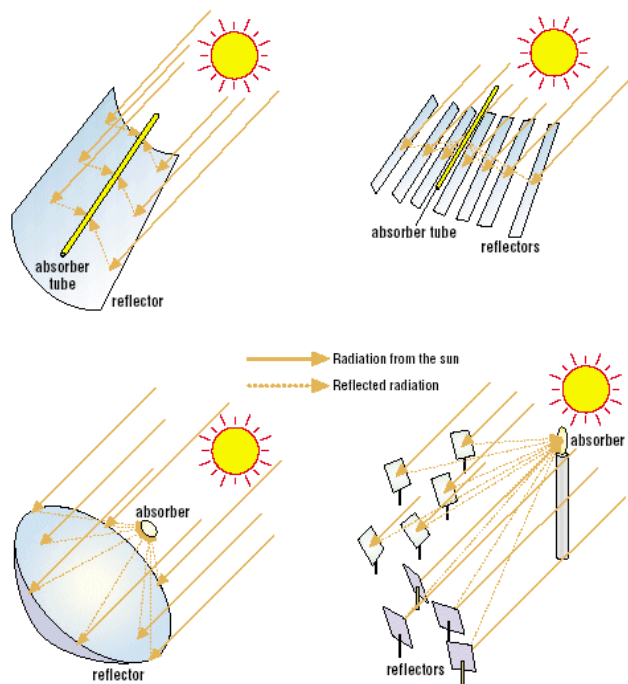


ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Κ.ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2010

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με το τίτλο «Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες» εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Κίμωνα Αντωνόπουλου.

Αντικείμενο του παρόντος συγγράματος είναι η περιγραφή διαφόρων ειδών συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών οι οποίοι προορίζονται για παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παρούσα εργασία χωρίζεται στα παρακάτω κεφάλαια:

Στο κεφάλαιο Α γίνεται μια εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία

Στο κεφάλαιο Β περιγράφεται η οπτική της συγκέντρωσης που περιλαμβάνει τη γεωμετρία της, τα οπτικά χαρακτηριστικά της και βασικά στοιχεία που αφορούν την αντανάκλαση και τη διάθλαση

Στο κεφάλαιο Γ περιγράφονται τα διάφορα είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών, η ιστορία τους, πρωτότυπες κατασκευές, η απόδοσή τους, τα οφέλη και οι επιπτώσεις τους και γίνονται διάφορα σχόλια που αφορούν τη τεχνολογία τους και πιθανά προβλήματα.

Τέλος το κεφάλαιο Δ αποτελεί το υπολογιστικό αυτής της εργασίας, όπου γίνεται μια εφαρμογή των συγκεντρωτικών συλλεκτών παραβολικών κοίλων στην Αθήνα.

A. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	6
A.1 Γενικά	6
A.2 Ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε δοσμένη επιφάνεια	9
B. ΟΠΤΙΚΗ ΤΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΗ	15
B.2 Λόγος συγκέντρωσης	16
B.2.1. Οπτικός λόγος συγκέντρωσης	16
B.2.2 Γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης	16
B.3 Παραβολική Γεωμετρία	17
B.3.1 Η παραβολή	17
B.3.2 Παραβολικός κύλινδρος	21
B.3.3 Παραβολοειδές	22
[1]	24
B.4. Παραβολικά και σφαιρικά οπτικά χαρακτηριστικά	24
B.4.1. Γενικά	24
B.4.2. Διδιάστατα διαγράμματα ανίχνευσης ακτίνων	27
B.4.3. Κοίλα εστιακής γραμμής	28
B.4.4. Δίσκοι εστιακού σημείου	31
B.5. Αντανάκλαση της ενέργειας στο δέκτη	31
B.5.1. Αντανάκλαση παράλληλων ακτίνων	31
B.5.2. Αντανάκλαση μη-παράλληλων ακτίνων	33
B.5.3. Εισαγωγή σφαλμάτων	34
B.6. Αντανάκλαση σε ένα σταθερό σημείο (Ο πύργος ισχύος)	36
B.7. Αρχές αντανάκλασης και διάθλασης	38
B.7.1. Κάτοπτρα	38
B.7.2. Φακοί	40
B.7.3. Φακοί Φρενέλ	40
Γ. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ	43
Γ.1. Δέκτης	43
Γ.1.1. Σχεδιασμός του δέκτη	43
Γ.1.2. Μέγεθος του δέκτη	43
Γ.1.3. Απώλειες του δέκτη	45
Γ.2. Συλλέκτες τύπου CPC	48
Γ.2.1. Οπτικά χαρακτηριστικά	49
Γ.2.2. Απορροφούμενη ακτινοβολία	52
Γ.2.3. Αποδιδόμενη θερμική ισχύς	55
Γ.3 Ηλιακός συλλέκτης σταθερού κατόπτρου (FMSC)	57
Γ.3.1. Γενικά	57
Γ.3.2. Περιγραφή ενός πρωτοτύπου συλλέκτη FMSC	60
Γ.3.3. Απόδοση	61
Γ.4. Ηλιακός συλλέκτης μετακινούμενου κατόπτρου και στατικού δέκτη (SLATS)	63
Γ.4.1. Γενικά	63
Γ.4.2. Περιγραφή ενός πρωτοτύπου συλλέκτη SLATS	64
Γ.4.3. Απόδοση του πρωτοτύπου	66
Γ.5. Συλλέκτης σταθερού κατόπτρου και μετακινούμενου εστιακού σημείου (FMDF)	68
Γ.5.1. Γενικά	68
Γ.5.2. Δέκτης	69
Γ.5.3. Έλεγχος και μηχανισμός παρακολούθησης	70
Γ.5.4. Περιγραφή ενός πρωτοτύπου συλλέκτη FMDF	70
Γ.5.5. Απόδοση του πρωτοτύπου	73
Γ.6. Ηλιακός πύργος ισχύος	74
Γ.6.1. Περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος	74
Γ.6.2. Ιστορία	77
Γ.6.3. Περιγραφή των στοιχείων της εγκατάστασης	82
Γ.6.3.1. Ηλιοστάτης και ηλιοστατικό πεδίο	83
Σφάλματα των ηλιοστατών	89
Φαινόμενο συνημιτόνου	90
Σκίαση και παρεμπόδιση	91
Ατμοσφαιρική διαπερατότητα	94
Γ.6.3.2. Κεντρικός δέκτης	95
Εξωτερικοί δέκτες	96
Δέκτες τύπου κοιλότητας	97

Σχεδιασμός του πύργου	99
Ρευστά μεταφοράς θερμότητας	100
<i>Γ.6.4. Θερμική απόδοση του συστήματος</i>	101
Γ.6.4.1. Απώλειες ενέργειας	102
Απώλειες πεδίου	103
Απώλειες δέκτη	103
<i>Γ.6.5. Εφαρμογή του συστήματος, οφέλη και επιπτώσεις</i>	105
Γ.6.5.1. Υβριδικοί σταθμοί	106
Γ.6.5.2. Οφέλη – Αποθήκευση ενέργειας	107
Γ.6.5.3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	109
<i>Γ.6.6. Υποθέσεις σχετικά με τη τεχνολογία και προβλήματα</i>	109
<i>Γ.6.7. Γη, νερό και απαιτήσεις υλικών</i>	111
Γ.7. Ηλιακός δίσκος/μηχανή	112
<i>Γ.7.1. Περιγραφή του συστήματος</i>	114
Γ.7.1.1. Συγκεντρωτές	114
Γ.7.1.2. Δέκτες	115
Γ.7.1.3. Θερμικές μηχανές.....	117
Γ.7.1.4. Βοηθητικός εξοπλισμός	120
<i>Γ.7.3. Εφαρμογή του συστήματος, οφέλη και επιπτώσεις</i>	123
Γ.7.3.1.Εφαρμογή στο δίκτυο ηλεκτροδότησης.....	123
Γ.7.3.2. Απομακρυσμένες εφαρμογές.....	124
Γ.7.3.3. Υβριδικές εφαρμογές.....	124
<i>Γ.7.4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις</i>	125
<i>Γ.7.5. Υποθέσεις σχετικά με τη τεχνολογία και προβλήματα</i>	126
<i>Γ.7.6. Γη, νερό και απαιτήσεις υλικών</i>	127
Γ.8. Παραβολικά ηλιακά κοίλα	128
<i>Γ.8.1. Περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος</i>	128
Γ.8.1.1. Ηλιακό σύστημα συνδυασμένου κύκλου (ISCCS).....	130
Γ.8.1.2. Υβρίδια άνθρακα	131
<i>Γ.8.2. Ιστορία</i>	131
<i>Γ.8.3. Τεχνολογία του συλλέκτη</i>	133
Γ.8.3.1. Συλλέκτης Luz System Three (LS-3)	133
Γ.8.3.2. Πρωτότυπο σύστημα της Sandia	135
Γ.8.3.3. Δέκτης	137
Γ.8.3.4. Μηχανισμός ελέγχου και παρακολούθησης	138
Γ.8.3.5. Ανακλαστήρες	139
Γ.8.3.6. Απόδοση	140
<i>Γ.8.4. Λειτουργία, συντήρηση και προβλήματα</i>	140
<i>Γ.8.5. Εφαρμογή του συστήματος, οφέλη και επιπτώσεις</i>	142
Γ.8.5.1. Σύνδεση στο δίκτυο	143
Γ.8.5.2. Ιδανικές αγορές για το σύστημα	143
Γ.8.5.4. Επιπτώσεις.....	144
<i>Γ.8.6. Υποθέσεις σχετικά με τη τεχνολογία και προβλήματα</i>	145
[2] <i>Wikipedia the free encyclopedia</i> (http://www.wikipedia.org)	148
Γ.9. Συλλέκτης Φρενέλ (FRESNEL)	149
<i>Γ.9.1. Περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος</i>	149
Γ.9.1.1. Περιγραφή ενός πρωτοτύπου συλλέκτη	151
<i>Γ.9.2. Θεωρητική απόδοση του συλλέκτη</i>	153
Γ.9.2.1. Οπτική απόδοση	155
Γ.9.1.2. Θερμική απόδοση.....	157
Γ.9.2.3. Καμπύλη απόδοσης.....	159
Γ.8.2.4. Προσομοίωση	159
Γ.9.2.5. Αποτελέσματα	160
Γ.9.2.6. Συμπέρασμα	162
Γ.10. Ηλιακή καμινάδα	163
<i>Γ.10.1. Περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος</i>	164
<i>Γ.10.2. Περιγραφή των στοιχείων της εγκατάστασης</i>	166
Γ.10.2.1. Συλλέκτης.....	166
Γ.10.2.2. Πύργος.....	167
Γ.10.2.3 Στρόβιλοι.....	168
Γ.10.2.4. Αποθήκευση	169
<i>Γ.10.3. Γενικά χαρακτηριστικά του συστήματος</i>	169
<i>Γ.10.4. Κόστος</i>	170
Δ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ	172
Δ.1. ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΩΝ ΚΟΙΛΩΝ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ	173

Α.ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Α.1 Γενικά

Στην παράγραφο αυτή δίνονται οι ορισμοί και οι σχέσεις υπολογισμού βασικών μεγεθών που αφενός μεν χαρακτηρίζουν την ηλιακή ακτινοβολία και αφετέρου δε χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια υαλοστασίου. Τα βασικά αυτά μεγέθη είναι τα εξής:

α) Γωνία ζενίθ , θ_z : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ήλιου.

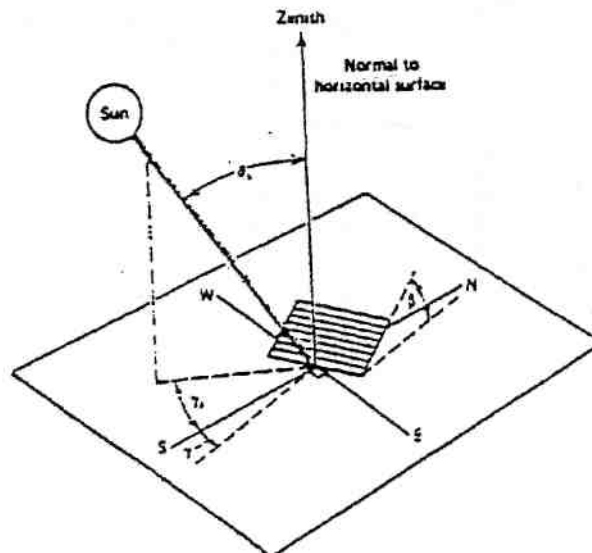
β) Ηλιακό ύψος, $90^\circ - \theta_z$: Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ήλιου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.

γ) Αζιμούθιο επιφανείας , γ : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Για όλα τα σημεία του ορίζοντα ισχύει ότι $-180^\circ < \gamma < 180^\circ$ με $\gamma=0^\circ$ στο νότο, $\gamma=90^\circ$ στη δύση, $\gamma=180^\circ$ στο βορρά και $\gamma=-90^\circ$ στην ανατολή.

δ) Αζιμούθιο ηλίου , γ_s : Είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

ε) Κλίση επιπέδου , β : Είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Ισχύει ότι $0^\circ < \beta < 180^\circ$. Για το οριζόντιο επίπεδο είναι $\beta = 0^\circ$, ενώ για το κατακόρυφο $\beta=90^\circ$.

Όλα τα παραπάνω μεγέθη φαίνονται στο σχήμα 1, το οποίο ακολουθεί:



Σχήμα Α.1: Γωνία ζενίθ θ_z , ηλιακό ύψος $90^\circ - \theta_z$, αζιμούθιο επιφανείας γ , αζιμούθιο ηλίου γ_s και κλίση επιπέδου β .

στ) Ωριαία γωνία ω : Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό $15^\circ / h$ το οποίο ισοδυναμεί με $0.25^\circ / \text{min}$. Υπολογίζεται δε από την παρακάτω σχέση :

$$\omega = 0,25 * (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (A.1)$$

Λαμβάνεται $\omega > 0$ για τις ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι και $\omega < 0$ για τις ώρες πριν το ηλιακό μεσημέρι.

ζ) Ηλιακή απόκλιση δ : Είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Επειδή το επίπεδο αυτό είναι κεκλιμένο κατά $23,45^\circ$ ως προς το επίπεδο της τροχιάς της γης περί τον ήλιο, η ηλιακή απόκλιση δ μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ των ορίων $-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$ με θετικές τιμές προς το βορρά. Υπολογίζεται δε από τη σχέση :

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360 * (284 + n)}{365}\right) \quad (A.2)$$

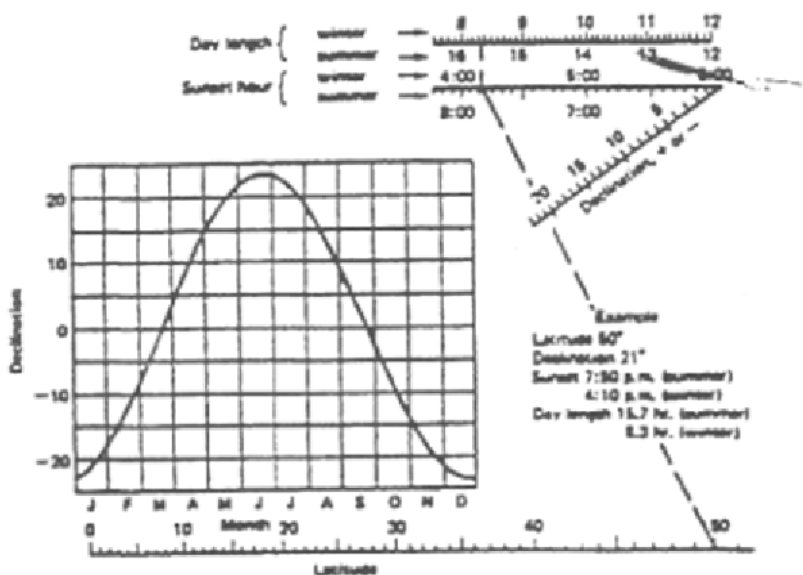
όπου ο n συμβολίζει τον αύξοντα αριθμό μιας οποιασδήποτε μέρας του έτους. Επομένως λοιπόν ο παράγοντας n δέχεται τιμές από 1 : 365.

Στον πίνακα 1 που ακολουθεί μπορούμε να δούμε τον αύξοντα αριθμό κάθε ημέρας του έτους, την 21^η ημέρα κάθε μήνα και την αντίστοιχη τιμή της αντίστοιχης ηλιακής απόκλισης.

Πίνακας Α.1: Αύζοντας αριθμός ημέρας του έτους, 21^η ημέρα κάθε μήνα και η ηλιακή της απόκλιση.

Μήνες του χρόνου	Μέρα του χρόνου	Για τη 21η μέρα του μήνα		
		Ημερομηνία	n	Απόκλιση δ
	N			
Ιανουάριος	i	21	21	-20.138
Φεβρουάριος	31 +i	21	52	-11.226
Μάρτιος	59+ i	21	80	-0.404
Απρίλιος	90+ i	21	111	11.579
Μάιος	120+ i	21	141	20.138
Ιούνιος	151 +i	21	172	23.450
Ιούλιος	181 +ί	21	202	20.442
Αύγουστος	212+ i	21	233	11.754
Σεπτέμβριος	243 + i	21	264	-0.202
Οκτώβριος	273+ i	21	294	-11.754
Νοέμβριος	304+ i	21	325	-20.442
Δεκέμβριος	334 + i	21	355	-23.450

Η μεταβολή αυτή του δ έχει σαν αποτέλεσμα την εναλλαγή των εποχών του έτους και την άνιση διάρκεια ημέρας και νύχτας. Στο σχήμα 2 φαίνεται η μεταβολή της ηλιακής απόκλισης κατά την διάρκεια του έτους:



Σχήμα Α.2. Μεταβολή της ηλιακής απόκλισης δ συναρτήσει των ημερών του έτους.

η) Γωνία πρόσπτωσης, θ : Η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία που δημιουργείται από τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες και την κάθετη στην επιφάνεια. Υπολογίζεται δε από την εξής σχέση :

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta * \sin\phi * \cos\beta - \sin\delta * \cos\phi * \sin\beta * \cos\gamma + \cos\delta * \cos\phi * \cos\beta * \cos\omega + \\ & + \cos\delta * \sin\phi * \sin\beta * \cos\gamma * \cos\omega + \cos\delta * \sin\beta * \sin\gamma * \sin\omega \end{aligned} \quad (A.3)$$

όπου ϕ είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το οποίο λαμβάνει τιμές μεταξύ $-90^\circ < \phi < 90^\circ$. Για την Αθήνα ισχύει ότι $\phi = 37,58^\circ$. Για οριζόντιες επιφάνειες ($\beta = 0^\circ$) η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με τη γωνία ζενίθ και άρα ισχύει ότι:

$$\cos\theta_z = \sin\delta * \sin\phi + \cos\delta * \cos\phi * \cos\omega \quad (A.4)$$

[1],[2].

A.2 Ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε δοσμένη επιφάνεια

Το ποσό του φυσικού φωτός που παίρνει μια δοσμένη εξωτερική επιφάνεια έχει τρία συστατικά:

- Το φως που παραλαμβάνεται από τον ουρανό, αφού διαχυθεί, από τα αέρια στην ατμόσφαιρα (αυτό είναι το γαλάζιο φως) και από τα σταγονίδια νερού στα σύννεφα (άσπρο φως).
- Το φως από τα δύο προηγούμενα συστατικά, αφού ανακλαστεί από το έδαφος και άλλες γειτονικές επιφάνειες.
- Εσωτερικά σε ένα κτίριο πρέπει να προστεθεί ένα τέταρτο συστατικό. Αυτό είναι το φως που ανακλάται από τις εσωτερικές επιφάνειες.

Κατά γενικό κανόνα, ο όρος “φυσικός φωτισμός” αναφέρεται στο φως που λαμβάνεται από τον ουρανό χωρίς το άμεσο ηλιακό φως. Ωστόσο, κάτω από ορισμένες περιπτώσεις, όπως είναι για κλίματα με μεγάλη ηλιοφάνεια ή κτίρια όπου η αντίθεση που δημιουργείται από άμεσο ηλιακό φως προσδίδει μια σημαντική συνεισφορά στη συνολική ποιότητα του φωτός του εσωτερικού χώρου, είναι σημαντικό να περιληφθεί και αυτό το συστατικό του άμεσου ηλιακού φωτός.

Το φως της ημέρας συνίσταται από άμεσο και διάχυτο φως. Οι ακτίνες του αμέσου φωτός είναι, τη στιγμή που φτάνουν στη γη, πραγματικά παράλληλες. Το διάχυτο φως παραλαμβάνεται από τον ουρανό, αφού ανακλαστεί από τα αέρια και τα σταγονίδια νερού που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Για το φωτισμό από το φως της ημέρας, ο ουρανός μπορεί να θεωρείται ως η ολοκλήρωση ενός άπειρου αριθμού από συγκεκριμένες σημειακές πηγές.

Η ολική ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος , I_t (W/m^2), που δέχεται μια επιφάνεια στη γη, υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_t = I_D + I_d + I_r = I_{DN} \cos \theta \quad (A.5)$$

όπου:

I_D = άμεση ηλιακή ακτινοβολία , W/m^2

I_d = διάχυτη (εξ ουρανού) ηλιακή ακτινοβολία, W/m^2

I_r = ηλιακή ακτινοβολία εξ ανακλάσεως σε γειτονικές επιφάνειες, W/m^2

I_{DN} = άμεση ηλιακή ακτινοβολία καθέτου επιπέδου, δηλαδή ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτινοβολίες, W/m^2

θ = γωνία πρόσπτωσης της αμέσου ακτινοβολίας, δηλ. η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτινών σε μία επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια.

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία την οποία δέχεται επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες , I_{DN} (W/m^2), στην επιφάνεια της γης υπό συνθήκες διαυγούς ατμοσφαιράς , προσεγγίζεται από την σχέση :

$$I_{DN} = \frac{A}{\exp(B / \sin \beta)} \quad (A.6)$$

όπου:

A = φαινόμενη ηλιακή ακτινοβολία μηδενικής αερίου μάζας, $m = 0$, σε W/m^2

B = συντελεστής ατμοσφαιρικής απόσβεσης , αδιάστατος .

Τα μεγέθη A και B μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του έτους λόγω εποχιακών αλλαγών της περιεκτικότητας της ατμοσφαιράς σε σωματίδια και υδρατμό, καθώς επίσης και λόγω της μεταβολής της απόστασης γης - ηλίου.

Για τα ελληνικά ατμοσφαιρικά δεδομένα (περιοχή Αθήνας), οι τιμές των A και B μπορούν να υπολογισθούν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$A = \sum_{i=0}^4 a_i D_i$$

$$B = \sum_{i=0}^4 b_i D_i$$
(A.7)

όπου D (1 έως 365) είναι η ημέρα του έτους και a_i, b_i είναι συντελεστές που δίνονται στον Πίνακα 2. Για πολύ διαυγή ατμόσφαιρα, η άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου I_{DN} , που υπολογίζεται με τις δοθείσες τιμές των A και B θα πρέπει να αυξηθεί κατά περίπου 15%.

Πίνακας A.2: Συντελεστές a_i, b_i, c_i που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας.

i	a_i	b_i	c_i
0	$0.11048968 * 10^1$	$0.12321833 * 10^0$	$8.51527187 * 10^{-2}$
1	$0.62310300 * 10^{-3}$	$-0.24593090 * 10^{-3}$	$1.64532521 * 10^{-4}$
2	$-0.21655676 * 10^{-4}$	$0.13219840 * 10^{-4}$	$1.30162335 * 10^{-5}$
3	$0.10841363 * 10^{-6}$	$-0.67643523 * 10^{-7}$	$-7,27912620 * 10^{-8}$
4	$-0.14720401 * 10^{-9}$	$0.90926050 * 10^{-10}$	$9.86283730 * 10^{-11}$

Η διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια προέρχεται αφ' ενός από τον ουρανό και αφ' ετέρου από ανάκλαση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος και σε γειτονικές επιφάνειες.

- Η εξ ουρανού διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία I_{ds} [W/m^2], που προσπίπτει σε ένα κεκλιμένο επίπεδο, υπό συνθήκες διαυγούς ατμοσφαιράς, μπορεί να προσεγγισθεί με τη σχέση :

$$I_{ds} = C * I_{ND} * F_{ss}$$
(A.8)

όπου:

F_{ss} = Παράγοντας όρασης κεκλιμένου επιπέδου - ουρανού, αδιάστατος. Υπολογίζεται από τη σχέση

$F_{ss} = (1 + \cos \beta) / 2$ όπου β είναι γωνία κλίσης του επιπέδου ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

C = συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας, αδιάστατος. Για την Ελλάδα (περιοχή Αθήνας) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$C = \sum_{i=0}^4 c_i D_i$$
(A.9)

όπου D (=1-365) είναι η ημέρα του έτους και c_i είναι συντελεστές που δίνονται στον Πίνακα 1.2.

• Η διάχυτη ακτινοβολία , I_{dg} [W/m^2], που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο προερχόμενη από ανάκλαση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος , προσεγγίζεται με τη σχέση :

$$I_{dg} = I_{IH} * \rho_g * F_{sg} \quad (A.10)$$

Όπου:

I_{IH} = ολική ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στο οριζόντιο επίπεδο σε W/m^2 Υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_{IH} = I_{DN} * (C + \sin \beta) \quad (A.11)$$

ρ_g = συντελεστής ανάκλασης του εδάφους, αδιάστατος. Λαμβάνει τιμές από 0.2 (συνήθης τιμή) έως 0.7 (για χιονισμένο έδαφος).

F_{sg} = Παράγοντας όρασης κεκλιμένου επιπέδου - εδάφους, αδιάστατος. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{sg} = (1 - \cos\beta) / 2 \quad (A.12)$$

Η σχέση μεταξύ της ολικής, της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας σε κάθε σημείο της γης εξαρτάται από τους παρακάτω δύο παράγοντες :

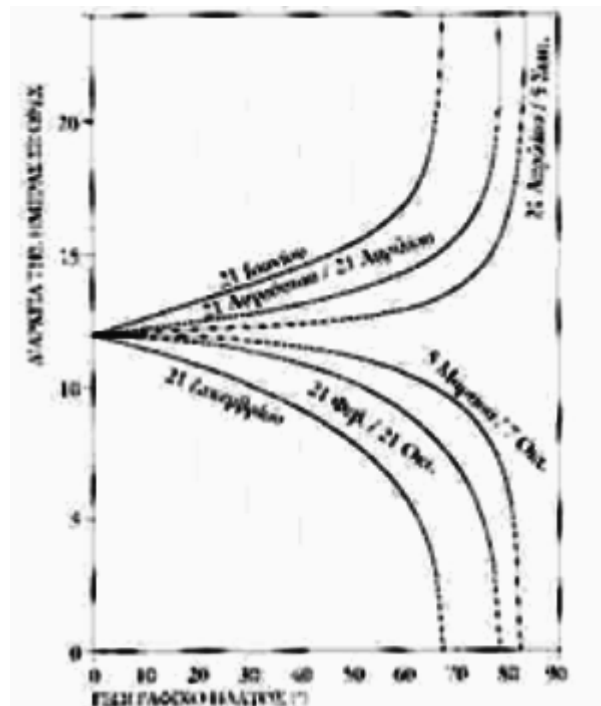
- 1.Την απόσταση μεταξύ του σημείου εισόδου της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και του σημείου άφιξης στην επιφάνεια της γης.
- 2.Το ποσό της ομίχλης.

Καθώς αυξάνεται η διανυόμενη απόσταση ή η ομίχλη, αυξάνει και η συνιστώσα της διάχυσης, ενώ η άμεση ακτινοβολία ελαττώνεται. Με την αύξηση της διάχυτης συνιστώσας μειώνεται η ολική ακτινοβολία, διότι με την αύξηση του φαινομένου της διάχυσης αυξάνεται ταυτόχρονα και το φαινόμενο της απορρόφησης.

Υπάρχουν δύο επιπλέον παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

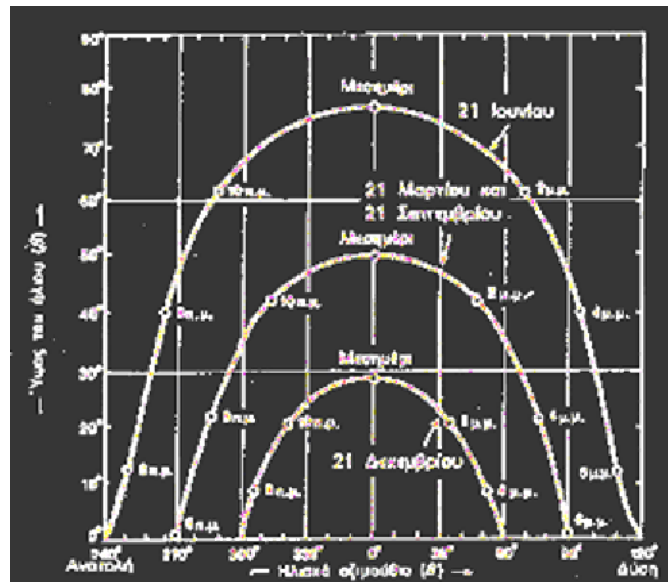
• Ο πρώτος σχετίζεται με τη διάρκεια της ημέρας που αυτή καθεαυτή εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και την εποχή του έτους. Στο σχήμα 5 φαίνεται η διάρκεια της ημέρας ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους για ορισμένες ειδικές ημέρες. Η διάρκεια της ημέρας είναι η ίδια στον ισημερινό για ολόκληρο τον κόσμο. Διαφέρει σημαντικά σύμφωνα με την τοποθεσία κατά την περίοδο των ηλιοστασιών. Κατά συνέπεια οι τεχνικές φυσικού φωτισμού έχουν

για αυτό περιορισμένη χρήση πάνω από 55° Β γεωγραφικό πλάτος, λόγω της έλλειψης φυσικού φωτός κατά το ήμισυ του έτους. Κατά την κίνηση πλησιέστερα προς τον Ισημερινό επιμηκύνεται όλο και πιο πολύ η διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα Α.3: Διάρκεια της ημέρας συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους

- Ο δεύτερος παράγοντας αναφέρεται στο ποσό του διαθέσιμου φωτός της κάθε μέρας. Κατά τη μεσημβρία, το καλοκαίρι, ο τυπικός νεφελώδης ουρανός είναι συχνά δύο φορές πιο φωτεινός από μια αντίστοιχη ημέρα και ώρα του χειμώνα. Αυτό συμβαίνει γιατί το καλοκαίρι ο ήλιος είναι σε υψηλότερη θέση πάνω από το στρώμα των νεφών (σχήμα 6) [1],[2].



Σχήμα Α.4: Τροχιά του ήλιου στον ουρανό, την 21^η Δεκεμβρίου, 21^η Σεπτεμβρίου, 21^η Μαρτίου και 21^η Ιουνίου.

[1] “Θερμικά-ηλιακά Συστήματα μέρος πρώτο”, Κ. Α. Αντωνόπουλος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004

[2] Μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια, Βεβέρη Παρασκευή, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2008

B. ΟΠΤΙΚΗ ΤΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΗ

B.1 Γενικά

Η λειτουργία κάθε συλλέκτη ηλιακής θερμικής ενέργειας μπορεί να περιγραφεί ως το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από το συλλέκτη και τη θερμικής ενέργειας που αφαιρείται ή χάνεται από το συλλέκτη. Αν δεν υπάρχει εναλλακτικός μηχανισμός για την απομάκρυνση της θερμικής ενέργειας, οι απώλειες θερμότητας του δέκτη του συλλέκτη πρέπει να είναι ίση με την απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια.

Η θερμοκρασία του δέκτη αυξάνεται μέχρι οι απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας από το δέκτη να γίνουν ίσες με την απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια. Η θερμοκρασία κατά την οποία αυτό συμβαίνει ονομάζεται “στάσιμη θερμοκρασία του συλλέκτη” (collector stagnation temperature).

Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του συλλέκτη σε κάποιο σημείο ψυχρότερο από τη στάσιμη θερμοκρασία τότε πρέπει να εγκατασταθεί ενεργητική απομάκρυνση της θερμότητας. Αυτή η θερμότητα είναι διαθέσιμη για χρήση από ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας. Ο ρυθμός με τον οποίο αφαιρείται θερμότητα ενεργητικά από το δέκτη καθορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας του. Για την απομάκρυνση μεγάλης ποσότητας απορροφούμενης ενέργειας ως χρήσιμη θερμότητα, το ποσό των απωλειών θερμότητας πρέπει να είναι πολύ μικρό.

Οι απώλειες θερμότητας του δέκτη μπορούν να μειωθούν με τη λειτουργία του συλλέκτη κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (όπως με τους συλλέκτες χαμηλής θερμοκρασίας) ή με τη κατασκευή ενός συλλέκτη τέτοιο ώστε οι απώλειες θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες να μειώνονται. Ο πιο κοινός τρόπος για τη μείωση των απωλειών στο δέκτη σε υψηλές θερμοκρασίες είναι η μείωση του μεγέθους της θερμής επιφάνειας (πχ. Ο δέκτης) δεδομένου ότι οι απώλειες είναι ανάλογες της έκτασης της θερμής επιφάνειας. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες μειώνουν της επιφάνεια του δέκτη με την ανάκλαση (ή διάθλαση) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από μια μεγάλη επιφάνεια (το άνοιγμα του συλλέκτη) σε απορροφητήρα μικρής έκτασης. Με μειωμένες θερμικές απώλειες, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες και να παρέχουν σημαντικές ποσότητες χρήσιμης θερμικής ενέργειας.

Ένας δεύτερος λόγος για τη χρήση συγκέντρωσης στο σχεδιασμό ηλιακών συλλεκτών είναι ότι , γενικά, οι ανακλαστικές επιφάνειες είναι λιγότερο ακριβές από τις απορροφούμενες επιφάνειες. Ως εκ τούτου, μεγάλες ποσότητες φθηνής ανακλώσας επιφάνειας μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα πεδίο, συγκεντρώνοντας της προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μικρότερες επιφάνειες απορρόφησης. Ωστόσο, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες πρέπει να παρακολουθούν τη πορεία του ήλιου στον ουρανό, προσθέτοντας σημαντικό κόστος στη κατασκευή ενός συγκεντρωτικού συστήματος [1].

B.2 Λόγος συγκέντρωσης

Ο όρος “λόγος συγκέντρωσης” χρησιμοποιείται για να περιγράψει το ποσό της συγκεντρωμένης ενέργειας φωτός που επιτυγχάνεται από ένα δεδομένο συλλέκτη. Δύο διαφορετικοί ορισμοί του λόγου συγκέντρωσης είναι γενικά σε χρήση.

B.2.1. Οπτικός λόγος συγκέντρωσης

Η μέση ακτινοβολία (ροή ακτινοβολίας) (I_r) ολοκληρωμένη στην επιφάνεια του δέκτη (A_r), δια τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο άνοιγμα του συλλέκτη.

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

(B.1)

B.2.2 Γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης

Η επιφάνεια του ανοίγματος του συλλέκτη A_a διαιρεμένη με την επιφάνεια του δέκτη A_r

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

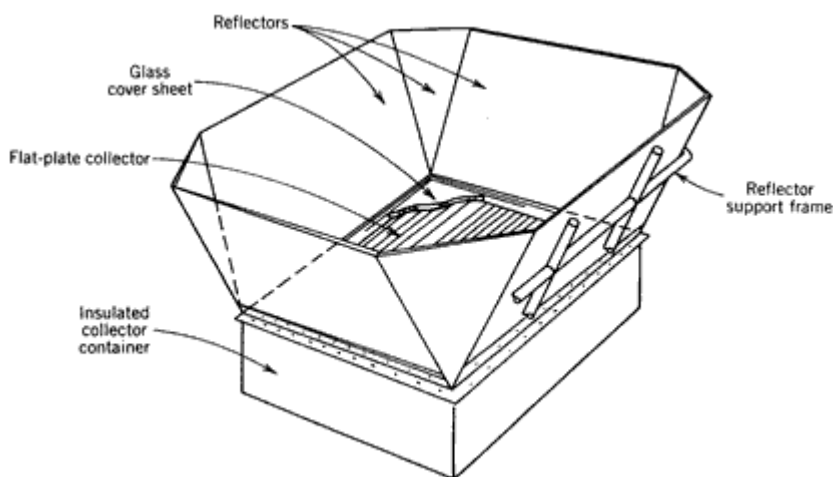
(B.2)

Ο οπτικός λόγος συγκέντρωσης σχετίζεται με τη ποιότητα των φακών η των κατόπτρων. Ωστόσο, σε πολλούς συλλέκτες η επιφάνεια του δέκτη είναι μεγαλύτερη από το συγκεντρωμένο ηλιακό είδωλο.

Οι θερμικές απώλειες σε τέτοιες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερες από ότι μπορεί να συναχθεί

εξετάζοντας τον οπτικό λόγο συγκέντρωσης. Από τη στιγμή που η γεωμετρική συγκέντρωση αναφέρεται στην επιφάνεια του δέκτη, χρησιμοποιείται πιο συχνά επειδή μπορεί να σχετίζεται με τις θερμικές απώλειες του συλλέκτη. Σε περίπτωση που η μόνωση του ανοίγματος και η ακτινοβολία του δέκτη είναι ομοιόμορφη καθ' όλη την έκταση, οι οπτικοί και γεωμετρικοί λόγοι συγκέντρωσης είναι ίσοι.

Πιθανώς ο πιο απλός συγκεντρωτικός συλλέκτης να είναι ο συγκεντρωτικός συλλέκτης επίπεδων-κατόπτρων. Ένα παράδειγμα τέτοιου συλλέκτη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτός ο τύπος συλλέκτη αποτελείται από μια επίπεδη πλάκα που περιβάλλεται από κάτοπτρα που αντανακλούν τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία έξω από τη περίμετρο της επίπεδης πλάκας προς την απορροφούμενη πλάκα του συλλέκτη. Αυτός ο τύπος συλλέκτη κατασκευάζεται για να μειώσει το κόστος ενός επίπεδου συλλέκτη μειώνοντας την επιφάνεια του απορροφητήρα και των καλυμμάτων, που είναι συχνά δαπανηρά. Ένας επίπεδος συλλέκτης όπως αυτός του παρακάτω σχήματος περιορίζεται σε γεωμετρικούς και οπτικούς λόγους συγκέντρωσης της τάξης του 2-3.



Σχήμα Β.1, Συγκεντρωτικός συλλέκτης επίπεδων κατόπτρων

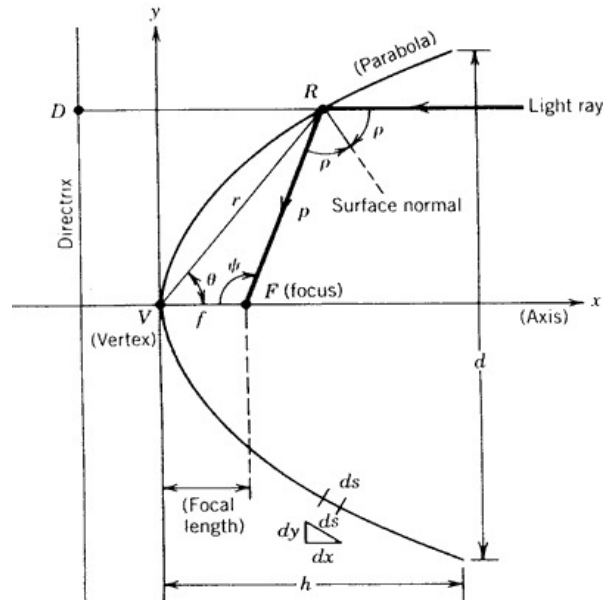
Αν είναι επιθυμητοί μεγαλύτεροι λόγοι συγκέντρωσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν καμπύλα κάτοπτρα ή φακοί [1].

B.3 Παραβολική Γεωμετρία

B.3.1 Η παραβολή

Η παραβολή είναι η θέση ενός σημείου το οποίο κινείται έτσι ώστε οι αποστάσεις του από μια σταθερή γραμμή και ένα σταθερό σημείο να είναι ίσες. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όπου η

σταθερή γραμμή φαίνεται με το όνομα *directrix* και το σημείο με ως F. Το μήκος FR είναι ίσο με το RD. Η κάθετη στη γραμμή *directrix* που περνάει από το σημείο F ονομάζεται άξονας της παραβολής. Η παραβολή τέμνει τον άξονα της στο σημείο V που ονομάζεται κορυφή και είναι ακριβώς στη μέση μεταξύ του σημείου F και της γραμμής *directrix*.



Σχήμα Β.2. Η παραβολή

Αν η αρχή των αξόνων ληφθεί στο σημείο V τότε η εξίσωση που περιγράφει τη παραβολή είναι

$$y^2 = 4fx$$

(B.3)

όπου f, το εστιακό μήκος, είναι η απόσταση VF από τη κορυφή στο εστιακό σημείο. Αν η αρχή τοποθετηθεί στο σημείο F όπως συμβαίνει συνήθως, η εξίσωση της παραβολής γίνεται

$$y^2 = 4f(x + f)$$

(B.4)

Σε πολικές συντεταγμένες αν r είναι η απόσταση από τη κορυφή και θ η γωνία από τον άξονα x μέχρι το r, έχουμε μια παραβολή με τη κορυφή της στην αρχή των αξόνων και συμμετρική κατά τον άξονα x.

$$\frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} = \frac{4f}{r}$$

(B.5)

Συχνά στις παραβολικές μελέτες, είναι πιο χρήσιμο να καθοριστεί η παραβολική καμπύλη με την αρχή στη θέση F και με βάση τη γωνία ψ σε πολικές συντεταγμένες. Η γωνία ψ μετριέται από τη

γραμμή VF και τη παραβολική ακτίνα p , είναι η απόσταση από το σημείο F μέχρι τη καμπύλη. Βάζοντας την αρχή των αξόνων στο σημείο F έχουμε:

$$p = \frac{2f}{1 + \cos\psi}$$

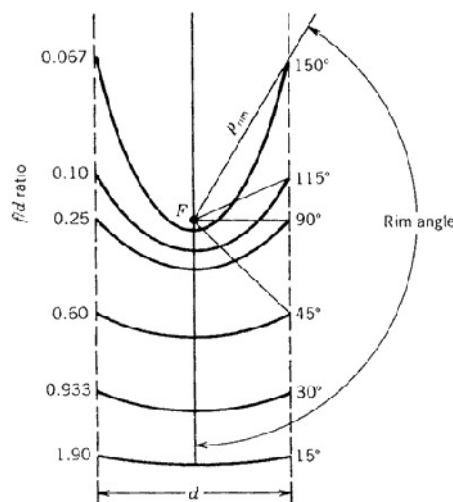
(B.6)

Το παραβολικό σχήμα χρησιμοποιείται ευρέως ως κατοπτρική επιφάνεια για ένα συγκεντρωτικό συλλέκτη, επειδή έχει την ιδιότητα για κάθε γραμμή παράλληλη με τον άξονα της παραβολής, η γωνία p μεταξύ του άξονα και της κάθετης στην επιφάνεια είναι ίση με τη γωνία ανάμεσα στη κάθετη και μια γραμμή προς το εστιακό σημείο. Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη είναι ουσιαστικά παράλληλες ακτίνες και επειδή η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, όλες οι ακτινοβολίες που είναι παράλληλες με τον άξονα της παραβολής θα ανακλαστούν στο σημείο F, που είναι το εστιακό σημείο. Ισχύει :

$$\psi = 2\rho$$

(B.7)

Οι γενικές σχέσεις που δόθηκαν μέχρι τώρα ορίζουν μια παραβολή με άπειρη έκταση. Οι ηλιακοί συγκεντρωτές χρησιμοποιούν ένα τμήμα αυτής της καμπύλης. Το μέγεθος του τμήματος καθορίζεται από την οριακή γωνία (rim angle) ή από το λόγο του εστιακού μήκους προς τη διάμετρο του ανοίγματος f/d . Το μέγεθος της καμπύλης καθορίζεται από μια γραμμική διάσταση όπως είναι η διάμετρος του ανοίγματος d ή το εστιακό μήκος f . Το παρακάτω σχήμα δείχνει διάφορα ήδη πεπερασμένων παραβολών που έχουν κοινό εστιακό σημείο F και ίδια διάμετρο ανοίγματος.



Σχήμα B.3 Τμήματα παραβολής με ίδιο εστιακό σημείο F και ίδια διάμετρο ανοίγματος

Φαίνεται ότι η παραβολή με μικρή οριακή γωνία είναι σχεδόν επίπεδη και το εστιακό μήκος είναι μεγάλο σε σχέση με τη διάμετρο του ανοίγματος. Μόλις ένα ορισμένο τμήμα της παραβολικής καμπύλης έχει επιλεγεί το ύψος της καμπύλης μπορεί να οριστεί ως η μέγιστη απόσταση από τη κορυφή της καμπύλης προς μια γραμμή που εκτείνεται στο άνοιγμα της παραβολής. Σε σχέση με το εστιακό μήκος και τη διάμετρο του ανοίγματος, το ύψος της παραβολής είναι:

$$h = \frac{d^2}{16f} \quad (B.8)$$

Κατά αναλογία η οριακή γωνία μπορεί να βρεθεί σε σχέση με τις διαστάσεις της παραβολής

$$\tan \psi_{rim} = \frac{1}{(d/8h) - (2h/d)} \quad (B.9)$$

Μια άλλη ιδιότητα της παραβολής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατανοηθεί καλύτερα ο σχεδιασμός ενός ηλιακού συγκεντρωτή είναι το μήκος τόξου s . Αυτό μπορεί να βρεθεί για μια ορισμένη παραβολή από την εξίσωση (B.3) ολοκληρώνοντας ένα διαφορικό τμήμα αυτής και εφαρμόζοντας τα όρια $x = h$ και $y = d/2$ όπως φάνηκε στο σχήμα B.2. Το αποτέλεσμα είναι:

$$s = \left[\frac{d}{2} \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] + 2f \ln \left[\frac{4h}{d} + \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] \quad (B.10)$$

Όπου d είναι η απόσταση μεταξύ του ανοίγματος της παραβολής και h η απόσταση από τη κορυφή στο άνοιγμα. Η περιοχή που περικλείεται από τη παραβολή και μια γραμμή μεταξύ του ανοίγματος και κάθετη στον άξονα δίνεται από το τύπο.

$$A_x = \frac{2}{3} * d * h \quad (B.11)$$

Αυτή η περιοχή δεν πρέπει να συγχέεται με την ανακλούμενη επιφάνεια ενός συλλέκτη παραβολικών κοίλων ή δίσκου ή τα ανοίγματα τους.

Οι παρακάτω ισοδυναμίες δίνονται προς διευκόλυνση του αναγνώστη.

$$\tan \psi_{rim} = \frac{(f/d)}{2(f/d)^2 - \frac{1}{8}}$$

(B.12)

$$\tan\left(\frac{\psi_{rim}}{2}\right) = \frac{1}{4(f/d)}$$

(B.13)

$$\frac{f}{d} = \frac{1 + \cos \psi_{rim}}{4 \sin \psi_{rim}}$$

(B.14)

$$\frac{f}{d} = \frac{1}{4 \tan(\psi_{rim}/2)}$$

(B.15)

B.3.2. Παραβολικός κύλινδρος

Η επιφάνεια που δημιουργείται αν μετακινήσουμε τη παραβολή κατά μήκος άξονα κάθετου στο επίπεδό της ονομάζεται παραβολικός κύλινδρος. Οι ηλιακοί συγκεντρωτές τέτοιου τύπου ονομάζονται παραβολικά κοίλα ή συγκεντρωτές εστιακής γραμμής επειδή η εστία της παραβολής με αυτή τη γεωμετρία είναι μια ευθεία γραμμή. Όταν το επίπεδο που περιέχει τους άξονες της παραβολής είναι ευθυγραμμισμένο παράλληλα με τις ακτίνες του ήλιου, οι ακτίνες συγκεντρώνονται σε αυτή την εστιακή γραμμή. Για ένα παραβολικό κύλινδρο μήκους L και έχοντας τις διαστάσεις του σχήματος B.2 το άνοιγμα του συλλέκτη δίνεται από το τύπο

$$A_a = l * d$$

(B.16)

Η ανακλαστική επιφάνεια βρίσκεται χρησιμοποιώντας το μήκος τόξου που αναπτύχθηκε προηγουμένως.

$$A_s = l * s$$

(B.17)

Το εστιακό μήκος f και η οριακή γωνία για το παραβολικό κύλινδρο δίνονται από τις εξισώσεις (B.8) και (B.9).

B.3.3. Παραβολοειδές

Η επιφάνεια που σχηματίζεται περιστρέφοντας μια παραβολική καμπύλη γύρω από τον άξονά της ονομάζεται παραβολοειδές. Οι ηλιακοί συγκεντρωτές που έχουν μια ανακλαστική επιφάνεια τέτοιου σχήματος ονομάζονται παραβολικοί δίσκοι. Η εξίσωση ενός παραβολοειδούς όπως του παρακάτω σχήματος σε ορθογώνιες συντεταγμένες με τον άξονα z ως τον άξονα συμμετρίας είναι:

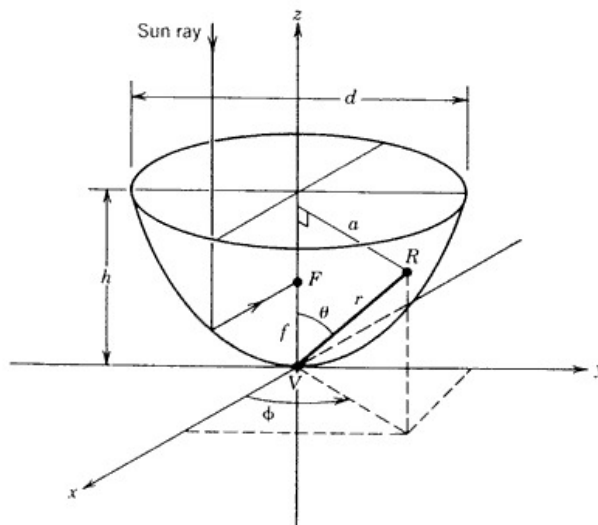
$$x^2 + y^2 = 4 * f * z$$

(B.18)

όπου η απόσταση f είναι το εστιακό μήκος VF. Σε κυλινδρικές συντεταγμένες, όπου a είναι το μήκος από τον άξονα z, η παραπάνω εξίσωση γίνεται.

$$z = \frac{a^2}{4f}$$

(B.19)



Σχήμα B.4. Παραβολοειδές εκ περιστροφής

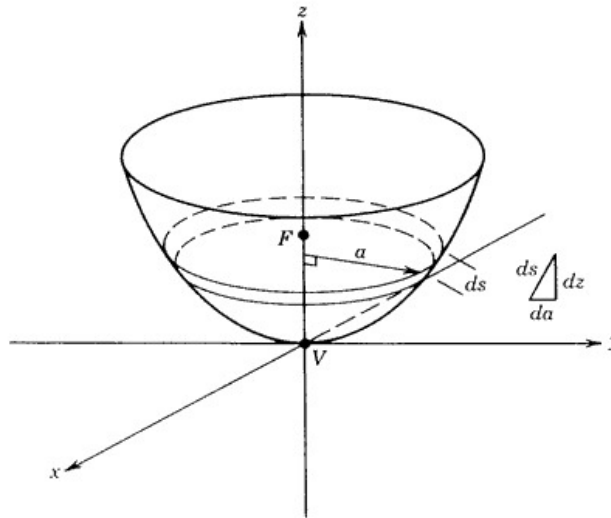
Σε κυκλικές συντεταγμένες η εξίσωση του παραβολοειδούς με την αρχή των αξόνων στη κορυφή της παραβολής V και τα r, φ και θ να ορίζουν την τοποθεσία του σημείου R του παραβολοειδούς, είναι

$$\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} = \frac{4f}{r}$$

(B.20)

Η επιφάνεια του παραβολοειδούς μπορεί να βρεθεί ολοκληρώνοντας της εξίσωση (B.19) με τα κατάλληλα όρια. Μπορούμε να ορίσουμε μια διαφορική περιοχή όπως αυτή του σχήματος B.5 ως

$$dA_s = 2\pi a \sqrt{dz^2 + da^2} \quad (B.21)$$



Σχήμα B.5 Παράμετροι που ορίζουν τη διαφορική λωρίδα

Βρίσκοντας τη παράγωγο του z εκφράζουμε τη διαφορική περιοχή ως:

$$dA_s = 2\pi a \sqrt{\left(\frac{a}{2f}\right)^2 + 1} da \quad (B.22)$$

Η συνολική επιφάνεια A, ενός παραβολοειδούς που έχει εστιακό μήκος f και άνοιγμα διαμέτρου d μπορεί να βρεθεί ολοκληρώνοντας τη παραπάνω εξίσωση. Το αποτέλεσμα είναι:

$$A_s = \int_0^{d/2} dA_s = \frac{8\pi f^2}{3} \left\{ \left[\left(\frac{d}{4f} \right)^2 + 1 \right]^{3/2} - 1 \right\} \quad (B.23)$$

Η περιοχή ανοίγματος του συγκεντρωτή, που είναι μεγάλης σημασίας για τον σχεδιαστή για να προβλέψει την απόδοση του ηλιακού συγκεντρωτή, είναι απλώς η κυκλική επιφάνεια που ορίζεται από τη διάμετρο του ανοίγματος d και δίνεται από το τύπο:

$$A_a = \frac{\pi d^2}{4} \quad (B.24)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (B.6) που είναι η πολική μορφή της εξίσωσης μιας παραβολής, έχουμε

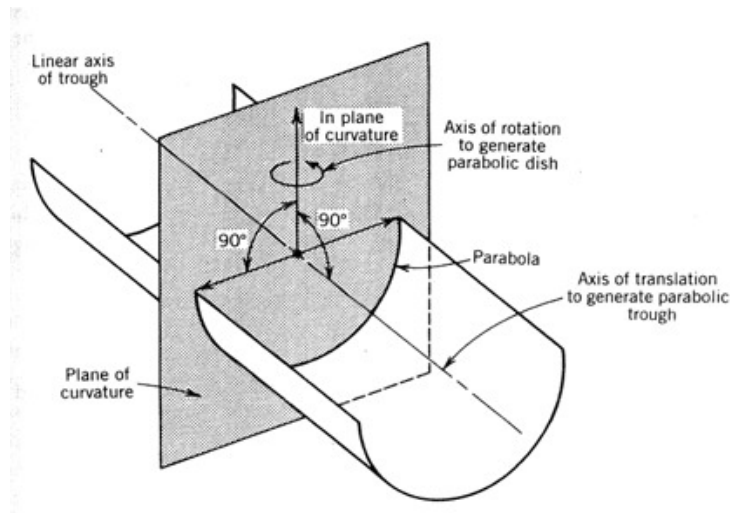
$$A_a = \frac{\pi}{4} (2p \sin \psi_{rim})^2 = 4\pi f^2 \frac{\sin^2 \psi_{rim}}{(1 + \cos \psi_{rim})^2} \quad (B.25)$$

[1].

B.4. Παραβολικά και σφαιρικά οπτικά χαρακτηριστικά

B.4.1. Γενικά

Στους ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες παρουσιάζονται οι σφαιρικές και οι παραβολικές γεωμετρίες. Η σφαιρική οπτική επιτρέπει τη δημιουργία συγκεντρωτών σταθερού ανοίγματος (χωρίς μηχανισμό παρακολούθησης). Δεδομένου ότι οι παραβολικές γεωμετρίες κυριαρχούν στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή σε αυτό το κεφάλαιο. Είναι σκόπιμο σε αυτό το σημείο να καθοριστεί ο όρος “επίπεδο της καμπυλότητας” όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ενός συλλέκτη παραβολικού κοίλου. Το επίπεδο της καμπυλότητας (δηλαδή, η τομή) μπορεί να θεωρηθεί ως μια διδιάστατη κάθετη φέτα, στη περίπτωση ενός παραβολικού κοίλου, στο γραμμικό άξονα του συγκεντρωτή. Για ένα σφαιρικό ή παραβολικό δίσκο το επίπεδο της καμπυλότητας περιστρέφεται για να δημιουργήσει τη γεωμετρία του δίσκου.



Σχήμα Β.6 Ορισμός του επιπέδου της καμπυλότητας

Οι σφαιρικές και παραβολικές γεωμετρίες περιέχουν βασικούς περιορισμούς οι οποίοι επηρεάζουν τα σχεδιασμό ενός συγκεντρωτή. Η εξίσωση ενός κύκλου σε καρτεσιανές συντεταγμένες με το κέντρο του στο a, b και με ακτίνα r είναι:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

(B.26)

Όταν το κέντρο του είναι στο σημείο $(0,0)$ τότε η εξίσωση απλοποιείται στη γνωστή:

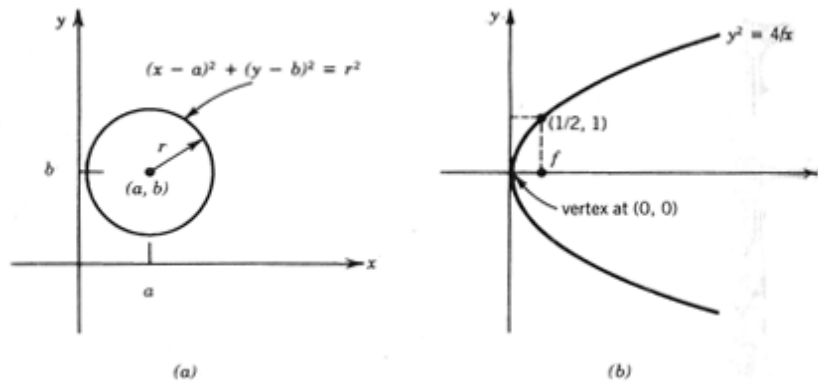
$$x^2 + y^2 = r^2$$

(B.27)

Η εξίσωση μιας εφαπτομένης γραμμής στο κύκλο αυτό σε ένα σημείο του (x_1, y_1) είναι:

$$x_1 x + y_1 y = r^2$$

(B.28)



Σχήμα B.7 Ορισμός (α) κύκλου, (β) παραβολής

Η εξίσωση μιας παραβολής με εστιακό μήκος f σε καρτεσιανές συντεταγμένες είναι :

$$y^2 = 4fx$$

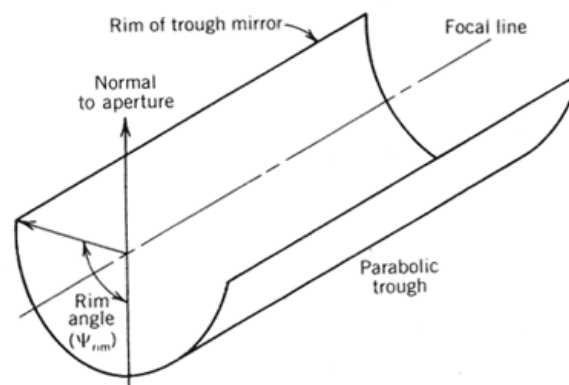
(B.29)

Η κορυφή της παραβολής που έχει τέτοια μορφή θα είναι στο $(0,0)$. Η εξίσωση μια εφαπτομένης γραμμής σε αυτή τη παραβολή στο σημείο (x_1, y_1) είναι:

$$y_1 y = 4f(x_1 + x)$$

(B.30)

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι χρήσιμες στην εξέταση των οπτικών ιδιοτήτων των σφαιρικών και παραβολικών κατόπτρων. Ένα άλλο χρήσιμο χαρακτηριστικό είναι η οριακή γωνία. Η οριακή γωνία ορίζεται στο παρακάτω σχήμα για ένα παραβολικό κοίλο. Ένας παρόμοιος ορισμός υπάρχει και για παραβολικούς δίσκους και κάτοπτρα βασισμένα σε σφαιρική γεωμετρία.



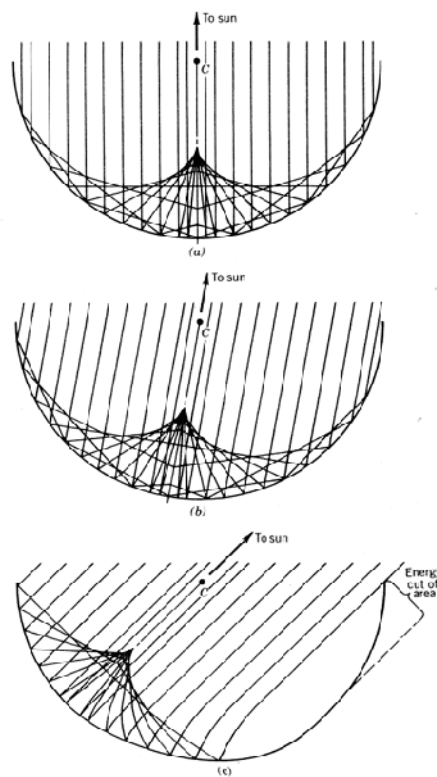
Σχήμα B.8 Ορισμός της οριακής γωνίας

B.4.2. Διδιάστατα διαγράμματα ανίχνευσης ακτίνων

Η αντανάκλαση παράλληλων ακτίνων ηλιακού φωτός από δύο διδιάστατα κυκλικά και παραβολικά κάτοπτρα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών κατόπτρων στη συγκέντρωση των παράλληλων ακτίνων της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας οι οποίες είναι κάθετες στην επιφάνεια του ανακλαστήρα είναι:

1. Όλες οι παράλληλες ακτίνες που αντανακλούν από ένα σφαιρικό κάτοπτρο περνάνε από μια γραμμή που περνά μέσα από το κέντρο του κύκλου και παράλληλα στις προσπίπτουσες ακτίνες
2. Όλες οι παράλληλες ακτίνες που αντανακλούν από ένα παραβολικό κάτοπτρο, όταν είναι παράλληλες στον άξονα συμμετρίας, διασταυρώνονται σε ένα σημείο

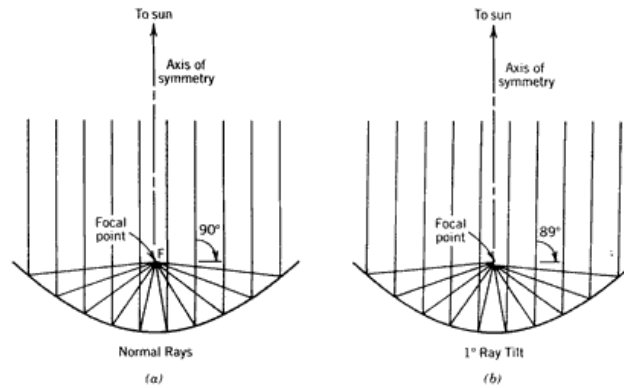
Επιπλέον, ένα κυκλικό κάτοπτρο είναι συμμετρικό όσο αφορά περιστροφές από το κέντρο του. Αυτό σημαίνει ότι αν οι ηλιακές ακτίνες δεν είναι κάθετες στο άνοιγμα του κατόπτρου, το σχέδιο των ανακλώμενων ακτίνων δείχνει ότι είναι το ίδιο αλλά είναι περιστρεμμένο.



Σχήμα B.9. Χαρακτηριστικά της σφαιρικής οπτικής

Ένα παραβολικό κάτοπτρο από την άλλη δεν είναι συμμετρικό όσο αφορά περιστροφές από το

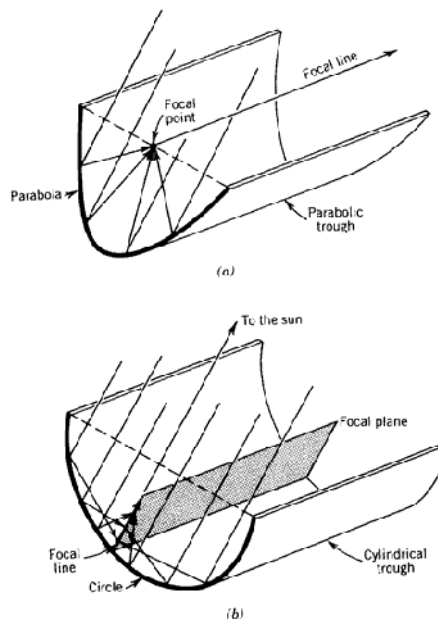
εστιακό του σημείο. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, στην περίπτωση που η προσπίπτουσα δέσμη παράλληλων ακτίνων δεν είναι κάθετη στο άνοιγμα του κατόπτρου, έχουμε ως αποτέλεσμα τη διασπορά της και την εξάπλωση του ειδώλου στο εστιακό σημείο. Για να είναι ακριβής η επικέντρωση σε ένα παραβολικό κάτοπτρο πρέπει να παρακολουθείται με ακρίβεια η κίνηση του ήλιου για να κρατά τον άξονα (ή το επίπεδο) της συμμετρίας παράλληλο με τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες.



Σχήμα Β.10. Χαρακτηριστικά της παραβολικής οπτικής για (α) ακτίνες παράλληλες στον άξονα της συμμετρίας, (β) για ακτίνες με κλίση 1° από τον άξονα συμμετρίας

B.4.3. Κοίλα εστιακής γραμμής

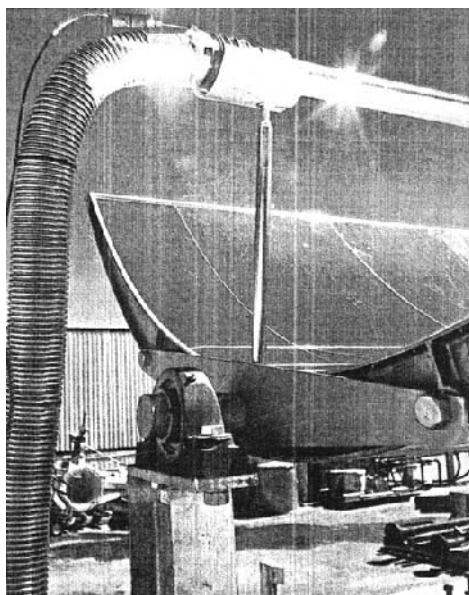
Για να δημιουργηθεί ένα κυλινδρικό ή παραβολικό κοίλο, πρέπει τα διδιάστατα κάτοπτρα των σχημάτων Β.8 και Β.9 να επεκταθούν κάθετα στο επίπεδο της καμπυλότητας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι ανάγκες για μηχανισμούς παρακολούθησης είναι οι ίδιες με αυτές των διδιάστατων κατόπτρων που συζητήθηκαν παραπάνω.



Σχήμα Β.11 Δημιουργία των γραμμικών κοίλων (α) παραβολικά κοίλα, (b) κυλινδρικά κοίλα

Ένα παραβολικό κοίλο έχει γραμμική εστίαση και πρέπει να έχει μηχανισμό παρακολούθησης κατά το γραμμικό του άξονα για να μπορεί να διατηρεί την εστίαση. Η κατάλληλη γωνία παρακολούθησης καθορίζεται από το προσανατολισμό του κοίλου σε σχέση με τη θέση του ήλιου. Το παραβολικό κοίλο πρέπει να παρακολουθεί κατά το γραμμικό του άξονα έτσι ώστε οι ηλιακές ακτίνες να είναι κάθετες στο άνοιγμα του.

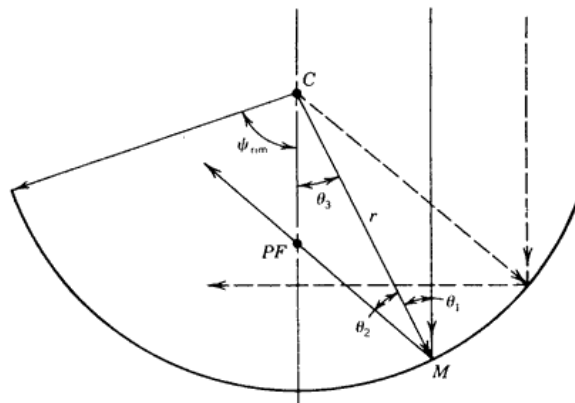
Από τη στιγμή που η γραμμική επέκταση της καμπύλης δεν εισάγει νέα καμπυλότητα κατά το μήκος του άξονα της επέκτασης το κοίλο δεν χρειάζεται να έχει δυνατότητα παρακολούθησης σε αυτή τη κατεύθυνση για να μπορέσει να διατηρήσει την εστίαση. Όπως στη περίπτωση της αντανάκλασης από ένα επίπεδο κάτοπτρο δεν χάνεται η συγκέντρωση των παράλληλων ηλιακών ακτίνων, έτσι και η προσπίπτουσα δέσμη ακτινοβολίας στο επίπεδο της επέκτασης δεν χάνει τη συγκέντρωσή της από μια γραμμική επέκταση. Σε περίπτωση που η προσπίπτουσα δέσμη δεν είναι κάθετη (δεδομένου ότι το παραβολικό κοίλο έχει μηχανισμό παρακολούθησης που ικανοποιεί τις απαιτήσεις εστίασης) το αποτέλεσμα είναι ότι η αντανακλώμενη δέσμη απλά επεκτείνεται κατά μήκος χωρίς να χάνεται η εστίαση στο σωλήνα του δέκτη. Όμως όπως φαίνεται και στη παρακάτω φωτογραφία πολλές φορές η αντανάκλαση γίνεται πέρα από το τέλος του δέκτη. Στη φωτογραφία συγκεντρωμένη ακτινοβολία πέφτει πάνω στον εύκαμπο σωλήνα και όχι στο δέκτη. Αυτή η ενέργεια χάνεται από το συλλέκτη.



Σχήμα Β.12. Απώλειες στην τέλος ενός συστήματος παραβολικών κοίλων

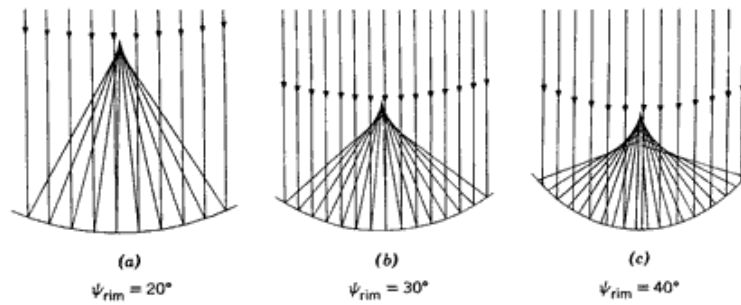
Από τη στιγμή που η γραμμική επέκταση δεν προκαλεί σφάλματα στην εστίαση, το άνοιγμα ενός κυλινδρικού κοίλου δεν χρειάζεται καθόλου παρακολούθηση. Ωστόσο ένα κυλινδρικό κοίλο με μεγάλη οριακή γωνία θα έχει εστιακό επίπεδο και όχι εστιακή γραμμή. Για να αποφευχθεί η διασπορά της εστίασης, τα κυλινδρικά κοίλα πρέπει να είναι σχεδιασμένα με μικρές οριακές γωνίες ώστε να παρέχουν μια προσεγγισμένη εστιακή γραμμή.

Η επίδραση της οριακής γωνίας Ψ_{rim} στην εστίαση των κυλινδρικών κοίλων μπορεί να φανεί παρατηρώντας τη πορεία μιας ακτίνας όπως εισέρχεται στο άνοιγμα του συλλέκτη. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις εμπλεκόμενες γωνίες. Αφού, εξ ορισμού η ακτίνα ενός κύκλου είναι κάθετη στην εφαπτομένη του κύκλου σε οποιοδήποτε σημείο προκύπτει $\theta_1 = \theta_2$. Επιπλέον, αφού η προσπίπτουσα ακτίνα είναι παράλληλη στον άξονα της καμπυλότητας $\theta_3 = \theta_1 = \theta_2$. Άρα το τρίγωνο C-PF-M είναι ένα ισοσκελές τρίγωνο με τα χαρακτηριστικά ότι το τμήμα C-PF είναι ίσο με $r/2$ για μικρές τιμές της θ_3 .



