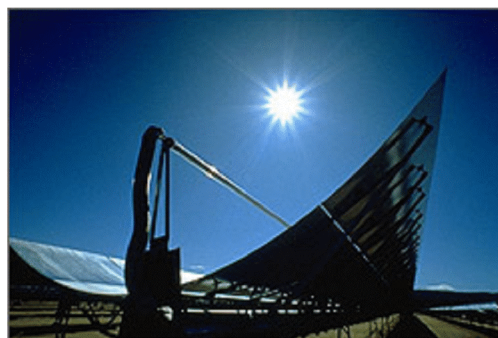




Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θερμότητας

Διπλωματική εργασία

Ηλιακή θερμική παραγωγή έργου με χρήση του κύκλου Rankine



Ιωάννης Καραθανάσης

Επιβλέπων: Χρ. Τζιβανίδης

-Αθήνα 2008-

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι σύγχρονες εξελίξεις καταδεικνύουν τη στροφή του ενδιαφέροντος της παγκόσμιας επιστημονικής και τεχνολογικής κοινότητας προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η στροφή αυτή επιβλήθηκε τόσο από περιβαλλοντικούς, όσο και από οικονομικούς παράγοντες, καθώς η υπέρμετρη χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει εγείρει ανησυχίες όσον αφορά τα διαθέσιμα αποθέματά τους και την αρνητική επίδραση που έχουν στο κλίμα του πλανήτη.

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα της την παραγωγή ισχύος σε μεγάλη κλίμακα με τη χρήση συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε χώρες με υψηλή ηλιοφάνεια.

Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρεται στις προβλέψεις για τα πιθανά αποθέματα ορυκτών πόρων στο άμεσο μέλλον, στα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων και στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παγκόσμια αγορά.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται τα βασικά φυσικά και γεωμετρικά μεγέθη που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον γίνεται αναφορά στην εξέλιξη των ηλιακών εφαρμογών και στις σημαντικότερες από αυτές που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των επιπέδων και των συγκεντρωτικών συλλεκτών και διατυπώνονται οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται οι γενικές αρχές της σύζευξης ενός πεδίου συγκεντρωτικών συλλεκτών με την εγκατάσταση παραγωγής ισχύος. Καθορίζονται με λεπτομέρεια οι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση της εγκατάστασης και περιγράφονται οι παράμετροι λειτουργίας των συνιστωσών που απαρτίζουν τη μονάδα παραγωγής ισχύος, καθώς και οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται οι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί που λειτουργούν ή βρίσκονται σε εκτεταμένο στάδιο σχεδιασμού ανά τον κόσμο. Επιπροσθέτως αναφέρονται στοιχεία που αφορούν τις συνιστώσες του κόστους και έχουν προκύψει από τη λειτουργία των σταθμών αυτών.

Εντέλει στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η προσομοίωση της λειτουργίας του ηλιακού θερμικού σταθμού SEGS VI που λειτουργεί από το 1988 στον κόμβο Κράμερ της Καλιφόρνια. Η προσομοίωση γίνεται με το λογισμικό TRNSYS, χρησιμοποιώντας επιπλέον τη βιβλιοθήκη STEC, η οποία περιέχει τα στοιχεία των συγκεντρωτικών συλλεκτών και των συνιστωσών που πραγματοποιούν τον κύκλο Rankine.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. <u>ΕΝΕΡΓΕΙΑ-ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ</u>	1
1.1. Ο όρος ενέργεια.....	1
1.2. Ενεργειακή κατανάλωση.....	2
1.3. Αποθέματα ορυκτών καυσίμων.....	5
1.4. Η ενέργεια στο μέλλον.....	7
1.5. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου.....	9
1.6. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	12
<u>1.6.1</u> Μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	13
1.7. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο παρόν και στο μέλλον.....	17
<u>1.7.1</u> Μελλοντική εξέλιξη.....	18
<u>1.7.2</u> Ανάπτυξη ανά τομέα.....	19
2. <u>Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ</u>	21
2.1. Εισαγωγή.....	21
2.2. Σύντομη ιστορική αναδρομή της ηλιακής ενέργειας.....	22
2.3. Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας.....	25
2.4. Βασικές έννοιες.....	26
2.5. Κατεύθυνση της άμεσου ακτινοβολίας.....	28
2.6. Γωνία πρόσπτωσης σε κινούμενα επίπεδα.....	29
2.7. Άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας και κεκλιμένης επιφάνειας.....	30
2.8. Σκίαση.....	30
2.9. Τρόποι χρήσης της ηλιακής ενέργειας.....	31
<u>2.9.1</u> Θέρμανση νερού.....	32
<u>2.9.2</u> Θέρμανση, κλιματισμός και εξαερισμός.....	33
<u>2.9.3</u> Θερμικές διεργασίες.....	36
<u>2.9.4</u> Απόσταξη και απολύμανση.....	37
<u>2.9.5</u> Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	38
<u>2.9.6</u> Φωτοχημικές αντιδράσεις.....	38
3. <u>ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ</u>	40
3.1. Επίπεδοι συλλέκτες.....	40
<u>3.1.1</u> Η απορροφητική πλάκα και οι σωληνώσεις του εργαζόμενου μέσου.....	41
<u>3.1.2</u> Το κάλυμμα.....	42
<u>3.1.3</u> Η μόνωση.....	43
3.2. Διάφοροι τύποι επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.....	43
<u>3.2.1</u> «Συμπαγείς» συλλέκτες υγρού.....	43
<u>3.2.2</u> Συλλέκτες υγρού με διάφανη επιφάνεια.....	44
<u>3.2.3</u> Ηλιακοί συλλέκτες αποθήκευσης.....	44
<u>3.2.4</u> Ηλιακοί συλλέκτες αέρα.....	45
3.3. Συντελεστής θερμικών απωλειών επίπεδου συλλέκτη.....	46
<u>3.3.1</u> Συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής.....	46
<u>3.3.2</u> Συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένα.....	48
<u>3.3.3</u> Συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών.....	48
3.4. Παράγων απόδοσης F'	48

3.5. Παράγων θερμικής απολαβής F_R	51
3.6. Απόδοση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.....	51
<u>3.6.1</u> Το γινόμενο διαπερατότητας του καλύμματος-απορροφητικό- της της πλάκας.....	53
<u>3.6.2</u> Γραμμική ανάλυση της απόδοσης ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.....	54
3.7. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες.....	54
3.8. Διάφοροι τύποι συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.....	58
<u>3.8.1</u> Συμπαγείς παραβολικοί συλλέκτες.....	58
<u>3.8.2</u> Συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων.....	60
<u>3.8.3</u> Γραμμικός ανακλαστής Fresnel.....	61
<u>3.8.4</u> Παραβολικά «πίατα».....	63
<u>3.8.5</u> Συλλέκτης με πεδίο ηλιοστατών.....	64
3.9. Απόδοση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη.....	66
<u>3.9.1</u> Οπτική ανάλυση.....	66
<u>3.9.2</u> Θερμική ανάλυση.....	70
4. ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΡΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΡΓΟΥ.....	73
4.1. Θερμοδυναμικοί κύκλοι.....	73
<u>4.1.1</u> Οργανικός κύκλος Rankine.....	75
<u>4.1.2</u> Εργαζόμενα μέσα για τον κύκλο Rankine.....	76
4.2. Αρχή παραγωγής ηλιακού θερμικού έργου.....	78
4.3. Παραγωγή έργου με τη χρήση πεδίου συλλεκτών παραβολικών κατόπτρων.....	81
<u>4.3.1</u> Τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης.....	82
<u>4.3.2</u> Σκίαση σειρών και απώλειες άκρων.....	82
<u>4.3.3</u> Απώλειες πεδίου.....	83
<u>4.3.4</u> Οπτικές απώλειες δέκτη.....	83
<u>4.3.5</u> Θερμικές απώλειες δέκτη.....	84
<u>4.3.6</u> Γραμμικό μοντέλο απωλειών θερμότητας.....	85
4.4. Παραγωγή έργου με τη χρήση πεδίου ηλιοστατών και κεντρικού δέκτη.....	86
<u>4.4.1</u> Η επίδραση του «συνημίτονου»	86
<u>4.4.2</u> Ατμοσφαιρική μετάδοση.....	87
<u>4.4.3</u> Θερμική απόδοση του συστήματος.....	88
<u>4.4.4</u> Ενεργειακές απώλειες.....	88
<u>4.4.5</u> Απώλειες πεδίου.....	89
<u>4.4.6</u> Απώλειες κεντρικού δέκτη.....	90
4.5. Συνιστώσες της διάταξης παραγωγής έργου.....	92
<u>4.5.1</u> Υπερθερμαντής-Αναθερμαντής.....	92
<u>4.5.2</u> Ατμοποιητής (boiler)	94
<u>4.5.3</u> Προθερμαντής.....	95
<u>4.5.4</u> Στρόβιλος.....	96
<u>4.5.5</u> Συμπυκνωτής.....	97
<u>4.5.6</u> Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού (με ατμό)	97
<u>4.5.7</u> Απαεριωτής.....	99
<u>4.5.8</u> Αντλία.....	100
4.6. Ενοποιημένο σύστημα ηλιακού συνδυασμένου κύκλου.....	100

5. ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑ.....	103
5.1. Εισαγωγή.....	103
5.2. Συστήματα παραβολικών κατόπτρων.....	104
5.2.1 Έργα υπό εξέλιξη.....	105
5.2.2 Περιβαλλοντική ανάλυση.....	108
5.3. Συστήματα κεντρικού δέκτη.....	110
5.3.1 Έργα υπό εξέλιξη.....	112
5.3.2 Περιβαλλοντική ανάλυση.....	113
5.4. Συστήματα παραβολικών πιάτων.....	114
5.4.1 Έργα υπό εξέλιξη.....	115
5.4.2 Περιβαλλοντική ανάλυση.....	116
6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ	
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ TRNSYS.....	117
6.1. Το πακέτο TRNSYS.....	117
6.2. Το στούντιο προσομοίωσης.....	117
6.3. Η βιβλιοθήκη STEC.....	118
6.3.1 Στοιχεία της βιβλιοθήκης STEC που χρησιμοποιούνται στην	
προσομοίωση.....	118
6.4. Προσομοίωση ηλιακού θερμικού σταθμού παραβολικών	
κατόπτρων.....	130
6.5. Περιγραφή κυκλώματος νερού/ατμού σε λειτουργία αναφοράς.....	131
6.6. Περιγραφή κυκλώματος μέσου μεταφοράς θερμότητας σε λειτουργία	
αναφοράς.....	135
6.7. Κατάρτιση του μοντέλου TRNSYS.....	136
6.8. Αποτελέσματα προσομοίωσης ηλιακού θερμικού σταθμού	
SEGS VI.....	159
6.9. Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα.....	194
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	201

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΝΕΡΓΕΙΑ-ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.

1.1 Ο όρος «ενέργεια».

Σύμφωνα με το Μαξ Πλανκ, ως ενέργεια ορίζεται η ικανότητα ενός συστήματος να προκαλέσει εξωτερική δράση. Υπό αυτή την άποψη διακρίνονται οι εξής μορφές ενέργειας: μηχανική ενέργεια, θερμική, ηλεκτρική και χημική ενέργεια, πυρηνική ενέργεια και ηλιακή ενέργεια. Στις πρακτικές εφαρμογές η ικανότητα παραγωγής έργου γίνεται ορατή μέσω της δύναμης, της θερμότητας και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ικανότητα παραγωγής έργου από τη χημική ενέργεια, καθώς και από την πυρηνική και την ηλιακή ενέργεια υφίσταται μόνο εάν αυτές οι μορφές ενέργειας μετασχηματιστούν σε μηχανική και/ή θερμική ενέργεια.

Ο όρος «φορέας ενέργειας» εκφράζει ένα μέσο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να παράξει ωφέλιμη ενέργεια είτε απ' ευθείας ή μέσα από μια σειρά από διεργασίες μετατροπής. Ανάλογα με το βαθμό της μετατροπής, οι ενεργειακοί φορείς χαρακτηρίζονται ως πρωτεύοντες ή δευτερεύοντες και ως τελικοί φορείς ενέργειας. Το αντίστοιχο ενεργειακό περιεχόμενο αυτών των φορέων αποτελείται από πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τελική ενέργεια.

Οι πρωτεύοντες φορείς ενέργειας είναι ουσίες που δεν έχουν υποστεί καμία τεχνική μετατροπή και συνεπώς ο όρος «πρωτεύοντες» αναφέρεται στο ενεργειακό περιεχόμενο των φορέων. Από την πρωτεύουσα ενέργεια (όπως η ισχύς του ανέμου ή η ηλιακή ακτινοβολία) και τους πρωτεύοντες ενεργειακούς φορείς (όπως ο γαιάνθρακας, ο λιγνίτης, το αργό πετρέλαιο και η βιομάζα) μπορεί να παραχθεί η δευτερεύουσα ενέργεια (ή οι δευτερεύοντες φορείς ενέργειας) είτε απευθείας ή με ένα ή περισσότερα στάδια μετατροπής. Η διεργασία που υφίσταται η πρωτεύουσα ενέργεια υπόκειται σε απώλειες μετατροπής και διανομής. Οι δευτερεύοντες ενεργειακοί φορείς (όπως η βενζίνη, το πετρέλαιο θέρμανσης και η ηλεκτρική ενέργεια) μπορούν να μετατραπούν σε άλλους δευτερεύοντες ή τελικούς φορείς από τους καταναλωτές.

Οι τελικοί ενεργειακοί φορείς και η τελική ενέργεια αντίστοιχα αποτελούν ενεργειακές ροές που καταναλώνονται απευθείας από τον τελικό χρήστη (όπως το πετρέλαιο θέρμανσης εντός της δεξαμενής ή η καύσιμη ξυλεία μπροστά από το φούρνο καύσης). Οι φορείς αυτοί προκύπτουν από τους δευτερεύοντες και πιθανόν από τους πρωτεύοντες φορείς ενέργειας εάν αφαιρέσουμε τις απώλειες μετατροπής και διανομής και την κατανάλωση του ίδιου του συστήματος μετατροπής. Οι τελικοί φορείς είναι διαθέσιμοι για μετατροπή σε ωφέλιμη ενέργεια.

Ο όρος «ωφέλιμη ενέργεια» αναφέρεται στην ενέργεια που είναι διαθέσιμη στον καταναλωτή μετά το τελευταίο βήμα μετατροπής για να ικανοποιήσει τις αντίστοιχες απαιτήσεις ή ενεργειακή ζήτηση (όπως η θέρμανση χώρων, η προετοιμασία τροφής ή οι μεταφορές). Η ωφέλιμη ενέργεια παράγεται από την τελική ενέργεια μειωμένη κατά τις απώλειες

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

της τελευταίας ενεργειακής μετατροπής (όπως η κατανάλωση ρεύματος από μια λάμπα ή οι απώλειες του φούρνου για να παράξει θερμότητα, αναφερόμενοι στα παραπάνω παραδείγματα).

Η συνολική ποσότητα ενέργειας που είναι διαθέσιμη στην ανθρωπότητα αναφέρεται ως ενεργειακή βάση και αποτελείται από ενέργεια από τους επικρατώντες πεπερασμένους πόρους και τους ανανεώσιμους πόρους. Οι ενεργειακοί πόροι κυρίως διακρίνονται σε ορυκτούς και «σύγχρονους».

Οι ορυκτές πηγές είναι αποθέματα ενέργειας τα οποία σχηματίστηκαν κατά τις προϊστορικές γεωλογικές περιόδους μέσω βιολογικών ή γεωλογικών διεργασιών. Υποδιαιρούνται επιπλέον σε οργανικές και ανόργανες πηγές ενέργειας. Η πρώτη κατηγορία συμπεριλαμβάνει τα αποθέματα γαιάνθρακα, φυσικού ουρανίου και αργού πετρελαίου, ενώ η δεύτερη περιέχει για παράδειγμα το ενεργειακό περιεχόμενο των αποθεμάτων ουρανίου και τις πηγές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διεργασίες πυρηνικής σύντηξης.

Οι σύγχρονοι πόροι δημιουργούνται επί του παρόντος για παράδειγμα από βιολογικές διεργασίες. Αυτοί περιλαμβάνουν, ανάμεσα σε άλλα, το ενεργειακό περιεχόμενο της βιομάζας.

Οι ενεργειακές πηγές, σε σύγκριση με τον ανθρώπινο χρόνο ζωής, παρέχουν ροή ενέργειας για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, αυτή η ενεργειακή ροή απελευθερώνεται μέσω φυσικών διεργασιών από πεπερασμένους φυσικούς πόρους.

Οι διαθέσιμοι ενεργειακοί φορείς μπορούν να διαχωριστούν επιπλέον σε οργανικούς, ανόργανους και ανανεώσιμους.

Οι ορυκτοί οργανικοί ενεργειακοί φορείς περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο το λιγνίτη, το γαιάνθρακα, καθώς και τους υγρούς και αέριους υδρογονάνθρακες (όπως το αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο). Μια επιπλέον διάκριση μπορεί να γίνει ανάμεσα στους οργανικούς πρωτεύοντες φορείς ενέργειας (όπως ο λιγνίτης) και στους δευτερεύοντες (όπως η βενζίνη και το πετρέλαιο κίνησης).

Οι ορυκτοί ανόργανοι ενεργειακοί φορείς περιλαμβάνουν όλες τις ουσίες που παρέχουν ενέργεια μέσω πυρηνικής σχάσης ή σύντηξης (όπως το ουράνιο, το θόριο και το υδρογόνο).

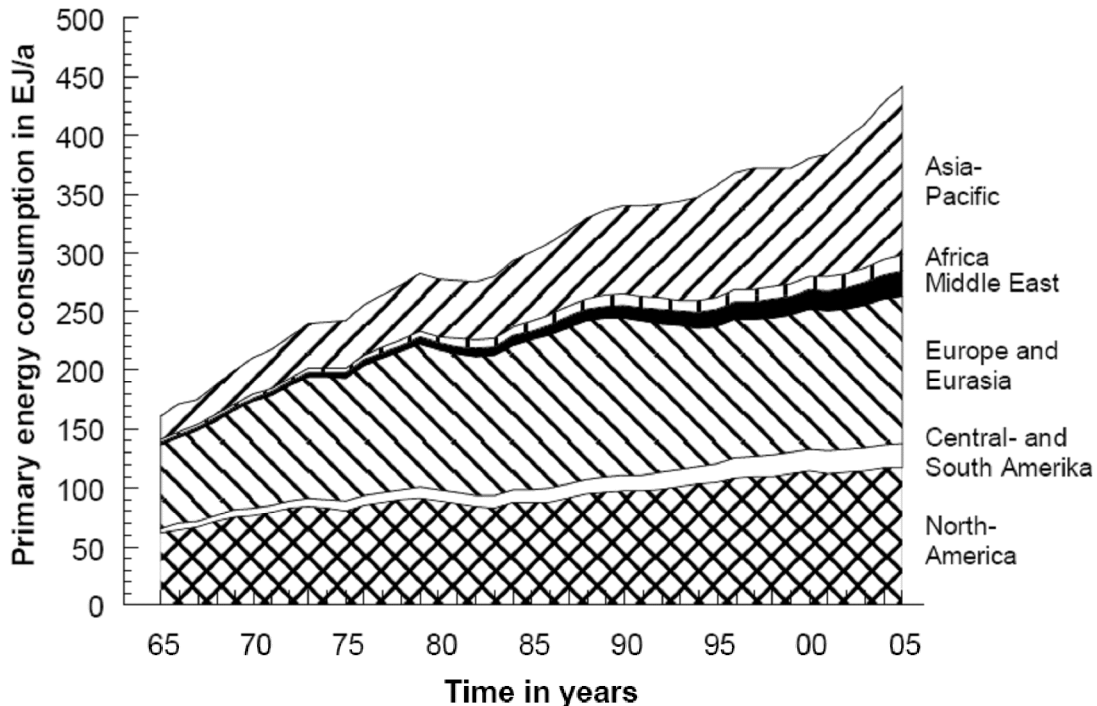
Ο όρος «ανανεώσιμη ενέργεια» αναφέρεται στην πρωτεύουσα ενέργεια η οποία θεωρείται ανεξάντλητη σε σχέση με την ανθρώπινη χρονική κλίμακα. Η ενέργεια που παράγεται εντός του ήλιου είναι υπεύθυνη για ένα μεγάλο πλήθος άλλων ανανεώσιμων ενεργειών (όπως η αιολική και η υδροηλεκτρική) και ενεργειακών φορέων (όπως τα στερεά και υγρά βιοκαύσιμα). Το ενεργειακό περιεχόμενο των αποβλήτων μπορεί να χαρακτηριστεί ως ανανεώσιμο, εφόσον είναι μη ορυκτής προέλευσης (για παράδειγμα τα οργανικά οικιακά απόβλητα ή τα απόβλητα από τη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων).

1.2 Ενεργειακή κατανάλωση.

Το 2005, η παγκόσμια κατανάλωση ορυκτών και υδάτινων φορέων ενέργειας ανερχόταν περίπου στα $441 \cdot 10^{18}$ J. Σχεδόν το 28% της συνολικής

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

κατανάλωσης ενέργειας εκτιμάται ότι γίνεται στην Ευρώπη και την Ευρασία, το 27% στη βόρειο Αμερική, περίπου 5% στην κεντρική και νότιο Αμερική, επίσης 5% στη Μέση Ανατολή, 3% στην Αφρική και προσεγγιστικά 32 % στην Ασία και την περιοχή του Ειρηνικού (κυρίως στην Αυστραλία και τη Νέα Ζηλανδία). Η βόρειο Αμερική, η Ευρώπη, η Ασία και η περιοχή του Ειρηνικού καταναλώνουν επί του παρόντος το 90% της ενέργειας που προέρχεται από ορυκτούς και υδάτινους πόρους.



Σχήμα 1.1 Εξέλιξη της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας ορυκτών και υδάτινων φορέων (EJ=10¹⁸J).

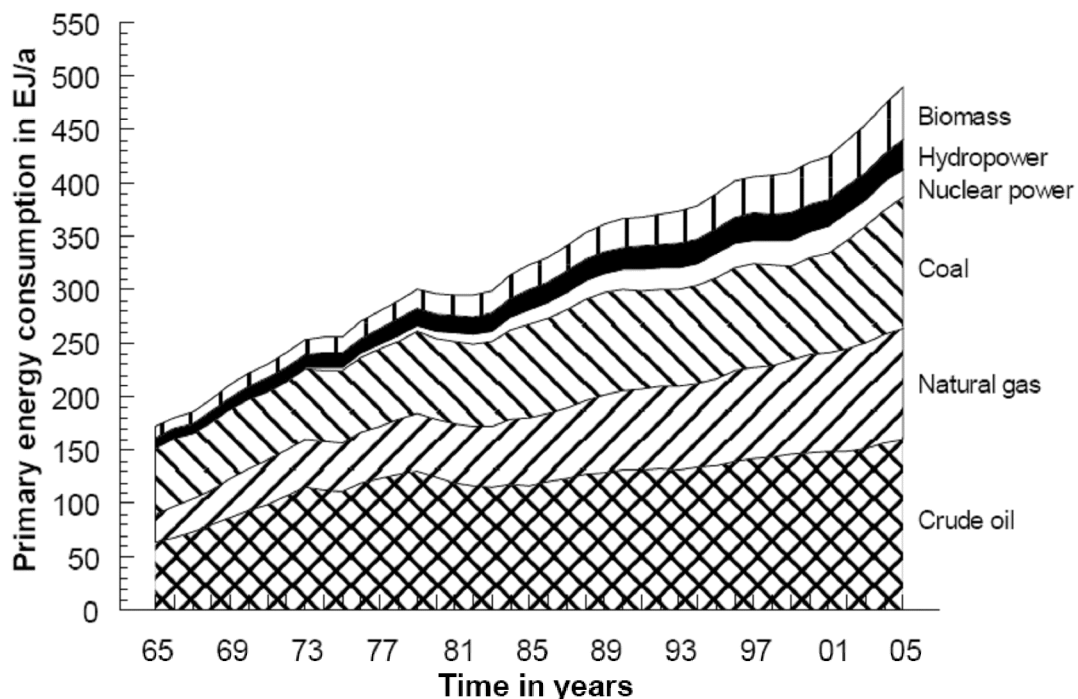
Σύμφωνα με το άνωθεν σχήμα, η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση έχει αυξηθεί κατά ένα παράγοντα 2,5 κατά τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Σε όλες τις περιοχές που απεικονίζονται στο γράφημα παρατηρείται μια αξιοσημείωτη αύξηση. Είναι επίσης αντιληπτό ότι η αύξηση δεν είναι γραμμική και φαίνεται έντονα η επίδραση των δύο κρίσεων στην τιμή του πετρελαίου το 1973 και το 1979-80. Επίσης κατά την έναρξη της δεκαετίας του 1990, η αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας επιβραδύνθηκε σημαντικά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ύφεση της παγκόσμιας οικονομίας και στην αλλαγή της δομής του πρώην ανατολικού μπλοκ. Κατά την ίδια χρονική περίοδο μια σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων παρατηρείται στην Ασία. Μόνο προς το μέσο της δεκαετίας του 1990, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας άρχισε να αυξάνεται. Κατά το τέλος της δεκαετίας η αύξηση αυτή επιβραδύνθηκε και πάλι για να παρατηρηθεί εκ νέου σημαντική αύξηση με την έναρξη της πρώτης δεκαετίας του 21^{ου} αιώνα.

Το 2005, η συνολική κατανάλωση ενέργειας ορυκτών και υδάτινων φορέων καλυπτόταν κατά 36% από το αργό πετρέλαιο, κατά 24% από το φυσικό αέριο, κατά 28% από κάρβουνο, ενώ τέλος 6% της ηλεκτρικής

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

ενέργειας παραγόταν από πυρηνική ή ενέργεια των υδάτων. Σε τοπικό επίπεδο, αυτά τα ποσοστά εξαρτώνται ισχυρά από τα γεωγραφικά και εθνικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής, λόγω της εθνικής ενεργειακής πολιτικής και των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων που διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Για παράδειγμα, στην Ασία το μεγαλύτερο ποσοστό της δεδομένης ζήτησης ορυκτών καυσίμων καλύπτεται από το κάρβουνο (αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τη Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας), ενώ αυτός ο φορέας ενέργειας θεωρείται ασήμαντος σε περιοχές όπως η Μέση Ανατολή. Εξ' αιτίας των μεγάλων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου σε αυτές τις περιοχές, γίνεται χρήση κυρίως υγρών και αερίων υδρογονανθράκων. Σε συνάρτηση με αυτή την παρατήρηση, η υψηλή χρήση φυσικού αερίου στη Ρωσία οφείλεται στην πληθώρα των φυσικών πόρων της.

Μέσα στα τελευταία σαράντα χρόνια, η σύνθεση των φορέων ενέργειας που χρησιμοποιείτο παγκοσμίως έχει αλλάξει δραματικά. Αυτό ισχύει κυρίως για το φυσικό αέριο. Ενώ αυτός ο φορέας είχε ένα μερίδιο της τάξης του 17% στη συνολική κατανάλωση ενέργειας το 1965, συνεισέφερε με ένα ποσοστό της τάξης του 45% στην κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης το 2005. Το 1965, η πυρηνική ενέργεια δεν ήταν σημαντική σε παγκόσμια κλίμακα, εντούτοις το 2005 κάλυπτε το 6% της παγκόσμιας ζήτησης με αυξητικές τάσεις. Παρότι η κατανάλωση γαιανθράκων αυξήθηκε σημαντικά από $62 \cdot 10^{18}$ J το 1965 σε $123 \cdot 10^{18}$ J το 2005, σε σχέση με τη συνολική κατανάλωση ορυκτών και υδάτινων φορέων ενέργειας παρατηρήθηκε μείωση από το 40% το 1965 στο 28% το 2005. Κατά την ίδια χρονική περίοδο, η κατανάλωση αργού πετρελαίου αυξήθηκε από περίπου $65 \cdot 10^{18}$ J το 1965 σε $161 \cdot 10^{18}$ J το 2005. Η κατανάλωση αργού πετρελαίου έχει υπερδιπλασιαστεί εντός τεσσάρων δεκαετιών, το ποσοστό της παρόλα αυτά στη συνολική κατανάλωση ενέργειας έχει παραμείνει περίπου το ίδιο.



Σχήμα 1.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με τους ενεργειακούς φορείς.

Τα παραπάνω στοιχεία αφορούν ενεργειακούς φορείς τους οποίους εκμεταλλεύονται οι εμπορικές αγορές ενέργειας. Όλα τα άλλα είδη ανανεώσιμων ή μη συμβατικών πηγών ενέργειας, όπως τα καυσόξυλα και διάφορα άλλα είδη βιομάζας (όπως το άχυρο) ή η αιολική ενέργεια δεν έχουν συνεπώς ληφθεί υπ' όψιν. Επί του παρόντος, υπάρχουν μόνο εκτιμήσεις που αφορούν την ποσότητα και την τοπική διανομή της χρήσης της βιομάζας και της αιολικής ενέργειας. Για τη βιομάζα, η οποία είναι ο πιο σημαντικός φορέας μη εμπορικής ανανεώσιμης ενέργειας, αυτές οι εκτιμήσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από $20 \cdot 10^{18}$ J έως περίπου $60 \cdot 10^{18}$ J το χρόνο. Σύμφωνα με αυτές τις εκτιμήσεις, η βιομάζα συνεισφέρει το 5-15% της παγκόσμιας χρήσης φορέων ενέργειας για να καλύψει τη δεδομένη ενεργειακή ζήτηση.

1.3 Αποθέματα ορυκτών καυσίμων.

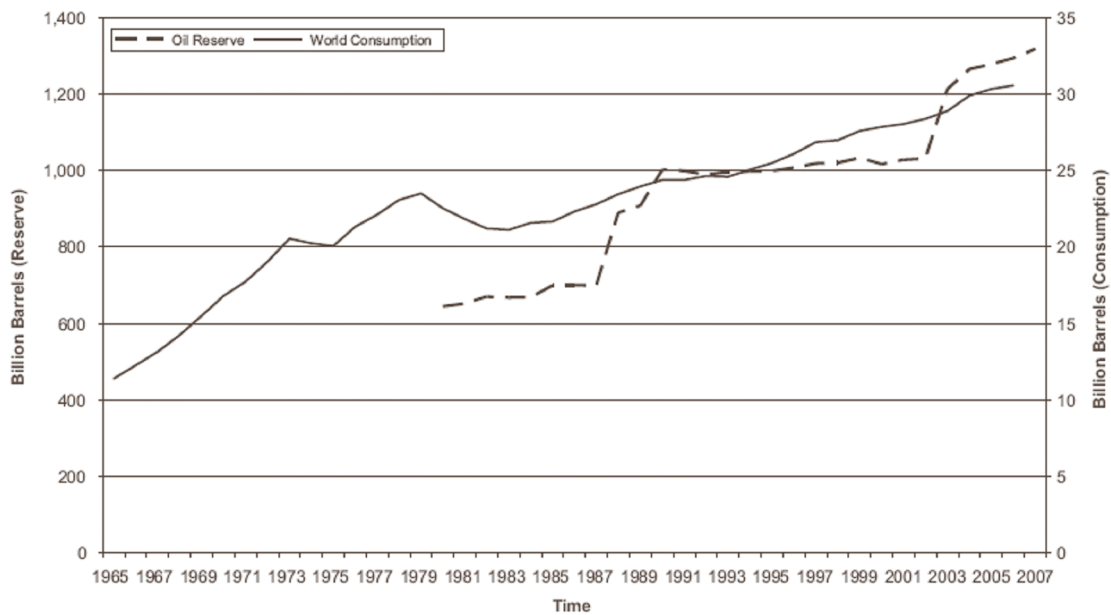
Κύριο μέλημα πολλών σύγχρονων ερευνητών αποτελεί η σύγκριση ανάμεσα στην παγκόσμια κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και τα αντίστοιχα αποθέματα. Σύμφωνα με αναλύσεις που έγιναν το 2006 από το Παγκόσμιο Ινστιτούτο Άνθρακα (WCI- World Coal Institute), με τα ισχύοντα επίπεδα παραγωγής, τα αποδεδειγμένα αποθέματα άνθρακα, πετρελαιοειδών και αερίου αναμένεται να διαρκέσουν για ακόμη 155, 41 και 65 χρόνια αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, ο OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries- Οργανισμός παραγωγών χωρών πετρελαίου) ισχυρίζεται ότι εκτιμήσεις δείχνουν έντονη αυξητική τάση για τα ανακτηθέντα αποθέματα. Για παράδειγμα τα αποθέματα πετρελαίου από μόλις 0,6 τρισεκατομμύρια βαρέλια κατά τη δεκαετία του 1940, αυξήθηκαν στα δύο τρισεκατομμύρια βαρέλια κατά τις δεκαετίες 1960-70 και σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις του αμερικανικού Γεωλογικού Ινστιτούτου τα αποθέματα επί του παρόντος ανέρχονται στα 3,3 τρισεκατομμύρια βαρέλια. Ένας σημαντικός αριθμός οργανισμών ασχολείται με την ανάλυση και την πρόβλεψη των μελλοντικών αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων με σημαντικότερους τους εξής:

- WCI (World Coal Institute)
- OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries)
- IEA (International Energy Agency)
- EIA (Energy Information Administration)
- WEC (World energy Council)

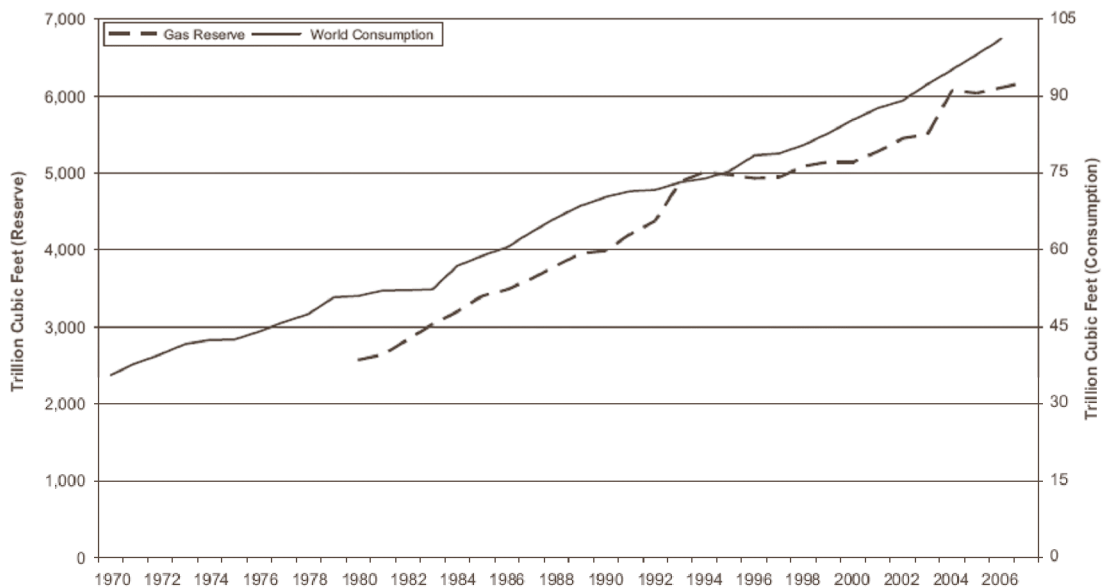
Οι απόψεις γύρω από τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων διαφέρουν με αποτέλεσμα να μη μπορεί να προβλέψει κανείς με σιγουριά πότε θα εξαντληθούν τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων. Η EIA ισχυρίζεται ότι τα συνολικά γνωστά αποθέματα γαιανθράκων στις Ηνωμένες Πολιτείες υπερβαίνουν τους 500 δισεκατομμύρια τόνους και διάφορες άλλες εκτιμήσεις αναφέρουν ακόμη μεγαλύτερα μεγέθη. Αυτό σημαίνει ότι τα αποθέματα θα διαρκέσουν ακόμη 500 χρόνια με τα ισχύοντα επίπεδα παραγωγής. Αντιθέτως, το WCI εκτιμά ότι τα αποθέματα άνθρακα θα διαρκέσουν μόνο 155 χρόνια με τα ισχύοντα επίπεδα παραγωγής.

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

Επιπροσθέτως, οι ενεργειακοί πόροι αναμένεται να είναι επαρκείς, για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη που αναμένεται, μέχρι το 2030. Αυτές οι αντίθετες απόψεις υποδεικνύουν ότι οι γνώμες για τα αποθέματα, τα κοιτάσματα και του πόρους σε παγκόσμια κλίμακα διίστανται. Τα ποσοστά παγκόσμιας κατανάλωσης προς αποθέματα για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, όπως απεικονίζονται στα σχήματα 1.3 και 1.4, υπολογίζονται περίπου σταθερά 1/40 και 1/70 αντίστοιχα, από το 1986 έως το 2006. Αυτό σημαίνει ότι εάν η παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου και φυσικού αερίου συνεχιστεί με τους ρυθμούς του 2006, τα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου θα είναι επαρκή για επιπλέον 40 και 70 χρόνια αντίστοιχα.



Σχήμα 1.3 Η πορεία της παγκόσμιας κατανάλωσης και των αποθεμάτων αργού πετρελαίου κατά τη χρονική περίοδο 1967-2007.



Σχήμα 1.4 Η πορεία της παγκόσμιας κατανάλωσης και των αποθεμάτων φυσικού αερίου κατά τη χρονική περίοδο 1970-2007.

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

Έχει προβλεφθεί ότι στο κοντινό μέλλον οι τιμές των ορυκτών καυσίμων θα αυξηθούν και κάποιοι άλλοι πόροι θα μετατραπούν σε αποθέματα. Αυτή η μετατροπή ίσως αναβληθεί και τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων θα μπορούσαν να διατηρηθούν με έλεγχο των τιμών, της κατανάλωσης και της παραγωγής. Εκτός αυτού, η χρήση άλλων πηγών ενέργειας, των οποίων η παραγωγή κοστίζει λιγότερο από τα ορυκτά καύσιμα, αποτελεί μια ακόμη επιλογή. Στο μέλλον λοιπόν είναι πιθανή η αντικατάσταση καυσίμων με σκοπό τη βέλτιστη αναλογία για το ενεργειακό σύστημα της κάθε χώρας. Από την άλλη μεριά, ορισμένοι ειδικοί επιχειρούν να πείσουν τα έθνη παγκοσμίως να χαλιναγωγήσουν τις απαιτήσεις τους για ενέργεια βασισμένη στα ορυκτά καύσιμα αντί να στραφούν σε μια ποικιλία εναλλακτικών καυσίμων.

Όπως παρατηρείται από τα σχήματα 1.3 και 1.4 τα αποθέματα δεν παρουσιάζουν σημαντική ελάττωση κατά το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα. Από το 1965 έως το 2006 τα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου παγκοσμίως είχαν αυξητική τάση. Η σύγκριση ανάμεσα στα αποθέματα και την κατανάλωση καταδεικνύει ότι οι ορυκτοί πόροι παγκοσμίως δε μειώνονται, παρά τη σημαντική εξόρυξη ορυκτών καυσίμων. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι πλέον είναι διαθέσιμα περισσότερα δεδομένα και βελτιωμένες τεχνολογίες. Συνεπώς η πρόβλεψη των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων παγκοσμίως παραμένει επισφαλής.

1.4 Η ενέργεια στο μέλλον.

Ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την εξέλιξη της συνολικής χρήσης ενέργειας στο άμεσο μέλλον είναι η ανάπτυξη του βιομηχανοποιημένου μέρους του κόσμου, εξ' αιτίας του κυρίαρχου μεριδίου που κατέχει στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Σε μεσοπρόθεσμη χρονική κλίμακα όμως, ο αποφασιστικός παράγοντας θα είναι εάν το μεγαλύτερο μέρος του κόσμου που τώρα χρησιμοποιεί λίγη ενέργεια θα συνεχίσει έτσι ή θα αυξήσει την ενεργειακή χρήση, είτε ακολουθώντας τον τρόπο ανάπτυξης των βιομηχανοποιημένων κρατών ή ακολουθώντας εναλλακτικές οδούς προόδου. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, η απόσταση, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, ανάμεσα στις περιοχές με τη μέγιστη και την ελάχιστη αντίστοιχα μπορεί να διευρυνθεί ή να περιοριστεί. Για τα βιομηχανοποιημένα κράτη, η αυξημένη έμφαση που δίνεται στη διατήρηση της ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής ενεργειακής χρήσης, παρά τις μελλοντικές καινοτομίες που θα εντείνουν την ενεργειακή ζήτηση.

Δεδομένου ότι δεν ακολουθούν όλες οι ανακαλύψεις την παραγωγική οδό και όλες οι καινοτομίες δεν τίθενται σε εφαρμογή, είναι έκδηλη η συσχέτιση ανάμεσα στην κατεύθυνση της τεχνολογίας και της ενεργειακής κατανάλωσης και σε μια σειρά αποφάσεων που λαμβάνονται εντός των σύγχρονων ανεπτυγμένων κρατών. Συνεπώς τίθεται το ζήτημα, εάν η ενεργειακή χρήση θα πρέπει να αυξάνεται όποτε αυτό είναι επιτρεπτό από οικονομική άποψη και από τους διαθέσιμους πόρους. Το πρόβλημα λοιπόν έγκειται στο κατά πόσο η παροχή ή η ζήτηση ενέργειας θα πρέπει να

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

καθορίζουν την ενεργειακή κατανάλωση. Η συνάφεια του ζητήματος βρίσκεται στην τάση να προτιμώνται δαπανηρές λύσεις όσον αφορά τους φθηνούς και άφθονους πόρους, παρότι η τεχνολογία είναι διαθέσιμη για να επιτευχθούν οι ίδιοι στόχοι με λιγότερο δαπανηρές διαδικασίες.

Οι προβλέψεις του παρελθόντος για επικείμενη έλλειψη στις πρώτες ύλες και στα καύσιμα ανετράπησαν από νέες ανακαλύψεις πόρων και τεχνικές εξόρυξης. Αυτό όμως δεν ισχύει για τις προειδοποιήσεις που δίνονται επί του παρόντος. Κατά την τελευταία δεκαετία, δεν έχουν ανακαλυφθεί αποθέματα συγκεκριμένων πόρων, όπως τα ορυκτά καύσιμα, με ρυθμό ανάλογο με την αυξανόμενη εξερευνητική προσπάθεια και την προθυμία να αυξηθούν οι τιμές (το γεγονός αυτό πιστεύεται ότι αντανακλά τη δυσκολία στην εξόρυξη και τον καθαρισμό του πόρου). Επιπροσθέτως, η συνείδηση ότι η περιβαλλοντική επίδραση των εξόρυξης και της χρήσης των πόρων θέτει απόλυτα όρια στην κατανάλωση ενεργειακών πηγών όπως τα ορυκτά καύσιμα, δίνουν επιπλέον βάρος στις προειδοποιήσεις για περιορισμό της ενεργειακής χρήσης. Ορισμένοι τύποι περιβαλλοντικών επιπτώσεων μπορούν να διατηρηθούν κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο με το ανάλογο οικονομικό κόστος βέβαια, ενώ η επίδραση ορισμένων άλλων στο περιβάλλον είναι αναπόφευκτη. Ένα παράδειγμα αποτελεί η κλιματική αλλαγή που οφείλεται εν μέρει στην αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα το οποίο σχετίζεται με την καύση ορυκτών καυσίμων.

Ο προβληματισμός για τον περιορισμό της παραγωγής υποδεικνύει δυο διαφορετικές πιθανές προσεγγίσεις. Η μια είναι να επιβληθεί περιορισμός στην εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, καθώς επιπλέον επέκταση θα πρέπει να περιμένει την ενδελεχή έρευνα γύρω από τις συνολικές επιπτώσεις της και το λεπτομερή σχεδιασμό με σκοπό την καλύτερη γεωγραφική διανομή του συνεπαγόμενου οφέλους. Βασική προτεραιότητα ίσως θα πρέπει να είναι η αναδιανομή των πόρων που βρίσκονται ήδη σε χρήση, γεγονός που υποδηλώνει μείωση των ποσοτήτων ενεργειακών πόρων που θα είναι διαθέσιμες για τα ανεπτυγμένα κράτη (αυτό δεν οδηγεί απαραίτητα σε χαμηλότερο βιοτικό επίπεδο, δεδομένου ότι ακριβώς αυτές οι χώρες έχουν την τεχνογνωσία και το απαραίτητο επίπεδο υποδομής, έτσι ώστε η μείωση της ενεργειακής εκμετάλλευσης να αντισταθμιστεί από πιο αποδοτική χρήση).

Η άλλη προσέγγιση είναι να προωθηθεί η παραγωγή όσο το δυνατόν περισσότερο, έως ότου χαλιναγωγηθεί από παράγοντες εκτός του ελέγχου της ανθρωπότητας (περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κλιματικές μεταβολές, επιβάρυνση της ανθρώπινης υγείας). Ορισμένοι πιστεύουν ότι εάν ληφθεί αυτή η προσέγγιση, οι παράγοντες που θεωρούνται επί του παρόντος περιοριστικοί θα εξαφανισθούν ως αποτέλεσμα της ανεπτυγμένης τεχνολογίας. Είναι προφανές ότι οι κίνδυνοι που εγκυμονεί η δεύτερη προσέγγιση είναι υψηλότεροι και διαφορετικής φύσεως από αυτούς που σχετίζονται με την πρώτη.

1.5 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου αποτελεί μια φυσική διεργασία που ως αποτέλεσμα έχει τη θέρμανση της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας της γης. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ορισμένα ατμοσφαιρικά αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρατμοί και το μεθάνιο έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν το ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη απορροφώντας ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, η οποία εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης. Χωρίς το φαινόμενο του θερμοκηπίου η μέση θερμοκρασία της γης θα ανερχόταν μόλις στους -18°C , αντί για τους 15°C που είναι σήμερα.

Καθώς η ηλιακή ενέργεια διαπερνά την ατμόσφαιρα ένα μέρος της αντανακλάται από τα σύννεφα και άλλα ατμοσφαιρικά σωματίδια πίσω στο διάστημα ή απορροφάται από αυτά. Περίπου η μισή της ηλιακής ακτινοβολίας φθάνει στην επιφάνεια της γης όπου χρησιμοποιείται για ένα μεγάλο αριθμό φυσικών διεργασιών ανάμεσα στις οποίες είναι και η θέρμανση του εδάφους. Η θέρμανση του εδάφους συνεπάγεται εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας, ένα μέρος της οποίας χάνεται στο διάστημα ενώ το υπόλοιπο συγκρατείται στην ατμόσφαιρα.

Το ποσό της θερμότητας που προστίθεται στην ατμόσφαιρα λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου ελέγχεται από τη συγκέντρωση των αερίων που το εντείνουν. Η συγκέντρωση των αερίων αυτών έχει αυξηθεί σημαντικά από την αρχή της βιομηχανικής επανάστασης (γύρω στο 1700). Ως αποτέλεσμα αυτών των υψηλών συγκεντρώσεων προκύπτει η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου με επιπλέον συνέπεια τη διαφοροποίηση του κλίματος. Υπολογιστικά μοντέλα έχουν δείξει ότι ο διπλασιασμός της συγκέντρωσης του βασικότερου αερίου του θερμοκηπίου, του διοξειδίου του άνθρακα, ενδέχεται να προκαλέσει αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας $1-3^{\circ}\text{C}$. Εντούτοις, οι αριθμητικές εξισώσεις των υπολογιστικών μοντέλων δεν προσομοιώνουν με ακρίβεια την επίδραση ορισμένων αντισταθμιστικών παραγόντων. Για παράδειγμα, η αύξηση στη θερμοκρασία της γης θα προκαλούσε τη μεγαλύτερη εξάτμιση του νερού των ωκεανών, με αποτέλεσμα η ατμόσφαιρα να έχει περισσότερη νέφωση. Η επιπλέον αυτή νέφωση θα αντανακλούσε μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας στο διάστημα μειώνοντας έτσι το ποσό ηλιακής ακτινοβολίας που θα απορροφούνταν από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της γης. Με την απορρόφηση λιγότερης ηλιακής ακτινοβολίας από την επιφάνεια, η επίδραση ενός ενισχυμένου φαινομένου του θερμοκηπίου θα αντισταθμιζόταν μερικώς.

Ένας αριθμός αερίων σχετίζεται με την ανθρωπογενή ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αυτά τα αέρια συμπεριλαμβάνουν: το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το διοξείδιο του αζώτου (N_2O), τους χλωροφθοράνθρακες (CF_xCl_x) και το όζον της τροπόσφαιρας. Το πιο σημαντικό από αυτά τα αέρια είναι το διοξείδιο του άνθρακα στο οποίο εκτιμάται ότι οφείλεται το 55% της αλλαγής στην ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η συμβολή των άλλων αερίων είναι 25% για τους χλωροφθοράνθρακες, 15% για το μεθάνιο και 5% για το διοξείδιο του

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

αζώτου. Η συμβολή του όζοντος στη ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου δεν έχει ποσοτικοποιηθεί ακόμη.

Η μέση συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα κατά το έτος 2005 υπολογίστηκε περίπου 380 ppm. Πριν το 1700 ήταν περίπου 280 ppm. Οι κοινωνικές αλλαγές εξ' αιτίας της βιομηχανικής επανάστασης οδήγησαν σε αύξηση του ατμοσφαιρικού CO₂. Οι κυριότερες πηγές του αερίου αυτού συμπεριλαμβάνουν την καύση ορυκτών καυσίμων για βιομηχανικές εφαρμογές, μεταφορές, θέρμανση χώρων και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εκπομπές από την καύση ορυκτών καυσίμων είναι υπεύθυνες για το 65% του επιπλέον CO₂ που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα. Το υπόλοιπο ποσοστό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αποψίλωση των δασών.

Οι τεχνητά δημιουργούμενοι χλωροφθοράνθρακες αποτελούν το ισχυρότερο αέριο του θερμοκηπίου ανά μόριο. Παρόλα αυτά, οι χαμηλές συγκεντρώσεις τους στην ατμόσφαιρα μειώνουν τη συμβολή τους στην ατμόσφαιρα. Πρόσφατες μετρήσεις δείχνουν ότι η συγκέντρωση των χημικών αυτών ουσιών έχει πτωτική τάση εξ' αιτίας της μείωσης των εκπομπών. Η αρνητική επίδραση των χλωροφθορανθράκων στη συγκέντρωση του όζοντος στη στρατόσφαιρα έχει οδηγήσει πολλά κράτη στη μείωση της χρήσης αυτών των ουσιών, όπως αναφέρεται και από το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ (1987).

Από το 1750, η συγκέντρωση του μεθανίου στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί κατά 150%. Οι πρωταρχικές πηγές για το επιπλέον μεθάνιο της ατμόσφαιρας είναι η καλλιέργεια ρυζιού, τα οικόσιτα ζώα, η υγειονομική ταφή των σκουπιδιών και η εξόρυξη γαιανθράκων, πετρελαίου και φυσικού αερίου. Οι αναερόβιες συνθήκες που σχετίζονται με το πλημμύρισμα των οριζώνων έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μεθανίου. Ωστόσο, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί πόσο μεθάνιο παράγεται με αυτό τον τρόπο. Τα οικόσιτα ζώα απελευθερώνουν μεθάνιο ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της πέψης. Ορισμένοι ερευνητές θεωρούν ότι η προσθήκη μεθανίου στην ατμόσφαιρα έχει τετραπλασιαστεί εξ' αιτίας αυτής της πηγής.

Η μέση συγκέντρωση του διοξειδίου του αζώτου στην ατμόσφαιρα αυξάνεται με ρυθμό 0,2 έως 0,3% το χρόνο. Πηγές για την αύξηση αυτή αποτελούν η μετατροπή στη χρήση της γης, η καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας, καθώς και η χρήση λιπασμάτων. Το περισσότερο διοξείδιο του αζώτου που προστίθεται στην ατμόσφαιρα κάθε χρόνο οφείλεται στην αποψίλωση και τη μετατροπή δασικών περιοχών σε αγροτικές.

Ο ρόλος του όζοντος στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι δύσκολο να καθορισθεί επιστημονικά, δεδομένου ότι δεν είναι διαθέσιμες ακριβείς μετρήσεις των επιπέδων του αερίου στην ατμόσφαιρα κατά το παρελθόν (επιπλέον των 25 ετών).

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

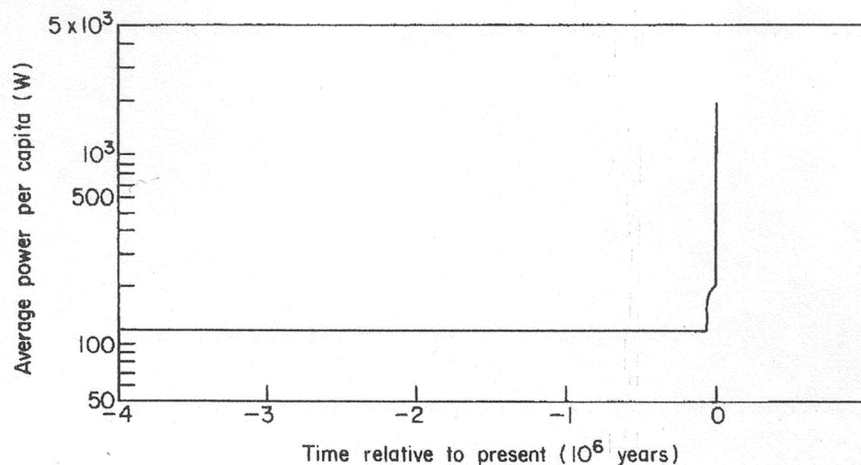
Αέριο Θερμοκηπίου	Συγκέντρωση 1750	Συγκέντρωση 2003	Ποσοστιαία μεταβολή	Φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές
CO ₂	280 ppm	376 ppm	34%	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Οργανική αποσύνθεση ➤ Δασικές φωτιές ➤ Ηφαιστεια ➤ Καύση Ορυκτών καυσίμων ➤ Απομείλωση των δασών ➤ Αλλαγή χρήσης της γης
CH ₄	0,71 ppm	1,79 ppm	152%	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Εδάφη με μεγάλη υγρασία ➤ Οργανική αποσύνθεση ➤ Εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου ➤ Καύση βιομάζας ➤ Καλλιέργεια ρυζιού ➤ Χορτοφάγα ζώα ➤ Υγειονομική ταφή σκουπιδιών
NO ₂	270 ppb	319 ppb	18%	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Δάση ➤ Ωκεανοί ➤ Καλλιέργειες ➤ Απορρίμματα ➤ Λιπάσματα ➤ Καύση βιομάζας ➤ Καύση ορυκτών καυσίμων
CFCs	0	880 ppt	–	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ψυγεία ➤ Εντομοκτόνα ➤ Καθαριστικές, διαλυτικές ουσίες
O ₃	Άγνωστη	Διαφέρει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο στην ατμόσφαιρα		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Δημιουργείται με φυσικό τρόπο εξ' αιτίας της δράσης του ηλιακού φωτός στο μοριακό οξυγόνο και τεχνητά μέσω του φωτοχημικού νέφους

Πίνακας 1.1 Συγκέντρωση και πηγές των αερίων του θερμοκηπίου.

1.6 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η αποθηκευμένη ενέργεια οποιασδήποτε μορφής που μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα, η οποία εντέλει χάνεται στο διάστημα, θα μπορούσε να ονομαστεί «μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας». Ο όρος «ανανεώσιμες πηγές ενέργειας» χρησιμοποιείται για ενεργειακές ροές οι οποίες αναπληρώνονται με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο «χρησιμοποιούνται».

Σε μια χρονική κλίμακα χαρακτηριστική της ανθρώπινης ιστορίας στη γη, η περίοδος κατά την οποία χρησιμοποιούνται μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αμελητέα. Η κατακόρυφη γραμμή στο χρόνο μηδέν (παρόν) του σχήματος 1.5 παριστά τέτοιου είδους πηγές ενέργειας και αν ακόμη η μέση κατά κεφαλήν ισχύς και το μέγεθος του πληθυσμού παραμείνουν σταθερά, τότε οι παρούσες εκτιμήσεις για τους ανακτήσιμους μη ανανεώσιμους πόρους δε θα επέτρεπαν σε αυτή την εποχή να παραταθεί επιπλέον του πάχους αυτής της κατακόρυφης γραμμής.



Σχήμα 1.5 Διαχρονική τάση στη μέση κατά κεφαλήν μετατροπή ενέργειας.

Είναι λοιπόν έκδηλο ότι μακροπρόθεσμα η ενεργειακή χρήση θα πρέπει να βασιστεί είτε στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή στην πυρηνική σύντηξη ή σε συνδυασμό των δύο, με δεδομένο ότι δε θα υπάρξει κάποια απρόβλεπτη μείωση του ανθρωπίνου πληθυσμού. Όμως δεν υπάρχουν ακόμη απτές αποδείξεις ότι η ενέργεια από πυρηνική σύντηξη μπορεί να είναι μια ελεγχόμενη πηγή παροχής ενέργειας και συνεπώς η ανάγκη να διευρυνθεί το επί του παρόντος περιορισμένο τεχνολογικό δυναμικό, που στοχεύει στη χρησιμοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, φαντάζει ακόμη πιο επιτακτική.

Είναι δύσκολο να γίνει μια σύγκριση ανάμεσα στην ανανεώσιμη και την ενέργεια σύντηξης επί του παρόντος, μιας και στη μια περίπτωση ο τελικός σχεδιασμός του εξοπλισμού μετατροπής ενέργειας δεν είναι ακόμη γνωστός. Παρόλα αυτά, είναι πιθανό τα δύο συστήματα να έχουν διαφορετικού είδους επίδραση στις κοινωνίες στις οποίες θα λειτουργήσουν. Οι θερμικοί σταθμοί σύντηξης θεωρούνται ογκώδεις μονάδες με πρωταρχικό στόχο την παραγωγή υψηλής ποιότητας ενέργειας (όπως ο ηλεκτρισμός και το υδρογόνο), ενώ οι

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας είναι εγκαταστάσεις μικρότερης κλίμακας οι οποίες εκμεταλλεύονται τις τοπικές συνθήκες.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται από ένα θεωρητικό μέγιστο ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια μπορεί να εξαχθεί με «ανανεώσιμο» τρόπο, δηλαδή ο ρυθμός εξαγωγής να είναι τέτοιος ώστε να υπάρχει ροή νέας ενέργειας στα αποθέματα που σχετίζονται με την ανανεώσιμη πηγή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ανθρώπινη παρέμβαση σε έναν δεδομένο ενεργειακό κύκλο, τροποποιεί το ρυθμό με τον οποίο εισρέει νέα ενέργεια. Για παράδειγμα η χρησιμοποίηση των θερμοκρασιακών διαφορών των ωκεανών μπορεί να μεταβάλλει το ρυθμό επιφανειακής εξάτμισης και τις ταχύτητες των θαλασσιών ρευμάτων. Η ροή γεωθερμικής ενέργειας από το εσωτερικό της γης δεν αποτελεί ανανεώσιμη πηγή, δεδομένου ότι το κύριο μέρος της ροής συσχετίζεται με ψύξη. Από την άλλη πλευρά είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό της θερμότητας που χάνεται ανά χρόνο ($2,4 \cdot 10^{10}$), έτσι πρακτικά η γεωθερμική ενέργεια συμπεριφέρεται ως ανανεώσιμη πηγή.

Η ενέργεια σύντηξης είναι επίσης μια ενέργεια με μεγάλο δυναμικό. Ωστόσο, δεν συμπεριφέρεται όπως μια πραγματική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, όπως συμβαίνει με τη γεωθερμική ενέργεια, δεδομένου ότι δε λαμβάνει χώρα φυσική ροή ενέργειας. Η ενέργεια σύντηξης συνεπώς παρουσιάζει μεγαλύτερη συνάφεια με τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αυθαιρέτως μεγάλους ρυθμούς, εάν κατασκευαστούν κατάλληλες συσκευές για να ξεπεραστούν οι αρχικοί φραγμοί.

1.6.1 Μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η πλειοψηφία των τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας τροφοδοτούνται άμεσα ή έμμεσα από την ηλιακή ενέργεια. Το σύστημα γη-ατμόσφαιρα βρίσκεται σε δυναμική ισορροπία, δηλαδή η εκπομπή θερμότητας στο διάστημα ισούται με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, έτσι ώστε το τελικά παραμένον επίπεδο ενέργειας εντός του συστήματος γη-ατμόσφαιρα να μπορεί να χαρακτηριστεί αδρά ως το «κλίμα» της γης. Η υδρόσφαιρα απορροφά το κύριο ποσοστό της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Η περισσότερη ακτινοβολία απορροφάται σε μικρό γεωγραφικό πλάτος γύρω από τον ισημερινό, αλλά αυτή η ενέργεια διασκορπίζεται σε όλη την υδρόγειο με τη μορφή ανέμων και θαλάσσιων ρευμάτων. Η κίνηση των υδάτων παίζει ρόλο στη διαδικασία μεταφοράς μηχανικής ενέργειας ανάμεσα στην ατμόσφαιρά και των ωκεανό μέσω της έντασης των ανέμων. Η ηλιακή ενέργεια είναι επίσης υπεύθυνη για τη διανομή των κατακρημνισμάτων, τα οποία είναι η κινητήρια δύναμη των υδροηλεκτρικών σταθμών, και για την ανάπτυξη των φυτών για τη δημιουργία βιοκαυσίμων. Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιλαμβάνουν φυσικά φαινόμενα όπως η ηλιοφάνεια, ο άνεμος, τα κύματα και η γεωθερμία. Κάθε μία από αυτές τις μορφές έχει μοναδικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν πώς και που χρησιμοποιούνται.

Αιολική ενέργεια.

Η κινητική ενέργεια του ανέμου που χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω ανεμογεννητριών.

Παρουσιάζεται σταθερή ανάπτυξη στο μέγεθος και την ισχύ των ανεμογεννητριών, οι οποίες διατίθενται πλέον σε δυναμικότητες έως 5 MW για μηχανές εκτός ακτής. Η τεχνολογική εξέλιξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών επηρεάζεται ξεκάθαρα από την οικονομική υποστήριξη που παρέχεται από τις κυβερνήσεις με σημαντικότερα παραδείγματα τα αιολικά πάρκα στις Ηνωμένες Πολιτείες, το Ηνωμένο Βασίλειο, τη Δανία και τη Γερμανία.

Διάφορες έρευνες υποδεικνύουν ότι ο άνεμος απορροφάται με ευκολία σε ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ισχύος έως ότου το μερίδιό του φθάσει το 20% της ζήτησης. Εξ' αιτίας της ταχείας αύξησης δυναμικού σε πολλές χώρες και περιοχές, η παγκοσμίως εγκατεστημένη αιολική ισχύς αναμένεται να φθάσει τα 150 GW έως το 2010, σε συνάρτηση και με την πολιτική υποστήριξη, τοπικά αλλά και διεθνώς, και από την επιπλέον βελτίωση στην απόδοση και το κόστος.

Ενέργεια των ωκεανών.

Η μηχανική ενέργεια που προέρχεται από την παλιρροιακή κίνηση, την κίνηση των κυμάτων ή των θαλάσσιων ρευμάτων και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Παρά την υψηλή προβλεψιμότητα των πηγών της παλιρροιακής ενέργειας, οι μεγάλοι χρόνοι κατασκευής, οι υψηλές απαιτούμενες επενδύσεις και οι μικροί συντελεστές φορτίου πιθανότατα αποκλείουν σημαντική μείωση του κόστους όσον αφορά τη συγκεκριμένη τεχνολογία βραχυπρόθεσμα.

Οι πρόσφατες ευνοϊκές εξελίξεις στην ενέργεια των κυμάτων εξ' αιτίας του αυξημένου ενδιαφέροντος για την κλιματική αλλαγή περιλαμβάνουν την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στη Σκωτία, την Αυστραλία, τη Δανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες, το υψηλό δυναμικό στην παρεχόμενη ενέργεια-η ενέργεια των κυμάτων θα μπορούσε να παρέξει το 10% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας και την πιθανή συνεργία με τις εκτός ακτών βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου, η οποία θα μπορούσε να είναι σημαντική. Εντούτοις, υπάρχει ένας αριθμός τεχνολογικών ζητημάτων που θα πρέπει να επιλυθούν ώστε η ενέργεια των κυμάτων να φανεί ανταγωνιστική στα επόμενα χρόνια.

Τα μεγάλα οφέλη της μετατροπής της θερμικής ενέργειας των ωκεανών (OTEC- ocean thermal energy conversion) περιλαμβάνουν: μικρή εποχιακή ημερήσια διακύμανση στη διαθεσιμότητα, ήπια περιβαλλοντική απόδοση και παραπροϊόντα για μια ομάδα εφαρμογών που λαμβάνει χώρα σε μεγάλα βάθη και τέλος υψηλό οικονομικό όφελος λόγω της αυξανόμενης τιμής του πετρελαίου. Ωστόσο και στη συγκεκριμένη τεχνολογία απαιτείται επιπλέον έρευνα για τη δημιουργία ενός πιλοτικού εργοστασίου που θα καταδεικνύει

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

τα πλεονεκτήματα της μετατροπής της θερμικής ενέργειας των ωκεανών στους πιθανούς επενδυτές.

Είναι σαφές ότι η έρευνα για τη χρησιμοποίηση της ενέργειας των θαλασσιών ρευμάτων για την παραγωγή ισχύος είναι σε πρώιμο επίπεδο και επί του παρόντος δεν έχει τεθεί κάποιος εμπορικός στρόβιλος σε λειτουργία (συνεπώς υπάρχει δυσκολία στην εκτίμηση του κόστους παραγωγής). Υπάρχει, παρόλα αυτά ένα μεγάλο παγκόσμιο θαλάσσιο δυναμικό, το οποίο κατέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με του υπόλοιπους ανανεώσιμους πόρους, όπως η υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, η υψηλή προβλεψιμότητα στην παραγόμενη ισχύ, η ανεξαρτησία από τις ακραίες ατμοσφαιρικές διακυμάνσεις και μηδαμινό οπτικό αντίκτυπο.

Υδροηλεκτρική ενέργεια.

Η δυναμική και κινητική ενέργεια του νερού που μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια και περιλαμβάνει έργα μικρής και μεγάλης κλίμακας.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι υπεύθυνη για το 17% της παγκόσμιας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας το ένα τρίτο του οικονομικά εκμεταλλεύσιμου δυναμικού της. Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια έχουν το πλεονέκτημα ότι αποφεύγεται η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Ο κοινωνικός του αντίκτυπος, όπως η απαλλοτρίωση γης, η επίδραση στην τοπική πανίδα και χλωρίδα και στην ποιότητα του νερού μπορούν να μετριασθούν με το σωστό σχεδιασμό κατά τα πρώτα στάδια της διαδικασίας ανέγερσης. Ενώ παραμένει το ερώτημα για τα πλεονεκτήματα των μικρών υδροηλεκτρικών σε σχέση με τα μεγάλα, γενικά η τεχνολογία που αφορά την υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη.

Ηλιακή ενέργεια.

Η ηλιακή ακτινοβολία που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση νερού και αέρα καθώς και για την παραγωγή μηχανικού έργου και ηλεκτρισμού.

Η αύξηση της συνεισφοράς της ηλιακής και άλλων εναλλακτικών πηγών ενέργειας στο 50% της πρωτεύουσας παροχής ενέργειας έως το 2050, όπως υποδεικνύεται από διάφορα ερευνητικά σενάρια, θα απαιτούσε εκτεταμένες αλλαγές στην ενεργειακή υποδομή και στον τρόπο που η ενέργεια παράγεται και χρησιμοποιείται.

Παρά την πρόοδο στην ανάπτυξη σύγχρονων ηλιακών συστημάτων κατά τα τελευταία σαράντα ή πενήντα χρόνια, αυτού του είδους η τεχνολογία χρειάζεται επιπλέον εμπλοκή από επιστήμονες, μηχανικούς, περιβαλλοντολόγους, επιχειρηματίες, οικονομολόγους, αρχιτέκτονες και πολιτικούς παράγοντες.

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

Γεωθερμική ενέργεια.

Η θερμότητα που εκπέμπεται από το εσωτερικό του φλοιού της γης, συνήθως με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού. Χρησιμοποιείται σε κατάλληλες τοποθεσίες για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή απευθείας ως θερμική ενέργεια.

Η χρησιμοποίηση και το δυναμικό των γεωθερμικών σταθμών, τόσο για την παραγωγή έργου όσο και για την απευθείας παροχή θερμότητας, αυξάνονται αν και ο ρυθμός ανάπτυξης για την παραγωγή έργου έχει επιβραδυνθεί ενώ για την παροχή θερμότητας έχει επιταχυνθεί. Η υπερβολική εκμετάλλευση των θερμών πηδάκων οδήγησε στη μείωση του γεωθερμικού δυναμικού των Ηνωμένων Πολιτειών τα τελευταία χρόνια, γεγονός όμως το οποίο αντισταθμίζεται από την αύξηση στο δυναμικό άλλων χωρών. Η μεγάλη αύξηση στον αριθμό των γεωθερμικών θερμικών αντλιών συνεισφέρει στην ανάπτυξη των εφαρμογών απευθείας θέρμανσης και γενικά η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας βραχυπρόθεσμα παρουσιάζει ελπιδοφόρα σημάδια βιωσιμότητας.

Βιοενέργεια.

Στερεή βιομάζα: αναφέρεται στα οργανικά, μη ορυκτά υλικά βιολογικής προέλευσης τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού.

Βιοαέριο: αέρια που αποτελούνται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα τα οποία παράγονται από την αναερόβια αποικοδόμηση της βιομάζας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή έργου ή θερμότητας.

Υγρά βιοκαύσιμα: υγρά καύσιμα με βιολογική προέλευση, από τη μετατροπή βιομάζας, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως στον τομέα των μεταφορών.

Αστικά απόβλητα: Η ενέργεια από απόβλητα περιλαμβάνει τα απόβλητα που παράγονται από τους οικιακούς, τους εμπορικούς και τους δημόσιους τομείς τα οποία αποτεφρώνονται σε ειδικές εγκαταστάσεις για την παραγωγή θερμότητας και έργου. Το ποσοστό της ανανεώσιμης ενέργειας καθορίζεται από την ενεργειακή αξία του βιοδιασπώμενου υλικού.

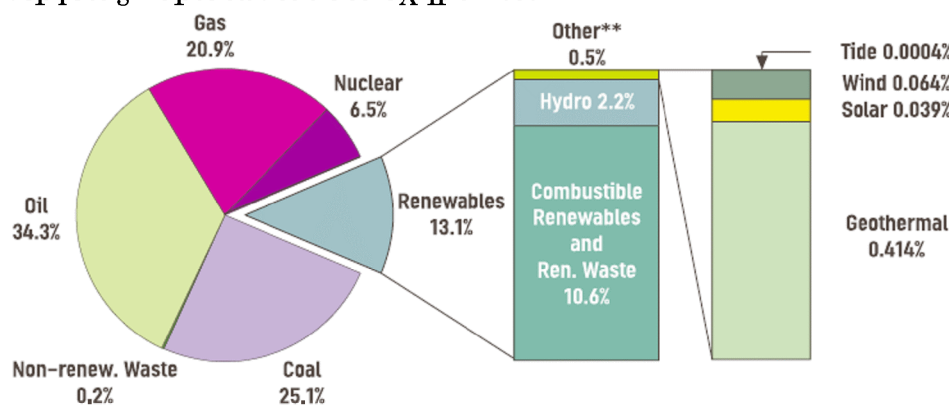
Οι πιο σημαντικές μορφές βιομάζας είναι τα κατάλοιπα της επεξεργασίας ζαχαροκάλαμου στο γεωργικό τομέα, τα υπολείμματα κατά την πολτοποίηση χαρτιού στη δασοκομία και η κοπριά ως κτηνοτροφικά υπολείμματα. Έχει τεθεί το ζήτημα ότι η βιομάζα μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα, ως πιο αποδοτική όσον αφορά την μείωση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα. Το πρωτόκολλο του Κιότο ενθαρρύνει την περαιτέρω χρήση βιομάζας.

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

Το διακυβερνητικό πλαίσιο για την κλιματική αλλαγή (IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το μακροπρόθεσμο ενεργειακό δυναμικό της βιομάζας θα μπορούσε να φθάσει τα $2600 \cdot 10^{18}$ J, το δυναμικό αυτό όμως περιορίζεται από τις ανταγωνιστικές γεωργικές απαιτήσεις για παραγωγή τροφίμων, χαμηλή παραγωγή βιομάζας και άλλους παράγοντες.

1.7 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο παρόν και στο μέλλον.

Κατά το έτος 2004, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ήταν υπεύθυνες για το 13,1% των 11059 Mtoe (μεγατόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) της παγκόσμιας πρωτεύουσας παροχής ενέργειας. Οι καύσιμοι ανανεώσιμοι πόροι και τα απόβλητα (το 97% των οποίων είναι βιομάζα εμπορικής και μη εμπορικής χρήσης) αποτελούν το 79,4% των χρησιμοποιούμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ακολουθούνται από την υδροηλεκτρική ενέργεια (16,7%). Τα κύρια καύσιμα που ευθύνονται για την παγκόσμια παροχή ενέργειας, καθώς και ο διαχωρισμός των κύριων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παριστάνονται στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 Μεριδίο των καυσίμων στην παγκόσμια παροχή ενέργειας.

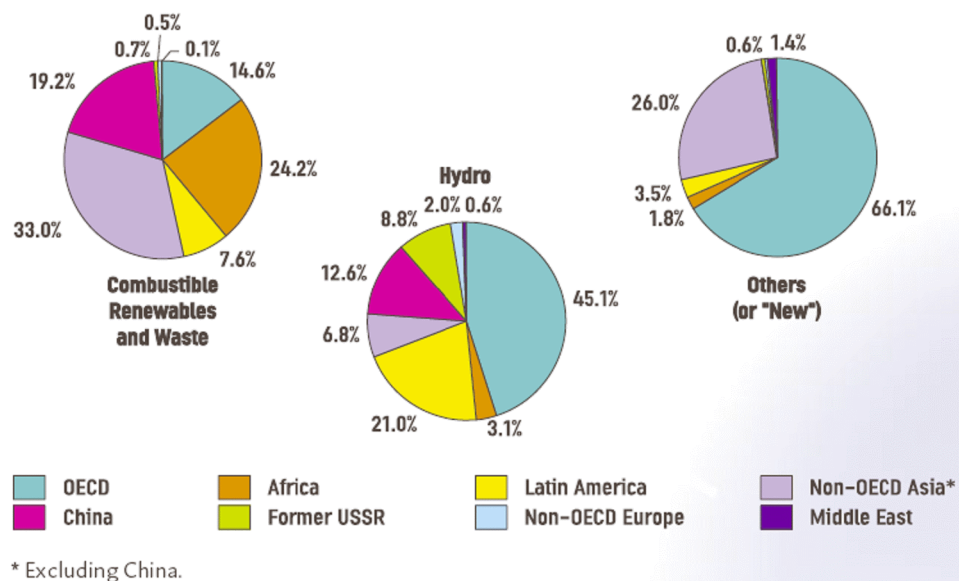
Κατά τα τελευταία 33 έτη, παρατηρήθηκε μια κατά μέσο όρο αύξηση της τάξης του 2,3% ετησίως στην παροχή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, οριακά υψηλότερη από την ετήσια αύξηση στη συνολική παγκόσμια πρωτεύουσα παροχή ενέργειας. Εντούτοις, οι «νέες» ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (γεωθερμική, ηλιακή, αιολική) κατέγραψαν μια πολύ υψηλότερη ετήσια αύξηση της τάξης του 8%. Λόγω της πολύ χαμηλής βάσης το 1971 και της σύγχρονης πολύ ταχείας ανάπτυξης, η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρήθηκε στην αιολική ενέργεια (+48%) και ακολούθως στην ηλιακή ενέργεια (+28%).

Εξαιτίας του υψηλού ποσοστού τη βιομάζας στις ανανεώσιμες πηγές, χώρες εκτός ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης) εμφανίζονται ως οι κύριοι χρήστες ανανεώσιμων πηγών. Το κυριότερο μέρος αυτής της κατανάλωσης λαμβάνει χώρα στον οικιακό τομέα για μαγείρεμα και θέρμανση. Όσον αφορά την υδροηλεκτρική και τις «νέες» ανανεώσιμες

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

πηγές οι χώρες του ΟΟΣΑ είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο ποσοστό της χρήσης με 45% και 66% αντίστοιχα το 2004.

Οι ανανεώσιμες πηγές έχουν την τρίτη μεγαλύτερη συνεισφορά στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού. Είναι υπεύθυνες για το 17,9% της παραγωγής το 2004, μετά το γαιάνθρακα (39,8%) και το φυσικό αέριο (19,6%), αλλά μπροστά από την πυρηνική ενέργεια (15,7%) και το πετρέλαιο (6,7%). Σχεδόν το 90% του ηλεκτρισμού που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές προέρχεται από υδροηλεκτρικά εργοστάσια ενώ 6% προέρχεται από ανανεώσιμα καύσιμα και απόβλητα. Η γεωθερμική, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια φθάνουν το 4,5% της παραγωγής.



Σχήμα 1.7 Γεωγραφική κατανομή του μεριδίου των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας στην παγκόσμια παροχή ενέργεια.

1.7.1 Μελλοντική εξέλιξη.

Το σενάριο αναφοράς που αναπτύχθηκε στην Παγκόσμια Ενεργειακή Επιθεώρηση 2005 της Διεθνούς Ενεργειακής Επιτροπής, στο οποίο υποτίθεται η συνέχιση των κυβερνητικών πολιτικών που ισχύουν σήμερα και καμία νέα τεχνολογική καινοτομία, η κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές θα αυξάνεται 1,8% το χρόνο από 1400 Mtoe το 2003 σε σχεδόν 2300 Mtoe το 2030, μια συνολική αύξηση 60%.

Σύμφωνα με αυτό το σενάριο, το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση θα παραμείνει σε μεγάλο βαθμό σταθερό στο 14%. Η βιομάζα είναι υπεύθυνη επί του παρόντος για το 7% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, αλλά το μερίδιό της θα μειωθεί καθώς οι αναπτυσσόμενες χώρες θα υιοθετήσουν σύγχρονες μορφές ενέργειας. Η παγκόσμια παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας θα αυξάνεται κατά μέσο όρο 1,8% ετησίως, αλλά το μερίδιό της θα παραμείνει σταθερό γύρω στο 2%. Τα μερίδια των «νέων» ανανεώσιμων πηγών (γεωθερμική, ηλιακή και αιολική) θα αυξάνεται σημαντικά κατά 6,2% ανά έτος αλλά δεδομένου ότι

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

ξεκινούν από πολύ χαμηλή βάση (με μερίδιο 0,5% το 2003) θα παραμείνουν η μικρότερη συνιστώσα της ανανεώσιμης ενέργειας με ποσοστό 1,7% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης.

Το εναλλακτικό σενάριο που αναπτύχθηκε στην Παγκόσμια Ενεργειακή Επισκόπηση 2005 αποτιμά τον αντίκτυπο που θα έχει στο παγκόσμιο ενεργειακό μέλλον η εφαρμογή πολιτικών οι οποίες μελετώνται επί του παρόντος ή είναι δικαιολογημένο να αναμένεται ότι θα εφαρμοσθούν έως το 2030. Τα καθοριστικά μέτρα συμπεριλαμβάνουν την προσπάθεια για βελτίωση της αποδοτικότητας κατά τη μετατροπή ενέργειας και τη χρήση ανανεώσιμων πηγών. Σύμφωνα με το εναλλακτικό σενάριο, η υδροηλεκτρική παραγωγή το 2030 θα είναι 15%, ελαφρά υψηλότερη από το 13% που προβλέπεται από το σενάριο αναφοράς. Το μερίδιο των εναλλακτικών μορφών, εκτός της υδροηλεκτρικής ενέργειας, θα αυξηθεί κατά πολύ περισσότερο, από ένα αθροιστικό 6% το 2030 σύμφωνα με το σενάριο αναφοράς στο 9% σύμφωνα με το εναλλακτικό σενάριο. Η μεγαλύτερη αύξηση λαμβάνει χώρα στα ευρωπαϊκά κράτη μέλη του ΟΟΣΑ, εξ' αιτίας της σημαντικής υποστήριξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας, εκτός της υδροηλεκτρικής, είναι σχεδόν δέκα φορές υψηλότερη το 2030 στο εναλλακτικό σενάριο σε σχέση με το 2003 και περισσότερο από 33% υψηλότερη απ' ότι προβλέπεται από το σενάριο αναφοράς.

1.7.2 Ανάπτυξη ανά τομέα.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα συνεχίσουν να αυξάνουν το μερίδιό τους στην αγορά παραγωγής ισχύος. Συνολικά θα είναι υπεύθυνες για το 20% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού το 2030 ,από 18% που είναι σήμερα. Παρότι η θέρμανση και το μαγείρεμα θα παραμείνουν η πρωταρχική χρήση των ανανεώσιμων πηγών-κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες όπου καταναλώνονται τα τρία τέταρτα ανανεώσιμων πόρων (κυρίως η βιομάζα)- ο τομέας παραγωγής ισχύος θα ηγηθεί της αύξησης στην κατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας ανάμεσα στο 2003 και το 2030. Το μερίδιό του στην παγκόσμια κατανάλωση αναμένεται να αυξηθεί από 15% το 2003 στο 38% έως το 2030.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εκτός της υδροηλεκτρικής, θα τριπλασιάσουν το ποσοστό τους όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρισμού, από 2% το 2003 σε 6% το 2030. Από αυτές τις πηγές ενέργειας:

- Η αιολική ενέργεια θα παρουσιάσει τη μεγαλύτερη αύξηση στο μερίδιό της στην αγορά.
- Το ποσοστό βιομάζας που χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρισμού θα τριπλασιαστεί έως το 2030.
- Η γεωθερμική ενέργεια θα παρουσιάσει την ίδια αύξηση με τη βιομάζα.
- Η ηλιακή, η παλιρροιακή και η ενέργεια των κυμάτων θα έχουν πιο σημαντική συνεισφορά κατά το τέλος της προβλεπόμενης περιόδου.

Η μεγαλύτερη αύξηση στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα λάβει χώρα στα ευρωπαϊκά κράτη μέλη του ΟΟΣΑ, εξ' αιτίας των κινήτρων που παρέχονται από τις κυβερνήσεις των κρατών αυτών.

Κεφάλαιο 1^ο: Ενέργεια-Παρούσα και μελλοντική κατάσταση.

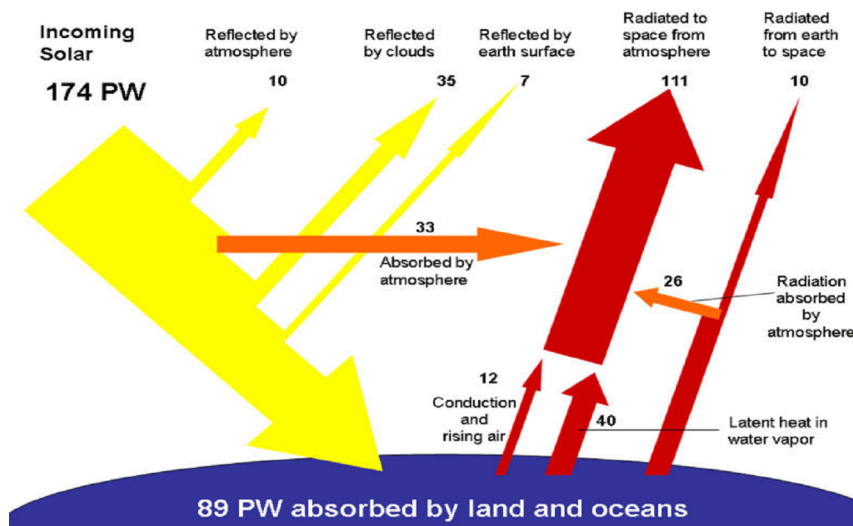
Μιας και το ένα τέταρτο του δυναμικού της παραγόμενης ισχύος θα βασίζεται στην ανανεώσιμη ενέργεια, το κόστος ανάπτυξης αναμένεται να είναι 1,6 τρισεκατομμύρια δολάρια (με την αξία του έτους 2000), σχεδόν το 40% των επενδύσεων για την παραγωγή ισχύος το 2030.

Το μερίδιο των βιοκαυσίμων στις παγκόσμιες επίγειες μεταφορές ήταν 0,6% το 2003. Αυτό το μερίδιο αναμένεται να αυξηθεί στο 1,4% το 2030.

2.1 Εισαγωγή.

Η ενέργεια από τον ήλιο ταξιδεύει προς τη γη με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, λοιπόν εκφράζεται συνήθως σε μονάδες ενέργειας προς χρόνο προς επιφάνεια, όπως είναι για παράδειγμα τα watts ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2). Το ποσό της ενέργειας που είναι διαθέσιμο από τον ήλιο εκτός της ατμόσφαιρας της γης είναι προσεγγιστικά ίσο με $1367 W/m^2$. Η μεταβολή της απόστασης γης-ήλιου προκαλεί μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμοσφαιράς κατά $\pm 3\%$.

Συνολικά, η γη λαμβάνει $174 \cdot 10^{15} W$ εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην ανώτερη ατμόσφαιρα ανά πάσα στιγμή. Όταν συναντά την ατμόσφαιρα, 6% της ακτινοβολίας ανακλάται και 16% απορροφάται. Οι συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες (σύννεφα, σκόνη, ρυπαντές) μειώνουν επιπλέον την ηλιακή ακτινοβολία που ταξιδεύει εντός της ατμόσφαιρας κατά 20% εξ' αιτίας ανάκλασης και κατά 3% λόγω απορρόφησης. Αυτές οι ατμοσφαιρικές συνθήκες όχι μόνο μειώνουν την ποσότητα της ενέργειας που φθάνει στην επιφάνεια της γης, αλλά επίσης διασπείρουν περίπου 20% του εισερχόμενου φωτός και φιλτράρουν τμήματα του φάσματός του. Μετά το πέρασμά της από την ατμόσφαιρα, η μισή ακτινοβολία βρίσκεται στο ορατό φάσμα, ενώ η άλλη μισή κατά κύριο λόγο στο υπέρυθρο φάσμα (ένα μικρό μέρος είναι υπεριώδης ακτινοβολία).



Εικόνα 2.1 Περίπου η μισή εισερχόμενη ενέργεια από τον ήλιο απορροφάται από τη θάλασσα και την ξηρά, ενώ το υπόλοιπο ακτινοβολείται πίσω στο διάστημα ($PW=10^{15} W$).

Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας μέσω ατμοσφαιρικής συναγωγής (μεταφορά αισθητής θερμότητας) και η εξάτμιση και συμπύκνωση του ατμού (μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας) επηρεάζουν τους ανέμους και τον κύκλο του νερού. Όμως, μόλις φθάσει την επιφάνεια, το ηλιακό φως απορροφάται από τους ωκεανούς, την ξηρά και τα φυτά. Η ενέργεια που

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

απορροφάται από την ξηρά, σε συνδυασμό με αυτή που ανακυκλώνεται λόγω το φαινομένου του θερμοκηπίου, θερμαίνει την επιφάνεια σε μια μέση θερμοκρασία περίπου ίση με 15°C. Το μικρό ποσοστό ηλιακής ενέργειας που δεσμεύεται από τα φυτά και άλλους φωτότροφους οργανισμούς μετατρέπεται σε χημική ενέργεια μέσω της φωτοσύνθεσης. Η ροή και αποθήκευση ηλιακής ενέργειας στο περιβάλλον είναι τεράστια σε σύγκριση με τις ανθρώπινες ενεργειακές ανάγκες.

- Η συνολική διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στη γη είναι κατά προσέγγιση $3850 \cdot 10^{21}$ J το χρόνο.
- Οι ωκεανοί απορροφούν περίπου $2850 \cdot 10^{21}$ J το χρόνο.
- Οι άνεμοι μπορούν θεωρητικά να προμηθεύσουν $6 \cdot 10^{21}$ J το χρόνο.
- Η βιομάζα δεσμεύει περίπου $1,8 \cdot 10^{21}$ J ηλιακής ενέργειας το χρόνο.
- Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ήταν $0,471 \cdot 10^{21}$ J το 2004.

2.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή της ηλιακής ενέργειας.

Από τις αρχαίες ελληνικές κατοικίες οι οποίες χτίζονταν με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να αντικρίζουν το ζεστό χειμερινό ήλιο, έως τα προηγμένα φωτοβολταϊκά λεπτού φιλμ τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, οι άνθρωποι χρησιμοποιούν τις ακτίνες του ήλιου για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες. Αυτό είναι απολύτως λογικό, δεδομένου ότι ο ήλιος περιλούζει τη γη κάθε ώρα με ενέργεια αρκετή ώστε να καλύψει την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση για ένα χρόνο και επιπλέον αυτή η ενέργεια είναι ευρέως διαθέσιμη, ανεξάντλητη και δεν επιβαρύνει το περιβάλλον.

Οι αρχαίοι Έλληνες και Ρωμαίοι ωφελήθηκαν πολύ από αυτό που σήμερα αναφέρεται ως παθητικός ηλιακός σχεδιασμός– τη χρήση της αρχιτεκτονικής, έτσι ώστε οι εσωτερικοί χώροι να φωτίζονται και να θερμαίνονται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο φιλόσοφο Σωκράτη αποδίδεται η φράση «στις οικίες με νότιο προσανατολισμό, ο ήλιος εισέρχεται στον προθάλαμο το χειμώνα». Οι Ρωμαίοι εξέλιξαν την τεχνολογία καλύπτοντας τα ανοίγματα νοτίου προσανατολισμού με γυαλί ή μίκα για να συγκρατούν τη θερμότητα του ήλιου κατά τη χειμερινή περίοδο. Μέσω της υπολογισμένης χρήσης της ηλιακής ενέργειας, οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι αντιστάθμισαν την ανάγκη καύσης ξύλων, οι προμήθειες των οποίων ήταν συχνά μικρές.

Η σύγχρονη ιστορία της ηλιακής ενέργειας ξεκινά το 19^ο αιώνα και φυσικά συνεχίζεται έως σήμερα.

1838

Ο Edmund Becquerel παρατήρησε και δημοσίευσε ευρήματα για τη φύση των υλικών που μετατρέπουν το φως σε ενέργεια. Τα ευρήματα θεωρήθηκαν ενδιαφέροντα, αλλά δεν υπήρξε περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

1860-1881

Ο Auguste Mouchout ήταν ο πρώτος άνθρωπος που παρουσίασε έναν κινητήρα που τροφοδοτούνταν από ηλιακή ενέργεια. Δεχόμενος κεφάλαια από το Γάλλο μονάρχη, σχεδίασε μια συσκευή που μετέτρεπε την ηλιακή ενέργεια σε μηχανικό έργο ατμού και σύντομα έθεσε σε λειτουργία την πρώτη ατμομηχανή. Αργότερα συνέδεσε την ατμομηχανή σε μια συσκευή ψύξης, αποδεικνύοντας ότι οι ακτίνες του ήλιου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να φτιαχτεί πάγος. Για την ανακάλυψη του αυτή, του απονεμήθηκε μετάλλιο.

Η ρηξικέλευθη έρευνά του, παρόλα αυτά τερματίστηκε απότομα. Οι Γάλλοι επαναδιαπραγματεύτηκαν μια πιο συμφέρουσα συμφωνία με την Αγγλία για την παροχή γαιάνθρακα και βελτίωσαν το σύστημα μεταφοράς του. Το έργο του Mouchout προς εύρεση μιας εναλλακτικής πηγής ενέργειας δε θεωρούνταν πλέον προτεραιότητα και έτσι δε λάμβανε πλέον κεφάλαια από το μονάρχη.

1873

Ο Βρετανός Willoughby Smith, πειραματίστηκε με τη χρήση ηλιακών κυττάρων σεληνίου, αφού ανακάλυψε την ευαισθησία τους στο φως ενώ δοκίμαζε υλικά για υποθαλάσσια καλώδια τηλεγράφου.

1876-1878

Ο William Adams έγραψε το πρώτο βιβλίο για την ηλιακή ενέργεια με τίτλο «Ένα υποκατάστατο των καυσίμων στις τροπικές χώρες». Αυτός και ο μαθητής του Richard Day, πειραματίστηκαν με τη χρήση κατόπτρων και κατάφεραν να κινήσουν μια ατμομηχανή 2,5 ίππων. Ισχύς πολύ μεγαλύτερη από την ατμομηχανή μισού ίππου του Mouchout. Το σχέδιό του γνωστό ως «Κεντρικός Δέκτης» (Power Tower) είναι πολύ διαδεδομένο σήμερα.

1883

Ο Charles Fritz μετέτρεψε την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό. Τα ηλιακά κύτταρα που κατασκεύασε είχαν ένα ποσοστό μετατροπής 1-2%, όμως η εφεύρεσή του θεωρείται ορόσημο για την ιστορία της ηλιακής ενέργειας.

1885-1889

Ο Γάλλος Charles Tellier που θεωρείται ο πατέρας της ψύξης πειραματίστηκε με ένα μη συγκεντρωτικό ηλιακό κινητήρα. Εγκατέστησε το πρώτο ηλιακό σύστημα για θέρμανση νερού στην οροφή της δικιάς του οικίας. Εντούτοις, η επιθυμία του να ερευνήσει ζητήματα που αφορούν την ψύξη οδήγησε στην εγκατάλειψη των πειραμάτων του με την ηλιακή ενέργεια.

1868-1888

Ο John Ericsson, ένας Αμερικανός μετανάστης από τη Σουηδία έγραψε την εξής σημαντική φράση «Το πέρασμα δύο χιλιάδων ετών στον ωκεανό του χρόνου, θα οδηγήσει σε πλήρη εξάντληση τα ορυχεία γαιάνθρακα στην Ευρώπη, εκτός εάν, εν τω μεταξύ, χρησιμοποιηθεί η θερμότητα από τον

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

ήλιο. Η σημαντικότερη συνεισφορά του Ericsson στην τεχνολογία που σχετίζεται με την ηλιακή ενέργεια ήταν η σχεδίαση του πρώτου συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου, τεχνολογία που λειτουργεί σήμερα με το ίδιο βασικό σχέδιο. Ο Ericsson ολοκλήρωσε το έργο του Mouchout και επίσης ανέπτυξε μια ατμομηχανή κινούμενη από ηλιακή ενέργεια με σχεδιασμό παρόμοιο με αυτό του Mouchout.

Η ιστορία της ηλιακής ενέργειας συνεχίζεται στον 20^ο αιώνα.

1892-1905

Ο Aubrey Eneas δημιούργησε την πρώτη εταιρεία ηλιακής ενέργειας, τη Solar Motor, η οποία πούλησε το πρώτο σύστημα ηλιακής ενέργειας στο Δρ. A.J. Chandler στην πόλη Mesa της Αριζόνα για 2160\$. Το σύστημα όμως καταστράφηκε σε λιγότερο από μια εβδομάδα από ανεμοθύελλα. Η εταιρεία πούλησε ένα δεύτερο σύστημα στο John May, αλλά και αυτό καταστράφηκε σε σύντομο χρονικό διάστημα από χαλαзоθύελλα. Αυτό οδήγησε στην κατάρρευση της εταιρείας.

1904

Ο Henry Wilsie αναγνώρισε την ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ισχύος και ανέγειρε δύο θερμικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας στην Καλιφόρνια. Ήταν ο πρώτος που κατάφερε να χρησιμοποιήσει ισχύ κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ την είχε παραγάγει τη μέρα. Εντούτοις, η επιχείρηση του δεν ήταν επικερδής και κατέρρευσε επίσης.

1906-1914

Η εταιρεία του Frank Shuman, η Sun Power Co., ανέγειρε το πιο μεγάλο και το πιο επικερδές ηλιακό ενεργειακό σύστημα, το οποίο κάλυπτε επιπλέον των 10000ft². Το σύστημα παρότι παρήγαγε μεγάλη ποσότητα ατμού, δεν παρείχε την απαιτούμενη πίεση. Σε συνεργασία με τον E.P.Haines δημιούργησαν τη Sun Power Co.Ltd., η οποία ανέγειρε ένα αρδευτικό εργοστάσιο λίγο έξω από το Κάιρο, το οποίο όμως καταστράφηκε κατά τη διάρκεια του Μεγάλου Πολέμου.

1921

Απονέμεται στον Albert Einstein Νόμπελ φυσικής για τις έρευνές του επάνω στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο την παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω της ηλιακής ενέργειας.

1954

Οι Calvin Fuller, Gerald Pearson και Daryl Chaplin των εργαστηρίων Bell ανακάλυψαν τυχαία τη χρήση του πυριτίου ως ημιαγωγό, γεγονός που οδήγησε στην κατασκευή ενός ηλιακού στοιχείου με βαθμό απόδοσης 6%.

1956

Το πρώτο εμπορικό ηλιακό κύτταρο γίνεται διαθέσιμο στο κοινό. Ωστόσο η τιμή του είναι πολύ υψηλή και φτάνει τα 300\$ ανά Watt.

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

Δεκαετίες 1950-1960

Τα διαστημικά προγράμματα χρησιμοποιούν τεχνολογίες που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια. Το 1958 εκτοξεύτηκε ο δορυφόρος Vanguard I που ήταν ο πρώτος δορυφόρος που χρησιμοποιούσε ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

1970

Προκαλείται παγκόσμια ενεργειακή κρίση λόγω του εμπάργκο που επιβλήθηκε από τον ΟΡΕC. Η ανάγκη εύρεσης μιας εναλλακτικής μορφής ενέργειας έγινε επιτακτική, καθώς έγινε διεθνώς κατανοητό το πόσο βασίζεται η ύπαρξη μας σε μη ανανεώσιμους, πεπερασμένους πόρους, όπως ο γαιάνθρακας το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

Την ίδια περίοδο η τιμή των ηλιακών κυττάρων έπεσε δραστικά στα 20\$ ανά Watt.

1980-1991

Η εταιρεία Luz Ltd. με έδρα το Los Angeles παρήγαγε το 95% του ηλεκτρισμού με πηγή την ηλιακή ακτινοβολία. Η εταιρία αναγκάστηκε να σταματήσει τη λειτουργία της, αφού οι επενδυτές απέσυραν τα κεφάλαιά τους εξ' αιτίας της πτώσης στην τιμή των ορυκτών καυσίμων και των μειωμένων οικονομικών κινήτρων που δίνονταν από την πολιτεία (η εταιρία λειτουργεί σήμερα με το όνομα Luz II).

Σήμερα

Οι νέες αυξήσεις στις τιμές των ορυκτών καυσίμων καθώς και οι κλιματικές αλλαγές οδήγησαν στην ανανέωση του παγκοσμίου ενδιαφέροντος γύρω από την ηλιακή ενέργεια. Τα ηλιακά συστήματα παρουσιάζουν συνεχώς μειούμενο κόστος, ενώ οι κυβερνήσεις διεθνώς παρέχουν υψηλές επιδοτήσεις σε προγράμματα που αφορούν τη χρήση ηλιακής ενέργειας.

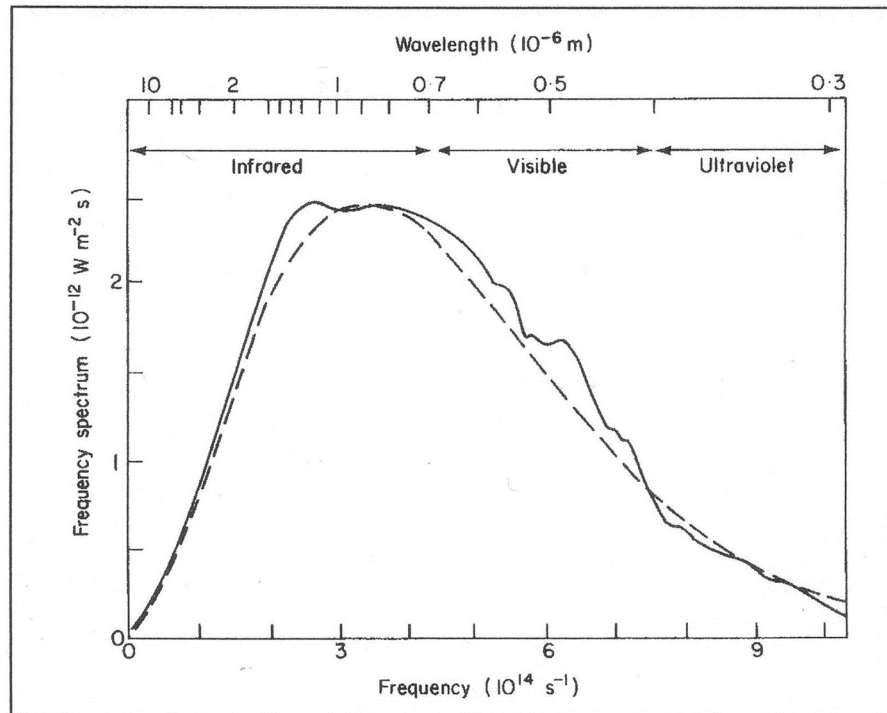
Η αγορά των φωτοβολταϊκών παρουσιάζει εντονότατη ανάπτυξη της τάξης του 30% το χρόνο, ενώ τα ηλιακά θερμικά συστήματα αποτελούν ένα κερδοφόρο μέσο για αρκετές βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές, καθώς και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.3 Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Πρακτικά όλη η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στη γη προέρχεται από τη φωτόσφαιρα, ένα λεπτό στρώμα που περιβάλλει το σχεδόν αδιαφανή μανδύα του ήλιου. Η ένταση με την οποία ένας παρατηρητής από τη γη μπορεί να δει τον ήλιο οφείλεται στη φωτόσφαιρα. Εξ' αιτίας του μεγαλύτερου μήκους διαδρομής στην απορροφητική περιοχή, η φαινόμενη φωτεινότητα του ήλιου μειώνεται προς τις άκρες. Η φωτόσφαιρα αποτελείται από άτομα με διαφορετικούς βαθμούς ιονισμού και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Ο μεγάλος αριθμός διασπάσεων που λαμβάνει χώρα, οδηγεί σε ένα φάσμα παρόμοιο με το αντίστοιχο που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα που βρίσκεται σε ισορροπία με θερμοκρασία $T \approx 6000\text{K}$. Ωστόσο, αυτό δεν είναι απόλυτα ακριβές, αφενός λόγω των οξείων γραμμών απορρόφησης που

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

αντιστοιχούν στις αποδιεγέρσεις των ηλεκτρονίων των διαφορετικών ατόμων (γραμμές απορρόφησης περισσότερων από 60 στοιχείων έχουν ταυτοποιηθεί στο ηλιακό φάσμα) και αφετέρου λόγω της θερμοκρασιακής διακύμανσης στη φωτόσφαιρα που έχει εύρος από 8000K στη ζώνη υψηλής συναγωγής με το μανδύα έως 4000K στη ζώνη μετάβασης στη χρωμόσφαιρα. Η συνολική εικόνα εντούτοις βρίσκεται σε συμφωνία με το νόμο του Planck για μια υποθετική ενεργό θερμοκρασία $T_{\text{eff}} \approx 5762\text{K}$, αγνοώντας τις λεπτές γραμμές απορρόφησης του φάσματος.



Σχήμα 2.2 Ηλιακό φάσμα κατά τη μέση απόσταση γης-ήλιου. Η συμπαγής γραμμή παριστά πραγματικές τιμές, ενώ η διακεκομμένη το αντίστοιχο φάσμα της ακτινοβολίας μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5762K.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι περίπου το 45% της ενέργειας του ήλιου φθάνει στη γη μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο ορατό φάσμα, ενώ λίγο περισσότερο από το 1% φθάνει με μικρότερα μήκη κύματος (υπεριώδης και ακτινοβολία X). Το υπόλοιπο 54% φθάνει με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας.

2.4 Βασικές έννοιες.

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένοι ορισμοί, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε εφαρμογές που σχετίζονται με την ηλιακή ενέργεια και σχετίζονται με έννοιες που αναφέρονται στα επόμενα κεφάλαια.

Άμεσος ακτινοβολία Η ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο χωρίς να υποστεί διασκορπισμό στην ατμόσφαιρα.

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

Διάχυτη ακτινοβολία Η ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο, αφού προηγουμένως έχει αλλάξει η κατεύθυνση της λόγω διασκορπισμού στην ατμόσφαιρα.

Συνολική ακτινοβολία Το άθροισμα της άμεσου και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας επάνω σε μια επιφάνεια.

Προσπίπτουσα ακτινοβολία Ο ρυθμός με τον οποίο προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία επάνω σε μια επιφάνεια. Η στιγμιαία τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (σε W/m^2) συμβολίζεται με το γράμμα G . Εάν η προσπίπτουσα ακτινοβολία ολοκληρωθεί για χρονικό διάστημα μιας ώρας χρησιμοποιείται το γράμμα I , ενώ για μια ημέρα χρησιμοποιείται το H (σε J/m^2).

Οι δείκτες των G, I και H είναι οι εξής: το a αναφέρεται σε ακτινοβολία εκτός της γήινης ατμόσφαιρας, το b και το d αναφέρονται σε άμεσο και διάχυτη ακτινοβολία αντίστοιχα, ενώ το T αναφέρεται στην ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο και το n σε επίπεδο κάθετο στην ακτινοβολία, εάν δεν εμφανίζεται δείκτης το επίπεδο θεωρείται οριζόντιο.

Ηλιακός χρόνος Ο χρόνος που βασίζεται στη φαινόμενη γωνιακή κίνηση του ήλιου στον ουρανό, με ηλιακό μεσημέρι να θεωρείται η στιγμή που ο ήλιος τέμνει το μεσημβρινό του παρατηρητή.

Ο ηλιακός χρόνος είναι αυτός που χρησιμοποιείται σε όλες τις σχέσεις των ηλιακών γωνιών και δε συμπίπτει με τον πραγματικό χρόνο. Είναι απαραίτητο να μετατραπεί ο τοπικός χρόνος σε ηλιακό με τη χρήση δυο διορθώσεων. Πρώτον, υπάρχει μια σταθερή διόρθωση για τη διαφορά γεωγραφικού μήκους ανάμεσα στο μεσημβρινό του παρατηρητή και στο μεσημβρινό που βασίζεται ο τοπικός χρόνος. Η δεύτερη διόρθωση είναι από την εξίσωση του χρόνου, η οποία λαμβάνει υπ' όψιν τις διαταραχές στο ρυθμό περιστροφής της γης που επηρεάζουν το χρόνο που ο ήλιος τέμνει το μεσημβρινό του παρατηρητή. Η διαφορά ανάμεσα στον ηλιακό και τον τοπικό χρόνο είναι:

$$\text{ηλιακός χρόνος} - \text{τοπικός χρόνος} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.1)$$

όπου L_{st} : το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος

L_{loc} : το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή.

Η εξίσωση του χρόνου E (σε λεπτά) καθορίζεται από τη σχέση:

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (2.2)$$

όπου $B = (n-1) \frac{360}{365}$ και n : η μέρα του χρόνου.

Αέριος μάζα m Το ποσοστό της μάζας της ατμόσφαιρας που διαπερνά η άμεσος ακτινοβολία προς τη μάζα που θα διαπερνούσε εάν ο ήλιος βρισκόταν

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

στο ζενίθ του. Συνεπώς στο επίπεδο της θάλασσας, $m=1$ όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ και $m=2$ για γωνία ζενίθ 60° . Για γωνίες ζενίθ (θ_z) από 0° έως 70° στο επίπεδο της θάλασσας ισχύει:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.3)$$

Για μεγαλύτερες γωνίες ζενίθ θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση της καμπυλότητας της γης, η οποία είναι πλέον σημαντική.

2.5 Κατεύθυνση της αμέσου ακτινοβολίας.

Οι γεωμετρικές σχέσεις ανάμεσα σε ένα επίπεδο οποιουδήποτε προσανατολισμού σχετικού με τη γη, οποιαδήποτε στιγμή (είτε το επίπεδο αυτό είναι στατικό ή κινείται σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους) και της θέσης του ήλιου σε σχέση με το επίπεδο μπορούν να περιγραφούν με διάφορες γωνίες οι οποίες είναι οι εξής:

Γεωγραφικό πλάτος φ Η γωνιακή θέση βόρεια ή νότια του ισημερινού, $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$, με θετικές τιμές για το βόρειο ημισφαίριο.

Ηλιακή απόκλιση δ Η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού, $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ με θετικές τιμές για το βορρά.

Η ηλιακή απόκλιση μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.4)$$

όπου n : η μέρα του χρόνου.

Κλίση β Η γωνία ανάμεσα στο επίπεδο της εξεταζόμενης επιφάνειας και το οριζόντιο επίπεδο, $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

Αζιμούθιο επιφανείας γ Η απόκλιση της προβολής της καθέτου στην επιφάνεια, επάνω στο οριζόντιο επίπεδο, από τον τοπικό μεσημβρινό (δηλαδή από τη νότια κατεύθυνση), $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ με θετικές τιμές για τα δυτικά και αρνητικές για τα ανατολικά.

Αζιμούθιο ηλίου γ_s Η γωνιακή απόκλιση της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο από τη νότια κατεύθυνση.

Ωριαία γωνία ω Η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό 15° την ώρα, θετικές τιμές για π.μ. και αρνητικές για μ.μ.

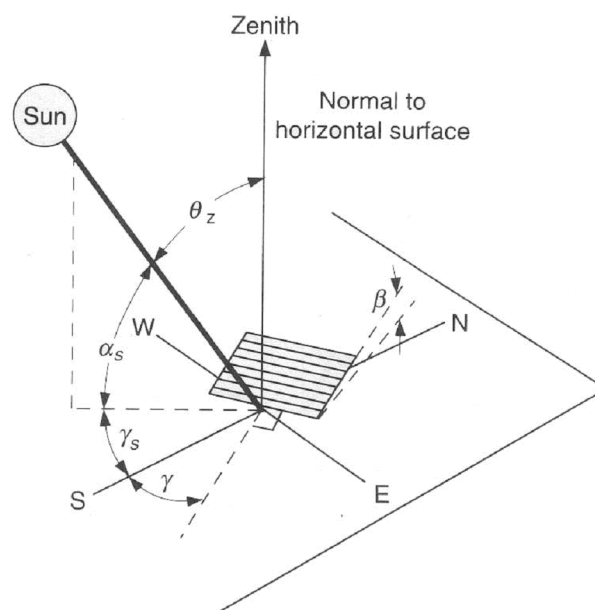
Γωνία πρόσπτωσης θ Η γωνία ανάμεσα στη (μία) ηλιακή ακτίνα και την κάθετο στην επιφάνεια. Οι σχέσεις που συνδέουν τη γωνία πρόσπτωσης της αμέσου ακτινοβολίας με τις άλλες γωνίες είναι:

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\ &\quad - \sin \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \\ &\quad + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega\end{aligned}\quad (2.5)$$

$$\text{και } \cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.6)$$

Γωνία ζενιθ θ_z Η γωνία ανάμεσα στην κατακόρυφο και στη γωνία όρασης του ηλίου, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης για οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 2.3 Γωνία ζενιθ, κλίση, αζιμούθιο επιφανείας και ηλιακό αζιμούθιο για κεκλιμένη επιφάνεια.

2.6 Γωνία πρόσπτωσης σε κινούμενα επίπεδα.

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες παρακολουθούν την πορεία του ηλίου κινούμενοι με προκαθορισμένο τρόπο για να ελαχιστοποιήσουν τη γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνειά τους και συνεπώς να μεγιστοποιήσουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Τα συστήματα παρακολούθησης κατηγοριοποιούνται από την κίνησή τους. Η περιστροφή μπορεί να είναι γύρω από έναν άξονα (ο οποίος θα μπορούσε να έχει οποιοδήποτε προσανατολισμό αλλά πρακτικά είναι οριζόντιος στον άξονα ανατολής-δύσης ή βορρά-νότου, κατακόρυφος ή παράλληλος στον άξονα της γης) ή μπορεί να είναι γύρω από δύο άξονες.

Για επίπεδο περιστρεφόμενο γύρω από οριζόντιο άξονα ανατολής-δύσης με μοναδική ημερήσια ρύθμιση, έτσι ώστε η άμεσος ακτινοβολία να είναι κάθετη στην επιφάνεια το μεσημέρι ισχύει:

$$\cos \theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cos \omega \quad (2.7)$$

Για επίπεδο περιστρεφόμενο γύρω από οριζόντιο άξονα βορρά-νότου με συνεχή ρύθμιση, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η γωνία πρόσπτωσης ισχύει:

$$\cos \theta = (\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cos^2 \omega)^{1/2} \quad (2.8)$$

Για επίπεδο περιστρεφόμενο γύρω από άξονα βορρά-νότου παράλληλο στον άξονα της γης με συνεχή ρύθμιση, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η γωνία πρόσπτωσης ισχύει:

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (2.9)$$

Για επίπεδο με συνεχή παρακολούθηση σε δύο άξονες με σκοπό την ελαχιστοποίηση της γωνίας πρόσπτωσης, ισχύει:

$$\cos \theta = 1 \quad (2.10)$$

2.7 Άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας και κεκλιμένης επιφάνειας.

Για λόγους σχεδιασμού ηλιακών εφαρμογών και υπολογισμών απόδοσης, είναι συχνά απαραίτητος ο υπολογισμός της ωριαίας ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια ενός συλλέκτη από μετρήσεις ή εκτιμήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Τα συχνότερα διαθέσιμα στοιχεία αφορούν την ωριαία ή ημερήσια ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, συνεπώς η ανάγκη έγκειται στον υπολογισμό της άμεσου και της διάχυτης ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη.

Ο γεωμετρικός παράγοντας, δηλαδή το ποσοστό της άμεσου ακτινοβολίας σε μια κεκλιμένη επιφάνεια προς την αντίστοιχη στην οριζόντια επιφάνεια, υπολογίζεται με κατάλληλη χρήση της σχέσης (2.5) και είναι

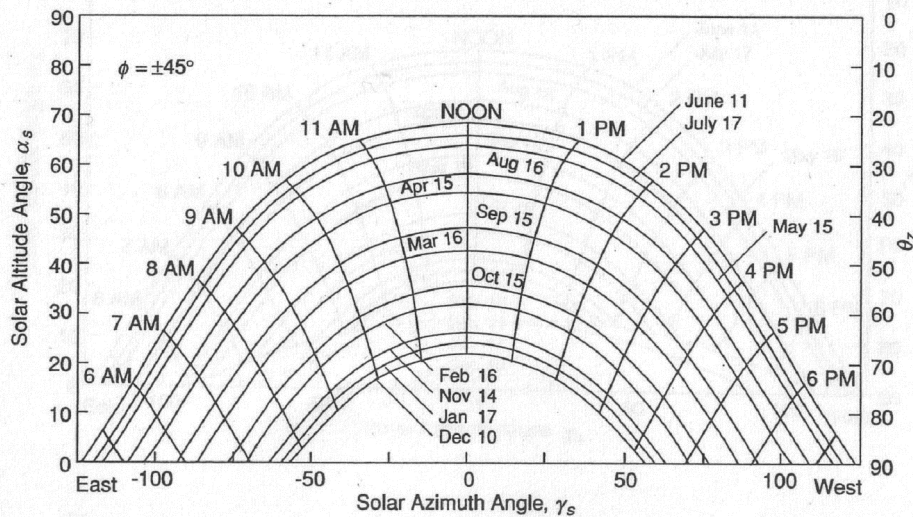
$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.11)$$

2.8 Σκίαση

Τρεις τύποι προβλημάτων σκίασης λαμβάνουν χώρα τόσο συχνά ώστε να απαιτούνται μέθοδοι αντιμετώπισής τους. Ο πρώτος είναι η σκίαση ενός συλλέκτη, παραθύρου ή άλλου δέκτη από παρακείμενα δέντρα, κτήρια ή άλλα εμπόδια. Οι γεωμετρίες μπορεί να είναι ακανόνιστες και ο συστηματικός υπολογισμός της σκίασης του εν λόγω συλλέκτη ίσως είναι πολύπλοκος. Διέξοδο δίνουν διαγράμματα της θέσης του ηλίου στον ουρανό, δηλαδή διαγράμματα του ηλιακού υψομέτρου α_s σε σχέση με το αζιμούθιο

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

του ηλίου γ_s , όπως αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 2.4, επάνω στα οποία είναι δυνατόν να υπερτεθούν τα σχήματα των εμποδίων (προφίλ σκίασης) για να καθορισθεί εάν οι ηλιακές ακτίνες προς το σημείο ενδιαφέροντος παρεμποδίζονται. Ο δεύτερος τύπος περιλαμβάνει τη σκίαση συλλεκτών πέραν της πρώτης σειράς, από τους συλλέκτες της προηγούμενης σειράς και ο τρίτος τη σκίαση παραθύρων από σκέπαστρα. Δεδομένου ότι στο δεύτερο και τρίτο τύπο η γεωμετρία είναι σαφώς καθορισμένη, η σκίαση είναι δυνατόν να προκύψει είτε με τη χρήση διαγραμμάτων ή μέσω τριγωνομετρικών υπολογισμών.



Σχήμα 2.4 Λιάγραμμα ηλιακής θέσης για βόρειο γεωγραφικό πλάτος $\pm 45^\circ$. Η γωνία ηλιακού υψομέτρου και το αζιμούθιο του ηλίου είναι συναρτήσεις της απόκλισης και της ωριαίας γωνίας οι οποίες είναι καθορισμένες καμπύλες επάνω στο διάγραμμα και υποδεικνύονται από τις ημερομηνίες και τις ώρες αντίστοιχα.

2.9 Τρόποι χρήσης της ηλιακής ενέργειας.

Υπάρχουν πολλά είδη τεχνολογιών ικανά να τιθασεύσουν την ηλιακή ενέργεια. Οι εφαρμογές καλύπτουν τομείς όπως ο εμπορικός, ο οικιακός, ο βιομηχανικός, ο αγροτικός και ο τομέας των μεταφορών. Στον πίνακα 2.1 αναφέρονται τα βασικά είδη τεχνολογίας που χρησιμοποιούνται σε κάθε τομέα, καθώς και ο σκοπός για τον οποίο χρησιμοποιείται η ηλιακή ενέργεια.

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

Σκοπός χρήσης	Τομέας	Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία
Θέρμανση νερού	Οικιακός Εμπορικός Αγροτικός	➤ Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες υγρού
Θέρμανση-Εξαερισμός	Οικιακός Εμπορικός Βιομηχανικός	➤ Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες αέρα
Θέρμανση Κτηρίων	Οικιακός Εμπορικός Αγροτικός	➤ Παράθυρα προηγμένης τεχνολογίας ➤ Διαφανής μόνωση ➤ Τοίχος Trombe ➤ Ηλιακοί συλλέκτες υγρού με σύστημα θέρμανσης κτηρίου
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (εκτός δικτύου)	Οικιακός Εμπορικός Μεταφορών	➤ Φωτοβολταϊκά στοιχεία μικρής κλίμακας
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (διανομή)	Οικιακός Εμπορικός Αγροτικός	➤ Φωτοβολταϊκά στοιχεία μέσης και μεγάλης κλίμακας ➤ Power Tower (Κεντρικός Δέκτης) ➤ Παραβολικά κάτοπτρα
Απολύμανση αέρα-νερού	Βιομηχανικός	➤ Φωτοκαταλύτες για οξείδωση

Πίνακας 2.1 Βασικές χρήσεις της ηλιακής ενέργειας.

Οι ηλιακές θερμικές εφαρμογές αποτελούν την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ηλιακής ενέργειας. Η τεχνολογία αυτού του είδους χρησιμοποιεί τη θερμότητα του ήλιου για θέρμανση νερού και χώρων, εξαερισμό, βιομηχανικές θερμικές διεργασίες, καθώς και απόσταξη και απολύμανση νερού.

2.9.1 Θέρμανση νερού.

Για να θερμάνουμε νερό χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια, ένας συλλέκτης τοποθετείται στην οροφή ενός κτηρίου ή σε έναν τοίχο προς το μέρος του ήλιου. Το εργαζόμενο μέσο κυκλοφορεί στο σύστημα είτε με τη βοήθεια αντλίας (ενεργητικό σύστημα) ή λόγω διαφοράς πυκνότητας θερμού και ψυχρού νερού (παθητικό σύστημα).

Ο συλλέκτης μπορεί να είναι φτιαγμένος από ένα απλό μονωμένο κουτί, του οποίου η επάνω επιφάνεια είναι γυάλινη, με έναν επίπεδο απορροφητή φτιαγμένο από φύλλα μετάλλου κολλημένο σε χάλκινους σωλήνες και βαμμένο σε μαύρο χρώμα ή μια συστοιχία από μεταλλικούς σωλήνες που περιβάλλονται από έναν αεροστεγή γυάλινο κύλινδρο. Σε μερικές περιπτώσεις, πριν την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας, χρησιμοποιείται ένα παραβολικό κάτοπτρο για την συγκέντρωση του ηλιακού φωτός στο σωλήνα.

Σε ένα απλό σύστημα θέρμανσης, νερό αντλείται προς το συλλέκτη με σκοπό τη θέρμανση του, ενώ το θερμό νερό ρέει προς μια δεξαμενή

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

συλλογής. Ο όγκος της δεξαμενής είναι μεγαλύτερος όσον αφορά τα ηλιακά συστήματα για να μην υπάρξει έλλειψη θερμού νερού σε περιπτώσεις κακοκαιρίας.

Το εργαζόμενο μέσο για τον απορροφητή, μπορεί να είναι το θερμό νερό από τη δεξαμενή, αλλά συνήθως υπάρχει ένα ξεχωριστό κύκλωμα υγρού -το οποίο περιέχει επιπλέον ένα αντιπηκτικό και αντιδιαβρωτικό πρόσθετο- για να μεταφέρει τη θερμότητα στη δεξαμενή μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας (συνήθως μια περιελιγμένη σωλήνωση εντός της δεξαμενής).

Όταν ένα ηλιακό σύστημα και ένα σύστημα κεντρικής θέρμανσης νερού χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, το θερμό νερό εξ' αιτίας της ηλιακής ενέργειας είτε θα συγκεντρώνεται σε μια δεξαμενή προθέρμανσης η οποία τροφοδοτεί μια δεξαμενή που με τη σειρά της θερμαίνεται από την κεντρική θέρμανση, ή ο εναλλάκτης θερμότητας θα βρίσκεται χαμηλότερα στη δεξαμενή από τον αντίστοιχο της κεντρικής θέρμανσης. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπ' όψιν, ότι η κύρια ανάγκη για κεντρική θέρμανση είναι κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπου δεν υπάρχει καθόλου ηλιακό φως και κατά τη χειμερινή περίοδο, όπου το ηλιακό θερμικό κέρδος είναι χαμηλό. Γι' αυτό η θέρμανση νερού μέσω ηλιακού συλλέκτη για οικιακή χρήση είναι συχνά καλύτερη εφαρμογή από την κεντρική θέρμανση, διότι υπάρχει μεγαλύτερη σύμπτωση παροχής και ζήτησης.

2.9.2 Θέρμανση, κλιματισμός και εξαερισμός.

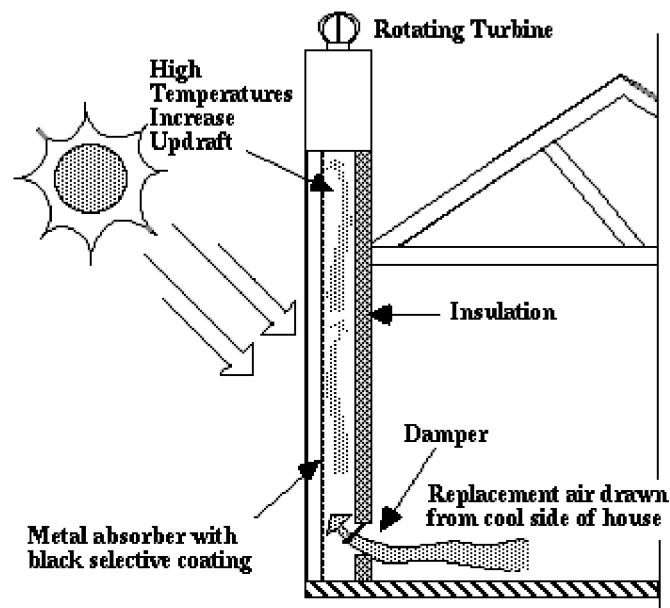
Τα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού κτηρίων έχουν ισχυρή εξάρτηση μεταξύ τους. Σκοπός όλων αυτών των συστημάτων είναι η παροχή θερμικής άνεσης και αποδεκτής ποιότητας αέρα στο εσωτερικό των κτηρίων, έχοντας παράλληλα λογικό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης. Τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης κλιματισμού και εξαερισμού αποτελούν σχεδόν το 28% της ενέργειας που χρησιμοποιείται στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρωπαϊκή Ένωση. Πολλές τεχνολογίες ηλιακών συστημάτων θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντισταθμίσουν αυτό το ποσοστό.

Τα υλικά θερμικής μάζας αποθηκεύουν ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας και απελευθερώνουν αυτή την ενέργεια σε ψυχρότερες περιόδους. Στα κοινώς χρησιμοποιούμενα υλικά θερμικής μάζας συμπεριλαμβάνονται η πέτρα, το τοιμέντο και το νερό. Για να επιτευχθεί η κατάλληλη αναλογία και τοποθέτηση θερμικών μαζών, θα πρέπει αρχικά να εξεταστούν πολυάριθμοι παράγοντες όπως το κλίμα, η ηλιοφάνεια και οι συνθήκες σκίασης. Με σωστή ενσωμάτωση, η θερμική μάζα μπορεί να διατηρήσει παθητικά ιδανική θερμοκρασία στο εσωτερικό του σπιτιού, ενώ μπορεί παράλληλα να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας. Πιο εξελιγμένα συστήματα θερμικών μαζών μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για εξαερισμό.

Η ηλιακή καμινάδα (ή θερμική καμινάδα) είναι ένα παθητικό σύστημα εξαερισμού το οποίο συντίθεται από μια κοίλη θερμική μάζα η οποία συνδέει το εσωτερικό με το εξωτερικό μέρος ενός κτηρίου. Καθώς θερμαίνεται η καμινάδα και συνεπώς ο εσωτερικός αέρας, δημιουργείται ρεύμα εξ' αιτίας της διαφοράς πυκνότητας θερμού-ψυχρού αέρα με

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

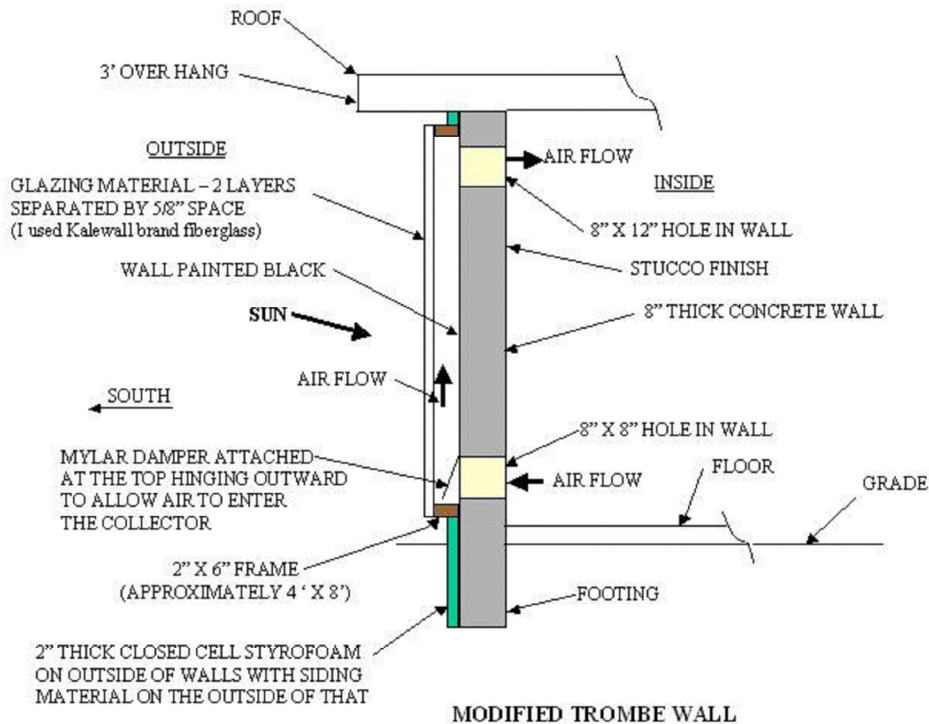
αποτέλεσμα τη δημιουργία ροής διαμέσου του κτηρίου. Η καμινάδα θα πρέπει να είναι υψηλότερη από το επίπεδο της οροφής και θα πρέπει να κατασκευαστεί στον τοίχο που βρίσκεται στην κατεύθυνση του ηλίου. Η απορρόφηση θερμότητας από τον ήλιο μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας μια γυάλινη επιφάνεια στον τοίχο που βρίσκεται απέναντι από τον ήλιο, ενώ στην αντίθετη πλευρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό που απορροφά θερμότητα. Το μέγεθος της απορροφητικής επιφάνειας είναι πιο σημαντικό από τη διάμετρο της καμινάδας. Μεγάλη επιφάνεια επιτρέπει πιο αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας προς τον αέρα μέσω συναγωγής και άρα καλύτερη ροή του αέρα μέσα στην καμινάδα.



Σχήμα 2.5 Ηλιακή καμινάδα

Ο τοίχος Trombe είναι ένα παθητικό σύστημα θέρμανσης και εξαερισμού το οποίο αποτελείται από ένα κανάλι αέρα ενδιάμεσου ενός υαλοπίνακα και μιας θερμικής μάζας που βρίσκεται προς την κατεύθυνση του ηλίου.

Οι μοντέρνοι τοίχοι Trombe έχουν θυρίδες στο πάνω και κάτω μέρος του καναλιού με αποτέλεσμα ο ψυχρός αέρας να εισέρχεται από την κάτω θυρίδα και αφού θερμανθεί λόγω συναγωγής από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, εισέρχεται στο εσωτερικό του κτηρίου μέσω της επάνω θυρίδας. Οι θυρίδες έχουν πτερύγια μιας κατεύθυνσης έτσι ώστε να αποτρέπεται η αντιστροφή της ροής κατά τη διάρκεια της νύχτας. Με την απομάκρυνση της θερμότητας από την επιφάνεια συλλογής μειώνονται σημαντικά οι θερμικές απώλειες τη νύχτα και βελτιώνεται το συνολικό θερμικό κέρδος. Κατά κανόνα, η θυρίδα προς το εσωτερικό είναι κλειστή κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπου το θερμικό κέρδος δεν είναι επιθυμητό.



Σχήμα 2.6 Τοίχος Trombe

Οι θερμικές απώλειες κατά τις νυχτερινές ώρες μέσω της θερμικής μάζας εξακολουθούν να είναι σημαντικές. Ο μοντέρνος σχεδιασμός μπορεί να βελτιωθεί επιπλέον μονώνοντας τη θερμική μάζα από τη συλλεκτική επιφάνεια. Η μόνωση μειώνει σημαντικά τις νυχτερινές απώλειες θερμότητας με κόστος τη μικρή μείωση του θερμικού κέρδους κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Οι ηλιακές λίμνες είναι μια μοναδική ηλιακή τεχνολογία ψύξης και θέρμανσης η οποία αναπτύχθηκε από το Harold Hay κατά τη δεκαετία του 1960. Ένα βασικό σύστημα αποτελείται από μια λίμνη μικρού βάθους (περίπου 5cm) τοποθετημένη στην οροφή ενός κτηρίου και από ένα κινούμενο μονωτικό κάλυμμα. Έτσι ελέγχεται η μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στο εσωτερικό του κτηρίου και το περιβάλλον με την αποκάλυψη και την κάλυψη της λίμνης κατά τη διάρκεια της μέρας και της νύχτας. Όταν απαιτείται θερμότητα το κάλυμμα αφαιρείται κατά τη διάρκεια της ημέρας επιτρέποντας έτσι στην ηλιακή ακτινοβολία να θερμάνει το νερό της λίμνης, το οποίο αποθηκεύει θερμότητα για απογευματινή χρήση. Αντιθέτως, όταν απαιτείται ψύξη του εσωτερικού χώρου, η καλυμμένη λίμνη τραβάει θερμότητα από το χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας και το κάλυμμα αφαιρείται τη νύχτα έτσι ώστε η αποθηκευμένη θερμότητα να ακτινοβοληθεί προς το ψυχρότερο περιβάλλον.

2.9.3 Θερμικές διεργασίες.

Η ηλιακή θερμική τεχνολογία μπορεί να εξασφαλίσει θερμότητα για την ξήρανση καρπών, να δημιουργήσει τις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται από ορισμένες χημικές αντιδράσεις, καθώς και για το λιώσιμο μετάλλων.

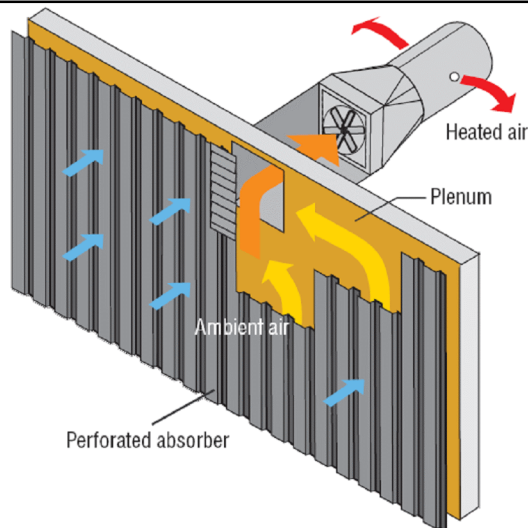
Η ηλιακή λίμνη που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία είναι μια «πισίνα» με αλμυρό νερό (συνήθως με βάθος 1-2 μέτρα) που συλλέγει και αποθηκεύει ηλιακή ενέργεια. Αυτού του είδους οι ηλιακές λίμνες προτάθηκαν για πρώτη φορά από τον Rudolph Bloch, έπειτα από αναφορές σύμφωνα με τις οποίες η θερμοκρασία ανέβαινε συναρτήσει του βάθους σε ορισμένες λίμνες.

Μια ηλιακή λίμνη αποτελείται από στρώσεις διαλυμάτων άλατος με αύξουσα συγκέντρωση (και συνεπώς πυκνότητα) μέχρι ένα συγκεκριμένο βάθος, κάτω από το οποίο το διάλυμα έχει ενιαία υψηλή συγκέντρωση άλατος.

Όταν απορροφάται ηλιακή ακτινοβολία, η «κλίση» της πυκνότητας αποτρέπει τη θερμότητα από τα κατώτερα στρώματα να ανέβει προς τα ανώτερα λόγω συναγωγής και συνεπώς να εγκαταλείψει τη λίμνη. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία στον πυθμένα της λίμνης θα ανέλθει σε πάνω από 90°C με έναν εκτιμώμενο βαθμό απόδοσης ηλιακής προς ηλεκτρική ενέργεια της τάξης του 2%, ενώ η θερμοκρασία στην επιφάνεια της λίμνης είναι συνήθως γύρω στους 30°C. Η θερμότητα που αποθηκεύεται στον αλατώδη πυθμένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως η θέρμανση νερού για βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή για να οδηγήσει ένα στρόβιλο προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι λίμνες εξάτμισης άλατος μπορούν να απομακρύνουν διαλυμένα στερεά από ρεύματα αποβλήτων ή να προμηθεύσουν αλάτι από θαλασσινό νερό (αλυκές). Μια λίμνη εξάτμισης αποτελείται από ένα ρηχό στρώμα νερού το οποίο μπορεί να εξατμίζεται με ρυθμό 3-6mm τη μέρα. Η χρήση λιμνών εξάτμισης για την απόκτηση άλατος από το θαλασσινό νερό είναι μια από τις παλαιότερες εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας, ενώ οι λίμνες εξάτμισης παραμένουν μια από τις πιο εκτεταμένες εμπορικές εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα.

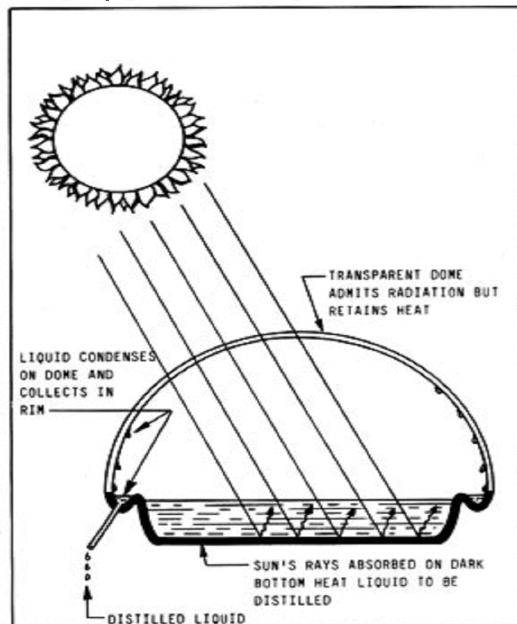
Ο «πορώδης» συλλέκτης αέρα είναι ένας διάτρητος τοίχος στην κατεύθυνση του ηλίου που πρωτοπαρουσιάστηκε στην αρχή της δεκαετίας του 1990. Ο τοίχος απορροφά ηλιακή ακτινοβολία και προθερμαίνει τον αέρα έως και 22°C, καθώς αυτός εισέρχεται στο σύστημα εξαερισμού. Αυτά τα συστήματα έχουν μεγάλη απόδοση (έως και 80%) και η απόσβεσή τους μπορεί να γίνει σε τρία έως δώδεκα χρόνια ως αντιστάθμιση του κόστους θέρμανσης. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτής της τεχνολογίας αποτελεί ο συλλέκτης επιφάνειας 860 m² που βρίσκεται στην Κόστα Ρίκα για ξήρανση σπόρων καφέ.



Σχήμα 2.7 "Πορώδης" συλλέκτης αέρα

2.9.4 Απόσταξη και απολύμανση.

Οι κύριοι τύποι ηλιακών αποστακτήρων είναι ο κωνοειδής, ο κιβωτιοειδής και ο αποστακτήρας σε κοιλότητα του εδάφους. Στους κωνοειδείς αποστακτήρες, το ακάθαρτο υγρό εισέρχεται στο δοχείο, όπου εξατμίζεται λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και συγκρατείται από καθαρό πλαστικό. Ελεύθερος από στερεά, είτε σε αιώρηση ή διάλυση, ο ατμός συμπυκνώνεται στην κορυφή και συλλέγεται από το πλάι της διάταξης.



Σχήμα 2.8 Ηλιακός αποστακτήρας εξελιγμένης μορφής

Η ηλιακή παστερίωση νερού χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για την απολύμανση νερού, διατηρώντας το σε θερμοκρασία άνω των 60°C για συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Μια επιπλέον μέθοδος απολύμανσης νερού είναι γνωστή με τα αρχικά SODIS (solar disinfection). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ένα καθαρό δοχείο

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

πληρώνεται κατά τα τρία τέταρτά του με νερό, το οποίο αναταράσσεται και τοποθετείται κλειστό στον ήλιο. Η αναταραχή οξυγονώνει κι έτσι εκκινεί η απολύμανση. Καθώς το δοχείο βρίσκεται υπό το ηλιακό φως, η υπερϊώδης ακτινοβολία κάνει το διαλυμένο οξυγόνο ιδιαίτερα ενεργό. Η ενεργός μορφή του οξυγόνου αποτρέπει τον πολλαπλασιασμό των μικροοργανισμών και επίσης αδρανοποιεί αρκετούς από αυτούς άμεσα. Ένα μέρος των παθογόνων μικροοργανισμών εξοντώνεται και εξ' αιτίας της θερμοκρασίας που επικρατεί στο δοχείο. Η μέθοδος SODIS δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο η παστερίωση και η ολοκλήρωση της απολύμανσης δεν είναι εύκολα μετρήσιμη.

2.9.5 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από τον ήλιο με διάφορους τρόπους. Τα φωτοβολταϊκά αναπτύχθηκαν αρχικά για μικρού και μέσου μεγέθους εφαρμογές, όμως τα τελευταία χρόνια έχουν χτιστεί εργοστάσια που παράγουν αρκετά μεγάλα.

Το ηλιακό ή φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι μια συσκευή που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρισμό με τη χρήση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την ύλη μετά την απορρόφηση ενέργειας από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα πρώτα ηλιακά κύτταρα κατασκευάστηκαν το 1883 από σελήνιο, ενώ κατά τη δεκαετία του 1940 άρχισε να χρησιμοποιείται ως υλικό κατασκευής το πυρίτιο.

Η συνολική εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ήταν περίπου 6000 MWp στο τέλος του 2006, ενώ υπήρξε αύξηση στα 9000MWp έως το τέλος του 2007. Με τις διάφορες εγκυκλίους που δίνουν κίνητρα φοροαπαλλαγής και επιδότησης, οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών αποσβένονται σε πέντε με δέκα χρόνια σε αρκετά μέρη του κόσμου. Τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα αποτελούν αυτή τη στιγμή το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς. Παρότι η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαρτάται ισχυρά από τις τοπικές συνθήκες και απαιτήσεις, πολλές χώρες αναπτύσσουν ενδιαφέρον για τα φωτοβολταϊκά ως μια από τις επιλογές τους για ανανεώσιμη παροχή ενέργειας.

2.9.6 Φωτοχημικές αντιδράσεις.

Οι ηλιακές χημικές διεργασίες χρησιμοποιούν φως και θερμότητα από τον ήλιο για την οδήγηση χημικών αντιδράσεων. Αυτές οι διεργασίες αντισταθμίζουν την ενέργεια που διαφορετικά θα απαιτείτο από κάποια άλλη πηγή, δεν προκαλούν ρύπανση και αν αναστραφούν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέθοδοι για αποθήκευση ενέργειας. Η ηλιακή χημική τεχνολογία βρίσκεται επί του παρόντος σε πειραματικό στάδιο, ενώ εστιάζει ιδιαίτερος στη ηλιακή θερμική τεχνολογία διαχωρισμού υλικών.

➤ Το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) αποσυντίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες (1200-1750°C). Ο παραγόμενος καθαρός ψευδάργυρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για εμπορικούς σκοπούς ή με περαιτέρω αντίδραση με νερό θερμοκρασίας 350 °C προς παραγωγή ZnO και υδρογόνου.

Κεφάλαιο 2^ο: Η ηλιακή ακτινοβολία.

- Ο ηλιακός κλίβανος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υψηλής καθαρότητας ασβέστη με παράλληλη μείωση 20-40% των εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την παραγωγή τσιμέντου. Ένας πρωτότυπος ηλιακός κλίβανος ισχύος 10kWth στο ινστιτούτο Paul Scherrer παρήγαγε ασβέστη με ρυθμό 64,2 γραμμάρια το λεπτό με βαθμό απόδοσης ηλιακής σε χημική ενέργεια της τάξης του 38%.
- Το νερό μπορεί να διαχωριστεί σε υψηλές θερμοκρασίες (2300-2600 °C). Αυτή η διαδικασία είναι αρκετά περιορισμένη λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητάς της και του χαμηλού βαθμού απόδοσης ηλιακής ενέργειας προς παραγόμενο υδρογόνο (1-2%).

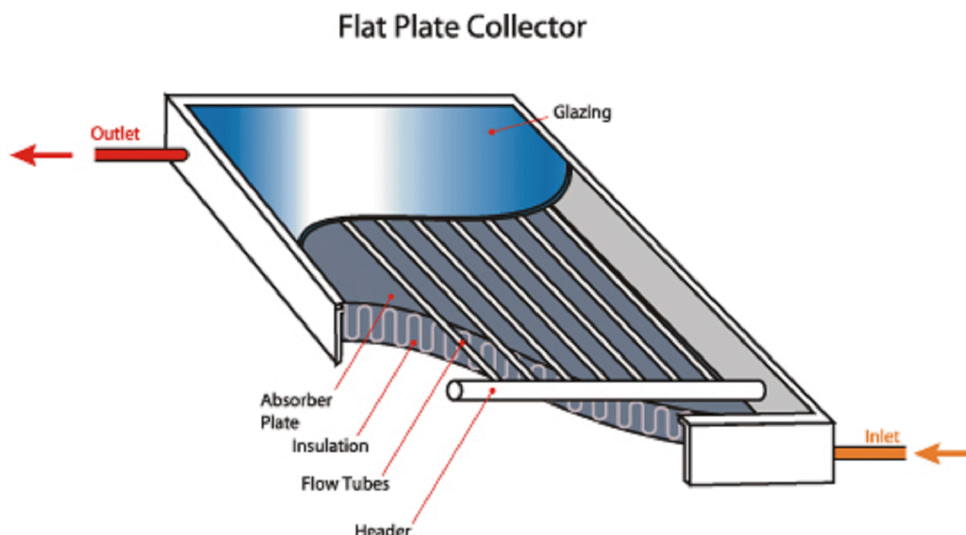
3.1 Επίπεδοι συλλέκτες.

Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι συσκευές που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε εύχρηστη θερμική. Ειδικά στους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες καμιά οπτική συγκέντρωση των ηλιακών ακτίνων δεν γίνεται και η ηλιακή ενέργεια - άμεση, έμμεση και ανακλώμενη - απορροφάται κατ' ευθείαν και μετατρέπεται σε θερμότητα στην απορροφητική επιφάνεια.

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, πέρα από τους γνωστούς τύπους των ηλιακών συλλεκτών, και οι παθητικοί ηλιακοί τοίχοι ή οροφές μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούν ειδικές περιπτώσεις επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.

Ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Την καλύπτουσα διαφανή επιφάνεια ή το διαφανές κάλυμμα, που μπορεί να αποτελείται από ένα, δύο ή και περισσότερες διαφανείς πλάκες από γυαλί ή πλαστικό.
- Την απορροφητική πλάκα που απορροφά την ηλιακή ενέργεια και είναι μια ειδικά επεξεργασμένη μεταλλική επιφάνεια ή βαμμένη με ειδική βαφή.
- Τους σωλήνες ή τους αεραγωγούς που είναι σε επαφή με την απορροφητική πλάκα μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το ρευστό που απάγει τη θερμική ενέργεια από την απορροφητική πλάκα.
- Την μόνωση στην οπίσθια και στις πλάγιες πλευρές του συλλέκτη.
- Το περίβλημα που συνήθως είναι μεταλλικό ή πλαστικό, ενοποιεί την κατασκευή και προστατεύει το συλλέκτη από τις συνθήκες του περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.1 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

Ανάλογα με το ρευστό που απάγει την θερμότητα διακρίνουμε δύο ειδών συλλέκτες: συλλέκτες αερίου, στους οποίους το ρευστό που απάγει τη

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

θερμότητα είναι συνήθως αέρας αλλά μπορεί να είναι και οποιοδήποτε άλλο αέριο ή συλλέκτες υγρού, στους οποίους το ρευστό είναι συνήθως νερό με διάφορα πρόσθετα αλλά μπορεί να είναι λάδι ή άλλα υγρά.

Η λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη και ιδιαίτερα των δύο στοιχείων του, δηλαδή της καλύπτουσας και της απορροφητικής επιφάνειας, στηρίζεται στο φαινόμενο κατά το οποίο, όταν οποιοδήποτε υλικό εκτεθεί σε ηλιακό φως (ή σε φως άλλης πηγής), ένα μέρος του φωτός ανακλάται, ένα μέρος του απορροφάται και τέλος ένα μέρος του μπορεί να περάσει μέσα από το υλικό, εφόσον αυτό είναι διαφανές. Αν λοιπόν τ είναι το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που το υλικό αφήνει να περάσει ή συντελεστής διαπερατότητας, ρ το αντίστοιχο ποσοστό που ανακλάται ή συντελεστής ανάκλασης και τέλος α το αντίστοιχο ποσοστό που απορροφάται ή συντελεστής απορροφητικότητας τότε ισχύει $\tau + \rho + \alpha = 1$

Η εξίσωση ισχύει για οποιοδήποτε μήκος κύματος, τα ποσοστά όμως τ , ρ , α διαφέρουν για κάθε μήκος κύματος και για κάθε υλικό. Ακριβώς αυτή η διαφορά της συμπεριφοράς των υλικών στα διάφορα μήκη κύματος βοηθά τον ηλιακό συλλέκτη να παγιδεύει μεγάλα ποσοστά της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

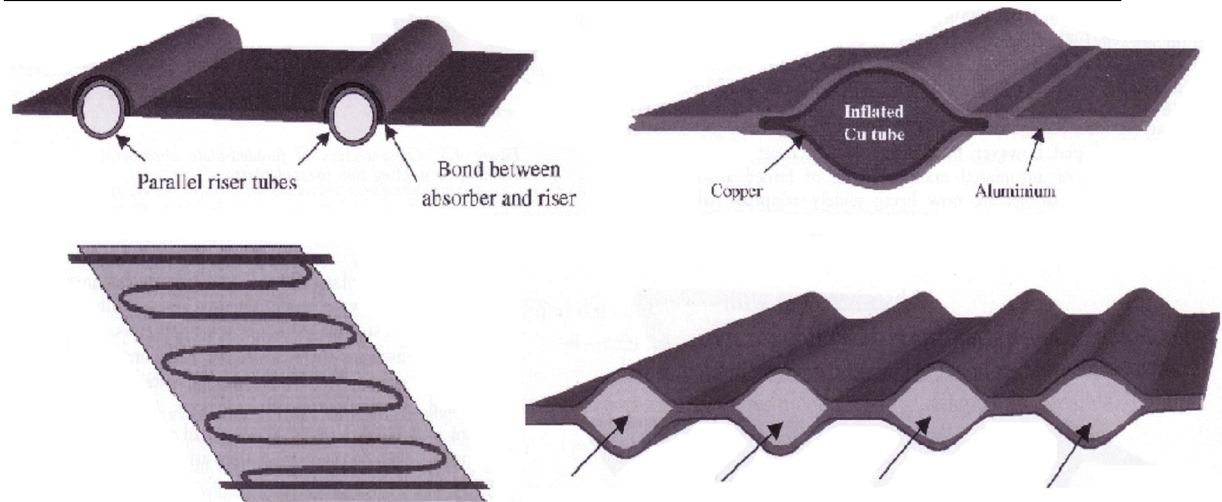
Οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν τη μεγαλύτερη επιφάνεια απορρόφησης θερμότητας, αλλά και τις περισσότερες θερμικές απώλειες από όλους τους συλλέκτες. Ο παράγοντας αυτός περιορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας για τους επίπεδους συλλέκτες σε λιγότερο από 80°C (για βαθμό απόδοσης >25%), ωστόσο με διπλό κάλυμμα, μείωση της συναγωγής και μόνωση κενού, υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας είναι δυνατές.

Για να ποσοτικοποιηθεί η απόδοση ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη θα πρέπει να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμικών απωλειών. Η ικανότητα ενός συλλέκτη να απορροφά ηλιακή ακτινοβολία καθορίζεται από τις ιδιότητες του καλύμματος, των ανακλαστικών επιφανειών και της απορροφητικής πλάκας.

3.1.1 Η απορροφητική πλάκα και οι σωληνώσεις του εργαζόμενου μέσου.

Οι μεταλλικές απορροφητικές πλάκες χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές θέρμανσης νερού και οι πλαστικοί απορροφητές για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών (όπως η θέρμανση πισινών). Οι μεταλλικές απορροφητικές πλάκες κατασκευάζονται συνήθως από χαλκό, αλουμίνιο ή ατσάλι. Η διαδρομές του εργαζόμενου μέσου στην απορροφητική πλάκα μπορούν να σχηματιστούν από:

- ίσιους παράλληλους σωλήνες κολλημένους σε μια μεγάλη επίπεδη πλάκα,
- σωλήνες και λωρίδες πτερυγίων,
- έναν οφιοειδή σωλήνα κολλημένο σε μια μεγάλη επίπεδη πλάκα,
- συγκόλληση δύο πλακών ή πλημμυρισμένο «απορροφητή».



Σχήμα 3.2 Τύποι απορροφητικών πλακών: (Άνω) (a) Με παράλληλους σωλήνες (b) Με σωλήνες και λωρίδες πτερυγίων. (Κάτω) (a) Με οφιοειδή σωλήνα (b) Απορροφητής «πλημμυρισμένης πλάκας».

Για να μεγιστοποιηθεί η συλλεγόμενη ενέργεια, ο απορροφητής του συλλέκτη θα πρέπει να έχει ένα στρώμα επικάλυψης με υψηλό συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά μικρό συντελεστή εκπομπής. Αυτό το στρώμα αναφέρεται ως «επιλεκτική επιφάνεια». Οι πιο συνηθισμένοι τύποι στρωμάτων επικάλυψης του απορροφητή, με σειρά αποδοτικότητας, είναι η μαύρη μπογιά, το οξείδιο του χαλκού, το μαύρο χρώμιο και τα στρώματα κεραμικών μιγμάτων. Οι επιλεκτικές επιφάνειες συνήθως αποτελούνται από μια λεπτή στρώση μαύρου μεταλλικού οξειδίου επάνω σε ένα μεταλλικό «φωτεινό» υπόστρωμα. Μια επιλεκτική επιφάνεια δίνει σημαντικά υψηλότερο βαθμό απόδοσης για θερμοκρασίες λειτουργίας περισσότερων από 40°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ωστόσο σε περιοχές με μεγάλη ηλιακή ακτινοβολία ένας απορροφητής με επιλεκτική επιφάνεια θα μπορούσε να παράγει υπερβολικές θερμοκρασίες. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι επιλεκτικών επιστρώσεων, όμως το μαύρο χρώμιο είναι αυτό που χρησιμοποιείται ευρέως.

3.1.2 Το κάλυμμα.

Το κάλυμμα ενός επίπεδου συλλέκτη θα πρέπει να παρουσιάζει υψηλή διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία. Το κοινό γυαλί έχει υψηλή αναλογία σιδήρου και συνεπώς δεν είναι κατάλληλο για χρήση σε ηλιακούς συλλέκτες. Το σκληρυμένο γυαλί χαμηλής αναλογίας σιδήρου χρησιμοποιείται κυρίως στους επίπεδους συλλέκτες, διότι αυξάνει σημαντικά τον οπτικό βαθμό απόδοσης του συλλέκτη. Τα πλαστικά έχουν επίσης υψηλή διαπερατότητα και είναι κατάλληλα για καλύμματα συλλεκτών, παρόλα αυτά, τα περισσότερα πλαστικά επιτρέπουν στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους που εκπέμπεται από τον απορροφητή να τα διαπεράσει και άρα δεν παρέχουν την ίδια θερμική μόνωση με το γυαλί.

Το φορτίο λόγω των ανέμων και της κατασκευής στο κάλυμμα περιορίζει την επιφάνεια των συλλεκτών. Οι συλλέκτες με γυάλινο κάλυμμα συνήθως

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

περιορίζονται σε επιφάνειες έως 3m² λόγω του ίδιου βάρους, ενώ έχουν κατασκευαστεί συλλέκτες με ακρυλικά καλύμματα επιφάνειας έως και 16m² (με ενδιάμεσα στηρίγματα). Η απώλεια θερμότητας λόγω συναγωγής παρουσιάζει μικρή εξάρτηση από το χώρο ανάμεσα στον απορροφητή και το κάλυμμα, για εύρος 15-40 mm. Η συνήθης απόσταση ανάμεσα στον απορροφητή και το κάλυμμα κυμαίνεται από 15 έως 25 mm.

3.1.3 Η μόνωση.

Η οπίσθια μόνωση ενός επίπεδου συλλέκτη συνήθως αποτελείται από ένα ανακλαστικό έλασμα και ένα στρώμα από fibreglass ή κάποιο άλλο στρώμα ανόργανων ινών το οποίο δε θα εξαχνωθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Fibreglass υψηλής αντοχής έχουν δοκιμαστεί πειραματικά σε θερμοκρασίες έως 180°C. Οι ίνες πολυεστέρα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο εξ' αιτίας των ζητημάτων υγείας και ασφάλειας, όσον αφορά το fibreglass, κατά τη συναρμολόγηση του συλλέκτη. Η μόνωση με αφρό δε χρησιμοποιείται ευρέως, λόγω προβλημάτων διαστολής σε συνθήκες αδράνειας (μηδενικός βαθμός απόδοσης).

3.2 Διάφοροι τύποι επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.

Τα σχέδια των ηλιακών συλλεκτών διαφοροποιούνται ανάλογα με το μέσο μεταφοράς θερμότητας και τον τρόπο με τον οποίο απορροφάται η ηλιακή ακτινοβολία. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο υπάρχουν τρεις γενικές κατηγορίες επίπεδων συλλεκτών:

- «Συμπαγείς» συλλέκτες υγρού.
- Συλλέκτες υγρού με διάφανη επιφάνεια.
- Συλλέκτες αέρα με διάφανη επιφάνεια.

Εντός αυτών των τριών κατηγοριών υπάρχουν διάφορες παραλλαγές στο σχεδιασμό των συλλεκτών.

3.2.1 «Συμπαγείς» συλλέκτες υγρού.

Το βασικό σχέδιο, το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως στην πιο απλή του μορφή, αποτελείται από μια απορροφητική πλάκα με το αντίστοιχο σύστημα σωληνώσεων για το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Το σχέδιο αυτό συλλέκτη αναφέρεται απλοϊκά και ως «απορροφητής» και χρησιμοποιείται κυρίως για τη θέρμανση εξωτερικών πισινών, όπου οι απαιτούμενες θερμοκρασίες είναι λίγο μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμομόνωση από το περιβάλλον δεν είναι απαραίτητη, επειδή δεν υπάρχει ιδιαίτερη θερμοκρασιακή διαφορά που θα μπορούσε να προκαλέσει αυξημένες θερμικές απώλειες. Επομένως, το διάφανο κάλυμμα και η μόνωση δεν αποτελούν στοιχεία του συγκεκριμένου συλλέκτη και οι μόνες οπτικές απώλειες οφείλονται στο συντελεστή ανάκλασης του απορροφητή ρ_{abs} . Το υλικό που χρησιμοποιείται κυρίως για τον απορροφητή ονομάζεται EPDM (ethylene-propylene-dien-monomers) το οποίο ανθίσταται στην υπεριώδη

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

ακτινοβολία και σε θερμοκρασίες έως 150°C, παρότι τόσο υψηλές θερμοκρασίες δεν λαμβάνουν χώρα εξ' αιτίας της έλλειψης μόνωσης. Αυτό το είδος απορροφητή είναι ιδιαίτερα φθηνό κι έχει υψηλή απόδοση.

3.2.2 Συλλέκτες υγρού με διάφανη επιφάνεια

Εάν απαιτούνται θερμοκρασίες αρκετά υψηλότερες από αυτή του περιβάλλοντος, τότε χρησιμοποιούνται κυρίως επίπεδοι συλλέκτες με διάφανη επιφάνεια. Οι συλλέκτες αυτοί κατασκευάζονται με ένα ή περισσότερα διάφανα καλύμματα. Για να μειωθούν επιπλέον οι απώλειες λόγω συναγωγής από την απορροφητική πλάκα έως το κάλυμμα, ο χώρος μεταξύ τους μπορεί να εκκενωθεί με αποτέλεσμα ο συλλέκτης να μετατρέπεται πλέον σε επίπεδο συλλέκτη κενού. Λόγω της διαφοράς πίεσης, το κάλυμμα θα πρέπει να στηρίζεται εσωτερικά σε αυτή την περίπτωση. Η θερμικές απώλειες από τον πυθμένα και την πλευρική επιφάνεια του συλλέκτη αποφεύγονται με τη χρήση μονωτικού υλικού.

Το σύστημα σωληνώσεων του συλλέκτη μπορεί να σχεδιασθεί είτε ως ένας οφιοειδής σωλήνας που καλύπτει όλη την απορροφητική επιφάνεια ή πολλοί παράλληλοι σωλήνες που συνδέονται με ένα διανομέα και ένα συλλέκτη επί της απορροφητικής πλάκας. Στην περίπτωση των παραλλήλων σωληνών η παροχή μάζας είναι μεγάλη, αλλά η θερμοκρασιακή ανύψωση είναι μικρή. Αντιθέτως, στην περίπτωση του ενός σωλήνα έχουμε μικρή παροχή μάζας και μεγάλη θερμοκρασιακή ανύψωση.

Οι ηλιακοί συλλέκτες κατασκευάζονται σε μονάδες επιφάνειας 1-16 m² και ως υλικά για το περίβλημά τους χρησιμοποιούνται το ατσάλι ή το αλουμίνιο, έτσι ώστε να είναι ανθεκτικοί σε όλες τις καιρικές συνθήκες.

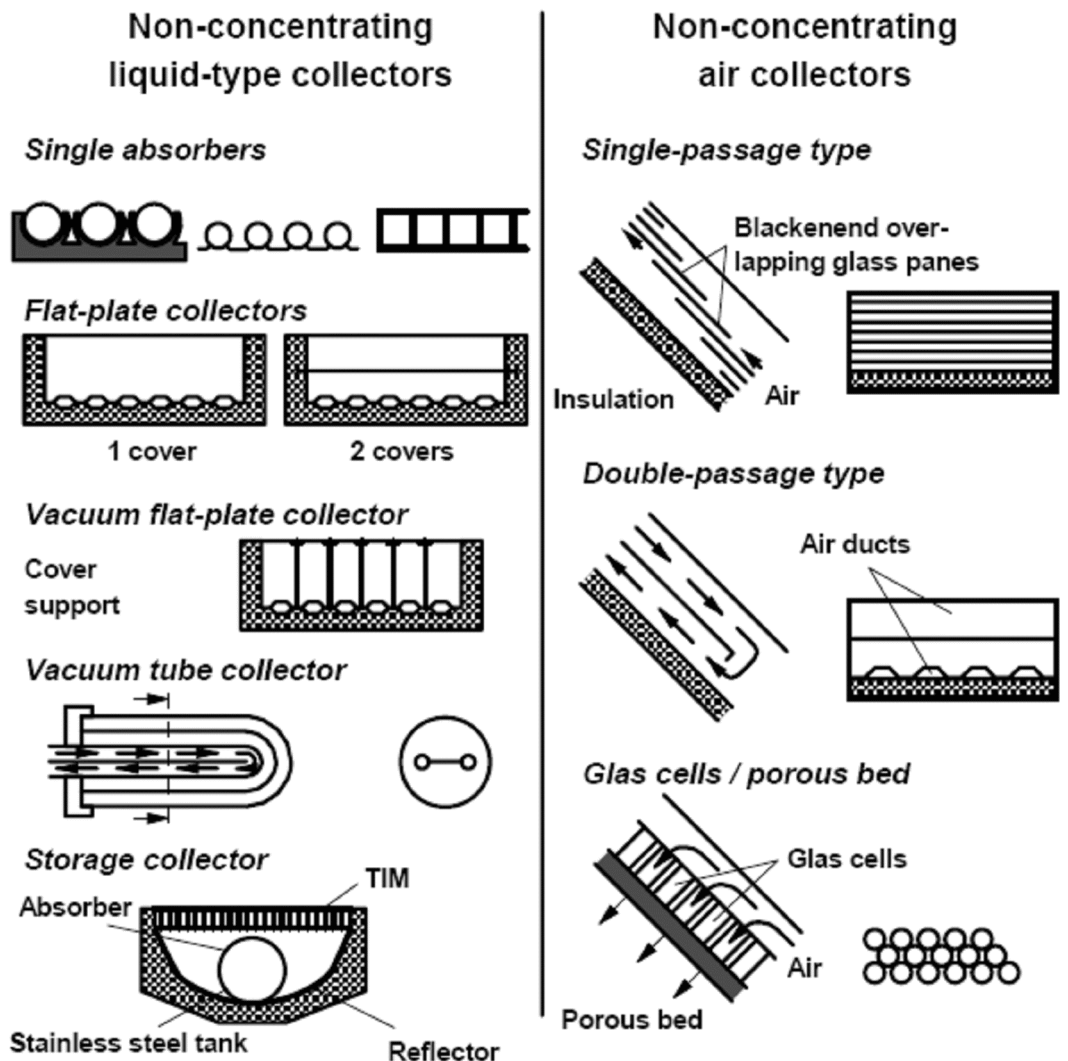
3.2.3 Ηλιακοί συλλέκτες αποθήκευσης.

Ο ηλιακός συλλέκτης αποθήκευσης αποτελεί έναν ειδικό τύπο επίπεδου συλλέκτη. Ο τύπος αυτός συνδυάζει το συλλέκτη και το σύστημα συσσώρευσης θερμότητας σε μια συσκευή. Μια δεξαμενή ανθεκτική στην πίεση τοποθετείται στο κέντρο ενός συγκεντρωτικού καθρέπτη. Η επιφάνεια της δεξαμενής είναι συνήθως βαμμένη με μαύρο χρώμα. Ο συλλέκτης αποθήκευσης συνδέεται απευθείας με τους σωλήνες ζεστού και κρύου νερού. Η ακτινοβολία του συλλέκτη αντανακλάται επάνω στη δεξαμενή από τον καθρέπτη κι έτσι το νερό που ρέει στη δεξαμενή θερμαίνεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα. Πλεονεκτήματα αυτού του σχεδιασμού αποτελούν ο μικρός αριθμός συνιστωσών και η συμπαγής κατασκευή. Ένα σημαντικό μειονέκτημα όμως αποτελούν οι αυξημένες θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής με αποτέλεσμα την αξιοσημείωτη πτώση της θερμοκρασίας εντός της δεξαμενής κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε περιπτώσεις κακοκαιρίας. Επιπροσθέτως, δεδομένου ότι στο συλλέκτη ρέει συνηθισμένο νερό, υπάρχει ο κίνδυνος σχηματισμού πάγου λόγω των κλιματικών συνθηκών στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

3.2.4 Ηλιακοί συλλέκτες αέρα.

Στο συγκεκριμένο τύπο συλλέκτη, η επιφάνεια επαφής ανάμεσα στην απορροφητική πλάκα και το θερμαινόμενο αέρα θα πρέπει να είναι μεγάλη λόγω του μικρού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Αυτό εξασφαλίζεται για παράδειγμα μέσω συστημάτων πολλαπλών περασμάτων ή μέσω διάτρητων απορροφητών.

Δεδομένου ότι δεν υφίστανται προβλήματα όπως ο πάγος, η υπερθέρμανση και η διάβρωση, οι συλλέκτες αέρα έχουν πιο απλή κατασκευή από τους αντίστοιχους υγρού. Ακόμη και η διαρροή εργαζόμενου μέσου παρουσιάζει συγκριτικά μικρότερες επιπλοκές. Βασικά μειονεκτήματα αποτελούν το μέγεθος των καναλιών ροής και η ισχύς που απαιτείται από τους ανεμιστήρες.



Σχήμα 3.3 Διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών υγρού και αέρα. (TIM: Transparent Insulation Material- Διαφανές υλικό Μόνωσης)

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

Η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται σε επίπεδο ηλιακό συλλέκτη με διαφανή επιφάνεια.

3.3 Συντελεστής θερμικών απωλειών επίπεδου συλλέκτη.

Ο συλλέκτης χάνει θερμότητα από τον πυθμένα του, από την πλευρική επιφάνειά του, αλλά κυρίως από τη διαφανή πλάκα, οι απώλειες από την οποία είναι με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Οι συνολικές θερμικές απώλειες του συλλέκτη συνεπώς, μπορούν να εκφραστούν ως το γινόμενο ενός συντελεστή απωλειών U_L ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας του συλλέκτη επί τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της απορροφητικής πλάκας T_p και του περιβάλλοντος T_a , δηλαδή ισχύει

$$q_L = U_L (T_p - T_a) \quad (3.1)$$

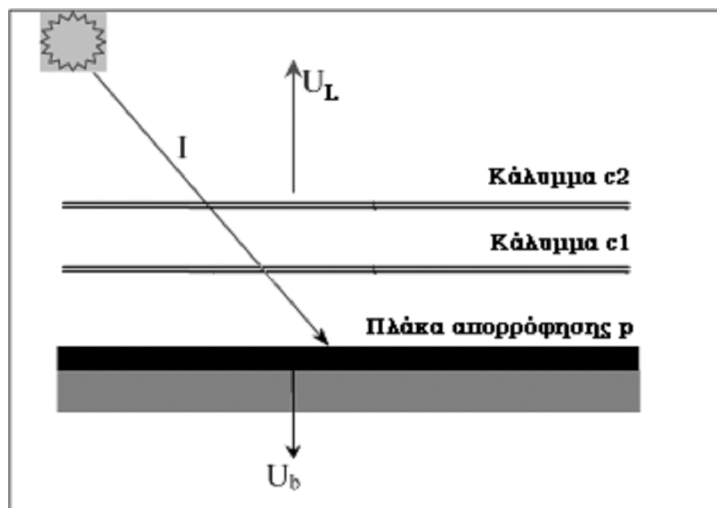
Ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών περιλαμβάνει τις τρεις συνιστώσες που αναφέρθηκαν, δηλαδή ισχύει

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (3.2)$$

όπου U_t : ο συντελεστής θερμικών απωλειών της διαφανούς πλάκας

U_b : ο συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένα

U_e : ο συντελεστής θερμικών απωλειών της πλευρικής επιφάνειας.



Σχήμα 3.4 Θερμικές απώλειες επίπεδου συλλέκτη με δύο καλύμματα.

3.3.1 Συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής.

Οι θερμικές απώλειες κορυφής, q_t , δηλαδή οι απώλειες δια συναγωγής και ακτινοβολίας από το κάλυμμα κορυφής προς το περιβάλλον (βλ. σχήμα 3.4), είναι ίσες με τη μεταφερόμενη ισχύ δια συναγωγής και ακτινοβολίας από την απορροφητική πλάκα θερμοκρασίας T_p μέχρι το πρώτο κάλυμμα

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

θερμοκρασίας T_{cl} , ισχύει δηλαδή (σύμφωνα με τη θεωρία θερμικών κυκλωμάτων)

$$q_t = h_{p-cl}(T_p - T_{cl}) + \frac{\sigma(T_p^4 - T_{cl}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} = (h_{p-cl} + h_{r,p-cl})(T_p - T_{cl}) = \frac{1}{R_3}(T_p - T_{cl}) \quad (3.3)$$

όπου με το γράμμα h και τον αντίστοιχο δείκτη συμβολίζεται ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δια συναγωγής μεταξύ των παραλλήλων επιφανειών, ενώ με h_r , συμβολίζονται οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας δι' ακτινοβολίας μεταξύ των παραλλήλων επιφανειών. Ακόμη σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann ε_p , ε_c οι συντελεστές εκπομπής της απορροφητικής πλάκας και του καλύμματος αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τη σχέση (3.3) η θερμική αντίσταση R_3 μεταξύ της απορροφητικής πλάκας και του πρώτου καλύμματος είναι

$$R_3 = \frac{1}{h_{p-cl} + h_{r,p-cl}} \quad (3.4)$$

Ανάλογες εκφράσεις προκύπτουν για την αντίσταση R_2 , μεταξύ των δύο καλυμμάτων και την R_1 από το κάλυμμα κορυφής μέχρι το περιβάλλον, δηλαδή

$$R_2 = \frac{1}{h_{c1-c2} + h_{r,c1-c2}} \quad (3.5) \quad R_1 = \frac{1}{h_{c2-a} + h_{r,c2-a}} \quad (3.6)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για σύστημα δύο καλυμμάτων, ο συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής από την απορροφητική πλάκα θερμοκρασίας T_p έως το περιβάλλον θερμοκρασίας T_a είναι

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.7)$$

και οι αντίστοιχες απώλειες κορυφής

$$q_t = U_t(T_p - T_a) \quad (3.8)$$

3.3.2 Συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένα.

Όσον αφορά τον πυθμένα του συλλέκτη, εμφανίζονται η θερμική αντίσταση της μόνωσης και η θερμική αντίσταση συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Δεδομένου, ότι η θερμική αντίσταση της μόνωσης είναι πολύ μεγαλύτερη, θεωρούμε προσεγγιστικά ότι όλη η αντίσταση στη ροή θερμότητας οφείλεται στη μόνωση. Συνεπώς ο συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένα είναι:

$$U_b = \frac{k}{L} \quad (3.9)$$

όπου k και L είναι η θερμική αγωγιμότητα και το πάχος της μόνωσης αντίστοιχα.

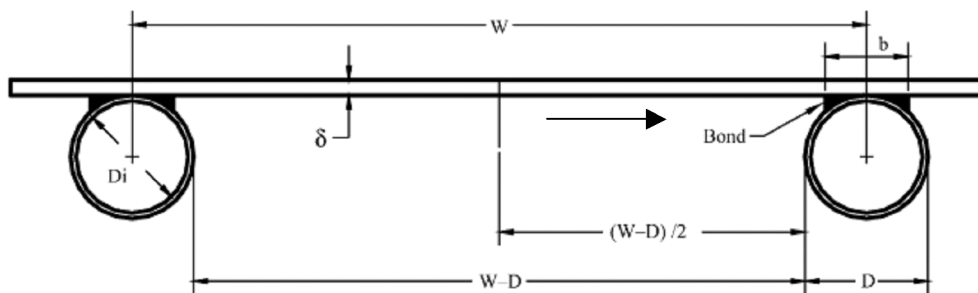
3.3.3 Συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών.

