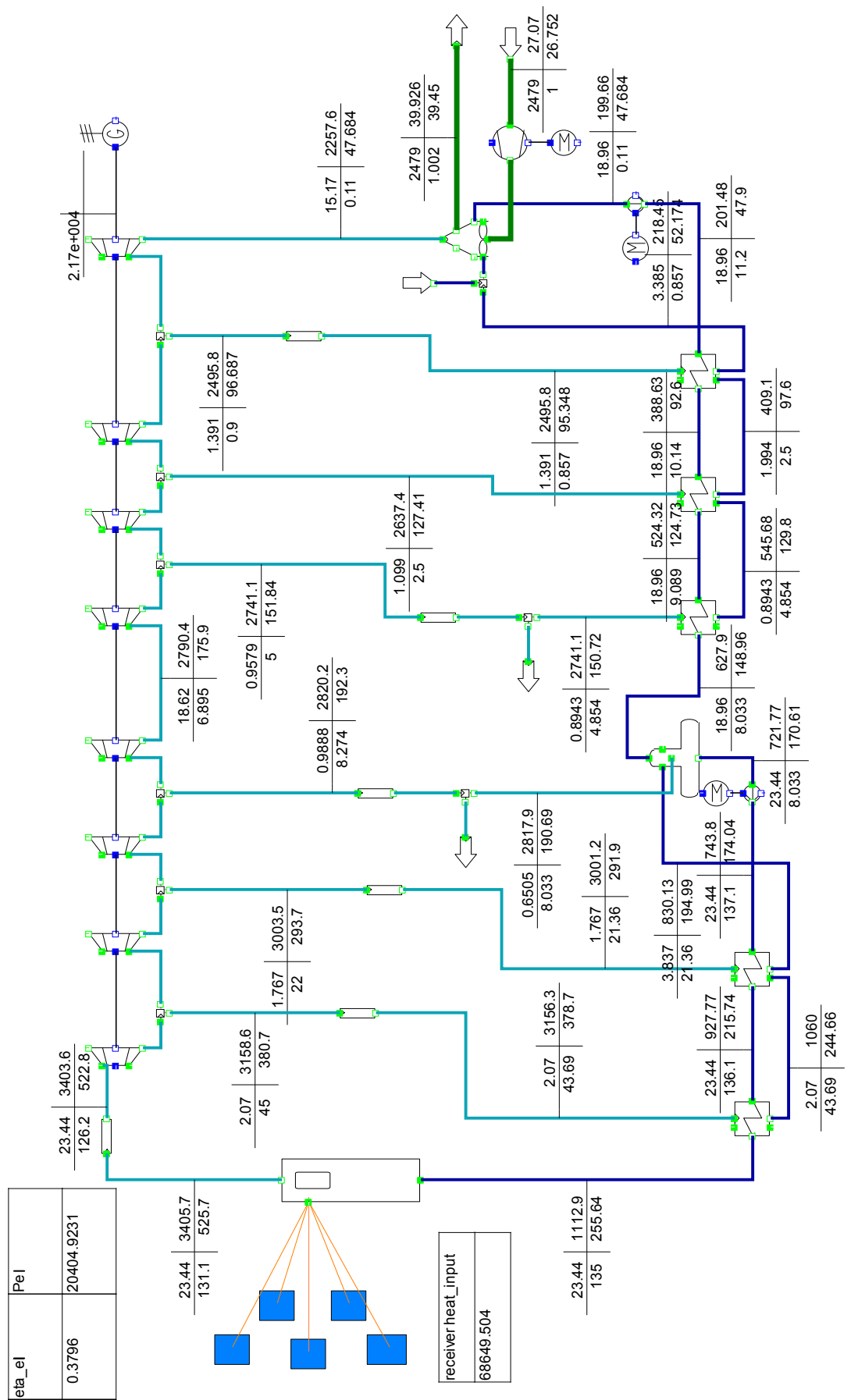
Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά, για την περίπτωση κυκλώματος νερού-ατμού με και χωρίς αναθέρμανση, στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

#### **5.4.1 Κύκλωμα χωρίς Αναθέρμανση**

Το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο ,για κύκλωμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς αναθέρμανση παρουσιάζεται, μαζί με τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του νερού-ατμού, στην επόμενη σελίδα.

Για τη διευκόλυνση του αναγνώστη, επεξηγείται ότι το μοτίβο παρουσίασης των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του νερού-ατμού στο πρόγραμμα IPSEpro®, έχει ως εξής:

<i>Παροχή Μάζας (Kg/s)</i>	<i>Ενθαλπία (KJ/Kg)</i>
<i>Πίεση (bar)</i>	<i>Θερμοκρασία (°C)</i>



Σχήμα 5.5 Κύκλωμα Νερού-Ατμού του Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, χωρίς Αναθέρμανση.

Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο κύκλωμα αναφέρονται στο σημείο σχεδίασης του σταθμού του Αθερινόλακκου. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία έχει τιμή, όπως είδαμε και προηγουμένως,  $814 \text{ W/m}^2$ , ενώ οι βαθμοί απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου και του δέκτη τέθηκαν ίσοι με 0,56 και 0,783 αντίστοιχα, σύμφωνα με τον πίνακα 3.1 της Ρ.Α.Ε.

Τα θερμοδυναμικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα κύκλωμα νερού-ατμού ενός πύργου ηλιακής ισχύος, και συνήθως τίθενται ως δεδομένα εισόδου από τον σχεδιαστή, είναι:

- Η θερμοκρασία και η πίεση του ατμού πριν την είσοδό του στο στρόβιλο (μετά τον ηλιακό δέκτη).
- Η πίεση του συμπυκνώματος
- Η πίεση στον απαεριωτή

Για το κύκλωμα, χωρίς αναθέρμανση, της εγκατάστασης του Αθερινόλακκου η θερμοκρασία και η πίεση εισόδου του ατμού στο στρόβιλο που επιλέχθηκαν είναι  $522,8 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $126,2 \text{ bar}$  αντίστοιχα. Η πίεση του συμπυκνώματος ισούται με  $0,11 \text{ bar}$ , ενώ η πίεση στον απαεριωτή είναι  $8,033 \text{ bar}$ . Επίσης, η συνολική παροχή μάζας ατμού που εισέρχεται στο στρόβιλο είναι  $23,44 \text{ Kg/s}$ .

Το πρώτο στοιχείο που μπορεί να παρατηρήσει κανείς για το κύκλωμα νερού-ατμού κοιτώντας το γενικά, είναι ότι αποτελεί ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χαρακτηρίζεται από άμεση ατμοπαραγωγή. Δηλαδή, ο ατμός, αφού απορροφήσει τη θερμότητα στις σωληνώσεις του ηλιακού δέκτη και εξέλθει από αυτόν, αποτονώνεται απ' ευθείας στο στρόβιλο χωρίς να μεσολαβήσει κάποιος εναλλάκτης θερμότητας, όπως θα συνέβαινε στην περίπτωση έμμεσης ατμοπαραγωγής.

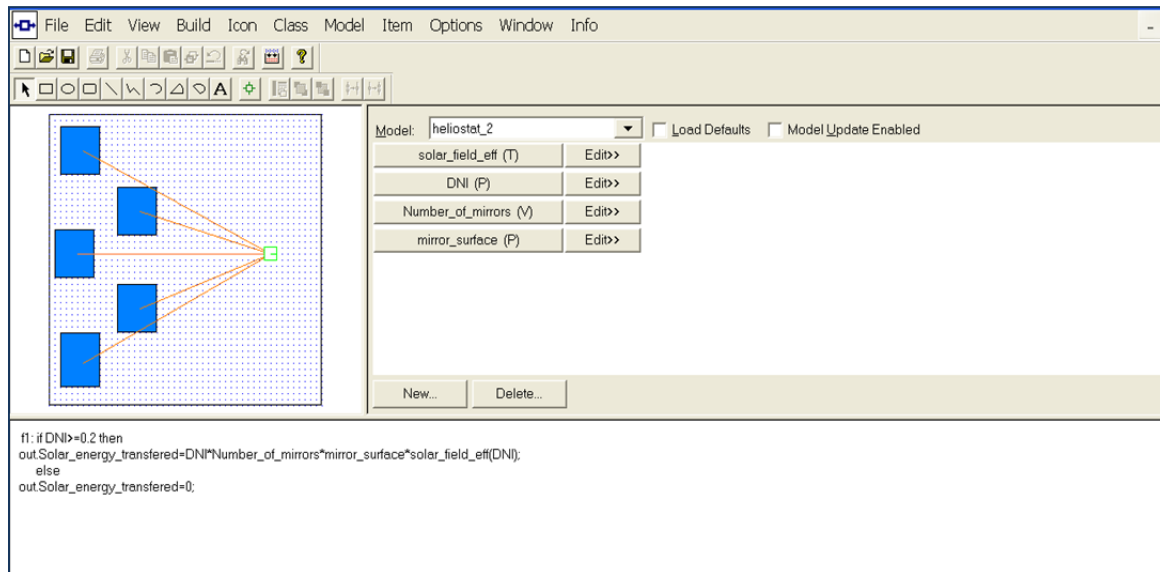
Στο κύκλωμα μπορεί κανείς να διακρίνει δύο στρόβιλους, με τρεις απομαστεύσεις ατμού ο καθένας. Χαρακτηριστικά, φαίνεται και ο αερόψυκτος συμπυκνωτής, ο οποίος λειτουργεί με παροχή μάζας αέρα  $2479 \text{ kg/s}$ . Ο υπέρθερμος ατμός, αφού αποτονωθεί στους στρόβιλους, εισέρχεται στον συμπυκνωτή και συμπυκνώνεται σε κορεσμένο νερό, το οποίο εν συνεχεία υφίσταται έξι προθερμάνσεις (συμπεριλαμβανομένου και του απαεριωτή), μέσω εναλλακτών θερμότητας, από τις απομαστεύσεις ατμού των στρόβιλων, στην πορεία του προς τον ηλιακό δέκτη.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι σε όλα τα κυκλώματα νερού-ατμού, που θα παρουσιαστούν, έγινε η παραδοχή, ότι στην έξοδο των εναλλακτών θερμότητας, για το θερμό ρεύμα, προκύπτει κορεσμένο νερό, όπως και στην έξοδο του συμπυκνωτή.

Για το συγκεκριμένο κύκλωμα νερού-ατμού, χωρίς αναθέρμανση, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης προκύπτει ίσος με **37,96%**, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.5. Επίσης, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, στο σημείο σχεδιασμού του σταθμού, ισούται με **20404,92 Kwe**.

Τα μοντέλα του ηλιοστατικού πεδίου και του κεντρικού ηλιακού δέκτη διακρίνονται στην αριστερή πλευρά του κυκλώματος, στην αντίστοιχη θέση που τοποθετείται ο ατμοπαραγωγός για έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό. Η λειτουργία τους και οι εξισώσεις που τους διέπουν θα παρουσιαστούν μέσω της εφαρμογής MDK®.

Πρώτο μοντέλο που κατασκευάστηκε ήταν αυτό του ηλιοστατικού πεδίου, για τη δημιουργία του οποίου βασιστήκαμε αποκλειστικά στις τιμές του οδηγού αξιολόγησης της Ρ.Α.Ε.. Στο ακόλουθο σχήμα, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του ηλιοστατικού πεδίου στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής MDK®:



Σχήμα 5.6 Μοντελοποίηση Ηλιοστατικού Πεδίου στην Εφαρμογή MDK®.

Βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα την εξίσωση και την συνθήκη ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε. Πιο συγκεκριμένα, με τη συνθήκη ελέγχου “if” ορίσαμε την ελάχιστη απαίτηση άμεση ηλιακής ακτινοβολίας  $200 \text{ W/m}^2$ , για την λειτουργία της εγκατάστασης, όπως είχε επισημανθεί από τη Ρ.Α.Ε. στον οδηγό αξιολόγησης. Η εξίσωση για την ισχύ, που μεταφέρεται από το ηλιοστατικό πεδίο προς τον κεντρικό δέκτη, δεν είναι άλλη από αυτήν που συναντήσαμε και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο:

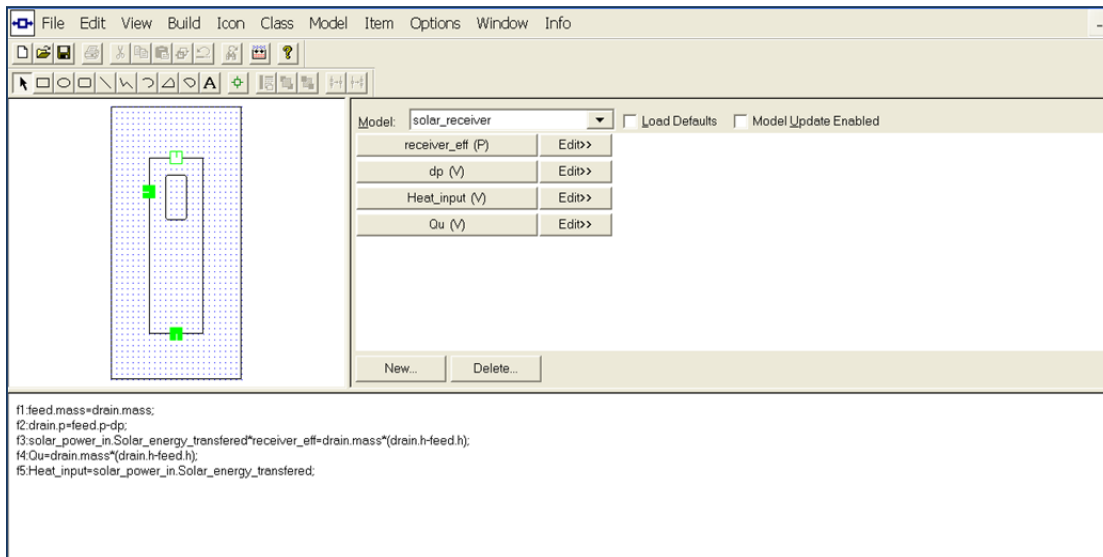
$$\dot{Q}_{inc} = N \cdot A_{heliostat} \cdot I \cdot \eta_{field} \cdot \Gamma$$

,για  $\Gamma=1$  (θεωρούμε όλους τους ηλιοστάτες εστιασμένους στον κεντρικό δέκτη).

Ουσιαστικά, η εξίσωση αυτή εκφράζει ότι το γινόμενο της συνολικής ανακλαστικής επιφάνειας του πεδίου ηλιοστατών ( $N \cdot A_{heliostat}$ ), με την προσπίπτουσα σε αυτήν άμεση ηλιακή ακτινοβολία  $I$  και τον βαθμό απόδοσης του πεδίου  $\eta_{field}$ , ισούται με την θερμική ισχύ  $\dot{Q}_{inc}$  που φτάνει στην επιφάνεια του κεντρικού ηλιακού δέκτη. Ο βαθμός απόδοσης  $\eta_{field}$ , όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, στο παρόν μοντέλο λήφθηκε ίσος με 56%, όπως όριζε η Ρ.Α.Ε.

Γενικότερα, ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο του ηλιοστατικού πεδίου, κατά τη διάρκεια μίας προσομοίωσης της εγκατάστασης, μπορούν να δοθούν οποιαδήποτε από τα παραπάνω μεγέθη, όπως ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου, και ο βαθμός απόδοσής του, το εμβαδό της επιφάνειας του κάθε ηλιοστάτη και η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Μετά την μοντελοποίηση του ηλιοστατικού πεδίου, ακολούθησε η σειρά και του κεντρικού ηλιακού δέκτη. Η μοντελοποίηση του παρουσιάζεται επίσης στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής MDK®:



Σχήμα 5.7 Μοντελοποίηση Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη στην Εφαρμογή MDK®.

Η παροχή μάζας στην είσοδο ισούται με αυτή στην έξοδο και η πίεση εξόδου ισούται με την πίεση εισόδου μείον τις απώλειες πίεσης στον δέκτη.

Εκτός από τις εξισώσεις που συνδέουν την πίεση και την παροχή μάζας του ατμού στην είσοδο και στην έξοδο του δέκτη, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λειτουργία του μοντέλου, η επιπλέον εξίσωση που εισάγεται για τον ηλιακό δέκτη είναι αυτή που είδαμε και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο:

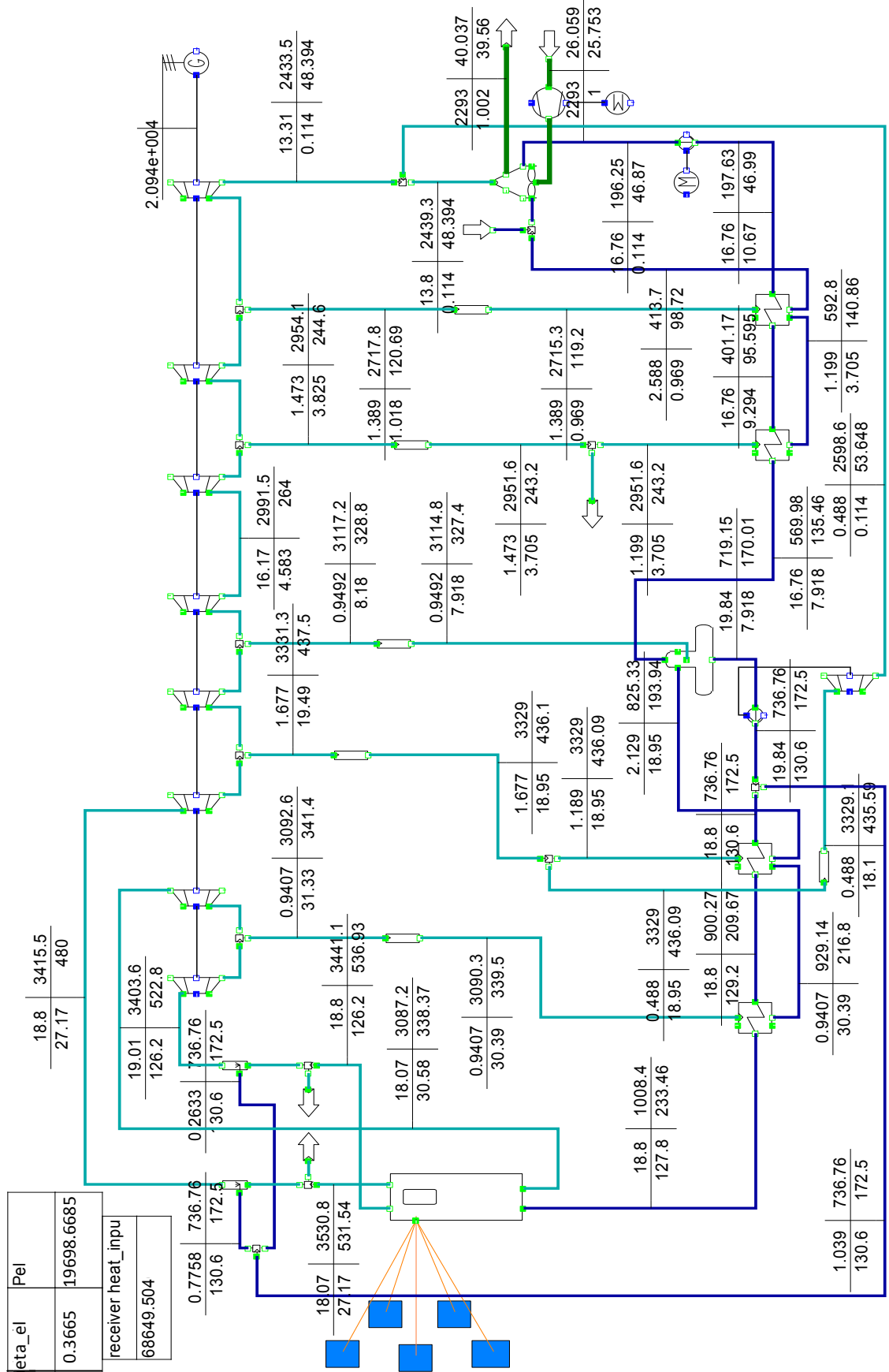
$$\eta_{receiver} \cdot \dot{Q}_{inc} = \dot{m} \cdot (h_{out_{rec}} - h_{in_{rec}})$$

Η εξίσωση αυτή, στην ουσία, εκφράζει ότι το ποσό της θερμικής ισχύος  $\dot{Q}_{inc}$  που φτάνει από το ηλιοστατικό πεδίο στην επιφάνεια του δέκτη, πολλαπλασιασμένο με τον βαθμό απόδοσής του, ισούται με τη θερμική ισχύ  $Q_m$  που απορροφάει τελικά το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Προφανώς, η ισχύς  $Q_m$  ισούται με το γινόμενο της παροχής μάζας του εργαζόμενου ρευστού, διαμέσου του δέκτη, με την ενθαλπική αύξηση που αυτό υφίσταται. Ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού δέκτη τέθηκε ίσος με την τιμή 0,783, από τον οδηγό αξιολόγησης της P.A.E..

Έχοντας ολοκληρωθεί, λοιπόν, η μοντελοποίηση του ηλιοστατικού πεδίου και του ηλιακού δέκτη, ακολούθησε η ενσωματωσή τους στα κυκλώματα νερού-ατμού στο πρόγραμμα IPSEpro®.

#### 5.4.2 Κύκλωμα με Αναθέρμανση

Ομοίως με την περίπτωση του κυκλώματος χωρίς αναθέρμανση, που προηγήθηκε, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε για το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο και ένα κύκλωμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αναθέρμανση του αποτονόμενου στο στρόβιλο ατμού. Το τελικό μοντέλο, μαζί με τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του νερού-ατμού, παρουσιάζεται στην ακόλουθη σελίδα, με τα αποτελέσματα να αντιστοιχούν και πάλι στο σημείο σχεδιασμού της εγκατάστασης:



Σχήμα 5.8 Κύκλωμα Νερού-Ατμού του Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, με Αναθέρμανση.



Εκ πρώτης όψεως φαίνεται πως το παραπάνω κύκλωμα είναι αρκετά πιο σύνθετο από αυτό που σχεδιάστηκε για την περίπτωση χωρίς αναθέρμανση. Ωστόσο, το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται και πάλι από άμεση ατμοπαραγωγή.

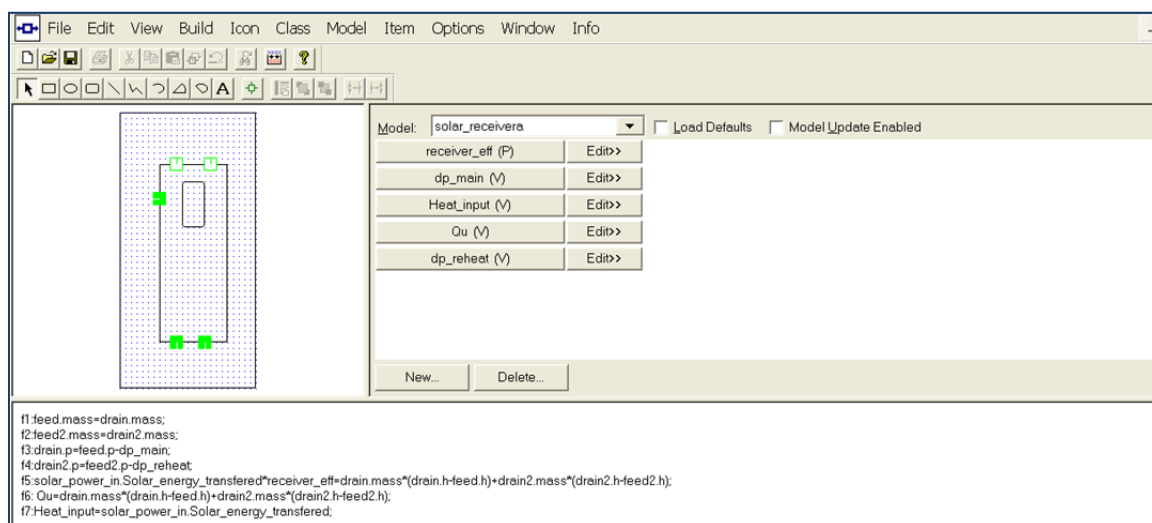
Η θερμοκρασία και η πίεση εισόδου του ατμού στο στρόβιλο επιλέχθηκαν όπως και στο πρώτο κύκλωμα, 522,8 °C και 126,2 bar αντίστοιχα. Η αναθέρμανση του ατμού πραγματοποιείται στους 480 °C και 27,17 bar. Η πίεση του συμπυκνώματος είναι 0,114 bar, ενώ η πίεση στον απαερωτή 7,918 bar. Τέλος, η παροχή μάζας του ατμού που εισέρχεται στο στρόβιλο ισούται με 19,01Kg/s.