Σχήμα Β.13 Ορισμοί των γωνιών ανάκλασης σε ένα κυλινδρικό ή σφαιρικό κάτοπτρο

Όσο αυξάνεται τη θ_3 , η ανακλώμενη ακτίνα περνάει τη γραμμή κάτω από το σημείο PF όπως φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή στο παραπάνω σχήμα. Η διασπορά της ανακλώμενης εικόνας όσο αυξάνεται η θ_3 ονομάζεται σφαιρική εκτροπή. Για πρακτικές εφαρμογές, αν η οριακή γωνία ενός κυλινδρικού κοίλου είναι μικρή (δηλαδή μικρότερη από 20-30 μοίρες), η σφαιρική εκτροπή είναι μικρή και έτσι επιτυγχάνεται μια εικονική εστιακή γραμμή. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την εστίαση των σφαιρικών κατόπτρων με διάφορες οριακές γωνίες.



Σχήμα B.14 Συγκέντρωση παράλληλων ακτίνων φωτός χρησιμοποιώντας σφαιρικά κάτοπτρα με διαφορετικές οριακές γωνίες

B.4.4. Δίσκοι εστιακού σημείου

Αν τα διδιάστατα κάτοπτρα των σχημάτων B.8 και B.9 περιστραφούν αντί να επεκταθούν, το αποτέλεσμα είναι οι σφαιρικοί και παραβολικοί δίσκοι αντίστοιχα. Ένας παραβολικός δίσκος πρέπει να παρακολουθεί τον ήλιο σε 2 διαστάσεις για να μπορεί να διατηρεί την προσπίπτουσα ηλιακή δέσμη κάθετη στο άνοιγμα του δίσκου όλες τις ώρες. Όπως με τα κυλινδρικά κοίλα έτσι και το άνοιγμα ενός σφαιρικού δίσκου δεν χρειάζεται παρακολούθηση εξαιτίας της συμμετρίας της σφαίρας (κύκλου). Ωστόσο είναι απαραίτητος ένας γραμμικός δέκτης που ανιχνεύει τη κινούμενη εστιακή γραμμή [1].

B.5. Αντανάκλαση της ενέργειας στο δέκτη

B.5.1. Αντανάκλαση παράλληλων ακτίνων

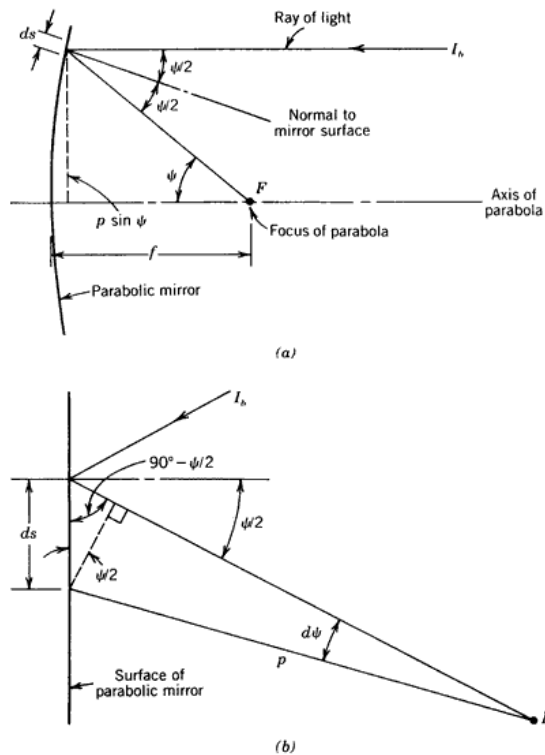
Ας θεωρήσουμε το παραβολικό κάτοπτρο που φαίνεται στο σχήμα B.15. Μια ακτίνα φωτός με ένταση I_b και πρόσπτωση παράλληλη με τον άξονα της παραβολής, θα αντανακλαστεί στην εστία F της παραβολής. Αφού θα χρειαστεί να συζητήσουμε τη συνολική ποσότητα φωτός που αντανακλάται στην επιφάνεια του κατόπτρου, είναι καλό να εισάγουμε τη διαφορική επιφάνεια dA_s η οποία μπορεί να ολοκληρωθεί για όλη την επιφάνεια του κατόπτρου αν είναι επιθυμητό. Η διαφορική επιφάνεια dA_s , ορίζεται ως

$$dA_s = l * ds \text{ (m}^2 \text{)} \tag{B.31}$$

όπου

ds = Το διαφορικό μήκος τόξου της παραβολής που φαίνεται στο σχήμα B.15

l = είτε το μήκος μιας διαφορικής λωρίδας στην επιφάνεια του παραβολικού κοίλου κατά τη διεύθυνση της εστιακής γραμμής, ή η περίμετρος ενός διαφορικού δακτυλίου στην επιφάνεια ενός παραβολικού δίσκου.



Σχήμα B.15 Αντανάκλαση ακτίνας φωτός από παραβολικό κάτοπτρο

Από το σχήμα B.15b παίρνουμε

$$ds = \frac{p \sin(d\psi)}{\cos(\psi / 2)} \quad (B.31)$$

Δεδομένου ότι η γωνία $d\psi$ είναι μικρή, ισχύει ότι $\sin(d\psi) = d\psi$ και η εξίσωση γίνεται

$$ds = \frac{p(d\psi)}{\cos(\psi / 2)} \quad (B.32)$$

Έτσι

$$dA_s = \frac{lp d\psi}{\cos(\psi / 2)} \quad (B.33)$$

Η συνολική ροή της ακτινοβολίας που αντανακλάται από αυτή τη διαφορική επιφάνεια

(υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες αντανάκλασης) στο σημείο της εστίασης είναι

$$d\Phi = dA_s I_b \cos(\psi / 2) = l p I_b d\psi$$

(B.34)

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση B.6 έχουμε

$$d\Phi = \frac{2 f l I_b d\psi}{(1 + \cos\psi)}$$

(B.35)

Η εξίσωση (B.35) είναι η γενική μορφή της εξίσωσης και ισχύει τόσο για παραβολικά κοίλα όσο και δίσκους. Ωστόσο, για τους παραβολικούς δίσκους μπορούμε να αντικαταστήσουμε το l στην εξίσωση (B.35). Παρουσιάζοντας τους δείκτες ΠΚ και ΠΔ για να ξεχωρίσουμε τα παραβολικά κοίλα από τους παραβολικούς δίσκους μπορούμε να ξαναγράψουμε τη παραπάνω εξίσωση ως

$$d\Phi_{PT} = \frac{2 f l I_b d\psi}{(1 + \cos\psi)}$$

(B.36)

και

$$d\Phi_{PD} = \frac{8\pi I_b f^2 \sin\psi d\psi}{(1 + \cos\psi)^2}$$

(B.37)

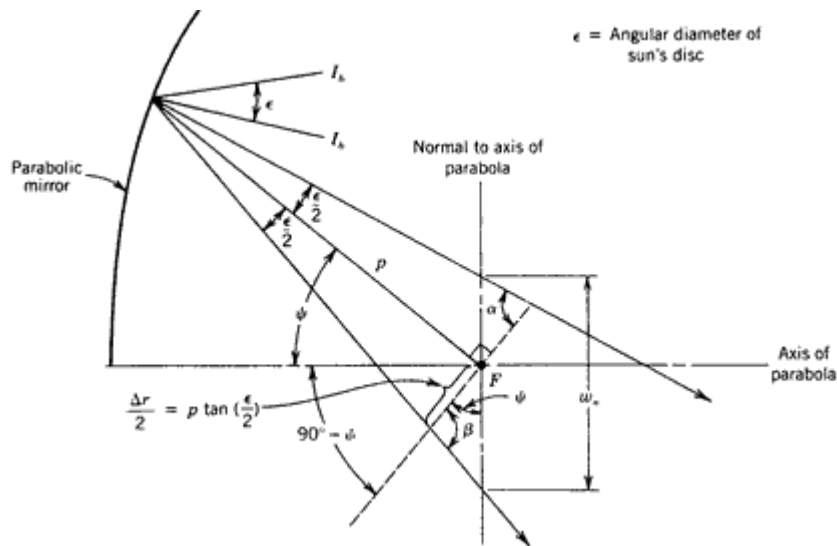
όπου χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη αντικατάσταση.

$$l = 2\pi p \sin\psi = \frac{4\pi f \sin\psi}{(1 + \cos\psi)}$$

(B.38)

B.5.2. Αντανάκλαση μη-παράλληλων ακτίνων

Τα προηγούμενα βασίζονται στο ότι οι προσπίπτουσες ακτίνες είναι παράλληλες. Όμως αυτό δεν είναι σωστό για τις ηλιακές εφαρμογές. Εξαιτίας του πεπερασμένου γωνιακού μεγέθους του ηλιακού δίσκου (περίπου 33 λεπτά τόξου ή 9.6mrad) οι ακτίνες του ήλιου που φτάνουν στο συγκεντρωτή δεν είναι παράλληλες. Έτσι, δεν ανακλώνται όλες οι ηλιακές ακτίνες στο εστιακό σημείο (η γραμμή στη περίπτωση των παραβολικών κοίλων), οι αντανακλώμενες ακτίνες σχηματίζουν ένα “είδωλο” πεπερασμένου μεγέθους κεντραρισμένο στην εστία. Η γεωμετρία που εμπλέκεται απεικονίζεται στο σχήμα B.16 όπου το γωνιακό μέγεθος του ηλιακού δίσκου φαίνεται με ϵ .



Σχήμα B.16 Αντανάκλαση μη-παράλληλων ακτίνων από ένα παραβολικό κάτοπτρο

Το πλάτος του ειδώλου του ήλιου σε ένα επίπεδο κάθετο στο p που περνάει από την εστία F είναι:

$$\Delta r = 2p \tan\left(\frac{\epsilon}{2}\right)$$

(B.39)

Αυτό είναι και το μικρότερο πλάτος που είναι δυνατό να υπάρξει. Οποιαδήποτε σφάλματα εμφανιστούν προκαλούν επιπλέον εξάπλωση του ειδώλου.

B.5.3. Εισαγωγή σφαλμάτων

Εκτός από το πεπερασμένο γωνιακό μέγεθος του ήλιου υπάρχουν και άλλα ανεξάρτητα σφάλματα όπως είναι η πιστότητα του κατόπτρου προς ένα πραγματικά παραβολικό σχήμα, σφάλματα παρακολούθησης, ευθυγράμμισης του δέκτη κ.α. τα οποία συμβάλλουν στην εξάπλωση της ανακλώμενης δέσμης φωτός. Τυπικά, αυτά τα σφάλματα θεωρούνται τυχαία και το συνδυασμένο τους αποτέλεσμα μπορεί να υπολογιστεί στατιστικά. Παρόλο που η ένταση του ήλιου δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη κατά το δίσκο του, μπορεί να προσεγγιστεί ως σταθερή κατανομή.

Το 1981 οι Harris και Duff χρησιμοποίησαν την κανονική κατανομή για να περιγράψουν την ένταση του ήλιου. Ανακάλυψαν ότι η προσέγγιση δεν εισάγει σημαντικά σφάλματα για παραβολικά κοίλα και δίσκους. Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται μερικά τυπικά σφάλματα μαζί με το αντίστοιχο πλάτος του ήλιου. Αυτά τα σφάλματα υπάρχουν για μία τυπικά απόκλιση (1σ).

Πίνακας 2.1. Τυπικά σφάλματα παραβολικών συγκεντρωτών

Τύπος και πηγή	Επίδραση στο μέγεθος	σ^2
<i>Μονοδιάστατα σφάλματα</i>		
Κατασκευή	$2.5 \text{ mrad} \times 2 = 5 \text{ mrad}$	25
Παρακολούθηση		
Αισθητήρες	2 mrad	4
Μη-ομοιόμορφη κίνηση	2 mrad	4
Δέκτης		
Ευθυγράμμιση	2 mrad	4
		$\Sigma\sigma_{1D}^2=37, \sigma_{1D}=6.1\text{mrad}$
<i>Διδιάστατα σφάλματα</i>		
Οπτική ανακλαστικότητα των κατόπτρων	$0.25 \text{ mrad} \times 2 = 0.50 \text{ mrad}$	0,25
Ηλιακό πλάτος	2.8 mrad	7,84
		$\Sigma\sigma_{2D}^2=8.09, \sigma_{2D}=2.8\text{mrad}$
<i>Συνολικό σφάλμα</i>		
$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{1D}^2 + \sigma_{2D}^2} = 6.7(\text{mrad})$		

Τα μονοδιάστατα σφάλματα συμβάλλουν στην εξάπλωση της δέσμης κατά το επίπεδο της καμπυλότητας και η συνισταμένη τους είναι:

$$\sigma_{1D} = \sqrt{(2\sigma_{\text{slope}})^2 + (\sigma_{\text{sensor}})^2 + (\sigma_{\text{drive}})^2 + (\sigma_{\text{rec}})^2} \quad (\text{B.40})$$

Τα διδιάστατα σφάλματα συμβαίνουν όταν η προσπίπτουσα ακτίνα δεν βρίσκεται μέσα στο επίπεδο της καμπυλότητας. Το γωνιακό πλάτος του ήλιου και οι μη-κατοπτρικές αντανάκλασεις βρίσκονται σε αυτή τη κατηγορία. Η συνισταμένη τους είναι

$$\sigma_{2D} = \frac{(\sigma_{\text{sun}}^2 + \sigma_{\text{refl}}^2)}{\cos \theta_i} \quad (\text{B.41})$$

Όπου θ η ηλιακή γωνία πρόσπτωσης. Το συνολικό σφάλμα είναι:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{(\sigma_{1D}^2 + \sigma_{2D}^2)} \quad (\text{B.42})$$

Για ένα παραβολικό δίσκο η γωνία πρόσπτωσης είναι πάντα 0. Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να ξαναγράψουμε την εξίσωση (B.39) ως

$$\Delta r = 2p \tan\left(n \frac{\sigma_{\text{tot}}}{2}\right)$$

(B.43)

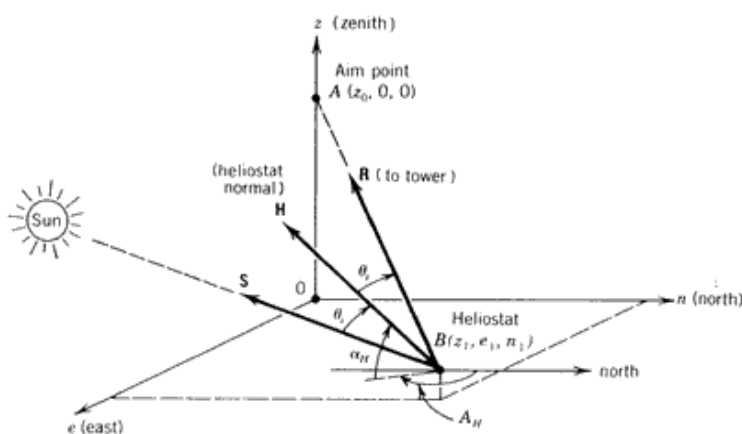
όπου n είναι ο αριθμός των τυπικών αποκλίσεων που λαμβάνουμε υπόψη.

Κάποιος μπορεί να περιμένει ότι το 68% της προσπίπτουσας ενέργειας θα πέσει στη γραμμή Δr όταν το n επιλεγεί να είναι ίσο με 2. Είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιείτε +2 με +3 φορές στωτ σε αναλύσεις για να εξασφαλιστεί ότι το 95% ή και περισσότερο της ενέργειας θα συλλεχθεί [1].

B.6. Αντανάκλαση σε ένα σταθερό σημείο (Ο πύργος ισχύος)

Με τα συστήματα κεντρικού δέκτη, οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν σε ένα πεδίο με μετακινούμενα κάτοπτρα και αντανακλούν σε ένα και μοναδικό σταθερό στο χώρο σημείο (το δέκτη).

Για να εξηγήσουμε τη γεωμετρία θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τις συντεταγμένες ζενίθ, ανατολικά και βόρεια (z, e, n) με την αρχή τους στο O όπως φαίνεται στο σχήμα B.17. Η τοποθεσία μιας αντανακλαστικής επιφάνειας B μπορεί να οριστεί με συντεταγμένες z_1, e_1 και n_1 και το σημείο-στόχος $z_0, 0, 0$.



Σχήμα B.17 Συντεταγμένες που ορίζουν την αντανάκλαση των ηλιακών ακτίνων από ένα ηλιοστάτη σε ένα σταθερό σημείο, το διάνυσμα H είναι κάθετο στην επιφάνεια του ανακλαστήρα.

Για να προβλέψουμε την αζιμούθια γωνία καθώς και την γωνία ύψους του ηλιοστάτη πρέπει να περιγράψουμε τρία διανύσματα. Το πρώτο είναι ένα διάνυσμα που στοχεύει τον ήλιο.

Χρησιμοποιώντας τη εικόνα B.15 όταν ένας παρατηρητής είναι στη θέση Q το διάνυσμα S που στοχεύει στον ήλιο είναι

$$S = S_z i + S_e j + S_n k \quad (B.44)$$

Ένα διάνυσμα από τον ανακλαστήρα προς το σημείο-στόχο ορίζεται ως

$$R = \frac{(z_o - z_1)i - e_1 j - n_1 k}{\sqrt{(z_o - z_1)^2 + e_1^2 + n_1^2}} \quad (B.45)$$

ή

$$R = R_z i + R_e j + R_n k \quad (B.46)$$

όπου i, j και k τα διανύσματα στις z, e , και n συντεταγμένες αντίστοιχα.

Η τρίτη είναι κάθετη στην επιφάνεια του ανακλαστήρα και ορίζεται ως:

$$H = H_z i + H_e j + H_n k \quad (B.47)$$

Δεδομένου ότι οι νόμοι της κατοπτρικής ανάκλασης απαιτούν ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης μπορούμε να γράψουμε μια έκφραση για αυτή τη γωνία σε σχέση με τις διανυσματικές μονάδες S και R.

$$\cos 2\theta_i = S \cdot R \quad (B.48)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (B.44) και (B.46) έχουμε

$$\cos 2\theta_i = R_z \sin \alpha + R_e \cos \alpha \sin A + R_n \cos \alpha \cos A \quad (B.49)$$

Έτσι αν γνωρίζουμε τη θέση του ήλιου και τη θέση του σημείου στόχου μπορούμε να βρούμε τη γωνία πρόσπτωσης ή τη γωνία ανάκλασης σε σχέση με την ανακλαστική επιφάνεια. Το διάνυσμα της ανακλαστικής επιφάνειας μπορεί να βρεθεί ως εξής:

$$H = \frac{R + S}{2 \cos \theta_i} = \frac{(R_z + S_z)i + (R_e + S_e)j + (R_n + S_n)k}{2 \cos \theta_i} \quad (B.50)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (B.44) και εκφράζοντας την υπομετρική γωνία και το αζιμούθιο της ανακλαστικής επιφάνειας σε ορθογωνικές συντεταγμένες έχουμε:

$$\sin \alpha_H = \frac{R_z + \sin \alpha}{2 \cos \theta_i} \quad (B.51)$$

και

$$\sin A_H = \frac{R_e + \cos \alpha \sin A}{2 \cos \theta_i \cos \alpha_H} \quad (B.52)$$

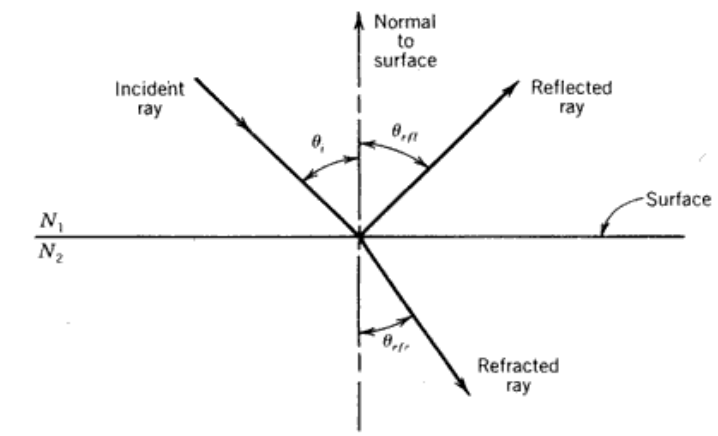
Η τρίτη έκφραση είναι ουσιαστικά περιττή αλλά δίνεται για λόγους πληρότητας.

$$\cos A_H = \frac{R_n + \cos \alpha \cos A}{2 \cos \theta_i \cos \alpha_H} \quad (B.53)$$

[1].

B.7. Αρχές αντανάκλασης και διάθλασης

B.7.1. Κάτοπτρα

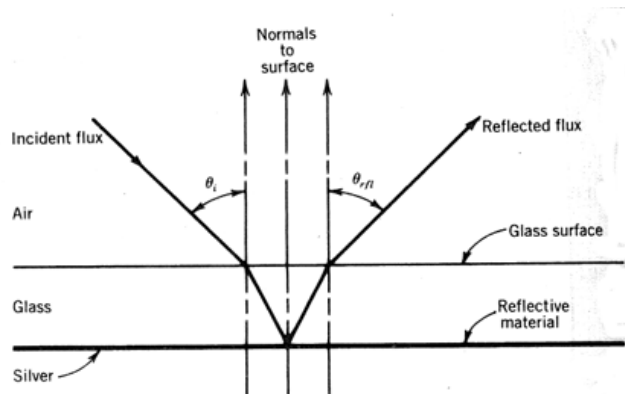


Σχήμα B.18. Αλληλεπίδραση του φωτός σε ένα υλικό.

Οι βασικές διαδικασίες που λαμβάνουν μέρος όταν το φως προσπίπτει σε μια διαφανή επιφάνεια φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Ένα μέρος της ακτινοβολίας αντανακλάται από την επιφάνεια με γωνία ίση με τη γωνία πρόσπτωσης. Ένα άλλο μέρος περνά μέσα από την επιφάνεια και εισέρχεται στο υλικό. Όταν γίνεται αυτό αλλάζει κατεύθυνση και σύμφωνα με το νόμο του Snell έχουμε

$$N_1 \sin \theta_i = N_2 \sin \theta_{tr} \quad (B.54)$$

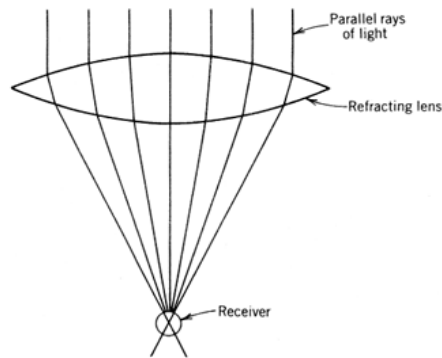
Σε περίπτωση που η επιφάνεια του κατόπτρου είναι καλή σε μεγάλη επιφάνεια έτσι ώστε η ανακλώμενη ακτίνα να καθορίζεται από το γενικό περίγραμμα της επιφάνειας τότε η αντανάκλαση αποκαλείται κατοπτρική. Σε περίπτωση που υπάρχουν στην επιφάνεια μικρές ανωμαλίες έτσι ώστε η ακτίνα να αντανακλάται σε γωνίες που δεν μπορούν να καθοριστούν από το γενικό περίγραμμα της επιφάνειας τότε λέγεται μη-κατοπτρική.



Σχήμα B.19 Κάτοπτρο δευτερεύουσας επιφάνειας

Τα περισσότερα κάτοπτρα που χρησιμοποιούνται συγκεντρωτικούς συλλέκτες είναι κάτοπτρα δευτερεύουσας επιφάνειας (second surface mirrors, δηλαδή η ανακλαστική επιφάνεια βρίσκεται πίσω από ένα προστατευτικό φύλλο από γυαλί ή πλαστικό). Όταν περνάει φως από ένα υλικό, ένα μέρος του απορροφάται. Η απορρόφηση του φωτός από διάφανα υλικά αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό κατόπτρων που χρησιμοποιούνται σε ηλιακούς συγκεντρωτές. Από τη στιγμή που το φως πρέπει να διασχίσει το πάχος του προστατευτικού στρώματος δύο φορές κάθε υλικό που απορροφά φως μειώνει σημαντικά την ηλιακή ενέργεια που φτάνει στο δέκτη. Η ικανότητα ενός υλικού να μεταδώσει φως χαρακτηρίζεται από τη διαπερατότητα του.

B.7.2. Φακοί

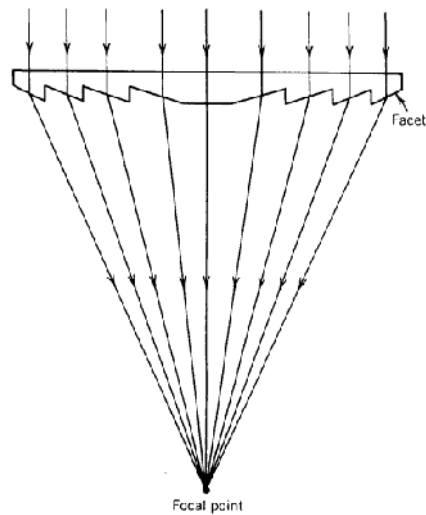


Σχήμα B.20 Συγκενρωτικός φακός

Οι φακοί λειτουργούν με βάση την αρχή του νόμου του Snell. Ειδικότερα, υλικά όπως το γυαλί και το πλαστικό χρησιμοποιούνται για να διαθλάσουν το φως, να μεταδώσουν το φως μέσα από το φακό και μετά να το διαθλάσουν ξανά όταν βγαίνει από το φακό. Με το σωστό προσανατολισμό, ένας κυρτός φακός είναι σε θέση να διαθλάσει παράλληλες ακτίνες του ήλιου και να συγκεντρώσει το είδωλο όπως φαίνεται στο σχήμα B.20

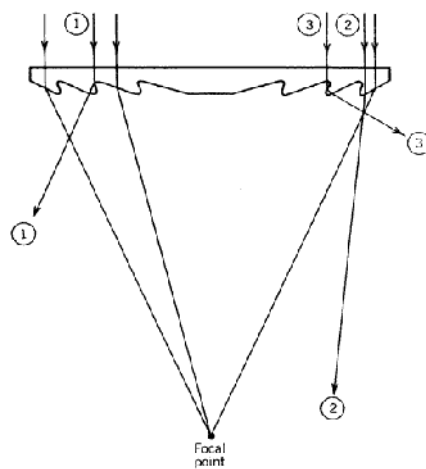
B.7.3. Φακοί Φρενέλ

Οι φακοί Φρενέλ που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλιακούς συλλέκτες μπορούν να συγκεντρώσουν φως χρησιμοποιώντας το φαινόμενο της διάθλασης. Δεδομένου ότι είναι μια επίπεδη προσέγγιση των κυρτών φακών χρησιμοποιεί λιγότερο υλικό και ζυγίζει λιγότερο από τους αντίστοιχους κυρτούς φακούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο κόστος και μικρότερες απώλειες οπτικής μετάδοσης μέσα από τους φακούς. Ένας εξιδανικευμένος φακός Φρενέλ που συγκεντρώνει παράλληλες ακτίνες φωτός σε ένα σημείο φαίνεται στο σχήμα B.21. Ο φακός Φρενέλ αποτελείται από κεκλιμένες πτυχές για να προσεγγίσει τη καμπυλότητα ενός φακού. Όσο περισσότερες είναι οι πτυχές τόσο καλύτερη και η προσέγγιση. Συνήθως ένας φακός Φρενέλ υψηλής ποιότητας έχει περισσότερες από 1000 πτυχές ανά εκατοστό.



Σχήμα Β.21. Φακοί φρενέλ

Αρκετοί παράγοντες περιορίζουν την αποτελεσματικότητα ενός φακού Φρενέλ. Το πιο σοβαρό είναι η ευκρίνεια με την οποία μπορούν να παραχθούν οι πτυχές. Οποιαδήποτε διαδικασία παραγωγής θα παράγει ελαφρώς στρογγυλοποιημένες πτυχές. Κάθε ακτίνα που προσπίπτει στη πίσω πλευρά μιας πτυχής ή στη κορυφή ή στη κοιλάδα της δεν θα κατευθυνθεί σωστά προς το δέκτη.



Σχήμα Β.22 Προβλήματα σχετικά με τους φακούς Φρενέλ

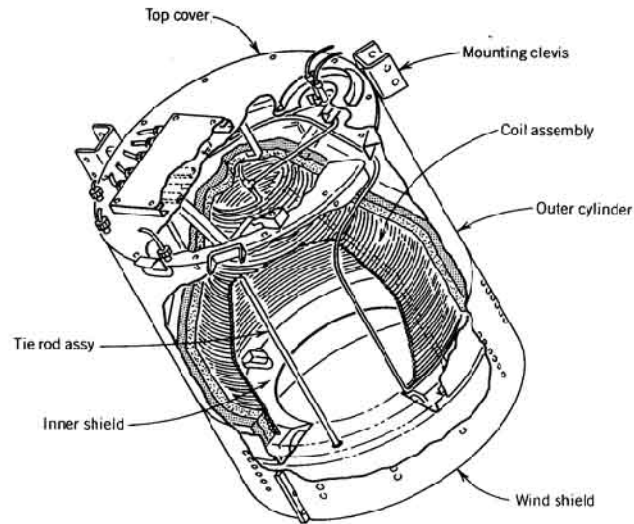
Ένας επιπλέον λόγος που μειώνει τις επιδόσεις των φακών Φρενέλ είναι η εσωτερική ανάκλαση, η οποία είναι αποτέλεσμα του νόμου του Snell όταν η γωνία διάθλασης γίνει ίση με 90° . Όταν η γωνία πρόσπτωσης πλησιάζει τις 42° τότε έχουμε εσωτερική ανάκλαση για γυάλινους φακούς. Έτσι οι πτυχές στην άκρη ενός φακού Φρενέλ είναι λιγότερο αποτελεσματικές από τις πτυχές στο κέντρο του. Τέλος ο πιο σημαντικός λόγος που μειώνει τη χρήση της διάθλασης ως οπτικής είναι η ανάγκη παρακολούθησης σε δύο άξονες [1].

[1] *“Power From The Sun Book, William B. Stine και Michael Geyer*
(<http://www.powerfromthesun.net/book.htm>)

Γ. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Γ.1. Δέκτης

Γ.1.1. Σχεδιασμός του δέκτη



Σχήμα Γ.1.1 Δέκτης τύπου κοιλότητας

Η δουλειά του δέκτη είναι να απορροφά όσο το δυνατό περισσότερη συγκεντρωμένη ηλιακή ροή και να τη μετατρέπει σε ωφέλιμη ενέργεια (συνήθως θερμική). Μόλις μετατραπεί σε θερμική ενέργεια, μεταφέρεται σε ένα ρευστό (υγρό ή αέριο). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απομακρυνθεί θερμότητα από το δέκτη και να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Υπάρχουν γενικά δύο διαφορετικά είδη δέκτη. Ο παγκατευθυντικός δηλαδή αυτός που δέχεται ακτινοβολία από όλες τις κατευθύνσεις και ο δέκτης τύπου κοιλότητας που δέχεται μόνο μέσα από ένα συγκεκριμένο άνοιγμα. Στο δέκτη τύπου κοιλότητας το επίπεδο του ανοίγματος της κοιλότητας τοποθετείται κοντά στην εστία της παραβολής και κάθετα στον άξονα της παραβολής. Έτσι πολλές φορές ένας τέτοιος δέκτης λέγεται και δέκτης εστιακού επιπέδου. Αν και η κοιλότητα θα μπορούσε να είναι ευθεία και έτσι να χρησιμοποιηθεί σε παραβολικά κοίλα, ένας δέκτης τύπου κοιλότητας χρησιμοποιείται συνήθως στους παραβολικούς δίσκους.

Γ.1.2. Μέγεθος του δέκτη

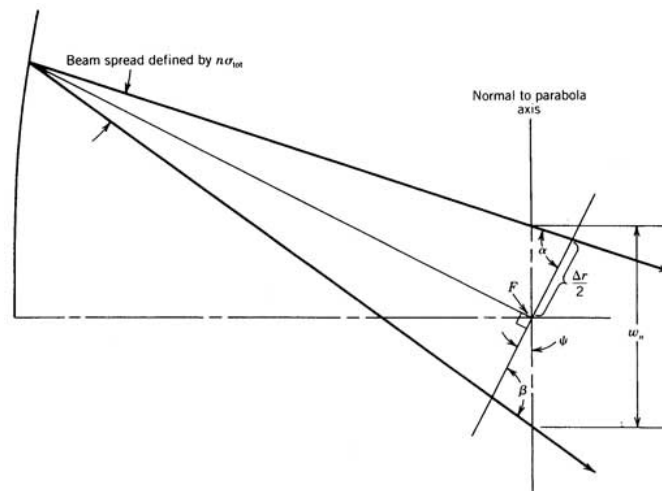
Παγκατευθυντικός δέκτης. Η διάμετρος του σωλήνα ενός τέτοιου δέκτη δίνεται από τον τύπο

$$\Delta r = 2p \tan\left(n \frac{\sigma_{\text{tot}}}{2}\right) \quad (Γ.1.1)$$

όπου p είναι η παραβολική ακτίνα, n ο αριθμός των τυπικών αποκλίσεων, και σ_{tot} η σταθμισμένη τυπική απόκλιση της εξάπλωσης της γωνίας της δέσμης για όλα τα σφάλματα του συγκεντρωτή.

Η τιμή του n καθορίζεται από μια διαδικασία βελτιστοποίησης που βασίζεται στην εξισορρόπηση του ποσού της ακτινοβολίας που έχει συλληφθεί με αυτή που χάνεται από το δέκτη. Ένας μεγαλύτερος δέκτης μπορεί να απορροφήσει παραπάνω ακτινοβολία αλλά θα έχει και μεγαλύτερες απώλειες.

Δέκτες τύπου κοιλότητας. Το κατάλληλο μέγεθος του ανοίγματος της κοιλότητας καθορίζεται από τις ίδιες οπτικές αρχές που χρησιμοποιήθηκαν στην εξίσωση Γ.1.1 αλλά προβάλλοντας το είδωλο στο εστιακό επίπεδο εκεί όπου βρίσκεται το άνοιγμα του δέκτη.



Σχήμα Γ.1.2 Υπολογίζοντας το μέγεθος του ανοίγματος της κοιλότητας ανάλογα με την εξάπλωση της δέσμης λόγω σφαλμάτων

Αν η εξάπλωση της δέσμης λόγω σφαλμάτων είναι μικρή τότε οι γωνίες α και β είναι μικρές και άρα η προβολή της εικόνας στο εστιακό επίπεδο είναι:

$$w_n = \frac{\Delta r}{\cos \psi} \quad (Γ.1.2)$$

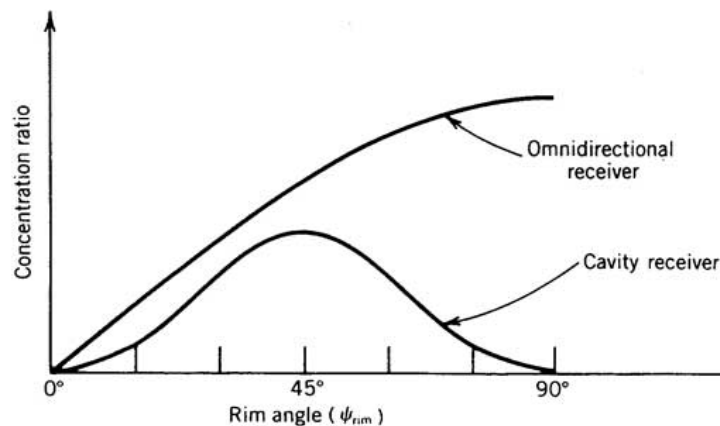
Αντικαθιστώντας στην εξίσωση Γ.1.1. έχουμε

$$W_n = \frac{\rho \tan[n(\sigma_{\text{tot}} / 2)]}{\cos \psi} \quad (\Gamma.1.3)$$

Επιλογή της οριακής γωνίας του συγκεντρωτή

Η επιλογή του τύπου του δέκτη επιδρά στην επιλογή της οριακής γωνίας του συγκεντρωτή. Ο συγκεντρωτής πρέπει να ανακλά τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε όσο το δυνατόν μικρότερο δέκτη για να μειωθούν οι θερμικές απώλειες.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη σχέση μεταξύ του λόγου συγκέντρωσης τόσο για παγκατευθυντικούς δέκτες όσο και για τύπου κοιλότητας σε σχέση με την οριακή γωνία. Ο λόγος συγκέντρωσης είναι ο λόγος της επιφάνειας του ανοίγματος του συλλέκτη δια της επιφάνειας του ειδώλου στο δέκτη. Για το παγκατευθυντικό δέκτη η γωνία φτάνει μέχρι της 90 μοίρες ενώ για το τύπου κοιλότητας τις 45.



Σχήμα Γ.1.3 Παραλλαγές του λόγου συγκέντρωσης σε σχέση με την οριακή γωνία.

Το αποτέλεσμα του φαινομένου είναι ότι οι περισσότεροι παγκατευθυντικοί έχουν οριακές γωνίες κοντά στις 90 μοίρες ενώ οι δέκτες με εστιακό επίπεδο κοντά στις 45. Οι καμπύλες δείχνουν μόνο τάσεις και το μέγεθος της μίας σε σχέση με την άλλη δεν είναι σωστό [1].

Γ.1.3. Απώλειες του δέκτη

Γραμμικός παγκατευθυντικός δέκτης

Ο ρυθμός θερμικών απωλειών ενός τέτοιου δέκτη είναι ίσες με το ρυθμό θερμικών απωλειών από την εξωτερική επιφάνεια του γυάλινου σωλήνα. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί ως το σύνολο των απωλειών συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον

$$Q_{\text{loss,g}} = h_g A_g (T_g - T_a) + \sigma_B \varepsilon_g F_{ga} A_g (T_g^4 - T_s^4) \quad (I.1.4)$$

όπου:

h_g = Συντελεστής θερμικής-μεταφοράς λόγω συναγωγής στην εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού

A_g = Εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού

T_g = Θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του γυαλιού

T_a = Θερμοκρασία περιβάλλοντος

σ_B = Σταθερά Stefan-Boltzmann $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

ε_g = Διαπερατότητα του γυαλιού

F_{ga} = Συντελεστής ιδιομορφής της ακτινοβολίας

T_s = Θερμοκρασία του ουρανού

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί εξαιτίας της θερμοκρασίας του γυάλινου περιβλήματος η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του σωλήνα του δέκτη και του συντελεστή ανταλλαγής θερμικής ενέργειας ανάμεσα στο σωλήνα του δέκτη και το γυάλινο περίβλημα. Η εξίσωση που ακολουθεί είναι ένας πιο απλός τρόπος για τον υπολογισμό των απωλειών όπου η θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος μπορεί να υπολογιστεί εξισώνοντας το ρυθμό απωλειών του γυάλινου περιβλήματος με το ρυθμό απωλειών του σωλήνα του δέκτη

$$Q_{\text{loss,t}} = \frac{\sigma_B A_t (T_t^4 - T_g^4)}{(1/\varepsilon_t) + (A_t/A_g)[(1/\varepsilon_g) - 1]} + \frac{2\pi k_e l_t (T_t - T_g)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (I.1.5)$$

όπου:

ε_t = Διαπερατότητα του σωλήνα του δέκτη

T_t = Θερμοκρασία της επιφάνειας του σωλήνα του δέκτη

A_t = Επιφάνεια του σωλήνα του δέκτη

l_t = Μήκος του δέκτη

r_1, r_2 = διάμετρος του σωλήνα του δέκτη και διάμετρος του γυάλινου περιβλήματος αντίστοιχα.

k_e = Θερμική αγωγιμότητα δια μέσω της αύλακας.

Το πρόβλημα στη παραπάνω εξίσωση είναι η εύρεση τιμής για το k_e . Μια τυπικά τιμή είναι 0.046 W/m K (0.027 Btu/h ft F) για 1.0 cm αύλακας (r_2-r_1) και αριθμό Rayleigh μεταξύ 3000-4000. Σε περίπτωση που στην αύλακα υπάρχει κενό τότε ο δεύτερος όρος της εξίσωσης είναι 0.

Δέκτες τύπου κοιλότητας

Η γενική ιδέα ενός δέκτη κοιλότητας είναι να κατανεμηθεί ομοιόμορφα η προσπίπτουσα ροή στο άνοιγμά του κατά τη μεγάλη εσωτερική επιφάνεια της κοιλότητας με σκοπό να μειωθεί η μέγιστη ροή που απορροφάται σε κάθε δεδομένο σημείο. Σε μια ιδανική κοιλότητα η θερμοκρασία είναι εύλογα ομοιόμορφη και οι θερμικές απώλειες που υπάρχουν οφείλονται στη συναγωγή και την ακτινοβολία από το άνοιγμα της κοιλότητας. Έτσι η εξίσωση Γ.1.4. ξαναγράφεται με τα χαρακτηριστικά μιας κοιλότητας.

$$\dot{Q}_{\text{loss,cav}} = h_{\text{cav}} A_{\text{cav}} (T_{\text{cav}} - T_a) + \sigma_B \epsilon_{\text{cav}} F_{\text{cav,a}} (T_{\text{cav}}^4 - T_s^4) \quad (Γ.1.6)$$

Από τη στιγμή που το άνοιγμα μιας κοιλότητας είναι αρκετά μικρό σε σχέση με την επιφάνεια ενός παγκατευθυντικού δέκτη, οι θερμικές απώλειες είναι αρκετά μειωμένες.

Η ενέργεια που συλλαμβάνεται από το δέκτη η οποία ανακλάται από μια στοιχειώδη λωρίδα της επιφάνειας του κατόπτρου (η στοιχειώδους δακτυλίου της επιφάνειας του κατόπτρου στη περίπτωση του παραβολικού δίσκου).

$$\Delta \dot{Q}_{\text{inter}} = \rho_s \alpha \Gamma \left(\frac{d\Phi}{d\psi} \right) \Delta\psi \quad (Γ.1.7)$$

Όπου:

ρ_s = ανακλαστικότητα της κατοπτρικής επιφάνειας

α = απορροφητικότητα του δέκτη

Γ = Κλάσμα της ροής που συλλαμβάνεται

$d\Phi/d\psi$ = από την εξίσωση B.36 ή B.37

$\Delta\psi$ = Στοιχειώδης γωνία της παραβολής που ορίζεται από τη λωρίδα ή το δακτύλιο.

[1] "Power From The Sun Book, William B. Stine και Michael Geyer
(<http://www.powerfromthesun.net/book.htm>)

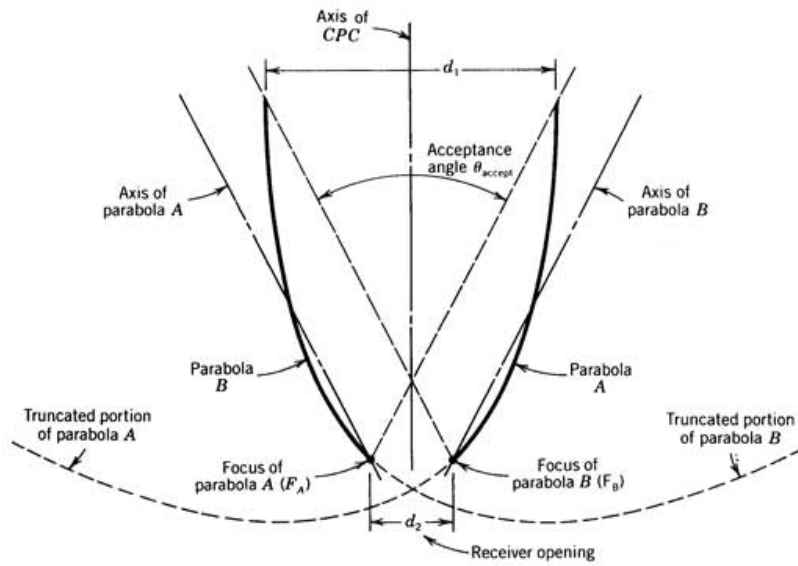
Γ.2. Συλλέκτες τύπου CPC



Σχήμα Γ.2.1 Συλλέκτης CPC

Οι σύνθετοι παραβολικοί συγκεντρωτές (Compound parabolic Concentrators) είναι συλλέκτες μέσης θερμοκρασίας και περιέχουν στοιχεία τόσο από συγκεντρωτικούς συλλέκτες όσο και από επίπεδους συλλέκτες [1]. Αυτό γιατί δεν συγκεντρώνουν απλά την ηλιακή δέσμη στο δέκτη με ένα ανακλαστήρα αλλά αξιοποιούν και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία όπως οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες. Η αξιοποίηση γίνεται υπό ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης και έτσι υπάρχουν ελάχιστες απαιτήσεις για παρακολούθηση του ήλιου. Ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτών χωρίς είδωλο και επιτυγχάνουν μικρούς λόγους συγκέντρωσης. Οι συγκεντρωτές με δύο άξονες μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερους λόγους συγκέντρωσης αλλά η επιβάρυνση και τα προβλήματα της συντήρησης του εξοπλισμού τους κάνουν λιγότερο αποδοτικούς οικονομικά [2],[3],[4]. Σύμφωνα με έρευνα του Ronnelid σε ίδιες συνθήκες δοκιμών, οι συντελεστές θερμικών απωλειών ενός επίπεδου συλλέκτη μπορεί να είναι ακόμα και 32% περισσότεροι από αυτούς ενός πρωτότυπου συλλέκτη CPC [5].

Γ.2.1. Οπτικά χαρακτηριστικά

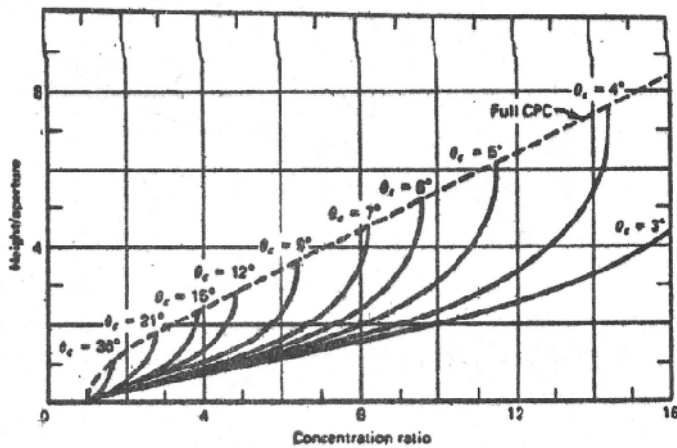


Σχήμα Γ.2.2 Γεωμετρία ενός CPC

Η συνηθέστερη μορφή των συλλεκτών CPC είναι η διδιάστατη τύπου σκάφης. Όπως φαίνεται στη τομή στο παραπάνω σχήμα κάθε πλευρά του CPC είναι τμήμα παραβολής. Και οι δύο παραβολικές επιφάνειες εκτείνονται μέχρι να γίνουν παράλληλες προς τον άξονα συμμετρίας του CPC. Η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα του CPC και την ευθεία που συνδέει την εστία της μιας παραβολής με το απέναντι άκρο του ανοίγματος, ονομάζεται ημιγωνία αποδοχής θ_c . Αν οι παραβολικές ανακλαστικές επιφάνειες είναι (οπτικά) τέλειες, τότε η ακτινοβολία που εισέρχεται στο άνοιγμα υπό γωνία θ , έτσι ώστε $-\theta_c < \theta < \theta_c$, ανακλάται προς το δέκτη, οποίος βρίσκεται στη βάση του CPC. Για $\theta < -\theta_c$ ή $\theta > \theta_c$ η ακτινοβολία δεν φτάνει στο δέκτη. Ο λόγος συγκέντρωσης για ένα (οπτικά) τέλειο επιμήκη CPC δίνεται από τη σχέση [6]:

$$C_i = \frac{1}{\sin \theta_c} \quad (Γ.2.1)$$

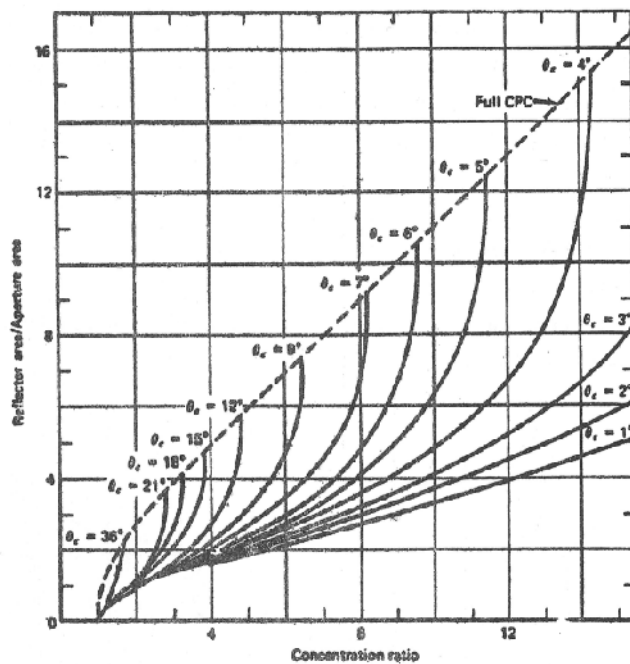
Τα άνω άκρα των παραβολικών πλευρών του CPC συνεισφέρουν ελάχιστα στην ανάκλαση της ακτινοβολίας προς τον δέκτη και συνεπώς μπορούν να αποκοπούν έτσι, το ύψος του CPC μπορεί να μειωθεί με ελάχιστη μείωση στην απόδοση, αλλά σημαντική μείωση στο κόστος κατασκευής.



Λόγος του ύψους προς το άνοιγμα για πλήρεις και αποκομμένους CPC, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και της ημιγωνίας αποδοχής.

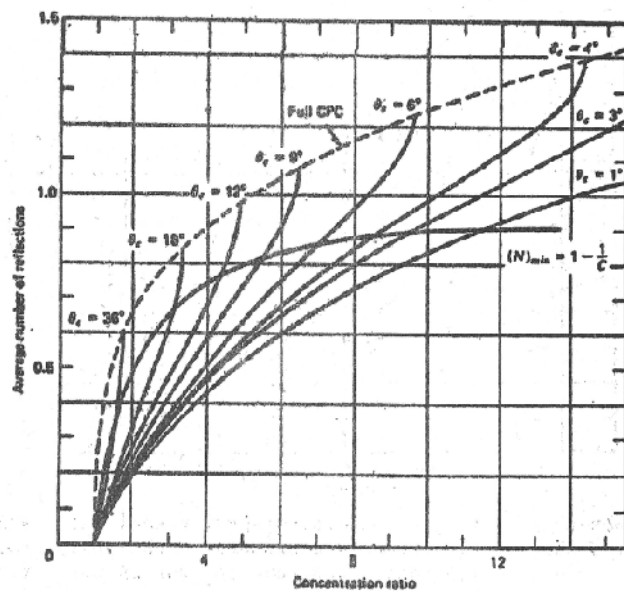
Σχήμα Γ.2.3.

Ο λόγος του ύψους προς το άνοιγμα, ο λόγος της ανακλαστικής επιφάνειας προς την επιφάνεια του ανοίγματος και ο μέσος αριθμός ανακλάσεων δίδονται στα σχέδια Γ.2.3, Γ.2.4, Γ.2.5. συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και με παράμετρο την ημιγωνία αποδοχής θ_c , για πλήρεις και αποκομμένους, τέλειους, CPC. Εάν η αποκοπή των άκρων του CPC είναι τέτοια ώστε να προκύπτει μέσος αριθμός ανακλάσεων κάτω από την καμπύλη N_{min} του Γ.2.5. τότε πρέπει να λαμβάνεται η τιμή N_{min} . Αλγεβρικές εκφράσεις για όλα τα παραπάνω μεγέθη δίδονται από τον Rabl (1976).



Λόγος της ανακλαστικής επιφάνειας προς την επιφάνεια του ανοίγματος για πλήρεις και αποκομμένους CPC, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και της ημιγωνίας αποδοχής.

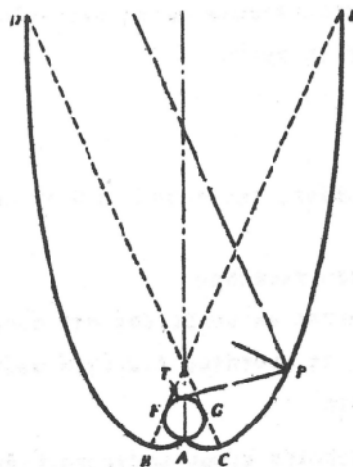
Σχήμα Γ.2.4.



Μέσος αριθμός ανακλάσεων για ελλείψεις και αποκομμένους CPC, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης και της ημιγωνίας αποβολής.

Σχήμα Γ.2.5.

Στο Σχήμα Γ.2.6 δίδεται ένα παράδειγμα συλλέκτη CPC με κυλινδρικό δέκτη, στο οποίο φαίνεται και ο τρόπος γένεσης του σχήματος της ανακλαστικής επιφάνειας που απαιτείται για τον δέκτη αυτό. Έτσι, στο τυχόν σημείο P της επιφάνειας CE πρέπει η κάθετος στο κάτοπτρο να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στον απορροφητήρα, PT, και η ευθεία που διέρχεται από το P και σχηματίζει γωνία θ_c με τον άξονα του CPC. Η παραπάνω μέθοδος γένεσης της ανακλαστικής επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε σχήμα κυρτού δέκτη, δημιουργώντας έτσι συλλέκτες τύπου CPC, οι οποίοι δεν είναι κατ' ανάγκη παραβολικοί.

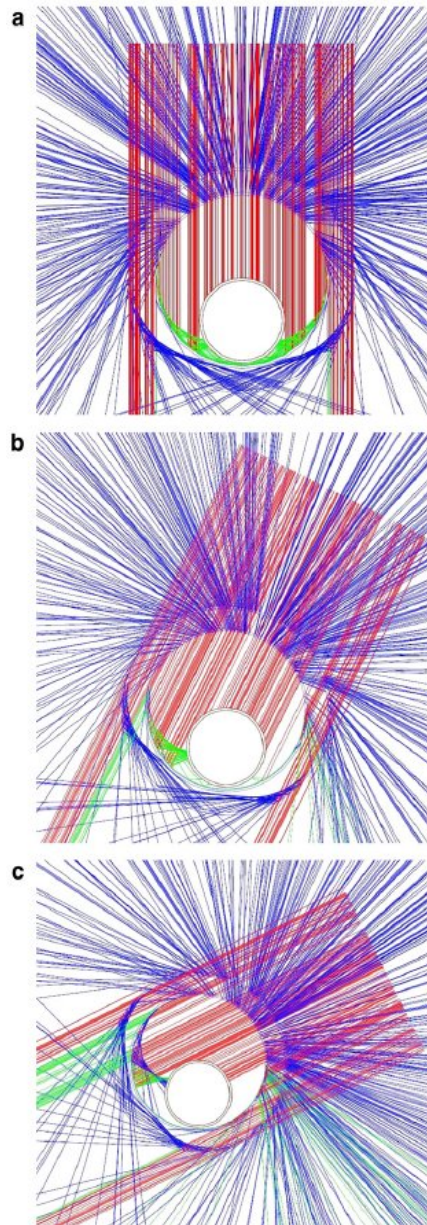


CPC με κυλινδρικό δέκτη (σωλήνα)

Σχήμα Γ.2.6

Ο CPC του παραπάνω σχήματος χρησιμοποιείται συνήθως αποκομμένος με σωληνοειδή δέκτη κενού και μάλιστα σε συστοιχία πολλών ομοίων CPC, η οποία φέρει επίπεδο υάλινο κάλυμμα [6].

Στο σχήμα Γ.2.7. βλέπουμε τα αποτελέσματα της ανίχνευσης των ακτίνων φωτός για γωνίες πρόσπτωσης (a) 0° , (b) 30° , (c) 60° . Με κόκκινο χρώμα είναι οι προσπίπτουσες ακτίνες, με πράσινο οι ανακλώμενες στον απορροφητήρα και με μπλε η διαθλώμενες και ανακλώμενες ακτίνες προς το περιβάλλον. [7]



Στο σχήμα Γ.2.7. Αποτελέσματα της ανίχνευσης των ακτίνων φωτός σε ένα CPC για γωνίες πρόσπτωσης (a) 0° , (b) 30° , (c) 60°

Γ.2.2. Απορροφούμενη ακτινοβολία.

Οι συλλέκτες CPC τοποθετούνται συνήθως με τον διαμήκη άξονα οριζόντιο και προσανατολισμένο κατά την Ανατολή-Δύση. Το επίπεδο του ανοίγματος είναι εστραμμένο προς τον ισημερινό, σχηματίζοντας γωνία β με το οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως υπάρχει δυνατότητας ρύθμισης (περιστροφής) περί τον επιμήκη άξονα, έτσι ώστε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει εντός των ορίων που επιβάλλει η γωνία αποδοχής $2\theta_c$. Αυξανόμενου του λόγου συγκέντρωσης μειώνεται η θ_c με συνέπεια την απαίτηση συχνότερης ρύθμισης.

Ο υπολογισμός της ακτινοβολίας που απορροφά ο δέκτης του CPC, με προσανατολισμό όπως περιγράφεται παραπάνω, γίνεται ως εξής [6]:

(1) Ελέγχεται αν η άμεσος ακτινοβολία προσπίπτει εντός των επιβαλλομένων ορίων. Τούτο συμβαίνει αν πληρούται η συνθήκη

$$\beta - \theta_c \leq \tan^{-1}(\tan \theta_z \cos \gamma_s) \leq (\beta + \theta_c) \quad (Γ.2.2)$$

Όπου θ_z είναι η γωνία ζενίθ και γ_s είναι το αζιμούθιο του ήλιου που υπολογίζεται συναρτήσει της ηλιακής απόκλισης δ του γεωγραφικού πλάτους Φ και της ωριαίας γωνίας ω , από τη σχέση

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \theta_z} \quad (Γ.2.3)$$

ή

$$\tan \gamma_s = \frac{\sin \omega}{\sin \varphi \cos \omega - \cos \varphi \tan \delta} \quad (Γ.2.4)$$

(2) Υπολογίζεται η αξιοποιούμενη προσπίπτουσα άμεση ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανείας του ανοίγματος $G_{b,CPC}$ από τη σχέση:

$$G_{b,CPC} = FG_{bn} \cos \theta \quad (Γ.2.5)$$

Όπου:

F = συνάρτηση ελέγχου που λαμβάνει την τιμή 1 ή 0 αν ικανοποιείται ή όχι η συνθήκη (Γ.2.2.)

G_{bn} = άμεση ακτινοβολία καθέτου επιπέδου

θ = η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας στο άνοιγμα

(3) Υποθέτοντας ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ισότροπη υπολογίζεται η αξιοποιούμενη διάχυτη ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανείας του ανοίγματος $G_{d,CPC}$ από τη σχέση

$$G_{b,CPC} = \frac{G_d}{C} \text{ αν } \beta + \theta_c < 90^\circ \quad (Γ.2.6)$$

Η από τη σχέση

$$G_{b,CPC} = G_d \left[\frac{1/c + \cos\beta}{2} \right] + G_p \left[\frac{1/c - \cos\beta}{2} \right] \text{ αν } \beta + \theta_c > 90^\circ \quad (Γ.2.7)$$

Όπου c ο λόγος συγκέντρωσης, G_d η ισότροπη διάχυτη ακτινοβολία, G η ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου και ρ ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση της εξίσωσης (Γ.2.6) επειδή $\beta + \theta_c < 90^\circ$ εισέρχεται στο CPC μόνο η διάχυτη προερχόμενη από τον ουρανό ενώ στην περίπτωση της εξίσωσης (Γ.2.7) λαμβάνεται υπόψη και η διάχυτη από τον ουρανό και η διάχυτη που προκύπτει από ανάκλαση της ολικής ακτινοβολίας στο έδαφος.

(4) Τέλος υπολογίζεται η συνολική ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανείας του ανοίγματος, S , την οποία απορροφά ο απορροφητήρας του συλλέκτη από τη σχέση:

$$S = (G_{b,CPC} \tau_{cb} \alpha_b + G_{d,CPC} \tau_{cd} \alpha_d) \tau_{CPC} \quad (Γ.2.8)$$

Όπου $\tau_{cb} \alpha_b$ = γινόμενο, για άμεση ακτινοβολία, της διαπερατότητας του καλύμματος που συνήθως τοποθετείται πάνω από τη συστοιχία των CPC, επί την απορροφητικότητα του απορροφητήρα.

$\tau_{cd} \alpha_d$ = το αντίστοιχο γινόμενο για διάχυτη ακτινοβολία

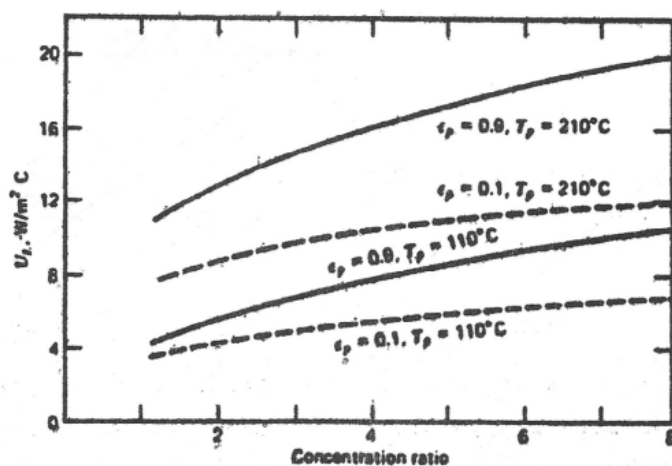
τ_{CPC} = διαπερατότητα του συγκεντρωτή, η οποία λαμβάνει υπόψη τις απώλειες ανάκλασης. Έτσι, αν ρ είναι ο συντελεστής ανάκλασης του ανακλαστήρα και N ο μέσος όρος ανακλάσεων, ισχύει

$$\tau_{CPC} = \rho^N \quad (Γ.2.9)$$

Ορισμένες παραλλαγές συλλεκτών CPC απαιτούν ενδεχομένως τροποποιήσεις στους παραπάνω γενικούς υπολογισμούς. Σαν παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση του CPC με σωληνοειδή δέκτη κενού, όπου πρέπει να ληφθεί υπόψη και το επιπρόσθετο κάλυμμα του δέκτη.

Γ.2.3. Αποδιδόμενη θερμική ισχύς

[Στο παρακάτω σχήμα δίνονται ως παράδειγμα οι τιμές του UL ανά μονάδα επιφάνειας του απορροφητήρα, συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης, τις οποίες υπολόγισε ο Rabl για συλλέκτες CPC με επίπεδο απορροφητήρα. Οι καμπύλες αντιστοιχούν σε δύο τιμές του συντελεστή εκπομπής και δύο τιμές της θερμοκρασίας του απορροφητήρα [6].



Σχήμα Γ.2.8 Συντελεστές θερμικών απωλειών συναρτήσει του λόγου συγκέντρωσης για συλλέκτες CPC με επίπεδο απορροφητήρα

Για συλλέκτες CPC με σωληνοειδή δέκτη κενού και κυλινδρική απορροφητική επιφάνεια, ο συντελεστής θερμικών απωλειών UL είναι της τάξης του $1\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, δηλαδή σημαντικά μικρότερος από τις τιμές του παραπάνω σχήματος.

Ο υπολογισμός της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος των συλλεκτών CPC μπορεί να συνοψισθεί ως εξής:

- Υπολογίζεται η απορροφούμενη ακτινοβολία S από την εξίσωση (Γ.2.8.)
- Λαμβάνεται κατ'εκτίμηση η μέση θερμοκρασία απορροφητήρα, T_p
- Για την εκτιμηθείσα τιμή T_p , λαμβάνεται από το σχήμα Γ.2.7. ή από άλλη πηγή ή υπολογίζεται ο συντελεστής θερμικών απωλειών UL
- Υπολογίζεται ο παράγων θερμικής απολαβής FR
- Υπολογίζεται η αποδιδόμενη θερμική ισχύς Q_u

- Με βάση τη Q_u υπολογίζεται νέα θερμοκρασία απορροφητήρα, T_p , και εφόσον η νέα T_p διαφέρει από την εκτίμηση του βήματος 2 επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί μέχρι συγκλίσεως.

[1] N.K. Abdul-Jabbar, S.A. Salman, *Effect of two-axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators*, *Energy Conversion and Management* 39 (10) (1998) 1073–1079.

[2] Q. Lin, S. Furbo, *Solar heating systems with evacuated tubular solar collector*, *EuroSun 98* (1998) 1–7 III.2.27.

[3] Y. Tripanagnostopoulos, P. Yianoulis, S. Papaefthimiou, M. Souliotis, Th. Nousia, *Cost effective asymmetric CPC solar collectors*, *Renewable Energy* 16 (1999) 628–631.

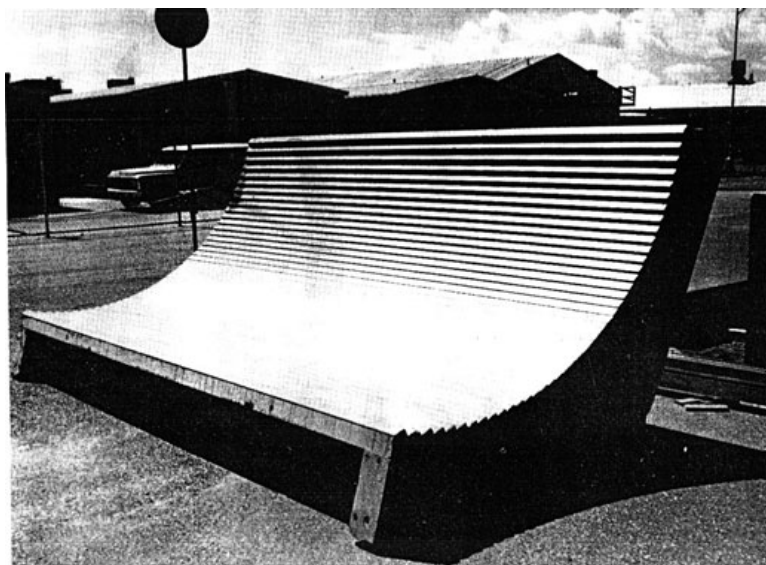
[4] D.R. Mills, I.M. Bassett, G.H. Derrick, *Relative cost-effectiveness of CPC reflector designs suitable for evacuated absorber tube solar collectors*, *Solar Energy* 36 (3) (1986) 199–206.

[5] M. Ronnelid, B. Perers, B. Karlsson, *Construction and testing of a large-area CPC-collector and comparison with a flat plate collector*, *Solar Energy* 57 (3) (1996) 177–184.

[6] “Θερμικά-ηλιακά Συστήματα μέρος πρώτο”, Κ. Α. Αντωνόπουλος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004

[7] “An evaluation on thermal performance of CPC solar collector” Yong Kim , GuiYoung Han, Taebeom Seo, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (2008) 446 – 457

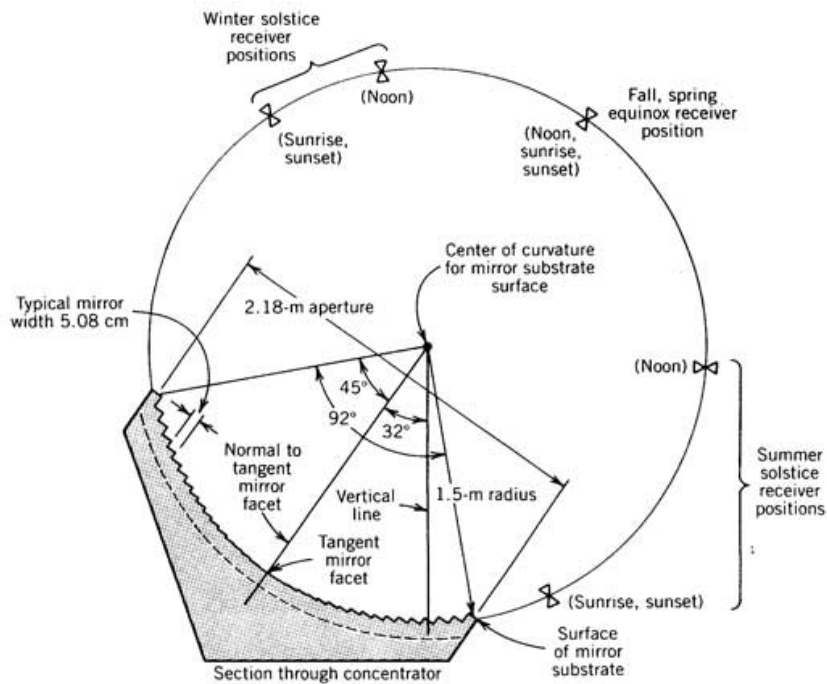
Γ.3 Ηλιακός συλλέκτης σταθερού κατόπτρου (FMSC) (Fixed-mirror solar collector)



Σχήμα Γ.3.1. Ηλιακός συλλέκτης σταθερού κατόπτρου χωρίς να έχει εγκατεστημένο δέκτη

Γ.3.1. Γενικά

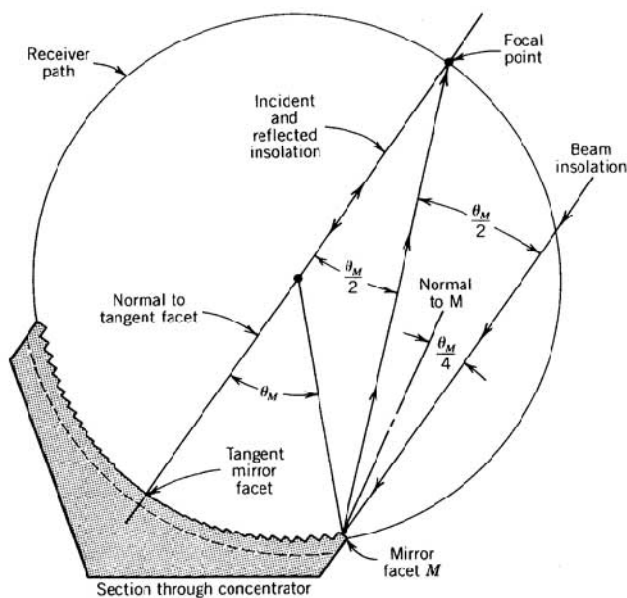
Ο όρος “Ηλιακός συλλέκτης σταθερού κατόπτρου” είναι ο γενικός όρος που εφαρμόζεται στο είδος του συλλέκτη σταθερού ανοίγματος όπως αυτός στο παραπάνω σχήμα. Άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο άνοιγμα του συλλέκτη και συγκεντρώνεται σε ένα γραμμικό δέκτη με ανάκλαση από επίπεδα κάτοπτρα. Τα κάτοπτρα παράγουν μια γραμμή συγκεντρωμένου φωτός η οποία μετακινείται κατά μήκος μιας κυκλικής διαδρομής κατά τη διάρκεια της μέρας εξαιτίας της πορείας του ήλιου στον ουρανό. Τα κάτοπτρα είναι τοποθετημένα σε μια κυλινδρική στήριξη όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η γραμμή εστίασης των κατόπτρων βρίσκεται στο περίγραμμα αυτού του κυλίνδρου. Ο άξονας περιστροφής του δέκτη βρίσκεται στο της καμπυλότητας. Διάφορες θέσεις του δέκτη σε διαφορετικές εποχές του χρόνου φαίνονται επίσης στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα Γ.3.2. Ηλιακός συλλέκτης σταθερού κατόπτρου που δείχνει τις ημερήσιες και ετήσιες θέσεις του δέκτη

Η ευθυγράμμιση κάθε κατόπτρου στη κυλινδρική στήριξη είναι συνάρτηση της θέσης του. Το πρώτο βήμα για να καθοριστεί ο κατάλληλος προσανατολισμός είναι να εντοπιστεί το εφαπτόμενο κάτοπτρο όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (tanged mirror facet) . Η επιφάνεια αυτού του κατόπτρου είναι εφαπτόμενη της επιφάνειας του κυλίνδρου που ορίζεται από το περίγραμμα της κυλινδρικής στήριξης. Η κάθετη στην επιφάνεια του εφαπτόμενου κατόπτρου διέρχεται εξ ορισμού από το κέντρο της καμπυλότητας της κυλινδρικής στήριξης, και κατά συνέπεια από τον άξονα περιστροφής του δέκτη. Ο προσανατολισμός της κάθετης κάθε άλλου κατόπτρου συνδέεται με τη γωνιακή απόσταση από το εφαπτόμενο κάτοπτρο.

Όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα η γωνία M που σχηματίζεται μεταξύ της κάθετης οποιουδήποτε κατόπτρου και της κάθετη στο εφαπτόμενο κάτοπτρο είναι ίση με $\theta_M/4$, όπου θ_M είναι η γωνιακή απόσταση των δύο κατόπτρων.



Σχήμα Σχήμα Γ.3.3. Καθορισμός της κλίσης των κατόπτρων για ένα συλλέκτη FMSC

Για να δειχθούν αυτές οι γωνιακές σχέσεις ας θεωρήσουμε τη περίπτωση που η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι παράλληλη με τη κάθετη στο επαπτόμενο κάτοπτρο όπως στο παραπάνω σχήμα. Η ανακλώμενη ακτινοβολία θα περάσει επίσης από το κέντρο της καμπυλότητας (η γωνία πρόσπτωσης για το επαπτόμενο κάτοπτρο είναι δηλαδή μηδέν). Το κάτοπτρο στη θέση M πρέπει να προσανατολιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η ανακλώμενη από αυτό ηλιακή ακτινοβολία να κατευθυνθεί προς το σημείο εστίασης. Αν η γωνιακή απόσταση μεταξύ του επαπτόμενου κατόπτρου και του κατόπτρου στη θέση M είναι θ_M , η γωνιακή απόσταση μεταξύ της ανακλώμενης ακτινοβολίας από το επαπτόμενο κάτοπτρο (και άρα από τη κάθετη στο επαπτόμενο κάτοπτρο) και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από το κάτοπτρο M είναι ίση με $\theta_M/2$.

Από τη γωνιακή σχέση των παράλληλων γραμμών, η γωνία μεταξύ της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και της ανακλώμενης από το κάτοπτρο M ακτινοβολίας είναι επίσης $\theta_M/2$. Έτσι αφού η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, η γωνία μεταξύ της ερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της κάθετης στο κάτοπτρο M είναι η μισή της $\theta_M/2$, άρα $\theta_M/4$. Δεδομένου ότι η προσπίπτουσα δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας θεωρήθηκε παράλληλη με τη κάθετη στο επαπτόμενο κάτοπτρο τότε $\theta_M/4$ είναι και η γωνία μεταξύ της κάθετης στο κάτοπτρο M και στη κάθετη στο επαπτόμενο κάτοπτρο. Αυτό ορίζει τη θέση του κατόπτρου M σε σχέση με το επαπτόμενο κάτοπτρο. Οι θέσεις όλων των υπόλοιπων κατόπτρων ορίζονται με αυτό το τρόπο.

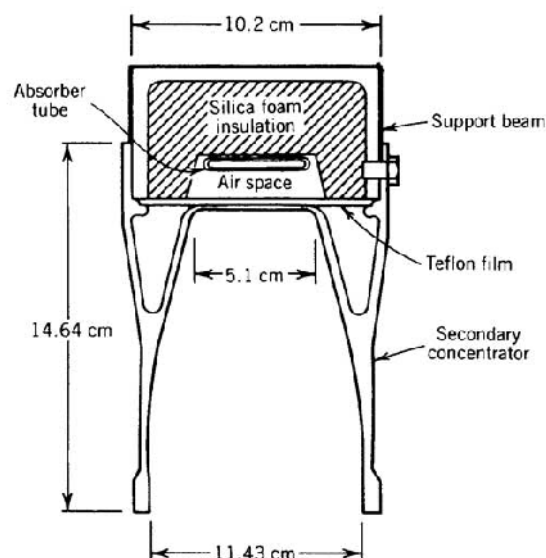
Συνήθως, το επαπτόμενο κάτοπτρο για έναν ηλιακό συλλέκτη σταθερού κατόπτρου ο οποίος είναι προσανατολισμένος Ανατολικά/Δυτικά τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε η κάθετη σε αυτό να

είναι παράλληλη με την άμεση κάθετη ηλιακή ακτινοβολία το ηλιακό μεσημέρι στις ισημερίες. Αυτό συνήθως αναφέρεται ως κλίση γεωγραφικού πλάτους. Η κλίση γεωγραφικού πλάτους τείνει να μεγιστοποιεί την ετήσια θερμική παραγωγή ενέργειας εκτός από περιοχές όπου εξαιτίας της εποχιακής κάλυψης του ουρανού με σύννεφα ενθαρρύνεται η μεγιστοποίηση της απόδοσης το καλοκαίρι ή το χειμώνα. Με κλίση γεωγραφικού πλάτους, η ηλιακή απόκλιση σε σχέση με το άνοιγμα του συλλέκτη σταθερού κατόπτρου κυμαίνεται στις 23.5 μοίρες από κάθε πλευρά των ηλιακών ισημεριών κατά τη διάρκεια του έτους.

Σε περίπτωση που ο συλλέκτης είναι προσανατολισμένος Βόρεια/Νότια, έχει τοποθετηθεί οριζόντια στο έδαφος με τη κάθετη στο εφαπτόμενο κάτοπτρο να είναι κατακόρυφη για να παρέχει συμμετρικές επιδόσεις το πρωί και το απόγευμα. Ένας τέτοιος συλλέκτης έχει σπάνια νότια κλίση εξαιτίας της δαπάνης που απαιτείται για να υποστηριχθεί μια κατασκευή με μεγάλη κλίση [1].

Γ.3.2. Περιγραφή ενός πρωτοτύπου συλλέκτη FMSC

Ένας δέκτης για ένα τυπικό ηλιακό συλλέκτης τύπου FMSC κατασκευάστηκε από την General atomic company και φαίνεται στο σχήμα 3.14. Η διατομή ενός τυπικού δέκτη για τους συλλέκτες σταθερού κατόπτρου που κατασκευάστηκε από τη General Atomic φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η δοκός υποστήριξης του δέκτη ήταν αυλάκι από διελασμένο αλουμίνιο. Ο απορροφητήρας ήταν ένας ορθογώνιος σωλήνας μέσα στο αυλάκι και αφρός διοξειδίου του πυριτίου χρησιμοποιήθηκε ως μονωτικό υλικό για να μειωθούν οι θερμικές απώλειες στο δέκτη.

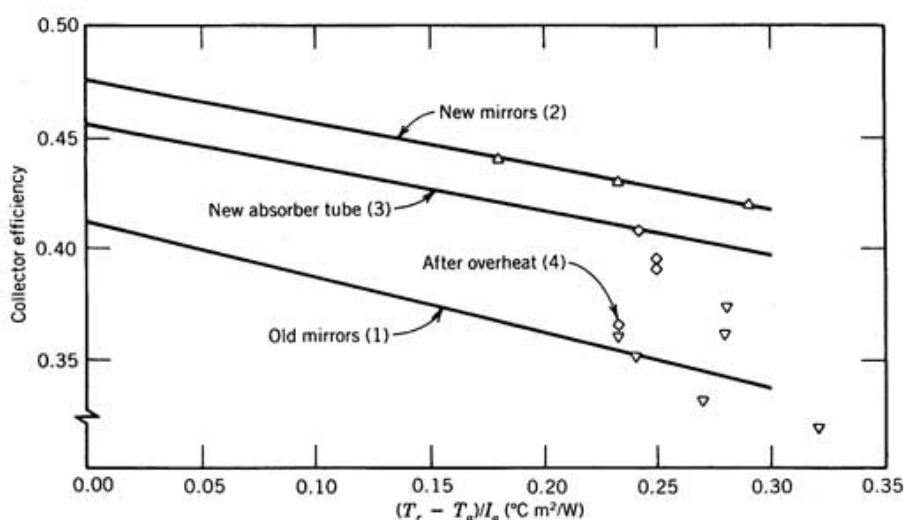


Σχήμα Γ.3.4 Δέκτης ενός FMSC

Ο απορροφητικός σωλήνας ήταν επικαλυμμένος με μια επιλεκτική μαύρη επίστρωση ώστε να μειωθεί η απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας. Η τοποθέτηση του απορροφητικού σωλήνα επέτρεπε αξονική κίνηση για να αντισταθμίσει θερμικές διαστολές και συστολές κατά τη διάρκεια του ημερήσιου θερμικού κύκλου στο δέκτη. Η πλευρά της απορροφητικού σωλήνα που ήταν εκτεθειμένη στην ακτινοβολία ήταν καλυμμένη με μια διαφανή μεμβράνη από τεφλόν για τη μείωση των θερμικών απωλειών λόγω συναγωγής. Ένας σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτής (CPC) ήταν τοποθετημένος στην είσοδο της κοιλότητας του δέκτη για να προσφέρει δευτερεύουσα συγκέντρωση. Η δευτερεύουσα συγκέντρωση αποζημιώνει για τυχόν ανακρίβειες στη τοποθέτηση των κατόπτρων που θα οδηγούσαν σε διεύρυνση ή ανακρίβεια του επίκεντρου της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Η ανακλώμενη επιφάνεια του δεύτερου συγκεντρωτή ήταν από στιλπνό ανοδιωμένο φύλλο αλουμινίου [1].

Γ.3.3. Απόδοση

Η αποδοτικότητα ενός πρωτοτύπου συλλέκτη σταθερού κατόπτρου δοκιμάστηκε στα εργαστήρια της Sandia National Laboratories και φαίνεται στη παρακάτω διάγραμμα. Ο συγκεντρωτής δοκιμάστηκε κοντά στο μεσημέρι για να εξαλείψει πιθανά σφάλματα και φαινόμενα συνημιτόνου. Υπήρχε όμως σε μικρό βαθμό η επίδραση του φαινομένου του συνημιτόνου αφού οι δοκιμές έγιναν τέλη Αυγούστου και το σταθερό άνοιγμα του συλλέκτη δεν θα μπορούσε να έχει κλίση τέτοια ώστε να είναι κάθετη στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Στα παρακάτω αποτελέσματα η κάθετη στο εφαπτόμενο κάτοπτρο είχε κλίση 32 μοίρες σε σχέση με τη κατακόρυφο.



Σχήμα Γ.3.5. Αποτελέσματα επιδόσεων για ένα συλλέκτη FMSC

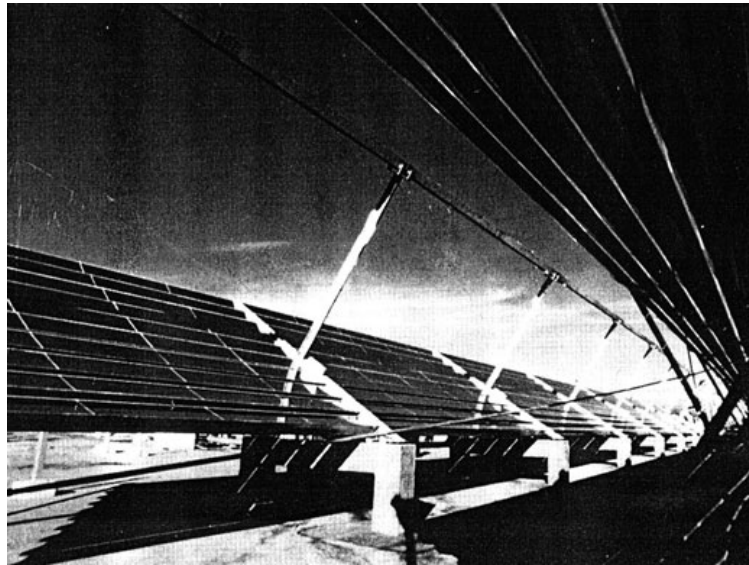
Την ημέρα έναρξης του πειράματος η γωνία ανύψωσης ήταν περίπου 68 μοίρες με αποτέλεσμα η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής δέσμης με το άνοιγμα του συλλέκτη ήταν περίπου 10 μοίρες. Αυτό

δημιούργησε ένα μικρό φαινόμενο συνημιτόνου της τάξης του 0.99, το οποίο δεν λήφθηκε υπόψη όταν συντάχθηκε το διάγραμμα. Παρόλο που η επιρροή του είναι μικρή, επισημαίνει τις πιθανότητες για συστηματικά σφάλματα που πιθανόν να περιλαμβάνονται σε δημοσιευμένα δεδομένα επιδόσεων. Τέτοια σφάλματα μπορούν κάποιες φορές να διορθωθούν ή να αντισταθμιστούν αν γίνουν γνωστά.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα αποκαλύπτουν τον αρκετά μεγάλο αντίκτυπο που έχει η υποβάθμιση των στοιχείων του συλλέκτη στην απόδοσή του. Η πρώτη σειρά πειραμάτων έγινε σε ένα συλλέκτη του οποίου τα κάτοπτρα των οποίων η ανακλαστική ικανότητα είχε υποβαθμιστεί στο 0.88 από την αρχική κατοπτρική ανακλαστικότητα του 0.92 πριν τη δοκιμή. Η εγκατάσταση νέων κατόπτρων με ανακλαστικότητα στο 0.95 είχε ως αποτέλεσμα της απότομη αύξηση της αποτελεσματικότητας του συλλέκτη (καμπύλη 2 στο σχήμα). Μετά την έναρξη των δοκιμών υπήρξε απώλεια της ροής υγρών που είχε ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του δέκτη. Προκειμένου να συνεχιστούν τα πειράματα εγκαταστάθηκε ένας νέος δέκτης που δεν ήταν σχεδιασμένος για το συγκεκριμένο συλλέκτη (καμπύλη 3) [1].

[1] *“Power From The Sun Book, William B. Stine και Michael Geyer*
(<http://www.powerfromthesun.net/book.htm>)

Γ.4. Ηλιακός συλλέκτης μετακινούμενου κατόπτρου και στατικού δέκτη (SLATS) (Moving reflector stationary receiver)



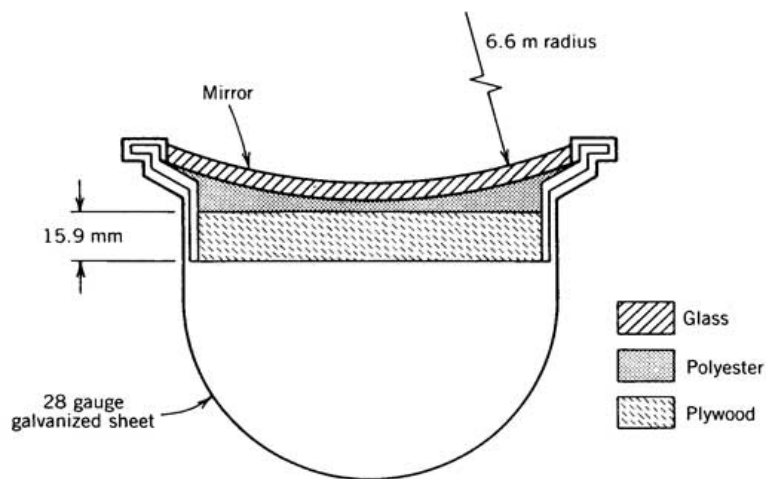
Σχήμα Γ.4.1. Συλλέκτης SLATS

Γ.4.1. Γενικά

Η συγκεκριμένη ιδέα βασίζεται σε μεμονωμένα κινούμενα κάτοπτρα που εστιάζουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ένα γραμμικό δέκτη όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα. Παρόλο που τα μεμονωμένα κάτοπτρα περιστρέφονται περί γραμμικών αξόνων για να επικεντρώσουν την προσπίπτουσα δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας στο στατικό δέκτη, το πλαίσιο (και άρα το άνοιγμα του ανακλαστήρα) που τα συγκρατεί παραμένει σταθερό. Άρα η ιδέα αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί ως συγκεντρωτής σταθερού ανοίγματος, όπου το άνοιγμα του συγκεντρωτή ορίζεται από το ορθογώνιο πλαίσιο του ανακλαστήρα. Καθώς τα μεμονωμένα κάτοπτρα μετακινούνται για να διατηρήσουν τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία προς το δέκτη, η σκίαση και τα κενά που μπορούν να δημιουργηθούν στο συγκεντρωτή παράγουν τα ίδια αποτελέσματα με τη γωνιακή πρόσπτωση σε ένα σταθερό επίπεδο πλαίσιο που έχει κλίση με την ίδια γωνία. Έτσι με βάση την επιφάνεια του ανακλαστήρα ένας τέτοιος συγκεντρωτής έχει προσπίπτουσα ακτινοβολία στο άνοιγμά του ίση με την ακτινοβολία ενός επίπεδου συλλέκτη που έχει κλίση με την ίδια γωνία [1].

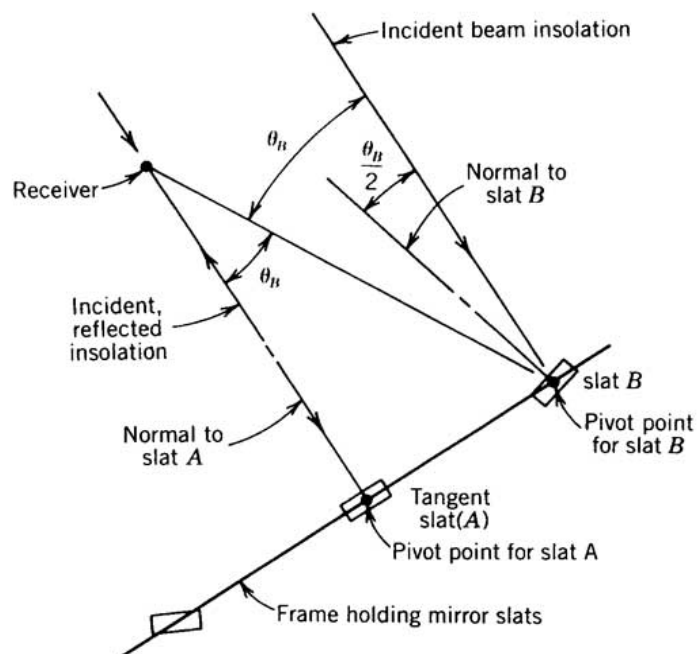
Γ.4.2. Περιγραφή ενός πρωτοτύπου συλλέκτη SLATS

Η διατομή ενός μεμονωμένου κατόπτρου που δοκιμάστηκε στα εργαστήρια της Sandia φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ένας τυπικός συγκεντρωτής συνίσταται από 2 τμήματα που το καθένα περιέχει 10 κάτοπτρα.. Κάθε κάτοπτρο έχει κυλινδρική περιφέρεια αφού η χρήση της έχει ως αποτέλεσμα την μείωση έκκεντρων εκτροπών δεδομένου ότι η δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας από οποιοδήποτε σημείο βλέπει την ίδια καμπυλότητα. Αφού ο απορροφητήρας παραμένει σταθερός, η κάθετη στο άνοιγμα κάθε κατόπτρου πρέπει να διχοτομήσει τη γωνία που καθορίζεται από τον ήλιο, το κάτοπτρο και το απορροφητήρα. Αυτή η σχέση καθορίζει τη σχετική κλίση κάθε κατόπτρου. Οι σχετικές θέσεις κάθε κατόπτρου μπορούν να καθοριστούν χρησιμοποιώντας την έννοια του εφαπτόμενου κατόπτρου που περιγράφηκε στο κεφάλαιο σχετικά με τους συλλέκτες FMSC.



Σχήμα Γ.4.2. Τομή του ανακλαστήρα ενός συλλέκτη SLATS

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το εφαπτόμενο κάτοπτρο (slat A). Η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας και τη γραμμή που στοχεύει το δέκτη για το κάτοπτρο slat B είναι θ_B . Από τη στιγμή που η κάθετη στο άνοιγμα του κατόπτρου slat B πρέπει να διχοτομεί η γωνία θ_B τότε η γωνία μεταξύ τις κάθετης του slat B και τις κάθετης του ανοίγματος του συλλέκτη είναι $\theta_B/2$. Αυτό καθορίζει τη γωνία κλίσεως του κατόπτρου slat B σε σχέση με τη κάθετη στο άνοιγμα του συλλέκτη.

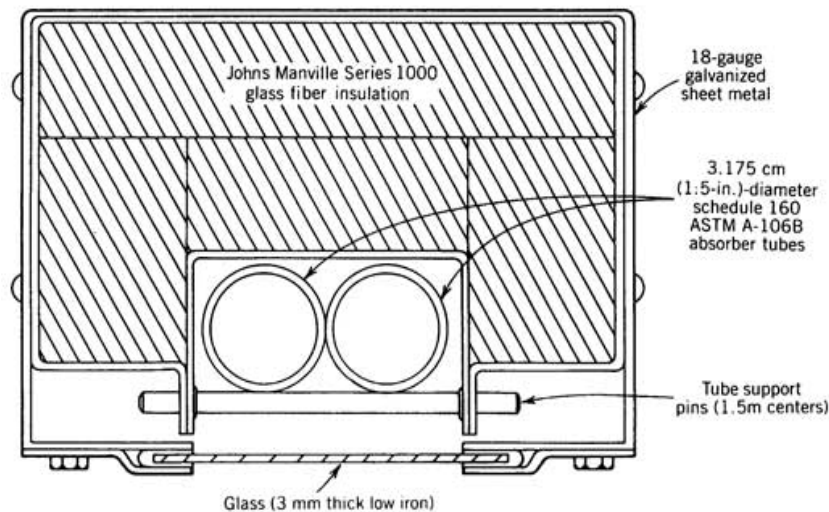


Σχήμα Γ.4.3.. Ορισμός των σχετικών κλίσεων για συλλέκτη SLATS

Από τη στιγμή που θα καθοριστεί η σχέση μεταξύ όλων των κατόπτρων τότε αυτοί μπορούν να ομαδοποιηθούν και να λειτουργούν ως μονάδα. Αν η συνιστώσα τις δέσμης τις ηλιακής ακτινοβολίας στο B/N επίπεδο αλλάξει κατά κάποια γωνία, τότε κάθε κάτοπτρο πρέπει να περιστραφεί κατά μισή από αυτή τη γωνία από την αρχική του θέση. Συνήθως τα κάτοπτρα μετακινούνται ως σύνολο χρησιμοποιώντας μιας αλυσίδα και ένα μηχανισμό μετάδοσης.

Τα οπτικά χαρακτηριστικά του συγκεντρωτή SLATS παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον γιατί το κάθε κάτοπτρο είναι κατασκευασμένο με την ίδια ακτίνα καμπυλότητας. Η αποτελεσματική εστιακή γραμμή για κάθε κάτοπτρο είναι διαφορετική. Επιπλέον η εστιακή γραμμή κάθε κατόπτρου κινείται κατά τη διάρκεια τις μέρας καθώς η γωνία πρόσπτωσης από τον ήλιο αλλάζει. Στη πράξη με ένα συλλέκτη SLATS μπορεί να επιτευχθεί τις λόγος συγκέντρωσης τις τάξης του 35.

Ο δέκτης που σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιηθεί από τα εργαστήρια Sandia φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο δέκτης σχεδιάστηκε για να λειτουργήσει με νερό που έφτανε τις 315°C. Γι αυτό το λόγο τα τοιχώματα του σωλήνα του δέκτη ήταν αρκετά παχιά (4.78mm). Ο δέκτης είχε ρυθμιστεί σε σχήμα U και ήταν ελεύθερος να επεκταθεί πλαγίως και έτσι δεν χρειαζόντουσαν αντισταθμιστικά μέτρα λόγω θερμικής διαστολής. Ο σωλήνας του δέκτη ήταν μονωμένος από τις τις πλευρές εκτός από τη πλευρά που έβλεπε στα κάτοπτρα. Μια πλάκα από γυαλί κάλυπτε το άνοιγμα του συλλέκτη για να μειώσει τις απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής.

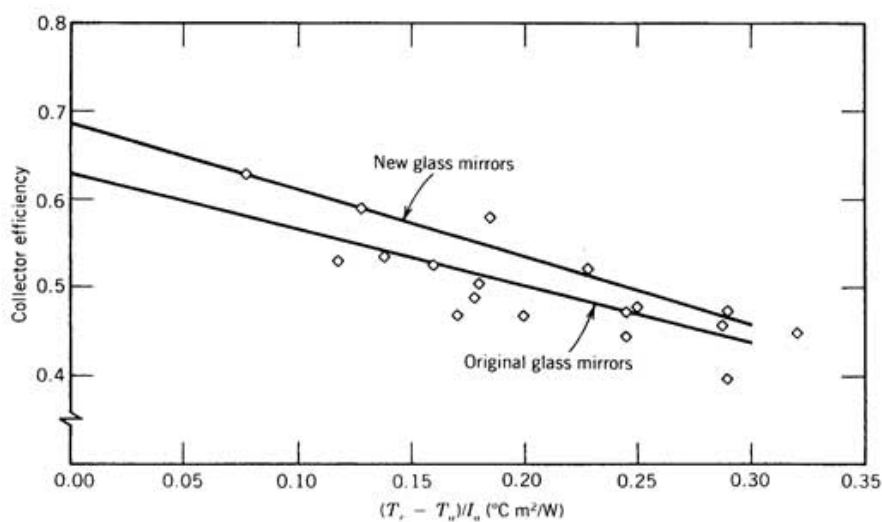


Σχήμα Γ.4.4. Τομή του δέκτη εντός συστήματος SLATS

Επειδή τα παχιά τοιχώματα του σωλήνα του δέκτη έπρεπε να αντέχουν την πίεση των 10.6 Μρα του νερού στους 315°C και τη μεγάλη θερμοχωρητικότητα του νερού, η θερμική μάζα του δέκτη ήταν πολύ μεγάλη. Δεδομένου ότι ο δέκτης κρύνει σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος το βράδυ η ενέργεια που είναι αναγκαία για να θερμάνει το δέκτη σε θερμοκρασία λειτουργίας την ημέρα χάνεται. Αυτό αποτελεί μια σημαντική απώλεια ενέργειας. Ένα επιπλέον πρόβλημα στο σχεδιασμό με νερό ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι η ψύξη. Στο συλλέκτη που δοκιμάστηκε στα εργαστήρια της Sandia υπήρχε προστασία από το φαινόμενο της ψύξης με τη κυκλοφορία ζεστού νερού στο δέκτη κάθε φορά που η θερμοκρασία έπεφτε χαμηλότερα από το σημείο ψύξης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα επιπλέον θερμικές απώλειες [1].

Γ.4.3. Απόδοση του πρωτοτύπου

Η θερμική απόδοση ενός πρωτοτύπου συλλέκτη SLATS δοκιμάστηκε στα εργαστήρια της Sandia το 1979 όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η αρχική δοκιμή οδήγησε στην εγκατάσταση νέων κατόπτρων που είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της οπτικής απόδοσης από 0.63 σε 0.70 . Σημειώνεται ότι η κλίση της καμπύλης $\Delta T/I$ άλλαξε ανάμεσα στις δύο δοκιμές. Η αλλαγή αυτή δεν θα έπρεπε να επηρεάζει σημαντικά το συντελεστή θερμικών απωλειών.



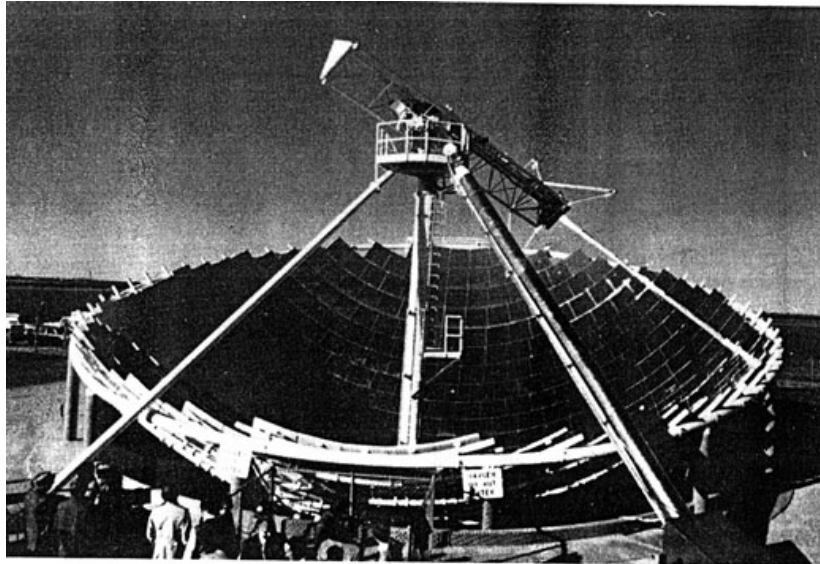
Σχήμα Γ.4.5. Απόδοση του συλλέκτη SLATS

Λόγω της μεγάλης διασποράς των σημείων οι κλίσεις των δύο γραμμών θα μπορούσαν, μέσα στο πειραματικό σφάλμα, να ήταν ίδιες. Επιπλέον τα δεδομένα των δοκιμών λήφθηκαν διαφορετικές ημέρες εξαιτίας της φύσης των διαδικασιών των δοκιμών, και η επανευθυγράμμιση των κατόπτρων ήταν αναγκαία αρκετές φορές την ημέρα. Τα παραπάνω μαζί με τη μεγάλη διασπορά δείχνουν τη σημασία της κατανόησης της εγκυρότητας των δεδομένων των δοκιμών [1].

[1] "Power From The Sun Book, William B. Stine και Michael Geyer
(<http://www.powerfromthesun.net/book.htm>)

Γ.5. Συλλέκτης σταθερού κατόπτρου και μετακινούμενου εστιακού σημείου (FMDF)

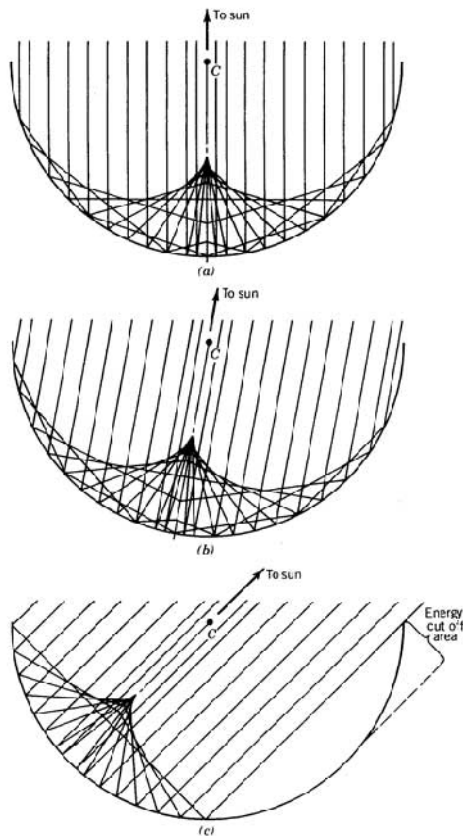
(Fixed mirror distributed focus)



Σχήμα Γ.5.1. Συλλέκτης FMDF

Γ.5.1. Γενικά

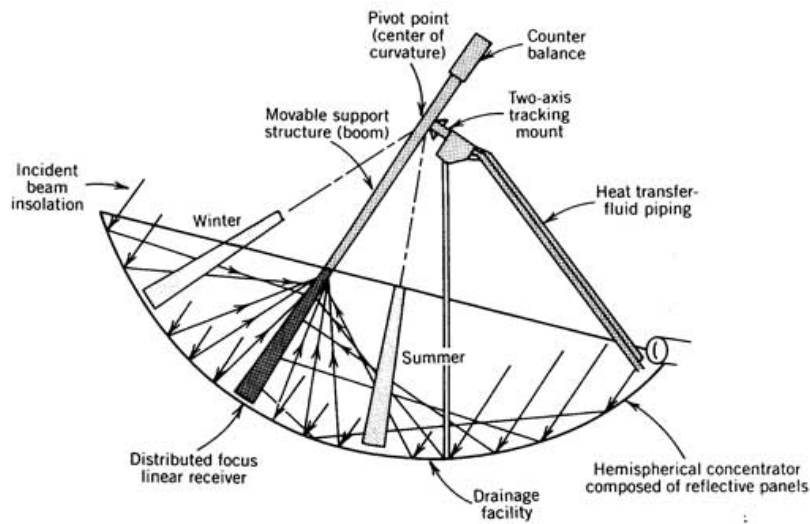
Η ιδέα ενός συλλέκτη σταθερού κατόπτρου με μετακινούμενο εστιακό σημείο φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Για προφανής λόγους η ιδέα αυτή αναφέρεται και ως “ηλιακό κύπελλο” και έχει το ακρωνύμιο FMDF (Fixed mirror distributed focus). Ο συλλέκτης αυτός έχει ένα κάτοπτρο σχήματος σφαιρικού κυπέλλου το οποίο συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε μια εστιακή γραμμή που διέρχεται από το κέντρο της σφαίρας και δείχνει τον ήλιο. Η ιδέα μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή από τα παρακάτω διαγράμματα [1].



Σχήμα Γ.5.2. Χαρακτηριστικά των σφαιρικών οπτικών

Γ.5.2. Δέκτης

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, η δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο άνοιγμα ενός σφαιρικού ανακλαστήρα ανακλάται σε μια γραμμή που περνάει από το κέντρο της καμπυλότητας και δείχνει τον ήλιο. Έτσι ο δέκτης πρέπει να είναι ρυθμισμένος ώστε να συλλαμβάνει την ενέργεια που περνά από το εστιακό σημείο. Επιπλέον, από τη στιγμή που η εστιακή γραμμή μετακινείται αφού αλλάζει η σχετική θέση του ήλιου, ο γραμμικός δέκτης πρέπει να έχει τη δυνατότητα να κινείται με δύο βαθμούς ελευθερίας. Τυπικά, η κίνηση του δέκτη επιτυγχάνεται περιστρέφοντας τη κατασκευή του δέκτη περί του κέντρου της καμπυλότητας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [1].



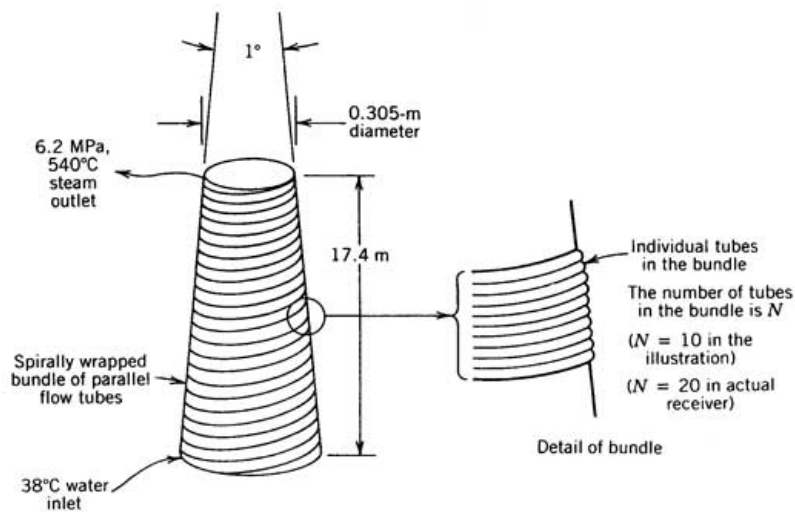
Γ.5.3. Έλεγχος και μηχανισμός παρακολούθησης

Υπάρχουν δύο διαφορετικές στρατηγικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση του ήλιου. Η μία στρατηγική είναι η παρακολούθηση με βάση το αζιμούθιο/άνυψωση και η άλλη είναι η πολική παρακολούθηση.

Η μέθοδος παρακολούθησης Αζ/Αν εξαρτάται συνήθως από την αλληλεπίδραση με έναν υπολογιστή που υπολογίζει το στιγμιαίες γωνίες του αζιμούθιου και της ανύψωσης του ήλιου και στη συνέχεια οδηγεί το δέκτη να στοχεύει σε αυτή τη κατεύθυνση. Σε ένα πολικό σύστημα παρακολούθησης, ο δέκτης περιστρέφεται σε έναν άξονα παράλληλο με τον άξονα περιστροφής της γης κατά τη σταθερή ταχύτητα των 15° ανά ώρα για να αντισταθμίσει τη περιστροφή της γης. Η κλίση του γραμμικού δέκτη σε σχέση με το πολικό άξονα προσαρμόζεται καθημερινά, αν χρειάζεται, για να αντισταθμίσει μεταβολές στην απόκλιση του ήλιου. Η κλίση του δέκτη σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο είναι ίση με τη γωνία ανύψωσης του ήλιου [1].

Γ.5.4. Περιγραφή ενός πρωτοτύπου συλλέκτη FMDF

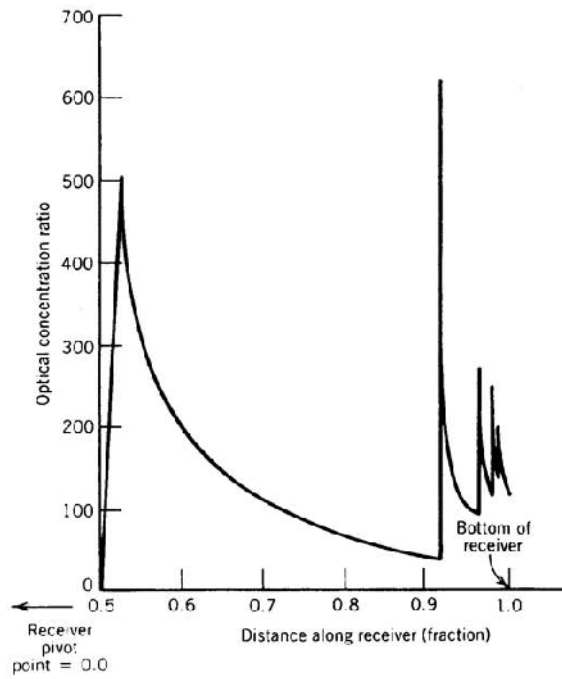
Ο συγκεντρωτής FMDF που φαίνεται στην εικόνα Γ.5.1. είναι μέρος από ένα μεγάλο έργο που προβλέπεται για κατασκευή στο Τέξας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Ο συγκεντρωτής χρησιμοποιείται για να παράγει ατμό της 510°C για να ελέγξει τη δυνατότητα της FMDF στην ηλεκτροπαραγωγή. Ο δέκτης αποτελείται από ελικοειδής δέσμες που η κάθε μία περιλαμβάνει 20 ξεχωριστούς σωλήνες της φαίνεται στη παρακάτω εικόνα. Αφού η εστιακή γραμμή της σφαιρικού κυπέλλου εκτείνεται μόνο μέχρι τη μέση της ακτίνας, οι δέσμες των σωλήνων που περιλαμβάνουν το δέκτη φτάνουν μόνο μέχρι τη μέση του σημείου περιστροφής της κατασκευής στήριξης του δέκτη. Η δομή του δέκτη ήταν αρχικά κωνική κατά 1 βαθμό.



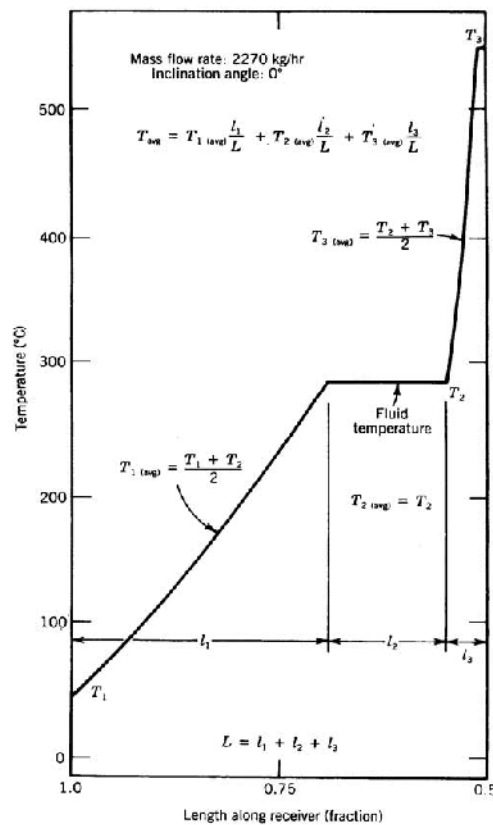
Σχήμα Γ.5.4. Διάγραμμα του δέκτη ενός συλλέκτη FMDF

Υπάρχει η αίσθηση ότι το κόστος κατασκευής ενός κωνικού δέκτη αντισταθμίζει οποιοδήποτε μικρό κέρδος. Στη πράξη η θερμοκρασία εισόδου του νερού θα ήταν περίπου 38°C και ο εξαγόμενος ατμός θα είχε θερμοκρασία 540°C με πίεση περίπου 6.2MPa .

Η κατανομή της ροής κατά μήκος του δέκτη δεν είναι ομοιόμορφη, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτό το είδος κατανομής της ροής προκαλεί αύξηση στο προφίλ της θερμοκρασίας κατά μήκος του δέκτη που φαίνεται στο σχήμα Γ.5.5. Το θερμοκρασιακό προφίλ που φαίνεται στο σχήμα Γ.5.6. είναι για μια συγκεκριμένη δοκιμή αλλά είναι τυπικό και απεικονίζει τις τρεις περιοχές μεταφοράς θερμότητας στο δέκτη – προθέρμανση, βρασμός, υπερθέρμανση. Σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε ότι όταν το συγκρίνουμε με το προφίλ της ροής, η περιοχή βρασμού του δέκτη καταλαμβάνει μια από τις περιοχές υψηλότερης ροής. Σε εκείνο το σημείο είναι που εμφανίζονται οι υψηλότεροι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και εμφανίζεται η μεγαλύτερη εισροή θερμότητας ως αποτέλεσμα της αλλαγής φάσης. Η περιοχή βρασμού του δέκτη είναι λοιπόν συμβατή με τη κατανομή της ροής. Προς το τέλος του δέκτη υπάρχει μια μικρή περιοχή υπερθέρμανσης.



Σχήμα Γ.5.5. Κατανομή της ροής κατά μήκος ενός δέκτη FMDF



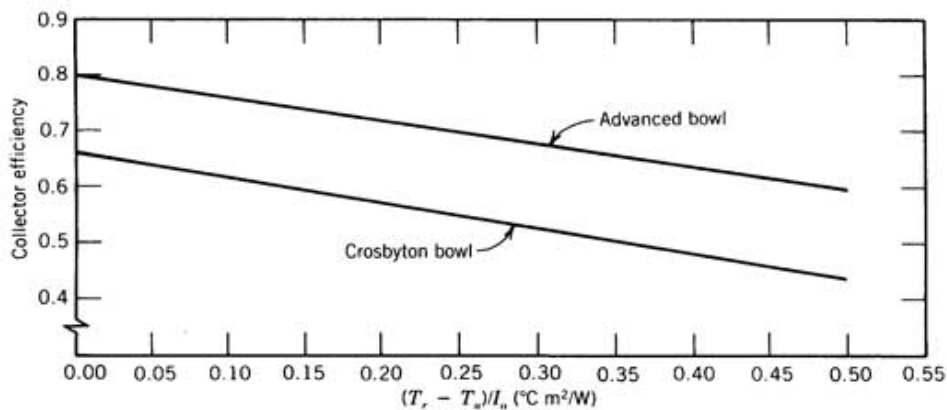
Σχήμα Γ.5.6. Κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος ενός δέκτη FMDF

Δεδομένου ότι ο δέκτης FMDF χρησιμεύει ως λέβητας, πρέπει να τροφοδοτεί το δέκτη επεξεργασμένο νερό. Ο ατμός που παράγεται θα μπορούσε σε μια εγκατάσταση παραγωγής

ενέργειας να τροφοδοτήσει ένα ατμοστρόβιλο [1].

Γ.5.5. Απόδοση του πρωτοτύπου

Παρά το γεγονός ότι ο συγκεντρωτής FMDF δεν έχει υποβληθεί στις δοκιμές που έχουν υποβληθεί άλλοι συγκεντρωτές εστιακής γραμμής, είναι πιθανό να εκτιμηθεί η καμπύλη απόδοσης $\Delta T/I$. Η οπτική απόδοση του πρωτοτύπου FMDF στο Τέξας ήταν 67% (το σημείο τομής του άξονα απόδοσης με τη καμπύλη $\Delta T/I$) και η τιμή του συνολικού συντελεστή θερμικών απωλειών στο δέκτη έχει εκτιμηθεί στο 0.43 (η κλίση της καμπύλης). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη καμπύλη απόδοσης του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα Γ.5.7. Προβλεπόμενη απόδοση ενός συλλέκτη FMDF

Από τη στιγμή που η θερμοκρασία στο δέκτη δεν αυξάνεται γραμμικά με το μήκος του δέκτη ως αποτέλεσμα της αλλαγής φάσης η μέση θερμοκρασία του δέκτη δεν είναι απλά ο μέσος όρος εισόδου και εξόδου των ρευστών στο δέκτη. Μια λογική προσέγγιση για τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας είναι να υπολογιστεί πρώτα η μέση θερμοκρασία της περιοχής προθέρμανσης, βρασμού και υπερθέρμανσης ξεχωριστά. Αυτές οι μέσες τιμές σταθμισμένες με το μήκος των αντίστοιχων περιοχών του δέκτη μπορούν τότε να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί η συνολική μέση θερμοκρασία του δέκτη [1].

[1] "Power From The Sun Book, William B. Stine και Michael Geyer
(<http://www.powerfromthesun.net/book.htm>)

Γ.6. Ηλιακός πύργος ισχύος



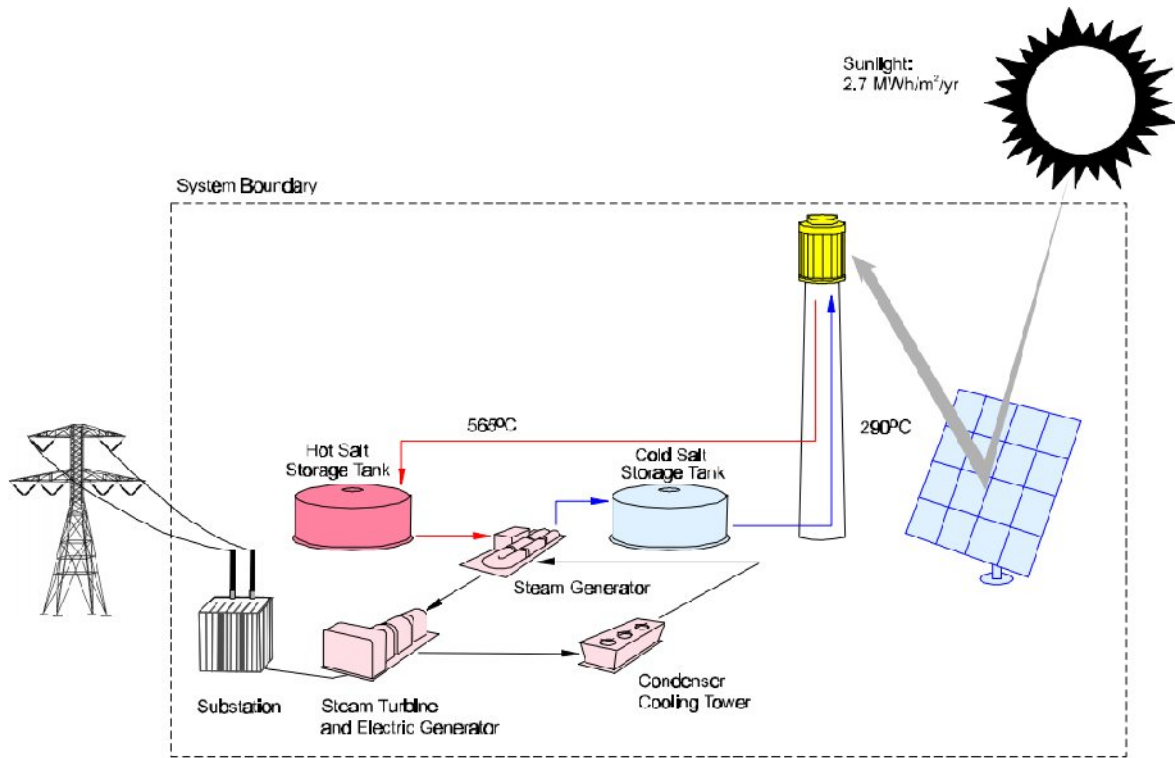
Σχήμα Γ.6.1. Σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος στην έρημο Mojave

Γ.6.1. Περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος

Οι ηλιακοί πύργοι (ή κεντρικοί δέκτες) παράγουν ηλεκτρική ενέργεια επικεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα εναλλάκτη θερμότητας που βρίσκεται τοποθετημένος πάνω σε ένα πύργο. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί από εκατοντάδες έως χιλιάδες καθρέπτες οι οποίοι αποκαλούνται **ηλιοστάτες** ώστε να αντανακλούν το φως του ήλιου στο δέκτη. Εκεί οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μετατρέπουν νερό σε ατμό, ο οποίος στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε γεννήτριες για να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα. Οι εγκαταστάσεις αυτές είναι κατάλληλες για εφαρμογές στο εύρος 30-400MWe.

Οι μονάδες κεντρικού δέκτη λόγω του μεγέθους τους έχουν τη δυνατότητα εγκατάστασης συστήματος αποθήκευσης της περισσευούμενης κατά τη διάρκεια της μέρας θερμότητας για να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας. Για παράδειγμα σε έναν ηλιακό πύργο **ρευστού αλατιού**, αλάτι σε υγρή μορφή στους 290°C αντλείται από μια 'κρύα' δεξαμενή αποθήκευσης προς το δέκτη όπου και θερμαίνεται στους 565°C και στη συνέχεια οδηγείται σε μια 'ζεστή' δεξαμενή για αποθήκευση. Όταν απαιτείται ενέργεια από την εγκατάσταση το ζεστό αλάτι αντλείται προς ένα σύστημα παραγωγής ατμού το οποίο παράγει υπέρθερμο ατμό για ένα συμβατικό σύστημα στροβίλου/γεννήτριας που βασίζεται στο κύκλο του Rankine. Στη συνέχεια το αλάτι επιστρέφει στη

'κρύα' δεξαμενή όπου και αποθηκεύεται για να θερμανθεί ξανά από το δέκτη. Στο παρακάτω διάγραμμα (Διαγρ.1) φαίνονται τα βασικά κυκλώματα ροής του αλατιού σε μια τέτοια εγκατάσταση. Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για το σχεδιασμό του συστήματος είναι η επιλογή του βέλτιστου μεγέθους αποθήκευσης ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σε ενέργεια. Οι δεξαμενές αποθήκευσης μπορούν να σχεδιαστούν με επαρκή χωρητικότητα ώστε να τροφοδοτείται η λειτουργία ενός στρόβιλου σε πλήρη παραγωγή έως και 13 ώρες.

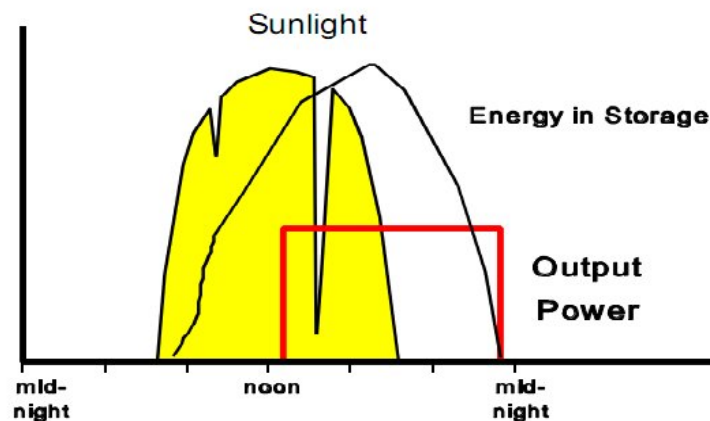


Σχήμα Γ.6.2. Εγκατάσταση πύργου ισχύος με τηγμένο άλας ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας

Το ηλιοστατικό πεδίο που περιβάλλει το πύργο είναι διατεταγμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιείται η ετήσια απόδοση της μονάδας. Το μέγεθος του πεδίου και του δέκτη εξαρτώνται επίσης από τις ανάγκες της εγκατάστασης. Σε μια τυπική εγκατάσταση η συλλογή ηλιακής ενέργειας υπερβαίνει το ανώτατο όριο που απαιτείται για να παρέχεται ατμός στο στρόβιλο. Συνεπώς το σύστημα θερμικής αποθήκευσης μπορεί να φορτίζεται την ίδια στιγμή που η εγκατάσταση βρίσκεται σε πλήρη παραγωγή ενέργειας. Ο λόγος της θερμικής ενέργειας που παρέχεται από το σύστημα συλλογής (ηλιοστατικό πεδίο και δέκτη) προς τη μέγιστη θερμική ενέργεια που απαιτείται από το στρόβιλο ονομάζεται ηλιακό πολλαπλάσιο (Solar multiple) . Με ένα ηλιακό πολλαπλάσιο της τάξης του 2.7, σύμφωνα με προσομοιώσεις των εργαστηρίων Sandia των ηνωμένων πολιτειών, ένας ηλιακός πύργος ρευστού αλατιού στην έρημο mojave της Καλιφόρνιας μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να φτάσει ετήσιο συντελεστή δυναμικού της τάξης του 65% . Συνεπώς ένας ηλιακός πύργος θα μπορούσε να λειτουργεί για το 65% ενός έτους χωρίς την

ανάγκη εφεδρικής πηγής καυσίμου. Χωρίς την αποθήκευση ενέργειας οι ηλιακές τεχνολογίες περιορίζονται σε ένα συντελεστή δυναμικού κοντά στο 25%.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την ηλιακή ένταση, την ενέργεια που αποθηκεύεται στη 'ζεστή' δεξαμενή και την ηλεκτρική ισχύ που παράγεται σε μια τυπική ημέρα στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Σε αυτό το παράδειγμα, η ηλιακή εγκατάσταση ξεκινά να συλλέγει θερμική ενέργεια αμέσως μετά την ανατολή και την αποθηκεύει στη 'ζεστή' δεξαμενή, συσσωρεύοντας ενέργεια κατά τη διάρκεια της μέρας. Απαντώντας στη ζήτηση αιχμής του δικτύου, ο στρόβιλος αρχίζει να λειτουργεί στις 13:00 και συνεχίζει τη παραγωγή ενέργειας έως τις 23:00. Εξαιτίας της αποθήκευσης η ενέργεια που παράγεται από το στρόβιλο παραμένει σταθερή παρά τις διακυμάνσεις της ηλιακής έντασης και έως ότου όλη η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στη ζεστή δεξαμενή να εξαντληθεί. Η αποθήκευση ενέργειας και η διανομή της είναι πολύ σημαντικό στοιχείο για την επιτυχία της τεχνολογίας του ηλιακού πύργου και το τηγμένο άλας πιστεύεται ότι είναι το κλειδί για την αποτελεσματική αποθήκευση ενέργειας.



Σχήμα Γ.6.3. Αποστολή ενέργειας από ένα πύργο ρευστού αλατιού

Οι πύργοι ισχύος πρέπει να είναι αρκετά μεγάλοι για να είναι οικονομικοί. Υστερούν σε αυτό το τομέα σε σχέση με τις τεχνολογίες των **παραβολικών κοίλων** και των **παραβολικών πιάτων**. Ιδανικά μέρη για την κατασκευή ηλιακών πύργων είναι αυτά που έχουν υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας και σχετικά χαμηλό κόστος γης. Τέτοιες περιοχές είναι οι νότιο-δυτικές Ηνωμένες πολιτείες, η Αφρική, το Μεξικό, η νότια Αμερική, η μέση ανατολή και η Ινδία [1].

Γ.6.2. Ιστορία

Παρόλο που οι ηλιακοί πύργοι ισχύος είναι εμπορικά λιγότερο ώριμοι από τα συστήματα παραβολικών κοίλων ένας αριθμός από τέτοια συστήματα έχει δοκιμαστεί σε όλο το κόσμο τα τελευταία 15 χρόνια, αποδεικνύοντας τις οικονομικές δυνατότητες της τεχνολογίας. Από τις αρχές της δεκαετίας του 80 οι ηλιακοί πύργοι έχουν κατασκευασθεί στη Ρωσία, την Ιταλία, την Ισπανία, την Ιαπωνία, τη Γαλλία και τις ηνωμένες πολιτείες. Στο πίνακα 1, αναφέρονται αυτές οι πειραματικές εγκαταστάσεις καθώς και μερικά από τα πιο σημαντικά τους χαρακτηριστικά. Σκοπός της κατασκευής τους ήταν εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η βελτίωση των επιμέρους στοιχείων του συστήματος και η συγκέντρωση πληροφοριών που αφορούν το σχεδιασμό, τις επιδόσεις, τη λειτουργία και τη συντήρησή τους.

Πίνακας Γ.6.1. Πειραματικοί πύργοι ισχύος

Πρόγραμμα	Χώρα	Ισχύς εξόδου (MWe)	Ρευστό μεταφοράς θερμότητας	Μέσο αποθήκευσης	Έτος ένταξης
SSPS	Ισπανία	0.5	Υγρό νάτριο	Νάτριο	1981
EURELIOS	Ιταλία	1	Ατμός	Νιτρικό άλας/νερό	1981
SUNSHINE	Ιαπωνία	1	Ατμός	Νιτρικό άλας/νερό	1981
Solar One	Η.Π.Α.	10	Ατμός	Έλαιο	1982
CESA-1	Ισπανία	1	Ατμός	Νιτρικό άλας	1983
MSEE/Cat B	Η.Π.Α.	1	Τηγμένο άλας	Νιτρικό άλας	1984
THEMIS	Γαλλία	2.5	Άλας Hi-Tec	Άλας Hi-Tec	1984
SPP-5	Ρωσία	5	Ατμός	Νερό/Ατμός	1986
TSA	Ισπανία	1	Ατμοσφαιρικός αέρας	Κεραμικά	1993
Solar Two	Η.Π.Α.	10	Τηγμένο νιτρικό άλας	Νιτρικό άλας	1996

Στους πρώτους ηλιακούς πύργους, η θερμική ενέργεια που συγκεντρωνόταν στο δέκτη χρησιμοποιούταν απευθείας για τη παραγωγή ατμού. Παρόλο που αυτά τα συστήματα ήταν απλά, είχαν ορισμένα μειονεκτήματα που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Παρακάτω θα γίνει η περιγραφή δύο τέτοιων συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις Ηνωμένες πολιτείες, ένα με απευθείας παραγωγή ατμού και ένα με αποθήκευση ρευστού αλατιού.

Solar one

Ο ηλιακός πύργος ισχύος 'solar one' λειτούργησε από το 1982 έως το 1988 και ήταν ο μεγαλύτερος της εποχής. Απέδειξε ότι ήταν εφικτή η παραγωγή ενέργειας μεγάλης κλίμακας με τη χρήση ηλιακών πύργων. Στην εγκατάσταση αυτή, το νερό μετατρέποταν σε ατμό στο δέκτη και

χρησιμοποιούταν απευθείας σε ένα ατμοστρόβιλο. Το ηλιοστατικό πεδίο αποτελούνταν από 1818 ηλιοστάτες ανακλαστικής επιφάνειας 39.3m² ο καθένας. Το έργο ανταποκρίθηκε στους τεχνικούς του στόχους αποδεικνύοντας ότι :

- ήταν εφικτό να παραχθεί ενέργεια με πύργους ισχύος
- υπήρχε η δυνατότητα να παραχθούν 10MW για οκτώ ώρες την ημέρα κατά το θερινό ηλιοστάσιο και τέσσερις ώρες την ημέρα κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο.

Κατά τη διάρκεια του τελευταίου έτους λειτουργίας του, η διαθεσιμότητα του solar one κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας ήταν 96% και η ετήσια απόδοση περίπου στο 7%. Η ετήσια απόδοση ήταν σχετικά χαμηλή λόγω του μικρού μεγέθους της εγκατάστασης και τη συμπερίληψη μη-βελτιστοποιημένων συστημάτων.

Το σύστημα θερμικής αποθήκευσης του solar one αποθήκευε θερμότητα από τον ατμό σε μια δεξαμενή γεμάτη με πέτρες και άμμο χρησιμοποιώντας λάδι ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Το σύστημα αυτό προέκτεινε τη παραγωγή ενέργειας της εγκατάστασης και κατά τη διάρκεια της νύχτας και έδινε τη δυνατότητα για παραγωγή ατμού χαμηλής ποιότητας ο οποίος μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να κρατηθούν μέρη της εγκατάστασης θερμά τις ώρες εκτός λειτουργίας και για την πρωινή εκκίνηση. Δυστυχώς, το σύστημα αποθήκευσης ήταν περίπλοκο και θερμοδυναμικά αναποτελεσματικό. Την ίδια στιγμή που ο solar one αποδείκνυε την επιτυχία της τεχνολογίας πύργων ισχύος αποκάλυψε ορισμένα μειονεκτήματα του συστήματος νερό/ατμός, όπως ήταν η διακοπτόμενη λειτουργία του στρόβιλου εξαιτίας της παρουσίας σύννεφων στον ουρανό και της έλλειψης αποτελεσματικότητας της θερμικής αποθήκευσης.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του solar one ξεκίνησε έρευνα για το σχεδιασμό των προηγμένων πύργων ισχύος που χρησιμοποιούσαν τηγμένο άλας. Η εξέλιξη αυτή οδήγησε στο έργο Solar two.

Solar two



Σχήμα Γ.6.4. Ο ηλιακός πύργος Solar two

Το 1995 ο solar one μετατράπηκε στο solar two. Σκοπός του επανασχεδιασμού της εγκατάστασης ήταν να επικυρώσει τη τεχνολογία νιτρικού άλατος, να μειώσει τους τεχνικούς και οικονομικούς κινδύνους των πύργων ισχύος και να προωθήσει την εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας. Ο solar two είχε τη δυνατότητα να παράγει 10MW ηλεκτρικής ενέργειας με αρκετό θερμικό απόθεμα έτσι ώστε να συνεχίσει να λειτουργεί πλήρως το στρόβιλο για 3 ώρες μετά τη δύση του ήλιου.

Η μετατροπή από το Solar one στο Solar two απαιτούσε ένα νέο σύστημα μεταφοράς θερμότητας (που περιελάμβανε το δέκτη, τη θερμική αποθήκευση, τις σωληνώσεις και τον ατμοπαραγωγό) καθώς και ένα νέο σύστημα ελέγχου. Το ηλιοστατικό πεδίο του Solar one και ο ατμοστρόβιλος απαιτούσαν ελάχιστες μόνο τροποποιήσεις. Στο ηλιοστατικό πεδίο προστέθηκαν 108 ηλιοστάτες ανεβάζοντας το συνολικό τους αριθμό σε 1926. Οι νέοι αυτοί ηλιοστάτες είχαν ανακλαστική επιφάνεια 95 m².

Ο δέκτης του solar one περιελάμβανε μια σειρά από πάνελ (κάθε ένα φτιαγμένο από 32 σωλήνες με λεπτά τοιχώματα από ανοξείδωτο χάλυβα) μέσα από τα οποία το τηγμένο άλας έρεε σε μια ελικοειδή διαδρομή. Τα πάνελ σχημάτιζαν ένα κυλινδρικό κέλυφος που περιέβαλλε σωληνώσεις, τη στήριξη της κατασκευής και τον εξοπλισμό ελέγχου. Οι εξωτερικές επιφάνειες των σωλήνων ήταν επικαλυμμένες με μαύρη μπογιά (Pyromark) που είναι ανθεκτική σε υψηλές θερμοκρασίες και θερμικές μεταβολές, και απορροφά το 95% της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο σχεδιασμός του δέκτη είχε βελτιστοποιηθεί για να απορροφά ένα μέγιστο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας μειώνοντας ταυτόχρονα τις θερμικές απώλειες εξαιτίας της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Ο σχεδιασμός του περιελάμβανε συγκολλήσεις με λείζερ, εξελιγμένες συνδέσεις σωλήνα-ακροφυσίου-κεφαλής, κλιπ που διευκόλυναν τις επεκτάσεις των σωλήνων και τις συστολές, και συσκευές που μετρούσαν τη ροή από απόσταση. Αυτό επέτρεπε στο δέκτη να αλλάξει θερμοκρασία μέσα σε μικρά χρονικά διαστήματα χωρίς να καταστραφεί. Για παράδειγμα κατά τη διάρκεια του περάσματος ενός

σύννεφου ο δέκτης μπορούσε να αλλάξει με ασφάλεια θερμοκρασία από τους 290°C στους 570°C σε λιγότερο από ένα λεπτό.

Το μέσο αποθήκευσης ήταν ένα μείγμα από 60% νιτρικό νάτριο και 40% νιτρικό κάλιο. Έλιωνε στους 220°C και παρέμενε σε υγρή μορφή στη “κρύα” δεξαμενή αποθήκευσης. Εξαιτίας του χαμηλού ιξώδους του (όμοιο με το νερό) το τηγμένο άλας δεν είναι εύκολο στο χειρισμό και μπορεί να κάνει δύσκολη τη μεταφορά του. Ένα πολύ σημαντικό σημείο στην επιτυχημένη εφαρμογή της τεχνολογίας είναι ο προσδιορισμός των αντλιών, βαλβίδων, τσιμουχών που να λειτουργούν καλά με το τηγμένο άλας. Κατά συνέπεια ο Solar two είχε σχεδιαστεί με ένα ελάχιστο αριθμό φλαντζών και τα περισσότερα όργανα, βαλβίδες και εξαρτήματα ήταν συγκολλημένα στη θέση τους.

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας του Solar two αποτελούταν από δύο δεξαμενές αποθήκευσης οι οποίες κατασκευάστηκαν επί τόπου, χωρητικότητας 875.000 λίτρων. Οι δεξαμενές ήταν μονωμένες εξωτερικά και κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα και ανθρακοχάλυβα για τις ζεστές και κρύες δεξαμενές αντίστοιχα. Η θερμική χωρητικότητα του συστήματος ήταν 110MWh. Στα θεμέλια της κάθε δεξαμενής χρησιμοποιούταν ένα φυσικό σύστημα συναγωγής θερμότητας που ελαχιστοποιούσε την υπερθέρμανση και την υπερβολική αφυδάτωση του υποκείμενου εδάφους.

Όλες οι σωληνώσεις, οι βαλβίδες και τα δοχεία για το ζεστό αλάτι κατασκευάστηκαν από ανοξείδωτο χάλυβα λόγω της αντίστασης του στη διάβρωση. Το σύστημα κρύου αλατιού ήταν κατασκευασμένο από μαλακό ανθρακοχάλυβα. Οι εναλλάκτες θερμότητας του συστήματος παραγωγής ατμού αποτελούνταν από ένα υπερθερμαντήρα, ένα boiler, και ένα προθερμαντήρα. Αντλίες από ανοξείδωτο χάλυβα μετέφεραν το αλάτι από τη ζεστή δεξαμενή μέσα από το σύστημα παραγωγής ατμού στη κρύα δεξαμενή. Το αλάτι από τη κρύα δεξαμενή αντλούταν με πολυβάθμιες φυγοκεντρικές αντλίες πάνω στο πύργο στο δέκτη.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε ότι ο solar two στα 10MW ήταν αρκετά μικρός για να είναι οικονομικά βιώσιμος. Τα κόστη για τη λειτουργία και τη συντήρηση ενός μικρού ηλιακού πύργου είναι αρκετά υψηλά. Τα κόστη γίνονται λογικά σε συστήματα που παράγουν από 30MW και πάνω. Ο solar two σταμάτησε τη λειτουργία του το 1999 [1].

Solar tres

Εξαιτίας της επιτυχίας του solar two, μια εμπορική μονάδα παραγωγής ενέργειας που ονομάζεται Πύργος ισχύος Solar tres κατασκευάζεται στην Ισπανία χρησιμοποιώντας τεχνολογία από το solar one και το solar two για εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των 15MW. Ο Solar tres θα είναι 3 φορές μεγαλύτερος από το solar two με 2493 ηλιοστάτες που ο καθένας θα έχει αντανακλαστική επιφάνεια 96m². Η συνολική αντανακλαστική επιφάνεια θα είναι 240.000m². Θα είναι κατασκευασμένοι από γυαλί υψηλής αντανάκλασης με μεταλλική πλάτη για να μειωθεί το κόστος κατά 45%. Επίσης θα χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη αποθηκευτική δεξαμενή ρευστού νιτρικού άλατος που θα δώσει στη μονάδα τη δυνατότητα να αποθηκεύει 600MWh ικανές για να επιτρέπουν τη λειτουργία 24 ώρες την ημέρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ακόμα ο solar tres θα χρησιμοποιεί ένα πιο εξελιγμένο σύστημα αντλιών που θα επιτρέπει την απευθείας άντληση του αλατιού από τις δεξαμενές χωρίς την ανάγκη για τη χρήση υποβρύχιων αντλιών. Θα χρησιμοποιεί ένα σύστημα ανακυκλοφορίας του ατμού στον ατμοπαραγωγό, ένα πιο αποτελεσματικό στρόβιλο υψηλής πίεσης και αναθέρμανσης και ένα απλοποιημένο βρόχο στον οποίο θα ρέει το αλάτι που θα μειώσει τη χρήση βαλβίδων κατά 50%. Παρόλο που ο στρόβιλος θα είναι ελάχιστα μεγαλύτερος από αυτόν του Solar two, το μεγαλύτερο ηλιοστατικό πεδίο και το αποθηκευτικό σύστημα θα δώσουν τη δυνατότητα στη μονάδα να έχει ένα συντελεστή δυναμικού της τάξης του 65%. [2]



*Σχήμα Γ.6.5. Από αριστερά προς τα δεξιά
οι πύργοι ισχύος PS10 και PS20*

PS10

Η μονάδα κεντρικού δέκτη PS10 είναι η πρώτη εμπορικά εκμεταλλεύσιμη μονάδα πύργου ισχύος στο κόσμο. Βρίσκεται σε λειτουργία από το 2007 και περιλαμβάνει 624 ηλιοστάτες οι οποίοι στοχεύουν σε πύργο ύψους 115. Η μονάδα έχει τη δυνατότητα να παράγει 10MW ισχύος. Η τοποθεσία της είναι κοντά στη Σεβίλλη της Ισπανίας [2]

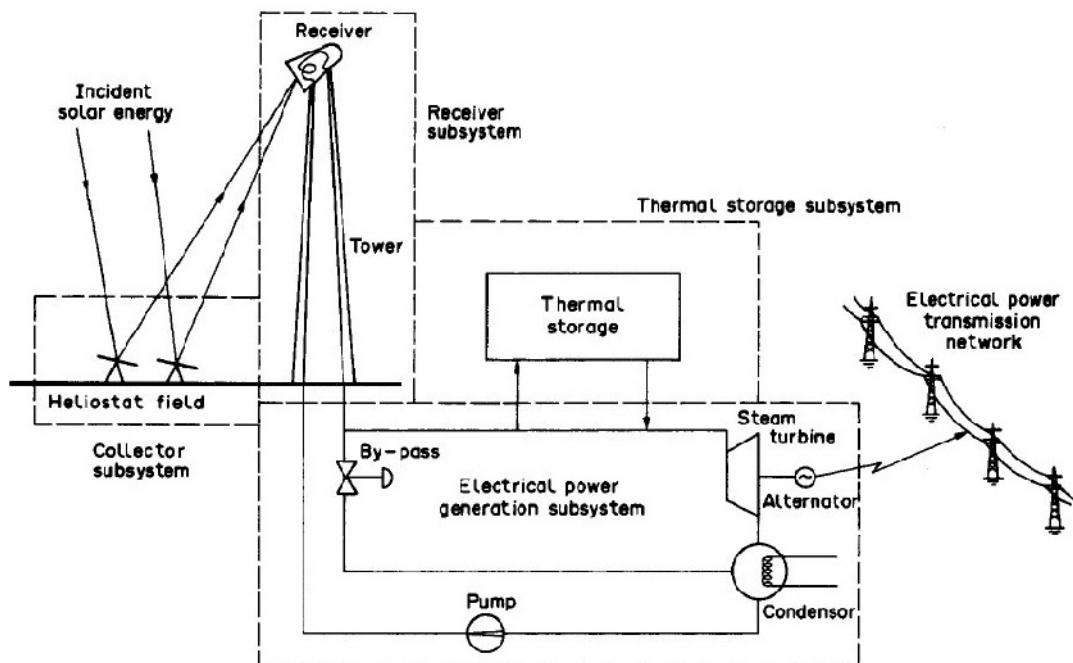
PS20

[2] Η μονάδα PS20 αποτελεί τη μεγαλύτερη μονάδα κεντρικού δέκτη στο κόσμο και περιλαμβάνει 1291 ηλιοστάτες επιφάνειας 120m^2 ο καθένας, το οποίο δίνει τη συνολική επιφάνεια του ηλιοστατικού πεδίου στα 155000m^2 . Ο πύργος της εγκατάστασης έχει ύψος 162m . Ο δέκτης μετατρέπει το 92% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ατμό ο οποίος στη συνέχεια μεταφέρεται σε ένα στρόβιλο στη βάση του πύργου. Η εγκατάσταση έχει τη δυνατότητα να παράγει 20MW ισχύος, ικανά για να τροφοδοτήσουν 10000 σπίτια. Η τοποθεσία της είναι πλησίον της μονάδας PS10 στη Σεβίλλη της Ισπανίας. [2]

Γ.6.3. Περιγραφή των στοιχείων της εγκατάστασης

Ο πύργος ισχύος μπορεί να χωριστεί στα παρακάτω 4 υποσυστήματα όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

- Το ηλιοστατικό πεδίο
- Το δέκτη
- Το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας
- Το σύστημα μετατροπής της θερμικής ενέργειας



Σχήμα Γ.6.6. Τα στοιχεία που αποτελούν μια εγκατάσταση πύργου ισχύος

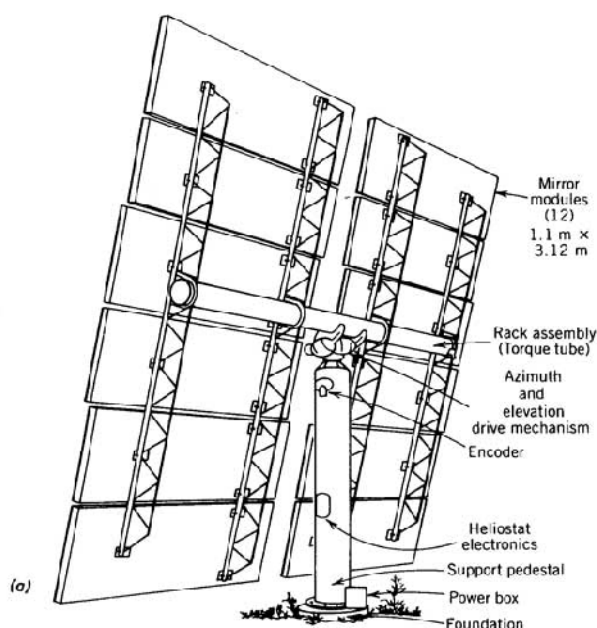
Στη παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε εκτενώς με τα τρία πρώτα αφού το τέταρτο έχει ήδη γίνει αντικείμενο πολλών άλλων εργασιών.

