



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Ι. Τετώρος

Επιπλέον: Μαρία Γ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Αύγουστος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Ι. Τετώρος

Επιπλέπων: Μαρία Γ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Αυγούστου 2015

.....

Μαρία Γ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Νικόλαος Θεοδώρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Αύγουστος 2015

.....

Παναγιώτης Ι. Τετώρος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Ι. Τετώρος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για 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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου Κα. Ιωαννίδου Μαρία-Παρασκευή τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και για την άριστη συνεργασία μας για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Ιωάννη και Κωνσταντίνα για την πολύτιμη υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, τα αδέρφια μου Δημήτρη και Ευαγγελία καθώς επίσης και τη Δήμητρα για την συμπαράσταση και την υπομονή τους. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους μου τους φίλους και στους συμφοιτητές μου Μήτσο, Μανώλη, Γιάννη, Μάριο για την πολύτιμη στήριξη τους.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των ηλιοθερμικών συγκεντρωτικών συστημάτων η οποία βρίσκεται υπό συνεχή ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και είναι μία από τις ανανεώσιμες τεχνολογίες που μπορούν να λύσουν τα σημερινά και μελλοντικά προβλήματα της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή έχει δοκιμαστεί κυρίως στην Ισπανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και έχει μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης στην Μεσόγειο και στην Ελλάδα.

Αποτελείται από οκτώ κεφάλαια. Στο πρώτο δίνεται ένα γενικό πλαίσιο που είναι κοινό σε όλα τα είδη των συγκεντρωτικών συστημάτων και γίνεται και μια σύντομη αναδρομή στην εξέλιξη της. Τα ηλιακά συστήματα είναι τεσσάρων ειδών: τα παραβολικά κοίλα, οι ηλιακοί πύργοι ισχύος, οι συλλέκτες Fresnel και το σύστημα δίσκου- Stirling.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των παραβολικών κοίλων, των επί μέρους τμημάτων του ενώ τονίζονται τα σημαντικότερα μέρη της αποθήκευσης θερμότητας.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η τεχνολογία του ηλιακού πύργου ισχύος, τα εξαρτήματά του και ένα υβριδικό σύστημα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται ο γραμμικός συλλέκτης Fresnel και στο πέμπτο περιγράφεται η τεχνολογία δίσκου/μηχανής.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στις μεγαλύτερες μονάδες από κάθε τεχνολογία σε παγκόσμιο επίπεδο ενώ στο έβδομο γίνεται μια σύντομη αναφορά στην Ελλάδα και τις προοπτικές ανάπτυξης μιας τέτοιας μονάδας.

Στο όγδοο κεφάλαιο δίνεται μια περίληψη της συγκεντρωτικής ηλιοθερμικής τεχνολογίας.

Λέξεις-Κλειδιά: Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα, Παραβολικά Κοίλα Κάτοπτρα, Ηλιακός Πύργος Ισχύος, Συλλέκτης Fresnel, Συστήματα δίσκου μηχανής, άμεση ηλιακή ακτινοβολία, Αθερινόλακκος Κρήτης

Abstract

The purpose of this thesis is the study of Concentrated Solar Systems which is under constant development in recent years and is one of the renewable technologies that can solve current and future problems of electricity. This technology has been demonstrated mainly in Spain and the U.S.A. and has strong growth potential in the Mediterranean and in Greece.

It consists of eight chapters. At the first is given a general framework which is common to all types of concentrated solar systems and there is a brief overview of the evolution of this technology. There are four solar systems: parabolic troughs, Solar power towers, Fresnel collectors and dish-stirling systems.

The second chapter is a detailed description of parabolic troughs, its individual parts while highlighting important parts of the heat storage.

The third chapter describes the technology of solar power towers, its components and a hybrid system.

The fourth chapter analyzes the linear Fresnel collector and the fifth describes the disk-stirling system.

In the sixth chapter there is a description to the largest plants of each technology on a global level while the seventh is a brief reference to Greece and the growth prospects of such a plant.

The eighth chapter provides an overview of concentrated solar technology.

Key-words: Concentrating Solar Power, Parabolic Trough Mirrors, Solar Tower Power, Fresnel collector, dish-stirling systems, direct normal irradiance, Atherinolakkos Crete

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή.....	18
1.1 Γενικά.....	18
1.2 Εγκαταστάσεις συγκεντρωτικής ηλιοθερμικής τεχνολογίας.....	19
2. PTC(Parabolic trough concentrators).....	21
2.1 Γενική περιγραφή.....	21
2.2 Περιγραφή λειτουργίας.....	22
2.3 Απορρόφηση ακτινοβολίας και θέση των κοίλων.....	23
2.4 Ο κύκλος Rankine.....	26
2.5 Σωλήνας-δέκτης.....	27
2.6 Ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF).....	29
2.6.1. Λάδι.....	30
2.6.2 Λιωμένα άλατα.....	30
2.7 Αποθήκευση.....	31
2.7.1 Αποθηκευτικό σύστημα.....	32
2.7.2 Περιγραφή των στοιχείων.....	32
2.7.3 Θέματα ασφαλείας.....	34
2.7.4 Εκτίμηση κόστους αποθήκευσης.....	35
2.8 Δοκιμή δύο συστημάτων DSG.....	36
2.8.1 Στρατηγικές αυτομάτου ελέγχου.....	37
2.8.2 Αποτελέσματα.....	41
3. Ηλιακός Πύργος Ισχύος.....	43
3.1 Περιγραφή λειτουργίας.....	45
3.2 Πεδίο του ηλιοστάτη και συλλέκτης.....	46
3.2.1 Αλγόριθμοι διάταξης ηλιοστατών.....	47
3.2.2 Περιορισμός ορίου για το πεδίο του ηλιοστάτη.....	49

3.2.3 Παρακολούθηση του ήλιου.....	51
3.3 Δέκτης.....	54
3.3.1 Νέο σχέδιο σωληνωτού δέκτη.....	54
3.3.2 Ογκομετρικός σωλήνας.....	57
3.3.2.1 Σταθερότητα ροής.....	59
3.3.2.2 Ανοιχτός ογκομετρικός δέκτης.....	60
3.3.2.3 Κλειστός ογκομετρικός δέκτης.....	61
3.4 Τεχνολογίες παραγωγής.....	62
3.4.1 Τεχνολογία νερού-ατμού.....	62
3.4.2 Τεχνολογία λιωμένου αλατιού.....	63
3.5 Υβριδικό σύστημα με αέριο.....	65
3.5.1 Περιγραφή λειτουργίας.....	66
3.5.2 Περιγραφή της ιδέας.....	67
3.5.3 Αποτελέσματα.....	68
4. Συλλέκτες Fresnel.....	70
4.1 Εισαγωγή.....	70
4.2 Συλλέκτης.....	72
4.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των γραμμικών συλλεκτών.....	72
4.2.2 Τυπικές διαμορφώσεις των γραμμικών συλλεκτών Fresnel.....	72
4.3 Τύποι του συγκροτήματος του δέκτη.....	73
4.3.1 Προσαρμοσμένος συμπυκνωτής στις άκρες.....	75
4.4 Fresnel με σύστημα DSG.....	78
4.4.1 Χρήση λιωμένου αλατιού.....	79
4.5 Σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών Fresnel.....	80
4.6 Συμπεράσματα.....	82
5. Συστήματα δίσκου-μηχανής (Stirling).....	84

5.1 Περιγραφή λειτουργίας.....	84
5.2 Μηχανή Stirling.....	87
5.3 Συλλέκτης.....	89
5.3.1 Πρώτα στάδια της εγκατάστασης καθρεπτών στην επιφάνεια του πιάτου	91
5.3.2 Ανάπτυξη σχεδίου.....	92
5.4 Δέκτης.....	93
5.4.1 Αξιολόγηση της οπτικής απόδοσης.....	94
5.5 Επιλογή περιοχής για τεχνολογία δίσκου/μηχανής.....	97
6. Μεγαλύτερα Έργα Για Κάθε Κατηγορία.....	99
6.1 Parabolic trough collector.....	99
6.1.1 Λειτουργία εγκατάστασης.....	101
6.2 Ηλιακός πύργος ισχύος.....	101
6.3 Συλλέκτες Fresnel.....	103
6.4 Σύστημα δίσκου-μηχανής Stirling.....	104
6.5 Η λίστα με τα ηλιοθερμικά που λειτουργούν σήμερα.....	105
6.6 Η λίστα με τις μονάδες που βρίσκονται υπό κατασκευή.....	107
7. Ηλιοθερμικά συστήματα στην Ελλάδα.....	108
7.1 Άδεια της ΡΑΕ.....	110
7.2 Παράμετροι για την εύρεση της κατάλληλης τοποθεσίας.....	111
8. Επίλογος.....	112
Βιβλιογραφία.....	115

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 2.1: Παραβολικό Κοίλο Σύστημα.....	21
Εικόνα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα PTC.....	22
Εικόνα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα της ηλιακής θερμικής μονάδας SEGS VI με υποστήριξη με ορυκτά καύσιμα.....	23
Εικόνα 2.4: Σωστή τοποθέτηση του παραβολικού συγκεντρωτή.....	24
Εικόνα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα ενός PTC.....	25
Εικόνα 2.6: Ο κύκλος του Rankine.....	27
Εικόνα 2.7: Ένας σωλήνας-δέκτης κενού για παραβολικό κοίλο συλλέκτη.....	28
Εικόνα 2.8: Andasol 1, Μονάδα PTC στην Ισπανία.....	29
Εικόνα 2.9: Σχηματικό διάγραμμα ροής ενός σταθμού PTC με δύο δεξαμενές αποθήκευσης λιωμένου αλατιού.....	31
Εικόνα 2.10: Χαρακτηριστικά θερμικού εξοπλισμού αποθήκευσης.....	34
Εικόνα 2.11: Δαπάνες των συστημάτων αποθήκευσης.....	35
Εικόνα 2.12: Σχηματικό διάγραμμα ροής της λειτουργίας άμεσου ατμού όπου το ρευστό διέρχεται μια φορά από τους σωλήνες.....	36
Εικόνα 2.13: Σχηματικό διάγραμμα ροής του τρόπου λειτουργίας άμεσου ατμού με επανακυκλοφορία.....	37
Εικόνα 2.14: Παραδοσιακή στρατηγική ελέγχου με PID ελεγκτή χωρίς τη βοηθητική θέρμανση.....	38
Εικόνα 2.15: Εναλλακτική 1 : Διάγραμμα ελέγχου δύο επιπέδων με PID ελεγκτές.....	39
Εικόνα 2.16: Εναλλακτική 2: Διάγραμμα κλιμακούμενου ελέγχου τριών επιπέδων με PID ελεγκτές.....	40
Εικόνα 2.17: Εναλλακτική 3: Διάγραμμα κλιμακούμενου ελέγχου τριών επιπέδων μαζί με έναν ελεγκτή μετάδρασης	40
Εικόνα 2.18: Συμπεριφορά της ελεγχόμενης μεταβλητής, της θερμοκρασίας ατμού για τον έλεγχο διαφορετικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων όλων των συστημάτων.....	41
Εικόνα 2.19: Συμπεριφορά της ελεγχόμενης μεταβλητής, της θερμοκρασίας ατμού για τον έλεγχο διαφορετικών συστημάτων, με συστήματα ελέγχου με εφεδρικά ορυκτά καύσιμα...42	
Εικόνα 3.1: Ηλιακός Πύργος Ισχύος.....	43

Εικόνα 3.2: Ηλιακός Πύργος Ισχύος και πεδίο των ηλιοστατών.....	45
Εικόνα 3.3: Αρχή λειτουργίας του κεντρικού δέκτη.....	46
Εικόνα 3.4: Σχέδιο που χρησιμοποιείται στη γραφική μέθοδο για τον υπολογισμό της ακτίνας της νέας σειράς.....	48
Εικόνα 3.5: Παράμετροι που ορίζουν κάθε αλγόριθμο.....	49
Εικόνα 3.6: Σύστημα συντεταγμένων της διάταξης του πεδίου των ηλιοστατών.....	50
Εικόνα 3.7: Κατανομή του συντελεστή απόδοσης για το έργο PS10.....	51
Εικόνα 3.8: Τοποθετημένος ηλιοστάτης με άξονες παρακολούθησης.....	52
Εικόνα 3.9: Σύστημα συντεταγμένων για την εξαγωγή των τύπων για την περιστροφή του ηλιοστάτη.....	53
Εικόνα 3.10: Διάνυσμα της ακτίνας σε συντεταγμένες εδάφους.....	54
Εικόνα 3.11: Σχέδιο ενός παραδοσιακού εξωτερικού δέκτη.....	55
Εικόνα 3.12: Σχέδιο ενός μπαγιονέτ δέκτη.....	56
Εικόνα 3.13: Σχέδιο ενός πάνελ του μπαγιονέτ δέκτη.....	57
Εικόνα 3.14: Απορρόφηση στη μεταφορά θέρμανσης του ογκομετρικού δέκτη.....	58
Εικόνα 3.15: Ζητήματα αστάθειας ροής.....	59
Εικόνα 3.16: Ανοιχτός ογκομετρικός δέκτης.....	60
Εικόνα 3.17: Κλειστός ογκομετρικός δέκτης.....	61
Εικόνα 3.18: Παραδείγματα δεκτών άμεσου ατμού.....	63
Εικόνα 3.19: Διάγραμμα λειτουργίας πύργου με τεχνολογία λιωμένου αλατιού.....	64
Εικόνα 3.20: Παράδειγμα δέκτη λιωμένου αλατιού.....	65
Εικόνα 3.21: Ολοκληρωτικό σύστημα ενός HRC.....	66
Εικόνα 3.22: Παρουσίαση εξαρτημάτων του SGHR.....	67
Εικόνα 3.23: Κατανομή της θερμοκρασίας για τα πάνελ 2,3 και 5.....	68
Εικόνα 3.24: Μηχανική καταπόνηση για τα πάνελ 2,3 και 5.....	69
Εικόνα 4.1: Σύστημα με γραμμικό συλλέκτη Fresnel.....	70
Εικόνα 4.2: Σχήμα ενός γενικού γραμμικού συλλέκτη Fresnel.....	71
Εικόνα 4.3: Ανακλαστήρας Fresnel.....	72
Εικόνα 4.4: Γραμμικοί συλλέκτες Fresnel χρησιμοποιώντας διάφορους δέκτες.....	73

Εικόνα 4.5: Διάγραμμα LFC.....	73
Εικόνα 4.6: Ένα LFC με ασύμμετρο σχεδιασμό.....	74
Εικόνα 4.7: Σχέδιο δέκτη με τραπεζοειδή κοιλότητα.....	74
Εικόνα 4.8: Εγκάρσια τομή του τραπεζοειδή δέκτη.....	74
Εικόνα 4.9: Συλλέκτης προσαρμοσμένος στις άκρες.....	75
Εικόνα 4.10: Διάταξη δέκτη που χρησιμοποιείται για το έργο FRESDEMO ο δευτερεύον συλλέκτης είναι εφοδιασμένος με φωτομετρικές μετρήσεις.....	76
Εικόνα 4.11: Διάταξη δέκτη NOVA-1 από την εταιρεία Novatec Solar.....	77
Εικόνα 4.12: Σχέδιο δευτερεύοντος επίπεδου συλλέκτη.....	77
Εικόνα 4.13: Συμπαγής συλλέκτης Fresnel στη μονάδα παραγωγής Kimberlina στην Καλιφόρνια.....	78
Εικόνα 4.14: Διαμόρφωση της ηλιακής εγκατάστασης με χρήση της τεχνολογίας DSG.....	78
Εικόνα 4.15: Διαμόρφωση της ηλιακής εγκατάστασης με χρήση τεχνολογίας λιωμένου αλατιού.....	79
Εικόνα 4.16: Τρέχον και προβλεπόμενο κόστος και εκτίμηση κόστους για LFC.....	81
Εικόνα 5.1: Σύστημα δίσκου/μηχανής Stirling.....	84
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα συστήματος δίσκου/μηχανής.....	85
Εικόνα 5.3: Αλληλουχία καταστάσεων.....	86
Εικόνα 5.4: Μηχανή Stirling.....	87
Εικόνα 5.5: Κάθετη τομή μηχανής Stirling.....	88
Εικόνα 5.6: Χαρακτηριστικά και απόδοση του συστήματος stirling των 25kW.....	89
Εικόνα 5.7: Συλλέκτης μονάδας δίσκου/μηχανής.....	90
Εικόνα 5.8: Πρώιμο στάδιο εγκατάστασης ενός καθρέπτη στην επιφάνεια.....	91
Εικόνα 5.9: Το πιάτο του SG3 400m ² (αριστερά) και μια εικόνα από CAD του νέου πιάτου SG4 500m ² (δεξιά).....	92
Εικόνα 5.10 : Τοποθέτηση πλαισίων στη βάση με ειδικά μηχανήματα.....	93
Εικόνα 5.11: Αποτελέσματα χαρτογράφησης της ροής σε έναν μονό καθρέπτη-πάνελ.....	94
Εικόνα 5.12: Κοντινή φωτογραφία του στόχου μέσα από ουδέτερα φίλτρα πυκνότητας....	95

Εικόνα 5.13: Αναλογία γεωμετρικής συγκέντρωσης σε σχέση με την απόσταση από το στόχο.....	96
Εικόνα 5.14: Αναλογία μέγιστης συγκέντρωσης σε σχέση με την απόσταση από το στόχο.....	96
Εικόνα 5.15: Σημαντικές παράμετροι για τη βέλτιστη εφαρμογή του εστιακού μήκους....	97
Εικόνα 5.16: Άμεση κανονική ακτινοβολία στον κόσμο.....	98
Εικόνα 6.1: SEGS στην Καλιφόρνια.....	99
Εικόνα 6.2: Μέρος της εγκατάστασης.....	100
Εικόνα 6.3: Ivanpah Solar Electric Generating System.....	101
Εικόνα 6.4: Ένας από τους τρεις πύργους της μονάδας.....	102
Εικόνα 6.5: Ηλιοθερμικό εργοστάσιο Kimberlina Solar.....	103
Εικόνα 6.6: Ηλιακός σταθμός Maricopa στην Αριζόνα.....	104
Εικόνα 7.1: Ετήσια «άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI)» μετρημένη σε kWh/m ² για τον Ελλαδικό χώρο.....	108
Εικόνα 7.2: Περιοχές της Κρήτης που έχει εκδηλωθεί ενδιαφέρον.....	109
Εικόνα 7.3: Η ακριβής περιοχή της Κρήτης.....	109

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Σήμερα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων αντιμετωπίζει πολλά προβλήματα, όπως η συνεχής αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων και ο φόβος της εξάντλησής τους. Επιπλέον, η καύση των ορυκτών καυσίμων είναι η κύρια αιτία της αύξησης της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα που οδηγεί στην αλλαγή της φυσικής ισορροπίας του περιβάλλοντος από την εισαγωγή επιβλαβών ουσιών ή από την εκπομπή χημικών αερίων στην ατμόσφαιρα. Ως εκ τούτου, υπάρχει επείγουσα ανάγκη να μειώσουμε την εξάρτησή μας από τα ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και φυσικών καυσίμων, όπως η ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση μιας μεγάλης παγκόσμιας καταστροφής και να κρατήσουμε τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων στο έδαφος.

Η τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών συστημάτων (CSP) αποτελεί μία από τις ανανεώσιμες τεχνολογίες οι οποίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επίλυση των παροντικών και μελλοντικών προβλημάτων της ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή χρησιμοποιούν τη θερμότητα του ήλιου, η οποία είναι απεριόριστη και είναι μια πηγή καθημερινής διαθέσιμης ενέργειας. Εκτός από αυτό, έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει τη θερμότητα του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας για να την επαναχρησιμοποιήσει κατά τη διάρκεια της νύχτας, γεγονός που τις καθιστά τις πιο αποδοτικές τεχνολογίες μεταξύ των τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας και ανταγωνιστικές σε σχέση με τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα.

Επί του παρόντος, υπάρχουν τέσσερις CSP τεχνολογίες, οι οποίες είναι οι παραβολικές κοίλες γούρνες όπου η πρώτη μονάδα χτίστηκε στο Meadi στην Αίγυπτο το 1913, ο γραμμικός συλλέκτης Fresnel όπου το πρώτο πρωτότυπο χτίστηκε και λειτούργησε στη Γένοβα στην Ιταλία το 1964, το σύστημα δίσκου μηχανής Stirling όπου το πρώτο πρωτότυπο χτίστηκε στη Νότια Καλιφόρνια κατά το διάστημα 1982-1985, και ο πρώτος ηλιακός πύργος ισχύος κατασκευάστηκε με το όνομα EURELIOS με εγκατεστημένη ισχύ 1MWe στο Adrano στη Σικελία της Ιταλίας το 1965. Η ικανότητα της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου ισχύος να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μεγάλης κλίμακας (10MWe) αποδείχθηκε από την εγκατάσταση SolarOne που χτίστηκε στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ το 1982. Η πρώτη εμπορική μονάδα CSP σε όλο τον κόσμο που ονομάζεται SEGS I χτίστηκε στην Καλιφόρνια το 1984 με τη χρήση συστήματος παραβολικών κοίλων και διέθετε εγκατεστημένη ισχύ 14Mwe. Ωστόσο η παραγωγική ικανότητα του εργοστασίου αυξήθηκε σε 354MWe από το 1990 μέχρι σήμερα.

Από το 1991 μέχρι το 2005 δεν χτίστηκε κανένα ηλιοθερμικό σύστημα σε ολόκληρο τον κόσμο, αλλά από το 2006 υπάρχει μια συνεχής ανάπτυξη στις κατασκευές μονάδων CSP. Αυτό έγινε εξαιτίας της αύξησης της θερμικής απόδοσης και του παράγοντα ικανότητας αυτών των τεχνολογιών αλλά και της ικανότητάς τους να περιορίσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλες περιβαλλοντικές επιδράσεις της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα CSP μειώνουν περίπου κατά 1 κιλό τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά 1 kW ενέργειας που παράγουν. Πέραν των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, οι CSP τεχνολογίες δημιουργούν ηλεκτρική ενέργεια από ελεύθερη και αμείωτη πηγή, η οποία συμβάλει στην αύξηση της οικονομίας των χωρών που έχουν υψηλή «άμεση κανονική ακτινοβολία» (DNI) και φθινή γη. Σήμερα, η Ισπανία θεωρείται ο μεγαλύτερος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση των CSP. Εν τω μεταξύ, υπάρχουν διάφορα μεγάλα ηλιοθερμικά συστήματα τα οποία έχουν προγραμματιστεί ή βρίσκονται υπό κατασκευή στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και σε άλλες χώρες.

1.2 Εγκαταστάσεις συγκεντρωτικής ηλιοθερμικής τεχνολογίας (CSPP)

Τα CSPP αποτελούνται από δύο μέρη που είναι το ηλιακό πεδίο και το πεδίο παραγωγής. Το ηλιακό πεδίο περιλαμβάνει πολλές σειρές που είναι διατεταγμένες με ένα συγκεκριμένο τρόπο και κάθε σειρά αποτελείται από συγκεντρωτές οι οποίοι ουσιαστικά είναι καθρέπτες που συλλέγουν τη θερμότητα του ήλιου ανακλώντας την σε έναν σημειακό ή γραμμικό δέκτη για να παράγει θερμότητα σε μεσαίες (περίπου 400-550°C) ή υψηλές (περίπου 600-1000°C) θερμοκρασίες. Στη συνέχεια, αυτή η συγκεντρωμένη θερμότητα μεταφέρεται στο υγρό μεταφοράς θερμότητας (θερμικό λάδι, λιωμένο αλάτι, νερό, αέρας, υδρογόνο ή ήλιο) και περνά μέσω των σωλήνων του δέκτη για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε μια συμβατική γεννήτρια στο πεδίο παραγωγής. Ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας που χρησιμοποιούν, κάποιες από τις μονάδες CSP μπορούν να αναβαθμιστούν με αποθηκευτικό σύστημα για να αποθηκεύουν ένα μέρος της συγκεντρωμένης θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια στις συννεφιασμένες μέρες ή όταν ο ήλιος δύει. Επίσης, μπορούν να υβριδοποιηθούν με ορυκτά καύσιμα για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για 24 ώρες την ημέρα προκειμένου να βελτιώσει τη θερμική απόδοση και τον παράγοντα ικανότητας και ως εκ τούτου να μειώσει το κόστος της τεχνολογίας.

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν τέσσερις CSP τεχνολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί σε όλο τον κόσμο, δηλαδή τα παραβολικά κοίλα κάτοπτρα, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel, ο ηλιακός πύργος ισχύος και τα συστήματα δίσκου/μηχανής. Οι δύο πρώτες είναι γνωστές ως γραμμικής εστίασης τεχνολογίες επειδή συγκεντρώνουν την

ηλιακή θερμότητα σε όλο το εστιακό μήκος του συλλέκτη, ενώ οι δεύτερες είναι γνωστές ως σημειακής εστίασης τεχνολογίες διοτί συγκεντρώνουν την ηλιακή θερμότητα σε ένα σημείο στον πύργο ή στο κέντρο του παραβολικού δίσκου.

Οι τεχνολογίες γραμμικής συγκέντρωσης εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία με συντελεστή συγκέντρωσης περίπου 100 επάνω στη γούρνα που είναι τοποθετημένη κατά μήκος του παραβολικού συλλέκτη ή του ανυψωμένου γραμμικού συλλέκτη Fresnel για την παραγωγή θερμότητας με θερμοκρασία 400-550°C. Αυτή η θερμότητα έχει την ικανότητα να παράγει ατμό σε μέτρια ποιότητα, τη στιγμή που τα συστήματα σημειακής συγκέντρωσης εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία με συντελεστή συγκέντρωσης περίπου 1000 επάνω στο δέκτη που βρίσκεται στην κορυφή του πύργου ή στο σημείο εστίασης του δίσκου για να παράγουν θερμότητα σε θερμοκρασία 600-1000°C που είναι η διπλάσια σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Η διαφορά στη θερμοκρασία καθιστά την τεχνική της σημειακής εστίασης πιο αποτελεσματική σε σχέση με τη γραμμική επειδή μειώνει η χρήση της γης μαζί με το αποτελεσματικότερο κόστος της Κιλοβατόρας του έργου. Ωστόσο, οι γραμμικές είναι φτηνότερες και τεχνικά λιγότερο πολύπλοκες από τις σημειακές τεχνολογίες.

2. PTC (Parabolic trough concentrators)

2.1 Γενική περιγραφή



Εικόνα 2.1: Παραβολικό Κοίλο Σύστημα

Τα ηλιακά ηλεκτρικά παραγωγικά συστήματα χρησιμοποιούν τα συστήματα παραβολικών κοίλων (PTC) για να παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια από το φως του ήλιου. Ο παραβολικός συλλέκτης χαρακτηρίζεται από ελαφριά δομή και υψηλή ανακλαστικότητα. Ένα σύστημα παραβολικών κοίλων αποτελείται από ένα φύλλο από ανακλαστικό υλικό, συνήθως χρησιμοποιείται ασημωμένο ακρυλικό, το οποίο κάμπτεται σε μια παραβολική μορφή. Πολλά τέτοια φύλλα τοποθετούνται μαζί σε σειρές για να διαμορφώσουν μακριές γούρνες. Αυτές οι ενότητες υποστηρίζονται από το έδαφος με απλές βάσεις και στα δύο άκρα.

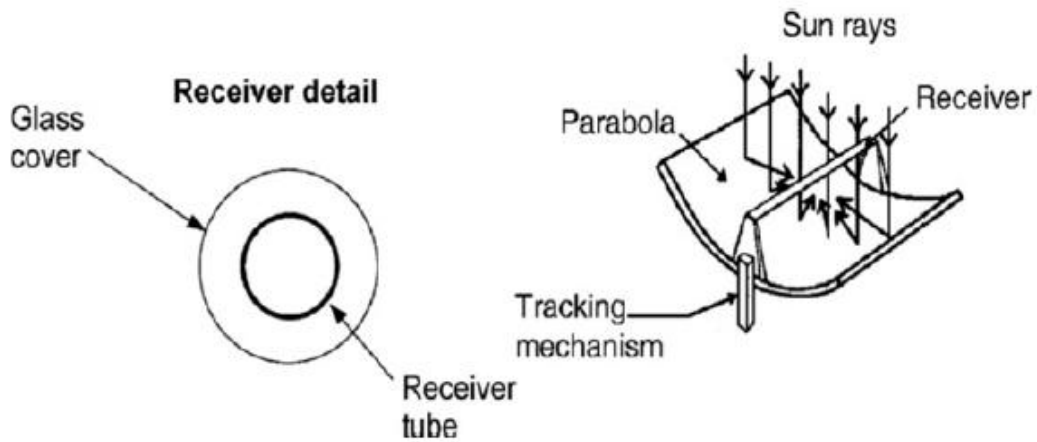
Ο λόγος συγκέντρωσης ενός PTC είναι μια αναλογία μεταξύ της επιφάνειας ανοίγματος του συλλέκτη και της συνολικής περιοχής του απορροφητικού σωλήνα. Συνήθεις τιμές αυτής της αναλογίας είναι περίπου 20, παρόλο που η μέγιστη θεωρητική τιμή είναι της τάξης των 70. Αναλογίες υψηλής συγκέντρωσης σχετίζονται με υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας. Ο λόγος συγκέντρωσης C δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{l_a l}{\pi d_o l} = \frac{l_a}{\pi d_o}$$

όπου d_o : η εξωτερική διάμετρος του ατσάλινου σωλήνα-δέκτη

l : μήκος του συλλέκτη

l_a : πλάτος της παραβολής

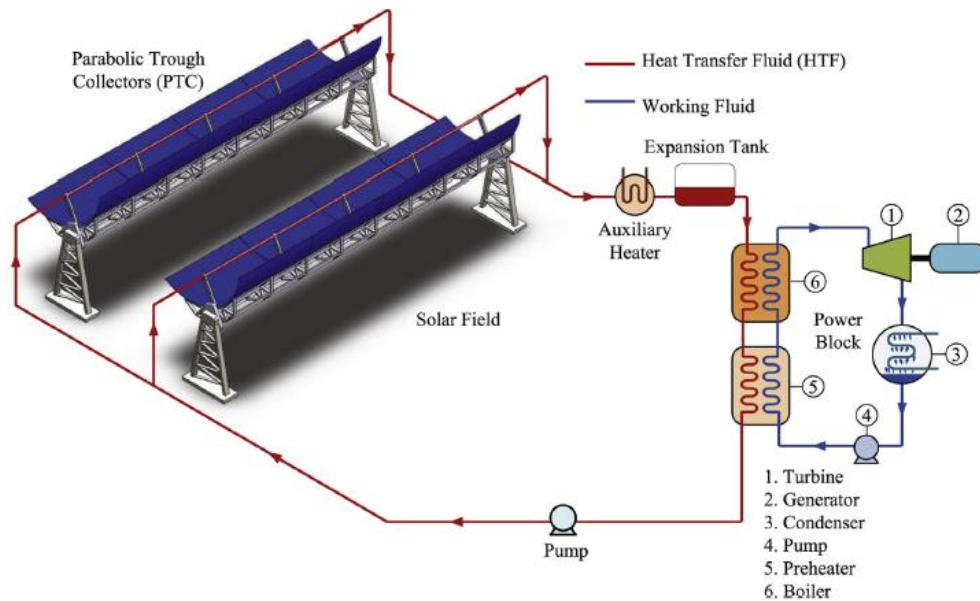


Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα PTC

Οι κοίλοι παραβολικοί συλλέκτες συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα απορροφητικό σωλήνα, ο οποίος είναι τυπικά από ανοξείδωτο ατσάλι με απορροφητική επιφάνεια. Ένα θερμικό λάδι χρησιμοποιείται ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF), που κυκλοφορεί μέσα στους απορροφητικούς σωλήνες και διοχετεύει την ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα θερμικό κύκλο. Το HTF φεύγει από τα PTCs με μια συγκεκριμένη θερμοκρασία εξόδου και μετά αντλείται σε διάφορους εναλλάκτες θερμότητας, εκεί όπου η ενέργεια μεταφέρεται στο εργαζόμενο ρευστό. Αυτό μπορεί να είναι νερό ή ατμός, τα οποία χρησιμοποιούνται για να οδηγήσουν έναν στρόβιλο ατμού που συνδέεται με μια γεννήτρια για να παράγει την ηλεκτρική ενέργεια.

2.2 Περιγραφή λειτουργίας

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, το PTC χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για παραγωγή ατμού. Το HTF ρέει μέσα από το στοιχείο που συλλέγει τη θερμότητα (HCE) όπου η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται και απορροφάται από το θερμικό λάδι. Το HCE αποτελείται τυπικά από έναν σωλήνα από ανοξείδωτο ατσάλι που περιβάλλεται από γυαλί. Ο ατσάλινος σωλήνας έχει επιφάνεια που χαρακτηρίζεται από υψηλή απορροφητικότητα και χαμηλή ικανότητα εκπομπής. Το γυάλινο περίβλημα είναι ένας γυάλινος σωλήνας με σχεδόν μηδαμινή ανακλαστικότητα και ανάμεσα στον απορροφητή και στο γυάλινο περίβλημα υπάρχει εσώκλειστο κενό για να μειώσει τις θερμικές απώλειες μεταξύ του απορροφητή και των γύρω υλικών και για να προταστεύσει τον απορροφητή από την οξείδωση. Συμβατικό γυαλί χρησιμοποιείται για να αποκτήσει η κατασκευή το απαραίτητο κενό περίβλημα και την ευελιξία που απαιτείται για την θερμική διαστολή μεταξύ απορροφητήρα και γυάλινου περιβλήματος.



Εικόνα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα της ηλιακής θερμικής μονάδας SEGS VI με υποστήριξη με ορυκτά καύσιμα.

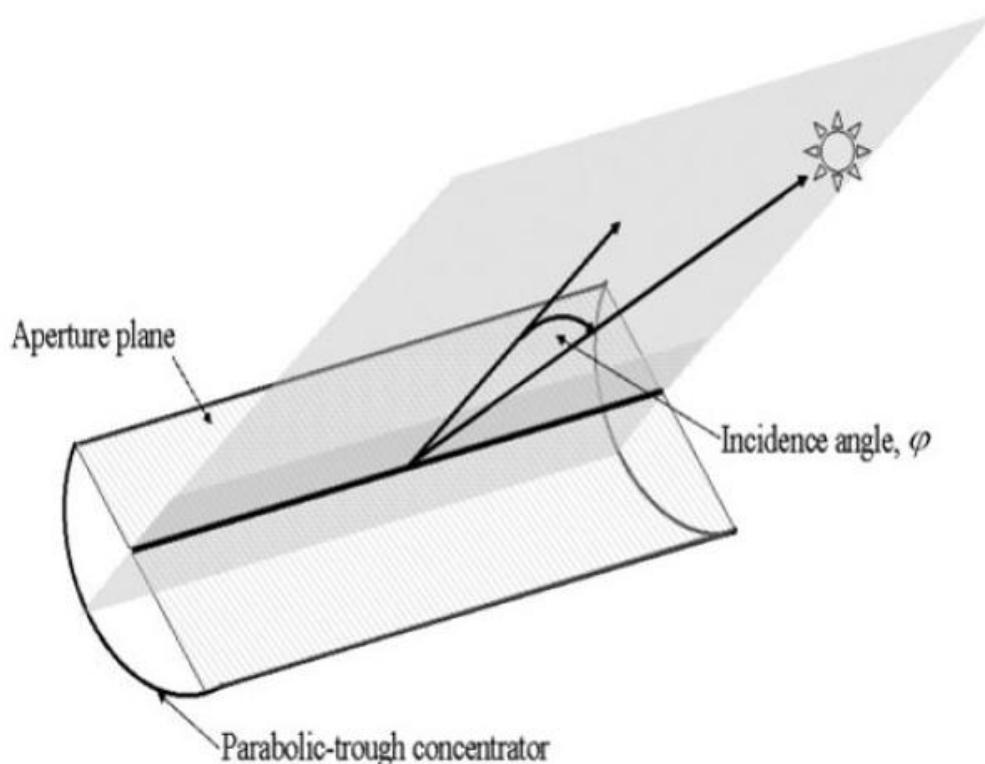
Μετά τη θέρμανση του HTF, αυτό φεύγει από τους συλλέκτες και η κερδισμένη ενέργεια μεταφέρεται στον θερμικό κύκλο, ο οποίος είναι ο αναπαραγωγικός κύκλος Rankine. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας ρέει μέσα από διάφορους θερμικούς εναλλάκτες όπως ο προθερμαντής όπου μια κλειστή τροφοδοσία νερού ζεσταίνει συμπιεσμένο νερό μέχρις ότου επιτευχθεί κορεσμένη υγρή κατάσταση, ο λέβητας όπου το κορεσμένο υγρό που έρχεται από τον προθερμαντή ζεσταίνεται μέχρι να έχουμε αλλαγή στη φάση από υγρό σε ατμό, ο υπερθερμαντής όπου επιπλέον ενέργεια προστίθεται στον ατμό, φερνοντάς τον σε υπέρθερμη κατάσταση. Ο υπέρθερμος ατμός τότε προωθείται μέσω της τουρμπίνας υψηλής πίεσης.

Άλλα σημαντικά στοιχεία του ηλιακού συστήματος είναι το δοχείο διαστολής, το οποίο λειτουργεί σαν αποθηκευτικό μέσο θερμότητας ειδικά τη νύχτα και τις συννεφιασμένες μέρες και επίσης παρέχει χώρο για διαστολή του HTF εξαιτίας της αλλαγής του όγκου από τη στιγμή που το HTF θερμαίνεται στο ηλιακό πεδίο μέχρι τη θερμοκρασία λειτουργίας.

2.3 Απορρόφηση ακτινοβολίας και θέση των κοίλων

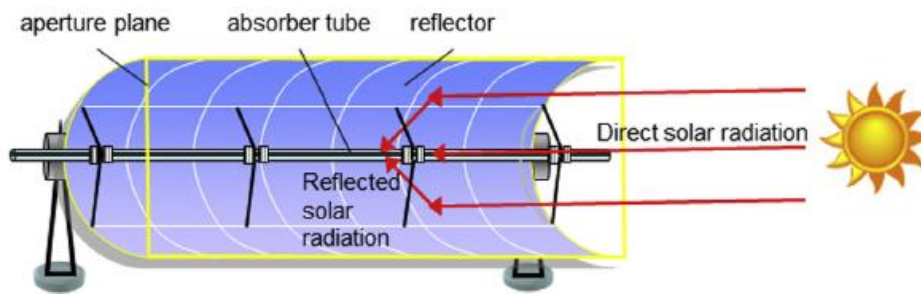
Επειδή ένα σύστημα παραβολικών κοίλων είναι ένας ηλιακός οπτικός συγκεντρωτής, θα πρέπει να τοποθετείται κάθε στιγμή σύμφωνα με τη θέση του ήλιου έτσι ώστε η εισερχόμενη απ' ευθείας ηλιακή ακτινοβολία να αντανακλάται επάνω στο σωλήνα-δέκτη. Αν ο συγκεντρωτής δεν είναι στη σωστή θέση, οι ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες δε θα πέσουν πάνω στο δέκτη. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διαδρομή που θα πρέπει να έχει η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία για να φτάσει το επίπεδο άνοιγμα του συλλέκτη

για να ανακλαστεί σωστά στον σωλήνα-δέκτη. Δεδομένου ότι η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία πέφτει πάνω στην επιφάνεια της γης στο επίπεδο του εδάφους χωρίς συγκεκριμένη κατεύθυνση, αυτή η συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι άχρηστη για παραβολικά κοίλα συστήματα, επειδή δε θα μπορεί να αντανακλάται από το συγκεντρωτή προς τον σωλήνα-δέκτη. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο τα PTCs είναι δυναμικές συσκευές που αλλάζουν τις θέσεις τους όταν ο ήλιος κινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας.



