



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΙΔΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ
ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΠΩΝΗ ΦΩΤΕΙΝΗ

A.M. 02103060



Επιβλέπων: Κίμων Α. Αντωνόπουλος
Καθηγητής Πολυτεχνείου

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κίμωνα Αντωνόπουλου, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγηση και την επιστημονική του συμβολή στη διεκπεραίωση της εργασίας αυτής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την πολύτιμη και αμέριστη συμπαράσταση τους, καθώς και τους αγαπημένους μου φίλους για την πολύτιμη στήριξη τους.

Περίληψη

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετάται η δομή και η λειτουργία των διαφορετικών ειδών συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητη τόσο η θεωρητική μελέτη και περιγραφή της λειτουργίας τους, όσο και κάποια υπολογιστική προσέγγιση τους. Σε κάθε κεφάλαιο αναλύεται ένα διαφορετικό είδος συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη και στο τελευταίο κεφάλαιο περιγράφεται η παραμετρική μελέτη που έγινε σε ένα σύστημα παραβολικών συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	σελ. 1
2.	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ	
2.1	Εισαγωγή.....	σελ. 3
2.2	Ιστορία.....	σελ. 4
2.3	Περιγραφή της εγκατάστασης.....	σελ. 6
2.4	Περιγραφή των επιμέρους συνιστωσών.....	σελ. 8
2.4.1	Συλλέκτης.....	σελ. 8
2.4.2	Δέκτης.....	σελ. 10
2.4.3	Σύστημα παρακολούθησης του ήλιου.....	σελ. 11
2.4.3.1	Χαρακτηριστικές αστρονομικές παράμετροι.....	σελ. 11
2.4.3.2	Τρόποι προσανατολισμού και παρακολούθησης του ήλιου.....	σελ. 13
2.5	Ρευστό μεταφοράς θερμότητας.....	σελ. 22
2.6	Συστήματα θερμικής αποθήκευσης ενέργειας.....	σελ. 23
2.7	Άμεση παραγωγή ατμού.....	σελ. 27
2.8	Υβριδικοί σταθμοί άνθρακα.....	σελ. 28
2.9	ISCCS (Integrated Solar Combined Cycle System).....	σελ. 29
2.10	Απόδοση και απώλειες του συστήματος.....	σελ. 30
3.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ	
3.1	Εισαγωγή.....	σελ. 40
3.2	Ιστορία.....	σελ. 41
3.3	Περιγραφή της εγκατάστασης.....	σελ. 42
3.4	Περιγραφή των επιμέρους συνιστωσών.....	σελ. 44
3.4.1	Πεδίο του συλλέκτη.....	σελ. 44
3.4.2	Ηλιακός δέκτης.....	σελ. 49
3.4.2.1	Γενική περιγραφή δέκτη.....	σελ. 49
3.4.2.2	Ταξινόμηση των δεικτών.....	σελ. 50
3.4.2.2(α)	Με βάση τη γεωμετρική τους διαμόρφωση.....	σελ. 50

3.4.2.2(β) Με βάση τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας.....	σελ. 51
3.4.2.3 Δέκτης με σωληνώσεις.....	σελ. 53
3.4.2.4 Ογκομετρικός δέκτης.....	σελ. 56
3.4.2.5 Απόδοση και απώλειες δέκτη.....	σελ. 61
3.5 Περιγραφή των διαφορετικών τρόπων λειτουργίας.....	σελ. 64
3.5.1 Εισαγωγή.....	σελ. 64
3.5.2 Εγκαταστάσεις νερού /ατμού.....	σελ. 65
3.5.3 Εγκαταστάσεις τηγμένου άλατος.....	σελ. 68
3.5.4 Ογκομετρικοί δέκτες ατμοσφαιρικού αέρα.....	σελ. 71
3.5.5 Συστήματα ηλιακής προθέρμανσης του αέρα για αεριοστρόβιλο.....	σελ. 74

4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΙΣΚΟΥ / ΜΗΧΑΝΗΣ

4.1 Εισαγωγή.....	σελ. 75
4.2 Ιστορία.....	σελ. 76
4.3 Περιγραφή της εγκατάστασης.....	σελ. 81
4.4 Περιγραφή των επιμέρους συνιστωσών.....	σελ. 83
4.4.1 Συλλέκτης.....	σελ. 83
4.4.2 Δέκτης.....	σελ. 85
4.4.3 Θερμική μηχανή.....	σελ. 87
4.4.3.1 Γενική περιγραφή.....	σελ. 87
4.4.3.2 Μηχανή Stirling.....	σελ. 88
4.4.3.3 Μηχανή Brayton.....	σελ. 89
4.5 Εφαρμογές του συστήματος δίσκου / μηχανής.....	σελ. 91
4.5.1 Εφαρμογές διασυνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης.....	σελ. 91
4.5.2 Απομακρυσμένες αυτόνομες εφαρμογές.....	σελ. 92
4.5.3 Υβριδικές εφαρμογές.....	σελ. 92

5. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ FRESNEL

5.1 Εισαγωγή.....	σελ. 94
5.2 Περιγραφή λειτουργίας του συστήματος.....	σελ. 94

5.3	Θεωρητική παρουσίαση του συλλέκτη.....	σελ. 97
5.3.1	Άνοιγμα συλλέκτη, εμβαδό ανοίγματος συλλέκτη και μεικτή επιφάνεια πεδίου.....	σελ. 97
5.3.2	Οπτική απόδοση.....	σελ. 98
5.3.3	Θερμική απόδοση.....	σελ. 100
5.4	Σύγκριση μεταξύ συλλέκτη Fresnel και ενός συλλέκτη παραβολικών κοίλων.....	σελ. 103

6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

6.1	Εισαγωγή.....	σελ. 104
6.2	Στοιχεία Κατασκευής του συστήματος παραβολικών συγκεντρωτικών συλλεκτών.....	σελ. 104
6.3	Αναλυτική περιγραφή της μελέτης.....	σελ. 106
6.3.1	Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στην Αθήνα.....	σελ. 108
6.3.2	Ενεργειακό ισοζύγιο και υπολογισμός θερμοκρασίας του μέσου μεταφοράς θερμότητας.....	σελ. 110
6.4	Αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης.....	σελ. 116
6.4.1	Διαγράμματα για κάθε μία περίπτωση.....	σελ. 116
6.4.2	Συγκριτικά διαγράμματα.....	σελ. 121
6.5	Συμπεράσματα – σχόλια.....	σελ. 125

7.	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	σελ. 127
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	σελ. 129
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	σελ. 131

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει ένα τεράστιο ποσό ενέργειας στη Γη. Το συνολικό ποσό ενέργειας που ακτινοβολείται από τον ήλιο στην επιφάνεια της γης είναι ίσο με 10.000 φορές περίπου την ετήσια παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Ενώ η ηλιακή ενέργεια που φθάνει στη γη κατά τη διάρκεια τριών ημερών είναι περισσότερη απ' ό,τι το κατ' εκτίμηση σύνολο των ορυκτών καυσίμων στη γη. Κατά μέσο όρο, προσπίπτουν 1700 kWh σε κάθε τετραγωνικό μέτρο κάθε χρόνο.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να γίνει με δυο τρόπους. Ο πρώτος είναι με τη χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών συστημάτων και ο δεύτερος είναι τα συγκεντρωτικά ηλιακά θερμικά συστήματα. Στην παρούσα εργασία θα αναπτύξουμε τις διάφορες εφαρμογές και τεχνολογίες των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά αναμφισβήτητα θα συμβάλουν σημαντικά κατά τις αμέσως επόμενες δεκαετίες στην αποδοτική και ανανεώσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι τεχνολογίες ηλιακής συγκέντρωσης είναι διατάξεις που συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια εστιάζοντας την ηλιακή ακτινοβολία σ' ένα σημείο ή μια γραμμή εστίασης. Τα συστήματα Ηλεκτροπαραγωγής με Ηλιακή Συγκέντρωση (ΗΗΣ) βρίσκονται ήδη στο στάδιο της εμπορευματοποίησης, και μονάδες ισχύος πολλών MW παράγουν τη φθηνότερη ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως τα τελευταία 15 έτη. Τα τελικά στάδια ηλεκτροπαραγωγής με χρήση συστημάτων ΗΗΣ είναι όμοια με αυτά της συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής, καθώς η τελική διεργασία ενεργειακής μετατροπής βασίζεται στη χρήση ατμού ή αερίου για την περιστροφή στροβίλων η την κίνηση ενός εμβόλου σε μια μηχανή Stirling. Σε ένα σύστημα ΗΗΣ ο ατμός ή το θερμό αέριο παράγεται μέσω της συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Όλες οι τεχνολογίες ηλιακής θερμικής ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνουν έναν αριθμό βασικών σταδίων:

- Συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός συστήματος συλλεκτών.
- Συγκέντρωση (ή εστίαση) της ακτινοβολίας σε έναν δέκτη.
- Μετατροπή της από το δέκτη σε θερμική ενέργεια.
- Μεταφορά της θερμικής ενέργειας στο σύστημα ενεργειακής μετατροπής.
- Μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό.

Πολλά τέτοια συστήματα είναι δυνατά, τα οποία μάλιστα μπορούν να συνδυάζονται με άλλες ανανεώσιμες και μη τεχνολογίες σε υβριδικά συστήματα. Ωστόσο θεωρείται ότι οι τέσσερις πολλά υποσχόμενες αρχιτεκτονικές θερμικής ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την τεχνική που χρησιμοποιείται για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, είναι:

- οι παραβολικοί συλλέκτες,
- οι ηλιακοί πύργοι ισχύος,
- τα συστήματα δίσκου
- ο συλλέκτης Fresnel.

2. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Η πιο δοκιμασμένη ηλιακή θερμοηλεκτρική τεχνολογία αυτή την περίοδο είναι η τεχνολογία των κυλινδρικών παραβολικών συλλεκτών. Όπως φαίνεται και παρακάτω, το σχήμα τους είναι παραβολικό και στην εστία της παραβολής υπάρχει σωλήνας/δέκτης όπου εστιάζεται η ηλιακή ενέργεια. Μεγάλα πεδία συλλεκτών κοίλων παραβόλων παρέχουν τη θερμική ενέργεια για την παραγωγή ατμού από ένα σύστημα στροβίλου/γεννήτριας κύκλου Rankine. Εννέα μεγάλες εμπορικού επιπέδου ηλιακές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, η πρώτη εκ των οποίων έχει τεθεί σε εφαρμογή στην έρημο της Καλιφόρνιας Mojave από το 1984. Αυτές οι εγκαταστάσεις, που συνεχίζουν να λειτουργούν σε καθημερινή βάση, κυμαίνονται σε μέγεθος από 14 έως 80 MW, ενώ το συνολικό εγκατεστημένο δυναμικό τους είναι 354 MW. [14]



Σχήμα 2.1: Πεδίο παραβολικών συλλεκτών

2.2 Ιστορία

Η οργανωμένη, μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη των ηλιακών συλλεκτών άρχισε στις ΗΠΑ στα μέσα της δεκαετίας του '70 υπό την Διοίκηση Έρευνας και Ανάπτυξης της Ενέργειας (ERDA, Research and Development Administration) και συνεχίστηκε με την καθιέρωση του αμερικάνικου Οργανισμού Ενέργειας (DOE, Department of Energy) το 1978. Συλλέκτες παραβολικών κοίλων ικανοί για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 500°C (932°F) αναπτύχθηκαν αρχικά σε βιομηχανικές εφαρμογές. Μεγάλο μέρος της πρόωρης ανάπτυξης διεξάχθηκε ή υποστηρίχθηκε μέσω των εθνικών εργαστηρίων Sandia στο Albuquerque του Νέου Μεξικού. Τέθηκαν σε λειτουργία πολυάριθμες εφαρμογές, των οποίων η περιοχή των συλλεκτών κυμαίνεται σε μέγεθος από μερικά εκατοντάδες έως και 5000 m². Οι εταιρείες Acurex, SunTec, και Solar Kinetics αποτέλεσαν τους βασικούς κατασκευαστές παραβολικών κοίλων στις Ηνωμένες Πολιτείες κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

Η ανάπτυξη των παραβολικών κοίλων πραγματοποιήθηκε επίσης στην Ευρώπη και κατέληξε με την κατασκευή από την Διεθνή Υπηρεσία Ενέργειας (International Energy Agency, IEA) του συγκροτήματος Μικρό Πρόγραμμα Συστημάτων Ηλιακής Ενέργειας/Διανεμημένο Συστήμα Συλλεκτών (Small Solar Power Systems Project/Distributed Collector System, SSPS/DCS) της IEA στο Tabernas, στην Ισπανία, το 1981. Το συγκρότημα αυτό απαρτίστηκε από δύο ηλιακά πεδία παραβολικών κοίλων με μια συνολική επιφάνεια ανοίγματος καθρεφτών 7602 m² (η έννοια της επιφάνειας ανοίγματος γίνεται ευκολότερα κατανοητή από το σχήμα 2.8). Τα πεδία χρησιμοποίησαν συλλέκτες μονού άξονα παρακολούθησης του ήλιου της εταιρείας Acurex και συλλέκτες διπλού άξονα παρακολούθησης της γερμανικής εταιρείας M.A.N. Το 1982, η εταιρεία Luz International Limited (Luz) ανέπτυξε ένα συλλέκτη παραβολικών κοίλων για βιομηχανικές εφαρμογές που βασίστηκε κατά ένα μεγάλο μέρος στην εμπειρία που αποκτήθηκε από την DOE/Sandia και τα προγράμματα SSPS. [14]

Οι υπεύθυνοι κατασκευής και ανάπτυξης παρόμοιων συστημάτων παραβολικών κοίλων στη δεκαετία του '70 και τη δεκαετία του '80, συνάντησαν γενικά δύο εμπόδια στο επιτυχές μάρκετινγκ των τεχνολογιών τους. Κατ' αρχάς, απαιτούνταν μια σχετικά υψηλή προσπάθεια για μάρκετινγκ και τεχνικές μελέτες ακόμη και για τα μικρά προγράμματα. Δεύτερον, οι περισσότεροι πιθανοί βιομηχανικοί πελάτες ακολουθούσαν βραδυκίνητες διαδικασίες κατά τη λήψη των

αποφάσεων. Διαδικασίες που συχνά οδηγούσαν σε μια αρνητική απόφαση εφόσον βέβαια είχαν ήδη σπαταληθεί σημαντικές προσπάθειες.

Το 1983, η εταιρεία Southern California Edison (SCE) υπέγραψε μια συμφωνία με την εταιρία Acurex για την κατασκευή μιας ηλιακής εγκατάστασης παραβολικών κοίλων. Η Acurex δεν κατάφερε να συγκεντρώσει το κεφάλαιο χρηματοδότησης για το πρόγραμμα. Συνεπώς, η SCE διαπραγματεύτηκε παρόμοιες συμφωνίες με τη Luz για την κατασκευή των εννέα ηλιακών μονάδων παραβολικών κοίλων στην έρημο Mojave της Καλιφόρνιας. Οι εγκαταστάσεις αυτές, που είναι γνωστές ως SEGES, κατασκευάστηκαν μεταξύ του 1984 και του 1991 και αποτέλεσαν το πρώτο μεγάλο μεγέθους σύστημα παραβολικών κοίλων. Το μέγεθος των πρώτων μονάδων ήταν 30 MW, ενώ αργότερα αυξήθηκε σε 80MW. Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των εννέα εγκαταστάσεων SEGES που χτίστηκαν από την Luz.

Το 1991, η Luz κήρυξε πτώχευση όταν ήταν ανήμπορη πλέον να εξασφαλίσει τη χρηματοδότηση για την κατασκευή της δέκατης εγκατάστασης SEGES. Αν και πολλοί παράγοντες συνέβαλαν στη διάλυση της Luz, το βασικό πρόβλημα ήταν ότι το κόστος της τεχνολογίας αυτής ήταν πάρα πολύ υψηλό ώστε να ανταγωνιστεί την συμβατική αγορά ενέργειας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι όλες οι εγκαταστάσεις SEGES πωλήθηκαν σε ομάδες επενδυτών ως ανεξάρτητα προγράμματα ενέργειας και συνεχίζουν να λειτουργούν σήμερα. [14]

Εγκαταστάσεις SEGES	Πρώτος Χρόνος Λειτουργίας	Ενεργό Δυναμικό (MWe)	Ηλιακό Πεδίο Θερμοκρασία Εξόδου (°C/°F)	Ηλιακό Πεδίο Εμβαδόν (m ²)	Απόδοση Ηλιακού Στροβίλου (%)	Απόδοση Στροβίλου Ορυκτών Καυσίμων (%)	Ετήσια Έξοδος (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

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων SEGES 1-9

αποτέλεσμα την συμπύκνωση του ατμού σε κορεσμένο υγρό. Το ψυχρό νερό του συμπυκνωτή ρέει σε κλειστό κύκλωμα, ψυχόμενο σε πύργους ψύξης, οι οποίοι είναι και αυτοί εναλλάκτες θερμότητας με ψυκτικό μέσον τον αέρα του περιβάλλοντος. Το κορεσμένο υγρό νερό από το συμπυκνωτή συμπιέζεται από τις αντλίες τροφοδοσίας του λέβητα και οδηγείται στο διαχωριστή ατμού, απ' όπου η υγρή φάση του νερού οδηγείται στην γεννήτρια του ατμού και κλείνει έτσι ο κύκλος του νερού.

Οι εγκαταστάσεις των παραβολικών συλλεκτών έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια ως πρωταρχική πηγή για να παραγάγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι εγκαταστάσεις μπορούν να λειτουργήσουν σε πλήρη ισχύ χρησιμοποιώντας μόνο την επαρκή ηλιακή είσοδο. Κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, οι εγκαταστάσεις λειτουργούν συνήθως για 10 έως 12 ώρες ημερησίως σε ονομαστική ηλεκτρική έξοδο. Εντούτοις, μέχρι σήμερα, όλες οι εγκαταστάσεις είναι υβριδικές. Δηλαδή έχουν έναν εφεδρικό λέβητα ατμού, που λειτουργεί με ορυκτά καύσιμα και χρησιμοποιείται για να συμπληρώσει την ηλιακή έξοδο κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης παράλληλα με τη γεννήτρια ατμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικοί βοηθητικοί αναθερμαντές ορυκτών καυσίμων. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον ατμολέβητα ορυκτών καυσίμων είναι περιορισμένο σε κάποια λογικά όρια. Τα όρια αυτά διαφέρουν από χώρα σε χώρα: 25% στη Καλιφόρνια, 15% στην Ισπανία, κανένα όριο στην Αλγερία. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται επίσης ότι η θερμική αποθήκευση είναι μια προαιρετική δυνατότητα που μπορεί να προστεθεί για την κάλυψη των αναγκών τροφοδοσίας με ηλεκτρική ενέργεια. [18]

2.4 Περιγραφή των Επιμέρους Συνιστωσών

2.4.1 Συλλέκτης

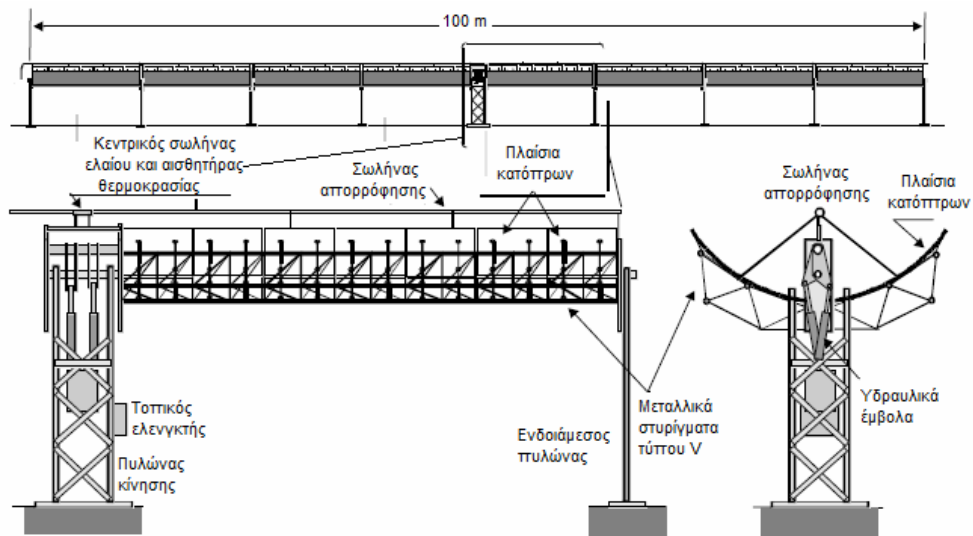
Ο ηλιακός συλλέκτης (ή αλλιώς ανακλαστήρας-συγκεντρωτής-ηλιοστάτης) είναι το βασικό συστατικό του συστήματος. Αποτελείται από την ανακλαστική επιφάνεια (κάτοπτρα-καθρέπτες) που κατευθύνει τις ηλιακές ακτίνες στο δέκτη, μια μεταλλική δομή στήριξης, το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου και το σύστημα ελέγχου. Ο πίνακας 2.2 παρουσιάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συλλεκτών από τις εταιρείες Acurex, M.A.N. (παρακολούθηση μονού άξονα) και Luz (συλλέκτες τριών γενεών). Η γενική τάση ήταν να κατασκευαστούν μεγαλύτεροι συλλέκτες με υψηλότερους λόγους συγκέντρωσης (ο λόγος του ανοίγματος της ανακλαστικής επιφάνειας προς τη διάμετρο του δέκτη) για να διατηρηθεί η θερμική απόδοση των συλλεκτών σε υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου του ρευστού.

Συλλέκτης	Acurex 3001	M.A.N. M480	Luz LS-1	Luz LS-2		Luz LS-3
Έτος	1981	1984	1984	1985	1988	1989
Επιφάνεια (m ²)	34	80	128	235		545
Άνοιγμα (m)	1.8	2.4	2.5	5		5.7
Μήκος (m)	20	38	50	48		99
Διάμετρος δέκτη (m)	0.051	0.058	0.042	0.07		0.07
Λόγος συγκέντρωσης	36:1	41:1	61:1	71:1		82:1
Οπτική απόδοση	0.77	0.77	0.734	0.737	0.764	0.8
Απορροφητικότητα δέκτη	0.96	0.96	0.94	0.94	0.99	0.96
Ανακλαστικότητα κατόπτρου	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94
Εκπομπή δέκτη	0.27	0.17	0.3	0.24	0.19	0.19
@ Θερμοκρασία (°C/°F)			300/572	300/572	350/662	350/662
Θερμοκρ. λειτουργίας (°C/°F)	295/563	307/585	307/585	349/660	390/734	390/734

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά ηλιακού συλλέκτη

Για τις μεγάλες ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας έχουν επικρατήσει δύο σχέδια παραβολικών συλλεκτών. Αυτά είναι το LS-3, που χρησιμοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις SEGS των 80 MW, και το EuroTrough (ET-100). Και τα δύο έχουν συνολικό μήκος 100 m και πλάτος 5,76 m. Η βασική διαφορά μεταξύ αυτών των δύο σχεδίων βρίσκεται στη μεταλλική δομή στήριξης των κατόπτρων, ανάλογα με την οποία ορίζεται και η μέγιστη ροπή στρέψης κατά την

παρακολούθηση του ήλιου (και συνεπώς η οπτική απόδοση). Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η δομή του συλλέκτη LS-3.

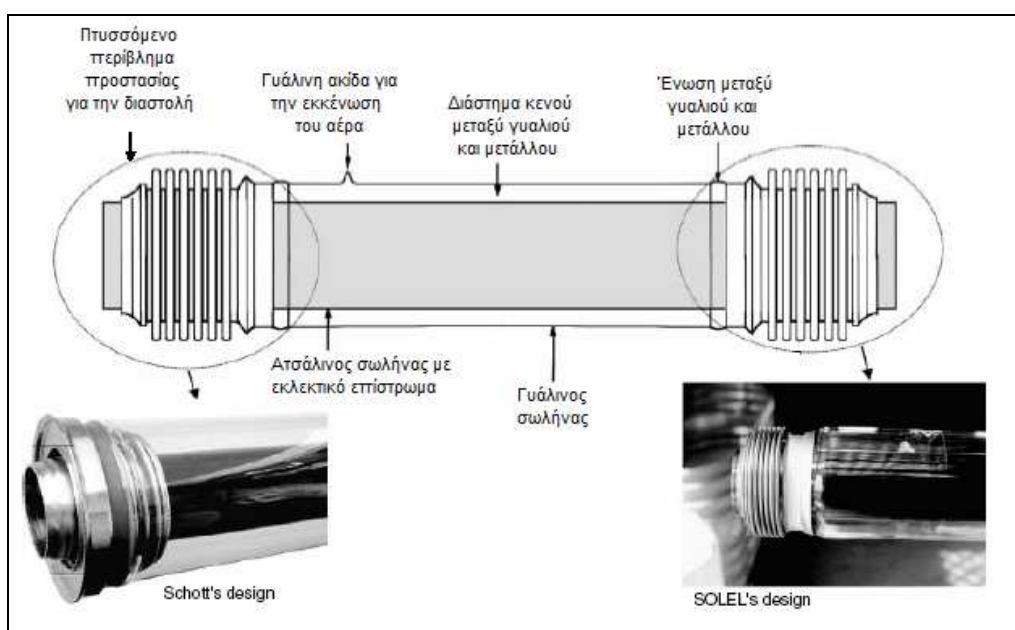


Σχήμα 2.3: Συναρμολόγηση του συλλέκτη LUZ LS-3

Το τζάμι κατασκευής των κατόπτρων είναι επαργυρωμένο στο πίσω τμήμα του και καλυμμένο με διάφορα προστατευτικά επιστρώματα. Υπάρχουν και άλλα είδη καθρεφτών, όπως είναι οι καθρέφτες στιλβωμένου αλουμινίου και οι επιμεταλλωμένοι ακρυλικοί καθρέφτες. Δεν προτιμούνται όμως καθώς έχουν μικρότερη αντοχή στη φθορά του χρόνου και μικρότερο ποσοστό αντανάκλασης. Κάτοπτρα με υψηλή ποιότητα επιτρέπουν στο 97% των ανακλώμενων ακτίνων να προσπίπτουν στο γραμμικό δέκτη. [14]

2.4.2 Δέκτης

Ο δέκτης είναι από τους βασικούς παράγοντες για την επίτευξη υψηλής απόδοσης μετατροπής (από ηλιακή ενέργεια σε θερμική). Έχει κυλινδρικό σχήμα και αποτελείται από δύο ομοαξονικούς σωλήνες. Ο εσωτερικός σωλήνας, μέσα στον οποίο ρέει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, αποτελεί ουσιαστικά το σωλήνα απορρόφησης. Είναι χαλύβδινος, έχει πάχος συνήθως 7cm και η εξωτερική του επιφάνεια είναι επιστρωμένη με κατάλληλα κεραμικά που διασφαλίζουν τη μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής θερμότητας. Ο εξωτερικός σωλήνας είναι γυάλινος και έχει μια «αντι-κατοπτρική» επίστρωση και στην εσωτερική και στην εξωτερική του επιφάνεια. Μεταξύ των δύο σωλήνων επικρατούν συνθήκες απόλυτου κενού. Το κενό χρησιμεύει κατά κύριο λόγο για την προστασία του εσωτερικού σωλήνα και για τη μείωση των απωλειών θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Λεπτομέρεια ενός τυπικού σωλήνα απορρόφησης φαίνεται στο σχήμα 2.4. [5]



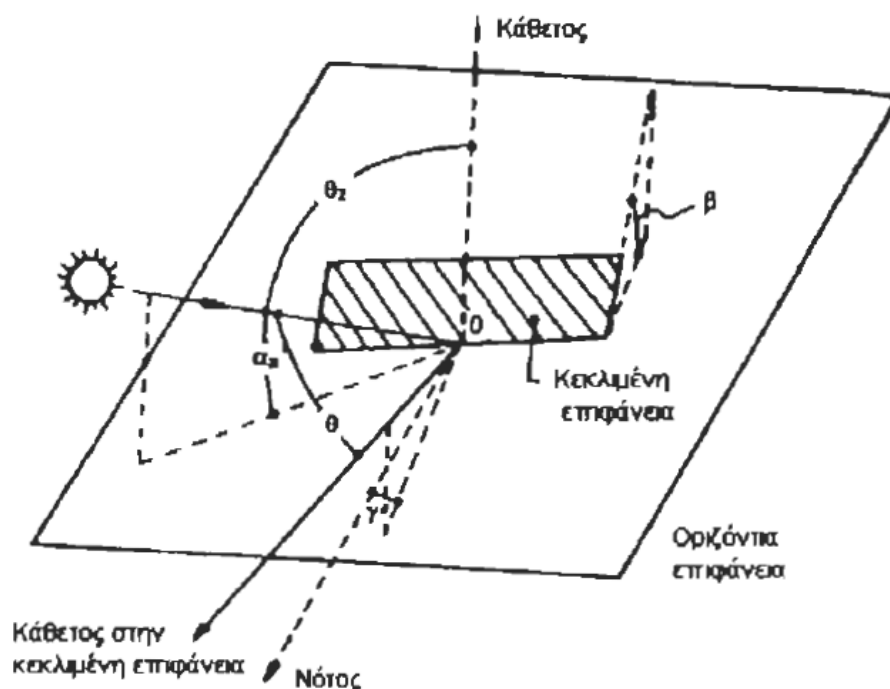
Σχήμα 2.4: Τυπικός σωλήνας απορρόφησης

Λόγω κατασκευαστικών περιορισμών, το μέγιστο μήκος για κάθε ξεχωριστό σωλήνα απορρόφησης είναι λιγότερο από 6 m. Ενώ, το συνολικό μήκος δέκτη για μια μόνο σειρά παραβολικών κοίλων κυμαίνεται συνήθως από 25 ως 150 m. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν μόνο δύο κατασκευαστές σωλήνων απορρόφησης: η γερμανική εταιρεία Schott και η ισραηλινή SOLEL. [5]

2.4.3 Σύστημα Παρακολούθησης του Ήλιου

2.4.3.1 Χαρακτηριστικές Αστρονομικές Παράμετροι

Για την καλύτερη κατανόηση των εξισώσεων και του τρόπου προσανατολισμού των συλλεκτών, είναι σημαντικό να γίνει μια αναφορά σχετικά με τις αστρονομικές χαρακτηριστικές παραμέτρους και τη γεωμετρία της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [7]



Σχημα 2.5: Απεικόνιση της γεωμετρίας της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνουμε τη γωνία πρόσπτωσης θ , την απόκλιση δ , την αζιμουθιακή γωνία επιφάνειας γ , την ωριαία γωνία ω και την κλίση του συλλέκτη β .

Γεωγραφικό πλάτος φ ενός τόπου είναι η γωνιακή θέση του βόρεια ή νότια από τον ισημερινό. Το γεωγραφικό πλάτος λαμβάνεται θετικό για το βόρειο ημισφαίριο και κυμαίνεται από -90° ως $+90^\circ$.

Η απόκλιση δ είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά την ηλιακή μεσημβρία σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού. Κυμαίνεται από $+23.45^\circ$ την 21^η Ιουνίου ως -23.45° την 21^η Δεκεμβρίου και γίνεται ίση με μηδέν τις ημέρες της ισημερίας. Η απόκλιση υπολογίζεται από την σχέση του Cooper:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad \text{όπου } n \text{ είναι η μέρα του έτους.} \quad (2.α)$$

Η αζιμουθιακή γωνία επιφάνειας γ , είναι η απόκλιση της καθέτου που άγεται στην επιφάνεια από τον τοπικό μεσημβρινό. Κυμαίνεται από -180° ως $+180^\circ$ και λαμβάνεται θετική για δυτικό προσανατολισμό και αρνητική για ανατολικό.

Η ωριαία γωνία ω είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, λόγω της περιστροφής της γης κατά 15° την ώρα γύρω από τον άξονά της. Για τις προ μεσημβρίας ώρες λαμβάνεται αρνητική και για τις μετά μεσημβρίας ώρες λαμβάνεται θετική.

Η κλίση β είναι η γωνία που σχηματίζεται από την επιφάνεια του συλλέκτη με το οριζόντιο επίπεδο.

Η γωνία πρόσπτωσης θ είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στη διεύθυνση του ήλιου και της καθέτου στην επιφάνεια του συλλέκτη. Δίνεται από:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \varphi (\sin \delta \cos \beta + \cos \delta \cos \gamma \cos \omega \sin \beta) \\ &+ \cos \varphi (\cos \delta \cos \omega \cos \beta - \sin \delta \cos \gamma \sin \beta) \\ &+ \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \sin \beta \end{aligned} \quad (2.β)$$

Είναι προφανές ότι για $\beta=90^\circ$:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \varphi (0 + \cos \delta \cos \gamma \cos \omega \cdot 1) \\ &+ \cos \varphi (0 - \sin \delta \cos \gamma \cdot 1) \\ &+ \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \cdot 1 \end{aligned}$$

$$\text{και} \quad \cos \theta = \sin \varphi \cos \delta \cos \gamma \cos \omega - \cos \varphi \sin \delta \cos \gamma + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \quad (2.γ)$$

Επίσης για $\beta=0^\circ$:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \sin \varphi (\cos \delta \cos \omega \cdot 1 + 0) \\ &+ \cos \varphi (\cos \delta \cos \omega \cdot 1 - 0) \\ &+ 0\end{aligned}$$

$$\text{και } \cos \theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (2.δ)$$

Στην περίπτωση αυτή ($\beta=0^\circ$), η γωνία πρόσπτωσης θ είναι η ζενίθια γωνία θ_z όπου στους παρακάτω υπολογισμούς ονομάζεται γωνία ηλιακού ύψους α_α .

Στο σημείο αυτό εισάγουμε την χαρακτηριστική παράμετρο ηλιακής γωνίας αζιμουθίου γ_s . Η γωνία αυτή σχηματίζεται στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ νότου και της παραβολής του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο και δίνεται από τη σχέση [7], [1]:

$$\cos \gamma_s = (\cos \theta_z \sin \varphi - \sin \delta) / \sin \theta_z \cos \varphi \quad (2.ε)$$

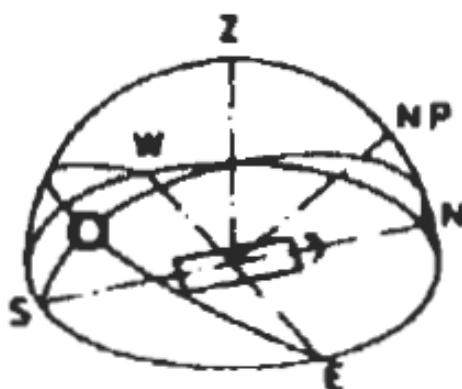
$$\text{και } \sin \gamma_s = \cos \theta_z \sin \varphi - \sin \delta .$$

2.4.3.2 Τρόποι Προσανατολισμού και Παρακολούθησης του Ηλίου

Ένας κυλινδρικός παραβολικός συλλέκτης είναι προσανατολισμένος με τον εστιακό άξονά του που δείχνει είτε ανατολικά - δυτικά, είτε βόρεια - νότια. Στον προσανατολισμό ανατολής - δύσης, ο εστιακός άξονας είναι οριζόντιος, ενώ στον προσανατολισμό βόρεια - νότια, ο εστιακός άξονας μπορεί να είναι οριζόντιος ή να έχει κάποια κλίση. Οι διάφοροι τρόποι παρακολούθησης της ακτινοβολίας που υιοθετούνται, είναι οι ακόλουθοι : [7]

Τρόπος I

Ο εστιακός άξονας είναι οριζόντιος και με προσανατολισμό ανατολικά – δυτικά. Ο συλλέκτης περιστρέφεται κατά οριζόντιο ανατολικό – δυτικό άξονα και ρυθμίζεται μία φορά κάθε ημέρα έτσι ώστε οι ακτίνες του ηλίου να είναι κάθετες στο δέκτη του συλλέκτη το ηλιακό μεσημέρι για συγκεκριμένη ημέρα.



Σχήμα 2.6: Τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας I

Σε αυτή την περίπτωση, ο δέκτης είναι μια υποθετική επιφάνεια με $\gamma = 0^\circ$ ή $\gamma = 180^\circ$. Η περίπτωση όπου $\gamma = 0^\circ$ εμφανίζεται όταν $(\varphi - \delta) > 0$ και η περίπτωση όπου $\gamma = 180^\circ$, εμφανίζεται όταν $(\varphi - \delta) < 0$. Προκειμένου να βρεθεί η κλίση β του δέκτη, έχουμε :

$$\beta = (\varphi - \delta) > 0 \text{ για } \gamma = 0^\circ \quad (2.1)$$

$$\beta = (\varphi - \delta) < 0 \text{ για } \gamma = 180^\circ \quad (2.2)$$

Η γωνία της πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο δέκτη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας λαμβάνεται τοποθετώντας τις εξισώσεις (2.1) και (2.2) στην (2.β). Για την περίπτωση όπου $\gamma = 0^\circ$, δηλαδή επιφάνεια με κλίση προς νότο έχουμε :

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \\ &+ \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \omega \end{aligned} \quad (2.2.a)$$

ενώ για $\gamma = 180^\circ$, δηλαδή επιφάνεια με κλίση προς βορά, λαμβάνουμε τη σχέση :

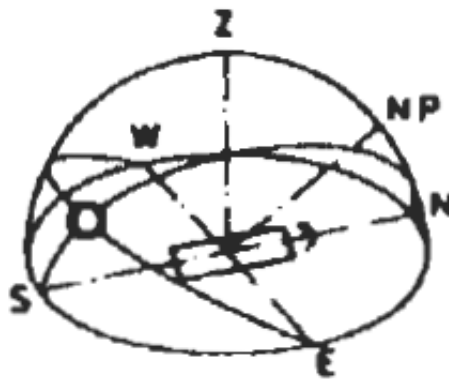
$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \cos \beta + \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \\ &+ \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega - \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \omega \end{aligned} \quad (2.2.\beta)$$

Οπότε και στις δυο περιπτώσεις:

$$\cos \theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cdot \cos \omega \quad (2.3)$$

Τρόπος II

Ο εστιακός άξονας είναι οριζόντιος και προσανατολίζεται ανατολικά – δυτικά. Ο συλλέκτης περιστρέφεται κατά ανατολικό – δυτικό οριζόντιο άξονα και ρυθμίζεται συνεχώς έτσι ώστε οι ακτίνες του ηλίου να έχουν πάντα την ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης με το δέκτη.



Σχήμα 2.7: Τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας II

Σε αυτή την περίπτωση, επίσης υποθέτουμε ότι ο δέκτης είναι μια επιφάνεια με $\gamma = 0^\circ$ ή $\gamma = 180^\circ$. Προκειμένου να βρεθεί η σχέση έτσι ώστε ο όρος θ να είναι ελάχιστος, διαφορίζουμε το δεξιό μέλος της προκύπτουσας εξίσωσης (2.2.α) ως προς β και το εξισώνουμε με μηδέν. Κατά συνέπεια, παίρνουμε :

$$\tan(\varphi - \beta) = \tan \delta / \cos \omega \quad \text{για } \gamma = 0^\circ \quad (2.4\alpha)$$

$$\tan(\varphi + \beta) = \tan \delta / \cos \omega \quad \text{για } \gamma = 180^\circ \quad (2.4\beta)$$

Οι εξισώσεις (2.4α) και (2.4β) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση της κλίσης του δέκτη. Η εξίσωση (2.4α) που αντιστοιχεί σε γωνία $\gamma = 0^\circ$ χρησιμοποιείται, εάν το μέγεθος της γωνίας αζιμουθίου γ_s είναι μικρότερο από 90° , ενώ η εξίσωση (2.4β) που αντιστοιχεί σε $\gamma = 180^\circ$ χρησιμοποιείται εάν το μέγεθος της γωνίας αζιμουθίου είναι μεγαλύτερο από 90° .

Η έκφραση για την αντίστοιχη ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης λαμβάνεται με αντικατάσταση της εξίσωσης (3.4α) και (3.4β) στην εξίσωση (3.β). Και για τις δύο περιπτώσεις, λαμβάνουμε :

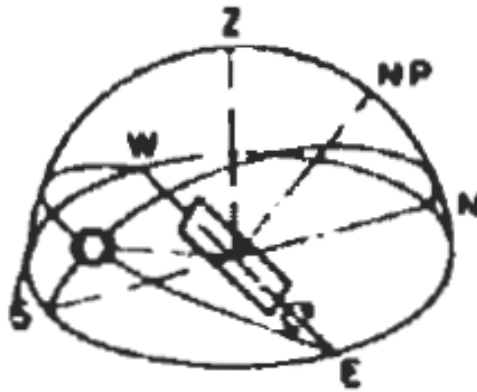
$$\cos \theta = \left(1 - \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega\right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Η κλίση αυτής της επιφάνειας δίνεται από:

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos \gamma_s|$$

Τροπος III

Στην περίπτωση αυτή ο εστιακός άξονας έχει προσανατολισμό βόρεια – νότια και είναι οριζόντιος. Ο συλλέκτης περιστρέφεται ως προς τον οριζόντιο άξονα βόρεια-νότια και ρυθμίζεται συνεχώς έτσι ώστε οι ακτίνες του ηλίου να έχουν πάντα την ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης με το δέκτη.



Σχήμα 2.8: Τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας ΙΙΙ.

Σε αυτή την περίπτωση, η γωνία αζιμουθίου γ είναι $+90^\circ$ πριν το μεσημέρι και -90° μετά το μεσημέρι. Κατά συνέπεια, πριν το μεσημέρι η εξίσωση (2.β) γίνεται:

$$\cos \theta = (\sin \varphi \cdot \sin \delta \cdot \cos \beta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \cdot \cos \beta + \cos \delta \cdot \sin \omega \cdot \sin \beta \quad (2.6)$$

Προκειμένου να βρεθεί η κλίση έτσι ώστε η γωνία θ να είναι ελάχιστη, έχουμε:

$$\tan \beta = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega} \quad (2.7)$$

Η εξίσωση (2.7) χρησιμοποιείται για την εύρεση της κλίσης του δέκτη οποιαδήποτε στιγμή πριν το μεσημέρι. Η έκφραση για την αντίστοιχη ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης λαμβάνεται με την αντικατάσταση της εξίσωσης (2.7) στην εξίσωση (2.6).

$$\cos \theta = \left[(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega)^2 + \cos^2 \delta \sin^2 \omega \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

όπου $(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) = \cos \theta_z$,

$$\text{οπότε} \quad \cos \theta = \left[\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \sin^2 \omega \right]^{1/2} \quad (2.8\alpha)$$

Μετά το μεσημέρι, δηλαδή για $\gamma = -90^\circ$, έχουμε:

$$\cos \theta = (\sin \varphi \sin \delta \cos \beta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \cos \beta - \cos \delta \sin \omega \sin \beta$$

$$\text{Άρα} \quad \cos \theta = \left(\cos^2 \theta_z - \cos^2 \delta \sin^2 \omega \right)^{1/2} \quad (2.8\beta)$$

και η κλίση για την ελάχιστη γωνία θ είναι :

$$\tan \beta = \frac{-\cos \delta \sin \omega}{\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega} \quad (2.9)$$

Η έκφραση του $\cos \theta$ λαμβάνεται η ίδια.

Τροπος IV

Ο εστιακός άξονας βλέπει προς βορρά – νότο και έχει σταθερή γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος. Κατά συνέπεια, είναι παράλληλος στον άξονα της γης. Αυτός ο προσανατολισμός αναφέρεται μερικές φορές ως πολικό υποστήριγμα. Ο συλλέκτης περιστρέφεται κατά άξονα παράλληλο στον άξονα της γης με γωνιακή ταχύτητα ίση και αντίθετη με τη διεύθυνση περιστροφής της γης (15° ανά ώρα).