Γ.6.3.1. Ηλιοστάτης και ηλιοστατικό πεδίο



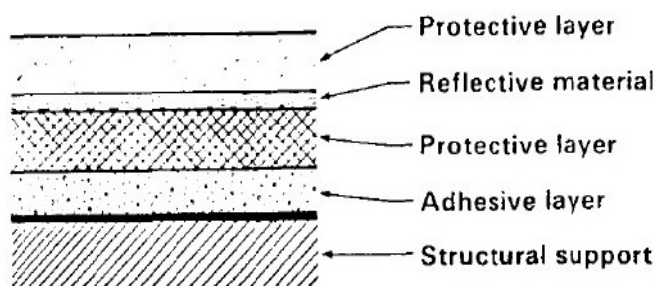
Σχήμα Γ.6.7. Ηλιοστάτης

Ο ηλιοστάτης είναι μια συσκευή που παρακολουθεί τη κίνηση του ήλιου. Η συσκευή χρησιμοποιεί ένα καθρέπτη ο οποίος μπορεί κατά τη διάρκεια της ημέρας να προσανατολίζεται και να ανακατευθύνει το ηλιακό φως προς ένα στατικό στόχο ή δέκτη. Οι απλούστεροι ηλιοστάτες χρησιμοποιούν μια ισημερινή βάση (δηλαδή βάση που παρακολουθεί τη περιστροφή της γης έχοντας έναν άξονα περιστροφής παράλληλο με τον άξονα περιστροφής της γης) καθώς και ένα μηχανισμό ρολογιού για να ανιχνεύουν τη κίνηση του ήλιου. Πιο ανεπτυγμένοι ηλιοστάτες ανιχνεύουν τη κίνηση του ήλιου απευθείας χρησιμοποιώντας αισθητήρες. Άλλοι ελέγχονται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές.



Σχήμα Γ.6.8. Στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένας ηλιοστάτης

Το ηλιοστατικό πεδίο είναι υπεύθυνο για το μισό περίπου κόστος κεφαλαίου σε μια μονάδα κεντρικού δέκτη. Οπότε είναι τεράστια η σημασία των υλικών από τα οποία αποτελείται ένας ηλιοστάτης. Τα κύρια υλικά ενός ηλιοστάτη είναι κατά 87% προϊόντα χάλυβα και καθρέπτες και η ανακλαστική επιφάνεια βρίσκεται πίσω από ένα διαφανές υπόστρωμα. Η δομή της κατασκευής αποτελείται από μία στήριξη από χάλυβα, ένα συγκολλητικό στρώμα, ένα προστατευτικό στρώμα από χαλκό, μία στρώση από ανακλαστικό ασήμι και ένα προστατευτικό στρώμα από χοντρό γυαλί. Η διάταξη αυτή φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Σχήμα Γ.6.9. Υλικά της ανακλαστικής επιφάνειας

Το ανακλαστικό υλικό πρέπει να αντανakλά τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία με ελάχιστες απώλειες και οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες του έχουν προφανώς μεγάλη σημασία. Επιπλέον η ανάκλαση δεν πρέπει να εξαρτάται από την αλληλεπίδραση με την υγρασία, την υπεριώδη ακτινοβολία, το φως, τη θερμοκρασία και άλλες περιβαλλοντικές παραμέτρους. Μια άλλη ιδιότητα που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το κόστος και η δυνατότητα κατασκευής.

Από τα ανακλαστικά μέταλλα το αλουμίνιο και το ασήμι έχουν τις καλύτερες επιδόσεις με ηλιακή ανάκλαση μεγαλύτερη από 0.9. Το υλικό που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την επιφάνεια ανάκλασης είναι το ασήμι εξαιτίας της υπάρχουσας εμπειρίας από τη βιομηχανία καθρεπτών και εξαιτίας της ανεπιθύμητης ζώνης απορρόφησης του αλουμινίου. Σε γενικές γραμμές η ηλιακή ανάκλαση κυμαίνεται από 0.95 σε 0.97 για επιφάνειες ασημιού μετά από σωστή επεξεργασία.

Μια σημαντική ανησυχία είναι η τάση των επιστρώσεων από ασήμι να διαβρώνονται και να υποβαθμίζονται. Παρατηρήσεις του ηλιοστατικού πεδίου έχουν αποκαλύψει ένα δυνητικά σοβαρό πρόβλημα. Ανακλαστικές επιφάνειες βρέθηκαν να έχουν επιδεινωθεί έπειτα από χρόνους έκθεσης μικρότερους από ένα έτος. Υπάρχουν διαφορετικά είδη επιδείνωσης. Η πιο κοινή μορφή είναι η εμφάνιση μαύρων κηλίδων τυχαία κατανεμημένων οι οποίες συνδέονται με την έλλειψη ή την συσσώρευση χαλκού και ασημιού (Χαλκός και μολύβδα εφαρμόζονται ως προστατευτικά επιχρίσματα στους καθρέπτες). Υποβαθμίσεις έχουν επίσης παρατηρηθεί και σε θέματα σχετικά με τα συγκολλητικά υλικά.

Έχουν γίνει πάρα πολλές προσπάθειες για να αναλυθούν οι διαβρωμένες ή υποβαθμισμένες περιοχές προκειμένου να εντοπισθούν οι υπεύθυνοι μηχανισμοί αλλά ακόμα δεν έχουν γίνει κατανοητοί. Μερικές από τις σημαντικότερες παρατηρήσεις είναι: το νερό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, η φύση του συγκολλητικού υλικού είναι αρκετά σημαντική σε ορισμένες περιπτώσεις, ο χαλκός συχνά απουσιάζει πλήρως από υποβαθμισμένες περιοχές και το θειάφι και το χλώριο συνδέονται συχνά με την υποβάθμιση. Ενώ οι έρευνες με στόχο να κατανοηθούν και να εξαλειφθούν οι μηχανισμοί αυτοί συνεχίζονται, ενδιάμεσες λύσεις θα μπορούσαν να εφαρμοστούν. Για παράδειγμα έχουν προταθεί σχέδια στα οποία η ανακλαστική επιφάνεια είναι εντελώς σφραγισμένη από δυνητικά βλαβερά χημικά που βρίσκονται στο περιβάλλον.

Το ανακλαστικό υλικό εναποτίθεται μέσα σε ένα διαφανές γυάλινο υπόστρωμα το οποίο χρησιμεύει ως πρώτο στάδιο προστασίας. Το γυαλί πρέπει να έχει χαμηλή απορροφητικότητα επειδή πιθανές απώλειες ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαιτίας της απορρόφησης του γυαλιού επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του συστήματος και το κόστος. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το γυαλί αποδίδεται σε προσμίξεις σιδήρου. Η πιο απλή λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η εξάλειψη του σιδήρου ως πρόσμιξη. Δυστυχώς όμως ο σίδηρος είναι μια κοινή πρόσμιξη σε πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή γυαλιών. Με τη συνετή επιλογή

των υλικών για τη παραγωγή γυαλιού μπορεί να μειωθεί η συγκέντρωση σε σίδηρο αλλά δεν μπορεί να εξαλειφθεί. Ωστόσο το γυαλί με μικρή συγκέντρωση σιδήρου είναι εξαιρετικά ακριβό.

Οι απώλειες λόγω απορρόφησης μπορούν επίσης να ελαχιστοποιηθούν με τη χρήση λεπτότερων στρωμάτων γυαλιού. Συνεπώς η ανάπτυξη διεργασιών για λεπτό γυαλί είναι άλλος ένας τομέας ενδιαφέροντος. Ένα δεύτερο όφελος που προέρχεται από τη χρήση λεπτού γυαλιού είναι η μείωση του βάρους, που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο κόστος και η αύξηση της ακρίβειας του ηλιοστατικού οδηγού και του μηχανισμού ελέγχου. Ωστόσο το λεπτό γυαλί είναι σχετικά δαπανηρό και μπορεί να αποδεχτεί δύσκολο για να διαχειριστεί σε μεγάλα φύλλα.

Δύο άλλοι μηχανισμοί που υποβαθμίζουν το γυαλί είναι η χημική επίθεση που δέχεται από το περιβάλλον όπως από υδρατμούς συνδυασμένους με σκόνη καθώς και οι αλλαγές που προκαλούνται από την ηλιακή ακτινοβολία όπου η ζημιά που προκαλείται από την υπερϊώδη ακτινοβολία εκπέμπει και τη μεγαλύτερη ανησυχία. Παρατηρήσεις που έχουν γίνει για το πρώτο από τα δύο φαινόμενα έχουν δείξει ότι υπό κανονικές συνθήκες δεν θα αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα. Όσο για το δεύτερο φαινόμενο παρόλο που δεν έχει κατανοηθεί καλά οι μέχρι τώρα έρευνες δείχνουν ότι ούτε αυτό θα αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα.

Υλικά πρέπει να εφαρμοστούν στην εκτεθειμένη πλευρά της ανακλαστικής επίστρωσης για να τη προστατέψουν από περιβαλλοντικά στοιχεία. Οι τυποποιημένες διαδικασίες περιλαμβάνουν την απόθεση ενός στρώματος χαλκού με τη τεχνική της ηλεκτρόλυσης που ακολουθείται από την εφαρμογή ενός στρώματος βαφής. Όπως σχολίασαμε παραπάνω αυτή η τεχνική δεν είναι αποτελεσματική για να προστατεύσει από τη διάβρωση και είναι επιτακτική η ανάγκη να προσδιοριστούν περισσότεροι ανθεκτικοί συνδυασμοί υλικών. Μια εναλλακτική μέθοδος θα ήταν να σχεδιαστεί ο καθρέπτης έτσι ώστε να είναι λιγότερο ευαίσθητος στη διείσδυση ενοχλητικών σωματιδίων όπως για παράδειγμα με το σφράγισμα των άκρων του. Ωστόσο, είναι πιο ελκυστικό να εντοπιστούν και να χρησιμοποιηθούν υλικά που είναι εγγενώς ανθεκτικά στην υποβάθμιση.

Όσο αφορά τα υλικά στήριξης πρέπει να είναι σταθερών διαστάσεων, ελαφριά και να έχουν χαμηλό κόστος. Υποψήφια υλικά στήριξης είναι το αφρώδες πολυστυρένιο και το αφρώδες γυαλί. Ο καθρέπτης είναι εγκατεστημένος πάνω στη στήριξη με υλικά συγκόλλησης τα οποία μπορεί να αποδειχθούν ως ο αδύναμος κρίκος για την αντοχή του ηλιοστάτη. Παρόλο που ο ρόλος του συγκολλητικού υλικού δεν είναι κατανοητός όσο αφορά τη διάβρωση της ανακλαστικής επιφάνειας, πρόκειται σαφώς για ένα τομέα ανησυχίας και αξίζει ιδιαίτερη προσοχή.

Εναλλακτικά σχέδια για τους ηλιοστάτες περιλαμβάνουν έρευνες για σύγχρονα συγκολλητικά υλικά και λεπτά φιλμ που μειώνουν το κόστος και το βάρος της κατασκευής. Κάποια παραδείγματα τέτοιων εναλλακτικών σχεδίων είναι ανακλαστήρες με επαργυρωμένα πολυμερή, ίνες γυαλιού ενισχυμένου πολυεστέρα και επαργυρωμένοι ανακλαστήρες. Προβλήματα που υπάρχουν με αυτά τα πιο καινούρια σχέδια περιλαμβάνουν αποκόλληση των προστατευτικών επιχρισμάτων, μείωση του ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται σε μεγάλες περιόδους έκθεσης στον ήλιο και υψηλά κόστη παραγωγής. [3]

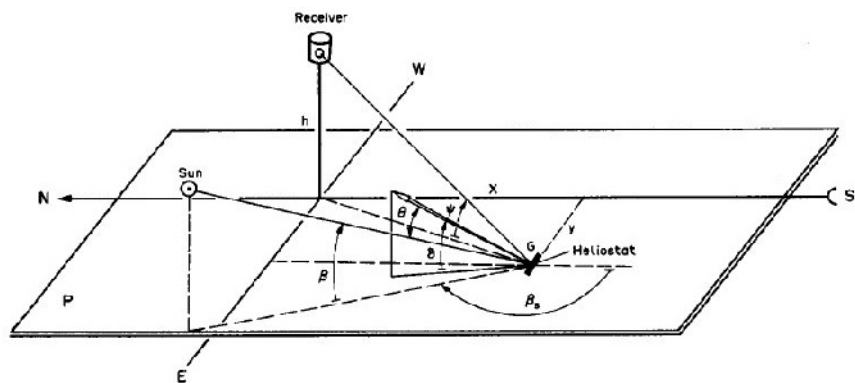
Το ηλιοστατικό πεδίο δεν χρησιμοποιείται στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας και έτσι δεν υπάρχει μεγάλη πρακτική εμπειρία για αυτό. Η ηλιακή γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στη κατακόρυφο του ηλιοστάτη και στις ακτίνες του ήλιου. Η γωνία πρόσπτωσης δίνεται από το τύπο

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin L \cos S - \sin \delta \cos L \sin S \cos \gamma + \cos \delta \cos L \cos S \cos H \\ & \cos \delta \sin L \sin S \cos \gamma \cos H + \cos \delta \sin S \sin \gamma \sin H \end{aligned} \quad (Γ.6.1)$$

Όπου δ η γωνία απόκλισης που δίνεται από το τύπο

$$\delta = \sin \mu \cos [2\pi (10.5 + N)/365.25] \quad (Γ.6.2)$$

όπου μ η γωνία ανάμεσα στον άξονα της γης και στο επίπεδο της ελλειπτικής τροχιάς της και είναι ίση με $-23^{\circ}27'$, N είναι η ημέρα από τη 1η Ιανουαρίου, L είναι το γεωγραφικό πλάτος, S είναι η γωνία κλίσης από τον ορίζοντα, γ είναι η αζιμούθια γωνία δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του ηλιοστάτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Όπως έχουμε αναφέρει ο ηλιοστάτης πρέπει να έχει κάποια συσκευή ανίχνευσης της κίνησης του ήλιου για να ελαχιστοποιεί τη γωνία πρόσπτωσης. Οι γωνίες που αναφέραμε παραπάνω φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα Γ.6.10. Αζιμούθια γωνία γ , γωνία πρόσπτωσης θ , ύψος πύργου ψ , ηλιακή υψομετρική γωνία β

Οι συντεταγμένες και διαδρομές της ακτίνας πρόσπτωσης και ανάκλασης του ηλιοστάτη G έχουν ληφθεί υπόψη έχοντας ένα πύργο με ύψος h την ώρα που η θέση του ήλιου στον ουρανό χαρακτηρίζεται από αζιμούθιου ϕ και υψόμετρο β .

Ο γωνιακός προσανατολισμός του ηλιοστάτη προσδιορίζεται από τις γωνίες β_s και S που φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. Η γωνία β_s μετριέται στο οριζόντιο επίπεδο με τη φορά του ρολογιού από τη νότια κατεύθυνση και η γωνία S μετριέται στο κατακόρυφο επίπεδο. Ένα τέτοιο σύστημα που μετρά τις γωνιακές συντεταγμένες είναι αρκετά συνηθισμένο όταν υπάρχει βάση αζιμούθιου-ζενίθ στον ηλιοστάτη όπου οι οριζόντιοι και κάθετοι άξονες περιστροφής είναι δεδομένοι. Λαμβάνοντας υπόψη τα θεωρήματα ημίτονου και συνημιτόνου έχουμε

$$\tan \beta_s = \frac{\sin \phi \cos \beta - \sin \alpha \cos \psi}{\cos \phi \cos \beta - \cos \alpha \cos \psi} \quad (Γ.6.3)$$

$$\tan S = \cos \beta_s \frac{\sin \beta \sin \psi}{\cos \phi \cos \beta - \cos \alpha \cos \psi} \quad (Γ.6.4)$$

Όταν λαμβάνουμε υπόψη τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως τότε οι νόμοι παίρνουν μια μορφή που χαρακτηρίζει το νόμο περιστροφής ενός ηλιοστάτη στο χρόνο.

$$\beta_s = \tan^{-1} \frac{\cos \delta \sin H - \sin \alpha \cos \psi}{\sin L \cos \delta \cos H - \cos L \sin \delta + \cos \alpha \cos \psi} \quad (Γ.6.5)$$

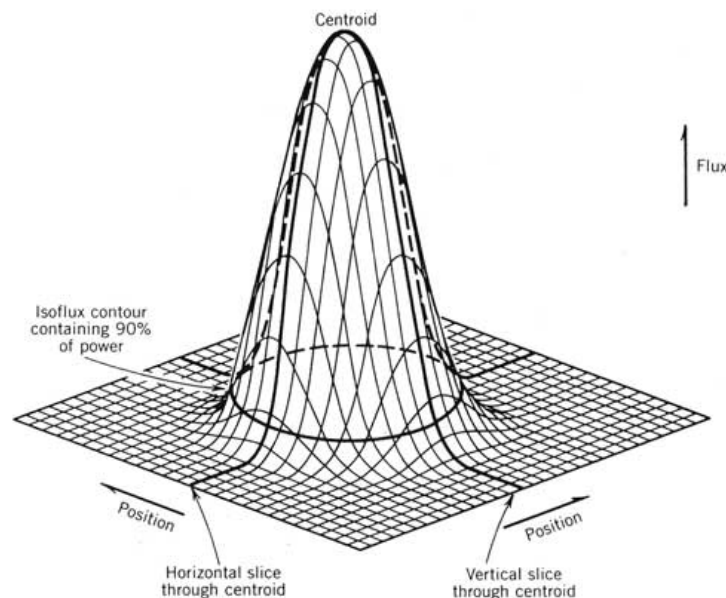
$$S = \tan^{-1} \left[\cos \beta_s \frac{\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos H + \sin \psi}{\sin L \cos \delta \cos H - \cos L \sin \delta - \cos \alpha \cos \psi} \right] \quad (Γ.6.6)$$

Οι δύο τελευταίες εξισώσεις μας δίνουν τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τις διαδοχικές θέσεις ενός συγκεκριμένου ηλιοστάτη. [4]

Σφάλματα των ηλιοστατών

Ένας απόλυτα επίπεδος ηλιοστάτης θα παρήγαγε ένα είδωλο στο δέκτη που θα είχε το μέγεθός του ηλιοστάτη αυξανόμενο κατά 0.5 λόγω εξάπλωσης. Για τις περισσότερες εφαρμογές κάθε τμήμα καθρέπτη γίνεται ελαφρός κοίλο και κάθε τμήμα καθρέπτη σε ένα ηλιοστάτη κλίνει προς ένα σημείο. Αυτό αυξάνει τη πυκνότητα ροής σε αυτό το σημείο.

Μια σειρά από παράγοντες τείνουν να αυξήσουν το μέγεθος του ειδώλου από ένα συγκεκριμένο ηλιοστάτη. Η κυματώδεις επιφάνεια των καθρεπτών είναι ένας σημαντικός παράγοντας στους ηλιοστάτες. Επιπλέον το ακαθόριστο σφάλμα καμπυλότητας κάθε τμήματος καθρέπτη και τα σφάλματα που αφορούν την ακρίβεια της κλίσης τους, αυξάνουν περαιτέρω το σφάλμα της εικόνας. Αυτή η τελευταία πηγή σφάλματος μπορεί να αυξηθεί από τα φαινόμενα της ως αποτέλεσμα της διαφορικής θερμικής ανάπτυξης και της βαρύτητας στο πλαίσιο του ηλιοστάτη. Όλα τα παραπάνω οπτικά παράγουν το προφίλ της ροής στο δέκτη το οποίο διανέμεται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο.



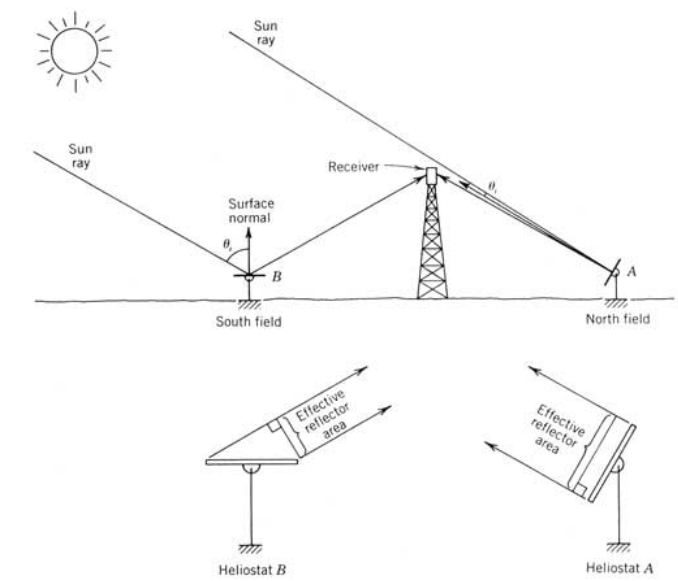
Σχήμα Γ.6.11. Πυκνότητα της ροής που φτάνει στο δέκτη από ένα ηλιοστάτη

Επίσης καθοριστικής σημασίας είναι η ικανότητα του μηχανισμού παρακολούθησης του ηλιοστάτη να τοποθετήσει το κέντρο του προφίλ της ροής στο κέντρο του δέκτη. Σφάλματα μπορούν να

συμβούν εξαιτίας της λανθασμένης τοποθέτησης του ηλιοστάτη η εξαιτίας λαθών των μηχανισμών ανάδρασης. Επιπλέον ο αέρας μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα προκαλώντας εκτροπές.

Τα περισσότερα από τα παραπάνω σφάλματα που αναφέρθηκαν γίνονται ακόμα πιο σημαντικά (όσο αφορά τη διαρροή της ροής από το δέκτη) όσο μακρύτερα βρίσκεται ο ηλιοστάτης από το δέκτη. Όμως προβλήματα τοποθέτησης και ροής συμβαίνουν και στους ηλιοστάτες κοντά στο πύργο επειδή η επιφάνεια προβολής του δέκτη είναι πολύ μικρή σε μια τέτοια απόσταση.[5]

Φαινόμενο συνημιτόνου



Σχήμα Γ.6.12. Το φαινόμενο συνημιτόνου για δύο ηλιοστάτες που βρίσκονται σε αντίθετες κατευθύνσεις από το πύργο

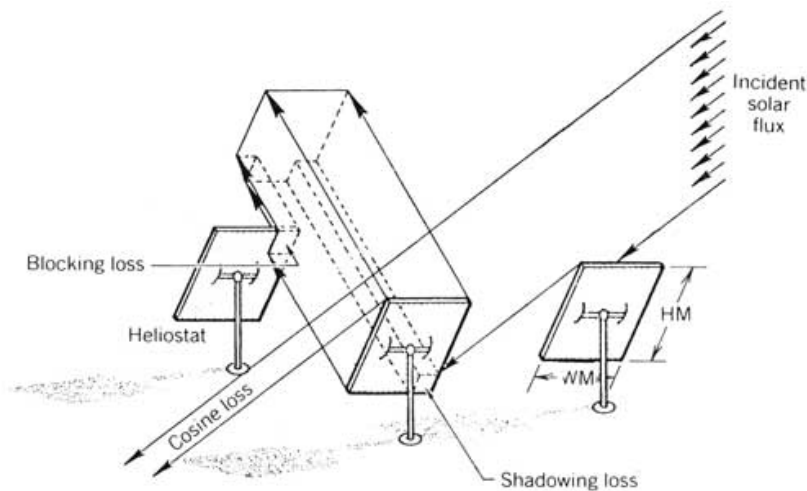
Ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει ένα βέλτιστο ηλιοστατικό πεδίο είναι η απόδοση του συνημιτόνου του ηλιοστάτη. Αυτή η απόδοση εξαρτάται τόσο από τη θέση του ήλιου και τη τοποθέτηση του μεμονωμένου ηλιοστάτη σε σχέση με το δέκτη. Ο ηλιοστάτης τοποθετείται από το μηχανισμό παρακολούθησης έτσι ώστε η κάθετη στην επιφάνειά του να διχοτομεί τη γωνία μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και τη γραμμή από τον ηλιοστάτη στο δέκτη. Η αποτελεσματική επιφάνεια αντανάκλασης του ηλιοστάτη μειώνεται από το συνημίτονο στο μισό αυτής της γωνίας. Αυτό μπορεί να γίνει εμφανές αν σκεφτούμε δύο ηλιοστάτες σε δύο θέσεις που φαίνονται στο σχήμα Γ.6.12. Ο ηλιοστάτης A έχει μικρές απώλειες συνημιτόνου αφού η κάθετη στην επιφάνειά του σχεδόν στοχεύει το δέκτη. Ο ηλιοστάτης B έχει μεγαλύτερες απώλειες συνημιτόνου εξαιτίας της θέσης που πρέπει να λάβει για να αντανάκλα της ακτίνες του ήλιου στο δέκτη. Σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε ότι οι πιο αποδοτικοί ηλιοστάτες είναι αυτοί που βρίσκονται απέναντι από τον ήλιο.

Μια έκφραση για τον υπολογισμό του συνημιτόνου αυτής της ημιγωνίας υπάρχει στην εξίσωση (Γ.6.7).

$$\cos 2\theta_i = \frac{(z_0 - z_1) \sin \alpha - e_1 \cos \alpha \sin A - n_1 \cos \alpha \cos A}{[(z_0 - z_1)^2 + e_1^2 + n_1^2]^{1/2}} \quad (\Gamma.6.7)$$

Όπου α και A είναι οι γωνίες του ηλιακού ύψους και του αζιμούθιου αντίστοιχα. Και z, e και n οι ορθογωνικές συντεταγμένες από ένα σημείο στο πύργο στο ύψος τους ηλιοστατικών κατόπτρων [5].

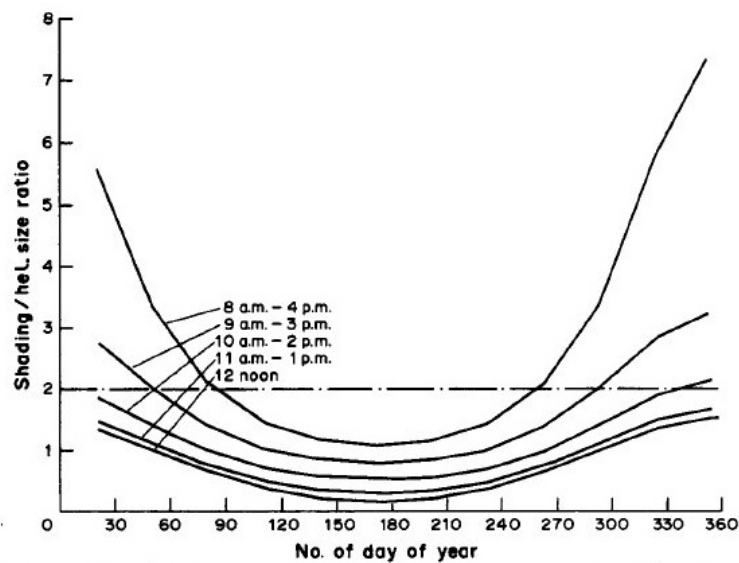
Σκίαση και παρεμπόδιση



Σχήμα Γ.6.13. Απώλειες λόγω σκίασης και παρεμπόδισης

Το κύριο πρόβλημα όταν γίνεται η σχεδίαση του ηλιοστατικού πεδίου σε περιορισμένο χώρο είναι να αποτρέπονται φαινόμενα σκίασης και παρεμπόδισης. Όταν μια ακτίνα από τον ήλιο εμποδίζεται από ένα ηλιοστάτη να φτάσει σε έναν άλλο ηλιοστάτη τότε έχουμε το φαινόμενο της σκίασης. Από την άλλη πλευρά όταν μια ανακλώμενη ακτίνα από ένα ηλιοστάτη εμποδίζεται από ένα γειτονικό ηλιοστάτη από το να φτάσει στο δέκτη έχουμε το φαινόμενο της παρεμπόδισης. Το φαινόμενο της σκίασης είναι πολύ πιο σοβαρό από το φαινόμενο της παρεμπόδισης και μειώνει σε μεγάλο βαθμό τη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο δέκτη. Για το λόγο αυτό έχει δημιουργηθεί ένας συντελεστής που ορίζεται ως το μήκος της σκίασης προς το μήκος του ηλιοστάτη για να μπορεί να λειτουργεί ως αναφορά που δείχνει την επιρροή κάθε παραμέτρου.

Ο συντελεστής αυτός είναι μικρότερος το καλοκαίρι από ότι την άνοιξη και το φθινόπωρο ενώ αντίθετα το χειμώνα, ειδικά το Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο αγγίζει τη μέγιστη τιμή του. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ο συντελεστής γίνεται μικρότερος όσο πλησιάζουμε το μεσημέρι. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε τη συμπεριφορά του συντελεστή κατά τη διάρκεια ενός έτους και για διαφορετικές ώρες της ημέρας. Το ύψος του πύργου και η απόσταση του ηλιοστατικού πεδίου από τη βάση του παίζουν μικρό ρόλο στο συντελεστή. Όσο το ύψος του πύργου αυξάνεται ο συντελεστής μειώνεται αλλά σε ένα πολύ μικρό σχεδόν ασήμαντο ποσό, και όσο η απόσταση από το ηλιοστατικό πεδίο ο συντελεστής αυξάνεται επίσης σε ένα πολύ μικρό βαθμό.



Σχήμα Γ.6.14. Λόγος σκίασης/μεγέθους ηλιοστάτη για κάθε ημέρα του χρόνου

Το πανεπιστήμιο του Houston έχει παράγει τους παρακάτω τύπους που υπολογίζουν την απόσταση και την πυκνότητα του ηλιακού πεδίου. Η ακτινική απόσταση ΔR και η αζιμουθιακή απόσταση ΔA ορίζονται ως

$$\Delta R = HM(1.44 \cot \theta_L - 1.094 + 3.068\theta_L - 1 / 1256\theta_L^2) \quad (m) \quad (Γ.6.8)$$

Και

$$\Delta A = WM(1.749 + 0.6396\theta_L) + \frac{0.2873}{\theta_L - 0.04902} \quad (m) \quad (Γ.6.9)$$

Όπου HM και WM είναι το ύψος και το πλάτος του ηλιοστάτη αντίστοιχα. Η υψομετρική γωνία από τον ηλιοστάτη προς το δέκτη μπορεί να υπολογιστεί ως

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

(Γ.6.10)

Όπου r είναι η κάθετη απόσταση από το πύργο στον ηλιοστάτη μετρημένη σε “ύψη πύργου”

Η πυκνότητα του πεδίου είναι ο λόγος της επιφάνειας των κατόπτρων προς την επιφάνεια γης. Μπορεί να υπολογιστεί ως

$$\rho_F = \frac{2DM \cdot WM \cdot HM}{\Delta R \cdot \Delta A}$$

(Γ.6.11)

Το φαινόμενο της σκίασης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί όταν οι ηλιοστάτες τοποθετηθούν σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Αυτό από την άλλη αυτό θα αυξήσει τη περιοχή που θα καλύπτει το πεδίο και αναπόφευκτα θα αυξήσει και το κόστος της μονάδας.

Ένας άλλος τρόπος για να μειωθεί το φαινόμενο είναι να μειωθεί και το μέγεθος των καθρεπτών. Επειδή όμως κάθε καθρέπτης χρειάζεται ένα ξεχωριστό σύστημα για να ανιχνεύει την κίνηση του ήλιου, ένα ηλιοστατικό πεδίο που θα αποτελούταν από ένα μεγάλο αριθμό ηλιοστατών μικρού μεγέθους θα απαιτούσε ένα πολύπλοκο σύστημα ελέγχου.

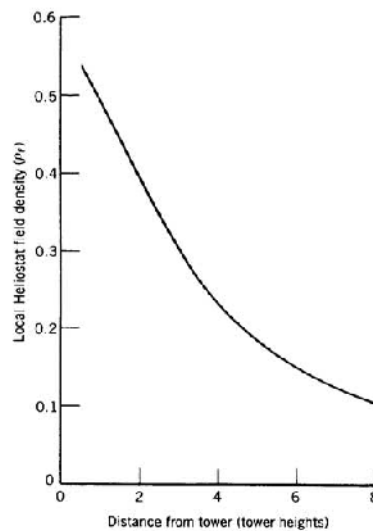
Το μεγαλύτερο ύψος του πύργου θα μπορούσε επίσης να μειώσει το μήκος της σκίασης αλλά αυτό όχι μόνο θα ανέβαζε το κόστος της κατασκευής του πύργου αλλά θα δημιουργούσε και αεροδυναμική αστάθεια στο πύργο σε περίπτωση ισχυρών ανέμων και καταιγίδων.

Αν το ηλιοστατικό πεδίο τοποθετούνταν σε μεγάλη απόσταση από τη βάση του πύργου τότε η σκίαση θα μειωνόταν όμως και εδώ θα αυξανόταν η ποσότητα της γης που θα καταλάμβανε το ηλιοστατικό πεδίο και θα αύξανε το κόστος.

Τέλος θα μπορούσε να μειωθεί το φαινόμενο της σκίασης αν η μονάδα ξεκινούσε και σταματούσε σε ώρες κοντά στο μεσημέρι αλλά αυτό θα μείωνε τις ώρες λειτουργίας της μονάδας και κατά συνέπεια την οικονομική βιωσιμότητα της [5].

Ατμοσφαιρική διαπερατότητα

Αρκετοί παράγοντες που έχουν να κάνουν με το ηλιακό πεδίο προτείνουν ότι το πεδίο πρέπει να προεκτείνεται προς τα βόρεια ενός πολύ ψηλού πύργου. Ένας περιορισμός της απόστασης που θα τοποθετηθεί ο ηλιοστάτης από το πύργο είναι η εξασθένηση της ανακλώμενης δέσμης όπως ταξιδεύει από τον ηλιοστάτη στο δέκτη.



Σχήμα Γ.6.15. Η πυκνότητα του ηλιοστατικού πεδίου όπως προβλέπεται από την εξίσωση (3.27)

Η ατμοσφαιρική διαπερατότητα έχει υπολογιστεί από τους Vittitoe και Biggs για μια καθαρή και μια ομιχλώδη ημέρα (ορατότητα 23km και 5km αντίστοιχα). Για μια καθαρή ημέρα είναι:

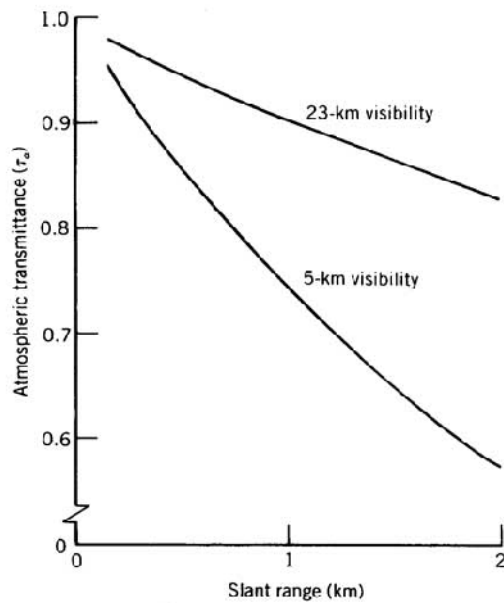
$$\tau_{\alpha} = 0.99326 - 0.1046S + 0.017S^2 - 0.002845S^3 \quad (\Gamma.6.12)$$

και για μια ομιχλώδη

$$\tau_{\alpha} = 0.98707 - 0.2748S + 0.03394S^2 \quad (\Gamma.6.13)$$

Παρόλο που αυτές οι εκφράσεις εκφράζουν ένα συγκεκριμένο υψόμετρο, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διανομή των αερίων στο επίπεδο του εδάφους και μόνο ελάχιστα από το υψόμετρο.

Το φαινόμενο παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα [5].



Σχήμα Γ.6.16. Ατμοσφαιρική διαπερατότητα καθαρής και ομιχλώδους ατμόσφαιρας

Γ.6.3.2. Κεντρικός δέκτης

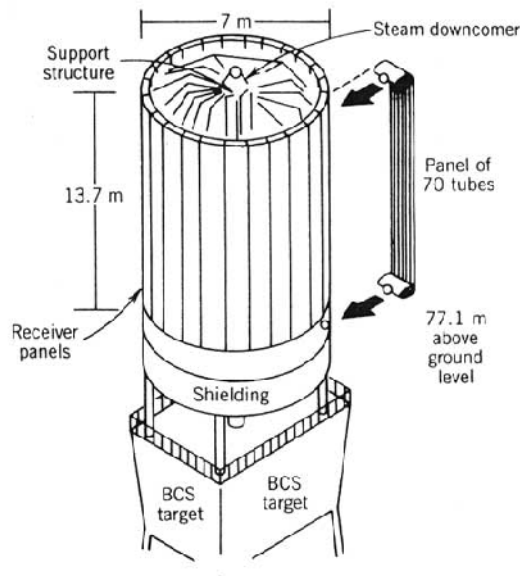


Σχήμα Γ.6.17. Δέκτης πύργου ισχύος

Η χρήση κεντρικών δεκτών δίνει τη δυνατότητα στη μονάδα να αποφύγει την ανάγκη για μεγάλα δίκτυα στα οποία θα μεταφέρεται η θερμότητα όπως συμβαίνει σε άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν συστοιχίες παραβολικών καθρεπτών. Το μέγεθος του πύργου καθώς και η θερμοκρασία του παραγόμενου ατμού παίζουν σημαντικό ρόλο στο κόστος και στην απόδοση του

συστήματος. Ο δέκτης τοποθετείται στη κορυφή ενός πύργου, βρίσκεται σε ένα σημείο όπου η ανακλώμενη από τους ηλιοστάτες ακτινοβολία μπορεί να συλληφθεί ευκολότερα. Απορροφά την ακτινοβολία και τη μεταφέρει σε ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας.

Εξωτερικοί δέκτες



Σχήμα Γ.6.18. Ο εξωτερικός δέκτης της εγκατάστασης Solar one

Οι εξωτερικοί δέκτες αποτελούνται από πλαίσια που περιλαμβάνουν πολλούς μικρούς (20-56mm) κάθετους σωλήνες οι οποίοι τοποθετούνται δίπλα-δίπλα σχηματίζοντας ένα κύλινδρο. Από τη κάτω άκρη κάθε σωλήνα γίνεται η τροφοδοσία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και από τη κορυφή του γίνεται η συλλογή του θερμασμένου πλέον ρευστού.

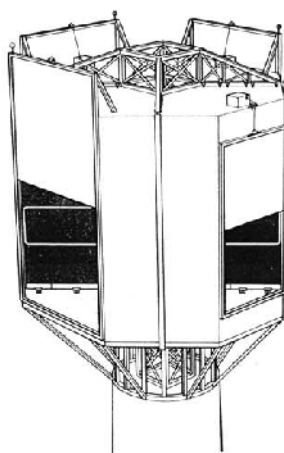
Στη παραπάνω φωτογραφία βλέπουμε το δέκτη που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση Solar one. Βρισκόταν σε ύψος 77.1 μέτρων και περιελάμβανε 24 πλαίσια, το κάθε ένα είχε ύψος 13,7 μέτρα και αποτελείτο από 70 σωλήνες με διάμετρο 12.7mm. 6 από αυτά τα πλαίσια υπήρχαν για να προθερμαίνουν το νερό και 18 για να παράγουν ατμό. Η συνολική διάμετρος του δέκτη ήταν 7 μέτρα. Οι σωλήνες ήταν κατασκευασμένες από Incoloy 800 και ήταν επικαλυμμένες στο εξωτερικό της με μαύρη μπογιά υψηλής απορρόφησης (Pyromark).

Οι εξωτερικοί δέκτες έχουν λόγο ύψους προς διάμετρο από 1:1 μέχρι 2:1. Η επιφάνεια του δέκτη πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας. Το κατώτατο όριο καθορίζεται από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των σωλήνων και κατά

συνέπεια τη δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας του ρευστού. Για παράδειγμα ένα σχέδιο για δέκτη που χρησιμοποιεί υγρό νάτριο ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας, με μέγιστη ισχύ 380 MW, απαιτεί ύψος 15 μέτρων και διάμετρο 13 μέτρων. Αν το ρευστό ήταν νερό/ατμός ή τηγμένο νιτρικό άλας θα χρειαζόταν επιφάνεια διπλάσια σε μέγεθος για την ίδια ισχύ δεδομένου της μικρότερης δυνατότητας μεταφοράς θερμότητας αυτών των υγρών.

Ανάλογα με τις ιδιότητες του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και την προσπίπτουσα ηλιακή ροή, ο σωλήνας πιθανόν να υποβάλλεται σε θερμομηχανικές πιέσεις. Επειδή η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μέσω της επιφάνειας του σωλήνα, είναι δύσκολο να λειτουργήσει το σύστημα αυτό σε μια προσπίπτουσα ροή πάνω από 600 kW/m^2 μόνο με υγρά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, όπως το νάτριο, είναι δυνατόν να λειτουργήσει ο δέκτης σε ηλιακές ροές πάνω από 1 MW/m^2 [5].

Δέκτες τύπου κοιλότητας



Σχήμα Γ.6.19. Δέκτης τύπου κοιλότητας με τέσσερις κοιλότητες

Σε μια προσπάθεια να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας στο δέκτη, μερικά σχέδια προτείνουν να τοποθετηθεί η επιφάνεια απορρόφησης στο εσωτερικό μιας μονωμένης κοιλότητας, με αποτέλεσμα να μειωθούν οι απώλειες συναγωγής. Ένα παράδειγμα ενός δέκτη κοιλότητας (με 4 κοιλότητες) φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η ροή από το ηλιοστατικό πεδίο αντανακλάται μέσα από ένα άνοιγμα στις επιφάνειες απορρόφησης που σχηματίζουν τους τοίχους της κοιλότητας. Τυπικά σχέδια έχουν επιφάνεια ανοίγματος από το $1/3$ έως το $1/2$ της εσωτερικής επιφάνειας απορρόφησης. Οι δέκτες κοιλότητας περιορίζονται σε μια γωνία αποδοχής 60° έως 120° . Ως εκ τούτου είτε πολλές κοιλότητες τοποθετούνται η μία δίπλα στην άλλη, ή το ηλιοστατικό πεδίο περιορίζεται μπροστά από το άνοιγμα της κοιλότητας.

Το μέγεθος του ανοίγματος ελαχιστοποιείται για να μειώσει τις απώλειες συναγωγής καθώς και τις απώλειες ακτινοβολίας χωρίς να εμποδίζει πολύ την ηλιακή ροή από το να φτάσει στο δέκτη. Το άνοιγμα έχει τυπικά τις ίδιες διαστάσεις με την αντανακλώμενη εικόνα του ήλιου από το πλέον απομακρυσμένο ηλιοστάτι, δίνοντας ποσοστό διαρροής της τάξης του 1-4%. Για το σχεδιασμό μιας μονάδας 380MW το πλάτος του ανοίγματος για τη μεγαλύτερη από τις τέσσερις κοιλότητες (αυτή που κοιτάζει το βορρά) είναι 16 μέτρα και η ροή στο επίπεδο του ανοίγματος είναι τέσσερις φορές η ροή που φτάνει στην απορροφούμενη επιφάνεια [5].

Ογκομετρικοί δέκτες



Σχήμα Γ.6.20. Πύργος με ογκομετρικό δέκτη

Στους ογκομετρικούς δέκτες δεν χρησιμοποιείται μόνο μια επιφάνεια ως εναλλάκτης θερμότητας αλλά ολόκληρος ο όγκος μιας πορώδους δομής. Τέτοιες πορώδεις δομές είναι τα αφρώδη μεταλλικά ή κεραμικά καλούπια ή τα ανθεκτικά στη θερμότητα σύρματα, σε στρώσεις ή πεπλεγμένα μεταξύ τους. Η ακτινοβολία διεισδύσει στο εσωτερικό της δομής και θερμαίνει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που συνήθως είναι ο αέρας. Οι καλοί ογκομετρικοί απορροφητήρες είναι εξαιρετικά πορώδεις και επιτρέπουν στην ακτινοβολία να διεισδύει βαθιά μέσα στη δομή τους. Υποδομές μικρού πάχους (συρμάτινα πλέγματα, τοιχώματα, δοκοί) εξασφαλίζουν καλύτερη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή. Ένας καλός ογκομετρικός απορροφητήρας παρουσιάζει το λεγόμενο "ογκομετρικό φαινόμενο", που σημαίνει ότι η ακτινοβολούμενη πλευρά του απορροφητήρα είναι σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία του θερμικού ρευστού κατά την έξοδο του από τον απορροφητήρα [2].

Σκέψεις σχετικές με τη θερμική ροή

Ο πρωταρχικός περιορισμός σχετικά με το σχεδιασμό του δέκτη είναι η θερμική ροή που μπορεί να απορροφηθεί από την επιφάνεια του δέκτη προς το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, χωρίς να υπερθερμάνει τους τοίχους του δέκτη ή το ρευστό μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό τους. Μια έρευνα σχετική με τις τυπικές μέγιστες τιμές δίνεται στο παρακάτω πίνακα. Η μέση ροή όλου του απορροφητικού τοίχου είναι τυπικά 1/2 με 1/3 των τιμών αυτών. Δύο πράγματα που πρέπει να ληφθούν επίσης υπόψη είναι: (1) ο περιορισμός των διαφοροποιήσεων της θερμοκρασίας κατά μήκους των πλαισίων του δέκτη και (2) οι καθημερινοί θερμικοί κύκλοι των σωλήνων του δέκτη [5].

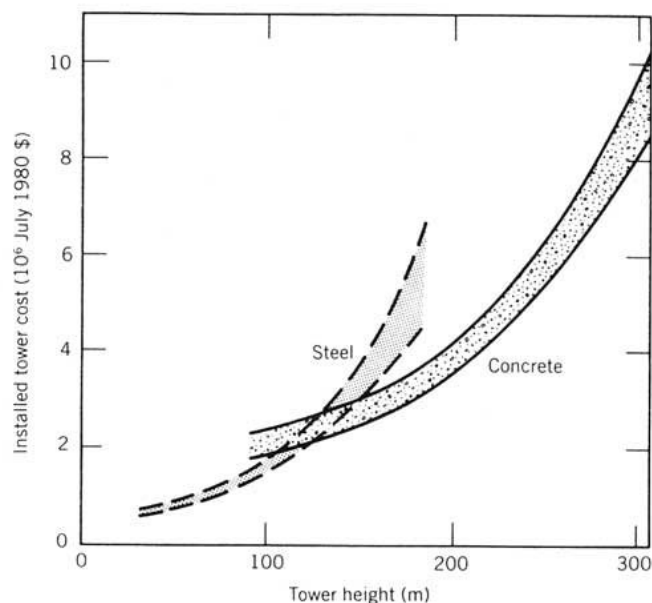
Πίνακας Γ.6.2. Μέγιστη ροή δέκτη σε σχέση με το ρευστό μεταφοράς θερμότητας

Ρευστό μεταφοράς θερμότητας	Διαμόρφωση	Μέγιστη ροή (MW/m ²)
Υγρό νάτριο	Σωλήνες	1.5
Υγρό νάτριο	Θερμοσωλήνες	1.2
Τηγμένο νιτρικό άλας	Σωλήνες	0.7
Υγρό νερό	Σωλήνες	0.7
Ατμός	Σωλήνες	0.5
Αέρας	Μεταλλικούς Σωλήνες	0.22

Σχεδιασμός του πύργου

Το ύψος του πύργου περιορίζεται από το κόστος του. Οι δύο πιο σημαντικοί παράγοντες για το σχεδιασμό του είναι το βάρος του και η εκτεθειμένη στον άνεμο επιφάνειά του. Επίσης σε αρκετές περιοχές πρέπει να εξεταστεί και η αντοχή τους σε σεισμούς. Το βάρος και το μέγεθος του δέκτη επηρεάζονται από το ρευστό όπως αναφέραμε προηγουμένως. Τυπικά βάρη για έναν δέκτη 380MW είναι 250.000kg για έναν εξωτερικό δέκτη που χρησιμοποιεί υγρό νάτριο μέχρι 2.500.000kg για έναν δέκτη κοιλότητας με αέρα. Αυτοί θα τοποθετηθούν σε ένα πύργο ύψους 140 με 170.

Προτεινόμενα σχέδια για το πύργο είναι είτε κατασκευές με ατσάλινα πλαίσια χρησιμοποιώντας τεχνικές σχεδιασμού φορτωτήρων πετρελαίου, ή σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας τεχνικές σχεδιασμού καπνοδόχων. Η ανάλυση κόστους δείχνει ότι οι πύργοι με ατσάλινο πλαίσιο είναι λιγότερο ακριβοί σε ύψη λιγότερο των 120 μέτρων και ότι οι πύργοι από σκυρόδεμα λιγότερο ακριβοί για υψηλότερους πύργους. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας ανάλυσης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα [5].



Σχήμα Γ.6.21. Κόστος του πύργου σε διαφορετική ύψη πύργου

Ρευστά μεταφοράς θερμότητας

Η επιλογή του ρευστού για τη μεταφορά της θερμότητας που θα ρέει μέσα από το δέκτη καθορίζεται από το είδος της εγκατάστασης. Το πρωταρχικό κριτήριο επιλογής είναι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος ακολουθούμενη από τη σχέση κόστους-απόδοσης του συστήματος και την ασφάλεια. Πέντε ρευστά έχουν μελετηθεί λεπτομερώς για χρήση σε συστήματα κεντρικού δέκτη. Θα εξεταστούν χωριστά στις παραγράφους που ακολουθούν.

Τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας είναι τα έλαια. Τόσο υδρογονάνθρακες όσο και συνθετικά έλαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλλά η μέγιστη θερμοκρασία τους είναι περίπου 425°C. Ωστόσο, η πίεσή τους σε τέτοιες θερμοκρασίες είναι αρκετά χαμηλή, επιτρέποντας έτσι τη χρήση τους για θερμική αποθήκευση ενέργειας. Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τους -10° C πρέπει να δοθεί θερμότητα για να ρέουν τα περισσότερα από αυτά τα έλαια. Σημαντικό τους μειονέκτημα είναι το ότι είναι εύφλεκτα και ως εκ τούτου απαιτούν ειδικά συστήματα ασφαλείας, όταν χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες. Το κόστος τους είναι περίπου \$0.77/kg.

Ο **ατμός** έχει μελετηθεί για αρκετές εγκαταστάσεις κεντρικού δέκτη και είναι το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση Solar one. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι περίπου 540°C όπου

η πίεση πρέπει να είναι περίπου 10 MPa (1450 psi) για να παραχθεί υψηλή θερμοκρασία βρασμού. Πρέπει να παρέχεται προστασία από το πάγωμα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 0°C. Το νερό που χρησιμοποιείται στο δέκτη πρέπει να είναι απιονισμένο. Το κόστος του είναι χαμηλότερο από αυτό άλλων ρευστών μεταφοράς θερμότητας. Η χρήση του νερού ως μέσο αποθήκευσης υψηλών θερμοκρασιών είναι δύσκολη εξαιτίας των υψηλών πιέσεων

Μείγματα νιτρικού άλατος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας και ως ρευστό αποθήκευσης σε θερμοκρασίες μέχρι τους 565°C. Ωστόσο τα περισσότερα μείγματα παγώνουν σε θερμοκρασίες από 140 έως 220°C και ως εκ τούτου πρέπει να θερμαίνονται όταν το σύστημα σταματάει τη λειτουργία του. Έχουν υψηλές δυνατότητες αποθήκευσης, λόγω της υψηλής ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας τους (τα τηγμένα άλατα έχουν ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου 500-700 kWh/m³). Το νιτρικό άλας αποτελεί ένα μείγμα 60% νιτρικού νατρίου και 40% νιτρικού καλίου. Το κόστος του υλικού είναι 0.70 \$/kg ή διαφορετικά 5.20 \$/kWh.

Υγρό νάτριο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί τόσο ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας, με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας αυτής των 600°C. Επειδή το νάτριο είναι υγρό σε αυτές τις θερμοκρασίες, η πίεση του είναι μικρή. Ωστόσο, στερεοποιείται στους 100°C και χρειάζεται θέρμανση όταν σταματά η λειτουργία της εγκατάστασης. Το κόστος των συστημάτων που βασίζονται στο νάτριο είναι υψηλότερο αυτών που βασίζονται στο νιτρικό άλας αφού το νάτριο στοιχίζει περίπου \$0.88/ kg.

Για εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες όπως είναι οι κύκλοι του Brayton, προτείνεται να χρησιμοποιηθεί αέρας ή ήλιο ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Προτείνονται θερμοκρασίες λειτουργίας περίπου 850°C με πίεση στις 12 ατμόσφαιρες. Παρόλο που το κόστος αυτών των αερίων είναι αρκετά μικρό, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση και χρειάζονται σωλήνες μεγάλης διαμέτρου για να μεταφερθούν μέσα στο σύστημα [5].

Γ.6.4. Θερμική απόδοση του συστήματος

Η θερμική απόδοση ενός συστήματος κεντρικού δέκτη μπορεί να οριστεί σε όρους της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Είναι αρκετά συνηθισμένο να ορίζεται αυτή η απόδοση σε όρους

άμεσης κάθετης ακτινοβολίας $I_{b,n}$ και της συνολικής επιφάνειας του ηλιοστατικού πεδίου. Η συνολική απόδοση της συλλεγόμενης ενέργειας σε ένα σύστημα κεντρικού δέκτη είναι

$$n_{col} = \frac{\dot{Q}_{useful}}{I_{b,n} n_h A}$$

(Γ.6.14)

Όπου Q_{useful} είναι ο ρυθμός της ενέργειας που περνάει στο εργαζόμενο ρευστό, n_h είναι ο συνολικός αριθμός ηλιοστατών στο πεδίο και A_h είναι η συνολική επιφάνεια των ηλιοστατών (βασισμένη στις εξωτερικές τους διαστάσεις) [5].

Γ.6.4.1. Απώλειες ενέργειας

Υπάρχουν 10 διαφορετικές πηγές που προκαλούν απώλειες σε ένα τυπικό σχέδιο κεντρικού δέκτη οι οποίοι ομαδοποιούνται μαζί για να σχηματίσουν τη συνολική απόδοση συλλογής ενέργειας. Αυτές οι απώλειες μπορούν να χωριστούν σε απώλειες του πεδίου και σε απώλειες του δέκτη. Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τις επιμέρους αυτές απώλειες μαζί με μερικές τυπικές τιμές, για ένα σύστημα 380MW που βρίσκεται σε έρημο σε μέσο γεωγραφικό πλάτος και χρησιμοποιεί εξωτερικό δέκτη, για να δει ο αναγνώστης της σχετική επιρροή κάθε μεμονωμένης απώλειας στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Πίνακας Γ.6.3 Απώλειες ενέργειας συστήματος κεντρικού δέκτη

Στοιχείο	Πηγή	Σημείο σχεδίασης, μεσημέρι (%)	Ετήσιος μέσος όρος
<i>Απώλειες πεδίου</i>			
	Συνημιτόνου	17,1	23,4
	Σκίαση και παρεμπόδιση	0	5,6
	Ανακλαστικότητα	10	10
	Εξασθένηση	5,4	6
<i>Συνολικές απώλειες πεδίου</i>		33,5	45
<i>Απώλειες δέκτη</i>			
	Διαρροή	1,2	2
	Απορροφητικότητα	2	2
	Ακτινοβολία	6,3	9,8
	Αγωγή και συναγωγή	0,2	0,2
<i>Συνολικές απώλειες δέκτη</i>		9,7	14
<i>Συνολικές απώλειες συστήματος</i>		42,2	59
Συνολική απόδοση του συστήματος		57,8	41

Απώλειες πεδίου

Οι απώλειες ενέργειας που σχετίζονται συγκεκριμένα με το ηλιοστατικό πεδίο περιλαμβάνουν τις 4 ή 5 μεγαλύτερες πηγές απωλειών ενέργειας. Η μεγαλύτερη από αυτές είναι οι απώλειες συνημίτονου που σχολιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ακολουθώντας είναι οι απώλειες ανακλαστικότητας Παρόλο που μπορούν να κατασκευαστούν νέα κάτοπτρα με ανακλαστικότητα περίπου 94%, ο χρόνος και η σκόνη σύντομα μειώνουν αυτή τη τιμή στο 90%. Το να κρατιούνται καθαροί και σε καλή κατάσταση είναι πολύ σημαντικό για να μεγιστοποιηθεί η ετήσια παραγωγή ενέργειας.

Ο τρίτος λόγος απωλειών είναι η σκίαση. Παρόλο που το μεσημέρι, όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μέγιστο ύψος, δεν υπάρχει σκίαση ή παρεμπόδιση για ένα καλά σχεδιασμένο πεδίο, το πρωί και το απόγευμα το φαινόμενο γίνεται ιδιαίτερα εμφανές, ειδικά το χειμώνα, όταν ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ουρανό.

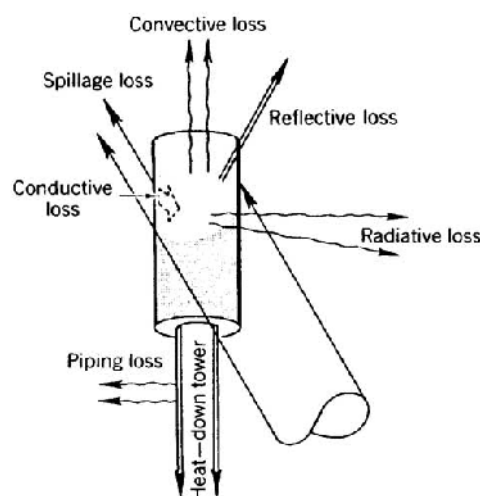
Ορίζοντας αυτές τις απώλειες σε όρους απόδοσης, εκφράζουμε τις απώλειες του πεδίου ως

$$n_{\text{field}} = n_{\text{cos}} n_{\text{shadow}} n_{\text{block}} n_{\text{refl}} n_{\text{atten}}$$

(Γ.6.15)

όπου n_{cos} , n_{shadow} , n_{block} , n_{refl} και n_{atten} είναι συντελεστές βασισμένοι στο συνημίτονο, στη σκίαση, στη παρεμπόδιση, στην ανάκλαση των κατόπτρων και στην ατμοσφαιρική εξασθένηση αντίστοιχα [5].

Απώλειες δέκτη



Σχήμα Γ.6.22. Θερμικές απώλειες δέκτη

Οι διαφορετικές απώλειες που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα δέκτη φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. Η απόδοση του δέκτη μπορεί να οριστεί ως αποτέλεσμα κάθε συντελεστή απωλειών.

$$\eta_{\text{receiver}} = \eta_{\text{spill}} \eta_{\text{absorp}} \eta_{\text{rad}} \eta_{\text{conv}} \eta_{\text{cond}}$$

(Γ.6.16)

Όπου η_{spill} , η_{absorp} , η_{rad} , η_{conv} και η_{cond} είναι συντελεστές βασισμένοι στην διαρροή, την απορροφητικότητα, την ακτινοβολία, τη συναγωγή και την αγωγή αντίστοιχα.

Η σημαντική απώλεια ενέργεια για το δέκτη είναι οι απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας θερμότητας. Αυτές οι απώλειες εξαρτώνται από το σχεδιασμό του δέκτη, αν είναι τύπου κοιλότητας ή εξωτερικός, της θερμαινόμενη επιφάνειά του και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Επιπλέον παράγοντες είναι η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο προσανατολισμός του δέκτη. Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής εξαρτώνται από το μέγεθος του δέκτη και τη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος. Για τα σύγχρονα συστήματα κεντρικού δέκτη η θερμοκρασία λειτουργίας είναι σταθερή. Έτσι, ο ρυθμός απωλειών ενέργειας από το δέκτη είναι σταθερός κατά τη διάρκεια της μέρας (και χρόνου) και το ποσοστό των απωλειών αυξάνεται το πρωί και το απόγευμα. Αυτό κάνει τις ετήσιες απώλειες μεγαλύτερες από τις απώλειες στο σημείο λειτουργίας. Είναι αυτός ο σταθερός ρυθμός απωλειών που καθορίζει το όριο λειτουργίας του συστήματος. Το σύστημα θα λειτουργεί μόνο όταν η ενέργεια από τον ήλιο είναι αρκετή έτσι ώστε να ξεπεράσει τις θερμικές απώλειες του δέκτη. Αυτό το όριο συνήθως συμβαίνει όταν η γωνία ύψους του ήλιου είναι περίπου 15 μοίρες. Λειτουργία σε μικρότερες γωνίες περιορίζεται επίσης από τα φαινόμενα σκίασης και παρεμπόδισης.

Οι απώλειες διαρροής ή απώλειες εξαιτίας της ενέργειας που δεν προσπίπτει στην απορροφητική επιφάνεια είναι παράμετροι τόσο του ηλιοστατικού πεδίου όσο και του δέκτη. Η ακρίβεια της επιφάνειας του ηλιοστάτη, η εξάπλωση της δέσμης, η ακρίβεια της παρακολούθησης όλα αυτά έχουν σημαντική επιρροή στη κατανομή της ροής στο δέκτη και σα συνέπεια στη διαρροή. Οι απώλειες διαρροής μπορούν να μειωθούν με την αύξηση του μεγέθους του δέκτη. Ο δέκτης συνήθως είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε να συλλάβει τη περισσότερη ανακλώμενη ακτινοβολία από το ηλιοστατικό πεδίο και να κρατήσει τη μέγιστη προσπίπτουσα ροή σε χαμηλές τιμές για το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο το μέγεθός του είναι περιορισμένο εξαιτίας τόσο της ακτινοβολίας όσο και των απωλειών συναγωγής που είναι ανάλογα με την επιφάνεια του δέκτη. Ο προσδιορισμός του βέλτιστου μεγέθους του δέκτη απαιτεί αρκετές μελέτες βελτιστοποίησης με υπολογιστικά μοντέλα.

Σε αντίθεση με τη διαρροή η απορροφητικότητα εξαρτάται μόνο από το είδος της επίστρωσης της απορροφητικής επιφάνειας. Πολλά από τα σύγχρονα σχέδια χρησιμοποιούν μογιά υψηλής απορροφητικότητας η οποία υπάρχει εμπορικά στην αγορά ως Pygmark. Αυτή η μογιά είναι σχεδιασμένη για επιφάνειες υψηλής θερμοκρασίας και έχει απορροφητικότητα περίπου 0.95 . Αν αυτή η απορροφητική επιφάνεια είναι μέσα σε κοιλότητα, η αποτελεσματική απορροφητικότητα αυξάνεται στο 0.98.

Η τελευταία απώλεια είναι η απώλεια αγωγής. Η περισσότερη από αυτή τη θερμότητα χάνεται μέσα από τη δομή που συνδέει το δέκτη με το πύργο. Αυτή αποτελεί συνήθως ένα μικρό ποσοστό και κρατιέται μικρό μειώνοντας τον αριθμό και το μέγεθος των σημείων σύνδεσης του δέκτη και χρησιμοποιώντας μέταλλα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας όπως είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας.

Η συνολική απόδοση της συλλογής ενέργειας σε ένα σύστημα κεντρικού δέκτη μπορεί να οριστεί σε σχέση με τους συντελεστές πεδίου και δέκτη [5].

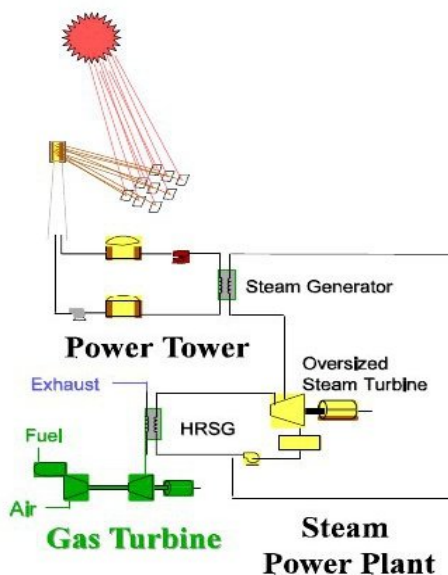
Γ.6.5. Εφαρμογή του συστήματος, οφέλη και επιπτώσεις

Σήμερα νέες πηγές ενέργειας είναι απαραίτητες σε πολλές περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου. Όπως αναφέραμε η Ινδία η Αίγυπτος και η νότια Αφρική είναι τοποθεσίες που φαίνονται να είναι ιδανικές για την ανάπτυξη πύργων ισχύος. Όσο η τεχνολογία ωριμάζει θα μπορούσαν να εμφανιστούν μονάδες με παραγωγή ακόμα και 400MW. Όσο οι μη-ρυπογόνες πηγές ενέργειας γίνονται προτιμητέες οι πύργοι ισχύος ρευστού αλατιού θα έχουν μεγάλη αξία επειδή η αποθήκευση της ενέργειας επιτρέπει τη προσφορά της τις ώρες αιχμής όταν είναι και πιο πολύτιμη. Επίσης η αποθήκευση ενέργειας επιτρέπει στη μονάδα να σχεδιαστεί και να χτιστεί μέσα σε ένα εύρος ετήσιου συντελεστή δυναμικού (20 έως 65%). Συνδυάζοντας υψηλούς παράγοντες χωρητικότητας και το γεγονός ότι η αποθήκευση ενέργειας θα επιτρέπει την εισαγωγή της στο δίκτυο με ελεγχόμενο τρόπο (μειώνοντας τα μεταβατικά φαινόμενα) και έτσι η διείσδυση στην αγορά θα είναι ακόμα υψηλότερη από μια διακοπτόμενη ηλιακή τεχνολογία χωρίς αποθήκευση.

Μια πιθανή ανησυχία για τη χρήση της τεχνολογίας είναι οι σχετικά μεγάλες εκτάσεις γης που απαιτούνται καθώς επίσης και η μεγάλη χρήση νερού. Αυτό μπορεί να γίνει ένα σημαντικό θέμα από πρακτική και περιβαλλοντική σκοπιά αφού αυτές οι μονάδες χρησιμοποιούνται συνήθως σε ερήμους που συχνά έχουν έλλειψη σε νερό και έχουν εύθραυστο υπέδαφος. Η χρήση του νερού

στους πύργους ισχύος είναι συγκρίσιμη με άλλες τεχνολογίες ίδιου μεγέθους και ετήσιας απόδοσης που χρησιμοποιούν το κύκλο του Rankine. Η χρήση της γης είναι γενικά μικρότερη από αυτή που χρειάζεται από τα υδροηλεκτρικά έργα και από την εξαγωγή ορυκτών (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο) , όταν συμπεριλαμβάνεται η εξόρυξη και η εξερεύνηση της γης [1].

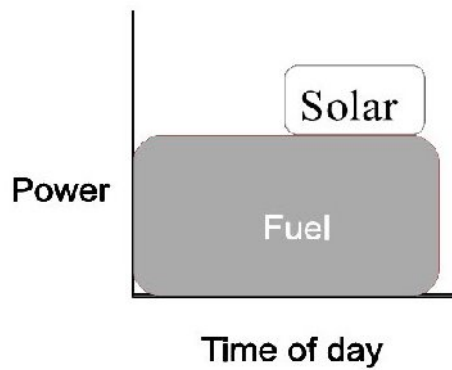
Γ.6.5.1. Υβριδικοί σταθμοί



Σχήμα Γ.6.23. Υβριδική μονάδα πύργου ισχύος με συνδυασμένο κύκλο. Ενέργεια παράγεται από τον αεριοστρόβιλο και τον ατμοστρόβιλο

Για τη μείωση των οικονομικών κινδύνων που συνδέονται με την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας παραγωγής ενέργειας καθώς και για τη μείωση του κόστους είναι αρκετά πιθανό οι πρώτοι εμπορικού πύργου ισχύος να συνδυαστούν με συμβατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές επιλογές για ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα όπως ο συνδυασμένος κύκλος με φυσικό αέριο, άνθρακα ή πετρέλαιο.