Ομοίως, θεωρούμε προσεγγιστικά ότι όλη η αντίσταση στη ροή θερμότητας οφείλεται στη μόνωση. Συνεπώς ο συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών ανηγμένος στην πλευρική επιφάνεια A_e , είναι $U_e' = k/L_e$, όπου L_e το πάχος της πλευρικής μόνωσης. Αν ο U_e' αναχθεί στην επιφάνεια του συλλέκτη A_a , προκύπτει:

$$U_e = U_e' \frac{A_e}{A_a} = \frac{k}{L_e} \frac{A_e}{A_a} \quad (3.10)$$

3.4 Παράγων απόδοσης F' .

Ο παράγοντας απόδοσης αναφέρεται στη θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του ελάσματος του απορροφητή επάνω στο οποίο είναι κολλημένοι οι σωλήνες. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του ελάσματος μεταξύ των σωλήνων υποτίθεται αμελητέα μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος των σωλήνων. Δεδομένου ότι το έλασμα είναι καλός αγωγός της θερμότητας και το πάχος του είναι μικρό, υποτίθεται επιπλέον αμελητέα μεταβολή της θερμοκρασίας.



Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

Σχήμα 3.5 Απορροφητική πλάκα με σωλήνες σε τομή και ισολογισμός ενέργειας σε στοιχείο Δx .

Από τον απλουστευμένο ενεργειακό ισολογισμό σε ένα στοιχειώδες τμήμα του ελάσματος εύρους Δx προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση της οποίας η μορφή είναι γνωστή από τη θεωρία πτερυγίων (δηλαδή το τμήμα του ελάσματος ανάμεσα στους σωλήνες θεωρείται ως πτερύγιο):

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{U_L}{k\delta} \left(T - T_a - \frac{S}{U_L} \right) \quad (3.11)$$

όπου S : η απορροφόμενη ηλιακή ενέργεια

T : η θερμοκρασία του ελάσματος στη θέση x

k : η θερμική αγωγιμότητα του ελάσματος

Οι οριακές συνθήκες είναι:

- $\left(\frac{dT}{dx} \right) = 0$ για $x=0$ (μέσο της απόστασης ανάμεσα στους σωλήνες)
- $T=T_b$ για $x = \frac{W-D}{2}$

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης δίνει τη θερμοκρασιακή κατανομή στην απορροφητική πλάκα ανάμεσα στους σωλήνες κατά τη διεύθυνση x :

$$\frac{T - T_a - S/U_L}{T_b - T_a - S/U_L} = \frac{\cosh(mx)}{\cosh[m(W-D)/2]} \quad (3.12)$$

όπου $m^2 = \frac{U_L}{k\delta}$

Η θερμική ισχύς ανά μονάδα μήκους του σωλήνα που οδεύει μέσω του ελάσματος στο σωλήνα υπολογίζεται από το νόμο του Fourier στη θέση $x=(W-D)/2$, δηλαδή:

$$\begin{aligned} q_R &= -k\delta \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=(W-D)/2} \\ &= (W-D) [S - U_L (T_b - T_a)] \frac{\tanh[m(W-D)/2]}{m(W-D)/2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

Χρησιμοποιώντας τον παράγοντα απόδοσης πτερυγίου F , η εξίσωση (3.13) γίνεται:

$$q_R = (W - D)F[S - U_L(T_b - T_a)] \quad (3.14)$$

$$\text{όπου } F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D/2)} \quad (3.15)$$

Η θερμική ισχύς που συλλέγεται κατ' ευθείαν επάνω από το σωλήνα συνεισφέρει επίσης στο θερμικό κέρδος. Η συνολική θερμική ισχύς που φθάνει στο σωλήνα ανά μονάδα μήκους αυτού είναι:

$$q_u' = [(W - D)F + D][S - U_L(T_b - T_a)] \quad (3.16)$$

Η θερμική ισχύς, η οποία μεταφέρεται στο ρευστό εντός του σωλήνα μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της θερμοκρασιακής διαφοράς $T_b - T_f$ και της θερμικής αντίστασης που μεσολαβεί, δηλαδή:

$$q_u' = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{\pi D_i h_{f,i} + \frac{\gamma}{bk_b}}} \quad (3.17)$$

όπου T_f : θερμοκρασία ρευστού εντός του σωλήνα

D_i : εσωτερική διάμετρος σωλήνα

$h_{f,i}$: συναγωγιμότητα ρευστού-εσωτερικής επιφάνειας σωλήνα

k_b, b, γ : θερμική αγωγιμότητα, εύρος και πάχος του συνδέσμου σωλήνα-ελάσματος αντιστοίχως.

Εάν από τις εξισώσεις (3.16) και (3.17) απαλειφθεί η θερμοκρασία T_b , προκύπτει

$$q_u' = WF'[S - U_L(T_f - T_a)] \quad (3.18)$$

όπου για τον παράγοντα απόδοσης F' ισχύει:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{\pi D_i h_{f,i}} + \frac{\gamma}{\beta k_b} \right]} \quad (3.19)$$

3.5 Παράγων θερμικής απολαβής F_R .

Καθώς το ρευστό κινείται μέσα στις σωληνώσεις της απορροφητικής πλάκας, η θερμοκρασία του ανυψώνεται και συνεπώς οι θερμικές απώλειες από τον απορροφητή αυξάνονται κατά τη διεύθυνση της ροής. Οι συνολικές θερμικές απώλειες συναρτώνται της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας κατά μήκος του συλλέκτη. Εάν υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή ανύψωση ανά πέρασμα από τον απορροφητή, η επίδραση των μεταβαλλόμενων θερμικών απωλειών κατά μήκος της πλάκας λαμβάνεται υπ' όψιν μέσω ενός νέου διορθωτικού παράγοντα, του παράγοντα θερμικής απολαβής F_R ο οποίος συμπεριλαμβάνει τον παράγοντα απόδοσης F' .

Ως παράγων θερμικής απολαβής λοιπόν ορίζεται ο λόγος της πραγματικά αποδιδόμενης θερμικής ισχύος προς τη θερμική ισχύ που θα αποδιδόταν εάν ολόκληρος ο απορροφητής είχε τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού T_i , δηλαδή:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{Q_u} = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A_a[S - U_L(T_i - T_a)]} \quad (3.20)$$

Η μορφή του παράγοντα θερμικής απολαβής που συμπεριλαμβάνει και τον παράγοντα απόδοσης αποδεικνύεται ότι είναι

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_a U_L} \left[1 - e^{-\frac{(A_a U_L F')}{(\dot{m}C_p)}} \right] \quad (3.21)$$

3.6 Απόδοση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.

Η λειτουργία ενός επίπεδου συλλέκτη επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες.

- Κατασκευή του συλλέκτη.
- Ηλιακοί παράγοντες: ένταση ακτινοβολίας, κλάσμα διάχυτης ακτινοβολίας, γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο συλλέκτη.
- Περιβαλλοντικές συνθήκες: θερμοκρασία περιβάλλοντος και ταχύτητα ανέμου.
- Συνθήκες λειτουργίας: θερμοκρασία εισερχόμενου ρευστού, παροχή μάζας ρευστού και θερμικές ιδιότητες, καθώς και κλίση και προσανατολισμός του συλλέκτη.

Η παραγόμενη ωφέλιμη θερμότητα δίνεται από τη σχέση

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (3.22)$$

όπου T_i : η θερμοκρασία του εισερχόμενου ρευστού

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

T_o : η θερμοκρασία του εξερχόμενου ρευστού
 \dot{m} : η παροχή μάζας του ρευστού μέσω του συλλέκτη

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a G_T} \quad (3.23)$$

όπου A_a : η επιφάνεια του συλλέκτη (m^2)
 G_T : η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2)

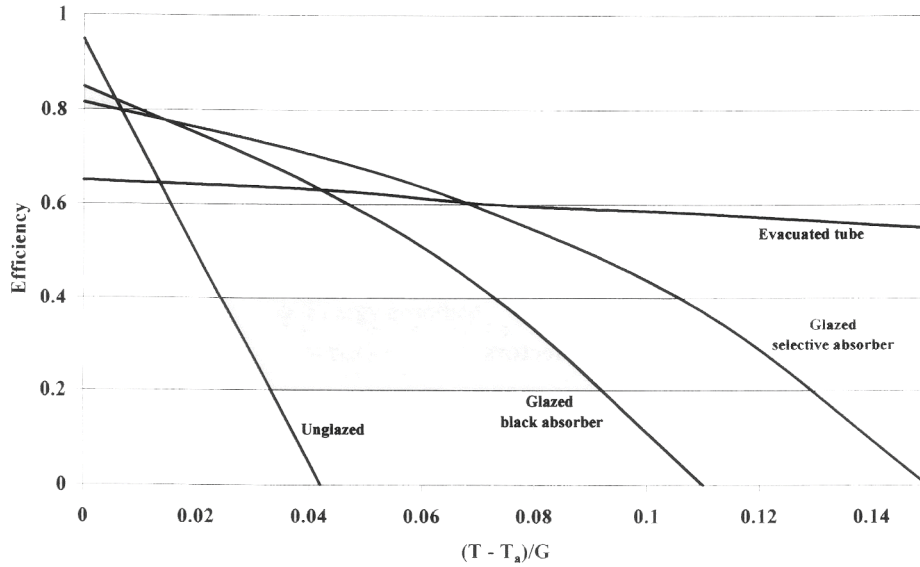
Ο βαθμός απόδοσης ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη είναι συνάρτηση των οπτικών ιδιοτήτων του καλύμματος και της απορροφητικής πλάκας και των απωλειών θερμότητας από τον απορροφητή. Τυπικές τιμές του βαθμού απόδοσης για διάφορα είδη ηλιακών συλλεκτών δίνονται στο σχήμα 3.6. Η διαφοροποίηση της απόδοσης σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη. Γραμμικά χαρακτηριστικά απόδοσης εκφράζονται από συναρτήσεις όπως η εξής:

$$\eta = \eta_o - \frac{U_L(\bar{T} - T_a)}{G_T} \quad (3.24)$$

ενώ για μη γραμμικά χαρακτηριστικά ισχύει

$$\eta = \eta_o - \frac{U_{L1}(\bar{T} - T_a)}{G_T} - \frac{U_{L2}(\bar{T} - T_a)^2}{G_T} \quad (3.25)$$

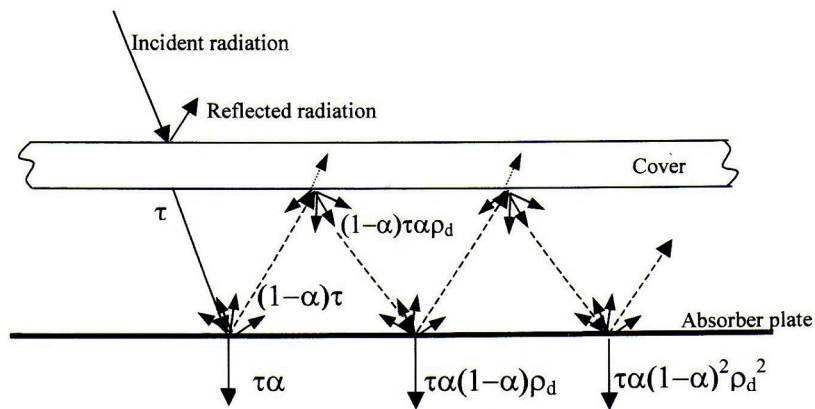
όπου η_o : ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη
 \bar{T} : η μέση θερμοκρασία του συλλέκτη



Σχήμα 3.6 Τυπικοί βαθμοί απόδοσης επιπέδων ηλιακών συλλεκτών.

3.6.1 Το γινόμενο διαπερατότητας του καλύμματος-απορροφητικότητας της πλάκας.

Όταν ένα κάλυμμα συνδυάζεται με μια απορροφητική πλάκα, η διαδρομή που ακολουθεί η (μοναδιαία) ακτινοβολία απεικονίζεται στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Διαδρομή ηλιακής ακτινοβολίας ανάμεσα σε κάλυμμα και απορροφητή.

Το κλάσμα της προσπίπτουσας ενέργειας που απορροφάται από την πλάκα είναι

$$\tau\alpha_{eff} = \tau\alpha \sum_{n=1}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad (3.26)$$

όπου α : η απορροφητικότητα της πλάκας
 τ : η διαπερατότητα του καλύμματος

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

ρ_d : η ανακλαστικότητα της οπίσθιας επιφάνειας του καλύμματος στη διάχυτη ακτινοβολία από την απορροφητική πλάκα.

Τυπικές τιμές του γινομένου $\tau\alpha_{\text{eff}}$ είναι 0,70-0,75 για συνηθισμένο γυαλί και 0,80-0,85 για γυαλί μικρής περιεκτικότητας σε σίδηρο.

3.6.2 Γραμμική ανάλυση της απόδοσης ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.

Υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας το ωφέλιμο θερμικό κέρδος ενός επίπεδου απορροφητή δίνεται από τη σχέση

$$Q_u = A_a [\tau\alpha G_T - U_L (T_p - T_\alpha)] \quad (3.27)$$

Δεδομένου ότι η θερμοκρασία του απορροφητή δεν είναι συνήθως γνωστή, είναι πιο κατάλληλο να συσχετίσουμε το ωφέλιμο θερμικό κέρδος με τη μέση θερμοκρασία ρευστού T_f :

$$Q_u = A_a F' [\tau\alpha G_T - U_L (T_f - T_\alpha)] \quad (3.28)$$

όπου F' είναι ο παράγων απόδοσης του συλλέκτη.

Εάν η ωφέλιμη ισχύς εκφράζεται σε σχέση με τη θερμοκρασία του εισερχόμενου ρευστού T_i , η σχέση γίνεται :

$$Q_u = A_a F_R [\tau\alpha G_T - U_L (T_i - T_\alpha)] \quad (3.29)$$

Οι δύο αντίστοιχες μορφές του βαθμού απόδοσης είναι

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a G_T} = F' \left[\tau\alpha - \frac{U_L (T_f - T_\alpha)}{G_T} \right] \quad (3.30)$$

και

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a G_T} = F_R \left[\tau\alpha - \frac{U_L (T_i - T_\alpha)}{G_T} \right] \quad (3.31)$$

3.7 Συγκεντρωτικοί συλλέκτες.

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες είναι συσκευές που συγκεντρώνουν με οπτικά μέσα την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια την απορροφούν και τη μετατρέπουν εύχρηστη θερμική. Στους συγκεντρωτικούς

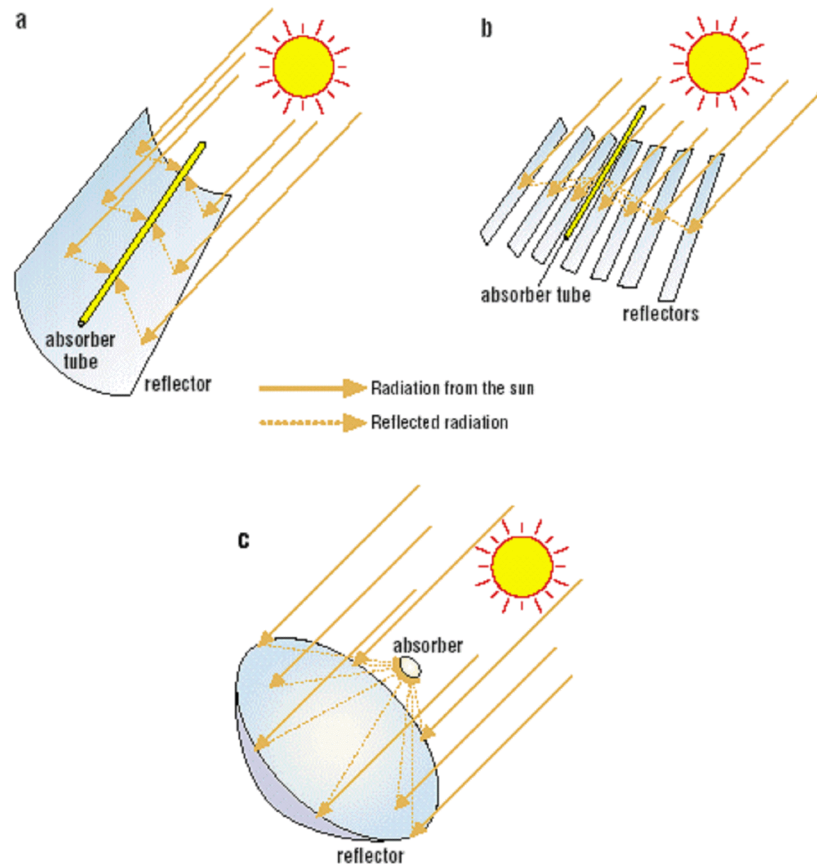
Κεφάλαιο 3ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

συλλέκτες, αντί της απορροφητικής επιφάνειας που διαθέτει ο επίπεδος συλλέκτης έχουμε:

- Το οπτικό σύστημα ή συγκεντρωτή, που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, τη συγκεντρώνει και την οδηγεί στον δέκτη.
- Το δέκτη που δέχεται και απορροφά την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και αποτελείται από την καλύπτουσα το δέκτη διαφανή πλάκα, την απορροφητική επιφάνεια και τη μόνωση.

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, μπορεί να έχουμε πληθώρα από διαφορετικούς τύπους συγκεντρωτικών συλλεκτών, ο κάθε ένας από τους οποίους απαιτεί τη δική του μαθηματική ανάλυση. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες διακρίνονται σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με τη διαμόρφωση του συγκεντρωτή και του δέκτη.

Έτσι ο συγκεντρωτής μπορεί να είναι καθρέπτης και να ανακλά την ηλιακή ακτινοβολία ή να είναι φακός και να τη διαθλά. Ακόμα ο συγκεντρωτής μπορεί να είναι επίπεδος, παραβολικός ή να αποτελείται από μια σειρά κινουμένων, ανάλογα με την πορεία του ηλίου επιπέδων, που να συγκεντρώνουν σε ορισμένο σημείο την ηλιακή ακτινοβολία, ή από σειρές ακίνητων επιπέδων που μπορούν να συγκεντρώσουν την μεσημβρινή ηλιακή ακτινοβολία του θερινού ή χειμερινού ηλιοστασίου ενός τόπου σε ένα σημείο. Μια άλλη διάκριση στηρίζεται στο είδος της επιφάνειας του συγκεντρωτή που μπορεί να είναι ευθυγενής καμπύλη επιφάνεια, οπότε και ο δέκτης είναι γραμμή, δηλαδή επιφάνεια δύο, μικρών σχετικά, διαστάσεων ή καμπυλογενής, οπότε και ο δέκτης είναι σημείο, δηλαδή στην πράξη μικρή σχετικά επιφάνεια τριών διαστάσεων. Ο δέκτης μπορεί να είναι σημείο, γραμμή ή επιφάνεια κυρτή ή κοίλη.



Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

Σχήμα 3.8 (a) Συγκεντρωτής με ευθριογενή καμπύλη επιφάνεια (παραβολικός) (b) Συγκεντρωτής με σειρά ακινητών επιπέδων (Fresnel) (c) Συγκεντρωτής με καμπυλογενή επιφάνεια.

Τέλος οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες είναι εικονικοί ή ανεικονικοί.

Εικονικοί λέγονται οι συλλέκτες που σχηματίζουν το είδωλο του ήλιου στο δέκτη, έστω και παραμορφωμένο. Δε θα πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός ότι ο ήλιος δεν είναι μια σημειακή φωτεινή πηγή, αλλά ένας δίσκος που φαίνεται υπό γωνία $0,54^\circ$ από τη γη πάνω στον ουράνιο θόλο.

Ανεικονικοί λέγονται οι συλλέκτες, στους οποίους η άμεση ηλιακή ακτινοβολία διαχέεται και απορροφάται τυχαία από το δέκτη, με συνέπεια κανένα είδωλο να μη σχηματίζεται.

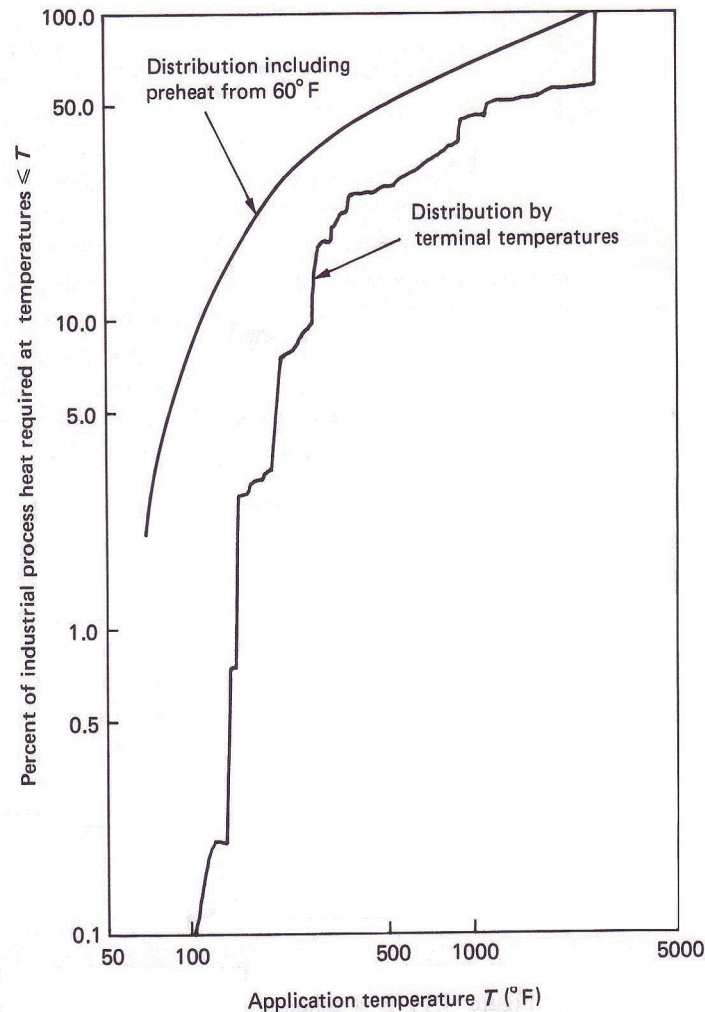
Η εξέλιξη των συγκεντρωτικών συλλεκτών είχε ως βασικό της σκοπό την επίτευξη θερμοκρασιών υψηλότερων από αυτές που επιτυγχάνονται στην απορροφητική επιφάνεια των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες παρουσιάζουν τρία κύρια πλεονεκτήματα:

- Συλλέγουν θερμότητα σε υψηλότερες θερμοκρασίες, με συνέπεια να είναι κατάλληλοι για πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών.
- Έχουν μειωμένες θερμικές απώλειες από την απορροφητική επιφάνεια, εξ' αιτίας της δραστηκής μείωσης της σε έκταση.
- Έχουν μειωμένο κόστος, δεδομένου ότι ένας ακριβός δέκτης αντικαθίσταται από μια λιγότερο ακριβή ανακλαστική ή διαθλαστική επιφάνεια.

Το μέτρο της μείωσης της απορροφητικής επιφάνειας δίνεται από το δείκτη συγκέντρωσης, που είναι ο λόγος της επιφάνειας του συγκεντρωτή προς την επιφάνεια του δέκτη, δηλαδή $CR = \frac{A_a}{A_r}$,

όπου A_a είναι η επιφάνεια του «παραθύρου» από το οποίο διέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία και A_r η επιφάνεια του δέκτη.

Δεδομένου ότι το άνω όριο της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας για τους συνηθισμένους επίπεδους συλλέκτες είναι της τάξης των 380 K, ο βαθμός απόδοσης Carnot περιορίζεται περίπου στο 20%. Για να έχουμε οικονομικό όφελος από μια θερμική μηχανή, είναι απαραίτητο να επιτευχθούν μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης χρησιμοποιώντας υψηλότερες θερμοκρασίες εργαζόμενου μέσου. Για παράδειγμα, εάν ένας ηλιακός συλλέκτης έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει θερμοκρασία 580 K αντί για 380 K, ο βαθμός απόδοσης Carnot και το παραγόμενο έργο μπορούν να διπλασιαστούν. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, λιγότερο από 10% των θερμικών αναγκών για βιομηχανικές διεργασίες στις Ηνωμένες Πολιτείες απαιτεί θερμοκρασίες μικρότερες των 230°F. Για να έχει σημαντική επίδραση η ηλιακή ενέργεια σε αυτό τον τομέα, η χρήση συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών είναι απαραίτητη.



Σχήμα 3.9 Ποσοστιαία κατανομή της απαιτούμενης θερμότητας βιομηχανικών διεργασιών σε διάφορες θερμοκρασίες.

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες είναι πιο αποδοτικοί σε μια δεδομένη θερμοκρασία από τους αντίστοιχους επίπεδους, μιας και η επιφάνεια από την οποία χάνεται θερμότητα είναι μικρότερη από την επιφάνεια του συγκεντρωτή. Στους επίπεδους συλλέκτες οι δύο επιφάνειες έχουν ίδιο μέγεθος. Ένας απλός θερμικός ισολογισμός αποδεικνύει αυτό το συλλογισμό. Η θερμική ισχύς που αποδίδεται από το συλλέκτη δίνεται από τη σχέση

$$Q_u = \eta_o G_T A_a - A_r U_L (T_r - T_a), \quad (3.32)$$

όπου η_o είναι ο οπτικός βαθμός απόδοσης. Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη, όπως έχει αναφερθεί, δίνεται από τη σχέση

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_T A_a} \quad (3.33)$$

από τον οποίο, με χρήση της εξίσωσης (3.35), προκύπτει

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_L(T_p - T_a)}{G_T} \frac{1}{CR} \quad (3.34)$$

Για τους επίπεδους συλλέκτες ισχύει $CR \approx 1$ και για τους συγκεντρωτικούς $CR > 1$. Συνεπώς, ο λόγος των απωλειών (δεύτερος όρος) είναι μικρότερος για τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες και άρα η απόδοση είναι υψηλότερη. Η ανάλυση αυτή βέβαια είναι απλοποιημένη και δεν εκφράζει τη μείωση στον οπτικό βαθμό απόδοσης, εξ' αιτίας της χρήσης καθρεπτών ή φακών με ατέλειες στους συγκεντρωτές. Η εκτίμηση του U_L σε ακριβή μορφή είναι αρκετά δύσκολη για συλλέκτες υψηλών θερμοκρασιών, δεδομένου ότι η απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας, η οποία είναι σημαντική, παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά ($\propto T^4$). Ένα μειονέκτημα των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι ότι συλλέγουν μόνο ένα μικρό ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας στην επιφάνειά τους. Η ιδιότητα αυτή αποτελεί σημαντικό κριτήριο για τον καθορισμό των γεωγραφικών ορίων, όπου η χρήση συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι επιτυχής.

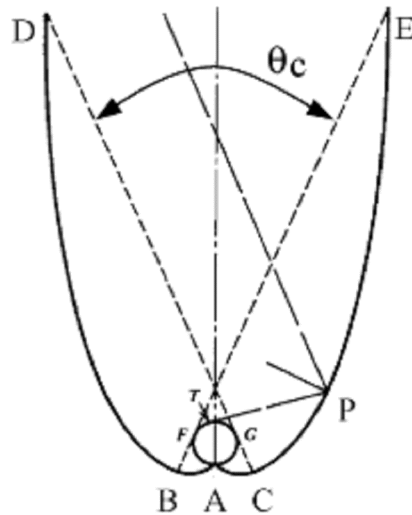
3.8 Διάφοροι τύποι συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.

Ο σχεδιασμός των συγκεντρωτικών συλλεκτών διαφοροποιείται κυρίως λόγω της μορφής της ανακλαστικής επιφάνειας η οποία επιτάσσει και τον αντίστοιχο τύπο δέκτη. Έτσι λοιπόν διακρίνονται οι εξής τύποι συγκεντρωτικών συλλεκτών:

- Συμπαγείς παραβολικοί συλλέκτες
- Συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων
- Συλλέκτες με γραμμικούς ανακλαστές Fresnel
- Παραβολικά «πίατα»
- Συλλέκτες με πεδίο ηλιοστατών

3.8.1 Συμπαγείς παραβολικοί συλλέκτες (CPC- Compound Parabolic Collectors).

Οι συμπαγείς παραβολικοί συγκεντρωτές ανήκουν στην κατηγορία των ανεικονικών συγκεντρωτών. Οι συγκεντρωτές αυτοί έχουν τη δυνατότητα να ανακλούν στον απορροφητή όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία εντός ευρέων ορίων. Η αναγκαιότητα μετακίνησης του συγκεντρωτή έτσι ώστε να προσαρμοστεί στο μεταβαλλόμενο προσανατολισμό του ήλιου μπορεί να μετριαστεί χρησιμοποιώντας μια «σκάφη» με δύο τμήματα παραβολής αντικριστά μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 Γεωμετρία του συμπαγή παραβολικού συγκεντρωτή.

Οι συμπαγείς παραβολικοί συγκεντρωτές δέχονται προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα σχετικά ευρύ φάσμα γωνιών. Χρησιμοποιώντας πολλαπλές εσωτερικές ανακλάσεις, όλη η ακτινοβολία που εισέρχεται στο «παράθυρο» του συγκεντρωτή, εντός της γωνίας αποδοχής, φτάνει έως τον απορροφητή που τοποθετείται στη βάση του συλλέκτη. Ο απορροφητής μπορεί να έχει μια ποικιλία διαμορφώσεων, για παράδειγμα μπορεί να είναι κυλινδρικός ή επίπεδος. Στο CPC που απεικονίζεται στο σχήμα 3.10, το κάτω μέρος του ανακλαστή (AB και AC) είναι κυκλικό, ενώ τα ανώτερα τμήματα (BD και CE) είναι παραβολικά. Καθώς τα ανώτερα τμήματα ενός CPC συνεισφέρουν λίγο στο να φθάσει η ακτινοβολία στον απορροφητή, συνήθως είναι περικομμένα σχηματίζοντας έτσι μια πιο κοντή μορφή CPC, η οποία είναι επίσης φθηνότερη. Οι CPC συνήθως καλύπτονται από γυαλί για να αποφεύγεται η είσοδος σκόνης και άλλων σωματιδίων στο συλλέκτη με συνέπεια τη μείωση της ανακλαστικότητας των τοιχωμάτων του.

Η γωνία αποδοχής ορίζεται ως η γωνία στα όρια της οποίας μπορεί να κινηθεί μη πηγή φωτός, ώστε να συγκλίνει στον απορροφητή. Ο προσανατολισμός ενός CPC σχετίζεται με τη γωνία αποδοχής του θ_c . Ακόμη ανάλογα με τη γωνία αποδοχής, ο συλλέκτης μπορεί να είναι στατικός ή να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου. Ένας συγκεντρωτής CPC μπορεί να προσανατολιστεί με το μεγάλο του άξονα είτε κατά τη διεύθυνση ανατολής-δύσης ή βορρά-νότου και η επιφάνειά του θα πρέπει να έχει κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο ίση με το τοπικό γεωγραφικό πλάτος. Εάν προσανατολισθεί κατά τη διεύθυνση βορρά-νότου, ο συλλέκτης θα πρέπει να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου γυρνώντας τον άξονά του. Καθώς η γωνία αποδοχής του συγκεντρωτή κατά το μεγάλο άξονά του είναι ευρεία, η εποχιακή ρύθμιση της κλίσης δεν είναι απαραίτητη. Ο συλλέκτης μπορεί να είναι επίσης στατικός, αλλά θα δέχεται ακτινοβολία μόνο όταν ο ήλιος βρίσκεται εντός της γωνίας αποδοχής του. Εάν ο συλλέκτης είναι προσανατολισμένος κατά τη διεύθυνση ανατολής-δύσης, με μικρή εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του, μπορεί να δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία αποτελεσματικά μέσω της ευρείας γωνίας αποδοχής του. Πρακτικά, οι

Κεφάλαιο 3ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

μεγάλες γωνίες αποδοχής χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα συλλογής διάχυτης ακτινοβολίας με κόστος το χαμηλότερο δείκτη συγκέντρωσης. Οι CPC με δείκτη συγκέντρωσης μικρότερο του 3 παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, διότι έχουν την ικανότητα να δεχθούν μεγάλο ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας και να τη συγκεντρώσουν, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της πορείας του ήλιου.

Δύο βασικοί τύποι CPC έχουν σχεδιασθεί, οι συμμετρικοί και οι ασύμμετροι. Αυτοί συνήθως χρησιμοποιούν δύο βασικούς τύπους απορροφητών: τύπου πτερυγίου με σωλήνα και κυλινδρικούς απορροφητές.

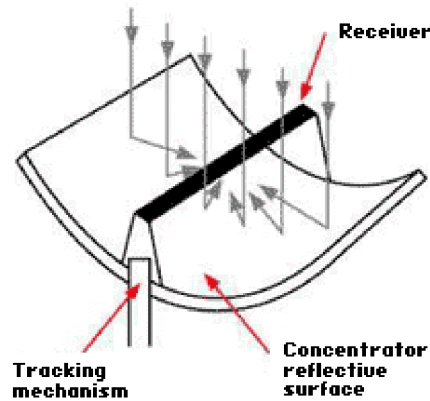
3.8.2 Συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων (PTC- Parabolic Trough Collectors).

Για να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες με υψηλή αποδοτικότητα, απαιτείται ένας συλλέκτης υψηλών επιδόσεων. Συστήματα με ελαφρά κατασκευή και τεχνολογία χαμηλού κόστους για διεργασίες θερμοκρασίας έως 400°C μπορούν να δημιουργηθούν με τη χρήση συλλεκτών παραβολικών κατόπτρων. Οι PTC μπορούν να παράξουν θερμότητα αποτελεσματικά σε θερμοκρασίες ανάμεσα στους 50 και τους 400°C.

Οι PTC δημιουργούνται κάμπτοντας ένα έλασμα ανακλαστικού υλικού σε σχήμα παραβολής. Ένας μαύρος μεταλλικός σωλήνας επικαλυμμένος από ένα γυάλινο σωλήνα προς μείωση των θερμικών απωλειών, τοποθετούνται κατά μήκος της ευθείας εστίασης του συγκεντρωτή. Όταν η παραβολή είναι στραμμένη κατά τη διεύθυνση του ηλίου, οι παράλληλες ακτίνες προσπίπτουν στον ανακλαστή και ανακλώνται στον απορροφητικό σωλήνα. Είναι επαρκής η χρήση ρύθμισης ενός άξονα με σκοπό την παρακολούθηση του ήλιου και συνεπώς οι μονάδες που παράγονται έχουν μεγάλο μήκος. Ο συλλέκτης μπορεί να προσανατολιστεί κατά τον άξονα ανατολής-δύσης, παρακολουθώντας έτσι την πορεία του ήλιου από το βορρά προς το νότο, ή κατά τον άξονα βορρά-νότου παρακολουθώντας έτσι την πορεία του ήλιου από την ανατολή προς τη δύση.

Για χρονική περίοδο ενός έτους, ένα οριζόντιο πεδίο παραβολικών συλλεκτών με προσανατολισμό βορρά-νότου συλλέγει ελαφρά περισσότερη ενέργεια από ένα αντίστοιχο προσανατολισμού ανατολής-δύσης. Εντούτοις, το πεδίο προσανατολισμού βορρά-νότου συλλέγει πολύ ενέργεια το καλοκαίρι και πολύ λιγότερη το χειμώνα, ενώ το αντίστοιχο προσανατολισμού ανατολής-δύσης παρέχει πιο σταθερή ετήσια απόδοση.

Οι PTC αποτελούν την πιο ώριμη ηλιακή τεχνολογία για παραγωγή θερμότητας σε θερμοκρασίες έως 400°C για παραγωγή ηλιακού θερμικού έργου ή θερμότητας για βιομηχανικές διεργασίες.



Σχήμα 3.11 Σχηματική απεικόνιση συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου.

Ο δέκτης ενός παραβολικού κατόπτρου είναι γραμμικός. Συνήθως ένας σωλήνας τοποθετείται κατά μήκος της γραμμής εστίασης για να σχηματίσει μια εξωτερική απορροφητική επιφάνεια. Το μέγεθος του σωλήνα και συνεπώς του δείκτη συγκέντρωσης καθορίζεται από το μέγεθος του ανακλώμενου ηλιακού ειδώλου και τις κατασκευαστικές ανοχές του κατόπτρου. Η επιφάνεια φέρει συνήθως επίστρωση επιλεκτικής επιφάνειας, η οποία έχει υψηλό συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά μικρό συντελεστή εκπομπής για να μην υπάρχουν αυξημένες θερμικές απώλειες.

Ένας γυάλινος σωλήνας τοποθετείται γύρω από τον απορροφητικό σωλήνα για να μειωθούν οι απώλειες συναγωγής από το δέκτη και συνεπώς ο συνολικός συντελεστής θερμικών απωλειών. Ένα μειονέκτημα του γυάλινου καλύμματος είναι ότι προσθέτει απώλειες διάβασης της τάξης του 0,9. Ο γυάλινος «φάκελος» φέρει επίστρωση κατά των αντανακλάσεων, έτσι ώστε να διευκολύνεται η μετάβαση της ακτινοβολίας προς τον απορροφητή. Ένας επιπλέον τρόπος για να μειωθούν οι θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής από τον απορροφητικό σωλήνα και συνεπώς να αυξηθεί η απόδοση του συλλέκτη, ειδικά για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, είναι να εκκενωθεί ο χώρος ανάμεσα στο δέκτη και το γυάλινο σωλήνα.

Για να επιτευχθεί μαζική παραγωγή και συνεπώς μείωση του κόστους, η κατασκευή του συλλέκτη θα πρέπει να είναι μεν συμπαγής αλλά να έχει μικρό βάρος και να μπορεί να παραχθεί με τυποποιημένες διαδικασίες. Έχει προταθεί ένας αριθμός κατασκευαστικών σχεδίων όπως το ατσάλινο πλαίσιο με κεντρικό σωλήνα ή με διπλά «μπράτσα» σχήματος V ή πλαίσιο από fibreglass.

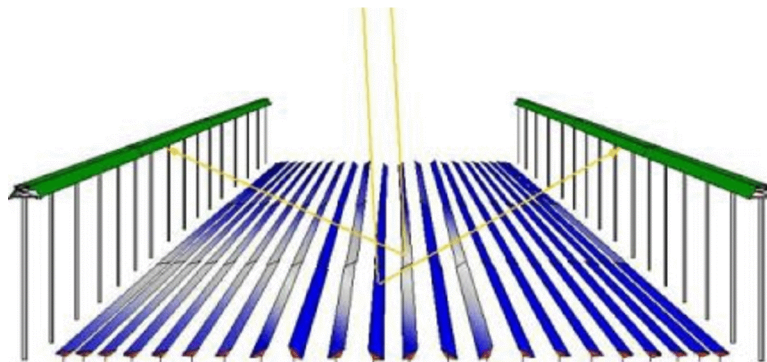
3.8.3 Γραμμικός ανακλαστής Fresnel (LFR- Linear Fresnel Collector).

Η τεχνολογία γραμμικού ανακλαστή Fresnel βασίζεται σε σειρά κατοπτρικών λωρίδων οι οποίες συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη στερεωμένο σε έναν γραμμικό πύργο. Το πεδίο LFR μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σπασμένος ανακλαστής παραβολικού κατόπτρου, αλλά σε αντίθεση με τα παραβολικά κάτοπτρα, δεν είναι απαραίτητο να έχει παραβολικό σχήμα, διότι υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευαστούν μεγάλοι

Κεφάλαιο 3ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

απορροφητές οι οποίοι δε χρειάζεται να κινούνται. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτού του τύπου συστήματος είναι ότι χρησιμοποιεί επίπεδους ή ελαστικά κυρτωμένους ανακλαστές οι οποίοι είναι φθηνότεροι από τα παραβολικά κάτοπτρα. Επιπροσθέτως, είναι τοποθετημένοι κοντά στο έδαφος ελαχιστοποιώντας τις κατασκευαστικές απαιτήσεις.

Μια δυσκολία που σχετίζεται με την τεχνολογία LFR είναι η αποφυγή της σκίασης και της παρεμπόδισης της ηλιακής ακτινοβολίας ανάμεσα σε διαδοχικούς συλλέκτες με αποτέλεσμα την αυξημένη απόσταση μεταξύ των συλλεκτών. Η παρεμπόδιση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να μειωθεί επιπλέον με αύξηση του ύψους του απορροφητή, αλλά αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση του κόστους. Η τεχνολογία συμπαγούς γραμμικού ανακλαστή Fresnel (CLFR- Compact Linear Fresnel Collector) αναπτύχθηκε πρόσφατα από το Πανεπιστήμιο του Σίδνεϋ στην Αυστραλία. Σύμφωνα με το σχέδιο αυτό οι διαδοχικοί ανακλαστές θα μπορούσαν να έχουν διαφορετικό προσανατολισμό προς αποφυγή της σκίασης. Με τη μείωση της απόστασης ανάμεσα στους ανακλαστές είναι δυνατή η χρήση δύο απορροφητικών πύργων. Με αυτή τη διάταξη ελαχιστοποιείται η παρεμπόδιση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και αυξάνεται η πυκνότητα των ανακλαστών, επιτρέποντας έτσι τη χρήση χαμηλότερων πύργων. Η κοντινή τοποθέτηση των ανακλαστών μειώνει επιπλέον την επιφάνεια της χρησιμοποιούμενης γης, γεγονός που είναι πολύ χρήσιμο εάν το πεδίο εγκατασταθεί σε αστική περιοχή ή κοντά σε ήδη υπάρχοντες θερμικούς σταθμούς. Η αποφυγή μεγάλων αποστάσεων ανάμεσα στους συλλέκτες και μεγάλων υψών πύργων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση συνιστώσες του κόστους, όπως η προετοιμασία του εδάφους, η κατασκευή των σειρών των ανακλαστών και το κόστος παραγωγής ατμού, καθώς οι θερμικές απώλειες αυξάνονται με την αύξηση της διαδρομής του εργαζομένου μέσου (η οποία εξαρτάται από το ύψος του δέκτη).

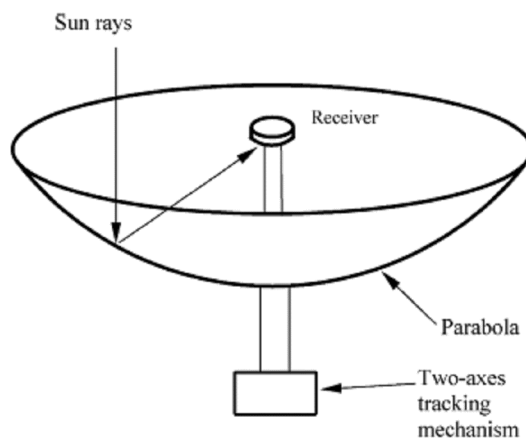


Σχήμα 3.12 Σχηματική απεικόνιση του προσανατολισμού των κατόπτρων σύμφωνα με την τεχνολογία CLFR.

3.8.4 Παραβολικά «πίατα» (PDR- Parabolic Dish Reflector).

Ο ανακλαστής τύπου παραβολικού «πίατου» παρακολουθεί την πορεία του ηλίου σε δύο άξονες και συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία στο σημείο εστίασης όπου και τοποθετείται ο δέκτης.

Ο δέκτης απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπει σε θερμική ενέργεια μέσω του ρευστού εργαζόμενου μέσου. Η θερμική ενέργεια μπορεί έπειτα να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή έργου. Τα συστήματα παραβολικού πιάτου μπορούν να επιτύχουν θερμοκρασίες ανώτερες των 1500°C. Δεδομένου ότι οι δέκτες είναι διανεμημένοι στην επιφάνεια του συλλεκτικού πεδίου, όπως συμβαίνει και με τα παραβολικά κάτοπτρα, τα παραβολικά «πίατα» αναφέρονται και ως συστήματα «διανεμημένων δεκτών».



Σχήμα 3.13 Σχηματική απεικόνιση παραβολικού «πίατου».

Τα παραβολικά «πίατα» έχουν αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Επειδή είναι πάντοτε απέναντι από τον ήλιο, έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση από όλα τα συστήματα συλλεκτών.
- Ο τυπικός δείκτης συγκέντρωσης κυμαίνεται από 600 έως 2000 και συνεπώς είναι πολύ αποδοτικά για συστήματα απορρόφησης ενέργειας και μετατροπής της σε έργο.
- Οι μονάδες του συγκεντρωτή και του συλλέκτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ανεξάρτητα ή ως μέρος ενός ευρύτερου συνόλου παραβολικών «πιτών».

Η κύρια χρήση αυτού του συγκεντρωτή είναι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα παραβολικών «πιτών» συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και μεταφέρουν την αντίστοιχη θερμική ενέργεια μέσω του εργαζόμενου μέσου στο συγκρότημα παραγωγής ισχύος. Η ανάγκη για κυκλοφορία του μέσου μεταφοράς θερμότητας εγείρει ζητήματα που αφορούν τη διάταξη των σωληνώσεων, τις απαιτούμενες αντλίες και τις θερμικές απώλειες.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν μικρές γεννήτριες στο σημείο εστίασης του κάθε «πίατου» παράγουν ενέργεια υπό τη μορφή ηλεκτρισμού και όχι ως θερμική ενέργεια του εργαζόμενου μέσου. Η μονάδα παραγωγής ισχύος περιλαμβάνει το δέκτη και τη θερμική μηχανή, η οποία είναι

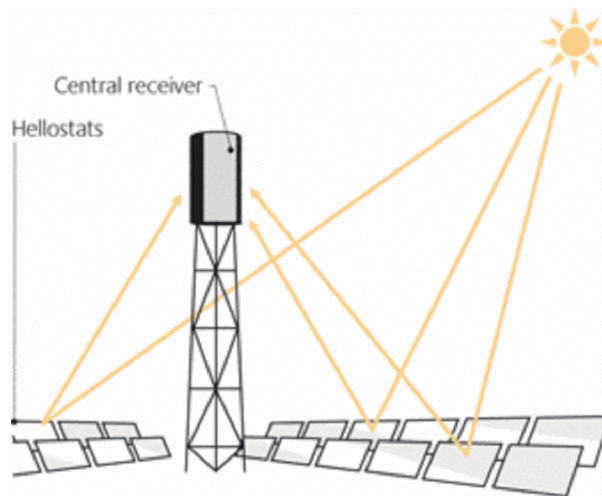
Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

συνήθως μια μηχανή Stirling. Ο δέκτης απορροφά τη συγκεντρωμένη άμεση ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπει σε θερμότητα, η οποία μεταφέρεται στη θερμική μηχανή. Ο δέκτης μπορεί να είναι μια δέση σωλήνων που τους διαρρέει ένα ψυκτικό υγρό. Τα μέσα μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το υδρογόνο και το ήλιο. Εναλλακτικοί δέκτες μπορεί να είναι σωλήνες όπου το εργαζόμενο μέσο, που ατμοποιείται και συμπυκνώνεται, μεταφέρει τη θερμότητα.

Το σύστημα παραβολικών «πιάτων» που χρησιμοποιεί θερμική μηχανή δεν έχει τη δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης όμως μπορεί να ενσωματωθεί σε υβριδικό κύκλο και να λειτουργήσει με ορυκτά καύσιμα σε περιόδους ελαττωμένης ηλιοφάνειας.

3.8.5 Συλλέκτης με πεδίο ηλιοστατών.

Για πολύ υψηλή εστίαση της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούνται πολλαπλοί επίπεδοι καθρέπτες, οι λεγόμενοι ηλιοστάτες, οι οποίοι χρησιμοποιούν υποστηρίγματα με διαφορετικό αζιμούθιο, έτσι ώστε να ανακλούν την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία σε έναν κοινό στόχο. Η διάταξη αυτή ονομάζεται πεδίο ηλιοστατών ή συλλέκτης κεντρικού δέκτη. Χρησιμοποιώντας κοίλα τμήματα καθρεπτών στους ηλιοστάτες, το ποσό της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας και συνεπώς θερμικής ενέργειας είναι τόσο μεγάλο που είναι δυνατό να παραχθεί ατμός σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις.



Σχήμα 3.14 Σχηματική απεικόνιση πεδίου ηλιοστατών και κεντρικού πύργου.

Η συγκεντρωμένη θερμική ενέργεια που απορροφάται από το δέκτη, μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο το οποίο μπορεί να αποθηκευθεί και να χρησιμοποιηθεί αργότερα για την παραγωγή ισχύος. Οι τεχνολογικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην πλειοψηφία των σύγχρονων εφαρμογών κεντρικού δέκτη, όσον αφορά το εργαζόμενο μέσο είναι δύο, ο δέκτης άλατος και ο ανοικτός ογκομετρικός δέκτης.

Το μέσο μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται στη διάταξη του δέκτη άλατος θα πρέπει να έχει μεγάλη θερμοχωρητικότητα και καλές

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

ιδιότητες θερμικής αγωγής. Το τηγμένο άλας που αποτελείται από νάτριο ή νιτρικό κάλιο ($\text{NaNO}_3, \text{KNO}_3$) συνάδει με αυτές τις απαιτήσεις. Για αμφότερες τις επιλογές, λόγω των ιδιοτήτων υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, το μέσο μεταφοράς θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέσο αποθήκευσης, εξομαλύνοντας έτσι τη διακύμανση της διαθέσιμης ακτινοβολίας.

Ένα μειονέκτημα όλων των συλλεκτών αυτού του τύπου είναι ότι το άλας θα πρέπει να διατηρείται σε υγρή μορφή και κατά τη διάρκεια αδρανών περιόδων χωρίς ηλιακή ακτινοβολία. Το γεγονός αυτό απαιτεί είτε τη θέρμανση του μέρους της εγκατάστασης στο οποίο περιέχεται άλας (συμπεριλαμβανομένων δεξαμενών, σωληνώσεων και βαλβίδων) με αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας που καταναλώνεται από το ίδιο το εργοστάσιο, ή την πλήρη απομάκρυνση του άλατος από το κύκλωμα. Η διαβρωτική αέρια φάση των χρησιμοποιούμενων αλάτων έχει μια επιπλέον επιβλαβή επίδραση, καθώς για συγκεκριμένες διεργασίες, η ανεπιθύμητη εξάτμιση μικρών ποσοτήτων άλατος δεν είναι δυνατόν να αποφευχθεί.

Στη διάταξη ανοικτού ογκομετρικού δέκτη, η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα απορροφητικό υλικό από χαλύβδινο σύρμα ή πορώδη κεραμικά. Οι ογκομετρικοί δέκτες αυτού του είδους χαρακτηρίζονται από υψηλή αναλογία απορροφητικής επιφάνειας προς διαδρομή ροής του αέρα που δρα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στο δέκτη μέσω ενός ανεμιστήρα και διαπερνά το απορροφητικό υλικό. Η ροή αέρα απορροφά τη θερμότητα και συνεπώς η απορροφητική επιφάνεια που αντικρίζει το πεδίο ηλιοστατών ψύχεται. Εξ' αιτίας αυτού του ψυκτικού φαινομένου, οι απορροφητικές επιφάνειες στις οποίες προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία είναι ψυχρότερες από τις εσωτερικές επιφάνειες του δέκτη όπου η θερμότητα μεταφέρεται μέσω της ροής του αέρα. Επομένως, ο αέρας που εγκαταλείπει τον απορροφητή παρουσιάζει υψηλότερη θερμοκρασία συγκρινόμενη με τις απορροφητικές επιφάνειες στις οποίες προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία. Αυτός είναι ο λόγος για τις χαμηλές θερμικές απώλειες του δέκτη.

Ο αέρας ως μέσο μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα ότι δεν είναι τοξικός, διαβρωτικός, εύφλεκτος και είναι ευρέως διαθέσιμος. Το μειονέκτημά του είναι η συγκριτικά χαμηλότερη ειδική θερμότητα με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερες επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας.

Οι διατάξεις κεντρικού δέκτη έχουν αρκετά πλεονεκτήματα:

- Συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία με οπτικό τρόπο και την μεταφέρουν σε ένα μοναδικό δέκτη με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών μεταφοράς της θερμικής ενέργειας.
- Συνήθως επιτυγχάνουν δείκτες συγκέντρωσης 300-1500 και συνεπώς παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα κατά τη συλλογή ενέργειας.
- Μπορούν να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια με ευκολία.
- Έχουν μεγάλο δυναμικό (γενικά περισσότερο από 10 MW) και συνεπώς παρουσιάζουν μειωμένο κόστος λόγω της μεγάλης τους κλίμακας.

Κάθε ηλιοστάτης σε μια εγκατάσταση κεντρικού δέκτη έχει ανακλαστική επιφάνεια από 50 έως 150 m². Οι ηλιοστάτες συλλέγουν και συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία στο δέκτη, ο οποίος την απορροφά μεταφέροντας έτσι την ενέργεια στο εργαζόμενο μέσο. Η μέση ακτινοβολία που προσπίπτει

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

στο δέκτη έχει τιμές από 200 έως 1000 kW/m² και επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 1500°C με αποτέλεσμα την ενσωμάτωση της θερμικής ενέργειας σε πιο αποδοτικούς κύκλους. Τα συστήματα κεντρικού δέκτη μπορούν να ενσωματωθούν με ευκολία σε θερμικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων για υβριδική λειτουργία και έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν για περισσότερες από τις μισές ώρες ενός έτους με ονομαστική ισχύ χρησιμοποιώντας θερμική αποθήκευση.

Υπάρχουν τρεις γενικές διατάξεις για τα συστήματα των συλλεκτών και του δέκτη. Σύμφωνα με την πρώτη, οι ηλιοστάτες περιβάλλουν τελείως τον πύργο του δέκτη και ο δέκτης, ο οποίος είναι κυλινδρικός, έχει μια εξωτερική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Σύμφωνα με τη δεύτερη, οι ηλιοστάτες τοποθετούνται βόρεια του πύργου (για το βόρειο ημισφαίριο) και η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του δέκτη είναι εσωτερική. Τέλος, σύμφωνα με την τρίτη διάταξη, οι ηλιοστάτες τοποθετούνται βόρεια του πύργου και ο δέκτης, ο οποίος είναι ένα κατακόρυφο επίπεδο, έχει μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας με βόρειο προσανατολισμό.

3.9 Απόδοση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη.

Για τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες απαιτείται ξεχωριστή οπτική και θερμική ανάλυση.

3.9.1 Οπτική ανάλυση.

Όσον αφορά τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες, ο λόγος συγκέντρωσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι πάντοτε μεγαλύτερος της μονάδας. Η μέγιστη δυνατή τιμή για συλλέκτες με έναν άξονα παρακολούθησης της πορείας του ηλίου είναι

$$CR_{\max} = \frac{1}{\sin\left(\frac{\theta_c}{2}\right)} \quad (3.35)$$

και για συλλέκτες με δύο άξονες παρακολούθησης της πορείας του ηλίου

$$CR_{\max} = \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\theta_c}{2}\right)} \quad (3.36)$$

όπου θ_c είναι η γωνία αποδοχής. Η γωνία αυτή υποδηλώνει το εύρος της ζώνης, η ακτινοβολία εντός της οποίας γίνεται δεκτή από το δέκτη του συγκεντρωτή.

Οι εξισώσεις (3.35) και (3.36) ορίζουν το άνω όριο της συγκέντρωσης που μπορεί να επιτευχθεί για δεδομένη γωνία όρασης του συλλέκτη. Για ένα στατικό CPC η γωνία θ_c εξαρτάται από την κίνηση του ηλίου στον ουρανό.

Κεφάλαιο 3ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

Για παράδειγμα εάν ένα CPC έχει τον άξονά του κατά την κατεύθυνση βορρά-νότου και η κλίση του είναι τέτοια ώστε το επίπεδο της κίνησης του ήλιου είναι κάθετο στο «παράθυρο», η γωνία αποδοχής σχετίζεται με τον αριθμό των ωρών που απαιτείται συλλογή ηλιακής ενέργειας. Εάν δηλαδή απαιτείται συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας για έστω έξι ώρες και δεδομένου ότι ο ήλιος ταξιδεύει με 15° την ώρα, ισχύει $CR_{\max} = \frac{1}{\sin(45^\circ)} = 1,41$.

Για ένα συλλέκτη που παρακολουθεί την πορεία του ηλίου, η γωνία αποδοχής περιορίζεται από το μέγεθος του ηλιακού δίσκου, τις ατέλειες και τις ανωμαλίες στην επιφάνεια του ανακλαστή και τα σφάλματα παρακολούθησης. Για ένα τέλειο συλλέκτη και σύστημα παρακολούθησης, ο μέγιστος δείκτης συγκέντρωσης εξαρτάται μόνο από τον ηλιακό δίσκο ο οποίος έχει πλάτος $0,53^\circ$. Συνεπώς,

➤ Για παρακολούθηση ενός άξονα: $CR_{\max} = \frac{1}{\sin(0.265^\circ)} = 216$

➤ Για παρακολούθηση δύο αξόνων: $CR_{\max} = \frac{1}{\sin^2(0.265^\circ)} = 46747$

Εν κατακλείδι θα μπορούσαμε να πούμε, ότι ο δείκτης συγκέντρωσης για κινούμενους συλλέκτες είναι πολύ υψηλότερος. Ωστόσο, απαιτείται υψηλή ακρίβεια στο σύστημα παρακολούθησης και προσεκτική κατασκευή του συλλέκτη, καθώς αυξάνεται ο δείκτης συγκέντρωσης και συνεπώς μειώνεται η γωνία αποδοχής. Στην πράξη, εξ' αιτίας διαφόρων σφαλμάτων, επιτυγχάνονται πολύ χαμηλότερες τιμές από τις μέγιστες που αναφέρονται παραπάνω.

Άλλος ένας παράγοντας που θα πρέπει να καθοριστεί είναι η γωνία πρόσπτωσης για τους διάφορους τρόπους παρακολούθησης. Αυτό ισχύει τόσο για την παρακολούθηση ενός άξονα, όσο και για την παρακολούθηση δύο αξόνων. Στην περίπτωση παρακολούθησης ενός άξονα η κίνηση μπορεί να γίνεται με διάφορους τρόπους, για παράδειγμα κατά τον άξονα βορρά-νότου, ανατολής-δύσης ή παράλληλα στον άξονα της γης.

Ο τρόπος παρακολούθησης επηρεάζει το ποσό της προσπίπτουσας στην επιφάνεια του συλλέκτη ακτινοβολίας σε αναλογία με το ημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης. Το ποσό της ενέργειας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια 1m^2 για τέσσερις τρόπους παρακολούθησης της πορείας του ήλιου κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο και τις αντίστοιχες ισημερίες απεικονίζεται στον πίνακα 3.1. Η απόδοση των διαφόρων τρόπων παρακολούθησης μπορεί να συγκριθεί με την πλήρη παρακολούθηση, η οποία συλλέγει το μέγιστο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας, το οποίο αναφέρεται ως 100% στον πίνακα 3.1.

Τρόπος Παρακολούθησης	Ηλιακή ακτινοβολία(kWh/m^2)			Ποσοστό Συλλογής		
	ΙΣ	ΘΗ	ΧΗ	ΙΣ	ΘΗ	ΧΗ
Πλήρης παρακολούθηση	8,43	10,60	5,70	100,0	100,0	100,0
E-W Πολική	8,43	9,73	5,23	100,0	91,7	91,7
N-S οριζόντια	6,22	7,85	4,91	73,8	74,0	86,2
E-W οριζόντια	7,51	10,36	4,47	89,1	97,7	60,9

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

Πίνακας 3.1 Σύγκριση απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας για τους διάφορους τρόπους παρακολούθησης της πορείας του ήλιου (ΙΣ: Ισημερινός, ΘΗ: Θερινό ηλιοστάσιο, ΧΗ: Χειμερινό ηλιοστάσιο).

Ο οπτικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως ο λόγος της ακτινοβολίας που απορροφάται από το δέκτη προς το λόγο της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο «παράθυρο» του ανακλαστή. Η οπτική απόδοση εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής, τη γεωμετρία του συλλέκτη και τις διάφορες ατέλειες που προκύπτουν κατά την κατασκευή του συλλέκτη. Η μορφή της εξίσωσης είναι:

$$\eta_o = \rho\tau\alpha\gamma \left[1 - A_f \tan(\theta) \cos(\theta) \right] \quad (3.37)$$

όπου ρ : ο συντελεστής ανάκλασης του κατόπτρου

γ : ο συντελεστής δέσμευσης

A_f : ο γεωμετρικός παράγοντας

Ο γεωμετρικός παράγοντας A_f υπαγορεύεται από τη γεωμετρία του συλλέκτη και είναι ένα μέτρο της μείωσης της επιφάνειας του «παραθύρου» του συλλέκτη λόγω ανωμαλιών που μπορεί να προκύψουν κατά την πρόσπτωση της ακτινοβολίας. Για ένα PTC η τιμή του δίνεται από τη σχέση

$$A_f = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left[1 + \frac{W_a^2}{48 f^2} \right] \quad (3.38)$$

όπου W_a : το «παράθυρο» του συλλέκτη (m)

h_p : το ύψος της παραβολής (m)

f : η απόσταση εστίασης (m)

Ο πιο περίπλοκος παράγοντας που περιλαμβάνεται στον καθορισμό του οπτικού βαθμού απόδοσης ενός PTC είναι ο παράγοντας δέσμευσης που ορίζεται ως το ποσοστό της ενέργειας που δεσμεύεται από το δέκτη προς την ενέργεια που ανακλάται από τη συσκευή εστίασης. Η τιμή του εξαρτάται από το μέγεθος του, τις ατέλειες στην επιφάνεια του παραβολικού κατόπτρου και την έκταση της ηλιακής δέσμης.

Τα σφάλματα που σχετίζονται με την παραβολική επιφάνεια είναι δύο ειδών, τυχαία ή αναμενόμενα. Τα τυχαία σφάλματα είναι αυτά που παριστώνται από κανονικές κατανομές πιθανοτήτων. Τα τυχαία σφάλματα προσδιορίζονται ως φαινομενικές αλλαγές στο εύρος του ήλιου, φαινόμενα διάχυσης της ακτινοβολίας που προκαλούνται από τυχαία σφάλματα που σχετίζονται με την κλίση (για παράδειγμα, παραμόρφωση της παραβολής λόγω φορτίου που οφείλεται στον άνεμο) και φαινόμενα διάχυσης λόγω της ανακλαστικής επιφάνειας. Τα αναμενόμενα σφάλματα προκύπτουν κατά την κατασκευή και συναρμολόγηση του συλλέκτη, αλλά και κατά τη λειτουργία

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

του. Αυτά προσδιορίζονται ως ατέλειες στο προφίλ του ανακλαστή, σφάλματα ευθυγράμμισης και τοποθέτησης του δέκτη.

Τα αναμενόμενα σφάλματα καθορίζονται από τη γνώση της γωνίας απόκλισης στην ευθυγράμμιση (δηλαδή τη γωνία ανάμεσα στην ανακλώμενη ακτίνα από το κέντρο του ηλίου και την κάθετη στο επίπεδο του «παραθύρου» του συλλέκτη) και της απόστασης του δέκτη από την εστία της παραβολής. Καθώς τα σφάλματα στο προφίλ του ανακλαστή και η λάθος τοποθέτηση του δέκτη κατά τον άξονα Y έχουν τα ίδια αποτελέσματα, μπορούν να ληφθούν υπ' όψιν με την χρήση μιας κοινής παραμέτρου. Σύμφωνα με τους Guven και Bannerot τα τυχαία και τα αναμενόμενα σφάλματα μπορούν να συνδυασθούν με τις γεωμετρικές παραμέτρους του συλλέκτη, το δείκτη συγκέντρωσης και τη διάμετρο του δέκτη με αποτέλεσμα να προκύπτουν γενικευμένες παράμετροι σφαλμάτων που αφορούν όλες τις γεωμετρίες των συλλεκτών. Οι γενικευμένες παράμετροι διακρίνονται από τις ήδη ορισμένες παραμέτρους με τη χρήση ενός αστερίσκου κατά το συμβολισμό τους. Χρησιμοποιώντας τις γενικευμένες παραμέτρους είναι δυνατή η διατύπωση της εξής σχέσης για τον παράγοντα δέσμευσης.

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1 - \cos \phi_r}{2 \sin \phi_r} \\ &\times \int_0^{\phi_r} \text{Erf} \left(\frac{\sin \phi_r (1 + \cos \phi) (1 - 2d^* \sin \phi) - \pi \beta^* (1 + \cos \phi_r)}{\sqrt{2\pi} \sigma^* (1 + \cos \phi_r)} \right) \\ &- \text{Erf} \left(-\frac{\sin \phi_r (1 + \cos \phi) (1 + 2d^* \sin \phi) + \pi \beta^* (1 + \cos \phi_r)}{\sqrt{2\pi} \sigma^* (1 + \cos \phi_r)} \right) \\ &\times \frac{d\phi}{(1 + \cos \phi)}, \text{ όπου} \end{aligned} \quad (3.39)$$

Erf: η συνάρτηση σφάλματος, που ορίζεται ως $\text{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$

D: εξωτερική διάμετρος κυλινδρικού δέκτη

d_r : απόσταση του δέκτη από τη γραμμή εστίασης (m)

β : γωνία κακής ευθυγράμμισης (μοίρες)

d^* : η γενικευμένη παράμετρος αναμενόμενων σφαλμάτων λόγω κακής τοποθέτησης του δέκτη και ατελειών στο προφίλ του ανακλαστή ($d^*=d_r/D$)

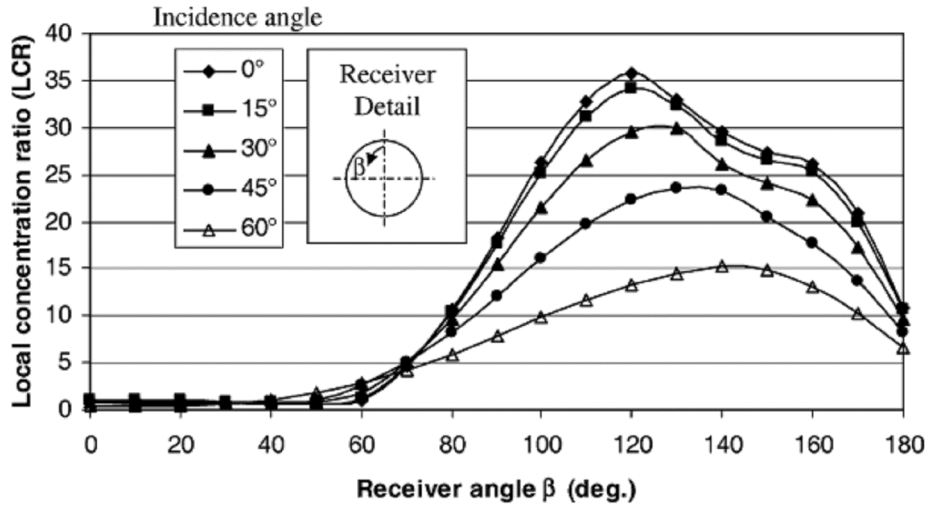
β^* : γενικευμένη παράμετρος σφαλμάτων λόγω γωνιακών παρεκκλίσεων ($\beta^*=\beta \cdot CR$)

σ^* : γενικευμένη παράμετρος τυχαίων σφαλμάτων ($\sigma^*=\sigma \cdot CR$)

Άλλη μια παράμετρος που πρέπει να καθορισθεί είναι η διανομή της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας στο δέκτη του συλλέκτη, η οποία ονομάζεται διαφορετικά ως τοπικός δείκτης συγκέντρωσης (LCR- Local

Κεφάλαιο 3ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

Concentration Ratio). Η διανομή για ένα PTC φαίνεται στο σχήμα 3.15. Η μορφή των καμπυλών εξαρτάται από τους ίδιους τύπους σφαλμάτων που ήδη αναφέρθησαν και από τη γωνία πρόσπτωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι στο σχήμα 3.15 φαίνεται η διανομή για το μισό δέκτη και όπως βλέπουμε το πάνω μέρος του δέκτη δέχεται μόνο άμεση ακτινοβολία και η μέγιστη συγκέντρωση λαμβάνει χώρα για μηδενική γωνία πρόσπτωσης και γωνία β 120°.



Σχήμα 3.15 Τοπικός δείκτης συγκέντρωσης στο δέκτη ενός συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου.

3.9.2 Θερμική ανάλυση.

Η γενικευμένη θερμική ανάλυση ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη είναι παρόμοια με αυτή ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη. Είναι απαραίτητο να εξαχθούν οι κατάλληλες εκφράσεις για τον παράγοντα απόδοσης F' του συλλέκτη, τον ολικό συντελεστή θερμικών απωλειών και τον παράγοντα θερμικής απολαβής F_R .

Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη, μπορεί να υπολογισθεί, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέσω ενεργειακού ισολογισμού στο δέκτη. Συνεπώς, η ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς του συγκεντρωτή είναι:

$$Q_u = G_{bT} \eta_o A_a - A_r U_L (T_r - T_a) \quad (3.40)$$

Το ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος ανά μονάδα μήκους του συλλέκτη μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της τοπικής θερμοκρασίας T_r του δέκτη ως εξής:

$$q_u' = \frac{A_a \eta_o G_{bT}}{L} - \frac{A_r U_L}{L} (T_r - T_a) \quad (3.41)$$

όπου L : το μήκος του συλλέκτη.

Κεφάλαιο 3^ο: Ηλιακοί συλλέκτες.

Με όρους μεταφοράς ενέργειας στο ρευστό στην τοπική του θερμοκρασία T_f :

$$q_u' = \frac{\left(\frac{A_r}{L}\right)(T_r - T_f)}{\frac{D_o}{h_{f,i}D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (3.42)$$

όπου D_o : εξωτερική διάμετρος σωλήνα (m)

D_i : εσωτερική διάμετρος σωλήνα (m)

$h_{f,i}$: συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του ρευστού με την εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα

k : θερμική αγωγιμότητα του απορροφητικού σωλήνα

Εάν απαλειφθεί η T_r από τις εξισώσεις (3.41) και (3.42) προκύπτει:

$$q_u' = F' \frac{A_a}{L} \left[\eta_o G_{bT} - \frac{U_L}{CR} (T_f - T_a) \right] \quad (3.43)$$

όπου ο παράγοντας απόδοσης του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{f,i}D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} + \ln \frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (3.44)$$

Ομοίως, όπως για τους επίπεδους συλλέκτες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παράγοντας θερμικής απολαβής και η σχέση (3.40) γράφεται ως εξής:

$$Q_u = F_R [G_{bT} \eta_o A_a - A_r U_L (T_{f,i} - T_a)] \quad (3.45)$$

Τελικά, ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη προκύπτει διαιρώντας το Q_u με $(G_{bT} A_a)$. Συνεπώς ισχύει:

$$\eta = F_R \left[\eta_o - U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G_{bT} CR} \right) \right] \quad (3.46)$$

Ο παράγοντας θερμικής απολαβής δίνεται από μια σχέση παρόμοια με αυτή που ισχύει για τους επίπεδους συλλέκτες:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_r U_L} \left[1 - e^{-\frac{(A_r U_L F')}{(\dot{m}C_p)}} \right] \quad (3.47)$$

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου
4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΡΟΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΡΓΟΥ.

4.1 Θερμοδυναμικοί κύκλοι.

Η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω ανοικτών ή κλειστών κύκλων. Κατά τις διεργασίες αυτές, το εργαζόμενο μέσο υφίσταται μια σειρά μεταβολών κατάστασης, οι οποίες προκαλούνται είτε από τη συναλλαγή θερμότητας ή από την απόδοση έργου.

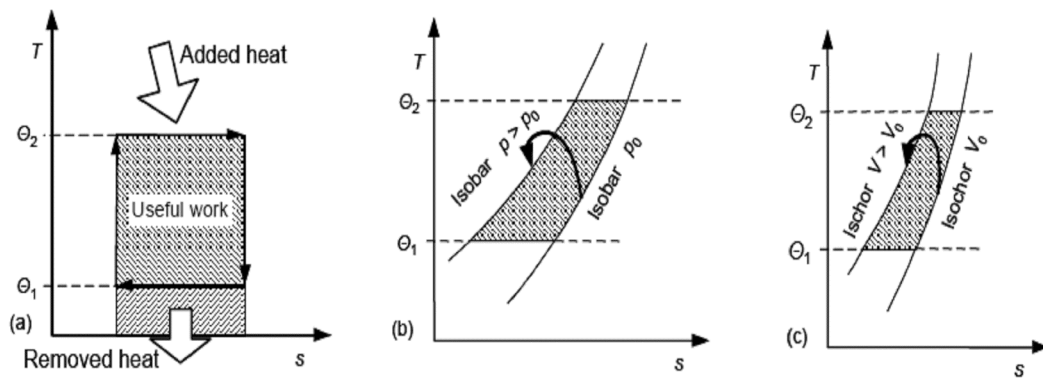
Εάν το αρχικό στάδιο είναι ταυτόσημο με το τελικό, έτοι ώστε το εργαζόμενο μέσο να μπορεί να υποβληθεί και πάλι στην ίδια διαδικασία, η διεργασία αναφέρεται ως «κλειστός κύκλος». Αντιθέτως, εάν το εργαζόμενο μέσο είναι μέρος ενός «ανεξάντλητου» αποθέματος (όπως ο ατμοσφαιρικός αέρας) και η τελική του κατάσταση είναι διαφορετική από την αρχική, τότε η διεργασία χαρακτηρίζεται ως «ανοικτός κύκλος».

Στην ανάλυση που ακολουθεί οι θερμοδυναμικοί κύκλοι παρίστανται σε διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας. Η παράσταση αυτή προσφέρει το πλεονέκτημα, ότι εξίσου οι ισοθερμοκρασιακές και οι ισηντροπικές μεταβολές εμφανίζονται ως ευθείες γραμμές.

Ο πιο αποδοτικός κύκλος θερμικών μηχανών που επιτρέπεται από τους φυσικούς νόμους είναι ο κύκλος Carnot, ο οποίος αποτελείται από δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές μεταβολές. Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, όλη η παρεχόμενη θερμότητα σε μια θερμική μηχανή δε μπορεί να μετατραπεί σε έργο · ο κύκλος Carnot θέτει την οριακή τιμή του ποσοστού της μετατροπής αυτής. Για να προσεγγιστεί η απόδοση του κύκλου Carnot, θα πρέπει οι μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στη θερμική μηχανή να είναι αντιστρεπτές και να μην υπάρχει αύξηση της εντροπίας. Αυτό σημαίνει ότι ο κύκλος Carnot είναι μια εξιδανίκευση, καθώς καμία πραγματική μεταβολή δεν είναι αναστρέψιμη και όλες επιφέρουν κάποια αύξηση της εντροπίας. Η θεμελιώδης αξία του κύκλου Carnot είναι ότι θέτει τη μέγιστη δυνατή απόδοση για έναν κύκλο που λειτουργεί ανάμεσα σε μια υψηλή θερμοκρασία Θ_2 και μια χαμηλή Θ_1 .

Ο κύκλος Ericsson αποτελεί την πρώτη τεχνική προσέγγιση του ιδανικού κύκλου Carnot. Η ισοβαρής συμπίεση και αποτόνωση αντικατέστησαν τις δυο ισηντροπικές μεταβολές του κύκλου Carnot. Ο βασικός κύκλος Ericsson είναι μη αντιστρεπτός, διότι στην πραγματικότητα η μεταφορά θερμότητας δεν είναι ισοθερμοκρασιακή. Παρόλα αυτά, με τη χρήση ενός ιδεατού εναλλάκτη θερμότητας θα προέκυπτε ένας κύκλος, ο οποίος θα ήταν θεωρητικά αντιστρεπτός.

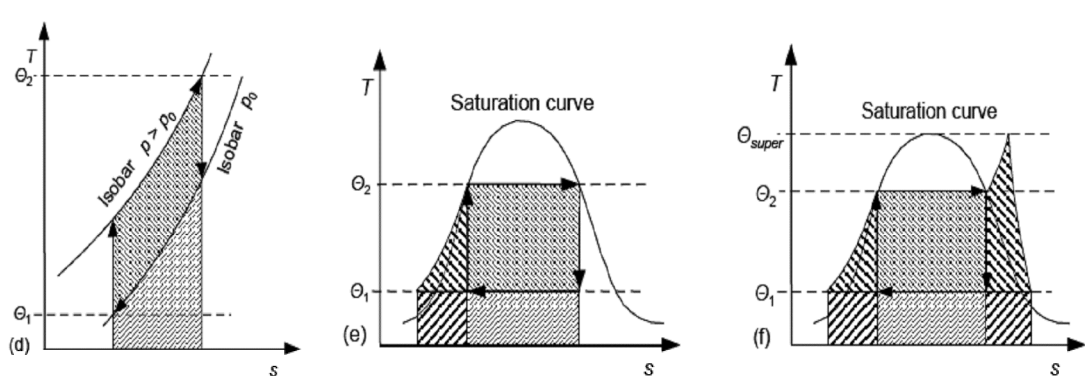
Ο κύκλος Stirling είναι παρόμοιος με τον κύκλο Ericsson. Αποτελείται από δύο ισόθερμες και δύο ισόχωρες μεταβολές. Καθώς η θερμότητα απορρίπτεται και προσδίδεται κατά τις ισόχωρες μεταβολές οι οποίες είναι μη αντιστρεπτές, ο βασικός κύκλος Stirling είναι επίσης μη αντιστρεπτός. Ο κύκλος Stirling θα μπορούσε να γίνει θεωρητικά αντιστρεπτός και με βαθμό απόδοσης ίσο με αυτόν του κύκλου Carnot με τη χρήση ενός ιδεατού εναλλάκτη θερμότητας που θα απορροφούσε την απορριπτόμενη θερμότητα και θα την προσέδιδε και πάλι στο σύστημα.



Σχήμα 4.1 Διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας των κύκλων Carnot (a), Ericsson (b) και Stirling (c).

Ο κύκλος Joule ή Brayton είναι ο θεωρητικός κύκλος των αεροστροβίλων. Αποτελείται από δύο αντιστρεπτές αδιαβατικές (ισεντροπικές) μεταβολές και δύο ισόθλιπτες μεταβολές. Γι' αυτό το λόγο ο κύκλος ονομάζεται και σταθερής πίεσης. Όσον αφορά τους αεροστρόβιλους, η ισεντροπική συμπίεση λαμβάνει χώρα στο συμπιεστή, η ισόθλιπτη θέρμανση στο θάλαμο καύσης, η ισεντροπική αποτόνωση στο στρόβιλο και η ισόθλιπτη ψύξη στο ψυγείο.

Ο κύκλος Clausius–Rankine (κύκλος ατμού) κάνει χρήση της αλλαγής φάσης του εργαζόμενου μέσου. Αυτή η αλλαγή φάσης αντιστοιχεί στην ισοθερμοκρασιακή πρόσδοση θερμότητας και σε μεγάλη αύξηση του ειδικού όγκου. Ο κύκλος Rankine αποτελείται, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας, από μια ισεντροπική συμπίεση και αποτόνωση, καθώς και ισοθερμοκρασιακή πρόσδοση και απόρριψη θερμότητας.



Σχήμα 4.2 Διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας των κύκλων Joule (d), Rankine (e) και Rankine με υπερθέρμανση (f)

Οι δύο κύκλοι που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο Rankine και ο Joule.

➤ Για τον κύκλο Joule, το εργαζόμενο μέσο που είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας συμπιέζεται πριν την πρόσδοση θερμότητας. Η θερμότητα προσδίδεται

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

στο σύστημα μέσω της καύσης παραδείγματος χάριν φυσικού αερίου. Για τις ηλιακές εφαρμογές η θερμότητα μεταφέρεται απ' ευθείας από τον απορροφητή στο εργαζόμενο μέσο μετατροπής ενέργειας. Ο ογκομετρικός απορροφητής έχει μεγάλη επιφάνεια, έτσι ώστε να διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η έμμεση πρόσδοση θερμότητας από άλλο μέσο δεν παρουσιάζει κανένα πλεονέκτημα καθώς ο αέρας έχει μικρή θερμική συναγωγιμότητα και συνεπώς απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες για τη μεταφορά θερμότητας.

➤ Ο κύκλος Rankine απαιτεί ένα εργαζόμενο μέσο αλλαγής φάσης, έτσι ώστε να είναι επιτρεπτή η ισοθερμοκρασιακή πρόσδοση θερμότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται νερό, αλλά υπάρχουν επίσης διεργασίες όπου χρησιμοποιούνται οργανικά εργαζόμενα μέσα (οργανικός κύκλος Rankine). Στην αρχή, το υγρό εργαζόμενο μέσο συμπέζεται και υφίσταται αλλαγή φάσης, ενώ προστίθεται θερμότητα. Το αέριο μέσο πλέον εκτονώνεται, πιθανώς αφού του έχει προσδοθεί επιπλέον θερμότητα. Έπειτα, απορρίπτεται θερμότητα με συνέπεια τη συμπύκνωση του εργαζόμενου μέσου υπό χαμηλή πίεση.

Όλοι οι κύκλοι που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν ως κοινό στοιχείο την αρχική πρόσδοση θερμότητας με σκοπό την αύξηση της ογκομετρικής παροχής ενός αερίου εργαζόμενου μέσου. Ακολούθως, κατά την αποτόνωσή του, το εργαζόμενο μέσο παράγει μηχανικό έργο. Για μεγάλης κλίμακας θερμικούς σταθμούς όπου έχουμε μεγάλη ογκομετρική παροχή χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στροβιλομηχανές.

Οι στρόβιλοι μετατρέπουν τη δυναμική ενέργεια του εργαζόμενου μέσου σε κινητική και έπειτα σε μηχανική ενέργεια στον περιστρεφόμενο άξονά τους. Το μέσο ρέει μέσω του στροβίλου είτε αξονικά ή ακτινικά, προκαλώντας έτσι την περιστροφή του. Ο στάτορας του οποίου τα πτερύγια σχηματίζουν ακροφύσια προκαλεί την αποτόνωση του εργαζόμενου μέσου και ταυτόχρονα το επιταχύνει. Στο ρότορα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον άξονα της μηχανής, η κινητική ενέργεια του εργαζόμενου μέσου μετατρέπεται ακολούθως σε ροπή. Ο συνδυασμός στάτορα-ρότορα αναφέρεται ως βαθμίδα. Για παράδειγμα, οι μεγάλοι στρόβιλοι έχουν έως και εξήντα βαθμίδες. Οι αναπόφευκτες τριβές, η κινητική ενέργεια του μέσου στην έξοδο του στροβίλου και οι διαρροές από τα διάκενα είναι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση του στροβίλου.

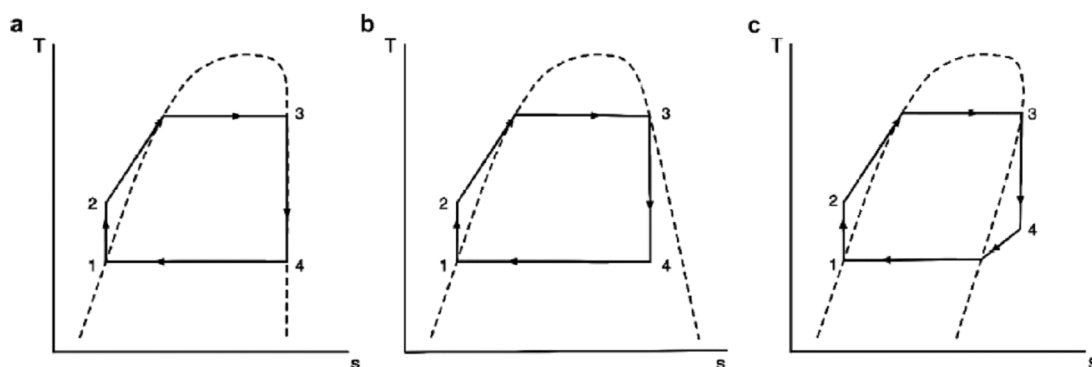
4.1.1 Οργανικός κύκλος Rankine.

Η διεργασία του οργανικού κύκλου Rankine (ORC-Organic Rankine Cycle) είναι πανομοιότυπη με τον κλασσικό κύκλο Clausius-Rankine, με μόνη διαφορά τη χρήση κάποιου οργανικού μέσου αντί για νερό.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την κατηγοριοποίηση των οργανικών κύκλων Rankine είναι το σχήμα της καμπύλης κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα θερμοκρασίας εντροπίας. Η καμπύλη κορεσμένου ατμού μπορεί να έχει είτε μορφή καμπάνας είτε να παρουσιάζει «προεξοχή». Ανάλογα με την κλίση της καμπύλης κορεσμού τα οργανικά ρευστά χαρακτηρίζονται ως ξηρά, υγρά ή ισεντροπικά, δηλαδή για θετική κλίση το

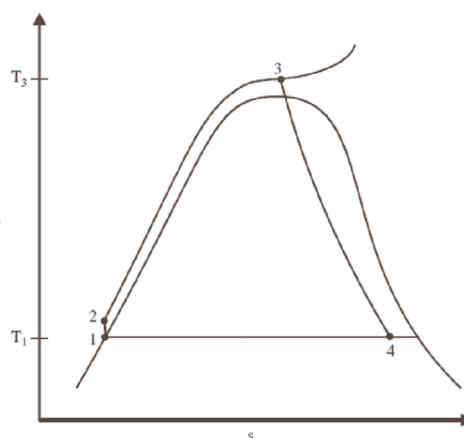
Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

ρευστό χαρακτηρίζεται υγρό, για αρνητική ξηρό, ενώ στην ειδική περίπτωση που η κλίση απειρίζεται το ρευστό χαρακτηρίζεται ως ισεντροπικό.



Σχήμα 4.3 Σύγκριση εργαζόμενων μέσων (a) ισεντροπικό (b) υγρό (καμπύλη με μορφή "καμπάνας") και (c) ξηρό (καμπύλη με προεξοχή).

Ακόμη ένα χαρακτηριστικό κατηγοριοποίησης των οργανικών κύκλων Rankine είναι η πίεση στην οποία το εργαζόμενο μέσο απορροφά θερμότητα. Για υποκρίσιμες πιέσεις το ρευστό υφίσταται αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, ενώ για υπερκρίσιμες πιέσεις αυτή η αλλαγή φάσης δεν λαμβάνει χώρα.



Σχήμα 4.4 Οργανικός κύκλος Rankine για υπερκρίσιμη πίεση.

4.1.2 Εργαζόμενα μέσα για τον κύκλο Rankine.