Ο δέκτης ρυθμίζεται έτσι ώστε να βλέπει προς το νότο. Κατά συνέπεια, θέτοντας όπου $\beta = \varphi$, $\gamma = 0$ και $\omega = 0$ στη σχέση (2.β), παίρνουμε:

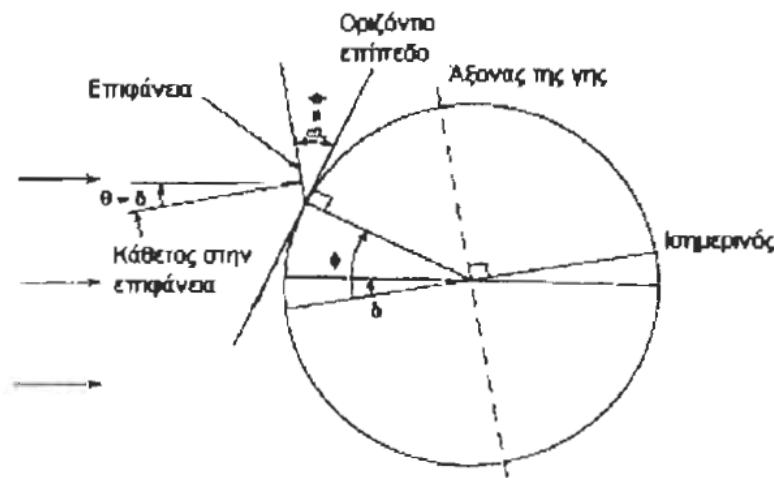
$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \varphi (\sin \delta \cos \beta + \cos \omega \sin \beta) + \cos \varphi (\cos \delta \cos \omega \cos \beta - \sin \delta \sin \beta) \\ &= \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos \omega \cos(\varphi - \beta) \end{aligned}$$

$$\text{Άρα} \quad \theta = \delta \quad (2.10)$$

Και η κλίση του συλλέκτη είναι:

$$\tan \beta = \frac{\tan \varphi}{\cos \gamma} \quad (2.11)$$

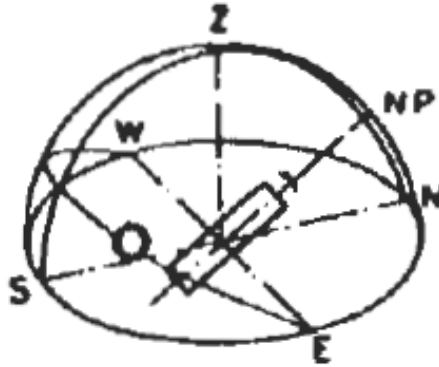
Αυτό φαίνεται επίσης από το σχήμα 2.9 στο οποίο ο κύκλος αντιπροσωπεύει το γεωγραφικό μήκος μέσω της θέσης του συλλέκτη. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, δεδομένου ότι ο συλλέκτης περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με την περιστροφή της γης και για έναν άξονα παράλληλο στον άξονά της, ισχύει η σχέση (2.10).



Σχήμα 2.9: Τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας IV. Η γωνία πρόσπτωσης θ είναι ίση με την απόκλιση δ .

Τρόπος V

Ο εστιακός άξονας βλέπει προς βορρά – νότο ενώ είναι κεκλιμένος. Ο συλλέκτης περιστρέφεται συνεχώς (αλλά όχι με μια σταθερή γωνιακή ταχύτητα) ως προς έναν άξονα παράλληλο στον εστιακό άξονα, ή και ως προς έναν οριζόντιο άξονα, κάθετο στον εστιακό, ενώ ρυθμίζεται έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν πάντα στο δέκτη υπό γωνία.



Σχημα 2.10: Τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας V.

Σε αυτή την περίπτωση, ισχύει προφανώς ότι $\cos\theta = 1$. Έτσι είναι εύκολο να δειχτεί ότι κατά το ηλιακό μεσημέρι ισχύει :

$$\beta = |\varphi - \delta| .$$

Οι συλλέκτες περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα για να παρακολουθούν τον ήλιο καθώς κινείται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συνήθως ο άξονας περιστροφής είναι προσανατολισμένος είτε προς βορρά-νότο είτε προς ανατολή-δύση, εντούτοις, οποιοσδήποτε άλλος προσανατολισμός θα ήταν επίσης εφικτός. Ο προσανατολισμός του συλλέκτη μερικές φορές καθορίζεται από τη μορφή και τον προσανατολισμό της περιοχής όπου αυτός εγκαθίσταται. Επηρεάζει τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων πάνω στο επίπεδο του ανοίγματος, το οποίο στη πορεία έχει επιπτώσεις στην απόδοση του συλλέκτη. Οι εποχιακές διακυμάνσεις στην έξοδο του προσανατολισμένου κατά βορρά-νότο συλλέκτη μπορούν να είναι αρκετά ευρείες. Τρεις έως τέσσερις φορές περισσότερη ενέργεια παράγεται καθημερινά κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών σε σχέση με το χειμώνα, ανάλογα βέβαια με το γεωγραφικό πλάτος και τις τοπικές καιρικές συνθήκες κάθε εγκατάστασης. Οι εποχιακές αυξομειώσεις στην ενεργειακή επίδοση είναι πολύ μικρότερες για έναν προσανατολισμό ανατολής-δύσης, συνήθως λιγότερο από 50%. Εντούτοις, ένας άξονας παρακολούθησης του ήλιου με προσανατολισμό βορρά-νότου παρέχει περισσότερη ενέργεια σε ετήσια βάση. Η καθημερινή αυξομείωση στη γωνία πρόσπτωσης είναι πάντα μεγαλύτερη για τον άξονα ανατολής-δύσης, με τις μέγιστες τιμές κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου και με ελάχιστη γωνία 0° κατά την ηλιακή μεσημβρία. [6]

Επομένως, ο προσανατολισμός του άξονα περιστροφής είναι πολύ σημαντικός για την απόδοση και η επιλογή του καλύτερου προσανατολισμού εξαρτάται από τις απαντήσεις στις ακόλουθες ερωτήσεις:

- Ποια εποχή του έτους θα πρέπει το ηλιακό πεδίο να παράγει την περισσότερη ενέργεια; Εάν απαιτείται περισσότερη ενέργεια το καλοκαίρι απ' ό,τι το χειμώνα, ο καταλληλότερος προσανατολισμός είναι βορρά-νότου.
- Είναι καλύτερα η ενέργεια να διανέμεται ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια όλου του έτους, παρόλο που το χειμώνα η παραγωγή είναι σημαντικά μικρότερη απ' ό,τι το καλοκαίρι; Εάν η απάντηση είναι ναι, ο καλύτερος προσανατολισμός είναι ανατολής-δύσης.
- Το ηλιακό πεδίο αναμένεται να παρέχει παρόμοια θερμική ενέργεια το καλοκαίρι και το χειμώνα; Εάν η απάντηση είναι ναι, ο κατάλληλος προσανατολισμός είναι ανατολής-δύσης.

Αυτή τη στιγμή όλα τα εμπορικά σχέδια παραβολικών κούλων χρησιμοποιούν ένα μονό άξονα στο σύστημα παρακολούθησης. Μολονότι στο παρελθόν έχουν σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και εξεταστεί σχέδια παρακολούθησης με διπλό άξονα, τα αποτελέσματα αξιολόγησης δείχνουν ότι είναι λιγότερο αποδοτικά οικονομικά. Η ύπαρξη ενός συστήματος δύο αξόνων επιτρέπει στο συλλέκτη να παρακολουθεί τον ήλιο με μια γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων που είναι πάντα ίση με 0° (μειώνοντας έτσι τις οπτικές απώλειες και αυξάνοντας παράλληλα το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμο στο επίπεδο του ανοίγματος), αλλά οι σχετικές θερμικές απώλειες και οι δαπάνες συντήρησης είναι σημαντικά υψηλότερες.

Σημαντικός περιοριστικός παράγοντας για την ομαλή λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης αποτελεί η ταχύτητα του ανέμου. Ο συλλέκτης είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί κανονικά για ανέμους μέχρι 40 km/h, ενώ για ανέμους μέχρι 56 km/h λειτουργεί αλλά με μειωμένη ακρίβεια σε κάποιο βαθμό. Η μέγιστη ταχύτητα ανέμου που αντέχει η κατασκευή του συλλέκτη είναι 113 km/h. [6]

2.5 Ρευστό Μεταφοράς Θερμότητας

Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιούνται συνήθως θερμικά έλαια για θερμοκρασίες πάνω από 200°C, επειδή σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας το νερό θα προκαλούσε υψηλές πιέσεις μέσα στους σωλήνες του δέκτη. Αυτή η υψηλή πίεση θα απαιτούσε ισχυρότερες συνδέσεις και σωληνώσεις και θα αύξανε έτσι την τιμή των συλλεκτών και ολόκληρου του ηλιακού πεδίου. Εντούτοις, η χρήση αφαλατωμένου νερού για υψηλές θερμοκρασίες/πιέσεις είναι αυτήν την περίοδο υπό έρευνα στην μονάδα Plataforma Solar de Almeria (PSA) και η δυνατότητα επίτευξης άμεσης παραγωγής ατμού σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία 400°C στους σωλήνες του δέκτη έχει ήδη αποδειχτεί σε ένα πειραματικό στάδιο. Για θερμοκρασίες κάτω από 200°C, είτε ένα μίγμα νερού-γλυκόλης αιθυλενίου είτε υγρό ύδωρ διατηρημένο σε σταθερή ατμοσφαιρική πίεση μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λειτουργικά ρευστά, επειδή η πίεση στις θερμοκρασίες αυτές διατηρείται σε μέτρια επίπεδα.

Κατά την επιλογή ενός θερμικού ελαίου ως ρευστό μεταφοράς, ο βασικός περιοριστικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τη διατήρηση της σταθερότητας είναι η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να πάρει το έλαιο. Πάνω από αυτήν την θερμοκρασία εμφανίζεται διάσπαση των υδρογονανθράκων του ελαίου και γρήγορη χημική αποικοδόμηση.

Το έλαιο που χρησιμοποιείται ευρύτατα σε εγκαταστάσεις παραβολικών κοίλων για θερμοκρασίες μέχρι 395°C είναι το VP-1, το οποίο είναι ένα εύτηκτο μίγμα 73,5% διφαινυλικού οξειδίου και 26,5% διφαινυλίου. Το βασικό πρόβλημα με αυτό το έλαιο είναι η υψηλή θερμοκρασία πήξης του (12°C) και απαιτείται έτσι βοηθητικό σύστημα θέρμανσης, καθώς οι γραμμές μεταφοράς διατρέχουν τον κίνδυνο να παγώσουν κάτω από αυτήν την θερμοκρασία. Επειδή η θερμοκρασία βρασμού σε πίεση 1013 mbar είναι 257°C, στο κύκλωμα του ελαίου πρέπει να ρυθμίζεται η πίεση με τη προσθήκη αζώτου, αργού, ή κάποιου άλλου αδρανούς αερίου όταν θερμαίνεται το έλαιο πάνω από αυτήν τη θερμοκρασία. Αν και υπάρχουν και άλλα κατάλληλα θερμικά έλαια για ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας με χαμηλότερες θερμοκρασίες στερεοποίησης, είναι πάρα πολύ ακριβά για τις μεγάλες ηλιακές εγκαταστάσεις. [5]

2.6 Συστήματα Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας

Το βασικό πρόβλημα με τη χρησιμοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ότι αποτελεί έναν παράγοντα παροδικά διακοπτόμενο, δηλαδή μπορεί να συλλεχθεί μόνο κατά τη διάρκεια των ωρών της μέρας με ηλιοφάνεια και σε περιόδους που δεν υπάρχουν καθόλου σύννεφα. Τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης εφαρμόζονται για να λύσουν αυτούς τους περιορισμούς. Ένα σύστημα αποθήκευσης αποθηκεύει μέρος της θερμικής ενέργειας που παρέχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας. Στην πορεία παρέχει αυτή τη θερμική ενέργεια κατά τη διάρκεια των ωρών που η άμεση ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι διαθέσιμη. Έτσι η συλλογή ηλιακής ενέργειας και η παροχή θερμικής ενέργειας δεν είναι απαραίτητο να είναι ταυτόχρονες.

Ένα σύστημα αποθήκευσης καυτού ύδατος, όπως αυτό που χρησιμοποιείται σε άλλα ηλιακά συστήματα με επίπεδους συλλέκτες που αναπτύσσουν χαμηλές θερμοκρασίες, δεν είναι κατάλληλο για τα συστήματα παραβολικών κοίλων επειδή η υψηλή πίεση στη δεξαμενή αποθήκευσης θα καθιστούσε το σύστημα πάρα πολύ ακριβό. Για αυτόν τον λόγο, τα συστήματα αυτά απαιτούν ένα διαφορετικό μέσο αποθήκευσης. Ανάλογα με το μέσο που η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται, υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων: συστήματα με μονό μέσο αποθήκευσης και συστήματα με διπλό μέσο αποθήκευσης.

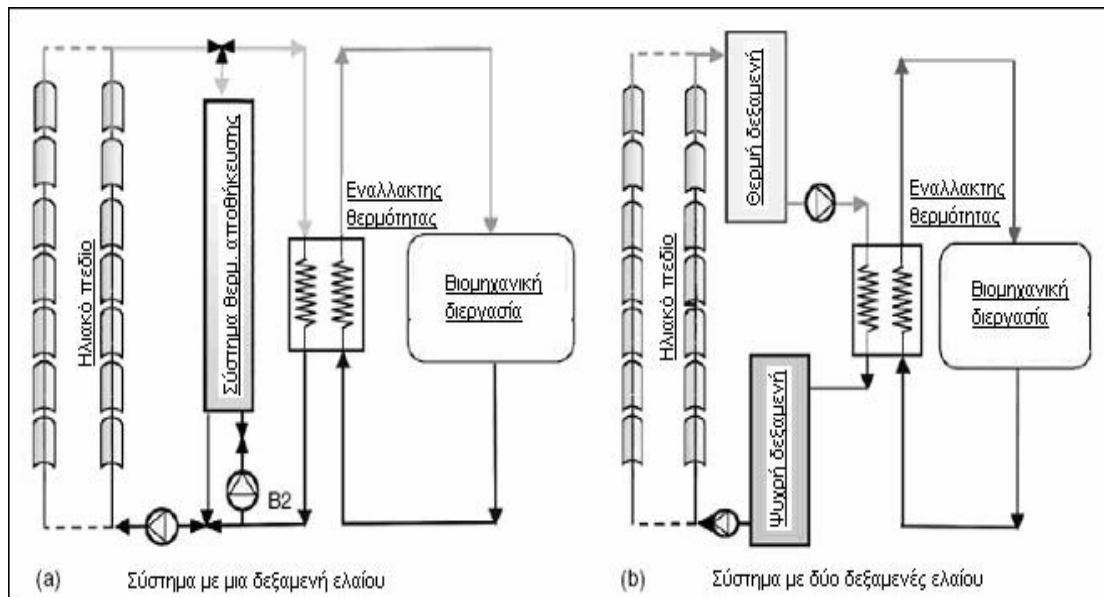
Συστήματα με Μονό Μέσο Αποθήκευσης

Τα συστήματα με μονό μέσο αποθήκευσης είναι εκείνα στα οποία το μέσο αποθήκευσης είναι το ίδιο ρευστό που κυκλοφορεί στον σωληνωτό δέκτη. Το συνηθέστερο μέσο που χρησιμοποιείται και ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας και ως μέσο αποθήκευσης είναι το θερμικό έλαιο. Η απόδοση αυτών των συστημάτων είναι πάνω από 90%. Βέβαια ένα μειονέκτημα των συστημάτων ελαίου είναι η ανάγκη για κατάλληλα πυροσβεστικά συστήματα, καθώς επίσης και για ένα τσιμεντένιο φρεάτιο όπου θα συλλέγονται οποιεσδήποτε διαρροές και θα αποφεύγεται η μόλυνση. Όλος αυτός ο πρόσθετος εξοπλισμός αυξάνει το κόστος του συστήματος αποθήκευσης. Τα συστήματα αποθήκευσης με έλαια μπορούν να διαμορφωθούν με δύο διαφορετικούς τρόπους: [6]

Συστήματα με Μια Δεξαμενή Ελαίου. Για συστήματα αποθήκευσης μικρής χωρητικότητας, η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε μια μόνο δεξαμενή. Στη δεξαμενή αυτή το έλαιο κατανέμεται σε στρώματα βάσει της θερμοκρασίας του. Το σχήμα 2.11a εμφανίζει τη διάταξη αυτού του τύπου συστήματος. Το ηλιακό πεδίο μπορεί να παρέχει το θερμικό έλαιο είτε στη δεξαμενή αποθήκευσης είτε στους εναλλάκτες θερμότητας (γεννήτρια ατμού) είτε και στα δυο ταυτόχρονα.

Η πυκνότητα των θερμικών ελαίων, που χρησιμοποιούνται και για μεταφορά και για αποθήκευση, ποικίλλει έντονα ανάλογα με τη θερμοκρασία. Επομένως, για παράδειγμα, η πυκνότητα του ελαίου Santotherm 55 στους 90°C είναι 842,5 kg/m³, ενώ στους 300°C είναι 701,4 kg/m³. Εξαιτίας της μικρότερης πυκνότητάς του, το καυτό έλαιο που εισάγεται από την κορυφή της δεξαμενής αποθήκευσης παραμένει στα ανώτερα στρώματα μέσα στη δεξαμενή, ενώ το κρύο έλαιο παραμένει πάντα στη κατώτερη στάθμη της δεξαμενής. Κατά την εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης, το καυτό έλαιο αφήνει τη δεξαμενή πάλι από την κορυφή της, μεταφέρεται στη γεννήτρια ατμού και επιστρέφει στον πυθμένα της δεξαμενής. Το κρύο έλαιο φεύγει από τον πυθμένα της δεξαμενής και πηγαίνει στο ηλιακό πεδίο κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας ώστε να θερμανθεί και να επιστρέψει έπειτα στην κορυφή της δεξαμενής. Το σύστημα αποθήκευσης φορτίζεται πλήρως όταν όλο το έλαιο που είναι αποθηκευμένο στη δεξαμενή είναι καυτό. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η χρήση μιας μόνο δεξαμενής αποθήκευσης ελαίου είναι εφικτή μόνο για μικρά συστήματα αποθήκευσης. Για μεγαλύτερης χωρητικότητας συστήματα, απαιτούνται δύο δεξαμενές ελαίου (δηλ., μια δεξαμενή για το κρύο και άλλη μια για το θερμό έλαιο). [6]

Συστήματα με Δύο Δεξαμενές Ελαίου. Σε αυτά τα συστήματα υπάρχουν δύο δεξαμενές ελαίου (σχήμα 2.11b), μια θερμή δεξαμενή και μια ψυχρή δεξαμενή. Ο λέβητας-εναλλάκτης θερμότητας τροφοδοτείται πάντα από την θερμή δεξαμενή, και μόλις το έλαιο μεταφέρει τη θερμότητα στο νερό του λέβητα, πηγαίνει στην ψυχρή δεξαμενή. Η τελευταία ανεφοδιάζει το ηλιακό πεδίο, το οποίο την ίδια στιγμή τροφοδοτεί την θερμή δεξαμενή με το έλαιο που θερμαίνεται από τους συλλέκτες.



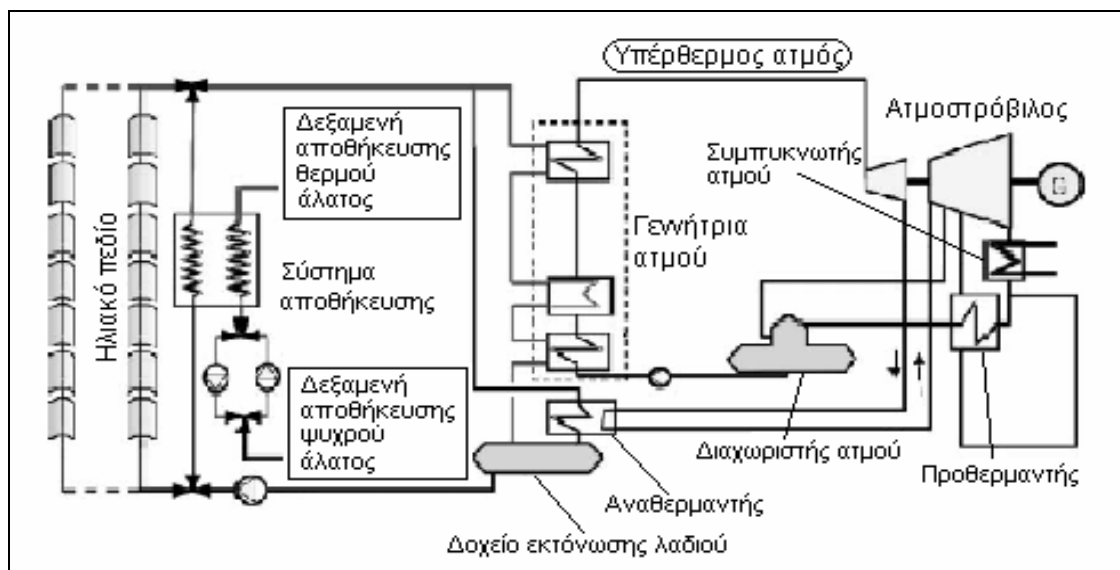
Σχήμα 2.11: Συστήματα θερμικής αποθήκευσης με μία και δύο δεξαμενές

Συστήματα με Διπλό Μέσο Αποθήκευσης

Τα συστήματα με διπλό μέσο αποθήκευσης είναι εκείνα στα οποία η θερμότητα αποθηκεύεται σε ένα μέσο διαφορετικό από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που θερμαίνεται στους ηλιακούς συλλέκτες. Πλάκες σιδήρου, κεραμικά υλικά, τηγμένα άλατα, ή ακόμη και πλάκες σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα αποθήκευσης. Σε αυτά τα συστήματα, το έλαιο χρησιμοποιείται συνήθως ως το μέσο μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ηλιακού πεδίου και του υλικού όπου η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται. Στην περίπτωση της θερμικής αποθήκευσης σε πλάκες σιδήρου, το έλαιο κυκλοφορεί μέσω καναλιών ανάμεσα από πλάκες χυτοσιδήρου. Έτσι το έλαιο μεταφέρει τη θερμική ενέργεια στις πλάκες (διαδικασία φόρτισης) ή την παίρνει από αυτές (διαδικασία εκφόρτισης).

Τα τηγμένα άλατα (ένα ευτηκτικό μίγμα νιτρικών αλάτων νατρίου και καλίου) μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για τα θερμικά συστήματα με διπλό μέσο αποθήκευσης στις ηλιακές εγκαταστάσεις παραβολικών κοίλων. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτούνται δύο δεξαμενές: μια για το ψυχρό τηγμένο άλας και άλλη μια για να αποθηκεύει το θερμό τηγμένο άλας. Προφανώς, η χαμηλότερη θερμοκρασία πρέπει να είναι πάντα επάνω από το σημείο τήξης του άλατος (περίπου 250°C). Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται ένας εναλλάκτης θερμότητας για να μεταφέρει την ενέργεια από τα έλαια που χρησιμοποιούνται στο ηλιακό πεδίο (μέσο μεταφοράς

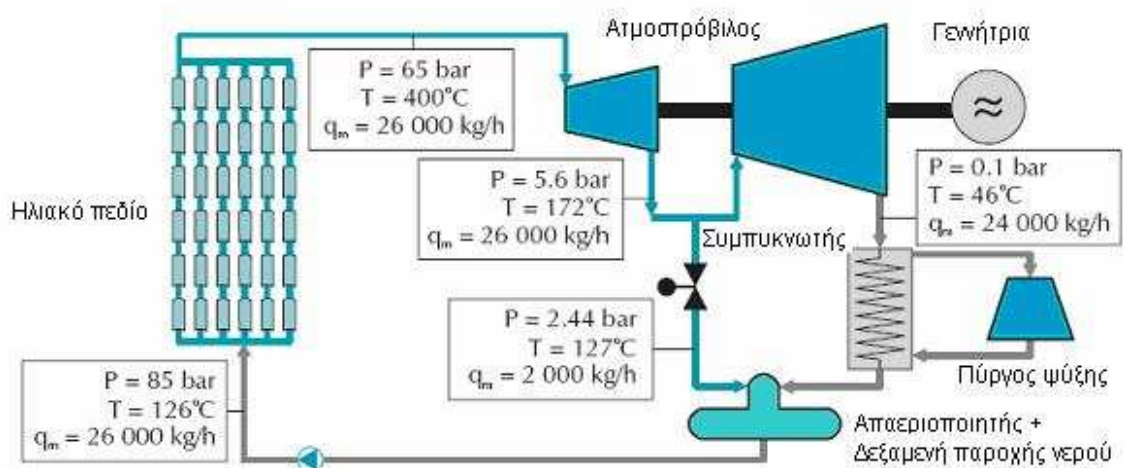
θερμότητας) στο τηγμένο άλας που χρησιμοποιείται για την ενεργειακή αποθήκευση (μέσο αποθήκευσης). Το σχήμα 2.12 εμφανίζει ένα απλουστευμένο σχέδιο μιας εγκατάστασης παραβολικών κοίλων με ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης ενέργειας τηγμένου άλατος. Αυτός ο τύπος συστήματος θερμικής αποθήκευσης θεωρείται ότι είναι ο πιο αποδοτικός οικονομικά για τις μεγάλες εμπορικές ηλιακές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής. [6]



Σχήμα 2.12: Σύστημα θερμικής αποθήκευσης τηγμένου άλατος

2.7 Άμεση Παραγωγή Ατμού

Η άμεση παραγωγή ατμού στους σωλήνες απορρόφησης ενός συστήματος παραβολικών συλλεκτών είναι μια ελκυστική ιδέα, σύμφωνα με την οποία ο ατμός δεν παράγεται σε μια σειρά εναλλακτών θερμότητας (γεννήτρια ατμού), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά μέσα στον ίδιο το σωληνωτό δέκτη. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται εδώ είναι νερό. Οι συγκεντρωμένες ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν με τη βοήθεια των κατόπτρων στο κάτω μέρος του σωληνωτού δέκτη. Έτσι θερμαίνονται και εξατμίζουν το νερό που βρίσκεται μέσα στο σωλήνα, όπου δημιουργείται μια ροή νερού (στο κάτω μέρος του) και μια ροή ατμού (στο πάνω μέρος του). Τα μειονεκτήματα αυτής της ιδέας σχετίζονται με την ύπαρξη ροής δύο φάσεων και με τα θερμοϋδραυλικά προβλήματα που αυτό συνεπάγεται. Εντούτοις, τα πειράματα που εκτελούνται στην εγκατάσταση Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία έχουν αποδείξει την τεχνική δυνατότητα πραγματοποίησης της αρχής αυτής σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας 100 bar και 400°C αντίστοιχα. [14]



Σχήμα 2.13: Διάγραμμα ενεργειακών ροών ενός συστήματος παραβολικών κοίλων με άμεση παραγωγή ατμού.

Τα τεχνικά πλεονεκτήματα στην άμεση παραγωγή ατμού είναι:

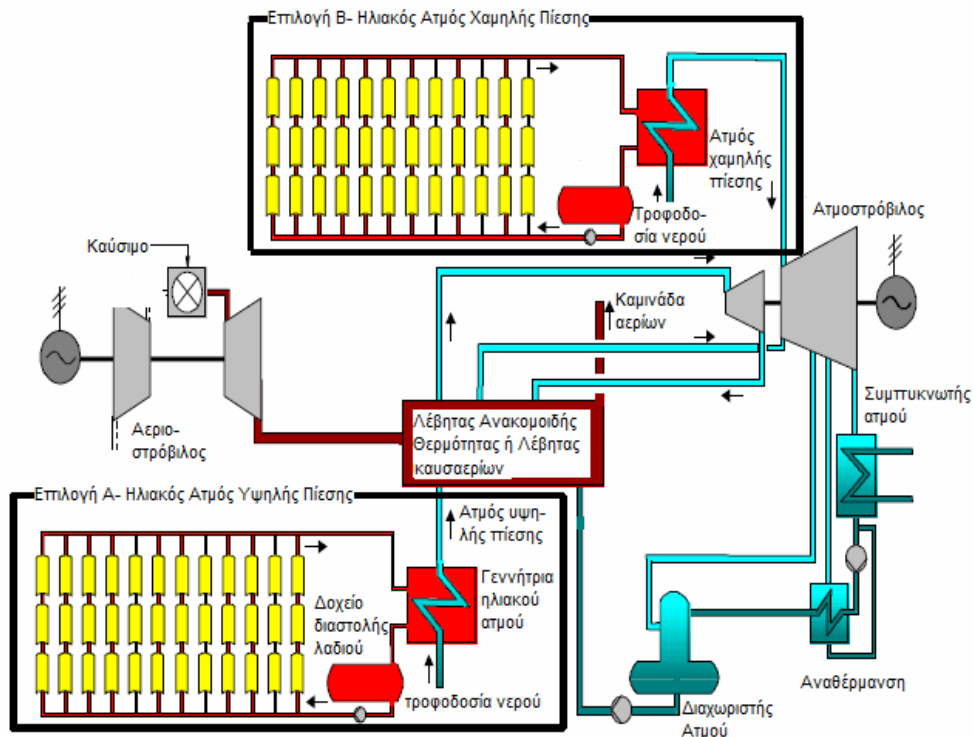
- Κανένας κίνδυνος ρύπανσης ή πυρκαγιάς λόγω της χρήσης κάποιου θερμικού ελαίου σε θερμοκρασίες περίπου 400°C
- Η δυνατότητα να αυξηθεί η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου Rankine πάνω από 400°C, όριο που επιβάλλεται από το θερμικό έλαιο που χρησιμοποιείται επί του παρόντος.
- Μείωση του μεγέθους του ηλιακού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

2.8 Υβριδικοί Σταθμοί Άνθρακα

Σε περιοχές με υψηλή ηλιακή έκθεση όπου χρησιμοποιούνται ήδη εγκαταστάσεις άνθρακα, μπορούν να ενσωματωθούν στις τελευταίες και μονάδες παραβολικών κοίλων είτε για να μειώσουν την κατανάλωση άνθρακα είτε για να συμπληρώνουν την ηλεκτρική παραγωγή σε περιόδους μεγάλης ζήτησης. Λόγω των συνθηκών πολύ υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης του ατμού που χρησιμοποιούνται στους σύγχρονους σταθμούς άνθρακα, ο ηλιακός ατμός ίσως να πρέπει να οδηγηθεί κατευθείαν στην βαθμίδα μέσης ή και χαμηλής πίεσης του στροβίλου.

2.9 ISCCS (Integrated Solar Combined Cycle System)

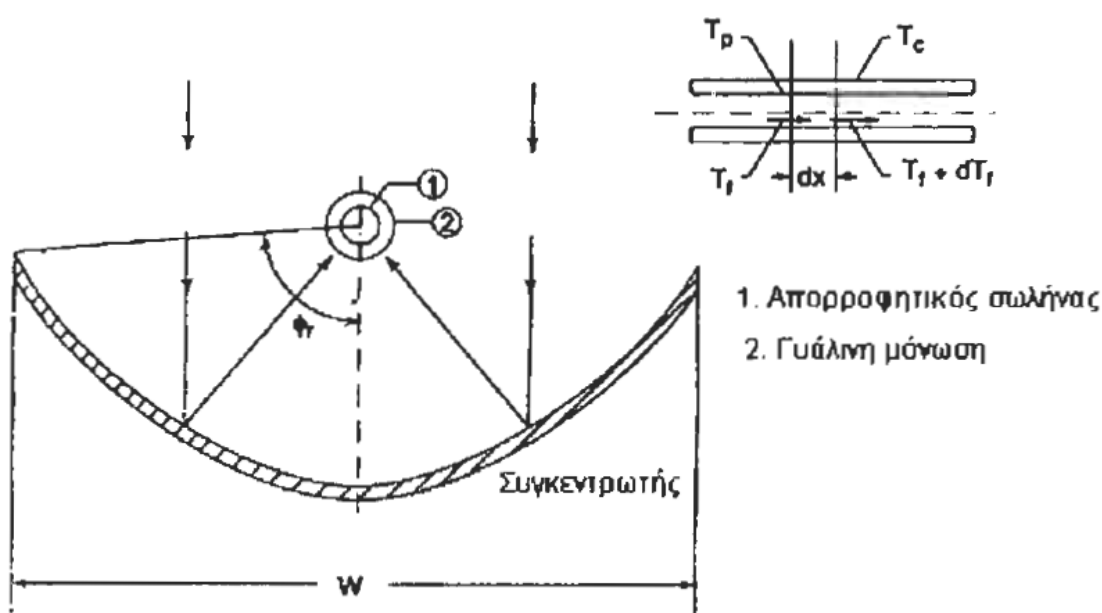
Το ISCCS είναι μια προτεινόμενη διάταξη που αξιοποιεί τον κύκλο του ατμού σε μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου (σταθμός παραβολικών συλλεκτών σε συνδυασμό με αεριοστροβιλικό σταθμό) για τη μετατροπή της θερμικής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η διάταξη ISCCS μπορεί να μειώσει το κόστος της ηλιακής ισχύος μέχρι και 22% ως προς το μικτό κόστος της ισχύος μιας συμβατικής μονάδας παραβολικών συλλεκτών παρόμοιου μεγέθους. Επίσης προσφέρει έναν καινοτόμο τρόπο να βελτιωθεί η γενική απόδοση μετατροπής από ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα διάγραμμα ενεργειακών ροών για έναν σταθμό τύπου ISCCS εμφανίζεται στο σχήμα 2.14. Ο σταθμός αυτός χρησιμοποιεί την ηλιακή θερμότητα για να συμπληρώσει τη θερμότητα των καυσαερίων από την έξοδο του αεριοστρόβιλου προκειμένου να επαυξηθεί η ηλεκτρική παραγωγή στο ζεύγος ατμοστρόβιλου-γεννήτριας κύκλου Rankine. [14]



Σχήμα 2.14: Διάγραμμα λειτουργίας ενός σταθμού ISCCS

2.10 Απόδοση και Απώλειες του Συστήματος

Εξετάζουμε την απόδοση ενός κυλινδρικού παραβολικού συγκεντρωτικού συλλέκτη του οποίου ο δέκτης έχει άνοιγμα W , μήκος L και περιφερειακή γωνία φ_r (σχήμα 2.14) [7]. Ο απορροφητικός σωλήνας 1 έχει εσωτερική διάμετρο D_i και εξωτερική D_o με μια ομόκεντρη κάλυψη γυαλιού 2 εσωτερικής διαμέτρου D_{ci} και εξωτερικής διαμέτρου D_{co} . Η παροχή του χρησιμοποιούμενου ρευστού είναι \dot{m} και έχει ειδική θερμότητα C_p , θερμοκρασία εισόδου T_{fi} και θερμοκρασία εξόδου T_{fo} . [7]



Σχήμα 2.15: Κυλινδρικός παραβολικός συλλέκτης σε τομή πρόοψης

Υποθέτουμε ότι ο απορροφητικός σωλήνας είναι λίγο μεγαλύτερος σε μήκος, (υποθέτουμε περίπου 10%) από το συγκεντρωτή και ότι η ροή δια μέσου του σωλήνα δε θα ήταν ομοιόμορφη κατά μήκος του αγωγού. Επίσης, υποθέτουμε ότι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο σωλήνα και την κάλυψη του γυαλιού είναι αμελητέα.

Ο λόγος συγκέντρωσης του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση, [7].

$$C = \frac{\text{Ενεργή Περιοχή Απορροφητή}}{\text{Εμβαδό Σωλήνα}} = \frac{(W - D_o)L}{\pi D_o L} = \frac{(W - D_o)}{\pi D_o} \quad (2.12)$$

Το ενεργειακό ισοζύγιο σε μια στοιχειώδη επιφάνεια dx του απορροφητή, σε μια απόσταση x από το εσωτερικό του σωλήνα, δίνει την εξίσωση για ένα σταθερό μήκος,

$$dQ_u = \left[I_b r_b (W - D_o) \rho \gamma (\tau \alpha)_b + I_b r_b (\tau \alpha)_b - U_L \pi D_o (T_p - T_a) \right] dx \quad (2.13)$$

όπου dQ_u = ωφέλιμη ηλιακή ενέργεια για ένα μήκος dx

ρ = ανακλαστικότητα της επιφάνειας του συλλέκτη

γ = παράγοντας παρεμπόδισης της ακτινοβολίας

$(\tau \alpha)_b$ = μέση τιμή απορροφητικότητας – μεταβιβασιμότητας

U_L = ολικός συντελεστής απωλειών

T_p = τοπική θερμοκρασία του απορροφητή

T_a = θερμοκρασία περιβάλλοντος

I_b = ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

r_b = άμεση ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια

Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (2.13) αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία που απορροφάται μετά την αντανάκλαση, ενώ ο δεύτερος την απορροφούμενη ακτινοβολία από τον απορροφητή. Ο δεύτερος όρος είναι μικρός σε σύγκριση με τον πρώτο, αλλά δε μπορεί να αγνοηθεί όταν ο λόγος συγκέντρωσης είναι μικρός. Ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει τη χαμένη από μεταφορά και ακτινοβολία, θερμική ενέργεια.

Κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν που υιοθετείται για έναν επίπεδο συλλέκτη, καθορίζουμε και την απορροφούμενη ισχύ S ως εξής, [7]

$$S = I_b r_b \rho \gamma (\tau \alpha)_b + I_b r_b (\tau \alpha)_b \left(\frac{D_o}{W - D_o} \right) \quad (2.14)$$

Η εξίσωση (2.13) έτσι γίνεται,

$$dQ_u = \left[S - \frac{U_L}{C} (T_p - T_a) \right] (W - D_o) dx \quad (2.15)$$

Η ωφέλιμη ηλιακή ενέργεια dQ μπορεί επίσης να γραφτεί και ως

$$dQ_u = h_f p D_i (T_p - T_f) dx \quad (2.16)$$

$$= \dot{m} C_p dT_f \quad (2.17)$$

όπου h_f ο συντελεστής θερμικής μετάβασης στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα και T_f η θερμοκρασία του ρευστού.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.15) και (2.16) κατά τρόπο τέτοιο ώστε να αποβληθεί η θερμοκρασία T_p του απορροφητή, λαμβάνουμε [7]

$$dQ_u = F' \left[S - \frac{U_L}{C} (T_f - T_a) \right] (W - D_o) dx \quad (2.18)$$

όπου το F' είναι ο συντελεστής απόδοσης του συλλέκτη που καθορίζεται από

$$F' = \frac{1}{U_L \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{D_i \cdot h_f} \right]} \quad (2.19)$$

Συνδυάζοντας ξανά τις εξισώσεις (2.17) και (2.18) λαμβάνουμε τη διαφορική εξίσωση

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{F'\pi D_o U_L}{\dot{m}C_p} \left[\frac{CS}{U_L} - (T_f - T_a) \right] \quad (2.20)$$

Αντικαθιστώντας όπου $x = 0$ και $T_f - T_{fi}$ έχουμε την κατανομή της θερμοκρασίας

$$\frac{\left(\frac{CS}{U_L} + T_a \right) - T_f}{\left(\frac{CS}{U_L} + T_a \right) - T_{fi}} = \exp \left\{ \frac{F'\pi D_o U_L x}{\dot{m}C_p} \right\} \quad (2.21)$$

Η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο λαμβάνεται αντικαθιστώντας όπου $x \rightarrow L$ και $T_f \rightarrow T_{fo}$ στην εξίσωση (2.21). Αντικαθιστώντας και αφαιρώντας και τις δύο πλευρές της προκύπτουσας εξίσωσης κατά μέλη, έχουμε [7]

$$\frac{(T_{fo} - T_{fi})}{\frac{CS}{U_L} + T_a - T_{fi}} = 1 - \exp \left\{ -\frac{F'\pi D_o U_L L}{\dot{m}C_p} \right\} \quad (2.22)$$

Κατά συνέπεια, η ωφέλιμη ενέργεια είναι

$$\begin{aligned} q_u &= \dot{m}C_p (T_{fo} - T_{fi}) \\ &= \dot{m}C_p \left[\frac{CS}{U_L} + T_a - T_{fi} \right] \left[1 - \exp \left\{ -\frac{F'\pi D_o U_L L}{\dot{m}C_p} \right\} \right] \\ &= F_R (W - D_o) L \left[S - \frac{U_L}{C} (T_{fi} - T_a) \right] \end{aligned} \quad (2.23)$$

όπου F_R είναι ο συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη που καθορίζεται από τη σχέση [7]

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{\pi D_o L U_L} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{F' \pi d_o U_L L}{\dot{m}C_p} \right\} \right] \quad (2.24)$$

Η στιγμιαία απόδοση του συλλέκτη n_i είναι ο λόγος της ωφέλιμης ενέργειας προς την ακτινοβολία που δέχεται το οπτικό σύστημα και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$n_i = \frac{q_u}{(I_d r_d + I_b r_b) WL} \quad (2.25)$$

Η στιγμιαία απόδοση μπορεί επίσης να υπολογιστεί βάσει της προσπίπτουσας ακτινοβολίας έτσι ώστε

$$n_{ib} = \frac{q_u}{I_b r_b WL} \quad (2.26)$$

Ο οπτικός βαθμός απόδοσης n_o του συλλέκτη είναι το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο συλλέκτη, το οποίο απορροφάει ο απορροφητής και δίνεται από τη σχέση

$$n_o = \frac{I_b r_b \rho \gamma (\tau \alpha)_b D_o L}{I_b r_b WL} = \rho \gamma (\tau \alpha)_b \frac{(W - D_o)}{W} + (\tau \alpha)_b \frac{D_o}{W} = \frac{S(W - D_o)}{I_b r_b W} \quad (2.27)$$

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια της ομόκεντρης γυάλινης επιφάνειας

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_w στην εξωτερική επιφάνεια ή κάλυψη (μερικές φορές αποκαλείται συντελεστής μεταφοράς πλάτους) μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της γνωστής σχέσης βασισμένη στα στοιχεία του Hilpert, ο οποίος πραγματοποίησε τα πειράματα στον αέρα που ρέει κάθετα σε σωλήνες διάφορων διαμέτρων σε χαμηλά επίπεδα ελεύθερης τυρβώδους ροής. Τα στοιχεία του Hilpert μπορούν να συσχετιστούν από την εξίσωση [7]

$$N_u = C_1 Re^n \quad (2.28)$$

όπου C_1 και n είναι σταθερές που έχουν τις ακόλουθες τιμές

- Για $40 < Re < 4000$, $C_1 = 0.615$, $n = 0.466$
- Για $4000 < Re < 40000$, $C_1 = 0.174$, $n = 0.618$
- Για $40000 < Re < 400000$, $C_1 = 0.0239$, $n = 0.805$

Η D_{co} είναι η χαρακτηριστική διάσταση που χρησιμοποιείται στην εξίσωση (2.28).

Οι ιδιότητες χρησιμοποιούνται για τη μέση θερμοκρασία $(T_c - T_a) / 2$.

Όπως σημειώνεται νωρίτερα, η εξίσωση (2.28) έχει ληφθεί για χαμηλά επίπεδα έντασης στροβιλισμών. Στην πράξη, η ένταση στροβιλισμών στον αέρα που ρέει πέρα από την κάλυψη μπορεί να είναι σημαντική. Κατά συνέπεια, υπάρχει μια αστάθεια στην τιμή h_w και η τιμή που προκύπτει από την εξίσωση (2.28) μπορεί να είναι χαμηλότερη από την πραγματική τιμή κατά 10 ή 15%. Ευτυχώς, αυτή η αστάθεια έχει επιπτώσεις στην τιμή του ολικού συντελεστή απωλειών μόνο κατά 1 ή 2%.