Εικόνα 2.4: Σωστή τοποθέτηση του παραβολικού συγκεντρωτή

Η εικόνα αναφέρεται σε ένα PTC με μονό άξονα παρακολούθησης του ήλιου όπου ο συλλέκτης μπορεί να περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα. Αν και έχουν σχεδιαστεί συστήματα παρακολούθησης με διπλό άξονα, έχουν κατασκευαστεί και έχουν δοκιμαστεί στο παρελθόν, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν ότι ήταν λιγότερο αποδοτικά από αυτά με μονό άξονα. Η ύπαρξη του διπλού άξονα μειώνει τις οπτικές απώλειες και αυξάνει την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμη στο επίπεδο άνοιγμα του PTC. Ωστόσο, το μήκος των παθητικών σωλήνων δηλαδή εκείνων που δεν θερμαίνονται από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και οι σχετικές θερμικές απώλειες είναι σημαντικά υψηλότερες από τους συλλέκτες μονού άξονα. Επιπλέον, τα έξοδα συντήρησης τους είναι υψηλότερα και η διαθεσιμότητά τους χαμηλή καθώς απαιτούν ένα πιο πολύπλοκο μηχανικό σχεδιασμό.



Εικόνα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα ενός PTC

Τα PTC συνήθως εγκαθίστανται με τον άξονα παρακολούθησης προσανατολισμένο είτε στον άξονα βορρά-νότου είτε στον άξονα ανατολή-δύση, ωστόσο κάθε άλλος προσανατολισμός μπορεί να είναι εφικτός. Η θέση και η κίνηση του άξονα παρακολούθησης έχει μια σημαντική επίδραση στη γωνία πρόσπτωσης του ήλιου πάνω στο επίπεδο άνοιγμα του συλλέκτη το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει την απόδοση του. Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία μεταξύ της καθέτου στο επίπεδο του ανοίγματος του συλλέκτη και του φορέα του ήλιου-και οι δύο περιέχονται σε ένα επίπεδο κάθετο προς τον άξονα του συλλέκτη.

Εποχικές διακυμάνσεις στην απόδοση του συλλέκτη μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες για προσανατολισμένους συλλέκτες στον άξονα Βορρά-Νότου. Τρεις έως τέσσερις φορές περισσότερη ενέργεια παραδίδεται καθημερινά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες από ό, τι κατά τους χειμερινούς μήνες, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τις καιρικές συνθήκες της περιοχής. Η εποχιακή διακύμανση της παροχής ενέργειας είναι πολύ μικρότερη για προσανατολισμό ανατολής-δύσης. Παρ' όλα αυτά η ετήσια θερμική απόδοση ενός PTC με άξονα παρακολούθησης βορρά-νότου είναι μεγαλύτερη. Αυτή η διαφορά στην παραγωγή ενέργειας προκαλείται από την διαφορετική οπτική γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει στο επίπεδο του ανοίγματος των συγκεντρωτών. Η ημερήσια μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης είναι πάντα μεγαλύτερη για τον προσανατολισμό ανατολή-δύση, έχοντας μέγιστης τιμές κατά την ανατολή και τη δύση του ήλιου και μια ελάχιστη τιμή 0° κάθε μέρα στο ηλιακό μεσημέρι.

Η κίνηση του συλλέκτη κατά μήκος της ημέρας απαιτεί μια μονάδα οδήγησης. Μία μονάδα οδήγησης είναι συνήθως αρκετή για παραβολικές μονάδες συνδεδεμένες σε σειρά και οδηγούνται μαζί ως ένα ενιαίο συλλέκτη. Οι παραβολικοί συμπυκνωτές υποστηρίζονται και συνδέονται με τις βάσεις από πυλώνες. Το είδος της μονάδας συναρμολόγησης εξαρτάται από το μέγεθος και τις διαστάσεις του συλλέκτη. Ενώ οι μονάδες που αποτελούνται από έναν ηλεκτροκινητήρα και ένα συνδυασμό κιβωτίου ταχυτήτων χρησιμοποιούνται για μικρούς συλλέκτες (περιοχή ανοίγματος $<100\text{m}^2$), υδραυλικές μονάδες ισχύος απαιτούνται για την περιστροφή μεγάλων συλλέκτων. Η μονάδα δίσκου τοποθετείται στον κεντρικό πυλώνα και διαχειρίζεται από μια τοπική μονάδα ελέγχου, η οποία λέει στη μονάδα δίσκου πότε και σε ποια κατεύθυνση να περιστρέψει το συλλέκτη για να παρακολουθεί τον ήλιο. Η μονάδα ελέγχου θα πρέπει να

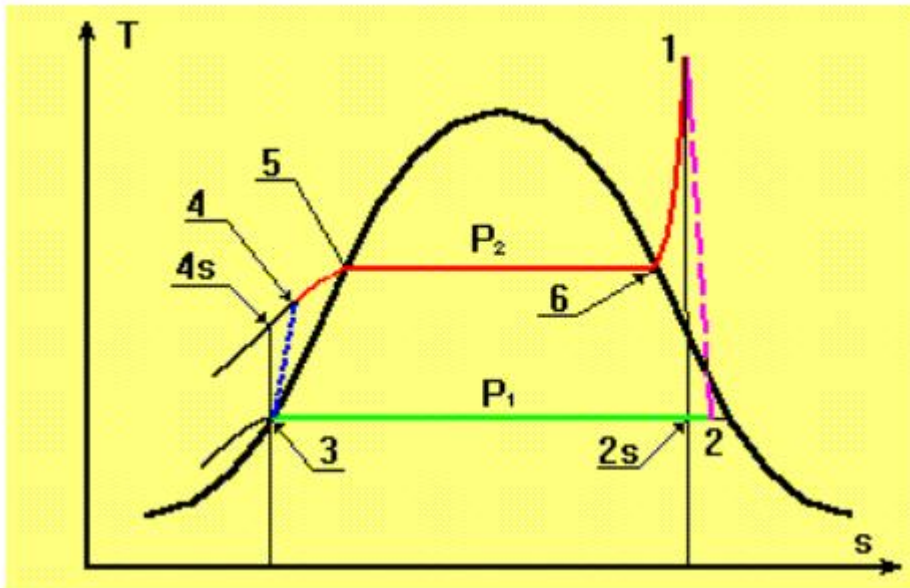
γνωρίζει τη θέση του ήλιου για να αποφασίζει πότε η θέση του συλλέκτη θα πρέπει να αλλάζει. Για το σκοπό αυτό, η θέση του ήλιου μπορεί είτε να ανιχνευθεί μέσω των ηλιακών κυττάρων ή θεωρητικά να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας ακριβείς μαθηματικούς αλγορίθμους. Και τα δύο συστήματα είναι διαθέσιμα στο εμπόριο σήμερα.

Το χαμηλότερο σημείο των συλλεκτών είναι γενικά εκτεθειμένο στον άνεμο, και πρέπει έτσι να είναι αρκετά ισχυρό για να αντέξει στα φορτία του ανέμου και να παρεμποδιστούν οι αποκλίσεις από την κανονική πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Μια μελέτη της τυρβώδους ροής γύρω από ένα PTC ισχύος 250kW στο Σιράζ, Ιράν, διεξήχθη από τους Naeeni και Yaghoubi. Η μελέτη ερευνά την καταπόνηση που εφαρμόζεται στο συλλέκτη, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες γωνίες λήψης, ταχύτητες του ανέμου και ροή του αέρα σε σχέση με το ύψος από το έδαφος. Μια δεύτερη μελέτη προβάλλει τις επιδράσεις των ίδιων παραμέτρων σχετικά με τη μεταφορά θερμότητας από το σωλήνα-δέκτη του PTC. Προκειμένου να καταστεί η δομή του PTC πιο ανθεκτική στις εξωτερικές δυνάμεις, είναι δυνατόν να ενισχυθούν οι επιφάνειες του συλλέκτη με ένα λεπτό στρώμα υαλοβάμβακα. Το στρώμα υαλοβάμβακα προστίθεται κάτω από την αντανάκλαστική επίστρωση (στην εσωτερική επιφάνεια) του παραβολικού κοίλου. Το συνολικό πάχος του ανακλαστήρα είναι 7 χιλιοστά, και μπορεί να σταθεί με μια δύναμη που ασκείται με 34m/s δύναμη με ελάχιστη απόκλιση. Η παραμόρφωση στο κέντρο της κορυφής της παραβολής ήταν μόνο 0,95 χιλιοστά, που βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων.

2.4 Ο κύκλος Rankine

Ο κύκλος Rankine αντιστοιχεί σε μια θερμική μηχανή με κύκλο ισχύος ατμού. Το πιο κοινό εργαζόμενο μέσο είναι το νερό. Ο κύκλος αποτελείται από τέσσερις διεργασίες

- 1 έως 2: Ισεντροπική εκτόνωση (ατμοστρόβιλος)
- 2 έως 3: Αποβολή της θερμότητας υπό σταθερή πίεση (συμπυκνωτής)
- 3 έως 4: Ισεντροπική συμπίεση (αντλία)
- 4 έως 1: Θέρμανση υπό σταθερή πίεση (λέβητας)



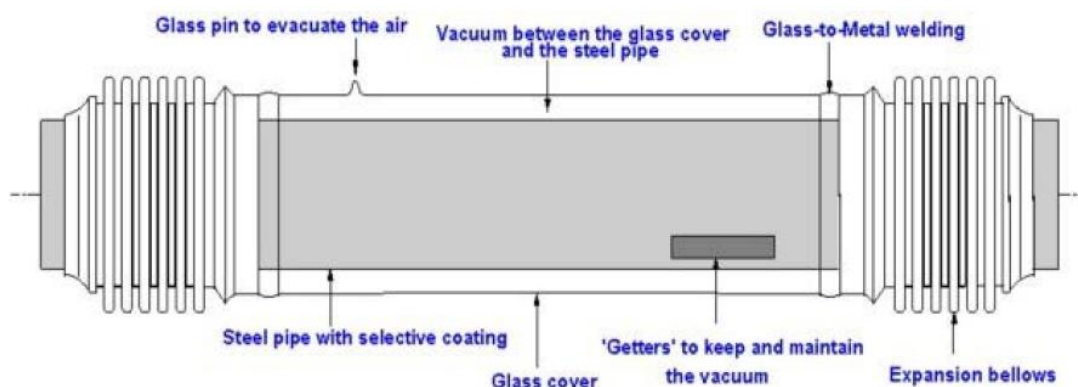
Εικόνα 2.6: Ο κύκλος του Rankine

2.5 Σωλήνας-δέκτης

Η καρδιά ενός PTC είναι ο σωλήνας-δέκτης επειδή η συνολική απόδοση του συλλέκτη σε μεγάλο βαθμό επηρεάζεται από τις οπτικές και θερμικές ιδιότητες του στοιχείου όπως για παράδειγμα ηλιακή απορροφητικότητα, εκπομπή θερμότητας και συντελεστής θερμικών απωλειών. Ο δέκτης ενός τυπικού PTC αποτελείται από έναν σωλήνα με εσωτερικό ατσάλι που περιβάλλεται από διαφανές γυάλινο σωλήνα για να μειώσει θερμικές απώλειες από τον ζεστό, ατσάλινο σωλήνα. Ο σωλήνας αυτός είναι εφοδιασμένος με μια ειδική επίστρωση η οποία έχει υψηλή ηλιακή απορροφητικότητα (>90%) και χαμηλή εκπομπή στο υπέρυθρο φάσμα μήκους κύματος (<30%), επομένως μειώνει τις θερμικές απώλειες από την ακτινοβολία. Διάφοροι τύποι από επιστρώσεις είναι διαθέσιμες στο εμπόριο για παραβολικά κοίλα συστήματα. Εάν η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από 290°C, μια φθηνή επίστρωση μαύρο-χρώμιο ή μαύριονικέλιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για υψηλότερες θερμοκρασίες, εξελιγμένα επιχρίσματα κεραμομετάλλου που κατασκευάζονται με φυσική εναπόθεση ατμών (PVD) ή επιμετάλλωση, απαιτείται για να επιτευχθεί μια καλή θερμική απόδοση (70%) στο PTC.

Ο δέκτης με κενό ανάμεσα στον ατσάλινο σωλήνα και στο γυάλινο κάλυμμα, καθώς και οι γυάλινοι σωλήνες είναι εφοδιασμένοι με μία αντιανακλαστική επίστρωση, χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί υψηλότερη θερμική απόδοση και καλύτερη ετήσια απόδοση του PTC, ειδικά σε υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας. Οι σωλήνες με λιγότερο κενό εφαρμόζονται συνήθως για θερμοκρασίες λειτουργίας κάτω από 250°C, επειδή οι θερμικές απώλειες δεν είναι τόσο κρίσιμες σε αυτές τις θερμοκρασίες. Εξαιτίας των περιορισμών στην κατασκευή, το μεγαλύτερο μήκος από

έναν μονό σωλήνα-δέκτη είναι μικρότερο από 6 μέτρα και έτσι ο πλήρης σωλήνας-δέκτης ενός PTC αποτελείται από έναν αριθμό από τέτοιους μονούς σωλήνες συγκολλημένοι στη σειρά μέχρι όλο το μήκος του συστήματος. Το συνολικό μήκος του δέκτη σε ένα PTC είναι συνήθως μεταξύ του εύρους 25-150 μέτρα.



Εικόνα 2.7: Ένας σωλήνας-δέκτης κενού για παραβολικό κοίλο συλλέκτη

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε έναν τυπικό δέκτη. Το γυάλινο κάλυμμα είναι συνδεδεμένο με τον ατσάλινο σωλήνα μέσω μεταλλικών εξαρτημάτων επέκτασης που αντισταθμίζουν τη διαφορετική θερμική διαστολή του γυαλιού και του χάλυβα όταν ο σωλήνας-δέκτης λειτουργεί στην ονομαστική θερμοκρασία. Το γυαλί συγκόλλησης που χρησιμοποιείται για να συνδεθεί το γυάλινο κάλυμμα και τα ευέλικτα μεταλλικά εξαρτήματα είναι ένα αδύναμο σημείο στο σωλήνα-δέκτη και πρέπει να προστατεύεται από την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία για να αποφευχθεί η υψηλή θερμική και μηχανική καταπόνηση που θα μπορούσε να οδηγήσει σε θραύση της συγκόλλησης. Μια ασπίδα αλουμινίου συνήθως τοποθετείται πάνω από τα εύκαμπτα μεταλλικά εξαρτήματα για την προστασία της συγκόλλησης.

Πολλά κομμάτια που ονομάζονται «getters» τοποθετούνται στο διάκενο μεταξύ του ατσάλινου σωλήνα-δέκτη και του γυάλινου καλύμματος. Η αποστολή αυτών των «getters» είναι να απορροφούν τα μόρια των αερίων που περνούν από το ρευστό προς το δακτύλιο διαμέσου του τοιχώματος του ατσάλινου σωλήνα κατά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής των σωλήνων του δέκτη (> 20 ετών). «Getters» είναι συνήθως κατασκευασμένα από ζιρκόνιο, στρόδιο, βαναδίο, κράμα μαγγανίου, αν και η ακριβής σύνθεση είναι πατενταρισμένη και δεν έχει δημοσιευθεί.



Εικόνα 2.8: Andasol 1, Μονάδα PTC στην Ισπανία

2.6 Ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF)

Το ρευστό που χρησιμοποιείται για να μεταφέρει θερμότητα (HTF) ρέει μέσω του δέκτη, συλλέγει και μεταφέρει θερμική ενέργεια σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι συνήθως ο λέβητας και η τουρμπίνα της γεννήτριας ή σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης.

Η επιλογή του εργαζόμενου υγρού για ένα ηλιακό πεδίο με PTCs είναι μια πολύ σημαντική απόφαση στη φάση του σχεδιασμού. Θερμικό λάδι είναι το πιο κοινό υγρό που χρησιμοποιείται στα κοίλα παραβολικά συστήματα για θερμοκρασίες πάνω από 200°C, επειδή αυτές οι θερμοκρασίες λειτουργίας θα παράγουν υψηλή πίεση μέσα στο σωλήνα-δέκτη και γενικά στις σωληνώσεις εάν χρησιμοποιούνταν κανονικό νερό. Αυτή η υψηλή πίεση θα απαιτούσε ισχυρότερες αρθρώσεις και σωληνώσεις, και επομένως θα αύξανε την τιμή των συλλεκτών και συνολικά του ηλιακού πεδίου. Ωστόσο, η χρήση απιονισμένου νερού για υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις ερευνάται αυτό το διάστημα στο «Plataforma solar de Almeria (PSA)» στην Ισπανία και το όφελος από την παραγωγή άμεσου ατμού στις συνθήκες 100bar/400°C στους δέκτες των PTCs έχει ήδη αποδειχθεί σε πειραματικό στάδιο. Βράζει μερικώς στο συλλέκτη και κυκλοφορεί μέσω ενός δοχείου ατμού όπου ο ατμός έχει διαχωριστεί από το νερό. Για θερμοκρασίες κάτω από 200°C είτε ένα μείγμα νερού / αιθυλενογλυκόλης είτε υπό πίεση υγρό νερό μπορεί να

χρησιμοποιηθεί ως ρευστό εργασίας, επειδή η πίεση που απαιτείται για να κρατήσει το υγρό σε υγρή φάση είναι μέτρια.

2.6.1 Λάδι

Υπάρχουν πολλά θερμικά λάδια κατάλληλα για PTCs. Μία από τις βασικές παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή του κατάλληλου τύπου ελαίου είναι η μέγιστη θερμοκρασία μάζας που ορίζεται από τον κατασκευαστή για να εγγυηθεί μια καλή σταθερότητα του ελαίου, αν δεν έχει ξεπεραστεί τέτοια θερμοκρασία. Πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, μπορεί να προκύψει πυρόλυση του και ταχεία αποικοδόμηση.

Το έλαιο που χρησιμοποιείται ευρύτατα σε PTCs για θερμοκρασίες μέχρι και 395°C είναι το VP-1, το οποίο είναι ένα εύτηκτο μείγμα από 73,5% οξείδιο διφαινυλίου / 26,5% διφαινυλίου. Το κύριο πρόβλημα του ελαίου αυτού είναι η υψηλή θερμοκρασία στερεοποίησης (12°C), η οποία απαιτεί την εφαρμογή ενός βοηθητικού συστήματος θέρμανσης όταν οι γραμμές του ελαίου διατρέχουν τον κίνδυνο της ψύξης κάτω από αυτή τη θερμοκρασία λειτουργίας. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία του συστήματος βρασμού σε 1013 mbar είναι 257°C, το κύκλωμα λαδιού πρέπει να είναι υπό πίεση με άζωτο, αργόν ή άλλο αδρανές αέριο όταν το λάδι θερμαίνεται πάνω από τη θερμοκρασία αυτή. Η κάλυψη του πλήρους κυκλώματος λαδιού με κάποιο αέριο χωρίς οξυγόνο είναι απαραίτητο κατά τη λειτουργία στις υψηλές θερμοκρασίες επειδή οι υψηλές υδρονεφώσεις δημιουργούν ένα εκρηκτικό μίγμα με τον αέρα. Αν και υπάρχουν και άλλα θερμικά έλαια κατάλληλα για ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία εργασίας και με χαμηλότερη θερμοκρασία στερεοποίησης για παράδειγμα "Syltherm 800", είναι δυσβάσταχτα για μεγάλες ηλιακές εγκαταστάσεις λόγω της πολύ υψηλότερης τιμής τους. Η χρήση του λαδιού ως ρευστό εργασίας στα ηλιακά πεδία είναι διεθνώς γνωστό ως τεχνολογία Ρευστού Μετάδοσης Θερμότητας (HTF), επειδή το λάδι λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ηλιακού πεδίου και της διαδικασίας όπου η θερμική ενέργεια που παρέχεται από το ηλιακό πεδίο καταναλώνεται.

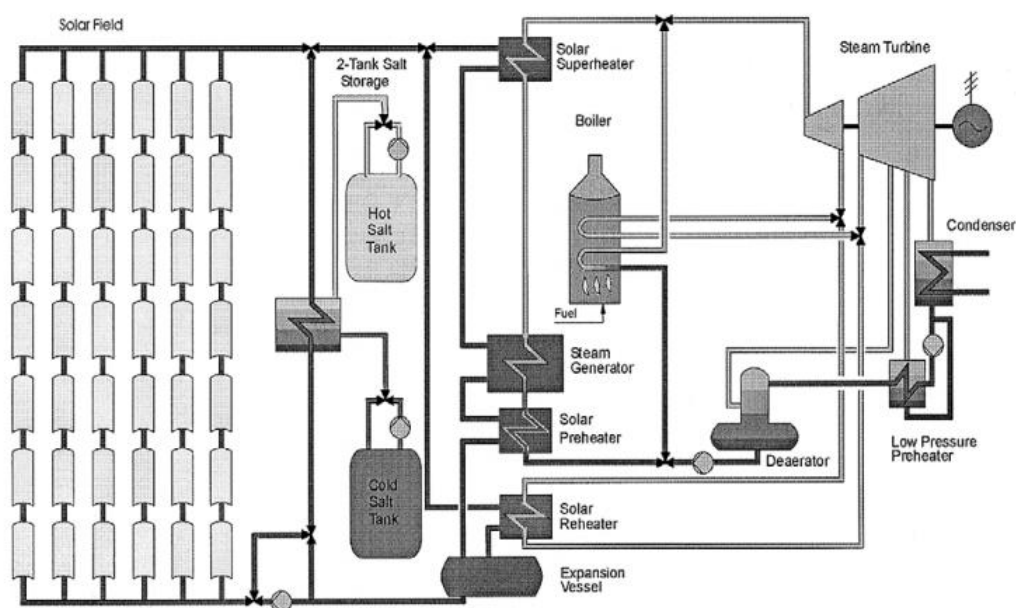
2.6.2 Λιωμένα άλατα

Σε αντίθεση με το σχέδιο DSG, το οποίο χρησιμοποιεί το νερό ως HTF, πρόσφατη καινοτομία προωθεί επίσης τη χρήση των ιοντικών υγρών (λιωμένα άλατα) ως μέσο μεταφοράς θερμότητας δεδομένου ότι είναι πιο ανθεκτικό στη θερμότητα από το λάδι και επομένως διαβρώνει λιγότερο τους σωλήνες. Ωστόσο, τα ιοντικά υγρά είναι πολύ ακριβά και μια τέτοια επένδυση θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ανάμεσα στα υπόλοιπα κόστη του δέκτη όπως η συντήρηση και η αντικατάσταση για να αποφασιστεί η οικονομική αποτελεσματικότητά τους.

2.7 Αποθήκευση

Λαμβάνοντας υπόψη ότι έχουμε ικανοποιητική εισαγωγή ηλιακής ενέργειας, το σύστημά μας έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει σε πλήρη ονομαστική ισχύ με χρήση μόνο της ηλιακής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, οι εγκαταστάσεις συνήθως λειτουργούν για 10-12 ώρες ημερησίως με τη χρήση μόνο ηλιακής ενέργειας σε πλήρη ονομαστική ισχύ εξόδου.

Για να μπορέσει να παρέχει τη ίδια ισχύ εξόδου κατά τη διάρκεια των συννεφιασμένων ημερών ή τις ώρες της νύχτας, η μονάδα έχει σχεδιαστεί ως υβριδικό ηλιακό σύστημα. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει διαθέσιμη μια εφεδρική μονάδα που στηρίζεται σε ορυκτά καύσιμα και έχει την ικανότητα να χρησιμοποιηθεί για να συμπληρώσει την ηλιακή παραγωγή κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Εναλλακτικά, η θερμική αποθήκευση μπορεί να ενσωματωθεί στο σχέδιο των εγκαταστάσεων για να επιτρέψει να αποθηκευτεί ηλιακή ενέργεια και να χρησιμοποιείται όταν απαιτείται. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει ένα σχηματικό διάγραμμα ροής για μια τυπική εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας με παραβολικά κοίλα συστήματα με δύο δεξαμενές αποθήκευσης τηγμένου αλατος.



Εικόνα 2.9: Σχηματικό διάγραμμα ροής ενός σταθμού PTC με δύο δεξαμενές αποθήκευσης λιωμένου αλατιού.

Σε αυτή τη διαμόρφωση, το ρευστό μεταφοράς ενέργειας (HTF) εκτρέπεται από το ηλιακό πεδίο μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση του θερμικού συστήματος αποθήκευσης, θερμαίνοντας αλάτι από το δοχείο κρύας αποθήκευσης μέχρι τους 385°C και αποθηκεύοντάς το στο δοχείο

θερμής αποθήκευσης. Όταν το σύστημα αποθήκευσης έχει αποφορτιστεί, το αλάτι που βρίσκεται στο ζεστό δοχείο στέλνεται πίσω στο εργαζόμενο ρευστό στον εναλλάκτη θερμότητας αλατιού και χρησιμοποιείται για να θερμάνει το κρύο ΗΤΦ. Το ψυχθέν αλάτι επιστρέφει στο δοχείο κρύας αποθήκευσης. Η θερμοκρασία του κρύου αλατιού είναι περίπου 300°C.

2.7.1 Αποθηκευτικό σύστημα

Το σύστημα θερμικής αποθήκευσης αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά στοιχεία: τον κατάλογο των νιτρικών αλάτων, τις δεξαμενές αποθήκευσης νιτρικού αλατιού, τους εναλλάκτες θερμότητας από λάδι σε αλάτι και τις αντλίες κυκλοφορίας νιτρικού άλατος. Όλα τα κύρια συστατικά, εκτός από τον εναλλάκτη θερμότητας έχουν ελεγχθεί σε μεγάλη κλίμακα από την αμερικάνικη εταιρεία Nagle Pumps όπως επίσης έχουν δοκιμαστεί και αναπτυχθεί οι νέες αντλίες για μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης.

2.7.2 Περιγραφή των στοιχείων

1. Κατάλογος νιτρικών αλάτων

Τα ανόργανα μείγματα νιτρικών αλάτων είναι τα προτιμώμενα μέσα αποθήκευσης επειδή τα άλατα προσφέρουν ένα πολύ ευνοϊκό συνδυασμό πυκνότητας (1880 kg/m³), ειδικής θερμότητας (1500J/Kg-K), χημικής αντιδραστικότητας (πολύ χαμηλή), πίεσης ατμού (<0,01Pa) και κόστους (\$0,40-\$0,90/kg). Τα τρία κύρια υποψήφια άλατα περιλαμβάνουν τα εξής: Hitec, ένα τριαδικό μείγμα από NaNO₂, NaNO₃ και KNO₃ με σημείο ψύξης τους 120°C, Hitec XL, ένα τριαδικό μείγμα από Ca(NO₃)₂ (νιτρικό ασβέστιο), NaNO₃ και KNO₃ με σημείο ψύξης τους 130°C και ένα δυαδικό μείγμα αλατιού από NaNO₃ και KNO₃ με σημείο ψύξης τους 220°C. Το τελευταίο είδος αλατιού επιλέχθηκε επειδή το κόστος του είναι το χαμηλότερο των τριών και η ελάχιστη θερμοκρασία του είναι τουλάχιστον 80°C πάνω από το σημείο ψύξης.

2. Δεξαμενές αποθήκευσης νιτρικού αλατιού

Η χαμηλή πίεση ατμού των νιτρικών αλάτων επιτρέπει να χρησιμοποιούνται κατακόρυφες, δεξαμενές που είναι τοποθετημένες στο έδαφος. Οι μεγάλες αυτές δεξαμενές οι οποίες λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση είναι παρόμοιες με τις εμπορικές δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου. Κατασκευάζονται από ανθρακοχάλυβα και χρησιμοποιούν αυτοφερόμενες στέγες. Τα τοιχώματα και το πάνω μέρος των δεξαμενών είναι μονωμένα με κομμάτια πετροβάμβακα και πυριτικό ασβέστιο αντίστοιχα. Η μόνωση αποτελείται από τα ακόλουθα (από το έδαφος προς τα πάνω):

- α)πλάκα σκυροδέματος
- β)θερμική βάση
- γ)μόνωση με αφρώδες γυαλί
- δ)μονωμένα πυροτούβλα
- ε)λεπτή επένδυση χάλυβα
- στ)άμμος

Μια κυκλική περίμετρος από μονωμένα πυροτούβλα υποστηρίζει το βάρος του πάνω μέρους και των τοιχωμάτων.

3. Εναλλάκτης θερμότητας από λάδι σε αλάτι

Οι εναλλάκτες θερμότητας από λάδι σε αλάτι πρέπει να είναι σχεδιασμένοι με πολύ μικρές διαφορές θερμοκρασίας, της τάξης των 3-10°C για να ελαχιστοποιήσουν προβλήματα στην απόδοση του κύκλου Rankine κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης ενέργειας και για να διατηρήσουν λογικές θερμοκρασίες παροχής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας προς το πεδίο του συλλέκτη κατά τη διάρκεια της θερμικής φόρτισης. Επιπλέον, η πίεση του ατμού του ρευστού μεταφοράς θερμότητας είναι περίπου 10 bar σε κανονική θερμοκρασία εξόδου 390°C από το πεδίο του συλλέκτη. Προσθέτοντας την απώλεια πίεσης στους εναλλάκτες θερμότητας και στο σύστημα των σωληνώσεων, η πίεση στην είσοδο του εναλλάκτη διατηρείται στην ονομαστική του αξία των 20bar. Σε αντίθεση, η πίεση του ατμού του νιτρικού αλατιού είναι πολύ χαμηλή (<1 Pa) και η πίεση του αλατιού στον εναλλάκτη είναι μόνο η απαραίτητη για να κυκλοφορήσει το αλάτι ή περίπου 5 bar. Επομένως, ο εναλλάκτης θερμότητας πρέπει να προσαρμόσει μια διαφορετική πίεση της τάξης των 15 bar μεταξύ του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και του υγρού αποθήκευσης. Ο πιο οικονομικός εναλλάκτης θερμότητας που παρέχει αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ένα συμβατικό περίβλημα με ένα σχέδιο σωληνώσεων. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας υψηλής πίεσης τοποθετείται στην πλευρά του σωλήνα, και το νιτρικό αλάτι τοποθετείται στην πλευρά του περιβλήματος. Οι σωλήνες ενώνονται και σφραγίζονται με οξυγονοκόλληση για να βελτιώσουν την αξιοπιστία του εναλλάκτη.

4. Αντλίες κυκλοφορίας νιτρικών αλάτων

Μηχανικές αντλίες, κατάλληλες για τα οξειδωτικά χαρακτηριστικά των νιτρικών αλάτων δεν έχουν ακόμη προσδιοριστεί. Κατά συνέπεια, οι αντλίες νιτρικών αλάτων είναι κάθετες τουρμπίνες. Το καπάκι των αντλιών παρέχεται από το συνδυασμό των 1) ενός δακτυλίου ρυθμιστικών βαλβίδων προς τα κάτω του τελευταίου σταδίου και

2) βαρύτητας η οποία επιστρέφει τη διαρροή στη δεξαμενή της αντλίας. Οι αντλίες αναρρόφησης αντλούν από το κάτω μέρος των δεξαμενών θερμικής αποθήκευσης και χρησιμοποιούν ένα μεγάλο άξονα που επιτρέπει στις αντλίες να υποστηρίζονται και στους κινητήρες να βρίσκονται πάνω σε μια σταθερή δομή πάνω από τις δεξαμενές.

Thermal storage equipment characteristics

Item	Storage capacity (h)					
	1	3	6	9	12	15
Active salt inventory (tons)	4778	14,096	28,192	42,288	56,384	70,480
Thermal storage tanks dimensions, height × diameter (m × m)						
Cold tank	12 × 16.6	14 × 26.3	14 × 37.2	14 × 45.5	14 × 37.2 ^a	14 × 41.6 ^a
Hot tank	12 × 16.8	14 × 26.7	14 × 37.7	14 × 46.2	14 × 37.7 ^a	14 × 42.2 ^a
Oil-to-salt heat exchangers						
Number of HX	3	3	3	4	5	6
Exchanger area (m ²)	8635 ^b	8635 ^b	8635 ^b	8419 ^c	9067 ^c	9499 ^c
Nitrate salt pumps						
Flow rate (kg/s)	1189 ^d	1189 ^d	1189 ^d	1546 ^e	2.081 ^e	2616 ^e
Head (m)	19.2 ^d	19.2 ^d	19.2 ^d	25.6 ^e	32.0 ^e	38.4 ^e
Power (kW _e)	316 ^d	316 ^d	316 ^d	547 ^e	921 ^e	1389 ^e

Εικόνα 2.10: Χαρακτηριστικά θερμικού εξοπλισμού αποθήκευσης

2.7.3 Θέματα ασφαλείας

Το ρευστό θερμικής αποθήκευσης είναι ένα μείγμα νιτρικού νατρίου και νιτρικού καλίου, τα οποία και τα δύο είναι οξειδωτικοί παράγοντες. Όταν τα νιτρικά άλατα είναι σε επαφή με οργανικά υλικά σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία ανάφλεξης, οι αντιδράσεις μπορούν να προχωρήσουν αρκετά γρήγορα και να προκαλέσουν ανάφλεξη, καύση ακόμα και έκρηξη.

Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι ένα συνθετικό οργανικό λάδι με ονομαστική σύνθεση 75% του βάρους από οξείδιο του διφαινυλίου και αιθέρα και 25% από διφαινύλιο. Έτσι, μια διαρροή στον εναλλάκτη θερμότητας από λάδι σε αλάτι, επιτρέπει σε οξειδωτικά υλικά να αναμειχθούν με έλαια υδρογονάνθρακα και υπάρχει η δυνατότητα για μια χημική αντίδραση ή καύση. Τα πιο σημαντικά δεδομένα αντίδρασης μεταξύ νιτρικού αλάτος και υδρογονανθράκων είναι ίσως από μια μελέτη ασφαλείας λιωμένου αλατιού που διεξήχθη από Sandia National Laboratories το 1980. Υγρό βενζίνης αναμειχθηκε με νιτρικό αλάτι σε θερμοκρασία των 600°C. Οι υδρογονάνθρακες εξαερώθηκαν όταν εκτέθηκαν στο νιτρικό αλάτι και κάηκαν όταν ήρθαν σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος. Ωστόσο, οι υδρογονάνθρακες δεν αντέδρασαν με το νιτρικό αλάτι κάτω από την επιφάνεια του αλατιού. Με άλλα λόγια, μια θερμοκρασία των 600°C δεν είναι αρκετά υψηλή για να ξεκινήσει μια θεωρητική αντίδραση μείωσης στην οποία ένα άτομο οξυγόνου απομακρύνεται από ένα νιτρικό μόριο. Στην περίπτωση μιας ρήξης ενός σωλήνα ή μια συγκόλλησης στον εναλλάκτη μια αντίδραση καύσης είναι πολύ απίθανη να συμβεί για τους ακόλουθους λόγους:

- Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας έχει βαθμολογία ευφλεκτότητας «1» από την Εθνικό Οργανισμό Πυροπραστασίας ενώ η βενζίνη έχει βαθμολογία «3». Άρα, είναι εξαιρετικά απίθανο το HTF να έχει μια πιο ενεργητική αντίδραση με το νιτρικό αλάτι από ότι η βενζίνη.
- Η υψηλότερη θερμοκρασία στον εναλλάκτη είναι 390°C η οποία είναι 201°C κάτω από τις δοκιμές που έγιναν απο τη Sandia και 220°C κάτω από τη θερμοκρασία αυτοανάφλεξης του HTF.

2.7.4 Εκτίμηση κόστους αποθήκευσης

Οι δαπάνες των συστημάτων αποθήκευσης για κάθε μία περίπτωση από αυτές που παρουσιάστηκαν προηγουμένως φαίνονται παρακάτω:

Thermal storage system costs in US\$ 1000						
Item	Storage capacity (h)					
	1	3	6	9	12	15
Nitrate salt inventory	2208	6512	13,025	19,537	26,049	32,562
Storage tanks	838	2405	4638	6842	9275	11,484
Tank insulation	300	608	974	1300	1947	2280
Tank foundations	518	984	1653	2273	3216	3823
Oil-to-salt heat exchanger	4195	4195	4195	5453	7340	9228
Nitrate salt pumps	692	812	1383	1647	2063	2629
Balance of system	875	1551	2587	3705	4989	6201
Total	9626	17,066	28,453	40,757	54,880	68,206
Unit cost, \$/kWh _t	65.63	38.79	32.33	30.88	31.18	31.00

Εικόνα 2.11: Δαπάνες των συστημάτων αποθήκευσης

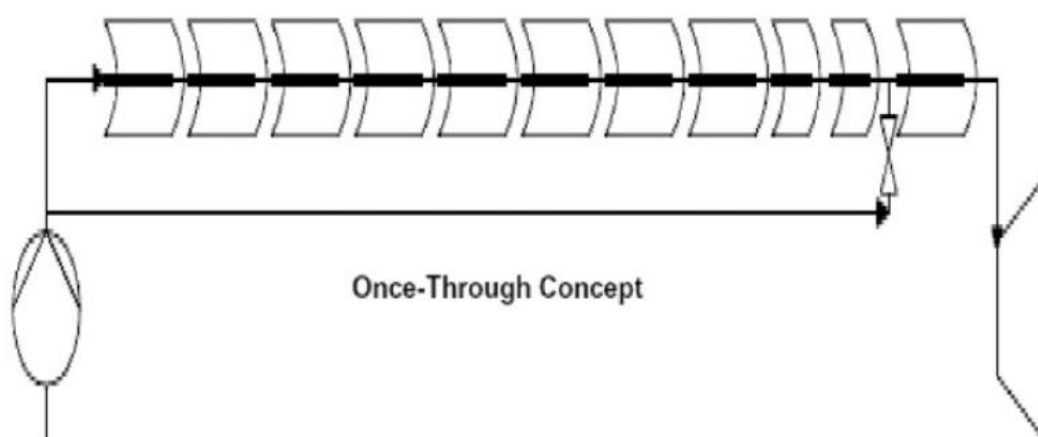
Τα έξοδα αποθήκευσης περιλαμβάνουν υλικό, εργασία εγκατάστασης, καθώς και τα γενικά έξοδα που συνδέονται με την κατασκευή του χώρου αλλά αποκλείουν τις δαπάνες για τη μηχανική, την προμήθεια και τη διαχείριση της κατασκευής. Οι τιμές στον πίνακα αναπτύχθηκαν από τα ακόλουθα:

- Τα έξοδα των ειδών του νιτρικού αλατιού και των αντλιών προήλθαν από τις πληροφορίες του προμηθευτή.
- Η δεξαμενή αποθήκευσης, η μόνωση και το κόστος θεμελίωσης προέρχονται από εκτιμήσεις για το κόστος κατασκευής του 10MWe PTC συστήματος στην Καλιφόρνια.
- Το μοναδιαίο κόστος του εναλλάκτη θερμότητας από λάδι σε αλάτι εκτιμήθηκε σε \$147/m².
- Η ισορροπία του συστήματος περιλαμβάνει σωληνώσεις, βαλβίδες, όργανα, ηλεκτρική ανίχνευση θερμότητας, θερμική μόνωση, καλωδίωση ηλεκτρικής ισχύος και ελέγχου και δομικό χάλυβα.