Σε μια υβριδική μονάδα, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τη χρήση ορυκτών καυσίμων ή για να αυξήσει την παραγόμενη ισχύ του ατμοστρόβιλου. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε τη παραγωγή ισχύος μιας υποθετικής υβριδικής μονάδας αύξησης ισχύος. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι είναι σαν να έχουμε μόνη της μια ηλιακή μονάδα πάνω από μια μονάδα φορτίου βάσης ορυκτών καυσίμων.



Σχήμα Γ.6.24. Υποθετικό προφίλ της ισχύος από ένα υβριδικό σύστημα

Στην υβριδική μονάδα αύξησης ισχύος μπορεί να παραχθεί επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια μεγαλώνοντας το μέγεθος του ατμοστροβίλου έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργήσει ταυτόχρονα με ενέργεια από ορυκτά καύσιμα καθώς και με ηλιακή ενέργεια όταν αυτή είναι διαθέσιμη. Έρευνες σε αυτό το θέμα έχουν δείξει ως βέλτιστη την αύξηση του μεγέθους του ατμοπαραγωγού κατά 25% με 50% σε σχέση με αυτό που παράγει ο στρόβιλος όταν λειτουργεί μόνο με τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Αύξηση του μεγέθους του ατμοστροβίλου πέρα από αυτές τις τιμές δεν προτείνεται επειδή θα οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική όταν η λειτουργία γίνεται μόνο με ορυκτά καύσιμα.

Σε μια τέτοια υβριδική μονάδα ο ηλιακός πύργος συνεισφέρει το 25% της παραγόμενης ενέργειας αιχμής και μεταξύ 10% και 25% της ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας. Το υψηλότερο ετήσιο ηλιακό κλάσμα μπορεί να επιτευχθεί όταν υπάρχει θερμική αποθήκευση διάρκειας 13 ωρών και το μικρότερο με αποθήκευση μόλις λίγων ωρών. Σχεδιάζοντας μονάδες με ένα σχετικά μέτριο ηλιακό κλάσμα μειώνει τον οικονομικό κίνδυνο επειδή το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από τα “δοκιμασμένα” ορυκτά καύσιμα και εξασφαλίζεται η σταθερή πληρωμή για τις πωλήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας [1].

Γ.6.5.2. Οφέλη – Αποθήκευση ενέργειας

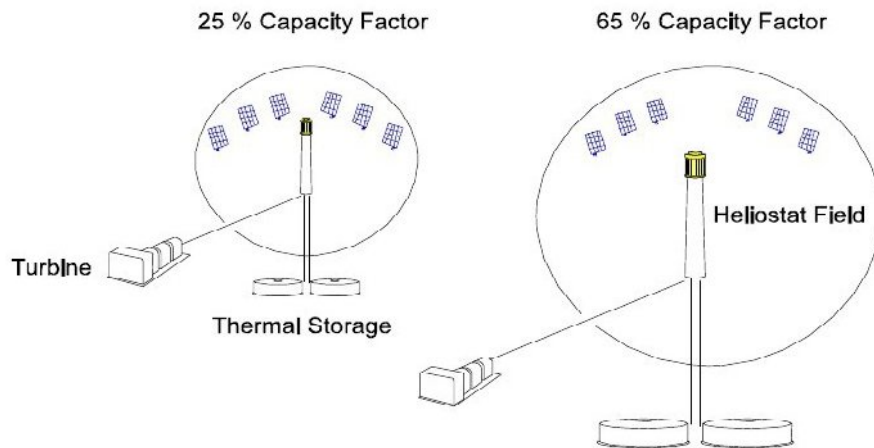
Η διαθεσιμότητα φθηνού και αποτελεσματικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να δώσει στους πύργους ισχύος ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Στο παρακάτω πίνακα βλέπουμε μια σύγκριση των προβλεπόμενων δαπανών, την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας για υποθετικές μονάδες των 200MW.

Πίνακας Γ.6.4. Σύγκριση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

	Installed cost of energy storage for a 200 MW plant (\$/kWh _e)	Lifetime of storage system (years)	Round-trip storage efficiency (%)	Maximum operating temperature (°C/°F)
Molten-Salt Power Tower	30	30	99	567/1,053
Synthetic-Oil Parabolic Trough	200	30	95	390/734
Battery Storage Grid Connected	500 to 800	5 to 10	76	N/A

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε ένα πύργο ισχύος επιτρέπει την αποστολή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο όταν η ζήτηση είναι υψηλότερη, αυξάνοντας έτσι η χρηματική αξία της ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς οι πύργοι ισχύος όπως συμβαίνει με τα υδροηλεκτρικά έργα δεν θεωρούνται ως μια διακοπτόμενη μονάδα ανανεώσιμης ενέργειας. Πέρα από τη δυνατότητα αποστολής ισχύος, η θερμική αποθήκευση δίνει την ελευθερία στους σχεδιαστές του συστήματος να αναπτύξουν ένα μεγάλο εύρος από παράγοντες χωρητικότητας έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του δικτύου. Αλλάζοντας το μέγεθος του ηλιακού πεδίου, του δέκτη καθώς και το μέγεθος της θερμικής αποθήκευσης οι μονάδες μπορούν να σχεδιαστούν με ετήσιους συντελεστές δυναμικού που κυμαίνονται από 20% έως 65%.

Οικονομικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα σταθμισμένα ενεργειακά κόστη μειώνονται με την προσθήκη παραπάνω αποθηκευτικού χώρου έως το όριο των 13 ωρών (περίπου 65% συντελεστής δυναμικού). Ενώ είναι αλήθεια ότι η αποθήκευση αυξάνει το κόστος της μονάδας είναι επίσης αλήθεια ότι μονάδες με μεγαλύτερους συντελεστές δυναμικού έχουν καλύτερη οικονομική αξιοποίηση του στροβίλου. Από τη στιγμή που η αποθήκευση άλατος είναι φθηνή το επιπλέον κόστος που προκαλεί η προσθήκη αποθήκευσης αποζημιώνεται [1].



Σχήμα Γ.6.25. Για να αυξήσει το συντελεστή δυναμικού για ένα δεδομένο μέγεθος στροβίλου ο σχεδιαστής θα μπορούσε να 1) αυξήσει τον αριθμό των ηλιοστατών, 2) να μεγαλώσει τις δεξαμενές θερμικής αποθήκευσης, 3) Να αυξήσει το ύψος του πύργου, 4) Να αυξήσει τις διαστάσεις του δέκτη

Γ.6.5.3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του πύργου δεν απελευθερώνονται επικίνδυνα αέρια η υγρά από τη μονάδα. Σε περίπτωση που χυθεί τηγμένο άλας, αυτό παγώνει πριν γίνει κάποια σημαντική μόλυνση του εδάφους. Το αλάτι στη συνέχεια μπορεί να μαζευτεί και να ανακυκλωθεί αν είναι απαραίτητο. Σε μια υβριδική μονάδα ηλιακού πύργου και συμβατικού ορυκτού καυσίμου εκπομπές θα απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα, όχι όμως από το ηλιακό τμήμα της μονάδας.

Γ.6.6. Υποθέσεις σχετικά με τη τεχνολογία και προβλήματα

Προκειμένου να γίνει η τεχνολογία ελκυστική για εμπορικούς σκοπούς είναι απαραίτητη η πρόοδος σε μερικά υποσυστήματα έτσι ώστε να μειωθούν τα κόστη και να αυξηθεί η αξιοπιστία της. Στην ιδανική περίπτωση για να είναι η τεχνολογία οικονομικά ανταγωνιστική έναντι της συμβατικής ορυκτής τεχνολογίας θα πρέπει ο πύργος ισχύος να είναι τουλάχιστον 100MW. Επειδή όμως ένα τέτοιο εγχείρημα εμπεριέχει τεχνικούς και οικονομικούς κινδύνους θα ήταν απαραίτητη πρώτα η κατασκευή ηλιακών πύργων ισχύος μέσου μεγέθους (30-50MW). Επειδή το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για ένα αυτοτελή ηλιακό πύργο των 30MW θα είναι σημαντικά υψηλότερο σε σχέση με την ανταγωνιστική τεχνολογία των ορυκτών καυσίμων θα πρέπει να βρεθούν χρηματοδοτήσεις ή επιδοτήσεις για να υποστηριχθεί το έργο. Ο υβριδισμός είναι ακόμα μια επιλογή που διερευνάται για να βοηθήσει την είσοδο στην αγορά.

Ηλιοστάτες

Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευασθεί σχετικά λίγοι ηλιοστάτες και το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό. Όσο όμως αυξάνεται η απαίτηση για ηλιακή ενέργεια θα αναπτυχθούν μαζικές μέθοδοι παραγωγής ηλιοστατών οι οποίες θα μειώσουν το κόστος. Σύμφωνα με μελέτες μια ελκυστική τιμή για να γίνει ανταγωνιστική η τεχνολογία στην αγορά είναι τα 100\$/m² ενώ οι σημερινές τιμές είναι από 130 έως 200\$/m². Δεδομένου ότι το ηλιοστατικό πεδίο αποτελεί τη μεγαλύτερη επένδυση κεφαλαίων σε μια μονάδα πύργου ισχύος είναι απαραίτητο να εξελιχθεί η τεχνολογία για να βελτιωθεί η ικανότητα παραγωγής, να μειωθεί το κόστος και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής των ηλιοστατών. Ειδικότερα πρέπει να μειωθεί το κόστος του αζιμούθιου συστήματος οδήγησης (προκειμένου να περιστρέφει τον ηλιοστάτη ως προς έναν άξονα κάθετο στο έδαφος).

Δέκτης

Για να βελτιωθεί η αποδοτικότητα και να μειωθεί η συντήρηση είναι απαραίτητο να κατασκευασθούν απλούστεροι δέκτες. Ήδη αναπτύσσονται νέοι εξελιγμένοι δέκτες με νέα κράματα χάλυβα για τις σωληνώσεις του δέκτη και ευκολία κατασκευής για όλο το υποσύστημα του.

Τηγμένο άλας

Το τηγμένο άλας αν και αποτελεί ένα εξαιρετικό μέσο αποθήκευσης μπορεί ταυτόχρονα να γίνει ενοχλητικό λόγω του υψηλού σημείου πήξης (220°C). Για να διατηρηθεί το αλάτι ρευστό θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα αρκετά περίπλοκο σύστημα ανίχνευσης της θερμότητας. Το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιείται για να κρατήσει σταθερή η να αυξήσει τη θερμοκρασία στις σωληνώσεις. Το σύστημα συνίσταται από ηλεκτρικά καλώδια που συνδέονται στην εξωτερική πλευρά των σωληνώσεων. Οι σωλήνες διατηρούνται ζεστές εξαιτίας θέρμανσης από αντιστάσεις. Περισσότερη έρευνα θα μπορούσε να γίνει σε αυτό το τομέα ώστε να μειωθεί η εξάρτηση της μονάδας από το συγκεκριμένο σύστημα. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί αναπτύσσοντας μια μέθοδο που θα μειώνει τη θερμοκρασία ψύξης του άλατος, την ανάπτυξη συστατικών που μπορούν να εκκινήσουν “κρύα” χωρίς να χρειάζεται εφαρμογή του συστήματος ανίχνευσης θερμότητας εκ των προτέρων και την ανάπτυξη πρακτικών θερμικής διαχείρισης που θα είναι λιγότερο εξαρτημένες από το σύστημα αυτό. Επίσης οι βαλβίδες μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικές συσκευασίες και οι διαρροές δεν είναι κάτι ασυνήθιστο. Επιπλέον η ψύξη του αλατιού στη βαλβίδα μπορεί να την εμποδίσει από το να λειτουργήσει σωστά. Παρόλο που η σημερινή τεχνολογία των βαλβίδων είναι επαρκής για το τηγμένο άλας περαιτέρω βελτιώσεις στο σχεδιασμό και την τυποποίηση θα μείωνε το κίνδυνο και τελικά θα μείωνε το κόστος.

Ατμοπαραγωγός

Περαιτέρω έρευνες θα πρέπει να γίνουν και στο τομέα του ατμοπαραγωγού για να αξιολογηθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός του [1].

Γ.6.7. Γη, νερό και απαιτήσεις υλικών

Στο παρακάτω πίνακα βλέπουμε την αξία της χρήσης νερού και γης όσο αφορά το ηλιακό τμήμα της μονάδας ισχύος. Ο σωστός τρόπος για να εκφραστεί η χρήση γης είναι σε εκτάρια/MWhr / έτος. Το να εκφραστεί η χρήση γης σε εκτάρια ανά MW δεν έχει νόημα σε μια ηλιακή μονάδα με αποθήκευση ενέργειας γιατί χάνεται η επίδραση του συντελεστή δυναμικού. Αν δεν υπάρχει αρκετό διαθέσιμο νερό στο χώρο του σταθμού θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα ξηρό σύστημα ψύξης το οποίο θα μπορούσε να μειώσει την απαίτηση για νερό έως και 90%. Ωστόσο σε αυτή τη περίπτωση το κόστος και η μείωση στις επιδόσεις αναμένονται να αυξηθούν κατά τουλάχιστον 10% [1].

Table 4. Resource requirements.

Indicator Name	Units	Base Year 1997	2000	2005	2010	2020	2030
Land	ha/MWh/yr	2.7×10^{-3}	1.5×10^{-3}	1.4×10^{-3}	1.3×10^{-3}	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}
Water	m ³ /MWh	3.2	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4

Σχήμα Γ.6.27. Απαιτήσεις πόρων

[1] “Technology Characterization Solar Power tower”, SolarPACES,

(http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_tower.pdf)

[2] Wikipedia the free encyclopedia <http://www.wikipedia.org>

[3] Materials Issues In Solar Thermal Energy Systems R. W. Mar and J. C. Swearingen, Solar Energy Materials 5 (1981) 37-53, North-Holland Publishing Company

[4] “Theoretical Study Of Main Factors Affecting The Heliostat Field Design Of Tower Power Plant”, Basil F. Ali, Energy Convers. Mgmt Vol. 30, No. 2, pp. 101-106, 1990

[5] “Power From The Sun Book, William B. Stine και Michael Geyer

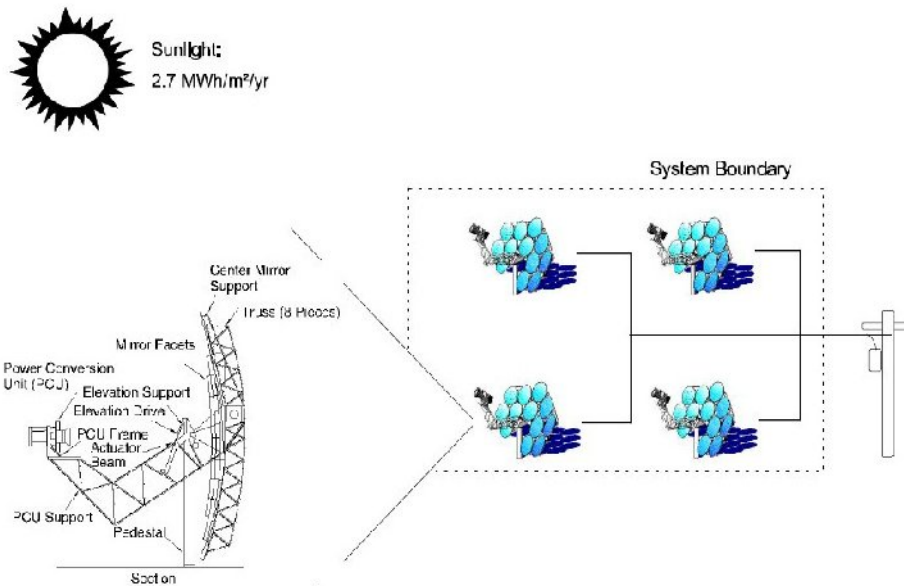
(<http://www.powerfromthesun.net/book.htm>)

Γ.7. Ηλιακός δίσκος/μηχανή



Σχήμα Γ.7.1. Ηλιακός δίσκος

Οι ηλιακοί δίσκοι μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια που περιέχεται στην ηλιακή ακτινοβολία σε μηχανική ενέργεια και μετά σε ηλεκτρική ενέργεια με τον ίδιο τρόπο που οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας μετατρέπουν θερμική ενέργεια λόγω της καύσης των ορυκτών καυσίμων σε ηλεκτρισμό. Όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα τα συστήματα ηλιακού δίσκου χρησιμοποιούν μια σειρά καθρεπτών για ανακλάσουν και να επικεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη, με σκοπό να επιτευχθούν θερμοκρασίες που είναι απαραίτητες για να μετατρέψουν αποτελεσματικά τη θερμότητα σε έργο. Η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το δέκτη και μεταφέρεται σε ένα κινητήρα.



Σχήμα Γ.7.2. Σύστημα δίσκου/μηχανής

Τα συστήματα ηλιακού δίσκου χαρακτηρίζονται από υψηλή αποδοτικότητα, αυτόνομη λειτουργία και μια εγγενής υβριδική ικανότητα (την ικανότητα να λειτουργεί είτε με ηλιακή ενέργεια ή με ορυκτό καύσιμο, ή και με τα δύο). Από όλες τις ηλιακές τεχνολογίες τα συστήματα δίσκου/μηχανής έχουν επιδείξει αποδοτικότητα όσο αφορά τη μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική (29.4%) και ως εκ τούτου έχουν τη δυνατότητα να καταστούν μία από τις πιο φθηνές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας. Η αυτονομία των συστημάτων δίσκου μηχανής τους επιτρέπει να λειτουργούν είτε μεμονωμένα είτε ομαδοποιημένα ανάλογα με την εφαρμογή. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης και οι τεχνικές προκλήσεις παραμένουν όσο αφορά τα ηλιακά μέρη και την εμπορική διαθεσιμότητα της.

Η συνολική απόδοση του συστήματος μπορεί να οριστεί ως:

$$\eta = \eta_c \eta_R \eta_{Eng} \eta_{Gen} = \frac{P}{A_c I} ,$$

(Γ.7.1)

όπου η_c είναι η απόδοση του συλλέκτη-συγκεντρωτή-εστιαστή, η_R είναι η απόδοση του δέκτη, η_{Eng} είναι η απόδοση της μηχανής, η_{Gen} είναι η απόδοση της γεννήτριας, P είναι η παραγόμενη ισχύς, A_c είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του συγκεντρωτή, και I είναι η άμεση κάθετη ακτινοβολία.[1]

Γ.7.1. Περιγραφή του συστήματος

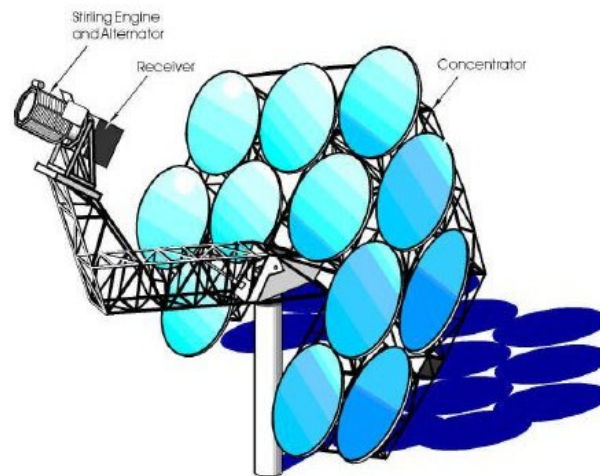
Γ.7.1.1. Συγκεντρωτές

Τα συστήματα ηλιακού δίσκου/μηχανής χρησιμοποιούν συγκεντρωτικούς συλλέκτες που ακολουθούν τη πορεία του τον ήλιο σε 2 άξονες. Μια ανακλαστική επιφάνεια από μεταλλοποιημένο γυαλί ή πλαστικό αντανακλά τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μια μικρή περιοχή που ονομάζεται **εστία**. Το μέγεθος του ηλιακού συγκεντρωτή εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανής. Με ονομαστική άμεση μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία των $100\text{W}/\text{m}^2$, ο ηλιακός συγκεντρωτής για σύστημα 25 KWe έχει μέγεθος περίπου 10 μέτρα.

Οι συγκεντρωτές χρησιμοποιούν μια ανακλαστική επιφάνεια από αλουμίνιο ή ασήμι το οποίο εφαρμόζεται πάνω σε γυαλί ή πλαστικό. Οι πιο ανθεκτικές ανακλαστικές επιφάνειες είναι οι καθρέπτες ασημιού/γυαλιού, που μοιάζουν με τους σπιτικούς διακοσμητικούς καθρέπτες. Προσπάθειες για να αναπτυχθούν ανακλαστικές μεμβράνες από πολυμερή χαμηλού κόστους δεν είχαν μεγάλη επιτυχία. Επειδή οι συγκεντρωτικοί δίσκοι έχουν μικρό μήκος εστίασης, απαιτούνται σχετικά λεπτοί καθρέπτες (πάχος περίπου ίσο με 1mm) για να επιτύχουν τις απαιτούμενες καμπύλες. Επιπλέον προκειμένου να βελτιωθεί η ανάκλαση είναι επιθυμητό το γυαλί να περιέχει μικρή ποσότητα σιδήρου. Εξαρτώμενοι από το πάχος και τη περιεκτικότητα τους σε σίδηρο, οι επαργυρωμένοι ηλιακοί καθρέπτες έχουν τιμές ηλιακής ανάκλασης από 90% έως 94%.

Το ιδανικό σχήμα του συγκεντρωτή είναι παραβολοειδές εκ περιστροφής. Ορισμένοι ηλιακοί συγκεντρωτές προσεγγίζουν το σχήμα αυτό με πολλαπλά, σφαιρικά κάτοπτρα τα οποία υποστηρίζονται σε έναν σκελετό από μεταλλικές δοκούς ενίσχυσης. Μια καινοτομία στο τομέα της σχεδίασης ηλιακών συγκεντρωτών είναι η χρήση τεταμένων μεμβρανών στην οποία μια λεπτή ανακλαστική μεμβράνη τεντώνεται πάνω σε μια στεφάνη. Μια δεύτερη μεμβράνη χρησιμοποιείται για να κλείσει το χώρο από πίσω. Ένα μερικό κενό σχηματίζεται σε αυτό το χώρο με αποτέλεσμα η ανακλαστική μεμβράνη να αποκτά ένα σφαιρικό σχήμα. Στη παρακάτω φωτογραφία βλέπουμε ένα σύστημα ηλιακού δίσκου/ Stirling που χρησιμοποιεί αυτή την ιδέα. Η οπτική σχεδίαση του συγκεντρωτή καθώς και η ακρίβεια καθορίζουν το λόγο συγκέντρωσης. Ο λόγος συγκέντρωσης ορίζεται ως η μέση ηλιακή ροή που περνά μέσα από το δέκτη διαιρεμένη με την άμεση ηλιακή

ακτινοβολία του περιβάλλοντος και είναι συνήθως πάνω από 2000. Το κλάσμα ανάκλασης που είναι το κλάσμα της ανακλώμενης ηλιακής ροής που περνά από το δέκτη είναι συνήθως 95%.



Σχήμα Γ.7.3. Σύστημα δίσκου/μηχανής με κάτοπτρα μεμβράνης

Η παρακολούθηση της κίνησης του ήλιου στον ουρανό συμβαίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους. Με τη παρακολούθηση του αζιμούθιου/ανύψωσης και με τη πολική παρακολούθηση. Στη περίπτωση της παρακολούθησης του αζιμούθιου ο δίσκος περιστρέφεται σε ένα επίπεδο παράλληλο με τη γη (αζιμούθιο) και σε ένα άλλο επίπεδο κάθετο σε αυτό (ανύψωση). Αυτό δίνει στο συλλέκτη τη δυνατότητα περιστροφής αριστερά-δεξιά και πάνω-κάτω. Οι ρυθμοί περιστροφής αλλάζουν κατά τη διάρκεια της μέρας αλλά μπορούν να υπολογιστούν πολύ εύκολα. Τα περισσότερα από τα μεγαλύτερα συστήματα δίσκου/μηχανής χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο. Στη μέθοδο πολικής παρακολούθησης ο συλλέκτης περιστρέφεται σε έναν άξονα παράλληλο με τον άξονα περιστροφής της γης. Ο συλλέκτης περιστρέφεται με σταθερό ρυθμό 15 μοίρες την ώρα για να ταιριάζει στη ταχύτητα περιστροφής της γης. Ο άλλος άξονας περιστροφής, ο άξονας απόκλισης είναι κάθετος στο πολικό άξονα. Η ταχύτητα περιστροφής σε αυτό τον άξονα είναι αρκετά αργή και αλλάζει περίπου κατά $\pm 23\frac{1}{2}$ μοίρες μέσα σε ένα έτος. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται από τα μικρότερα συστήματα δίσκου μηχανής.

Γ.7.1.2. Δέκτες

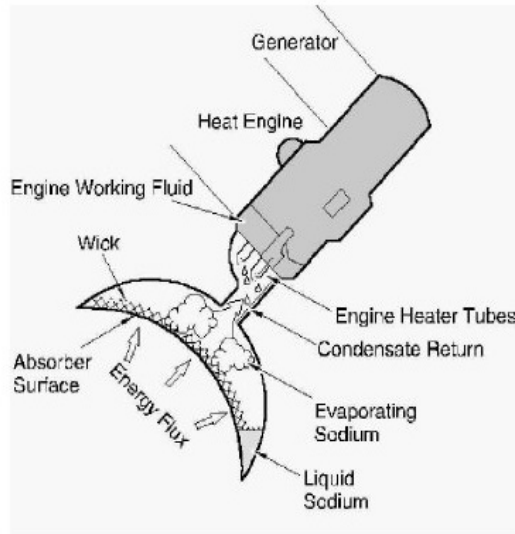
Ο δέκτης απορροφά την ενέργεια που ανακλάται από το συγκεντρωτή και τη μεταφέρει στο ρευστό με το οποίο λειτουργεί η μηχανή. Η επιφάνεια απορρόφησης τοποθετείται πίσω από την εστίαση του συγκεντρωτή με σκοπό να μειώσει την τυχαία προσπίπτουσα ροή. Ένα άνοιγμα τοποθετείται στην εστίαση με σκοπό να μειώσει τις απώλειες της ακτινοβολίας και της συναγωγής θερμότητας. Κάθε μηχανή έχει και τα δικά της θέματα. Ο δέκτης της μηχανής Stirling πρέπει να μεταφέρει

αποτελεσματικά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια σε ένα υψηλής πίεσης ταλαντούμενο αέριο, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Στους δέκτες μηχανής Brayton η ροή είναι σταθερή αλλά σε σχετικά χαμηλές πιέσεις.

Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι δεκτών Stirling, οι δέκτες άμεσου φωτισμού και οι δέκτες έμμεσου φωτισμού οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα ενδιάμεσο ρευστό που μεταφέρει θερμότητα. Οι δέκτες άμεσου φωτισμού προσαρμόζουν τις θερμοιόμενες σωλήνες της μηχανής Stirling να απορροφούν τη συγκεντρωμένη ηλιακή ροή. Εξαιτίας της μεγάλης ικανότητας για μεταφορά θερμότητας από το υψηλής ταχύτητας και υψηλής πίεσης ήλιο ή υδρογόνο, οι δέκτες άμεσου φωτισμού έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν υψηλά επίπεδα ηλιακής ροής (περίπου $75\text{W}/\text{cm}^2$). Όμως υπάρχει ένα θέμα όσο αφορά την εξισορρόπηση της θερμοκρασίας μεταξύ των κυλίνδρων μιας πολυκύλινδρης μηχανής Stirling.

Προκειμένου να λυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιούνται ηλιακοί δέκτες θερμοσωλήνα, υγρού μετάλλου. Σε αυτούς τους δέκτες υγρό νάτριο εξατμίζεται στην απορροφητική επιφάνεια και συμπυκνώνεται στους σωλήνες θερμότητας της μηχανής Stirling. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ομοιόμορφη θερμοκρασία επιτρέποντας έτσι υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής για ένα δεδομένο υλικό αυξάνοντας τελικά την απόδοση της μηχανής. Επίσης με τη χρήση θερμοσωλήνων είναι θεωρητικά δυνατή η αύξηση της διάρκειας ζωής των δεκτών. Το νάτριο στη συνέχεια επιστρέφει παθητικά στον απορροφητήρα λόγω της βαρύτητας και διανέμεται ομοιόμορφα σε αυτόν λόγω της πορώδους επιφάνειας του απορροφητήρα. Οι δέκτες Stirling είναι περίπου 90% αποτελεσματικοί στη μεταφορά ενέργειας από τον συγκεντρωτή στη μηχανή.

Οι ηλιακοί δέκτες για συστήματα δίσκου/Brayton είναι λιγότερο αναπτυγμένοι. Επιπροσθέτως η μεταφορά θερμότητας με αέρα σχετικά χαμηλής πίεσης δεν είναι τόσο αποδοτική και η ανάγκη να μειωθεί η πτώση πίεσης στο δέκτη κάνει το σχεδιασμό του μια πραγματική πρόκληση. Οι πιο αποτελεσματικοί δέκτες Brayton έχουν χρησιμοποιήσει “ογκομετρική απορρόφηση” στην οποία η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία περνάει μέσα από ένα παράθυρο λιωμένου διοξειδίου του πυριτίου και απορροφάται από μια πορώδη κοιλότητα. Αυτή η προσέγγιση παρέχει σημαντικά μεγαλύτερη επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας από τους συμβατικούς εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούν την αγωγή μέσα από ένα τοίχο. Οι ογκομετρικοί δέκτες Brayton που χρησιμοποιούν αφρώδη μεταλλικά ή κεραμικά καλούπια έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς αλλά μόνο για μικρά χρονικά διαστήματα. Άλλα σχέδια περιλαμβάνουν την αγωγή μέσα από ένα τοίχο καθώς και τη χρήση πτερυγίων. Οι δέκτες Brayton έχουν συνήθως απόδοση πάνω από 80% [1].



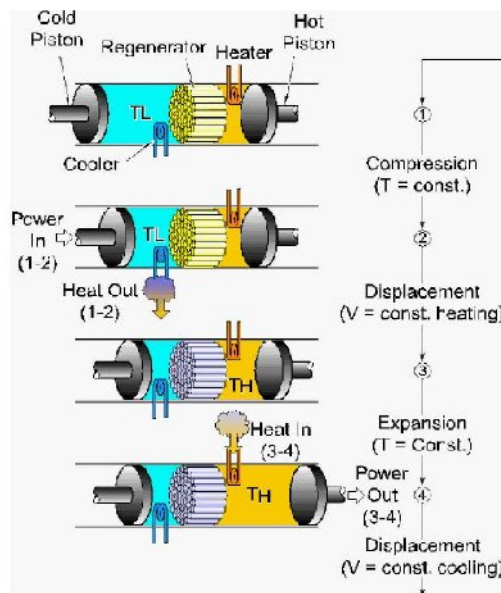
Σχήμα Γ.7.4. Λειτουργία ηλιακού δέκτη θερμοσολήνα

Γ.7.1.3. Θερμικές μηχανές

Η μηχανή σε ένα σύστημα δίσκου/μηχανής μετατρέπει θερμική ενέργεια σε μηχανική με ένα τρόπο παρόμοιο με τις συμβατικές μηχανές, αυτός είναι συμπιέζοντας το ρευστό όταν αυτό είναι κρύο, στη συνέχεια ζεσταίνοντας το και τελικά διαστέλλοντας το σε ένα στρόβιλο ή ένα έμβολο για να παράγει έργο. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω μιας ηλεκτρικής γεννήτριας ή ενός εναλλακτήρα. Διάφοροι θερμοδυναμικοί κύκλοι και εργαζόμενα ρευστά έχουν ληφθεί υπόψη για τη λειτουργία των συστημάτων δίσκου/μηχανής. Αυτά περιλαμβάνουν το κύκλο του Rankine που χρησιμοποιεί νερό ή οργανικό εργαζόμενο ρευστό, τον ανοιχτό και το κλειστό κύκλο του Brayton και τέλος το κύκλο Stirling. Επίσης έχουν ληφθεί υπόψη και άλλοι θερμοδυναμικοί κύκλοι και παραλλαγές τους. Οι θερμικές μηχανές που προτιμούνται χρησιμοποιούν κύκλους Stirling και Brayton. Η χρήση συμβατικών κύκλων Otto και Diesel δεν είναι εφικτή λόγω των δυσκολιών να ενσωματωθούν με τη συγκεντρωτική ηλιακή ενέργεια. Επίσης μπορεί να υπάρχει παροχή θερμότητας από ένα συμπληρωματικό καυστήρα αερίου για να γίνει εφικτή η λειτουργία κατά τη διάρκεια της παρουσίας νεφών στον ουρανό ή κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε ένα σύστημα δίσκου/μηχανής είναι περίπου 25 KWe για μηχανές Stirling και 30KWe για μηχανές Brayton. Επίσης έχουν κατασκευαστεί μικρότερα συστήματα Stirling 5-10KWe.

Κύκλος Stirling. Οι μηχανές κύκλου Stirling που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλιακών δίσκων είναι υψηλής πίεσης, υψηλής θερμοκρασίας εξωτερικές μηχανές που χρησιμοποιούν

υδρογόνο και ήλιο ως εργαζόμενα ρευστά. Οι θερμοκρασίες των εργαζόμενων ρευστών είναι πάνω από 700°C και η πίεση φτάνει τα 20MPa. Στο κύκλο Stirling, το εργαζόμενο ρευστό θερμαίνεται και ψύχεται διαδοχικά από διαδικασίες σταθερής θερμοκρασίας και όγκου. Συνήθως οι μηχανές Stirling ενσωματώνουν έναν αναθερμαντήρα που αυξάνει την απόδοση συλλαμβάνει θερμότητα κατά τη διάρκεια της ισόογκης ψύξης και την αντικαθιστά όταν το ρευστό θερμαίνεται. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις τέσσερις βασικές διεργασίες μηχανής κύκλου Stirling. Υπάρχουν μια σειρά από μηχανικές διατάξεις που κάνουν δυνατή την εφαρμογή των ισοθερμοκρασιακών και ισόογκων διαδικασιών. Οι περισσότερες αφορούν τη χρήση εμβόλων και κυλίνδρων. Μερικές χρησιμοποιούν ένα έμβολο που εκτοπίζει το εργαζόμενο ρευστό χωρίς να αλλάζει τον όγκο του, για να παλινδρομήσουν το εργαζόμενο ρευστό από τη θερμή περιοχή της μηχανής προς τη ψυχρή και ανάποδα. Για τα περισσότερα σχέδια της μηχανής η ισχύς εξάγεται κινηματικά από ένα περιστρεφόμενο στροφαλοφόρο άξονα. Μια εξαίρεση είναι η διάταξη ελεύθερου εμβόλου, όπου τα έμβολα δεν περιορίζονται από στροφαλοφόρους άξονες ή άλλους μηχανισμούς. Αναπηδούν μπρος και πίσω πάνω σε ελατήρια και η ισχύς εξάγεται από ένα γραμμικό εναλλακτήρα ή μια αντλία. Οι μηχανές Stirling για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις περίπου 40% και παρουσιάζονται ως η καλύτερη επιλογή επειδή το γεγονός ότι θερμαίνονται εξωτερικά τις κάνει ιδανικές για συγκεντρωτική ηλιακή ροή και επειδή έχουν μεγάλη απόδοση.



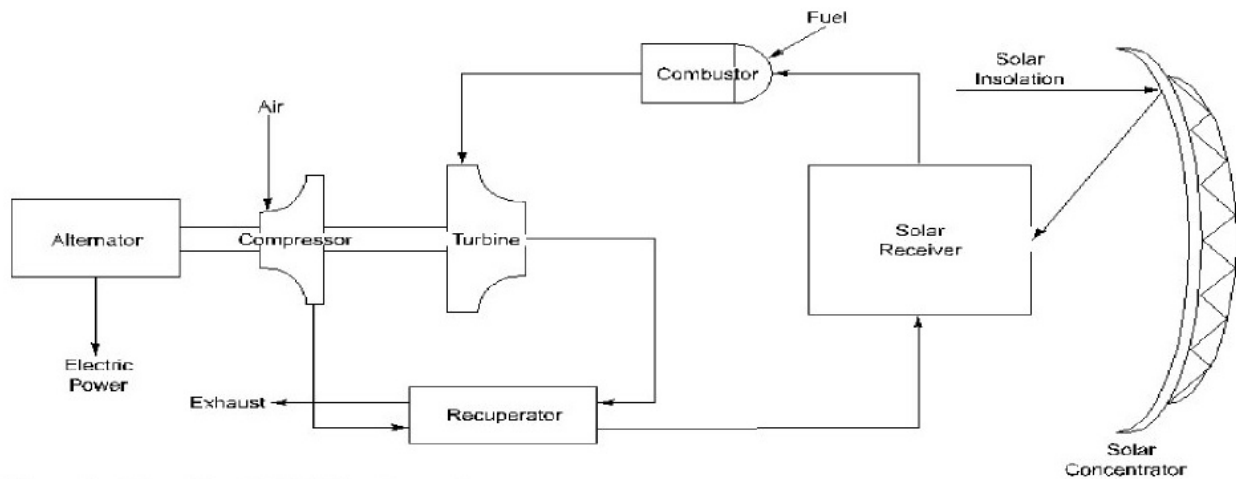
Σχήμα Γ.7.5. Αρχή λειτουργίας μηχανής Stirling

Αυτήν την περίοδο, οι μηχανές Stirling που υποστηρίζουν συστήματα δίσκου/μηχανής είναι η κινηματική SOLO 161 11-kW μηχανή, η κινηματική Kockums 25-kW (πρώην United Stirling 4-

95) και η κινηματική Stirling Thermal Motors STM 4-120 25-kW. Επί του παρόντος δεν αναπτύσσονται μηχανές ελεύθερου-εμβόλου για εφαρμογές δίσκου/μηχανής. Όλες οι κινηματικές μηχανές Stirling που εξετάζονται για ηλιακές εφαρμογές κατασκευάζονται και για άλλες χρήσεις. Η επιτυχής εμπορευματοποίηση οποιασδήποτε από αυτές τις μηχανές θα εξαλείψει ένα σημαντικό εμπόδιο για την εισαγωγή της τεχνολογίας δίσκου/μηχανής.

Κύκλος Brayton. Η μηχανή Brayton, που αποκαλείται επίσης και μηχανή μηχανή τζετ ή στρόβιλος καύσης ή αεριοστρόβιλος, είναι μια μηχανή εσωτερικής καύσεως που παράγει ενέργεια από ελεγχόμενη καύση των καυσίμων. Στη μηχανή Brayton, όπως και στις μηχανές Otto και Diesel, ο αέρας συμπιέζεται, στη συνέχεια προστίθεται το καύσιμο, και το μείγμα καίγεται. Σε ένα σύστημα δίσκου/Brayton, χρησιμοποιείται ηλιακή θερμότητα για να αντικαταστήσει (ή να συμπληρώσει) το καύσιμο. Το αποτέλεσμα είναι ένα θερμό αέριο που διαστέλλεται ταχύτατα και χρησιμοποιείται για να παράγει ενέργεια. Στον αεριοστρόβιλο η καύση είναι συνεχής και το αέριο χρησιμοποιείται για να περιστρέψει το στρόβιλο και εναλλακτήρα. Όπως στη μηχανή Stirling, η ανάκτηση της χαμένης θερμότητας αποτελεί βασικό παράγοντα για να επιτευχθεί μεγάλη απόδοση. Επομένως, η θερμότητα που αποβάλλεται από το στρόβιλο χρησιμοποιείται για να προθερμάνει αέρα από το συμπιεστή. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια αναπαράσταση ενός τέτοιου συστήματος δίσκου/Brayton. Οι μηχανές που είναι υποψήφιες για τη χρησιμοποίησή τους σε ένα σύστημα ηλιακού δίσκου έχουν αναλογία πίεσης περίπου 2.5 και η θερμοκρασία εισόδου του στρόβιλου είναι περίπου 850°C. Η απόδοση της μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική για τις μηχανές Brayton για εφαρμογές σε συστήματα ηλιακού δίσκου είναι πάνω από 30%.

Η εμπορευματοποίηση παρόμοιων στροβιλομηχανών για διάφορες άλλες χρήσεις μπορεί να αποτελέσει ευκαιρία για την ανάπτυξη των συστημάτων ηλιακού δίσκου/Brayton [1].



Σχήμα Γ.7.6. Λειτουργία συστήματος δίσκου/Brayton

Γ.7.1.4. Βοηθητικός εξοπλισμός.

Εναλλακτήρας. Η συσκευή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική σε ένα σύστημα ηλιακού δίσκου εξαρτάται από τη μηχανή και την εφαρμογή. Επαγωγικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται στις κινηματικές μηχανές Stirling συνδεδεμένες με ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Οι επαγωγικοί κινητήρες συγχρονίζονται με το δίκτυο και μπορούν να παράγουν μονοφασικό ή τριφασικό ρεύμα 230 ή 460 volts. Η απόδοση της μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι περίπου 94%. Σε πολλούς εναλλακτήρες χρησιμοποιούνται ανορθωτές για να μετατρέψουν το ρεύμα σε συνεχές και στη συνέχεια σε εναλλασσόμενο για να χειριστούν ασυμβατότητες ανάμεσα στη μηχανή και το δίκτυο. Για παράδειγμα λόγω της υψηλής ταχύτητας του αεριοστροβίλου χρησιμοποιείται ένας υψηλής ταχύτητας εναλλακτήρας που παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας το οποίο με έναν ανορθωτή μετατρέπεται σε συνεχές και στη συνέχεια με ένα αναστροφέα μετατρέπεται σε μονοφασικό ή τριφασικό. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να έχει πλεονεκτήματα όσον αφορά την απόδοση της μηχανής.

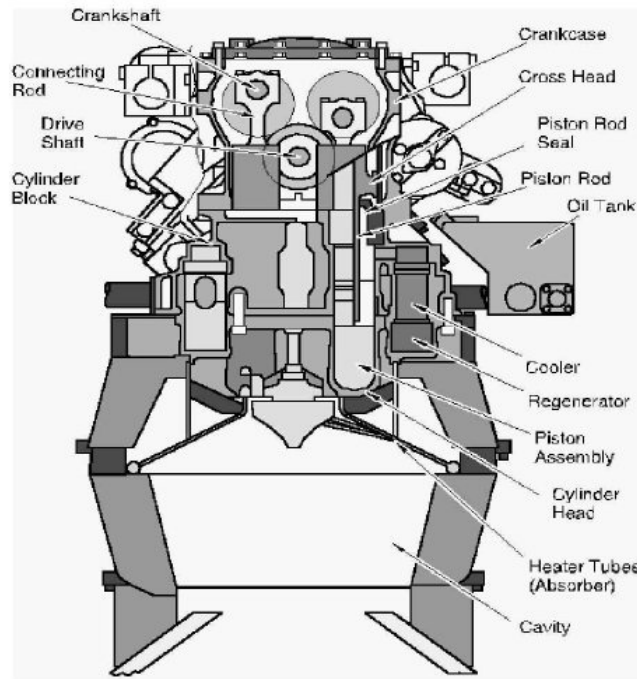
Σύστημα ψύξης. Οι θερμικές μηχανές χρειάζεται να αποβάλλουν θερμότητα στο περιβάλλον. Οι μηχανές Stirling χρησιμοποιούν ένα καλοριφέρ για να αποβάλλουν θερμότητα από τη μηχανή στην ατμόσφαιρα. Στις μηχανές Brayton ανοικτού κύκλου η θερμότητα αποβάλλεται από μια εξάτμιση. Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος ψύξης μιας μηχανής Stirling (ανεμιστήρας και αντλία) και για την κίνηση και τον έλεγχο της συγκεντρωτή είναι περίπου 1KWe.

Έλεγχος. Η αυτόνομη λειτουργία εξασφαλίζεται με τη χρήση ελέγχων βασισμένους σε μικροϋπολογιστές που βρίσκονται στο δίσκο με σκοπό να ελέγχουν τη λειτουργία της μηχανής και

την παρακολούθηση του ήλιου. Μερικά συστήματα χρησιμοποιούν ξεχωριστό έλεγχο για τη μηχανή. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου και συλλογής δεδομένων χρησιμοποιείται για να παρέχει εποπτικό έλεγχο και λήψη δεδομένων [1].

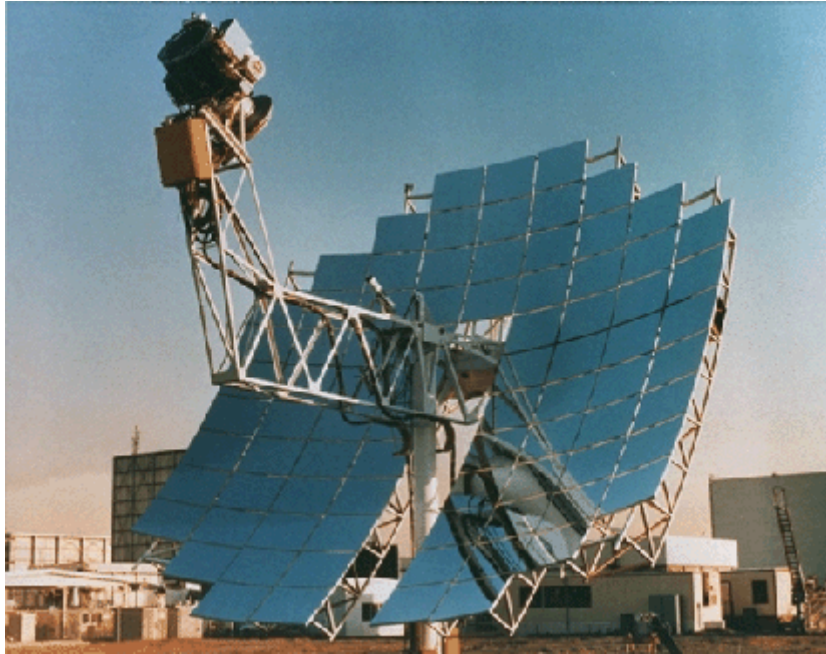
Γ.7.2. Ιστορία

Η τεχνολογία δίσκου/μηχανής είναι η παλαιότερη από τις ηλιακές τεχνολογίες και χρονολογείται στο 1800 όταν ένας αριθμός εταιριών έδειξε σε λειτουργία συστήματα ατμού-Rankine και Stirling με ηλιακή τροφοδοσία. Η σύγχρονη τεχνολογία αναπτύχθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 70' και αρχές του 80 από τις United Stirling AB, Advanco Corporation, McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA), NASA's Jet Propulsion Laboratory, και DOE. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιούσε σωληνοειδής ηλιακούς δέκτες που δέχονταν άμεσα το φως του ήλιου, κινηματικές μηχανές Stirling που είχαν αναπτυχθεί για εφαρμογές σε αυτοκίνητα και ηλιακούς καθρέπτες ασημιού/γυαλιού. Η απόδοση της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική έφτασε το 29.4%. Η απόδοση αυτή ορίζεται ως η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που δόθηκε στο δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια που χρειαζόταν για παρασιτικούς σκοπούς, διαιρούμενη με την τυχαία άμεση ακτινοβολία στους καθρέπτες. Η MDA έκανε προσπάθειες να εμπορευματοποιήσει τη τεχνολογία χρησιμοποιώντας δικά της σχέδια. Πριν το πρόγραμμα ακυρωθεί το 1986, εξαιτίας της απόφασης της MDA να σταματήσει όλες τις σχετικές με ενέργεια δραστηριότητές της, είχαν κατασκευαστεί οχτώ πρωτότυπα συστήματα. Τα συστήματα της MDA μετέτρεπαν την τυχαία ηλιακή ακτινοβολία πάνω στους συγκεντρωτικούς καθρέπτες σε ηλεκτρισμό με καθαρές αποδόσεις περίπου 30%. Η εταιρία Southern California Edison συνέχισε τα πειράματα με τα συστήματα της MDA για άλλα δύο χρόνια και στο τελευταίο χρόνο λειτουργίας τους η ετήσια απόδοση έφτασε το 12% περιλαμβάνοντας τις διακοπές του συστήματος καθώς και πολλές άλλες επιπτώσεις όπως η εμφάνιση ακαθαρσιών στους καθρέπτες. Χωρίς τις διακοπές μια ετήσια απόδοση μεγαλύτερη από 23% ήταν θεωρητικά εφικτή.



Σχήμα Γ.7.7. Σχηματική αναπαράσταση της κινηματικής μηχανής Stirling "United Stirling 4-95"

Στις αρχές του 1990 η εταιρία Cummins Engine προσπάθησε να εκμεταλλευθεί εμπορικά τα συστήματα δίσκου/Stirling που βασίζοντας στο ελεύθερο-έμβολο. Το 1991 ξεκίνησε το πρόγραμμα Joint Venture που είχε ως σκοπό να αναπτύξει ένα σύστημα 5-10 KWe για απομακρυσμένες εφαρμογές. Το 1993 ξεκίνησε ένα άλλο πρόγραμμα μεγαλύτερης κλίμακας με σκοπό την ανάπτυξη συστημάτων 25 KWe για σύνδεση με τα δίκτυα ηλεκτροδότησης. Όμως κυρίως επειδή η Cummings ήθελε να επικεντρωθεί στις μηχανές Diesel ακύρωσε την ανάπτυξη των συστημάτων το 1996. Τεχνικές δυσκολίες που προέκυψαν με τις μηχανές Stirling ελεύθερου-εμβόλου δεν λύθηκαν ποτέ [1][2].



Σχήμα Γ.7.8. Μονάδα McDonnell Douglas

Γ.7.3. Εφαρμογή του συστήματος, οφέλη και επιπτώσεις

Τα συστήματα δίσκου/μηχανής διαθέτουν τα χαρακτηριστικά της υψηλής απόδοσης, της ευελιξίας και της δυνατότητας για υβριδική λειτουργία. Η υψηλή απόδοση συμβάλλει σε αυξημένη παραγωγή και χαμηλότερο κόστος, σε σύγκριση με άλλες ηλιακές τεχνολογίες. Ανάλογα με το σύστημα και την τοποθεσία, τα συστήματα δίσκου/μηχανής απαιτούν περίπου 1.2 με 1.6 εκτάρια γης ανά MWe. Το εγκατεστημένο κόστος του συστήματος, αν και επί του παρόντος πάνω από 12,000 \$/kWe για ηλιακές μόνο πρωτότυπες εγκαταστάσεις, θα μπορούσε να πλησιάσει τα 1,400 \$/kW για υβριδικά συστήματα μαζικής παραγωγής. Αυτή η δυνατότητα για χαμηλό κόστος είναι σε μεγάλο βαθμό αποτέλεσμα της υψηλής απόδοσης του συστήματος.

Γ.7.3.1. Εφαρμογή στο δίκτυο ηλεκτροδότησης

Λόγω της ευελιξίας τους και της ικανότητας τους να χρησιμοποιηθούν υβριδικά, τα συστήματα δίσκου/μηχανής έχουν ένα ευρύ φάσμα δυναμικών εφαρμογών. Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα δίσκου/μηχανής είναι σε θέση να παρέχουν ισχύ που κυμαίνεται από μερικά kW έως και φτάνει μέχρι και GW. Ωστόσο, αναμένεται ότι τα συστήματα αυτά θα έχουν το μεγαλύτερο αντίκτυπο σε διασυνδεδεμένες με το δίκτυο εφαρμογές στο εύρος ισχύος από 1 έως 50 MWe. Η μεγαλύτερη δυναμικά αγορά για τα συστήματα ηλιακού δίσκου είναι οι μεγάλης κλίμακας ηλεκτροπαραγωγικοί

σταθμοί που συνδέονται με δίκτυο ηλεκτρισμού. Η ικανότητά τους να εγκαθίστανται γρήγορα, η αυτονομία τους και οι ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις τα καθιστά έναν καλό υποψήφιο για νέες εγκαταστάσεις ισχύος. Τα μεμονωμένα αυτόνομα συστήματα δίσκου/μηχανής μπορούν να ομαδοποιηθούν για να σχηματίσουν μια “φάρμα” και να παράγουν τη συλλογική ισχύ που είναι επιθυμητή. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα να προστεθούν επιπλέον συστήματα για να ικανοποιήσουν τις πιθανές μελλοντικές αυξήσεις στη ζήτηση. Οι ώρες που η παραγωγή γίνεται μέγιστη συνήθως συμπίπτουν με τις ώρες όπου και η ζήτηση γίνεται μέγιστη. Αν και τα συστήματα δίσκου/μηχανής δεν έχουν αυτήν την περίοδο ένα οικονομικά αποδοτικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης, η ικανότητά τους να λειτουργούν μαζί με ορυκτά ή βίο-παραγόμενα καύσιμα τους δίνει τη δυνατότητα να προβαίνουν σε συνεχόμενη παραγωγή ενέργειας. Αυτή τους η δυνατότητα μαζί με την αυτονομία και τις μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα για να συστήματα αυτά.

Γ.7.3.2. Απομακρυσμένες εφαρμογές

Τα συστήματα δίσκου/μηχανής μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα σε αυτόνομα συστήματα για εφαρμογές όπως η άντληση νερού. Αν και η ονομαστική ισχύς και η αυτονομία των συστημάτων φαίνονται ιδανικές για τέτοιες εφαρμογές, υπάρχουν αρκετές δυσκολίες που σχετίζονται με την εγκατάσταση και τη συντήρηση αυτών των συστημάτων σε ένα απομακρυσμένο περιβάλλον. Τα συστήματα δίσκου/μηχανής πρέπει να σταματήσουν τη λειτουργία τους όταν οι ταχύτητες του αέρα υπερβαίνουν έναν συγκεκριμένο όριο, συνήθως τα 16 m/s. Συνεπώς απαιτούνται αξιόπιστοι αισθητήρες για τον ήλιο και τον αέρα για να καθορίσουν εάν οι συνθήκες εγγυώνται τη λειτουργία. Επιπλέον, για να είναι δυνατή η λειτουργία μέχρι το σύστημα να γίνει αυτοσυντηρούμενο απαιτείται η χρήση ενεργειακής αποθήκευσης (π.χ., μια μπαταρία όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σε σύστημα με γεννήτριες diesel) με τα συνεπακόλουθα ζητήματα του κόστους και της αξιοπιστίας. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό ότι η είσοδος στις αυτόνομες αγορές να συμβεί αφού πρώτα έχει η τεχνολογία την ευκαιρία να ωριμάσει σε εφαρμογές που αφορούν τη σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης ή στην ηλεκτροδότηση χωριών.

Εφαρμογές ενδιάμεσης κλίμακας, όπως είναι η ηλεκτροδότηση σε μικρά δίκτυα, φαίνονται να είναι κατάλληλες για τα συστήματα δίσκου/μηχανής. Η δυνατότητα για χρήση πολλαπλών μονάδων που να υποστηρίζουν ένα μικρό δίκτυο, η δυνατότητα να προστίθενται επιπλέον μονάδες αν χρειάζεται, σε συνδυασμό με την υβριδική δυνατότητα, καθιστά την τεχνολογία αυτή ιδανική για μικρά δίκτυα.[1]

Γ.7.3.3. Υβριδικές εφαρμογές

Επειδή τα συστήματα δίσκου/μηχανής χρησιμοποιούν θερμικές μηχανές, έχουν μια εγγενή ικανότητα να λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Η χρήση του ίδιου εξοπλισμού μετατροπής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων της μηχανής, της γεννήτριας, των καλωδίων κλπ., σημαίνει ότι μόνο η προσθήκη ενός θαλάμου καύσης ορυκτών καυσίμων θα καταστήσει δυνατή την υβριδική λειτουργία. Για τα συστήματα δίσκου/Brayton η προσθήκη υβριδικής δυνατότητας είναι απλή. Ένας θάλαμος καύσης ορυκτού καυσίμου ικανός να παρέχει συνεχή λειτουργία σε πλήρη ισχύ μπορεί να ενσωματωθεί με ελάχιστες δαπάνες και επιπλοκές. Ο υβριδικός θάλαμος καύσης βρίσκεται κατάντη του ηλιακού δέκτη και δεν έχει καμιά αρνητική επίπτωση στην απόδοση. Στην πραγματικότητα, επειδή η μηχανή του αεριοστρόβιλου μπορεί να λειτουργεί συνεχώς στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, όπου η απόδοση γίνεται βέλτιστη, τότε η συνολική απόδοση του συστήματος ενισχύεται. Η αποδοτικότητα του συστήματος με βάση την αυξημένη θερμογόνο δύναμη, αναμένεται να είναι περίπου 30% σε ένα υβριδικό σύστημα δίσκου/Brayton.

Από την άλλη πλευρά, για τα συστήματα δίσκου/Stirling, η προσθήκη υβριδικής λειτουργίας αποτελεί πρόκληση. Η εξωτερική, υψηλής-θερμοκρασίας, ισοθερμική προσθήκη θερμότητας που απαιτείται για τις μηχανές Stirling είναι από πολλές απόψεις ευκολότερο να επιτευχθεί με την ηλιακή θερμότητα απ' ό,τι με τη θερμότητα καύσης. Γεωμετρικοί περιορισμοί κάνουν την ένταξη ακόμα δυσκολότερη. Ως αποτέλεσμα το κόστος για υβριδική λειτουργία ενός συστήματος Stirling προβλέπεται να αυξάνεται κατά 250 \$/kW σε παραγωγές μεγάλης κλίμακας. Το κόστος αυτό είναι μικρότερο από την προσθήκη ενός ξεχωριστού συστήματος γεννήτριας Diesel. Στα πρώτα υβριδικά συστήματα αναμένεται η λειτουργία να γίνει είτε με ηλιακή ακτινοβολία είτε με φυσικό αέριο αλλά όχι και με τα δύο ταυτόχρονα. Παρόλο που το κόστος σε τέτοια συστήματα αναμένεται μικρότερο από τα υβριδικά η λειτουργική τους ευελιξία αναμένεται επίσης να μειωθεί σημαντικά. Η απόδοση του συστήματος με βάση την αύξηση της θερμογόνου δύναμης αναμένεται να είναι περίπου 33% για ένα σύστημα δίσκου/Stirling με υβριδική λειτουργία. [1]

Γ.7.4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων δίσκου/μηχανής είναι ελάχιστες. Οι μηχανές Stirling είναι γνωστές για το ότι είναι ήσυχες, σχετικά με τις μηχανές εσωτερικής καύσης βενζίνης και ντίζελ, και οι μηχανές Brayton έχουν αναφερθεί ως σχετικά ήσυχες. Η μεγαλύτερη πηγή θορύβου για ένα σύστημα δίσκου/Stirling είναι ο ανεμιστήρας που χρησιμοποιείται για τη ψύξη. Μέχρι τώρα δεν έχει υπάρξει μεγάλη ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων για να εκτιμηθεί ρεαλιστικά το οπτικό αντίκτυπο. Τα συστήματα μπορεί να έχουν μεγάλο ύψος που μπορεί να φτάνει και τα 15 μέτρα. Ωστόσο από αισθητικής πλευράς δεν πρέπει να θεωρούνται επιζήμια. Τα συστήματα

δίσκου/μηχανής μοιάζουν με τα δορυφορικά πιάτα που είναι γενικός αποδεκτά από το κοινό. Οι εκπομπές τους είναι σχετικά χαμηλές. Πέρα από το ενδεχόμενο να χυθούν μικρές ποσότητες από λάδι μηχανής ή ψυκτικό μέσο ή γράσο τα συστήματα αυτά δεν παράγουν απόβλητα όταν λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια. Ακόμα και όταν γίνεται χρήση ορυκτών καυσίμων τα συστήματα καύσης συνεχούς ροής που χρησιμοποιούνται και στα δύο συστήματα Stirling και Brayton έχουν ως αποτέλεσμα εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα εκπομπών. Αυτό άλλωστε είναι το απαιτούμενο στην περίπτωση των υβριδικών οχημάτων και σε εφαρμογές συμπαραγωγής για τα οποία οι μηχανές αυτές κυρίως αναπτύσσονται. [1]

Γ.7.5. Υποθέσεις σχετικά με τη τεχνολογία και προβλήματα

Τα συστήματα δίσκου/μηχανής βρίσκονται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης. Το βασικό σύστημα αποτελείται από ένα παραβολικό δίσκο ο οποίος περιλαμβάνει πάνελ ασημιού/γυαλιού. Ο δέκτης είναι ένας άμεσα φωτιζόμενος σωληνωτός δέκτης. Ως αποτέλεσμα της εκτεταμένης μηχανικής ανάπτυξης αναμένονται σημαντικές βελτιώσεις στο τομέα της μηχανής οι οποίες θα διπλασιάσουν την ετήσια απόδοση από το 12 στο 23%. Τα συστήματα αναμένεται να ωφεληθούν από τις εξελικτικές προόδους στις τεχνολογίες του συγκεντρωτικού δίσκου και της μηχανής. Η εισαγωγή της τεχνολογίας του δέκτη θερμοσωλήνα μαζί με την εισαγωγή προηγμένων υλικών και την ενσωμάτωση κεραμικής ή ογκομετρικής απορρόφησης θα μπορούσαν να προσφέρουν σημαντική πρόοδο στις επιδόσεις. Η ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιώσεις πάνω από 10%.

Η κύρια ανάγκη όσο αφορά την έρευνα και την ανάπτυξη για τη τεχνολογία δίσκου/μηχανής είναι η εισαγωγή μιας εμπορικής ηλιακής μηχανής. Δευτερευόντως οι ανάγκες περιλαμβάνουν ένα εμπορικά βιώσιμο ηλιακό δέκτη τεχνολογίας θερμοσωλήνα για δίσκους/Stirling, ένα υβριδικό δέκτη για δίσκους/Stirling και ένα αποδεδειγμένο δέκτη για δίσκους/Brayton. Επίσης βελτιώσεις στα στοιχεία του συγκεντρωτικού δίσκου, σε οπτικά στοιχεία και στη κατασκευή είναι επίσης απαραίτητες. Τα ηλιακά συστατικά είναι τα ακριβά στοιχεία ενός συστήματος δίσκου μηχανής και βελτιωμένα σχέδια, υλικά και τεχνικές κατασκευής είναι το κλειδί για να αυξηθεί η ανταγωνιστικότητα.

Κάθε νέο προϊόν παρουσιάζει προβλήματα που έχουν να κάνουν με την ανάπτυξή του και την ενσωμάτωση του. Για παράδειγμα ακόμα και αν μια εταιρία καταφέρει να λύσει όλα τα ζητήματα που αφορούν το σύστημα της, οι μέθοδοι που ακολούθησε μπορεί να μην είναι δυνατόν να

εφαρμοστούν σε άλλα σχέδια. Θέματα όπως οι αλγόριθμοι ελέγχου, οι πτυχές κατασκευής και οι μέθοδοι ευθυγράμμισης αν και σχετικά απλά, χρειάζονται ανάλυση για κάθε σχέδιο. Επίσης αν αυτά τα θέματα δεν αντιμετωπιστούν σωστά μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά το κόστος.

Πέρα από την έρευνα και την ανάπτυξη που απαιτούνται για να γίνει η εμπορική εκμετάλλευση των μηχανών βιομηχανικού τύπου που προαναφέρθηκαν, υπάρχουν μεγάλες ευκαιρίες για μηχανές σχεδιασμένες αποκλειστικά για ηλιακές εφαρμογές. [1]

Γ.7.6. Γη, νερό και απαιτήσεις υλικών

Οι απαιτήσεις γης για τα συστήματα δίσκου/μηχανής είναι περίπου 1.2-1.6 εκτάρια ανά Mwe. Δεν χρειάζεται νερό για τη ψύξη της μηχανής. Σε μερικές περιοχές ένα μικρό ποσό νερού απαιτείται για να καθαριστούν οι καθρέπτες. Δεν υπάρχουν βασικά υλικά τα οποία να είναι αποκλειστικά για τη τεχνολογία δίσκου/μηχανής.

[1] “*Technology Characterization Solar Dish Systems*”, solarPACES
(http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_dish.pdf)

[2] *Wikipedia the free encyclopedia* (<http://www.wikipedia.org>)

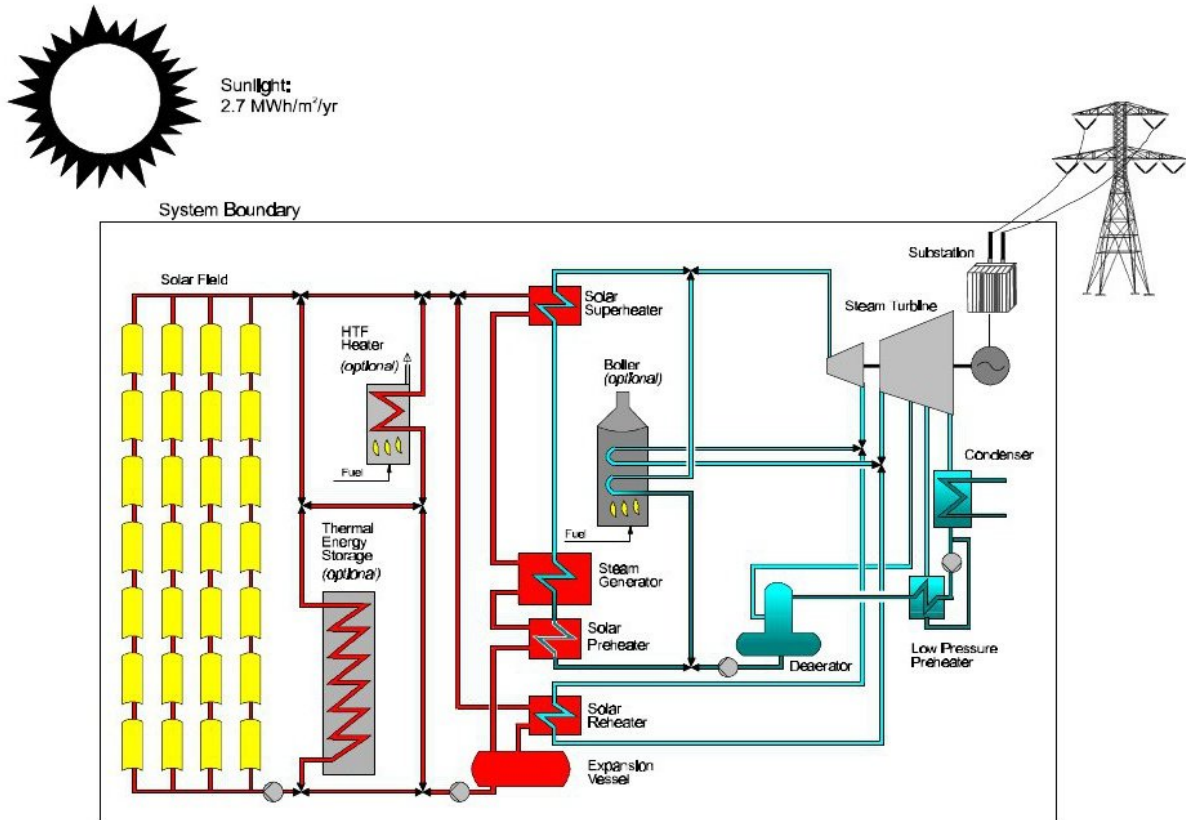
Γ.8. Παραβολικά ηλιακά κοίλα



Σχήμα Γ.8.1. Σύστημα παραβολικών κοίλων

Γ.8.1. Περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος

Η τεχνολογία των παραβολικών κοίλων είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία ηλιακής θερμικής ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό οφείλεται κυρίως σε εννέα ευρείας εμπορικής κλίμακας συστήματα ηλιακής ενέργειας, το πρώτο από τα οποία λειτουργεί στη Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών στην έρημο Mojave από το 1984. Αυτά τα συστήματα, τα οποία εξακολουθούν να λειτουργούν σε καθημερινή βάση έχουν μέγεθος που κυμαίνεται από 14 έως 80MW και αντιστοιχούν σε δυναμικότητα εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος 354MW. Μεγάλα πεδία με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες τροφοδοτούν με την απαιτούμενη θερμική ενέργεια για τη παραγωγή ατμού για μια στροβιλογεννήτρια που λειτουργεί με βάση το κύκλο του Rankine.

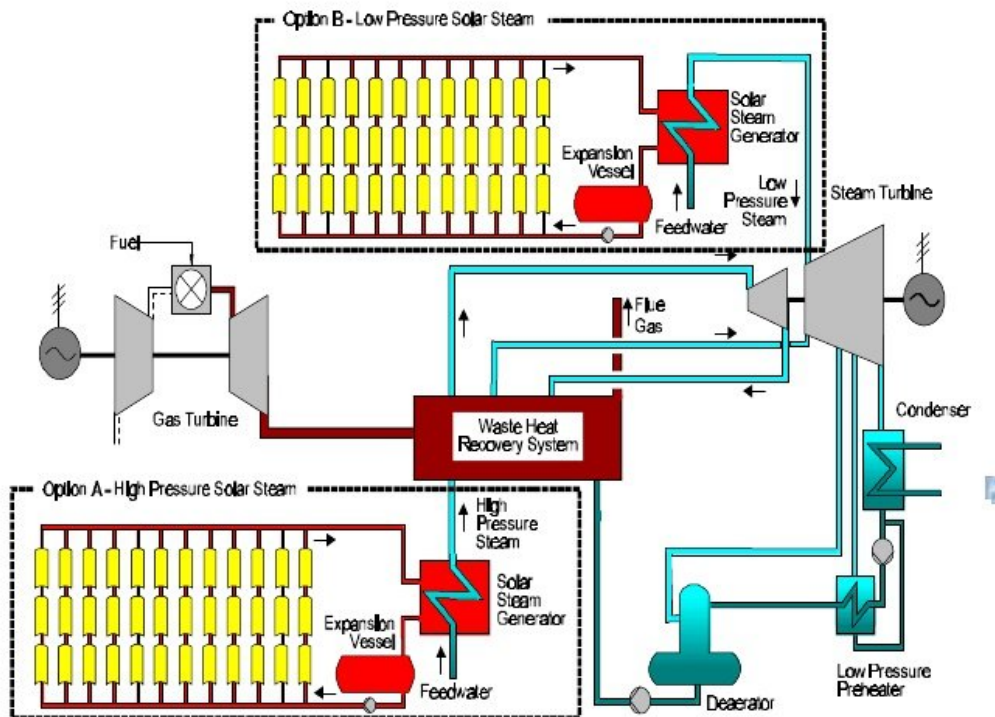


Σχήμα Γ.8.2. Σύστημα παραβολικών κοίλων με κύκλο Rankine

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τη λειτουργία του συστήματος που είναι αντιπροσωπευτικό για τη πλειοψηφία των συστημάτων παραβολικών κοίλων που λειτουργούν σήμερα. Το πεδίο του συλλέκτη συνίσταται από ένα μεγάλο πεδίο από παραβολικούς κοίλους ηλιακούς συλλέκτες που έχουν έναν άξονα παρακολούθησης. Το ηλιακό πεδίο αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές ηλιακών συλλεκτών ευθυγραμμισμένες με έναν οριζόντιο άξονα βορρά-νότου. Κάθε ηλιακός συλλέκτης έχει μια παραβολικού-σχήματος γραμμική ανακλαστική επιφάνεια που εστιάζει την άμεση ακτινοβολία του ήλιου σε έναν γραμμικό δέκτη που βρίσκεται κατά μήκος της εστιακής γραμμής. Οι συλλέκτες παρακολουθούν τη κίνηση του ήλιου από την ανατολή στη δύση κατά τη διάρκεια της μέρας για να εξασφαλιστεί ότι ο ήλιος είναι συνεχώς εστιασμένος στο γραμμικό δέκτη. Ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας θερμαίνεται καθώς κυκλοφορεί μέσω του δέκτη και επιστρέφει σε μια σειρά από εναλλάκτες θερμότητας, όπου το υγρό χρησιμοποιείται για να παραχθεί υπέρθερος ατμός υψηλής πίεσης. Ο υπέρθερος ατμός στη συνέχεια τροφοδοτεί μια συμβατική στροβιλογεννήτρια αναθερμαινόμενου ατμού για τη παραγωγή ηλεκτρισμού. Στη συνέχεια ο ατμός που διέρχεται από το στρόβιλο συμπυκνώνεται σε ένα συμπυκνωτή και επιστρέφει στους εναλλάκτες θερμότητας μέσω αντλιών για να μετατραπεί ξανά σε ατμό. Η ψύξη στο συμπυκνωτή επιτυγχάνεται από πύργους ψύξης.