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του απορροφητή

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_f στην εσωτερική επιφάνεια του απορροφητικού σωλήνα μπορεί να υπολογιστεί σε περιπτώσεις όπου η ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως. Αυτή η υπόθεση δικαιολογείται επειδή ο λόγος μήκους προς τη διάμετρο είναι μεγάλος, συνήθως μεγαλύτερος από 20. Για έναν αριθμό Reynolds μικρότερο του 2000, η ροή είναι στρωτή και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση: [7]

$$Nu = 3.66 \quad (2.29)$$

Αφ' ετέρου, για έναν αριθμό Reynolds μεγαλύτερο του 2000, η ροή είναι τυρβώδης και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (2.30)$$

Η χαρακτηριστική διάσταση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των Nu και Re στις εξισώσεις (2.29) και (2.30) είναι η D_i . Στις περισσότερες περιπτώσεις, η παροχή μάζας \dot{m} είναι μικρή και η ροή είναι στρωτή. Επομένως χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.29). κατά συνέπεια, η τιμή h_f είναι μερικές φορές τόσο μικρή ώστε να επηρεάσει αρνητικά η τιμή F_R . Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούμενο θερμικό υγρό είναι λάδι. Τέτοιου είδους θερμικά υγρά έχουν υψηλό σημείο βρασμού και χαρακτηρίζονται από τους χαμηλούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας και τους υψηλούς αριθμούς Prandtl. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί κάποια αυξητική τεχνική για να αυξηθεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Μία από τις απλούστερες τεχνικές είναι να χρησιμοποιηθεί μια σπειροειδής ταινία, πλάτους D_i τοποθετημένη κατά μήκος του εσωτερικού του απορροφητικού σωλήνα. Οι Hong και Bergles, έχουν προτείνει την ακόλουθη σχέση για αυτή την περίπτωση. [7]

$$Nu = 5.172 \left[1 + 0.005484 \left\{ Pr \left(\frac{Re}{X} \right)^{1.78} \right\}^{0.7} \right]^{0.5} \quad (2.31)$$

όπου,

$$X = \text{ο λόγος της σπειροειδούς ταινίας} = H / D_i$$

H = το μήκος της σπειροειδούς κατά 180° ταινίας.

Η χαρακτηριστική διάσταση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό Nu και Re είναι η D_i .

Για μέση ταχύτητα του ρευστού

$$V = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} D_i^2 \rho} \quad (2.32)$$

έχουμε αριθμό Reynolds

$$Re = \frac{V \cdot D_i}{\nu} \quad (2.33)$$

και αριθμό Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \cdot \nu \cdot \rho}{k} \quad (2.34)$$

Άρα από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του απορροφητή:

$$h_f = Nu \frac{k}{D_i} \quad (2.35)$$

Εμπειρική εξίσωση για τον ολικό συντελεστή απωλειών

Με βάση τους υπολογισμούς για έναν μεγάλο αριθμό περιπτώσεων που καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο των όρων που αντιμετωπίζονται με τους κυλινδρικούς παραβολικούς συλλέκτες, οι Mullic και Nanda έχουν αναπτύξει μια ημι – εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό του γενικού συντελεστή απωλειών. Αυτή η εξίσωση εξαλείφει την ανάγκη για έναν επαναληπτικό υπολογισμό. [7]

$$\frac{1}{U_L} = \frac{1}{C_3(T_{pm} - T_c)^{0.25} + \left[\sigma(T_{pm}^2 + T_c^2)(T_{pm} + T_c) / \left\{ \frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{D_o}{D_{ci}} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right\} \right]} + \left(\frac{D_o}{D_{co}} \right) \left(\frac{1}{h_w + \sigma \varepsilon_c (T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a)} \right) \quad (2.36)$$

Η σταθερά C_3 έχει ληφθεί από τη σχέση των Rathby και Hollands και δίνεται από τη σχέση

$$C_3 = \frac{17.74}{(T_{pm} + T_c)^{0.4} D_o (D_o^{-0.75} + D_{ci}^{-0.75})} \quad (2.37)$$

Η θερμοκρασία του καλύμματος T_c δίνεται από

$$\left(\frac{T_c - T_a}{T_{pm} - T_a} \right) = 0.163 \left(\frac{D_o}{D_{co}} \right)^{0.4} h_w^{0.67} \left[2 - 3\varepsilon_p + \frac{(6 + 9\varepsilon_p)T_{pm}}{100} \right] \quad (2.38)$$

όταν $333 < T_{pm} < 513$ K.

Και από τη σχέση

$$\left(\frac{T_c - T_a}{T_{pm} - T_a} \right) = 0.163 \left(\frac{D_o}{D_{co}} \right)^{0.4} h_w^{-0.67} \left[2 - 3\varepsilon_p + \frac{(1 + 3\varepsilon_p)T_{pm}}{100} \right] \quad (2.39)$$

όταν $513 < T_{pm} < 623$ K.

Στις εξισώσεις (2.36) – (2.39), οι T_{pm} , T_c και T_a εκφράζονται σε Κ.

Οι D_o , D_{ci} και D_{co} σε m, το σ σε $W / m^2 - K^4$ και ο h_w σε $W / m^2 - K$.

Η τιμή U_L λαμβάνεται σε $W / m^2 - K$.

Η εξίσωση (2.23) έχει εκφραστεί για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

$$0.1 \leq \varepsilon_p \leq 0.95$$

$$0.0125 \leq D_o \leq 0.15 \text{ m}$$

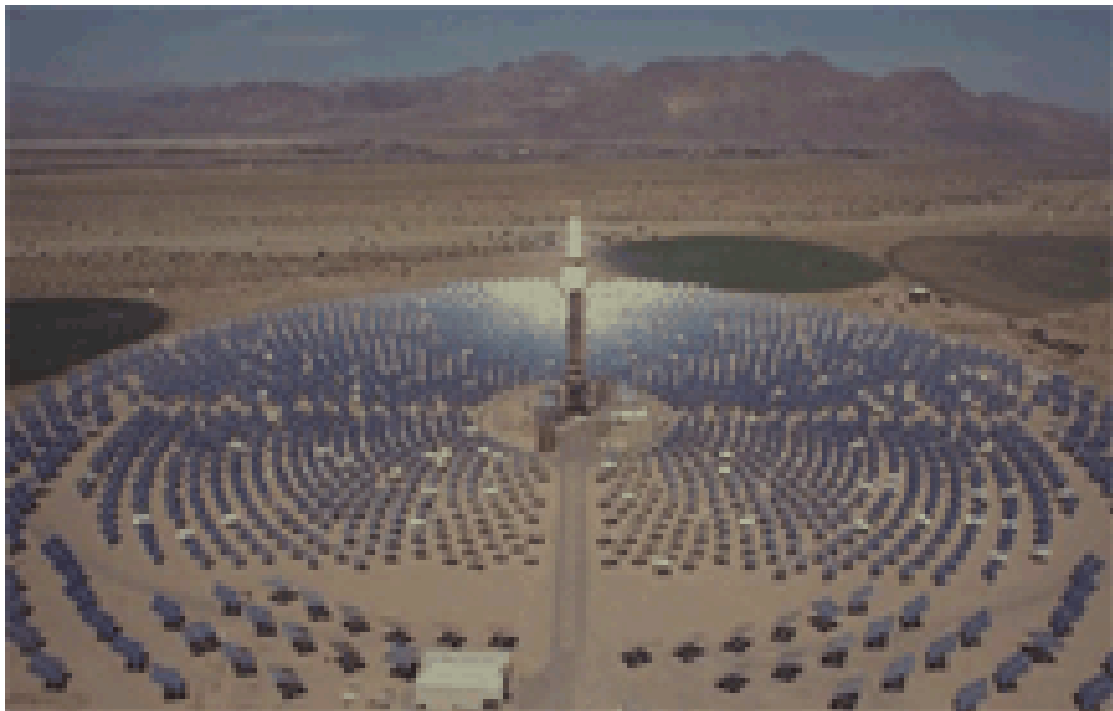
$$15 \leq h_w \leq 60 \text{ W / m}^2 - K$$

$$273 \leq T_a \leq 313 \text{ K}$$

3. ΗΛΙΑΚΟΣ ΠΥΡΓΟΣ ΙΣΧΥΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Οι πύργοι ηλιακής ισχύος παράγουν ηλεκτρική ισχύ από το φως του ήλιου συγκεντρώνοντας εστιασμένη ηλιακή ακτινοβολία σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (δέκτη) που είναι τοποθετημένος σε έναν πύργο. Το σύστημα χρησιμοποιεί εκατοντάδες με χιλιάδες ανακλαστές που ακολουθούν την πορεία του ήλιου (ηλιοστάτες) και για να είναι δυνατή η οπτική επαφή με τον δέκτη υπάρχει ο πύργος. Αυτού του είδους οι μονάδες είναι πιο κατάλληλες για μονάδες της τάξης των 30 - 400MWe. Οι πύργοι ηλιακής ισχύος για να είναι οικονομικοί πρέπει να είναι μεγάλοι σε ισχύ άρα και έκταση. Δεν αποτελούνται από τμήματα και δε γίνεται να δημιουργηθούν σε μικρότερη κλίμακα όπως τα ηλιακά πιάτα και τα κοίλα παράβολα και να παραμείνουν οικονομικά αποδοτικοί. Κατάλληλες περιοχές είναι αυτές με άφθονη ηλιακή ακτινοβολία και φθινό κόστος γης.



3.2 Ιστορία

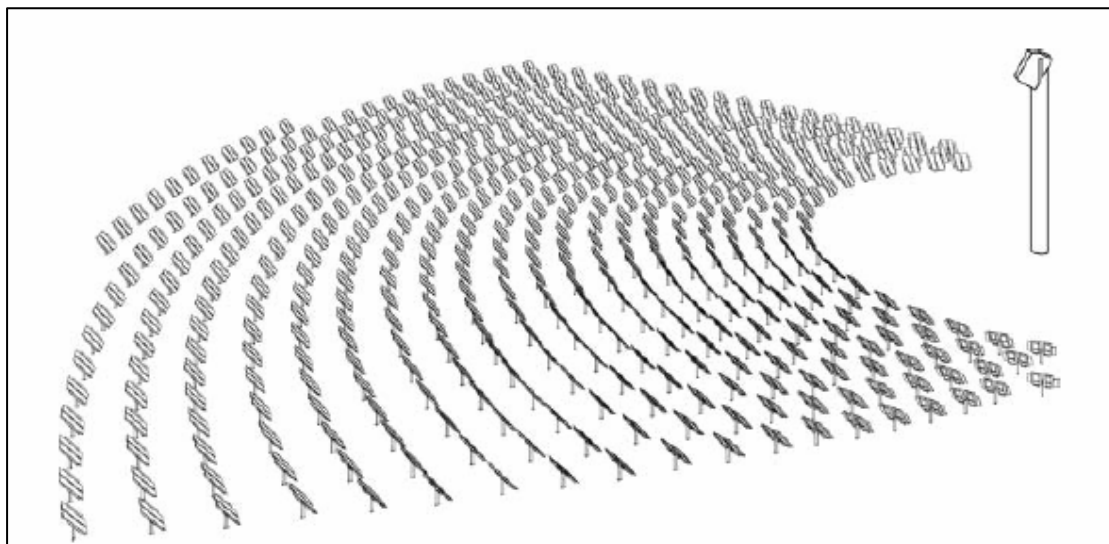
Τα συστήματα ηλιακού πύργου, ή διαφορετικά συστήματα κεντρικού δέκτη, είναι πλέον σε θέση να αναπτύξουν την πρώτη γενιά εμπορικών διασυνδεδεμένων στο δίκτυο εγκαταστάσεων. Η τεχνολογία των συστημάτων πύργου ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ως αρκετά ώριμη μετά από την αποκτηθείσα εμπειρία αρκετών πρωτοποριακών, πειραματικών εγκαταστάσεων δυναμικού 0,5-10 MW στις αρχές της δεκαετίας του '80, και τη μετέπειτα βελτίωση βασικών συνιστωσών τους όπως είναι οι ηλιοστάτες και οι ηλιακοί δέκτες σε πολλά πιο πρόσφατα προγράμματα, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών. Στον πίνακα 3.1 παρατίθενται μερικές από τις πειραματικές εγκαταστάσεις μαζί με κάποια από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. Ηλιακές μόνο εγκαταστάσεις όπως η Solar Tres και το PS10 αλλά και υβριδικές διατάξεις όπως οι σταθμοί Solgas, ConSolar και SOLGATE έχουν παρουσιάσει ένα σημαντικό αριθμό εναλλακτικών λύσεων για την κατασκευή των πρώτων μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων κατά την περίοδο 2005-2010. [13]

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

Πίνακας 3.1: Πειραματικοί σταθμοί ηλιακών πύργων

3.3 Περιγραφή της Εγκατάστασης

Στους πύργους ισχύος, οι ηλιοστάτες παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου ώστε να ανακλάται και να συγκεντρώνεται το άμεσο ηλιακό φως σε έναν κεντρικό δέκτη (εναλλάκτη θερμότητας) τοποθετημένο στην κορυφή ενός πύργου (σχήμα 3.1). Εκεί η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική, καθώς θερμαίνεται ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Το τελευταίο διοχετεύεται προαιρετικά στο σύστημα αποθήκευσης και, εν τέλει, στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρισμό και τροφοδοτεί το δίκτυο.



Σχήμα 3.1: Πεδίο ηλιοστατών που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σύστημα δέκτη/πύργου.

Ο χαρακτηριστικός λόγος συγκέντρωσης των συστημάτων αυτών κυμαίνεται από 200 έως 1000. Ενώ το μέγεθος τους φτάνει από 10 ως 200 MW. Η υψηλή προσπίπτουσα ηλιακή ροή στο δέκτη (κατά μέσο όρο μεταξύ 300 και 1000 kW/m²) επιτρέπει τη λειτουργία σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες μέχρι και 1000°C. Τα συστήματα ηλιακού πύργου μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε συμβατικές θερμικές εγκαταστάσεις με ορυκτά καύσιμα για υβριδική λειτουργία. Ακόμα, λόγω της δυνατότητας για θερμική αποθήκευση, μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με υψηλούς ετήσιους συντελεστές δυναμικού (το ποσοστό του έτους που η

τεχνολογία μπορεί να αποδώσει ηλιακή ενέργεια στην ονομαστική ισχύ). Δηλαδή σταθμοί πύργου ισχύος που περιλαμβάνουν σύστημα αποθήκευσης μπορούν να σχεδιαστούν για ετήσιο συντελεστή δυναμικού της τάξης του 60-70% (περίπου 4500 ώρες λειτουργίας ετησίως) όταν οι σταθμοί χωρίς αποθήκευση περιορίζονται σε αντίστοιχες τιμές κοντά στο 25%. Τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών συνοψίζονται στον πίνακα 3.2.

Τυπικό μέγεθος	10-200MW ^a
Θερμοκρασία λειτουργίας	
Rankine	565 °C
Brayton	800 °C
Ετήσιος συντελεστής δυναμικού	20-77 % ^a
Απόδοση αιχμής	16-23 % ^a
Ετήσια καθαρή απόδοση	12-20 % ^a
Εμπορική κατάσταση	Επίδειξη κλιμακωτής αύξησης (10-30 MW)
Ρίσκο ανάπτυξης της τεχνολογίας	Μεσαίο
Διαθέσιμο μέσο αποθήκευσης	Νιτρικό άλας για δέκτες τηγμένου άλατος κεραμική επίπεδη επιφάνεια για δέκτες ατμοσφαιρικού αέρα
Υβριδικά σχέδια	Ναι
Κόστος επένδυσης	
\$ W⁻¹	4.4-2.5 ^a

Οι τιμές με δείκτη “a” υποδηλώνουν την αναμενόμενη πρόοδο από το παρόν μέχρι το 2030.

Πίνακας 3.2: Βασικά χαρακτηριστικά συστημάτων πύργου ισχύος.

Λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών τους, τα συστήματα ηλιακού πύργου ήταν σε θέση να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία θερμικών ρευστών, όπως αέρα, νερό/ατμό, τηγμένο νιτρικό άλας και υγρό νάτριο. Η επιλογή του θερμικού ρευστού σε συνδυασμό με την επιλογή της τεχνολογίας του δέκτη καθορίζουν και τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητο να περιγράψουμε πρώτα τις βασικές συνιστώσες (πεδίο ηλιοστατών, δέκτης) ενός συστήματος ηλιακού πύργου και στη συνέχεια να αναλύσουμε τους διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας.

3.4 Περιγραφή των Επιμέρους Συνιστωσών

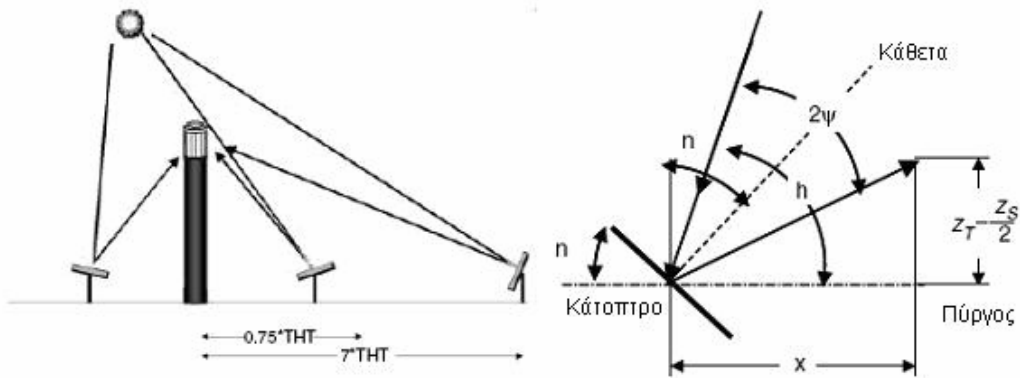
3.4.1 Πεδίο του Συλλέκτη

Το πεδίο του συλλέκτη αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων ηλιοστατών που παρακολουθούν τον ήλιο. Η ανακλαστική επιφάνεια κάθε ηλιοστάτη (για τα σύγχρονα και όχι τα πειραματικά μοντέλα) έχει μέγεθος 100-150 m², ενώ το κόστος κατασκευής εκτιμάται στα 130-200 \$/m². Δεδομένου ότι κάθε ηλιοστάτης είναι τοποθετημένος σε διαφορετική θέση μπροστά από τον δέκτη-πύργο η ανακλαστική επιφάνεια κάθε ηλιοστάτη πρέπει να έχει διαφορετική κλίση ως προς το επίπεδο του εδάφους. Η γωνία κλίσης (ή γωνία ανύψωσης) \mathbf{n} ενός ανεξάρτητου ηλιοστάτη είναι συνάρτηση του ύψους του πύργου \mathbf{Z}_T , της κάθετης προβολής του ηλιοστάτη \mathbf{Z}_S (δηλαδή της προβολής του σε ένα επίπεδο κάθετο στο επίπεδο του εδάφους), της απόστασης του από τον πύργο \mathbf{X} και των γωνιών $\boldsymbol{\psi}$ και \mathbf{h} , όπως αυτές παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2. Τόσο η γωνία πρόσπτωσης όσο και η γωνία ανάκλασης των ηλιακών ακτίνων πάνω στην επιφάνεια ισούνται με $\boldsymbol{\psi}$. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις γωνίες $\boldsymbol{\psi}$ και \mathbf{n} δίνονται παρακάτω: [13]

$$\psi = h + n - 90^\circ \text{ (σε μοίρες)} \quad (1)$$

$$90^\circ - n = \arctan \left[\frac{\mathbf{Z}_T - \mathbf{Z}_S/2}{\mathbf{X}} \right] + \psi \text{ (σε μοίρες)} \quad (2)$$

$$n = \left[\frac{180^\circ - h - \arctan \left[\frac{\mathbf{Z}_T - \mathbf{Z}_S/2}{\mathbf{X}} \right]}{2} \right] \quad (3)$$



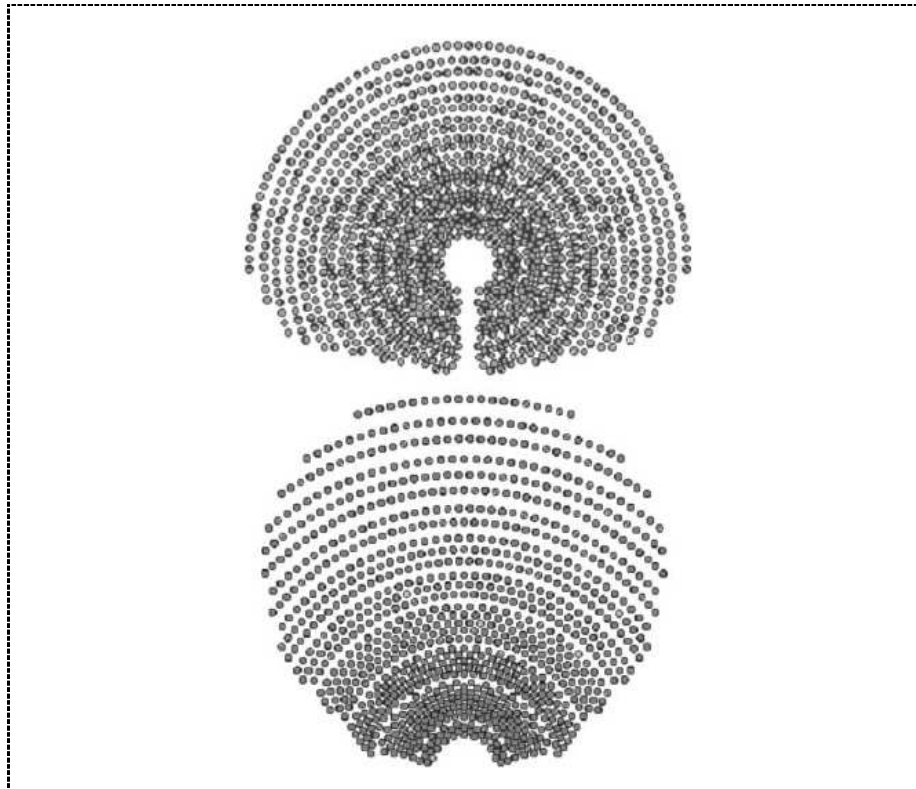
Σχήμα 3.2: (Αριστερά) Μεταβλητότητα των γωνιών ανύψωσης σε ένα πεδίο ηλιοστάτων. (Δεξιά) Γεωμετρικός προσδιορισμός της γωνίας ανύψωσης n .

Η οπτική απόδοση του πεδίου των ηλιοστατών ισούται με το λόγο της ηλιακής ενέργειας που φτάνει τελικά στο δέκτη προς την άμεση ηλιακή έκθεση ανά μονάδα επιφάνειας επί τη συνολική επιφάνεια των καθρεπτών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και που αναλύονται παρακάτω είναι:

- το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης ($\cos\psi$),
- η σκίαση που προκαλείται από γειτονικούς ηλιοστάτες,
- το μπλοκάρισμα των ανακλώμενων ακτίνων πάλι από γειτονικούς ηλιοστάτες,
- η ατμοσφαιρική εξασθένηση που υφίστανται οι ανακλώμενες ακτίνες,
- η ανακλαστικότητα των κατόπτρων και
- οι ακτίνες που δε βρίσκουν το στόχο τους και διαχέονται γύρω από το δέκτη (συντελεστής διάχυσης).

Επειδή η ανακλαστική επιφάνεια του ηλιοστάτη δεν είναι κάθετη στις προσπίπτουσες ακτίνες, η λειτουργική του επιφάνεια μειώνεται από το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης ψ . Το μέσο ετήσιο $\cos\psi$ ποικίλλει από περίπου 0,9 για ηλιοστάτες που είναι διατεταγμένοι βόρεια του πύργου σε περίπου 0,7 για ηλιοστάτες νότια του πύργου (οι ηλιοστάτες θεωρούνται σε απόσταση διπλάσια από το ύψος του πύργου. Φυσικά, το ετήσιο μέσο συνημίτονο εξαρτάται ιδιαίτερα από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Συνεπώς, σε μέρη κοντά στον ισημερινό ένα πεδίο που

περιβάλλει τον πύργο θα ήταν η καλύτερη επιλογή. Όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος στο βόρειο ημισφαίριο τόσο περισσότερο βελτιώνεται η απόδοση με την τοποθέτηση των ηλιοστατών στη βόρεια πλευρά του πύργου (αντίστοιχα στη νότια πλευρά στο νότιο ημισφαίριο). Οι αντιπροσωπευτικές διατάξεις του πεδίου του συλλέκτη (περιβάλλουσα και βόρεια διάταξη) απεικονίζονται στο σχήμα 3.3. [13]



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση βελτιστοποιημένων πεδίων για γεωγραφικό πλάτος 36° . Στο επάνω μέρος φαίνεται η περιβάλλουσα διάταξη και στο κάτω η βόρεια διάταξη.

Το μπλοκάρισμα των ανακλώμενων ακτίνων είναι επίσης ένας σημαντικός περιορισμός για την διάταξη των ηλιοστατών. Δηλαδή οι γειτονικοί ηλιοστάτες μπλοκάρουν και παρεμποδίζουν την ομαλή ροή των ανακλώμενων ακτίνων προς το δέκτη. Για να αποφευχθούν οι απώλειες μπλοκαρίσματος, η απόσταση Δx μεταξύ των σειρών των ηλιοστατών πρέπει να υπολογιστεί σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta x = x \frac{Z_S}{Z_T} \quad (4)$$

όπου x είναι η απόσταση από τον πύργο.

Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η σκίαση που προκαλείται από γειτονικούς ηλιοστάτες. Το φαινόμενο της σκίασης είναι η παρεμπόδιση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (προσπίπτουσας) λόγω των γειτονικών ηλιοστατών. Εμφανίζεται συνήθως για χαμηλές γωνίες του ήλιου και κυρίως στο μέσο του πεδίου. Η σκίαση μετατοπίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, όπως βέβαια και ο προσανατολισμός των ηλιοστατών, έτσι δεν υπάρχει κάποιος απλός κανόνας διευθέτησης του προβλήματος. Επιπλέον, ο πύργος ή άλλα αντικείμενα μπορούν να προκαλούν σκίαση πάνω από ένα τμήμα του πεδίου.

Η ηλιακή ακτινοβολία που αντικατοπτρίζεται από τους ηλιοστάτες δεν φτάνει ολόκληρη στην περιοχή του δέκτη. Μέρος της ενέργειας διασκορπίζεται και απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται ως ατμοσφαιρική εξασθένηση και αυξάνεται όταν η υγρασία του περιβάλλοντος είναι υψηλή.

Η ανακλαστικότητα κάθε ηλιοστάτη εξαρτάται από το είδος του καθρέφτη, το μέγεθος του ηλιοστάτη και τις διάφορες κατασκευαστικές ατέλειες που έχει η ανακλαστική επιφάνεια. Λόγω των ατελειών αυτών τμήμα της ηλιακής ενέργειας διαχέεται στην γειτνιαζούσα περιοχή του δέκτη. Αν και η διάχυση αυτή μπορεί να περιοριστεί αυξάνοντας το μέγεθος της επιφάνειας απορρόφησης του δέκτη, σε κάποιο σημείο το αυξανόμενο μέγεθος γίνεται αντιπαραγωγικό λόγω της συνεπακόλουθης αύξησης του κόστους. [13]

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση του πεδίου των ηλιοστατών πρέπει να βελτιστοποιηθεί για να καθοριστεί μια αποδοτική χωροταξική διαρρύθμιση. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης για τον καθορισμό του ακτινικού και αζιμουθιακού διαστήματος των ηλιοστατών και των σειρών. Μια από τις πιο κλασικές, αποτελεσματικές και διαδεδομένες διαδικασίες είναι το πρότυπο της *ακτινικής εναλλαγής*, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.4. Ένα τυπικό πεδίο ακτινικής εναλλαγής σε γεωγραφικό πλάτος 35 που χρησιμοποιεί τετράγωνους ηλιοστάτες μπορεί να εκφραστεί από τις σχέσεις:

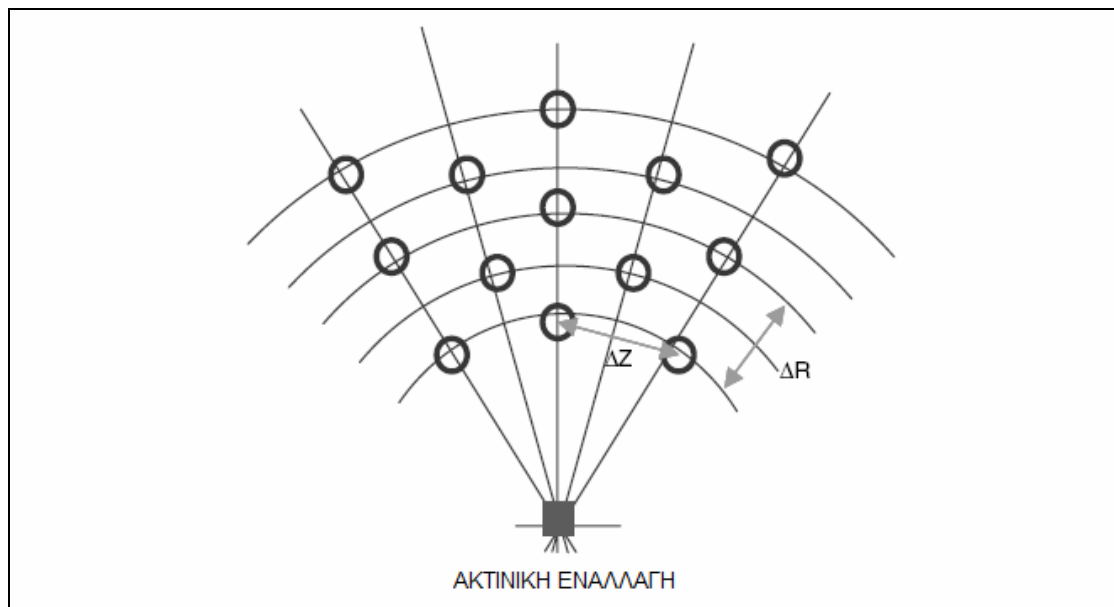
$$\Delta R = \frac{1.009}{\Theta} - 0.063 + 0.4803\Theta \quad (5)$$

$$\Delta Z = 2.170 - 0.6589\Theta + 1.247\Theta^2 \quad (6)$$

Όπου το Θ εκφράζεται σε rad και δίνεται από τον τύπο:

$$\Theta = \arctan \left[\frac{Z_T - Z_S/2}{x} \right]. \quad (7)$$

Βέβαια, η χωροταξική διάταξη του πεδίου των ηλιοστάτων καθορίζεται μετά από εξισορρόπηση μεταξύ των παραμέτρων κόστους και απόδοσης. Το κόστος και η απόδοση συχνά έχουν αντίθετες τάσεις. Έτσι για παράδειγμα όταν οι ηλιοστάτες τοποθετούνται πιο κοντά μεταξύ τους, αυξάνονται τα φαινόμενα σκίασης και μπλοκαρίσματος, αλλά μειώνονται οι σχετικές δαπάνες.



Σχήμα 3.4: Διάταξη πεδίου με ακτινική εναλλαγή, όπου το ΔZ εκφράζει το αζιμουθιακό διάστημα και το ΔR το ακτινικό διάστημα.

3.4.2 Ηλιακός Δέκτης

3.4.2.1 Γενική Περιγραφή του Δέκτη

Σε έναν σταθμό ηλιακού πύργου, ο δέκτης είναι ο εναλλάκτης θερμότητας όπου το ανακλώμενο ηλιακό φως από τον συλλέκτη μετατρέπεται σε ωφέλιμη θερμική ενέργεια. Η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία είναι σημαντικά μεγαλύτερες απ' ό,τι στους παραβολικούς συλλέκτες, γι' αυτό το λόγο απαιτείται ανώτερη τεχνολογία στη σχεδίαση του δέκτη καθώς και υλικά με υψηλές επιδόσεις. Ο ηλιακός δέκτης πρέπει να απορρόφα όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα της ανακλώμενης ακτινοβολίας περιορίζοντας στο ελάχιστο τις απώλειες. Στα περισσότερα σχέδια, ο ηλιακός δέκτης είναι μια ανεξάρτητη μονάδα που συγκεντρώνει όλη την ηλιακή ενέργεια, που συλλέγεται από το μεγάλο πεδίο των κατόπτρων, και επομένως απαιτείται καλή αντοχή στη φθορά του χρόνου. Δηλαδή οι προτεραιότητες κατά το σχεδιασμό του δέκτη είναι η θερμική απόδοση και η ανθεκτικότητα. Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες λειτουργίας του δέκτη - απορροφητή είναι μεταξύ 500°C και 1200°C, ενώ η προσπίπτουσα ηλιακή ροή κυμαίνεται μεταξύ 300 και 1000 kW/m². Η εικόνα στο σχήμα 3.5 εμφανίζει καθαρά την υψηλή ηλιακή ροή που φτάνει στον δέκτη. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια ταξινόμησης των ηλιακών δεκτών ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δέκτη και τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας. [6]

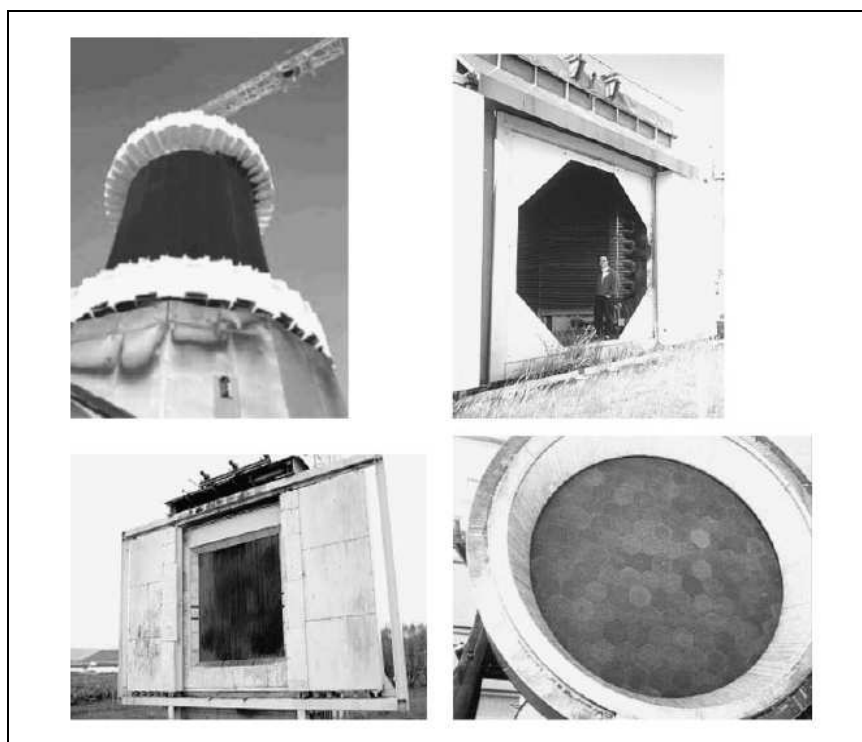


Σχήμα 3.5: Πλάγια όψη του τσιμεντένιου πύργου ύψους 80 m της μονάδας CESA-1 στην εγκατάσταση Plataforma Solar de Almeri´a στην Ισπανία.

3.4.2.2 Ταξινόμηση των Δεκτών

3.4.2.2(α) Με βάση τη γεωμετρική τους διαμόρφωση

Σύμφωνα με τη γεωμετρική διαμόρφωση, υπάρχουν βασικά δύο σχεδιαστικές δυνατότητες δέκτη, οι εξωτερικοί δέκτες και οι δέκτες τύπου κοιλότητας. Οι τελευταίοι αποτελούνται από μια κοιλότητα σε σχήμα κουτιού, στο εσωτερικό της οποίας διέρχονται οι ανακλώμενες ακτίνες. Καθώς η κοιλότητα έχει μόνο ένα πολυγωνικό άνοιγμα εισόδου, οι δέκτες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται στις διατάξεις με βόρεια πεδία (ή νότια πεδία) ηλιοστατών. Υπάρχουν δύο είδη εξωτερικού δέκτη. Το πρώτο είδος έχει τη μορφή ενός ορθογώνιου επίπεδου πλαισίου, ενώ ο δεύτερος έχει κυλινδρικό σχήμα. Οι κυλινδρικοί εξωτερικοί δέκτες είναι η χαρακτηριστική λύση που υιοθετείται για πεδία ηλιοστατών που περιβάλλουν τον πύργο. Το σχήμα 3.6 εμφανίζει παραδείγματα ενός κυλινδρικού εξωτερικού δέκτη, ενός δέκτη επίπεδου πλαισίου και ενός δέκτη με κοιλότητα. [6]



Σχήμα 3.6: Διαφορετικές διαμορφώσεις του ηλιακού δέκτη.
Από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω:
(α) κυλινδρικός εξωτερικός δέκτης με σωληνώσεις,
(β) δέκτης κοιλότητας με σωληνώσεις
(γ) δέκτης επίπεδου πλαισίου
(δ) ογκομετρικός δέκτης

3.4.2.2(β) Με βάση τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας

Οι τεχνολογίες για τη μετάδοση της ηλιακής θερμότητας σε κάποιο θερμικό ρευστό είναι δύο. Στην πρώτη τοποθετούνται πάνω στο δέκτη πλαίσια που περιέχουν σωληνώσεις. Ο δέκτης μπορεί να είναι είτε τύπου κοιλότητας είτε εξωτερικός. Μέσα στους σωλήνες ρέει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας και αποσπά τη θερμότητα που συλλέγεται από την εξωτερική μαύρη επιφάνεια του πλαισίου μέσω του φαινομένου της συναγωγής. Επομένως κάθε πλαίσιο λειτουργεί ως ένας εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας. 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 (peak). Στον πίνακα 3.3 φαίνεται ότι μόνο με υγρά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, όπως το νάτριο, είναι δυνατόν να λειτουργήσει ο δέκτης σε ηλιακές ροές πάνω από 1 MW/m^2 .

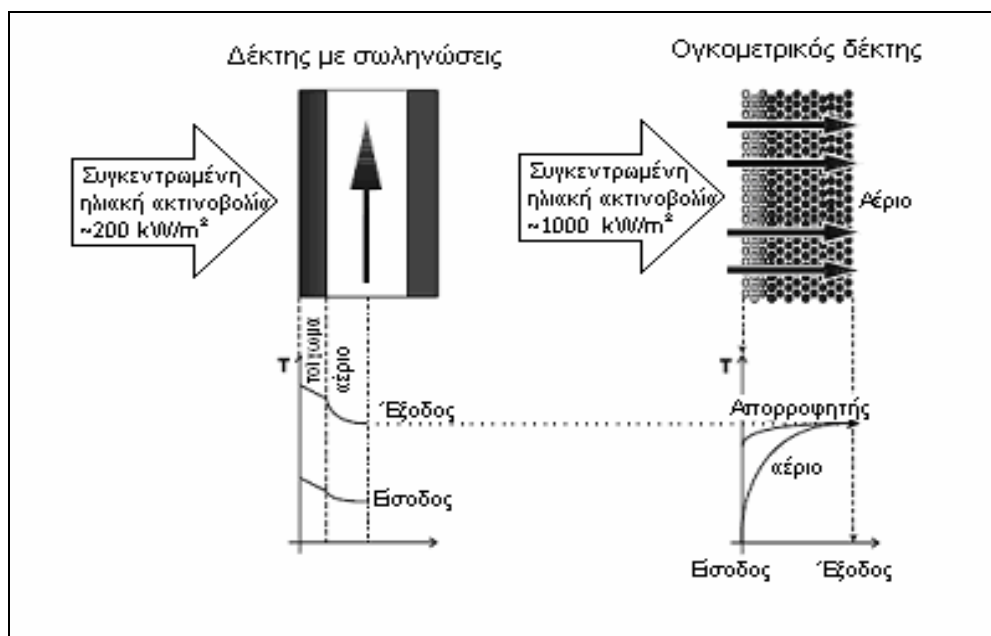
Η δεύτερη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση της θερμότητας σε κάποιο ρευστό είναι οι ογκομετρικές διατάξεις. Στις διατάξεις αυτές η ηλιακή ακτινοβολία δεν απορροφάται μόνο από μια εξωτερική επιφάνεια (όπως είναι η εξωτερική μαύρη επιφάνεια των πλαισίων) αλλά διεισδύει στο εσωτερικό της ογκομετρικής διάταξης. Εδώ, δηλαδή, ως εναλλάκτης συναγωγής δε λειτουργεί μόνο μια επιφάνεια αλλά ολόκληρος ο όγκος του δέκτη. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθούν στους ογκομετρικούς δέκτες ιδιαίτερα πορώδεις δομές, όπως ανθεκτικά στη θερμότητα σύρματα, σε στρώσεις ή πεπλεγμένα μεταξύ τους, και αφρώδη μεταλλικά ή κεραμικά καλούπια. Το μέσο μεταφοράς της θερμότητας (συνήθως ο αέρας) εξαναγκάζεται να διέλθει διαμέσω της πορώδους δομής και θερμαίνεται με το φαινόμενο της συναγωγής. Το σχήμα 3.7 εμφανίζει μια σύγκριση των δύο αρχών απορρόφησης (σωληνώσεις και ογκομετρική διάταξη). Οι καλοί ογκομετρικοί απορροφητές είναι εξαιρετικά πορώδεις και επιτρέπουν στην ακτινοβολία να διεισδύει βαθειά μέσα στη δομή τους. Υποδομές μικρού πάχους (συρμάτινα πλέγματα, τοιχώματα, δοκοί) εξασφαλίζουν καλύτερη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή. Ένας καλός ογκομετρικός απορροφητής παρουσιάζει το λεγόμενο "ογκομετρικό φαινόμενο", που σημαίνει ότι η ακτινοβολούμενη πλευρά του

απορροφητή είναι σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία του θερμικού ρευστού κατά την έξοδο του από τον απορροφητή. [6]

Η επιλογή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας δέκτη είναι μια σύνθετη και δύσκολη εργασία, καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας, το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και ο θερμοδυναμικός κύκλος επηρεάζουν τη μελέτη. Γενικά, οι τεχνολογίες με σωληνώσεις επιτρέπουν είτε υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 1000°C) είτε υψηλές πιέσεις (μέχρι 120 bar), αλλά όχι και τα δύο. Οι ογκομετρικοί δέκτες επιτρέπουν ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες αλλά περιορίζουν τις πιέσεις κάτω από 15 bar.

Ρευστό	Νερό / Ατμός	Υγρό Νάτριο	Τηγμένο άλας (νιτρικό)	Ογκομετρικός αέρας
Ηλιακή ροή (MW/m ²)				
Μέση τιμή	0.1-0.3	0.4-0.5	0.4-0.5	0.5-0.6
Μέγιστη τιμή	0.4-0.6	1.4-2.5	0.7-0.8	0.8-1.0
Θερμοκρασία εξόδου ρευστού (°C)	490-525	540	540-565	700-800(>800)

Πίνακας 3.3: Θερμοκρασία λειτουργίας και ηλιακή ροή στους δέκτες της εγκατάστασης Solar Two.



Σχήμα 3.7: Αρχές μετάδοσης θερμότητας σε σωληνοειδείς και ογκομετρικούς δέκτες.