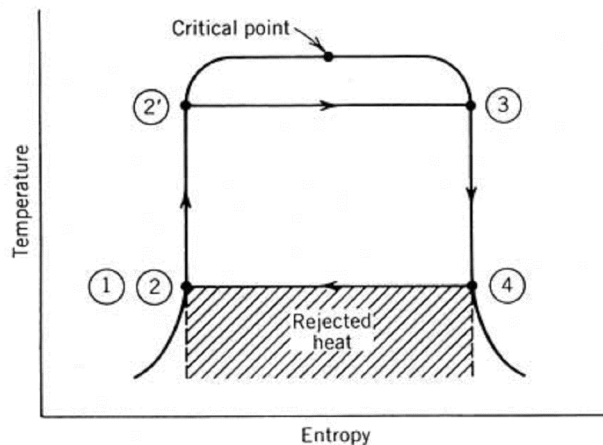
Μια προφανής απαίτηση, για να επιτευχθεί υψηλός θερμοκός βαθμός απόδοσης και να γίνει χρήση όσο το δυνατόν περισσότερης διαθέσιμης ενέργειας, είναι η επιλογή του κατάλληλου οργανικού εργαζόμενου μέσου. Ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την επιλογή του οργανικού μέσου είναι οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται εξ' αιτίας της διαθέσιμης πηγής ενέργειας, οι οποίες μπορεί να έχουν εύρος από 100°C έως 350°C. Ένα ζήτημα το οποίο θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν όταν αναφερόμαστε σε οργανικούς κύκλους Rankine, είναι κατά πόσο η οργανική ουσία παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με το νερό για τη

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

συγκεκριμένη διεργασία. Αυτό το ζήτημα προκύπτει κυρίως για τις μέσες θερμοκρασίες, αφού όσον αφορά τις χαμηλές το πλεονέκτημα των οργανικών ουσιών είναι προφανές εξ' αιτίας του λόγου του όγκου του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο και στην έξοδο του στροβίλου. Αυτός μπορεί να είναι μικρότερος κατά μια τάξη μεγέθους για τα οργανικά ρευστά σε σχέση με το νερό επιτρέποντας έτσι τη χρήση απλούστερων και φθηνότερων στροβίλων.

Η επιλογή του κατάλληλου εργαζόμενου μέσου για χρήση σε οργανικούς κύκλους Rankine απαιτεί εκτεταμένη έρευνα με σκοπό την ανεύρεση των παρακάτω επιθυμητών θερμοδυναμικών και φυσικών χαρακτηριστικών: κατάλληλα χαμηλή κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία, μικρός ειδικός όγκος, μικρή συνεκτικότητα και επιφανειακή τάση, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, θερμική ευστάθεια, μη διαβρωτική και μη τοξική δράση και τέλος συμβατότητα με τα υλικά κατασκευής της μηχανής και το λιπαντικό λάδι.

Οι μελέτες των διάφορων ερευνητών έχουν υποδείξει κάποια οργανικά εργαζόμενα μέσα τα οποία είναι περιβαλλοντικά αποδεκτά. Κύριο επιθυμητό θερμοδυναμικό χαρακτηριστικό των μέσων αυτών αποτελεί η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα και η σχεδόν κάθετη γραμμή κορεσμένου υγρού έτσι ώστε το μεγαλύτερο ποσό θερμότητας να προσδίδεται κατά την αλλαγή φάσης χωρίς να χρειάζεται αναγεννητική τροφοδοσία θερμότητας για να επιτευχθεί υψηλός βαθμός απόδοσης. Εκτός αυτού η σχεδόν κάθετη γραμμή κορεσμένου ατμού είναι επιθυμητή, έτσι ώστε αφενός να προκύπτει λίγη υγρασία κατά την αποτόνωση και αφετέρου να μην είναι αναγκαία η συμπύκνωση υπέρθερμου ατμού.



Σχήμα 4.5 Ιδεατό εργαζόμενο μέσο για τον κύκλο Rankine.

Επιπλέον σημεία ενδιαφέροντος όσον αφορά τα οργανικά εργαζόμενα μέσα αποτελούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους και η χημική τους σταθερότητα. Η συμβολή που έχουν τα συγκεκριμένα οργανικά μέσα στην καταστροφή του ατμοσφαιρικού όζοντος (ODP- Ozone Depletion potential) και στην ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου (GWP- Global Warming Potential) καθώς και άλλες ιδιότητες τους όπως ο ατμοσφαιρικός χρόνος ζωής (ALT- Atmospheric Lifetime) μελετώνται από οργανισμούς όπως το Πρακτορείο Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA- Environmental Protection Agency) οι οποίοι εκδίδουν εκτεταμένα στοιχεία.

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

Όσον αφορά την ασφάλεια, η ευφλεκτότητα και η αυτανάφλεξη είναι δύο παράγοντες που θα πρέπει να αναφερθούν. Η εμπειρία έχει δείξει ότι παρότι αρκετές ουσίες είναι εύφλεκτες, δεν παρατηρούνται προβλήματα ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Η αυτανάφλεξη αντιθέτως αποτελεί πρόβλημα για τα σύνθετα αλκάνια (C_nH_{2n+2}) όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τους 200°C. Ένας άλλος παράγοντας προβληματισμού είναι η χημική σταθερότητα των οργανικών μέσων. Παρότι δεν έχει γίνει ενδελεχής έρευνα επάνω στο συγκεκριμένο θέμα, υπάρχουν ενδείξεις ότι δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα κυρίως για τα αλκάνια.

Ιδιότητα	Νερό	Μεθανόλη	2-μεθυλο- πυριδίνιο/νερό)	Fluorinol 85	Τολουένιο	Φρέον R-11	Φρέον R-113
Μοριακό βάρος	18	32	33	88	92	137	187
Σημείο βρασμού (1atm) (°C)	100	64	93	75	110	24	48
Πυκνότητα (kg/m ³)	999,5	749,6	934	1370	856,9	1476	1565
Ειδικός όγκος (κορεσμένος ατμός στο σημείο βρασμού) (m ³ /kg)	1,69	0,8	0,87	0,31	0,34	0,17	0,14
Μέγιστη θερμοκρασία σταθερότητας (°C)	–	175-230	370-400	290-330	400-425	150-175	175-230
Υγρό-ξηρό μέσο	Υγρό	υγρό	υγρό	υγρό	Ξηρό	Και τα δύο	Ξηρό
Θερμότητα ατμοποίησης στη 1 atm (kJ/kg)	2256	1098	879	442	365	181	146
Ισοεντροπική ενθαλπική πτώση στο στρόβιλο (kJ/kg)	348-1160	162-302	186-354	70-186	116-232	23-46	23-46

Πίνακας 4.1 Φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες των κυρίως καταλλήλων εργαζομένων μέσων για τον κύκλο Rankine.

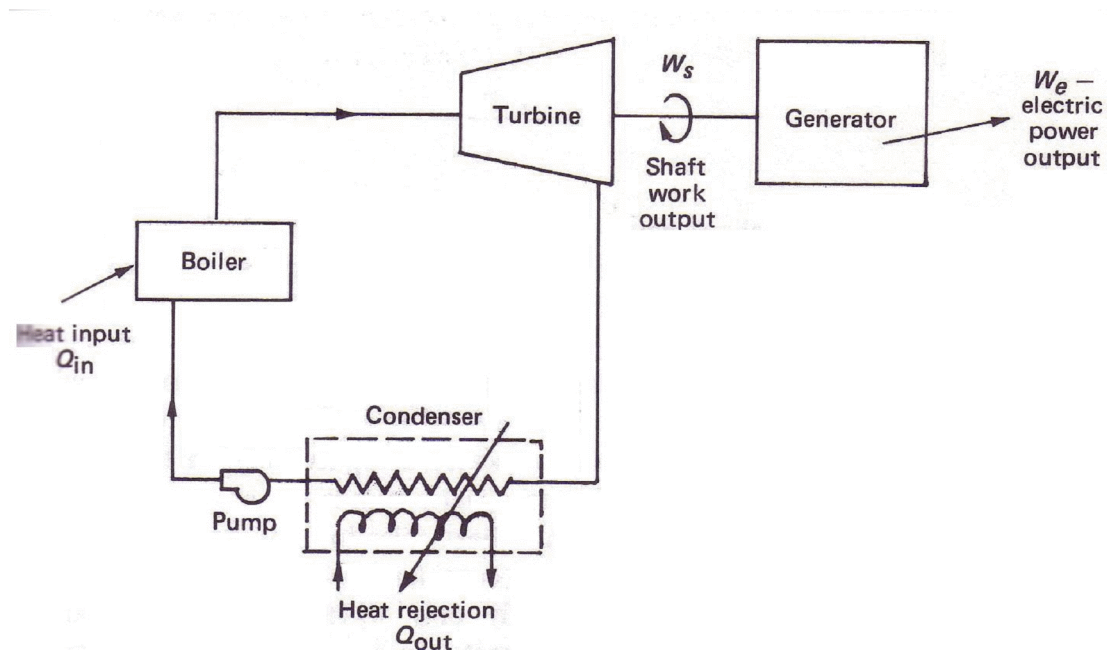
4.2 Αρχή παραγωγής ηλιακού θερμικού έργου.

Πρακτικά το σύνολο το θερμικών σταθμών παραγωγής ισχύος λειτουργούν με χρήση του κύκλου Rankine. Για τη λειτουργία ενός θερμικού σταθμού είναι απαραίτητη η πρόσδοση θερμότητας στο λέβητα, όπου το εργαζόμενο μέσο, συνήθως νερό, εξατμίζεται κι έπειτα υπερθερμαίνεται. Ο υπέρθερμος ατμός εισέρχεται στο στρόβιλο, όπου αφαιρείται η ενέργειά του μέσω των βαθμίδων και έτσι παράγεται έργο στον

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

άξονα που είναι συνδεδεμένος στο στρόβιλο. Το εργαζόμενο μέσο που εγκαταλείπει το στρόβιλο είναι ακόμη ατμός, αλλά σε χαμηλή πίεση και σχετικά χαμηλή θερμοκρασία. Επιστρέφει στην υγρή φάση στο συμπυκνωτή, όπου αφαιρείται η λανθάνουσα θερμότητά του. Η θερμότητα που αφαιρείται από το εργαζόμενο μέσο θα πρέπει να απορριφθεί σε μια δεξαμενή θερμότητας που μπορεί να είναι μια δεξαμενή νερού, αν είναι διαθέσιμη, ή η ατμόσφαιρα. Η μεταφορά θερμότητας στο συμπυκνωτή, που είναι ένα αναγκαίο στάδιο σε οποιονδήποτε θερμικό κύκλο, αποτελεί τη βασική αιτία θερμικής μόλυνσης.

Μετά το συμπυκνωτή, το υγρό καταθλίβεται σε υψηλή πίεση μέσω μιας αντλίας και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Η συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας έγκειται στην πρόσδοση μέρους ή όλης της θερμότητας που απαιτείται από το λέβητα. Δεδομένου ότι η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη συνεχώς, θα πρέπει να υπάρχει θερμική αποθήκευση ικανή να παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε περιπτώσεις κακοκαιρίας. Διαφορετικά θα πρέπει να γίνεται χρήση μιας βοηθητικής συμβατικής πηγής ενέργειας η οποία θα παράγει την απαιτούμενη θερμότητα, όταν η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη.



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα θερμικού σταθμού που λειτουργεί με κύκλο Rankine.

Θεωρητικά ο πιο αποδοτικός κύκλος για θερμική παραγωγή έργου είναι ο κύκλος Carnot. Δεν είναι πρακτικά χρησιμοποιήσιμος εξ' αιτίας των απωλειών θερμότητας και τριβής στις πραγματικές μηχανές, οι οποίες μειώνουν την απόδοση μιας μηχανής Carnot κάτω από το επίπεδο που μπορεί να επιτευχθεί με τον κύκλο Rankine. Παρόλα αυτά, για μια αρχική ανάλυση της απόδοσης του θερμικού σταθμού θεωρούμε, ότι πρόκειται για ένα ιδανικό ηλιακό σύστημα Carnot. Εάν αμεληθούν οι απώλειες λόγω τριβής και η ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι:

$$\eta = \frac{W_s}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} \quad (4.1)$$

όπου W_s το παραγόμενο έργο, Q_{in} η προσδιδόμενη και Q_{out} η απορριπτόμενη από το σύστημα θερμότητα. Στον θεωρητικό κύκλο Carnot, η πρόσδοση και η απόρριψη θερμότητας λαμβάνουν χώρα σε σταθερές θερμοκρασίες, έστω T_1 και T_2 αντιστοίχα, ενώ η συμπίεση και η αποτόνωση του εργαζόμενου μέσου είναι ισοεντροπικές. Ο βαθμός απόδοσης Carnot δίνεται ως γνωστόν από τη σχέση

$$\eta_E = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (4.2)$$

Ανάλυση της παραπάνω σχέσης οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι για να επιτευχθεί υψηλός βαθμός απόδοσης, θα πρέπει η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη, ενώ η θερμοκρασία της δεξαμενής απόρριψης να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Η θερμοκρασία της δεξαμενής απόρριψης, καθορίζεται ουσιαστικά από το περιβάλλον, του οποίου η θερμοκρασία επηρεάζεται από συνθήκες που δεν επιδέχονται έλεγχο. Η μόνη επιλογή που μπορεί να γίνει είναι εάν θα χρησιμοποιηθεί αέρας ή νερό ως μέσο αποθήκευσης.. Οι συμβατικοί θερμικοί σταθμοί που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, τα οποία μεταφέρονται εύκολα, είναι συνήθως εγκατεστημένοι κατά μήκος ποταμών ή γενικότερα κοντά σε μεγάλες υδάτινες μάζες, διότι η απόρριψη θερμότητας σε μια υδάτινη δεξαμενή είναι λιγότερο ακριβή και μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από ότι η απόρριψη στον ατμοσφαιρικό αέρα. Όσον αφορά τους ηλιακούς θερμικούς σταθμούς, εισέρχονται επιπλέον παράγοντες σε σχέση με την επιλογή της περιοχής εγκατάστασης. Η ηλιακή ενέργεια παρέχεται με οικονομικό όφελος σε περιοχές, όπου η γη είναι φθηνή και η ηλιοφάνεια υψηλή. Στις περιοχές αυτές, η ποσότητα του νερού είναι ανεπαρκής για τις ανάγκες του συμπυκνωτή. Συνεπώς, η απόρριψη θερμότητας σε έναν αερόψυκτο συμπυκνωτή ίσως είναι απαραίτητη.

Η δεύτερη απαίτηση για την απόκτηση υψηλού βαθμού απόδοσης είναι να θερμανθεί το εργαζόμενο μέσο σε υψηλή θερμοκρασία. Το κύριο πρόβλημα με αυτή την προσέγγιση είναι οι πρακτικές δυσκολίες επίτευξης υψηλής θερμοκρασίας, ο εφικτός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από ένα εργαζόμενο μέσο υψηλών θερμοκρασιών στο δέκτη, τα θερμοκρασιακά όρια που θέτουν το εργαζόμενο μέσο και τα υλικά κατασκευής και τέλος το κόστος των ανακλαστήρων με συνεχή παρακολούθηση της πορείας του ήλιου.

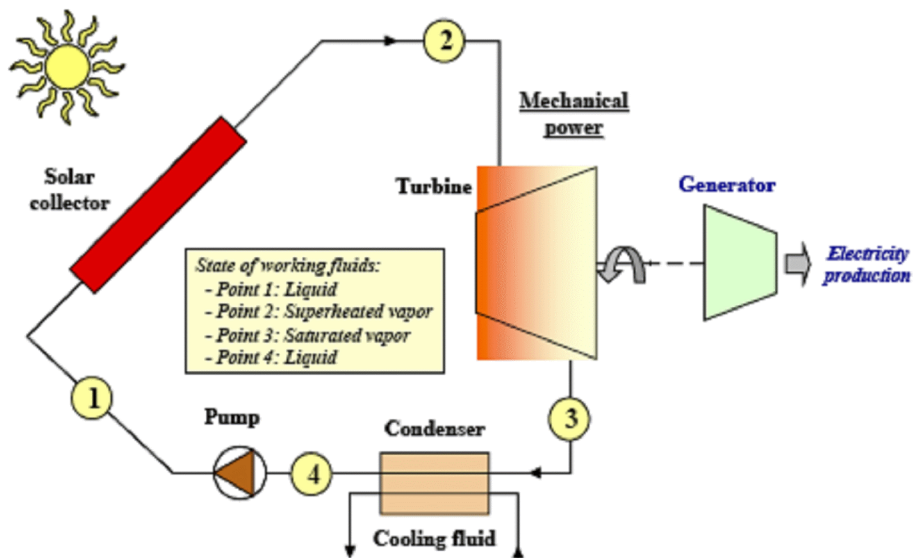
Η απόδοση οποιουδήποτε ηλιακού θερμικού σταθμού έχει ακόμη έναν σημαντικό περιορισμό, τη θερμική απόδοση των ηλιακών συλλεκτών, η οποία μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες σε έναν ηλιακό συλλέκτη, είναι σημαντικό να

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

χρησιμοποιηθεί επιλεκτική επιφάνεια για το δέκτη και το σύστημα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας με σκοπό την επίτευξη μεγάλης πυκνότητας ροής της ακτινοβολίας. Αλλά ανεξαρτήτως αυτών των βελτιώσεων, η απόδοση του συλλέκτη θα μειωθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας. Συμπερασματικά, για ένα σύστημα παραγωγής έργου με χρήση ηλιακού συλλέκτη και θερμικού κύκλου, ο συνολικός βαθμός απόδοσης προκύπτει από το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη και το βαθμό απόδοσης του κύκλου ως εξής

$$\eta_{overall} = \eta_c \eta_E \quad (4.3)$$

Δεδομένου ότι ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη μειώνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας, ενώ ο βαθμός απόδοσης του κύκλου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, θα υπάρχει μια ιδεατή θερμοκρασία για τη λειτουργία του ηλιακού θερμικού σταθμού.



Σχήμα 4.7 Σχηματική απεικόνιση ηλιακού θερμικού σταθμού που λειτουργεί με κύκλο Rankine.

4.3 Παραγωγή έργου με τη χρήση πεδίου συλλεκτών παραβολικών κατόπτρων.

Η θερμική απόδοση ενός συστήματος παραβολικών κατόπτρων είναι δυνατόν να αποδοθεί με τη χρήση του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης, ο οποίος ορίζεται ως το ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος του πεδίου ηλιακών συλλεκτών προς την προσπίπτουσα στους απορροφητικούς σωλήνες ηλιακή ακτινοβολία:

$$\eta_{FIELD} = \frac{\dot{Q}_u}{A_a \cdot I_{bn} \cdot \cos \theta \cdot IAM} \quad (4.4)$$

όπου \dot{Q}_u : ο ρυθμός του ωφέλιμου ενεργειακού κέρδους [W]

A_a : η συνολική επιφάνεια ανοίγματος (παραθύρου) όλων των συλλεκτών του πεδίου [m²]

I_{bn} : η άμεσος κάθετη ακτινοβολία [W/m²]

θ : η γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια

IAM : ο τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης

4.3.1 Τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης (IAM –Incidence Angle Modifier).

Δεδομένου ότι σχεδόν εξ' ολοκλήρου στις εφαρμογές παραγωγής ηλιακού θερμικού έργου χρησιμοποιούνται παραβολικοί συλλέκτες κενού, προκύπτουν επιπρόσθετες απώλειες που οφείλονται στην ανάκλαση και την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας από το γυάλινο φάκελο που περιβάλλει το σωλήνα απορρόφησης θερμότητας. Οι επιπρόσθετες αυτές απώλειες λόγω ανάκλασης και απορρόφησης λαμβάνονται υπ' όψιν από τον τροποποιητή γωνίας πρόσπτωσης, ο οποίος δίνεται μέσω εμπειρικών σχέσεων που βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα για καθορισμένο τύπο συλλέκτη. Μια εμπειρική σχέση που έχει προκύψει για τους ευρέως χρησιμοποιούμενους συλλέκτες LS-2 είναι η εξής:

$$IAM = 1 + 0,000884 \frac{\theta}{\cos \theta} - 0,00005369 \frac{\theta^2}{\cos \theta} \quad (4.5)$$

4.3.2 Σκίαση σειρών και «απώλειες άκρων».

Η τοποθέτηση και η γεωμετρία των παραβολικών κατόπτρων και των απορροφητικών σωλήνων παρουσιάζει επιπλέον απώλειες, εξ' αιτίας της σκίασης παραλλήλων σειρών κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες, καθώς και τις «απώλειες άκρων» του απορροφητικού σωλήνα.

Θεωρώντας ότι οι συλλέκτες παρακολουθούν την πορεία του ήλιου, κατά τις πρωινές ώρες, όλοι οι συλλέκτες κοιτούν ανατολικά. Λόγω του χαμηλού ηλιακού ύψους κατά τις πρωινές ώρες, η πρώτη σειρά κατά την ανατολή λαμβάνει πλήρη ηλιακή ακτινοβολία, όμως οι σειρές που επακολουθούν θα σκιάζονται από τη σειρά αυτή. Καθώς ο ήλιος ανεβαίνει και οι συλλέκτες συνεχίζουν να παρακολουθούν την πορεία του, το φαινόμενο της αμοιβαίας σκίασης μειώνεται, μέχρι μια κρίσιμη γωνία ζενίθ όπου το φαινόμενο δε λαμβάνει πλέον χώρα. Η αμοιβαία σκίαση ανάμεσα στις σειρές επανεμφανίζεται κατά τις απογευματινές ώρες, όπου το ηλιακό ύψος είναι και πάλι χαμηλό. Η σκίαση των σειρών μειώνει την απόδοση του συλλέκτη, δεδομένου ότι μειώνεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο συλλέκτη.

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

Οι «απώλειες άκρων» λαμβάνουν χώρα στα άκρα του σωλήνα απορρόφησης θερμότητας, όπου, για μη μηδενικές γωνίες πρόσπτωσης, ένα μέρος του μήκους του απορροφητικού σωλήνα δε δέχεται καθόλου ανακλώμενη ακτινοβολία από τα κάτοπτρα.

4.3.3 Απώλειες πεδίου.

Οι οπτικές απώλειες του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών έγκεινται στις ιδιότητες και τις ατέλειες της επιφάνειας των παραβολικών κατόπτρων, του γυάλινου φακέλου και των υλικών του απορροφητικού σωλήνα. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να απορροφηθεί ή να διασκορπιστεί από ακαθαρσίες στα κάτοπτρα ή να ανακλαστεί με λάθος τρόπο λόγω επιφανειακών ατελειών ή σφαλμάτων παρακολούθησης. Οι επιφανειακές αυτές ιδιότητες σε συνδυασμό με τη σκίαση, τις «απώλειες άκρων», τον τροποποιητή γωνίας πρόσπτωσης και το μέρος του πεδίου που είναι διαθέσιμο προς παρακολούθηση του ηλίου, εάν εκφραστούν με όρους βαθμού απόδοσης, δίνουν το συνολικό βαθμό απόδοσης του πεδίου μέσω της σχέσης:

$$\eta_{field} = \eta_{IAM} \eta_{sh} \eta_{end} \eta_{track} \eta_{acc} \eta_{refl} \eta_{clean} \quad (4.6)$$

όπου $\eta_{IAM} \eta_{sh} \eta_{end} \eta_{track} \eta_{acc} \eta_{refl} \eta_{clean}$ είναι οι βαθμοί απόδοσης με βάση τον τροποποιητή γωνίας πρόσπτωσης, τη σκίαση, τις απώλειες άκρων, την παρακολούθηση της πορείας του ήλιου, την επιφανειακή ακρίβεια, την ακρίβεια της ανάκλασης και την καθαρότητα των κατόπτρων.

4.3.4 Οπτικές απώλειες δέκτη.

Η συνολική επίδραση των παραμέτρων επιφάνειας και διόρθωσης στη διάταξη απορρόφησης ενέργειας συνοψίζονται ως ένας ενιαίος βαθμός απόδοσης:

$$\eta_{REC,opt} = \eta_{dust} \eta_{envtrans} \eta_{abs} \eta_{misc} \quad (4.7)$$

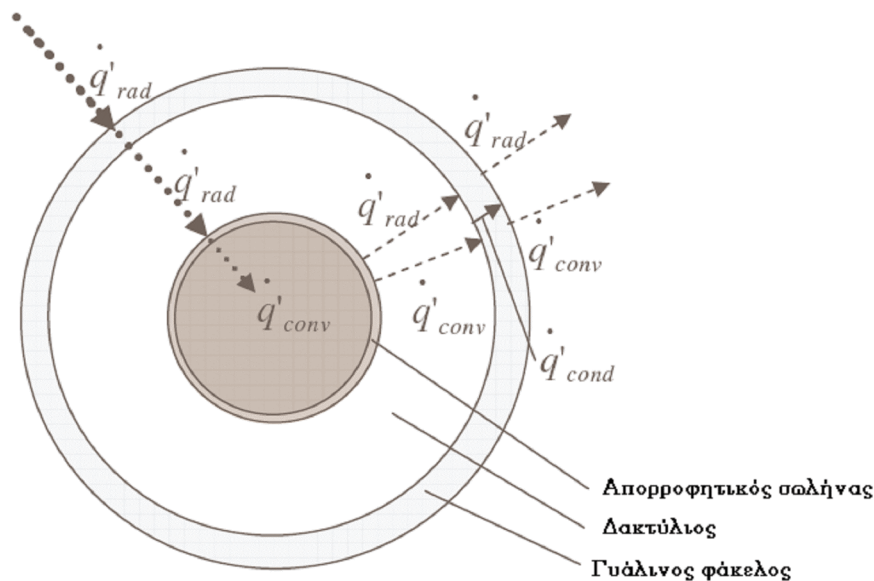
όπου $\eta_{dust} \eta_{envtrans} \eta_{abs} \eta_{misc}$ είναι οι βαθμοί απόδοσης με βάση τη σκόνη που επικάθεται στο γυάλινο φάκελο, την εκπομπή του «φακέλου», την απορροφητικότητα της επιλεκτικής επιστρώσης, καθώς και έναν παράγοντα στον οποίο συγκεντρώνονται τυχόν άλλες απώλειες. Τυπικές ιδιότητες επιφάνειας και παράμετροι διόρθωσης για το πεδίο των συλλεκτών και τη διάταξη συλλογής ενέργειας δίνονται στον πίνακα 4.2.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
η_{track}	0,99	η_{dust}	0,98
η_{acc}	0,98	η_{envtrans}	0,96
η_{refl}	0,93	η_{abs}	0,95
η_{clean}	0,95	η_{misc}	0,96

Πίνακας 4.2 Τυπικές τιμές οπτικών παραμέτρων παραβολικών συλλεκτών και πεδίου.

4.3.5 Θερμικές απώλειες δέκτη.

Καθώς το ρευστό μεταφοράς ενέργειας που βρίσκεται εντός του δέκτη απορροφά ενέργεια, η θερμοκρασία του θα αυξηθεί. Αυτή η αύξηση δημιουργεί μια διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία της μάζας του ρευστού και τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Οι απώλειες θερμότητας από τον απορροφητικό σωλήνα προς το γυάλινο «φάκελο», καθώς και από το γυάλινο φάκελο προς τον ατμοσφαιρικό αέρα, οφείλονται σε αυτή τη θερμοκρασιακή διαφορά. Το σχήμα 4.7 δείχνει τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τις απώλειες ανάμεσα στις επιφάνειες του συλλέκτη και το περιβάλλον.



Σχήμα 4.8 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας που επιδρούν στις επιφάνειες συλλογής θερμότητας.

Η ροή θερμότητας σε κάθε επιφάνεια των στοιχείων συλλογής θερμότητας θα πρέπει να εξισορροπεί τις ροές που εγκαταλείπουν την επιφάνεια. Για δεδομένη θερμοκρασία ρευστού, ηλιοφάνεια, συνθήκες περιβάλλοντος, διαστάσεις στοιχείου συλλογής θερμότητας και ιδιότητες επιφάνειας, ο ενεργειακός ισολογισμός σε κάθε επιφάνεια του στοιχείου συλλογής θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των επιφανειακών θερμοκρασιών, της καθαρής ροής θερμότητας που

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου
 απορροφάται από το ρευστό και της καθαρής ροής θερμότητας που χάνεται προς το περιβάλλον.

4.3.6 Γραμμικό μοντέλο απωλειών θερμότητας.

Η διατύπωση ενός απλοποιημένου μοντέλου έχει γίνει μέσω της αναγνώρισης των κυρίαρχων μηχανισμών που συνεισφέρουν στην απώλεια θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο διαμέσου του συλλέκτη. Μιας και οι ροές θερμότητας σε κάθε επιφάνεια θα πρέπει να εξισορροπούνται, η ροή θερμότητας από την ακραία επιφάνεια του στοιχείου συλλογής θερμότητας θα επηρεάζεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία στη συγκεκριμένη επιφάνεια. Σημαντικό αντίκτυπο στις θερμικές απώλειες έχει και η παροχή μάζας του ρευστού, καθώς η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής αυξάνει για μεγαλύτερες παροχές. Η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος επηρεάζει τις απώλειες θερμότητας, καθώς χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνει τη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο μέσο μεταφοράς θερμότητας και το περιβάλλον εντείνοντας έτσι τις απώλειες θερμότητας. Τέλος, η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει τις απώλειες θερμότητας, καθώς αυξάνει το συντελεστή συναγωγής από την εξώτατη επιφάνεια του στοιχείου συλλογής ενέργειας προς τον αέρα του περιβάλλοντος. Η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου θεωρείται αμελητέα, με εξαίρεση την περίπτωση όπου δεν υφίσταται γυάλινος «φάκελος».

Η επίδραση της παροχής του μέσου μεταφοράς θερμότητας και της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος θεωρείται μικρή σε σχέση με την επίδραση της θερμοκρασίας της μάζας του ρευστού και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συνεπώς, οι απώλειες θερμότητας του συλλέκτη μοντελοποιούνται ως συνάρτηση των δύο αυτών μεταβλητών.

Η γραμμική ανάλυση των απωλειών ενός σωλήνα κενού με επιλεκτική επίστρωση για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C οδήγησε στην παρακάτω εξίσωση για τις απώλειες θερμότητας:

$$HL = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + I_{b,n} (b_0 + b_1 T^2) \quad (4.8)$$

όπου HL: η απώλεια θερμότητας από την εξώτατη επιφάνεια του δέκτη ανά μονάδα μήκους [W/m].

T: η θερμοκρασία του ρευστού [°C]

a,b: συντελεστές που δίνονται από τον πίνακα 4.3

Παράμετρος	Τιμή
α_0	-9,463033
α_1	$3,029616 \cdot 10^{-1}$
α_2	$-1,386833 \cdot 10^{-3}$
α_3	$6,929243 \cdot 10^{-6}$
b_0	$7,649610 \cdot 10^{-2}$
b_1	$1,128818 \cdot 10^{-7}$

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

Πίνακας 4.3 Συντελεστές της εξίσωσης απωλειών θερμότητας συλλέκτη.

Το μοντέλο απωλειών συλλέκτη, αναφέρεται στις απώλειες θερμότητας για σταθερή θερμοκρασία ρευστού. Για να γίνει δυνατή η χρήση της εξίσωσης 4.8 στο πεδίο των ηλιακών συλλεκτών όπου η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του πεδίου μπορεί να είναι έως και 100°C υψηλότερη από την αντίστοιχη στην είσοδο, αυτή ολοκληρώνεται για όλο το θερμοκρασιακό εύρος ανάμεσα στη θερμοκρασία εισόδου και εξόδου και διαιρείται με τη θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου-εξόδου από το πεδίο:

$$HL_{field} = \frac{a_0(T_0 - T_1) + \frac{a_1}{2}(T_0^2 - T_1^2) + \frac{a_2}{3}(T_0^3 - T_1^3) + \frac{a_3}{4}(T_0^4 - T_1^4) + I_{b,n} \left[b_0(T_0 - T_1) + \frac{b_1}{3}(T_0^3 - T_1^3) \right]}{(T_0 - T_1)} \quad (4.9)$$

όπου T_0 : η θερμοκρασία στην έξοδο του πεδίου [°C]

T_1 : η θερμοκρασία στην είσοδο του πεδίου [°C]

4.4 Παραγωγή έργου με τη χρήση πεδίου ηλιοστατών και κεντρικού δέκτη.

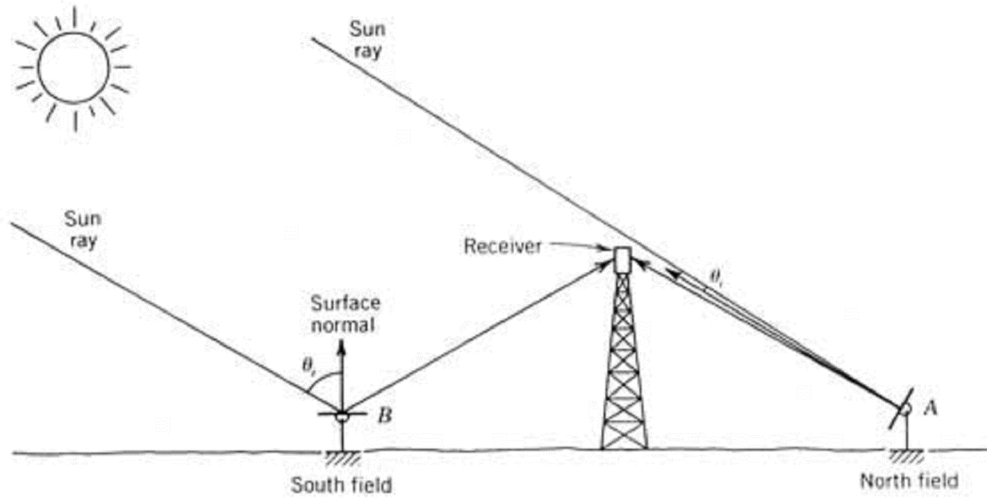
Η βασική διαφορά στο σχέδιο του κεντρικού δέκτη σε σχέση με τους συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων είναι ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται από ολόκληρο το πεδίο μεταδίδεται οπτικά σε μια μικρή κεντρική περιοχή συλλογής, αντί να κυκλοφορεί στις σωληνώσεις με τη μορφή θερμού ρευστού. Εξ' αιτίας του χαρακτηριστικού αυτού, τα συστήματα κεντρικού δέκτη επιτυγχάνουν υψηλότερες θερμοκρασίες από τα αντίστοιχα παραβολικών κατόπτρων, οι οποίες κυμαίνονται από 540 °C έως 840°C.

4.4.1 Η επίδραση του «συνημίτονου».

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τη βέλτιστη διάταξη του πεδίου είναι η «απόδοση συνημίτονου» του κάθε ηλιοστάτη. Η απόδοση αυτή βασίζεται στη θέση του ηλίου αλλά και στη θέση του ηλιοστάτη σε σχέση με το δέκτη. Ο ηλιοστάτης τοποθετείται με τέτοιο τρόπο από το μηχανισμό παρακολούθησης, ώστε η κάθετος στην επιφάνειά του να διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζεται από τις ακτίνες του ηλίου και μια νοητή ευθεία από τον ηλιοστάτη στο δέκτη. Η ενεργή ανακλαστική επιφάνεια του ηλιοστάτη μειώνεται κατά το συνημίτονο του μισού της γωνίας αυτής (θ). Η έννοια της «απόδοσης συνημίτονου» μπορεί να γίνει πιο κατανοητή εάν θεωρήσουμε τους ηλιοστάτες σε δύο θέσεις του πεδίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Ο ηλιοστάτης Α έχει πολύ μικρές απώλειες λόγω συνημίτονου, καθώς η κάθετος στην επιφάνειά του έχει σχεδόν κατεύθυνση προς το δέκτη. Ο ηλιοστάτης Β έχει πολύ μεγαλύτερες απώλειες λόγω συνημίτονου εξ'

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

αιτίας της θέσης που πρέπει να πάρει για να ανακλά τις ακτίνες του ηλίου στο δέκτη.



Σχήμα 4.9 Η επίδραση συνημίτονου για δύο ηλιοστάτες με αντίθετες κατευθύνσεις από το δέκτη.

Μια έκφραση για τον υπολογισμό του συνημίτονου αυτής της ημιγωνίας είναι η εξής:

$$\cos 2\theta_i = \frac{(z_0 - z_1) \sin a - e_1 \cos a \sin \gamma_s - n_1 \cos a \cos \gamma_s}{\left[(z_0 - z_1)^2 + e_1^2 + n_1^2 \right]} \quad (4.10)$$

όπου a : η γωνία ηλιακού ύψους

γ_s : το αζιμούθιο του ηλίου

z_1, n_1, e_1 : οι συντεταγμένες της ανακλαστικής επιφάνειας του ηλιοστάτη σε τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων (ηλιακό ζενίθ, βορράς, ανατολή) με αρχή των αξόνων τη βάση του πύργου του κεντρικού δέκτη.

z_0 : ύψος της συλλεκτικής επιφάνειας του πύργου.

4.4.2 Ατμοσφαιρική μετάδοση.

Πολλοί παράγοντες που αφορούν τη διάταξη του πεδίου των ηλιοστατών υποδηλώνουν ότι το πεδίο θα πρέπει να εκτείνεται σε μεγάλη απόσταση βόρεια ενός ψηλού πύργου. Ένας πολύ σημαντικός περιορισμός στην απόσταση που τοποθετείται ένας ηλιοστάτης σε σχέση με τον πύργο είναι η εξασθένηση της ανακλώμενης δέσμης καθώς ταξιδεύει από τον ηλιοστάτη στο δέκτη.

Η ατμοσφαιρική μετάδοση τ_a δίνεται από προσεγγιστικές σχέσεις που ισχύουν για αίθρια (23km ορατότητα) και για ημέρα με νέφωση (5km ορατότητα).

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

$$\tau_{\alpha} = 0,99326 - 0,1046S + 0,017S^2 - 0,002845S^3 \text{ (αίθρια ημέρα)} \quad (4.11)$$

$$\tau_{\alpha} = 0,98707 - 0,2748S + 0,03394S^2 \text{ (ημέρα με νέφωση)} \quad (4.12)$$

όπου S: η απόσταση από την ανακλαστική επιφάνεια του ηλιοστάτη έως την επιφάνεια συλλογής του κεντρικού δέκτη [km].

4.4.3 Θερμική απόδοση του συστήματος.

Η θερμική απόδοση ενός συστήματος κεντρικού δέκτη γίνεται με όρους ενός συνολικού βαθμού απόδοσης. Είναι σύνηθες ο βαθμός απόδοσης να ορίζεται ως συνάρτηση της αμέσου κάθετης ακτινοβολίας και της συνολικής επιφάνειας όλων των ηλιοστατών του πεδίου. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι λοιπόν:

$$\eta_{REC} = \frac{\dot{Q}_u}{I_{b,n} n_h A_h} \quad (4.13)$$

όπου \dot{Q}_u : ο ρυθμός ενέργειας που προστίθεται στο εργαζόμενο μέσο [W]

n_h : ο συνολικός αριθμός ηλιοστατών στο πεδίο

A_h : η συνολική επιφάνεια του ηλιοστάτη (βασιζόμενη στις εξωτερικές διαστάσεις) [m²]

4.4.4 Ενεργειακές απώλειες.

Υπάρχουν δέκα σημαντικές πηγές απωλειών σε ένα σύστημα κεντρικού δέκτη που συνδυάζονται για να σχηματίσουν τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος συλλογής. Αυτές οι απώλειες μπορούν να προσδιορισθούν είτε ως απώλειες του πεδίου ή ως απώλειες του δέκτη. Ο πίνακας 4.4 κατηγοριοποιεί τις διάφορες απώλειες για ένα τυπικό σχέδιο κεντρικού δέκτη και τις διαχωρίζει ως μέρος της απόδοσης του πεδίου ή του δέκτη.

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

Συνιστώσα	Πηγή	Ποσοστιαία απώλεια	
		Σημείο Λειτουργίας (%)	Μέση ετήσια (%)
<u>Πεδίο</u>	Συνημίτονο	17,1	23,4
	Σκίαση και παρεμπόδιση	0,0	5,6
	Ανάκλαση	10,0	10,0
	Εξασθένηση	5,4	6,0
	Συνολικές απώλειες πεδίου	33,5	45,0
<u>Δέκτης</u>	Διαρροή	1,2	2,0
	Απορρόφηση	2,0	2,0
	Ακτινοβολία	6,3	9,8
	Αγωγή και συναγωγή	0,2	0,2
	Συνολικές απώλειες δέκτη	9,7	14,0
	Συνολικές απώλειες συστήματος	42,2	59,0
	Βαθμός απόδοσης συστήματος	57,8	41,0

Πίνακας 4.4 Απώλειες τυπικού συστήματος κεντρικού δέκτη.

4.4.5 Απώλειες πεδίου.

Οι ενεργειακές απώλειες που σχετίζονται ειδικά με το πεδίο των ηλιοστατών περιλαμβάνουν τέσσερις από τις πέντε σημαντικότερες πηγές ενεργειακών απωλειών. Ο μεγαλύτερος όρος απωλειών είναι οι απώλειες συνημίτονου, οι οποίες βέβαια μπορούν να μετριάσθουν με τον κατάλληλο σχεδιασμό του πεδίου.

Δεύτερος παράγοντας σε σημαντικότητα είναι οι απώλειες ανάκλασης των κατόπτρων. Παρότι έχουν κατασκευαστεί νέοι καθρέπτες χαμηλής απορροφητικότητας με ποσοστό ανάκλασης περίπου 94%, η γήρανση και η σκόνη μειώνουν την τιμή αυτή στο 90%. Ο καθαρισμός και η συντήρηση των καθρεπτών αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για τη μεγιστοποίηση της ετησίως παραγόμενης ενέργειας.

Ο τρίτος παράγοντας απωλειών είναι η ατμοσφαιρική εξασθένηση της ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, η επίδραση του παράγοντα αυτού γίνεται σημαντική για πολύ μεγάλα πεδία, όπου οι εξωτερικοί ηλιοστάτες απέχουν μεγάλη απόσταση από τον κεντρικό δέκτη.

Τέλος, η παρεμπόδιση και η σκίαση αποτελούν έναν ακόμη παράγοντα απωλειών για την απόδοση της συστήματος κεντρικού δέκτη. Παρότι το μεσημέρι, όπου το ύψος του ηλίου είναι μέγιστο, δεν υφίσταται παρεμπόδιση ή σκίαση για ένα καλοσχεδιασμένο πεδίο, το φαινόμενο γίνεται σημαντικό κατά της πρωινές και της απογευματινές ώρες, ειδικά τη χειμερινή περίοδο, μιας και τότε ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ουρανό.

Ερμηνεύοντας αυτές τις απώλειες ως όρους αποδοτικότητας, ο βαθμός απόδοσης του πεδίου δίνεται από τη σχέση:

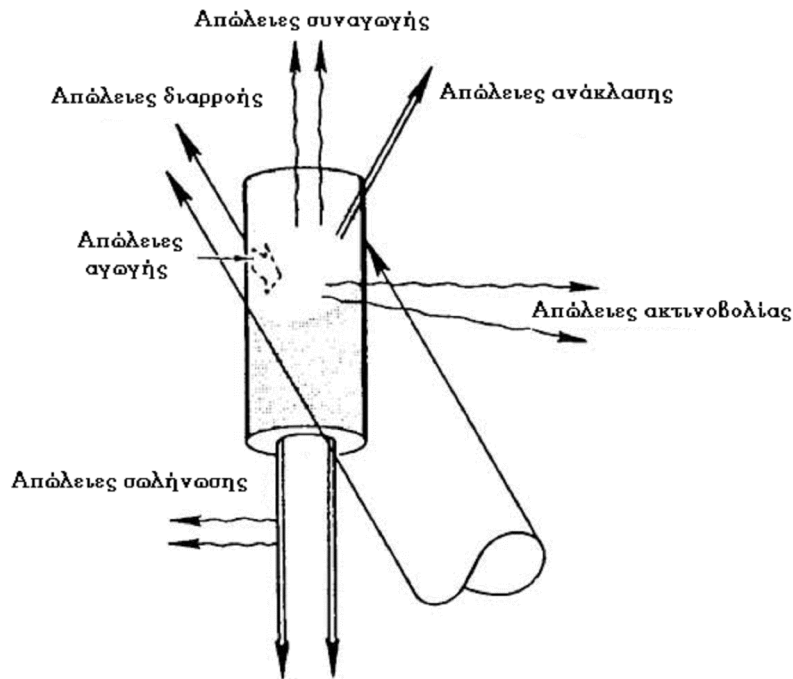
$$\eta_{field} = \eta_{\cos} \eta_{sh} \eta_{bl} \eta_{ref} \eta_{atten} \quad (4.14)$$

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

όπου η_{\cos} , η_{sh} , η_{bl} , η_{ref} , η_{atten} είναι οι βαθμοί απόδοσης με βάση το συνημίτονο, τη σκίαση, την παρεμπόδιση, την ανάκλαση των καθρεπτών και την ατμοσφαιρική εξασθένηση αντίστοιχα.

4.4.6 Απώλειες κεντρικού δέκτη.

Οι εναπομείνουσες απώλειες του πίνακα 4.4 που αναφέρονται στον κεντρικό δέκτη και απεικονίζονται στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10 Θερμικές απώλειες κεντρικού δέκτη.

Ο βαθμός απόδοσης του κεντρικού δέκτη μπορεί να οριστεί ως το γινόμενο της απόδοσης με βάση κάθε παράγοντα απωλειών:

$$\eta_{rec} = \eta_{sp} \eta_{abs} \eta_{rad} \eta_{conv} \eta_{cond} \quad (4.15)$$

όπου η_{sp} , η_{abs} , η_{rad} , η_{conv} , η_{cond} είναι οι βαθμοί απόδοσης με βάση τις απώλειες διαρροής, απορρόφησης, ακτινοβολίας, συναγωγής και αγωγής αντίστοιχα.

Η πιο σημαντική ενεργειακή απώλεια του δέκτη προέρχεται από τη μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας στο περιβάλλον. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από το σχεδιασμό του συλλέκτη, την επιφάνεια συλλογής ενέργειας και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Επιπρόσθετοι παράγοντες συμπεριλαμβάνουν την ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τον προσανατολισμό του συλλέκτη.

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής συναρτώνται κυρίως του μεγέθους του δέκτη και της θερμοκρασίας λειτουργίας. Όσον αφορά τα σύγχρονα σχέδια συστημάτων, ο δέκτης λειτουργεί σε σταθερή θερμοκρασία. Συνεπώς, ο ρυθμός με τον οποίο χάνεται ενέργεια από το δέκτη είναι στην ουσία σταθερός κατά τη διάρκεια της ημέρας (και του έτους), ενώ το ποσοστό των απωλειών αυξάνεται κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες. Το γεγονός αυτό καθιστά τις μέσες ποσοστιαίες ετήσιες απώλειες μεγαλύτερες από τις απώλειες στο σημείο λειτουργίας (μεσημέρι), όπως φαίνεται και από τον πίνακα 4.4.

Οι απώλειες διαρροής, δηλαδή η ενέργεια που κατευθύνεται μεν προς το δέκτη αλλά δεν προσπίπτει στην απορροφητική επιφάνεια, εξαρτώνται από το πεδίο των ηλιοστατών αλλά και το σχεδιασμό του συλλέκτη. Η επιφανειακή ακρίβεια των ηλιοστατών, η διασπορά της ηλιακής δέσμης, η ακρίβεια στην κλίση των καθρεπτών, και η παρακολούθηση της πορείας του ηλίου είναι παράγοντες που έχουν σημαντική επίδραση στην κατανομή της ενέργειας στο δέκτη και συνεπώς στις απώλειες διαρροής.

Οι απώλειες διαρροής μπορούν να μειωθούν με την αύξηση του μεγέθους του δέκτη. Ο δέκτης κατασκευάζεται συνήθως τόσο μεγάλος, ώστε να δέχεται το μεγαλύτερο μέρος της ανακλώμενης από το πεδίο των ηλιοστατών ακτινοβολίας και να διατηρεί τη μέγιστη τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας εντός του θερμοκρασιακού εύρους που επιτάσσεται από το εργαζόμενο μέσο. Εντούτοις, το μέγεθός του περιορίζεται από τις θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας οι οποίες είναι ανάλογες της επιφάνειας του δέκτη. Ο καθορισμός του βέλτιστου μεγέθους του δέκτη απαιτεί πολυάριθμες προσομοιώσεις υπολογιστικών προγραμμάτων.

Σε αντίθεση με τη διαρροή, η απορροφητικότητα του δέκτη είναι συνάρτηση μόνο της επίστρωσης της επιφάνειάς του. Τα περισσότερα σύγχρονα σχέδια χρησιμοποιούν μπογιά υψηλής απορροφητικότητας που είναι γνωστή με το εμπορικό όνομα Pyromark. Η μπογιά αυτή ενδείκνυται για επιφάνειες υψηλής θερμοκρασίας και επιτυγχάνει απορροφητικότητα της τάξης του 95%. Εάν η απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται εντός κοιλότητας, η συνολική απορροφητικότητα (εξ' αιτίας και της ανάκλασης από το «παράθυρο» της κοιλότητας πίσω στην απορροφητική επιφάνεια) αυξάνεται στο 98%.

Ο τελευταίος όρος ενεργειακών απωλειών αναφέρεται στη θερμότητα που απάγεται από το δέκτη λόγω αγωγής. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας χάνεται από τους βραχίονες που συνδέουν το δέκτη με τον υπόλοιπο πύργο. Οι απώλειες λόγω αγωγής αποτελούν συνήθως μικρό μέρος των συνολικών απωλειών και διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα ελαχιστοποιώντας τα σημεία σύνδεσης του δέκτη με τον πύργο και χρησιμοποιώντας μέταλλα με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως το ανοξείδωτο ατσάλι.

Οι συνιστώσες του κυκλώματος νερού/ατμού ενός ηλιακού θερμικού σταθμού, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η παραγωγή έργου, δε διαφέρουν λειτουργικά από αυτές ενός συμβατικού ατμοηλεκτρικού σταθμού. Οι κύριες διαφορές έγκεινται στη μορφολογία των εναλλακτών θερμότητας (προθερμαντής HTF, ατμοποιητής, υπερθερμαντής αναθερμαντής), αφού όσον αφορά τους ηλιακούς θερμικούς σταθμούς δεν υφίσταται θάλαμος καύσης και η πρόσδοση θερμότητας γίνεται, μέσω αντιρροής, από το θερμότερο εργαζόμενο μέσο προς το ψυχρότερο νερό/ατμό.

4.5.1 Υπερθερμαντής-Αναθερμαντής.

Ο υπερθερμαντής και ο αναθερμαντής είναι εναλλάκτες θερμότητας που αυξάνουν τη θερμοκρασία του εισερχόμενου ατμού (ο οποίος εισέρχεται κοντά στην κατάσταση κορεσμού) πέρα από τη θερμοκρασία κορεσμού, αναφερόμενοι στην πίεση λειτουργίας.

Η θερμική απόδοση του υπερθερμαντή και του αναθερμαντή ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στο θερμό και στο ψυχρό ρεύμα προς τη μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στα δύο ρεύματα:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} \quad (4.16)$$

Για την εκτίμηση της \dot{Q}_{\max} , είναι απαραίτητο να ορισθεί η θερμοχωρητικότητα του κάθε ρεύματος, η οποία ισούται με την παροχή μάζας του ρεύματος επί την ειδική θερμότητα του ρευστού:

$$\dot{C}_C = \dot{m}_{st} cp_{st} \quad (4.17)$$

$$\dot{C}_H = \dot{m}_{HTF} cp_{HTF} \quad (4.18)$$

όπου \dot{C}_C : η θερμοχωρητικότητα του ρευστού στην κρύα πλευρά του εναλλάκτη (ατμός) [kW/K]

\dot{C}_H : η θερμοχωρητικότητα του ρευστού στη θερμή πλευρά του εναλλάκτη (μέσο μεταφοράς θερμότητας) [kW/K]

\dot{m}_{st} : παροχή μάζας ατμού [kg/s]

\dot{m}_{HTF} : παροχή μάζας μέσου μεταφοράς θερμότητας [kg/s]

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

$c_{p_{st}}$: μέση ειδική θερμότητα του ατμού ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του εναλλάκτη [kJ/kgK]

$c_{p_{HTF}}$: μέση ειδική θερμότητα του μέσου μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του εναλλάκτη [kJ/kgK]

Η μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στα δύο ρεύματα θα ισούται με τη μικρότερη θερμοχωρητικότητα επί τη θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευμάτων στην είσοδο του εναλλάκτη.

$$\dot{Q}_{\max} = C_{\min} (T_{HTF,i} - T_{st,i}) \quad (4.19)$$

όπου $C_{\min} = \min(\dot{C}_C, \dot{C}_H)$

Η αποδοτικότητα του εναλλάκτη θερμότητας σχετίζεται με δύο παραμέτρους: το λόγο θερμοχωρητικότητας των δύο ρευμάτων και τον αριθμό των μονάδων μεταφοράς του εναλλάκτη. Ο αριθμός μονάδων μεταφοράς ορίζεται ως ο λόγος του γινομένου του συντελεστή συναγωγιμότητας-επιφάνειας προς τη μικρότερη θερμοχωρητικότητα.

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (4.20)$$

Για εναλλάκτες αντιρροής, η αποδοτικότητα του συλλέκτη καθορίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{[-NTU(1-C^*)]}}{1 - C^* e^{[-NTU(1-C^*)]}} \quad (4.21)$$

όπου $C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$

Όταν καθορισθεί το \dot{Q}_{\max} και ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη, η πραγματική μεταφορά θερμότητας καθορίζεται από τη σχέση (4.16).

Η ενθαλπία εξόδου του ατμού καθορίζεται από την αντιστοιχη ενθαλπία εισόδου συν την ειδική μεταφορά θερμότητας:

$$h_{st,out} = h_{st,i} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{st}} \quad (4.22)$$

Η θερμοκρασία εξόδου καθορίζεται από την ενθαλπία και την πίεση εξόδου του ατμού:

$$T_{st,o} = T(h_{st,o}, P_{st,o}) \quad (4.23)$$

Η ενθαλπία εξόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας δίνεται από ενεργειακό ισολογισμό στο ρευστό:

$$h_{HTF,o} = h_{HTF,i} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{HTF}} \quad (4.24)$$

Τέλος σύμφωνα με την αρχή της συνέχειας ισχύει:

$$\dot{m}_{st,o} = \dot{m}_{st,i} \quad (4.25)$$

$$\dot{m}_{HTF,o} = \dot{m}_{HTF,i} \quad (4.26)$$

4.5.2 Ατμοποιητής (boiler).

Ο ατμοποιητής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας με νερό τροφοδοσίας εντός του δοχείου και μέσο μεταφοράς θερμότητας εντός της σωλήνωσης. Το νερό τροφοδοσίας ατμοποιείται στην επιφάνεια των σωλήνων του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και εξέρχεται από τον ατμοποιητή ως κορεσμένος ατμός. Η ροή μέσω του ατμοποιητή ελέγχεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η παροχή τροφοδοτικού νερού να παραμένει σταθερή.

Η αποδοτικότητα του ατμοποιητή καθορίζεται ως συνάρτηση του αριθμού μονάδων μεταφοράς. Κατά την αλλαγή φάσης από κορεσμένο υγρό σε κορεσμένο ατμό, η θερμοχωρητικότητα του τροφοδοτικού νερού/ατμού είναι άπειρη. Συνεπώς η ελάχιστη θερμοχωρητικότητα θα είναι αυτή του μέσου μεταφοράς θερμότητας και ο λόγος θερμοχωρητικοτήτων θα είναι μηδέν. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο βαθμός απόδοσης του ατμοποιητή δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \quad (4.27)$$

Η ενθαλπία εξόδου του ατμού θεωρείται ίση με την αντίστοιχη κορεσμένου ατμού στην πίεση εισόδου στον ατμοποιητή, δηλαδή υποτίθεται μηδενική πτώση πίεσης στον ατμοποιητή:

$$P_{st,i} = P_{st,o} \quad (4.28)$$

$$h_{st,o} = h(P_{st,o}, x = 1)$$

Η παροχή μάζας του τροφοδοτικού νερού/ατμού μέσω του ατμοποιητή μπορεί να καθορισθεί από τη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στα ρευστά προς τη διαφορά ενθαλπίας του τροφοδοτικού νερού στην είσοδο και του ατμού στην έξοδο:

$$\dot{m}_{st,out} = \frac{\dot{Q}}{h_{st,out} - h_{w,i}} \quad (4.29)$$

Η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας καθορίζεται από την ενθαλπία εισόδου μειωμένη κατά την ειδική θερμότητα που μεταφέρεται:

$$h_{HTF,o} = h_{HTF,i} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{HTF}} \quad (4.30)$$

Τέλος, σύμφωνα με την αρχή της συνέχειας η παροχές μάζας του ατμού και του μέσου μεταφοράς θερμότητας στην είσοδο και στην έξοδο θα είναι ίσες.

$$\dot{m}_{w,i} = \dot{m}_{st,o} \quad (4.31)$$

$$\dot{m}_{HTF,i} = \dot{m}_{HTF,o} \quad (4.32)$$

4.5.3 Προθερμαντής.

Ο προθερμαντής ανυψώνει τη θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού από την τιμή που έχει στην έξοδο του τελευταίου προθερμαντή (με ατμό) έως τη θερμοκρασία κορεσμού στην έξοδο του προθερμαντή. Η πίεση εξόδου από τον προθερμαντή προκύπτει από την πίεση εισόδου μειωμένη κατά το συντελεστή πτώσης πίεσης επί το τετράγωνο της παροχής μάζας.

$$P_{fw,o} = P_{fw,i} - k_{fw} \dot{m}_{fw}^2 \quad (4.33)$$

$$h_{fw,o} = h(P_{fw,o}, x = 0) \quad (4.34)$$

Η μεταφορά θερμότητας από τον προθερμαντή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{fw} (h_{fw,o} - h_{fw,i}) \quad (4.35)$$

Για έναν αδιαβατικό εναλλάκτη θερμότητας, η μεταφορά θερμότητας προς το τροφοδοτικό νερό ισούται με τη μεταφορά θερμότητας από το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Η ενθαλπία εξόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση

$$h_{HTF,o} = h_{HTF,i} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{HTF}} \quad (4.36)$$

4.5.4 Στρόβιλος.

Υπέρθερμος ατμός σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση εισέρχεται στο στρόβιλο. Η αποτόνωση του ατμού, καθώς μεταπίπτει από υψηλή σε χαμηλή πίεση, μετατρέπει τη δυναμική του ενέργεια (υπό τη μορφή πίεσης) σε κινητική ενέργεια, μεταδίδοντας την ορμή του στα πτερύγια του στροβίλου και συνεπώς προκαλώντας την περιστροφή του συζευγμένου άξονα.

Η απόδοση κάθε βαθμίδας χαρακτηρίζεται από τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης, δηλαδή το λόγο της διαφοράς ενθαλπίας του εργαζόμενου μέσου προς τη διαφορά που θα υπήρχε εάν η μεταβολή ήταν ισεντροπική (αντιστρεπτή).

$$\eta_t = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h'_{out}} \quad (4.37)$$

όπου h'_{out} : η ενθαλπία στην έξοδο του στροβίλου εάν η μεταβολή ήταν ισεντροπική.

Το ειδικό έργο που παράγεται από το στρόβιλο ισούται με την ενθαλπική διαφορά του εργαζόμενου μέσου.

$$\dot{w}_{1-2} = (h_1 - h_2) \quad (4.38)$$

Στην έξοδο κάθε βαθμίδας, ένα ποσοστό της παρεχόμενης μάζας του εργαζόμενου μέσου απομαστεύεται και χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού του ατμοποιητή. Η παροχή μάζας της επόμενης βαθμίδας ισούται με την παροχή μάζας του στροβίλου μειωμένη κατά την μάζα που απομαστεύεται.

4.5.5 Συμπυκνωτής.

Μετά την έξοδό του από το στρόβιλο, το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στο συμπυκνωτή που είναι τοποθετημένος ακριβώς κάτω από το στρόβιλο. Ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας όπου στη σωλήνωση έχουμε ροή ψυκτικού νερού και εντός του δοχείου ρέει ατμός από το στρόβιλο. Η λειτουργία της συσκευής είναι η συμπύκνωση του εξερχόμενου από το στρόβιλο ατμού, έτσι ώστε μέσω της αντλίας να φθάσει ως τροφοδοτικό νερό στον ατμοποιητή.

Η πτώση πίεσης του ατμού στην έξοδο του συμπυκνωτή θεωρείται ότι είναι μηδενική, ενώ η ενθαλπία του ισούται με αυτή του κορεσμένου υγρού για τη συγκεκριμένη πίεση.

$$P_{st,in} = P_{w,out} \quad (4.39)$$

$$h_{w,out} = h(P_{w,out}, x = 0) \quad (4.40)$$

Η πίεση συμπύκνωσης αποτελεί σημαντική παράμετρο του κύκλου παραγωγής έργου. Η πίεση συμπύκνωσης καθορίζεται από τη συνολική επιφάνεια συναγωγής του συμπυκνωτή, καθώς επίσης από την παροχή μάζας και την ενθαλπία του εργαζόμενου μέσου εντός του συμπυκνωτή και την παροχή μάζας και ενθαλπία του νερού ψύξης. Η θερμοκρασία του νερού που παρέχεται στο συμπυκνωτή καθορίζεται από την απόδοση του ψυκτικού πύργου και τη θερμοκρασία υγρής σφαίρας του εξωτερικού αέρα.

4.5.6. Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού (με ατμό).

Ο προθερμαντής τροφοδοτικού νερού είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας με υψηλής πίεσης τροφοδοτικό νερό εντός της σωλήνωσης και συμπυκνούμενο ατμό στο κέλυφος. Παρότι η απομάστευση ατμού για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού μειώνει την παραγόμενη ισχύ του στρόβιλου, επίσης αυξάνει τη θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού του ατμοποιητή, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για πρόσδοση θερμότητας από το πεδίο των ηλιακών συλλεκτών και αυξάνοντας το βαθμό απόδοσης του κύκλου.

Η μεταφορά θερμότητας στον προθερμαντή λαμβάνει χώρα σε τρεις ζώνες: τη ζώνη όπου ο υπέρθερμος ατμός μεταπίπτει σε κορεσμένο, τη ζώνη όπου ο κορεσμένος ατμός συμπυκνώνεται σε κορεσμένο υγρό και τη ζώνη όπου το κορεσμένο υγρό ψύχεται επιπλέον και μεταπίπτει στην υπόψυκτη περιοχή. Για τον προθερμαντή ορίζεται ένας συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (UA) θεωρώντας ότι ο ατμός συμπυκνώνεται κατά μήκος του εναλλάκτη.

Ο βαθμός απόδοσης του προθερμαντή δίνεται ως συνάρτηση του αριθμού μονάδων μεταφοράς (NTU) και χαρακτηρίζεται ως ο λόγος της πραγματικά

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου

μεταφερόμενης θερμότητας προς τη μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας. Όσον αφορά τον αριθμό μονάδων μεταφοράς, αυτός ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα της μικρότερης θερμοχωρητικότητας. Για τον προθερμαντή, η μικρότερη θερμοχωρητικότητα θα είναι πάντα αυτή του ρεύματος του τροφοδοτικού νερού.

Για έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπου το ένα ρευστό υφίσταται αλλαγή φάσης, ο λόγος της ελάχιστης προς τη μέγιστη θερμοχωρητικότητα είναι μηδέν και η σχέση απόδοσης-NTU δίνεται από τη σχέση (4.27).

Η ενθαλπία εξόδου του συμπυκνώματος είναι αυτή κορεσμένου υγρού σε πίεση ίση με την πίεση εισόδου στον προθερμαντή, θεωρώντας ότι δεν υπάρχει πτώση πίεσης στο συμπυκνούμενο ρεύμα:

$$P_{st,i} = P_{st,o} \quad (4.41)$$

$$h_{st,i} = h(P_{st,o}, x = 0) \quad (4.42)$$

Η παροχή μάζας μέσω του προθερμαντή καθορίζεται από τη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στα δύο ρεύματα προς την ενθαλπική διαφορά του εισερχόμενου ατμού και του εξερχόμενου συμπυκνώματος:

$$\dot{m}_{st} = \frac{\dot{Q}}{(h_{st,i} - h_{st,o})} \quad (4.43)$$

Η ενθαλπία εξόδου του τροφοδοτικού νερού καθορίζεται από την αντίστοιχη ενθαλπία εισόδου, αυξημένη κατά τη μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα παροχής μάζας του τροφοδοτικού νερού:

$$h_{fw,o} = h_{fw,i} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{fw}} \quad (4.44)$$

Η θερμοκρασία εξόδου του τροφοδοτικού νερού μπορεί να καθοριστεί από την πίεση εξόδου και την ενθαλπία εξόδου:

$$T_{fw,o} = T(P_{fw,o}, h_{fw,o}) \quad (4.45)$$

Η παροχές μάζας του τροφοδοτικού νερού και του ατμού/συμπυκνώματος καθορίζονται από την αρχή της συνέχειας:

$$\dot{m}_{fw,i} = \dot{m}_{fw,o} \quad (4.46)$$

$$\dot{m}_{st,i} = \dot{m}_{st,o} \quad (4.47)$$

4.5.7 Απαεριωτής.

Ο απαεριωτής, ομοίως με τον προθερμαντή με ατμό, χρησιμοποιεί απομαστευόμενο ατμό από το στρόβιλο για να προθερμάνει το τροφοδοτικό νερό του ατμοποιητή. Σε αντίθεση όμως με τον προθερμαντή, ο ατμός αναμιγνύεται απ' ευθείας με το τροφοδοτικό νερό. Παρότι ο απαεριωτής είναι πιο αποτελεσματικός από τον προθερμαντή, έχει το μειονέκτημα ότι η πίεση στην έξοδο του δε μπορεί να υπερβαίνει την πίεση του απομαστευόμενου ατμού και συνεπώς απαιτείται μια πρόσθετη αντλία για να αυξήσει την πίεση του εξερχόμενου νερού σε πίεση ατμοποίησης.

Ο απαεριωτής μοντελοποιείται ως ένας αναμείκτης ρευστών με τρία ρεύματα εισόδου και ένα ρεύμα εξόδου. Τα τρία ρεύματα εισόδου είναι ο απομαστευόμενος από το στρόβιλο ατμός, το κορεσμένο νερό που προέρχεται από την έξοδο της θερμής πλευράς των προθερμαντών τροφοδοτικού νερού υψηλής πίεσης και το τροφοδοτικό νερό που εξέρχεται από την ψυχρή πλευρά των προθερμαντών τροφοδοτικού νερού χαμηλής πίεσης. Η παροχή μάζας του ρεύματος εξόδου δίνεται ως άθροισμα των ρευμάτων εισόδου ατμού $\dot{m}_{st,ext}$, διοχετευόμενου νερού $\dot{m}_{st,dr}$ και εισερχόμενου τροφοδοτικού νερού $\dot{m}_{fw,i}$:

$$\dot{m}_{st,ext} + \dot{m}_{st,dr} + \dot{m}_{fw,i} = \dot{m}_{fw,o} \quad (4.48)$$

Από τον ενεργειακό ισολογισμό στον απαεριωτή προκύπτει επίσης

$$\dot{m}_{ext} h_{ext} + \dot{m}_{st,dr} h_{st,dr} + \dot{m}_{fw,i} h_{fw,i} = \dot{m}_{fw,o} h_{fw,o} \quad (4.49)$$

Υποθέτοντας ότι το τροφοδοτικό νερό εξέρχεται ως κορεσμένο υγρό ($x=0$), η ενθαλπία στην έξοδο είναι ίση με την ενθαλπία κορεσμένου υγρού στην πίεση εξόδου:

$$h_{fw,o} = h(P_{fw,o}, x = 0) \quad (4.50)$$

όπου η πίεση στην έξοδο λαμβάνεται ίση με την πίεση του απομαστευόμενου ατμού:

$$P_{fw,o} = P_{st,ext} \quad (4.51)$$

Δεδομένου ότι το εργαζόμενο μέσο εξέρχεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού, το ρευστό εξέρχεται του απαεριωτή με θερμοκρασία κορεσμού για τη συγκεκριμένη πίεση.

4.5.8 Αντλία.

Η λειτουργία της αντλίας στον κύκλο είναι να αυξάνει την πίεση του εργαζόμενου μέσου. Η απόδοση της αντλίας χαρακτηρίζεται από τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης, δηλαδή το λόγο της ισεντροπικής μεταβολής στην ενθαλπία του ρευστού προς την πραγματική ενθαλπική μεταβολή που έλαβε χώρα:

$$\eta_{pump} = \frac{h_{w,i} - h'_{w,o}}{h_{w,i} - h_{w,o}} \quad (4.52)$$

όπου $h'_{w,o}$: η ενθαλπία στην έξοδο της αντλίας εάν η μεταβολή ήταν ισεντροπική. Η ιδεατή αυτή ενθαλπία εκτιμάται χρησιμοποιώντας την επιθυμητή πίεση εξόδου και την εντροπία εισόδου του ρευστού:

$$h'_{w,o} = h(P_{w,o}, s_{w,i}) \quad (4.53)$$

Το παραγόμενο από την αντλία ειδικό έργο ισούται με την ενθαλπική διαφορά του ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο της αντλίας:

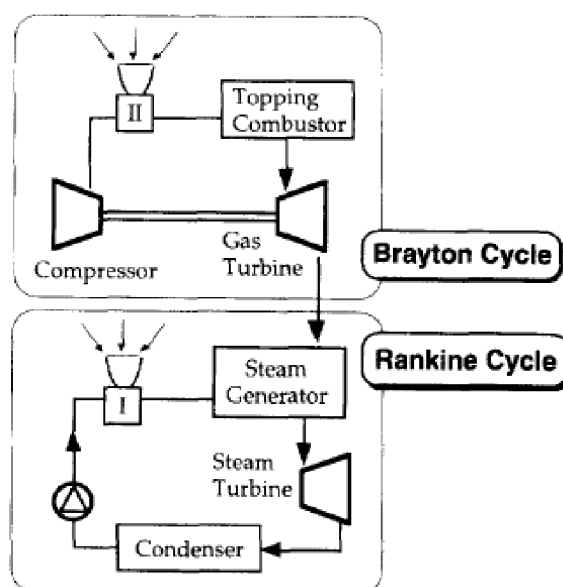
$$w_p = h_{w,i} - h_{w,o} \quad (4.54)$$

Θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι η ενθαλπία του τροφοδοτικού νερού στην είσοδο της αντλίας θα είναι πάντοτε μικρότερη από την αντίστοιχη στην έξοδο και συνεπώς η τιμή του έργου προκύπτει αρνητική.

4.6 Ενοποιημένο σύστημα ηλιακού συνδυασμένου κύκλου (ISCCS-Integrated Solar Combined Cycle Steam).

Οι συνδυασμένοι κύκλοι (CC-combined cycles), αποτελούμενοι από έναν αεριοστρόβιλο που λειτουργεί με τον κύκλο Brayton και έναν ατμοστρόβιλο που λειτουργεί με τον κύκλο Rankine, αποτελούν μια ελκυστική επιλογή για τη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας, εξ' αιτίας των υψηλών βαθμών απόδοσής τους και της χρήσης φθηνών καυσίμων. Το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας των σύγχρονων αεριοστρόβιλων κυμαίνεται από 1200°C έως 1500°C. Η ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμεύσει αποτελεσματικά ως η πηγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας για την οδήγηση ενός συνδυασμένου κύκλου, καθώς η αυξημένη απόδοση θα αντιστάθμιζε την υψηλή αρχική επένδυση που απαιτείται στις ηλιακές εφαρμογές. Τα συστήματα που έχουν προταθεί και αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για την μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέρουν παρόλα αυτά ηλιακές τεχνολογίες χαμηλότερων θερμοκρασιών, οι οποίες είναι

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου
κατάλληλες για την οδήγηση κύκλων ατμού (Rankine), αλλά όχι
συνδυασμένων κύκλων.

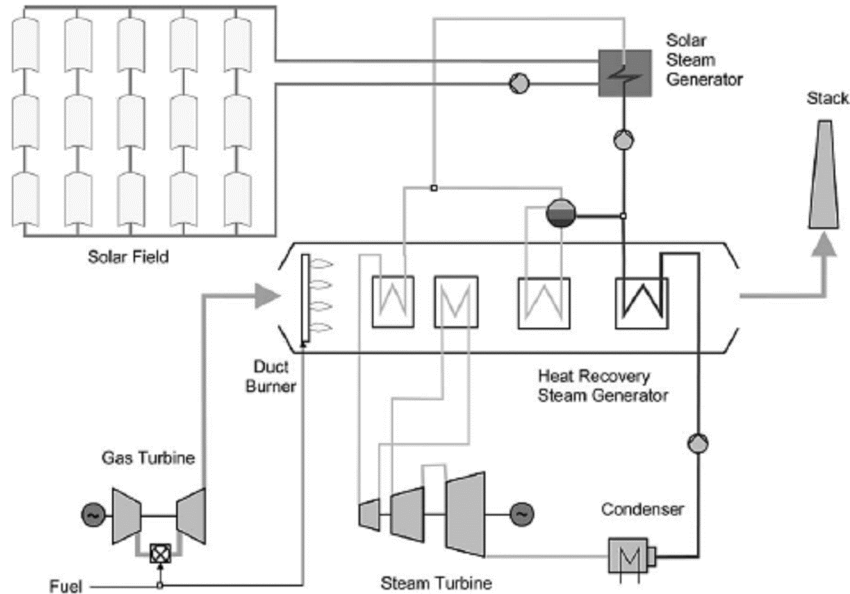


Σχήμα 4.11 Διατάξεις για την ενσωμάτωση ηλιακής ενέργειας σε συνδυασμένο κύκλο.

Έχουν προταθεί πολυάριθμες διατάξεις για την ενσωμάτωση ηλιακών τεχνολογιών που προσφέρουν ενέργεια χαμηλής θερμοκρασίας σε θερμικούς σταθμούς συνδυασμένου κύκλου. Η συμπληρωματική ηλιακή θερμότητα θα μπορούσε να προσαχθεί στο κατώτατο σημείο του κύκλου Rankine, όπως φαίνεται στην επιλογή (I) του σχήματος 4.11, αλλά η μετατροπή της προερχόμενης από τον ήλιο θερμότητας γίνεται στη χαμηλή απόδοση του κύκλου Rankine και η ηλιακή συνεισφορά είναι σχετικά μικρή. Έχουν προταθεί τροποποιήσεις για αυτή την ηλιακά ενισχυμένη διάταξη συνδυασμένου κύκλου, με σκοπό την καλύτερη προσαρμογή του ηλιακού στοιχείου, όπως η επέκταση του κατώτατου κύκλου. Μια τελείως διαφορετική πρόταση είναι η ηλιακή προθέρμανση στον ανώτατο κύκλο Brayton, επιλογή (II) στο σχήμα 4.11. Αυτή η διάταξη προσφέρει υψηλή απόδοση μετατροπής, αλλά περιορισμένη ηλιακή συνεισφορά στη συνολική παραγωγή του θερμικού σταθμού.

Ένα τυπικό παράδειγμα ISCCS, όπου η ηλιακή θερμότητα προσάγεται στον κύκλο Rankine (επιλογή I) απεικονίζεται στο σχήμα 4.12. Το προθερμασμένο από τον προθερμαντή υψηλής πίεσης τροφοδοτικό νερό οδεύει προς τον ηλιακό ατμοποιητή, όπου ατμοποιείται και υπερθερμαίνεται ελαφρά. Ο υπέρθερμος αυτός ατμός επιστρέφει στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας και μαζί με τον ατμό από το συμβατικό ατμοποιητή, υπερθερμαίνεται έως την τελική απαιτούμενη θερμοκρασία. Ο ατμοστρόβιλος, ο προθερμαντής, ο υπερθερμαντής και ο συμπυκνωτής ενός ISCCS θα πρέπει να είναι μεγαλύτεροι από τα αντίστοιχα τμήματα ενός συνδυασμένου κύκλου που χρησιμοποιεί τον ίδιο τύπο αεριοστρόβιλου, εξ' αιτίας της αυξημένης παροχής μάζας που διαρρέει το ενοποιημένο σύστημα.

Κεφάλαιο 4^ο: Χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή έργου



Σχήμα 4.12 ISCCS με πρόοδοση ηλιακής θερμότητας στον κύκλο Rankine.

Σε σύγκριση με τους υπάρχοντες θερμικούς σταθμούς παραβολικών συλλεκτών που χρησιμοποιούν τον κύκλο Rankine, οι σταθμοί ISCCS έχουν τρία σημαντικά πλεονεκτήματα: Πρώτον η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε έργο με υψηλότερη απόδοση. Δεύτερον, το επιπλέον κόστος για μεγαλύτερο ατμοστρόβιλο είναι μικρότερο απ' ό τι το κόστος μιας νέας εξ' ολοκλήρου ηλιακής μονάδας. Τρίτον, ένας ενοποιημένος θερμικός σταθμός δεν υφίσταται τη θερμική ανεπάρκεια που σχετίζεται με την καθημερινή εκκίνηση και σταμάτημα λειτουργίας του ατμοστρόβιλου. Ο πίνακας 4.5 παρέχει συγκριτικά τις παραμέτρους διαφόρων τύπων θερμικών σταθμών.

Τύπος θερμικού σταθμού	SEGS	SEGS (TES)	ISCCS	ISCCS (TES)	CC
Καθαρή ονομαστική ισχύς (MWe)	50	50	310	310	310
Ηλιακό πεδίο(m ²)	270320	427280	270320	427280	0
Τύπος καυσίμου	Φυσικό αέριο	Φυσικό αέριο	Φυσικό αέριο	Φυσικό αέριο	Φυσικό αέριο
Θερμική αποθήκευση ενέργειας	0	839	0	839	0
Σύστημα ενίσχυσης με ορυκτά καύσιμα	Λέβητας	Λέβητας	Θάλαμος Καύσης	Θάλαμος Καύσης	-
Ισχύς αεριοστρόβιλου (MWe)	0	0	162	162	201
Ισχύς ατμοστρόβιλου (MWe)	50	50	148	148	109
Καθαρός βαθμός απόδοσης	34,70%	32,60%	68,60%	68,10%	56,50%
Συνολική παρασυντιτική ενέργεια(MWe)	3,77	6,54	6,14	8,61	3,77

Πίνακας 4.5 Τιμές παραμέτρων διατάξεων θερμικών σταθμών. (TES-Thermal Energy Storage-Θερμική Αποθήκευση ενέργειας)

5.1 Εισαγωγή.

Το White Paper του 1997 που εκδόθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή με σκοπό την ανάπτυξη μιας ενιαίας κοινοτικής στρατηγικής και σχεδίου δράσης όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προβλέπει ότι τουλάχιστον 1GWe θα παράγεται στην Ευρώπη έως το έτος 2010. Αυτός ο στόχος είναι επιτεύξιμος με τη δημιουργία 25 έως 30 εμπορικών ηλιακών θερμικών εργοστασίων με μέγεθος 30 έως 50 MWe το καθένα, κατά μήκος της νότιας Ευρώπης.

Οι τρεις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες, όσον αφορά τα ηλιακά θερμικά εργοστάσια, χρησιμοποιούν συγκεντρωτικά συστήματα ηλιακής ενέργειας, τα οποία ονομαστικά είναι τα εξής:

- παραβολικά κάτοπτρα,
- κεντρικοί δέκτες (πύργοι), και
- παραβολικά «πίατα».

Αυτές οι ηλιακές θερμικές τεχνολογίες συνάδουν με τους πρωταρχικούς στόχους και την ευρύτερη πολιτική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, διότι

- η εξέλιξή τους θα ενισχύσει την ανάπτυξη συστημάτων ηλιακής ενέργειας για μαζική παραγωγή ενέργειας και τη διατήρηση της ενέργειας που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, με συνέπεια τη διαφύλαξη του περιβάλλοντος, ιδιαιτέρως εξ' αιτίας της υψηλής συνεισφοράς τους στην μείωση των εκπομπών CO₂,
- μειώνουν το κόστος παραγωγής των ηλιακών εργοστασίων και συνεπώς συνεισφέρουν στη διασφάλιση διαρκούς και αξιόπιστης παραγωγής ενέργειας με ανεκτό κόστος στο μεσο-μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα,
- θα φέρουν την ευρωπαϊκή βιομηχανία σε προνομιούχο θέση και συγχρόνως θα διευρύνουν τη δυνατότητα βιομηχανικής ανάπτυξης όχι μόνο στην αγορά των νοτιο-ευρωπαϊκών κρατών, αλλά και μέσω εξαγωγών εξοπλισμού και υπηρεσιών στο πεδίο των ηλιακών εγκαταστάσεων. Η ευκαιρία να δημιουργηθεί ένα δίκτυο με τις αναπτυσσόμενες χώρες και τις αγορές τους είναι αυταπόδεικτη,
- συμβάλλουν στους κοινωνικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπως είναι η ποιότητα ζωής, η υγεία, η ασφάλεια (συμπεριλαμβανομένων των συνθηκών εργασίας) και η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Η ανέγερση τέτοιων εργοστασίων σε μη ανεπτυγμένες περιοχές της νότιας Ευρώπης μπορεί να δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για βιομηχανική ανάπτυξη, λειτουργία και διατήρηση.

Συνεπώς,, η τεχνολογία των ηλιακών θερμικών εργοστασίων θέτει ισχυρή υποψηφιότητα για να παρέχει ένα μεγάλο μερίδιο της καθαρής και ανανεώσιμης ενέργειας που θα απαιτείται στο μέλλον, διότι

- τα ηλιακά θερμικά εργοστάσια είναι ανάμεσα στις πιο αποτελεσματικές ανανεώσιμες τεχνολογίες όσον αφορά το κόστος,
- η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται ήδη με επιτυχία. Από το 1985 εννέα εργοστάσια με παραβολικούς συλλέκτες στην Καλιφόρνια έχουν παράξει περισσότερες από οχτώ δισεκατομμύρια κιλοβατώρες ηλεκτρισμού

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

που βασίζεται στην ηλιακή ενέργεια, αποδεικνύοντας έτσι την ορθότητα του εγχειρήματος.

➤ οι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί παραγωγής ισχύος είναι πλέον έτοιμοι για πιο εντατική εισχώρηση στην αγορά. Εξελιγμένες εφαρμογές διασύνδεσης με το δίκτυο θα οδηγήσουν σε περαιτέρω μείωση του κόστους και σε νέες καινοτομίες.

Είναι ευτυχές το γεγονός, ότι οι ευκαιρίες για τη δημιουργία ηλιακών θερμικών έργων θα είναι αυξημένες κατά την επόμενη δεκαετία εξ' αιτίας των εξής παραγόντων:

➤ η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης στηρίζει σταθερά μια μείωση της τάξης του 8% στις εκπομπές καυσαερίων με αντίστοιχο διπλασιασμό του μεριδίου των ανανεώσιμων ενεργειών στο ευρωπαϊκό ενεργειακό ισοζύγιο από 6 σε 12% έως το έτος 2010.

➤ μια πρόσφατη αναφορά της Παγκόσμιας Τράπεζας προβλέπει μείωση του κόστους της ηλιακής θερμικής τεχνολογίας κάτω από τα 6US cents/kWh μετά το έτος 2010, πείθοντας με αυτό τον τρόπο τον Παγκόσμιο Οργανισμό Περιβάλλοντος (GEF-Global Environmental Facility) να υποστηρίξει την εισαγωγή της ηλιακής θερμικής ενέργειας στις αγορές των αναπτυσσόμενων χωρών. Η Ινδία, η Αίγυπτος και το Μεξικό έχουν αιτηθεί για περίπου πενήντα εκατομμύρια δολάρια επιδότηση για κάθε έργο, ώστε να καλύψουν το αυξημένο κόστος.

Με τη θετική εμπειρία από την εξέλιξη στην κατασκευή και λειτουργία των πρώτων πειραματικών εργοστασίων, επιπλέον έργα αναμένεται να ακολουθήσουν. Μέχρι το έτος 2015, το δυναμικό των ηλιακών θερμικών σταθμών παραγωγής ισχύος αναμένεται να είναι 7 GWe στη νότια Ευρώπη με αντίστοιχη μείωση των εκπομπών CO₂ έως και δώδεκα εκατομμύρια τόνους το χρόνο.

Τα μεσογειακά κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι σίγουρο ότι βασίζονται στους ηλιακούς θερμικούς σταθμούς ως μια άριστη επιλογή για να επιτύχουν τους στόχους που αναφέρθηκαν μέσω της εθνική πολιτικής τους. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί η Ισπανία, όπου έχει δοθεί προτεραιότητα στην ηλιακή ενέργεια. Αναμένεται ότι η νέα ισπανική νομοθεσία θα επιδοτεί τους ηλιακούς θερμικούς σταθμούς με επιπλέον 18 €cents/kWh πέραν της συμβατικής τιμής της κλινοβατώρας. Το γεγονός αυτό θα ωφελήσει αναμφίβολα τη βραχυπρόθεσμη κατασκευή εμπορικών ηλιακών θερμικών εργοστασίων στην Ισπανία.

5.2 Συστήματα παραβολικών κατόπτρων.

Τα εργοστάσια παραβολικών κατόπτρων αποτελούν την πιο «ώριμη» τεχνολογία, αριθμώντας 354MWe ηλιακών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (SEGS- solar electric generating systems) συνδεδεμένων στο δίκτυο της Καλιφόρνια από τη δεκαετία του 1980. Οι εγκατεστημένες μονάδες έχουν δυναμικότητα 14 MWe, 35 MWe και 80 MWe αντίστοιχα. Με περισσότερα από δύο εκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα ανακλαστικής επιφάνειας έχουν παράξει περισσότερες από 8 TWh ηλεκτρισμού από το 1985. Τα εργοστάσια δυναμικότητας 35 MW που

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

βρίσκονται στον κόμβο Κράμερ με ετήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω από 2700 kWh/m² έχουν εξακριβωμένο κόστος παραγωγής 15 US cents/kWh κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής (το φορτίο αιχμής οφείλεται κυρίως στη ζήτηση κατά τις μεσημεριανές ώρες, εξ' αιτίας της χρήσης κλιματιστικών συσκευών, ενώ παράλληλα έχουν τη δυνατότητα να παράγουν έως και το 25% της ετήσιας ισχύος με συμπληρωματική καύση φυσικού αερίου. Το ισοδύναμο κόστος για καθαρή χρήση ηλιακής ενέργειας θα ήταν 20 US cents/kWh.



Σχήμα 5.1 Πανοραμική όψη των 5x35MW ηλιακών θερμικών σταθμών στον κόμβο Κράμερ, Καλιφόρνια.

Οι θερμικοί σταθμοί στη λίμνη Χάρπερ με τις ίδιες τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας έχουν εξακριβωμένο κόστος παραγωγής 12 US cents/kWh, ενώ επίσης έχουν τη δυνατότητα να παράγουν έως και το 25% της ετήσιας ισχύος με συμπληρωματική καύση φυσικού αερίου. Το ισοδύναμο κόστος για καθαρή χρήση ηλιακής ενέργειας θα ήταν 16 US cents/kWh. Οι συγκεκριμένοι σταθμοί έχουν επιτύχει πολύ υψηλές τιμές ετήσιας απόδοσης, της τάξης του 14% και μια ημερήσια ηλιακή προς ηλεκτρική απόδοση κοντά στο 20%, ενώ η απόδοση αιχμής φτάνει έως το 21%. Η ετήσια διαθεσιμότητα του εργοστασίου ξεπέρασε το 98% και του πεδίου των συλλεκτών το 99%. Τα πέντε εργοστάσια στο κόμβο Κράμερ έχουν επιτύχει μέσα στα τελευταία χρόνια μείωση 30% στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Επιπροσθέτως, οι κατασκευάστριες εταιρίες παραβολικών κατόπτρων στην Ευρώπη έχουν παρουσιάσει αξιοσημείωτη πρόοδο.

5.2.1 Έργα υπό εξέλιξη.

Ενώ η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υποστηρίζει μόνο τους εξ' ολοκλήρου ηλιακούς σταθμούς, η Παγκόσμια Τράπεζα σε συνεργασία με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Περιβάλλοντος στοχεύουν στην ενσωμάτωση παραβολικών κατόπτρων σε σταθμούς συνδυασμένου κύκλου (ISCCS) σε ηλιόλουστες αναπτυσσόμενες χώρες. Έτσι λοιπόν, διάφορα έργα με ισχύ που κυμαίνεται από 50 έως 310 MWe και εκτεταμένα πεδία παραβολικών συλλεκτών

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

βρίσκονται υπό εκτεταμένο σχεδιασμό ή κατασκευή από ευρωπαϊκές και αμερικανικές εταιρίες με επιδοτήσεις της Παγκόσμιας Τράπεζας και άλλων οργανισμών. Ονομαστικά, τα έργα αυτά είναι τα εξής:

- *Ελλάδα*: ηλιακός θερμικός σταθμός ΘΗΣΕΑΣ δυναμικότητας 50 MWe στην Κρήτη με ηλιακό πεδίο περίπου 300000m². Η προώθηση του έργου έχει αναληφθεί από γερμανικές και ελληνικές εταιρίες και η αναμενόμενη παραγωγή είναι 112 GWh καθαρού «ηλιακού ηλεκτρισμού» το χρόνο.
- *Αίγυπτος*: εργοστάσιο συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο (ISCCS) στο Kuraymat στις όχθες του Νείλου δυναμικότητας 135 MWe. Η ισοδύναμη ηλιακή δυναμικότητα είναι 30 MWe. Η προώθηση του έργου έχει αναληφθεί από βιομηχανικό όμιλο με επιπλέον επιδότηση 40-50 εκατομμύρια δολάρια από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Περιβάλλοντος.
- *Μαρόκο*: εργοστάσιο συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο (ISCCS) δυναμικότητας 150 MWe. Η ισοδύναμη ηλιακή δυναμικότητα είναι 30-50 MWe. Η προώθηση του έργου έχει αναληφθεί από βιομηχανικούς ομίλους με επιπλέον επιδότηση 40-50 εκατομμύρια δολάρια από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Περιβάλλοντος.
- *Ινδία*: εργοστάσιο συνδυασμένου κύκλου με νάφθα (ISCCS) στο Mathania/Rajasthan δυναμικότητας 140 MWe. Η ισοδύναμη ηλιακή δυναμικότητα είναι 35 MWe. Η προώθηση του έργου έχει αναληφθεί από βιομηχανικό όμιλο με επιπλέον επιδότηση 49 εκατομμύρια δολάρια από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Περιβάλλοντος και 100 εκατομμύρια δολάρια της γερμανικής τράπεζας KfW.
- *Ιράν*: Μελέτη για την υλοποίηση εργοστασίου συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο (ISCCS) δυναμικότητας 200 MWe με 200000-400000m² πεδίο παραβολικών κατοπτρών στην έρημο Yazd. Στο συμβόλαιο αναφέρεται ότι η ανέγερση θα γίνει με εθνικά κεφάλαια.
- *Μεξικό*: εργοστάσιο συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο (ISCCS) στη βόρεια μεξικανική έρημο δυναμικότητας 310 MWe. Η ισοδύναμη ηλιακή δυναμικότητα είναι 40 MWe. Η προώθηση του έργου έχει αναληφθεί από βιομηχανικό όμιλο με επιπλέον επιδότηση 40-50 εκατομμύρια δολάρια από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Περιβάλλοντος.

Επιπλέον, υπάρχει η γερμανο- ισπανική σύμπραξη έρευνας και εξέλιξης (R&D) για άμεση παραγωγή ατμού χρησιμοποιώντας παραβολικούς συλλέκτες τύπου LS- 3 της εταιρίας LUZ. Αυτό το νέο σχέδιο αναμένεται να προκαλέσει μείωση του κόστους των ηλιακών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά 20 έως 30%. Οι μελλοντικοί αμιγώς ηλιακοί θερμικοί σταθμοί σχεδιάζονται έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν συστήματα αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας με σκοπό τη αύξηση της δυναμικότητάς τους και την αντίστοιχη ελαχιστοποίηση εκπομπών CO₂.



Σχήμα 5.2 Παραβολικοί συλλέκτες LS 3 της εταιρίας LUZ για άμεση παραγωγή ατμού (Αλμερία, νότια Ισπανία).

Το κόστος εγκατάστασης των ηλιακών θερμικών σταθμών στην Καλιφόρνια για λειτουργία αιχμής, έπεσε από τα 4000\$/kWe στα 3000\$/kWe ανάμεσα στα έτη 1984 και 1991 κυρίως λόγω της αύξησης δυναμικού των μονάδων από 30 σε 80 MWe. Το προβλεπόμενο κόστος παραγωγής για ένα θερμικό σταθμό με παραβολικούς συλλέκτες σε μια περιοχή με προσπίπτουσα ακτινοβολία 2400 kWh/m² αναμένεται να είναι 14 ¢cents/kWh (χωρίς επιδότηση) ή 18 ¢cents/kWh για μια περιοχή με προσπίπτουσα ακτινοβολία 2000 kWh/m², όπως η νότια Ισπανία. Παρόλα αυτά, σε υβριδική μορφή με έως και 48% παραγωγή ισχύος από ορυκτά καύσιμα, το κόστος θα μπορούσε να πέσει έως τα 8 ¢cents/kWh.

Το κόστος εγκατάστασης ηλιακών πεδίων έχει πέσει στα 210 €/m², όσον αφορά την τρέχουσα τεχνολογία ηλιακών συλλεκτών (τύπου LS 3). Μάλιστα, το κόστος αναμένεται να πέσει κάτω από τα 200 €/m² για εξελιγμένους συλλέκτες και μεγαλύτερο ρυθμό παραγωγής μεσοπρόθεσμα και στα 130 έως 110 €/m² για πολύ υψηλό ρυθμό παραγωγής μακροπρόθεσμα. Επιπλέον, θα πρέπει να αναμένονται χαμηλότερες τιμές έως και 15%, σε σχέση με τις αμερικανικές και τις ευρωπαϊκές τιμές, για την εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων στις αναπτυσσόμενες χώρες, λόγω του χαμηλότερου κόστους εργασίας.

Σύμφωνα με αναφορά της Παγκόσμιας Τράπεζας, το κόστος εγκατάστασης στο άμεσο χρονικό διάστημα για τους ηλιακούς θερμικούς σταθμούς αναμένεται να είναι από 3500 έως 2440 €/kWh για εργοστάσια τύπου SEGS με κύκλο Rankine και παραγόμενη ισχύ από 30 έως 200 MWe, ενώ για τα εργοστάσια συνδυασμένου κύκλου (ISCCS) το κόστος αναμένεται γύρω στα 1080 €/kWh για υβριδικά εργοστάσια ισχύος 130 MWe με ισοδύναμη ηλιακή δυναμικότητα 30 MWe. Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται με την υπόθεση ανέγερσης του θερμικού σταθμού στις Ηνωμένες Πολιτείες ή στις ευρωπαϊκές χώρες. Το προβλεπόμενο συνολικό κόστος ηλεκτρισμού έχει εύρος από 10 έως 7 ¢cents/kWh για εργοστάσια τύπου SEGS και λιγότερο από 7 ¢cents/kWh για εργοστάσια συνδυασμένου κύκλου, τα οποία όμως εκτιμάται ότι δεν θα έχουν χαμηλότερο κόστος ηλεκτρισμού από τους συμβατικούς σταθμούς συνδυασμένου κύκλου.

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

Η αναμενόμενη πτώση του κόστους εγκατάστασης των διασυνδεδεμένων στο δίκτυο εργοστασίων ISCCS θα έχει ως αποτέλεσμα το κόστος ηλεκτρισμού να πέσει στα 6 ¢cents/kWh μεσοπρόθεσμα και στα 5 ¢cents/kWh μακροπρόθεσμα (200 MWe εργοστάσιο κύκλου Rankine και με αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας). Μακροπρόθεσμα, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι σταθμοί παραβολικών συλλεκτών με κύκλο Rankine να συναγωνίζονται τους συμβατικούς σταθμούς αιχμής σε τοποθεσίες με μεγάλη ηλιοφάνεια. Η μακροπρόθεσμη εξέλιξη της τεχνολογία άμεσης παραγωγής ατμού είναι ακόμη πιο υποσχόμενη, εξ' αιτίας των μεγάλων δυνατοτήτων μείωσης του κόστους.

5.2.2 Περιβαλλοντικά ανάλυση.

Η παρακάτω ανάλυση αναφέρεται στην επίδραση που μπορεί να έχει στο περιβάλλον η ανέγερση, λειτουργία, η δυσλειτουργία και ο τερματισμός της λειτουργίας ενός ηλιακού θερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων.

Κατασκευή. Στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αφορούν τους ηλιακούς θερμικούς σταθμούς μπορούν να συμπεριληφθούν εκείνες που προκύπτουν από την παραγωγή των συνιστωσών που τα αποτελούν. Οι επιπτώσεις αυτές είναι κατά κύριο λόγο παρόμοιες με εκείνες των συμβατικών θερμικών σταθμών και άλλων βιομηχανικών διεργασιών παραγωγής. Παρόλα αυτά, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν περιορίζονται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και σε πολλές χώρες υπόκεινται σε εκτεταμένες νομικές απαιτήσεις. Επιπροσθέτως, οι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί βρίσκονται επί του παρόντος σε ερήμους και στέπες όπου η πληθυσμιακή πυκνότητα είναι σχετικά μικρή. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει περιορισμένη γνώση για την πιθανή επίδραση που έχουν στους ανθρώπους και στο περιβάλλον.

Κανονική λειτουργία. Όπως συμβαίνει με το σύνολο των θερμικών σταθμών, έτσι και οι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί προκαλούν κάποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας τους. Παρακάτω παρατίθενται οι σημαντικότερες από αυτές.

➤ *Απαιτηση γης.* Οι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία ως πηγή ενέργειας, η οποία έχει συγκριτικά χαμηλή πυκνότητα. Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί τέτοιου είδους εργοστάσια απαιτούν μεγάλη συλλεκτική επιφάνεια και συνεπώς μεγάλη έκταση γης. Δεδομένου ότι οι μεμονωμένοι συλλέκτες θα πρέπει να είναι προσβάσιμοι κατά τη λειτουργία, το έδαφος όπου εγκαθίσταται το πεδίο των συλλεκτών συμπιέζεται και καθίσταται επίπεδο κατά την κατασκευή. Επιπροσθέτως, η ανάπτυξη της χλωρίδας μπορεί να μειώσει τον τεχνικό χρόνο ζωής των συλλεκτών (λόγω υγρασίας, σκίασης ή κινδύνου πυρκαγιάς). Συνεπώς, στην ευρύτερη περιοχή που καταλαμβάνει ένα ηλιακός θερμικός σταθμός επιτρέπεται μόνο η ύπαρξη γρασιδιού. Εξ' αιτίας της έλλειψης βλάστησης, το χώμα είναι πιο επιρρεπές στη διάβρωση. Μιας και οι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί είναι κατά κύριο λόγο εγκατεστημένοι σε περιοχές με χαμηλή βροχόπτωση και τα πεδία των συλλεκτών πρέπει να είναι εφοδιασμένα με εκτεταμένο σύστημα αποχέτευσης για να προστατευθούν τα θεμέλια και να εξασφαλισθεί η προσβασιμότητα, η επίδραση αυτή στο έδαφος μπορεί σχεδόν

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

να αγνοηθεί. Λόγω του γεγονότος ότι οι συλλέκτες έχουν γυάλινη επιφάνεια, τα πεδία είναι επιρρεπή σε ζημιές που προκαλούνται παραδείγματος χάριν από ακραίους ανέμους. Ολόκληρο το εργοστάσιο είναι γι' αυτό το λόγο περιφραγμένο, αλλά και επιπλέον για να μην επηρεάζεται το φυσικό οικοσύστημα της περιοχής (πανίδα) από την παρουσία του. Παρόλα αυτά, δεδομένου της προτιμώμενης εγκατάστασης σε απομακρυσμένες περιοχές, η απαίτηση αυτή μπορεί να εκπληρωθεί χωρίς πρόβλημα.

➤ **Οπτική όχληση.** Σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες η επίδραση στο τοπίο είναι στατική καθώς δε συμπεριλαμβάνονται κινούμενα μέρη, όπως συμβαίνει με το ρότορα του ανεμοκινητήρα. Γι' αυτό το λόγο ο αντίκτυπος στο φυσικό τοπίο γίνεται πιο εύκολα αποδεκτός από το θεατή. Τέλος δεδομένου, ότι τέτοιου είδους εργοστάσια ανεγείρονται σε περιοχές με μικρή πληθυσμιακή πυκνότητα, δεν αναμένεται ιδιαίτερη οπτική επιρροή στους ανθρώπους.

➤ **Αντανακλάσεις.** Οι σταθμοί ηλιακού πύργου, παραβολικών κατόπτρων και «πιάτων» εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε μια συγκεκριμένη γραμμή ή σημείο. Δεδομένου ότι το εργοστάσιο λειτουργεί σωστά, δηλαδή ότι οι συλλέκτες παρακολουθούν την κίνηση του ήλιου επακριβώς, καμία από τις γνωστές περιβαλλοντικές επιπτώσεις δεν πρόκειται να λάβει χώρα. Παρόλα αυτά, λόγω της πολύ μεγάλης πυκνότητας ενέργειας της εστιασμένης ηλιακής ακτινοβολίας, άτομα μπορεί να εκτεθούν σε αξιοσημείωτο κίνδυνο σε περιπτώσεις εσφαλμένης λειτουργίας. Η σωστή λειτουργία και εστίαση της ακτινοβολίας στο σταθμό θα πρέπει να επιτυγχάνεται με κάθε τρόπο.

➤ **Εκπομπές.** Ένα μέρος ηλιακών θερμικών σταθμών χρησιμοποιούν και συμβατική τεχνολογία θερμικών σταθμών με αποτέλεσμα να είναι πιθανές πηγές αερίων ρύπων. Παρόλα αυτά, οι ρύποι που εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και οι άλλοι τύποι ρύπων απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μόνο κατά τη διάρκεια της υβριδικής λειτουργίας που περιλαμβάνει και την καύση ορυκτών καυσίμων. Η χρήση όμως τέτοιου είδους καυσίμων υπόκειται σε εκτεταμένες νομικές απαιτήσεις με συνέπεια οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις να είναι περιορισμένες. Επιπλέον, μπορεί να δημιουργηθεί θόρυβος από τις αντλίες και τους στροβίλους. Αυτά τα επίπεδα θορύβου μπορούν να διατηρηθούν στο ελάχιστο με την εφαρμογή εξελιγμένης τεχνολογίας η οποία έχει γίνει επιτακτική απαίτηση, λαμβάνοντας υπ' όψιν και τα υπάρχοντα όρια θορύβου που θεσπίζονται σε κάθε κράτος. Δεδομένου ότι το συγκρότημα παραγωγής ισχύος βρίσκεται περίπου στο κέντρο του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών, τα επίπεδα θορύβου στα όρια της εγκατάστασης είναι πρακτικά αμελητέα. Γι' αυτό το λόγο δεν έχουν προκύψει ζητήματα έως τώρα που να αφορούν τα επίπεδα θορύβου. Επιπλέον εκπομπή μπορεί να θεωρηθεί ο ατμός που προέρχεται από τα συστήματα ψύξης των συμπυκνωτών και του γενικού φορτίου των θερμικών κυκλωμάτων. Επίσης σε αυτό τον τομέα, υπάρχουν εκτεταμένες νομικές και ρυθμιστικές απαιτήσεις που πρέπει να εκπληρωθούν για να δοθεί άδεια λειτουργίας του εργοστασίου.

Δυσλειτουργία. Σε περίπτωση βλάβης, αναμένονται στη χειρότερη περίπτωση οι ίδιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις με τις αντίστοιχες ενός συμβατικού θερμικού σταθμού καύσης ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον βλάβες

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

που μπορεί να λάβουν χώρα στο πεδίο των ηλιακών συλλεκτών, αφορούν στη διαρροή εργαζόμενου μέσου η οποία ίσως έχει αρνητική επίδραση στο περιβάλλον.

Τέλος λειτουργίας. Για να αποφευχθούν ανεπιθύμητες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τα εργοστάσια αποσυναρμολογούνται και απορρίπτονται κατάλληλα στο τέλος της λειτουργίας τους. Η απόρριψη των συνιστωσών του εργοστασίου δεν αναμένεται να έχει επίδραση στο περιβάλλον, καθώς αυτές είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες των συμβατικών εργοστασίων και υπόκεινται σε νομικές απαιτήσεις.

5.3 Συστήματα κεντρικού δέκτη (Power Tower).

Η τεχνική επιτευξιμότητα της τεχνολογίας κεντρικού δέκτη (πύργου) έχει αποδειχθεί παγκοσμίως ανάμεσα στα έτη 1981-1986 με τη λειτουργία έξι ερευνητικών ηλιακών σταθμών με δυναμικότητα 1 έως 5 MWe και από ένα πιλοτικό έργο (το SOLAR ONE με δέκτη νερού/ατμού) διασυνδεδεμένα στο δίκτυο της νότιας Καλιφόρνια με συνολική καθαρή δυναμικότητα 21,5 MWe και συνολική εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιοστατών 160000 m².

Το πιλοτικό έργο SOLAR ONE λειτουργήσε στην Καλιφόρνια από το 1982 έως το 1985 με ατμό ως εργαζόμενο μέσο και εξελίχθηκε στο εργοστάσιο SOLAR TWO όπου το εργαζόμενο μέσο ήταν τηγμένο άλας και επιπλέον υπήρχαν δύο δεξαμενές αποθήκευσης τηγμένου αλάτος από το 1997 έως το 1999. Το SOLAR TWO κατέγραψε πολλές χιλιάδες ώρες λειτουργία και διένειμε ενέργεια σε μόνιμη βάση. Αυτό το σχέδιο αποτέλεσε τη βάση των αμερικανικών προσπαθειών για την εμπορευματοποίηση του θερμικού σταθμού κεντρικού πύργου · έχει τη δυνατότητα επίτευξης βαθμού απόδοσης της τάξης του 15% ηλιακής προς ηλεκτρική ενέργεια και συνολική ετήσια διαθεσιμότητα της τάξης του 90%.



Σχήμα 5.3 Ο σταθμός SOLAR TWO.

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

Διαφορετικά μέσα μεταφοράς θερμότητα έχουν ερευνηθεί με επιτυχία (νερό/ατμός, υγρό νάτριο, τηγμένο άλας, ατμοσφαιρικός αέρας). Δύο θερμικοί σταθμοί έχουν μετατραπεί σε εγκαταστάσεις κεντρικού δέκτη στο μεγαλύτερο ηλιακό δοκιμαστικό κέντρο της Ευρώπης, το PSA (Plataforma Solar de Almeria) στην Ισπανία, ενώ δυο επιπλέον μεγάλες δοκιμαστικές εγκαταστάσεις είναι διαθέσιμες στις Ηνωμένες Πολιτείες και στο Ισραήλ για δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης. Τα πιο υποσχόμενα εξελιγμένα συστήματα αναφέρονται στην ευρωπαϊκή τεχνολογία ογκομετρικού δέκτη αέρα και στην αμερικανική τεχνολογία δέκτη με σωλήνες τηγμένου άλατος. Αυτά τα δύο σχέδια εκτιμώνται ως τα πιο υποσχόμενα όσον αφορά την τεχνολογία κεντρικού συλλέκτη για εφαρμογές παροχής ενέργειας στο δίκτυο σε μεσο-μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα. Η τεχνολογία των ηλιοστατών η οποία έχει πλέον εμπορευματοποιηθεί στην Ευρώπη (κυρίως στη Γερμανία και την Ισπανία) και στις Ηνωμένες Πολιτείες συμπεριλαμβάνει δύο τύπους ηλιοστατών, γυαλιού-μετάλλου και «τεντωμένης μεμβράνης», με ανακλαστική επιφάνεια από 70 έως 150 m².

Πρόσφατες ευρωπαϊκές δραστηριότητες έχουν δείξει ότι τα χαρακτηριστικά κρίσιμης ροής μεγιστοποιούνται σε ογκομετρικούς δέκτες αέρα υψηλής απόδοσης, είτε σε ανοικτούς ή κλειστούς κύκλους, στους οποίους η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια ακτινοβολεί βρόχους συρμάτων ή κεραμικά υλικά μεταφέροντας έτσι ενέργεια μέσω συναγωγής άμεσα στον αέρα στο επιθυμητό πεδίο θερμοκρασιών 700-1200°C. Δοκιμές που διεξήχθησαν στο PSA σε ένα από κοινού πρόγραμμα Γερμανίας-Ισπανίας ανάμεσα στο 1993 και το 1995 (πρόγραμμα PHOEBUS) σε συνδυασμό με τον γερμανικό πειραματικό σταθμό ισχύος 2,5 MWth απέδειξαν την επιτευξιμότητα και τις προοπτικές του ογκομετρικού δέκτη αέρα με σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας σε κεραμικά υλικά.

Οι θερμικοί σταθμοί κεντρικού δέκτη μπορούν να σχεδιασθούν ως αμιγώς ηλιακοί για φορτίο αιχμής (με περίπου 2000 ισοδύναμες ώρες πλήρους φορτίου), όμως τα υβριδικά έργα, τα οποία είναι προτιμότερα για την παρούσα κατάσταση της αγοράς, είναι τα εργοστάσια ISCCS για μέσο και χαμηλό φορτίο.

Οι μελλοντικοί αμιγώς ηλιακοί θερμικοί σταθμοί κεντρικού δέκτη έχουν καλές μακροχρόνιες προοπτικές όσον αφορά την υψηλή απόδοση μετατροπής ενέργειας και τη χρήση πολύ αποδοτικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με σκοπό την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών και συνεπώς περισσότερης παραγόμενης ισχύος.

Το 1999 η αναφορά της Παγκόσμιας Τράπεζας αποτίμησε ότι οι συνθήκες για την εμπορευματοποίηση και την παρουσίαση στην αγορά των συστημάτων κεντρικού δέκτη είναι λιγότερο ευνοϊκή σε σχέση με τα αντίστοιχα παραβολικών κατόπτρων, εξ' αιτίας της έλλειψης μονάδων μεγάλης κλίμακας που να λειτουργούν σε εμπορικό επίπεδο. Συνεπώς, απαιτείται η κατασκευή συστημάτων κεντρικού δέκτη μεγάλης κλίμακας πριν να θεωρηθούν τέτοιου είδους συστήματα έτοιμα προς εμπορική χρήση.

5.3.1 Έργα υπό εξέλιξη.

Η ευρωπαϊκή δραστηριότητα σε σχέση με την τεχνική και οικονομική επιτευξιμότητα εργοστασίων κεντρικού δέκτη έχει ήδη ξεκινήσει. Δύο έργα ισχύος 10 MWe είναι επί του παρόντος υπό εξέλιξη με κεφάλαια που προβλέπονται από το ισπανικό βασιλικό διάταγμα του 1998 με ειδικούς όρους πληρωμής που αφορούν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές. Στην εξέλιξη των έργων συνεπικουρούν και τα κεφάλαια που επένδυσε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή σύμφωνα με το πέμπτο ενεργειακό πρόγραμμα του 1999. Τα έργα που βρίσκονται υπό ανάπτυξη είναι ονομαστικά τα εξής:

- *Ισπανία*: το αμιγώς ηλιακό εργοστάσιο Planta Solar (PS10) στο Sanlucar κοντά στη Σεβίλλη το οποίο προωθείται από ισπανικές και γερμανικές εταιρίες. Στο συγκεκριμένο έργο βρίσκεται εφαρμογή ο ογκομετρικός δέκτης αέρα με τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας (πρόγραμμα PHOEBUS) και επιπλέον γίνεται χρήση 90 m² ηλιοστατών ισπανικής κατασκευής.
- *Ισπανία*: το αμιγώς ηλιακό εργοστάσιο στην Cordoba το οποίο προωθείται από ισπανικές και αμερικανικές εταιρίες. Στο συγκεκριμένο έργο βρίσκεται εφαρμογή η αμερικανική τεχνολογία τηγμένου άλατος για το δέκτη με επιπλέον χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Οι ηλιοστάτες είναι ισπανικής κατασκευής με μειωμένο κόστος και διαστάσεις.

Επιπροσθέτως, υπό εξέλιξη βρίσκονται τα εξής έργα έρευνας και εξέλιξης (R&D) που αφορούν συστήματα κεντρικού δέκτη:

- *Ισπανία*: το πρόγραμμα SOLAIR με σύστημα ογκομετρικού δέκτη αέρα υψηλών θερμοκρασιών παραγόμενης ισχύος 3 MWth που λαμβάνει χώρα στο PSA με πρόταση ευρωπαϊκής ομάδας υπό ισπανική βιομηχανική καθοδήγηση, ενώ επιπρόσθετη χρηματοδότηση γίνεται από το πέμπτο ενεργειακό πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.
- *Ισπανία*: το πρόγραμμα REFOS με ισχύ 1 MWth η οποία παράγεται από ένα σύμπλεγμα τριών ογκομετρικών δεκτών αέρα υπό πίεση. Στο συγκεκριμένο έργο που λαμβάνει χώρα στο PSA με πρόταση των ινστιτούτων DLR και CIEMAT γίνεται προθέρμανση με ηλιακή ενέργεια του αέρα καύσης αεριοστροβίλου σε σταθμό συνδυασμένου κύκλου.
- *Ισπανία*: το πρόγραμμα SIREC από τη CIEMAT και την IAER σε συνεργασία με ισπανική εταιρία, όπου παρουσιάζονται νέοι ηλιοστάτες χαμηλού κόστους και εξελιγμένης τεχνολογίας.
- *Ισραήλ*: το πρόγραμμα εξέλιξης συστήματος κεντρικού δέκτη DIAPR από ισραηλινή βιομηχανία σε συνεργασία με γερμανικούς και αμερικανικούς φορείς που λαμβάνει χώρα στο ινστιτούτο Weizmann (WIS-Weizmann institute of science) για ηλιακές-θερμικές και ηλιακές-χημικές εφαρμογές.
- *Ισραήλ*: το πρόγραμμα SOLASYS από ισραηλινή εταιρία με γερμανική συνεργασία στις εγκαταστάσεις δοκιμών κεντρικού δέκτη στο WIS με σκοπό την παραγωγή συνθετικού αερίου μέσω «ηλιακής αναμόρφωσης» φυσικού αερίου. Στο έργο γίνεται χρήση ενός ογκομετρικού δέκτη αέρα υψηλών θερμοκρασιών ισχύος 400kWth.

Σύμφωνα με την ανάλυση της Παγκόσμιας τράπεζας, το κόστος εγκατάστασης ενός θερμικού σταθμού κεντρικού δέκτη αναμένεται βραχυπρόθεσμα να έχει εύρος από 4300 €/kWh (εργοστάσιο ISCCS ισχύος

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

130 MWe με 30 MWe δυναμικότητα εξ' αιτίας ηλιακής ενέργειας και αποθήκευση) έως 3300 €/kWh (εργοστάσιο ισχύος 100 MWe με κύκλο Rankine και αποθήκευση). Οι τιμές αυτές αφορούν ανέγερση στην Ευρώπη ή στις Ηνωμένες Πολιτείες, ενώ το εύρος του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού αναμένεται από 14 έως 12 ¢cents/kWh.

Στην Ευρώπη, τα αναπτυσσόμενα προγράμματα στην Ισπανία έχουν δείξει ότι θεωρείται επιτεύξιμο ένα αρχικό κόστος της τάξης των 2700 €/kWh για θερμικό σταθμό κεντρικού δέκτη με περιορισμένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, με το εύρος τους κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας να κυμαίνεται από 20 έως 14 ¢cents/kWh.

Το ακριβές εύρος του κόστους εγκατάστασης πεδίων ηλιοστατών κυμαίνεται από 180 έως 250 €/m² για μικρό ρυθμό παραγωγής στις Ηνωμένες Πολιτείες και από 140 έως 220 €/m² στην Ευρώπη. Χαμηλότερες τιμές κατά 15% αναμένονται στις αναπτυσσόμενες χώρες λόγω του μικρότερου κόστους εργατικών. Το κόστος των ηλιοστατών αναμένεται να πέσει μακροπρόθεσμα κάτω από τα 100 €/m² για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής.

Τα έργα κεντρικού δέκτη θα ωφεληθούν από παράγοντες μείωσης του κόστους ανάλογους με αυτούς που αναφέρθηκαν για τους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων. Με την αναμενόμενη εξέλιξη και τη διασύνδεση των θερμικών σταθμών κεντρικού δέκτη στο δίκτυο το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πέσει στα 8 έως 7 ¢cents/kWh μεσοπρόθεσμα (σταθμός ισχύος 100MWe με κύκλο Rankine ή συνδυασμένου κύκλου (ISCCS) ίδιας ισχύος αμφότερα με αποθήκευση ενέργειας) και στα 5 ¢cents/kWh μακροπρόθεσμα (σταθμός κύκλου Rankine ισχύος 200 MWe με αποθήκευση), σύμφωνα με αναλύσεις της Παγκόσμιας Τράπεζας. Οι σταθμοί κεντρικού δέκτη αναμένεται στο μέλλον να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με έως και 25% χαμηλότερο κόστος από τους αντίστοιχους παραβολικών κατόπτρων. Υπάρχει επιπλέον η μακροπρόθεσμη πολλά υποσχόμενη δυνατότητα τα συστήματα κεντρικού δέκτη με κύκλο Rankine να συναγωνίζονται τους συμβατικούς σταθμούς αιχμής κύκλου Rankine σε τοποθεσίες με μεγάλη ηλιοφάνεια. Όπως αναφέρθηκε και για τα εργοστάσια παραβολικών κατόπτρων συνδυασμένου κύκλου, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των εργοστασίων ISCCS κεντρικού δέκτη δεν αναμένεται να είναι χαμηλότερο από τους συμβατικούς σταθμούς συνδυασμένου κύκλου.

5.3.2 Περιβαλλοντική ανάλυση.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σταθμών κεντρικού δέκτη είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες που έχουν αναφερθεί για τους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων. Ειδική αναφορά θα πρέπει να γίνει στο θέμα της οπτικής όχλησης δεδομένου ότι ο κεντρικός πύργος έχει μια επίδραση στο φυσικό τοπίο που δεν είναι δυνατό να αγνοηθεί και μάλιστα όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του πύργου τόσο εντονότερη είναι η επίδραση αυτή. Σε αντίθεση με τους ανεμοκινητήρες, το γεγονός ότι δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη καθιστά την επίδραση στο φυσικό σκηνικό πιο εύκολα αποδεκτή. Η επίδραση αυτή στο φυσικό τοπίο μπορεί να περιοριστεί ακόμη περισσότερο

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

με τη χρήση κατάλληλων χρωμάτων για τον πύργο, μέθοδος που έχει ήδη παρουσιαστεί για τις ανεμογεννήτριες. Ως οπτική όχληση κατά τη διάρκεια της νύχτας θα μπορούσαν να θεωρηθούν και οι απαραίτητοι προειδοποιητικοί λαμπτήρες για τα αεροσκάφη που βρίσκονται στον κεντρικό πύργο. Μιας και το ύψος του πύργου αντιστοιχεί στο 15 έως 25% της ακτίνας του πεδίου των συλλεκτών, ενοχλητική σκίαση εκτός του χώρου του εργοστασίου λαμβάνει χώρα μόνο για ηλιακά ύψη μικρότερα των 15°.

5.4 Συστήματα παραβολικών πιάτων.

Πολλά συστήματα παραβολικών «πιάτων» μικρής ισχύος για παραγωγή ηλεκτρισμού εκτός δικτύου με εύρος από 5 έως 25 MWe έχουν αποδείξει την τεχνική επιτευξιμότητά τους σε πολυάριθμα ερευνητικά προγράμματα διεθνώς ήδη από το τέλος της δεκαετίας του 1970. Αυτού του είδους τα συστήματα έχουν άριστες δυνατότητες για υψηλούς βαθμούς απόδοσης εξ' αιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στη μηχανή Stirling. Η μέγιστη τιμή έχει καταγραφεί από ένα αμερικανικό σύστημα παραβολικού «πιάτου» με βαθμό απόδοσης ηλιακής προς ηλεκτρική ενέργεια της τάξης του 30%. Η σύγχρονη τεχνολογία εξελίσσεται κυρίως από ευρωπαϊκές (γερμανικές) και αμερικανικές βιομηχανίες και ινστιτούτα, τα οποία αναπτύσσουν κυρίως μονάδες ισχύος 10 kWe (γερμανικές μονάδες) και 25 kWe (αμερικανικές μονάδες). Αυτά τα συστήματα βρίσκονται ακόμη σε δοκιμαστική λειτουργία στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ισπανία, ώστε να αποδείξουν την αξιοπιστία τους. Το σχέδιο των συστημάτων συγκέντρωσης μεμβράνης βρίσκεται επί του παρόντος σε δοκιμαστική λειτουργία στο PSA με χρήση εξελιγμένης γερμανικής τεχνολογίας. Τα συστήματα αυτά αναμένεται να έχουν τόσο μειωμένο κόστος ώστε να είναι ανταγωνιστικά προς τους θερμικούς σταθμούς Ντήζελ σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε νησιά. Ο απαραίτητος εξοπλισμός για μικρή παραγωγή της τάξης των εκατό μονάδων το χρόνο βρίσκεται επίσης υπό εξέλιξη.



Σχήμα 5.4 Σύγχρονο συγκεντρωτικό «πίατο» μεμβράνης.

5.4.1 Έργα υπό εξέλιξη.

Τα παρακάτω πιλοτικά προγράμματα που αφορούν συστήματα παραβολικών «πιάτων» βρίσκονται σε εκτεταμένο στάδιο εξέλιξης.

➤ *Ευρώπη*: το πρώτο βιομηχανικό πρόγραμμα παραβολικών «πιάτων» Stirling υπό εξέλιξη για την απόδειξη επιτυχημένης συνεχούς λειτουργίας μονάδων ισχύος 9 και 10 kWe με σκοπό την εμπορευματοποίησή τους (τρία συστήματα DISTAL I λειτουργούν από το 1992 και τρία DISTAL II από το 1997). Τα συστήματα DISTAL I έχουν καταγράψει περισσότερες από 60000 ώρες λειτουργίας μέχρι σήμερα. Επιπλέον, εξελίσσονται νέοι τύποι σωληνώσεων δεκτών και μηχανών Stirling με σκοπό την εξακρίβωση της αξιοπιστίας τους. Νέες μονάδες παραβολικών «πιάτων» ισχύος 9 και 10 MWe βρίσκονται καθ' οδόν προς δοκιμές στο PSA με κεφάλαια που προβλέπονται από το πρόγραμμα Eurodish του 1998 και επιδοτήσεις από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Σκοπός του προγράμματος είναι η μείωση του κόστους μέσω εξελιγμένων κατασκευών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εμπορευματοποίηση των ευρωπαϊκών συστημάτων παραβολικών «πιάτων».

➤ *Ισπανία*: έρευνα επιτευξιμότητας και μικρό έργο επίδειξης ισχύος 25 kWe που προωθείται από ισπανικό όμιλο σε συνεργασία με την πολυεθνική SES (Stirling Energy Systems) προς ανέγερση στη νοτιο-ανατολική Ισπανία.

➤ *Ηνωμένες Πολιτείες*: η πρώτη βιομηχανική σειρά πέντε πρωτότυπων συστημάτων παραβολικών «πιάτων» ισχύος 25 kWe το καθένα.

➤ *Αυστραλία*: το πιλοτικό πρόγραμμα με την ονομασία «μεγάλο πιάτο» έκτασης 400m² και δυναμικότητα έως και 150kWth βρίσκεται υπό ερευνητικές δοκιμές στο Εθνικό Πανεπιστήμιο της Αυστραλίας (ANU- Australian National University) από το 1994. Το έργο έχει σχεδιαστεί για την παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιώντας μια μηχανή παραγωγής ατμού ισχύος 50kWe ή για συμπαραγωγή μέσω απ' ευθείας παραγωγής ατμού από την ηλιακή ενέργεια.

➤ Η αυστραλιανή κυβέρνηση χρηματοδοτεί έναν ηλιακό θερμικό σταθμό ισχύος 2,6 MWth, που αποτελείται από δεκαοκτώ μονάδες «μεγάλων πιάτων» συνολικής επιφάνειας 400m², ο οποίος θα εισάγει ατμό παραγόμενο από ηλιακή ενέργεια απ' ευθείας στον ατμοστρόβιλο ενός ήδη υπάρχοντος λιγνιτικού σταθμού. Άλλη μια μονάδα συλλεκτών έκτασης 400m² πουλήθηκε πρόσφατα στο ισραηλινό κέντρο ηλιακών δοκιμών στην έρημο Negev για ερευνητικούς σκοπούς.

Το κόστος εγκατάστασης μιας μονάδας παραβολικών «πιάτων» ισχύος 9 έως 10 kWe κυμαίνεται σήμερα από 10000 έως 14000 €/kWe ενώ το κόστος αναμένεται να μειωθεί βραχυπρόθεσμα στα 7100 €/kWe (με ρυθμό παραγωγής 100 μονάδων το χρόνο). Στο μέσο-μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα τα συστήματα παραβολικών «πιάτων» αναμένεται να έχουν δραστικά μειωμένο κόστος εγκατάστασης σε συνάρτηση με τον αριθμό των μονάδων στη γραμμή παραγωγής. Ο στόχος για το πρόγραμμα Eurodish είναι πτώση του κόστους κάτω από τα 7100 €/kWe για ρυθμό παραγωγής εκατό μονάδων το χρόνο, περαιτέρω πτώση του κόστους στα 3700 €/kWe για ρυθμό παραγωγής χιλίων μονάδων το χρόνο, ενώ για αύξηση του ρυθμού παραγωγής στις τρεις χιλιάδες μονάδες το χρόνο το κόστος αναμένεται να

Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά θερμικά εργοστάσια.

πέσει στα 2400 €/kWe. Η ελαχιστοποίηση του κόστους επιτυγχάνεται για ρυθμό παραγωγής δέκα χιλιάδων μονάδων το χρόνο και η τελική τιμή του είναι 1600 €/kWe, δεδομένου ότι περαιτέρω μείωση θεωρείται απίθανη εξ' αιτίας του αυξημένου κόστους της τεχνολογίας των βοηθητικών συστημάτων. Το κόστος το συλλεκτών αναμένεται μέσο-μακροπρόθεσμα να κυμαίνεται από 125 έως 105 €/m² για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής. Τα συστήματα παραβολικών «πιάτων» έχουν τη δυνατότητα να ανταγωνίζονται στο μέλλον τις αντίστοιχες μονάδες Ντήζελ σε απομακρυσμένες περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια ή σε νησιά.

5.4.2 Περιβαλλοντική ανάλυση.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σταθμών παραβολικών «πιάτων» είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες που έχουν αναφερθεί για τους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων και κεντρικού δέκτη.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ TRNSYS.

6.1 Το πακέτο TRNSYS.

Το TRNSYS αποτελεί ένα πλήρες και επεκτάσιμο υπολογιστικό περιβάλλον για την προσομοίωση χρονικά μεταβαλλόμενων συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των πολυζωνικών κτηρίων. Η χρήση του από ερευνητές και μηχανικούς γίνεται για την αξιολόγηση νέων ενεργειακών διατάξεων, από απλά συστήματα θέρμανσης νερού οικιακής χρήσης έως το σχεδιασμό και την προσομοίωση κτηρίων και του εξοπλισμού τους, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ελέγχου και τη συμπεριφορά των κατοίκων, αλλά και εναλλακτικών ενεργειακών συστημάτων (αιολικά, ηλιακά, φωτοβολταϊκά και συστήματα υδρογόνου).

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό λειτουργικό χαρακτηριστικό του TRNSYS είναι η ανοιχτή δομή του. Ο πηγαίος κώδικας του πυρήνα και τα μοντέλα των στοιχείων είναι διαθέσιμα για τους χρήστες, απλοποιώντας έτσι την επέκταση των ήδη υπάρχοντων μοντέλων με σκοπό την εναρμόνιση τους με τις συγκεκριμένες ανάγκες των χρηστών.

Η αρχιτεκτονική με βάση τα αρχεία DLL επιτρέπει στους χρήστες να προσθέσουν εύκολα νέα μοντέλα στοιχείων, χρησιμοποιώντας τις γνωστές γλώσσες προγραμματισμού (C, C++, PASCAL, FORTRAN). Επιπροσθέτως, το TRNSYS μπορεί να συνδεθεί με διάφορες εφαρμογές, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία των δεδομένων πριν αλλά και μετά από την προσομοίωση. Στις εφαρμογές του TRNSYS συμπεριλαμβάνονται:

- Ηλιακά συστήματα (ηλιακά θερμικά και φωτοβολταϊκά)
- Κτήρια χαμηλής ενέργειας και συστήματα θέρμανσης και εξαερισμού με χαρακτηριστικά εξελιγμένου σχεδιασμού (φυσική κυκλοφορία αέρα, διπλή πρόσοψη).
- Συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας
- Συστήματα συμπαραγωγής, κυψέλες καυσίμου

6.2 Το στούντιο προσομοίωσης (Simulation Studio).

Το κύριο περιβάλλον γραφικών του TRNSYS είναι το στούντιο προσομοίωσης, όπου και δημιουργούνται οι διάφορες διατάξεις, μεταφέροντας και τοποθετώντας τα στοιχεία στο χώρο εργασίας, συνδέοντας τα και θέτοντας τις γενικές παραμέτρους της προσομοίωσης.

Το στούντιο προσομοίωσης δημιουργεί ένα αρχείο με τις πληροφορίες της διάταξης (Trnsys Project File *.tpf). Όταν γίνει η προσομοίωση, δημιουργείται επιπλέον ένα αρχείο εισόδων, δηλαδή ένα αρχείο κειμένου που περιέχει όλες τις πληροφορίες της προσομοίωσης, αλλά καμία γραφική απεικόνιση.

Το στούντιο προσομοίωσης περιλαμβάνει επιπλέον ένα διαχειριστή εξόδων, απ' όπου ελέγχονται οι μεταβλητές που πρόκειται να ολοκληρωθούν, να εκτυπωθούν ή να παρασταθούν και ένα διαχειριστή

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

σφαλμάτων που επιτρέπει τη λεπτομερή μελέτη των γεγονότων που έλαβαν χώρα κατά την προσομοίωση.

Τέλος μέσω του στούντιο προσομοίωσης μπορούν να διενεργηθούν πολλές επιπρόσθετες εργασίες όπως η δημιουργία νέων στοιχείων χρησιμοποιώντας την επιλογή «Fortran Wizard», η επεξεργασία των παραμέτρων, των εισόδων, των εξόδων και της περιγραφής ενός στοιχείου και η επισκόπηση των εξαγόμενων αρχείων.

6.3 Η βιβλιοθήκη STEC (Solar Thermal Electric Components).

Η βιβλιοθήκη STEC βασίζεται στους νόμους διατήρησης ενέργειας (1^{ος} και 2^{ος} νόμος) διαμορφωμένους κατάλληλα σε θερμοδυναμικές ποσότητες (θερμοκρασία, πίεση, ενθαλπία). Η βιβλιοθήκη αποτελείται από στοιχεία κατάλληλα για κύκλους Rankine, ηλιακά συστήματα (κεντρικός δέκτης, πεδίο ηλιοστατών και παραβολικά κάτοπτρα), συστήματα θερμικής αποθήκευσης και κύκλους Brayton.

Η STEC αποτελείται από τέσσερις βιβλιοθήκες στοιχείων με τις εξής ονομασίες: “Rankine” για τα στοιχεία που υλοποιούν τους κύκλους Rankine, “STE” για τα ηλιακά θερμικά στοιχεία, “Brayton” για τα στοιχεία κύκλου αεριοστροβίλων και “Storage” για τα στοιχεία που περιγράφουν συστήματα θερμικής αποθήκευσης υψηλής θερμοκρασίας.

6.3.1 Στοιχεία της βιβλιοθήκης STEC που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση.

Συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων (Τύπος 396)



Ο συλλέκτης παραβολικού κατόπτρου μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια ενιαία σχέση για το βαθμό απόδοσης που αναφέρεται στη διαφορετική θερμοκρασία του εργαζόμενου ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο του πεδίου των συλλεκτών. Μέσω του μοντέλου υπολογίζεται η απαιτούμενη παροχή μάζας του μέσου μεταφοράς θερμότητας για να επιτευχθεί η θερμοκρασία εξόδου από το πεδίο που καθορίζεται από το χρήστη ως εξής:

$$\dot{M} = \frac{\dot{Q}_{net}}{c_p (T_{out} - T_{in})} \quad (6.1)$$

όπου $\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{pipe}$ και $\dot{Q}_{abs} = A_a \cdot DNI \cdot \eta$

Ο βαθμός απόδοσης του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών δίνεται από τη σχέση

$$\eta = K \cdot M \cdot Sh \left[A + B \frac{\Delta T_{out} + \Delta T_{in}}{2} \right] + (C + C_w \cdot WS) \frac{\Delta T_{out} + \Delta T_{in}}{2DNI} + D \frac{\Delta T_{out} \cdot \Delta T_{in} + \frac{1}{3} (\Delta T_{out} - \Delta T_{in})^2}{DNI}$$

(6.2)

όπου A,B,C,C_w,D: εμπειρικοί συντελεστές που περιγράφουν την απόδοση του συλλέκτη

K: τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης

M: συντελεστής που αφορά τις «απώλειες άκρων»

Sh: συντελεστής που αφορά τη σκίαση των παράλληλων σειρών

ΔT_{out} : θερμοκρασιακή διαφορά του ρευστού στην έξοδο του πεδίου και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

ΔT_{in} : θερμοκρασιακή διαφορά του ρευστού στην είσοδο του πεδίου και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

DNI: η άμεσος κάθετη ακτινοβολία (I_{bn})

Το μοντέλο λαμβάνει επίσης υπ' όψιν την παρασιτική ενέργεια που καταναλίσκεται για την παρακολούθηση του ηλίου, την έναρξη και το σταμάτημα της λειτουργίας και τη λειτουργία των αντλιών. Η λειτουργία σταματά αυτόματα σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Μια περίοδος μείωσης της παροχής έχει συμπεριληφθεί, έτσι ώστε η παροχή να μειώνεται γραμμικά έως το επίπεδο που θα έχει κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το ποσοστό του πεδίου που παρακολουθεί τον ήλιο μπορεί επίσης να οριστεί από το χρήστη ως είσοδος.

Παράμετροι

- συντελεστής απωλειών A
- συντελεστής απωλειών B
- συντελεστής απωλειών C
- συντελεστής απωλειών C_w
- συντελεστής απωλειών D
- καθαρή ανακλαστικότητα
- ποσοστό σπασμένων κατόπτρων
- μήκος παραβολικού συλλέκτη
- πλάτος «παραθύρου» παραβολικού κατόπτρου
- εστιακό μήκος παραβολικού συλλέκτη
- απόσταση ανάμεσα στις σειρές του πεδίου
- μέγιστη κατανάλωση ισχύος από την αντλία
- μέγιστη παροχή μάζας από την αντλία
- συντελεστής ισχύος 1 της αντλίας
- συντελεστής ισχύος 2 της αντλίας
- συντελεστής ισχύος 3 της αντλίας

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

- ρυθμός θερμικών απωλειών δεξαμενής
- απώλειες θερμότητας στις σωληνώσεις ανά μονάδα επιφάνειας του πεδίου στους 343°C
- παρασιτική ενέργεια παρακολούθησης ανά μονάδα επιφάνειας του πεδίου στους 275°C
- παρασιτική ενέργεια αποθήκευσης ανά μονάδα επιφάνειας του πεδίου
- όριο ταχύτητας ανέμου

Είσοδοι

- απαιτούμενη θερμοκρασία εξόδου από το πεδίο των συλλεκτών
- θερμοκρασία εισόδου στο πεδίο
- καθαρότητα του πεδίου
- ειδική θερμότητα του μέσου μεταφοράς θερμότητας
- αζιμούθιο ηλίου
- γωνία ζενίθ
- άμεσος κάθετη ακτινοβολία
- ταχύτητα ανέμου
- θερμοκρασία περιβάλλοντος
- ποσοστό του πεδίου που παρακολουθεί τον ήλιο
- διαθέσιμο ποσοστό του πεδίου
- παροχή νυχτερινής λειτουργίας
- διάρκεια περιόδου μείωσης παροχής
- μέγιστη παροχή στο τέλος της περιόδου μείωσης

Εξοδοι

- παροχή μάζας του πεδίου συλλεκτών
- θερμοκρασία εξόδου από το πεδίο συλλεκτών
- συνολική παρασιτική ενέργεια
- απώλεια ενέργειας λόγω κακής εστίασης
- καθαρή ενέργεια που μεταβιβάζεται στο εργαζόμενο μέσο
- κατάσταση του συστήματος

Διαχωριστής μέσου μεταφοράς θερμότητας (Τύπος 352)



Με τον τύπο αυτό μοντελοποιείται ο ελεγχόμενος διαχωρισμός ενός ρεύματος μέσου μεταφοράς θερμότητας σε δύο ροές.

Παράμετροι

- συντελεστής k_p (αναφέρεται στην πτώση πίεσης)

Είσοδοι

- θερμοκρασία εισόδου
- πίεση εισόδου

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

- παροχή μάζας εισερχόμενου ρεύματος
- ειδική θερμότητα εισερχόμενου μέσου
- ποσοστό της εισερχόμενης παροχής που οδεύει προς την έξοδο 1 (FRAC)

Έξοδοι

- θερμοκρασία εξόδου 1
- πίεση εξόδου 1
- παροχή εξερχόμενης μάζας 1
- ειδική θερμότητα ρευστού εξόδου 1
- θερμοκρασία εξόδου 2
- πίεση εξόδου 2
- παροχή εξερχόμενης μάζας 2
- ειδική θερμότητα ρευστού εξόδου 2



Αναμεικτής μέσου μεταφοράς θερμότητας (Τύπος 353)

Ο αναμεικτής μοντελοποιεί τη συνένωση δύο ρευμάτων ρευστού μέσω μεταφοράς θερμότητας. (Λόγω μη συμβατότητας του τύπου 353 με τη χρησιμοποιούμενη έκδοση του TRNSYS, χρησιμοποιείται ο τύπος 11h-tee piece).

Παράμετροι

- mode

Είσοδοι

- θερμοκρασία εισόδου 1
- παροχή εισερχόμενης μάζας 1
- θερμοκρασία εισόδου 2
- παροχή εισερχόμενης μάζας 2

Έξοδοι

- θερμοκρασία εξόδου
- παροχή μάζας εξερχόμενου ρεύματος



Υπερθερμαντής (Τύπος 315)

Ένας εναλλάκτης αισθητής θερμότητας τύπου αντιρροής μοντελοποιείται, θεωρώντας ότι στην είσοδο της ψυχρής πλευράς υπάρχει νερό/ατμός σε συνάρτηση με την ξηρότητα. Η αντίστοιχη ειδική θερμότητα

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

του ρευστού της ψυχρής πλευράς υπολογίζεται από δεδομένα ιδιοτήτων νερού/ατμού.

Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δίνεται από τη σχέση

$$UA = UA_{ref} \left(\frac{\dot{m}_{cold}}{\dot{m}_{cold,ref}} \right)^{UA_exp} \quad (6.3)$$

όπου $0,1UA_{ref} \leq UA \leq 2UA_{ref}$

Τα UA_{ref} , $\dot{m}_{cold,ref}$, UA_exp μπορούν να καθοριστούν από το χρήστη.

Επιπροσθέτως η απώλεια πίεσης υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο:

$$\Delta p = \Delta p_{ref} \left(\frac{\dot{m}_{cold}}{\dot{m}_{cold,ref}} \right)^{\Delta p_exp} \quad (6.4)$$

όπου $\Delta p \leq 2\Delta p_{ref}$

Τα Δp_{ref} , $\dot{m}_{cold,ref}$, Δp_exp μπορούν επίσης να καθοριστούν από το χρήστη.

Παράμετροι

- τύπος 2 για εναλλάκτη αντιρροής
- συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αναφοράς
- πτώση πίεσης αναφοράς
- παροχή μάζας αναφοράς ψυχρής πλευράς
- εκθέτης UA_exp
- εκθέτης Δp_exp

Είσοδοι

- θερμοκρασία εισόδου θερμής πλευράς
- παροχή μάζας θερμής πλευράς
- θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς
- παροχή μάζας ψυχρής πλευράς
- ξηρότητα ψυχρής πλευράς
- πίεση εξόδου ψυχρής πλευράς
- ειδική θερμότητα θερμής πλευράς

Εξοδοι

- θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

- παροχή μάζας θερμής πλευράς
- θερμοκρασία εξόδου ψυχρής πλευράς
- παροχή μάζας ψυχρής πλευράς
- ρυθμός μεταφοράς θερμότητας
- ξηρότητα εξόδου ψυχρής πλευράς
- πίεση εισόδου ψυχρής πλευράς

Ατμοποιητής (Τύπος 316)



Αυτό το μοντέλο προσομοιώνει έναν ατμοποιητή νερού, δίνοντας θερμοκρασία και παροχή μάζας του θερμού και του ψυχρού ρεύματος στην έξοδο, ενώ απαιτείται η κατάλληλη παροχή νερού στην είσοδο για να επιτευχθεί πλήρης ατμοποίηση. Η ψυχρή πλευρά θεωρείται νερό/ατμός σε σχέση με την ξηρότητα. Οι συνθήκες του νερού/ατμού δίνονται από τη θερμοκρασία, την πίεση και την ξηρότητα. Η μεταφορά θερμότητας περιγράφεται μέσω του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας UA. Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εκτιμάται όπως στο μοντέλο του υπερθερμαντή.

Παράμετροι

- συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αναφοράς
- πτώση πίεσης αναφοράς
- εκθέτης για το UA
- εκθέτης για το Δp

Είσοδοι

- θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς
- παροχή μάζας θερμής πλευράς
- θερμοκρασία εξόδου ψυχρής πλευράς
- πίεση εξόδου ψυχρής πλευράς
- ξηρότητα ψυχρής πλευράς
- ειδική θερμότητα θερμής πλευράς

Εξοδοι

- θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς
- παροχή μάζας θερμής πλευράς
- θερμοκρασία εξόδου ψυχρής πλευράς
- πίεση εισόδου θερμής πλευράς
- ξηρότητα εξόδου ψυχρής πλευράς
- απαιτούμενη παροχή μάζας ψυχρής πλευράς
- παροχή μάζας ψυχρής πλευράς

Μετατροπές παραμέτρων νερού ατμού (Τύπος 391)



Το μοντέλο αυτό μετατρέπει τις ιδιότητες του ατμού που δίνονται μέσω της πίεσης, της θερμοκρασίας και της ξηρότητας και χρησιμοποιούνται από στοιχεία όπως ο προθερμαντής και ο ατμοποιητής σε ενθαλπία και πίεση που χρησιμοποιούνται από το στρόβιλο.

Παράμετροι

(καμία)

Είσοδοι

- θερμοκρασία ατμού
- πίεση ατμού
- ξηρότητα ατμού
- παροχή ατμού

Εξοδοι

- ενθαλπία ατμού
- πίεση ατμού
- παροχή ατμού

Μετατροπές παραμέτρων νερού ατμού (Τύπος 392)



Το μοντέλο αυτό μετατρέπει τις ιδιότητες του ατμού που δίνονται μέσω της ενθαλπίας και της πίεσης που χρησιμοποιούνται από το στρόβιλο, σε θερμοκρασία και ξηρότητα που χρησιμοποιούνται από στοιχεία όπως ο προθερμαντής και ο ατμοποιητής.

Παράμετροι

(καμία)


Είσοδοι

- ενθαλπία ατμού
- πίεση ατμού
- παροχή ατμού

Εξοδοι

- θερμοκρασία ατμού
- πίεση ατμού

- ξηρότητα ατμού
- παροχή ατμού
- ενθαλπία ατμού

Βαθμίδα στροβίλου (Τύπος 318) 

Το μοντέλο της βαθμίδας στροβίλου υπολογίζει την πίεση εισόδου στη βαθμίδα από την πίεση εξόδου, την παροχή μάζας ατμού και τιμές αναφοράς για την πίεση και την παροχή μάζας εισόδου και εξόδου χρησιμοποιώντας το νόμο της έλλειψης. Η εκτίμηση της ενθαλπίας εξόδου από την ενθαλπία εισόδου και της πίεσης εισόδου και εξόδου γίνεται με χρήση του ισοεντροπικού βαθμού απόδοσης, ο οποίος υπολογίζεται από μια τιμή αναφοράς ως εξής:

$$\eta_{is} = \eta_{is,ref} \left(1 + a \cdot f + b \cdot f^2 + c \cdot f^3 \right) \text{ με } 0,2 \leq \eta_{is} \leq 1 \quad (6.5)$$

όπου $f = \frac{\dot{m} - \dot{m}_{ref}}{\dot{m}}$ με $-0,7 \leq f \leq 0,7$

Η τιμή του δείκτη παράκαμψης τίθεται ίση με 0, εάν η παροχή μάζας είναι χαμηλότερη από ένα ποσοστό αναφοράς που δηλώνεται στις παραμέτρους. Εάν δε δοθεί τιμή στο δείκτη παράκαμψης, ο ατμός περνά από το στρόβιλο χωρίς να παράξει έργο και παραμένει στις ίδιες συνθήκες. Η πίεση υποτίθεται ότι αντιστοιχεί σε συνθήκες ελάχιστης ροής όταν η παράκαμψη είναι ενεργοποιημένη.

Παράμετροι

- πίεση εισόδου αναφοράς
- πίεση εξόδου αναφοράς
- παροχή μάζας αναφοράς
- βαθμός απόδοσης αναφοράς
- βαθμός απόδοσης γεννήτριας
- συντελεστής a
- συντελεστής b
- συντελεστής c

Είσοδοι

- πίεση εξόδου
- παροχή μάζας εισόδου
- ενθαλπία εισόδου
- δείκτης παράκαμψης εισόδου

Εξοδοι

- πίεση εισόδου
- παροχή μάζας εξόδου
- ενθαλπία εξόδου
- ισχύς στροβίλου
- δείκτης παράκαμψης εξόδου
- ισεντροπικός βαθμός απόδοσης

Διαχωριστής ατμού (Τύπος 389)



Ο τύπος αυτός μοντελοποιεί έναν ελεγχόμενο διαχωριστή με μια είσοδο και δύο εξόδους. Η απαιτούμενη παροχή μάζας ορίζεται ως έξοδος 1, ενώ η εναπομείνουσα παροχή πηγαίνει στην έξοδο 2. Η ενθαλπία μεταφέρεται κατά την κατεύθυνση της ροής, δηλαδή η ενθαλπία των εξόδων 1 και 2 είναι ίση με την ενθαλπία της εισόδου. Η πίεση μεταφέρεται αντίθετα της ροής, δηλαδή η πίεση στην έξοδο 2 μεταφέρεται στην έξοδο 1 και στην είσοδο. Εάν η απαιτούμενη παροχή είναι μεγαλύτερη από την παροχή εισόδου, ένα μήνυμα σφάλματος εμφανίζεται στο αρχείο λίστας (list file).

Παράμετροι

(καμία)

Είσοδοι

- απαιτούμενη παροχή εξόδου 1
- εισερχόμενη παροχή
- πίεση εξόδου 2
- ενθαλπία εισόδου

Εξοδοι

- εξερχόμενη παροχή 1
- εξερχόμενη πίεση 1
- εξερχόμενη παροχή 2
- εισερχόμενη πίεση
- εξερχόμενη ενθαλπία 1
- εξερχόμενη ενθαλπία 2

Συμπυκνωτής (Τύπος 383)



Ο τύπος αυτός μοντελοποιεί ένα συμπυκνωτή που χρησιμοποιεί νερό ως ψυκτικό μέσο. Η θερμοκρασιακή άνοδος του νερού ψύξης δίνεται από την παράμετρο 2, ενώ η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

εξόδου του ψυκτικού νερού και τη θερμοκρασία συμπύκνωσης δίνεται από την παράμετρο 1. Η μεταφερόμενη από το συμπυκνωτή θερμική ισχύς υπολογίζεται από τη σχέση

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{st} h_{st} + \dot{m}_c h_c - (\dot{m}_{st} + \dot{m}_c) h_{sat} \quad (6.6)$$

όπου \dot{m}_{st} : παροχή μάζας εισερχόμενου ατμού

h_{st} : ενθαλπία εισερχόμενου ατμού

\dot{m}_c : παροχή μάζας πρόσθετου συμπυκνώματος

h_c : ενθαλπία πρόσθετου συμπυκνώματος

h_{sat} : ενθαλπία κορεσμένου νερού στην πίεση συμπύκνωσης

Η παροχή του νερού ψύξης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{Q}_{cond}}{c_{p_w} \Delta T_w} \quad (6.7)$$

όπου c_{p_w} : η ειδική θερμότητα του νερού

ΔT_w : η θερμοκρασιακή άνοδος του νερού ψύξης

Παράμετροι

- θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού νερού και τη θερμοκρασία συμπύκνωσης
- θερμοκρασιακή άνοδος του νερού ψύξης

Είσοδοι

- θερμοκρασία εισερχόμενου ψυκτικού νερού
- ενθαλπία εισερχόμενου ατμού
- παροχή μάζας εισερχόμενου ατμού
- παροχή μάζας εισερχόμενου συμπυκνώματος
- θερμοκρασία εισερχόμενου συμπυκνώματος
- ξηρότητα εισερχόμενου συμπυκνώματος

Εξοδοι

- θερμοκρασία συμπύκνωσης
- πίεση συμπύκνωσης
- μεταφερόμενη θερμική ισχύς
- θερμοκρασία εξόδου νερού ψύξης
- παροχή μάζας νερού ψύξης
- παροχή μάζας συμπυκνώματος

Απαεριωτής (Τύπος 384)



Το μοντέλο αυτό περιγράφει ένα προθερμαντή ανάμιξης νερού υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας, με τρεις εισόδους και μια έξοδο. Το εξερχόμενο νερό βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού. Η παροχή ατμού που είναι απαραίτητη για να θερμάνει τα εισερχόμενα ρεύματα σε κατάσταση κορεσμού είναι

$$\dot{m}_{st} = \frac{\dot{m}_c (h' - h_c) + \dot{m}_{fw} (h' - c_p T_{fw,i})}{h_{st} - h'} \quad (6.8)$$

όπου \dot{m}_c, h_c : παροχή μάζας και ενθαλπία συμπυκνώματος

$\dot{m}_{fw}, T_{fw,i}$: παροχή μάζας και θερμοκρασία εισερχόμενου νερού

h' : ενθαλπία κορεσμένου νερού για τη συγκεκριμένη πίεση

Το μοντέλο του απαεριωτή έχει μια είσοδο on/off που παίρνει την τιμή 1 για κανονική λειτουργία και την τιμή 0 για μηδενική παροχή ατμού.

Παράμετροι

(καμία)

Είσοδοι

- θερμοκρασία τροφοδοτικού νερού
- παροχή μάζας τροφοδοτικού νερού
- ενθαλπία εισερχόμενου ατμού
- πίεση εισερχόμενου ατμού
- θερμοκρασία εισερχόμενου συμπυκνώματος
- παροχή μάζας εισερχόμενου συμπυκνώματος
- ξηρότητα εισερχόμενου συμπυκνώματος
- on/off

Έξοδοι

- θερμοκρασία εξόδου τροφοδοτικού νερού
- απαιτούμενη παροχή ατμού
- παροχή μάζας εξερχόμενου τροφοδοτικού νερού

Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού (Τύπος 317)



Το μοντέλο του προθερμαντή προϋποθέτει νερό με σταθερή θερμοχωρητικότητα στην ψυχρή πλευρά και συμπυκνούμενο ατμό στη θερμή πλευρά. Επιπλέον υπολογίζεται η απαιτούμενη παροχή μάζας ατμού που θα διατηρούσε το επίπεδο του νερού στον εναλλάκτη σταθερό. Τα

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας χαρακτηρίζονται από το συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος εκτιμάται ως συνάρτηση της παροχής της ψυχρής πλευράς μέσω της σχέσης (6.3).

Η απαιτούμενη παροχή μάζας ατμού για να έρθει το τροφοδοτικό νερό και το εισερχόμενο συμπύκνωμα σε συνθήκες κορεσμού εκτιμάται από τη σχέση:

$$\dot{m}_{st,dem} = \frac{1}{\left[2\dot{m}_{con} (h_{st,i} - h_{sat}) \right] - \dot{m}_{con} h_{con} + \dot{m}_{con} h_{sat} + \dot{Q} + S} \quad (6.9)$$

$$S = \sqrt{\dot{m}_{con}^2 h_{con}^2 - 2\dot{m}_{con}^2 h_{con} h_{sat} - 2\dot{m}_{con} h_{con} \dot{Q} + \dot{m}_{con}^2 h_{sat}^2 - 2\dot{m}_{con} h_{sat} \dot{Q} + \dot{Q}^2 + 4\dot{Q} \dot{m}_{con} h_{st,i}} \quad (6.10)$$

όπου $h_{st,i}$: ενθαλπία εισερχόμενου ατμού

\dot{m}_{con}, h_{con} : παροχή μάζας και ενθαλπία συμπυκνώματος

h_{sat} : ενθαλπία κορεσμένου νερού

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από τον ισολογισμό:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{st,dem} (h_{mix} - h_{sat}) \quad (6.11)$$

$$\text{όπου } h_{mix} = \frac{\dot{m}_{st,dem} h_{st,i} + \dot{m}_{con} h_{con}}{\dot{m}_{st,i} + \dot{m}_{con}} \quad (6.12)$$

Αντλία (Τύπος 300)



Το μοντέλο της αντλίας υπολογίζει την παροχή μάζας χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση μεταβλητού ελέγχου, η οποία θα πρέπει να έχει τιμή από 0 έως 1, και μια σταθερή μέγιστη παροχή που υπολογίζεται από το χρήστη. Η ισχύς της αντλίας μπορεί να υπολογιστεί επίσης, είτε ως γραμμική συνάρτηση της παροχής μάζας ή από μια πολυωνυμική σχέση που καθορίζεται από το χρήστη. Τέλος, είναι δυνατό να προσδιορισθεί από το χρήστη το ποσοστό της ισχύος της αντλίας που μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια του ρευστού.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αντλία θέτει την τιμή της παροχής μάζας των υπόλοιπων στοιχείων του κυκλώματος, πολλαπλασιάζοντας τη μέγιστη παροχή μάζας (παράμετρος 1) με το σήμα ελέγχου (είσοδος 3). Η παροχή μάζας ως είσοδος του συγκεκριμένου στοιχείου χρησιμοποιείται μόνο για

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

εποπτικούς λόγους και δε χρησιμοποιείται παρά μόνο για να ελεγχθεί εάν συγκλίνουν τα δύο μεγέθη.

Η έκφραση που χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση της ισχύος της αντλίας με την παροχή μάζας είναι

$$P = P_{\max} \left(c_0 \cdot \gamma + c_1 \cdot \gamma + c_2 \cdot \gamma^2 + c_3 \cdot \gamma^3 + c_i \cdot \gamma^i \right) \quad (6.13)$$

όπου P_{\max} : η μέγιστη κατανάλωση ισχύος από την αντλία

γ : το σήμα ελέγχου με τιμές ανάμεσα στο 0 και το 1

c_0, \dots, c_i : συντελεστές που εισάγονται από το χρήστη

Εάν η υπολογιζόμενη ισχύς προκύψει μεγαλύτερη από τη μέγιστη δυνατή, τότε η τιμή της τίθεται ίση με τη μέγιστη.

Παράμετροι

- μέγιστη παροχή μάζας
- ειδική θερμότητα ρευστού
- μέγιστης ισχύς
- ποσοστό μετατροπής ισχύος της αντλίας σε θερμική ενέργεια του ρευστού
- συντελεστές c_0, \dots, c_i

Είσοδοι

- θερμοκρασία εισερχόμενου ρευστού
- παροχή μάζας εισερχόμενου ρευστού
- επιθυμητή παροχή μάζας (σήμα ελέγχου γ)

Εξοδοι

- θερμοκρασία εξερχόμενου ρευστού
- παροχή μάζας εξόδου
- κατανάλωση ισχύος

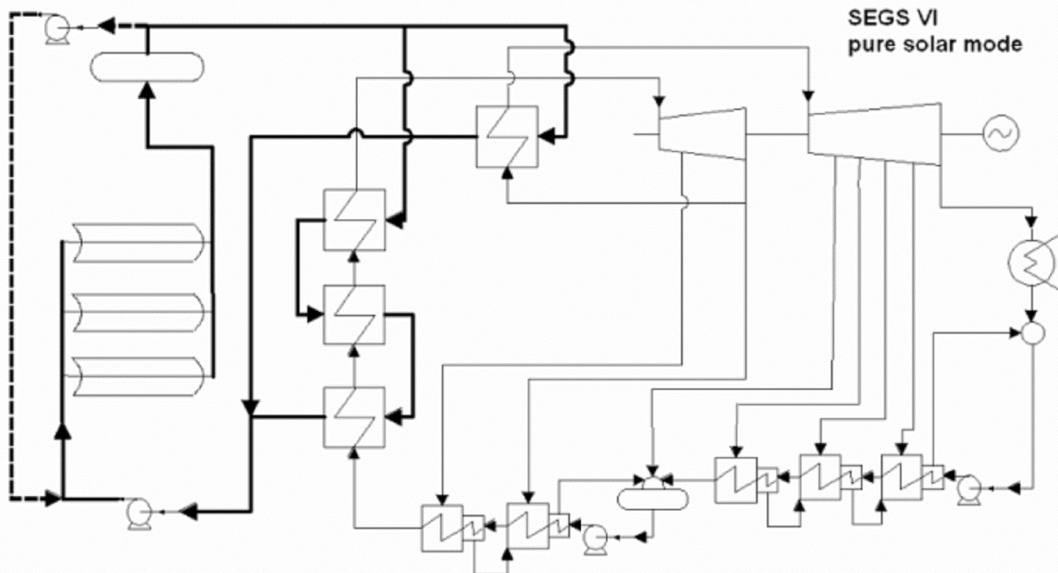
6.4 Προσομοίωση ηλιακού θερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων.

Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται η προσομοίωση του ηλιακού θερμικού σταθμού SEGS VI που κατασκευάστηκε κατά τα έτη 1986-1988, από την εταιρεία Luz Int., στον κόμβο Κράμερ της Καλιφόρνια και λειτουργεί έκτοτε με ονομαστική ισχύ 35 MW_e. Ο θερμικός σταθμός SEGS λειτουργεί σύμφωνα με το συμβατικό κύκλο Rankine για την παραγωγή του απαιτούμενου έργου, χρησιμοποιώντας τη θερμική ενέργεια που συλλέγεται από τους παραβολικούς συλλέκτες που βρίσκονται στο ηλιακό πεδίο. Το μονογραμμικό διάγραμμα του σταθμού απεικονίζεται στο σχήμα 6.1.

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Σύμφωνα με το διάγραμμα πρόκειται για διάταξη έμμεσου κύκλου με δύο ανεξάρτητα κυκλώματα, όπου στο μεν κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί ως εργαζόμενο μέσο το Therminol VP-1, στο δε κύκλωμα παραγωγής ισχύος κυκλοφορεί νερό-ατμός.

Η προσομοίωση του ηλιακού θερμικού σταθμού θα γίνει με το υπολογιστικό πακέτο TRNSYS χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη STEC η οποία περιέχει τις απαραίτητες συνιστώσες (components) που απαρτίζουν τις διατάξεις παραγωγής έργου και μεταφοράς θερμότητας. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κύκλου νερού-ατμού, καθώς και του κύκλου του μέσου μεταφοράς θερμότητας έχουν ληφθεί από βιβλιογραφικές πηγές (Kearney et al, 1988) και βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία με αυτά που επικρατούν στην πραγματική διάταξη. Επιπροσθέτως, όλες οι παράμετροι των συνιστωσών της διάταξης προσομοίωσης είναι σε αντιστοιχία με τις αντίστοιχες των πραγματικών συνιστωσών.



Σχήμα 6.1 Μονογραμμικό διάγραμμα SEGS VI (με έντονη γραμμή παρουσιάζεται η διαδρομή του μέσου μεταφοράς θερμότητας, ενώ με λεπτή η διαδρομή του νερού ατμού).

6.5 Περιγραφή κυκλώματος νερού ατμού σε λειτουργία αναφοράς.

Το κύκλωμα νερού ατμού συμπεριλαμβάνει τον προθερμαντή, τον ατμοποιητή, τον υπερθερμαντή, τις δύο βαθμίδες υψηλής πίεσης και τις πέντε βαθμίδες χαμηλής πίεσης του στροβίλου, το συμπυκνωτή, την αντλία χαμηλής πίεσης, τους δύο προθερμαντές τροφοδοτικού νερού χαμηλής πίεσης, τον απαεριωτή, την αντλία υψηλής πίεσης και τους δύο προθερμαντές υψηλής πίεσης και παρίσταται από το μοντέλο του TRNSYS που απεικονίζεται στο σχήμα 6.3.

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Ο υπέρθερμος ατμός παροχής 38,97 kg/s εξέρχεται από τον υπερθερμαντή με ενθαλπία 3005 kJ/kg και πίεση 100 bar και οδηγείται στην πρώτη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου, όπου εκτονώνεται έως ενθαλπία 2807 kJ/kg και πίεση 33,61 bar. Στο συγκεκριμένο σημείο απομαστεύονται, μέσω ενός διαχωριστή ατμού (s-split), 2,931 kg/s ατμού τα οποία χρησιμοποιούνται για προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού στο δεύτερο προθερμαντή τροφοδοτικού νερού υψηλής πίεσης (preheater-high2). Η εναπομένουσα ποσότητα ατμού (36,039 kg/s) οδεύει προς τη δεύτερη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου όπου και εκτονώνεται έως ενθαλπία 2710 kJ/kg και πίεση 18,58 bar. Μέσω ενός δεύτερου διαχωριστή ατμού, απομαστεύεται ποσότητα 2,80 kg/s η οποία οδεύει προς τον πρώτο προθερμαντή υψηλής πίεσης (preheater-high1), ενώ ο υπόλοιπος ατμός παροχής 33,239 kg/s οδηγείται στον αναθερμαντή από όπου εξέρχεται με ενθαλπία 3190 kJ/kg και πίεση 17,10 bar, δηλαδή υπάρχει απώλεια πίεσης 1,48 bar εντός του αναθερμαντή. Από τον αναθερμαντή, ο ατμός οδηγείται στην πρώτη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του στροβίλου όπου και εκτονώνεται έως ενθαλπία 3016 kJ/kg και πίεση 7,98 bar για να ακολουθήσει νέα απομάστευση ατμού παροχής 2,21 kg/s ο οποίος οδηγείται στον απαερωτή προς θέρμανση και απαερίωση του τροφοδοτικού νερού. Η παροχή 31,03 kg/s που απομένει οδηγείται στη δεύτερη βαθμίδα χαμηλής πίεσης από όπου εξέρχεται με ενθαλπία 2798 kJ/kg και πίεση 2,73 bar. Ο ατμός που απομαστεύεται στο σημείο αυτό παροχής 1,769 kg/s οδηγείται στον τρίτο κατά σειρά προθερμαντή τροφοδοτικού νερού χαμηλής πίεσης (preheater-low3) και η παροχή 29,26 kg/s οδηγείται στην τρίτη βαθμίδα χαμηλής πίεσης για να ακολουθήσει εκτόνωση του ατμού έως ενθαλπία 2624 kJ/kg και πίεση 0,96 bar. Κατ' αναλογία με τη δεύτερη βαθμίδα χαμηλής πίεσης, αφαιρείται ατμός παροχής 1,62 kg/s και η υπολειπόμενη παροχή 27,64 kg/s εκτονώνεται στην τέταρτη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του στροβίλου έως καταστάσεως 2348 kJ/kg/0,29 bar. Η τελευταία απομάστευση ατμού είναι της τάξης του 1,10 kg/s και ο ατμός που απομένει εντέλει παροχής 26,54 kg/s εκτονώνεται έως τελικής ενθαλπίας 2325 kJ/kg και πίεσης 0,08 bar και οδηγείται στο συμπυκνωτή. Τα χαρακτηριστικά του ατμού στην είσοδο και στην έξοδο κάθε βαθμίδας του στροβίλου παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 6.1.

Βαθμίδα στροβίλου	P _i [bar]	P _o [bar]	h _i [kJ/kg]	h _o [kJ/kg]
HP-1	100,00	33,61	3005	2807
HP-2	33,61	18,58	2807	2710
LP-1	17,10	7,98	3190	3016
LP-2	7,98	2,73	3016	2798
LP-3	2,73	0,96	2798	2624
LP-4	0,96	0,29	2624	2348
LP-5	0,29	0,08	2348	2325

Πίνακας 6.1 Χαρακτηριστικά ατμού στις βαθμίδες του στροβίλου.

Στο συμπυκνωτή, ο τελικά εξερχόμενος από το στρόβιλο ατμός αναμιγνύεται με το συμπύκνωμα που εξέρχεται από τη θερμή πλευρά του πρώτου προθερμαντή χαμηλής πίεσης (preheater-low1) παροχής 4,49 kg/s και ενθαλπίας 221,44 kJ/kg. Το κορεσμένο νερό που εξέρχεται από το συμπυκνωτή έχει συνολική παροχή 31,03 kg/s και εισέρχεται στην αντλία συμπυκνώματος χαμηλής πίεσης εκ της οποίας εξέρχεται με πίεση 14,76 bar/ ενθαλπία 174,9 kJ/kg και εισέρχεται στην κρύα πλευρά του πρώτου προθερμαντή χαμηλής πίεσης (preheater-low1). Το τροφοδοτικό νερό θερμαίνεται μέσω του ατμού που απομαστεύεται από τη βαθμίδα LP-4 του στρόβιλου, ενώ επιπλέον στον πρώτο προθερμαντή χαμηλής πίεσης εισέρχεται το συμπύκνωμα (drain) που εξέρχεται από το δεύτερο προθερμαντή χαμηλής πίεσης (preheater-low2) με ενθαλπία 312,85 kJ/kg.

Το τροφοδοτικό νερό εισέρχεται με ενθαλπία 271,7 kJ/kg και πίεση 10 bar στο δεύτερο προθερμαντή χαμηλής πίεσης (preheater-low2), δηλαδή υπάρχει μια πτώση πίεσης της τάξης των 4,76 bar στον πρώτο προθερμαντή.

Στη θερμή πλευρά του δεύτερου προθερμαντή χαμηλής πίεσης εισέρχεται ο απομαστευόμενος από την LP-3 βαθμίδα του στρόβιλου ατμός και επιπλέον εισέρχεται το συμπύκνωμα που εξέρχεται από τον τρίτο προθερμαντή χαμηλής πίεσης (preheater-low3) με ενθαλπία 440,54 kJ/kg.

Το τροφοδοτικό νερό εισέρχεται με ενθαλπία 398,9 kJ/kg και πίεση 8,70 bar στον τρίτο προθερμαντή χαμηλής πίεσης (preheater-low3), δηλαδή η πτώση πίεσης στο δεύτερο προθερμαντή είναι 1,30 bar. Η θέρμανση του τροφοδοτικού νερού οφείλεται στον ατμό που απομαστεύεται από την LP-2 βαθμίδα του στρόβιλου. Το εξερχόμενο τροφοδοτικό νερό οδεύει προς τον απαερωτή με ενθαλπία 532,65 kJ/kg και πίεση 7,94 bar.

Στον απαερωτή υπάρχουν τρία ρεύματα εισόδου: το προς απαερίωση τροφοδοτικό νερό με παροχή μάζας 31,03 kg/s, ο απομαστευόμενος ατμός από τη βαθμίδα LP-1 του στρόβιλου παροχής μάζας 2,21 kg/s και το συμπύκνωμα που εξέρχεται από τη θερμή πλευρά του πρώτου προθερμαντή υψηλής πίεσης (preheater-high1) παροχής 5,73 kg/s. Το τροφοδοτικό νερό εξέρχεται από τον απαερωτή με ενθαλπία 722,5 kJ/kg και εισέρχεται στην αντλία υψηλής πίεσης προς ανύψωση της πίεσής του στα 125 bar.

Το τροφοδοτικό νερό καταστάσεως 722,5 kJ/kg/125 bar εισέρχεται στην ψυχρή πλευρά του πρώτου προθερμαντή υψηλής πίεσης (preheater-high1) για την επιπλέον προθέρμανσή του μέσω του ατμού παροχής 2,80 kg/s που απομαστεύεται από τη HP-2 βαθμίδα του στρόβιλου, ενώ επιπλέον στον πρώτο προθερμαντή υψηλής πίεσης εισέρχεται και το συμπύκνωμα που εξέρχεται από τη θερμή πλευρά του δεύτερου προθερμαντή υψηλής πίεσης με ενθαλπία 914,82 kJ/kg.

Τα χαρακτηριστικά του τροφοδοτικού νερού στην είσοδο του δεύτερου προθερμαντή υψηλής πίεσης (preheater-high2) είναι 873,2 kJ/kg/112 bar, δηλαδή παρατηρείται πτώση πίεσης 13 bar κατά τη διόδο του νερού μέσω του πρώτου προθερμαντή υψηλής πίεσης.

Στο δεύτερο προθερμαντή υψηλής πίεσης, το τροφοδοτικό νερό προθερμαίνεται τελικώς έως ενθαλπίας 1014,80 kJ/kg, μέσω του ατμού που απομαστεύεται από τη βαθμίδα HP-1 του στρόβιλου και οδεύει προς τον προθερμαντή-μέσου μεταφοράς θερμότητας (pre-heater), δεδομένου ότι τη θερμή πλευρά του προθερμαντή διαρρέει το εργαζόμενο μέσο Therminol

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

VP-1. Τα χαρακτηριστικά του τροφοδοτικού νερού, του ατμού απομάστευσης και του συμπυκνώματος που εισέρχεται σε κάθε προθερμαντή παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 6.2 και 6.3.

Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού	$P_{st,I}$ [bar]	$P_{fw,I}$ [bar]	$P_{st,o}$ [bar]	$P_{fw,o}$ [bar]	h_{ext} [kJ/kg]	$h_{fw,I}$ [kJ/kg]
<i>Preheater-high2</i>	33,61	112,00	20,50	103,56	2807	873,2
<i>Preheater-high1</i>	18,58	125,00	9,86	112,00	2710	722,5
<i>Preheater-low3</i>	2,73	8,70	1,21	7,94	2798	398,9
<i>Preheater-low2</i>	0,96	10,00	0,38	8,70	2624	271,7
<i>Preheater-low1</i>	0,29	14,76	0,14	10,00	2348	174,9

Πίνακας 6.2 Χαρακτηριστικά ρευμάτων εισόδου-εξόδου από τους προθερμαντές με ατμό.

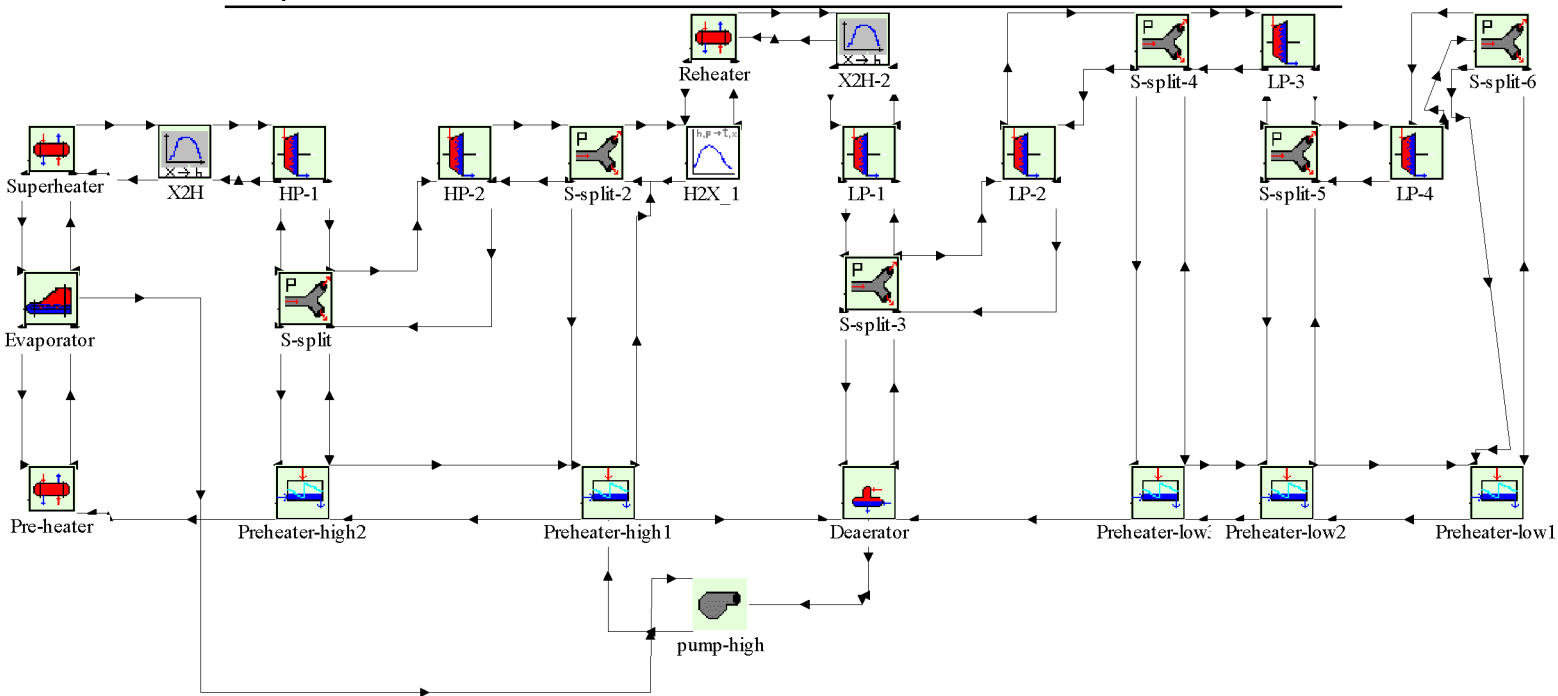
Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού	$h_{fw,o}$ [kJ/kg]	$h_{dr,o}$ [kJ/kg]	$h_{dr,I}$ [kJ/kg]	$m_{st,I}$ [kg/s]	$m_{fw,I}$ [kg/s]	$m_{dr,I}$ [kg/s]
<i>Preheater-high1</i>	1014,80	914,82	0	2,931	38,97	0
<i>Preheater-high2</i>	873,16	759,90	914,82	2,800	38,97	2,93
<i>Preheater-low3</i>	532,65	440,54	0	1,769	31,03	0
<i>Preheater-low2</i>	398,90	312,85	440,54	1,620	31,03	1,77
<i>Preheater-low1</i>	271,66	221,44	312,85	1,100	31,03	3,39

Πίνακας 6.3 Χαρακτηριστικά ρευμάτων εισόδου-εξόδου από τους προθερμαντές με ατμό.

Το νερό εξέρχεται από τον προθερμαντή σε κατάσταση κορεσμού με πίεση 103,42 bar και εισέρχεται στον ατμοπαραγωγό όπου ατμοποιείται πλήρως χωρίς απώλειες πίεσης. Εν συνεχεία, ο κορεσμένος ατμός που εξέρχεται από τον ατμοποιητή εισέρχεται στον υπερθερμαντή για περαιτέρω πρόσδοση θερμότητας. Τα χαρακτηριστικά του νερού-ατμού κατά τη διαδρομή του μέσω της διάταξης ατμοποίησης- υπερθέρμανσης και μέσω της διάταξης αναθέρμανσης απεικονίζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 6.4 .

Εναλλάκτης θερμότητας	$T_{st,I}$ [°C]	$P_{st,I}$ [bar]	$h_{st,I}$ [kJ/kg]	$x_{st,i}$	$x_{st,o}$	$T_{st,o}$ [°C]	$P_{st,o}$ [bar]
<i>Pre-heater</i>	234,83	103,56	-	-	0	-	103,420
<i>Evaporator</i>	-	103,42	-	0	1	-	103,420
<i>Superheater</i>	-	103,42	-	1	-	371,00	100,000
<i>Reheater</i>	-	18,58	2709,6	-	-	371,00	17,099

Πίνακας 6.4 Χαρακτηριστικά νερού-ατμού στα συστήματα ατμοποίησης-υπερθέρμανσης και αναθέρμανσης.



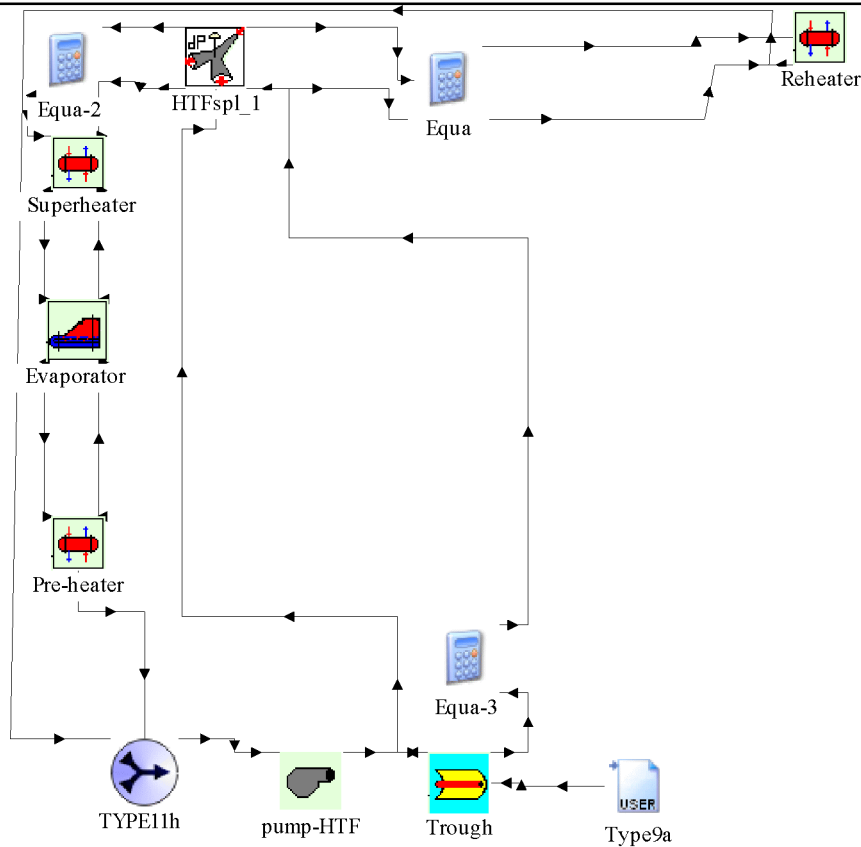
Σχήμα 6.3 Μοντέλο TRNSYS για τον κύκλο νερού-ατμού του ηλιακού θερμικού σταθμού SEGS VI.

6.6 Περιγραφή κυκλώματος μέσου μεταφοράς θερμότητας (HTF) σε λειτουργία αναφοράς.

Το κύκλωμα μέσου μεταφοράς θερμότητας συμπεριλαμβάνει τον προθερμαντή, τον ατμοποιητή, τον υπερθερμαντή, τον αναθερμαντή, την αντλία μέσου μεταφοράς θερμότητας και το πεδίο παραβολικών συλλεκτών. Το μοντέλο του TRNSYS που το παριστά απεικονίζεται στο σχήμα 6.4.

Το μέσο μεταφοράς θερμότητας παροχής 396,39 kg/s εξέρχεται από το πεδίο των παραβολικών συλλεκτών με θερμοκρασία 397,56°C και διαχωρίζεται σε δύο παροχές 345,49 kg/s και 50,90kg/s οι οποίες οδηγούνται στη θερμή πλευρά του υπερθερμαντή και του αναθερμαντή αντίστοιχα.

Η παροχή 345,49 kg/s που διέρχεται από τον υπερθερμαντή, τον ατμοποιητή και τον προθερμαντή, εξέρχεται τελικώς με θερμοκρασία 297,78 °C και αναμιγνύεται με την παροχή 50,90 kg/s που εξέρχεται από τη θερμή πλευρά του αναθερμαντή με θερμοκρασία 294,00 °C. Η συνολική παροχή μέσου μεταφοράς θερμότητας εξέρχεται από τον αναμεικτή με θερμοκρασία 297,29 °C και μέσω της αντλίας εισέρχεται στο πεδίο των παραβολικών συλλεκτών με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας του έως την απαιτούμενη τιμή εξόδου. Τα χαρακτηριστικά του μέσου μεταφοράς θερμότητας αναφέρονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 6.5.



Σχήμα 6.4 Κύκλωμα μέσου μεταφοράς θερμότητας (HTF) του μοντέλου SEGS VI.

Εναλλάκτης θερμότητας	$T_{HTF,i}$ [°C]	$T_{HTF,o}$ [°C]	m_{st} [kg/s]	m_{HTF} [kg/s]
<i>Preheater</i>	317,78	297,78	38,97	345,49
<i>Evaporator</i>	377,22	317,78	38,97	345,49
<i>Superheater</i>	390,56	377,22	38,97	345,49
<i>Reheater</i>	390,56	294,00	33,034	50,90

Πίνακας 6.5 Θερμοκρασία και παροχή του μέσου μεταφοράς θερμότητας.

6.7 Κατάρτιση του μοντέλου TRNSYS.

Το μοντέλο του σταθμού SEGS VI δημιουργείται με τη χρήση των κατάλληλων στοιχείων της βιβλιοθήκης STEC που απαρτίζουν το κύκλωμα νερού-ατμού και το κύκλωμα μέσου μεταφοράς θερμότητας, την τοποθέτηση των τιμών των εισόδων και των παραμέτρων του κάθε στοιχείου και τέλος την κατάλληλη διασύνδεση των στοιχείων έτσι ώστε να αναπαριστάται η ροή του ρευστού εντός του κυκλώματος.

Θεωρούμε ως «αρχή» του κυκλώματος νερού-ατμού το στοιχείο του υπερθερμαντή (Τύπος 315), στην καρτέλα εισόδων (inputs) του οποίου εισάγονται τα χαρακτηριστικά του νερού-ατμού και του μέσου μεταφοράς θερμότητας που περιγράφονται λεπτομερώς στους πίνακες 6.4 και 6.5. Το σύνολο των εισόδων του υπερθερμαντή αναγράφεται στον πίνακα 6.6. Η

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

ειδική θερμότητα του μέσου μεταφοράς θερμότητας λαμβάνεται από την αντίστοιχη βιβλιογραφία για εργαζόμενο μέσο Therminol VP-1.

Υπερθερμαντής	Είσοδος	Τιμή
1.	Θερμοκρασία εισόδου θερμής πλευράς	390,56°C
2.	Παροχή μάζας θερμής πλευράς	1243764 kg/hr
3.	Θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς	313,48°C
4.	Παροχή μάζας ψυχρής πλευράς	140292 kg/hr
5.	Ξηρότητα ψυχρής πλευράς	1
6.	Πίεση εξόδου ξηρής πλευράς	100 BAR
7.	Ειδική θερμότητα θερμής πλευράς	2,59 kJ/kgK

Πίνακας 6.6 Τιμές εισόδων υπερθερμαντή (Τύπος 315).

Οι τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων εισάγονται με βάση τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στους πίνακες 6.4 και 6.5, καθώς και με βάση κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Kearney et al). Το σύνολο των παραμέτρων του υπερθερμαντή αναγράφεται στον πίνακα 6.7.

Υπερθερμαντής	Παράμετρος	Τιμή
1.	Μοντέλο αντιρροής (παραμ. συστήματος)	2
2.	UA _t	292000 W/K
3.	Πτώση πίεσης αναφοράς ψυχρής πλευράς	3,42 BAR
4.	Παροχή μάζας αναφοράς ψυχρής πλευράς	140292 kg/hr
5.	Εκθέτης για το UA	0
6.	Εκθέτης για το DP	0

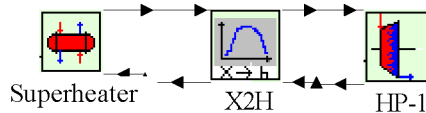
Πίνακας 6.7 Τιμές παραμέτρων υπερθερμαντή (Τύπος 315).

Το στοιχείο του υπερθερμαντή συνδέεται με το στοιχείο που μοντελοποιεί τη βαθμίδα στροβίλου (Τύπος 318) μέσω ενός μετατροπέα ιδιοτήτων νερού-ατμού (Τύπος 391), σύμφωνα με τη διάταξη που απεικονίζεται στο σχήμα 6.5. Ο μετατροπέας ιδιοτήτων νερού-ατμού παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο στοιχείων, διότι η βαθμίδα στροβίλου έχει ως είσοδο την ενθαλπία ατμού, ενώ ο υπερθερμαντής έχει ως έξοδο τη θερμοκρασία ατμού, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η απ' ευθείας σύνδεση. Οι εισοδοί και έξοδοι των στοιχείων υπερθερμαντή- μετατροπέας ιδιοτήτων νερού ατμού συνδέονται ως εξής:

- θερμοκρασία εξόδου ψυχρής πλευράς υπερθερμαντή → θερμοκρασία ατμού μετατροπέα
- παροχή μάζας ψυχρής πλευράς υπερθερμαντή → παροχή ατμού μετατροπέα
- ξηρότητα ψυχρής πλευράς υπερθερμαντή → ξηρότητα ατμού μετατροπέα
- πίεση εξόδου ψυχρής πλευράς υπερθερμαντή ← πίεση ατμού μετατροπέα

Ομοίως, η σύνδεση ανάμεσα στα στοιχεία μετατροπείας ιδιοτήτων-βαθμίδα στροβίλου είναι η εξής:

- ενθαλπία ατμού μετατροπεία → ενθαλπία εισόδου στροβίλου
- παροχή μάζας ατμού μετατροπεία → παροχή εισόδου στροβίλου
- πίεση ατμού μετατροπεία ← πίεση εισόδου στροβίλου



Σχήμα 6.5 Διάταξη σύνδεσης υπερθερμαντή-βαθμίδας HP-1.

Οι τιμές των εισόδων του μετατροπεία νερού-ατμού παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 6.8, ενώ οι τιμές των εισόδων και των παραμέτρων για τη βαθμίδα HP-1 παρουσιάζονται στους πίνακες 6.9 και 6.10 .

Μετατροπείας	Είσοδος	Τιμή
1.	Θερμοκρασία ατμού	371°C
2.	Πίεση ατμού	100 BAR
3.	Ξηρότητα ατμού	1
4.	Παροχή μάζας ατμού	140292 kg/hr

Πίνακας 6.8 Τιμές εισόδων μετατροπεία ιδιοτήτων νερού-ατμού (Τύπος 391).

Στροβίλος HP-1	Είσοδος	Τιμή
1.	Πίεση εξόδου στροβίλου	33,61 BAR
2.	Εισερχόμενη παροχή μάζας στροβίλου	140292 kg/hr
3.	Εισερχόμενη ενθαλπία στροβίλου	3005 kJ/kg
4.	Συντελεστής παράκαμψης	1

Πίνακας 6.9 Τιμές εισόδων βαθμίδας στροβίλου (Τύπος 318).

Στροβίλος HP-1	Παράμετρος	Τιμή
1.	Πίεση εισόδου αναφοράς	100 BAR
2.	Πίεση εξόδου αναφοράς	33,61 BAR
3.	Παροχή μάζας αναφοράς	140292 kg/hr
4.	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης	0,838
5.	Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	0,98
6.	Συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0,0
7.	b συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0,0
8.	c συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0,0

Πίνακας 6.10 Τιμές παραμέτρων βαθμίδας στροβίλου (Τύπος 318).

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Το μοντέλο της εγκατάστασης συνεχίζεται με τη σύνδεση της βαθμίδας HP-1 με ένα διαχωριστή ατμού (Τύπος 381), οι δύο έξοδοι του οποίου συνδέονται με τη βαθμίδα στροβίλου HP-2 και τον προθερμαντή υψηλής πίεσης (Preheater-high2) αντίστοιχα όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.6. Τα στοιχεία βαθμίδα HP-1-διαχωριστής ατμού συνδέονται ως εξής:

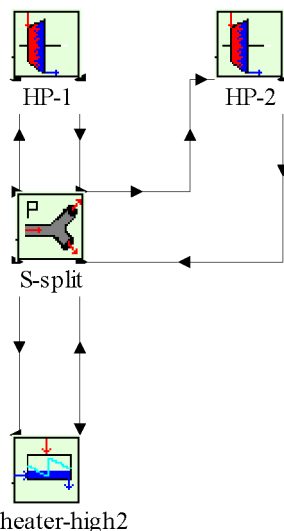
- παροχή εξόδου στροβίλου → εισερχόμενη παροχή διαχωριστή
- ενθαλπία εξόδου στροβίλου → εισερχόμενη ενθαλπία διαχωριστή
- πίεση εξόδου στροβίλου ← εισερχόμενη πίεση διαχωριστή

Ομοίως, η σύνδεση ανάμεσα στα στοιχεία διαχωριστής ατμού-βαθμίδα στροβίλου HP-2 είναι η εξής:

- εξερχόμενη παροχή 2 → παροχή εισόδου στροβίλου
- εξερχόμενη ενθαλπία 2 → ενθαλπία εισόδου στροβίλου
- εξερχόμενη πίεση 2 ← πίεση εισόδου στροβίλου

Τέλος, η συνδεσμολογία των στοιχείων διαχωριστής ατμού-προθερμαντής τροφοδοτικού νερού είναι παραστατικά:

- εξερχόμενη πίεση 1 → πίεση εισόδου θερμής πλευράς προθερμαντή
- εξερχόμενη ενθαλπία 1 → ενθαλπία εισόδου θερμής πλευράς προθερμαντή
- απαιτούμενη εξερχόμενη παροχή 1 ← απαιτούμενη εισερχόμενη παροχή θερμής πλευράς προθερμαντή



Σχήμα 6.6 Διάταξη σύνδεσης βαθμίδας HP-1-διαχωριστή ατμού-βαθμίδας HP-2 και διαχωριστή ατμού-προθερμαντή υψηλής πίεσης 2.

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Ο διαχωριστής ατμού έχει τέσσερις εισόδους οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.11, ενώ οι τιμές των εισόδων και των παραμέτρων του προθερμαντή (preheater-high2) και της βαθμίδας HP-2 παρουσιάζονται στους πίνακες 6.12-6.13 και 6.14–6.15 αντίστοιχα.

Διαχωριστής ατμού s-split	Είσοδος	Τιμή
1.	Απαιτούμενη εξερχόμενη παροχή 1	10551,6 kg/hr
2.	Εισερχόμενη παροχή	140292 kg/hr
3.	Εξερχόμενη πίεση 2	33,61 BAR
4.	Εισερχόμενη ενθαλπία	2807 kJ/kg

Πίνακας 6.11 Τιμές εισόδων μετατροπέα ιδιοτήτων νερού-ατμού (Τύπος 391).

Προθερμαντής Preheater-high2	Είσοδος	Τιμή
1.	Ενθαλπία εισόδου θερμής πλευράς	2807 kJ/kg
2.	Πίεση εισόδου θερμής πλευράς	33,61 BAR
3.	Θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς	204,47 °C
4.	Εισερχόμενη παροχή μάζας ψυχρής πλευράς	140292 kg/hr
5.	Θερμοκρασία εισόδου συμπυκνώματος	0 °C
6.	Εισερχόμενη παροχή μάζας συμπυκνώματος	0,0 kg/hr
7.	Ξηρότητα εισερχόμενου συμπυκνώματος	0,0
8.	on/off	1,0

Πίνακας 6.12 Τιμές εισόδων προθερμαντή τροφοδοτικού νερού (Τύπος 317).

Προθερμαντής Preheater-high2	Παράμετρος	Τιμή
1.	Ειδική θερμότητα υγρού ψυχρής πλευράς	4,65 kJ/kgK
2.	UA	316000 W/K
3.	Παροχή αναφοράς ψυχρής πλευράς	140292 kg/hr
4.	Εκθέτης για το UA	0

Πίνακας 6.13 Τιμές παραμέτρων προθερμαντή τροφοδοτικού νερού (Τύπος 317).

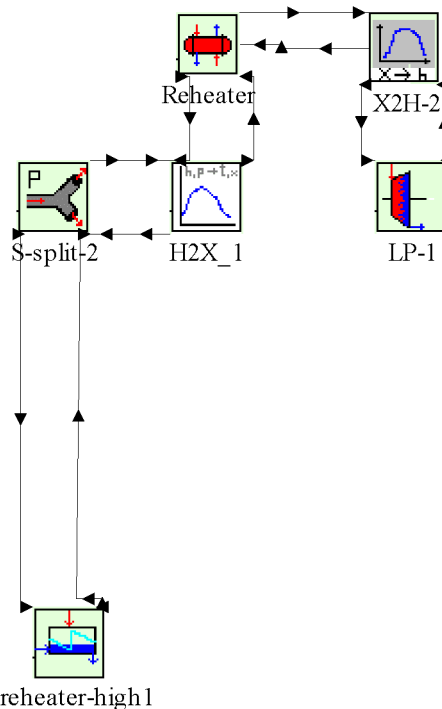
Στροβίλος HP-2	Είσοδος	Τιμή
1.	Πίεση εξόδου στροβίλου	18,58 BAR
2.	Εισερχόμενη παροχή μάζας στροβίλου	129740,4 kg/hr
3.	Εισερχόμενη ενθαλπία στροβίλου	2807 kJ/kg
4.	Συντελεστής παράκαμψης	1

Πίνακας 6.14 Τιμές εισόδων βαθμίδας στροβίλου (Τύπος 318).

Στροβίλος HP-2	Παράμετρος	Τιμή
1.	Πίεση εισόδου αναφοράς	33,61 BAR
2.	Πίεση εξόδου αναφοράς	18,58 BAR
3.	Παροχή μάζας αναφοράς	129740,4 kg/hr
4.	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης	0,843
5.	Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	0,98
6.	Συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0,0
7.	b συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0,0
8.	c συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0,0

Πίνακας 6.15 Τιμές παραμέτρων βαθμίδας στροβίλου (Τύπος 318).

Ο διαχωρισμός της εξερχόμενης παροχής μάζας από τη βαθμίδα HP-2 επιτυγχάνεται με τη σύνδεσή της με ένα δεύτερο διαχωριστή ατμού (S-split-2), η πρώτη έξοδος του οποίου συνδέεται με τον πρώτο προθερμαντή υψηλής πίεσης (Preheater-high 1), ενώ η δεύτερη έξοδος συνδέεται με τον αναθερμαντή (Τύπος 315), μέσω ενός μετατροπέα ιδιοτήτων νερού-ατμού (Τύπος 392), καθώς ο εξερχόμενος ατμός από το διαχωριστή χαρακτηρίζεται από την ενθαλπία και την πίεσή του, ενώ η μοντελοποίηση του Τύπου 315 απαιτεί το χαρακτηρισμό του από τη θερμοκρασία και την ξηρότητά του. Οι τιμές εισόδων και παραμέτρων του διαχωριστή, του αναθερμαντή, του μετατροπέα και του προθερμαντή αναφέρονται στους πίνακες 6.16 έως 6.22.



Σχήμα 6.7 Λιάταξη σύνδεσης διαχωριστή ατμού-αναθερμαντή-βαθμίδας LP-1 και διαχωριστή ατμού-προθερμαντή υψηλής πίεσης 1.

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Αναθερμαντής	<i>Είσοδος</i>	<i>Τιμή</i>
1.	Θερμοκρασία εισόδου θερμής πλευράς	390,56°C
2.	Παροχή μάζας θερμής πλευράς	183240 kg/hr
3.	Θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς	208,69°C
4.	Παροχή μάζας ψυχρής πλευράς	119660,4 kg/hr
5.	Ξηρότητα ψυχρής πλευράς	0,95
6.	Πίεση εξόδου ξηρής πλευράς	17,10 BAR
7.	Ειδική θερμότητα θερμής πλευράς	2,59 kJ/kgK

Πίνακας 6.16 Τιμές εισόδων αναθερμαντή (Τύπος 315).

Αναθερμαντής	<i>Παράμετρος</i>	<i>Τιμή</i>
1.	Μοντέλο αντirroής (παραμ. συστήματος)	2
2.	UA _t	460000 W/K
3.	Πτώση πίεσης αναφοράς ψυχρής πλευράς	1,48 BAR
4.	Παροχή μάζας αναφοράς ψυχρής πλευράς	119660,4 kg/hr
5.	Εκθέτης για το UA	0
6.	Εκθέτης για το DP	0

Πίνακας 6.17 Τιμές παραμέτρων αναθερμαντή (Τύπος 315).

Διαχωριστής ατμού s-split-2	<i>Είσοδος</i>	<i>Τιμή</i>
1.	Απαιτούμενη εξερχόμενη παροχή 1	10080 kg/hr
2.	Εισερχόμενη παροχή	129740,4 kg/hr
3.	Εξερχόμενη πίεση 2	18,58 BAR
4.	Εισερχόμενη ενθαλπία	2710 kJ/kg

Πίνακας 6.18 Τιμές εισόδων διαχωριστή ατμού (Τύπος 391).

Προθερμαντής Preheater-high1	<i>Είσοδος</i>	<i>Τιμή</i>
1.	Ενθαλπία εισόδου θερμής πλευράς	2710 kJ/kg
2.	Πίεση εισόδου θερμής πλευράς	18,58 BAR
3.	Θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς	169,27 °C
4.	Εισερχόμενη παροχή μάζας ψυχρής πλευράς	140292 kg/hr
5.	Θερμοκρασία εισόδου συμπυκνώματος	213,73 °C
6.	Εισερχόμενη παροχή μάζας συμπυκνώματος	10551,6 kg/hr
7.	Ξηρότητα εισερχόμενου συμπυκνώματος	0,0
8.	on/off	1,0

Πίνακας 6.19 Τιμές εισόδων προθερμαντή τροφοδοτικού νερού (Τύπος 317).

Προθερμαντής Preheater-high1	<i>Παράμετρος</i>	<i>Τιμή</i>
1.	Ειδική θερμότητα υγρού ψυχρής πλευράς	4,46 kJ/kgK
2.	UA	360000 W/K
3.	Παροχή αναφοράς ψυχρής πλευράς	140292 kg/hr
4.	Εκθέτης για το UA	0

Πίνακας 6.20 Τιμές παραμέτρων προθερμαντή τροφοδοτικού νερού (Τύπος 317).

Στροβίλος LP-1	Είσοδος	Τιμή
1.	Πίεση εξόδου στροβίλου	7,98 BAR
2.	Εισερχόμενη παροχή μάζας στροβίλου	119660,4 kg/hr
3.	Εισερχόμενη ενθαλπία στροβίλου	3190 kJ/kg
4.	Συντελεστής παράκαμψης	1

Πίνακας 6.21 Τιμές εισόδων βαθμίδας στροβίλου (Τύπος 318).

Στροβίλος LP-1	Παράμετρος	Τιμή
1.	Πίεση εισόδου αναφοράς	17,10 BAR
2.	Πίεση εξόδου αναφοράς	7,98 BAR
3.	Παροχή μάζας αναφοράς	119660,4 kg/hr
4.	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης	0,859
5.	Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	0,98
6.	Συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0,0
7.	b συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0,0
8.	c συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0,0

Πίνακας 6.22 Τιμές παραμέτρων βαθμίδας στροβίλου (Τύπος 318).

Η σύνδεση s-split-2 \leftrightarrow preheater-high1 είναι η τυπική σύνδεση διαχωριστή-προθερμαντή που έχει αναφερθεί ήδη. Ομοίως, η σύνδεση αναθερμαντή (Τύπος 315) \leftrightarrow X2H-2 \leftrightarrow LP-1 είναι ίδια με αυτή που αναφέρεται στη βαθμίδα HP-1. Η αμφίδρομη σύνδεση s-split-2-H2X_1 είναι η εξής:

- εξερχόμενη παροχή 2 \rightarrow παροχή ατμού μετατροπέα
- εξερχόμενη ενθαλπία 2 \rightarrow ενθαλπία μετατροπέα
- εξερχόμενη πίεση 2 \leftarrow πίεση μετατροπέα

Ομοίως, η σύνδεση του μετατροπέα με τον αναθερμαντή είναι η εξής:

- παροχή μάζας μετατροπέα \rightarrow εισερχόμενη παροχή μάζας ψυχρής πλευράς αναθερμαντή
- θερμοκρασία μετατροπέα \rightarrow θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς αναθερμαντή
- ξηρότητα ατμού \rightarrow ξηρότητα ψυχρής πλευράς αναθερμαντή
- πίεση μετατροπέα \leftarrow εισερχόμενη πίεση ψυχρής πλευράς αναθερμαντή

Η διάταξη του κυκλώματος χαμηλής πίεσης επεκτείνεται με τη σύνδεση των δύο εξόδων του διαχωριστή ατμού (s-split-3) με τον απαεριστή (Τύπος

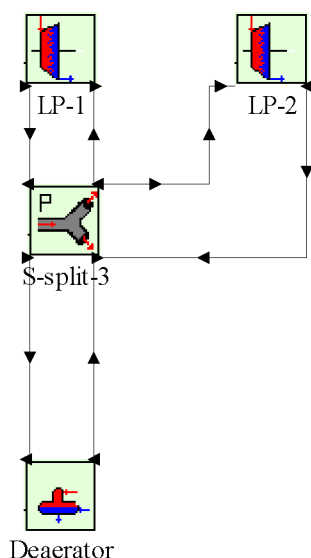
384) και τη βαθμίδα LP-2. Οι τιμές των εισόδων του απαεριωτή παρουσιάζονται στον πίνακα 6.23.

Απαεριωτής	Είσοδος	Τιμή
1.	Θερμοκρασία εισόδου τροφοδοτικού νερού	126,7 °C
2.	Παροχή τροφοδοτικού νερού	111708 kg/hr
3.	Ενθαλπία εισόδου ατμού	3016 kJ/kg
4.	Πίεση εισόδου ατμού	7.98 BAR
5.	Θερμοκρασία εισόδου συμπυκνώματος	179.27 °C
6.	Εισερχόμενη παροχή μάζας συμπυκνώματος	20628 kg/hr
7.	Ξηρότητα εισερχόμενου συμπυκνώματος	0,0
8.	on/off	1,0

Πίνακας 6.23 Τιμές εισόδων απαεριωτή (Τύπος 384).

Η αμφίδρομη σύνδεση ανάμεσα στο διαχωριστή και τις βαθμίδες LP-1 και LP-2 είναι η ίδια με αυτή που αναφέρεται για τις βαθμίδες υψηλής πίεσης (HP-1 και HP-2). Η σύνδεση του διαχωριστή με τον απαεριωτή είναι η εξής:

- πίεση εξόδου 1 → πίεση εισόδου ατμού στον απαεριωτή
- ενθαλπία εξόδου 1 → ενθαλπία εισόδου ατμού στον απαεριωτή
- απαιτούμενη εξερχόμενη παροχή 1 ← απαιτούμενη εισερχόμενη παροχή ατμού προς απαερίωση του τροφοδοτικού νερού



Σχήμα 6.8 Λιάταξη σύνδεσης διαχωριστή ατμού-βαθμίδας LP-2 και διαχωριστή ατμού-απαεριωτή.

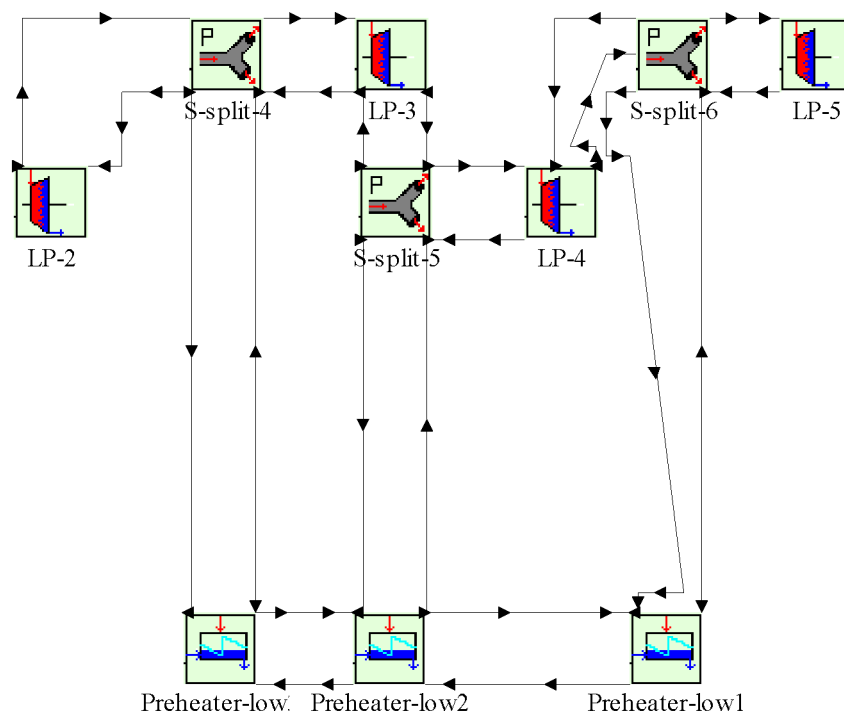
Δεδομένου ότι το κύκλωμα χαμηλής πίεσης επεκτείνεται με τη διαδοχική τοποθέτηση διαχωριστών με σκοπό τη δημιουργία δύο ρευμάτων τα οποία οδεύουν προς τους προθερμαντές χαμηλής πίεσης και τις βαθμίδες

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

του στροβίλου αντίστοιχα, όλες οι συνδέσεις που δημιουργούνται είναι ίδιες με την τυπική σύνδεση του συγκροτήματος βαθμίδα-διαχωριστής-βαθμίδα και προθερμαντής που έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά (βλ. σχήμα 6.6 για τις βαθμίδες υψηλής πίεσης). Οι τιμές των εισόδων και των παραμέτρων των διαχωριστών, των βαθμίδων του στροβίλου χαμηλής πίεσης και των προθερμαντών που απαρτίζουν το σχήμα 6.9 αναφέρονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 6.24 έως 6.28.

Διαχωριστής ατμού	Είσοδος	<i>s-split-4</i>	<i>s-split-5</i>	<i>s-split-6</i>
1.	Απαιτούμενη εξερχόμενη παροχή 1	6368,4 kg/hr	5832 kg/hr	3960 kg/hr
2.	Εισερχόμενη παροχή	111704,4 kg/hr	105336 kg/hr	99504 kg/hr
3.	Εξερχόμενη πίεση 2	2,73 BAR	0,96 BAR	0,29 BAR
4.	Εισερχόμενη ενθαλπία	2798 kJ/kg	2624 kJ/kg	2348 kJ/kg

Πίνακας 6.24 Συγκεντρωτικός πίνακας εισόδων διαχωριστών.



Σχήμα 6.9 Λιάταξη διαδοχικής σύνδεσης διαχωριστή ατμού-βαθμίδα και διαχωριστή ατμού-προθερμαντή.

Στρόβιλος	Είσοδος	<i>LP-2</i>	<i>LP-3</i>	<i>LP-4</i>	<i>LP-5</i>
1.	Πίεση εξόδου στροβίλου	2,73 BAR	0,96 BAR	0,29 BAR	0,08 BAR
2.	Εισερχόμενη παροχή μάζας στροβίλου	111704,4 kg/hr	105336 kg/hr	99504 kg/hr	95544 kg/hr
3.	Εισερχόμενη ενθαλπία στροβίλου	3016 kJ/kg	2798 kJ/kg	2624 kJ/kg	2348 kJ/kg
4.	Συντελεστής παράκαμψης	1	1	1	1

Πίνακας 6.25 Συγκεντρωτικός πίνακας εισόδων βαθμίδων στροβίλου.

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Στρόβιλος	Παράμετρος	LP-2	LP-3	LP-4	LP-5
1.	Πίεση εισόδου αναφοράς	7,98 BAR	2,73 BAR	0,96 BAR	0,29 BAR
2.	Πίεση εξόδου αναφοράς	2,73 BAR	0,96 BAR	0,29 BAR	0,08 BAR
3.	Παροχή μάζας αναφοράς	111704,4 kg/hr	105336 kg/hr	99504 kg/hr	95544 kg/hr
4.	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης	0,919	0,936	0,88	0,6445
5.	Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	0,98	0,98	0,98	0,98
6.	Συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0	0	0	0
7.	b συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0	0	0	0
8.	c συντελεστής για την εξίσωση εσωτερικού β.α.	0	0	0	0

Πίνακας 6.26 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων βαθμίδων στρόβιλου.

Προθερμαντής	Είσοδος	low1	low2	low3
1.	Ενθαλπία εισόδου θερμής πλευράς	2348 kJ/kg	2624 kJ/kg	22798 kJ/kg
2.	Πίεση εισόδου θερμής πλευράς	0,29 BAR	0,96 BAR	2,73 BAR
3.	Θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς	41,77 °C	64,90 °C	95,18 °C
4.	Εισερχόμενη παροχή μάζας ψυχρής πλευράς	111708 kg/hr	111708 kg/hr	111708 kg/hr
5.	Θερμοκρασία εισόδου συμπυκνώματος	68,35 °C	105,08 °C	0,0 °C
6.	Εισερχόμενη παροχή μάζας συμπυκνώματος	12204 kg/hr	6368,4 kg/hr	0,0 kg/hr
7.	Ξηρότητα εισερχόμενου συμπυκνώματος	0	0	0
8.	on/off	1	1	1

Πίνακας 6.27 Συγκεντρωτικός πίνακας εισόδων προθερμαντιών τροφοδοτικού νερού.

Προθερμαντής	Παράμετρος	low1	low2	low3
1.	Ειδική θερμότητα υγρού ψυχρής πλευράς	4,21 kJ/kgK	4,23 kJ/kgK	4,27 kJ/kgK
2.	UA	260000 W/K	300000 W/K	77000 W/K
3.	Παροχή αναφοράς ψυχρής πλευράς	111708 kg/hr	111708 kg/hr	111708 kg/hr
4.	Εκθέτης για το UA	0	0	0

Πίνακας 6.28 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων προθερμαντιών τροφοδοτικού νερού.

Η κύρια παροχή ατμού-νερού, μετά την πλήρη αποτόνωση της στο στρόβιλο οδεύει προς το συμπυκνωτή (Τύπος 383). Συνεπώς, η διάταξη σύμφωνα με την οποία η κύρια παροχή μάζας οδεύει από την έξοδο του στρόβιλου προς την ψυχρή πλευρά του πρώτου προθερμαντή χαμηλής πίεσης απεικονίζεται αναλυτικά στο σχήμα 6.10, ενώ οι τιμές εισόδων και παραμέτρων του συμπυκνωτή παρουσιάζονται στους πίνακες 6.29 και 6.30.

Οι συνδέσεις που απεικονίζονται στο σχήμα 6.10 είναι οι εξής:

Βαθμίδα LP-5 ↔ Συμπυκνωτής

- εξερχόμενη παροχή βαθμίδας → παροχή μάζας εισόδου συμπυκνωτή
- ενθαλπία εξόδου βαθμίδας → ενθαλπία εισερχόμενου ατμού στο συμπυκνωτή

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

- πίεση εξόδου στροβίλου ← πίεση συμπύκνωσης

Συμπυκνωτής ⇒ Αντλία χαμηλής πίεσης

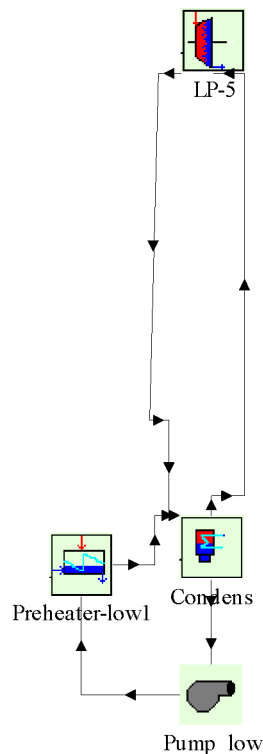
- θερμοκρασία συμπύκνωσης → θερμοκρασία εισόδου ρευστού στην αντλία
- παροχή μάζας συμπυκνώματος → εισερχόμενη παροχή μάζας

Αντλία χαμηλής πίεσης ⇒ Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού

- θερμοκρασία εξόδου ρευστού → θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή
- εξερχόμενη παροχή → εισερχόμενη παροχή στην ψυχρή πλευρά του προθερμαντή

Προθερμαντής χαμηλής πίεσης ⇒ συμπυκνωτής

- θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς → θερμοκρασία εισόδου συμπυκνώματος
- παροχή εξόδου θερμής πλευράς → εισερχόμενη παροχή συμπυκνώματος
- ξηρότητα εξόδου θερμής πλευράς → ξηρότητα εισερχόμενου συμπυκνώματος



Σχήμα 6.10 Διάταξη σύνδεσης βαθμίδας στροβίλου - συμπυκνωτή - αντλίας - προθερμαντή.

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Συμπυκνωτής	Είσοδος	Τιμή
1.	Θερμοκρασία εισόδου νερού ψύξης	25 °C
2.	Ενθαλπία εισερχόμενου ατμού	2325kJ/kg
3.	Παροχή μάζας ατμού	95544kg/hr
4.	Παροχή μάζας εισερχόμενου συμπυκνώματος	16164kg/hr
5.	Θερμοκρασία εισόδου συμπυκνώματος	52,58°C
6.	Ξηρότητα εισερχόμενου συμπυκνώματος	0

Πίνακας 6.29 Τιμές εισόδων συμπυκνωτή (Τύπος 383).

Συμπυκνωτής	Παράμετρος	Τιμή
1.	ΔT θερμοκρασία εξόδου ψυκτικού νερού-θερμοκρασία συμπύκνωσης	11,475°C
2.	Θερμοκρασιακή άνοδος ψυκτικού νερού	5,0°C

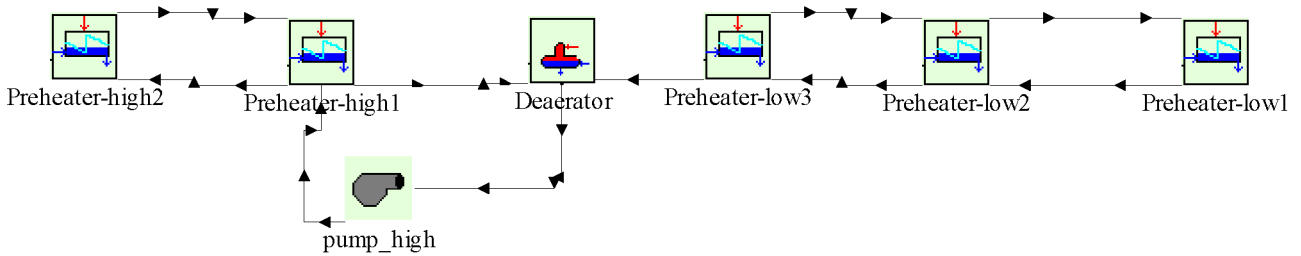
Πίνακας 6.30 Τιμές παραμέτρων συμπυκνωτή (Τύπος 383).

Η προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού έως την είσοδο του στον προθερμαντή με HTF, γίνεται με μια σειρά από προθερμαντές νερού-ατμού, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6.11. Όπως φαίνεται και από τη σχηματική απεικόνιση του μοντέλου ανάμεσα στους προθερμαντές χαμηλής και υψηλής πίεσης παρεμβάλλεται ο απαεριωτής, με σκοπό την εξάλειψη του τυχόν εναπομεινάντος ανεπιθύμητου ατμού, ο οποίος προκαλεί διαβρώσεις στα τοιχώματα των σωληνώσεων κατά τη συμπύκνωσή του. Οι τιμές των παραμέτρων και των εισόδων όλων των προθερμαντών χαμηλής πίεσης αναφέρονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 6.27 και 6.28, οι τιμές εισόδων του απαεριωτή αναφέρονται στον πίνακα 6.23, οι τιμές εισόδων και παραμέτρων του πρώτου προθερμαντή υψηλής πίεσης αναφέρονται στους πίνακες 6.12 και 6.13 και αντίστοιχα του δεύτερου προθερμαντή στους πίνακες 6.19 και 6.20. Όλοι οι προθερμαντές του σχήματος 6.11 συνδέονται ανά δύο με τον ίδιο τρόπο, ο οποίος είναι ο εξής (προθερμαντής με υψηλότερη πίεση εισόδου θερμής πλευράς (2)-προθερμαντής με χαμηλότερη πίεση εισόδου θερμής πλευράς (1)):

- θερμοκρασία εξόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή 1→θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή 2
- εξερχόμενη παροχή ψυχρής πλευράς προθερμαντή 1→εισερχόμενη παροχή ψυχρής πλευράς υπερθερμαντή 2
- θερμοκρασία εισόδου συμπυκνώματος προθερμαντή 1←θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς προθερμαντή 2
- παροχή εισόδου συμπυκνώματος προθερμαντή 1←εξερχόμενη παροχή θερμής πλευράς υπερθερμαντή 2

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

- Ξηρότητα εισόδου συμπυκνώματος προθερμαντή 1 ← ξηρότητα εξόδου θερμής πλευράς υπερθερμαντή 2



Σχήμα 6.11 Διάταξη σύνδεσης προθερμαντών- απαεριωτή αντλίας υψηλής πίεσης .

Η σύνδεση του τρίτου προθερμαντή χαμηλής πίεσης (Preheater-low3) με τον απαεριωτή είναι η εξής:

- θερμοκρασία εξόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή → θερμοκρασία εισόδου τροφοδοτικού νερού απαεριωτή
- παροχή εξόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή → παροχή εισόδου τροφοδοτικού νερού απαεριωτή

Η σύνδεση του πρώτου προθερμαντή υψηλής πίεσης (Preheater high1) με τον απαεριωτή είναι η εξής:

- θερμοκρασία εισόδου συμπυκνώματος στον απαεριωτή ← θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς προθερμαντή
- εισερχόμενη παροχή συμπυκνώματος στον απαεριωτή ← εξερχόμενη παροχή θερμής πλευράς προθερμαντή
- Ξηρότητα εισόδου συμπυκνώματος στον απαεριωτή ← Ξηρότητα εξόδου θερμής πλευράς προθερμαντή

Στη σύνδεση του απαεριωτή με την ψυχρή πλευρά του πρώτου προθερμαντή παρεμβάλλεται η αντλία υψηλής πίεσης. Οι συνδέσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής:

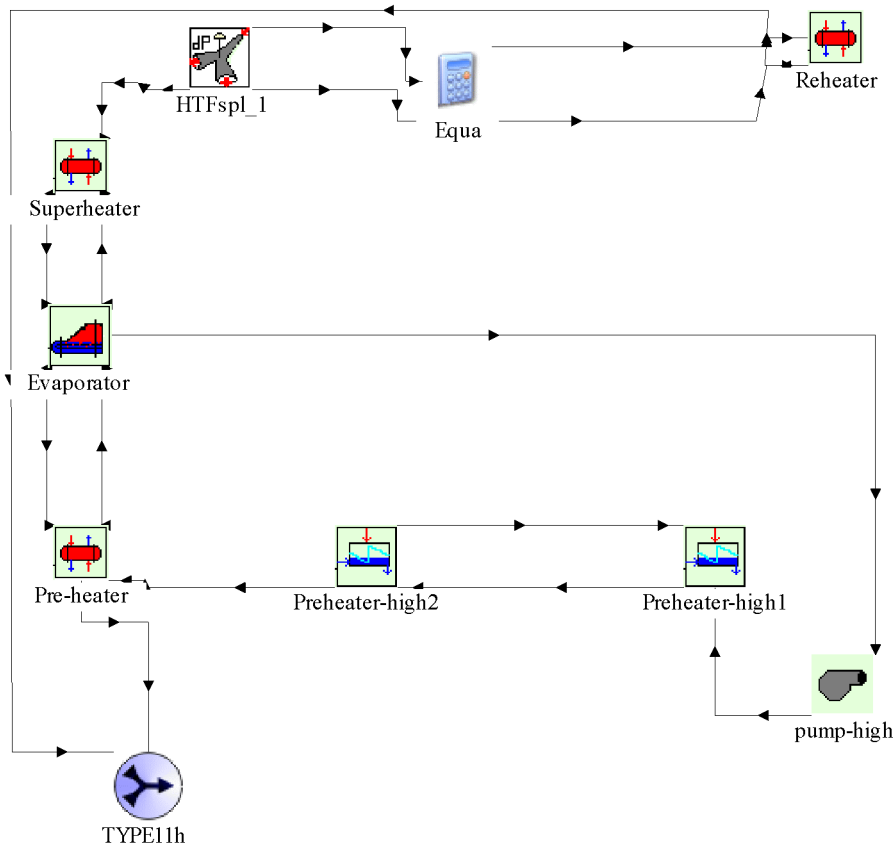
Απαεριωτής ⇒ Αντλία υψηλής πίεσης

- θερμοκρασία εξόδου τροφοδοτικού νερού → θερμοκρασία εισόδου ρευστού
- παροχή εξόδου τροφοδοτικού νερού → παροχή εισόδου ρευστού

Αντλία υψηλής πίεσης⇒Πρώτος προθερμαντής υψηλής πίεσης

- θερμοκρασία εξόδου ρευστού→θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή
- παροχή εξόδου ρευστού→παροχή εισόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή

Το τροφοδοτικό νερό εξέρχεται από το σύμπλεγμα των προθερμαντών ατμού και εισέρχεται στη διάταξη προθέρμανσης (Τύπος 315), ατμοποίησης (Τύπος 316) και υπερθέρμανσης (Τύπος 315) εξ' αιτίας του μέσου μεταφοράς θερμότητας. Το μοντέλο TRNSYS της διάταξης αυτής απεικονίζεται στο σχήμα 6.12. Στους εναλλάκτες θερμότητας που απεικονίζονται στο σχήμα 6.12 έχουμε αντιρροή νερού-ατμού (ψυχρή πλευρά) και μέσου μεταφοράς θερμότητας (θερμή πλευρά). Οι τιμές των εισόδων και των παραμέτρων του προθερμαντή με μέσο μεταφοράς θερμότητας και του ατμοποιητή δίνονται στους πίνακες 6.31-6.32 και 6.33-6.34.



Σχήμα 6.12 Διάταξη σύνδεσης διαχωριστή-υπερθερμαντή και αναθερμαντή και εναλλακτών HTF-προθερμαντή ατμού και εναλλακτών HTF-αναμεικτή.

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Προθερμαντής HTF	<i>Είσοδος</i>	<i>Τιμή</i>
1.	Θερμοκρασία εισόδου θερμής πλευράς	317,78°C
2.	Παροχή μάζας θερμής πλευράς	1243764 kg/hr
3.	Θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς	234,83°C
4.	Παροχή μάζας ψυχρής πλευράς	140292 kg/hr
5.	Ξηρότητα ψυχρής πλευράς	0
6.	Πίεση εξόδου ξηρής πλευράς	103,42 BAR
7.	Ειδική θερμότητα θερμής πλευράς	2,36 kJ/kgK

Πίνακας 6.31 Τιμές εισόδων προθερμαντή με HTF (Τύπος 315).

Προθερμαντής HTF	<i>Παράμετρος</i>	<i>Τιμή</i>
1.	Μοντέλο αντirroής (παραμ. ουσιήματος)	2
2.	UA _t	724000 W/K
3.	Πτώση πίεσης αναφοράς ψυχρής πλευράς	0,14 BAR
4.	Παροχή μάζας αναφοράς ψυχρής πλευράς	140292 kg/hr
5.	Εκθέτης για το UA	0
6.	Εκθέτης για το DP	0

Πίνακας 6.32 Τιμές παραμέτρων προθερμαντή με HTF (Τύπος 315).

Ατμοποιητής	<i>Είσοδος</i>	<i>Τιμή</i>
1.	Θερμοκρασία εισόδου θερμής πλευράς	377,22 °C
2.	Παροχή μάζας θερμής πλευράς	1243764 kg/hr
3.	Θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς	313,48 °C
4.	Πίεση εξόδου ψυχρής πλευράς	103,42 BAR
5.	Ξηρότητα εισόδου ψυχρής πλευράς	0
6.	Ειδική θερμότητα ρευστού θερμής πλευράς	1.9714 kJ/kgK

Πίνακας 6.33 Τιμές εισόδων ατμοποιητή (Τύπος 316).

Ατμοποιητής	<i>Παράμετρος</i>	<i>Τιμή</i>
1.	UA	2051000 W/K
2.	Παροχή μάζας αναφοράς ψυχρής πλευράς	140292 kg/hr
3.	Ποσοστό οβησίματος	0
4.	Πτώση πίεσης αναφοράς	0 BAR
5.	Εκθέτης για το UA	0
6.	Εκθέτης για το dp	0

Πίνακας 6.34 Τιμές παραμέτρων ατμοποιητή (Τύπος 316).

Ο διαχωριστής HTF (Τύπος 352) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δύο παροχών 50,90 kg/s (προς αναθερμαντή) και 345,49 kg/s (προς υπερθερμαντή). Αντίστοιχα χρησιμοποιείται ο αναμεικτής (Τύπος 11h) για την ανάμειξη των δύο ρευμάτων HTF, έτσι ώστε η συνολική παροχή που εισέρχεται στο πεδίο των παραβολικών συλλεκτών να είναι 396,39 kg/s. Οι

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

τιμές των εισόδων και των παραμέτρων του διαχωριστή και του αναμεικτή δίνονται στους πίνακες 6.35-6.36 και 6.37. Τα δύο στοιχεία εξισώσεων χρησιμοποιούνται, διότι οι μονάδες της εξερχόμενης από το διαχωριστή παροχής είναι σε kg/s, ενώ από τα στοιχεία του υπερθερμαντή και του αναθερμαντή απαιτείται να είναι σε kg/hr.

Διαχωριστής HTF	Είσοδος	Τιμή
1.	Θερμοκρασία	390,56°C
2.	Πίεση	50 BAR
3.	c_p	2,590 kJ/kgK
4.	Ποσοστό εξόδου 1/έξοδο 22	0,12840889

Πίνακας 6.35 Τιμές εισόδων διαχωριστή HTF (Τύπος 352).

Διαχωριστής HTF	Παράμετρος	Τιμή
1.	k_p	0

Πίνακας 6.36 Τιμές παραμέτρων διαχωριστή HTF (Τύπος 352).

Αναμεικτής HTF	Είσοδος	Τιμή
1.	Θερμοκρασία στην είσοδο 1	294°C
2.	Παροχή μάζας στην είσοδο 1	183240 kg/hr
3.	Θερμοκρασία στην είσοδο 2	29,78°C
4.	Παροχή μάζας στην είσοδο 1	1243764 kg/hr

Πίνακας 6.37 Τιμές εισόδων αναμεικτή HTF (Τύπος 11).

Οι συνδέσεις που φαίνονται στο σχήμα 6.12 είναι οι εξής:

Προθερμαντής HTF ↔ Ατμοποιητής

- θερμοκρασία εξόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή → θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς ατμοποιητή
- ξηρότητα εξόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή → ξηρότητα εισόδου ψυχρής πλευράς ατμοποιητή
- θερμοκρασία εισόδου θερμής πλευράς προθερμαντή ← θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς ατμοποιητή
- παροχή εισόδου θερμής πλευράς προθερμαντή ← παροχή εξόδου θερμής πλευράς ατμοποιητή
- πίεση εξόδου ψυχρής πλευράς προθερμαντή ← πίεση εισόδου ψυχρής πλευράς ατμοποιητή

Ατμοποιητής \Leftrightarrow Αντλία υψηλής πίεσης

- απαιτούμενη παροχή ψυχρής πλευράς ατμοποιητή \rightarrow επιθυμητή παροχή αντλίας

Ατμοποιητής \Leftrightarrow Υπερθερμαντής

- θερμοκρασία εξόδου ψυχρής πλευράς ατμοποιητή \rightarrow θερμοκρασία εισόδου ψυχρής πλευράς υπερθερμαντή
- ξηρότητα εξόδου ψυχρής πλευράς ατμοποιητή \rightarrow ξηρότητα εισόδου ψυχρής πλευράς υπερθερμαντή
- παροχή εξόδου ψυχρής πλευράς ατμοποιητή \rightarrow παροχή εισόδου ψυχρής πλευράς υπερθερμαντή
- θερμοκρασία εισόδου θερμής πλευράς ατμοποιητή \leftarrow θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς υπερθερμαντή
- παροχή εισόδου θερμής πλευράς ατμοποιητή \leftarrow παροχή εξόδου θερμής πλευράς υπερθερμαντή
- πίεση εξόδου ψυχρής πλευράς ατμοποιητή \leftarrow πίεση εισόδου ψυχρής πλευράς υπερθερμαντή

Διαχωριστής HTF \Rightarrow Υπερθερμαντής

- θερμοκρασία εξόδου 2 \rightarrow θερμοκρασία εισόδου θερμής πλευράς υπερθερμαντή
- παροχή μάζας εξόδου 2 (μέσω eqa-2) \rightarrow παροχή εισόδου θερμής πλευράς υπερθερμαντή

Διαχωριστής HTF \Rightarrow Αναθερμαντής

- θερμοκρασία εξόδου 1 \rightarrow θερμοκρασία εισόδου θερμής πλευράς αναθερμαντή
- παροχή μάζας εξόδου 1 (μέσω eqa) \rightarrow παροχή εισόδου θερμής πλευράς αναθερμαντή

Προθερμαντής HTF \Rightarrow Αναμείκτης HTF

- θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς προθερμαντή HTF \rightarrow θερμοκρασία στην είσοδο 2

- παροχή εξόδου θερμής πλευράς προθερμαντή HTF → παροχή στην είσοδο 2

Αναθερμαντής ⇒ Αναμείκτης HTF

- θερμοκρασία εξόδου θερμής πλευράς αναθερμαντή → θερμοκρασία στην είσοδο 1
- παροχή εξόδου θερμής πλευράς αναθερμαντή → παροχή στην είσοδο 1

Το μοντέλο του TRNSYS ολοκληρώνεται με την επιστροφή του μέσου μεταφοράς θερμότητας, μέσω της αντλίας HTF, στο πεδίο των παραβολικών συλλεκτών (Τύπος 396) για την εκ νέου πρόσδοση θερμότητας και τη μετέπειτα έξοδο του ως το διαχωριστή HTF. Το στοιχείο εξίσωσης equa-3 χρησιμοποιείται διότι η παροχή μάζας ως έξοδος από το ηλιακό πεδίο δίνεται σε kg/hr, ενώ η είσοδος του διαχωριστή HTF απαιτεί μονάδες kg/s.

Οι τιμές των εισόδων και των παραμέτρων για το ηλιακό πεδίο και τον data reader αναφέρονται στους πίνακες 6.38-6.39 και 6.40 αντίστοιχα, ενώ οι συνδέσεις που υπάρχουν στο σχήμα 6.13 είναι οι εξής:

Αναμείκτης HTF ⇒ Αντλία HTF

- θερμοκρασία εξόδου → θερμοκρασία εισόδου ρευστού στην αντλία
- παροχή εξόδου → παροχή εισόδου ρευστού στην αντλία

Αντλία HTF ⇒ Ηλιακό Πεδίο

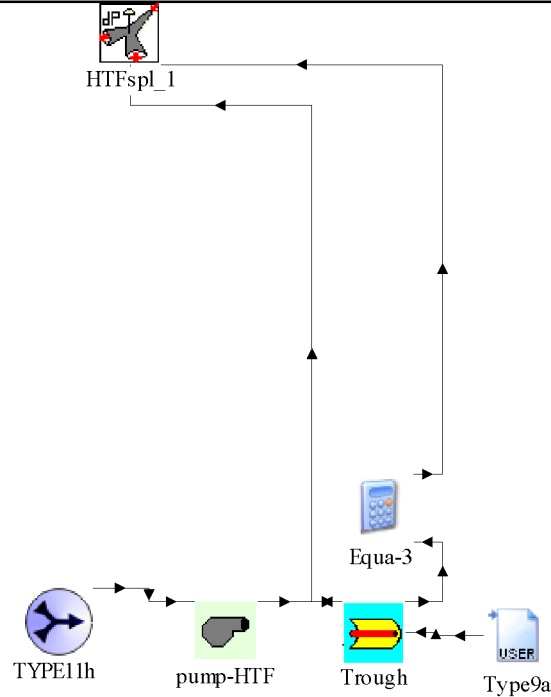
- θερμοκρασία εξόδου ρευστού → θερμοκρασία εισόδου ρευστού στο ηλιακό πεδίο

Εισαγωγή δεδομένων (Data reader) ⇒ Ηλιακό πεδίο

- έξοδος 1 → άμεση κάθετος ακτινοβολία

Ηλιακό πεδίο ⇒ Διαχωριστής HTF

- θερμοκρασία εξόδου ρευστού από το ηλιακό πεδίο → θερμοκρασία εισόδου διαχωριστή
- παροχή μάζας ηλιακού πεδίου (μέσω equa-3) → εισερχόμενη παροχή μάζας διαχωριστή



Σχήμα 6.13 Διάταξη σύνδεσης αντλίας HTF-ηλιακού πεδίου-διαχωριστή HTF .

Ηλιακό πεδίο	Παράμετρος	Τιμή
1.	A-Συντελεστής απωλειών	73,6
2.	B-Συντελεστής απωλειών	- 0,0042
3.	C-Συντελεστής απωλειών	7,40
4.	C _w -Συντελεστής απωλειών	0
5.	D-Συντελεστής απωλειών	- 0,096
6.	Καθαρή ανακλαστικότητα	0,935
7.	Ποσοστό οπασμένο ανακλαστήρων	0,0
8.	Μήκος στοιχείου συλλογής ηλιακής ενέργειας	50 m
9.	Πλάτος "παραθύρου" στοιχείου συλλογής ενέργειας	4,83 m
10.	Εστιακό μήκος στοιχείου συλλογής ενέργειας	5 m
11.	Απόσταση μεταξύ των σειρών των συλλεκτών	13m
12.	Συνολική επιφάνεια πεδίου	182000 m ²
13.	Μέγιστη ισχύς αντλίας	1E6 kJ/hr
14.	Μέγιστη παροχή αντλίας	1427004 kg/hr
15.	Συντελεστής για την εξίσωση ισχύος αντλίας-1	1,308
16.	Συντελεστής για την εξίσωση ισχύος αντλίας-2	4.28E-3
17.	Συντελεστής για την εξίσωση ισχύος αντλίας-3	1,99E-5
18.	Ρυθμός θερμικών απωλειών δεξαμενής στους 275°C	2,57E6
19.	Θερμικές απώλειες σωληνώσεων	20 W/m ²
20.	Παρασιτική ενέργεια για τους μηχανισμούς παρακολούθησης ηλίου	0,86 W/m ²
21.	Ενέργεια πλήρωσης για κάθε m ² ηλιακού πεδίου	11250kJ
22.	Όριο ανέμου για την παρακολούθηση της πορείας του ήλιου	13,7 m/s

Πίνακας 6.38 Τιμές παραμέτρων πεδίου ηλιακών συλλεκτών.

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Ηλιακό πεδίο	Είσοδος	Τιμή
1.	Απαιτούμενη θερμοκρασία εξόδου	390,56°C
2.	Θερμοκρασία εισόδου στο ηλιακό πεδίο	295,8°C
3.	Καθαρότητα ηλιακού πεδίου	0,951
4.	Ειδική θερμότητα HTF	2,30 kJ/kg
5.	Αζιμούθιο ηλίου	0°
6.	Γωνία ζενίθ	0°
7.	Κάθετη άμεσος ακτινοβολία	3114 kJ/hr m ²
8.	Ταχύτητα ανέμου	0 m/s
9.	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	25°C
10.	Ποσοστό πεδίου που παρακολουθεί την πορεία του ήλιου	1,0
11.	Λιαθέσιμο ποσοστό ηλιακού πεδίου	0,99
12.	Ποσοστό νυχτερινή παροχής	0,1
13.	Περίοδος μείωσης της παροχής	1 hr
14.	Ποσοστό παροχής στο τέλος της περιόδου μείωσης παροχής	0,1

Πίνακας 6.39 Τιμές εισόδων πεδίου ηλιακών συλλεκτών.

Data reader	Παράμετρος	Τιμή
1.	Mode	2
2.	Γραμμές επικεφαλίδας	0
3.	Αριθμός τιμών που θα διαβαστούν	1
4.	Χρονικό διάστημα των δεδομένων	5 min
5.	Γραμμική παρεμβολή ή όχι	-1
6.	Παράγοντας πολλαπλασιασμού	1,0
7.	Παράγοντας πρόσθεσης	0
8.	Μέση ή στιγμιαία τιμή	1
9.	Λογική μονάδα για το αρχείο εισόδου	30

Πίνακας 6.40 Τιμές παραμέτρων data reader.

Για την περάτωση της περιγραφής της λειτουργίας όλων των στοιχείων που αποτελούν το μοντέλο TRNSYS, απομένει η αναφορά στις τιμές των εισόδων και των παραμέτρων των τριών αντλιών (Τύπος 300) που υπάρχουν στο μοντέλο, οι οποίες είναι ονομαστικά: οι αντλίες χαμηλής (pump-low) και υψηλής πίεσης (pump-high) και η αντλία μέσου μεταφοράς θερμότητας (pump-HTF).

Οι τιμές εισόδων και παραμέτρων συγκεντρωτικά για τις τρεις αντλίες αναφέρονται στους πίνακες 6.41 και 6.42.

Αντλίες	Είσοδος	Pump-low	Pump-high	Pump-HTF
1.	Θερμοκρασία εισόδου ρευστού	41,77°C	169,27 °C	295,8°C
2.	Παροχή μάζας εισερχόμενου ρευστού	111708kg/hr	140292kg/hr	1427004kg/hr
3.	Επιθυμητή παροχή μάζας	-1	-1	-1

Πίνακας 6.41 Συγκεντρωτικός πίνακας εισόδων αντλιών.

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Αντλίες	Παράμετρος	Pump-low	Pump-high	Pump-HTF
1.	Μέγιστη παροχή	111708 kg/hr	140292 kg/hr	1427004 kg/hr
2.	Ειδική θερμότητα ρευστού	4,18 kJ/kgK	4,18 kJ/kgK	2,30 kJ/kgK
3.	Μέγιστη ισχύς	680 kW	680 kW	4000 kW
4.	Συντελεστής μετατροπής	0,0	0,0	0,0
5.	Συντελεστής ισχύος	1	1	1

Πίνακας 6.42 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων αντλιών.

6.8 Αποτελέσματα προσομοίωσης του ηλιακού θερμικού σταθμού SEGS VI.

Η προσομοίωση της λειτουργίας του SEGS VI γίνεται για συγκεκριμένες ημέρες του έτους, χρησιμοποιώντας μέσες ωριαίες τιμές της κάθετης άμεσου ακτινοβολίας (DNI). Τα απαραίτητα δεδομένα λαμβάνονται από τα στοιχεία ηλιακής ακτινοβολίας που έχουν εκδοθεί από το υπουργείο ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών για τα έτη 1991-2005. Ο πλησιέστερος, στο συγκρότημα των σταθμών SEGS, μετεωρολογικός σταθμός βρίσκεται στην πόλη Daggett, η οποία απέχει περίπου έξι χιλιόμετρα, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 6.14.



Σχήμα 6.14 Σχετική θέση Daggett και συγκροτήματος σταθμών SEGS (σήμανση Α) (Κλίμακα 1:250000).

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης επιλέγονται τέσσερις ημέρες του έτους 2005, οι οποίες είναι οι εξής:

- 14.01.2005
- 25.03.2005
- 21.06.2005
- 17.07.2005

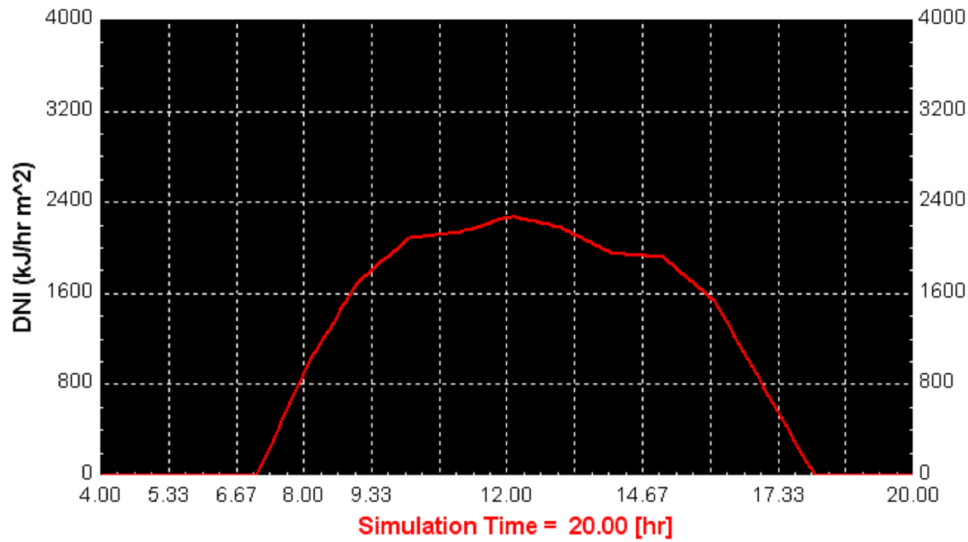
Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Η προσομοίωση της λειτουργίας του SEGS VI γίνεται από τις 4⁰⁰ έως τις 20⁰⁰ και για τις τέσσερις ημέρες που έχουν επιλεχθεί, ενώ το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι 5 min. Ο αριθμός των επαναλήψεων ορίζεται στις 200 για κάθε χρονική στιγμή.

◆ 14.01.2005

DNI (kJ/hr m²)

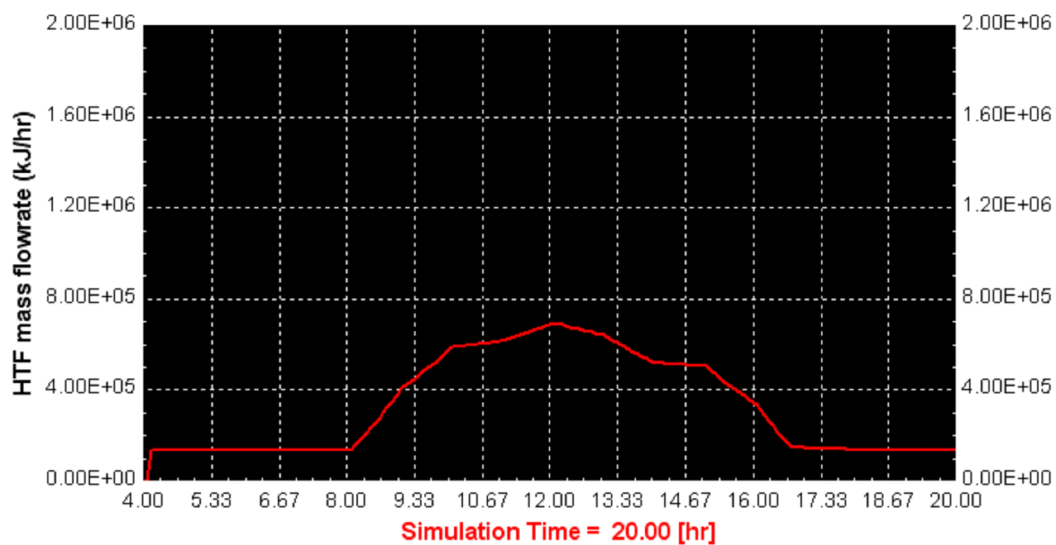
— 14.01.2005



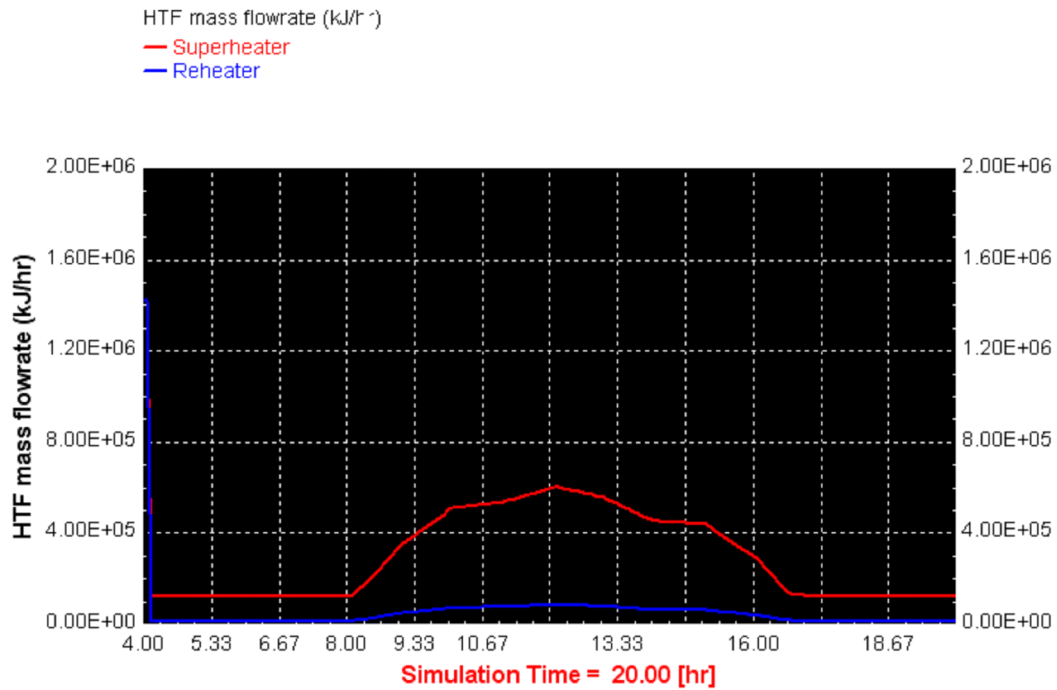
Σχήμα 6.15 Κάθετη άμεσος ακτινοβολία κατά την 14^η.01.2005.

HTF mass flowrate (kJ/hr)

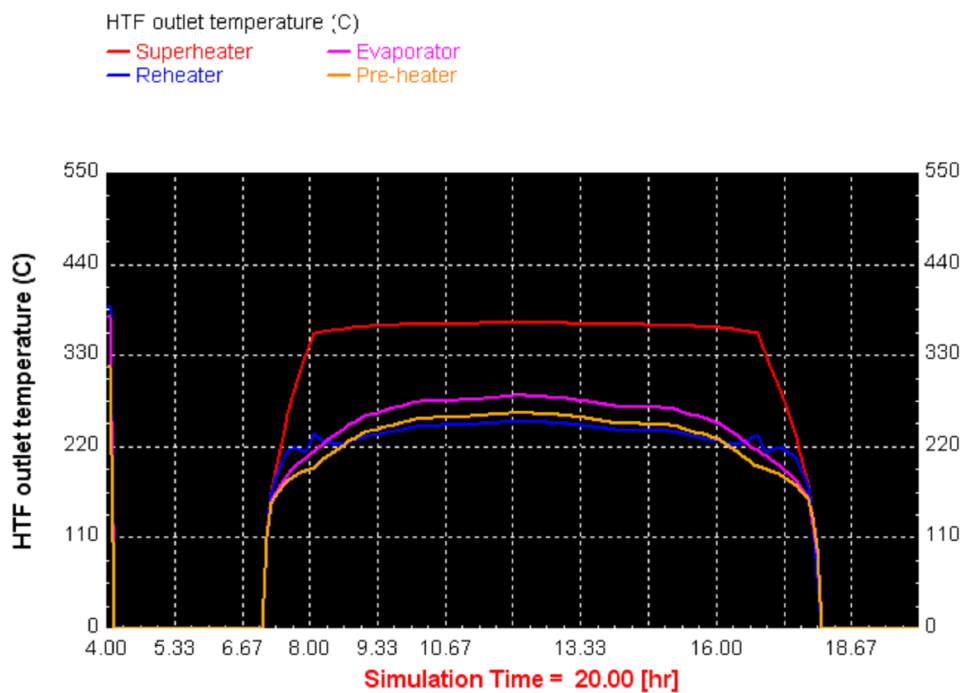
— field



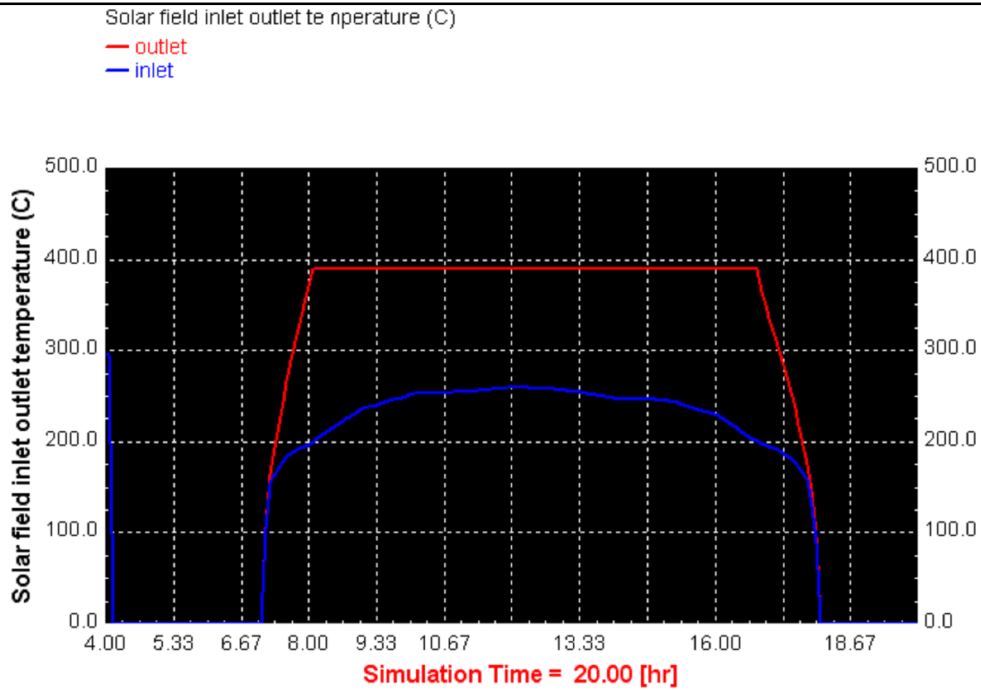
Σχήμα 6.16 Παροχή μάζας HTF στο ηλιακό πεδίο.



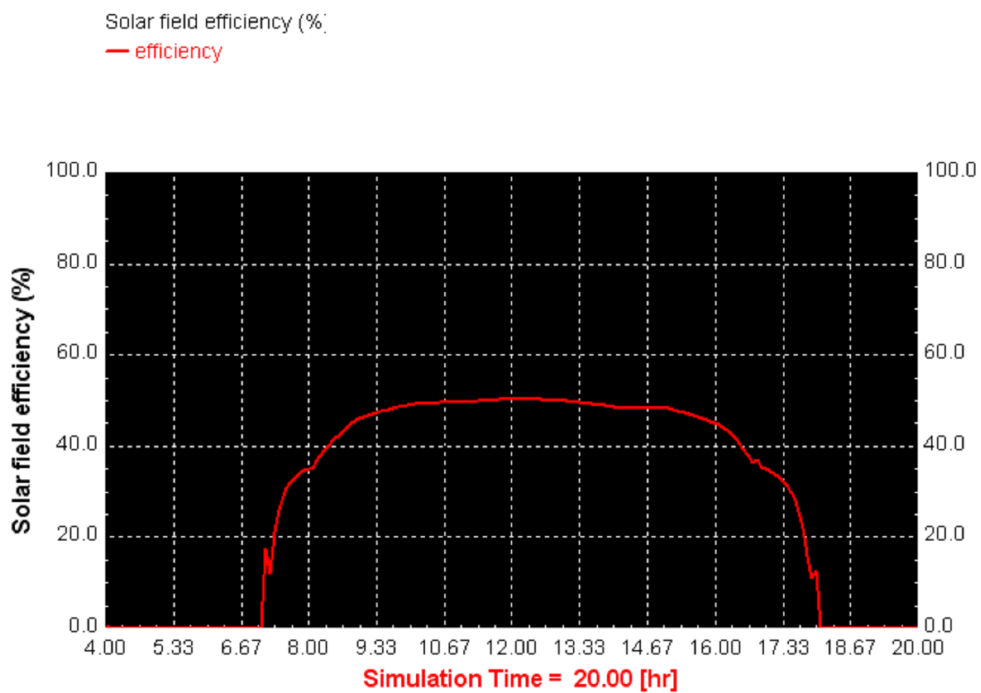
Σχήμα 6.17 Παροχή μάζας HTF σε υπερθερμαντή και αναθερμαντή.



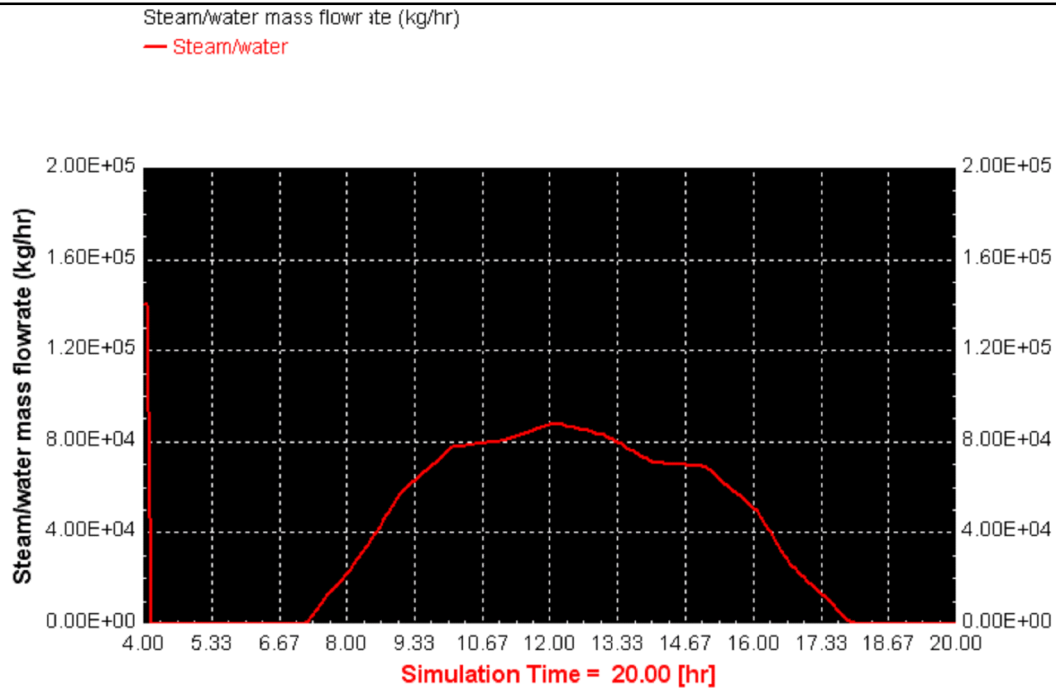
Σχήμα 6.18 Θερμοκρασία εξόδου HTF από τους εναλλάκτες θερμότητας.



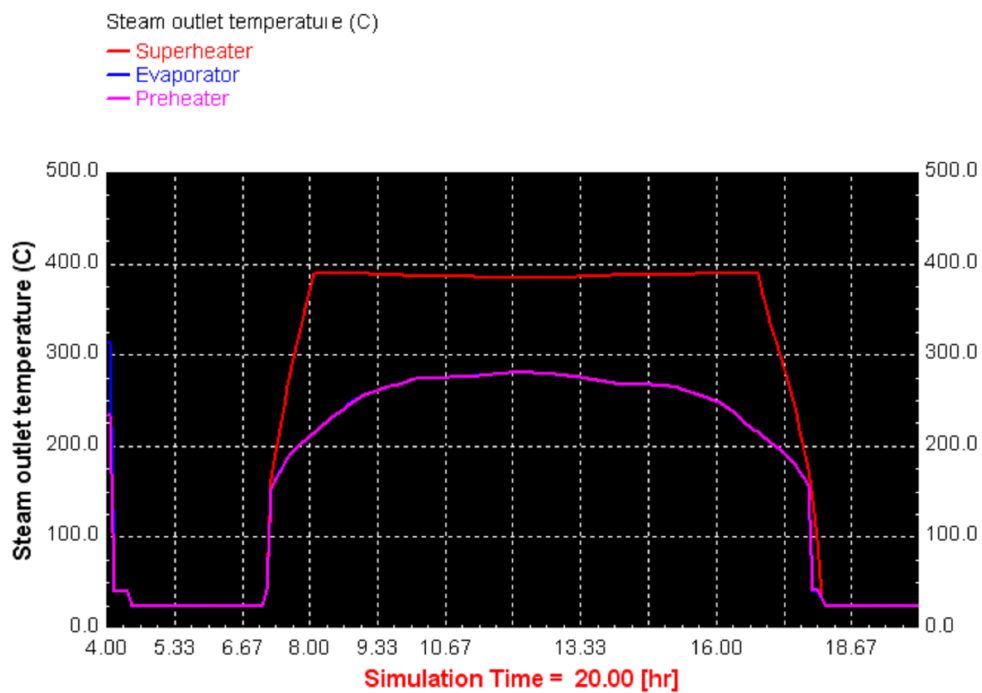
Σχήμα 6.19 Θερμοκρασία εισόδου-εξόδου HTF από το ηλιακό πεδίο.



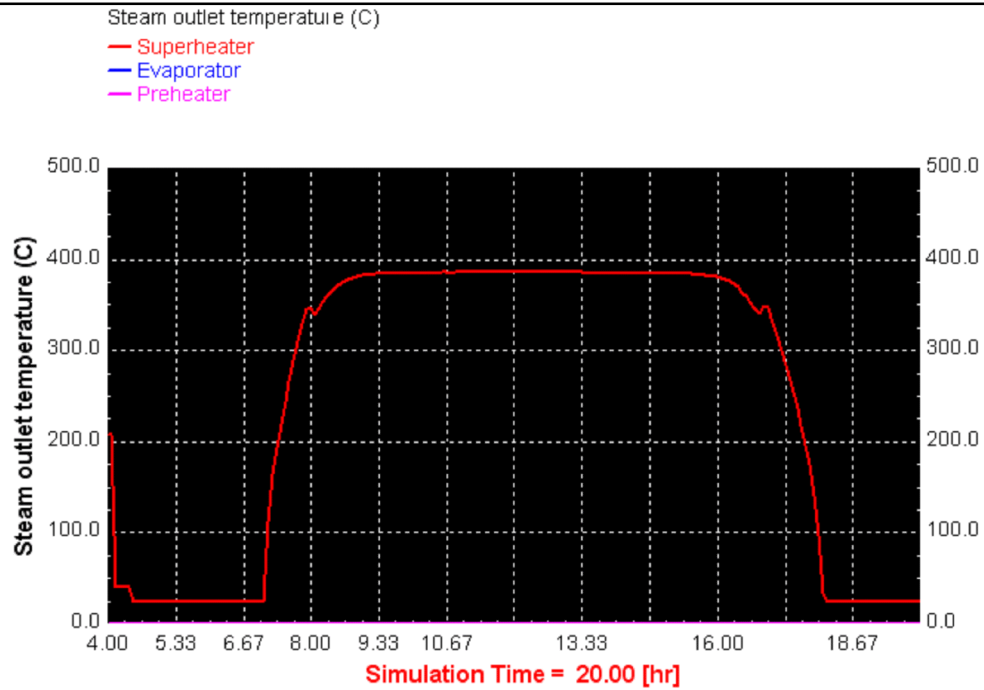
Σχήμα 6.20 Απόδοση ηλιακού πεδίου.



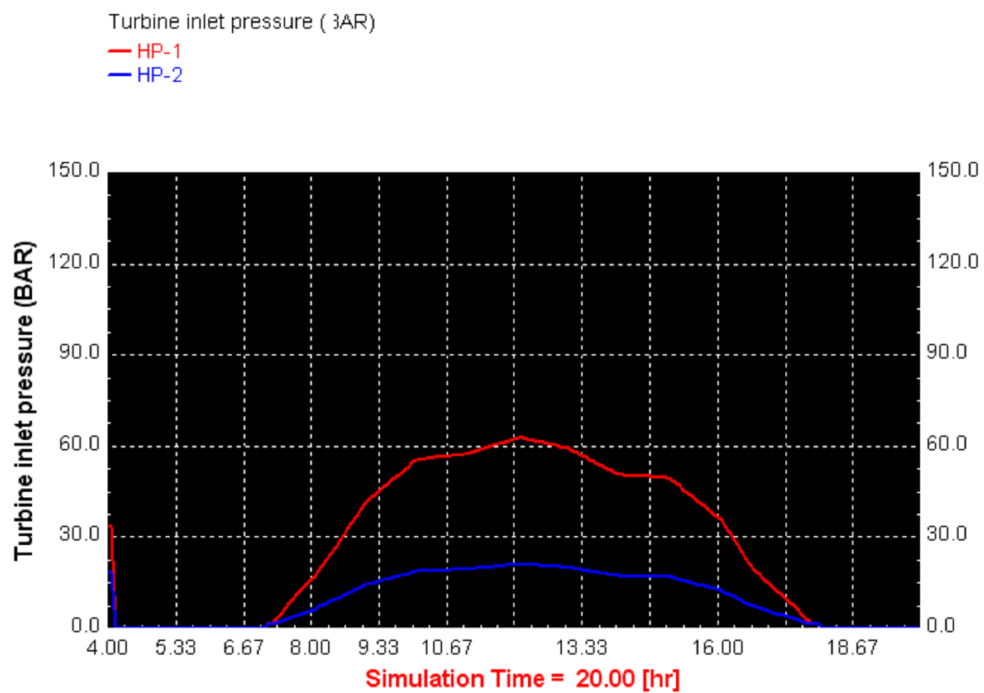
Σχήμα 6.21 Παροχή μάζας νερού/ατμού στο κύκλωμα παραγωγής έργου.



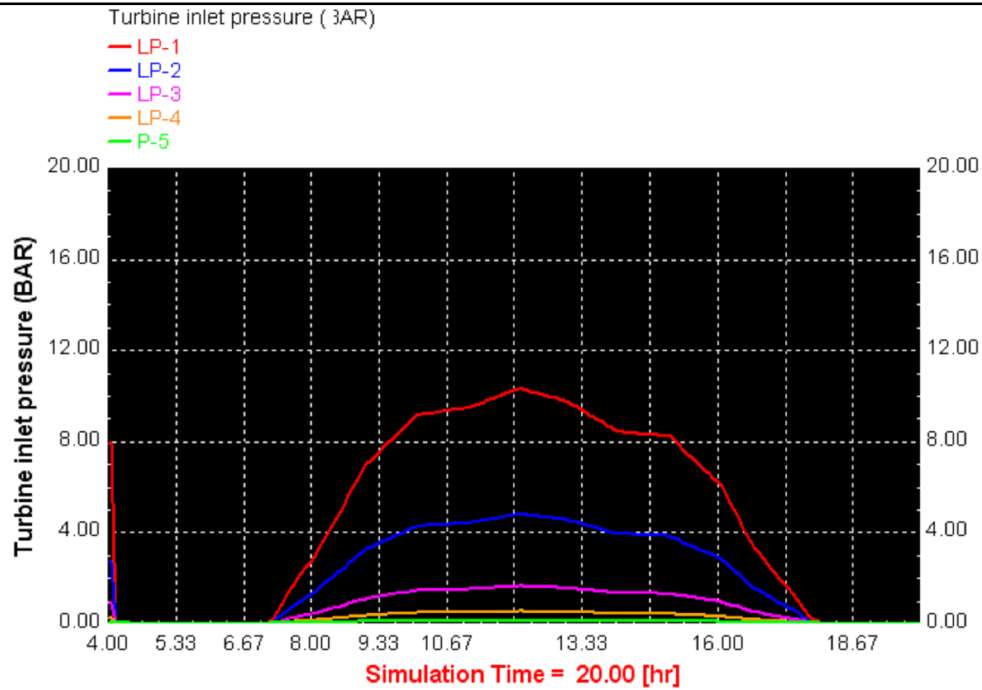
Σχήμα 6.22 Θερμοκρασία εξόδου ατμού από τους εναλλάκτες θερμότητας.



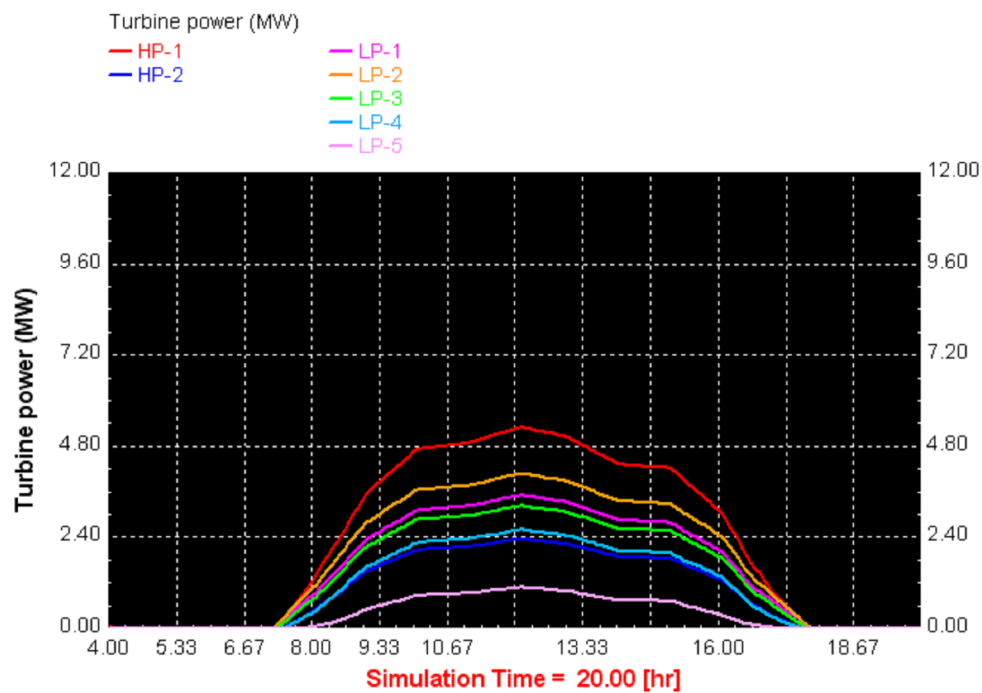
Σχήμα 6.23 Θερμοκρασία εξόδου ατμού από τον αναθερμαντή.



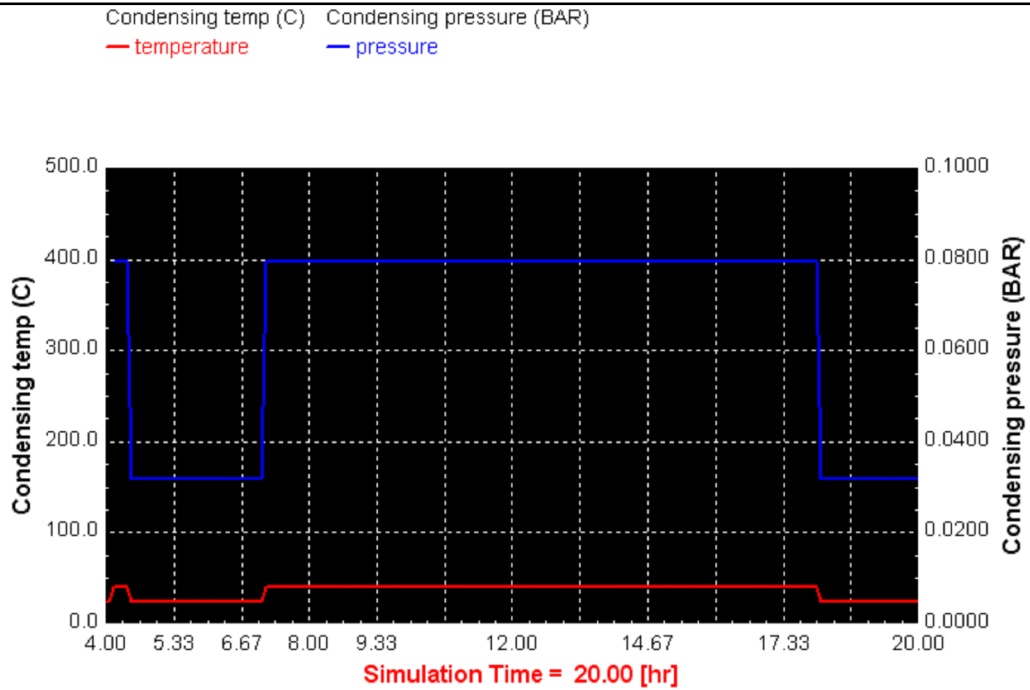
Σχήμα 6.24 Πίεση εισόδου στις βαθμίδες υψηλής πίεσης του στροβίλου.



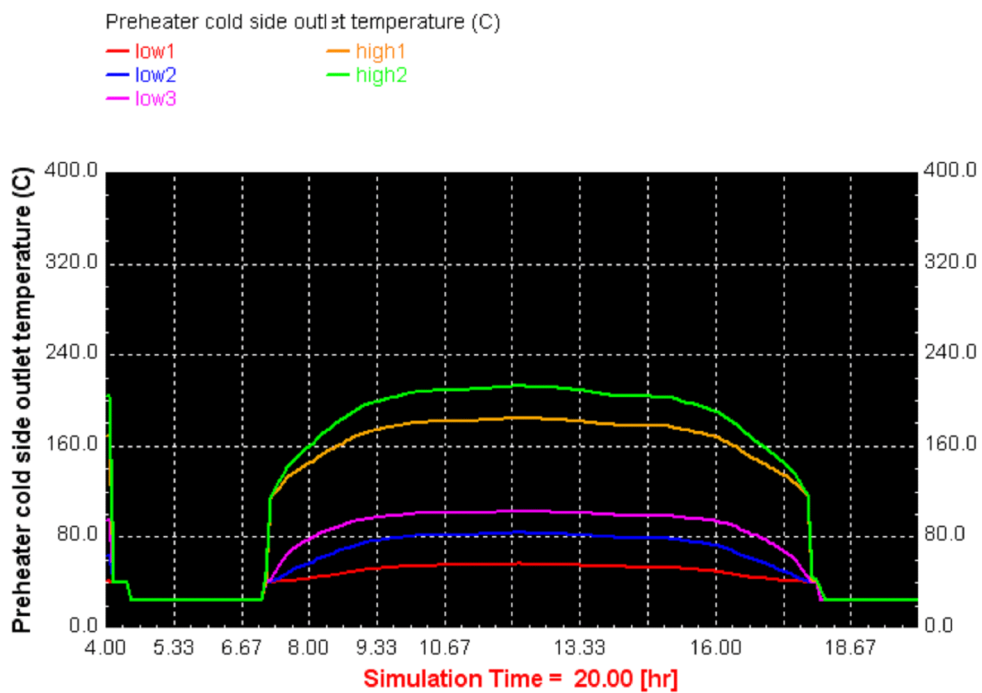
Σχήμα 6.25 Πίεση εισόδου στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης του στροβίλου.



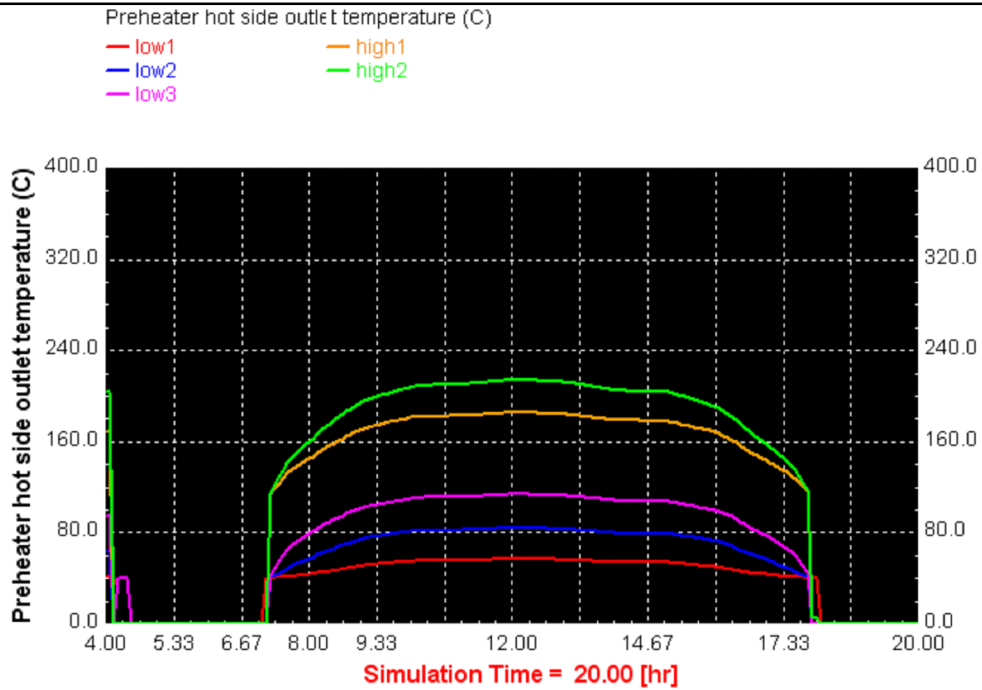
Σχήμα 6.26 Παραγόμενη ισχύς από τις βαθμίδες του στροβίλου.



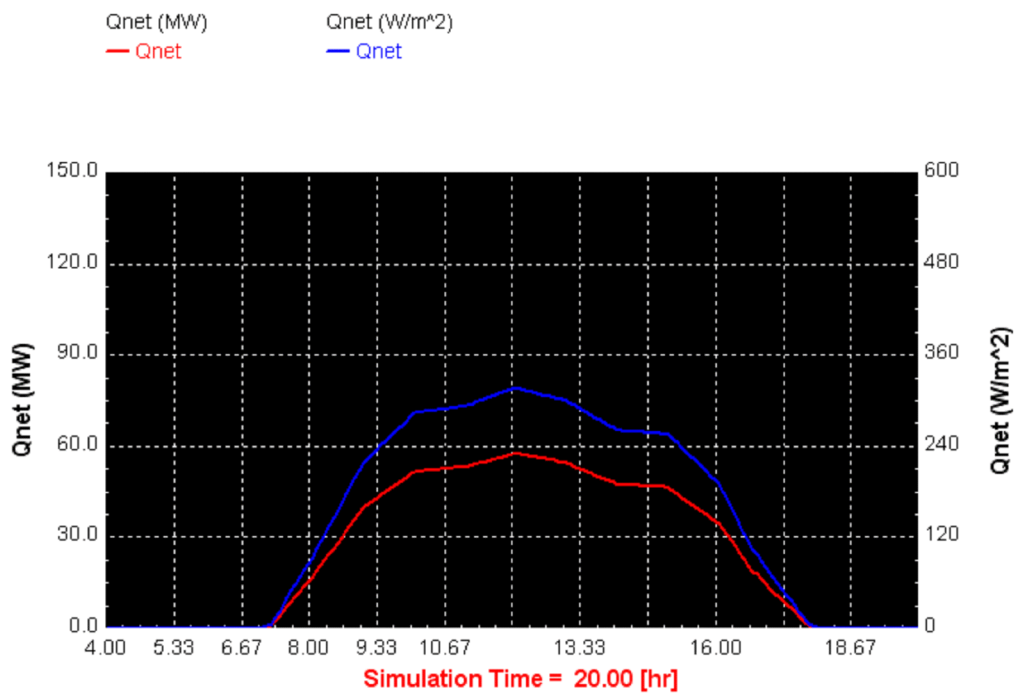
Σχήμα 6.27 Θερμοκρασία και πίεση συμπύκνωσης.



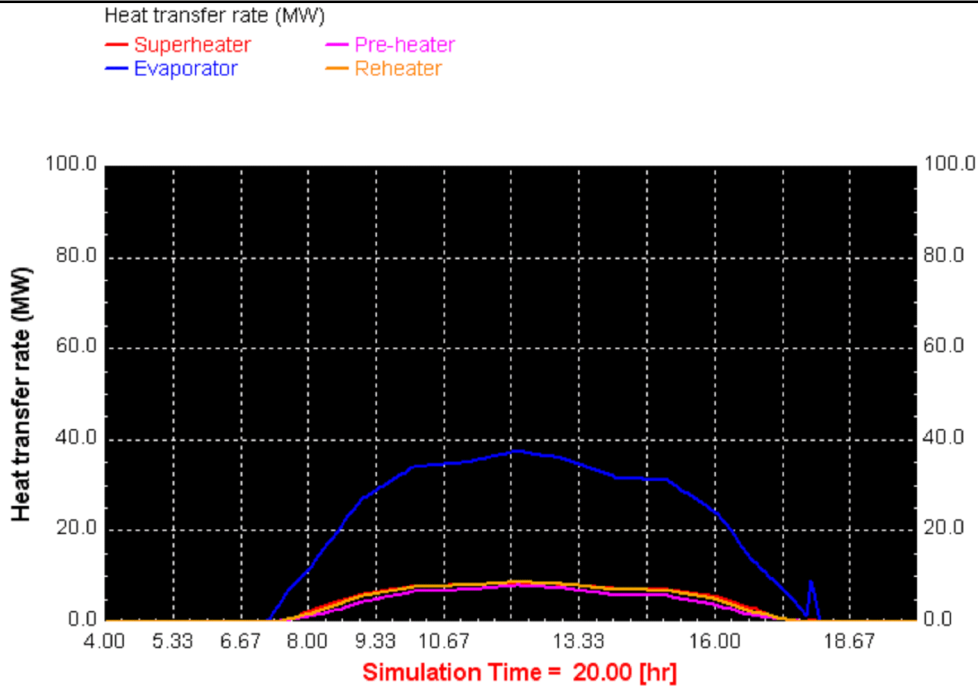
Σχήμα 6.28 Θερμοκρασία εξόδου τροφοδοτικού νερού από την ψυχρή πλευρά των προθερμαντιών ατμού.



Σχήμα 6.29 Θερμοκρασία εξόδου συμπυκνώματος από την θερμή πλευρά των προθερμαντών ατμού.



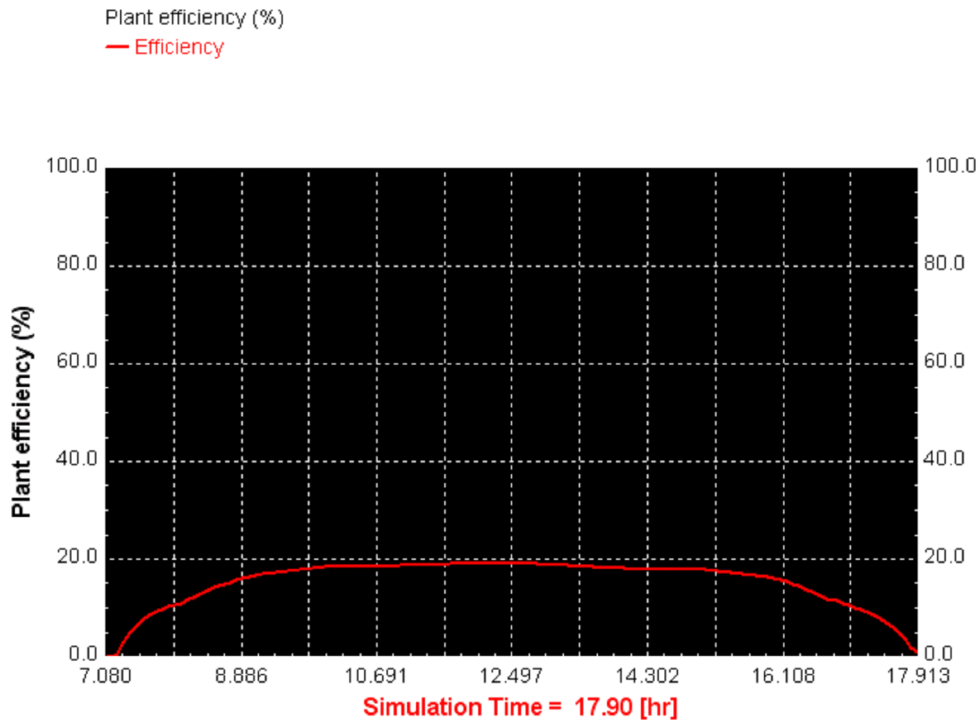
Σχήμα 6.30 Καθαρή θερμική ενέργεια που μεταφέρεται στο ΗΤΦ.



Σχήμα 6.31 Ρυθμός μεταφοράς θερμικής ενέργειας στους εναλλάκτες.

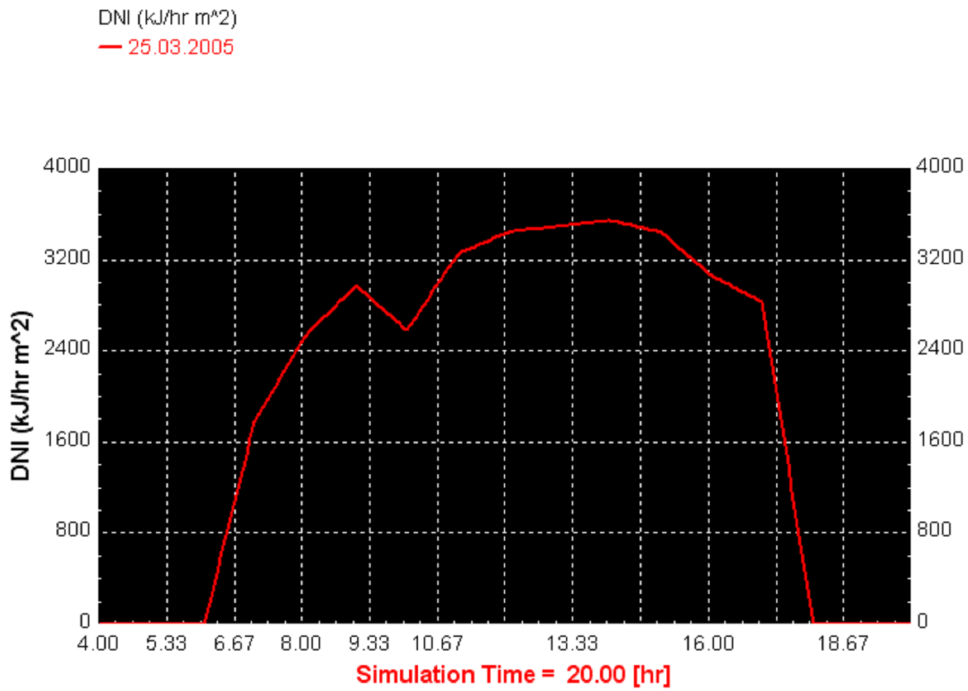
Ο (μικτός) θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης ορίζεται ως το πηλίκο της παραγόμενης ισχύος προς τη δεσμευόμενη από το πεδίο κάθετη άμεσο ακτινοβολία :

$$\eta_{plant} = \frac{P_G}{DNI \cdot A_a} \quad (6.14)$$

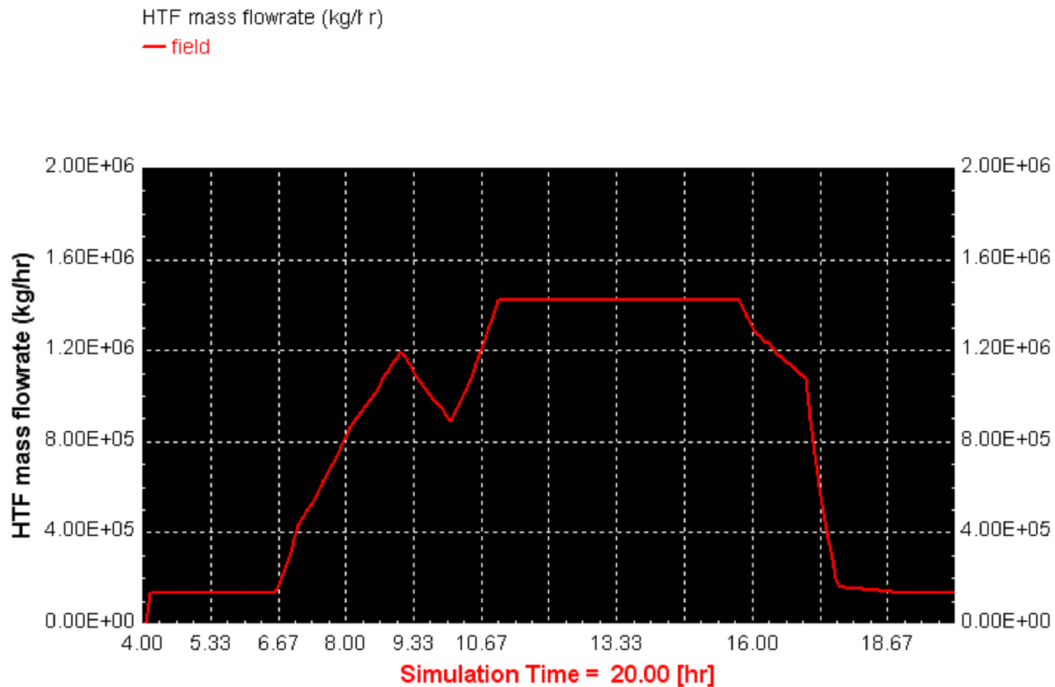


Σχήμα 6.32 Θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

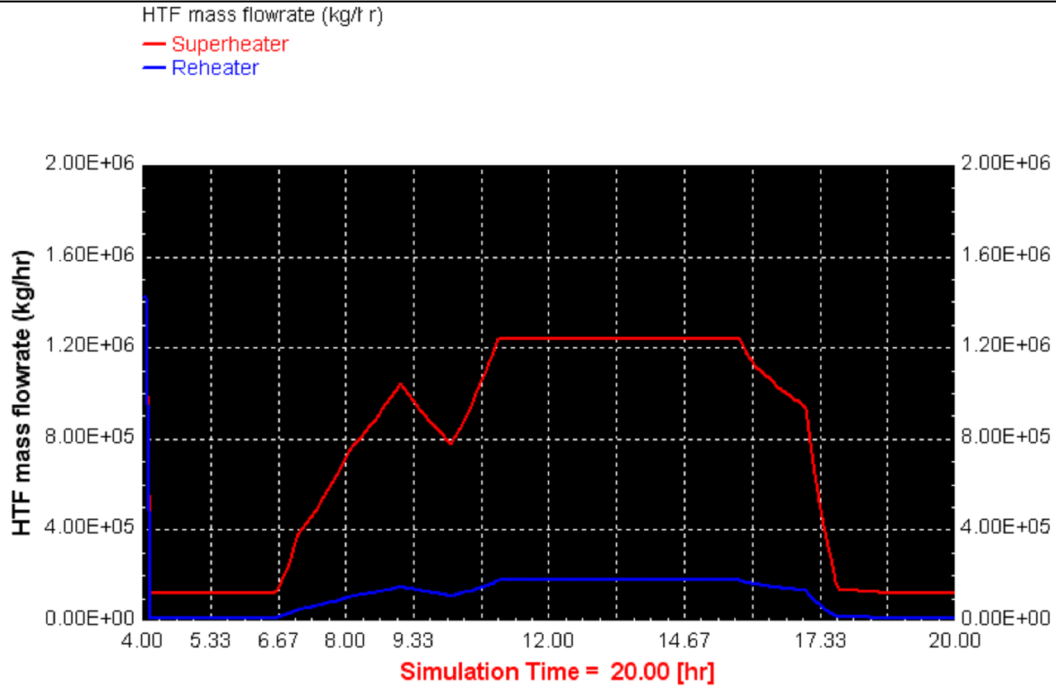
◆ 25.03.2005



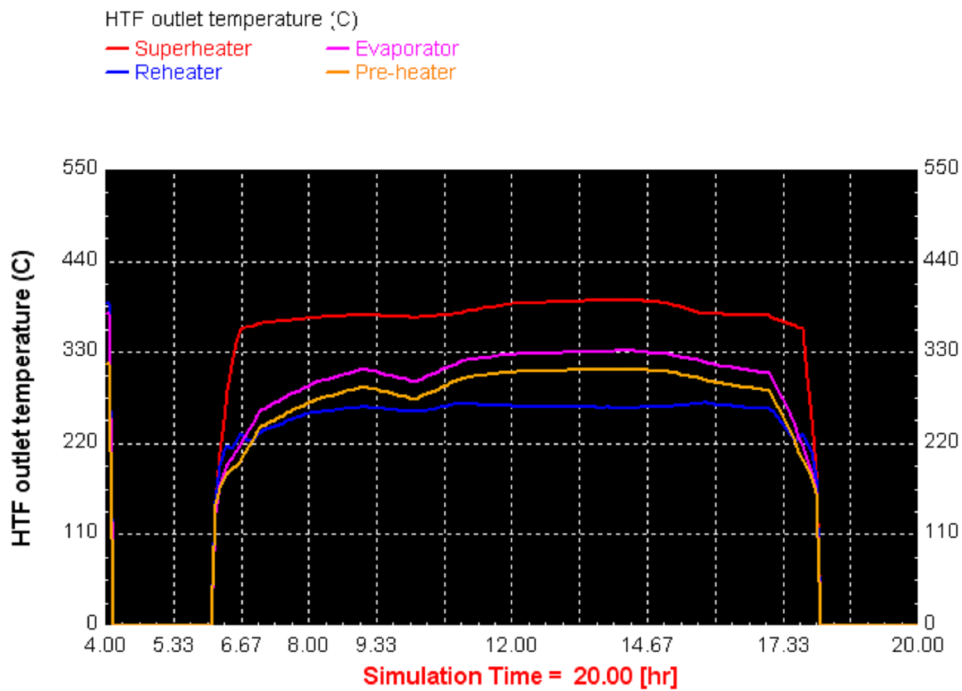
Σχήμα 6.33 Κάθετη άμεσος ακτινοβολία κατά την 25^η.03.2005.



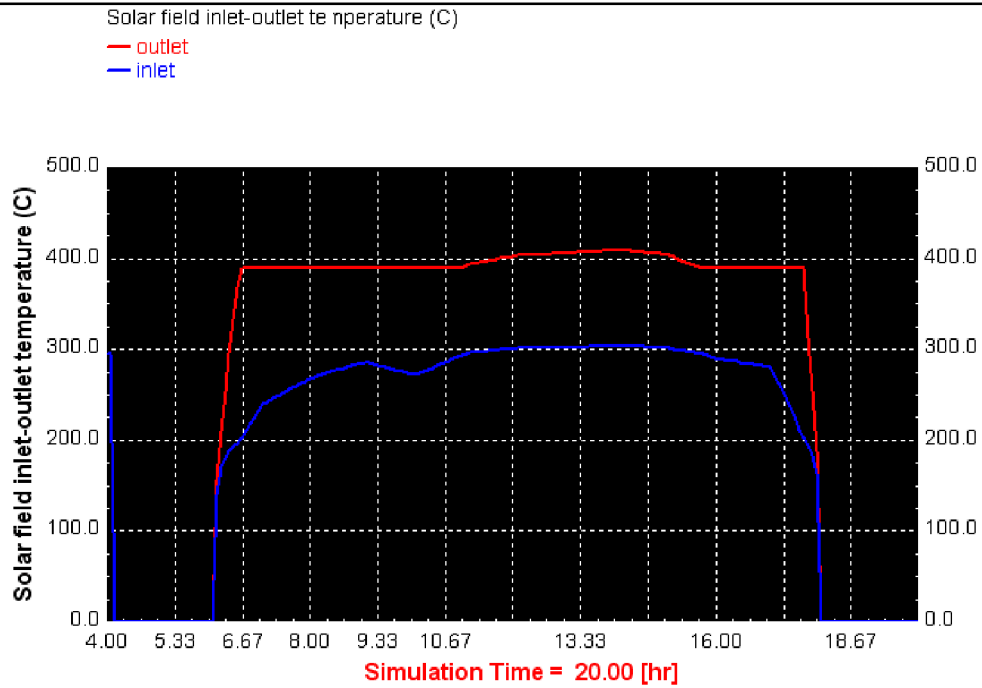
Σχήμα 6.34 Παροχή μάζας HTF στο ηλιακό πεδίο.



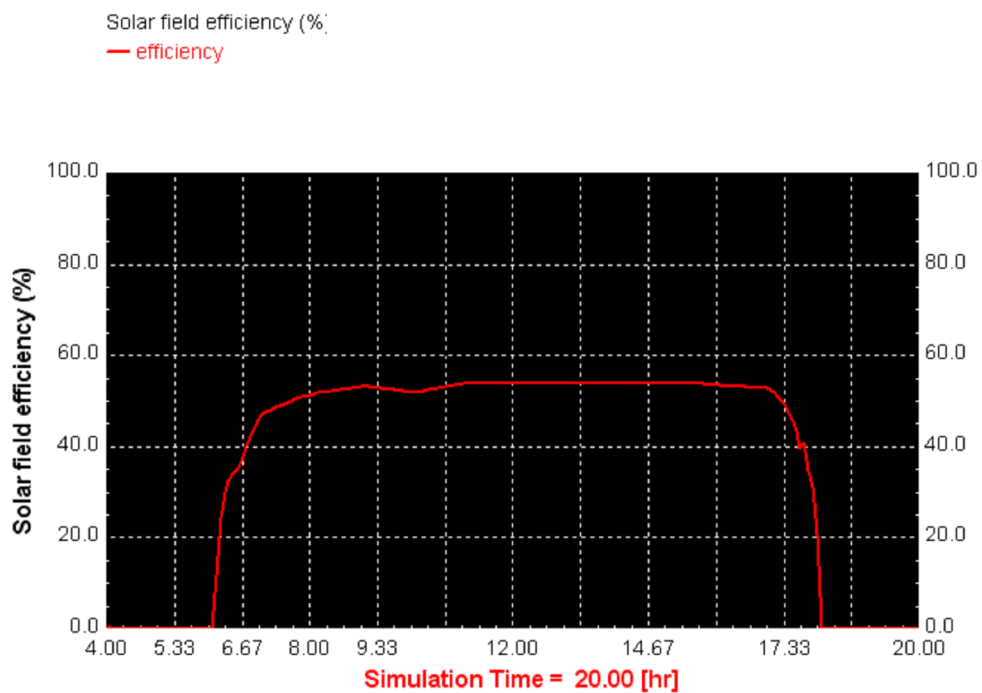
Σχήμα 6.35 Παροχή μάζας HTF σε υπερθερμαντή και αναθερμαντή.



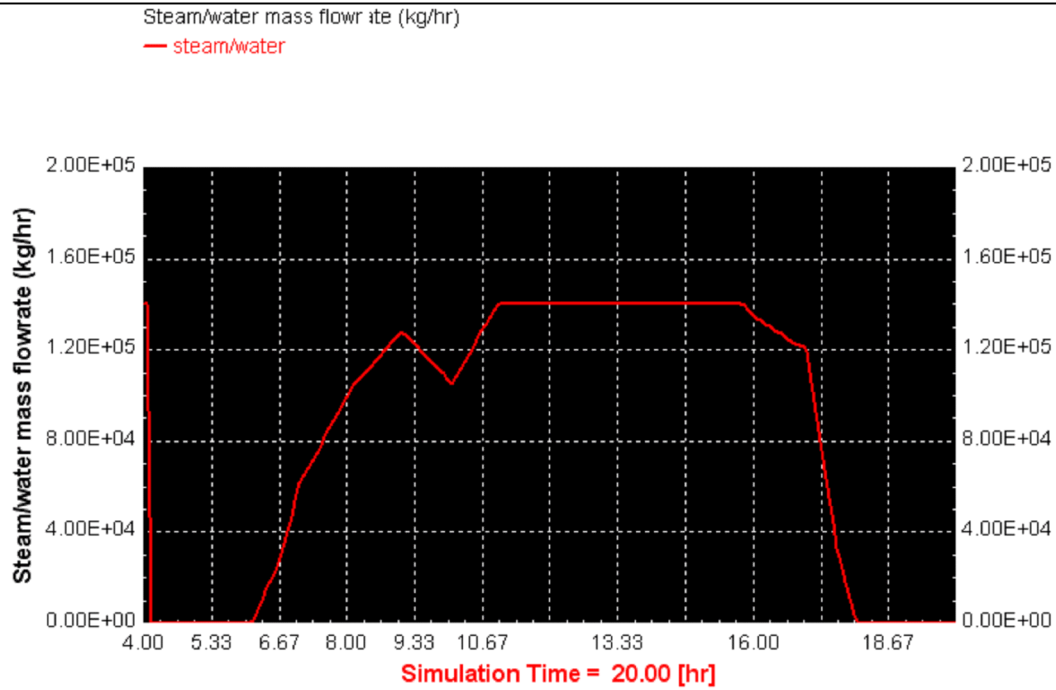
Σχήμα 6.36 Θερμοκρασία εξόδου HTF από τους εναλλάκτες θερμότητας.



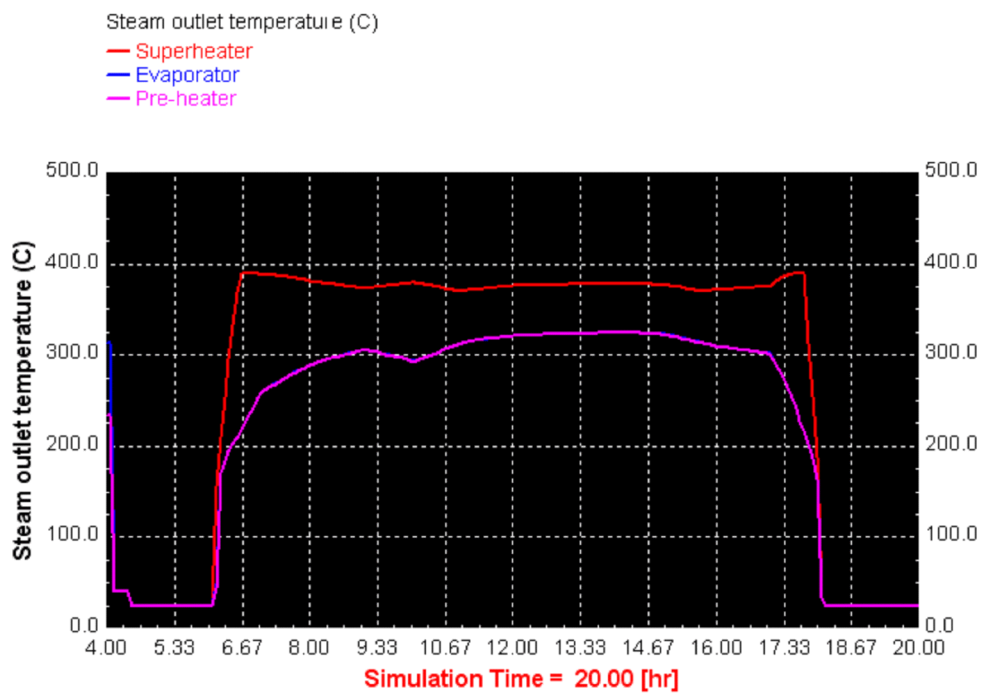
Σχήμα 6.37 Θερμοκρασία εισόδου-εξόδου HTF από το ηλιακό πεδίο.



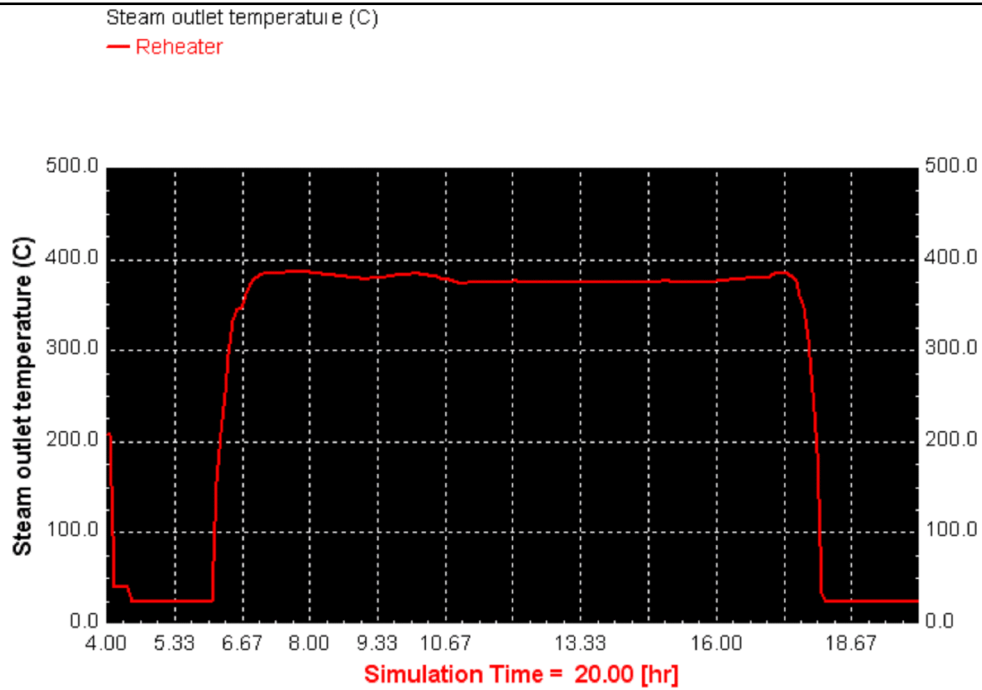
Σχήμα 6.38 Απόδοση ηλιακού πεδίου.



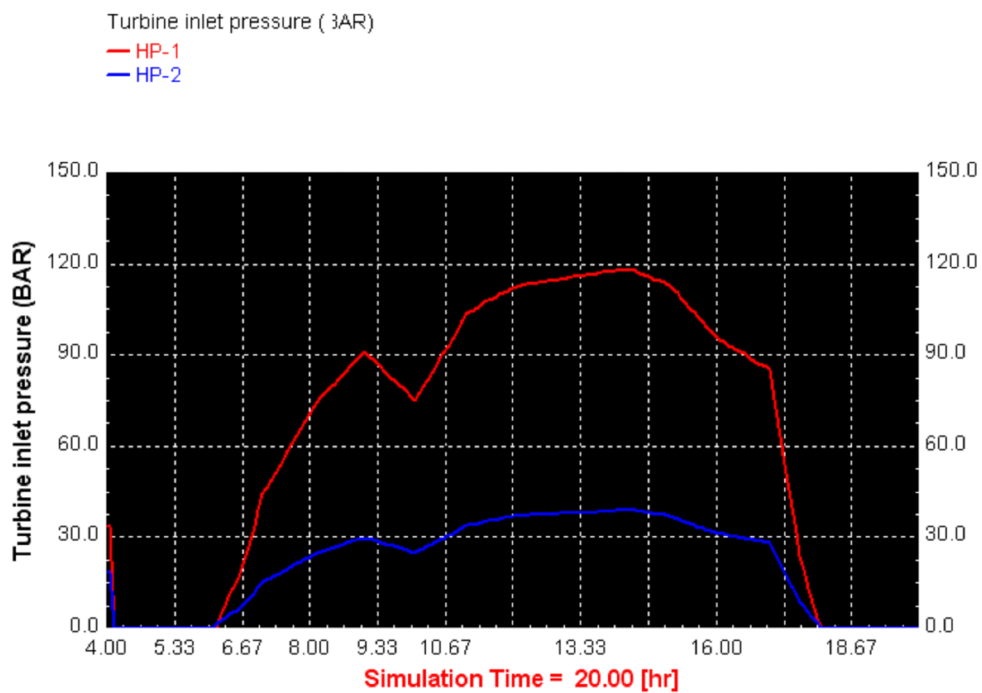
Σχήμα 6.39 Παροχή μάζας νερού/ατμού στο κύκλωμα παραγωγής έργου.



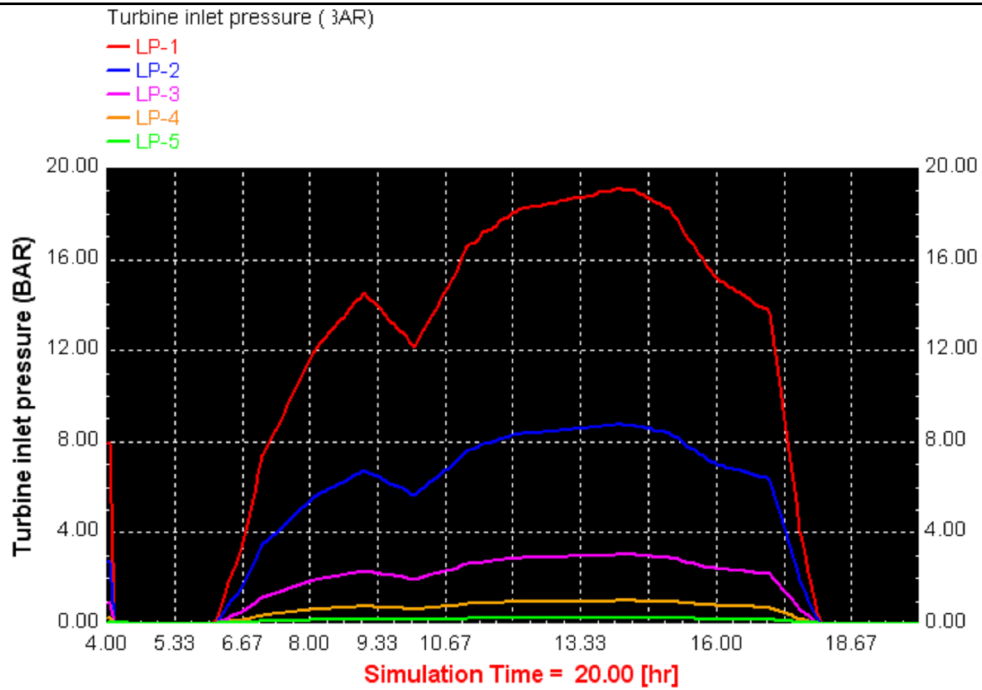
Σχήμα 6.40 Θερμοκρασία εξόδου ατμού από τους εναλλάκτες θερμότητας.



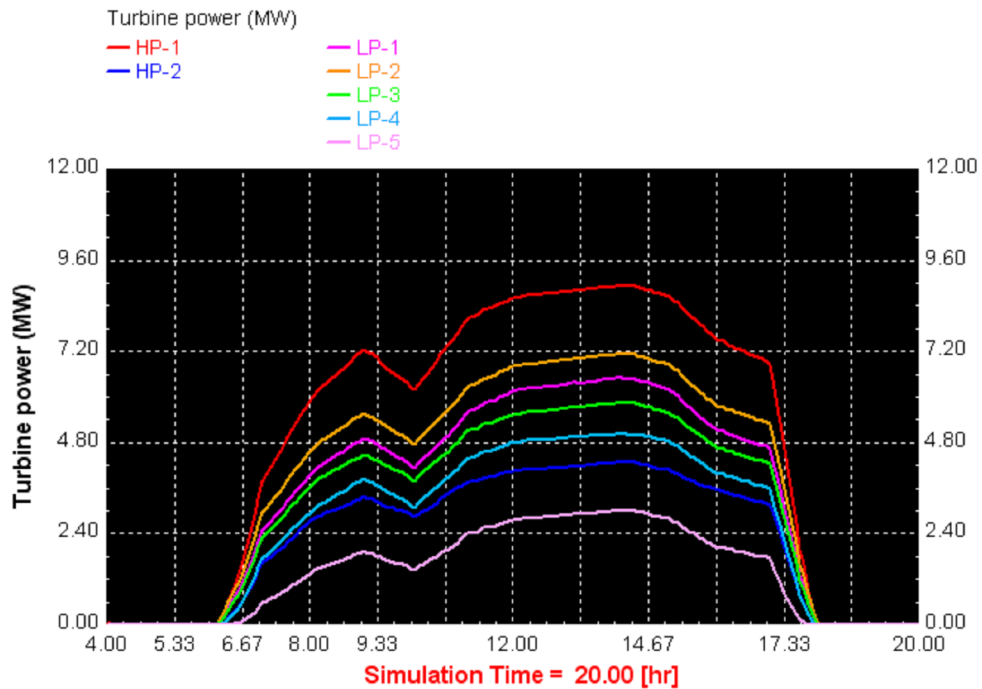
Σχήμα 6.41 Θερμοκρασία εξόδου ατμού από τον αναθερμαντή.



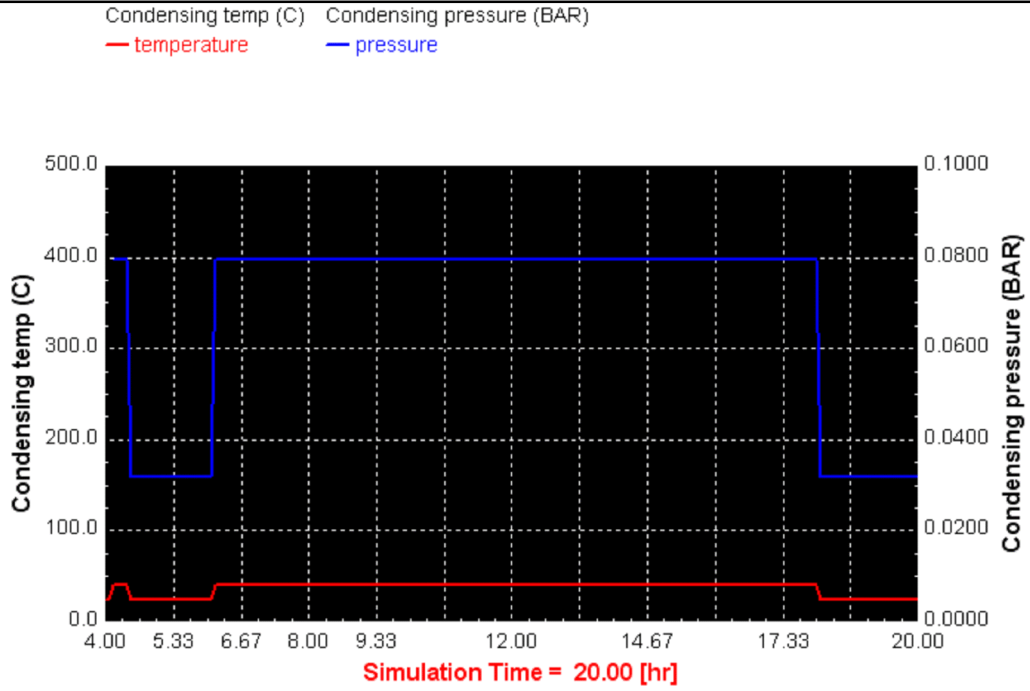
Σχήμα 6.42 Πίεση εισόδου στις βαθμίδες υψηλής πίεσης του στροβίλου.



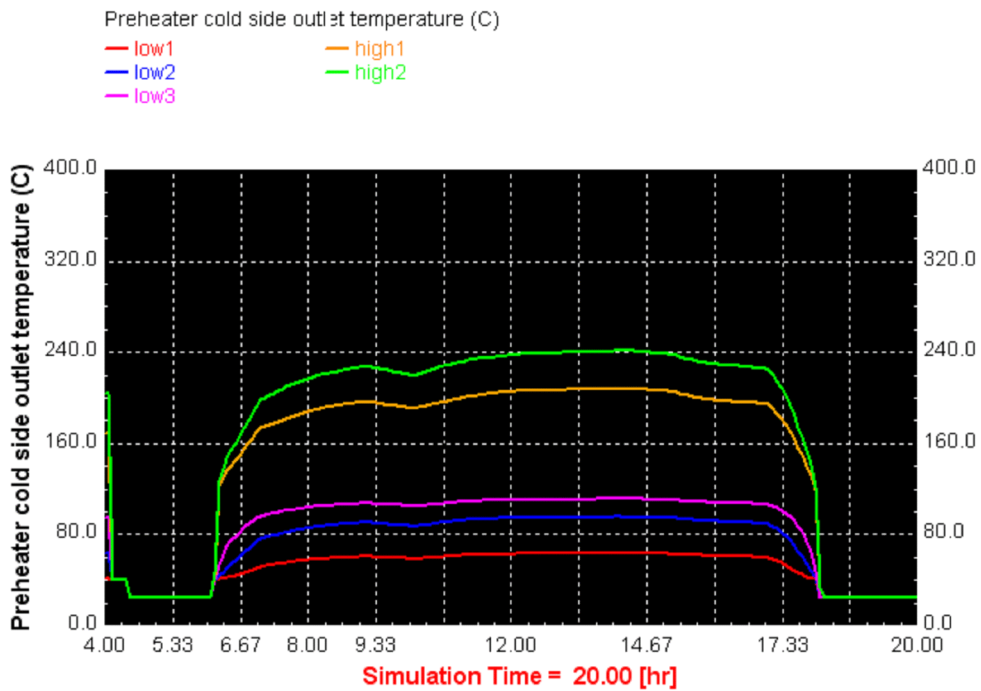
Σχήμα 6.43 Πίεση εισόδου στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης του στροβίλου.



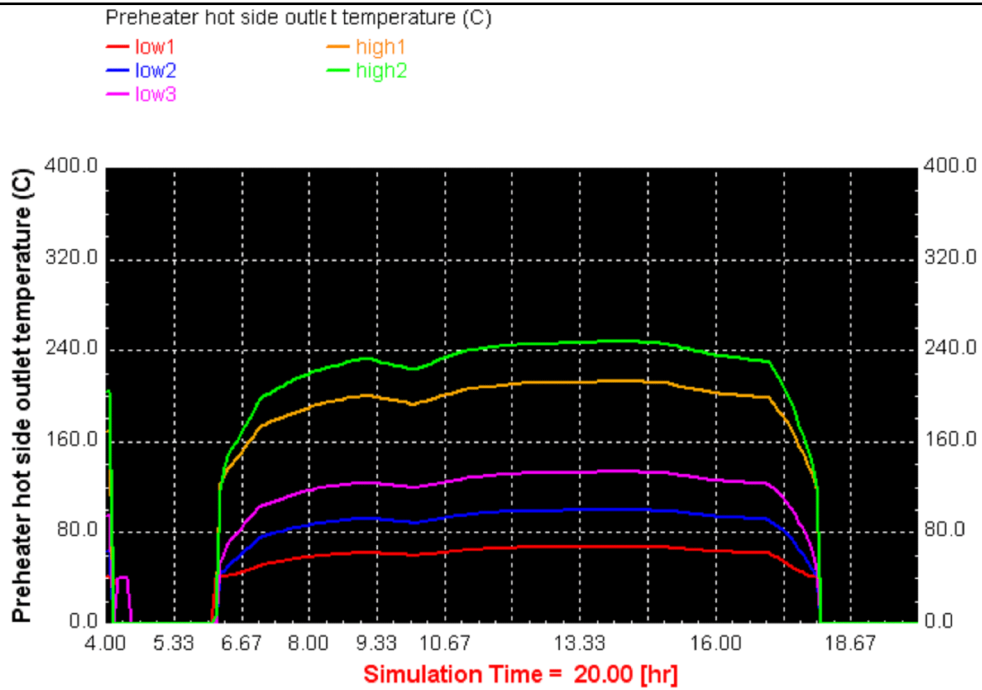
Σχήμα 6.44 Παραγόμενη ισχύς από τις βαθμίδες του στροβίλου.



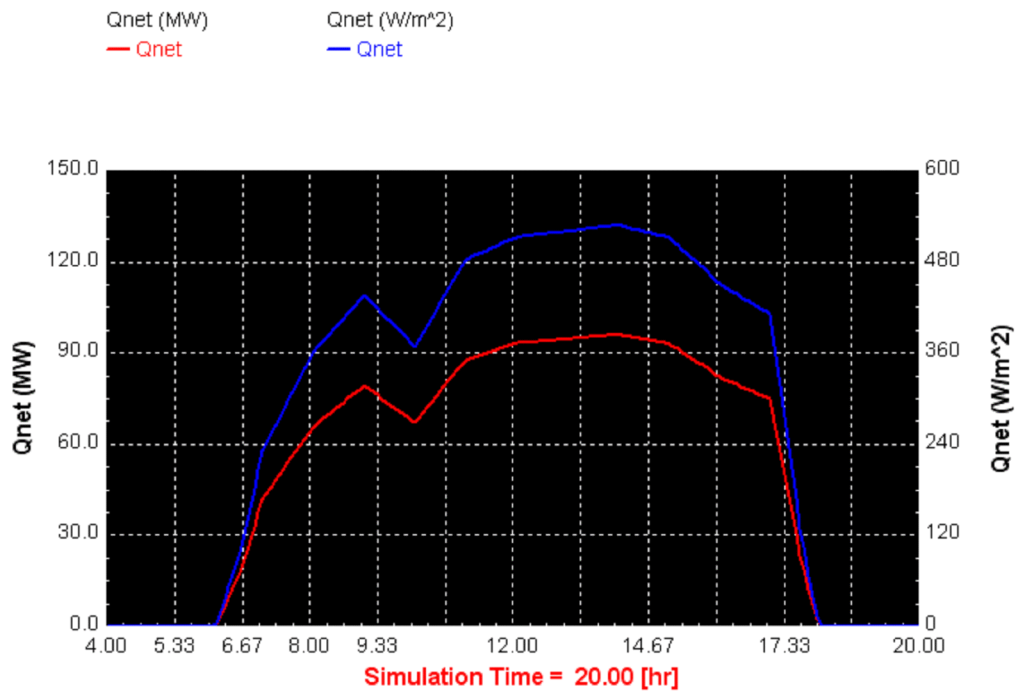
Σχήμα 6.45 Θερμοκρασία και πίεση συμπύκνωσης.



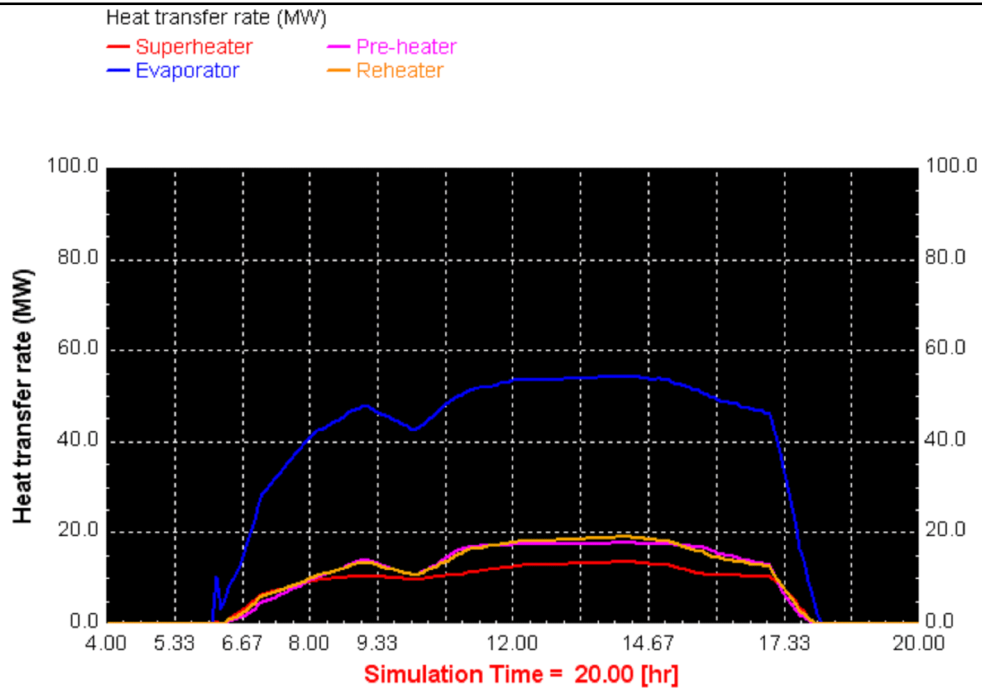
Σχήμα 6.46 Θερμοκρασία εξόδου τροφοδοτικού νερού από την ψυχρή πλευρά των προθερμαντών ατμού.



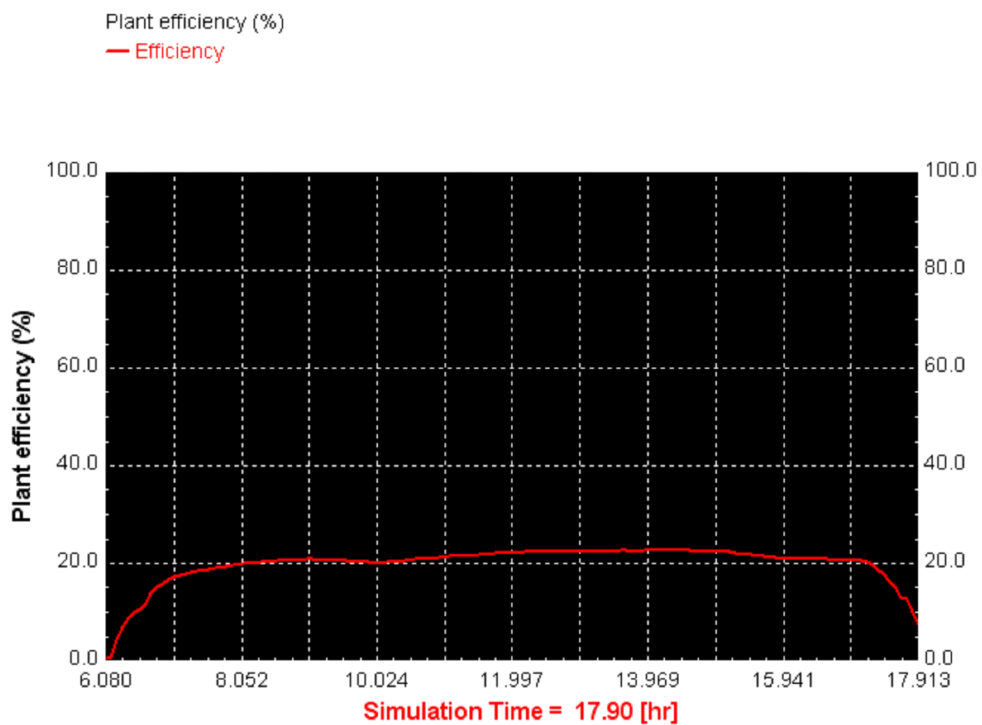
Σχήμα 6.47 Θερμοκρασία εξόδου συμπυκνώματος από την θερμή πλευρά των προθερμαντών ατμού.



Σχήμα 6.48 Καθαρή θερμική ενέργεια που μεταφέρεται στο HTF.

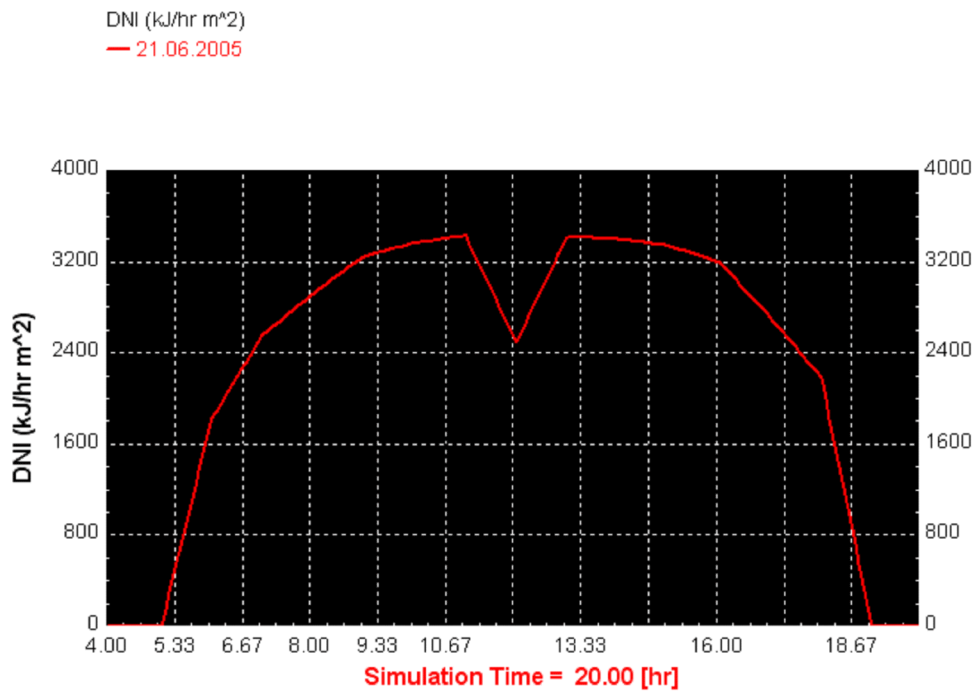


Σχήμα 6.49 Ρυθμός μεταφοράς θερμικής ενέργειας στους εναλλάκτες.

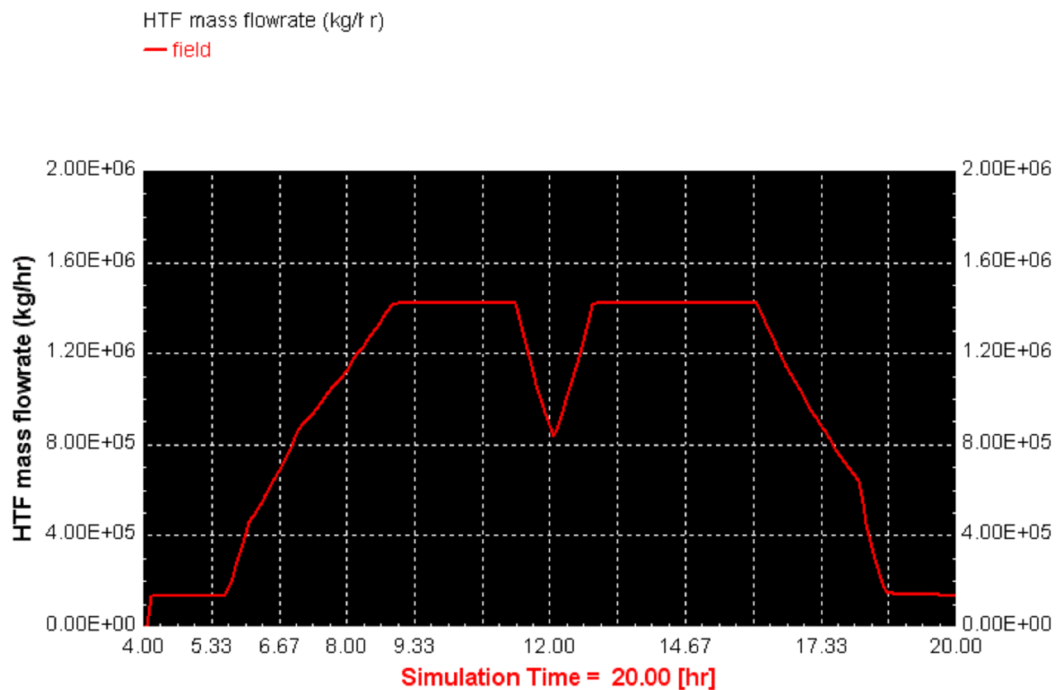


Σχήμα 6.50 Θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

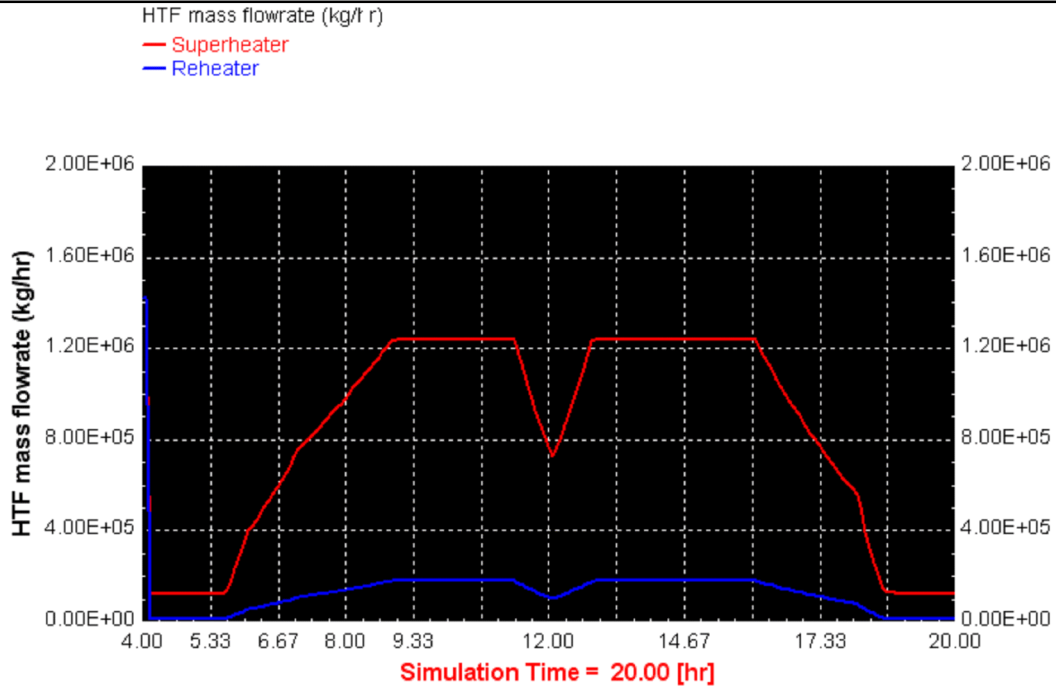
◆ 21.06.2005



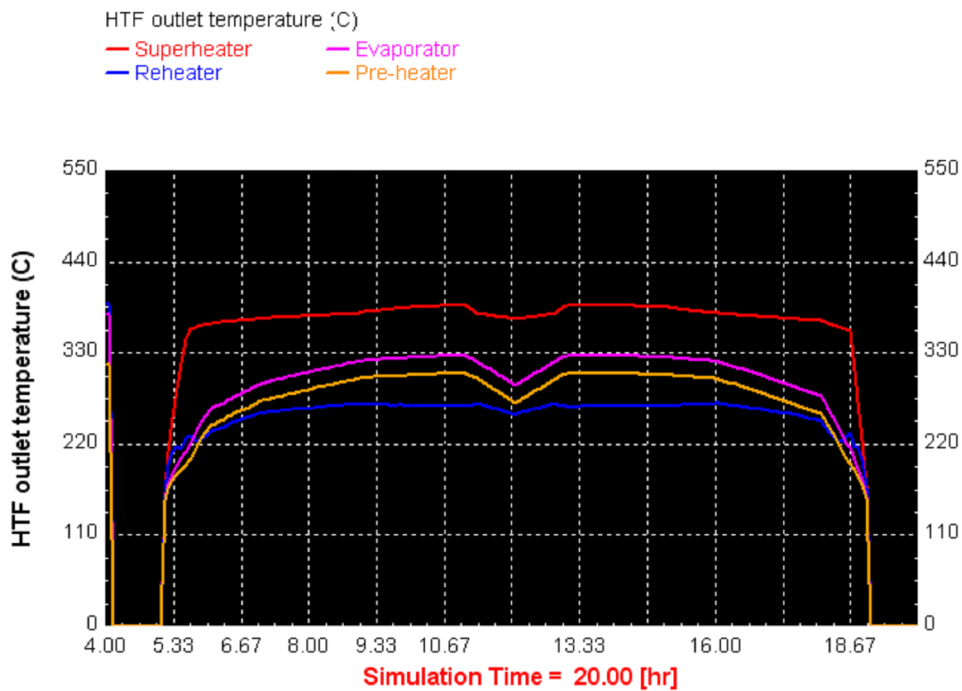
Σχήμα 6.51 Κάθετη άμεσος ακτινοβολία κατά την 21^η .06.2005.



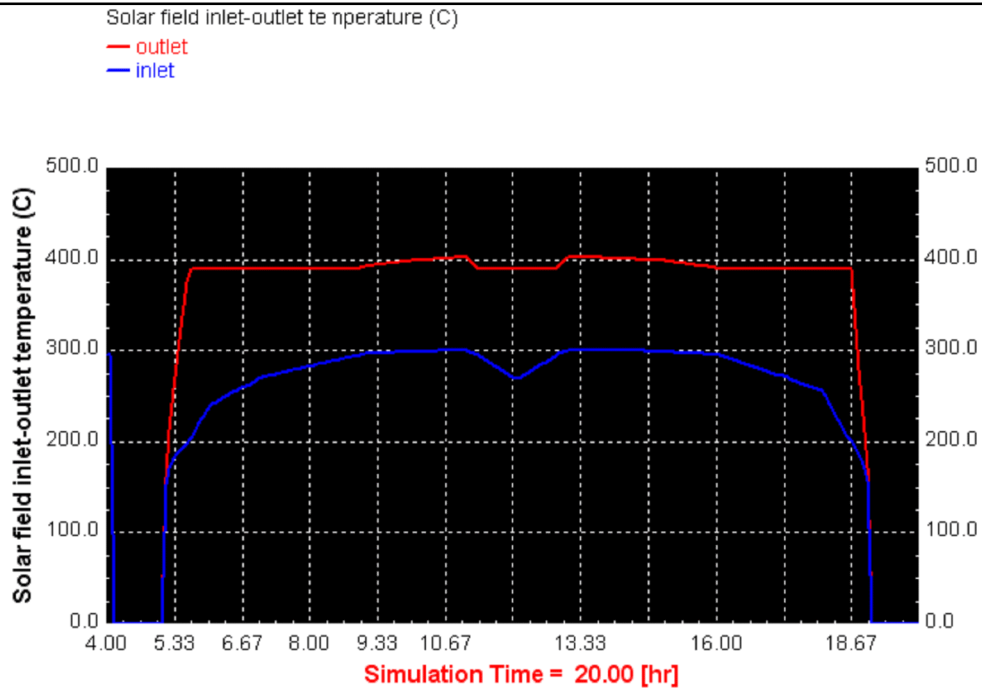
Σχήμα 6.52 Παροχή μάζας HTF στο ηλιακό πεδίο.



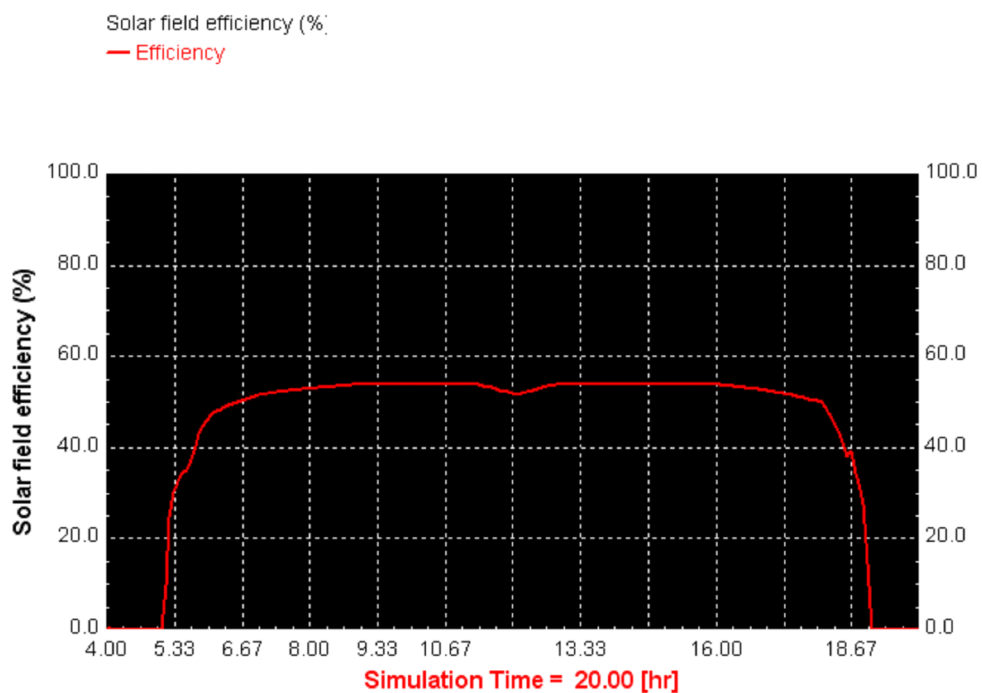
Σχήμα 6.53 Παροχή μάζας HTF σε υπερθερμαντή και αναθερμαντή.



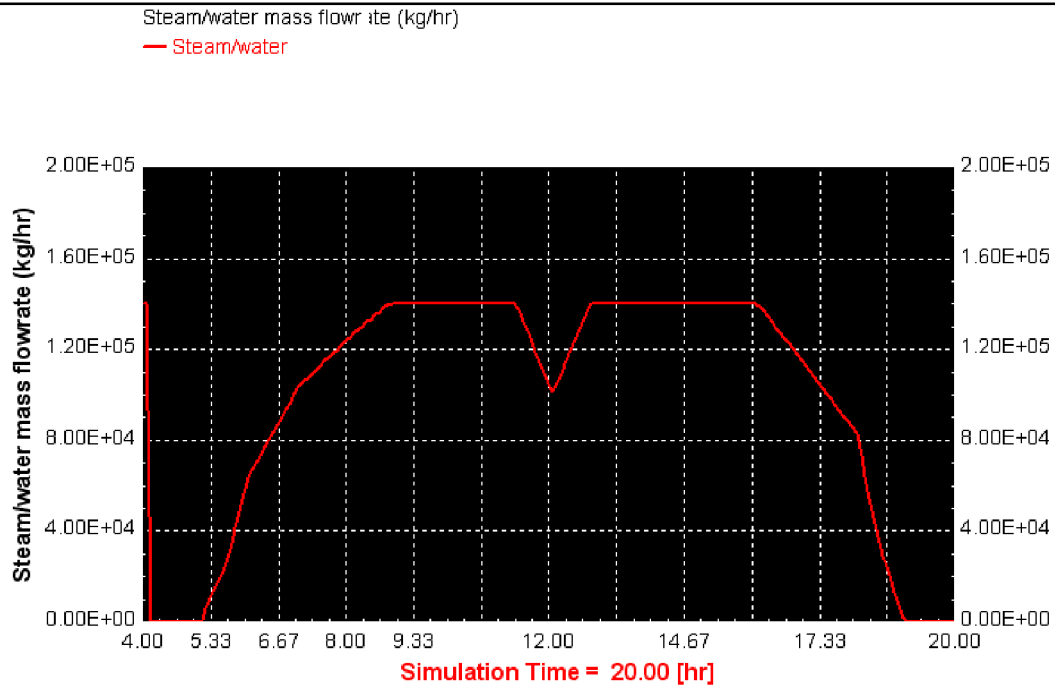
Σχήμα 6.54 Θερμοκρασία εξόδου HTF από τους εναλλάκτες θερμότητας.



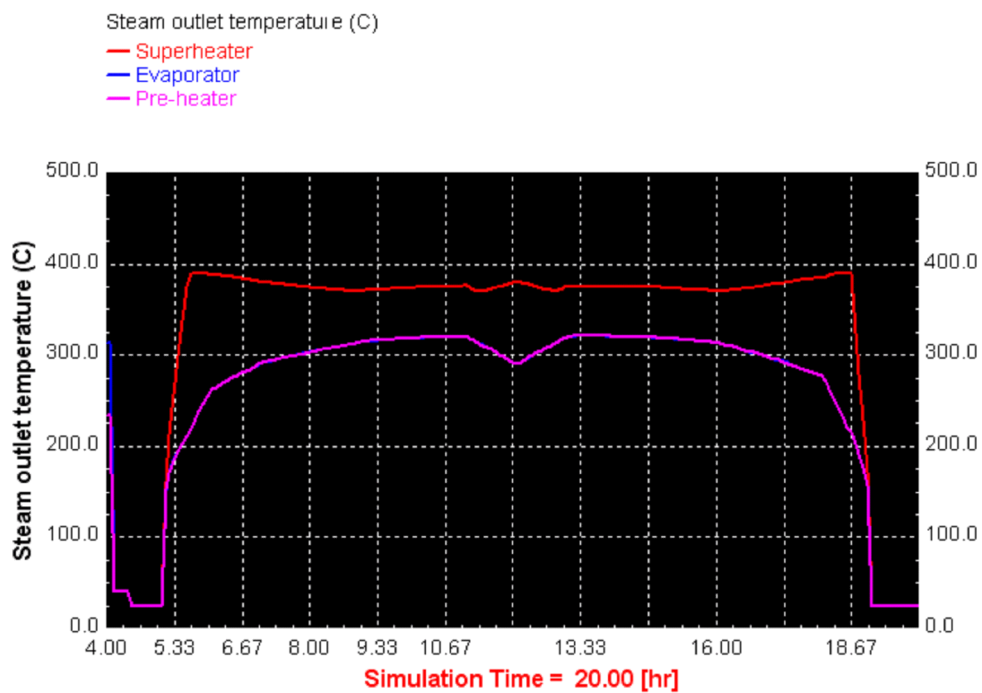
Σχήμα 6.55 Θερμοκρασία εισόδου-εξόδου HTF από το ηλιακό πεδίο.



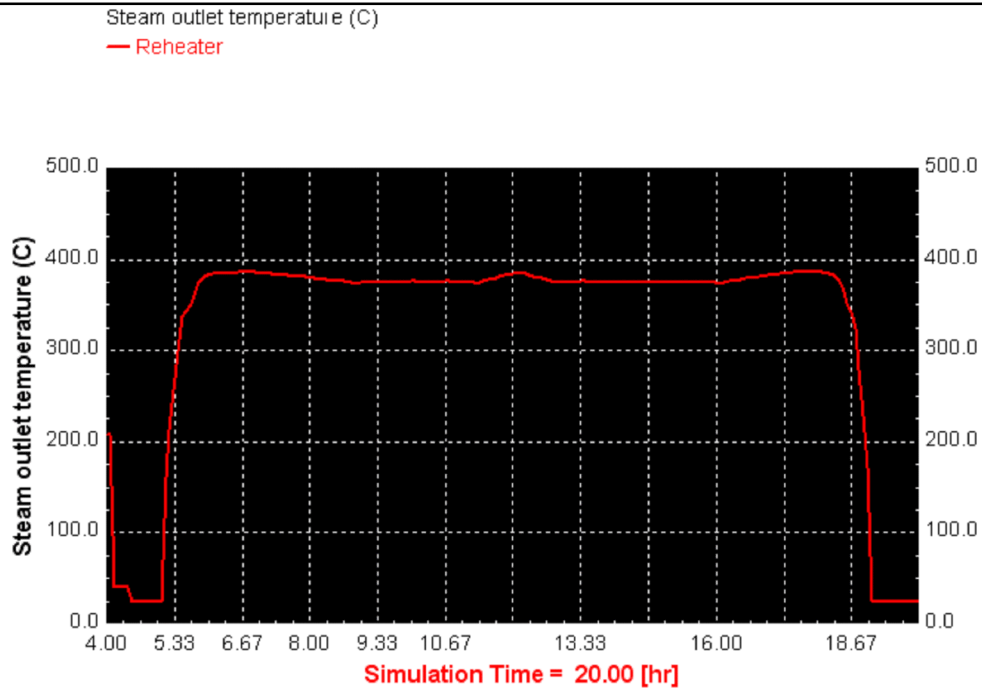
Σχήμα 6.56 Απόδοση ηλιακού πεδίου.



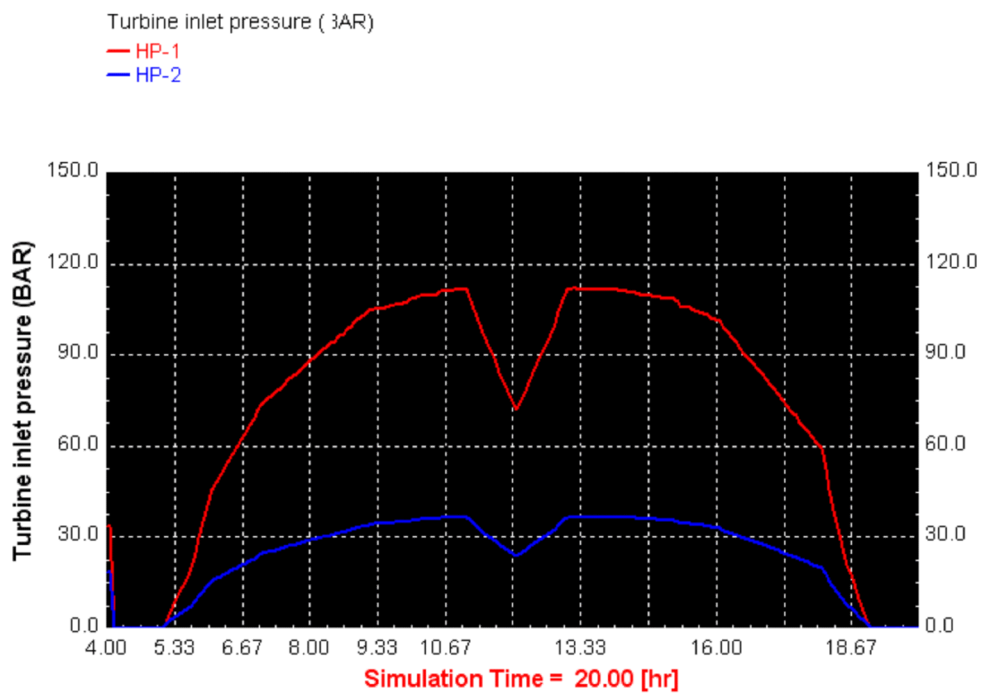
Σχήμα 6.57 Παροχή μάζας νερού/ατμού στο κύκλωμα παραγωγής έργου.



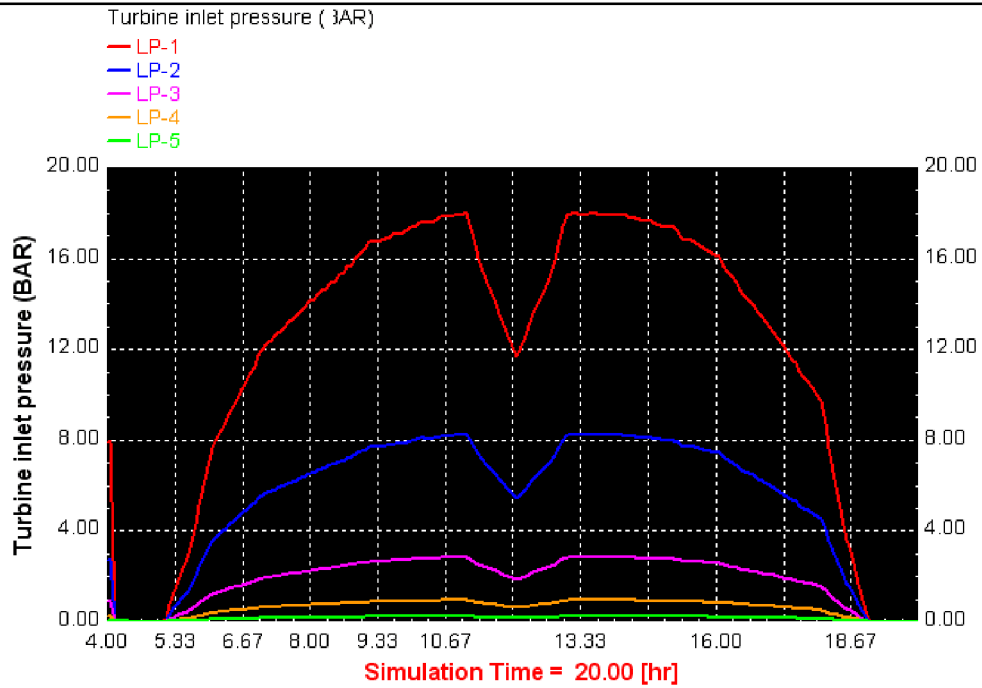
Σχήμα 6.58 Θερμοκρασία εξόδου ατμού από τους εναλλάκτες θερμότητας.



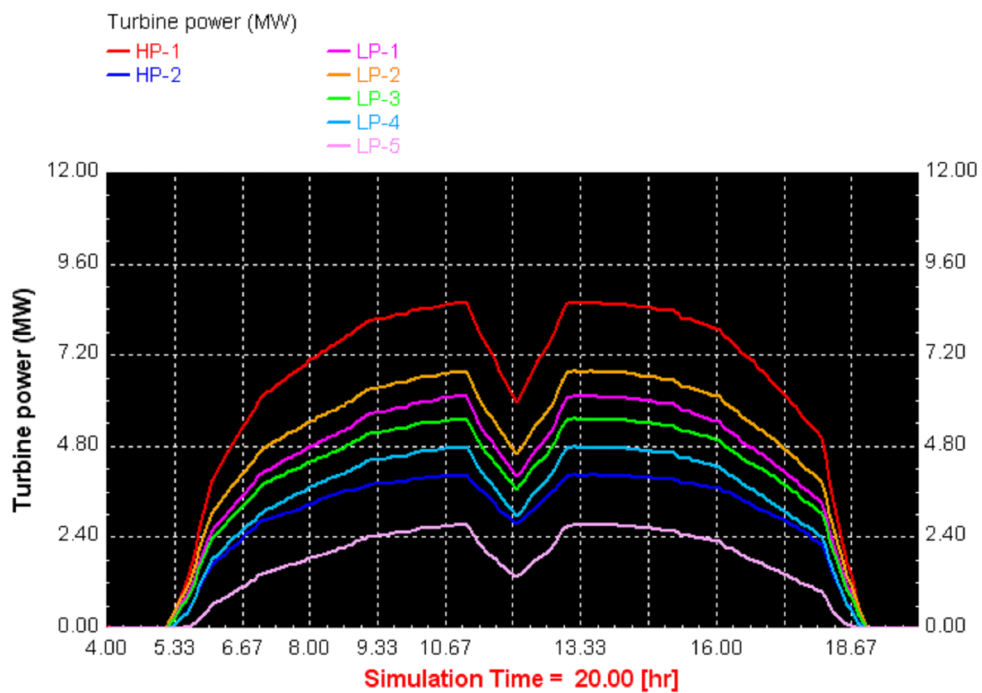
Σχήμα 6.59 Θερμοκρασία εξόδου ατμού από τον αναθερμαντή.



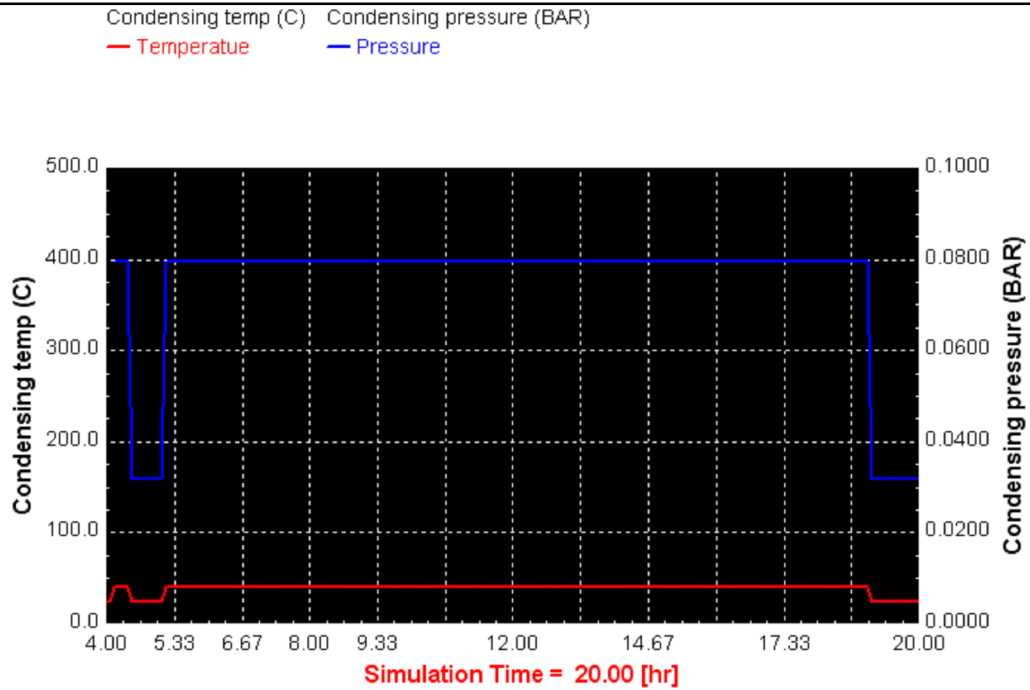
Σχήμα 6.60 Πίεση εισόδου στις βαθμίδες υψηλής πίεσης του στροβίλου.



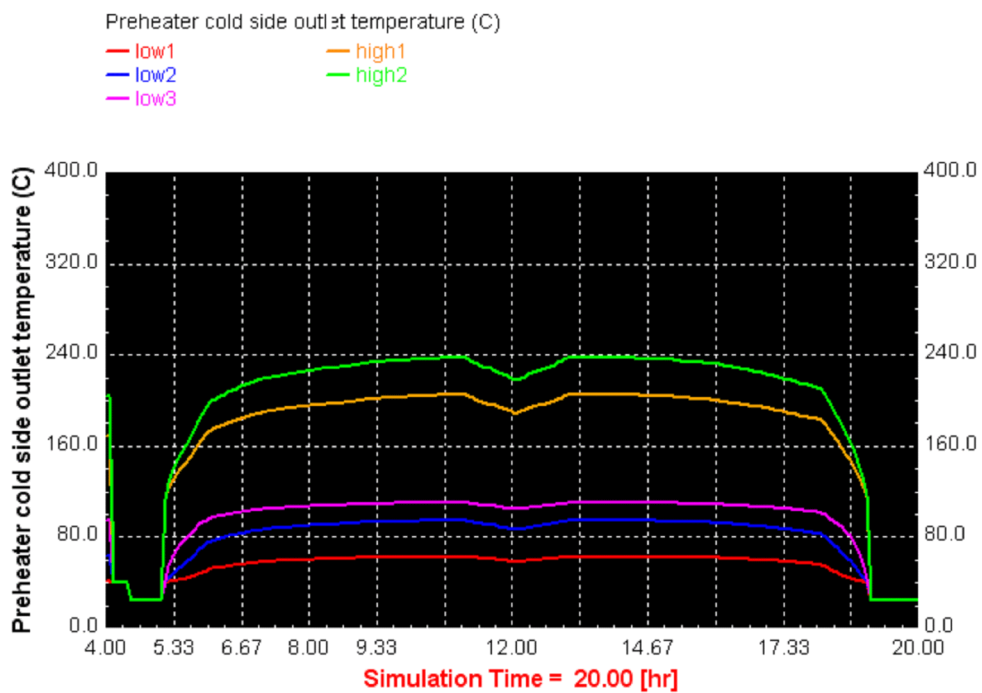
Σχήμα 6.61 Πίεση εισόδου στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης του στροβίλου.



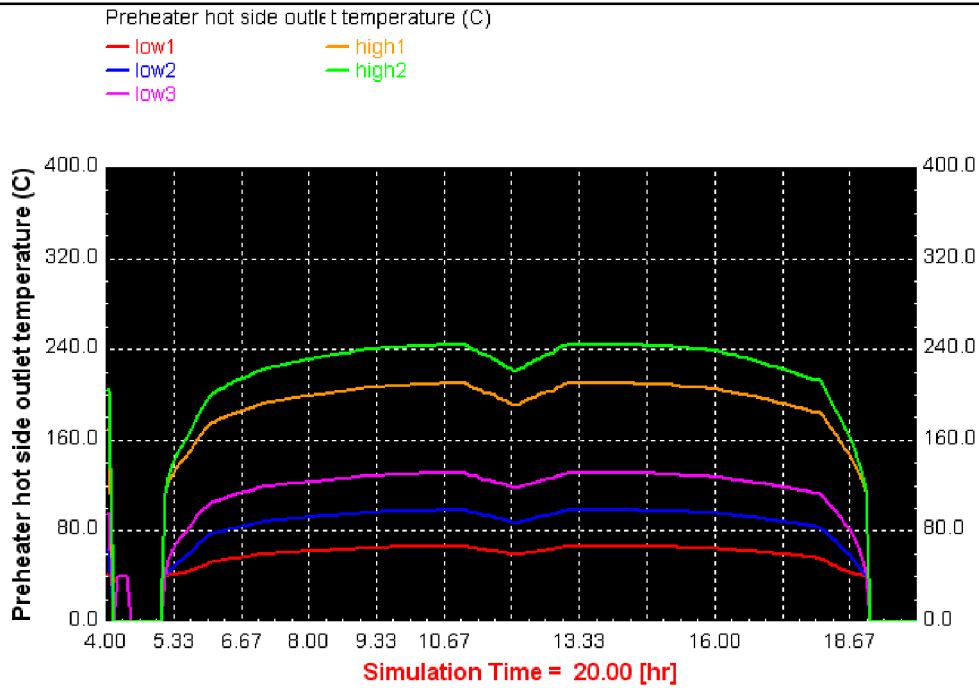
Σχήμα 6.62 Παραγόμενη ισχύς από τις βαθμίδες του στροβίλου.



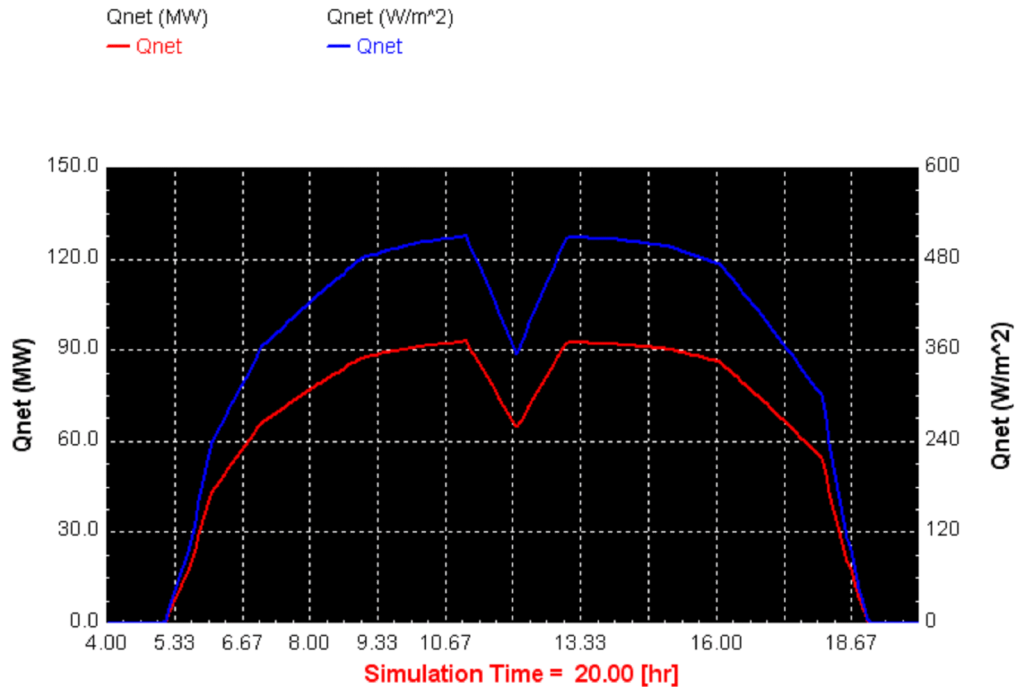
Σχήμα 6.63 Θερμοκρασία και πίεση συμπύκνωσης.



Σχήμα 6.64 Θερμοκρασία εξόδου τροφοδοτικού νερού από την ψυχρή πλευρά των προθερμαντών ατμού.

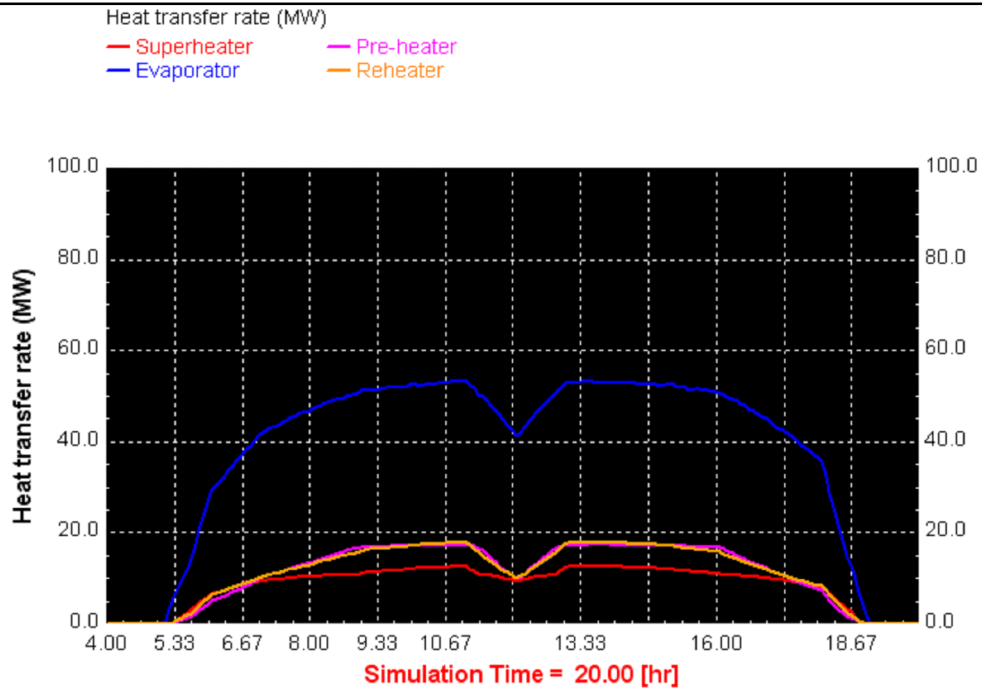


Σχήμα 6.65 Θερμοκρασία εξόδου συμπυκνώματος από την θερμή πλευρά των προθερμαντών ατμού.

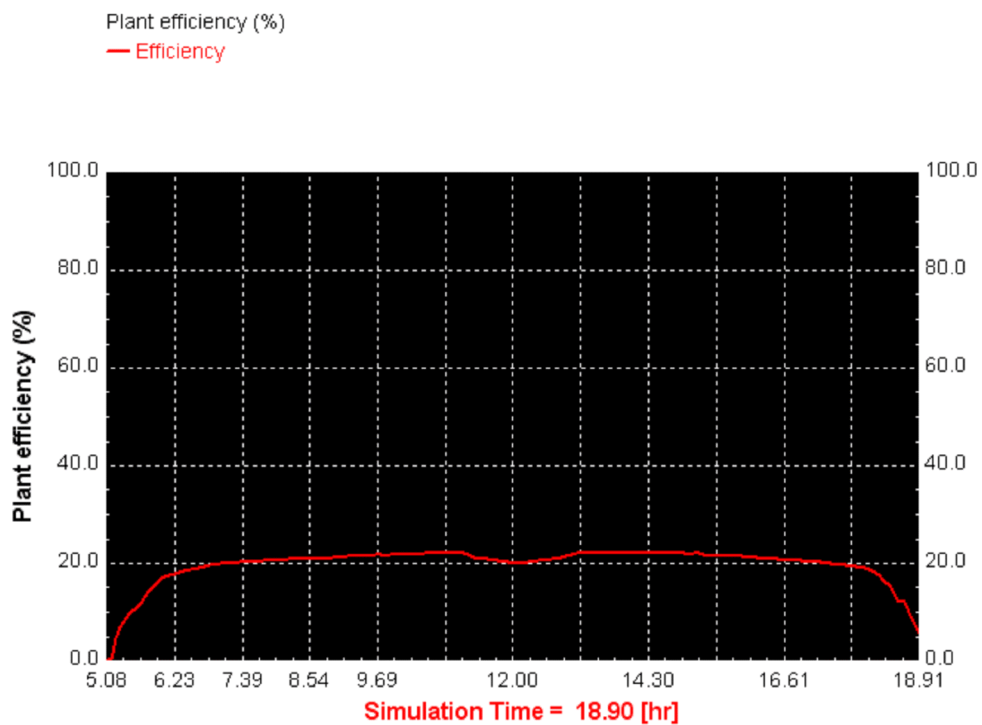


Σχήμα 6.66 Καθαρή θερμική ενέργεια που μεταφέρεται στο HTF.

Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.



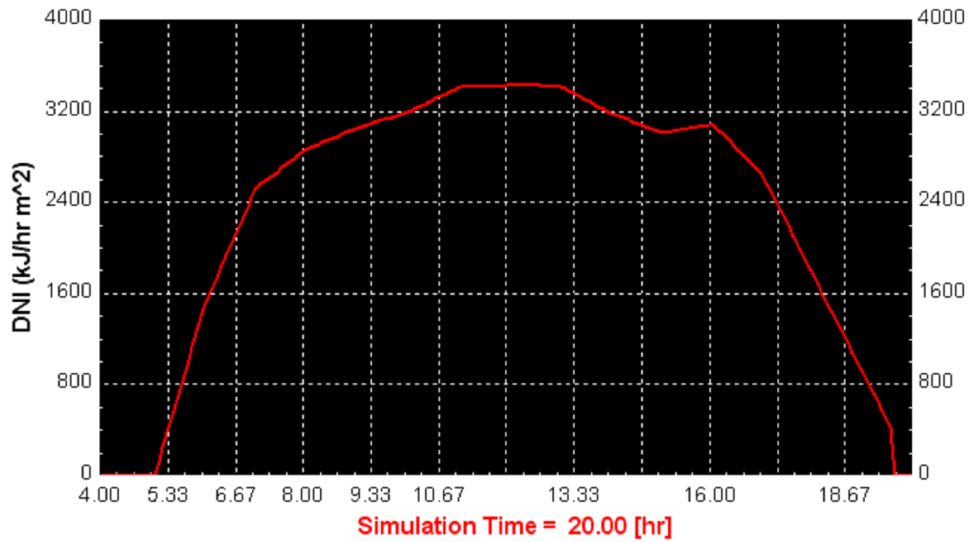
Σχήμα 6.67 Ρυθμός μεταφοράς θερμικής ενέργειας στους εναλλάκτες.



Σχήμα 6.68 Θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

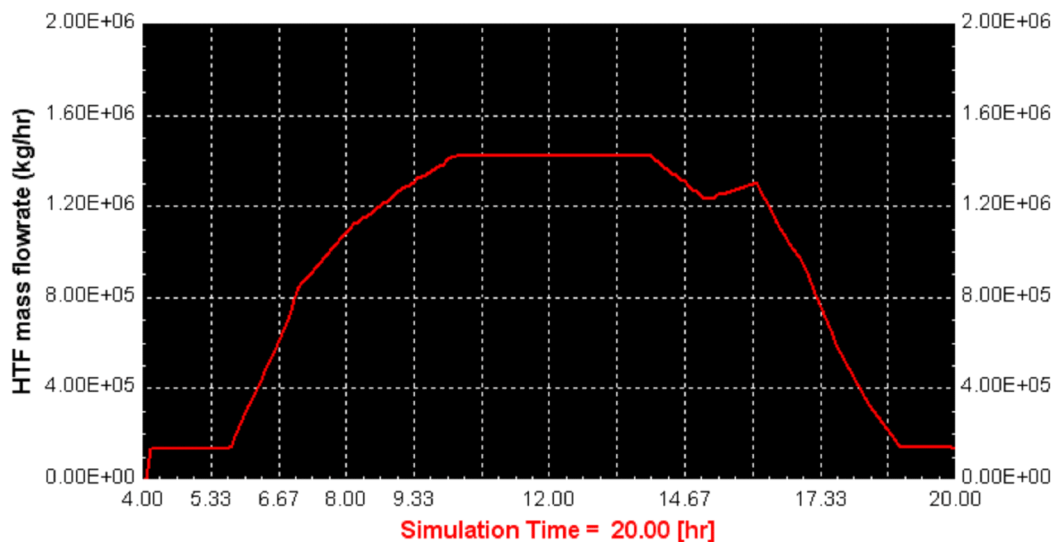
◆ 17.07.2005

DNI (kJ/hr m²)
— 17.07.2005

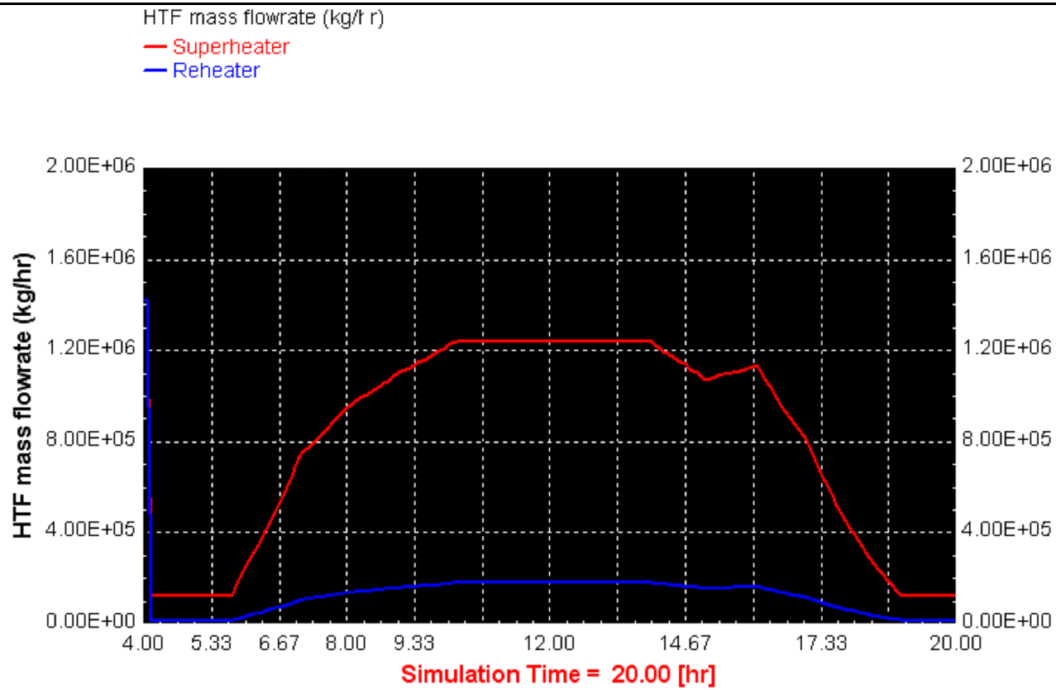


Σχήμα 6.69 Κάθετη άμεσος ακτινοβολία κατά την 17^η .07.2005.

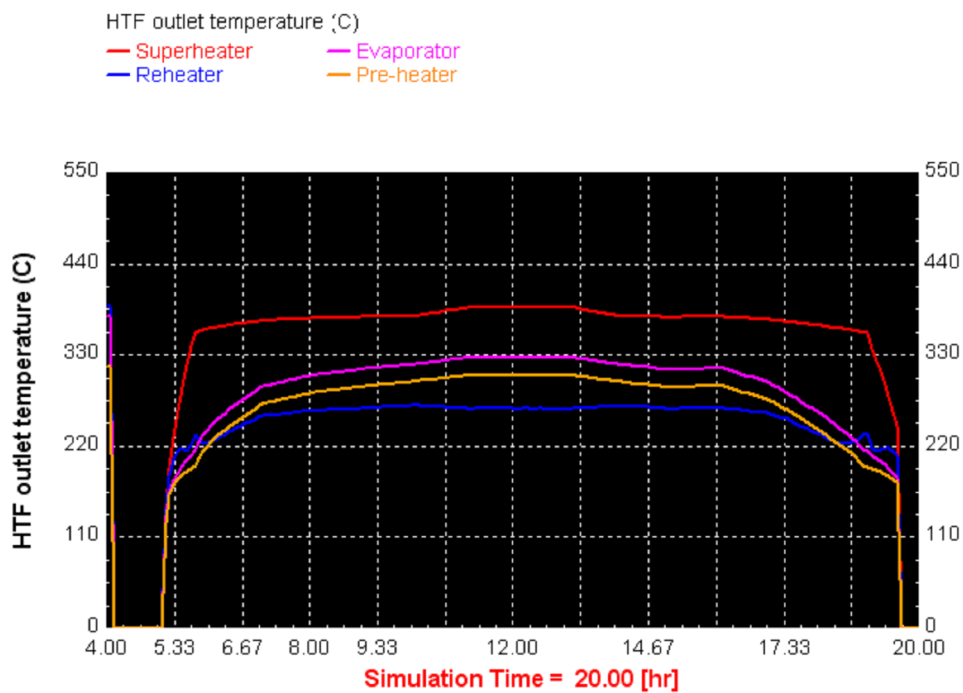
HTF mass flowrate (kg/t r)
— field



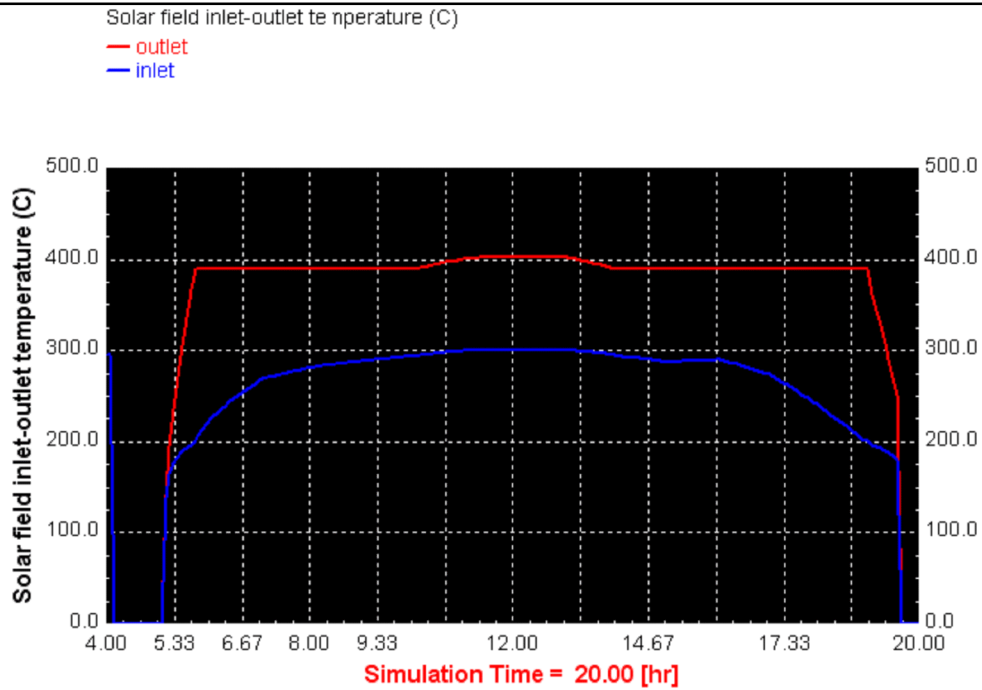
Σχήμα 6.70 Παροχή μάζας HTF στο ηλιακό πεδίο.



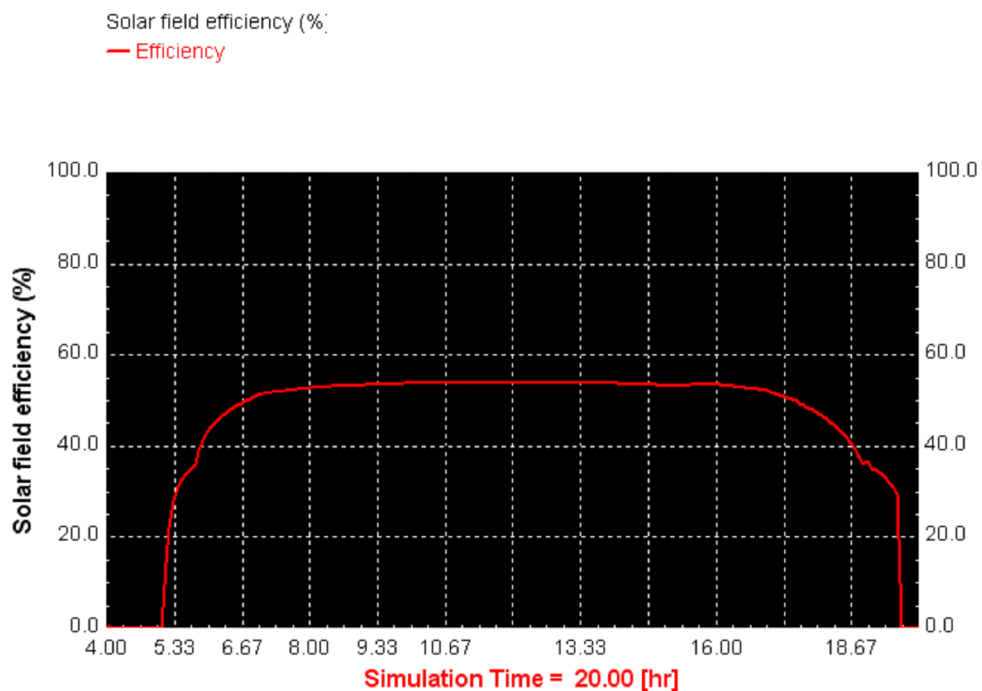
Σχήμα 6.71 Παροχή μάζας HTF σε υπερθερμαντή και αναθερμαντή.



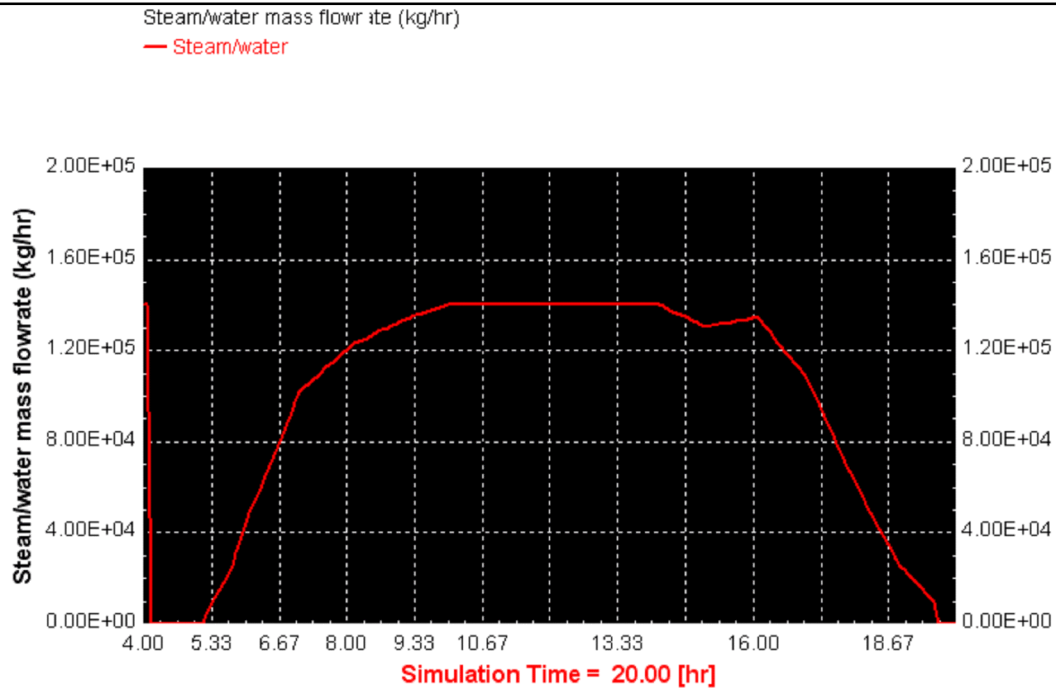
Σχήμα 6.72 Θερμοκρασία εξόδου HTF από τους εναλλάκτες θερμότητας



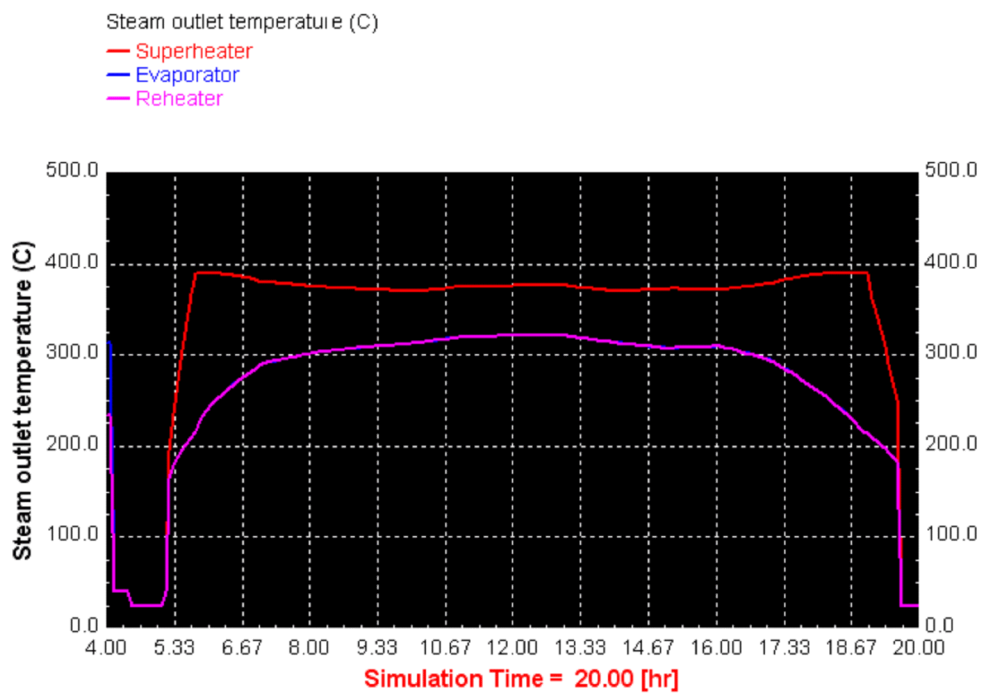
Σχήμα 6.73 Θερμοκρασία εισόδου-εξόδου HTF από το ηλιακό πεδίο.



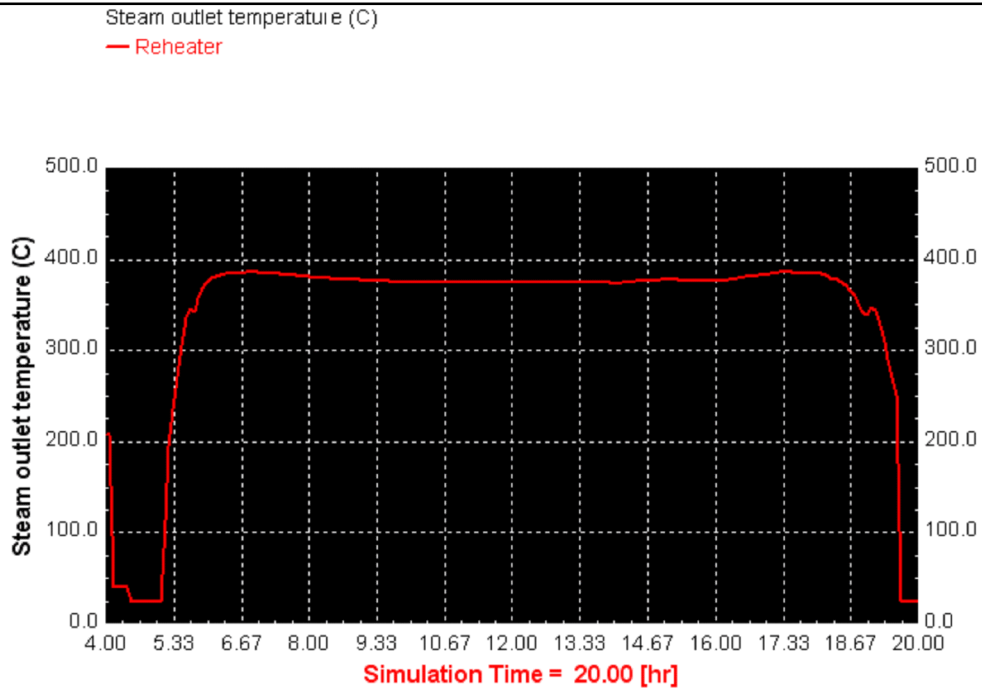
Σχήμα 6.74 Απόδοση ηλιακού πεδίου.



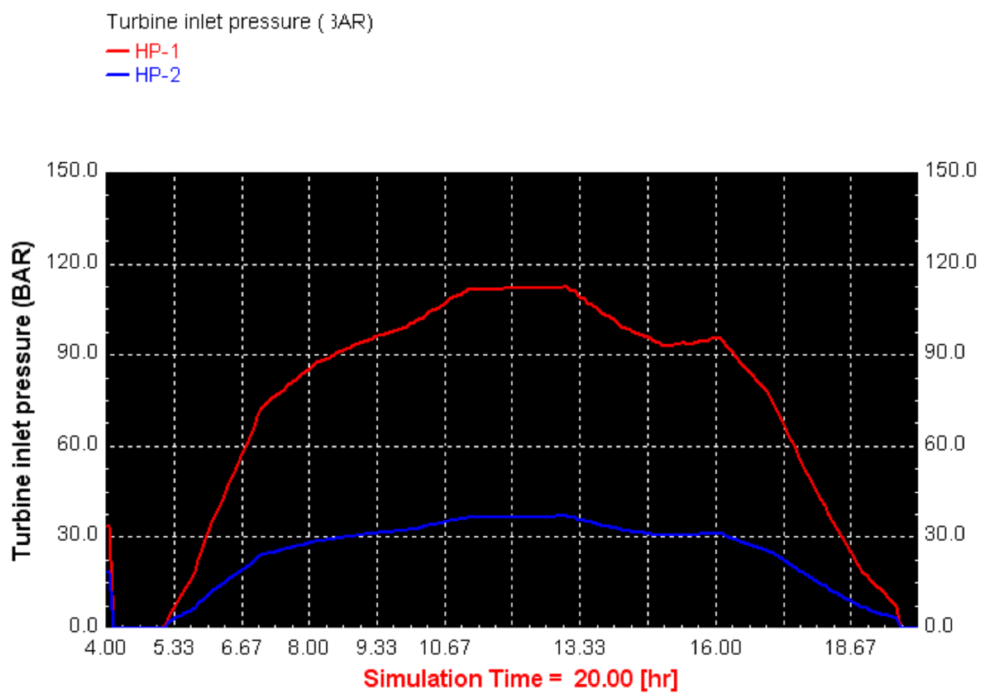
Σχήμα 6.75 Παροχή μάζας νερού/ατμού στο κύκλωμα παραγωγής έργου.



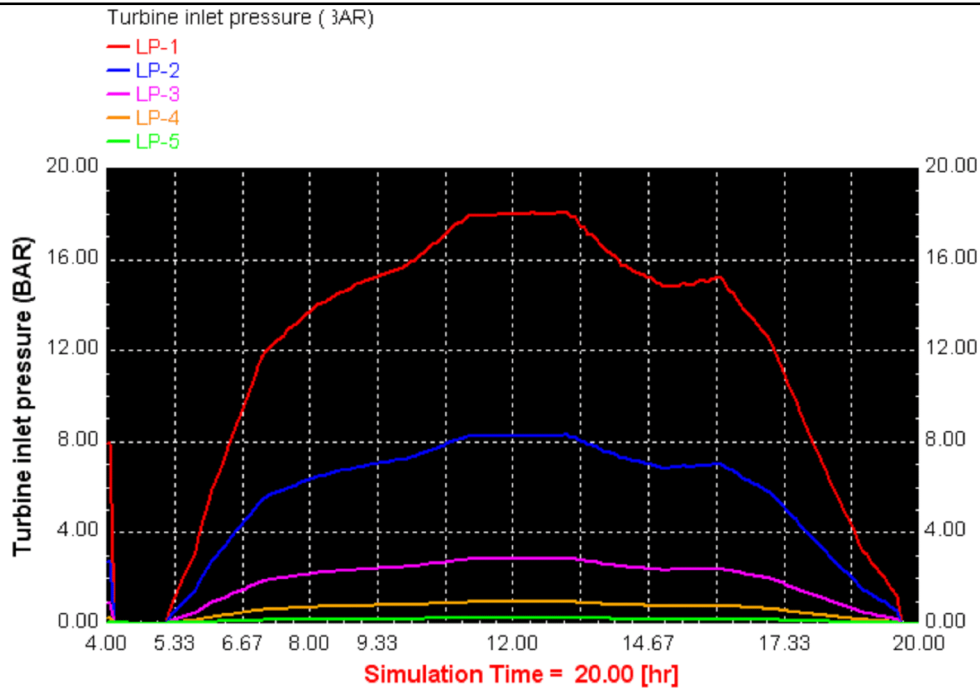
Σχήμα 6.76 Θερμοκρασία εξόδου ατμού από τους εναλλάκτες θερμότητας.



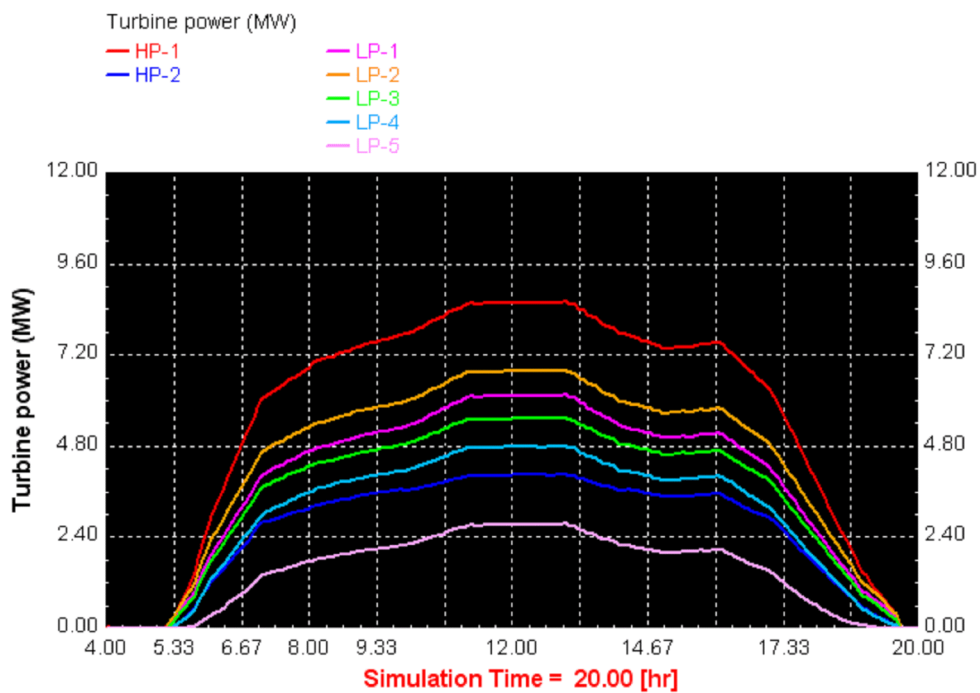
Σχήμα 6.77 Θερμοκρασία εξόδου ατμού από τον αναθερμαντή.



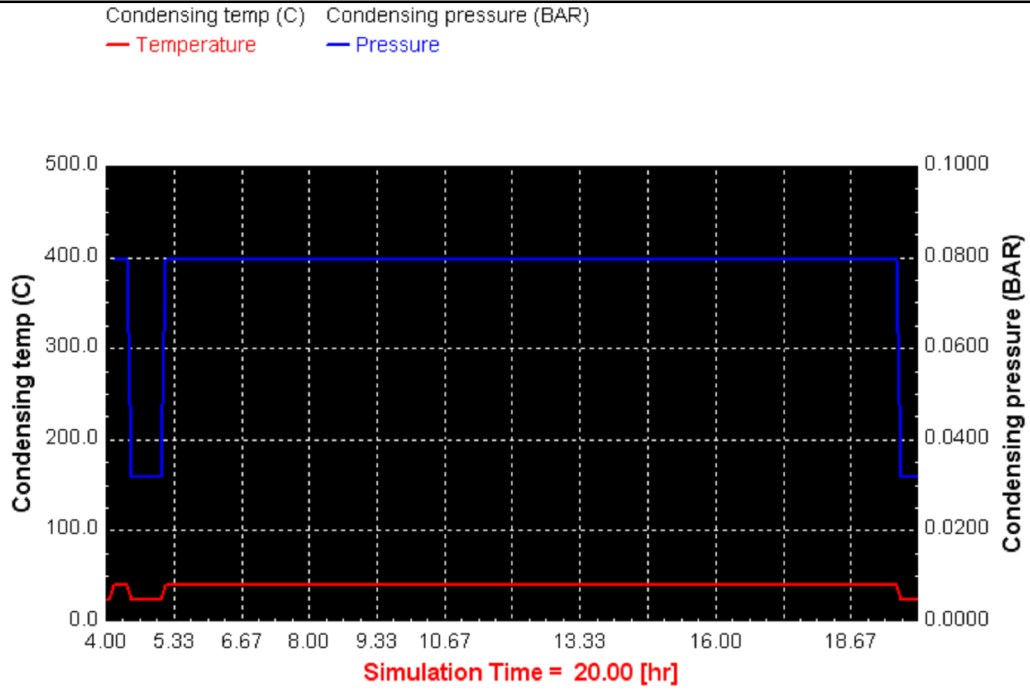
Σχήμα 6.78 Πίεση εισόδου στις βαθμίδες υψηλής πίεσης του στροβίλου.



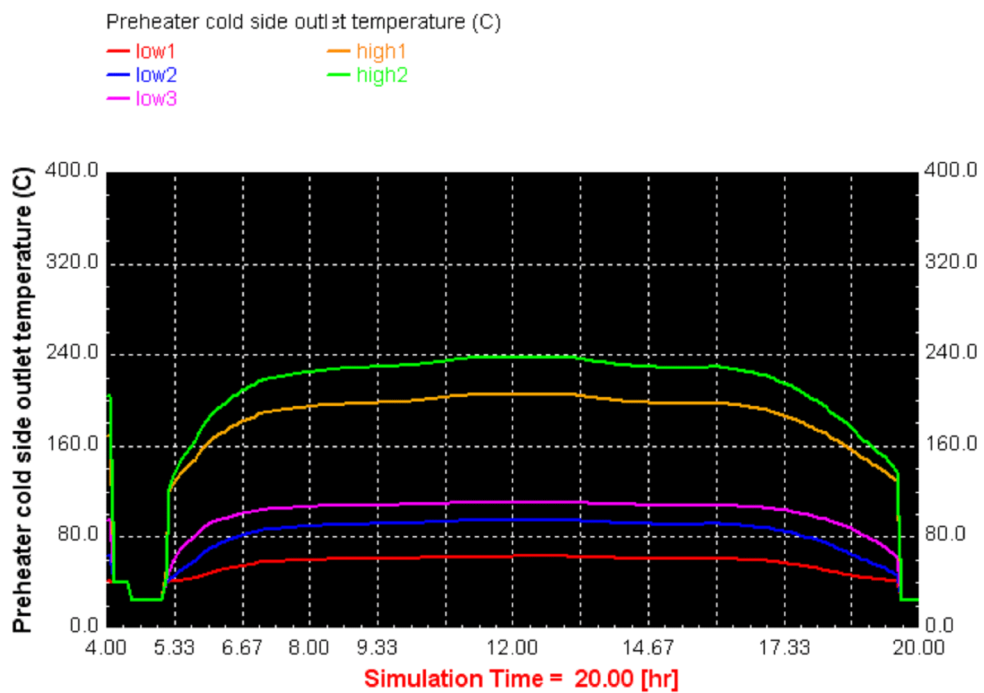
Σχήμα 6.79 Πίεση εισόδου στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης του στροβίλου.



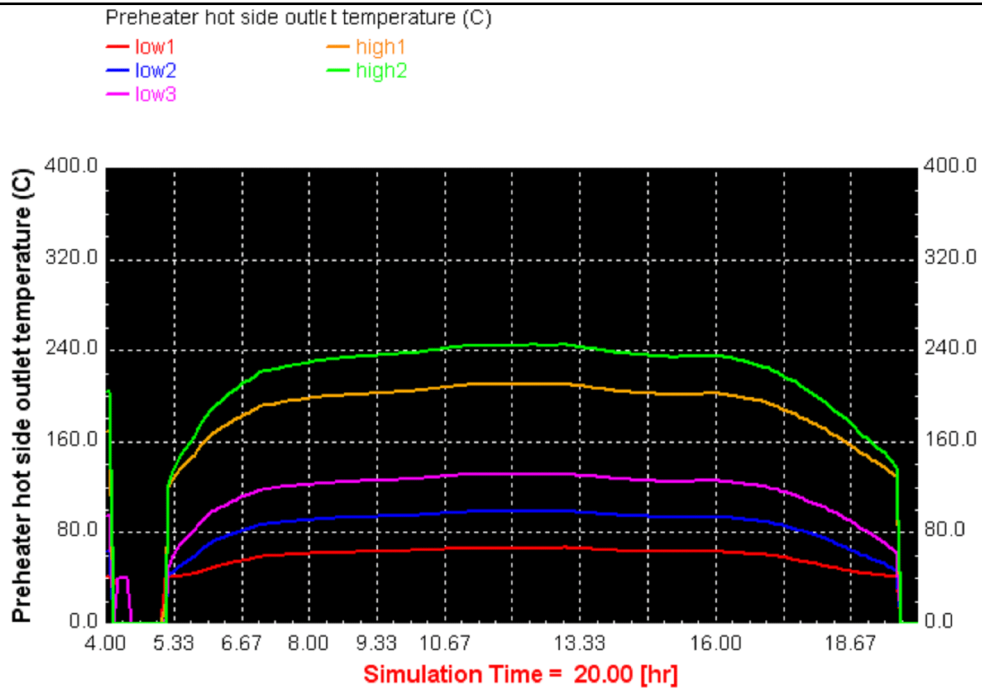
Σχήμα 6.80 Παραγόμενη ισχύς από τις βαθμίδες του στροβίλου.



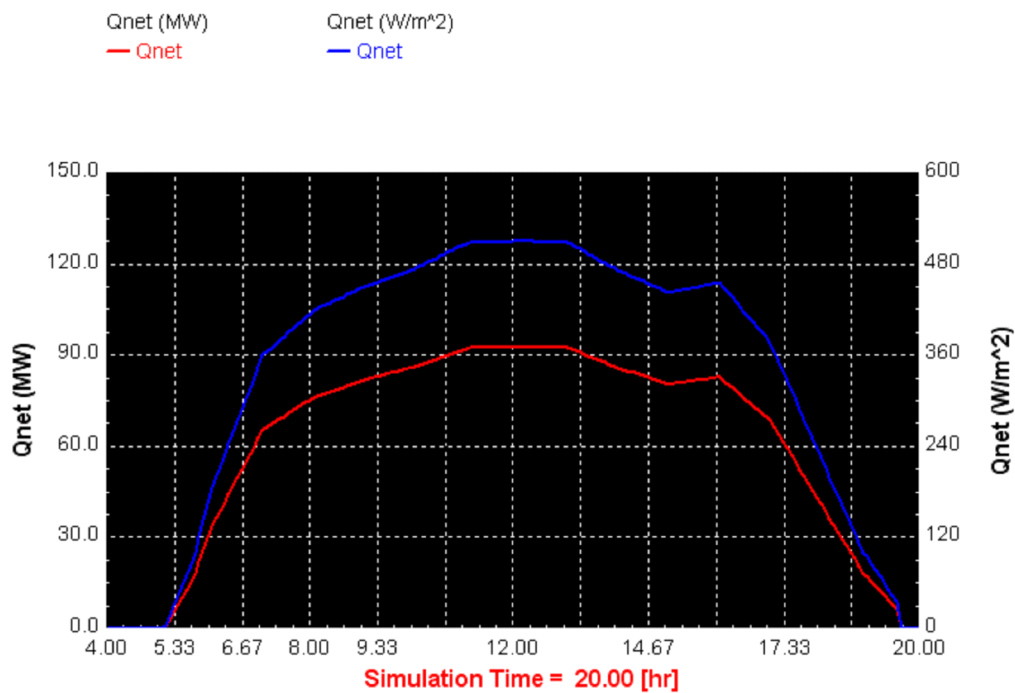
Σχήμα 6.81 Θερμοκρασία και πίεση συμπύκνωσης.



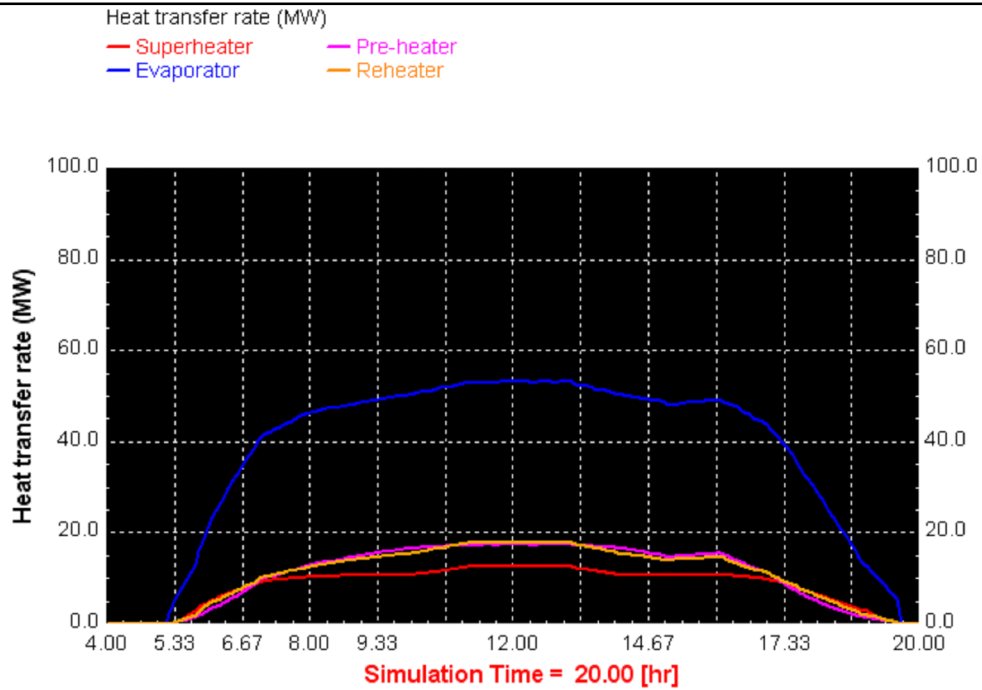
Σχήμα 6.82 Θερμοκρασία εξόδου τροφοδοτικού νερού από την ψυχρή πλευρά των προθερμαντών ατμού.



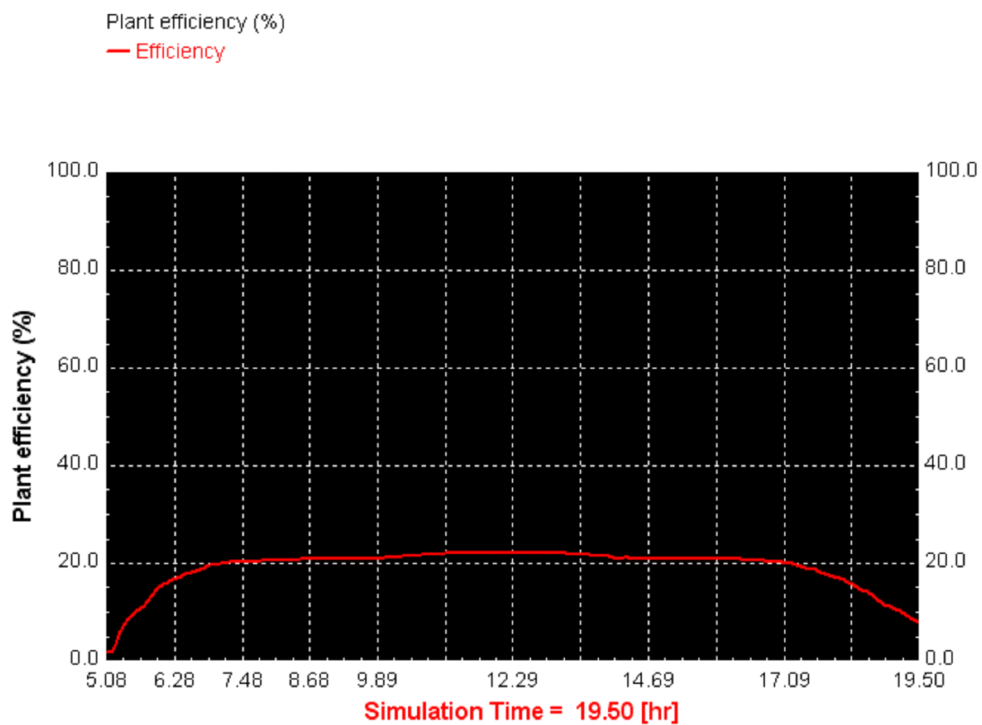
Σχήμα 6.83 Θερμοκρασία εξόδου συμπυκνώματος από την θερμή πλευρά των προθερμαντών ατμού.



Σχήμα 6.84 Καθαρή θερμική ενέργεια που μεταφέρεται στο HTF.



Σχήμα 6.85 Ρυθμός μεταφοράς θερμικής ενέργειας στους εναλλάκτες.



Σχήμα 6.86 Θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

6.9 Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα.

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την προσομοίωση της λειτουργίας του σταθμού SEGS VI, οδηγούν στην εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων που αφορούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του θερμικού σταθμού και την εξάρτησή τους από τις παραμέτρους σχεδίασης των συνιστωσών που τον απαρτίζουν και από τις τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

➤ Ο κόμβος Kramer αποτελεί ιδανική τοποθεσία για την εγκατάσταση του ηλιακού θερμικού σταθμού, καθώς η μέγιστη ημερήσια κάθετη άμεσος ακτινοβολία διαυγούς ημέρας διατηρεί σταθερές τιμές που κυμαίνονται από 950 έως 1000 W/m² καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Επιπλέον, η μέση ημερήσια κάθετος άμεση ακτινοβολία έχει τιμή 310 W/m², μια από τις υψηλότερες στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης επιλέγονται τέσσερις ημέρες του έτους 2005 κατά τις οποίες επικρατούν διαφορετικές συνθήκες ηλιοφάνειας. Κατά την 14^η Ιανουαρίου, οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα με μέγιστη τιμή τα 634 W/m² το μεσημέρι, χωρίς να παρουσιάζονται ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Κατά την 25^η Μαρτίου, παρατηρούνται υψηλές τιμές της κάθετης αμέσου ακτινοβολίας, με μια έντονη διακύμανση στις 10⁰⁰, όπου και παρατηρείται μείωση της ηλιοφάνειας. Ομοίως, κατά την 21^η Ιουνίου παρατηρούνται υψηλές τιμές ηλιοφάνειας, με εξαίρεση το μεσημέρι όπου έχουμε μια παροδική, αλλά πολύ έντονη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τέλος, κατά την 17^η Ιουλίου παρατηρούνται υψηλές τιμές της καθέτου άμεσης ακτινοβολίας, χωρίς διακύμανση, με αποτέλεσμα η λειτουργία του σταθμού να πλησιάζει τις συνθήκες αναφοράς.

➤ Η παροχή μάζας του μέσου μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τις διακυμάνσεις της καθέτου άμεσης ακτινοβολίας, γεγονός που αποδεικνύεται και από τη σχέση (6.1). Δεδομένου ότι η θερμοκρασία εξόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας από το ηλιακό πεδίο θα πρέπει να κυμαίνεται εντός πολύ περιορισμένων ορίων, η παροχή ρυθμίζεται από το μοντέλο έτσι ώστε όλη η ποσότητα εργαζόμενου μέσου που διέρχεται από το ηλιακό πεδίο να θερμαίνεται έως τους 390,56°C, η οποία είναι η ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία εξόδου από το πεδίο. Κατά τις χρονικές περιόδους της ημέρας όπου παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, η παροχή του μέσου μεταφοράς θερμότητας αυξάνει έως τη μέγιστη τιμή, αφ' ενός για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή παραγωγή έργου από την εγκατάσταση και αφ' ετέρου για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του μέσου μεταφοράς θερμότητας, καθώς το Therminol VP-1 έχει του 420°C ως ανώτατο όριο θερμοκρασίας λειτουργίας.

Ως ελάχιστη παροχή (νυχτερινή παροχή) του μέσου μεταφοράς θερμότητας ορίζεται το 10% της μέγιστης παροχής, δηλαδή 142700 kg/hr.

➤ Η παροχή μάζας του μέσου μεταφοράς θερμότητας διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους παροχές προς τον υπερθερμαντή και τον αναθερμαντή, με την

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

παροχή προς τον αναθερμαντή να αποτελεί περίπου το 13% της συνολικής παροχής. Η αναλογία παροχών ανάμεσα στα δύο ρεύματα αποτελεί παράμετρο σχεδίασης του μοντέλου και η τιμή της τίθεται λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η παροχή που διέρχεται από τους τρεις εναλλάκτες θερμότητας που απαρτίζουν τον σύστημα ατμοποίησης (προθερμαντής, ατμοποιητής και υπερθερμαντής) είναι υπεύθυνη για τη μετάβαση κορεσμένου νερού σε υπέρθερμο ατμό, ενώ η παροχή που διέρχεται από τον αναθερμαντή υπερθερμαίνει κορεσμένο ατμό στα ίδια θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά που επικρατούν και στην έξοδο του υπερθερμαντή. Οι επιμέρους παροχές του μέσου μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζουν την ίδια εξάρτηση σε σχέση με τις τιμές της κάθετης αμέσου ακτινοβολίας, όπως συμβαίνει αντιστοίχα και για τη συνολική παροχή. Ως νυχτερινή παροχή για τα δύο ρεύματα ορίζεται κι εδώ το 10% της μέγιστης παροχής, σε αντιστοιχία με ότι συμβαίνει για τη συνολική παροχή.

➤ Η θερμοκρασία εξόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας από τον κάθε εναλλάκτη του συστήματος ατμοποίησης και από τον αναθερμαντή συσχετίζεται άμεσα με τον απαιτούμενο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνει χώρα στον εκάστοτε εναλλάκτη. Έτσι λοιπόν παρατηρούμε, όσον αφορά το σύστημα ατμοποίησης, ότι το μέσο μεταφοράς θερμότητας υφίσταται τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή πτώση στον ατμοποιητή, δεδομένου ότι εκεί απαιτείται ο υψηλότερος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας για την ατμοποίηση του κορεσμένου νερού. Ο αναθερμαντής αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση, καθώς διαρρέεται από πολύ μικρή παροχή μέσου μεταφοράς θερμότητας (περίπου το 13% της συνολικής), ενώ στην ψυχρή πλευρά του πρέπει να διαχειριστεί ολόκληρη την ποσότητα νερού/ατμού. Γι αυτό, παρότι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι ίδιος με τον προθερμαντή, παρατηρείται πολύ μεγαλύτερη πτώση στη θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας.

Κατά τα φαινόμενα μεταβατικής λειτουργίας (διακυμάνσεις στην άμεση κάθετο ακτινοβολία), η μεγαλύτερη ευαισθησία παρουσιάζεται στη θερμοκρασιακή πτώση που λαμβάνει χώρα στον ατμοποιητή, ενώ στους υπόλοιπους εναλλάκτες διατηρείται σε περίπου σταθερά επίπεδα.

➤ Η ανύψωση της θερμοκρασίας του μέσου μεταφοράς θερμότητας κατά τη διέλευσή του από το ηλιακό πεδίο, σε λειτουργία μόνιμης κατάστασης, είναι περίπου 100°C, τιμή η οποία είναι χαρακτηριστική για την τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων. Εάν απαιτείται μεγαλύτερη θερμοκρασιακή ανύψωση, η μόνη διαθέσιμη τεχνολογική λύση είναι αυτή του συστήματος κεντρικού δέκτη.

Η θερμοκρασία εξόδου από το ηλιακό πεδίο κυμαίνεται από 390,6°C έως 410°C, εύρος που εμπίπτει στην περιοχή βέλτιστης λειτουργίας του Therminol VP-1. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη θέρμανση της ελάχιστης παροχής του μέσου μεταφοράς θερμότητας είναι περίπου 35-40 λεπτά · από το σημείο όπου η θερμοκρασία της παροχής αυτής φθάσει τους 390,6°C, αυξάνεται σταδιακά η παροχή του μέσου μεταφοράς θερμότητας. Παρατηρούμε δηλαδή, ότι ο έλεγχος της παροχής μάζας έχει ως σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας εξόδου από το πεδίο σε σταθερά επίπεδα. Η

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

Θερμοκρασία εισόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας στο ηλιακό πεδίο καθορίζεται από τη θερμοκρασία εξόδου των δύο ρευμάτων, του προθερμαντή και του αναθερμαντή αντίστοιχα. Κατά τις χρονικές περιόδους όπου το ηλιακό πεδίο διαχειρίζεται παροχή μικρότερη της μέγιστης, η θερμοκρασιακή ανύψωση είναι μεγαλύτερη και είναι δυνατόν να προσεγγίσει τους 190°C, δεδομένου ότι δεν παρατηρούνται διακυμάνσεις της άμεσης καθέτου ακτινοβολίας.

➤ Ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού πεδίου, όπως καταδεικνύεται από την εξίσωση (6.2), εξαρτάται από τις τιμές της άμεσης καθέτου ηλιακής ακτινοβολίας και τις θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας από το πεδίο. Η μεγαλύτερη εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου από το πεδίο γίνεται εμφανής από το γεγονός ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται κατά τις μεσημεριανές ώρες όπου παρουσιάζονται επίσης και οι μέγιστες τιμές της άμεσης καθέτου ακτινοβολίας.

Οι τιμές του βαθμού απόδοσης κυμαίνονται από 50-54% και θεωρούνται πολύ ικανοποιητικές για το πεδίο των παραβολικών κατόπτρων. Η διακύμανση του βαθμού απόδοσης οφείλεται μόνο στις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας που παρατηρούνται κατά τις ημέρες που γίνεται η προσομοίωση. Εάν πρόκειται να εξεταστεί ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού πεδίου σε βάθος χρόνου, θα πρέπει να εξεταστούν και επιπρόσθετοι παράγοντες που συμβάλουν στη χειροτέρευση του όπως το ποσοστό καθαριότητας του πεδίου, το ποσοστό των σπασμένων κατόπτρων και η χειροτέρευση της επιφάνειας των κατόπτρων με αποτέλεσμα τη μείωση της καθαρής ανακλαστικότητας.

➤ Η παροχή μάζας νερού/ατμού που κυκλοφορεί στο κύκλωμα παραγωγής έργου παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με την παροχή μέσου μεταφοράς θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα, η παροχή μάζας νερού/ατμού παίρνει τη μέγιστη τιμή της όταν και η παροχή του μέσου μεταφοράς θερμότητας είναι μέγιστη, ενώ όταν η παροχή του μέσου μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι διακυμάνσεις αυτές «μεταβιβάζονται» και στο κύκλωμα παραγωγής έργου. Παρόλα αυτά το ποσοστό μείωσης στην παροχή νερού ατμού είναι μικρότερο από την αντίστοιχη του μέσου μεταφοράς θερμότητας κατά περίπου 15%, γεγονός που συμβάλλει στην πιο ευσταθή παραγωγή ισχύος (αφού $\dot{P} = \dot{m}\Delta h$).

Η αλληλεπίδραση του κυκλώματος μεταφοράς θερμότητας με το κύκλωμα παραγωγής έργου, υφίσταται εξ' αιτίας του ατμοποιητή ο οποίος καθορίζει την ποσότητα νερού/ατμού σε ολόκληρο το κύκλωμα, δεδομένου ότι η αντλία υψηλής πίεσης παρέχει την κατάλληλη ποσότητα νερού, σύμφωνα με το σήμα ελέγχου του ατμοποιητή για το ποια είναι η ποσότητα νερού την οποία έχει τη δυνατότητα να μετατρέψει εξ' ολοκλήρου σε κορεσμένο ατμό.

➤ Ο προθερμαντής μέσω HTF, ο υπερθερμαντής και ο αναθερμαντής θεωρούνται εναλλάκτες «μεταβλητού μήκους», δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα αύξησης της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας και συνεπώς

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (UA). Το κατασκευαστικό χαρακτηριστικό των εναλλακτών θερμότητας γίνεται έκδηλο κατά την εκδήλωση μεταβατικών φαινομένων λειτουργίας, όπως για παράδειγμα κατά την 21^η Ιουνίου 2005. Η έντονη πτώση της ηλιακής ακτινοβολίας το μεσημέρι της ημέρας αυτής επιδρά στη θερμοκρασία και την πίεση εξόδου του ατμού από τον υπερθερμαντή και τον αναθερμαντή. Το σύστημα ελέγχου όμως του μοντέλου παρεμβαίνει δεδομένου ότι η ενθαλπία εξόδου από τον υπερθερμαντή και τον αναθερμαντή θα πρέπει να βρίσκεται εντός πολύ συγκεκριμένων ορίων για να είναι δυνατή η λειτουργία των βαθμίδων του στροβίλου με σταθερό βαθμό απόδοσης. Έτσι λοιπόν αυξάνεται ελαφρώς ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη, έτσι ώστε η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού που θα εισέλθει στην εκάστοτε βαθμίδα του στροβίλου να διατηρείται περίπου σταθερή.

Η θερμοκρασία εξόδου του ατμού από τον προθερμαντή μέσω HTF και τον ατμοποιητή είναι προφανώς η ίδια και απεικονίζεται για εποπτικούς λόγους, για να εξακριβωθεί ότι ο ατμοποιητής παρέχει ακριβώς την απαραίτητη λανθάνουσα θερμότητα για τη μετάβαση από κορεσμένο νερό σε κορεσμένο ατμό.

➤ Η πίεση του ατμού τροφοδοσίας των βαθμίδων του στροβίλου αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους σχεδίασης του κύκλου παραγωγής έργου καθώς από αυτή εξαρτάται η ενθαλπική πτώση που λαμβάνει χώρα στις βαθμίδες και συνεπώς η ισχύς που παράγεται από την εγκατάσταση. Είναι προφανές ότι τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του υπέρθερμου ατμού εξαρτώνται ισχυρά από τις τιμές της άμεσης καθέτου ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να παρατηρείται πτώση της παραγόμενης ισχύος και συνεπώς του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης κατά τις ώρες όπου παρατηρούνται χαμηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

Η πτώση της παραγόμενης ισχύος εντούτοις οφείλεται κατά κύριο λόγο στην πτώση της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου, καθώς το μοντέλο επενεργεί με σκοπό τη διατήρηση της ενθαλπίας του εξερχόμενου ατμού από τον υπερθερμαντή και τον αναθερμαντή σε σχετικά σταθερά επίπεδα.

➤ Η πραγματική μηχανική ισχύς του στροβίλου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή που απεικονίζεται στα διαγράμματα, καθώς για την απεικόνιση έχει υποτεθεί η παρεμβολή γεννήτριας με βαθμό απόδοσης 0,98, δηλαδή πρόκειται για την ηλεκτρική εξερχόμενη ισχύ. Η παραδοχή αυτή είναι απολύτως βάσιμη δεδομένου ότι η πραγματική εγκατάσταση λειτουργεί εξ' ολοκλήρου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επιπλέον παρόμοιες εγκαταστάσεις τέτοιας κλίμακας δεν αναμένεται να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς.

Οι βαθμοί απόδοσης των βαθμίδων του στροβίλου κυμαίνονται στις τιμές 0,85-0,90 που θεωρούνται ως απολύτως ικανοποιητικές με εξαίρεση το βαθμό απόδοσης της βαθμίδας LP-5 με τιμή 0,64. Τα δεδομένα τόσο για την ενθαλπία εισόδου, όσο και για την ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα LP-5, όπως έχουν δοθεί από τους Kearney et al είναι εσφαλμένα διότι κατά την εκτόνωση παρουσιάζεται μείωση της εντροπίας. Συνεπώς, ελήφθησαν με

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

παραδοχή οι τιμές 2348 kJ/kg και 2325 kJ/kg, ενώ διατηρήθηκε ο βαθμός απόδοσης παρά τη χαμηλή τιμή του.

Η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος ως συνάρτηση των μεταβολών στην τιμή της άμεσης καθέτου ακτινοβολίας γίνεται μέσω του έλεγχου της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου, καθώς η ενθαλπική πτώση στην εκάστοτε βαθμίδα του στροβίλου διατηρείται σε σταθερά επίπεδα.

➤ Η πίεση συμπύκνωσης και η πίεση τροφοδοσίας του ατμού θέτουν τη διαθέσιμη ενθαλπική πτώση και συνεπώς οριοθετούν το έργο που είναι δυνατόν να παραχθεί από τις βαθμίδες του στροβίλου. Δεδομένου, ότι ο ατμός από την τελευταία βαθμίδα του στροβίλου εξέρχεται προς το συμπυκνωτή και όχι προς το περιβάλλον, είναι δυνατόν να επιτευχθούν πολύ μικρές πιέσεις συμπύκνωσης. Η υποπίεση στην έξοδο του στροβίλου έχει ευεργετική επίδραση στις επιδόσεις του κύκλου καθώς η ενθαλπική πτώση για δεδομένη πτώση πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε χαμηλές πιέσεις. Η είσοδος ατμοσφαιρικού αέρα στο συμπυκνωτή είναι ανεπιθύμητη καθώς αυξάνει την πίεση και συνεπώς θα πρέπει να ληφθούν ενέργειες για την αποτροπή της.

Η θερμοκρασία συμπύκνωσης είναι αυτή του κορεσμένου νερού για την πίεση που επικρατεί στο συμπυκνωτή.

➤ Στο κύκλωμα παραγωγής έργου υπάρχουν δύο προθερμαντές (κλειστού τύπου) υψηλής πίεσης και τρεις χαμηλής πίεσης. Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που προσδιορίζει την αποδοτικότητα των προθερμαντών είναι η τερματική διαφορά θερμοκρασίας TTD (Terminal Temperature Difference), η οποία ορίζεται ως η διαφορά της θερμοκρασίας κορεσμού του ατμού απομάστευσης από τη θερμοκρασία εξόδου του τροφοδοτικού νερού από την ψυχρή πλευρά του προθερμαντή. Η TTD του πρώτου και δεύτερου προθερμαντή χαμηλής πίεσης κυμαίνεται στους 3-4°C, ενώ η TTD των προθερμαντών υψηλής πίεσης είναι περίπου έναν έως δύο βαθμούς υψηλότερη. Η τερματική διαφορά θερμοκρασίας του τρίτου προθερμαντή χαμηλής πίεσης είναι ασυνήθιστα υψηλή και υπερβαίνει ελαφρώς τους 20°C (με εξαίρεση τη 14^η Ιανουαρίου όπου η διαφορά είναι περίπου 10°C). Η διαφορά αυτή στη συμπεριφορά του τρίτου προθερμαντή χαμηλής πίεσης οφείλεται στο γεγονός ότι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δηλώνεται στα δεδομένα της εγκατάστασης 77000 W/K, μια τιμή πολύ χαμηλότερη σε σχέση με του υπόλοιπους προθερμαντές κλειστού τύπου. Εάν θεωρήσουμε ότι η τιμή του δεύτερου και του τρίτου προθερμαντή χαμηλής πίεσης είναι η ίδια, δηλαδή 300000 W/K, τότε η TTD μειώνεται στους 4°C. Ο συνολικός συντελεστής θερμότητας του πρώτου προθερμαντή υψηλής πίεσης, από την άλλη μεριά, έχει την πολύ υψηλή τιμή 360000 W/K και συνεπώς οδηγεί σε μεγάλη αύξηση τη θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού στην ψυχρή πλευρά του. Στην προσομοίωση, παρά τις αμφιβολίες που προκύπτουν για την ορθότητά της, διατηρήθηκε η τιμή 77000 W/K για τον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του δεύτερου προθερμαντή χαμηλής πίεσης.

Παρόλο που ο ιδανικός κύκλος αναγέννησης μπορεί να προσεγγιστεί με ένα μεγάλο αριθμό απομαστεύσεων, πρακτικά στη θεωρία των

ατμοπαραγωγών αναφέρεται ότι σε εγκαταστάσεις συναντώνται έως επτά προθερμαντές κλειστού τύπου, καθώς η προσθήκη επιπλέον προθερμαντών οδηγεί σε σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης χωρίς την ιδιαίτερη βελτίωση του βαθμού απόδοσης.

➤ Ως καθαρή θερμική ενέργεια (\dot{Q}_{net}) ορίζεται η ενέργεια που μεταβιβάζεται εξ' ολοκλήρου στο μέσο μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή το ποσοστό της απορροφούμενης ενέργειας που απομένει, εάν από αυτή αφαιρεθούν οι θερμικές απώλειες των σωληνώσεων. Η \dot{Q}_{net} είναι επιπλέον το μέγεθος που συσχετίζει την παροχή μάζας του μέσου μεταφοράς θερμότητας με τις τιμές της κάθετης άμεσου ακτινοβολίας, μέσω της εξίσωσης (6.1).

Στα διαγράμματα απεικονίζεται αφ' ενός η απόλυτη τιμή θερμικής ενέργειας που αποδίδεται στο μέσο μεταφοράς θερμότητας κατά τη διέλευσή του από το ηλιακό πεδίο και αφ' ετέρου το ίδιο μέγεθος ανηγμένο ανά m^2 του ηλιακού πεδίου. Η ανηγμένη τιμή της καθαρής ενέργειας αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος για το ηλιακό πεδίο και καθορίζει το βαθμό απόδοσής του για δεδομένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας. Όσον αφορά την προσομοίωση, οι τιμές της ανηγμένης καθαρής θερμικής ενέργειας ξεπερνούν τα 500 W/m^2 για συνθήκες υψηλής ηλιοφάνειας, με αποτέλεσμα τη μεγάλη αποδοτικότητα του ηλιακού πεδίου (περίπου 54%).

➤ Μέσω των διαγραμμάτων που απεικονίζουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας γίνεται εμφανής η συνεισφορά του κάθε εναλλάκτη ξεχωριστά στη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου που ρέει στο κύκλωμα παραγωγής έργου. Όπως γίνεται έκδηλο από τα διαγράμματα, η θερμότητα που προσδίδεται στο νερό/ατμό κατά τη φάση της ατμοποίησης υπερκαλύπτει τη συνολική θερμότητα που προσδίδεται από τους άλλους τρεις εναλλάκτες θερμότητας. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στον ατμοποιητή καθορίζει επιπλέον την ποσότητα του εργαζόμενου μέσου στην οποία μπορεί να προσδώσει την απαραίτητη λανθάνουσα θερμότητα και συνεπώς την παροχή σε ολόκληρο το κύκλωμα παραγωγής έργου.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα ατμοποίησης και στον αναθερμαντή καθορίζεται κατά κύριο λόγο από το συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (UA_t), ο οποίος αποτελεί κατασκευαστική παράμετρο του κάθε εναλλάκτη. Όπως είναι προφανές, ο απαιτούμενος συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας καθορίζει το μέγεθος του εναλλάκτη με αποτέλεσμα οι διαστάσεις του ατμοποιητή να είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των άλλων εναλλακτών μέσω HTF. Θα πρέπει να αναφερθεί ακόμη ότι οι διαστάσεις όλων των εναλλακτών είναι μεγαλύτερες από τους αντίστοιχους ενός συμβατικού ατμοπαραγωγού (ο οποίος χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα), δεδομένου ότι σε έναν ηλιακό θερμικό σταθμό η πρόσδοση θερμότητας γίνεται από υγρό μέσο μεταφοράς θερμότητας (Therminol VP-1) και όχι από καυσαέριο, όπως συμβαίνει στους συμβατικούς σταθμούς.

➤ Ο θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης προκύπτει από το βαθμό απόδοσης του ηλιακού πεδίου και από το βαθμό απόδοσης του κύκλου παραγωγής έργου. Για υψηλές τιμές της άμεσης καθέτου ηλιακής

Κεφάλαιο 6^ο: Προσομοίωση ηλ. θερμικού σταθμού με χρήση του TRNSYS.

ακτινοβολίας ο συνολικός (μικτός) θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης ξεπερνά το 22%, ενώ σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας υπερβαίνει το 19%. Οι τιμές αυτές καθιστούν την τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων μη ανταγωνιστική ως προς τους σύγχρονους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς (των οποίων ο βαθμός απόδοσης ξεπερνά το 40%), αν θεωρηθεί ως μοναδικό κριτήριο σύγκρισης η απόδοση. Θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν όμως δύο σημαντικοί παράγοντες που καθιστούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία ιδιαίτερος ελκυστική: πρώτον, το γεγονός ότι η προσδιδόμενη θερμική ενέργεια στην εγκατάσταση, δηλαδή η ηλιακή ενέργεια, είναι άφθονη σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στους συμβατικούς ατμοπαραγωγούς όπου η προσδιδόμενη θερμική ενέργεια εξαρτάται από την παροχή του καυσίμου με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους και δεύτερον η μηδενική εκπομπή ρύπων με αποτέλεσμα την αποφυγή εγκατάστασης ογκωδών διατάξεων, όπως τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, οι οποίες είναι απαραίτητες για οποιονδήποτε συμβατικό ατμοπαραγωγό και αυξάνουν τόσο το κόστος, όσο και την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ηλιακού θερμικού σταθμού SEGS VI συγκλίνουν πολύ ικανοποιητικά με τις τιμές που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία και συνεπώς φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο που έχει δημιουργηθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως όργανο για την κατανόηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του θερμικού σταθμού, καθώς και για τη διερεύνηση των παραγόντων που επιδρούν σημαντικά στη συνολική λειτουργία του.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν απόλυτη σύγκλιση σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας και τα μόνα σημεία ανωμαλιών παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια πολύ έντονων μεταβατικών δεδομένων, όπως το ξεκίνημα και η παύση της λειτουργίας της εγκατάστασης (τις πρωινές και τις βραδινές ώρες αντίστοιχα). Ούτως ή άλλως η έναρξη και η παύση της λειτουργίας ενός θερμικού σταθμού αποτελούν ειδικές περιπτώσεις και απαιτούν εκτός από την παρέμβαση του συστήματος ελέγχου και ενέργειες από τους χειριστές του σταθμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αντωνόπουλος Κ., Θερμικά-Ηλιακά συστήματα (Μέρος πρώτο), Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2007
2. Μαθιουδάκης Κ., Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2007
3. Μοσχάτος Α., Ηλιακή ενέργεια-Συνιστώσες της ηλιακής θερμικής διαδικασίας, Εκδόσεις Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, 1992
4. Παπαγεωργίου Ν., Ατμοπαραγωγοί-Γενικές αρχές, Εκδόσεις Συμείων, 1991
5. Becker M., Meinecke W., Geyer M., Trieb F., Blanco M., Romero M., Ferrière A., Solar Thermal Power Plants, EUREC Agency, 2000
6. Dersch J., Geyer M., Herrmann U., Jones S., Kelly B., Kistner R., Ortmanns W., Pitz-Paal R., Price H., Trough integration into power plants—a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems, *Energy, Volume 29, Issues 5-6, April-May 2004, Pages 947-959*
7. Duffie J., Beckman W., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons Inc., 1991
8. Forristall R., Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver, NREL, 2003
9. García-Rodríguez L., Blanco-Gálvez J., Solar-heated Rankine cycles for water and electricity production: POWERSOL project, *Desalination, Volume 212, Issues 1-3, 25 June 2007, Pages 311-318*
10. Gordon J., Solar Energy-The state of the art: ISES Position Papers, James & James Ltd., 2001
11. Hale M.J., Solar Two Performance Evaluation Methodology, *Proceedings of the ASME Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century Conference, 11-14 April 1999*
12. International Energy Agency, Renewables in Global Energy Supply, 2006
13. Jones S., Pitz-Paal R., Schwarzböezl P., Blair N., Cable R., TRNSYS modelling of the SEGS VI parabolic trough solar electric generating system, Proceedings of Solar Forum, 2001

-
14. Kalogirou S., Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 30, Issue 3, 2004, Pages 231-295
 15. Kaltschmitt M., Streicher W., Wiese A., Renewable Energy-Technology Economics and Environment, Springer, 2007
 16. Kreith F., Kreider F., Principles of Solar Engineering, McGraw-Hill, 1978
 17. Kribus A., Zaibel R., Carey D., Segal A., Karni J., A solar driven combined cycle power plant, *Solar Energy*, Volume 62, Issue 2, February 1998, Pages 121-129
 18. Kutz M., Mechanical Engineers' Handbook Vol.4, John Wiley & Sons Inc., 2006
 19. Mago P., Chamra L., Srinivasan K., Somayaji C., An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids, *Applied Thermal Engineering*, Volume 28, Issues 8-9, June 2008, Pages 998-1007
 20. Maizza V., Maizza A., Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems, *Applied Thermal Engineering*, Volume 21, Issue 3, 1 February 2001, Pages 381-390
 21. Ortega I., Burgaleta I., Tellez F., Central Receiver System (CRS) solar power plant using molten salt as heat transfer fluid
 22. Patnode A., Simulation and performance evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants, University of Wisconsin-Madison, 2006
 23. Price H., Parabolic Trough Technology Overview, NREL, 2002
 24. Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J., Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles, *Energy*, Volume 32, Issue 3, 2007, Pages 1210-1221
 25. Schwarzboezl P., STEC Reference Manual, DLR Zentrum, 2006
 26. Shafiee S., Topal E., An econometrics view of worldwide fossil fuel consumption and the role of US, *Energy Policy*, Volume 36, Issue 2, February 2008, Pages 775-786
 27. Sorensen B., Renewable Energy, Academic press, 2002
 28. Stine W.B., Harrigan R.W., Solar Energy Systems Design, John Wiley & Sons Inc., 1985

-
29. Brayton, Stirling and other standard Cycles από το www.rocw.raifoundation.org
 30. TRNSYS Reference Manual Vol.1& Vol.3, SEL Univ. of Winsconsin-Madison
 31. Therminol VP-1 brochure διαθέσιμο από τη Solutia SA
 32. http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy
 33. http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_hot_water
 34. http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_chimney
 35. http://en.wikipedia.org/wiki/Trombe_wall
 36. http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_pond
 37. http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy
 38. http://www.canren.gc.ca/tech_appl/index.asp?CaId=5&PgId=121
 39. <http://www.greenbuilder.com/sourcebook/PassSolGuide3.html>
 40. http://journeytoforever.org/biofuel_library/
 41. <http://www.trec-uk.org.uk/csp.htm>
 42. <http://www.powerfromthesun.net/>
 43. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7h.html#table>
 44. http://ec.europa.eu/research/energy/nn/nn_rt/nn_rt_cs/article_1114_en.htm
 45. <http://www.eere.energy.gov/de/csp.html>
 46. <http://www.renewables-made-in-germany.com/en/solar-thermal-power-plants/>
 47. http://www.southface.org/solar/solar-roadmap/solar_how-to/history-of-solar.htm
 48. <http://www.facts-about-solar-energy.com/solar-energy-history.html>
 49. <http://www.smso.net/SEGS>

-
50. <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/definitions.shtml#solar>
 51. http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2005/ (DNI data)
 52. <http://www.volker-quaschnig.de/artikel/konzenson2/index.html>
 53. <http://www.global-greenhouse-warming.com/global-temperature.html>
 54. <http://www.mareinitiative.com/technologies>
 55. <http://www.physics.usyd.edu.au/app/research/solar/clfr.html>
 56. <http://www.seao2.com/solarsphere/csp.htm>
 57. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/class/p71d10.html#c3>
 58. Steam and water properties software διαθέσιμο στο <http://www.steam-water-properties.com>
 59. TRNSYS – A Transient System Simulation Program, University of Wisconsin-Madison Solar Energy Laboratory
 60. STEC ver.3.0– A TRNSYS Model Library for Solar Thermal Electric Components, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) διαθέσιμη στο <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnlib/stec/stec.htm>