



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

*Σχεδιασμός ηλιοστατικού πεδίου ηλιοθερμικής εγκατάστασης με  
κεντρικό ηλιακό δέκτη και προσδιορισμός της προς ατμοπαραγωγή  
θερμικής απολαβής*

Διπλωματική Εργασία

**ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

Επιβλέπων: Καρέλλας Σωτήριος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

**Αθήνα, Ιούλιος 2013**

.....  
Λαμπρόπουλος Παναγιώτης

**Copyright © ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, 2013.  
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 αποτελεί το επιστέγασμα των σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των ηλιοθερμικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας και πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του επίκουρου καθηγητή κ. Σωτήρη Καρέλλα.

Για το λόγο αυτό, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον κ. Καρέλλα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου.

Οφείλω επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Αλέξη Φωκά Κοσμετάτο, διευθύνων σύμβουλο της NUR-MOH A.E. και τεχνικό διευθυντή (CTO) της Nur Energie, ο οποίος με τις υποδείξεις και ιδέες του, συνέβαλε καταλυτικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον συνεργάτη και φίλο μου Χρήστο Σμυρνάκη για το άριστο κλίμα συνεργασίας μας και τις παρατηρήσεις του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής.

Σε καμία περίπτωση δε μπορώ να ξεχάσω τις ξαδέρφες και τους φίλους μου, τόσο από τη σχολή, όσο και από την πατρίδα μου, τη Μυτιλήνη, για την καθημερινή τους υποστήριξη. Η χρονιά αυτή μας βρήκε τους περισσότερους στην τελευταία φοιτητική χρονιά στην προσπάθεια μας να ολοκληρώσουμε τις σπουδές μας με την πίεση που αυτό συνεπάγεται. Η επικοινωνία μαζί τους ήταν σημαντικό έρεισμα σε στιγμές που ήμουν έτοιμος να εγκαταλείψω.

Τέλος, τις θερμότερες ευχαριστίες μου θα ήθελα να τις εκφράσω προς τους γονείς μου και την αδερφή μου για την αμέριστη ηθική και υλική στήριξη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια. Σας ευχαριστώ για την υπομονή σας...

Πραγματικά σας ευχαριστώ...

Λαμπρόπουλος Παναγιώτης

Αθήνα, Ιούλιος 2013

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εις βάθος κατανόηση της λειτουργίας των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη ή αλλιώς πύργων ηλιακής ισχύος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο πρώτο υποσύστημά τους, που έρχεται σε επαφή με τις ακτίνες του ήλιου, το ηλιοστατικό πεδίο. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος σχεδιασμού ηλιοστατικών πεδίων, ο οποίος λαμβάνει υπόψιν την ιδιαίτερη τοπογραφία της εκάστοτε διαθέσιμης έκτασης, παρέχοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης αποδοτικών πεδίων σε περιοχές με μη επίπεδο έδαφος. Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά οι διάφορες απώλειες του πεδίου, καθώς και του κεντρικού δέκτη, και αναπτύσσονται οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι υπολογισμού τους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιείται διερεύνηση των παραμέτρων σχεδιασμού ηλιοστατικού πεδίου στην περιοχή του Αθρινόλακκου στην Κρήτη, από την οποία εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα γενικότερης ισχύος. Προτείνεται επίσης, συγκεκριμένη διάταξη ηλιοστατών στο μελετούμενο πεδίο και με χρήση μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής, προσδιορίζεται η θερμική απολαβή στον ηλιακό δέκτη κατά τη διάρκεια ενός έτους. Τέλος, πραγματοποιείται προκαταρκτική σχεδίαση του κεντρικού δέκτη για ατμοηλεκτρικό σταθμό εγκατεστημένης ισχύος 50 MWe με σύστημα αποθήκευσης, και προσδιορίζεται η τελική θερμική ισχύς που προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο του σταθμού (νερό-ατμός) ανά δεκάλεπτο, για όλο το έτος.

**Λέξεις-κλειδιά:** Ηλιακή Ενέργεια, Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα, Ηλιοθερμικές Εγκαταστάσεις, Πύργοι Ηλιακής Ισχύος, Πεδίο Ηλιοστατών, Ηλιοστάτης, Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης, Απώλειες Ηλιοστατικού Πεδίου, Επίδραση Συνημιτόνου, Ατμοσφαιρική Διαπερατότητα, Σκίαση και Παρεμπόδιση, Απώλειες ηλιακού δέκτη

## Summary

The scope of this diploma thesis is the analysis and simulation of the operation of central solar receiver systems, also referred to as solar tower power plants. Particular emphasis is given to their first subsystem that comes into contact with the rays of the sun, the heliostat field. Specifically, a new algorithm for the design of heliostat fields is proposed, which takes into account the particular topography of the available area, enabling the development of efficient fields in areas with uneven terrain. Additionally, the various losses of the heliostat field and the central receiver are described in detail, and algorithms for their calculation are developed. In the present work, an investigation of the design parameters of a heliostat field in the area of Atherinolakkos (Crete) is carried out, varying several characteristics of the plant, in order to understand its behavior. A heliostat layout in the studied field is suggested and the heat gain on the receiver is determined throughout a year. Finally, a preliminary design of the central receiver is performed for a direct steam generation 50MWe power plant with storage, and the thermal input on the working fluid (water-steam) is calculated for a whole year in 10 minute timesteps.

**Key-words:** Solar Energy, Concentrating Solar Power Systems (CSP), Solar Thermal Power Plants, Solar Power Tower, Heliostat Field, Heliostats, Central Solar Receiver, Heliostat Field Losses, Cosine Losses, Atmospheric Attenuation, Shadowing and Blocking, Central Receiver Losses

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες . . . . .	3
Περίληψη.....	4
Summary .....	5
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Εισαγωγή στα Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα (ΣΗΣ) .....	9
1.1 Ανάγκη Υιοθέτησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας .....	9
1.2 Συγκέντρωση Ηλιακής Ενέργειας: Ιστορική Αναδρομή .....	11
1.3 Αρχή Λειτουργίας και Εφαρμογές Ηλιοθερμικής Τεχνολογίας .....	13
1.3.1 Συγκέντρωση Ηλιακής Ακτινοβολίας και Λόγος Συγκέντρωσης .....	13
1.3.2 Πεδία Αξιοποίησης Συγκεντρωτικών Ηλιοθερμικών Συστημάτων .....	14
1.3.3 Θερμοδυναμικοί κύκλοι εκμετάλλευσης Ηλιακής Ενέργειας .....	15
1.4 Περιοχές κατάλληλες για ανάπτυξη ΣΗΣ - Ηλιακό Δυναμικό.....	18
1.5 Διαθέσιμες Τεχνολογίες ΣΗΣ.....	19
1.5.1 Συστήματα Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών .....	20
1.5.2 Συστήματα με Γραμμικούς Ανακλαστήρες τύπου Fresnel.....	22
1.5.3 Συστήματα Δίσκου - Μηχανής.....	22
1.5.4 Συστήματα με Πύργο Ηλιακής Ισχύος (Κεντρικού Δέκτη).....	23
1.5.4 Σύγκριση Διαφορετικών Τεχνολογιών .....	24
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Τεχνολογία Πύργου Ηλιακής Ισχύος .....	26
2.1 Αρχή Λειτουργίας.....	27
2.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα των Πύργων Ηλιακής Ισχύος .....	27
2.3 Υποσυστήματα του Πύργου Ηλιακής Ισχύος.....	29
2.3.1 Ηλιοστατικό Πεδίο .....	30
2.3.2 Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης .....	34
2.3.3 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	39
2.3.4 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας.....	42
2.3.5 Σύστημα Εφεδρικής Καύσης.....	46
2.4 Συστήματα Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη ανά τον Κόσμο.....	47
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Ηλιοστατικού Πεδίου .....	48
3.1 Επιλογή Κατάλληλης Διάταξης Ηλιοστατών .....	48
3.2 Αλγόριθμος Σχεδιασμού Ηλιοστατικού Πεδίου με βάση την τοπογραφία της διαθέσιμης έκτασης.....	50
3.2.1 Δεδομένα εισόδου από το σχεδιαστή – Παράμετροι Σχεδιασμού .....	51

3.2.2	Περιγραφή αλγορίθμου .....	53
3.2.3	Υπολογισμός μέγιστης κλίσης εδάφους στη θέση του ηλιοστάτη .....	58
3.3	Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Ηλιοστατικού Πεδίου .....	59
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> :	Απόδοση Συστημάτων Ηλιοστατικού πεδίου & Ηλιακού Δέκτη .....	61
4.1	Εύρεση της Θέσης του Ήλιου .....	61
4.1.1	Συστήματα Ηλιακών Συντεταγμένων.....	62
4.1.2	Αλγόριθμος Υπολογισμού Ηλιακών Γωνιών .....	63
4.2	Απώλειες Ηλιοστατικού Πεδίου.....	66
4.2.1	Απώλειες Συνημιτόνου (Cosine Losses) .....	67
4.2.2	Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδισης (Shadowing & Blocking Losses) .....	71
4.2.3	Απώλειες Ατμοσφαιρικής Διαπερατότητας (Attenuation Losses) .....	78
4.2.4	Απώλειες Ανακλαστικότητας (Heliostat Reflectivity Losses) .....	79
4.2.5	Απώλειες Διαρροής (Spillage Losses).....	81
4.3	Απώλειες Κεντρικού Δέκτη .....	82
4.3.1	Απώλειες Συναγωγής (Convection Losses).....	82
4.3.2	Απώλειες Ακτινοβολίας (Radiation Losses).....	84
4.3.3	Απώλειες Αγωγής (Conduction Losses).....	85
4.3.4	Απώλειες Λόγω Ανάκλασης (Receiver Reflection/ Absorption Losses) .....	85
4.3.5	Ορισμός Βαθμού Απόδοσης Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη .....	86
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> :	Μοντελοποίηση Ηλιοστατικού Πεδίου και Κεντρικού Δέκτη	
Μελέτη περίπτωσης στον Αθρινόλακκο Κρήτης.....		87
5.1	Δεδομένα Περιοχής .....	88
5.1.1	Τοποθεσία Πεδίου .....	88
5.1.2	Άμεση Ηλιακή Ακτινοβολία.....	89
5.1.3	Τοπογραφία της περιοχής.....	90
5.1.4	Διαθέσιμη έκταση για τοποθέτηση ηλιοστατών.....	91
5.2	Διερεύνηση των Παραμέτρων Σχεδίασης του Ηλιοστατικού Πεδίου (Ανάλυση Ευαισθησίας) .....	92
5.2.1	Μέγιστη επιτρεπτή κλίση εδάφους για τοποθέτηση ηλιοστατών.....	92
5.2.2	Θέση Πύργου.....	95
5.2.3	Μέγεθος Ηλιοστατών – Απόδοση πεδίου.....	96
5.2.4	Ύψος πύργου .....	98
5.2.5	Πυκνότητα διάταξης ηλιοστατών.....	102
5.3	Χαρακτηριστικά Προτεινόμενης Εγκατάστασης .....	104
5.3.1	Παράμετροι Σχεδίασης Ηλιοστατικού Πεδίου .....	104
5.3.2	Απώλειες Ηλιοστατικού Πεδίου.....	105

5.3.3	Θερμική Ισχύς στην Επιφάνεια του Δέκτη.....	109
5.3.4	Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση του Δέκτη .....	111
5.3.5	Υπολογισμός Θερμικής Ισχύος προσδιδόμενης στο εργαζόμενο μέσο.....	115
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> :	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....	118
Βιβλιογραφία.....		117
Παράρτημα.....	Παράρτημα.....	127



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Έισαγωγή στα Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα

### 1.1 Ανάγκη Υιοθέτησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Είναι αδιαμφισβήτητο ότι η χρήση ορυκτών καυσίμων στις μετακινήσεις, στην παραγωγή ενέργειας και σε όλες σχεδόν τις βιομηχανικές δραστηριότητες κατά τον προηγούμενο αιώνα, οδήγησε σε πρωτοφανή άνηση και άνοδο του βιοτικού επιπέδου και του προσδόκιμου ζωής στις χώρες του σύγχρονου αναπτυγμένου κόσμου. Θα μπορούσε μάλιστα χωρίς υπερβολή να πει κανείς ότι η ενεργειακή ζήτηση μιας χώρας, η οποία καλύπτεται κατά συντριπτικό ποσοστό -αν όχι εξολοκλήρου- από την καύση ορυκτών καυσίμων, αποτελεί μέτρο της ποιότητας διαβίωσης των πολιτών της. Ομολογουμένως, δεν άργησε να γίνει αντιληπτό ότι η καύση των ορυκτών καυσίμων συνοδευόταν και από τη ρύπανση της ατμόσφαιρας. Εξαιτίας όμως, της μεγάλης οικονομικής ανάπτυξης και ζήτησης που σημειωνόταν, δεν δόθηκε αρκετή σημασία, ανώ ακόμα και τα τελευταία χρόνια, οι προσπάθειες μείωσης των εκπομπών ρύπων είναι σπασμωδικές και αναποτελεσματικές.

Η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι ένα πρόβλημα που ταλανίζει τις σημερινές κοινωνίες και έχει λάβει τρομακτικές διαστάσεις. Η κλιματική αλλαγή είναι πλέον ορατή, και πολλά είναι τα φαινόμενα που εντείνουν τις ανησυχίες για την πορεία του πλανήτη μας στο μέλλον. Η άνοδος της θερμοκρασίας, το λιώσιμο των πάγων στους πόλους και η αντίστοιχη αύξηση της στάθμης της θάλασσας, τα ακραία καιρικά φαινόμενα που παρατηρούνται τα τελευταία έτη όλο και συχνότερα, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η μείωση των αποθεμάτων του πόσιμου νερού είναι λίγα μόνο από τα προβλήματα αυτά, και δεν αφήνουν περιθώρια αμφιβολίας για την έκταση του προβλήματος.

Συγκεκριμένα, η κύρια αιτία της κλιματικής αλλαγής είναι η υπέρογκη αύξηση εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το μεγαλύτερο μέρος των οποίων προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Πρόσφατες μελέτες από έγκριτους φορείς (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας IEA, Γερμανικό Ινστιτούτο αεροδιαστημικής DLR, Ευρωπαϊκή Ένωση EU) προβλέπουν ότι στα επόμενα 20 χρόνια, η ζήτηση ορυκτών καυσίμων θα υπερδιπλασιαστεί, η τιμή του πετρελαίου και του φυσικού αερίου θα εκτοξευθεί από \$125/ βαρέλι σε \$215/ βαρέλι σαν αποτέλεσμα και της μείωσης των αποθεμάτων τους, ενώ αντίστοιχη θα είναι και η αύξηση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Μέχρι το 2050 υπολογίζεται ότι οι εκπομπές CO<sub>2</sub>, οι οποίες θα σχετίζονται με παραγωγή ενέργειας θα υπερδιπλασιαστούν. [1]

Παράλληλα, καταστροφικά γεγονότα, όπως το ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό της Φουκουσίμα στην Ιαπωνία το Μάρτιο του 2011, και αναταραχές στον κόσμο όπως για παράδειγμα η πολιτική αστάθεια και οι συγκρούσεις μεταξύ χωρών της μέσης

Ανατολής και της βόρειας Αφρικής δημιουργούν ανασφάλεια και έχουν οδηγήσει πολλά κράτη στην αναθεώρηση της ενεργειακής τους πολιτικής, απορρίπτοντας την πυρηνική ενέργεια. Ως αποτέλεσμα, το μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη μειώνεται και ο ενεργειακός χάρτης μεταβάλλεται.

Για τους παραπάνω λόγους, όλο και περισσότερες χώρες καθιστούν υποχρεωτική την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.), οι οποίες θεωρητικά είναι ανεξάντλητες και συμβάλλουν στη μείωση της ρύπανσης της ατμόσφαιρας. Σύμφωνα με τον διεθνή οργανισμό ενέργειας, το 50% των νέων υποδομών παραγωγής ενέργειας θα βασίζονται σε ανανεώσιμες «καθαρές» ως προς το περιβάλλον πηγές, όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, η υδροηλεκτρική και η βιομάζα, με στόχο περισσότερο από 30% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το 2035 να προέρχεται από αυτές.

Αν οι Α.Π.Ε. γίνουν βασικό συστατικό ενός νέου ενεργειακού δόγματος, μπορούν να καλύψουν σημαντικό μέρος της ενεργειακής ζήτησης των αναπτυσσόμενων χωρών σε σύντομο σχετικά χρονικό διάστημα με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η δυσκολία της καθιέρωσης τους παγκοσμίως, έγκειται κυρίως στον δισταγμό των πολιτικών αρχών κάθε χώρας σχετικά με την υιοθέτηση στρατηγικών στόχων, τη διαμόρφωση αποτελεσματικών πολιτικών και τη διάθεση των αναγκαίων πόρων. Επομένως είναι επιτακτική η διαμόρφωση ενός μακροπρόθεσμου σχεδίου δράσης, με γνώμονα τη βιωσιμότητά τους σε παγκόσμια όσο και εγχώρια κλίμακα, ώστε να αντιμετωπιστούν έγκαιρα και αποτελεσματικά οι περιβαλλοντικές και οικονομικές προκλήσεις [2].

Ιδιαίτερα σε εθνικό επίπεδο, οι παρεμβάσεις και οι αλλαγές στο ενεργειακό μοντέλο φαντάζουν επιβεβλημένες, στην προσπάθεια να επιτευχθεί η έξοδος της χώρας από την σημερινή οικονομική κρίση, μέσω σημαντικών επενδύσεων στον τομέα της ενέργειας τα επόμενα χρόνια. Η προώθηση των ΑΠΕ στην Ελλάδα συνάδει και με την εκπλήρωση των δεσμεύσεων που έχει αναλάβει η χώρα μας ως κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πιο συγκεκριμένα, η Ελλάδα δεσμεύεται με τον νόμο 3851/Άρθρο 1 να πετύχει τον εθνικό στόχο των ΑΠΕ που θέσπισε για αυτήν η Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με τον οποίο προβλέπεται συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% μέχρι το 2020 και συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 40%. Επιπλέον, ζητείται συμβολή των ΑΠΕ της τάξεως του του 10% στην τελική κατανάλωση ενέργειας για μεταφορές, και πάλι ως το 2020. [3]

Στην παρούσα εργασία διερευνώνται πτυχές της *τεχνολογίας συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών συστημάτων - ΣΗΣ (Concentrating Solar Power Systems)*, η οποία τα τελευταία χρόνια εξελίσσεται γρηγορότερα από κάθε άλλη ίσως ανανεώσιμη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας και δημιουργεί μεγάλες προσδοκίες για το μέλλον. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί την ανανεώσιμη ηλιακή ενέργεια για παραγωγή θερμότητας και μετέπειτα ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς εκπομπές ρυπογόνων καυσαερίων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι εγκατεστημένη ισχύς ενός μεγαβάτ (MW) από συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα αντιστοιχεί σε αποφυγή εκπομπής 688 τόνων CO<sub>2</sub> από ένα αντίστοιχο σύστημα με συνδυασμένο κύκλο και 1360 τόνων σε αναλογία με έναν συμβατικό ατμοηλεκτρικό σταθμό που καίει άνθρακα [4]. Σε αντίθεση με τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία, τα ΣΗΣ προσφέρουν την εγγενή

δυνατότητα ευκολότερης και αποδοτικότερης αποθήκευσης της θερμότητας για κάποιο διάστημα και μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια, όποτε κριθεί επιθυμητό. Όταν δηλαδή, συνδυάζονται με αποθήκευση, τα συστήματα αυτά δύνανται να παράγουν ενέργεια σε συνθήκες μειωμένης ηλιοφάνειας ή και μετά τη δύση του ηλίου. Προσφέρουν λοιπόν, ευελιξία και αξιοπιστία στο ηλεκτρικό δίκτυο και το βοηθούν να ενσωματώσει περισσότερη ισχύ από άλλες εγκαταστάσεις μεταβλητών με το χρόνο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολατικά και οι αννεμογεννήτριες [5].

## 1.2 Συγκέντρωση Ηλιακής Ενέργειας: Ιστορική Αναδρομή

Η συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας δεν είναι μια καινοτομία των τελευταίων ετών. Η πρώτη καταγραφή χρήσης της αναφέρεται ήδη στο 212 π.Χ, όταν ο Αρχιμήδης χρησιμοποίησε για πρώτη φορά καθρέφτες για τη συγκέντρωση των ακτίνων του ήλιου. Το 1615 ο Salomon De Caux εφήυρε μια μικρή μηχανή, η οποία απαρτιζόταν από γυάλινους φακούς εστίασης και ένα αεροστεγές μεταλλικό δοχείο που περιείχε νερό και αέρα. Η διάταξη αυτή θεωρείται ως η πρώτη μηχανική εφαρμογή με πηγή ενέργειας την ηλιακή.



*Σχήμα 1.1 Συγκέντρωση ηλιακών ακτίνων για απόθεση του ρωμαϊκού στόλου κατά την πολιορκία των Συρρακουσών από τον Αρχιμήδη [9]*

Πάνω από ένας αιώνας πέρασε, ώσπου το 1774 οι Lavoisier και Joseph Priestley ανέπτυξαν τη θεωρία καύσης μέσω συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα δοκιμαστικό σωλήνα για την παραγωγή αερίου. Στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, ο Augustin Mouchot σχεδίασε μια ηλιακή ατμομηχανή για τη λειτουργία μιας τυπογραφικής πρέσας, ενώ αργότερα, το 1878, ένας μικρός ηλιακός σταθμός παραγωγής ενέργειας, αποτελούμενος από ένα παραβολικό συγκεντρωτικό κάτοπτρο συνδεδεμένο με μια μηχανή, παρουσιάστηκε στο παγκόσμιο συνέδριο «World's Fair» στο Παρίσι.

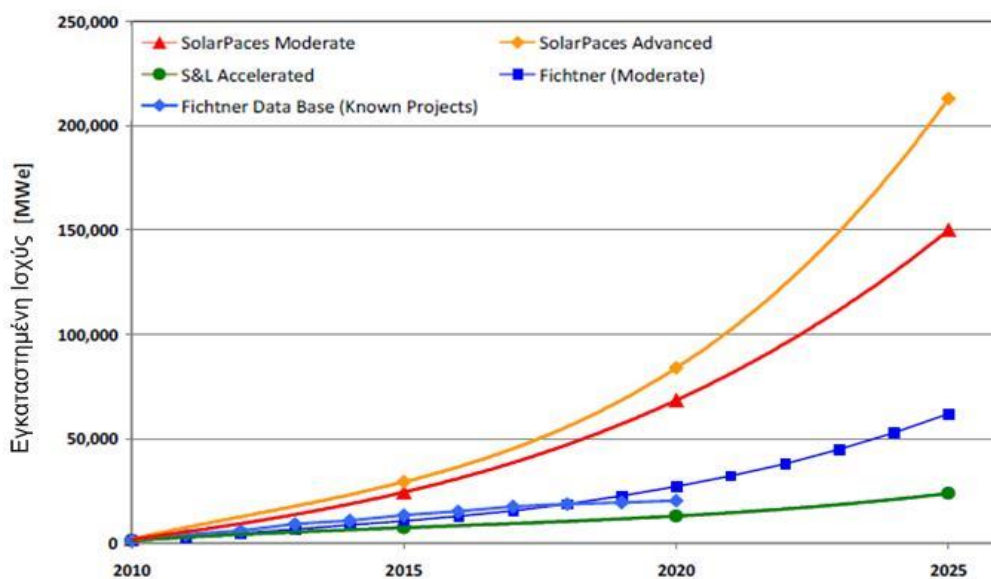
Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα και παρόλη τη μείωση του ενδιαφέροντος για την ηλιακή ενέργεια, ως συνέπεια της εξέλιξης των μηχανών εσωτερικής καύσης και την αυξανόμενη διαθεσιμότητα των φθηνών ορυκτών καυσίμων, ο πρώτος σταθμός παραγωγής ενέργειας από συγκεντρωτική ηλιακή ενέργεια, εγκαταστάθηκε στο Al Meadi της Αιγύπτου. Σκοπός αυτής της πρώτης υλοποίησης, που συναντάται το 1913, ήταν η άντληση νερού για τις καλλιέργειες της περιοχής. Τη δεκαετία του '60 με την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων, το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια επανήλθε. Η πετρελαϊκή κρίση κατά την επόμενη δεκαετία, ενίσχυσε τις έρευνες και πιλοτικά συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα άρχισαν να αναπτύσσονται. Έτσι, οι πρώτοι εμπορικοί σταθμοί λειτούργησαν στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ την περίοδο 1984-1991. Την εγκατάσταση των σταθμών αυτών ώθησαν ομοσπονδιακά και φορολογικά κίνητρα και συμβάσεις υποχρεωτικής αγοράς της παραγόμενης ενέργειας σε μακροχρόνια βάση. Η πτώση ωστόσο, των τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, που σημειώθηκε την εποχή εκείνη, απέτρεψε την υιοθέτηση τέτοιων πολιτικών και από άλλα κράτη με συνέπεια την απουσία νέων σταθμών μέχρι το 2006. Τη χρονιά εκείνη, το ενδιαφέρον για συστήματα συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας μεγάλης κλίμακας αναζωπυρώθηκε γρήγορα ιδιαίτερα στην Ισπανία και στις ΗΠΑ ως αποτέλεσμα κυβερνητικών μέτρων που εξασφάλιζαν δελεαστικές τιμές πώλησης της ενέργειας και παροχή φορολογικών ελαφρύνσεων. [4], [8]

Σήμερα, το 2013, η εγκατεστημένη ισχύς συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων ανέρχεται στα 2.14 GW, ενώ 2,48 GW βρίσκονται υπό κατασκευή και 10.14 GW έχουν ανακοινωθεί [6]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική αναφορά [7], η ισχύς των υπο μελέτη ή υπό ανάπτυξη συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων ανέρχεται παγκοσμίως στα 17 GW. Οι ΗΠΑ προηγούνται με 8 GW, η Ισπανία ακολουθεί με 4,46 GW και η Κίνα με 2.5 GW.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται χαρακτηριστικά η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής με την συνεχώς αυξανόμενη εγκατεστημένη ισχύ της και οι εκτιμήσεις για την εξέλιξή της στο μέλλον από διάφορους φορείς τόσο σύμφωνα με συντηρητικά όσο και με περισσότερο αισιόδοξα σενάρια.



Σχήμα 1.2 Εγκατεστημένη Ισχύς Συγκεντρωτικών Ηλιοθερμικών Συστημάτων την τελευταία 20ετία [6]



Σχήμα 1.3 Εκτιμήσεις Μελλοντικής Εξέλιξης ΣΗΣ [10]

### 1.3 Αρχή Λειτουργίας και Εφαρμογές Ηλιοθερμικής Τεχνολογίας

#### 1.3.1 Συγκέντρωση Ηλιακής Ακτινοβολίας και Λόγος Συγκέντρωσης

Τα Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά συστήματα (ΣΗΣ), τα οποία είναι γνωστά και ως συστήματα Συγκεντρωτικής Ηλιακής Ενέργειας ή συστήματα Συγκεντρωτικής Ηλιακής Θερμότητας, αποτελούν συστήματα που χρησιμοποιούν οπτικά μέσα (συλλέκτες) με στόχο τη συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) σε μια μικρή περιοχή - το δέκτη προς παραγωγή υψηλών θερμοκρασιών. Σε αντίθεση με τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, τα ΣΗΣ δε μπορούν να εκμεταλλευτούν τη διάχυτη ακτινοβολία (το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, που διασκορπίζεται στην ατμόσφαιρα λόγω νεφών και σωματιδίων στον αέρα), καθώς η τελευταία δε μπορεί να εστιαστεί.

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε μία «καθαρή» μέρα αντιστοιχεί στο 80-90% της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, ενώ σε μια συννεφιασμένη μέρα, η άμεση ακτινοβολία είναι σχεδόν μηδενική. Για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας απαιτείται δηλαδή «άνεφος» ουρανός, που συναντάται συνήθως σε ημιορημικές περιοχές.

Με το λόγο συγκέντρωσης προσδιορίζεται ο βαθμός εστίασης που μπορεί να επιτευχθεί από μία διάταξη κατόπτρων-δέκτη. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί ορισμοί [11]:

## Οπτικός Λόγος Συγκέντρωσης

$$CR_o = \frac{\frac{1}{A_r} \int I_r dA_r}{I_a}$$

όπου:

$A_r$ : Η επιφάνεια του δέκτη ( $m^2$ )

$I_a$ : Η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, στην ανηγμένη επιφάνεια (aperture) των κατόπτρων ( $W/m^2$ )

## Γεωμετρικός Λόγος Συγκέντρωσης

$$CR_g = \frac{A_a}{A_r}$$

όπου:

$A_a$ : Η συνολική ανηγμένη επιφάνεια των κατόπτρων ( $m^2$ )

$A_r$ : Η επιφάνεια του δέκτη ( $m^2$ )

Ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης χρησιμοποιείται συνηθέστερα διότι μπορεί να συσχετιστεί ευκολότερα με τις θερμικές απώλειες στο δέκτη, οι οποίες είναι ανάλογες της επιφάνειάς του, καθώς περιλαμβάνει τον όρο  $A_r$ .

### 1.3.2 Πεδία Αξιοποίησης Συγκεντρωτικών Ηλιοθερμικών Συστημάτων

Τρία είναι τα πεδία χρήσης της τεχνολογίας αυτής, τα οποία έχουν συγκεντρώσει το ενδιαφέρον της παγκόσμιας κοινότητας: η ηλιακή χημεία, η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανικές διεργασίες και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η *ηλιακή χημεία* (*solar chemistry*) πραγματεύεται την ανάπτυξη και υλοποίηση οδηγούμενων από τον ήλιο θερμοχημικών αντιδράσεων. Χρησιμοποιείται για παραγωγή ενεργειακών φορέων, μεταποίηση χημικών προϊόντων και αποτοξικοποίηση και ανακύκλωση αποβλήτων. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η παραγωγή, με χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας, μεταλλικού ψευδαργύρου από οξειδία του, παράγοντας ελάχιστες εκπομπές  $CO_2$ . Τελικός στόχος είναι η ανάπτυξη μιας κυκλικής διαδικασίας παραγωγής ενέργειας σε κυψελίδες καύσης ψευδαργύρου [12]. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν την παραγωγή αερίων καυσίμων όπως υδρογόνο, αιθέριο κ.α. Μια εκτενή παρουσίαση των θερμοχημικών διεργασιών που κάνουν χρήση των ΣΗΣ μπορεί να βρει κανείς στη βιβλιογραφική αναφορά [13].

Ο δεύτερος κλάδος εφαρμογής των ΣΗΣ περιλαμβάνει την παραγωγή θερμότητας για βιομηχανικές διεργασίες. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι περισσότερες διεργασίες πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες μέχρι  $250^\circ C$ , το οποίο είναι ένα επίπεδο το οποίο μπορεί πολύ εύκολα να επιτευχθεί με την συγκέντρωση της ηλιακής

ακτινοβολίας. Διαδικασίες καθαρισμού, ξήρανσης και αποστάξεων είναι ενδεικτικά παραδείγματα διεργασιών, στις οποίες η συνεισφορά των ΣΗΣ μπορεί να είναι καταλυτική.

Το τρίτο πεδίο, που συγκεντρώνει και το μεγαλύτερο ίσως ενδιαφέρον είναι η παραγωγή ηλεκτρικής 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 εκτελεί εν συνεχεία έναν *θερμοδυναμικό κύκλο*, αποδίδοντας την παραπάνω θερμότητα προς παραγωγή έργου. Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των συχνότερα χρησιμοποιούμενων κύκλων.

### 1.3.3 Θερμοδυναμικοί κύκλοι εκμετάλλευσης Ηλιακής Ενέργειας [11],[14]

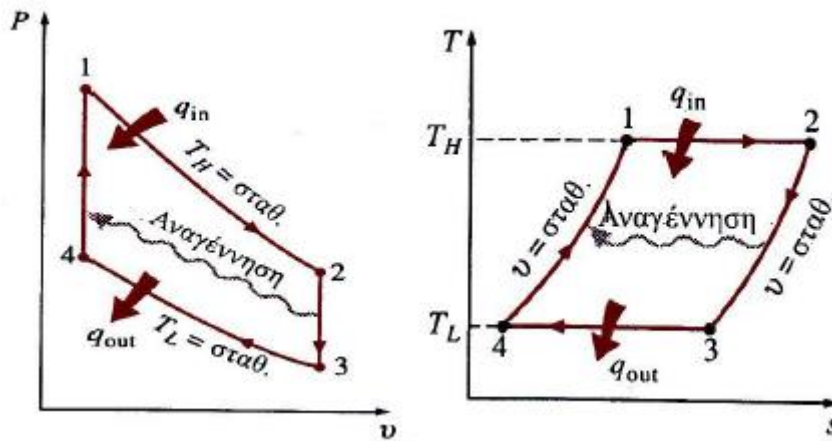
Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σε κλειστούς και ανοιχτούς κύκλους. Στους κλειστούς κύκλους, το ρευστό λειτουργίας επανέρχεται στο τέλος του κύκλου στην αρχική του κατάσταση και επανακυκλοφορεί, ενώ στους ανοιχτούς, το ρευστό λειτουργίας ανανεώνεται στο τέλος κάθε κύκλου.

Οι κύκλοι που παρέχουν τη δυνατότητα εξωτερικής πρόσδοσης θερμότητας είναι ιδανικοί για ηλιακές εφαρμογές και οι τρεις κυριότεροι θα περιγραφούν στη συνέχεια. Πρέπει να τονιστεί ότι οι κύκλοι αυτοί αποτελούν εξιδανικεύσεις των πραγματικών κύκλων που πραγματοποιούνται στις θερμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής. Σε σχέση με τους ιδανικούς κύκλους, οι πραγματικοί περιλαμβάνουν πολλές εστίες αναντιστρεπτότητας, με αποτέλεσμα η απόδοσή τους να είναι μικρότερη της θεωρητικής. Αιτίες αναντιστρεπτότητας στους πραγματικούς κύκλους είναι τριβές που προκαλούν πτώση πίεσης και αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού κατά τη ροή του σε σωληνώσεις ή συσκευές όπως οι εναλλάκτες θερμότητας, μη αντιστρεπτές μεταφορές θερμότητας κατά μήκος πεπερασμένων θερμοκρασιακών διαφορών, και διεργασίες εκτόνωσης και συμπίεσης σε κατάσταση ανισορροπίας των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων στον όγκο του ρευστού.

#### Ιδανικός κύκλος Stirling

Αποτελείται από δύο ισόθερμες και δύο ισόχωρες μεταβολές. Ο ιδανικός κύκλος Stirling είναι ολικά (εσωτερικά και εξωτερικά) αντιστρεπτός κύκλος, καθώς η προσθήκη και αποβολή θερμότητας προς και από το ρευστό λειτουργίας λαμβάνει χώρα υπό σταθερή θερμοκρασία. Η απόδοση του ιδανικού κύκλου Stirling είναι κοινή με εκείνη του κύκλου Carnot, και επομένως ίση με τη μέγιστη δυνατή για οποιαδήποτε θερμική μηχανή που πραγματοποιεί κύκλο μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων. Ο πραγματικός κύκλος είναι προφανώς μη αντιστρεπτός και με χαμηλότερη απόδοση. Θα μπορούσε να γίνει θεωρητικά αναστρέψιμος και με βαθμό απόδοσης ίσο με αυτόν του κύκλου Carnot, αν ήταν δυνατή η χρήση ενός ιδανικού εναλλάκτη θερμότητας, που θα απορροφούσε την απορριπτόμενη θερμότητα και θα την προσέδιδε και πάλι στο σύστημα.



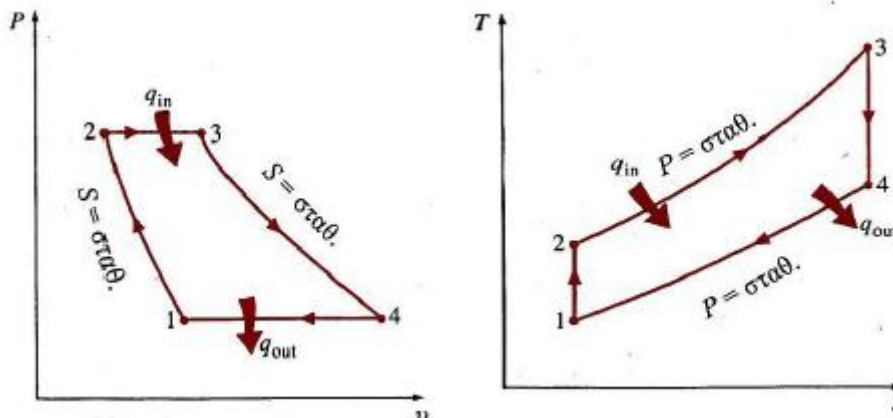


Σχήμα 1.4 Διαγράμματα Ιδανικού Κύκλου Stirling [11]

Οι μηχανές Stirling είναι μηχανές εξωτερικής καύσης (που σημαίνει ότι η πηγή θερμότητας βρίσκεται εκτός των ορίων του συστήματος), κλειστού κύκλου, οι οποίες χρησιμοποιούν αέρια ως ρευστά λειτουργίας. Για τη μεταφορά θερμότητας προς και από το ρευστό λειτουργίας χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας (θερμαντής για την ισόθερμη εκτόνωση, αναγεννητής για την ισόχωρη προθέρμανση και αναγέννηση και ψύκτης για την ισόθερμη συμπίεση). Η απόδοση των μηχανών Stirling κυμαίνεται μεταξύ 30 και 40%, ενώ τυπικές συνθήκες λειτουργίας είναι θερμοκρασίες 650 έως 800°C.

### Ιδανικός κύκλος Brayton – Joule

Πρόκειται για τον θερμοδυναμικό κύκλο που περιγράφει τη λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου. Στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται κυρίως ως εφεδρικές μονάδες για την κάλυψη της παραγωγής σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, ή ως μονάδες αιχμής σε περιόδους υψηλής ζήτησης, λόγω της γρήγορης απόκρισής τους και του σχετικά χαμηλού τους κόστους. Αποτελείται από δύο αντιστρεπτές ισηντροπικές μεταβολές και δύο ισόθλιπτες. Για το λόγο αυτό είναι γνωστός και ως κύκλος σταθερής πίεσης.



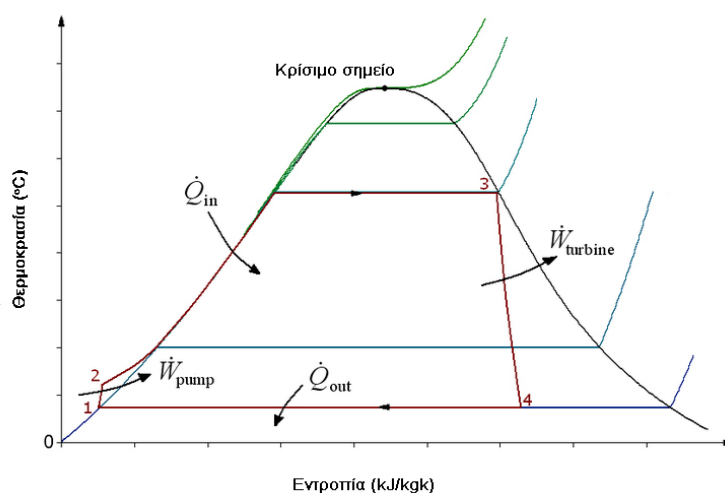
Σχήμα 1.5 Διαγράμματα Ιδανικού Κύκλου Brayton - Joule [11]



Ο κύκλος Brayton μπορεί να πραγματοποιηθεί σαν ανοιχτός ή κλειστός κύκλος. Στην περίπτωση του ανοιχτού κύκλου, η προσθήκη θερμότητας γίνεται μέσω εξωτερικής καύσης σε θάλαμο καύσης και η απόρριψη θερμότητας γίνεται με την αποβολή των καυσαερίων από το στρόβιλο. Στην περίπτωση του κλειστού κύκλου, η προσθήκη και η αποβολή της θερμότητας γίνονται μέσω εναλλακτών θερμότητας. Ο κλειστός κύκλος Brayton έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται οξυγόνο για την καύση του καυσίμου, επομένως ως ρευστό λειτουργίας του κύκλου μπορεί να επιλεγεί οποιοδήποτε αέριο διαθέτει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (όπως π.χ. το ήλιο).

## Ιδανικός κύκλος Rankine

Πρόκειται για τον πιο διαδεδομένο κύκλο μετατροπής θερμότητας σε έργο, καθώς χρησιμοποιείται στις μέρες μας για το 90% της ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως. Ο κύκλος αυτός κάνει χρήση της αλλαγής φάσης του εργαζόμενου μέσου, η οποία αντιστοιχεί σε ισοθερμοκρασιακή πρόσδοση θερμότητας και σημαντική αύξηση του όγκου του. Στην ιδανική του μορφή, αποτελείται από ισεντροπική συμπίεση και αποτόνωση και από ισοθερμοκρασιακή πρόσδοση και αποβολή θερμότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται το νερό, το οποίο σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες μετατρέπεται σε ατμό. Η επιλογή του ρευστού λειτουργίας καθορίζεται κυρίως από τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου και εκτός του νερού χρησιμοποιούνται υγρά μέταλλα (όπως π.χ. ο υδράργυρος) σε κύκλους υψηλών θερμοκρασιών, ή οργανικά ρευστά (ο κύκλος σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται οργανικός) υψηλού μοριακού βάρους και χαμηλού σημείου ζέσεως που μπορούν να αξιοποιήσουν πηγές θερμότητας χαμηλότερης θερμοκρασίας, όπως είναι η γεωθερμία, η βιομάζα και η απορριφθείσα θερμότητα κύκλων υψηλότερων θερμοκρασιών.

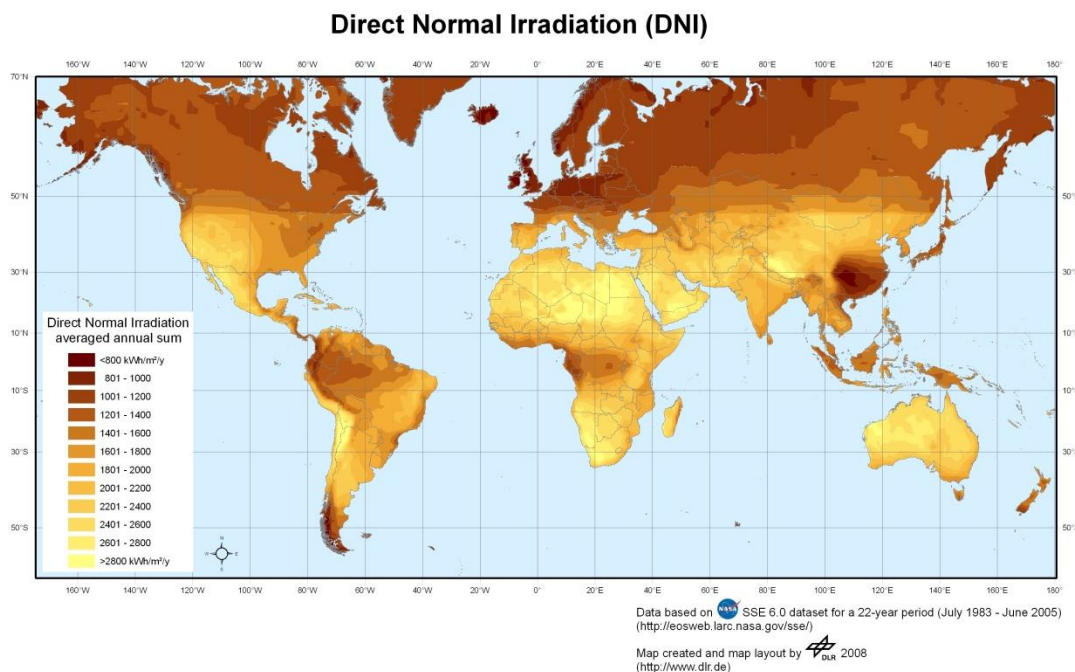


Σχήμα 1.6 Ιδανικός Κύκλος Rankine [15]

Κοινό στοιχείο των παραπάνω κύκλων αποτελεί η πρόσδοση θερμότητας με σκοπό την αύξηση της ενεργειακής στάθμης του εργαζόμενου μέσου και ακολούθως η παραγωγή μηχανικού έργου κατά την αποτόνωση του. Για μεγάλης κλίμακας θερμικούς σταθμούς, όπου η ογκομετρική παροχή είναι μεγάλη, χρησιμοποιούνται σχεδόν απολειστικά στροβιλομηχανές για την αποτόνωση του εργαζόμενου μέσου.

## 1.4 Περιοχές κατάλληλες για ανάπτυξη ΣΗΣ - Ηλιακό Δυναμικό

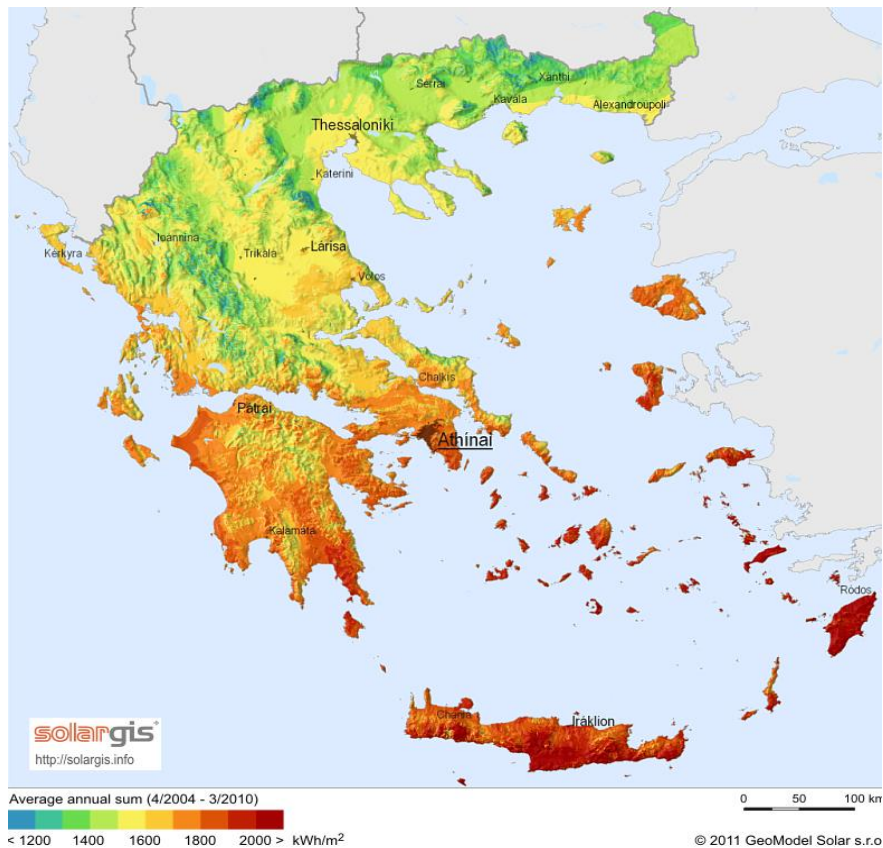
Πριν αναφερθούμε πιο αναλυτικά στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα και στις διαφορετικές τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί, πρέπει να επισημανθεί ποιές περιοχές είναι κατάλληλες για την εγκατάστασή τους. Το πρώτο και βασικότερο κριτήριο, που υποδεικνύει την καταλληλότητα ενός μέρους σχετικά με την εγκατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων είναι το ηλιακό δυναμικό (άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας). Το δυναμικό αυτό αναφέρεται ουσιαστικά στις τιμές της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην εκάστοτε περιοχή κατά μέσο όρο στη διάρκεια ενός έτους. Όσο πιο υψηλό είναι το ηλιακό δυναμικό μιας περιοχής, τόσο περισσότερο ενδείκνυται σε αυτήν η κατασκευή ηλιοθερμικών εγκαταστάσεων. Παρακάτω ακολουθεί ο παγκόσμιος χάρτης με τις ετήσιες τιμές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ανά τον κόσμο :



Σχήμα 1.7 Παγκόσμιος Χάρτης Άμεσης Προσπίπτουσας Ηλιακής Ακτινοβολίας [16]

Παρατηρούμε ότι οι περιοχές κοντά στη γραμμή του ισημερινού, με γεωγραφικό πλάτος περίπου από  $-40^{\circ}$  έως  $+40^{\circ}$ , συγκεντρώνουν το υψηλότερο ηλιακό δυναμικό. Γενικά η εγκατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συστήνεται σε περιοχές με ετήσια άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία μεγαλύτερη των  $2000\text{KWh/m}^2$ , ενώ σε περιοχές με άμεση ακτινοβολία μεγαλύτερη των  $2600\text{KWh/m}^2$  αποτελεί ιδανική επιλογή [17].

Στη συνέχεια ακολουθεί ο χάρτης ηλιακού δυναμικού στην Ελλάδα.



Σχήμα 1.8 Χάρτης Άμεσης Προσπίπτουσας Ηλιακής Ακτινοβολίας - Ελλάδα [18]

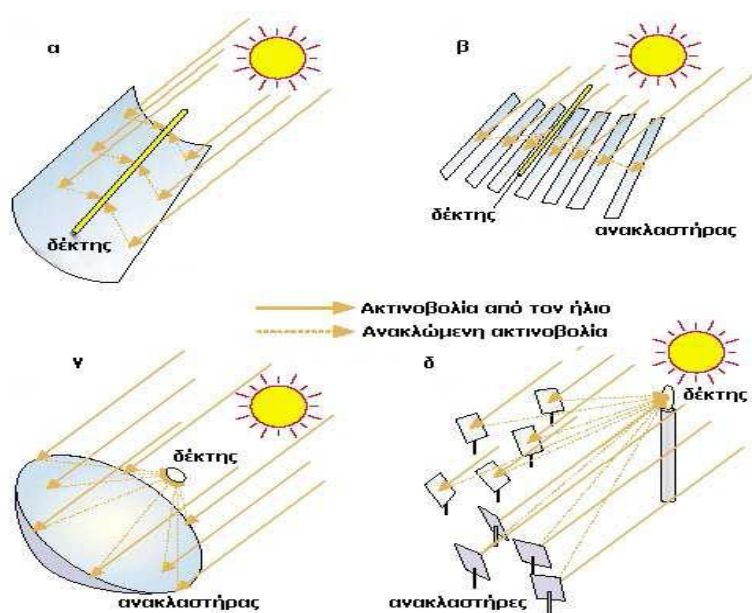
Από τον παραπάνω χάρτη προκύπτει ότι υπάρχουν περιοχές, κυρίως στο νότιο τμήμα της Ελλάδας, που παρουσιάζουν υψηλό ηλιακό δυναμικό, και ιδιαίτερα τα νότια νησιά όπως η Ρόδος και η Κρήτη βρίσκονται πολύ κοντά στο φράγμα των 2000 kWh/m<sup>2</sup> ετησίως. Το γεγονός αυτό δίνει μία αρχική εκτίμηση πως η εγκατάσταση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων εκεί θα ήταν συμφέρουσα επιλογή, και για το λόγο αυτό στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε η προσομοίωση ενός συστήματος κεντρικού ηλιακού δέκτη στην περιοχή της Κρήτης, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την εισαγωγή συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων στην Ελλάδα.

## 1.5 Διαθέσιμες Τεχνολογίες ΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν οι διατάξεις που βρίσκουν εφαρμογή στην εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μεταφορά θερμότητας στις θερμικές μηχανές των ηλιοθερμικών μονάδων. Στις μέρες μας, τέσσερις είναι οι τεχνολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί, είτε με πιλοτικά έργα με κύριο σκοπό την επίδειξη και την έρευνα, είτε με σταθμούς πλήρως λειτουργικούς που συνεισφέρουν στα ενεργειακά μείγματα των χωρών όπου είναι εγκατεστημένα, και η κατηγοριοποίησή τους γίνεται με κριτήριο τη διαμόρφωση των ηλιακών συλλεκτών και του δέκτη.

Οι τεχνολογίες αυτές είναι :

- ❖ Παραβολικοί Κοίλοι Συλλέκτες (Parabolic Trough Collectors - PTC)
- ❖ Συγκεντρωτικοί Γραμμικοί Ανακλαστήρες Fresnel (Concentrating Linear Fresnel Reflectors)
- ❖ Συστήματα Δίσκου - Μηχανής (Dish-Engine Systems).
- ❖ Πύργοι Ηλιακής Ισχύος ή Συστήματα Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη (Solar Power Towers or Central Solar Receiver Systems - CRS).



Σχήμα 1.9 Τεχνολογίες Ηλιοθερμικών Συστημάτων [14]

### 1.5.1 Συστήματα Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών

Τα συστήματα αυτά, που συναντώνται επίσης με τον όρο ηλιοθερμικά συστήματα συλλεκτών παραβολικής σκάφης, είναι τα πιο δοκιμασμένα και εξελιγμένα συστήματα από τις τεχνολογίες ΣΗΣ σήμερα, καθώς βρίσκονται σε εφαρμογή για πάνω από 25 χρόνια. Αρκεί να αναφερθεί ότι στο τέλος του 2010 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς τέτοιων συστημάτων έφτανε τα 1220 MW [19].

Πρόκειται για γραμμικά παραβολικού σχήματος κάτοπτρα, τα οποία συγκεντρώνουν μέσω ανάκλασης την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη τοποθετημένο κατά τη γραμμή εστίασης τους. Ο δέκτης είναι σωλήνωση υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, μέσα στην οποία ρέει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Ο δέκτης είναι επικαλυμμένος με επίστρωση ειδικού υλικού, ώστε να απορροφά αποδοτικά την ηλιακή μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία, ενώ παράλληλα να μην εκπέμπει την υπέρυθη (μεγάλου μήκους κύματος) ακτινοβολία, ελαχιστοποιώντας έτσι τις απώλειες και εξωτερικά συνήθως επικαλύπτεται με λεπτό στρώμα γυαλιού [20].



Πρέπει να σημειωθεί ότι προσφέρονται πολλές δυνατότητες σχετικά με την ένταξη ενός πεδίου συλλεκτών παραβολικής σκάφης σε ένα σύστημα παραγωγής ισχύος. Ανάλογα με την έκταση του πεδίου και τη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτό, οι συλλέκτες μπορούν να προσφέρουν την απαιτούμενη θερμότητα για την προθέρμανση ή υπερθέρμανση του ρευστού λειτουργίας [11]. Οι συλλέκτες στο πεδίο διατάσσονται σειριακά ώστε να σχηματίζουν κλειστούς βρόχους, στους οποίους η είσοδος είναι ρευστό μεταφοράς θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία και η έξοδος είναι ρευστό στην απαιτούμενη θερμοκρασία του κύκλου. Η θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί στο πεδίο εξαρτάται από τον αριθμό των συλλεκτών στο βρόχο (κάθε συλλέκτης προσδίδει ενέργεια στο ρευστό με σταθερό ρυθμό) και από την ταχύτητα/μαζική παροχή του ρευστού στους αγωγούς - δέκτες των συλλεκτών. Οι συστοιχίες των συλλεκτών μπορεί να ξεπερνούν σε μήκος τα 100m και τυπική τιμή του ανοίγματός τους είναι 5 - 6m [19]. Τα περισσότερα εν λειτουργία συστήματα χρησιμοποιούν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας κάποιο συνθετικό έλαιο, το οποίο θερμένεται στους 150 - 400°C καθώς ρέει κατά μήκος του δέκτη και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο λόγος συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας με τη μέθοδο αυτή κυμαίνεται σε τιμές 8-80, και ο ετήσιος βαθμός απόδοσης τους είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, της τάξεως του 15%.

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 μπορούν να προσανατολιστούν κατά τον άξονα ανατολής - δύσης, παρακολουθώντας την πορεία του ήλιου από το βορρά προς το νότο, ή κατά τον άξονα βορρά - νότου παρακολουθώντας την πορεία του ήλιου από την ανατολή προς τη δύση. Για χρονική περίοδο ενός έτους, ένα οριζόντιο πεδίο παραβολικών κατόπτρων με προσανατολισμό βορρά - νότου συλλέγει περισσότερη ενέργεια σε σχέση με ένα αντίστοιχο προσανατολισμού ανατολής - δύσης. Ωστόσο, παράγει πολύ περισσότερη ενέργεια το καλοκαίρι από ό,τι τον χειμώνα, ενώ το αντίστοιχο ανατολής - δύσης παρέχει πιο σταθερή απόδοση κατά τη διάρκεια του έτους. Για τους παραπάνω λόγους, τα πεδία προσανατολισμού βορρά - νότου προτιμούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ τα πεδία προσανατολισμού ανατολής - δύσης επιλέγονται για περιπτώσεις θέρμανσης καθώς παρουσιάζουν σταθερότερη απόδοση [14].



Σχήμα 1.10 Τυπικό Σύστημα Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών. [21], [22]

### 1.5.2 Συστήματα με Γραμμικούς Ανακλαστήρες τύπου Fresnel

Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι όμοιος με τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων παραβολικών κοίλων συλλεκτών. Η βασική διαφορά είναι ότι αντί για παραβολικούς κοίλους συλλέκτες, χρησιμοποιούνται γραμμικοί επίπεδοι ή ελαφρώς ελαστικά κυρτομένοι ανακλαστές, οι οποίοι συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε σωληνώσεις (μέσα από τις οποίες ρέει το εργαζόμενο ρευστό) στερεωμένες σε γραμμικούς πύργους. Στην περίπτωση των γραμμικών ανακλαστήρων, η γραμμή εστίασης διαστρεβλώνεται λόγω του φαινομένου του αστιγματισμού και για αυτό απαιτείται η ύπαρξη δευτερεύουσας κατοπτρικής επιφανείας πάνω από το επίπεδο του δέκτη – σωλήνα για την επανεστίαση των «άστοχων» ακτίνων. Άλλη διάταξη που συναντάται χαρακτηρίζεται από δέκτες αποτελούμενους από πολλαπλούς παράλληλους σωλήνες, ώστε η επιφάνεια του δέκτη να είναι μεγαλύτερη και να επιτυγχάνεται η απορρόφηση της ακτινοβολίας χωρίς τη χρήση δευτερεύοντος κατόπτρου [19].

Οι ανακλαστήρες αυτοί αποτελούν πιο οικονομική λύση σε σχέση με τα παραβολικά κάτοπτρα ενώ παράλληλα τοποθετούνται πολύ κοντά στο έδαφος, ελαχιστοποιώντας τις κατασκευαστικές απαιτήσεις. Βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η δυσκολία αποφυγής της σκίασης και της παρεμπόδισης ηλιακής ακτινοβολίας ανάμεσα σε διαδοχικούς συλλέκτες. Η αξιοπιστία και αυτής της τεχνολογίας παρουσιάζει ερωτηματικά και εξετάζεται ακόμα, όσον αφορά σε εγκαταστάσεις που απαιτείται μεγάλη ισχύς και υψηλές θερμοκρασίες [14].



Σχήμα 1.11 Τυπικό Σύστημα με Γραμμικούς Ανακλαστήρες τύπου Fresnel. [23], [24]

### 1.5.3 Συστήματα Δίσκου - Μηχανής

Είναι συνήθως αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας, τα οποία χρησιμοποιούν ένα παραβολικό δίσκο ως συλλέκτη συγκεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία στο σημείο εστίασης του, όπου βρίσκεται ο δέκτης. Το κάτοπτρο παρακολουθεί την πορεία του ήλιου πραγματοποιώντας κινήσεις σε δύο άξονες. Ο δέκτης μπορεί να είναι μικροστρόβιλος ή μηχανή Stirling. Το περισσότερο ερευνητικό ενδιαφέρον

εστιάζεται στη χρήση μηχανής Stirling, τοποθετημένη στο σημείο εστίασης του κατόπτρου, σε σύνδεση με γεννήτρια, με στόχο τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική [19].

Τα συστήματα δίσκου - μηχανής επιτυγχάνουν πολύ μεγάλους λόγους συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, από 1000 - 4000 φορές, όμως ακόμα χρησιμοποιούνται για μικρές ποσότητες παραγωγής ενέργειας της τάξεως των 5 – 25 KW. Οι μονάδες του συγκεντρωτή και του δέκτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ανεξάρτητα, είτε ως μέρος ενός ευρύτερου συνόλου παραβολικών πιάτων. 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. Παράλληλα, η ψύξη τους μπορεί να επιτευχθεί μέσω απλών αερόψυκτων συστημάτων, καθιστώντας δυνατή την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής σε άγονες ερημικές περιοχές, απουσία αποθεμάτων νερού. 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. Τέλος να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης, όμως είναι εφικτή η υβριδοποίηση και η λειτουργία με ορυκτά καύσιμα σε περίπτωση ελαττωμένης ηλιοφάνειας.



Σχήμα 1.12 Τυπικό Σύστημα Δίσκου-Μηχανής. [25]

#### 1.5.4 Συστήματα με Πύργο Ηλιακής Ισχύος (Κεντρικού Δέκτη)

Οι πύργοι ηλιακής ισχύος είναι συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλη περιπλοκότητα. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε έναν κεντρικό δέκτη στην κορυφή ενός πύργου, μέσω της ανεξάρτητης κίνησης ενός αριθμού εκατοντάδων ή και χιλιάδων επίπεδων κατόπτρων (ηλιοστατών), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε μια μεγάλη έκταση κυκλικά ή βόρεια του πύργου. Με τη συγκεκριμένη τεχνολογία, και χάρη στη μικρή επιφάνεια του δέκτη, μπορούν να επιτευχθούν λόγοι συγκέντρωσης της τάξεως του 600-1000. Το εργαζόμενο μέσο απορροφά κατά τη ροή του μέσω του δέκτη, τη



συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια και φτάνει θερμοκρασίες από 300°C μέχρι ακόμα και 1000°C (Μια συνήθης θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου είναι περί τους 550°C). Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες καθίστανται δυνατές λόγω της μικρής επιφάνειας του δέκτη και των υψηλών λόγως συγκέντρωσης. Ο ετήσιος βαθμός απόδοσης εγκαταστάσεων ηλιακού πύργου κυμαίνεται κοντά στο 20% και θεωρητικά η ισχύς τους κυμαίνεται από 1 έως και 500 MW (συνηθέστερες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 30-400MW [28]). Η περαιτέρω ανάλυση της τεχνολογίας του πύργου ηλιακής ισχύος αποφεύγεται στο παρόν κεφάλαιο καθώς θα περιγραφεί διεξοδικά στη συνέχεια της εργασίας. [4], [19]



Σχήμα 1.13 Τυπικό Σύστημα Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη. [22],[27]

#### 1.5.4 Σύγκριση Διαφορετικών Τεχνολογιών

Στον πίνακα 1.1 συνοψίζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τεσσάρων τεχνολογιών. Οι διαφορές που παρατηρούνται, είναι σημαντικές όχι μόνο από τεχνοοικονομική πλευρά, αλλά και σχετικά με την αξιοπιστία, την ωριμότητα και τη λειτουργική εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τους υπάρχοντες σταθμούς. Καταρχήν, τα συστήματα με παραβολικούς συλλέκτες, αποτελούν την πιο εμπορικά διαδεδομένη και ώριμη τεχνολογία από τις τέσσερις, και για το λόγο αυτό, συνιστούν την επιχειρηματικά πιο «σίγουρη» (χαμηλού επενδυτικού ρίσκου) τεχνολογία. Ωστόσο, ακόμα και αυτά τα συστήματα επιδέχονται βελτίωσης της λειτουργίας και απόδοσής τους, καθώς και μείωση του κόστους των εξαρτημάτων τους. Με την ενσωμάτωση συστήματος αποθήκευσης στα συστήματα αυτά, στα Fresnel, και ακόμα περισσότερο στους πύργους ηλιακής ισχύος, είναι δυνατή η ανταπόκριση τους, στις απαιτήσεις ενός λειτουργικού σταθμού, που μπορεί να παρέχει την ζητούμενη ισχύ στο δίκτυο, όποτε αυτό είναι επιθυμητό. Οι πύργοι ηλιακής ισχύος αποτελούν, όπως φαίνεται, την περισσότερο υποσχόμενη τεχνολογία, ωστόσο η μικρή εμπειρία σχετικά με την τεχνολογία τους, τους καθιστά μια ακριβή τεχνολογία μεσαίου επενδυτικού ρίσκου. Τα συστήματα δίσκου – μηχανής τέλος, διαφοροποιούνται σημαντικά από τις υπόλοιπες τρεις τεχνολογίες και αναφέρονται σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ μικρότερη κλίμακα. Ελκύουν ωστόσο, σημαντικό ενδιαφέρον λόγω της



ευελιξίας που παρουσιάζουν ως προς την τοποθέτησή τους και τον υψηλό βαθμό απόδοσης τους.

Πίνακας 1.1: Συγκριτικός Πίνακας Διαθέσιμων Τεχνολογιών ΣΗΣ [19]



	Παραβολικής Σκάφης	Κεντρικού Δέκτη	Γραμμικοί Fresnel	Δίσκου - Μηχανής
Τυπική Ισχύς (MW)	10-300	10-200	10-200	0.01-0.025
Ωριμότητα Τεχνολογίας	Εμπορικά αποδεδειγμένη	Πιλοτικοί και εμπορικοί σταθμοί	Πιλοτικοί σταθμοί	Συστήματα επίδειξης και έρευνας
Μεγαλύτεροι Προμηθευτές Τεχνογνωσίας	Abengoa Solar, SolarMillennium, Sener Group, Acciona, Siemens, NextEra κ.α.	Abengoa Solar, BrightSource, Energy, eSolar, SolarReserve, Torresol	Novatec Solar, Areva	
Ρίσκο Ανάπτυξης Τεχνολογίας	Χαμηλό	Μεσαίο	Μεσαίο	Μεσαίο
Θερμοκρασία Λειτουργίας	350-550	250-565	390	550-750
Μέγιστη Απόδοση Σταθμού	14-20	23-35*	18	30
Ετήσια καθαρή απόδοση (ηλιακή - σε - ηλεκτρική)	11-16	7-20	13	12-25
Ετήσιος Συντελεστής Εμεταλλευσιμότητας	25-28 (χωρίς αποθήκευση) 29-43 (αποθήκ. 7 ωρών)	55-60 (αποθήκ. 10 ωρών)	22-24	25-28
Λόγος Συγκέντρωσης	70-80	>1000	>60	>1300
Αποθήκευση	Ναι	Ναι	Μικρό χρονικό διάστημα	Χημική αποθήκευση υπό έρευνα
Υβριδοποίηση	Ναι (και άμεση)	Ναι	Ναι	Δεν προβλέπεται
Σταθερότητα Δικτύου	Μεσαία προς υψηλή (αποθήκευση ή υβριδοποίηση)	Υψηλή (πολύωρη αποθήκευση)	Μεσαία	Πολύ χαμηλή
Συνθήκες Ατμού (°C, bar)	380-540 / 100	540 / 100-160	260 / 50	-
Ανάγκες σε νερό (m <sup>3</sup> /MWh)	3 (υδρόψυκτο) 0.3 (αερόψυκτο)	2-3 (υδρόψυκτο) 0.25 (αερόψυκτο)	3 (υδρόψυκτο) 0.2 (αερόψυκτο)	0.05-0.1 (καθαρισμός κατόπτρων)
Καταλληλότητα για αερόψυκτο σύστημα ψύξης	Χαμηλή προς καλή	Καλή	Χαμηλή	Βέλτιστη

\* Μέγιστη απόδοση στην περίπτωση ατμοστροβίλου συνδυασμένου κύκλου

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### Τεχνολογία Πύργου Ηλιακής Ισχύος

Οι πύργοι ηλιακής ισχύος (solar power towers) ή αλλιώς συστήματα κεντρικού ηλιακού δέκτη, αποτελούν την πιο υποσχόμενη ίσως, τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Σε αντίθεση με τα παραβολικά κάτοπτρα, τα οποία ήδη εφαρμόζονται ευρύτατα στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 (στα πλαίσια, βέβαια, της περιορισμένης διείσδυσης της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο και της καθιέρωσής της ως εναλλακτικής και βιώσιμης πηγής ενέργειας), οι ηλιακοί πύργοι έχουν βρεί προς το παρόν, περιορισμένη εφαρμογή ως εμπορικά εκμεταλλεύσιμες ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις. Στο άμεσο μέλλον, αυτό αναμένεται να αλλάξει, όταν εφαρμοστούν οικονομίες κλίμακας στην κατασκευή των εξαρτημάτων τους, καθιστώντας τους ανταγωνιστικούς, ενώ και η έρευνα σε αυτή την τεχνολογία είναι συνεχής, αποδίδοντας διαρκώς αποδοτικότερα κάτοπτρα και βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους κατασκευής και λειτουργίας τους. [11]



*Σχήμα 2.1 Σταθμός Κεντρικών Ηλιακών Δεκτών Ιβανπαχ, Απρίλιος 2013 [31]*

## 2.1 Αρχή Λειτουργίας

Στους πύργους ηλιακής ισχύος, η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται μέσω της ανάκλασής της από εκατοντάδες ή και χιλιάδες ανακλαστικά κάτοπτρα (τους λεγόμενους ηλιοστάτες), που βρίσκονται σε πολύ καθορισμένη διάταξη μεταξύ τους και έχουν ανεξάρτητο σύστημα κίνησης, ώστε να ανιχνεύει ο καθένας ξεχωριστά και με ακρίβεια την τροχιά του ήλιου. Όλοι οι ηλιοστάτες εστιάζουν στο ίδιο σημείο (στην πραγματικότητα σε μία πεπερασμένη περιοχή), συγκεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία σε μία μικρή επιφάνεια στην κορυφή ενός μεταλλικού ή τσιμεντένιου πύργου, όπου είναι τοποθετημένος ο ηλιακός δέκτης. Από την επιφάνεια του δέκτη διέρχονται πολλές μικρές σωληνώσεις, μέσα από τις οποίες διέρχεται ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο θερμένεται από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια και μεταφέρεται σε εναλλάκτη θερμότητας για τη μεταφορά θερμότητας στο ρευστό λειτουργίας του κύκλου ισχύος και την παραγωγή ατμού. (Σε κάποιες διατάξεις, το ρευστό λειτουργίας ρέει στις σωληνώσεις του δέκτη και θερμένεται άμεσα χωρίς την ανάγκη ύπαρξης εναλλάκτη.) Ο ατμός στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας μέσω μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια, για χημικές/ βιομηχανικές διεργασίες που απαιτούν τη χρήση υπέρθερμου συμπιεσμένου ατμού κ.α. 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 σε περιόδους περιορισμένης ηλιοφάνειας λόγω πχ. νέφωσης ή κατά τις βραδυνές ώρες.

## 2.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα των Πύργων Ηλιακής Ισχύος

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να γίνει μια καταγραφή τόσο των θετικών, όσο και των αρνητικών χαρακτηριστικών της τεχνολογίας πύργου ηλιακής ισχύος. Επιδιώκεται σε αρκετά σημεία σύγκριση με τα υπόλοιπα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, και κυρίως σε σχέση με τις εγκαταστάσεις παραβολικών κοίλων συλλεκτών, οι οποίες έως σήμερα έχουν εφαρμοστεί και δοκιμαστεί περισσότερο, με σκοπό την κατανόηση των λόγων, για τους οποίους φαίνεται η τεχνολογία πύργου να παρουσιάζει τις καλύτερες προοπτικές εξέλιξης.

Στα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων συλλογής και εστίασης της ηλιακής ακτινοβολίας συγκαταλέγονται:

- ❖ Δυνατότητα επίτευξης υψηλών θερμοκρασιών: Οι ηλιακοί πύργοι μπορούν να πετύχουν πολύ υψηλούς γεωμετρικούς λόγους συγκέντρωσης της ακτινοβολίας (300 – >1000 ήλιους, έναντι 80 ήλιων για τα παραβολικά κάτοπτρα) και θερμοκρασίες, που περιορίζονται μόνο από τη θερμική αντοχή των υλικών του δέκτη [26]. 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.

- ❖ Δυνατότητα κίνησης των κατόπτρων σε δύο άξονες: Ο εντοπισμός της τροχιάς του ήλιου γίνεται τρισδιάστατα, καθώς οι ηλιοστάτες δύνανται να περιστρέφονται τόσο γύρω από τον κατακόρυφο, όσο και τον οριζόντιο άξονα. Για το λόγο αυτό, ακόμα και σε χαμηλές γωνίες ηλιακού ύψους 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. Επίσης, τα κάτοπτρα μπορούν να τοποθετηθούν περιμετρικά του πύργου και μπορούν να εκμεταλλευθούν την αυξημένη ακτινοβολία στη διεύθυνση Ανατολής - Δύσης κατά τους χειμερινούς μήνες.
- ❖ Δυνατότητα Υβριδισμού: Με χρήση νέων κεραμικών υλικών και ογκομετρικών δεκτών, οι ηλιακοί πύργοι θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών (καθώς μπορούν να επιτευχθούν και θερμοκρασίες άνω των 1000°C), όπως η παραγωγή υδρογόνου και η συνεργασία με κύκλους αεριοστροβίλων Brayton υψηλών θερμοκρασιών. Επίσης, οι ηλιακοί πύργοι μπορούν να ενσωματωθούν σε ήδη υπάρχουσες θερμοηλεκτρικές μονάδες, παρέχοντας θερμότητα μέσω εναλλακτών, ή απευθείας ατμό.
- ❖ Δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης: Οι εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων μπορούν να σχεδιαστούν έτσι, ώστε μέρος του ρευστού μεταφοράς θερμότητας να αποθηκεύεται σε μία ή περισσότερες δεξαμενές για χρήση στον κύκλο ισχύος, όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ή κατά τις νυχτερινές ώρες, αυξάνοντας τη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος. Επίσης, οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνουν καθιστούν δυνατή την άμεση χρήση ρευστών με εξαιρετικές δυνατότητες αποθήκευσης, όπως είναι τα τήγματα νιτρικών αλάτων.
- ❖ Σε σύγκριση με τα παραβολικά κοίλα συστήματα, οι πύργοι ηλιακής ισχύος παρουσιάζουν μικρότερες θερμικές απώλειες και ιδιοκαταναλώσεις (οι ιδιοκαταναλώσεις στα συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών είναι σχεδόν διπλάσιες από αυτές στους πύργους ηλιακής ισχύος). Αυτό εξηγείται αν αναλογιστεί κανείς το γεγονός ότι οι εγκαταστάσεις με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες διαρρέονται από ένα μεγάλο σύστημα σωληνώσεων σε όλο το μήκος των ηλιακών συλλεκτών, ενώ στους πύργους ηλιακής ισχύος οι αντίστοιχες σωληνώσεις βρίσκονται στην επιφάνεια του κεντρικού ηλιακού δέκτη και το μήκος τους είναι προφανώς πολύ μικρότερο. Οι θερμικές απώλειες που εμφανίζονται σε αυτές είναι λοιπόν σημαντικά μικρότερες ενώ παράλληλα 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.
- ❖ Πιο ευέλικτη κατασκευή σε σχέση με τα συστήματα παραβολικών συλλεκτών ή Fresnel, καθώς το όριο κλίσης του εδάφους της περιοχής κατασκευής είναι μεγαλύτερο (συνήθως μέχρι 5°) [27].

Από την άλλη, τα κυριότερα μειονεκτήματα και περιορισμοί των ηλιακών πύργων είναι:

- ❖ **Κόστος:** Τα αποτελέσματα στις μέχρι τώρα εγκαταστάσεις δείχνουν ότι το κόστος κεφαλαίου και συντήρησης των ηλιακών πύργων καθιστούν ασύμφορη τη λειτουργία τους σε εγκαταστάσεις με ισχύ μικρότερη από 30MW [28],[29]. Ωστόσο, όσο η τεχνολογία ερευνάται και εξελίσσεται και αποκτάται λειτουργική εμπειρία, το κόστος των εξαρτημάτων της τεχνολογίας αυτής αναμένεται να μειωθεί σημαντικά.
- ❖ **Απαίτηση για σημαντικές εκτάσεις:** Συνήθως, η επιφάνεια των ηλιοστατών είναι ιδιαίτερα υψηλή σε εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η πραγματική έκταση που καταλαμβάνουν οι συλλέκτες είναι πολλές φορές υπερδιπλάσια της επιφάνειάς τους (ώστε να περιορίζονται οι απώλειες σκίασης), αυξάνει το κόστος κεφαλαίου και περιορίζει την εγκατάστασή τους σε περιοχές όπου τέτοιες εκτάσεις είναι διαθέσιμες. Γενικά, τα συστήματα παραβολικής σκάφης καταλαμβάνουν λιγότερη έκταση σε σχέση με τα συστήματα κεντρικού δέκτη για την ίδια ονομαστική ισχύ.
- ❖ **Επιπλέον, η εγκατάστασή τους δεν είναι αρθρωτή, καθώς τυπικά, η εγκατάσταση νέου πεδίου ηλιοστατών απαιτεί και την ανέγερση νέου πύργου.**

[11], [30]

### 2.3 Υποσυστήματα του Πύργου Ηλιακής Ισχύος

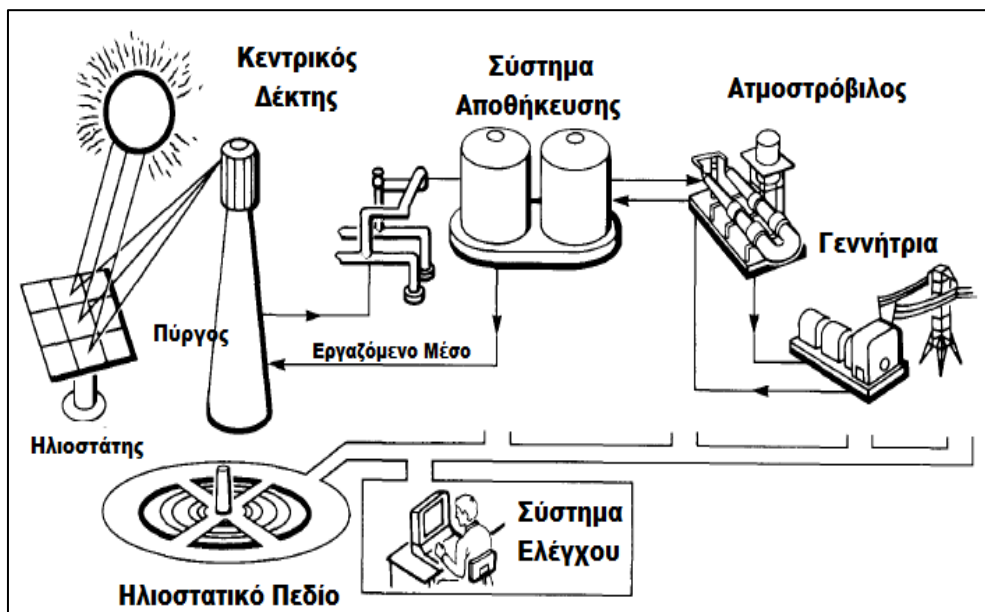
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια περιγραφή των υποσυστημάτων, τα οποία συνιστούν μια εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος. Ονομαστικά, τα συστήματα αυτά είναι τα εξής:

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

Τα δύο τελευταία συστήματα είναι προαιρετικά. Ωστόσο χρησιμοποιούνται σε έναν μεγάλο αριθμό ηλιοθερμικών μονάδων, καθώς συμβάλλουν σημαντικά στην εύρυθμη λειτουργία του σταθμού και στην τήρηση του επιθυμητού προφίλ παραγόμενης ενέργειας.



Αμέσως παρακάτω ακολουθεί μια σχηματική αναπαράσταση μια τυπικής διάταξης ηλιοθερμικού σταθμού με σύστημα κεντρικού ηλιακού δέκτη:



Σχήμα 2.2 Υποσυστήματα Ηλιοθερμικής Εγκατάστασης με Πύργο Ηλιακής Ισχύος [32]

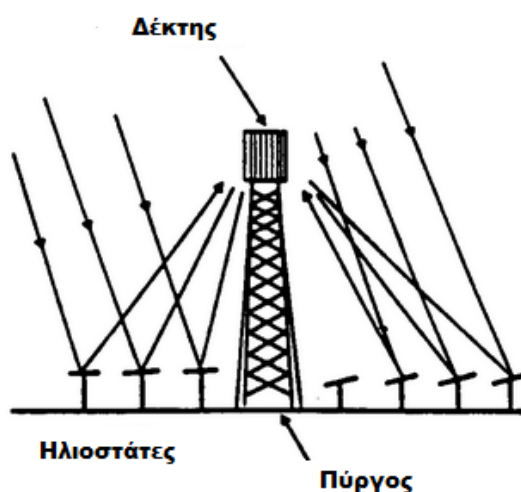
### 2.3.1 Ηλιοστατικό Πεδίο [11],[43],[44]

Βασική λειτουργία του ηλιοστατικού πεδίου είναι η παρακολούθηση, ανακατεύθυνση, και συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στον κεντρικό ηλιακό δέκτη. Αποτελείται από τους ηλιοστάτες και τον χώρο τον οποίο αυτοί καταλαμβάνουν στο έδαφος, στη γειτονική περιοχή του πύργου. Στο κεφάλαιο αυτό, θα δοθεί περισσότερη έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλιοστατών (ως μονάδες), καθώς στα επόμενα κεφάλαια θα μελετηθεί διεξοδικά η διάταξη, οι παράμετροι σχεδιασμού και η απόδοση του πεδίου.



Σχήμα 2.3 Άποψη Πεδίου Ηλιοστατών του σταθμού PS20, Ισπανία [33]

Οι ηλιοστάτες είναι ανακλαστικές (κατοπτρικές) επιφάνειες, στερεωμένες στο έδαφος με ένα σύστημα στήριξης, των οποίων η κίνηση ρυθμίζεται βάσει μηχανισμού ελέγχου. Σκοπός του κάθε ηλιοστάτη είναι, με την ανεξάρτητη κίνησή του σε σχέση με τους υπόλοιπους, να καταφέρει 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 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 τον ήλιο.



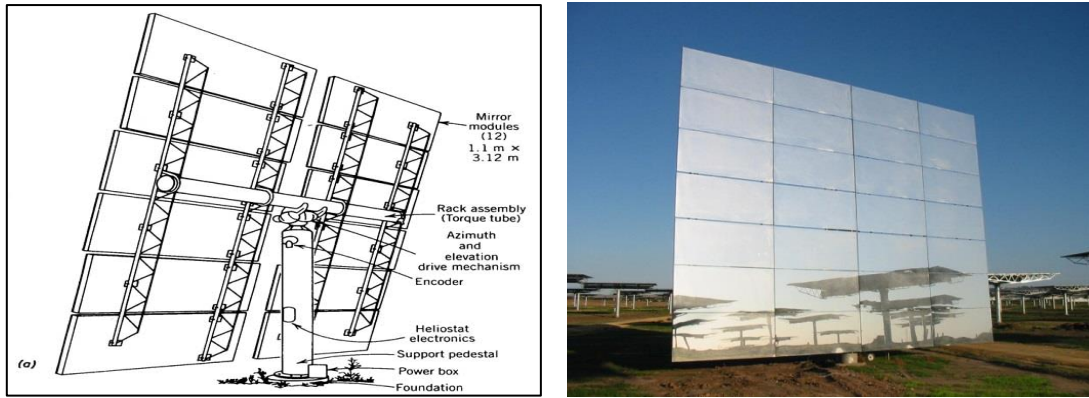
Σχήμα 2.4 Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας σε σύστημα κεντρικού δέκτη [34]

Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί ηλιοστάτες σε πολλά διαφορετικά μεγέθη, με το εμβαδόν της ανακλαστικής τους επιφάνειας να ξεκινάει από  $1 \text{ m}^2$  και ξεπερνώντας σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλων εγκαταστάσεων μέχρι και τα  $140 \text{ m}^2$ . 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.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970, που ξεκίνησε η έρευνα γύρω από τους ηλιακούς πύργους έχουν προταθεί πολλές κατασκευαστικές διαμορφώσεις των ηλιοστατών [29]. Οι δύο διαμορφώσεις που έχουν βρει εφαρμογή είναι:

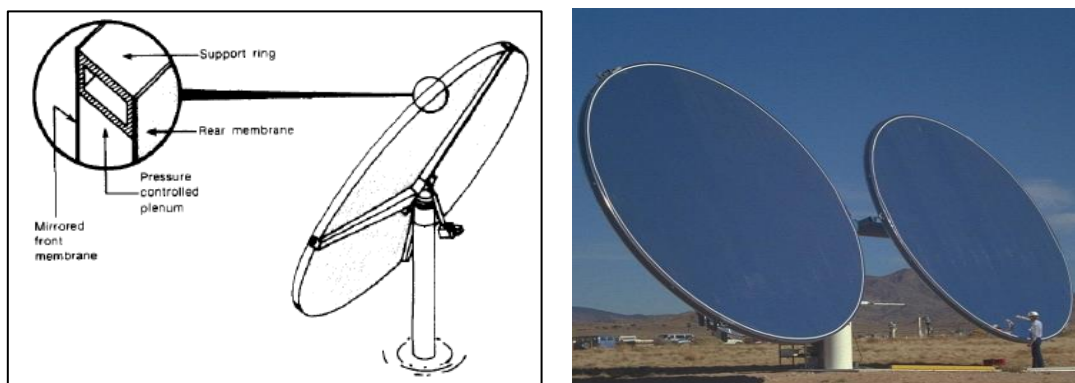
- ❖ Ηλιοστάτες γυαλιού/μετάλλου (glass/metal heliostats)
- ❖ Ηλιοστάτες τανυσμένης μεμβράνης (stretched membrane heliostats)

Στους πρώτους, η ανακλαστική επιφάνεια αποτελείται από υλικό υψηλού δείκτη ανάκλασης, κάτω από γυάλινη επιφάνεια χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο και υψηλής διαπερατότητας. Η ανακλαστική επιφάνεια επικολλάται μέσω κατάλληλης συγκολλητικής ουσίας σε μεταλλική βάση στήριξης, η οποία σχηματίζει και τη γεωμετρία του ηλιοστάτη. Η συνολική επιφάνεια ανάκλασης του ηλιοστάτη αποτελείται από ένα ή περισσότερα τέτοια κάτοπτρα. Παράδειγμα ηλιοστάτη γυαλιού/μετάλλου με τα κυριότερα εξαρτήματά του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.5 Τυπικός Ηλιοστάτης γυαλιού / μετάλλου [35],[36]

Μία σχετικά νέα τεχνολογία σχεδιασμού ηλιοστατών, με σκοπό τη μείωση του βάρους και του κόστους τους, είναι αυτή των τεντωμένων μεμβρανών. Η οπτική τους επιφάνεια επιφάνεια ορίζεται από ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο τανυσμένο γύρω από ένα δακτύλιο. Στις πρώτες υλοποιήσεις αυτής της διαμόρφωσης, το μεταλλικό φύλλο καλυπτόταν από διαφανές πολυμερικό φιλμ, ενισχυμένο με υλικό υψηλού δείκτη ανάκλασης (όπως είναι ο άργυρος και το αλουμίνιο), ενώ η τελική μορφή του κατόπτρου (μικρή καμπυλότητα μεμβράνης) πραγματοποιούνταν με εφαρμογή υποπίεσης μεταξύ των δύο μεταλλικών φύλλων. Αν και αυτού του τύπου οι ηλιοστάτες επιτυγχάνουν πολύ καλύτερη προσέγγιση της παραβολικής γεωμετρίας σε σχέση με τους ηλιοστάτες γυαλιού μετάλλου, το εκτεθειμένο πολυμερικό φιλμ σύντομα εμφάνισε προβλήματα αποδόμησης κατά την έκθεσή του στην υπεριώδη ακτινοβολία [37], και για το λόγο αυτό αντικαστάθηκε από λεπτή στρώση υάλου, γεγονός όμως που αύξησε το κόστος τους.



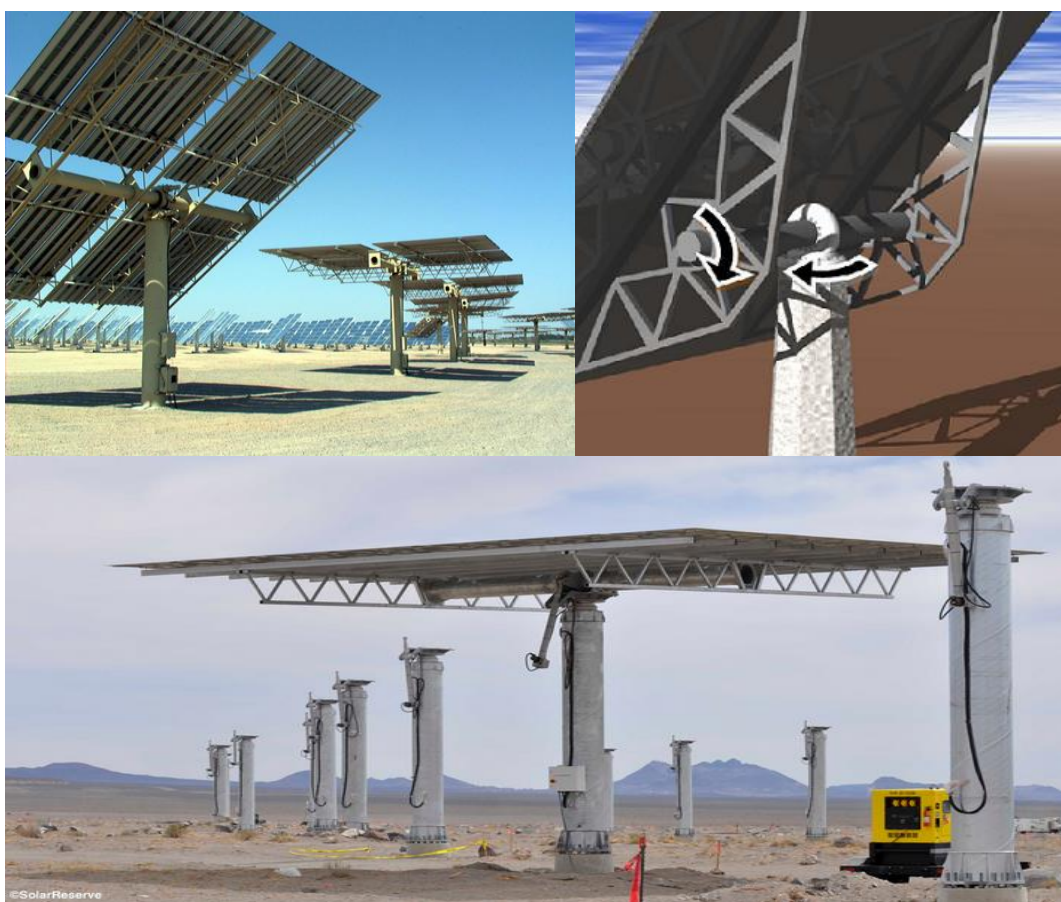
Σχήμα 2.6 Τυπικός Ηλιοστάτης Τεντωμένης Μεμβράνης [37],[38]

Ανεξαρτήτως της κατασκευαστικής τους διαμόρφωσης, βασικό μέλημα ενός σωστά κατασκευασμένου ηλιοστάτη είναι να παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα, χαμηλό σχετικά βάρος και υψηλή αντοχή στη φθορά λόγω των διαφόρων καιρικών φαινομένων. Το πιο σημαντικό περιβαλλοντικό κριτήριο σχεδιασμού που πρέπει να πληροί ένας ηλιοστάτης σχετίζεται με την ταχύτητα του ανέμου. Τυπικές απαιτήσεις είναι η σωστή λειτουργία του ηλιοστάτη για μέση ταχύτητα ανέμου έως και 12-14 m/s, να μην παθαίνει βλάβες για ταχύτητες μέχρι 22 m/s και να μπορεί να πάρει τη



θέση αδρανείας (οριζόντια θέση με την ανακλαστική επιφάνεια παράλληλη στο έδαφος) για ταχύτητες έως και 40 m/s. Επίσης, σημαντική είναι η δυνατότητα επιβίωσης στο χαλάζι (τυπικό κριτήριο επιβίωσης είναι όταν αυτό έχει διάμετρο 19mm και ταχύτητα 20m/s).

Η κίνηση των ηλιοστατών γίνεται μέσω βηματικών κινητήρων [39], ενώ ο έλεγχος πραγματοποιείται ψηφιακά μέσω υπολογιστή. Τα δύο συστήματα αξόνων που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα για την παρακολούθηση της ηλιακής κίνησης, είναι το σύστημα ύψους – αζιμουθίου, και το σύστημα του οποίου ο ένας άξονας συμπίπτει με τη διεύθυνση της νοητής γραμμής ηλιοστάτη – ηλιακού δέκτη (target-aligned axis heliostats). Το σύστημα κίνησης των ηλιοστατών πρέπει να είναι ικανό να εκτελεί πολύ αργές κινήσεις με μεγάλους λόγους μείωσης, ώστε να παρακολουθεί με τεράστια ακρίβεια την πορεία του ήλιου, καθώς ακόμα και μια πολύ μικρή γωνιακή απόκλιση στην κίνηση ενός απομακρυσμένου ηλιοστάτη μπορεί να ισοδυναμεί με απόκλιση πολλών μέτρων του αποτυπώματος των ανακλώμενων ακτίνων στον δέκτη. Παράλληλα όμως, πρέπει να προσφέρει και τη 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.



Σχήμα 2.7 Σύστημα Στήριξης και Μηχανισμός Κίνησης Ηλιοστάτη [40],[41],[42]

### 2.3.2 Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης

Ο κεντρικός ηλιακός δέκτης, τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου, απορροφά τη συγκεντρωμένη από το ηλιοστατικό πεδίο ηλιακή ακτινοβολία και την προσδίδει σε ένα εργαζόμενο ρευστό με τη μορφή θερμικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός του είναι προϊόν εκτενούς ανάλυσης και βελτιστοποίησης, καθώς το κόστος του ανέρχεται περίπου στο 15% του αρχικού κεφαλαίου, και είναι το υποσύστημα μιας τέτοιας εγκατάστασης με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα σχετικά με τη διάρκεια ζωής του, καθώς στην επιφάνεια του παρατηρούνται πολλά μεταβατικά φαινόμενα και αναπτύσσονται ισχυρές θερμικές τάσεις [45].

Το μέγεθος του ηλιακού δέκτη εξαρτάται από τη ζητούμενη από την εγκατάσταση παραγόμενη ενέργεια, 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 συγκεντρώνεται σε αυτήν. Εξίσου 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 τη 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 χρησιμοποιούνται 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, είναι το νερό-ατμός, τα τετηγμένα νιτρικά άλατα, το υγρό νάτριο και πολύ σπανιότερα ο αέρας.

Σε χρήση στις εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων, βρίσκονται δύο τύποι δεκτών [1]:

#### **Εξωτερικός δέκτης (external receiver)**

Ο *εξωτερικός δέκτης* αποτελείται από επίπεδες ή κυρτές (προς το ηλιοστατικό πεδίο) επιφάνειες απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες βρίσκονται εκτεθειμένες στο περιβάλλον. Οι επιφάνειες απορρόφησης θερμότητας του δέκτη είναι παρόμοιες με εκείνες ενός συμβατικού λέβητα ορυκτού καυσίμου. Αποτελούνται δηλαδή, από πολλά πάνελ παράλληλων μεταλλικών σωλήνων μικρής διαμέτρου (20-56mm), συγκολλημένων μεταξύ τους με κοινή κεφαλή εισόδου και εξόδου, μέσω των οποίων ρέει το εργαζόμενο ρευστό, απάγοντας την ηλιακή ενέργεια που έχει απορροφηθεί από την εξωτερική τους επιφάνεια στη μορφή θερμότητας. Οι σωλήνες, κατασκευασμένοι συνήθως από ανοξείδωτο ατσάλι και κράματα νικελίου, επικαλύπτονται εξωτερικά με μαύρη βαφή υψηλής απορροφη-

τικότητας Pyromark®. Για εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος, όπου το πεδίο των ηλιοστατών περικυκλώνει τον πύργο, τα πάνελ συγκολλούνται πλευρικά μεταξύ τους σχηματίζοντας πολυέδρο, το οποίο προσεγγίζει κυλινδρική διάταξη. Ο λόγος ύψους - διαμέτρου ενός κυλινδρικού εξωτερικού δέκτη είναι συνήθως της τάξης του 1:1 με 2:1. Σε μικρότερες εγκαταστάσεις με βόρεια διάταξη πεδίου, εάν χρησιμοποιηθεί εξωτερικός δέκτης, συνήθως συνίσταται στην τομή ενός κυλινδρικού δέκτη, όπου έχουν αφαιρεθεί τα πάνελ σωλήνων με νότιο προσανατολισμό.

Οι παρακάτω εικόνες απεικονίζουν σχεδιαγράμματα τυπικού κυλινδρικού εξωτερικού δέκτη, καθώς και φωτογραφίες δεκτών εγκαταστάσεων που είναι ήδη σε λειτουργία ή υπο κατασκευή. Με τη σειρά παράθεσης τους, στις αντίστοιχες φωτογραφίες μπορεί κανείς να δει τον δέκτη του Crescent Dunes Solar Energy Plant Tower ισχύος 110 MWe με αποθήκευση που κατασκευάζεται στη Νεβάδα και υπολογίζεται ότι θα μπει σε λειτουργία στο τέλος του έτους, και τον δέκτη της εγκατάστασης Sierra Sun Tower ισχύος 5 MWe στην Καλιφόρνια που τέθηκε σε ισχύ το 2009.

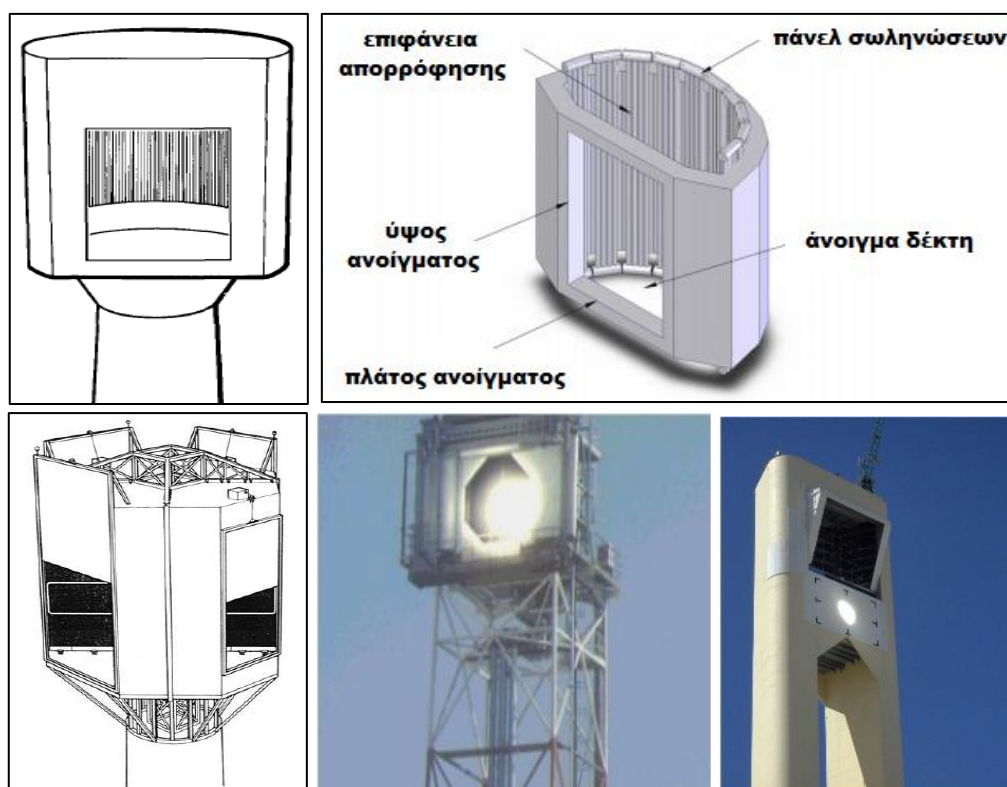


Σχήμα 2.8 Παραδείγματα Εξωτερικού Ηλιακού Δέκτη [35],[32],[42],[47]

### Δέκτης κοιλότητας (cavity receiver)

Στους δέκτες αυτού του τύπου, η επιφάνεια απορρόφησης τοποθετείται στο εσωτερικό μιας διαμόρφωσης τύπου κοιλότητας (η κατασκευή μοιάζει με κουτί). Με τον τρόπο αυτό περιορίζονται οι απώλειες θερμότητας της επιφάνειας λόγω συναγωγής, ενώ η ακτινοβολία περνά μέσα από ένα ή περισσότερα ανοίγματα, τα οποία καλύπτονται από διαφανές υλικό, σε μια κοίλη διάταξη στο εσωτερικό της

κατασκευής. Εκεί είναι τοποθετημένες οι επιφάνειες απορρόφησης της ακτινοβολίας και μεταφοράς θερμότητας (πάνελ σωληνώσεων). 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. 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. Τυπικές διαστάσεις των ανοιγμάτων κυμαίνονται μεταξύ τους ενός τρίτου και ενός δευτέρου της επιφάνειας απορρόφησης του δέκτη, ενώ τα ανοίγματα μπορούν να δέχονται ακτινοβολία από ένα κυκλικό τομέα γωνίας μεταξύ  $60^\circ$  και  $120^\circ$ . Ως εκ τούτου, το πεδίο των ηλιοστατών περιορίζεται σε αυτό τον κυκλικό τομέα, ή σε περίπτωση που απαιτούνται περισσότεροι ηλιοστάτες, ο δέκτης διαθέτει περισσότερα του ενός ανοίγματα. Τα ανοίγματα σχεδιάζονται κατά τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας, ενώ οι διαστάσεις τους προκύπτουν από τις διαστάσεις του ειδώλου κατοπτρισμού από το μακρινότερο ηλιοστάτη, συν τις απώλειες ανακοπής (περίπου 1-4%). Δέκτες τύπου κοιλότητας παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα:



Σχήμα 2.9 Παραδείγματα Ηλιακού Δέκτη Κοιλότητας [32],[48],[35],[49]

Το εμβαδόν της απορροφητικής επιφάνειας ενός δέκτη κοιλότητας είναι περίπου κατά 25% μεγαλύτερο από αυτό για έναν εξωτερικό δέκτη για ίδια εισερχόμενη θερμική ισχύ, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του, με συνέπεια το βάρος και το πλήθος των εξαρτημάτων του να είναι συνήθως μεγαλύτερα. Ταυτόχρονα όμως, οι σωληνώσεις του δέκτη κοιλότητας προστατεύονται πολύ περισσότερο από τους εξωγενείς περιβαλλοντικούς παράγοντες και παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. [32],[35],[50]



Εκτός από τους προηγούμενους δύο τύπους δεκτών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ήδη σε εμπορικές εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων, υπό ανάπτυξη βρίσκεται και ένας τρίτος τύπος δέκτη, ο ογκομετρικός δέκτης (volumetric receiver).

### Ογκομετρικός δέκτης (volumetric receiver)

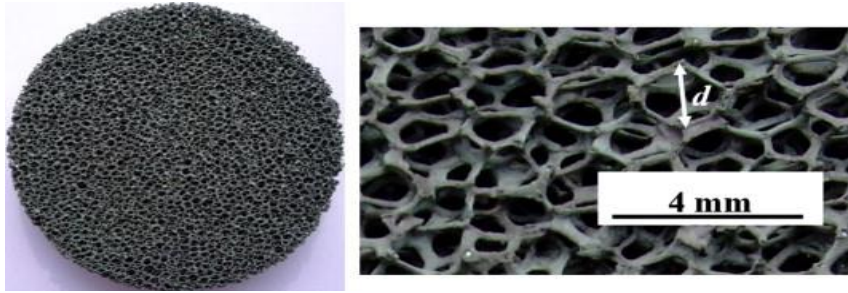
Στους δέκτες αυτούς, η επιφάνεια απορρόφησης δεν αποτελείται από αγωγούς, αλλά από εξαιρετικά πορώδες υλικό, μέταλλο ή κεραμικό, σε μορφή πλέγματος, αφρού ή πολλαπλών στρώσεων. Το ρευστό λειτουργίας περνά από το πορώδες του υλικού, απορροφώντας την εστιασμένη ακτινοβολία και θερμαίνεται μέσω συναγωγής. Η διάταξη αυτή υπόσχεται την επίτευξη εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών αναλόγως με το υλικό της επιφάνειας απορρόφησης, και συγκεκριμένα:

- ❖ 800 – 1000°C, με χρήση μετάλλων
- ❖ 1200°C με χρήση κεραμικών SiSiC και 1500°C με κεραμικά SiC.
- ❖ Έως και 2000°C με χρήση κεραμικών αλουμίνας.

Οι ογκομετρικοί δέκτες είναι καταλληλότεροι για χρήση με συμπιεσμένα αέρια, όπως ο αέρας και το ήλιο, λόγω των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται. Προς το παρόν, δεν έχουν βρει εμπορική εφαρμογή, αλλά από το 2009 γίνονται δοκιμές ενός τέτοιου κεραμικού δέκτη στο Jülich της Γερμανίας, σε εγκατάσταση επίδειξης, ισχύος 1,5MWe [11]. Τα πλεονεκτήματα τους συνοψίζονται στην απουσία αλλαγής φάσης του εργαζόμενου αερίου μέσου, στις υψηλές θερμοκρασίες που 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. Οι ογκομετρικοί δέκτες χρειάζονται περαιτέρω 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. [44],[51],[52]

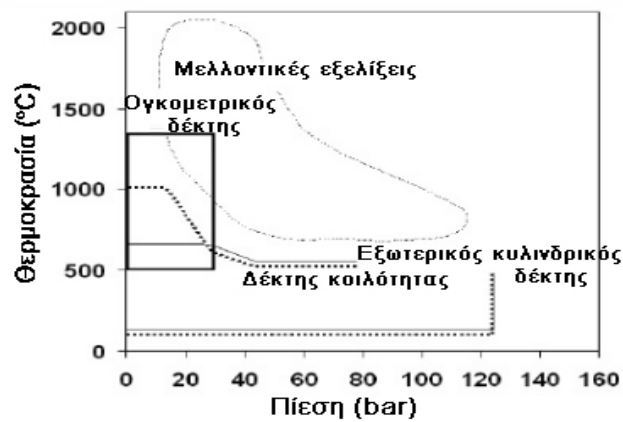


Σχήμα 2.10 Συναρμολόγηση πειραματικού ογκομετρικού δέκτη SolAir3000 [53]



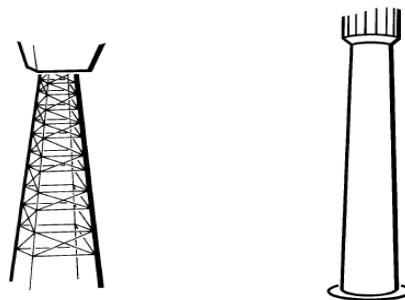
Σχήμα 2.11 Πορώδης κυψελοειδής διάταξη κεραμικού υλικού για χρήση σε ογκομετρικούς δέκτες [54]

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



Σχήμα 2.12 Τυπικές Συνθήκες Λειτουργίας Ηλιακών Δεκτών [50]

Ο δέκτης όπως αναφέρθηκε τοποθετείται στην κορυφή ενός πύργου. Σημαντικό ρόλο σχετικά με το ύψος του πύργου και την κατασκευή του διαδραματίζει το είδος του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας στις σωληνώσεις του δέκτη, το βάρος που καλείται να υποστηρίξει ο πύργος, τα φορτία ανέμου και σεισμών της περιοχής, καθώς και το κόστος κατασκευής του, το οποίο αυξάνεται εκθετικά με το ύψος. Οι πύργοι μπορούν να κατασκευαστούν είτε από ατσάλινους βραχίονες σε δικτύωμα, είτε από ενισχυμένο σκυρόδεμα. 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. [32]



Σχήμα 2.13 Κατασκευή πύργου α) δικτύωμα από ατσάλι, β) σκυρόδεμα [32]

### 2.3.3 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας [44]

Τα βασικά εξαρτήματα που αποτελούν το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 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 τη θερμότητα που προσδίδει ο ατμοπαραγωγός στο ρευστό, στην περίπτωση των ηλιοθερμικών σταθμών, την προσδίδει η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία μέσω του ηλιακού δέκτη. Ο ρόλος του ατμοπαραγωγού υποκαθίσταται δηλαδή, από το σύστημα ηλιοστατών-κεντρικού δέκτη.

Καταρχάς, η τελική διάταξη των κυκλωμάτων, τα οποία θα αποτελέσουν το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης καθορίζονται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, που ρέει στους αγωγούς του δέκτη. Η επιλογή του είναι συνάρτηση της μέγιστης θερμοκρασίας που απαιτεί η εφαρμογή, του κόστους του ρευστού, καθώς και άλλων κριτηρίων όπως η ασφάλεια κατά τη χρήση του και το σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας, εφόσον υπάρχει. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας που έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ηλιακών πύργων με τις κυριότερες φυσικές ιδιότητές τους.

Πίνακας 2.1: Ρευστά μεταφοράς θερμότητας σε δέκτες ηλιακών πύργων

Ρευστό	Θερμοκρασίες Λειτουργίας (οC)	Ποκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Ειδική Θερμότητα (J/kg.οC)	Ποκνότητα Ενέργειας (kJ/m <sup>3</sup> .οC)
Νερό - Ατμός	0 - 540	*	*	*
Υγρό Νάτριο	100 - 760	750	1260	945
Τήγμα Αλάτων (50% KNO <sub>3</sub> - 40% NaNO <sub>2</sub> - 7% NaNO <sub>3</sub> ) κ.β.	142 - 560	1680	1560	2620
Θερμικά Έλαια	-10 - 425	+	+	+

\* Εξαρτάται από τη φάση

+ Εξαρτάται από τον τύπο θερμικού ελαίου

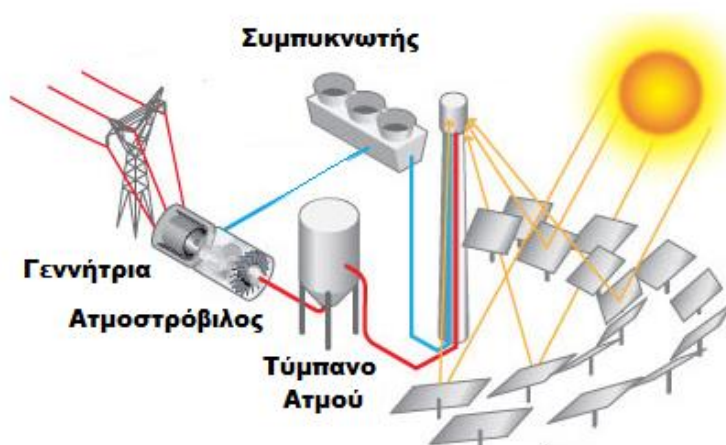
Το νερό χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων, αλλά και μεταγενέστερα (στις εγκαταστάσεις PS10 και PS20 στην Ισπανία). Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζει το προτέρημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας, ως ρευστό λειτουργίας στον κύκλο ισχύος ενός ατμοστρόβιλου, χωρίς την παρουσία ενδιάμεσου εναλλάκτη θερμότητας, ωστόσο παρουσιάζει προβλήματα ως ρευστό αποθήκευσης ενέργειας λόγω των υψηλών πιέσεων που αναπτύσσει στη φάση του ατμού. Το υγρό νάτριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, ενώ βρίσκει χρήση και ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας και ως μέσο αποθήκευσης, λόγω της χαμηλής τάσης ατμών στην υγρή φάση. Ωστόσο, στερεοποιείται σε θερμοκρασία 100°C, επομένως απαιτεί θέρμανση κατά την αποθήκευσή του. Το τήγμα αλάτων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ρευστό

μεταφοράς θερμότητας και ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας με την προϋπόθεση ότι θερμαίνεται για να παραμείνει πάνω από τη θερμοκρασία στερεοποίησής του. Είναι ωστόσο φθηνότερο από το υγρό νάτριο, ενώ προτιμάται στις πρόσφατες εφαρμογές ηλιακών πύργων (όπως στο Gemasolar Thermosolar Plant της Ισπανίας) λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας (υψηλή πυκνότητα ενέργειας). Τα θερμικά έλαια έχουν τη χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας, καθώς αποδομούνται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 425°C. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας, λόγω της χαμηλής τους τάσης ατμών, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν και σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός. Εξαιρετική προσοχή πρέπει να δίνεται στην περίπτωση που είναι εύφλεκτα ή τοξικά.

Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε συστήματα άμεσης ατμοπαραγωγής και συστήματα έμμεσης ατμοπαραγωγής, όπως αυτά περιγράφονται αμέσως παρακάτω.

### 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 υπέρθερμος ατμός στη συνέχεια, εκτονώνεται απ' ευθείας στο στρόβιλο, παράγοντας μηχανικό έργο και κατ' επέκταση ηλεκτρικό ρεύμα μέσω της γεννήτριας. Αφότου αποτονωθεί, ο ατμός υφίσταται συμπίκνωση, 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.



Σχήμα 2.14 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Άμεση Ατμοπαραγωγή [59]



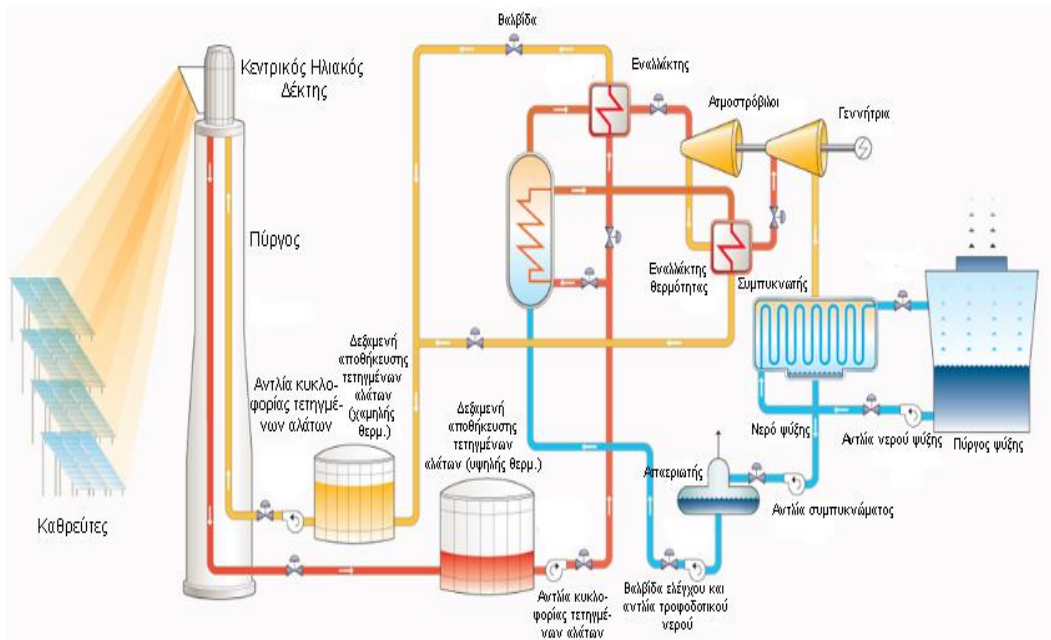
Η μεγάλη εμπειρία σχετικά με τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του νερού-ατμού ως εργαζόμενου μέσου σε κυκλώματα ατμοπαραγωγής, αποτελεί σαφές πλεονέκτημα. Επιπροσθέτως, με την εξ' ολοκλήρου χρήση νερού-ατμού στο κύκλωμα του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποφεύγονται οι απώλειες από τη χρήση ενός επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας για την ατμοπαραγωγή. Σημαντικό είναι επίσης, 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 - ατμός ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας, επιβαρύνει σημαντικά τις σωληνώσεις, καθώς αναπτύσσονται σε αυτές υψηλές πιέσεις λόγω της αλλαγής φάσης του, ενώ παράλληλα, δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικό μέσο για αποθήκευση ενέργειας, καθώς τα συστήματα αποθήκευσης με χρήση ατμού εμφανίζουν 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, στο πρώτο κύκλωμα ρέει ένα ρευστό διαφορετικό από νερό, το οποίο χρησιμοποιείται για την απαγωγή της θερμότητας από τις σωληνώσεις του κεντρικού ηλιακού δέκτη και ενδεχομένως και για την αποθήκευση της, αν υπάρχει κατάλληλο σύστημα θερμικής αποθήκευσης. Το θερμό ρεύμα ρευστού, μετά την απορρόφηση θερμότητας στον ηλιακό δέκτη, διέρχεται από έναν ή περισσότερους εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι δρουν ως ατμοπαραγωγός, καθώς από αυτούς 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 ατμοποιείται και υπερθερμαίνεται.

Ο ατμός στη συνέχεια, εκτελεί τις θερμοδυναμικές μεταβολές που περιγράφηκαν και στα συστήματα άμεσης ατμοπαραγωγής 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, 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 2.15 Τυπικό Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Έμμεση Ατμοπαραγωγή για Πύργο Ηλιακής Ισχύος. [44]

### 2.3.4 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (Thermal Energy Storage - TES) [55]

Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, τα ηλιοθερμικά συστήματα παράγουν σε πρώτη φάση θερμική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια σε ένα συμβατικό στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την αποθήκευση της ενέργειας στο στάδιο της θερμότητας, μια διαδικασία η οποία είναι σχετικά απλή και φτηνή. Η δυνατότητα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας δίνει στην ηλιοθερμική τεχνολογία ένα σημαντικότατο πλεονέκτημα έναντι άλλων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά συστήματα, τα οποία δεν έχουν ακόμη αναπτύξει ανταγωνιστικά συστήματα αποθήκευσης, καθώς η αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε σύγκριση με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ πιο αποδοτική αλλά και φθηνότερη. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί με εγκαταστάσεις αποθήκευσης αποδεσμεύονται από τις δυσκολίες που θέτει η διακοπόμενη φύση της ηλιακής ενέργειας και δύνανται να διασφαλίσουν αξιόπιστη λειτουργία και αυξημένη ποιότητα παρεχόμενης ισχύος (χωρίς έντονες διακυμάνσεις) σε συνθήκες συννεφιάς αλλά και λειτουργία ακόμη και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ένα ακόμη πλεονέκτημα που παρέχει η αποθήκευση της θερμότητας στους σταθμούς αυτούς, είναι η δυνατότητα χρονικής μετατόπισης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος τους από τη φυσική αιχμή της ηλιοφάνειας στην αιχμή της ζήτησης όπου, σε μια ευέλικτη αγορά, η ηλεκτρική ενέργεια πωλείται ακριβότερα, αυξάνοντας έτσι τα περιθώρια κέρδους του σταθμού. Επιπλέον, η αποθήκευση καθιστά δυνατή τη σχεδόν ακαριαία διανομή της ισχύος ανάλογα με τη ζήτηση (on demand), έτσι ώστε να ικανοποιούνται αναμενόμενες και μη καταναλώσεις φορτίου. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι παρέχεται στο Διαχειριστή του Συστήματος η ευελιξία να ρυθμίζει τη διείσδυση και των άλλων ΑΠΕ περιορίζοντας, αν χρειάζεται, την ισχύ εξόδου των

ηλιοθερμικών σταθμών. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα της θερμικής αποθήκευσης έχουν σαν αποτέλεσμα έναν αρκετά υψηλότερο συντελεστή χρησιμοποίησης και ένα μειωμένο χρόνο απόσβεσης της επένδυσης.

Η γενική ιδέα της αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας είναι ότι η θερμότητα από τον ήλιο που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας αντί να χρησιμοποιηθεί εξ ολοκλήρου για άμεση ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να αποθηκευτεί σε ορισμένα μέσα αποθήκευσης, όπως για παράδειγμα τηγμένα άλατα. Το ηλιακό πεδίο υπερδιαστασιολογείται, έτσι ώστε ο σταθμός κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας να βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία και ταυτόχρονα να αποθηκεύει το πλεόνασμα ηλιακής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συνθήκες συννεφιάς η θερμότητα αποδίδεται από το μέσο στο οποίο βρίσκεται αποθηκευμένη μέσω εναλλάκτη θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο προκειμένου να διατηρηθεί η λειτουργία του στροβίλου. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί με αποκλειστική χρήση ηλιακής ενέργειας (solar-only) λειτουργούν ιδανικά για να καλύψουν τις μεγάλες αιχμές ζήτησης τα μεσημέρια των θερινών μηνών σε περιοχές με σημαντικές καταναλώσεις κλιματισμού. Με ενσωμάτωση θερμικής αποθήκευσης, αυτοί οι σταθμοί μπορούν να λειτουργούν περισσότερο, ικανοποιώντας ακόμη και το φορτίο βάσης.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Στην *άμεση αποθήκευση* το μέσο μεταφοράς της θερμότητας αποθηκεύεται απευθείας σε θερμικά μονωμένες δεξαμενές, παίζοντας ταυτόχρονα και το ρόλο του μέσου αποθήκευσης. Για να εφαρμοστεί ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης θα πρέπει το μέσο μεταφοράς της θερμότητας να είναι οικονομικό και να έχει υψηλή θερμική χωρητικότητα προκειμένου να μειωθεί το κόστος της δεξαμενής. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η σταθερή θερμοκρασία του θερμού μέσου τόσο στη μεταφορά όσο και στην αποθήκευση της θερμότητας.

*Έμμεση αποθήκευση* σημαίνει ότι το μέσο αποθήκευσης θερμαίνεται μέσω εναλλακτών θερμότητας από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που ρέει στις σωληνώσεις του δέκτη. Τα μέσα αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται είναι υλικά με υψηλή θερμική χωρητικότητα όπως συμπιεσμένος ατμός, σκυρόδεμα, μια ποικιλία από υλικά αλλαγής φάσης και κυρίως τηγμένα άλατα, όπως για παράδειγμα νιτρικό νάτριο και νιτρικό κάλιο. Έμμεση αποθήκευση εφαρμόζεται όταν το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι πολύ ακριβό (όπως το συνθετικό έλαιο) ή δύσκολο να αποθηκευτεί (όπως ο συμπιεσμένος ατμός). Το πλεονέκτημα της έμμεσης μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος του μέσου αποθήκευσης, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό κόστος του εναλλάκτη θερμότητας αλλά και οι απώλειες θερμότητας σε αυτόν.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επικρατούσες εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης:

### **Αποθήκευση με τη χρήση τηγμένων αλάτων**

Διάφορα ρευστά έχουν δοκιμαστεί για να αποθηκεύσουν τη θερμότητα του ήλιου, όπως νερό, αέρας, έλαιο και νάτριο αλλά το υγροποιημένο άλας έχει επιλεγεί ως το καταλληλότερο και αποτελεί το επικρατέστερο μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας προς το παρόν. Το τηγμένο άλας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε σύστημα άμεσης αποθήκευσης σε ηλιοθερμικούς σταθμούς με ηλιακό πύργο επειδή είναι υγρό στην ατμοσφαιρική πίεση, αλλά επικρατεί κυρίως στα συστήματα έμμεσης

αποθήκευσης. Είναι ένα ιδιαίτερα αποδοτικό αλλά και οικονομικό μέσο αποθήκευσης. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του είναι συμβατές με τους σύγχρονους ατμοστροβίλους υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας, ενώ δεν είναι εύφλεκτο ούτε τοξικό. Επιπρόσθετα, υπάρχει μια σχετική εμπειρία και από τη χρήση του σε μη ηλιακά συστήματα καθώς χρησιμοποιείται ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας σε χημικές και μεταλλουργικές βιομηχανίες.

Το χρησιμοποιούμενο τηγμένο άλας είναι ένα μείγμα το οποίο αποτελείται κατά 60% από νιτρικό νάτριο και κατά 40% από νιτρικό κάλιο. Και τα δύο αυτά συστατικά χρησιμοποιούνται και στην παραγωγή τροφίμων ως συντηρητικά αλλά και στη γεωργία ως λιπάσματα. Το μείγμα ρευστοποιείται στους 220°C ενώ η μέγιστη ασφαλής θερμοκρασία στην οποία μπορεί να θερμανθεί είναι οι 560°C. Όταν φτάσει η ώρα να τεθεί εκτός λειτουργίας ένας σταθμός με τέτοιο σύστημα αποθήκευσης, στο τέλος της διάρκειας ζωής του, τα άλατα μπορούν να κρυσταλλωθούν και να απομακρυνθούν στη στερεά τους μορφή για να επαναχρησιμοποιηθούν σε άλλες διαδικασίες, όπως για παράδειγμα στη γεωργία.

Ο πρώτος και μοναδικός εν λειτουργία μέχρι στιγμής σταθμός κεντρικού ηλιακού δέκτη, ο οποίος ενσωματώνει σύστημα άμεσης αποθήκευσης με τηγμένο άλας είναι ο σταθμός Gemasolar μεγέθους 19.9MW, στην Ισπανία. Ο σταθμός αυτός χρησιμοποιεί ένα πρωτοποριακό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε τηγμένο άλας που φτάνει σε θερμοκρασίες πάνω από 500°C. Σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι το τηγμένο άλας χρησιμοποιείται τόσο ως μέσο αποθήκευσης αλλά και ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας. 8500 τόνοι τηγμένου άλατος μπορούν να αποθηκευτούν στις δεξαμενές αποθήκευσης (διαστάσεων 10,5m σε ύψος και 23m σε διάμετρο), εξασφαλίζοντας στο σταθμό μια αυτονομία περίπου 15 ωρών. Έτσι, ο Gemasolar μπορεί να λειτουργεί 24 ώρες την ημέρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ενώ εκτιμάται ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησής του θα φτάσει το 75%. [56]



*Σχήμα 2.16 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας δύο δεξαμενών (Gemasolar) [57]*

Οι δεξαμενές είναι πολύ καλά μονωμένες και σε αυτές το τηγμένο άλας μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία του ακόμη και για αρκετές εβδομάδες (η θερμοκρασιακή απώλεια είναι της τάξης του ενός με δύο βαθμούς ημερησίως).

## Άμεση αποθήκευση ατμού

Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης εφαρμόζεται σε εμπορική χρήση στην περίπτωση του σταθμού με ηλιακό πύργο PS10 στην Ισπανία. Στον PS10 αποθηκεύεται θερμότητα σε δεξαμενές ως συμπιεσμένος ατμός στα 50bar και στους 285°C. Ο ατμός συμπυκνώνεται κατά την αποθήκευση και κατά τη χρήση επιστρέφει στην αέρια κατάσταση ελαττώνοντας την πίεση. Η χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης είναι περιορισμένη εξαιτίας του υψηλού κόστους των δεξαμενών συμπίεσης για μεγάλο όγκο ατμού. Αυτή η μέθοδος είναι μια συμβατική τεχνολογία, η οποία είναι γνωστή ως αποθήκευση Ruth. Η ιδανικότερη χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι ως αποθήκευση ανάγκης για την αιχμή του φορτίου.



*Σχήμα 2.17 Δεξαμενές αποθήκευσης πεπιεσμένου ατμού του ηλιοθερμικού σταθμού PS10 [58]*

## Έμμεση αποθήκευση με σκυρόδεμα

Η χρησιμοποίηση σκυροδέματος ως μέσου αποθήκευσης βρίσκεται σε διαφορετικά στάδια σε πειραματικές εφαρμογές με θετικές έως τώρα ενδείξεις. Η αποθήκευση γίνεται σε θερμοκρασίες 400-500 °C. Είναι μια δομοστοιχειωτή σχεδίαση μεταβλητού μεγέθους όπου η θερμότητα αποθηκεύεται σε ένα δίκτυο στερεών πλακών. Προς το παρόν το κόστος επένδυσης είναι περίπου 30€/kWh, αλλά ο στόχος είναι να μειωθεί κάτω από τα 20€/kWh. Συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη είναι αναγκαία για να φτάσει αυτή η τεχνολογία στην εμπορική χρήση.



*Σχήμα 2.18 Πειραματική διάταξη από σκυρόδεμα με δυνατότητα αποθήκευσης 400 kWh θερμικής ενέργειας [55]*



## Έμμεση αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials-PCMs)

Η τεχνολογία αυτή, που βρίσκεται υπό ανάπτυξη, προσφέρει την προοπτική πιο αποδοτικής αποθήκευσης της ενέργειας σε ηλιοθερμικούς σταθμούς. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι οργανικά ή ανόργανα και χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμοκρασία τήξης. Υγροποιούνται και στερεοποιούνται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, και είναι ικανά να αποθηκεύουν και να εκλύουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Η βασική αρχή χρήσης τους στην αποθήκευση θερμότητας είναι ότι απορροφάται θερμότητα κατά την αλλαγή από τη στερεά στην υγρή κατάσταση και εκλύεται κατά την αντίστροφη πορεία. Η μεγαλύτερη ενθαλπία στα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης καθιστά τα ένυδρα άλατα ιδανικό μέσο αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Στα συστήματα αυτά, το θερμό ρευστό μεταφοράς της θερμότητας ρέει μέσω ενός διανομέα, που είναι ενσωματωμένος στα υλικά αλλαγής φάσης, μεταφέροντας τη θερμότητά του στο υλικό αποθήκευσης. Η μέθοδος έχει δοκιμαστεί προς το παρόν σε διάφορα πρωτότυπα συστήματα, αλλά όχι σε εμπορικές εφαρμογές. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης και το χαμηλό κόστος των μέσων αποθήκευσης. Ωστόσο υπάρχουν ορισμένα εμπόδια στην ανάπτυξη αυτής της μεθόδου, όπως είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα αυτών των υλικών, τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου να αποτελέσει μια εμπορικά βιώσιμη λύση.

### 2.3.5 Σύστημα Εφεδρικής Καύσης [2]

Οι εγκαταστάσεις πύργων ηλιακής ισχύος μπορούν σε κάποιες περιπτώσεις να υβριδιστούν με την ενσωμάτωση ενός συστήματος εφεδρικής καύσης ορυκτών καυσίμων. Βασικός σκοπός του είναι η άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιπτώσεις χαμηλής ή και μηδενικής ηλιοφάνειας. Στην ουσία, ένα σύστημα εφεδρικής καύσης λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας για τον ηλιοθερμικό σταθμό, επιτρέποντάς του 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. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να τηρούνται οι περιορισμοί που ορίζει η εκάστοτε νομοθεσία για το σύστημα εφεδρικής καύσης.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές βασικές διατάξεις συστημάτων εφεδρικής καύσης. Στην πρώτη (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. Στη δεύτερη διάταξη (μόνο σε συστήματα έμμεσης ατμοπαραγωγής) ο εφεδρικός καυστήρας τοποθετείται στη σειρά με τον εναλλάκτη-ατμοπαραγωγό, έτσι ώστε όταν το εργαζόμενο μέσο 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 παράγοντας ατμό με τα χαρακτηριστικά που απαιτεί η εγκατάσταση.



## 2.4 Συστήματα Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη ανά τον Κόσμο

Στο παρόν εδάφιο πραγματοποιείται μία συνοπτική παρουσίαση των εγκαταστάσεων κεντρικού ηλιακού δέκτη, που λειτουργούν ή βρίσκονται υπό κατασκευή σε όλο τον κόσμο, καθώς και κάποιων βασικών χαρακτηριστικών τους.

Πίνακας 2.2: Σταθμοί Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη υπό λειτουργία

Όνομα Σταθμού	Περιοχή	Ισχύς (Mwe)	Αριθμός / μέγεθος ηλιοστατών (m <sup>2</sup> )	Αποθήκευση	Έναρξη Λειτουργίας
<b>Badaling</b>	Beijing, China	1.5	100/100	1h	Άυγουστος 2012
<b>Gemasolar</b>	Seville, Spain	19.9	2650/120	15h	Απρίλιος 2011
<b>Julich</b>	Julich, Germany	1.5	2153/8	1.5h	Δεκέμβριος 2008
<b>PS 10</b>	Seville, Spain	11	624/120	1h	Ιούνιος 2007
<b>PS 20</b>	Seville, Spain	20	1255/120	1h	Απρίλιος 2009
<b>Sierra Sun</b>	California, USA	5	24360/1.14	-	Ιούλιος 2009
<b>Yanqing</b>	Yanqing, China	1	100/100	Ναι	Ιούλιος 2011

Πίνακας 2.3: Σταθμοί Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη υπό κατασκευή

Όνομα Σταθμού	Περιοχή	Ισχύς (Mwe)	Αναμενόμενη Ολοκλήρωση
<b>Ivanpah (3 πύργοι)</b>	USA	377	2013
<b>Crescent Dunes</b>	USA	110	2013/2014
<b>Khi Solar One</b>	South Africa	100	2014
<b>Delingha</b>	China	50	2013
<b>e-Cube 1</b>	China	1	2013
<b>THEMIS</b>	France	1.4	-

Το πλήθος των υπό μελέτη και σχεδιασμό εγκαταστάσεων είναι πραγματικά εντυπωσιακό. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στην ιστοσελίδα της βιβλιογραφικής αναφοράς [96], όπου γίνεται αναλυτική καταγραφή όλων των ηλιοθερμικών εγκαταστάσεων, ακόμα και στα πιο πρώιμα στάδια ανάπτυξής τους.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Ηλιοστατικού Πεδίου

Ο σωστός σχεδιασμός και η προσπάθεια βελτιστοποίησης του ηλιοστατικού πεδίου είναι διαδικασίες πολύ σημαντικές, κατά την μοντελοποίηση και μελέτη ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας με πύργο ηλιακής ισχύος. Το κόστος του ηλιοστατικού πεδίου ανέρχεται, στις περισσότερες περιπτώσεις, στο 40-50% του συνολικού κόστους της εγκατάστασης και η σωστή σχεδίαση του μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης [29],[60]. Είναι λοιπόν σαφής η σημασία του τόσο από ενεργειακή όσο και από οικονομική άποψη, και αν κάποιος επέλεγε να βελτιστοποιήσει πρώτο ένα από τα υποσυστήματα του πύργου ηλιακής ισχύος, αυτό αδιαμφισβήτητα θα ήταν το πεδίο ηλιοστατών.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής ανάλυση σχετικά με τη σχεδίαση και βελτιστοποίηση ενός ηλιοστατικού πεδίου και προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος σχεδιασμού πεδίων, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

#### 3.1 Επιλογή Κατάλληλης Διάταξης Ηλιοστατών

Προτού 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. Οι δύο διατάξεις που συναντώνται είναι:

- ❖ η διάταξη του ηλιοστατικού πεδίου βόρεια του πύργου (*North Field Layout*)
- ❖ η περιβάλλουσα διάταξη (*Surrounding Field Layout*), με τους ηλιοστάτες τοποθετημένους γύρω από τον πύργο

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. Όπως θα γίνει καλύτερα κατανοητό στο επόμενο κεφάλαιο κατά την περιγραφή των απωλειών συνημιτόνου, τα βόρεια πεδία παρουσιάζουν γενικά καλύτερη απόδοση, ωστόσο όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ισχύς της εγκατάστασης, τόσο περισσότεροι ηλιοστάτες απαιτούνται. Έτσι, σε ένα μεγάλο πεδίο με διάταξη βόρεια του πύργου, αρκετοί καθρέφτες θα ήταν αναγκαίο να τοποθετηθούν σε πολύ μακρινές θέσεις με χαμηλή απόδοση λόγω της ατμοσφαιρικής απορρόφησης. Στην περιβάλλουσα διάταξη απεναντίας, οι ηλιοστάτες τοποθετούνται σε κοντινότερες αποστάσεις και παρόλη την αύξηση των απωλειών συνημιτόνου, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του πεδίου είναι μεγαλύτερος.

Οι δύο βασικές διατάξεις ηλιοστατικών πεδίων, για τις οποίες γίνεται λόγος, φαίνονται χαρακτηριστικά στα παρακάτω σχήματα:



*Σχήμα 3.1 Διάταξη Ηλιοστατικού Πεδίου Βόρεια του Πύργου PS10. [61]*



*Σχήμα 3.2 Περιβάλλουσα Διάταξη Ηλιοστατικού Πεδίου του Πύργου Gemasolar. [46]*

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; Οι Luis Crespo et al. απαντούν στο ερώτημα αυτό στο άρθρο τους [63], συγκρίνοντας τις δύο διαφορετικές διατάξεις, για ένα κοινό εύρος τιμών της ονομαστικής ισχύος της εγκατάστασης ως προς το γινόμενο των ετήσιων βαθμών απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου και του κεντρικού ηλιακού δέκτη. Η τιμή της ονομαστικής ισχύος της εγκατάστασης, που αποτελεί τη

διαχωριστική γραμμή για την επιλογή της μίας ή της άλλης διάταξης, βρέθηκε περί τα 90 MWe. Για σταθμούς ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 90 MWe χωρίς σύστημα αποθήκευσης συνίσταται 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. Βέβαια, εάν αναφερθούμε σε εγκαταστάσεις που περιλαμβάνουν σύστημα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας, η διαχωριστική γραμμή μετακινείται προς μικρότερες τιμές ισχύος. Ως παράδειγμα, αναφέρεται ότι για σταθμούς με σύστημα αποθήκευσης 6 ωρών, η ονομαστική ισχύς του σταθμού, που αποτελεί τη διαχωριστική γραμμή για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης, προσεγγίζει τα 50 MWe.

Κάθε εγκατάσταση ωστόσο, παρουσιάζει τα δικά της εγγενή χαρακτηριστικά και τυχόν απαιτήσεις, που μπορεί να επιφέρουν αποκλίσεις από τις τιμές αυτές. Η κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξετάζεται με βάση λειτουργικούς και οικονομικούς παράγοντες, αλλά καταρχήν, για εγκαταστάσεις ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 50 MWe συστήνεται να εξετάζεται κυρίως η επιλογή της διάταξης των ηλιοστατών βόρεια του πύργου. [63]

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. [32]

### **3.2 Αλγόριθμος Σχεδιασμού Ηλιοστατικού Πεδίου με βάση την τοπογραφία της διαθέσιμης έκτασης**

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι γένεσης ηλιοστατικών πεδίων που συναντώνται στη βιβλιογραφία, αναφέρονται σε επίπεδο έδαφος χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν συνεχείς κλίσεις του εδάφους και υψομετρικές διαφορές, καθώς στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, τα πεδία που επιλέγονται για κατασκευή συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων είναι σχεδόν επίπεδα. Τα περισσότερα προγράμματα είναι σε θέση να λάβουν υπόψιν μια ενιαία κλίση του εδάφους προς μια κατεύθυνση (πχ. ανύψωση του εδάφους προς το βορρά με σταθερή κλίση  $5^\circ$ ), ελάχιστα είναι όμως εκείνα, που λαμβάνουν υπόψιν την αναλυτική μορφολογία του εδάφους κατά το σχεδιασμό του πεδίου.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζουμε την ανάπτυξη αλγορίθμου γένεσης ηλιοστατικού πεδίου γενικής ισχύος, ο οποίος να λαμβάνει υπόψη την ιδιαίτερη μορφολογία οποιοδήποτε σύνθετου ή μη πεδίου. Το ενδιαφέρον μας κατά την ανάπτυξη του αλγορίθμου, εντοπίζεται στην γένεση ενός ηλιοστατικού πεδίου με τρόπο τέτοιο, ώστε να δίνεται η δυνατότητα στο σχεδιαστή να επιλέγει τις παραμέτρους που επιθυμεί, και να παρακολουθεί τις διαφορές που επιφέρουν στο ηλιοστατικό πεδίο.

### 3.2.1 Δεδομένα εισόδου από το σχεδιαστή – Παράμετροι Σχεδιασμού

Για το σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου, τα δεδομένα που καλείται να επιλέξει ο χρήστης και αποτελούν τις παραμέτρους σχεδιασμού του πεδίου είναι τα εξής:

❖ Ύψος πύργου: *tower\_height*.

Στην περίπτωση σταθμού με ηλιοστατικό πεδίο βόρεια του πύργου και δέκτη κοιλότητας, το ύψος του πύργου επιλέγεται συνήθως μεγαλύτερο, σε σχέση με την περίπτωση σταθμού με εξωτερικό κυλινδρικό δέκτη και ηλιοστατικό πεδίο που περιβάλλει τον πύργο.

❖ Ύψος και πλάτος ηλιοστατών: *hs\_height*, *hs\_width* αντίστοιχα.

Αναφέρονται στις διαστάσεις της συνολικής ανακλαστικής επιφάνειας του κάθε ηλιοστάτη. Στον παρόν αλγόριθμο, θεωρείται η χρήση ορθογωνικού σχήματος κατόπτρων, που είναι και η πιο συνήθης διαμόρφωση. Η τροποποίηση του κώδικα για ηλιοστάτες κυκλικής επιφάνειας μπορεί να γίνει εύκολα ζητώντας από το χρήστη ως είσοδο τη διάμετρο της επιφάνειας του, ωστόσο δεν μελετήθηκε στην παρούσα ανάλυση.

❖ Πλευρικό διάκενο μεταξύ ηλιοστατών της ίδιας σειράς: *hs\_gap*.

❖ Ακτινικό διάκενο μεταξύ ηλιοστατών διαδοχικών σειρών: *vert\_gap*.

Όπως θα γίνει κατανοητό κατά την περιγραφή του αλγορίθμου, οι αποστάσεις μεταξύ των ηλιοστατών προκύπτουν από συγκεκριμένες γεωμετρικές απαιτήσεις που έχουν τεθεί, ώστε να προκύπτει ένα αποδοτικό πεδίο. Ωστόσο, δίνοντας ο σχεδιαστής τιμές στα διάκενα αυτά, μπορεί να ρυθμίσει τις ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των ηλιοστατών κατά το δοκούν.

❖ Μέγιστος αριθμός ηλιοστατών.

Αν το πεδίο είναι περιορισμένο, θα τοποθετηθούν πιθανώς λιγότεροι ηλιοστάτες, όπως ορίζει ο αλγόριθμος τοποθέτησης τους. Αν το πεδίο επιτρέπει την τοποθέτηση περισσότερων ηλιοστατών, ο αριθμός αυτός αποτελεί τον μέγιστο αριθμό ηλιοστατών, που θα τοποθετηθούν σε κατάλληλη διαμόρφωση γύρω από τον πύργο.

❖ Ακτινική απόσταση 1<sup>ης</sup> σειράς ηλιοστατών από τη βάση του πύργου:  $R_{MIN}$ .

Η απόσταση μεταξύ της πρώτης σειράς ηλιοστατών από τον πύργο αποτελεί αντικείμενο μελέτης και εξαρτάται από το ύψος του πύργου, τη σκίαση που αυτός προκαλεί, την απαιτούμενη έκταση των υπομονάδων του σταθμού, όπως για παράδειγμα το σύστημα αποθήκευσης και η ηλεκτροπαραγωγική μονάδα. Αν επίσης, ο δέκτης είναι κοιλότητας, η ακτίνα αυτή εξαρτάται και από τις διαστάσεις του ανοίγματος του, καθώς και την κλίση του, ώστε να μπορούν οι ανακλώμενες ακτίνες να εισέρχονται στην επιφάνεια απορρόφησης του.

❖ Ύψος πυλώνα στήριξης του ηλιοστάτη στο έδαφος: *hs\_pylon*.

Αναφέρεται στο ύψος του μηχανισμού στήριξης του κάθε ηλιοστάτη και στην ουσία αποτελεί την κατακόρυφη απόσταση του κέντρου της ανακλαστικής επιφάνειας του ηλιοστάτη από το έδαφος.

❖ Ενδεικτικό μήκος (βήμα) *z\_step* για υπολογισμό των κλίσεων του εδάφους.

Η ακριβής του χρησιμότητα γίνεται κατανοητή κατά την περαιτέρω ανάλυση της μεθόδου. Η επιλογή του σχετίζεται με την ακρίβεια υπολογισμού των κλίσεων του εδάφους στην ευρύτερη περιοχή κάθε ηλιοστάτη.

❖ Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής.

Η τοπογραφία του πεδίου δίνεται σε αρχείο κειμένου (.txt, .cvs, .dat) σε μορφή πίνακα με τιμές του ύψους του εδάφους σε διάφορες θέσεις. Το πεδίο αντικατοπτρίζεται από ένα διδιάστατο πίνακα, του οποίου η πρώτη σειρά περιέχει τις συντεταγμένες *X* σε αύξουσα σειρά και η πρώτη στήλη τις συντεταγμένες *Y* σε φθίνουσα σειρά. Ο υπόλοιπος πίνακας περιέχει τις υψομετρικές τιμές *z* του εδάφους στο σημείο που χαρακτηρίζεται από τις αντίστοιχες συντεταγμένες. Προφανώς, όσο μεγαλύτερης ακρίβειας είναι το πλέγμα αυτό, τόσο ακριβέστερο και ρεαλιστικό είναι το πεδίο που παράγεται.

❖ Η περίμετρος του πεδίου / των εδαφίων, στα οποία δύναται να τοποθετηθούν ηλιοστάτες.

Η περίμετρος του πεδίου (όρια διαθέσιμης έκτασης) δίνεται σε αρχείο κειμένου με ένα σύνολο σημείων (*X,Y*), τα οποία σχηματίζουν κλειστή καμπύλη. Αν το πεδίο είναι σύνθετο ή περιέχει περιοχές, στις οποίες δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση ηλιοστατών (συνήθη τέτοια παραδείγματα είναι δρόμοι, ρέματα και ρυάκια τα οποία δε μπορούν να τροποποιηθούν λόγω περιβαλλοντικών κανονισμών κ.α.) είναι προφανές, ότι μπορούν να δοθούν περισσότερες της μιας περιμέτροι.

❖ Οι συντεταγμένες  $X_{tower}$ ,  $Y_{tower}$  της θέσης του πύργου στο κύριο σύστημα συντεταγμένων.

Καθορίζουν τη θέση του πύργου στο πεδίο. Ανάλογα με τη θέση του πύργου, από το τοπογραφικό αρχείο της περιοχής, εξάγεται το υψόμετρο του εδάφους στο σημείο αυτό  $Z_{tower}$ .

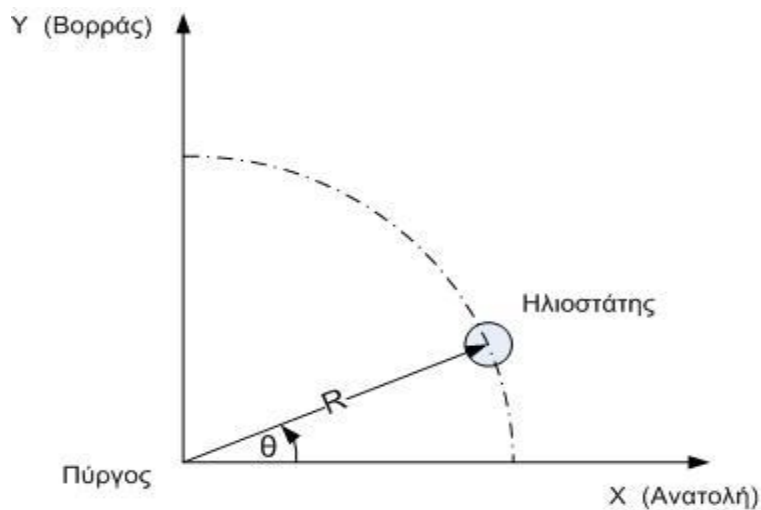
Τονίζεται ότι οι συντεταγμένες του πύργου, του τοπογραφικού χάρτη και τα σημεία που καθορίζουν τη διαθέσιμη περίμετρο πρέπει να αναφέρονται στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Οποιοδήποτε μετρικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρκεί να υπάρχει συνέπεια.



### 3.2.2 Περιγραφή αλγορίθμου

Στο σημείο αυτό, έχουμε πλέον τα απαραίτητα στοιχεία για να ξεκινήσουμε τον σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου βήμα προς βήμα. Ορίζεται ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή (0,0) στο επίπεδο xy, την θέση του πύργου και άξονες x και y προς την Ανατολή και τον Βορρά αντίστοιχα. Ο άξονας z δείχνει προς τον ουράνιο θόλο και το  $z=0$  αντιστοιχεί στο εκάστοτε τοπογραφικό / υψομετρικό επίπεδο αναφοράς. Οι συντεταγμένες των ηλιοστατών τελικά θα προκύψουν ως σημεία (x,y,z) στο προαναφερθέν σύστημα συντεταγμένων και στη συνέχεια θα αθροιστούν σε αυτές οι συντεταγμένες  $X_{tower}$ ,  $Y_{tower}$  του πύργου, ώστε να αναφέρονται στο γενικό σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται.

Κατά τους γεωμετρικούς υπολογισμούς και το σχεδιασμό του πεδίου, χρήσιμες θα φανούν οι πολικές συντεταγμένες : η ακτινική απόσταση του κάθε ηλιοστάτη από τον πύργο  $R$  και η γωνία που σχηματίζει η ακτινική διεύθυνση με τον άξονα x (ανατολή)  $\theta$ , όπως φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



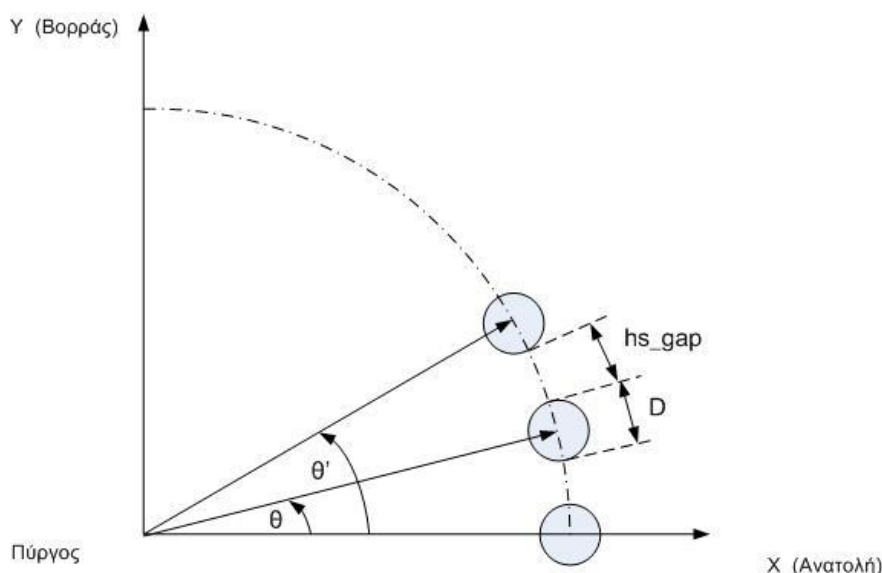
Σχήμα 3.3 Σύστημα συντεταγμένων για το σχεδιασμό του πεδίου.

Ο νοητός όγκος, μέσα στον οποίο περιλαμβάνεται κάθε πιθανή περιστροφική κίνηση της επιφάνειας του ηλιοστάτη, θα μπορούσε να περιγραφεί από μία σφαίρα με διάμετρο ίση με τη διαγώνιο του ηλιοστάτη  $D = \sqrt{hs\_width^2 + hs\_height^2}$ . Στο επίπεδο xy λοιπόν, ο κάθε ηλιοστάτης θα θεωρείται ως κύκλος με την παραπάνω διάμετρο.

Ξεκινώντας τη διαδικασία σχεδιασμού, τοποθετούμε την πρώτη σειρά ηλιοστατών του πεδίου σε περιφέρεια κύκλου ακτίνας  $R_{MIN}$  (παράμετρος που επιλέγει στην αρχή της διαδικασίας ο σχεδιαστής), οπότε και τοποθετείται ο πρώτος ηλιοστάτης σε ακτίνα  $R_{MIN}$  από την αρχή των αξόνων και για γωνία  $\theta = 0$  (το κέντρο του πρώτου ηλιοστάτη βρίσκεται πάνω στον άξονα x).

Ο επόμενος ηλιοστάτης τοποθετείται στον κύκλο αυτό (ακτίνας  $R_{MIN}$ ) κατά την αντιωρολογιακή φορά, έτσι ώστε να διασφαλίζεται πλευρικό διάκενο  $hs\_gap$  μεταξύ των νοητών εμβადών που αντιπροσωπεύουν τις πιθανές κινήσεις των ηλιοστατών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Χρησιμοποιώντας απλή τριγωνομετρία αυτό το πετυχαίνουμε υπολογίζοντας τη γωνία  $\theta'$  του ηλιοστάτη σε σχέση με τη γωνία  $\theta$  του προηγούμενου από τον τύπο:

$$\theta' = \theta + 2 * \sin^{-1} \left( \frac{D+hs\_gap}{2*R} \right).$$



Σχήμα 3.4 Προσθήκη ηλιοστατών στην ίδια σειρά – αξιμουθιακό κενό.

Προφανώς αν  $hs\_gap = 0$ , οι κύκλοι που αναπαριστούν τους ηλιοστάτες θα εφάπτονται. Μικρές αρνητικές τιμές δεν είναι απαγορευτικές υπό προϋποθέσεις αλλά για λόγους ασφαλείας και αποφυγής σύγκρουσης ηλιοστατών το πλευρικό διάκενο είναι καλό να μην παίρνει αρνητικές τιμές.

Για την τοποθέτηση ενός ηλιοστάτη στην ίδια σειρά, γίνεται αρχικά ο έλεγχος εάν στη σειρά αυτή «χωράνε» ακόμα δύο ηλιοστάτες. Μαθηματικά εκφράζεται με τη συνθήκη  $\theta + 4 * \sin^{-1} \left( \frac{D+hs\_gap}{2*R} \right) < 2\pi$ , η οποία στην ουσία διασφαλίζει ότι ο τελευταίος ηλιοστάτης της σειράς δε θα έρχεται σε επικάλυψη με τον πρώτο (στον άξονα x). Αν η συνθήκη αυτή είναι αληθής τοποθετείται ένας ηλιοστάτης σε γωνία  $\theta' = \theta + 2 * \sin^{-1} \left( \frac{D+hs\_gap}{2*R} \right)$ , ενώ όταν πάψει να ισχύει, τότε η τοποθέτηση ηλιοστατών στη σειρά αυτή έχει ολοκληρωθεί και περνάμε στην επόμενη.

Με τον παραπάνω τρόπο συμπληρώνεται όλη η πρώτη σειρά με ηλιοστάτες, των οποίων οι συντεταγμένες είναι:

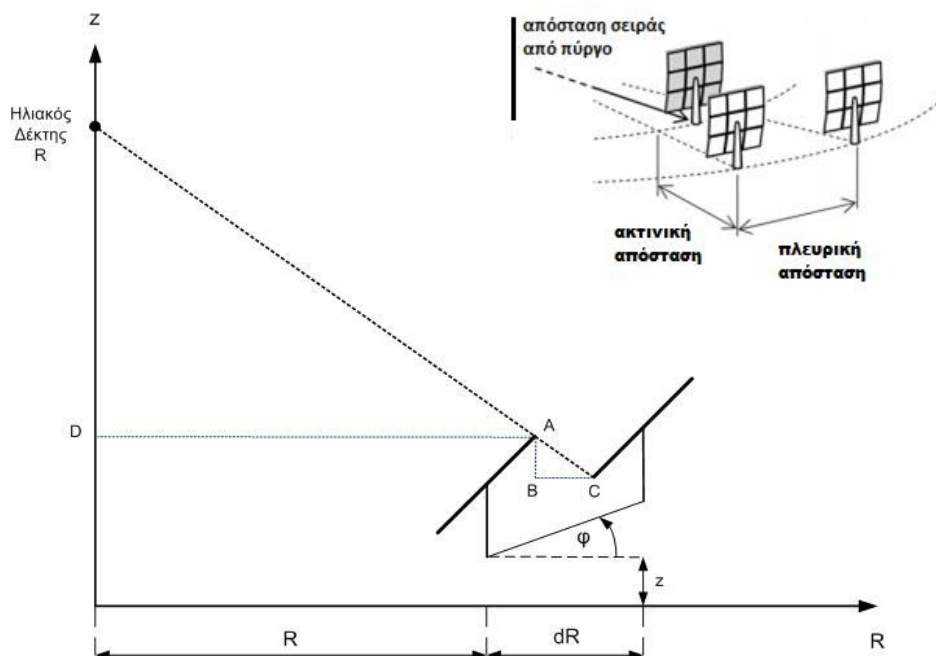
$$x = X_{tower} + R_{MIN} * \cos(\theta)$$

$$y = Y_{tower} + R_{MIN} * \sin(\theta)$$

Η συντεταγμένη z υπολογίζεται από το τοπογραφικό αρχείο παρεμβάλλοντας τις συντεταγμένες του κάθε ηλιοστάτη στον πίνακα του τοπογραφικού αρχείου. (Το ύψος

z του εδάφους στη θέση του ηλιοστάτη προκύπτει με 2D παρεμβολή στις τιμές των υψών των 4 σημείων του τοπογραφικού πίνακα που το περιβάλλουν).

Η διαδικασία τοποθέτησης ηλιοστατών σε επόμενη σειρά απαιτεί τον υπολογισμό της οριζόντιας ακτινικής απόστασης  $dR$  του ηλιοστάτη από την προηγούμενη του σειρά. Ο υπολογισμός γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι για 2 διαδοχικούς ηλιοστάτες (με ίδια γωνία  $\theta$ ) με κλίση της κατοπτρικής τους επιφάνειας  $43^\circ$  ( $0.75 \text{ rad}$ ) ως προς το οριζόντιο επίπεδο, η ευθεία που ενώνει το κατώτερο σημείο του πιο απομακρυσμένου ηλιοστάτη με τον δέκτη στην κορυφή του πύργου, να περνάει από το ανώτερο σημείο του προηγούμενου του χωρίς να τον τέμνει. Η συνθήκη αυτή γίνεται καλύτερα κατανοητή στο παρακάτω σχήμα, στο οποίο δεν έχει τηρηθεί ρεαλιστική κλίμακα για λόγους καλύτερης εποπτείας και κατανόησης της γεωμετρικής μεθόδου.



Σχήμα 3.5 Προσδιορισμός ακτινικής απόστασης μεταξύ διαδοχικών ηλιοστατών

Με αυτό τον τρόπο αναμένεται να προκύψει ένα πεδίο με πολύ καλή συμπεριφορά ως προς τις απώλειες παρεμπόδισης. Αρκετοί διαθέσιμοι κώδικες βασίζονται στο σχεδιασμό του πεδίου στον μηδενισμό των απωλειών αυτών. Η πρακτική που ακολουθείται εδώ μπορεί να μην τις μηδενίζει, ωστόσο κάνει αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου χώρου καθώς τοποθετούνται περισσότεροι ηλιοστάτες, χωρίς να επιδεινώνει σημαντικά τις απώλειες αυτές.

Η γωνία  $\varphi$ , όπως ορίζεται στο παραπάνω σχήμα, αποδίδει την κλίση του εδάφους της περιοχής αυτής στην ακτινική κατεύθυνση. Για τον υπολογισμό της γίνεται χρήση του βήματος  $z_{\text{step}}$  και προκύπτει από τον τύπο:

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{Z_{R+zstep} - Z_R}{z_{step}} \right),$$

όπου  $Z_R$  και  $Z_{R+zstep}$  τα ύψη του εδάφους στη θέση του ηλιοστάτη και σε θέση που απέχει μήκος « $z_{step}$ » από αυτόν κατά την ακτινική διεύθυνση αντίστοιχα.

Η απόσταση  $dR$  υπολογίζεται λοιπόν, από την ομοιότητα των τριγώνων  $ADR$  και  $ABC$ , λόγω της οποίας ισχύει:

$$\frac{RD}{AB} = \frac{AD}{BC}$$

$$RD = (Z_{tower} + tower\_height) - \left[ z + hs\_pylon + \frac{hs\_height}{2} \sin(0.75) \right]$$

$$AB = \left[ z + hs\_pylon + \frac{hs\_height}{2} * \sin(0.75) \right] - \left[ z + dR * \tan(\varphi) + hs\_pylon - \frac{hs\_height}{2} \sin(0.75) \right] = hs\_height * \sin(0.75) - dR * \tan(\varphi)$$

$$AD = R + \frac{hs\_height}{2} * \cos(0.75)$$

$$BC = dR - hs\_height * \cos(0.75)$$

Επιλύοντας το παραπάνω σύστημα, προκύπτει λοιπόν ( $THT = tower\_height$ ):

$$dR = \frac{hs\_height * [R * \sin(0.75) + (THT - hs\_pylon) * \cos(0.75)]}{\left[ THT - hs\_pylon - \frac{hs\_height}{2} * \sin(0.75) \right] + \tan(\varphi) * \left[ R + \frac{hs\_height}{2} * \cos(0.75) \right]}$$

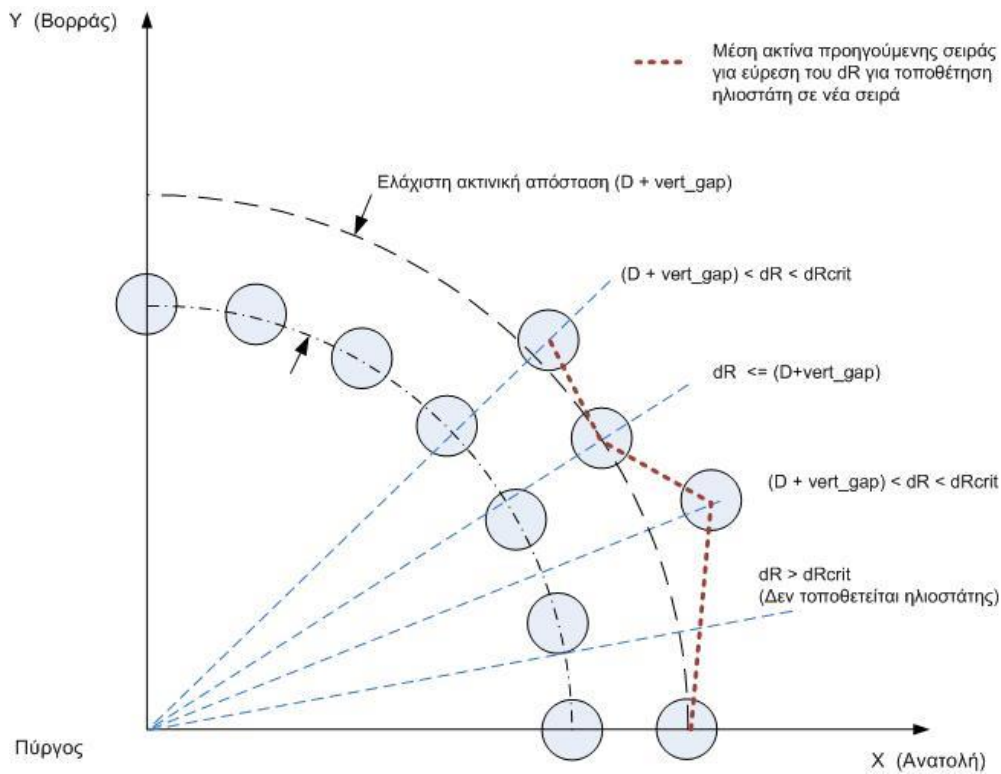
Το μέγεθος  $R$  που χρησιμοποιείται στους παραπάνω τύπους λαμβάνεται ως «μέση» ακτινική απόσταση της προηγούμενης σειράς από τον πύργο στην περιοχή αυτή, με γραμμική παρεμβολή στις ακτινικές αποστάσεις των κοντινότερων ηλιοστατών της σειράς εκατέρωθεν της γωνίας αυτής  $\theta$ . (Αν υπάρχει ηλιοστάτης στην προηγούμενη σειρά για ίδια γωνία  $\theta$ , προφανώς το  $R$  αποτελεί την οριζόντια απόσταση του ηλιοστάτη αυτού από τον πύργο.)

Αν το  $dR$  που υπολογίζεται είναι πολύ μεγάλο, τότε δεν τοποθετείται ηλιοστάτης στη θέση αυτή και εξετάζεται η τοποθέτηση ηλιοστάτη στην ίδια σειρά (για την επόμενη γωνία  $\theta$ , όπως περιγράφεται παραπάνω κατά την τοποθέτηση ηλιοστατών στην ίδια σειρά). Για τη νέα θέση υπολογίζεται πάλι το  $dR$  κ.ο.κ. Κατά σύμβαση ως οριακή τιμή του  $dR$ , πέραν της οποίας δεν τοποθετείται ηλιοστάτης, θεωρούμε τη μέγιστη από τις εξής 2:  $dR_{crit} = MAX( R_{prev} * 0.05 , 2 * (D + vert\_gap) )$ .

Ωστόσο, η ακτινική απόσταση μεταξύ δύο ηλιοστατών διαδοχικών σειρών δε μπορεί να είναι μικρότερη από τη διαγώνιο  $D$  όπως ορίστηκε παραπάνω, ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν παρενοχλείται μηχανικά η κίνησή των ηλιοστατών ενώ παράλληλα για σχεδιαστικούς λόγους μπορεί να είναι επιθυμητή μια επιπλέον ακτινική απόσταση  $vert\_gap$ .

Οπότε η ακτινική απόσταση (στο οριζόντιο επίπεδο  $XY$ ) του ηλιοστατή από τον πύργο προκύπτει αν αθροίσουμε στην ακτίνα της προηγούμενης σειράς (μέση ακτίνα στη γωνία αυτή) το  $dR$ , ή το ακτινικό διάκενο αν είναι μεγαλύτερο:

$$R_{n+1} = R_n + MAX(dR, D + vert\_gap)$$



Σχήμα 3.6 Τοποθέτηση Ηλιοστατών πέραν της πρώτης σειράς

Κατά την τοποθέτηση λοιπόν κάθε ηλιοστατή καθορίζονται οι πολικές του συντεταγμένες  $R, \theta$  από τις οποίες προκύπτουν οι συντεταγμένες του στο κύριο σύστημα συντεταγμένων ως εξής :

$$x = X_{tower} + R * \cos(\theta)$$

$$y = Y_{tower} + R * \sin(\theta)$$

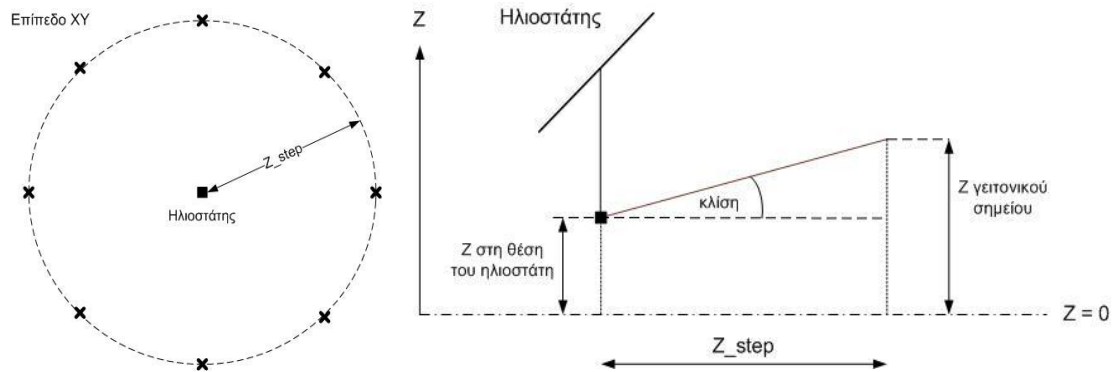
και η συντεταγμένη  $z$  υπολογίζεται από την τοπογραφία της περιοχής, όπως περιγράφηκε νωρίτερα.

### 3.2.3 Υπολογισμός μέγιστης κλίσης εδάφους στη θέση του ηλιοστάτη [64]

Αφού έχουμε υπολογίσει τις συντεταγμένες ενός ηλιοστάτη, υπολογίζονται από το τοπογραφικό αρχείο τα γεωγραφικά ύψη των 8 σημείων που βρίσκονται ανα  $45^\circ$  πάνω σε κύκλο με κέντρο το κέντρο του ηλιοστάτη και ακτίνα  $z\_step$ , την οποία επιλέγει ο σχεδιαστής. Η κλίση του εδάφους για κάθε μια από τις 8 κατευθύνσεις γύρω από τον ηλιοστάτη προκύπτει από τον τύπο:

$$\text{κλίση} = \frac{Z_{\text{γειτονικού σημείου}} - Z_{\text{ηλιοστάτη}}}{z\_step}$$

και κρατάμε τη μέγιστη απόλυτη τιμή, ώστε να λάβουμε υπόψιν όχι μόνο θετικές αλλά και αρνητικές κλίσεις.



Σχήμα 3.7 Υπολογισμός κλίσης εδάφους στη θέση στήριξης ηλιοστάτη

Η κλίση του εδάφους από τον παραπάνω τύπο εκφράζεται σε μορφή ποσοστού πολλαπλασιάζοντας την επί 100, είτε ως γωνία  $\varphi = \tan^{-1}(\text{κλίση})$  σε μοίρες και rad. Ενδεικτικές τιμές κλίσεων εκφρασμένες με τους παραπάνω τρόπους παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.1: Αντιστοιχία τιμών κλίσης εδάφους ως ποσοστό % και ως γωνίες

%	μοίρες	rad	%	μοίρες	rad
5	2.86	0.050	60	30.96	0.540
10	5.71	0.100	70	34.99	0.611
15	8.53	0.149	80	38.66	0.675
20	11.31	0.197	90	41.99	0.733
25	14.04	0.245	100	45.00	0.785
30	16.70	0.291	120	50.19	0.876
35	19.29	0.337	140	54.46	0.951
40	21.80	0.381	160	57.99	1.012
45	24.23	0.423	180	60.95	1.064
50	26.57	0.464	200	63.43	1.107



Γνωρίζουμε λοιπόν, πόσο «ανώμαλο» είναι το έδαφος στην περιοχή τοποθέτησης του κάθε ηλιοστάτη και μπορούμε με έναν απλό έλεγχο με μια δεδομένη επιτρεπτή τιμή κλίσης να μην τοποθετήσουμε τους ηλιοστάτες σε σημεία με μεγαλύτερη από το επιθυμητό κλίση.

### 3.3 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Ηλιοστατικού Πεδίου

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού ενός ηλιοστατικού πεδίου 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 ως προς κάποιο κριτήριο. Οι παράμετροι, σύμφωνα με τις οποίες πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση είναι αρκετές, και πολλές φορές αλληλοσυγκρούονται, δημιουργώντας ένα πολυ-παραμετρικό πρόβλημα. Τα συνηθέστερα κριτήρια βελτιστοποίησης που καλείται να λάβει υπόψιν του ο σχεδιαστής του πεδίου είναι [65]:

- ❖ Μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας
- ❖ Ελαχιστοποίηση του κόστους ανά μονάδα ενέργειας
- ❖ Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της εγκατάστασης
- ❖ Ελαχιστοποίηση της συνολικής έκτασης, που αυτό καταλαμβάνει

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.

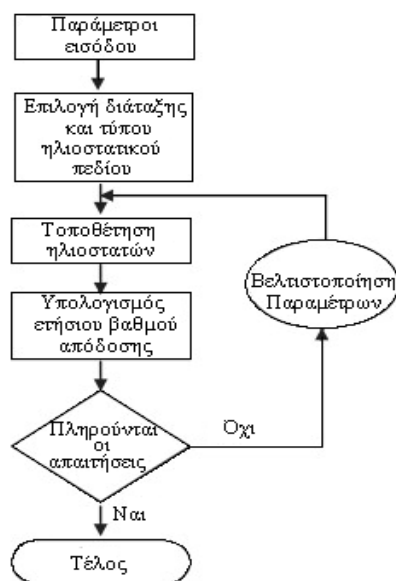
Την πρώτη κατηγορία αποτελούν μέθοδοι, οι οποίες δημιουργήθηκαν δίνοντας βαρύτητα και στην ταχύτητα εκτέλεσης της βελτιστοποίησης. Κοινό χαρακτηριστικό τους είναι ότι βελτιστοποιούν τις θέσεις των ηλιοστατών, αφού πρώτα τους έχουν τοποθετήσει σε μία αρχική διάταξη στο πεδίο, καθορίζοντας ένα σύνολο παραμέτρων. Έπειτα μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων αυτών μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος και με ένα κατάλληλο βήμα, πραγματοποιείται η 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 δίνεται από το κλάσμα:

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

το οποίο παίρνει την ελάχιστη τιμή του για για τον καλύτερο δυνατόν συνδυασμό των δύο μεγεθών.

Στον παραπάνω τύπο η πυκνότητα του ηλιοστατικού πεδίου ορίζεται ως:  
 $\rho = \frac{\text{συνολική επιφάνεια ηλιοστατών}}{\text{εμβαδόν ηλιοστατικού πεδίου}} \cdot [60],[66]$

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



Σχήμα 3.8 Διαδικασία Βελτιστοποίησης Ηλιοστατικού Πεδίου [60]

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν μέθοδοι βελτιστοποίησης, που βασίζονται σε ετήσιες κανονικοποιημένες επιφάνειες ενέργειας (Yearly Normalized Energy Surfaces). Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι αυτές εκμεταλλεύονται τη μεγάλη υπολογιστική ισχύ που προσφέρει η σύγχρονη τεχνολογία, υπολογίζοντας την ηλιακή ενέργεια που βρίσκεται διαθέσιμη ετησίως σε κάθε σημείο του επιπέδου του ηλιοστατικού πεδίου, για δεδομένο ύψος πύργου, πριν ακόμα τοποθετηθούν οι ηλιοστάτες. Χρησιμοποιώντας δεδομένα άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) για το τυπικό μετεωρολογικό έτος δημιουργούνται χάρτες ετήσιου βαθμού απόδοσης για την τοποθεσία, βασισμένοι στους συντελεστές συνημιτόνου, διαρροής και ατμοσφαιρικής διαπερατότητας. 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. Αφού τοποθετηθεί ο πρώτος ηλιοστάτης, επανυπολογίζονται οι ετήσιες κανονικοποιημένες επιφάνειες ενέργειας, περιλαμβάνοντας αυτή τη φορά και τους συντελεστές σκίασης και παρεμπόδισης. 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 απωλειών του πεδίου για την αναπροσαρμογή των ετήσιων κανονικοποιημένων επιφανειών ενέργειας, κάθε φορά που τοποθετείται ένας ηλιοστάτης στο πεδίο, κοστίζει ακριβά σε χρόνο και υπολογιστική ισχύ. [67]

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Απόδοση Συστημάτων Ηλιοστατικού πεδίου & Ηλιακού Δέκτη

#### 4.1 Εύρεση της Θέσης του Ήλιου

Απαραίτητη για τον υπολογισμό των οπτικών απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου είναι η γνώση της θέσης του ήλιου σε σχέση με το μελετούμενο πεδίο κάθε χρονική στιγμή.

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά θερμικά συστήματα απαιτούν την ανίχνευση της θέσης του ήλιου με μεγάλη ακρίβεια. Καταρχήν, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτείται. Στην τεχνολογία ηλιακού πύργου συγκεκριμένα, όπου οι λόγοι συγκέντρωσης είναι ιδιαίτερα υψηλοί, είναι σημαντικό η ανίχνευση της θέσης του ήλιου σε σχέση με το πεδίο, να γίνεται με μεγάλη ακρίβεια, καθώς ακόμη και μικρές αποκλίσεις στην παρακολούθηση του ήλιου, μπορούν να μετατοπίσουν τις ανακλώμενες ακτίνες από τους πιο απομακρυσμένους ηλιοστάτες σημαντικά από το δέκτη. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια αυτή, τόσο μεγαλύτερο είναι και το περιθώριο ανοχής για άλλα σφάλματα του συστήματος (οπτικής, μηχανικής ή άλλης φύσης). Παράλληλα, η θέση του ήλιου πρέπει να καθορίζεται μέσω γρήγορων και χαμηλών σε απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος, αλγορίθμων, ώστε τα συστήματα ελέγχου του προσανατολισμού των ηλιοστατών που εκτελούν τον υπολογισμό αυτό να είναι όσο το δυνατόν φθηνότερα, μειώνοντας το συνολικό κόστος του ηλιοστατικού πεδίου.

Στη βιβλιογραφία συναντάται μεγάλος αριθμός από άρθρα και μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου. Οι υπολογισμοί μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται σε σχεστικά απλές συναρτήσεις, οι οποίες υπολογίζουν για μια δεδομένη ημέρα βασικές παραμέτρους όπως η απόκλιση του ήλιου και η εξίσωση του χρόνου (τα μεγέθη που αναφέρονται εδώ θα περιγραφούν αμέσως παρακάτω). Η δεύτερη αφορά σε ακριβείς μεθόδους, οι οποίες με δεδομένα τη χρονική στιγμή και τη θέση του παρατηρητή, υπολογίζουν αναλυτικά τις ηλιακές γωνίες εκφρασμένες σε όλα τα χρησιμοποιούμενα συστήματα συντεταγμένων. [72]

Συνήθως, το σύστημα ανίχνευσης που χρησιμοποιούν οι ηλιοστάτες απαιτεί τη γνώση των τοπικών οριζόντιων συντεταγμένων του ήλιου. Η θέση του ήλιου στο σύστημα αυτό καθορίζεται από τη *γωνία ανύψωσης* και το *αζιμούθιο* του, όπως θα περιγραφούν παρακάτω. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό των γωνιών αυτών ανήκει στη δεύτερη κατηγορία και αναπτύχθηκε με βάση τις αναλυτικές σχέσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφική αναφορά [70]. Να αναφερθεί ότι λαμβάνεται η μέθοδος «χαμηλής ακρίβειας», η οποία θεωρεί ότι η κίνηση της γης είναι καθαρά ελλειπτική αμελώντας τις διακυμάνσεις που επιφέρει η κίνηση του φεγγαριού και των πλανητών και παρουσιάζει ακρίβεια 1/100 μοίρας ή αντίστοιχα περίπου 3 δευτερολέπτων, η οποία καλύπτει πλήρως τις ανάγκες μας.

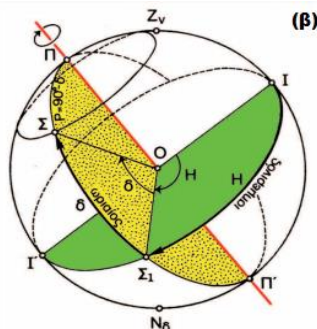
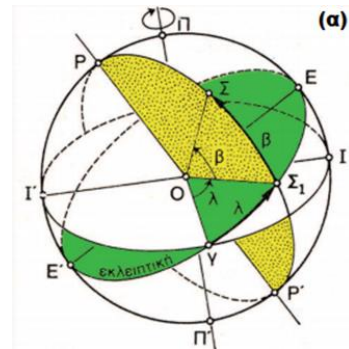
#### 4.1.1 Συστήματα Ηλιακών Συντεταγμένων [68], [69]

Η Γη εκτελεί μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον Ήλιο σε περίπου 365,25 ημέρες, περιγράφοντας μία ελλειπτική τροχιά με τον Ήλιο τοποθετημένο στη μία από τις δύο εστίες της. Ταυτόχρονα με την περιστροφή της γύρω από τον Ήλιο, η Γη εκτελεί επίσης μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της (νοητή ευθεία που συνδέει το Βόρειο με το Νότιο πόλο) κάθε 24 ώρες. Ο άξονας περιστροφής της Γης είναι στραμμένος κατά  $23,45^\circ$  ως προς το επίπεδο της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο, ενώ είναι στραμμένος έτσι ώστε να δείχνει πάντα προς τον Πολικό Αστέρα, και σε αυτό οφείλεται η αλλαγή των εποχών και η μεταβολή στη διάρκεια της μέρας κατά τη διάρκεια του χρόνου. Μια εναλλακτική θεώρηση της κίνησης της Γης γύρω από τον Ήλιο είναι να θεωρηθεί η Γη ως στατική, και να εξεταστεί η φαινομενική κίνηση του Ήλιου ως προς ένα παρατηρητή στην επιφάνειά της. Βάσει αυτής της θεώρησης, προκύπτει η ουράνια σφαίρα, με την προβολή του ισημερινού της Γης και των πόλων της ως ουράνιου ισημερινού και ουράνιων πόλων αντίστοιχα. Η φαινομενική τροχιά που ακολουθεί ο Ήλιος, κατά την περιστροφή του στην ουράνια σφαίρα ονομάζεται εκλειπτική. [11]

Η θέση κάθε αστέρα πάνω στην ουράνια σφαίρα προσδιορίζεται με τη βοήθεια δυο κάθετων βασικών επιπέδων, που είναι πάντα μέγιστοι κύκλοι της ουράνιας σφαίρας. Οι συντεταγμένες του αστέρα ορίζονται με τη βοήθεια δυο τόξων πάνω σ' αυτά τα επίπεδα ή από τις αντίστοιχες επίκεντρες γωνίες. Η επιλογή των δύο αυτών επιπέδων αναφοράς, καθώς και η αρχή μέτρησης και η φορά των γωνιών καθορίζουν τα διάφορα συστήματα συντεταγμένων.

##### α) Με Εκλειπτικές συντεταγμένες (ecliptic coordinates)

Στο σύστημα αυτό, ως βασικοί κύκλοι λαμβάνονται η εκλειπτική (τομή του επιπέδου της φαινομενικής τροχιάς του ήλιου με την ουράνια σφαίρα) και ο μέγιστος κύκλος που περνά από τους πόλους της εκλειπτικής, και το εαρινό ισημερινό σημείο  $\gamma$ . Η θέση ενός αστέρα προσδιορίζεται από το εκλειπτικό μήκος (ecliptic longitude)  $\lambda$  ( $0^\circ - 360^\circ$ ) με αρχή μέτρησης το  $\gamma$  και από το εκλειπτικό πλάτος (ecliptic latitude)  $\beta$  ( $0^\circ - \pm 90^\circ$ ) με αρχή μέτρησης την εκλειπτική. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στην Ουράνια Μηχανική.

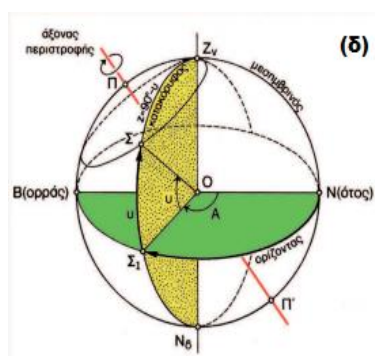
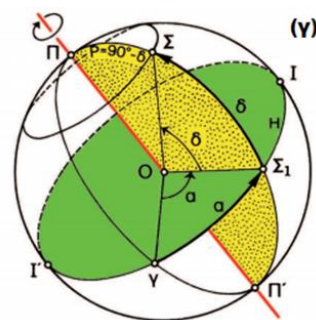


##### β) Με Ισημερινές συντεταγμένες (equatorial coordinates)

Στο σύστημα αυτό, ως βασικοί κύκλοι λαμβάνονται ο ουράνιος ισημερινός και ο μεσημβρινός του τόπου. Η θέση ενός αστέρα προσδιορίζεται από την ωριαία γωνία (hour angle)  $H$  με αρχή μέτρησης το μεσημβρινό του τόπου και από την απόκλιση (declination)  $\delta$  με αρχή μέτρησης τον ισημερινό.

γ) Με Ουρανογραφικές συντεταγμένες (celestial coordinates)

Στο σύστημα αυτό ως βασικοί κύκλοι λαμβάνονται ο ουράνιος ισημερινός και ο ωριαίος του εαρινού ισημερινού σημείου γ. Η θέση ενός αστέρα προσδιορίζεται από την ορθή αναφορά (right ascension)  $\alpha$  (0–24h) με αρχή μέτρησης το γ (κατά την ορθή φορά) και από την απόκλιση (declination)  $\delta$ . Το σύστημα αυτό είναι το πιο διαδεδομένο σύστημα συντεταγμένων στην αστρονομία, ανεξάρτητο από τη θέση του παρατηρητή και χρησιμοποιείται ευρέως στην καταχώρηση των αστέρων σε καταλόγους, συνήθως κατά αύξουσα ορθή αναφορά.



δ) Με Οριζόντιες συντεταγμένες (horizontal coordinates)

Στο σύστημα αυτό, που είναι και το φυσικό σύστημα παρατηρήσεων, ως βασικοί κύκλοι λαμβάνονται ο ορίζοντας και ο μεσημβρινός του τόπου. Η θέση ενός αστέρα ορίζεται από το αζιμούθιο (azimuth)  $A$  με αρχή μέτρησης το Νότο και θετική την ωρολογιακή φορά και από το ύψος (altitude)  $\alpha$  ( $0^\circ - \pm 90^\circ$ ) με αρχή μέτρησης τον ορίζοντα.

Σχήμα 4.1 Συστήματα Συντεταγμένων για προσδιορισμό της θέσης του ήλιου.  
(α) εκλειπτικό, (β)ισημερινό, (γ) ουρανογραφικό, (δ) οριζόντιο [68]

#### 4.1.2 Αλγόριθμος Υπολογισμού Ηλιακών Γωνιών [70], [71]

Ως είσοδοι στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε δίνονται τα εξής:

- ❖ Γεωγραφικό μήκος πεδίου (*longitude*) σε μοίρες.
- ❖ Γεωγραφικό πλάτος πεδίου (*latitude*) σε μοίρες.
- ❖ Ημερομηνία (*date*) στη μορφή σειριακού ακεραίου αριθμού όπως αναπαριστάται από το Microsoft Excel ©, όπου με την τιμή 1 αναπαρίσταται η 1/1/1900. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ημερομηνία 1/1/2009 συμβολίζεται με τον αριθμό 39814, η 2/1/2009 με τον 39815 κ.ο.κ.
- ❖ Τοπική Ώρα (Time) σε «ώρες : λεπτά : δευτερόλεπτα» (00:00:00 - 23:59:59)
- ❖ Ζώνη ώρας τοποθεσίας πεδίου (*Time Zone*), που δίνεται ως προσημασμένος ακέραιος αριθμός (-2, -1, 0, +1, +2 κλπ).
- ❖ Θερινή Ώρα (daylight saving). Δίνεται η τιμή 1 αν το κράτος υιοθετεί τη θερινή ώρα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση δίνεται η τιμή 0. (Σχεδόν όλες οι ασιατικές και αφρικάνικες χώρες δεν συμμετέχουν στη θερινή ώρα).

Αρχικά υπολογίζεται ο χρόνος εκφρασμένος σε ιουλιανούς αιώνες (Julian centuries) αποτελούμενους από 36525 ημέρες με αρχή μέτρησης την ημερομηνία J 2000.0 στο ιουλιανό ημερολόγιο (1 Ιανουαρίου 2000):

$$T = \frac{JD - 36525}{36525}$$

,όπου  $JD = date + \frac{Time}{24} - \frac{Timezone}{24} - \frac{DaylightSaving}{24} - 1 - 0.5$  .

Οι εκλειπτικές συντεταγμένες του ήλιου υπολογίζονται από την Ιουλιανή ημέρα με τις παρακάτω εξισώσεις.

Το μέσο γεωγραφικό μήκος του ήλιου αναφορικά με το μέσο ισημερινό της δεδομένης ημερομηνίας δίνεται από τον τύπο:

$$L_0 = (280.46646 + 36000.76983 * T + 0.0003032 * T^2) \text{ MOD } 360$$

Και η μέση ανωμαλία (*mean anomaly*) του ήλιου:

$$M = (357.52911 + 35999.05029 * T - 0.0001537 * T^2) \text{ MOD } 360$$

Υπολογίζεται λοιπόν η εξίσωση του κέντρου του ηλίου C:

$$C = (1.9146 - 0.004817 * T - 0.000014 * T^2) * \sin(M) + (0.019993 - 0.000101 * T) * \sin(2M) + 0.00029 * \sin(3M)$$

Οπότε, το πραγματικό γεωγραφικό μήκος  $\Theta$  του ήλιου και η πραγματική ανωμαλία  $v$  δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\Theta = L_0 + C \quad , \quad v = M + C$$

Από το πραγματικό γεωγραφικό μήκος του ήλιου, το οποίο αναφέρεται στο μέσο ισημερινό, προκύπτει το φαινόμενο (ή εκλειπτικό) γεωγραφικό μήκος του ήλιου  $\lambda$ , λαμβάνοντας υπόψιν τα φαινόμενα της κλόνησης (nutation), εξ αιτίας της ροπής που ασκεί ο ήλιος στο σύστημα γης – σελήνης με αποτέλεσμα την περιοδική μεταβολή της κλίσης του στιγμιαίου άξονα περιστροφής της γης, και της αποπλάνησης (aberration), που οφείλεται στην κίνηση της γης και της πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός.

$$\Omega = 125.04 - 1934.136 * T$$

$$\lambda = \Theta - 0.00569 - 0.00478 * \cos(\Omega)$$

Η εκλειπτική και ο ισημερινός τέμνονται κατά τη γραμμή των ισημεριών (equinox line) και η μεταξύ τους γωνία αποτελεί τη λόξωση της εκλειπτικής (obliquity of the ecliptic). Η λόξωση της φαινόμενης εκλειπτικής τροχιάς  $\varepsilon$  δίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon = 23.43929111 - 0.013004167 * T - 0.000000163889 * T^2 + 0.000000503611 * T^3 + 0.00256 * \cos(\Omega)$$



Η μετατροπή από εκλειπτικές σε ουρανογραφικές συντεταγμένες γίνεται με χρήση των παρακάτω τριγωνομετρικών σχέσεων.

Η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  υπολογίζεται ως:  $\delta = \sin^{-1}(\sin(\varepsilon) * \sin(\lambda))$

και η φαινόμενη ορθή αναφορά (right ascension):  $ra = \tan^{-1}(\cos(\varepsilon) * \tan(\lambda))$

Τέλος, ακολουθεί η μετατροπή των ουρανογραφικών σε οριζόντιες συντεταγμένες:

Ηλιακός χρόνος (solar time):

$$ST = Time - \frac{daylight}{24} + \frac{4 * [(L_o - ra + 40) \bmod 90] - 160}{1440} + \frac{-15 * Timezone + longitude}{360}$$

και η αντίστοιχη γωνία:  $\theta = [(ST \bmod 1) - 0.5] * 360$

Πραγματικό Ηλιακό ύψος (true altitude):

$$ta = \sin^{-1}[\sin(latitude) * \sin \delta + \cos(latitude) * \cos \delta * \cos \theta]$$

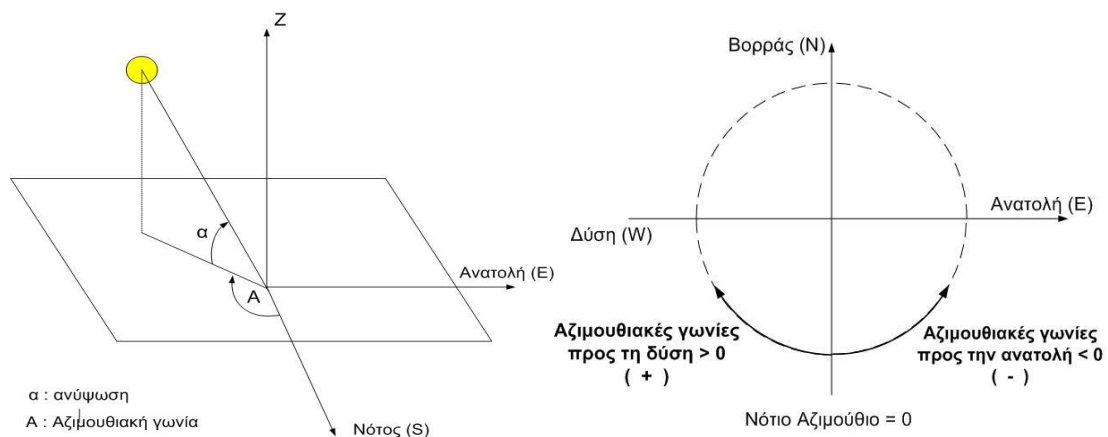
Φαινόμενο ηλιακό ύψος (apparent altitude):

$$\alpha = ta + \frac{1}{60} * \frac{1,02}{\tan(ta + \frac{10,3}{ta + 5,11})}$$

Το ηλιακό αζιμούθιο υπολογίζεται τέλος, από τον τύπο:

$$A = 180 - \cos^{-1} \left[ \frac{\sin \delta - \sin(latitude) * \sin(ta)}{\cos(latitude) * \cos(ta)} \right] * sign(\theta)$$

Το σύστημα και η φορά μέτρησης των παραπάνω γωνιών αναφέρονται, όπως αναφέρθηκε, στο οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων, όπως ορίστηκε νωρίτερα, και για λόγους πληρότητας και καλύτερης κατανόησης απεικονίζονται πάλι στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.2 Ηλιακές γωνίες (ηλιακό ύψος και αζιμούθιο)

## 4.2 Απώλειες Ηλιοστατικού Πεδίου

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 του σταθμού. [60].

Οι σημαντικότερες απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου είναι οι εξής, και συναντώνται στη βιβλιογραφία με τον όρο *οπτικές απώλειες ηλιοστατικού πεδίου*:

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

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι παραπάνω απώλειες, καθώς και η διαδικασία υπολογισμού τους. Για ένα συγκεκριμένο ηλιοστατικό πεδίο με γνωστές παραμέτρους σχεδίασης (γεωγραφικό μήκος και πλάτος πεδίου, συντεταγμένες, σχήμα και μέγεθος ηλιοστατών, ύψος πύργου κ.ο.κ), οι απώλειες του μπορούν να υπολογιστούν για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα και να βρεθούν μέσες ημερήσιες, μηνιαίες ή και ετήσιες τιμές.

Αν κάθε μία από τις παραπάνω απώλειες εκφραστεί με τη μορφή συντελεστή απόδοσης, το γινόμενο τους ισοδυναμεί με τον *ολικό οπτικό βαθμό απόδοσης* του πεδίου, ο οποίος ορίζεται ως [35]:

$$\eta_{field} = \eta_{cos} \cdot \eta_{sh} \cdot \eta_{bl} \cdot \eta_{atten} \cdot \eta_{refl} \cdot \eta_{spill}$$

Εναλλακτικά, θα μπορούσε κανείς να ορίσει τον ολικό βαθμό απόδοσης ενός ηλιοστατικού πεδίου και ως τον λόγο της θερμικής ισχύος που συγκεντρώνεται στον κεντρικό ηλιακό δέκτη προς την ισχύ που προσπίπτει στη συνολική επιφάνεια των ηλιοστατών, μέσω της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. [35]

Ο υπολογισμός του συντελεστή απόδοσης ενός συγκεκριμένου πεδίου είναι πολύ σημαντικός, όπως θα φανεί στη συνέχεια της εργασίας καθώς είναι απαραίτητος κατά τη βελτιστοποίηση του πεδίου, και για τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος στην επιφάνεια του δέκτη, και κατ' επέκταση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού.

Υπάρχουν εμπορικά προγράμματα για τη διερεύνηση και τον υπολογισμό των απωλειών ηλιοστατικών πεδίων, τα περισσότερα από τα οποία αναπτύχθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '80 και στη συνέχεια επιδέχθηκαν διορθώσεις και βελτιώσεις συμπεριλαμβάνοντας σε αρκετές περιπτώσεις και οικονομική ανάλυση [75]. Μια ενδιαφέρουσα και σε βάθος παρουσίαση των συχνότερα χρησιμοποιούμενων προγραμμάτων μπορεί να βρει κανείς στη βιβλιογραφική αναφορά [62].

Συνοπτικά, θα αναφέρουμε ότι τα διαθέσιμα προγράμματα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες με κριτήριο το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιούν για τον υπολογισμό των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης, ο υπολογισμός των οποίων είναι και ο πιο σύνθετος.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα προγράμματα που υπολογίζουν τις σκιάσεις των ηλιοστατών με τη μέθοδο ανίχνευσης ακτίνων Monte Carlo (Monte Carlo ray tracing). Πρόκειται για στατιστική μέθοδο, η οποία επιλέγει τυχαία δέσμες ηλιακών ακτίνων από μια επιφάνεια σε μια άλλη, με ακτινοβολία στην επιφάνεια ανάλογη του αριθμού των προσπίπτουσών ακτίνων και μετρώνται πόσες από αυτές φτάνουν στην δεύτερη επιφάνεια.. Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόζεται δύο φορές (μία από τον ήλιο στην επιφάνεια του ηλιοστάτη και στη συνέχεια από την επιφάνεια του ηλιοστάτη προς τον δέκτη) και απαιτεί τεράστιο υπολογιστικό φορτίο, ώστε να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Παραδείγματα προγραμμάτων της κατηγορίας αυτής είναι τα MIRVAL και SolTRACE.

Τα προγράμματα της δεύτερης κατηγορίας χρησιμοποιούν μαθηματικούς αλγόριθμους συνέλιξης (convolution methods), στους οποίους ανακλώμενες ακτίνες από στοιχειώδεις κατοπτικές επιφάνειες (πεπερασμένα στοιχεία) παριστάνονται ως κώνοι, υπολογισμένοι με συνελιζεις κανονικής κατανομής Gauss. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι εμπορικοί κώδικες UHC, HFLCAL, DELSOL.

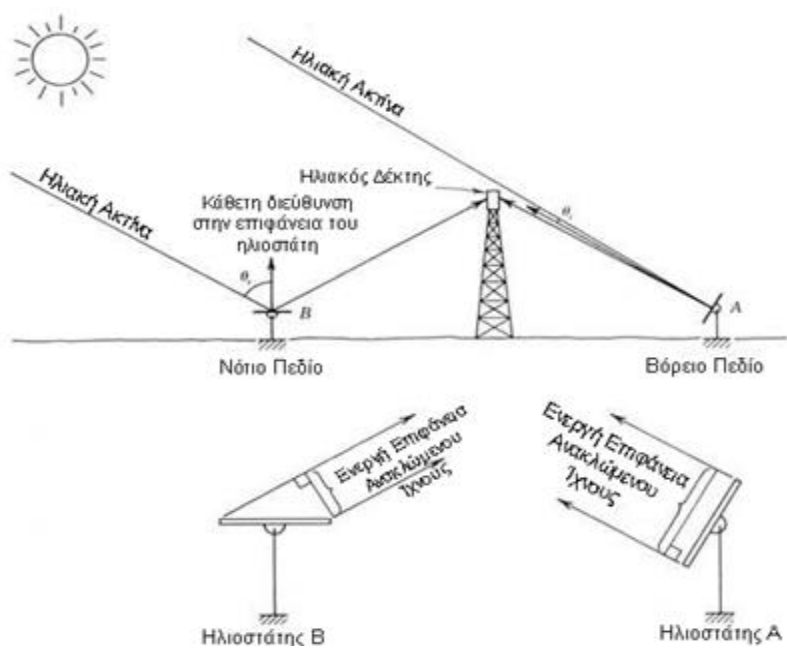
Οι παραπάνω κώδικες ωστόσο, είναι ιδιαίτερος σύνθετοι και αρκετοί είναι συνυφασμένοι με το σχεδιασμό και τη δομή του ηλιοστατικού πεδίου, θέτοντας από την αρχή μερικές εγγενείς του κώδικα απαιτήσεις, όπως π.χ. χρησιμοποίηση επίπεδης οριζόντιας γης, βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης ηλιοστατών και όχι βελτιστοποίηση της χρήσης γης κ.α. Επιπλέον, όταν χρησιμοποιούνται στην πλήρη δυναμική τους, απαιτούν πολύ μεγάλο – απαγορευτικό σε κάποιες περιπτώσεις – υπολογιστικό χρόνο. Για τους λόγους αυτούς και λόγω του αυξημένου ενδιαφέροντος που παρατηρείται για την ηλιοθερμική τεχνολογία τα τελευταία χρόνια, η έρευνα προσεγγιστικών και ημιαναλυτικών μεθόδων, ικανών να εκτιμήσουν τις οπτικές απώλειες του πεδίου όσο το δυνατόν απλότερα και ταχύτερα αποτελεί ένα πολύ ενεργό πεδίο έρευνας με ραγδαία εξέλιξη [75].

Στο παρόν κεφάλαιο κινηθήκαμε προς την κατεύθυνση αυτή και παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι διάφορες απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου, καθώς και ο αλγόριθμος και το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού τους.

#### **4.2.1 Απώλειες Συνημιτόνου (Cosine Losses)**

Με τιμές που κυμαίνονται στο 20-30%, οι απώλειες συνημιτόνου είναι οι πιο σημαντικές για ένα πεδίο ηλιοστατών [60]. Το μέγεθός τους εξαρτάται από τη θέση του ήλιου και την τοποθέτηση του κάθε ηλιοστάτη σε σχέση με τον δέκτη. Οι ηλιοστάτες, όπως προαναφέρθηκε, προσανατολίζονται κάθε στιγμή από το μηχανισμό ελέγχου και κίνησής τους, έτσι ώστε η κάθετος στην επιφάνεια τους να διχοτομεί τη γωνία, που σχηματίζεται μεταξύ των ακτίνων του ήλιου που προσπίπτουν στο κέντρο τους, και της νοητής ευθείας από το κέντρο τους προς το κέντρο του δέκτη. Η

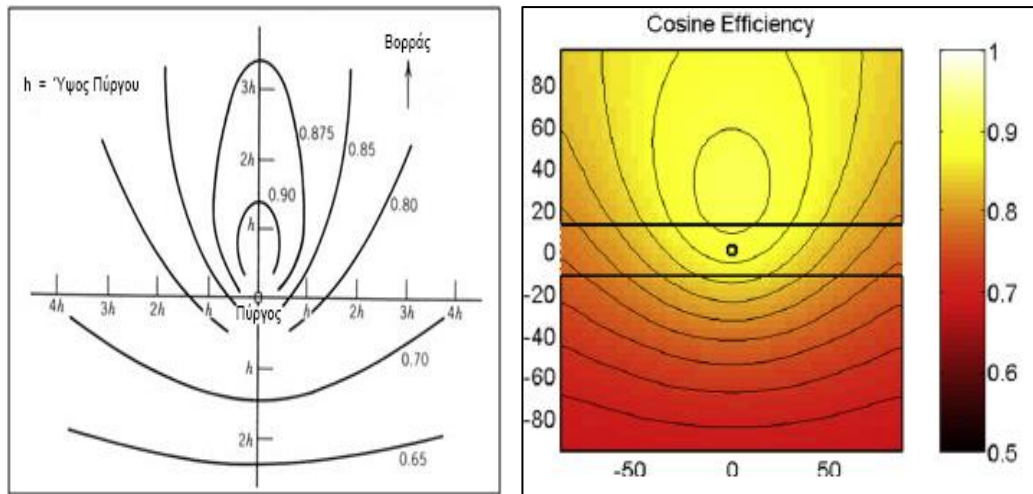
προβολή της ανακλαστικής επιφάνειας του ηλιοστάτη σε επίπεδο κάθετο στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ίση με την επιφάνεια ανοίγματος του ηλιοστάτη επί το συνημίτονο του ήμισυ αυτής της γωνίας, και βαίνει μειούμενη όσο η γωνία αυτή αυξάνεται. Το ενεργό ανακλώμενο ίχνος δηλαδή, από τη δέσμη προσπιπτουσών 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 πανομοιότυποι ηλιοστάτες σε πολύ διαφορετικές θέσεις του πεδίου:



Σχήμα 4.3 Απώλειες Συνημιτόνου [35]

Ο ηλιοστάτης A για τη δεδομένη θέση του ήλιου, έχει πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια ανακλώμενου ίχνους από τον ηλιοστάτη B, παρόλο που οι διαστάσεις των κατοπτρικών επιφανειών τους είναι ίδιες. Το ηλιακό αποτύπωμα που θα φτάνει από τον ηλιοστάτη A στο άνοιγμα του κεντρικού δέκτη δηλαδή, θα είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του B, και συνεπώς ο τελευταίος θα παρουσιάζει υψηλότερες απώλειες συνημιτόνου. Είναι προφανές λοιπόν, ότι οι ηλιοστάτες που βρίσκονται "απέναντι" από τον ήλιο έχουν σαφές πλεονέκτημα, σε σχέση με αυτούς που αναγκάζονται να τοποθετήσουν την επιφάνεια τους πιο οριζόντια με αυξημένη γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων. Αυτός είναι και ο λόγος που το ηλιοστατικό πεδίο, σε περιπτώσεις ηλιακού δέκτη με ένα άνοιγμα, τοποθετείται βόρεια του πύργου (σε βόρεια γεωγραφικά πλάτη), ώστε η τροχιά που ακολουθεί ο ήλιος να είναι μπροστά από τους ηλιοστάτες [44].

Χαρακτηριστικό είναι το ακόλουθο σχήμα, που απεικονίζει την ετήσια μέση επίδραση του συνημιτόνου σε κάθε θέση ενός ηλιοστατικού πεδίου (σε βόρεια γεωγραφικά πλάτη).



Σχήμα 4.4 Επίδραση Συνημιτόνου γύρω από τον Πύργο Ηλιακής Ισχύος. [35],[73]

Αξίζει να αναφερθεί ότι το χειμώνα, που ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά στον ορίζοντα, οι απώλειες συνημιτόνου ενός βόρειου ηλιοστατικού πεδίου είναι αρκετά μικρότερες, αυξάνοντας και τον συνολικό βαθμό απόδοσης του. [60]

#### Αλγόριθμος υπολογισμού απωλειών συνημιτόνου

Η μεγάλη απόσταση του ήλιου από τη γη μας επιτρέπει να θεωρήσουμε χωρίς σφάλμα ότι οι ακτίνες του ήλιου σε όλο το εξεταζόμενο πεδίο είναι παράλληλες και προσπίπτουν στους ηλιοστάτες του πεδίου με την ίδια κατεύθυνση.

Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στο παρόν κεφάλαιο είναι το γενικό σύστημα συντεταγμένων το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη σχεδίαση του πεδίου στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχή του συστήματος μπορεί να είναι οποιαδήποτε, καθώς στη διανυσματική ανάλυση που εφαρμόζεται χρησιμοποιούνται διανύσματα κατεύθυνσης και σχετικές συντεταγμένες (πχ. μεταξύ ηλιοστατών και πύργου).

Το διάνυσμα διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας (μοναδιαίο διάνυσμα  $S$  που δείχνει από τους ηλιοστάτες του πεδίου προς την κατεύθυνση του ήλιου στον ουράνιο θόλο) εκφράζεται ως προς το σύστημα αυτό:

$$S = S_x i + S_y j + S_z k$$

Όπου  $i, j, k$  τα μοναδιαία διανύσματα στους άξονες x (ανατολική κατεύθυνση), y (βόρεια κατεύθυνση) και z (κάθετος στην επιφάνεια της Γης) αντίστοιχα.

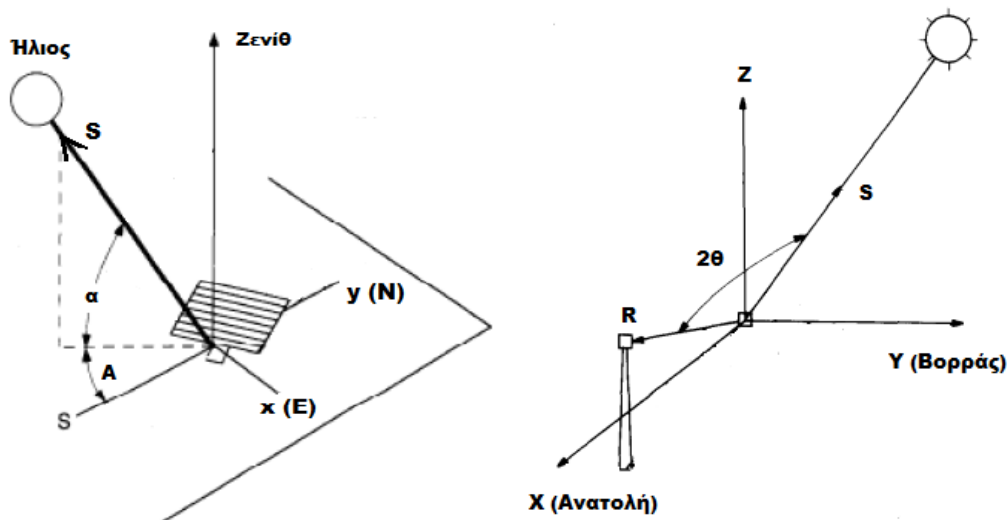
Οι συνιστώσες  $S_x, S_y, S_z$  δίνονται ως συνάρτηση των γνωστών γωνιών ηλιακού ύψους  $\alpha$  και ηλιακού αζιμούθιου  $A$  κάθε χρονική στιγμή από τις σχέσεις:

$$S_x = -\cos \alpha \sin A$$

$$S_y = -\cos \alpha \cos A$$

$$S_z = \sin \alpha$$

Εξ ορισμού, το διάνυσμα αυτό έχει την αντίθετη κατεύθυνση από τις προσπίπτουσες στους ηλιοστάτες ηλιακές ακτίνες.



Σχήμα 4.5 Σχηματική αναπαράσταση διανυσμάτων διεύθυνσης των προσπίπτουσων και ανακλώμενων ηλιακών ακτίνων

Η ανακλώμενη ακτίνα από κάθε ηλιοστάτη προς το δέκτη παρίσταται από το εκάστοτε διάνυσμα  $\mathbf{R}$ , το οποίο υπολογίζεται, καθώς γνωρίζουμε τις συντεταγμένες των ηλιοστατών και του πύργου. Ο κάθε ηλιοστάτης απεικονίζεται με τις συντεταγμένες του κέντρου του, το οποίο τις περισσότερες φορές ταυτίζεται με το σημείο σύνδεσης της κατοπτρικής του επιφάνειας με τον πύλωνα – μηχανισμό στήριξής του, και αποτελεί προφανώς την αρχή του διανύσματος  $\mathbf{R}$ . Πέρας του διανύσματος αυτού, αποτελεί ο δέκτης στην κορυφή του πύργου, ο οποίος για τον υπολογισμό αυτό θεωρείται ως σημείο με συντεταγμένες τη θέση (X,Y) του πύργου και Z το ύψος του.

Επομένως,

$$\mathbf{R} = R_x \mathbf{i} + R_y \mathbf{j} + R_z \mathbf{k}$$

Όπου

$$R_x = x_{\delta\acute{\epsilon}κτη} - x_{\eta\lambda\iota\sigma\tau\acute{\alpha}τη}$$

$$R_y = y_{\delta\acute{\epsilon}κτη} - y_{\eta\lambda\iota\sigma\tau\acute{\alpha}τη}$$

$$R_z = z_{\delta\acute{\epsilon}κτη} - z_{\eta\lambda\iota\sigma\tau\acute{\alpha}τη}$$

Υπενθυμίζεται ότι  $z_{\delta\acute{\epsilon}κτη} = Z_{tower} + tower\_height$  και  $z_{\eta\lambda\iota\sigma\tau\acute{\alpha}τη} = z + hs\_pylon$ , όπως τα μεγέθη αυτά έχουν οριστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο κατά το σχεδιασμό του ηλιοστατικού πεδίου.



Το οποίο κανονικοποιούμε στο μοναδιαίο διάνυσμα  $\mathbf{r}$ , το οποίο υποδηλώνει την κατεύθυνση των ανακλώμενων ακτινών από κάθε ηλιοστάτη προς το δέκτη. Καθώς οι θέσεις του δέκτη και των ηλιοστατών είναι καθορισμένες, ο υπολογισμός του διανύσματος αυτού γίνεται μία φορά.

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{R}}{\|\mathbf{R}\|} \quad , \quad \text{όπου} \quad \|\mathbf{R}\| = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}.$$

Οι ηλιοστάτες παρακολουθούν την πορεία του ήλιου και προσανατολίζονται κάθε στιγμή έτσι ώστε το κάθετο στην επιφάνεια τους διάνυσμα  $\mathbf{H}$  να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζεται από την προσπίπτουσα και την ανακλώμενη ακτινοβολία, δηλαδή τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των διανυσμάτων  $\mathbf{S}$  και  $\mathbf{r}$ . Αφού επιπλέον τα διανύσματα αυτά είναι μοναδιαία, το διανυσματικό τους άθροισμα θα αποτελεί διάνυσμα που διχοτομεί τη μεταξύ τους γωνία, και έτσι προκύπτει άμεσα το διάνυσμα

$$\vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{S}} + \vec{\mathbf{r}} = (S_x + r_x)\mathbf{i} + (S_y + r_y)\mathbf{j} + (S_z + r_z)\mathbf{k} = H_x\mathbf{i} + H_y\mathbf{j} + H_z\mathbf{k}$$

Το διάνυσμα αυτό σημειώνεται ότι δεν είναι μοναδιαίο, αλλά αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η κατεύθυνση του.

Έπειτα, όπως γνωρίζουμε από τη διανυσματική άλγεβρα το εσωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων ισούται με το γινόμενο των μέτρων τους επί το συνιμήτονο της μεταξύ τους γωνίας  $\theta$ . Οπότε, είναι εύκολο να βρούμε το συνιμήτονο της γωνίας  $\theta$  ως:

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{S} \cdot \mathbf{H}}{\|\mathbf{S}\| \cdot \|\mathbf{H}\|} = \eta_{\cos}$$

Προφανώς,  $\|\mathbf{S}\|=1$  καθώς το διάνυσμα είναι μοναδιαίο, και  $\|\mathbf{H}\| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$ .

Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζεται κάθε χρονική στιγμή ο συντελεστής συνιμητόνου  $\eta_{\cos}$  για τον κάθε ηλιοστάτη ξεχωριστά.

#### 4.2.2 Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδισης (Shadowing & Blocking Losses)

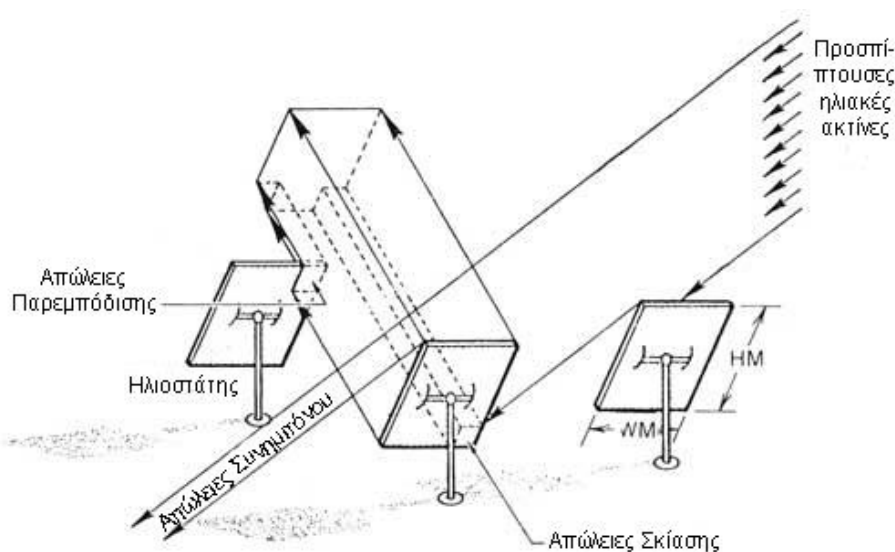
Οι απώλειες αυτές προκύπτουν από τη χωροθέτηση των ηλιοστατών στο πεδίο και τη σχετική τους θέση, και είναι οι πιο σύνθετες για ένα ηλιοστατικό πεδίο, καθώς εξαρτώνται από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό παραγόντων, οι οποίοι συν τους άλλους μεταβάλλονται διαρκώς με το χρόνο.

Με τον όρο *σκίαση* εννοούμε το φαινόμενο, κατά το οποίο η σκιά που δημιουργείται από έναν ηλιοστάτη καλύπτει μέρος της ανακλαστικής επιφάνειας των πίσω του, εμποδίζοντας έτσι κατά ένα ποσοστό την ανάκλαση των προσπιπτουσών ακτίνων στους τελευταίους. Οι απώλειες σκίασης είναι σημαντικές σε μικρές γωνίες ηλιακού ύψους. Για το λόγο αυτό, τις πρώτες πρωινές ώρες, καθώς και πριν τη δύση του ήλιου και ιδιαίτερα το χειμώνα, όπου το ηλιακό ύψος είναι μικρό και οι ηλιοστάτες είναι σε σχεδόν κατακόρυφη θέση, οι απώλειες αυτές λαμβάνουν μεγάλες τιμές [35]. 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.

Κατά αντιστοιχία, η παρεμπόδιση εμφανίζεται όταν ένας ηλιοστάτης μπροστινής σειράς παρεμβάλλεται στην πορεία των ακτίνων που ανακλώνται από κάποιον από τους πίσω ηλιοστάτες προς τον κεντρικό ηλιακό δέκτη. Οι απώλειες παρεμπόδισης (ή και παρεμβολής όπως συναντώνται αλλού) αυξάνονται όσο πυκνότερα διατεταγμένοι είναι οι ηλιοστάτες στο πεδίο, ενώ είναι προφανώς και συνάρτηση του μεγέθους τους.

Διαφωτιστικό ,σχετικά με τον σχηματισμό των απωλειών σκίασης και παρεμπόδισης σε ένα ηλιοστατικό πεδίο, είναι το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.6 Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδισης [35]

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης είναι οι αποστάσεις μεταξύ γειτονικών ηλιοστατών, η θέση του ήλιου, το ύψος του πύργου, η κλίση του εδάφους, το μήκος των σειρών από ηλιοστάτες στο πεδίο, το γεωγραφικό πλάτος της εγκατάστασης και το σχήμα των ηλιοστατών. 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.

Γενικά, οι απώλειες αυτές αντιμετωπίζονται, με την τοποθέτηση των ηλιοστατών σε μεγαλύτερες μεταξύ τους αποστάσεις. Ωστόσο, με τον τρόπο αυτό, απαιτείται μεγαλύτερη έκταση πεδίου, γεγονός που ισοδυναμεί με μεγαλύτερο κόστος αγοράς γης, μη αποδοτική χρήση της διαθέσιμης έκτασης και αύξηση απωλειών ατμοσφαιρικής απορρόφησης, όπως θα γίνει κατανοητό παρακάτω. Συνεπώς, οι αποστάσεις μεταξύ των ηλιοστατών αποτελούν αντικείμενο βελτιστοποίησης, ώστε να προκύψει βέλτιστος συνδυασμός βαθμού απόδοσης πεδίου και χρήσης της διαθέσιμης έκτασης. [77]

## Αλγόριθμος υπολογισμού απωλειών σκίασης [76],[77],[78],[79],[80],[81]

Το μοναδιαίο διάνυσμα  $\mathbf{H}_I$ , το οποίο είναι κάθετο στην ανακλαστική επιφάνεια του κάθε ηλιοστάτη και υποδηλώνει τον προσανατολισμό της, μπορεί να εκφραστεί εναλλακτικά συναρτήσει της αζιμουθιακής γωνίας  $A_H$  και της γωνίας ύψους  $\alpha_H$ , κατά τις οποίες στρέφεται η ανακλαστική επιφάνεια του ηλιοστάτη από το σύστημα κίνησης του. Οι γωνίες αυτές ορίζονται στο σχήμα 4.7, και οι συνιστώσες του διανύσματος διεύθυνσης  $\mathbf{H}_I$  προκύπτουν:

$$H_{Ix} = \cos \alpha_H \sin A_H$$

$$H_{Iy} = \cos \alpha_H \cos A_H$$

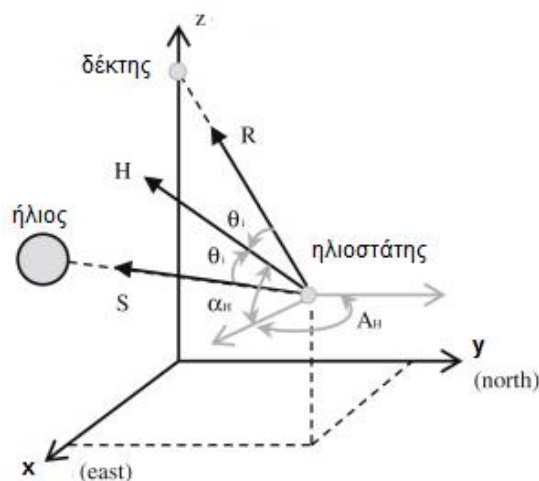
$$H_{Iz} = \sin \alpha_H$$

Οι γωνίες περιστροφής της ανακλαστικής επιφάνειας του ηλιοστάτη προκύπτουν επίσης γεωμετρικά, και υπολογίζονται από τους τύπους:

$$\alpha_H = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \alpha + R_z}{2 \cdot \cos \theta} \right)$$

$$\text{και } A_H = \sin^{-1} \left( \frac{R_x - \cos \alpha \cdot \sin A}{2 \cdot \cos \alpha_H \cdot \cos \theta} \right)$$

Στην περίπτωση που  $\cos A_H < 0$ ,  $A_H = \pi - \sin^{-1} \left( \frac{R_x - \cos \alpha \cdot \sin A}{2 \cdot \cos \alpha_H \cdot \cos \theta} \right)$ .



Σχήμα 4.7 Γωνίες περιστροφής ηλιοστάτη για την ανίχνευση των ηλιακών ακτινών

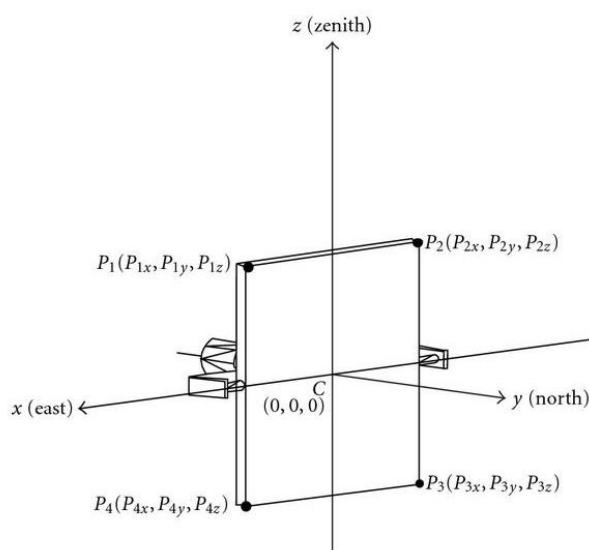
Από τους προηγούμενους υπολογισμούς, έχουμε ήδη τις συντεταγμένες του κέντρου του κάθε ηλιοστάτη  $x_{hs}$ ,  $y_{hs}$ ,  $z_{hs}$  (από τον καθορισμό του ηλιοστατικού πεδίου) και τον προσανατολισμό του (το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του καθενός  $\mathbf{H}_I$ , καθώς και τις γωνίες περιστροφής του κάθε ηλιοστάτη). Αφού επιπλέον γνωρίζουμε τις διαστάσεις των ηλιοστατών (ύψος:  $hs\_height$  και πλάτος:  $hs\_width$ ) μπορούμε να εξάγουμε τις συντεταγμένες των 4 γωνιών του κάθε ηλιοστάτη στο γενικό σύστημα συντεταγμένων με την διαδικασία που περιγράφεται αμέσως παρακάτω.

Οι αρχικές συντεταγμένες του πλαισίου του ηλιοστάτη ορίζονται στη θέση αναφοράς του στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.8. Αρχή του συστήματος αυτού είναι το κέντρο  $C(0,0,0)$  της κατοπτρικής επιφάνειας του ηλιοστάτη, και οι κατευθύνσεις των αξόνων συμπίπτουν με το γενικό σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

Οι συντεταγμένες της κάθε γωνίας αναπαριστούνται μέσω διανύσματος, όπου προστίθεται ακόμα μία διάσταση για να επιτευχθεί γραμμικότητα των μετασχηματισμών των συντεταγμένων στον τρισδιάστατο χώρο [77].

Οι αρχικές συντεταγμένες λοιπόν, των γωνιών αναπαρίστανται με τα διανύσματα  $P_i$ , όπως ορίζονται παρακάτω (Η κατοπτρική επιφάνεια θεωρείται ως επίπεδη και το πάχος της αμελείται):

$$P_1 = \begin{bmatrix} hs\_width/2 \\ 0 \\ hs\_height/2 \\ 1 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} -hs\_width/2 \\ 0 \\ hs\_height/2 \\ 1 \end{bmatrix}, P_3 = \begin{bmatrix} -hs\_width/2 \\ 0 \\ -hs\_height/2 \\ 1 \end{bmatrix}, P_4 = \begin{bmatrix} hs\_width/2 \\ 0 \\ -hs\_height/2 \\ 1 \end{bmatrix}$$



Σχήμα 4.8 Αρχικές συντεταγμένες γωνιών ηλιοστάτη με προσανατολισμό αναφοράς[77]

Οι τελικές συντεταγμένες των γωνιών του κάθε ηλιοστάτη προκύπτουν κάθε χρονική στιγμή, από τις αρχικές συντεταγμένες, με κατάλληλο μετασχηματισμό, ώστε να ληφθούν υπόψη οι δύο γωνιακές κινήσεις του ηλιοστάτη, καθώς και η μετατόπιση από το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του ηλιοστάτη στο γενικό σύστημα του πεδίου.

Συγκεκριμένα, το μητρώο περιστροφής ως προς τον άξονα Cx κατά τη γωνία  $a_H$  είναι:

$$R_x(a_H) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_H & -\sin a_H & 0 \\ 0 & \sin a_H & \cos a_H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Το μητρώο περιστροφής ως προς τον άξονα Cz κατά τη γωνία  $A_H$  είναι:

$$R_z(A_H) = \begin{bmatrix} \cos A_H & \sin A_H & 0 & 0 \\ -\sin A_H & \cos A_H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Τέλος, το μητρώο μετατόπισης βασίζεται στις συντεταγμένες του κάθε ηλιοστάτη στο γενικό σύστημα συντεταγμένων του πεδίου ως εξής:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -R_x \\ 0 & 1 & 0 & -R_y \\ 0 & 0 & 1 & z + h_{s\_pylon} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

όπου  $R_x$ ,  $R_y$  ορίστηκαν παραπάνω και με αρνητικό πρόσημο στην ουσία υποδηλώνουν την απόσταση του κάθε ηλιοστάτη από τον πύργο, στους άξονες x, y αντίστοιχα.

Οι τελικές λοιπόν, συντεταγμένες των γωνιών της επιφάνειας των ηλιοστατών συμβολίζονται με το διάνυσμα  $\mathbf{Pc}_k$ :

$$\mathbf{Pc}_k = [T] \cdot R_z(A_H) \cdot R_x(a_H) \cdot \mathbf{Pi}_k, \quad k = 1 \dots 4$$

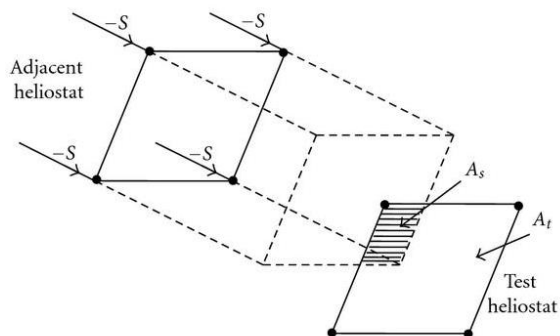
Για τον υπολογισμό της σκίασης, που προκαλείται στην επιφάνεια ενός ηλιοστάτη κάθε χρονική στιγμή από τους γύρω του, προβάλλονται οι επιφάνειες των κοντινών κατόπτρων στο επίπεδο του υπό εξέταση ηλιοστάτη με σημείο παρατήρησης τον ήλιο. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι ακτίνες του ήλιου θεωρούνται παράλληλες για όλο το εύρος του πεδίου, δεδομένης της μεγάλης απόστασης του από την επιφάνεια της γης, με κατεύθυνση  $-\mathbf{S}$ . Οι επιφάνειες των ηλιοστατών στο επίπεδο που «βλέπει» ο ήλιος, οριοθετούνται από τις συντεταγμένες των τεσσάρων γωνιών, προβεβλημένων στο κάθετο στο διάνυσμα αυτό, επίπεδο, όπως προκύπτουν από τον εξής τύπο:

$$\mathbf{Pc}_k' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin a & -\cos a & 0 \\ 0 & \cos a & \sin a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A & 0 & 0 \\ -\sin A & \cos A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Pc}_k, \quad k = 1 \dots 4$$

Τα παραπάνω μητρώα χρησιμοποιούνται για την περιστροφή των αξόνων του γενικού συστήματος συντεταγμένων, κατά τις αντίστοιχες ηλιακές γωνίες, ώστε αν από τις συντεταγμένες που θα προκύψουν, απομονώσουμε τις x, y, οι τελευταίες να αναφέρονται στο ζητούμενο επίπεδο. Από τις τομές των πολυγώνων που σχηματίζονται (από τις 4 γωνίες), οι οποίες αναπαριστούν τις επιφάνειες των ηλιοστατών, θα προκύψουν άμεσα οι περιοχές στις οποίες υπάρχει σκίαση, δηλαδή τα τμήματα της επιφάνειας κάποιου ηλιοστάτη, όπου η ακτινοβολία του ήλιου δε μπορεί να φτάσει.

Αν συμβολίσουμε με  $A_s$  το εμβαδόν των σκιασμένων τμημάτων (τομές πολυγώνων) και με  $A_t$  το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας του υπό εξέταση ηλιοστάτη, ο βαθμός απόδοσης σκίασης του ορίζεται ως:

$$\eta_{sh} = \left(1 - \frac{A_s}{A_t}\right)$$



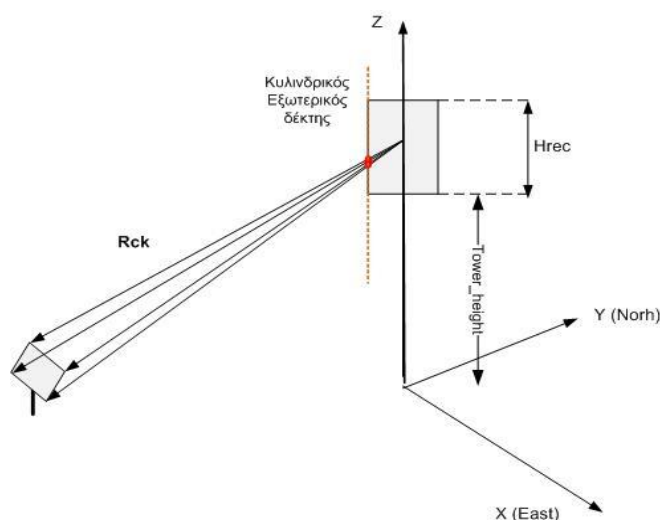
Σχήμα 4.9 Σκίαση ηλιοστάτη από τον μπροστινό του [77]

### Υπολογισμός Απωλειών Παρεμπόδισης

Ο υπολογισμός των απωλειών παρεμπόδισης προκύπτει ως φυσική συνέχεια του υπολογισμού των απωλειών σκίασης. Έχουν ήδη υπολογιστεί οι τελικές συντεταγμένες των γωνιών της επιφάνειας των ηλιοστατών, οι οποίες εκφράζονται με τα διανύσματα  $Pc_k$  για  $k = 1 \dots 4$ .

Παρόλο που οι ηλιοστάτες θεωρούνται επίπεδοι, στην πράξη κατά την κατασκευή τους, τους προσδίδεται μια μικρή παραβολικότητα, ώστε να ανακλούν τις ηλιακές ακτίνες προς τον κυλινδρικό, στην παρούσα μελέτη, δέκτη ύψους  $H_{rec}$  και ακτίνας  $R_{rec}$ , μειώνοντας το ηλιακό αποτύπωμα τους πάνω σ' αυτόν. Αν υποθέσουμε ότι σημείο εστίασης των ανακλώμενων ακτίνων του κάθε ηλιοστάτη αποτελεί το κέντρο συμμετρίας του δέκτη, μπορούμε να ορίσουμε τα διανύσματα, με αρχή το κέντρο του δέκτη και πέρας τις γωνίες του, ως εξής:

$$Rc_k = \begin{bmatrix} Pcx_k \\ Pcy_k \\ Pcz_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (Z_{tower} + tower\_height + \frac{H_r}{2}) \end{bmatrix}, \quad k = 1 \dots 4$$



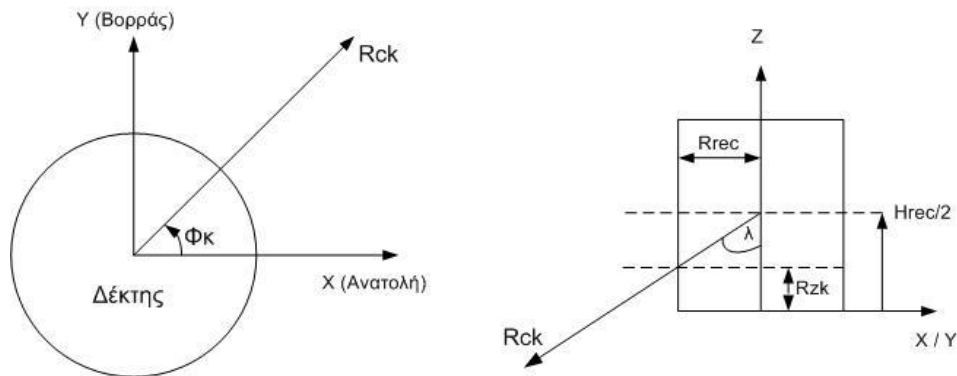
Σχήμα 4.10 Μοντέλο υπολογισμού απωλειών παρεμπόδισης



Στη συνέχεια, προσδιορίζεται η τομή των διανυσμάτων αυτών με την εξωτερική επιφάνεια του δέκτη. Τα αντίστοιχα σημεία μπορούν να παρασταθούν με ζεύγη συντεταγμένων  $(\Phi_k, R_{z_k})$ , όπου  $k=1\dots 4$  για κάθε μια από τις τέσσερις γωνίες ενός ηλιοστάτη, όπως αυτές ορίζονται στο σχήμα 4.10. Συγκεκριμένα, η γωνία  $\Phi_k$  παίρνει τιμές από  $0 - 2\pi$  και αντιστοιχεί στη γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα  $R_{c_k}$  στο επίπεδο  $XY$  με τον άξονα  $X$  (ανατολή), ενώ το  $R_{z_k}$  αποτελεί το κατακόρυφο μήκος του σημείου τομής του διανύσματος αυτού με την κυλινδρική επιφάνεια, από τη βάση του δέκτη, η οποία αντιστοιχεί στο  $z=0$  του τοπικού συστήματος συντεταγμένων που χρησιμοποιείται.

$$\Phi_k = \tan^{-1} \left( \frac{R_{c_y k}}{R_{c_x k}} \right)$$

$$R_{z_k} = \frac{H_{rec}}{2} - \frac{R_{rec}}{\tan(\lambda)}, \quad \text{όπου } \lambda = \cos^{-1} \left( \frac{-R_{c_z k}}{\|R_{c_k}\|} \right)$$



Σχήμα 4.11 Μοντέλο υπολογισμού απωλειών παρεμπόδισης

Τα τέσσερα σημεία  $(\Phi_k, R_{z_k})$  που ορίζονται από τις ανακλώμενες ακτίνες των γωνιών κάθε ηλιοστάτη, οριοθετούν ένα πολύγωνο στο ανάπτυγμα της κυλινδρικής επιφάνειας του δέκτη, το οποίο αντιστοιχεί στις ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες από το συγκεκριμένο ηλιοστάτη. Η πρακτική αυτή εφαρμόζεται για όλους τους ηλιοστάτες του πεδίου, και από τις τομές των πολυγώνων προκύπτουν περιοχές, όπου σημειώνεται παρεμβολή κάποιου ηλιοστάτη στην πορεία των ανακλώμενων ακτίνων από έναν άλλο. Στο σημείο αυτό, κρίνεται καλό να επισημανθεί ξανά ότι ο υπολογισμός των απωλειών με τη μεθοδολογία αυτή δεν είναι ακριβής και απόλυτα ορθός, ωστόσο αποτελεί μια καλή προσέγγιση, δίνοντας αποτέλεσμα γρήγορα και με χαμηλό υπολογιστικό φορτίο σε σχέση με άλλες ακριβείς μεθόδους, που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

Ο βαθμός απόδοσης λόγω παρεμβολής, ορίζεται σε αναλογία με τον βαθμό απόδοσης λόγω σκίασης, όπου πλέον το εμβαδό των επικαλυπτόμενων περιοχών των πολυγώνων συμβολίζεται ως  $A_b$ , ως εξής:

$$\eta_{bl} = \left( 1 - \frac{A_b}{A_t} \right)$$

### 4.2.3 Απώλειες Ατμοσφαιρικής Διαπερατότητας (Attenuation Losses)

Από τις προηγούμενες παραγράφους θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει ότι μία αποδοτική διάταξη του πεδίου ηλιοστατών στο χώρο, θα ήταν μία αραιά τοποθετημένη διάταξη μικρών ηλιοστατών στα βόρεια του πύργου, με αυξανόμενη απόσταση από τον πύργο, όσο οι απαιτήσεις ισχύος της εγκατάστασης αυξάνονται. Κάτι τέτοιο όμως, πέρα από την προφανή αύξηση του κόστους, λόγω της αύξησης της έκτασης γης που θα απαιτούσε η εγκατάσταση, έχει ως συνέπεια την εξασθένηση της ακτινοβολίας που φθάνει από τους ηλιοστάτες στο δέκτη, λόγω της αύξησης της μεταξύ τους απόστασης, καθώς ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαθλάται και απορροφάται από την ατμόσφαιρα στην πορεία του προς αυτόν. Οι απώλειες αυτές ονομάζονται απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας και για ένα μέσο τυπικό ηλιοστατικό πεδίο κυμαίνονται περί το 6% ετησίως. Οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας αυξάνονται δραματικά όσο αυξάνεται η απόσταση των ηλιοστατών από το δέκτη και για ηλιοστάτες με απόσταση μεγαλύτερη του 1 χιλιομέτρου από το δέκτη προσεγγίζουν τιμές μεγαλύτερες του 10% [54], [78]. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις απώλειες αυτές είναι και η καθαρότητα της ατμόσφαιρας λόγω καιρικών φαινομένων. Γενικά, όσο πιο ομιχλώδης και γεμάτη υγρασία είναι η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας.

Έχουν προταθεί οι κάτωθι σχέσεις για τον υπολογισμό των απωλειών αυτών εκφρασμένων με τη μορφή συντελεστή, για κάθε ηλιοστάτη, ανάλογα με την καθαρότητά της ατμόσφαιρας:

- ❖ Για ορατότητα σε απόσταση 5km [35]:

$$\eta_{atten} = 0,98707 - 0,2748 \cdot d_{HR} + 0,03394 \cdot d_{HR}^2$$

- ❖ Για ορατότητα σε απόσταση 23km [35]:

$$\eta_{atten} = 0,99326 - 0,1046 \cdot d_{HR} + 0,017 \cdot d_{HR}^2 - 0,002845 \cdot d_{HR}^3$$

- ❖ Για ορατότητα σε απόσταση 40km [82]:

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

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

όπου  $d_{HR}$  η απόσταση σε μέτρα (m) μεταξύ ηλιοστάτη και κεντρικού ηλιακού δέκτη. Η απόσταση  $d_{HR}$  είναι στην ουσία το μέτρο του διανύσματος  $\mathbf{R}$ ,  $\|\mathbf{R}\|$ , όπως ορίστηκε κατά τον υπολογισμό των απωλειών συνημιτόνου όταν οι συντεταγμένες του πύργου και των ηλιοστατών μετρώνται σε μέτρα (m), αλλιώς πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον κατάλληλο συντελεστή, ώστε να γίνει η μετατροπή της απόστασης σε μέτρα.

Σε μεγάλα ηλιοστατικά πεδία μονάδων υψηλής ισχύος, οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας αναμένεται να παίζουν έναν ακόμη πιο σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό τους και θα πρέπει να αναπτυχθούν νέες σχέσεις, οι οποίες να υπολογίζουν τις απώλειες αυτές με μεγαλύτερη ακρίβεια, λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιαίτερες

συνθήκες του εκάστοτε πεδίου (όπως για παράδειγμα τιμές υγρασίας, συγκέντρωση αερίων aerosol στην κατώτερη ατμόσφαιρα κ.α.). [32],[35],[78]

Κατά τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του πεδίου που πραγματοποιείται στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιείται η σχέση για ορατότητα σε απόσταση 40km για τον υπολογισμό των εν λόγω απωλειών, καθώς είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στη βιβλιογραφία.

#### 4.2.4 Απώλειες Ανακλαστικότητας (Heliostat Reflectivity Losses)

Η ανακλαστικότητα των ηλιοστατών σχετίζεται με την ικανότητά τους να ανακλούν αποδοτικά τις ακτίνες του ήλιου και εξαρτάται από την ποιότητα της κατοπτρικής τους επιφάνειας. Είναι στην ουσία, το μόνο είδος απωλειών του ηλιοστατικού πεδίου που μπορεί να υποθεθεί σταθερό και ίσο για όλους του ηλιοστάτες. Η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται, και στις μέρες μας οι κατασκευαστές ηλιοστατών έχουν καταφέρει να επιτύχουν ονομαστικούς λόγους ανάκλασης στις επιφάνειες αυτές περί το 94%. Το ποσοστό αυτό φυσικά μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Ένας παράγοντας που επιδρά σημαντικά στις απώλειες ανακλαστικότητας των ηλιοστατών είναι και ο βαθμός καθαρότητας τους, ο οποίος έχει σαφή εξάρτηση από τις περιβαλλοντικές συνθήκες του εκάστοτε πεδίου. Στην ουσία, ο βαθμός απόδοσης ανακλαστικότητας θα μπορούσε να προσδιοριστεί 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.

Αφού ο ηλιοστάτης τοποθετηθεί και εκτεθεί στις περιβαλλοντικές συνθήκες, η αρχικά «τέλεια» ανακλαστική επιφάνειά του δε μπορεί να ανακτηθεί πλήρως. Θα επιδεινωθεί ως συνάρτηση του χρόνου τόσο από τη συσσώρευση σκόνης όσο και από την επικάλυψη υλικών από το περιβάλλον, τα οποία δημιουργούν χημικούς δεσμούς με το γυαλί στην επιφάνεια των ηλιοστατών, δημιουργώντας ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα που μειώνει την ανακλαστική ικανότητα των κατόπτρων. Παράλληλα, περιστασιακές αμμοθύελλες και ισχυροί άνεμοι στην περιοχή προκαλούν γρατζουνιές λόγω αμμοβολής στην επιφάνεια των ηλιοστατών και εντείνουν τη διάβρωση, η οποία κατά τη διάρκεια ζωής ενός συνήθους ηλιοστάτη υπολογίζεται ότι μπορεί να μειώσει την ανακλαστική του ικανότητα κατά 2%. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι η σύσταση του εδάφους, η ταχύτητα των ανέμων και οι βροχοπτώσεις της περιοχής του εκάστοτε ηλιοστατικού πεδίου επηρεάζει σημαντικά τις απώλειες ανακλαστικότητας του.

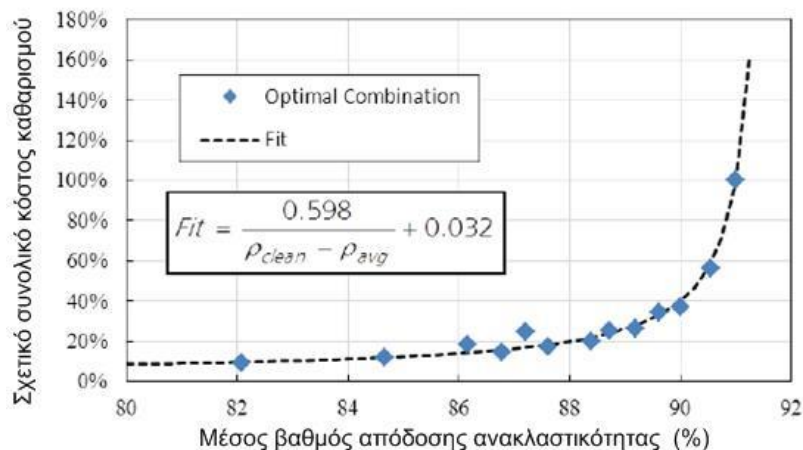
Για τη διατήρηση των απωλειών αυτών σε λογικά αποδεκτά πλαίσια, καθίσταται αναγκαίος ο τακτικός καθαρισμός τους μέσω ψεκασμού (spray washing) ή τριψίματος (contact scrubbing). Η απομάκρυνση της σκόνης και των διάφορων ακαθαρσιών από την επιφάνεια των ηλιοστατών επιτυγχάνεται μέσω ψεκασμού με νερό υψηλής πίεσης. Χάρη στην απουσία επαφής με τους ηλιοστάτες, το σύστημα αυτό καθαρισμού δεν απαιτεί σύνθετες διατάξεις, είναι γρήγορο και ελαχιστοποιεί

τον κίνδυνο πρόκλησης τυχόν βλάβης στην επιφάνεια του ηλιοστάτη. Ο καθαρισμός μέσω τριψίματος από την άλλη πραγματοποιείται με οχήματα στα οποία είναι προσαρμοσμένοι βραχίονες με περιστρεφόμενες καθαριστικές κεφαλές (ανάλογες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα συνεργεία καθαρισμού αυτοκινήτων). Είναι συνήθως 5 φορές πιο αργό από τον ψεκασμό αλλά χρησιμοποιεί την μισή περίπου ποσότητα νερού και είναι ο μόνος τρόπος για τον πλήρη καθαρισμό των στρωμάτων και διαμορφώσεων που δημιουργούνται πάνω στις επιφάνειες των ηλιοστατών. Επιπλέον όμως, λόγω της επαφής με τους ηλιοστάτες, αποκλίσεις στη ρύθμιση του συστήματος μπορεί να οδηγήσουν στην ανάπτυξη βλαβών στην επιφάνεια των κατοπτρικών επιφανειών. Ο καθαρισμός των κατοπτρικών επιφανειών πραγματοποιείται είτε χειρωνακτικά από κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό που οδηγεί μηχανήματα, στα οποία είναι προσαρμοσμένα εργαλεία καθαρισμού, είτε από αυτοματοποιημένα ρομποτικά συστήματα, τα οποία δεν απαιτούν την ύπαρξη προσωπικού και η ανάπτυξη τους είναι ένα τρέχον πεδίο έρευνας, όπου συγκεντρώνεται μεγάλο ενδιαφέρον.



Σχήμα 4.12 Καθαρισμός ηλιοστατών α) με ψεκασμό νερού και β) με τρίψιμο. [83],[73]

Όσο συχνότερα καθαρίζονται οι ηλιοστάτες, τόσο καλύτερη ανακλαστικότητα έχουν και το πεδίο παρουσιάζει καλύτερη συνολική απόδοση. Ταυτόχρονα όμως, αυξάνεται το λειτουργικό κόστος καθαρισμού. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η συσχέτιση του σχετικού κόστους που προκύπτει για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης μέσης απόδοσης ανακλαστικότητας.



Σχήμα 4.13 Σχέση ανακλαστικότητας ηλιοστατών και κόστους καθαρισμού. [84]

Με γνωστό το ρυθμό συσσώρευσης σκόνης και επικαθίσεων, το χρονοδιάγραμμα καθαρισμού βελτιστοποιείται, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος καθαρισμού για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου μέσου βαθμού απόδοσης ανακλαστικότητας πεδίου. Θεωρώντας συνήθεις ρυθμούς συσσώρευσης σκόνης και τα αντίστοιχα κόστη καθαρισμού των επιφανειών των ηλιοστατών, προκύπτει ότι τα ηλιοστατικά πεδία είναι πιο αποδοτικά ως προς το κόστος, όταν η επιθυμητή τιμή του βαθμού ανάκλασης των ηλιοστατών είναι 3-4% κάτω από την αρχική τους τιμή. Έτσι, είναι σκόπιμο ο καθαρισμός να γίνεται με συχνότητα, τέτοια ώστε η ανακλαστικότητα των ηλιοστατών να υποβαθίζεται κατά 6-8% πριν τον καθαρισμό τους. [32],[35],[84],[85]

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας στην ανάλυση που πραγματοποιείται στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο, ο βαθμός απόδοσης ανακλαστικότητας των ηλιοστατών θεωρείται ίσος με:

$$\eta_{refl} = 0.89$$

#### 4.2.5 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%. 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, καθώς τα δύο αυτά χαρακτηριστικά επηρεάζουν άμεσα την γωνία εκτροπής των ανακλώμενων ακτίνων από τους ηλιοστάτες ηλιοστάτες. Επιπλέον, οι μικρές αποκλίσεις του συστήματος εντοπισμού της ακριβούς θέσης του ήλιου και του μηχανισμού κίνησης του ηλιοστάτη από τις ιδανικές τιμές, συμβάλλουν στην αύξηση των απωλειών αυτών, καθώς 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.

Όσον αφορά στον κεντρικό ηλιακό δέκτη, όπως είναι λογικό, οι διαστάσεις της επιφάνειάς του είναι αντιστρόφως ανάλογες με τις απώλειες διαρροής. Στην περίπτωση μεγαλύτερης επιφάνειας ή μεγαλύτερου ανοίγματος σε δέκτες κοιλότητας, μία δέσμη ανακλώμενων ακτίνων έχει αυξημένες πιθανότητες να διέλθει μέσα από το άνοιγμα του δέκτη. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του δέκτη, 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. 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. Φυσικά, αναλόγως με την προαναφερθείσα στρατηγική διαμορφώνονται και κάποιες αυξομειώσεις στο μέγεθος των απωλειών διαρροής, για την εκάστοτε περίπτωση.

Αξίζει να αναφέρουμε, ότι σε αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές οι απώλειες διαρροής συγκαταλέγονται στις απώλειες του δέκτη, καθώς εξαρτώνται και από τη διαμόρφωση και τη γεωμετρία του. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία προτιμήθηκε να συμπεριληφθούν στις απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου. 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 μέσω προγραμμάτων ανίχνευσης ηλιακών ακτίνων 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. [44].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας στην ανάλυση που πραγματοποιείται στο 5ο κεφάλαιο και λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι ο δέκτης είναι εξωτερικός κυλινδρικής διαμόρφωσης, θα θεωρηθεί ένας υψηλός βαθμός απόδοσης του πεδίου (που χαρακτηρίζει τις συγκεκριμένες απώλειες) ίσος με:

$$\eta_{spill} = 0.98$$

### 4.3 Απώλειες Κεντρικού Δέκτη [32],[35]

Προτού ορίσουμε τον βαθμό απόδοσης του κεντρικού ηλιακού δέκτη, είναι χρήσιμο να περιγράψουμε τις θερμικές του απώλειες. Ο δέκτης παρουσιάζει απώλειες και των τριών ειδών μεταφοράς θερμότητας: συναγωγή, ακτινοβολία και αγωγή. Οι απώλειες αυτές περιγράφονται με τη σειρά αμέσως παρακάτω, ενώ παράλληλα, προτείνεται ένας αλγόριθμος για τον υπολογισμό τους. Η περίπτωση, στην οποία δίνεται μεγαλύτερη έμφαση είναι η χρήση εξωτερικού κυλινδρικού δέκτη, καθώς αυτή η διαμόρφωση θα μελετηθεί κατά τη μοντελοποίηση του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

#### 4.3.1 Απώλειες Συναγωγής (Convection Losses)

Οι απώλειες λόγω συναγωγής είναι ίσως οι σημαντικότερες για τον ηλιακό δέκτη και αναφέρονται στη θερμική ενέργεια που χάνεται από την εξωτερική επιφάνεια του, τόσο λόγω ελεύθερης συναγωγής, που δημιουργείται από τη διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας του δέκτη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όσο και από την εξαναγκασμένη συναγωγή, που δημιουργείται από την κίνηση του αέρα



εφαπτομενικά στα τοιχώματά του. 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, διαδραματίζουν οι καιρικές συνθήκες της περιοχής και για την ακρίβεια η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου [86].

Οι απώλειες συναγωγής σε έναν κεντρικό ηλιακό δέκτη δίνονται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{conv} = h_c * (\overline{T}_R - T_a) * A_R$$

, όπου  $A_R$  το εμβαδόν της επιφάνειας / ανοίγματος του δέκτη,  $\overline{T}_R$  η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων του,  $T_a$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος, και  $h_c$  ο συντελεστής συναγωγής.

$T_R$  είναι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του δέκτη. Ωστόσο, η θερμοκρασία αυτή δεν διανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του δέκτη, ούτε παρουσιάζει κάποιο συγκεκριμένο προφίλ κατανομής ως προς το ύψος ή την περίμετρο του δέκτη. Ένας αναλυτικός υπολογισμός απωλειών θα απαιτούσε πλήρη χαρτογράφηση της κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας που συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του δέκτη κάθε στιγμή και γνώση της ακριβούς διάταξης και γεωμετρίας των μερών που τον αποτελούν, ώστε να είναι γνωστή η κατανομή της θερμοκρασίας στο δέκτη. Η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας εξωτερικού κυλινδρικού δέκτη ύψους  $h_R$  λαμβάνεται λοιπόν, από το ολοκλήρωμα:

$$\overline{T}_R = \frac{1}{2\pi h_R} \int_0^{h_R} \int_0^{2\pi} T_R d\theta dx .$$

$h_c$  είναι ο συντελεστής συναγωγής, ο οποίος πρέπει να υπολογιστεί συνεκτιμώντας τόσο την ελεύθερη όσο και την εξαναγκασμένη συναγωγή.

$$h_c = (h_{free}^a + h_{forced}^a)^{1/a}$$

όπου  $h_{free}$  ο συντελεστής ελεύθερης, και  $h_{forced}$  ο συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής. Το  $a$  είναι ένας εκθέτης που επιλέγεται εμπειρικά αναλόγως με το σχεδιασμό του δέκτη και για την περίπτωση κυλινδρικού εξωτερικού δέκτη προτείνεται η τιμή  $a=1$ .

Επιπλέον, για κυλινδρική διαμόρφωση δέκτη προτείνονται οι ακόλουθες σχέσεις για τον υπολογισμό των συντελεστών συναγωγής [88]:

Συντελεστής ελεύθερης συναγωγής:

$$h_{free} = 1.973 * 10^{-3} * (T_R - T_a)^{1/4} , kJ/m^2 sK$$

Ενώ αντίστοιχα, ο συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής υπολογίζεται ως εξής:

$$h_{forced} = Nu_f \left( \frac{k_a}{D_R} \right),$$

$$\text{όπου } Nu_f = 0.3 + \frac{0.62 * Re_D^{1/2} * Pr_a^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr_a)^{2/3}]^{1/4}} * \left[ 1 + \left( \frac{Re_D}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5}$$

$$\text{και } Re_D = 10^3 * \rho_a * D_R * V_a / \mu_a .$$

Άλλη μέθοδος υπολογισμού που χρησιμοποιείται συχνά, είναι αυτή των Siebers και Kraabel, σύμφωνα με την οποία για τον συντελεστή ελεύθερης συναγωγής ισχύει [44]:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{Όπου } \dot{Q}_{fc} = 7631 \cdot \frac{A_{ap}}{W_{ap}^{0,2}}, \dot{Q}_{nc} = 5077 \cdot A_{cav}.$$

όπου  $A_{ap}$  το εμβαδόν του ανοίγματος ( $m^2$ ) στην πρόσοψη του δέκτη,  $W_{ap}$  το πλάτος του ανοίγματος (m) και  $A_{cav}$  η συνολική επιφάνεια στο εσωτερικό της κοιλότητας ( $m^2$ ). [44]

### 4.3.2 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.

Για τον υπολογισμό τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\dot{Q}_{rad} = e_R * \sigma * (\overline{T_R^4} - T_a^4) * A_R$$

, όπου  $e_R = 0.88$  ο συντελεστής εκπομπής [87],  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ,  $A_R$  το εμβαδόν της επιφάνειας / ανοίγματος του δέκτη,  $T_R$  η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων του και  $T_a$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η μέση θερμοκρασία για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω ακτινοβολίας προκύπτει για εξωτερικό κυλινδρικό δέκτη ύψους  $h_R$  από το ολοκλήρωμα [88]:

$$\overline{T_R^4} = \frac{1}{2\pi h_R} \int_0^{h_R} \int_0^{2\pi} T_R^4 d\theta dx$$

### 4.3.3 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. Αν ο σχεδιασμός του πύργου γίνει σωστά, οι απώλειες αυτές είναι αμελητέες (<1%) 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.

### 4.3.4 Απώλειες Λόγω Ανάκλασης (Receiver Reflection/ Absorption Losses)

Οι συγκεκριμένες απώλειες αναφέρονται στο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που συγκεντρώνεται στον δέκτη και δεν απορροφάται από αυτόν λόγω ανάκλασης. Χάρη στη βαφή υψηλής απορροφητικότητας με την οποία επικαλύπτονται οι επιφάνειες του δέκτη, οι απώλειες αυτές λαμβάνουν μικρές τιμές, μη ξεπερνώντας το 5%. Με το πέρασμα του χρόνου βέβαια, η γήρανση της βαφής οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες ανακλαστικότητας. Γενικά, οι απώλειες αυτές είναι λίγο μεγαλύτερες στους εξωτερικούς δέκτες σε σχέση με τους δέκτες κοιλότητας, καθώς στους τελευταίους υφίστανται πολλαπλές ανακλάσεις και δε διαφεύγει μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι απώλειες αυτές και ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης που προκύπτει αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία και ως απώλειες / βαθμός απόδοσης απορρόφησης του δέκτη (receiver absorption losses / efficiency).

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. Μια συνήθης τιμή του συντελεστή απορρόφησης

είναι της τάξεως του 0.95, ενώ για δέκτη κοιλότητας, στο εσωτερικό της οποίας γίνονται περισσότερες της μίας αντανάκλασεις, μπορεί να φτάσει και το 0.98. [32]

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για εξωτερικό δέκτη λαμβάνεται:  $\eta_{absr} = 0.95$

#### 4.3.5 Ορισμός Βαθμού Απόδοσης Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη

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

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

όπου  $N$  ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου,  $A_{helio\,stat}$  το εμβαδόν της επιφάνειας του ηλιοστάτη,  $DNI$  η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ηλιοστατικό πεδίο,  $\eta_{field}$  ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.2 και  $C$  κατάλληλος συντελεστής, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό των ηλιοστατών που είναι εστιασμένοι στον κεντρικό δέκτη (σε θέση λειτουργίας). Συνήθως λαμβάνεται ίσος με 1.

Παραλείποντας τις απώλειες αγωγής από τον υπολογισμό (ως αμελητέες) και λαμβάνοντας υπόψη, το βαθμό απορρόφησης του δέκτη, καθώς και τις απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας, υπολογίζεται η καθαρή θερμική ισχύς, που προσδίδεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο διατρέχει τις σωληνώσεις του:

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

Ορίζεται λοιπόν, ο βαθμός απόδοσης του κεντρικού δέκτη, ως ο λόγος της καθαρής θερμικής ισχύος που προσδίδεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας, προς την συνολική θερμική ισχύ λόγω της συγκεντρωμένης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, που φτάνει στην ενεργή επιφάνεια του:

$$\eta_{receiver} = \frac{\dot{Q}_{net}}{\dot{Q}_{inc}} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta h}{\dot{Q}_{inc}}$$

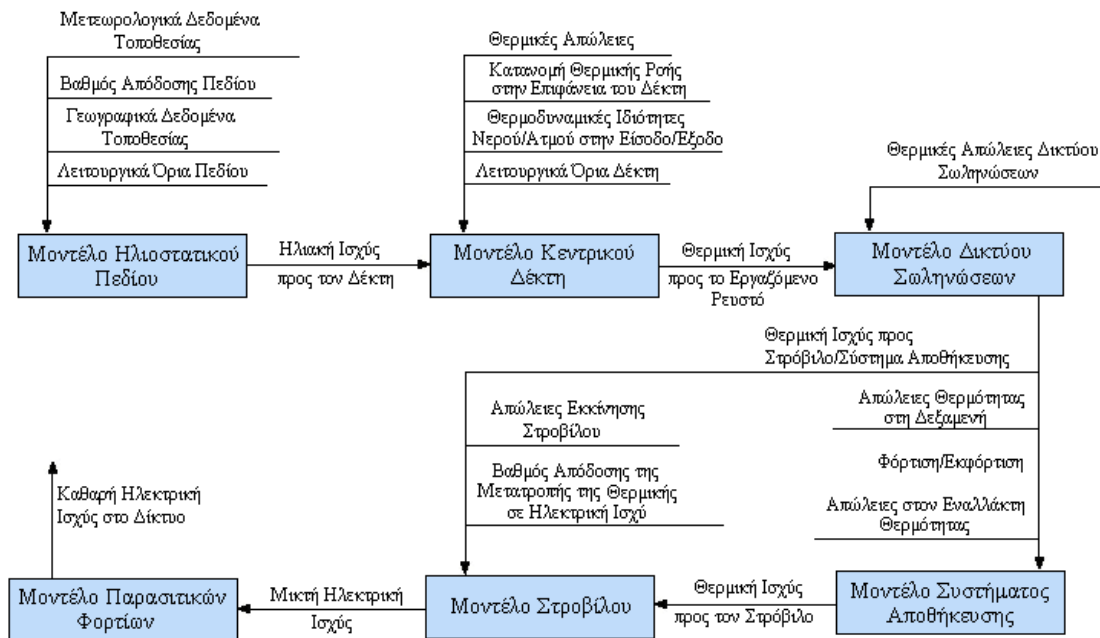
,όπου  $\dot{m}$  η παροχή μάζας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στις σωληνώσεις του δέκτη, και  $\Delta h$  η ενθαλπική αύξηση του από την είσοδο στην έξοδό του.

Ο ακριβής 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.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Μοντελοποίηση Ηλιοστατικού Πεδίου και Κεντρικού Δέκτη Μελέτη περίπτωσης στον Αθρινόλακκο Κρήτης

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. [44,87]

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάστηκαν τα δύο πρώτα υποσυστήματα (του ηλιοστατικού πεδίου και του ηλιακού κεντρικού δέκτη), τα οποία και μοντελοποιήθηκαν. Η επιλογή έγινε με γνώμονα την υψηλή συνεισφορά των τμημάτων αυτών στην απόδοση του σταθμού και τα σημαντικά περιθώρια βελτιστοποίησης που εμφανίζουν, καθώς είναι ένα πολύ σύγχρονο ερευνητικό αντικείμενο. Εκτός των άλλων, η μοντελοποίηση όλων των υποσυστημάτων της εγκατάστασης θα απαιτούσε αρκετά μεγαλύτερη έκταση από αυτή της παρούσας εργασίας, για να καλυφθεί ικανοποιητικά.

## 5.1 Δεδομένα Περιοχής

### 5.1.1 Τοποθεσία Πεδίου

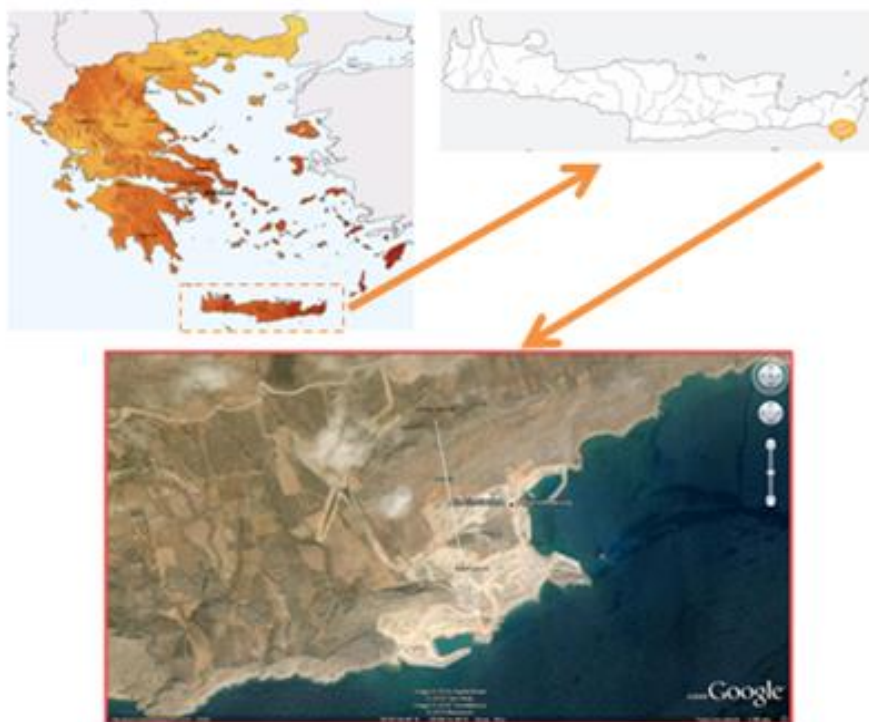
Η περιοχή που επιλέγεται για την εφαρμογή των όσων αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις παραμέτρους σχεδίασης και την απόδοση του ηλιοστατικού πεδίου, είναι οι Πλαγιές Αθρινολάκκου στην Κρήτη. Πρόκειται για μια παραθαλάσσια τοποθεσία στο νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού στο δήμο Σητείας.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα ανάλυση θα εξετασθεί το πεδίο, στο οποίο μελετάται η εγκατάσταση του σταθμού MINOS από την εταιρεία «NUR-MOH A.E.». Το έργο πρόκειται για ηλιοθερμική εγκατάσταση τεχνολογίας κεντρικού ηλιακού δέκτη, εγκατεστημένης ισχύος 50 MWe, με σύστημα αποθήκευσης. Έχει ήδη λάβει άδεια εγκατάστασης, και αποτελεί το πιο ώριμο αδειοδοτικά ηλιοθερμικό έργο στην Ελλάδα [89].

Το πεδίο προς μελέτη, βρίσκεται πολύ κοντά στον ατμοηλεκτρικό σταθμό Αθρινολάκκου της ΔΕΗ (βόρεια του). Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του είναι:

*Γεωγραφικό Πλάτος:* **35.013°** (Βόρεια)

*Γεωγραφικό Μήκος:* **26.136°** (Ανατολικά)



Σχήμα 5.2 Τοποθεσία Αθρινολάκκου

### 5.1.2 Άμεση Ηλιακή Ακτινοβολία

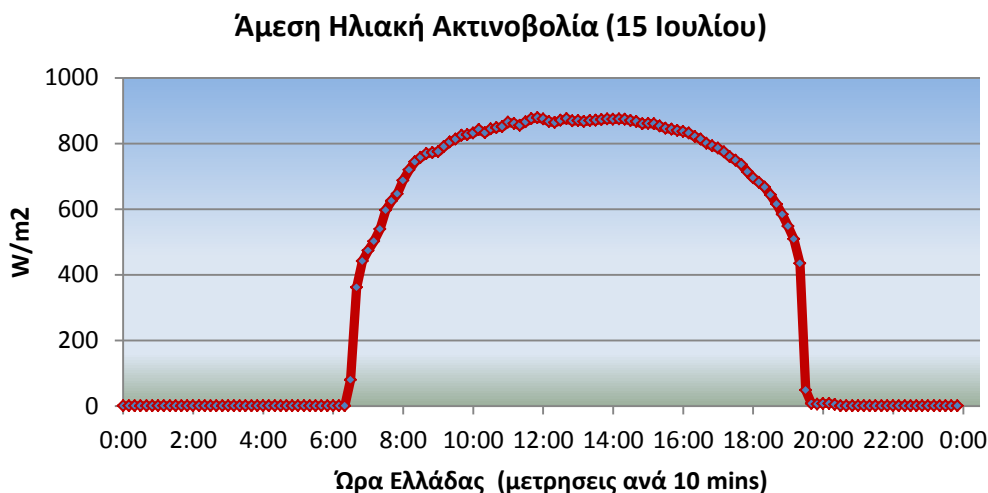
Το πρώτο ίσως κριτήριο που λαμβάνει κανείς υπόψη σχετικά με την καταλληλότητα μιας περιοχής ως προς την εγκατάσταση ηλιοθερμικού σταθμού, είναι οι τιμές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Λόγω της εξάρτησης των τιμών της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από μετεωρολογικά φαινόμενα, είναι επιθυμητό και αναγκαίο για μια σωστή μοντελοποίηση, τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας να χαρακτηρίζονται από μεγάλη συχνότητα. Η ανάγκη αυτή γίνεται περισσότερο σαφής, αν αναλογιστεί κανείς ότι η παρουσία ενός σύννεφου στην πορεία των προσπιπτουσών ηλιακών ακτίνων προς το ηλιοστατικό πεδίο, ακόμα και για λίγα λεπτά, μπορεί να στοιχίσει σημαντικά στην παραγωγή ενέργειας της εγκατάστασης.

Η ετήσια χρονοσειρά των τιμών της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) για την περιοχή του Αθρινόλακκου λαμβάνεται με ακρίβεια 10λέπτου από την ιστοσελίδα SoDa (Solar Energy Services for Professionals) [90]. Χρησιμοποιήθηκε η σειρά για το έτος 2009. Γενικά, κρίνεται καλό σε προκατακτικές μελέτες πεδίων να γίνονται μοντελοποιήσεις με χρήση των μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής των τελευταίων 5 ετών. Οι τιμές της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας δίνονται σε  $W/m^2$  και χρησιμοποιείται ο συγχρονισμένος παγκόσμιος χρόνος (UTC).

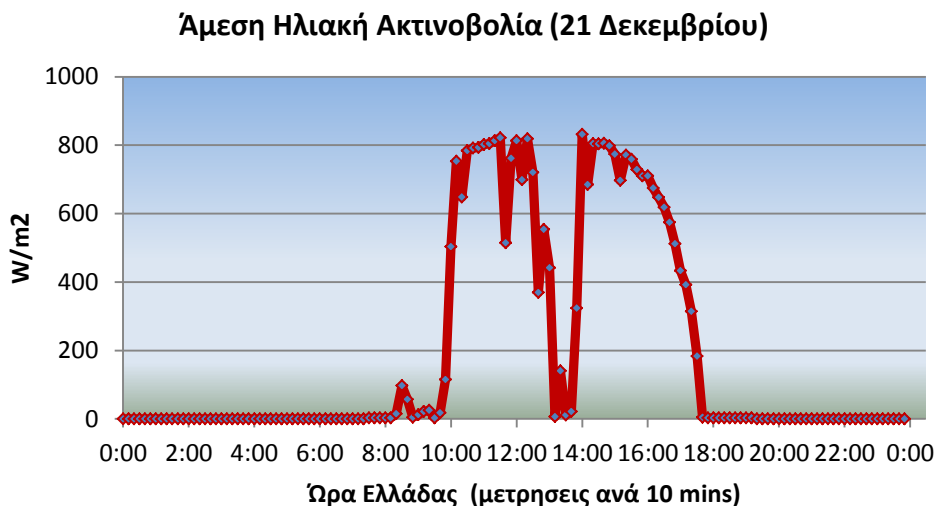
Από το άθροισμα των τιμών για όλο το έτος, και με διαίρεση τους με το 6, ώστε το αποτέλεσμα να προκύψει σε  $Wh/m^2$ , προέκυψε ότι η ετήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή είναι **2131,379  $KWh/m^2$** . Η τιμή αυτή είναι αρκετά υψηλή, και μάλιστα πληροί τις προϋποθέσεις ικανοποιητικής απόδοσης που θέτει η P.A.E. στον οδηγό αξιολόγησης έργων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας [91]. Γενικά, περιοχές με μέση ετήσια τιμή άμεσης ακτινοβολίας (DNI) μεγαλύτερη από  $2000 kWh/m^2$  εξετάζονται ως υποψήφιες για εγκατάσταση ηλιοθερμικής εγκατάστασης [92].

Τυπικές καμπύλες DNI για 2 ημέρες του έτους ακολουθούν παρακάτω για καλύτερη εποπτεία.



Σχήμα 5.3 Καμπύλη DNI στις Πλαγιές Αθρινόλακκου στις 15 Ιουλίου 2009





*Σχήμα 5.4 Καμπύλη DNI στις Πλαγιές Αθερινόλακκου στις 21 Δεκεμβρίου 2009*

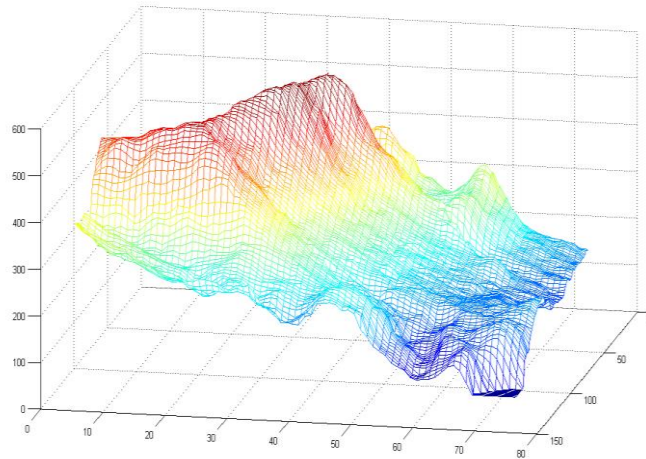
Η πρώτη εικόνα αντικατοπτρίζει μια «τέλεια» ημέρα με συνεχή ηλιοφάνεια, ενώ η δεύτερη αντιστοιχεί σε ημέρα, όπου είναι εμφανής η μείωση στην τιμή του DNI για κάποια διαστήματα, πιθανότατα λόγω της παρουσίας συννεφιάς. Το προφίλ του DNI για τις περισσότερες ημέρες του καλοκαιριού προσιδιάζει στην πρώτη καμπύλη, ενώ το χειμώνα και το φθινόπωρο περιμένουμε περισσότερες ημέρες του δεύτερου τύπου, ή και πολύ χειρότερες!

### 5.1.3 Τοπογραφία της περιοχής

Το πεδίο του Αθερινόλακκου είναι ένα αρκετά σύνθετο πεδίο καθώς το έδαφος στο σύνολο του παρουσιάζει αρκετές σημαντικές εναλλαγές κλίσεις του εδάφους και ιδιαίτερος το βόρειο τμήμα του βρίσκεται πάνω στην πλαγιά ενός λόφου καθιστώντας δύσκολη την τοποθέτηση ηλιοστατών. Μια άποψη για την τοπογραφία της περιοχής μπορεί ο αναγνώστης να σχηματίσει από τις εικόνες που ακολουθούν.



*Σχήμα 5.5 Φωτογραφία της περιοχής*



Σχήμα 5.6 Τοπογραφία της ευρύτερης περιοχής (Πλαγιές Αθρινόλλακου)

Στο μοντέλο που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε τοπογραφικό αρχείο της περιοχής, με διακριτοποίηση 1m, το οποίο μου παραχωρήθηκε από την «NUR-MOH Α.Ε» για αποκλειστική χρήση στην παρούσα εργασία. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στο επίπεδο X,Y είναι το EGSA: Ελληνικό Γαιωδευτικό Σύστημα Αναφοράς 1987, και σύμφωνα με τις συντεταγμένες αυτού του αρχείου καθορίζονται η θέση του πύργου, των ηλιοστατών και η διαθέσιμη περίμετρος.

#### 5.1.4 Διαθέσιμη έκταση για τοποθέτηση ηλιοστατών

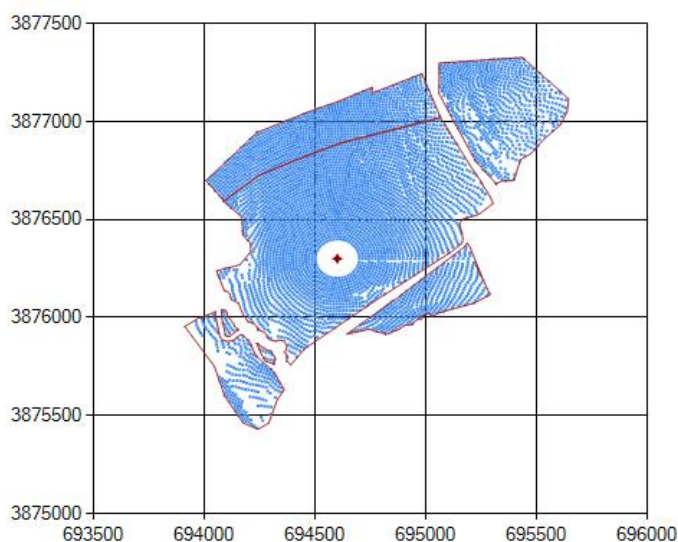
Η διαθέσιμη έκταση, όπου μπορούν να τοποθετηθούν ηλιοστάτες, οριοθετείται από την περίμετρο του πεδίου. Η περίμετρος δίνεται ως ένα σύνολο ζευγών συντεταγμένων (X,Y) στο σύστημα EGSA, τα οποία σχηματίζουν κλειστές καμπύλες οι οποίες αντιστοιχούν στην έκταση του πεδίου, όπου επιτρέπεται η τοποθέτηση ηλιοστατών, και μου δόθηκε από την «NUR-MOH Α.Ε». Όπως θα φανεί και από τις απεικονίσεις των ηλιοστατικών πεδίων στη συνέχεια, πρόκειται για ένα σύνθετο πεδίο. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει τρεις λωρίδες γης, στις οποίες δεν τοποθετούνται ηλιοστάτες. Στην πραγματικότητα, αντιστοιχούν σε δύο ρέματα, τα οποία δε φέρουν νερό, ωστόσο για περιβαλλοντικούς λόγους απαγορεύεται η επέμβαση σε αυτά, καθώς και σε έναν ήδη υπάρχοντα δρόμο που εξυπηρετεί το εργοστάσιο της ΔΕΗ και την ευρύτερη περιοχή.

## 5.2 Διερεύνηση των Παραμέτρων Σχεδίασης του Ηλιοστατικού Πεδίου (Ανάλυση Ευαισθησίας)

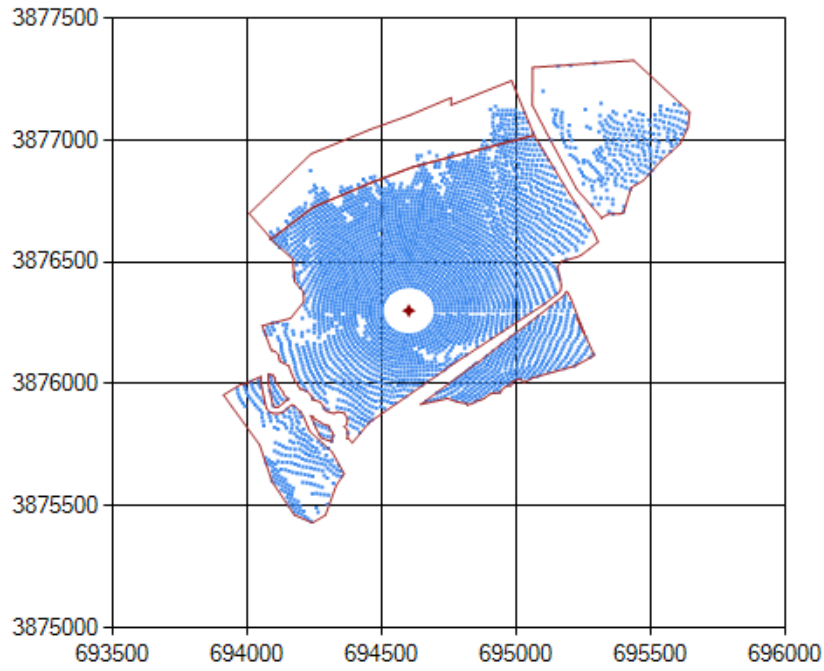
### 5.2.1 Μέγιστη επιτρεπτή κλίση εδάφους για τοποθέτηση ηλιοστατών

Όπως είναι φυσικό, όταν το έδαφος παρουσιάζει μεγάλες κλίσεις δεν είναι τεχνικά εύκολο να τοποθετηθούν ηλιοστάτες και η παρέμβαση με γεωτεχνικά έργα για την εξομάλυνση του πεδίου είναι πολλές φορές ασύμφορη. Κλίσεις εδάφους  $< 12\%$  δεν αποτελούν, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, πρόβλημα για την τοποθέτηση ηλιοστατών καθώς επιτρέπουν την προσέγγιση τους από τα συνήθη οχήματα μεταφοράς πασσάλων και λοιπού εξοπλισμού, ενώ κλίσεις εδάφους  $> 30\%$  συνηθίζεται να αποφεύγονται. Μεγαλύτερη μέγιστη επιτρεπτή κλίση του εδάφους ισοδυναμεί με αποδοτικότερη χρήση της διαθέσιμης γης, καθώς θα τοποθετηθούν περισσότεροι ηλιοστάτες στο πεδίο, ωστόσο ταυτόχρονα αυξάνονται τα έξοδα για την τοποθέτηση των ηλιοστατών, καθώς σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να απαιτούνται γεωτεχνικές επεμβάσεις (εξομάλυνση του εδάφους) ή αυξημένο κόστος μηχανισμών στήριξης.

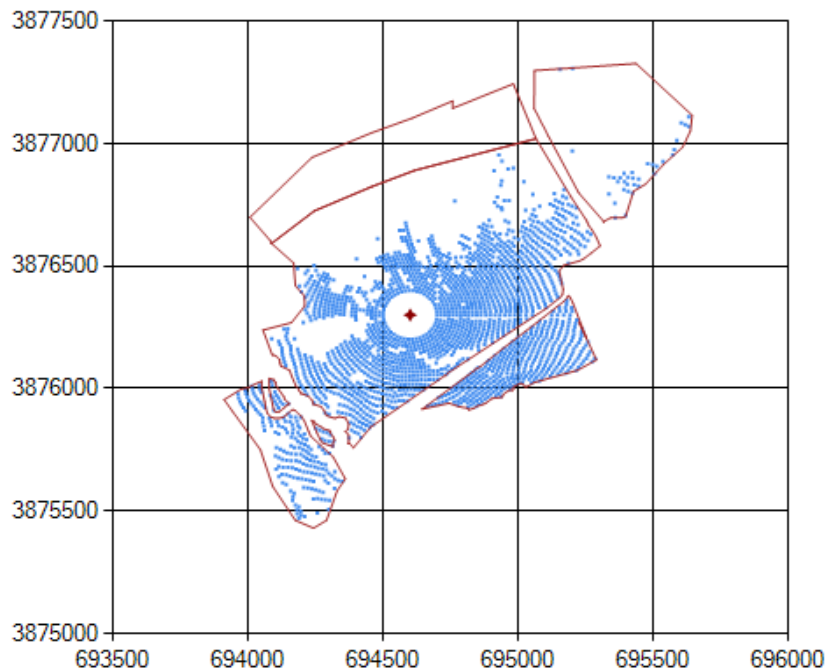
Στις εικόνες που ακολουθούν μπορεί κανείς να αντιληφθεί, πώς μεταβάλεται η εικόνα και ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου, που μοντελοποιείται σύμφωνα με τη μεθοδολογία του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου, ανάλογα με την μέγιστη επιτρεπτή κλίση του εδάφους στις περιοχές τοποθέτησης ηλιοστατών και την τοπογραφία του πεδίου. Τα εικονιζόμενα πεδία αναφέρονται σε ίδια και στις 3 περιπτώσεις δεδομένα σχεδίασης με μοναδική μεταβαλλόμενη παράμετρο τη μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση του εδάφους. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του πεδίου, που χρησιμοποιήθηκαν: ύψος πύργου 160m, ύψος ηλιοστατών 8 m, πλάτος ηλιοστατών 10 m, πλευρικό και ακτινικό κενό 1 m, διάμετρος πρώτης σειράς ηλιοστατών 100 m και θέση πύργου όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Όλες οι προαναφερθείσες παράμετροι, επιλέχθηκαν, έτσι ώστε η επιρροή του αναγλύφου να είναι εμφανής, χωρίς να αποτελούν αποτέλεσμα βελτιστοποίησης. Ο οριζόντιος άξονας x αναφέρεται στην κατεύθυνση Δύση – Ανατολή κι ο y, Βορρά- Νότου, και κάθε μπλε κουκίδα αναπαριστά έναν ηλιοστάτη μέσω των συνταταγμένων του κέντρου του στο επίπεδο XY.



Σχήμα 5.7 Παράδειγμα ηλιοστατικού πεδίου με τοποθέτηση ηλιοστατών χωρίς περιορισμό μέγιστης κλίσης εδάφους.

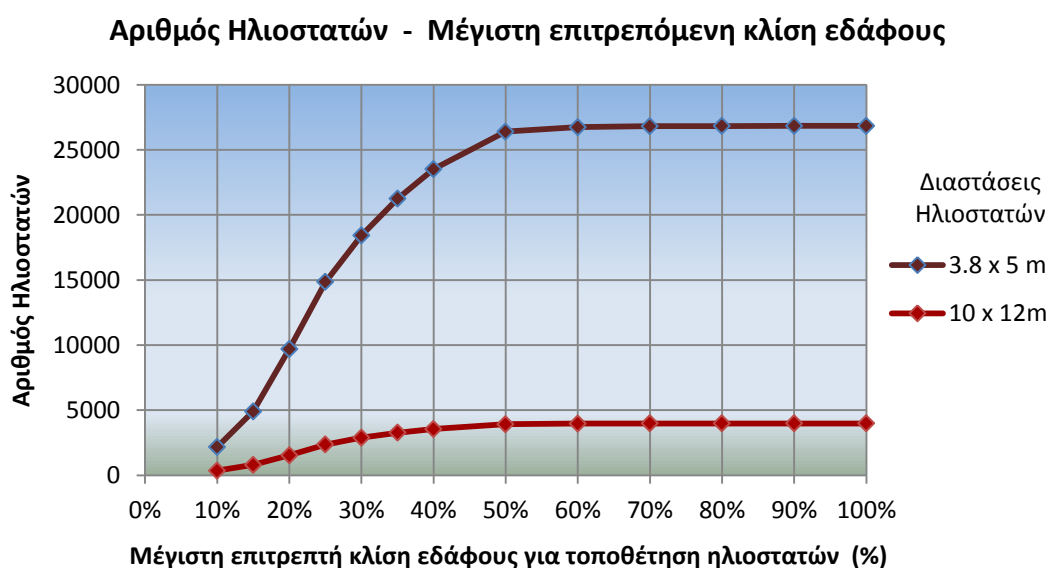


Σχήμα 5.8 Παράδειγμα ηλιοστατικού πεδίου με τοποθέτηση ηλιοστατών για κλίση εδάφους < 30%.



Σχήμα 5.9 Παράδειγμα ηλιοστατικού πεδίου με τοποθέτηση ηλιοστατών για κλίση εδάφους < 20%.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η μεταβολή του αριθμού των ηλιοστατών ανάλογα με την μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση του εδάφους, για την οποία επιτρέπεται η τοποθέτηση ηλιοστατών. Οι ακριβείς τιμές της ανάλυσης αυτής, από τις οποίες προέκυψε το διάγραμμα, παρατίθενται στον πίνακα ΠΑ-1 του παραρτήματος. Οι δύο καμπύλες του διαγράμματος αναφέρονται σε ηλιοστάτες διαφορετικών διαστάσεων (ύψος x πλάτος, όπως φαίνεται στο υπόμνημα), επιφάνειας 19 και 120 m<sup>2</sup> αντίστοιχα. Οι διαστάσεις αυτές επιλέχθηκαν για τις αναλύσεις μας, επειδή αντιστοιχούν στους ηλιοστάτες των δύο μεγαλύτερων κατασκευαστών. Τα λοιπά χαρακτηριστικά του πεδίου είναι: ύψος πύργου 160m, πλευρικό και ακτινικό κενό 0.5m για την περίπτωση των μικρών ηλιοστατών, και 1 m για τους μεγαλύτερους, ακτίνα πρώτης σειράς ηλιοστατών 100m και συντεταγμένες θέσης πύργου, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως και. Υπενθυμίζεται ότι οι συντεταγμένες λαμβάνονται στο σύστημα EGSA.



Σχήμα 5.10 Σχέση μέγιστης επιτρεπόμενης κλίσης εδάφους για εγκατάσταση ηλιοστάτη και αριθμού ηλιοστατών για το πεδίο του Αθερινόλακκου

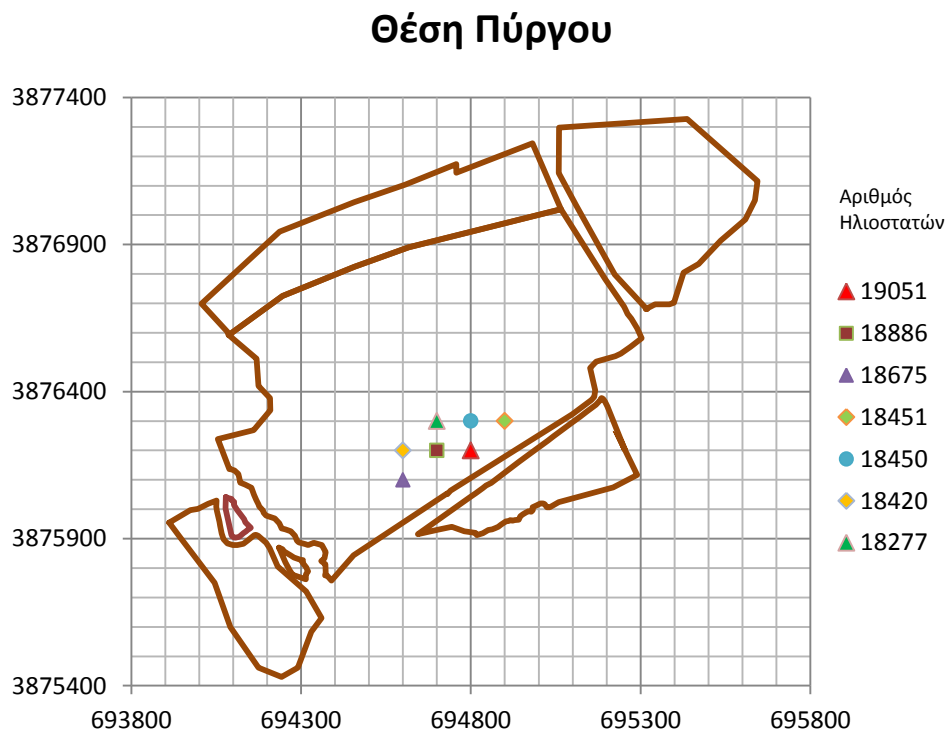
Για την τελική επιλογή επιτρεπτής κλίσης συνεκτιμώνται τόσο ο αριθμός ηλιοστατών όσο και η οικονομικότητα της εγκατάστασης τους. Μεγαλύτερη τιμή επιτρεπτής κλίσης οδηγεί σε αυξημένο κόστος εγκατάστασης των ηλιοστατών, ωστόσο η αύξηση στον αριθμό τους μπορεί να οδηγήσει στη συγκέντρωση περισσότερης θερμικής ισχύος στο δέκτη. Έτσι το παραπάνω διάγραμμα σε συνδυασμό και με την εικόνα του πεδίου μπορεί να υποδείξει περιοχές, στις οποίες μια μικρή αύξηση της ανοχής σε κλίση εδάφους συνεπάγεται σημαντική αύξηση του αριθμού των ηλιοστατών.

Στην περαιτέρω ανάλυση θα θεωρήσουμε ως ανώτερο όριο κλίσης εδάφους για τοποθέτηση ηλιοστατών την τιμή 30%, καθώς αποτελεί μια γενικώς αποδεκτή τιμή που δεν αυξάνει σημαντικά το κόστος της εγκατάστασης των ηλιοστατών, ενώ παράλληλα δε περιορίζει σε απαγορευτικό βαθμό τον αριθμό των ηλιοστατών που το αποτελούν.

## 5.2.2 Θέση Πύργου

Αφετηρία κατά την ανάπτυξη και μελέτη ενός ηλιοστατικού πεδίου, αποτελεί η εκτίμηση της θέσης (συντεταγμένες) του πύργου. Μια πρώτη εκτίμηση ώστε να ξεκινήσουμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η επιλογή της θέσης του πύργου με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του αριθμού των ηλιοστατών. Η τοποθέτηση του πύργου γίνεται σε κάθε δυνατή θέση του πεδίου σε ένα πλέγμα 100x100m και υπολογίζεται ο αριθμός των ηλιοστατών που τοποθετούνται.

Στο παρακάτω σχήμα έχουν σημειωθεί οι θέσεις του πύργου, για τις οποίες τοποθετούνται οι περισσότεροι ηλιοστάτες. Τα χαρακτηριστικά του πεδίου που εξετάζεται εδώ είναι: ύψος πύργου 160m, ύψος ηλιοστατών 3.8 m, πλάτος ηλιοστατών 5 m, πλευρικό και ακτινικό διάκενο 0.5 m και διάμετρος πρώτης σειράς ηλιοστατών 100 m.



Σχήμα 5.11 Προκαταρκτική επιλογή θέσης πύργου με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του αριθμού ηλιοστατών του πεδίου

Η θέση του πύργου που μεγιστοποιεί τον αριθμό ηλιοστατών άρα και τη συνολική επιφάνεια ανάκλασης των ηλιακών ακτίνων δεν αποτελεί κατ' ανάγκη την καλύτερη τελική επιλογή. Ο προσδιορισμός της ακριβούς θέσης του πύργου προκύπτει έπειτα από εκτενή διερεύνηση των απωλειών και των χαρακτηριστικών του πεδίου με στόχο συνήθως τη μεγιστοποίηση της ετήσιας θερμότητας που προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο όπως θα δούμε στη συνέχεια.



Παρατηρούμε ότι οι θέσεις του πύργου που μεγιστοποιούν τον αριθμό ηλιοστατών σημειώνονται στο νότιο τμήμα του πεδίου. Επιπλέον, από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι οι ηλιοστάτες που είναι τοποθετημένοι σε βόρειο πεδίο παρουσιάζουν μεγαλύτερη ετήσια απόδοση από ένα πεδίο με περιβάλλουσα διάταξη, οπότε καταρχήν αναμένουμε η τελική επιλογή της θέσης του πύργου, όπου το γινόμενο απόδοσης πεδίου και συνολικής επιφάνειας ηλιοστατών θα είναι μέγιστο, να γίνει στην ευρύτερη περιοχή.

Έτσι, επιλέγουμε αρχικά μια θέση στην περιοχή αυτή, εν προκειμένω τη θέση με συντεταγμένες κατά EGSA (694700,3876200), για την οποία θα πραγματοποιήσουμε τις αναλύσεις ευαισθησίας που ακολουθούν.

### 5.2.3 Μέγεθος Ηλιοστατών - Απόδοση πεδίου

Στη μέχρι σήμερα εξέλιξη των πύργων ηλιακής ισχύος, έχουν χρησιμοποιηθεί ηλιοστάτες σε ένα μεγάλο εύρος μεγεθών. Οι αρχικά μικρές ανακλαστικές επιφάνειες της τάξεως των  $40\text{m}^2$ , που ήταν συνήθεις στις αρχές της δεκαετίας του '80, όταν πρωτοεμφανίστηκε η τεχνολογία αυτή, αντικαταστάθηκαν από ολοένα και μεγαλύτερες έως  $160\text{m}^2$  (τα τρία συστήματα κεντρικού ηλιακού δέκτη που κατασκευάστηκαν την τελευταία δεκαετία στην Ισπανία χρησιμοποιούν ηλιοστάτες εμβαδού  $120\text{m}^2$ ), με σκοπό τη μείωση του κόστους λόγω των λιγότερων μηχανισμών κίνησης και ελέγχου που θα χρειάζονταν για τους ηλιοστάτες του πεδίου [63]. Ωστόσο, σε πρόσφατα έργα όλο και συχνότερα εξετάζονται ηλιοστάτες μικρού εμβαδού  $12 - 20\text{m}^2$  [93], ενώ πρόσφατα σε πύργους ηλιακής ισχύος μικρής κλίμακας εξετάζεται ακόμα και η τοποθέτηση ηλιοστατών εμβαδού  $1-2\text{m}^2$ .

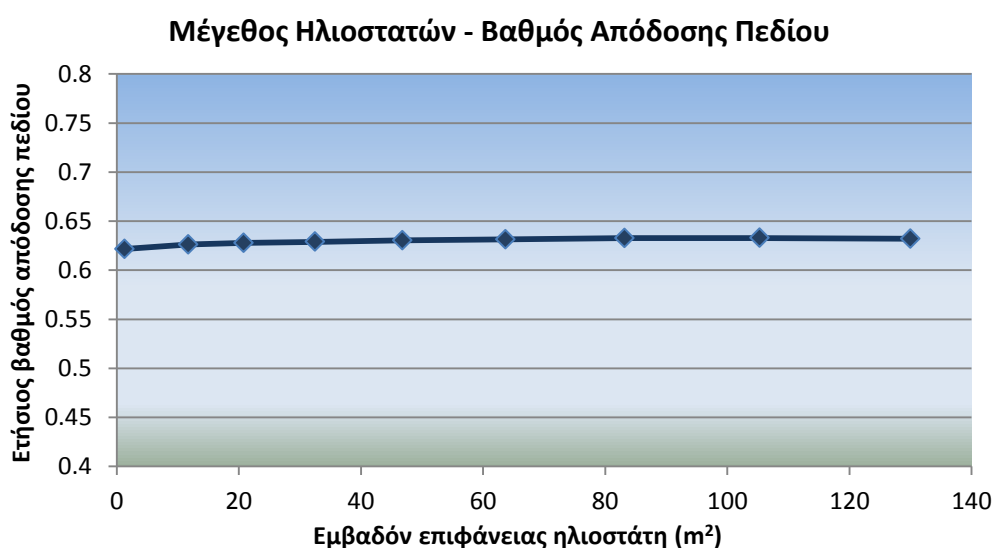
Στην παρούσα μοντελοποίηση ελέγχεται από τεχνική άποψη, πώς επηρεάζει το μέγεθος των ηλιοστατών (εμβαδόν ανακλαστικής επιφάνειας τους) το συνολικό βαθμό απόδοσης του πεδίου. Για το σκοπό αυτό θεωρείται σταθερό ύψος πύργου ίσο με  $160\text{m}$  και λόγος πλάτους προς ύψος ηλιοστατών ίσο με  $1.3$ . Η τιμή αυτή του λόγου ύψους/ πλάτους επιλέχθηκε στο εύρος  $1.2 - 1.5$ , το οποίο προτείνεται ως βέλτιστο από ανάλυση που έχει προηγηθεί στη βιβλιογραφία [63]. Μεταβάλλοντας τις διαστάσεις των ηλιοστατών και τον αριθμό τους, έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση το συνολικό εμβαδόν ανάκλασης του πεδίου να παραμένει περίπου σταθερό, όπως φαίνεται στον πίνακα ΠΑ-2 του παραρτήματος, υπολογίζεται κάθε φορά ο ετήσιος βαθμός απόδοσης του πεδίου, όπως περιγράφεται αμέσως παρακάτω:

Ο βαθμός απόδοσης του πεδίου, που υπολογίζεται για την παρούσα ανάλυση, λαμβάνει υπόψιν τις απώλειες συνημιτόνου, σκίασης, παρεμπόδισης και ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, οι οποίες υπολογίζονται μέσω των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν προηγουμένως στα αντίστοιχα κεφάλαια. Οι υπόλοιποι βαθμοί απόδοσης παραλείπονται, καθώς εξαρτώνται από την κατασκευή και τα χαρακτηριστικά των ηλιοστατών (καθαρότητα, ποιότητα επιφάνειας, καμπυλότητα κλπ.) και στην παρούσα εργασία θεωρούνται ως σταθερές ως προς το χρόνο, και δε μεταβάλλονται ως γνωστή συνάρτηση του μεγεθους των ηλιοστατών.



Ο υπολογισμός γίνεται για χρονικό διάστημα ενός έτους - εν προκειμένω για το 2009 για το οποίο γίνεται η εύρεση της θέσης του ήλιου - και για χρονικό βήμα 1 ώρας. Οι βαθμοί απόδοσης συνημιτόνου και ατμ. διαπερατότητας υπολογίζονται για κάθε ηλιοστάτη ξεχωριστά και έτσι οι αντίστοιχοι μέσοι ωριαίοι βαθμοί απόδοσης για το πεδίο προκύπτουν ως το άθροισμα των βαθμών απόδοσης κάθε ηλιοστάτη δια τον αριθμό τους. Οι βαθμοί απόδοσης σκίασης και παρεμπόδισης προκύπτουν κάθε ώρα ως μέση τιμή για όλο το πεδίο. Ο εκάστοτε μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του πεδίου προκύπτει αθροίζοντας τους μέσους ωριαίους βαθμούς απόδοσης του πεδίου και διαιρώντας με το σύνολο των ωρών του έτους, κατά τις οποίες το ηλιακό ύψος είναι  $>0$ . (Αρνητικό ηλιακό ύψος αντιστοιχεί σε ώρες πριν την ανατολή του ήλιου ή μετά τη δύση του, όπου οι αντίστοιχοι βαθμοί απόδοσης είναι μηδενικοί – στην ουσία δεν έχει νόημα να οριστούν).

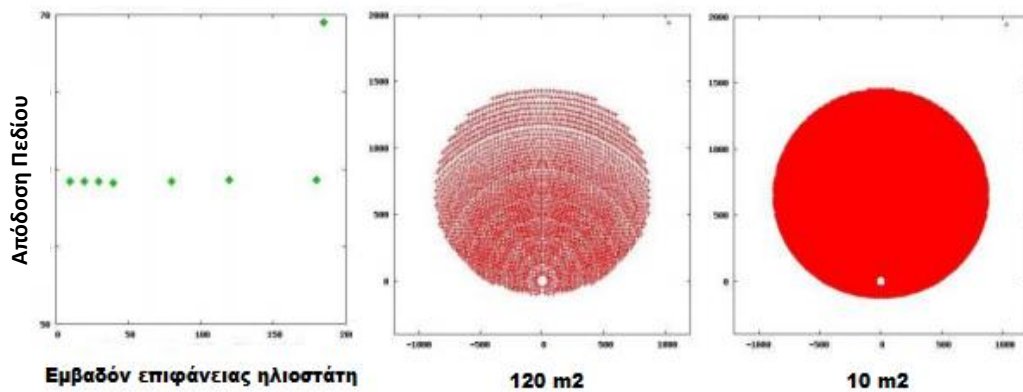
Προκύπτει λοιπόν το εξής διάγραμμα:



*Σχήμα 5.12 Συσχέτιση μέσου ετήσιου βαθμού απόδοσης πεδίου με το μέγεθος της ανακλαστικής επιφάνειας των ηλιοστατών*

Ο συνολικός ετήσιος βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου φαίνεται να μην επηρεάζεται από το μέγεθος των ηλιοστατών που επιλέγεται κάθε φορά. (Στην περίπτωση των πολύ μικρών ηλιοστατών με επιφάνεια εμβαδού 1.3m παρατηρείται μια ελάχιστη πτώση απόδοσης, κυρίως λόγω της ανάγκης τοποθέτησης τους σε σχετικά πυκνότερη διάταξη, ώστε να χωρέσουν αρκετοί ηλιοστάτες για να παραμείνει σταθερή η συνολική επιφάνεια ανάκλασης)

Στη βιβλιογραφική αναφορά [63], πραγματοποιήθηκε παρόμοια ανάλυση για εγκατάσταση ισχύος 100 MWe σε επίπεδο ηλιοστατικό πεδίο με ηλιοστάτες εμβαδού 10 - 120 m<sup>2</sup>. Για τα διάφορα μεγέθη ηλιοστατών συγκρίθηκαν η απαιτούμενη έκταση και ο συνολικός μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης τους. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους, συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα και έρχονται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα της ανάλυσης της παρούσας εργασίας. Δεν φαίνεται δηλαδή, να υπάρχει εξάρτηση του ετήσιου βαθμού απόδοσης του πεδίου από το μέγεθος των ηλιοστατών.



Σχήμα 5.13 Απόδοση πεδίου συναρτήσει εμβαδού ηλιοστατών (από βιβλιογραφία) [63]

Για αυτόν το λόγο, κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους ηλιοστατών αποτελεί κυρίως το κόστος τους. Το κόστος των ηλιοστατών διακρίνεται σε κόστος ανάλογα με τον αριθμό των ηλιοστατών (όπως π.χ. τα κόστη των κινητήρων, των συστημάτων ελέγχου, και τα κόστη καλωδιώσεων), και σε κόστη ανά μονάδα επιφάνειας (π.χ. το κόστος των κατόπτρων, κόστος γης). Συνεπώς, ο αριθμός και η επιφάνεια των ηλιοστατών προκύπτει από αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος [73]. 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.

Καταρχήν, η εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τα τελευταία 30 χρόνια δίνουν στους μεγαλύτερους ηλιοστατές ένα μικρό προβάδισμα στον τομέα του κόστους με την άποψη «bigger is better» να επικρατεί στην αγορά [29]. Από την άλλη πλευρά, οι ηλιοστατές 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 [63]. Επιτρέπουν τη χρήση φθηνών βηματικών κινητήρων που απαιτούν μικρό κιβώτιο μετάδοσης ισχύος ενώ ταυτόχρονα λόγω της πυκνής διάταξης τους παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά στα φορτία του ανέμου.

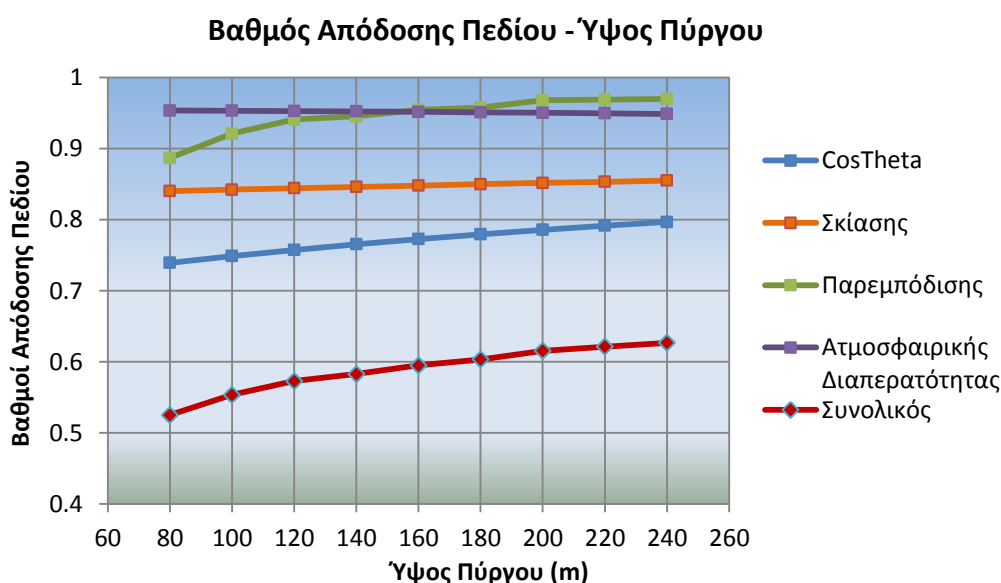
Τιμές μικρότερες από 100 \$ / m<sup>2</sup> (εκφρασμένων σε \$ του 2006) κρίνονται αρκετά ανταγωνιστικές. Με την πάροδο των χρόνων και τη μαζικοποίηση της παραγωγής ηλιοστατών, οι τιμές προβλέπεται να μειωθούν κι άλλο, καθιστώντας την τεχνολογία αυτή ακόμα πιο ελκυστική.

#### 5.2.4 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.

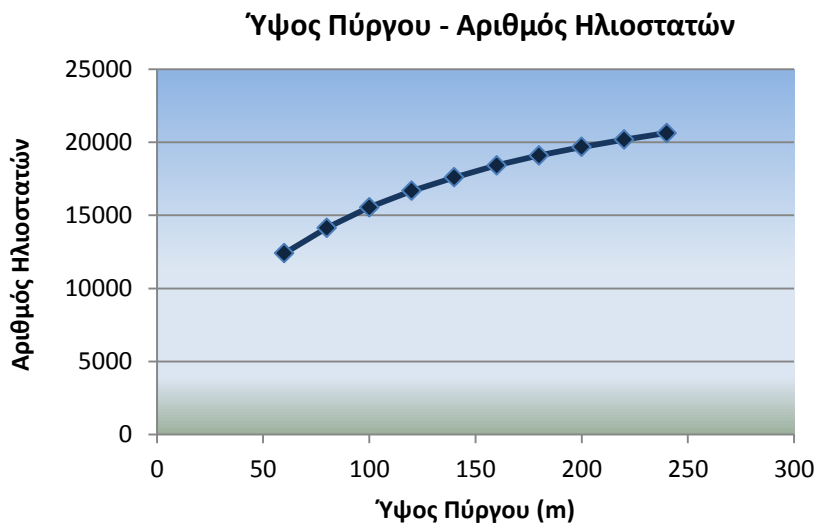
Σε πρώτο στάδιο, αναπτύσσεται ένα ηλιοστατικό πεδίο με τα εξής χαρακτηριστικά: Ύψος Πύργου 160m, ηλιοστάτες διαστάσεων 3.8 x 5 m, διάκενα μεταξύ τους 0.5m, απόσταση πρώτης σειράς από τον πύργο 100m και θέση πύργου με συντεταγμένες X, Y κατά EGSA (694700,3876200). Με καθορισμένη πλέον διάταξη πεδίου και γνωστές τις συντεταγμένες κάθε ηλιοστάτη, υπολογίζεται η απόδοση του πεδίου για διαφορετικά ύψη πύργου σε ένα εύρος 80 – 240m. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα, καθώς και στον πίνακα ΠΑ-3 του παραρτήματος. Οι βαθμοί απόδοσης είναι μέσοι ετήσιοι για όλο το πεδίο στο σύνολό του, και υπολογίζονται με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως.



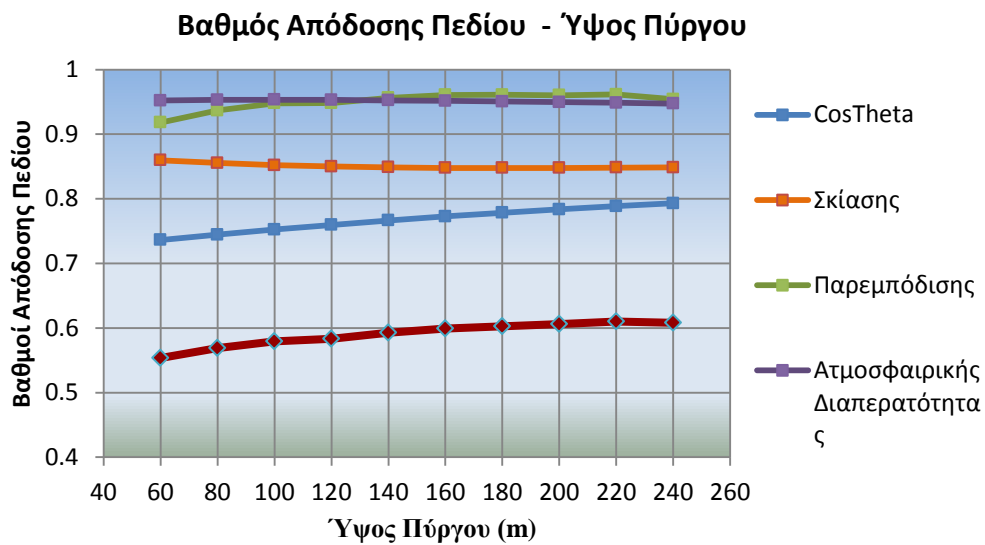
*Σχήμα 5.14 Επίδραση του ύψους πύργου στο μέσο ετήσιο βαθμός απόδοσης συγκεκριμένου ηλιοστατικού πεδίου*

Παρατηρούμε ότι 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. Οι απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, απεναντίας, όπως είναι και λογικό αυξάνονται όσο ψηλότερος είναι ο πύργος, καθώς οι ανακλώμενες δέσμες ακτίνων χρειάζεται να διανύσουν μεγαλύτερη συνολικά απόσταση μέχρι να φτάσουν στον κεντρικό δέκτη. Τα παραπάνω αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα και συμφωνούν με τη βιβλιογραφία [36],[38]. Καταρχήν, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του πεδίου αυξάνεται με το ύψος του πύργου, αλλά ο ρυθμός αύξησης σε μεγάλα ύψη μειώνεται, κυρίως λόγω της αύξησης των απωλειών ατμοσφαιρικής διαπερατότητας και πάνω από μια τιμή ύψους αναμένεται ότι μπορεί να υπάρξει μείωση του.

Στην παραπάνω μελέτη υπολογίσαμε την επίδραση του ύψους του πύργου στην απόδοση ενός συγκεκριμένου ηλιοστατικού πεδίου. Ωστόσο, η μεταβολή του ύψους του πύργου επιδρά κατά τη σχεδίαση του ηλιοστατικού πεδίου στη διάταξή του. Στο σημείο αυτό λοιπόν, θα εξετάσουμε για διαφορετικές τιμές ύψους πύργου, πώς μεταβάλλεται το πεδίο (που αναπτύσσεται σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο) και συγκεκριμένα ο αριθμός ηλιοστατών, καθώς και η απόδοσή του. Προς την κατεύθυνση αυτή, διατηρήσαμε σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους σχεδίασης του πεδίου όπως στην προηγούμενη περίπτωση και για κάθε ύψος πύργου στο διάστημα 60 - 240 m με βήμα 20m, σχεδιάζουμε το αντίστοιχο πεδίο και υπολογίζουμε το μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης του. Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα ΠΑ-4 του παραρτήματος, ενώ η συσχέτιση των παραμέτρων συνοψίζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



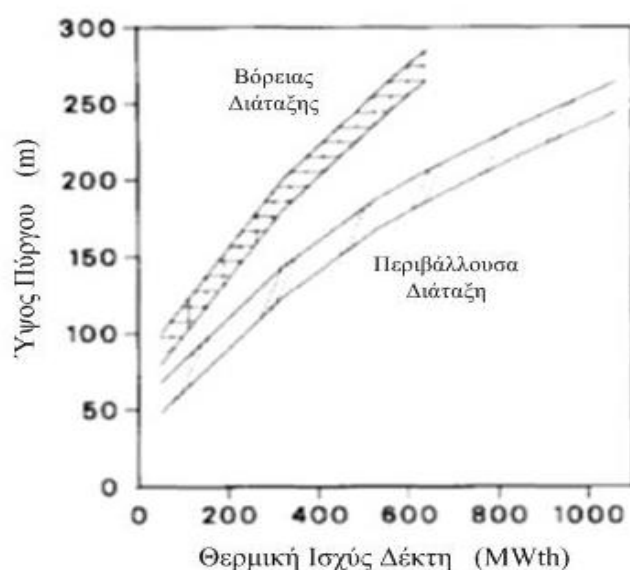
Σχήμα 5.15 Αριθμός ηλιοστατών συναρτήσει του ύψους του πύργου



Σχήμα 5.16 Βαθμός απόδοσης πεδίου συναρτήσει του ύψους του πύργου

Δηλαδή, ένας ψηλότερος πύργος μπορεί στην ουσία, να εξασφαλίσει 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. Σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης παρεμπόδισης φαίνεται να παρουσιάζει μικρότερο ρυθμό αύξησης, ενώ ο βαθμός απόδοσης σκίασης φαίνεται να παρουσιάζει μια μικρή ελάττωση. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι παρόλο που γενικά το ύψος του πύργου επιδρά θετικά στις απώλειες αυτές, εν προκειμένω, η αύξηση του ύψους οδηγεί σε πιο πυκνή διάταξη πεδίου με περισσότερους ηλιοστάτες σε απομακρυσμένες από τον πύργο περιοχές, όπου η σκίαση και η παρεμπόδιση είναι εν γένει μεγαλύτερες. Ωστόσο, η μείωση που παρατηρείται στο βαθμό απόδοσης λόγω σκίασης είναι ελάχιστη και για ύψη πύργου > 120m θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι σχεδόν σταθερή. Είναι λοιπόν σαφές ότι περιορισμοί στο ύψος του πύργου τίθενται κυρίως από τις απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας και από το κόστος.

Ένας ακόμη παράγοντας, που επηρεάζει τον καθορισμό του ύψους του πύργου είναι και η θερμική ισχύς του κεντρικού ηλιακού δέκτη. Διαφωτιστικό όσο αναφορά στη συσχέτιση των δύο μεγεθών είναι το σχήμα που ακολουθεί.

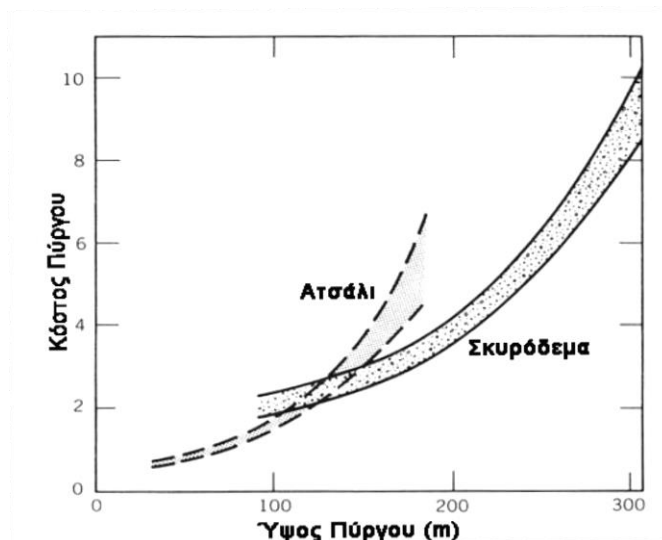


Σχήμα 5.17 Ύψος Πύργου συναρτήσει της Θερμικής Ισχύος του Κεντρικού Δέκτη. [36]

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. Επιπλέον περιορισμοί, τίθενται ανάλογα με τα φορτία ανέμου και σεισμών της περιοχής. [36]

Τέλος, ιδιαίτερα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή του ύψους του πύργου αποτελεί το κόστος του, το οποίο αυξάνεται εκθετικά με το ύψος. Οι πύργοι μπορούν να κατασκευαστούν είτε από ασάλινους βραχίονες σε δικτύωμα, είτε από ενισχυμένο

σκυρόδεμα. Όπως προκύπτει και από το παρακάτω 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]



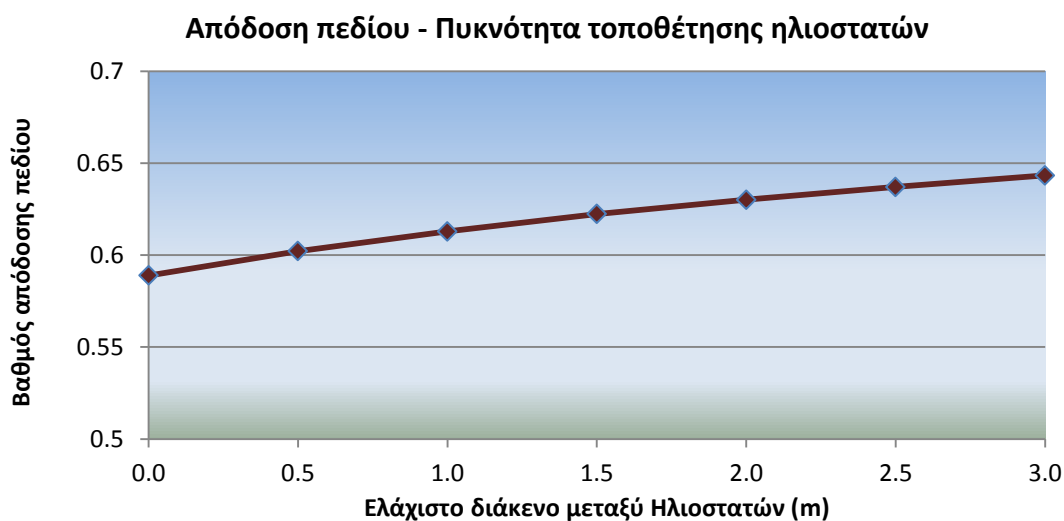
Σχήμα 5.18 Κόστος Πύργου συναρτήσει του ύψους του [37]

### 5.2.5 Πυκνότητα διάταξης ηλιοστατών

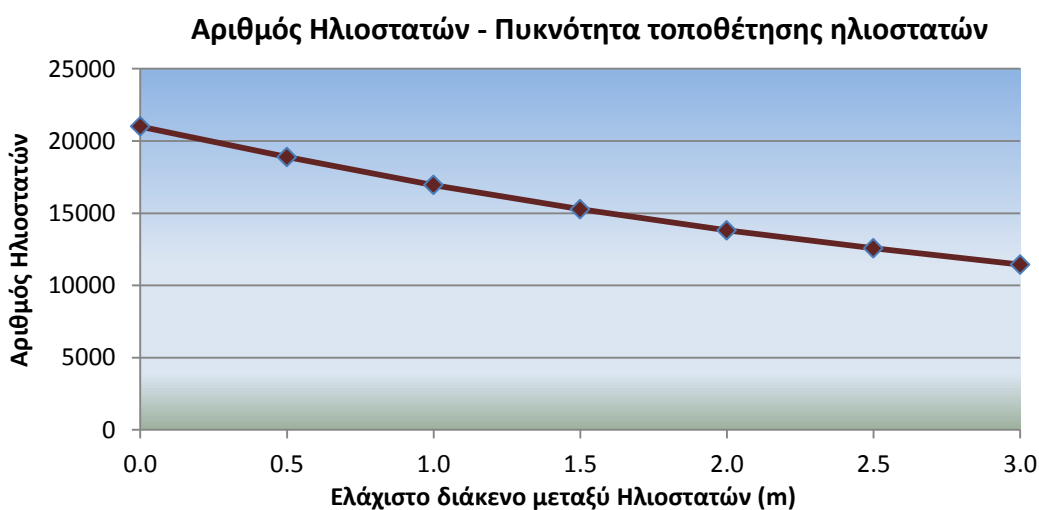
Το πλήθος των ηλιοστατών έχει άμεση σχέση με την παραγόμενη ισχύ του σταθμού. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας και συνεπώς ο λόγος συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να επιτευχθεί στο δέκτη. Ωστόσο, όσο 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. Για το λόγο αυτό η αύξηση του αριθμού των ηλιοστατών σε ένα πεδίο, αυξάνει μεν τη θερμική ισχύ που συγκεντρώνεται στον κεντρικό δέκτη αλλά ανάλογα και με τη διάταξη που χρησιμοποιείται, λειτουργεί σε γενικές γραμμές επιβαρυντικά στο βαθμό απόδοσης του [55].

Στην παρούσα σύγκριση πεδίων οι παράμετροι που μεταβάλλονται είναι τα ελάχιστα διάκενα μεταξύ των ηλιοστατών. Στην παρούσα ανάλυση θεωρούμε ηλιοστάτες 3.8 x 5 m. Δίνουμε την ίδια τιμή στα δύο διάκενα (πλευρικό και ακτινικό) σε ένα εύρος από 0 έως 3 m μεταξύ τους, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους σχεδίασης: ύψος πύργου 160m, απόσταση πρώτης σειράς από τον πύργο 100m και θέση πύργου με συντεταγμένες X, Y κατά EGSA (694700,3876200). Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλουμε τον αριθμό ηλιοστατών στο πεδίο εξετάζοντας την απόδοση του για

την πυκνότερη δυνατή τοποθέτηση ηλιοστατών (με μηδενικό διάκενο μεταξύ τους) καθώς και στη συνέχεια για λιγότερο πυκνά πεδία.



Σχήμα 5.19 Απόδοση πεδίου συναρτήσει των ελάχιστων διακένων μεταξύ ηλιοστατών



Σχήμα 5.20 Μεταβολή αριθμού ηλιοστατών συναρτήσει των ελάχιστων διακένων μεταξύ των ηλιοστατών

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται τα διάκενα μεταξύ των ηλιοστατών, η συνολική απόδοση του πεδίου αυξάνεται καθώς βελτιώνονται σημαντικά οι απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης. Ωστόσο, παράλληλα μειώνεται ο αριθμός των ηλιοστατών και μειώνεται η συνολική επιφάνεια συγκέντρωσης των ηλιακών ακτίνων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται στον πίνακα ΠΑ-5 του παραρτήματος. Η τελική επιλογή διακένων προσπαθεί να επιτύχει τον βέλτιστο συνδυασμό βαθμού απόδοσης πεδίου και αριθμού ηλιοστατών, σύμφωνα με την επιθυμητή θερμική ισχύ της εγκατάστασης και τα αντίστοιχα κόστη.



## 5.3 Χαρακτηριστικά Προτεινόμενης Εγκατάστασης

### 5.3.1 Παράμετροι Σχεδίασης Ηλιοστατικού Πεδίου

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω χαρακτηριστικά, μελετήθηκαν διάφορες περιπτώσεις σε ένα πεδίο τιμών των παραμέτρων σχεδίασης, που κρίθηκαν ως καταλληλότερες για το προς ανάπτυξη πεδίο στον Αθρινόλακκο. Το τελικό πεδίο που προτείνεται στο παρόν κεφάλαιο χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους.

<b>Παράμετροι Σχεδιασμού Πεδίου</b>	
Ύψος πύργου	190 m
Σχήμα Ηλιοστατών	ορθογώνιο
Ύψος ηλιοστατών	3.8 m
Πλάτος ηλιοστατών	5 m
Πλευρικό διάκενο	0.5 m
Ακτινικό διάκενο	0.5 m
Αριθμός Ηλιοστατών	19375
Απόσταση πρώτης σειράς ηλιοστατών από τον πύργο	100 m
Ύψος πυλώνα στήριξης ηλιοστατών	1 m
Συντεταγμένη X του πύργου	694 600
Συντεταγμένη Y του πύργου	3 876 200
Μέγιστη κλίση εδάφους για τοποθέτηση ηλιοστάτη	30 %

Οι παραπάνω παράμετροι επιλέχθηκαν για τον Αθρινόλακκο, έτσι ώστε να τοποθετηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι ηλιοστάτες στη διαθέσιμη έκταση και να είναι δυνατή η κατασκευή σταθμού ισχύος 50 MWe με σύστημα αποθήκευσης. Το ύψος του πύργου (190m) μπορεί να οδηγεί σε ακριβότερη κατασκευή, ωστόσο κρίνεται αναγκαίο, ώστε να τοποθετηθούν περισσότεροι ηλιοστάτες και να επιτευχθεί η ζητούμενη παραγωγή ενέργειας.

### **Χαρακτηριστικά Πεδίου**

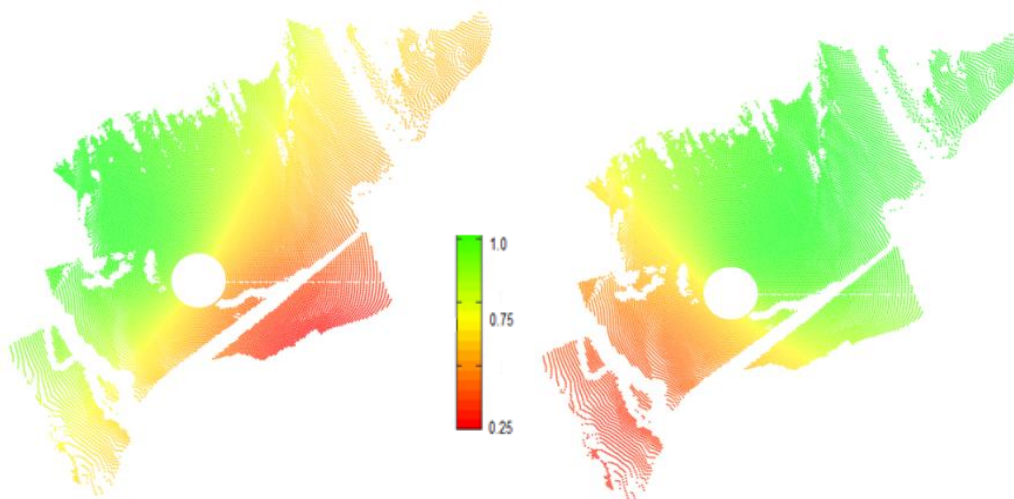
Γεωγραφικό Μήκος	26.136°
Γεωγραφικό Πλάτος	35.013°
Ζώνη Ώρας	+ 2
Χρήση Θερινής Ώρας	Ναι
Χρονικό διάστημα προσομοίωσης	01/01/2009 - 31/12/2009
Χρονικό βήμα αναλυτικού υπολογισμού απωλειών πεδίου	1 ώρα

### 5.3.2 Απώλειες Ηλιοστατικού Πεδίου

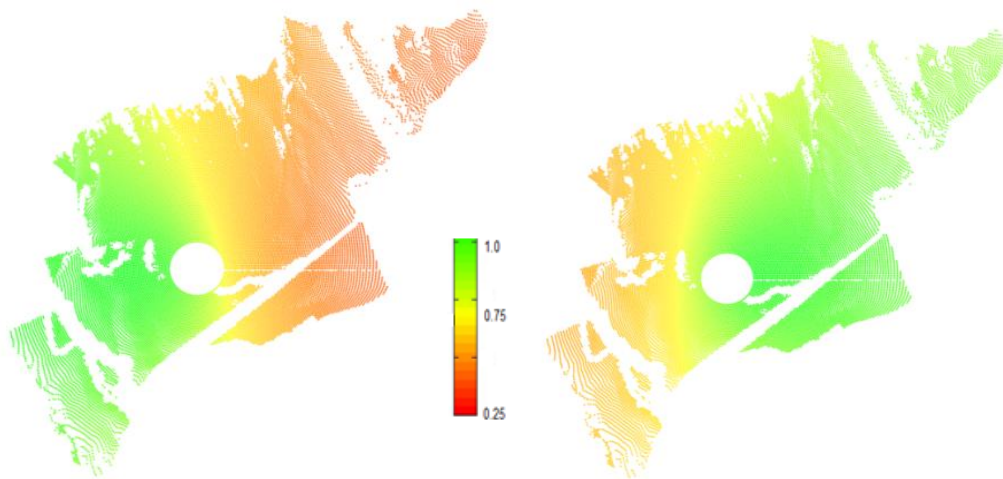
Στην ανάλυση που πραγματοποιείται στο κεφάλαιο αυτό για το δεδομένο πεδίο, υπολογίζονται οι απώλειες του πεδίου (συνημιτόνου, σκίασης, παρεμπόδισης, ατμοσφαιρικής διαπερατότητας), μέσω των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν προηγουμένως στα αντίστοιχα κεφάλαια. Ο υπολογισμός γίνεται για χρονικό διάστημα ενός έτους - εν προκειμένω για το 2009 για το οποίο γίνεται η εύρεση της θέσης του ήλιου – και για χρονικό βήμα 1 ώρας.

#### Απώλειες Συνημιτόνου

Οι απώλειες συνημιτόνου, όπως αναφέρθηκε είναι οι σημαντικότερες που παρουσιάζονται σε ένα πεδίο. Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζεται η εικόνα του πεδίου με κριτήριο τις απώλειες συνημιτόνου του κάθε ηλιοστάτη για δύο χαρακτηριστικές ώρες της ημέρας για μια τυπική χειμερινή και μια καλοκαιρινή ημέρα. Τις πρωινές ώρες όπου ο ήλιος βρίσκεται προς την ανατολή, οι ηλιοστάτες που είναι τοποθετημένοι δυτικά του πύργου παρουσιάζουν πολύ καλύτερη απόδοση. Το αντίθετο συμβαίνει το απόγευμα. Το συμπέρασμα που προκύπτει άμεσα από την εποπτεία των εικόνων αυτών είναι το αναμενόμενο: οι ηλιοστάτες που βρίσκονται μεταξύ του πύργου και του ήλιου παρουσιάζουν σημαντικές απώλειες συνημιτόνου καθώς αναγκάζονται να τοποθετήσουν πιο οριζόντια την επιφάνεια τους για να ανακλάσουν τις ηλιακές ακτίνες στο δέκτη. Απεναντίας οι ηλιοστάτες που βρίσκονται απέναντι από τον ήλιο παρουσιάζουν χαμηλότερες απώλειες και συνεπώς μεγάλο βαθμό απόδοσης (πράσινες περιοχές).



Σχήμα 5.21 Βαθμός απόδοσης συνημιτόνου ηλιοστατών πεδίου κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο α) στις 10.00 , β) στις 17.00

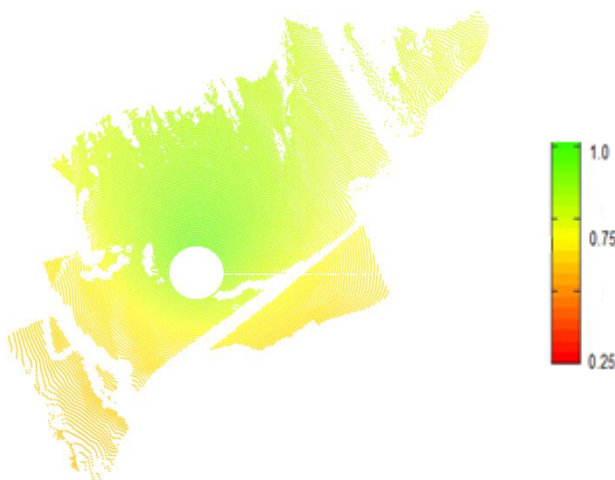


Σχήμα 5.22 Βαθμός απόδοσης συνημιτόνου ηλιοστατών πεδίου κατά το θερινό ηλιοστάσιο α) στις 10.00 , β) στις 17.00

Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται για κάθε ηλιοστάτη για τη διάρκεια ενός έτους από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου (N=1) μέχρι την 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου (N=365) ανά μία ώρα (dt=1). Για κάθε μέρα υπολογίζονται μετά την ανατολή του ήλιου, από την πρώτη ώρα, όπου το ηλιακό ύψος λαμβάνει θετική τιμή,  $t_f$  μέχρι και τη δύση του, όπου με  $t_i$  συμβολίζεται η τελευταία ώρα μιας ημέρας με θετικό ηλιακό ύψος. ( $t_f, t_i = 1 \dots 24$ ). Για τον  $i$ -οστό ηλιοστάτη, ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης συνημιτόνου του, μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\bar{\eta}_{cos}(i) = \frac{\sum_{N=1}^{365} \{ \sum_{t_s=t_f}^{t_i} [\eta_{cos}(t_s, N)] \}}{\sum_{N=1}^{365} [ \sum_{t_s=t_f}^{t_i} dt ]}$$

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται χρωματική αναπαράσταση του εν λόγω πεδίου με κριτήριο το μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης συνημιτόνου κάθε ηλιοστάτη, όπου παρατηρούμε το σαφές πλεονέκτημα των ηλιοστατών που είναι τοποθετημένοι στο βόρειο τμήμα του πεδίου και έχουν τον ήλιο «απέναντι» κατά το μεγαλύτερο τμήμα του έτους.

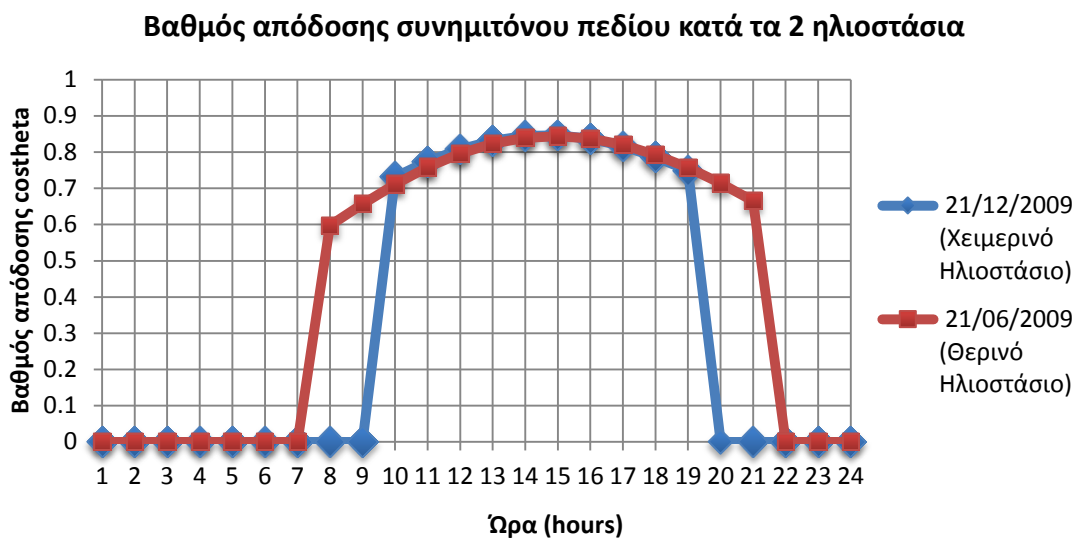


Σχήμα 5.23 Μέσος Ετήσιος Βαθμός Απόδοσης συνημιτόνου ηλιοστατών πεδίου

Ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης συνημιτόνου του πεδίου υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_{cos} = \frac{\sum_{i=1}^{19375} [\bar{\eta}_{cos}(i)]}{19375} = 78.12 \%$$

Τέλο, στο παρακάτω διάγραμμα σημειώνονται οι μέσοι ωριαίοι βαθμοί απόδοσης του πεδίου κατά το χειμερινό και θερινό ηλιοστάσιο αντίστοιχα. Η διαφορά στην έκταση των καμπυλών στον άξονα x οφείλεται προφανώς στη μικρότερη διάρκεια της ημέρας κατά το χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι. Παρατηρούμε ότι η απόδοση του πεδίου δε διαφέρει σημαντικά για τις 2 αυτές ημέρες. Η σταθερή σχετικά απόδοση των ηλιοστατών κατά τη διάρκεια του έτους είναι χαρακτηριστικό πεδίων περιβάλλουσας διάταξης, ενώ σε πεδία βόρειας διάταξης αναμένεται το χειμώνα ο βαθμός απόδοσης συνημιτόνου να είναι μεγαλύτερος.



Σχήμα 5.24 Χρονοσειρά βαθμού απόδοσης συνημιτόνου πεδίου για τα δύο ηλιοστάσια

### Απώλειες σκίασης και παρεμπόδισης

Καθώς οι βαθμοί απόδοσης αυτοί, προκύπτουν ανά μία ώρα ως μέσοι βαθμοί όλου του πεδίου, ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης σκίασης και ο αντίστοιχος παρεμπόδισης, υπολογίζονται ως εξής:

$$\eta = \frac{\sum_{N=1}^{365} \{ \sum_{t_s=ts}^{t_f} [\eta(t_s)] \}}{\sum_{N=1}^{365} [ \sum_{t_s=ts}^{t_f} dt ]}$$

Οι αντίστοιχοι βαθμοί απόδοσης του πεδίου είναι:

$$\eta_{sh} = 84.94\% \quad \text{και} \quad \eta_{bl} = 97.61\%$$

Για τις απώλειες αυτές, ορίζουμε και το βαθμό απόδοσης σταθμισμένο ως προς την άμεση ηλιακή ακτινοβολία DNI:

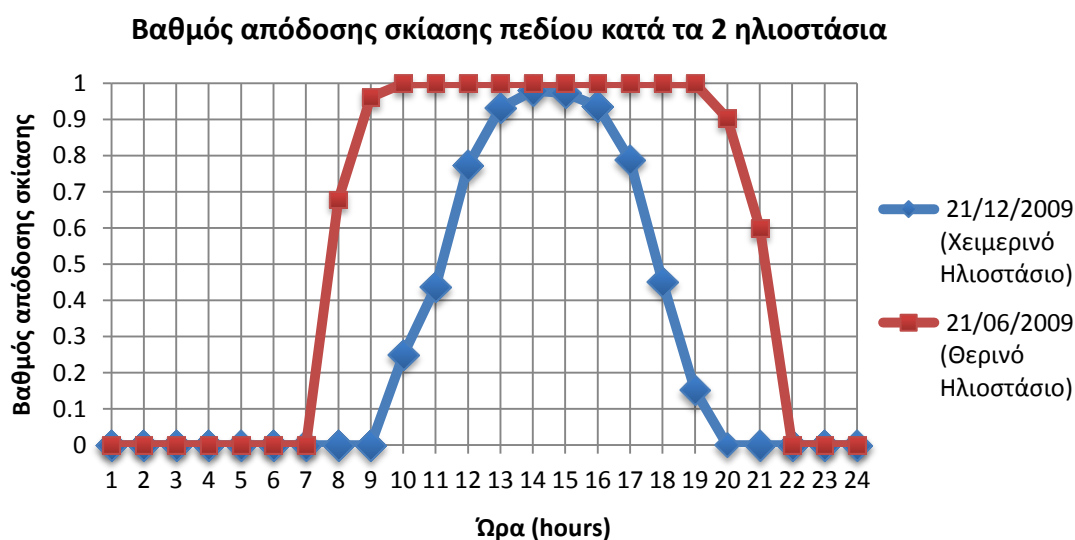
$$\eta = \frac{\sum_{N=1}^{365} \{ \sum_{ts=tf}^{tl} [\eta(t_s) * DNI] \}}{\sum_{N=1}^{365} [ \sum_{ts=tf}^{tl} DNI dt ]}$$

Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, προκύπτουν οι εξής βαθμοί απόδοσης:

$$\eta_{sh} = 93.2 \% \quad \text{και} \quad \eta_{bl} = 97.7 \% \quad (DNI \text{ adjusted})$$

Παρατηρούμε ότι ο σταθμισμένος ως προς την ηλιακή ακτινοβολία, βαθμός απόδοσης σκίασης, είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον προηγουμένως ορισμένο βαθμό απόδοσης σκίασης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι κατά τις ώρες, όπου το ηλιακό ύψος είναι μικρό, δηλαδή τις πρωινές και απογευματινές ώρες και ιδιαίτερα το χειμώνα, οι απώλειες αυτές είναι σημαντικές, ενώ οι τιμές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερες. Όσο το ηλιακό ύψος αυξάνεται, τόσο βελτιώνονται οι απώλειες αυτές και για τις κοντινές στο ηλιακό μεσημέρι ώρες όπου παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές DNI, οι απώλειες αυτές σχεδόν μηδενίζονται και ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης τείνει στη μονάδα. Από την άλλη, παρατηρούμε ότι οι βαθμοί απόδοσης λόγω παρεμπόδισης είναι σχεδόν ίσοι, καθώς οι αντίστοιχες απώλειες είναι σχεδόν σταθερές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο βαθμός απόδοσης λόγω παρεμπόδισης, άλλωστε, εξαρτάται κυρίως από τη διάταξη του πεδίου και λιγότερο από τη θέση του ήλιου.

Για καλύτερη κατανόηση, παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα, όπου παρίσταται η εξέλιξη του βαθμού απόδοσης σκίασης του πεδίου κατά τη διάρκεια μιας τυπικής χειμερινής και μιας καλοκαιρινής ημέρας. Ιδιαίτερα, για το καλοκαίρι παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης του πεδίου είναι σχεδόν ίσος με τη μονάδα για τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 5.25 Χρονοσειρά βαθμού απόδοσης σκίασης πεδίου για τα δύο ηλιοστάσια

## Απώλειες ατμοσφαιρικής διαπερατότητας

Το πεδίο παρουσιάζει μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης ατμοσφαιρικής διαπερατότητας ίσο με:

$$\eta_{atten} = 95.04 \%$$

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των απωλειών όπως περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο, λαμβάνει εξάρτηση των απωλειών αυτών μόνο από την απόσταση των ηλιοστατών από τον δέκτη. Έτσι, υπολογίζεται ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης για κάθε ηλιοστάτη ξεχωριστά και στη συνέχεια αθροίζοντας τους, και διαιρώντας με το πλήθος των ηλιοστατών, προκύπτει ο μέσος βαθμός απόδοσης του πεδίου. Η τιμή αυτή είναι σταθερή για το πεδίο για κάθε χρονική στιγμή και αρκεί να υπολογιστεί μια φορά.

## Λοιπές απώλειες πεδίου

Οι απώλειες ανακλαστικότητας των ηλιοστατών καθώς και οι απώλειες διαρροής έχουν θεωρηθεί σταθερές στην παρούσα εργασία, όπως εξηγείται στις αντίστοιχες παραγράφους του 4ου κεφαλαίου. Υπενθυμίζονται οι αντίστοιχοι βαθμοί απόδοσης:

$$\eta_{refl} = 89\% \text{ και } \eta_{spill} = 98\% \text{ αντίστοιχα.}$$

### 5.3.3 Θερμική Ισχύς στην Επιφάνεια του Δέκτη

Η εισερχόμενη θερμική ισχύς στην επιφάνεια του ηλιακού δέκτη από τους ηλιοστάτες του πεδίου υπολογίζεται για όλο το έτος και για χρονικό βήμα δεκαλέπτου από τον τύπο:

$$\dot{Q}_{inc} = N \cdot A_{hs} \cdot DNI \cdot \eta_{field} \cdot C_{av} \cdot i_{wind}$$

όπου  $N$ : ο αριθμός των ηλιοστατών του πεδίου,

$A_{hs}$ : το εμβαδόν της επιφάνειας του ηλιοστάτη ( $m^2$ ),

$DNI$ : η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ηλιοστατικό πεδίο σε  $W/m^2$  (ανά δεκάλεπτο),

$\eta_{field}$ : ο βαθμός απόδοσης του ηλιοστατικού πεδίου, όπως ορίστηκε στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο ( $\eta_{field} = \eta_{cos} \cdot \eta_{sh} \cdot \eta_{bl} \cdot \eta_{atten} \cdot \eta_{refl} \cdot \eta_{spill}$ ). Οι τρεις πρώτοι, για οικονομία υπολογιστικού χρόνου, υπολογίζονται για χρονικό βήμα μίας ώρας. Έπειτα

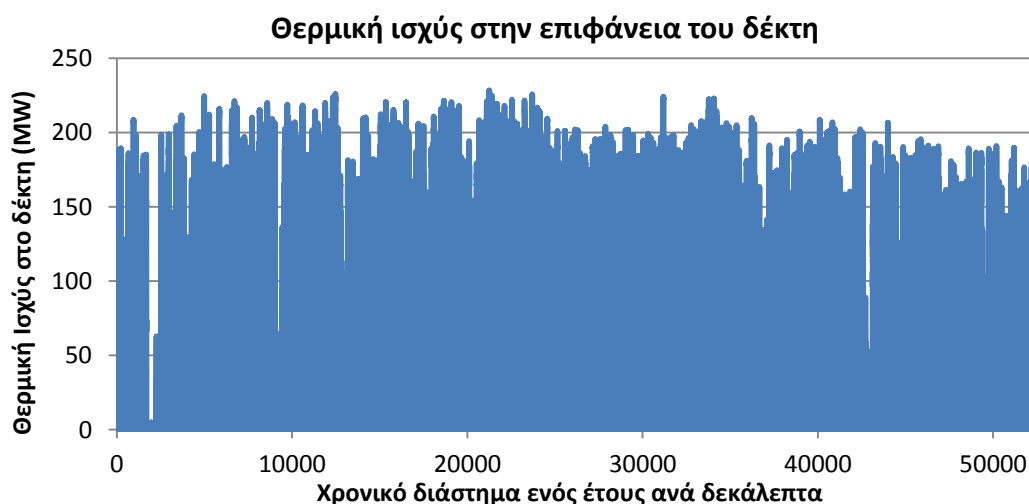
με γραμμική παρεμβολή στους βαθμούς απόδοσης του πεδίου της προηγούμενης και επόμενης ώρας, υπολογίζονται οι αντίστοιχοι βαθμοί απόδοσης για κάθε δεκάλεπτο.

$C_{av}$ : εκφράζει το ποσοστό των ηλιοστατών που είναι εστιασμένοι στον κεντρικό δέκτη (σε θέση λειτουργίας). Στην παρούσα εργασία, λαμβάνεται πάντα ίσος με τη μονάδα ( $C_{av} = 1$ ).

$i_{wind}$ : συντελεστής ανέμου, ο οποίος λαμβάνει την τιμή 1 ή 0 αντίστοιχα αν η τιμή του ανέμου επιτρέπει ή όχι τη λειτουργία των ηλιοστατών. Το πιο σύνηθες μέγιστο όριο ανέμου για το οποίο λειτουργούν κανονικά οι ηλιοστάτες είναι τα 14m/s. Για λόγους ασφαλείας, αν υπάρξει μία μέτρηση ταχύτητας ανέμου  $> 14\text{m/s}$  για κάποιο δεκάλεπτο, η τιμή αυτή δίνεται σε όλη την ώρα (στα 3 προηγούμενα και τα 3 επόμενα δεκάλεπτα). Πρακτικά, οι ηλιοστάτες για την ώρα αυτή απεστιάζονται από το δέκτη και διατηρούν τη θέση ισορροπίας με αποτέλεσμα μηδενική συγκέντρωση ακτινοβολίας στον δέκτη.

Οι τιμές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και ανέμου του πεδίου, που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση, μου δόθηκαν με ακρίβεια δεκαλέπτου για το έτος 2009, από το αρχείο της εταιρείας NUR-MOH A.E. Επιπλέον, να αναφερθεί εδώ ότι στο ίδιο αρχείο περιέχονταν και οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος στην περιοχή, επίσης ανά δεκάλεπτο, οι οποίες απαιτούνται για τον υπολογισμό των απωλειών του δέκτη, όπως περιγράφονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Εφαρμόζοντας λοιπόν τον παραπάνω τύπο για κάθε δεκάλεπτο, λαμβάνουμε την θερμική ισχύ που συγκεντρώνεται κάθε χρονική στιγμή στην επιφάνεια του δέκτη, όπως εμφανίζεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

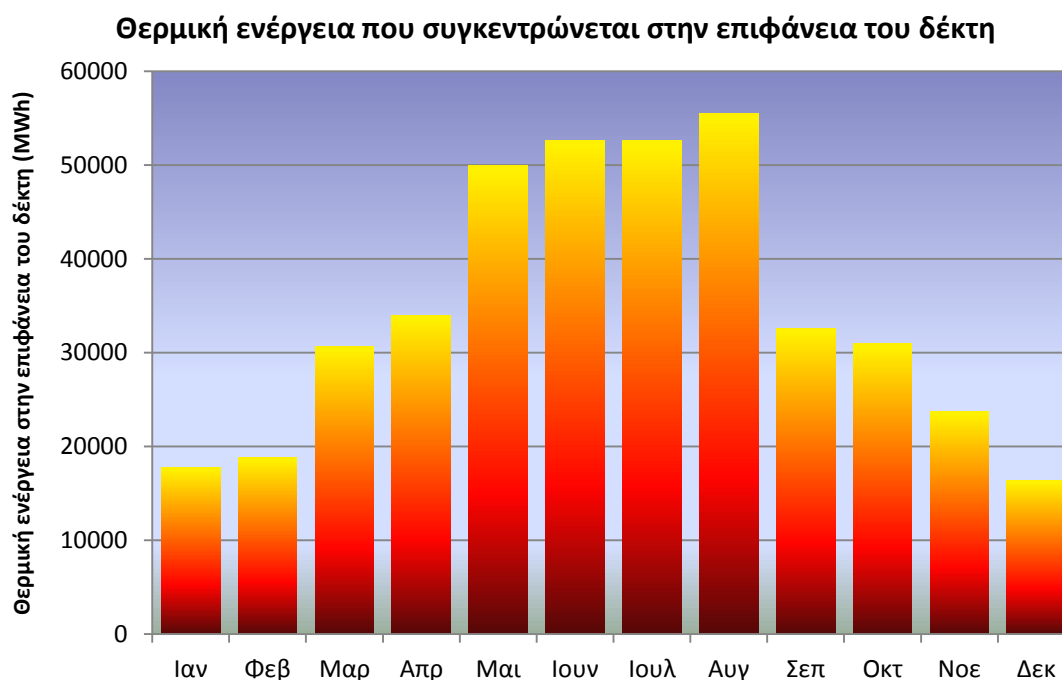


Σχήμα 5.26 Ετήσια Χρονοσειρά θερμικής ισχύος στην επιφάνεια του δέκτη

Η παραπάνω χρονοσειρά, που αποτελείται από τις τιμές θερμικής ισχύος που συγκεντρώνεται στο δέκτη ανά δεκάλεπτο περιέχεται στο αρχείο Thermal Output.txt, το οποίο επισυνάπτεται στο CD της εργασίας.



Προσθέτοντας την εισερχόμενη από το πεδίο θερμική ισχύ στο δέκτη ανά δεκάλεπτο για κάθε μήνα του έτους και διαιρώντας με το 6 εξάγουμε τις μηνιαίες τιμές, οι οποίες απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.27 Μηνιαίες τιμές θερμικής ενέργειας συγκεντρωμένης στον κεντρικό δέκτη

### 5.3.4 Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση του Δέκτη

Καθώς οι τιμές της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων της εγκατάστασης βασίζεται σε μια συγκεκριμένη στιγμή, η οποία είναι γνωστή ως σημείο σχεδίασης. Η σωστή επιλογή του σημείου αυτού είναι μείζονος σημασίας, ώστε να προκύψει το επιθυμητό προφίλ παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει του χρόνου. Ένα σημείο σχεδίασης, επιλεγμένο σε ημέρα με πολύ υψηλές τιμές συγκεντρωμένης θερμικής ισχύος, επιτρέπει στα υποσυστήματα του σταθμού να λειτουργούν με μεγάλες ροές ενέργειας σε περιπτώσεις έντονης ηλιοφάνειας. Ωστόσο, ελοχεύει ο κίνδυνος υπερδιαστασιολόγησης τους, με αποτέλεσμα τη μείωση του ετήσιου βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, ως αποτέλεσμα της λειτουργίας των διάφορων εξαρτημάτων για μεγάλα χρονικά διαστήματα εκτός του σημείου σχεδίασης τους. Από την άλλη, καθορισμός του σημείου σχεδίασης για συντηρητική τιμή θερμικής ισχύος εξασφαλίζει ένα πιο ομοιόμορφο προφίλ παραγόμενης ενέργειας, αλλά ταυτόχρονα σε περιόδους έντονης ηλιοφάνειας θα απορρίπτονται ποσότητες περισσευούμενης ενέργειας.

Στη βιβλιογραφία, η επιλογή του σημείου σχεδίασης για την πλειοψηφία των περιπτώσεων γίνεται για το μεσημέρι της 21<sup>ης</sup> Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο), χωρίς

ωστόσο να αποτελεί κανόνα. Την στιγμή εκείνη αναμένεται υψηλή τιμή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και θεωρείται μια καλή εκτίμηση, καθώς συνήθως οι μετεωρολογικές συνθήκες στα πεδία που εξετάζονται για ανάπτυξη ηλιοθερμικής εγκατάστασης, προσεγγίζουν καλοκαιρινές τιμές κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Στην παρούσα εργασία καθώς έχει γίνει υπολογισμός της χρονοσειράς της θερμικής ισχύος που συγκεντρώνεται στο δέκτη καθόλη τη χρονιά, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.26, υπολογίζουμε τη θερμική χωρητικότητα του δέκτη με βάση αυτή.

Καθώς το πεδίο που αναπτύσσεται για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι περιβάλλουσα διάταξης, καταλληλότερος κρίνεται εξωτερικός δέκτης. Επιπλέον, το σύστημα παραγωγής ενέργειας που μελετάται στον Αθρινόλακκο χαρακτηρίζεται από άμεση ατμοπαραγωγή, χρησιμοποιεί δηλαδή το νερό/ ατμό ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας από τον ηλιακό δέκτη. Στο παρόν κεφάλαιο λοιπόν, θα γίνει μια προκαταρκτική απλοποιητική σχεδίαση ενός εξωτερικού δέκτη με εργαζόμενο ρευστό το νερό/ ατμό. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου δεν είναι ο σχεδιασμός ενός σύνθετου βέλτιστου δέκτη -εργασία η οποία είναι επίπονη και θα μπορούσε να αποτελεί μια ξεχωριστή διπλωματική εργασία- , αλλά κυρίως η εκτίμηση των απωλειών του, ώστε να προσδιοριστεί η τελικώς προσδιδόμενη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο.

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη διαστασιολόγηση του δέκτη στην παρούσα εργασία περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

### Βήμα 1<sup>ο</sup>

Από τη χρονοσειρά της θερμικής ισχύος, που συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του δέκτη κατά τη διάρκεια του έτους, λαμβάνουμε την τιμή 220 MWth ως μια υψηλή τιμή συγκεντρωμένης θερμικής ισχύος στο δέκτη. Ο υπολογισμός των απωλειών του δέκτη και του αντίστοιχου βαθμού απόδοσης του, προϋποθέτει γνώση του εμβαδού της επιφάνειας του δέκτη. Είναι λοιπόν σαφές ότι κατά τη διαστασιολόγησή του, θα ληφθεί μια εκτίμηση σχετικά με τον βαθμό απόδοσης του. Σε πρώτο στάδιο θεωρούμε τυπικές τιμές για τις απώλειες μεταφοράς θερμότητας και ανάκλασης του δέκτη 8% και 5% αντίστοιχα. Η διαστασιολόγηση λοιπόν, του ηλιακού δέκτη γίνεται έτσι, ώστε να είναι δυνατόν να απορροφά θερμότητα ίση με  $220 \cdot 0.92 \cdot 0.95 \text{ MWth} = 192.28 \text{ MWth}$ .

Αποφασίζουμε λοιπόν, να διαστασιολογήσουμε το δέκτη για απορροφώμενη θερμική ισχύ:

$$\dot{Q}_{R\text{ design}} = 190 \text{ MWth.}$$

### Βήμα 2<sup>ο</sup>

Το εργαζόμενο μέσο που πραγματοποιεί το θερμοδυναμικό κύκλο προς παραγωγή ενέργειας στο σταθμό του Αθρινόλακκου, είναι το νερό - ατμός. Πρόκειται για έναν πύργο ηλιακής ισχύος άμεσης ατμοποίησης, όπου το εργαζόμενο μέσο μεταφοράς θερμότητας στο οποίο προσδίδεται η θερμότητα από τον δέκτη είναι το ίδιο με αυτό που εκτονώνεται στον στρόβιλο. Στο ονομαστικό σημείο σχεδίασης του κυκλώματος έχουν καθοριστεί οι συνθήκες του ατμού στην είσοδο και την έξοδο του από το

δέκτη, καθώς και η παροχή του, για την εκτόνωση του στον αμοστρόβιλο προς παραγωγή ισχύος 50MWe.

Θερμοκρασία και πίεση νερού κατά την είσοδο του στο δέκτη:

$$T_{in} = 258.4 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad p_{in} = 148.8 \text{ bar}$$

Θερμοκρασία και πίεση νερού κατά την έξοδο του από το δέκτη:

$$T_{out} = 542.9 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad p_{out} = 144.9 \text{ bar}$$

Παροχή μάζας ατμού για τον αμοστρόβιλο:  $\dot{m}_{turb} = 56.55 \text{ kg/s}$

Από τις παραπάνω συνθήκες και με χρήση του διαγράμματος του Mollier για ατμό βρίσκουμε τις αντίστοιχες ενθαλπίες.

Ενθαλπία εισερχόμενου στο δέκτη νερού:  $h_{in} = 1126.12 \text{ kJ/kg}$

Ενθαλπία υπέρθερμου ατμού στην έξοδο του δέκτη:  $h_{out} = 3436.7 \text{ kJ/kg}$

Ενθαλπία κορεσένου ατμού σε ενδιάμεση πίεση (147 bar):  $h_s = 2619.31 \text{ kJ/kg}$

Για τη θέρμανση λοιπόν του ατμού, που θα εκτονωθεί άμεσα στον αμοστρόβιλο, στις κατάλληλες συνθήκες απαιτείται θερμική ισχύς:

$$\dot{Q}_{st,turb} = \dot{m}_{turb}(h_{out} - h_{in}) = 56.55 * (3436.7 - 1126.12) = 130.663 \text{ MWth}.$$

Όπως είπαμε προηγουμένως, η διαστασιολόγηση του δέκτη γίνεται στα 190MWth, η οποία υπερκαλύπτει τη ζητούμενη. Η υπερδιαστασιολόγηση του πεδίου, ώστε να συγκεντρώνει περισσότερη θερμική ισχύ από την απαιτούμενη για την λειτουργία του στροβίλου του αμοηλεκτρικού κυκλώματος των 50MWe έγινε σκόπιμα, καθώς ήταν επιθυμητή η ενσωμάτωση συστήματος αποθήκευσης. Το πλεόνασμα της θερμικής ισχύος κάθε στιγμή, αν υπάρχει, μπορεί λοιπόν να χρησιμοποιηθεί για πρόσδοση θερμότητας στο σύστημα αποθήκευσης.

Συγκεκριμένα, στο σημείο σχεδίασης του σταθμού, η επιπλέον θερμική ισχύς υπολογίζεται:

$$\dot{Q}_{stor} = \dot{Q}_{R_{design}} - \dot{Q}_{st,turb} = 59.337 \text{ MWth}$$

Και μπορούν να θερμανθούν επιπλέον  $\dot{m}_{stor} = \frac{\dot{Q}_{stor}}{(h_{out} - h_{in})} = 25.68 \text{ kg/s}$ .

Ο ατμός αυτός στη συνέχεια μέσω εναλλάκτη θερμότητας θερμαίνει το εργαζόμενο μέσο του συστήματος αποθήκευσης.

Στο σημείο σχεδίασης λοιπόν της εγκατάστασης, η συνολική παροχή νερού – ατμού από τις σωληνώσεις του δέκτη είναι:

$$\dot{m}_{steam} = \dot{m}_{turb} + \dot{m}_{stor} = 82.23 \text{ kg/s}$$

### Βήμα 3<sup>ο</sup>

Από τον ισολογισμό θερμότητας στο δέκτη, η θερμότητα που απαιτείται για ατμοποίηση και υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου στις επιθυμητές συνθήκες εξόδου δίνεται αντίστοιχα από τους παρακάτω τύπους:

$$Q_{ev} = \dot{m}_{steam}(h_s - h_{in})$$

$$Q_{sh} = \dot{m}_{steam}(h_{out} - h_s)$$

Διαιρώντας τις παραπάνω θερμότητες με τον βαθμό απόδοσης του δέκτη (όπως υποθέσαμε παραπάνω =  $0.92 \cdot 0.95$ ), υπολογίζονται οι τιμές θερμότητας που απαιτείται να συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του δέκτη ώστε να προκύψει η απαραίτητη ενθαλπική ανύψωση του ρευστού.

$$Q'_{ev} = Q_{ev} / \eta_{receiver} = 140486.29 \text{ KW}$$

$$\text{και } Q'_{sh} = Q_{sh} / \eta_{receiver} = 76903.86 \text{ KW}$$

### Βήμα 4<sup>ο</sup>

Επειδή στη φάση προκαταρκτικής σχεδίασης της εγκατάστασης δεν έχει καθοριστεί μεθοδολογία στόχευσης των ηλιοστατών στην επιφάνεια του δέκτη, ούτε έχει γίνει ανάλυση της κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του δέκτη, θα ληφθούν τυπικές τιμές από τη βιβλιογραφία. Καταρχήν, τίθεται ένα άνω όριο θερμικής ροής ανά μονάδα επιφάνειας του δέκτη από τα όρια θερμικής αντοχής των υλικών των σωληνώσεων του και από τις απαιτήσεις συναλλαγής θερμότητας σε αυτούς. Αν λοιπόν θεωρήσουμε τυπικές τιμές ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο στην επιφάνεια του δέκτη για ατμοποίηση και στην αντίστοιχη για υπερθέρμανση [94], [95], υπολογίζουμε τις αναγκαίες επιφάνειες του κάθε μέρους:

$$\text{Θερμική ροή στο τμήμα ατμοποίησης: } \text{Flux}_{onEV} = 700 \text{ kW/ m}^2$$

$$\text{Θερμική ροή στο τμήμα υπερθέρμανσης: } \text{Flux}_{onSH} = 300 \text{ kW/m}^2$$

Απαιτούμενη επιφάνεια για ατμοποίηση:

$$A_{ev} = \frac{Q'_{ev}}{\text{Flux}_{onEV}} = \frac{140486.29}{700} \text{ m}^2 = 200.69 \text{ m}^2$$

Απαιτούμενη επιφάνεια για υπερθέρμανση του κορεσμένου ατμού:

$$A_{sh} = \frac{Q'_{sh}}{\text{Flux}_{onSH}} = \frac{76903.86}{300} \text{ m}^2 = 256.35 \text{ m}^2$$

Η συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του δέκτη προκύπτει από το άθροισμα τους:

$$A_{receiver} = (A_{ev} + A_{sh}) = 457.04 \text{ m}^2 \approx 460 \text{ m}^2$$

και τα ποσοστά της επιφάνειας του δέκτη, που αντιστοιχούν σε ατμοποίηση και υπερθέρμανση του νερού-ατμού αντίστοιχα είναι:

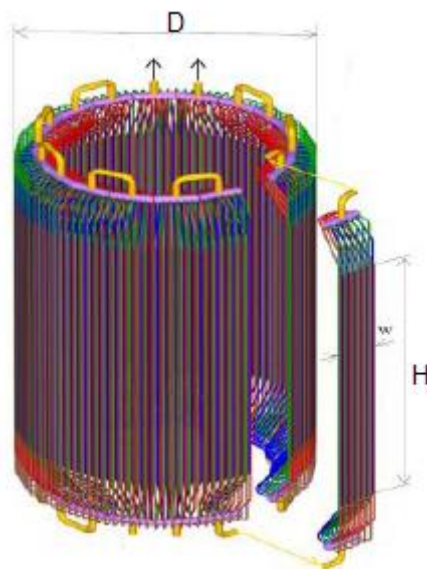
$$\lambda_{ev} = \frac{A_{ev}}{A_{receiver}} = \frac{200.69}{457.04} = 0.439 \quad \text{και} \quad \lambda_{sh} = 1 - \lambda_{ev} = 0.557$$

### Βήμα 5<sup>ο</sup>

Θεωρώντας λοιπόν, κυλινδρική διαμόρφωση δέκτη διαμέτρου  $D_R$ , ύψους  $H_R$  και με λόγο ύψους προς διάμετρο  $\frac{H_R}{D_R} = 1.4$ , η οποία είναι μια τυπική τιμή που συναντάται στην πλειοψηφία της σχετικής βιβλιογραφίας:

$$\pi D_R * H_R = A_{receiver} \leftrightarrow 1.4 * D_R^2 = \frac{A_{receiver}}{\pi} \leftrightarrow D_R = \sqrt{\frac{A_{receiver}}{1.4 * \pi}}$$

Επομένως,  $D_R = 10.23 \text{ m}$  and  $H_R = 14.32 \text{ m}$ .



Σχήμα 5.28 Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας εξωτερικού κυλινδρικού δέκτη

### 5.3.5 Υπολογισμός Θερμικής Ισχύος προσδιδόμενης στο εργαζόμενο μέσο

Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόζονται όσα περιγράφησαν στο κεφάλαιο 4.3 για τον υπολογισμό των απωλειών του δέκτη, με σκοπό τον τελικό υπολογισμό της θερμικής ισχύος που προσδίδεται στο νερό-ατμό. Παραλείποντας τις απώλειες αγωγής από τον υπολογισμό (ως αμελητέες) και λαμβάνοντας υπόψη, το βαθμό απορρόφησης του δέκτη, καθώς και τις απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας, υπολογίζεται η καθαρή θερμική ισχύς, που προσδίδεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο διατρέχει τις σωληνώσεις του:

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

Όπως περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο θεωρήσαμε βαθμό απόδοσης λόγω ανάκλασης ίσο με  $\eta_{absorp} = 0.95$

Για λόγους πληρότητας επαναλαμβάνονται εδώ οι εξισώσεις υπολογισμού των παραπάνω απωλειών, οι οποίες χρησιμοποιούνται:

$$\dot{Q}_{losses} = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} = \{e_R \cdot \sigma \cdot (\overline{T}_R^4 - T_a^4) + h_c \cdot (\overline{T}_R - T_a)\} \cdot A_R$$

όπου

$$h_c = h_{free} + h_{forced} = 1.973 \cdot 10^{-3} \cdot (T_R - T_a)^{\frac{1}{4}} + Nu_f \left(\frac{k_a}{D_R}\right)$$

$$Nu_f = 0.3 + \frac{0.62 \cdot Re_D^{\frac{1}{2}} \cdot Pr_a^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr_a}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad \text{και} \quad Re_D = 10^3 \cdot \rho_a \cdot D_R \cdot V_a / \mu_a.$$

Προσεγγίζουμε τη θερμοκρασία  $T_R$  με τυπικές τιμές από τη βιβλιογραφία [94]. Μια τυπική θερμοκρασία στην επιφάνεια του δέκτη, όπου συντελείται η ατμοποίηση του νερού είναι:  $T_{ev} = 400^\circ C$ , ενώ αντίστοιχα στο τμήμα υπερθέρμανσης του κορεσμένου νερού:  $T_{sh} = 600^\circ C$ .

Ο υπολογισμός των απωλειών λοιπόν προκύπτει πλέον από το άθροισμα:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{losses} &= \{e_R \cdot \sigma \cdot (T_{ev}^4 - T_a^4) + h_c \cdot (T_{ev} - T_a)\} \cdot A_{ev} \\ &+ \{e_R \cdot \sigma \cdot (T_{sh}^4 - T_a^4) + h_c \cdot (T_{sh} - T_a)\} \cdot A_{sh}. \end{aligned}$$

Οι υπόλοιποι όροι των εξισώσεων:

$$e_R = 0.88 \text{ ο συντελεστής εκπομπής [87]}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$$

Οι ιδιότητες του αέρα περιβάλλοντος λαμβάνονται για μια μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος [88]:

$$\rho_a = 0,6615 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_a = 0,0270 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$k_a = 4,27 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kW}}{\text{mK}}$$

$$Pr_a = 0.69$$

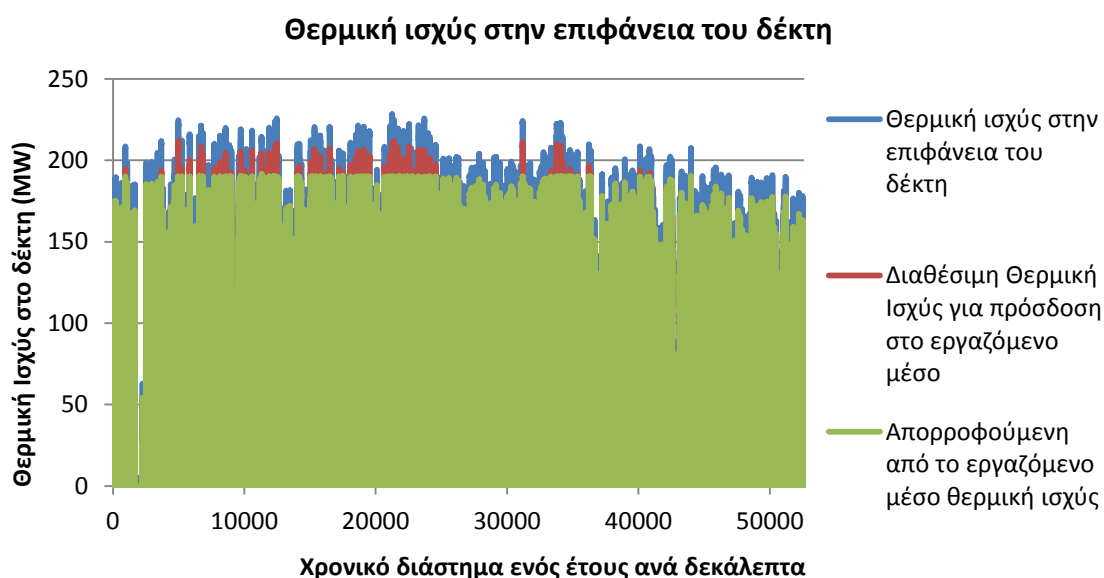
Ενώ από τη διαστασιολόγηση του δέκτη, που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη ανάλυση προέκυψαν τα μεγέθη:

$$A_{ev} = 200.69 \text{ m}^2, \quad A_{sh} = 256.35 \text{ m}^2, \quad D_R = 10.23 \text{ m}$$

Τελικά, ενσωματώνοντας τον αλγόριθμο υπολογισμού των απωλειών του δέκτη στο προηγούμενο μοντέλο προκύπτει η θερμική ισχύς, η οποία προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο.

Συγκεκριμένα στο παρακάτω διάγραμμα αναπαρίστανται:

- ❖ Με μπλέ χρώμα, η χρονοσειρά της θερμικής ισχύος που συγκεντρώνεται από το ηλιοστατικό πεδίο στην επιφάνεια του κεντρικού δέκτη  $\dot{Q}_{inc}$ .
- ❖ Με κόκκινο χρώμα, η θερμική ισχύς που είναι διαθέσιμη για πρόσδοση στο εργαζόμενο μέσο. Στην ουσία, πρόκειται για τη θερμική ισχύ που συγκεντρώνεται κάθε χρονική στιγμή στην επιφάνεια του δέκτη αν αφαιρέσουμε τις απώλειες του τελευταίου  $\dot{Q}_{net}$ .
- ❖ Με πράσινο χρώμα, η θερμική ισχύς που τελικά απορροφάται από το νερό ατμό. Στην ουσία πρόκειται για την ισχύ  $\dot{Q}_{net}$  με ανώτατο όριο τα 190MWth, για τα οποία έχει διαστασιολογηθεί ο δέκτης για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας του, με συνέπεια να μην μπορεί να απορροφήσει την παραπάνω ισχύ  $\dot{Q}_{absorbed}$ .



Σχήμα 5.28 Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας εξωτερικού κυλινδρικού δέκτη

Στην ουσία, οι κόκκινες περιοχές του ανωτέρω διαγράμματος αντιστοιχούν στη διαθέσιμη ισχύ, η οποία απορρίπτεται λόγω αδυναμίας απορρόφησής της από το εργαζόμενο μέσο. Αν το σύστημα είχε διαστασιολογηθεί για μεγαλύτερη ισχύ, οι απώλειες θα μειώνονταν, ωστόσο όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής θα αναγκαζόταν να λειτουργεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα εκτός σημείου σχεδίασης, με χαμηλότερη απόδοση, ενώ ταυτόχρονα το αρχικό κόστος εγκατάστασης θα ήταν μεγαλύτερο.



## 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 πύργων ηλιακής ισχύος. Ο βασικός σκοπός, που δεν ήταν άλλος από την ενασχόληση με μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας, 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 και αποτελούν πολύ ενεργό πεδίο έρευνας σε όλο τον κόσμο.

Πιο συγκεκριμένα, ύστερα από μία συνοπτική παρουσίαση των διαθέσιμων συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, η προσοχή εστιάστηκε στους πύργους ηλιακής ισχύος. Περιγράφηκε αναλυτικά 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.

Ο αλγόριθμος σχεδιασμού ηλιοστατικών πεδίων, που προτείνεται στην παρούσα εργασία λαμβάνει υπόψη την τοπογραφία της περιοχής και δεν θέτει ως προϋπόθεση επίπεδη έκταση, όπως η συντριπτική πλειοψηφία των εμπορικών σχεδιαστικών προγραμμάτων. Από την ανάλυση του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου μάλιστα, αποδεικνύεται η ευελιξία του αλγορίθμου και η ικανότητά του να παράγει πεδία με αρκετά καλό βαθμό απόδοσης. Θα λέγαμε λοιπόν, ότι η παρούσα εργασία συμπληρώνει ένα κενό της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο για την ανάπτυξη ενός ακόμα αποδοτικό-τερου αλγορίθμου.

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. Επίσης, από τη διερεύνηση των παραμέτρων σχεδίασης του πεδίου που πραγματοποιήθηκε στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο βρέθηκαν συσχετίσεις της μεταβολής του βαθμού απόδοσης και του αριθμού ηλιοστατών με χαρακτηριστικά όπως το ύψος του πύργου, τα διάκενα μεταξύ των ηλιοστατών, οι διαστάσεις τους κ.α.

Από την ανάλυση που πραγματοποιήσαμε, κρίνεται ότι το δεδομένο πεδίο στην περιοχή του Αθερινόλακκου μπορεί να υποστηρίξει έναν σταθμό εγκατεστημένης ισχύος 50 MWe με αποθήκευση. Από τη μεταβλητότητα επίσης, των τιμών της θερμικής ισχύος που συγκεντρώνεται στο δέκτη κατά τη διάρκεια της ημέρας φαίνεται η ανάγκη και η μεγάλη χρησιμότητα συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας, ώστε να εξομαλύνεται το προφίλ της παραγόμενης ενέργειας.

Τέλος, από τη μοντελοποίηση του ηλιακού δέκτη, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας, και την ενσωμάτωσή του στον υπολογισμό της τελικής προσδιδόμενης θερμικής ισχύος στο ρευστό λειτουργίας, φαίνεται η πολυπλοκότητα της διάταξης αυτής και η συμβολή της σωστής διαστασιολόγησης του συστήματος αυτού στην τελική θερμική απολαβή του σταθμού.

Σαν σενάριο για μελλοντική έρευνα, θα μπορούσε λοιπόν, να εξεταστεί μια ακριβής σχεδίαση κεντρικού δέκτη και να πραγματοποιηθεί διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων του μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών του μέσω της όσο το δυνατόν πιο οικονομικής κατασκευής.

Επίσης, λόγω της μεταβλητότητας της χρονοσειράς της θερμικής ισχύος που παράγεται από τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα κατά τη διάρκεια κάθε ημέρας, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μοντελοποίηση των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αποθήκευσης και εφεδρικής καύσης σε συνδυασμό μεταξύ τους. Στόχος είναι με την υιοθέτηση κατάλληλων στρατηγικών λειτουργίας και ανάλογη βελτιστοποίηση των υποσυστημάτων να παραχθεί ένα μοντέλο λειτουργίας του σταθμού με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ηλεκτροπαραγωγής (μεγιστοποίηση ετήσιας παραγόμενης ενέργειας / παραγωγή σταθερής ισχύος για όλη τη διάρκεια της ημέρας / αδιάκοπη λειτουργία σε 24ωρη βάση κ.α).

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).

Τέλος, η εξέταση της οικονομικής βιωσιμότητας τέτοιων συστημάτων στην ελληνική επικράτεια και σύγκρισή τους με αντίστοιχες μονάδες φωτοβολταϊκών θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

## Βιβλιογραφία

- [1]. **International Energy Agency.** *World Energy Outlook 2012, Executive summary.* Διαθέσιμο στο: <<http://www.worldenergyoutlook.org>>
- [2]. **Μαρκόπουλος Βασίλειος.** *Σύγκριση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας Με Εφαρμογή Σε Ηλιοθερμικές Ηλεκτροπαραγωγικές Εγκαταστάσεις.* Μεταπτυχιακή Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2012
- [3]. Νόμος υπ' αριθμόν 3851/2010 ΦΕΚ 85Α'/4.6.2010
- [4]. **Omar Behar, Abdallah Khellaf, Kamal Mohammedi.** *A review of studies on central receiver solar thermal power plants.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 23. Elsevier Ltd (2013)
- [5]. **International Energy Agency.** *Technology Roadmap Concentrating Solar Power* (2010). Διαθέσιμο στο: <<http://www.worldenergyoutlook.org>>
- [6]. <<http://www.cspworld.com>> [Ηλεκτρονικό]
- [7]. <<http://www.renewableenergyworld.com>> [Ηλεκτρονικό]
- [8]. **European Commission.** *European Research on Concentrated Solar Thermal Energy.* (EUR 20898). Διαθέσιμο στο: <[http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/cst\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/cst_en.pdf)>
- [9]. <<http://www.calpoly.edu/~gthorncr/ME450/documents/Handout2.HistoryofSolar.pdf>> [Ηλεκτρονικό]
- [10]. **Fichtner Engineering and Consulting Services.** *Assessment of Technology Options for Development of Concentrating Solar Power in South Africa for The World Bank.* Presentation, Johannesburg 9-10<sup>th</sup> December 2010.
- [11]. **Δάφλος Ι. Δημήτριος.** *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια. Σχεδιασμός Εγκατάστασης Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης για την υβριδοποίηση του ΑΗΣ της περιοχής Σορωνής Ρόδου.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακή Εργασία, Μάρτιος 2012.
- [12]. **Wieckert C., Frommherz U., Kräupl S., Guillot E., Olalde G., Epstein M., Santén S., Osinga T., Steinfeld A..** *A 300 kW solar chemical pilot plant for the carbothermic production of zinc.* ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 129, No. 2, p. 190-196, (2007)
- [13]. **T. Kodama.** *High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels.* Progress in Energy and Combustion Science, Volume 29, Issue 6, 2003, Pages 567-597. Elsevier Ltd (2003)

- [14]. **Τράκας Δημήτριος.** *Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής Τεχνολογίας Ηλιακού Πύργου.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακή Εργασία, Οκτώβριος 2011.
- [15]. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle)> [Ηλεκτρονικό]
- [16]. <<http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/reaccess/ssedni60.jpg>> [Ηλεκτρονικό]
- [17]. **David S.Ginley, David Cahen.** *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability.* Cambridge University Press (2011)
- [18]. SolarGIS database (SolarGIS © 2013 GeoModel Solar s.r.o.). <[http://solargis.info/doc/\\_pics/freemaps/1000px/dni/SolarGIS-Solar-map-DNI-Greece-en.png](http://solargis.info/doc/_pics/freemaps/1000px/dni/SolarGIS-Solar-map-DNI-Greece-en.png)> [Ηλεκτρονικό]
- [19]. **International Renewable Energy Agency (IRENA).** *Concentrating Solar Power.* Irena Working Paper, Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Volume 1: Power Sector, Issue 2/5. June 2012
- [20]. **A. Gazzo, P. Gousseland, J. Verdier, C. Kost, G. Morin, M. Engelken, J. Schrof, P. Nitz, J. Selt, W. Platzer, M. Ragwitz, I. Boie, D. Hauptstock, W. Eichhammer.** *Middle East and North Africa Region Assessment of the Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power (CSP) Projects.* World Bank Report, January 2011
- [21]. <<http://whatwow.org/parabolic-trough/>> [Ηλεκτρονικό]
- [22]. <<http://www.trec-uk.org.uk/resources/pictures/stills4.html>> [Ηλεκτρονικό]
- [23]. **R. D. Rugescu.** *Application of Solar Energy.* INTECH, February 2013 ISBN 978-953-51-0969-3
- [24]. <<http://teeic.anl.gov/er/solar/restech/desc/index.cfm>> [Ηλεκτρονικό]
- [25]. <<http://uni-leipzig.de/~energy/ef/17.htm>> [Ηλεκτρονικό]
- [26]. **Rajesh Chhabara.** *Towers versus troughs?* Άρθρο στην ιστοσελίδα: <<http://social.csptoday.com/technology/towers-versus-troughs>> 4 Δεκεμβρίου 2009
- [27]. **SunShot.** *SunShot Vision Study.* U.S. Department of Energy, February 2012
- [28] **SolarPACES.** *Technology Characterization Solar Power Towers.* Διαθέσιμο στο: <[http://www.solarpaces.org/CSP\\_Technology/docs/solar\\_tower.pdf](http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_tower.pdf)>
- [29]. **Gregory J. Kolb, Scott A. Jones, Matthew W. Donnelly, David Gorman, Robert Thomas, Roger Davenport, Ron Lumia.** *Heliostat Cost Reduction Study.* Sandia Report SAND2007-3293 (Unlimited Release Printed June 2007), Sandia Laboratories

- [30]. **Geyer Dr. Michael.** *Concentrated Solar Thermal Power- Now!* s.l.: SolarPaces, September 2005.
- [31]. BrightSource Energy Photo Gallery  
<<http://www.brightsourceenergy.com/image-downloads>> [Ηλεκτρονικό]
- [32]. **Patricia Kuntz Falcone.** *A handbook for solar central receiver design.* Sandia National Laboratories, 1986
- [33]. Abengoa Solar Photo Gallery  
<<http://www.abengoasolar.com/web/en/galeria>> [Ηλεκτρονικό]
- [34]. **George M. Kaplan.** *Understanding Solar Concentrators.* Technical Paper #30. ISBN: 0-86619-239-5. VITA, Virginia 1985
- [35]. **William B. Stine, Michael Geyer.** *Power From The Sun.* Chapter 10, Central Receiver Systems. Copyright © 2001
- [36]. <<http://jcwinnie.biz/wordpress/?p=2120>> [Ηλεκτρονικό]
- [37]. **D.J. Alpert, R.M. Houser, A.A. Heckes, W.W. Erdman, K. Beninga, A. Konnerth III.** *The development of stretched-membrane heliostats in the United States.* Solar Energy Materials, Volume 21. Elsevier Ltd (December 1990)
- [38]. <<http://www.pveng.com/FEA/FEANotes/LargeDisplace/LargeDisplace.php>>
- [39]. **W.B.Stine, R.W.Harrigan.** *Solar Energy Systems Design.* Revised and updated version by William Stine and Michael Geyer. John Wiley and Sons, Inc. 1986.
- [40]. NREL Image Gallery. Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: <<http://images.nrel.gov/>>
- [41]. *Reduced-Cost Heliostat.* Junior/Senior Design Clinic project for New Mexico Institute of Mining and Technology's (NMT) department of Mechanical Engineering. 2012. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <<http://infohost.nmt.edu/~helio/background.html>>
- [42]. SOLARRESERVE Tonopah Power Plant (Nevada), Photo Gallery  
<<http://www.solarreserve.com/what-we-do/csp-projects/crescent-dunes/>> [Ηλεκτρονικό]
- [43]. **Eduardo Zarzaand, Manuel Romero - Alvarez.** *Concentrating Solar Thermal Power.* Κεφάλαιο 21 του βιβλίου: *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy.* LLC Press, 2007.
- [44]. **Ελευθέριος Σαατσάκης.** *Μελέτη ηλιοθερμικής εγκατάστασης με πύργο ηλιακής ισχύος στην περιοχή του Αθρινόλακκου.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία, 2012.
- [45]. **M. R. Rodríguez-Sanchez, M. Venegas-Bernal, C. Marugán-Cruz and D. Santana.** *Thermal, mechanical and hydrodynamic analysis to optimize the design of molten salt central receivers of solar tower power plants.* International Conference on

Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13) Bilbao (Spain), 20th to 22th March, 2013

[46]. < <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1393879/Gemasolar-Power-Plant-The-worlds-solar-power-station-generates-electricity-NIGHT.html> > [Ηλεκτρονικό]

[47]. < <http://www.csp-world.com/cspworldmap/sierra-suntower> > [Ηλεκτρονικό]

[48]. **Xin Li, Weiqiang Kong, Zhifeng Wang, Chun Chang, Fengwu Bai.** *Thermal model and thermodynamic performance of molten salt cavity receiver.* Renewable Energy, Volume 35, 2010. Elsevier Ltd.

[49]. **Manuel Silva Perez.** *Concentrated Solar Thermal Power Technology Training, Session-3 Point Focus Technologies.* April 14 2010. Παρουσίαση διαθέσιμη στο: <<http://www.slideshare.net/sustenergy/session-3-point-focus>>

[50]. **South Asia Energy Unit Sustainable Development Department.** *Review of CSP Technologies and Cost Drivers Overview, Phase I (Part I). Consulting services for a Study of local capabilities to manufacture and supply components for development of Concentrating Solar thermal Power plants (CSP) in India.* The World Bank, 2010

[51]. **Antonio L. Ávila-Marín.** *Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review.* Solar Energy, Volume 85, May 2011. Elsevier Ltd.

[52]. **Nils Ahlbrink, Boris Belhomme, Robert Pitz-Paal.** *Modeling and Simulation of a Solar Tower Power Plant with Open Volumetric Air Receiver.* Proceedings 7th Modelica Conference, Como, Italy, Sep. 20-22, 2009

[53]. **Zhiyong Wu, Zhifeng Wang.** *Fully coupled transient modeling of ceramic foam volumetric solar air receiver.* Solar Energy, Vol. 89, March 2013. Elsevier Ltd.

[54]. **Zhiyong Wu, Cyril Caliot, Gilles Flamant, Zhifeng Wang.** *Coupled radiation and flow modeling in ceramic foam volumetric solar air receivers.* Solar Energy, Volume 85, Issue 9, September 2011. Elsevier Ltd.

[55]. **Αντώνιος Α. Μαντήκος.** *Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία, Σεπτέμβριος 2011

[56]. **Juan Ignacio Burgaleta, Santiago Arias, Diego Ramirez.** *GEMASOLAR, THE FIRST TOWER THERMOSOLAR COMMERCIAL PLANT WITH MOLTEN SALT STORAGE.* European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA) Files.

[57]. <[http://www.qmtmag.com/display\\_eds.cfm?edno=7863502](http://www.qmtmag.com/display_eds.cfm?edno=7863502)> [Ηλεκτρονικό]

- [58]. **Andy Skumanich**. *CSP: Developments in heat transfer and storage materials*. Άρθρο στην ιστοσελίδα: <<http://www.renewableenergyfocus.com/view/17095/csp-developments-in-heat-transfer-and-storage-materials/>> 13 Απριλίου 2001
- [59]. <<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=530>> [Ηλεκτρονικό]
- [60]. **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.
- [61]. <<http://www.solarpaces.org/Tasks/Task1/ps10.htm>> [Ηλεκτρονικό]
- [62]. **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. (2008)
- [63]. **Luis Crespo, Francisco Ramos, Fernando Martínez**. *Questions and Answers on Solar Central Receiver Plant Design by NSPOC*. SolarPACES 2011.
- [64] <[http://en.wikipedia.org/wiki/Trigonometric\\_function#Slope\\_definitions](http://en.wikipedia.org/wiki/Trigonometric_function#Slope_definitions)>
- [65]. **Dan Weinstock, Joseph Appelbaum**. *Optimal Solar Field Design of Stationary Collectors*. *Journal of Solar Energy Engineering*. Tel-Aviv University
- [66]. **Xiudong Wei, Zhenwu Lu, Zi Lin, Hongxin Zhang, Zhengguo Ni**. *Optimization Procedure for Design of Heliostat Field Layout of a IMWe Solar Tower Thermal Power Plant*.
- [67]. **Marcelino Sanchez, Manuel Romero**. *Methodology for generation of heliostat field layout in central receiver systems based on yearly normalized energy surfaces*. *Solar Energy*, Volume 80, Issue 7. Elsevier Ltd.
- [68]. **Στ. Αυγολούπης, Γ. Σειραδάκης**. *ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΑΚΗ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ, Β' εκδοση, έγχρωμη βελτιωμένη και συμπληρωμένη*. Πλανητάριο Θεσσαλονίκης, 2010. ISBN: 978-960-9453-00-4
- [69]. **Κωνσταντίνος Κ. Ράμμος**. *Εισαγωγή στην Αστρονομία (Μέρος 2ο)*. Άρθρο δημοσιευμένο στις 09/05/2013 στη διαδικτυακή τοποθεσία: <[http://www.astronomy-astrophotography.com/introduction\\_to\\_astronomy\\_2.html](http://www.astronomy-astrophotography.com/introduction_to_astronomy_2.html)>
- [70]. **Jean Meeus**. *Astrological Algorithms, First Edition*. Willmann-Bell Inc., Virginia 1991
- [71]. <<http://www.precisionsundials.com/software.htm>> [Ηλεκτρονικό]
- [72]. **M. Bl. Muriel, Diego C. Alarcon Padilla, T. L. Moratalla, M. Lara-Coira**. *Computing The Solar Vector*. *Solar Energy*, Volume 70, Issue 5. 2001 Elsevier Ltd.



- [73]. **Steve Schell.** *Design and evaluation of esolar's heliostat fields.* Solar Energy, Volume 85. 2011 Elsevier Ltd.
- [74]. **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.
- [75]. **Erminia Leonardi, Bruno D'Aguanno.** *A numerical code for the calculation of the solar power collected in a central receiver system.* Energy, Volume 36, Elsevier Ltd. (2011)
- [76]. **Matteo Chiesi, Luca Vanzolini, Eleonora Franchi Scarselli, Roberto Guerrieri.** *Accurate optical model for design and analysis of solar fields based on heterogeneous multicore systems.* Renewable Energy, Volume 55 (July 2013). Elsevier Ltd.
- [77]. **K.-K. Chong and M. H. Tan.** *Comparison Study of Two Different Sun-Tracking Methods in Optical Efficiency of Heliostat Field.* International Journal of Photoenergy, Volume 2012, Article ID 908364 (2012)
- [78]. **Corey J. Noone, Manuel Torrilhon, Alexander Mitsos.** *Heliostat Field Optimization: A New Computationally Efficient Model and Biomimetic Layout.* <[http://www.mathcces.rwth-aachen.de/torrilhon/NooneTorrilhonMitsos\\_SolEner2012.pdf](http://www.mathcces.rwth-aachen.de/torrilhon/NooneTorrilhonMitsos_SolEner2012.pdf)> (2011)
- [79]. <[http://www.medialab.ntua.gr/education/ComputerGraphics/OpenGL\\_Slides/05-Chapter3.pdf](http://www.medialab.ntua.gr/education/ComputerGraphics/OpenGL_Slides/05-Chapter3.pdf)> [Ηλεκτρονικό]
- [80]. **Sergei Savchenko.** *3D GRAPHICS PROGRAMMING GAMES AND BEYOND.* Sams Publishing, First Edition July 2000
- [81]. <<http://hops.googlecode.com/svn/trunk/doc/hops.html>> [Ηλεκτρονικό]
- [82]. **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, Vol. 80. Elsevier Ltd. (2006)
- [83]. < <http://gigaom.com/2012/05/01/a-road-trip-to-the-land-where-oil-and-solar-meet/103-2> > [Ηλεκτρονικό]
- [84]. **Kyle Kattke, Lorin Vant-Hull.** *Optimum Target Reflectivity For Heliostat Washing.* SolarPaces Paper (2012)
- [85]. **Francisco J. Collado.** *Quick evaluation of the annual heliostat field efficiency.* Solar Energy, Volume 82, Issue 4. Elsevier Ltd. April 2008
- [86]. **Robert Y. Ma.** *Wind Effects on Convective Heat Loss From a Cavity Receiver for a Parabolic Concentrating Solar Collector.* Contractor Report. SAND92-7293. September 1993

- [87]. **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. November 2009
- [88]. **J.George Broze, Saidas Ranade, H.William Prengle Jr.** *An approximate model for sizing and costing a solar thermal collector-central receiver system.* Solar Energy, Volume 34, Issues 4-5. Elsevier Ltd. 1985
- [89]. <<http://www.energyregister.gr/stathmos-ape/nur-moh-ae->> [Ηλεκτρονικό]
- [90].<[http://www.soda-is.com/eng/services/service\\_invoke/gui.php?xml\\_descript=hc3v4\\_invoke\\_15\\_dni\\_demo.xml#parameters](http://www.soda-is.com/eng/services/service_invoke/gui.php?xml_descript=hc3v4_invoke_15_dni_demo.xml#parameters)> [Ηλεκτρονικό]
- [91]. **Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.).** *Οδηγός αξιολόγησης έργων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας. Έκδοση 1.0.* Νοέμβριος 2010. Διαθέσιμο στο: < <http://www.rae.gr/old/downloads/SolThermGuide.pdf> >
- [92]. **Franz Trieb, Christoph Schillings, Marlene O’Sullivan, Thomas Pregger, Carsten Hoyer-Klick.** *Global Potential of Concentrating Solar Power.* SolarPaces Conference Berlin, September 2009
- [93]. **A. Segal.** *Optimum layout of heliostat field when the tower-top receiver is provided with secondary concentrators.* Report for SFERA, WP.13, Task2, April 2012
- [94]. **Alexis B. Zavoico.** *Solar Power Tower Design Basis Document.* SAND2001-2100, Unlimited Release Printed July 2001
- [95]. **R. Ben-Zvi, M. Epstein, A. Segal.** *Simulation of an integrated steam generator for solar tower.* Solar Energy 86. Elsevier Ltd. 2012
- [96]. <<http://social.csptoday.com/tracker/projects>> [Ηλεκτρονικό]

## Παράρτημα

Πίνακας ΠΑ-1: Μεταβολή του αριθμού των ηλιοστατών ανάλογα με την μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση του εδάφους.

Επιτρεπτή κλίση εδάφους (ποσοστό)	Ηλιοστάτες 3.8 x 5 m		Ηλιοστάτες 10 x 12 m	
	Αριθμός ηλιοστατών	Διαφορά στον αριθμό ηλιοστατών	Αριθμός ηλιοστατών	Διαφορά στον αριθμό ηλιοστατών
0.1	2174		354	
0.15	4907	+2733	790	+436
0.2	9702	+4795	1534	+744
0.25	14856	+5154	2363	+829
0.3	18420	+3564	2885	+522
0.35	21241	+2821	3266	+381
0.4	23517	+2276	3556	+290
0.5	26394	+2877	3924	+368
0.6	26742	+348	3971	+47
0.7	26815	+73	3982	+11
0.8	26835	+20	3985	+3
0.9	26845	+10	3985	0
1	26847	+2	3985	0

Πίνακας ΠΑ-2: Παράμετροι σχεδίασης πεδίου για την εξαγωγή της εξάρτησης του βαθμού απόδοσης του πεδίου από το μέγεθος των ηλιοστατών.

Ύψος Ηλιοστατών	Πλάτος Ηλιοστατών	Εμβαδόν ανακλαστικής επιφάνειας	Αριθμός ηλιοστατών	Συνολική επιφάνεια ανάκλασης πεδίου	Βαθμός απόδοσης πεδίου
1m	1.3 m	1.3 m <sup>2</sup>	198 600	258 180 m <sup>2</sup>	62.161%
3 m	3.9 m	11.7 m <sup>2</sup>	22 076	258 289.2 m <sup>2</sup>	62.613%
4 m	5.2 m	20.8 m <sup>2</sup>	12 413	258 190.4 m <sup>2</sup>	62.779%
5 m	6.5 m	32.5 m <sup>2</sup>	7 948	258 310 m <sup>2</sup>	62.887%
6 m	7.8 m	46.8 m <sup>2</sup>	5 516	258 148.8 m <sup>2</sup>	63.041%
7 m	9.1 m	63.7 m <sup>2</sup>	4 056	258 367.2 m <sup>2</sup>	63.140%
8 m	10.4 m	83.2 m <sup>2</sup>	3 102	258 086.4 m <sup>2</sup>	63.262%
9 m	11.7 m	105.3 m <sup>2</sup>	2 452	258 195.6 m <sup>2</sup>	63.280%
10 m	13 m	130 m <sup>2</sup>	1 986	258 180 m <sup>2</sup>	63.212%

Πίνακας ΠΑ-3: Μεταβολή ετήσιων βαθμών απόδοσης πεδίου για συγκεκριμένο πεδίο συναρτήσει του ύψους πύργου.

Ύψος Πύργου	B. A. Συνημιτόνου	B. A. Σκίασης	B. A. Παρεμπόδισης	B. A. Ατμοσφ. Διαπερατότητας	Συνολικός B. A.
80m	73.93%	84.02%	88.67%	95.34%	52.51%
100m	74.86%	84.22%	92.11%	95.31%	55.34%
120m	75.73%	84.41%	94.08%	95.27%	57.29%
140m	76.53%	84.60%	94.54%	95.22%	58.28%
160m	77.26%	84.79%	95.45%	95.16%	59.50%
180m	77.94%	84.97%	95.77%	95.10%	60.32%
200m	78.57%	85.15%	96.78%	95.03%	61.53%
220m	79.14%	85.33%	96.89%	94.95%	62.13%
240m	79.68%	85.50%	96.96%	94.87%	62.66%

Πίνακας ΠΑ-4: Μεταβολή αριθμού ηλιοστατών και ετήσιων βαθμών απόδοσης πεδίου συναρτήσει του ύψους πύργου.

Ύψος Πύργου	B. A. Συνημιτόνου	B. A. Σκίασης	B. A. Παρεμπόδισης	B. A. Ατμοσφ. Διαπερατότητας	Συνολικός B. A.	Αριθμός Ηλιοστατών
60m	73.63%	85.97%	91.82%	95.21%	55.34%	12409
80m	74.46%	85.54%	93.68%	95.32%	56.87%	14147
100m	75.24%	85.20%	94.79%	95.33%	57.92%	15542
120m	75.95%	85.00%	94.81%	95.30%	58.32%	16677
140m	76.64%	84.87%	95.64%	95.24%	59.25%	17595
160m	77.26%	84.79%	96.08%	95.16%	59.90%	18420
180m	77.83%	84.78%	96.10%	95.07%	60.28%	19092
200m	78.37%	84.78%	96.02%	94.97%	60.59%	19677
220m	78.86%	84.82%	96.16%	94.86%	61.02%	20182
240m	79.31%	84.84%	95.41%	94.75%	60.83%	20631

Πίνακας ΠΑ-5: Μεταβολή αριθμού ηλιοστατών και ετήσιων βαθμών απόδοσης πεδίου συναρτήσει των ελάχιστων διακένων μεταξύ των ηλιοστατών.

Διάκενα	Αριθμός Ηλιοστατών	B. A. Συνημιτόνου	B. A. Σκίασης	B. A. Παρεμπόδισης	B. A. Ατμοσφ. Διαπερατότητας	Συνολικός B. A.
0m	21005	77.57%	83.46%	95.57%	95.18%	58.89%
0.5m	18886	77.47%	84.72%	96.44%	95.14%	60.22%
1m	16946	77.39%	85.81%	97.05%	95.11%	61.29%
1.5m	15274	77.30%	86.81%	97.57%	95.07%	62.24%
2m	13811	77.21%	87.70%	97.92%	95.04%	63.02%
2.5m	12567	77.15%	88.51%	98.21%	95.00%	63.71%
3m	11438	77.09%	89.25%	98.47%	94.98%	64.34%