3.4.2.3 Δέκτης με Σωληνώσεις

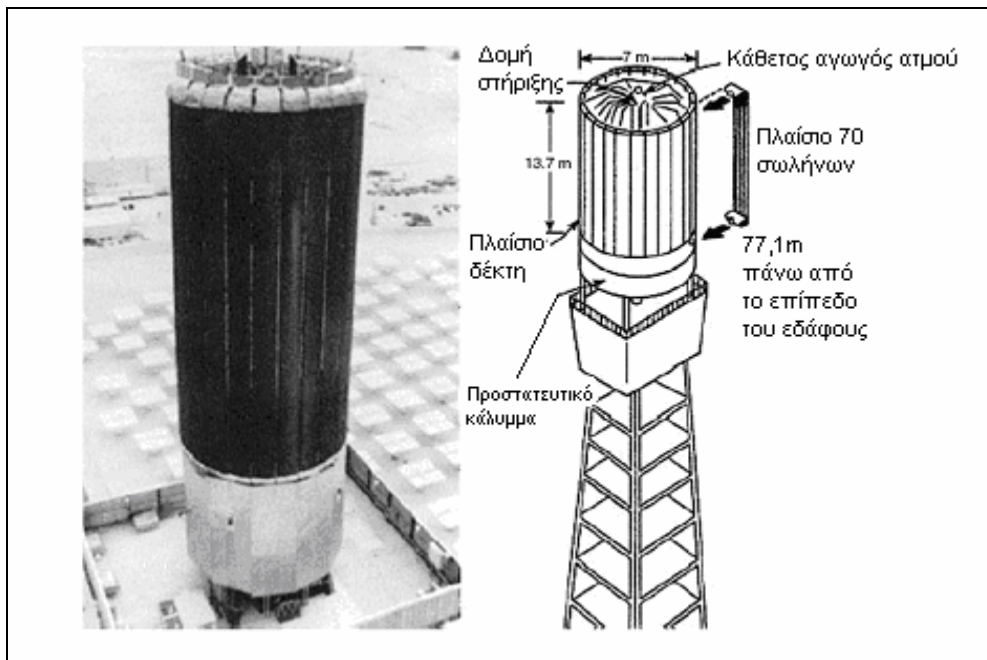
Τα πιο συνηθισμένα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν είναι οι δέκτες με σωληνώσεις, μέσα στις οποίες κυκλοφορεί το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Οι σωληνώσεις αυτές είναι τοποθετημένες πάνω σε μεταλλικά ή κεραμικά πλαίσια. Τα συμβατικά πλαίσια με μαυρισμένους μεταλλικούς σωλήνες έχουν ως ρευστό ατμό, νάτριο και τηγμένα άλατα για θερμοκρασίες μέχρι και 500-600°C. Πολύ μικρότερη εμπειρία είναι διαθέσιμη στους δέκτες με αέριο ως ρευστό, αν και εδώ οι θερμοκρασίες φτάνουν τους 800-900°C. Οι δέκτες τύπου κοιλότητας έχουν εξεταστεί στη Γαλλία (Themis) και την Ισπανία (πρόγραμμα IEA-SSPS-CRS και σταθμός CESA-1). Οι εξωτερικοί σωληνοειδείς δέκτες χρησιμοποιήθηκαν στο σταθμό Solar One (ΗΠΑ), στο πρόγραμμα IEA-SSPS-CRS (Ισπανία) και στον σταθμό Solar Two (ΗΠΑ). [13]

Ο σταθμός Solar One στην Καλιφόρνια, χρησιμοποίησε έναν δέκτη νερού-ατμού. Λειτουργήσε από το 1984 ως το 1988 και ήταν ο μεγαλύτερος κεντρικός δέκτης στον κόσμο για δύο δεκαετίες. Ήταν ένας εξωτερικός κυλινδρικός δέκτης φτιαγμένος από 24 ορθογώνια πλαίσια πλάτους 1 m και ύψους 14 m (σχήμα 3.8). Τα έξι πλαίσια στη νότια πλευρά προθέρμαιναν το νερό. Το προθερμασμένο νερό μεταφερόταν έπειτα στους λέβητες και στα πλαίσια της βόρειας πλευράς, όπου και υπερθερμαινόταν. Οι προδιαγραφές του σχεδίου ήταν για ατμό σε θερμοκρασία 516°C και πίεση 100 bar. Μέχρι 42 MWt (θερμική ισχύς) μπορούσαν να απορροφηθούν από το δέκτη. Η αρχική θερμική αποδοτικότητα ήταν 77% για μια απορροφημένη ενέργεια 34 MWt. Εφόσον τα πλαίσια βάφτηκαν μαύρα και φροντίστηκε η επιφάνεια τους, η απόδοση αυξήθηκε σε 82%. Σχεδόν σταθερές εξακριβώθηκαν οι θερμικές απώλειες (4,5-5 MWt) για αυτό το είδος δέκτη. Οφείλονταν κατά κύριο λόγο στις απώλειες ακτινοβολίας και στη λειτουργία του δέκτη σε σταθερή θερμοκρασία ρυθμίζοντας κάθε στιγμή την τιμή της θερμορροής. Ραγίσματα, παραμορφώσεις και διαρροές παρατηρήθηκαν στους σωλήνες μετά από 18 μήνες λειτουργίας. Η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ της περιφέρειας και του κέντρου των σωλήνων μπορεί να φτάσει τους 111°C κατά τη διάρκεια των εκκινήσεων και των παύσεων.

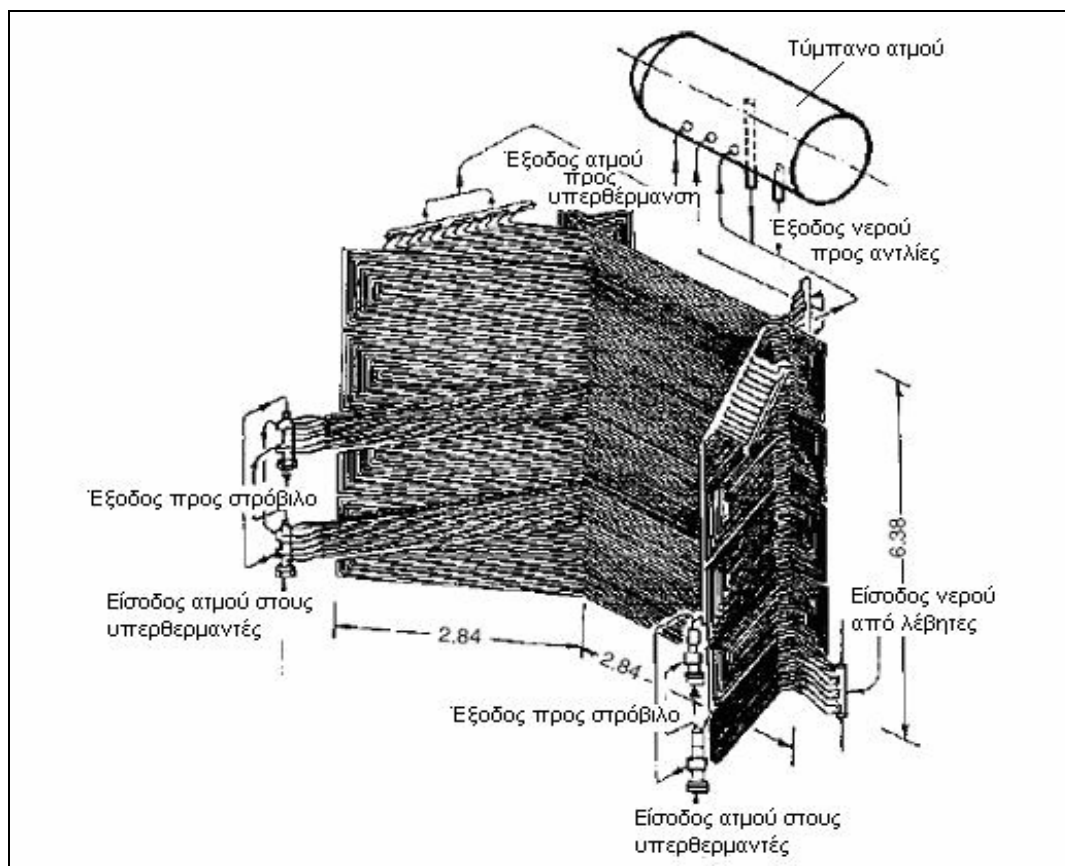
Ο σταθμός CESA-1, που λειτουργήσε 1631 ώρες μεταξύ του 1983 και του 1986 στην Almeria, Ισπανία, ήταν ένας δέκτης τύπου κοιλότητας με νερό-ατμό ως

ρευστό μεταφοράς θερμότητας που αντίκριζε το βορρά. Το άνοιγμα του με εμβαδόν 3.4 m^2 είχε κλίση 20° προς το πεδίο των ηλιοστάτων. Ο λέβητας αποτελούνταν από τρία πλαίσια με μεταλλικούς σωλήνες (με ενεργό επιφάνεια 48.6 m^2) και έναν μεταλλικό υπερθερμαντή (τύμπανο ατμού). Η διαμόρφωση των πλαισίων και η θέση του τύμπανου του ατμού φαίνονται στο σχήμα 3.9. Η μέγιστη προσπίπτουσα ενέργεια στο δέκτη με τιμή $6,7 \text{ MW}$ παρήγαγε υπέρθερμο ατμό στα 110 kg/cm^2 και 525°C . Προβλήματα κατά τη λειτουργία και αξιοπρόσεχτες παραμορφώσεις παρουσιάστηκαν στο τμήμα υπερθέρμανσης, αναγκάζοντας έτσι τον δέκτη να λειτουργεί σε χαμηλότερη ροή. Εξαιτίας αυτού, η λειτουργία έπρεπε να προχωράει αργά κατά τη διάρκεια της εκκίνησης και των μεταβατικών φαινομένων, επιβαρύνοντας την αποδοτικότητα. Περισσότερο από 45 λεπτά απαιτούνταν για να επιτευχθούν ονομαστικές συνθήκες.

Οι σωληνοειδείς δέκτες τηγμένου άλατος αντιπροσωπεύονται από το σύστημα Themis (δέκτης κοιλότητας) και το Solar Two (κυλινδρικός εξωτερικός δέκτης). Σε ένα σύστημα τηγμένου άλατος, το ψυχρό άλας περίπου στους 290°C αντλείται από μια δεξαμενή στο επίπεδο του εδάφους στον δέκτη που είναι τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου όπου και θερμαίνεται από το συγκεντρωμένο ηλιακό φως στους 565°C . Μίγματα τηγμένων αλάτων με 60% νιτρικό νάτριο και 40% νιτρικό κάλιο έχουν εξεταστεί εκτενώς με ικανοποιητικά αποτελέσματα στη Γαλλία και στις ΗΠΑ. Τα τηγμένα νιτρικά άλατα παρέχουν καλή θερμική αγωγιμότητα ($0,52 \text{ W/mK}$) και θερμοχωρητικότητα ($1,6 \text{ kJ/kgK}$) σε σχετικά χαμηλές τιμές κόστους. Τα νιτρικά αυτά άλατα, αν και αποτελούν ένα άριστο μέσο θερμικής αποθήκευσης, μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα λόγω του σχετικά υψηλού σημείου πήξης τους (220°C). Για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό και να παραμείνει το άλας τηγμένο, ηλεκτρικά καλώδια συνδέονται με την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων έτσι ώστε οι σωλήνες να κρατιούνται θερμοί μέσω της θέρμανσης της αντίστασης. [13]



Σχήμα 3.8: Εξωτερικός κυλινδρικός σωληνοειδής δέκτης που χρησιμοποιήθηκε στον σταθμό Solar One στην Καλιφόρνια.



Σχήμα 3.9: Εσωτερική άποψη των σωληνωτών πλαισίων από τον δέκτη κοιλότητας με νερό/ατμό ως μέσο μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα CESA-1 στην Ισπανία.

3.4.2.4 Ογκομετρικός Δέκτης

Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι ογκομετρικοί δέκτες χρησιμοποιούν ιδιαίτερα πορώδεις δομές για την απορρόφηση της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας βαθιά μέσα στο εσωτερικό της κατασκευής τους (μέσα στον "όγκο" τους). Το μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι συνήθως ο αέρας. Οι ογκομετρικοί δέκτες μπορούν να λειτουργήσουν ανοικτοί, ακάλυπτοι δηλαδή ως προς το περιβάλλον ή να περιβάλλονται από ένα διαφανές τζάμι. Σε δέκτες με μεταλλικά πορώδη υλικά είναι δυνατό να επιτευχθούν θερμοκρασίες εξόδου αέρα μέχρι 850°C, ενώ σε δέκτες με κεραμικές ίνες, αφρούς ή μονόλιθους (SiC), η θερμοκρασία μπορεί να ξεπεράσει τους 1000°C.

Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός αερόψυκτου ογκομετρικού δέκτη είναι:

- Ο αέρας είναι ελεύθερος και πλήρως διαθέσιμος από το περιβάλλον.
- Υψηλότερες θερμοκρασίες είναι δυνατές και επομένως η ένταξη της ηλιακής θερμικής ενέργειας σε πιο αποδοτικούς θερμοδυναμικούς κύκλους φαίνεται επιτεύξιμη.
- Καμία αλλαγή φάσης (από υγρή σε αέρια).
- Απλούστερο σύστημα.
- Γρήγορη απόκριση στα μεταβατικά φαινόμενα ή στις αλλαγές της προσπίπτουσας ροής.
- Δεν απαιτείται ιδιαίτερη ασφάλεια.
- Κανένας περιβαλλοντικός αντίκτυπος.

Οι ανοικτοί ογκομετρικοί δέκτες έχουν σημειώσει δραματική πρόοδο από τις αρχικές καινοτόμες εμπειρίες στα τέλη της δεκαετίας του '70 και στις αρχές της δεκαετίας του '80. Περισσότεροι από 20 απορροφητές και πρωτότυπα στη σειρά των 200-300 kW_{th} έχουν εξεταστεί στο πεδίο δοκιμής Sulzer στον σταθμό PSA. Απορροφητές με συρμάτινα πλέγματα και αφρώδη μεταλλικά και κεραμικά υλικά αναπτύχθηκαν ανά τον κόσμο. Ο σχετικά μεγάλος αριθμός ογκομετρικών προτύπων που δοκιμάστηκε έχει καταδείξει τη δυνατότητα παραγωγής θερμού αέρα σε θερμοκρασίες 1000°C και άνω. Η μέση ηλιακή ροή είναι 400 kW/m² ενώ η μέγιστη φτάνει τα 1000 kW/m². Οι συγκριτικές αξιολογήσεις έχουν καταδείξει ότι το

συρμάτινο πλέγμα έχει τις χαμηλότερες θερμικές απώλειες (πίνακας 3.4). Αυτό μπορεί κυρίως να εξηγηθεί από την υψηλή παρουσία πόρων στον συγκεκριμένο απορροφητή, πράγμα που επιτρέπει σε ένα μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας να διεισδύει βαθιά μέσα στον όγκο του. Η επιλογή των κεραμικών ως υλικό του απορροφητή, καθιστά δυνατές υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου του αέρα. Αν και οι κεραμικοί απορροφητές έχουν χαμηλότερες αποδοτικότητες στους 680°C (αυτή είναι η θερμοκρασία αναφοράς για εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται θερμός αέρας ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού σε έναν εναλλάκτη θερμότητας), έχουν επιδείξει υψηλότερες αποδοτικότητες της τάξης του 80% για θερμοκρασίες 800°C. [13]

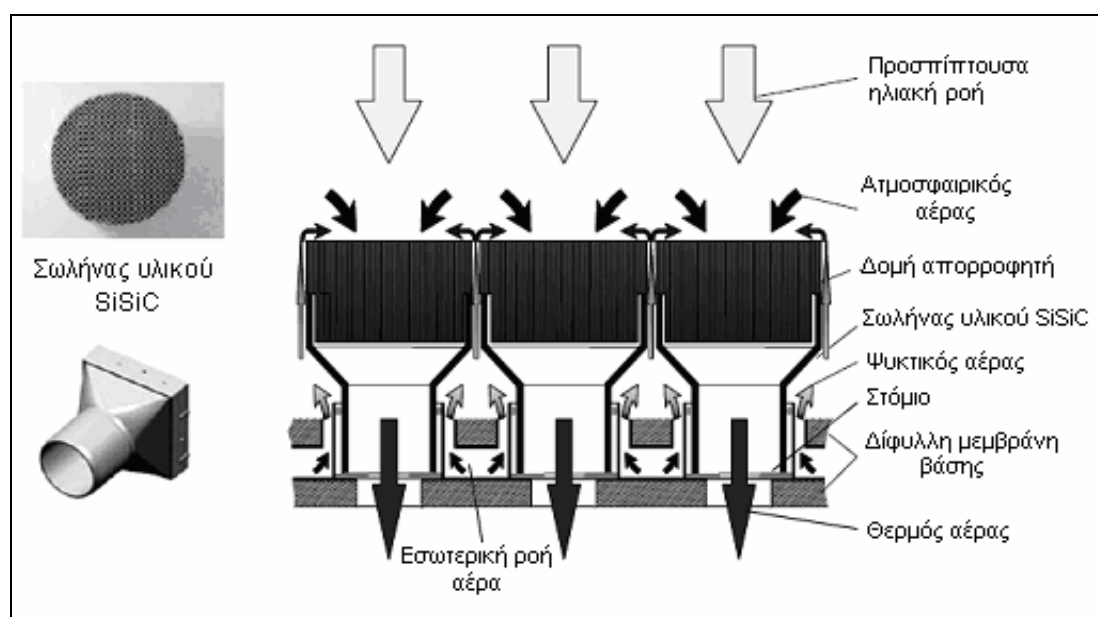
Ένας σημαντικός αριθμός ογκομετρικών πρωτοτύπων στάθηκε ανίκανος να φθάσει στις σχεδιαστικές ονομαστικές συνθήκες λόγω τοπικών ρωγμών και ζημιών. Οι αποτυχίες αυτές, σε πολλές περιπτώσεις, προκλήθηκαν από θερμικούς κραδασμούς, υλικές ατέλειες ή εσφαλμένη λειτουργία. Στα μέσα της δεκαετίας του '80, μερικά προγράμματα που προωθήθηκαν από το Γερμανικό Αεροδιαστημικό Κέντρο μελέτησαν τη δυναμική των ρευστών και τους θερμικούς μηχανισμούς που ενυπάρχουν στους ογκομετρικούς απορροφητές. Ένα από τα συμπεράσματα αυτών των μελετών ήταν ότι στα ιδιαίτερα πορώδη υλικά απορρόφησης η ροή του αέρα μέσω της δομής του απορροφητή είναι ασταθής κάτω από υψηλή ηλιακή ροή, πράγμα που οδηγεί στην καταστροφή (ρωγμές ή τήξη) της κατασκευής του απορροφητή ύστερα από τοπική υπερθέρμανση. Ως συνέπεια αυτής της ανάλυσης, αναπτύχθηκαν οι μονολιθικοί κεραμικοί απορροφητές που είναι ικανοί να εργάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες και ροές λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας και της γεωμετρικής πολυσυναρτησιακότητας τους. Οι απορροφητές αυτοί εφαρμόστηκαν στο γερμανο-ισπανικό πρόγραμμα HiTRec και αργότερα στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα Solair.

Η αρχή λειτουργίας και η διάταξη συναρμολόγησης των δεκτών HiTRec-Solair παρουσιάζονται στα σχήματα 3.10 και 3.11 αντίστοιχα. Η διάταξη αποτελείται από μια βάση ανοξείδωτου χάλυβα. Πάνω στη βάση αυτή, που λειτουργεί ως στήριγμα, τοποθετείται ένα σύνολο κεραμικών μονάδων απορρόφησης που δεν έχουν επαφή και είναι ανεξάρτητες η μια από την άλλη. Στο πίσω μέρος κάθε κεραμικής μονάδας υπάρχει προσδεμένος ένας σωλήνας. Η βάση στήριξης είναι μια δίφυλλη μεμβράνη που μπορεί να δροσίζεται είτε από τον αέρα του περιβάλλοντος (αέρας ανοικτού βρόχου) είτε από αέρα που ανακυκλώνεται (αέρας κλειστού βρόχου). Οι σωλήνες που προσδέονται στις μονάδες απορρόφησης περνούν μέσα από τρύπες στο

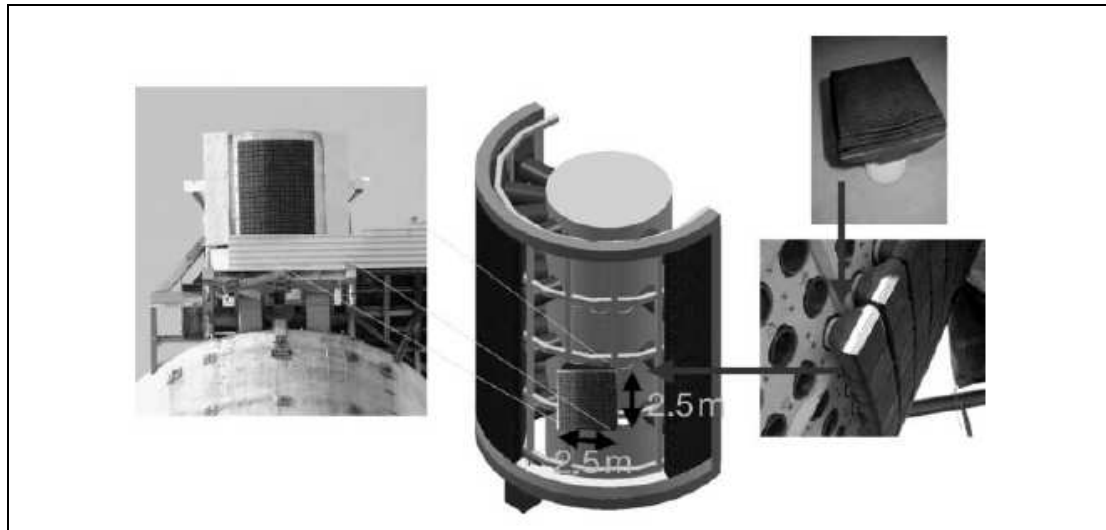
μπροστινό φύλλο της βάσης και συγκολλούνται στο πίσω φύλλο. Ο ψυχρός αέρας που κυκλοφορεί μεταξύ των δύο φύλλων περνά ανάμεσα από τους σωλήνες και ανάμεσα από τα κενά μεταξύ των μονάδων απορρόφησης, καθώς εξέρχεται προς το περιβάλλον. Ο εξερχόμενος αέρας και ο αέρας του περιβάλλοντος αναμιγνύονται και απορροφούνται προς τα πίσω μέσα, τώρα, από τις κεραμικές μονάδες απορρόφησης. Καθώς διαπερνούν τη δομή απορρόφησης, ο αέρας θερμαίνεται με συναγωγή. Στη συνέχεια διέρχεται μέσα από τους σωλήνες. Κάθε σωλήνας έχει ένα στόμιο, που το άνοιγμα του ρυθμίζει το ποσοστό θερμορροής του αέρα ώστε να παρέχονται ομοιογενείς θερμοκρασίες εξόδου από κάθε σωλήνα. [13]

Τύπος δέκτη	Σχεδιασμός	Κατασκευή απορροφητή	Παρουσία πόρων ($V_p/V_{ολ}$)	Πάχος απορροφητή	Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα	Απόδοση 680 °C (%)
Μεταλλικό σύρμα	SULZER	Πλέγμα συρμάτων	0.95	35	Ανοξείδωτο ατσάλι	20	75
Αφρώδη κεραμικά υλικά	SANDIA	Άμορφος αφρός	0.8	30	Al_2O_3	25	54
Λεπτό μεταλλικό έλασμα	Interatom/Emitec	Πρισματικά κανάλια	0.9	90	$X_5CrAl_2O_5$	20	57
Λεπτό κεραμικό έλασμα	DLR / Ceramtec	Πρισματικά κανάλια	0.4	92	SiSiC	80	60
Κεραμικοί σωλήνες	DLR / STOBBE	Πρισματικά κανάλια	0.5+0.12 apert	80	SiSiC	80	60

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες και αποδόσεις για διάφορα υλικά του απορροφητή που εξετάστηκαν στην εγκατάσταση Plataforma Solar de Almeria.



Σχήμα 3.10: Αρχή λειτουργίας των ογκομετρικών δεκτών που χρησιμοποιήθηκαν στα προγράμματα HiTRec και Solair.

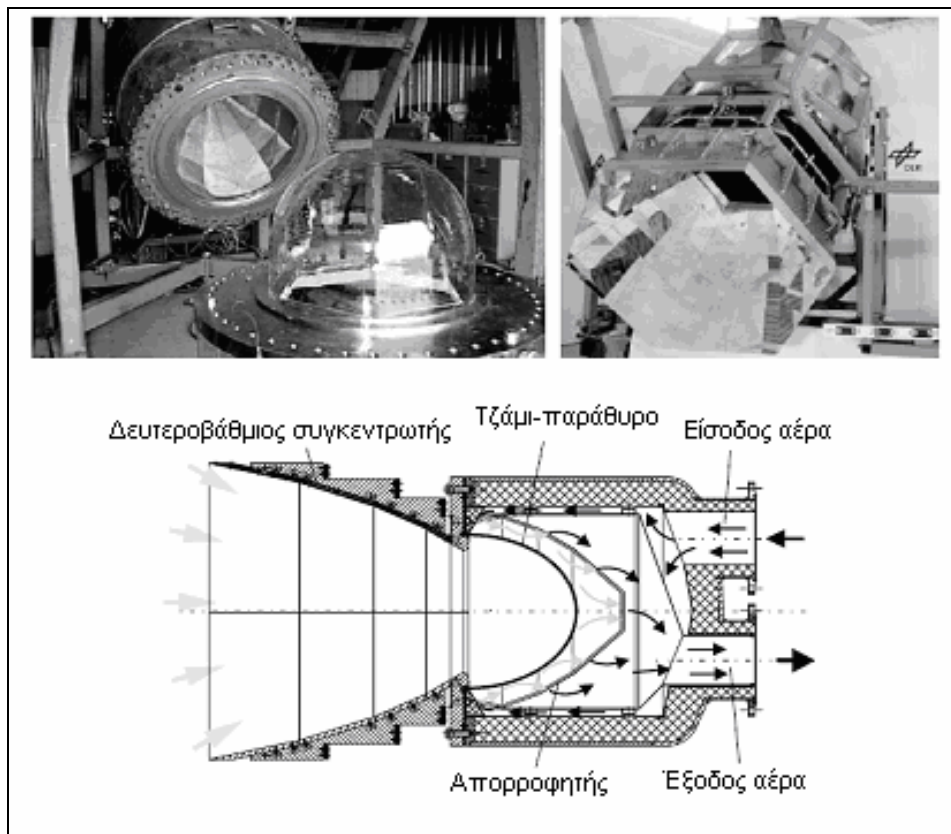


Σχήμα 3.11: Στα αριστερά ένας δέκτης 3 MW τύπου Solair που εξετάστηκε στο πρόγραμμα PSA. Η πολυσυναρτησιακότητα της σχεδιαστικής αυτής αρχής επιτρέπει στο μέγεθος του δέκτη να είναι ευμετάβλητο. Στο κέντρο φαίνεται μια πρόταση ενός δέκτη 55 MW που αποτελείται από μια συστάδα υπομονάδων 3 MW.

Μια άλλη δυνατότητα, είναι η χρήση ογκομετρικών δεκτών που περιβάλλονται από ένα τζάμι-παράθυρο. Εδώ ο αέρας ανακυκλώνεται σε έναν κλειστό βρόχο. Μια ελκυστική εφαρμογή είναι η χρήση των ηλιακών αυτών δεκτών ως θάλαμο προθέρμανσης σε έναν αεριοστρόβιλο. Το 1996, το Γερμανικό Αεροδιαστημικό Κέντρο άρχισε ένα ειδικό πρόγραμμα ανάπτυξης αποκαλούμενο REFOS με σκοπό την παραγωγή ενός βέλτιστου σχεδίου για έναν δέκτη με τζάμι ισχύος 350 kW ικανό να λειτουργεί σε θερμοκρασίες μέχρι 1000°C και σε πιέσεις μέχρι 15 bar. Φωτογραφία και σχηματική παράσταση του δέκτη αυτού παρουσιάζονται στο σχήμα 3.12. Ο στόχος του προγράμματος REFOS ήταν να αναπτύξει, να κατασκευάσει και να εξετάσει ογκομετρικούς δέκτες που διατηρούνται υπό ατμοσφαιρική πίεση για σύζευξη με αεριοστρόβιλους. Βέβαια οι δέκτες αυτοί είναι πιθανόν να αποτελούνται από παραπάνω από μία μονάδες των 350 kW. [13]

Οι τυπικές προδιαγραφές των ανεξάρτητων μονάδων 350 kW ενός δέκτη REFOS είναι:

- Θερμική ισχύς που απορροφάται : 350 kW ανά μονάδα.
- Απόλυτη πίεση : 15 bar.
- Θερμοκρασία εξόδου αέρα: 800°C για μεταλλικό απορροφητή και μέχρι 1000°C για κεραμικό.
- Αύξηση της θερμοκρασίας ανά μονάδα: 150°C.
- Απόδοση δέκτη (συμπεριλαμβανομένου και του δευτερεύοντος): 80%.



Σχήμα 3.12: Παράδειγμα της υπομονάδας REFOS ισχύος 350 kW.

3.4.2.5 Απόδοση και Απώλειες του Δέκτη

Οι θερμικές και οπτικές απώλειες είναι οι βασικές παράμετροι για τον προσδιορισμό της αποδοτικότητας ενός ηλιακού δέκτη. Η εξίσωση παρακάτω περιγράφει την ενεργειακή ισορροπία κέρδους και απωλειών σε έναν δέκτη, που περιβάλλεται από ένα διαφανές τζάμι-παράθυρο. Δηλαδή η ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να περάσει πρώτα από το διαφανές τζάμι προτού φθάσει στην τελική επιφάνεια απορρόφησης (απορροφητή). [6]

$$\eta_{\text{rec}} = (a\tau_w) + (a\varepsilon_w) \frac{\sigma T_w^4}{C\Phi} - (\varepsilon\bar{\rho}) \frac{\sigma T^4}{C\Phi} - U \frac{(T - T_a)}{C\Phi}. \quad (8)$$

$$\bar{\rho} = 1 - \rho_w = a_w + \tau_w$$

όπου,

- T, T_w, T_a : Είναι οι θερμοκρασίες σε Kelvin του απορροφητή, του διάφανου τζαμιού και του περιβάλλοντος αντίστοιχα.
- $\varepsilon, \varepsilon_w$: Είναι οι συντελεστές εκπομπής του απορροφητή και του τζαμιού αντίστοιχα. (Ο λόγος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια επιφάνεια προς την ακτινοβολία που εκπέμπει μέλαν σώμα ίδιας θερμοκρασίας. Προφανώς $0 \leq \varepsilon, \varepsilon_w \leq 1$.)
- a, a_w : Οι συντελεστές απορρόφησης του απορροφητή και του τζαμιού αντίστοιχα. ($0 \leq a, a_w \leq 1$)
- ρ_w : Ο συντελεστής ανάκλασης του διάφανου τζαμιού ($0 \leq \rho_w \leq 1$).
- τ_w : Ο συντελεστής διαπερατότητας του διάφανου τζαμιού ($0 \leq \tau_w \leq 1$).
- σ : Η σταθερά του Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$).
- $(C\Phi)$: Η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από το πεδίο του συλλέκτη και συγκεντρώνεται στον δέκτη (W/m^2).
- U : Ο συντελεστής απωλειών συναγωγής ($\text{W/m}^2\text{K}$).

Ο δεύτερος όρος στο δεξιό μέρος της εξ.8 εκφράζει την ενέργεια που εκπέμπεται σε θερμοκρασία T_w από το θερμό τζάμι προς τον απορροφητή. Επομένως, αυτός ο δεύτερος όρος αποτελεί κέρδος που προστίθεται στον πρώτο όρο. Οι απώλειες στο δέκτη μπορεί να είναι είτε ακτινοβολίας (είναι ο μηχανισμός μετάδοσης

θερμότητας από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων) είτε συναγωγής (είναι η μετάδοση θερμότητας που πραγματοποιείται μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού σε επαφή με την επιφάνεια, όταν αυτά βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία). Οι απώλειες ακτινοβολίας διαμέσω της επιφάνειας ανοίγματος του δέκτη εκφράζονται από τον τρίτο όρο της εξ.8. Αυτές οι απώλειες ακτινοβολίας εξαρτώνται από τον συντελεστή εκπομπής ϵ του απορροφητή και από τον συντελεστή ανάκλασης ρ_w του τζαμιού.

Οι απώλειες συναγωγής του δέκτη προς το περιβάλλον εκφράζονται από τον τέταρτο όρο της εξ.8. Καθορίζονται από το συντελεστή απωλειών θερμότητας U , ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την εξαναγκασμένη συναγωγή λόγω αέρα. Το U μπορεί να μειωθεί αρκετά μέσω καλής θερμικής μόνωσης και μειωμένης επιφάνειας ανοίγματος. Γενικά, αυτός ο συντελεστής λαμβάνεται από τον αδιάστατο αριθμό Nusselt και στη συνέχεια ως μια συνάρτηση των αριθμών Reynolds (Re), Prandtl (Pr) και Grashoff (Gr). Η αναγκασμένη συναγωγή καθορίζεται από συνδυασμούς των αριθμών Re και Pr, ενώ η φυσική συναγωγή χαρακτηρίζεται από τους αριθμούς Pr και Gr.

Ο υπολογισμός των απωλειών συναγωγής στον ηλιακό πύργο εξαρτάται από το αν ο δέκτης είναι τύπου κοιλότητας ή αν είναι εξωτερικός κυλινδρικός (οι τεχνολογίες αυτές περιγράφονται παρακάτω). Για έναν εξωτερικό δέκτη ο μεικτός συντελεστής απωλειών (δηλαδή και για εξαναγκασμένη και για φυσική συναγωγή) μπορεί να θεωρηθεί από τη σχέση: [6]

$$U_{mix} = \left(h_{εξαν.}^{3.2} + h_{φυσ.}^{3.2} \right)^{1/3.2}, \quad (9)$$

όπου $h_{φυσ.} = 9.09 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$ για μια μέση θερμοκρασία απορρόφησης 480° , ενώ για την $h_{εξαν.}$ υπάρχουν τρεις περιπτώσεις ανάλογα από τη διάμετρο του δέκτη. Σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή του αριθμού Reynolds είναι $Re=(1.751 \times 10^5)D$.

Case (1): $D \leq 4.0 \text{ m}$	$h_{forced} = \left(\frac{1}{D}\right) \cdot \left[0.3 + 0.488 \cdot Re^{0.5} \cdot \left(1.0 + \left(\frac{Re}{282,000}\right)^{0.625} \right)^{0.8} \right] \cdot 0.04199,$
Case (2): $4.0 < D \leq 125.0$	$h_{forced} = 14.0,$
Case (3): $D > 125.0 \text{ m}$	$h_{forced} = 33.75 \cdot D^{-0.19}.$

Για έναν συλλέκτη κοιλότητας οι απώλειες συναγωγής μπορούν να υπολογιστούν άμεσα από τους τύπους:

$$Q_{\text{συναγ.}} = Q_{\text{εξαν.}} + Q_{\text{φυσ.}} \quad (\text{W}), \quad (10)$$

$$Q_{\text{εξαν.}} = 7631 \frac{A}{W_{\text{ap}}^{0.2}}, \quad (11)$$

$$Q_{\text{φυσ.}} = 5077 A_{\text{cav}}, \quad (12)$$

Όπου A είναι η επιφάνεια ανοίγματος (m^2), W_{ap} το πλάτος ανοίγματος (m) και A_{cav} είναι η προσέγγιση της συνολικής εσωτερικής επιφάνειας της κοιλότητας (m^2).

3.5 Περιγραφή των Διαφορετικών Τρόπων Λειτουργίας

3.5.1 Εισαγωγή

Τα περισσότερα πιλοτικά προγράμματα ηλιακών πύργων που λειτούργησαν τη δεκαετία το 80' έχουν χαρακτηριστεί ως μικρά καθώς η ισχύς τους κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 10 MW. Τα θερμικά ρευστά που έχουν χρησιμοποιηθεί στο δέκτη είναι υγρό νάτριο, κορεσμένος ή υπέρθερμος ατμός, νιτρικά κυρίως τηγμένα άλατα και ατμοσφαιρικός αέρας. Το σύνολο των εμπειριών έχουν καταδείξει την τεχνική δυνατότητα πραγματοποίησης εμπορικών εγκαταστάσεων ηλιακού πύργου. Η μεγαλύτερη εμπειρία έχει συλλεχθεί από διάφορα ευρωπαϊκά προγράμματα που βρίσκονται στην Ισπανία στις εγκαταστάσεις Power Solar d' Almeria καθώς και από τους σταθμούς Solar One και Solar Two στις ΗΠΑ.

Από τις αρχές του 1990 και μετά, οι περισσότερες προτάσεις για την πρώτη γενιά εμπορικών εγκαταστάσεων έχουν εστιάσει στο νιτρικό άλας και στον ατμοσφαιρικό αέρα ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας στον δέκτη. Στις ΗΠΑ, η τεχνολογία που χρησιμοποιείται κυρίως βασίζεται σε ηλιακές μόνο εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με μεγάλη ικανότητα θερμικής αποθήκευσης και νιτρικό τηγμένο άλας ως ρευστό λειτουργίας. Η χρήση των ογκομετρικών δεκτών, τόσο με αέρα σε κλειστούς βρόχους για μια αποδοτική ένταξη σε αεριοστροβιλικούς κύκλους όσο και με ελεύθερο αέρα για ενδιάμεσες λύσεις αποθήκευσης ή/και υβριδοποίησης, έχει προωθηθεί στην Ευρώπη και το Ισραήλ σε προγράμματα όπως το SOLGATE, το Solair και το ConSolar. Τέλος, μια πιο συντηρητική προσέγγιση στην Ισπανία χρησιμοποιεί τους ηλιακούς δέκτες κορεσμένου ατμού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε προγράμματα όπως το Solgas, το COLON SOLAR και το PS10. [13]

3.5.2 Εγκαταστάσεις Νερού/Ατμού

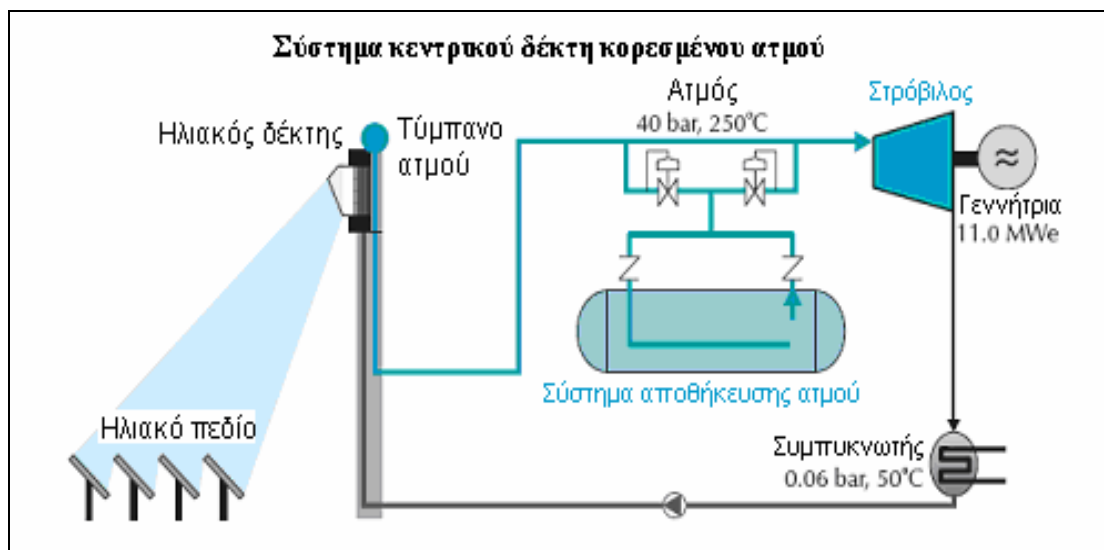
Η παραγωγή υπέρθερμου ατμού στον ηλιακό δέκτη έχει καταδειχθεί σε διάφορες εγκαταστάσεις, όπως είναι οι Solar One (ΗΠΑ), Eurelios (Ιταλία) και CESA-1 (Ισπανία). Εμφανίστηκαν όμως προβλήματα σχετικά με την ρύθμιση της λειτουργίας τμημάτων με ανόμοιους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας όπως για παράδειγμα οι λέβητες και οι υπερθερμαντές. Καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με τη διάρκεια ζωής και το πρόβλημα της ρύθμισης διαφορετικών τμημάτων έχουν αναφερθεί για τους δέκτες κορεσμένου ατμού. Όμως ακόμα κι αν τα τεχνικά προβλήματα είναι μειωμένα στους δέκτες κορεσμένου ατμού, οι θερμοκρασίες εξόδου είναι σημαντικά χαμηλότερες απ' ό,τι αυτές του υπέρθερμου ατμού, καθιστώντας απαραίτητη την αντικατάσταση της θερμικής αποθήκευσης από εφεδρικές μονάδες ορυκτών καυσίμων.

Αυτή τη στιγμή, το εκτιμώμενο κόστος της ηλεκτρικής παραγωγής από το ηλιακό μόνο μερίδιο σε υβριδικά συστήματα είναι 0,08\$- 0,15\$ ανά kWh, ενώ το κόστος για ηλιακές μόνο εγκαταστάσεις κυμαίνεται από 0.15\$ ως 0.20\$ ανά kWh. Η εφαρμογή των υβριδικών συστημάτων είναι μία από τις λύσεις που θα οδηγήσουν σε μια σημαντική υπέρβαση των οικονομικών προβλημάτων κατά την ανάπτυξη των ηλιακών ηλεκτρικών τεχνολογιών δεδομένου ότι μειώνει την αρχική επένδυση. Τα χαμηλά τεχνολογικά ρίσκα ενός συστήματος κεντρικού δέκτη με κορεσμένο ατμό ως ρευστό λειτουργίας καθιστούν την τεχνολογία αυτή κατάλληλη για χρήση σε υβριδικές εγκαταστάσεις. Όπως παρατηρείται στον πίνακα 3.5 η χρήση δεκτών κορεσμένου ατμού, παρά τη χαμηλή θερμοκρασία εξόδου, αποδίδει μια πολύ μεγαλύτερη θερμική απόδοση μέχρι και 92% για ονομαστική φόρτιση. Ο πίνακας παρουσιάζει μια θεωρητική σύγκριση μεταξύ ενός τυπικού ογκομετρικού αερόψυκτου δέκτη με θερμοκρασία εξόδου του αέρα τους 700°C και ενός δέκτη κορεσμένου ατμού με θερμική έξοδο 250°C. Και οι δύο είναι δέκτες κοιλότητας ισχύος 45 MW. [10]

Απώλειες	Αέρας (%)	Ατμός
Ανακλαστικότητα	7.9	2.0
Ακτινοβολία	8.6	0.8
Συναγωγή	0.0	2.6
Διάχυση	5.0	2.1
Επιστροφή αέρα	3.7	0.0
Συνολική απόδοση	74.8	92.4

Πίνακας 3.5: Σύγκριση των οπτικών απωλειών και της απόδοσης ενός δέκτη ογκομετρικού αέρα και ενός δέκτη κορεσμένου ατμού που εφαρμόστηκαν στον σταθμό PS10.

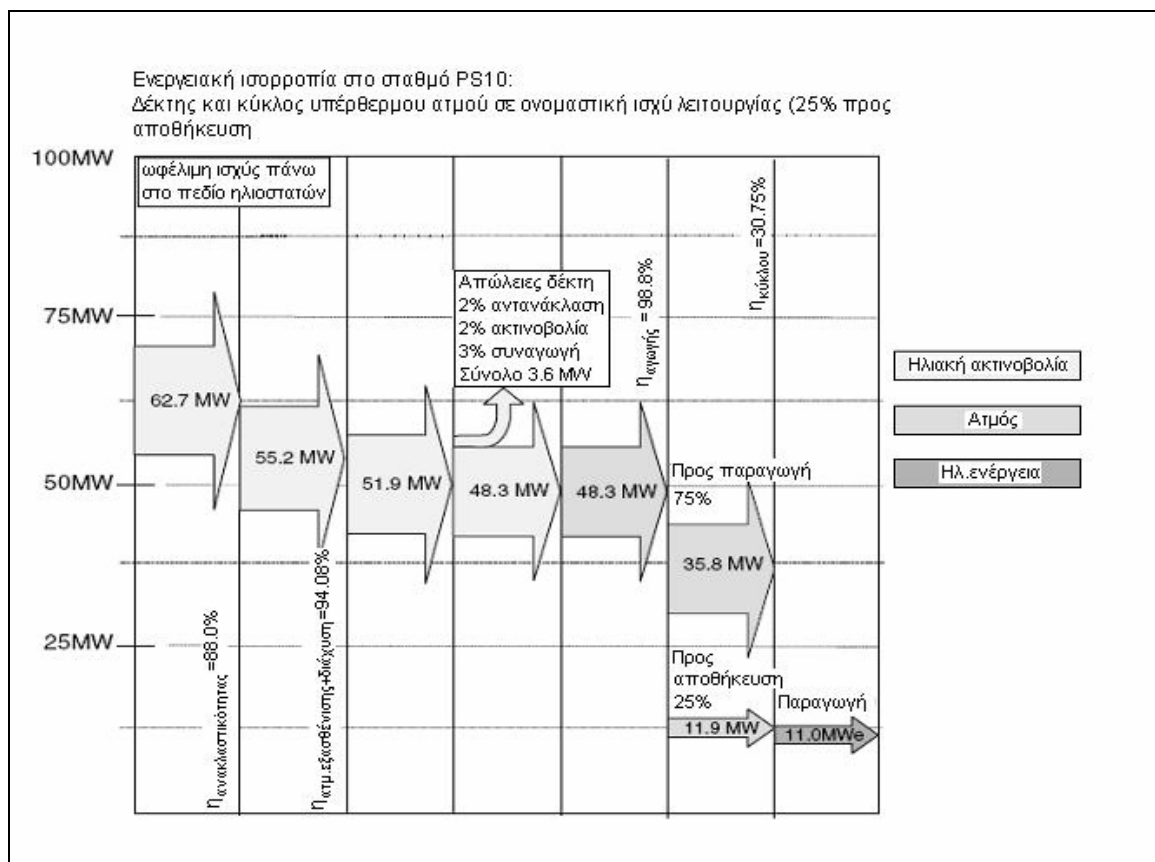
Το πρόγραμμα PS10 (που περιγράφεται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο) αποτελείται από ένα ηλιακό μόνο σύστημα κορεσμένου ατμού. Αποτελεί έναν σταθμό ορόσημο στην εξέλιξη των συστημάτων πύργου ισχύος καθώς είναι η πρώτη μονάδα ηλιακού πύργου που λειτουργεί και πουλάει ηλεκτρική ενέργεια σε εμπορικό επίπεδο. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.6, ο συνδυασμός της οπτικής απόδοσης του πεδίου των ηλιοστατών και των αποδόσεων του δέκτη και του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους οδηγούν σε μια συνολική ονομαστική απόδοση της τάξης του 21.7%. Η απόδοση αυτή μειώνεται στο 15.4% λόγω απωλειών κατά τη λειτουργία αλλά και απωλειών λόγω βλαβών. Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενεργειακής ροής αυτού του συστήματος και στο σχήμα 3.14 ένα ενεργειακό διάγραμμα των αποδόσεων.