Ιστορικά τα συστήματα παραβολικών κοίλων έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια ως τη κύρια πηγή ενέργειας για τη παραγωγή ηλεκτρισμού. Τα συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν σε πλήρη ονομαστική ισχύ χρησιμοποιώντας μόνο ηλιακή ενέργεια με δεδομένη την επάρκεια της. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, τα συστήματα συνήθως λειτουργούν από 10 έως 12 ώρες τη μέρα σε πλήρη ηλεκτρική παραγωγή. Ωστόσο μέχρι σήμερα όλες οι μονάδες είναι υβριδικές χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια και ορυκτά καύσιμα. Αυτό σημαίνει ότι έχουν μια βοηθητική δυνατότητα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συμπληρωθεί η ηλιακή ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Στο παραπάνω σχήμα ο προαιρετικός θερμαντήρας φυσικού αερίου βρίσκεται σε παράλληλη σύνδεση με το ηλιακό πεδίο. Τα ορυκτά καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια συννεφιάς η κατά τις νυχτερινές περιόδους. Στο προηγούμενο σχήμα βλέπουμε επίσης ότι μια πιθανή λύση για να λυθεί το πρόβλημα της διακοπόμενης παραγωγής είναι η προσθήκη θερμικής αποθήκευσης [1].

Γ.8.1.1. Ηλιακό σύστημα συνδυασμένου κύκλου (ISCCS)



Σχήμα Γ.8.3 Σύστημα συνδυασμένου κύκλου

Το ISCCS είναι μια καινούρια ιδέα η οποία ενσωματώνει μια εγκατάσταση παραβολικών κοίλων με μια μονάδα αεριοστροβίλου συνδυασμένου κύκλου. Το ISCCS έχει κερδίσει μεγάλο ενδιαφέρον επειδή προσφέρει ένα επαναστατικό τρόπο για να μειωθεί το κόστος και να αυξηθεί η συνολική απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Ένα διάγραμμα ροής των

διαδικασιών ενός ISCCS φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το σύστημα συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιεί ηλιακή θερμότητα για να συμπληρώσει τις θερμικές απώλειες από τον αεριοστρόβιλο, με σκοπό να αυξήσει τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο κύκλο ατμού του Rankine. Με αυτό το σχεδιασμό η ηλιακή ενέργεια γενικά χρησιμοποιείται για να παραχθεί επιπλέον ατμός και οι απώλειες θερμότητας του αεριοστρόβιλου χρησιμοποιούνται για να προθερμάνουν ή να υπερθερμάνουν τον ατμό. Τα περισσότερα σχέδια εξέτασαν την αύξηση του μεγέθους του ατμοστρόβιλου έως και 100%. Το σχέδιο του ISCCS πιθανώς να προτιμηθεί σε σχέση με την ηλιακή μονάδα Rankine σε περιοχές όπου μονάδες συνδυασμένου κύκλου έχουν ήδη κατασκευαστεί [1].

Γ.8.1.2. Υβρίδια άνθρακα

Σε περιοχές με καλούς ηλιακούς πόρους όπου χρησιμοποιούνται μονάδες άνθρακα, μπορούν να ενσωματωθούν μονάδες παραβολικών κοίλων για να μειώσουν την κατανάλωση άνθρακα. Εξαιτίας της κατάστασης του ατμού στις σύγχρονες μονάδες άνθρακα όπου χαρακτηρίζεται από υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις, ο ηλιακός ατμός είναι πιθανό να χρειαστεί να σταλθεί σε στρόβιλους μέσης ή χαμηλής πίεσης.

Γ.8.2. Ιστορία

Η οργανωμένη ανάπτυξη οργανωμένων, μεγάλης κλίμακας ηλιακών συλλεκτών ξεκίνησε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής στα μέσα του 1970 από την Energy Research and Development Administration (ERDA) και συνεχίστηκε με την ίδρυση του αμερικανικού υπουργείου ενέργειας το 1978. Συλλέκτες παραβολικών κοίλων ικανών να παράγουν θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 500°C αναπτύχθηκαν αρχικά για βιομηχανικές εφαρμογές με θερμικές διεργασίες. Το μέγεθός τους ήταν από μερικές εκατοντάδες έως 5000m² επιφάνειας συλλέκτη.

Η ανάπτυξη παραβολικών κοίλων λάμβανε χώρα και στην Ευρώπη και κορυφώθηκε με τη κατασκευή της εγκατάστασης IEA Small Power Systems Project/ Distributed Collector System στην Ισπανία το 1981. Αυτή η εγκατάσταση αποτελείτο από δύο πεδία ηλιακών παραβολικών κοίλων με συνολική επιφάνεια ανοίγματος των κατόπτρων τα 7602m². Το 1982 η Luz International Limited ανέπτυξε επίσης ένα συλλέκτη παραβολικών κοίλων.

Δύο ήταν τα εμπόδια που απέτρεπαν την εμπορική επιτυχία της τεχνολογίας. Πρώτον, ήταν απαιτούμενη μια σχετικά μεγάλη εμπορική και μηχανική προσπάθεια ακόμα και στα μικρά έργα. Δεύτερον, οι περισσότεροι πιθανοί βιομηχανικοί πελάτες είχαν μια δυσκίνητη διαδικασία λήψης αποφάσεων που συχνά οδηγούσε σε αρνητικές αποφάσεις αφού είχε καταναλωθεί ήδη αρκετή προσπάθεια.

Το 1983 η Southern California Edison (SCE) υπέγραψε συμφωνία με την Acurex Corporation για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδα παραβολικών κοίλων. Η Acurex δεν ήταν σε θέση να αυξήσει τη χρηματοδότηση για το έργο. Συνεπώς η Luz διαπραγματεύτηκε παρόμοια συμφωνία με την SCE για τις μονάδες ηλιακής-ηλεκτρικής παραγωγής SEGS I και II. Αργότερα προέκυψε η ανάπτυξη των έργων SEGS III μέχρι και SEGS IX. Αρχικά οι μονάδες περιορίζονταν στα 30MW. Αργότερα το όριο αυξήθηκε στα 80MW.

Πίνακας Γ.8.1. Χαρακτηριστικά των μονάδων SEGS I-IX

SEGS Plant	1st Year of Operation	Net Output (MW _e)	Solar Field Outlet Temp. (°C/°F)	Solar Field Area (m ²)	Solar Turbine Eff. (%)	Fossil Turbine Eff. (%)	Annual Output (MWh)
I	1985	13.8	307/585	82,960	31.5	-	30,100
II	1986	30	316/601	190,338	29.4	37.3	80,500
III & IV	1987	30	349/660	230,300	30.6	37.4	92,780
V	1988	30	349/660	250,500	30.6	37.4	91,820
VI	1989	30	390/734	188,000	37.5	39.5	90,850
VII	1989	30	390/734	194,280	37.5	39.5	92,646
VIII	1990	80	390/734	464,340	37.6	37.6	252,750
IX	1991	80	390/734	483,960	37.6	37.6	256,125

Το 1991 η Luz κήρυξε πτώχευση όταν έφτασε σε σημείο να μην είναι σε θέση να εξασφαλίσει χρηματοδότηση για την κατασκευή της μονάδας SEGS X. Πολλοί ήταν οι παράγοντες που συνέβαλαν με βασικό το κόστος της τεχνολογίας που ήταν πολύ υψηλό για να είναι ανταγωνιστικό στην αγορά ενέργειας. Όλες οι μονάδες SEGS πουλήθηκαν σε ανεξάρτητες ομάδες επενδυτών και συνεχίζουν να λειτουργούν μέχρι σήμερα [1],[2].

Πίνακας Γ.8.2. Χαρακτηριστικά συλλέκτη

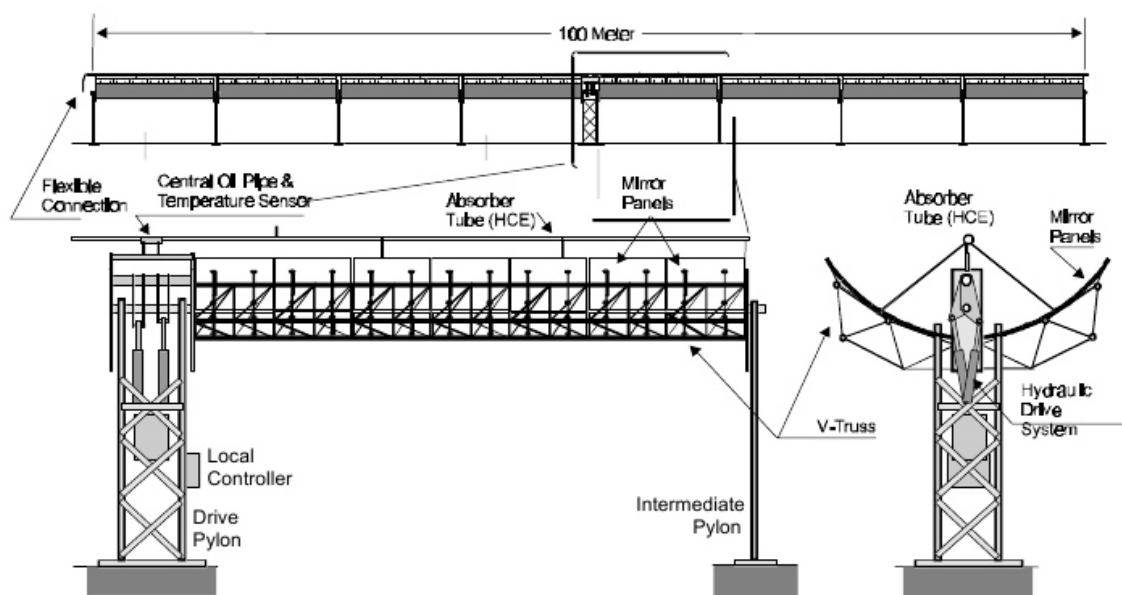
Collector	Acurex 3001	M.A.N. M480	Luz LS-1	Luz LS-2		Luz LS-3
Year	1981	1984	1984	1985	1988	1989
Area (m ²)	34	80	128	235		545
Aperture (m)	1.8	2.4	2.5	5		5.7
Length (m)	20	38	50	48		99
Receiver Diameter (m)	0.051	0.058	0.042	0.07		0.07
Concentration Ratio	36:1	41:1	61:1	71:1		82:1
Optical Efficiency	0.77	0.77	0.734	0.737	0.764	0.8
Receiver Absorptivity	0.96	0.96	0.94	0.94	0.99	0.96
Mirror Reflectivity	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94
Receiver Emittance	0.27	0.17	0.3	0.24	0.19	0.19
@ Temperature (°C/°F)			300/572	300/572	350/662	350/662
Operating Temp. (°C/°F)	295/563	307/585	307/585	349/660	390/734	390/734

Γ.8.3. Τεχνολογία του συλλέκτη

Κάθε ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από το παραβολικό κοίλο που είναι κατασκευασμένο από παραβολικά κάτοπτρα, το μηχανισμό παρακολούθησης, τη μεταλλική στήριξη, τις σωλήνες του δέκτη. Ο μηχανισμός παρακολούθησης περιλαμβάνει τον οδηγό, τους αισθητήρες και το σύστημα ελέγχου. Στο παρακάτω πίνακα βλέπουμε τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά διαφόρων συλλεκτών τέτοιου τύπου. Η γενική τάση ήταν να χτίζονται μεγαλύτεροι συλλέκτες με μεγαλύτερους λόγους συγκέντρωσης για να διατηρείται η θερμική απόδοση του συλλέκτη σε υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας.

Γ.8.3.1. Συλλέκτης Luz System Three (LS-3)

Ο συλλέκτης LS-3 ήταν το τελευταίος που σχεδιάστηκε από τη Luz και χρησιμοποιήθηκε στις μεγαλύτερες μονάδες των 80MW. Ο LS-3 αποτελεί τον πιο αντιπροσωπευτικό συλλέκτη παραβολικών κοίλων.



Σχήμα Γ.7.4. Συλλέκτης Luz system three

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε τον συλλέκτη LS-3. Οι ανακλαστήρες του κατασκευάζονται από γυάλινα πλαίσια και υποστηρίζονται από ένα δικτύωμα που του προσφέρει δοκιμή ακεραιότητα. Το άνοιγμα ή πλάτος των παραβολικών κατόπτρων είναι 5.76m και το συνολικό μήκος 95.2m. Τα κάτοπτρα είναι κατασκευασμένα από γυαλί χαμηλής περιεκτικότητας σε οξείδια σιδήρου με μεταδοτικότητα 98% που είναι επαργυρωμένα στη πλάτη και καλύπτονται από διάφορα προστατευτικά επιχρίσματα. Τα κάτοπτρα θερμαίνονται σε παραβολικές φόρμες σε ειδικούς φούρνους για να αποκτήσουν παραβολικό σχήμα. Κεραμικά μαξιλαράκια χρησιμοποιούνται για να στερεώσουν τα κάτοπτρα στη δομή του συλλέκτη και επισυνάπτονται με ειδική κόλλα. Η υψηλή ποιότητα των κατόπτρων επιτρέπει το 97% της ακτινοβολίας να φτάσει στο γραμμικό δέκτη.

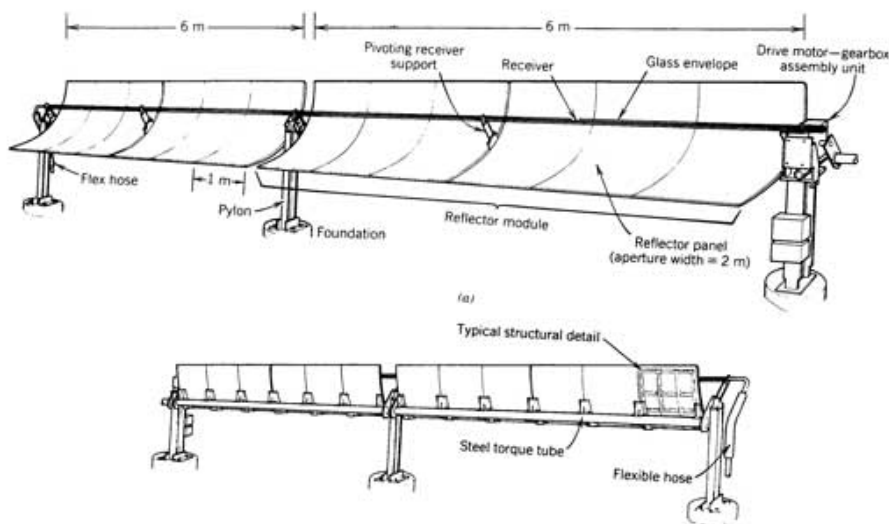
Ο γραμμικός δέκτης που αναφέρεται και ως στοιχείο συλλογής της θερμότητας είναι ένας από τους βασικούς λόγους της υψηλής απόδοσης του συλλέκτη. Αποτελείται από ένα σωλήνα από χάλυβα πάχους 70mm με επιλεκτική κεραμομεταλλουργική επιφάνεια, που περιβάλλεται από ένα γυάλινο σωλήνα εκκένωσης. Ο δέκτης περιλαμβάνει σφραγίδες μεταξύ του γυαλιού και του χάλυβα για την επίτευξη του κενού. Ο λόγος της ύπαρξης του κενού είναι η προστασία της επιλεκτικής επιφάνειας και η μείωση των θερμικών απωλειών στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Το κενό διατηρείται σε περίπου 0.0001 mm Hg (0.013Pa). Η κεραμομεταλλουργική επικάλυψη προσφέρει εξαιρετικές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας, με απορροφητικότητα 0.96 επί της άμεσης προσπίπτουσας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας και διαπερατότητα 0.19 στους 350°C. Η εξωτερική πλευρά του

γυάλινου κυλίνδρου έχει αντιανακλαστική επίστρωση για να μειώσει τις απώλειες αντανάκλασης. Ουσίες που έχουν σχεδιαστεί για να απορροφούν μόρια αερίων έχουν εγκατασταθεί στο κενό χώρο για να απορροφούν υδρογόνο και άλλα αέρια που διεισδύουν με τη πάροδο του χρόνου.

Ο συλλέκτης περιστρέφεται γύρω από τον άξονα βορά-νότου για να παρακολουθεί τη πορεία του ήλιου στον ουρανό κατά τη διάρκεια της μέρας. Ο άξονας περιστροφής βρίσκεται στο κέντρο μάζας του συλλέκτη για να μειώσει την ισχύ παρακολούθησης. Το σύστημα καθοδήγησης χρησιμοποιεί υδραυλικά έμβολα για να μετακινεί το συλλέκτη. Το σύστημα παρακολούθησης βασίζεται σε ηλιακούς αισθητήρες. Ένας τοπικός ελεγκτής ελέγχει τη παρακολούθηση του συλλέκτη και παρακολουθεί τη θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και στέλνει δεδομένα σχετικά με τη λειτουργία σε ένα κεντρικό υπολογιστή στο δωμάτιο ελέγχου. Ο συλλέκτης έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί κανονικά υπό ανέμους ταχύτητας 40km/h και με μειωμένη ακρίβεια σε ανέμους 55km/h. Το σύστημα αντέχει ανέμους της τάξης των 110km/h.

Η δομή του αποτελείται από δικτυώματα τύπου V τα οποία κατασκευάζονται και ευθυγραμμίζονται πριν τοποθετηθούν στη θέση τους για τη τελική συναρμολόγηση. Το αποτέλεσμα είναι μια ελαφριά και ισχυρή κατασκευή[1].

Γ.8.3.2. Πρωτότυπο σύστημα της Sandia



Σχήμα Γ.8.5. Υποσύστημα παραβολικών κοίλων. Χορδή καθοδήγησης.

Το σύστημα παραβολικών κοίλων που θα εξεταστεί στη συνέχεια αναπτύχθηκε από την Sandia National Laboratories σε συνεργασία με βιομηχανίες. Το σύστημα συναρμολογήθηκε από κομμάτια τα οποία κατασκευάστηκαν από ιδιωτικές εταιρίες με χρήση τεχνικών μαζικής παραγωγής.

Χαρακτηρίζεται πρωτότυπο επειδή παρόλο που δεν είναι εμπορικά διαθέσιμο, περιέχει στοιχεία από πολλά εμπορικά συστήματα τα οποία είναι υπό ανάπτυξη.

Ένα σχήμα του συστήματος φαίνεται παρακάτω. Ο συλλέκτης αποτελείται από πολλά κομμάτια ανακλαστήρα-δέκτη τα οποία συναρμολογούνται μαζί και καθοδηγούνται από μια μονάδα κινητήρα-κιβωτίου ταχυτήτων. Η μονάδα αυτή τοποθετείται στο κέντρο της χορδής καθοδήγησης.

Τα παραβολικά ανακλαστικά πλαίσια έχουν μήκος 1.0m και άνοιγμα πλάτους 2.0m. Έξι ανακλαστικά πλαίσια με οριακή γωνία 90° τοποθετούνται σε ένα σωλήνα ροπής μήκους 6.0m, και ο σωλήνας ροπής είναι τοποθετημένος σε πυλώνες από χάλυβα.

Τα 6.0m μήκους επιλέχθηκαν για να μειώσουν το φαινόμενο της κάμψης της κατασκευής ανάμεσα στους πυλώνες που επηρεάζει την οπτική απόδοση του συστήματος. Το μέγεθος του σωλήνα ροπής (διάμετρος και πάχος τοιχώματος) καθορίζεται από τα αναμενόμενα μέγιστα φορτία ανέμου στη κατασκευή. Σκοπός της επιλογής του μήκους του σωλήνα ροπής είναι να μειωθεί το κόστος του πεδίου (να μειωθεί ο αριθμός των τιμεντένιων στηριγμάτων) διατηρώντας παράλληλα άκαμπτη τη δομή χρησιμοποιώντας μια λογική διάμετρο. Ανάλογα με τις αξιολογήσεις των μηχανικών τα βασικό μήκος μπορεί να έχει διάφορες τιμές. Τα συστήματα παραβολικών κοίλων που παράγονται εμπορικά έχουν ενότητες ανακλαστήρα με διάφορα μήκη και αυτό δείχνει την αβεβαιότητα που επικρατεί στην αξιολόγηση του κόστους και των αποτελεσμάτων.

Όπως φαίνεται στο σχήμα Γ.8.5, μια μονάδα κινητήρα-κιβωτίου ταχυτήτων χρησιμοποιείται για να οδηγήσει τέσσερα ενότητες ανακλαστήρα με συνολικό μήκος τα 24m. Το μήκος της κατασκευής του συλλέκτη που οδηγείται από μια μονάδα κινητήρα-κιβωτίου είναι αντικείμενο ανάλυσης. Για να μειωθεί το κόστος, ο σχεδιαστής του συλλέκτη θα ήθελε να οδηγήσει ένα πολύ μεγάλο μήκος συλλέκτη με μια μόνο μονάδα κινητήρα-κιβωτίου. Ωστόσο, όσο αυξάνεται το μήκος της δομής αυξάνεται και το μέγεθος του κινητήρα και του κιβωτίου με αποτέλεσμα να αυξάνονται στα στρεπτικά φορτία. Ανάλογα με την εκτίμηση των φορτίων (κυρίως φορτία που έχουν να κάνουν με την ανάγκη οδήγησης του συλλέκτη υπό ισχυρούς ανέμους) η χορδή καθοδήγησης μπορεί να είναι μακρύτερη η πιο κοντή από τα 24m του πρωτοτύπου. Αναλύσεις σε αεροδυναμικές σήραγγες δείχνουν ότι ένα μήκος χορδής καθοδήγησης της τάξης των 24-48m είναι λογική. Για άλλη μια φορά εξαιτίας της αβεβαιότητας όσο αφορά τα φορτία παράγονται για εμπορικούς σκοπούς συλλέκτες με διάφορα μεγέθη χορδής καθοδήγησης.

Η χορδή καθοδήγησης είναι η βασική μονάδα, ή δομικό στοιχείο ενός πεδίου παραβολικών κοίλων. Ο αριθμός των χορδών καθοδήγησης που συνδέονται σειριακά καθορίζεται από την επιθυμητή αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Η επιλογή της αύξησης της θερμοκρασίας του ρευστού και ως εκ τούτου του μήκους της χορδής καθοδήγησης εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής που εξυπηρετεί το ηλιακό θερμικό σύστημα.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα μήκους του παραβολικού κοίλου συλλέκτη καθορίζεται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το σχεδιασμό του συλλέκτη, και την ανάγκη παροχής τυρβώδους ροής μέσα στο δέκτη για να υπάρχει καλή μετάδοση θερμότητας. Ως εκ τούτου, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι παράμετρος της σχεδίασης του συλλέκτη και καθορίζεται συνήθως από τον κατασκευαστή του συλλέκτη. Μια λογική τιμή για ένα συλλέκτη παρόμοιο με αυτό του σχήματος Γ.8.5. είναι 1.0 – 2.0°C αύξηση της θερμοκρασίας ανά μέτρο μήκους κοίλου όταν το ρευστό μεταφοράς είναι κάποιο έλαιο [3].

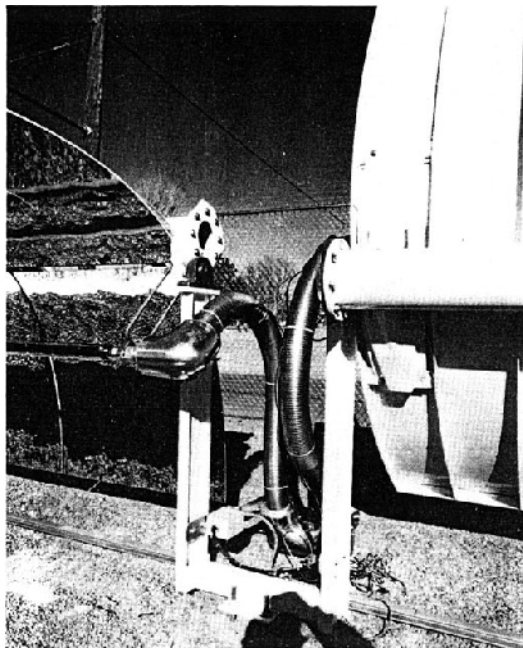
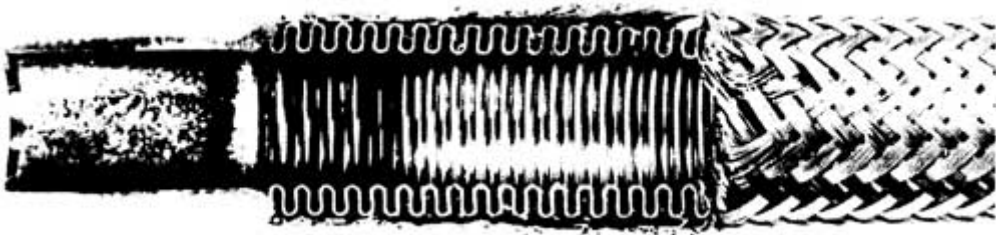
Γ.8.3.3. Δέκτης

Ο σωλήνας του δέκτη αποτελείται από ένα σωλήνα κατασκευασμένο από χάλυβα που περιβάλλεται από γυαλί για να καταστείλει απώλειες θερμότητας μέσω συναγωγής. Ο σωλήνας έχει εξωτερική διάμετρο 31.57mm και το μέγεθός του είναι τέτοιο ώστε να συλλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της ανακλώμενης ακτινοβολίας ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τις θερμικές απώλειες. Ο δέκτης είναι επικαλυμμένος με μια μαύρη επίστρωση για να μειώσει τις απώλειες ακτινοβολίας στις υψηλές θερμοκρασίες. Κοντά στο τέλος του περιβλήματος από γυαλί υπάρχουν δαχτυλίδια σχήματος Ο που προστατεύουν από την είσοδο ρύπων στην αύλακα.

Ο περιστρεφόμενος μηχανισμός στήριξης του δέκτη φαίνεται στην εικόνα Γ.8.5 . Η περιστροφή προστατεύει το δέκτη από το φαινόμενο της διαστολής όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στη θερμοκρασία λειτουργίας. Προστασία από τη διαστολή προβλέπεται επίσης και από τα δαχτυλίδια σχήματος Ο, που επιτρέπουν σχετική κίνηση μεταξύ του σωλήνα του δέκτη και του περιβλήματος από γυαλί. Η σχετική κίνηση είναι απαραίτητη για να αντισταθμίσει τη διαφορά της θερμικής διαστολής μεταξύ του σωλήνα και του περιβλήματος.

Αν και στον αύλακα μεταξύ του δέκτη και του γυαλιού δεν υπάρχει κενό, έχει προταθεί δέκτης κενού. Η δυσκολία εντοπίζεται στην εύρεση της χρυσής τομής ανάμεσα στο επιπλέον κόστος και στα κέρδη από της αύξηση της απόδοσης του συλλέκτη. Το κέρδος στην απόδοση του συλλέκτη με τη χρήση δέκτη κενού είναι περίπου 5-10% αν μπορεί να διατηρηθεί κενό της τάξης του 0.1Pa. Η εμπειρία έχει δείξει ότι είναι δύσκολη η διατήρηση ενός τέτοιου κενού.

Δεδομένου ότι ο δέκτης κινείται σε σχέση με το σωλήνα μεταφοράς θερμότητας του πεδίου του συλλέκτη, προβλέπεται ένας εύκαμπτος σωλήνας. Η κατασκευή ενός εύκαμπτου σωλήνα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αποτελείται από μεταλλικούς φυσητήρες που περιβάλλονται από ένα πλεγμένο καλώδιο για να προστατευτούν οι φυσητήρες από μηχανική ζημιά [3].



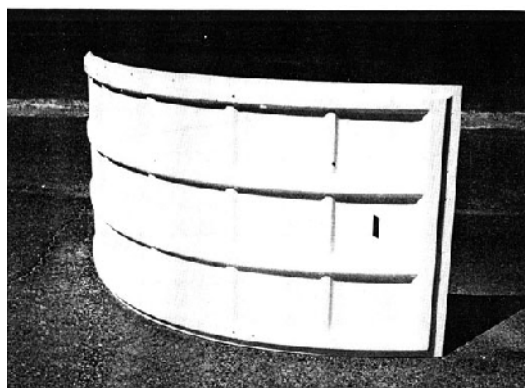
Σχήμα Γ.8.6. Χρήση εύκαμπτων σωλήνων για να απομονωθεί η κίνηση κάθε χορδής καθοδήγησης από τη γειτονική της έτσι ώστε να εξλειφθεί η ανάγκη για συγχρονισμό του ενός κινητήρα με τον επόμενο

Γ.8.3.4. Μηχανισμός ελέγχου και παρακολούθησης

Ο έλεγχος και η παρακολούθηση του συστήματος παρέχεται από ένα ιεραρχικό σύστημα ελέγχου. Ένας κεντρικός ελεγκτής παρακολουθεί την κατάσταση του πεδίου και υπολογίζει τις στιγμιαίες γωνίες παρακολούθησης των κοίλων και επικοινωνεί με τις χορδές καθοδήγησης. Σε κάθε χορδή καθοδήγησης υπάρχουν μικροϋπολογιστές που συγκεντρώνουν πληροφορίες από ηλεκτροπτικούς αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στο σωλήνα του δέκτη για να τελειοποιήσουν την παρακολούθηση των μεμονωμένων χορδών καθοδήγησης. Οι αισθητήρες αποτελούνται από δύο

όμοια σύρματα νικελίου τοποθετημένα πάνω σε κάθε πλευρά του σωλήνα του δέκτη. Η ανακλώμενη ακτινοβολία ζεσταίνει κάθε ένα από τους αισθητήρες, αλλάζοντας έτσι την αντίστοιχη αντίστασή του. Οι διαφορές στις ηλεκτρικές αντιστάσεις των δύο καλωδίων χρησιμοποιούνται για να τελειοποιήσουν την παρακολούθηση του κοίλου. Με τέλεια παρακολούθηση, στα δύο καλώδια ανακλάται η ίδια ροή και έτσι έχουν ίδιες αντιστάσεις [3].

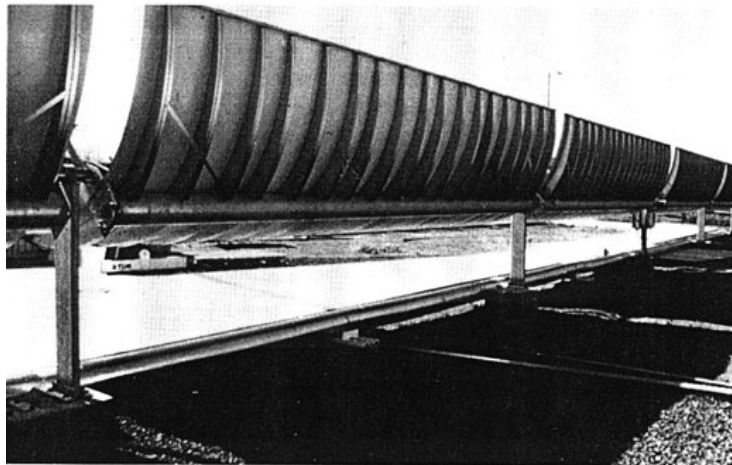
Γ.8.3.5. Ανακλαστήρες



Σχήμα Γ.8.7. Ανακλαστικό πλαίσιο από λαμαρίνα

Ίσως το πιο ιδιαίτερο στοιχείο σε ένα υποσύστημα παραβολικών κοίλων να είναι το ανακλαστικό πλαίσιο. Η πρόκληση είναι να δημιουργηθεί μια κατασκευή με ένα ακριβές παραβολικό περίγραμμα και υψηλή κατοπτρική ανακλαστικότητα. Ένα από τα πολλά διαφορετικά σχέδια ανακλαστήρων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτό το σχήμα εκμεταλλεύεται τη τεχνολογία μαζικής παραγωγής φύλλων λαμαρίνας για να παρέχει ένα παραβολικό υπόστρωμα επί του οποίου συνδέονται οι γυάλινοι ανακλαστήρες. Εμπορικά ανακλαστικά πλαίσια έχουν επιτύχει υψηλή ακρίβεια περιγράμματος (σφάλματα στην κλίση μικρότερα από 2.5mrad)

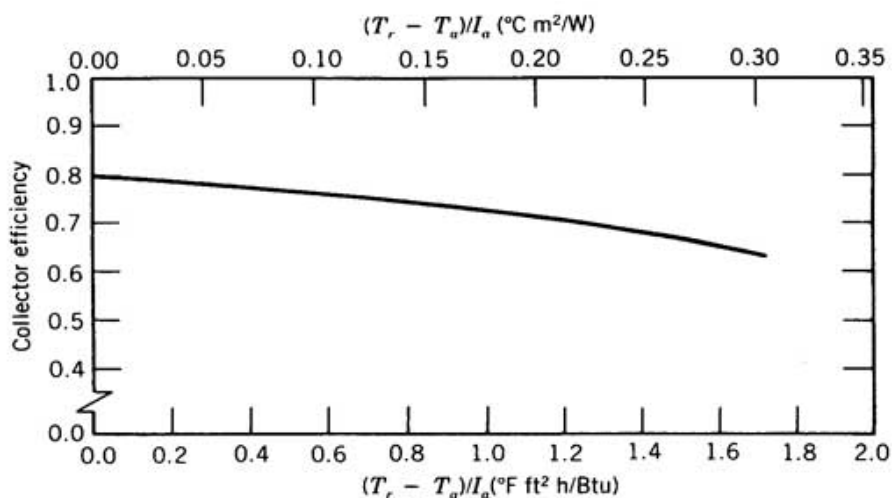
Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ένα σχέδιο ανακλαστήρα που αποτελείται από ένα από παραβολικό γυάλινο κάτοπτρο το οποίο υποστηρίζεται από δύο φύλλα λαμαρίνας. Αυτό το σχέδιο είναι αρκετά ελκυστικό επειδή μειώνει την υποστήριξη του ανακλαστήρα στον εαυτό του με κάποια ελάχιστα στοιχεία υποστήριξης [3] .



Σχήμα Γ.8.8. Γυάλινο κάτοπτρο που στηρίζεται σε φύλλα λαμαρίνας

Γ.8.3.6. Απόδοση

Η θερμική απόδοση του πρωτοτύπου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Δεδομένου ότι τα παραβολικά κοίλα τείνουν να χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, η απόδοση του συλλέκτη αναφέρεται ως καμπύλη. Οι τιμές έχουν προσδιοριστεί πειραματικά [3].



Σχήμα Γ.8.9. Απόδοση του πρωτοτύπου κοίλου

Γ.8.4. Λειτουργία, συντήρηση και προβλήματα

Στοιχεία του ηλιακού πεδίου

Ένα πρόβλημα με ένα απλό στοιχείο μπορεί να επηρεάσει χιλιάδες άλλα σε ένα μεγάλο ηλιακό πεδίο. Είναι ενδεδειγμένο κάθε στοιχείο της εγκατάστασης να σχεδιάζεται για τουλάχιστον 30 χρόνια ζωής της μονάδας και ότι υπάρχει κάποιο πρόγραμμα διασφάλισης της ποιότητας/ ποιοτικού ελέγχου για να εξασφαλίσει ότι η κατασκευή και η εγκατάσταση πληρούν τις προϋποθέσεις

σχεδιασμού. Τα προβλήματα με διάφορα στοιχεία της εγκατάστασης μπορούν να μειωθούν ή να επιλυθούν με ταχύτητα όταν έχουν συμπεριληφθεί στο σχεδιασμό οι απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης.

Δέκτης

Ένας μεγάλος αριθμός προβλημάτων έχει εμφανιστεί στα στοιχεία που αποτελούν το δέκτη. Απώλεια του κενού σε δέκτες κενού, σπάσιμο του περιβλήματος από γυαλί, κάμψη των σωλήνων από χάλυβα είναι οι κυριότερες αιτίες αστοχίας. Όλα τα παραπάνω προβλήματα επηρεάζουν τη θερμική απόδοση της εγκατάστασης. Η συνεχής έκθεση στον αέρα επιταχύνει την υποβάθμιση των επιφανειών.

Ανακλαστήρες

Ένα πρόβλημα που εμφανίστηκε νωρίς ήταν η διαφορετική θερμική διαστολή ανάμεσα στα κάτοπτρα και τη στήριξη που οδηγούσε στο διαχωρισμό τους. Το πρόβλημα λύθηκε με τη χρήση κεραμικών υλικών, πιο εύκαμπτης κόλλας και θερμικής θωράκισης. Επίσης σπασίματα των κατόπτρων λόγω υψηλών ανέμων είναι αρκετά πιθανά ειδικά κοντά στις άκρες των ηλιακών πεδίων. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα έχουν σχεδιαστεί ισχυρότερα κάτοπτρα από γυαλί καθώς και η χρήση λεπτού πλαστικού επαργυρωμένου φιλμ. Επίσης κάθε κάτοπτρο πρέπει αν έχει τη δυνατότητα να καθαρίζεται χωρίς να καταστρέφεται η οπτική ποιότητά του.

Εύκαμπτοι σωλήνες

Αναφέρθηκε ήδη η χρήση εύκαμπτων σωλήνων στις χορδές καθοδήγησης. Οι εύκαμπτοι σωλήνες παρουσιάζουν υψηλές τιμές αστοχίας. Οι τελευταίες μονάδες χρησιμοποιούν βελτιωμένα σχέδια που αυξάνουν τη ζωή και μειώνουν τις αστοχίες. Επιπροσθέτως ένα νέο σχέδιο αντικαθιστά τους εύκαμπτους σωλήνες με σφαιρικές αρθρώσεις οι οποίες μειώνουν το κόστος, μειώνουν σημαντικά τη πτώση πίεσης, και μειώνουν τις θερμικές απώλειες.

Καθάρισμα των κατόπτρων και παρακολούθηση της ανακλαστικότητας τους

Η ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού προγράμματος για την παρακολούθηση της ανακλαστικότητας των κατόπτρων το καθαρισμό τους είναι κρίσιμο. Τα ποσοστά ρύπανσης είναι διαφορετικά ανά εποχή και για αυτό απαιτείται ευελιξία. Για παράδειγμα έχουν παρατηρηθεί υψηλά ποσοστά ρύπανσης της τάξης του 0.5% / ημέρα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για το καθαρισμό των κατόπτρων όπως είναι το κατακλυσμικό πλύσιμο και η χρήση άμεσων ψεκασμών υψηλής πίεσης. Όλες οι μέθοδοι απαιτούν νερό για να έχουν καλή απόδοση. Ο περιοδικός έλεγχος της ανακλαστικότητας των κατόπτρων μπορεί να προσφέρει ένα χρήσιμο

εργαλείο στο καθαρισμό τους και να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της πλύσης. Ως γενικός κανόνας τα κάτοπτρα από γυαλί μπορούν να επιστρέφουν στο σχεδιαστικό επίπεδο με καλό πλύσιμο.

Συντήρηση

Πολλά προγράμματα έχουν αναπτυχθεί για τη συντήρηση των συμβατικών μονάδων ορυκτών καυσίμων. Τα προγράμματα αυτά ενισχύουν σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα και το σχεδιασμό των δραστηριοτήτων συντήρησης, μειώνοντας το κόστος. Όμως τα προγράμματα αυτά δεν είναι ιδανικά για τη χρήση σε συστήματα παραβολικών κοίλων και αυτό γιατί ενώ μπορούν να χειριστούν συστήματα με εκατοντάδες ξεχωριστά κομμάτια δεν είναι κατάλληλα για το χειρισμό συστημάτων που χρησιμοποιούν χιλιάδες ξεχωριστά κομμάτια. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικά προγράμματα για να ανιχνεύουν προβλήματα και να καθορίζουν τη συντήρηση της ηλιακής μονάδας. Τα προγράμματα αυτά έχουν αποδειχθεί ότι είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση και το σχεδιασμό των δραστηριοτήτων συντήρησης και πρέπει να θεωρούνται σημαντικά για κάθε νέο έργο.

Προσανατολισμός του συλλέκτη

Η εμπειρία έχει δείξει ότι είναι σημαντικό να υπάρχει η δυνατότητα του περιοδικού ελέγχου του προσανατολισμού του συλλέκτη και η δυνατότητα επιδιόρθωσης των προβλημάτων ευθυγράμμισης όταν είναι απαραίτητο. Ο σχεδιασμός των συλλεκτών πρέπει να επιτρέπει τον έλεγχο του προσανατολισμού του πεδίου και τις εύκολες διορθώσεις.

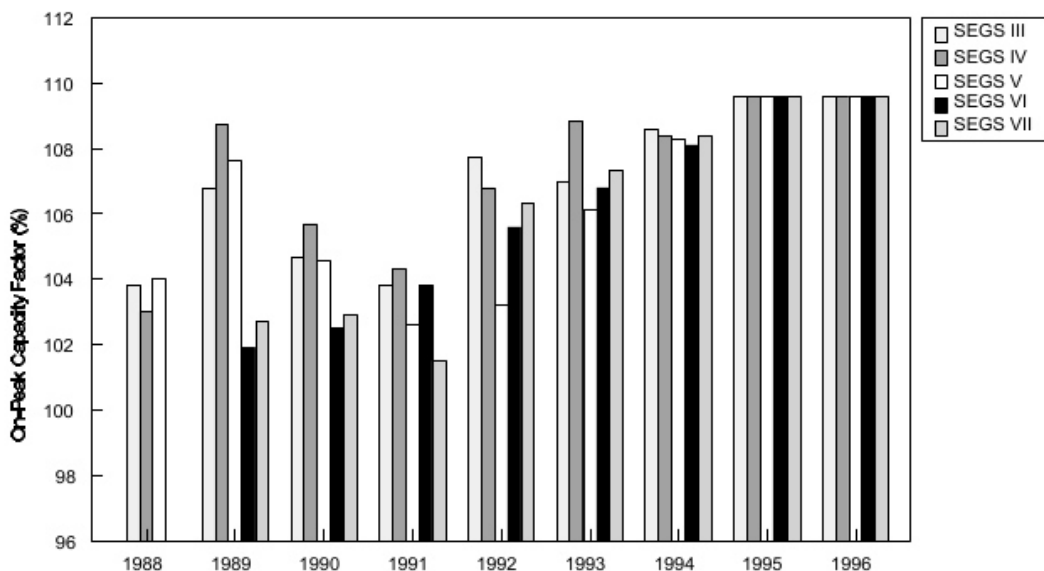
Θερμικοί κύκλοι και καθημερινή εκκίνηση

Τυπικά οι παραβολικές μονάδες λειτουργούν όποτε υπάρχει επαρκής ηλιακή ακτινοβολία και τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται εφεδρικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μονάδες να σταματούν τη λειτουργία τους κατά τη διάρκεια της νύχτας και να απαιτείται η επανεκκίνησή τους κάθε μέρα. Οι μονάδες πρέπει να είναι σχεδιασμένες όχι μόνο να εκκινούν κάθε μέρα αλλά να εκκινούν όσο γίνεται πιο γρήγορα. Η χρήση θερμικής αποθήκευσης μπορεί να μειώσει σημαντικά οποιαδήποτε προβλήματα. Γενικά ο εξοπλισμός, οι προδιαγραφές του εξοπλισμού και οι διαδικασίες λειτουργίας πρέπει να αναπτύσσονται λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις απαιτήσεις [1].

Γ.8.5. Εφαρμογή του συστήματος, οφέλη και επιπτώσεις

Γ.8.5.1. Σύνδεση στο δίκτυο

Η κύρια εφαρμογή των μονάδων παραβολικών κοίλων είναι η σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο στο εύρος των 30 με 300MW. Επειδή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα σε υβριδικούς σταθμούς με ορυκτά καύσιμα, οι μονάδες μπορούν να σχεδιαστούν να παρέχουν σταθερή αιχμή σε ενδιάμεση ισχύ φορτίου. Η μονάδα είναι κατάλληλη για εγκαταστάσεις όπου οι ζήτηση αιχμής συσχετίζεται με τη παροχή ηλιακής ακτινοβολίας. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε πέντε μονάδες SEGS (SEGSIII-SEGSVII) οι οποίες λειτούργησαν σε τέτοιες συνθήκες. Παρατηρούμε ότι παρήγαγαν περισσότερο από 100% της ονομαστικής τους ικανότητας κατά τη διάρκεια των περιόδων αιχμής μεταξύ 12:00 και 18:00 τις εργάσιμες ημέρες από τον Ιούνιο μέχρι το Σεπτέμβριο. Αυτό δείχνει την υψηλή διαθεσιμότητα που μπορούν να επιτύχουν αυτές οι μονάδες [1].



Σχήμα Γ.8.10 Συντελεστές χωρητικότητας για 5 μονάδες SEGS

Γ.8.5.2. Ιδανικές αγορές για το σύστημα

Με όλο και αυξανόμενη ζήτηση για νέες μεθόδους παραγωγής ενέργειας σε αρκετές αναπτυσσόμενες χώρες η εγκατάσταση παραβολικών κοίλων μοιάζει αρκετά ελκυστική. Η εγκατάσταση είναι ιδανική για περιοχές όπως η Ινδία, η Αίγυπτος, το Μεξικό, η Κρήτη και το Θιβέτ που έχουν εκφράσει ενδιαφέρον για τη τεχνολογία. Αρκετές χώρες σχεδιάζουν την εγκατάσταση έργων συνδυασμένου κύκλου. Για αυτές τις χώρες το σχέδιο ISCCS παρέχει μια φθηνή και με χαμηλό κίνδυνο ευκαιρία για να ξεκινήσουν να αναπτύξουν μονάδες παραβολικών κοίλων.

Γ.8.5.3. Οφέλη

Χαμηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού. Οι μονάδες παραβολικών κοίλων αποτελούν τις πιο φθηνές πηγές παραγωγής ηλεκτρισμού από ηλιακή ενέργεια. Έχουν ενισχυθεί σημαντικά από πολύτιμη εμπειρία λειτουργίας.

Ημερήσια ισχύς αιχμής. Τα παραβολικά κοίλα παράγουν ανανεώσιμη ενέργεια κατά τη διάρκεια της ωρών αιχμής, για παράδειγμα ηλιόλουστες ημέρες όπου τα φορτία λόγω κλιματισμού γίνονται μέγιστα. Οι υβριδικές εγκαταστάσεις καθώς και η θερμική αποθήκευση επιτρέπουν στις μονάδες να λειτουργούν ακόμα και σε περιόδους που δεν υπάρχει ήλιος.

Περιβαλλοντικά: Οι μονάδες παραβολικών κοίλων μειώνουν τη λειτουργία των μονάδων ορυκτών καυσίμων κατά τη διάρκεια των ηλιόλουστων απογευμάτων σε ώρες όπου σχηματίζεται το φωτοχημικό νέφος, που επιδεινώνεται από τις εκπομπές NOX από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.

Οικονομικά: Η κατασκευή και η λειτουργία μιας μονάδας παραβολικών κοίλων έχει θετική επίδραση στη τοπική οικονομία. Ένα πολύ μεγάλος αριθμός υλικών για τη κατασκευή των μονάδων μπορεί γενικά να παρέχεται τοπικά. Αρκετή εργασία για τη κατασκευή και τη λειτουργία μπορεί να γίνει από τοπικό εργατικό δυναμικό.

Γ.8.5.4. Επιπτώσεις

Διαρροές ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Πολλές φορές το ρευστό μεταφοράς θερμότητας μπορεί να αποτελεί κάποια επικίνδυνη ουσία με βάση τα πρότυπα μιας χώρας. Σε περίπτωση που υπάρχει διαρροή πρέπει να αφαιρεθεί το μολυσμένο έδαφος και να μεταφερθεί σε εγκατάσταση που χρησιμοποιεί βακτήρια στο έδαφος για να αποσυνθέσουν το έλαιο μέχρι να φτάσει η συγκέντρωσή του σε αποδεκτά επίπεδα.

Νερό: Η διαθεσιμότητα του νερού είναι ένα σημαντικό θέμα στις άνυδρες περιοχές που είναι ιδανικές για μονάδες παραβολικών κοίλων. Η πλειονότητα της κατανάλωσης νερού (περίπου 90%) οφείλεται στους πύργους ψύξης. Η κατανάλωση του νερού είναι ονομαστικά η ίδια όπως θα ήταν σε οποιαδήποτε μονάδα παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί το κύκλο του Rankine και περιέχει πύργους ψύξης και η οποία παράγει το ίδιο επίπεδο ηλεκτρικής ενέργειας. Ξηροί πύργοι ψύξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειωθεί σημαντικά η κατανάλωση νερού. Ωστόσο αυτό μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της απόδοσης της μονάδας κατά 10%. Ένα άλλο θέμα είναι η απομάκρυνση του νερού από τη μονάδα. Το νερό που αποβάλλεται από τη μονάδα πρέπει να

στέλνεται σε ειδικές λίμνες εξάτμισης εξαιτίας της συγκέντρωσής του σε μέταλλα ή εξαιτίας χημικών που έχουν προστεθεί.

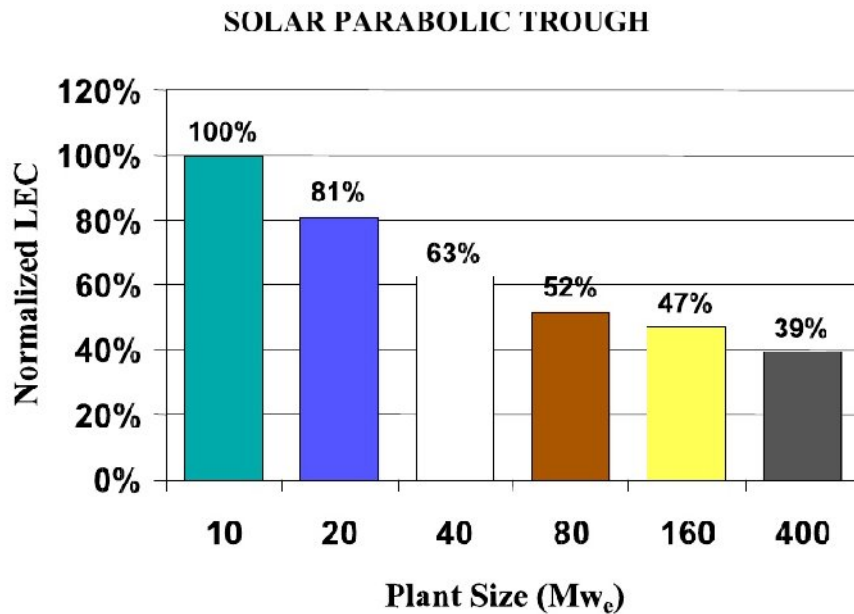
Χρήση Γης: Οι παραβολικές μονάδες απαιτούν ένα σημαντικό ποσό γης το οποίο συνήθως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα για άλλες χρήσεις. Η απαιτήσεις σε γη είναι μικρότερες για τις μονάδες παραβολικών κοίλων από τις υπόλοιπες ανανεώσιμες τεχνολογίες (αιολικές, βιομάζα, υδροηλεκτρικές) και επίσης μικρότερες από αυτές των ορυκτών καυσίμων όταν συμπεριλαμβάνονται η εξόρυξη και οι γεωτρήσεις. Η τρέχουσα τεχνολογία παράγει 100kWh/έτος/m² γης.

Υβριδική λειτουργία: Τα υβριδικά συστήματα θα λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα κάποιες περιόδους. Αυτές τις περιόδους η μονάδα θα παράγει εκπομπές σχετικές με το καύσιμο.

Γ.8.6. Υποθέσεις σχετικά με τη τεχνολογία και προβλήματα.

Μέγεθος της μονάδας

Η αύξηση του μεγέθους της εγκατάστασης είναι η ευκολότερη μέθοδος για να μειωθεί το κόστος από τις μονάδες παραβολικών κοίλων. Μελέτες έχουν δείξει ότι διπλασιάζοντας το μέγεθος της μονάδας μειώνεται το κεφάλαιο κατά 12-14%. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα παράδειγμα πως το ενεργειακό κόστος ηλεκτρισμού από ηλιακή ενέργεια μειώνεται έως και 60% αυξάνοντας απλώς το μέγεθος της μονάδας. Η μείωση του κόστους έρχεται από 3 σημεία. Πρώτον, η αύξηση του όγκου παραγωγής των συλλεκτών μειώνει το κόστος κατά τετραγωνικό μέτρο. Δεύτερον, μια μονάδα που είναι διπλάσια σε μέγεθος δεν θα στοιχίσει τα διπλάσια χρήματα για να κατασκευαστεί. Τρίτον, τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης θα είναι μικρότερα ανά kW.



Σχήμα Γ.8.11 Επίδραση του μεγέθους στο σταθμισμένο κόστος

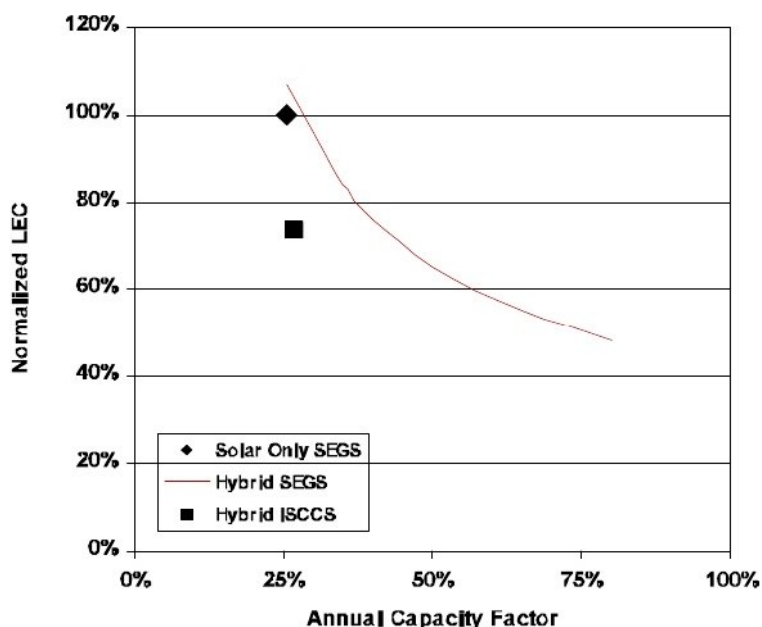
Υβριδική λειτουργία

Η υβριδική λειτουργία με ορυκτά καύσιμα προσφέρει έναν αριθμό από πιθανά οφέλη για τις ηλιακές εγκαταστάσεις που περιλαμβάνουν τη μείωση του κινδύνου για τους επενδυτές, τη βελτίωση της απόδοσης της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, και τη μείωση του κόστους της ενέργειας από τη μονάδα. Επίσης επιτρέπει στη μονάδα να παρέχει σταθερή ισχύ.

Δεδομένου ότι τα ορυκτά καύσιμα είναι προς το παρόν φθηνά η υβριδοποίηση των παραβολικών κοίλων θεωρείται ότι παρέχει μια καλή ευκαιρία για να μειωθεί το μέσο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από τη μονάδα. Υβριδικές μονάδες έχουν επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Οι εγκαταστάσεις SEGS έχουν υβριδικό σχεδιασμό που επιτρέπουν μέχρι και το 25% της ετήσιας ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Η ενέργεια από τα ορυκτά καύσιμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπερθερμανθεί ο ηλιακά παραγόμενος ατμός (SEGS I), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χρησιμοποιηθεί σε ξεχωριστό λέβητα για να παράγει ατμό όταν η ηλιακή ενέργεια είναι ανεπαρκής (SEGS II-VII), η μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα θερμαντήρα ελαίου παράλληλα με το ηλιακό πεδίο όταν η ηλιακή ενέργεια είναι ανεπαρκής (SEGS VIII-IX). Η απόφαση για το τύπο της υβριδοποίησης είναι πρωταρχικά μια οικονομική απόφαση. Ωστόσο, είναι φανερό από την εμπειρία από τις μονάδες SEGS ότι ο υβριδισμός ήταν απαραίτητο στοιχείο για τη λειτουργική επιτυχία των έργων.

Το εναλλακτικό ISCCS σχέδιο προσφέρει έναν αριθμό από δυνητικά πλεονεκτήματα τόσο για την ηλιακή μονάδα όσο και για τη μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Τα πλεονεκτήματα της ηλιακής μονάδας είναι ότι το κόστος της αύξησης του μεγέθους του αμοστροβίλου στο συνδυασμένο

κύκλο είναι μικρότερο από τη κατασκευή μιας πλήρους αυτόνομης μονάδας. Επίσης, η καθαρή ετήσια απόδοση μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική αυξάνεται επειδή η ηλιακή ακτινοβολία δεν χάνεται περιμένοντας τη μονάδα να ξεκινήσει, και επειδή η μέση απόδοση του στροβίλου θα είναι μεγαλύτερη επειδή θα λειτουργεί με 50% φορτίο ή και περισσότερο. Ο συνδυασμένος κύκλος έχει πλεονεκτήματα επειδή η απόδοση της μετατροπής των ορυκτών καυσίμων αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ηλιακής λειτουργίας αφού οι θερμικές απώλειες του αεριοστροβίλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο αποτελεσματικά. Επίσης η ηλιακή λειτουργία βοηθάει στην αντιστάθμιση της μείωσης της επίδοσης που αντιμετωπίζουν οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου τις θερμές περιόδους. Το παρακάτω σχήμα δείχνει πως μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου συγκρίνεται με μια σκέτη ηλιακή μονάδα και μια συμβατική υβριδική [1].



Σχήμα Γ.8.12 Επίδραση του υβριδισμού στο σταθμισμένο κόστος ενέργειας

Θερμική αποθήκευση

Η διαθεσιμότητα αποτελεσματικής και μικρού κόστους θερμικής αποθήκευσης είναι σημαντική για τη μακροπρόθεσμη μείωση του κόστους της τεχνολογίας παραβολικών κοίλων όπως επίσης και για την αύξηση των πιθανοτήτων για την εμπορική εκμετάλλευσή τους. Μια μονάδα παραβολικών κοίλων (για παράδειγμα στην έρημο Mojave) χωρίς θερμική αποθήκευση μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό μέχρι περίπου το 25% του ετήσιου συντελεστή δυναμικού. Η προσθήκη θερμικής αποθήκευσης μπορεί να επιτρέψει στη μονάδα τη παραγωγή ενέργειας τις μέρες που δεν επαρκεί η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνοντας το συντελεστή δυναμικού της μονάδας στο 50%. Προσπάθεια για να αυξηθεί ο ετήσιος συντελεστής δυναμικού πάνω από 50% δεν έχει νόημα γιατί το κόστος θα είναι μεγαλύτερο από το κέρδος τους καλοκαιρινούς μήνες.

Άμεση παραγωγή ατμού: Η άμεση παραγωγή ατμού στα παραβολικά κοίλα μειώνει το κόστος εξαλείφοντας της ανάγκη για ρευστό μεταφοράς θερμότητας και μειώνει τις απώλειες που προέρχονται από τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας. Η αποδοτικότητα του ηλιακού πεδίου αναμένεται να αυξηθεί εξαιτίας των χαμηλότερων μέσων θερμοκρασιών λειτουργίας και της βελτιωμένης μεταφοράς θερμότητας στο δέκτη. Οι συλλέκτες απαιτούν κάποιες τροποποιήσεις λόγω της υψηλότερης πίεσης λειτουργίας.

Προσαρμογή στις επιδόσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες περιοχές. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι ίδια σε κάθε τοποθεσία. Στο παρακάτω πίνακα φαίνεται η διαφορά στην απόδοση που αναμένεται λόγω των διαφορετικών πόρων ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες περιοχές του κόσμου (Μεταξύ των οποίων και η Κρήτη) . Το μέγεθος του ηλιακού πεδίου μπορεί να αυξηθεί για να αντισταθμίσει τη μειωμένη απόδοση λόγω μειωμένων επιπέδων ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά δεν μπορεί να βοηθήσει σε μειώσεις που προκύπτουν από αυξημένη νεφοκάλυψη [1].

Location	Site Latitude	Annual DNI (kWh/m ²)	Relative Solar Resource	Relative Solar Electric Output
United States				
Barstow, California	35°N	2,725	1.00	1.00
Las Vegas, Nevada	36°N	2,573	0.94	0.93
Tucson, Arizona	32°N	2,562	0.94	0.92
Alamosa, Colorado	37°N	2,491	0.91	0.89
Albuquerque, New Mexico	35°N	2,443	0.90	0.87
El Paso, Texas	32°N	2,443	0.90	0.87
International				
Northern Mexico	26-30°N	2,835	1.04	1.05
Wadi Rum, Jordan	30°N	2,500	0.92	0.89
Ouarzazate, Morocco	31°N	2,364	0.87	0.83
Crete	35°N	2,293	0.84	0.79
Jodhpur, India	26°N	2,200	0.81	0.75

Σχήμα Γ.8.13. Απόδοση ηλιακής ακτινοβολίας

[1] “Technology Characterization Solar Parabolic Trough”, SolarPACES (http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_trough.pdf)

[2] Wikipedia the free encyclopedia (<http://www.wikipedia.org>)

[3] “Power From The Sun Book, William B. Stine και Michael Geyer (<http://www.powerfromthesun.net/book.htm>)

Γ.9. Συλλέκτης Φρενέλ (FRESNEL)

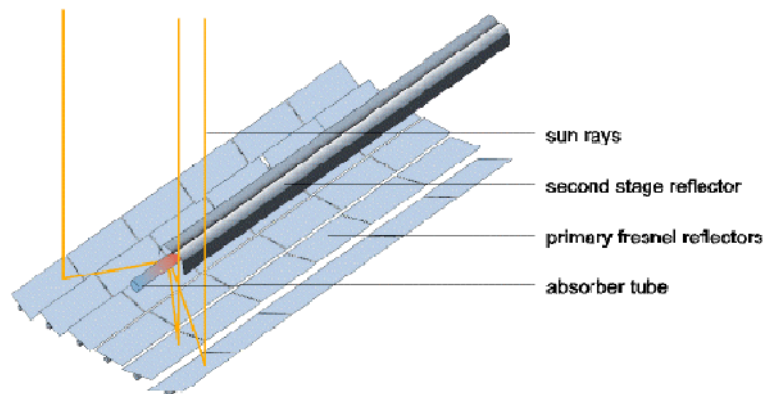


Σχήμα Γ.9.1. Συλλέκτης Φρενέλ

Γ.9.1. Περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος

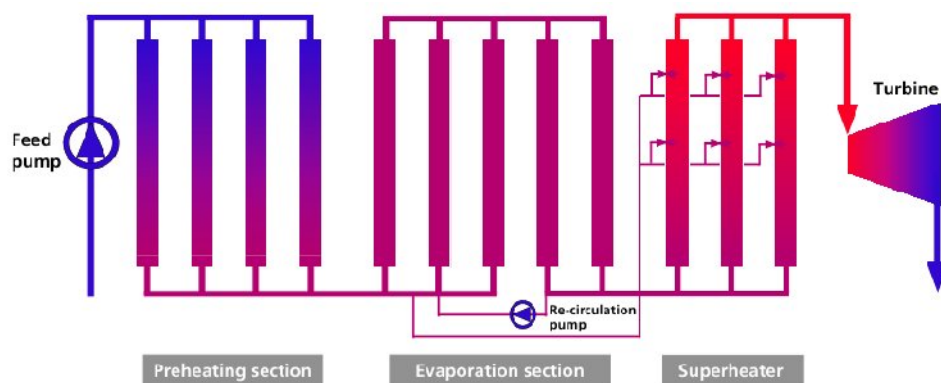
Η ιδέα του να χρησιμοποιηθεί ένα ηλιακό πεδίο με μηχανισμό παρακολούθησης που να συγκεντρώνει την ηλιακή ενέργεια σε ένα σταθερό απορροφητήρα και να μειώσει έτσι την εξάρτηση από μεγάλα κάτοπτρα αποδίδεται στον Baum στη πρώτη έκδοση του περιοδικού Solar energy [1]. Το πρώτο άτομο που εφάρμοσε αυτή την αρχή ήταν ο Francia από το πανεπιστήμιο της Genoa στην Ιταλία το 1960 [2]. Σε ένα συλλέκτη Φρενέλ μεγάλα πεδία ανακλαστήρων συγκεντρώνουν τη δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα στατικό δέκτη που βρίσκεται αρκετά μέτρα ψηλότερα από το έδαφος. Ο δέκτης περιέχει ένα δεύτερο ανακλαστήρα που συγκεντρώνει όλη την εισερχόμενη ακτινοβολία σε ένα σωληνωτό απορροφητήρα. Τα κάτοπτρα δεν είναι εντελώς επίπεδα αλλά έχουν μικρή καμπύλη η οποία επιτυγχάνεται με μηχανική κάμψη.

Ο δεύτερος συγκεντρωτής δεν μεγαλώνει απλά το στόχο για τους ανακλαστήρες Φρενέλ αλλά επιπλέον μονώνει το απορροφητικό σωλήνα. Στο πίσω μέρος του είναι καλυμμένος με μια αδιαφανή μόνωση ενώ στο μπροστινό ένας υαλοπίνακας μειώνει τις απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής.



Σχήμα Γ.9.2. Αρχή λειτουργίας συλλέκτη Φρενέλ

Ο σχεδιασμός μιας εγκατάστασης συλλεκτών Φρενέλ για άμεση παραγωγή ατμού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στο σχήμα αυτό ένα ηλιακό πεδίο για μια μονάδα των 50MW θα κατασκευαστεί με 12 σειρές συλλεκτών όπου η κάθε μία έχει μήκος 1000m. Οι σειρές μπορούν να κατασκευαστούν η μία κοντά στην άλλη ώστε να μειωθεί η χρήση γης καθώς το ηλιακό πεδίο δεν είναι πρακτικά μεγαλύτερο από τη περιοχή των κατόπτρων. Οι σειρές των συλλεκτών είναι συνδεδεμένες σε σειρά και παράλληλα και το ηλιακό πεδίο είναι χωρισμένο σε τρία μέρη για τη προθέρμανση, την εξάτμιση και την υπερθέρμανση.



Σχήμα Γ.9.3. Ροή στο ηλιακό πεδίο

Τα πλεονεκτήματα που έχει ένας συλλέκτης Φρενέλ σε σχέση με τους συλλέκτες παραβολικών κοίλων είναι τα εξής:

- Φθηνά επίπεδα κάτοπτρα με απλό μηχανισμό παρακολούθησης
- Απορροφητικό σωλήνα σταθερής θέσης χωρίς την ανάγκη για εύκαμπτες συνδέσεις υψηλής

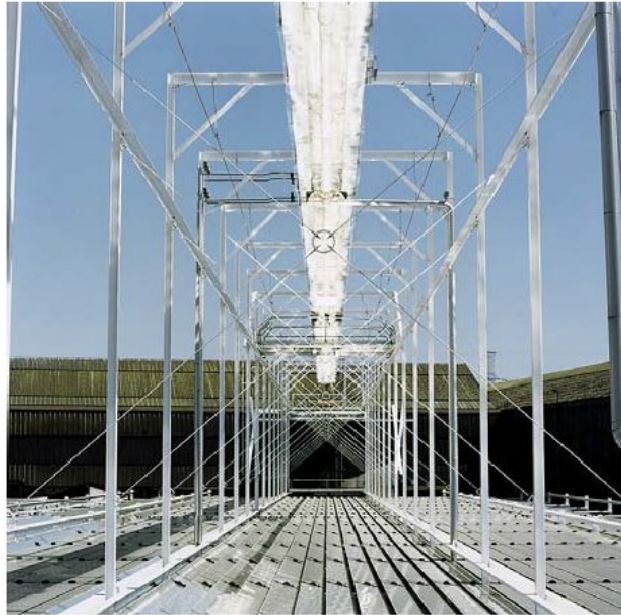
πίεσης

- Δεν απαιτείται τεχνολογία κενού και γυάλινο περίβλημα.
- Ένας απορροφητικός σωλήνας χωρίς την απαίτηση για τόξα θερμικής διαστολής
- Λόγω της επιπεδότητας των κατόπτρων τα φορτία ανέμου είναι σημαντικά μειωμένα
- Ο απορροφητικός σωλήνας μπορεί να έχει και τρεις φορές το πλάτος των παραβολικών κοίλων
- Εξαιτίας της άμεσης παραγωγής ατμού δεν υπάρχει ανάγκη για εναλλάκτη θερμότητας
- Αποτελεσματική χρήση της γης αφού οι συλλέκτες μπορούν να τοποθετηθούν ο ένας δίπλα στον άλλον.

Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορούν να οδηγήσουν σε έως και 50% της μείωσης του κόστους όσο αφορά το ηλιακό πεδίο σε σχέση με τα παραβολικά κοίλα. Περαιτέρω μείωση του κόστους είναι εφικτή λόγω οικονομίας κλίμακας και βέλτιστου σχεδιασμού του συλλέκτη . Επιπλέον, εκτός από το μειωμένο κόστος του ηλιακού πεδίου υπάρχουν και εξοικονόμηση πόρων εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους λειτουργίας και συντήρησης.

Σε σύγκριση με τη τεχνολογία παραβολικών κοίλων που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχει μια επιπλέον χρήση για το σύστημα συλλεκτών Φρενέλ η οποία δεν εκτιμάται αυτή τη περίοδο αλλά μπορεί να φανερώσει μελλοντικά οφέλη και είναι η δημιουργία ελεγχόμενου θερμοκηπίου στο χώρο κάτω από τα κάτοπτρα. Χρησιμοποιώντας το διάχυτο φως και το φως που ανακλάται στη πίσω πλευρά των κατόπτρων κάποιος μπορεί να δημιουργήσει τις ιδανικές συνθήκες για τη ανάπτυξη φυτών υπό σκιά ακόμα και σε άγονες κλιματικές ζώνες [3].

Γ.9.1.1. Περιγραφή ενός πρωτοτύπου συλλέκτη

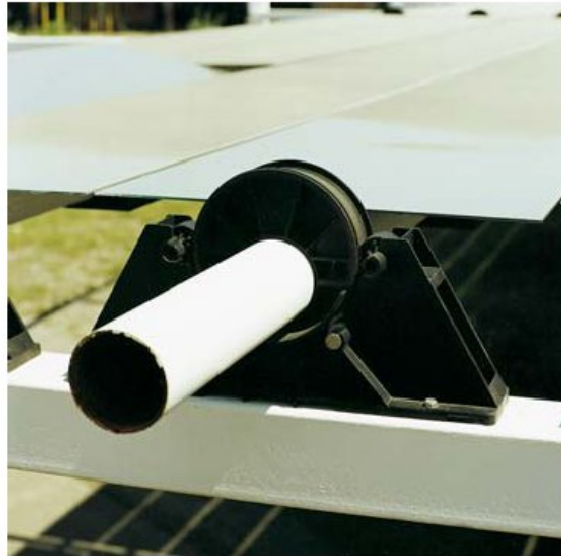


Σχήμα Γ.9.4. Πρωτότυπος συλλέκτης στο Βέλγιο

Το 1999 η εταιρία Solarmundo άρχισε τη κατασκευή ενός πρωτοτύπου συλλέκτη 2.500m² στο Liege στο Βέλγιο για τον εντοπισμό σφαλμάτων του συστήματος και την επικύρωση των μηχανικών πτυχών του.

Οι δοκιμές έγιναν σε περιόδους όπου οι ηλιοφάνειες ήταν σπάνιες για να συγκεντρωθεί εμπειρία σχετικά με το σύστημα παρακολούθησης. Ωστόσο, για να δοκιμαστούν οι μηχανικές πτυχές του συστήματος δεν είναι απαραίτητη η ηλιοφάνεια.

Ένα σημαντικό πρόβλημα το οποίο απαιτεί είναι η δυνατότητα να εξασφαλιστεί χαμηλή συντήρηση σε πολύ άσχημες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για αυτό το λόγο τα έδρανα και ο μηχανισμός καθοδήγησης εξετάστηκαν εκτενώς σε εργαστήριο. Το ασύμμετρο σχήμα των εδράνων προσαρμόζει το κέντρο βάρους των σειρών των κατόπτρων στον άξονα περιστροφής τους. Αυτό είναι απαραίτητο για να επιτευχθούν χαμηλές κινητήριες δυνάμεις.



Σχήμα Γ.9.5. Ασύμμετρα έδρανα

Η αρχή του συστήματος είναι αρκετά απλή. Επειδή η σχετική κίνηση των κατόπτρων είναι παρόμοια για την παρακολούθηση, από τη στιγμή που έχουν τοποθετηθεί σωστά, η κίνησή τους μπορεί να συνδεθεί μηχανικά. Πολλές σειρές κατόπτρων μετακινούνται από ένα μόνο κινητήρα. Η μηχανική σύνδεση γίνεται με ειδικό μηχανισμό που δεν κατακρατεί άμμο ή ρύπους και τα αφήνει απλά να πέσουν. Το σύστημα αυτό δοκιμάστηκε εκτενώς και απέδειξε τη δυνατότητά του να αντέχει πολλά χρόνια λειτουργίας με συνεχή παρουσία άμμου και ρύπων.

Ο απορροφητικός σωλήνας έχει εσωτερική διάμετρο 18 εκατοστών και είναι συγκολλημένος στο εργοτάξιο στο συνολικό του μήκος. Η θερμική διαστολή επιτρέπεται από τη στερέωση του σωλήνα σε σιδηροτροχιές. Η συνολική κίνηση από τη θερμική διαστολή σε μια μονάδα με μήκος ένα χιλιόμετρο είναι περίπου 6 μέτρα στο τέλος του ενός σωλήνα. Στο πρωτότυπο χρησιμοποιήθηκε ένας μαύρος απορροφητήρας, μη επιλεκτικός, που ήταν απολύτως επαρκής για το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε. Για να επιτευχθεί ικανοποιητική θερμική απόδοση ωστόσο, μια εξαιρετικά επιλεκτική επίστρωση πρέπει να εφαρμοστεί, που πρέπει να είναι σταθερή σε συνθήκες που δεν υπάρχει κενό σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

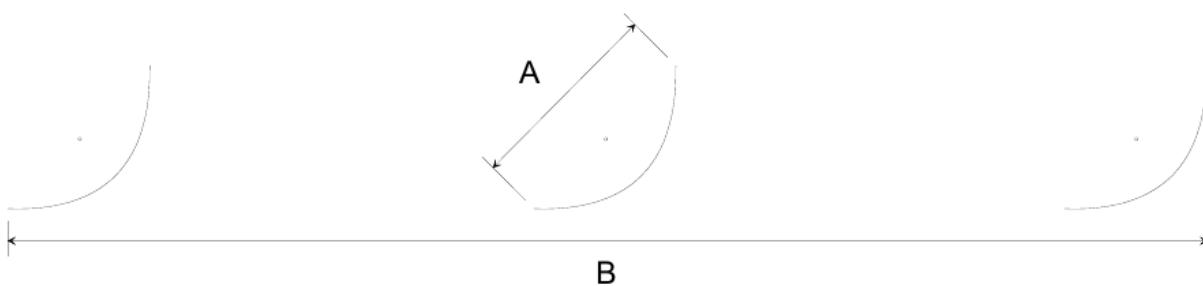
Η solarmundo παρουσίασε δείγματα επιλεκτικής επίστρωσης σε ένα μικρότερο απορροφητικό σωλήνα τα οποία συνδύαζαν ελπιδοφόρες οπτικές ιδιότητες και καλή αντοχή σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες [3].

Γ.9.2. Θεωρητική απόδοση του συλλέκτη

Παρόλο που ο πρωτότυπος συλλέκτης λειτούργησε σε πραγματικές συνθήκες και απέδειξε ότι μπορούσε να παράγει ατμό δεν έγιναν μετρήσεις σχετικές με τη θερμική απόδοση. Οι οπτικές και θερμικές αποδόσεις πρέπει να εξαχθούν θεωρητικά. Οι παρακάτω υπολογισμοί έχουν σκοπό να δώσουν μια θεωρητική εκτίμηση για την επιτεύξιμη οπτική και θερμική απόδοση σε ένα τέτοιο συλλέκτη. Για τον υπολογισμό της οπτικής απόδοσης χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα παρακολούθησης των ηλιακών ακτίνων και για τη θερμική απόδοση χρησιμοποιήθηκε υπολογιστική ρευστομηχανική.

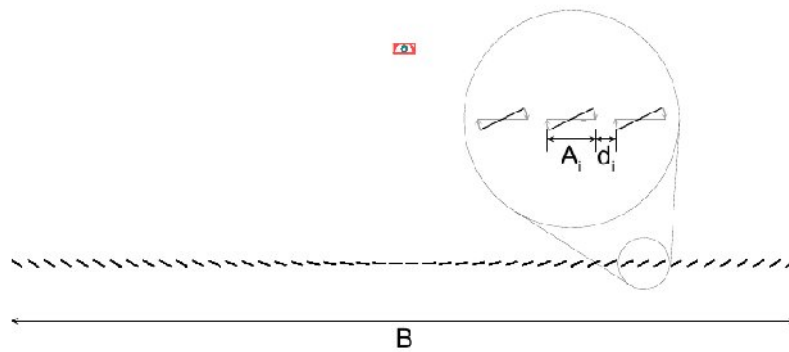
Άνοιγμα, επιφάνεια ανάκλασης και μικτή επιφάνεια

Για να συγκριθούν οι συλλέκτες Φρενέλ με αυτούς των παραβολικών κοίλων πρέπει να οριστεί μια κοινή περιοχή αναφοράς. Στη παρούσα εργασία επιλέχτηκε η επιφάνεια ανοίγματος ως βάση όλων των συγκρίσεων. Η περιοχή ανοίγματος στα παραβολικά κοίλα εκφράζεται ως η προβολή της ανακλαστικής του επιφάνειας. Η μικτή επιφάνεια ενός ηλιακού πεδίου λαμβάνει υπόψη το χώρο μεταξύ των κοίλων, το οποίο είναι τυπικά δύο φορές το άνοιγμα.



Σχήμα Γ.9.6. Επιφάνεια αναφοράς παραβολικών κοίλων: Άνοιγμα A και μικτή επιφάνεια B

Η επιφάνεια ανοίγματος ενός συλλέκτη Φρενέλ είναι σχεδόν ταυτόσημη με την ανακλαστική επιφάνεια επειδή η καμπυλότητα ενός συλλέκτη Φρενέλ μπορεί να αγνοηθεί σε αυτό το σημείο. Το κενό d μεταξύ των μεμονωμένων ανακλαστήρων πρέπει να προστεθεί στην επιφάνεια ανοίγματος A για να αποδώσει τη μικτή επιφάνεια B.



Σχήμα Γ.8.7. Επιφάνεια αναφοράς συλλέκτη Φρενέλ

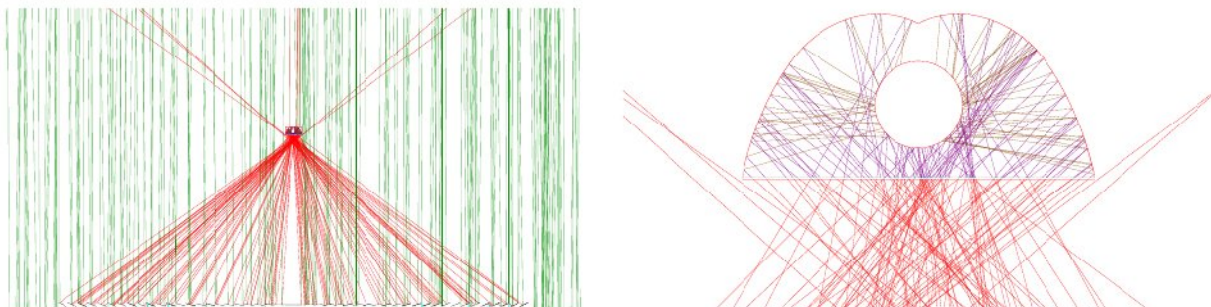
Εξ' ορισμού το άνοιγμα ενός κοίλου παρακολουθεί τη πορεία του ήλιου. Το άνοιγμα ενός συλλέκτη Φρενέλ παραμένει οριζόντιο ακόμα και αν οι μεμονωμένες πτυχές παρακολουθούν τον ήλιο [3].

Γ.9.2.1. Οπτική απόδοση

Για τον υπολογισμό της οπτικής απόδοσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα OptiCAD χρησιμοποιώντας τις παρακάτω παραμέτρους

Ανακλαστικότητα του πρωτογενούς ανακλαστήρα:	92%
Μεταδοτικότητα του υαλοπίνακα:	95%
Ανακλαστικότητα του δευτεροβάθμιου ανακλαστήρα:	95%
Απορροφητικότητα του απορροφητικού σωλήνα:	94%

Η απόκλιση της δέσμης της ηλιακής ακτινοβολίας συμπεριλήφθηκε στους υπολογισμούς και θεωρήθηκε ομοιογενής σε ένα μεγάλο γωνιακό εύρος για να καλύψει τη περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Η ανακλαστικότητα του πρωτογενούς κατόπτρου διαμορφώθηκε χρησιμοποιώντας κατανομή Gauss και τα σφάλματα θέσης των συλλεκτών υποτέθηκαν κατανεμημένα κατά Gauss.



Σχήμα Γ.9.8. Παρακολούθηση δέσμης, διατομή και δέκτης

Ολοκληρώνοντας την ένταση όλων των απορροφούμενων ακτίνων από τον απορροφητικό σωλήνα δίνει το αποτέλεσμα ότι για τις δεδομένες παραμέτρους

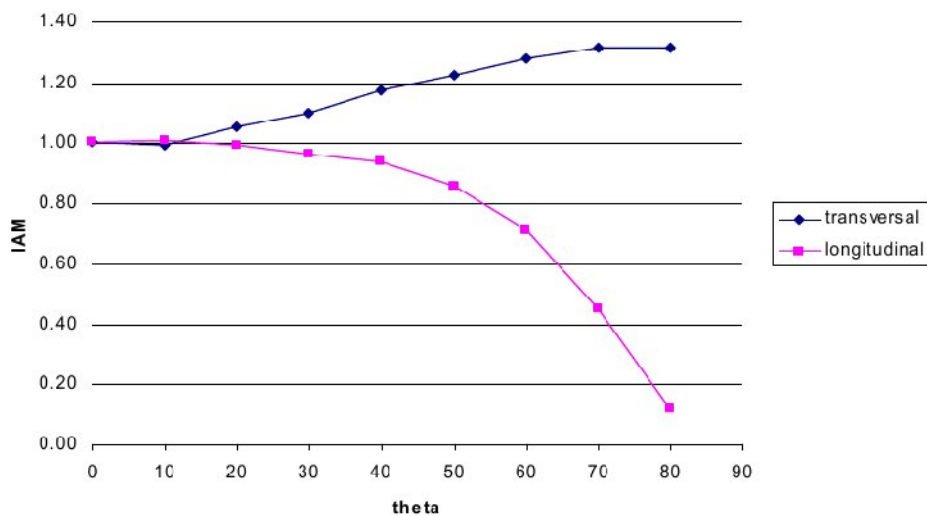
$$n_0=61\%$$

της κάθετης προσπίπτουσας ακτινοβολίας. (στον ισημερινό το ηλιακό μεσημέρι το Μάρτη ή στις 21 του Δεκέμβρη.) απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα στην απορροφητική επιφάνεια. Εφαρμόζοντας το ίδιο για προσπίπτουσες γωνίας άλλες από την κάθετη και συγκρίνοντας τις μας δίνει το μετατροπέα της γωνίας πρόσπτωσης ο οποίος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

$$IAM=n_0(\Theta) / n_0(\Theta=0)$$

(Γ.9.1)

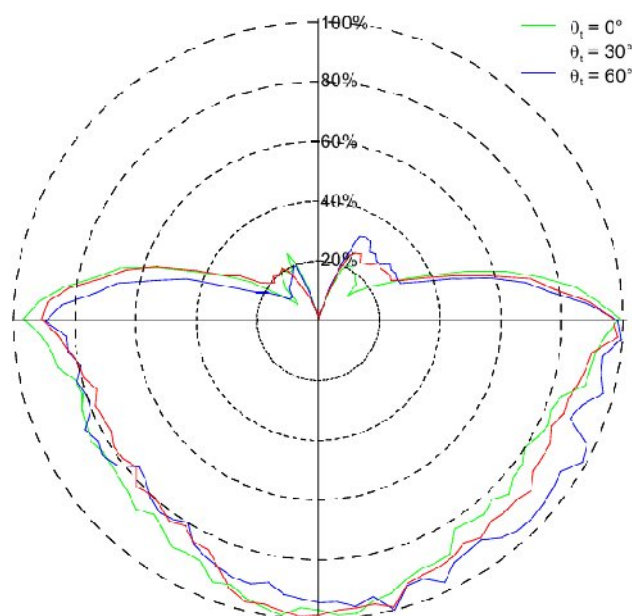
Ο μετατροπέας της γωνίας πρόσπτωσης υπολογίζει τις αλλαγές στην απόδοση για προσπίπτουσες γωνίες διαφορετικές από τη κάθετη. Δεν υπολογίζει όμως τις απώλειες του φαινομένου του συνημιτόνου της κάθετης δέσμης. Ο εγκάρσιο IAMt ορίζεται ως ο μετατροπέας της γωνίας πρόσπτωσης σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα παρακολούθησης. Είναι αξιοσημείωτο ότι ο IAMt φθάνει αρκετά υψηλές τιμές για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για υψηλές γωνίες πρόσπτωσης λιγότερες ακτίνες χάνονται στα κενά μεταξύ των κατόπτρων και λιγότερα γειτονικά κάτοπτρα αντανακλούν ακτινοβολία στη πλάτη το ένα του άλλου αντί για το απορροφητήρα. Ο διαμήκης IAMl είναι παράλληλος με τον άξονα παρακολούθησης και καθορίζεται από το άνοιγμα του υαλοπίνακα του δευτεροβάθμιου συγκεντρωτή.



Σχήμα Γ.9.9. Διαζωνικός μετατροπέας γωνίας πρόσπτωσης

Ένα πλεονέκτημα των συλλεκτών Φρενέλ είναι το γεγονός ότι ο απορροφητήρας φωτίζεται από κάτω ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα για τη λειτουργία μιας ροής διπλής φάσης, όπου το υγρό βρίσκεται το χαμηλότερο σημείο του σωλήνα και ο ατμός στο υψηλότερο.

Ένα αποτέλεσμα των προσομοιώσεων παρακολούθησης των ακτίνων είναι η σχετική κατανομή της έντασης στο απορροφητήρα η οποία δείχνει ότι είναι πολύ ομοιόμορφα διανεμημένη στο χαμηλότερο μέρος και λίγο στο υψηλότερο του σωλήνα. Αυτό δεν αλλάζει σημαντικά για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης [3].



Σχήμα Γ.9.10. Κατανομή της έντασης στο δέκτη για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

Γ.9.1.2. Θερμική απόδοση

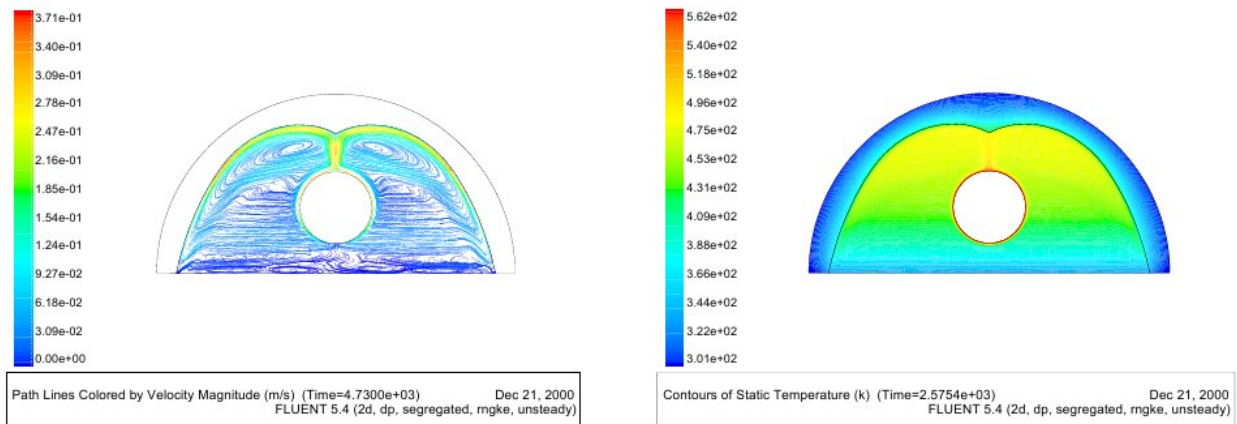
Για να υπολογιστούν οι θερμικές απώλειες από τον απορροφητήρα χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής όπου υπολογίζουν όλους τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, ακτινοβολία, αγωγή, συναγωγή. Πέρα από τη βασική γεωμετρία ένας αριθμός βασικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένα.

Θερμική διαπερατότητα του απορροφητήρα 5%

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το άνοιγμα του υαλοπίνακα και πίσω από το δευτεροβάθμιο συγκεντρωτή στο περιβάλλον $10\text{W/m}^2\text{K}$

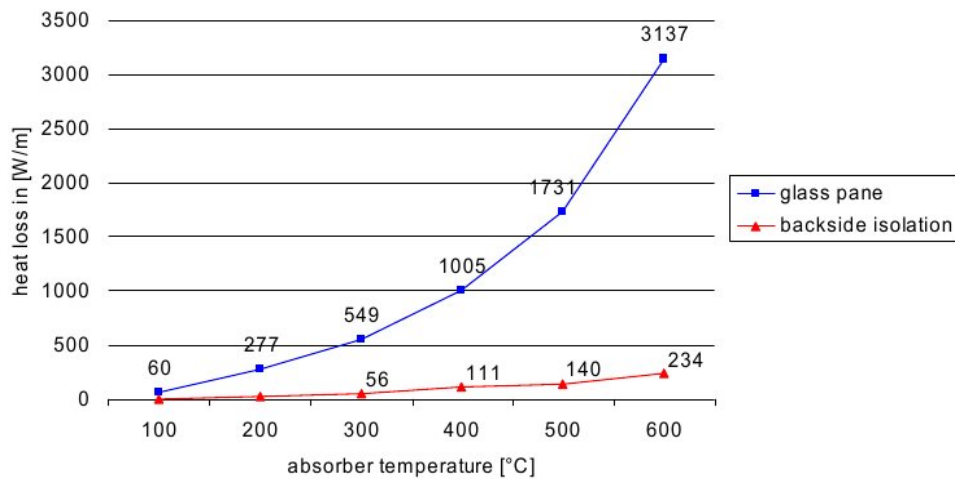
Θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης στη πίσω πλευρά 0.005W/mK

Η κατανομή της ροής συναγωγής και της θερμοκρασίας που προκύπτει ανάμεσα στο απορροφητικό σωλήνα και στο δευτεροβάθμιο ανακλαστήρα και ναλοπίνακα μελετήθηκε για θερμοκρασίες από 100°C μέχρι 600°C με σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 30°C



Σχήμα Γ.9.11. Γραμμές διαδρομής της συναγωγής και κατανομή της θερμοκρασίας

Το αποτέλεσμα της θερμικής ροής μπροστά και πίσω φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα σε μονάδες W/m του απορροφητικού σωλήνα. Όπως ήταν αναμενόμενο δείχνει να είναι αρκετά εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία.



Σχήμα Γ.9.12 Υπολογισμένες θερμικές απώλειες μπροστά και πίσω από τον απορροφητήρα

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών που προκύπτει είναι [3]:

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

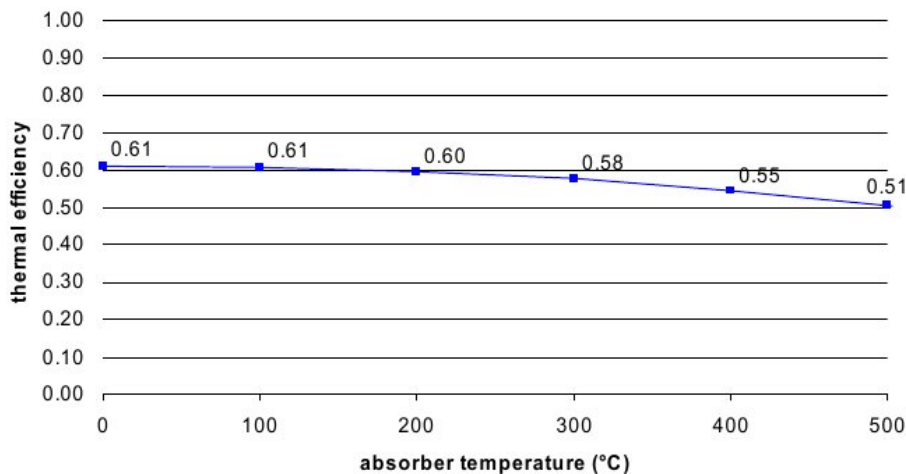
(Γ.9.2)

Γ.9.2.3. Καμπύλη απόδοσης

Η παρακάτω καμπύλη δίνει τη θεωρητικής καμπύλης της απόδοσης για κάθετη ακτινοβολία $800\text{W}/\text{m}^2$ σε σχέση με την θερμοκρασία του απορροφητήρα σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος 30°C .

$$\eta(T_{\text{absorber}}) = \eta_0 - u \frac{T_{\text{absorber}} - T_{\text{ambient}}}{E_{\text{beam}}}$$

(Γ.9.3)



Σχήμα Γ.9.12. Καμπύλη απόδοσης

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η μεταφορά θερμότητας από τον απορροφητήρα στο ρευστό πρέπει να εξετασθεί επιπροσθέτως όταν υπολογίζεται η θερμική απόδοση του συλλέκτη [3].

Γ.8.2.4. Προσομοίωση

Για τη σύγκριση των συλλεκτών Φρενέλ με αυτούς των παραβολικών κοίλων χρησιμοποιήθηκε ένα υφιστάμενο μοντέλο παραβολικών κοίλων. Για τα παραβολικά κοίλα χρησιμοποιήθηκε επιφάνεια ανοίγματος 261.600m^2 ενώ για το συλλέκτη Φρενέλ επιφάνεια 336.700m^2 για να αντισταθμίσει τη μικρότερη απόδοση. Χρησιμοποιήθηκαν ηλιακά δεδομένα από την Αίγυπτο και οι συλλέκτες υποτέθηκαν με προσανατολισμό Βόρειο/Νότιο. Η εξωτερική θερμοκρασία του ηλιακού πεδίου των κοίλων περιορίστηκε στους 393°C για να αποφευχθεί αποσύνθεση του ρευστού μεταφοράς

θερμότητας. Για συγκριτικούς λόγους το ίδιο θεωρήθηκε και για το συλλέκτη Φρενέλ. Το ωφέλιμο μέρος της θερμικής ισχύος και για τα δύο συστήματα ορίστηκε ως οποιοδήποτε ισχύ μεταξύ 38 και 152 MW. Το άνω όριο προέρχεται από το σχεδιασμό της παραγωγής του πεδίου και το κατώτερο από το περιορισμό για τη λειτουργία του στροβίλου. Για το συλλέκτη Φρενέλ δόθηκαν οι τιμές οπτικής απόδοσης και θερμικών απωλειών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Για να εκτιμηθεί η θερμική παραγωγή των τριών σταδίων άμεσης παραγωγής ατμού υπολογίστηκε η απόδοση (ροή μάζας στις απαιτούμενες συνθήκες) κάθε τμήματος με βάση την ηλιακή ακτινοβολία. Επειδή η θερμοκρασία και η ενθαλπία είναι διαφορετική σε κάθε τμήμα η ροή μάζας ποικίλλει. Επειδή η ροή μάζας για κάθε τμήμα πρέπει να είναι πανομοιότυπη το τμήμα με τη μικρότερη ροή μάζας περιορίζει τις επιδόσεις του πεδίου [3].

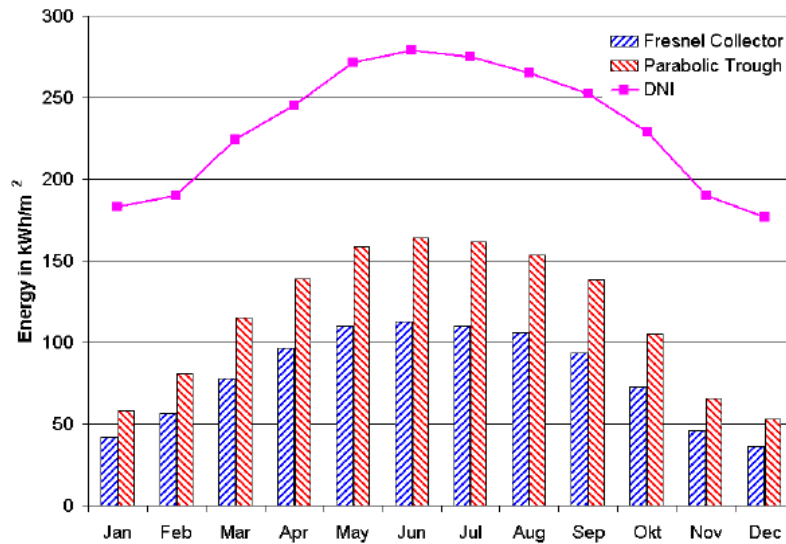
Γ.9.2.5. Αποτελέσματα

Η σύγκριση των ετήσιων αποτελεσμάτων των συλλεκτών φαίνεται παρακάτω. Το σύστημα Φρενέλ εκμεταλλεύεται το 34.5% της άμεσης κάθετης ακτινοβολίας ενώ το σύστημα κοίλων το 50.1%

Direct normal irradiance	Fresnel collector			Parabolic trough collector			
	used Energy	lower limit dumping	upper limit dumping	used Energy	lower limit dumping	upper limit dumping	
2782	958	41	44	1393	38	27	kWh/m ²

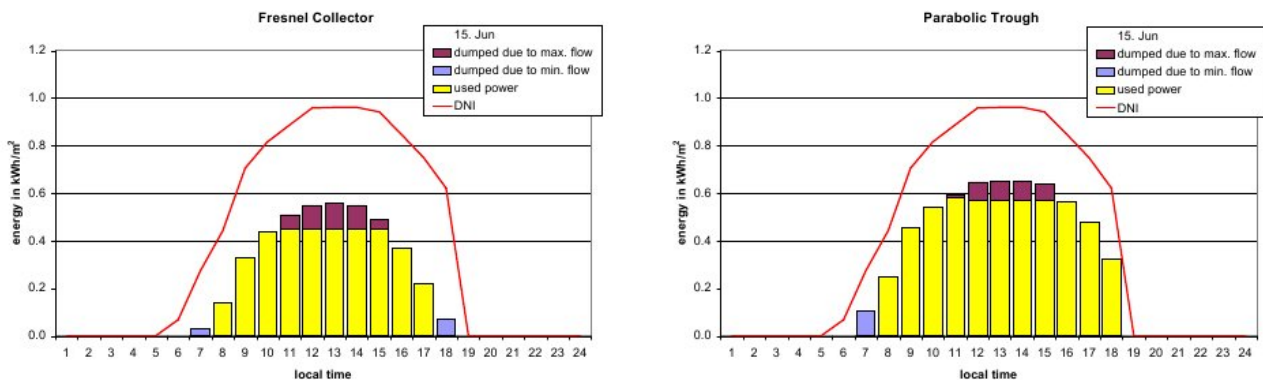
Πίνακας Γ.9.1. Αποτελέσματα ετήσιας απόδοσης για ένα συλλέκτη Φρενέλ και ένα παραβολικών κοίλων

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι μηνιαίες τιμές και για τα δύο συστήματα. Δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην εποχιακή απόδοση μεταξύ των συλλεκτών.



Σχήμα Γ.9.13. Μηνιαία ποσά χρησιμοποιούμενης ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο ανοίγματος και στα δύο συστήματα

Στο παρακάτω σχήμα γίνεται μια σύγκριση για μία συγκεκριμένη ημέρα. Εδώ φαίνεται ότι ο συλλέκτης Φρενέλ είναι λιγότερο αποδοτικός νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα εξαιτίας των επίπεδων γωνιών πρόσπτωσης στο άνοιγμα [3].



Σχήμα Γ.9.14. Απόδοση συλλέκτη Φρενέλ και παραβολικών κοίλων για μία ημέρα

Κόστος ηλεκτρισμού

Με τις υπολογιζόμενες τιμές έγινε μια πρώτη προσπάθεια για σύγκριση του κόστους μεταξύ των δύο διαφορετικών συστημάτων. Οι μονάδες που τέθηκαν σε σύγκριση λειτουργούν μόνο με ηλιακή ενέργεια.

Η μικρότερη απόδοση του συλλέκτη Φρενέλ αντισταθμίζεται από το μικρότερο κόστος του. Για το συλλέκτη Φρενέλ έγιναν προβλέψεις κόστους 117€/m² ενώ για τα κοίλα υποτέθηκε κόστος 220€/m². Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίστηκε με ένα απλό οικονομικό μοντέλο και το αποτέλεσμα ήταν ο συλλέκτης Φρενέλ να έχει μικρότερο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

	Solarmundo	Parabolic Trough
System Layout		
Rated Power	50 MWel	50 MWel
Power Block Efficiency	33.0%	33.0%
Collector Area	336.700 m ²	261.600 m ²
Investment		
Power Block Investment	34,832 T€	33,993 T€
Specific Field Investment	117 €/m ²	220 €/m ²
Solar Field Investment	39,401 T€	57,552 T€
Total Investment	74,233 T€	91,545 T€
Cost		
Interest rate	6.7%	6.7%
Economic lifetime	28 Years	28 Years
Capital Cost	5,940 T€	7,325 T€
Insurance Cost	470 T€	654 T€
O&M (Staff and Materials)	1,570 T€	2,184 T€
Total Annual Cost	7,980 T€	10,163 T€
Yields/m²		
Solar Ressource	1,171 kWh/m ² a	1,752 kWh/m ² a
Usable Thermal Energy	958 kWh/m ² a	1,393 kWh/m ² a
Lower Dumping	41 kWh/m ² a	38 kWh/m ² a
Upper Dumping	44 kWh/m ² a	27 kWh/m ² a
Electricity Yield	316 kWh/m ² a	460 kWh/m ² a
Total Yields		
Solar Ressource	394 GWh/a	456 GWh/a
Usable Thermal Energy	323 GWh/a	364 GWh/a
Electricity Yield	106 GWh/a	120 GWh/a
Electricity Cost	0.0750 €/kWh	0.0845 €/kWh

Πίνακας Γ.9.2. Κόστος ηλεκτρισμού για ένα σύστημα συλλέκτη Φρενέλ και ένα παραβολικών κοίλων

Γ.9.2.6. Συμπέρασμα

Ο συλλέκτης Φρενέλ έχει περίπου 70% της θερμικής απόδοσης των παραβολικών κοίλων ανά επιφάνεια ανοίγματος. Όμως το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού είναι κατά 10% μικρότερο στη περίπτωση του συλλέκτη Φρενέλ. Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι τα συστήματα παραβολικών κοίλων έχουν επιβεβαιωθεί πειραματικά και εμπορικά ενώ του συλλέκτη Φρενέλ μόνο θεωρητικά.

[1] Baum V.A., High Power solar installations, Solar Energy 1957;1:6-13.

[2] Francia G., Pilot Plants for Solar Steam Generation Stations, Solar Energy 1968;12:51-64.

[3] "The Solarmundo line focussing Fresnel collector. Optical and thermal performance and cost calculations.", Andreas Häberle, Christian Zahler, Hansjörg Lerchenmüller, Max Mertins, Christof Wittwer, Franz Trieb, Jürgen Dersch (http://www.spg-gmbh.com/UserFiles/File/PDF/Fresnel_trough_cost_compare.pdf)

Γ.10. Ηλιακή καμινάδα



Σχήμα Γ.10.1. Εγκατάσταση ηλιακής καμινάδας

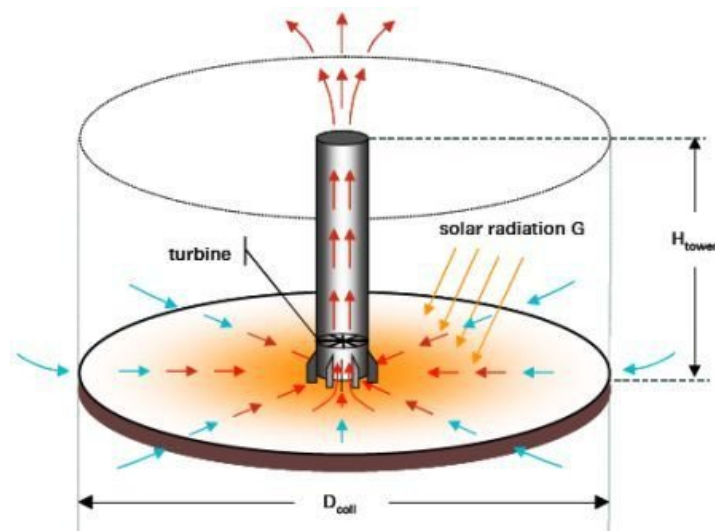
Η «Ηλιακή Καμινάδα» είναι μια ηλιακή θερμική μονάδα που χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό ηλιακών συλλεκτών αέρα και ενός κεντρικού κάθετου κυλινδρικού σωλήνα (καμινάδα). Αρχικά εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία για να θερμάνει στρώματα αέρα, που βρίσκονται κάτω από μια μεγάλη γυάλινη επιφάνεια. Στη συνέχεια ο θερμός αέρας κινείται ανοδικά στη καμινάδα όπου κινεί κάποιες τουρμπίνες (αεριοστροβίλους) που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Σημειώνεται ότι παρόμοια είναι η αρχή λειτουργίας των συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Για παράδειγμα στα ατμοηλεκτρικά εργοστάσια, με την καύση ορυκτών καυσίμων (πχ λιγνίτης, λιθάνθρακας) θερμαίνεται νερό και ο ατμός που παράγεται περιστρέφει τεράστιους ατμοστροβίλους (τουρμπίνες), οι οποίοι τελικά παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Τα τρία σημαντικά στοιχεία μιας εγκατάστασης ηλιακής καμινάδας – ο ηλιακός συλλέκτης αέρα, η καμινάδα/πύργος και οι αεριοστροβίλλοι είναι γνωστά εδώ και αιώνες. Ο συνδυασμός τους για την παραγωγή ενέργειας έχει περιγραφεί ήδη από το 1931. Ένας τέτοιος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, προτείνεται για εγκατάσταση σε περιοχές με υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας και με διαθέσιμες μεγάλες επίπεδες εκτάσεις γης όπως στις ερήμους, όπου εκμεταλλεύεται την υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και ελαχιστοποιεί την όχληση, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει ενεργειακές λύσεις σε κοινωνίες που σήμερα δεν έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες ηλεκτρισμού.

Με την τεχνολογία της ηλιακής καμινάδας είναι εφικτή η δημιουργία ακόμη και μεγάλων μονάδων

ηλεκτροπαραγωγής της τάξης των 200-400 MW. Για μια μονάδα 200 MW απαιτείται μια γυάλινη επιφάνεια διαμέτρου 7 Km και μια καμινάδα 1000m. Με την τοποθέτηση κάτω από την γυάλινη επιφάνεια απλών σωληνώσεων, στις οποίες υπάρχει νερό, μπορεί να εξασφαλιστεί συνεχής λειτουργία, ακόμη και τις νυχτερινές ώρες . Αυτό επειδή την ημέρα με την ηλιοφάνεια θερμαίνεται το νερό και το βράδυ αποδίδει την θερμότητα πίσω στον αέρα κάτω από την γυάλινη επιφάνεια, προκαλώντας και πάλι το φαινόμενο της καμινάδας. Το πρώτο πιλοτικό έργο έγινε στην Ισπανία το 1980. Ήταν ένα απλό έργο, μόλις 200 μέτρα διάμετρο και 200 μέτρα ύψος καμινάδας[1] [2] .

Γ.10.1. Περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος



Σχήμα Γ.10.2. Αρχή λειτουργίας εγκατάστασης ηλιακής καμινάδας

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Ο αέρας θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία κάτω από μία χαμηλή, κυκλική, διαφανή ή ημιδιαφανή οροφή η οποία είναι ανοιχτή στην περιφέρειά της. Η οροφή και το έδαφος σχηματίζουν ένα ηλιακό συλλέκτη αέρα. Στη μέση της οροφής υπάρχει ένας κάθετος πύργος που στη βάση του έχει μεγάλα στόμια εισαγωγής αέρα. Η ένωση μεταξύ της οροφής και του πύργου είναι αεροστεγής. Επειδή ο θερμός αέρας είναι ελαφρύτερος του ψυχρού υψώνεται στο πύργο. Η αναρρόφηση από το πύργο τραβάει περισσότερο ζεστό αέρα από το συλλέκτη και ψυχρός αέρας εισέρχεται από την εξωτερική περίμετρο. Συνεχής 24ωρη λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση σωλήνων στις οποίες κυκλοφορεί νερό κάτω από τη στέγη. Το νερό θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της μέρας και απελευθερώνει τη θερμότητα στον αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι εν λόγω σωλήνες χρειάζεται να πληρωθούν μία μόνο φορά και δεν χρειάζεται επιπλέον νερό. Με αυτό το τρόπο η ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί ένα σταθερό ανοδικό ρεύμα αέρα στο πύργο. Η ενέργεια που περιέχεται στο ανοδικό

ρεύμα μετατρέπεται σε μηχανική με τη χρήση αεριοστροβίλων στη βάση του πύργου και στη συνέχεια σε ηλεκτρική με συμβατικές γεννήτριες.

Η ισχύς που παράγεται μπορεί να υπολογιστεί αν πολλαπλασιάσουμε την ηλιακή ακτινοβολία με το συντελεστή απόδοσης του συλλέκτη, του πύργου και των στροβίλων.

$$P = Q * n_{coll} * n_{tower} * n_{turbine} = Q * n_{plant} \quad (Γ.10.1)$$

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να γραφτεί ως το αποτέλεσμα της οριζόντιας ακτινοβολίας G_h και της επιφάνειας του συλλέκτη A .

$$Q_{solar} = G_h * A_{coll} \quad (Γ.10.2)$$

Ο πύργος (καμινάδα) μετατρέπει τη θερμική ροή που παράγεται από το συλλέκτη σε κινητική ενέργεια και δυναμική ενέργεια (πτώση πίεσης στο στρόβιλο). Έτσι η διαφορά στη πυκνότητα του αέρα που προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας στο συλλέκτη δουλεύει ως κινητήρια δύναμη. Η ελαφρύτερη στήλη του αέρα στο πύργο ενώνεται με τη περιβάλλουσα ατμόσφαιρα στη βάση (μέσα στο συλλέκτη) και στη κορυφή του πύργου και έτσι ανυψώνεται. Μια διαφορά πίεσης Δp_{tot} δημιουργείται ανάμεσα στη βάση του πύργου και το περιβάλλον.

$$\Delta p_{tot} = g \cdot \int_0^{H_{tower}} (\rho_a - \rho_{tower}) \cdot dH \quad (Γ.10.3)$$

Άρα η διαφορά πίεσης αυξάνεται όσο αυξάνεται το ύψος του πύργου. Η διαφορά πίεσης Δp_{tot} μπορεί να διαιρεθεί σε μία στατική και μία δυναμική συνιστώσα, παραμελώντας τις απώλειες τριβής.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (Γ.10.4)$$

Η διαφορά της στατικής πίεσης μειώνεται στο στρόβιλο. Η δυναμική συνιστώσα περιγράφει την κινητική ενέργεια της ροής του αέρα. Με τη συνολική διαφορά πίεσης και τη ροή του όγκου του αέρα σε $\Delta p_s = 0$ η ισχύς P_{tot} που περιέχεται στη ροή είναι τώρα

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} * v_{tower,max} * A_{coll}$$

απ την οποία μπορεί να προκύψει η αποδοτικότητα του πύργου

$$n_{tower} = P_{tot} / Q \quad (Γ.10.5)$$

Η υποδιαίρεση της διαφοράς πίεσης σε μια στατική και μια δυναμική συνιστώσα εξαρτάται από την ενέργεια που λαμβάνεται από το στρόβιλο. Χωρίς το στρόβιλο επιτυγχάνεται η μέγιστη ταχύτητα

ροής $V_{tower,max}$ και ολόκληρη η διαφορά πίεσης χρησιμοποιείται για να επιταχύνει τον αέρα και έτσι μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια.

$$P_{tot} = \frac{1}{2} m V^2 \quad (Γ.10.6)$$

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Boussinesq η ταχύτητα που επιτυγχάνεται από τα ελεύθερα ρεύματα μεταφοράς μπορεί να εκφραστεί ως:

$$V_{tower,max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{tower} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (Γ.10.7)$$

Όπου ΔT είναι η αύξηση της θερμοκρασίας ανάμεσα στο περιβάλλον και στην έξοδο του συλλέκτη (εισροή του πύργου). Η απόδοση του πύργου δίνεται από το τύπο

$$n_{tower} = \frac{g \cdot H_{tower}}{c_p \cdot T_0} \quad (Γ.10.8)$$

Αυτή η απλοποιημένη αναπαράσταση εξηγεί μία από τις βασικές ιδιότητες του συστήματος ηλιακής καμινάδας που είναι ότι η απόδοση του πύργου αυξάνεται ουσιαστικά μόνο από το ύψος του. Για ύψη 1000m η απόκλιση της προσέγγισης Boussinesq από την ακριβή λύση είναι αμελητέα.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η απόδοση της ισχύος του ηλιακού πύργου είναι ανάλογη της επιφάνειας του συλλέκτη και του ύψους του πύργου.

Επειδή η ηλεκτρική ισχύς του πύργου είναι ανάλογη του όγκου που περιλαμβάνεται από την επιφάνεια του συλλέκτη και το ύψος του πύργου το ίδιο αποτέλεσμα θα μπορούσε να επιτευχθεί από ένα ψηλότερο πύργο με μικρότερη επιφάνεια συλλέκτη και αντιστρόφως. Αν συμπεριλάβουμε στους υπολογισμούς και τις απώλειες λόγω τριβών τότε παύει να είναι γραμμική η συσχέτιση μεταξύ της ηλεκτρικής ισχύος και του όγκου. Όμως εξακολουθεί να είναι ένας καλός εμπειρικός κανόνας όσο η διάμετρος του συλλέκτη δεν είναι πολύ μεγάλη [1].

Γ.10.2. Περιγραφή των στοιχείων της εγκατάστασης

Γ.10.2.1. Συλλέκτης



Σχήμα Γ.10.3. Γυάλινη επιφάνεια πρωτότυπης μονάδας

Ο θερμός αέρας για το πύργο παράγεται εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου σε ένα απλό συλλέκτη αέρα που αποτελείται από γυάλινους ή πλαστικούς υαλοπίνακες που εκτείνονται οριζόντια αρκετά μέτρα πάνω από το έδαφος. Το ύψος του υαλοπίνακα αυξάνεται κοντά στη βάση του πύργου έτσι ώστε ο αέρας να εκτρέπεται σε κάθετη κίνηση με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες τριβών. Οι υαλοπίνακες επιτρέπουν την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας και εγκλωβίζουν την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος από το θερμό έδαφος. Έτσι το έδαφος κάτω από την οροφή θερμαίνεται και μεταφέρει τη θερμότητα στον αέρα που ρέει ακτινικά από το εξωτερικό προς το πύργο.

Γ.10.2.2. Πύργος



Σχήμα Γ.10.3. Πύργος πρωτότυπης μονάδας

Ο πύργος αποτελεί τη θερμική μηχανή της εγκατάστασης. Είναι ένας σωλήνας πίεσης με μικρές απώλειες τριβής (όπως στους σταθμούς υδροηλεκτρικής ενέργειας) εξαιτίας της ευνοϊκής αναλογίας όγκου-επιφάνειας. Η ταχύτητα της ανοδικής ροής του αέρα είναι ανάλογη με την αύξηση της θερμοκρασίας στο συλλέκτη (ΔT) και το ύψος του πύργου. Σε ένα σύστημα πολλών MW ο συλλέκτης αυξάνει τη θερμοκρασία κατά περίπου 30 με 35 K. Αυτό προκαλεί ανοδική ταχύτητα στο πύργο περίπου 15m/s στην ονομαστική ηλεκτρική ισχύ, καθώς η περισσότερη από τη διαθέσιμη δυναμική πίεση χρησιμοποιείται από τους στροβίλους και δεν επιταχύνει τον αέρα. Συνεπώς είναι δυνατόν να εισέλθει κάποιος στον πύργο για λόγους συντήρησης χωρίς να κινδυνεύει από την υψηλή ταχύτητα του αέρα.

Γ.10.2.3 Στρόβιλοι



Σχήμα Γ.10.3. Στρόβιλος πρωτότυπης μονάδας

Χρησιμοποιώντας στροβίλους μπορεί να μεταφερθεί μηχανική ισχύς από το ρεύμα αέρα στον πύργο. Οι στρόβιλοι στα συστήματα ηλιακών καμινάδων λειτουργούν με βαθμίδα πίεσης παρόμοια δηλαδή με αυτούς στις εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής ενέργειας, όπου η στατική πίεση μετατρέπεται σε περιστροφική ενέργεια. Η ειδική ισχύς των στροβίλων στα συστήματα αυτά είναι περίπου μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή των στροβίλων με βαθμίδα ταχύτητας. Η ταχύτητα του ανέμου πριν και μετά το στρόβιλο είναι περίπου η ίδια. Η ισχύς που επιτυγχάνεται είναι ανάλογη του όγκου ροής ανά μονάδα χρόνου και ανάλογη της διαφοράς πίεσης στο στρόβιλο.

Αν οι επίπεδες πλευρές των πτερυγίων των στροβίλων είναι κάθετες προς τη ροή του αέρα τότε ο στρόβιλος δεν περιστρέφεται. Αν τα πτερύγια είναι παράλληλα με τη ροή του αέρα τότε αφήνουν

τον αέρα να περνά ανενόχλητο. Δεν υπάρχει πτώση πίεσης στο στρόβιλο και δεν μπορεί να παραχθεί ενέργεια. Ανάμεσα σε αυτά τα δύο άκρα υπάρχει μία βέλτιστη ρύθμιση των πτερυγίων: Η ισχύς γίνεται μέγιστη αν η πτώση πίεσης στο στρόβιλο είναι περίπου το 80% της συνολικής διαφοράς πίεσης που είναι διαθέσιμη. Το βέλτιστο κλάσμα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης όπως οι απώλειες πίεσης λόγω τριβής.

Γ.10.2.4. Αποθήκευση

Η αποθήκευση της θερμότητας γίνεται με μαύρους σωλήνες πληρωμένους με νερό οι οποίοι τοποθετούνται δίπλα-δίπλα στο έδαφος κάτω από το συλλέκτη. Οι σωλήνες γεμίζουν με νερό μόνο μια φορά και παραμένουν κλειστοί στη συνέχεια έτσι ώστε να μη μπορεί να υπάρξει εξάτμιση.

Ο όγκος του νερού στους σωλήνες είναι επιλεγμένος ώστε να αντιστοιχεί σε ένα στρώμα νερού 5-20 εκατοστά αναλόγως τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της παραγόμενης ενέργειας. Τη νύχτα όταν ο αέρας στο συλλέκτη αρχίζει να κρυώνει το νερό στο εσωτερικό των σωλήνων απελευθερώνει τη θερμότητα που αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια της μέρας. Η αποθήκευση της θερμότητας με νερό δουλεύει πιο αποτελεσματικά από ότι μόνο με το έδαφος αφού ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες του νερού – από τη φυσική συναγωγή στους σωλήνες – η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των σωλήνων και του νερού είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και των στρωμάτων εδάφους κάτω από αυτή και επειδή η θερμοχωρητικότητα του νερού είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του εδάφους [1].

Γ.10.3. Γενικά χαρακτηριστικά του συστήματος

Πέρα από το ότι τα ηλιακά συστήματα καμινάδας λειτουργούν με βάση μια πολύ απλή αρχή, έχουν μερικά ειδικά χαρακτηριστικά:

- Ο συλλέκτης μπορεί να χρησιμοποιήσει όλη την ηλιακή ακτινοβολία, τόσο την άμεση όσο και την διάχυτη. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τις τροπικές χώρες όπου υπάρχουν αρκετές νεφώσεις.
- Εξαιτίας του εδάφους κάτω από το συλλέκτη που λειτουργεί ως ένα φυσικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας οι εγκαταστάσεις μπορούν να λειτουργούν 24/24 μόνο με ηλιακή ενέργεια, με μειωμένη ισχύ τις βραδινές ώρες. Αν είναι επιθυμητό επιπλέον σωλήνες με νερό μπορούν να τοποθετηθούν κάτω από την οροφή. Έτσι οι τα συστήματα αυτά μπορούν να

λειτουργήσουν ως μονάδες βάσης. Επειδή η κινητήρια μηχανή της μονάδας είναι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο περιβάλλον και τη βάση του πύργου, οι μικρότερες θερμοκρασίες τη νύχτα βοηθούν στο να κρατηθεί η ισχύς σε σχεδόν σταθερό επίπεδο παρόλο που η θερμοκρασία των φυσικών και τεχνητών τρόπων θερμικής αποθήκευσης επίσης μειώνεται χωρίς την ηλιοφάνεια, καθώς η θερμοκρασιακή διαφορά είναι πρακτικά η ίδια.

- Οι μονάδες είναι αρκετά αξιόπιστες και δεν είναι επιρρεπείς σε φθορές σε αντίθεση με άλλες μονάδες ισχύος. Οι στρόβιλοι και οι γεννήτριες είναι τα μοναδικά κινούμενα μέρη της μονάδας. Αυτή η απλή κατασκευή εξασφαλίζει λειτουργία με μικρή συντήρηση και χωρίς καύσιμα
- Αντίθετα με άλλους σταθμούς παραγωγής ισχύος τα συστήματα ηλιακής καμινάδας δεν χρειάζονται υδρόψυξη. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε αρκετές χώρες με μεγάλη ηλιοφάνεια οι οποίες αντιμετωπίζουν προβλήματα με τη παροχή του νερού.
- Τα υλικά που απαιτούνται για να κατασκευαστεί η εγκατάσταση, κυρίως τσιμέντο και γυαλί είναι διαθέσιμα παντού σε επαρκείς ποσότητες. Για την ακρίβεια με την ενέργεια που παράγεται από τη μονάδα την ίδια και τη πέτρα και την άμμο που είναι διαθέσιμες στην έρημο μπορούν να παραχθούν επί τόπου.
- Οι μονάδες μπορούν να κατασκευαστούν σήμερα σε λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες. Η βιομηχανία των περισσότερων κρατών επαρκεί πλήρως για τις απαιτήσεις τέτοιων εγκαταστάσεων. Δεν είναι απαραίτητες οι επενδύσεις σε τομείς υψηλής τεχνολογίας.
- Ακόμα και σε φτωχές χώρες είναι δυνατόν να κατασκευαστούν μεγάλες μονάδες χωρίς να υπάρχουν δαπάνες σε ξένα νομίσματα με χρήση τοπικών πόρων και εργατικού δυναμικού. Αυτό μπορεί να μειώσει τις απαιτούμενες επενδύσεις κεφαλαίου και έτσι το κόστος της παραγωγής ενέργειας [1],[2].

Γ.10.4. Κόστος

Σχετικά με το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, αυτό προσδιορίζεται στα 0,06-0,10 ευρώ/κιλοβατώρα σε απλές μονάδες (ισχύος 200 MW), ενώ μπορεί να μειωθεί σε 0,04-0,05 ευρώ/κιλοβατώρα σε ολοκληρωμένα σχήματα παραγωγής (πχ κατασκευή πολλών γειτονικών μονάδων ή αξιοποίηση τέτοιων μονάδων σε συνδυασμό με ενεργοβόρες βιομηχανίες όπως τσιμεντοβιομηχανίες, βιομηχανίες παραγωγής γυαλιού κτλ). Για λόγους σύγκρισης, αναφέρεται ότι

στην ηπειρωτική Ελλάδα το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των λιγνιτικών σταθμών της ΔΕΗ είναι περίπου 0,03-0,04 ευρώ/κιλοβατώρα ενώ στο ελληνικό νησιωτικό δίκτυο το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ είναι πολύ υψηλό και κυμαίνεται μεταξύ 0,40 ευρώ/kWh (μικρά νησιά) και 0,20 ευρώ/kWh (μεσαία νησιά), ενώ σε σπάνιες περιπτώσεις συναντάται κόστος μικρότερο από 0,10 ευρώ/kWh.

[1] “Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems – Utilization of Solar Induced Convective

[2] Wikipedia the free encyclopedia (<http://www.wikipedia.org>)

Δ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ

Δ.1. ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΩΝ ΚΟΙΛΩΝ

ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ

Ο λόγος που επιλέχθηκαν οι συλλέκτες παραβολικών κοίλων για προσομοίωση των επιδόσεων τους στην Ελλάδα είναι η μεγάλη εμπειρία που έχει αποκτηθεί σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες συγκεντρωτικών συλλεκτών, η απλότητα του σχεδιασμού τους και η δυνατότητα υβριδισμού τους με συμβατικές μονάδες καθώς και μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Ως έδρα των υπολογισμών επιλέχθηκε η Αθήνα παρόλο που η τεχνολογία θα ήταν ιδανική σε νησιά όπως η Κρήτη.

Για τη θερμική ανάλυση θα υποθέσουμε ένα τυπικό συλλέκτη όπως ο LS3 που περιγράφηκε στο κεφάλαιο Γ.8.3.1. Ο συλλέκτης αυτός θα έχει τα παρακάτω τυπικά χαρακτηριστικά.

Συνολική επιφάνεια συλλέκτη	: 547 m ²
Μήκος απορροφητήρα	: 99 m
Οπτική απόδοση	: 76 %
Εσωτερική διάμετρο του απορροφητικού σωλήνα	: 0.066 m
Εξωτερική διάμετρο του απορροφητικού σωλήνα	: 0.07 m
Θερμοκρασία ρευστού μεταφοράς θερμότητας	: 350°C
Άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο σημείο σχεδιασμού	: 940W/m ²

Οι απώλειες χωρίζονται στις οπτικές, στις θερμικές και στις γεωμετρικές. Οι οπτικές απώλειες συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 0.70 και 0.76. Οι απώλειες αυτές εμφανίζονται στην ανακλαστικότητα της επιφάνειας του συλλέκτη η οποία μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου λόγω ρύπων, στο παράγοντα ανάσχεσης όπου η αντανάκλαση ορισμένων ακτίνων γίνεται με λάθος γωνία και δεν καταφέρνει να φτάσει στο δέκτη εξαιτίας μικροσκοπικών ατελειών, στη διαπερατότητα του γυάλινου περιβλήματος που δεν επιτρέπει ένα μέρος της ακτινοβολίας να φτάσει στο μεταλλικό σωλήνα και στην απορροφητικότητα του μεταλλικού σωλήνα αφού δεν μπορεί να απορροφήσει το 100% της ακτινοβολίας που φτάνει σε αυτόν. Ο απορροφητήρας θα περιβάλλεται από ένα γυάλινο περίβλημα και ανάμεσα στο περίβλημα και τον απορροφητήρα θα επικρατεί κενό.

Θερμική ανάλυση ενός συλλέκτη παραβολικών κοίλων

Για να βρεθεί μια σχέση που να περιγράφει τις συνολικές θερμικές απώλειες από το συλλέκτη πρέπει πρώτα να βρεθεί η θερμική ισορροπία στον απορροφητικό σωλήνα. Οι συνολικές απώλειες είναι:

$$Q_{\text{total}} = Q_{(ab-g)} + Q_b \quad (4.1)$$

Όπου

$$Q_{(ab-g)} = Q_{r,(ab-g)} + Q_{d,(ab-g)} \quad (4.2)$$

Επίσης ισχύει

$$Q_{\text{total}} = Q_{(g-a)} + Q_b \quad (4.3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις:

Q_r = απώλειες λόγω ακτινοβολίας

Q_c = απώλειες λόγω συναγωγής

Q_d = απώλειες λόγω αγωγής

Q_b = απώλειες από τους μεταλλικούς πτυχωτούς συνδέσμους.

Και οι δείκτες:

ab = απορροφητήρας

g = γυάλινο περίβλημα

a = περιβάλλον

Οι απώλειες λόγω συναγωγής είναι αμελητέες λόγω του κενού ανάμεσα στον απορροφητήρα και το περίβλημα. Η μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στον απορροφητικό σωλήνα και το γυάλινο περίβλημα λόγω ακτινοβολίας δίνεται από το τύπο:

$$Q_{r,(ab-g)} = \frac{\sigma(T_{ab}^4 - T_g^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{ab}} + \frac{D_{ab,o}}{[D_g(1/\varepsilon_g - 1)]}} \cdot A_{\text{absorber}} \quad (4.4)$$

Όπου

D = διάμετρος

ε = διαπερατότητα

και οι δείκτες:

o = εξωτερική

i = εσωτερική

Σε αυτή την εξίσωση ε_{ab} είναι η διαπερατότητα του απορροφητήρα και μπορεί να βρεθεί σε σχέση με τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων του απορροφητήρα, T_{wall} . Για τις μονάδες SEGS ίσχυε:

$$\varepsilon_{ab} = 0.00042 \times T_{\text{wall}} - 0.0995 \quad (4.5)$$

Μεταξύ του απορροφητήρα και του γυάλινου περιβλήματος υπάρχει υπολειπόμενο αέριο σε χαμηλή πίεση. Το αέριο αυτό κυκλοφορεί στην αύλακα και η ροή του είναι στρωτή. Σε στρωτή ροή το ρευστό δεν αναμειγνύεται και ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας είναι η μοριακή αγωγή. Οι απώλειες βρίσκονται από τον τύπο:

$$Q_{d,(ab-g)} = h_d \cdot (T_{ab} - T_g) \cdot A_{\text{absorber}} \quad (4.6)$$

Όπου h_d ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς σε αέριο χαμηλής πυκνότητας που δίνεται από τον Ratzel (1979):

$$h_d = \frac{k_{\text{air}}}{(D_{ab,o} / 2) \ln(D_g / D_{ab,o}) + B\lambda[(D_{ab,o} / D_g) + 1]} \quad (4.7)$$

Όπου k_{air} είναι η θερμική αγωγιμότητα του αέρα σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και

$$B = \frac{2-C}{C} \cdot \left[\frac{9\gamma-5}{2(\gamma+1)} \right] \quad (4.8)$$

Όπου C ο συντελεστής προσαρμογής για την αλληλεπίδραση επιφάνειας-αερίου. C=1 εκτός και αν η επιφάνεια είναι υπερβολικά καθαρή. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη μέση ελεύθερη διαδρομή ανάμεσα στα μόρια του ρευστού (σε cm).

$$\lambda = 2.331 \times 10^{-10} \times \frac{T_m}{P\delta^2} \quad (4.9)$$

Όπου λ είναι η μέση ελεύθερη διαδρομή μεταξύ κρούσεων ενός μορίου, T_m η μέση θερμοκρασία σε Kelvin και P η μέση πίεση σε (mm Hg). Η μοριακή διάμετρος του αέρα δ είναι 2.32×10^{-8} cm και γ ο λόγος ειδικής θερμότητας 1.4 στους 300K και 1.37 στους 600K. Η μέση θερμοκρασία είναι:

$$T_m = \frac{T_{ab} + T_g}{2} \quad (4.10)$$

Οι θερμικές απώλειες της εξωτερικής επιφάνειας του γυάλινου περιβλήματος λόγω συναγωγής με τον αέρα και ανταλλαγής ακτινοβολίας με τον ουρανό είναι

$$Q_{(g-a)} = Q_{r,(g-s)} + Q_{c,(g-a)} \quad (4.11)$$

Όπου:

$$Q_{c,(g-a)} = h_c \cdot (T_g - T_a) \cdot A_{\text{glass}} \quad (4.12)$$

h_c είναι ο συντελεστής θερμικών απωλειών λόγω συναγωγής. Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι:

$$Q_{r,(g-s)} = \sigma \cdot \varepsilon_g (T_g^4 - T_{\text{sky}}^4) \cdot A_{\text{glass}} \quad (4.13)$$

Η θερμοκρασία ουρανού T_{sky} μπορεί να βρεθεί σε σχέση με τη θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου T_a και τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου ως εξής:

$$T_{sky} = (\varepsilon_{sky})^{0.25} \cdot T_a \quad (\Delta.14)$$

Όπου:

$$\varepsilon_{sky} = 0.711 + 0.56(t_{dp} / 100) + 0.73(t_{dp} / 100)^2 \quad (\Delta.15)$$

Όπου t_{dp} είναι το σημείο δρόσου σε °C. Οι θερμικές απώλειες από τους πτυχωτούς συνδέσμους είναι:

$$Q_b = A_b h_c (T_{ab} - T_a) n_b \quad (\Delta.16)$$

Όπου A_b είναι η εκτεθειμένη επιφάνεια και n_b η απόδοση των πτυχώσεων.

Οι συνολικές απώλειες θερμότητας σε ένα συλλέκτη παραβολικών κοίλων μπορούν να υπολογιστούν με βάση τις παραπάνω εξισώσεις συναρτήσει της μέσης θερμοκρασία του απορροφητήρα (T_{ab}) και του περιβάλλοντος (T_a). Οι υπολογιζόμενες απώλειες συσχετίζονται με τη παρακάτω εξίσωση

$$q_1 = (\alpha + c \cdot V) \cdot (T_{ab} - T_a) + \varepsilon_{ab} \cdot b \cdot (T_{ab}^4 - T_{sky}^4) \quad (\Delta.17)$$

Οι συντελεστές α , b , c υπολογίζονται πειραματικά με προσέγγιση της καμπύλης των αποτελεσμάτων από τις εξισώσεις (Δ.1) έως (Δ.16). Για ένα συλλέκτη των εργαστηρίων της Sandia είναι:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1.9182 \times 10^{-2}, \text{WK}^{-1} \text{m}^{-2} \\ b &= 2.02 \times 10^{-9}, \text{WK}^{-4} \text{m}^{-2} \\ c &= 6.612 \times 10^{-3}, \text{JK}^{-1} \text{m}^{-3} \end{aligned} \quad (\Delta.18)$$

Η απόδοση του συλλέκτη μπορεί να εκφραστεί με τους όρους θερμικών απωλειών και της οπτικής απόδοσης από τον τύπο

$$\eta = \eta_{opt} \cdot K_{\tau\alpha} - (\alpha + c \cdot V_{wind}) \cdot \frac{(T_{ab} - T_a)}{I_{direct}} - \varepsilon_{ab} \cdot b \cdot \frac{(T_{ab}^4 - T_{sky}^4)}{I_{direct}} \quad (4.19)$$

Όπου I_{direct} είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία και $K_{\tau\alpha}$ είναι ο μετατροπέας της γωνίας πρόσπτωσης. Ο μετατροπέας γωνίας πρόσπτωσης εκφράστηκε από τον Dudley σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης στη κάθετη του συλλέκτη ως εξής:

$$K_{\tau\alpha} = \cos(\theta) + 0.000994(\theta) - 0.00005369(\theta)^2 \quad (4.20)$$

Όπου θ είναι η γωνία πρόσπτωσης. Η γωνία πρόσπτωσης σε οριζόντια επιφάνεια ταυτίζεται με τη γωνία ζενίθ και δίνεται από το τύπο

$$\cos \theta = \cos \delta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \Phi \quad (4.21)$$

Όπου δ , Φ και ω είναι η ηλιακή απόκλιση, το γεωγραφικό πλάτος (για την Αθήνα=37.97°) και η ωριαία γωνία, αντίστοιχα. Η ηλιακή απόκλιση υπολογίζεται από το τύπο

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360 * (284 + n)}{365}\right) \quad (4.22)$$

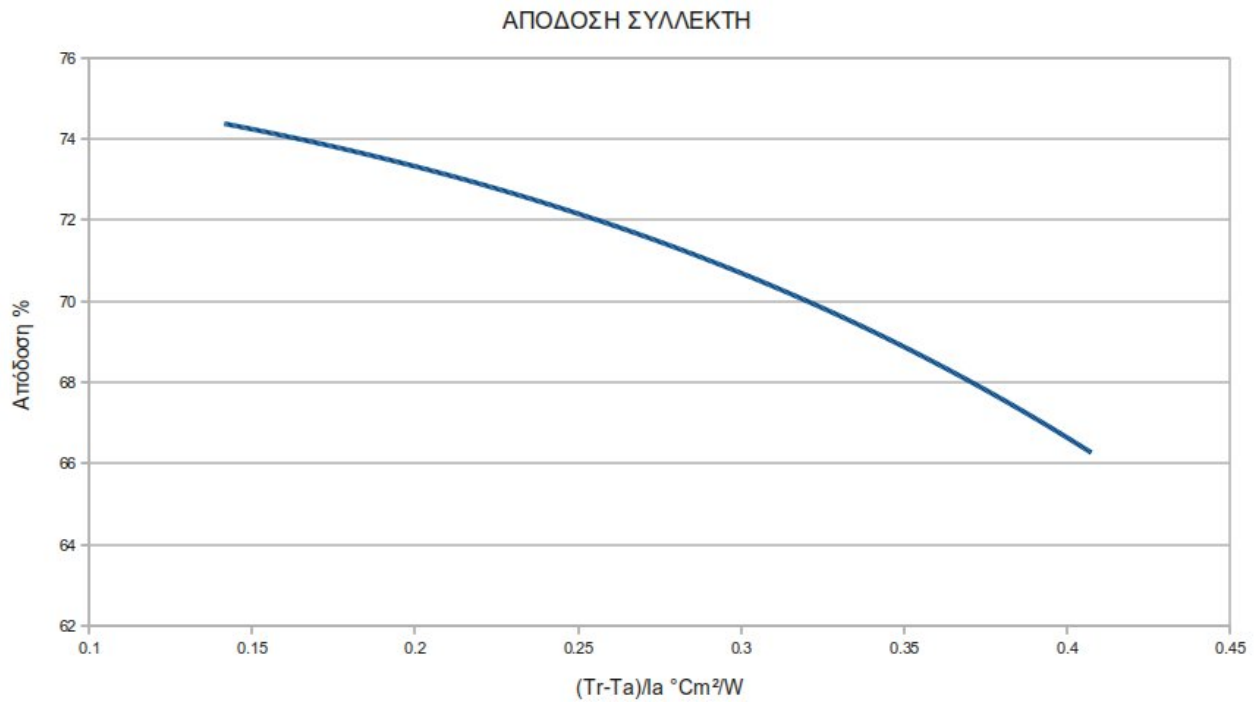
Η ωριαία γωνία ω , η οποία είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό $15^\circ/h=0.2^\circ/\text{min}$, δίδεται από τη σχέση:

$$\omega = 0,25 * (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (4.23)$$

Ο προσανατολισμός του συλλέκτη υποθέτεται βόρειος/νότιος.

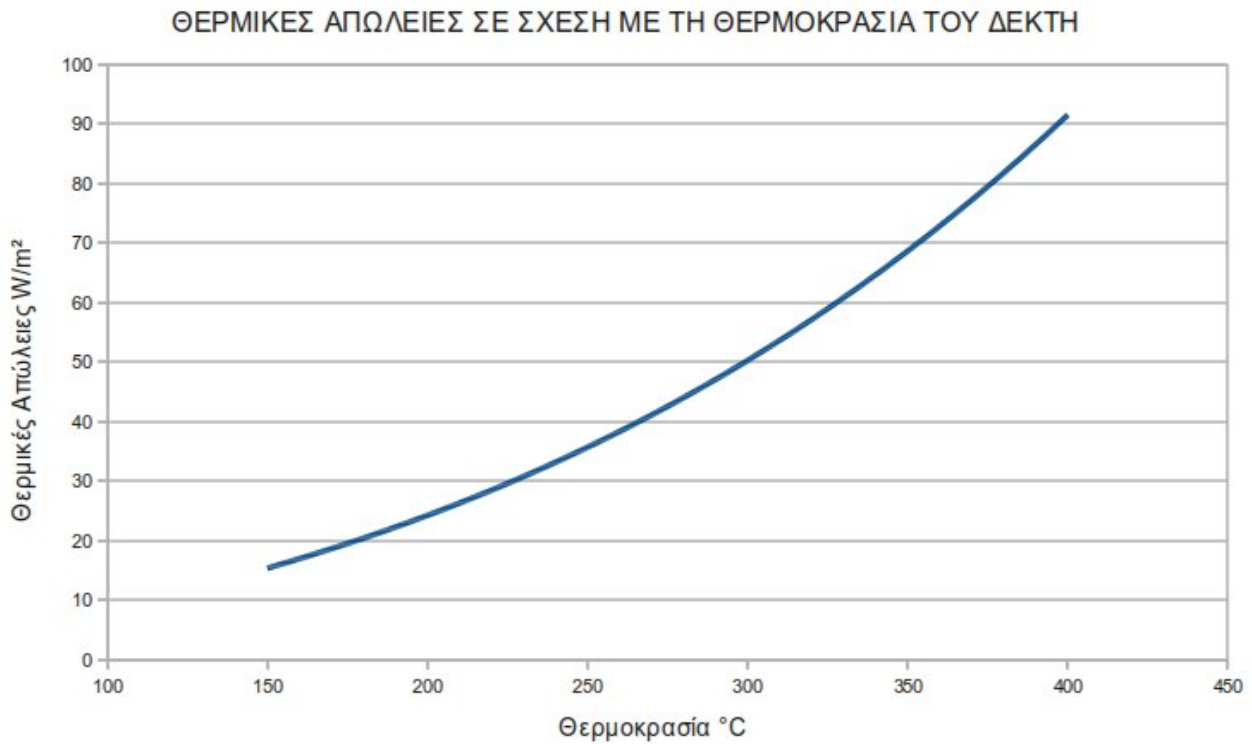
Με βάση τις σχέσεις (Δ.17) και (Δ.19) κατασκευάστηκε σε fortran ο κώδικας που δίνεται στο τέλος του κεφαλαίου και υπολογίζει την απόδοση του συλλέκτη σε σχέση με διάφορες παραμέτρους.

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η απόδοση του συλλέκτη για ακτινοβολία στο σημείο σχεδίασης $I_a=940\text{W/m}^2$, $T_r=350^\circ\text{C}$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος 17°C . Η γωνία πρόσπτωσης είναι 0° δηλαδή υποθέτεται ότι οι ακτινοβολία είναι κάθετη στο επίπεδο του ανοίγματος.



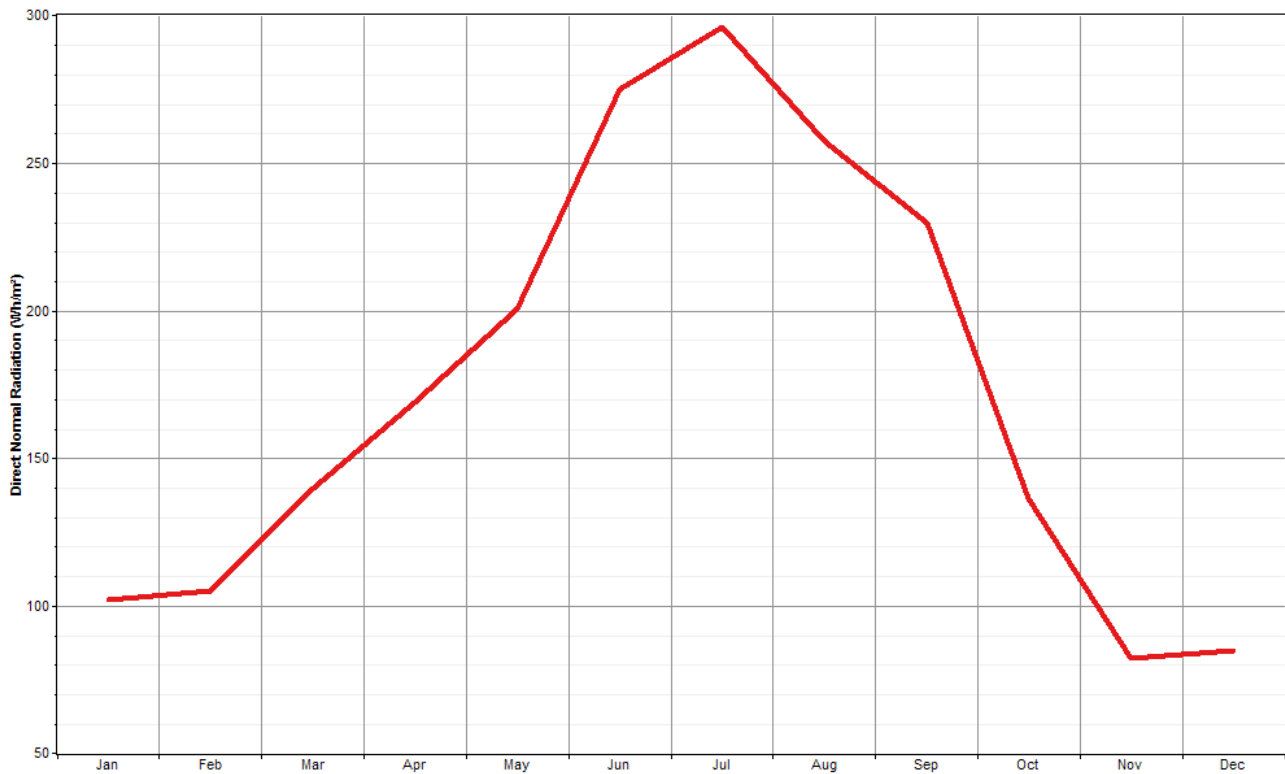
Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ περιβάλλοντος και δέκτη μειώνεται η απόδοση του συλλέκτη. Αυτό είναι λογικό γιατί με βάση την εξίσωση (Δ.19) όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του δέκτη αυξάνονται και οι θερμικές απώλειες.

Στο παρακάτω διάγραμμα υπάρχει η απόδοση του συλλέκτη σε σχέση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Όσο αυξάνεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται και η απόδοση του συλλέκτη. Στο παρακάτω πίνακα βλέπουμε τις θερμικές απώλειες του συλλέκτη με βάση τη θερμοκρασία του δέκτη. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως και με βάση την εξίσωση (Δ.17) όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του δέκτη αυξάνονται οι θερμικές απώλειες.

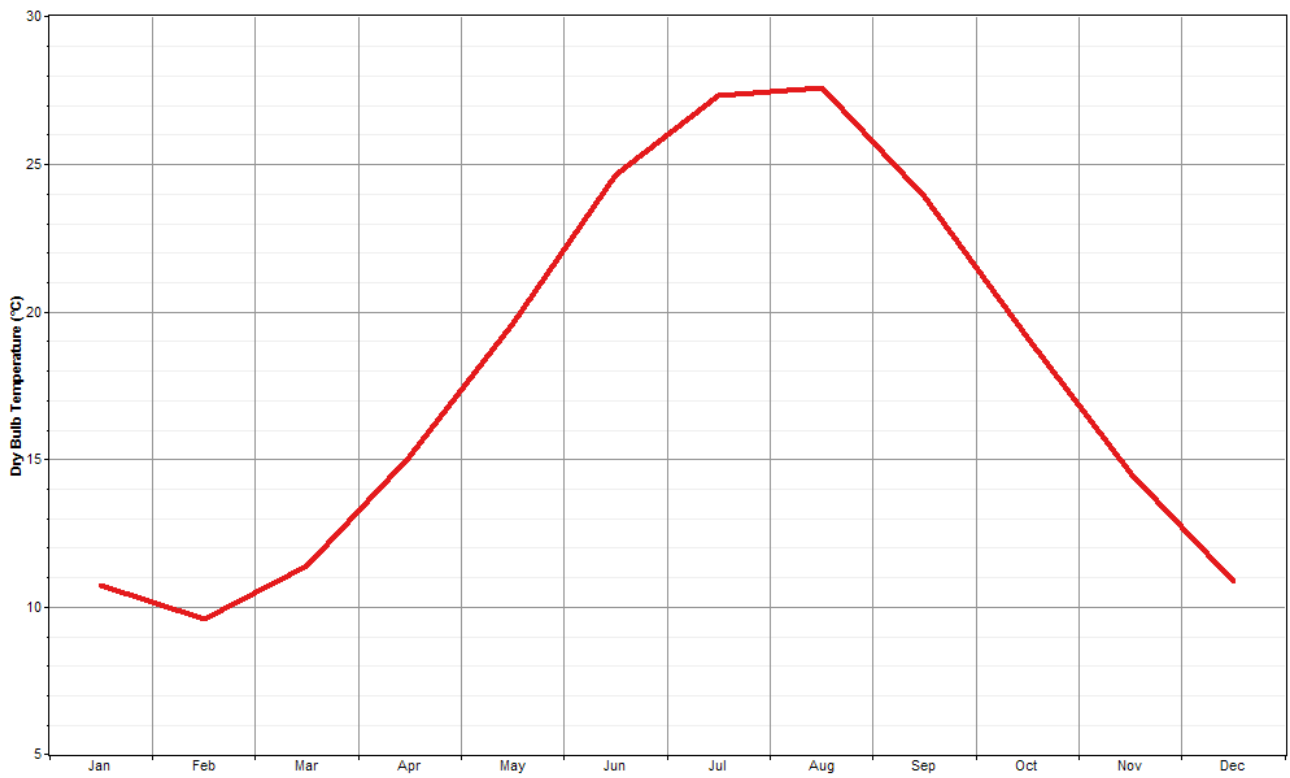


Στους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιήσαμε για το συλλέκτη τιμές σχεδιασμού. Παρακάτω χρησιμοποιούμε τις πραγματικές τιμές για την Αθήνα. Οι τιμές αυτές είναι από το EnergyPlus Energy simulation program, US Department of Energy, (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=GRC/cname=Greece)

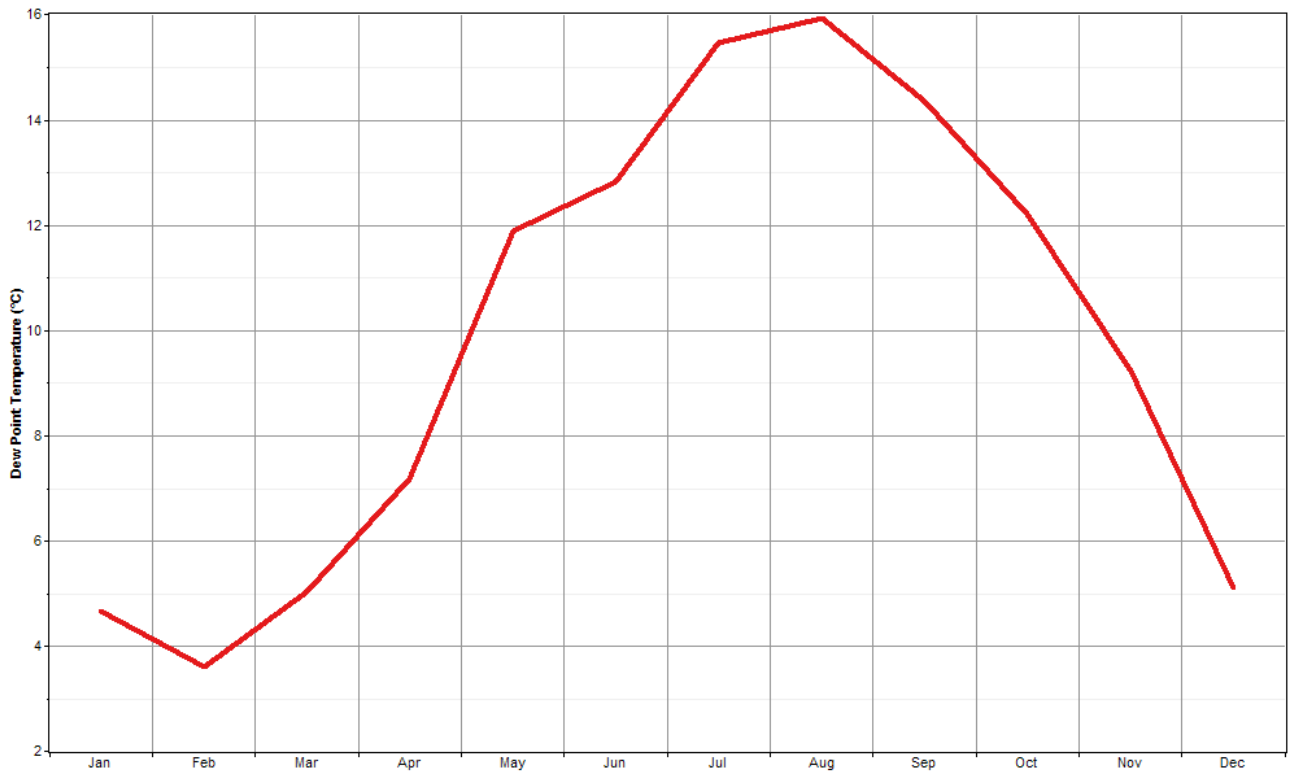
Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα είναι για την Αθήνα



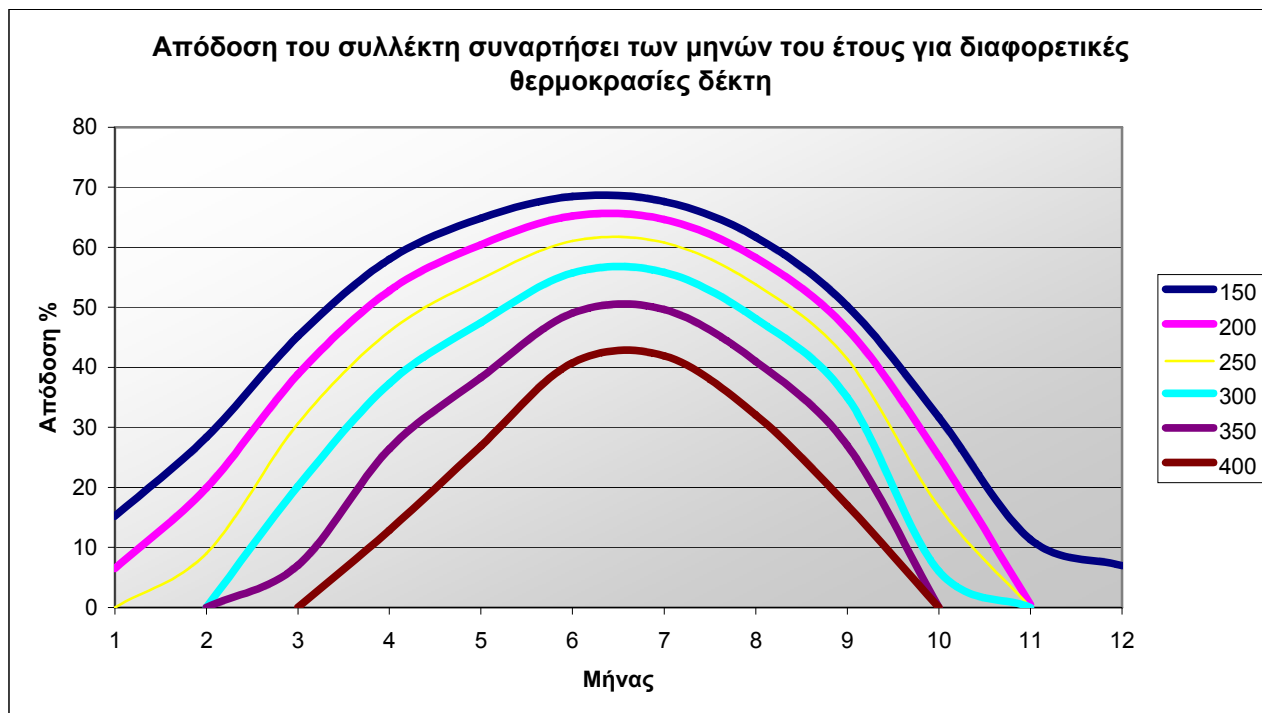
Η θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου



Η θερμοκρασία του σημείου δρόσου

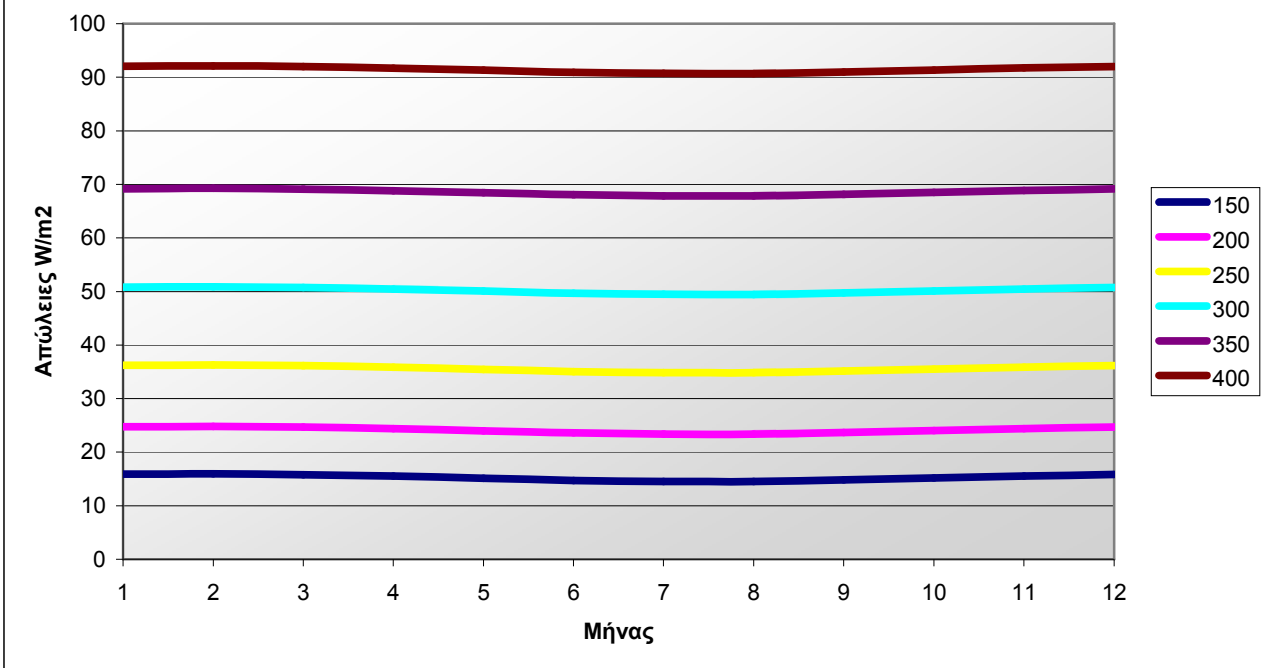


Με βάση τις παραπάνω τιμές και κάνοντας τους υπολογισμούς για την 21^η ημέρα κάθε μήνα έχουμε:



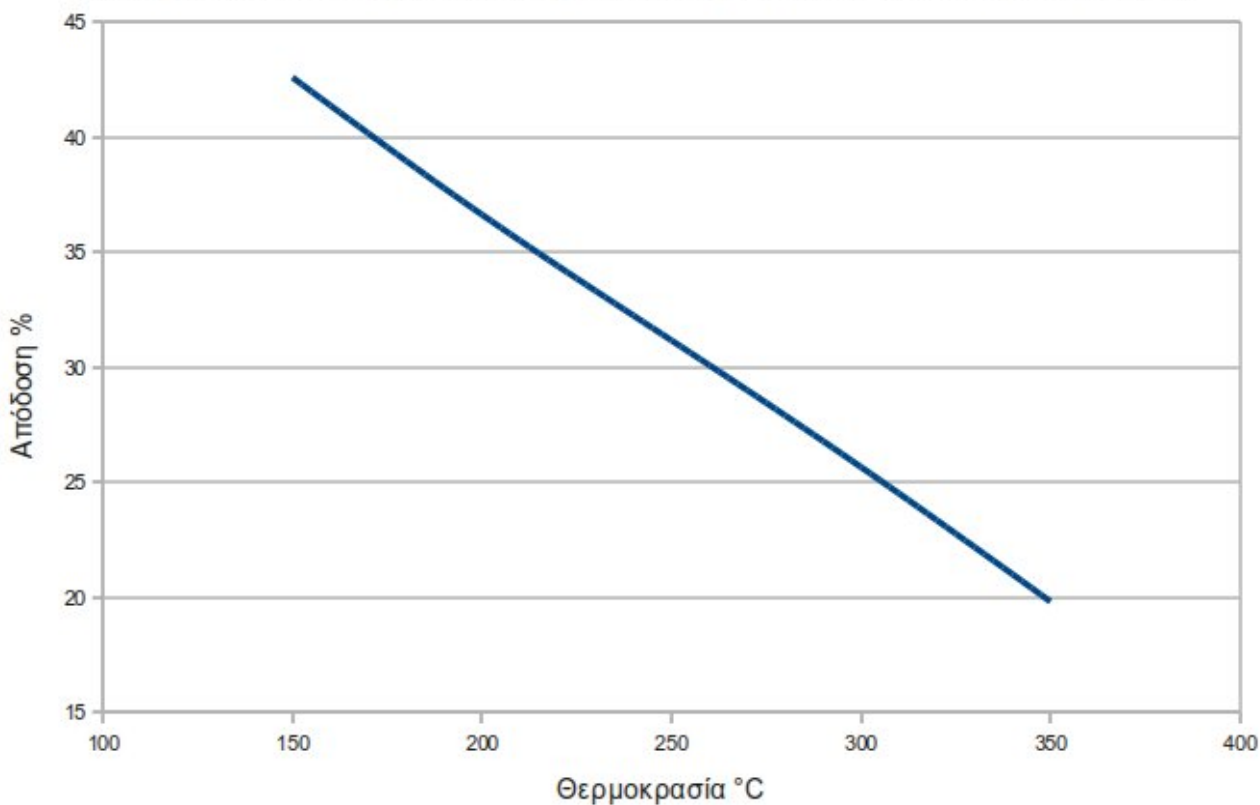
Η μέση ετήσια απόδοση για θερμοκρασία λειτουργίας δέκτη 350°C όσο είναι μια τυπική τιμή για συλλέκτες παραβολικών κοίλων είναι 19% ενώ για τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο είναι 46,55%. Παρατηρούμε εδώ ότι για θερμοκρασίες δέκτη πάνω από 250°C κατά τους χειμερινούς μήνες η απόδοση είναι 0. Αυτό συμβαίνει γιατί εκείνους τους μήνες η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρή και δεν επαρκεί για να ξεπεραστούν οι θερμικές απώλειες. Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ενδεικτικά και δίνονται για συγκριτικούς λόγους. Στη πραγματικότητα δεν γίνεται η απόδοση του συλλέκτη να είναι 0 δηλαδή η εγκατάσταση να μη λειτουργήσει καθόλου κατά τους χειμερινούς μήνες. Το σφάλμα αυτό δημιουργείται επειδή χρησιμοποιήσαμε τη μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μήνα. Θα υπάρχουν όμως ημέρες όπου η ποσότητα της ηλιοφάνειας θα επαρκεί για να ξεπεραστούν οι θερμικές απώλειες. Έτσι η μέση μηνιαία απόδοση θα είναι μικρή μεν αλλά λίγο πιο πάνω από το 0. Οι θερμικές απώλειες είναι περίπου σταθερές κατά τη διάρκεια του έτους και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα για κάθε θερμοκρασία δέκτη. Η όποιες διαφορές κατά το έτος οφείλονται στις διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Απώλειες του συλλέκτη συναρτήσει των μηνών του έτους για διαφορετικές θερμοκρασίες δέκτη



Στα παρακάτω διαγράμματα βλέπουμε τη μέση ετήσια απόδοση για όλες τις θερμοκρασίες δέκτη καθώς και τις μέσες ετήσιες απώλειες

ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΑΝΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΕΚΤΗ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ





Παρόλο που όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του δέκτη μειώνεται η απόδοση του συλλέκτη αυτό δε σημαίνει ότι συμφέρει να λειτουργεί ο δέκτης σε μικρές θερμοκρασίες. Γιατί μπορεί να αυξάνεται η απόδοση του συλλέκτη αλλά μειώνεται η συνολική παραγωγή ενέργειας της εγκατάστασης αφού υπάρχει διαθέσιμη μικρότερη ποσότητα θερμικής ενέργειας για χρήση.

Για να υπολογιστεί η παραγωγή ενέργειας μιας μονάδας παραβολικών κοίλων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα εξομοίωσης SAM (Solar Advisor Model) για να εξομοιώσει μια πραγματική εγκατάσταση στη περιοχή της Αθήνας για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το πρόγραμμα SAM αναπτύχθηκε από τις NREL(National Renewable Energy Laboratory),Sandia National Laboratory, U.S. Department of Energy (DOE), Solar Energy Technologies Program (SETP) το 2004 και συνεχίζει μέχρι σήμερα την ανάπτυξή του. Τα δεδομένα που δόθηκαν στο πρόγραμμα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες και συνοπτικά είναι τα εξής:

Συλλέκτης τύπου LS3 μήκους 100 μέτρων και πλάτους 5.73 μέτρα συνολικής επιφάνειας ανοίγματος 545m². Μέσου εστιακού μήκους 2.1m Η ανακλαστικότητα των κατόπτρων δόθηκε 0.935 και ο συντελεστής καθαρότητας των κατόπτρων 0.95 και η οπτική απόδοση 0.70. Το στοιχείο συλλογής θερμότητας ήταν από τη Luz και ήταν δέκτης κενού. Η συνολική επιφάνεια του

ηλιακού πεδίου 887825m² που δίνει ένα ηλιακό πολλαπλάσιο του 1.44. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι θερμηνόλη VP-1 με θερμοκρασία εισόδου 293 και εξόδου 391°C. Η παραγωγή ισχύος γίνεται με βάση το στρόβιλο 80MWe των μονάδων SEGS. Στην εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε θερμική αποθήκευση. Οι ισοδύναμες ώρες μέγιστου φόρτου της θερμικής αποθήκευσης επιλέχθηκαν 6. Το σύστημα έχει δύο δεξαμενές αποθήκευσης μία κρύα και μία ζεστή και το ρευστό αποθήκευσης είναι τηγμένο άλας. Φυσικά τα καιρικά δεδομένα είναι αυτά της Αθήνας από το EnergyPlus Energy simulation program, US Department of Energy, (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=GRC/cname=Greece)

Field Layout	
<input type="radio"/> Option 1:	Solar Multiple <input type="text" value="2"/>
<input checked="" type="radio"/> Option 2:	Solar Field Area <input type="text" value="887875"/> m ²
Distance between SCAs in Row	<input type="text" value="1"/> m
Row spacing, center-to-center	<input type="text" value="15"/> m
Number of SCAs per Row	<input type="text" value="4"/>
Deploy Angle	<input type="text" value="10"/> deg
Stow Angle	<input type="text" value="170"/> deg

Heat Transfer Fluid	
Solar Field HTF Type	VP-1
Property table for user-defined HTF	<input type="button" value="Edit..."/>
Solar Field Inlet Temp.	<input type="text" value="293"/> °C
Solar Field Outlet Temp.	<input type="text" value="391"/> °C
Solar Field Initial Temp.	<input type="text" value="100"/> °C
Piping Heat Losses @ Design Temp.	<input type="text" value="10"/> W/m ²
Piping Heat Loss Coeff 1	<input type="text" value="0.001693"/>
Piping Heat Loss Coeff 2	<input type="text" value="-1.683e-005"/>
Piping Heat Loss Coeff 3	<input type="text" value="6.78e-008"/>
Solar Field Piping Heat Losses	<input type="text" value="11"/> W/m ²
Minimum HTF Temp.	<input type="text" value="50"/> °C
HTF Gallons per Area	<input type="text" value="0.614"/> gal/m ²

Solar Multiple (Design Point)	
Calculated Values	
Solar Multiple (calc)	<input type="text" value="1.44171"/>
Solar Field Area (calc)	<input type="text" value="887875"/> m ²
Solar Multiple Reference Conditions	
Ambient Temp.	<input type="text" value="17"/> °C
Direct Normal Radiation	<input type="text" value="783"/> W/m ²
Wind Velocity	<input type="text" value="5"/> m/s
Reference Condition (SM=1)	
Exact Area	<input type="text" value="615820"/> m ²
Exact Num. SCAs	<input type="text" value="1129.94"/>
Values From Other Pages	
Aperture Area per SCA	<input type="text" value="545"/> m ² /SCA
HCE Thermal Losses	<input type="text" value="71.0367"/> W/m ²
Optical Efficiency	<input type="text" value="0.709243"/>
Design Turbine Thermal Input	<input type="text" value="291.468"/> MWt
Orientation	
Collector Tilt	<input type="text" value="0"/> deg
Collector Azimuth	<input type="text" value="0"/> deg
Tilt: 0 deg = horizontal, 90 deg = vertical	
Azimuth: 0 deg = south, 90 deg = west, -90 deg = east	

Solar Collector Assembly (SCA)

Current SCA inputs:

SCA Length	<input type="text" value="100"/> m	Tracking Error and Twist	<input type="text" value="0.99"/>
SCA Aperture	<input type="text" value="5.75"/> m	Geometric Accuracy	<input type="text" value="0.98"/>
SCA Aperture Area	<input type="text" value="545"/> m ²	Mirror Reflectivity	<input type="text" value="0.935"/>
Average Focal Length	<input type="text" value="2.1"/> m	Mirror Cleanliness Factor (avg)	<input type="text" value="0.95"/>
Incident Angle Mod Coeff 1	<input type="text" value="1"/>	Dust on Envelope (avg)	<input type="text" value="0.98"/>
Incident Angle Mod Coeff 2	<input type="text" value="0.0506"/>	Concentrator Factor	<input type="text" value="1"/>
Incident Angle Mod Coeff 3	<input type="text" value="-0.1763"/>	Solar Field Availability	<input type="text" value="0.99"/>

Heat Collection Element (HCE)

	Receiver 1	Receiver 2	Receiver 3	Receiver 4
	<input type="button" value="Library..."/>	<input type="button" value="Library..."/>	<input type="button" value="Library..."/>	<input type="button" value="Library..."/>
Current HCE inputs:	Luz Cermet,Vacuum	Luz Cermet,Vacuum	Luz Cermet,Vacuum	No library match.
Percent of Solar Field:	<input type="text" value="0.985"/>	<input type="text" value="0.01"/>	<input type="text" value="0.005"/>	<input type="text" value="0"/>
Optical Parameters:				
Bellows Shadowing	<input type="text" value="0.971"/>	<input type="text" value="0.971"/>	<input type="text" value="0.971"/>	<input type="text" value="0.963"/>
Envelope Transmissivity	<input type="text" value="0.935"/>	<input type="text" value="0.935"/>	<input type="text" value="0.935"/>	<input type="text" value="0.963"/>
Absorber Absorption	<input type="text" value="0.925"/>	<input type="text" value="0.925"/>	<input type="text" value="0.925"/>	<input type="text" value="0.96"/>
Unaccounted	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>
Optical Efficiency (HCE)	<input type="text" value="0.709243"/>	<input type="text" value="0.709243"/>	<input type="text" value="0.709243"/>	<input type="text" value="0.751876"/>
Optical Efficiency (Weighted)	<input type="text" value="0.709243"/>			
Heat Loss Parameters:				
Heat Loss Coeff A0	<input type="text" value="2.4237"/>	<input type="text" value="2.4237"/>	<input type="text" value="2.4237"/>	<input type="text" value="11.8"/>
Heat Loss Coeff A1	<input type="text" value="0.21369"/>	<input type="text" value="0.21369"/>	<input type="text" value="0.21369"/>	<input type="text" value="1.35"/>
Heat Loss Coeff A2	<input type="text" value="-0.00047461"/>	<input type="text" value="-0.00047461"/>	<input type="text" value="-0.00047461"/>	<input type="text" value="0.00075"/>
Heat Loss Coeff A3	<input type="text" value="6.8836e-006"/>	<input type="text" value="6.8836e-006"/>	<input type="text" value="6.8836e-006"/>	<input type="text" value="4.07e-006"/>
Heat Loss Coeff A4	<input type="text" value="9.6216e-008"/>	<input type="text" value="9.6216e-008"/>	<input type="text" value="9.6216e-008"/>	<input type="text" value="5.85e-008"/>
Heat Loss Coeff A5	<input type="text" value="-2.2423"/>	<input type="text" value="-2.2423"/>	<input type="text" value="-2.2423"/>	<input type="text" value="4.48"/>
Heat Loss Coeff A6	<input type="text" value="0.032325"/>	<input type="text" value="0.032325"/>	<input type="text" value="0.032325"/>	<input type="text" value="0.285"/>
Heat Loss Factor	<input type="text" value="1.25"/>	<input type="text" value="1.25"/>	<input type="text" value="1.25"/>	<input type="text" value="1"/>
Min. Windspeed (m/s)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
HCE Heat Losses (W/m)	<input type="text" value="408.461"/>	<input type="text" value="408.461"/>	<input type="text" value="408.461"/>	<input type="text" value="944.442"/>
Thermal Losses (Weighted W/m)	<input type="text" value="408.461"/>			
Thermal Losses (Weighted W/m ²)	<input type="text" value="71.0367"/>			

Plant Characteristics

Rated Turbine Net Capacity MWe
 Design Turbine Gross Output MWe

Power Cycle

Current power block:

Design Turbine Thermal Input MWt Turbine Startup Energy
 Design Turbine Gross Efficiency Boiler LHV Efficiency
 Max. Over Design Operation* Max. Thermal Input MWt
 Minimum Load* Min. Thermal Input MWt

	F0	F1	F2	F3	F4
Turb. Part-load Therm to Elec	-0.037726	1.0062	0.076316	-0.044775	0
Turb. Part Load Elec to Therm	0.03737	0.98823	-0.064991	0.039388	0
Cooling Tower Correction	1	0	0	0	0
Temp. Correction Mode	Wet-bulb Basis				

* Fraction of Design Point

Thermal Energy Storage (TES)

Equiv. Full Load Hours of TES hours Maximum Energy Storage MWht
 Storage System Configuration Design Turbine Thermal Input MWt
 Storage Fluid Type Max. Power To Storage MWt
 Turbine TES Adj. - Efficiency Max. Power From Storage MWt
 Turbine TES Adj. - Gross Output Heat Exchanger Duty*
 Initial Thermal Storage MWht
 Tank Heat Losses MWt

Parasitic Electric Energy Use

Current reference parasitic system:

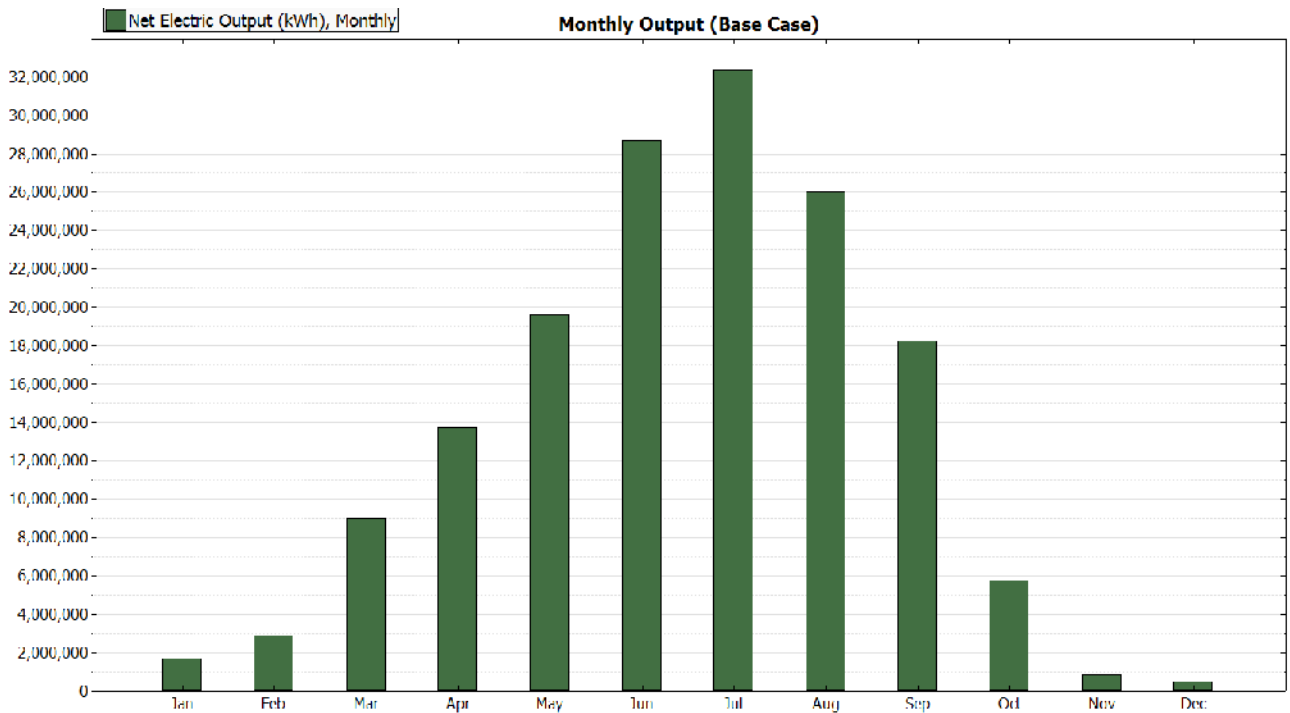
 Solar Field Area m²
 Gross Turbine Output MWe

	PF	F0	F1	F2	Design Point Parasitics	
SCA Drives & Electronics	<input type="text" value="2.66e-007"/> MWe/m ²	<input type="text" value="1"/>			<input type="text" value="0.236175"/> MWe	
Solar Field HTF Pumps	<input type="text" value="1.052e-005"/> MWe/m ²	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="-0.036"/>	<input type="text" value="0.242"/>	<input type="text" value="0.794"/>	<input type="text" value="9.34044"/> MWe
TES Pumps	<input type="text" value="0.02"/> MWe/MWe	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="-0.036"/>	<input type="text" value="0.242"/>	<input type="text" value="0.794"/>	<input type="text" value="2.2"/> MWe
Antifreeze Pumping	<input type="text" value="0.1"/> fraction					<input type="text" value="0.934044"/> MWe
Power Block Fixed	<input type="text" value="0.0055"/> fraction					<input type="text" value="0.605"/> MWe
Balance of Plant	<input type="text" value="0.02467"/> MWe/MWe	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0.483"/>	<input type="text" value="0.517"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="2.7137"/> MWe
Heater & Boiler	<input type="text" value="0.02273"/> MWe/MWe	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0.483"/>	<input type="text" value="0.517"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="2.5003"/> MWe
Cooling Towers	<input type="text" value="0.017045"/> MWe/MWe	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="-0.036"/>	<input type="text" value="0.242"/>	<input type="text" value="0.794"/>	<input type="text" value="1.87495"/> MWe

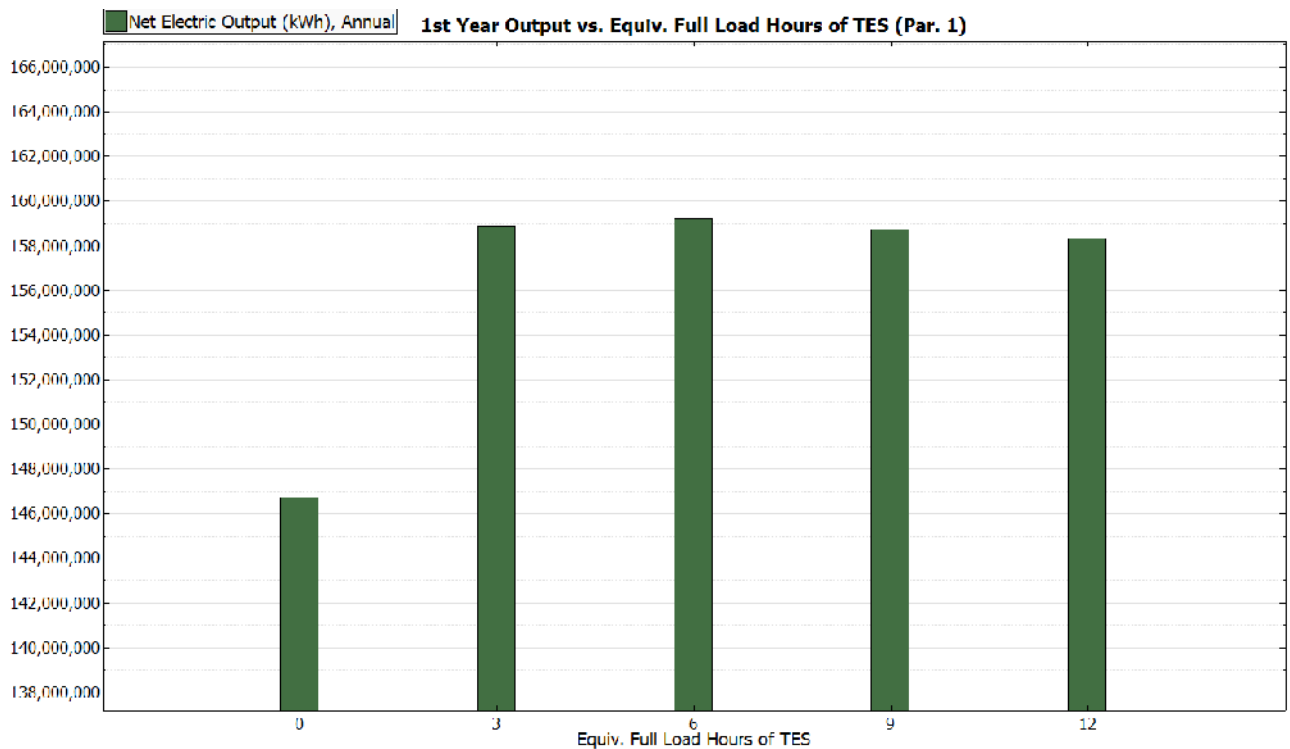
Cooling Tower Operation Mode

Total Design Point Parasitics MWe

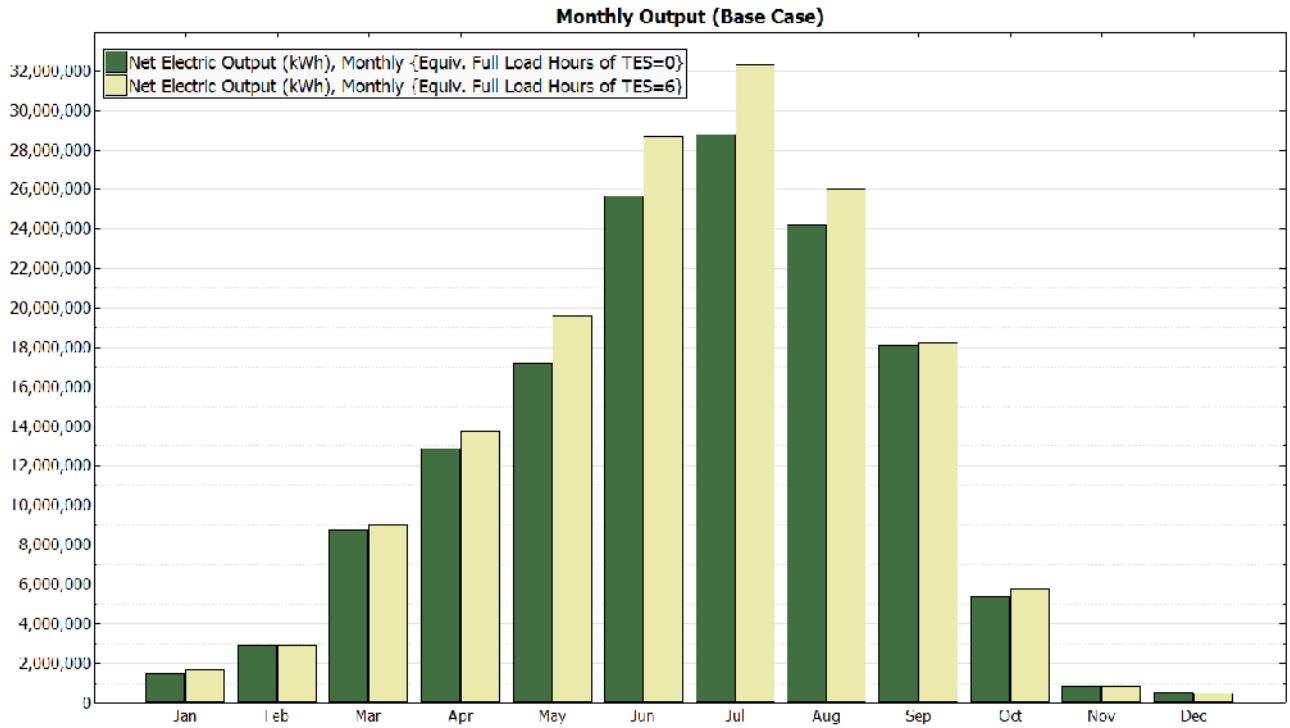
Με βάση τις παραπάνω τιμές η συνολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη μονάδα είναι:



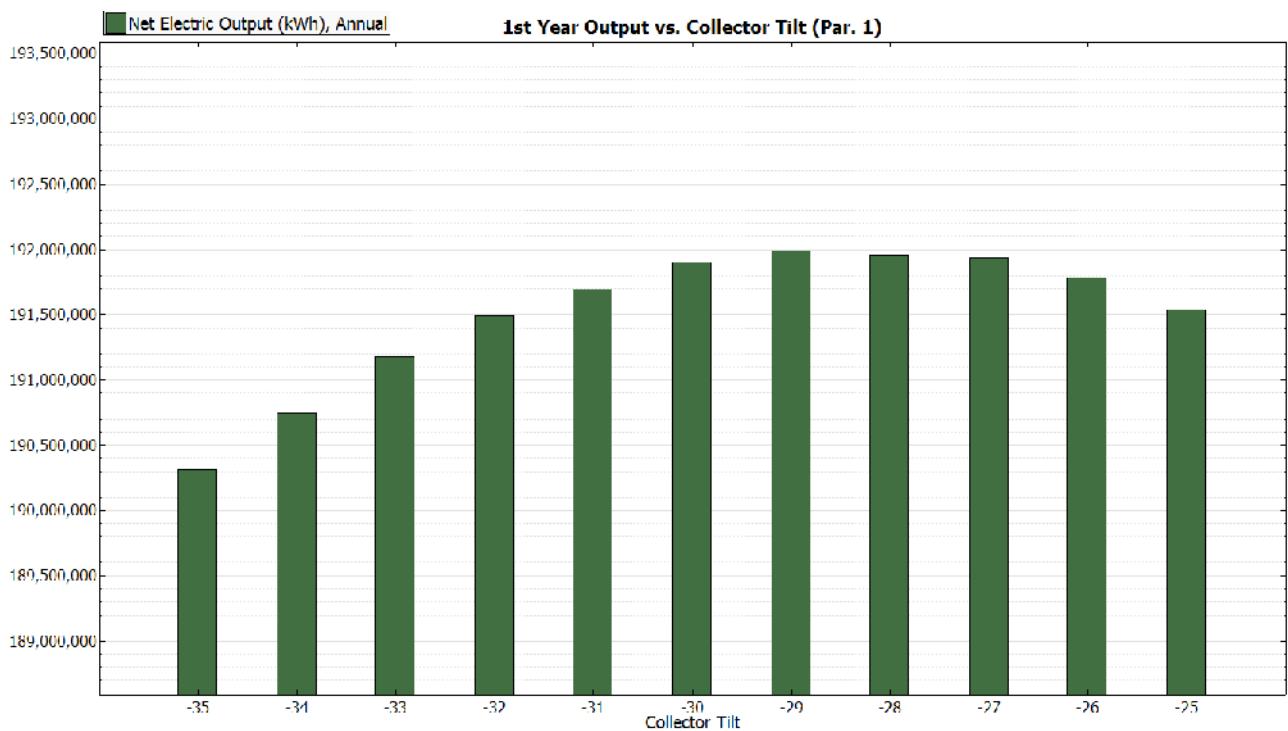
Με συνολική ετήσια παραγωγή 159,213,000 kWh. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η συσχέτιση της συνολικής ετήσιας παραγωγής ενέργειας βάση των ισοδύναμων ωρών μέγιστου φορτίου θερμικής αποθήκευσης.



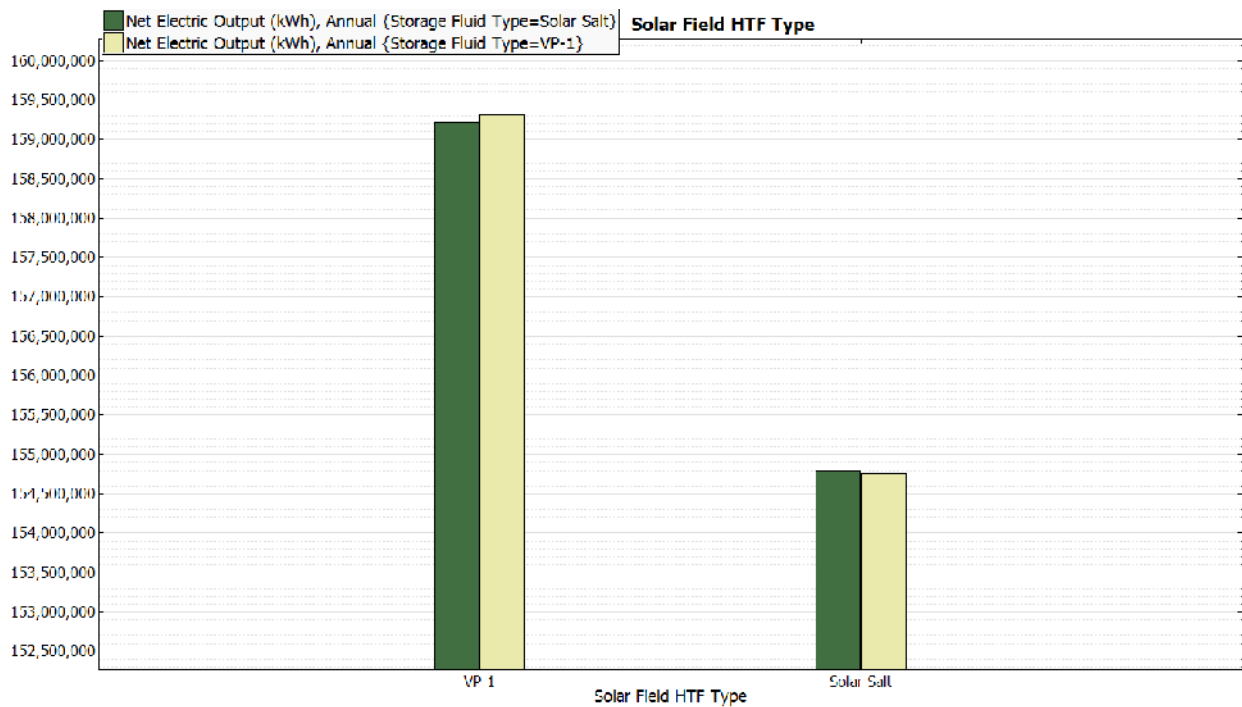
Στο επόμενο διάγραμμα βλέπουμε τη μηνιαία παραγωγή ενέργειας χωρίς και με θερμική αποθήκευση ισοδύναμη με 6 ώρες μέγιστου φορτίου. Το ετήσιο όφελος είναι της τάξης του 6%



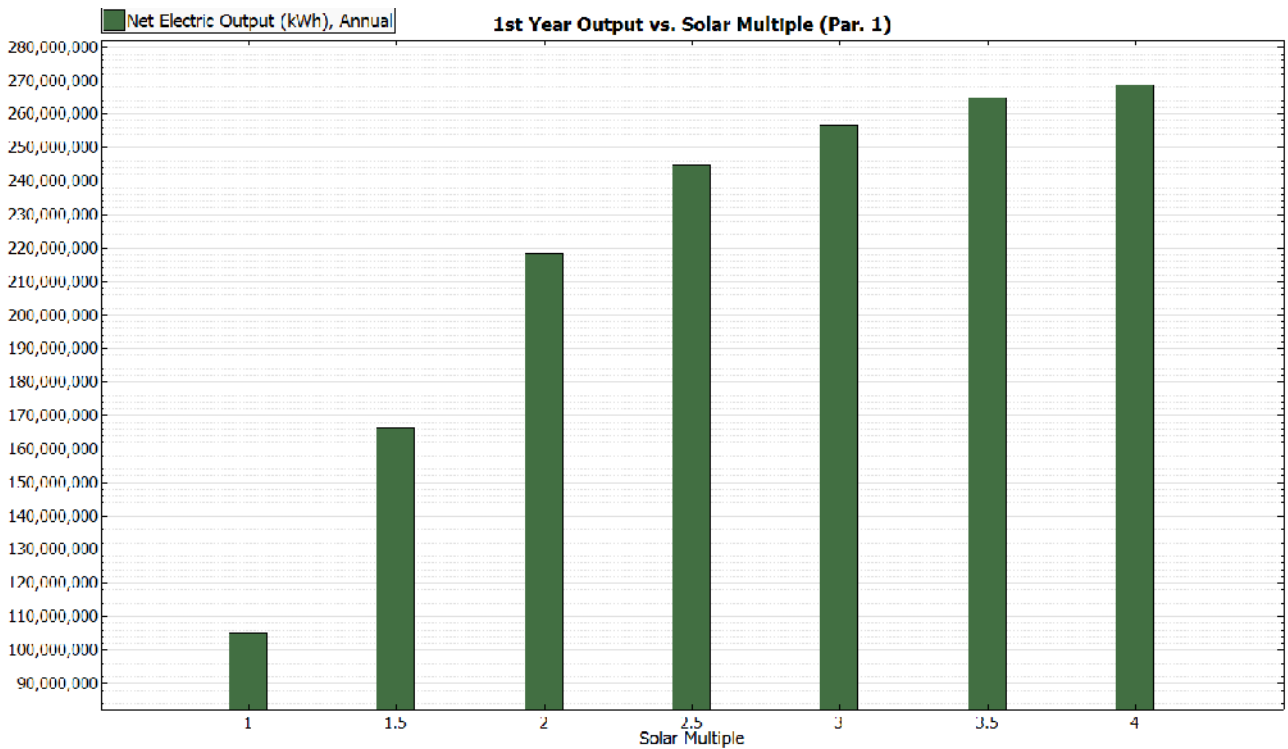
Στο επόμενο διάγραμμα είναι η ετήσια παραγωγή ενέργειας ανάλογα με τη κλίση του συλλέκτη για αζιμούθια γωνία 0°. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραγωγή είναι για κλίση 29°. Ο λόγος που το διάγραμμα γράφει -29° είναι ότι για θετικές τιμές της γωνίας υψώνει το νότιο μέρος του συλλέκτη. Δηλαδή θετικές τιμές ο συλλέκτης έχει κλίση 29° κοιτάζοντας βόρεια. Για αρνητικές χαμηλώνει το νότιο μέρος του συλλέκτη κοιτάζοντας με αυτό το τρόπο νότια. Παρόλο που η βέλτιστη παραγωγή ενέργειας συμβαίνει για 29° συνήθως οι συλλέκτες παραβολικών κοίλων είναι οριζόντιοι. Αυτό γιατί έχουν μεγάλο μήκος και η κλίση εισάγει δυσκολίες και επιπλέον έξοδα όσο αφορά τη στήριξη και το καθαρισμό τους.



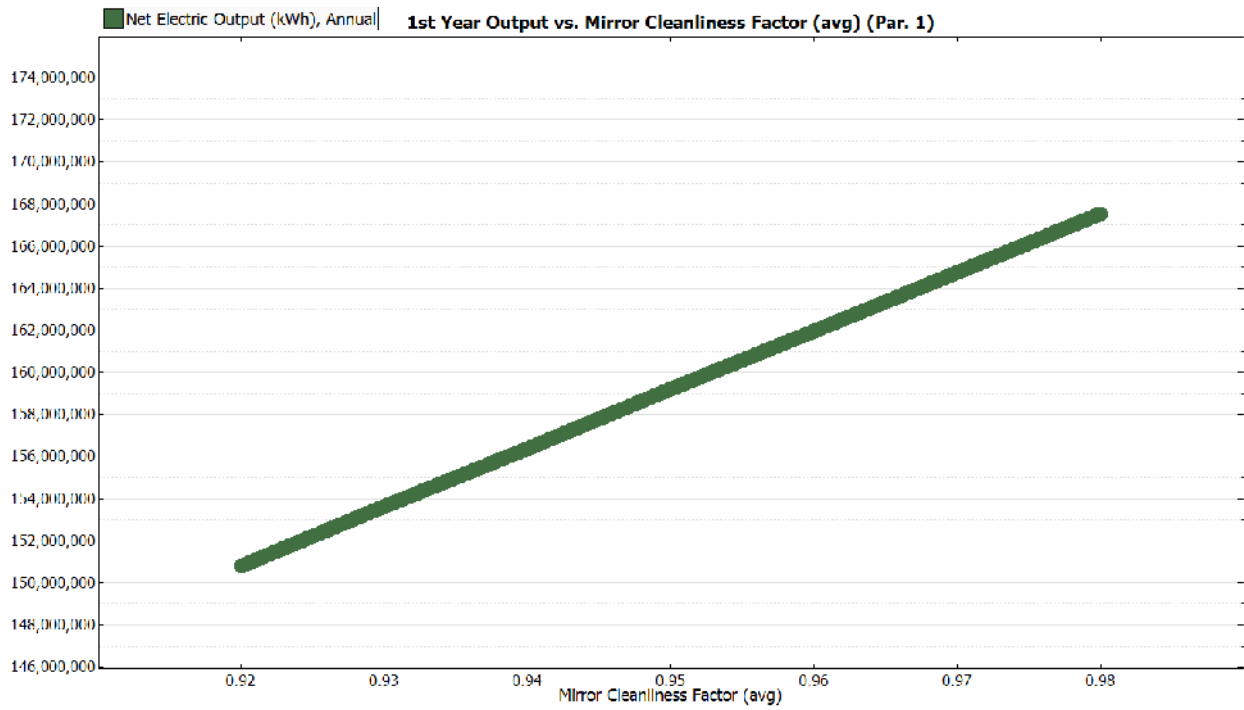
Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την επίδραση που έχει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας στην εγκατάσταση, καθώς και η επιλογή του ρευστού αποθήκευσης. Από τους παρακάτω συνδυασμούς ο βέλτιστος είναι χρήση VP-1 και στα δύο. Να σημειώσουμε ότι σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ίδιο ρευστό μεταφοράς και αποθήκευσης η εγκατάσταση το σύστημα είναι άμεσο ενώ όταν είναι διαφορετικά είναι έμμεσο και χρησιμοποιεί εναλλάκτη θερμότητας.



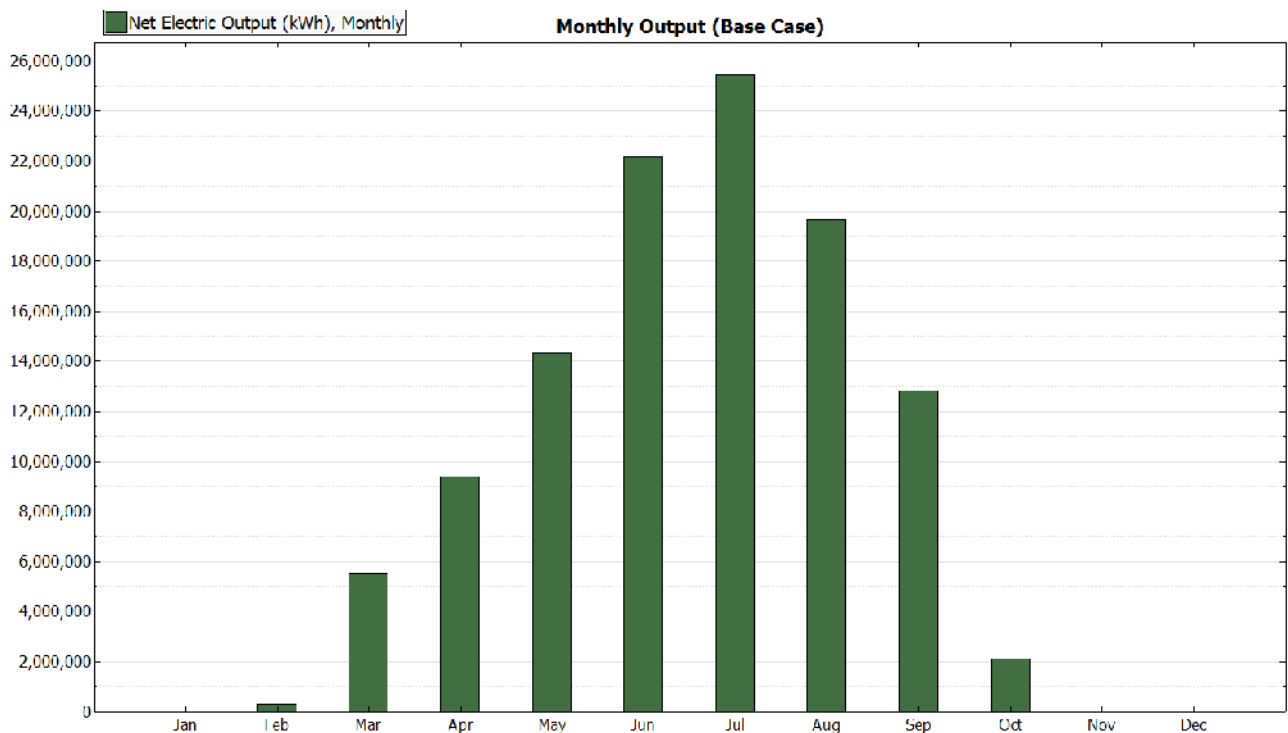
Στο επόμενο διάγραμμα βλέπουμε την επίδραση του ηλιακού πολλαπλάσιου σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Αυτό που πρέπει να παρατηρήσουμε είναι η αλλαγή στην κλίση όσο μεγαλώνει το ηλιακό πολλαπλάσιο. Για παράδειγμα από ηλιακό πολλαπλάσιο 2 σε ηλιακό πολλαπλάσιο 4 διπλασιάζεται το ηλιακό πεδίο όμως δεν διπλασιάζεται αντίστοιχα και η παραγωγή ενέργειας.



Στο επόμενο διάγραμμα βλέπουμε την ετήσια παραγωγή ενέργειας σε συνάρτηση με το συντελεστή καθαρότητας των κατόπτρων. Μια τυπική τιμή είναι το 0.95.



Τέλος βλέπουμε τις επιπτώσεις που θα υπάρχουν στη παραγωγή της ενέργειας σε περίπτωση που χαθεί το κενό στο δέκτη. Η ετήσια παραγωγή γίνεται 109,337,226 kWh. Το ποσοστό της ενέργειας που χάνεται είναι της τάξης του 31%



“A Parabolic Trough Solar Power Plant Simulation Model”, NREL(National Renewable Energy Laboratory) ISES 2003:International Solar Energy Conference,Hawaii Island, Hawaii,March 16–18, 2003

“Modelling Of Parabolic Trough Direct Steam Generation Solar Collectors”, S. D. Odeh, G. L. Morrison και M. Behnia, Solar Energy Vol. 62, No. 6, pp. 395–406, 1998

“Modelling, Optimisation and Performance Evaluation of a Parabolic Trough Solar Collector Steam Generation System”, Soteris Kalogirou, Stephen Lloyd and John Ward, Solar Energy Vol. 60, No. 1, pp. 49-59, 1997

“Thermal Analysis Of Parabolic Trough Solar Collectors For Electric Power Generation” S. D. Odeh, G. L. Morrison and M. Behnia S. D. Odeh, G. L. Morrison and M. Behnia, School of Mechanical and Manufacturing Engineering Univers“Parabolic Trough Concentrators---

design, construction and evaluation”, A.Thomas and H. M. Guven, Energy Convers. Mgmt Vol. 34, No. 5, pp. 401-416, 1993

“The application of parabolic trough technology under Jordanian climate” Omar Badrana, Markus Eckb, Renewable Energy 31 (2006) 791–802

“Parabolic Trough Concentrators---design, construction and evaluation”, A.Thomas and H. M. Guven, Energy Convers. Mgmt Vol. 34, No. 5, pp. 401-416, 1993

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας Fortran που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του πρώτου μέρους των αποτελεσμάτων του συλλέκτη παραβολικών κοίλων.

```
PROGRAM APODOSI
```

```
implicit double precision (a-h,l-z)
```

```
Dimension TAMB(12), TA(12), TM(12), TP(12), TD(12), TG(12,12)
```

```
Dimension TSUM(12), D(12), TCO(12), TKL(12),TDP(12),Esky(12)
```

```
Dimension Tsky(12), N(12), Q(12)
```

```
open (1, File='RESULT')
```

```
TABS=150.0+273.0
```

```
* do 550 TABS=423.0,673.0,50
```

```
TAMB(1)=10.701+273.0
```

```
TAMB(2)=9.583+273.0
```

```
TAMB(3)=11.388+273.0
```

```
TAMB(4)=15.059+273.0
```

```
TAMB(5)=19.608+273.0
```

```
TAMB(6)=24.612+273.0
```

```
TAMB(7)=27.297+273.0
```

```
TAMB(8)=27.588+273.0
```

```
TAMB(9)=23.879+273.0
```

```
TAMB(10)=19.147+273.0
```

```
TAMB(11)=14.507+273.0
```

```
TAMB(12)=10.864+273.0
```

```
Vair=3.0
```

```
nopt=0.76
```

```
Eab=0.19
```

```
pi=acos(-1.d0)
```

```
TD(1)=21
```

```
TD(2)=52
```

```
TD(3)=80
```

```
TD(4)=111
```

```
TD(5)=141
```

TD(6)=172

TD(7)=202

TD(8)=233

TD(9)=264

TD(10)=294

TD(11)=325

TD(12)=355

TDP(1)=3.9

TDP(2)=3.9

TDP(3)=5.5

TDP(4)=8.3

TDP(5)=11.7

TDP(6)=14.5

TDP(7)=14.5

TDP(8)=14.5

TDP(9)=13.3

TDP(10)=11.7

TDP(11)=8.9

TDP(12)=6.1

TSUM(1)=101.98

TSUM(2)=105.22

TSUM(3)=139.83

TSUM(4)=168.66

TSUM(5)=200.72

TSUM(6)=274.86

TSUM(7)=296.23

TSUM(8)=257.11

TSUM(9)=229.36

TSUM(10)=136.41

TSUM(11)=81.99

TSUM(12)=84.96

do 50 i=1,12

$$Esky(i)=0.711+0.56*(TDP(i)/100.0)+0.73*((TDP(i)/100.0)**2.0)$$

$$Tsky(i)=((Esky(i))**(0.25))*TAMB(i)$$

50 continue

$$Tskum=0.0$$

do 100 i=1,12

$$Tskym=Tskym+Tsky(i)$$

100 continue

$$Tskym=Tskym/12.0$$

$$aa=0.000994$$

$$bb=0.00005369$$

do 400 i=1,12

$$D(i)=23.45*\sin((pi/180.0)*((360.0*(284.0+TD(i)))/365.0))$$

$$CO=\cos((pi/180.0)*D(i))*\cos((pi/180.0)*37.97)$$

$$SI=\sin((pi/180.0)*D(i))*\sin((pi/180.0)*37.97)$$

$$TCO(i)=CO+SI$$

$$TCO2=(\cos(TCO(i)))*(180/pi)$$

$$TKL(i)=TCO(i)+(aa*TCO2)-(bb*(TCO2**2))$$

400 continue

$$TKLM=0.0$$

do 425 i=1,12

$$TKLM=TKLM+TKL(i)$$

425 continue

$$TKLM=TKLM/12.0$$

$$na=1.91*(10.0**(-2.0))$$

$$nb=2.02*(10.0**(-9.0))$$

$$nc=6.608*(10.0**(-3.0))$$

*****mesh stigmaia apodosh kai apwleies*****

do 450 i=1,12

$$nl=nopt*TKL(i)$$

```

n2=((na+(nc*Vair))*(TABS-TAMB(i)))/TSUM(i)
qn2=((na+(nc*Vair))*(TABS-TAMB(i)))
n3=Eab*nb*((TABS**4.0)-(Tsky(i)**4.0))/TSUM(i)
qn3=Eab*nb*((TABS**4.0)-(Tsky(i)**4.0))
N(i)=n1-n2-n3
Q(i)=qn2+qn3
if (N(i).LT.0) then
  N(i)=0
ELSE
  N(i)=N(i)
ENDIF
write(1,*) N(i)*100,'% ',Q(i),i
450 continue
  AN=0.0
  AQ=0.0
  do 500 i=1,12
    AN=AN+N(i)
    AQ=AQ+Q(i)
500 continue
  write(1,*) ''
  write(1,*) AN/12, AQ/12
*550 continue

*  write(*,*) ''
***** apodosh se diaforetikos aktinobolies*****
  do 600 ITSUM=300,1000,50
    n1=nopt
    n2=((na+(nc*Vair))*(TABS-290.0))/ITSUM
    n3=Eab*nb*((TABS**4.0)-(Tskym**4.0))/ITSUM
    Nol=n1-n2-n3
*  write(1,*) Nol,ITSUM
600 continue
*  write(1,*) ''
*****apwleies kai apodosi me I=940w/m2*****
  do 650 ITABS=423,673,10

```


n1=nopt

*n2=((na+(nc*Vair))*(ITABS-290.0))/940.0*

*qn2=((na+(nc*Vair))*(ITABS-290.0))*

*n3=Eab*nb*((ITABS**4.0)-(Tskym**4.0))/940.0*

*qn3=Eab*nb*((ITABS**4.0)-(Tskym**4.0))*

Nol=n1-n2-n3

Qol=qn2+qn3

** write(1, *) Nol,(ITABS-290.0)/940.0,Qol,ITABS-273.0*

650 continue

stop

end

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. “Θερμικά-ηλιακά Συστήματα μέρος πρώτο”, Κ. Α. Αντωνόπουλος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004
2. “Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα”, Γεώργιος Μπαράκος, ΤΕΙ Πάτρας (<http://eclass.teipat.gr/MECH-STE135/>)
3. “Power From The Sun Book, William B. Stine και Michael Geyer (<http://www.powerfromthesun.net/book.htm>)
4. “Technology Characterization Solar Power tower”, SolarPACES, (http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_tower.pdf)
5. “Technology Characterization Solar Parabolic Trough”, SolarPACES (http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_trough.pdf)
6. “Technology Characterization Solar Dish Systems”, solarPACES (http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_dish.pdf)
7. “The Solarmundo line focussing Fresnel collector. Optical and thermal performance and cost calculations.”, Andreas Häberle, Christian Zahler, Hansjörg Lerchenmüller, Max Mertins, Christof Wittwer, Franz Trieb, Jürgen Dersch (http://www.spg-gmbh.com/UserFiles/File/PDF/Fresnel_trough_cost_compare.pdf)
8. “A Parabolic Trough Solar Power Plant Simulation Model”, NREL(National Renewable Energy Laboratory) ISES 2003:International Solar Energy Conference,Hawaii Island, Hawaii, March 16–18, 2003
9. “Modelling Of Parabolic Trough Direct Steam Generation Solar Collectors”, S. D. Odeh, G. L. Morrison και M. Behnia, Solar Energy Vol. 62, No. 6, pp. 395–406, 1998
10. “Modelling, Optimisation and Performance Evaluation of a Parabolic Trough Solar Collector Steam Generation System”, Soteris Kalogirou, Stephen Lloyd and John Ward, Solar Energy Vol. 60, No. 1, pp. 49-59, 1997
11. “Simulation Model Of A CPC Collector With Temperature-Dependent Heat Loss Coefficient”, N. Fraidenraich, R. De C. F. De Lima, C. Tiba και E. M. De S. Barbosa, Solar Energy Vol. 65, No. 2, pp. 99–110, 1999
12. “Thermal Analysis Of Parabolic Trough Solar Collectors For Electric Power Generation” S. D. Odeh, G. L. Morrison and M. Behnia S. D. Odeh, G. L. Morrison and M. Behnia, School of Mechanical and Manufacturing Engineering University of New South Wales, Sydney, Australia
13. “Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems – Utilization of Solar Induced Convective
14. Flows for Power Generation”, Jörg Schlaich, Rudolf Bergemann, Wolfgang Schiel, Gerhard Weinrebe, Proceedings of ISEC 2003: 2003 International Solar Energy Conference, Hawaii, 15-18 March 2003
15. “Classification Of Solar Collectors”, Žanis Jesko, Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering (2008)
16. “Parabolic Trough Concentrators---design, construction and evaluation”, A. Thomas and H. M. Guven, Energy Convers. Mgmt Vol. 34, No. 5, pp. 401-416, 1993

17. "The application of parabolic trough technology under Jordanian climate" Omar Badrana, Markus Eckb, *Renewable Energy* 31 (2006) 791–802
18. "An evaluation on thermal performance of CPC solar collector" Yong Kim , GuiYoung Han, Taebeom Seo, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (2008) 446 – 457
19. "Theoretical Study Of Main Factors Affecting The Heliostat Field Design Of Tower Power Plant", Basil F. Ali, *Energy Convers. Mgmt Vol. 30, No. 2, pp. 101-106, 1990*
20. *Materials Issues In Solar Thermal Energy Systems* R. W. Mar and J. C. Swearingen, *Solar Energy Materials* 5 (1981) 37-53, North-Holland Publishing Company
21. N.K. Abdul-Jabbar, S.A. Salman, *Effect of two-axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators, Energy Conversion and Management* 39 (10) (1998) 1073–1079.
22. Q. Lin, S. Furbo, *Solar heating systems with evacuated tubular solar collector, EuroSun 98 (1998) 1–7 III.2.27.*
23. Y. Tripanagnostopoulos, P. Yianoulis, S. Papaefthimiou, M. Souliotis, Th. Nousia, *Cost effective asymmetric CPC solar collectors, Renewable Energy* 16 (1999) 628–631.
24. D.R. Mills, I.M. Bassett, G.H. Derrick, *Relative cost-effectiveness of CPC reflector designs suitable for evacuated absorber tube solar collectors, Solar Energy* 36 (3) (1986) 199–206.
25. M. Ronnelid, B. Perers, B. Karlsson, *Construction and testing of a large-area CPC-collector and comparison with a flat plate collector, Solar Energy* 57 (3) (1996) 177–184.
26. Πρόγραμμα προσομοίωσης "SAM – Solar Advisor Model", NREL(National Renewable Energy Laboratory), Sandia National Laboratory, U.S. Department of Energy (DOE), *Solar Energy Technologies Program (SETP)*, (<https://www.nrel.gov/analysis/sam/>)
27. Δεδομένα καιρού για αθήνα από EnergyPlus Energy simulation program, US Department of Energy, (http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=GRC/cname=Greece)