

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΟΥΣ

Ράπτης Πέτρος
ΑΕΜ: 5557

Αριθμ. Εργασίας:

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: καθηγητής Γεώργιος Τσιλιγκιρίδης

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2018

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Περιγραφή ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων και σύγχρονη κατάσταση

1.1. Σύγχρονη κατάσταση και κατεύθυνση προς την ανάπτυξη συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.....	5
1.2. Γενικές αρχές λειτουργίας των ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων.....	6
1.3. Ελαττώματα των επιφανειών ανάκλασης στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα.....	7
1.4. Συντελεστής συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και μέθοδοι μέτρησής του στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα.....	10
1.5. Αποδοτικότητα ηλιακών σταθμών που χρησιμοποιούν συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα.....	13

Κεφάλαιο 2. Κατηγορίες ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων

2.1. Οι παραβολοκυλινδρικοί.....	17
2.2. Οι ηλιακοί πύργοι	18
2.3. Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα δίσκων (με κινητήρα Stirling ή φωτομετασχηματιστές).....	24
2.4. Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα με φακούς Fresnel.....	24

Κεφάλαιο 3. Ηλιακοί Πύργοι. Εφαρμογές ανα τον κόσμο

3.1. Ο ηλιακός σταθμός Solar Two.....	26
3.2. Ο ηλιακός σταθμός Gemasolar.....	27
3.3. Ο ηλιακός σταθμός Crescent Dunes.....	29
3.4. Ο ηλιακός σταθμός PS10.....	30
3.5. Ο ηλιακός σταθμός Invarpah Solar Electric Generating System.....	32
3.6. Ο ηλιακός σταθμός C ³ C-5.....	34
3.7. Ο ηλιακός σταθμός SunCan DunHuang.....	35
3.8. Δομικά στοιχεία της εγκατάστασης ηλιακού πύργου.....	36

Κεφάλαιο 4. Σχεδιομελέτη συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος κεντρικού πύργου με εξωτερικούς σωληνωτούς δέκτες

4.1. Σχεδιαστικά Κριτήρια.....	37
4.2. Σύγκριση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.....	41
4.3. Υπολογισμός παραμέτρων.....	44
4.4. Υπολογισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης.....	49
4.5. Σχεδιομελέτη της τοποθέτησης των ηλιοσταίων στο πεδίο.....	51
4.6. Προτεινόμενη κατασκευή ηλιοστατών με σκοπό την μείωση των απωλειών από το πεδίο των ηλιοστατών.....	53

Κεφάλαιο 5. Μελέτη εφαρμογής κεντρικού πύργου στην Ελλάδα

5.1. Επιλογή συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος.....	56
5.2. Απαιτούμενα δεδομένα.....	59
5.3. Επιλογή βασικών μεγεθών	61

5.4. Επιλογή του πεδίου της εγκατάστασης (lay out εγκατάστασης).....	62
<u>6. Συμπεράσματα.....</u>	<u>66</u>
<u>7. Βιβλιογραφία.....</u>	<u>68</u>
<u>Παράρτημα Α.....</u>	<u>70</u>

Κεφάλαιο 1. Περιγραφή ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων και σύγχρονη κατάσταση

1.1. Σύγχρονη κατάσταση και κατεύθυνση προς την ανάπτυξη συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων

Κατά την διάρκεια των 15 τελευταίων χρόνων, η διείδυση της ηλιακής ενέργειας στην συνολική παραγόμενη ενέργεια αυξήθηκε (η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια παγκοσμίως αυξήθηκε κατά 20%). Σε αυτό συνεισφέραν τόσο οι διάφοροι εφευρέτες όσο και οι κυβερνήσεις κρατών. Χρηματοδοτήθηκαν έρευνες, δημιουργήθηκαν πειραματικά μοντέλα, συσσωρεύθηκε εμπειρία. Δημιουργήθηκε ένα σύνολο νέων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων τρόπων συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας και την μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Όλες οι βελτιστοποιήσεις έχουν στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε άλλες μορφές ενέργειας και στην μείωση του κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη των ηλιακών συστημάτων έχει δυο κατευθύνσεις :

- Την δημιουργία μεμονωμένων ενεργειακών ηλιακών συστημάτων που έχουν σκοπό την ενεργειακή τροφοδότηση κατοικιών
- Την δημιουργία ηλιακών ενεργειακών σταθμών, ικανών να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε βιομηχανική κλίμακα

Στην δεύτερη περίπτωση η ανάπτυξη του κλάδου γίνεται πάλι σε δυο κατευθύνσεις:

- Κατασκευή ηλιακών φωτοηλεκτρικών σταθμών που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική με χρήση κεραμικών φωτοκυττάρων χωρίς την χρήση συγκεντρωτών ηλιακή ενέργειας
- Κατασκευή ηλιακών ενεργειακών σταθμών με χρήση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων

Ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 80 του προηγούμενου αιώνα κατασκευάστηκαν στις Η.Π.Α τα πρώτα δείγματα βιομηχανικών ηλιοσταθμών που χρησιμοποιούσαν συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα. Εξαιτίας έλλειψης οικονομικής σκοπιμότητας, <πάγωσε> η χρηματοδότηση τέτοιων τεχνολογιών. Στις αρχές του 21 αιώνα ξεκίνησε νέο ενδιαφέρον για τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα σε περιοχές <πλούσιες> σε ηλιακή ενέργεια όπως η Ισπανία, το Ισραήλ, η Γερμανία, νοτιοδυτικές πολιτείες των Η.Π.Α. Στη δεύτερη δεκαετία του 21 αιώνα η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας αναπτύχθηκε σε χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία, η Ουκρανία καθώς και σε άλλες χώρες.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας είναι σημαντική υπόθεση. Κάθε τετραγωνικό χιλιόμετρο ακατοίκητης ερήμου μπορεί να δώσει ενέργεια ισοδύναμη με 1,5 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου το χρόνο. Επίσης έχει υπολογιστεί ότι αν εγκατασταθεί συνολικό εμβαδό συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων ίσο με 65000 km², το οποίο είναι μικρότερο από το 1% του εμβαδού της ερήμου Σαχάρα, μπορούμε να λάβουμε τόση ηλεκτρική ενέργεια, όση καταναλώθηκε παγκοσμίως το 2008. Επίσης από το ένα πέμπτο αυτού του εμβαδού μπορεί να δώσει τόση ενέργεια, όση καταναλώθηκε το 2008 από την δυτική Ευρώπη [9].

Σημαντικός δείκτης ο οποίος επηρεάζει την ελκυστικότητα των ηλιακών συστημάτων είναι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ευρώπη το 2008 η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία πάρθηκε από παραβολοκυλινδρικά ηλιακά συστήματα

ήταν λιγότερο από 0,3\$/kWh. Οι αναλυτές υποδεικνύουν εμπορικά αποδεχόμενο στόχο τα 0,1\$/kWh. Ετησίως παρατηρείται μείωση του κόστους της μονάδας ενέργειας (και της μονάδας εγκατεστημένης ισχύος), που παράγεται με την βοήθεια ηλιακών σταθμών κατά 2-5%. Η τιμή της μονάδας εγκατεστημένης ισχύος το 2015 ήταν στο όριο 0,62-0,8\$/W [9].

Οι ηλεκτρικοί σταθμοί με συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα είναι ελκυστικοί για τους επενδυτές, μόνο αν γίνουν φθηνότεροι και αποδοτικότεροι από ότι οι παραδοσιακοί θερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής

1.2. Γενικές αρχές λειτουργίας των ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων

Η διαδικασία της θερμικής ηλεκτροπαραγωγής πραγματοποιείται με τα παρακάτω βήματα:

- Συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός συστήματος συλλέκτη
- Αύξηση της πυκνότητας ροής ακτινοβολίας (δηλαδή της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα δέκτη), αν γίνεται
- Απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας (δηλαδή μετατροπή της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια (θερμότητα) μέσα στο δέκτη)
- Μεταφορά της θερμικής ενέργειας σε μια μονάδα μετατροπής της ενέργειας
- Μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική χρησιμοποιώντας μια θερμική μηχανή(π.χ. ατμοστρόβιλος)
- Μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια.

Η συγκέντρωση της ακτινοβολίας έχει στόχο την αύξηση της θερμοκρασίας του αποροφητήρα Όλα τα υλικά απορροφούν μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία απορροφάται και προκαλεί τα άτομα του υλικού να δονούνται και έτσι παράγουν θερμότητα. Αυτή η θερμότητα, είτε μεταφέρεται στο απορροφητικό υλικό με θερμική αγωγιμότητα και απελευθερώνεται σε θερμική ακτινοβολία ή συνάγεται πίσω στην ατμόσφαιρα. Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελείται από το ορατό φως ,δηλαδή το μέρος της ακτινοβολίας με τα βραχέα κύματα είναι κυρίαρχο .Η κατανομή της φωτεινότητας των διαφορετικών μηκών κύματος αντιστοιχεί περίπου σε εκείνο του μέλανος σώματος με θερμοκρασία περίπου 5.700 K. Σε αντίθεση, όσον αφορά τις θερμοκρασίες που σχετίζονται με ηλιακές θερμικές μονάδες (περίπου 100 έως 1.000 ° C) τα όργανα εκπέμπουν κυρίως μεσαίου και μικρού κύματος ακτινοβολία (Νόμος του Wien). Όταν παρατηρούμε μόνο μια μικρή περιοχή του φάσματος, οι συντελεστές απορρόφησης και της εκπομπής είναι πανομοιότυποι (νόμος του Kirchhoff). Ωστόσο, κατάλληλες "επιλεκτικές" επιστρώσεις εξασφαλίζουν ότι τα βραχέα κύματα φωτός του ήλιου απορροφούνται καλά, ενώ η (μεγάλου μήκους κύματος) ακτινοβολία θερμότητας αναστέλλεται. Τέτοια υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλούς συντελεστές απορρόφησης σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία και από χαμηλούς συντελεστές εκπομπής ε, σε σχέση με την μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία της θερμότητας.

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια πηγή ενέργειας της οποίας η ένταση ποικίλλει λόγω της περιστροφής της γης (ημέρα/νύχτα) και των πραγματικών μετεωρολογικών επιρροών (σύννεφα, αερολύματα, κτλ). Για την αντιστάθμιση αυτών των

διακυμάνσεων χρησιμοποιούνται συστήματα θερμικής αποθήκευσης. Τα μέσα αποθήκευσης διακρίνονται:

- Σε περίπτωση αποθήκευσης του μέσου μεταφοράς θερμότητας, αποθηκεύεται ενδιάμεσα σε θερμομονωτικά δοχεία. Αυτό σημαίνει ότι το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι ανέξοδα διαθέσιμο και έχει μεγάλο όγκο-ειδική θερμότητα για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Μέχρι σήμερα δοχεία με θερμικό έλαιο και λιωμένο αλάτι έχουν εφαρμοστεί, ωστόσο έχουν προγραμματιστεί συσσωρευτές νερού/ατμού. Το πλεονέκτημα αυτού του τρόπου αποθήκευσης είναι η σταθερή θερμοκρασία του θερμού μέσου μεταφοράς, η οποία μειώνεται μόνο από τις απώλειες θερμότητας της δεξαμενής αποθήκευσης (και έτσι είναι συνάρτηση της περιόδου αποθεματοποίησης, της επιφάνειας των εμπορευματοκιβωτίων και της μόνωσης).
- Σε περίπτωση μαζικής αποθήκευσης, το μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιεί ένα δεύτερο θερμικό υλικό υψηλής θερμοχωρητικότητας. Για το σκοπό αυτό μια καλή μεταφορά της θερμότητας (δηλαδή μεγάλες επιφάνειες και υψηλοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας) πρέπει να παρέχεται μεταξύ του θερμικού μέσου μεταφοράς και του υλικού αποθήκευσης, για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη θερμοκρασιακή διαφορά οδήγησης και να μειωθεί η επακόλουθη απώλεια εξέργειας της θερμότητας. Οι μαζικές αποθήκες εφαρμόζονται εάν το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι πάρα πολύ ακριβό (Π.χ. συνθετικό λάδι μεταφοράς θερμότητας) ή είναι δύσκολο να αποθηκευτεί (π.χ. αέρας υποπίεσης). Για μαζικές αποθήκες εφαρμόζονται οι ακόλουθοι συνδυασμοί:
 - Θερμικό έλαιο/σκυρόδεμα,
 - θερμικό έλαιο/λιωμένο αλάτι
 - ατμός/λάδι-άμμος και
 - αέρας/κεραμικά τούβλα.

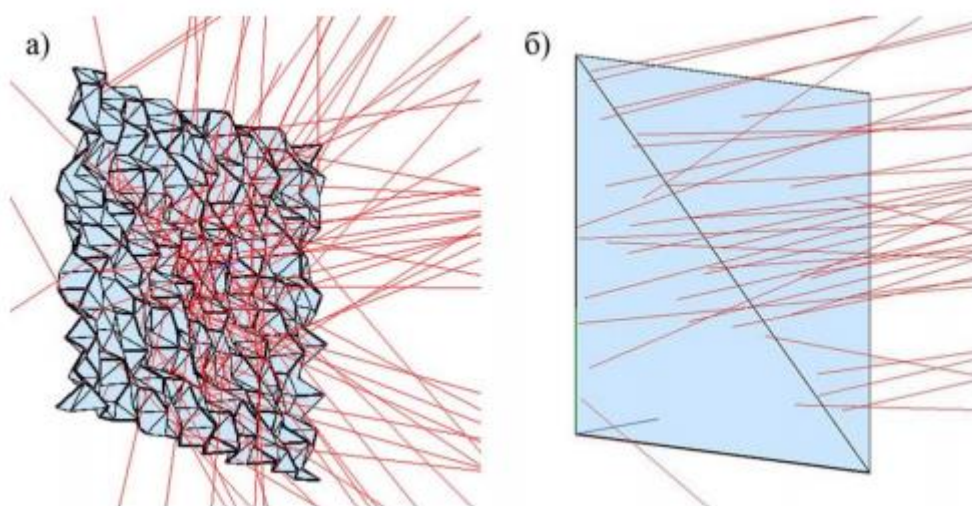
Αυτά τα συστήματα έχουν το πλεονέκτημα του πολύ χαμηλού κόστους υλικού αποθήκευσης. Ωστόσο, παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι εκτός από την κοινή απώλεια θερμότητας από την δεξαμενή αποθήκευσης μια απώλεια εξέργειας συμβαίνει κατά τη διάρκεια της διπλής μεταφοράς θερμότητας, κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση το υλικού αποθήκευσης.

- Μέσα σε δεξαμενές αποθήκευσης με υλικό αλλαγής φάσης, όπου ατμός συμπυκνώνεται ισόθερμα, έτσι ώστε ένα υλικό αποθήκευσης (π.χ. άλατα, όπως NaCl, NaNO₃, KOH) να είναι στερεοποιημένο/ισόθερμα λιωμένο. Και στην περίπτωση αυτή μία απώλεια εξέργειας συμβαίνει λόγω διπλής μετάδοσης της θερμότητας. Επιπλέον μια τέτοια αλλαγή φάσης υλικών εξακολουθεί να είναι πολύ ακριβή.

1.3. Ελαττώματα των επιφανειών ανάκλασης στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα

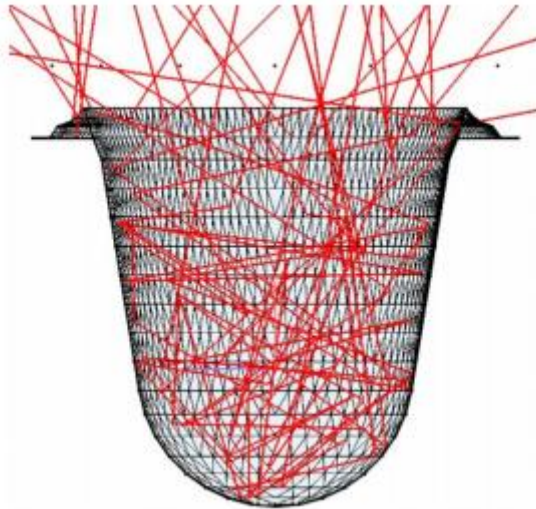
Για την δημιουργία υψηλής δυναμικότητας ηλιακών σταθμών είναι απαραίτητα η χρησιμοποίηση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Για την επίτευξη υψηλής ισχύος είναι απαραίτητη η δημιουργία μεγάλου μεγέθους ηλιακών συγκεντρωτών με υψηλές απαιτήσεις ως προς την κατασκευή τους και την ποιότητα της επιφανείας τους. Μεγαλύτερη εφαρμογή πήραν τα καθρεπτικά συγκεντρωτικά συστήματα. Ο

πειραματικός προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της επιφάνειας των καθρεπτικών συγκεντρωτικών συστημάτων απαιτεί διεξαγωγή δύσκολων και ακριβών πειραμάτων. Για αυτό ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η κατάστροση μαθηματικών μοντέλων για τον καθορισμό της επιθυμητής επιφάνειας αυτών των ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων με υπολογισμό της επίδρασης των συνθηκών λειτουργίας, των κατασκευαστικών ιδιαιοτητών, της φθοράς, της τραχύτητας και άλλων παραμέτρων. Η μαθηματική μοντελοποίηση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται με τις αρχές της στατιστικής μοντελοποίησης με χρησιμοποίηση μεθόδων Μοντε-Κάρλο και η μοντελοποίηση του πεδίου των ταχυτήτων και της παραμόρφωσης με την χρησιμοποίηση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον για να έχουμε μια πλήρη εικόνα της κατανομής του πεδίου θερμοκρασιών χρειάζεται μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών των επιφανειών του συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος και κυρίως της τραχύτητας. Τις επιφάνειες ανάλογα με την τραχύτητά τους τις χωρίζουμε σε δυο κατηγορίες. Τις σχετικά λείες όπου η ακτινοβολία ανακλάται μια φορά και τις επιφάνειες με κοιλότητες όπου η ακτινοβολία ανακλάται περισσότερες φορές. Η λειτουργία με επιφάνειες της δεύτερης κατηγορίας προφανώς δεν είναι αποδοτική για το σύστημά μας, μπορούν να προκύψουν όμως κατά την διάρκεια λειτουργίας του λόγω φθοράς ή λόγω εξωτερικού παράγοντα που προκάλεσε αυτές τις κοιλότητες. Στην εικόνα 1.3.1 φαίνεται το πεδίο ακτινοβολίας για δυο διαφορετικές επιφάνειες.



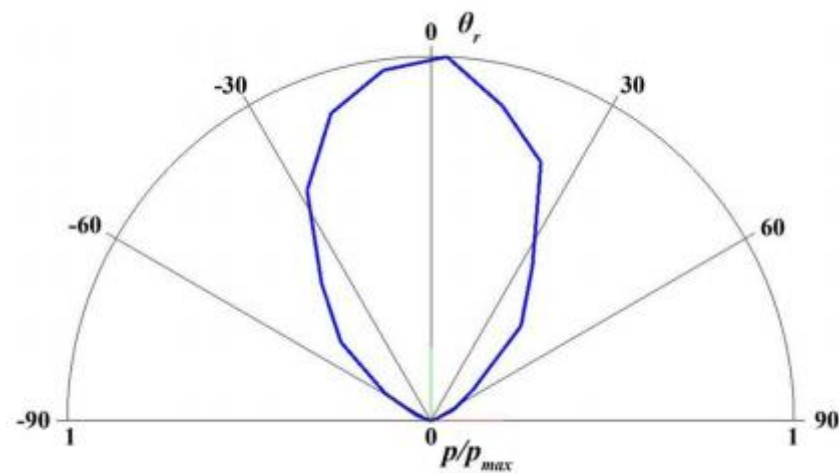
Εικόνα 1.3.1: Πεδίο ακτινοβολίας για δυο διαφορετικές επιφάνειες

Η κατανομή της ακτινοβολίας μέσα σε έναν κρατήρα (κοιλότητα), ο οποίος έχει διαμορφωθεί λόγω πρόσκρουσης σωματιδίου μικροκλίμακας (στην περίπτωσή μας της ακτινοβολίας του ήλιου) στην επιφάνεια του ανακλαστήρα φαίνεται στην εικόνα 1.3.2



Εικόνα 1.3.2: Κατανομή ακτινοβολίας σε κρατήρα ανακλαστήρα

Ο δείκτης ανακλαστικότητας από την επιφάνεια του κρατήρα, ορίζοντας ως p την ανακλαστική ικανότητα (εδώ διαιρούμενη προς την μέγιστη τιμή της p_{max}) και θ_r την γωνία ανάκλασης, φαίνεται στην εικόνα 1.3.3

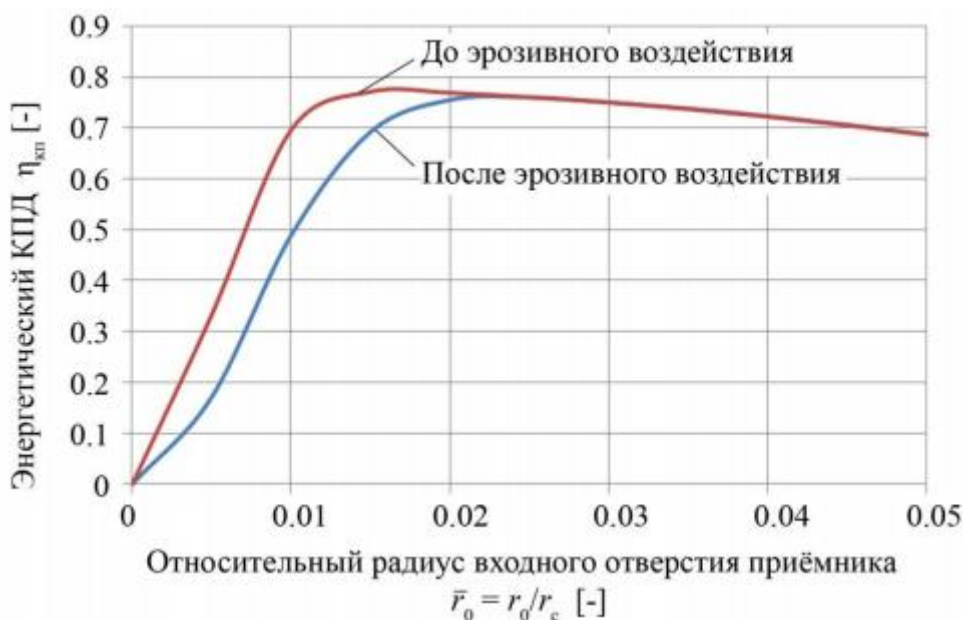


Εικόνα 1.3.3: Δείκτης ανακλαστικότητας σε σχέση με την γωνία ανάκλασης

Η ύπαρξη μικρού αριθμού κρατήρων δεν έχει μεγάλη επίδραση στα ενεργειακά χαρακτηριστικά του συστήματος. Με την αύξηση του αριθμού τους, αυξάνεται η συνιστώσα του διαχεόμενου φωτός στην ανακλούμενη ακτίνα, που οδηγεί στην αποδυνάμωση των ενεργειακών χαρακτηριστικών του συστήματος.

Ως παράδειγμα είναι η αλλαγή στον ενεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος συλλέκτης-δέκτης που αποτελείται από μονοκαθρεπτικό παραβολικό συγκεντρωτή (διαμέτρου 12m) και δέκτη σφαιρικής μορφής. Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης είναι μια από τις πιο βασικές παραμέτρους του ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος και ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που λαμβάνεται από τον δέκτη προς τον καταναλωτή

προς την συνολική ισχύ που πέφτει στην επιφάνεια του συγκεντρωτή. Στην εικόνα 1.3.4 φαίνεται η εξάρτηση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης του δεδομένου ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος από την σχετική ακτίνα του δέκτη (ο λόγος της ακτίνας εισόδου του δέκτη Γ_0 προς την ακτίνα του συγκεντρωτή Γ_k) για πριν και μετά την εμφάνιση κρατήρων.



Εικόνα 1.3.4: Βαθμός απόδοσης σε σχέση με την σχετική ακτίνα του δέκτη

Η κόκκινη γραμμή είναι πριν την εμφάνιση και η μπλε μετά την εμφάνιση κρατήρων στην επιφάνεια του ανακλαστήρα. Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα καθώς αυξάνεται η ακτίνα εισόδου του δέκτη αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του συστήματος λόγω της αύξησης του εύρους της ανακλούμενης ακτίνας που πέφτει στον δέκτη και έπειτα ο βαθμός απόδοσης μειώνεται λόγω του ότι η επιπλέον ενέργεια που πέφτει στην επιφάνεια του δέκτη λόγω της αύξησης της ακτίνας εισόδου του είναι μικρότερη από την ενέργεια που ανακλάται από τον δέκτη λόγω της θέρμανσής του.

1.4. Συντελεστής συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και μέθοδοι μέτρησής του στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα

Είναι γνωστοί ορισμένοι δείκτες για τους συγκεντρωτές της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι γνωστοί δείκτες των συγκεντρωτών είναι:

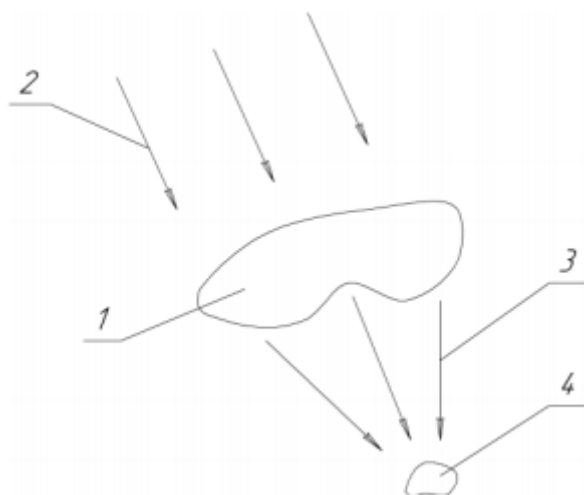
- Συντελεστής συγκέντρωσης ή βαθμός αύξησης της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας
- Βαθμός ομοιόμορφης κατανομής της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στον δέκτη
- Η γεωμετρική μορφή του συγκεντρωτή

Υπάρχει σχέση ανάμεσα στην γεωμετρική μορφή του συγκεντρωτή και της πυκνότητας της συγκεντρούμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό μας βοηθάει στον καθορισμό ενός καινούργιου δείκτη για τους συγκεντρωτές της ηλιακής ακτινοβολίας. Η εύρεση αυτού του δείκτη μπορεί να βοηθήσει στην ταξινόμηση των συγκεντρωτών, η οποία είναι απαραίτητη για την δημιουργία νέων μοντέλων συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Συγκεκριμένα, η αλλαγή της πυκνότητας της συγκεντρούμενης ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί αλλαγή στο μέγεθος της ροής του φωτοηλεκτρικού μετρητή πυκνότητας της ροής (ΦΙΠΠΗ). Γνωρίζοντας το μέγεθος της ροής του φωτοηλεκτρικού μετρητή πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή συγκέντρωσης. Οι αισθητήρες του μετρητή έχουν ειδική αντίσταση $0,1 \Omega \cdot \text{cm}$, επιφάνεια αισθητήρα $0,4 \times 0,8 \text{ mm}$, φασματική ευαισθησία $0,01-0,2 \text{ A/V}$ για εύρος $0,5-1 \mu\text{m}$, εύρος μέτρησης ενεργειακής φωτεινότητας $0,4 - 4 \cdot 10^3 \text{ V/cm}^3$

Η γεωμετρική μορφή του συγκεντρωτή συνδέεται με την πυκνότητα της συγκεντρούμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

Ο συγκεντρωτής συγκεντρωτικών φακών Φρενέλ έχει επιφάνεια που δέχεται τις ακτίνες του ηλίου σε μορφή κύκλου. Το σημείο εστίασης του συγκεντρωτή έχει επίσης μορφή κύκλου. Ο λόγος των δυο εμβαδών των επιφανειών αυτών δίνει το βαθμό συγκέντρωσης k της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι συγκεντρωτές που έχουν διαφορετική γεωμετρική μορφή, για παράδειγμα οι γραμμικοί φακοί Φρενέλ, δέχονται ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια με μορφή ορθογωνίου και έχουν

συντελεστή συγκέντρωσης \sqrt{K} φορές μικρότερο, από ότι οι συγκεντρωτικοί φακοί Φρενέλ. Στην εικόνα 1.4.1 φαίνεται το σχήμα των ροών της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλιακό μοντέλο με συγκεντρωτή.



Εικόνα 1.4.1: Ηλιακό μοντέλο συγκεντρωτή

Η ηλιακή ακτινοβολία στην εικόνα 1.4.2 που συμβολίζεται με τον αριθμό 2, πέφτει στην επιφάνεια του συγκεντρωτή 1 και η συγκεντρωμένη ακτινοβολία 3 πέφτει στην επιφάνεια του δέκτη 4. Ο λόγος του εμβαδού της επιφάνειας του συγκεντρωτή στην οποία πέφτει η ηλιακή ακτινοβολία προς το εμβαδό της επιφάνειας του δέκτη στην οποία πέφτει η συγκεντρωμένη ακτινοβολία είναι ο γεωμετρικός συντελεστής συγκέντρωσης. Η απευθείας μέτρηση του συντελεστή συγκέντρωσης στους

ενεργειακούς σταθμούς είναι δύσκολη λόγω της μεγάλης πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας (1-3 kW/cm²).

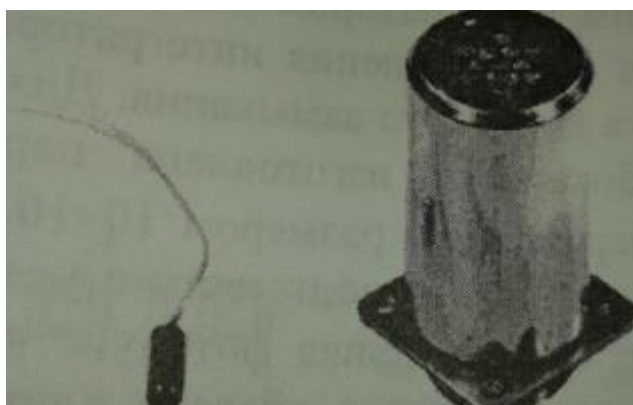
Στην αρχή της δεκαετίας του 70 του περασμένου αιώνα δεν υπήρχε πρότυπος δέκτης για την απευθείας μέτρηση του συντελεστή συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το 1977 ο Дмитрий Семёнович Стребков εφηύρε φωτοηλεκτρικό μετρητή της πυκνότητας της ηλιακής ροής (ΦΙΠΠΙ). Ο αισθητήρας του μετρητή φαίνεται στην εικόνα 1.4.2, είναι ένας κύβος πυριτίου με ειδική αντίσταση 0,1 Ω*cm με κάθετους ημιαγωγούς p-n και ισότοπους ημιαγωγούς p-p+. Το εμβαδό του αισθητήρα είναι 0,4X0,8 mm. Η κατασκευή αυτή μετράει την ενεργειακή φωτεινότητα

στο εύρος 0,4 – 4*10³ V/cm². Η φασματική ευαισθησία του αισθητήρα είναι 0,01-0,2 A/V για εύρος 0,5-1 μm. Στην εικόνα 1.4.3 φαίνεται ο ΦΙΠΠΙ-1 που περιέχει έναν αισθητήρα και ο ΦΙΠΠΙ-13 που περιέχει δεκατρείς αισθητήρες.



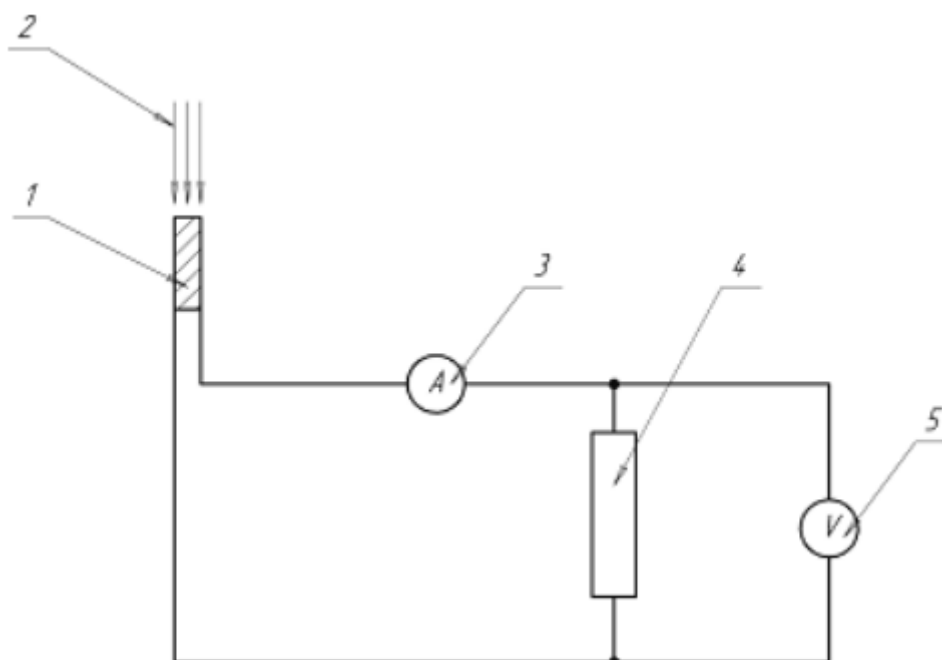
Εικόνα 1.4.2: Αισθητήρας του μετρητή ΦΙΠΠΙ

Ο αισθητήρας σε μικρή χρονική διάρκεια εισάγεται στο σημείο εστίασης του συγκεντρωτή και οι μετρήσεις γίνονται με παλμική λειτουργία. Ο λόγος των μεγεθών της ροής με τον συγκεντρωτή και χωρίς συγκεντρωτή μας δίνει το μέγεθος του συντελεστή συγκέντρωσης. Γνωρίζοντας την αντιστοιχία μεταξύ των μεγεθών της ροής και των ενεργειακών χαρακτηριστικών της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να καθοριστεί η πυκνότητα της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας



Εικόνα 1.4.3: Οι μετρητές ΦΙΠΠΙ-1 και ΦΙΠΠΙ-13

Για την βαθμονόμηση του μετρητή είναι απαραίτητη η μέτρηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του αισθητήρα χρησιμοποιώντας το σχήμα που φαίνεται στην εικόνα 1.4.4



Εικόνα 1.4.4: Σχήμα μέτρησης ηλεκτρικών χαρακτηριστικών αισθητήρα

Η ηλιακή ακτινοβολία (2) πέφτει στην επιφάνεια του μετρητή, στην οποία μετασχηματίζεται σε ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα με αντίσταση (4). Το βολτόμετρο (5) δείχνει το μέγεθος της πτώσεων της τάσης στη αντίσταση (4) και το αμπερόμετρο (3) μετράει την ένταση του ρεύματος στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Συνήθως η ένταση του ρεύματος είναι $1 \mu\text{A}$ και η αντίσταση $0,2 \text{ M}\Omega$.

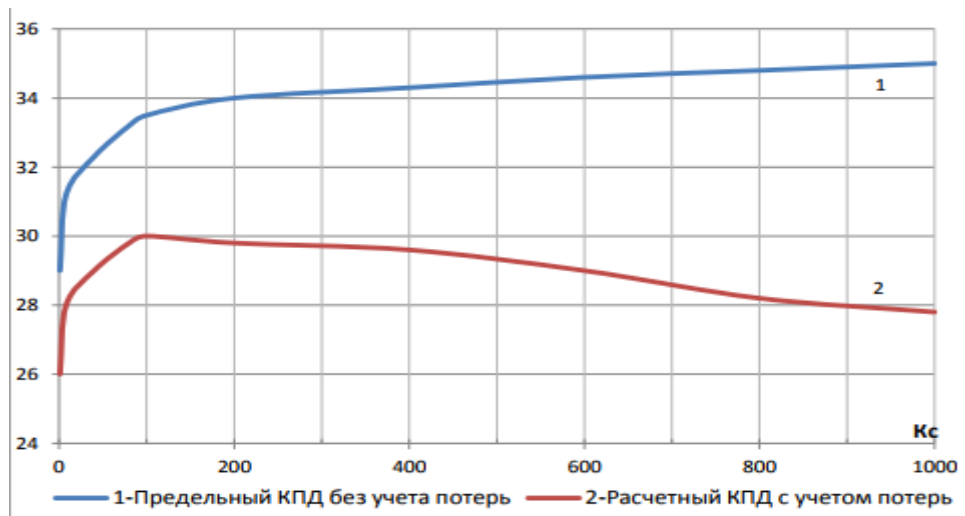
1.5. Αποδοτικότητα ηλιακών σταθμών που χρησιμοποιούν συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα

Έρευνες διαφόρων ειδών φωτοηλεκτρικών μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται σε ηλιακούς σταθμούς με συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα έδειξαν ότι η αύξηση του συντελεστή συγκέντρωσης οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοηλεκτρικών μετασχηματιστών και ως αποτέλεσμα είναι η μείωση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης τους καθώς και στην αποικοδόμησή τους. Αυτό το γεγονός πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή του επιθυμητού βαθμού συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, επομένως πρέπει να προβλέπεται και η ύπαρξη ενός συστήματος ψύξης.

Για παράδειγμα οι φωτοηλεκτρικοί μετασχηματιστές από πυρίτιο έχουν μηδενικό βαθμό απόδοσης για θερμοκρασία 300 C . Βασικά υλικά για την δημιουργία φωτοηλεκτρικών μετασχηματιστών με αυξημένη ισχύ είναι το πυρίτιο και το αρσενικό γάλλιο (Ga-As). Το βέλτιστο εύρος του βαθμού συγκέντρωσης χρησιμοποιώντας φωτοηλεκτρικούς μετασχηματιστές από αρσενικό γάλλιο είναι σχεδόν μια τάξης ανώτερο από το αντίστοιχο με την χρησιμοποίηση φωτοηλεκτρικών μετασχηματιστών από πυρίτιο. Ως αποτέλεσμα στα συγκεντρωτικά μοντέλα που χρησιμοποιούν φωτοστοιχεία διαφόρων υλικών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλά

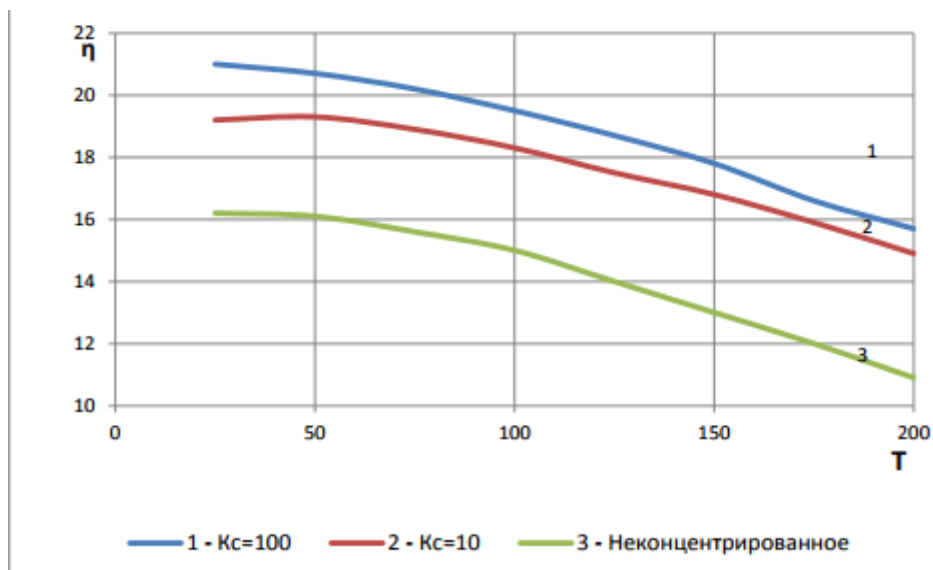
και φθηνά συστήματα ψύξης, για ηλεκτρική ισχύ, που λαμβάνεται από ένα φωτοηλεκτρικό μετασχηματιστή, μεγαλύτερη από 10 W. Με αυτόν τον τρόπο η χρησιμοποίηση δομής Al-Ga-As για την δημιουργία φωτοστοιχείου δίνει την δυνατότητα της αύξησης της αποδοτικότητας μετασχηματισμού της ηλιακής ενέργειας. Αυτή η δομή χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την κατασκευή φωτοστοιχείων λόγω της εγγύτητας των παραμέτρων του πλέγματος αρσενικού γαλλίου και αρσενικού αλουμινίου.

Στην εικόνα 1.5.1 φαίνεται το διάγραμμα του βαθμού απόδοσης του φωτοηλεκτρικού μετασχηματιστή κατασκευασμένου από AlGaAs-GaAs με τον συντελεστή συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μπλε καμπύλη αναφέρεται στον βαθμό απόδοσης χωρίς των συνυπολογισμό των απωλειών ενώ η κόκκινη καμπύλη αναφέρεται στους υπολογισμούς μαζί με τον συνυπολογισμό των απωλειών



Εικόνα 1.5.1: Βαθμός απόδοσης σε σχέση με το συντελεστή συγκέντρωσης

Στην εικόνα 1.5.2 φαίνεται το διάγραμμα του βαθμού απόδοσης με την θερμοκρασία. Η μπλε καμπύλη αφορά τον βαθμό συγκέντρωσης 100, η κόκκινη τον βαθμό συγκέντρωσης 10 και η πράσινη χωρίς την χρήση συγκεντρωτή.



Εικόνα 1.5.2: Βαθμός απόδοσης σε σχέση με την θερμοκρασία

Η έγχυση ψευδαργύρου με την μέθοδο της διάχυσης έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της θερμοκρασιακής σταθερότητας του φωτοηλεκτρικού μετασχηματιστή κατασκευασμένου από AlGaAs-GaAs

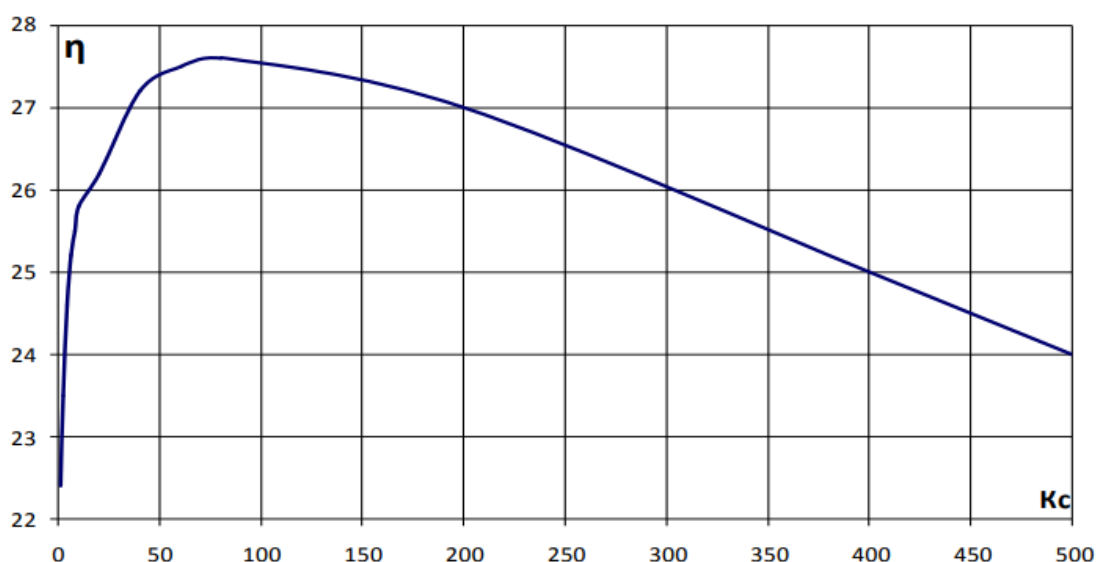
Φωτοηλεκτρικά στοιχεία κατασκευασμένα από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο για ηλιακά συστήματα χωρίς συγκεντρωτές χρησιμοποιούνται αρκετά σε αυτόνομες ηλιακές εγκαταστάσεις. Εκτός από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο δημιουργούνται επίσης φωτοηλεκτρικοί μετασχηματιστές πολυκρυσταλλικού και υδρογονωμένου άμορφου πυρίτιου, που έχει ως κύριο πλεονέκτημα το μικρό κόστος.

Ο βαθμός απόδοσης φωτοηλεκτρικών μετασχηματιστών από άμορφο πυρίτιο μπορεί να φτάσει το 15%. Όμως η αποδοτικότητα αυτών των φωτοηλεκτρικών μετασχηματιστών μπορεί να μειωθεί σημαντικά με την χρησιμοποίηση συγκεντρωτών. Για αυτό στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα δεν χρησιμοποιούνται φωτοηλεκτρικοί μετασχηματιστές από άμορφο ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ούτε γενικά υλικά λεπτών ημιαγωγικών ενώσεων.

Κατασκευαστικά τους φωτοηλεκτρικούς μετασχηματιστές από πυρίτιο μπορούμε να τους χωρίσουμε σε δυο κατηγορίες :

- Στα φωτοστοιχεία με διόδους p-n παράλληλους προς την επιφάνεια που λαμβάνει την ακτινοβολία
- Στους φωτοηλεκτρικούς μετασχηματιστές με πολλές διόδους τοποθετημένες κάθετα στην επιφάνεια που λαμβάνει την ακτινοβολία

Ο πρώτος τύπος είναι ο συνηθισμένος τύπος φωτοηλεκτρικών μετασχηματιστών. Ο δεύτερος τύπος είναι κατασκευές ειδικά για την χρησιμοποίησή τους σε συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, καθώς σε αυτούς τους μετασχηματιστές επιτυγχάνεται μείωση των ωμικών απωλειών

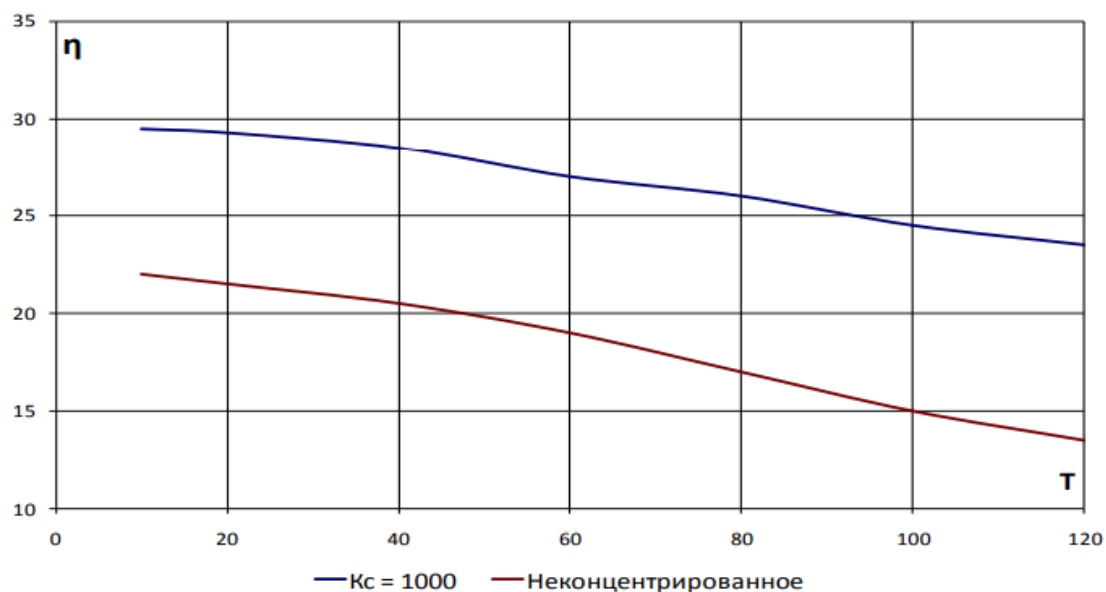


Εικόνα 1.5.3: Βαθμός απόδοσης σε σχέση με το βαθμό συγκέντρωσης

Στην εικόνα 1.5.3 φαίνεται το διάγραμμα του βαθμού απόδοσης με τον βαθμό συγκέντρωσης της ηλιακή ακτινοβολίας για φωτοηλεκτρικό μετασχηματιστή από πυρίτιο. Παρατηρούμε ότι για βαθμό συγκέντρωσης $k=100$ ο βαθμός απόδοσης ξεπερνάει το 20%. Το διάγραμμα αυτό λήφθηκε για φωτοηλεκτρικό μετασχηματιστή η θερμοκρασία λειτουργίας του οποίου κρατήθηκε σταθερή (24-27 C). Όμως σε

πραγματικές συνθήκες με φυσική ψύξη από το αέρα και με χρησιμοποίηση συγκεντρωτή η θερμοκρασία μπορεί να ξεπεράσει τους 100 C.

Στην εικόνα 1.5.4 φαίνεται το διάγραμμα του βαθμού απόδοσης του φωτοηλεκτρικού μετασχηματιστή με την θερμοκρασία λειτουργίας



Εικόνα 1.5.4: Βαθμός απόδοσης σε σχέση με την θερμοκρασία

Η μπλε καμπύλη αναφέρεται σε βαθμό συγκέντρωσης $k=1000$ και η κόκκινη χωρίς χρησιμοποίηση συγκεντρωτή.

Έτσι για την επιλογή του βέλτιστου βαθμού συγκέντρωσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοηλεκτρικού μετασχηματιστή

Κεφάλαιο 2. Κατηγορίες και βασικές αρχές λειτουργίας ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων

Οι θερμικές ηλιακές μονάδες με τεχνολογίες οπτικής συγκέντρωσης είναι σημαντικές υποψήφιας για την μαζική παραγωγή του ηλιακού ηλεκτρικού ρεύματος που χρειάζεται μέσα στις επόμενες δεκαετίες.

Υπάρχουν τέσσερις τύποι συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων:

2.1. Οι παραβολοκυλινδρικοί

Είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία για την λήψη θερμότητας από την ηλιακή ενέργεια. Υπάρχουν σταθμοί με παραβολοκυλινδρικά συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα στις Η.Π.Α και στην Ισπανία. Τα παραβολοκυλινδρικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από καθρέπτες, καθένας από τους οποίους εστιάζει την ηλιακή ακτινοβολία στον σωλήνα του απορροφητή, ο οποίος απορροφά την ανακλώμενη ενέργεια. Το σύστημα παρακολουθεί την κίνηση του ηλίου, έτσι ώστε συνεχώς οι ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες να εστιάζονται στον σωλήνα



Εικόνα 2.1.1: Παραβολοκυλίνδροι

Στην εικόνα 2.1.2 φαίνεται η συγκέντρωση των ηλιακών ακτινών σε μια εγκατάσταση με παραβολικούς συγκεντρωτές



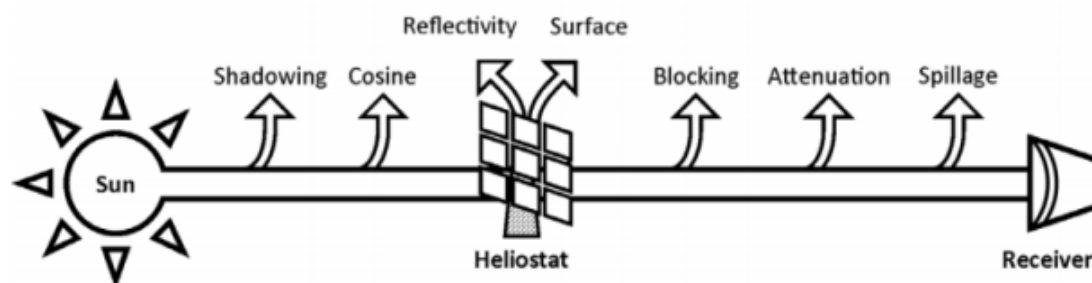
Εικόνα 2.1.2: Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας από παραβολικούς συγκεντρωτές

2.2. Οι ηλιακοί πύργοι

Αυτές οι εγκαταστάσεις αποτελούνται από μεγάλο αριθμό ηλιοστατών, οι οποίοι κατευθύνουν τις ανακλώμενες ηλιακές ακτινοβολίες σε ένα δέκτη, που είναι τοποθετημένος στην κορυφή του ηλιακού πύργου. Η τιμή της κιλοβατώρας σε ένα τέτοιο ηλιακό σύστημα εκτιμάται σε 0,07-0,08 \$. Οι ηλιακοί πύργοι και τα παραβολοκυλινδρικά ηλιακά συστήματα έχουν κοινά πλεονεκτήματα. Μπορούν να περιέχουν συσσωρευτές θερμικής ενέργειας με βάση τήγματα αλάτων, πράγμα το οποίο καθιστά εφικτή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και κατά την διάρκεια της νύχτας.

Το πεδίο ηλιοστατών αποτελείται από ηλιοστάτες που μπορούν να προσανατολιστούν σε δύο άξονες. Υπάρχουν δυο τρόποι τοποθέτησης των ηλιοστατών. Η τοποθέτηση κυκλικά γύρω από τον κεντρικό πύργο και η τοποθέτηση όλων των ηλιοστατών είτε στο βόρειο κομμάτι του πύργου είτε στο νότιο. Ο πρώτος τρόπος τοποθέτησης είναι κατάλληλος για περιοχές του ισημερινού ενώ ο δεύτερος για τις περιοχές του νότιου ή βόρειου ημισφαιρίου λόγω της τροχιάς του ηλίου

Η ηλιακή ακτινοβολία υφίσταται πολλές απώλειες πριν φτάσει στον δέκτη. Στην εικόνα 2.1.2 φαίνονται διάφορα είδη απωλειών στο πεδίο των ηλιοστατών. Οι απώλειες συνημίτονου του ηλιοστάτη είναι το κύριο γεγονός που καθορίζει τον τρόπο τοποθέτησης των ηλιοστατών. Ο οπτικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται τόσο από την τοποθέτηση των ηλιοστατών σε σχέση με τον δέκτη όσο και από την τροχιά του ηλίου. Ο μηχανισμός παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου χρησιμοποιείται για να προσανατολίσει τον ηλιοστάτη έτσι ώστε η κάθετη στην επιφάνειά του να διχοτομεί την γωνία ανάμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία και την ανακλώμενη ακτινοβολία προς τον δέκτη. Το αποδοτικό εμβαδό ανάκλασης μειώνεται με το συν ημίτονο της μισής γωνίας που σχηματίζεται από την ηλιακή ακτινοβολία και την ανακλώμενη προς τον δέκτη και οι απώλειες λόγω του γεγονότος αυτού λέγονται απώλειες συνημίτονου. Οι απώλειες σκίασης οφείλονται από την σκιά των γειτονικών ηλιοστατών σε έναν ηλιοστάτη. Το φαινόμενο του μπλοκαρίσματος ηλιακής ακτινοβολίας ενός ηλιοστάτη προς τον δέκτη από έναν άλλο ηλιοστάτη ονομάζεται απώλειες μπλοκαρίσματος. Οι απώλειες απόσβεσης είναι λόγω σωματιδίων που υπάρχουν στην διαδρομή προς τον δέκτη. Οι απώλειες της ανακλώμενης ακτινοβολίας που δεν εστιάζεται στον δέκτη ονομάζεται απώλεια διαρροής. Αυτό συμβαίνει όταν η επιφάνεια του ηλιοστάτη είναι μεγαλύτερη από την επιφάνεια του δέκτη.



Εικόνα 2.1.3: Απώλειες στο πεδίο των ηλιοστατών

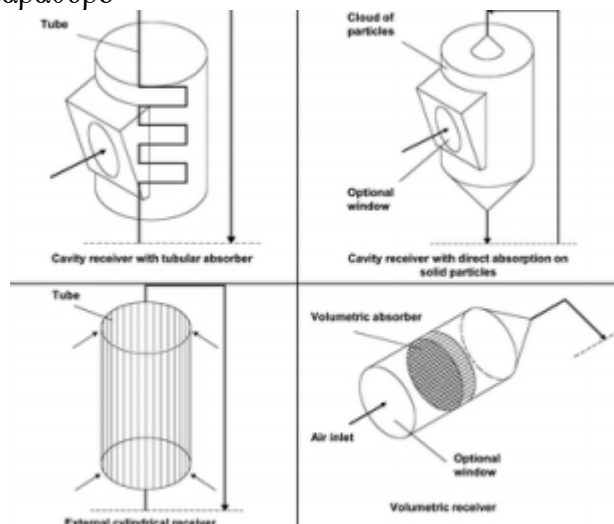
Οι κύριοι τύποι κεντρικών δεκτών φαίνονται στην εικόνα και οι κατηγορίες είναι οι εξής:

- Σωληνωτοί δέκτες:

Χωρίζονται σε εξωτερικούς δέκτες και δέκτες κοιλότητας

- Ογκομετρικοί δέκτες:

Μπορούν να λειτουργούν ανοικτά στο περιβάλλον ή να περικλείονται από ένα διαφανές παράθυρο



Εικόνα 2.1.4: Τύποι δεκτών

Οι σωληνωτοί δέκτες είναι οι περισσότερο χρησιμοποιούμενοι. Ο τύπος του δέκτη (εξωτερικός ή με κοιλότητα) επηρεάζει το πεδίο των ηλιοστατών. Οι εξωτερικοί δέκτες συνήθως χρησιμοποιούνται με πεδίο ηλιοστατών που έχουν τοποθετηθεί κυκλικά γύρω από τον κεντρικό πύργο ενώ οι δέκτες με κοιλότητα με πεδίο όπου έχουν τοποθετηθεί όλοι οι ηλιοστάτες στο βόρειο ή στο νότιο τμήμα του κεντρικού πύργου. Στους εξωτερικούς δέκτες όλες οι επιφάνειες του απορροφητή εκτίθενται στο πεδίο ηλιοστατών ενώ στον δέκτη με κοιλότητα οι απορροφητικοί σωλήνες τοποθετούνται μέσα σε μια κοιλότητα. Η ακτινοβολία εισέρχεται στην κοιλότητα και χτυπάει τους απορροφητικούς σωλήνες. Αυτό μειώνει τις θερμικές απώλειες σε σχέση με τους εξωτερικούς δέκτες. Όμως εφόσον η κοιλότητα περιορίζει την είσοδο της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας οι απώλειες διαρροής στους δέκτες με κοιλότητα είναι μεγαλύτερες από ότι στους εξωτερικούς δέκτες.

Σωληνωτοί δέκτες

Οι σωληνωτοί δέκτες είναι οι πιο χρησιμοποιούμενοι. Δύο παραδείγματα σωληνωτών δεκτών φαίνονται στην εικόνα 2.1.4. Υπάρχουν τρία κοινά συστήματα δέκτη και υγρού αποθήκευσης. Ανάμεσα σε αυτά, το νερό/ατμός και το λιωμένο άλας είναι αυτά που έχουν την πιο διαδεδομένη εφαρμογή ως εργαζόμενο μέσο και το υγρό νάτριο είναι ακόμα στο στάδιο της έρευνας.



Εικόνα 2.1.5 Τύποι δεκτών

Νερό/Ατμός

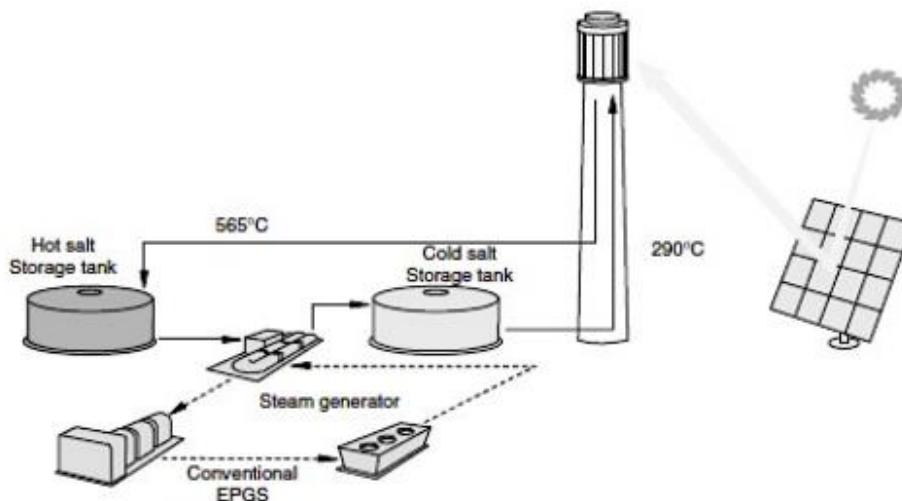
Στην εικόνα φαίνεται το σύστημα νερού/ατμού. Το νερό χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Επομένως υπάρχει μια απευθείας δημιουργία ατμού στον δέκτη. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι ότι δεν χρειάζεται να υπάρχει εναλλάκτης, όταν δεν χρειάζεται αποθήκευση. Τα μειονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

- Χαμηλό όριο ηλιακής ροής του δέκτη (0,3 ως 0,6 MW/m²)
- Η αποθηκευμένη ενέργεια σε μορφή ατμού υψηλής πίεσης είναι οικονομικά ασύμφορη, επομένως η ενέργεια πρέπει να μεταφερθεί σε άλλο μέσο με εναλλάκτες θερμότητας και με αποτέλεσμα εξεργειακές απώλειες.
- Η αλλαγή φάσης του υγρού μέσου, καθορίζει συγκεκριμένη κατασκευή του δέκτη με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η αποδοτικότητά του

Λιωμένο αλάτι

Η πιλοτική μονάδα Solar One απέδειξε με επιτυχία τη λειτουργία του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με κλιμακωτό πύργο. Το Solar One θέρμινε ψυχρό νερό σε υπέρθερμο ατμό, ο οποίος οδηγούταν σε ένα στρόβιλο. Ο υπέρθερμος ατμός επίσης χρησιμοποιούνταν για να φορτίσει ένα θερμοκλινές σύστημα αποθήκευσης. Ο Solar One λειτουργούσε για 6 χρόνια ,από το 1982 έως 1988, τα τρία τελευταία από τα οποία διατέθηκαν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και ο Solar One έχει αποδείξει σαφώς την λειτουργικότητα του πύργου 92 ισχύος, το σύστημα θερμικής αποθήκευσης είναι ανεπαρκές για τη λειτουργία του στρόβιλου στη μέγιστη αποδοτικότητα, επειδή το αποθηκευτικό σύστημα λειτουργεί μόνο μεταξύ 220 °C και 305 ° C, ενώ στην έξοδο του δέκτη η θερμοκρασία ήταν 510°C. Ο κύριος τρόπος λειτουργίας ήταν άμεσα από την έξοδο του δέκτη στην είσοδο της τουρμπίνας, παρακάμπτοντας το σύστημα θερμικής αποθήκευσης, φύλαξης και βοηθητικού ατμού κατά τη διάρκεια των μη συνδεδεμένων περιόδων. Για τους υψηλούς ετήσιους

παράγοντες ικανότητας, οι ηλιακοί σταθμοί πρέπει να έχουν ένα οικονομικά αποδοτικό σύστημα θερμικής αποθήκευσης. Ένα τέτοιο σύστημα θερμικής αποθήκευσης χρησιμοποιεί τηγμένο νιτρικό αλάτι. Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί, το εύρος λειτουργίας του νιτρικού λιωμένου αλατος (ένα μείγμα νιτρικού νατρίου 60% και 40% νιτρικό κάλιο) πρέπει να ταιριάζει με τις θερμοκρασίες λειτουργίας των σύγχρονων ανεμογεννητριών του κύκλου Rankine. Σε ένα σταθμό πύργου λιωμένου αλατιού, το ψυχρό αλάτι στους 290°C αντλείται από μια δεξαμενή στο επίπεδο του εδάφους με το δέκτη τοποθετημένο στην κορυφή ενός πύργου όπου θερμαίνεται από την συμπυκνωμένη ηλιακή ακτινοβολία στους 565°C. Το αλάτι ρέει πίσω στο επίπεδο του εδάφους σε μια άλλη δεξαμενή. Για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το ζεστό αλάτι αντλείται από τη δεξαμενή ζεστού μέσω μιας γεννήτριας ατμού για να παράξει υπέρθερμο ατμό. Ο υπέρθερμος ατμός κινεί μια τουρμπίνα κύκλου Rankine. Ένα διάγραμμα του πύργου ισχύος τηγμένου αλατος φαίνεται στην εικόνα 2.1.5. Ο συλλέκτης πεδίου μπορεί να πάρει μέγεθος ώστε να συγκεντρώσει περισσότερη δύναμη από ό, τι απαιτείται από το σύστημα γεννήτριας ατμού, και το αλάτι που περισσεύει συσσωρεύεται στο καυτό βυτίο. Με αυτόν τον τρόπο της αποθήκευσης οι πύργοι κατασκευάζονται με ετήσια ικανότητα μέχρι 70%. Καθώς το λιωμένο αλάτι έχει μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας ανά όγκο (500-700 kWh/m³), όπως είναι ιδανικό για τα συστήματα ηλιακής-θερμικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη χωρητικότητα. Ακόμα κι αν τα νιτρικά άλατα έχουν χαμηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα κατ'όγκο από τα ανθρακικά άλατα, αποθηκεύουν 250 kWh/m³. Η μέση θερμική αγωγιμότητα των νιτρικών αλάτων είναι 0,52W/mK και η θερμική ισχύς τους είναι περίπου 1,6 kJ/kgK. Τα νιτρικά άλατα είναι μια φθηνή λύση για την αποθήκευση μεγάλων συστημάτων. Το κόστος του υλικού είναι \$ 0.70/kg ή \$5.20/kWh. Οι εκτιμήσεις για τα μεγάλα συστήματα είναι της τάξης των \$ 13/kWh.



Εικόνα 2.1.6: Σκαρίφημα εγκατάστασης κεντρικού πύργου με λιωμένο άλας

Αρκετά πειράματα επίδειξης και ανάπτυξης πύργων λιωμένου αλατιού έχουν διεξαχθεί στις προηγούμενες δύομισι δεκαετίες στις ΗΠΑ και την Ευρώπη. Ο μεγαλύτερος πύργος ισχύος τηγμένου αλατος ήταν το Solar Two, ένας πύργος 10 MW που βρίσκεται κοντά στο Barstow, Καλιφόρνια. Μια εικόνα του Solar Two φαίνεται στην εικόνα 2.1.6



Εικόνα 2.1.7: Ηλιακός σταθμός Solar Two

Ο σκοπός του έργου Solar Two ήταν να επιβεβαιώσει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη λιωμένου αλατιού, την αποθήκευση θερμότητας και τις τεχνολογίες της γεννήτριας ατμού και να βελτιώσει την ακρίβεια των οικονομικών προβλέψεων για τα εμπορικά έργα αυξάνοντας το κεφάλαιο λειτουργίας και συντήρησης της βάσης κόστους, καθώς και η διανομή πληροφοριών σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας της βιομηχανίας ηλιακής ενέργειας για την προώθηση ενός ευρύτερου ενδιαφέροντος προς την πρώτη εμπορική εγκατάσταση. Το Solar Two εργοστάσιο χτίστηκε στο ίδιο σημείο με την πιλοτική μονάδα Solar One και επαναχρησιμοποίησε ένα μεγάλο μέρος του υλικού, συμπεριλαμβανομένου του συλλέκτη ηλιοστατών, τη δομή του πύργου, και της τουρμπίνες 10 MW. Ένα νέο, 110 MWht δύο-δεξαμενών, θερμικό σύστημα αποθήκευσης λιωμένου αλατιού εγκαταστάθηκε καθώς και της της δέκτης 42 MWt, μια 35 MWt γεννήτρια ατμού (535°C, 100 bar) και ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου. Το εργοστάσιο άρχισε να λειτουργεί τον Ιούνιο του 1996. Το έργο απέδειξε με επιτυχία τη δυνατότητα της τεχνολογίας νιτρικού άλατος. Ορισμένα από τα βασικά αποτελέσματα ήταν: η απόδοση δέκτη μετρήθηκε στο 88%, το σύστημα θερμικής αποθήκευσης είχε απόδοση άνω του 97%, και η αποδοτικότητα της τουρμπίνας του κύκλου Rankine ήταν 34%, τα οποία ταιριάζουν της προβλέψεις της απόδοσης του. Η απόδοση του πεδίου συλλέκτη ήταν μικρότερη από την αναμενόμενη, κυρίως λόγω της χαμηλής διαθεσιμότητας των ηλιοστατών (85-95% έναντι 98% αναμενόμενης) και της υποβάθμισης του επιφάνειας του κατόπτρου. Τα περισσότερα προβλήματα του ηλιοστάτη αποδόθηκαν στο γεγονός ότι το πεδίο ηλιοστάτη ήταν σε αδράνεια και ασυντήρητο για έξι χρόνια μετά το κλείσιμο του Solar One. Η συνολική μέγιστη αποδοτικότητα μετατροπής του εργοστασίου μετρήθηκε στο 13,5%. Το εργοστάσιο απόδειξε επιτυχώς την ικανότητά του να παράγει ηλεκτρική ενέργεια ανεξάρτητα από την ηλιακή συλλογή. 95 Επειδή το Solar Two ήταν ένα έργο επίδειξης και ήταν αρκετά μικρή συμβατική εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας, δεν θα μπορούσε να ανταγωνιστεί οικονομικά με την ηλεκτροπαραγωγή καύσης ορυκτών μονάδων χωρίς ειδικές επιδοτήσεις. Οι σκέτες ηλιακές εμπορικές εγκαταστάσεις πρέπει να είναι μεγαλύτερες για να επωφεληθούν από της οικονομίες κλίμακας και για αποδοτικότερα σχέδια. Για να μειωθούν οι κίνδυνοι που συνδέονται με το υλικό κλιμάκωσης, ο πρώτος εμπορικός πύργος λιωμένου αλατιού πρέπει να είναι περίπου τρεις φορές το μέγεθος του Solar Two. Μια προσπάθεια για εξέλιξη της τεχνολογίας λιωμένου αλατιού είναι το Solar Tres που προωθείται από την ισπανική εταιρεία

SENER και εν μέρει χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Το κόστος της επένδυσης που προβλέπεται για το Solar Tres είναι 147 εκατομμύρια Ευρώ. Ο σχεδιασμός του βελτιώνει αποτελεσματικά την μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της απαιτούμενες επενδύσεις. Με μόνο 17 Mwe, το εργοστάσιο αναμένεται για την παραγωγή 105 Gwhe/έτος. Η μονάδα είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί όλο το εικοσιτετράωρο το καλοκαίρι, οδηγώντας σε ένα ετήσιο συντελεστή δυναμικού του 71%. Τα ορυκτά ασφαλείας που αντιστοιχούν στο 15% της ετήσιας παραγωγής θα προστεθούν. Το κόστος της ενέργειας εκτιμάται ότι θα είναι περίπου \$ 0.16/kWh.

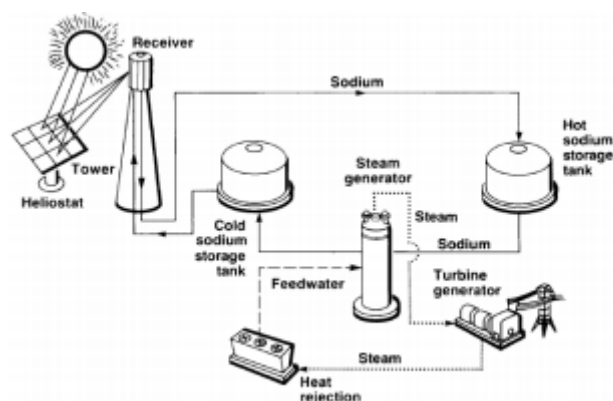
Υγρό Νάτριο

Ένα κεντρικό σύστημα υγρού νατρίου φαίνεται στην εικόνα 2.1.7 . Οι περισσότεροι δέκτες με υγρό νάτριο είναι εξωτερικού τύπου και έχουν μικρές απώλειες, οπότε χρησιμοποίηση δέκτη με κοιλότητα με υγρό νάτριο δεν είναι οικονομικά σκόπιμη. Σε σχέση με το λιωμένο άλας το υγρό νάτριο έχει πολύ καλές θερμικές ιδιότητες που φαίνονται παρακάτω:

- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα που έχει ως αποτέλεσμα την λειτουργία του δέκτη με υψηλή ηλιακή ροή (της τάξεως των 1,5 MW/m²)
- Το υγρό νάτριο παγώνει της 100 °C, που είναι δυο φορές μικρότερο από το λιωμένο άλας.
- Το υγρό νάτριο έχει μεγάλο σημείο βρασμού (873 °C) πράγμα το οποίο βοηθάει να λειτουργεί με υψηλού θερμοκρασιακά κύκλου Brayton
- Το μέγεθος του δέκτη και οι θερμικές απώλειες μειώνονται λόγω της μεγαλύτερη ηλιακής ροής στο σύστημα αυτό

Της παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που καθιστούν την εφαρμογή του υγρού νατρίου μη διαδεδομένη. Μερικοί από της είναι:

- Το υψηλό σχετικά κόστος του νατρίου
- Η μικρή ογκομετρική χωρητικότητα του νατρίου, πράγμα το οποίο καθιστά το χώρο αποθήκευσης μεγάλο και κατά συνέπεια ακριβό
- Η μεγάλη αντιδραστικότητα του νατρίου με το νερό, πράγμα το οποίο θέτει σε κίνδυνο όλο το σύστημα



Εικόνα 2.1.8: Σκαρίφημα ηλιακού σταθμού με υγρό νάτριο

2.3. Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα δίσκων (με κινητήρα Στίρλινγκ ή με φωτομετασχηματιστές)

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από τον συγκεντρωτή σε μορφή πιάτου, ο οποίος ανακλά την ηλιακή ενέργεια στον δέκτη, που είναι τοποθετημένος στο σημείο εστίασης του συγκεντρωτή. Ο δέκτης μπορεί να είναι κινητήρας Στίρλινγκ με γεννήτρια, ή ημιαγωγικός μετασχηματιστής. Τα ηλιακά συστήματα με κινητήρα Στίρλινγκ έχουν βαθμό απόδοσης περίπου 30%, αλλά η υψηλή τιμή της και η δυσκολία κατασκευής της, περιορίζει την διάδοσή της



Εικόνα 2.1.9: Ηλιακά πιάτα/μηχανή

2.4. Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα με φακούς Φρενέλ

Της ο τύπος συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων έχει την μικρότερη διάδοση στον κόσμο και άρχισε την ενεργή δράση του της αρχές του 21 αιώνα. Βασίζεται στην συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας με την βοήθεια φακών Φρενέλ σε έναν δέκτη, που αποτελείται από σωλήνες ή από ημιαγωγικά φωτοστοιχεία. Οι φακοί Φρενέλ είναι εύκολο στο να κατασκευαστούν, έχουν χαμηλή σχετικά τιμή και με την βοήθεια της μπορεί να ληφθεί σημαντική πυκνότητα ηλιακής ενέργειας σε μικρό εμβαδό. Σε τέτοιες ηλιακές εγκαταστάσεις είναι επιτεύξιμη ενεργειακή πυκνότητα ως 1000 kW/m².



Εικόνα 2.1.10: Φακοί Frenel

Της οι υπάρχουσες πιλοτικές εγκαταστάσεις μιμούνται παραβολικές γεωμετρίες με μεγάλες περιοχές κατόπτρου και δουλεύουν κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Οι ανακλαστικοί συγκεντρωτές επιλέγονται συνήθως αφού έχουν της καλύτερες προοπτικές για την ανάπτυξη

Τα παραβολικά κοίλα και τα συστήματα Fresnel είναι δυσδιάστατα συστήματα συγκέντρωσης στα οποία η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε μια εστιακή γραμμή από ένα μονοαξονικό κάτοπτρο. Είναι σε θέση να συγκεντρώνουν την ηλιακή ροή ακτινοβολίας 30-80 φορές και να θερμαίνουν το θερμικό υγρό έως 393°C. Οι μονάδες μετατροπής της ενέργειας είναι γεννήτριες που χρησιμοποιούν κύκλους Rankine με ισχύ 30-80W.

Τα συστήματα πύργου είναι πιο περίπλοκα, δεδομένου ότι ο ηλιακός δέκτης που είναι τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου συγκεντρώνει το ηλιακό φως μέσω της μεγάλου παραβολοειδούς που διακρίτοποιείται σε ένα πεδίο από ηλιοστάτες. Της ο τρισδιάστατος συγκεντρωτής έχει άξονα ανεξάρτητου βαθμού ελευθερίας και απαιτεί ηλιοστάτες δυσδιάστατης παρακολούθησης. Οι συντελεστές συγκέντρωσης είναι μεταξύ 200 και 1000 και τα μεγέθη της μονάδας είναι μεταξύ 10 και 200 MW. Ως εκ τούτου είναι κατάλληλοι για της αγορές και την ενσωμάτωση της προηγμένους θερμοδυναμικούς κύκλους. Μια μεγάλη ποικιλία των θερμικών ρευστών, της ο κορεσμένος ατμός, ο υπέρθερμος ατμός, τα τηγμένα άλατα , ο ατμοσφαιρικός αέρας ή ο πεπιεσμένος αέρας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενώ οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 300°C και 1000°C.

Τέλος, τα συστήματα δίσκου-μηχανής είναι μικρές αρθρωτές μονάδες με αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μηχανές Stirling ή Brayton που είναι στο σημείο εστίασής της. Τα συστήματα αυτά είναι παραβολικοί τρισδιάστατοι συγκεντρωτές με υψηλές αναλογίες συγκέντρωσης (1000-4000) και μεγέθη μονάδων 5-25 kW. Χρησιμοποιούνται ως συνδεδεμένα συστήματα στο κεντρικό δίκτυο ή ως ανεξάρτητα συστήματα για παραγωγή ενέργειας.

Κεφάλαιο 3. Ηλιακοί Πύργοι. Εφαρμογές ανα τον κόσμο

3.1. Ο ηλιακός σταθμός Solar Two

Ο ηλιακός σταθμός Solar Two βρισκόταν στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α. Η τεχνολογία συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στον σταθμό αυτό είναι κεντρικό σύστημα πύργου. Μια όψη του σταθμού αυτού φαίνεται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Ηλιακός σταθμός Solar Two

Λειτουργία του Solar Two:

Ο σταθμός της λειτουργεί από το 1995 ως αποτέλεσμα εκσυγχρονισμού του ήδη από πριν υπάρχοντα σταθμού Solar One. Ο Solar Two αποτελούταν από 1926 ηλιοστάτες με συνολικό εμβαδό 82.750 m² και τροφοδοτούσε 7.500 σπίτια. Ο Solar Two χρησιμοποιούσε λιωμένο άλας με 60% νιτρικό νάτριο και 40% νιτρικό κάλιο. Αυτό βοήθησε στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας κατά την διάρκεια όπου δεν υπήρχε ηλιακή ροή λόγω σύννεφων. (παλιότερα στον Solar One το εργαζόμενο μέσο ήταν νερό οπότε αυτή η δυνατότητα δεν υπήρχε). Φυσικά το λιωμένο άλας βοήθησε στην αποθήκευση της ενέργειας για χρήση της κατά την διάρκεια της νύχτας. Το 1999 ο Solar Two τέθηκε εκτός λειτουργίας και το 2009 μετά από 10 χρόνια σε κατάσταση μη λειτουργίας κατεδαφίστηκε

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά του σταθμού Solar Two [12]

Τοποθεσία του ηλιακού σταθμού	
Γεωγραφικό πλάτος	34.51° N
Γεωγραφικό μήκος	116.53° W
Ενεργειακά χαρακτηριστικά του σταθμού	
Ηλεκτρική Ισχύς	10 MW
Αποθηκευτική δυναμικότητα	3 ώρες
Χαρακτηριστικά του δέκτη	
Θερμική ισχύς δέκτη	43 MW
Υγρό μέσο του δέκτη	Λιωμένο Άλας
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη	
Απορροφητική επιφάνεια	99,29 m ²
Διάμετρος δέκτη	5,1 m
Ύψος δέκτη	6,2 m
Διάμετρος του σωλήνα του δέκτη	23 mm
Πάχος του σωλήνα του δέκτη	1,2 mm
Αριθμός πάνελς του δέκτη	24
Αριθμός σωλήνων ανα πάνελ	32
Ύψος πύργου	76 m
Ετήσιοι βαθμοί απόδοσης (%)	
Συνολικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης	13,5
Οπτικός βαθμός απόδοσης	46,5
Θερμικός βαθμός απόδοσης	88
Βαθμός απόδοσης μπλοκ ισχύος	34
Αποθηκευτικός βαθμός απόδοσης	97

3.2. Ο ηλιακός σταθμός Gemasolar

Ο ηλιακός σταθμός Gemasolar βρίσκεται στο Fuentes de Andalucía κοντά στην πόλη Σεβίλλη, Ισπανία. Μια όψη του σταθμού αυτού φαίνεται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Ηλιακός σταθμός Gemasolar

Λειτουργία του σταθμού Gemasolar:

Η σχεδιαστική αυτού του σταθμού στηρίχθηκε στην σχεδιαστική του σταθμού SoaIr Two. Το πρώτο του όνομα ήταν Solar Tres και έπειτα μετονομάστηκε σε Gemasolar. Αποτελείται από συνολική επιφάνεια ηλιοστατών 30,5 εκτάρια και 2.650 ηλιοστάτες ο καθένας με επιφάνεια 120 m² και τοποθετημένων σε ομόκεντρους κύκλους γύρω από τον πύργο. Η συνολική γη της εγκατάστασης από τους ηλιοστάτες είναι 195 εκτάρια. Το βασικότερο πλεονέκτημά του σε σχέση με άλλους σταθμούς είναι η πολύ υψηλή αποθηκευτική του ικανότητα (15 ώρες), πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια καθ'όλη την διάρκεια της νύχτας και τις μέρες με σύννεφα. Με την παραγόμενη ισχύ του 19,9MW ετησίως παράγει 110 GWh, αρκετά για να παρέχουν ενέργεια σε 27.500 σπίτια. Ο σταθμός λειτουργεί από το 2011. Από τον δεύτερο κιόλας έτος λειτουργίας του ξεπέρασε όλες τις προσδοκίες. Το καλοκαίρι του 2013, ο σταθμός πέτυχε συνεχή παραγωγή όλο το 24ωρο για 36 συνεχόμενες ημέρες, που κανένας άλλος σταθμός στον κόσμο δεν έχει πετύχει.

Παρόλα αυτά αξίζει να αναφερθεί ότι το έργο αυτό χρηματοδοτήθηκε με 5 εκατομμύρια από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και με ένα δάνειο 80 εκατομμυρίων από την Ευρωπαϊκή Ερευνητική Τράπεζα. Τα πιο καινοτόμα δομικά στοιχεία του σταθμού ανήκουν στην εταιρεία Torres Energy και συγκεκριμένα η τεχνολογία για την μετάδοση θερμότητας ανήκει στην SENER.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά του σταθμού Gemasolar [13]

Τοποθεσία του ηλιακού σταθμού	
Γεωγραφικό πλάτος	37.33° N
Γεωγραφικό μήκος	5.19° W
Ενεργειακά χαρακτηριστικά του σταθμού	
Ηλεκτρική Ισχύς	19,9 MW
Αποθηκευτική δυναμικότητα	15 ώρες
Χαρακτηριστικά πεδίου ηλιοστατών	
Αριθμός ηλιοστατών	2.650
Συνολικό εμβαδό ηλιοστατών	304.750 m ²
Συνολικό εμβαδό γης εγκατάστασης	1.950.000 m ²
Χαρακτηριστικά του δέκτη	
Θερμική ισχύς δέκτη	120 MW
Υγρό μέσο του δέκτη	Λιωμένο Άλας
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη	
Απορροφητική επιφάνεια	269,6 m ²
Διάμετρος δέκτη	8,1 m
Ύψος δέκτη	10,6 m
Διάμετρος του σωλήνα του δέκτη	25 mm
Πάχος του σωλήνα του δέκτη	1,65 mm
Αριθμός πάνελς του δέκτη	16
Αριθμός σωλήνων ανα πάνελ	64
Ύψος πύργου	140 m
Ετήσιοι Βαθμοί απόδοσης (%)	
Συνολικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης	18,34
Οπτικός βαθμός απόδοσης	50,42
Θερμικός βαθμός απόδοσης	94,47
Απώλειες λόγω άντλησης	99,87
Βαθμός απόδοσης μπλοκ ισχύος	39,07
Αποθηκευτικός βαθμός απόδοσης	98,69

3.3. Ο ηλιακός σταθμός Crescent Dunes

Ο ηλιακός σταθμός Crescent Dunes βρίσκεται στην Τοποραχ στην Νεβάδα, Η.Π.Α. Μια όψη του σταθμού φαίνεται στην εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Ηλιακός σταθμός Crescent Dunes

Λειτουργία του σταθμού Crescent Dunes:

Ο σταθμός περιέχει 10.347 ηλιοστάτες από 115,72 m² ο καθένας. Το έργο έγινε από την SolarReserve και αγοράστηκε από την Tonopah Solar Energy λιγότερο από ένα δις. \$. Η κατασκευαστική εταιρία του έργου ήταν η ACS Cobra. Το συνολικό εμβαδό της εγκατάστασης των ηλιοστατών είναι 1.196.778 m². Υπό την συμφωνία της SolarReserve και της NV Energy, όλη η ενέργεια που παράγεται από το σταθμό για τα επόμενα 25 χρόνια θα πουλιέται στην Nevada Power Company για 0,135\$/kWh. Το 2011 η Tonopah Solar Energy πήρε 737 εκατομμύρια \$ δάνειο από το US Department of Energy και τότε άρχισε να κατασκευάζεται το έργο. Άρχισε την λειτουργία του το Σεπτέμβριο του 2015 αλλά αναβλήθηκε η λειτουργία του τον Οκτώβριο του 2016 λόγω διαρροής στον αποθηκευτικό χώρο του λιωμένου άλατος και ξανάρχισε να λειτουργεί κανονικά τον Ιούλιο του 2017.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά του σταθμού Crescent Dunes [14]

Τοποθεσία του ηλιακού σταθμού	
Γεωγραφικό πλάτος	38.14° N
Γεωγραφικό μήκος	117.22° W
Ενεργειακά χαρακτηριστικά του σταθμού	
Ηλεκτρική Ισχύς	110 MW
Αποθηκευτική δυναμικότητα	10 ώρες
Χαρακτηριστικά πεδίου ηλιοστατών	
Αριθμός ηλιοστατών	10.347
Συνολικό εμβαδό ηλιοστατών	1.197.148 m ²
Συνολικό εμβαδό γης εγκατάστασης	16.000.000 m ²
Χαρακτηριστικά του δέκτη	
Θερμική ισχύς δέκτη	540 MW
Υγρό μέσο του δέκτη	Λιωμένο Άλας
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη	
Απορροφητική επιφάνεια	1105,28 m ²
Διάμετρος δέκτη	17,6 m
Ύψος δέκτη	20 m
Διάμετρος του σωλήνα του δέκτη	42 mm
Πάχος του σωλήνα του δέκτη	1,65 mm
Αριθμός πάνελς του δέκτη	16
Αριθμός σωλήνων ανα πάνελ	76
Ύψος πύργου	195 m

3.4. Ο ηλιακός σταθμός PS10

Ο ηλιακός σταθμός PS10 βρίσκεται στο Sanlucar la Mayor κοντά στην Σεβίλλη, Ισπανία. Ο σταθμός αυτός έχει δέκτη με κοιλότητα. Μια όψη του σταθμού αυτού φαίνεται στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Ηλιακός σταθμός PS10

Λειτουργία του σταθμού PS10:

Ο σταθμός αποτελείται από 624 ηλιοστάτες από 120 m² η καθεμία. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2004 και ολοκληρώθηκε σε 3,5 χρόνια. Το κόστος κατασκευής του ήταν 35 εκατομμύρια ευρώ και η παραγόμενη ετήσια ενέργεια είναι 23.400 MWh και λαμβάνονται 271 ευρώ ανά παραγόμενη MWh, πράγμα που σημαίνει 6,3 εκατομμύρια τον χρόνο. Η κατασκευαστική εταιρεία του πεδίου των ηλιοστατών και ο ιδιοκτήτης του έργου είναι η Abengoa Solar. Ο δέκτης κατασκευάστηκε από την Technical-Tecnicas Reunidas και ο πύργος κατασκευάστηκε από την ALTAC. Το εργαζόμενο μέσο του πύργου είναι το νερό (ο δέκτης λαμβάνει την ηλιακή ακτινοβολία τουλάχιστον 9 ώρες την ημέρα για 320 ημέρες του χρόνου και 15 ώρες την ημέρα στα μέσα του καλοκαιριού). Ο παραγόμενος υπέρθερμος ατμός στο πύργο είναι θερμοκρασίας 275 C. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι 17%. Το βασικότατο μειονέκτημα αυτού του σταθμού είναι η έλλειψη αποθηκευτικού χώρου (μιας και έχοντας εργαζόμενο μέσο το νερό είναι οικονομικά ασύμφορο η δημιουργία αποθηκευτικού χώρου με ατμό υπό υψηλή πίεση) για αυτό και ο συντελεστής δυναμικότητας του σταθμού είναι 24% (ενώ με ύπαρξη αποθηκευτικού χώρου μπορεί να φτάσει τα 70%)

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά του σταθμού PS10 [15]

Τοποθεσία του ηλιακού σταθμού	
Γεωγραφικό πλάτος	37.26° N
Γεωγραφικό μήκος	6.15° W
Ενεργειακά χαρακτηριστικά του σταθμού	
Ηλεκτρική Ισχύς	10 MW
Αποθηκευτική δυναμικότητα	0,5 ώρες
Χαρακτηριστικά πεδίου ηλιοστατών	
Αριθμός ηλιοστατών	624
Συνολικό εμβαδό ηλιοστατών	75.000 m ²
Συνολικό εμβαδό γης εγκατάστασης	550.000 m ²
Χαρακτηριστικά του δέκτη	
Θερμική ισχύς δέκτη	40 MW
Υγρό μέσο του δέκτη	Νερό
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη	
Απορροφητική επιφάνεια	260 m ²
Ακτίνα κοιλότητας	7 m
Ύψος δέκτη	12 m
Πλάτος δέκτη	14 m
Πλάτος διαφράγματος	14 m
Ύψος διαφράγματος	9 m
Ύψος πύργου	120 m
Ετήσιοι βαθμοί απόδοσης (%)	
Συνολικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης	16,05
Οπτικός βαθμός απόδοσης	64,72
Θερμικός βαθμός απόδοσης	92,83
Απώλειες άντλησης	98,85
Βαθμός απόδοσης μπλοκ ισχύος	27,33
Αποθηκευτικός βαθμός απόδοσης	98,85

3.5. Ο ηλιακός σταθμός Ivanpah Solar Electric Generating System

Ο ηλιακός σταθμός Ivanpah Solar Electric Generating System βρίσκεται στην Mojave Desert, στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α. Ο σταθμός αποτελείται από τρεις μονάδες πύργους με συνολικά 173.500 ηλιοστάτες. Η μεικτή δυναμικότητα είναι 392 MW (126 MW ο πρώτος πύργος και 133 οι άλλοι δυο) ενώ η καθαρή δυναμικότητα είναι 377 MW. Ο συντελεστής δυναμικότητας του σταθμού είναι 0,28 και η ετήσια καθαρή παραγωγή είναι 940 GWh. Μια όψη του σταθμού φαίνεται στην εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5: Ηλιακός σταθμός Ivanpah Solar Electric Generating System

Λειτουργία του σταθμού Ivanpah Solar Electric Generating System [16] :

Η κατασκευή του σταθμού ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2010. Ο πρώτος πύργος του σταθμού συνδέθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο το Σεπτέμβριο του 2013 για να δοκιμαστούν κάποια τεστ συγχρονισμού. Η κανονική του λειτουργία έγινε το Φεβρουάριο του 2014. Την ίδια χρονιά ήταν ο μεγαλύτερος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα στον κόσμο. Το κόστος κατασκευής ήταν 2,2 δις \$ και χρηματοδοτήθηκε από την Bright Source Energy. Ο μεγαλύτερος επενδυτής ήταν η NRG Energy με 300 εκατομμύρια \$. Η Google επένδυσε 168 εκατομμύρια \$. Η κυβέρνηση των Η.Π.Α έδωσε δάνειο 1,6 δις \$. Στην αρχή σχεδιαζόταν για συνολική ισχύ 440 MW αλλά αναθεωρήθηκε έτσι ώστε να μην διαταραχθεί ο βιότοπος της χελώνας της ερήμου. Ο ατμοστρόβιλος και διάφορος εξοπλισμός για την εγκατάσταση δόθηκε από την SIEMENS. Ο σταθμός χρησιμοποιεί την τεχνολογία Luz Power Tower 550 με την οποία το νερό θερμαίνεται στους 550 C απευθείας στον δέκτη. Το εργαζόμενο μέσο είναι νερό. Αποθηκευτικός χώρος δεν υπάρχει, πράγμα το οποίο δικαιολογεί τον συντελεστή δυναμικότητας του σταθμού 0,28. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στα 2/3 της πωλείται στην Pacific Gas and Electric Company και το υπόλοιπο στην Southern California Edison.

Ο σταθμός καίει κάθε πρωί φυσικό αέριο για να τεθεί σε λειτουργία. Η πολιτεία της Καλιφόρνια το 2014 ενέκρινε τον σταθμό να αυξήσει την κατανάλωση του φυσικού αερίου από 328 εκατομμύρια κυβικά πόδια σε 525 εκατομμύρια κυβικά πόδια. Το 2014 ο σταθμός έκαψε συνολικά σχεδόν 868 δις BTU φυσικού αερίου εκλύοντας 46.084 τόνους διοξειδίου του άνθρακα που είναι δύο φορές παραπάνω από το επιτρεπτό όριο εκπομπής που επιτρέπεται για την πολιτεία της Καλιφόρνια. Αν αυτό το καύσιμο χρησιμοποιούταν σε συναζόμενο κύκλο αεροστροβίλου θα παρήγαγε 124.000 MWh ενώ στο σταθμό που χρησιμοποιήθηκε μαζί με την ηλιακή ενέργεια παρήγαγε 524.000 MWh. Το 2015 η συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου μειώθηκε στους 565 δις BTU ενώ η συνολική παραγωγή αυξήθηκε στις 652.300 MWh. Το πρώτο χρόνο λειτουργίας του το Associated Press δήλωσε ότι ο σταθμός παρήγαγε το μισό από την προσδοκούμενη παραγωγή. Η California Energy Commission αυτό το απέδωσε στον καιρό, στα σύννεφα. Στον δεύτερο χρόνο η παραγωγή βελτιώθηκε στις 650 GWh. Το 2017 λόγω βελτιώσεων στην κατασκευή ο σταθμός κατάφερε να πετύχει την αρχική προσδοκούμενη παραγωγή. Η μέση ετήσια άμεση ακτινοβολία στην τοποθεσία είναι 2.717 kWh/m². Ο κάθε ηλιοστάτης έχει επιφάνεια 12,05 m². Η συνολική επιφάνεια των ηλιοστατών στο σταθμό είναι 2.437.144 m². Άρα λαμβάνεται μια ηλιακή ετήσια ροή 6.621.720 MWh. Η θερμική ισχύς υπολογίζεται στο 55% αυτής της τιμής άρα 3.641.946 MWh. Ο συντελεστής δυναμικότητας είναι 0,28 οπότε η ετήσια παραγόμενη ενέργεια είναι 1.045.967 MWh. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης επομένως είναι 16%. Όλοι αυτοί οι υπολογισμοί είναι θεωρητικοί επειδή τις βραδινές ώρες ψύχεται το σύστημα και τα εξαρτήματα με αποτέλεσμα τις πρωινές ώρες όταν είναι να τεθεί σε λειτουργία χρειάζεται αναθέρμανση το σύστημα. Αν χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο ως καύσιμο για την θέρμανση του σταθμού τότε τα υπολογιζόμενα μεγέθη μπορεί να είναι υπαρκτά επί του πρακτέου.

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά του σταθμού Ivanpah [19]

Τοποθεσία του ηλιακού σταθμού	
Γεωγραφικό πλάτος	35.57°N
Γεωγραφικό μήκος	115.47°W
Ενεργειακά χαρακτηριστικά του σταθμού	
Ηλεκτρική Ισχύς	392 MW
Αποθηκευτική δυναμικότητα	0 ώρες
Χαρακτηριστικά πεδίου ηλιοστατών	
Αριθμός ηλιοστατών	173.500
Συνολικό εμβαδό ηλιοστατών	2.600.000 m ²
Συνολικό εμβαδό γης εγκατάστασης	35.000.000m ²

3.6. Ο ηλιακός σταθμός СЭС-5

Ο ηλιακός σταθμός СЭС-5 βρίσκεται στην Κριμαία, Ρωσία. Η εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού αυτού είναι 5 MW. Μια όψη του σταθμού αυτού φαίνεται στην εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Ηλιακός σταθμός СЭС-5

Λειτουργία του σταθμού:

Ο σταθμός ήταν ο πρώτος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΣΣΔ. Ο σκοπός λειτουργίας του ήταν πειραματικός. Το υπολογισμό του πεδίου των ηλιοστατών πραγματοποίησε η ЭНИИ και η НПО «Солнце» АН ТССР ενώ την κατασκευή της εγκατάστασης η Днепрострой. Βασικός σκοπός ήταν η κατανόηση των ιδιοτήτων λειτουργίας του ειδικού εξοπλισμού και η απόκτηση εμπειρίας από την λειτουργία τέτοιων σταθμών. Επιπλέον να βρεθούν τα μειονεκτήματα του τρόπου κατασκευής και των δομικών στοιχείων και η περαιτέρω διόρθωση αν αυτή είναι δυνατή. Το κόστος κατασκευής ήταν 29 εκατομμύρια ρούβλια. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1980 και η ολοκλήρωσή της έγινε το 1985. Το 1995 λόγω έλλειψης χρηματοδότησης για την συντήρηση του σταθμού και λόγω φθοράς των καθρεπτών από την ήδη δεκάχρονη λειτουργία τους αποφασίστηκε η διακοπή της λειτουργίας του σταθμού. Το 2005 έγινε η κατεδάφιση του πύργου και το 2008 έγινε στην θέση αυτή η τοποθέτηση δυο ανεμογεννήτριες ισχύος 650 kW η καθεμία. Συνολικός αριθμός λειτουργίας του σταθμού ανά έτος ήταν 1920. Τον καιρό πριν την απενεργοποίηση της λειτουργίας του σταθμού, ο σταθμός παρήγαγε 2 εκατομμύρια kWh.

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά του σταθμού CЭС-5 [17]

Χαρακτηριστικά του σταθμού	
Ύψος πύργου	89 m
Εμβαδό εγκατάστασης	20 εκτάρια
Αριθμός ηλιοστατών	1600
Συντελεστής ανακλαστικότητας	0,71
Εμβαδό δέκτη	154 m ²
Ονομαστική θερμοκρασία υγρού μέσου στον δέκτη	250 C
Όγκος αποθηκευτικού χώρου	70 m ³
Αποθηκευτική δυναμικότητα	3,5 ώρες
Ηλεκτρική Ισχύς	5 MW

3.7. Ο ηλιακός σταθμός SunCan DunHuang

Ο ηλιακός σταθμός SunCan χρησιμοποιεί την τεχνολογία του κεντρικού πύργου και βρίσκεται στην πόλη DunHuang στην Κίνα. Μια όψη του σταθμού φαίνεται στην εικόνα 3.7



Εικόνα 3.7: Ηλιακός σταθμός SunCan

Λειτουργία του σταθμού:

Ο σταθμός αυτός άρχισε να λειτουργεί από τον Δεκέμβριο του 2016.(η κατασκευή του ξεκίνησε το Αύγουστο του 2014). Τα χρήματα για την κατασκευή του ήταν στο ύψος των 420 εκατομμυρίων γιουέν δηλαδή σχεδόν 65,5 εκατομμύρια δολάρια. Στον πρώτο χρόνο λειτουργίας του η ηλεκτροπαραγωγή είναι στα προβλεπόμενα ύψη και μάλιστα είναι ο πρώτος ηλιακός σταθμός κεντρικού πύργου στην Κίνα που επιτυγχάνει ηλεκτρική παραγωγή για συνεχόμενες 24 ώρες έχοντας αποθηκευτική δυναμικότητα 15 ώρες, λαμβάνοντας 5800 τόνους λιωμένου άλατος

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά του σταθμού SunCan [18]

Τοποθεσία του ηλιακού σταθμού	
Γεωγραφικό πλάτος	40°4' 59.0" N
Γεωγραφικό μήκος	94°26' 1.0" E
Ενεργειακά χαρακτηριστικά του σταθμού	
Ηλεκτρική Ισχύς	10 MW
Αποθηκευτική δυναμικότητα	15 ώρες
Χαρακτηριστικά πεδίου ηλιοστατών	
Αριθμός ηλιοστατών	1525
Συνολικό εμβαδό ηλιοστατών	175.375 m ²
Συνολικό εμβαδό γης εγκατάστασης	1.200.000 m ²
Ύψος πύργου	138 m

3.8. Δομικά στοιχεία της εγκατάστασης του ηλιακού πύργου

Τα συστήματα ηλιακού πύργου ισχύος (CRS) αποτελούνται από τα παρακάτω υποσυστήματα:

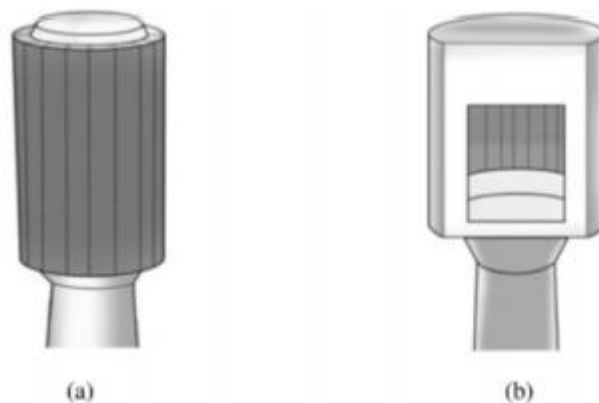
- Το σύστημα συλλεκτών, ή ηλιοστατών που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό διαξονικών μονάδων παρακολούθησης ταξινομημένων σε σειρές
- Τον ηλιακό δέκτη, όπου απορροφάται η συμπυκνωμένη ροή. Είναι το βασικό στοιχείο των εγκαταστάσεων και αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ του ηλιακού πεδίου του συστήματος και του μπλοκ ισχύος. Οι δέκτες είναι κυρίως δύο ειδών: οι εξωτερικοί (σωληνοειδείς και κυλινδρικοί) και οι δέκτες τύπου κοιλότητας. Η επιλογή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας δέκτη είναι ένα πολύπλοκο έργο, καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας, το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και ο θερμοδυναμικός κύκλος επηρεάζουν το σχεδιασμό
- Το σύστημα εναλλάκτη θερμότητας, όπου ένα ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμικής ενέργειας από τον δέκτη στο στρόβιλο -Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, με την οποία εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα κατά τη διάρκεια γεγονότων όπως το πέρασμα σύννεφων και έτσι προσαρμόζεται στις καμπύλες ζήτησης
- Το ορυκτό εφεδρικό καύσιμο για υβριδικά συστήματα για μια πιο σταθερή απόδοση 162
- Το μπλοκ τροφοδοσίας, συμπεριλαμβανομένης της γεννήτριας ατμού και του εναλλάκτη στροβίλου
- Τον κεντρικό έλεγχο, το UPS και τα συστήματα αποβολής θερμότητας Τα εμπορικά CRS χωρίζονται σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με το υλικό μεταφοράς της θερμότητας από τον δέκτη: -Συστήματα τύπου νερού-ατμού (όπως ο σταθμός PS10 στην Ισπανία)
- Συστήματα τύπου λιωμένου αλατιού (πχ Solar Two στην Καλιφόρνια που έχει σαν σκοπό να επιβεβαιώσει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη λιωμένου αλατιού, της αποθήκευσης θερμότητας και τις τεχνολογίες της γεννήτριας ατμού και να βελτιώσει την ακρίβεια των οικονομικών προβλέψεων για τα εμπορικά έργα)
- Συστήματα με ογκομετρικούς ατμοσφαιρικούς δέκτες (πχ PHOEBUS και Solair) καθώς και
- Ηλιακά συστήματα προθέρμανσης (Έργο SOLGATE που δοκιμάστηκε στην Ισπανία).

Κεφάλαιο 4. Σχεδιομελέτη συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος κεντρικού πύργου με εξωτερικούς σωληνωτούς δέκτες

4.1. Σχεδιαστικά Κριτήρια

Κριτήρια σχεδιασμού του δέκτη [22]

Στην εικόνα 4.1.1 φαίνεται το σχήμα ενός εξωτερικού σωληνωτού δέκτη και ενός σωληνωτού δέκτη με κοιλότητα



Εικόνα 4.1.1: Εξωτερικός (α) και δέκτης με κοιλότητα (β)

Falcone 1986

Ο Falcone πρότεινε τα ακόλουθα βήματα για τον σχεδιασμό σωληνωτών δεκτών:

- Υπολογισμός της θερμικής ισχύος του δέκτη βασισμένη στο επίπεδο των απαιτήσεων του συστήματος όπως ο χώρος της εγκατάστασης, τύπος του υγρού μέσου του δέκτη και του αποθηκευτικού μέσου και ο κύκλος ισχύος
- Επιλογή της επιθυμητής ηλιακής ροής βασισμένη στο υλικό των σωλήνων του δέκτη και το εργαζόμενο μέσο
- Υπολογισμός του εμβαδού της απορροφητικής επιφάνειας του δέκτη για δεδομένη ηλιακή ροή
- Σχεδιασμός του δέκτη λαμβάνοντας υπόψη τις θερμικές απώλειες και το πρακτικό μέγεθος του δέκτη. Το ελάχιστο μέγεθος του δέκτη σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από τις απώλειες ροής που επηρεάζονται από το μέγεθος της επιφάνειας των ηλιοστατών. Το μέγιστο μέγεθος του δέκτη περιορίζεται από το ύψος των σωλήνων του δέκτη

Zavoico 2001

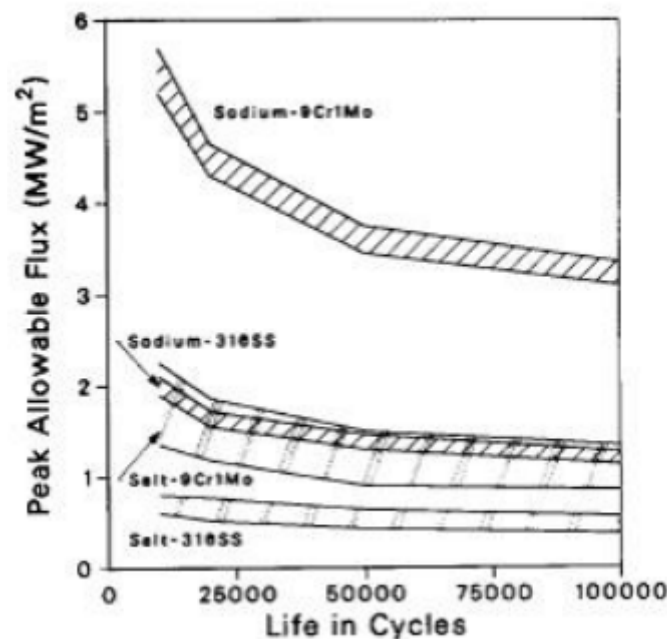
Ο Zavoico πρότεινε τα εξής βήματα για τον σχεδιασμό ενός σωληνωτού δέκτη:

- Επιλογή μεγέθους δέκτη για την μείωση των θερμικών απωλειών (επιλογή aspect ratio)
- Επιλογή μικρής διαμέτρου σωλήνα για την μεγιστοποίηση της θερμικής αποδοτικότητας του δέκτη και την αποφυγή αστοχίας λόγω κόπωσης ή ερπυσμού (Επιλογή διαμέτρου σωλήνων)

- Επιλογή πάχους των σωλήνων για την βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης
- Ελαχιστοποίηση της απώλειας πίεσης με την βελτιστοποίηση του αριθμού των πάνελ (αριθμός πάνελ και δρομολόγηση του λιωμένου άλατος)
- Επιλογή υλικού από κράμα υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο με άριστες μηχανικές ιδιότητες

Επιτρεπτό όριο ηλιακής ροής [22]

Ένα επιτρεπτό εύρος ηλιακής ροής για διάφορα υγρά μέσα των δεκτών φαίνεται στον πίνακα 4.1. Εξαρτάται από το υλικό των σωλήνων. Στην εικόνα 4.1.2 φαίνεται η εξάρτηση της επιτρεπτής ηλιακής ροής σε σχέση με τον χρόνο (σε κύκλους) του δέκτη για διάφορα υλικά σωληνώσεων και υγρά μέσα. Με ένα κύκλο την ημέρα για 30 χρόνια δέκτη θα έχουμε 11000 κύκλους. Επίσης κάποιος πρέπει να λαμβάνει υπόψη του μεταβολές λόγω καιρικών συνθηκών. Εναλλακτικά η επιτρεπτή ηλιακή ροή μπορεί να προσδιοριστεί με βάση ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί την επιτρεπτή θερμική καταπόνηση, την θερμική διαστολή και τον λόγο Poisson του υλικού. Η επιτρεπτή ηλιακή ροή μπορεί να υπολογιστεί από τον λόγο της μέγιστης προς την μέση τιμή της. Σύμφωνα με τους Stine και Harrigan ο λόγος της μέγιστης προς την μέση τιμή της ηλιακής ροής λαμβάνει τιμές 2 έως 3



Εικόνα 4.1.2: Επιτρεπόμενη ηλιακή ροή σε σχέση με την διάρκεια ζωής

Πίνακας 4.1: Εύρος ηλιακής ροής για διάφορα υγρά μέσα των δεκτών

Name of the HTF	Flux limit range	Unit
Water/Steam	0.3 to 0.6	MW/m ²
Molten Salt	0.6 to 1.2	MW/m ²
Liquid Sodium	1.2 to 1.75	MW/m ²

Μέγεθος του δέκτη [22]

Η θερμική ισχύς του δέκτη πρέπει να εκτιμηθεί. Έπειτα η επιτρεπτή μέση ηλιακή ροή πρέπει να εκτιμηθεί βασιζόμενη στο υγρό μέσο και στο υλικό του δέκτη, έτσι ώστε να υπολογιστεί το εμβαδό του δέκτη για την συγκεκριμένη ηλιακή ροή. Η επιλογή της μέγιστης ηλιακής ροής πρέπει να γίνει με προσοχή έτσι ώστε να αποφευχθούν θερμικές καταπονήσεις και αστοχία λόγω κόπωσης ή ερπυσμού. Γενικά το μισό ή το ένα τρίτο της μέγιστης τιμής της ηλιακής ροής επιλέγεται ως μέση τιμή της ηλιακής ροής. Ο δέκτης σχεδιάζεται για την μέση τιμή της ηλιακής ροής έτσι ώστε να βεβαιωθούμε ότι δεν θα αποτύχει.

Για του δέκτες με κοιλότητα οι εσωτερικές επιφάνειες εκτίθενται σε ακτινοβολία από επαναντανάκλαση λόγω της κλειστής κατασκευής, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση. Σύμφωνα με τον Falcone το μέγεθος του δέκτη, για δέκτη με κοιλότητα, είναι 25% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του εξωτερικού δέκτη για την ίδια θερμική ισχύ.

Γεωμετρική αναλογία του δέκτη [22]

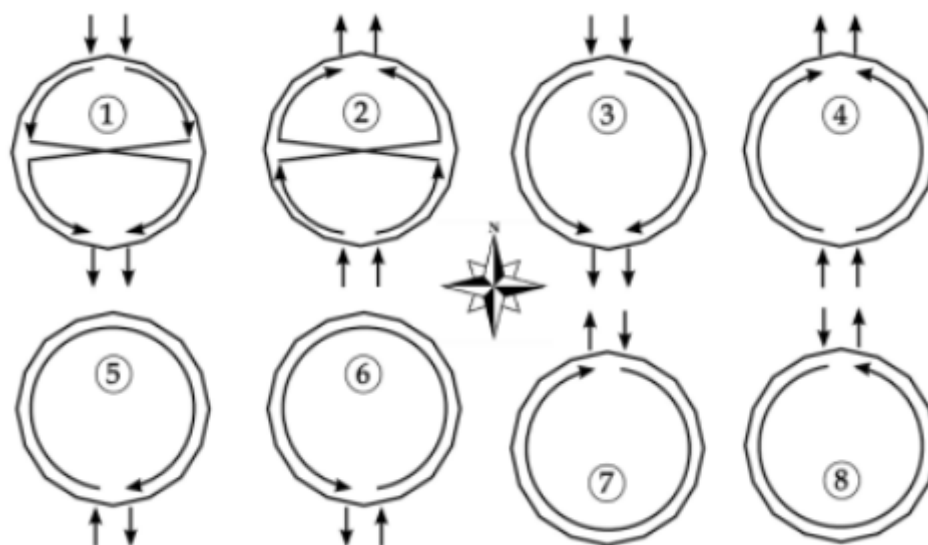
Η γεωμετρική αναλογία του δέκτη Aspect Ratio είναι ο λόγος του ύψους του δέκτη προς την διάμετρό του. Σύμφωνα με τον Falcone ο λόγος αυτός πρέπει να είναι από 1 έως 2. Θα πρέπει να επιλέγεται με βάση τις θερμικές απώλειες και τις απώλειες διαρροής. Σύμφωνα με τον Zanoico ο λόγος αυτός πρέπει να είναι στο όριο 1,2 έως 1,5 και πρέπει να επιλέγεται για μέγιστη αποδοτικότητα του δέκτη. Για τους δέκτες με κοιλότητα επιλέγεται συνήθως στο όριο 0,7 έως 1.

Επιλογή διαμέτρου σωλήνων [22]

Η διάμετρος του σωλήνα του δέκτη μπορεί να ποικίλει στο όριο 20 mm έως 45mm. Το υλικό των σωλήνων είναι συνήθως ανοξείδωτο ατσάλι. Σύμφωνα με την ανάλυση του Lata έχουμε:

- Οι μικρές διαμέτροι αυξάνουν την αποδοτικότητα του δέκτη λόγω της αύξησης της ταχύτητας του άλατος και του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Όμως εξίσου αυξάνουν το βιομηχανικό κόστος και την πτώση πίεσης. Η πτώση πίεσης είναι ανάλογη του μήκους του κυκλώματος του άλατος και του τετραγώνου της ταχύτητας άλατος και είναι αντιστρόφως ανάλογο της διαμέτρου του σωλήνα του δέκτη. Επομένως για την βελτιστοποίηση του δέκτη πρέπει να βρεθεί η χρυσή τομή μεταξύ της πτώσης πίεσης και της αποδοτικότητας του δέκτη.
- Τα λεπτά τοιχώματα των σωλήνων αυξάνουν τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας λόγω της μείωσης της αντίστασης συναγωγής στους σωλήνες. Επί του πρακτέου το πάχος των σωλήνων έχει τυποποιημένες τιμές.

Επιλογή διαδρομής του υγρού μέσου [22]



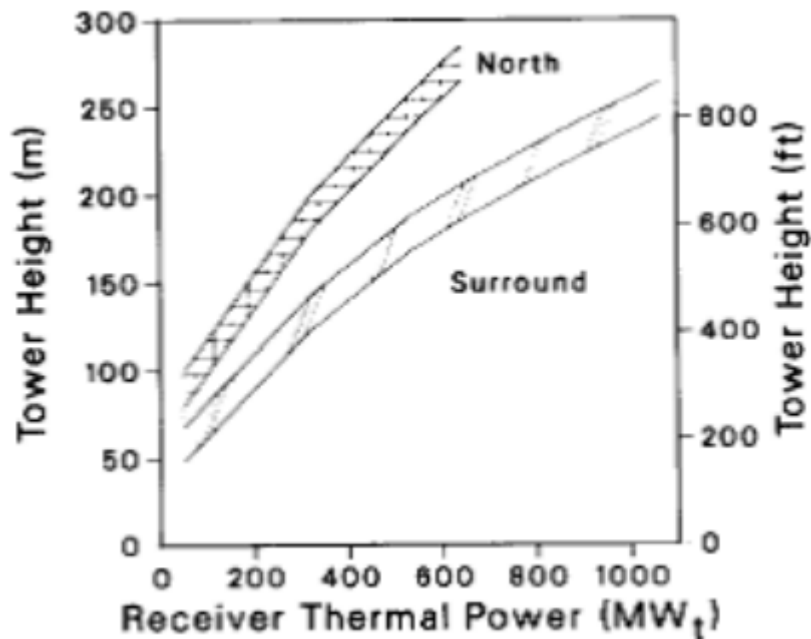
Εικόνα 4.1.3: Διάφορες διαδρομές του υγρού μέσου στο δέκτη

Η διαδρομή του υγρού μέσου επιλέγεται έτσι ώστε να κατανέμεται η μέγιστη τιμή της ηλιακής ροής ομοιόμορφα στον δέκτη. Η διαδρομή του υγρού έχει επιρροή στην πτώση πίεσης. Σύμφωνα με τον Falcone η προς τα πάνω ροή του υγρού είναι προτιμητέα έτσι ώστε η δύναμη άνωσης του υγρού να μην εξουδετερώνεται με την πίεση άντλησης. Το λιωμένο άλας έχει μεγάλη ογκομετρική χωρητικότητα που έχει ως αποτέλεσμα μικρή παροχή όγκου για δεδομένη ισχύ. Επομένως για δέκτες με λιωμένο άλας χρειάζονται πολλαπλές εισροές υγρού μέσου έτσι ώστε να επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες και υψηλοί συντελεστές μετάδοσης θερμότητας στα τοιχώματα των σωλήνων. Είναι δύσκολο να επιτευχθεί η ροή προς τα πάνω. Επομένως η ροή σερπαντίνας (πάνω και κάτω) είναι μια εναλλακτική διάταξη. Ο Wagner ανέπτυξε ένα μοντέλο για τον δέκτη και μελέτησε οκτώ πιθανούς τρόπους ροής του υγρού μέσου του δέκτη που φαίνονται στην εικόνα. Σύμφωνα με το Wagner έχουμε:

- Η μονή ροή του υγρού μέσου έχει υψηλή πτώση πίεσης, που αυξάνει την παρασιτική ισχύ άντλησης. Επομένως δυο παράλληλες ροές στον δέκτη είναι επιθυμητές για την επίτευξη μεγαλύτερης αποδοτικότητας
- Στο Βόρειο Ημισφαίριο, στο βόρειο τμήμα του δέκτη θα ληφθεί υψηλή ηλιακή ροή λόγω της θέσης του ηλίου τις ώρες αιχμής. Αν ψυχρό υγρό εισέλθει μέσα από τα υψηλής ηλιακής ροής πάνελ, θα έχει ως αποτέλεσμα υψηλές θερμικές απώλειες. Επομένως η ροή από τον νότο προς το βορά δίνει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα για το βόρειο ημισφαίριο. Όμως σε αυτή την διάταξη το καυτό υγρό από την νότια πλευρά δεν θα μπορεί να ψύξει τα υψηλής ηλιακής ροής πάνελ της βόρειας πλευράς κατά τις ώρες αιχμής. Επομένως τα πάνελ της βόρειας πλευράς εκτίθενται σε υψηλές θερμικές καταπονήσεις που δεν συνιστανται. Επομένως στο Βόρειο Ημισφαίριο συνιστάται η ροή από την βόρεια προς την νότια πλευρά με δυο παράλληλες ροές με ή χωρίς διαχωρισμό.

Μέγεθος πύργου [22]

Το ύψος του πύργου εξαρτάται κυρίως από την θερμική ισχύ του δέκτη. Επίσης εξαρτάται από την μορφή του πεδίου των ηλιοστατών. Ο Falcone κατασκεύασε ένα γράφημα που δείχνει την διακύμανση του ύψους του πύργου για μια δεδομένη θερμική ισχύ του δέκτη και μορφής πεδίου ηλιοστατών και φαίνεται στην εικόνα. Οι πύργοι μπορούν να κατασκευαστούν από ατσάλι ή από σκυρόδεμα. Στην εικόνα 4.1.3 φαίνονται τόσο πύργος από ατσάλι όσο και από σκυρόδεμα



Εικόνα 4.1.4: Ύψος του πύργου σε σχέση με την θερμική ισχύ του δέκτη

4.2. Σύγκριση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων

Βασικές παράμετροι για την σύγκριση ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων είναι:

- Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή
- Συντελεστής δυναμικότητας
- Έκταση γης που απαιτείται
- Ποσότητα νερού που απαιτείται

Ετήσια ενεργειακή παραγωγή

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα μπορεί να υπολογιστεί ως: [20]

$$E_{\text{annual}} = A \times \text{DNI}_{\text{annual}} \times \text{N}_{\text{annual}}$$

Όπου:

E_{annual} η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε MWh/έτος

N_{annual} είναι η ετήσια αποδοτικότητα μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια

$\text{DNI}_{\text{annual}}$ είναι η ετήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε MWh/ m² έτος

A είναι το εμβαδό των συγκεντρωτών ηλιακής ενέργειας στο ηλιακό πεδίο

Η ετήσια αποδοτικότητα μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ο λόγος της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει στο δέκτη προς την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποδοτικότητα για διάφορες τεχνολογίες φαίνεται στο πίνακα 4.1:

Πίνακας 4.1: Βαθμός απόδοσης διάφορων εγκαταστάσεων

Τεχνολογία	Nannual
Παραβολικός συγκεντρωτής	15%
Ηλιακός πύργος	17-35%
Γραμμικοί ανακλαστήρες Fresnel	8-11%
Ηλιακά πιάτα	25-30%

Συντελεστής δυναμικότητας

Ο συντελεστής δυναμικότητας για έναν ηλιακό σταθμό είναι ο λόγος της πραγματικής ενέργειας που παράχθηκε σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο προς την μέγιστη δυνατή που θα μπορούσε να παραχθεί αυτή την χρονική περίοδο.

Επομένως ο συντελεστής δυναμικότητας βρίσκεται από τον τύπο: [20]

$$AnnualCF = \frac{\text{actual energy generated (MWh)}}{365days \times 24hours \times \text{nominal power output(MW)}}$$

Ο ετήσιος συντελεστής δυναμικότητας για διάφορες τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων φαίνεται στον πίνακα 4.2. Όλα τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα έχουν μεγαλύτερο συντελεστή δυναμικότητας όταν έχουν και ενεργειακή αποθήκευση.

Πίνακας 4.2: Ετήσιος συντελεστής δυναμικότητας για διάφορες τεχνολογίες

Τεχνολογία	Συντελεστής δυναμικότητας
Παραβολικοί συγκεντρωτές χωρίς ενεργειακή αποθήκευση	25%
Παραβολικοί συγκεντρωτές με ενεργειακή αποθήκευση	Μεγαλύτερο από 40%
Ηλιακός πύργος	Περίπου 25%
Γραμμικός ανακλαστήρας Fresnel	Περίπου 17%
Ηλιακά πιάτα	50%

Απαιτούμενη έκταση γης [20]

Το πεδίο των συγκεντρωτών καταλαμβάνει τον περισσότερο χώρο στην ηλιακή εγκατάσταση. Ένα μικρό κενό χώρου μεταξύ των συγκεντρωτών είναι απαραίτητο έτσι ώστε να εξαλείφει ή να μειώνει τις απώλειες λόγο σκίασης του ενός συγκεντρωτή από τον άλλο. Η απαιτούμενη γη μπορεί να εκφραστεί είτε ως ο λόγος του εμβαδού των συγκεντρωτών προς το συνολικό εμβαδό της εγκατάστασης είτε ως ο λόγος του συνολικού εμβαδού της εγκατάστασης προς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Δηλαδή έχουμε: [20]

$$\text{Land use efficiency} = \frac{\text{collector area, m}^2}{\text{total plant area, m}^2}$$

Or

$$\text{Land use efficiency, ha/MW} = \frac{\text{total plant area, ha}}{\text{output power, MW}}$$

Πίνακας 4.3: Εύρος τιμών για την απαιτούμενη έκταση γης για διάφορες τεχνολογίες

Τεχνολογία	Πρώτος ορισμός (m ² /m ²)	Δεύτερος ορισμός (εκτάρια/MW)
Παραβολικοί συγκεντρωτές	0,26	3,9
Ηλιακός πύργος	0,12-0,22	5,4
Γραμμικός ανακλαστήρας Fresnel	0,62	0,8-1
Ηλιακά πιάτα	0,36-0,48	1,2-1,6

Απαιτούμενη ποσότητα νερού [20]

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα απαιτούν μεγάλη ποσότητα νερού για την ψύξη τους. Όσο μικρότερη είναι η αποδοτικότητα του συστήματος τόσο περισσότερη ποσότητα νερού χρειάζεται λόγω των μεγαλύτερων θερμικών απωλειών. Στον πίνακα 4.4 βλέπουμε την ποσότητα νερού που απαιτείται για την ψύξη συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων διάφορων τεχνολογιών. Βλέπουμε ότι η ποσότητα νερού για την ψύξη ενός σταθμού με συμβατική καύσιμα είναι μικρότερη από τους σταθμούς με συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα. Αυτό είναι λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητάς του. Τα ηλιακά πιάτα δεν χρειάζονται νερό για ψύξη καθώς η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται απευθείας στην κατασκευή και οι απώλειες απλώς διαχέονται στον περιβάλλοντα αέρα.

Πίνακας 4.4: Απαιτούμενη ποσότητα νερού για διάφορες τεχνολογίες

Τεχνολογία	Ποσότητα νερού (litre/MWh)
Σταθμός με συμβατικά καύσιμα	800
Παραβολικοί συγκεντρωτές	3000
Ηλιακός Πύργος	2000
Γραμμικοί ανακλαστήρες Fresnel	3000
Ηλιακά πιάτα	80*

*Η ποσότητα αυτή είναι μόνο για τον καθαρισμό. Δεν απαιτείται νερό για ψύξη στα ηλιακά πιάτα.

4.3. Υπολογισμός παραμέτρων

Θερμική Ισχύς Δέκτη [22]

Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος του δέκτη από το ηλιακό πεδίο. Για αυτό τον σκοπό υπολογίζεται η απαιτούμενη θερμική ισχύς για τον δέκτη και υποθέτουμε μια τιμή για τον θερμικό βαθμό απόδοσης του δέκτη. Επομένως η θερμική ισχύς του δέκτη είναι:

$$\dot{Q}_{th,rec} = \frac{\dot{Q}_{th,pb}}{\eta_{rec,guess}} \cdot SM$$

Όπου:

$\dot{Q}_{th,pb}$ είναι η θερμική ισχύς που απαιτείται για την εγκατάσταση

$\eta_{rec,guess}$ είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης του δέκτη

SM = Solar Multiple (συνήθως λαμβάνεται ίσο με την μονάδα)

Υπολογισμός των ιδιοτήτων του υγρού μέσου του δέκτη [22]

Οι ιδιότητες του υγρού μέσου παίζουν καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό του δέκτη. Οι ιδιότητες που χρειάζονται είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμική χωρητικότητα, το δυναμικό ιξώδες και η θερμική αγωγιμότητα. Συνήθως το υγρό μέσο είναι το λιωμένο άλας. Οι σχέσεις υπολογισμού των ιδιοτήτων του είναι:

Property	Equation	Units
Density	$\rho = 2090 - (0.636 \cdot T_{mean,htf})$	kg/m ³
Specific heat capacity	$C_p = 1443 + 0.172 \cdot T_{mean,htf}$	J/kgK
Dynamic viscosity	$\mu = (22.714 - (0.120 \cdot T_{mean,htf}) + (2.281 \times 10^{-4} \cdot T_{mean,htf}^2) - (1.474 \times 10^{-7} \cdot T_{mean,htf}^3))/10^3$	Pa s
Thermal conductivity	$k = 0.443 + 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot T_{mean,htf}$	W/m K

$T_{mean,htf}$ is the mean fluid temperature, °C

Μέγεθος του δέκτη [22]

Το μέγεθος του δέκτη επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη την επιτρεπόμενη ηλιακή ροή στο δέκτη. Η επιτρεπόμενη ηλιακή ροή εξαρτάται από το υλικό του δέκτη και από το υγρό μέσο. Γενικά η μέγιστη επιτρεπόμενη ηλιακή ροή για το λιωμένο άλας για δέκτες από ανοξείδωτο ατσάλι είναι 0.83 MW/m². Για δέκτες από Incoloy 800H είναι 1 MW/m².

Η μέση επιτρεπόμενη ηλιακή ροή μπορεί να υπολογιστεί από τον λόγο της μέγιστης προς της μέσης ηλιακής ροής. Ο Falcone χρησιμοποίησε την τιμή 1,78 για εξωτερικούς δέκτες και την 2,65 για τους δέκτες με κοιλότητα. Χρησιμοποιώντας την μέση επιτρεπόμενη ηλιακή ροή η απορροφητική επιφάνεια του δέκτη μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$A_{rec} = \frac{\dot{Q}_{th,rec}}{q_{avg,flux}}$$

Όπου:

$q_{avg,flux}$ είναι η επιτρεπόμενη μέση ηλιακή ροή του δέκτη, W/m²

$Q_{th,rec}$ είναι η θερμική ισχύς του δέκτη, W

Υπολογισμός επιφανειακής θερμοκρασίας δέκτη [22]

Δεχόμαστε την παραδοχή ότι ο δέκτης έχει ομοιόμορφα κατανομημένο πεδίο θερμοκρασίας στην επιφάνειά του. Η μετάδοση θερμότητας μέσα από τα τοιχώματα του σωλήνα υπολογίζεται. Οι υπολογισμοί λαμβάνουν υπόψη την μετάδοση θερμότητας με αγωγή στο πάχος του τοιχώματος του δέκτη και έπειτα με συναγωγή στο ρευστό του δέκτη. Η θερμοκρασία του δέκτη υπολογίζεται ως:

$$T_{s,avg} = \dot{Q}_{fluid} \cdot (R_{cond} + R_{conv}) + T_{htf,avg}$$

$T_{htf,avg}$ είναι η μέση θερμοκρασία του δέκτη, K. Η αντίσταση λόγω αγωγής στο τοίχωμα του σωλήνα του δέκτη δίνεται από τον τύπο:

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_{o,tube}/r_{i,tube})}{2 \cdot \pi \cdot H_{rec} \cdot k_{tube} \cdot n_{tube}}$$

Όπου :

$r_{o,tube}$ είναι η ακτίνα του εξωτερικού σωλήνα

$r_{i,tube}$ είναι η ακτίνα του εσωτερικού σωλήνα

n_{tube} είναι ο συνολικός αριθμός των σωλήνων στον δέκτη

Η αντίσταση λόγω συναγωγής μεταξύ του σωλήνα και του υγρού του σωλήνα είναι :

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{inner} \cdot \pi \cdot r_{i,tube} \cdot H_{rec} \cdot n_{tube}}$$

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας για εσωτερική συναγωγή μεταξύ ενός τοιχώματος και ενός ρευστού δίνεται από τον τύπο :

$$h_{inner} = Nu \cdot k_{fluid}/L_c$$

Όπου

L_c είναι το χαρακτηριστικό μήκος που είναι η διάμετρος του εσωτερικού σωλήνα του δέκτη $d_{i,tube}$.

Ο αριθμός Nusselt βρίσκεται από τον τύπο:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$$

για $0.7 < Pr < 120$ και $10^4 < Re < 1.2 \times 10^5$

Υπολογισμός ροής μάζας του υγρού μέσου [22]

Η ροή μάζας του υγρού του δέκτη υπολογίζεται με την απορροφούμενη θερμική ισχύ από τον δέκτη. Το μικρότερο όριο της ροής μάζας δίνεται από την παραδοχή ότι η ροή πρέπει να είναι τυρβώδης. Επομένως ο αριθμός Re πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος από 4000. Η ροή μάζας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\dot{m}_{htf} = \frac{\dot{Q}_{inc,rec} \cdot \eta_{rec}}{c_{p,htf,avg} \cdot (T_{htf,hot} - T_{htf,cold})}$$

Όπου:

η_{rec} - είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης του δέκτη

$c_{p,htf,avg}$ -είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού μέσου, J/kg K

$T_{htf,hot}$ - είναι η θερμοκρασία εξόδου του καυτού υγρού μέσου, K

$T_{htf,cold}$ - είναι η θερμοκρασία εισόδου του κρύου υγρού μέσου, K

Υπολογισμός πτώσης πίεσης και ισχύος άντλησης

Η πτώση πίεσης στο σωλήνα του δέκτη δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Delta P_{tube} = \rho_{fluid} \cdot f \cdot \frac{H_{rec}}{D_{tube,inner}} \cdot \frac{v_{fluid}^2}{2}$$

με $f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2}$ για λείους σωλήνες με $10000 < Re < 1.000.000$

v_{fluid} - είναι η ταχύτητα του υγρού μέσου του δέκτη, m/s

Η πτώση πίεσης λόγω άντλησης του υγρού μέσου στο δέκτη είναι:

$$\Delta P_{tower} = \rho_{fluid} \cdot g \cdot H_{tower}$$

H_{tower} – είναι το ύψος του πύργου, m

Η καθαρή πτώση πίεσης είναι:

$$\Delta P_{net} = \Delta P_{tube} \cdot \frac{n_{panels}}{n_{flowpath}} + \Delta P_{tower}$$

n_{panels} – είναι ο αριθμός των πάνελς στο δέκτη

$n_{flowpath}$ – είναι ο αριθμός των δρομολογίων της ροής στον δέκτη

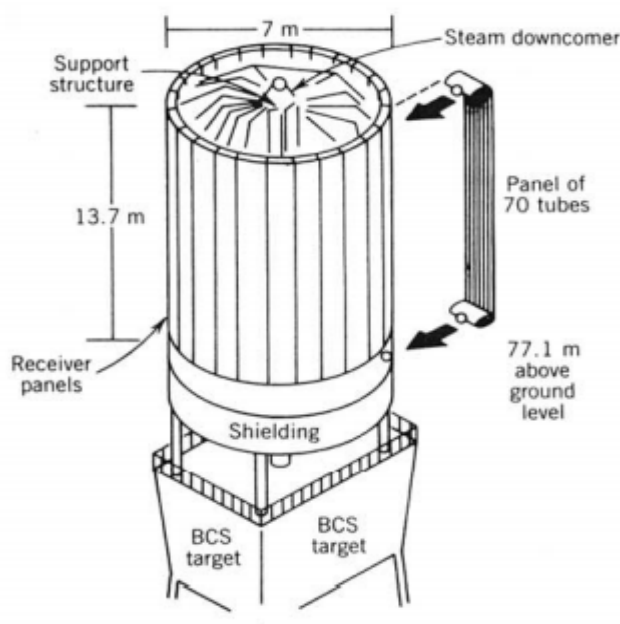
Η ισχύς που απαιτείται για την άντληση του υγρού μέσου μέσα από τον δέκτη είναι :

$$\dot{Q}_{pump} = \frac{\Delta P_{net} \cdot \frac{\dot{m}_{htf}}{\rho_{fluid}}}{\eta_{pump}}$$

η_{pump} – είναι η αποδοτικότητα άντλησης

Σχεδιασμός εξωτερικού σωληνωτού δέκτη [22]

Στην εικόνα 4.3.1 φαίνεται η μορφή ενός εξωτερικού δέκτη.



Εικόνα 4.3.1: Σκαρίφημα εξωτερικού σωληνωτού δέκτη

Για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του δέκτη η παράμετρος που λαμβάνεται είναι ο λόγος ύψους προς διάμετρο Aspect Ratio. Στους εξωτερικούς δέκτες η τιμή του Aspect Ratio βρίσκεται στο όριο από 1 έως 2. Το εμβαδό του δέκτη μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$A_{rec} = \pi \cdot D_{rec} \cdot H_{rec} \cdot \pi/2$$

Σχεδιασμός σωλήνων και πάνελ [22]

Η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα, το πάχος του σωλήνα και ο αριθμός των δρομολογίων του υγρού μέσου στον σωλήνα πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε να γίνει η σχεδίαση του σωλήνα και των πάνελ του δέκτη. Η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα κυμαίνεται στις τιμές 20 mm έως 45 mm. Η διατομή του σωλήνα πρέπει να είναι

τέτοια ώστε η ταχύτητα του υγρού μέσου να είναι στα επιτρεπτά όρια. Η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα βρίσκεται από τον τύπο:

$$d_{o,tube} = (0.2682 \times 10^{-4} \cdot \dot{Q}_{th,rec}) + 0.02268$$

Το πάχος του σωλήνα εξαρτάται από την πίεση που ασκεί το υγρό μέσο στα τοιχώματα του σωλήνα. Για την περίπτωση του λιωμένου άλατος το πάχος του σωλήνα μπορεί να επιλεγεί 1mm.

Ο συνολικός αριθμός των σωλήνων του δέκτη δίνεται από τον τύπο:

$$n_{tube,rec} = \frac{\pi \cdot D_{rec}}{d_{o,tube}}$$

Ο αριθμός των σωλήνων ανά πάνελ βρίσκεται από τον τύπο:

$$n_{tube,panel} = \frac{A_{sec}}{\pi \cdot (d_{i,tube}/2)^2 \cdot n_{flowpath}}$$

Το εμβαδό διατομής της διαδρομής του υγρού μέσου δίνεται από τον τύπο:

$$A_{sec} = \frac{\dot{m}_{htf}}{\rho_{fluid} \cdot v_{fluid}}$$

Αφού υπολογιστεί ο αριθμός των σωλήνων ανά πάνελ, ο συνολικός αριθμός των πάνελ είναι:

$$n_{panels} = \frac{n_{tube,rec}}{n_{tube,panel}}$$

Στο σχεδιασμό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι ο αριθμός των πάνελ πρέπει να είναι άρτιος αριθμός, αν ο αριθμός των δρομολογίων του υγρού μέσου είναι άρτιος αριθμός.

Σχεδιασμός ύψους πύργου [22]

Σύμφωνα με τον Falcone ο υπολογισμός του ύψους του πύργου βρίσκεται από τον τύπο:

$$H_{tower,min} = 36.30075 + (0.3013896 \cdot \dot{Q}_{th,rec}) - (0.1004369 \times 10^{-3} \cdot \dot{Q}_{th,rec}^2)$$

$$H_{tower,max} = 54.91579 + (0.3070526 \cdot \dot{Q}_{th,rec}) - (0.1039793 \times 10^{-3} \cdot \dot{Q}_{th,rec}^2)$$

$$H_{tower} = \frac{H_{tower,min} + H_{tower,max}}{2}$$

4.4. Υπολογισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης

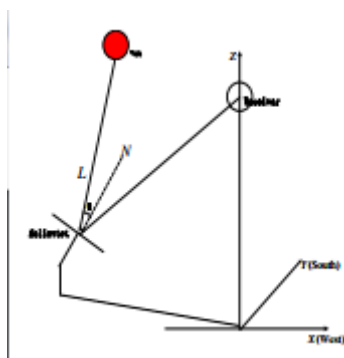
Υπολογισμός βαθμού απόδοσης από το πεδίο των ηλιοστατών:

Ο βαθμός απόδοσης είναι το γινόμενο των βαθμών αποδόσεων λόγω των απωλειών: συνημίτονου η_{\cos} , της ατμοσφαιρικής εξασθένησης η_{atm} , της αντανάκλαστικότητας των ηλιοστατών η_{ref} , των απωλειών σκίασης η_{sb} και των απωλειών διαρροής $\eta_{spillage}$. Επομένως ο βαθμός απόδοσης του πεδίου των ηλιοστατών δίνεται από τον τύπο:

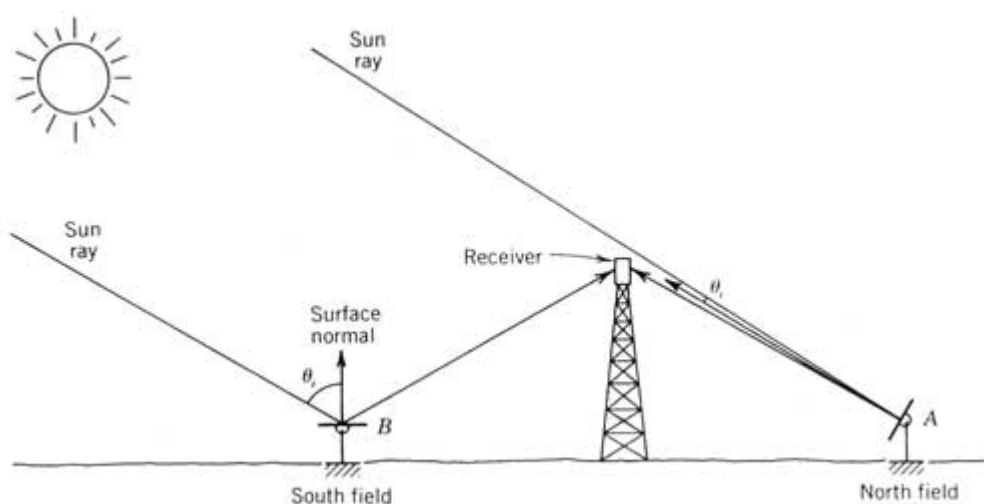
$$\eta = \eta_{\cos} \times \eta_{atm} \times \eta_{ref} \times \eta_{sb} \times \eta_{spillage} .$$

Απώλειες συνημίτονου:

Είναι οι απώλειες λόγω της γωνίας θ της ακτίνας του ηλίου και της καθέτου στην επιφάνεια των ηλιοστατών όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4.1 και 4.4.2. $\eta_{\cos} = \cos\theta$



Εικόνα 4.4.1: απώλειες συνημίτονου



Εικόνα 4.4.2: απώλειες συνημίτονου

Τυπικές τιμές αυτών των απωλειών βρίσκονται στο εύρος 0,8-0,9

Απώλειες ατμοσφαιρικής εξασθένησης:

Κατά την διαδρομή από τον ηλιοστάτη στον δέκτη οι ηλιακές ακτίνες εξασθενούνται ανάλογα με την απόσταση από τον δέκτη και από τις συνθήκες και την σύσταση της ατμόσφαιρας.

Αυτές οι απώλειες μπορούν να υπολογιστούν από τον τύπο:

$$\eta_{\text{atm}} = \begin{cases} 0.99321 - 0.0001176 \times \text{dist} + 1.97 \times 10^{-8} \times \text{dist}^2 & \text{dist} \leq 1000\text{m} \\ \exp(-0.0001106 \times \text{dist}) & \text{dist} > 1000\text{m} \end{cases}$$

Όπου dist είναι η απόσταση του κάθε ηλιοστάτη από τον δέκτη.

Απώλειες αντανάκλαστικότητας επιφανειών των ηλιοστατών:

Αυτές οι απώλειες εξαρτώνται από την ποιότητα της επιφάνειας των ηλιοστατών. Τυπικές τιμές βρίσκονται στο εύρος 0,7-0,9

Απώλειες σκίασης:

Αυτές οι απώλειες οφείλονται στην σκίαση μέρους της επιφάνειας κάποιου ηλιοστάτη από κάποιον άλλο κατά την διάρκεια της μέρας. Υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\eta_{\text{shd}} = 1 - \frac{\text{Shaded surface}}{\text{heliostat surface}}$$

Τυπικές τιμές βρίσκονται στο εύρος 0,9-0,95

Απώλειες διαρροής:

Αυτές οι απώλειες γίνονται όταν μέρος της ανακλώμενης ακτινοβολίας δεν χτυπάει στον δέκτη. Η τιμή τους μπορεί να θεωρηθεί 0,99

Πέρα από τις απώλειες του πεδίου των ηλιοστατών έχουμε και τις απώλειες στα υπόλοιπα δομικά στοιχεία της εγκατάστασης. Οι απώλειες στον δέκτη είναι ο λόγος της απορροφημένης ενέργειας από το υγρό μέσο του δέκτη (συνήθως λιωμένο άλας) προς την συνολική ενέργεια στον δέκτη από το πεδίο των ηλιοστατών. Μπορεί να θεωρηθεί ίση με 0,9.

Οι απώλειες μετάδοσης θερμότητας. Αυτές οι απώλειες είναι ο λόγος της απορροφούμενης ενέργειας του εργαζόμενου μέσου (νερό) από το υγρό μέσο του δέκτη (λιωμένο άλας). Μπορεί να θεωρηθεί 0,9.

Οι απώλειες θερμικής αποθήκευσης είναι ο λόγος της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται προς την συνολική αρχική ενέργεια στο σύστημα αποθήκευσης. Μπορεί να θεωρηθεί 0,95

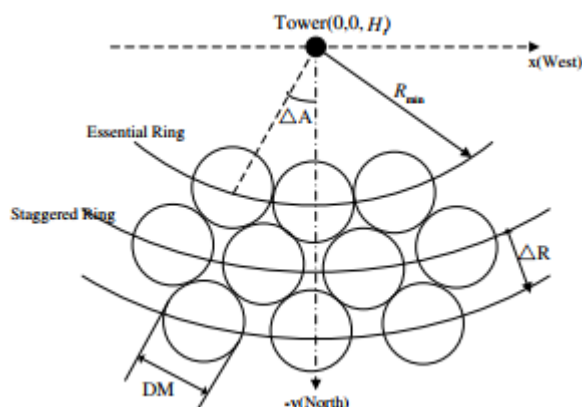
Οι απώλειες της εγκατάστασης ισχύος είναι οι απώλειες από διάφορα στοιχεία που υπάρχουν στο σύστημα παραγωγής ισχύος (στρόβιλος, συμπυκνωτής κα). Μπορούν να υπολογιστούν από τον τύπο:

$$\eta_{pb} = 0.441 - 0.262 \times e^{-0.06 \times P_{cap,d}} \quad \text{for } 0 \leq P_{cap,d} < 50$$
$$\eta_{pb} = 0.44 \quad \text{for } P_{cap,d} \geq 50$$

Όπου $P_{cap,d}$ είναι η επιθυμητή δυναμικότητα της εγκατάστασης σε MW.

4.5. Σχεδιομελέτη της τοποθέτησης των ηλιοστατών στο πεδίο

Τα περισσότερα πεδία των ηλιοστατών σχεδιάζονται με την μορφή κυκλικής εναλλαγής, με σκοπό να υπάρχει ελεύθερη κίνηση των ηλιοστατών για την παρακολούθηση του ηλίου και κάθε ηλιοστάτης που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο άλλους ηλιοστάτες της μπροστινής ακτινικής απόστασης από τον πύργο να ελαχιστοποιεί τις απώλειες μπλοκαρίσματος. Όλα τα μοντέλα βελτιστοποίησης γίνονται πάνω σε αυτή την μορφή τοποθέτησης. Η γενική της μορφή φαίνεται στην εικόνα 4.6.1



Εικόνα 4.6.1: Τοποθέτηση των ηλιοστατών με κυκλική εναλλαγή

Η βασική ιδέα είναι η τοποθέτηση σε ομόκεντρους κύκλους όπου στον έναν κύκλο τοποθετούνται οι ηλιοστάτες στον βόρειο άξονα (ο άξονας με διακεκομμένη στο σχήμα 4.6.1) ενώ στον επόμενο κύκλο δεν υπάρχει ηλιοστάτης στον βόρειο άξονα.

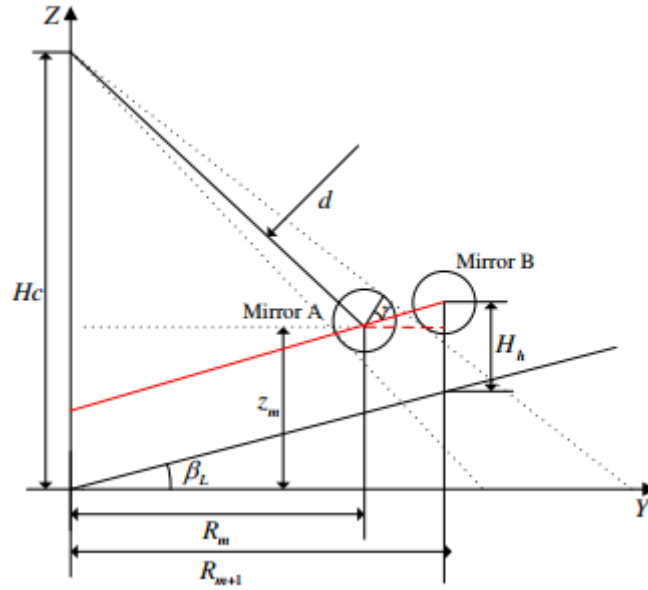
Η απόσταση του πρώτου κύκλου για την τοποθέτηση των ηλιοστατών επιλέγεται ίση με το ύψος του πύργου.

Η μέγιστη και η ελάχιστη απόσταση του ενός κύκλου από τον άλλο:

Η ελάχιστη απόσταση του ενός κύκλου από τον άλλο πρέπει να εγγυάται ότι δεν θα υπάρχει σύγκρουση μεταξύ δύο ηλιοστατών. Οπότε βρίσκεται από την σχέση:

$$\Delta R_{min} = R_{m+1,min} - R_m = DM \times \cos 30^\circ \times \cos \beta_L$$

Όπου β_L είναι η κλίση του πεδίου στο οποίο βρισκόμαστε. (για επίπεδη γη είναι μηδεν). Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των δυο κύκλων ορίζεται από το γεγονός ότι δεν υπάρχει καμία απώλεια από μπλοκάρισμα μεταξύ των δύο ηλιοστατών. Στην εικόνα 4.6.2 φαίνεται η τοποθέτηση δύο σειρών ηλιοστατών ως προς τον δέκτη.



Εικόνα 4.6.2: Τοποθέτηση δυο σειρών ηλιοστατών ως προς τον δέκτη

Οι υπολογισμοί είναι οι ακόλουθοι:

$$z_m = R_m \tan \beta_L + H_h$$

$$d = \sqrt{R_m^2 + (H_c - z_m)^2}$$

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{DM}{2d}\right) + \arcsin\left(\frac{R_m}{d}\right) - \beta_L$$

$$\Delta R_{max} = R_{m+1,max} - R_m = DM \cos \beta_L / \cos \gamma$$

Όπου H_h είναι το ύψος του ηλιοστάτη και H_c είναι το ύψος στο οποίο βρίσκεται ο δέκτης. DM είναι η διάμετρος του κάθε ηλιοστάτη και d η απόστασή τους από το δέκτη. R_m η ακτινική απόσταση της σειράς από τον πύργο και R_{m+1} η ακτινική απόσταση της επόμενης σειράς από τον πύργο. Επομένως το R_{m+1} μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$R_{m+1} = R_m + \Delta R_{min} + R_{coef}(\Delta R_{max} - \Delta R_{min})$$

Όπου R_{coef} είναι ο συντελεστής βελτιστοποίησης που παίρνει τιμή από 0 έως 1. Για την σχεδιομελέτη η τιμή 0,8 είναι ικανοποιητική.

Μέγιστη και ελάχιστη γωνιακή απόσταση σε ένα κύκλο:

Η ελάχιστη απόσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta A_{min} = \arcsin(DM/2/R_m)$$

Η μέγιστη απόσταση είναι για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες μπλοκαρίσματος και βρίσκεται από τον τύπο για τον πρώτο κύκλο:

$$\Delta A_{max} = \arcsin(DM/2/R_m) + \arcsin(DM/2/R_{m+1})$$

Και από τον δεύτερο κύκλο από τον τύπο:

$$\Delta A_{max} = \arcsin(DM/2/R_m) + \arcsin(DM/2/R_{m-1})$$

Επομένως ως μονάδα γωνιακής απόστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$A_m = \Delta A_{min} + A_{coef}(\Delta A_{max} - \Delta A_{min})$$

Όπου A_{coef} είναι σταθερά βελτιστοποίησης που παίρνει τιμές από 0 έως 1 (η επιλογή 0,7 είναι ικανοποιητική). Επομένως η τοποθέτηση των ηλιοστατών σε κάθε κύκλο δίνεται από τον τύπο:

$$\psi_m = \pm n A_m$$

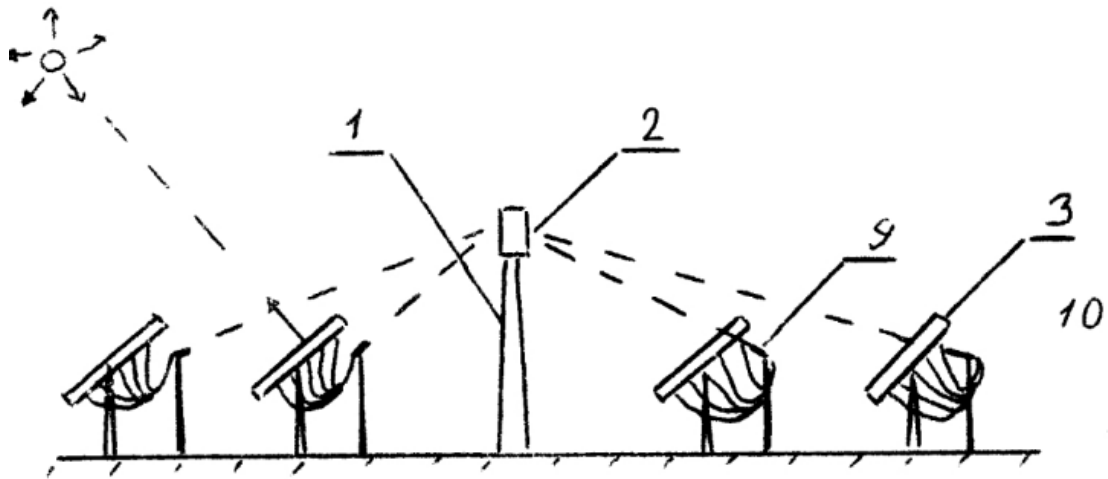
Όπου $n=0,2,4,\dots$ για τους κύκλους που έχουν ηλιοστάτη στον βόρειο άξονα και $n=1,3,5,\dots$ Για τους υπόλοιπους κύκλους.

Η βέλτιστη τοποθέτηση των ηλιοστατών βρίσκεται λαμβάνοντας υπόψη όλες αυτές τις παραμέτρους

4.6. Προτεινόμενη κατασκευή ηλιοστατών με σκοπό την μείωση των απωλειών από το πεδίο των ηλιοστατών

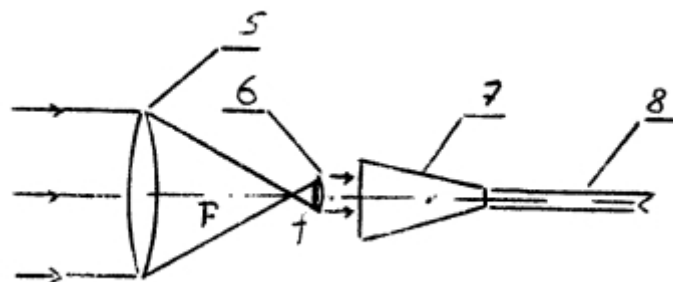
Ο ηλιακός ηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από ένα κεντρικό πύργο, στο πάνω άκρο του οποίου βρίσκεται δέκτης ηλιακής ακτινοβολίας, συνδεδεμένος με θερμική μηχανή που είναι μονταρισμένη με ηλεκτρογεννήτρια. Γύρω από τον κεντρικό πύργο είναι τοποθετημένοι ηλιοστάτες, οι οποίοι αποτελούνται από συγκεντρωτικά στοιχεία που έχουν φακούς με μεγάλο σημείο εστίασης F , φακούς με μικρό σημείο εστίασης f , κωνική πλήρη εσωτερική αντανάκλαστική εστίαση και οπτικό καλώδιο, έτσι τα συγκεντρωτικά στοιχεία με φακούς με σημείο εστίασης f βρίσκονται σε απόσταση $F+f$ από τα συγκεντρωτικά στοιχεία με φακούς με σημείο εστίασης F . Η οπή εισόδου της εστιακής γραμμής βρίσκεται στον φακό με σημείο εστίασης f και στην οπή εξόδου του είναι συνδεδεμένο οπτικό καλώδιο, η διάμετρος του οποίου είναι ίση με την διάμετρο της οπής εξόδου της κωνικής εστιακής γραμμής. Τα άκρα εξόδου των καλωδίων οπτικών ινών των συγκεντρωτικών στοιχείων συνδέονται σε μια δέσμη, η οποία είναι συνδεδεμένη σε μια στήλη, τοποθετημένη στον ηλιοστάτη και προσανατολίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι συγκεντρωμένες ηλιακές ακτίνες που εξέρχονται από μια δέσμη καλωδίων οπτικών ινών, να πέφτουν στον ηλιακό δέκτη.

Η κατασκευή των ηλιοστατών με συγκεντρωτικά στοιχεία βοηθάει ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να μετατρέπεται σε παράλληλα συγκεντρωμένη δέσμη φωτός, η οποία εισέρχεται στα καλώδια οπτικών ινών και κατευθύνεται προς τον δέκτη της ηλιακής ακτινοβολίας με την στερέωση των άκρων εξόδου των καλωδίων οπτικών ινών στην επιθυμητή κατεύθυνση. Ο προσανατολισμός των ηλιοστατών σύμφωνα με την θέση του ηλίου γίνεται με σύστημα ελέγχου. Με την ύπαρξη αυτού του συστήματος παρακολούθησης της θέσης του ηλίου μπορούμε να μειώσουμε τον αριθμό των ηλιοστατών με δεδομένη επιθυμητή ισχύ



Εικόνα 4.5.1: Σκαρίφημα ηλιακού σταθμού [10]

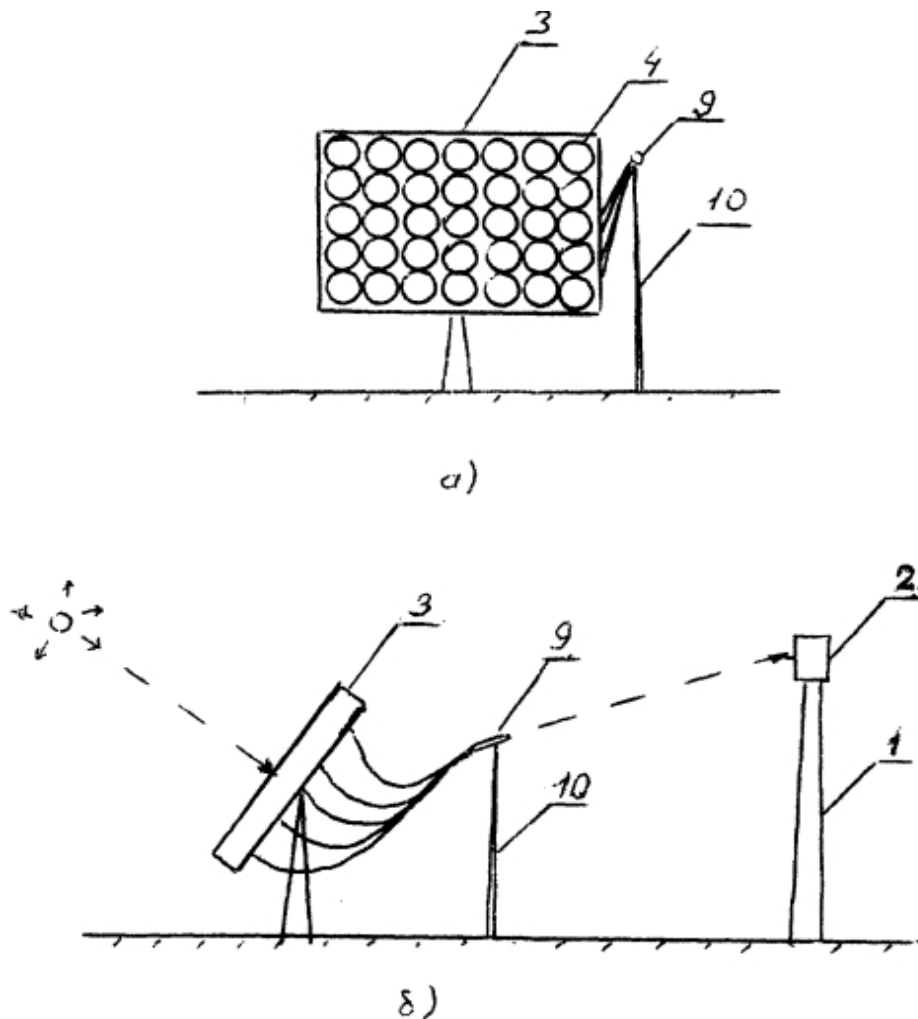
Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5.1 ο ηλιακός ηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από τον κεντρικό πύργο (1), στο πάνω άκρο του οποίου βρίσκεται ο ηλιακός δέκτης (2). Η κατασκευή του ηλιακού δέκτη εξαρτάται από την μορφή της θερμικής μηχανής που είναι μονταρισμένη με την ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για τις θερμικές μηχανές όπου το εργαζόμενο μέσο είναι ατμός, ο ηλιακός δέκτης μπορεί να κατασκευαστεί με την μορφή δεξαμενής με νερό. Κοντά στον κεντρικό πύργο είναι τοποθετημένοι ηλιοστάτες (3), οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από συγκεντρωτικά στοιχεία (4), το σχήμα των οποίων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.5.2



Εικόνα 4.5.2: Σχήμα συγκεντρωτικών στοιχείων [10]

Το συγκεντρωτικό στοιχείο περιέχει το φακό (5) με μεγάλο σημείο εστίασης F , τον φακό (6) με μικρό σημείο εστίασης f , κωνική εστιακή γραμμή πλήρης εσωτερικής αντανάκλασης (7) και καλώδιο οπτικών ινών (8). Ο φακός (6) βρίσκεται σε απόσταση $F+f$ από τον φακό (5), πράγμα το οποίο επιτρέπει να παίρνουμε παράλληλα συγκεντρωμένη δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας. Ο φακός (5) μπορεί να είναι φακός Φρενέλ με σημείο εστίασης της τάξεως των 50 cm. Στον φακό (6) είναι τοποθετημένη οπή εισαγωγής κωνικής εστιακής γραμμής (7), κατασκευασμένη στην μορφή περικομμένου γυάλινου κώνου. Η βάση του περικομμένου κώνου (που είναι στην ουσία η οπή εισαγωγής) έχει μεγαλύτερη διάμετρο από ότι η διάμετρος του φακού (6) σχεδόν τρεις φορές, πράγμα το οποίο μας επιτρέπει να μειώσουμε την απαίτηση για ακρίβεια της καθοδήγησης του συγκεντρωτικού στοιχείου ως προς την θέση του ηλίου. Υπό μη ακριβής καθοδήγηση η παράλληλη δέσμη συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας βγαίνοντας από τον φακό (6) και χτυπώντας στην κωνική εστιακή γραμμή (7), ως αποτέλεσμα πλήρους εσωτερικής αντανάκλασης θα εξέλθει από την εξωτερική οπή της κωνικής εστιακής γραμμής (7) και θα εισέλθει στο καλώδιο

οπτικών ινών (8), το οποίο είναι συνδεδεμένο με την οπή εξαγωγής της κωνικής εστιακής γραμμής (7). Η διάμετρος του καλωδίου οπτικών ινών είναι ίση με την διάμετρο της εξωτερικής οπής της εστιακής γραμμής (7).



Εικόνα 4.5.3: Διάταξη συγκεντρωτικών στοιχείων

Όπως φαίνεται από την εικόνα 4.5.3 τα συγκεντρωτικά στοιχεία (4) είναι διατεταγμένα σε σειρές πάνω στον ηλιοστάτη (3). Τα άκρα εξόδου των καλωδίων οπτικών ινών (8) των συγκεντρωτικών στοιχείων (4), που σχηματίζουν τον ηλιοστάτη (3), ενώνονται στην δέσμη (9) η οποία στερεώνεται στην κολώνα (10) και κατευθύνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία που βγαίνει από την δέσμη (9) να πέφτει στον ηλιακό δέκτη (2). Η κολώνα (10) είναι τοποθετημένη πίσω και πλάγια από τον ηλιοστάτη (3) έτσι ώστε να μην τον εμποδίζει να περιστρέφεται κατά την παρακολούθηση του ηλίου.

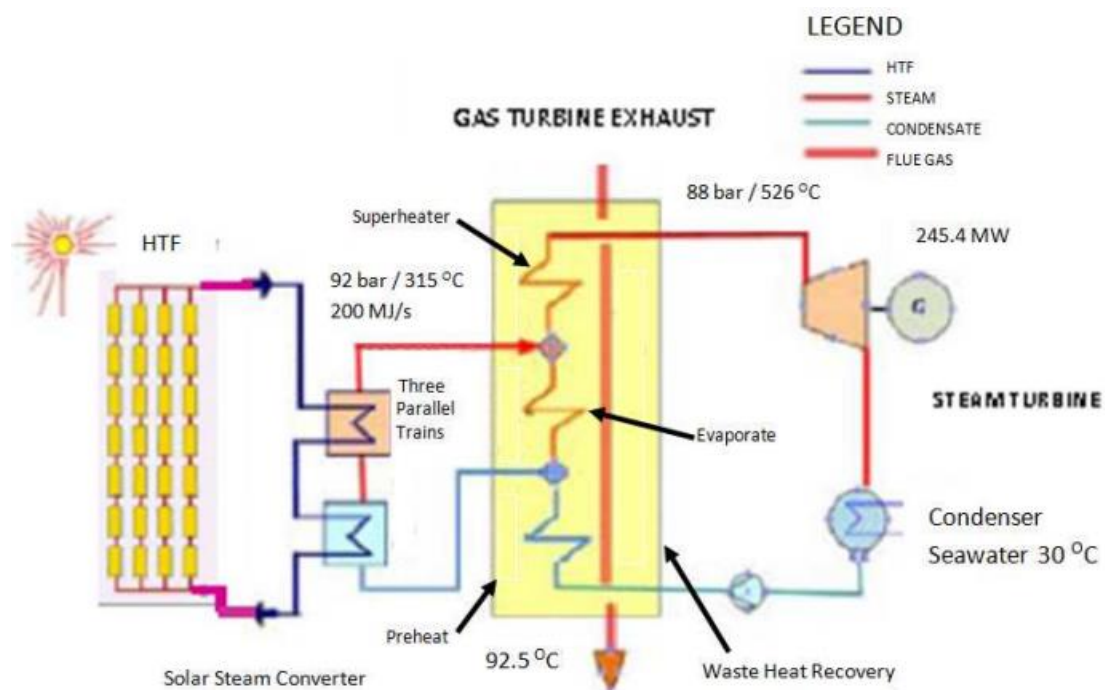
Κεφάλαιο 5. Μελέτη εφαρμογής κεντρικού πύργου στην Ελλάδα

5.1. Επιλογή συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα που χρησιμοποιούνται κατά κόρον παγκοσμίως είναι τα συστήματα παραβολικού συγκεντρωτή, οι ηλιακοί πύργοι και οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel. Σχεδιαστικοί περιορισμοί και οικονομικοί λόγοι καθιστούν τις εγκαταστάσεις με συλλέκτες Fresnel λιγότερο ελκυστικές. Για αυτό κυρίως επιλέγονται είτε ηλιακοί πύργοι είτε παραβολικοί συγκεντρωτές.

Ενεργειακή σύγκριση: [21]

Στους ηλιακούς πύργους ο παραγόμενος ατμός κατευθύνεται απευθείας στον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές του εργαζόμενο μέσο είναι ένα λάδι το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνά τη θερμοκρασία 400 C. Για αυτό ο παραγόμενος ατμός περνά από ένα λέβητα για αναθέρμανση πριν εισέλθει στον ατμοστρόβιλο έτσι ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του μέχρι και 520 C. Για αυτό το λόγο ο βαθμός απόδοσης στις εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές είναι σχετικά μικρότερος από τις εγκαταστάσεις ηλιακού πύργου. Ένα σκαρίφημα λειτουργίας της εγκατάστασης με παραβολικούς συγκεντρωτές φαίνεται στην εικόνα 5.1.1



Εικόνα 5.1.1: Σκαρίφημα λειτουργίας του σταθμού με παραβολικούς συγκεντρωτές

Σύγκριση γης που απαιτείται για την εγκατάσταση: [21]

Η γη που απαιτείται για την εγκατάσταση μπορεί να εκφραστεί με μονάδες $m^2/(MWh/year)$. Υπάρχει πάντα η παρεξήγηση ότι οι ηλιακοί πύργοι καταλαμβάνουν σχετικά μεγαλύτερο χώρο. Για τους ηλιακούς πύργους υπάρχει αλγόριθμος για την

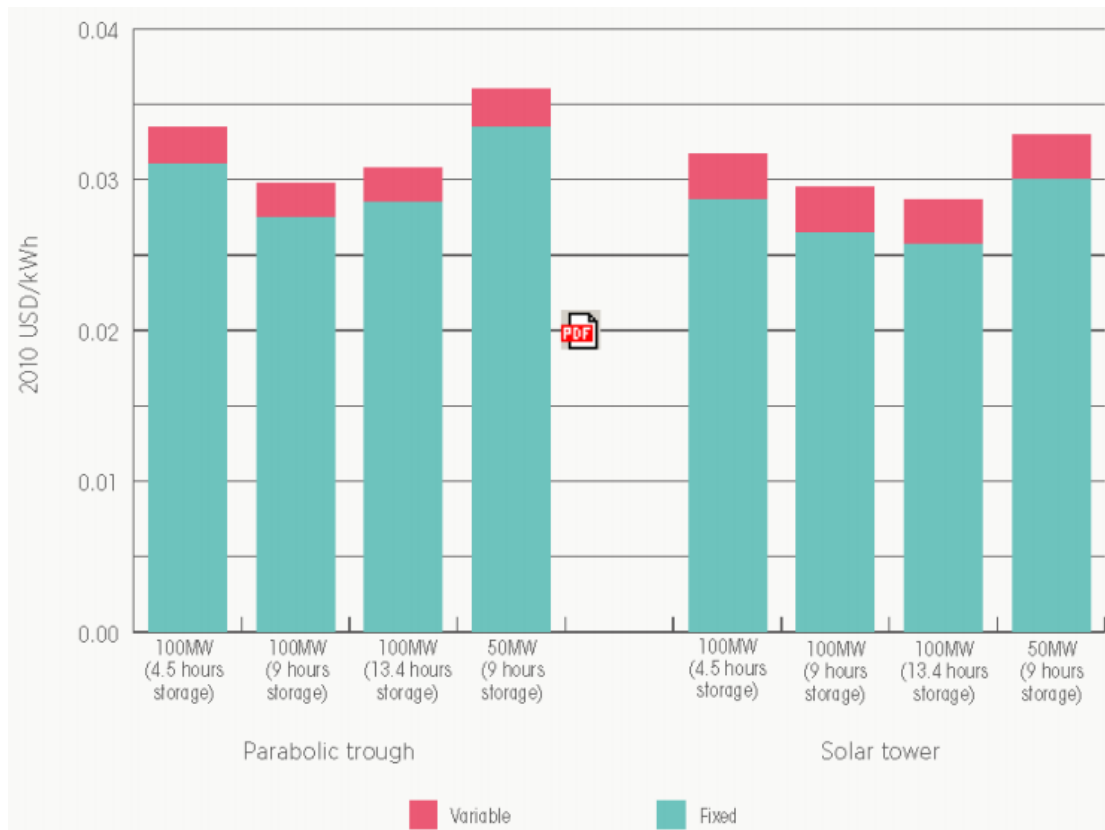
βέλτιστη τοποθέτηση των ηλιοστατών στο χώρο. Οι ηλιακοί πύργοι μπορούν να παράγουν περισσότερη ενέργεια για τον ίδιο καταλαμβανόμενο χώρο.

Περιβαλλοντική επίδραση των συστημάτων Ηλιακού πύργου και εγκατάστασης με παραβολικούς συγκεντρωτές: [21]

Οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που υπάρχουν από την εφαρμογή αυτών των εγκαταστάσεων σχετίζονται με την διαρροή εργαζόμενου μέσου στο περιβάλλον. Στην περίπτωση του συνθετικού λαδιού ως εργαζόμενο μέσο σε σύγκριση με άλλα εργαζόμενα μέσα είναι ιδιαίτερα τοξικό. Οι εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές αποτελούνται από μεγάλο μήκος του ηλιακού δέκτη (δηλαδή σωλήνες) που αυξάνει τον κίνδυνο διαρροής του εργαζόμενου μέσου. Στην περίπτωση που η διαρροή γίνεται από το σύστημα αποθήκευσης ο περιβαλλοντικός κίνδυνος αυξάνεται. Υπάρχει πάντα μια αναπόφευκτη μυρωδιά από την διαρροή του εργαζόμενου μέσου μιας και το σύστημα έχει πολλούς σωλήνες, εξαρτήματα και σφαιρικές αρθρώσεις. Το συνθετικό λάδι είναι ιδιαίτερα τοξικό, μπορεί να ρυπάνει το έδαφος και να περάσει πολύ γρήγορα σε υδροφόρους ορίζοντες. Για αυτό προτείνεται όταν η εγκατάσταση είναι σε ευαίσθητο έδαφος να αποφεύγεται η χρησιμοποίηση συνθετικού λαδιού. Στα συστήματα με ηλιακό πύργο αυτό το πρόβλημα δεν υπάρχει γιατί το εργαζόμενο μέσο δεν είναι ποτέ συνθετικό λάδι. Για να αποφευχθεί αυτός ο κίνδυνος από τις εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαζόμενο μέσο το νερό. Σε αυτή την περίπτωση όμως γίνεται πολύ πιο δύσκολη η θερμική αποθήκευση, για αυτό άλλωστε τέτοια τεχνολογία είναι ακόμα υπό έρευνα. Οι κλιματικές συνθήκες και η υγρασία δεν επηρεάζει τόσο τους ηλιακούς πύργους όσο τις εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές γιατί η επιφάνεια των ηλιοστατών είναι επίπεδη.

Συντήρηση της εγκατάστασης: [21]

Η εγκατάσταση με παραβολικούς συγκεντρωτές αποτελείται από πολλούς σωλήνες, εξαρτήματα και συνδέσεις, με άλλα λόγια το σύστημα είναι εύθραυστο. Για παράδειγμα η εγκατάσταση με παραβολικούς συγκεντρωτές Daggett ισχύος 103 MW που βρίσκεται στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α το κόστος συντήρησης (χωρίς τον υπολογισμό του κόστους του υποσυστήματος της θερμικής αλλαγής και του υποσυστήματος ισχύος) είναι στο ύψος των (για δεδομένα 2009) 1,289,786.00\$. Αυτός ο αριθμός είναι αρκετά υψηλός. Οι εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως μέταλλα, γυαλί, πλαστικό, τα οποία είναι ευαίσθητα σε θερμικά φορτία. Το κόστος συντήρησης για τους ηλιακούς πύργους είναι σχετικά μικρότερο σε σχέση με τις εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές. Στην εικόνα 5.1.2 φαίνεται η σύγκριση όσο αφορά το κόστος συντήρησης για τον ηλιακό πύργο και τις εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές

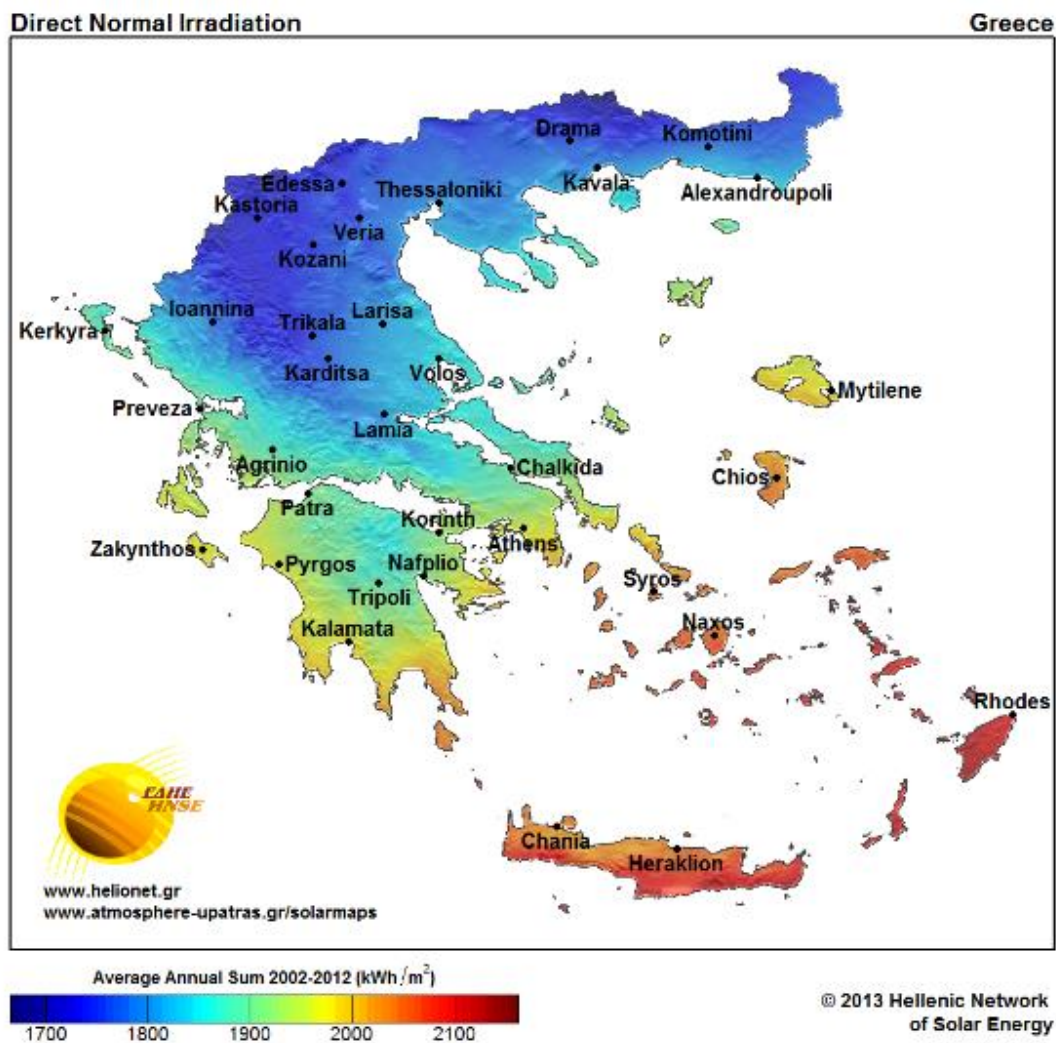


Εικόνα 5.1.2: Σύγκριση κόστους διατήρησης ηλιακού πύργου και εγκατάστασης με παραβολικούς συγκεντρωτές

Επομένως η επιλογή εγκατάστασης ηλιακού πύργου είναι προτιμητέα για μια εγκατάσταση στην Λίνδο με δυναμικότητα 10MW.

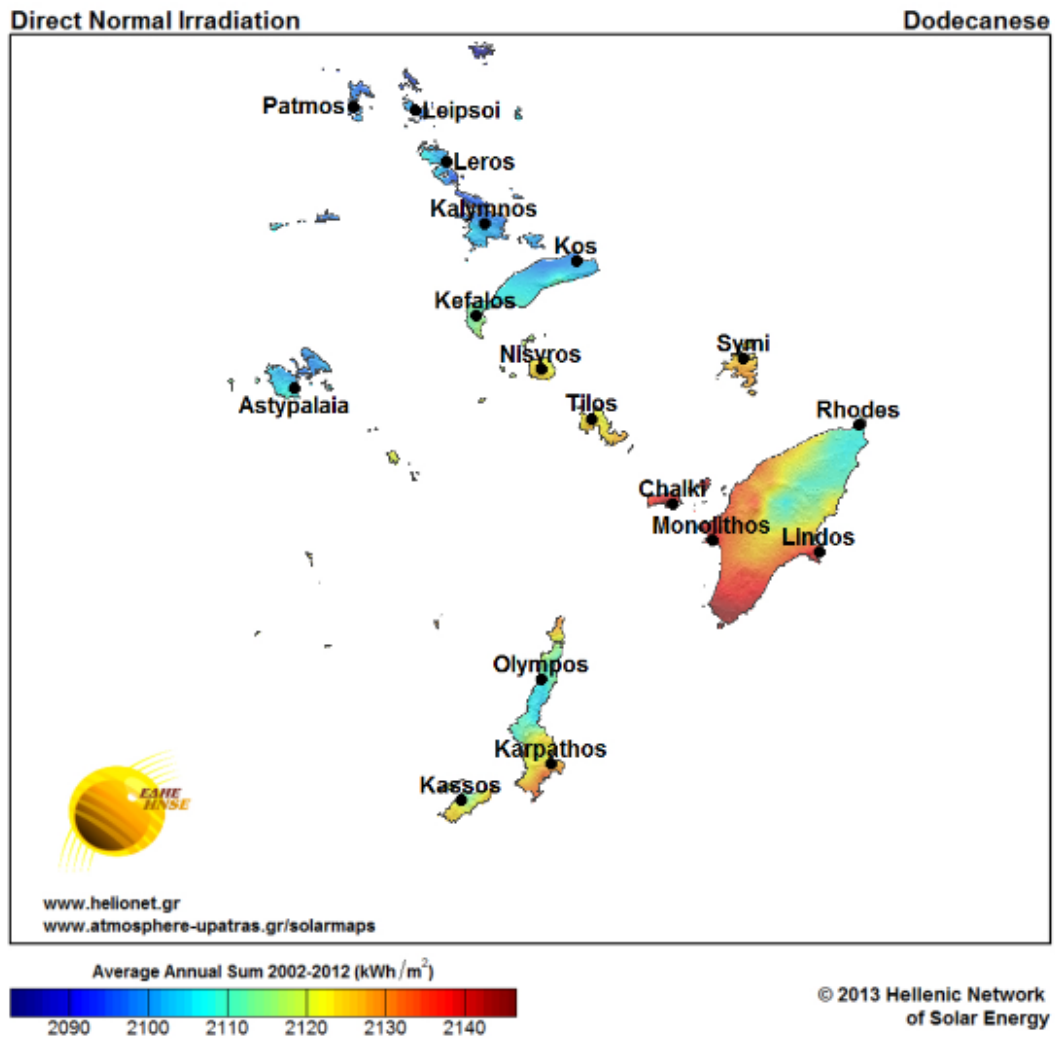
5.2. Απαιτούμενα δεδομένα

Από τα δεδομένα για την ετήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα έχουμε [8] :



Παρατηρούμε ότι οι περιοχές που είναι οι καταλληλότερες για την εγκατάσταση ενός ηλιακού σταθμού βρίσκονται στα νότια της χώρας

Συγκεκριμένα για τα Δωδεκάνησα [8] :



Παρατηρούμε ότι η Ρόδος και συγκεκριμένα στην Λίνδο είναι καλή η τοποθεσία για ηλιακό σταθμό. Βλέπουμε ότι η ετήσια μέση άμεση ακτινοβολία είναι 2140 kWh/m²

5.3. Επιλογή βασικών μεγεθών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται τα διάφορα μεγέθη για την κατασκευή ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος στην Λίνδο βάση της σχεδιομελέτης που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο με δυναμικότητα 10 MW

Εμβαδό ηλιοστατών	133.960 m ²
Απαιτούμενη γη	991.452 m ²
Ετήσια ποσότητα νερού για ψύξη του συστήματος	122.640.000 litre
Διάμετρος ηλιακού δέκτη	5 m
Ύψος ηλιακού δέκτη	3,4 m
Εμβαδό δέκτη	83,8 m ²
Διάμετρος σωλήνα του δέκτη	23 mm
Πάχος σωλήνα	1 mm
Αριθμός σωλήνων ανα πάνελ	31
Αριθμός πάνελ	22
Ύψος πύργου	67 m
Όγκος αποθηκευτικού χώρου	50 m ³
Αποθηκευτική χωρητικότητα	2 ώρες

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο βαθμός απόδοσης για τα δομικά στοιχεία της εγκατάστασης:

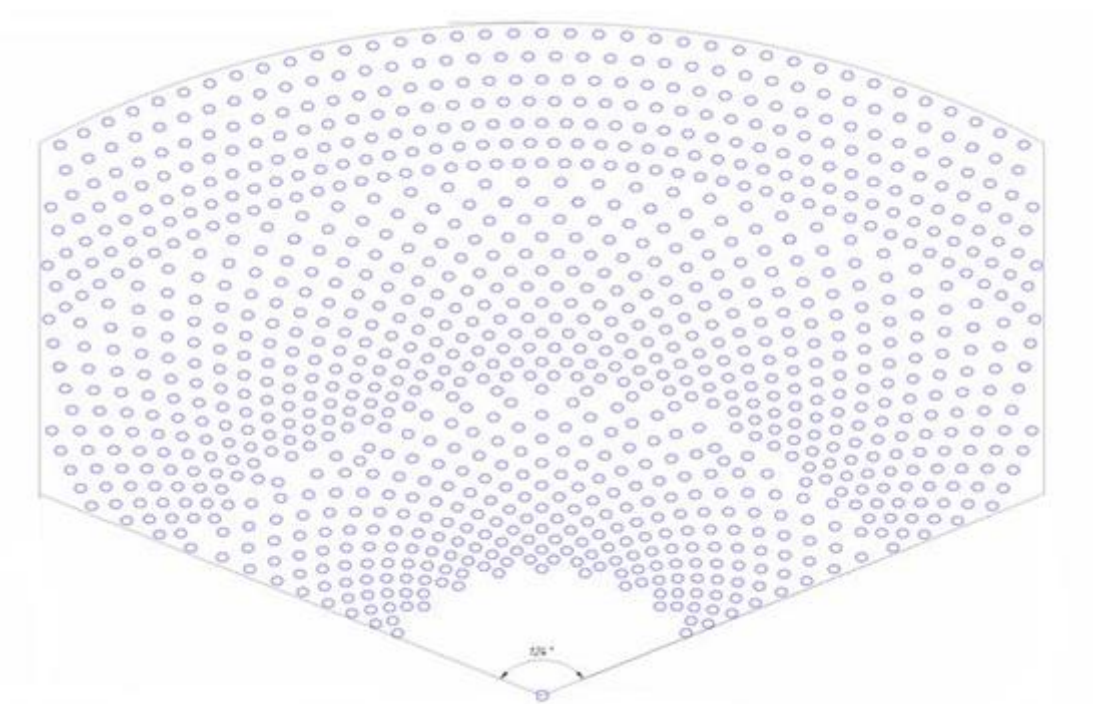
Απώλειες συνημίτονου	0,8
Απώλειες ατμοσφαιρικής εξασθένησης	0,95
Απώλειες αντανάκλαστικότητας ηλιοστατών	0,8
Απώλειες σκίασης	0,95
Απώλειες διαρροής	0,99
Αποδοτικότητα δέκτη	0,9
Αποδοτικότητα μετάδοσης θερμότητας υγρού μέσου του δέκτη	0,9
Αποθηκευτικός βαθμός απόδοσης	0,95
Βαθμός απόδοσης εγκατάστασης ισχύος	0,297

Επομένως ο συνολικός εκτιμώμενος βαθμός απόδοσης για την εγκατάσταση είναι περίπου 13% και με βαθμό δυναμικότητας περίπου 42%

5.4. Επιλογή του πεδίου της εγκατάστασης (lay-out εγκατάστασης)

Το συνολικό εμβαδό των ηλιοστατών είναι 220.417 m². Ο κάθε ηλιοστάτης μπορεί να είναι κυκλικής μορφής με συνολικό εμβαδό 122,45 m². Οπότε θα χρειαστεί να τοποθετηθούν 1094 ηλιοστάτες. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες στο πεδίο των ηλιοστατών και κυρίως οι απώλειες συνημίτονου όλοι οι ηλιοστάτες τοποθετούνται στο βόρειο τμήμα του πύργου (εφόσον η Ελλάδα ανήκει στο Βόρειο ημισφαίριο)

Η προτεινόμενη μορφή του πεδίου ηλιοστατών με τον πύργο είναι η εξής :



Εικόνα 5.4.1: Προτεινόμενη χωροθέτηση του σταθμού κεντρικού πύργου για την Λίνδο

Η γωνία κατανομής των ηλιοστατών που σχηματίζεται από την προτεινόμενη τοποθέτηση είναι 124 μοίρες, οπότε η τελευταία σειρά ηλιοστατών θα απέχει από τον πύργο 957,44 m έτσι ώστε να ικανοποιείται το απαιτούμενο εμβαδό της γης της εγκατάστασης 991.452 m². Σύμφωνα με την σχεδιομελέτη της χωροθέτησης που αναφέρεται στο προηγούμενο κεφάλαιο και με την βοήθεια του Matlab προέκυψε για τον προτεινόμενο σταθμό με κεντρικό πύργο 16 σειρές ομόκεντρων κύκλων η απόσταση της κάθε σειράς φαίνεται στην εικόνα 5.4.2 που είναι τα αποτελέσματα με χρησιμοποίηση του προγράμματος Matlab

R =

Columns 1 through 9

67.0000 84.6119 104.5613 127.3598 153.5845 183.8935 219.0433 259.9078 307.5009

Columns 10 through 16

363.0018 427.7843 503.4510 591.8733 695.2376 816.0993 957.4461

Εικόνα 5.4.2: απόσταση από τον πύργο της κάθε σειράς κύκλων τοποθέτησης ηλιοστατών σε μέτρα στον προτεινόμενο σταθμό με κεντρικό πύργο για την Λίνδο.

Στην εικόνα 5.4.3 φαίνεται το βήμα σε μοίρες της ακτινικής τοποθέτησης των ηλιοστατών σε καθέναν από τους 16 ομόκεντρους κύκλους, όπως προέκυψε από την σχεδιομελέτη του προηγούμενου κεφαλαίου και με την χρησιμοποίηση του λογισμικού Matlab

L =

Columns 1 through 9

8.3178 7.9765 6.3870 5.2074 4.2978 3.5774 2.9960 2.5204 2.1275

Columns 10 through 16

1.8003 1.5265 1.2963 1.1021 0.9379 0.7987 0.6806

Εικόνα 5.4.3: Βήμα σε μοίρες της τοποθέτησης των ηλιοστατών για την κατασκευή του προτεινόμενου σταθμού στην Λίνδο

Έχοντας υπόψη ότι θέλουμε να τοποθετήσουμε τους ηλιοστάτες στο βόρειο τμήμα του πύργου και στην επιφάνεια που ορίζεται με 124 μοίρες γύρω από το πύργο η ακριβής τοποθέτηση των 1094 ηλιοστατών σε κάθε σειρά φαίνεται στον πίνακα 5.1

Πίνακας 5.1: Κατανομή του αριθμού των ηλιοστατών σε κάθε ομόκεντρο κύκλο

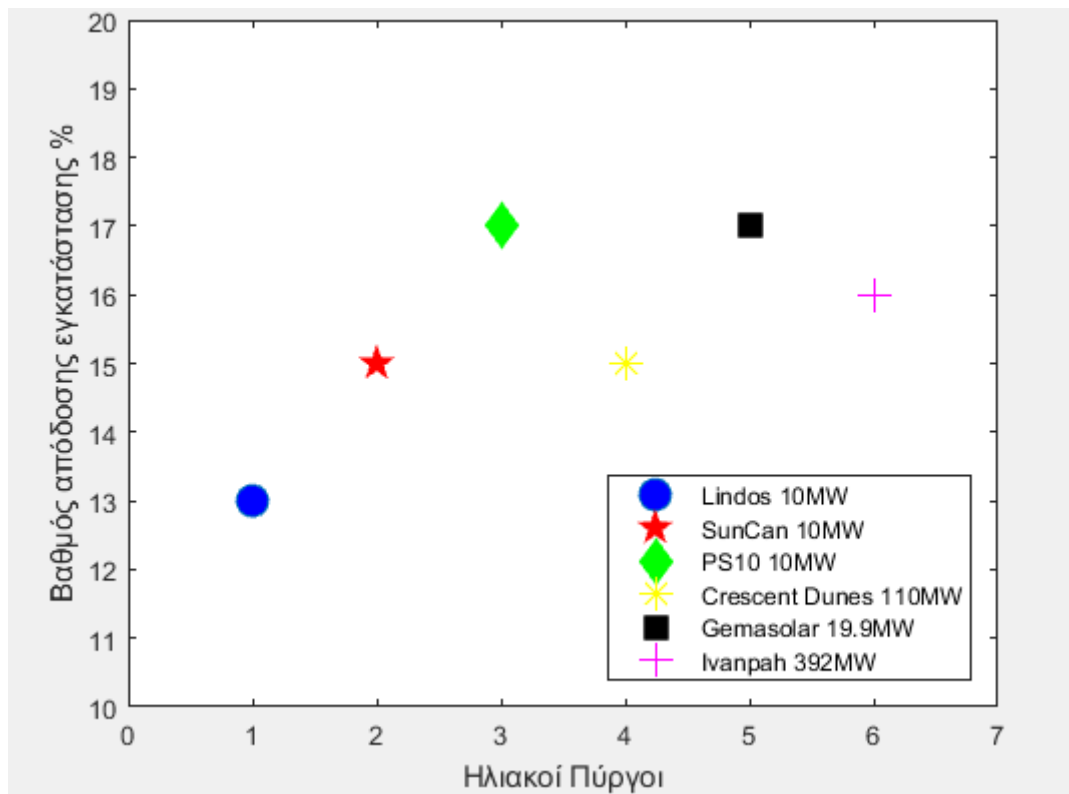
Σειρά ομόκεντρου κύκλου	Αριθμός ηλιοστατών
1	15
2	14
3	17
4	22
5	29
6	34
7	41
8	46
9	57
10	66
11	81
12	94
13	113
14	130
15	153
16	182

Στον πίνακα 5.2 είναι συγκεντρωμένα τα βασικά χαρακτηριστικά πέντε σταθμών ηλιακού πύργου ανά τον κόσμο και το προτεινόμενο για την Λίνδο

Πίνακας 5.2: Βασικά χαρακτηριστικά ηλιακών πύργων ανα τον κόσμο και του προτεινόμενου της Λίνδου

	Μονάδες	Gemasolar	Crescent Dunes	PS 10	Ivanpah	SunCan	Lindos
Ηλεκτρική Ισχύς	MW	20	110	10	392	10	10
Συνολικό Εμβαδό ηλιοστατών	m ²	304.750	1.197.148	75.000	2.600.000	175.375	133.960
Αριθμός ηλιοστατών	-	2650	10.347	624	173.500	1.525	1.094
Συνολικό εμβαδό γης εγκατάστασης	m ²	1.950.000	16.000.000	550.000	35.000.000	1.200.000	991.452
Ύψος πύργου	m	140	195	120	-	138	67
Εργαζόμενο μέσο	-	Λιωμένο άλας	Λιωμένο άλας	Νερό	Νερό	Λιωμένο άλας	Λιωμένο άλας
Αποθηκευτική δυναμικότητα	ώρες	15	10	0,5	0	15	2
Τοποθεσία	-	Ισπανία	Η.Π.Α	Ισπανία	Η.Π.Α	Κίνα	Ελλάδα

Στην εικόνα 5.4.2 φαίνεται ένα διάγραμμα για τον συνολικό βαθμό απόδοσης της προτεινόμενης ηλιακής εγκατάστασης ηλιακού πύργου στην Λίνδο και στις ήδη υπάρχουσες 5 εγκαταστάσεις που εικονίζονται



Εικόνα 5.4.2: Διάγραμμα συνολικού βαθμού απόδοσης εγκαταστάσεων ηλιακών πύργων

6. Συμπεράσματα

1. Τα τελευταία χρόνια γενικά οι τεχνολογίες για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως αναπτύσσονται, ωστόσο ο βαθμός διείσδυσης τους στην βιομηχανία εξαρτάται από το κόστος της παραγομένης ενέργειας. Συγκεκριμένα οι ηλιακοί σταθμοί με συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα δεν μπορούν να τροφοδοτούν πλήρως τους καταναλωτές (δεν μπορεί να επιτευχθεί πλήρης ενεργειακή αυτονομία). Περιορίζονται μόνο σε ένα ποσοστό της συνολικής παραγωγής είτε σε σταθμούς επίδειξης. Ωστόσο αναπτύσσονται συνεχώς μοντέλα ηλιακών σταθμών με συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα και στο μέλλον ολοένα και περισσότερο θα αυξάνεται η ανάγκη για την μεγαλύτερη συμμετοχή τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εφόσον οι συμβατικές πηγές ενέργειας εξαντλούνται.
2. Οι ηλιακοί σταθμοί δεν έχουν τον ίδιο βαθμό απόδοσης σε όλες τις κλιματικές ζώνες. Οπότε κατά την κατασκευή ενός ηλιακού σταθμού πέρα από την μορφή του συγκεντρωτή και τα υλικά των φωτοηλεκτρικών μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η μέση ένταση της ακτινοβολίας της κάθε κλιματικής ζώνης.
3. Οποιαδήποτε κατασκευαστική μορφή ηλιακού σταθμού με συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα και αν επιλεγεί έχει μειονεκτήματα καθώς ο βαθμός απόδοσής τους είναι χαμηλός. Η επιλογή των υλικών και της μορφής των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων εξαρτάται από την απαιτούμενη ισχύ.
4. Οι ηλιακοί πύργοι έχουν γενικά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τις εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές. Επίσης ο χώρος που καταλαμβάνουν προς την παραγόμενη ενέργεια που λαμβάνεται από αυτούς είναι 20-30% υπέρ των ηλιακών πύργων. Δεν χρησιμοποιείται τοξικό εργαζόμενο μέσο στους ηλιακούς πύργους (λιωμένο άλας). Το κόστος συντήρησης των ηλιακών πύργων είναι γενικά 15-20% μικρότερο σε σχέση με τις εγκαταστάσεις με παραβολικούς συγκεντρωτές. Ο μόνος λόγος για τον οποίο η εφαρμογή των ηλιακών πύργων δεν είναι ακόμα πιο πολύ ευρεία είναι ότι ακριβείς μηχανισμούς παρακολούθησης του ηλίου από όλους τους ηλιοστάτες και αλγόριθμους για την βέλτιστη τοποθέτησή τους διαθέτουν μόνο ορισμένες εταιρίες. Κατά τα άλλα μπορούν να προσαρμοστούν σε πολλές γεωγραφικές και κλιματικές συνθήκες.
5. Οι ηλιακοί πύργοι και τα παραβολοκυλινδρικά ηλιακά συστήματα έχουν κοινά πλεονεκτήματα. Μπορούν να περιέχουν συσσωρευτές θερμικής ενέργειας, πράγμα το οποίο καθιστά εφικτή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και κατά την διάρκεια της νύχτας. Η εφαρμογή τους στην Ελλάδα είναι καταλληλότερη στα νότια της χώρας σε περιοχές όπως η Κρήτη ή τα Δωδεκάνησα. Στην παρούσα εργασία έγινε επιλογή βασικών μεγεθών του συστήματος κεντρικού πύργου δυναμικότητας 10MW.
6. Από τη κατασκευή εγκαταστάσεων κεντρικού πύργου ανά τον κόσμο φαίνεται ότι η κατασκευή τους διαρκεί συνήθως 5 χρόνια. Επίσης οι περισσότεροι πρώτα κατασκευάζονται σύμφωνα με την αρχική σχεδιομελέτη και έπειτα βελτιστοποιούνται προκειμένου να επιτύχουν τα επιθυμητά αρχικά αποτελέσματα (είτε αυτό οφείλεται στα υλικά της εγκατάστασης είτε στην συντήρηση που χρειάζεται είτε σε καιρικές συνθήκες που δεν προβλέφθηκαν με ακρίβεια εξαρχής). Μάλιστα πολλοί

τέτοιοι σταθμοί έχουν κατασκευασθεί κυρίως για πειραματικό σκοπό και την απόκτηση εμπειρίας πάνω σε τέτοια συστήματα. Σε μια χώρα όπως η Ελλάδα που με τα σημερινά δεδομένα δεν έχει πουθενά στην επικράτεια της τέτοια τεχνολογία, η αρχική κατασκευή μιας πειραματικής τέτοιας εγκατάστασης θα ήταν επιθυμητή. Επιπλέον τα περισσότερα έργα έχουν χρηματοδοτηθεί από συγκεκριμένες ιδιωτικές επιχειρήσεις (οι οποίες έχουν την πιο σύγχρονη τεχνολογία για όλα τα δομικά στοιχεία της εγκατάστασης) είτε έχουν πάρει δάνεια από κρατικές δομές. Οπότε η επίτευξη ενός τέτοιου έργου για τα ελληνικά δεδομένα θα ήταν πιο πιθανό να γινόταν από κάποιον επενδυτή. Στην παρούσα εργασία προτείνεται η κατασκευή ενός σταθμού 10 MW. Σε εγκαταστάσεις όπου η παραγόμενη ισχύς ξεπερνάει για παράδειγμα τα 100 MW πρέπει οπωσδήποτε να εξετάζεται παράλληλα με την λειτουργία του σταθμού και η επίδρασή του στον βιότοπο της περιοχής.

7. Βιβλιογραφία

1. M Prakash, SB Kedare, and JK Nayak. Investigations on heat losses from a solar cavity receiver. *Solar Energy*, 83(2):157–170, 2009
2. D Yogi Goswami and Frank Kreith. *Energy conversion*. CRC press, 2007
3. William B Stine and Raymond W Harrigan. *Solar energy fundamentals and design*. 1985
4. WB Stine. *Power from the sun*, published online by william b. stine and michael geier, 2001.
5. Fouad Takla Company, "ChamSolar," 2009. [Online]. Available: <http://www.chamsolar.com/en/ed/solarthermal.htm>.
6. M. W. P. G. P. J. W. D. Keith Lovegrove, "Realising the Potential of Concentrating Solar Power in Australia – Summary for Stakeholders," Australian Solar Institute, Newcastle, 2012
7. Patricia Kuntz Falcone. *A handbook for solar central receiver design*. Technical report, Sandia National Labs., Livermore, CA (USA), 1986
8. http://www.helionet.gr/maps/clima_yearly_avg/direct/Dodecanese
9. Захидов Р. А., Огнева Т. А., Клычев Ш. И. и др. Исследование энергетических характеристик параболоторических фоконов. // Гелиотехника. 1984. №4, С. 30-33
10. Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, М.Б. Каган, И.И. Протасов, В.Г. Трофим. ФТП, 4, 12 (1970)
11. Михеев, М.А. Краткий курс теплопередачи. [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева - М.-Л., Госэнергоиздат, 1961. - 208 с
12. wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/The_Solar_Project
13. wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Gemasolar_Thermosolar_Plant
14. wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Crescent_Dunes_Solar_Energy_Project
15. wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/PS10_solar_power_plant
16. wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Ivanpah_Solar_Power_Facility
17. wikipedia <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%AD%D0%A1-5>
18. https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=6315
19. https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=62
20. <file:///C:/Users/user/Downloads/cspreportrevision7.pdf>
21. <http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.j.ajee.20150303.11.pdf>
22. <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:971712/FULLTEXT01.pdf>

Παράρτημα Α

Παρατίθεται ένας πίνακας με τις κατασκευές ηλιακών πύργων που υπάρχουν ανά τον κόσμο και την κατάσταση λειτουργίας τους.

Δυναμικότητα (MW)	Όνομα ηλιακού πύργου	Τοποθεσία	Κατάσταση λειτουργίας
392	Ivanpah solar tower	 Η.Π.Α	Λειτουργεί
125	Crescent Dunes	 Η.Π.Α	Λειτουργεί
50	Khi solar tower	 Νότια Αφρική	Λειτουργεί
20	Gemasolar	 Ισπανία	Λειτουργεί
20	PS20	 Ισπανία	Λειτουργεί
10	PS10	 Ισπανία	Λειτουργεί
10	SunCan	 Κίνα	Λειτουργεί
2,5	ACME solar tower	 Ινδία	Λειτουργεί
1,5	Sundrop	 Αυστραλία	Λειτουργεί
1	Jemalong	 Κίνα	Λειτουργεί
1	Julich	 Γερμανία	Λειτουργεί
1	Dahan	 Κίνα	Λειτουργεί
1	Greenway solar power	 Τουρκία	Λειτουργεί
200	Golmud	 Κίνα	Υπό κατασκευή
121	Ashalim power station 1	 Ισραήλ	Υπό κατασκευή
110	Atacama-1	 Χιλή	Υπό κατασκευή
100	Redstone solar thermal power	 Νότια Αφρική	Υπό κατασκευή
100	El Reboso 2+3	 Ισπανία	Υπό κατασκευή
100	Diwakar	 Ινδία	Υπό κατασκευή
100	KVK energy solar project	 Ινδία	Υπό κατασκευή
50	SupCon solar project	 Κίνα	Υπό κατασκευή
50	Hami solar tower	 Κίνα	Υπό κατασκευή
1.600	Sadstone Energy project	 Η.Π.Α	Σχεδιάζεται
390	Likana solar project	 Χιλή	Σχεδιάζεται
260	Copiapó solar project	 Χιλή	Σχεδιάζεται
150	Aurora solar thermal power project	 Αυστραλία	Σχεδιάζεται
135	Huanghe	 Κίνα	Σχεδιάζεται
50	Minos	 Ελλάδα	Σχεδιάζεται
10	Solar Two	 Η.Π.Α	Κατεδαφίστηκε
5	C9C-5	 Ε.Σ.Σ.Δ	Κατεδαφίστηκε

2.2 Ηλιακοί σταθμοί με τεχνολογία παραβολικών συγκεντρωτών ανα το κόσμο

Ο ηλιακός σταθμός Andasol Solar Power στην πόλη Guadix στην Ανδαλουσία, Ισπανία. Σε αυτό τον σταθμό χρησιμοποιούνται βυτία από λιωμένο άλας ως μέσο για την θερμική ενεργειακή αποθήκευση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανεξάρτητα από το αν είναι μέρα ή νύχτα.

Στην εικόνα 2.2.1 φαίνεται μια όψη του σταθμού αυτού



Εικόνα 2.2.1: Ηλιακός σταθμός Andasol Solar Power

Τα χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου φαίνονται στον πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά ηλιακού πεδίου

Τεχνολογία	Παραβολικός συγκεντρωτής
Εμβαδό εγκατάστασης	600 εκτάρια
Ηλιακή ακτινοβολία	2.316 kWh/m ² /yr

Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης φαίνονται στον πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης

Ονομαστική δυναμικότητα	150 MW
Συντελεστής δυναμικότητας	0,41
Αποθηκευτική χωρητικότητα	7,5 ώρες
Ετήσια καθαρή παραγωγή	495 GWh

Ο ηλιακός σταθμός SEGS III στο Mojave Desert στην California, ΗΠΑ. Στην εικόνα φαίνεται μια όψη αυτού του σταθμού.



Εικόνα 2.2.2: Ηλιακός σταθμός SEGS III

Τα χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου φαίνονται στον πίνακα 2.3:

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου

Τεχνολογία	Παραβολικοί συγκεντρωτές
Εμβαδό εγκατάστασης	647,5 εκτάρια
Ηλιακή ακτινοβολία	2,725 kWh/m ² /yr

Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης φαίνονται στον πίνακα 2.4:

Πίνακας 2.4: Ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης

Ονομαστική δυναμικότητα	361 MW
Συντελεστής δυναμικότητας	0,2
Ετήσια καθαρή παραγωγή	539 GWh

Ο ηλιακός σταθμός KaXu Solar One κοντά στην πόλη Pofadder στην Νότια Αφρική. Ο σταθμός αυτός χρησιμοποιεί λιωμένο άλας για την ενεργειακή αποθήκευση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια όψη αυτού του ηλιακού σταθμού φαίνεται στην εικόνα 2.2.3 :



Εικόνα 2.2.3: Ηλιακός σταθμός KaXu Solar One

Τα χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου φαίνονται στον πίνακα 2.5:

Πίνακας 2.5: Χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου

Τεχνολογία	Παραβολικοί συγκεντρωτές
Εμβαδό εγκατάστασης	1.100 εκτάρια

Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης φαίνονται στον πίνακα 2.6:

Πίνακας 2.6: Ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης

Ονομαστική δυναμικότητα	100 MW
Αποθηκευτική χωρητικότητα	2,5 ώρες
Ετήσια καθαρή παραγωγή	320 GWh

Ο ηλιακός σταθμός Soloana Generating Station βρίσκεται κοντά στο Gila Bend στην Αριζόνα, Η.Π.Α. Στον σταθμό αυτό η ενεργειακή αποθήκευση γίνεται με λιωμένο άλας. Στην εικόνα 2.2.4 φαίνεται μια όψη αυτού του σταθμού.



Εικόνα 2.2.4: Ηλιακός σταθμός Soloana Generating

Τα χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου φαίνονται στον πίνακα 2.7:

Πίνακας 27: Χαρακτηριστικά ηλιακού πεδίου

Τεχνολογία	Παραβολικοί συγκεντρωτές
Εμβαδό εγκατάστασης	780 εκτάρια

Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης φαίνονται στον πίνακα 2.8:

Πίνακας 2.8: Ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης

Ονομαστική δυναμικότητα	280 MW
Αποθηκευτική χωρητικότητα	6 ώρες
Ετήσια καθαρή παραγωγή	724 GWh

Ο ηλιακός σταθμός Shams Solar Power Station βρίσκεται στην πόλη Madinat Zayed στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Μια όψη του σταθμού αυτού φαίνεται στην εικόνα 2.2.5.



Εικόνα 2.2.5: Ηλιακός σταθμός Shams Solar Power Station

Τα χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου φαίνονται στον πίνακα 2.9:

Πίνακας 2.9: Χαρακτηριστικά του ηλιακού πεδίου

Τεχνολογία	Παραβολικοί συγκεντρωτές
Εμβαδό εγκατάστασης	2,5 km ²
Ηλιακή ακτινοβολία	1.934 kWh/m ² /yr

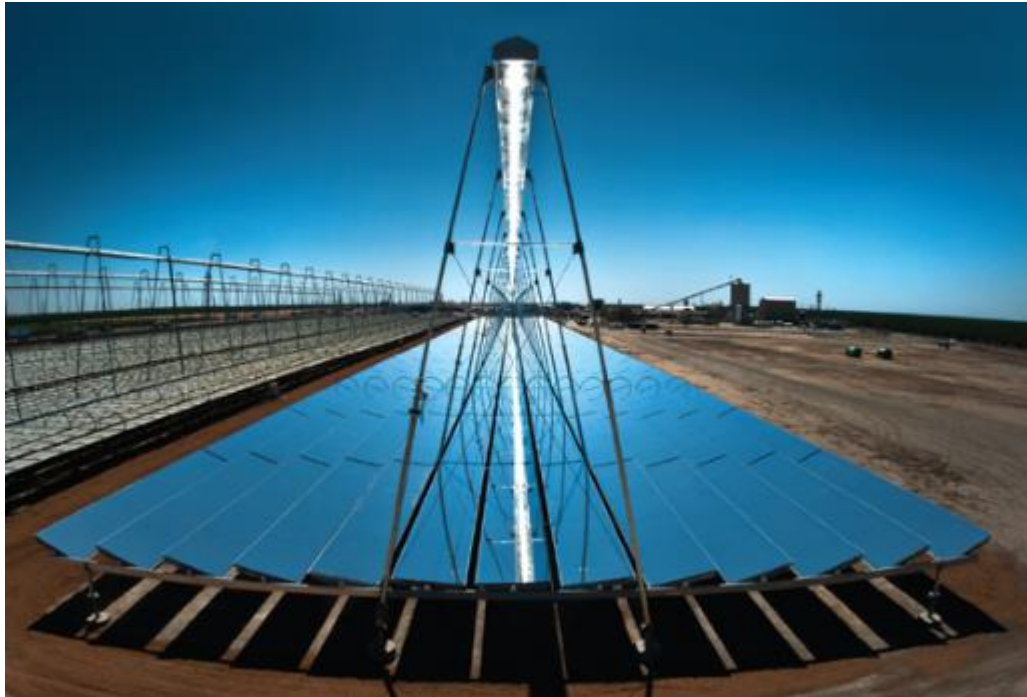
Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης φαίνονται στον πίνακα 2.10:

Πίνακας 2.10: Ενεργειακά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης

Ονομαστική δυναμικότητα	100 MW
Ετήσια καθαρή παραγωγή	210 GWh

2.3 Ηλιακοί σταθμοί με τεχνολογία συλλεκτών Fresnel ανα τον κόσμο

Ο ηλιακός σταθμός Kimberlina δυναμικότητας 5 MW βρίσκεται στο Barksfield, στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α και έχει ως τεχνολογία συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας τους συλλέκτες Fresnel. Κάθε ηλιακός λέβητας διαθέτει μια ομάδα από 13 στενούς, επίπεδους καθρέφτες, οι οποίοι παρακολουθούν και εστιάζουν χωριστά τη θερμότητα του ήλιου στους εναέριους σωλήνες που μεταφέρουν νερό. Το νερό βράζει απευθείας στον ατμό. Ο ατμός μπορεί στη συνέχεια να περιστρέψει έναν στρόβιλο για να παράγει ηλεκτρισμό ή να χρησιμοποιηθεί ως βιομηχανικός ατμός για τρόφιμα. Ο ηλιακός λέβητας Kimberlina επιτυγχάνει σήμερα υπερθερμασμένο ατμό 750 βαθμών F. Ο νέος ηλιακός λέβητας υπό κατασκευή έχει σχεδιαστεί για να επιτυγχάνει υπερθερμασμένο ατμό 900 βαθμών F. Μια όψη του σταθμού αυτού φαίνεται στην εικόνα 2.3.1



Εικόνα 2.3.1: Ηλιακός σταθμός Kimberlina

Ο ηλιακός σταθμός PE1 δυναμικότητας 1,4 MW βρίσκεται στην πόλη Μούρθια στην Ισπανία. Μια όψη αυτού του σταθμού φαίνεται στην εικόνα 2.3.2:



Εικόνα 2.3.2: Ηλιακός σταθμός PE1

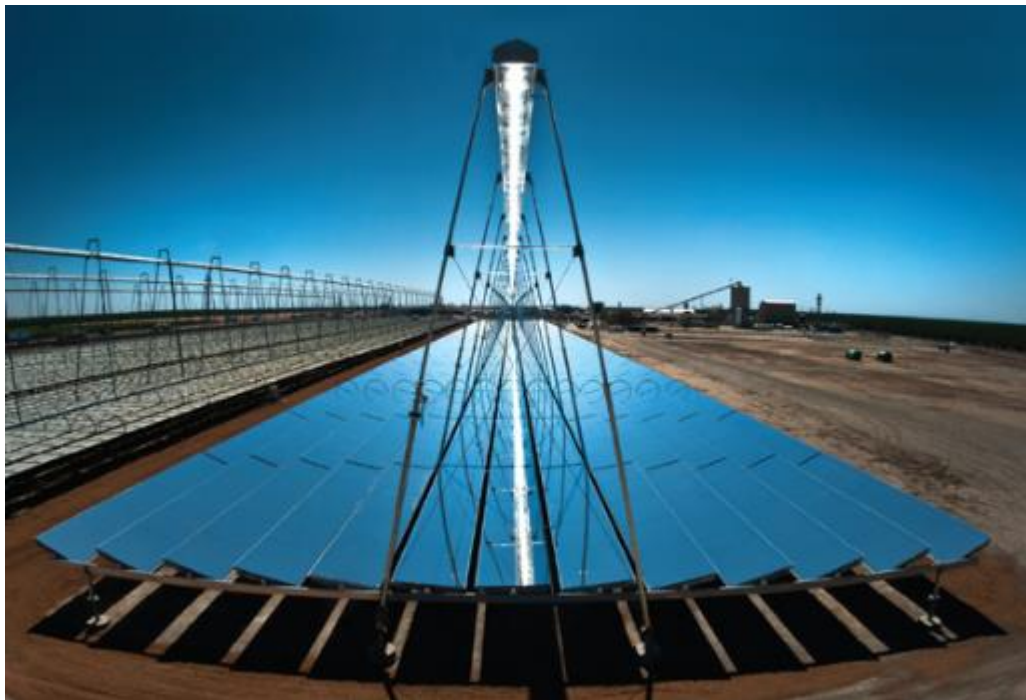
Τα χαρακτηριστικά αυτού του σταθμού φαίνονται στον πίνακα 2.11:

Πίνακας 2.11: Χαρακτηριστικά του σταθμού

Δυναμικότητα	1,4 MW
Εμβαδό εγκατάστασης	7 εκτάρια
Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια	2000 MWh/έτος
Μέγιστη θερμοκρασία	270 C
Θερμική αποθηκευτική δυναμικότητα	0 ώρες
Υγρό μέσο μετάδοσης θερμότητας	Νερό

2.3 Ηλιακοί σταθμοί με τεχνολογία συλλεκτών Fresnel ανα τον κόσμο

Ο ηλιακός σταθμός Kimberlina δυναμικότητας 5 MW βρίσκεται στο Barksfield, στην Καλιφόρνια, Η.Π.Α και έχει ως τεχνολογία συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας τους συλλέκτες Fresnel. Κάθε ηλιακός λέβητας διαθέτει μια ομάδα από 13 στενούς, επίπεδους καθρέφτες, οι οποίοι παρακολουθούν και εστιάζουν χωριστά τη θερμότητα του ήλιου στους εναέριους σωλήνες που μεταφέρουν νερό. Το νερό βράζει απευθείας στον ατμό. Ο ατμός μπορεί στη συνέχεια να περιστρέψει έναν στρόβιλο για να παράγει ηλεκτρισμό ή να χρησιμοποιηθεί ως βιομηχανικός ατμός για τρόφιμα. Ο ηλιακός λέβητας Kimberlina επιτυγχάνει σήμερα υπερθερμασμένο ατμό 750 βαθμών F. Ο νέος ηλιακός λέβητας υπό κατασκευή έχει σχεδιαστεί για να επιτυγχάνει υπερθερμασμένο ατμό 900 βαθμών F. Μια όψη του σταθμού αυτού φαίνεται στην εικόνα 2.3.1



Εικόνα 2.3.1: Ηλιακός σταθμός Kimberlina

Ο ηλιακός σταθμός PE1 δυναμικότητας 1,4 MW βρίσκεται στην πόλη Μούρθια στην Ισπανία. Μια όψη αυτού του σταθμού φαίνεται στην εικόνα 2.3.2:



Εικόνα 2.3.2: Ηλιακός σταθμός PE1

Τα χαρακτηριστικά αυτού του σταθμού φαίνονται στον πίνακα 2.11:

Πίνακας 2.11: Χαρακτηριστικά του σταθμού

Δυναμικότητα	1,4 MW
Εμβαδό εγκατάστασης	7 εκτάρια
Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια	2000 MWh/έτος
Μέγιστη θερμοκρασία	270 C
Θερμική αποθηκευτική δυναμικότητα	0 ώρες
Υγρό μέσο μετάδοσης θερμότητας	Νερό

2.4 Ηλιακοί σταθμοί με τεχνολογία πιάτου/μηχανής ανα τον κόσμο

Ο ηλιακός σταθμός White Cliffs Solar Power Station βρίσκεται στην Νέα Νότια Ουαλία, Αυστραλία. Ο σταθμός αυτός αποτελείται από συνολικά 14 συγκεντρωτές. Μια όψη του σταθμού φαίνεται στην εικόνα 2.3.3.

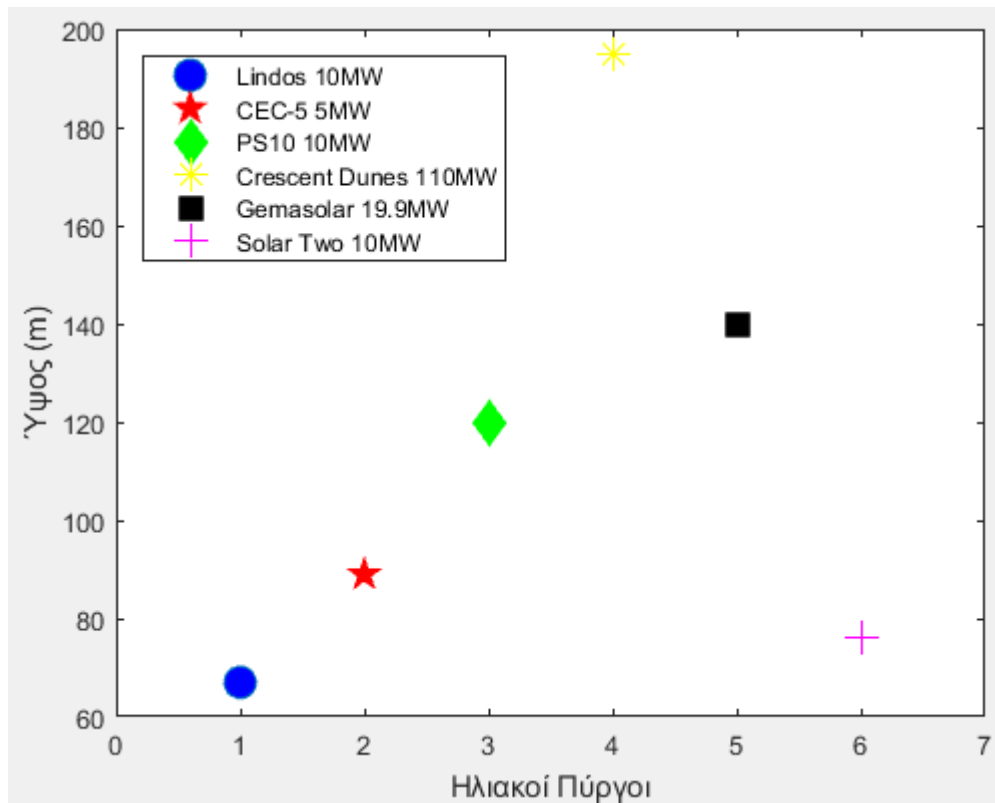


Εικόνα 2.3.3: Ηλιακός σταθμός White Cliffs Solar Power Station

Ο ηλιακός σταθμός Maricopa Solar Power Dish Plant βρίσκεται στη Peoria, στην Αριζόνα, Η.Π.Α. Ο σταθμός αυτός αποτελείται από 60 δίσκους-συγκεντρωτές και έχει ισχύ 1,5 MW. Μια όψη του σταθμού αυτού φαίνεται στην εικόνα 2.3.4.



Εικόνα 2.3.4: Ηλιακός σταθμός Maricopa Solar Power Dish Plant



	Gemasolar	Crescent Dunes	PS10	Ivanpah	SunCan	Lindos
Ηλεκτρική Ισχύς	120 MW	110 MW	10 MW	392 MW	10 MW	10 MW
Συνολικό Εμβαδό ηλιοστατών	304.750 m ²	1.197.148 m ²	75.000 m ²	2.600.000 m ²	175.375 m ²	133.960 m ²
Αριθμός ηλιοστατών	2650	10.347	624	173500	1525	1094
Συνολικό εμβαδό γης εγκατάστασης	1.950.000 m ²	16.000.000 m ²	550.000 m ²	35.000.000 m ²	1.200.000 m ²	991.452 m ²
Ύψος πύργου	140 m	195 m	120 m	-	138 m	67 m
Εργαζόμενο μέσο	Λιωμένο Άλας	Λιωμένο Άλας	Νερό	Νερό	Λιωμένο άλας	Λιωμένο άλας
Αποθηκευτική ή δυναμικότητα	15 ώρες	10 ώρες	0,5 ώρες	0 ώρες	15 ώρες	2 ώρες