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα ενεργειακών ροών μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής πύργου ισχύος κορεσμένου ατμού (PS10).

Ονομαστικές τιμές λειτουργίας		
Οπτική απόδοση	77.0%	67.5 MW→51.9 MW
Απόδοση δέκτη & συνδιαλλαγής θερμότητας	92.0%	51.9MW→47.7 MW
Θερμική ισχύς προς αποθήκευση		11.9 MW
Θερμική ισχύς προς στρόβιλο		35.3 MW
Απόδοση, θερμ.ισχύς→ηλ.ισχύς	30.7%	35.3 MW→11.0 MW
Συνολική απόδοση σε ονομαστικές τιμές	21.7%	
Ενεργειακή ισορροπία σε ετήσια βάση		
Μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση	64.0%	148.63 GWh(useful) →95.12 GWh
Μέση ετήσια απόδοση δέκτη & συνδιαλλαγής θερμότητας	90.2%	95.12 GWh→85.80 GWh
Απόδοση λειτουργίας (εκκινήσεις/ διακοπές)	92.0%	85.80 GWh→78.94 GWh
Απόδοση λειτουργίας (ζημιές από θραύσματα, λειτουργία & συντήρηση)	95.0%	78.94 GWh→75.00 GWh
Μέση ετήσια απόδοση, θερμική ενέργεια→ηλεκτρική ενέργεια	30.6%	75.00 GWh→23.00 GWh
Ετήσια ολική απόδοση	15.4%	

Πίνακας 3.6: Ετήσιος ενεργειακός ισολογισμός για τον σταθμό PS10 υπό ονομαστικές συνθήκες.



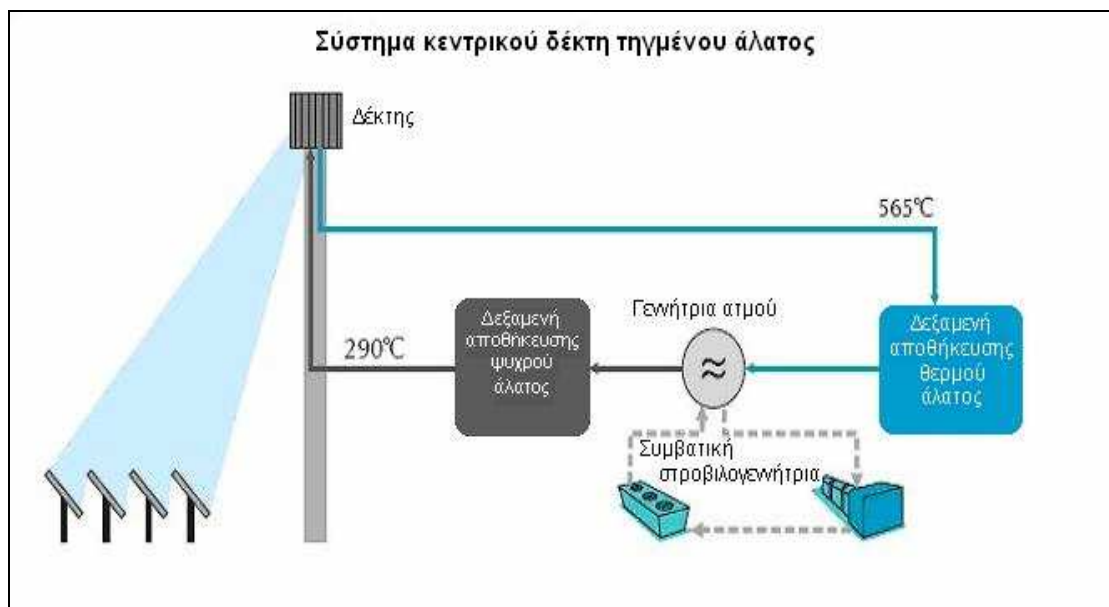
Σχήμα 3.14: Διάγραμμα μείωσης της ενεργειακής απόδοσης.

3.5.3 Εγκαταστάσεις Τηγμένου Άλατος

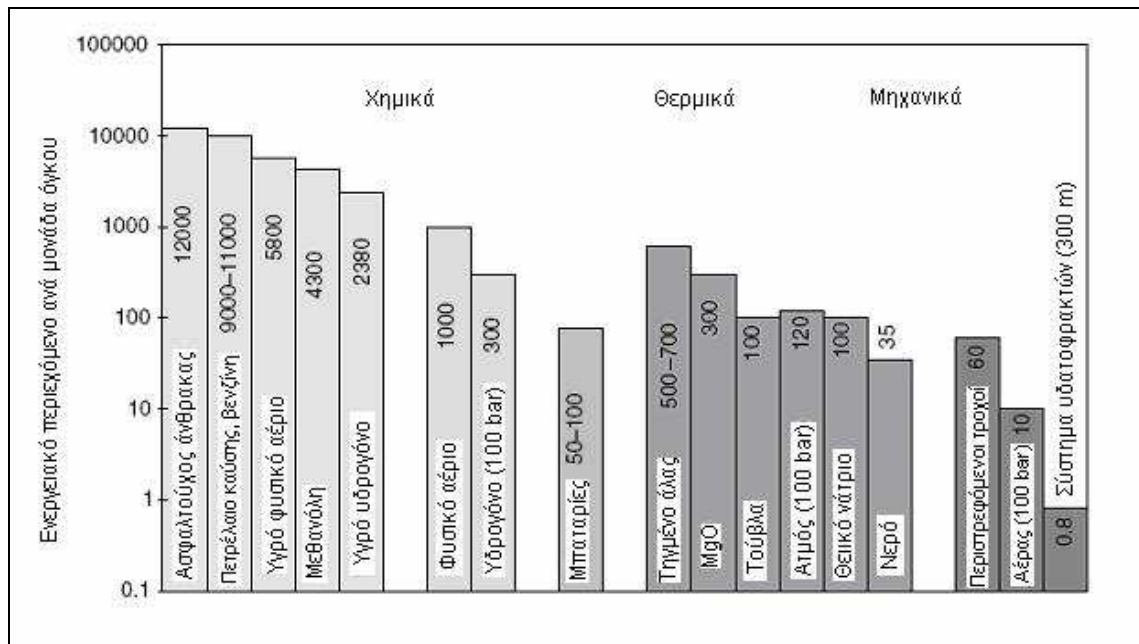
Για υψηλούς ετήσιους συντελεστές δυναμικού (το ποσοστό του έτους που η τεχνολογία μπορεί να αποδώσει ηλιακή ενέργεια στην ονομαστική ισχύ), οι εγκαταστάσεις που λειτουργούν ηλιακά μόνο πρέπει να έχουν ενσωματωμένο ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης. Το τηγμένο νιτρικό άλας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας στο δέκτη και ως μέσο θερμικής αποθήκευσης. Το νιτρικό άλας αποτελεί ένα μίγμα 60% νιτρικού νατρίου και 40% νιτρικού καλίου. Σε ένα σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος τηγμένου άλατος, αντλείται υγρό άλας στους 290°C από μια "ψυχρή" δεξαμενή αποθήκευσης, διέρχεται μέσα από το δέκτη όπου θερμαίνεται στους 565°C, και από εκεί μεταφέρεται προς μια "θερμή" δεξαμενή όπου αποθηκεύεται. Όταν απαιτείται ηλεκτρική ισχύς από το σταθμό, το ζεστό άλας αντλείται σε ένα σύστημα αμοπαγωγής όπου παράγεται υπέρθερμος ατμός για ένα συμβατικό σύστημα στροβίλου/γεννήτριας κύκλου Rankine. Από τον αμοπαγωγό το άλας επιστρέφει στην ψυχρή δεξαμενή όπου αποθηκεύεται, και στη συνέχεια οδηγείται πάλι στο δέκτη για να αναθερμανθεί. Ένα διάγραμμα ροής μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής πύργου ισχύος με σύστημα αποθήκευσης τηγμένου άλατος εμφανίζεται στο σχήμα 3.15. Με αυτόν τον τύπο συστήματος αποθήκευσης, οι εγκαταστάσεις ηλιακού πύργου μπορούν να σχεδιαστούν για ετήσιους συντελεστές δυναμικού μέχρι 70%. Καθώς τα τηγμένα άλατα έχουν μια υψηλή ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου (500-700 kWh/m³), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16, είναι άμεσα υποψήφια για τις ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής με υψηλούς συντελεστές δυναμικού. Τα νιτρικά άλατα αποτελούν μια φτηνή λύση για τα μεγάλα συστήματα αποθήκευσης. Το κόστος του υλικού είναι 0.70 \$/kg ή διαφορετικά 5.20 \$/kWh. [10]

Διάφορα πειράματα ανάπτυξης και επίδειξης τηγμένου άλατος έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δύο δεκαετιών στις ΗΠΑ και την Ευρώπη. Η μεγαλύτερη επίδειξη ενός πύργου ισχύος τηγμένου άλατος ήταν το πρόγραμμα Solar Two, ένας πύργος ισχύος 10 MW εγκατεστημένος στο Barstow στην Καλιφόρνια. Μια εικόνα του Solar Two φαίνεται στο σχήμα 3.17. Ο σταθμός άρχισε να λειτουργεί τον Ιούνιο του 1996. Είχε ετήσια αποδοτικότητα μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια της τάξης του 8.5%, ετήσιο συντελεστή δυναμικού 20% και θερμική αποθήκευση για λειτουργία τριών ωρών. Στις 8 Απριλίου

του 1999, ο έλεγχος και η αξιολόγηση του πειραματικού αυτού προγράμματος ολοκληρώθηκαν και ο σταθμός έκλεισε. Επειδή το Solar Two ήταν ένα πειραματικό πρόγραμμα και ήταν αρκετά μικρό σε σχέση με έναν τυπικό συμβατικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής δεν μπορούσε να συναγωνιστεί οικονομικά τους σταθμούς ορυκτών καυσίμων. Για να μειωθούν τα οικονομικά προβλήματα, η πρώτη εμπορική μονάδα πρέπει να έχει το τριπλάσιο μέγεθος του Solar Two. Ενώ σύμφωνα με προβλέψεις, για τα εξελιγμένα συστήματα πύργου ισχύος αναμένονται τιμές της αποδοτικότητας μετατροπής και του ετήσιου συντελεστή δυναμικού της τάξης των 20% και 77% αντίστοιχα. [10]



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα ενεργειακών ροών μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής πύργου ισχύος με σύστημα αποθήκευσης τηγμένου άλατος και έναν εξωτερικό κυλινδρικό δέκτη.



Σχήμα 3.16: Σύγκριση της ικανότητας ενεργειακής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου για διάφορα χημικά, θερμικά και μηχανικά μέσα.

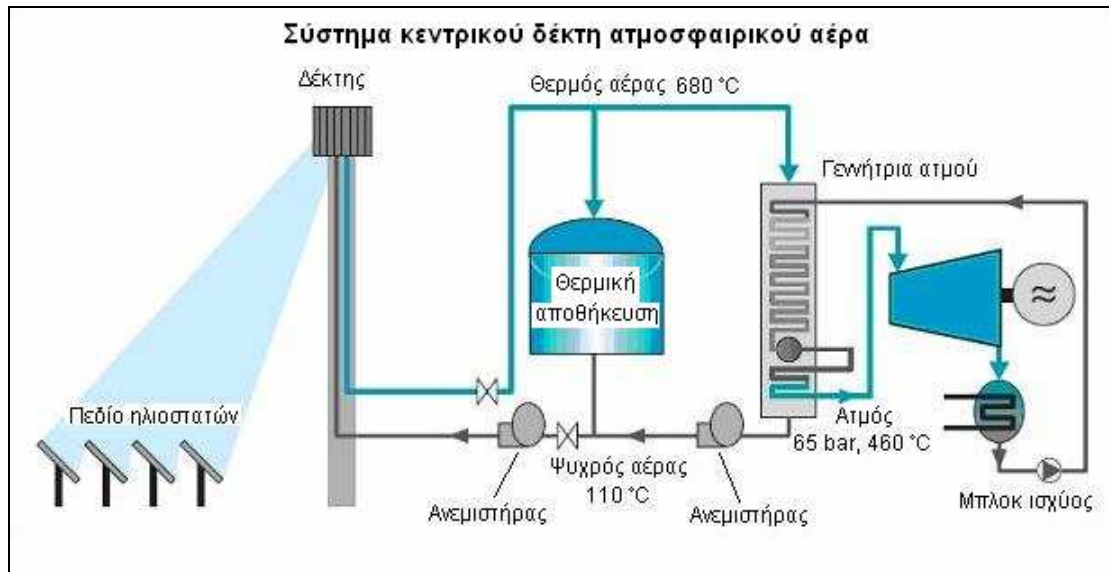


Σχήμα 3.17: Εναέρια φωτογραφία από το σταθμό ηλεκτροπαραγωγής πύργου ισχύος 10MWe, Solar Two.

3.5.4 Ογκομετρικοί Δέκτες Ατμοσφαιρικού Αέρα

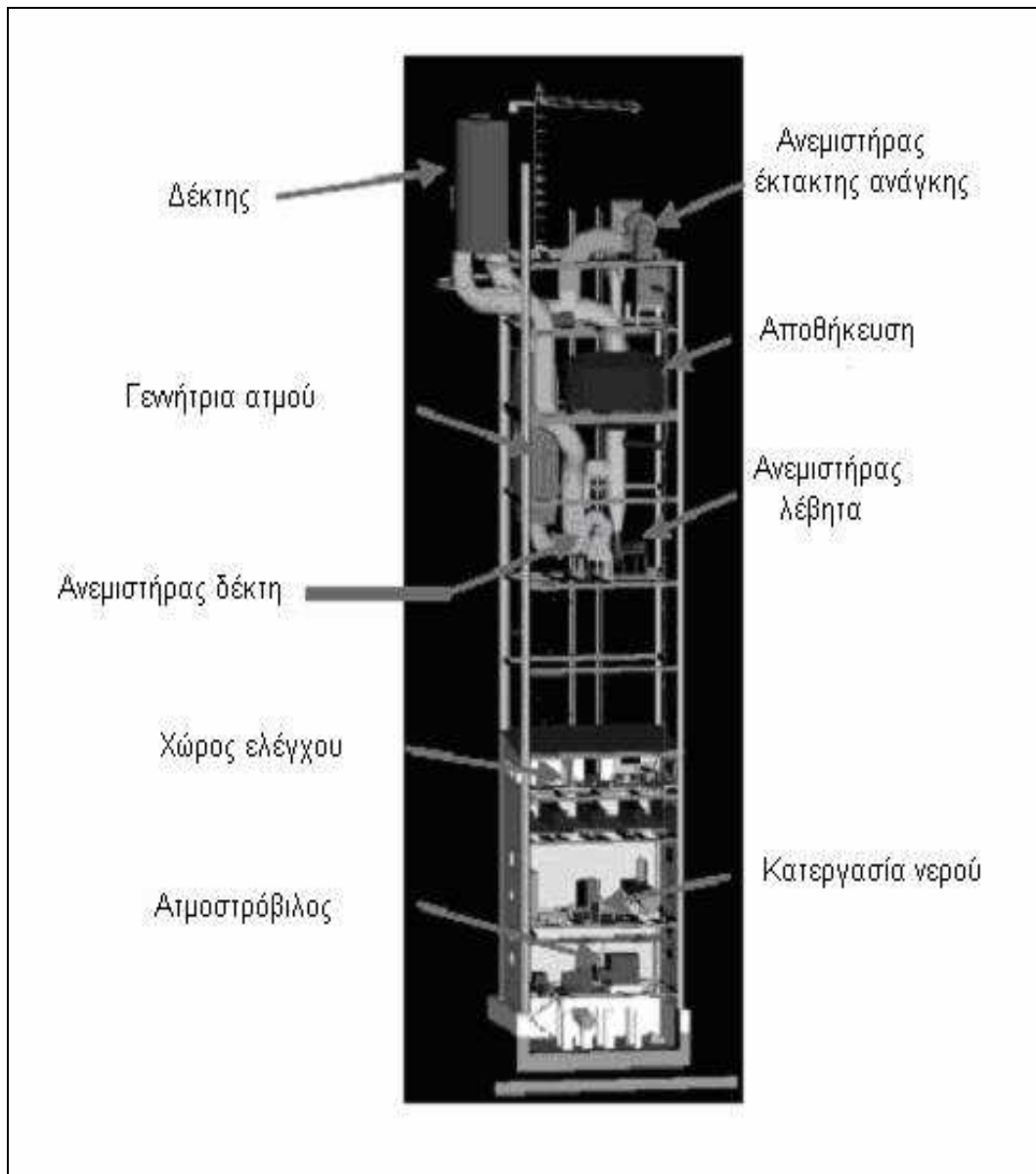
Η πρώτη μελέτη για εγκαταστάσεις πύργου ισχύος με ατμοσφαιρικό αέρα ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας ήταν το πρόγραμμα METAR0Z στις ελβετικές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του '80, που ακολουθήθηκε από μια δεύτερη μελέτη που διεξήχθη από την ελβετική κοινοπραξία SOTEL. Αυτές οι πρωτοποριακές μελέτες έθεσαν τα θεμέλια για το σχέδιο PHOEBUS, στο οποίο ο ατμοσφαιρικός αέρας θερμαίνεται μέσω ενός ογκομετρικού δέκτη συρμάτινου πλέγματος σε θερμοκρασίες 700°C. Ο αέρας αυτός χρησιμοποιείται για να παράγει ατμό στους 480-540°C και πίεση 35-140 bar, σε μια αμογεννήτρια ανάκτησης θερμότητας με ξεχωριστό υπερθερμαντή, προθερμαντή, εξαμιστήρα και οικονομητήρα. Τελικά ο ατμός τροφοδοτεί ένα σύστημα στροβίλου Rankine/γεννήτριας. Το σύστημα θερμικής αποθήκευσης στο σχέδιο PHOEBUS, που αποτελείται από θερμοκλινή κεραμικά υλικά, μπορεί να φορτίζεται και να εκφορτίζεται με τη βοήθεια δύο αξονικών ανεμιστήρων που αντιστρέφουν τη ροή του αέρα.

Κατά τη διάρκεια της φάσης ανάπτυξης του προγράμματος PS10, που περιγράφηκε πιο πάνω, διεξήχθη μια μελέτη για να αναλυθεί η πιθανή χρήση μιας εμπορικής εγκατάστασης 10 MW χρησιμοποιώντας την τεχνολογία τύπου PHOEBUS. Τα αποτελέσματα εκείνης της μελέτης είναι προς το παρόν οι πιο αξιόπιστες πληροφορίες για την αξιολόγηση της χρήσης ογκομετρικών δεκτών με ανοιχτό κύκλωμα αέρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα διάγραμμα ροής του συστήματος αυτού παρατίθεται στο σχήμα 3.18. Ο αριστερός ανεμιστήρας ρυθμίζει τη ροή του αέρα στο δέκτη και ο δεξιός ανεμιστήρας τον αέρα στη γεννήτρια ατμού. Η θερμοκρασία εισόδου του δέκτη είναι 110°C και η εξόδου 680°C. Οι καυτοί αγωγοί του αέρα είναι θερμικά μονωμένοι στο εσωτερικό τους. Λόγω αυτής της εσωτερικής μόνωσης, η ταχύτητα του αέρα δεν μπορεί να υπερβεί τα 33 m/s. Η τεχνολογία της θερμικής αποθήκευσης δεν αποτελεί ένα υψηλό τεχνικό ρίσκο. Είναι μια τεχνολογία που έχει ήδη αναπτυχθεί σε φούρνους μεγάλων θερμοκρασιών και σε διάφορες βιομηχανίες, όπως είναι η τσιμεντοβιομηχανία και η κλωστοϋφαντουργία, για την ανάκτηση της θερμότητας που αποβάλλεται από τις καμινάδες. Η γεννήτρια ατμού είναι μια δέσμη σωλήνων σε σχήμα μαϊανδρου με φυσική κυκλοφορία. Ο ατμός (10,73 kg/s) θα παραχθεί στους 460°C και στα 65 bar. Η στροβιλογεννήτρια θα παράγει 10 MWe ηλεκτρικής ισχύος με απόδοση 30%. [13]



Σχήμα 3.18: Διάγραμμα ενεργειακών ροών ενός συστήματος κεντρικού δέκτη με ατμοσφαιρικό αέρα ως θερμικό ρευστό.

Σε ένα σύστημα ατμοσφαιρικού ογκομετρικού αέρα, για να μειωθεί το μεγάλο μήκος των αγωγών του αέρα απαιτούνται συμπτυγμένα σχέδια δέκτη. Δηλαδή σχέδια στα οποία οι διάφορες συνιστώσες του συστήματος που βρίσκονται δεξιά του δέκτη στο διάγραμμα ενεργειακών ροών του σχήματος 3.18 να περιορίζονται σε όσο το δυνατόν μικρότερο χώρο. Ένα παράδειγμα συμπτυγμένου σχεδίου που δείχνει πώς το κύκλωμα του αέρα ενσωματώνεται στον ηλιακό πύργο εμφανίζεται στο σχήμα 3.19. Αν και οι αερόψυκτοι ανοιχτοί ογκομετρικοί δέκτες είναι ένας ελπιδοφόρος τρόπος παραγωγής υπέρθερμου ατμού, η μέτρια θερμική αποδοτικότητα (74% ονομαστική τιμή και 61,4% ετήσια μέση τιμή) πρέπει ακόμα να βελτιωθεί. Αυτή τη στιγμή, όλα τα οφέλη της τεχνολογίας αυτής λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών εξόδου μειώνονται εξαιτίας των απωλειών ακτινοβολίας στο δέκτη, πράγμα που οδηγεί σε χαμηλή ετήσια ηλεκτρική παραγωγή. Έτσι είναι σαφές ότι οι τεχνικές βελτιώσεις στους ογκομετρικούς δέκτες πρέπει να στραφούν στη μείωση των απωλειών. [13]

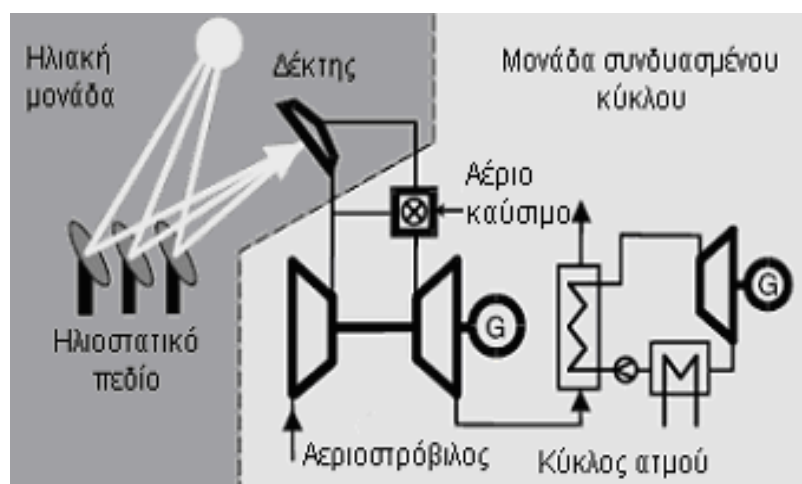


Σχήμα 3.19: Συμπυκνόμενο σχέδιο δέκτη, κυκλώματος αέρα, αποθήκευσης και γεννήτριας ατμού για ένα σύστημα 10 MW, που εξετάστηκε πειραματικά στην μονάδα PS10.

3.5.5 Συστήματα Ηλιακής Προθέρμανσης του Αέρα για Αεριοστρόβιλο

Η εισαγωγή της ηλιακής ενέργειας στον αεριοστρόβιλο των σταθμών συνδυασμένου κύκλου προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες ηλιακές υβριδικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής. Ένας πολύ ελπιδοφόρος τρόπος για την εφαρμογή αυτή είναι με την ηλιακή προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα που οδηγείται από τον συμπιεστή στον θάλαμο καύσης. Ένα διάγραμμα ροής της αρχής αυτής εμφανίζεται στο σχήμα 3.20.

Για ένα συγκεκριμένο ετήσιο ηλιακό μερίδιο, η τεχνολογία αυτή οδηγεί σε μείωση του μεγέθους του πεδίου των ηλιοστατίων και έτσι σε χαμηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης σε σύγκριση με τις τεχνολογίες όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Η ηλιακή προθέρμανση του αέρα προσφέρει μια καλή προοπτική για μείωση του κόστους της ηλιακής θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, το σχέδιο αυτό θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα επιπέδων ισχύος (1-100 MWe).



Σχήμα 3.20: Σύστημα ηλιακής προθέρμανσης του αέρα για αεριοστρόβιλο.

4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΙΣΚΟΥ/ΜΗΧΑΝΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα δίσκου/μηχανής μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική με πολύ μεγάλη απόδοση. Χρησιμοποιώντας ένα κοίλο κάτοπτρο, οι ακτίνες του ηλίου συγκεντρώνονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο, τον δέκτη. Ο δέκτης στη συνέχεια μεταδίδει την ενέργεια συνήθως σε μια μηχανή Stirling. Τα συστήματα είναι αποδοτικά στη συλλογή ηλιακής ενέργειας σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχουν παρουσιάσει απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια μέχρι και 32%. Αυτή είναι η υψηλότερη απόδοση που έχει επιτευχθεί ως σήμερα από κάθε άλλο σύστημα ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής.



Σχήμα 4.1: Μονάδα συστήματος ηλιακού δίσκου - μηχανής

4.2 Ιστορία

Όπως στις άλλες τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, η εφαρμογή του συστήματος δίσκου/μηχανής στην πράξη άρχισε στις αρχές της δεκαετίας του '80. Η μεγαλύτερη πιλοτική ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε στις ΗΠΑ και στη Γερμανία. Παρ' όλα αυτά εξετάστηκε ένας μικρός μόνο αριθμός μονάδων.

Η πρώτη γενιά δίσκων ήταν ένας συγκεντρωτής, η ανακλαστική επιφάνεια του οποίου αποτελούταν από ανεξάρτητα μεταξύ τους καμπυλωτά πλαίσια κατόπτρων με διπλή επιφάνεια. Αν και οι καθρέφτες αυτοί κατοχύρωσαν ρεκόρ ηλιακής συγκέντρωσης ($C=3000$) και εμφάνισαν άριστη λειτουργική συμπεριφορά, το εκτιμώμενο κόστος τους για μαζική παραγωγή ήταν πάνω από $300 \text{ \$/m}^2$. Οι κατασκευές τους ήταν εξαιρετικά βαριές και ζύγιζαν περίπου 100 kg/m^2 . Το πρωτότυπο Vanguard-1 ισχύος 25 kW που κατασκευάστηκε από την εταιρεία Advanco λειτούργησε στην έρημο Mojave της Καλιφόρνιας για 18 μήνες (από τον Φεβρουάριο του 1984 μέχρι τον Ιούνιο του 1985). [12]



Σχήμα 4.2: Μονάδα Vanguard-1

Αυτό το σύστημα είχε διάμετρο 10,7 m, με εμβαδόν ανακλαστικής επιφάνειας $86,7 \text{ m}^2$, και μονάδα μετατροπής ισχύος 25 kW κατασκευασμένη από την United Stirling AB (USAB) μοντέλου 4-95 Mark II. Η μηχανή αυτή είχε τέσσερις

κυλίνδρους με 95 cm^3 ογκομετρικό εκτόπισμα ο καθένας. Το αέριο λειτουργίας ήταν υδρογόνο με μέγιστη πίεση 20 MPa και θερμοκρασία 720°C . Η ισχύς της μηχανής ελεγχόταν με την μεταβολή της πίεσης του αερίου. Το σύστημα Advanco/Vanguard με καθαρή απόδοση μετατροπής (συμπεριλαμβανομένων των βοηθητικών συστημάτων) πάνω από 30%, διατηρεί μέχρι σήμερα το παγκόσμιο ρεκόρ μετατροπής.



Σχήμα 4.3: Μονάδα McDonnell Douglas

Η εταιρεία McDonnell Douglas (MDA) ανέπτυξε αργότερα ένα άλλο κάπως βελτιωμένο σύστημα δίσκου χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνολογία και την ίδια μηχανή. Ο δίσκος ήταν 10,5 m και 25 kW. Ο παραβολικός δίσκος επιφάνειας 88 m^2 αποτελούνταν από 82 σφαιρικά καμπυλωτά πλαίσια γυαλιού. Έξι από αυτές τις μονάδες παρήχθησαν και εγκαταστάθηκαν στις ΗΠΑ για δοκιμαστική λειτουργία. Οι λειτουργίες και οι αποδόσεις ήταν παρόμοιες με αυτές του συστήματος Advanco/Vanguard. Το πρόγραμμα πάγωσε για αρκετά χρόνια μέχρι το 1996, όταν η εταιρεία Stirling Energy Systems (SES) απέκτησε τα πνευματικά και τεχνολογικά δικαιώματα πάνω στον συγκεντρωτή αυτό, καθώς και τα αμερικανικά δικαιώματα κατασκευής του συστήματος Kockums, που βασίζεται στην τεχνολογία της United Stirling 4-95. Στο πλαίσιο ενός προγράμματος της DOE (USA Department of Energy) για την εμπορευματοποίηση του συστήματος δίσκου/μηχανής σε ανερχόμενες αγορές, η SES άρχισε τις δοκιμές και τις βελτιώσεις σε αρκετές μονάδες στις ΗΠΑ και τη

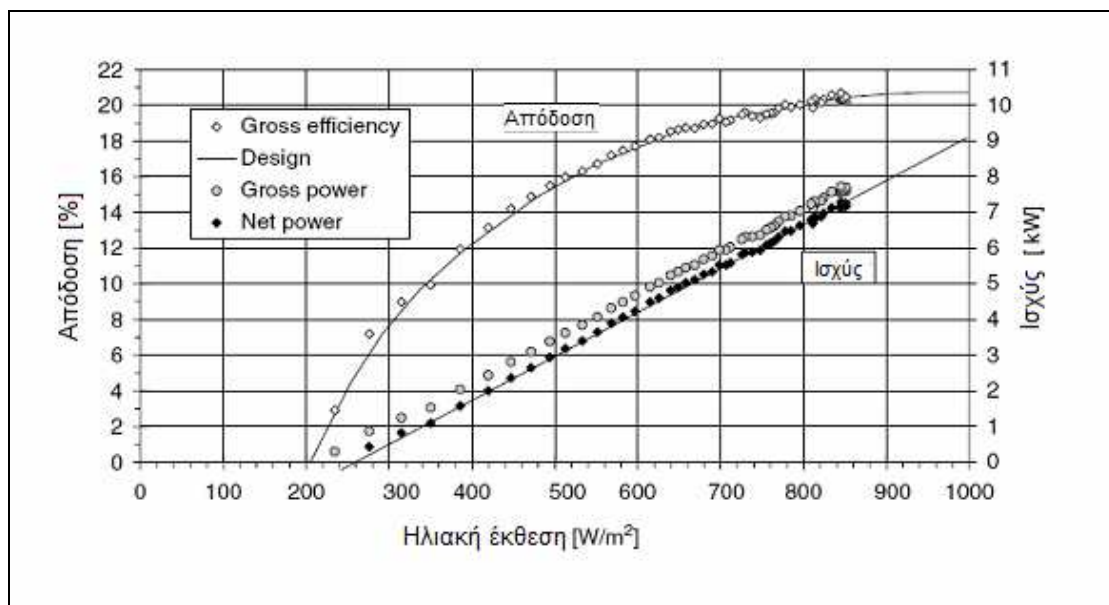
Νότια Αφρική. Περισσότερες από 100.000 ώρες λειτουργίας συσσωρεύτηκαν για τα συστήματα αυτά. Η καθημερινή αποδοτικότητα καταγράφηκε να είναι 24-27% και ο ετήσιος μέσος όρος 24%. Η SES έχει αναλάβει αυτήν τη περίοδο την προώθηση αρκετών εμπορικών προγραμμάτων για μεγάλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής σε δυτικές πολιτείες της Αμερικής όπως είναι η Νεβάδα και η Αριζόνα.

Από τις υψηλές επιδόσεις του πιλοτικού δίσκου Vanguard και μετά, οι περισσότερες επιλογές μοντέλων έχουν κατευθυνθεί προς την ανάπτυξη στρατηγικών που θα μειώσουν το κόστος. Αυτές οι στρατηγικές οδήγησαν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, επιβαρύνοντας όμως με αυτόν τον τρόπο την αποδοτικότητα, και στην χρήση ελαφρύτερων και λιγότερο ακριβών ανακλαστήρων φτιαγμένων από πολυμερή ή από λεπτό γυαλί. Αυτοί οι δίσκοι, που έχουν χαμηλότερη οπτική απόδοση, χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε εφαρμογές όπου η μηχανή δεν ήταν τύπου Stirling, ώστε να εξασφαλιστούν οι χαμηλότερες θερμοκρασίες. Τέτοιες εφαρμογές ήταν το Shenandoah και το Solarplant 1. Οι λόγοι συγκέντρωσης κυμαινόντουσαν από 600 έως 1000 και οι θερμοκρασίες λειτουργίας ήταν περίπου 650°C. Αρκετά πρωτότυπα αναπτύχθηκαν από τις εταιρείες Acurex, Lajet, GE, SKI, SBP, SAIC και WGA.

Η πιο εκτενής δοκιμή αυτής της ιδέας για ελαφρύτερα υλικά έγινε με τον συγκεντρωτή τεταμένων μεμβρανών που αναπτύχθηκε στη Γερμανία από την εταιρεία Schalich, Bergemann und Partner (SBP). Περισσότερες από 50.000 ώρες δοκιμών έχουν συσσωρευτεί στο ηλιακό πεδίο των έξι μονάδων που προάχθηκε από την SBP και την Steinmüller και αξιολογήθηκε στην εγκατάσταση Plataforma Solar de Almeria (PSA) της Ισπανίας. Ο συγκεντρωτής αποτελείται από μία ενιαία τεταμένη μεμβράνη ανοξειδωτού χάλυβα διαμέτρου 7,5 m και πάχους 0,23 mm. Πάνω στην τελευταία συγκολλούνται λεπτοί γυάλινοι καθρέφτες. Η μηχανή που χρησιμοποιείται είναι η V-160 Stirling, που κατασκευάζεται από την γερμανική εταιρεία Solo Kleinmotoren. Η μηχανή έχει απόδοση 30%, ενώ το σύστημα έχει συνολική απόδοση μετατροπής 20,3% (σχήμα 4.5). [12]



Σχήμα 4.4: Μονάδα Schlich, Bergemann und Partner



Σχήμα 4.5: Παράμετροι εισόδου/εξόδου και η απόδοση για ένα σύστημα δίσκου/Stirling τεταμένων μεμβρανών δυναμικού 9 kW, που κατασκευάστηκε από την εταιρεία SBP και δοκιμάστηκε στην Almeria της Ισπανίας.

Αν και οι τεταμένες μεμβράνες είχαν άριστα οπτικά αποτελέσματα, οι οικονομικές αναλύσεις αποκάλυψαν ότι το κόστος παραγωγής ήταν υψηλότερο από το αναμενόμενο. Ο διάδοχος των δίσκων SBP με μεμβράνες είναι το σύστημα EuroDish. Το πρόγραμμα EuroDish είναι μια κοινοπραξία της Ευρωπαϊκής

Επιτροπής, της γερμανικής και ισπανικής βιομηχανίας (SBP, MERO, KleinCStekl, Inabensa) και των ερευνητικών κέντρων DLR και CIEMAT. Το νέο σχέδιο αντικαθιστά το συγκεντρωτή τεταμένων μεμβρανών με ένα σύνθετο κέλυφος από ίνες γυαλιού (φίμπεργκλας) πάνω στο οποίο συγκολλούνται οι γυάλινοι καθρέφτες. Η μηχανή που χρησιμοποιείται στο EuroDish είναι η V-161 Stirling, η επόμενη γενιά της Solo Kleinmotoren. Δύο νέες μονάδες EuroDish ισχύος 10 kW η καθεμία (σχήμα 4.6), εγκαταστάθηκαν στην Plataforma Solar de Almeria (PSA) στην Ισπανία, αρχές το 2001 για δοκιμή και επίδειξη. Σε ένα ακόλουθο πρόγραμμα γνωστό ως EnviroDish, επιπλέον μονάδες τοποθετήθηκαν στη Γαλλία, την Ινδία, την Ιταλία και την Ισπανία για να συγκεντρωθεί λειτουργική εμπειρία σε διαφορετικές γεωγραφικά περιοχές. Η μέγιστη απόδοση μετατροπής του συστήματος από ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική αναμένεται να είναι 21-22%. Η ετήσια παραγωγή ενός συστήματος EuroDish που λειτουργεί στην Αλμπικέρκη στο Νέο Μεξικό, είναι 20.252 kWh ηλεκτρικής ενέργειας με ετήσια αποδοτικότητα 15,7%. Η SBP και οι βιομηχανίες που σχετίζονται με το πρόγραμμα EuroDish έχουν υπολογίσει ότι το κόστος για μια μονάδα 10 kW είναι 10.000 U.S.\$/kW. Ενώ για παραγωγή 500 μονάδων ανά έτος (5 MW/έτος) το κόστος πέφτει στα 2.500 U.S.\$/kW και για παραγωγή 5000 μονάδων ανά έτος (50 MW/έτος) το κόστος είναι 1.500 U.S.\$/kW. [12]



Σχήμα 4.6: Δύο μονάδες Eurodish ισχύος 10 kW_e στην εγκατάσταση Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία.

4.3 Περιγραφή της Εγκατάστασης

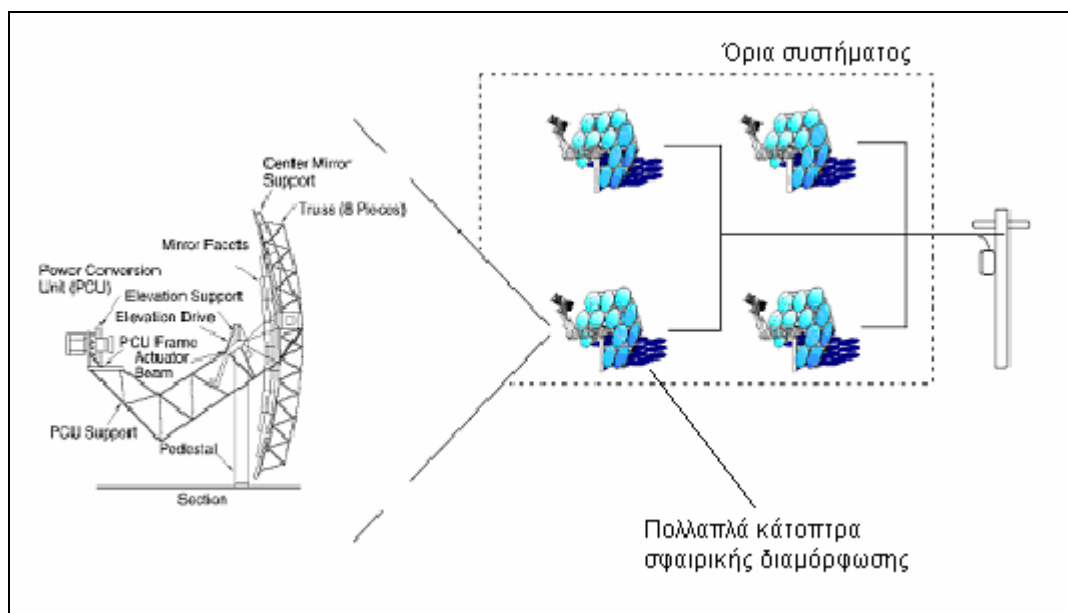
Στα συστήματα δίσκου/μηχανής ένας δίσκος παρακολουθεί τον ήλιο και συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ενέργεια σε έναν δέκτη στο εστιακό του σημείο, όπου απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Μια θερμική μηχανή (συνήθως η μηχανή Stirling) μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη βοήθεια μιας γεννήτριας που είναι ενσωματωμένη πάνω στο δέκτη. Οι δίσκοι παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου σε δύο άξονες και, για το λόγο αυτό, είναι τα πιο αποδοτικά συστήματα συλλεκτών, καθώς είναι συνεχώς στραμμένα προς τον ήλιο. Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται ένα σύστημα δίσκου/μηχανής.

Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, δυνατότητα αρθρωτής, σπονδυλωτής κατασκευής (δηλαδή μια μονάδα μπορεί να αποτελείται από πολλαπλά κάτοπτρα-υπομονάδες), αυτονομία λειτουργίας, και από μια εγγενή υβριδική δυνατότητα, δηλαδή η ικανότητα να λειτουργούν είτε με ηλιακή ενέργεια είτε με ορυκτά καύσιμα είτε και με τα δύο μαζί. Από όλες τις ηλιακές τεχνολογίες, ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό έχει αναφερθεί στα συστήματα δίσκου/μηχανής (29,4%), και για το λόγο αυτό έχουν το δυναμικό να καταστούν μια από τις λιγότερο ακριβές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας. Η πολυσυναρτησιακότητα των συστημάτων δίσκου/μηχανής επιτρέπει την αυτόνομη χρήση τους για απόμακρες εφαρμογές ή την ομαδοποίησή τους για εφαρμογές ηλεκτροδότησης σε μικρά δίκτυα ή απομονωμένα σημεία του δικτύου. Τα συστήματα δίσκου μπορούν επίσης να λειτουργούν υβριδικά με κάποιο συμβατικό καύσιμο ώστε να παρέχουν εμπορεύσιμη ισχύ. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται στο στάδιο της τεχνικής εξέλιξης και απομένουν κάποια προβλήματα προς επίλυση που αφορούν τις ηλιακές συνιστώσες και την εμπορική διαθεσιμότητα μιας τέτοιας θερμικής μηχανής ικανής να εκτίθεται σε ηλιακές ακτίνες. [18]

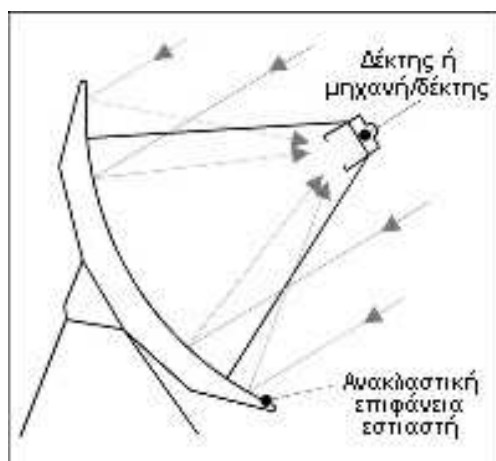
Η συνολική απόδοση του συστήματος μπορεί να οριστεί ως:

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

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.



Σχήμα 4.7: Σχηματική παράσταση ενός συστήματος δίσκου/μηχανής με τον συνδυασμό τεσσάρων μονάδων των 25 kW_e.



Σχήμα 4.8: Δέκτης και συγκεντρωτής ενός συστήματος δίσκου/μηχανής που χρησιμοποιεί ένα μόνο κάτοπτρο σφαιρικής διαμόρφωσης.