Ο αερόψυκτος συμπυκνωτής επιλέγεται και σε αυτή την περίπτωση, και λειτουργεί με αέρα παροχής μάζας 2293 kg/s.

Διαφορά εντοπίζεται στον αριθμό των στρόβιλων, οι οποίοι για το κύκλωμα με αναθέρμανση είναι τρεις. Ο πρώτος στρόβιλος παρουσιάζει μία απομάστευση ατμού, ενώ οι άλλοι δύο έχουν από δύο απομαστεύσεις ο καθένας. Επιπροσθέτως, σε αντίθεση με το κύκλωμα χωρίς αναθέρμανση, εδώ το τροφοδοτικό νερό υφίσταται πέντε προθερμάνσεις (συμπεριλαμβανομένου του απαερωτή), πριν διέλθει και πάλι μέσα από τις σωληνώσεις του δέκτη. Σχετικά ασυνήθιστο είναι το γεγονός ότι επιστρατεύεται ένας επιπλέον στρόβιλος για την κίνηση της αντλίας του τροφοδοτικού νερού (στροβιλοαντλία), μετά τον απαερωτή.

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συστήματος παραγωγής ενέργειας υπολογίζεται ίσος με **36,65%**, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.8. Το γεγονός, ότι ο βαθμός αυτός προκύπτει μικρότερος απ' ότι στην περίπτωση του κυκλώματος χωρίς αναθέρμανση, ίσως οφείλεται εν' μέρει στην μία λιγότερη προθέρμανση που δέχεται το τροφοδοτικό νερό, πριν φτάσει στον δέκτη. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στους ακροδέκτες της γεννήτριας είναι **19698,67 Kwe**.

Για το ηλιοστατικό πεδίο, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ακριβώς το ίδιο με την περίπτωση του κυκλώματος χωρίς αναθέρμανση, ενώ για τον κεντρικό ηλιακό δέκτη το προηγούμενο μοντέλο χρειάστηκε να υποστεί μια μικρή αναπροσαρμογή στις συνθήκες της αναθέρμανσης:



Σχήμα 5.9 Αναπροσαρμογή του Μοντέλου του Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη για την Περίπτωση Κυκλώματος με Αναθέρμανση, στην Εφαρμογή MDK®.

Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, το αναπροσαρμοσμένο μοντέλο του ηλιακού δέκτη έχει δύο εισόδους και δύο εξόδους για το εργαζόμενο ρευστό. Εκτός από τις εξισώσεις που συνδέουν τη παροχή μάζας και την πίεση στην είσοδο και έξοδο, για κάθε ρεύμα που διέρχεται από τον δέκτη, η επιπλέον εξίσωση που εκφράζει τη ροή της θερμικής ισχύος αναπροσαρμόζεται ως εξής:

$$\eta_{receiver} \cdot \dot{Q}_{inc} = \dot{m}_1 \cdot (h_{out1_{rec}} - h_{in1_{rec}}) + \dot{m}_2 \cdot (h_{out2_{rec}} - h_{in2_{rec}})$$

,όπου ο δείκτης 1 αναφέρεται στο αρχικό ρεύμα εισόδου του νερού-ατμού στον δέκτη, ενώ ο δείκτης 2 στο ρεύμα αναθέρμανσης.

Προφανώς ισχύει για την θερμική ισχύ που απορροφάει το ρευστό ότι:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_1 \cdot (h_{out1_{rec}} - h_{in1_{rec}}) + \dot{m}_2 \cdot (h_{out2_{rec}} - h_{in2_{rec}})$$

Για τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κύκλωμα με αναθέρμανση, χρησιμοποιήθηκε βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου ίσος με 0,56 και βαθμός απόδοσης του κεντρικού ηλιακού δέκτη ίσος με 0,783, κατά την οδηγία της P.A.E..

Η θερμική ισχύς  $\dot{Q}_{inc}$  που φτάνει στην επιφάνεια του ηλιακού δέκτη, όπως μπορεί εύκολα κανείς να παρατηρήσει, δεν εξαρτάται από στοιχεία του κυκλώματος νερού-ατμού αλλά μόνο από το ηλιοστατικό πεδίο και την τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτό και στα δύο κυκλώματα που αναλύονται, η θερμική ισχύς  $\dot{Q}_{inc}$  ισούται με **68649,504 KWth**.

## 5.5 Χρήση της Εφαρμογής CSPsim® για τη Δημιουργία του Ηλιοστατικού Πεδίου

Ύστερα από βαθύτερη ενασχόληση με το υποσύστημα του ηλιοστατικού πεδίου και έχοντας κατά νου τον τρόπο σχεδιασμού αλλά και τις διάφορες απώλειες του, όπως παρουσιάστηκαν νωρίτερα, προέκυψε ως αδιαμφισβήτητο συμπέρασμα, ότι η απόδοση του παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα, ανά πάσα στιγμή, στη διάρκεια της ημέρας. Γνωρίζοντας το γεγονός αυτό, θελήσαμε να προσομοιώσουμε με έναν διαφορετικό τρόπο το ηλιοστατικό πεδίο της εγκατάστασης του Αθερινόλακκου. Ο ανεξάρτητος αυτός τρόπος προσομοίωσης θα μπορούσε να λειτουργήσει σαν μηχανισμός ελέγχου και επιβεβαίωσης της ορθότητας του μοντέλου του ηλιοστατικού πεδίου που είχε δημιουργηθεί νωρίτερα στην εφαρμογή MDK®, όταν και χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο ο βαθμός απόδοσης 56% σύμφωνα με τη P.A.E.

Για τον καινούργιο τρόπο προσομοίωσης του ηλιοστατικού πεδίου, αποφασίσαμε να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό του στο χώρο, στηριζόμενοι στα τεχνικά χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.3.

Η τοποθέτηση των ηλιοστατών στο πεδίο, δηλαδή ο προσδιορισμός των συντεταγμένων της θέσης τους, έγινε με τη βοήθεια της εφαρμογής CSPsim®, η οποία αποτέλεσε τη διπλωματική εργασία του κ. Πια Κτινογυκ, απόφοιτου του πανεπιστημίου Technion ITT

(Israel Institute of Technology). Τα δικαιώματα της εφαρμογής ανήκουν στο προαναφερθέν πανεπιστήμιο.

Ο τρόπος ,με τον οποίο λειτουργεί η εφαρμογή, είναι παρόμοιος με τη διαδικασία σχεδιασμού ενός ηλιοστατικού πεδίου βόρειας διάταξης που περιγράψαμε στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Η ακτινική απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών ηλιοστατών υπολογίζεται από τη συνθήκη μηδενικών απωλειών παρεμπόδισης του πεδίου, την οποία χρησιμοποιεί η εφαρμογή. Η προαναφερθείσα συνθήκη εξασφαλίζει ,επίσης, πολύ μικρές απώλειες σκίασης ,αν και κάτι τέτοιο αυξάνει την έκταση που απαιτείται για το ηλιοστατικό πεδίο.

Στο σχετικό παράθυρο δεδομένων εισόδου στην εφαρμογή CSPsim®, εισάγονται το ύψος του κεντρικού σημείου της επιφάνειας του ηλιακού δέκτη, οι διαστάσεις των ηλιοστατών και ο συντελεστής ανακλαστικότητας της επιφάνειας τους, η γωνία του κυκλικού τομέα μέσα στον οποίο θέλουμε ο αλγόριθμος να δημιουργήσει θέσεις για ηλιοστάτες (Limit angle), ο αριθμός των σειρών ηλιοστατών, το ποσοστό κάλυψης των σειρών (rings cover ratio), το υψόμετρο της τοποθεσίας, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος και η ώρα και ημερομηνία προσομοίωσης.

Από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, αυτό που ίσως απαιτεί επεξήγηση είναι το ποσοστό κάλυψης των σειρών. Το μέγεθος αυτό αφορά στις σειρές του ηλιοστατικού πεδίου, στις οποίες πρέπει να τοποθετηθούν επιπλέον ηλιοστάτες, όπως έγινε και στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλυτικά. Το ποσοστό κάλυψης μιας σειράς ηλιοστατών ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού της συνολικής ανακλαστικής τους επιφάνειας, προς το εμβαδόν που καταλαμβάνει όλη η σειρά. Όταν το ποσοστό αυτό ,για μία σειρά, πέσει κάτω από μια τιμή που έχει θέσει ο χρήστης, αυτόματα ο αλγόριθμος μειώνει τη γωνία αζιμουθιακού διακένου μεταξύ των ηλιοστατών της σειράς ,ώστε να τοποθετηθούν σε αυτή περισσότεροι ηλιοστάτες.

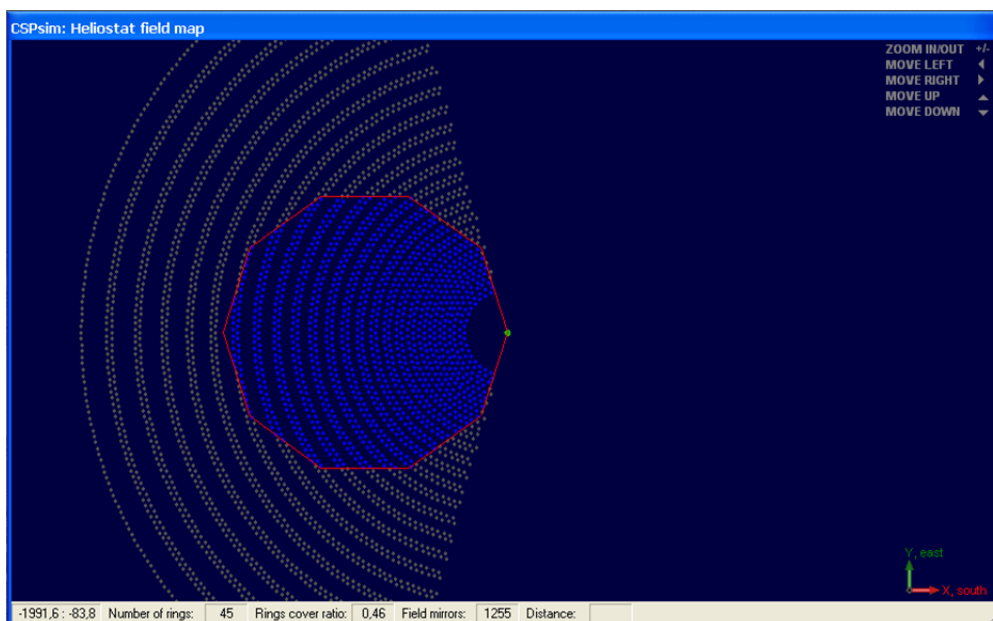
Το σχετικό παράθυρο της εφαρμογής CSPsim® με τα δεδομένα εισόδου που θέσαμε ,σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης του Αθερινόλακκου, παρουσιάζεται παρακάτω:

CSPsim: Input data	
Input parameters:	
Receiver aim point height:	165
Heliostat height:	9.57
Heliostat width:	12.88
Limit angle (max. 90 deg):	75
Number of rings:	45
Rings cover ratio:	0.4
Date [dd.mm.yyyy]:	21/6/2011
dT GMT:	3
Hour:	12
Longitude:	26.137
Latitude:	35.006
Power-plant elevation [km]:	0.2
Mirror reflectivity:	0.874

*Σχήμα 5.10 Δεδομένα Εισόδου στην Εφαρμογή CSPsim® για το Σχεδιασμό του Ηλιοστατικού Πεδίου του Πύργου Ηλιακής Ισχύος στον Αθερινόλακκο.*

Πριν προχωρήσει στον υπολογισμό των συντεταγμένων των ηλιοστατών, η εφαρμογή CSPsim® ζητάει επίσης από τον χρήστη να προσδιορίσει ,με διακριτά σημεία στο επίπεδο του εδάφους, το περίγραμμα των ορίων του ηλιοστατικού πεδίου, βόρεια του πύργου. Ακολουθώντας πάντα γραμμή παράλληλη με την εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος PS20 στη Σεβίλλη, επιλέγουμε ένα κυκλικό περίγραμμα για τα όρια του ηλιοστατικού πεδίου, με διαστάσεις τέτοιες ,ώστε να εμπεριέχει ακριβώς 1255 ηλιοστάτες.

Το ηλιοστατικό πεδίο που δημιουργείται τελικά από την εφαρμογή CSPsim® ,σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.6 που ακολουθεί. Διακρίνεται με κόκκινη γραμμή το περίγραμμα των ορίων του πεδίου.



Σχήμα 5.11 Ηλιοστατικό Πεδίο του Πύργου ηλιακής Ισχύος στον Αθερινόλακκο, μέσω της εφαρμογής CSPsim®.

Η χρησιμότητα της εφαρμογής CSPsim® έγκειται κυρίως στο γεγονός ,ότι μπορεί ,με σχετικά λίγα δεδομένα εισόδου και σε μικρό χρονικό διάστημα, να σχεδιάσει το ηλιοστατικό πεδίο ενός πύργου, τοποθετώντας τους ηλιοστάτες σε συγκεκριμένες θέσεις ,και επιστρέφοντας ως αποτέλεσμα στο χρήστη ένα αρχείο κειμένου με τις ακριβείς συντεταγμένες τους.

Για την περίπτωση του ηλιοστατικού πεδίου του σταθμού στον Αθερινόλακκο που μελετάμε, το αρχείο αυτό περιείχε τις 1255 τιμές των συντεταγμένων των ηλιοστατών στο επίπεδο.

## 5.6 Χρήση του Προγράμματος Tonatiuh® για την Προσομοίωση της Λειτουργίας του Ηλιοστατικού Πεδίου

Έχοντας προσδιορίσει με την εφαρμογή CSPsim® τις συντεταγμένες του καθενός από τους 1255 ηλιοστάτες του πεδίου, αυτό που έλειπε για την προσομοίωσή της λειτουργίας του ήταν να βρεθεί ένα κατάλληλο πρόγραμμα που θα την πραγματοποιούσε, συνδυάζοντας τη

μοντελοποίηση των ηλιοστατών με τα δεδομένα άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που είχαν συγκεντρωθεί για την περιοχή του Αθρινόλακκου.

Ύστερα από μια εκτεταμένη αναζήτηση για προγράμματα και κώδικες προσομοίωσης ηλιοστατικών πεδίων, καταλήξαμε στο πρόγραμμα ανίχνευσης ηλιακών ακτίνων Tonatiuh®. Η αρχή των μεθόδων ανίχνευσης ηλιακών ακτίνων, γνωστών και ως μεθόδων Monte Carlo, βασίζεται στην τυχαία επιλογή μιας δέσμης ακτίνων που προέρχονται από μία επιφάνεια  $\alpha$ , και τον προσδιορισμό αυτών που τελικά φτάνουν σε μία επιφάνεια  $\beta$ . Η ακτινοβολία σε μια στοιχειώδη επιφάνεια είναι ανάλογη του αριθμού των ηλιακών ακτίνων που προσκρούουν σε αυτή. [74]

Το πρόγραμμα Tonatiuh® περιλαμβάνει κώδικες που επιτρέπουν σε μια ανακλαστική επιφάνεια να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου, κάθε στιγμή, με τέτοιο τρόπο, ώστε να ανακλά τις προσπίπτουσες σε αυτήν ηλιακές ακτίνες προς ένα συγκεκριμένο σημείο εστίασης. Τις διαστάσεις και το σχήμα της ανακλαστικής επιφάνειας μπορεί να τα επιλέξει ο χρήστης μέσα από μια μεγάλη ποικιλία που διατίθεται. Η θέση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα υπολογίζεται, κάθε φορά, ανάλογα με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της τοποθεσίας, και την ώρα και ημέρα του έτους που επιλέγονται. Επιπλέον, το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίζει τη θερμική ισχύ που φτάνει σε μία επιφάνεια με συγκεκριμένο συντελεστή απορροφητικότητας, μέσω της ενέργειας των φωτονίων που προσκρούουν σε αυτή. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τον αριθμό των προσπιπτουσών ηλιακών ακτίνων, με τον οποίο θα γίνει η προσομοίωση σε κάθε περίπτωση. Προφανώς, όσο μεγαλύτερος αριθμός ακτίνων επιλεγεί, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ακρίβεια του αποτελέσματος που θα προκύψει.

Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά του προγράμματος, μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει την καταλληλότητα του για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός ηλιοστατικού πεδίου. Ας δούμε, όμως, για την περίπτωση του ηλιοστατικού πεδίου του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο, πως χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα.

Συνοπτικά, τα δεδομένα που χρειάστηκε να δοθούν ως είσοδοι ήταν:

- ✓ Ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου
- ✓ Οι συντεταγμένες των ηλιοστατών
- ✓ Οι διαστάσεις των ηλιοστατών
- ✓ Ο συντελεστής αντανάκλαστικότητας των ηλιοστατών
- ✓ Το ύψος του πύργου
- ✓ Οι διαστάσεις της απορροφητικής επιφάνειας του δέκτη
- ✓ Το γεωγραφικό μήκος/πλάτος
- ✓ Η ώρα/ημερομηνία προσομοίωσης
- ✓ Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία

Το βασικό σκεπτικό ήταν να τοποθετηθούν οι ηλιοστάτες στο πεδίο, στις συντεταγμένες που είχε ορίσει η εφαρμογή CSPsim®, και μέσω της μεθόδου ανίχνευσης ηλιακών ακτίνων να ρυθμιστούν, ώστε να εστιάζουν τις ανακλώμενες ακτίνες στο κέντρο της

απορροφητικής, επίπεδης επιφάνειας ,διαστάσεων 15×15 m, του εξωτερικού δέκτη, στην κορυφή του πύργου ύψους 165 m. Αποτέλεσμα της προσομοίωσης θα ήταν ο προσδιορισμός της θερμικής ισχύος που θα έφτανε εκεί, μέσω της ενέργειας των φωτονίων.

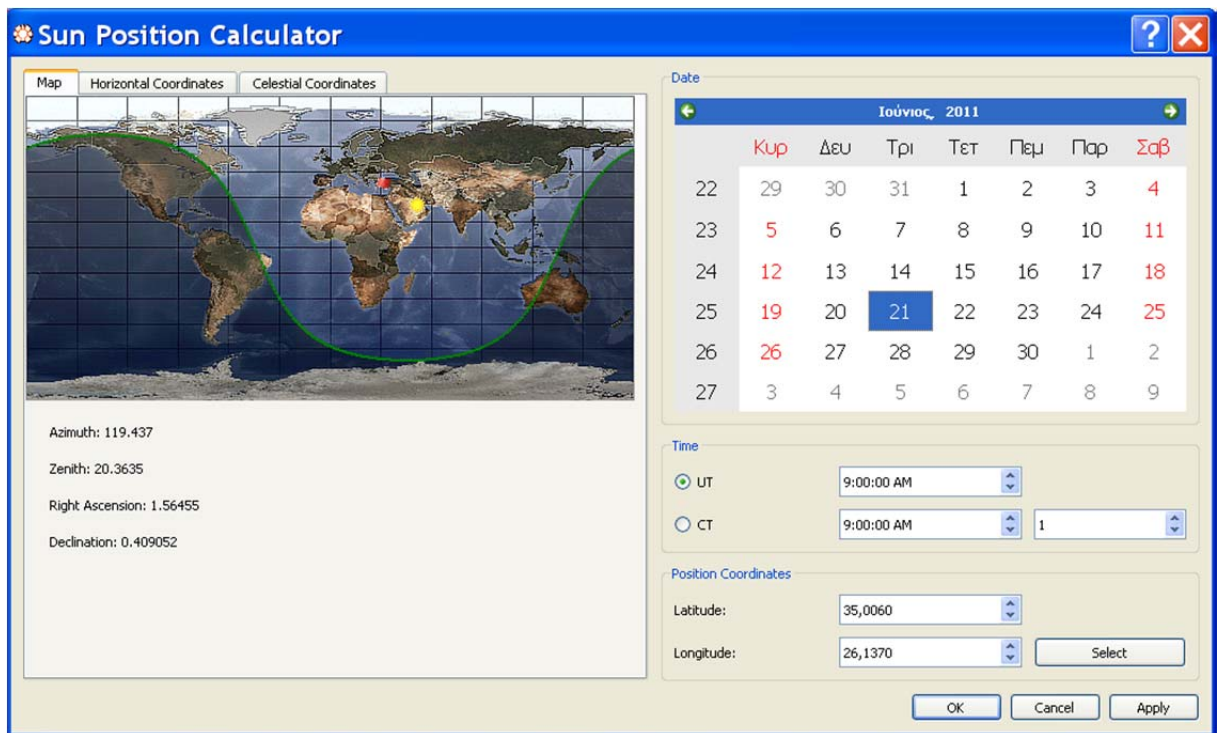
Αποφασίσαμε χάριν απλότητας, ότι ο κεντρικός ηλιακός δέκτης θα είναι επίπεδης επιφάνειας και εξωτερικός. Αυτή η παραδοχή έγινε ,λόγω του ότι η μοντελοποίηση ενός δέκτη κοιλότητας θα ήταν ασφαλώς αρκετά δύσκολη, εξαιτίας της σύνθετης γεωμετρίας του. Εξάλλου, ο βαθμός απόδοσης του κεντρικού ηλιακού δέκτη θα ετίθετο ίσος με την προτεινόμενη τιμή 0,783 του οδηγού αξιολόγησης της P.A.E. τόσο στην περίπτωση του μοντέλου του σταθμού ,που κατασκευάστηκε με το πρόγραμμα IPSEpro® και την εφαρμογή MDK®, όσο και στην περίπτωση της παρούσας προσομοίωσης. Σκοπός της σύγκρισης και του ελέγχου σύγκλισης των αποτελεσμάτων των δύο περιπτώσεων είναι να εξάγουν συμπεράσματα για την απόδοση του ηλιοστατικού πεδίου και όχι του δέκτη.

Ο σχεδιασμός του μοντέλου στο πρόγραμμα Tonatiuh® ξεκίνησε με τον πύργο ύψους 165 m ,στην κορυφή του οποίου τοποθετήσαμε την επιφάνεια του ηλιακού δέκτη, μηδενικής ανακλαστικότητας και διαστάσεων 15×15 m. Η βάση του πύργου ορίστηκε ως η αρχή του συστήματος συντεταγμένων (0,0). Στη συνέχεια, ορίστηκαν μία προς μία οι θέσεις των ηλιοστατών του πεδίου, από τα 1255 ζεύγη συντεταγμένων που είχαμε εξασφαλίσει μέσω της εφαρμογής CSPsim®. Σε κάθε μία από αυτές τις θέσεις τοποθετήθηκε ο ίδος ηλιοστάτης επίπεδης επιφάνειας, με διαστάσεις 12,88×9,57 m και συντελεστή ανακλαστικότητας 0,874. Αφότου σχεδιάστηκαν ο πύργος και το ηλιοστατικό πεδίο, ενεργοποιήθηκε ο ανιχνευτής ηλιακών ακτίνων του κάθε ηλιοστάτη ,ώστε ο τελευταίος να μπορεί να κινεί την επιφάνεια του ανάλογα με την τροχιά του ηλίου. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης απέμενε μόνο να δοθούν οι γεωγραφικές συντεταγμένες της εγκατάστασης, η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, η ώρα και η ημερομηνία προσομοίωσης και ο αριθμός των ηλιακών ακτίνων που θα χρησιμοποιούνταν για αυτή.

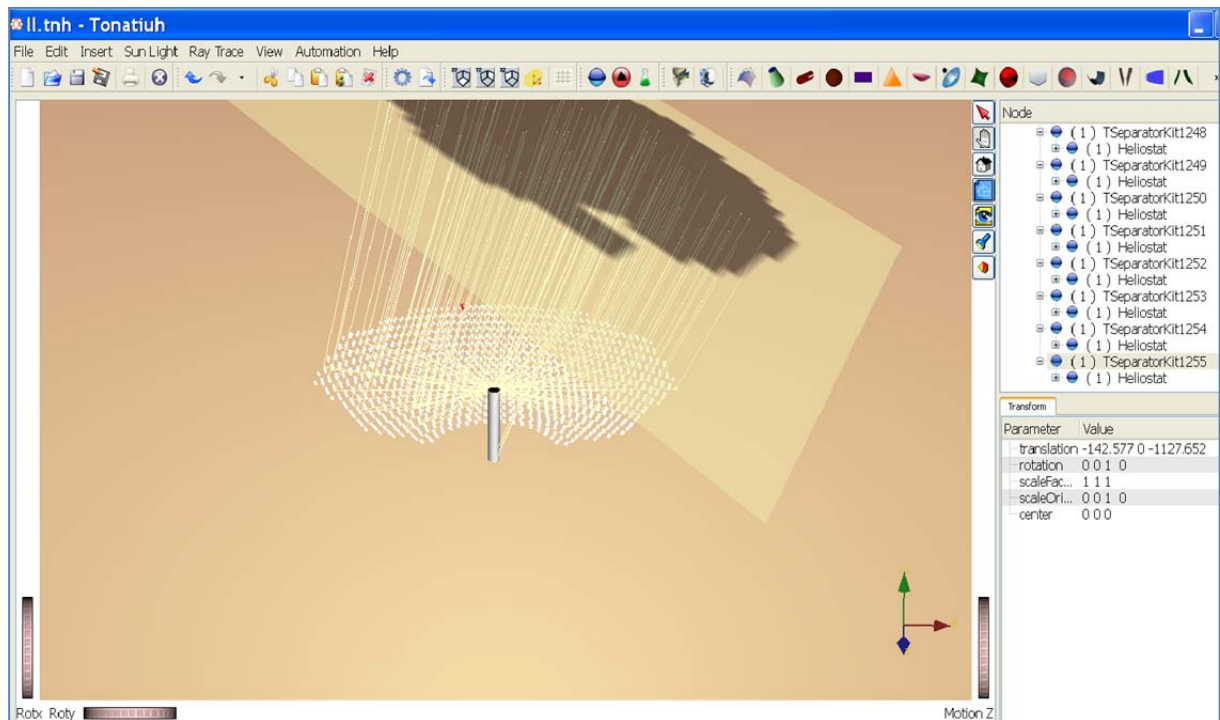
Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο σημείο σχεδιασμού της εγκατάστασης του Αθρινόλακκου(12:00 η ώρα το μεσημέρι της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου), με τιμή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας 814 W/m<sup>2</sup> και για αριθμό 200.000 ακτίνων, έτσι ώστε να υπάρχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια υπολογισμών.

Με τα παραπάνω δεδομένα, η θερμική ισχύς που φτάνει στην επιφάνεια του κεντρικού ηλιακού δέκτη υπολογίστηκε ίση με  $\dot{Q}_{inc} \approx 81863,28 \text{ KWth}$ , ως το γινόμενο του αριθμού των φωτονίων που προσκρούουν σε αυτή και της ενέργειας φωτονίου.

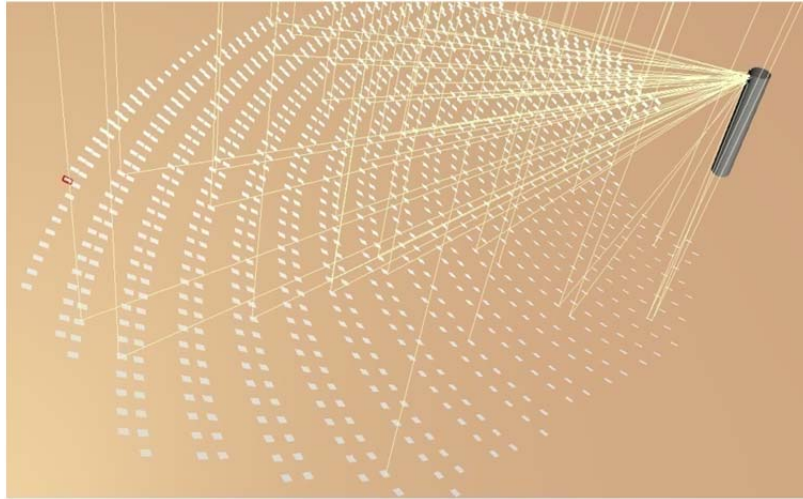
Στη συνέχεια παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από τη διαδικασία προσομοίωσης της λειτουργίας του ηλιοστατικού πεδίου της εγκατάστασης, στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος Tonatiuh®:



Σχήμα 5.12 Εισαγωγή Δεδομένων Γεωγραφικού Μήκους/Πλάτους και Ημερομηνίας/Ωρας.



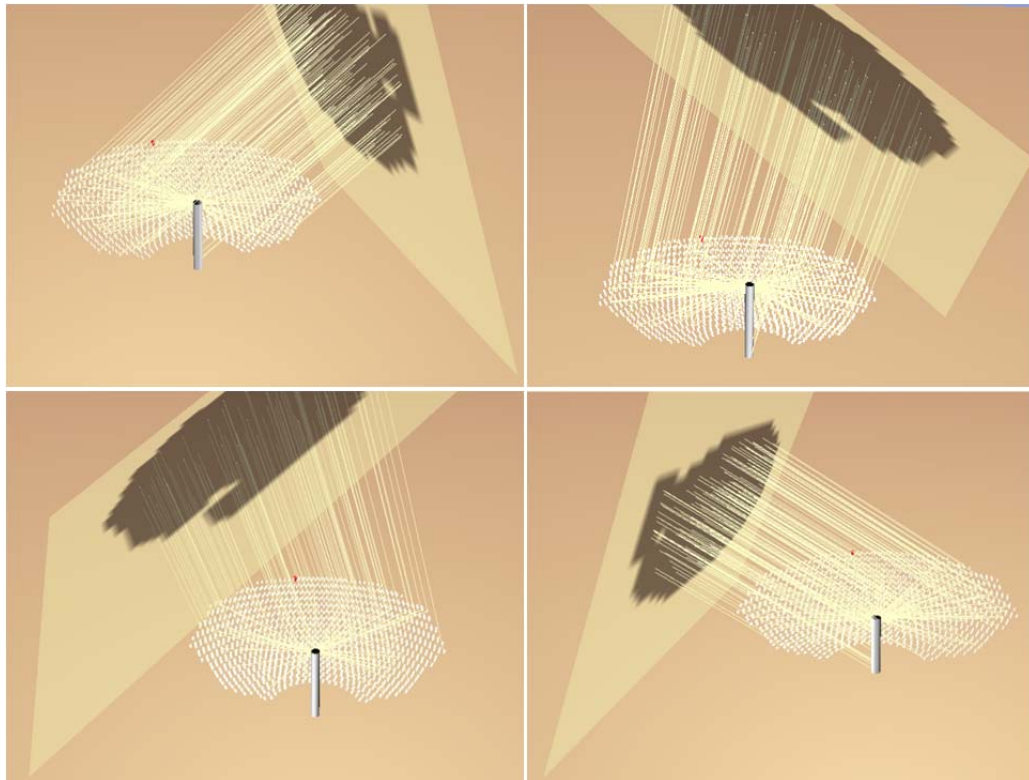
Σχήμα 5.13 Προσομοίωση της Λειτουργίας του Ηλιοστατικού Πεδίου της Εγκατάστασης Πύργου Ηλιακής Ισχύος στον Αθηνινόλακκο, μέσω του Προγράμματος Tonatiuh®.



Σχήμα 5.14 Απεικόνιση της Διάταξης του Ηλιοστατικού Πεδίου στο Πρόγραμμα Tonatiuh®.

Το πρόγραμμα Tonatiuh® χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας του ηλιοστατικού πεδίου της εγκατάστασης του Αθερινόλακκου και σε περιπτώσεις εκτός του σημείου σχεδιασμού. Ως αποτέλεσμα, προέκυπτε πάντα ο αριθμός των φωτονίων πάνω στην απορροφητική επιφάνεια του κεντρικού δέκτη και η ενέργεια φωτονίου, επιτρέποντας τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος στο σημείο εκείνο.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται ,χαρακτηριστικά, προσομοιώσεις του ηλιοστατικού πεδίου ,που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Tonatiuh®, για διαφορετικές ώρες της ημέρας:



Σχήμα 5.15 Προσομοίωση της Λειτουργίας του Ηλιοστατικού Πεδίου σε διαφορετικές Ώρες της Ημέρας.



## 5.7 Έλεγχος Σύγκλισης των Αποτελεσμάτων και Ολοκλήρωση του Μοντέλου

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω τρία τελευταία κεφάλαια, παρουσιάζουμε έναν χαρακτηριστικό πίνακα με τις δύο βασικές μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν:

Μεθοδολογία	Δημιουργία μοντέλου της εγκατάστασης του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο	Προσομοίωση της λειτουργίας του ηλιοστατικού πεδίου της εγκατάστασης, με χρήση τεχνικών χαρακτηριστικών του
Εφαρμογές/Προγράμματα	IPSEpro®, MDK®	CSPsim®, Tonatiuh®
Βαθμοί απόδοσης	$\eta_{field}=0,56$ $\eta_{rec}=0,783$ } Σύμφωνα με τον οδηγό αξιολόγησης της P.A.E.	Ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου $\eta_{field}$ δεν υπολογίζεται άμεσα
Θερμική ισχύς στην επιφάνεια του κεντρικού ηλιακού δέκτη, για το σημείο σχεδιασμού του σταθμού	<b>68649,504 KWth</b>	<b>81863,28KWth</b>

Πίνακας 5.1 Οι Βασικές Μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν και τα Αποτελέσματά τους.

Από τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνεται μία αρκετά σημαντική απόκλιση ,της τάξεως των 13213,776 KWth, μεταξύ των δύο διαφορετικών μεθοδολογιών, όσο αφορά στο μέγεθος της θερμικής ισχύος που φτάνει στην επιφάνεια του ηλιακού δέκτη ,μέσω του ηλιοστατικού πεδίου.

Για έναν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της τάξεως του 37% για το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παραπλήσιο δηλαδή με τις τιμές που συναντήσαμε στα κυκλώματα του κεφαλαίου 5.4, αυτή η διαφορά στη θερμική ισχύ θα οδηγούσε σε απόκλιση στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ περίπου 3,8 MWe. Η τιμή αυτή είναι αρκετά μεγάλη, αν αναλογιστεί κανείς και το γεγονός ότι η ονομαστική ισχύς του σταθμού είναι 20 MW.

Προκειμένου να εντοπίσουμε την αιτία αυτής της απόκλισης, εστίασαμε την προσοχή μας στον τρόπο μοντελοποίησης του ηλιοστατικού πεδίου στην εφαρμογή MDK®. Γνωρίζοντας από την μέχρι τώρα ανάλυση ,που έχει γίνει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ότι ο βαθμός απόδοσης ενός ηλιοστατικού πεδίου χαρακτηρίζεται από υψηλής συχνότητας μεταβλητότητα σε συνάρτηση με το χρόνο, αποφασίσαμε ,ότι δεν θα τον χαρακτήριζε απόλυτα η χρησιμοποίηση της σταθερής τιμής 0,56 ,που προτείνει για αυτόν η P.A.E.. Πιθανόν βέβαια, η τιμή 0,56 να αντιπροσωπεύει τον ετήσιο βαθμό απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, δηλαδή τον μέσο όρο των τιμών του στη διάρκεια ενός έτους. Σε κάθε περίπτωση όμως, όταν πραγματοποιείται η προσομοίωση της λειτουργίας της ηλιοθερμικής εγκατάστασης ,για συγκεκριμένη ημέρα και ώρα, είναι προτιμότερο και πιο ακριβές να υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του πεδίου εκείνη τη στιγμή, ανάλογα με τη θέση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα. Θα διαπιστωθεί και στο επόμενο κεφάλαιο πως ,ακόμα και για ετήσιο βαθμό απόδοσης ηλιοστατικού πεδίου, η τιμή 0,56 ενδέχεται να αντιπροσωπεύει μια αρκετά συντηρητική προσέγγιση.

Ο βαθμός απόδοσης του κεντρικού ηλιακού δέκτη, όπως διαφαίνεται και μέσα από το σχετικό με τις απώλειες κεφάλαιο, παρουσιάζει και αυτός κάποια μεταβλητότητα με τον

χρόνο, ωστόσο όχι τόσο μεγάλη όσο το ηλιοστατικό πεδίο. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μελέτης, η τιμή 0,783 του βαθμού απόδοσης του δέκτη, που προτείνεται από τη P.A.E. στον οδηγό αξιολόγησης, θεωρήθηκε αρκετά αξιόπιστη και υπετέθη σταθερή για τις προσομοιώσεις που έγιναν. Η μεταβλητότητα του βαθμού απόδοσης του ηλιακού δέκτη με τον χρόνο ,θα μπορούσε να μελετηθεί σε μία καινούργια εξ' ολοκλήρου εργασία, με τη δημιουργία κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας του.

Για την κατασκευή ,λοιπόν, ενός πιο ολοκληρωμένου και ακριβούς μοντέλου της εγκατάστασης πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο, χρειαζόταν, στο αρχικό μοντέλο που είχαμε δημιουργήσει με την εφαρμογή MDK® και το πρόγραμμα IPSEpro®, να θέτουμε κάθε φορά την τιμή του βαθμού απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, που προέκυπτε για την δεδομένη χρονική στιγμή που γινόταν η προσομοίωση.

Ο γενικός ισολογισμός ισχύος που μπορεί να γραφεί για μία εγκατάσταση ηλιακού πύργου είναι:

$$\dot{Q}_{avail} \cdot \eta_{field} \cdot \eta_{rec} \cdot \eta_{el} = P_{el}$$

$$\dot{Q}_{avail} \cdot \eta_{field} = \dot{Q}_{inc}$$

$$\dot{Q}_{inc} \cdot \eta_{rec} = \dot{Q}_u$$

,όπου  $\dot{Q}_{avail}$  είναι η συνολική ισχύς που προσπίπτει στο ηλιοστατικό πεδίο ,μέσω της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Δηλαδή:

$$\dot{Q}_{avail} = N \cdot A_{helio\,stat} \cdot I$$

,όπου N ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου,  $A_{helio\,stat}$  το εμβαδόν της επιφάνειας του ηλιοστάτη και I η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Παρατηρούμε, ότι την τιμή  $\dot{Q}_{avail}$  είμαστε σε θέση να τη γνωρίζουμε κάθε στιγμή ,για το ηλιοστατικό πεδίο της εγκατάστασης του Αθρινόλακκου, εφόσον έχουμε δεδομένα άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας της περιοχής ανά διαστήματα μιας ώρας. Επίσης ,όπως είδαμε και νωρίτερα, το πρόγραμμα Tonatiuh® έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τη θερμική ροή  $\dot{Q}_{inc}$  που φτάνει στην επιφάνεια του κεντρικού ηλιακού δέκτη.

Ξέροντας ,λοιπόν, την τιμή των  $\dot{Q}_{avail}$  και  $\dot{Q}_{inc}$  ,ανά διαστήματα μίας ώρας, για τον πύργο ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο, μπορούμε από τη σχέση  $\dot{Q}_{avail} \cdot \eta_{field} = \dot{Q}_{inc}$  να υπολογίζουμε τον βαθμό απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου του και να τον θέτουμε ,εν συνεχεία, ως δεδομένο εισόδου στο μοντέλο που κατασκευάσαμε με τη βοήθεια του προγράμματος IPSEpro® και της εφαρμογής MDK®.

Έτσι, για το σημείο σχεδιασμού της εγκατάστασης του Αθρινόλακκου ισχύει:

$$\dot{Q}_{avail} = N \cdot A_{helio\,stat} \cdot I = 1255 \cdot 120 \cdot 0,814 = 122588,4 \text{ KWth}$$

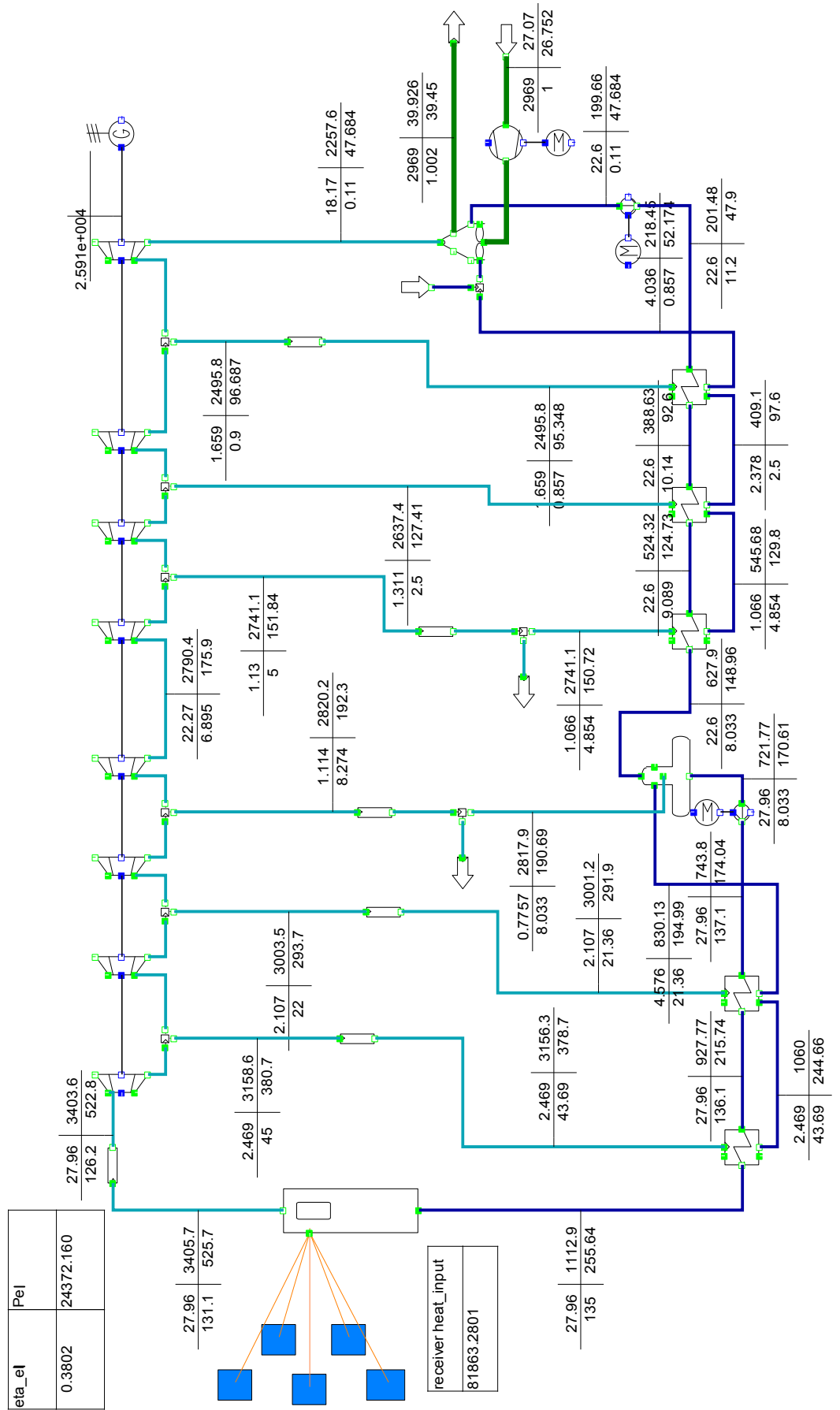
Από την προσομοίωση του ηλιοστατικού πεδίου ,για το σημείο σχεδιασμού, στο πρόγραμμα Tonatiuh® είχε προκύψει:

$$\dot{Q}_{inc} \approx 81863,28 \text{ KWth}$$

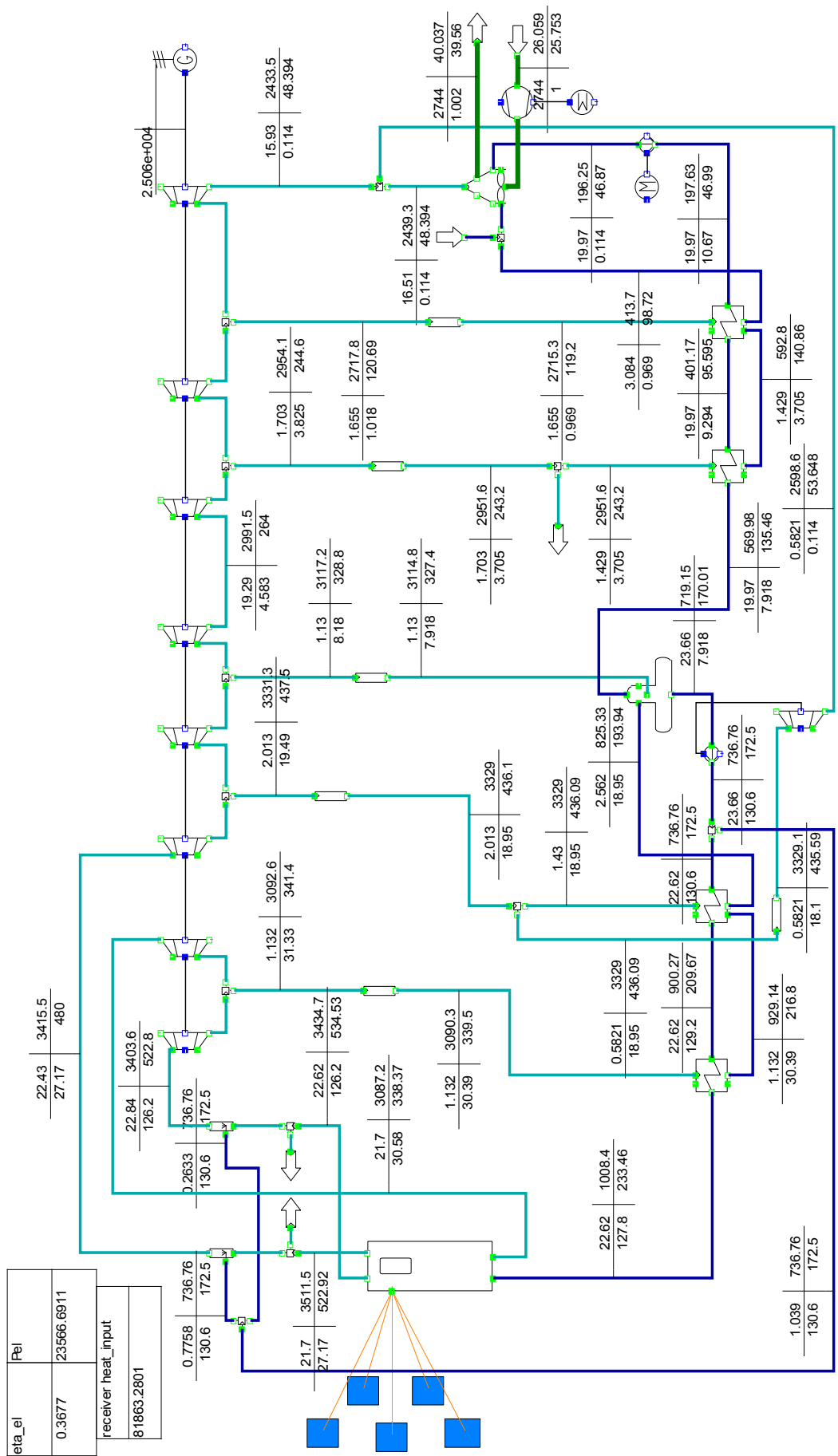
Επομένως, ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου στις 12 το μεσημέρι της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου προκύπτει:

$$\eta_{field} = \frac{\dot{Q}_{inc}}{\dot{Q}_{avail}} = \frac{81863,28}{122588,4} \approx 0.66779$$

Το ολοκληρωμένο μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρερινόλακκο παρουσιάζεται στο σημείο σχεδιασμού του, στις σελίδες που ακολουθούν, τόσο για κύκλωμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αναθέρμανση, όσο και χωρίς. Η διαφορά σε σχέση με το μοντέλο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5.4, έγκειται στον αναπροσαρμοσμένο βαθμό απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου.



Σχήμα 5.16 Αναπροσαρμοσμένο Μοντέλο του Πύργου Ηλιακής Ισχύος στον Αθρινόλακκο, με Κύκλωμα Νερού-Ατμού χωρίς χωρίς Αναθέρμανση (21<sup>η</sup> Ιουνίου, 12:00 ή 9:00GMT).



Σχήμα 5.17 Αναπροσαρμοσμένο Μοντέλο του Πύργου Ηλιακής Ισχύος στον Αθερνώλακκο, με Αναθέριμανση στο Κύκλωμα Νερού-Ατμού (21<sup>η</sup> Ιουνίου, 12:00 ή 9:00GMT).

Συγκρίνοντας τα παραπάνω σχήματα με αυτά της παραγράφου 5.4, βλέπουμε ,χαρακτηριστικά, τη σημαντική επίδραση της αλλαγής του βαθμού απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου στην μεικτή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ του σταθμού.

## 5.8 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος κατά τη Διάρκεια της Τυπικής Θερινής και Χειμερινής Ημέρας

Ένα πολύ χαρακτηριστικό διάγραμμα της απόδοσης ενός συστήματος κεντρικού ηλιακού δέκτη, είναι αυτό της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο σε συνάρτηση με το χρόνο ( $P_{el\_net} - t$ ).

Λόγω της μεταβλητότητας του βαθμού απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου με την ώρα, η δυνατότητα σχεδιασμού τέτοιων διαγραμμάτων ήταν εξ' αρχής περιορισμένη. Για κάθε διαφορετική ώρα της ημέρας ,και συνεπώς διαφορετική τιμή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και βαθμού απόδοσης του πεδίου, θα χρειαζόταν και μία νέα προσομοίωση στο πρόγραμμα Tonatiuh®, με τα καινούργια δεδομένα. Μια τέτοια διαδικασία δεν ήταν αυτοματοποιημένη και ,όπως κανείς καταλαβαίνει, στα πεπερασμένα χρονικά όρια εκπόνησης μίας διπλωματικής εργασίας δεν θα μπορούσε να επαναληφθεί πολλές φορές.

Αποφασίσαμε έτσι, να σχεδιάσουμε το διάγραμμα της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τη διάρκεια μιας τυπικής θερινής και μιας τυπικής χειμερινής μέρας.

Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε ως τυπική θερινή μέρα η 21<sup>η</sup> Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο), και ως τυπική χειμερινή μέρα η 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο).

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε για τα διαφορετικά δεδομένα κάθε ώρας, είχε τα εξής διακριτά βήματα:

- Προσομοίωση της λειτουργίας του ηλιοστατικού πεδίου της εγκατάστασης του Αθερινόλακκου στο πρόγραμμα Tonatiuh® ,για τη συγκεκριμένη ώρα και την τιμή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε αυτή.
- Προσδιορισμός της θερμικής ισχύος  $\dot{Q}_{inc}$  στην επιφάνεια του κεντρικού δέκτη, ως αποτέλεσμα της προαναφερθείσας προσομοίωσης.
- Υπολογισμός του βαθμού απόδοσης  $\eta_{field}$  του ηλιοστατικού πεδίου από τον λόγο της θερμικής ισχύος  $\dot{Q}_{inc}$  στην επιφάνεια του κεντρικού δέκτη, προς την προσπίπτουσα ισχύ ,λόγω ακτινοβολίας, στο πεδίο  $\dot{Q}_{avail}$ .
- Προσθήκη της τιμής της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και του βαθμού απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου ,που υπολογίστηκε για την συγκεκριμένη ώρα, στο μοντέλο του σταθμού στο πρόγραμμα IPSEpro®, και προσδιορισμός της παραγόμενης μεικτής ηλεκτρικής ισχύος στη γεννήτρια του.

- Πολλαπλασιασμός της παραγόμενης μεικτής ηλεκτρικής ισχύος με τον συντελεστή ιδιοκαταναλώσεων 0,884 που προτείνει η P.A.E για ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις. Αν η τιμή που προκύπτει, ξεπερνάει την ονομαστική ισχύ των 20 MWe του σταθμού, πρέπει η τιμή της προσδιδόμενης στο δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος να τίθεται ίση με 20 MWe και η περισσευούμενη ισχύς να απορρίπτεται, εφόσον δεν υπάρχει σύστημα αποθήκευσης στην εγκατάσταση. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η τιμή που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό είναι η καθαρή ηλεκτρική ισχύς στο δίκτυο.

Με τη διαδικασία αυτή υπολογίστηκε η προσδιδόμενη στο δίκτυο ηλεκτρική ισχύς από το σταθμό, για κάθε ώρα της τυπικής θερινής και χειμερινής ημέρας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στους πίνακες που ακολουθούν:

Μήνας	Ημέρα	Ωρα(GMT)	DNI(W/m <sup>2</sup> )	$\dot{Q}_{avail}$ (KWth)	$\dot{Q}_{inc}$ (KWth)	$\eta_{field}$	Pel (1) (KWe)	Pel (1)* $\eta_{par}$	Pel_net (1) (KWe)	Pel (2) (KWe)	Pel (2)* $\eta_{par}$	Pel_net (2) (KWe)
Ιούνιος	21	1	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Ιούνιος	21	2	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Ιούνιος	21	3	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Ιούνιος	21	4	10	1506	0	-	0	0	0	0	0	0
Ιούνιος	21	5	23	3463,8	0	-	0	0	0	0	0	0
Ιούνιος	21	6	412	62047,2	34914,7	0,562712	10276,67	9084,5763	9084,576	9821,75	8682,427	8682,427
Ιούνιος	21	7	634	95480,4	56317,74	0,589836	16702,56	14765,063	14765,06	16088,6	14222,322	14222,32
Ιούνιος	21	8	751	113100,6	71445,34	0,631697	21244,35	18780,005	18780,01	20517,1	18137,116	18137,12
Ιούνιος	21	9	814	122588,4	81863,28	0,66779	24372,16	21544,989	20000	23566,69	20832,954	20000
Ιούνιος	21	10	836	125901,6	86537,07	0,687339	25775,38	22785,436	20000	24934,82	22042,381	20000
Ιούνιος	21	11	837	126052,2	84797,6	0,672718	25253,13	22323,767	20000	24425,64	21592,266	20000
Ιούνιος	21	12	756	113853,6	72807,79	0,639486	21653,4	19141,606	19141,61	20915,93	18489,682	18489,68
Ιούνιος	21	13	745	112197	69356,33	0,618166	20617,16	18225,569	18225,57	19905,58	17596,533	17596,53
Ιούνιος	21	14	701	105570,6	62017,7	0,587452	18413,87	16277,861	16277,86	17757,27	15697,427	15697,43
Ιούνιος	21	15	558	84034,8	44716,78	0,532122	13219,57	11686,1	11686,1	12692,12	11219,834	11219,83
Ιούνιος	21	16	289	43523,4	19427,07	0,446359	5626,79	4974,0824	4974,082	5283,01	4670,1808	4670,181
Ιούνιος	21	17	60	9036	0	-	0	0	0	0	0	0
Ιούνιος	21	18	3	451,8	0	-	0	0	0	0	0	0
Ιούνιος	21	19	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Ιούνιος	21	20	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 5.2 Προσδιδόμενη Ηλεκτρική Ισχύς στο Δίκτυο από τον Πύργο Ηλιακής Ισχύος στον Αθρινόλακκο, για την τυπική θερινή Ημέρα.

Στον παραπάνω πίνακα ,και στον αντίστοιχο που ακολουθεί για την τυπική χειμωνιάτικη μέρα, επισημαίνεται ,πως ο δείκτης (1) αναφέρεται στο μοντέλο του σταθμού με κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, ενώ ο δείκτης (2) στο μοντέλο του σταθμού με αναθέρμανση στο κύκλωμα νερού-ατμού.

Από τον μέσο όρο των βαθμών απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, για τις ώρες που ο σταθμός παράγει ενέργεια, προκύπτει:

$$\eta_{field_{21th June}} = 0.603243$$

Η τιμή του βαθμού απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου για την τυπική θερινή ημέρα, θα μπορούσαμε να πούμε πως είναι ικανοποιητικά υψηλή, συγκρινόμενη με τιμές γνωστών εγκαταστάσεων με πύργο ηλιακής ισχύος.

Για την προσομοίωση της λειτουργίας του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος, κατά την τυπική χειμερινή μέρα, το τέταρτο βήμα της διαδικασίας που περιγράφηκε νωρίτερα περιλαμβάνει επιπλέον κάποιες αναπροσαρμογές που πρέπει να γίνουν στο τμήμα του συμπυκνωτή.

Από τις βάσεις δεδομένων της ιστοσελίδας [72] βρίσκουμε πως μία τυπική τιμή της θερμοκρασίας του αέρα για την περιοχή του Αθρινόλακκου, το μεσημέρι της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου, είναι 18,162°C. Την τιμή αυτή την τοποθετούμε στην είσοδο του αέρα στον συμπυκνωτή, για το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.16, με την ανάλογη φυσικά τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο ηλιοστατικό πεδίο. Αλλάζοντας, όμως, τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο συμπυκνωτή, αλλάζει και η παροχή μάζας του, λόγω της αλλαγής της πυκνότητας του. Η θερινή και η χειμερινή θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του συμπυκνωτή συνδέονται με τη σχέση  $\rho_{sum} \cdot T_{sum} = \rho_{win} \cdot T_{win}$ , μέσω της καταστατικής εξίσωσης. Από την προηγούμενη σχέση μπορεί να προσδιοριστεί η πυκνότητα του αέρα για τη χειμερινή θερμοκρασία εισόδου του. Η παροχή όγκου του αέρα στον συμπυκνωτή, ωστόσο, παραμένει σταθερή σε καλοκαίρι και χειμώνα, οπότε η παροχή μάζας του, κατά τη χειμερινή λειτουργία, προκύπτει από την εξίσωση:

$$\dot{V}_{sum} = \dot{V}_{win} \Rightarrow \frac{\dot{m}_{sum}}{\rho_{sum}} = \frac{\dot{m}_{win}}{\rho_{win}}$$

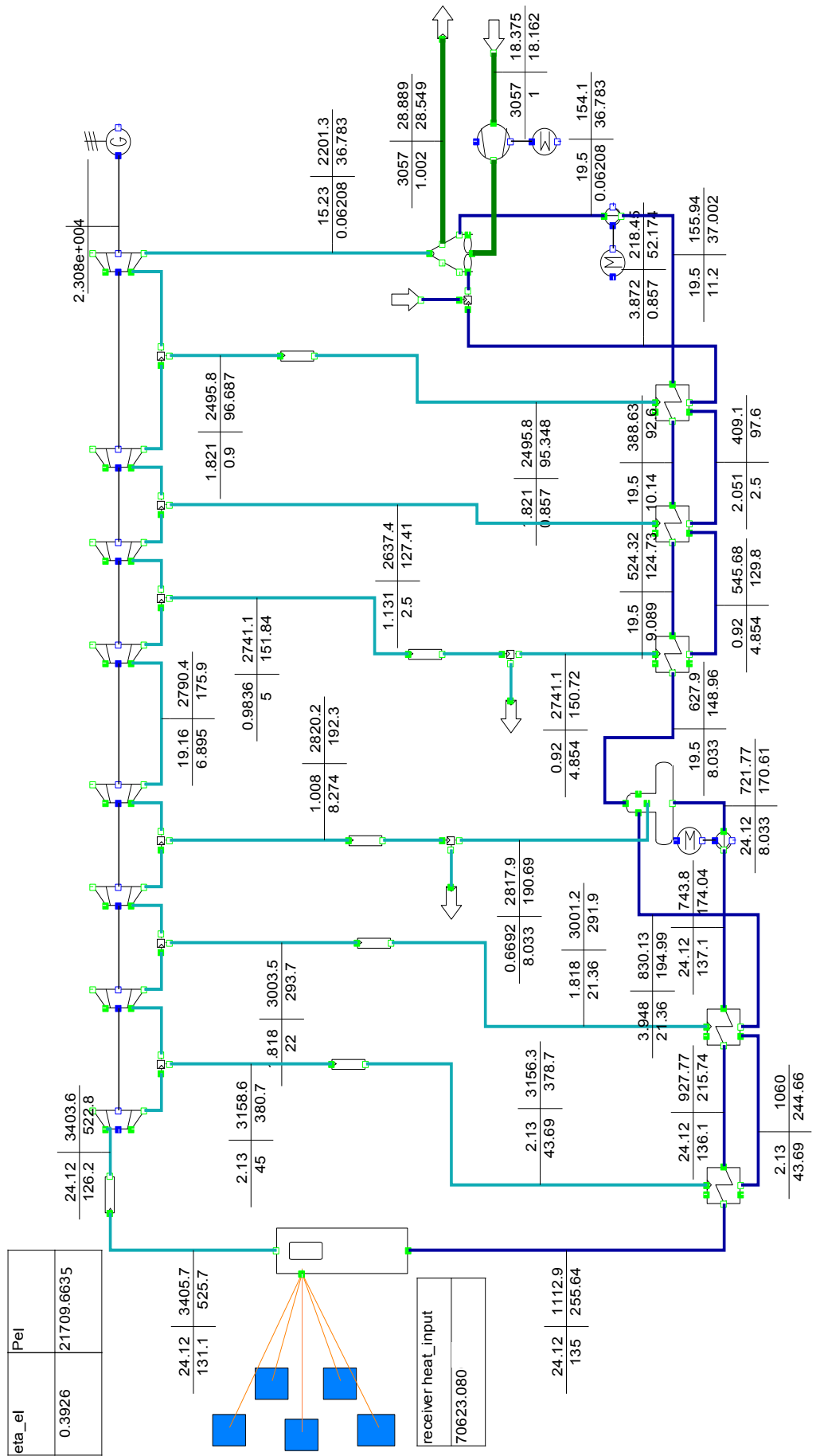
Επίσης, αλλάζοντας τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο συμπυκνωτή, αλλάζει και η θερμοκρασία εξόδου του και κατά συνέπεια η διαφορά θερμοκρασίας  $dt_{out}$ , που ισούται με την θερμοκρασία εισόδου του ατμού στον συμπυκνωτή, μείον τη θερμοκρασία εξόδου του αέρα από αυτόν. Σκοπός μας είναι να διατηρήσουμε την τιμή  $dt_{out}$  σταθερή κατά τη μετάβαση του μοντέλου από την θερινή στη χειμερινή λειτουργία. Για να το πετύχουμε αυτό, αλλάζουμε την θερμοκρασία εξόδου του ατμού από το στρόβιλο τόσο, ώστε το  $dt_{out}$  να επανέλθει στην τιμή που είχε για την καλοκαιρινή λειτουργία.

Η παραπάνω μεθοδολογία πρέπει να εφαρμόζεται όταν αλλάζει η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον συμπυκνωτή. Για το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος που παρουσιάστηκε νωρίτερα, στο σημείο σχεδιασμού του, η μεθοδολογία εφαρμόζεται, με τον ίδιο τρόπο, και για τις δύο εκδοχές των κυκλωμάτων του, δηλαδή με αναθέρμανση και χωρίς.

Στις ακόλουθες σελίδες παρουσιάζονται, ενδεικτικά, οι δύο εκδοχές του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος του Αθρινόλακκου, για τη λειτουργία του στις 12:00 το μεσημέρι της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου.

Η προσομοίωση της λειτουργίας της εγκατάστασης για τη δεδομένη ημέρα και ώρα θα χρειαστεί και παρακάτω, στο κεφάλαιο 5.10.





Σχήμα 5.18 Αναπροσαρμοσμένο Μοντέλο του Πύργου Ηλιακής Ισχύος στον Αθρινόδιακκο, με Κύκλωμα Νερού-Ατιμού χωρίς χωρίς Αναθέρμανση (21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου, 12:00 ή 10:00GMT).



Μήνας	Ημέρα	Ωρα(GMT)	DNI(W/m <sup>2</sup> )	Q <sub>avail</sub> (KWth)	Q <sub>inc</sub> (KWth)	η <sub>field</sub>	Pel (1) (KWe)	Pel(1)*η <sub>par</sub>	Pel <sub>net</sub> (1) (KWe)	Pel (2) (KWe)	Pel(2)*η <sub>par</sub>	Pel <sub>net</sub> (2) (KWe)
Δεκέμβριος	21	3	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Δεκέμβριος	21	4	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Δεκέμβριος	21	5	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Δεκέμβριος	21	6	9	1355,4	0	-	0	0	0	0	0	0
Δεκέμβριος	21	7	120	18072	0	-	0	0	0	0	0	0
Δεκέμβριος	21	8	397	59788,2	39492,45	0,660539	12040,02	10643,378	10643,38	11531,96	10194,253	10194,25
Δεκέμβριος	21	9	596	89757,6	62982,45	0,701695	19336,37	17093,351	17093,35	18639,16	16477,017	16477,02
Δεκέμβριος	21	10	666	100299,6	70623,08	0,704121	21709,66	19191,339	19191,34	20950,55	18520,286	18520,29
Δεκέμβριος	21	11	722	108733,2	76770,97	0,706049	23619,29	20879,452	20000	22810,43	20164,42	20000
Δεκέμβριος	21	12	644	96986,4	65609,32	0,67648	20152,32	17814,651	17814,65	19433,85	17179,523	17179,52
Δεκέμβριος	21	13	458	68974,8	42442,15	0,615328	12956,24	11453,316	11453,32	12424,57	10983,32	10983,32
Δεκέμβριος	21	14	189	28463,4	0	-	0	0	0	0	0	0
Δεκέμβριος	21	15	44	6626,4	0	-	0	0	0	0	0	0
Δεκέμβριος	21	16	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Δεκέμβριος	21	17	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 5.3 Προσδιδόμενη Ηλεκτρική Ισχύς στο Δίκτυο από τον Πύργο Ηλιακής Ισχύος στον Αθρινόλακκο, για την τυπική χειμερινή Ημέρα.

Για τις δύο εκδοχές του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο, στις 12:00 η ώρα Ελλάδος, το μεσημέρι της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου, αξίζει να σχολιστεί το γεγονός, ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται βελτιωμένος, σε σχέση με αυτόν των αντίστοιχων δύο εκδοχών του μοντέλου για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μειωμένη θερμοκρασία εξόδου του ατμού από το στρόβιλο, που συνεπάγεται την καλύτερη αποτόνωση του.

Στην περίπτωση της τυπικής χειμερινής ημέρας, ο μέσος όρος των βαθμών απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, στις ώρες λειτουργίας του σταθμού, προκύπτει:

$$\eta_{field_{21th Dec}} = 0.677369$$

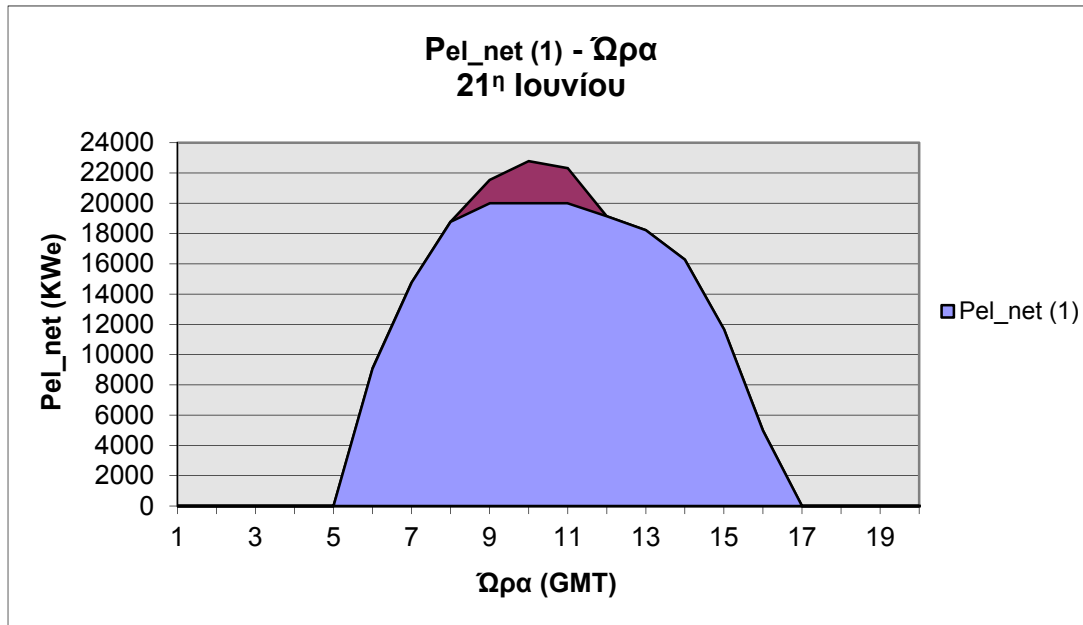
Η τιμή αυτή, για τον βαθμό απόδοσης του πεδίου κατά την τυπική χειμερινή μέρα είναι υψηλή, και συγκεκριμένα αρκετά υψηλότερη από την αντίστοιχη της τυπικής θερινής ημέρας. Κάτι τέτοιο ήταν απόλυτα αναμενόμενο, καθώς όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το χειμώνα τα ηλιοστατικά πεδία ,με διάταξη βόρεια του πύργου, παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση απ' ότι το καλοκαίρι ,εξ' αιτίας του γεγονότος ότι ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά στην ουράνια σφαίρα ,απέναντι από τους ηλιοστάτες, μειώνοντας κατά πολύ τις βασικές απώλειες συνημιτόνου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους ανωτέρω πίνακες, σχεδιάζονται και τα ζητούμενα διαγράμματα ( $P_{el\_net} - t$ ). Για κάθε μέρα σχεδιάζονται από δύο διαγράμματα, ένα για την περίπτωση του μοντέλου του σταθμού με κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση και ένα για την περίπτωση του μοντέλου με αναθέρμανση.

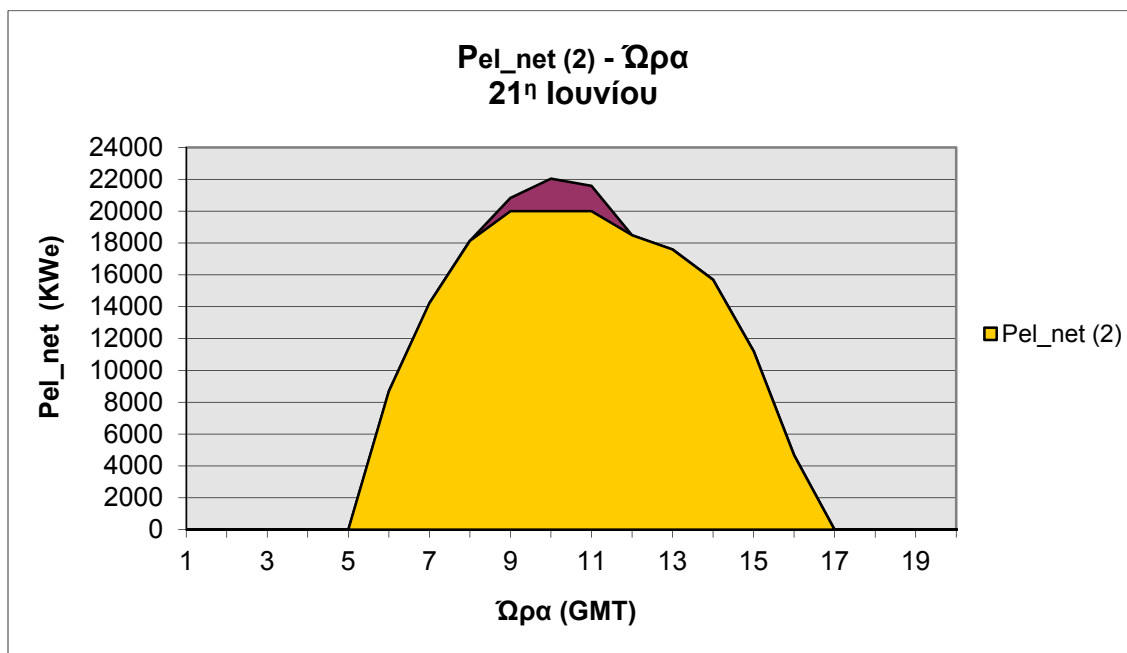
Στο υπόβαθρο των διαγραμμάτων σχεδιάζεται επίσης το γινόμενο της μεικτής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης με το συντελεστή ιδιοκαταναλώσεων

$(P_{el} \cdot \eta_{par})$ , σε συνάρτηση με την ώρα, έτσι ώστε να απεικονίζεται το ποσό της ηλεκτρικής ισχύος που τελικά δεν απορροφάται από το δίκτυο, όταν ξεπερνιέται η ονομαστική ισχύς των 20 MWe.

Έτσι, για την τυπική θερινή ημέρα:

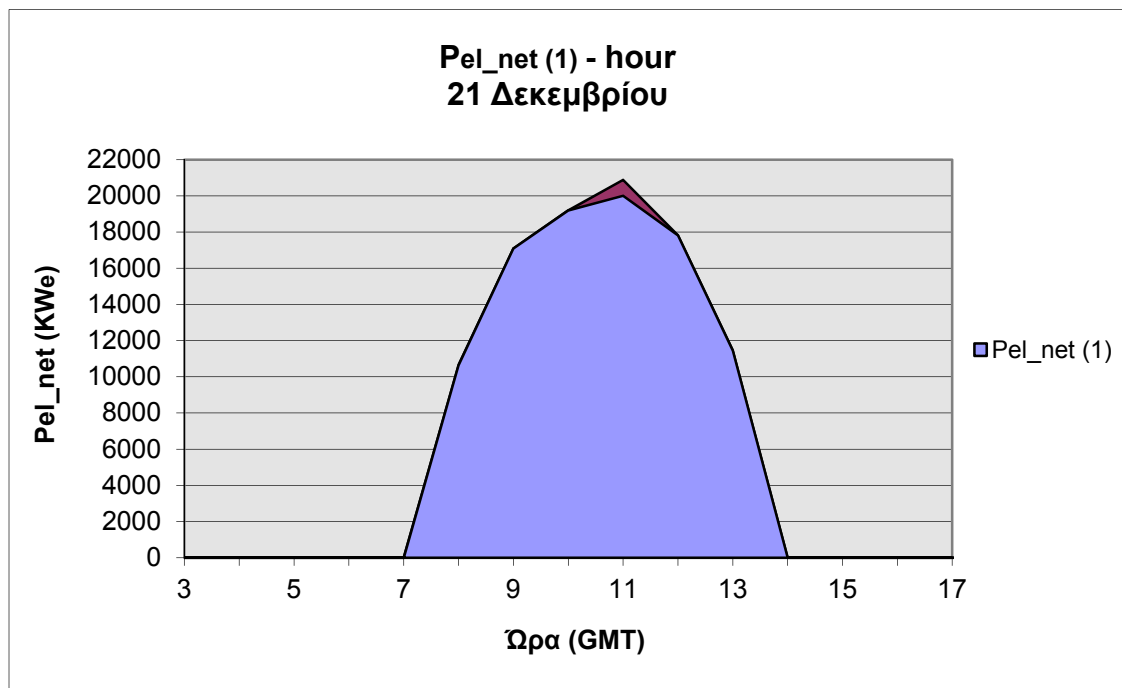


Σχήμα 5.20 Προσδιδόμενη Ηλεκτρική Ισχύς στο Δίκτυο, κατά την τυπική θερινή μέρα, από τον Πύργο Ηλιακής Ισχύος του Αθρινόλακκου, για την περίπτωση κυκλώματος Νερού-Ατμού χωρίς Αναθέρμανση.

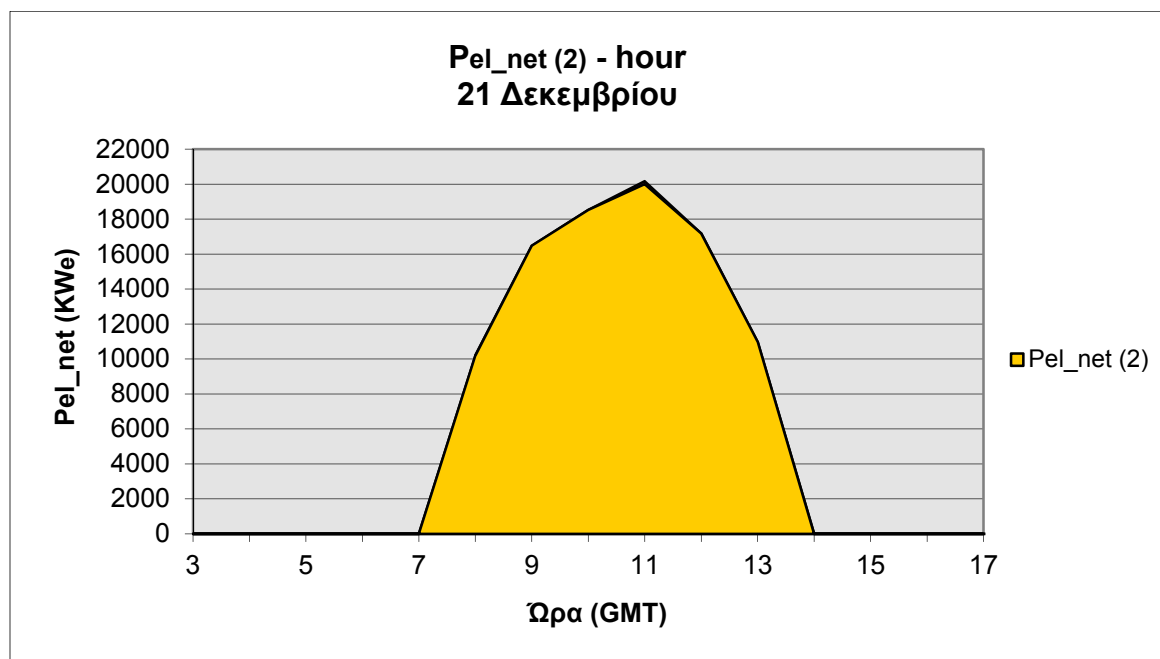


Σχήμα 5.21 Προσδιδόμενη Ηλεκτρική Ισχύς στο Δίκτυο, κατά την τυπική θερινή μέρα, από τον Πύργο Ηλιακής Ισχύος του Αθρινόλακκου, για την περίπτωση κυκλώματος Νερού-Ατμού με Αναθέρμανση.

Αντίστοιχα, για την τυπική χειμερινή μέρα:



Σχήμα 5.22 Προσδιδόμενη Ηλεκτρική Ισχύς στο Δίκτυο ,κατά την τυπική χειμερινή μέρα, από τον Πύργο Ηλιακής Ισχύος του Αθρινόλακκου ,για την περίπτωση κυκλώματος Νερού-Ατμού χωρίς Αναθέρμανση.



Σχήμα 5.23 Προσδιδόμενη Ηλεκτρική Ισχύς στο Δίκτυο ,κατά την τυπική χειμερινή μέρα, από τον Πύργο Ηλιακής Ισχύος του Αθρινόλακκου ,για την περίπτωση κυκλώματος Νερού-Ατμού με Αναθέρμανση.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, ως γενικό συμπέρασμα προκύπτει, ότι η διαστασιολόγηση της εγκατάστασης πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο έχει γίνει με ικανοποιητικό τρόπο, ώστε αυτή να παράγει ηλεκτρική ενέργεια αποδοτικά. Παρατηρούμε πως το καλοκαίρι υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος για διάστημα περίπου 11 ωρών, ενώ το χειμώνα για διάστημα περίπου 6 ωρών. Προσοχή πρέπει να δοθεί και στην τήρηση του σχετικού με το κατώφλι της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας περιορισμού. Φαίνεται χαρακτηριστικά στους πίνακες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, ότι για τιμές της ακτινοβολίας κάτω των  $200 \text{ W/m}^2$ , η εγκατάσταση δεν λειτουργεί, καθώς δεν δύναται να καλύψει τις ιδιοκαταναλώσεις της. Τελευταία, αλλά και πολύ σημαντική, είναι η παρατήρηση ότι, κατά τις μεσημεριανές ώρες, η εγκατάσταση λειτουργεί κοντά στην τιμή της ονομαστικής ισχύος της, και μάλιστα όταν την ξεπερνάει το ποσό της περισσευούμενης ηλεκτρικής ισχύος που απορρίπτεται είναι σχετικά μικρό.

## 5.9 Σύγκριση Αποτελεσμάτων με την υπάρχουσα Εγκατάσταση Πύργου Ηλιακής Ισχύος PS20 στην Ισπανία

Στα πλαίσια του ελέγχου της αξιοπιστίας του μοντέλου, το οποίο δημιουργήσαμε, για τον πύργο ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο, αποφασίσαμε να συγκρίνουμε χαρακτηριστικά της απόδοσης του με τα αντίστοιχα του πύργου ηλιακής ισχύος PS20 στη Σεβίλλη. Όπως είδαμε, όμως, και σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλιοστατικού πεδίου και το ύψος του πύργου στον Αθερινόλακκο είχαν τεθεί ίδια με αυτά του σταθμού PS20. Επιπρόσθετα, οι λεπτομέρειες του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού PS20 δεν ήταν γνωστές, ώστε αυτός να μπορεί να μοντελοποιηθεί. Σαν μία αξιολογία εναλλακτική λύση, ωστόσο, φάνταζε η σύγκριση της απόδοσης του μοντέλου που είχαμε δημιουργήσει για το σταθμό στον Αθερινόλακκο, με την απόδοση που θα παρουσίαζε το ίδιο μοντέλο, αν λειτουργούσε στο γεωγραφικό μήκος και πλάτος που βρίσκεται αυτή τη στιγμή ο σταθμός PS20. Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα θα συγκρίνονταν και με τα πραγματικά δεδομένα του σταθμού PS20 ως έχει. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε στο σημείο σχεδιασμού της εγκατάστασης του Αθερινόλακκου, δηλαδή για την 21<sup>η</sup> Ιουνίου, στις 12:00 το μεσημέρι.

Χρησιμοποιώντας και πάλι τη βάση δεδομένων της ιστοσελίδας [72], για το γεωγραφικό μήκος  $-6,15^\circ$  και πλάτος  $37,26^\circ$  του σταθμού PS20 αυτή τη φορά, βρέθηκε ότι η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, στο προαναφερθέν σημείο σχεδιασμού, είναι  $842 \text{ W/m}^2$ .

Συνεπώς, τα πραγματικά δεδομένα για την υπάρχουσα εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος PS20, θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι τα εξής:

- Αριθμός ηλιοστατών του πεδίου: 1255
- Άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο σημείο σχεδιασμού:  $842 \text{ W/m}^2$
- Ονομαστική ισχύς 20 MWe

Το πρώτο κριτήριο σύγκρισης θα μπορούσε να είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στους ακροδέκτες της γεννήτριας.

Για το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο, που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.16, είχε βρεθεί ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στη γεννήτρια είναι **24,372**

**MWe.** Αντίστοιχα, για το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο, που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.17, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στο σημείο σχεδιασμού ήταν **23,567 MWe**.

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση ,με κριτήριο την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, απέμενε να προσομοιωθεί η λειτουργία των δύο παραπάνω εκδοχών του μοντέλου της εγκατάστασης του Αθερινόλακκου, στην τοποθεσία όπου βρίσκεται σήμερα ο σταθμός PS20.

Προσομοιώνοντας τη λειτουργία του πεδίου των 1255 ηλιοστατών ,που είχαμε δημιουργήσει στο πρόγραμμα Topatuh®, για τιμή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας  $842 \text{ W/m}^2$  ,ώρα Γκρίνουιτς 10 π.μ. και για τις γεωγραφικές συντεταγμένες του πύργου PS20, προέκυψε ότι η θερμική ισχύς στην επιφάνεια του κεντρικού ηλιακού δέκτη ήταν 81502,22 KWth. Σε αυτό το σημείο διευκρινίζεται ότι ,κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η Ισπανία βρίσκεται δύο ώρες μπροστά από την ώρα Γκρίνουιτς. Από την προαναφερθείσα τιμή της θερμικής ισχύος στην επιφάνεια του κεντρικού δέκτη και από τη διαθέσιμη στο πεδίο ισχύ  $\dot{Q}_{avail} = 1255 \cdot 120 \cdot 0,842 = 125805,2 \text{ KWth}$ , προσδιορίστηκε ο βαθμός απόδοσης του τελευταίου, ο οποίος και ετέθη ως δεδομένο εισόδου στο μοντέλο της εγκατάστασης του Αθερινόλακκου, τόσο για την εκδοχή του με κύκλωμα με αναθέρμανση, όσο και για αυτήν χωρίς αναθέρμανση. Αφού εκτελέστηκε η προσομοίωση του μοντέλου ,και για τις δύο εκδοχές του, προέκυψε ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στην περίπτωση κυκλώματος νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση είναι **24,264 MWe** ,ενώ στην περίπτωση κυκλώματος νερού-ατμού με αναθέρμανση είναι **23,461 MWe**.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης ,με κριτήριο την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στη γεννήτρια, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Τοποθεσία	PeI (MWe)	DNI (KW/m <sup>2</sup> )	Αριθμός ηλιοστατών	
Αθερινόλακκος	<b>23,567</b>	0,814	1255	(κύκλωμα με αναθέρμανση)
Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	<b>23,461</b>	0,842	1255	(κύκλωμα με αναθέρμανση)
Τοποθεσία	PeI (MWe)	DNI (KW/m <sup>2</sup> )	Αριθμός ηλιοστατών	
Αθερινόλακκος	<b>24,372</b>	0,814	1255	(κύκλωμα χωρίς αναθέρμανση)
Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	<b>24,264</b>	0,842	1255	(κύκλωμα χωρίς αναθέρμανση)

*Πίνακας 5.4 Σύγκριση της Απόδοσης του Μοντέλου του Πύργου Ηλιακής Ισχύος ,με Κριτήριο την παραγόμενη Ηλεκτρική Ισχύ, ανάλογα με την Τοποθεσία Λειτουργίας του.*

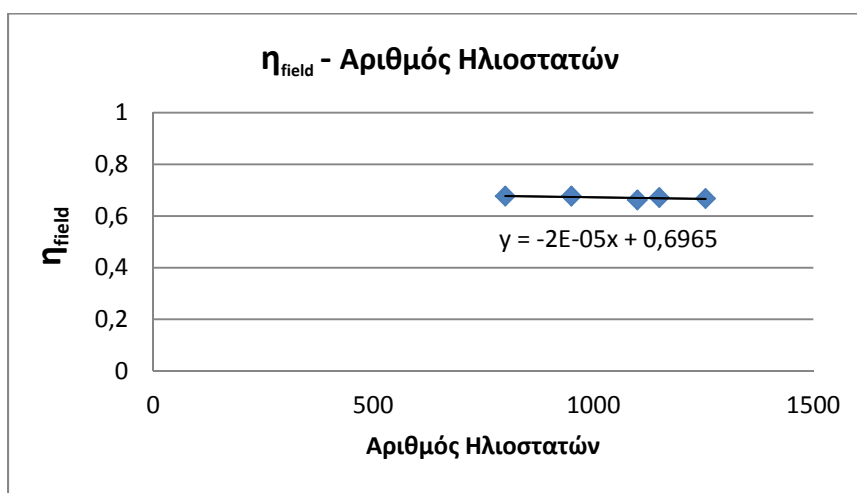
Παρατηρεί κανείς, ότι παρόλο που η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ,στο σημείο σχεδίασης, είναι μεγαλύτερη στη Σεβίλλη, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στη γεννήτρια είναι κατά περίπου 100 KW μεγαλύτερη στην περίπτωση του Αθερινόλακκου. Εφόσον η σύγκριση έγινε με το ίδιο μοντέλο εγκατάστασης, συμπεραίνουμε πως πιθανότατα η θέση του ηλίου στις 12:00 Ισπανίας είναι τέτοια ,ώστε να προκύπτει μικρότερος βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, από αυτόν που προκύπτει για την τοποθεσία του Αθερινόλακκου στις 12:00 Ελλάδος. Ωστόσο, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του μοντέλου στις δύο τοποθεσίες ,και για τις δύο περιπτώσεις κυκλώματος, προκύπτει σχεδόν πανομοιότυπη. Σε σύγκριση με την ονομαστική ισχύ του σταθμού PS20, των 20 MWe ,βλέπουμε πως υπάρχει μία απόκλιση της παραγόμενης από το μοντέλο ηλεκτρικής ισχύος της τάξεως των 3-4 MW προς τα πάνω.

Το δεύτερο κριτήριο σύγκρισης αποφασίστηκε να είναι ο αριθμός των ηλιοστατών που θα χρειάζονταν για την παραγωγή 20 MWe ισχύος στη γεννήτρια της εγκατάστασης.

Η αλλαγή ,όμως, του αριθμού των ηλιοστατών σε ένα πεδίο ,επηρεάζει σε έναν μικρό ποσοστό και το βαθμό απόδοσής του. Για να βρούμε ,λοιπόν μία συσχέτιση αυτών των δύο μεγεθών για το ηλιοστατικό πεδίο που δημιουργήσαμε στην παράγραφο 5.6 , αποφασίσαμε να αφαιρούμε σταδιακά ένα ποσοστό από τους αρχικούς 1255 καθρέφτες ,να προσομοιώνουμε τη λειτουργία του καινούργιου πεδίου και να παρατηρούμε την επίδραση στο βαθμό απόδοσης του. Ακολουθώντας αυτό το σκεπτικό, εκτελέσαμε στο σημείο σχεδιασμού του σταθμού του Αθερινόλακκου προσομοιώσεις με 1150,1100,950 και 800 ηλιοστάτες και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν:

Αριθμός Ηλιοστατών:	1255					
Μήνας	Ημέρα	Ώρα(GMT)	DNI(W/m <sup>2</sup> )	$\dot{Q}_{avail}$ (KWth)	$\dot{Q}_{inc}$ (KWth)	$\eta_{field}$
Ιούνιος	21	9	814	122588,4	81863,28	0,6677898
Αριθμός Ηλιοστατών:	1150					
Μήνας	Ημέρα	Ώρα(GMT)	DNI(W/m <sup>2</sup> )	$\dot{Q}_{avail}$ (KWth)	$\dot{Q}_{inc}$ (KWth)	$\eta_{field}$
Ιούνιος	21	9	814	112332	75426,22	0,671458
Αριθμός Ηλιοστατών:	1100					
Μήνας	Ημέρα	Ώρα(GMT)	DNI(W/m <sup>2</sup> )	$\dot{Q}_{avail}$ (KWth)	$\dot{Q}_{inc}$ (KWth)	$\eta_{field}$
Ιούνιος	21	9	814	107448	71127,6	0,6619723
Αριθμός Ηλιοστατών:	950					
Μήνας	Ημέρα	Ώρα(GMT)	DNI(W/m <sup>2</sup> )	$\dot{Q}_{avail}$ (KWth)	$\dot{Q}_{inc}$ (KWth)	$\eta_{field}$
Ιούνιος	21	9	814	92796	62833,69	0,6771164
Αριθμός Ηλιοστατών:	800					
Μήνας	Ημέρα	Ώρα(GMT)	DNI(W/m <sup>2</sup> )	$\dot{Q}_{avail}$ (KWth)	$\dot{Q}_{inc}$ (KWth)	$\eta_{field}$
Ιούνιος	21	9	814	78144	52872,93	0,676609

Πίνακας 5.5 Συσχέτιση μεταξύ Βαθμού Απόδοσης Ηλιοστατικού Πεδίου και Αριθμού Ηλιοστατών.



Σχήμα 5.24 Συσχέτιση μεταξύ Βαθμού Απόδοσης Ηλιοστατικού Πεδίου και Αριθμού Ηλιοστατών.



Στο παραπάνω γράφημα βλέπουμε τη γραμμική σχέση συσχέτισης των δύο μεγεθών ,που προέκυψε για το ηλιοστατικό πεδίο της εγκατάστασης του Αθερινόλακκου.

Ομοίως με την ανωτέρω διαδικασία, πράττουμε και για την περίπτωση που το ηλιοστατικό πεδίο της παραγράφου 5.6 τοποθετείται στην τοποθεσία Sanlúcar la Mayor, που βρίσκεται ο σταθμός PS20. Στο πρόγραμμα Tonatiuh® τίθενται οι διαφορετικές γεωγραφικές συντεταγμένες και η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας  $842 \text{ W/m}^2$ . Στην περίπτωση αυτή, η γραμμική συσχέτιση του βαθμού απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου και του αριθμού των ηλιοστατών του προκύπτει ως:  $\eta_{field} = -0,00002 \cdot N + 0,667836$ .

Έχοντας εξασφαλίσει τη σχέση συσχέτισης του βαθμού απόδοσης με τον αριθμό των ηλιοστατών του πεδίου ,για να προσδιορίσουμε για κάθε μία περίπτωση το πόσοι από αυτούς απαιτούνται για την παραγωγή 20 MWe ισχύος στη γεννήτρια ,ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

- Για την περίπτωση που το μοντέλο του σταθμού βρίσκεται στη τοποθεσία του Αθερινόλακκου, ως σχεδιάστηκε, θέτουμε στο πρόγραμμα IPSEpro® την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ ίση με 20 MWe και αφήνουμε από το σύστημα εξισώσεων και αγνώστων να προκύψει η τιμή του αριθμού των ηλιοστατών που απαιτούνται.
- Όμως, για το νέο αριθμό ηλιοστατών που προκύπτει, ο βαθμός του ηλιοστατικού πεδίου αλλάζει και αυτός. Για να τον υπολογίσουμε, χρησιμοποιούμε τη γραμμική συσχέτιση που προσδιορίσαμε παραπάνω.
- Θέτουμε το νέο βαθμό απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου ως είσοδο στο μοντέλο της εγκατάστασης που έχουμε σχεδιάσει στο πρόγραμμα IPSEpro®. Θέτουμε επίσης τον αριθμό των ηλιοστατών που είχε υπολογίσει το πρόγραμμα αρχικά, και αφήνουμε αυτή τη φορά να προσδιοριστεί η τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Αυτή θα πρέπει να συγκλίνει προς την τιμή των 20 MWe , όσο προχωράει η διαδικασία.
- Αφού διαπιστώσουμε πόσο κοντά στην τιμή των 20 MWe βρίσκεται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στη γεννήτρια, θέτουμε και πάλι την ισχύ της ίση με 20 MWe και ξεκινάμε να επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το πρώτο βήμα.

Η μέθοδος αυτή πρέπει ύστερα από έναν αριθμό επαναλήψεων να συγκλίνει σε μία τιμή για τους απαιτούμενους ηλιοστάτες του πεδίου.

Προφανώς, στην περίπτωση που το μοντέλο του σταθμού τοποθετείται στη τοποθεσία Sanlúcar la Mayor, που βρίσκεται σήμερα ο σταθμός PS20, η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η ίδια, με τη μόνη διαφορά ότι στην αρχή τίθεται η διαφορετική τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και η διαφορετική τιμή του βαθμού απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου ,που υπολογίστηκε μέσω της προσομοίωσης του από το πρόγραμμα Tonatiuh®.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, τόσο για την περίπτωση του μοντέλου της εγκατάστασης με κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, όσο και για αυτή με κύκλωμα νερού-ατμού με αναθέρμανση, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Τοποθεσία	Pel (MWe)	DNI (KW/m <sup>2</sup> )	Αριθμός ηλιοστατών	
Αθερινόλακκος	20	0,814	1056	(κύκλωμα με αναθέρμανση)
Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	20	0,842	1067	(κύκλωμα με αναθέρμανση)
Τοποθεσία	Pel (MWe)	DNI (KW/m <sup>2</sup> )	Αριθμός ηλιοστατών	
Αθερινόλακκος	20	0,814	1019	(κύκλωμα χωρίς αναθέρμανση)
Sanlúcar la Mayor (Sevilla)	20	0,842	1029	(κύκλωμα χωρίς αναθέρμανση)

Πίνακας 5.6 Σύγκριση της Απόδοσης του Μοντέλου του Πύργου Ηλιακής Ισχύος ,με Κριτήριο τον Αριθμό των Ηλιοστατών του Πεδίου, ανάλογα με την Τοποθεσία Λειτουργίας του.

Όπως και στην περίπτωση της σύγκρισης με κριτήριο την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στη γεννήτρια, έτσι και εδώ παρατηρούμε ότι το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος λειτουργεί πιο αποδοτικά στην περιοχή του Αθερινόλακκου, αφού χρειάζεται λιγότερους ηλιοστάτες για να επιτύχει παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ της τάξεως των 20 MWe. Είναι επίσης φανερό, ότι τόσο για την περίπτωση κυκλώματος με αναθέρμανση, όσο και για την περίπτωση χωρίς, η απόδοση της εγκατάστασης αλλάζει πολύ λίγο για τις δύο διαφορετικές τοποθεσίες. Πιο συγκεκριμένα, για την εκδοχή του μοντέλου της εγκατάστασης με κύκλωμα νερού-ατμού και αναθέρμανση, η διαφορά στην απόδοση ,λόγω της διαφορετικής τοποθεσίας του ηλιοστατικού πεδίου, ισοδυναμεί με μόλις 11 ηλιοστάτες. Αντίστοιχα, για την εκδοχή του μοντέλου της εγκατάστασης με κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, εμφανίζεται διαφορά μόνο 10 ηλιοστατών, λόγω της διαφορετικής τοποθεσίας του πεδίου. Τέλος, άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ,ότι παρατηρείται μία σημαντική διαφορά περίπου 200 ηλιοστατών ,μεταξύ του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος και της πραγματικής εγκατάστασης PS20, που έχει ονομαστική ισχύ 20 MWe και πεδίο 1255 ηλιοστατών. Βέβαια, η σύγκριση που έγινε στο παρόν εδάφιο, περιορίζεται μόνο στο σημείο σχεδιασμού που επιλέχθηκε για την εγκατάσταση του Αθερινόλακκου, και συνεπώς τα συμπεράσματα δεν μπορούν να έχουν γενικευμένη ισχύ.

## 5.10 Ενεργειακή Σύγκριση Υδρόψυκτου με Αερόψυκτο Συμπυκνωτή στην Εγκατάσταση του Αθερινόλακκου

Στις μέρες μας, η μεγάλη πλειοψηφία των εν λειτουργία εγκαταστάσεων με πύργο ηλιακής ισχύος χρησιμοποιούν υδρόψυκτο συμπυκνωτή. Ωστόσο, μέσα από πολλές σύγχρονες μελέτες ,αλλά και από ηλιοθερμικούς σταθμούς υπό κατασκευή, φαίνεται πως οι αερόψυκτοι συμπυκνωτές αναμένεται να αποτελέσουν ένα δυνατό ανταγωνιστή στο μέλλον, ιδιαίτερα λόγω του σημαντικού πλεονεκτήματός τους να μην σπαταλούν νερό για την ψύξη τους. Είναι γενικά παραδεκτό, ότι ένας υδρόψυκτος συμπυκνωτής έχει μικρότερες ιδιοκαταναλώσεις από έναν αερόψυκτο. Ωστόσο, αυτός ο ισχυρισμός πρέπει να εξετάζεται συναρτήσει του υψομέτρου της εγκατάστασης, καθώς ο υδρόψυκτος συμπυκνωτής απαιτεί τη χρήση αντλίας ,η οποία ανεβάζει μεγάλες ποσότητες νερού από το επίπεδο της θάλασσας ,η κάποιας δεξαμενής, στο επίπεδο της εγκατάστασης. Για μία συγκεκριμένη τιμή του υψομέτρου και άνω, οι ιδιοκαταναλώσεις ενός υδρόψυκτου συμπυκνωτή σαφώς και μπορούν να προκύψουν μεγαλύτερες.

Τα παραπάνω ζητήματα καλείται να εξετάσει το παρόν κεφάλαιο για την εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος ,που μελετήθηκε, στην περιοχή του Αθερινόλακκου.

Η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί και για τις δύο εκδοχές κυκλωμάτων νερού-ατμού του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο, για συνθήκες τυπικής θερινής και χειμερινής ημέρας ,στις 12:00 το μεσημέρι.

Το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος ,που παρουσιάστηκε στα σχήματα 5.16 και 5.17 ,και αναφέρεται στις 12:00 το μεσημέρι της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου (σημείο σχεδιασμού), συμπεριλαμβάνει αερόψυκτο συμπυκνωτή. Επιλέγουμε ,για αυτό το λόγο, να ξεκινήσουμε την ανάλυσή από τους αερόψυκτους συμπυκνωτές για την ηλιοθερμική εγκατάσταση του Αθερινόλακκου.

Το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθερινόλακκο ,που δημιουργήσαμε στο κεφάλαιο 5.4 και αναπροσαρμόσαμε στο κεφάλαιο 5.7, παρουσιάστηκε και προσομοιώθηκε στις ακόλουθες εκδοχές του ,με αερόψυκτο συμπυκνωτή:

- Μοντέλο πύργου ηλιακής ισχύος με κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου. (όπως ακριβώς παρουσιάζεται στο σχήμα 5.16)
- Μοντέλο πύργου ηλιακής ισχύος με αναθέρμανση στο κύκλωμα νερού-ατμού στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου. (όπως ακριβώς παρουσιάζεται στο σχήμα 5.17)
- Μοντέλο πύργου ηλιακής ισχύος με κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου. (όπως ακριβώς παρουσιάζεται στο σχήμα 5.18)
- Μοντέλο πύργου ηλιακής ισχύος με αναθέρμανση στο κύκλωμα νερού-ατμού στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου. (όπως ακριβώς παρουσιάζεται στο σχήμα 5.19)

Σε κάθε μία από τις ανωτέρω εκδοχές του μοντέλου, στο ρεύμα εισόδου του αέρα στο συμπυκνωτή έχει τοποθετηθεί συμπιεστής συνδεδεμένος με ηλεκτροκινητήρα. Ο συμπιεστής σε εκείνο το σημείο παίζει το ρόλο μεγάλου ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται σε κλασσικές περιπτώσεις αερόψυκτου συμπυκνωτή. Η διαφορά πίεσης dP στον συμπιεστή έχει τεθεί ,για αυτό το λόγο, ίση με την τυπική τιμή 2 mbar. Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνει ο ανεμιστήρας στον αερόψυκτο συμπυκνωτή, αρκεί να εκτελέσουμε την προσομοίωση της λειτουργίας του μοντέλου και να διαβάσουμε την

<b>Εκδοχή του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος</b>	<b>Pe<sub>l_fan</sub> (KWe)</b>	<b>Pe<sub>l</sub> - Pe<sub>l_fan</sub> (KWe)</b>
<i>Κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου</i>	818,54	24372,16 - 818,54=23553,62
<i>Κύκλωμα νερού-ατμού με αναθέρμανση, στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου</i>	752,18	23566,69-752,18=22814,51
<i>Κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου</i>	806,7	21709,66-806,7=20902,96
<i>Κύκλωμα νερού-ατμού με αναθέρμανση, στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου</i>	745,66	20950,55-745,66=20204,89

*Πίνακας 5.7 Κατανάλωση Ισχύος στον Ανεμιστήρα του Αερόψυκτου Συμπυκνωτή.*

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ισχύς που καταναλώνει ο ανεμιστήρας τους καλοκαιρινούς

μήνες, που η θερμοκρασία του αέρα είναι υψηλότερη, για να ψύξει τον συμπυκνωτή είναι μεγαλύτερη.

Οι παραπάνω τέσσερις εκδοχές του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος πρέπει να αναπροσαρμοστούν για τη χρήση υδρόψυκτου συμπυκνωτή. Ας δούμε, όμως, πως γίνεται η ενσωμάτωση του υδρόψυκτου συμπυκνωτή στο κύκλωμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω του προγράμματος IPSEpro®. Θα αναφερθούμε για στην εκδοχή του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος, με κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, όπως αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 5.16. Όσα θα περιγραφούν, εφαρμόζονται ομοίως και για την εκδοχή του μοντέλου με αναθέρμανση.

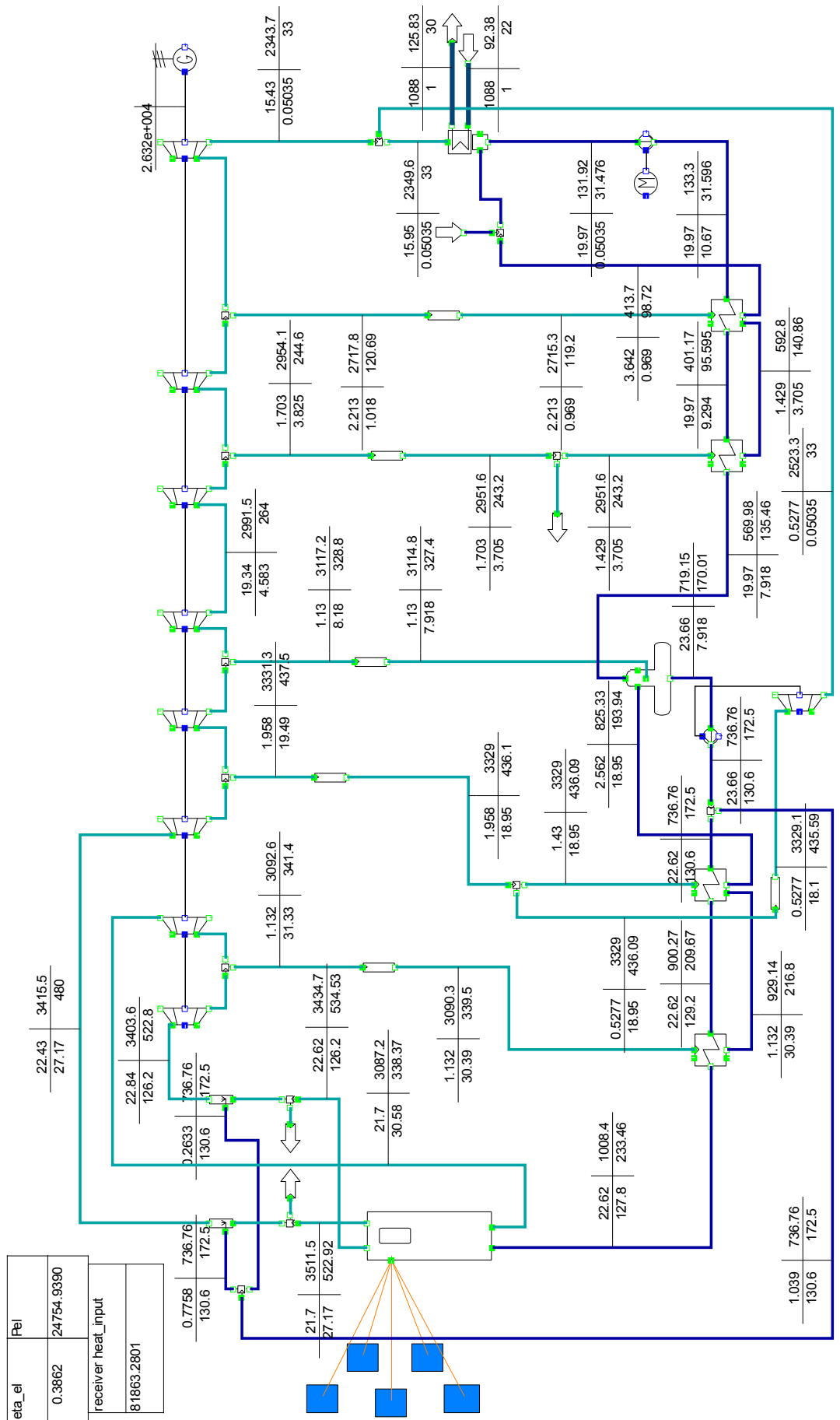
Στο αναπροσαρμοσμένο μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος του σχήματος 5.16 αφαιρούμε τον αερόψυκτο συμπυκνωτή, και στη θέση του τοποθετούμε έναν υδρόψυκτο από τη βιβλιοθήκη μοντέλων του προγράμματος IPSEpro®. Ως τυπική θερμοκρασία εισόδου του νερού ψύξης στον συμπυκνωτή επιλέγεται η τιμή 22°C [61]. Η τιμή αυτή είναι αρκετά συνηθισμένη σε ελληνικές θάλασσες για τους καλοκαιρινούς μήνες [75]. Το νερό ψύξης εξέρχεται συνήθως από τον συμπυκνωτή κατά περίπου 8°C θερμότερο από την είσοδο. Αποφασίσαμε, έτσι, να θέσουμε τη θερμοκρασία εξόδου του νερού ψύξης ίση με 30°C. Προσομοιώνοντας το καινούργιο μοντέλο της εγκατάστασης με αυτά τα δεδομένα, προέκυψε η τιμή της παροχής μάζας του νερού ψύξης του υδρόψυκτου συμπυκνωτή ίση με 1083 Kg/s. Για σταθερή παροχή μάζας 1083 Kg/s του νερού ψύξης, αποσύραμε την τιμή της θερμοκρασίας του στην έξοδο του συμπυκνωτή, και προσομοιώσαμε το μοντέλο, αλλάζοντας την τιμή της θερμοκρασίας εξόδου του ατμού από το στρόβιλο έτσι, ώστε η διαφορά  $dt_{out}$  στο συμπυκνωτή να πάρει τη συνήθη για τέτοιες περιπτώσεις τιμή 3°C. Υπενθυμίζουμε ότι το μέγεθος  $dt_{out}$  ισούται με την θερμοκρασία εισόδου του ατμού στον συμπυκνωτή, μείον τη θερμοκρασία εξόδου του νερού ψύξης από αυτόν. Έχοντας ακολουθήσει την παραπάνω διαδικασία, καταφέραμε να παραστήσουμε το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος του Αθερινόλακκου με κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, και για λειτουργία με υδρόψυκτο συμπυκνωτή, στις 12:00 η ώρα της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου.

Για να μεταβούμε από τη θερινή, στη χειμερινή λειτουργία της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου, του παραπάνω μοντέλου, δεν χρειάστηκαν ιδιαίτερες αλλαγές. Η θερμοκρασία εισόδου του νερού ψύξης στο συμπυκνωτή θεωρήθηκε, σύμφωνα με πηγή θαλάσσιων θερμοκρασιακών δεδομένων, ίση με 13°C [75]. Η παροχή μάζας του νερού ψύξης στο συμπυκνωτή παρέμεινε η ίδια που είχε υπολογιστεί για την καλοκαιρινή λειτουργία, καθώς η πυκνότητα του νερού σε θερμοκρασιακό εύρος της τάξεως των 8°C δεν αλλάζει αισθητά. Για τις τιμές αυτές προσομοιώθηκε η λειτουργία του μοντέλου και η θερμοκρασία του ατμού στην έξοδο του στρόβιλου μειώθηκε περαιτέρω, έως ότου το  $dt_{out}$  να παίρνει και πάλι την τιμή 3°C.

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε, ομοίως, και για την θερινή και χειμερινή λειτουργία του μοντέλου του σταθμού στον Αθερινόλακκο, με αναθέρμανση στο κύκλωμα νερού-ατμού.

Οι τέσσερις εκδοχές του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος, αναπροσαρμοσμένες για υδρόψυκτο συμπυκνωτή, παρουσιάζονται ευθύς αμέσως:





Σχήμα 5.26 Αναπροσαρμοσμένο Μοντέλο του Πύργου Ηλιακής Ισχύος στον Αθερνώλακκο, με Αναθέρμανση στο Κύκλωμα Νερού-Ατμού και υδρόφωνο Στυπκνωτή (21<sup>η</sup> Ιουνίου, 12:00 ή 9:00GMT).







Εκ πρώτης όψεως, από τις τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στη γεννήτρια, για τις διάφορες εκδοχές του μοντέλου του σταθμού, φαίνεται ότι τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με υδρόψυκτο συμπυκνωτή έχουν ένα μικρό προβάδισμα, έναντι αυτών με αερόψυκτο. Ωστόσο, για να πραγματοποιηθεί η τελική σύγκριση και να δοθεί μία ξεκάθαρη ετυμηγορία, πρέπει πρώτα να υπολογιστούν οι ιδιοκαταναλώσεις που προκύπτουν από την αντλία νερού ενός υδρόψυκτου συμπυκνωτή.

Με τη βοήθεια του προγράμματος GoogleEarth® ,εστιάζοντας στις γεωγραφικές συντεταγμένες της τοποθεσίας του Αθρινόλακκου, καταφέραμε να μελετήσουμε ,με μικρή ωστόσο λεπτομέρεια, τη μορφολογία του εδάφους και να επιλέξουμε ένα κατάλληλο σημείο για την εγκατάσταση του πύργου. Το σημείο αυτό απέχει κάθετη απόσταση από τη θάλασσα 1338 m και έχει **υψόμετρο 190 m**. Θα μπορούσαμε δηλαδή, με μία προσέγγιση, να πούμε ,ότι το μήκος της σωλήνωσης που θα χρειαζόταν για την προσκόμιση του νερού ψύξης στην εγκατάσταση θα ήταν ,σύμφωνα με το πυθαγόρειο θεώρημα, ίσο με:  

$$L = \sqrt{190^2 + 1338^2} = 1351,42 \text{ m}$$

Θα ξεκινήσουμε τη μελέτη από την εκδοχή του πύργου ηλιακής ισχύος με κύκλωμα χωρίς αναθέρμανση, και στη συνέχεια θα επαναλάβουμε τη διαδικασία για την εκδοχή με αναθέρμανση στο κύκλωμα νερού-ατμού.

Η παροχή όγκου του νερού ψύξης για μέση θερμοκρασία 17,5°C προκύπτει ως:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}}{\rho_{water_{17,5^\circ C}}} = \frac{1083}{998,65} \approx \mathbf{1,084514 \text{ (m}^3/\text{s)}} \text{ ή } 3904,25 \text{ (m}^3/\text{h)}$$

Από πίνακα σχετικό με τις συνιστώμενες τιμές της ταχύτητας του νερού στον σωλήνα κατάθλιψης [76], και με χρήση της γραμμικής παρεμβολής, προκύπτει για την παραπάνω τιμή παροχής όγκου ότι:

$$c = 2,9839 \text{ m/s}$$

Όμως, για την ταχύτητα αυτή η διάμετρος της σωλήνωσης δίνεται από τον τύπο:

$$\dot{Q} = c \cdot A = c \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{Q}}{c \cdot \pi}} \approx 0,68 \text{ m}$$

Από τον σχετικό πίνακα με τις τυποποιημένες διαμέτρους χαλύβδινων σωληνώσεων, η παραπάνω τιμή της διαμέτρου τυποποιείται στην  $d_{new}=0,6892 \text{ m}$  (DN700). [76]

Έτσι η νέα τιμή της ταχύτητας του νερού μέσα στη σωλήνωση υπολογίζεται:

$$c_{new} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{4 \cdot \dot{Q}}{\pi \cdot d_{new}^2} \approx 2,907 \text{ m/s}$$

Προχωρούμε στον υπολογισμό του ολικού ύψους H της αντλίας.

Οι γραμμικές απώλειες της σωλήνωσης υπολογίζονται από τη σχέση Darcy-Weisbach:

$$\delta h_L = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g}$$

,όπου L το μήκος σωλήνωσης, c η μέση ταχύτητα της ροής, d η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα,  $g=9,81 \text{ m/sec}^2$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\lambda$  ο συντελεστής γραμμικών απωλειών, η τιμή του οποίου προκύπτει συναρτήσει της τιμής του αριθμού Reynolds  $Re$  της ροής και της σχετικής τραχύτητας  $\varepsilon_s = \varepsilon/d$ , για  $\varepsilon=0,20 \text{ mm}$ .

Δηλαδή:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,2}{689,2} \approx 2,9 \cdot 10^{-4}$$

Ακόμη:

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu_{17,5^\circ C}} = \frac{2,907 \cdot 0,6892}{1,075 \cdot 10^{-6}} = 1,863 \cdot 10^6$$

Ο συντελεστής των γραμμικών απωλειών  $\lambda$  μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο του Jain:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \cdot \log \left( \frac{21,25}{Re^{0,9}} + \varepsilon_s \right) \approx 8,0813 \Rightarrow \lambda \approx 0,0153$$

Άρα, οι γραμμικές απώλειες υπολογίζονται:

$$\delta h_L = 0,0153 \cdot \frac{1351,42}{0,6892} \cdot \frac{2,907^2}{2 \cdot 9,81} = 12,92 \text{ mSY}$$

Το άλλο είδος απωλειών σε μία σωλήνωση είναι οι λεγόμενες εντοπισμένες απώλειες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχουμε ακριβή στοιχεία για τα εξαρτήματα και τη διαμόρφωση της σωλήνωσης στο χώρο, ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε τις εντοπισμένες απώλειες με ακρίβεια. Για τον λόγο αυτό θα υποθέσουμε τα απολύτως απαραίτητα εξαρτήματα της σωλήνωσης κατά τον υπολογισμό.

Θεωρούμε, λοιπόν, ότι τα εξαρτήματα αυτά είναι ένα στόμιο αναρρόφησης ( $\zeta=0,50$ ), μία βάννα (συρταρωτή) ( $\zeta=0,15$ ) και μία βαλβίδα αντεπιστροφής ( $\zeta=0,30$ ). [76]

Η υδραυλική απώλεια του κάθε εξαρτήματος εκφράζεται ως:

$$\delta h_s = \zeta \cdot \frac{c^2}{2 \cdot g}$$

,όπου  $\zeta$  ο συντελεστής εντοπισμένων απωλειών

Στην περίπτωση μας είναι επομένως:

$$\delta h_s = 0,15 \cdot \frac{2,907^2}{2 \cdot 9,81} + 0,3 \cdot \frac{2,907^2}{2 \cdot 9,81} + 0,5 \cdot \frac{2,907^2}{2 \cdot 9,81} \approx 0,409 \text{ m}\Sigma Y$$

Άρα, οι συνολικές απώλειες στη σωλήνωση θα είναι:

$$\delta h = \delta h_L + \delta h_s = 13,329 \text{ m}\Sigma Y$$

και το ολικό ύψος της αντλίας:

$$H = h + \delta h = 190 + 13,329 = \mathbf{203,329 \text{ m}}$$

Αντίστοιχη ακριβώς διαδικασία ακολουθούμε και για την εκδοχή του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος του Αθερινόλακκου με αναθέρμανση στο κύκλωμα νερού-ατμού:

Η παροχή όγκου του νερού ψύξης για μέση θερμοκρασία 17,5°C προκύπτει ως:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}}{\rho_{\text{water}}_{17,5^\circ\text{C}}} = \frac{1088}{998,65} \approx \mathbf{1,08952 \text{ (m}^3/\text{s)}} \text{ ή } 3922,275 \text{ (m}^3/\text{h)}$$

Από πίνακα σχετικό με τις συνιστώμενες τιμές της ταχύτητας του νερού στον σωλήνα κατάθλιψης [76], και με χρήση της γραμμικής παρεμβολής, προκύπτει για την παραπάνω τιμή παροχής όγκου ότι:

$$c = 2,985 \text{ m/s}$$

Όμως, για την ταχύτητα αυτή η διάμετρος της σωλήνωσης δίνεται από τον τύπο:

$$\dot{Q} = c \cdot A = c \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{Q}}{c \cdot \pi}} \approx 0,6817 \text{ m}$$

Από τον σχετικό πίνακα με τις τυποποιημένες διαμέτρους χαλύβδινων σωληνώσεων, η παραπάνω τιμή της διαμέτρου τυποποιείται στην  $d_{\text{new}}=0,6892 \text{ m}$  (DN700). [76]

Έτσι η νέα τιμή της ταχύτητας του νερού μέσα στη σωλήνωση υπολογίζεται:

$$c_{\text{new}} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{4 \cdot \dot{Q}}{\pi \cdot d_{\text{new}}^2} \approx 2,92 \text{ m/s}$$

Προχωρούμε στον υπολογισμό του ολικού ύψους H της αντλίας.

Για τις γραμμικές απώλειες ισχύουν:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,2}{689,2} \approx 2,9 \cdot 10^{-4}$$

Ακόμη:

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu_{17,5^\circ C}} = \frac{2,92 \cdot 0,6892}{1,075 \cdot 10^{-6}} = 1,872 \cdot 10^6$$

Ο συντελεστής των γραμμικών απωλειών  $\lambda$  μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο του Jain:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \cdot \log\left(\frac{21,25}{Re^{0,9}} + \varepsilon_s\right) \approx 8,0819 \Rightarrow \lambda \approx 0,0153$$

Άρα, οι γραμμικές απώλειες υπολογίζονται:

$$\delta h_L = 0,0153 \cdot \frac{1351,42}{0,6892} \cdot \frac{2,92^2}{2 \cdot 9,81} = 13,038 \text{ m}\Sigma Y$$

Ενώ οι εντοπισμένες απώλειες είναι:

$$\delta h_s = 0,15 \cdot \frac{2,92^2}{2 \cdot 9,81} + 0,3 \cdot \frac{2,92^2}{2 \cdot 9,81} + 0,5 \cdot \frac{2,92^2}{2 \cdot 9,81} \approx 0,413 \text{ m}\Sigma Y$$

Άρα, οι συνολικές απώλειες στη σωλήνωση θα είναι:

$$\delta h = \delta h_L + \delta h_s = 13,451 \text{ m}\Sigma Y$$

και το ολικό ύψος της αντλίας:

$$H = h + \delta h = 190 + 13,329 = \mathbf{203,451 \text{ m}}$$

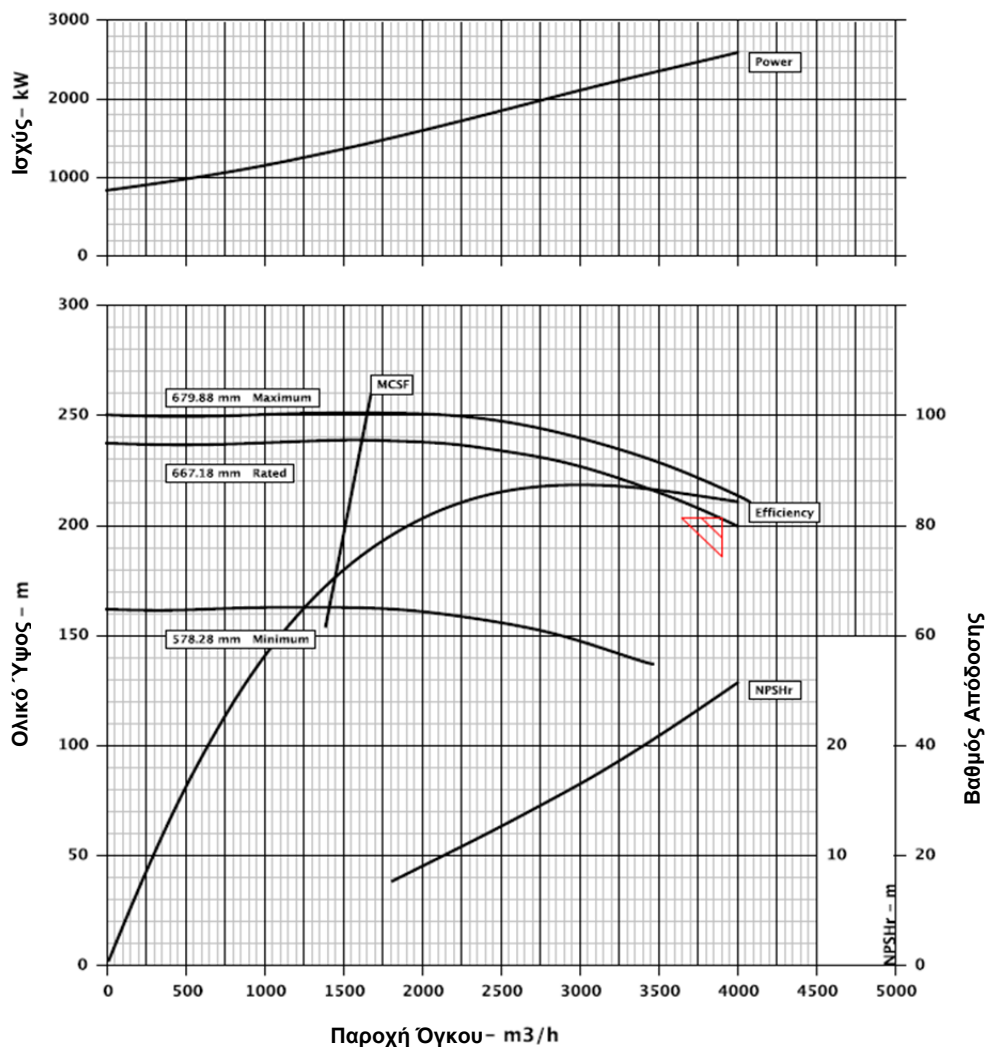
Έχοντας υπολογίσει την παροχή όγκου  $\dot{Q}$  και το ολικό ύψος της αντλίας  $H$ , για κάθε μία από τις δύο εκδοχές του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος με διαφορετική παροχή μάζας νερού ψύξης στο συμπυκνωτή, μπορούμε να διαλέξουμε την κατάλληλη για κάθε περίπτωση αντλία και να προσδιορίσουμε την ισχύ που καταναλώνει ο ηλεκτροκινητήρας της.

Στην προσπάθεια εύρεσης της κατάλληλης αντλίας συναντήσαμε το πρόβλημα ,ότι για τόσο μεγάλες τιμές ύψους και παροχής όγκου δεν δίνονταν οι χάρτες λειτουργίας H-Q και η-Q ,ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε τον βαθμό απόδοσης της.

Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήσαμε την εφαρμογή επιλογής αντλίας Flowselex®, της ιστοσελίδας [77], η οποία με δεδομένα εισόδου το ύψος και την παροχή όγκου, εμφανίζει μία λίστα από τύπους αντλιών κατάλληλων για αυτό το ζεύγος τιμών. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει έναν τύπο αντλίας ,από τους προτεινόμενους, και η εφαρμογή υπολογίζει τα χαρακτηριστικά της κατάλληλης αντλίας και του ηλεκτροκινητήρα της στο ζητούμενο σημείο (H,Q). Αφού υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά της αντλίας, δίνονται επίσης οι χάρτες που απεικονίζουν το σημείο λειτουργίας της.

Έτσι, για την περίπτωση του μοντέλου του ηλιακού πύργου με κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, το ζεύγος δεδομένων εισόδου είναι : **(H,Q)=(203,329, 3904,25)**

Η αντλία που επιλέγεται για αυτές τις τιμές, με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ισχύος, είναι η **16x26A-DVSH** με βαθμό απόδοσης 84,8% και ταχύτητα περιστροφής 1780 στροφές ανά λεπτό. Η ονομαστική ισχύς της είναι 2547 KWe και του ηλεκτροκινητήρα της **2610 KWe**. Το σημείο λειτουργίας της παρουσιάζεται ενδεικτικά στους χάρτες που ακολουθούν:



Σχήμα 5.29 Σημείο Λειτουργίας της Αντλίας Νερού Ψύξης. [77]

Αντίστοιχα, για την περίπτωση του μοντέλου του ηλιακού πύργου ,με αναθέρμανση στο κύκλωμα νερού-ατμού, το ζεύγος δεδομένων εισόδου είναι : **(H,Q)=(203,451, 3922,275)**

Η αντλία και ο ηλεκτροκινητήρας που επιλέγεται για αυτήν είναι ακριβώς τα ίδια με της πρώτης εκδοχής. Δηλαδή, η καταναλισκόμενη ισχύς και σε αυτή την περίπτωση είναι 2610 KWe.

Κατ' αναλογία με τον πίνακα 5.7, παρουσιάζεται ακολούθως ο πίνακας 5.8 με τα αποτελέσματα της κατανάλωσης ισχύος από την αντλία του υδρόψυκτου συμπυκνωτή, και για τις τέσσερις εκδοχές του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 5.25-5.28:

Εκδοχή του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος	Κατανάλωση ισχύος στον ηλεκτροκινητήρα της αντλίας $P_M$	$P_{el} - P_M$ (KWe)
Κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, στις 12:00 της 21 <sup>ης</sup> Ιουνίου	2610	25482,56 - 2610=22872,56
Κύκλωμα νερού-ατμού με αναθέρμανση, στις 12:00 της 21 <sup>ης</sup> Ιουνίου	2610	24754,94-2610=22144,94
Κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, στις 12:00 της 21 <sup>ης</sup> Δεκεμβρίου	2610	22593,4-2610=19983,4
Κύκλωμα νερού-ατμού με αναθέρμανση, στις 12:00 της 21 <sup>ης</sup> Δεκεμβρίου	2610	21952,62-2610=19342,62

Πίνακας 5.8 Κατανάλωση Ισχύος στον Ηλεκτροκινητήρα της Αντλίας του Υδρόψυκτου Συμπυκνωτή.

Συνοψίζουμε τα αποτελέσματα των πινάκων 5.7 και 5.8 στον ακόλουθο πίνακα, ο οποίος παρουσιάζει ξεκάθαρα την πιο συμφέρουσα ενεργειακά επιλογή για τον συμπυκνωτή του ηλιοθερμικού σταθμού του Αθρινόλακκου:

Εκδοχή του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος	Κέρδος Ισχύος [ $P_{el} - P_{el\_fan}$ (KWe) ] – [ $P_{el} - P_M$ (KWe) ]
Κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, στις 12:00 της 21 <sup>ης</sup> Ιουνίου	681,06
Κύκλωμα νερού-ατμού με αναθέρμανση, στις 12:00 της 21 <sup>ης</sup> Ιουνίου	919,56
Κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση, στις 12:00 της 21 <sup>ης</sup> Δεκεμβρίου	669,57
Κύκλωμα νερού-ατμού με αναθέρμανση, στις 12:00 της 21 <sup>ης</sup> Δεκεμβρίου	862,27

Πίνακας 5.9 Τελικό Αποτέλεσμα της Σύγκρισης Αερόψυκτου με Υδρόψυκτο Συμπυκνωτή.

Στον άνωθεν πίνακα παρατηρούμε πως σε κάθε εκδοχή του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο, η χρήση αερόψυκτου συμπυκνωτή είναι τελικά πιο συμφέρουσα ενεργειακά από τη χρήση υδρόψυκτου, εάν το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται ο σταθμός είναι 190 m. Για την περίπτωση αυτή, η χρήση αερόψυκτου συμπυκνωτή θα απέφερε κέρδος ισχύος έως και 919,56 KWe.

Η επιλογή του υψομέτρου τοποθέτησης του σταθμού, όπως είδαμε παραπάνω, έγινε κατά προσέγγιση. Φάνηκε, επίσης ότι οι απώλειες στην αντλία του νερού ψύξης είναι αρκετά υψηλότερες από τις απώλειες στον ανεμιστήρα ενός αερόψυκτου συμπυκνωτή, και μάλιστα το μέγεθός τους είχε άμεση εξάρτηση με το υψόμετρο. Αποφασίστηκε, για αυτό το λόγο, η μελέτη σχετικά με την επιλογή υδρόψυκτου ή αερόψυκτου συμπυκνωτή, να επεκταθεί και για μικρότερα υψόμετρα, έως την τιμή αυτή για την οποία ο υδρόψυκτος συμπυκνωτής θα συνέφερε ενεργειακά.

Μειώνοντας το υψόμετρο, η κατανάλωση ισχύος από τον ανεμιστήρα του αερόψυκτου συμπυκνωτή μένει ανεπηρέαστη. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει και με την κατανάλωση ισχύος από την αντλία.

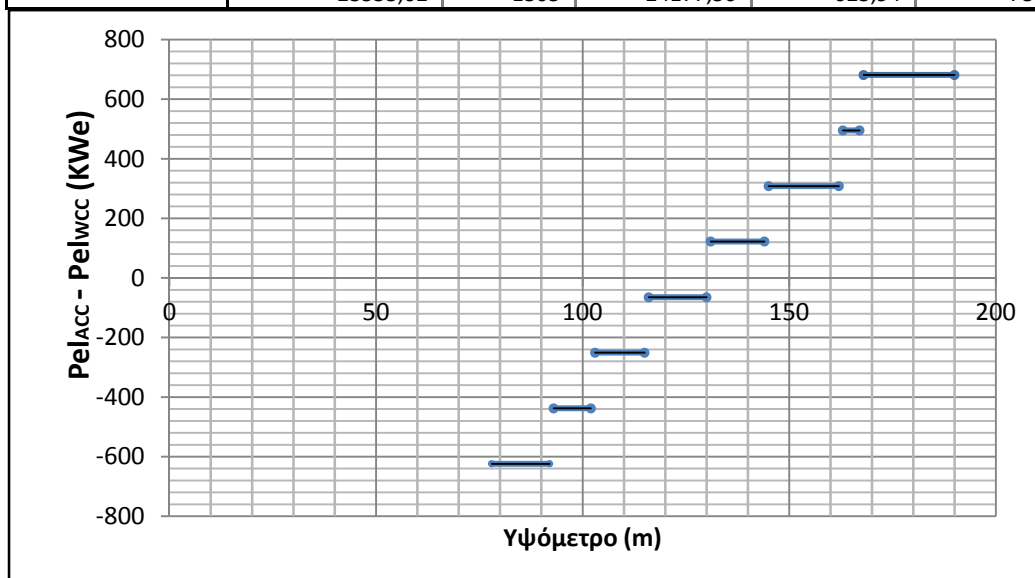
Η μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω ,για την επιλογή αντλίας σε υψόμετρο 190 m, επαναλαμβάνεται ,τόσο για την εκδοχή κυκλώματος με αναθέρμανση ,όσο και για αυτή

χωρίς, για τιμές υψομέτρου διαρκώς μειούμενες. Προφανώς, η παροχή όγκου του νερού ψύξης  $Q$  παραμένει σταθερή, ενώ το ολικό ύψος  $H$  μειώνεται διαρκώς, με το υψόμετρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επιλέγονται διαφορετικές αντλίες για τα καινούργια σημεία λειτουργίας τους, με ισχύ ηλεκτροκινητήρα όλο και μικρότερη. Ο ίδιος τύπος αντλίας, άρα και ηλεκτροκινητήρα, μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά για ένα εύρος υψομέτρων. Ωστόσο, όταν ξεπεραστεί κάποια τιμή, το νέο σημείο λειτουργίας  $(H,Q)$  που προκύπτει, ξεφεύγει από την περιοχή λειτουργίας αυτού του τύπου της αντλίας. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να επιλεγεί η επόμενη πιο κατάλληλη αντλία για το ζεύγος τιμών  $(H,Q)$  και ο ηλεκτροκινητήρας της.

Ακολουθώντας τη διαδικασία που μόλις περιγράφηκε, και με τη βοήθεια της εφαρμογής Flowselex® για την επιλογή της κατάλληλης αντλίας με την μικρότερη ισχύ σε κάθε περίπτωση, καταλήξαμε σε μία τιμή του υψομέτρου, για την οποία η χρήση υδρόψυκτου συμπυκνωτή συνέφερε περισσότερο, από άποψη ισχύος.

Τα αποτελέσματα μαζί με τα ανάλογα χαρακτηριστικά διαγράμματα, για την κάθε εκδοχή του μοντέλου του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο, παρουσιάζονται στις ακόλουθες σελίδες.

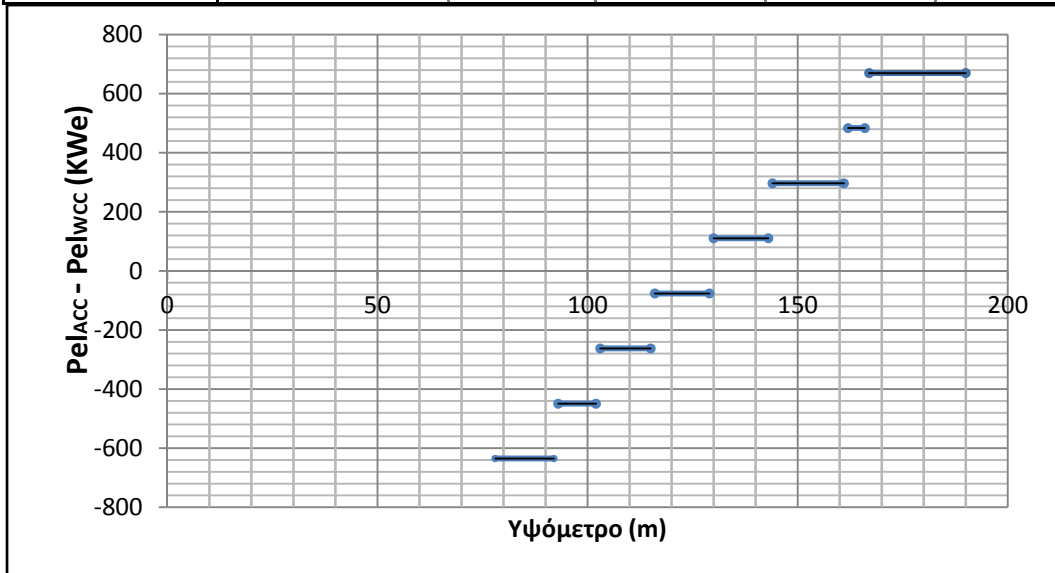
Χαρακτηριστικά Μοντέλου:	<u>Κύκλωμα νερού-ατμού χωρίς αναθέρμανση</u>				
	<b>21<sup>η</sup> Ιουνίου</b>				
	Pel - Pel fan (KWe)	P <sub>M</sub> (KWe)	P <sub>el</sub> - P <sub>M</sub> (KWe)	Κέρδος Ισχύος	Υψόμετρο
	23553,62	2610	22872,56	681,06	190
	23553,62	2610	22872,56	681,06	168
	23553,62	2424	23058,56	495,06	167
	23553,62	2424	23058,56	495,06	163
	23553,62	2237	23245,56	308,06	162
	23553,62	2237	23245,56	308,06	145
	23553,62	2051	23431,56	122,06	144
	23553,62	2051	23431,56	122,06	131
	23553,62	1864	23618,56	-64,94	<b>130</b>
	23553,62	1864	23618,56	-64,94	116
	23553,62	1678	23804,56	-250,94	115
	23553,62	1678	23804,56	-250,94	103
	23553,62	1491	23991,56	-437,94	102
	23553,62	1491	23991,56	-437,94	93
	23553,62	1305	24177,56	-623,94	92
	23553,62	1305	24177,56	-623,94	78



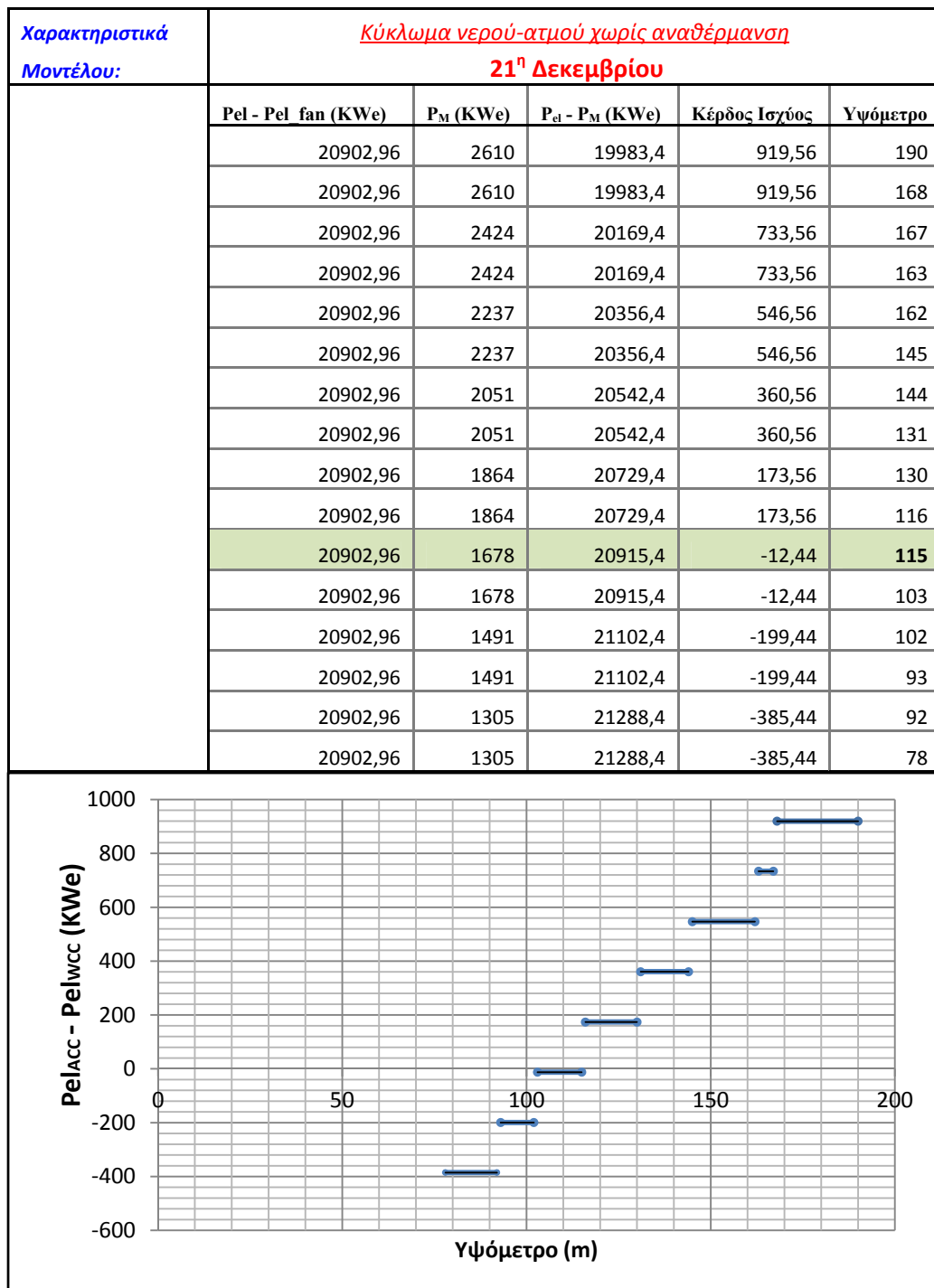
Σχήμα 5.30 Σύγκριση Υδρόψυκτου-Αερόψυκτου Συμπυκνωτή συναρτήσεως του Υψομέτρου για Πύργο Ηλιακής Ισχύος, με Κύκλωμα Νερού-Ατμού χωρίς Αναθέρμανση, στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου.



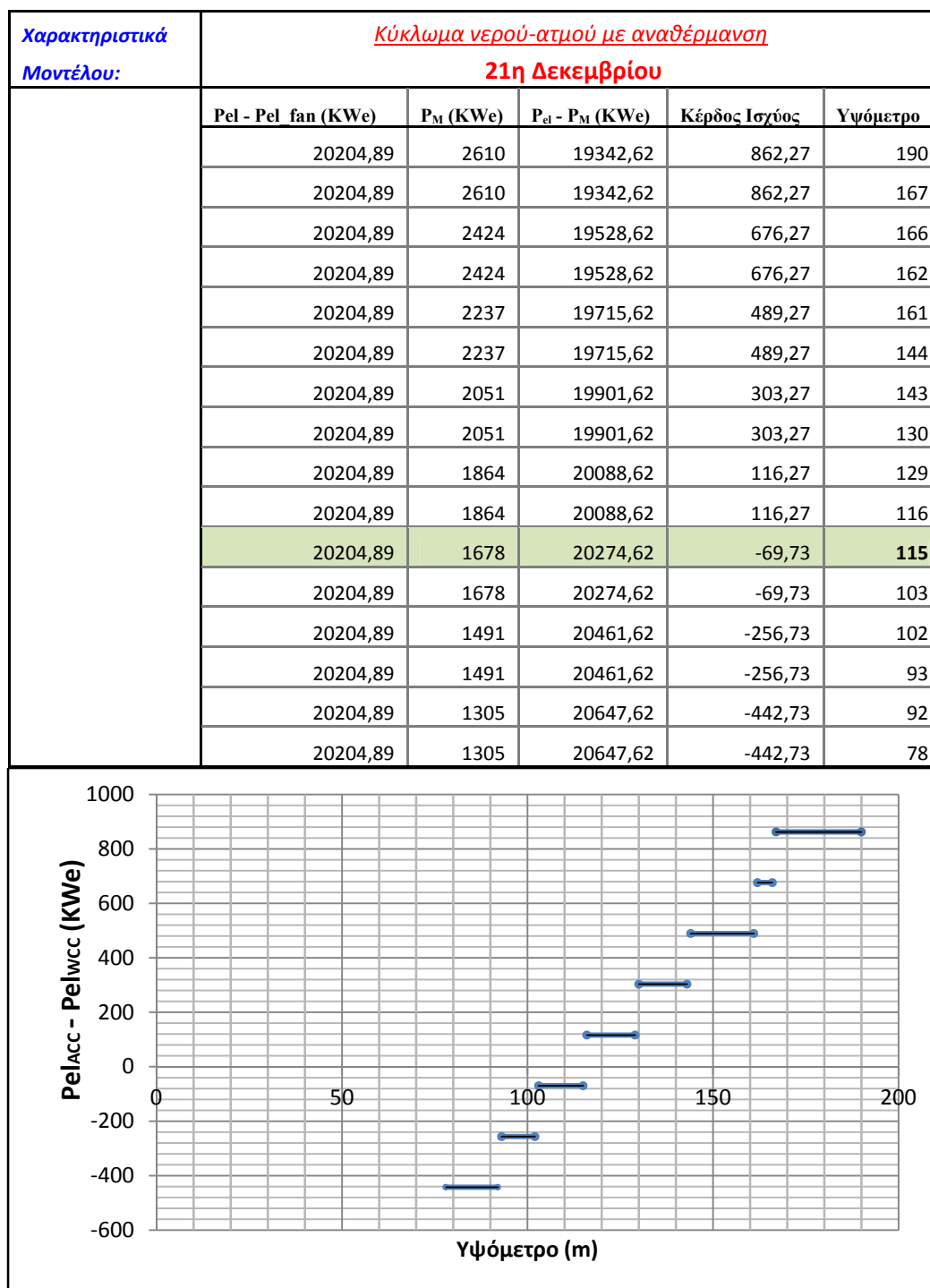
Χαρακτηριστικά Μοντέλου:	<u>Κύκλωμα νερού-ατμού με αναθέρμανση</u>				
	<b>21<sup>η</sup> Ιουνίου</b>				
	P <sub>el</sub> - P <sub>el fan</sub> (KWe)	P <sub>M</sub> (KWe)	P <sub>el</sub> - P <sub>M</sub> (KWe)	Κέρδος Ισχύος	Υψόμετρο
	22814,51	2610	22144,94	669,57	190
	22814,51	2610	22144,94	669,57	167
	22814,51	2424	22330,94	483,57	166
	22814,51	2424	22330,94	483,57	162
	22814,51	2237	22517,94	296,57	161
	22814,51	2237	22517,94	296,57	144
	22814,51	2051	22703,94	110,57	143
	22814,51	2051	22703,94	110,57	130
	22814,51	1864	22890,94	-76,43	<b>129</b>
	22814,51	1864	22890,94	-76,43	116
	22814,51	1678	23076,94	-262,43	115
	22814,51	1678	23076,94	-262,43	103
	22814,51	1491	23263,94	-449,43	102
	22814,51	1491	23263,94	-449,43	93
	22814,51	1305	23449,94	-635,43	92
	22814,51	1305	23449,94	-635,43	78



Σχήμα 5.31 Σύγκριση Υδρόψυκτου-Αερόψυκτου Συμπυκνωτή συναρτήσεσι του Υψομέτρου για Πύργο Ηλιακής Ισχύος ,με Αναθέρμανση στο Κύκλωμα Νερού-Ατμού, στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου.



Σχήμα 5.32 Σύγκριση Υδρόψυκτου-Αερόψυκτου Συμπυκνωτή συναρτήσεως του Υψομέτρου για Πύργο Ηλιακής Ισχύος, με Κύκλωμα Νερού-Ατμού χωρίς Αναθέρμανση, στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου.



Σχήμα 5.33 Σύγκριση Υδρόψυκτου-Αερόψυκτου Συμπυκνωτή συναρτήσεως του Υψομέτρου για Πύργο Ηλιακής Ισχύος ,με Αναθέρμανση στο Κύκλωμα Νερού-Ατμού, στις 12:00 της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου.

Από τα τελικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι ,από ενεργειακής άποψης, η χρήση υδρόψυκτου συμπυκνωτή συμφέρει για υψομετρικές τιμές μικρότερες των 129 m την 21<sup>η</sup> Ιουνίου, και για υψομετρικές τιμές μικρότερες των 115 m την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### **Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε μία προσπάθεια εμβάθυνσης στη σύγχρονη τεχνολογία των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη, ή αλλιώς γνωστών και ως πύργων ηλιακής ισχύος. Το θέμα αναλύθηκε σφαιρικά, αλλά και ειδικά στα πλαίσια της ελληνικής επικράτειας, όπως είδαμε κυρίως στο υπολογιστικό τμήμα της εργασίας. Σε κάθε περίπτωση, ο βασικός σκοπός, που δεν ήταν άλλος από την ενασχόληση με μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας στο μέλλον, φαίνεται να εκπληρώθηκε. Σε μεγάλο τμήμα της εργασίας παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν ζητήματα, τα οποία θα μπορούσε κανείς να πει, ότι ανήκουν στον πυρήνα αυτής της τεχνολογίας.

Πιο συγκεκριμένα, ύστερα από μία συνοπτική παρουσίαση των διαθέσιμων συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, η προσοχή εστιάστηκε στους πύργους ηλιακής ισχύος. Μελετήθηκε κάθε ξεχωριστό υποσύστημα που τους αποτελεί, και δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο πεδίο των ηλιοστατών, λόγω των σύνθετων οπτικών διατάξεων του αλλά και της μεγάλης επίδρασής του στον συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Εξετάστηκε, ακόμα, ο τρόπος σχεδιασμού της διάταξης ενός ηλιοστατικού πεδίου, καθώς έγινε αντιληπτός ο ρόλος της στην αποδοτική λειτουργία του σταθμού. Βασικό συμπέρασμα που προέκυψε από την εκτενέστερη μελέτη του ηλιοστατικού πεδίου, είναι ότι ο βαθμός απόδοσης του κινείται σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανάλογα με την θέση του ηλίου στον ουρανό. Τονίστηκε, για το λόγο αυτό η ανάγκη υπολογισμού του βαθμού απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου κατά συχνά διαστήματα, για τη σωστή προσομοίωση της λειτουργίας μιας εγκατάστασης με πύργο ηλιακής ισχύος. Είδαμε χαρακτηριστικά, ότι η υιοθέτηση ενός σταθερού μέσου όρου για το βαθμό απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, στην προσπάθεια προσομοίωσής του, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα για την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στη γεννήτρια, όπως και αποδείξαμε για την προτεινόμενη τιμή 0,56 του βαθμού απόδοσης του πεδίου από τον οδηγό αξιολόγησης της P.A.E., μέσω του μοντέλου που κατασκευάσαμε για τον πύργο ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της λειτουργίας του μοντέλου αυτού, αν και λίγα σε αριθμό, έδειξαν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά στοιχεία για την εκμετάλλευση της ηλιακής ισχύος από τον σταθμό. Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ήταν για τις μεσημεριανές ώρες συνεχώς υψηλή, και ακόμα και στις περιπτώσεις που ξεπερνούσε την τιμή της ονομαστικής του σταθμού, τα απορριπτόμενα ποσά ηλεκτρικής ισχύος παρέμεναν μικρά. Εκτός των άλλων, τα δεδομένα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στον Αθρινόλακκο, μαρτυρούσαν εξ' αρχής μία τοποθεσία με υψηλό ηλιακό δυναμικό. Σημαντικά συμπεράσματα εξήχθησαν, επίσης, σχετικά με τα κυκλώματα νερού-ατμού που χρησιμοποιούνται στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τέτοιων ηλιοθερμικών εγκαταστάσεων. Το μοντέλο της εγκατάστασης του ηλιακού πύργου στον Αθρινόλακκο, προσομοιώθηκε για την εκδοχή κυκλώματος νερού-ατμού με και χωρίς αναθέρμανση. Ουσιαστική εμπειρία αποκομίστηκε και από την μετάβαση του μοντέλου από συνθήκες θερινής σε συνθήκες χειμερινής λειτουργίας, καθώς έτσι προσδιορίστηκαν τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά που αλλάζουν στο εκάστοτε κύκλωμα νερού-ατμού, και επηρεάζουν την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Τέλος, παρουσιάστηκε μια αρκετά διαφωτιστική σύγκριση της απόδοσης του σταθμού για υδρόψυκτο και αερόψυκτο συμπυκνωτή. Από αυτή συμπεράναμε, ότι η χρήση αερόψυκτου συμπυκνωτή ευνοείται για μεγάλες τιμές του υψομέτρου, ενώ η χρήση υδρόψυκτου συμπυκνωτή για μικρότερες.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις διάφορες προσομοιώσεις ,που εκτελέστηκαν για το μοντέλο του πύργου ηλιακής ισχύος στον Αθρινόλακκο ,ήταν ικανοποιητικά. Παρ' όλα αυτά, είναι σχεδόν πάντα βέβαιη η πιθανότητα ύπαρξης μικρών η μεγαλύτερων σφαλμάτων. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, ένα σφάλμα που μπορεί να υπεισέρχεται στους υπολογισμούς, είναι αυτό που προκύπτει από την παραδοχή που έγινε, ότι ο βαθμός απόδοσης του κεντρικού ηλιακού δέκτη παραμένει σταθερός και ίσος με την τιμή 0,783 που προτείνει στον οδηγό αξιολόγησης συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων η P.A.E.. Φυσικά, ο βαθμός απόδοσης του κεντρικού δέκτη δεν παρουσιάζει σε καμία περίπτωση μεταβλητότητα ανάλογη με αυτή του βαθμού απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου. Παρ' όλα αυτά, για την κατασκευή ενός τέλει μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας ενός πύργου ηλιακής ισχύος, θα απαιτείτο να εφαρμοστεί για τον ηλιακό δέκτη ανάλογη διερεύνηση και ξεχωριστή προσομοίωση της λειτουργίας του με αυτή που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για το ηλιοστατικό πεδίο. Η ιδέα αυτή της εξέλιξης του μοντέλου προσομοίωσης του πύργου, αφήνεται ως πρόταση για μελλοντική έρευνα.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάστηκε και περιόρισε το πλήθος των αποτελεσμάτων που θα μπορούσαν να προκύψουν, ήταν το γεγονός ότι η λειτουργία του σταθμού μπορούσε να προσομοιωθεί ,μέσω του μοντέλου που είχε κατασκευαστεί, μόνο για διακριτές χρονικές στιγμές στο χρόνο, όπως για παράδειγμα 12:00 της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου ή 12:00 της 21<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου. Το γεγονός, ότι ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου έπρεπε να προσδιοριστεί κάθε φορά από τη σύζευξη του προγράμματος Tonatiuh® με το πρόγραμμα IPSEpro®, έκανε τη διαδικασία προσομοίωσης χρονοβόρα και μη αυτοματοποιημένη. Σαν σενάριο για μελλοντική έρευνα, θα μπορούσε ,λοιπόν, να εξεταστεί ένας τρόπος αυτοματοποίησης της παραπάνω διαδικασίας, μέσω προγραμματισμού, έτσι ώστε να γίνεται εφικτή ,σε λογικά χρονικά πλαίσια, η προσομοίωση της λειτουργίας ενός πύργου ηλιακής ισχύος για κάθε ώρα του έτους.

Επιπροσθέτως, αντικείμενο προς μελέτη, θα μπορούσε να αποτελέσει η διερεύνηση συστημάτων κεντρικού δέκτη για υβριδικού χαρακτήρα εφαρμογές, όπως για παράδειγμα την προθέρμανση αέρα καύσης συστήματος αεριοστροβίλου, εγκατεστημένου σε μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Η εξέταση της οικονομικής βιωσιμότητας τέτοιων υβριδικών συστημάτων στην ελληνική επικράτεια θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Θέματα σύγχρονης τεχνολογίας ,συνυφασμένα με την εκμετάλλευση της ηλιακής ισχύος, που θα μπορούσαν επίσης να μελετηθούν είναι η παραγωγή ηλιακών καυσίμων μέσω συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συστήματος ηλιακής καμινάδας (solar chimney).

## **Βιβλιογραφία**

- [1]. Wikipedia, the free encyclopedia-sun.  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Sun> [Ηλεκτρονικό]
- [2]. Wikipedia, the free encyclopedia-solar energy.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy) [Ηλεκτρονικό]
- [3]. Wikipedia, the free encyclopedia-earth's orbit.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Earth's\\_orbit](http://en.wikipedia.org/wiki/Earth's_orbit) [Ηλεκτρονικό]
- [4]. **Soteris Kalogirou**. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. s.l.: Elsevier 2009. ISBN 978-0-12-374501-9.
- [5]. **Στέφανος Δεληκαράογλου**. *Συμβολή στο σχεδιασμό της μεγάλης διείσδυσης αιολικής ενέργειας στο Ελληνικό Σύστημα*. s.l.: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία, 2010.
- [6]. U.S. Energy Information Administration (EIA).  
<http://205.254.135.7/countries/country-data.cfm?fips=GR#cde> [Ηλεκτρονικό]
- [7]. Νόμος υπ' αριθμόν 3851/2010 ΦΕΚ 85Α'/4.6.2010
- [8]. Invest in Greece Agency.  
<http://www.investingreece.gov.gr/default.asp?pid=36&sectorID=38&la=2> [Ηλεκτρονικό]
- [9]. **Νατάσσα Μπλάτσιου**. *Ελληνική Επανάσταση στην Ενέργεια*. Άρθρο του ένθετου "Κ" της εφημερίδας "Η Καθημερινή" /Αρ. Τεύχους 392, 5 Δεκεμβρίου 2010.
- [10]. **Κίμων Α. Αντωνόπουλος**. Καθηγητής Ε.Μ.Π. *Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα (Μέρος Πρώτο)*. s.l.: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008.
- [11]. ITACA (Innovación en Tecnología Apropiada Comunitaria y Autónoma).  
<http://itacanet.org/eng/elec/solar/sun3.pdf> [Ηλεκτρονικό]
- [12]. Teach Engineering. Lesson: Solar Angles and Tracking Systems.  
[http://www.teachengineering.org/view\\_lesson.php?url=http://www.teachengineering.org/collecti%20on/cub/\\_lessons/cub\\_pveff/cub\\_pveff\\_lesson01.xml](http://www.teachengineering.org/view_lesson.php?url=http://www.teachengineering.org/collecti%20on/cub/_lessons/cub_pveff/cub_pveff_lesson01.xml) [Ηλεκτρονικό]
- [13]. [www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com) [Ηλεκτρονικό]
- [14]. **Geyer Dr. Michael**. *Concentrated Solar Thermal Power- Now!* s.l.: SolarPaces, September 2005.
- [15]. Solar Server- Online Portal to Solar Energy.  
<http://www.solarserver.com/solar-magazine/solar-report/solar-report/concentrated-solar-power.html> [Ηλεκτρονικό]

- [16]. [www.dlr.de](http://www.dlr.de) [Ηλεκτρονικό]
- [17]. [www.nurenergie.com](http://www.nurenergie.com) [Ηλεκτρονικό]
- [18]. Team 04 Stirling.  
[http://poisson.me.dal.ca/~dp\\_08\\_04/Theory.html](http://poisson.me.dal.ca/~dp_08_04/Theory.html) [Ηλεκτρονικό]
- [19]. Wikipedia, the free encyclopedia-Brayton Cycle.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Brayton\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Brayton_cycle) [Ηλεκτρονικό]
- [20]. Wikipedia, the free encyclopedia-Rankine Cycle.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle) [Ηλεκτρονικό]
- [21]. Thermodynamics-Theory.  
[https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=th&chap\\_sec=10.3&page=theory](https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=th&chap_sec=10.3&page=theory)  
[Ηλεκτρονικό]
- [22]. **Alvarez, Romero Manuel.** *Concentrating Solar Thermal Power.*  
Κεφάλαιο 21 του βιβλίου: *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy.* Frank Keith. s.l.: Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [23]. **Keith Lovegrove** and **Andreas Luzzi.** *Solar Thermal Power Systems.* Encyclopedia of Physical Science and Technology, 3rd Edition, Vol. 15
- [24]. <http://blog.paksc.org/2011/05/14/solar-thermal-solution-energy-crisis/> [Ηλεκτρονικό]
- [25]. [www.greens.org.au](http://www.greens.org.au) [Ηλεκτρονικό]
- [26]. [www.solar-thermal.com](http://www.solar-thermal.com) [Ηλεκτρονικό]
- [27]. [www.solarpowerworldonline.com](http://www.solarpowerworldonline.com) [Ηλεκτρονικό]
- [28]. (Σχέδιο Νόμου Α.Π.Ε.) <http://www.skai.gr/files/1/gpapav2/ape2204.pdf>  
[Ηλεκτρονικό]
- [29]. <http://www.brightsourceenergy.com/technology/faqs> [Ηλεκτρονικό]
- [30]. <http://www.skepticalscience.com/Zero-Carbon-Australia-2020.html> [Ηλεκτρονικό]
- [31]. [www.energy-enviro.fi](http://www.energy-enviro.fi) [Ηλεκτρονικό]
- [32]. [www.pveng.com](http://www.pveng.com) [Ηλεκτρονικό]
- [33]. <http://csirosolarblog.com/tag/heliostat/> [Ηλεκτρονικό]
- [34]. Wikipedia, the free encyclopedia-Heliostat.  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Heliostat> [Ηλεκτρονικό]
- [35]. <http://www.practicalsolar.com/technology.html> [Ηλεκτρονικό]

- [36]. **Patricia Kuntz Falcone**. *A handbook for solar central receiver design*. Sandia National Laboratories, Livermore, December 1986.
- [37]. William B. Stine and Michael Geyer. *Power From The Sun*. Chapter 10, Central Receiver Systems. Copyright © 2001
- [38]. *Review of CSP Technologies and Cost Drivers Overview, Phase I (Part I)*. South Asia Energy Unit Sustainable Development Department, The World Bank, s.l. Ynfiniti Engineering Services, 2010.
- [39]. **Manuel A. Silva Perez**. *Concentrated Solar Thermal Power Technology Training, Session-3 Point Focus Technologies*. April 14, 2010. (<http://www.slideshare.net/sustenergy/session-3-point-focus>)
- [40]. **Qiang Yu, Zhifeng Wang, Ershu Xu**. *Simulation and analysis of the central cavity receiver's performance of solar thermal power tower plant*. Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic Systems, Chinese Academy of Sciences, Institute of Electrical Engineering, Beijing 100190, China. *Solar Energy*, Volume 86, Issue 1. Elsevier Ltd.
- [41]. **Marc Medrano, Antoni Gil, Ingrid Martorell, Xavi Potau, Luisa F. Cabeza**. *State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies*. GREA Innovació Concurrent, Universitat de Lleida, Pere de Cabrera s/n, 25001 Lleida, Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 1. Elsevier Ltd.
- [42]. <http://flowserve.com/Industries/Power-Generation/Concentrated-Solar-Power> [Ηλεκτρονικό]
- [43]. U.S. Department of Energy. [http://www.eere.energy.gov/basics/renewable\\_energy/thermal\\_storage.html](http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/thermal_storage.html) [Ηλεκτρονικό]
- [44]. [www.emeraldinsight.com](http://www.emeraldinsight.com) [Ηλεκτρονικό]
- [45]. Wikipedia, the free encyclopedia-PS10 solar power plant. [http://en.wikipedia.org/wiki/PS10\\_solar\\_power\\_plant](http://en.wikipedia.org/wiki/PS10_solar_power_plant) [Ηλεκτρονικό]
- [46]. Oil of Russia: Lukoil International Magazine. <http://www.oilru.com/or/47/1001/> [Ηλεκτρονικό]
- [47]. Wikipedia, the free encyclopedia-The Solar Project. [http://en.wikipedia.org/wiki/The\\_Solar\\_Project#Solar\\_One](http://en.wikipedia.org/wiki/The_Solar_Project#Solar_One) [Ηλεκτρονικό]
- [48]. Wikipedia, the free encyclopedia-List of solar thermal power stations. [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_thermal\\_power\\_stations#cite\\_note-officialcalifornia-40](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations#cite_note-officialcalifornia-40) [Ηλεκτρονικό]
- [49]. [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org) [Ηλεκτρονικό]



- [50]. CSPToday World Map 2011.  
<http://www.trec-uk.org.uk/images/CSPTodayWorldMap2011.pdf> [Ηλεκτρονικό]
- [51]. Solar Energy Industries Association -SEIA.  
[www.seia.org](http://www.seia.org) [Ηλεκτρονικό]
- [52]. Οδηγός αξιολόγησης έργων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας. – Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (P.A.E.). Έκδοση 1.0 ,Νοέμβριος 2010.  
<http://www.rae.gr/old/downloads/SolThermGuide.pdf> [Ηλεκτρονικό]
- [53]. **Xiudong Wei, Zhenwu Lu, Zhifeng Wang, Weixing Yu, Hongxing Zhang, Zhihao Yao.** *A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant.* Renewable Energy, Volume 35, Issue 9. Elsevier Ltd.
- [54]. **Xiudong Wei, Zhenwu Lu, Weixing Yu, Zhifeng Wang.** *A new code for the design and analysis of the heliostat field layout for power tower system.* Solar Energy, Volume 84, Issue 4. Elsevier Ltd.
- [55]. **Francisco J. Collado.** *Quick evaluation of the annual heliostat field efficiency.* Univ. Zaragoza, CPS-B, Dpto de Ingeniería Mecánica, María de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain. Solar Energy, Volume 82, Issue 4. Elsevier Ltd.
- [56]. **Peter P. Groumpos, Kamel Khouzam.** *A Generic Approach to the Shadow Effect of Large Solar Power Systems.* Energy Research Center, Department of Electrical Engineering, Cleveland State University, Cleveland OH 44115 (U.S.A.).
- [57]. **Xiudong Wei, Zhenwu Lu, Zi Lin, Hongxin Zhang, Zhengguo Ni.** *Optimization Procedure for Design of Heliostat Field Layout of a 1MWe Solar Tower Thermal Power Plant.*
- [58]. **Mark Schmitz, Peter Schwarzbözl, Reiner Buck, Robert Pitz-Paal.** *Assessment of the potential improvement due to multiple apertures in central receiver systems with secondary concentrators.* Solar Energy, Volume 80, Issue 1. Elsevier Ltd.
- [59]. **Zhihao Yao, Zhifeng Wang, Zhenwu Lu, Xiudong Wei.** *Modeling and simulation of the pioneer 1 MW solar thermal central receiver system in China.* Renewable Energy, Volume 34, Issue 11. Elsevier Ltd.
- [60]. **Robert Y. Ma.** *Wind Effects on Convective Heat Loss From a Cavity Receiver for a Parabolic Concentrating Solar Collector.* Department of Mechanical Engineering, California State Polytechnic University Pomona, CA 91768. September 1993. SAND92-7293.
- [61]. **Εμμ. Κ. Κακαράς,** Καθηγητής Ε.Μ.Π. *Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί (Δεύτερη Έκδοση).* s.l.: Fountas

- [62]. **Akiba Segal, Michael Epstein.** *Optimized working temperatures of a solar central receiver.* Solar Research Facilities Unit, Weizmann Institute of Science, Herzl Street, P.O. Box 26, Rehovot 76100, Israel. Solar Energy, Volume 75, Issue 6. Elsevier Ltd.
- [63]. **Dan Weinstock, Joseph Appelbaum.** *Optimal Solar Field Design of Stationary Collectors.* Journal of Solar Energy Engineering.
- [64]. [www.renewableenergyfocus.com](http://www.renewableenergyfocus.com) [Ηλεκτρονικό]
- [65]. **Luis Crespo, Francisco Ramos, Fernando Martínez.** *Questions and Answers on Solar Central Receiver Plant Design by NSPOC.* SolarPACES 2011.
- [66]. **Motoaki Utamura, Yutaka Tamaura, Minoru Yuasa, Rina Kajita, Takashi Yamamoto.** *Optimal Heliostat Layout for Concentrating Solar Tower Systems.* Proceedings of the International Conference on Power Engineering 2007. October 23-27, 2007, Hangzhou, China. Challenges of Power Engineering and Environment.
- [67]. **L. M. Murphy, J. V. Anderson, W. Short, T. Wendelln.** *System Performance and Cost Sensitivity Comparisons of Stretched Membrane Heliostat Reflectors with Current Generation Glass/Metal Concepts.* Solar Energy Research Institute-A Division of Midwest Research Institute. December 1985.
- [68]. <http://www.shimadzu.com/products/opt/off/5iqj1d0000002ws5.html> [Ηλεκτρονικό]
- [69]. **Thomas R. Mancini.** *Catalog of Solar Heliostats.* SolarPACES technical report No. III - 1/00. June 2000.
- [70]. **Bruce L. Kistler.** *A user's manual for DELSOL3: A computer code for calculating the optical performance and optimal system design for solar thermal central receiver plants.* Solar Central Receiver Components Division. Sandia National Laboratories, Livermore. SAND 86-8018.
- [71]. **Marcelino Sanchez, Manuel Romero.** *Methodology for generation of heliostat field layout in central receiver systems based on yearly normalized energy surfaces.* DER-Plataforma Solar de Almeria, CIEMAT, Avda. Complutense 22, E-28040 Madrid, Spain. Solar Energy, Volume 80, Issue 7. Elsevier Ltd.
- [72]. SoDa-Solar Radiation Data.  
<http://www.soda-is.com/eng/index.html> [Ηλεκτρονικό]
- [73]. <http://wpp.greenwichmeantime.com/time-zone/europe/european-union/greece/>  
[Ηλεκτρονικό]
- [74]. **Pierre Garcia, Alain Ferriere, Jean-Jacques Beziau.** *Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review.* Solar Energy, Volume 82, Issue 3. Elsevier Ltd.
- [75]. [www.meteo.gr](http://www.meteo.gr) [Ηλεκτρονικό]

[76]. **Δημήτριος Ε. Παπαντώνης**, Καθηγητής Ε.Μ.Π. *Υδροδυναμικές Μηχανές. Αντλίες-Υδροστρόβιλοι*. Έκδοση 2<sup>η</sup>, Αθήνα 2002. Εκδόσεις Συμείων.

[77] [www.flowserve.com](http://www.flowserve.com) [Ηλεκτρονικό]