Το μοναδιαίο κόστος αποθήκευσης για την περίπτωση 1-h είναι πολύ υψηλό, επειδή το υψηλό κόστος του εναλλάκτη θερμότητας πρέπει να ληφθεί από μια μικρή χωρητικότητα αποθήκευσης. Για τις υπόλοιπες πέντε περιπτώσεις, το κόστος του εναλλάκτη γίνεται προοδευτικά λιγότερο σημαντικό.

2.8 Δοκιμή δύο συστημάτων DSG

Το έργο με PTC που πραγματοποιήθηκε στην πολή Tabernas στην Ισπανία έγινε με τεχνολογία άμεσης παραγωγής ατμού, όπου δύο DSG λειτουργικά συστήματα και συστήματα ελέγχου αναπτύχθηκαν και εξετάστηκαν, και είναι μέχρι στιγμής η κυριότερη δοκιμή με τέτοια λειτουργία. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν τον έλεγχο πίεσης εκτός από τον έλεγχο θερμοκρασίας του νερού που κυκλοφορεί. Αυτή η προσέγγιση γίνεται για να επιτευχθεί μια σταθερή παραγωγή ατμού καθ' όλη τη διάρκεια των περισσότερων ωρών της ημέρας (9π.μ.-6μ.μ.). Το επίπεδο της πίεσης είναι 100bar η θερμοκρασία είναι μέχρι 400°C .

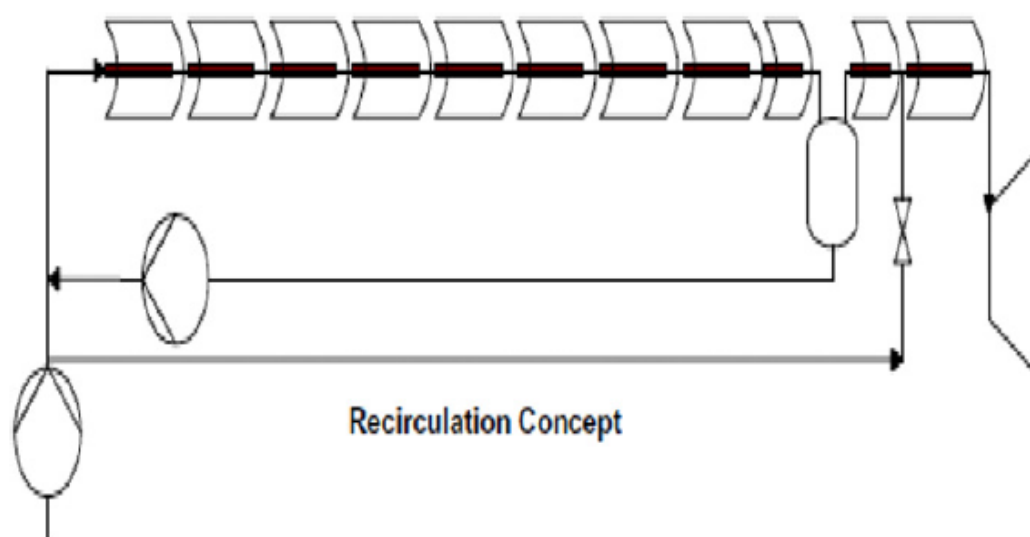


Εικόνα 2.12: Σχηματικό διάγραμμα ροής της λειτουργίας άμεσου ατμού όπου το ρευστό διέρχεται μια φορά από τους σωλήνες

Στην παραπάνω εικόνα έχουμε την πρώτη λειτουργία όπου το εργαζόμενο ρευστό διέρχεται μια φορά μέσα από τους σωλήνες και διαθέτει προθερμασμένο νερό στην είσοδο. Καθώς το νερό κυκλοφορεί μέσω των συλλεκτών, εξατμίζεται και μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό που χρησιμοποιείται για να κινήσει την τουρμπίνα.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τη δεύτερη λειτουργία όπου είναι περισσότερο συντηρητική η λειτουργία του νερού, ένας διαχωριστής νερού-ατμού τοποθετείται στο συλλέκτη στο τέλος του βρόχου. Περισσότερο νερό τροφοδοτείται στον εξατμιστήρα από όσο μπορούσε να εξατμιστεί με την πρώτη λειτουργία όπου το νερό έκανε έναν κύκλο. Το νερό που περισσεύει ανακυκλοφορεί μέσω του ενδιάμεσου διαχωριστή στην είσοδο του συλλέκτη στο τέλος του βρόχου όπου αναμειγνύεται με το προθερμασμένο νερό. Αυτή η

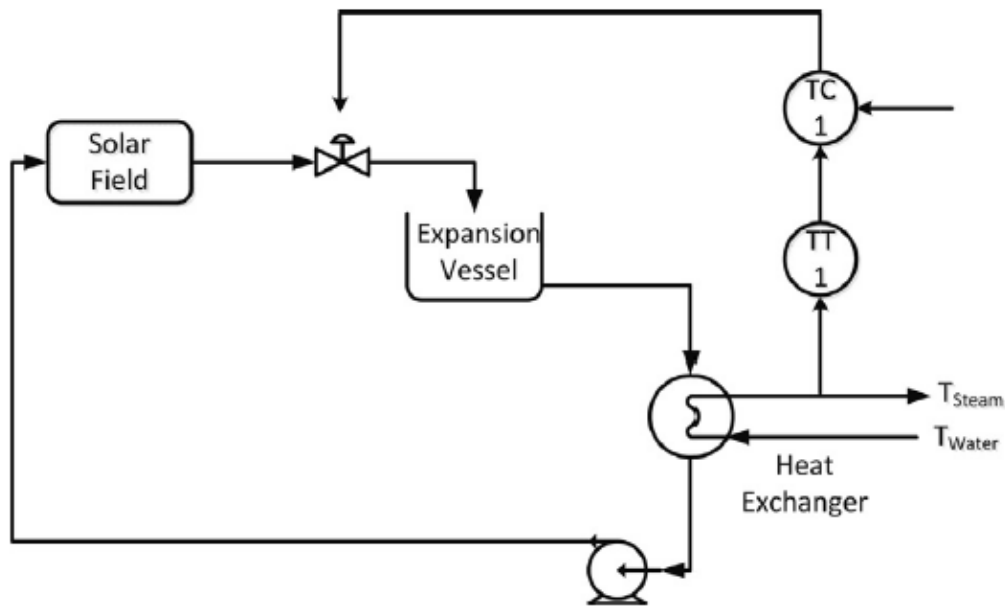
διαδικασία εγγυάται το καλό βρέξιμο των σωλήνων που αποτρέπει τη δημιουργία στρώματος. Ο ατμός είναι διαχωρισμένος από το νερό και τροφοδοτείται στην είσοδο του τμήματος της υπερθέρμανσης. Με τη διαδικασία της επανακυκλοφορίας, το σύστημα ελέγχεται ευκολότερα αλλά έχει περισσότερο φορτίο λόγω της πρόσθετης διαδικασίας. Η χρήση του νερού ως HTF καταπονεί περισσότερο τους απορροφητικούς σωλήνες από άλλα μέσα μεταφοράς θερμότητας εξαιτίας της ρευστότητας του. Η ικανοποιητική ψύξη των απορροφητικών σωλήνων και μια μέση πτώση της πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου μπορεί να βοηθήσει στην μείωση της πίεσης, και στη διάβρωση αλλά και να παρατείνει το χρόνο ζωής των σωλήνων.



Εικόνα 2.13: Σχηματικό διάγραμμα ροής του τρόπου λειτουργίας άμεσου ατμού με επανακυκλοφορία.

2.8.1 Στρατηγικές αυτομάτου ελέγχου

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλιακής ενέργειας πρέπει να εξετάσουν το πρόβλημα της διαλείπουσας ηλιακής ακτινοβολίας, ειδικά κατά τη διάρκεια των νεφελωδών ημερών. Οι στρατηγικές αυτομάτου ελέγχου υιοθετούνται για να κρατήσουν τη θερμοκρασία του ατμού κοντά στο καθορισμένο σημείο ή στην επιθυμητή θερμοκρασία. Επιπλέον, η θερμοκρασία εξόδου των συλλεκτών δε θα πρέπει να υπερβεί τους 85°C πάνω από τη θερμοκρασία της εισόδου των συλλεκτών προκειμένου να διατηρηθεί η βέλτιστη απαίτηση ισχύος στο ηλιακό πεδίο. Το HTF εκτίθεται σε διάφορες διαταραχές: διακυμάνσεις περιβαλλοντικής θερμοκρασίας, ταχύτητα του ανέμου και την παραλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω παρουσίας σύννεφων και διαφορετικών εποχών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

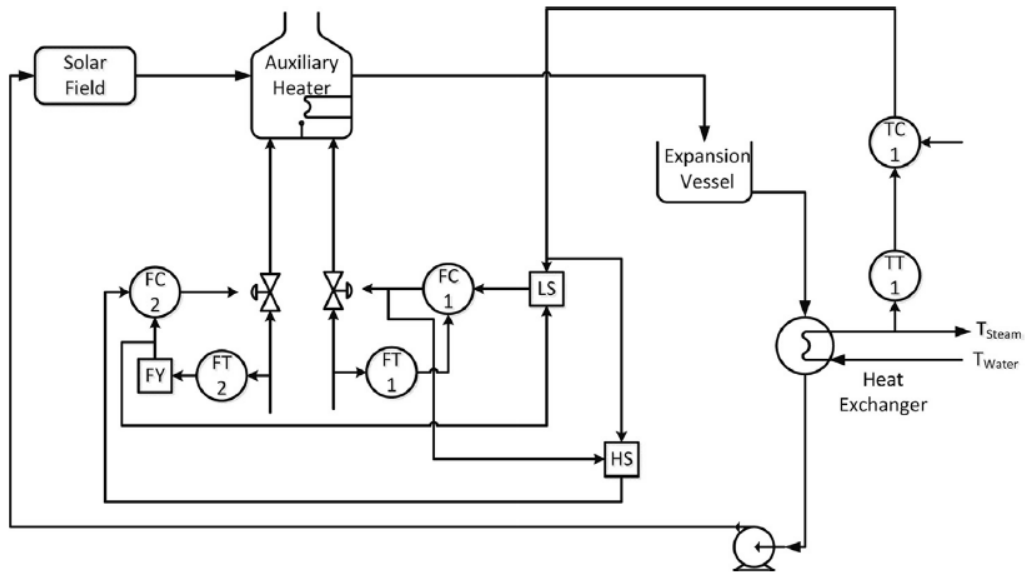


Εικόνα 2.14: Παραδοσιακή στρατηγική ελέγχου με PID ελεγκτή χωρίς τη βοηθητική θέρμανση

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται το παραδοσιακό σχέδιο που χρησιμοποιείται, ένας PID ελεγκτής με ανατροφοδότηση. Αν και διάφορες στρατηγικές έχουν υιοθετηθεί για προηγμένο έλεγχο, όλες έχουν κοινό στοιχείο πως ο ρυθμός ροής της μάζας του HTF είναι η ρυθμιζόμενη μεταβλητή η οποία χρησιμοποιείται για ελέγξει τον ατμό ή τη θερμοκρασία του HTF μετά το πέρασμα από τα PTCs.

Μια εναλλακτική στρατηγική (προσομοίωση και έλεγχος από τους Armando Fontalvo, Juses Garcia, Marco Sanjuan, Ricardo Vasquez Padilla) για τον έλεγχο αυτών των δύο θερμοκρασιών είναι εισάγοντας ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης μετά την έξοδο από το PTC και ένας έλεγχος δύο επιπέδων κλιμάκωσης.

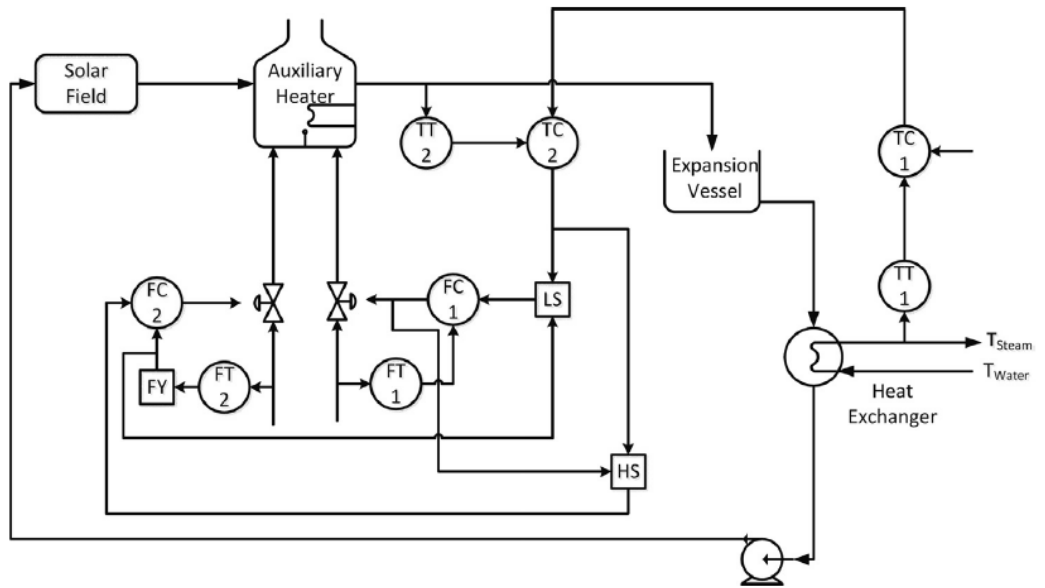
- **Εναλλακτική 1:** Δύο μικρότεροι ελεγκτές PID που ελέγχουν και χειρίζονται το ποσοστό ροής του ορυκτού καυσίμου και το ποσοστό ροής αέρα και ο κύριος ελεγκτής που ελέγχει τη θερμοκρασία του ατμού, ρυθμίζοντας τη ροή του αέρα και τη ροή του καυσίμου κοντά σε καθορισμένα σημεία. Η εναλλακτική αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.15: Εναλλακτική 1 : Διάγραμμα ελέγχου δύο επιπέδων με PID ελεγκτές

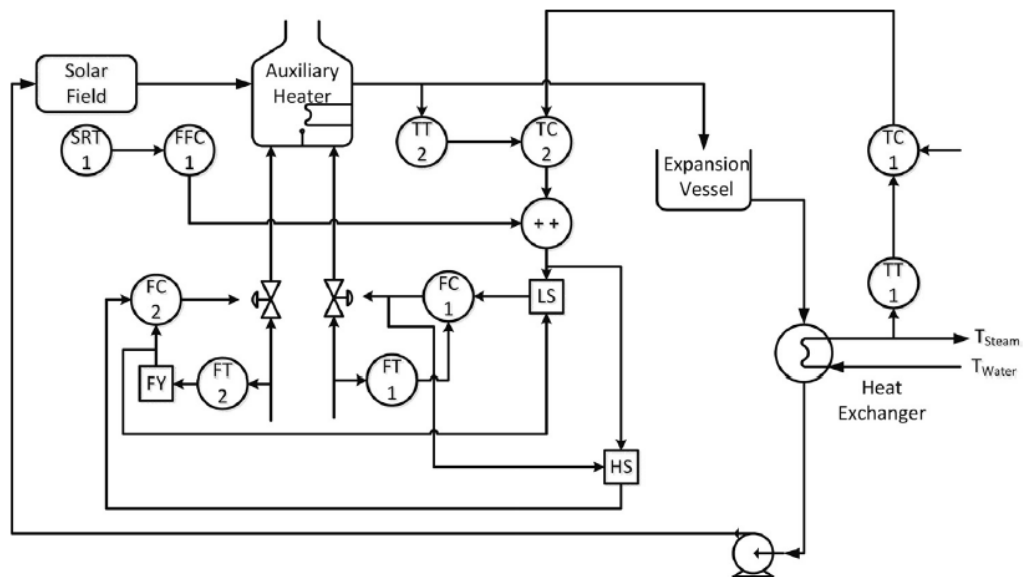
Δύο ακόμα σχέδια ελέγχου εξετάζονται: Ένας κλιμακούμενος έλεγχος τριών επιπέδων και ένας ένας έλεγχος τριών επιπέδων κλιμάκωσης μαζί με έναν ελεγκτή μετάδρασης.

- Εναλλακτική 2:** Το κλιμακωτό σχέδιο ελέγχου τριών επιπέδων προκύπτει από το γεγονός ότι το HTF αλλάζει στην έξοδο του φούρνου πριν από τη θερμοκρασία ατμού και αυτό μπορεί να μετρηθεί και να δίνει ανατροφοδότηση σε έναν PID ελεγκτή που ρυθμίζει το καθορισμένο σημείο των δύο ελεγκτών ροής αέρα και ροής καυσίμων. Ο κύριος έλεγκτης λαμβάνει τη μέτρηση θερμοκρασίας του ατμού από έναν αισθητήρα-πομπό και εάν υπάρχει απόκλιση από το καθορισμένο σημείο, προσαρμόζει το σημείο ρύθμισης του ελεγκτή θερμοκρασίας του φούρνου, ότι ρυθμίζει τη ροή αέρα και τη ροή καυσίμου στο καθορισμένο σημείο και αλλάζει τον αέρα και το ρυθμό ροής του καυσίμου. Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει τον έλεγχο που περιγράψαμε.



Εικόνα 2.16: Εναλλακτική 2 :Διάγραμμα κλιμακούμενου ελέγχου τριών επιπέδων με PID ελεγκτές

- **Εναλλακτική 3:** Το τελευταίο σχέδιο ελέγχου που προτείνεται παρουσιάζεται εδώ.

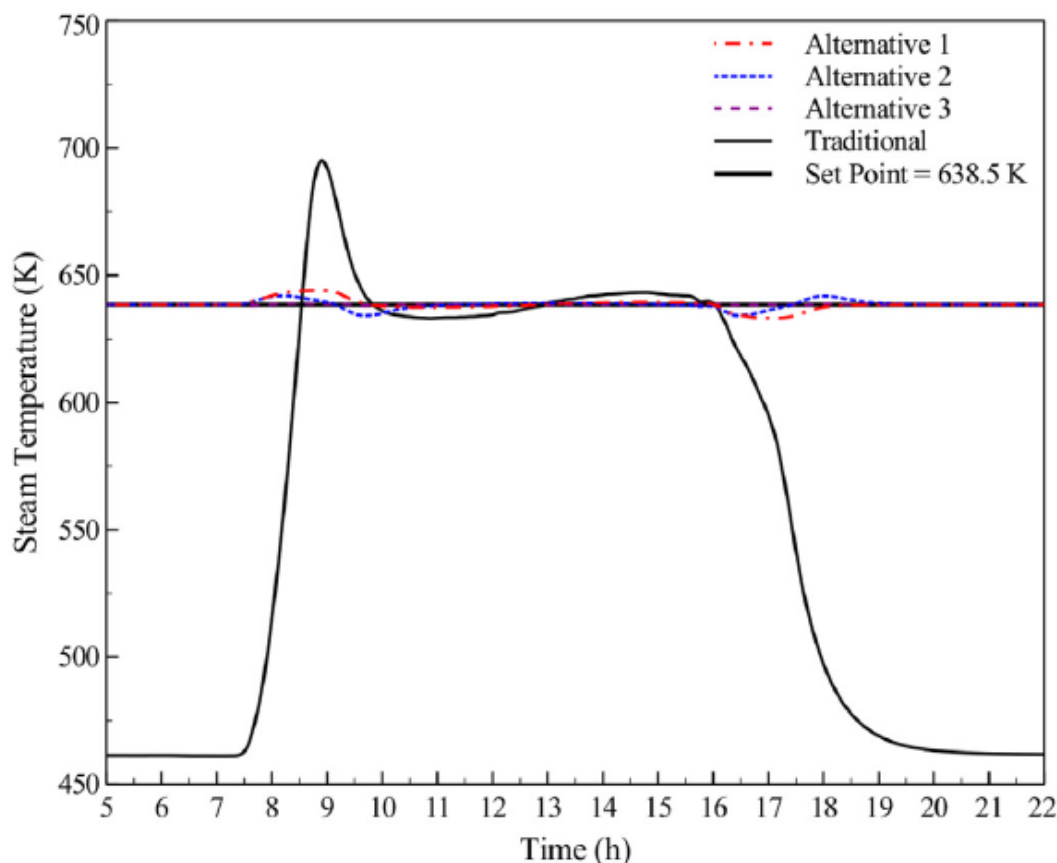


Εικόνα 2.17: Εναλλακτική 3: Διάγραμμα κλιμακούμενου ελέγχου τριών επιπέδων μαζί με έναν ελεγκτή μετάδρασης

Ο τριών επιπέδων κλιμακούμενος έλεγχος συν ένας ελεγκτής μετάδρασης βελτιώνει την απόδοση του ελεγκτή με την αντιστάθμιση των διαταραχών της ακτινοβολίας προτού επηρεάσουν την ελεγχόμενη μεταβλητή μετρώντας την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

2.8.2 Αποτελέσματα

Παρακάτω παραθέτουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των διαφορετικών στρατηγικών που έγινε με simulink από την ερευνητική ομάδα που αναφέρθηκε πιο πάνω. Αυτά είναι σύμφωνα με την ικανότητα της κάθε στρατηγικής να διατηρήσει τη διαδικασία πλησίον του καθορισμένου σημείου θερμοκρασίας.



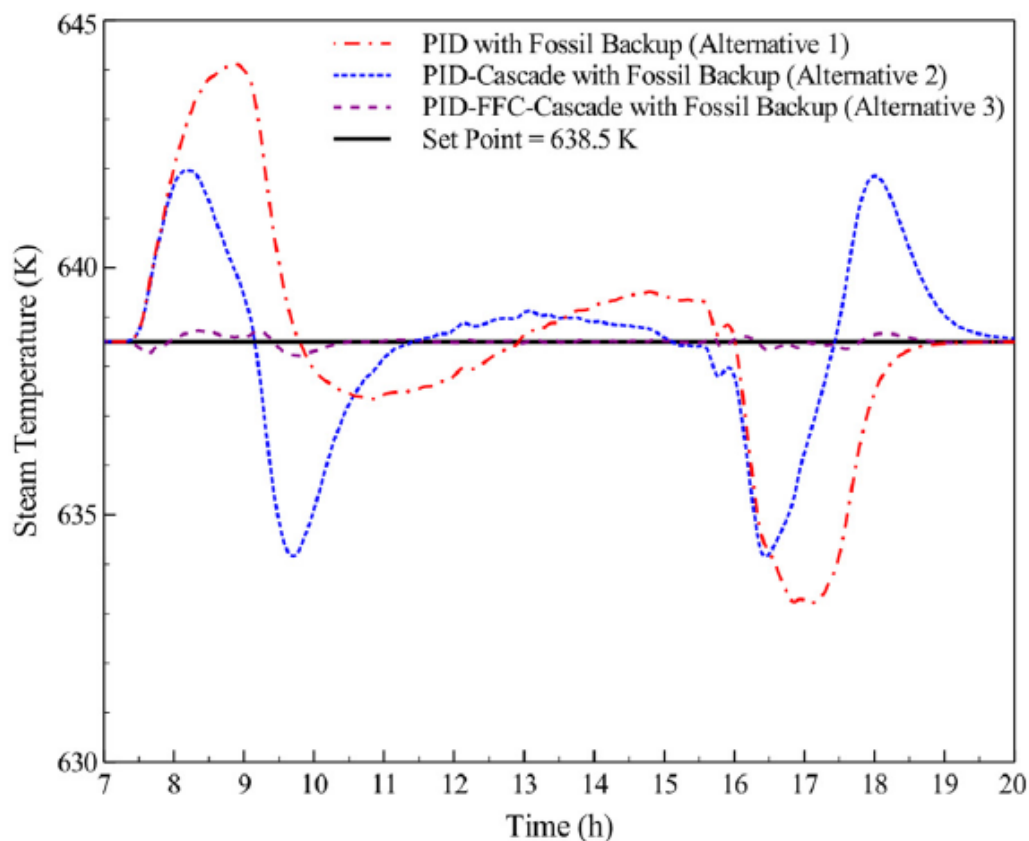
Εικόνα 2.18: Συμπεριφορά της ελεγχόμενης μεταβλητής, της θερμοκρασίας ατμού για τον έλεγχο διαφορετικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων όλων των συστημάτων

Η Εναλλακτική 3 (τρία κλιμακωτά επίπεδα ελέγχου συν ένα ελεγκτή μεταδράσεως) έχει την καλύτερη επίδοση όσο η θερμοκρασία ατμού ήταν μεταξύ 638,2K και 638,7 K. Η κύρια ανησυχία για αυτήν την στρατηγική είναι ότι οι ταλαντώσεις γύρω από το σημείο ρύθμισης παρουσιάζονται

όταν η ηλιακή ακτινοβολία και οι κλιματικές συνθήκες αλλάζουν, λόγω της στρατηγικής ελέγχου μεταδράσεως.

Η δεύτερη καλύτερη στρατηγική επιτυγχάνεται με ένα σύστημα ελέγχου τριών επιπέδων κλιμάκωσης (εναλλακτική λύση 2) που υπολογίστηκε με PID ελεγκτές. Αυτή η στρατηγική δεν αποδίδει τόσο καλά, όσο με έναν ελεγκτή μεταδράσεως επειδή δεν έχει γνώση της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας πριν εισαχθεί η διαδικασία. Τέλος, η εναλλακτική 1, όπου ένας έλεγχος δύο επιπέδων κλιμάκωσης με PID ελεγκτές εφαρμόζεται με ορυκτά διαθέσιμα, είχε τη χαμηλότερη απόδοση, δεδομένου ότι η ελεγχόμενη θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 622,3 και 644,1 K. Όλες οι εναλλακτικές λύσεις που παρουσιάζονται

έχουν καλύτερες επιδόσεις από το παραδοσιακό σύστημα ελέγχου, το οποίο χειρίζεται ο ρυθμός ροής της μάζας του ΗΤΦ, έτσι ώστε η βοηθητική θέρμανση με χρήση των ορυκτών καυσίμων αυξάνει την αντοχή του συστήματος. Ωστόσο, το παραδοσιακό σύστημα ελέγχου επιτρέπει να γλυτώσετε το κόστος, διότι δεν περιλαμβάνει τη χρήση των ορυκτών καυσίμων.



Εικόνα 2.19: Συμπεριφορά της ελεγχόμενης μεταβλητής, της θερμοκρασίας ατμού για τον έλεγχο διαφορετικών συστημάτων, με συστήματα ελέγχου με εφεδρικά ορυκτά καύσιμα

Μπορεί να συναχθεί από τα προηγούμενα αποτελέσματα πως ο έλεγχος με μετάδραση σε συνδυασμό με κλιμακωτό έλεγχο βελτιώνει την απόδοση του συστήματος και διασφαλίζει σταθερότητα. Η μονή χρήση της ανάδρασης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του ατμού απαιτεί ότι υπάρχει σφάλμα πριν από τη λειτουργία του ελεγκτή. Αυτό εξηγεί την υπέρβαση που παρουσιάζεται στις δύο εναλλακτικές 1 και 2. Ωστόσο, η χρήση της πρόσθιας τροφοδότησης και τριών ελέγχων επιπέδων κλιμάκωσης στις εναλλακτικές 2 και 3 περιλαμβάνει περισσότερες παραμέτρους για την προσαρμογή από την εναλλακτική λύση 1, η οποία είναι πιο απλή.

3. Ηλιακός Πύργος Ισχύος



Εικόνα 3.1: Ηλιακός Πύργος Ισχύος

Η πιο πρόσφατη τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών συστημάτων που υπήρξε διαθέσιμη στο εμπόριο ήταν ο ηλιακός πύργος ισχύος. Αυτός ο ακριβός και δυναμικός σχεδιασμός έχει μέχρι στιγμής ενσωματωθεί σε σχετικά λίγες τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο. Το Solar One ισχύος 10 MW (1981) και το Solar Two (1995) ήταν τα πρώτα έργα αυτής της τεχνολογίας, τα οποία χτίστηκαν στην έρημο Mojave στην Καλιφόρνια. Το συγκεκριμένο έργο το οποίο ήταν μια κοινοπραξία του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ, της εταιρείας Southern California Edison Company (SCE), του τομέα υδάτων και ενέργειας του Λος Άντζελες και της επιτροπής ενέργειας της

Καλιφόρνια ήταν μια εγκατάσταση που λειτουργούσε με νερό-ατμό. Το έργο συνέβαλε αποφασιστικά στο να αποδείξει ότι η τεχνολογία με κεντρικό δέκτη είναι αποτελεσματική, αξιόπιστη και πρακτική για χρησιμότητα σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Λειτούργησε το διάστημα 1982-1988 και τελικώς κατάφερε να έχει 96% διαθεσιμότητα κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας.

Λίγα χρόνια αργότερα, το Solar One αναδιαμορφώθηκε σε ένα άλλο ηλιακό πύργο ισχύος που ονομάστηκε Solar Two και λειτουργούσε με την τεχνολογία λιωμένου αλάτος και είχε επίσης θερμικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Η αλλαγή από ατμό σε λιωμένο αλάτι για το εργαζόμενο ρευστό έγινε κυρίως λόγω της ευκολίας ενσωμάτωσης ενός συστήματος υψηλής απόδοσης (περίπου 99%) και χαμηλού κόστους. Το Solar Two λειτούργησε στο διάστημα 1996-1999 και βοήθησε να επικυρωθεί η τεχνολογία του νιτρικού αλάτος, να μειώσει τους τεχνικούς και οικονομικούς κινδύνους των πυλώνων της ΔΕΗ και να τονωθεί η εμπορευματοποίηση του πύργου ηλιακής ισχύος

Άλλα έργα όπως το PS10 ισχύος 10 MW και το PS20 με ισχύ 20MW στην Ισπανία, και το Sierra SunTower ισχύος 5MW στην Καλιφόρνια πρόσφατα ολοκληρώθηκαν και τέθηκαν σε λειτουργία. Επίσης, υπό κατασκευή βρίσκονται αυτή τη στιγμή αρκετά εμπορικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως το BrightSource Energy's Ivanpah (392MWe) στην Καλιφόρνια και το Torresol Energy's (SENER and Masdar) Gemasolar (17MWe) στην Ισπανία ενώ ήδη έχουν ανακοινωθεί ότι ξεκινούν την κατασκευή ανάλογων εγκαταστάσεων εταιρείες στις περιοχές Toporah, Νεβάδα και Palm Springs, Καλιφόρνια.

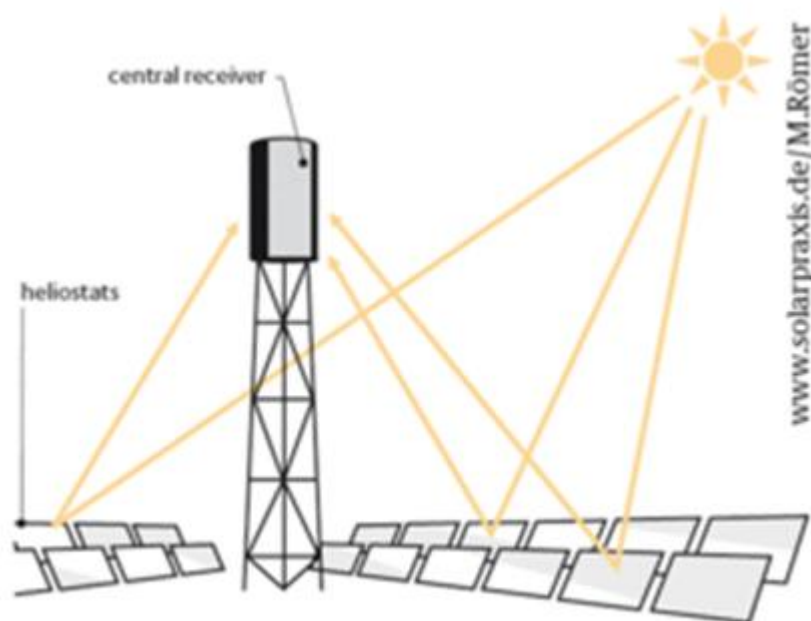


Εικόνα 3.2: Ηλιακός Πύργος Ισχύος και πεδίο των ηλιοστατών

3.1 Περιγραφή λειτουργίας

Ο σχεδιασμός του πεδίου των ηλιοστατών με τους συλλέκτες διαθέτει μια μεγάλη σειρά από επίπεδους καθρέπτες οι οποίοι διανέμονται γύρω από έναν κεντρικό δέκτη τοποθετημένο σε ένα ηλιακό πύργο. Κάθε ηλιοστάτης βρίσκεται πάνω σε ένα διπλό άξονα παρακολούθησης του ήλιου και έχει μια επιφάνεια που κυμαίνεται από 50 μέχρι 150 m². Χρησιμοποιώντας ελαφρώς κοίλα τμήματα καθρέπτη, οι ηλιοστάτες μπορούν να αυξήσουν την ηλιακή ροή που αντικατοπτρίζουν αν και αυτό ανεβάζει το κόστος παραγωγής. Κάθε ηλιοστάτης είναι προσανατολισμένος να αντανακλά κάθε ηλιακή ακτίνα απευθείας στην κεντρική μονάδα λήψης. Η τοποθέτηση του δέκτη πάνω σε ένα ψηλό πύργο μειώνει την απόσταση μεταξύ των καθρεπτών που θα τοποθετηθούν για να αποφευχθεί η σκίαση. Το ύψος των

πύργων κυμαίνεται μεταξύ 75-150 m.



Εικόνα 3.3: Αρχή λειτουργίας του κεντρικού δέκτη

Ένα ρευστό που κυκλοφορεί σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου, διέρχεται από τον κεντρικό δέκτη και απορροφά θερμική ενέργεια για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας και την αποθήκευση. Ένα πλεονέκτημα του ηλιακού πύργου ισχύος είναι ότι μεγάλη ποσότητα ακτινοβολίας επικεντρώνεται σε ένα μόνο δέκτη ($200-1000\text{kW/m}^2$) και έτσι ελαχιστοποιεί τις απώλειες θερμότητας και απλοποιεί τις απαιτήσεις μεταφοράς και αποθήκευσης. Η παραγωγή ενέργειας συνήθως πραγματοποιείται με ατμό και γεννήτριες στροβίλων. Τέλος το σχέδιο με τον μονό δέκτη παρέχει τη δυνατότητα εύκολης ενσωμάτωσης και συνεργασίας με τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα (υβριδικές τεχνολογίες).

3.2 Πεδίο του ηλιοστάτη και συλλέκτης

Το πεδίο των ηλιοστατών είναι ένα κεντρικό υποσύστημα στους πύργους ηλιακής ενέργειας επειδή συνήθως συμβάλλει περίπου κατά 50% στο συνολικό κόστος και προκαλεί απώλειες ισχύος 40%. Ως εκ τούτου ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση της διάταξης του πεδίου του ηλιοστάτη είναι πολύ σημαντική. Λόγω της σχετικής θέσης μεταξύ των ηλιοστατών και της σχετικής θέσης μεταξύ του πεδίου των ηλιοστατών και του πύργου, υπάρχουν απώλειες που σχετίζονται με την επίδραση του συνημιτόνου, τη σκίαση, το μπλοκάρισμα, την εξασθένηση λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών και διάφορες διαρροές. Αρκετοί αλγόριθμοι και μεθοδολογίες υπάρχουν στη βιβλιογραφία για το σχεδιασμό του πεδίου των

ηλιοστατών για να μειωθούν αυτές οι απώλειες. Επιπλέον, αυτοί οι αλγόριθμοι διευκολύνουν το σχεδιασμό με τη μείωση του αριθμού των παραμέτρων που εξετάζονται. Επί του παρόντος, οι ακτινικές διάταξεις κλιμακωτού τύπου χρησιμοποιούνται σε πραγματικές διατάξεις πεδίων.

3.2.1 Αλγόριθμοι διάταξης ηλιοστατών

Ο σχεδιασμός της διάταξης των ηλιοστατών είναι ένα σύνθετο έργο λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους και του υψηλού αριθμού μεταβλητών που πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να επιτευχθεί ο καλύτερος αριθμός ηλιοστατών και οι συντεταγμένες τους.

- **Πυκνά ακτινική κλιμάκωση**

Η ακτινική κλιμακωτή διάταξη προτάθηκε αρχικά από το Πανεπιστήμιο του Χιούστον για τον αλγόριθμο του RCELL. Σε αυτές τις διατάξεις οι ηλιοστάτες βρίσκονται γύρω από τον πύργο σαν δακτύλιος. Οι ηλιοστάτες ενός δακτυλίου τοποθετούνται με μια αζιμουθιακή γωνιακή απόσταση και ο αλγόριθμος εξασφαλίζει ότι κανένας ηλιοστάτης δεν είναι μπροστά από άλλον μιας παρακείμενης σειράς. Το Collado παρουσιάζει μια απλοποιημένη έκδοση αυτού του αλγορίθμου που θεωρεί ότι η απόσταση μεταξύ των δακτυλίων είναι μια σταθερή ζώνη. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες σκίασης και μπλοκαρίσματος και για να διατηρηθούν οι ελάχιστες αποστάσεις για μηχανικές πιέσεις, ο αλγόριθμος προτείνει την παράμετρο «desp» για να ορίσει την ελάχιστη αυτή απόσταση μεταξύ των ηλιοστατών.

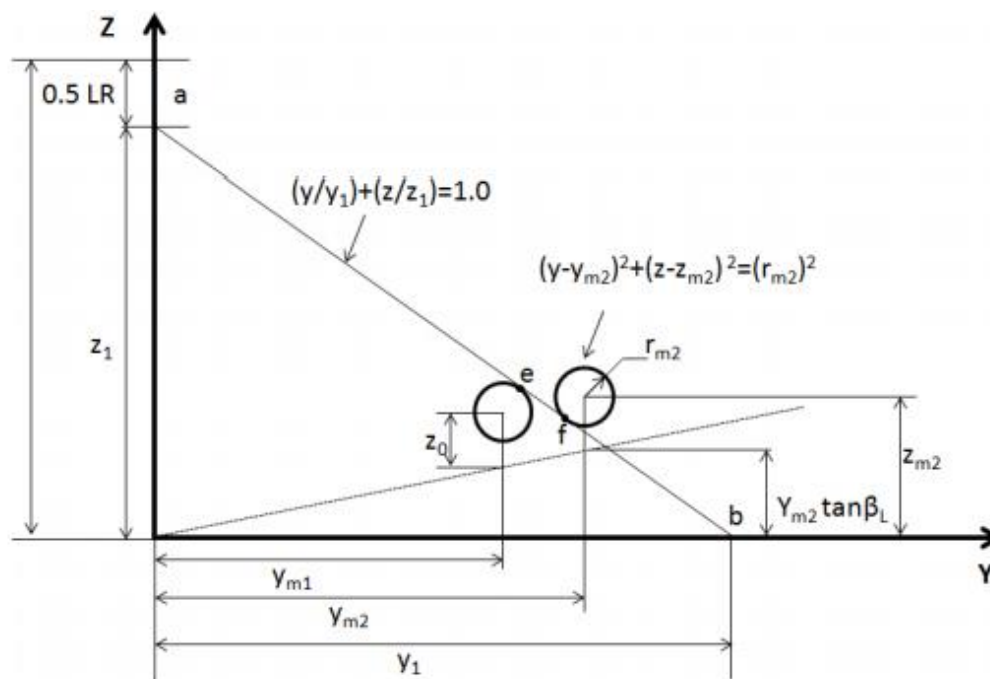
- **Campo**

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προτείνει μια ακτινωτή επέκταση της προηγούμενης διάταξης που περιγράφηκε. Για αυτόν τον αλγόριθμο, το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων που καθορίζουν κάθε ζώνη του πεδίου (διάστημα αζιμουθίου, η ακτίνα της πρώτης σειράς στη ζώνη, ο αριθμός ηλιοστατών ανά σειρά και ο αριθμός σειρών ανά ζώνη). Κατόπιν, για κάθε ηλιοστάτη υπολογίζεται μια ακτινωτή επέκταση, χρησιμοποιώντας έναν παράγοντα αποκλεισμού που υπολογίζει πόσο αυξάνει η ακτινωτή απόσταση.

- **Γραφική μέθοδος**

Ο αλγόριθμος παρουσιάζει μια μεθοδολογία για την δημιουργία μιας διαμόρφωσης ενός ακτινωτού κλιμακωτού πεδίου χρησιμοποιώντας μια γραφική μέθοδο που αποφεύγει τις απώλειες μπλοκαρίσματος μεταξύ των ηλιοστατών. Το πεδίο χωρίζεται σε ζώνες για να αυξήσει την αποδοτικότητα της χρήσης της γης. Καθορίζεται η ακτίνα για μια νέα σειρά που μεγιστοποιεί τη χρήση της γης και για

το σκοπό αυτό ο αλγόριθμος πρέπει να αποφασίσει εάν θα προσθέσει μια νέα σειρά στην τρέχουσα ζώνη ή να αρχίσει μια νέα ζώνη όταν απαιτείται ένας νέος δακτύλιος. Για να προστεθεί μια νέα σειρά στη ζώνη η ακτίνα υπολογίζεται τριγωνομετρικά.



Εικόνα 3.4: Σχέδιο που χρησιμοποιείται στη γραφική μέθοδο για τον υπολογισμό της ακτίνας της νέας σειράς

Προκειμένου να υπολογιστεί η ακτίνα, σχεδιάζεται μια γραμμή από το κέντρο του δέκτη και εφάπτεται στον ηλιοστάτη της νέας σειράς και της προηγούμενης όπως φαίνεται παραπάνω.

- **DELSOL**

Ο αλγόριθμος DELSOL χωρίζει το πεδίο σε ζώνες που διανέμονται σε ακτινωτή και αζιμουθια κατεύθυνση. Μετά, υπολογίζονται το διάστημα του αζιμουθίου και το ακτινωτό για αυτή τη ζώνη χρησιμοποιώντας ορισμένες εξισώσεις και μετά από την επαλήθευση πως αυτό το διάστημα διατηρεί τα μηχανικά όρια, υπολογίζεται η πυκνότητα των ηλιοστατών για κάθε ζώνη. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, υπολογίζεται ο αριθμός των ηλιοστατών για κάθε ζώνη για να καθοριστούν οι θέσεις τους. Εκτός από την καθαρά ακτινική κλιμακωτή διαμόρφωση, η DELSOL επίσης περιλαμβάνει την επιλογή να χρησιμοποιήσει «split planes» για να ελαχιστοποιηθεί η σκίαση και το μπλοκάρισμα. Το «split plane» είναι ένας δακτύλιος σε μια ζώνη στην οποία η απόσταση του αζιμουθίου αλλάζει σε σχέση με την προηγούμενη τιμή. Κινούμενοι από το κέντρο μιας ζώνης με ακτινική κατεύθυνση προς τον πύργο, οι παρακείμενες σειρές γίνονται πιο συμπιεσμένες αυξάνοντας τη σκίαση και το μπλοκάρισμα. Όταν τα σφάλματα αυτά γίνουν

υπερβολικά, τότε μερικοί ηλιοστάτες αφαιρούνται από έναν δακτύλιο για να ανακουφιστούν οι υπόλοιποι.

- **Σπείρα Fermat**

Η σπείρα Fermat χρησιμοποιεί τις τιμές των παραμέτρων «a» και «b» για να καθορίσει τις εξισώσεις που θα δημιουργήσουν τις σπείρες. Αυτές οι εξισώσεις καθορίζουν την ακτινική απόσταση προς τον πύργο και τη γωνία αζιμουθίου στο πεδίο. Μετά τον καθορισμό των θέσεων των ηλιοστατών, ο αλγόριθμος πρέπει να να διασφαλίσει ότι αυτές οι θέσεις σέβονται τα όρια των αποστάσεων ασφαλείας. Σε αυτό τον αλγόριθμο η πυκνότητα των ηλιοστατών μεταξύ των ζωνών είναι πιο συνεχής σε σχέση με τη διαμόρφωση ακτινικής κλιμάκωσης. Οι παράμετροι που χρησιμοποιεί κάθε αλγόριθμος για να δημιουργήσει ένα πεδίο είναι διαφορετικές και έτσι οι αριθμοί των τιμών που συμμετέχουν στη βελτιστοποίηση είναι διαφορετικές για κάθε αλγόριθμο.

Algorithm	Parameter	Description
Dense radial staggered	dsep	Security distance for heliostats
Campo	dsep	Security distance for heliostats
	freb	Reference blocking factor
Graphical method	dsep7	Security distance for heliostats
DELSOL	Nrad;	Number of radial zones in the field
	expansionFactor	Expansion factor for fields
	gapBetweenZones	Spacing for rows of different zones
Fermat spiral	a	Parameter 'a' of the Fermat spiral equation
	b	Parameter 'b' of the Fermat spiral equation

Εικόνα 3.5: Παράμετροι που ορίζουν κάθε αλγόριθμο

3.2.2 Περιορισμός ορίου για το πεδίο του ηλιοστάτη

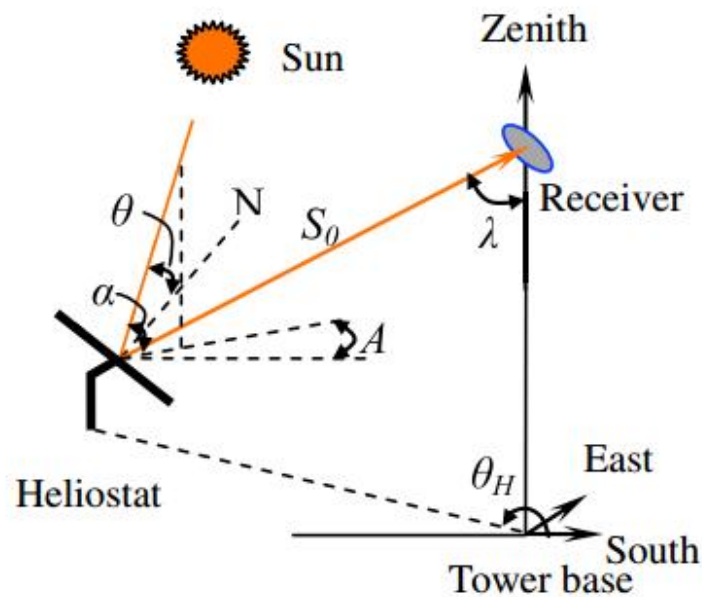
Μια βελτιωμένη μέθοδος περιορισμού του ορίου για το σχεδιάγραμμα του πεδίου των ηλιοστατών χαρακτηρίζεται από το γεωμετρικό άνοιγμα των δεκτών και από έναν παράγοντα αποδοτικότητας που είναι το προϊόν της ετήσιας αποδοτικότητας συνημιτόνου και της ετήσιας ατμοσφαιρικής αποδοτικότητας μετάδοσης. Το σχέδιο αρχίζει από την εισαγωγή ενός κατάλληλου παράγοντα ορίου που ακολουθείται από τον υπολογισμό του παράγοντα αποδοτικότητας και έπειτα μια σύγκριση μεταξύ του υπολογισμένου αποτελέσματος και του εισαγμένου παράγοντα.

Η νέα αυτή μέθοδος μπορεί να βεβαιώσει ότι οι ηλιοστάτες τοποθετούνται σε εκείνες τις ζώνες όπου η ετήσια αποδοτικότητα συνημιτόνου, η ετήσια αποδοτικότητα παρεμπόδισης και η ετήσια ατμοσφαιρική αποδοτικότητα μετάδοσης είναι οι υψηλότερες. Η αποδοτικότητα του συνημιτόνου είναι ίση με το

συνημίτονο της γωνίας παρέμπόδισης ρ σχετικά με το κέντρο του ηλιοστάτη και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\eta_{\cos} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[\sin \alpha \cos \lambda - \cos(\theta_H - A) \cos \alpha \sin \lambda + 1 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Όπου α είναι η ηλιακή γωνία ύψους, A είναι η ηλιακή γωνία αζιμουθίου, λ είναι η γωνία μεταξύ της ανακλώμενης ακτίνας και του κάθετου επιπέδου του πύργου, θ_H είναι η αζιμουθιακή γωνία σε σχέση με τη βάση του πύργου.



Εικόνα 3.6: Σύστημα συντεταγμένων της διάταξης του πεδίου των ηλιοστατών

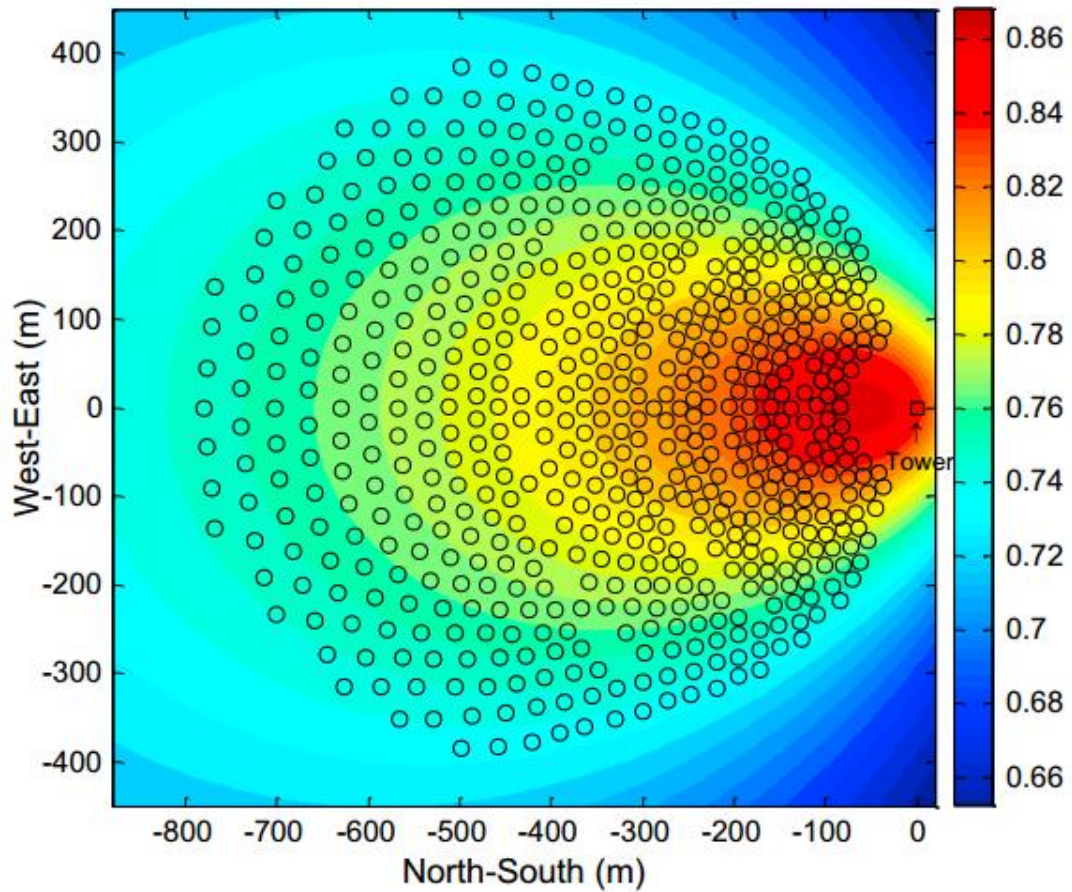
Η ατμοσφαιρική αποδοτικότητα μετάδοσης εξαρτάται έντονα από τις καιρικές συνθήκες και την απόσταση μεταξύ του ηλιοστάτη με τον δέκτη. Για μια οπτική απόσταση 40 km, η ατμοσφαιρική αποδοτικότητα μετάδοσης μπορεί εύκολα να υπολογιστεί σαν συνάρτηση μεταξύ του δέκτη με τον ηλιοστάτη.

$$\eta_{at} = 0.99321 - 0.0001176 \times S_0 + 1.97 \times 10^{-8} \times S_0^2 \quad (S_0 \leq 1000 \text{ m})$$

$$\eta_{at} = e^{-0.0001106 \times S_0} \quad (S_0 > 1000 \text{ m})$$

Όπου S_0 είναι η απόσταση αυτή.

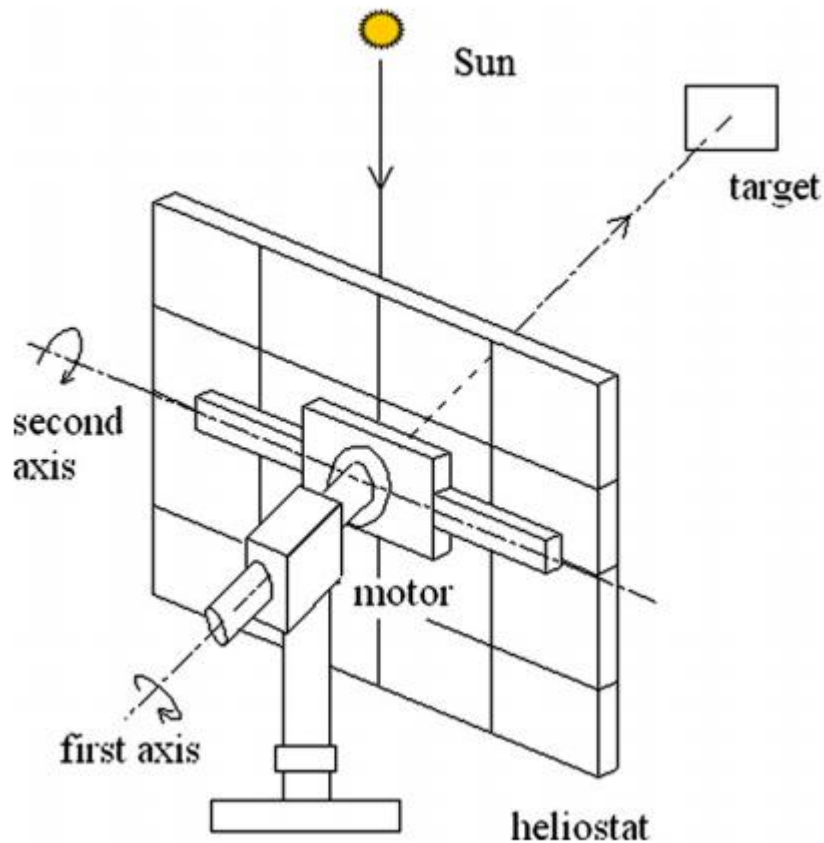
Παίρνοντας ως παράδειγμα το σύστημα PS10, ο παράγοντας αποδοτικότητας υπολογίστηκε από την HFLD.



Εικόνα 3.7: Κατανομή του συντελεστή απόδοσης για το έργο PS10

3.2.3 Παρακολούθηση του ήλιου

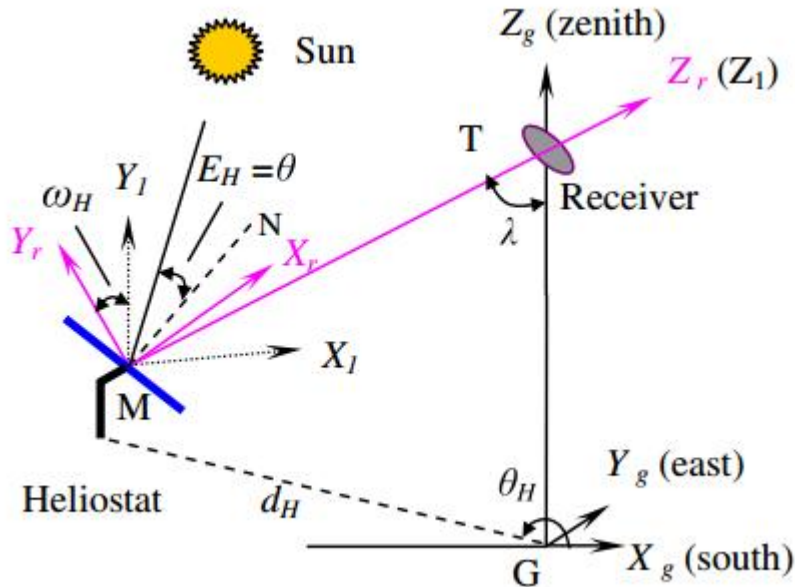
Το ευθυγραμμισμένο στον στόχο ηλιόστατο έχει δύο άξονες περιστροφής.



Εικόνα 3.8: Τοποθετημένος ηλιοστάτης με άξονες παρακολούθησης

Ο πρώτος άξονας καθορίζει την κίνηση σχετικά με το έδαφος και δείχνει προς το στόχο και ο δεύτερος άξονας είναι κάθετος στον πρώτο άξονα και βρίσκεται στο επίπεδο του ηλιοστάτη. Καθώς ο ήλιος κινείται, ο ηλιοστάτης περιστρέφεται γύρω από τον πρώτο άξονα αρχικά έτσι ώστε το επίπεδο φως του ηλίου συμπίπτει με το μεσημβρινό επίπεδο του ηλιοστάτη και μετά περιστρέφεται γύρω από το δεύτερο άξονα για να απεικονίσει το φως του ηλίου στο στόχο. Οι γωνίες περιστροφής του ηλιοστάτη μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τον ηλιακό χρόνο, τον ηλιοστάτη και τη θέση του στόχου στο έδαφος.

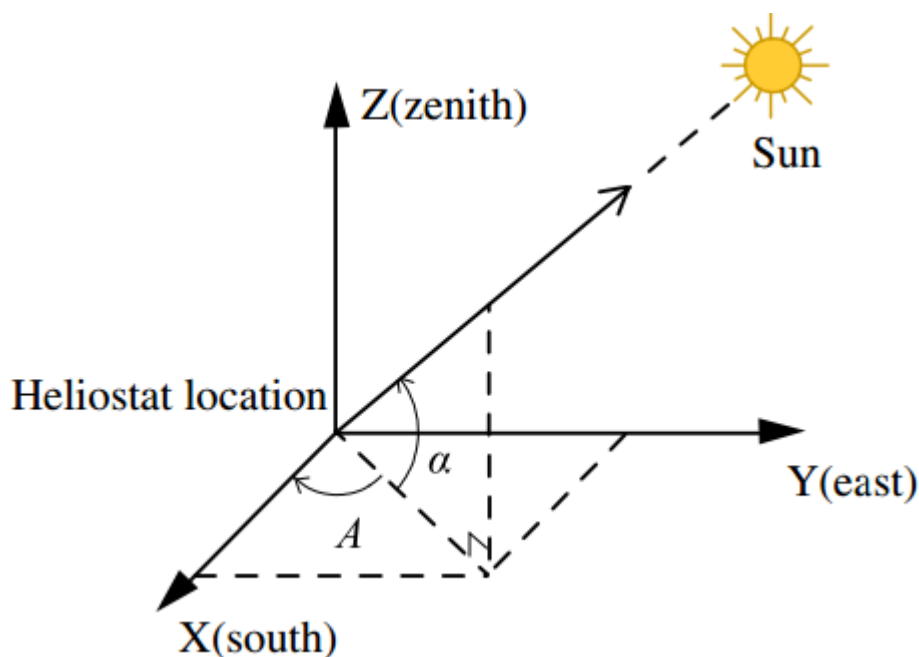
Για την εξαγωγή των τύπων της γωνίας περιστροφής για τους ευθυγραμμισμένους στο στόχο ηλιοστάτες, χρησιμοποιείται το σύστημα του δεξιού χεριού με τις καρτεσιανές συντεταγμένες που είναι εγκατεστημένες.



Εικόνα 3.9: Σύστημα συντεταγμένων για την εξαγωγή των τύπων για την περιστροφή του ηλιοστάτη

Οι συντεταγμένες του εδάφους ορίζονται ως X_g, Y_g, Z_g , με κέντρο τον πύργο ισχύος G . X_g δείχνει προς το Νότο, Y_g δείχνει προς το Βορρά και Z_g δείχνει προς το ύψος του πύργου. Οι ανακλαστικές συντεταγμένες ορίζονται ως X_r, Y_r, Z_r όπου το κέντρο M είναι το επίπεδο του ηλιοστάτη. Το Z_r είναι κατά μήκος της ανάκλασης προς το στόχο, X_r είναι το οριζόντιο και Z_r και το Y_r είναι κάθετο προς το X_r προς τα πάνω. Το T δηλώνει το κέντρο του στόχου που αντιστοιχεί στο σημείο τομής των αξόνων Z_r και Z_g . Το επίπεδο $Y_r Z_r$ αντιστοιχεί στο μεσημβρινό επίπεδο του ηλιοστάτη στη μηδενική θέση ενώ οι βοηθητικές συντεταγμένες X_1, Y_1, Z_1 αντιστοιχούν στην πραγματική θέση του ηλιοστάτη μετά τις περιστροφές του πρώτου άξονα.

Το διάνυσμα πρόσπτωσης που δείχνει προς τον ήλιο από τη θέση των ηλιοστατών στις συντεταγμένες του εδάφους φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.10: Διάνυσμα της ακτίνας σε συντεταγμένες εδάφους

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \cos\beta_i \\ \cos\gamma_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A \cos\alpha \\ \sin A \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix}$$

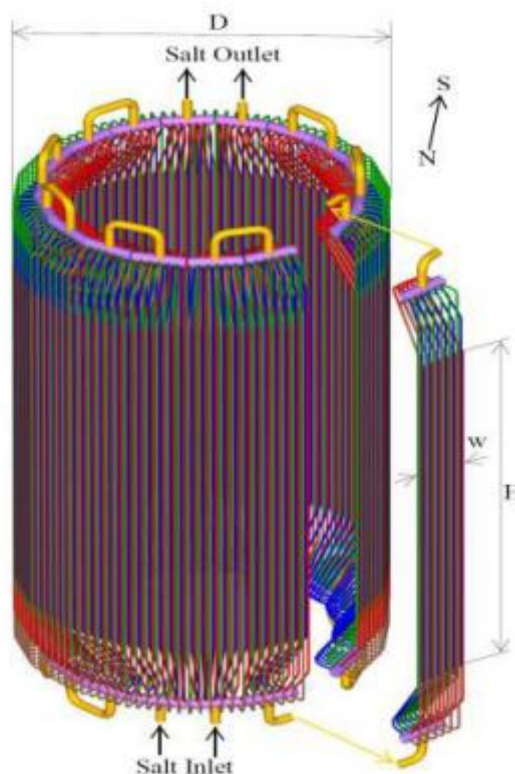
Όπου $\cos\alpha_i$, $\cos\beta_i$, $\cos\gamma_i$ είναι τα στοιχεία συνημιτόνου κατεύθυνσης του διανύσματος πρόσπτωσης και όπως αναφέρθηκε προηγουμένα, α είναι η ηλιακή γωνία ύψους και A είναι η αζιμουθιακή γωνία που μετριέται δεξιόστροφα σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο από την προβολή της κεντρικής ακτίνας του ήλιου. Οι γωνίες α και A μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τον ηλιακό χρόνο και τη θέση των ηλιοστατών στη γη.

3.3 Δέκτης

3.3.1 Νέο σχέδιο σωληνωτού δέκτη

Ο παραδοσιακός δέκτης με χρήση λιωμένου αλατιού διαμορφώνεται ως ένας κυλινδρικός δέκτης που σχηματίζεται από ένα μεταβλητό αριθμό κάθετων τμημάτων σωλήνων που ονομάζονται πάνελ. Κάθε πάνελ περιλαμβάνει μια κεφαλή εισόδου, τα ακροφύσια εισόδου, τους σωλήνες, τα ακροφύσια εξόδου και μια κεφαλή εξόδου. Οι σωλήνες κάθε πάνελ υποστηρίζονται ξεχωριστά στην κορυφή τους και περιοδικά οδηγούνται πέρα από το μήκος τους από συνδετήρες σωλήνων που επιτρέπουν απεριόριστη καθοδική θερμική διαστολή τους. Προκειμένου να

μειωθούν οι απώλειες θερμότητας στην πίσω πλευρά των σωλήνων, υπάρχει ένα πυρίμαχο τοίχωμα θερμικά μονωμένο το οποίο είναι φτιαγμένο από ένα υλικό υψηλής ανακλαστικότητας (λευκό PyroMark).



Εικόνα 3.11: Σχέδιο ενός παραδοσιακού εξωτερικού δέκτη

Σε αυτή τη μελέτη οι σωλήνες του δέκτη πρέπει να είναι φτιαγμένες με ειδικά υλικά που να μπορούν να υποστηρίξουν υψηλές θερμοκρασίες και τη διάβρωση από το αλάτι. Το υλικό Incoloy 800H χρησιμοποιείται επικαλυμμένο με υλικό υψηλής ηλιακής απορροφητικότητας (Μαύρο PyroMark). Στο θερμικό μοντέλο, η πυκνότητα και η ειδική θερμοκρασία του υλικού του σωλήνα θεωρείται ότι είναι σταθερή με τη θερμοκρασία και μόνο οι μεταβολές της θερμικής αγωγιμότητας με διακυμάνσεις της θερμοκρασίας λαμβάνονται υπόψη. Το HTF είναι λιωμένο αλάτι με 60%KNO₃ - 40%NaNO₃.

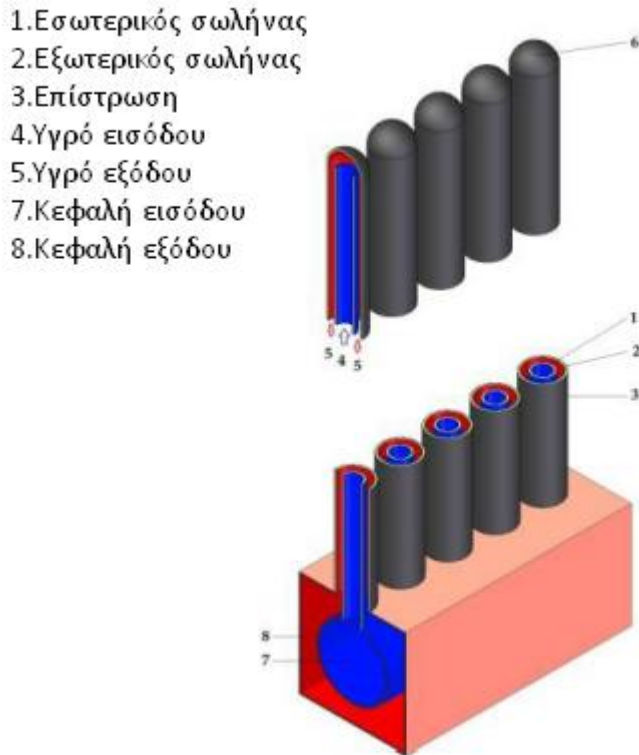
Η ροή εισόδου, στη χαμηλότερη θερμοκρασία του άλατος, εισέρχεται παράλληλα μέσα από κάθε σωλήνα που βρίσκονται στα δύο βορειότερα πάνελ του δέκτη όπου η συγκεντρωμένη ηλιακή ροή είναι μέγιστη. Το αλάτι στη συνέχεια χωρίζεται σε δύο παράλληλες διαδρομές ροής (βόρειο-ανατολικά-νότια, βόρεια-δυτικά-νότια). Για να περάσει από το ένα πάνελ στο επόμενο, το HTF ρέει μέχρι να φτάσει στο νότιο πάνελ του δέκτη όπου το λιωμένο αλάτι εξέρχεται στη μέγιστη θερμοκρασία.

Σχήμα δέκτη



Εικόνα 3.12: Σχέδιο ενός μπαγιονέτ δέκτη

Από τη μια πλευρά, η νέα προτεινόμενη σχεδίαση του δέκτη αποτελείται από πάνελ που σχηματίζονται από μπαγιονέτ σωλήνες αντί για κυκλικούς σωλήνες. Ο σωλήνας με τη μεγαλύτερη διάμετρο θα καλυφθεί στον εξωτερικό της τοίχωμα με μια κοινή επίστρωση (Μαύρο PyroMark). Το υλικό του σωλήνα είναι το ίδιο με πριν αν και ο εσωτερικός σωλήνας θα μπορούσε να γίνει από ανοξείδωτο χάλυβα λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας.



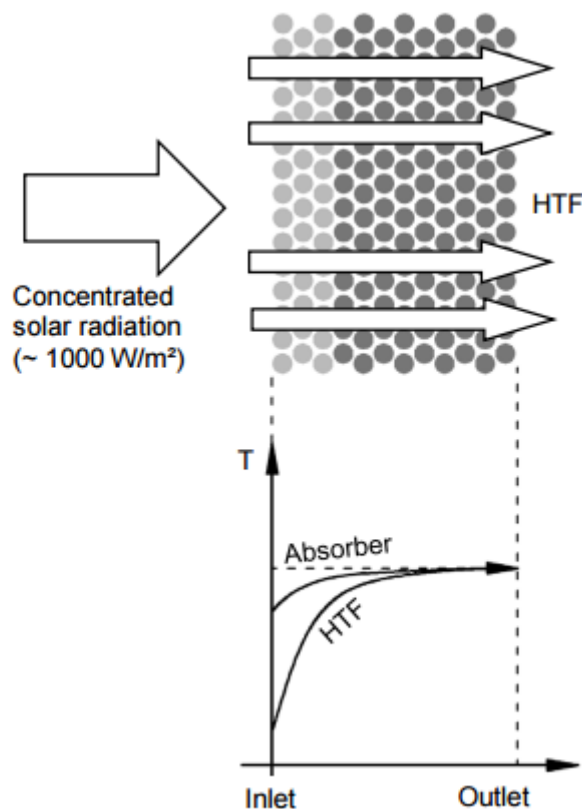
Εικόνα 3.13: Σχέδιο ενός πάνελ του μαγιονέτ δέκτη

Ο τρόπος λειτουργίας των μαγιονέτ δεκτών έχει δύο πιθανές κατευθύνσεις ροής. Το κρύο υγρό μπορεί να αντληθεί μέσα στον εσωτερικό σωλήνα και στη συνέχεια το θερμό ρευστό ρέει μέσω του δακτυλιοειδούς διακένου (εσωτερικός μαγιονέτ) ή αλλιώς το κρύο υγρό μπορεί να εισαχθεί στο δακτυλιοειδές διάκενο και να εξέλθει θερμότερο από τον εσωτερικό σωλήνα. Δεδομένου ότι σε έναν σωλήνα μαγιονέτ οι ζώνες εισόδου και εξόδου βρίσκονται στο ίδιο άκρο του σωλήνα, οι κεφαλές θα βρίσκονται στον πυθμένα για να επιτρέψει την εύκολη αποστράγγιση. Επιπλέον, στην κορυφή των σωλήνων μαγιονέτ, θα μπορούσε να τοποθετηθεί μια βαλβίδα εξαέρωσης για να αποφευχθεί η συγκέντρωση αερίου.

3.3.2 Ογκομετρικός σωλήνας

Το σχέδιο του ογκομετρικού δέκτη βασίζεται σε απορροφητικά υλικά που αποτελούνται από ένα πλήθος από πορώδη αλληλένδετα σχήματα όπως είναι ο αφρός, κυψελοειδείς δομές, πορώδη κεραμικά και άλλα υλικά που έχουν πόρους. Το απορροφητικό υλικό καταλαμβάνει όγκο στο εσωτερικό του δέκτη και ακτινοβολείται με συγκεκριμένη ακτινοβολία ενώ απορροφά την ενέργεια στο βάθος της δομής και επομένως θερμαίνεται. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του ογκομετρικού ηλιακού δέκτη δηλαδή την

άυξηση της περιοχής μεταφοράς θερμότητας και την επακόλουθη μείωση της τοπικής πυκνότητας ροής στην επιφάνειες του απορροφητή. Το ρευστό μεταφοράς ενέργειας, το οποίο συνήθως είναι αέρας, περνά μέσα από τον όγκο και την ίδια στιγμή η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται μέσω συναγωγής από τον απορροφητή στο HTF. Η θέρμανση του HTF λόγω των επιπτώσεων της απορρόφησης και της σκέδασης της προσπίπτουσας συγκεντρωμένης ακτινοβολίας στο εσωτερικό του είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με τη μεταφερόμενη θερμότητα και συνήθως αμελητέα.



Εικόνα 3.14: Απορρόφηση στη μεταφορά θέρμανσης του ογκομετρικού δέκτη

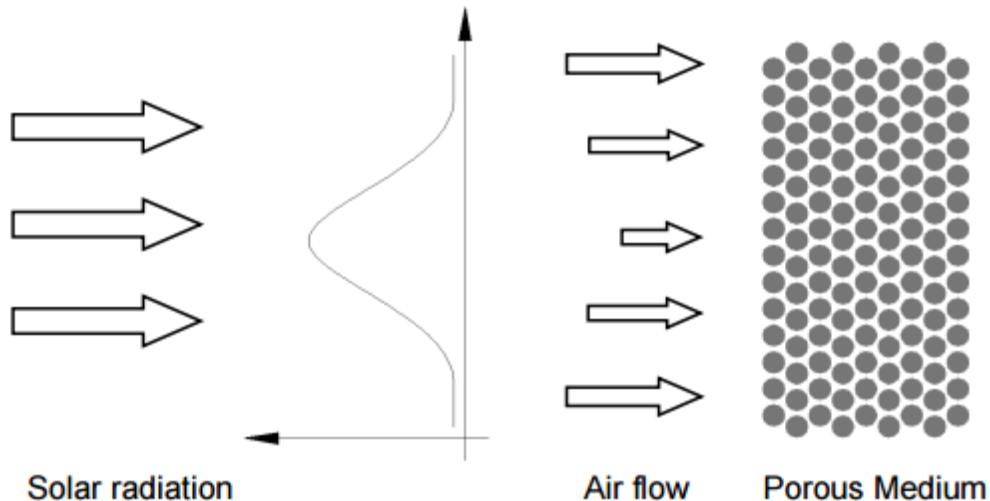
Παραπάνω φαίνεται η βασική αρχή συμπεριλαμβανομένης της ογκομετρικής επίδρασης που αναγκάζει τη θερμοκρασία της ακτινοβολημένης επιφάνειας να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία εξόδου προκαλώντας εκ νέου απώλειες ακτινοβολίας.

Σχετικά με την επιλογή του υλικού, τα μέταλλα και τα κεραμικά είναι τα κατάλληλα για τον απορροφητή λόγω των σχετικά υψηλών θερμοκρασιών. Οι ογκομετρικοί δέκτες με το μεταλλικό απορροφητή είναι ικανοί να παράγουν θερμοκρασίες εξόδου από 800°C-1000°C, οι δέκτες με κεραμικούς απορροφητές με ανθρακικό πυρίτιο σιλκόνης (SiSiC) θερμοκρασία 1200°C και οι δέκτες με απορροφητή ανθρακικού πυριτίου (SiC) θερμοκρασία μέχρι 1500°C. Το κύριο πλεονέκτημα του ογκομετρικού δέκτη σε σύγκριση με το σωληνωτό είναι η ικανότητα να απορροφά

σχετικά υψηλότερη ηλιακή ροή και να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ εξακολουθεί να είναι συμπαγής.

3.3.2.1 Σταθερότητα ροής

Ένα σημαντικό ζήτημα του ογκομετρικού δέκτη είναι η σταθερότητα ροής. Παρουσιάζεται η βασική σχέση μεταξύ της ηλιακής ροής και της ταχύτητας ροής.



Εικόνα 3.15: Ζητήματα αστάθειας ροής

Μπορεί να φανεί ότι η τοπική υψηλή ηλιακή ροή οδηγεί σε χαμηλή ροή μάζας και η τοπική χαμηλή ηλιακή ροή σε υψηλή ροή μάζας. Τα χαρακτηριστικά απώλειες πίεσης του πορώδους μέσου έχουν τη σημαντικότερη επιρροή στην αστάθεια της ροής. Εάν η πτώση πίεσης μέσα στο πορώδες μέσο εξαρτάται γραμμικά με την ταχύτητα ροής (ροή Darcy) μπορεί να προκύψουν αστάθειες ενώ αν υπάρχει απλώς μια τετραγωνική εξάρτηση (ροή Forchheimer) δεν εμφανίζονται αστάθειες. Προτείνεται ένα απλό μαθηματικό πρότυπο βασισμένο στην εξίσωση Darcy-Forchheimer που περιγράφει την απώλεια πίεσης μέσα σε πορώδη μέσα ως λειτουργία της ταχύτητας ροής του υγρού στην επιφάνεια. Η απώλεια πίεσης περιγράφεται

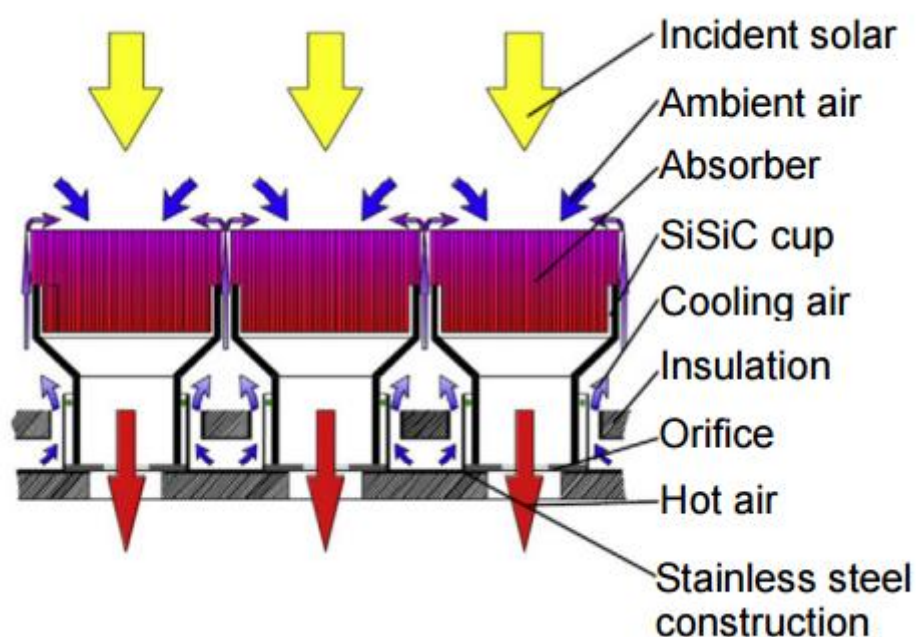
$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K} \cdot u + \frac{\rho_f \cdot C_f}{\sqrt{K}} \cdot u^2 \quad \left(\frac{Pa}{m} \right)$$

Όπου το p σημαίνει πίεση, x είναι μια ειδική μεταβλητή που δείχνει την κατεύθυνση της ροής, K είναι η ειδική διαπερατότητα, C_f είναι ο συντελεστής αδράνειας, μ είναι το δυναμικό παχός του υγρού, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού μεταφοράς

θερμότητας και η επιφανειακή ταχύτητα του ρευστού. Η ειδική διαπερατότητα και ο αδρανειακός συντελεστής είναι ιδιότητες του υλικού απορρόφησης.

3.3.2.2 Ανοιχτός ογκομετρικός δέκτης

Οι ογκομετρικοί δέκτες μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε πίεση περιβάλλοντος είτε υπό πίεση. Οι δέκτες που λειτουργούν σε πίεση περιβάλλοντος συνήθως ονομάζονται ανοιχτοί ογκομετρικοί δέκτες και αυτοί που λειτουργούν σε υψηλά επίπεδα πίεσης κλειστοί ογκομετρικοί δέκτες.



Εικόνα 3.16: Ανοιχτός ογκομετρικός δέκτης

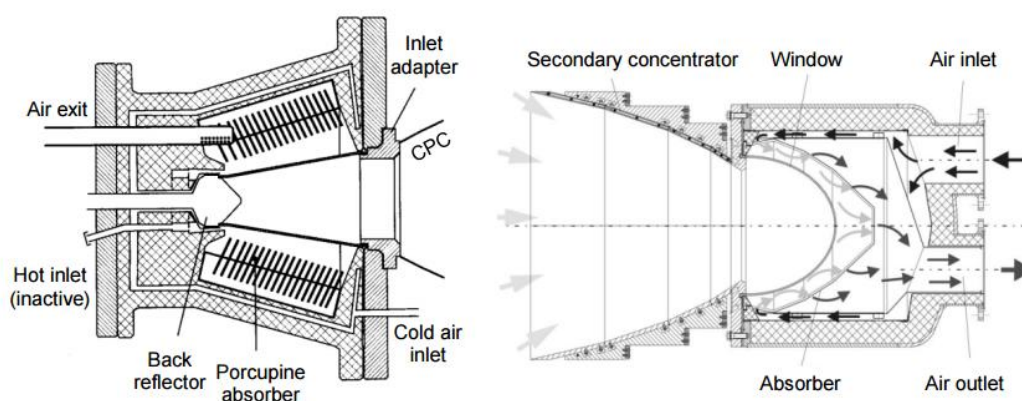
Η συγκεντρώμενη ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από ένα κεραμικό κυψελωτό απορροφητή θερμαίνοντάς τον ενώ ο αέρας του περιβάλλοντος αναρροφάται στους δέκτες και ενεργεί σαν HTF. Προκειμένου να βελτιωθεί η αποδοτικότητα του δέκτη στο ανοικτό ογκομετρικό σύστημα, συχνά εφαρμόζεται σύστημα επιστροφής του αέρα. Ο κρύος αέρας που εξέρχεται του συστήματος χρησιμοποιείται πρώτα για την ψύξη της δομής του δέκτη και στη συνέχεια τροφοδοτείται πάλι στο σύστημα μπροστά από τον απορροφητή για να επαναχρησιμοποιήσει την ενθαλπία. Το σύστημα HiTRec δεν ήταν εξοπλισμένο με τέτοιο σύστημα αλλά τα επόμενα έργα (HiTRec II, SOLAIR 200, SOLAIR 3000) το διέθεταν. Χρησιμοποιούνταν συνήθως επιστροφή περίπου 50%.

Συνήθως ο θερμός αέρας χρησιμοποιείται για να παράγει υπέρθερμο ατμό και στη συνέχεια να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε ένα συμβατικό κύκλο Rankine. Η

συγκεκριμένη τεχνολογία βρίσκεται σε προ-εμπορικό στάδιο ενώ το 2009 ξεκίνησε η λειτουργία του SOLAIR 3000 για πρώτη φορά στη Γερμανία.

3.3.2.3 Κλειστός ογκομετρικός δέκτης

Ο δεύτερος τύπος ογκομετρικού δέκτη είναι ο κλειστός ογκομετρικός δέκτης που συνήθως είναι υπό πίεση. Αυτοί οι δέκτες βασίζονται σε ένα διαφανές παράθυρο για να καθίσταται δυνατή η λειτουργία υψηλής πίεσης, να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ανάκλασης και οι απώλειες επανακινοβόλησης και μεταφοράς.



Εικόνα 3.17: Κλειστός ογκομετρικός δέκτης

Παραπάνω φαίνονται οι αρχές εργασίας των δύο κλειστών ογκομετρικών δεκτών. Στα αριστερά, βρίσκεται ο άμεσα ακτινοβολημένος δακτυλιοειδής δέκτης υπό σταθερή πίεση (DIAPR) που είναι βασισμένος σε απορροφητές φτιαγμένους από κεραμικά υψηλής θερμοκρασίας και στα αριστερά ένας δέκτης για το υβριδικό ηλιακό σύστημα Gasturbine και CC Systems με έναν μεταλλικό ή κεραμικό απορροφητή.

Η αρχή λειτουργίας του κλειστού ογκομετρικού δέκτη είναι παρόμοια με του αντίστοιχου ανοιχτού. Μία διαφορά είναι η χρήση του δευτερεύοντος συγκεντρωτή για να εστιάσει την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στον απορροφητή και να προστατεύσει την περιβάλλουσα δομή του δέκτη. Είναι εξοπλισμένος με ένα διαφανές παράθυρο μέσω του οποίου η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να περάσει προτού προσκρούσει σε αυτό και το θερμάνει. Το HTF δεν είναι περιβαλλοντικός αέρας αλλά αέρας διατηρημένος σε σταθερή ατμοσφαιρική πίεση που μπαίνει στο δέκτη από την είσοδο του. Έπειτα θερμαίνεται από τον ζεστό απορροφητή και φεύγει από το δέκτη από την οπή αερισμού. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ηλιακό κύκλο κατευθείαν σαν καύσιμο σε έναν συμβατικό στρόβιλο αερίου ή σε έναν υβριδικό κύκλο καθώς ο προθερμασμένος αέρας μπαίνει στο θάλαμο καύσης ενός στρόβιλου αερίου.

3.4 Τεχνολογίες παραγωγής

Οι δύο κύριες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυτή την περίοδο που ακολουθούνται από τους υπεύθυνους καθορίζονται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF) στο δέκτη

- Ατμός
- Λιωμένο αλάτι

Και τα δύο συστήματα έχουν μοναδικά λειτουργικά χαρακτηριστικά τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

3.4.1 Τεχνολογία νερού-ατμού

Στους ηλιακούς πύργους άμεσου ατμού, οι ηλιοστάτες αντανακλούν το φως του ήλιου επάνω σε έναν δέκτη στον πύργο ο οποίος είναι παρόμοιος με έναν λέβητα συμβατικής εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας με άνθρακα. Το νερό τροφοδοσίας αντλείται από το μπλοκ τροφοδοσίας, εξατμίζεται και υπερθερμαίνεται στο δέκτη για να παράγει ατμό ο οποίος τροφοδοτεί με τη σειρά του τουρμπίνα γεννήτριας για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η τρέχουσα κατάσταση του ατμού για το σύστημα άμεσου ατμού στους πύργους παραγωγής κυμαίνεται από κορεσμένο ατμό στους 250°C σε υπέρθερμο ατμό πάνω από 500°C. Διάφορα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου συστήματος μπορούν να το καταστήσουν ελκυστικό:

- ❖ Το απλό σχέδιο
- ❖ Η χρήση της συμβατικής τεχνολογίας λεβήτων, των υλικών και των τεχνικών κατασκευής
- ❖ Η υψηλή θερμοδυναμική αποδοτικότητα
- ❖ Μικρή παρασιτική κατανάλωση ισχύος

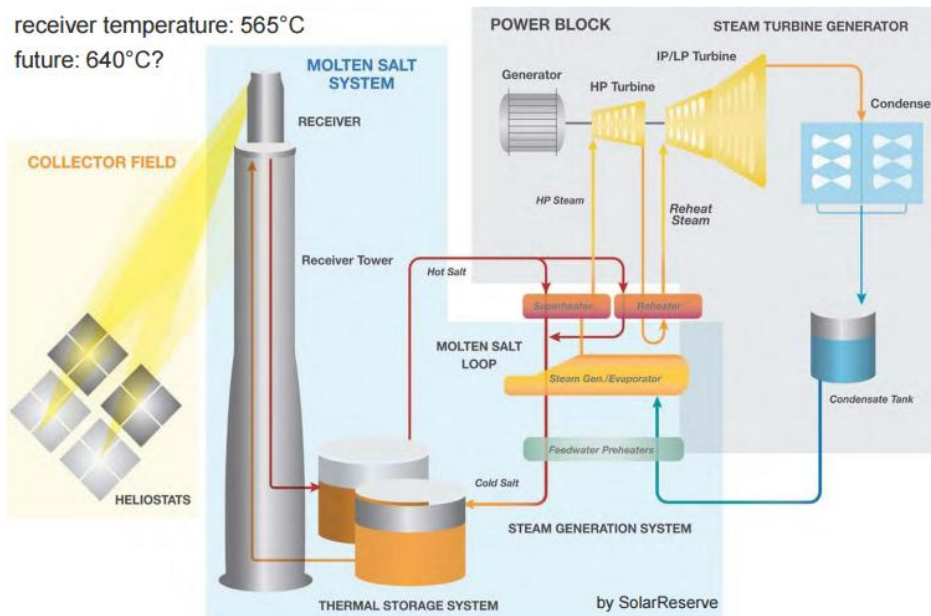
Η μικρής διάρκειας αποθήκευση άμεσου ατμού έχει αποδειχθεί στον ηλιακό πύργο ισχύος 20 MW PS20 στην Ισπανία. Όπως πολλές τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών, έτσι και οι πύργοι ατμού μπορούν να υβριδοποιηθούν με φυσικό αέριο για να παρέχουν πρόσθετη λειτουργική ευελιξία και βελτιωμένη δυνατότητα αποστολής της ενέργειας. Η μέση ετήσια απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια ενός πύργου ισχύος είναι περίπου 14%-18%, με τους πύργους άμεσου ατμού ελαφρά υψηλότερους από τους αντίστοιχους με σύστημα λιωμένου αλατιού. Η μέση ετήσια αποδοτικότητα αντιπροσωπεύει τη γενική πραγματική απόδοση ενώ οι τιμές του σχεδίου είναι χρήσιμες για τη σύγκριση της απόδοσης των επιμέρους τμημάτων.



Εικόνα 3.18: Παραδείγματα δεκτών άμεσου ατμού

3.4.2 Τεχνολογία λιωμένου αλατιού

Σε ένα πύργο ισχύος με τεχνολογία λιωμένου άλατος, το αλάτι που βρίσκεται σε θερμοκρασία 290°C αντλείται από μια δεξαμενή κρύας αποθήκευσης σε έναν δέκτη, όπου το ανακλώμενο φως του ήλιου από το πεδίο των ηλιοστατών θερμαίνει το αλάτι στους 565°C. Το αλάτι είναι τυπικά ένα μείγμα νατρίου και νιτρικού καλίου, τα οποία στο εμπόριο πωλούνται ως λίπασμα. Το θερμό αλάτι συγκρατείται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης και όταν απαιτείται παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αντλείται στη γεννήτρια ατμού η οποία παράγει ατμό υψηλής πίεσης σε ονομαστικές συνθήκες 100-150bar και μέχρι 540°C. Το ψυχρό αλάτι τώρα επιστρέφει από τη γεννήτρια ατμού στη δεξαμενή ψυχρής αποθήκευσης για να ολοκληρώσει τον κύκλο. Εξαιτίας της αμελητέας πίεσης ατμού του αλατιού, και οι δύο δεξαμενές αποθήκευσης βρίσκονται στην ατμοσφαιρική πίεση. Ο ατμός μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια σε μια συμβατική ατμογεννήτρια. Με την τοποθέτηση της αποθήκευσης μεταξύ του δέκτη και της γεννήτριας ατμού, η συλλογή ηλιακής ενέργειας αποσυνδέεται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 3.19: Διάγραμμα λειτουργίας πύργου με τεχνολογία λιωμένου αλατιού

Κατά συνέπεια, όταν περνούν σύννεφα και μειώνουν προσωρινά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI), δεν υπάρχει επίπτωση στην παραγωγή του στροβίλου. Επίσης, η δαπάνη αποθήκευσης θερμικής ενέργειας θα μπορούσε να είναι λιγότερο από μισή από την αποθήκευση στα PTCs επειδή το μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος στο σύστημα αποθήκευσης επιτρέπει σε περισσότερη ενέργεια να αποθηκευτεί ανά μάζα άλατος. Ο συνδυασμός της πυκνότητας του αλατιού, της συγκεκριμένης θερμότητας του αλατιού και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των δύο δεξαμενών επιτρέπει οικονομικά μεγάλες χωρητικότητες μέχρι 15 ώρες λειτουργίας του στροβίλου στο πλήρες φορτίο. Μια τέτοια εγκατάσταση θα μπορούσε να λειτουργεί 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα το καλοκαίρι και σε μερικό φορτίο το χειμώνα για να επιτευχθεί 70% ετήσια χωρητικότητα μόνο με τον ήλιο. Το εργοστάσιο Gemasolar στην Ισπανία έχει σχεδιαστεί για τέτοια απόδοση. Παρακάτω φαίνεται ένας θερμικός δέκτης 43MW στο εργοστάσιο κεντρικού δέκτη Solar Two των 10 MW το οποίο ολοκληρώθηκε το 1995 στο Barstow, στην Καλιφόρνια.



Εικόνα 3.20: Παράδειγμα δέκτη λιωμένου αλατιού

3.5 Υβριδικό σύστημα με αέριο

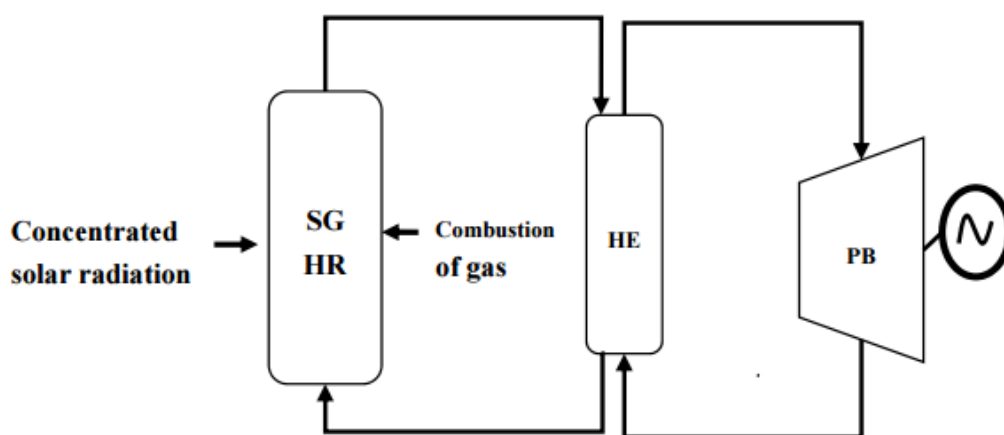
Μόνο μια μικρή ποσότητα από την παγκόσμια παραγωγή ενέργειας προέρχεται απευθείας από συγκεντρωτικά ηλιακά θερμικά, κυρίως εξαιτίας της υψηλής αρχικής επένδυσης αλλά και του τεχνολογικού ρίσκου με το μεγάλο πεδίο των ηλιαστατών που απαιτείται για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας. Επίσης ο τεχνολογικός κίνδυνος συνδέεται με την αξιοπιστία του δέκτη και τη μεταβλητότητα της ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας που σημαίνει ότι απαιτείται η ύπαρξη ενός συστήματος αποθήκευσης για την αποφυγή της διακοπής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα υβριδικά συστήματα με ηλιακούς δέκτες και αέριο βιομάζας παρουσιάζεται ως μια πιθανή λύση για την αντιμετώπιση του κόστους, της αξιοπιστίας και τα θέματα διακοπής λειτουργίας. Και οι δύο πηγές υποφέρουν από το υψηλό κόστος. Ωστόσο η υβριδοποίησή τους παρουσιάζει ενδιαφέρον λόγω του συμπληρωματικού τους χαρακτήρα καθώς από τη μια πλευρά η ηλιακή θερμική ενέργεια έχει υψηλό κόστος λόγω της διαλείπουσας φύσης αλλά το ίδιο το καύσιμο έχει μηδενικό κόστος ενώ από την άλλη πλευρά η παροχή αερίων βιομάζας δεν είναι διακοπτόμενα αλλά το κόστος καυσίμου είναι υψηλό. Ως εκ τούτου, ο υβριδισμός της ηλιακής τεχνολογίας με τα καύσιμα βιοαερίου επιτρέπει την άυξηση της δυνατότητας αποστολής μόνο

μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και να μειώσει τις δαπάνες που οφείλονται στην κοινή χρήση των υποδομών. Επιπλέον, αυτό το έργο μπορεί να επεκταθεί σε φθηνότερα ορυκτά καύσιμα προκειμένου να επιτευχθεί ένας πιο οικονομικός ενεργειακός εφοδιασμός.

3.5.1 Περιγραφή λειτουργίας

Η λειτουργία ενός σωληνωτού δέκτη (TTR) και ενός λέβητα αερίου συνδυάζεται σε μια μονή συσκευή η οποία θα ονομάζεται υβριδικός ηλιακός δέκτης αερίου (SGHR). Η καύση του αερίου πραγματοποιείται στον SGHR ταυτόχρονα ή διαδοχικά με την ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμότητά του χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη θερμική δύναμη του ρευστού μεταφοράς θερμότητας (HTF) και για να αποφευχθεί η εξάρτηση από την ηλιακή ακτινοβολία. Στη συνέχεια ο εναλλάκτης θερμότητας (HE) μεταφέρει τη θερμική ενέργεια του HTF στον ατμό στο Power Block (PB). Κατά συνέπεια, η ενσωμάτωση του λέβητα φυσικού αερίου και του ηλιακού δέκτη σε μια ενιαία συσκευή μειώνει την ποσότητα του εξοπλισμού που απαιτείται για να επιτύχει την ενέργεια που χρειάζεται χωρίς την ανάγκη της ενεργειακής αποθήκευσης. Επιπλέον, η λειτουργία του συστήματος καύσης είναι ανεξάρτητη από τη διαθεσιμότητα ακτινοβολίας η οποία αποτρέπει το SGHR από θερμικούς κλονισμούς λόγω της ηλιακής διακοπής ακτινοβολίας. Ακόμη, η ομοιογενής θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο δέκτη αποφεύγει τη γρήγορη υποβάθμιση του SGHR αυξάνοντας την αξιοπιστία των εγκαταστάσεων.



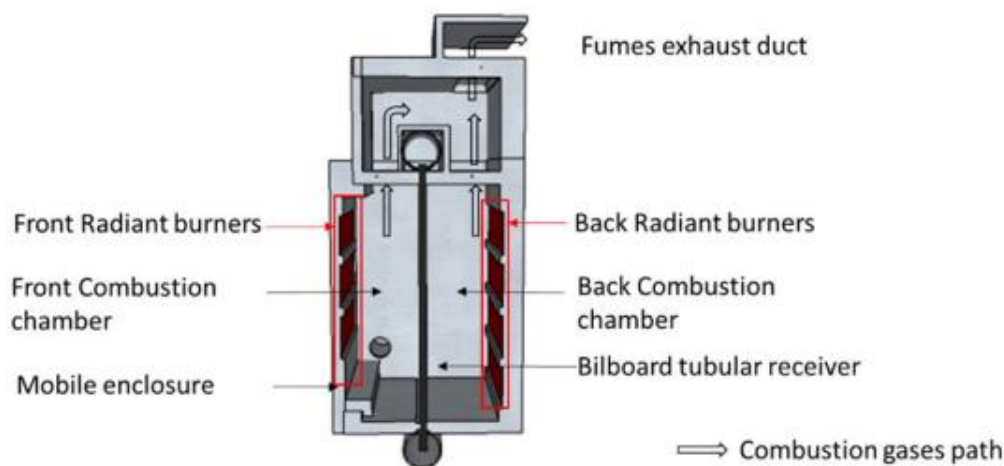
Εικόνα 3.21: Ολοκληρωτικό σύστημα ενός HRC

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι σωλήνες, οι οποίοι συνθέτουν το στοιχείο συλλογής θερμότητας (HCE) ενός συμβατικού TTR λειτουργούν όχι μόνο σε υψηλές θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις αλλά και υπομένουν καθημερινές εναλλαγές θερμοκρασίας από πολύ υψηλές (λειτουργίας) μέχρι περιβάλλοντος. Αυτές οι

ακραίες συνθήκες ενεργοποιούν μηχανισμούς υποβάθμισης όπως: χαμηλή καταπόνηση κύκλων, οξείδωση στις υψηλές θερμοκρασίες και ερπυσμός. Αν και τα οικονομικά οφέλη ενός παρόμοιου έργου που χρησιμοποιεί φυσικό αέριο αντί αέριο βιομάζας έχουν αποδειχθεί παλιότερα, τώρα αποδεικνύεται το πρόσθετο όφελος της αυξανόμενης αξιοπιστίας λόγω της μειωμένης θερμικής ανακύκλωσης και της θερμικής πίεσης.

3.5.2 Περιγραφή της ιδέας

Ο υβριδικός ηλιακός δέκτης αερίου (SGHR) αποτελείται από μια κοιλότητα, ένα σωληνωτό δέκτη, λιωμένο αλάτι σαν ρευστό μεταφοράς θερμότητας, δύο θάλαμους καύσης (μπροστά και πίσω από τον δέκτη), έναν αγωγό εξάτμισης καυσαερίων και ένα κινητό περίβλημα.

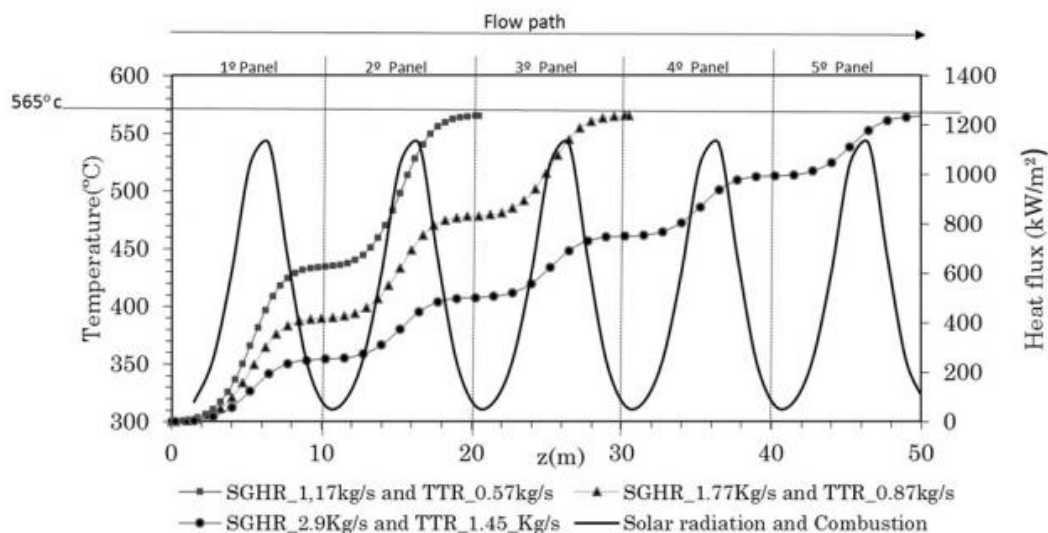


Εικόνα 3.22: Παρουσίαση εξαρτημάτων του SGHR

Αυτή η διάταξη επιτρέπει να μεταφερθεί η θερμότητα στους σωλήνες, στοιχείο συλλογής θερμότητας και από τις δύο πλευρές μειώνοντας τη θερμική καταπόνηση που παράγεται από την περιμετρική θερμική κλίση. Από τη μια πλευρά, η εμπρόσθια όψη των σωλήνων θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία και την καύση διαδοχικά με αυτόν τον τρόπο: όταν η άμεση κανονική ακτινοβολία (DNI) είναι αρκετά υψηλή, η πρόσοψη του δέκτη θερμαίνεται από το ηλιακό πεδίο και όταν η DNI δεν είναι αρκετή για να διατηρήσει τη λειτουργία, το κινητό περίβλημα κλείνει την κοιλότητα και η εμπρόσθια όψη των σωλήνων θερμαίνεται από τον θάλαμο καύσης. Από την άλλη πλευρά, η οπίσθια όψη των σωλήνων θερμαίνεται με την καύση του αερίου συνεχώς. Τέτοια καύση πραγματοποιείται στους καυστήρες ακτινοβολίας που επιτρέπουν στη χωρική διανομή της ροής της ακτινοβολίας να ποικίλει στο απαραίτητο επίπεδο. Τέλος, τα αέρια καύσης απευθύνονται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας προκειμένου να ανακτηθεί η θερμότητά του.

3.5.3 Αποτελέσματα

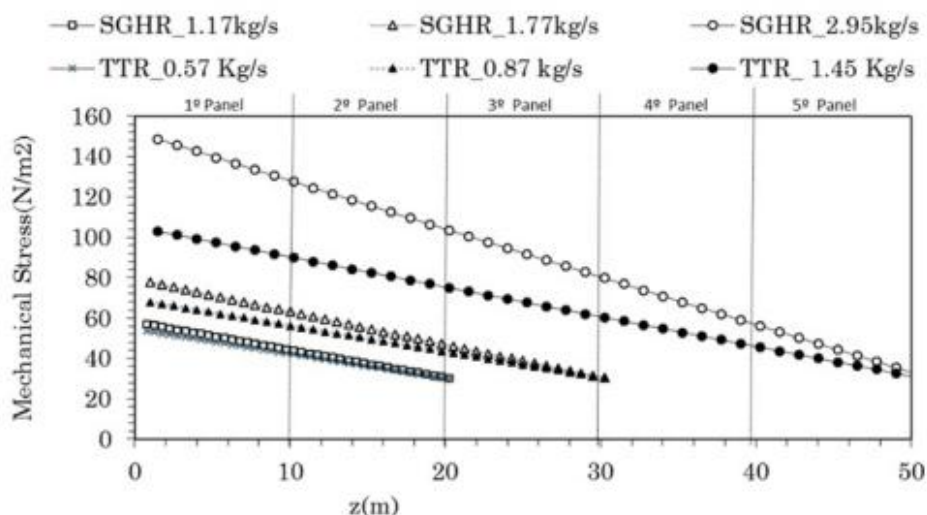
Η σύγκριση της αξιοπιστίας μεταξύ ενός σωληνωτού δέκτη (TTR) και ενός υβριδικού ηλιακού δέκτη αερίου (SGHR) πραγματοποιήθηκε σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας και σταθερή κατάπονηση για 30 χρόνια ζωής. Το στοιχείο συλλογής θερμότητας των δύο ειδών δεκτών αποτελούνται από πάνελ μήκους 10 μέτρων τα οποία είναι τοποθετημένα σε σειρά. Τα πάνελ συντίθεται από ανοξείδωτους ασφάλινους σωλήνες που διατάσσονται παράλληλα με εξωτερική διάμετρο 25mm και 2mm πάχος τοιχώματος που είναι το συνηθισμένο σε σωληνωτούς δέκτες. Η θερμοκρασία του λιωμένου αλατιού στην είσοδο του πρώτου πάνελ έχει καθοριστεί στους 300°C και ο ρυθμός ροής μάζας και η είσοδος πίεσης έχουν προσαρμοστεί ώστε να επιτύχουν τη θερμοκρασία των 565°C και 5bar πίεσης στην έξοδο του 2^{ου}, του 3^{ου} και του 5^{ου} πάνελ.



Εικόνα 3.23: Κατανομή της θερμοκρασίας για τα πάνελ 2,3 και 5

Παρατηρούμε παραπάνω την εξέλιξη της θερμοκρασίας του HTF κατά μήκος του 2^{ου}, του 3^{ου} και του 5^{ου} πάνελ και βλέπουμε πως ο ρυθμός ροής μάζας του SGHR είναι σχεδόν ο διπλάσιος σε όλες τις περιπτώσεις λόγω του γεγονότος ότι η αύξηση της θερμότητας είναι η διπλάσια σε όλες τις περιπτώσεις από ό,τι στον TTR. Άρα, για το ίδιο πάνελ σωλήνων τον SGHR παράγει διπλάσια θερμική ενέργεια.

Παρόλα αυτά, ένας υψηλότερος ρυθμός ροής μάζας για την ίδια διάμετρο του σωλήνα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες πτώσεις πίεσης. Η πίεση στην είσοδο πρέπει να είναι υψηλότερη στον SGHR από ότι στο TTR καθώς η πίεση εξόδου έχει ορίσει μια σταθερή τιμή στα 5 bar. Υψηλή πίεση εισόδου μπορεί να παράγει σημαντικά υψηλές μηχανικές καταπονήσεις.



Εικόνα 3.24: Μηχανική καταπόνηση για τα πάνελ 2,3 και 5

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε την κατανομή της μηχανικής καταπόνησης που παράγεται από της πίεση του ΗΤΦ στην εξωτερική στεφάνη του σωλήνα. Αποτέλεσμα του υψηλού ρυθμού ροής που απαιτείται για να απορροφήσει τη ροή θερμότητας, ο SGHR αντέχει υψηλότερες μηχανικές καταπονήσεις και ως εκ τούτου, η αξιοπιστία μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο. Προκειμένου να επιτευχθεί η πίεση εξόδου των 5 bar, η πίεση εισόδου πρέπει να είναι 26,4 για τα 5 πάνελ που αντιστοιχούν σε 145N/m^2 ενώ στην περίπτωση των 2 πάνελ με ΤΤΡ που απαιτούν πίεση εισόδου 9,5bar το οποίο αντιστοιχεί σε 53N/m^2 .

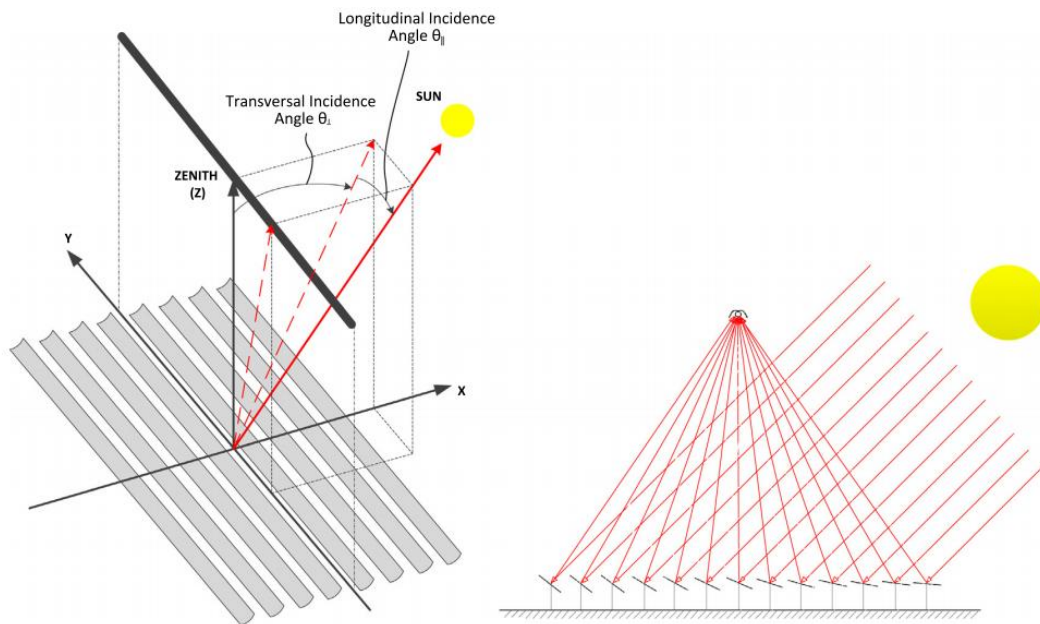
4. Συλλέκτες Fresnel



Εικόνα 4.1: Σύστημα με γραμμικό συλλέκτη Fresnel

4.1 Εισαγωγή

Οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel είναι μία από τις δύο πραγματοποιήσιμες τεχνολογίες γραμμικής συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας, μαζί με τα συστήματα παραβολικών κοίλων.



Εικόνα 4.2: Σχήμα ενός γενικού γραμμικού συλλέκτη Fresnel

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχηματικό διάγραμμα, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel χρησιμοποιούν μια σειρά από επίπεδους ή σχεδόν επίπεδους βασικούς ανακλαστήρες και μια σταθερή δομή δέκτη που περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους γραμμικούς σωλήνες-δέκτες και έναν προαιρετικό δευτερεύων ανακλαστήρα. Οι αρχικοί ανακλαστήρες ακολουθούν την τροχιά του ήλιου σε όλη τη διάρκεια της ημέρας ενώ οι δέκτες παραμένουν σταθεροί. Η αρχιτεκτονική του δευτερεύοντος ανακλαστήρα επιτρέπει την άυξηση της αναλογίας συγκέντρωσης χωρίς αυξανόμενα φορτία ανέμου τα οποία είναι διαφορετικά στις περιπτώσεις των συστημάτων με παραβολικές γούρνες και στους καθρέπτες μεγάλου μεγέθους των ηλιοστατών για τα συστήματα του κεντρικού δέκτη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φορτίο ροπής του ανέμου είναι κατά προσέγγιση ανάλογο με το τετράγωνο του ύψους των καθρεπτών.

Επειδή η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προβλέπει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή μιας αναλογίας συγκέντρωσης, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα σε διαφορετικές θερμοκρασίες που θέλουμε να πετύχουμε για την κάλυψη διαφορετικών αναγκών. Ιστορικά, οι περισσότεροι συλλέκτες Fresnel χρησιμοποιήθηκαν ή αναπτύχθηκαν για παραγωγή θερμότητας μέσης ή χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτές οι θερμοκρασίες με τους συλλέκτες Fresnel έχουν ευρεία εφαρμογή στα κτίρια ψύξης ή θέρμανσης, σε βιομηχανικές διαδικασίες παροχής θερμότητας και στην κατεργασία ύδατος. Οι συλλέκτες Fresnel της εταιρείας State-of-the-art (SOTA) σχεδιάζονται κυρίως για να παράγουν θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας για μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές διαδικασίες ή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 4.3: Ανακλαστήρας Fresnel

4.2 Συλλέκτης

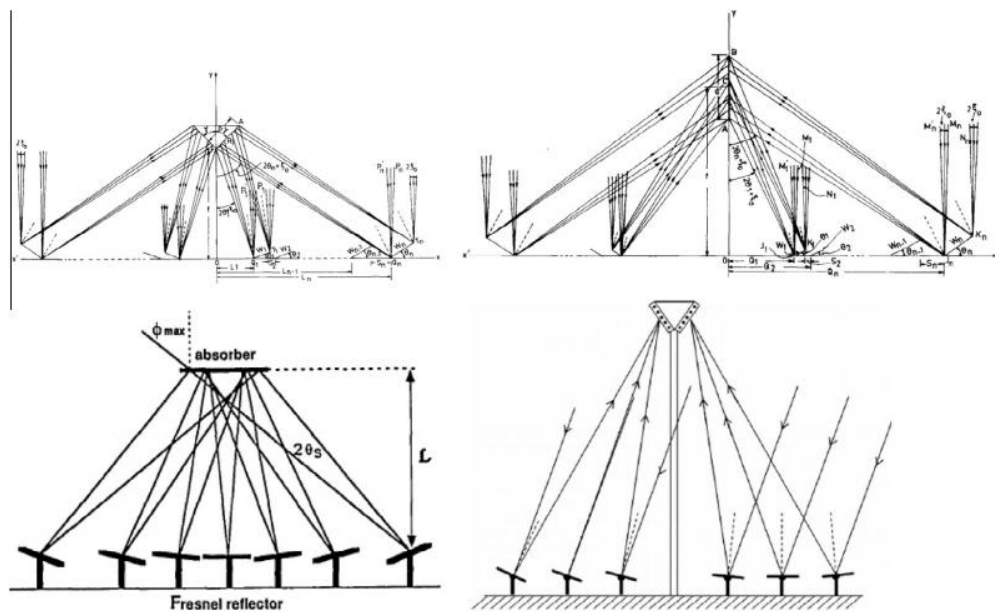
4.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των γραμμικών συλλεκτών

Ένας τυπικός συλλέκτης Fresnel περιλαμβάνει μια σειρά από πάνελ-καθρέπτες, έτσι το σχέδιο του μπορεί να διαφέρει από τις διαστάσεις των μεμονομένων καθρεπτών και των γενικών μοντέλων. Επιπλέον, η φύση του δέκτη παρέχει μεγάλη ελευθερία σχεδιασμού. Από την άλλη πλευρά, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel έχουν χαμηλότερη οπτική και θερμική απόδοση από τις παραβολικές γούρνες επειδή ο συνδυασμός ενός σταθερού δέκτη και ενός άξονα παρακολούθησης του ήλιου σε οριζόντιο επίπεδο οδηγούν σε μεγαλύτερες απώλειες συνημιτόνου από ότι τα PTC. Τα τμήματα χαμηλού κόστους του συλλέκτη συχνά χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίζουν αυτό το μειονέκτημα.

4.2.2 Τυπικές διαμορφώσεις των γραμμικών συλλεκτών Fresnel

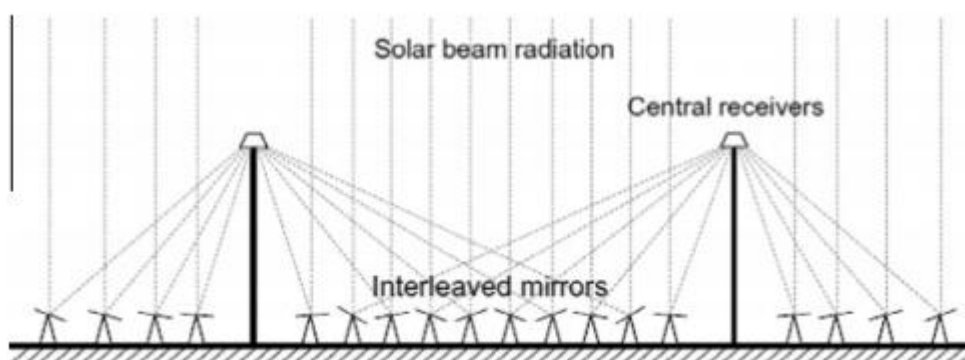
Η έννοια του γραμμικού συλλέκτη έχει αναλυθεί εκτενώς παραπάνω, και υπάρχουν πολυάριθμα σχέδια συλλεκτών. Μερικά από αυτά έχουν προχωρήσει στη διαμόρφωση πρωτοτύπων ενώ άλλα είτε ήταν μόνο για τη θεωρητική εξερεύνηση είτε είναι ακόμα υπό αξιολόγηση εννοιολογική. Σε γενικές γραμμές, τα σχέδια των συλλεκτών Fresnel διαφέρουν στη συναρμολόγηση των σχεδίων του δέκτη και στη

ρύθμιση των συστοιχιών των καθρεπτών. Ο δέκτης μπορεί να είναι οριζόντιος, κάθετος ή σε τριγωνική διαμόρφωση.



Εικόνα 4.4: Γραμμικοί συλλέτες Fresnel χρησιμοποιώντας διάφορους δέκτες

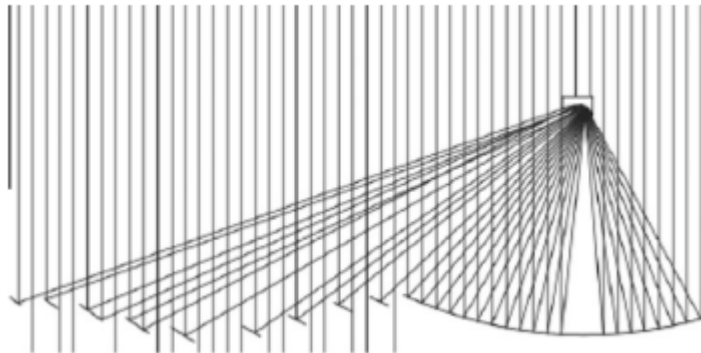
Ειδικότερα, ο συμπαγής γραμμικός ανακλαστήρας Fresnel (CLFR) μπορεί να χρησιμοποιήσει δύο διαφορετικούς πύργους δέκτη. Ένας καθρέφτης στο CLFR μπορεί να αολουθήσει κάθε δέκτη σε μια δεδομένη στιγμή της ημέρας ανάλογα με το ποιά επιλογή παρακολούθησης παρέχει λιγότερη σκίαση και άρα απώλειες. Αυτό μπορεί να παρέχει καλύτερη οπτική απόδοση αλλά αυξάνει την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού του μηχανισμού παρακολούθησης του ήλιου.



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα LFC

Ένα άλλο ενδιαφέρον γραμμικό σχέδιο συλλέκτη Fresnel ονομάζεται Etendue CLFR. Ενσωματώνει την έννοια του CLFR και περισσότερο ειδικεύεται σε κάθε ατομικό ανακλαστήρα ξεχωριστά σε σχέση με το ύψος και το πλάτος του ώστε να

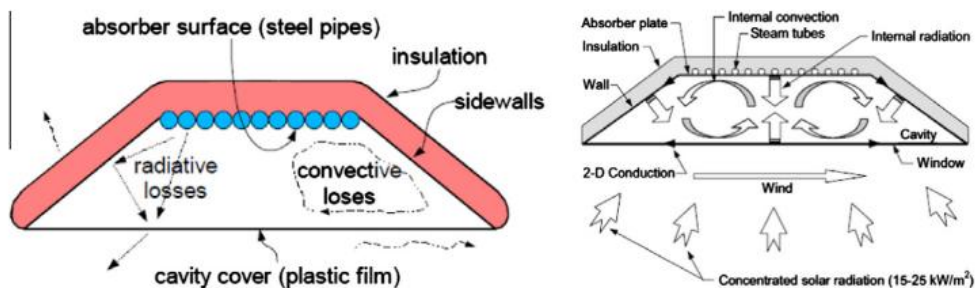
μεγιστοποιηθεί η συνολική οπτική απόδοση. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει αυτό το σχέδιο το οποίο επί του παρόντος βρίσκεται στη φάση του σχεδιασμού.



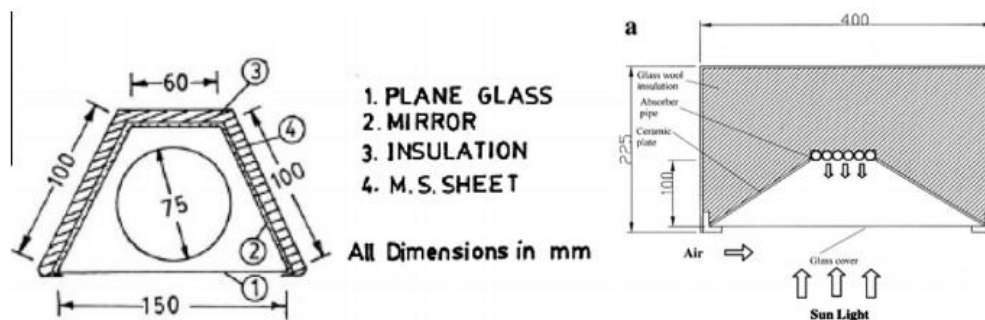
Εικόνα 4.6: Ένα LFC με ασύμμετρο σχεδιασμό

4.3 Τύποι του συγκροτήματος του δέκτη

Έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια στο σχεδιασμό του δέκτη προκειμένου να αυξηθεί η οπτική απόδοση του συλλέκτη. Στις παρακάτω εικόνες παρατηρούμε ότι χρησιμοποιούνται μια σειρά από σωλήνες-δέκτες αντί για έναν μόνο σωλήνα για να αυξηθεί η επιφάνεια του δέκτη, οδηγώντας έτσι σε μια αύξηση του παράγοντα παρεμπόδισης των συλλεκτών.



Εικόνα 4.7: Σχέδιο δέκτη με τραπεζοειδή κοιλότητα

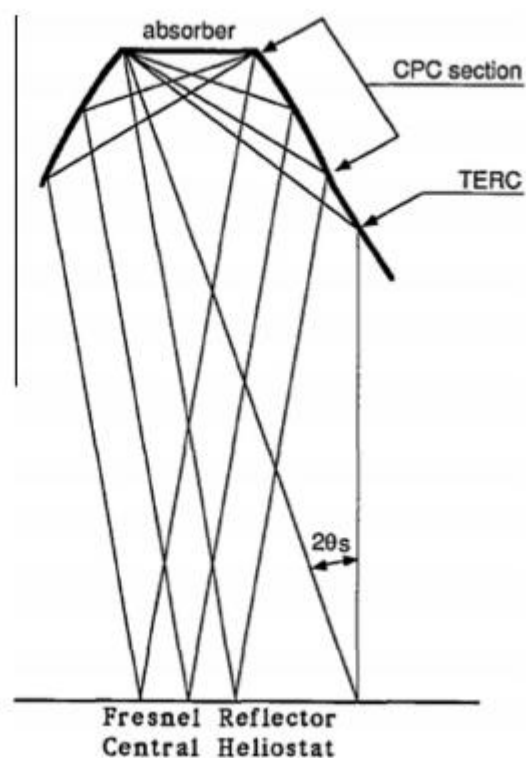


Εικόνα 4.8: Εγκάρσια τομή του τραπεζοειδή δέκτη

Οι δέκτες με τραπεζοειδή κοιλότητα χρησιμοποιούν πλευρικό τοίχωμα μόνωσης για τη μείωση των θερμικών απωλειών. Όταν χρησιμοποιείται αυτός ο τύπος δέκτη, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel μπορεί να είναι πιο κατάλληλοι σχετικά με εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας (όπως 180-300°C) λόγω των σχετικά υψηλών συντελεστών θερμικών απωλειών. Η θερμική απώλεια θα μπορούσε να είναι πολύ σημαντική για θερμική παραγωγή υψηλότερη από 400°C. Στα περισσότερα σχέδια δέκτη, η απώλεια ακτινοβολίας κυριαρχεί συχνά στις απώλειες θερμότητας του δέκτη εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας της επιφάνειας του σωλήνα-δέκτη.

Το σχέδιο του τραπεζοειδή δέκτη είναι η βασική ιδέα στην οποία αναπτύχθηκε ο δέκτης Arena Solar's CLFR. Όταν ένας μονός σωλήνας δέκτης χρησιμοποιείται για να μειώσει την παραγωγή και το κόστος του υλικού, ένας δευτερεύων ανακλαστήρας συχνά χρησιμοποιείται για να αυξήσει την οπτική απόδοση του συλλέκτη. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του δευτερεύοντος κατόπτρου είναι μια πολύ πολύπλοκη διαδικασία και μπορεί επίσης να εξαρτάται από το υπόλοιπο σχέδιο του συλλέκτη. Διαφορετικές υποθέσεις απλοποίησης στην οπτική ανάλυση μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά σχέδια και δεν υπάρχει κάποια γενική άποψη σχετικά με τη βέλτιστη μορφή του δευτερεύοντος κατόπτρου.

4.3.1 Προσαρμοσμένος συμπυκνωτής στις άκρες



Εικόνα 4.9: Συλλέκτης προσαρμοσμένος στις άκρες

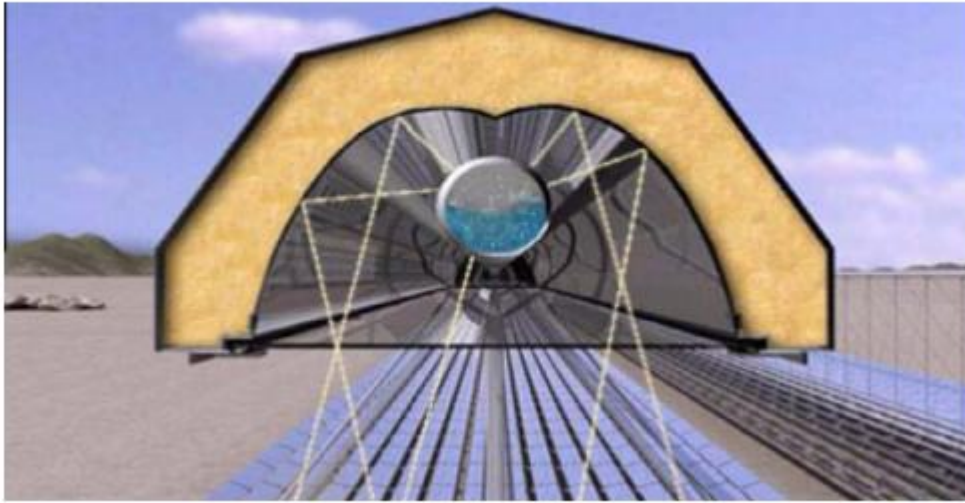
Τα παραδοσιακά σχέδια των δευτερευόντων ανακλαστήρων τείνουν να ακολουθούν ή να είναι μια εξέλιξη των σχημάτων του παραβολικού συγκεντρωτή (CPC). (*Hinterberger and Winston 1966, Winston and Minano 2005, Baranov and Melnikov, 1966*)

Σε αυτά τα σχέδια η επιφάνεια του ανακλαστήρα θα μπορούσε να είναι μια παραβολή (*Winston and Hinterberger, 1975*) ή μια εξέλιξη αυτής (*Rabl, 1976*) ανάλογα με τη χρήση του σχήματος του δέκτη. Στη γραμμική αρχιτεκτονική Fresnel, ένας ή πολλαπλοί κυκλικοί σωλήνες απορρόφησης χρησιμοποιούνται γενικά, και στην περίπτωση του FRESDEMO και της Novatec ο δευτερεύον ανακλαστήρας υιοθέτησε ένα σχήμα παρόμοιο με τα CPC χρησιμοποιώντας έναν σωλήνα ως δέκτη.



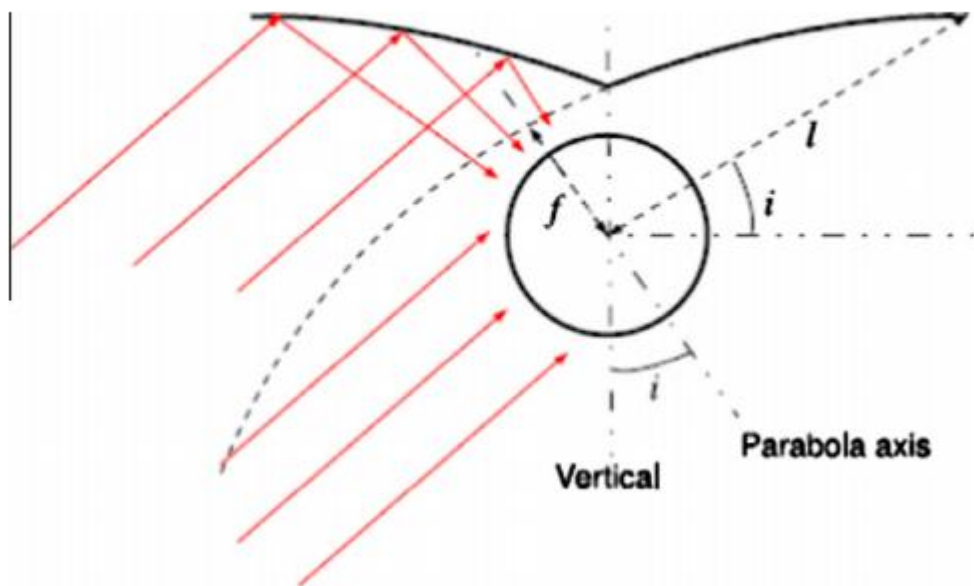
Εικόνα 4.10: Διάταξη δέκτη που χρησιμοποιείται για το έργο FRESDEMO, ο δευτερεύον συλλέκτης είναι εφοδιασμένος με φωτομετρικές μετρήσεις

Novatec



Εικόνα 4.11: Διάταξη δέκτη NOVA-1 από την εταιρεία Novatec Solar

Συγχρόνως, κάποια πρόσφατη ανάλυση έδειξε ότι ένα επίπεδο σχήμα δευτερεύουσας επιφάνειας ανακλαστήρα μπορεί να έχει καλύτερες επιδόσεις.



Εικόνα 4.12: Σχέδιο δευτερεύοντος επίπεδου συλλέκτη

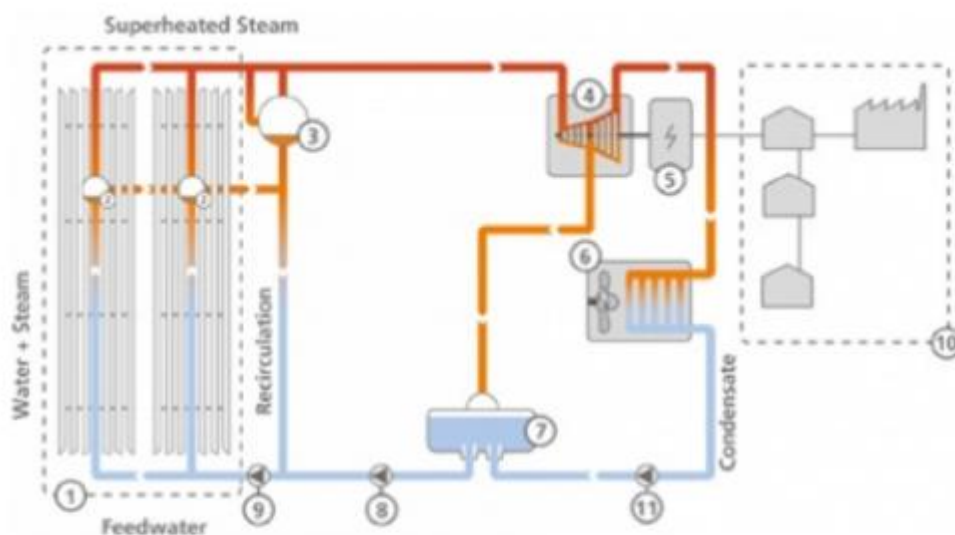
Υπάρχουν επίσης επιχειρήματα ότι ένας δευτερεύων ανακλαστήρας μπορεί να μην είναι αναγκαίος εξαιτίας του γεγονότος ότι προσθέτει πολυπλοκότητα κατασκευής και επιπλέον απαίτηση συντήρησης ειδικά όταν χρησιμοποιείται ένας μεγάλου μεγέθους σωλήνας-δέκτης.

4.4 Fresnel με σύστημα DSG



Εικόνα 4.13: Συμπαγής συλλέκτης Fresnel στη μονάδα παραγωγής Kimberlina στην Καλιφόρνια

Επί του παρόντος, οι εταιρείες Novatec Solar(2013) και Areva Solar(2013) έχουν εμπορικά διαθέσιμα γραμμικά συστήματα με συλλέκτες Fresnel. Και τα δύο είναι γραμμικά προϊόντα που χρησιμοποιούνται για την άμεση παραγωγή ατμού (DSG).



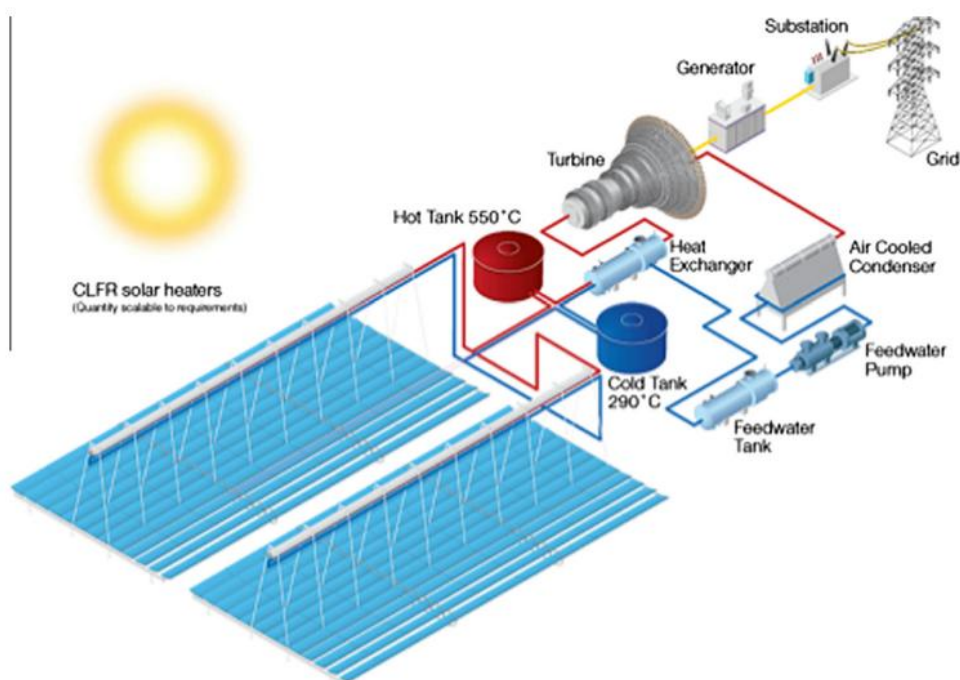
- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1. Solar Field | 7. Deaerator/Feedwater Tank |
| 2. Steam Separator | 8. Feedwater Pump |
| 3. Volume Balance Tank | 9. Recirculation Pump |
| 4. Turbine | 10. Public Electricity Grid |
| 5. Generator | 11. Condensate Pump |
| 6. Air-Cooled Condenser | |

Εικόνα 4.14: Διαμόρφωση της ηλιακής εγκατάστασης με χρήση της τεχνολογίας DSG

Ένα σύστημα DSG παράγει και προμηθεύει άμεσα με ατμό υψηλής θερμοκρασίας την τουρμπίνα για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η θερμοκρασία του ατμού εξόδου από το ηλιακό πεδίο αποδείχθηκε πως μπορεί να φτάσει μέχρι 480-520°C. Το κύριο πλεονέκτημα ενός DSG συστήματος είναι ότι αποβάλλει το δαπανηρό εναλλάκτη θερμότητας που απαιτείται για άλλα συγκεντρωτικά συστήματα που περιλαμβάνουν περισσότερα από ένα HTF όπως τα συμβατικά παραβολικά συστήματα (PTC). Επιπλέον, χρησιμοποιώντας το νερό ως HTF στο ηλιακό πεδίο, απλοποιεί πολύ τη λειτουργία και τη συντήρηση του ηλιακού συσσωρευτή και μειώνει τους λειτουργικούς κινδύνους. Εντούτοις, αν και αυτό είναι εφικτό να προσθέσει βραχυπρόθεσμη αποθήκευση στα συστήματα DSG, αυτό δε θα ήταν οικονομικώς αποδοτικό ή τεχνικά κατάλληλο για ένα σύστημα άμεσης παραγωγής ατμού για να αναπτύξει ένα μεγάλης κλίμακας σύστημα αποθήκευσης ικανό να καλύψει την απαίτηση του φορτίου βάσης.

4.4.1 Χρήση λιωμένου αλατιού

Από την άλλη πλευρά, ένα γραμμικό σύστημα Fresnel που χρησιμοποιεί το αλάτι και ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας και ως αποθηκευτικό μέσο, έχει τη δυνατότητα να παρέχει μια επιλογή φορτίου βάσης για το ηλεκτρικό κύκλωμα με τα σημαντικά οικονομικά οφέλη.



Εικόνα 4.15: Διαμόρφωση της ηλιακής εγκατάστασης με χρήση τεχνολογίας λιωμένου αλατιού

Μια μεγάλη διαφορά από το σύστημα άμεσης μετάδοσης ατμού είναι η προσθήκη ενός εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του ηλιακού πεδίου με το λιωμένο αλάτι και του εργαζόμενου μέσου της τουρμπίνας. Ένα αποθηκευτικό σύστημα που χρησιμοποιεί άμεσα το λιωμένο αλάτι μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στο σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο σχέδιο των γραμμικών συλλεκτών Fresnel εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου και θα μπορούσε να διαφέρει σημαντικά από τη μια εγκατάσταση στην άλλη. Το γραμμικό σύστημα Fresnel με τη χρήση λιωμένου αλάτος έχει αποδειχθεί ότι είναι εφικτό και μπορεί να έχει μεγάλα οικονομικά πλεονεκτήματα. Η βιομηχανία ακολουθεί τώρα αυτήν την τεχνολογία ως πορεία στην ανταγωνιστικότητα των δαπανών.

4.5 Σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών Fresnel

Από τεχνική άποψη, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel είναι κατάλληλοι για εφαρμογές συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων υψηλής θερμοκρασίας για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Θα εξεταστούν παρακάτω ορισμένα σενάρια εγκαταστάσεων Fresnel τα οποία προσδιορίζονται ως πιθανή διάβαση για να πετύχουμε ένα ισορροπημένο κόστος ηλεκτρισμού (LCOE), που θα ήταν οικονομικά ανταγωνιστικό με τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα χωρίς οποιεσδήποτε κυβερνητικές επιδοτήσεις ή κίνητρα. Συγκεκριμένα, το Αμερικάνικο Υπουργείο Ενέργειας απαιτεί μείωση του κόστους της ενέργειας από το τρέχον επίπεδο σε 8 cents/kWh και τελικά σε 6 cents/kWh. Τα 6 cents/kWh είναι ισοδύναμο με το τρέχον κόστος της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα του Υπουργείου Ενέργειας.

Το LCOE είναι ένας τυποποιημένος τρόπος μέτρησης του ενεργειακού κόστους που επιτρέπει τη σύγκριση στις διάφορες τεχνολογίες. Εδώ ο υπολογισμός του LCOE γίνεται ως εξής:

$$\text{LCOE}_{\text{real}} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{R_{\text{required},n}}{(1+d_{\text{nominal}})^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1+d_{\text{real}})^n}}$$

Όπου E_n είναι η ενέργεια που παράγεται κατά το έτος n , και N είναι τα χρόνια ζωής του έργου. $R_{\text{required},n}$ είναι το απαιτούμενο εισόδημα κατά το έτος n και είναι ίσο με την αξία των πωλήσεων ηλεκτρικής ενέργειας που εκτιμάται με μια προκαθορισμένη συμφωνία αγοράς ενέργειας, και τέλος d_{nominal} και d_{real} είναι το ονομαστικό και το πραγματικό επιτόκιο εξόφλησης αντίστοιχα.

Case	Linear Fresnel (General)	Linear Fresnel (SOTA) Novatec/SAM	Linear Fresnel (Salt) Empirical	Linear Fresnel (Salt, 8 cents/kWh) Empirical	Linear Fresnel (Steam, 8 cents/kWh) Empirical	Linear Fresnel (SunShot, 6 cents/kWh) Empirical
Source	SAM model	Novatec/SAM	Empirical	Empirical	Empirical	Empirical
<i>Design assumptions</i>						
Technology	Direct steam	Direct steam	Direct Salt	Direct Salt	Steam with concrete/salt storage	Direct Salt with advanced power cycle
Turbine inlet temperature (°C)	440	500	550	650	650	700
Solar multiple	1.8	1.65	2.82	3.3	3.4	2.5
TES (hours)	–	–	10	12	12	14
Plant capacity (MW, net)	100	100	100	250	250	400
Power cycle gross efficiency	0.380	0.394	0.420	0.470	0.470	0.520
Cooling method	Wet	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry
<i>Cost Assumptions</i>						
Site preparation cost (\$/m ²)	20	20	20	15	15	10
Solar field cost (\$/m ²)	225	181	150	110	100	100
Power plant cost (\$/kW)	940	940	940	880	880	836
HTF system (\$/m ²)	35	35	40	20	15	20
Thermal storage cost (\$/kWh-th)	–	–	30	20	20	15
Parasitic ratio (%)	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	6.0
Contingency (%)	7	7	7	7	7	7
Indirect (% of direct costs + contingency)	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8
Interest during construction (%)	5	5	5	5	5	5
O&M (\$/MWh)	15	15	15	7.5	7.5	7.5
<i>SAM results</i>						
Annual system energy efficiency (%)	9.3	11.0	14.2	16.2	15.2	18.2
Annual net electricity (GWh)	223.0	240.0	420.7	1534.7	1477.0	2859.7
Capacity factor (%)	26.7	27.9	51.0	66.5	64.0	70.0
Project direct installed cost (\$/kW)	3662	3061	4438	3803	3676	3221
Total project installed cost (\$/kW)	4142	3313	5227	4700	4550	3980
Annual investment energy return (kWh/\$-yr)	0.61	0.78	0.95	1.61	1.61	2.22
LCOE (¢/kWh, real) [zero ITC, SVS financial assumptions]	20.5	16.5	16.1	8.0	8.0	6.0

Εικόνα 4.16: Τρέχον και προβλεπόμενο κόστος και εκτίμηση κόστους για LFC

Στον παραπάνω πίνακα συνοψίζονται έξι σενάρια ηλιακών εγκαταστάσεων χρησιμοποιώντας τις γραμμικές τεχνολογίες Fresnel σε διάφορες κατηγορίες. Το πρώτο σενάριο αφορά ένα γενικό γραμμικό σύστημα Fresnel με άμεση μετάδοση θερμότητας το οποίο είναι διαθέσιμο στο εμπόριο. Το δεύτερο και το τρίτο αντιπροσωπεύουν την State of the Art (SOTA) τεχνολογία, το τέταρτο και το πέμπτο είναι σενάρια που προσπαθούν να επιτύχουν το στόχο των 8 cents/kWh. Το τελευταίο σενάριο προβλέπει μια διαμόρφωση με την προοπτική να επιτευχθεί ο στόχος των 6 cents/kWh. Επιπλέον, κάποιες ακόμα παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την παροχή πρόσθετων γνώσεων για κάθε σενάριο είναι:

- Θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου
- Η παρασιτική αναλογία
- Μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης
- Ετήσια ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος
- Ετήσια καθαρή ηλεκτρική ενέργεια
- Ετήσια ενεργειακή επιστροφή επένδυσης, η αναλογία της ετήσιας καθαρής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από εγκαταστάσεις ηλιακής ενέργειας και το άμεσο κόστος των συστημάτων των εγκαταστάσεων.

Ειδικότερα, η ετήσια ενεργειακή αποδοτικότητα ορίζεται ως ο λόγος της ετήσιας καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας προς τη διάθεσιμη άμεση ακτινοβολία πέρα επί του συνολικού ηλιακό ανοίγματος των καθρεπτών δηλαδή η αναλογία μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια. Κάθε σενάριο περιγράφεται με συντομία ως εξής:

1. Γραμμικό Fresnel (Γενικός, άμεσος ατμός): Αυτό είναι ένα σύστημα άμεσης μετάδοσης ατμού. Οι δαπάνες καθορίζονται με βάση τις εισροές από τη σχετική βιομηχανία. Αν και ένα έμμεσο σύστημα αποθήκευσης ή ένα σύστημα αποθήκευσης άμεσου ατμού μπορεί να είναι εφικτό, καμιά αποθήκευση δεν προβλέπεται.
2. Γραμμικό Fresnel (SOTA, άμεσος ατμός): Αυτό είναι επίσης ένα DSG σύστημα αλλά με μια υψηλότερη ηλιακή θερμοκρασία παραγωγής. Τα αποτελέσματα της απόδοσης του συστήματος προέρχονται από ένα γραμμικό πρότυπο Fresnel. Μερικές παράμετροι διαμόρφωσης των εγκαταστάσεων και τιμές δαπανών ρυθμίστηκαν για να απεικονίσουν καλύτερα την απόδοση από αυτό τον τύπο εγκατάστασης της SOTA με θερμοκρασίες πάνω από 500 °C στην πραγματικότητα. Καμιά αποθήκευση δεν προβλέπεται.
3. Γραμμικό Fresnel (αλάτι): Αυτή είναι μια εγκατάσταση της SOTA που χρησιμοποιεί λειωμένο αλάτι ως μέσο μεταφοράς θερμότητας στο ηλιακό πεδίο και στο σύστημα αποθήκευσης.
4. Γραμμικό Fresnel (αλάτι, 8 cents/kWh): Αυτό είναι ένα σενάριο άμεσου λειωμένου αλατιού με γραμμικό σύστημα Fresnel. Η ετήσια ενεργειακή επιστροφή επένδυσης που απαιτείται για να επιτευχθεί το 8 cents/kWh είναι 1.61 kWh/\$-yr. Για να γίνει εφικτός ο στόχος αυτός ρυθμίζονται η απαιτούμενη αποδοτικότητα του συστήματος, ο παράγοντας χωρητικότητας και το σύστημα μέτρησης κόστους. Σε σύγκριση με το σενάριο 3, η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου θα πρέπει να αυξηθεί σε περίπου 650°C και η ετήσια απόδοση του συστήματος θα πρέπει να φτάσει το 20%.
5. Γραμμικό Fresnel (Ατμός, 8 cents/kWh): Αυτό είναι ένα σενάριο με DSG γραμμικό Fresnel με έμμεσο σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιώντας είτε σκυρόδεμα είτε αλάτι, όπως τα μέσα αποθήκευσης. Οι παράμετροι του συστήματος και οι μετρήσεις του κόστους αναμένεται να καλύψουν τον ετήσιο στόχο του 1.61 kWh/\$-yr ο οποίος θα οδηγήσει στο 8 cents/kWh.
6. Γραμμικό Fresnel (6 cents/kWh): Η απαιτούμενη ετήσια ενεργειακή επιστροφή επένδυσης είναι περίπου 2.20 kWh/\$-yr. Η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου είναι περίπου 700°C.

4.6 Συμπεράσματα

Σε σύγκριση με τα PTC, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel πάσχουν από χαμηλότερη οπτική απόδοση. Ωστόσο, η τεχνολογία τους διαθέτει την ικανότητα να αυξάνει την

αναλογία συγκέντρωσης και τη θερμοκρασία του δέκτη με την προσθήκη ανακλαστήρα στο άνοιγμα χωρίς αύξηση των σχεδιστικών απαιτήσεων του συστήματος. Επιπλέον, υπάρχουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα PTC:

- Συγκεκριμένη ρύθμιση του συλλέκτη Fresnel δε θέτει καμία μηχανική δυσκολία για τη μεγιστοποίηση του λόγου συγκέντρωσης, ο οποίος επιτρέπει υψηλή θερμοκρασία εξόδου.
- Το σταθερό τμήμα δεκτών μειώνει πολύ τον κίνδυνο διαρροής HTF και την προκύπτουσα εργασία συντήρησης.
- Η γραμμική διαμόρφωση Fresnel είναι τεχνικά φιλική για μεγάλους δέκτες. Ο αυξανόμενος δέκτης μπορεί να βελτιώσει την οπτική αποδοτικότητα των συλλεκτών.

Επίσης υπάρχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κεντρικούς πύργους:

- Η γραμμική φύση των συλλεκτών επιτρέπει πολύ χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης και είναι φιλικό για τους αυτόματους μηχανισμούς πλύσης.
- Η οδήγηση και το σύστημα ελέγχου ενός άξονα των Fresnel συλλεκτών μπορεί να παρέχει μια πολύ απλούστερη και οικονομικώς πιο αποδοτική επιλογή από αυτή για τις εγκαταστάσεις με κεντρικό πύργο.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ορισμένες προκλήσεις και οι οποίες υπάρχουν για τα συστήματα Fresnel όπως:

- Είναι δύσκολο να αυξηθεί και να διατηρηθεί η οπτική αποδοτικότητα ενός γραμμικού συστήματος αυξάνοντας το λόγο συγκέντρωσης.
- Τα υψηλής απόδοσης υλικά επιστρώσεως των σωλήνων απορρόφησης περιορίζονται σε 450-550°C, υποθέτοντας ένα χρόνο ζωής 20-30 χρόνια. Θα πρέπει να γίνουν αρκετά βήματα για να βελτιωθούν περαιτέρω τα υλικά επιστρώματος για να στηρίξουν τις υψηλότερες θερμοκρασίες των 600-700°C.
- Ο κύκλος και η αποθήκευση του λιωμένου αλατιού υψηλής θερμοκρασίας θέτει πρόσθετα λειτουργικά ζητήματα σε πρακτικές εγκαταστάσεις όπως η αποκατάσταση του παγώματος.

Τέλος, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel και η δομή τους είναι κατάλληλη για το συνδυασμό της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας με την ηλιακή ψύξη και θέρμανση, τα φωτοβολταϊκά και τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά εξαιτίας της ευελιξίας του σχεδιασμού του δέκτη.

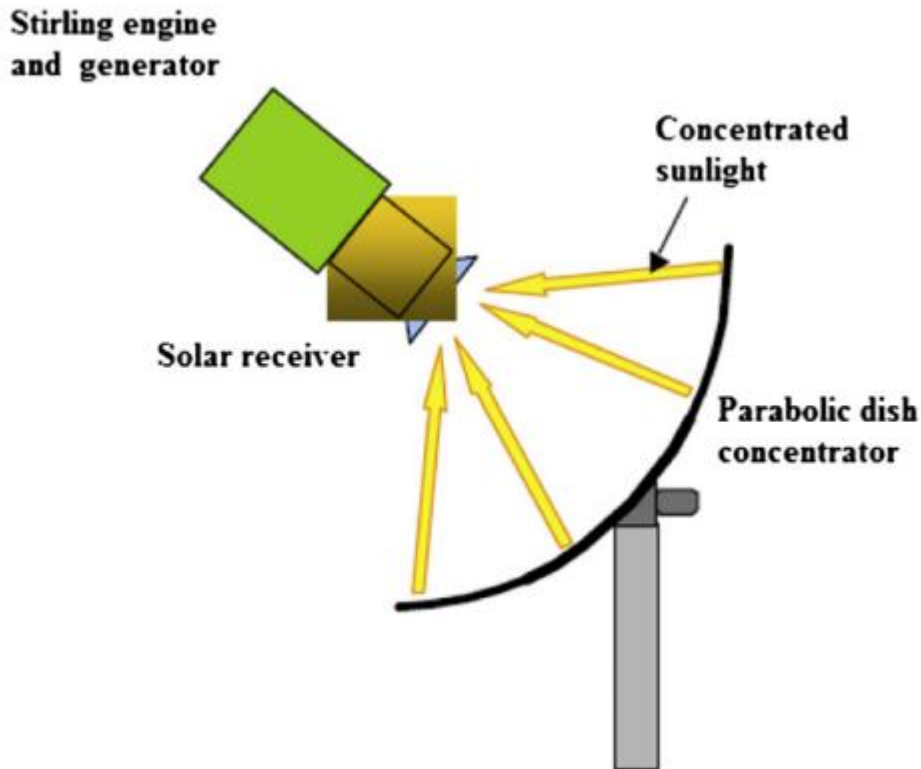
5. Συστήματα δίσκου-μηχανής (Stirling)



Εικόνα 5.1: Σύστημα δίσκου/μηχανής Stirling

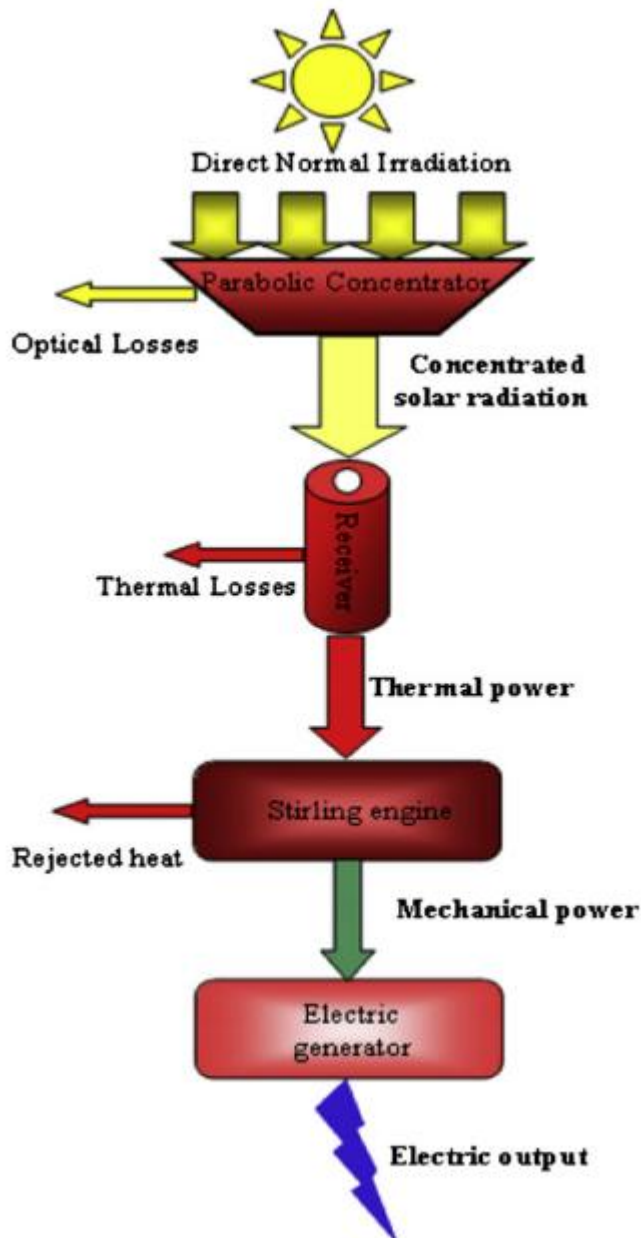
5.1 Περιγραφή λειτουργίας

Τα συστήματα παραβολικών πιάτων με μηχανές Stirling είναι μία από τις τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων που έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί για επίγειες εφαρμογές και επιτρέπει την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών συγκεντρώνοντας την ακτινοβολία του ήλιου σε μια εστίαση. Το σύστημα των παραβολικών πιάτων παρακολουθεί τον ήλιο και εστιάζει την ηλιακή ενέργεια στην κοιλότητα ενός δέκτη. Τότε ο δέκτης απορροφά την ενέργεια και τη μεταφέρει σε μια μηχανή θερμότητας-γεννήτρια που παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Η συμπεριφορά των θερμικών μηχανών βασίζεται στους θερμοδυναμικούς κύκλους που αξιοποιούν τη μέγιστη θερμοκρασία η οποία επιτυγχάνεται από το εργαζόμενο ρευστό.



Εικόνα 5.2: Διάγραμμα συστήματος δίσκου/μηχανής

Η μηχανή Stirling αποτελείται από ένα κλειστό σύστημα το οποίο είναι γεμάτο με εργαζόμενο αέριο (τυπικά υδρογόνο ή ήλιο) που εναλλακτικά θερμαίνεται ή ψύχεται. Είναι γνωστό ως εργαζόμενο αέριο, επειδή συνεχώς ανακυκλώνεται στο εσωτερικό της μηχανής και δεν καταναλώνεται. Η μηχανή λειτουργεί συμπιέζοντας το εργαζόμενο αέριο όταν αυτό είναι κρύο και το διαστέλλει όταν είναι θερμό. Με τη διαστολή του αερίου επιτυγχάνεται περισσότερη παραγωγή ενέργειας από ότι με τη συμπίεση του ψυχρού αέρα. Αυτή η εναλλαγή στις φάσεις παράγει μια πτώση και μια αύξηση της πίεσης στο έμβολο της μηχανής, η κίνηση του οποίου μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ. Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε μηχανική ισχύ μειώνει ταυτόχρονα το κόστος και την πολυπλοκότητα της κινητήριας μηχανής.



Εικόνα 5.3: Αλληλουχία καταστάσεων

Στη θεωρία, τα κυριότερα πλεονεκτήματα των μηχανών Stirling είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιούν μια εξωτερική πηγή θερμότητας και η υψηλή τους απόδοση. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια φτηνή πηγή ισχύος για τις αναπτυσσόμενες χώρες. Ως εκ τούτου, το σύστημα δίσκου-μηχανής έχει ερευνηθεί σε βάθος και μπορεί να επιτύχει καλή θερμοδυναμική απόδοση σε σύγκριση με τα άλλα ηλιοθερμικά συγκεντρωτικά συστήματα.

Τα συστήματα δίσκου-μηχανής είναι αρθρωτά, που σημαίνει πως κάθε σύστημα είναι μια αυτόματη γεννήτρια και μπορούν να συναρμολογηθούν σε μια εγκατάσταση που θα κυμαίνεται από 1 Kw σε 10 kW. Αυτά τα συστήματα μπορούν επίσης να συνδυαστούν με το φυσικό αέριο και έτσι το υβριδικό σύστημα που θα προκύψει να έχει τη δυνατότητα να παρέχει συνεχή ηλεκτρική παραγωγή όπως

άλλα συμβατικά συστήματα ηλιακής ενέργειας. Εγκαθίστανται κυρίως σε περιοχές που έχουν υψηλά επίπεδα από άμεση ακτινοβολία όπως η βόρεια Αφρική, το Μεξικό, το νοτιοδυτικό τμήμα των ΗΠΑ καθώς επίσης και σε περιοχές της Αυστραλίας.

Στην πραγματικότητα, υπάρχουν μόνο δύο συστήματα δίσκου-μηχανής Stirling, τα οποία έχουν αναπτυχθεί και βρίσκονται στο εμπόριο:

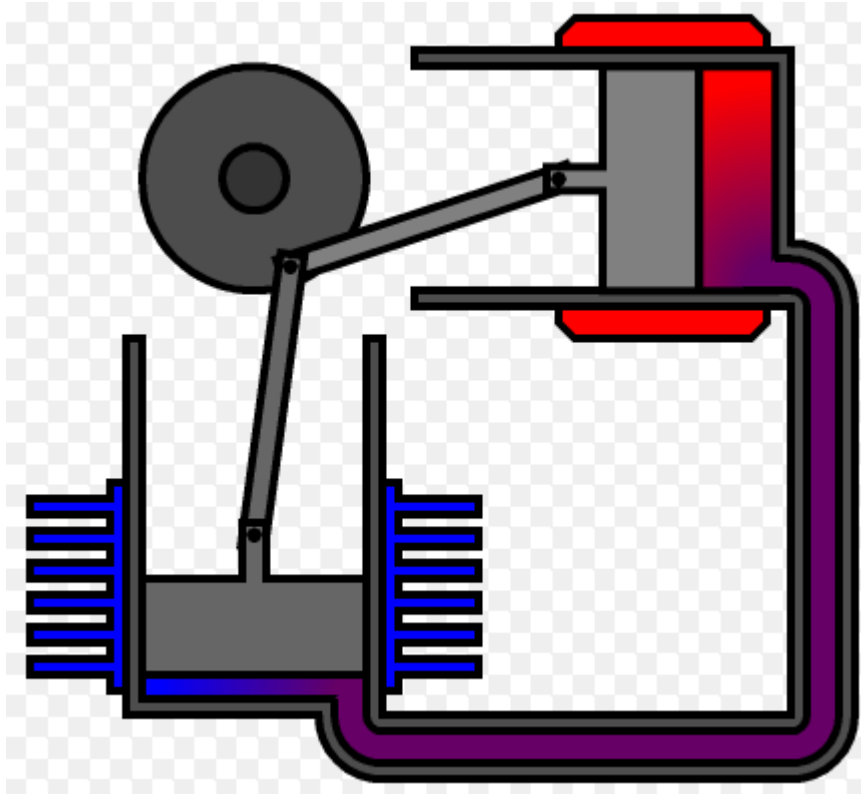
- Euro dish της Schlaich-Bergermann und Partner (SBP)
- SunCatcher Dish Stirling system της Stirling Energy Systems (SES)

5.2 Μηχανή Stirling



Εικόνα 5.4: Μηχανή Stirling

Η μηχανή είναι μια συσκευή η οποία λειτουργεί σε έναν κλειστό αναπαραγωγικό θερμοδυναμικό κύκλο, με κυκλική συμπίεση και διαστολή του εργαζόμενου ρευστού σε διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα. Μπορεί να περιγραφεί ως μια διάταξη εμβόλων και εναλλακτών θερμότητας. Μια τυπική διάταξη έχει δύο έμβολα και τρεις εναλλάκτες. Τα έμβολα, ένα εργαλείο που εκτοπίζει τον αέρα (εκτοπιστής έμβολο) και ένα ειδικό έμβολο ισχύος, επηρεάζουν την κίνηση του υγρού μέσα στη μηχανή και οι εναλλάκτες θερμότητας επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας από τις συσκευές προσθήκης και της απόρριψης θερμότητας καθώς και την εσωτερική ροή μέσα στη μηχανή.



Εικόνα 5.5: Κάθετη τομή μηχανής Stirling

Προκειμένου να επιτευχθεί θετικό καθαρό έργο από το έμβολο ισχύος, ο εκτοπιστής και τα έμβολα ισχύος δεν είναι συμφασικά. Αυτή η διαφορά στη φάση εκδηλώνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες μηχανών Stirling: την κινηματική και αυτή με ελεύθερα έμβολα.

- Σχεδιασμός κινηματικής: Η διαφορά φάσης ελέγχεται από μια μηχανική σύνδεση όπως ένας στροφαλοφόρος άξονας μεταξύ του εκτοπιστή και του εμβόλου ισχύος. Αυτή τη στιγμή, οι κινηματικές μηχανές Stirling όπως η Kockums (United Stirling) 4-95 25 kWe, η Stirling Thermal Motors (STM) 4-120 25 kWe και η SOLO 161 11kWe είναι τα παραδείγματα για τις μηχανές που χρησιμοποιούνται για συστήματα δίσκου-μηχανής.
- Σχεδιασμός με ελεύθερα έμβολα: Δεν υπάρχει κανένας άμεσος μηχανικός σύνδεσμος μεταξύ των δύο εμβόλων. Η απαραίτητη διαφορά φάσης καθορίζεται από τις διαφορές πιέσεις στον κύκλο και τη δυναμική απόκριση των στοιχείων. Το συγκεκριμένο σχέδιο μπορεί να οδηγήσει σε μια ερμητική συγκράτηση χωρίς απώλειες υγρών αλλά η έλλειψη ενός μηχανικού δεσμού μεταξύ του εκτοπιστή και του εμβόλου ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη απόδοση. Αυτά τα σχέδια υπόσχονται μακρά διάρκεια ζωής με ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης. Στην πραγματικότητα, καμιά μηχανή με ελεύθερα έμβολα δεν αναπτύσσεται για εφαρμογές ηλιακών πεδίων.

Specifications	Quantity
Concentrator	
Type (and N° of facets)	Faceted (82)
Reflecting area	Thin glass mirror
Diameter	10.57 m
Projected area	87.7 m ²
Glass area	91.01 m ²
Reflectivity	0.91
Concentration factor	7500
Focal length	7.45 m
Optical efficiency	0.88
Receiver	
Aperture diameter	0.2 m
Receiver temperature	720 °C
Working pressure	20 Mpa
Receiver efficiency	0.9
Stirling engine (kinematics)	
Type	Kockums 4–95 SES
Size	4 cylinders 380 cc
Working fluid	Hydrogen
Engine efficiency	38–40%
Generator	
Type	Induction
Rotation speed	1800 rpm
Efficiency of generator	0.92–0.94
Solar Dish Stirling System Performances	
Electrical output at 1000 W/m ²	25 kWe
Peak net efficiency	29.4%
Max output power	27 kWe
Annual efficiency	24%
Minimum insolation	250–300 W/m ²

Εικόνα 5.6: Χαρακτηριστικά και απόδοση του συστήματος stirling των 25kW

5.3 Συλλέκτης

Το μέγεθος του ηλιακού συλλέκτη για τα συστήματα δίσκου-μηχανής προσδιορίζεται από την ισχύ εξόδου που επιδιώκεται σε μέγιστα επίπεδα έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία (1000W/m²) και τις αποδόσεις του συλλέκτη και της μετατροπής ισχύος. Με τις τρέχουσες τεχνολογίες, ένα σύστημα Stirling απαιτεί ένα πιάτο διαμέτρου 5,5m. Ένα σύστημα 10 kWe απαιτεί πιάτο 7,5m διαμέτρου και ένα σύστημα 25 kWe χρειάζεται πιάτο με 10m διάμετρο.



Εικόνα 5.7: Συλλέκτης μονάδας δίσκου/μηχανής

Λόγω της παραβολικής μορφής, τα πιάτα έχουν αναλογίες συγκεντρώσεων που κυμαίνονται από 600 έως 2000 και μπορούν να πετύχουν θερμοκρασίες πάνω από 1500°C. Ο μεγαλύτερος συγκεντρωτής σε όλο τον κόσμο είναι το «big Dish» στην Αυστραλία που έχει άνοιγμα 500m². Το «big Dish» έχει 380 ίδια πάνελ καθρέπτες με διαστάσεις 1,17m x 1,17m, το οποίο ενσωματώνει τους καθρέπτες πάνω στο μέταλλο. Η κατασκευή του πρώτου πρωτοτύπου στην Εθνικό Αυστραλιανό Πανεπιστήμιο ξεκίνησε το 2008 και το πρώτο τεστ στον ήλιο πραγματοποιήθηκε στις 29 Ιουνίου 2009. Ο ιδανικός συμπυκνωτής έχει μια παραβολική μορφή ενώ μερικοί προσεγγίζουν αυτή τη μορφή χρησιμοποιώντας τις τεχνολογίες που παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Συμπυκνωτές με όψη γυαλιού:** Χρησιμοποιούν ευθυγραμμισμένα σφαιρικής κοιλότητας μεμονωμένα κομμάτια γυαλιού με καθρέπτη, τοποθετημένα πάνω σε μια προσεγγιστική δομή παραβολικού σχήματος. Αυτά τα σχέδια γενικότερα έχουν υψηλές αναλογίες συγκέντρωσης και τείνουν επίσης να είναι ιδιαίτερα βαριά, ακριβά και να απαιτούν ιδιαίτερα ακριβή ευθυγράμμιση ενός μεγάλου αριθμού κατόπτρων.
- **Παραβολικοί συμπυκνωτές πλήρους επιφάνειας:** Ολόκληρη η επιφάνεια σχηματίζει περίπου μια παραβολική μορφή.

- **Συμπυκνωτές με τεντωμένη μεμβράνη:** Μπορεί να είναι μονόπλευρη ή πολύπλευρη. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει λεπτές μεμβράνες οι οποίες είναι τεντωμένες πάνω και στις δύο πλευρές του μεταλλικού δακτυλίου. Οι μεμβράνες μπορεί να είναι λεπτά πλαστικά φύλλα ή λεπτά μεταλλικά φύλλα με μια αντανακλαστική επικάλυψη που εφαρμόζεται σε μια από τις μεμβράνες. Αυτή η τεχνολογία έχει αποκαλύψει προβλήματα συμπεριφοράς των μεμβράνων. Σήμερα χρησιμοποιείται για παραβολές μικρότερης διαμέτρου.

5.3.1 Πρώτα στάδια της εγκατάστασης καθρεπτών στην επιφάνεια του πιάτου



Εικόνα 5.8: Πρώιμο στάδιο εγκατάστασης ενός καθρέπτη στην επιφάνεια

Σχετικά με την ανακλαστική επιφάνεια, τρεις τύποι χρησιμοποιούνται σε σχέδια συμπυκνωτή:

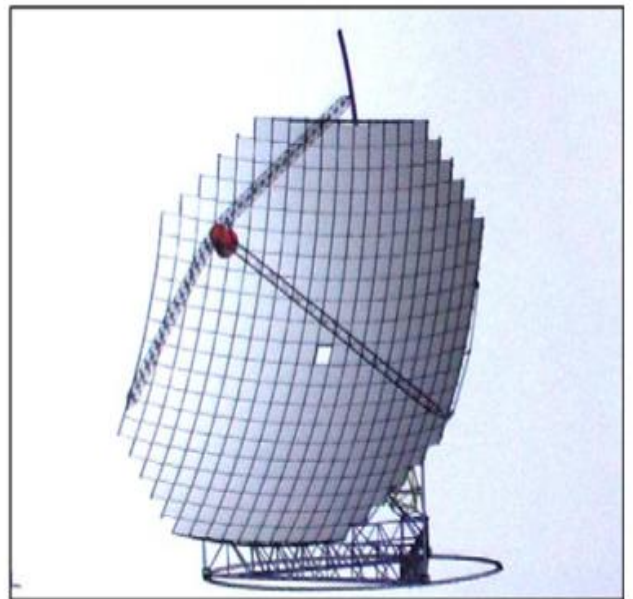
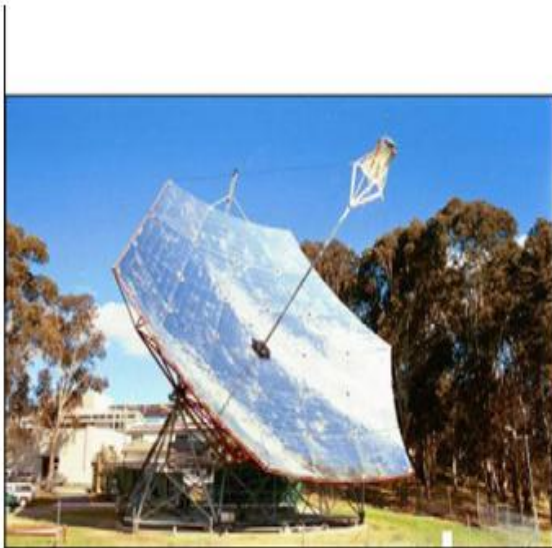
- ❖ Ανακλαστική επιφάνεια από αλουμίνιο ή άργυρο εναποτίθεται πάνω σε πλαστικό ή γυαλί. Είναι οι πιο ανθεκτικές ανακλαστικές επιφάνειες με μια τιμή ανάκλασης της τάξης του 95%. Αυτή η ιδέα χρησιμοποιείται σε πολλά τρέχοντα σχέδια συμπυκνωτή όπως Suncatcher systems, EURODISH, WGA, big dish.
- ❖ Ανακλαστικό πολυμερές φιλμ. Αυτό έχει χαμηλότερο κόστος αλλά οι οπτικές και μηχανικές του ιδιότητες μπορούν να υποστούν φθορά μετά από

μακροχρόνια έκθεση σε υπεριώδεις ακτίνες. Χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος, ευελιξία και υψηλή ανακλαστικότητα (96%).

- ❖ Γυαλισμένο και ανακλαστικό φύλλο αλουμινίου. Χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος αλλά τα σημαντικά μειονεκτήματά τους είναι ότι έχουν μόνο μέτρια κατοπτρική ανάκλαση (85%) και μια φτωχή αντοχή στις καιρικές συνθήκες.

5.3.2 Ανάπτυξη σχεδίου

Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι ένα πιάτο θα μπορούσε να κατασκευαστεί με καλή οπτική απόδοση χρησιμοποιώντας τυποποιημένα σφαιρικά πάνελ καθρεπτών τα οποία θα βοηθούσαν στην μαζική παραγωγή. Τα υλικά, οι οπτικοί και δομικοί περιορισμοί αναθεωρήθηκαν για να επιλεγεί μια τετραγωνική παρά τριγωνική μονάδα και να καθοριστεί ένα βέλτιστο μέγεθος μονάδας.



Εικόνα 5.9: Το πιάτο του SG3 400m² (αριστερά) και μια εικόνα από CAD του νέου πιάτου SG4 500m²(δεξιά)

Τα φορτία ανέμου ήταν σημαντικός οδηγός στον καθορισμό του δομικού σχεδιασμού. Ο κατάλληλος δομικός κώδικας σχεδίου για την Αυστραλία (Standards Australia 2002) προσδιορίζει την οριακή κατάσταση της ταχύτητας του ανέμου με βάση την τοποθεσία, το ύψος και άλλους παράγοντες. Η γεωμετρία του σχεδίου του SG3 έχει το πιάτο τοποθετημένο οριζόντια για τη μέγιστη αντίσταση απέναντι σε κάποια καταιγίδα. Για το συγκεκριμένο πιάτο, υποδεικνύεται ότι το όριο της ταχύτητας του ανέμου είναι 162 km h⁻¹.



Εικόνα 5.10 : Τοποθέτηση πλαισίων στη βάση με ειδικά μηχανήματα

Εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα του κόστους για διάφορα υλικά που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν ένα ενδεικτικό φορτίο πάνω από 3 μέτρα άνοιγμα. Το ξύλο και το ενισχυμένο σκυρόδεμα αποδείχθηκε ότι είναι πιο αποδοτικά οικονομικά αλλά κρίθηκαν μη πρακτικά. Το αλουμίνιο και οι γαλβανισμένοι σωλήνες από χάλυβα φάνηκαν πως είναι σχεδόν πανομοιότυπα σε ότι αφορά το κόστος. Τελικώς, επιλέχθηκε ο χάλυβας με βάση την ευρύτερη δυνατότητα εφαρμογής και επεξεργασίας για μεγάλες δομές.

5.4 Δέκτης

Οι δέκτες για τα συστήματα Stirling είναι δέκτες με κοιλότητα με ένα μικρό άνοιγμα μέσω του οποίου εισάγεται το συγκεντρωμένο φως του ήλιου. Το άνοιγμα του δέκτη έχει βελτιστοποιηθεί για να είναι αρκετά μεγάλο για να επιτρέπει την εισαγωγή του συγκεντρωμένου ηλιακού φωτός αλλά ταυτόχρονα αρκετά μικρό για να περιορίζει τις απώλειες ακτινοβολίας και θερμότητας.

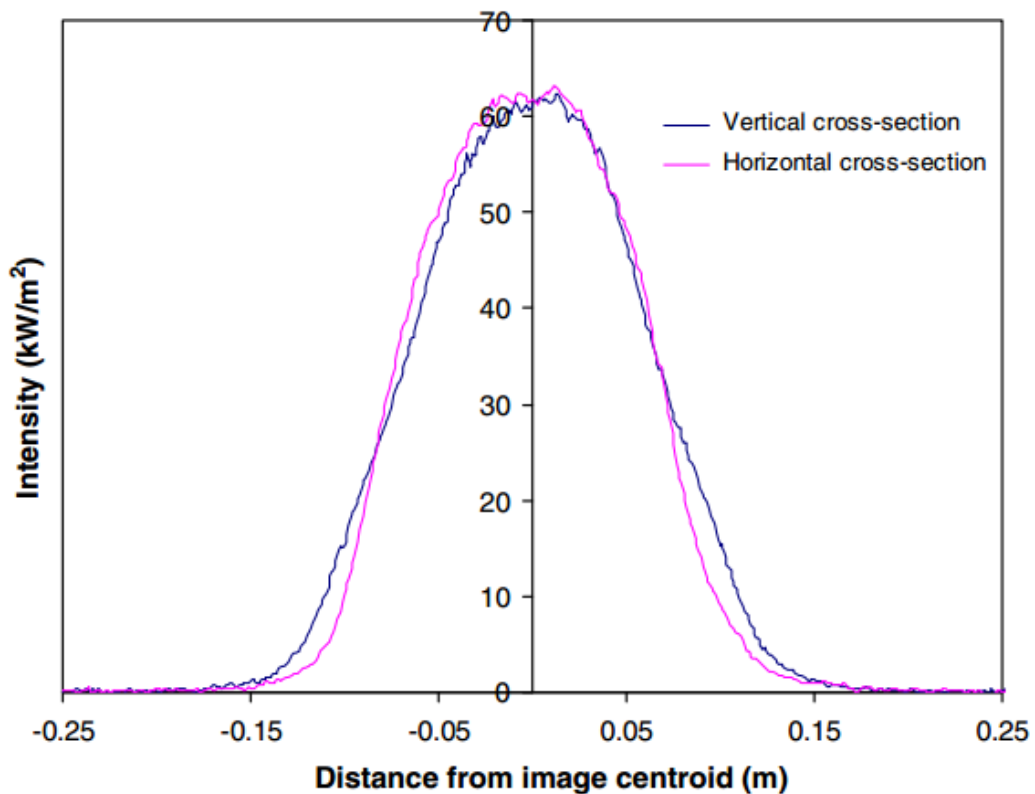
Δύο διαφορετικές μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται συνήθως στα παραβολικά πιάτα είναι:

- ❖ **Δέκτες απ'ευθείας φωτισμού(DIR):** Οι σωλήνες θερμότητας της μηχανής Stirling προσαρμόζονται να απορροφούν την συγκεντρωμένη ηλιακή ροή. Είναι ικανά να απορροφούν υψηλά επίπεδα από την ηλιακή ροή. Αυτό το είδος του δέκτη χρησιμοποιείται σε διάφορα συστήματα πιάτου μηχανής όπως το EURODISH, Suncatcher και Sundish.

- ❖ **Έμμεσος δέκτης (Υγρό-μέταλλο, ηλιακοί δέκτες σωλήνων θερμότητας):**
Χρησιμοποιεί ένα υγρό μεταφοράς υγρού μετάλλου, το υγρό μεταλλικό νάτριο εξατμίζεται από την επιφάνεια του απορροφητή και συμπυκνώνεται στους σωλήνες θέρμανσης του κινητήρα Stirling και έτσι εξασφαλίζει μια ομοιόμορφη θερμοκρασία στους σωλήνες θέρμανσης.

5.4.1 Αξιολόγηση της οπτικής απόδοσης

Η μέθοδος χαρτογράφησης ροής με κάμερα έχει επιλεγεί ως μια πρωτεύουσα μέθοδος για την αξιολόγηση της οπτικής απόδοσης και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήσαμε μια μονοχρωματική κάμερα Prosilica GC1290 12-bit. Χαρτογραφείται η ροή σε αντιπροσωπετικούς καθρέπτες- πάνελ κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας.



Εικόνα 5.11: Αποτελέσματα χαρτογράφησης της ροής σε έναν μονό καθρέπτη-πάνελ

Προτείνεται ένα μέσο σφάλμα κλίσης της επιφάνειας του πάνελ της τάξης των 1,3 mrad.

Κατά τη διάρκεια της πρώτης δοκιμής στον ήλιο, τα πλαστικά καλύμματα παρέμειναν πάνω στα περισσότερα από τα πάνελ και η ακτινοβολία συγκεντρώθηκε μόνο από τα εκτειθέμενα άκρα των καθρεπτών. Σε αυτή τη διαμόρφωση, η

συνολική επιφάνεια του κατόπτρου που βρισκόταν σε λειτουργία ήταν 82m^2 από τη συνολική που είναι 489m^2 .

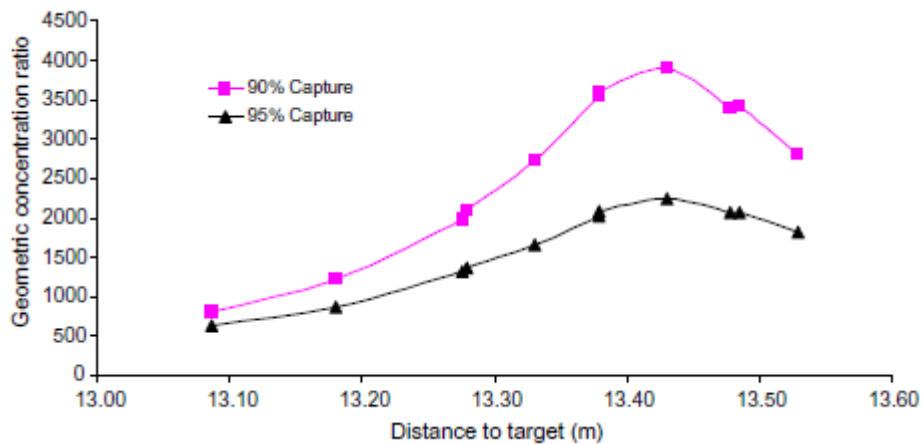


Εικόνα 5.12: Κοντινή φωτογραφία του στόχου μέσα από ουδέτερα φίλτρα πυκνότητας

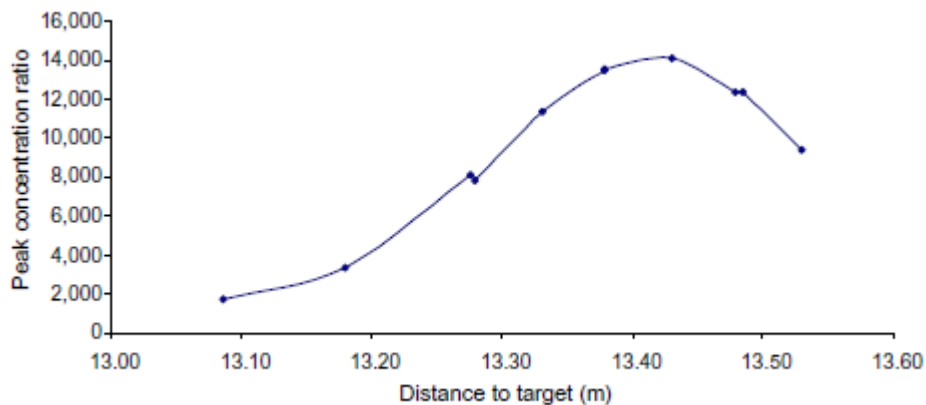
Ο τετραγωνικός στόχος είναι $1,5\text{m}$ σε μια πλευρά και το μέγεθος της εικόνας προτείνει μια αναλογία συγκέντρωσης περίπου 1600. Πρέπει να σημειωθεί πως ο στόχος ήταν 200mm πίσω από την εστιακή θέση και υπήρχε κάποια αυξομείωση λόγω σύννεφων τα οποία είναι παράγοντες που περιορίζουν την συγκέντρωση που επιτυγχάνεται. Έγιναν πολλές προσπάθειες για να μετρηθεί η ροή χρησιμοποιώντας υδρόψυκτους στόχους από αλουμίνιο. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση ο στόχος καταστρέφονταν από υψηλότερα του αναμενόμενου επίπεδα ροών πριν προλάβουμε να λάβουμε καλά δεδομένα. Η ροή επίσης έλιωσε μια κεραμική κουβέρτα η οποία τοποθετείται για την προστασία της δομής του δέκτη και η θερμοκρασία της αξιολογήθηκε κοντά στους 1200°C . Στη συνέχεια, οι προσπάθειες μεταφέρθηκαν στη χαρτογράφηση της ροής τις νυχτερινές ώρες χρησιμοποιώντας το Δία και την πανσέληνο. Αυτή είναι μια καθιερωμένη τεχνική για τη μέτρηση της οπτικής των συλλεκτών υψηλής συγκέντρωσης:

Το μέγεθος της εικόνας της πανσελήνου είναι κοντά σε αυτή που θα λαμβάνονταν από τον ήλιο, καθώς οι ηλιακές και οι σεληνιακές γωνιακές διαμέτροι έχουν απόκλιση περίπου 7%. Μια επιτυχημένη χαρτογράφηση της ροής της πανσελήνου έγινε στις 4 Σεπτεμβρίου 2009. Μια δεύτερη εικόνα της ανάλυσης της εικόνας είναι:

Η θέση του στόχου θα μπορούσε να ρυθμιστεί από το έδαφος μέσω ενός ηλεκτρικού γρύλου. Αυτό έγινε προκειμένου να προσδιοριστεί το πραγματικό εστιακό μήκος.



Εικόνα 5.13: Αναλογία γεωμετρικής συγκέντρωσης σε σχέση με την απόσταση από το στόχο



Εικόνα 5.14: Αναλογία μέγιστης συγκέντρωσης σε σχέση με την απόσταση από το στόχο

Το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό είναι τα πολύ υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης, με τη μέγιστη τιμή στα 14100 και μια γεωμετρική αναλογία συγκέντρωσης για 95% κάλυψη του 2240. Αυτά μπορούν να συγκριθούν με τα πραγματικά πιάτα SG3 που έχουν τιμές 1000 και 500 αντίστοιχα.

Με βάση τις μετρήσεις, το εστιακό επίπεδο είναι στην περιοχή 13,40-13,45m από την κορυφή του πιάτου το οποίο συμφωνεί με την τιμή σχεδιασμού του 13,4m .

Peak concentration ratio	Geometric concentration		Aperture diameter (mm)	
	90% capture	95% capture	90% capture	95% capture
14,100	3900	2240	400	530

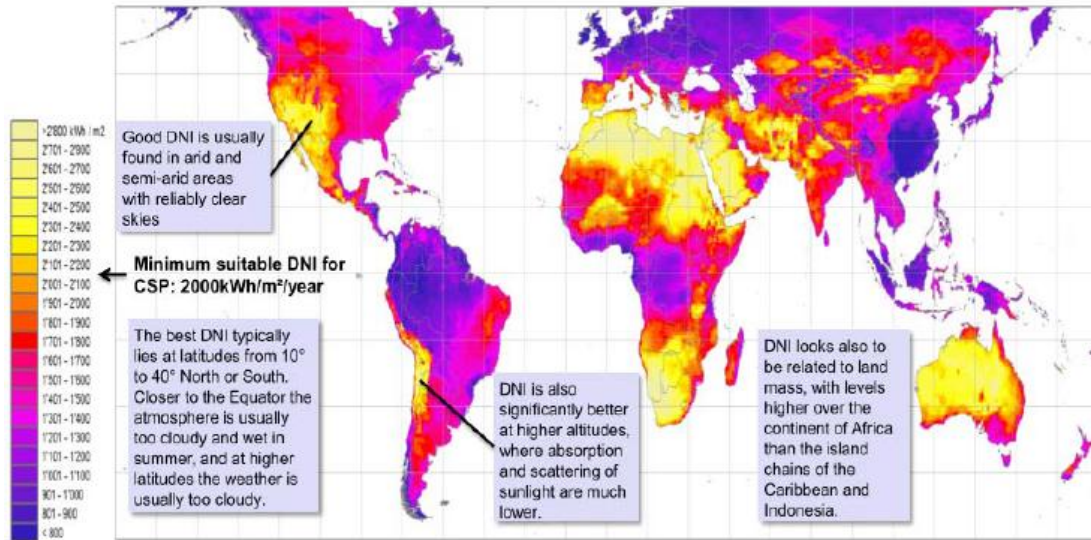
Εικόνα 5.15: Σημαντικές παράμετροι για τη βέλτιστη εφαρμογή του εστιακού μήκους

Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν μια οπτική απόδοση που είναι υψηλότερη από την αναμενόμενη. Είναι ελαφρώς καλύτερες από τα αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί για το πιάτο του Ισραήλ από το Birjukov (2004) και μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από ότι προκύπτει για το πιάτο SG3 (Johnston,1995). Θα πρέπει ωστόσο να τονιστεί ότι ακόμα είναι προκαταρκτικές ενώ οι αβεβαιότητες εκτιμάται ότι είναι περίπου 5%. Δύο προφανείς πηγές σφάλματος έχουν εξεταστεί σε βάθος. Η γωνιακή απόκριση από το διάχυτο λευκό στόχο έχει μετρηθεί και έχει ενσωματωθεί σε μια ανάλυση ακτίνων για τον έλεγχο της ευαισθησίας και επομένως παρουσιάζει μια παραπάνω πρόβλεψη συγκέντρωσης περίπου 1-2,5%. Το επίπεδο της έντασης του φόντου μπορεί να μετρηθεί μόνο εντός των ορίων της κάμερας στο άνοιγμα που θα επιλεγεί. Αυτό θα μπορούσε να είναι σημαντικό, ωστόσο το σφάλμα μπορεί να είναι μόνο προς την κατεύθυνση της υποεκτίμησης του επιπέδου του φόντου με μια επακόλουθη υποεκτίμηση της συγκέντρωσης. Τελικά, είναι περισσότερο επιθυμητή η άμεση μέτρηση της ηλιακή ροής με ένα όργανο ραδιομέτρων.

5.5 Επιλογή περιοχής για τεχνολογία δίσκου/μηχανής

Το παραβολικό πιάτο έχει μερικά πλεονεκτήματα όπως το ότι είναι σπονδυλωτό, κατάλληλο για μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις και το πιο εξελιγμένο για μικρά εργοστάσια με συγκεντρωμένη ηλιακή τεχνολογία. Ωστόσο, η επιλογή της σωστής περιοχής είναι από τα πιο κρίσιμα σημεία για την ανάπτυξη μιας βιώσιμης εγκατάστασης CSP όπως είναι αυτή του δίσκου/μηχανής. Κατά την επιλογή του τόπου ή της θέσης, ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος. Η άμεση ακτινοβολία είναι θεμελιώδους σημασίας για τη χωροθέτηση του εργοστασίου, αφού έτσι μόνο οι παραβολικές τεχνολογίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η ισχυρή άμεση ακτινοβολία απαιτείται καθώς έτσι δημιουργούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες που χρειάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Εν τω μεταξύ, η εμμέση ακτινοβολία δεν μπορεί να συγκεντρωθεί και θέσεις με αρκετή συννεφιά είναι ακατάλληλες για τα παραβολικά πιάτα. Περισσότερο από $5\text{kWh/m}^2/\text{day}$ άμεσης κανονικής ακτινοβολίας (DNI) απαιτείται για να λειτουργήσει και να είναι οικονομικά.



Εικόνα 5.16: Άμεση κανονική ακτινοβολία στον κόσμο

Συνολικά, λίγες είναι οι περιοχές ή οι τοποθεσίες με μια άριστη πηγή ηλιακής ενέργειας και ο πιο επιθυμητός για την ανάπτυξη των συστημάτων δίσκου/μηχανής Stirling. Αυτές είναι: Βόρεια Αφρική, Μέση Ανατολή, Νότια Αφρική, Αυστραλία, το δυτικό τμήμα των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής και τμήματα της Νότιας Αμερικής.

Ακόμα και έτσι, αυτό εξαρτάται προφανώς κατά μέσο όρο από τις μετεωρολογικές συνθήκες κατά τη διάρκεια ενός έτους. Επίσης, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία θα επηρεαστεί από μετεωρολογικούς παράγοντες όπως η κάλυψη των νεφών, η υγρασία και τοπικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως σκουπίδια και μόλυνση του αέρα.

6. Μεγαλύτερα Έργα Για Κάθε Κατηγορία

Τα πρώτα εμπορικά ηλιοθερμικά συγκεντρωτικά συστήματα (CSP) αναπτύχθηκαν τον 1980. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση σήμερα είναι το Invarah Solar Power Facility με εγκατεστημένη ισχύ 370 MW που ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2014 καθώς επίσης και η εγκατάσταση των 354 MW του SEGS τα οποία βρίσκονται στην έρημο της Mojave στην Καλιφόρνια ενώ στην συγκεκριμένη τοποθεσία έχουν πραγματοποιηθεί διάφορα άλλα έργα. Με εξαίρεση τον ηλιακό σταθμό Shams που χτίστηκε το 2013 κοντά στο Άμπου Ντάμπι των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων, όλες οι υπόλοιπες εγκαταστάσεις ισχύος 100 MW ή και μεγαλύτερες βρίσκονται είτε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής είτε στην Ισπανία.

6.1 Parabolic trough collector

Η εγκατάσταση Solar Energy Generating Systems (SEGS) στην Καλιφόρνια με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ από τρεις ξεχωριστές τοποθεσίες στα 354 MW είναι σήμερα η δεύτερη μεγαλύτερη εγκατάσταση ηλιοθερμικών συστημάτων στον κόσμο και πρώτη όσον αφορά την τεχνολογία των παραβολικών κοίλων συστημάτων.



Εικόνα 6.1: SEGS στην Καλιφόρνια

Αποτελείται από εννέα εργοστάσια ηλιακής ενέργειας στην έρημο Mojave στην οποία η ηλιακή ακτινοβολία είναι μία από τις καλύτερες διαθέσιμες στις Η.Π.Α. Οι εγκαταστάσεις SEGS I-II (44MW) βρίσκονται στο Daggett, οι SEGS III-VII (150MW) είναι εγκατεστημένες στο Kramer Junction και οι SEGS VIII-IX (160MW) στη λίμνη

Harper. Η εταιρεία NextEra Energy Resources λειτουργεί και μερικώς κατέχει τις εγκαταστάσεις που βρίσκονται στο Kramer Junction και στη λίμνη Harper.

Λίμνη Harper

Τα SEGS VIII και SEGS IX ήταν οι μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής ηλιακής θερμικής ενέργειας ατομικά και συλλογικά στον κόσμο μέχρι το 2014. Είναι τα πιο πρόσφατα, τα μεγαλύτερα και πιο εξελιγμένα εργοστάσια από τα εννέα στο SEGS. Η κατασκευή της δέκατης μονάδας στην ίδια τοποθεσία διεκόπη λόγω πτώχευσης της εταιρείας που την κατασκεύαζε ενώ δεν ξεκίνησε ποτέ η κατασκευή ενδέκατης και δωδέκατης μονάδας παρ'όλο που είχε εγκριθεί. Κάθε μία από τις προγραμματισμένες εγκαταστάσεις είχε ικανότητα 80MW εγκατεστημένης ισχύος. Η εταιρεία Abengoa Solar κατασκεύασε πρόσφατα το εργοστάσιο Mojave Solar Project (MSP) ισχύος 280MW δίπλα στα SEGS VIII και SEGS IX, χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνολογία με αυτά.

Kramer Junction

Οι ανακλαστήρες στην τοποθεσία Kramer Junction είναι στραμμένοι στη δυτική πλευρά του ουρανού για να εστιάσουν αργά το απόγευμα το φως του ήλιου στους σωλήνες απορρόφησης. Αυτή η τοποθεσία έχει κατά μέσο όρο 340 ημέρες ηλιοφάνειας το χρόνο που την καθιστά ιδανική για παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Η μέση άμεση κανονική ακτινοβολία (DNR) είναι 7.44kWh/m²/day, μία από τις καλύτερες παγκοσμίως.



Εικόνα 6.2: Μέρος της εγκατάστασης

6.1.1 Λειτουργία εγκατάστασης

Η εγκατάσταση έχει καθαρή εγκατεστημένη ισχύ 354MW. Οι στρόβιλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και την νύχτα με την καύση φυσικού αερίου. Η εταιρεία NextEra ισχυρίζεται ότι οι μονάδες παραγωγής μπορούν να τροφοδοτήσουν 232500 σπίτια κατά τη διάρκεια της ημέρας στη μέγιστη ισχύ, αντικαθιστώντας 3800 τόνους ρύπανσης ετησίως που θα παράγονταν αν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχονταν από ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο. Οι εγκαταστάσεις διαθέτουν συνολικά 936384 καθρέπτες και καλύπτουν περισσότερα από 1600 στρέμματα. Αν ήταν παραταγμένα σε σειρά, οι παραβολικοί καθρέπτες θα εκτείνονταν πάνω από 369 χιλιόμετρα.

6.2 Ηλιακός πύργος ισχύος

Το Ivanpah Solar Electric Generating System είναι ένα συγκεντρωτικό ηλιοθερμικό σύστημα στην έρημο Mojave στην Καλιφόρνια, 64 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά του Λας Βέγκας με μια καθαρή εγκατεστημένη ισχύ 392 MW. Αποτελείται από 173500 ηλιοστάτες καθέναν από τους οποίους έχει δύο καθρέπτες που εστιάζουν την ηλιακή ενέργεια σε λέβητες που βρίσκονται τοποθετημένοι πάνω σε τρεις κεντρικούς ηλιακούς πύργους ισχύος και κατέχει έκταση 4000 στρεμάτων. Η πρώτη μονάδα του έργου συνδέθηκε στο σύστημα το Σεπτέμβριο του 2013 ενώ η εγκατάσταση άνοιξε επισήμως στις 13 Φεβρουαρίου το 2014 και είναι μέχρι στιγμής ο μεγαλύτερος ηλιοθερμικός σταθμός του κόσμου. Το κόστος του ανήλθε στα 2,2 δισεκατομμύρια δολάρια. Το 2010 το έργο αποκλιμακώθηκε από τον αρχικό σχεδιασμό των 440MW για να αποφευχθεί η διατάραξη του φυσικού περιβάλλοντος της χελώνας της ερήμου.



Εικόνα 6.3: Ivanpah Solar Electric Generating System

Το έργο απαιτεί την καύση φυσικού αερίου κάθε πρωί για να ξεκινήσει τη λειτουργία του. Χρησιμοποιεί δύο λέβητες νερού Rentech Type-D με ύψος 130 πόδια και 60 ίντσες διάμετρο ενώ η κατανάλωση καυσίμου είναι 242500 cu-ft/hr.



Εικόνα 6.4: Ένας από τους τρεις πύργους της μονάδας

Η μονάδα ατμού έχει σχεδιαστεί να αποδίδει συνολικά 28,72%. Η τοπική ακτινοβολία κοντά στην περιοχή είναι περίπου $7,4 \text{ km}^3/\text{h}/\text{m}^2/\text{day}$ για μια συνολική ηλιακή ροή ενέργειας στο ορατό φάσμα $2,717 \text{ MW}^3/\text{h}/\text{m}^2$ ετησίως. Ο συντελεστής χωρητικότητας είναι 31,4% και υποδηλώνει ότι η μονάδα θα λειτουργήσει για 365 ημέρες*24 ώρες* 31,4%=2751 ώρες το έτος. Με σταθερή ισχύ (καθαρή ονομαστική παραγωγική ικανότητα) 377MW, θα έχει παραγωγή $1,04 \text{ TW}^3/\text{h}/\text{έτος}$.

Κάθε καθρέπτης τους ηλιοστάτη έχει $7,02 \text{ m}^2$ ανακλαστική επιφάνεια και συνολικά κάθε ηλιοστάτης έχει $14,05 \text{ m}^2$. Η συνολική επιφάνεια των ηλιοστατών είναι 2437144 m^2 και με βάση την ακτινοβολία, η υποκλέπτουσα ηλιακή ροή ετησίως είναι $6621720 \text{ MW}^3/\text{h}$. Η θερμική απόδοση είναι 55% λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες ανάκλασης, μετάδοσης, ακτινοβολίας και απορρόφησης με αποτέλεσμα η θερμική ισχύς που οδηγείται στο στρόβιλο να είναι $3641946 \text{ MW}^3/\text{h}$. Η εγκατάσταση Inanraha είχε υπολογίσει πριν τη λειτουργία του να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά περισσότερο από 400000 τόνους ετησίως. Είχε σχεδιαστεί να ελαχιστοποιήσει τις επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον σε σχέση με ορισμένες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων επειδή η χρήση των ηλιοστατών δεν απαιτεί τόσο μεγάλη διαβάθμιση της γης.

6.3 Συλλέκτες Fresnel

Το ηλιοθερμικό εργοστάσιο Kimberlina Solar εγκατεστημένης ισχύος 5MW στο Bakersfield της Καλιφόρνια είναι η πρώτη εμπορική ηλιοθερμική μονάδα που κατασκευάστηκε από την εταιρεία Areva Solar. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 2008 και χρησιμοποιεί ως ηλιακούς λέβητες τους συμπαγείς γραμμικούς ανακλαστήρες Fresnel για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού.



Εικόνα 6.5: Ηλιοθερμικό εργοστάσιο Kimberlina Solar

Κάθε ηλιακός λέβητας έχει μια ομάδα 13 στενών, επίπεδων καθρεπτών οι οποίοι παρακολουθούν ανεξάρτητα το καθένα και εστιάζουν την ηλιακή θερμότητα πάνω σε εναέριους σωλήνες που μεταφέρουν νερό. Το νερό βράζει άμεσα και μετατρέπεται σε ατμό ο οποίος μπορεί έπειτα να περιστρέψει μια τουρμπίνα για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια ή να χρησιμοποιηθεί ως βιομηχανικός ατμός για το φαγητό, το λάδι ή τις διαδικασίες αφαλάτωσης. Αυτή τη στιγμή ο ηλιακός λέβητας της Kimberlina επιτυγχάνει υπέρθερμο ατμό θερμοκρασίας 750 βαθμούς Fahrenheit ενώ η επόμενη γενιά λέβητα που βρίσκεται ήδη υπό κατασκευή σχεδιάζεται να πετυχαίνει 900 βαθμούς Fahrenheit.

Η ηλιοθερμική ενεργειακή εγκατάσταση Kimberlina ήταν η πρώτη του είδους της που χτίστηκε στην Καλιφόρνια εδώ και πάνω από 20 χρόνια, με την προηγούμενη εγκατάσταση να είναι το SEGS που λειτουργεί με PTC.

6.4 Συστήμα δίσκου-μηχανής Stirling

Ο ηλιακός σταθμός Maricopa εγκατεστημένης ισχύος 1,5MW είναι μια συγκεντρωτική ηλιοθερμική μονάδα στην Ρεορία στην πολιτεία της Αριζόνα των Ηνωμένων Πολιτειών. Το έργο ξεκίνησε τις δραστηριότητές του τις τελευταίες εβδομάδες του Δεκεμβρίου του 2009, τέσσερις μόλις μήνες έπειτα από την έναρξη των εργασιών κατασκευής. Εγκαινιάστηκε επίσημα τον Ιανουάριο του 2010 ενώ ανήκει και λειτουργεί από την εταιρεία Tesseract Solar. Ο σταθμός Maricopa είναι το πρώτο εμπορικό έργο στον κόσμο που στεγάζει την τεχνολογία SunCatcher.



Εικόνα 6.6: Ηλιακός σταθμός Maricopa στην Αριζόνα

Βρίσκεται στα βόρεια του σταθμού παραγωγής Aqua Fria και διαθέτει 60 ηλιακά συγκεντρωτικά πιάτα SunCatcher καθένα από τα οποία έχει ένα παραβολικό πιάτο πλάτους 38 ποδιών με κάτοπτρα ακριβείας που αυτόματα εντοπίζουν και συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια σε μια μονάδα μετατροπής ενέργειας (PCU) μετατρέποντας αυτή την ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια υψηλής ποιότητας. Δε χρησιμοποιείται νερό στη διαδικασία αυτή ενώ παράγεται καθαρή ενέργεια εναλλασσομένου ρεύματος και έτσι δεν απαιτείται μετατροπή ισχύος από DC σε AC που θα οδηγούσε σε απώλειες ενέργειας. Η τεχνολογία SunCatcher μπορεί εύκολα να κλιμακωθεί από 1,5MW σε σχεδόν 1000MW για να καλύψει τις μελλοντικές ανάγκες.

6.5 Η λίστα με τα ηλιοθερμικά που λειτουργούν σήμερα

MW	Όνομα	Χώρα	Τοποθεσία	Τύπος
392	Ivanpah Solar Power Facility	ΗΠΑ	San Bernardino Country, California	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
354	Solar Energy Generating Systems (SEGS)	ΗΠΑ	Mojave Desert, California	PTC
280	Mojave Solar Project	ΗΠΑ	Barstow, California	PTC
280	Solana Generating Station	ΗΠΑ	Gila Bend, Arizona	PTC
250	Genesis Solar Energy Project	ΗΠΑ	Blythe, California	PTC
200	Solaben Solar Power Station	Ισπανία	Logrosan	PTC
150	Solnova Solar Power Station	Ισπανία	Sanlucar la Mayor	PTC
150	Andasol solar power station	Ισπανία	Guadix	PTC
150	Extresol Solar Power Station	Ισπανία	Torre de Miguel Sesmero	PTC
100	KaXu Solar One	Νότια Αφρική	Pofadder, Northern Cape	PTC
100	Palma del Rio Solar Power Station	Ισπανία	Palma del Rio	PTC
100	Manchasol Power Station	Ισπανία	Alcazar de San Juan	PTC
100	Valle Solar Power Station	Ισπανία	San Jose del Valle	PTC
100	Helioenergy Solar Power Station	Ισπανία	Ecija	PTC
100	Aste Solar Power Station	Ισπανία	Alcazar de San Juan	PTC
100	Solacor Solar Power Station	Ισπανία	El Carpio	PTC
100	Helios Solar Power Station	Ισπανία	Puerto Lapice	PTC
100	Shams solar power station	Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	Abu Dhabi Madinat Zayad	PTC
100	Termosol Solar Power Station	Ισπανία	Navalvillar de Pela	PTC
75	Martin Next Generation Solar Energy Center	ΗΠΑ	Indiatown, Florida	PTC συνδυασμένου κύκλου
64	Nevada Solar One	ΗΠΑ	Boulder City, Nevada	PTC
50	Puertollano Solar Thermal Power Plant	Ισπανία	Puertollano, Ciudad Real	PTC
50	Alvarado I	Ισπανία	Badajoz	PTC
50	La Florida	Ισπανία	Alvarado (Badajoz)	PTC
50	Majadas de Tietar	Ισπανία	Caceres	PTC
50	La Dehesa	Ισπανία	La Garrovilla	PTC
50	Lebrija-1	Ισπανία	Lebrija	PTC
50	Astexol 2	Ισπανία	Badajoz	PTC
50	Moron	Ισπανία	Moron de la Frontera	PTC
50	La Africana	Ισπανία	Posada	PTC
50	Guzman	Ισπανία	Palma del Rio	PTC
50	Olivenza 1	Ισπανία	Olivenza	PTC
50	Orellana	Ισπανία	Orellana la Vieja	PTC
50	Godawari Green Energy Limited	Ινδία	Nokh	PTC
50	Enerstar Villena Power Plant	Ισπανία	Villena	PTC
31.4	Puerto Errado	Ισπανία	Murcia	Συλλέκτης Fresnel
25	Hassi R'Mel integrated solar combined cycle power station	Αλγερία	Hassi R'mel	PTC συνδυασμένου κύκλου
22.5	Termosolar Borges	Ισπανία	Borges Blanques	Υβριδικό PTC με βιομάζα

20	Kuraymat Plant	Αίγυπτος	Kuraymat	PTC συνδυασμένου κύκλου
20	Ain Beni Mathar Integrated Thermo Solar Combined Cycle Power Plant	Μαρόκο	Ain Bni Mathar	PTC συνδυασμένου κύκλου
20	PS20 solar power tower	Ισπανία	Seville	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
19.9	Gemasolar	Ισπανία	Fuentes de Andalucia (Seville)	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
17	Yazd integrated solar combined cycle power station	Ιράν	Yazd	PTC συνδυασμένου κύκλου
11	PS10 solar power tower	Ισπανία	Seville	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
10	Delingha Solar Power Plant (Supcon)	Κίνα	Delingha	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
9	Liddell Power Station Solar Steam Generator	Αυστραλία	New South, Wales	PTC συνδυασμένου κύκλου
5	Kimberlina Solar Thermal Energy Plant	ΗΠΑ	Bakersfield, California	Συλλέκτης Fresnel
5	Archimede solar power plant	Ιταλία	Syracuse, Sicily	PTC συνδυασμένου κύκλου
5	Thai Solar Energy (TSE) 1	Ταϊλάνδη	Huaykrachao	PTC
5	Greenway CSP Mersin Solar Tower Plant	Τουρκία	Mersin	Ηλιακός Πυργός Ισχύος
5	Sierra SunTower	ΗΠΑ	Lancaster, California	Ηλιακός Πυργός Ισχύος
2.5	Acme Solar Thermal Tower	Ινδία	-	Ηλιακός Πυργός Ισχύος
2	Keahole Solar Power	ΗΠΑ	Hawaii	PTC
1.5	Julich Solar Tower	Γερμανία	Julich	Ηλιακός Πυργός Ισχύος
1.5	Beijing Badaling Solar Tower	Κίνα	Beijing	Ηλιακός Πυργός Ισχύος
1	Feranova CSP Plant	Τουρκία	Aydin, Turkey	Συλλέκτης Fresnel
1	Saguaro Solar Power Station	ΗΠΑ	Red Rock, Arizona	PTC
1	Yanqing Solar Power Station	Κίνα	Yanqing County	Ηλιακός Πυργός Ισχύος
0.5	Shiraz solar power plant	Ιράν	Shiraz	PTC
0.25	Augustin Fresnel Solar Power Station	Γαλλία	Targassonne	Συλλέκτης Fresnel

6.6 Η λίστα με τις μονάδες που βρίσκονται υπό κατασκευή

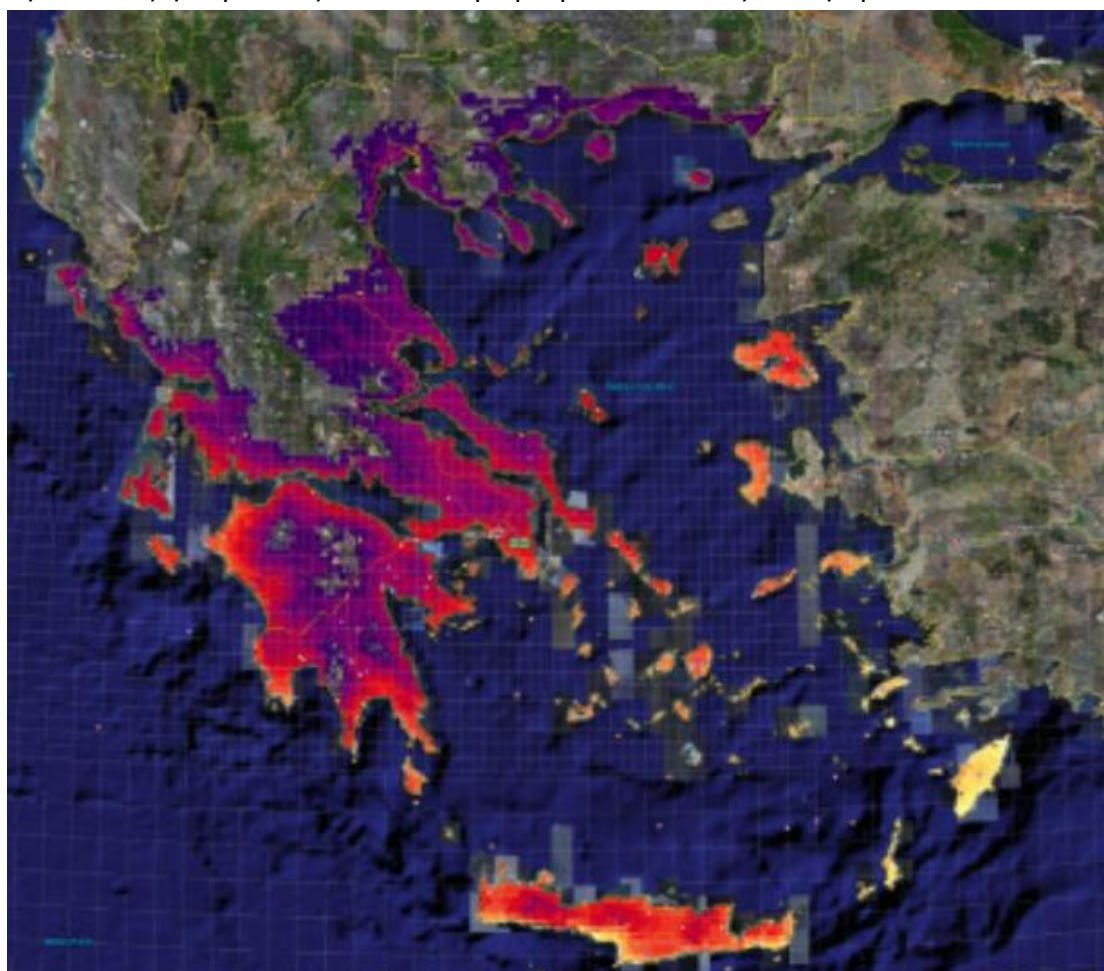
MW	Όνομα	Χώρα	Τοποθεσία	Τύπος Τεχνολογίας
160	Ouarzazate solar power station	Μαρόκο	Ouarzazate	PTC
121	Ashalim power station 1	Ισραήλ	Negev desert	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
110	Crescent Dunes Solar Energy Project	ΗΠΑ	Nye County, Nevada	Ηλιακός Πύργος Ισχύος

110	Cerro Dominador Solar Thermal Plant (Atacama 1)	Χιλή	Maria Elena, Antofagasta	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
100	Redstone Solar Thermal Power	Νότια Αφρική	Northern Cape	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
100	Xina CSP South Africa	Νότια Αφρική	Northern Cape	PTC
100	Ilanga 1	Νότια Αφρική	Northern Cape(Upington)	Συλλέκτης Fresnel
100	El Reboso 2+3	Ισπανία	El Puebla del Rio (Seville)	PTC
100	Dhursar	Ινδία	-	Συλλέκτης Fresnel
100	Diwakar	Ινδία	Askandra	PTC
100	KVK Energy Solar Project	Ινδία	Askandra	PTC
50	Arenales PS	Ισπανία	-	PTC
50	Casablanca	Ισπανία	-	PTC
50	Erdos Solar Power Plant	Κίνα	Hanggin Banner	PTC
50	Khi Solar One	Νότια Αφρική	Upington	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
50	Megha Solar Plant	Ινδία	Anantapur	PTC
50	Bokroort	Νότια Αφρική	Groblersoop	PTC
44	Kogan Creek Solar Boost	Αυστραλία	Chinchilla	Συλλέκτης Fresnel
27.5	Jinshawan	Κίνα	China	Ηλιακή Καμινάδα
25	Gujarat Solar One	Ινδία	Kutch	PTC
17	Stillwater	ΗΠΑ	Nevada	PTC
12	Alba Nova 1	Γαλλία	Corsica	Συλλέκτης Fresnel
5	Sundt Power Plant	ΗΠΑ	Arizona	Συλλέκτης Fresnel
3	Airlight Energy Ait Baha Plant	Μαρόκο	Ait Baha	PTC
1.5	Tooele Army Depot	ΗΠΑ	Tooele	Dish/stirling
1.4	THEMIS Solar Power Tower	Γαλλία	Pyrenees-Orientales	Ηλιακός Πύργος Ισχύος
1	e-Cube 1	Κίνα	Hainan	Αρθρωτός Ηλιοστάτης
1	Renovalia	Ισπανία	Albacete	Dish/stirling

7. Ηλιοθερμικά συστήματα στην Ελλάδα

Η Ελλάδα λόγω της γεωγραφικής της θέσης είναι αρκετά ελκυστική σε τεχνολογίες ηλιοθερμικών τεχνολογιών. Το υψηλό δυναμικό ηλιακής ενέργειας καθώς επίσης και η ευνοϊκή νομοθεσία έχουν προσελκύσει το τελευταίο διάστημα επενδυτικό ενδιαφέρον.

Με τα σημερινά δεδομένα μόνο τα νότια παράλια της Κρήτης και η Ρόδος έχουν αρκετά υψηλή ηλιακή ακτινοβολία για βιώσιμους ηλιοθερμικούς σταθμούς. Άλλα νησιά όπως η Κάρπαθος είναι πολύ μικρά για να είναι αξιοποιήσιμα.



Εικόνα 7.1: Ετήσια «άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI)» μετρημένη σε kWh/m² για τον Ελλαδικό χώρο

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει επτά αιτήσεις στην Κρήτη και δύο στην Ρόδο για εγκατάσταση ηλιοθερμικών ωστόσο καμία δεν προχώρησε σε επόμενο στάδιο.



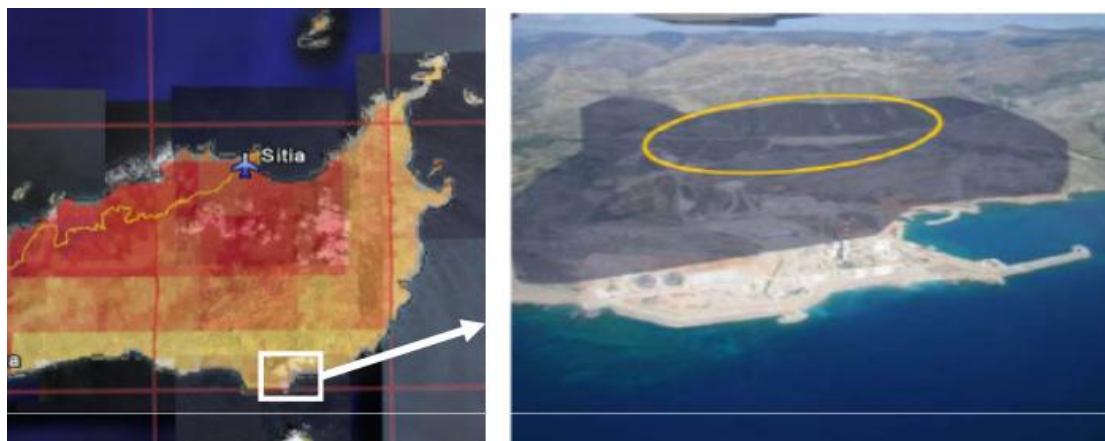
Εικόνα 7.2: Περιοχές της Κρήτης που έχει εκδηλωθεί ενδιαφέρον



Εικόνα 7.3: Περιοχές της Ρόδου που έχει εκδηλωθεί ενδιαφέρον

Η μοναδική ρεαλιστική μελέτη που πραγματοποιήθηκε αφορούσε την περίπτωση ενός έργου ηλιοθερμικής τεχνολογίας πύργου, στην νοτιοανατολική Κρήτη και συγκεκριμένα στις πλαγιές Αθερινόλακκου, μεγέθους 50MWe από την εταιρεία NUR-MOH A.E. Η εταιρεία προτείνει την ανάπτυξη του ηλιοθερμικού σταθμού της

σε ιδανική τοποθεσία με την υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία στην Κρήτη και ίσως στην Ελλάδα γειτονικά του ατμοηλεκτρικού σταθμού Αθερνόλακκου της ΔΕΗ. Η επιλεγμένη περιοχή διαθέτει 1000 στρέμματα ελαφριάς κλίσης προς το Νότο ενώ η μελέτη αφορά μέγιστη ισχύ 50 MWe και τεχνολογία πύργου της Brightsource Energy.



Εικόνα 7.3: Η ακριβής περιοχή της Κρήτης

7.1 Άδεια της ΡΑΕ

Η απόφαση της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας για άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για ηλιοθερμικό σταθμό στη θέση “Πλαγίες Αθερνόλακκου” του δημοτικού διαμερίσματος Λεύκης του δήμου Σητείας της Περιφερειακής Ενότητας Λασιθίου Κρήτης στην εταιρεία «NUR-MOH ΑΝΩΝΥΜΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ» συνοψίζεται ως εξής:

Ο ηλιοθερμικός σταθμός θα αποτελείται από ηλιοστάτες οι οποίοι ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία σε κεντρικό συλλέκτη(ες) που βρίσκεται(ονται) στην κορυφή ηλιακού πύργου και θερμαίνουν υγρό μέσο με το οποίο γίνεται παραγωγή θερμού ατμού ο οποίος τελικώς χρησιμοποιείται σε στρόβιλο-γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού παραγωγής ανέρχεται σε 52MWe. Ο ηλιοθερμικός σταθμός περιλαμβάνει σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που αποτελείται από δύο δεξαμενές άλατος για λειτουργία του σταθμού στο ονομαστικό του φορτίο για χρονικό διάστημα 5 ωρών. Η αδειούχος δύναται να εγκαταστήσει στο χώρο του σταθμού συμβατικό(ούς) λέβητα(ες) συνολικής ισχύος 100Mwh κατά μέγιστο με χρήση συμβατικού καυσίμου (ντίζελ, φυσικού αερίου, LPG) ή βιοκαύσιμου. Για τη λειτουργία του εν λόγω ηλιοθερμικού σταθμού απαιτούνται σε ετήσια βάση περίπου 124000m³ ύδατος.

7.2 Παράμετροι για την εύρεση της κατάλληλης τοποθεσίας

- Τα παραβολικά κοίλα συστήματα απαιτούν επιφάνεια τουλάχιστον 1800 στρεμμάτων με μέγιστες υψομετρικές διαφορές 15 μέτρων.
- Ο ηλιακός πύργος ισχύος χρειάζεται επιφάνεια τουλάχιστον 3000 στρεμμάτων.
- Χαμηλό κόστος δηλαδή γαιές χαμηλής παραγωγικότητας ή χέρσες εκτάσεις.
- Μέγιστη απόσταση 10 χιλιομέτρων από τον σταθμό υψηλής τάσης 150kV.
- Κατανάλωση νερού τουλάχιστον 800 χιλ. m³ για ανάγκες ψύξης
- Απουσία κινδύνων πλημμύρας, περιβαλλοντικών και αρχαιολογικών περιορισμών καθώς επίσης και ανέμων έντασης άνω των 145 km/h.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως μια προμελέτη που ακόμη βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο πραγματοποιήθηκε στη Φλώρινα και αφορά την κατασκευή του μεγαλύτερου πάρκου εφαρμογής του συστήματος δίσκου/μηχανής Stirling στον κόσμο. Το πάρκο που μελετάται θα έχει υπερπολλαπλάσια ενεργειακή παραγωγή από τις σημερινές με αυτή την τεχνολογία καθώς η εγκατεστημένη ισχύς της θα αγγίζει τα 75,3MW και έχει σχεδιαστεί για την πεδιάδα Πελαγονίας αποτελούμενη από 37 ξεχωριστές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

8. Επίλογος

Οι τεχνολογίες οπτικής συγκέντρωσης που περιλαμβάνονται στις ηλιοθερμικές μονάδες είναι πολύ σημαντικές για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Σήμερα, τέσσερις είναι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας:

- Συστήματα παραβολικών κοίλων (PTC)
- Ηλιακός πύργος ισχύος
- Συλλέκτης Fresnel
- Συστήματα δίσκου/μηχανής Stirling

Όλες οι παραπάνω εγκαταστάσεις που λειτουργούν σήμερα στον κόσμο μιμούνται παραβολικές γεωμετρίες με μεγάλα κάτοπτρα ενώ οι ανακλαστικοί συγκεντρωτές επιλέγονται συνήθως αφού έχουν τις καλύτερες προοπτικές για εξέλιξη.

Η διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής με την τεχνολογία της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας έχει ως εξής:

- Συγκεντρώνεται η ακτινοβολία του ήλιου μέσω ενός συστήματος συλλέκτη και η συγκέντρωση αυτή περιγράφεται από ένα δείκτη που λέγεται δείκτης συγκέντρωσης.
- Συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα δέκτη
- Μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα μέσα στο δέκτη δηλαδή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας μεταφέρει τη θερμική ενέργεια σε μια μονάδα μετατροπής ενέργειας.
- Σε έναν ατμοστρόβιλο γίνεται η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική.
- Μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση μιας γεννήτριας.
- Αποθήκευση της θερμότητας σε ειδικά συστήματα αποθήκευσης για μελλοντική χρήση.

Τα παραβολικά κοίλα κάτοπτρα αποτελούνται από γραμμικούς παραβολικούς ανακλαστήρες που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη που βρίσκεται κατά μήκος της γραμμής του συλλέκτη. Ο δέκτης είναι ένας σωλήνας που τοποθετείται ακριβώς πάνω από τη μέση του παραβολικού κατόπτρου και είναι γεμάτο με ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας το οποίο θερμαίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 150-350°C καθώς ρέει μέσω του δέκτη και στη συνέχεια χρησιμοποιείται σαν θερμική πηγή για ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής. Τα συστήματα παραβολικών κοίλων είναι η πιο ανεπτυγμένη τεχνολογία CSP.

Ο ηλιακός πύργος ισχύος αποτελείται από μια συστοιχία ηλιοστατών (ανακλαστήρων) διπλού άξονα που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν κεντρικό δέκτη στην κορυφή ενός πύργου. Ο δέκτης περιλαμβάνει ένα υγρό το οποίο είναι λιωμένο αλάτι, θερμαίνεται μέσα στο δέκτη σε θερμοκρασίες μεταξύ 500-1000°C και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή για αποθήκευση της ενέργειας. Ένα πλεονέκτημα του ηλιακού πύργου ισχύος είναι ότι οι ανακλαστήρες μπορούν να προσαρμοστούν αντί ολόκληρου του πύργου. Το σύστημα του ηλιακού πύργου είναι λιγότερο προηγμένο σε σχέση με τα PTC, αλλά προσφέρει υψηλότερη απόδοση και καλύτερη ικανότητα αποθήκευσης.

Οι γραμμικοί ανακλαστήρες Fresnel χρησιμοποιούν μακρύτερα και λεπτά τμήματα από καθρέπτη για να εστιάσουν την ηλιακή ακτινοβολία επάνω σε ένα σταθερό απορροφητή που βρίσκεται σε ένα κοινό σημείο των ανακλαστήρων. Αυτοί οι καθρέπτες έχουν τη δυνατότητα να συγκεντρώνουν την ενέργεια του ήλιου περίπου 30 φορές από την κανονική της ένταση. Αυτή η συμπυκνωμένη ενέργεια μεταφέρεται μέσω του απορροφητή σε κάποιο θερμικό υγρό (αυτό τυπικά είναι λάδι για να διατηρεί την υγρή του κατάσταση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες). Το υγρό στη συνέχεια ρέει μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας για να τροφοδοτήσει μια γεννήτρια ατμού. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς γραμμικούς συλλέκτες Fresnel, οι συμπαγείς συλλέκτες χρησιμοποιούν πολλαπλούς απορροφητές στην περιοχή των κατόπτρων.

Το σύστημα δίσκου/μηχανής Stirling είναι γνωστό ότι έχει την υψηλότερη απόδοση από όλες τις ηλιακές τεχνολογίες (30% σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά που είναι 15%) και προβλέπεται ότι θα είναι σε θέση να παράγει την φθηνότερη ενέργεια μεταξύ όλων των ανανεώσιμων πηγών σε θερμές περιοχές όπως οι έρημοι. Ένα σύστημα δίσκου χρησιμοποιεί ένα μεγάλο, ανακλαστικό, παραβολικό δίσκο (παρόμοιο σε σχήμα με ένα δορυφορικό πιάτο τηλεόρασης) και εστιάζει όλη την ηλιακή ακτινοβολία που χτυπά στο δίσκο σε ένα σημείο πάνω από το δίσκο όπου ο δέκτης συλλέγει τη θερμότητα και τη μετατρέπει σε μια χρήσιμη μορφή. Τυπικά, ο δίσκος συνδυάζεται με μια μηχανή Stirling σε ένα σύστημα δίσκου/μηχανής Stirling, αλλά επίσης μερικές φορές χρησιμοποιείται μια ατμομηχανή. Αυτά δημιουργούν περιστροφική κινητική ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση μια ηλεκτρικής γεννήτριας.

Αυτή τη στιγμή σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχουν πολλά συγκεντρωτικά συστήματα που λειτουργούν και αρκετά ακόμη που βρίσκονται σε διαδικασία κατασκευής. Εκμεταλεύονται τα πλεονεκτήματα που παρέχει αυτή η τεχνολογία όπως η αυξημένη απόδοση σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά και η δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας. Το μεγαλύτερο εργοστάσιο χρησιμοποιεί ηλιακό πύργο ισχύος και βρίσκεται στην Καλιφόρνια της Αμερικής ωστόσο αυτή τη στιγμή η Ισπανία θεωρείται ο μεγαλύτερος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση CSP. Στη

χώρα μας έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες μελέτες ωστόσο το χαμηλό επίπεδο της «άμεσης κανονικής ακτινοβολίας» περιορίζει τις επιλογές. Μια περιοχή της Κρήτης έχει επιλεγεί για εγκατάσταση μιας μονάδας 50MWe και το έργο αυτό θα ωφελήσει ουσιαστικά την ενεργειακή αυτάρκεια του νησιού.

Βιβλιογραφία

- 1.http://el.wikipedia.org/wiki/φωτοβολταϊκό_σύστημα
- 2.<http://www.theguardian.com/environment/2010/apr/27/sahara-europe-solar-power>
- 3.<http://www.rae.gr/old/downloads/SolThermGuide.pdf>
- 4.<https://www.flickr.com/photos/brightsourceenergy/>
- 5.<http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e6-106-05.pdf>
- 6.<http://scialert.net/fulltext/?doi=ajaps.2012.384.393&org=12>
- 7.http://14gymmaris.lar.sch.gr/drupal/sites/default/files/ergasies_mathiton/texnologia/mixani_stirling_pantazos_giannis.pdf
- 8.<http://fouit.gr/2015/06/08/%CE%B5%CE%BD-%CE%B4%CE%B7%CE%BC%CE%BF-%CE%BC%CE%B9%CE%B1-%CF%80%CF%81%CF%8C%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B7-%CF%84%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%B8%CE%AD%CF%81%CE%BC%CE%B1%CE%BD%CF%83%CE%B7%CF%82-%CF%80%CE%BF%CF%85/>
- 9.<http://www.heliotrack.com/Parabolic.html>
- 10.www.metonorm.com
- 11.www.intelligentenergyEurope.com
- 12.http://www.irena.org/DocumentDownloads/events/IITC/presentations/16_Buck_Session_IV.pdf
- 13.http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/47927_chapter5.pdf
- 14.<http://clui.org/ludb/site/segs-3-7-kramer-junction-solar-electric-generating-system>
- 15.https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems
- 16.https://en.wikipedia.org/wiki/Ivanpah_Solar_Power_Facility
- 17.<http://www.ibtimes.co.uk/mirrors-desert-photos-ivanpah-solar-electric-generating-system-1437448>
- 18.<http://www.solec.org/index.php/about/>
- 19.https://en.wikipedia.org/wiki/Kimberlina_Solar_Thermal_Energy_Plant

20. <http://www.power-technology.com/projects/maricopasolarplantar/>
21. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maricopa_Dish-Stirling_plant_03.jpg
22. www.nurenergie.com
23. www.rae.gr
24. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations
25. "Solar thermal collectors and applications" by Soteris A. Kalogirou 2004
26. "Automatic control strategies for hybrid solar-fossil fuel power plants" Armando Fontalvo, Jesus Garcia, Marco Sanjuan, Ricardo Vasquez Padilla, March 2013
27. "A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat" Aranzazu Fernandez-garcia, Esther Rojas, Manuel Perez, Ricardo Silva, Quetzalcoatl Hernandez-Escobedo, Francisco Manzano-Agugliaro , May 2014
28. "Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar" Ulf Hermann, Bruce Kelly, Henry Price
29. "SOLAR ENERGY CONVERSION AND PHOTOENERGY SYSTEMS" E.Zarza
30. "Tracking and ray tracing equations for the target-aligned heliostat for solar tower power plants" Xiudong Wei, Zhenwu Lu, Weixing Yu, Hongxin Zhang, Zhifeng Wang, November 2009
31. "Comparison of heliostat field layout design methodologies and impact on power plant efficiency" A.Mutuberría, J.Pascual, M.V. Guisado, F.Mallor
32. "A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant" Xiudong Wei, Zhenwu Lu, Zhifeng Wang , Weixing Yu, Hongxing Zhang , Zhihao Yao, June 2009
33. "New designs of molten-salt tubular-receiver for solar power tower" M.R. Rodríguez-Sánchez, A. Sánchez-González, C. Marugán-Cruza, D. Santana
34. "Solar Receiver Design and Verification for Small Scale Polygeneration Unit" by Lukas Aichmayer
35. "Reliability analysis of Solar-Gas Hybrid Receivers for central tower Plants" E. Setien, M. Frasqueta, G. Salioua, M. Silvaa, G. Pinnaa, R. Blázquez, V. Ruiza
36. "Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power" Vinod Kumar, R.L.Shrivastava, S.P.Untawale, September 2014
37. "Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar

reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods”

Yu Qiu, Ya-Ling He, Ze-Dong Cheng, Kun Wang

38. “Fresnel-based modular solar fields for performance/cost optimization in solar thermal power plants: A comparison with parabolic trough collectors” Hani H. Sait, Jose M. Martinez-Val, Ruben Abbas, Javier Munoz-Anton

39. “A new 500 m² paraboloidal dish solar concentrator” K. Lovegrove, G. Burgess, J. Pye, December 2009

40. “Dish Stirling technology: A 100 MW solar power plant using hydrogen for Algeria” Mohamed Abbas, Bousaad Boumeddane, Noureddine Said, Ahmed Chikouche, August 2010

41. “A Review of Parabolic Dish-Stirling Engine System Based on Concentrating Solar Power” Liaw Geok Pheng, Rosnani Affandi, Mohd Ruddin Ab Ghani, Chin Kim Gan, Zanariah Jano, Tole Sutikno, December 2014

42. “Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review” Dhyia Aidroos Baharoon, Hasimah Abdul Rahman, Wan Zaidi Wan Omar, Saeed Obaid Fadhl, February 2014

42. “Innovation in concentrated solar power” by David Barlev, Ruxandra Vidu, Pieter Stroeve, October 2010