4.4 Περιγραφή των Επιμέρους Συνιστωσών

4.4.1 Συλλέκτης

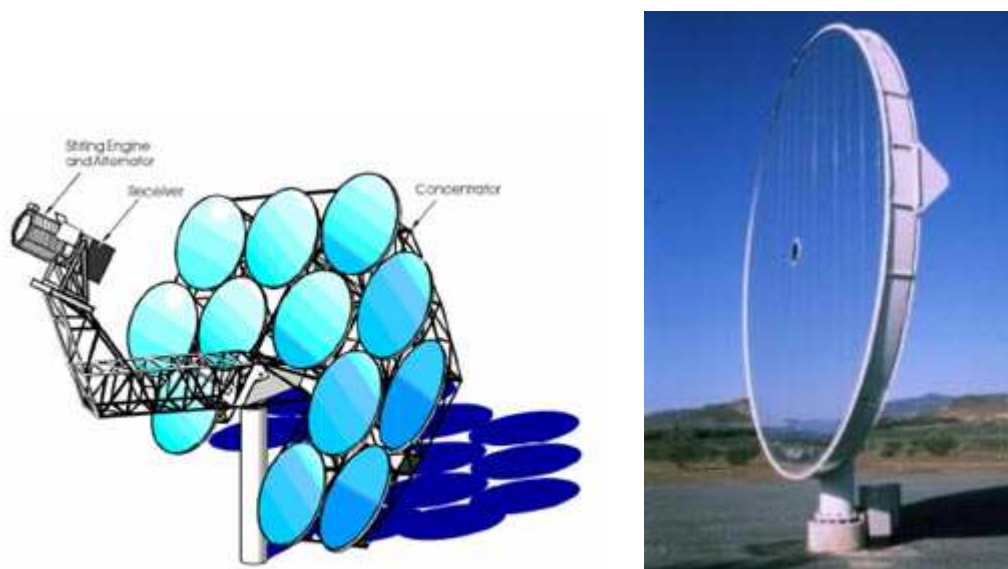
Τα συστήματα δίσκου/μηχανής χρησιμοποιούν συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες που παρακολουθούν τον ήλιο σε δύο άξονες. Μια ανακλαστική επιφάνεια ανακλά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή του δέκτη που είναι γνωστή ως “εστία”. Το μέγεθος του ηλιακού συγκεντρωτή για τα συστήματα δίσκου καθορίζεται από το είδος της θερμικής μηχανής που χρησιμοποιείται. Σε ονομαστική μέγιστη άμεση ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m^2 , ένα σύστημα δίσκου με μηχανή Stirling ισχύος 25 kW_e έχει διάμετρο περίπου 10 m .

Οι συλλέκτες-εστιαστές-συγκεντρωτές χρησιμοποιούν μια ανακλαστική επιφάνεια που αποτελείται από γυαλί (ή πλαστικό) διαποτισμένο με αλουμίνιο ή άργυρο. Οι πιο ανθεκτικές ανακλαστικές επιφάνειες είναι οι καθρέφτες άργυρου/γυαλιού, που είναι παρόμοιες με τους διακοσμητικούς καθρέφτες που χρησιμοποιούνται στο σπίτι. Προσπάθειες να αναπτυχθούν χαμηλού κόστους ανακλαστικές μεμβράνες με πολυμερή είχαν περιορισμένη επιτυχία. Επειδή οι συγκεντρωτές της τεχνολογίας αυτής έχουν μικρά μήκη εστίασης (δηλαδή είναι μικρή η απόσταση από τον συγκεντρωτή ως την εστία), απαιτούνται καθρέφτες σχετικά λεπτού γυαλιού (πάχος περίπου 1 mm) για να επιτύχουν τις απαραίτητες καμπυλώσεις της ανακλαστικής επιφάνειας. Επιπλέον, είναι επιθυμητό να περιέχει το γυαλί μια μικρή ποσότητα σιδήρου καθώς βελτιώνεται ο συντελεστής ανάκλασης. Ανάλογα με το πάχος και την περιεκτικότητα σε σίδηρο, ο συντελεστής ανάκλασης των επαργυρωμένων ηλιακών καθρεφτών έχει τιμές που κυμαίνεται από 90 ως 94%.

Το ιδανικό σχήμα του συγκεντρωτή-εστιαστή είναι παραβολοειδές εκ περιστροφής. Ορισμένοι ηλιακοί εστιαστές προσεγγίζουν το σχήμα αυτό με πολλαπλά, κάτοπτρα σφαιρικής διαμόρφωσης στηριζόμενα σε έναν σκελετό από μεταλλικές δοκούς ενίσχυσης (σχήμα 4.7). Μια καινοτομία στη σχεδίαση του ηλιακού εστιαστή αποτελεί η χρήση τεταμένων μεμβρανών, κατά την οποία μια λεπτή ανακλαστική μεμβράνη τεντώνεται μέσω μιας στεφάνης ή ενός τσαταλιού, ενώ χρησιμοποιείται μια δεύτερη μεμβράνη για να κλείσει τον πίσω χώρο. Στο χώρο αυτό δημιουργείται μερικό κενό, δημιουργώντας έτσι ένα κατά προσέγγιση σφαιρικό σχήμα στην ανακλαστική μεμβράνη. Στο σχήμα 4.9 απεικονίζονται δυο συστήματα που αξιοποιούν αυτήν την ιδέα.

Οι λόγοι συγκέντρωσης κυμαίνονται από 600 ως 2000 και μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες πάνω από 1500°C. Το κλάσμα ανάκλασης, το οποίο ορίζεται ως το κλάσμα της ανακλώμενης ηλιακής ροής που διέρχεται μέσω του δέκτη, είναι συνήθως πάνω από 95%.

Η παρακολούθηση του ήλιου σε δύο άξονες πραγματοποιείται με τον έναν από τους ακόλουθους δύο τρόπους, (1) παρακολούθηση αζιμούθιου-ανύψωσης και (2) πολική παρακολούθηση. Στην παρακολούθηση αζιμούθιου-ανύψωσης, ο δίσκος περιστρέφεται σε ένα επίπεδο παράλληλο στη γη (αζιμούθιο) και σε ένα άλλο επίπεδο κάθετο σε αυτό (ανύψωση). Έτσι μπορεί ο συλλέκτης να περιστρέφεται αριστερά/δεξιά και πάνω/κάτω. Τα περισσότερα από τα μεγάλα συστήματα δίσκου/μηχανής χρησιμοποιούν αυτήν την μέθοδο. Στην πολική μέθοδο παρακολούθησης, ο συλλέκτης περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα (πολικό άξονα) παράλληλο στον άξονα περιστροφής της γης. Ο συλλέκτης περιστρέφεται με έναν σταθερό ρυθμό 15°/ώρα για να εναρμονιστεί με την περιστροφική ταχύτητα της γης. Ο άλλος άξονας περιστροφής, ο άξονας απόκλισης, είναι κάθετος στον πολικό άξονα. Η κίνηση γύρω από αυτόν τον άξονα σημειώνεται αργά και ποικίλλει κατά $\pm 23\frac{1}{2}^\circ$ μέσα σε ένα έτος. Τα περισσότερα από τα μικρά συστήματα δίσκου/μηχανής χρησιμοποιούν αυτήν την μέθοδο. [18]



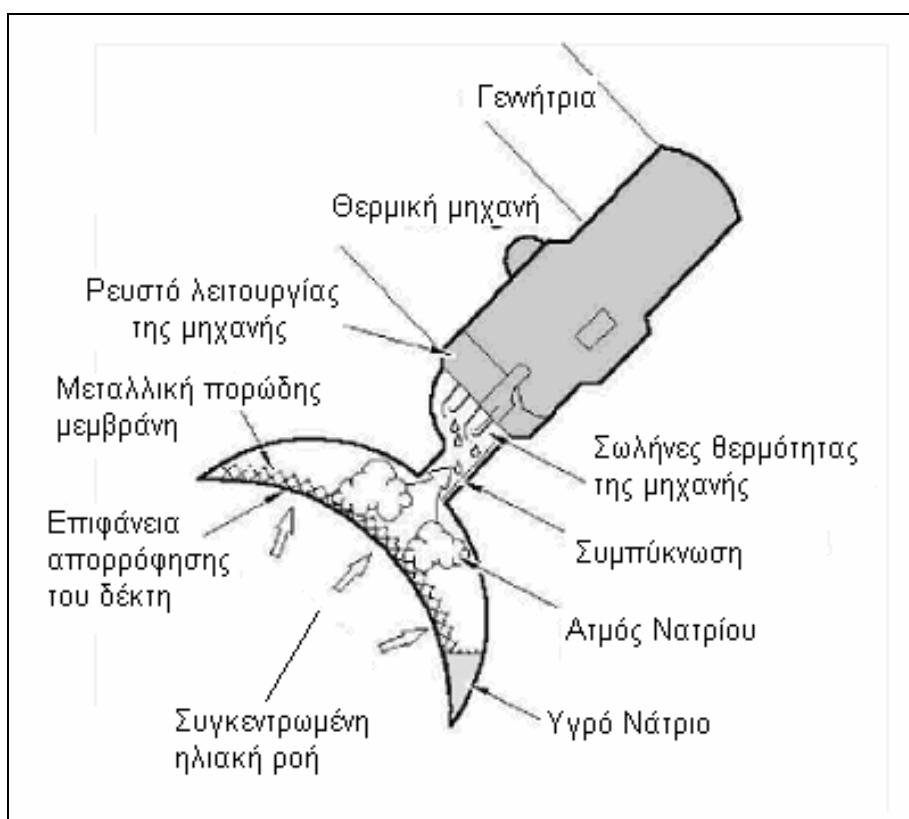
Σχήμα 4.9: Απεικόνιση συστημάτων με κάτοπτρα τεταμένων μεμβρανών.

4.4.2 Δέκτης

Όπως στα συστήματα παραβολικών κοίλων και ηλιακού πύργου ισχύος, έτσι και εδώ ο δέκτης απορροφά την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία και μεταφέρει την ενέργεια ως θερμότητα στο αέριο λειτουργίας της μηχανής, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Οι θερμοκρασίες του θερμικού ρευστού λειτουργίας κυμαίνονται μεταξύ 650°C και 750°C. Αυτή η θερμοκρασία επηρεάζει έντονα την αποδοτικότητα της θερμικής μηχανής. Επίσης, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, οι απώλειες ακτινοβολίας επιβαρύνουν έντονα και την απόδοση του δέκτη. Επομένως, ένας δέκτης τύπου κοιλότητας είναι η βέλτιστη λύση για αυτό το είδος συστήματος. Ο δέκτης αυτός είναι παρόμοιος με τον δέκτη κοιλότητας σε ένα σύστημα ηλιακού πύργου, αλλά σε πολύ μικρότερο μέγεθος.

Δύο διαφορετικές μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιούνται συνήθως στους δέκτες των συστημάτων δίσκου/Stirling, οι άμεσα και οι έμμεσα φωτισμένοι δέκτες. Στους άμεσα φωτισμένους δέκτες, το ίδιο ρευστό που χρησιμοποιείται μέσα στη μηχανή θερμαίνεται στο δέκτη καθώς ρέει μέσω μιας δέσμης σωλήνων. Αν και αυτή είναι η συμβατικότερη μέθοδος, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας περιορίζεται στο να είναι κάποιο αέριο με υψηλή πίεση και ταχύτητα. Τέτοια αέρια είναι το ήλιο και το υδρογόνο. Στους έμμεσους δέκτες, ένα ενδιάμεσο ρευστό χρησιμοποιείται για να αποσυνδέσει την ηλιακή ροή και την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο δέκτη από το ρευστό της μηχανής. Μια τέτοια μέθοδος είναι οι “δέκτες σωλήνα θερμότητας” (σχήμα 4.10). Στους δέκτες αυτούς στο εσωτερικό της επιφάνειας απορρόφησης υπάρχει μια μεταλλική πορώδης μεμβράνη που είναι εμποτισμένη με υγρό νάτριο. Το υγρό αυτό θερμαίνεται μέσω της επιφάνειας απορρόφησης του δέκτη και ατμοποιείται. Ο ατμός έπειτα κινείται διαμέσου του δέκτη και συμπυκνώνεται στους σωλήνες θερμότητας της μηχανής Stirling, μεταφέροντας έτσι τη θερμότητα στη μηχανή. Το νάτριο επιστρέφει παθητικά στον απορροφητή λόγω βαρύτητας και διανέμεται σχεδόν ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια απορρόφησης λόγω της παρουσίας των πόρων στη μεταλλική μεμβράνη. Η αλλαγή της φάσης του νατρίου από υγρό σε αέριο εγγυάται καλό έλεγχο της θερμοκρασίας, παρέχοντας έτσι ομοιόμορφη θέρμανση της μηχανής. Οι δέκτες Stirling είναι περίπου 90% αποδοτικοί στη μεταφορά της ενέργειας που ελευθερώνεται από το συμπυκνωτή στη μηχανή.

Οι ηλιακοί δέκτες για συστήματα δίσκου/Brayton είναι λιγότερο αναπτυγμένοι. Στους δέκτες αυτούς η ροή του ρευστού (συνήθως ατμοσφαιρικός αέρας) είναι σταθερή, αλλά σε σχετικά χαμηλές πιέσεις. Για το λόγο αυτό η βελτίωση των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας αλλά και η ελαχιστοποίηση της πτώσης πίεσης στο δέκτη αποτελούν μία πρόκληση για τους μελετητές. Οι πιο επιτυχημένοι δέκτες Brayton έχουν χρησιμοποιήσει τη μέθοδο "ογκομετρικής απορρόφησης". Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται μέσα από ένα τζάμι χαλαζία που περιβάλλει τον απορροφητή και τελικά συγκεντρώνεται σε μια πορώδη κοιλότητα. Η παρουσία πόρων επιτρέπει στον ατμοσφαιρικό αέρα, που θερμαίνεται από την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία, να διέλθει στο εσωτερικό (στον "όγκο") της δομής του απορροφητή. Η προσέγγιση αυτή παρέχει σημαντικά μεγαλύτερη επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας από τους συμβατικούς εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούν την αγωγή μέσω ενός τοιχώματος. Οι ογκομετρικοί δέκτες Brayton χρησιμοποιούν αφρώδη μεταλλικά ή κεραμικά καλούπια. Έχουν καταδειχθεί επιτυχώς, αλλά μόνο για βραχυπρόθεσμη λειτουργία (μερικές δεκάδες ωρών). Η απόδοση του δέκτη Brayton είναι πάνω από 80%. [10]



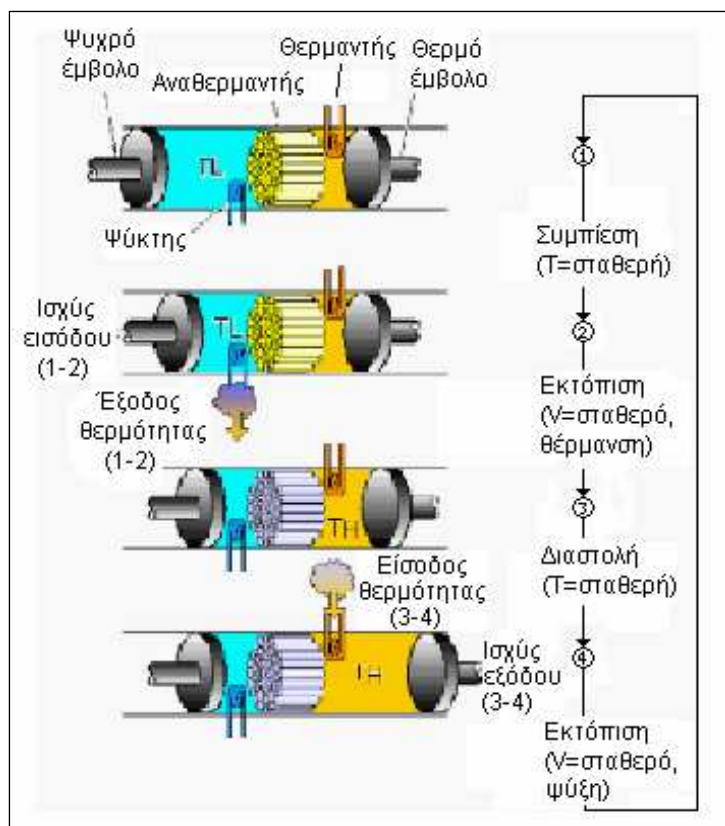
Σχήμα 4.10: Σχηματική απεικόνιση που δείχνει τη λειτουργία ενός δέκτη σωλήνα θερμότητας.

4.4.3 Θερμική Μηχανή

4.4.3.1 Γενική Περιγραφή

Η μηχανή σε ένα σύστημα δίσκου/μηχανής μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική, συμπιέζοντας ένα ρευστό λειτουργίας όταν είναι κρύο, θερμαίνοντας το συμπιεσμένο ρευστό και έπειτα διαστέλλοντας το μέσω ενός στροβίλου ή με ένα έμβολο για να παραχθεί τελικά έργο. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με μια ηλεκτρική γεννήτρια. Διάφοροι θερμοδυναμικοί κύκλοι και ρευστά λειτουργίας έχουν εξεταστεί για τα συστήματα δίσκου/μηχανής. Στους κύκλους αυτούς περιλαμβάνεται ο κύκλος Rankine, στον οποίο χρησιμοποιείται νερό ή ένα οργανικό ρευστό λειτουργίας, ο κύκλος Brayton, είτε ανοιχτός είτε κλειστός, και ο κύκλος Stirling. Άλλοι, πιο ασυνήθιστοι θερμοδυναμικοί κύκλοι και παραλλαγές των παραπάνω κύκλων έχουν επίσης εξεταστεί. Οι θερμικές μηχανές που προτιμούνται συνήθως χρησιμοποιούν τον κύκλο Stirling και τον ανοιχτό κύκλο Brayton (αεριοστρόβιλος). Η χρήση των συμβατικών κύκλων των μηχανών Otto και Diesel δεν είναι εφικτή λόγω της δυσκολίας ενσωμάτωσής τους στη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια. Η θερμότητα στη μηχανή μπορεί επίσης να παρέχεται από έναν συμπληρωματικό καυστήρα αερίου για να επιτρέπεται έτσι η λειτουργία κατά τη διάρκεια νεφελώδους καιρού και τη νύχτα. Η ηλεκτρική έξοδος στα παρόντα συστήματα δίσκου/μηχανής είναι περίπου 25 kW_e για συστήματα Stirling και περίπου 30 kW_e για τα υπό μελέτη συστήματα Brayton. Μικρότερα συστήματα Stirling 5 έως 10 kW_e έχουν επίσης αναπτυχθεί στο παρελθόν. [9]

4.4.3.2 Μηχανή Stirling



Σχήμα 4.11: Αρχή λειτουργίας μηχανής Stirling

Οι μηχανές κύκλου Stirling που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά συστήματα δίσκου λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση, θερμαίνονται εξωτερικά και χρησιμοποιούν υδρογόνο ή ήλιο ως αέριο λειτουργίας. Οι θερμοκρασίες του αερίου λειτουργίας ξεπερνούν τους 700°C ενώ η πίεση του φτάνει τα 20 MPa. Στον κύκλο Stirling, το αέριο θερμαίνεται και ψύχεται διαδοχικά με διεργασίες σταθερής θερμοκρασίας και σταθερού όγκου.

Οι μηχανές Stirling ενσωματώνουν συνήθως έναν αναθερμαντή που συλλαμβάνει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ψύξης σε σταθερό όγκο και την επιστρέφει όταν το αέριο θερμαίνεται σε σταθερό πάλι όγκο. Το σχήμα 4.11 εμφανίζει τις τέσσερις βασικές διεργασίες μιας μηχανής κύκλου Stirling. Υπάρχουν διάφορες μηχανικές διατάξεις που εφαρμόζουν αυτές τις διεργασίες σταθερής θερμοκρασίας και σταθερού όγκου. Οι περισσότερες περιλαμβάνουν τη χρήση εμβόλων και κυλίνδρων. Ορισμένες χρησιμοποιούν ένα έμβολο που εκτοπίζει το αέριο λειτουργίας χωρίς να μεταβάλλει τον όγκο του. Το έμβολο αυτό παλινδρομεί το

αέριο μπρος-πίσω από την θερμή περιοχή στην ψυχρή περιοχή της μηχανής. Για τα περισσότερα σχέδια μηχανών, η κινητική ενέργεια λαμβάνεται από έναν περιστρεφόμενο στροφαλοφόρο άξονα. Η μέγιστη απόδοση μετατροπής από θερμική σε ηλεκτρική ενέργεια για μηχανή Stirling είναι περίπου 40%. Οι μηχανές Stirling είναι ο κύριος υποψήφιος για τα συστήματα δίσκου/μηχανής καθώς η εξωτερική θέρμανσή τους τις καθιστά κατάλληλες για θέρμανση μέσω της συγκεντρωμένης ηλιακής ροής, αλλά και λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς τους.

Αυτή την περίοδο, οι μηχανές Stirling που χρησιμοποιούνται στα συστήματα δίσκου/μηχανής είναι οι μηχανές SOLO 161 11-kW, Kockums 25-kW (πρώην United Stirling 4-95) και Stirling Thermal Motors STM 4-120 25-kW. Όλες οι μηχανές Stirling που είναι υπό εξέταση για ηλιακές εφαρμογές κατασκευάζονται και για άλλες μη ηλιακές εφαρμογές, όπως δηλαδή για συμπαραγωγή, για υποβρύχια προωθητικά συστήματα και για υβριδικά οχήματα. Η επιτυχής εμπορευματοποίηση οποιασδήποτε από αυτές τις μηχανές θα εξαλείψει διάφορα εμπόδια στην εμπορική ανάπτυξη της τεχνολογίας δίσκου/μηχανής. [9]

4.4.3.3 Μηχανή Brayton

Η μηχανή Brayton, γνωστή επίσης ως μηχανή ώσεως αερίων (μηχανή τζετ) ή στρόβιλος εσωτερικής καύσης ή αεριοστρόβιλος, είναι μια μηχανή εσωτερικής καύσεως που παράγει ενέργεια με την ελεγχόμενη καύση των καυσίμων. Στη μηχανή Brayton, όπως στις μηχανές κύκλου Otto και Diesel, ο ατμοσφαιρικός αέρας συμπιέζεται, προστίθενται τα καύσιμα, και το μίγμα καίγεται. Σε ένα σύστημα δίσκου/Brayton, η ηλιακή θερμότητα χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει (ή να συμπληρώσει) τα καύσιμα. Τα καυσαέρια που προκύπτουν από την καύση εκτονώνονται σε έναν στρόβιλο, όπου και μετατρέπουν μέρος της ενέργειάς τους σε μηχανική. Ο στρόβιλος κινεί την γεννήτρια (όπως επίσης και τον συμπιεστή) η οποία παράγει ηλεκτρισμό. Όπως στη μηχανή Stirling, η ανάκτηση της θερμότητας των καυσαερίων είναι ένας βασικός παράγοντας για την επίτευξη υψηλής αποδοτικότητας. Επομένως, τα καυσαέρια από τον στρόβιλο δεσμεύονται και χρησιμοποιούνται για να προθερμάνουν, στον αναθερμαντή, τον αέρα υψηλής πίεσης που προέρχεται από τον συμπιεστή. Μια σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος

4.5 Εφαρμογές του Συστήματος Δίσκου / Μηχανής

Τα συστήματα δίσκου/μηχανής έχουν τα προσόντα της υψηλής αποδοτικότητας, της αρθρωτής σχεδίασης και της υβριδικής λειτουργίας. Η υψηλή αποδοτικότητα συντελεί σε αυξημένη παραγωγή και σε χαμηλότερο κόστος, σε σχέση με άλλες ηλιακές τεχνολογίες. Ανάλογα με το σύστημα και την περιοχή, τα συστήματα δίσκου/μηχανής απαιτούν περίπου 5 με 6.5 στρέμματα εδάφους ανά MW. Το εγκατεστημένο κόστος του συστήματος, αν και αυτήν την περίοδο για ηλιακές μόνο εγκαταστάσεις είναι άνω των 12,000 \$/kW θα μπορούσε να πλησιάσει τα 1,400 \$/kW για υβριδικά συστήματα μαζικής παραγωγής. [10]

4.5.1 Εφαρμογές Διασυνδεδεμένες στο Κεντρικό Δίκτυο Ηλεκτροδότησης

Λόγω της προσαρμοστικότητας και της υβριδικής ικανότητάς τους, τα συστήματα δίσκου/μηχανής έχουν ένα ευρύ φάσμα δυναμικών εφαρμογών. Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα δίσκου/μηχανής είναι ικανά να παρέχουν ισχύ που ξεκινάει από την τάξη των kW και φτάνει στην τάξη των GW. Εντούτοις, αναμένεται ότι τα συστήματα αυτά θα παρουσιάσουν την μεγαλύτερη ανάπτυξή τους στις διασυνδεδεμένες με το δίκτυο εφαρμογές στην κλίμακα ισχύος από 1 έως 50 MWe. Δηλαδή η καλύτερη προοπτική ανάπτυξης των συστημάτων ηλιακού δίσκου είναι σε μεγάλης κλίμακας σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που συνδέονται με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρισμού. Η δυνατότητά τους να εγκαθίστανται γρήγορα και ο μηδαμινός αντίκτυπος στο περιβάλλον τα καθιστά έναν καλό υποψήφιο για νέες εγκαταστάσεις που θα καλύπτουν φορτία αιχμής. 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 βιο-παραγόμενα καύσιμα αντισταθμίζει το μειονέκτημα αυτό και τα καθιστά ικανά να τροφοδοτούν το δίκτυο χωρίς διακοπές και προβλήματα. [10]

4.5.2 Απομακρυσμένες Εφαρμογές

Τα συστήματα δίσκου/μηχανής μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε αυτόνομες και ανεξάρτητες εφαρμογές όπως για παράδειγμα η άντληση νερού. Ενώ η διαβάθμιση της ισχύος και η πολυσυναρτησιακότητα των συστημάτων φαίνονται ιδανικά για αυτόνομες εφαρμογές, υπάρχουν αρκετές δυσκολίες σχετικά 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 όρο, συνήθως τα 16 m/s. Για το λόγο αυτό απαιτούνται αξιόπιστοι αισθητήρες ήλιου και αέρα για να καθορίσουν εάν οι συνθήκες εγγυώνται τη λειτουργία. Επιπλέον, σε τέτοιες απόμακρες εφαρμογές απαιτείται η ύπαρξη ενεργειακής αποθήκευσης (π.χ., μια μπαταρία όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σε ένα συγκρότημα με ντιζελογεννήτριες) με τα συνεπακόλουθα ζητήματα κόστους και αξιοπιστίας. Για το λόγο αυτό μια δυναμική ένταξη των συστημάτων δίσκου σε ανεξάρτητες απόμακρες εφαρμογές θα συμβεί μόνο όταν η τεχνολογία αυτή ωριμάσει πρώτα αρκετά σε εφαρμογές διασυνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Οι εφαρμογές μεσαίας κλίμακας, όπως είναι η ηλεκτροδότηση σε μικρά τοπικά δίκτυα, εμφανίζονται να ταιριάζουν καλά στα συστήματα δίσκου/μηχανής. Η χρησιμοποίηση πολλαπλών μονάδων δίσκου και η δυνατότητα τους να προστίθενται ή να αφαιρούνται από την παραγωγή ανάλογα με την ζήτηση φορτίου, σε συνδυασμό με την υβριδική δυνατότητα, καθιστά την τεχνολογία αυτή ιδανική για τα μικρά δίκτυα.

4.5.3 Υβριδικές Εφαρμογές

Καθώς τα συστήματα δίσκου/μηχανής χρησιμοποιούν θερμικές μηχανές, έχουν την έμφυτη ικανότητα να λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Η χρήση του ίδιου εξοπλισμού μετατροπής της ισχύος, συμπεριλαμβανομένων της μηχανής, της γεννήτριας, των καλωδίων, του δικτύου διανομής, κ.λπ., σημαίνει ότι μόνο η προσθήκη ενός θαλάμου καύσης ορυκτών καυσίμων απαιτείται για να καταστεί δυνατή η υβριδική λειτουργία. Στα 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 ελάχιστο κόστος και χωρίς περιπλοκές. Ο υβριδικός καυστήρας είναι κατάντη του ηλιακού δέκτη και ουσιαστικά δεν ασκεί καμία δυσμενή επίδραση στην απόδοση. Στην πραγματικότητα, επειδή με υβριδική λειτουργία η μηχανή του αεριοστρόβιλου μπορεί να λειτουργεί συνεχώς στις ονομαστικές τιμές της, η γενική απόδοση του συστήματος ενισχύεται. Η αποδοτικότητα με βάση την ανωτέρα θερμογόνο δύναμη ενός συστήματος δίσκου/Brayton που λειτουργεί υβριδικά αναμένεται να είναι περίπου 30%.

Για τα συστήματα δίσκου/Stirling, η προσθήκη υβριδικής υποστήριξης παρουσιάζει διάφορα προβλήματα. Η εξωτερική, 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 ενός ορυκτού καυσίμου. Σ' αυτό συμβάλλουν επίσης και οι γεωμετρικοί περιορισμοί της μηχανής. Κατά συνέπεια, το πρόσθετο κόστος για υβριδική λειτουργία ενός μεγάλου συστήματος Stirling φτάνει περίπου τα 250 \$/kW. Η αποδοτικότητα με βάση την ανωτέρα θερμογόνο δύναμη ενός συστήματος δίσκου/Stirling που λειτουργεί υβριδικά αναμένεται να είναι περίπου 33%. Με το σύστημα δίσκου της εταιρείας MDA (περιγράφεται παρακάτω) επιτεύχθηκε ένας ετήσιος συντελεστής δυναμικού 12.5%, ενώ λαμβάνοντας υπόψη την υβριδική δυνατότητα αναμένεται ένας ετήσιος συντελεστής δυναμικού 50%, που αντιστοιχεί σ' ένα ηλιακό μερίδιο 50%. [10]

5. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ FRESNEL

5.1 Εισαγωγή

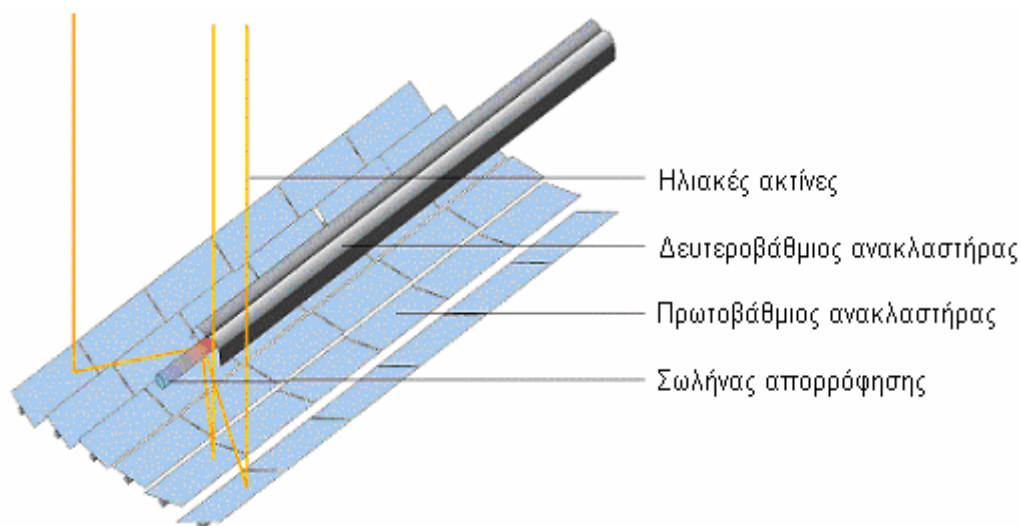
Το σύστημα του συλλέκτη Fresnel έχει πολλές ομοιότητες με αυτό των παραβολικών συλλεκτών. Και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν ένα σωληνωτό δέκτη που είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής του συλλέκτη. Εντούτοις οι σημαντικές τεχνικές διαφορές που υπάρχουν στους συλλέκτες των δύο συστημάτων καθιστούν το σύστημα Fresnel ένα ξεχωριστό συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα. Η βελγική εταιρεία Solarmundo είναι η πρώτη που εφάρμοσε την τεχνολογία αυτή και υποστήριξε τις λειτουργικές και οικονομικές δυνατότητες του συλλέκτη Fresnel. Οι εγκαταστάσεις Solarmundo βρίσκονται στη Λιέγη, στο Βέλγιο, και έχουν έκταση 2.500 m². Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι θερμικές και οι γεωμετρικές ιδιότητες του συλλέκτη Solarmundo καθώς και η διαφορετική συμπεριφορά των συλλεκτών Fresnel έναντι των παραβολικών κοίλων.

5.2 Περιγραφή της Εγκατάστασης

Ο συλλέκτης Fresnel αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές ανακλαστήρων που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη τοποθετημένο κατά μήκος των σειρών αυτών και σε αρκετά μέτρα ύψος. Οι ανακλαστήρες αυτοί είναι γνωστοί ως πρωτοβάθμιοι για να μη συγχέονται με ένα δευτεροβάθμιο ανακλαστήρα που είναι τοποθετημένος στο επάνω μέρος του δέκτη και κατευθύνει όλες τις εισερχόμενες ακτίνες στο σωλήνα απορρόφησης, (σχήμα 5.1 και 5.3).

Σύμφωνα με το πρότυπο Solarmundo οι πρωτοβάθμιοι, που κάθε ένας έχει πλάτος 0.5 m, δεν είναι απολύτως επίπεδοι αλλά έχουν μια πολύ μικρή καμπυλότητα. Ο συλλέκτης αποτελείται από 48 σειρές καθρεφτών (κατά πλάτος), πράγμα που "οδηγεί σε" ένα συνολικό πλάτος 24 m. Η αρχή Fresnel είναι πολύ απλή: Επειδή η σχετική κίνηση όλων των πρωτοβάθμιων καθρεφτών είναι ίδια κατά την παρακολούθηση του ήλιου, άπαξ τοποθετηθούν σωστά, η κίνηση τους μετά μπορεί να συζητηθεί μηχανικά. Αρκετές σειρές καθρεφτών οδηγούνται από μία μόνο μηχανή.

Ο δευτεροβάθμιος συγκεντρωτής όχι μόνο διευρύνει το στόχο για τους ανακλαστήρες Fresnel αλλά λειτουργεί και ως μόνωση κατά των απωλειών από το σωλήνα απορρόφησης. Το πίσω τμήμα του συγκεντρωτή αυτού καλύπτεται από μια αδιαφανή μόνωση, ενώ στο μπροστινό τμήμα ένα κατοπτρικό τζάμι μειώνει τις απώλειες θερμότητας από συναγωγή. [16]



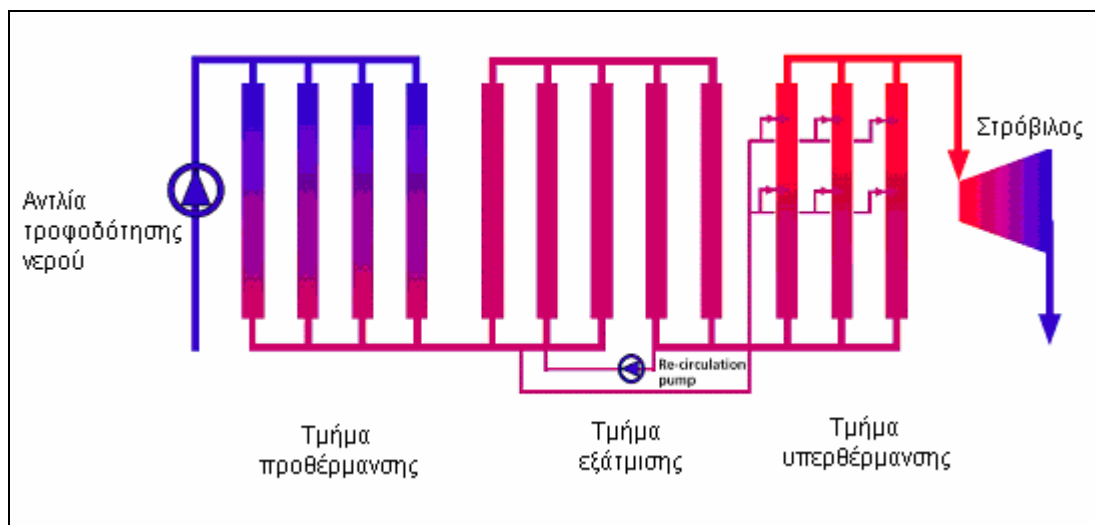
Σχήμα 5.1: Αρχή λειτουργίας του συλλέκτη fresnel

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

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

Το βασικό σχέδιο ενός ολόκληρου πεδίου συλλεκτών για άμεση παραγωγή ατμού παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2. Το ηλιακό πεδίο για ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 50 MW αναπτύσσεται σε 12 σειρές συλλεκτών κάθε μια μήκους 1000 m. Οι σειρές μπορούν να είναι εγκατεστημένες η μια κοντά στην άλλη έτσι ώστε η χρήση εδάφους του ηλιακού πεδίου να είναι πρακτικά όχι μεγαλύτερη απ' ότι η έκταση των καθρεφτών. Οι σειρές συλλεκτών

συνδέονται παράλληλα και σε σειρά και το ηλιακό πεδίο διαιρείται σε τρία τμήματα: της προθέρμανσης, της εξάτμισης και της υπερθέρμανσης. [16]



Σχήμα 5.2: Η ροή στο πεδίο του συλλέκτη



Σχήμα 5.3: 2500 m² πρωτότυπος σταθμός στην Liège, Βέλγιο

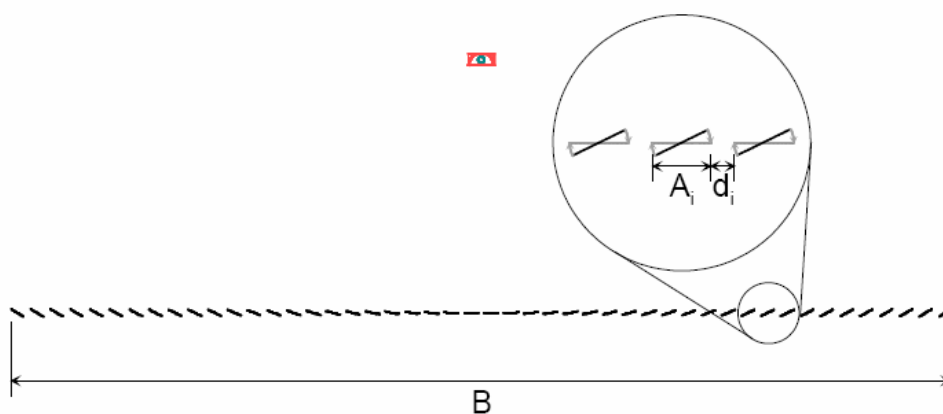
5.3 Θεωρητική Παρουσίαση του Συλλέκτη

Αν και ο πρωτότυπος συλλέκτης Solarmundo λειτούργησε κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες και απέδειξε ότι μπορεί να παράγει ατμό, δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις της θερμικής απόδοσης ακόμα. Συμπεράσματα για την οπτική και θερμική απόδοση πρέπει να αντληθούν από τις θεωρητικές μελέτες, που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν.

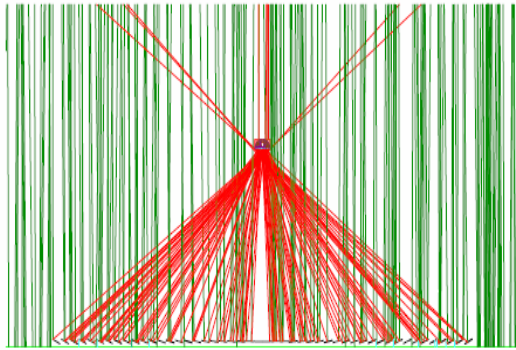
5.3.1 Άνοιγμα συλλέκτη, εμβαδό ανοίγματος συλλέκτη και μεικτή επιφάνεια πεδίου

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

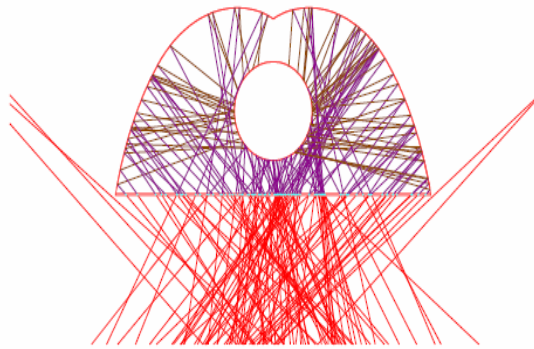
Το άνοιγμα ενός συλλέκτη Fresnel παραμένει οριζόντιο, παρόλο που οι ανεξάρτητοι ανακλαστήρες ακολουθούν τον ήλιο.



Σχήμα 5.4: Επιφάνεια αναφοράς συλλέκτη Fresnel: άνοιγμα $A = \sum A_i$, μεικτή επιφάνεια B



Σχήμα 5.5: "καταγραφή ακτίνων"



Σχήμα 5.6: απορροφητής και δευτεροβάθμιος ανακλαστήρας

5.3.2 Οπτική Απόδοση

Οι ακόλουθοι παράμετροι υλικών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της οπτικής απόδοσης :

Πίνακας 5.1: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΛΙΚΩΝ	
Ανακλαστικότητα πρωτοβάθμιου κατόπτρου	92%
Συντελεστής εκπομπής κατοπτρικού τζαμιού * (τζάμι στο δευτεροβάθμιο κάτοπτρο)	95%
Ανακλαστικότητα δευτεροβάθμιου κατόπτρου	95%
Απορροφητικότητα του σωλήνα απορρόφησης	94%

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

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

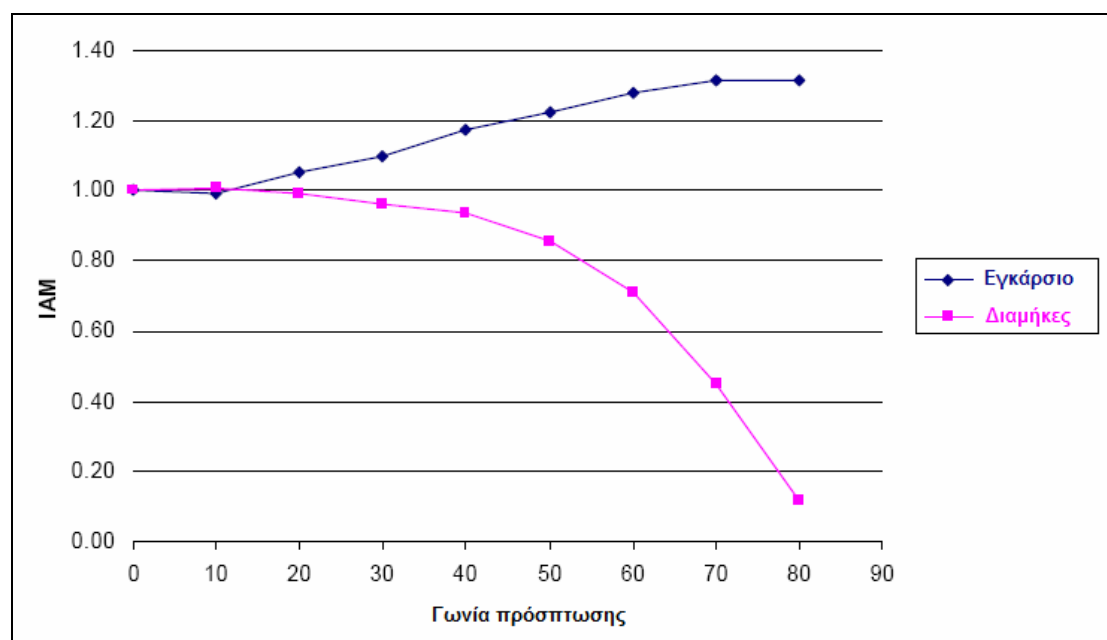
$$\eta_0(\theta=0)=61\%$$

όπου θ είναι η γωνία πρόσπτωσης.

