

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Αριθμός 1270**

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:
ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:
ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ**

ΠΑΤΡΑ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση των τεσσάρων κατηγοριών των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Οι διατάξεις αυτές είναι:

- § παραβολικά κοίλα
- § ηλιακοί πύργοι ισχύος
- § συστήματα δίσκου και
- § συλλέκτες Fresnel

Πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην αρχή λειτουργίας και στις τεχνικές ιδιότητες κάθε κατηγορίας. Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα είναι διατάξεις στις οποίες συνεργάζονται η επιστήμη της ηλεκτρολογίας και της μηχανολογίας και αποτελούν τεχνολογία αιχμής όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τεχνογνωσία που διαρκώς βελτιώνεται ούτως ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός βαθμός απόδοσης των συστημάτων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες (της τάξης των MW) μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα μελετηθούν οι τέσσερις επικρατούσες και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Πρόκειται για διατάξεις που με τη χρήση κατόπτρων τα οποία συνεργάζονται σε διάφορες διατάξεις, συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σ' ένα σημείο από το οποίο διέρχεται κάποιο ρευστό θερμαντικό μέσο, το οποίο θερμαίνεται παράγοντας ατμό με τη βοήθεια εναλλάκτη θερμότητας. Ο ατμός χρησιμοποιείται για την κίνηση ατμογεννητριών με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιες μονάδες ισχύος πολλών MW παράγουν φθηνή ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως. Οι τέσσερις αρχιτεκτονικές θερμικής ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής είναι:

- Τα παραβολικά κοίλα: παραβολικά κάτοπτρα σε μορφή σκάφης που συγκεντρώνουν το ηλιακό φως σε έναν διαφανή σωλήνα που διατρέχει κάθε σκάφη. Μέσα στο σωλήνα κυκλοφορεί το ρευστό που θερμαίνεται.
- Οι ηλιακοί πύργοι ισχύος: Αποτελούνται από έναν δέκτη ηλιακής ακτινοβολίας ο οποίος περιβάλλεται από ηλιοστάτες που κατευθύνουν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω του. Από εκεί η ενέργεια μεταφέρεται σε ένα ρευστό.
- Τα συστήματα δίσκου: Χρησιμοποιούν ένα σύνολο καθρεπτών για την ανάκλαση και συγκέντρωση του ηλιακού φωτός στο δέκτη. Η συγκεντρωμένη ακτινοβολία μεταφέρεται σε μια μηχανή (Stirling ή Brayton) όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Ο συλλέκτης Fresnel: αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές ανακλαστήρων που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη τοποθετημένο κατά μήκος των σειρών αυτών και σε αρκετά μέτρα ύψος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
Εκμετάλλευση Ηλιακής Ενέργειας.....	1
Θερμοδυναμικοί κύκλοι εκμετάλλευσης Ηλιακής Ενέργειας.....	1
Θερμοδυναμικός Κύκλος Stirling.....	1
Θερμοδυναμικός Κύκλος Joule-Brayton.....	2
Θερμοδυναμικός Κύκλος Rankine.....	2
Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα.....	3
Συστήματα Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών (Parabolic Trough Collectors-PTC).....	4
Πύργοι Ηλιακής Ισχύος ή Συστήματα Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη (Solar Power Towers or Central Solar Receiver Systems-CRS).....	5
Συστήματα Δίσκου-Μηχανής (Dish-Engine Systems-DE).....	6
Συστήματα με Γραμμικούς Ανακλαστήρες τύπου Fresnel (Linear Fresnel Reflector Systems-LF).....	7
1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΩΝ ΚΟΙΛΩΝ^{[9], [10], [11],[17]}.....	8
3.1 Αρχή λειτουργίας.....	8
3.2 Δομή ενός ηλιακού συλλέκτη.....	9
3.2.1 Σκελετός του ηλιακού συλλέκτη.....	9
<i>Συλλέκτες με σύστημα Luz</i>	9
<i>Συλλέκτες EuroTrough</i>	10
<i>Συλλέκτες Solargenix</i>	11
3.2.2 Ανακλαστήρας.....	11
3.2.3 Δέκτης.....	12
3.2.4 Σύστημα παρακολούθησης του ήλιου ^[15]	13
3.3 Άμεση Παραγωγή Ατμού ^[16]	15
3.4 Απόδοση και απώλειες του συστήματος ^[15]	16
3.4.1 Γεωμετρικές παράμετροι σχεδίασης.....	16
3.4.2 Απώλειες.....	17
3.4.3 Οπτικές απώλειες.....	17
3.4.4 Θερμικές απώλειες.....	18
3.4.5 Γεωμετρικές απώλειες.....	19
2 ΗΛΙΑΚΟΙ ΠΥΡΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ^{[18], [20],[25]}.....	21
2.1 Αρχή λειτουργίας.....	21
2.2 Πλεονεκτήματα έναντι άλλων Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων.....	21
2.3 Υποσυστήματα του Πύργου Ηλιακής Ισχύος.....	22
2.3.1 Ηλιοστατικό Πεδίο ^[20]	22
2.3.2 Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης.....	28
3 ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΣΚΟΥ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	34
3.1 Αρχή λειτουργίας.....	34
3.2 Συγκεντρωτές.....	36
3.3 Δέκτες.....	37
3.4 Κινητήρες Stirling.....	38
3.4.1 Διαμορφώσεις μηχανών Stirling.....	39
3.5 Αρχή λειτουργίας Μηχανής Stirling ^{[41], [42]}	40
3.6 Ενδεικτικές εφαρμογές των θερμικών μηχανών Stirling ^[32]	44
3.6.1 Η Stirling στη στεριά.....	44
3.6.2 Η Stirling στη θάλασσα ^[36]	46
3.6.3 Η Stirling στο Διάστημα.....	47

3.6.4	Η ψυκτική μηχανή	47
3.7	Μειονεκτήματα – Πλεονεκτήματα Μηχανής Stirling ^[40]	49
4	ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ FRESNEL	50
4.1	Ιστορική Αναδρομή ^{[44],[45]}	50
4.2	Γενική Επισκόπηση του Συστήματος ^{[45], [46]}	51
4.3	Θεωρητική παρουσίαση του συλλέκτη ^[49]	53
4.3.1	Οπτική απόδοση.....	55
4.3.2	Θερμική απόδοση	57
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	59

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εκμετάλλευση Ηλιακής Ενέργειας

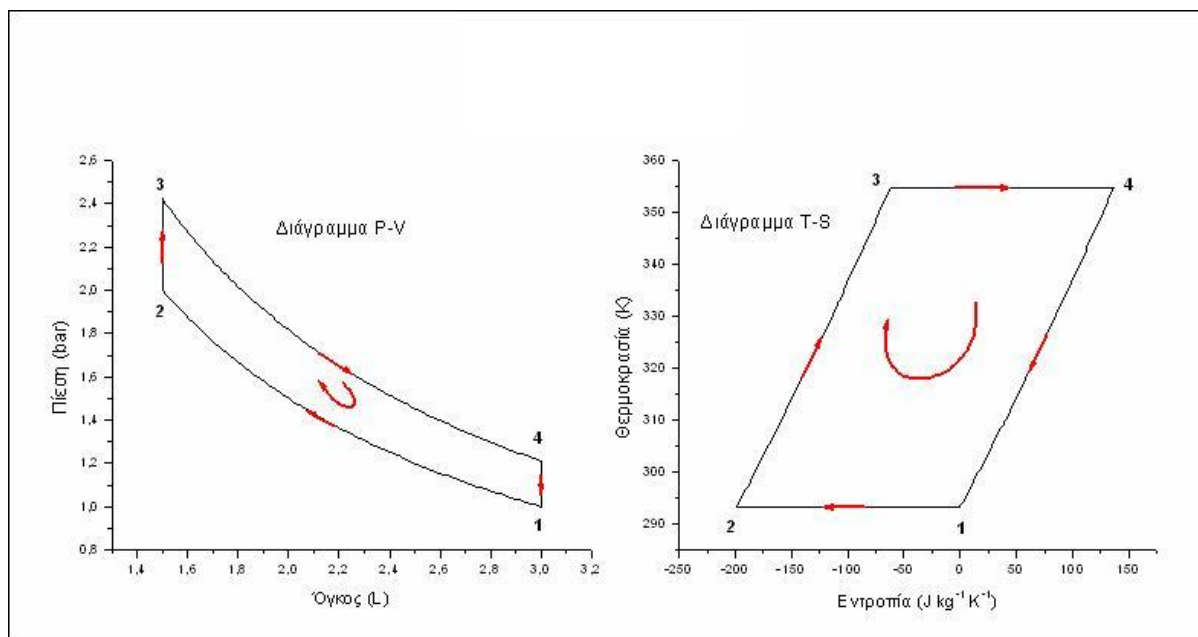
Η αρχή της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στην θερμότητα που αυτή μπορεί να προσδώσει σε ένα μέσο όταν συγκεντρωθεί κατάλληλα πάνω του. Το μέσο στη συνέχεια, μπορεί να εκτελέσει έναν θερμοδυναμικό κύκλο, αποδίδοντας την παραπάνω θερμότητα προς παραγωγή έργου.

Θερμοδυναμικοί κύκλοι εκμετάλλευσης Ηλιακής Ενέργειας

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

Θερμοδυναμικός Κύκλος Stirling

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



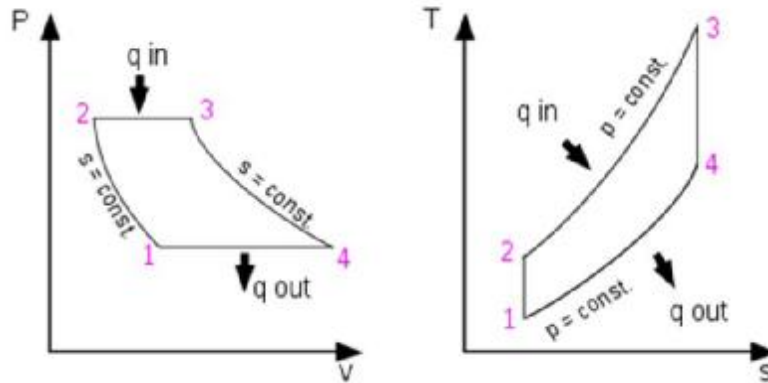
Σχήμα 1 Ιδανικός Κύκλος Stirling^[1]

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές αναλυτικά:

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

Θερμοδυναμικός Κύκλος Joule-Brayton

Πρόκειται για τον θερμοδυναμικό κύκλο που περιγράφει τη λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου. Αποτελείται από δύο αντιστρεπτές ισεντροπικές μεταβολές και δύο ισόθλιπτες. Για το λόγο αυτό είναι γνωστός και ως κύκλος σταθερής πίεσης.



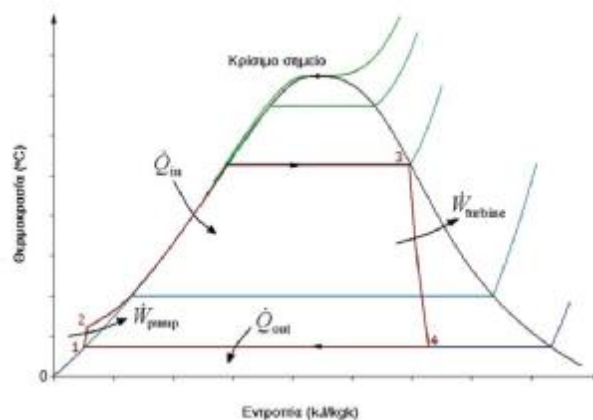
Σχήμα 2 Ιδανικός Κύκλος Joule-Brayton^[2]

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές αναλυτικά:

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

Θερμοδυναμικός Κύκλος Rankine

Πρόκειται για τον πιο διαδεδομένο κύκλο μετατροπής θερμότητας σε έργο καθώς χρησιμοποιείται στις μέρες μας για το 90% της ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως. Στην ιδανική του μορφή αποτελείται από μια ισεντροπική συμπίεση και μια αποτόνωση και από μία ισοθερμοκρασιακή πρόσδοση και μια αποβολή θερμότητας αντίστοιχα. Η λειτουργία του συγκεκριμένου κύκλου απαιτεί την ύπαρξη μέσου αλλαγής φάσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις ως μέσο χρησιμοποιείται το νερό το οποίο σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες μετατρέπεται σε ατμό.



Σχήμα 3 Τυπικός Θερμοδυναμικός κύκλος Rankine^[3]

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές αναλυτικά:

1" 2: Συμπύεση.

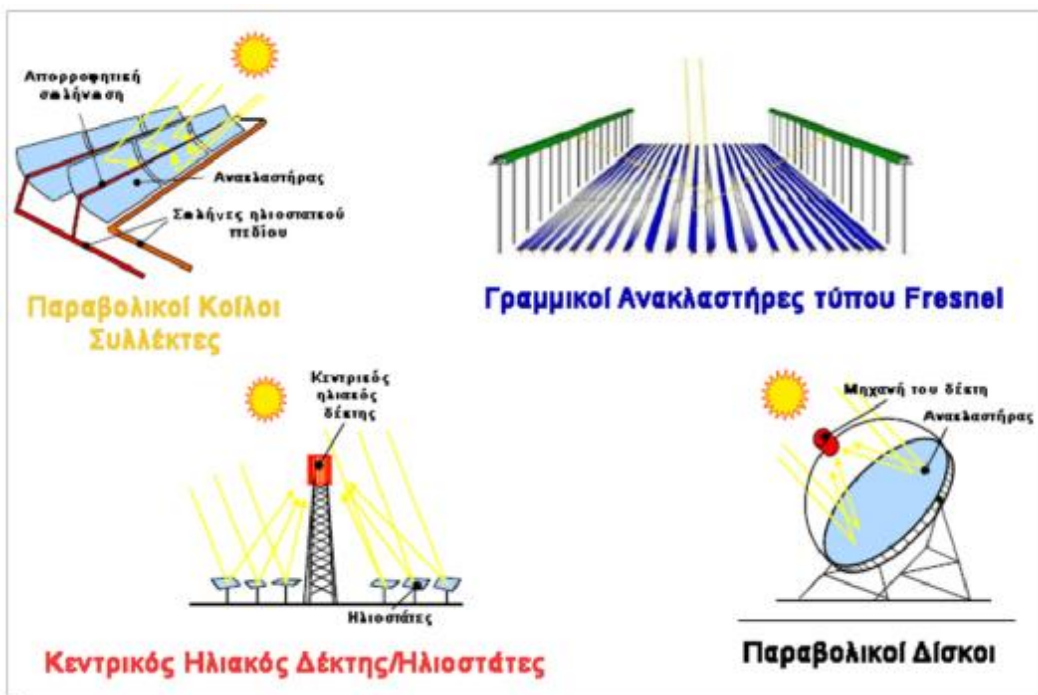
2" 3: Ισοβαρής πρόσδοση θερμότητας.

3" 4: Αποτόνωση.

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

Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα

Εδώ και αρκετές δεκαετίες, ο άνθρωπος είχε αναγνωρίσει την χρησιμότητα της ηλιακής ενέργειας. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να επιδιώκει με το πέρασμα των χρόνων την ολοένα και πιο αποτελεσματική συγκέντρωση της προσπίπτουσας στη γη ηλιακής ακτινοβολίας, εκμεταλλεύμενος την ιδιότητα της να προσδίδει θερμότητα σε ένα μέσο. Αυτή η μεταβολή της θερμοκρασίας του μέσου μπορούσε στη συνέχεια, με τη βοήθεια ενός θερμοδυναμικού κύκλου να οδηγήσει στην παραγωγή μηχανικού έργου σε κάποιον άξονα και επακόλουθα και ηλεκτρικής ενέργειας. Για να γίνει κάτι τέτοιο συνήθως χρησιμοποιείται κάποιος αμοστροβίλος ή μία μηχανή Stirling. Ακολουθώντας τον παραπάνω συλλογισμό, οι ερευνητές οδηγήθηκαν σήμερα σε τεχνολογίες συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας πολύ συγκεκριμένες και με ανταγωνιστική απόδοση. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων είναι ότι αποτελούνται από τα τμήματα του ηλιακού συλλέκτη, του ηλιακού δέκτη, του συστήματος μεταφοράς και αποθήκευσης του μέσου και του συστήματος μετατροπής της ισχύος. Σημαντικό μέγεθος για κάθε συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα είναι ο λόγος συγκέντρωσης που ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας του ηλιακού συλλέκτη στον οποίο προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία, προς την επιφάνεια του δέκτη, στον οποίο αυτή τελικά απορροφάται. Προφανώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος συγκέντρωσης τόσο υψηλότερες είναι και οι θερμοκρασίες που μπορεί να φτάσει το μέσο και συνεπώς τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός απόδοσης της ηλιοθερμικής εγκατάστασης. Οι σύγχρονες τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στις διάφορες ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις στις μέρες μας και υπόσχονται να υποκαταστήσουν σημαντικό κομμάτι της ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως στο μέλλον είναι οι ακόλουθες.



Σχήμα 4 Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα^[4]

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

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



Σχήμα 5 *Τυπικό Σύστημα Παραβολικών Κοίλων Συλλεκτών^[5]*

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

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



Σχήμα 6 Τοπικό Σύστημα Πύργου Ηλιακής Ισχύος^[6]

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

Είναι συνήθως αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας τα οποία χρησιμοποιούν ένα παραβολικό δίσκο ως συλλέκτη συγκεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία στο σημείο εστίασης του όπου βρίσκεται ως δέκτης στις περισσότερες περιπτώσεις μία μηχανή τύπου Stirling ή πιο σπάνια κάποιος μικροστρόβιλος. Σε κάποιες διατάξεις έχει δοκιμαστεί και η χρήση περισσότερων του ενός παραβολικού δίσκου με έναν κοινό δέκτη. Όπως και στα συστήματα κεντρικού ηλιακού δέκτη, ο εντοπισμός της τροχιάς που διαγράφει ο ήλιος στην ουράνια σφαίρα γίνεται και στις τρεις διαστάσεις. Σκοπός του μηχανισμού κίνησης του παραβολικού δίσκου είναι η επιφάνεια του τελευταίου να είναι πάντα κάθετη στην νοητή ευθεία που συνδέει το κέντρο του με το κέντρο του ηλίου. Τα συστήματα δίσκου-μηχανής επιτυγχάνουν πολύ μεγάλους λόγους συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, από 1000 έως και 4000 φορές, όμως ακόμα χρησιμοποιούνται για μικρές ποσότητες παραγωγής ενέργειας της τάξεως των 5-25KW μόλις. Σημαντικό στοιχείο και φυσικό επακόλουθο του υψηλού λόγου συγκέντρωσης, είναι πως η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει αγγίξει το φράγμα του 30% στον ετήσιο βαθμό απόδοσης της. Από την άλλη πλευρά όμως, η αξιοπιστία της βρίσκεται ακόμα υπό αμφισβήτηση, καθώς το κόστος τέτοιων συστημάτων αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τη μαζική παραγωγή τους.



Σχήμα 7 Τυπικό Σύστημα Δίσκου-Μηχανής^[7]

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

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



Σχήμα 8 Τοπικό Σύστημα με Γραμμικούς Ανακλαστήρες τύπου Fresnel^[8]

1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΩΝ ΚΟΙΛΩΝ^{[9], [10], [11],[17]}

3.1 Αρχή λειτουργίας

Το ηλιακό πεδίο αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές ηλιακών συλλεκτών που ευθυγραμμίζονται οριζόντια ώστε να παρακολουθούν τον ήλιο κατά μήκος ενός άξονα - συνήθως κατά τον άξονα βορά-νότου. Από κάθε σειρά συγκεντρώνεται η ηλιακή ακτινοβολία σε έναν σωληνωτό δέκτη που είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής του κοίλου. Ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας θερμαίνεται καθώς κυκλοφορεί κατά μήκος του δέκτη και καταλήγει σε μια σειρά εναλλακτών θερμότητας (γεννήτρια ατμού) που παράγουν υπέρθερμο ατμό περίπου στους 400°C. Ο υπέρθερμος ατμός οδηγείται σε έναν αμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την έξοδο του στροβίλου ο ατμός οδηγείται σε έναν συμπυκνωτή, όπου και γίνεται συμπύκνωση του ατμού σε κορεσμένο υγρό. Το κορεσμένο υγρό συμπιέζεται από τις αντλίες τροφοδοσίας του λέβητα και οδηγείται στον εξατμιστή, απ' όπου η υγρή φάση του νερού οδηγείται στην γεννήτρια του ατμού και κλείνει έτσι ο κύκλος του νερού.



Σχήμα 9 Ηλιακοί συλλέκτες^[12]

Οι εγκαταστάσεις μπορούν να λειτουργήσουν σε πλήρη ισχύ χρησιμοποιώντας μόνο την ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, οι εγκαταστάσεις λειτουργούν συνήθως για 10 έως 12 ώρες ημερησίως σε ονομαστική ηλεκτρική έξοδο. Παρ'όλ'αυτά, μέχρι σήμερα, όλες οι εγκαταστάσεις είναι υβριδικές. Δηλαδή έχουν έναν εφεδρικό λέβητα ατμού, που λειτουργεί με ορυκτά καύσιμα και χρησιμοποιείται για να συμπληρώσει την ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης παράλληλα με τη γεννήτρια ατμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικοί βοηθητικοί αναθερμαντές ορυκτών καυσίμων.

3.2 Δομή ενός ηλιακού συλλέκτη

Ένας ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από

- § Το σκελετό
- § Τον ανακλαστήρα
- § Το δέκτη, και
- § Το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου

3.2.1 Σκελετός του ηλιακού συλλέκτη

Ο σκελετός ενός ηλιακού συλλέκτη χρησιμοποιείται

- § για να στηρίζει τους ανακλαστήρες και τους δέκτες και να τους διατηρεί σε κατάλληλη θέση μεταξύ τους ώστε να επικεντρώνεται σωστά η ηλιακή ακτινοβολία.
- § Για να αντέχει καταπονήσεις όπως δυνάμεις από αέρα και βροχή
- § Για να περιστρέφεται κατάλληλα ο ανακλαστήρας και ο δέκτης προκειμένου να λαμβάνουν πάντα τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία.

Τα τρία συστήματα ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται είναι

- § Το σύστημα Luz
- § Το σύστημα EuroTrough
- § Το σύστημα Solargenix

Συλλέκτες με σύστημα Luz

Οι συλλέκτες τύπου Luz αποτελούν το μέτρο σύγκρισης βάσει του οποίου συγκρίνονται οι υπόλοιποι τύποι συλλεκτών. Κατασκευάζονται από γαλβανισμένο χαλκό και είναι πάρα πολύ αξιόπιστοι. Οι περισσότεροι ηλιακοί σταθμοί χρησιμοποιούν τέτοιου τύπου συλλέκτες. Υπάρχουν δύο τύποι Luz συλλεκτών: ο LS-2 και ο LS-3.

Ο συλλέκτης LS-2 είναι έτσι κατασκευασμένος ώστε να μπορεί εύκολα να ανασηκωθεί και να είναι δύσκολο να περιστραφεί και άρα δύσκολο να χάσει τη θέση του. Αποτελείται από έξι βάσεις σε σχήμα συνεστραμμένου σωλήνα, τρεις σε κάθε πλευρά. Σε κάθε βάση εδράζονται δύο δέκτες 4 μέτρα έκαστος. Το μειονέκτημα αυτής της κατασκευής είναι ότι χρησιμοποιεί μεγάλη ποσότητα χάλυβα και απαιτεί ακρίβεια στην κατασκευή..



Σχήμα 10 Ο συλλέκτης LS-2

Για μείωση κατασκευαστικού κόστους η εταιρεία Luz σχεδίασε τον μεγαλύτερο συλλέκτη LS-3 η κατασκευή του οποίου απαιτεί λιγότερο χάλυβα. Ο LS-3 αποδείχθηκε πολύ αξιόπιστη

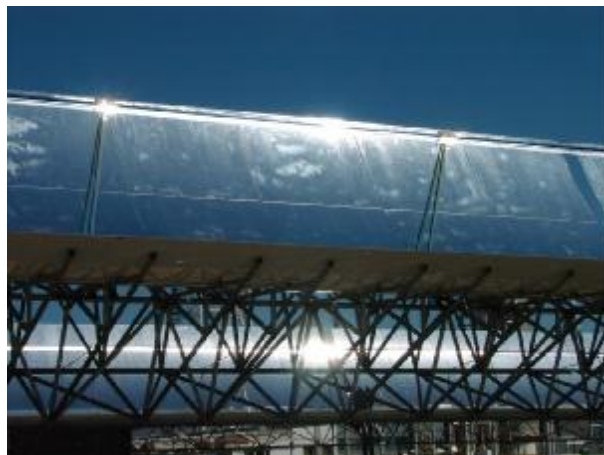
κατασκευή. Χρησιμοποιεί μια γέφυρα με μεταλλικά στηρίγματα σε κάθε πλευρά του. Κάθε στηρίγμα περιλαμβάνει τρεις δέκτες 4 μέτρων έκαστος. Ο σχεδιασμός του LS-3 τελικά δεν μείωσε στο αναμενόμενο το κατασκευαστικό κόστος και επίσης παρουσίασε προβλήματα ευστάθειας που σαν αποτέλεσμα είχαν θερμοαντική απόδοση χαμηλότερη της αναμενόμενης.



Σχήμα 11 Ο συλλέκτης LS-3

Συλλέκτες EuroTrough

Μια ευρωπαϊκή εταιρεία, η EuroTrough ξεκίνησε την ανάπτυξη ενός νέου συλλέκτη με σκοπό να ενσωματωθούν τα πλεονεκτήματα των συλλεκτών LS-2 και LS-3. Ο συλλέκτης EuroTrough ενσωμάτωσε στην κατασκευή του το συνεστραμμένο σωλήνα για να ενισχύσει τη σταθερότητα του συλλέκτη καθώς και την χαμηλότερη περιεκτικότητα σε χάλυβα για οικονομία.



Σχήμα 12 Ο συλλέκτης EuroTrough

Συλλέκτες Solargenix

Υπό την αιγίδα του υπουργείου ενέργειας των ΗΠΑ η εταιρεία Solargenix Energy ανέπτυξε έναν νέο συλλέκτη με συγχρηματοδότηση και συνεργασία στο κομμάτι της έρευνας και από το NREL (national renewable energy laboratory).



Σχήμα 13 Ο συλλέκτης Solargenix

Ο συλλέκτης Solargenix είναι κατασκευασμένος από πεπιεσμένο αλουμίνιο. Χρησιμοποιεί μια οργανική ύλη, την οποία η εταιρεία Gossamer Spaceframes πρωτοανέπτυξε για εφαρμογή σε κτήρια και γέφυρες. Η νέα αυτή κατασκευή :

- Είναι ελαφρύτερη από τις χαλύβδινες κατασκευές
- Απαιτεί πολύ λίγους συνδετήρες
- Δεν απαιτεί οξυγονοκολλήσεις ούτε και ειδικές κατασκευές
- Συναρμολογείται εύκολα

3.2.2 Ανακλαστήρας

Το βασικό μέρος του ηλιακού συλλέκτη είναι ο ανακλαστήρας-συγκεντρωτής. Αποτελείται από την ανακλαστική επιφάνεια (κάτοπτρα-καθρέπτες) σε παραβολική μορφή και κατασκευάζονται από την εταιρεία Flabeg. Το τζάμι κατασκευής των κατόπτρων είναι επαργυρωμένο στο πίσω τμήμα του και καλυμμένο με διάφορα προστατευτικά επιστρώματα. Έχει πάχος 4 mm και χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανακλαστικότητα. Κάτοπτρα με υψηλή ποιότητα επιτρέπουν στο 93.5% των ανακλώμενων ακτίνων να προσπίπτουν στο γραμμικό δέκτη. Κάθε κάτοπτρο έχει εμβαδό περίπου 2 τετραγωνικά μέτρα. Ένα βασικό χαρακτηριστικό καλής απόδοσης του συλλέκτη είναι ο λόγος συγκέντρωσης, δηλαδή ο λόγος του ανοίγματος της ανακλαστικής επιφάνειας προς τη διάμετρο του δέκτη. Ο λόγος αυτός με την πάροδο των χρόνων αυξήθηκε προκειμένου να αυξηθεί η θερμική απόδοση των συλλεκτών.

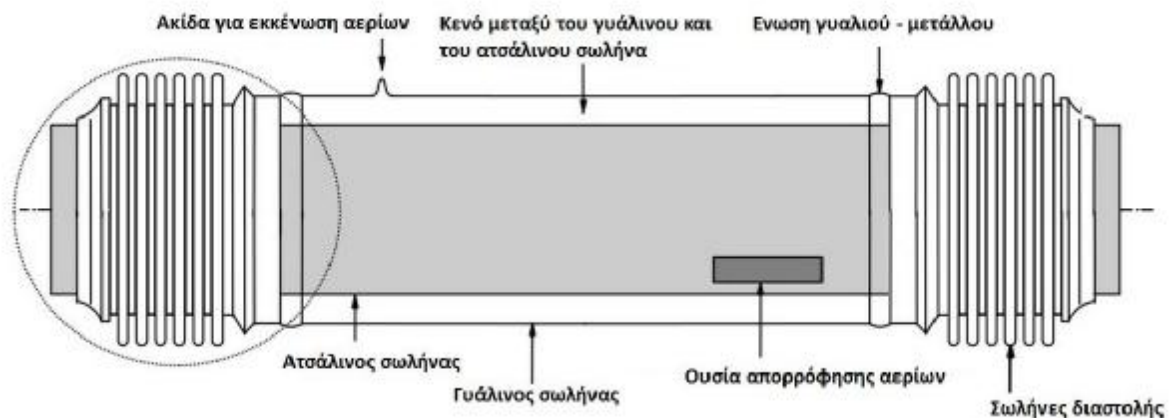
Οι συλλέκτες έχουν δείξει καλή απόδοση κατά τη λειτουργία τους στις ηλιακές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηρίζονται από υψηλή ανακλαστικότητα και παρουσιάζουν ελάχιστες βλάβες. Μόνο κάποιοι θρυμματισμοί συμβαίνουν οπότε και πρέπει να αντικατασταθούν. Η αντικατάσταση βέβαια έχει μεγάλο κόστος και ερευνώνται καινούρια υλικά και ιδιότητες προκειμένου να μειωθεί το κόστος και ταυτόχρονα να αυξηθεί η αξιοπιστία των κατόπτρων.

3.2.3 Δέκτης

Ο δέκτης είναι από τους βασικούς παράγοντες για την επίτευξη υψηλής απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική. Έχει κυλινδρικό σχήμα και αποτελείται από δύο ομοαξονικούς σωλήνες. Ο εσωτερικός σωλήνας, μέσα στον οποίο ρέει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, αποτελεί ουσιαστικά το σωλήνα απορρόφησης. Είναι χαλύβδινος, έχει μήκος 4 μέτρα και πάχος συνήθως 7cm και η εξωτερική του επιφάνεια είναι επιστρωμένη με κατάλληλα κεραμικά που διασφαλίζουν τη μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής θερμότητας. Ο εξωτερικός σωλήνας είναι γυάλινος, διαμέτρου 11.5 εκατοστά και έχει μια «αντι-ανακλαστική» επίστρωση και στην εσωτερική και στην εξωτερική του επιφάνεια. Μεταξύ των δύο σωλήνων επικρατούν συνθήκες απόλυτου κενού. Το κενό χρησιμεύει για την προστασία του εσωτερικού σωλήνα από οξείδωση και για τη μείωση των απωλειών θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Λεπτομέρεια ενός τυπικού σωλήνα απορρόφησης φαίνεται στο σχήμα 14.

Ο δέκτης που είχε αρχικά χρησιμοποιηθεί στους συλλέκτες Luz δεν είχε αξιοπιστία όσον αφορά στα υλικά των δύο σωλήνων. Οι εταιρείες Solel Solar Systems και Schott Glass έχουν αναπτύξει καλύτερους σωλήνες με τα παρακάτω χαρακτηριστικά

- § Καλύτερη συμπεριφορά υλικών
- § Καλύτερη θερμική απόδοση
- § Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής



Σχήμα 14 Τυπικός σωλήνας απορρόφησης- Δομικό διάγραμμα^[11]



Σχήμα 15 Σωλήνες απορρόφησης^{[13], [14]}

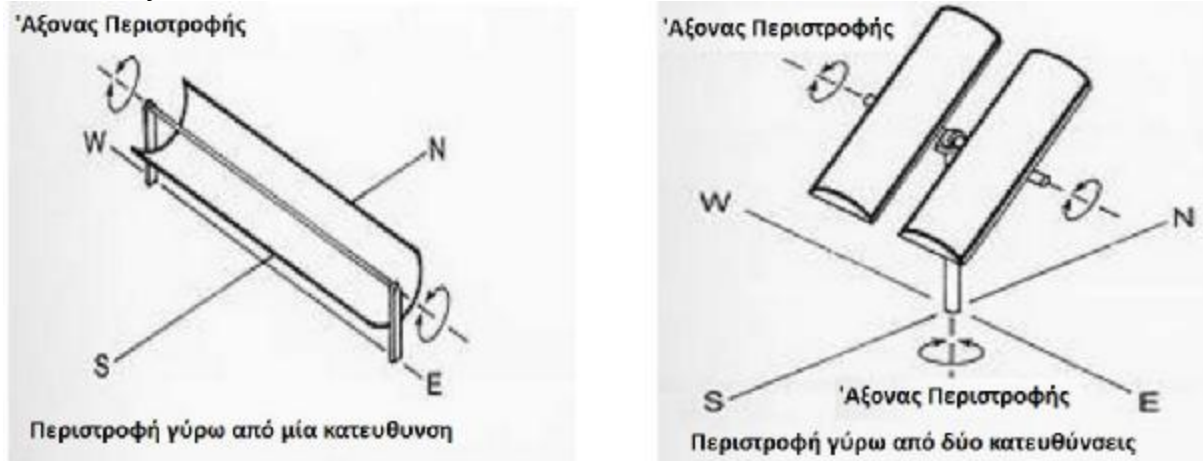
3.2.4 Σύστημα παρακολούθησης του ήλιου^[15]

Οι συλλέκτες περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα για να παρακολουθούν τον ήλιο καθώς κινείται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συνήθως ο άξονας περιστροφής είναι προσανατολισμένος είτε προς βορρά-νότο είτε προς ανατολή-δύση. Ο προσανατολισμός του συλλέκτη καθορίζεται από τη μορφή και τον προσανατολισμό της περιοχής όπου αυτός εγκαθίσταται. Επηρεάζει τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων πάνω στο επίπεδο του ανοίγματος, η οποία με τη σειρά της έχει επιπτώσεις στην απόδοση του συλλέκτη. Τρεις έως τέσσερις φορές περισσότερη ενέργεια παράγεται καθημερινά κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών σε σχέση με το χειμώνα, ανάλογα βέβαια με το γεωγραφικό πλάτος και τις τοπικές καιρικές συνθήκες κάθε εγκατάστασης. Οι εποχιακές αυξομειώσεις στην ενεργειακή απόδοση είναι πολύ μικρότερες για έναν προσανατολισμό ανατολής-δύσης, συνήθως λιγότερο από 50%. Άρα ένας άξονας παρακολούθησης του ήλιου με προσανατολισμό βορρά-νότου παρέχει περισσότερη ενέργεια σε ετήσια βάση. Από τα παραπάνω καταλαβαίνει κανείς ότι ο προσανατολισμός του άξονα περιστροφής είναι πολύ σημαντικός για την απόδοση και η επιλογή του καλύτερου προσανατολισμού εξαρτάται από τις ακόλουθες απαιτήσεις:

§ Εάν απαιτείται περισσότερη ενέργεια το καλοκαίρι απ' ό,τι το χειμώνα, ο καταλληλότερος προσανατολισμός είναι βορρά-νότου.

§ Αν πρέπει η ενέργεια να συλλέγεται και να διανέμεται ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια όλου του έτους, παρόλο που το χειμώνα η παραγωγή είναι σημαντικά μικρότερη απ' ό,τι το καλοκαίρι, τότε ο καλύτερος προσανατολισμός είναι ανατολής-δύσης.

Μια πιο αποδοτική προσέγγιση αποτελεί το σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων, τόσο δηλ ανατολής-δύσης όσο και βορρά νότου. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται και οι δύο κατασκευές.



Σχήμα 16 Τρόποι παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς^[15]

Σημαντικός περιοριστικός παράγοντας για την ομαλή λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης αποτελεί η ταχύτητα του ανέμου. Ο συλλέκτης είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί κανονικά για ανέμους μέχρι 40 km/h, ενώ για ανέμους μέχρι 56 km/h λειτουργεί αλλά με μειωμένη ακρίβεια σε κάποιο βαθμό. Η μέγιστη ταχύτητα ανέμου που αντέχει η κατασκευή του συλλέκτη είναι 113 km/h.

Τέλος, τα συστήματα περιστροφής των συλλεκτών μπορεί να είναι είτε ηλεκτρικά είτε υδραυλικά

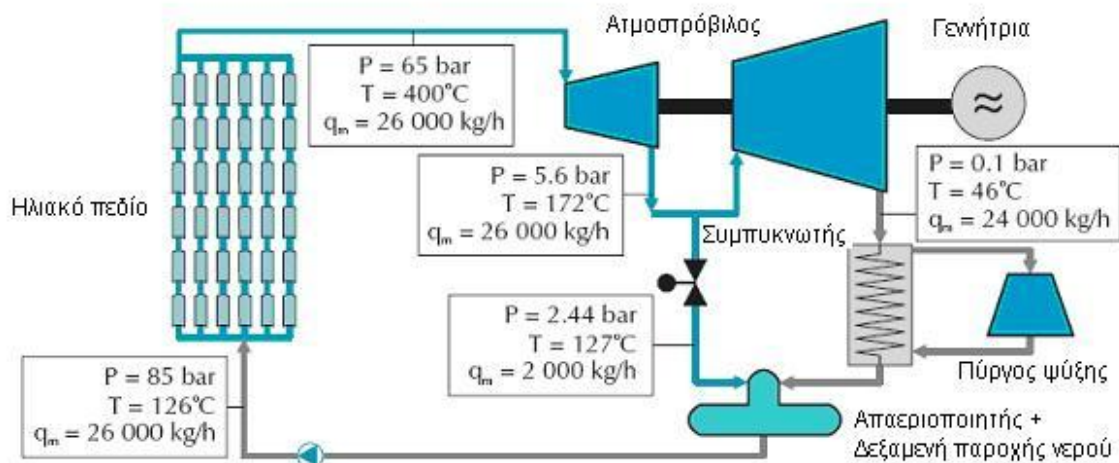


Σχήμα 17 Ηλεκτρικό και υδραυλικό tracker^[15]

3.3 Άμεση Παραγωγή Ατμού^[16]

Η άμεση παραγωγή ατμού στους σωλήνες απορρόφησης ενός συστήματος παραβολικών κοίλων είναι μια ελκυστική ιδέα, σύμφωνα με την οποία ο ατμός δεν παράγεται σε μια σειρά εναλλακτών θερμότητας (γεννήτρια ατμού), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά μέσα στον ίδιο το σωληνωτό δέκτη. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται εδώ είναι νερό. Οι συγκεντρωμένες ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν με τη βοήθεια των κατόπτρων στο κάτω μέρος του σωληνωτού δέκτη. Έτσι θερμαίνονται και εξατμίζουν το νερό που βρίσκεται μέσα στο σωλήνα, όπου δημιουργείται μια ροή νερού (στο κάτω μέρος του) και μια ροή ατμού (στο πάνω μέρος του). Τα μειονεκτήματα αυτής της ιδέας σχετίζονται με την ύπαρξη ροής δύο φάσεων και με τα θερμοϋδραυλικά προβλήματα που αυτό συνεπάγεται. Εντούτοις, τα πειράματα που εκτελούνται στην εγκατάσταση Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία έχουν αποδείξει την τεχνική δυνατότητα πραγματοποίησης της αρχής αυτής σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας 100 bar και 400°C αντίστοιχα. Τα τεχνικά πλεονεκτήματα στην άμεση παραγωγή ατμού είναι:

- Κανένας κίνδυνος ρύπανσης ή πυρκαγιάς λόγω της χρήσης κάποιου θερμικού ελαίου σε θερμοκρασίες περίπου 400°C
- Η δυνατότητα να αυξηθεί η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου Rankine πάνω από 400°C, όριο που επιβάλλεται από το θερμικό έλαιο που χρησιμοποιείται επί του παρόντος.
- Μείωση του μεγέθους του ηλιακού πεδίου και, κατά συνέπεια, μείωση του κόστους επένδυσης.
- Μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης, δεδομένου ότι τα συστήματα που βασίζονται στα θερμικά έλαια απαιτούν μια ορισμένη ποσότητα των αποθεμάτων ελαίου να αντικαθίσταται κάθε έτος, καθώς επίσης απαιτούν και αντιψυκτική προστασία όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι κάτω από 14°C.



Σχήμα 18 Διάγραμμα ενεργειακών ροών ενός συστήματος παραβολικών κοίλων με άμεση παραγωγή ατμού^[17]

3.4 Απόδοση και απώλειες του συστήματος^[15]

3.4.1 Γεωμετρικές παράμετροι σχεδίασης

Τρεις παράμετροι σχεδίασης που απαιτούνται για ένα σύστημα παραβολικών κοίλων είναι ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης C , η γωνία εισόδου β , και η οριακή γωνία του συλλέκτη ϕ (σχήμα 19). Ο λόγος συγκέντρωσης είναι ο λόγος μεταξύ της επιφάνειας του ανοίγματος του συλλέκτη και της συνολικής επιφάνειας του σωλήνα απορρόφησης. Η γωνία εισόδου είναι η μέγιστη γωνία που μπορεί να διαμορφωθεί από δύο ακτίνες σε ένα επίπεδο εγκάρσιο στο άνοιγμα του συλλέκτη έτσι ώστε να σταματούν τη πορεία τους στο σωλήνα του δέκτη εφόσον πρώτα ανακλαστούν από τους παραβολικούς καθρέφτες. Δηλαδή είναι το εύρος της γωνίας εντός του οποίου όλες ή σχεδόν όλες οι ηλιακές ακτίνες γίνονται αποδεκτές χωρίς μερική ή ολική μετατόπιση του συλλέκτη. Ο λόγος συγκέντρωσης, C , δίνεται από τον τύπο:

$$C = \frac{l_a}{p \cdot d_0}$$

όπου d_0 είναι η εξωτερική διάμετρος του σωληνωτού δέκτη και l_a είναι το πλάτος της παραβολής.

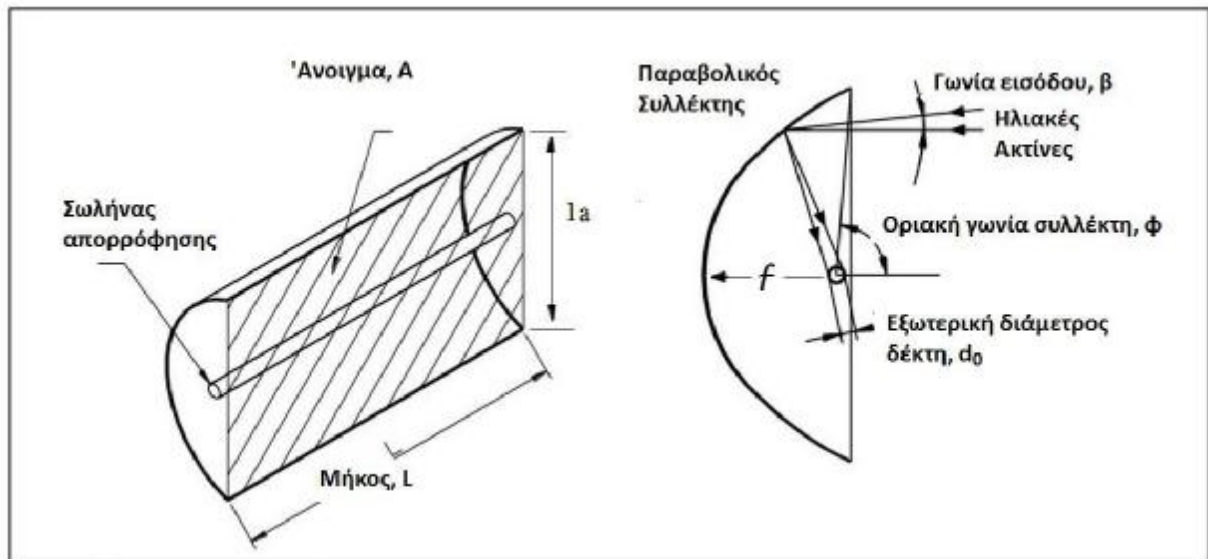
Όσο μεγαλύτερη η γωνία εισόδου του συλλέκτη, τόσο μικρότερης ακρίβειας χρειάζεται να είναι το σύστημα παρακολούθησης, καθώς ο συλλέκτης δεν θα πρέπει να ανανεώνει τη θέση του τόσο συχνά. Οι συνηθισμένες τιμές του λόγου συγκέντρωσης είναι περίπου 20, αν και η μέγιστη θεωρητική τιμή είναι σχεδόν 70. Υψηλοί λόγοι συγκέντρωσης συνεπάγονται χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, αλλά και πολύ μικρές γωνίες εισόδου, που απαιτούν πολύ ακριβή συστήματα παρακολούθησης του ήλιου και συνεπώς υψηλότερες δαπάνες.

Η ελάχιστη αποδεκτή γωνία εισόδου είναι $0,53^\circ$. Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε σύστημα με μια γωνία εισόδου μικρότερη από $0,53^\circ$ θα σκόρπιζε πάντα ένα μέρος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα, οι γωνίες εισόδου για εμπορικά συστήματα παραβολικών κοίλων είναι μεταξύ 1° και 2° . Μικρότερες γωνίες θα απαιτούσαν συστήματα παρακολούθησης μεγάλης ακρίβειας και συχνή ενημέρωση της θέσης του συλλέκτη, ενώ υψηλότερες τιμές θα οδηγούσαν σε μικρούς λόγους συγκέντρωσης και, επομένως, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Για αυτό το λόγο, οι γωνίες εισόδου μεταξύ 1° και 2° είναι οι πιο αποδοτικές οικονομικά.

Η οριακή γωνία του συλλέκτη Φ (rim angle), όπως φαίνεται στο σχήμα 19, σχετίζεται άμεσα με το μήκος τόξου του συλλέκτη και η τιμή της μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση ως συνάρτηση της παραβολικής εστιακής απόστασης, f , και του πλάτους ανοίγματος, l_a :

$$\frac{l_a}{4f} = \tan \frac{\Phi}{2}$$

Οι συνηθισμένες τιμές της οριακής γωνίας συλλέκτη είναι μεταξύ 70° και 110° . Μικρότερες γωνίες δεν είναι ενδεδειγμένες επειδή μειώνουν την επιφάνεια ανοίγματος. Ενώ γωνίες άνω των 110° δεν είναι αποδοτικές οικονομικά επειδή αυξάνουν τη συνολική ανακλαστική επιφάνεια χωρίς να αυξάνουν αποτελεσματικά το πλάτος ανοίγματος.



Σχήμα 19 Λόγος συγκέντρωσης και γωνία εισόδου ενός συλλέκτη παραβολικών κοίλων^[15]

3.4.2 Απώλειες

Όταν η άμεση ηλιακή ακτινοβολία φθάνει στην επιφάνεια ενός παραβολικού κοίλου, ένα σημαντικό ποσό από αυτήν χάνεται λόγω αρκετών διαφορετικών παραγόντων. Οι συνολικές απώλειες μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις τύπους, οι οποίοι κατά φθίνουσα σειρά σημασίας είναι:

- Οπτικές απώλειες
- Θερμικές απώλειες από το σωλήνα απορρόφησης στο περιβάλλον
- Γεωμετρικές απώλειες

3.4.3 Οπτικές απώλειες

Οι οπτικές απώλειες συνδέονται με τέσσερις παραμέτρους (σχήμα 20), οι οποίες είναι:

§ *Ανακλαστικότητα, ρ , της ανακλαστικής επιφάνειας του συλλέκτη:*

Επειδή η ανακλαστικότητα του συγκεντρωτή παραβολικών κοίλων είναι μικρότερη από 1, μόνο ένα μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται προς το σωλήνα του δέκτη. Οι χαρακτηριστικές τιμές ανακλαστικότητας για καθαρούς επαργυρωμένους γυάλινους καθρέφτες είναι περίπου 0,93. Η ανακλαστικότητά μειώνεται με την πάροδο του χρόνου λόγω της συσσώρευσης ρύπων. Τα εμπορικά κάτοπτρα πλένονται όταν η ανακλαστικότητά τους πέφτει στο 0,9.

§ *Παράγοντας ανάσχεσης, γ :*

Ένα μέρος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από τους καθρέφτες δεν φθάνει στην γυάλινη κάλυψη του σωλήνα απορρόφησης είτε λόγω μικροσκοπικών ατελειών στους καθρέφτες είτε λόγω μακροσκοπικών σφαλμάτων κατά τη συναρμολόγηση παραβολικών συγκεντρωτών. Αυτά τα σφάλματα προκαλούν την αντανάκλαση μερικών ακτίνων σε λανθασμένη γωνία και επομένως δεν φτάνουν στο δέκτη. Αυτές οι απώλειες προσδιορίζονται από μια παράμετρο γνωστή ως παράγοντας ανάσχεσης, γ , του οποίου η χαρακτηριστική τιμή είναι 0,95 για έναν συλλέκτη σωστά συναρμολογημένο.

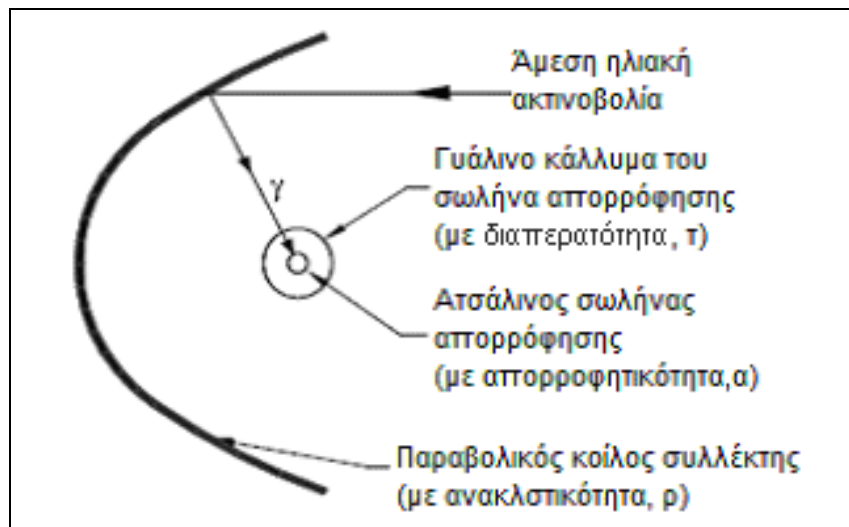
§ *Διαπερατότητα του γυάλινου σωλήνα, τ :*

Ένα μέρος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από τους καθρέφτες και φτάνει στο γυάλινο περίβλημα του δέκτη δεν είναι ικανό να περάσει διαμέσω του και

να φτάσει στον εσωτερικό μεταλλικό σωλήνα. Ο λόγος μεταξύ της ακτινοβολίας που περνάει διαμέσω του γυάλινου σωλήνα και της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε αυτόν, δίνει το συντελεστή διαπερατότητας, τ , χαρακτηριστική τιμή είναι $\tau=0.93$.

§ *Απορροφητικότητα του μεταλλικού σωλήνα του δέκτη, a :*

Αυτή η παράμετρος προσδιορίζει το ποσό της ενέργειας που απορροφάται από τον ατσάλινο σωλήνα απορρόφησης του δέκτη, σε σχέση με τη συνολική ακτινοβολία που φθάνει στο εξωτερικό τοίχωμα του. Η τυπική τιμή της παραμέτρου αυτής είναι 0,95 για μεταλλικούς σωλήνες δεκτών με επίστρωση κεραμομετάλλων, ενώ είναι ελαφρώς χαμηλότερη για σωλήνες επιστρωμένους με μαύρο νικέλιο ή χρώμιο.



Σχήμα 20 Οπτικές παράμετροι ενός παραβολικού κοίλου συλλέκτη¹⁵¹

Ο πολλαπλασιασμός αυτών των τεσσάρων παραμέτρων (ανακλαστικότητα, παράγοντας ανάσχισης, διαπερατότητα γυαλιού, και απορροφητικότητα του ατσάλινου σωλήνα) όταν η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων στο επίπεδο του ανοίγματος είναι 0° δίνει τη μέγιστη οπτική απόδοση ενός συστήματος παραβολικών κοίλων $\eta_{opt,0^\circ}$:

$$n_{opt,0^\circ} = r \cdot g \cdot t \cdot a \Big|_{f=0^\circ}$$

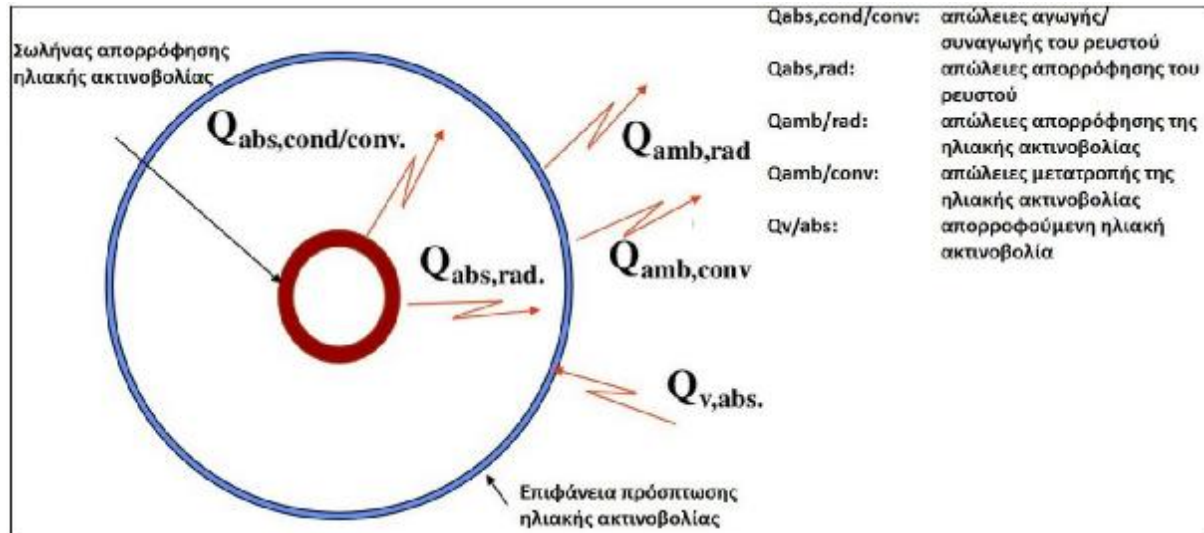
Η απόδοση $\eta_{opt,0^\circ}$ κυμαίνεται συνύθως από 0.70 έως 0.76 για καθαρά, σε καλή κατάσταση συστήματα παραβολικών κοίλων

3.4.4 Θερμικές απώλειες

Οι συνολικές θερμικές απώλειες, $P_{Q, \text{συλλέκτης} \rightarrow \text{περιβάλλον}}$, οφείλονται στην απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας από το σωλήνα απορρόφησης προς το περιβάλλον, $P_{Q, \text{απορροφητής} \rightarrow \text{περιβάλλον}}$, και στις απώλειες λόγω αγωγής και συναγωγής από το σωλήνα απορρόφησης στον εξωτερικό σωλήνα γυαλιού, $P_{Q, \text{απορροφητής} \rightarrow \text{γυαλί}}$. Οι απώλειες αυτές δίνονται από τον τύπο:

$$P_{Q, \text{συλλέκτης} \rightarrow \text{περιβάλλον}} = U_{L, \text{abs}} \cdot p \cdot d_0 \cdot L \cdot (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}})$$

όπου T_{abs} είναι η μέση θερμοκρασία του σωλήνα απορρόφησης, T_{amb} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, d_0 είναι η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα απορρόφησης, l είναι το μήκος του σωλήνα απορρόφησης (συνολικό μήκος του συστήματος) και $U_{L,abs}$ είναι ο συντελεστής θερμικών απωλειών.



Σχήμα 21 Θερμικές απώλειες^{15]}

Στην παραπάνω εξίσωση, ο συντελεστής θερμικών απωλειών δίνεται σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2_{abs}). Συνήθως η τιμή του είναι μικρότερη από $5 W/m^2_{abs}$. Ο $U_{L,abs}$ εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σωλήνα απορρόφησης και βρίσκεται πειραματικά με την εκτέλεση συγκεκριμένων δοκιμών θερμικών απωλειών σε ένα σύστημα παραβολικών κοίλων ενώ λειτουργεί σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η απόκλιση των τιμών του σε σχέση με τη θερμοκρασία του σωλητού δέκτη μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω πολυωνυμική εξίσωση, όπου οι συντελεστές a , b και c έχουν υπολογιστεί πειραματικά:

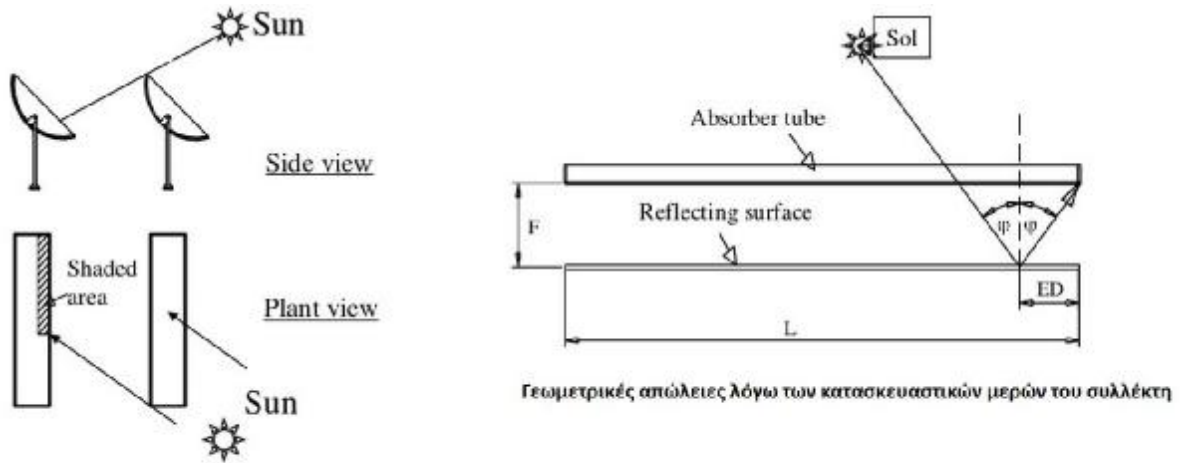
$$U_{L,abs} = a + b \cdot (T_{abs} - T_{amb}) + c \cdot (T_{abs} - T_{amb})^2 \left(\frac{W}{m^2_{abs}} \right)$$

3.4.5 Γεωμετρικές απώλειες

Η τρίτη ομάδα απωλειών ενός συστήματος παραβολικών κοίλων είναι οι γεωμετρικές απώλειες, που οφείλονται στη γωνία πρόσπτωσης, φ , της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ανοίγματος του συλλέκτη. Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου που είναι κάθετο στο επίπεδο του ανοίγματος και του ηλιακού διανύσματος, ενώ και το κάθετο επίπεδο και το ηλιακό διάνυσμα εμπεριέχονται σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα του συλλέκτη. Η γωνία αυτή εξαρτάται από την ημέρα του έτους και την ώρα της ημέρας. Αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα, επειδή το τμήμα της άμεσης ακτινοβολίας που είναι χρήσιμο στο συλλέκτη είναι άμεσα ανάλογο προς το συνημίτονο αυτής της γωνίας. Μειώνει τη χρήσιμη επιφάνεια ανοίγματος κατά ένα ποσό A_e γνωστό ως *γεωμετρικές οριακές απώλειες* που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A_e = l_a \cdot ED = l_a \cdot F_m \cdot \tan j$$

όπου l_a είναι το πλάτος της παραβολής, ED είναι το μήκος του συλλέκτη που μένει ανεκμετάλλευτο λόγω της συγκεκριμένης γωνίας φ , F είναι η εστιακή απόσταση του παραβολικού συγκεντρωτή, F_m είναι η μέση εστιακή απόσταση σε ένα εγκάρσιο τμήμα του παραβολικού συγκεντρωτή, και φ είναι η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.



Απώλειες σκίασης λόγω της διάταξης των συλλεκτών

Σχήμα 22 Γεωμετρικές απώλειες^{15]}

Τέλος στις γεωμετρικές απώλειες κατατάσσονται και οι απώλειες σκίασης που είναι αναπόφευκτες μιας και οι συλλέκτες διατάσσονται σε τέτοια απόσταση μεταξύ τους που κατά τη διάρκεια της ημέρας κάποια σειρά έστω και για μικρό χρονικό διάστημα θα δημιουργεί σκιά σε κάποια γειτονική της. Ακόμα δεν προσπίπτει πάντα ακτινοβολία σε όλους τους συλλέκτες όπως εξάλλου φαίνεται και στο σχήμα 22

2 ΗΛΙΑΚΟΙ ΠΥΡΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ^{[18], [20],[25]}

2.1 Αρχή λειτουργίας

Αρχικά η άμεση ηλιακή ακτινοβολία ,που προσπίπτει στη γη, ανακλάται από έναν μεγάλο αριθμό κατοπτρικών επιφανειών-ηλιοστατών που βρίσκονται σε πολύ καθορισμένη διάταξη μεταξύ τους, αλλά έχουν ανεξάρτητο σύστημα κίνησης, ώστε να εντοπίζει ο καθένας ξεχωριστά και με ακρίβεια την τροχιά του ηλίου. Με αυτό τον τρόπο η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε μία μικρή επιφάνεια στην κορυφή ενός πύργου, όπου είναι τοποθετημένος ο ηλιακός δέκτης ,και απορροφάται από αυτόν. Πίσω από την επιφάνεια του δέκτη διέρχεται με πολλές μικρές σωληνώσεις το θερμαντικό μέσο που ατμοποιείται άμεσα ή έμμεσα. Στη συνέχεια, ακολουθεί η εκτέλεση ενός θερμοδυναμικού κύκλου (στις περισσότερες περιπτώσεις συμβατικός κύκλος Rankine) από το θερμαντικό μέσο. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη του σταθμού PS10 που είναι εγκατεστημένη και λειτουργεί από το 2006 στη νότια Ισπανία.



Σχήμα 23. Ο σταθμός PS10^[19]

2.2 Πλεονεκτήματα έναντι άλλων Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων

Η τεχνολογία των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη αποτελεί την πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, καθώς οι δυνατότητες βελτίωσής της στο μέλλον είναι πολύ μεγάλες. Το κυριότερο πλεονέκτημα των συστημάτων κεντρικού ηλιακού δέκτη είναι ότι ο εντοπισμός της τροχιάς του ηλίου γίνεται τόσο με περιστροφή των ηλιοστατών γύρω από τον κατακόρυφο ,όσο και γύρω από τον οριζόντιο άξονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ακόμα και σε χαμηλές γωνίες ηλιακού ύψους ,δηλαδή στην ανατολή ή δύση του ηλίου, να επιτυγχάνονται σημαντικά υψηλότεροι λόγοι συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στον δέκτη, σε σχέση με τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα που επιτρέπουν περιστροφή των συλλεκτών μόνο γύρω από έναν άξονα, όπως τα παραβολικά κοίλα. Ο υψηλός λόγος συγκέντρωσης, με τη σειρά του, επιτρέπει στο ρευστό μέσο να αποκτά υψηλές θερμοκρασίες στον δέκτη, γεγονός που αυξάνει και τον συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Σε σύγκριση με τα παραβολικά κοίλα συστήματα, οι πύργοι ηλιακής ισχύος παρουσιάζουν μικρότερες θερμικές απώλειες και ιδιοκαταναλώσεις. Αυτό εξηγείται αν αναλογιστεί κανείς ότι οι εγκαταστάσεις με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες διαρρέονται από ένα μεγάλο σύστημα σωληνώσεων σε όλο το μήκος των ηλιακών συλλεκτών, ενώ στους πύργους ηλιακής ισχύος το πεδίο των ηλιοστατών δεν περιλαμβάνει καν σωληνώσεις. Οι αντίστοιχες σωληνώσεις, για την περίπτωση του πύργου, βρίσκονται πίσω από την επιφάνεια του κεντρικού ηλιακού δέκτη και συνεπώς το μήκος τους είναι ,σαφώς, πολύ μικρότερο. Για τον λόγο αυτό, οι απώλειες θερμότητας που συμβαίνουν στις επιμήκειες σωληνώσεις των εγκαταστάσεων παραβολικών κοίλων συλλεκτών είναι μεγαλύτερες. Είναι προφανές ,ακόμα, ότι η αντλία, που χρησιμοποιείται για την διακίνηση του θερμαντικού μέσου στο μεγάλο σύστημα σωληνώσεων των παραβολικών συλλεκτών, καταναλώνει πολύ περισσότερη

ενέργεια, από αυτή που χρησιμοποιείται για να ανεβάσει απλά το θερμαντικό μέσο στην κορυφή του πύργου, στον κεντρικό ηλιακό δέκτη. Συνέπεια είναι οι ιδιοκαταναλώσεις στα συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών να προκύπτουν σχεδόν διπλάσιες από αυτές στους πύργους ηλιακής ισχύος. Επιπρόσθετα, τα παραβολικά κάτοπτρα είναι ακριβότερα από τα επίπεδα που χρησιμοποιούνται ως ηλιοστάτες στους πύργους ηλιακής ισχύος. Η μικρότερη αντίσταση των τελευταίων στον αέρα απαιτεί και μικρότερο κόστος για την στήριξή τους στο έδαφος.

2.3 Υποσυστήματα του Πύργου Ηλιακής Ισχύος

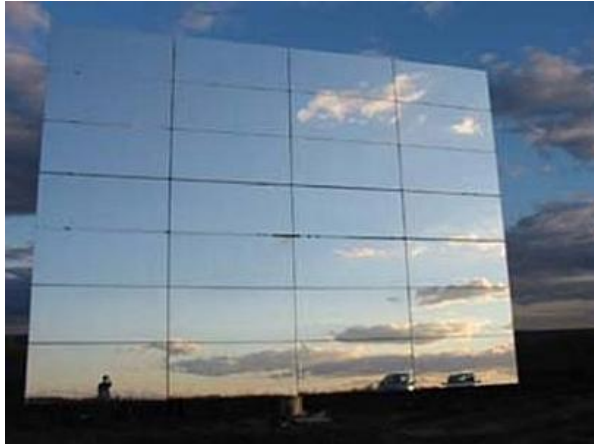
Μια εγκατάσταση πύργου ηλιακής ισχύος αποτελείται από τα παρακάτω υποσυστήματα:

§ Ηλιοστατικό Πεδίο (ή πεδίο Ηλιοστατών)

§ Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης

2.3.1 Ηλιοστατικό Πεδίο^[20]

Το ηλιοστατικό πεδίο οριοθετείται από τους ηλιοστάτες και τον χώρο τον οποίο αυτοί καταλαμβάνουν στο έδαφος, περιμετρικά του πύργου. Ο ηλιοστάτης είναι, στην ουσία, μια ανακλαστική (κατοπτρική) επιφάνεια στερεωμένη στο έδαφος με ένα σύστημα στήριξης, της οποίας η κίνηση ρυθμίζεται βάσει ενός μηχανισμού ελέγχου. Σκοπός του κάθε ηλιοστάτη είναι, με την ανεξάρτητη κίνηση του σε σχέση με τους υπόλοιπους του πεδίου, να καταφέρνει να τοποθετεί την ανακλαστική του επιφάνεια, κάθε στιγμή, με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνει την όσο το δυνατόν καλύτερη συγκέντρωση της άμεσης προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον κεντρικό δέκτη, στην κορυφή του πύργου. Η ανακλαστική επιφάνεια ενός τυπικού ηλιοστάτη κατασκευάζεται συνήθως από μία χαλύβδινη βάση, ένα συγκολλητικό στρώμα, ένα προστατευτικό στρώμα χαλκού, μια επίστρωση από ασήμι υψηλής ανακλαστικότητας και ένα χοντρό στρώμα γυαλιού. Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί ηλιοστάτες σε πολλά διαφορετικά μεγέθη, ξεκινώντας από 1 m² και ξεπερνώντας σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλων εγκαταστάσεων μέχρι και τα 120 m². Πολλές φορές, η συνολική ανακλαστική επιφάνεια ενός μεγάλου ηλιοστάτη διαιρείται σε έναν αριθμό από μικρότερες επιφάνειες, ώστε να εξασφαλίζεται μια ελαφριά καμπυλότητα που επιτρέπει την καλύτερη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στον δέκτη. Βασικό μέλημα ενός σωστά κατασκευασμένου ηλιοστάτη είναι να παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα στην επιφάνειά του, χαμηλό σχετικά βάρος και υψηλή αντοχή στη φθορά λόγω των διαφόρων καιρικών φαινομένων. Μία σχετικά νέα τεχνολογία σχεδιασμού ηλιοστατών, με σκοπό τη μείωση του βάρους και του κόστους τους, είναι αυτή των τεντωμένων μεμβρανών. Ένας ηλιοστάτης τεντωμένης μεμβράνης κατασκευάζεται από ένα κυκλικού σχήματος πλαίσιο, το οποίο τεντώνει μια μεμβράνη από λεπτό, ανοξειδωτο ατσάλι, όπως γίνεται με τη μεμβράνη ενός τύμπανου. Στη συνέχεια, πάνω στην μεμβράνη κολλούνται καθρέφτες γυαλιού. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, χρησιμοποιούνται απ' ευθείας λεπτές μεμβράνες με ανακλαστική επιφάνεια, φτιαγμένες από πολυμερή υλικά. Η μικρή καμπυλότητα της μεμβράνης εξασφαλίζεται μέσω της χρήσης κενού στο εσωτερικό της κατασκευής.



Σχήμα 24 Τυπικός Ηλιοστάτης και Ηλιοστάτης Τεντωμένης Μεμβράνης αντίστοιχα^{[21],[22]}

Ο κάθε ηλιοστάτης του ηλιοστατικού πεδίου στερεώνεται στο έδαφος με ένα σύστημα δύο πυλώνων, εγκάρσιων μεταξύ τους. Ο κατακόρυφος πυλώνας πακτώνεται σταθερά μέσα στη γη. Στην ουσία, πρόκειται για τους δύο άξονες, γύρω από τους οποίους πραγματοποιείται η κίνηση του ηλιοστάτη, για την δεδομένη γωνία ηλιακού ύψους και αζιμουθίου, κάθε στιγμή. Οι συντεταγμένες που τοποθετείται ο κάθε ηλιοστάτης στο πεδίο είναι αυστηρά καθορισμένες, και μάλιστα παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην τελική απόδοση της εγκατάστασης. Το σύστημα στήριξης και ο μηχανισμός κίνησης ενός ηλιοστάτη πρέπει να παρουσιάζουν τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

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

2.3.2.1 Απώλειες Πεδίου Ηλιοστατών^{[23],[24]}

Στο ηλιοστατικό πεδίο παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες απώλειες ισχύος όλης της εγκατάστασης, με ποσοστά που αγγίζουν το 40-47% των συνολικών απωλειών. Οι απώλειες του ηλιοστατικού πεδίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

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

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

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

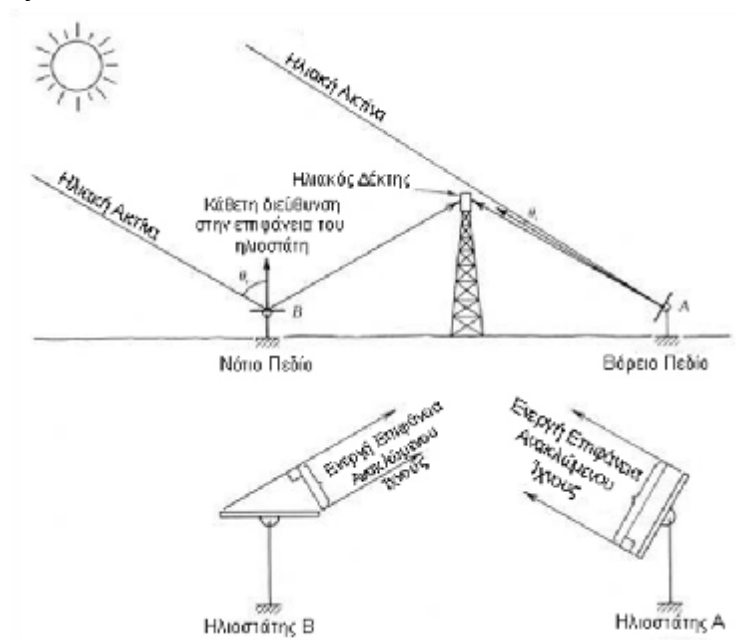
$$N_{field} = N_{cos} \cdot N_{refl} \cdot N_{atten} \cdot N_{shaddow} \cdot N_{block} \cdot N_{spill}$$

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

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

Απώλειες Συνημιτόνου (cosine losses)

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



Σχήμα 25 Απώλειες Συνημιτόνου^[23]

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

το αντίστοιχο του ηλιοστάτη B, και συνεπώς ο τελευταίος θα παρουσιάζει υψηλότερες απώλειες συνημιτόνου. Είναι προφανές λοιπόν, ότι οι ηλιοστάτες που βρίσκονται απέναντι από τον ήλιο έχουν σαφές πλεονέκτημα ,σε σχέση με αυτούς που αναγκάζονται να τοποθετήσουν την επιφάνεια τους με τρόπο που αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων. Αυτός είναι και ο λόγος που το ηλιοστατικό πεδίο ,σε περιπτώσεις ηλιακού δέκτη με ένα άνοιγμα, τοποθετείται βόρεια του πύργου (σε βόρεια γεωγραφικά πλάτη) ,ώστε η τροχιά που ακολουθεί ο ήλιος να είναι μπροστά από τους ηλιοστάτες.

Απώλειες Ανακλαστικότητας (reflectivity losses)

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

Απώλειες Ατμοσφαιρικής Διαπερατότητας (atmospheric attenuation losses)

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

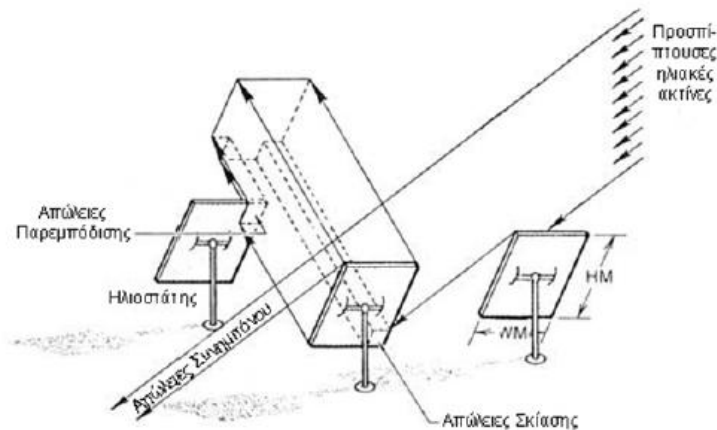
$$n_{atten} = 0,99321 - 0,0001176 \cdot S_0 + 1,97 \cdot 10^{-8} \cdot S_0^2, \text{για } (S_0 \leq 1000m)$$

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

όπου S_0 η απόσταση μεταξύ ηλιοστάτη και κεντρικού ηλιακού δέκτη.

Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδισης (shadowing & blocking losses)

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



Σχήμα 26 Απώλειες Σκίασης και Παρεμπόδισης^[23]

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

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

Ομοίως μπορούμε να πράξουμε για τις απώλειες παρεμπόδισης.

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

Απώλειες Διαρροής (spillage losses)

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

σκίασης και παρεμπόδισης, έτσι και στην περίπτωση των απωλειών διαρροής ο υπολογισμός γίνεται αυτόματα μέσω προγραμμάτων ανίχνευσης ηλιακών ακτίνων, για κάθε διάταξη των ηλιοστατών στο πεδίο. Τα προγράμματα αυτά ,κατά την μοντελοποίηση της εγκατάστασης, χρησιμοποιούν την υπόθεση, ότι η κατανομή της ροής θερμότητας από τον κάθε ηλιοστάτη υπακούει με καλή ακρίβεια στην γνωστή κατανομή του Gauss, και με τον τρόπο αυτό οδηγούνται στην εκτίμηση των απωλειών διαρροής.

2.3.2 Κεντρικός Ηλιακός Δέκτης

Ο κεντρικός ηλιακός δέκτης είναι το τμήμα του πύργου ηλιακής ισχύος, στο οποίο η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία από το ηλιοστατικό πεδίο μεταδίδεται σε ένα ρευστό, με τη μορφή θερμικής ενέργειας. Πρόκειται, στην ουσία, για έναν ειδικά σχεδιασμένο εναλλάκτη θερμότητας, που βρίσκεται τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου. Ένας τέτοιος εναλλάκτης θερμότητας δημιουργείται από έναν μεγάλο αριθμό πάνελ, αποτελούμενων από παράλληλους, κατακόρυφους λεπτούς σωλήνες (~20÷56 mm) συγκολλημένους μεταξύ τους με κοινή κεφαλή εισόδου και εξόδου. Οι σωλήνες συνήθως επικαλύπτονται εξωτερικά με μαύρη βαφή ,πολύ υψηλής απορροφητικότητας Pyromark[®]. Το ρευστό ρέει, διαμέσου των σωλήνων, απάγοντας την ηλιακή ενέργεια που έχει απορροφηθεί από την εξωτερική τους επιφάνεια, σε μορφή θερμότητας. Τα βασικά μέρη ενός κεντρικού ηλιακού δέκτη είναι η απορροφητική επιφάνεια, αποτελούμενη από τα πάνελ σωληνώσεων, η κεντρική κατασκευή πάνω στην οποία αυτά είναι στερεωμένα, οι σωληνώσεις διασύνδεσης των πάνελ, οι σωληνώσεις εισόδου-εξόδου του εργαζόμενου μέσου και οι δεξαμενές ατμού ή τύμπανο ατμού, ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση.



Σχήμα 27 Ηλιακός Δέκτης^[20]

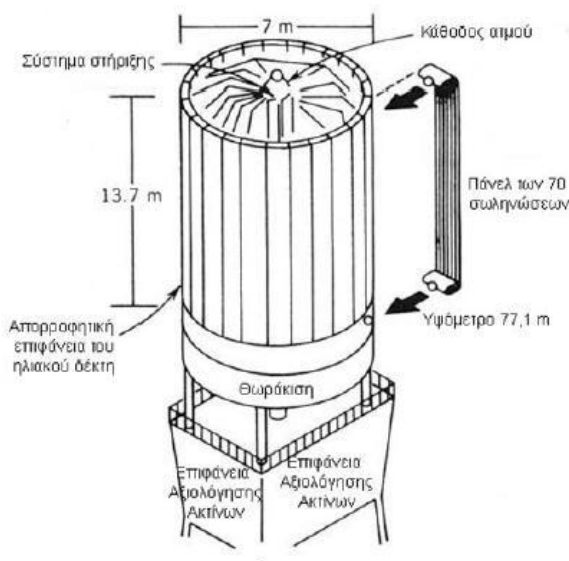
Η εισερχόμενη ροή θερμότητας είναι επιθυμητό να παίρνει μεγάλες τιμές ,καθώς αυξάνει την συνολική απόδοση του δέκτη, ωστόσο και αυτή περιορίζεται από κάποιο άνω όριο, λόγω της περιορισμένης αντοχής των υλικών κατασκευής του δέκτη σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Τυπικές θερμοκρασίες ,στις οποίες λειτουργεί ένας κεντρικός ηλιακός δέκτης είναι 300- 1200 °C , και τυπικές τιμές για την εισερχόμενη ροή θερμότητας στην απορροφητική επιφάνεια είναι 200-1200 KW/m².

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

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

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

Ο λόγος ύψους-διαμέτρου ενός κυλινδρικού εξωτερικού δέκτη είναι συνήθως της τάξης του 1:1 με 2:1.



Σχήμα 28 Παράδειγμα Εξωτερικού Κυλινδρικού Ηλιακού Δέκτη της Εγκατάστασης Πύργου Ηλιακής Ισχύος^[20]

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

αποτύχουν να περάσουν μέσα από το άνοιγμα. Συνήθως, το εμβαδό του ανοίγματος κατασκευάζεται υποδιπλάσιο ή υποτριπλάσιο από το συνολικό εμβαδό των επιφανειών, του εσωτερικού της κοιλότητας.



Σχήμα 29 Παράδειγμα Ηλιακού Δέκτη Κοιλότητας^[20]

Ο ογκομετρικός δέκτης (*volumetric receiver*) βασίζεται σε εξαιρετικά πορώδεις δομές που λειτουργούν ως εναλλάκτες θερμότητας με συναγωγή, απορροφώντας τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν απορροφάται σε μια εξωτερική επιφάνεια, όπως στους άλλους τύπους ηλιακού δέκτη, αλλά στο εσωτερικό του όγκου. Το μέσο μεταφοράς θερμότητας, που είναι είτε ατμοσφαιρικός, είτε προσυμπιεσμένος αέρας, εξαναγκάζεται να περάσει από την πορώδη δομή και να θερμανθεί μέσω συναγωγής. Το απορροφητικό υλικό σε έναν ογκομετρικό δέκτη αποτελείται συνήθως από λεπτά, και ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες σύρματα ή από μεταλλικές ή κεραμικές κυψελοειδείς δομές. Οι ογκομετρικοί δέκτες συναντώνται σε δύο βασικές μορφές, είτε εκτεθειμένοι στο περιβάλλον, είτε περιβαλλόμενοι από ένα διαφανές παράθυρο. Στην τελευταία μορφή, ο ογκομετρικός δέκτης χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που καλείται να θερμάνει αέρα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (της τάξεως των 1200°C), ο οποίος έχει νωρίτερα συμπιεστεί και προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως αέρας καύσης πριν εισέλθει σε κάποιον αεριοστρόβιλο. Βασικό χαρακτηριστικό όλων των ογκομετρικών δεκτών είναι τα ιδιαίτερα πορώδη υλικά κατασκευής τους, καθώς και οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται στο εσωτερικό τους. Τα πλεονεκτήματά τους συνοψίζονται, στο ότι ο αέρας είναι δωρεάν και πάντα διαθέσιμος, δεν υπάρχει αλλαγή φάσης του εργαζόμενου μέσου και ούτε κίνδυνος στερεοποίησής του, πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επιτυγχάνονται, επιτρέποντας στο εργαζόμενο μέσο να εκτελέσει αποδοτικότερους θερμοδυναμικούς κύκλους, η κατασκευή είναι σχετικά απλή, χωρίς μηχανισμούς ασφάλειας και με γρήγορη απόκριση στις αλλαγές της κατάστασης του αέρα στην είσοδο και δεν υπάρχει καμία αρνητική επίδραση στο περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά, οι ογκομετρικοί δέκτες χρειάζονται περεταίρω βελτίωση της θερμικής τους απόδοσης και της γενικότερης αξιοπιστίας που παρουσιάζουν. Οι απώλειες ακτινοβολίας πρέπει να μειωθούν και η αντοχή τους στο χρόνο να τεθεί υπό διερεύνηση. Τα οφέλη τους είναι προφανή, ωστόσο, μέχρι σήμερα, η χρήση τους βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό κυρίως στάδιο, με δοκιμές που έχουν δείξει θετικές προοπτικές.



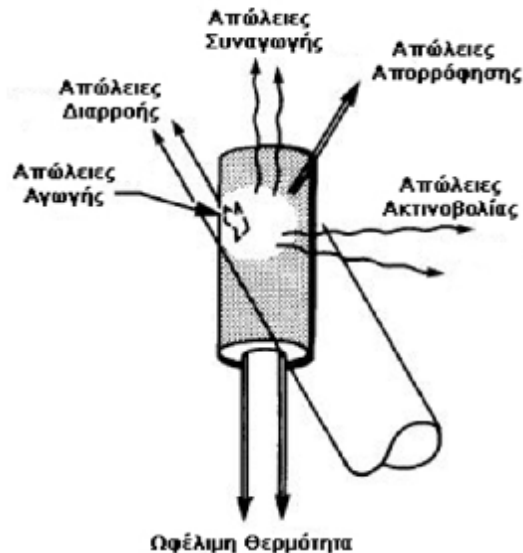
Σχήμα 30 Παράδειγμα Ογκομετρικού Δέκτη ,από το Πείραμα TSA στην Ηλιακή Πλατφόρμα της Αλμερίας.^[20]

2.3.2.2 Απώλειες Κεντρικού Δέκτη^[24]

Το δεύτερο ,βασικό, υποσύστημα ενός πύργου ηλιακής ισχύος ,το οποίο συναντούν οι ηλιακές ακτίνες ,αφού ανακλαστούν από το ηλιοστατικό πεδίο, είναι ο κεντρικός ηλιακός δέκτης. Εκεί εντοπίζεται ένα επίσης μεγάλο ποσοστό των απωλειών ισχύος της εγκατάστασης. Οι απώλειες που συμβαίνουν σε έναν κεντρικό ηλιακό δέκτη, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

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

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



Σχήμα 31 Απώλειες Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη.^[24]

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

$$n_{receiver} = n_{conv} \cdot n_{rad} \cdot n_{absorb} \cdot n_{cond}$$

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

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

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

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

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

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

Ας δούμε ,όμως, τις προαναφερθείσες απώλειες πιο αναλυτικά:

Απώλειες Συναγωγής (convection losses)

Οι απώλειες λόγω συναγωγής είναι από τις σημαντικότερες για έναν ηλιακό δέκτη, διότι το μέγεθος τους μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο ποσοστό τον ολικό βαθμό απόδοσης του. Αναφέρονται στην θερμική ενέργεια που χάνεται από τις επιφάνειες του δέκτη, λόγω του ότι απάγεται από τον ψυχρότερο αέρα που κυκλοφορεί εφαιτομενικά τους. Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να διαχωρίσουμε την ελεύθερη συναγωγή, που δημιουργείται από τη διαφορά θερμοκρασίας, από την εξαναγκασμένη συναγωγή, που δημιουργείται από την κίνηση του αέρα. Στην περίπτωση του κεντρικού δέκτη συναντώνται και τα δύο είδη, ωστόσο το ποσοστό της ελεύθερης συναγωγής είναι συνήθως μεγαλύτερο. Πολλοί είναι οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το μέγεθος των απωλειών συναγωγής, όπως το είδος του δέκτη, το μέγεθος της επιφάνειάς του (ή του ανοίγματός του αν πρόκειται για δέκτη κοιλότητας), η θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτόν και η γωνία κλίσης του.

Σημαντικό ρόλο ,επίσης, παίζουν και οι καιρικές συνθήκες της περιοχής και για την ακρίβεια η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου. Ένας αριθμός πειραμάτων με δέκτες κοιλότητας έχει δείξει πως η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου συνεπάγεται και αύξηση των απωλειών συναγωγής.

Απώλειες Ακτινοβολίας (radiation losses)

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

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

όπου $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$, ϵ ο συντελεστής εκπομπής, A_{ap} το εμβαδόν του ανοίγματος του δέκτη, T_w η μέση θερμοκρασία των τοιχωμάτων του και T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Απώλειες Απορρόφησης (absorption losses)

Οι συγκεκριμένες απώλειες αναφέρονται στο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο αντί να απορροφάται από την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του δέκτη, αντανακλάται σε αυτήν και διαφεύγει. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου χρησιμοποιείται βαφή υψηλής απορροφητικότητας που επικαλύπτει την προαναφερθείσα επιφάνεια. Οι απώλειες απορρόφησης είναι γενικώς μικρές και εξαρτώνται μόνο από είδος της επικάλυψης της επιφάνειας του δέκτη. Πρέπει ωστόσο να δίνεται προσοχή στην κατάσταση της βαφής με το πέρασμα του χρόνου, καθώς η γήρανση της μπορεί να αυξήσει τις απώλειες απορρόφησης. Ο συντελεστής απορρόφησης είναι ο λόγος της θερμικής ισχύος που απορροφά η επιφάνεια του ηλιακού δέκτη προς τη θερμική ισχύ που προσπίπτει στην επιφάνεια αυτή από το ηλιοστατικό πεδίο:

$$\eta_{\text{absorb}} = \frac{Q_{\text{absorb}}}{Q_{\text{inc}}}$$

Μια συνήθης τιμή του συντελεστή απορρόφησης η_{absorb} είναι της τάξεως του 0,95, ενώ για δέκτη κοιλότητας, στο εσωτερικό της οποίας γίνονται περισσότερες της μίας αντανακλάσεις, μπορεί να φτάσει και το 0,98.

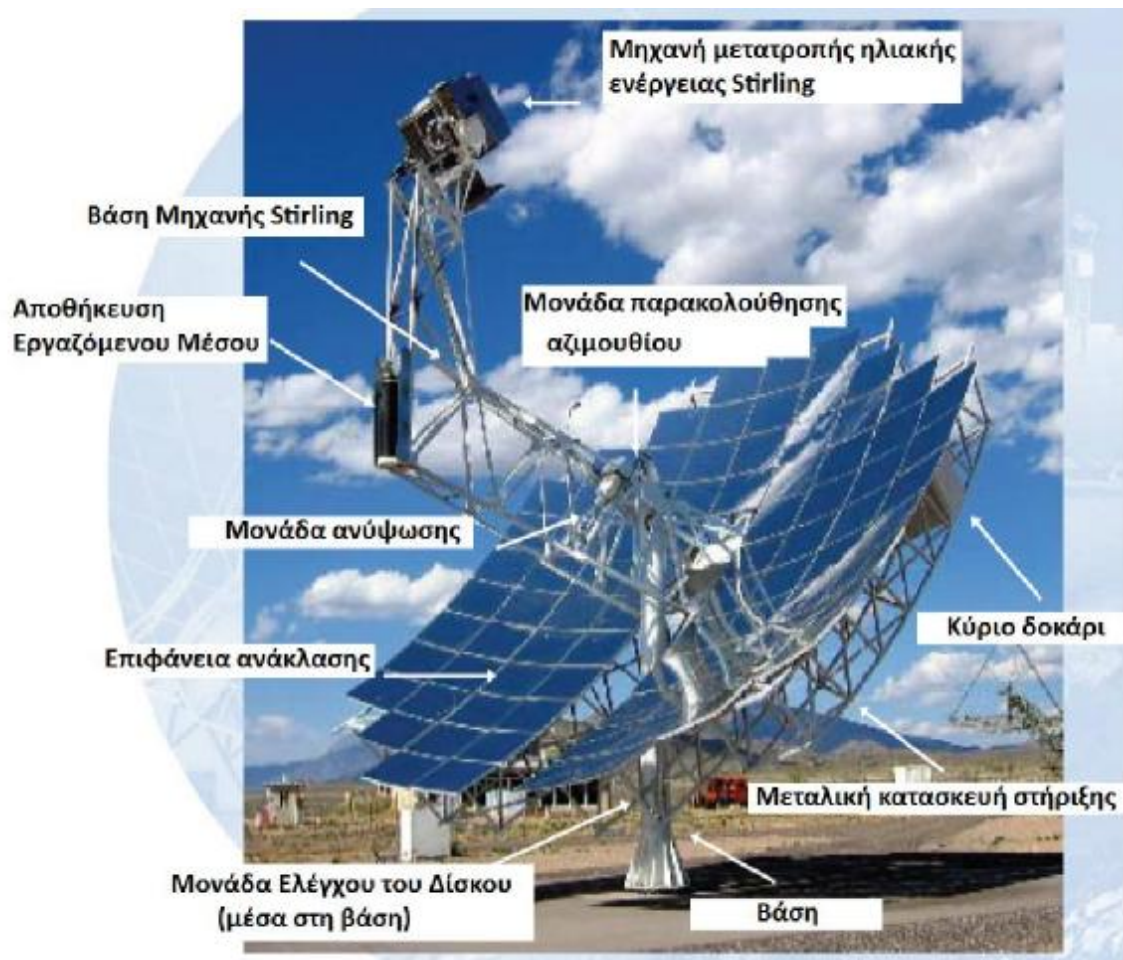
Απώλειες Αγωγής (conduction losses)

Οι απώλειες αγωγής αναφέρονται στη θερμότητα που διαφεύγει από τον κεντρικό ηλιακό δέκτη, διαμέσου των μονωμένων επιφανειών του και των διατάξεων που τον στηρίζουν στην κορυφή του πύργου. Το μέγεθος των απωλειών αγωγής είναι συνήθως πολύ μικρό, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες απώλειες του ηλιακού δέκτη, και για τον λόγο αυτόν συχνά και παραλείπονται. Για την ελαχιστοποίησή τους απαιτείται καλή μόνωση των επιφανειών που δεν χρησιμοποιούνται για συναλλαγή θερμότητας, και όσο το δυνατόν λιγότερα σημεία επαφής του δέκτη με τον υπόλοιπο πύργο. Επίσης, η στήριξη πρέπει να γίνεται με υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, όπως το ανοξείδωτο ατσάλι. Αν ο σχεδιασμός του δέκτη γίνει, τηρώντας τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις, οι απώλειες λόγω αγωγής μπορούν να πέσουν ακόμα και κάτω από το 1%.

3 ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΣΚΟΥ ΜΗΧΑΝΗΣ

3.1 Αρχή λειτουργίας

Οι δίσκοι/μηχανές μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια σχεδόν με τον ίδιο τρόπο με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Οι δίσκοι/μηχανές χρησιμοποιούν μια σειρά καθρέφτες που αντανακλούν και συγκεντρώνουν τις εισερχόμενες άμεσες κάθετες ηλιακές ακτινοβολίες σε έναν δέκτη, προκειμένου να επιτευχθούν οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για τη μετατροπή της θερμότητας ώστε να λειτουργήσουν. Αυτό προϋποθέτει ότι το πιάτο παρακολουθεί τον ήλιο σε δύο άξονες. Η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τον δέκτη και μεταφέρεται σε έναν κινητήρα. Οι δίσκοι/κινητήρες χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, σπονδυλωτή διάταξη, αυτόνομη λειτουργία και μια εγγενή υβριδική ικανότητα (την ικανότητα να λειτουργούν είτε με ηλιακή ενέργεια ή με ορυκτά καύσιμα, ή και με τα δύο). Τα συστήματα αυτά λόγω της υψηλής τους απόδοσης έχουν την δυνατότητα να γίνουν μία από τις λιγότερο ακριβές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Σχήμα 32 Σύστημα δίσκου/κινητήρα με κάτοπτρα τεντωμένης-μεμβράνης^[26]

Οι τυπικές διαστάσεις ενός παραβολικού δίσκου είναι από 5 έως 10 μ. σε διάμετρο με επιφάνεια κατόπτρων από 40 έως 120 τ.μ., αν και έχουν κατασκευαστεί δίσκοι επιφάνειας ως και 400 τ.μ. Διάφοροι περιορισμοί των υλικών μπορεί να θέτουν ένα άνω όριο στο μέγεθος του δίσκου, αν και έχει ανακοινωθεί η κατασκευή δίσκων διαμέτρου ως και 15μ. οι οποίοι θα

παράγουν μέχρι και 50Kw ηλεκτρικής ισχύος. Προς το παρόν, οι μηχανές Stirling που χρησιμοποιούνται παράγουν ως και 25kW.

Όπως συμβαίνει και με τους συλλέκτες στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων και ηλιακού πύργου, τα ηλιακά αυτά «πιάτα» πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου έτσι ώστε να επιτύχουν μέγιστη απόδοση. Ο μηχανισμός παρακολούθησης πρέπει να είναι δύο αξόνων και καθώς έχει να κινήσει ένα ιδιαίτερα βαρύ πλαίσιο έχει αρκετά υψηλό κόστος. Μια μεταλλική βάση στηρίζει ένα μεταλλικό κιγκλίδωμα πάνω στο οποίο είναι στερεωμένοι πολλοί μεμονωμένοι κοίλοι καθρέπτες οι οποίοι σχηματίζουν ολόκληρο τον παραβολικό δίσκο. Οι καθρέπτες αυτοί μπορεί να είναι είτε από γυαλί είτε από στιλβωμένο μέταλλο και έχουν σχήμα κυκλικό ή τετράγωνο.

Κάθε μονάδα παραβολικού δίσκου είναι ένα ξεχωριστό σύστημα με δική του θερμική μηχανή και αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρισμού. Ως εκ τούτου η εν λόγω τεχνολογία είναι άκρως δομοστοιχειωτής φύσης, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για διεσπαρμένη παραγωγή. Αρκετοί δοκιμαστικοί παραβολικοί δίσκοι έχουν λειτουργήσει επιτυχημένα τα τελευταία δέκα χρόνια, με ποικίλα μεγέθη από 10kW (εταιρεία Schlaich, Bergemann and Partner), 25kW (εταιρεία SAIC) μέχρι και πάνω από 100kW (το «Big Dish» του Εθνικού Πανεπιστημίου της Αυστραλίας-ANU). Εξαιτίας του μεγέθους τους αλλά και της δομοστοιχειωτής τους φύσης, οι παραβολικοί δίσκοι είναι κατάλληλοι για αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος και για απομονωμένα, αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ^[27].

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος EURO-DISH, ένας οικονομικά αποδοτικός δίσκος 10kW με κινητήρα Stirling (Dish-Stirling engine) για αποκεντρωμένη ηλεκτροπαραγωγή αναπτύχθηκε από μια ευρωπαϊκή κοινοπραξία με εταίρους από το χώρο της βιομηχανίας και της έρευνας. Αντίθετα, η σχεδίαση που προωθείται από την εταιρεία Stirling Energy Systems (SES) καλείται “SunCatcher” και είναι ένα σύστημα 25kW που αποτελείται από ένα δίσκο διαμέτρου 38 ποδιών στον οποίο εδράζονται 82 κοίλα κάτοπτρα, διαστάσεων 3 επί 4 πόδια το καθένα. Η γεννήτρια οδηγείται από έναν τετρακύλινδρο παλινδρομικό κινητήρα κύκλου Stirling, παράγοντας 25kW σε κάθε παραβολικό δίσκο. Το 2008, η εταιρεία SES επιχείρησε να καταγράψει ρεκόρ στην απόδοση μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια, επιτυγχάνοντας καθαρή απόδοση 31,25% στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ [3]. Το Μάρτιο του 2010 τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το Maricopa Solar, το πρώτο παγκοσμίως εμπορικό ηλιοθερμικό πάρκο με παραβολικούς δίσκους στην Αριζόνα των ΗΠΑ από την εταιρεία SES. Έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 1,5MW και αποτελείται από 60 παραβολικούς δίσκους SunCatcher ^[28].

Η τεχνολογία του Big Dish εισάγεται στην αγορά από την εταιρεία Wizard Power. Το μοντέλο αυτό που έχει επιφάνεια 500m², χρησιμοποιεί ένα σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας που βασίζεται στη θερμοχημική διαδικασία της διάσπασης και σύνθεσης της αμμωνίας (ενδόθερμη και εξώθερμη αντίδραση, αντίστοιχα). Με τον τρόπο αυτό, ο δίσκος λειτουργεί και τη νύχτα ή υπό άσχημες καιρικές συνθήκες, τροφοδοτώντας συνεχώς το φορτίο βάσης ή βάσει ζήτησης το φορτίο αιχμής. ^[43]

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας δίσκων Stirling είναι:

- § Οι νεότερες μονάδες αυτού του τύπου εμφανίζουν υψηλή απόδοση μετατροπής, μέχρι 31,5%, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται στο εσωτερικό των μηχανών.
- § Δεν έχουν ανάγκη συστήματος ψύξης, όπως συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες όπου εγκαθίσταται ατμοστρόβιλος, κάτι που οφείλεται στο ότι το θερμαινόμενο αέριο προκαλεί κίνηση μέσω της διαστολής του.

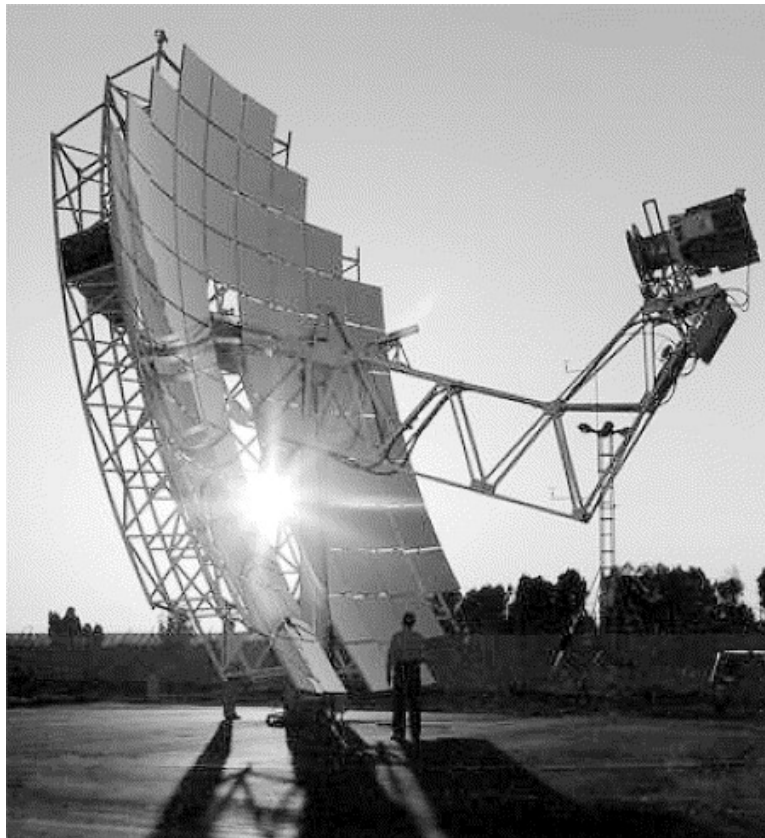
Μειονεκτήματα της τεχνολογία αυτής είναι ότι:

- § Εμφανίζουν μικρή εγκατεστημένη ισχύ ανά παραβολικό δίσκο που κυμαίνεται από 3-25 kW.

§ Εμφανίζουν προβλήματα αξιοπιστίας ενώ είναι σε ερευνητικό στάδιο η δυνατότητα λειτουργία τους παράλληλα με συμβατική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Είναι γεγονός ότι, πρόσφατα, επενδύσεις σε αυτή την τεχνολογία έχουν συναντήσει προβλήματα στη χρηματοδότηση καθώς ακόμη δεν έχει αποδεδειγμένη τιμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ελκυστική για τους επενδυτές, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια στασιμότητα στη συγκεκριμένη αγορά.

3.2 Συγκεντρωτές

Οι συγκεντρωτές χρησιμοποιούν μια αντανάκλαστική επιφάνεια από αλουμίνιο ή ασήμι. Οι πιο ανθεκτικές αντανάκλαστικές επιφάνειες έχουν ασημί/γυάλινους καθρέπτες, παρόμοιους με τα κοινά κάτοπτρα. Επειδή τα πιάτα των συγκεντρωτών έχουν μικρό εστιακό μήκος, απαιτούνται καθρέπτες σχετικά λεπτού γυαλιού (πάχους περίπου 1mm) για να δημιουργήσουν την απαιτούμενη καμπυλότητα. Επιπλέον, γυαλί με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο είναι απαραίτητο για να βελτιωθεί η ανάκλαση. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε σίδηρο και το πάχος, τα ηλιακά κάτοπτρα έχουν τιμές ηλιακής ανακλαστικότητας στην περιοχή 90 έως 94%. Το ιδανικό σχήμα συγκεντρωτή είναι παραβολοειδές με περιστροφή. Μερικοί ηλιακοί συγκεντρωτές προσεγγίζουν αυτό το σχήμα με πολλαπλούς, σφαιρικού σχήματος καθρέπτες υποστηριζόμενους, σε δομή γέφυρας (Σχήμα 33)



Σχήμα 33 Παραβολοειδής Συγκεντρωτής^[29]

Μια καινοτομία στον ηλιακό συγκεντρωτή είναι η χρήση των τεντωμένων μεμβρανών με την οποία μια λεπτή αντανάκλαστική μεμβράνη τεντώνεται σε μια στεφάνη. Μια δεύτερη μεμβράνη χρησιμοποιείται για να κλείσει το χώρο πίσω. Ένα μερικό κενό δημιουργείται σε αυτόν τον χώρο, φέρνοντας την αντανάκλαστική μεμβράνη σε ένα περίπου σφαιρικό σχήμα. Ο οπτικός σχεδιασμός και η ακρίβεια του συγκεντρωτή προσδιορίζουν τον δείκτη συγκέντρωσης. Ο δείκτης συγκέντρωσης, ορίζεται ως η μέση ηλιακή ροή μέσω του

ανοίγματος του δέκτη που χωρίζεται από το άμεσο περιβάλλον της ηλιακής ακτινοβολίας, και είναι συνήθως πάνω από 2000. Το κλάσμα τομής, ορίζεται ως το κλάσμα της ανακλώμενης ηλιακής ροής που περνάει μέσα από το άνοιγμα του δέκτη και είναι συνήθως πάνω από 95%. Η παρακολούθηση σε δύο άξονες επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: (1) παρακολούθηση αζιμούθιου-ανύψωσης και (2) πολική παρακολούθηση.

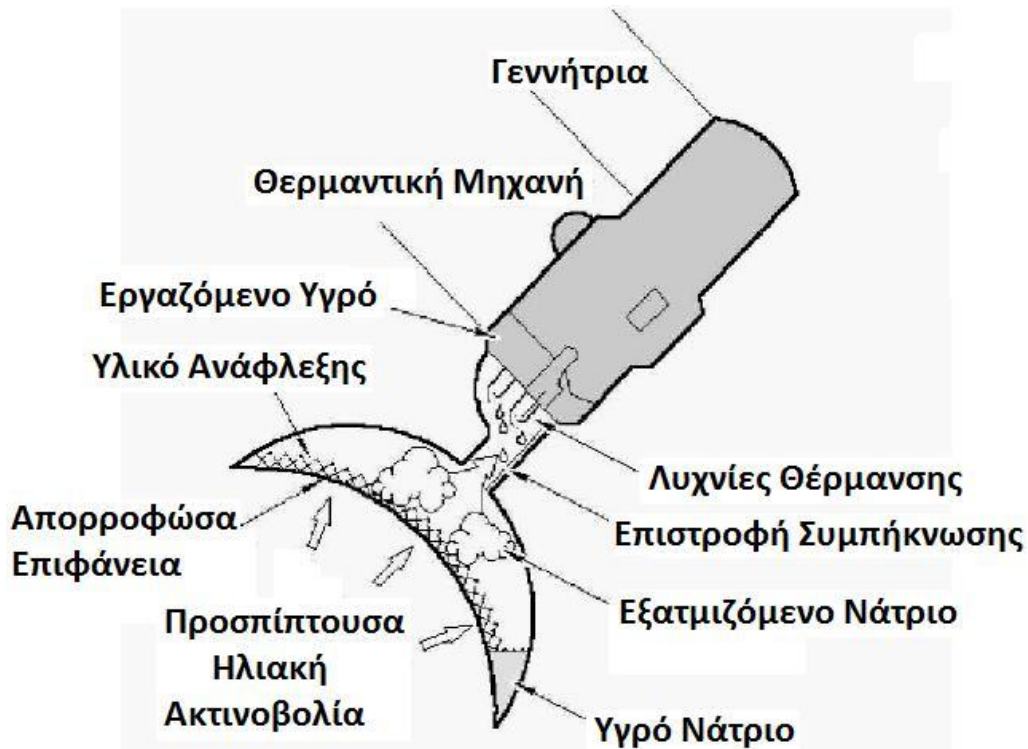
Στην παρακολούθηση αζιμούθιου-ανύψωσης το πιάτο περιστρέφεται σε ένα επίπεδο παράλληλο προς τη γη (αζιμούθιο) και σε ένα άλλο επίπεδο κάθετο σε αυτό (ανύψωση). Αυτό δίνει στο συλλέκτη περιστροφές αριστερά/δεξιά και πάνω/κάτω. Τα ποσοστά περιστροφής ποικίλλουν όλη την ημέρα, αλλά μπορούν εύκολα να υπολογιστούν. Τα περισσότερα από τα μεγαλύτερα πιάτα/κινητήρες χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο παρακολούθησης.

Στην πολική παρακολούθηση ο συλλέκτης περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα παράλληλο προς τον άξονα περιστροφής της γης. Ο συλλέκτης περιστρέφεται με σταθερό ποσοστό 15°/ώρα για να ταιριάζει με την ταχύτητα περιστροφής της γης. Ο άλλος άξονας περιστροφής, ο άξονας απόκλισης, είναι κάθετος στον πολικό άξονα. Η κίνηση για τον άξονα αυτόν είναι αργή και ποικίλλει κατά $\pm 23 \frac{1}{2}$ ανά χρόνο. Όπως και στους κεντρικούς δέκτες και τα παραβολικά κοίλα, έτσι και εδώ ο δέκτης απορροφά το φως και μεταφέρει την ενέργεια ως θερμότητα στο αέριο λειτουργίας του κινητήρα, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Οι θερμοκρασίες του ρευστού είναι μεταξύ 650°C και 750°C. Η θερμοκρασία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα του κινητήρα. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, οι απώλειες ακτινοβολίας επηρεάζουν έντονα την αποδοτικότητα του δέκτη. Ως εκ τούτου ένα σχέδιο κοιλότητας είναι η βέλτιστη λύση για αυτό το είδος του συστήματος.

3.3 Δέκτες

Ο δέκτης απορροφά την ενέργεια που αντανάκλαται από τον συμπυκνωτή και την μεταφέρει στο ρευστό λειτουργία του κινητήρα. Η απορροφώσα επιφάνεια συνήθως τοποθετείται πίσω από την εστία του δέκτη για να μειώσει την ένταση ροής σε αυτό. Ένα διάφραγμα τοποθετείται στο επίκεντρο για τη μείωση της ακτινοβολίας και την συναγωγή των απωλειών θερμότητας. Κάθε μηχανή έχει το δικό της τρόπο διασύνδεσης. Οι δέκτες του κινητήρα πρέπει να μεταφέρουν αποτελεσματικά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια σε υψηλής πίεσης φυσικό αέριο ταλάντωσης, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι των δεκτών Stirling, οι απευθείας φωτισμού δέκτες (direct-illumination receivers (DIR)) και οι έμμεσοι δέκτες που χρησιμοποιούν ενδιάμεσα υγρά μεταφοράς θερμότητας. Οι άμεσα-φωτιζόμενοι δέκτες Stirling προσαρμόζουν τους σωλήνες θέρμανσης του κινητήρα Stirling ώστε να απορροφήσουν την συγκεντρωμένη ηλιακή ροή. Λόγω της υψηλής ικανότητας μεταφοράς θερμότητας υψηλής ταχύτητας και της υψηλής πίεσης ήλιου ή υδρογόνου, οι απευθείας φωτισμού δέκτες είναι σε θέση να απορροφήσουν υψηλά επίπεδα της ηλιακής ροής (περίπου 75W/cm²). Ωστόσο, η εξισορρόπηση των θερμοκρασιών και η διαχείριση της θερμότητας μεταξύ των κυλίνδρων του Stirling κινητήρα είναι ένα θέμα που χρήζει προσεκτικής μελέτης. Υγρά μέταλλα, δέκτες με σωλήνες θέρμανσης βοηθούν στην επίλυση αυτού του ζητήματος (έμμεσοι δέκτες). Σε έναν δέκτη σωλήνων θέρμανσης το υγρό του μετάλλου από νάτριο εξατμίζεται στην επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη και συμπυκνώνεται στους σωλήνες θέρμανσης του κινητήρα Stirling (Σχήμα 34). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια ομοιόμορφη θερμοκρασία στους σωλήνες θέρμανσης, επιτρέποντας έτσι την υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα για ένα δεδομένο υλικό, και ως εκ τούτου μεγαλύτερη απόδοση του κινητήρα. Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στους δέκτες και τις κεφαλές του θερμαντήρα του κινητήρα είναι επίσης θεωρητικά δυνατή από τη χρήση των σωληνώσεων θέρμανσης. Ο δέκτης αυτός μεταφέρει ισοθεμικά την θερμότητα από την εξατμισμό του νατρίου στον δέκτη/απορροφητήρα και τον συμπυκνώνει στις σωληνώσεις θέρμανσης του κινητήρα. Το νάτριο επιστρέφει στον απορροφητήρα από τη βαρύτητα και διανέμεται κατά τη διάρκεια της απορρόφησης. Οι δέκτες Stirling είναι συνήθως κατά 90%

αποτελεσματικοί στη μεταφορά της ενέργειας που παραδίδεται από τον συμπυκνωτή στον κινητήρα.



Σχήμα 34 Σχεδιάγραμμα που δείχνει τη λειτουργία ενός ηλιακού δέκτη ^[30]

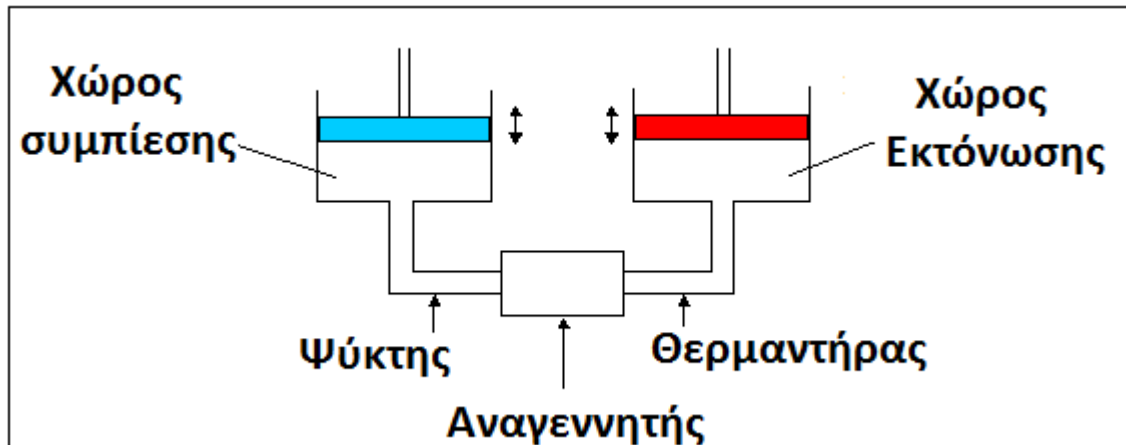
3.4 Κινητήρες Stirling

Ο κινητήρας σε ένα σύστημα πιάτου μετατρέπει τη θερμότητα του κινητήρα σε μηχανική ισχύ κατά τρόπο παρόμοιο με τους συμβατικούς κινητήρες, δηλαδή από τη συμπίεση ενός αερίου όταν είναι κρύο, τη θέρμανση του πεπιεσμένου λειτουργικού αερίου, και στη συνέχεια την επέκταση μέσω ενός στροβίλου ή ενός εμβόλου. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική από μια ηλεκτρική γεννήτρια ή δυναμό.

3.4.1 Διαμορφώσεις μηχανών Stirling

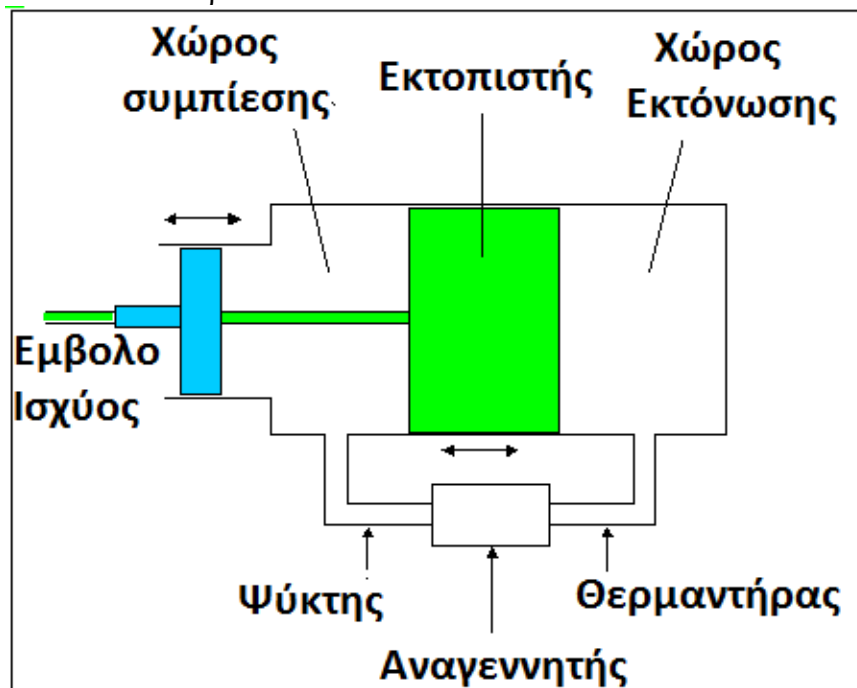
Υπάρχουν αρκετοί τρόποι κατάταξης των μηχανών Stirling. Οι κυριότερες διαμορφώσεις (τύποι) είναι τρεις:

1. **Διαμόρφωση Α.** Ο κρύος χώρος συμπίεσης και το έμβολο ισχύος ή έμβολο συμπίεσης (PP) βρίσκονται σε ξεχωριστό κύλινδρο από το θερμό χώρο εκτόνωσης όπου υπάρχει το έμβολο εκτόνωσης (P) .



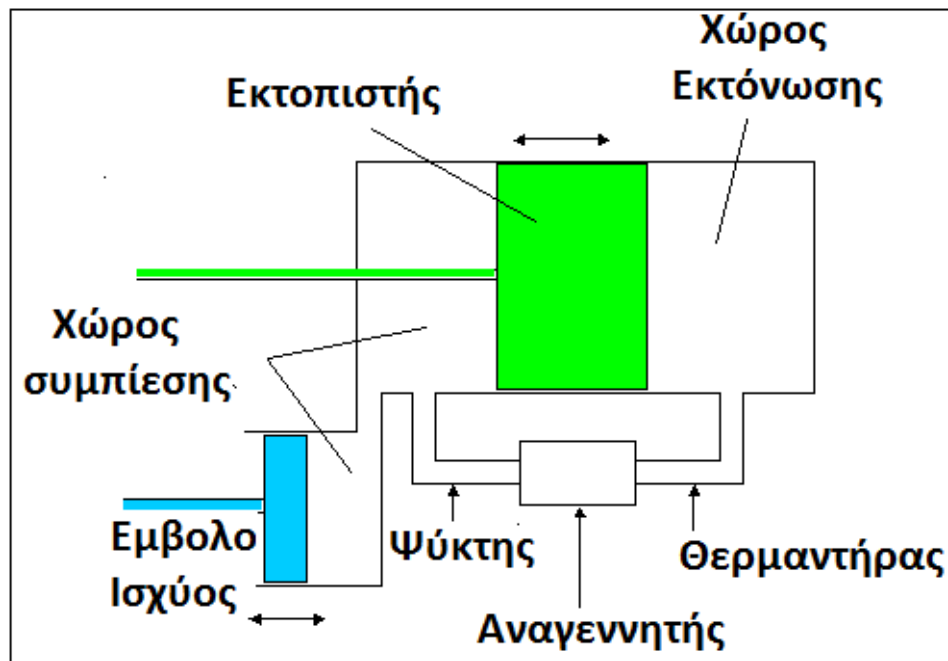
Σχήμα 35 Διαμόρφωση Α μηχανής Stirling^[31]

2. **Διαμόρφωση Β.** Το έμβολο ισχύος (PP) και ο εκτοπιστής (displacer, DP) στον ίδιο κύλινδρο .



Σχήμα 36 Διαμόρφωση Β μηχανής Stirling^[31]

3 Διαμόρφωση Γ. Το έμβολο ισχύος (PP) και ο εκτοπιστής (displacer, DP) σε διαφορετικούς κυλίνδρους .



Σχήμα 37 Διαμόρφωση Γ μηχανής Stirling^[31]

3.5 Αρχή λειτουργίας Μηχανής Stirling^{[41],[42]}

Η μηχανή Stirling τύπου A είναι η πιο απλή σε σχέση με τις άλλες δύο διαμορφώσεις. Αποτελείται από δύο κυλίνδρους. Ο ένας κύλινδρος αποτελεί το χώρο εκτόνωσης (Expansion Space - ES) και ο άλλος τον χώρο συμπίεσης (Compression Space - CS). Ο χώρος εκτόνωσης διατηρείται ζεστός με τη βοήθεια του θερμαντήρα (Heater) ενώ στο ίδιο χρονικό διάστημα ο χώρος συμπίεσης (συμπιεστής) διατηρείται κρύος με τη βοήθεια του ψύκτη (Cooler). Στον συμπιεστή υπάρχει το έμβολο ισχύος (Piston Power - PP) ενώ στον χώρο εκτόνωσης το έμβολο P που κινεί το εγκλωβισμένο εργαζόμενο αέριο (π.χ. Αέρας, Ήλιο, Υδρογόνο, Άζωτο) μεταξύ του θερμού και κρύου άκρου της μηχανής. Στη διαμόρφωση B και Γ το έμβολο P αντικαθίσταται από τον εκτοπιστή (Displacer Piston - DP). Ο θερμαντήρας μπορεί να λειτουργεί με καίγόμενο καύσιμο (στερεό, υγρό ή αέριο), ηλεκτρική ενέργεια, πυρηνική ενέργεια καθώς επίσης και με ήπιες ή ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (π.χ. ηλιακή). Ο ψύκτης στην απλούστερη μορφή του μπορεί να έχει πτερύγια, μπορεί όμως να χρησιμοποιεί και νερό σαν ψυκτικό υγρό όπως ακριβώς οι μηχανές εσωτερικής καύσης.

Μεταξύ του θερμαντήρα και του ψύκτη υπάρχει το σημαντικότερο τμήμα της μηχανής που είναι ο αναγεννητής (Regenerator). Πρόκειται για έναν μεταλλικό κύλινδρο ο οποίος στο εσωτερικό του περιέχει ένα θερμοαγωγίμο υλικό σε μορφή επάλληλων διάτρητων φύλλων ή σφαιριδίων ή νημάτων (όπως το σύρμα για τις κατσαρόλες). Τα υλικά αυτά που αποτελούν τη μήτρα του αναγεννητή (regenerator matrix) απορροφά και στη συνέχεια αποδίδει θερμότητα. Η λειτουργία του έχει ως εξής:

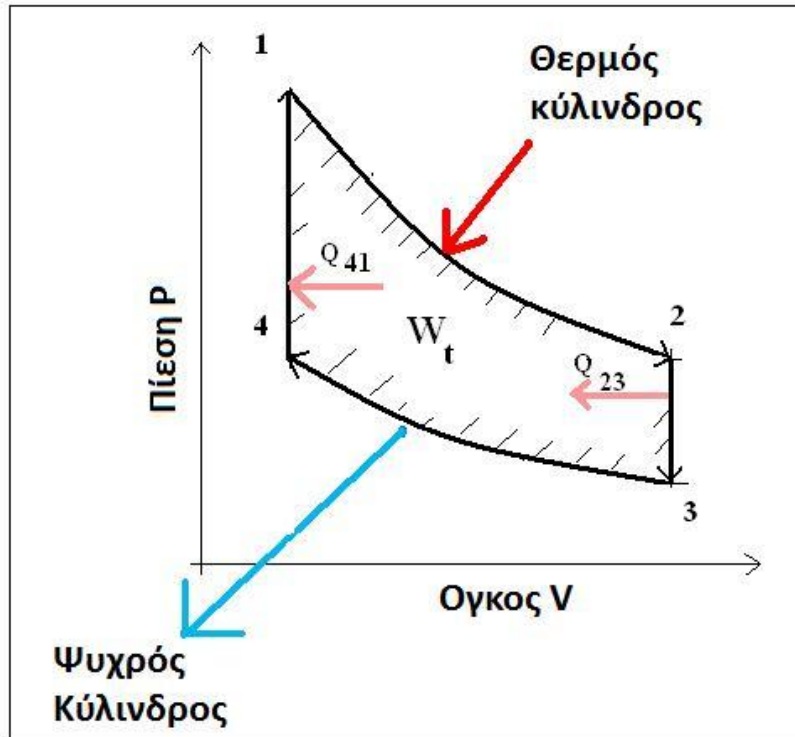
- § Όταν το θερμό αέριο μεταφέρεται από το θερμό χώρο (ES) στον ψυχρό (CS), ένα μέρος της εσωτερικής του ενέργειας κατακρατείται από τη μήτρα του αναγεννητή (R) και αποθηκεύεται σ' αυτήν.
- § Όταν το κρύο αέριο επιστρέφει πίσω από τον ψυχρό χώρο (CS) στο θερμό χώρο (ES) με τη βοήθεια του εμβόλου P (ή του DP στις διαμορφώσεις B και Γ), το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που είχε ήδη αποθηκευθεί στη μήτρα του

αναγεννητή αποδίδεται στο αέριο. Έτσι ο αναγεννητής προψύχει και προθερμαίνει το εργαζόμενο αέριο, βελτιώνοντας θεαματικά την απόδοση της μηχανής.

Τα κύρια λοιπόν μέρη της μηχανής κατά σειρά είναι:

- i) Χώρος Συμπίεσης (CS),
- ii) Ψύκτης (C),
- iii) Αναγεννητής (R),
- iv) Θερμαντήρας (H),
- v) Χώρος Εκτόνωσης (ES).
- vi)

Κατά την κυκλοφορία του αερίου μέσα στη μηχανή, όπως περιγράφεται παραπάνω εκτελείται ένας θερμοδυναμικός κύκλος ο οποίος είναι γνωστός ως κύκλος Stirling.

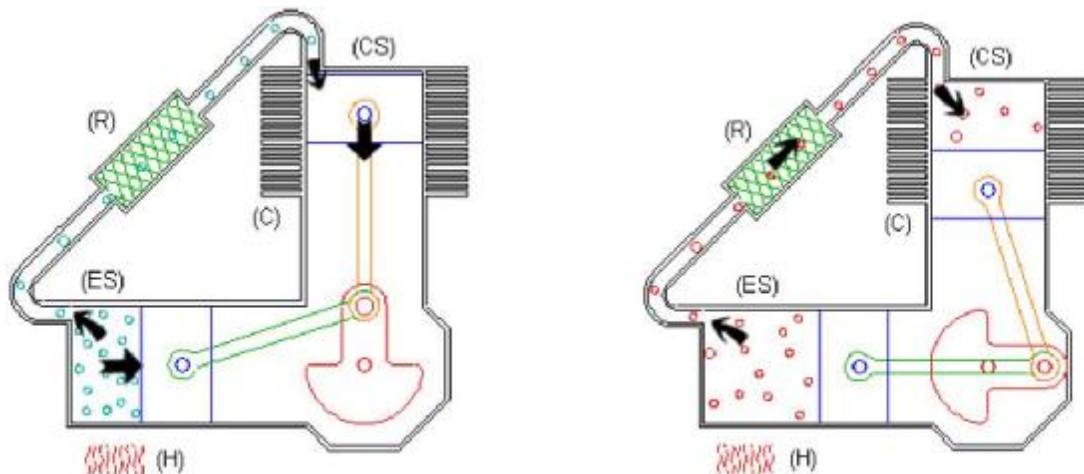


Σχήμα 38 Θερμοδυναμικός Κύκλος Stirling

Όταν ένα αέριο είναι κλεισμένο σε έναν κύλινδρο και μετακινείται στο θερμό μέρος του κυλίνδρου, αυξάνεται η πίεσή του και επιδιώκει να διασταλεί. Έτσι μπορεί να παράγει ενέργεια μέσω έργου. Αντίθετα, όταν το αέριο αναγκάζεται να πάει στο κρύο μέρος του κυλίνδρου, ψύχεται και συστέλλεται, καταναλώνοντας ενέργεια.. Το αέριο παράγει περισσότερη ενέργεια μέσω έργου κατά την εκτόνωση σε σχέση με αυτή που χρειάζεται κατά την συμπίεσή του. Το αλγεβρικό άθροισμα των δύο αυτών ενεργειών κατά την διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας είναι η καθαρή παραγόμενη ενέργεια ανά κύκλο από τη μηχανή (σε J/κύκλο) την οποία αν στη συνέχεια πολλαπλασιάσουμε με τη συχνότητα λειτουργίας της μηχανής (σε κύκλους/s) υπολογίζουμε την ισχύ της (σε W). Ακολουθεί λεπτομερής ανάλυση του κύκλου Stirling μέσα σε μια μηχανή με βάση το σχήμα 38 όπου φαίνονται τα τέσσερα στάδια του κύκλου (1" 2" 3" 4)

1. Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση 1" 2

Το μεγαλύτερο μέρος του εργαζόμενου αερίου που βρίσκεται μέσα στο κλειστό σύστημα έχει οδηγηθεί μέσα στο θερμό κύλινδρο. Το αέριο θερμαίνεται και εκτονώνεται οδηγώντας και τα δύο έμβολα προς τα μέσα (στο σχήμα μας το έμβολο του θερμού κυλίνδρου προς τα δεξιά ενώ του ψυχρού κυλίνδρου προς τα κάτω). Η γωνιακή εκτροπή του στρόφαλου μετρούμενη από την κατακόρυφη και με δεξιόστροφη φορά διαγραφής στην αρχή της φάσης είναι μηδέν. Στο τέλος της πρώτης φάσης ο στρόφαλος στις 90°.

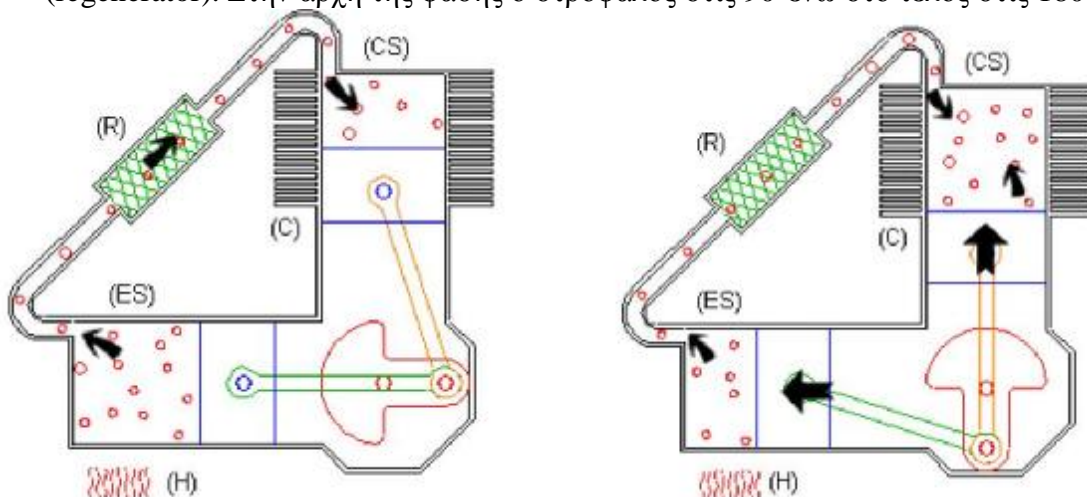


Σχήμα 39 Αρχή Φάσης 1" 2

Τέλος Φάσης 1" 2 ^[32]

2. Ισόογκη ψύξη 2" 3

Το αέριο έχει εκτονωθεί. Το περισσότερο αέριο (περίπου τα 2/3 του) βρίσκεται ακόμα στο θερμό κύλινδρο και το ένα τρίτο στον κρύο κύλινδρο. Ο όγκος στο θερμό κύλινδρο είναι μέγιστος. Καθώς μεταφέρεται θερμός όγκος αερίου από το θερμό στον κρύο κύλινδρο, αποθηκεύεται ποσό θερμότητας στον αναγεννητή (regenerator). Στην αρχή της φάσης ο στρόφαλος στις 90° ενώ στο τέλος στις 180°.

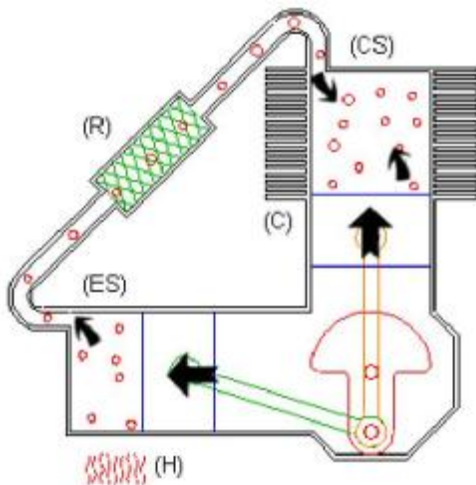


Σχήμα 40 Αρχή Φάσης 2" 3

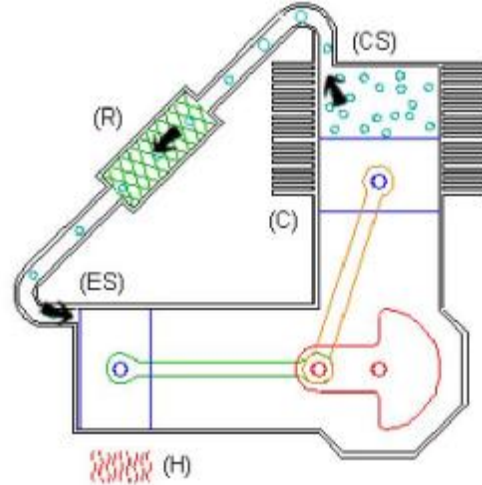
Τέλος Φάσης 2" 3 ^[32]

3. Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση 3" 4

Τώρα το μεγαλύτερο μέρος του εργαζόμενου θερμού αερίου, που έχει εκτονωθεί, έχει μεταφερθεί στον κρύο κύλινδρο. Το αέριο ψύχεται και συστέλλεται, μαζεύοντας και τα δύο έμβολα προς το εσωτερικό των κυλίνδρων τους (στον κάτω αριστερό κύλινδρο προς τα αριστερά ενώ στον πάνω κύλινδρο προς τα πάνω). Ο αναγεννητής συνεχίζει να απορροφά θερμότητα από το εργαζόμενο αέριο καθώς αυτό περνά από το θερμό προς το ψυχρό κύλινδρο. Στην αρχή της φάσης ο στρόφαλος στις 180° ενώ στο τέλος στις 270°.



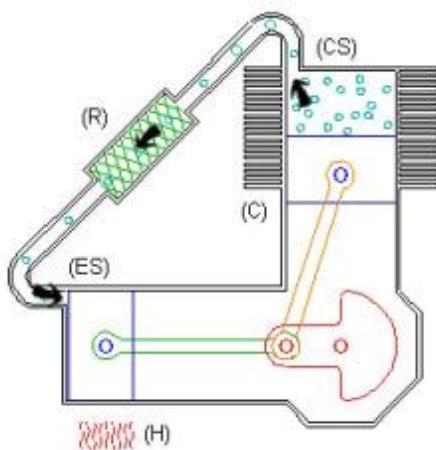
Σχήμα 41 Αρχή Φάσης 3" 4



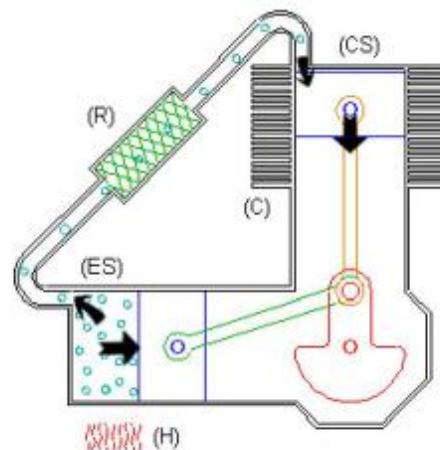
Τέλος Φάσης 3" 4 ^[32]

4. Ισόογκη θέρμανση 4" 1

Τώρα το αέριο που έχει ήδη συσταλθεί βρίσκεται κυρίως στον κρύο κύλινδρο. Ο στρόφαλος στρέφεται ακόμη κατά 90° αναγκάζοντας το αέριο να επιστρέψει στον θερμό κύλινδρο και να συμπληρωθεί ο κύκλος. Καθώς μεταφέρεται κρύος όγκος αερίου από τον κρύο στο θερμό κύλινδρο, ο αναγεννητής αποδίδει θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο, προθερμαίνοντάς το. Αν ο αναγεννητής θεωρηθεί τέλειος τότε και μόνο αποδίδει τόση θερμότητα όση είχε απορροφήσει. Στην αρχή της φάσης ο στρόφαλος στις 270° ενώ στο τέλος στις 360°.



Σχήμα 42 Αρχή Φάσης 4" 1



Τέλος Φάσης 4" 1 ^[32]

3.6 Ενδεικτικές εφαρμογές των θερμικών μηχανών Stirling ^[32]

Μηχανές Stirling έχουν τοποθετηθεί πειραματικά, σε μικρά σκάφη αναψυχής, σε φορητά αυτοκίνητα, σε λεωφορεία και σε μικρά επιβατικά. Μεγάλες εταιρίες (GENERAL MOTORS, FORD, PHILIPS, MAN, UNITED STIRLING, FIAT) έχουν συνεργαστεί επιτυχώς για το σκοπό αυτό. Ωστόσο δεν είναι δυνατόν, τουλάχιστον προς το παρόν, να εκτοπίσουν τις ΜΕΚ (βενζινομηχανές και πετρελαιομηχανές) λόγω της μακροχρόνιας εξέλιξής τους. Σήμερα οι μηχανές Stirling έχουν εφαρμογές ευρέως φάσματος από παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση βιομάζας σε μικρές αγροτικές μονάδες έως το να κινούν υποβρύχια ή να παρέχουν επικουρικό ή ακόμα και κύριο ενεργειακό έργο σε διαστημικά οχήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

3.6.1 Η Stirling στη στεριά

Στο Σχ. 7 φαίνεται μία μηχανή Stirling της εταιρίας Phillips για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ στο Σχ. 8 μια σύγχρονη ηλεκτρογεννήτρια της Γερμανικής εταιρίας SOLO που παράγει ηλεκτρική ισχύ 2-9 kW από 8-24 kW θερμική ισχύ.



Σχήμα 43 Ηλεκτρική Γεννήτρια της Phillips ^[33]



Σχήμα 44 Ηλεκτρική Γεννήτρια της SOLO ^[34]

Στο σχήμα 45 φαίνεται ένα ενεργειακό ηλιακό σύστημα της Αμερικάνικης εταιρίας Infinia. Στην γειτονιά της εστίας του κατόπτρου βρίσκεται μια εργοπαραγωγός μηχανή Stirling. (Σχήμα 46).



Σχήμα 45 Ενεργειακό ηλιακό σύστημα της εταιρείας Infinia ^[35]



Σχήμα 46 Εργοπαραγωγός μηχανή Stirling ^[35]

3.6.2 Η Stirling στη θάλασσα ^[36]

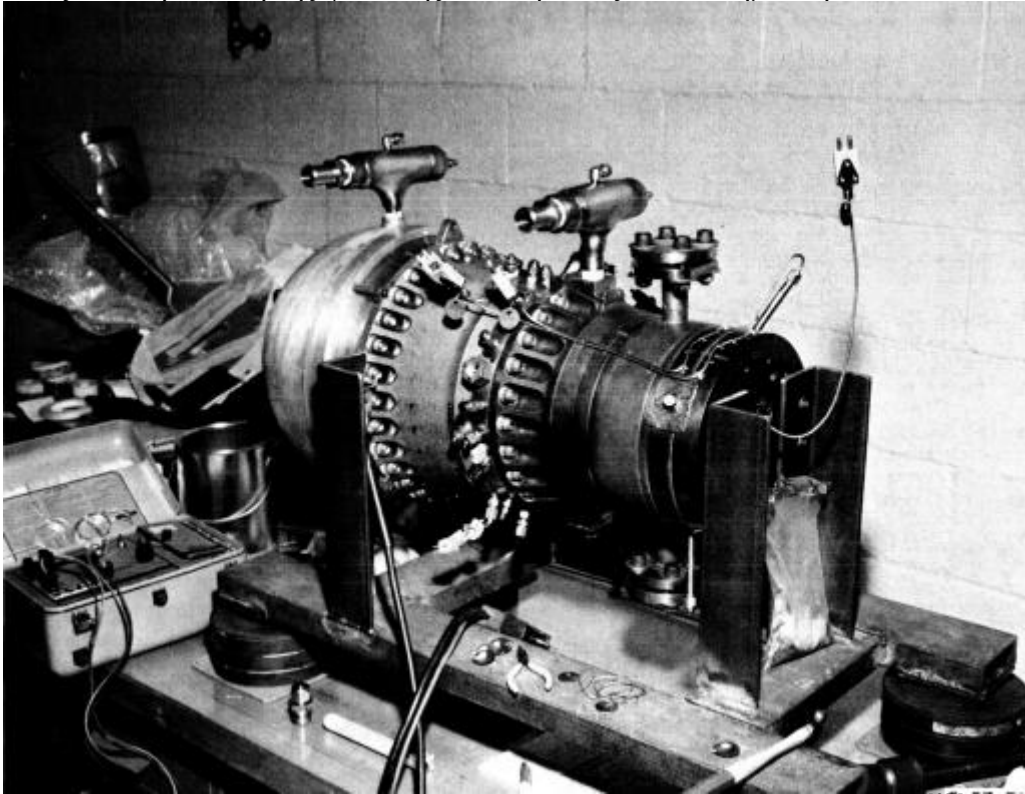
Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 η Σουηδική εταιρία Kockums προσάρμοσε μια μηχανή Stirling (Σχ. 16) στο υποβρύχιο Nacken του Βασιλικού Σουηδικού Ναυτικού. Το υποβρύχιο τοποθετήθηκε αρχικά στη δεξαμενή του ναυπηγείου, κόπηκε στα δύο και εισήχθη ένα πλήρως εφοδιασμένο σύστημα Stirling AIP μήκους οκτώ μέτρων. Τα χρόνια των πρακτικών θαλάσσιων δοκιμών που ακολούθησαν ήταν εξαιρετικά ικανοποιητικά και οδήγησαν στην εγκατάσταση των συστημάτων Stirling AIP στα νέα υποβρύχια τύπου Gotland.



Σχήμα 47 Σύγχρονο Σουηδικό υποβρύχιο κινούμενο με μηχανή Stirling ^[36]

3.6.3 Η Stirling στο Διάστημα

Η NASA (Glenn Research Center-Rockwell International) το Μάρτιο του 1993 δημοσίευσε μία ολοκληρωμένη μελέτη με τον τίτλο “Lunar Electric Power Systems Utilizing the SP-100 Reactor Coupled to Dynamic Conversion Systems”. Στη μελέτη αυτή παρουσιάζεται μία εφαρμογή μηχανής Stirling η οποία καταναλώνοντας πυρηνικό καύσιμο παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες ενός διαστημικού σταθμού. Ο σταθμός αυτός μπορεί να είναι εγκατεστημένος πάνω στην επιφάνεια ενός απομακρυσμένου πλανήτη ή να βρίσκεται πάνω σε διαστημικό όχημα που κινείται στα όρια του Ηλιακού συστήματος όπου η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας είναι ασήμαντη.



Σχήμα 48 Stirling ελευθέρων εμβόλων για διαστημική χρήση^[37]

3.6.4 Η ψυκτική μηχανή

Οι μηχανές Stirling λειτουργούν πολύ καλά και ως ψυκτικές. Οι δυνατότητες αυτές είχαν αναγνωριστεί ήδη από το 1834, από τον John Herschel. Το 1876 ο Alexander Kirk περιέγραψε μια μηχανή ψύξης η οποία χρησιμοποιούνταν δέκα χρόνια. Ωστόσο, μόνο προς τα τέλη της δεκαετίας του 1940 έγιναν σοβαρές προσπάθειες ως προς την εμπορική ανάπτυξη των ψυκτικών μηχανών κύκλου Stirling. Αυτό το ανέλαβε η εταιρεία Philips στο Eindhoven. Η πρώτη ψυκτική μηχανή παρουσιάστηκε το 1953 και ήταν ένας υγροποιητής αέρα. Από τότε, περαιτέρω έρευνα οδήγησε στην ανάπτυξη μιας ποικιλίας ψυκτικών μηχανών Stirling που αφορούν ψυκτική ικανότητα ευρέως φάσματος, και στην κατασκευή σχετικού εξοπλισμού για κρυογονική έρευνα και βιομηχανικές εφαρμογές. Ως τώρα, οι ψυκτικές μηχανές κύκλου Stirling έχουν αποδειχθεί πιο κατάλληλες για το κρυογονικό πεδίο (δηλαδή για εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες), σε αντίθεση με το πεδίο υψηλών θερμοκρασιών (οικιακού και βιομηχανικού ενδιαφέροντος) το οποίο κυριαρχείται προς το παρόν από ψυκτικές μηχανές συμπίεσης ατμού π.χ. Αμμωνίας, R22 [CHClF₂] και άλλων οικολογικότερων ψυκτικών ρευστών. Άλλοι κατασκευαστές έχουν εισέλθει στην αγορά των μικρών (και μικροσκοπικών) κρυογονικών μηχανών ψύξης οι οποίες χρησιμοποιούνται σαν

βοηθητικές σε ηλεκτρονικές εφαρμογές, κυρίως σε ανιχνευτικούς μηχανισμούς με υπέρυθη ακτινοβολία για ποικιλία στρατιωτικών και πολιτικών σκοπών.

Στο Σχήμα 49 φαίνεται μία επιδαπέδια ψυκτική μηχανή, η SPC-1, της Ολλανδικής εταιρίας Stirling Cryogenics & Refrigeration BV. Έχει μάζα 600kg, εργάζεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έως 45° C, με μέγιστη σχετική υγρασία 95%, έχει ψυκτική ικανότητα 1kW στους 70K ή 3kW στους 200K, ψύχει 750 L νερό ανά ώρα και απαιτεί συντήρηση κάθε 6.000 ώρες λειτουργίας.



Σχήμα 49 Ψυκτική μηχανή SPC-1 ^[38]

Στο Σχήμα 50 φαίνεται μία μικρή κρυογονική μηχανή, η CryoTel, της Αμερικανικής εταιρίας Sunpower. Έχει ψυκτική ικανότητα 5W στους 80K, συχνότητα 60Hz, καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ 80W, διάρκεια ζωής 50.000 ώρες και εργάζεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος από -40° C έως 60°C. ^[39]



Σχήμα 50 Ο cryocooler CryoTel MT^[39]

3.7 Μειονεκτήματα – Πλεονεκτήματα Μηχανής Stirling^[40]

Σήμερα οι μηχανές Stirling διεγείρουν σημαντικά το ενδιαφέρον μας αφού:

- § Ρυπαίνουν ελάχιστα
- § λειτουργούν αθόρυβα, πρακτικά χωρίς ταλαντώσεις (σέβονται το περιβάλλον),
- § καταναλώνουν πολλαπλά καύσιμα (ηλιακή ενέργεια, διάφορα στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, ακόμα και πυρηνικό καύσιμο)
- § λειτουργούν αναστρέψιμα (σαν θερμικές μηχανές ή αντλίες θερμότητας),
- § παρουσιάζουν μηχανολογική απλότητα,
- § πολλαπλές εφαρμογές,
- § μέγιστη απόδοση (θεωρητικά όση του κύκλου Carnot).

Τα μειονεκτήματα των μηχανών Stirling εντοπίζονται κυρίως:

- § υψηλό κόστος κατασκευής. Συνήθως κοστίζουν τουλάχιστον διπλάσια τιμή σε σχέση με τις μηχανή Diesel της ίδιας αποδιδόμενης ισχύος. Αυτό οφείλεται στα ακριβά τμήματα της μηχανής (π.χ. Heater), στα στεγανωτικά (Seals) τα οποία πρέπει να είναι πολύ καλής ποιότητας για να μη διαρρέει το εγκλωβισμένο εργαζόμενο μέσο, το οποίο συνήθως έχει μικρό MB και εργάζεται σε υψηλές ταχύτητες και υπό μεγάλες πιέσεις
- § Έλλειψη εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού για την συντήρηση των μηχανών.

4 ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ FRESNEL

4.1 Ιστορική Αναδρομή^{[44],[45]}

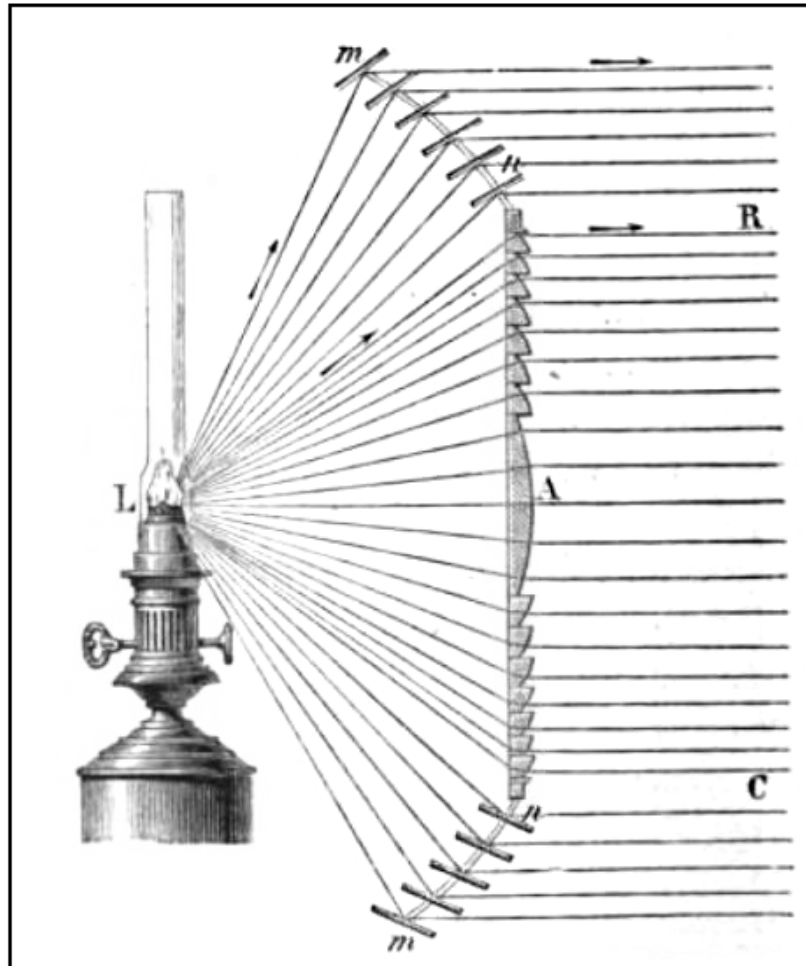
Ο Αυγουστίνος Ιωάννης Φρενέλ (Augustin-Jean Fresnel, (10 Μαΐου 1788 - 14 Ιουλίου 1827) ήταν Γάλλος φυσικός και εφευρέτης. Ασχολήθηκε κυρίως με την πόλωση, την διάθλαση, την διπλή ανάκλαση του φωτός καθώς και με την κυματοειδή του διάδοση. Έγινε μέλος της Γαλλικής Ακαδημίας των Επιστημών (1823) και της Αγγλικής Βασιλικής Εταιρίας των Επιστημών.



Σχήμα 51 Φαρικό οπτικό (μηχανή) τύπου Φρενέλ όπου διακρίνονται οι επάλληλοι οριζόντιοι (πάνω και κάτω) και κάθετοι ομόκεντροι δακτύλιοι (διοπτρικά στοιχεία) περιμετρικά.^[44]

Η πρακτικότερη των επινοήσεών του ήταν εκείνη των οπτικών μηχανών των φάρων, με την οποία ασχολήθηκε αφότου ανέλαβε Γενικός Γραμματέας της επί των Φάρων της Γαλλίας Γνωμοδοτικής Επιτροπής. Συγκεκριμένα αντιλήφθηκε την ανάγκη της χρησιμοποίησης των επιπεδόκυρτων φακών στις μηχανές των φάρων. Ασχολούμενος με την έρευνα αυτή εφηύρε τη μέθοδο κατασκευής αυτών με τη χρήση αντί ολόσωμων φακών δακτυλιοειδών επάλληλων

διοπτρικών στοιχείων, επιτρέποντας έτσι την δημιουργία μεγάλων διαμέτρων και μικρής διαμέτρου και μάλιστα με πολύ μικρή δαπάνη. Η δημιουργία του πρώτου τέτοιου «φαρικού οπτικού» που τοποθετήθηκε προς δοκιμή στα πρόσγεια του Μπορντώ, στον Φάρο του Κορντουάν, γενίκευσε την χρήση της επινόησης του Φρενέλ. Η μέθοδός του χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα αποκλειστικά σε όλους τους φάρους του κόσμου, που για αυτό το λόγο ονομάζονται «καταδιοπτρικοί» φαίνεται στο σχήμα 52



Σχήμα 52 Μέθοδος Fresnel^[45]

Η μέθοδος Fresnel χρησιμοποιείται στις μέρες μας και αποτελεί μια ξεχωριστή μέθοδο συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται στη συνέχεια.

4.2 Γενική Επισκόπηση του Συστήματος^{[45], [46]}

Το σύστημα του συλλέκτη Fresnel (Φρενέλ) έχει πολλές ομοιότητες με αυτό των παραβολικών κοίλων. Και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν ένα σωληνωτό δέκτη που είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής του συλλέκτη. Παρόλα αυτά, οι σημαντικές τεχνικές διαφορές που υπάρχουν στους συλλέκτες των δύο συστημάτων καθιστούν το σύστημα Fresnel ένα ξεχωριστό συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα. Η βελγική εταιρεία Solarmundo είναι η πρώτη που εφάρμοσε την τεχνολογία αυτή και υποστήριξε τις λειτουργικές και οικονομικές δυνατότητες του συλλέκτη Fresnel.

Ο συλλέκτης Fresnel αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές επίπεδων ανακλαστήρων που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη τοποθετημένο κατά μήκος των

σειρών αυτών και σε αρκετά μέτρα ύψος. Οι ανακλαστήρες αυτοί χαρακτηρίζονται ως πρωτοβάθμιοι για να διαχωρίζονται από έναν δευτεροβάθμιο κοίλο ανακλαστήρα που είναι τοποθετημένος στο επάνω μέρος του δέκτη και κατευθύνει όλες τις εισερχόμενες ακτίνες στο σωλήνα απορρόφησης ελαττώνοντας έτσι τις απώλειες (σχήμα 53).

Σύμφωνα με το πρότυπο Solarmundo οι πρωτοβάθμιοι ανακλαστήρες, που κάθε ένας έχει πλάτος 0.5 m, δεν είναι απολύτως επίπεδοι αλλά έχουν μια πολύ μικρή καμπυλότητα. Ο συλλέκτης αποτελείται από 48 σειρές καθρεφτών (κατά πλάτος), με αποτέλεσμα να σχηματίζεται τελικά μια επιφάνεια συλλέκτη συνολικού πλάτους 24 m. Η λειτουργία της επιφάνειας είναι πολύ απλή: Επειδή η σχετική κίνηση όλων των πρωτοβάθμιων καθρεφτών είναι ίδια κατά την παρακολούθηση του ήλιου, μετά τη σωστή τοποθέτησή τους, η κίνηση τους συντονίζεται μηχανικά. Αρκετές σειρές καθρεφτών οδηγούνται από μία μόνο μηχανή.

Ο δευτεροβάθμιος συλλέκτης-συγκεντρωτής όχι μόνο διευρύνει το στόχο για τους ανακλαστήρες Fresnel αλλά λειτουργεί και ως μόνωση κατά των απωλειών από το σωλήνα απορρόφησης. Το πίσω τμήμα του συγκεντρωτή αυτού καλύπτεται από μια αδιαφανή μόνωση, ενώ στο μπροστινό τμήμα ένα κατοπτρικό τζάμι μειώνει τις απώλειες θερμότητας από συναγωγή.

Ο σωλήνας απορρόφησης έχει εσωτερική διάμετρο 18cm και είναι τοποθετημένος κατά μήκος πάνω σε σταθερά μεταλλικά στηρίγματα (ράγες), χωρίς να απαιτούνται τόξα στήριξης όπως στα ηλιακά παραβολικά κοίλα, επιτρέποντας έτσι με απλό και οικονομικό τρόπο τη θερμική διαστολή του σωλήνα. Η συνολική μετακίνηση λόγω της διαστολής σε μια εγκατάσταση μήκους ενός χιλιομέτρου μπορεί να είναι πάνω από 6 μέτρα στο τέλος ενός σωλήνα.

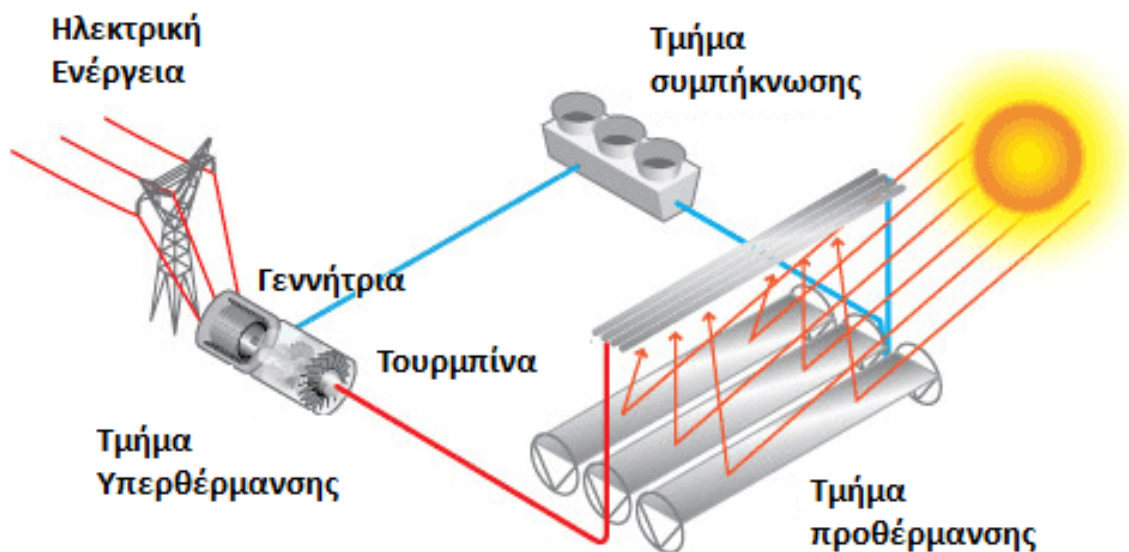
Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που ρέει μέσα στο δέκτη είναι νερό. Ωστόσο, η παραγωγή του ατμού δε γίνεται σε εναλλάκτες θερμότητας αλλά μέσα στον ίδιο το σωλήνα απορρόφησης. Γίνεται δηλαδή άμεση παραγωγή ατμού.



Σχήμα 53 Αρχή λειτουργίας του συλλέκτη Fresnel^[47]

Το βασικό σχέδιο ενός ολόκληρου πεδίου συλλεκτών για άμεση παραγωγή ατμού παρουσιάζεται στο σχήμα 54. Το ηλιακό πεδίο για ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 50 MW αναπτύσσεται σε 12 σειρές συλλεκτών κάθε μια μήκους 1000 m. Οι σειρές μπορούν να είναι εγκατεστημένες η μια κοντά στην άλλη έτσι ώστε η

χρήση εδάφους του ηλιακού πεδίου να είναι πρακτικά όχι μεγαλύτερη απ' ό,τι η έκταση των καθρεφτών. Οι σειρές συλλεκτών συνδέονται παράλληλα και σε σειρά και το ηλιακό πεδίο διαιρείται σε τρία τμήματα: της προθέρμανσης, της συμπύκνωσης και της υπερθέρμανσης.



Σχήμα 54 Η ροή στο πεδίο του συλλέκτη ^[48]

Τα βασικά πλεονεκτήματα του συλλέκτη Fresnel, σε σύγκριση με τους συλλέκτες παραβολικών κοίλων είναι:

- Φτηνά επίπεδα κάτοπτρα και απλό σύστημα παρακολούθησης του ήλιου.
- Σταθερός σωλήνας απορρόφησης χωρίς την ανάγκη για εύκαμπτες ενώσεις υψηλή πίεσης.
- Το πλάτος του συλλέκτη Fresnel για έναν σωλήνα απορρόφησης μπορεί να είναι τρεις φορές το πλάτος των παραβολικών κοίλων.
- Λόγω της άμεσης παραγωγής ατμού δεν υπάρχουν εναλλάκτες θερμότητας.
- Αποδοτική χρήση του εδάφους καθώς οι συλλέκτες μπορεί να είναι τοποθετημένοι ο ένας δίπλα στον άλλον.
- Εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής ακόμη και σε περιοχές με σχετικά χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία.

Σύμφωνα με την Solarmundo αυτά τα πλεονεκτήματα οδηγούν σε μια μείωση του κόστους περίπου 50% για το ηλιακό πεδίο έναντι των παραβολικών κοίλων. Εκτός από το μειωμένο κόστος του ηλιακού πεδίου, οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης είναι και αυτές ιδιαίτερα μειωμένες.

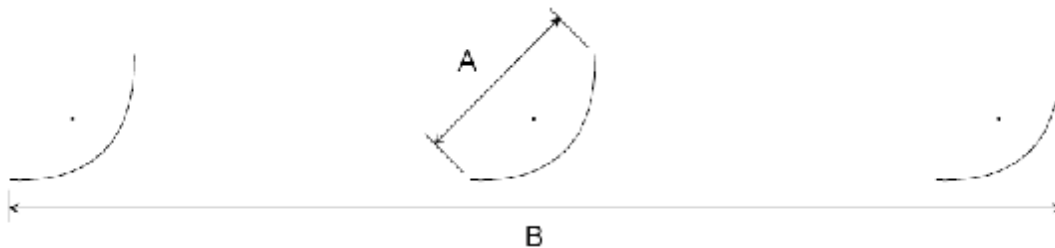
4.3 Θεωρητική παρουσίαση του συλλέκτη ^[49]

Αν και ο πρωτότυπος συλλέκτης Solarmundo λειτούργησε κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες και απέδειξε ότι μπορεί να παράγει ατμό, δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις της θερμικής απόδοσης ακόμα. Συμπεράσματα για την οπτική και θερμική απόδοση πρέπει να αντληθούν από τις θεωρητικές μελέτες, που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν. Μια από αυτές τις μελέτες πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του προγράμματος SolarPaces της Διεθνούς Επιτροπής Ενέργειας (IEA). Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, η μέθοδος "ανίχνευση ακτινών" (ray tracing) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της οπτικής απόδοσης ενώ η θερμική

απόδοση υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους δυναμικής ρευστών. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου καταγραφής ακτινών μια σειρά από ακτίνες, παραγόμενες από μια τεχνητή πηγή φωτός, προκαλεί ανακλάσεις, διαθλάσεις και σκιές σε ένα γραφικό οπτικό είδωλο και προσδιορίζονται οι επιδράσεις των ακτινών σε κάθε πίξελ του είδωλου.

Άνοιγμα συλλέκτη, εμβαδό ανοίγματος συλλέκτη και μεικτή επιφάνεια πεδίου

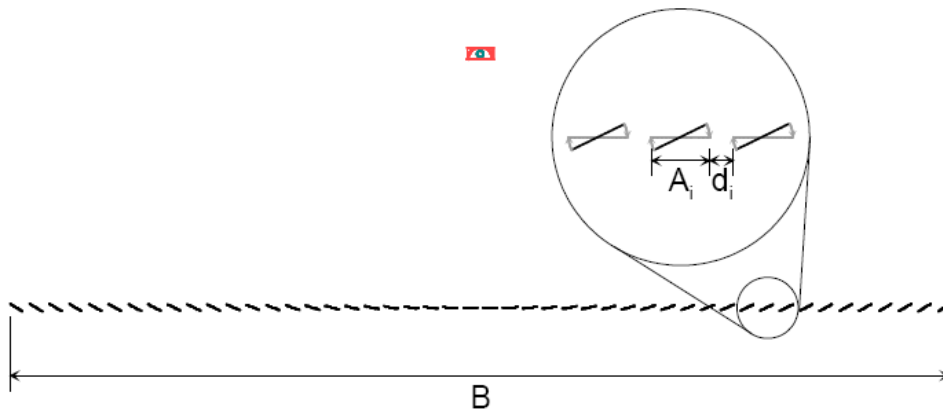
Προκειμένου να συγκριθούν οι αποδόσεις των συλλεκτών Fresnel και των παραβολικών κοίλων, μπορεί να καθοριστεί ως κοινό σημείο αναφοράς το εμβαδόν του ανοίγματος του συλλέκτη. Σε έναν συλλέκτη παραβολικών κοίλων το εμβαδόν του ανοίγματος ορίζεται ως η οριζόντια προβολή της ανακλαστικής του επιφάνειας. Η μεικτή επιφάνεια ενός πεδίου συλλεκτών λαμβάνει υπόψη και το διάστημα μεταξύ των κοίλων, το οποίο συνήθως είναι δύο φορές το άνοιγμα.



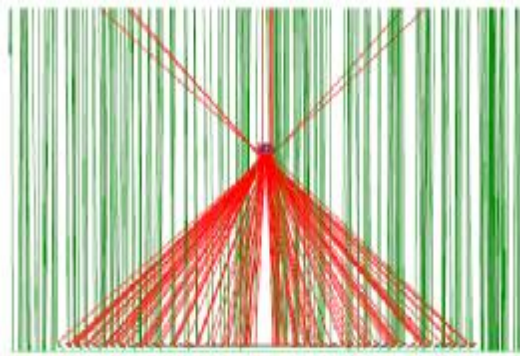
Σχήμα 55 Επιφάνεια αναφοράς πεδίου συλλεκτών παραβολικών κοίλων: άνοιγμα A , μεικτή επιφάνεια B

Το εμβαδόν ανοίγματος ενός συλλέκτη Fresnel είναι σχεδόν ίδιο με το εμβαδόν της επιφάνειας ανάκλασης, καθώς η κυρτότητα των πρωτοβάθμιων ανακλαστήρων Fresnel είναι αρκετά μικρή ώστε να μην λαμβάνεται υπόψιν. Τα κενά διαστήματα μήκους d_i μεταξύ των ανακλαστήρων πρέπει να προστεθούν στην επιφάνεια ανοίγματος A για να δώσουν την μεικτή επιφάνεια B (του συλλέκτη και όχι του πεδίου εδώ).

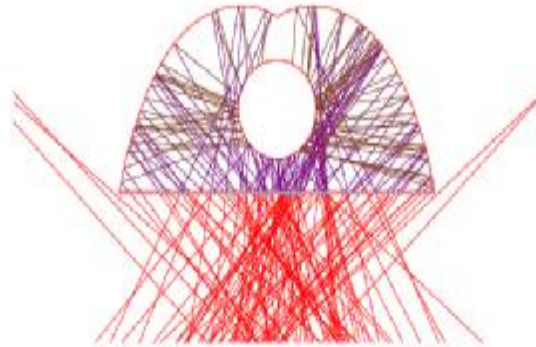
Το άνοιγμα ενός παραβολικού κοίλου, καθώς παρακολουθεί τον ήλιο, παίρνει μια κλίση. Το άνοιγμα ενός συλλέκτη Fresnel παραμένει οριζόντιο, παρόλο που οι ανεξάρτητοι ανακλαστήρες ακολουθούν τον ήλιο.



Σχήμα 56 Επιφάνεια αναφοράς συλλέκτη Fresnel: άνοιγμα $A = \sum A_i$, μεικτή επιφάνεια B



Σχήμα 57: "ανίχνευση ακτινών"



Σχήμα 58: απορροφητής και δευτεροβάθμιος ανακλαστήρας

4.3.1 Οπτική απόδοση

Στους υπολογισμούς τρισδιάστατης "ανίχνευσης ακτινών", που πραγματοποιήθηκαν στην μελέτη SolarPaces, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες παράμετροι υλικών:

Πίνακας 1: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΛΙΚΩΝ	
Ανακλαστικότητα πρωτοβάθμιου κατόπτρου	92%
Συντελεστής εκπομπής κατοπτρικού τζαμιού * (τζάμι στο δευτεροβάθμιο κάτοπτρο)	95%
Ανακλαστικότητα δευτεροβάθμιου κατόπτρου	95%
Απορροφητικότητα του σωλήνα απορρόφησης	94%

* Ο λόγος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία επιφάνεια προς την ακτινοβολία που εκπέμπει μέλαν σώμα ίδιας θερμοκρασίας. Η ακτινοβολία που εκπέμπει μια επιφάνεια δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την θερμοκρασία της, το μήκος κύματος και την διεύθυνση εκπομπής.

Με τις δεδομένες παραμέτρους βρέθηκε ότι για τις κάθετα προσπίπτουσες ακτινοβολίες (π.χ. στον ισημερινό το μεσημέρι της 21ης Μαρτίου ή Δεκεμβρίου) ο βαθμός απόδοσης (μετατροπή ενέργειας από ηλιακή σε θερμική στην επιφάνεια του απορροφητή) είναι:

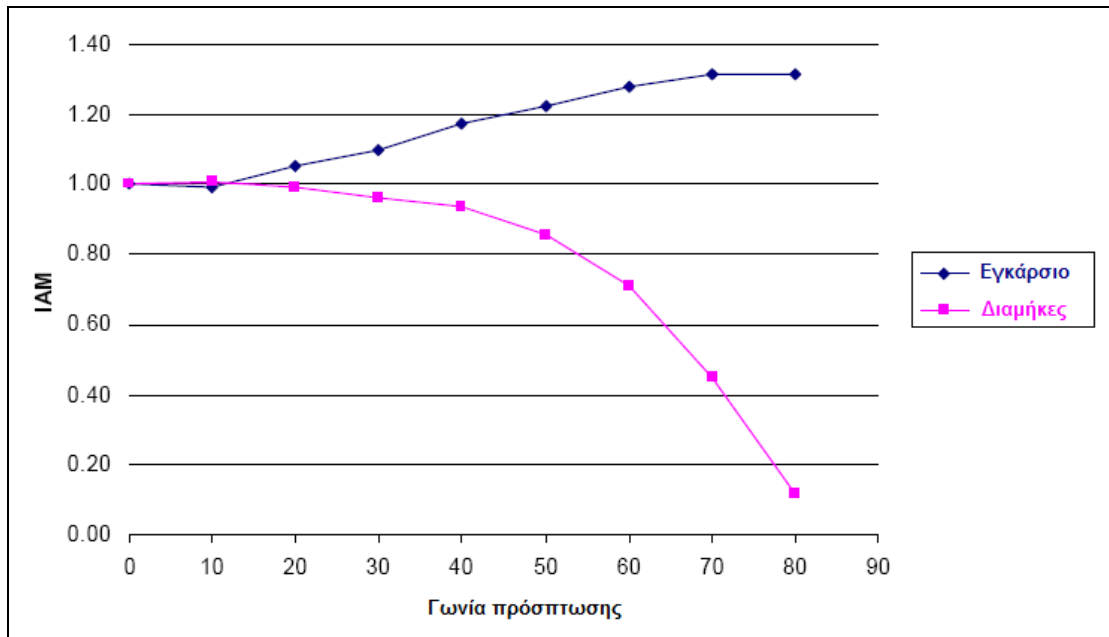
$$n_{0(q=0)} = 61\% \quad \text{όπου } \theta \text{ είναι η γωνία πρόσπτωσης.}$$

Βρίσκοντας το βαθμό απόδοσης $\eta_{0(\theta)}$ για γωνίες πρόσπτωσης διάφορες του μηδενός θεωρούμε το λόγο μετατροπής IAM (incident angle modifier), ο οποίος παριστάνεται στο σχήμα 59 για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης.

$$IAM = \frac{h_0(q)}{h_0(q=0)}$$

Ο λόγος αυτός περιγράφει την αλλαγή στον βαθμό απόδοσης για γωνίες πρόσπτωσης μη κάθετες. Το εγκάρσιο IAM_i ορίζεται ως η προβολή του IAM σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα παρακολούθησης. Είναι αξιοπρόσεκτο ότι το IAM_i παίρνει υψηλές τιμές για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης χάνονται λιγότερες ακτίνες στα χάσματα μεταξύ των καθρεφτών και λιγότεροι γειτονικοί καθρέφτες φωτίζουν ο ένας τη πίσω πλευρά του άλλου αντί να φωτίζουν τον απορροφητή (μικρότερο μπλοκάρισμα). Το διαμήκες IAM_l είναι παράλληλο στον άξονα παρακολούθησης

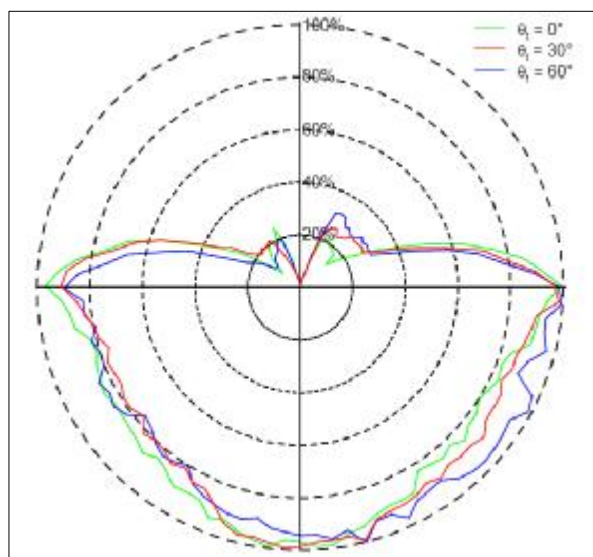
και καθορίζεται βασικά από το άνοιγμα της γυάλινης πλευράς του δευτεροβάθμιου ανακλαστήρα.



Σχήμα 59: Γραφική παράσταση του λόγου μετατροπής IAM για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

Ένα πλεονέκτημα των συλλεκτών Fresnel είναι το γεγονός ότι ο σωλήνας απορρόφησης φωτίζεται πάντα από την κάτω μεριά του ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα για τη δημιουργία ροής στρωμάτων, όπου το υγρό είναι στο χαμηλότερο τμήμα του σωλήνα και ο ατμός είναι στο ανώτερο τμήμα.

Η σχετική κατανομή της ηλιακής έντασης στον απορροφητή παρουσιάζεται στο σχήμα 60. Φαίνεται μόνο στο κάτω μέρος του σωλήνα εμφανίζεται ομαλή κατανομή (μεταξύ 80% και 100%). Η μορφή της κατανομής δεν αλλάζει σημαντικά για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης.



δύο
ότι

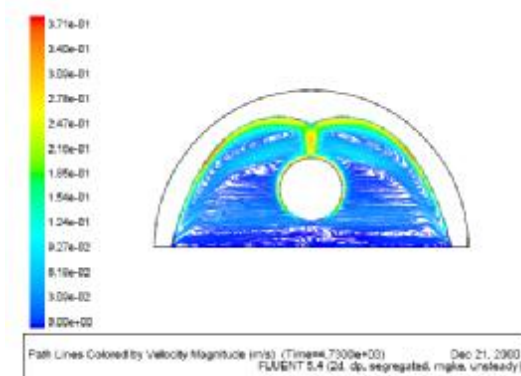
Σχήμα 60: Σχετική κατανομή της έντασης στον απορροφητή για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

4.3.2 Θερμική απόδοση

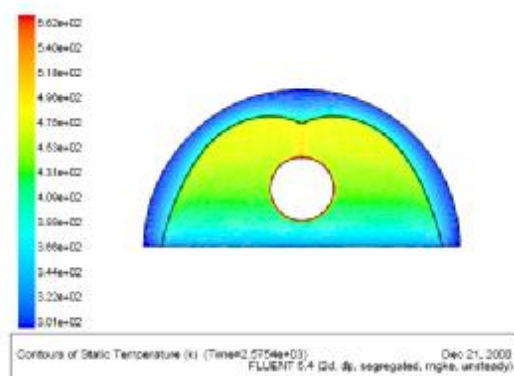
Για τον υπολογισμό των απωλειών θερμότητας από το σωλήνα απορρόφησης, πραγματοποιήθηκαν διάφορες υπολογιστικές μέθοδοι δυναμικής ρευστών, που λαμβάνουν υπόψη όλους τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας: ακτινοβολία, αγωγή, συναγωγή. Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς αυτούς στη μελέτη του SolarPaces δίνονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΛΙΚΩΝ	
Θερμική εκπομπή του απορροφητή	5%
Συντελεστής συναγωγής από το άνοιγμα και από το πίσω μέρος του δευτεροβάθμιου ανακλαστήρα προς το περιβάλλον	10 W/m ² K
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας από την μόνωση του πίσω μέρους του δευτεροβάθμιου ανακλαστήρα	0.05 W/mK

Η θερμορροή συναγωγής και η προκύπτουσα κατανομή θερμότητας μεταξύ του σωλήνα απορρόφησης και του δευτεροβάθμιου ανακλαστήρα μελετήθηκαν για θερμοκρασίες απορροφητή από 100°C (373K) ως 600°C (873K) με σταθερή τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 30°C (303K).

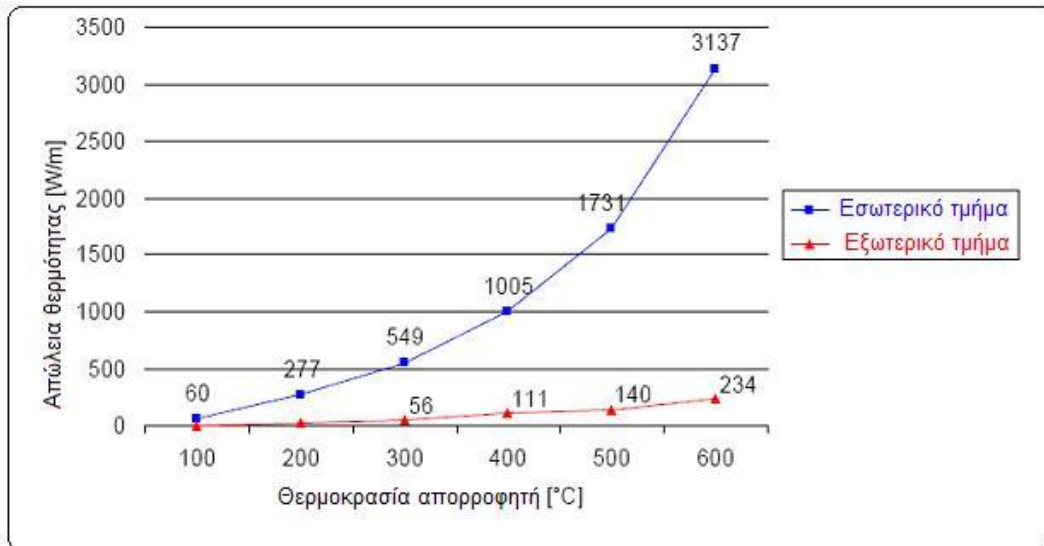


Σχήμα 61: Θερμορροή συναγωγής,
 $T_{\text{απορρόφησης}}=500^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 62: Θερμοκρασιακή κατανομή,
 $T_{\text{απορρόφησης}}=500^{\circ}\text{C}$

Οι απώλειες στο δέκτη, τόσο στο εσωτερικό τμήμα του δευτεροβάθμιου συγκεντρωτή όσο και στο εξωτερικό του τμήμα, παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα σε μονάδες W/m του σωλήνα απορρόφησης. Όπως φαίνεται οι απώλειες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία.



Σχήμα 63: Θερμικές απώλειες στο εσωτερικό και εξωτερικό τμήμα του δευτεροβάθμιου συγκεντρωτή.

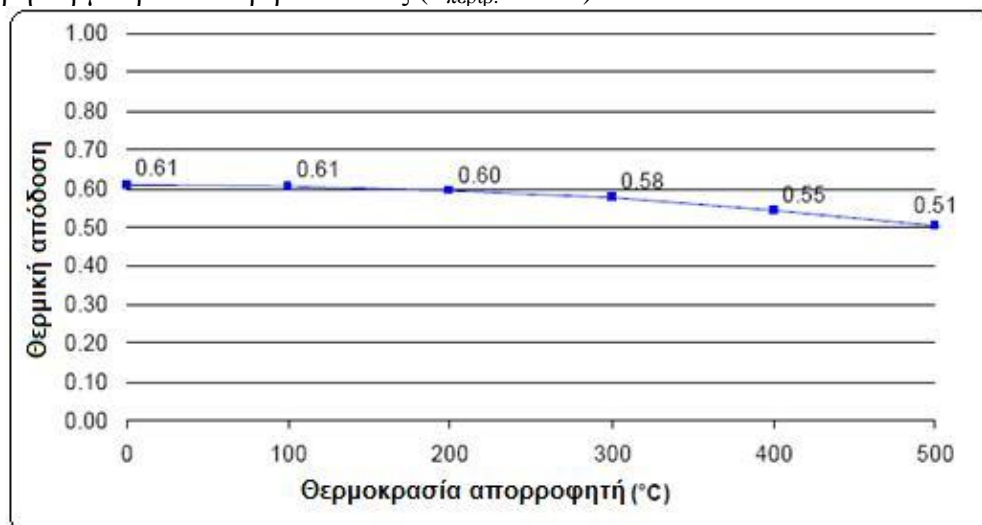
Ο συντελεστής θερμικών απωλειών ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$u = 3.8 \cdot 10^{-4} (T_{\text{aporrófhshV}} - T_{\text{peribállon}}) \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

Ενώ η θερμική απόδοση είναι:

$$n_{(T_{\text{aporrófhshV}})} = n_0 - u \frac{T_{\text{aporrófhshV}} - T_{\text{peribállon to V}}}{E_{\text{aktinoboliaV}}}$$

Το σχεδιάγραμμα που ακολουθεί δίνει την προκύπτουσα καμπύλη της θερμικής απόδοσης για κάθετη ακτινοβολία ($E_{\text{aktiv.}}=800\text{W/m}^2$) σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του απορροφητή σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{\text{περιβ.}}=30^\circ\text{C}$).



Σχήμα 64: Καμπύλη απόδοσης για κάθετη ακτινοβολία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://thermodynamics.catalysis.gr/stirling/stirling.html>
- [2] <http://www.answers.com/topic/brayton-cycle>
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle
- [4] http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/csp_technology.htm
- [5] <http://whatwow.org/parabolic-trough/>
- [6] <http://www.newarchitecture.biz/2010/10/solar-tower-energy-australia.html>
- [7] <http://renewable-energy-info.com/solar/csp-dish.html>
- [8] <http://www.solarpowerworldonline.com/2011/03/automation-company-invests-in-csp/>
- [9] http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_trough.pdf
- [10] http://www.nrel.gov/csp/troughnet/solar_field.html
- [11] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112002741>
- [12] http://www.archimedesolarenergy.it/parabolic_trough_archimede.htm
- [13] <http://www.schott.com/>
- [14] <http://www.oklsolar.com/en/about.aspx>
- [15] <http://www.slideshare.net/sustenergy/concentrated-solar-power-course-session-2-parabolic-trough>
- [16] <http://www.docstoc.com/docs/133929481/Fern%C3%A1ndez-Garc%C3%ADa-et-al--2010---Parabolic-trough-solar-collectors-and-their-applications>
- [17] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X05002173>
- [18] http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_tower.pdf
- [19] <http://www.solarpaces.org/Tasks/Task1/ps10.htm>
- [20] <http://www.slideshare.net/sustenergy/session-3-point-focus>
- [21] <http://www.energy-enviro.fi/index.php?PAGE=641>
- [22] <http://www.pveng.com/FEA/FEAGeneral/LargeDisplace/LargeDisplace.php>
- [23]. Xiudong Wei, Zhenwu Lu, Zhifeng Wang, Weixing Yu, Hongxing Zhang, Zhihao

Yao. *A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant.*

- [24]. Xiudong Wei, Zhenwu Lu, Weixing Yu, Zhifeng Wang. *A new code for the design and analysis of the heliostat field layout for power tower system.*
- [25] <http://www.docstoc.com/docs/20028382/SOLAR-POWER-TOWER>
- [26] <http://www.mtholyoke.edu/~wang30y/csp/ParabolicDish.html>
- [27] <http://www.solarpaces.org/Library/docs/concentrating-solar-power-2009.pdf>
- [28] http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=58
- [29] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148102001520>
- [30] <http://www.solarpaces.org/inicio.php>
- [31] <http://newenergydirection.com/blog/2010/06/stirling-engine/>
- [32] <http://users.sch.gr/nborbil/>
- [33] <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/hotair/hotair.htm>
- [34] http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_04_37_sonne_hochtemperatur_stirling.htm
- [35] <http://www.infiniacorp.com/solutions/powerdish/>
- [36] <http://www.kockums.se/>
- [37] http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880002365_1988002365.pdf
- [38] <http://www.stirlingcryogenics.com/products/cryogenic-cooling/cryogenic-cooling-plants-80K-1000W/all/spc-1/>
- [39] <http://www.sunpower.com/cryocoolers/cryotel.php>
- [40] <http://www.slideshare.net/sustenergy/session-3-point-focus>
- [41] <http://www.stirling-fette.de/howdo.htm#fig11>
- [42] http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine
- [43] <http://www.solarpaces.org/Library/docs/concentrating-solar-power-2009.pdf>
- [44] http://el.wikipedia.org/wiki/Αυγουστίνος_Φρενέλ
- [45] http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_lens

- [46] <http://science.howstuffworks.com/question244.htm>
- [47] http://www.dlr.de/en/DesktopDefault.aspx/tabid-4530/3681_read-9671/gallery-1/gallery_read-Image.1.3622/
- [48] http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/linear_concentrator.html
- [49] www.solarpaces.org solarpaces fresnel 9 2002