Βρίσκοντας το βαθμό απόδοσης $\eta_0(\theta)$ για γωνίες πρόσπτωσης διάφορες του μηδενός θεωρούμε το λόγο μετατροπής IAM (incident angle modifier), ο οποίος παριστάνεται στο σχήμα 5.8 για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. [11]

$$IAM = \frac{\eta_0(\Theta)}{\eta_0(\Theta = 0)}$$

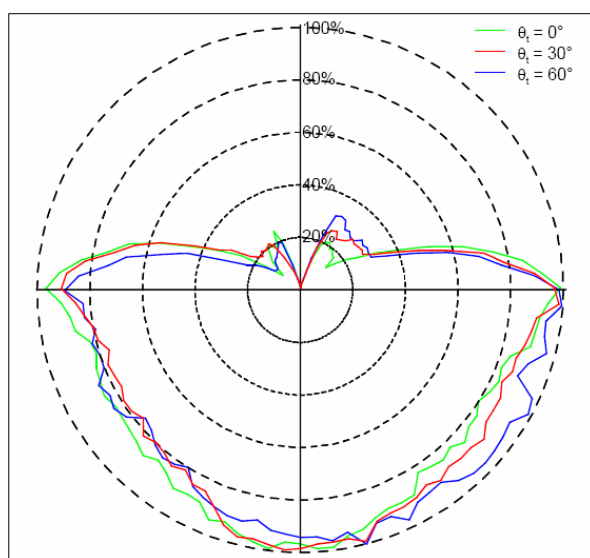
Ο λόγος αυτός περιγράφει την αλλαγή στον βαθμό απόδοσης για γωνίες πρόσπτωσης μη κάθετες. Το εγκάρσιο IAM_t ορίζεται ως η προβολή του IAM σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα παρακολούθησης. Είναι αξιοπρόσεκτο ότι το IAM_t παίρνει υψηλές τιμές για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης χάνονται λιγότερες ακτίνες στα χάσματα μεταξύ των καθρεφτών και λιγότεροι γειτονικοί καθρέφτες φωτίζουν ο ένας τη πίσω πλευρά του άλλου αντί να φωτίζουν τον απορροφητή (μικρότερο μπλοκάρισμα). Το διαμήκες IAM_l είναι παράλληλο στον άξονα παρακολούθησης και καθορίζεται βασικά από το άνοιγμα της γυάλινης πλευράς του δευτεροβάθμιου ανακλαστήρα. [11]



Σχήμα 5.7: Γραφική παράσταση του λόγου μετατροπής IAM για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

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

Η σχετική κατανομή της ηλιακής έντασης στον απορροφητή παρουσιάζεται στο σχήμα 5.8. Φαίνεται ότι μόνο στο κάτω μέρος του σωλήνα εμφανίζεται ομαλή κατανομή (μεταξύ 80% και 100%). Η μορφή της κατανομής δεν αλλάζει σημαντικά για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης.



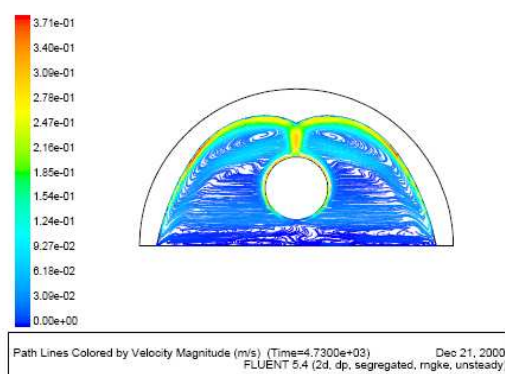
Σχήμα 5.8: σχετική κατανομή της έντασης στον απορροφητή για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης

5.3.3 Θερμική Απόδοση

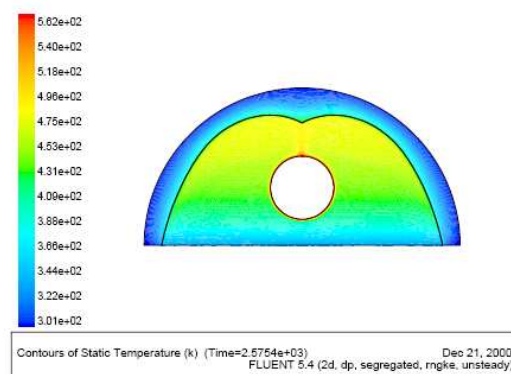
Για τον υπολογισμό των απωλειών θερμότητας από το σωλήνα απορρόφησης, πραγματοποιούνται διάφορες υπολογιστικές μέθοδοι δυναμικής ρευστών, που λαμβάνουν υπόψη όλους τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας: ακτινοβολία, αγωγή, συναγωγή. Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς αυτούς δίνονται στον πίνακα 5.2. [16]

Πίνακας 5.2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΛΙΚΩΝ	
Θερμική εκπομπή του απορροφητή	5%
Συντελεστής συναγωγής από το άνοιγμα και από το πίσω μέρος του δευτεροβάθμιου ανακλαστήρα προς το περιβάλλον	10 W/m ² K
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας από την μόνωση του πίσω μέρους του δευτεροβάθμιου ανακλαστήρα	0.05 W/mK

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

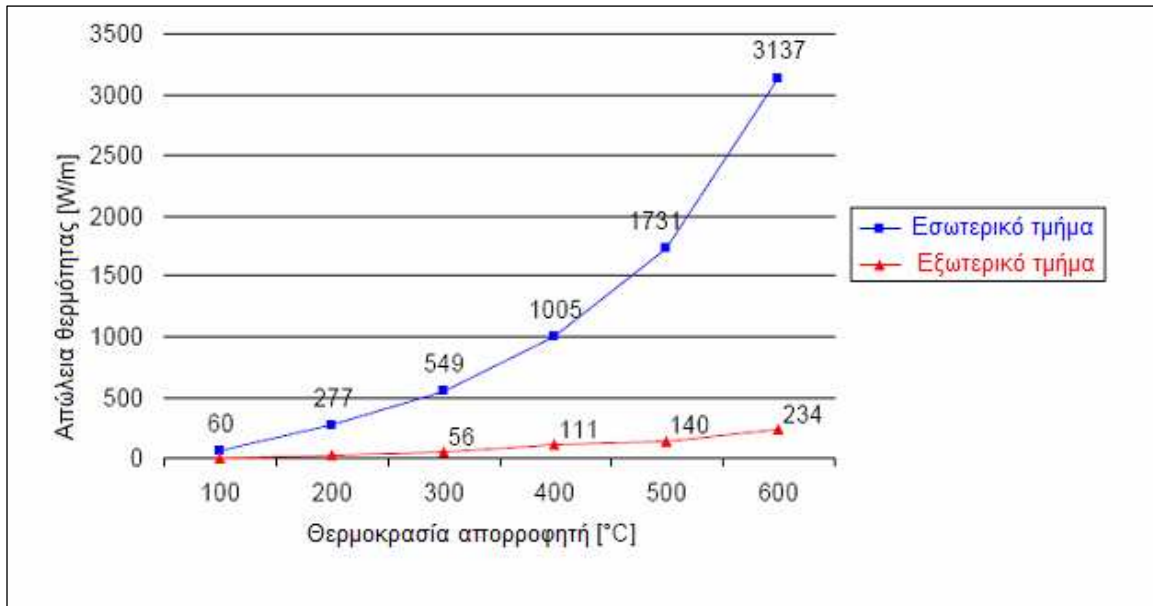


Σχήμα 5.9: Θερμορροή συναγωγής,
 $T_{\text{απορρόφησης}}=500^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 5.10: Θερμοκρασιακή κατανομή,
 $T_{\text{απορρόφησης}}=500^{\circ}\text{C}$

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



Σχήμα 5.11: Θερμικές απώλειες στο εσωτερικό και εξωτερικό τμήμα του δευτεροβάθμιου συγκεντρωτή.

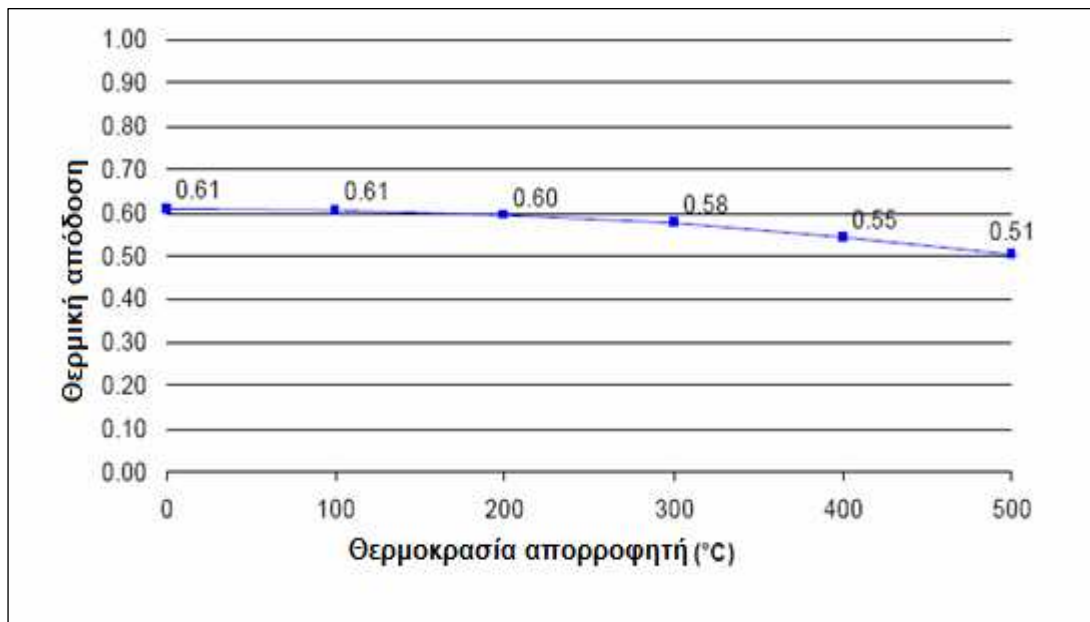
Ο συντελεστής θερμικών απωλειών ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

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

Ενώ η θερμική απόδοση είναι:

$$\eta(T_{\text{απορρόφησης}}) = \eta_0 - u \frac{T_{\text{απορρόφησης}} - T_{\text{περιβάλλοντος}}}{E_{\text{ακτινοβολίας}}}$$

Το σχεδιάγραμμα που ακολουθεί δίνει την προκύπτουσα καμπύλη της θερμικής απόδοσης για κάθετη ακτινοβολία ($E_{\text{ακτιν.}}=800\text{W/m}^2$) σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του απορροφητή σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{\text{περιβ.}}=30^\circ\text{C}$). [11]



Σχήμα 5.12: Καμπύλη απόδοσης για κάθετη ακτινοβολία.

5.4 Σύγκριση συλλέκτη Fresnel και παραβολικών συλλεκτών

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

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

Σύμφωνα με την Solarmundo αυτά τα πλεονεκτήματα οδηγούν σε μια μείωση του κόστους περίπου 50% για το ηλιακό πεδίο έναντι των παραβολικών κοίλων. Εκτός από το μειωμένο κόστος του ηλιακού πεδίου, οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης είναι και αυτές ιδιαίτερα μειωμένες. [11]

6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

6.1 Εισαγωγή

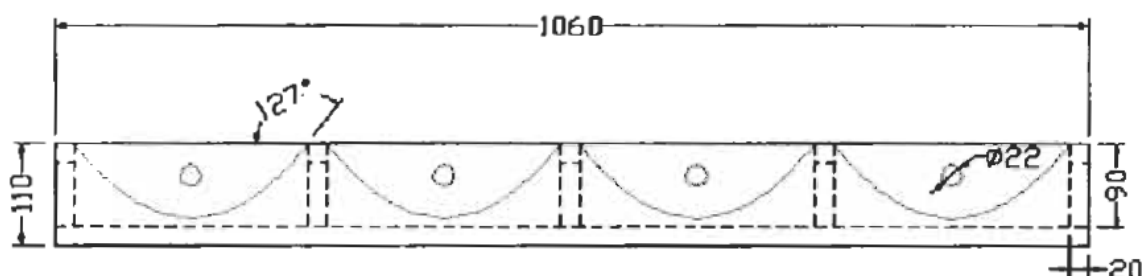
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παραμετρική μελέτη ενός συστήματος παράλληλα συνδεδεμένων παραβολικών συγκεντρωτικών συλλεκτών στις συνθήκες της Αθήνας. Το σύστημα έχει σταθερές όλες τις εξωτερικές του διαστάσεις, τα κατασκευαστικά στοιχεία και χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις το ίδιο λάδι ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Τα στοιχεία που μεταβάλλονται είναι το πλάτος του κάθε συλλέκτη και ο αριθμός των παράλληλα συνδεδεμένων συλλεκτών αντίστοιχα, ώστε το συνολικό εμβαδό του συστήματος να παραμένει σταθερό. Επίσης, για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις, μεταβάλλεται ο όγκος της δεξαμενής με την οποία συνδέεται το σύστημά μας, ενώ παραμένουν σταθερές οι διαστάσεις του απορροφητή.

6.2 Στοιχεία Κατασκευής του Συστήματος Παραβολικών Συγκεντρωτικών Συλλεκτών

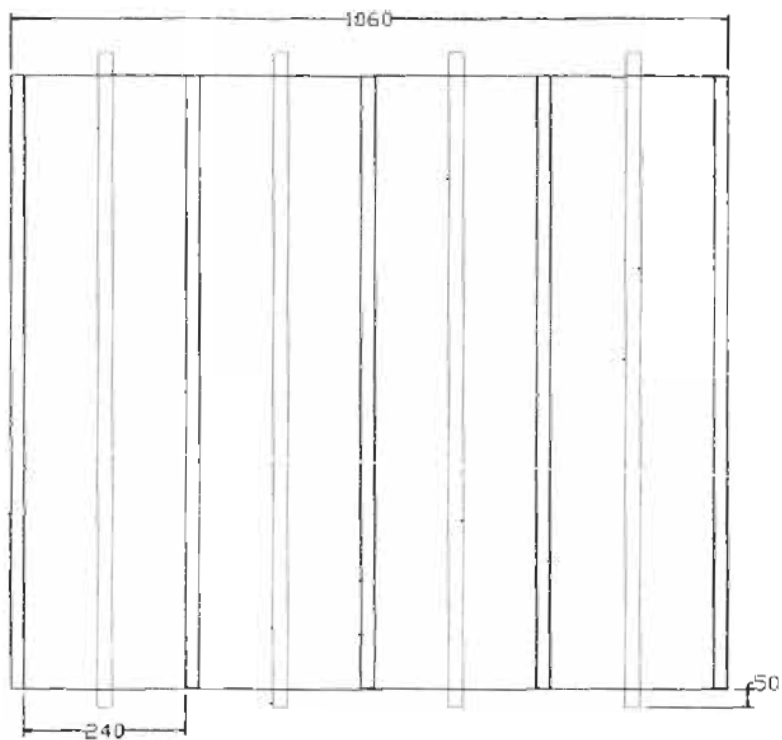
Παρακάτω παρουσιάζονται ως παράδειγμα τα κατασκευαστικά σχέδια ενός συστήματος τεσσάρων παράλληλα συνδεδεμένων παραβολικών συλλεκτών.

Πιο αναλυτικά θα δούμε στοιχεία, υλικά κατασκευής, τρόπους συναρμολόγησης και διάφορες άλλες πληροφορίες σχετικές με το σύστημα των συλλεκτών.

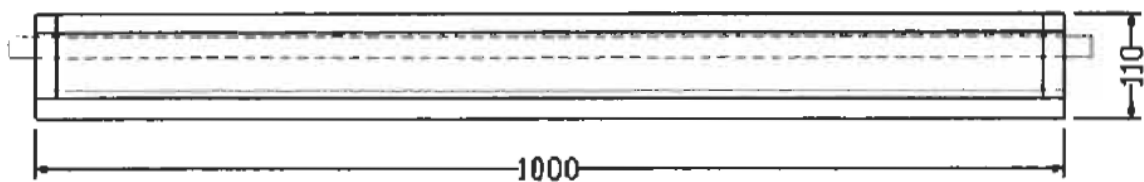
Κατασκευαστικά Σχέδια



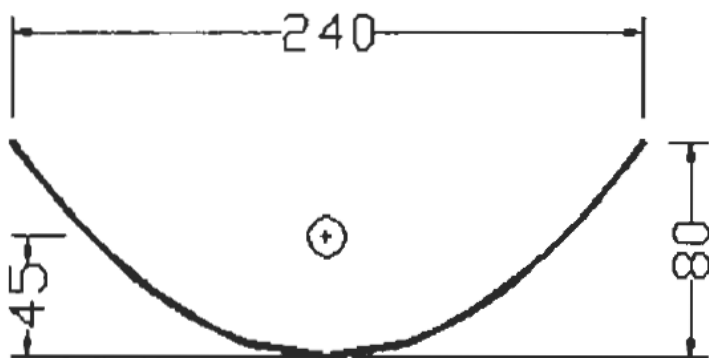
Σχήμα 6.1: Πρόοψη των τεσσάρων παράλληλα συνδεδεμένων παραβολικών συλλεκτών



Σχήμα 6.2: Κάτοψη των τεσσάρων παράλληλα συνδεδεμένων παραβολικών συλλεκτών



Σχήμα 6.3: Πλάγια όψη των τεσσάρων παράλληλα συνδεδεμένων παραβολικών συλλεκτών



Σχήμα 6.4: Πρόοψη ενός παραβολικού συλλέκτη (διαστάσεις παραβολής)

Κατασκευαστικά Στοιχεία

Όπως βλέπουμε και από τα σχέδια το σύστημα έχει γενικά εμβαδό 1.06 m^2 και το ύψος του είναι 110 mm . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αποτελείται από τέσσερις επιμέρους συλλέκτες.

Το κυρίως πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από ηλεκτροσυγκολλημένες στραντζαριστές ράβδους ενισχυμένου τύπου διαστάσεων $20 \times 20 \text{ mm}$.

Η ανακλαστική επιφάνεια είναι στερεωμένη με ήλους (πριτσίνια). Αποτελείται από ανοξείδωτο inox υλικό τύπου καθρέφτη με πάχος 0.6 mm και είναι διαμορφωμένο σε σχήμα παραβολής ($x^2 = 4ay$).

Ο απορροφητής αποτελείται από χαλκοσωλήνα εξωτερικής διαμέτρου 22 mm και εσωτερικής 19 mm . Επιπλέον είναι καλυμμένος με επιλεκτικό μαύρο ματ χρώμα ανθεκτικό στην θερμότητα. Οι απορροφητές είναι στερεωμένοι στο συλλέκτη με έλασμα από φύλλο λαμαρίνας πάχους 1 mm . Μεταξύ των αγωγών και του ελάσματος, παρεμβάλλεται πλαστικό μονωτικό υλικό.

6.3 Αναλυτική Περιγραφή της Μελέτης

Στις συνθήκες της Αθήνας και για τις αντίστοιχες ωριαίες τιμές ακτινοβολίας, υπολογίζεται για τους μήνες από Απρίλιο έως Σεπτέμβριο, η αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου μεταφοράς θερμότητας για διάφορες περιπτώσεις του συστήματος συλλεκτών.

Οι περιπτώσεις αυτές είναι οι εξής:

1) δύο συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι, έχοντας ο καθένας πλάτος $W = 0.48 \text{ m}$ και η δεξαμενή που διέρχεται το ρευστό είναι όγκου $V = 1 \text{ m}^3$.

2) δύο συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι, έχοντας ο καθένας πλάτος $W = 0.48 \text{ m}$ και η δεξαμενή που διέρχεται το ρευστό είναι όγκου $V = 2 \text{ m}^3$.

3) δύο συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι, έχοντας ο καθένας πλάτος $W = 0.48 \text{ m}$ και η δεξαμενή που διέρχεται το ρευστό είναι όγκου $V = 3 \text{ m}^3$.

4) τρεις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι, έχοντας ο καθένας πλάτος $W = 0.32 \text{ m}$ και η δεξαμενή που διέρχεται το ρευστό είναι όγκου $V = 1 \text{ m}^3$.

5) τρεις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι, έχοντας ο καθένας πλάτος $W = 0.32 \text{ m}$ και η δεξαμενή που διέρχεται το ρευστό είναι όγκου $V = 2 \text{ m}^3$.

6) τρεις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι, έχοντας ο καθένας πλάτος $W = 0.32 \text{ m}$ και η δεξαμενή που διέρχεται το ρευστό είναι όγκου $V = 3 \text{ m}^3$.

7) τέσσερις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι, έχοντας ο καθένας πλάτος $W = 0.24 \text{ m}$ και η δεξαμενή που διέρχεται το ρευστό είναι όγκου $V = 1 \text{ m}^3$.

8) τέσσερις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι, έχοντας ο καθένας πλάτος $W = 0.24 \text{ m}$ και η δεξαμενή που διέρχεται το ρευστό είναι όγκου $V = 2 \text{ m}^3$.

9) τέσσερις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι, έχοντας ο καθένας πλάτος $W = 0.24 \text{ m}$ και η δεξαμενή που διέρχεται το ρευστό είναι όγκου $V = 3 \text{ m}^3$.

Το ρευστό που χρησιμοποιείται δεν είναι νερό, αλλά θερμικό έλαιο για την αποφυγή ανάπτυξης μεγάλων πιέσεων στις μεγάλες θερμοκρασίες, όπως έχει αναφερθεί στην αντίστοιχη παράγραφο του δεύτερου κεφαλαίου. Το θερμικό έλαιο αυτής της εφαρμογής έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- πυκνότητα $\rho = 750.3 \text{ kg} / \text{m}^3$
- κινηματικό ιξώδες $\nu = 2.42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$
- ειδική θερμοχωρητικότητα $C_p = 2.449 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$
- θερμική αγωγιμότητα $k = 0.119 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$

Η παροχή του θερμικού ελαίου είναι $\dot{m} = 0.005 \text{ kg/s}$.

6.3.1 Υπολογισμός της Ηλιακής Ακτινοβολίας στην Αθήνα

Σύμφωνα με τη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων πολλών ετών του Αστεροσκοπείου Αθηνών, έχει προκύψει η παρακάτω εξίσωση υπολογισμού της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας για την αντίστοιχη ώρα και ημέρα του έτους.

$$G_b = M_t + A_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} D - P_t\right) \quad (6.1)$$

όπου $D = 1 \div 365$ η ημέρα του έτους και

M_t , A_t και P_t οι αντίστοιχοι συντελεστές για κάθε ώρα της ημέρας που λαμβάνονται από τον παρακάτω πίνακα:

Time (hrs LST)	Mt (kW / m ²)	At (kW / m ²)	Pt (kW / m ²)
7	0,007	0,046	86,18
8	0,057	0,068	87,31
9	0,119	0,104	87,94
10	0,191	0,129	88,31
11	0,258	0,153	89,35
12	0,319	-0,181	-88,88
13	0,342	-0,194	-89,18
14	0,325	0,183	87,21
15	0,269	0,166	86,22
16	0,183	0,147	82,1
17	0,078	0,131	79,85
18	-0,025	0,114	77,36

Πίνακας 6.1: Τιμές των συντελεστών υπολογισμού της άμεσης οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας στην Αθήνα.

Από την αντίστοιχη παράγραφο 2.4.3 του δεύτερου κεφαλαίου, έχουμε:

Η απόκλιση δ είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά την ηλιακή μεσημβρία σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού. Κυμαίνεται από $+23.45^\circ$ την 21^η Ιουνίου ως -23.45° την 21^η Δεκεμβρίου και γίνεται ίση με μηδέν τις ημέρες της ισημερίας.

Η απόκλιση υπολογίζεται από την σχέση του Cooper:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad \text{όπου } n \text{ είναι η μέρα του έτους} \quad (6.2)$$

Η αζιμουθιακή γωνία επιφάνειας γ , είναι η απόκλιση της καθέτου που άγεται στην επιφάνεια από τον τοπικό μεσημβρινό. Κυμαίνεται από -180° ως $+180^\circ$ και λαμβάνεται θετική για δυτικό προσανατολισμό και αρνητική για ανατολικό.

Για την Αθήνα έχουμε αζιμουθιακή γωνία $\gamma = 0$.

Η ωριαία γωνία ω είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, λόγω της περιστροφής της γης κατά 15° την ώρα γύρω από τον άξονά της. Για τις προ μεσημβρίας ώρες λαμβάνεται αρνητική και για τις μετά μεσημβρίας ώρες λαμβάνεται θετική.

$$\omega = \pm 0.25 (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (6.3)$$

Η κλίση β είναι η γωνία που σχηματίζεται από την επιφάνεια του συλλέκτη με το οριζόντιο επίπεδο. Στην εφαρμογή μας θεωρούμε πως η κλίση είναι σταθερή $\beta = 30^\circ$.

Για τον υπολογισμό της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένης επιφάνειας, όταν είναι γνωστή η άμεσος ακτινοβολία, απαιτείται η τιμή του λόγου R_b , η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση για την περίπτωση μας, όπου $\gamma = 0$.

$$R_b = \frac{\sin \delta \sin (\varphi - \beta) + \cos \delta \cos (\varphi - \beta) \cos \omega}{\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega} \quad (6.4)$$

Οι υπολογισμοί της ηλιακής ακτινοβολίας (άμεσης οριζόντιας και άμεσης κεκλιμένης επιφάνειας) γίνονται για τη μέση ημέρα του κάθε μήνα και τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν στην επαναληπτική διαδικασία που θα ακολουθήσει για τριάντα (30) ή τριάντα-μία (31) φορές αντίστοιχα για κάθε μήνα.

6.3.2 Ενεργειακό Ισοζύγιο και Υπολογισμός Θερμοκρασίας του Μέσου Μεταφοράς Θερμότητας

Σύμφωνα με τις εξισώσεις της παραγράφου 2.10 του δεύτερου κεφαλαίου, οι οποίες περιγράφουν το σύστημα, έχουμε:

Ο λόγος συγκέντρωσης του συλλέκτη

$$C = \frac{\text{Ενεργή Περιοχή Απορροφητή}}{\text{Εμβαδό Σωλήνα}} = \frac{(W - D_o)L}{\pi D_o L} = \frac{(W - D_o)}{\pi D_o} \quad (6.5)$$

όπου W = το άνοιγμα του συλλέκτη (m)

D_o = η εξωτερική διάμετρος του απορροφητή (=0,022 m)

L = το μήκος του συλλέκτη (=1m)

Η απορροφούμενη ισχύς S (W / m^2)

$$S = I_b R_b \rho \gamma (\tau\alpha)_b + I_b r_b (\tau\alpha)_b \left(\frac{D_o}{W - D_o} \right) \quad (6.6)$$

όπου ρ = ανακλαστικότητα της επιφάνειας του συλλέκτη (=0,93)

γ = παράγοντας παρεμπόδισης της ακτινοβολίας (=0,95)

$(\tau\alpha)_b$ = μέση τιμή απορροφητικότητας – μεταβιβασιμότητας (= 0,93·0,95)

I_b = ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του απορροφητή h_f :

$$\text{Μέση ταχύτητα του ρευστού} \quad V = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} D_i^2 \rho} \quad (6.7)$$

όπου D_i = η εσωτερική διάμετρος του απορροφητή (=0,019 m)

Αντικαθιστώντας, προκύπτει $V = 0,0235$ m/s

$$\text{Αριθμός Reynolds} \quad \text{Re} = \frac{V \cdot D_i}{\nu} \Rightarrow \text{Re} = 184,5 \quad (6.8)$$

$$\text{Αριθμός Prandtl} \quad \text{Pr} = \frac{C_p \cdot \nu \cdot \rho}{k} \Rightarrow \text{Pr} = 37,37 \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} \text{Αριθμός Nusselt} \quad Nu &= 5.172 \left[1 + 0.005484 \left\{ \text{Pr} (\text{Re} / X)^{1.78} \right\}^{0.7} \right]^{0.5} \Rightarrow \\ Nu &= 15,676 \end{aligned} \quad (6.10)$$

όπου $X = \text{o λόγος της σπειροειδούς ταινίας} = H / D_i \quad (= 4)$

$H = \text{το μήκος της σπειροειδούς κατά } 180^\circ \text{ ταινίας.}$

Άρα από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει :

$$h_f = Nu \frac{k}{D_i} \Rightarrow h_f = 98,18 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (6.11)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια h_w

Υποθέτουμε πως η ταχύτητα του αέρα που ρέει πάνω στον απορροφητή είναι

$$u = 5 \text{ m/sec}$$

$$\text{Ο αριθμός Reynolds} \quad \text{Re} = u \cdot D / \nu = 5 \cdot 0.048 / 2.094 \cdot 10^{-5} = 11461 \quad (6.12)$$

Για τον αριθμό αυτό από τη σχέση 2.32 παίρνουμε

$$Nu = 0.174 \text{Re}^{0.618} = 56.12 \quad (6.13)$$

Έτσι ο συντελεστής μετάβασης του αέρα είναι:

$$h_w = Nu \cdot k / D = 56.12 \cdot 0.0268 / 0.048 = 31.33 \quad (6.14)$$

όπου $k = \text{η θερμική αγωγιμότητα του γυάλινου καλύμματος.}$

Ο συντελεστής ολικών απωλειών U_L

$$\frac{1}{U_L} = \frac{1}{C_3(T_{pm} - T_c)^{0.25} + \left[\sigma(T_{pm}^2 + T_c^2)(T_{pm} + T_c) / \left\{ \frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{D_o}{D_{ci}} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right\} \right] + \left(\frac{D_o}{D_{co}} \right) \left(\frac{1}{h_w + \sigma \varepsilon_c (T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a)} \right)} \quad (6.15)$$

όπου,

U_L ο ολικός συντελεστής θερμικών απωλειών [$W / m^2 K$]

T_{pm} η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του απορροφητή [K]

Υποθέτουμε μια μέση τιμή $120^\circ C = 293 K$

T_c η θερμοκρασία καλύμματος

T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος

ε_p ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας του απορροφητή (=0,60)

ε_c ο συντελεστής εκπομπής του καλύμματος (=0,88)

D_o η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα

D_{ci} η εσωτερική διάμετρος γυάλινου καλύμματος

Υποθέτουμε $D_{ci} = 40 \text{ mm} = 0.040 \text{ m}$

D_{co} η εξωτερική διάμετρος γυάλινου καλύμματος

Υποθέτουμε $D_{co} = 48 \text{ mm} = 0.048 \text{ m}$

h_w ο συντελεστής μετάβασης του αέρα

σ η σταθερά Stefan – Boltzman [$= 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot K$]

C_3 σταθερά με
$$C_3 = \frac{17.74}{(T_{pm} + T_c)^{0.4} D_o (D_o^{-0.75} + D_{ci}^{-0.75})}$$

h_f ο συντελεστής θερμικής μετάβασης στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα

Η θερμοκρασία του καλύμματος T_c δίνεται από

$$\left(\frac{T_c - T_a}{T_{pm} - T_a} \right) = 0.163 \left(\frac{D_o}{D_{co}} \right)^{0.4} h_w^{0.67} \left[2 - 3\varepsilon_p + \frac{(6 + 9\varepsilon_p)T_{pm}}{100} \right] \quad (6.16)$$

όταν $333 < T_{pm} < 513$ K.

Μετά τους υπολογισμούς προκύπτει:

μέση θερμοκρασία απορροφητή $T_{pm} = 293$ K

συντελεστής $C_3 = 2.11$

μέσος συντελεστής ολικών απωλειών $U_L = 8.71$ W / m² · K

Ο συντελεστής απόδοσης του συλλέκτη F'

$$F' = \frac{1}{U_L \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{D_i \cdot h_f} \right]} \Rightarrow F' = 0,91 \quad (6.17)$$

Ο συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη F_R

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{\pi D_o L U_L} \left[1 - \exp \left\{ - \frac{F' \pi D_o U_L L}{\dot{m}C_p} \right\} \right] \Rightarrow F_R = 0,89 \quad (6.18)$$

Η ωφέλιμη ενέργεια του συλλέκτη q_u

$$q_u = F_R (W - D_o) L \left[S - \frac{U_L}{C} (T_{fi} - T_a) \right] \quad (6.19) (1)$$

Η ωφέλιμη ενέργεια του συστήματος

$$q_u = mC_p(T_{fo} - T_{fi}) \quad (6.19) (2)$$

όπου $m = V \cdot \rho$

$V =$ ο όγκος της δεξαμενής με την οποία συνδέεται το σύστημα των συλλεκτών.

Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις που αναφέραμε πως θα μελετήσουμε, ακολουθούμε επαναληπτική διαδικασία μεταξύ των εξισώσεων (1) και (2), εφόσον έχουμε υπολογίσει όλα τα προηγούμενα.

Για τον μήνα Απρίλιο θεωρούμε πως το ρευστό μεταφοράς θερμότητας έχει ως αρχική θερμοκρασία, τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος που είναι $16^\circ C$.

Άρα για θερμοκρασία $T_{fi} = 16^\circ C$ και για ισχύ S που έχει ήδη υπολογιστεί για την κάθε ώρα της μέσης ημέρας του μήνα Απριλίου ($15^{\text{η}}$ Απριλίου), υπολογίζουμε από την εξίσωση (1) την ωφέλιμη ενέργεια q_u του συστήματος των συλλεκτών.

Στη συνέχεια, από την εξίσωση (2) υπολογίζουμε τη θερμοκρασία του ρευστού που εξέρχεται από τη δεξαμενή πριν εισέλθει το σύστημα των συλλεκτών.

$$(2) \Rightarrow T_{fo} = \frac{q_u}{m \cdot C_p} + T_{fi}$$

Αυτή τη θερμοκρασία T_{fo} χρησιμοποιούμε ως θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη (T_{fi}) για την επόμενη ώρα και την αντίστοιχη ισχύ από την ηλιακή ακτινοβολία (S) για εκείνη την ώρα, στην εξίσωση (1) για να υπολογίσουμε τη νέα ωφέλιμη ενέργεια q_u . Από την εξίσωση (2) υπολογίζουμε τη νέα θερμοκρασία εξόδου T_{fo} .

Η διαδικασία αυτή, επαναλαμβάνεται ανά ώρα και για 30 ή 31 φορές, αναλογα με το μήνα που μελετάμε.

Η τελευταία θερμοκρασία εξόδου του ρευστού που προκύπτει τον ένα μήνα, λαμβάνεται ως αρχική θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο σύστημα συλλεκτών, τον επόμενο μήνα.

Οι συλλέκτες είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, άρα η ωφέλιμη ενέργεια που προκύπτει από την εξίσωση (1) για κάθε συλλέκτη, πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο αριθμό των συλλεκτών, ώστε να έχουμε την ωφέλιμη ενέργεια ολόκληρου του συστήματος των συλλεκτών.

Για κάθε περίπτωση, μεταβάλλονται το πλάτος του κάθε συλλέκτη W , ο αριθμός των συλλεκτών που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα και ο όγκος της δεξαμενής.

Για κάθε ώρα της ημέρας, μεταβάλλονται η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Επίσης, θεωρούμε πως στο σύστημά μας υπάρχει μια ρύθμιση ώστε να μη λειτουργεί, όταν η ωφέλιμη ενέργεια προκύπτει αρνητική, δηλαδή όταν το σύστημα προσλαμβάνει θερμότητα από το ρευστό, αντί να αποδίδει σε αυτό.

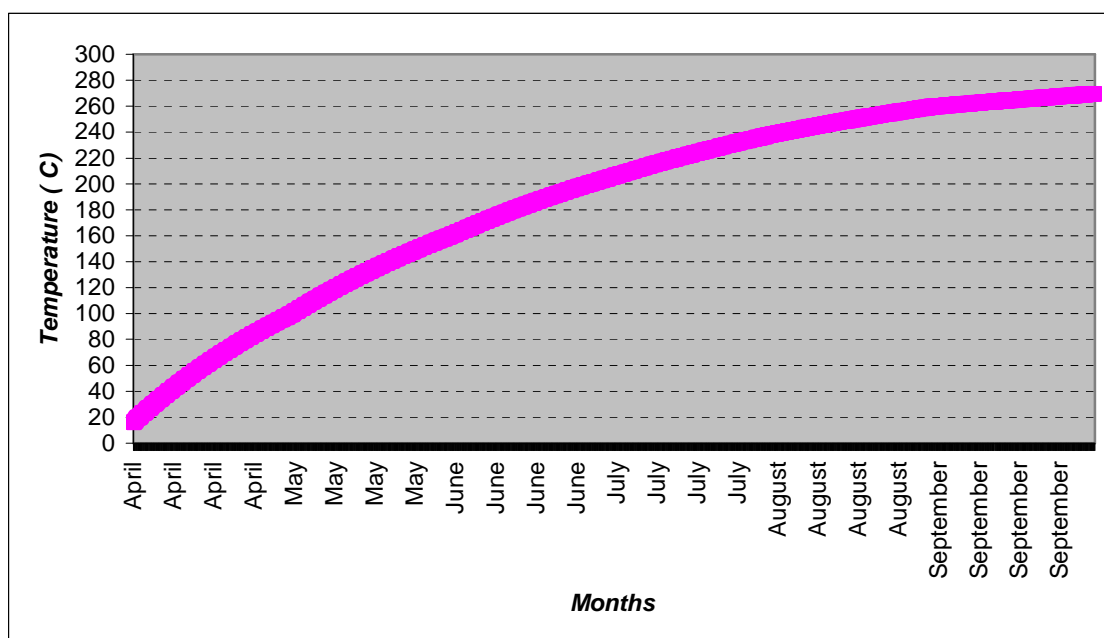
Τα αποτελέσματα τις παραμετρικής μελετης που πραγματοποιήθηκε, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

6.4 Αποτελέσματα της Παραμετρικής Μελέτης

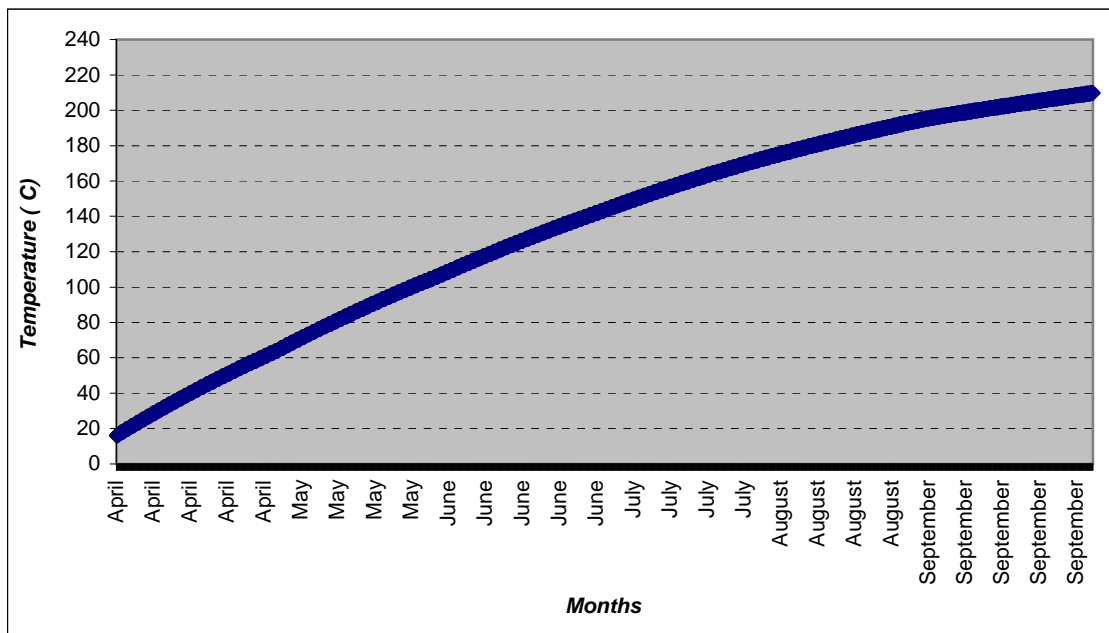
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας που κυκλοφορεί στο σύστημα των συλλεκτών, συναρτήσει του χρόνου των έξι μηνών.

Αρχικά παρατίθενται ξεχωριστά τα διαγράμματα για κάθε μία από τις εννέα περιπτώσεις. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα συγκριτικά διαγράμματα, κρατώντας σταθερή τη μία παράμετρο και μεταβάλλοντας την άλλη.

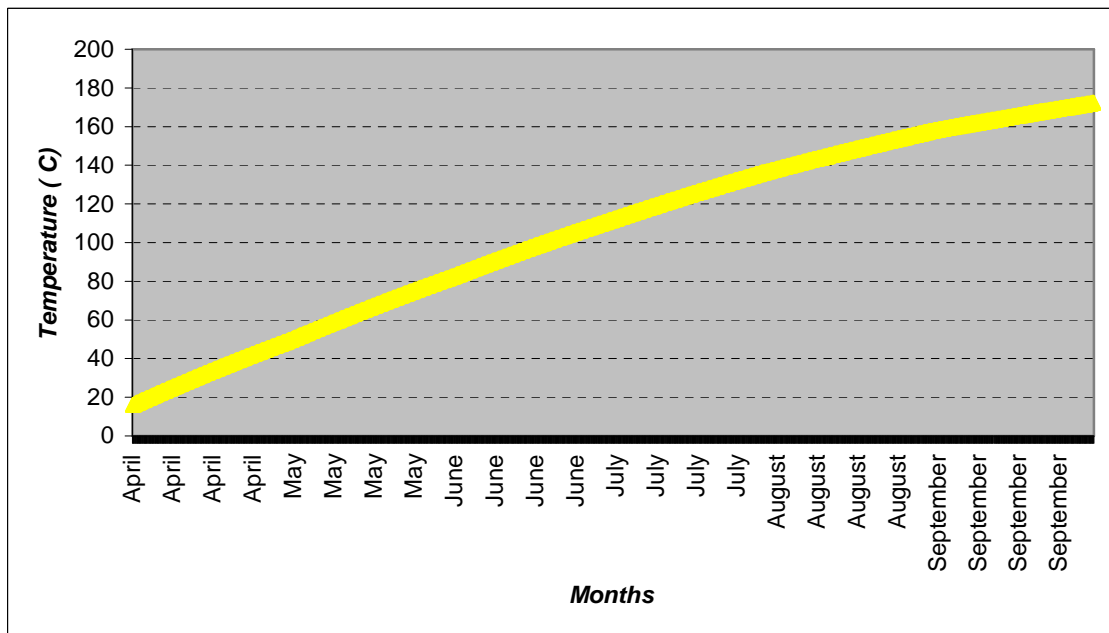
6.4.1 Διαγράμματα για κάθε μία περίπτωση



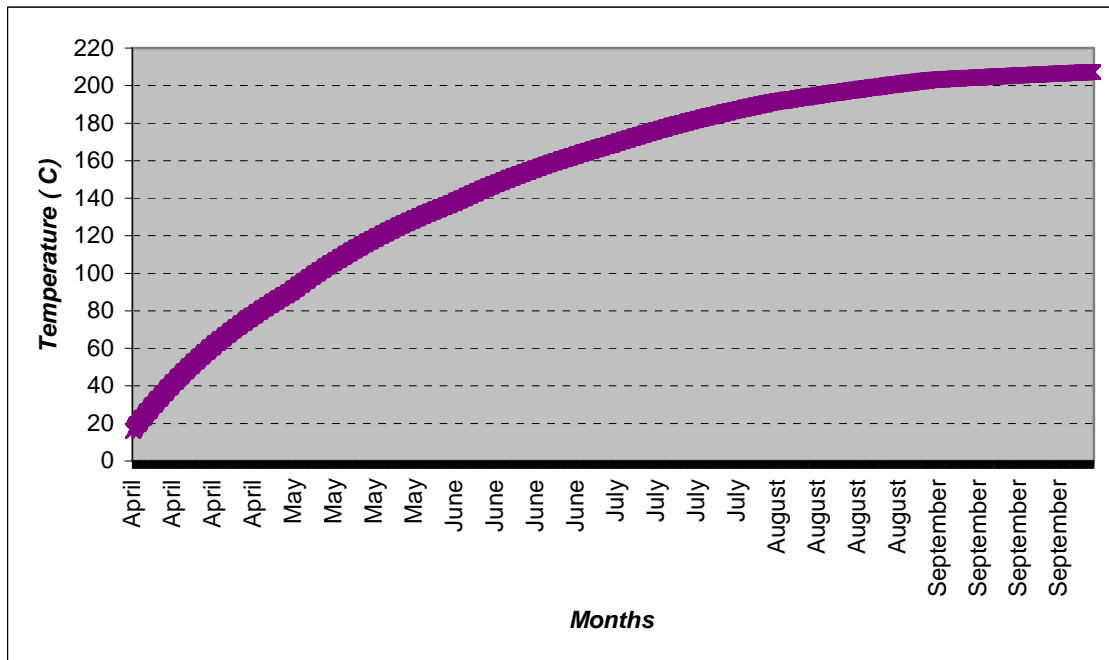
Διαγραμμα 6.1: Δύο συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.48$ m ο καθένας και δεξαμενή όγκου $V = 1$ m³.



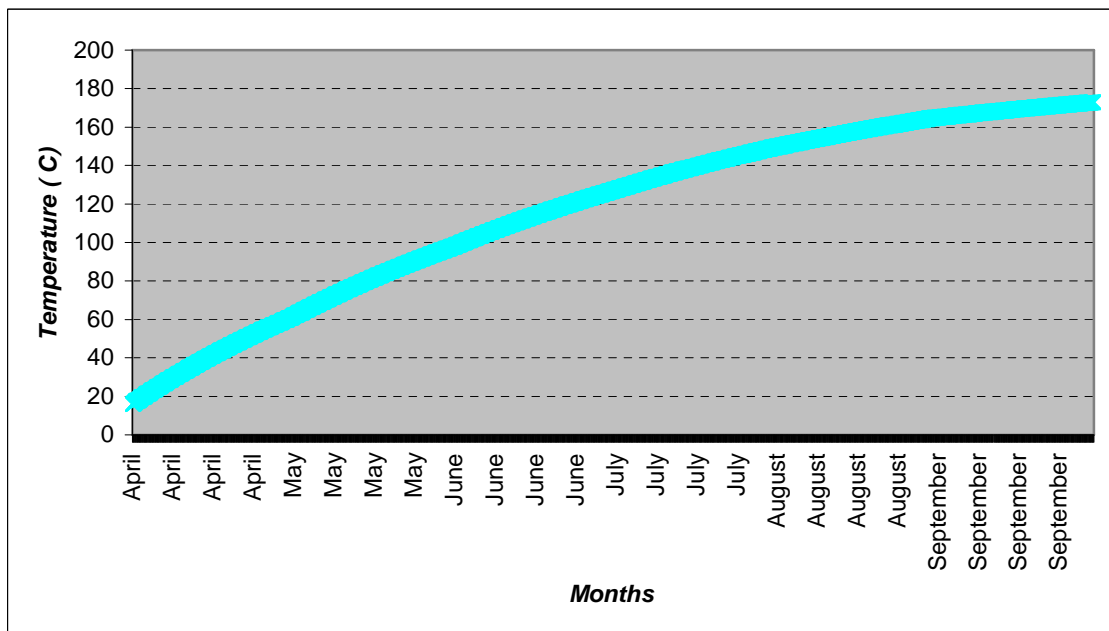
Διάγραμμα 6.2: Δύο συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.48 \text{ m}$ ο καθένας και δεξαμενή όγκου $V = 2 \text{ m}^3$.



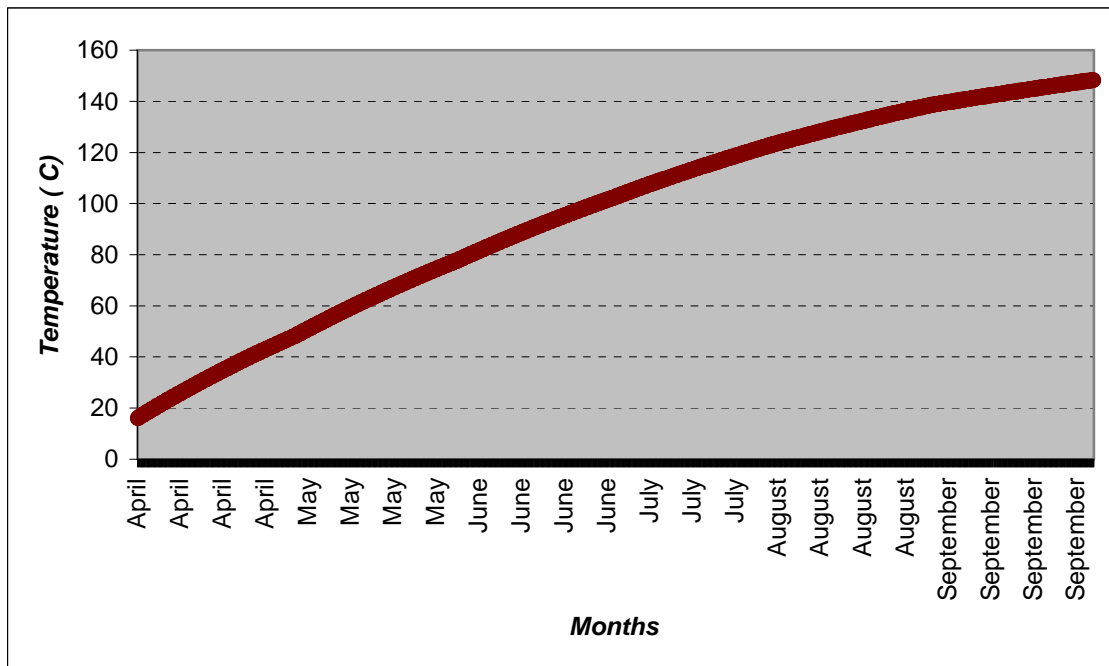
Διαγραμμα 6.3: Δύο συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.48 \text{ m}$ ο καθένας και δεξαμενή όγκου $V = 3 \text{ m}^3$.



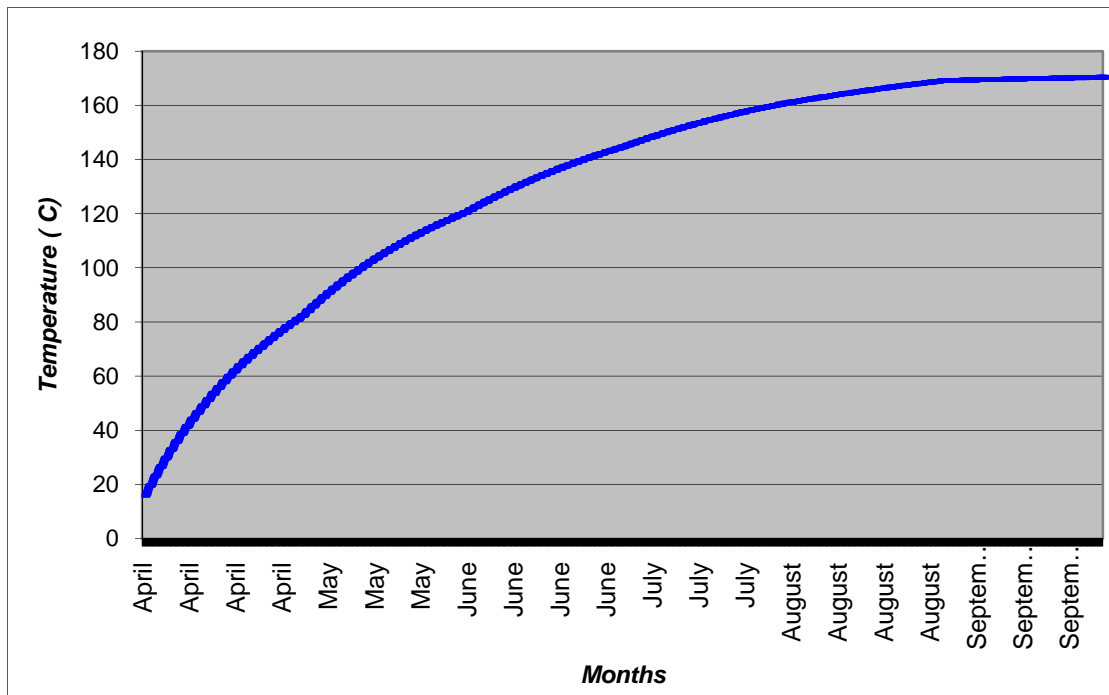
Διαγραμμα 6.4: *Τρεις* συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.32 \text{ m}$ ο καθένας και δεξαμενή όγκου $V = 1 \text{ m}^3$.



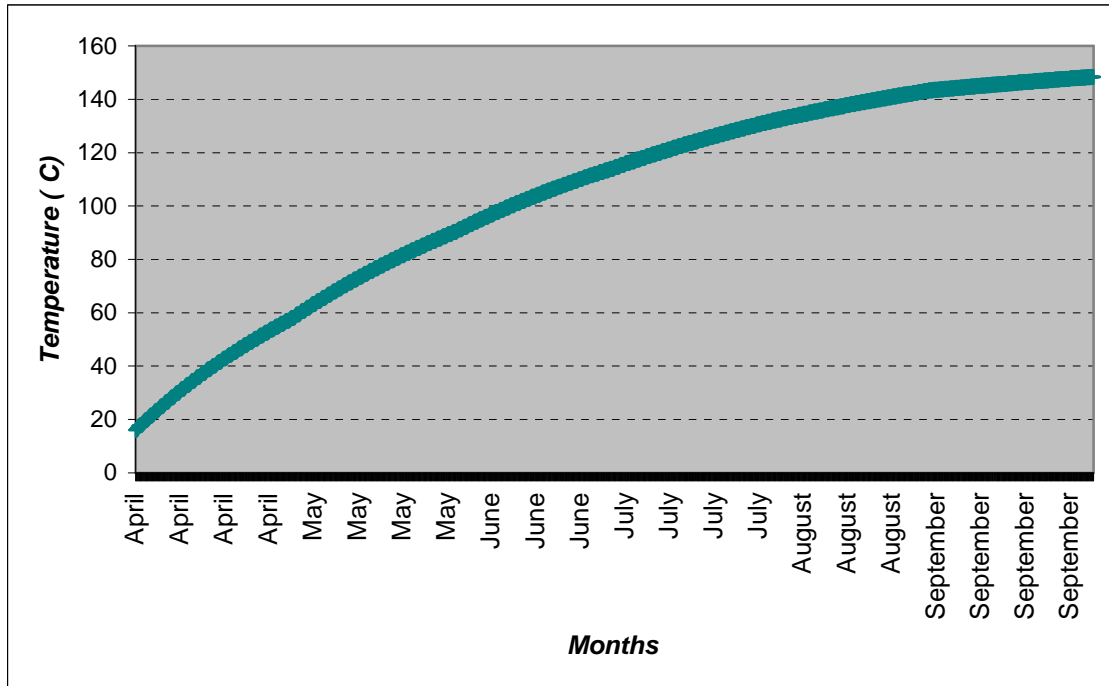
Διαγραμμα 6.5: *Τρεις* συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.32 \text{ m}$ ο καθένας και δεξαμενή όγκου $V = 2 \text{ m}^3$.



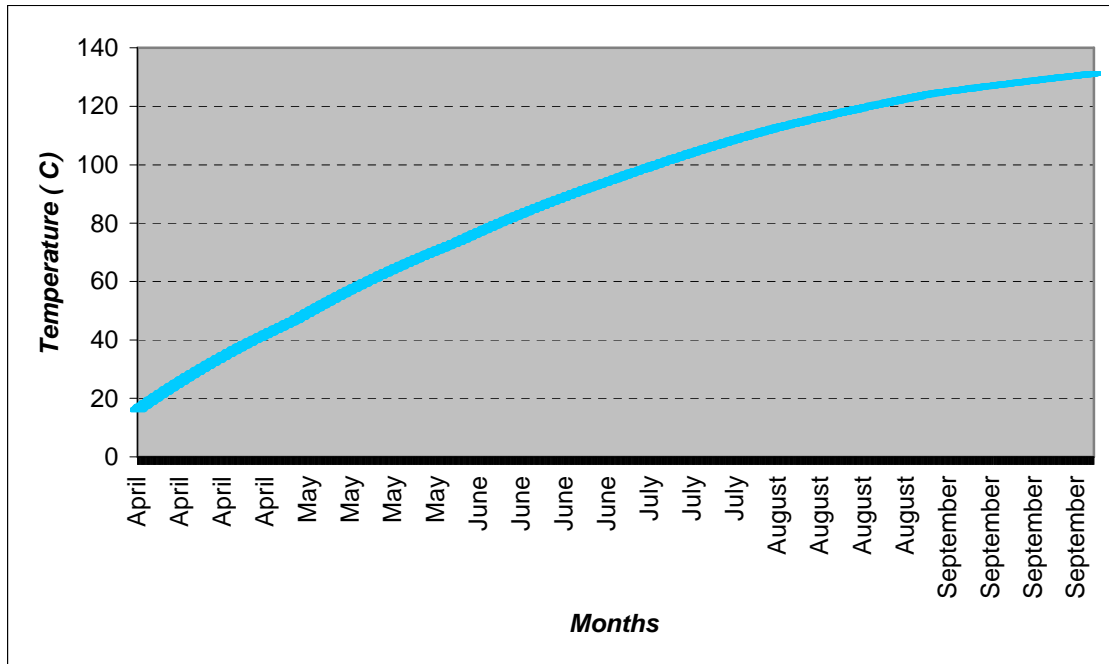
Διαγραμμα 6.6: Τρεις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.32 \text{ m}$ ο καθένας και δεξαμενή όγκου $V = 3 \text{ m}^3$.



Διαγραμμα 6.7: Τέσσερις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.24 \text{ m}$ ο καθένας και δεξαμενή όγκου $V = 1 \text{ m}^3$.

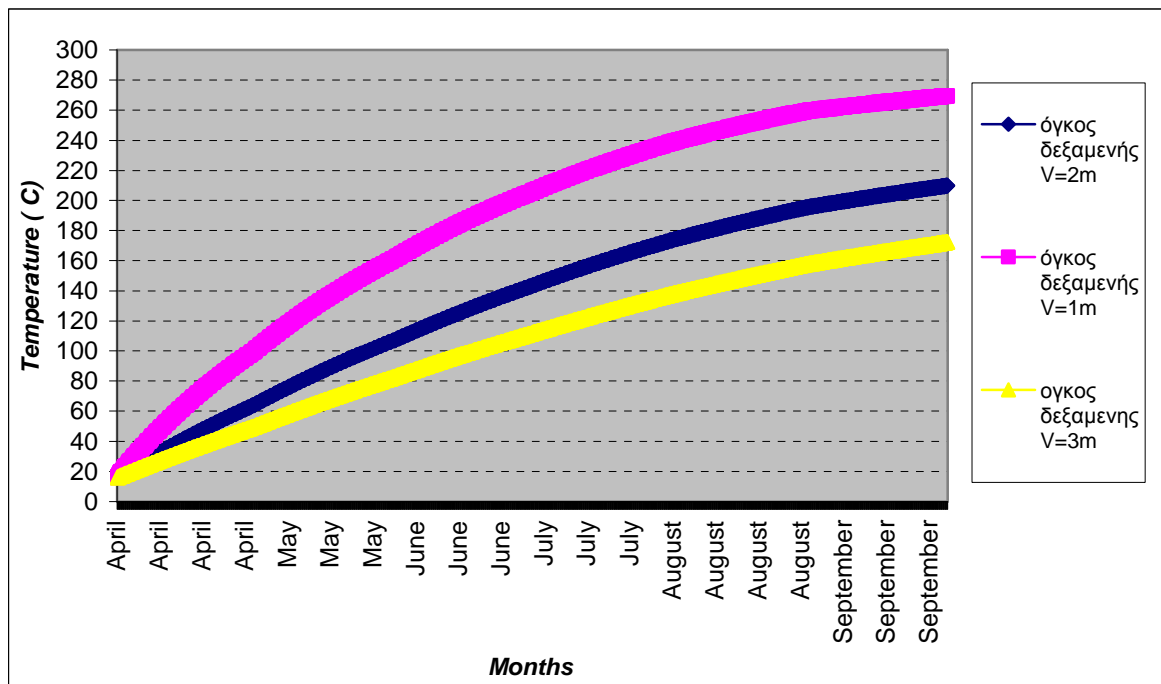


Διαγραμμα 6.8: Τέσσερις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.24$ m ο καθένας και δεξαμενή όγκου $V = 2$ m³.

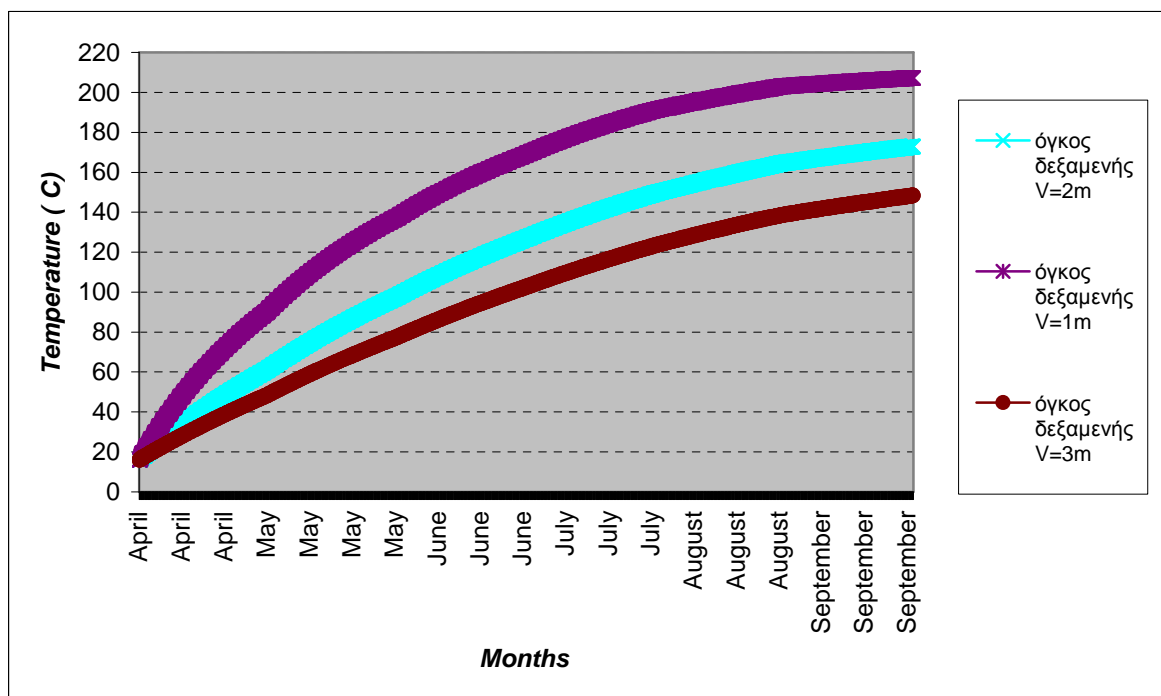


Διαγραμμα 6.9: Τέσσερις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.24$ m ο καθένας και δεξαμενή όγκου $V = 3$ m³.

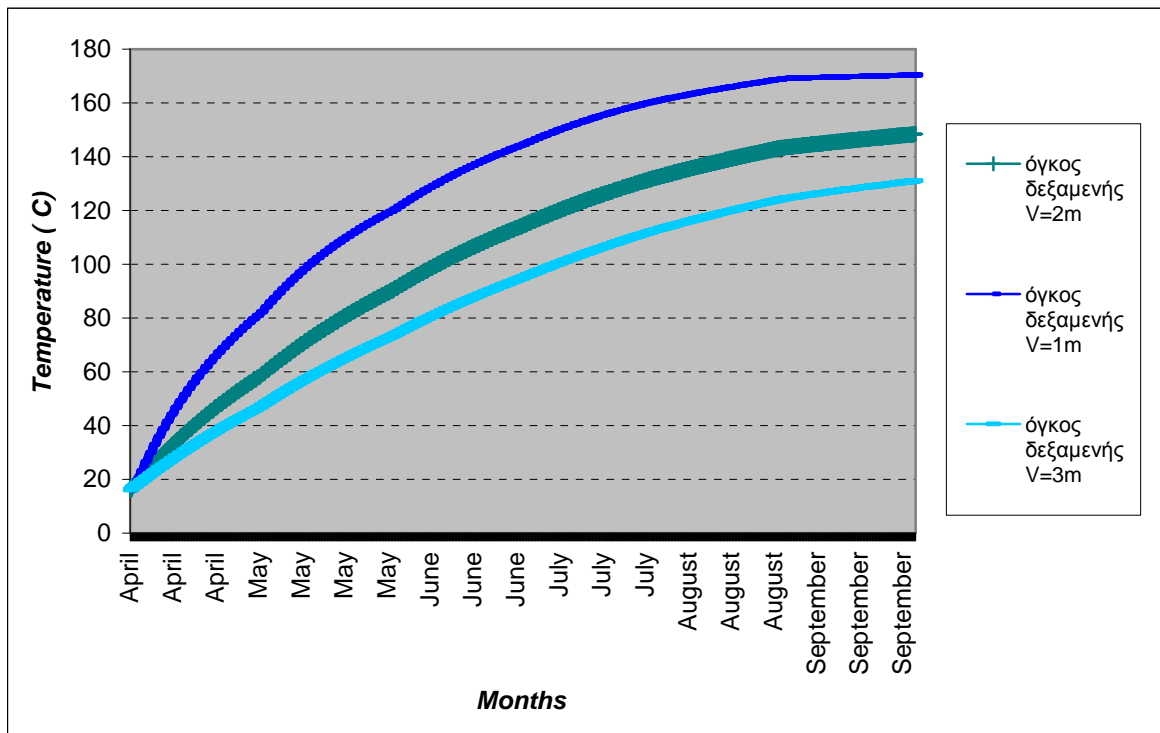
6.4.2 Συγκριτικά Διαγράμματα



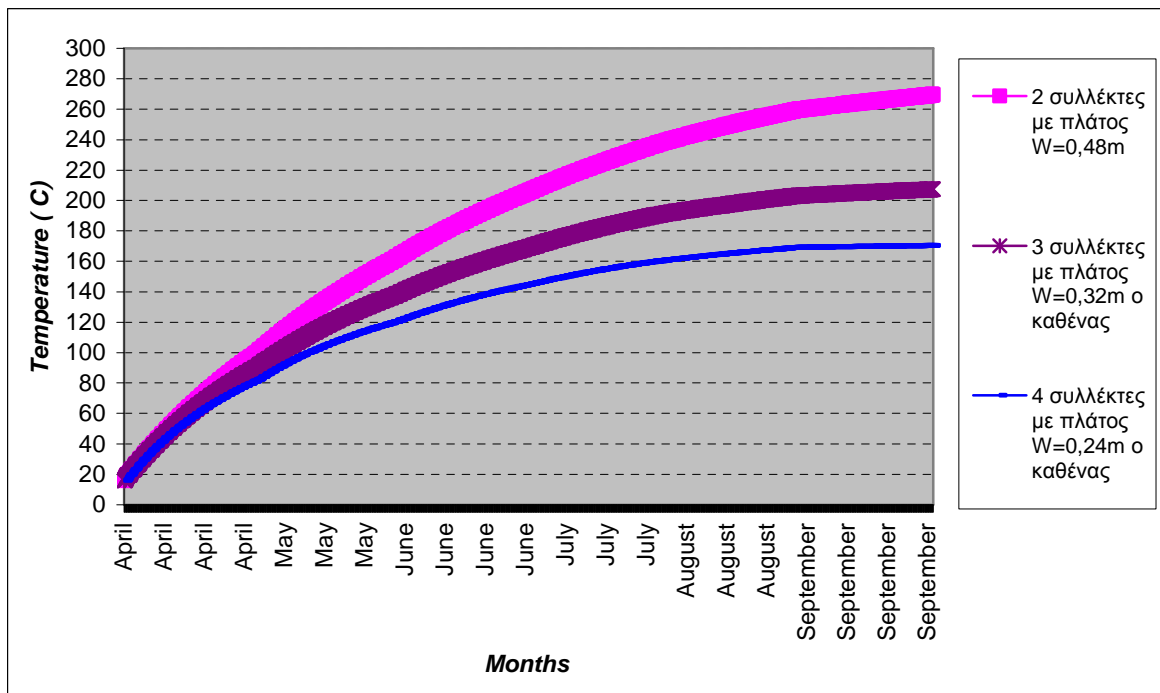
Διαγραμμα 6.10: Δύο συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.48$ m ο καθένας για τρεις περιπτώσεις διαφορετικού όγκου δεξαμενής.



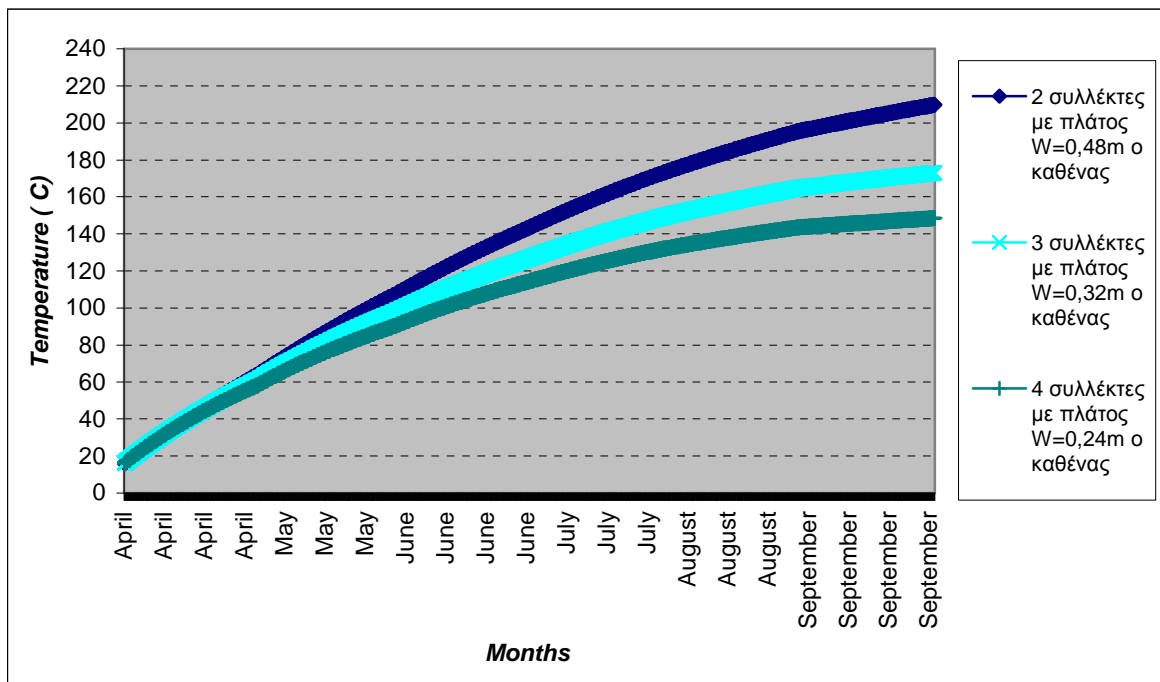
Διαγραμμα 6.11: Τρεις συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.32$ m ο καθένας για τρεις περιπτώσεις διαφορετικού όγκου δεξαμενής.



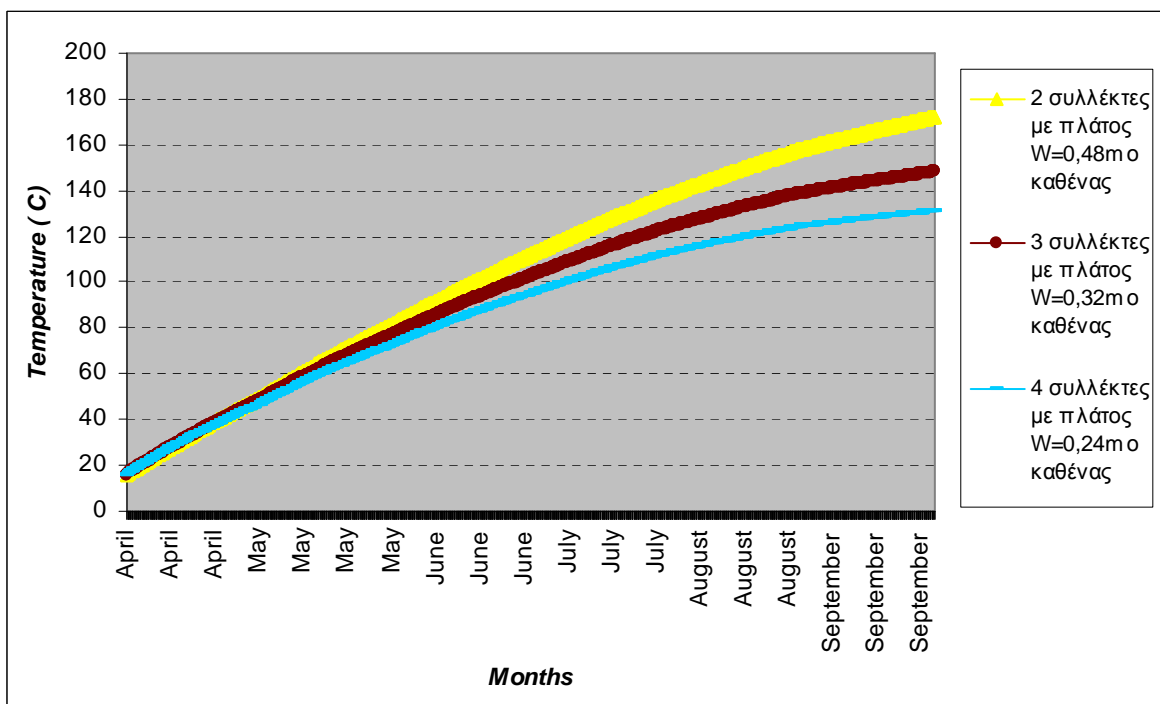
Διαγραμμα 6.12: *Τέσσερις* συλλέκτες παράλληλα συνδεδεμένοι με πλάτος $W = 0.24 \text{ m}$ ο καθένας για τρεις περιπτώσεις διαφορετικού όγκου δεξαμενής.



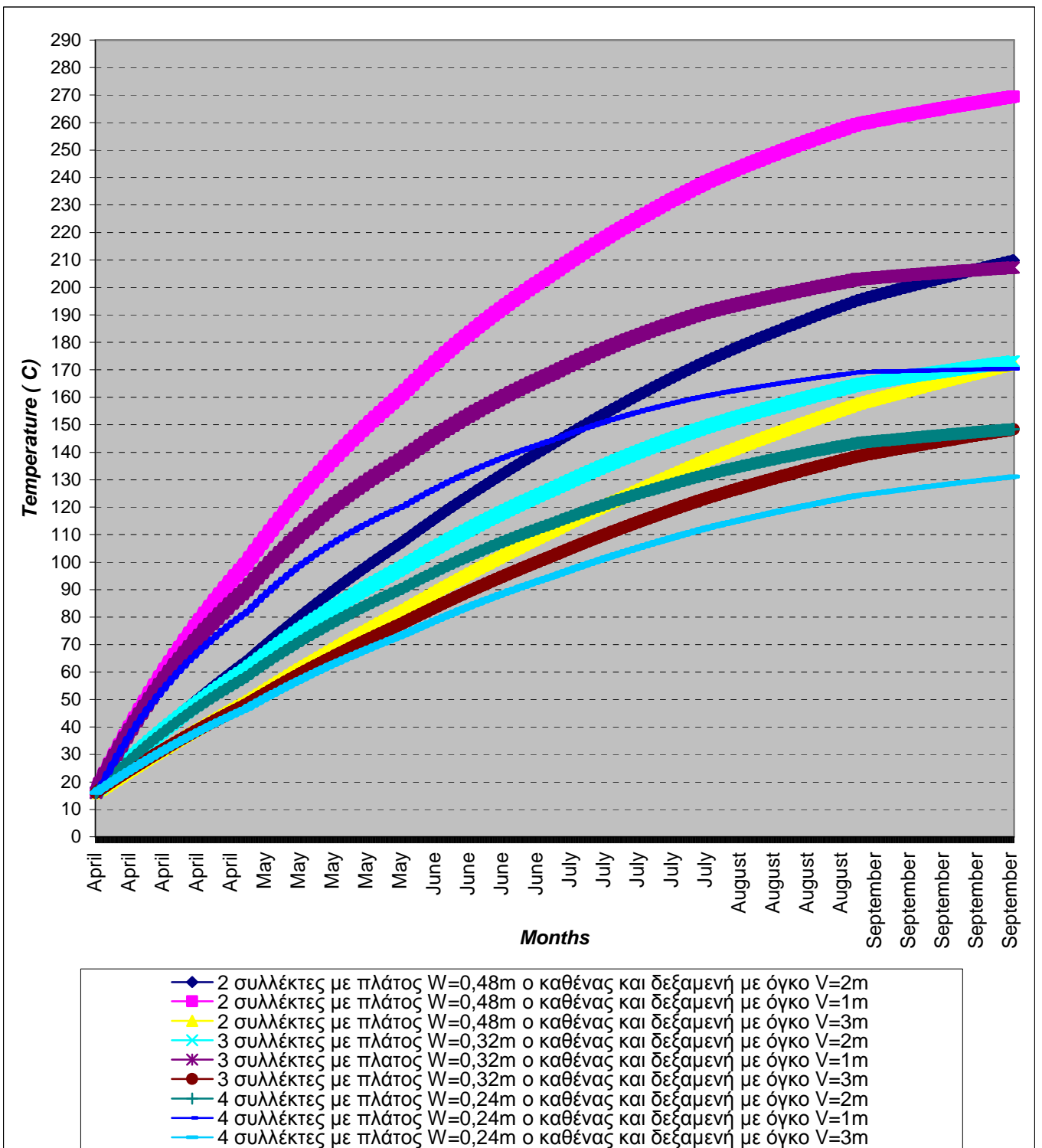
Διάγραμμα 6.13: Δεξαμενή σταθερού όγκου $V = 1 \text{ m}^3$ για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις παράλληλα συνδεδεμένων συλλεκτών.



Διάγραμμα 6.14: Δεξαμενή σταθερού όγκου $V = 2 \text{ m}^3$ για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις παράλληλα συνδεδεμένων συλλεκτών.



Διάγραμμα 6.15: Δεξαμενή σταθερού όγκου $V = 3 \text{ m}^3$ για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις παράλληλα συνδεδεμένων συλλεκτών.



Διάγραμμα 6.16: Σύγκριση των εννέα παραπάνω περιπτώσεων παράλληλα συνδεδεμένων συλλεκτών

6.5 Συμπεράσματα - Σχόλια

Κρατώντας ως σταθερά δεδομένα το συνολικό εμβαδό των παράλληλα συνδεδεμένων συλλεκτών και τον όγκο της δεξαμενής με την οποία συνδέονται οι συλλέκτες μας και στην οποία κυκλοφορεί το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, παρατηρούμε τα συγκριτικά διαγράμματα 6.10 – 6.12. Καθώς τα μόνα στοιχεία που αλλάζουν, είναι ο αριθμός των συλλεκτών και το πλάτος του καθενός, συμπεραίνουμε ότι όσο λιγότεροι είναι οι συλλέκτες, με μεγαλύτερο πλάτος ο καθένας, η αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας είναι μεγαλύτερη. Μελετώντας το σύστημα των συλλεκτών, βλέπουμε πως όταν αυξάνεται το πλάτος του συλλέκτη έχοντας σταθερή τη διάμετρο του απορροφητή, αυξάνεται ο λόγος συγκέντρωσης του συλλέκτη. Με τον λόγο συγκέντρωσης διαιρείται ο συντελεστής απωλειών, συνεπώς το σύστημα μας έχει λιγότερες απώλειες και άρα παίρνουμε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού που κυκλοφορεί σε αυτό. Λαμβάνουμε σταθερό το συνολικό εμβαδό των συλλεκτών, ώστε οι υπόλοιπες παράμετροι να παραμένουν σταθερές στους υπολογισμούς μας.

Παρατηρώντας τα συγκριτικά διαγράμματα 6.13 – 6.14, διαπιστώνουμε πως σε κάθε περίπτωση διατηρώντας σταθερό το συνολικό εμβαδό των παράλληλα συνδεδεμένων συλλεκτών, όσο μικρότερος είναι ο όγκος της δεξαμενής με την οποία συνδέονται οι συλλέκτες μας και στην οποία κυκλοφορεί το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, τόσο μεγαλύτερη είναι η τελική θερμοκρασία του ρευστού. Αυτό είναι λογικό, εφόσον έχοντας μικρότερο όγκο, έχουμε και μικρότερη μάζα του ρευστού που κυκλοφορεί και θερμαίνεται στους συλλέκτες μας. Κατά συνέπεια, η θερμοκρασία του ρευστού διατηρείται και αυξάνεται με πιο γρήγορο ρυθμό.

Σε αυτό το σημείο, οφείλουμε να επισημάνουμε πως καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του θερμικού ελαίου που κυκλοφορεί στο σύστημα των συλλεκτών μας, αυξάνονται και οι απώλειες προς το περιβάλλον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τους τελευταίους μήνες, που η θερμοκρασία του ρευστού είναι υψηλή, να απαιτείται μεγάλη ηλιακή ακτινοβολία για να υπερκαλύψει τις απώλειες αυτές. Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, έχουμε ρύθμιση στο σύστημά μας, ώστε όταν η ωφέλιμη ενέργεια του συστήματος προκύπτει αρνητική, τότε αυτό να μη λειτουργεί. Κατά συνέπεια, όσο περνούν οι μήνες, το σύστημα των συλλεκτών λειτουργεί όλο και λιγότερο. Αρχικά, τον Απρίλιο που η θερμοκρασία του ρευστού θεωρούμε πως είναι

ίση με τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος του μήνα, παρατηρούμε πως οι συλλέκτες μας είναι σε λειτουργία 7 - 10 ώρες. Ενώ τον Σεπτέμβριο, που είναι κι ο τελευταίος μήνας στη μελέτη μας, παρατηρούμε πως χρησιμοποιούνται μόνο 2 – 5 ώρες, λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας που έχει αποκτήσει το ρευστό.

Ένα επιπλέον συμπέρασμα που προκύπτει, παρατηρώντας και τα αποτελέσματα της μελέτης που παρουσιάζονται στο Παράρτημα, είναι πως στις περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία του ρευστού είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες, το σύστημα των συλλεκτών λειτουργεί λιγότερες ώρες από τις υπόλοιπες περιπτώσεις τους αντίστοιχους μήνες.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση των τεσσάρων συλλεκτών με πλάτος $W=0,24\text{m}$ και δεξαμενή με όγκο $V=1\text{ m}^3$, όπου τον Σεπτέμβριο οι συλλέκτες λειτουργούν μόνο μία ώρα τη μέρα, γιατί όλες τις υπόλοιπες ώρες το ποσό της αποδιδόμενης ενέργειας που προκύπτει, είναι αρνητικό.

Όλα τα αποτελέσματα αναλυτικά παρατίθενται στο Παράρτημα στο τέλος.

7. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα μετά την κρίση του 1973, όπου η τιμή του πετρελαίου τετραπλασιάστηκε, οδήγησε τις κυβερνήσεις των ανεπτυγμένων κυρίως χωρών στην αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών (ηλιακή, αιολική και υδραυλική ενέργεια, βιομάζα, γεωθερμία, ενέργεια κυμάτων) κρίνεται αναγκαία και επιτακτική καθώς αυτές είναι ανεξάντλητες, εκμεταλλεύσιμες σε σημεία που άλλες μορφές ενέργειας είναι δύσκολο και δαπανηρό να χρησιμοποιηθούν, αλλά και γιατί είναι φιλικές προς το περιβάλλον.

Μία βασική πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή και ένας σημαντικός τρόπος εκμετάλλευσης της, και της απ' ευθείας μετατροπής της σε παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, είναι με την χρήση ηλιοθερμικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής, όπως τα κοίλα παραβολικά κάτοπτρα γραμμικής εστίασης, τα παραβολικά κάτοπτρα σημειακής εστίασης και τους ηλιακούς πύργους ισχύος.

Σε κάθε περίπτωση, η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας θα μπορούσε να είναι περισσότερο αποδοτική εάν το κόστος για τη συλλογή, αποθήκευση και διανομή αυτής μειωνόταν. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί με την μείωση του κόστους των υλικών για την εγκατάσταση μεγάλων μονάδων συλλογής ηλιακής ενέργειας (ηλιακών πάρκων), με τη μελέτη για την εύρεση της ιδανικής τοποθεσίας εγκατάστασής τους, καθώς και μέσω της απ' ευθείας διανομής της παραγόμενης ενέργειας στην κατανάλωση, αποφεύγοντας έτσι το κόστος αποθήκευσης.

Επίσης θα πρέπει να τονισθεί ότι για να επιτευχθούν αποτελεσματικότερες συνθήκες εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, θα πρέπει να υπάρξει συνεργασία μεταξύ των χωρών που διαθέτουν τεχνογνωσία για την εκμετάλλευσή της (χώρες της Βόρειας Ευρώπης, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, Καναδάς κ.τ.λ) και εκείνων των χωρών που έχουν επαρκή ηλιοφάνεια αλλά δεν διαθέτουν την απαραίτητη τεχνογνωσία (χώρες Βόρειας Αφρικής, Μέσης Ανατολής κ.τ.λ).

Στη χώρα μας η ηλιοφάνεια διαρκεί περισσότερες από 2700 ώρες το χρόνο και προσφέρεται για την περαιτέρω ανάπτυξη συστημάτων εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, ιδιαίτερα σε περιοχές όπως η Ρόδος και η νότια Κρήτη όπου η

ηλιοφάνεια ξεπερνά τις 3100 ώρες ετησίως. Συνεπώς, η χώρα μας θα μπορούσε να είναι από τις πρώτες στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, γεγονός που θα συνέβαλε εν μέρει και στην ενεργειακή της αυτονομία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κ.Αντωνόπουλος: “Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα”, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2007
2. Σ.Καπλάνης: “Ήπιες Μορφές Ενέργειας”, εκδόσεις , Πάτρα 1995
3. Αν.Μπακιρτζή: “Οικονομική Λειτουργία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 1998
4. Α.Μοσχάτος: “Ηλιακή Ενέργεια – Συνιστώσες της Ηλιακής Θερμικής Κατεργασίας”, εκδόσεις ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2001
5. Pietro Menna και Domenico Rossetti di Valdalbero: “ Concentrating Solar Power – From research to implementation”
εκδόσεις “Publications Office of the European Communities”
6. Duffie, Beckman: “Solar Energy Engineering of Thermal Processes, Second Edition”
7. S.P.Sukhatme: “Solar Energy – Principles of Thermal Collection and Storage”, εκδόσεις Tata-McGraw – Hill, 1996
8. Nobuyuki Hara (IEA): “Renewable Energy: RD&D Priorities”
9. B.S.Magal: “Solar Power Engineering”, εκδόσεις Tata-McGraw – Hill, 1994
10. Global Environment Facility (GEF): “Assessment of the World Bank / GEF Strategy for the Market
Development of Concentrating Solar Thermal Power”
11. Andreas Häberle , Christian Zahler , Hansjörg Lerchenmüller , Max Mertins ,
Christof Wittwer , Franz Trieb , Jürgen Dersch :
“The Solarmundo line focussing Fresnel collector.

Optical and thermal performance and cost calculations.”

12. Rich Diver (Sandia National Laboratory), Greg Kolb (Sandia National Laboratory), Hank Price (National Renewable Energy Laboratory):
“SOLAR DISH ENGINE”
13. Rich Diver (Sandia National Laboratory), Greg Kolb (Sandia National Laboratory), Hank Price (National Renewable Energy Laboratory):
“SOLAR POWER TOWER”
14. Rich Diver (Sandia National Laboratory), Greg Kolb (Sandia National Laboratory), Hank Price (National Renewable Energy Laboratory):
“SOLAR PARABOLIC TROUGH”
15. ΚΑΠΕ : “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ ”
16. Anna Heimsath, Werner Platzer, Thorsten Bothe, Wansong Li :
“Characterization of optical components for linear Fresnel collectors by fringe reflection method”
17. Gabriel Morin, Werner Platzer, Martin Strelow, Reinhard Leithner :
“Techno-Economic System Simulation and Optimization of Solar Thermal Power Plants”
18. Rainer Aringhoff, Georg Brakmann (ESTIA), Dr. Michael Geyer (IEA SolarPaces), Sven Teske (Greenpeace):
“Concentrated Solar Thermal Power-Now”
19. D.Yogi Goswami και Frank Kreith: “Energy Conversion”
20. ECOSTAR: “European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping”