

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

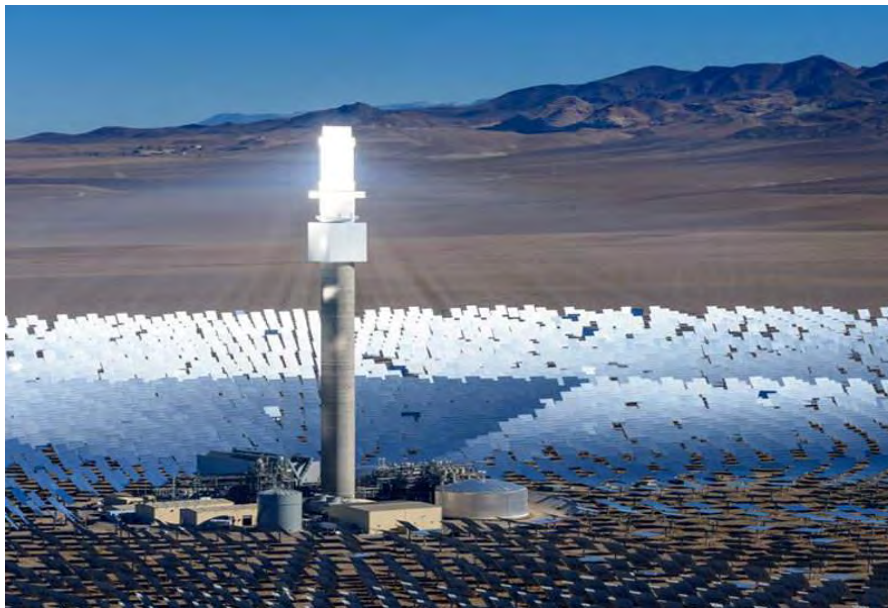
Διπλωματική εργασία

ΒΑΣΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

υπό

ΤΖΙΑΡΟΥ ΦΙΛΩΤΑ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Ιούνιος 2019

© 2019 Τζιαρός Φιλώτας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Δημήτριος Βαλουγεώργης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αλέξης Κερμανίδης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον κ. Δημήτρη Βαλουγεώργη, καθηγητή του Πανεπιστήμιου Θεσσαλίας, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας αλλά και για τις κατευθυντήριες γραμμές που μου έδωσε και τους κ. Νίκο Ανδρίτσο και κ. Αλέξη Κερμανίδη για την αποδοχή της πρότασης συμμετοχής τους στην εξεταστική επιτροπή. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Αλέξανδρο Τσιμπούκη για την συνεχή επίβλεψη και άριστη συνεργασία σε όλα τα στάδια της εργασίας και ιδιαίτερα στο κομμάτι της προσομοίωσης του λογισμικού TRNSYS.

Φυσικά, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου, την αδερφή μου και τους γονείς μου, για την υλική και ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου Γιώργο Κωνσταντινίδη, Μιγάλη Μπαρμπαρή, Κωνσταντίνο Λούκα, Ανδρέα Μεσσή και Κώστα Μολόχα, για τη συνεχή βοήθεια και τη στήριξη κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Τζιαρός Φιλώτας

ΒΑΣΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΤΖΙΑΡΟΣ ΦΙΛΩΤΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2019

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Δημήτριος Βαλουγεώργης, Καθηγητής Αναλυτικών και
Υπολογιστικών Μεθόδων Μεσοκλίμακας σε Φαινόμενα Ροής και Μεταφοράς

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση και η προσομοίωση της λειτουργίας ηλιακών θερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα, σε προγραμματιστικό περιβάλλον FORTRAN και στο λογισμικό TRNSYS. Γίνεται μία σύντομη αναφορά στις διάφορες τεχνολογίες στις οποίες βασίζονται τέτοιου είδους σταθμοί ισχύος, σε εγκατεστημένα εργοστάσια και στους τύπους συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών ανά τον κόσμο. Επίσης, παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις και τα ισοζύγια που διέπουν τους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες. Στη συνέχεια, μελετάται ο τρόπος μοντελοποίησης ενός ηλιακού θερμικού συστήματος, καθορίζονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του συλλέκτη, της δεξαμενής αποθήκευσης και του φορτίου ζήτησης και προσαρμόζονται έτσι ώστε να εφαρμοστούν σε συνδυασμό με θερμική μηχανή. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αξιοποίηση πραγματικών ηλιακών δεδομένων για την καλύτερη αξιολόγηση του συστήματος και επισημαίνονται οι σημαντικότερες μεταβλητές. Όλα τα παραπάνω εισάγονται στον πηγαίο κώδικα SolSys του Εργαστηρίου Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Π.Θ., και συγκρίνονται με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία και με το λογισμικό TRNSYS. Προσομοιώνεται ο ηλιακός θερμικός σταθμός SEGS VI που βρίσκεται στη California με τη χρήση του πακέτου TRNSYS, παραθέτονται και σχολιάζονται οι σημαντικότερες μεταβλητές της προσομοίωσης και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη βιβλιογραφία. Τέλος, γίνεται ανασκόπηση των αποτελεσμάτων και προτείνονται κάποιες ιδέες για περαιτέρω έρευνα και μελέτη πάνω στους ηλιακούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγικές Έννοιες	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	2
1.3 Δομή και στόχος της διπλωματικής εργασίας	6
Κεφάλαιο 2 Ηλιακοί Συλλέκτες.....	11
2.1 Βασικές έννοιες.....	11
2.2 Οπτικός σχεδιασμός	12
2.2.1 Οπτικός σχεδιασμός συγκεντρωτικού συλλέκτη	13
2.3 Θερμικός σχεδιασμός.....	18
2.3.1 Θερμικός σχεδιασμός συγκεντρωτικού συλλέκτη.....	18
Κεφάλαιο 3 Μοντελοποίηση Σταθμού Παραγωγής Ισχύος με Η.Θ.Σ.....	25
3.1 Ηλιακός συλλέκτης υψηλής θερμοκρασίας	25
3.2 Δεξαμενή αποθήκευσης	29
3.3 Φορτίο	29
3.4 Επεκτάσεις πηγαίου κώδικα SolSys.....	30
3.4.1 Θερμική μηχανή Carnot.....	30
3.4.2 Πραγματικά ηλιακά δεδομένα	41
3.5 Συμβολή εφεδρικού καυστήρα σε ηλιοθερμικούς σταθμούς.....	50
3.5.1 Διατήρηση θερμοκρασίας επιμέρους στοιχείων	51
3.5.2 Συνεισφορά στη παραγωγή ισχύος	52

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του Σταθμού SEGS VI με το Λογισμικό TRNSYS

.....	63
4.1 Το πακέτο TRNSYS	63
4.2 Περιγραφή στοιχείων προσομοίωσης.....	63
4.3 Περιγραφή ηλιακού θερμικού σταθμού SEGS VI.....	75
4.3.1 Περιγραφή κύκλου μεταφοράς θερμότητας	77
4.3.2 Περιγραφή κύκλου παραγωγής ισχύος-Rankine.....	78
4.4 Λεπτομερής ανάλυση συνδέσεων προσομοίωσης	81
Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα και Σχολιασμός	101
5.1 Κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας.....	102
5.2 Κύκλωμα παραγωγής ισχύος.....	103
5.2.1 Κύκλωμα υψηλής πίεσης	104
5.2.2 Κύκλωμα χαμηλής πίεσης.....	105
5.3 Συνολική παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης σταθμού.....	106
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα	119
Βιβλιογραφία	122
Παραρτήματα.....	126
Α) Υπολογισμός των Ημερήσιων Ποσοτήτων $q_{s,ref}(i)$, $T_{amb}(i)$	126
Β) Αρχείο Εισόδου στο Πακέτο TRNSYS	127

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Ενδεικτικές τιμές για τις τέσσερις βασικές τεχνολογίες ηλιακών σταθμών..8	
Πίνακας 2 Τιμές εισόδου στο κώδικα SolSys από τη βιβλιογραφία.....34	
Πίνακας 3 Τιμές αναφοράς για το μέσο μεταφοράς θερμότητας στους εναλλάκτες θερμότητας.....77	
Πίνακας 4 Τιμές αναφοράς για το νερό-ατμό στους εναλλάκτες θερμότητας.....77	

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Γυάλινος σωλήνας κενού και απορρόφησης.....	8
Σχήμα 1.2 Απεικόνιση ηλιακού θερμικού κύκλου πεδίου ηλιοστατών-κεντρικού δέκτη.....	8
Σχήμα 1.3 Ηλιακός θερμικός σταθμός παραγωγής ενέργειας με γραμμικούς ανακλαστήρες Fresnel.....	9
Σχήμα 1.4 Ηλιακός συλλέκτης παραβολικού «πιάτου» συνδυασμένος με θερμικό κύκλο Stirling.....	9
Σχήμα 1.5 Έξι παραβολικοί «δίσκοι-πιάτα» στο ερευνητικό κέντρο της Plataforma Solar De Almeria.....	9
Σχήμα 2.1 Απορροφητική πλάκα και κάλυμμα ενός συλλέκτη κενού διπλής υάλωσης.....	23
Σχήμα 2.2 Γωνία αποδοχής μεταξύ ηλίου και συγκεντρωτή.....	23
Σχήμα 2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός PTC συλλέκτη.....	24
Σχήμα 2.4 Οι επιφάνειες στις οποίες προκαλείται το «end effect».....	24
Σχήμα 2.5 Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για ένα δέκτη με γυάλινο σωλήνα κενού.....	25
Σχήμα 3.1 Αναπαράσταση ενός τυπικού θερμικού ηλιακού συστήματος.....	53
Σχήμα 3.2 Θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης του πηγαιού κώδικα και σύγκριση με [18].....	54
Σχήμα 3.3 Απόδοση πεδίου ηλιοστατών και σύγκριση με [18].....	54
Σχήμα 3.4 Απόδοση θερμικού κύκλου Carnot και σύγκριση με [18].....	55
Σχήμα 3.5 Συμπεριφορά του Η.Θ.Σ για τρεις συνεχόμενες μέρες.....	55
Σχήμα 3.6 Συμπεριφορά του ηλιακού θερμικού σταθμού για $A_c = 5 \times 10^5 \text{ m}^2$	56

Σχήμα 3.7 Συμπεριφορά του ηλιακού θερμικού σταθμού για $(\dot{m}c_p) = 2 \times 10^{10} \text{ J/K}$	56
Σχήμα 3.8 Απόκριση του ηλιακού θερμικού σταθμού για $\dot{W}_e = 130 \text{ MW}$	57
Σχήμα 3.9 Εκτύπωση πραγματικής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε αρχείο κειμένου στο λογισμικό TRNSYS.....	57
Σχήμα 3.10 Προσομοίωση του παραδείγματος της [18] για τη λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη, κατά την εκκίνηση της λειτουργίας του σταθμού.....	58
Σχήμα 3.11 Σύγκριση πηγαίου κώδικα SolSys με το λογισμικό TRNSYS για λειτουργία του συστήματος συλλέκτη-δεξαμενής αποθήκευσης κατά την ημέρα εκκίνησης του σταθμού.....	58
Σχήμα 3.12 Ημιτονοειδής προσομοίωση της ηλιακής ακτινοβολίας της [18].....	59
Σχήμα 3.13 Επίλυση του παραδείγματος [18] με πραγματικά ηλιακά δεδομένα στο λογισμικό TRNSYS.....	59
Σχήμα 3.14 Αποκρίσεις των δύο λογισμικών για πραγματικά καιρικά δεδομένα στις 1/5 στην Αθήνα.....	60
Σχήμα 3.15 Άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην Αθήνα (1/5).....	60
Σχήμα 3.16 Άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία στην Αθήνα για τις πρώτες τέσσερις ημέρες του Μαΐου.....	61
Σχήμα 3.17 Απόκριση του σταθμού για τις πρώτες τέσσερις ημέρες του Μαΐου.....	61
Σχήμα 4.1 Απώλειες στα άκρα του παραβολικού συλλέκτη λόγω του φαινομένου “end effect”.....	82
Σχήμα 4.2 Τιμές των συντελεστών απόδοσης για διάφορα είδη παραβολικών συλλεκτών που προέκυψαν από μετρήσεις.....	82
Σχήμα 4.3 Οι παράμετροι που ορίστηκαν για το στοιχείο Type 396 κατά τη προσομοίωση.....	83

Σχήμα 4.4 Παράμετρος του στοιχείου HTF-Split κατά τη προσομοίωση.....	83
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα που περιγράφει τις ροές στον υπερθερμαντή [34].....	83
Σχήμα 4.6 Οι παράμετροι για το στοιχείο Superheater (Type 315).....	84
Σχήμα 4.7 Οι παράμετροι για το στοιχείο Reheater (Type 315).....	84
Σχήμα 4.8 Οι παράμετροι του Evaporator (Type 316).	84
Σχήμα 4.9 Οι παράμετροι του Preheater (Type 315).....	84
Σχήμα 4.10 Παράμετρος για HTF-Mix (Type 11h).....	85
Σχήμα 4.11 Παράμετροι που αντιστοιχούν στις βαθμίδες υψηλής πίεσης HP-1, HP-2 του στροβίλου.....	85
Σχήμα 4.12 Παράμετροι που αντιστοιχούν στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης LP-1, LP-2 του στροβίλου.....	85
Σχήμα 4.13 Παράμετροι που αντιστοιχούν στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης LP-3, LP-4 του στροβίλου.....	85
Σχήμα 4.14 Οι παράμετροι της τελευταίας βαθμίδας LP-5 του στροβίλου.....	86
Σχήμα 4.15 Παράμετροι για είσοδο P, h	86
Σχήμα 4.16 Παράμετροι για είσοδο P, s	86
Σχήμα 4.17 Ορισμός παραμέτρων $\Delta T_{parameter(1)}, \Delta T_w$ για τον συμπυκνωτή.....	86
Σχήμα 4.18 Διάγραμμα ροής του συμπυκνωτή.....	87
Σχήμα 4.19 Ορισμός παραμέτρων για τους Preheater-1, Preheater-2, Preheater-3.....	87
Σχήμα 4.20 Παράμετροι προσομοίωσης για τους Preheater-4, Preheater-5.....	87
Σχήμα 4.21 Διάγραμμα ροής για τον απαεριωτή.....	87
Σχήμα 4.22 Παράμετροι προσομοίωσης για την αντλία συμπυκνώματος, την αντλία νερού τροφοδοσίας και την αντλία HTF, αντίστοιχα.....	88
Σχήμα 4.23 Παράμετροι για το στοιχείο Type 9a.....	88

Σχήμα 4.24 Απεικόνιση του κύκλου μεταφοράς θερμότητας και του κύκλου παραγωγής ισχύος.....	89
Σχήμα 4.25 Βαθμίδες υψηλής πίεσης στο macro HP-TURBINES.....	89
Σχήμα 4.26 Μοντέλο TRNSYS του σταθμού SEGS VI.....	90
Σχήμα 4.27 Βαθμίδες χαμηλής πίεσης και συμπυκνωτής στο macro LP-TURBINES..	91
Σχήμα 4.28 Υπολογισμός ενθαλπίας εξόδου και έργου της εκάστοτε βαθμίδας του στροβίλου από το macro “stage”.....	92
Σχήμα 4.29 Κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας του υπό προσομοίωση μοντέλου.....	92
Σχήμα 4.30 Ο κύκλος παραγωγής ισχύος του σταθμού SEGS VI.....	93
Σχήμα 4.31 Σύνδεση της άμεσης ακτινοβολίας του αναγνώστη κειμένου με το στοιχείο Type 396.....	93
Σχήμα 4.32 Μεταφορά της ενθαλπίας εισόδου από τον μετατροπέα P-h-in στον P _{out} -isentropic	93
Σχήμα 4.33 Μεταφορά της πίεσης εισόδου στον μετατροπέα P-h-in	93
Σχήμα 4.34 Μεταφορά της πίεσης εξόδου στον μετατροπέα P _{out} -isentropic	93
Σχήμα 4.40 Σύνδεση του προθερμαντή με το HTF-Mix.....	94
Σχήμα 4.41 Σύνδεση του HTF-Mix με την αντλία HTF.....	94
Σχήμα 4.42 Σύνδεση του εξαμιστή με το στοιχείο του υπερθερμαντή.....	94
Σχήμα 4.43 Σύνδεση του υπερθερμαντή με το στοιχείο του εξαμιστή.....	94
Σχήμα 4.44 Σύνδεση του εξαμιστή με τον προθερμαντή.....	94
Σχήμα 4.35 Σύνδεση της αντλίας HTF με το στοιχείο Type396.....	94
Σχήμα 4.36 Σύνδεση του Type 396 με τον διαχωριστή HTF.....	94
Σχήμα 4.37 Σύνδεση του HTF-Split με τον αναθερμαντή.....	94
Σχήμα 4.38 Σύνδεση του HTF-Split με τον υπερθερμαντή.....	94
Σχήμα 4.39 Σύνδεση του αναθερμαντή με το HTF-Mix.....	94

Σχήμα 4.45 Σύνδεση του προθερμαντή με τον εξατμιστή.....	95
Σχήμα 4.46 Σύνδεση του υπερθερμαντή με το macro HP-Turbines (στοιχείο H2X)....	95
Σχήμα 4.47 Σύνδεση του macro HP-Turbines(στοιχείο H2X) με τον υπερθερμαντή....	95
Σχήμα 4.48 Σύνδεση του στοιχείου H2X με το macro stage-1.....	95
Σχήμα 4.49 Σύνδεση της βαθμίδας HP-1 με τον μετατροπέα H2X.....	95
Σχήμα 4.50 Σύνδεση του στοιχείου HP-2 με το macro stage-1.....	95
Σχήμα 4.51 Σύνδεση των στοιχείων H2X → HP-1	95
Σχήμα 4.52 Σύνδεση των στοιχείων HP-1 → S-split-1.....	95
Σχήμα 4.53 Μεταφορά της πίεσης στη σύνδεση των στοιχείων S-split-1 → HP-1.....	95
Σχήμα 4.54 Σύνδεση των στοιχείων stage-1 → S-split-1.	95
Σχήμα 4.55 Σύνδεση των στοιχείων S-split-1 → HP-2	96
Σχήμα 4.56 Σύνδεση των στοιχείων HP-2 → S-split-1	96
Σχήμα 4.57 Σύνδεση των στοιχείων S-split-1 → stage-2	96
Σχήμα 4.58 Σύνδεση των στοιχείων HP-2 → stage-2	96
Σχήμα 4.59 Σύνδεση των στοιχείων HP-2 → S-split-2	96
Σχήμα 4.60 Σύνδεση των στοιχείων S-split-2 → HP-2	96
Σχήμα 4.61 Σύνδεση των στοιχείων stage-2 → S-split-2	96
Σχήμα 4.62 Σύνδεση των S-split-2 → Type58-13.....	96
Σχήμα 4.63 Σύνδεση των στοιχείων H2X_1 → S-split-2	96
Σχήμα 4.64 Σύνδεση των στοιχείων Bar-to-kPa → Type58-13.....	96
Σχήμα 4.65 Σύνδεση των στοιχείων S-split-2 → H2X_1.....	97
Σχήμα 4.66 Σύνδεση των στοιχείων H2X_1 → Type58-13.....	97
Σχήμα 4.67 Σύνδεση των στοιχείων H2X_1 → stage-2	97
Σχήμα 4.68 Σύνδεση του macro HP-Turb → Reheater	97

Σχήμα 4.69 Σύνδεση του αναθερμαντή με το macro HP-Turbines.....	97
Σχήμα 4.70 Σύνδεση των στοιχείων HP-Turb → Preheater-5	97
Σχήμα 4.71 Σύνδεση των στοιχείων Preheater-5 → HP-Turb	97
Σχήμα 4.72 Σύνδεση των στοιχείων Preheater-4 → HP-Turb	97
Σχήμα 4.73 Σύνδεση των στοιχείων HP-Turb → Preheater-4	97
Σχήμα 4.74 Σύνδεση των στοιχείων LP-Turb → Deaerator	98
Σχήμα 4.75 Σύνδεση των στοιχείων Deaerator → LP-Turb	98
Σχήμα 4.76 Σύνδεση των στοιχείων Preheater-3 → Deaerator	98
Σχήμα 4.77 Σύνδεση των στοιχείων Deaerator → FeedWater-Pump	98
Σχήμα 4.78 Σύνδεση των στοιχείων Evaporator → FeedWater-Pump	98
Σχήμα 4.79 Σύνδεση FW-Pump → Preheater-4	98
Σχήμα 4.80 Σύνδεση των στοιχείων Preheater-4 → Deaerator	98
Σχήμα 4.81 Σύνδεση των στοιχείων Preheater-4 → Preheater-5	98
Σχήμα 4.82 Σύνδεση των στοιχείων Preheater-5 → Preheater-4	98
Σχήμα 4.83 Σύνδεση των Preheater-5 → Preheater	98
Σχήμα 4.84 Σύνδεση του αναθερμαντή με το macro LP-Turbines.....	98
Σχήμα 4.85 Σύνδεση του LP-Turb με τον αναθερμαντή.....	99
Σχήμα 4.86 Σύνδεση των lp-split-4 → stage-LP-5	99
Σχήμα 4.87 Σύνδεση των LP-5 → stage-LP-5	99
Σχήμα 4.88 Σύνδεση των LP-5 → Condenser	99
Σχήμα 4.89 Σύνδεση του συμπυκνωτή με τη πέμπτη βαθμίδα του στροβίλου.....	99
Σχήμα 4.90 Σύνδεση των stage-LP-5 → Condenser	99
Σχήμα 4.91 Σύνδεση των Condenser → stage-LP-5	99
Σχήμα 4.92 Σύνδεση των Preheater-1 → Condenser	99

Σχήμα 4.93 Σύνδεση των Condenser → Condensate-Pump	99
Σχήμα 4.94 Σύνδεση των Condensate-Pump → Preheater-1	99
Σχήμα 5.1 Άμεση ακτινοβολία για τη πόλη Daggett στις (14/01/2005)	106
Σχήμα 5.2 Παροχή μάζας του φέροντος ρευστού στο ηλιακό πεδίο.....	107
Σχήμα 5.3 Θερμοκρασίες εξόδου του φέροντος ρευστού (HTF) για τον εξατμιστή και τον υπερθερμαντή.....	107
Σχήμα 5.4 Θερμοκρασίες εξόδου του (HTF) για τον προθερμαντή και τον αναθερμαντή.....	108
Σχήμα 5.5 Θερμοκρασίες εισόδου/εξόδου του HTF από το πεδίο των PTC's.....	108
Σχήμα 5.6 Απόδοση του πεδίου των παραβολικών συλλεκτών.....	109
Σχήμα 5.7 Μαζική παροχή νερού/ατμού στον κύκλο παραγωγής ισχύος.....	109
Σχήμα 5.8 Θερμοκρασίες εξόδου του ατμού για τον εξατμιστή και τον υπερθερμαντή.....	110
Σχήμα 5.9 Θερμοκρασίες εξόδου του ατμού για τον προθερμαντή και τον αναθερμαντή.....	110
Σχήμα 5.10 Πιέσεις εισόδου των βαθμίδων υψηλής πίεσης HP-1, HP-2	111
Σχήμα 5.11 Παραγόμενη ισχύς των βαθμίδων HP-1, LP-1, HP-2	111
Σχήμα 5.12 Πιέσεις εισόδου των βαθμίδων χαμηλής πίεσης LP-1, LP-3, LP-5.....	112
Σχήμα 5.13 Πιέσεις εισόδου των βαθμίδων χαμηλής πίεσης LP-2, LP-4.....	112
Σχήμα 5.14 Παραγόμενη ισχύς των βαθμίδων LP-2, LP-3, LP-4, LP-5.....	113
Σχήμα 5.15 Πίεση συμπίκνωσης και θερμοκρασία συμπίκνωσης.....	113
Σχήμα 5.16 Θερμοκρασίες εξόδου του απομαστευμένου ατμού των βαθμίδων από τους προθερμαντές.....	114

Σχήμα 5.17 Χρήσιμη θερμική ενέργεια που μεταφέρει το πεδίο στο HTF, σε [MW] στον αριστερό άξονα (\dot{Q}_{net}) και σε $[W/m^2]$ στο δεξιό (\dot{Q}_{net})	114
Σχήμα 5.18 Ρυθμός μεταφοράς θερμικής ενέργειας για τον εξατμιστή και τον αναθερμαντή.....	115
Σχήμα 5.19 Ρυθμός μεταφοράς θερμικής ενέργειας για τον υπερθερμαντή και τον προθερμαντή.....	115
Σχήμα 5.20 Συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για τις (14/01/2005)	116
Σχήμα 5.21 Θερμικός βαθμός απόδοσης του σταθμού.....	116

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγικές Έννοιες

1.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη της στροφής προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τόσο στην Ευρώπη όσο και στον υπόλοιπο κόσμο. Αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στη κλιματική αλλαγή του πλανήτη, καθώς και στο γεγονός ότι οι ενεργειακές ανάγκες και ο πληθυσμός των ανθρώπων συνεχώς αυξάνονται, ενώ τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων μειώνονται. Εκτιμάται ότι η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια θα έχει διπλασιαστεί μέσα σε 10-15 χρόνια [1]. Παράλληλα, οι περιορισμοί της αέριας ρύπανσης γίνονται όλο και πιο αυστηροί με αποτέλεσμα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να αντικαθιστούν τη συμβατική καύση σε όλο και περισσότερες χώρες. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τις εξής: ηλιακή, υδροηλεκτρική, ενέργεια θαλασσών (παλιρροϊκή, κυματική), αιολική, γεωθερμία και βιομάζα [2].

Στην Ελλάδα, καθώς και στη πλειοψηφία των υπολοίπων χωρών, το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από τη συμβατική καύση ορυκτών πόρων, η οποία γίνεται σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ισχύος. Σε αυτές τις διατάξεις γίνεται η καύση του ορυκτού καυσίμου στο λέβητα με σκοπό τη θέρμανση νερού σε υπέρθερμο ατμό και μετά την εκτόνωση του στον αμοστρόβιλο με αποτέλεσμα την παραγωγή μηχανικού έργου που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο ατμός που εξέρχεται από τη τουρμπίνα συμπυκνώνεται έπειτα στον συμπυκνωτή (πύργος ψύξης) με σκοπό την επανεισαγωγή του στο λέβητα. Ο παραπάνω θερμικός κύκλος ονομάζεται Rankine και αποτελεί τη βασική αρχή λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων. Άλλοι βασικοί κύκλοι για τη παραγωγή ισχύος είναι οι κύκλοι Brayton και Stirling [3]. Η κύρια διαφορά μεταξύ των

προαναφερθέντων σταθμών με τους ηλιακούς θερμικούς είναι ότι στους τελευταίους αξιολογείται η ηλιακή ενέργεια για τη προσθήκη θερμότητας στον εκάστοτε θερμικό κύκλο με αποτέλεσμα την ελάχιστη ή και τη μηδενική χρήση ορυκτών καυσίμων. Όσο αφορά την Ελλάδα (2017) [4] το 48% της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος προέρχεται από τη καύση ορυκτών (λιγνίτης 23%, πετρέλαιο 11% , φυσικό αέριο 14%) σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, το 19% από υδροηλεκτρικούς σταθμούς ενώ το υπόλοιπο 33% από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η τωρινή εγκατεστημένη ισχύς από σταθμούς Α.Π.Ε. προέρχεται από αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκούς σταθμούς και ένα μικρό ποσοστό από τη καύση βιομάζας. Γίνεται φανερό λοιπόν η έλλειψη ηλιακών θερμικών σταθμών στον Ελλαδικό χώρο ο οποίος δέχεται ιδιαίτερα μεγάλα ποσοστά ηλιακής ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρεται κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, χώρες όπως η Ισπανία (53 σταθμοί) η Ιταλία (1 σταθμός) και η Γαλλία (1 σταθμός) έχουν ήδη προχωρήσει στην κατασκευή Η.Θ.Σ συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP-Concentrating Solar Power). Στην Ευρώπη η παραγόμενη ενέργεια από τον ήλιο παίζει ήδη σημαντικό ρόλο καλύπτοντας το 10% της συνολικής ζήτησης το 2013, με στόχο να ξεπεράσει το 20% μέχρι το τέλος του 2040 [5]. Γενικά η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να οδηγήσει την Ευρώπη σε μείωση των εκπομπών CO_2 της τάξης του (80 ~ 95)% , μέχρι το 2050 [6].

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί παραγωγής ισχύος λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες παραγόμενου ατμού, οπότε χρησιμοποιούνται οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες. Τα κυριότερα είδη των εγκατεστημένων θερμικών σταθμών περιλαμβάνουν:

- a) Συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων (parabolic trough system-PTC).
- b) Πύργο ισχύος-κεντρικό δέκτη, σε συνδυασμό με ηλιοστάτες (solar power tower-SPT).
- c) Συλλέκτες με γραμμικούς ανακλαστές Fresnel (linear Fresnel reflectors power plant-LFR).
- d) Συλλέκτες παραβολικών «πιάτων» (parabolic dish concentrator-PDC) [7].

Οι σταθμοί της κατηγορίας (a) είναι οι πιο διαδεδομένοι και προχωρημένοι σε μελέτες καθώς ήδη από το 1984 μέχρι το 1990 είχαν χτιστεί εννέα τέτοιου είδους σταθμοί (SEGS), στην έρημο Mojave της Καλιφόρνιας. Κάθε ένας από αυτούς τους σταθμούς έχει διαφορετική ισχύ εξόδου. Οι σταθμοί SEGS I, SEGS II είναι της τάξης των 14 MW και 30 MW αντίστοιχα. Οι πέντε σταθμοί SEGS III - SEGS VII είναι της τάξης των 30 MW και οι δύο σταθμοί SEGS VIII και SEGS IX της τάξης των 80 MW. Όλοι οι σταθμοί SEGS κατασκευάστηκαν από την εταιρία Luz International και σε συνδυασμό μπορούν να παρέχουν μέχρι και 354 MW μέγιστη ισχύ. Τέλος, παρέχουν τη δυνατότητα λειτουργίας συμβατικού λέβητα φυσικού αερίου που μπορεί να συνεισφέρει στη παραγωγή ατμού μέχρι και 25% [8]. Άλλα εργοστάσια που λειτουργούν με συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων είναι, οι σταθμοί: Nevada Solar One, ονομαστικής ισχύος 64 MW, της εταιρείας Acciona στην κοιλάδα El Dorado στη Νεβάδα των ΗΠΑ [7], Andasol 1,2,3 ονομαστικής ισχύος 50 MW έκαστος, της εταιρείας Solar Millennium, στην Ανδαλουσία της Ισπανίας που αποτελούν έναν από τους μεγαλύτερους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων στο κόσμο [9]. Άλλοι σημαντικοί σταθμοί, είναι τα εργοστάσια Solnova 1,3,4 στη Σεβίλλη της Ισπανίας τα οποία κατασκευάστηκαν το 2010 και σε συνδυασμό έχουν συνολική ονομαστική ισχύ 150 MW. Οι σταθμοί, Alvarado1 50 MW, Ibersol Ciudad Real 50 MW, Extresol 1&2 100MW, φανερώνουν την τεχνογνωσία και την εμπειρία της Ισπανίας σε τέτοιου

είδους τεχνολογίες, καθώς και τη στροφή της προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [10]. Γενικά οι συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων περιέχουν ένα γυάλινο σωλήνα κενού εντός του οποίου υπάρχει ο σωλήνας απορρόφησης ο οποίος παραλαμβάνει τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και εντός του οποίου ρέει το φέρον ρευστό. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απορρόφηση της ακτινοβολίας και να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας ο σωλήνας απορρόφησης είναι επιλεκτικά χρωματισμένος. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται αναλυτικά ο γυάλινος σωλήνας κενού και ο σωλήνας απορρόφησης. Οι μονάδες με συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων καταλαμβάνουν το μικρότερο δυνατό χώρο σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη σταθμών [1].

Οι σταθμοί της κατηγορίας (b) χρησιμοποιούν ένα πεδίο αποτελούμενο από ηλιοστάτες οι οποίοι συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία στο κεντρικό δέκτη (πύργο ισχύος). Κάθε ηλιοστάτης έχει το δικό του σύστημα παρακολούθησης του ήλιου το οποίο είναι κατά μήκος δύο αξόνων. Το σύστημα αυτό είναι ικανό να επιτύχει αρκετά υψηλές θερμοκρασίες στο φέρον ρευστό το οποίο ανέρχεται του πύργου και παραλαμβάνει τη θερμική ενέργεια της συγκεντρωμένης από τους ηλιοστάτες ακτινοβολίας. Αναπαράσταση τέτοιων σταθμών σε συνδυασμό με ενδεικτικές τιμές για ένα θερμικό κύκλο Rankine με χρήση νερού-ατμού ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Ο μεγαλύτερος ηλιακός θερμικός σταθμός παραγωγής ισχύος στον κόσμο λειτουργεί από το 2014 με αυτή τη τεχνολογία και εδρεύει στην έρημο της Mojave στη California. Ονομάζεται Ivanpah Solar Power Facility, συνολικής ονομαστικής ισχύος 392 MW, και αποτελείται από τρεις επιμέρους σταθμούς (πύργους), Ivanpah 1 (126 MW), Ivanpah 2 (133 MW), Ivanpah 3 (133 MW), ενώ έχει 173500 ηλιοστάτες επιφάνειας 14m^2 έκαστος. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και από τους 3 επιμέρους σταθμούς είναι αρκετή για να καλύψει τις ανάγκες 14×10^4 νοικοκυριών στη California κατά τις ώρες αιχμής. Επιπλέον, συνεισφέρει στη μείωση

των εκπομπών CO_2 κατά 4×10^5 τόνους ανά χρόνο [11,12]. Στην Ισπανία λειτουργούν ήδη τρεις τέτοιου είδους σταθμοί, το Planta Solar 10 (2007) ισχύος 11 MW, με 624 ηλιοστάτες επιμέρους επιφάνειας 120 m^2 , το Planta Solar 20 (2009) ισχύος 20 MW, με 1255 ηλιοστάτες επιμέρους επιφάνειας 120 m^2 και το Gemasolar ισχύος 17 MW. Περαιτέρω υπάρχουν και πιο μικρής ισχύος εργοστάσια εκ των οποίων, ένα βρίσκεται στις Η.Π.Α. (Sierra Sun Tower) και ένα στη Γερμανία (Julich) [1]. Τέλος, στην Ελλάδα αναμένεται να κατασκευαστεί το M.I.N.O.S CSP 50 MW από τις εταιρίες Nur Energie και Motor Oil Hellas, στην νοτιοανατολική Κρήτη, καθώς έχει υπάρξει η κατάλληλη αδειοδότηση για το έργο [13]. Επίσης, προβλέπεται η κατασκευή του σταθμού Aurora CSP 150 MW στη νότια Αυστραλία (Port Augusta) [14].

Οι σταθμοί της κατηγορίας (c) συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία με γραμμικούς ανακλαστήρες Fresnel σε διατάξεις οι οποίες περιέχουν επίπεδους ή ελαστικά κυρτωμένους ανακλαστήρες σε σειρά λωρίδων που κατευθύνονται αυτόματα προς τον ήλιο συγκεντρώνοντας την ακτινοβολία σε έναν συνήθως κυλινδρικό δέκτη με τη μορφή αγωγού όπου κυλάει το φέρον ρευστό [15]. Σχηματική απεικόνιση τέτοιου σταθμού φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Υπάρχουν συνολικά τρία ενεργά εργοστάσια με ανακλαστήρες Fresnel: ένα στις Η.Π.Α.(Καλιφόρνια) το Kimberlina ισχύος 5 MW, ένα στην Ισπανία (Calasparra) το Puerto Errado 1.4MW, και ένα στην Αυστραλία (Lake Liddell, New South Wales) [1] .

Οι σταθμοί της κατηγορίας (d) είναι πιο σπάνιοι από τις υπόλοιπες κατηγορίες, και υπάρχει μόνο ένας ενεργός, ο Maricopa Solar 1.5 MW στην Αριζόνα των Η.Π.Α., ο οποίος περιλαμβάνει 60 παραβολικά «πιάτα» που το καθένα τροφοδοτεί ένα 4-κύλινδρο κύκλο Stirling ισχύος 25 kW. Το εργαζόμενο μέσο αυτής της διάταξης είναι το υδρογόνο [16]. Οι σταθμοί παραβολικών «πιάτων» αποτελούνται από παραβολικούς ανακλαστήρες οι οποίοι ακολουθούν τη πορεία του ήλιου και συγκεντρώνουν την

ηλιακή ακτινοβολία στο σημείο εστίασης που είναι ο δέκτης. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες έως 750°C στο φέρον ρευστό που είναι συνήθως ήλιο ή υδρογόνο [10]. Συνήθως στο δέκτη είναι συνδεδεμένη μια θερμική μηχανή Stirling, αν και υπάρχει δυνατότητα λειτουργίας μικρής κλίμακας αεριοστροβίλου. Θεωρητικά μια μηχανή Stirling μπορεί να επιτύχει βαθμό απόδοσης μέχρι και 40%, ενώ στη πράξη έχει επιτευχθεί μέχρι και 30%. Ο δέκτης μπορεί να είναι μια δέσμη αγωγών που τους διαρρέει ένα ψυκτικό υγρό [15]. Μία τυπική διάταξη ενός συλλέκτη παραβολικού «πιάτου» συνδυασμένος με θερμικό κύκλο Stirling απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4. Επίσης στο Σχήμα 1.5 διακρίνονται έξι παραβολικοί «δίσκοι-πιάτα» στο ερευνητικό κέντρο της Plataforma Solar De Almeria της Ισπανίας ισχύος 10kW έκαστος.

Ολοκληρώνοντας τη παρουσίαση των κύριων τεχνολογιών που απαρτίζουν τους ηλιακούς σταθμούς παραγωγής ισχύος, γίνεται αναφορά σε κάποια βασικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε τεχνολογίας. Ο Πίνακας 1 αναφέρεται στο κόστος εγκατάστασης, στην ανάγκη σε έκταση γης, στο ψυκτικό μέσο, στην απόδοση, στη θερμοκρασία λειτουργίας, στο λόγο συγκέντρωσης και στη δυνατότητα εξέλιξης της εκάστοτε τεχνολογίας.

1.3 Δομή και στόχος της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσης εργασίας είναι ο βασικός σχεδιασμός (μελέτη, ανάλυση, προσομοίωση) των ηλιακών θερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και η δυνατότητα εφαρμογής τους στην Ελλάδα. Η μοντελοποίηση γίνεται με πηγαίο λογισμικό σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN καθώς και το λογισμικό TRNSYS (Transient System Simulation Program).

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή και απόδειξη των εξισώσεων οπτικού και θερμικού σχεδιασμού συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών. Ο οπτικός

σχεδιασμός περιλαμβάνει την ανάλυση του ηλιακού φάσματος και τον τρόπο απορρόφησης του καθώς αυτό προσπίπτει στην επιφάνεια συλλογής/απορρόφησης του εκάστοτε συλλέκτη. Ο θερμικός σχεδιασμός περιλαμβάνει τους υπολογισμούς των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας και άλλων ποσοτήτων οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στις βασικές εξισώσεις λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη γενική μορφή ενός ηλιακού θερμικού συστήματος και στο τρόπο με τον οποίο μπορεί να μοντελοποιηθεί. Οι εξισώσεις που αναφέρονται χρησιμοποιούνται στον πηγαίο κώδικα SolSys που αναπτύχθηκε από ερευνητές του εργαστηρίου Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, καθώς και στην επέκταση του για ηλιακά θερμικά συστήματα σε συνδυασμό με θερμική μηχανή. Επιπλέον, δίνεται έμφαση στην αξιοποίηση πραγματικών καιρικών συνθηκών με μεταφορά αρχείων από το λογισμικό TRNSYS. Η επέκταση του πηγαίου κώδικα SolSys πιστοποιείται με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία και με το πακέτο TRNSYS. Τέλος επισημαίνεται η αναγκαιότητα του βοηθητικού καυστήρα συμβατικής καύσης σε τέτοιου είδους συστήματα και περιγράφονται τα πεδία συνεισφοράς του.

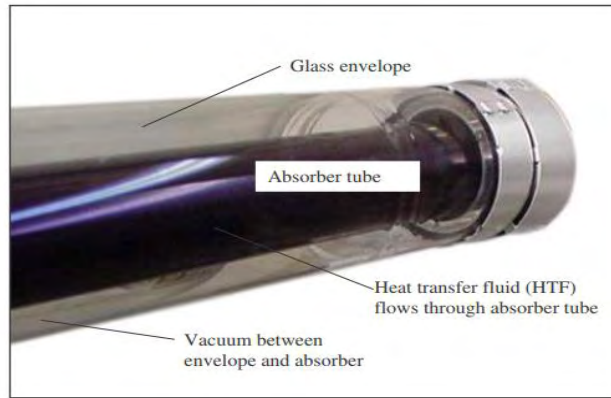
Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η προσομοίωση του σταθμού παραγωγής ισχύος SEGS VI (Solar Electric Generating Systems) που βρίσκεται στη Mojave της California. Για τη προσομοίωση χρησιμοποιείται το πακέτο TRNSYS και πιο συγκεκριμένα η βιβλιοθήκη STEC. Γίνεται εκτενής περιγραφή των εξισώσεων, των συνδέσεων των μεταβλητών, των αρχικών τιμών αναφοράς, και των παραμέτρων που διέπουν το κάθε επιμέρους στοιχείο του συστήματος της προσομοίωσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σταθμού SEGS VI. Επίσης, αυτά συγκρίνονται με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία.

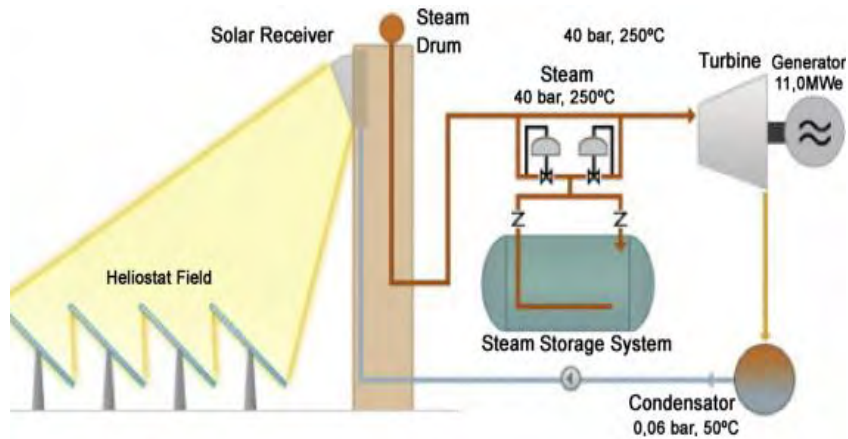
Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται σύντομη ανασκόπηση των πλέον σημαντικών συμπερασμάτων και αναφέρονται περιοχές μελλοντικής έρευνας.

Πίνακας 1 Ενδεικτικές τιμές για τις τέσσερις βασικές τεχνολογίες ηλιακών σταθμών [17].

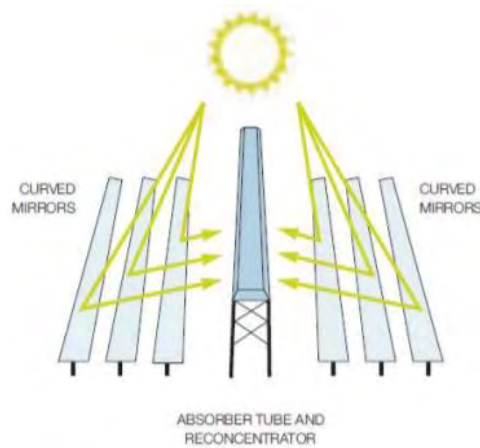
	Κόστος	Έκταση γης	Ψυκτικό μέσο [L/MWh]	Απόδοση	Εύρος T_{range} [°C]	C	Βελτίωση
PTC	Χαμηλό	Μεγάλη	3×10^3 ή αέρας	Χαμηλή	20–400	15– 45	Περιορισμένη
LFR	Πολύ Χαμηλό	Μεσαία	3×10^3 ή αέρας	Χαμηλή	50–300	10- 40	Σημαντική
SPT	Υψηλό	Μεσαία	1.5×10^3 ή αέρας	Υψηλή	300–565	150- 1500	Πολύ Σημαντική
PDC	Πολύ Υψηλό	Μικρή	-	Υψηλή	120–1500		Υψηλή για Μαζική Παραγωγή



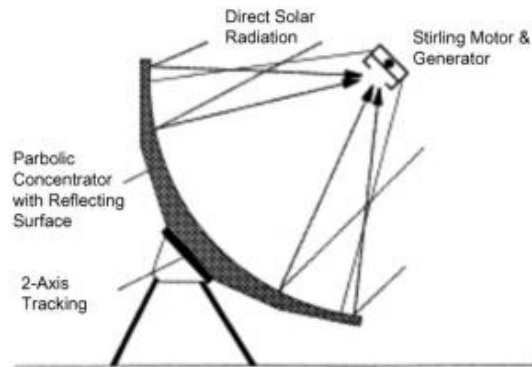
Σχήμα 1.1 Γυάλινος σωλήνας κενού και απορρόφησης [8].



Σχήμα 1.2 Απεικόνιση ηλιακού θερμικού κύκλου πεδίου ηλιοστατών-κεντρικού δέκτη [1].



Σχήμα 1.3 Ηλιακός θερμικός σταθμός παραγωγής ενέργειας με γραμμικούς ανακλαστήρες Fresnel [10].



Σχήμα 1.4 Ηλιακός συλλέκτης παραβολικού «πιάτου» συνδυασμένος με θερμικό κύκλο Stirling [1].



Σχήμα 1.5 Έξι παραβολικοί «δίσκοι-πιάτα» στο ερευνητικό κέντρο της Plataforma Solar De Almeria [10].

Κεφάλαιο 2 Ηλιακοί Συλλέκτες

2.1 Βασικές έννοιες

Η χρήση του ηλιακού συλλέκτη έγκειται στο να απορροφάει την ηλιακή ακτινοβολία με σκοπό τη μεταφορά της εναπομένουσας θερμικής ενέργειας σε ένα ρευστό, το οποίο με τη σειρά του την προσδίδει, είτε έμμεσα (π.χ. σε μια δεξαμενή αποθήκευσης), είτε άμεσα για οποιοδήποτε σκοπό χρήσης. Υπάρχουν τρία βασικά χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν την απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη:

- Η ικανότητα να απορροφά το μέγιστο της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας. Σχετίζεται με την οπτική απόδοση του συλλέκτη, $(\tau\alpha)_{eff}$ ή η_0 , η οποία θα αναλυθεί παρακάτω στον οπτικό σχεδιασμό.
- Η ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών του συλλέκτη προς το περιβάλλον. Σχετίζεται με τον αδιάστατο συντελεστή θερμικών απωλειών b , ο οποίος θα αναλυθεί κατά το θερμικό σχεδιασμό.
- Η ικανότητα μεταφοράς της θερμότητας που έχει απομείνει στο φέρον ρευστό. Σχετίζεται με τον παράγοντα θερμικής απολαβής F_R [18], ο οποίος επίσης θα αναλυθεί κατά τον θερμικό σχεδιασμό.

Οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίζονται σε :

- I. Επίπεδους (μη συγκεντρωτικοί)
- II. Συγκεντρωτικούς

Οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν ίδια επιφάνεια συλλογής και απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι συνήθως στατικές διατάξεις, ενώ οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες έχουν επί το πλείστον κοίλες επιφάνειες συλλογής της ακτινοβολίας, που εστιάζεται σε μικρότερη επιφάνεια απορρόφησης απ' όπου συνήθως διέρχεται το φέρον ρευστό. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία

λειτουργίας των συγκεντρωτικών έναντι των επίπεδων συλλεκτών. Επιπροσθέτως, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες συνήθως έχουν ένα σύστημα παρακολούθησης της πορείας του ηλίου, καθώς αξιοποιούν κατά κύριο λόγο την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία [19]. Κάθε μία από τις δύο αυτές κατηγορίες έχει πολλές υποκατηγορίες συλλεκτών διαφορετικής κατασκευής και όπως είναι αντιληπτό η επιλογή του εκάστοτε ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται από τη χρήση του (ιδιότητες) στο σύστημα, την απόδοση, το κλάσμα κάλυψης και την οικονομική ανάλυση. Η επιλογή κάθε ηλιακού συλλέκτη επίσης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φέροντος ρευστού του συλλέκτη, δηλαδή για χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας ($T_f < 100^\circ\text{C}$) χρησιμοποιούνται επίπεδοι συλλέκτες, για μέσες ($100^\circ\text{C} < T_f < 400^\circ\text{C}$) συλλέκτες κενού ή κάποια είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών, ενώ για υψηλές θερμοκρασίες ($400^\circ\text{C} < T_f < 1000^\circ\text{C}$) χρησιμοποιούνται ηλιοστάτες σε συνδυασμό με πύργο ισχύος με κεντρικό δέκτη, ή άλλα είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών [1].

2.2 Οπτικός σχεδιασμός

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ηλιακού συλλέκτη είναι το κάλυμμα και η πλάκα απορρόφησης, τα οποία διακρίνονται στο Σχήμα 2.1. Κατά τον οπτικό σχεδιασμό των ηλιακών συλλεκτών λαμβάνοντας υπόψιν δύο βασικοί παράγοντες :

- a) Η ελαχιστοποίηση των οπτικών απωλειών που προκαλούνται από την ανάκλαση της ακτινοβολίας στο κάλυμμα του συλλέκτη.
- b) Η μεγιστοποίηση της απορρόφησης της διαθέσιμης ακτινοβολίας από την πλάκα απορρόφησης [20].

Η μεθοδολογία είναι ίδια για όλους τους συλλέκτες, λαμβάνοντας όμως υπόψη τις αλλαγές στη γεωμετρία, στις επιμέρους επιφάνειες (συλλογής, απορρόφησης), και στον

αριθμός των καλυμμάτων. Στο πλαίσιο της εργασίας γίνεται αναφορά στον οπτικό σχεδιασμό ορισμένων συγκεντρωτικών συλλεκτών.

2.2.1 Οπτικός σχεδιασμός συγκεντρωτικού συλλέκτη

Αρχικά πρέπει να προσδιοριστεί ο λόγος συγκέντρωσης και η θεωρητικά μέγιστη τιμή του. Ως λόγος συγκέντρωσης C , ορίζεται το κλάσμα της επιφάνειας συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας A_c , προς την επιφάνεια απορρόφησης A_{abs} .

$$C = A_c / A_{abs}$$

Για τους επίπεδους συλλέκτες ο λόγος C είναι ίσος με τη μονάδα, ενώ για τους συγκεντρωτικούς είναι πάντα μεγαλύτερος. Για να προσδιοριστεί η θεωρητικά μέγιστη τιμή του πρέπει να καθοριστεί εάν ο συλλέκτης είναι τρισδιάστατο σώμα (παραβολοειδής συγκεντρωτής) ή δισδιάστατο (γραμμικός συγκεντρωτής). Για ένα σφαιρικό συγκεντρωτή ακτίνας r , ο οποίος έχει απόσταση R από τον ήλιο, το ήμισυ της γωνίας αποδοχής θ_m φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Θεωρώντας ότι ο ήλιος και ο απορροφητής είναι μελανά σώματα σε θερμοκρασίες (T_s, T_r) αντίστοιχα και ότι ο ήλιος είναι περίπου κυκλικός, η ακτινοβολία που εκπέμπει προς τη Γη είναι

$$Q_s = (4\pi r^2) \sigma T_s^4.$$

Το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια συλλογής του συγκεντρωτή ισούται με

$$E_{s \rightarrow r} = A_c / (4\pi R^2).$$

Άρα, η συνολική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο και προσπίπτει στην επιφάνεια απορρόφησης του συλλέκτη είναι

$$Q_{s \rightarrow r} = A_c (r^2 / R^2) \sigma T_s^4.$$

Με τη σειρά του ο απορροφητής εκπέμπει ενέργεια ίση με $A_{abs}T_r^4$, και ένα ποσοστό αυτής $E_{r \rightarrow s}$ φτάνει στον ήλιο, άρα

$$Q_{r \rightarrow s} = A_{abs} \sigma T_r^4 E_{r \rightarrow s}$$

Σε αυτή την ιδανικευμένη κατάσταση η μέγιστη θερμοκρασία του απορροφητή είναι ίση με αυτή του ηλίου, δηλαδή $Q_{s \rightarrow r} = Q_{r \rightarrow s}$, και επομένως προκύπτει η σχέση

$$A_c / A_{abs} = (R^2 / r^2) E_{r \rightarrow s}.$$

Αφού η μέγιστη τιμή του κλάσματος $E_{r \rightarrow s}$ ισοδυναμεί με τη μονάδα τότε η θεωρητικά μέγιστη τιμή για ένα σφαιρικό (τρισεδιάστατο) συγκεντρωτή είναι

$$C_{\text{παραβ,max}} = (A_c / A_{abs})_{\text{παραβ,max}} = R^2 / r^2 = 1 / \sin^2 \theta_m, \quad (1)$$

ενώ για ένα γραμμικό συγκεντρωτή είναι

$$C_{\text{γραμμικ,max}} = (A_c / A_{abs})_{\text{γραμμικ,max}} = 1 / \sin \theta_m, \quad (2)$$

Η γωνία αποδοχής ($2\theta_m$) υποδηλώνει το εύρος της ζώνης εντός της οποίας η ακτινοβολία γίνεται δεκτή από τον απορροφητή, χωρίς να χρειάζεται να τοποθετηθεί σύστημα παρακολούθησης του ηλίου. Για ένα συλλέκτη χωρίς τέτοιο σύστημα η γωνία θ_m εξαρτάται από τη πορεία του ηλίου. Για ένα συλλέκτη που έχει μονοαξονικό σύστημα παρακολούθησης του ηλίου το εύρος της γωνιακής ζώνης είναι μεγαλύτερο όπως είναι λογικό και περιγράφεται από την Εξ. (2). Το ίδιο ισχύει και για ένα συλλέκτη με διαξονικό σύστημα παρακολούθησης αντίστοιχα από την Εξ. (1). Συνοψίζοντας, οι συλλέκτες με διαξονικό σύστημα παρακολούθησης του ήλιου, έχουν τη μέγιστη τιμή του λόγου συγκέντρωσης [19,21].

Για το σύστημα ηλιοστατών πύργου ισχύος υπάρχουν και άλλες παράμετροι που πρέπει να συνυπολογιστούν, όπως η σκίαση της επιφάνειας συλλογής ενός ηλιοστάτη από έναν άλλο διπλανό του, καθώς και η παρεμπόδιση της ανακλώμενης

ακτινοβολίας ενός, από τους διπλανούς του ηλιοστάτες, με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής ακτινοβολίας που τελικά προσπίπτει στον πύργο. Για αυτό το λόγο οι ηλιοστάτες τοποθετούνται σε απόσταση μεταξύ τους με αποτέλεσμα μόνο ένα ποσοστό ψ της συνολικής περιοχής να καλύπτεται από αυτούς. Γενικά η τιμή του ψ κυμαίνεται μεταξύ 0.3 και 0.5. Για ένα τρισδιάστατο σύστημα ηλιοστατών με γωνία χείλους φ_r , γωνία διασποράς δ , σε γεωγραφικό πλάτος φ , και σφαιρικό πύργο-δέκτη, ο μέγιστος λόγος συγκέντρωσης δίνεται από τη σχέση [21]

$$C_{\max} = \frac{\psi \sin^2 \varphi_r}{4 \sin^2 (0.267 + \delta/2)} - 1 ,$$

ενώ για έναν επίπεδο πύργο-δέκτη από τη σχέση

$$C_{\max} = \psi \left[\frac{\sin \varphi_r \cos(\varphi_r + 0.267 + \varphi/2)}{\sin(0.267 + \delta/2)} \right]^2 - 1 .$$

Για έναν συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου (PTC-parabolic trough collector) τα χρήσιμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διακρίνονται στο Σχήμα 2.3. Η άκρη της παραβολής, όπου η ακτίνα r_r από το συγκεντρωτή είναι μέγιστη, σχηματίζει τη γωνία χείλους φ_r με τη προσπίπτουσα ακτινοβολία σε εκείνο το σημείο. Η εξίσωση της παραβολικής επιφάνειας του κατόπτρου, βάση του συστήματος συντεταγμένων, ορίζεται από την εξίσωση $y = 4fx$, με f να είναι η απόσταση εστίασης της παραβολής. Στο Σχήμα 2.2 διακρίνεται η γωνία αποδοχής $2\theta_m$ βάση της οποίας ορίζεται ο μέγιστος συντελεστής συγκέντρωσης.

Για ένα κατοπτρικό ανακλαστήρα με τέλεια ευθυγράμμιση η απαιτούμενη διάμετρος ενός κυλινδρικού δέκτη για να απορροφά όλη την ηλιακή ενέργεια δίνεται από την εξίσωση

$$D = 2r_r \sin(\theta_m)$$

και η ακτίνα της παραβολής είναι

$$r = 2f / [1 + \cos(\varphi)]$$

όπως διακρίνονται στο Σχήμα 2.3. Είναι κατανοητό ότι για τη γωνία χείλους $\varphi = \varphi_r$ η μέγιστη ακτίνα από τον δέκτη είναι

$$r_r = 2f / [1 + \cos(\varphi_r)]. \quad (3)$$

Το μήκος της παραβολής δίνεται από την εξίσωση

$$W_a = 2r_r \sin(\varphi_r) \quad (4)$$

και αντικαθιστώντας την εξίσωση (3) στη (4) προκύπτει

$$W_a = 4f \sin(\varphi_r) / [1 + \cos(\varphi_r)] \quad \text{ή} \quad W_a = 4f \tan(\varphi_r / 2). \quad (5)$$

Η μισή τιμή της γωνίας αποδοχής θ_m εξαρτάται από την ακρίβεια του μηχανισμού παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου και από τις ανωμαλίες της επιφάνειας συλλογής του ανακλαστήρα, όπως έχει προαναφερθεί. Όσο πιο ακριβείς είναι οι δύο τελευταίοι παράγοντες τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος της ζώνης εντός του οποίου η ηλιακή ακτινοβολία γίνεται αποδεκτή και αυτό έχει ως συνέπεια μεγαλύτερο κλάσμα συγκέντρωσης C . Για ένα τέλειο συλλέκτη η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στον ανακλαστήρα σε γωνία $2\theta_m$ και ανακλάται στην ίδια γωνία ακριβώς. Αυτό όμως δεν ισχύει στη πράξη, γι' αυτό εισάγεται ο συντελεστής παρεμπόδισης γ . Από τον ορισμό του λόγου συγκέντρωσης ισχύει ότι

$$C_{PTC} = A_c / A_{abs} = W_a / \pi D .$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση για την ακτίνα του δέκτη D , και την Εξ. (5) προκύπτει ο λόγος συγκέντρωσης

$$C_{PTC} = \frac{\sin(\varphi_r)}{\pi \sin(\theta_m)} ,$$

για ένα PTC συλλέκτη με κυλινδρικό δέκτη συναρτήσει των γωνιών θ_m, φ_r .

Ο μέγιστος λόγος συγκέντρωσης προκύπτει όταν η γωνία χείλους είναι $\varphi_r = 90^\circ$, επομένως

$$C_{PTC, \max} = \frac{1}{\pi \sin(\theta_m)} .$$

Η διαφορά της τελευταίας εξίσωσης με τις (1), (2) είναι ότι αυτή ισχύει αποκλειστικά για έναν PTC με κυλινδρικό δέκτη ενώ οι πρώτες δύο είναι γενικές σχέσεις και ισχύουν σε εξιδανικευμένες περιπτώσεις.

Επιπροσθέτως, για να ολοκληρωθεί ο οπτικός σχεδιασμός θα πρέπει να καθοριστεί ο οπτικός βαθμός απόδοσης η_o του συλλέκτη, ο οποίος ορίζεται ως το κλάσμα της ενέργειας που απορροφάται από τον απορροφητή προς την ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια συλλογής και δίδεται από τη σχέση

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

όπου ρ ο συντελεστής ανάκλασης του κατόπτρου, τ η διαπερατότητα του καλύμματος, α η ικανότητα απορροφητικότητας του απορροφητή, γ ο συντελεστής παρεμπόδισης και A_f ο γεωμετρικός παράγοντας μείωσης της επιφάνειας. Ο γεωμετρικός παράγον A_f είναι ένας συντελεστής μείωσης της επιφάνειας συλλογής λόγω ανωμαλιών που προκύπτουν κατά τη πρόσπτωση της ακτινοβολίας, σκιών, ή άλλων εμποδίων. Για έναν PTC συλλέκτη (parabolic trough collector), κάποιες φορές η ακτινοβολία που ανακλάται κοντά στα άκρα του συγκεντρωτή, αντίθετα του ηλίου, δεν φτάνει στον δέκτη. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται «end effect», και φαίνεται στο Σχήμα 2.4, όπου

$$A_e = f W_a \left[1 + \frac{W_a^2}{48 f^2} \right] \text{ και } A_b = \frac{2}{3} W_a h_p ,$$

με h_p να είναι το ύψος, W_a η επιφάνεια της παραβολής και f η απόσταση εστίασης.

Επομένως μπορεί να υπολογιστεί τελικά για έναν PTC συλλέκτη η ποσότητα

$$A_f = (A_e + A_b) / A_c .$$

Ο πιο χρονοβόρος και συνάμα δύσκολος υπολογισμός είναι αυτός του συντελεστή παρεμπόδισης γ ο οποίος δίνεται αναλυτικά στην ενότητα 3.6.3 της αναφοράς [19] για έναν PTC συλλέκτη. Γενικά ο οπτικός σχεδιασμός διαφέρει ανάλογα με το είδος του συλλέκτη [15,19,20,21].

2.3 Θερμικός σχεδιασμός

2.3.1 Θερμικός σχεδιασμός συγκεντρωτικού συλλέκτη

Για ένα συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη η γενική θερμική ανάλυση είναι ίδια με αυτή ενός επίπεδου με τις διαφορές να έγκειται στις διαφορετικές γεωμετρίες και χαρακτηριστικά του συλλέκτη. Οι σημαντικές θερμικές απώλειες στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες εδρεύουν στον δέκτη (απορροφητή), εκεί όπου γίνεται η απορρόφηση της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, και μπορούν να περιγραφούν από έναν συντελεστή απωλειών U_L ο οποίος ανάγεται στην επιφάνεια απορρόφησης του δέκτη A_{abs} . Η μεθοδολογία για τον υπολογισμό των απωλειών δεν μπορεί να συνοψιστεί για όλους τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες καθώς υπάρχει ποικιλομορφία στον σχεδιασμό και στη διαμόρφωσή τους. Στο πλαίσιο της εργασίας μελετάται ο θερμικός σχεδιασμός ενός συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου (PTC) για την περίπτωση, «γυμνού» αγωγού και αγωγού κενού με γυάλινο κάλυμμα, ως δέκτη. Και στις δύο περιπτώσεις υπολογίζονται οι απώλειες λόγω συναγωγής, ακτινοβολίας και αγωγής.

Για ένα «γυμνό» κυλινδρικό δέκτη ο συντελεστής απωλειών θερμότητας με το περιβάλλον δίνεται από την Εξ. (8), με το συντελεστή h_w να εκφράζει τις απώλειες λόγω συναγωγής, το συντελεστή h_r τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας και το συντελεστή

h_c τις απώλειες λόγω αγωγής στη στήριξη του δέκτη. Πιο συγκεκριμένα ο γραμμικοποιημένος συντελεστής απωλειών λόγω ακτινοβολίας είναι

$$h_r = \varepsilon\sigma \frac{(T_r^4 - T_{sky}^4)}{T_r - T_a}. \quad (6)$$

Για τις απώλειες λόγω συναγωγής με το περιβάλλον θα πρέπει να καθοριστεί η ροή του αέρα. Για $0.1 < Re < 1000$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση

$$Nu = 0.4 + 0.54 Re^{0.52},$$

ενώ για $1000 < Re < 50000$

$$Nu = 0.3 Re^{0.6},$$

όπου $Nu = h_w L/k$, είναι ο αριθμός Nusselt. (7)

Επίσης με L, k συμβολίζονται το μήκος του αγωγού και η θερμική αγωγιμότητα του αέρα αντίστοιχα. Τέλος, για τις απώλειες λόγω αγωγής h_c θα πρέπει να είναι γνωστή η κατασκευή του αγωγού απορρόφησης, διότι αυτές οι απώλειες εμφανίζονται στη στήριξη του. Άρα, ο συνολικός συντελεστής απωλειών είναι

$$U_L = h_w + h_r + h_c. \quad (8)$$

Σε περίπτωση που η τιμή του U_L δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, λόγω των μεγάλων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας κατά μήκος της ροής, ο αγωγός μπορεί να χωριστεί σε τμήματα, που το καθένα από αυτά θα έχει και ένα δικό του σταθερό U_L .

Για τη περίπτωση που τοποθετείται ομόκεντρο γυάλινο προστατευτικό κάλυμμα κενού γύρω από τη σωλήνα απορρόφησης, οι απώλειες λόγω συναγωγής ανάμεσα στη σωλήνα απορρόφησης και στο κάλυμμα μηδενίζονται. Άρα, ο συνολικός συντελεστής απωλειών δίνεται από την εξίσωση

$$U_L = \left[\frac{A_{abs}}{(h_w + h_{r,g-amb})A_g} + \frac{1}{h_{r,r-g}} \right]^{-1} \quad (9)$$

όπου $h_{r,g-amb}$ είναι ο γραμμικοποιημένος συντελεστής απωλειών λόγω ακτινοβολίας του γυάλινου καλύμματος με το περιβάλλον, που δίνεται στην Εξ. (6) όπου $T_r \equiv T_g$, A_g είναι η εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος, h_w είναι ο συντελεστής που περιγράφει τις απώλειες λόγω συναγωγής του καλύμματος με το περιβάλλον, που δίνεται στην Εξ. (7) ανάλογα το είδος της ροής του αέρα και $h_{r,r-g}$ είναι ο γραμμικοποιημένος συντελεστής απωλειών λόγω ακτινοβολίας του σωλήνα απορρόφησης με το κάλυμμα που δίδεται από τη σχέση

$$h_{r,r-g} = \frac{\sigma(T_r + T_g)(T_r^2 + T_g^2)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_{abs}}{A_g} \left(\frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)} .$$

Στη προηγούμενη εξίσωση χρειάζεται να υπολογιστεί η θερμοκρασία της επιφάνειας του καλύμματος T_g , η οποία είναι πιο κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος T_a , σε σχέση με αυτή του δέκτη T_r . Αυτό γίνεται εφικτό εφαρμόζοντας το κατάλληλο ενεργειακό ισοζύγιο, αγνοώντας την ακτινοβολία που απορροφάται από το κάλυμμα, και επιλύοντας ως προς T_g :

$$\begin{aligned} A_g (h_{r,g-amb} + h_w)(T_g - T_a) &= A_{abs} h_{r,r-g} (T_r - T_g) \Rightarrow \\ \Rightarrow T_g &= \frac{A_{abs} h_{r,r-g} T_r + A_g (h_{r,g-amb} + h_w) T_a}{A_{abs} h_{r,r-g} + A_g (h_{r,g-amb} + h_w)} \end{aligned} \quad (10)$$

Η διαδικασία υπολογισμού της T_g είναι επαναληπτική. Πρώτα υποθέτουμε μια τιμή της κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος, υπολογίζουμε τον συντελεστή U_L από την Εξ. (9), αφού έχουμε πρώτα υπολογίσει τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας από τις Εξ. (6) και (7). Μετά ελέγχεται η νέα τιμή της T_g από την πάνω Εξ. (10). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να επιτευχθεί σύγκλιση. Τέλος, για τον υπολογισμό του ολικού συντελεστή θερμικών απωλειών πρέπει να συμπεριληφθούν

οι απώλειες θερμότητας διαμέσου του τοιχώματος της σωλήνας απορρόφησης διότι στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες. Η παρακάτω σχέση περιγράφει τον συνολικό συντελεστή θερμικών απωλειών ενός συγκεντρωτικού συλλέκτη

$$U_0 = \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} \right]^{-1},$$

όπου με D_o, D_i, k είναι, η εξωτερική, η εσωτερική διάμετρος και η θερμική αγωγιμότητα της σωλήνας αντίστοιχα. Ο συντελεστής h_{fi} περιγράφει τις απώλειες λόγω συναγωγής του φέροντος ρευστού εντός του αγωγού και δίνεται από τις Εξ(11) και (12), για τυρβώδη και στρωτή ροή αντίστοιχα, μέσω του αριθμού Nusselt για ροή ρευστού διαμέσου σωλήνα.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = h_{fi} L / k_{fi}, \quad \text{για } Re > 2300 \quad (11)$$

$$Nu = 4.364 = h_{fi} L / k_{fi}, \quad \text{για } Re \leq 2300 \quad (12)$$

Η απεικόνιση των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας που αντιστοιχούν στις θερμικές αντιστάσεις για την περίπτωση ενός ομόκεντρου γυάλινου προστατευτικού καλύμματος κενού γύρω από τη σωλήνα απορρόφησης φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Η στιγμιαία χρήσιμη ενέργεια που αποκτάει ο συγκεντρωτικός συλλέκτης μπορεί να υπολογιστεί από το ισοζύγιο ενέργειας

$$Q_u = Q_{beam} - Q_{loss} \Rightarrow Q_u = S_{beam} \eta_0 A_c - A_{abs} U_L (T_r - T_a)$$

με τον στιγμιαίο βαθμό απόδοσης να δίνεται από την εξίσωση

$$\eta_c = Q_u / S_{beam} A_c.$$

Άρα, από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι

$$\eta_c = \eta_0 - \frac{U_L (T_r - T_a)}{S_{beam}} \frac{1}{C}.$$

Από τη τελευταία σχέση γίνεται φανερό ότι παρόλο που οι απώλειες των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι μεγαλύτερες από αυτές των επίπεδων λόγω της ακτινοβολίας και των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, ο βαθμός απόδοσης των συγκεντρωτικών παραμένει υψηλός και πολλές φορές είναι μεγαλύτερος από των επίπεδων συλλεκτών, αφού $C \gg 1$, ενώ $C_{flat-plate} = 1$. Να σημειωθεί ότι οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες αξιοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία του ήλιου Q_{beam} .

Η ωφέλιμη ενέργεια ανά μονάδα μήκους του αγωγού δίνεται από την εξίσωση

$$q_u = \frac{S_{beam} \eta_0 A_c}{L} - \frac{A_{abs} U_L (T_r - T_a)}{L}.$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση για τη μεταφορά θερμότητας από το φέρον ρευστό στιγμιαίας θερμοκρασίας T_f η ωφέλιμη ενέργεια ανά μονάδα μήκους του αγωγού δίνεται από την εξίσωση

$$q_u = \frac{(A_{abs}/L)(T_r - T_f)}{\frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k}}.$$

Με απαλοιφή της θερμοκρασίας T_r από τις δύο παραπάνω σχέσεις για την ωφέλιμη ενέργεια προκύπτει

$$q_u = F' \frac{A_c}{L} \left[\eta_0 S_{beam} - \frac{U_L}{C} (T_f - T_a) \right],$$

όπου F' ο παράγοντας απόδοσης του συλλέκτη

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k}} = \frac{1/U_L}{1/U_0} = \frac{U_0}{U_L},$$

με $1/U_0$ να εκφράζουν τις θερμικές απώλειες φέροντος ρευστού/περιβάλλοντος και $1/U_L$ να εκφράζουν τις θερμικές απώλειες του κυλινδρικού δέκτη με το περιβάλλον.

Ο παράγοντας απόδοσης F' εκφράζει την αναλογία ανάμεσα στην πραγματική

θερμική ενέργεια που παραλαμβάνει το φέρον ρευστό από τον συλλέκτη, προς την θερμική ενέργεια που θα παραλάμβανε αν η κυλινδρική επιφάνεια απορρόφησης είχε την τοπική (στιγμιαία) θερμοκρασία $T_f(y)$, με y να συμβολίζει τον άξονα κατά τη κατεύθυνση της ροής του φέροντος ρευστού. Όμοια προκύπτει και ο παράγων θερμικής απολαβής F_R , που εκφράζει την αναλογία ανάμεσα στην πραγματική θερμική ενέργεια που παραλαμβάνει το φέρον ρευστό από τον συλλέκτη, προς την θερμική ενέργεια που θα παραλάμβανε αν όλος ο αγωγός απορρόφησης είχε την θερμοκρασία εισόδου του φέροντος ρευστό T_{fin} και ορίζεται ως

$$F_R = \frac{Q_u}{S_{beam}\eta_0 A_c - A_{abs} U_L (T_{fin} - T_a)} = \frac{\dot{m} c_p (T_{fout} - T_{fin})}{A_c [S_{beam}\eta_0 - U_L (T_{fin} - T_a)/C]}$$

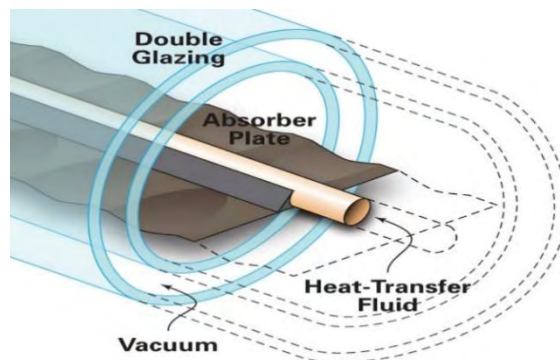
Μία άλλη σχέση που περιγράφει το F_R ως συνάρτηση του παράγοντα απόδοσης είναι η εξής :

$$F_R = \left(\dot{m} c_p / A_{abs} U_L \right) \left[1 - e^{-U_L F A_{abs} / \dot{m} c_p} \right]$$

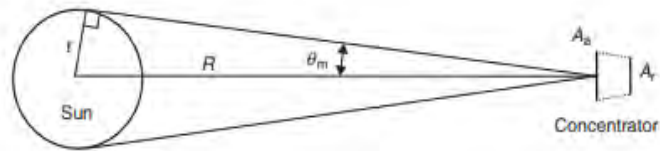
Άρα, η ωφέλιμη ενέργεια συλλογής και η απόδοση του συλλέκτη μπορούν να διατυπωθούν συναρτήσει του παράγοντα θερμικής απολαβής [15,18,19,20,21] :

$$Q_u = F_R \left[S_{beam}\eta_0 A_c - A_{abs} U_L (T_{fin} - T_a) \right] = F_R A_c \left[S_{beam}\eta_0 - \frac{U_L (T_{fin} - T_a)}{C} \right],$$

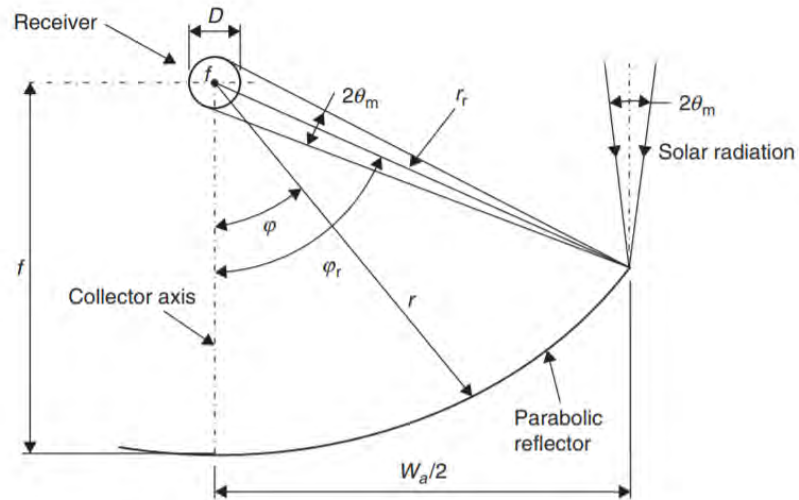
$$\eta = F_R \left[\eta_0 - U_L \left(\frac{T_{fin} - T_a}{S_{beam} C} \right) \right].$$



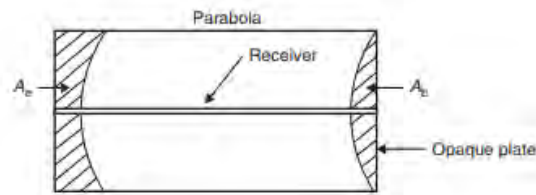
Σχήμα 2.1 Απορροφητική πλάκα και κάλυμμα ενός συλλέκτη κενού διπλής υάλωσης [22].



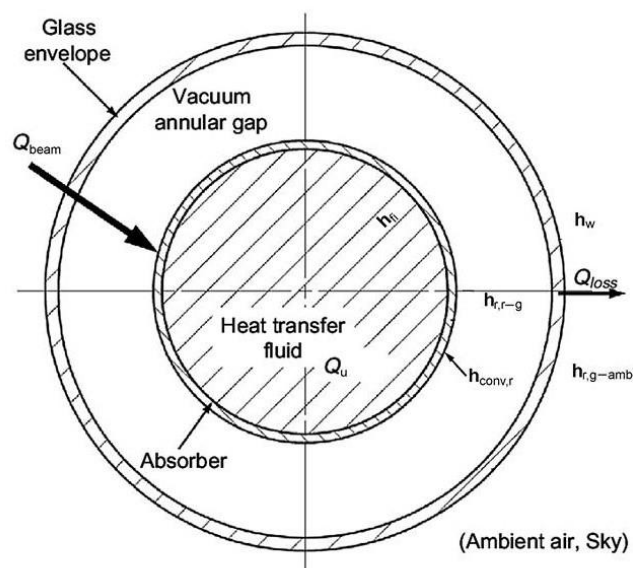
Σχήμα 2.2 Γωνία αποδοχής θ_m μεταξύ ηλίου και συγκεντρωτή [19].



Σχήμα 2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός PTC συλλέκτη [19].



Σχήμα 2.4 Οι επιφάνειες A_e, A_b στις οποίες προκαλείται το «end effect» [19].



Σχήμα 2.5 Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για ένα δέκτη με γυάλινο σωλήνα κενού [23].

Κεφάλαιο 3 Μοντελοποίηση Σταθμού Παραγωγής

Ισχύος με Η.Θ.Σ.

Πολλά διαφορετικά ηλιακά θερμικά συστήματα μπορούν να αναπαρασταθούν με ένα απλό σύστημα όπως αυτό του Σχήματος 3.1. Το σύστημα αποτελείται από έναν ηλιακό συλλέκτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης και ένα στοιχείο που προσομοιώνει το φορτίο χρήσης. Επίσης, περιέχει δύο αντλίες, οι οποίες πέρα από τη κίνηση που προσδίδουν στο αντίστοιχο ρευστό, υποστηρίζουν και τον έλεγχο συστήματος. Κάθε σύστημα ελέγχεται και ρυθμίζεται ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του, όπως και διαφορετικό τρόπο προσομοίωσης του εκάστοτε φορτίου. Συστήματα όπως, ζεστού νερού χρήσης, θέρμανσης εσωτερικού χώρου, βιομηχανικής θέρμανσης/ψύξης και πολλά άλλα μπορούν να αναπαρασταθούν με αυτό το μοντέλο. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας θα μελετηθεί ένα υψηλής θερμοκρασίας θερμικό σύστημα παραγωγής έργου.

3.1 Ηλιακός συλλέκτης υψηλής θερμοκρασίας

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες έχουν περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας περίπου $[40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}]$ ανάλογα με το τύπο του συλλέκτη, ενώ αντίθετα οι συγκεντρωτικοί πετυχαίνουν υψηλότερες θερμοκρασίες. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται συγκεντρωτικός συλλέκτης, χωρίς καθοριστεί το είδος του, αφού η ανάλυση που θα ακολουθήσει είναι σχετικά απλή και συμπεριλαμβάνει γενικούς υπολογισμούς, οι οποίοι ισχύουν για κάθε είδος. Ο τύπος της απόδοσης για έναν συγκεντρωτικό ηλιακό συλλέκτη είναι ο εξής:

$$\eta = \frac{Q_u(t)}{q_s(t)A_c} = (\tau\alpha)_{\text{eff}} - \left[b(\bar{\theta}_{\pi\lambda} - \theta_{\alpha}) + a(\bar{\theta}_{\pi\lambda}^4 - \theta_{\alpha}^4) \right] / \psi(t),$$

Η ποσότητα $(\tau\alpha)_{eff}$ εκφράζει το κλάσμα της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην πλάκα απορρόφησης, όπως έχει αναλυθεί κατά τον οπτικό σχεδιασμό του συλλέκτη. Ο πρώτος όρος εντός της αγκύλης, εκφράζει τις απώλειες λόγω αγωγής και συναγωγής και εξαρτάται από τον μέσο συνολικό συντελεστή θερμικών απωλειών U_L , καθώς ως b ορίζεται ο αδιάστατος συντελεστής απωλειών λόγω αγωγής και συναγωγής. Ο δεύτερος όρος a εκφράζει τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας του ηλιακού συλλέκτη. Αυτός ο όρος μπορεί να αγνοηθεί για συλλέκτες οι οποίοι λειτουργούν μέχρι και 50°C πάνω από τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος, αφού είναι αμελητέος σε σχέση με τις απώλειες λόγω αγωγής και συναγωγής. Έτσι η εξίσωση για την απόδοση γίνεται γραμμική με τη θερμοκρασία. Όμως, για τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες που λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, έχει σημαντικό ρόλο λόγω της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς με αυτή του περιβάλλοντος, και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Οι αδιάστατες παράμετροι a και b δίνονται από τις σχέσεις

$$b = \frac{U_L A_{abs} \bar{T}_a}{q_{s,ref} A_c} = \frac{U_L \bar{T}_a}{q_{s,ref} C}, \quad (13)$$

$$a = \frac{\varepsilon_{eff} \sigma A_{abs} \bar{T}_a^4}{q_{s,ref} A_c} = \frac{\varepsilon_{eff} \sigma \bar{T}_a^4}{q_{s,ref} C},$$

όπου ο όρος

$$\bar{\theta}_{\pi\lambda} = \bar{T}_{\pi\lambda} / \bar{T}_a$$

είναι η αδιάστατη μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης, ενώ ο

$$\theta_a = T_a / \bar{T}_a$$

είναι η αδιάστατη θερμοκρασία περιβάλλοντος, και

$$\psi(t) = q_s / q_{s,ref},$$

το κλάσμα ακτινοβολίας.

Τέλος η ποσότητα $q_{s,ref}$ εκφράζει μία τιμή αναφοράς της ηλιακής ακτινοβολίας, για παράδειγμα την μέγιστη τιμή της σε μια καθαρή μέρα ηλιοφάνειας, ενώ \bar{T}_a είναι η μέση καθημερινή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για υπολογιστική ευκολία και λόγω ότι είναι πιο δύσκολο να μετρηθεί η μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης ο τύπος της απόδοσης μπορεί να μετασχηματιστεί

$$\eta = F_R \left[(\tau\alpha)_{eff} - \left[b(\bar{\theta}_{fin} - \theta_\alpha) + a(\bar{\theta}_{fin}^4 - \theta_\alpha^4) \right] / \psi(t) \right] \quad (14)$$

διευκολύνοντας τον υπολογισμό της απόδοσης αφού συνήθως είναι γνωστή η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού $\theta_{fin} = T_{fin} / \bar{T}_a$, όπως και η τιμή του F_R του εκάστοτε συλλέκτη.

Η ωφέλιμη ενέργεια του συλλέκτη υπολογίζεται από τη θερμοδυναμική εξίσωση

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_{fout} - T_{fin}),$$

η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη μέσω της ωφέλιμης ενέργειας ορίζεται από τη σχέση

$$\eta = Q_u / q_s A_c. \quad (15)$$

Η θερμοκρασία εξόδου από το συλλέκτη προκύπτει από την εξίσωση

$$T_{fout} = T_{fin} \left(1 - \frac{bF_R}{\gamma} \right) + \frac{F_R \bar{T}_a}{\gamma} \left[(\tau\alpha)_{eff} + b\theta_\alpha \right] - \frac{\alpha \bar{T}_a}{\gamma} (\theta_{\pi\lambda}^4 - \theta_\alpha^4),$$

όπου

$$\gamma = \delta_\Sigma \dot{m} c_p \bar{T}_a / A_c q_{s,ref}, \quad \text{με } \gamma \in (0, +\infty) \quad (16)$$

και εκφράζει την ικανότητα του φέροντος ρευστού να απάγει ενέργεια από το συλλέκτη στην ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς. Η ποσότητα δ_Σ παίρνει τιμές 0 και 1 αν η αντλία του συλλέκτη είναι ανοιχτή ($\delta_\Sigma = 1$), ή κλειστή αντίστοιχα. Η θερμοκρασία εξόδου του φέροντος ρευστού από το συλλέκτη (T_{fout}) δίνεται από τη σχέση

$$T_{fout} = T_{fin} \left(1 - \frac{bF_R}{\gamma} \right) + \frac{F_R \bar{T}_a}{\gamma} [(\tau\alpha)_{eff} + b\theta_\alpha] - \frac{\alpha \bar{T}_a}{\gamma} (\theta_{fin}^4 - \theta_\alpha^4).$$

Η αντικατάσταση της μέσης θερμοκρασίας της πλάκας απορρόφησης με τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού ($\theta_{fin} \equiv \bar{\theta}_{\pi\lambda}$), θεωρείται συνήθως "αποδεκτή" αφού για έναν συλλέκτη που λειτουργεί στους 300K και με 5K άνοδο της θερμοκρασίας, η προσέγγιση έχει 3.4% σφάλμα, ενώ η τιμή του σφάλματος μειώνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας. Τέλος, είναι αναγκαίος ο έλεγχος της θερμοκρασίας της πλάκας απορρόφησης σε μηδενικές συνθήκες ροής (T_{stag}). Η θερμοκρασία αυτή προσδιορίζεται υπό τους όρους

$$(\dot{m} = 0) \Leftrightarrow (\delta_\Sigma = 0),$$

$$(\eta = 0) \Rightarrow$$

$$T_{stag} = \theta_\alpha \bar{T}_a + \frac{(\tau\alpha)_{eff} \psi(t)}{b} \bar{T}_a - \frac{a}{b} (\theta_{stag}^4 - \theta_\alpha^4) \bar{T}_a \Leftrightarrow$$

$$T_{stag} = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{eff} \psi(t)}{b} \bar{T}_a - \frac{\varepsilon_{eff} \sigma}{U_L} (T_{stag}^4 - T_a^4) \quad (17)$$

Για συλλέκτες που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως οι επίπεδοι, δεν είναι αναγκαίος ο έλεγχος της θερμοκρασίας της πλάκας απορρόφησης για μηδενικές συνθήκες ροής, αφού η θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης (T_{stag}) παίρνει αρκετά χαμηλές τιμές (ο όρος των απωλειών από ακτινοβολία είναι αμελητέος). Για τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες όμως, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες λειτουργίας, η μέγιστη θερμοκρασία T_{stag} μπορεί να αποτελέσει έναν περιορισμό ανάλογα με την κατανομή της, αφού η τιμή της μπορεί να γίνει αρκετά υψηλή. Η εξίσωση (17) επιλύεται επαναληπτικά [18,20].

3.2 Δεξαμενή αποθήκευσης

Εξετάζεται δεξαμενή αποθήκευσης πλήρης ανάμειξης με ομοιόμορφη θερμοκρασία T_{st} η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο. Οι θερμικές απώλειες της δεξαμενής με το περιβάλλον θεωρούνται ομοιόμορφες και χαρακτηρίζονται από έναν ολικό συντελεστή U_{st} .

3.3 Φορτίο

Ένας χρήσιμος και συνάμα απλός τρόπος προσομοίωσης του φορτίου είναι η θεώρηση εναλλαγής θερμικής ενέργειας σε εναλλάκτη θερμότητας, όπου το θερμό ρευστό εισαγωγής αναρροφάται από τη δεξαμενή αποθήκευσης ($T_{Lin} = T_{st}$). Το θερμικό καθήκον του εναλλάκτη είναι ίσο με αυτό του φορτίου:

$$Q_L = \delta_L \dot{m} c_p (T_{Lin} - T_{Lout})$$

Η ποσότητα δ_L παίρνει τιμές 0 και 1 και αντιπροσωπεύει αν η αντλία του φορτίου είναι ανοιχτή ($\delta_L = 1$), ή κλειστή ($\delta_L = 0$). Για ένα θερμικό σύστημα παραγωγής έργου θα πρέπει αρχικά να καθοριστεί η συνολική ηλεκτρική ισχύς \dot{W}_e που θα έχει το σύστημα. Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη μειώνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας, ενώ αντίθετα η θερμοδυναμική απόδοση ενός θερμικού κύκλου αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ της ανώτατης και της κατώτατης θερμοκρασίας T_{Lin} . Πιο συγκεκριμένα για ένα κύκλο Carnot η κατώτατη θερμοκρασία (απόρριψης) δεν θα μπορούσε να είναι άλλη παρά αυτή του περιβάλλοντος T_a . Ο τύπος της απόδοσης για ένα κύκλο Carnot δίνεται από την εξίσωση

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}} = 1 - \frac{T_a}{T_{Lin}}. \quad (18)$$

Συνοψίζοντας, σε θερμικό κύκλο Carnot με σταθερή συνολική ισχύ η μοντελοποίηση του φορτίου γίνεται ως εξής [3,18,20]:

$$Q_L = \frac{\dot{W}_e}{\eta_t} = \frac{\dot{W}_e}{1 - T_a/T_{Lin}} \quad (19)$$

3.4 Επεκτάσεις πηγαίου κώδικα SolSys

Τα τελευταία χρόνια δημιουργήθηκε από ερευνητές του εργαστηρίου Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ο πηγαίος κώδικας SolSys, σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN που μπορεί να υπολογίσει την απόδοση, το φορτίο κάλυψης και άλλες βασικές παραμέτρους σχεδιασμού ενός ηλιακού θερμικού συστήματος με επίπεδους συλλέκτες. Εφαρμόζεται για συστήματα ζεστού νερού χρήσης και συστήματα θέρμανσης με σταθερή ή και μεταβλητή ζήτηση φορτίου. Τέλος, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία καθώς και η θερμοκρασία περιβάλλοντος προσομοιώνονται ως ημιτονοειδής συναρτήσεις και οι υπολογισμοί γίνονται με χρονικό βήμα ενός λεπτού.

3.4.1 Θερμική μηχανή Carnot

Τμήμα της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει την επέκταση του κώδικα έτσι ώστε να μπορεί να χειριστεί ηλιακά θερμικά συστήματα σε συνδυασμό με θερμική μηχανή για τη παραγωγή έργου. Οι συλλέκτες που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους συστήματα έχουν υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας και είναι ως επί το πλείστον συγκεντρωτικοί. Οι προσθήκες που έγιναν είναι:

- a) Εισαγωγή μεταβλητής ελέγχου (*icarnot*) που καθορίζει αν το σύστημα περιλαμβάνει θερμική μηχανή Carnot, (*icarnot* = 1) ή όχι (*icarnot* = 0).

```
!insert type of solar thermal system, icarnot=1 for a thermal carnot
!cycle system, for anything else icarnot=0
icarnot=1
```

- b) Εισαγωγή μεταβλητής ελέγχου (*flatplate*) που καθορίζει αν το σύστημα περιλαμβάνει επίπεδους συλλέκτες (*flatplate*=1) ή συγκεντρωτικούς, (*flatplate*=0).

```
else if (icarnot==1)then
  !check if you have flat plate collectors or not flatplate=1 for
  !flat plate collectors
  print*,'type 1 for plate collectors otherwise type 0'
  read*,flatplate
```

- c) Εισαγωγή απαραίτητων υπολογισμών [*b, a, A_{abs}*] για την περίπτωση συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη.

```
if (flatplate==0)then
  print*,'give the total absorption area of the collectors'
  read*,Aabs

  Am=Aabs/A
  acol=(e*srad*(Tam**4)*Am)/(qref)
else
  Aabs=A
  Am=1
  acol=(e*srad*(Tam**4)*Am)/(qref)
endif
```

- d) Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου T_{fout} , καθώς και της θερμοκρασίας της πλάκας απορρόφησης για μηδενικές συνθήκες ροής T_{stag} , συμπεριλαμβάνοντας τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας.

```
if(icarnot==1)then

  ya=Ta/Tam
  yfin=Tfin/Tam

  Tfout= (Tfin*(1-(b*Fr/g)))+(Fr*Tam/g)*((ta_eff*Qs/qref)&
  &+(b*ya))- (Tam*acol/g)*((yfin**4)-(ya**4))

  w=srad/U
  d= Ta+ (ta_eff*Qs/(Am*U))+ (w*(Ta**4))

  call find_root(xin,0.9,30,result,success)
  Tstag=result
```

- e) Για την επίλυση της Εξ. (17) καλείται η Υπορουτίνα [24] η οποία εμπεριέχει την επαναληπτική αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson.

- f) Η προσθήκη μεταβλητού φορτίου ζήτησης \dot{Q}_L το οποίο περιγράφεται από την Εξ. (19).

$$\dot{Q}_l = \dot{W}_e / (1 - (T_a / T_{lin}))$$

- g) Τέλος, υπολογίζονται οι αποδόσεις του ηλιακού συλλέκτη και του θερμικού κύκλου Carnot, μέσω των εξισώσεων (15) ή (14) και (18) αντίστοιχα.

```
If (Qs>0 ) then
  n=(100*Qu/(Qs*A))

  n2=100*Fr*(ta_eff-((b*qref/Qs)*(yfin-ya))&
    &-((acol*qref/Qs)*((yfin**4)-(ya**4))))

else
  n=0

  n2=0
end if
```

```
if(icarnot==1)then
  nt=(1-(Ta/Tlin))*100
endif
```

Η πιστοποίηση της επέκτασης του κώδικα βασίστηκε σε σύγκριση με αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [18], όπου το πρόγραμμα SolSys δέχεται ως δεδομένα τις τιμές του Πίνακα 2.


```

contains

  real function z(x)

  !real::x
  double precision::x
  z=w*(x**4)+x-d
  end function

subroutine find_root( xinit, tol, maxiter, result, success)

  implicit none

  !real, intent(in)      :: xinit
  real, intent(in)      :: tol
  integer, intent(in)   :: maxiter
  real, intent(out)     :: result
  logical, intent(out)  :: success

  !real                  :: eps = 1.0e-4
  !real*16               :: zx1
  !real *16             :: zx2
  !real*16  :: zprime
  !real                  :: x
  !real*16               :: xnew
  integer                :: i
  double precision::zprime,zx1,zx2,xnew,x,eps = 0.1
  double precision,intent(in)::xinit

  result = 0.0
  success = .false.

  x = xinit
  do i = 1,max(1,maxiter)
    zx1 = z(x)
    zx2 = z(x+eps)
    write(*,*) i, zx1, zx2, eps
    zprime = (zx2 - zx1) / eps

    xnew = x - zx1 / zprime

    if ( abs(xnew-x) <= tol ) then
      success = .true.
      result = xnew
      exit
    endif

    x = xnew
    write(*,*) i, x
  enddo

end subroutine

```

Υπορούτιστα Newton Raphson [24].

Πίνακας 2 Τιμές εισόδου στο κώδικα SolSys από τη βιβλιογραφία [18].

Χρόνος προσομοίωσης: 4320min
Προσομοίωση ηλιακής ακτινοβολίας: $q_s(t) = 800 \sin[\pi(t - 420)/600] \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$,
$q_{s,ref} = 800 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$,
$\bar{T}_a = 285 \text{ [K]}, \Delta T_a = 10 \text{ [K]}$,
$(\dot{m}c_p)_{st} = 1.6 \times 10^{10} \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right]$, $U_{st} = 0.28 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$, $[L/D]_{st} = 3$,
$(\tau\alpha)_{eff} = 0.9$, $b = 0.00404$, $a = 6.2 \times 10^{-4}$
$c_p = 4.183 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$,
$A_c = 576 \times 10^3 \text{ [m}^2\text{]}, A_{abs} = 500 \text{ [m}^2\text{]}$,
Προσομοίωση θερμοκρασίας περιβάλλοντος:
$T_a = \bar{T}_a + \Delta T_a \sin[2\pi((t - t_{rise} + 360)/1440)]$.
Μαζική ροή στον συλλέκτη: $\dot{m} = 27 \times 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right]$.
Μαζική ροή στο φορτίο: $\dot{m}_L = 10^4 \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right]$.
Αρχική θερμοκρασία δεξαμενής αποθήκευσης: $(T_{st})_{initial} = 300 \text{ [K]}$.
Ελάχιστη θερμοκρασία εισόδου στον κύκλο Carnot: $(T_{Lin})_{min} = 600 \text{ [K]}$.
Μέγιστη θερμοκρασία αποθήκευσης: $(T_{st})_{max} = 750 \text{ [K]}$.
Συνολική ισχύς εξόδου του κύκλου Carnot: $\dot{W}_c = 10^8 \text{ [W]}$.

Το παράδειγμα προσομοιώνει τη συμπεριφορά ενός ηλιακού θερμικού σταθμού 100MW, το οποίο τροφοδοτεί με ατμό μία δεξαμενή αποθήκευσης και αυτή με τη σειρά της έναν ιδανικό κύκλο Carnot. Τέτοιας φύσεως σταθμοί λειτουργούν συνήθως με ηλιοστάτες οι οποίοι συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια σε έναν πύργο όπου και απορροφάται, ενώ στη συνέχεια μεταφέρεται στο φέρον ρευστό. Στο συγκεκριμένο

παράδειγμα θεωρούνται 3600 ηλιοστάτες επιφάνειας $4 \times 4 = 16 \text{ m}^2$ ο καθένας. Άρα, η συνολική επιφάνεια συλλογής της ηλιακή ενέργειας είναι $A_c = 36000 \times 16 = 576 \times 10^3 \text{ m}^2$ και ένας πύργος-δέκτης επιφάνειας $A_{abs} = 500 \text{ m}^2$. Όσο αφορά τη δεξαμενή αποθήκευσης αγνοείται η αλλαγή φάσης του φέροντος ρευστού (νερό). Σημειώνεται ότι δεν δίνεται ο παράγοντας θερμικής παραλαβής F_R . Μετά από δοκιμές με τιμές του κοντά στο 0.9 τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά καθώς η θερμοκρασία της δεξαμενής T_{st} δεν ξεπερνούσε τους 670K τη πρώτη μέρα, ενώ από τα αποτελέσματα της ψηφιοποίησης η μέγιστη τιμή της είναι 725K. Επίσης, η μέγιστη τιμή της απόδοσης του συλλέκτη κατά τη πρώτη μέρα ήταν 0.81, ενώ θα έπρεπε να είναι 0.9. Με την ολοκλήρωση των δοκιμών προκύπτει ότι $F_R = 1$. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η συμπεριφορά της θερμοκρασίας της δεξαμενής αποθήκευσης του συστήματος για τρεις μέρες. Η συμπαγής μαύρη γραμμή περιγράφει την απόκριση του πηγαίου κώδικα SolSys, ενώ η μαύρη γραμμή με τα κόκκινα σύμβολα προκύπτει από τη ψηφιοποίηση του διαγράμματος της βιβλιογραφίας [18]. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του πηγαίου κώδικα με αυτά της βιβλιογραφίας για την T_{st} είναι πολύ καλή καθώς τα σχετικά σφάλματα είναι αμελητέα. Στα Σχήματα 3.3 και 3.4 δίνονται οι επιμέρους δύο αποδόσεις του συστήματος, η απόδοση του πεδίου ηλιοστατών και η θερμική απόδοση Carnot. Οι καμπύλες της απόκρισης του SolSys και των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας έχουν την ίδια σχηματική απεικόνιση. Η πιστοποίηση της απόδοσης του πεδίου ηλιοστατών μπορεί να θεωρηθεί επιτυχημένη καθώς οι τιμές έχουν αμελητέο σφάλμα σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του πεδίου, με εξαίρεση τις ακραίες τιμές στις οποίες η ηλιακή ενέργεια έχει τις ελάχιστες τιμές της (ανατολή-δύση), όπου πιθανόν να μην καλύπτονται σκόπιμα από τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Αυτό είναι αρκετά πιθανό διότι μια μικρής

έντασης ακτινοβολία δεν μπορεί να ανυψώσει σημαντικά την θερμοκρασία του φέροντος ρευστού έχοντας αποδόσεις που κυμαίνονται από (50 ~ 70)%, ιδιαίτερα μετά την ανύψωση της θερμοκρασίας της δεξαμενής ($T_{fin} = T_{st}$) από τους 300K στους 600K. Όσο αφορά την απόδοση Carnot του συστήματος, τα σφάλματα είναι μηδενικά, εκτός από τις περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία της δεξαμενής έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της, $(T_{st})_{max} = 750K$, κατά τη δεύτερη και τρίτη μέρα λειτουργίας. Σε εκείνες τις χρονικές στιγμές η απόκριση του SolSys είναι μεταβλητή ενώ στα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας διατηρείται σταθερή. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι στη βιβλιογραφία διατηρείται σταθερή η $T_{st} = 750K$, ενώ ο πηγαίος κώδικας υπολογίζει τις μικρές αυξομειώσεις που εμφανίζονται γύρω από τη μέγιστη θερμοκρασία της δεξαμενής λόγω των απωλειών του φορτίου και του περιβάλλοντος, σύμφωνα με το θερμικό για αυτήν ισοζύγιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη σταθερή συμπεριφορά της η_t σε εκείνες τις χρονικές στιγμές.

Για να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά του συστήματος κατά το σχολιασμό παρατίθεται το Σχήμα 3.5 στο οποίο είναι συμπτυγμένα τα τρία παραπάνω διαγράμματα, όπως ακριβώς παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία [18]. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας της δεξαμενής αποθήκευσης T_{st} με μαύρο χρώμα, καθώς και αυτές των αποδόσεων, του συλλέκτη η_c , και του κύκλου Carnot η_t , με μπλε και κόκκινο, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η μηχανή Carnot λειτουργεί λίγο λιγότερο από 8 ώρες την πρώτη μέρα, και περίπου 11 με 12 ώρες κατά τη δεύτερη και τρίτη μέρα λειτουργίας. Επίσης, η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης φτάνει τη μέγιστη τιμή της $(T_{st})_{max} = 750K$ την δεύτερη κιόλας μέρα λίγο πριν τη 13:00 το μεσημέρι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αντλία που τροφοδοτεί τον συλλέκτη να κλείνει

($\delta_L = 0$) και να μην αξιοποιείται η περεταίρω ηλιακή ενέργεια η οποία εκείνες τις ώρες λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της. Η ίδια συμπεριφορά ισχύει και για τη τρίτη μέρα λειτουργίας περίπου. Για να αξιοποιηθεί αυτή η χαμένη ενέργεια τις ώρες όπου η ηλιοφάνεια είναι ισχυρή θα πρέπει είτε να μειωθεί η επιφάνεια συλλογής A_c του συλλέκτη, ή να αυξηθεί η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης ($\dot{m}c_p$) = 2×10^{10} J/K, ή και τα δύο ταυτόχρονα. Τέλος το κλάσμα κάλυψης του φορτίου είναι $f = 0.431$ και η μέση απόδοση είναι $\bar{\eta}_c = 0.77$.

Στο ίδιο σύστημα αυξάνει η αναλογία των επιφανειών σε $A_{abs}/A_c = 1/10^3$, μειώνοντας την επιφάνεια συλλογής σε $A_c = 5 \times 10^5 \text{ m}^2$ και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα, που δίνονται στο Σχήμα 3.6. Παρατηρείται ότι την πρώτη μέρα ο θερμικός κύκλος Carnot παραλαμβάνει ατμό για πρώτη φορά στις 13:00 και κλείνει λίγο πριν τις 18:00. Άρα, προκύπτουν 6 ωφέλιμες ώρες λειτουργίας του θερμικού σταθμού κατά τις οποίες παράγεται ισχύς 100 MW_e . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κλάσμα κάλυψης του φορτίου να είναι μειωθεί σε $f = 0.402$. Επίσης, η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης ανέρχεται μέχρι τους 660K. Τη δεύτερη και τη τρίτη μέρα λειτουργίας όμως ο θερμικός σταθμός παράγει την απαιτούμενη ισχύ για 12 περίπου ώρες, όπως ακριβώς συνέβαινε και στην προηγούμενη περίπτωση $A_c = 576 \times 10^3 \text{ m}^2$. Επιπροσθέτως, παρότι η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης φτάνει την μέγιστη τιμή των 750K, η αντλία που τροφοδοτεί τον συλλέκτη κλείνει για ελάχιστο χρονικό διάστημα, καθώς το θερμικό ισοζύγιο για τη δεξαμενή είναι ελάχιστα θετικό προς όφελος της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξισορρόπηση της T_{st} ελάχιστα κάτω από τους 750 K, ενώ παράλληλα συνεχίζεται να συλλέγεται ηλιακή ενέργεια προς όφελος του συστήματος. Το γεγονός αυτό συμβαίνει τις ώρες κατά τις οποίες η ηλιακή ακτινοβολία είναι σε φθίνουσα κατάσταση (λίγο πριν τις 15:00) με αποτέλεσμα ο

ηλιακός συλλέκτης να μην μπορεί να ανυψώσει την ήδη αρκετά μεγάλη τιμή της T_{st} . Η βελτιωμένη συμπεριφορά αυτή γίνεται κατανοητή από τη μεγαλύτερη μέση απόδοση $\bar{\eta}_c = 0.84$, λόγω καλύτερης εκμετάλλευσης της ακτινοβολίας. Η τιμή της απόδοσης η_c του ηλιακού συλλέκτη δεν έχει επηρεαστεί σημαντικά καθώς το μέγιστο σφάλμα των τιμών της βρίσκεται στο 1%. Η θερμική απόδοση Carnot η_t φαίνεται να εμφανίζει περισσότερες διακυμάνσεις με την μείωση της επιφάνειας A_c . Τη πρώτη μέρα η απόκλιση ανάμεσα στους βαθμούς απόδοσης είναι 4% λογικό αφού στη μια περίπτωση η T_{st} ανέρχεται μέχρι τους 715K ενώ στην άλλη μέχρι τους 660K. Είναι δεδομένο ότι η η_t είναι άμεσα εξαρτημένη από την T_{st} , αφού η δεξαμενή αποθήκευσης τροφοδοτεί άμεσα τη θερμική μηχανή ($T_{st} = T_{Lim}$). Κατά τις επόμενες δύο μέρες το σφάλμα αυτό ελαχιστοποιείται στο 1.5%, όμως υπάρχει μία χρονική μετατόπιση στις κορυφαίες τιμές της η_t . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ρυθμός αύξησης της T_{st} σε αυτή τη περίπτωση είναι μικρότερος λόγω της μείωσης του A_c , με αποτέλεσμα η η_t να έχει ακόμα πιο ομαλή και μικρή μεταβολή στις τιμές της. Συμπεραίνοντας η μείωση της επιφάνειας συλλογής της ηλιακής ενέργειας δείχνει να επιδρά θετικά στη συμπεριφορά του συστήματος, καθώς γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας ($\bar{\eta}_c = 0.84$). Η μείωση του ποσοστού κάλυψης του φορτίου f οφείλεται στη πρώτη μέρας λειτουργίας (εκκίνηση του σταθμού), ενώ σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας το ποσοστό αυτό αναμένεται να είναι ίδιο. Επίσης, θα πρέπει να επισημανθεί το γεγονός του παράγοντα νέφωσης του ουρανού, ο οποίος παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο στη συλλογή της ηλιακής ενέργειας και δεν λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς, άρα θα πρέπει γίνει επιπλέον μελέτη για τυχόν μείωση της επιφάνειας συλλογής σε πραγματικές εφαρμογές.

Αυτή τη φορά θα μεταβληθεί η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης ($\dot{m}c_p$) = 2×10^{10} J/K, ενώ η επιφάνεια συλλογής θα παραμείνει σταθερή $A_c = 576 \times 10^3 \text{ m}^2$. Η τριήμερη απόκριση του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Παρατηρείται μείωση του ρυθμού της μεταβολής της T_{st} , που είναι αναμενόμενη καθώς αυξήθηκε η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης. Κατά τη πρώτη μέρα λειτουργίας του σταθμού η θερμοκρασία της δεξαμενής ανέρχεται στους 657K, και η μηχανή Carnot παράγει έργο για πέντε περίπου ώρες. Τις δύο επόμενες μέρες όμως ο σταθμός παράγει ισχύ για περίπου 13 ώρες (8:00–21:00). Άρα, η αύξηση της χωρητικότητας της δεξαμενής κατά 0.4×10^{10} J/K, προσέδωσε μία ώρα παραπάνω στη λειτουργία του θερμικού κύκλου σε μόνιμη κατάσταση. Αυτό αιτιολογεί τη βελτίωση του κλάσματος κάλυψης σε $f = 0.447$. Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη παραμένει στις υψηλές (αρχικές) τιμές σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της πρώτης ημέρας και φθίνει απότομα μόνο κατά τα τελευταία λεπτά της ηλιοφάνειας. Αυτό συμβαίνει διότι το σύστημα λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες T_{st} και έτσι επιτυγχάνεται μεγάλη απόδοση (δυνατότητα ανύψωσης της $T_{fin} = T_{st}$) από τον συλλέκτη. Η ίδια συμπεριφορά περίπου επικρατεί και στην προηγούμενη περίπτωση για επιφάνεια συλλέκτη $A_c = 5 \times 10^5 \text{ m}^2$, τη πρώτη μέρα, για τον ίδιο λόγο. Τις επόμενες δύο μέρες η απόδοση του συλλέκτη ακολουθεί την ίδια κατανομή με αυτή του αρχικού παραδείγματος, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, με πολύ μικρές αποκλίσεις στη τιμή της. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι καλύτερη σε σχέση με το αρχικό παράδειγμα καθώς η αντλία του συλλέκτη κλείνει σχεδόν για μία ώρα συνολικά κάθε μέρα (τη δεύτερη και τρίτη μέρα). Όμως, πάλι χάνονται σημαντικά ποσά ενέργειας καθώς τη χρονική στιγμή που κλείνει η ακτινοβολία είναι σχετικά μεγάλη (κοντά στη μέγιστη τιμή της). Η μέση απόδοση είναι $\bar{\eta}_c = 0.81$. Η συμπεριφορά της απόδοσης Carnot φαίνεται να είναι ίδια

με αυτή του προηγούμενου παραδείγματος $A_c = 5 \times 10^5 \text{ m}^2$, γεγονός αποδεκτό αφού η θερμοκρασία της δεξαμενής ακολουθεί την ίδια περίπου συμπεριφορά.

Τέλος θα μελετηθεί η απόκριση του συστήματος για μεταβολή της ισχύος εξόδου \dot{W}_e , λόγω της παρατήρησης ότι η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης φτάνει τη μέγιστη τιμή της $(T_{st})_{\max} = 750\text{K}$, από τη δεύτερη κιόλας μέρα και χάνονται σημαντικά ποσά της ηλιακής ενέργειας. Για αυτό το λόγο ενδείκνυται η αύξηση της ισχύος εξόδου καθώς ο σταθμός μπορεί να ανταποκριθεί προς αυτή την αλλαγή η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.8 για ισχύ εξόδου $\dot{W}_e = 130\text{MW}$. Τη πρώτη μέρα η θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης ανέρχεται μέχρι τους 674K, αυτό οφείλεται στο γεγονός της αύξησης του φορτίου Q_L , λόγω της αύξησης της ισχύος μέσω της Εξ. (19), οπότε το ισοζύγιο θερμότητας αποφέρει μικρότερη ανύψωση προς όφελος της T_{st} . Η θερμική μηχανή Carnot τροφοδοτείται με ατμό λίγο πριν τη 13:00 και σταματάει η λειτουργία της κατά τις 17:30, παρέχοντας ισχύ $\dot{W}_e = 130\text{MW}$ για πέντε ώρες και 30 λεπτά. Κατά τη δεύτερη και τη τρίτη μέρα λειτουργίας του σταθμού η T_{st} φτάνει τη μέγιστη τιμή της στις 14:30, χωρίς να κλείνει στη συνέχεια η αντλία τροφοδότησης του ηλιακού συλλέκτη. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία της φθίνουσας ηλιακής ενέργειας να ανυψώσει την ήδη μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας δεξαμενής. Η θερμική μηχανή λειτουργεί 11 ώρες καθημερινά σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Παρατηρείται ότι για αύξηση της ισχύος σε 130 MW οι ώρες λειτουργίας της θερμικής μηχανής μειώθηκαν κατά 1 ώρα ημερησίως σε μόνιμη κατάσταση, ενώ τη πρώτη μέρα κατά 2.5 ώρες. Αυτό ερμηνεύεται μέσω του κλάσματος κάλυψης $f = 0.364$, που παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή του σε σχέση με τις προηγούμενες τροποποιήσεις. Η αντλία τροφοδοσίας του ηλιακού συλλέκτη δεν κλείνει καθόλου κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα την επίτευξη της μέγιστης μέσης απόδοσης $\bar{\eta}_c = 0.85$ για τον

συλλέκτη. Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη κατά τη πρώτη μέρα παραμένει σε σχετικά μεγάλες τιμές με ελάχιστη μείωση της τιμής της τη μεγαλύτερη διάρκεια της μέρας και απότομη μείωση κατά τη δύση του ηλίου. Η συμπεριφορά αυτή είναι ίδια με αυτή που είχε η απόδοση η_c κατά την αύξηση της χωρητικότητας ή τη μείωση της επιφάνειας συλλογής και οφείλεται στη πιο αργή μεταβολή (αύξηση) της T_{st} . Τις δύο επόμενες μέρες η απόδοση η_c έχει πολύ μικρές αποκλίσεις και ίδια συμπεριφορά σε σχέση με το αρχικό παράδειγμα. Όσο αφορά την απόδοση του θερμικού κύκλου Carnot τη πρώτη μέρα έχει ελάχιστες αποκλίσεις στη τιμή της, ενώ σε μόνιμη κατάσταση παρουσιάζει μια αργή αύξηση, η οποία οφείλεται στην αργή μεταβολή της T_{st} , μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της (61.5%) και έπειτα φθίνει με πιο γρήγορο ρυθμό, καθώς αντίστοιχη μεταβολή ακολουθεί και η θερμοκρασία T_{st} , λόγω αυξημένου φορτίου σε συνδυασμό με τη φθίνουσα ηλιακή ακτινοβολία.

3.4.2 Πραγματικά ηλιακά δεδομένα

Η επέκταση του πηγαίου κώδικα SolSys περιλαμβάνει τα ηλιακά δεδομένα. Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή της ενότητας 3.4 το πρόγραμμα έδινε τη δυνατότητα προσομοίωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ως ημιτονοειδείς συναρτήσεις. Στη πραγματικότητα όμως αυτές οι καιρικές συνθήκες δεν είναι πάντα τόσο ομοιόμορφες και ιδανικές. Ειδικά η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να παρουσιάσει μεγάλες διακυμάνσεις στη τιμή της, με τον παράγοντα νέφωσης της εκάστοτε περιοχής να έχει μείζονα ρόλο. Για αυτό το λόγο ο κώδικας SolSys εμπλουτίστηκε με τη δυνατότητα να διαβάζει πραγματικά αρχεία καιρού σε μορφή κειμένου (.txt) και να κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς για το χρονικό διάστημα στο οποίο αντιστοιχούν τα εκάστοτε αρχεία. Συγκεκριμένα, οι πραγματικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

εκτυπώθηκαν σε αρχείο κειμένου με τη βοήθεια του λογισμικού TRNSYS. Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πακέτο TRNSYS. Το αρχείο καιρού Type109-TMY2 παρέχει την ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια καθώς και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, σε συγκεκριμένη περιοχή, για το χρονικό διάστημα που επιλέγεται από το χρήστη. Οι τιμές που περιέχονται σε αυτό το στοιχείο αντιπροσωπεύουν ένα τυπικό μετεωρολογικό χρόνο, είναι δηλαδή μέσες τιμές των μετεωρολογικών μεγεθών, τα οποία μετρήθηκαν στην εκάστοτε περιοχή για μερικά χρόνια. Η βιβλιοθήκη του TRNSYS περιέχει αρκετές τοποθεσίες ανά τον κόσμο. Στο στοιχείο Equa γίνονται οι απαραίτητες μετατροπές μονάδων αφού το αρχείο καιρού έχει ως έξοδο τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε °C και την ακτινοβολία σε $\text{kJ}/(\text{hr}\times\text{m}^2)$, ενώ ο πηγαίος κώδικας δέχεται ως είσοδο τις θερμοκρασίες σε K και την ακτινοβολία σε W/m^2 . Η κατεύθυνση της επέκτασης του κώδικα SolSys έχει ως σκοπό τη χρησιμοποίηση πραγματικών δεδομένων για οποιοδήποτε αριθμό ημερών ενός συγκεκριμένου μήνα που αποφάσιζε ο χρήστης μέσω του πακέτου TRNSYS αρχικά και έπειτα στον ίδιο τον κώδικα. Άρα, η επέκταση περιλαμβάνει εκτός της μεταβίβασης των πραγματικών καιρικών δεδομένων (q_s, T_a) και υπολογισμούς χαρακτηριστικών παραμέτρων οι οποίες αλλάζουν με το πέρασμα της κάθε ημέρας. Τέτοιες μεταβλητές είναι η ακτινοβολία αναφοράς $q_{s,ref}$, η οποία αντιστοιχεί συνήθως στη μέγιστη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μέρα, και της μέσης καθημερινής θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} . Τέλος, ορίζεται η μεταβλητή ελέγχου (monthly) για πραγματικά καιρικά δεδομένα, και η μεταβλητή T_m που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ημερών για τα δεδομένα που δίνει ο χρήστης στα αρχεία κειμένου από το πακέτο TRNSYS. Το συγκεκριμένο κομμάτι αυτού του κώδικα δίνεται στο παράρτημα Α.

Για την πιστοποίηση αυτής της επέκτασης χρησιμοποιείται το ίδιο παράδειγμα από την αναφορά [18], το οποίο δεν χρησιμοποιεί όμως πραγματικά ηλιακά δεδομένα όπως έχει διαπιστωθεί στη παράγραφο 3.4.1. Για να γίνει αυτό εφικτό αρχικά επιλύεται το αρχικό παράδειγμα μέσω του λογισμικού TRNSYS. Σε αυτή τη περίπτωση επιλέγεται να μελετηθεί μόνο η συμπεριφορά του ηλιακού συλλέκτη σε συνδυασμό με το σύστημα της δεξαμενής αποθήκευσης ατμού, χωρίς τον θερμικό κύκλο Carnot. Άρα, η χρονική προσομοίωση του παραδείγματος θα γίνει ακριβώς πριν ανοίξει η βαλβίδα τροφοδοσίας του φορτίου ζήτησης, δηλαδή για το χρονικό διάστημα όπου $(\delta_L = 0) \Rightarrow t_{final} = 12:05$, κατά τη μέρα εκκίνησης του συστήματος. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο TRNSYS για την επίλυση του προβλήματος διακρίνεται στο Σχήμα 3.10 [25,26]. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για το παρακάτω μοντέλο είναι τα εξής:

Data Reader (Type 9a)

Ο αναγνώστης κειμένου διαβάζει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI-data) και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (Tamb-data) από αρχεία κειμένου τα οποία προέρχονται από τον πηγαίο κώδικα για τις ημιτονοειδές μορφές τους σύμφωνα με το παράδειγμα (βλέπε Πίνακα 2).

Radiation Processor (Type 16g)

Ο επεξεργαστής ακτινοβολίας δέχεται ως εισόδους τη άμεση και την ολική ηλιακή ακτινοβολία από το στοιχείο DNI-data και επιστρέφει σαν αποτέλεσμα την ηλιακή ζενιθιακή και αζιμούθια γωνία.

Heliostat Field (Type 194)

Όπως έχει αναφερθεί στην αρχική πιστοποίηση ο ηλιακός συλλέκτης προσομοιώνεται σαν ένα πεδίο $N_h = 36000$ ηλιοστατών, επιφάνειας $A_h = 16\text{m}^2$ έκαστος. Για αυτό το

λόγο επιλέχθηκε αυτό το στοιχείο από τη βιβλιοθήκη STEC του TRNSYS. Το πεδίο Ηλιοστατών δέχεται ως εισόδους την άμεση ηλιακή ακτινοβολία από το στοιχείο DNI-data, και τις δύο προαναφερθείσες γωνίες από τον επεξεργαστή ακτινοβολίας. Επιπροσθέτως, δέχεται ως εξωτερικό ενσωματωμένο αρχείο έναν πίνακα αποδόσεων του συλλέκτη, οι οποίες αντιστοιχούν για ένα ζεύγος αζιμούθιων και ζενιθιακών γωνιών. Έτσι το στοιχείο αυτό παρεμβάλλοντας αυτές τις τιμές υπολογίζει την τελική απόδοση του πεδίου ηλιοστατών (η_{field}), ανάλογα με τη θέση του ηλίου. Η τελική ποσότητα ακτινοβολίας που ανακλάται στο πύργο-δέκτη υπολογίζεται από την εξίσωση

$$PTR = \eta_{field} N_h A_h \rho_h DNI \gamma,$$

όπου ρ_h, γ η ικανότητα ανάκλασης του ηλιοστάτη και το ποσοστό των ηλιοστατών που είναι εστιασμένοι στον πύργο και έχει να κάνει με την ταχύτητα του ανέμου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ισχύει ότι $\gamma = 1$, καθώς δεν υπάρχει σύνδεση της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου από ηλιακά δεδομένα.

Differential Controller (Type 2b)

Ο διαφορικός ελεγκτής θερμοκρασίας απαρτίζει το σύστημα ελέγχου του ηλιοστάτη και καθορίζει εάν θα ανοίξει η αντλία του συστήματος ($\delta_\Sigma = 1$) έτσι ώστε να περάσει ρευστό στον πύργο, ή όχι ($\delta_\Sigma = 0$). Αυτό γίνεται ελέγχοντας την ανύψωση της θερμοκρασίας του ρευστού στο πύργο ($T_{fout} - T_{fin}$) έτσι ώστε να είναι πάνω από μία καθορισμένη τιμή. Στην προκειμένη περίπτωση αυτή η διαφορά είναι της τάξης των δύο θερμικών μονάδων.

Central Receiver (Equation Element) Central-Receiver

Στη περίπτωση του κεντρικού πύργου-δέκτη δοκιμάστηκε το στοιχείο CenRec (Type 395), όμως ενώ στη περιγραφή του ανέφερε ότι μπορεί να λειτουργήσει και με σταθερή ροή μάζας και με μεταβλητή, στην ουσία μετά από αναζήτηση στον κώδικα λειτουργίας του σε FORTRAN, έγινε κατανοητό ότι λειτουργεί μόνο για μεταβλητή μαζική ροή έτσι ώστε να επιτευχθεί μία επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον πύργο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθεί το στοιχείο εξίσωσης για την προσομοίωση του CenRec (Type395) για σταθερή μαζική ροή. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδια με αυτή του CenRec με τη διαφορά της σταθερής παροχής και είναι η σχέση

$$T_{f_{out}} = T_{f_{in}} + \left(\eta_{rec} PTR / \dot{m}_c c_p \right) ,$$

με τη παράμετρο η_{rec} να είναι η απόδοση της επιφάνειας απορρόφησης του πύργου, και οι μεταβλητές $T_{f_{in}}, \dot{m}_c$, να συνδέονται μέσω της αντλίας τροφοδοσίας.

Tank-Storage (Type 4a)


Δεξαμενή αποθήκευσης πλήρους ανάμειξης όπου εισέρχονται ως παράμετροι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της (V_{st}, L_{st}) , οι ιδιότητες του ρευστού που χρησιμοποιείται (ρ, c_p) , καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία της δεξαμενής, που στο συγκεκριμένο στοιχείο ορίζεται ως και θερμοκρασία βρασμού (boiling point temperature). Τέλος, ορίζεται ο συντελεστής απωλειών με το περιβάλλον U_{st} και η θερμοκρασία διατήρησης της δεξαμενής με τη βοήθεια εφεδρικής θέρμανσης. Στη δεξαμενή εισέρχεται ρευστό μάζας και θερμοκρασίας από τον πύργο απορρόφησης, καθώς δέχεται και σαν είσοδο τη θερμοκρασία περιβάλλοντος από το στοιχείο Tamb-data.

Pump (Type 114)

Προσομοίωση της αντλίας τροφοδοσίας του πύργου-δέκτη η οποία δέχεται ως εισόδους, τη προκαθορισμένη μαζική ροή (flowrate to heat source) καθώς και τη θερμοκρασία εισόδου (temperature to heat source), από τη δεξαμενή αποθήκευσης και τέλος τον δείκτη ελέγχου από τον ελεγκτή.

Σε όλα τα παραπάνω στοιχεία έχουν δοθεί οι αρχικές τιμές εισόδου και οι παράμετροι που έχουν προσαρτηθεί στον Πίνακα 2. Τέλος, τα δύο στοιχεία Equa-1, Equa-2, χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή των μονάδων θερμοκρασίας και ακτινοβολίας στις επιθυμητές μονάδες, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω. Τα αποτελέσματα του πηγαίου κώδικα και του λογισμικού TRNSYS παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.11. Με αποχρώσεις του μπλε διακρίνονται οι θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού στον συλλέκτη, οι οποίες αντιστοιχούν και στη θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης για τα δύο λογισμικά. Με κόκκινο και πράσινο παριστάνονται οι θερμοκρασίες εξόδου από τον συλλέκτη και τέλος με αποχρώσεις του ροζ οι αποδόσεις του ηλιακού συλλέκτη για το εκάστοτε πρόγραμμα. Παρατηρείται ότι στο πηγαίο κώδικα οι αρχικές τιμές που δίνονται για τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του συλλέκτη παραμένουν σταθερές, ενώ στο πακέτο TRNSYS χρησιμοποιείται η εφεδρική θέρμανση της δεξαμενής έτσι ώστε να ανέλθει και να διατηρηθεί η θερμοκρασία της στους 300K. Σε αυτόν τον παράγοντα οφείλεται η αρχική διαφορά που υπάρχει στις αποδόσεις του ηλιακού συλλέκτη, καθώς στο TRNSYS η τροφοδοσία του συλλέκτη ανοίγει σχετικά πιο μετά, ενώ ο πηγαίος κώδικας αξιοποιεί την ελάχιστη “πρωινή” ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης, είναι διαφορετικός ο τρόπος λειτουργίας του διαφορικού ελεγκτή του πακέτου TRNSYS, με τον έλεγχο που γίνεται στον πηγαίο κώδικα. Το μέγιστο σχετικό σφάλμα για τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου ανέρχεται σε 4.3% και 3.1% αντίστοιχα, κυρίως κατά τις ώρες που η ακτινοβολία φτάνει στη μέγιστη τιμή της. Τα σχετικά σφάλματα στις επιμέρους αποδόσεις των

ηλιοστατών είναι μικρά με εξαίρεση τις διαφορές που προαναφέρθηκαν. Τέλος η προσομοίωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ως ημιτονοειδής καμπύλη διακρίνεται στο Σχήμα 3.12 για τις ώρες που μελετήθηκε το σύστημα ηλιοστατών-δεξαμενής αποθήκευσης.

Θεωρώντας τα σφάλματα των αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών αποδεκτά, δύναται η πιστοποίηση της επέκτασης του πηγαίου κώδικα SolSys στη κατεύθυνση της χρησιμοποίησης πραγματικών ηλιακών δεδομένων μέσω του πακέτου TRNSYS. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την επίλυση του παραδείγματος [18] με πραγματικά ηλιακά δεδομένα στο λογισμικό TRNSYS φαίνεται στο Σχήμα 3.13 και είναι το ίδιο με αυτό του Σχήματος 3.10 με τη διαφορά ότι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία και οι ηλιακές γωνίες (ζενιθιακή-αζιμούθια) προκύπτουν απευθείας από το αρχείο καιρού Type109-TMY2  το οποίο όπως έχει αναφερθεί περιέχει κλιματικά δεδομένα για ένα μεγάλο αριθμό περιοχών, για ένα τυπικό μετεωρολογικό χρόνο. Στη προκειμένη περίπτωση επιλέγονται τυχαία σαν τοποθεσία η Αθήνα, και σαν ημερομηνία η πρώτη μέρα του Μαΐου. Όσο αφορά τον κώδικα SolSys προστίθεται μία εξωτερική επανάληψη η οποία σχετίζεται με τις μέρες του μήνα (T_m) που ο χρήστης επιλέγει να δώσει τα πραγματικά καιρικά δεδομένα, αν δεν γίνει αυτό, δηλαδή (monthly=0), τότε η επανάληψη γίνεται μόνο για μία μέρα $\Rightarrow T_m = 1$ και το πρόγραμμα υπολογίζει τις προκαθορισμένες ποσότητες για ημιτονοειδή ακτινοβολία. Οι αποκρίσεις και των δύο λογισμικών διακρίνονται στο Σχήμα 3.14 με παρόμοιες καμπύλες όπως αυτές του Σχήματος 3.11. Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από τις ποσότητες $q_{s,ref}$, T_{amb} , μεταβάλλονται και οι ($b \Leftrightarrow U$) με το πέρασ της κάθε μέρας, ανάλογα με το ποιο από τα δύο μεγέθη είναι γνωστό μέσω της Εξ. (13), καθώς και ο αδιάστατος συντελεστής γ μέσω της Εξ. (17), διότι και αυτές είναι εξαρτημένες από τους δύο πρώτους όρους.

Σε αυτή τη περίπτωση οι ηλιακοί συλλέκτες αρχίζουν τη λειτουργία τους την ίδια περίπου χρονική στιγμή, και τα σφάλματα στις αποδόσεις τους παραμένουν σχετικά χαμηλά κατά το μεγαλύτερο διάστημα της λειτουργίας τους με εξαίρεση μία στιγμιαία πτώση της απόδοσης στο λογισμικό TRNSYS, η οποία αντιστοιχεί σε σχετικό σφάλμα 3.3% και κατά τη τελευταία ώρα λειτουργίας του πεδίου με μέγιστο σχετικό σφάλμα 5.5%. Επιπροσθέτως, τα σφάλματα των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου κυμαίνονται σε αρκετά χαμηλές τιμές, με αύξηση τους κατά τις τελευταίες ώρες λειτουργίας σε 3.37% και 3.43% αντίστοιχα. Για να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά του συστήματος παρατίθεται η ακτινοβολία που εκτυπώθηκε από το TRNSYS για την Αθήνα (1/5) στο Σχήμα 3.16. Παρατηρείται ότι αυτή η ακτινοβολία πέρα από τις διακυμάνσεις που παρουσιάζει στην κατανομή της λόγω πραγματικών μετρήσεων, είναι πολύ μικρότερη σε συνολική ωφέλιμη ενέργεια από αυτή του πρωτότυπου παραδείγματος (ημιτονοειδής). Για το λόγο αυτό η θερμοκρασία της δεξαμενής ($T_{st} = T_{fin}$) ανέρχεται κατά τους 600K λίγο πριν τις 17:00 και εκεί σταματάει η προσομοίωση διότι μετά ανοίγει η τροφοδοσία του κύκλου Carnot στον πηγαίο κώδικα SolSys. Αυτό σημαίνει ότι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία τη πρώτη μέρα του Μάιου δεν επαρκεί για τη λειτουργία του συγκεκριμένου θερμικού κύκλου παραγωγής ισχύος στην Αθήνα, καθώς η θερμοκρασία της δεξαμενής με τα βίαια ανέρχεται στην ελάχιστη θερμοκρασία εισαγωγής στον κύκλο, σε ώρα όπου η ακτινοβολία βρίσκεται σε χαμηλή ένταση με φθίνουσα πορεία.

Παρατηρώντας ότι η πρώτη μέρα του Μαΐου καλύπτει την ελάχιστη προθέρμανση του ηλιακού θερμικού σταθμού παραγωγής ισχύος $T_{st} = 600K$, δύναται η εξέταση της απόκρισης του συστήματος για περισσότερες μέρες έτσι ώστε να υπάρχει μια πιο σφαιρική εικόνα για τη συμπεριφορά του κάτω από πραγματικές καιρικές συνθήκες. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε η προσομοίωση να διαρκέσει για τις

πρώτες τέσσερις μέρες του Μαΐου (1/5-4/5), για την Αθήνα. Η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία καθώς και η συμπεριφορά του συστήματος για αυτή τη χρονική διάρκεια διακρίνονται στο Σχήμα 3.16 και Σχήμα 3.17 αντίστοιχα. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η ημιτονοειδής ακτινοβολία με μέγιστη τιμή $(q_s)_{\max} = 800 \text{ W/m}^2$ του πρωτότυπου παραδείγματος από τη βιβλιογραφία, είναι περισσότερο από επαρκής για τη λειτουργία του σταθμού, σε πραγματικές καιρικές συνθήκες όμως για τις τέσσερις πρώτες μέρες του Μαΐου στην Αθήνα, παρατηρείται ότι η λειτουργία τέτοιου είδους σταθμού δεν είναι ικανοποιητική. Σε αυτό ευθύνεται προφανώς η μη ομαλή άμεση ηλιακή ακτινοβολία η οποία είναι στενά επηρεαζόμενη από τον παράγοντα νέφωσης, καθώς αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό της συνολικής ηλιακής. Για αυτό το λόγο τέτοιοι σταθμοί συνήθως λειτουργούν σε συνδυασμό με εφεδρικό καυστήρα ο οποίος συνεισφέρει ενεργειακά στο σύστημα και η χρήση του θα περιγραφεί στη παράγραφο 3.5. Κατά τη πρώτη μέρα λειτουργίας η θερμική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας επαρκεί έως την ανύψωση της θερμοκρασίας της δεξαμενής αποθήκευσης, από αυτή του περιβάλλοντος, στους $T_{st} = 600\text{K}$ στις 17:00 το απόγευμα. Εκείνη τη χρονική στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία βρίσκεται σε φθίνουσα κατάσταση με χαμηλές γενικά τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θερμική μηχανή Carnot να παραλαμβάνει ατμό και η θερμοκρασία της δεξαμενής να κατέρχεται από τους 600K με αποτέλεσμα τη παύση της τροφοδοσίας της θερμικής μηχανής. Αυτή η κατάσταση επαναλαμβάνεται μέχρι τη δύση του ηλίου, με τη μηχανή Carnot να έχει μια ασταθή λειτουργία ανοιγοκλείνοντας συνεχώς. Τη δεύτερη μέρα η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετή για την απρόσκοπτη λειτουργία της μηχανής Carnot από μετά τις 7:00 το πρωί μέχρι μισή ώρα μετά τη δύση του ηλίου. Η T_{st} ανέρχεται μέχρι τους 700K και παραμένει σχεδόν σταθερή για περίπου μία ώρα. Η απόδοση του πεδίου ηλιοστατών ακολουθεί μια παρόμοια κατανομή με τιμές κοντά στη μέγιστη τιμή της $0.85 \leq \eta_c \leq 0.89$ για αρκετή ώρα όσο δηλαδή η

ηλιακή ακτινοβολία είναι κοντά στις μέγιστες τιμές της. Τέλος, η απόδοση της θερμικής μηχανής έχει κατανομή όμοια με αυτή της T_{st} και είναι η μόνη μέρα από τις τέσσερις που εξασφαλίζεται απρόσκοπτη λειτουργία της για πάνω από 11 ώρες, με την απόδοση να κυμαίνεται $51\% \leq \eta_t \leq 57.5\%$. Τη τρίτη μέρα η μηχανή Carnot έχει περίπου 4.5 ώρες απρόσκοπτης λειτουργίας [10:00-14:30] καθώς τις υπόλοιπες ανοιγοκλείνει, διότι η ακτινοβολία δεν μπορεί να διατηρήσει τη τιμή της πάνω από τους 600K. Η ίδια κατάσταση επαναλαμβάνεται τη τελευταία μέρα με τη θερμική μηχανή να παραλαμβάνει ατμό σε διακριτές χρονικές τιμές ανοιγοκλείνοντας. Τα παραπάνω αποτελέσματα κάνουν κατανοητή την αναγκαιότητα της χρήσης εφεδρικού καυστήρα, όπως και ενός καλύτερου συστήματος ελέγχου της τροφοδοσίας της θερμικής μηχανής, με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, καθώς και καλύτερης ποιότητας παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

3.5 Συμβολή εφεδρικού καυστήρα σε ηλιοθερμικούς σταθμούς

Η χρήση συμβατικού καυστήρα σε ηλιακούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής ισχύος καθίσταται αναγκαία τόσο για την ομαλή και συνάμα αποδοτική λειτουργία τους (συνεισφορά στη παραγωγή ισχύος), όσο και για την ασφάλεια και διατήρηση της θερμοκρασίας ορισμένων επιμέρους στοιχείων του εκάστοτε σταθμού. Η λειτουργία του συμβατικού καυστήρα τίθεται υπό έλεγχο καθώς υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία, η οποία επιτρέπει τη χρήση ενέργειας που προέρχεται από diesel, LPG, φυσικό αέριο, βιοντίζελ ή άλλα βιοκαύσιμα, με το ποσοστό αυτής να μην ξεπερνάει το 15% της συνολικής ετήσιας παραγόμενης από ηλιακούς συλλέκτες ενέργειας. Το ποσοστό αυτό μπορεί να αυξηθεί έως και 20% σε περίπτωση χρήσης βιοντίζελ ή άλλων ειδών βιοκαυσίμων, ως πηγές ενέργειας [27].

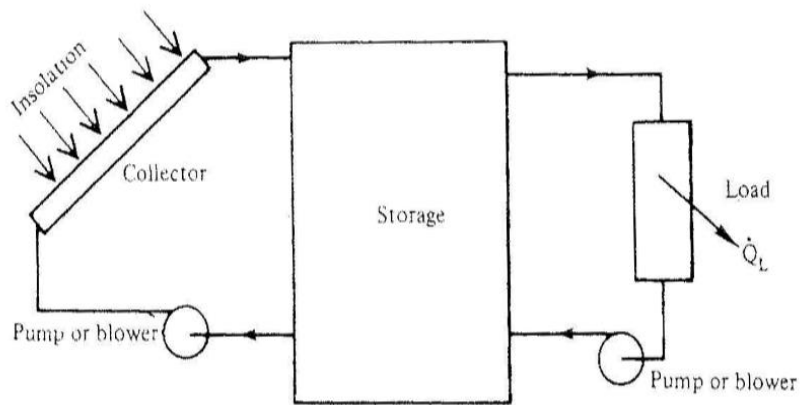
3.5.1 Διατήρηση θερμοκρασίας επιμέρους στοιχείων

Όπως είναι πλέον κατανοητό η λειτουργία ενός ηλιακού θερμικού σταθμού παραγωγής ισχύος είναι χρονικώς μεταβαλλόμενη λόγω των συνεχών αλλαγών των καιρικών συνθηκών, και κυρίως της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τη δύση του ηλίου σταματάει η λειτουργία του σταθμού είτε άμεσα (μη ύπαρξη δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας), είτε μετά το πέρας της τροφοδοσίας της δεξαμενής του φέροντος ρευστού, ανάλογα με τη δυνατότητα αυτονομίας που του παρέχει η αποθήκη. Τις περισσότερες φορές το φέρον ρευστό είναι ένα συνθετικό έλαιο που ονομάζεται Therminol VP-1 και ανήκει στη κατηγορία των αρωματικών υδρογονανθράκων [19]. Κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, μετά το τέλος της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, η παροχή του φέροντος ρευστού μειώνεται στην ελάχιστη τιμή της, η οποία είναι συνήθως ένα κλάσμα της μέγιστης (Rampdown Ratio). Το ποσοστό αυτό παίρνει τιμές κοντά στο 10%. Αυτό γίνεται διότι το συνθετικό έλαιο πρέπει να διατηρείται πάνω από τη θερμοκρασία πήξης του, η οποία για το Therminol VP-1 είναι 12°C, αλλιώς μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές επιπτώσεις στο σύστημα του ηλιακού πεδίου του σταθμού. Για τις καιρικές συνθήκες του σταθμού SEGS VI στον κόμβο Kramer της California, η ελάχιστη τιμή που φτάνει το μέσο μεταφοράς θερμότητας (Therminol VP-1) είναι της τάξης των 80°C [8], αρκετά μεγαλύτερη από αυτή της πήξης του. Θα πρέπει όμως να υπάρχει δυνατότητα θέρμανσης του συνθετικού ελαίου σε περίπτωση ακραίων καιρικών συνθηκών, ανάλογα την τοποθεσία του εκάστοτε σταθμού, η οποία γίνεται μέσω του εφεδρικού καυστήρα [10]. Ένα άλλο επιμέρους στοιχείο των ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής ισχύος το οποίο θα πρέπει να διατηρείται σε μια ελάχιστη θερμοκρασία είναι το μείγμα τηγμένων αλάτων της δεξαμενής αποθήκευσης, σε περίπτωση που ο σταθμός εμπεριέχει. Η θερμοκρασία πήξης του μείγματος των τηγμένων αλάτων είναι οι 220°C και η θερμοκρασία του

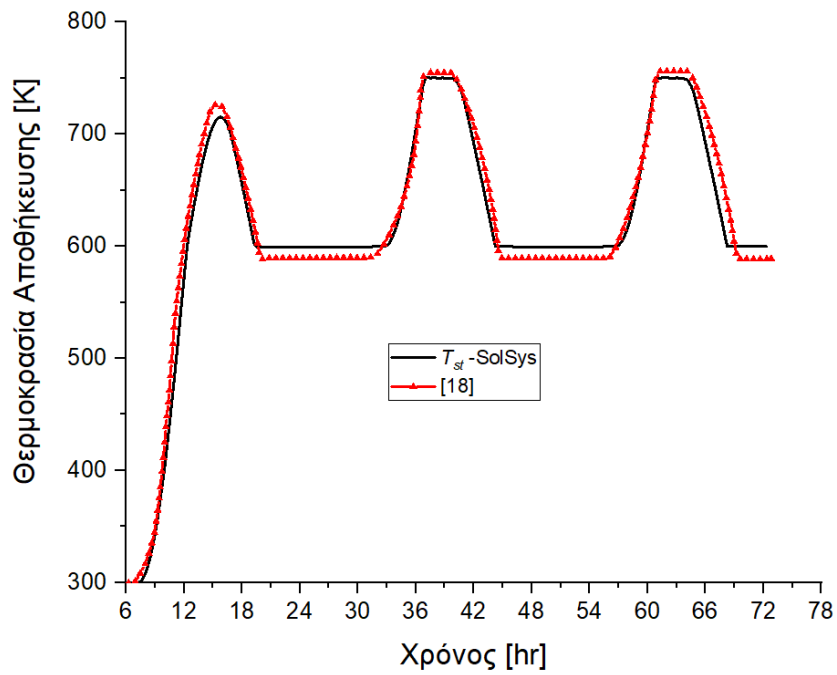
μείγματος μετά την εκφόρτιση της δεξαμενής είναι 290°C. Μια πτώση της θερμοκρασίας των τηγμένων αλάτων της τάξης των 70°C είναι αρκετά απίθανη δεδομένου ότι οι δεξαμενές αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας είναι πολύ καλά μονωμένες [28]. Όμως και σε τέτοιες ακραίες περιπτώσεις θα πρέπει να μπορεί ο συμβατικός καυστήρας να συνεισφέρει προς αποφυγήν τυχόν δυσλειτουργιών οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα [10].

3.5.2 Συνεισφορά στη παραγωγή ισχύος

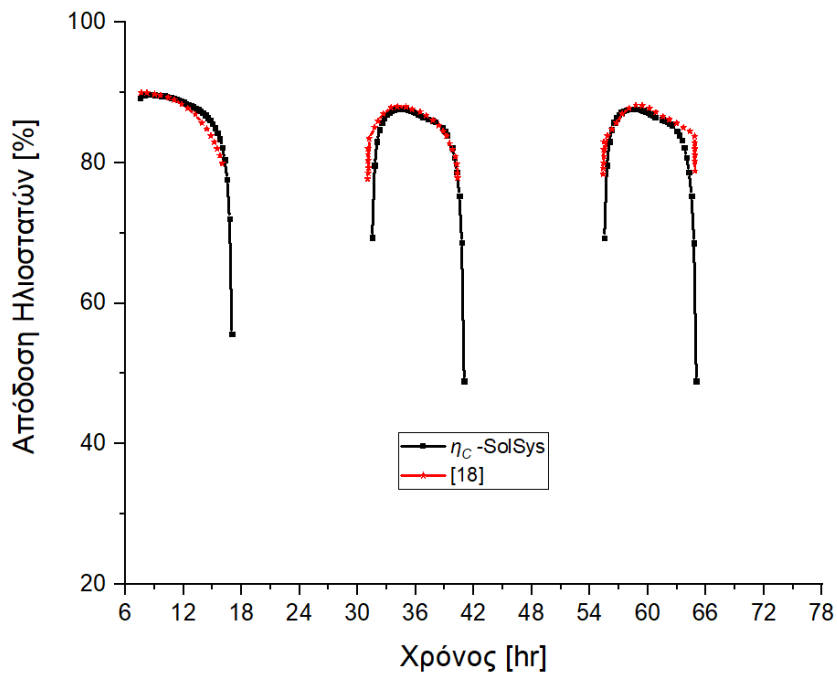
Κατά τις πρώτες πρωινές ώρες η ηλιακή ενέργεια είναι χαμηλής έντασης και ταυτόχρονα υπάρχει ένα μεγάλο ποσοστό των κατόπτρων το οποίο σκιάζεται από το αντίστοιχο γειτονικό του, λόγω της χαμηλής θέσης του ήλιου, έτσι το συνθετικό έλαιο χρειάζεται αρκετό χρονικό διάστημα για να θερμανθεί επαρκώς μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο παραπάνω λόγος μαζί με το γεγονός ότι ο ατμοστρόβιλος του σταθμού θα πρέπει να τροφοδοτηθεί με υψηλής ποιότητας υπέρθερμο ατμό κατά την εκκίνηση του, για να αποφευχθούν τυχόν φθορές που μπορεί να προκαλέσει η υγρασία λόγω αλλαγής φάσης του ατμού [29], καθιστούν απαραίτητη την ενεργειακή συμβολή του συμβατικού καυστήρα κατά την εκκίνηση της παραγωγής ισχύος. Έτσι επιτυγχάνεται γρηγορότερη εκκίνηση του σταθμού, καθώς και αποδοτικότερη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ομοίως συμβαίνει και τις απογευματινές ώρες κατά τη δύση του ηλίου όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι σε φθίνουσα κατάσταση και χρειάζεται να επέμβει ο καυστήρας, με σκοπό την ομαλή παραγωγή ισχύος και την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Κατά την ομαλή λειτουργία του σταθμού σε κατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος κοντά στην ονομαστική, ο συμβατικός καυστήρας καλείται να συνεισφέρει σε τυχόν βυθίσεις της ισχύος που οφείλονται λόγω παροδικής νέφωσης (απότομης μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας) με σκοπό την διοχέτευση καλής και σταθερής ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο [10].



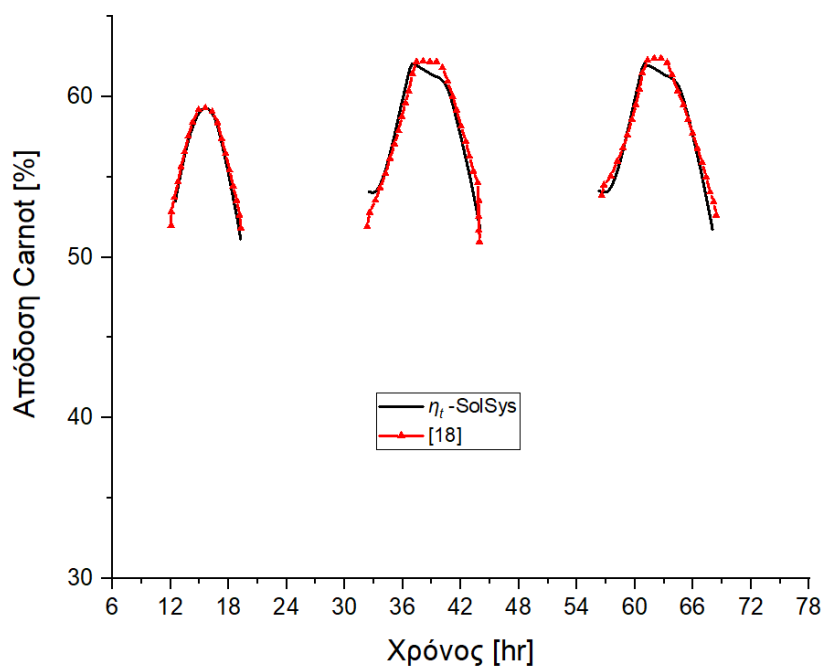
Σχήμα 3.1 Αναπαράσταση ενός τυπικού θερμικού ηλιακού συστήματος [18].



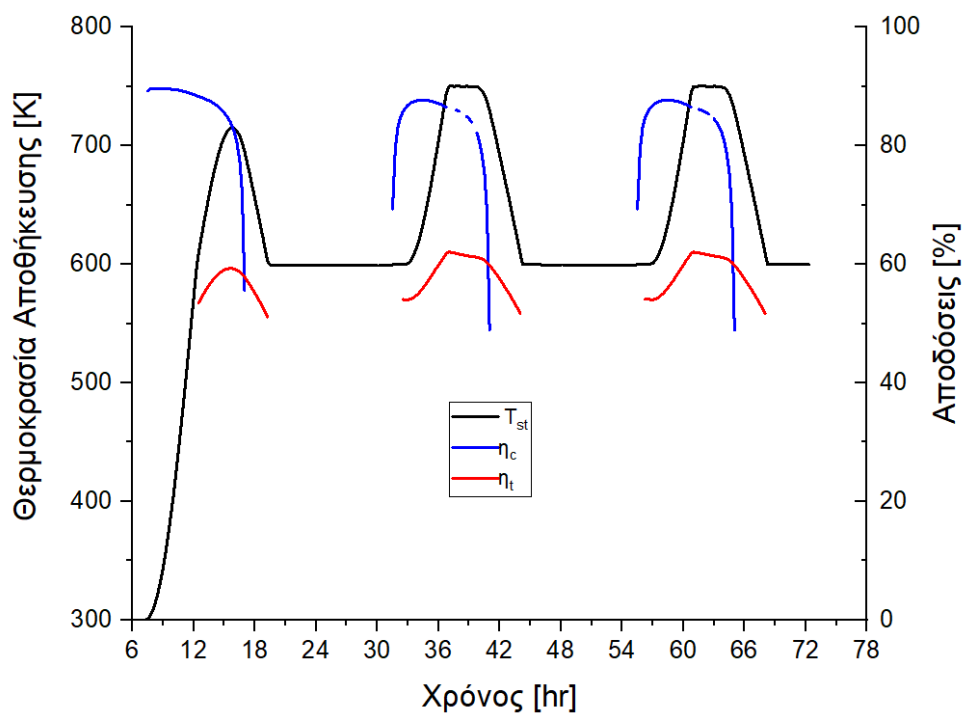
Σχήμα 3.2 Θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης T_{st} του πηγαίου κώδικα και σύγκριση με [18].



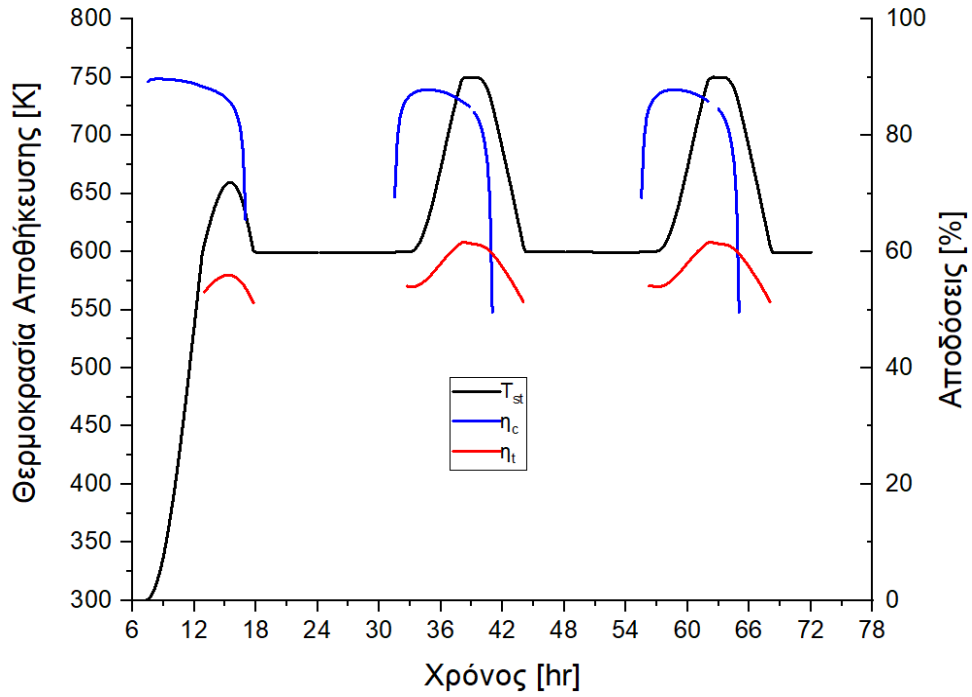
Σχήμα 3.3 Απόδοση πεδίου ηλιοστατών η_c και σύγκριση με [18].



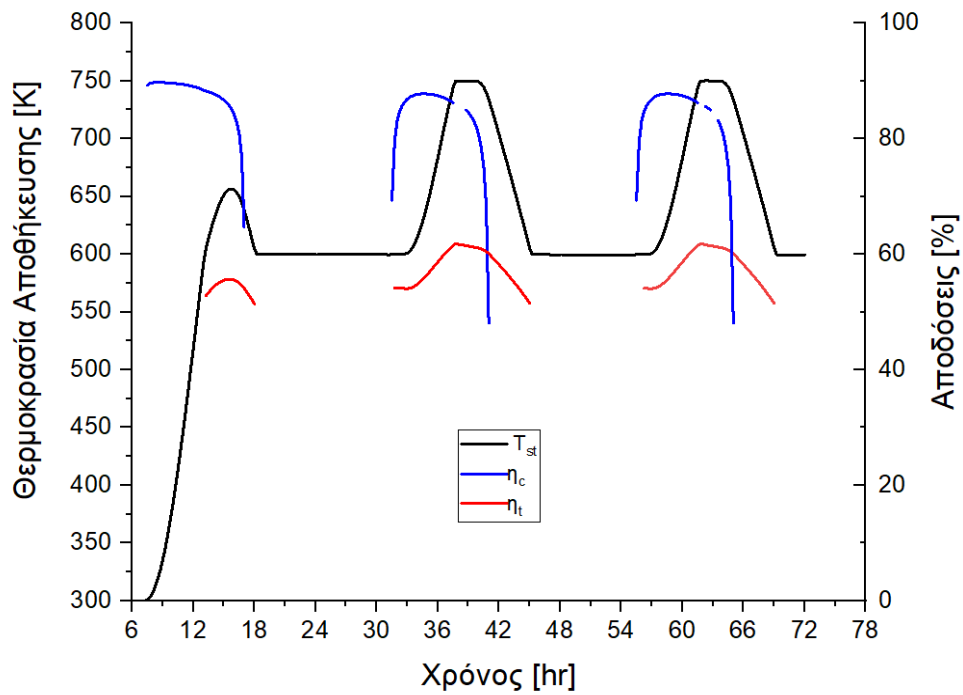
Σχήμα 3.4 Απόδοση θερμικού κύκλου Carnot η_t και σύγκριση με [18].



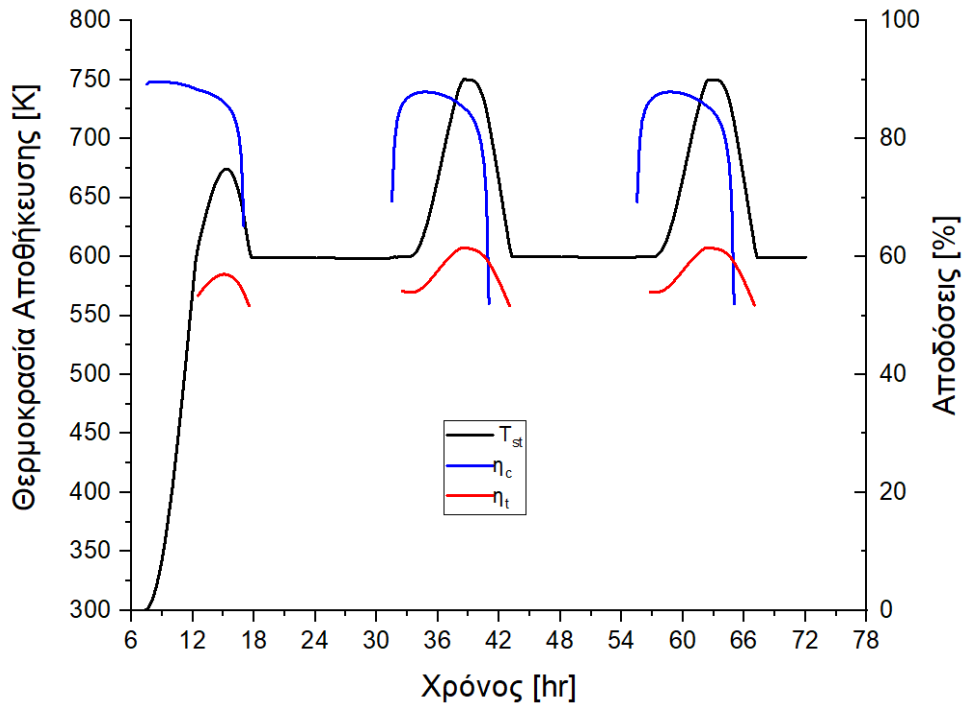
Σχήμα 3.5 Συμπεριφορά του Η.Θ.Σ για τρεις συνεχόμενες μέρες.



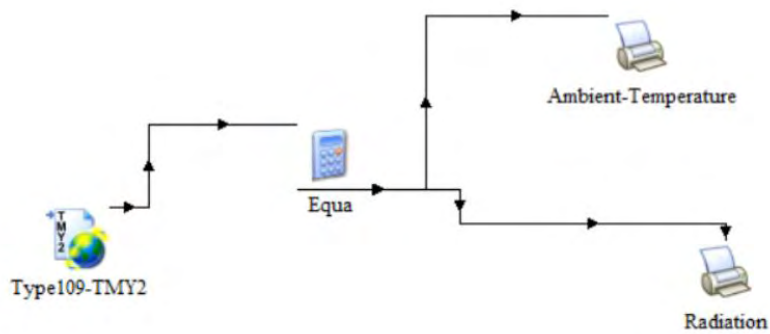
Σχήμα 3.6 Συμπεριφορά του ηλιακού θερμικού σταθμού για $A_c = 5 \times 10^5 \text{ m}^2$.



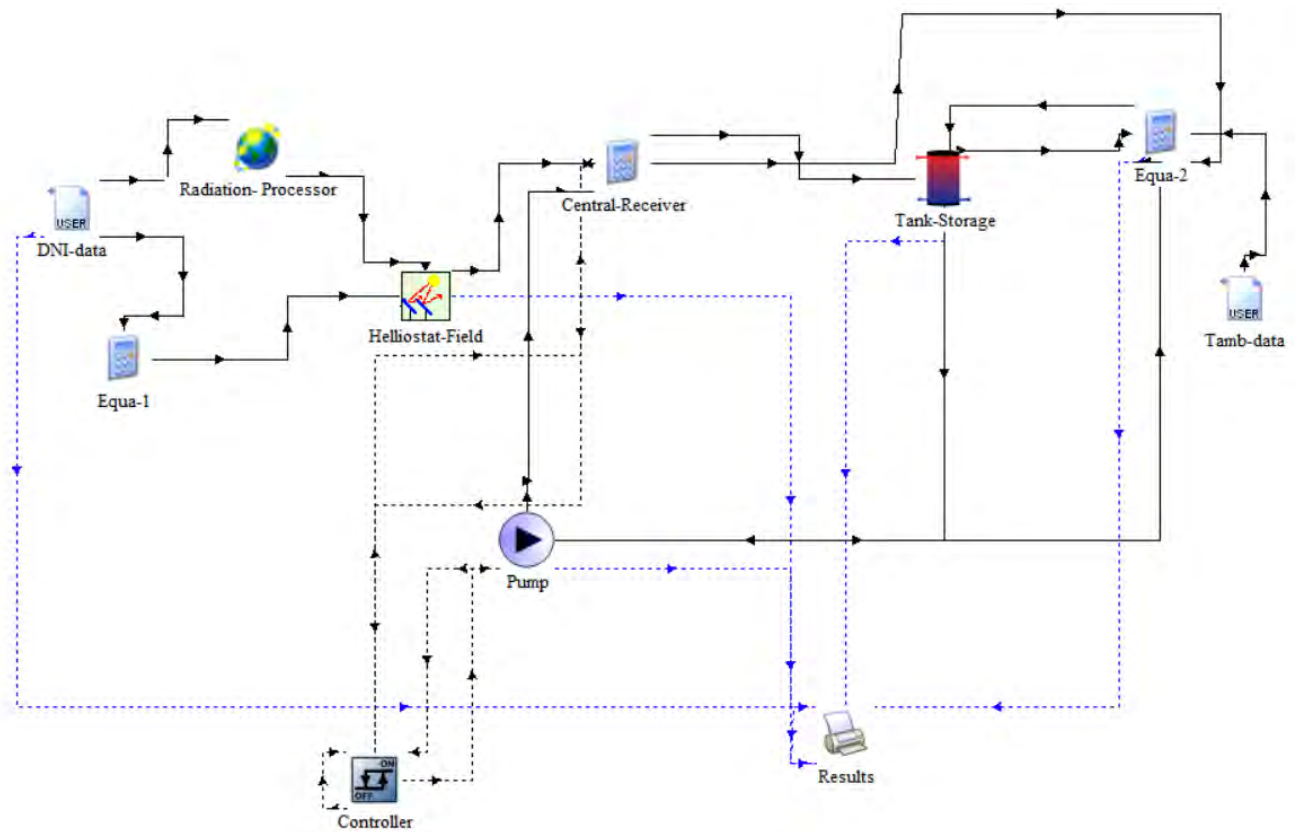
Σχήμα 3.7 Συμπεριφορά του ηλιακού θερμικού σταθμού για $(\dot{m}c_p) = 2 \times 10^{10} \text{ J/K}$.



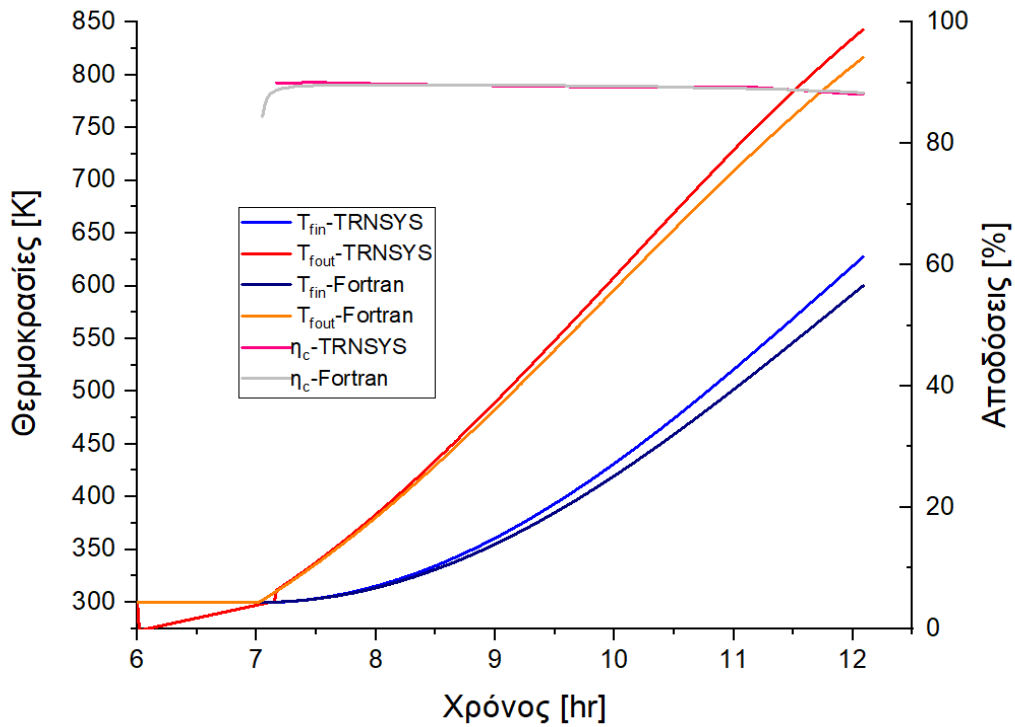
Σχήμα 3.8 Απόκριση του ηλιακού θερμικού σταθμού για $\dot{W}_e = 130\text{MW}$.



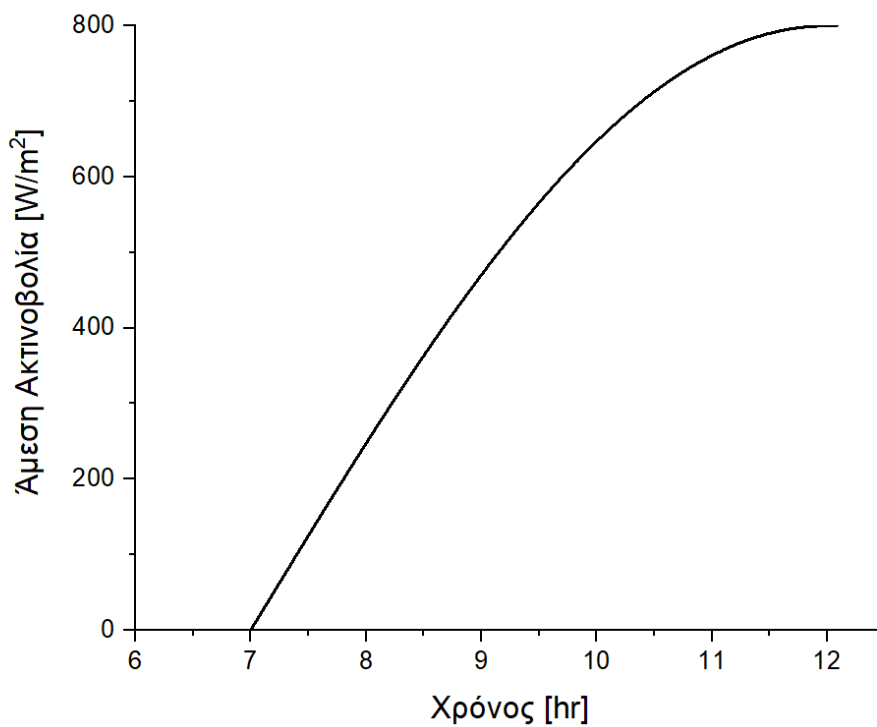
Σχήμα 3.9 Εκτύπωση πραγματικής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε αρχείο κειμένου στο λογισμικό TRNSYS.



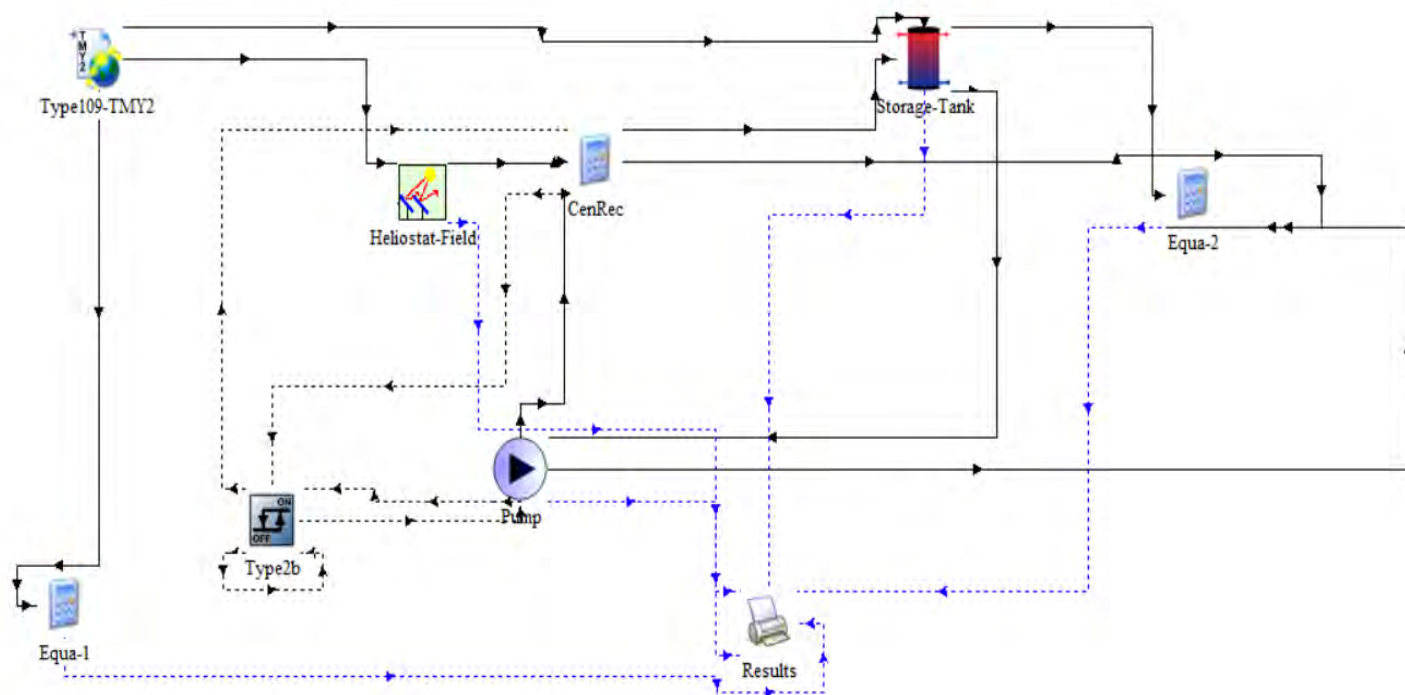
Σχήμα 3.10 Προσομοίωση του παραδείγματος της αναφοράς [18] για τη λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη κατά την εκκίνηση της λειτουργίας του σταθμού.



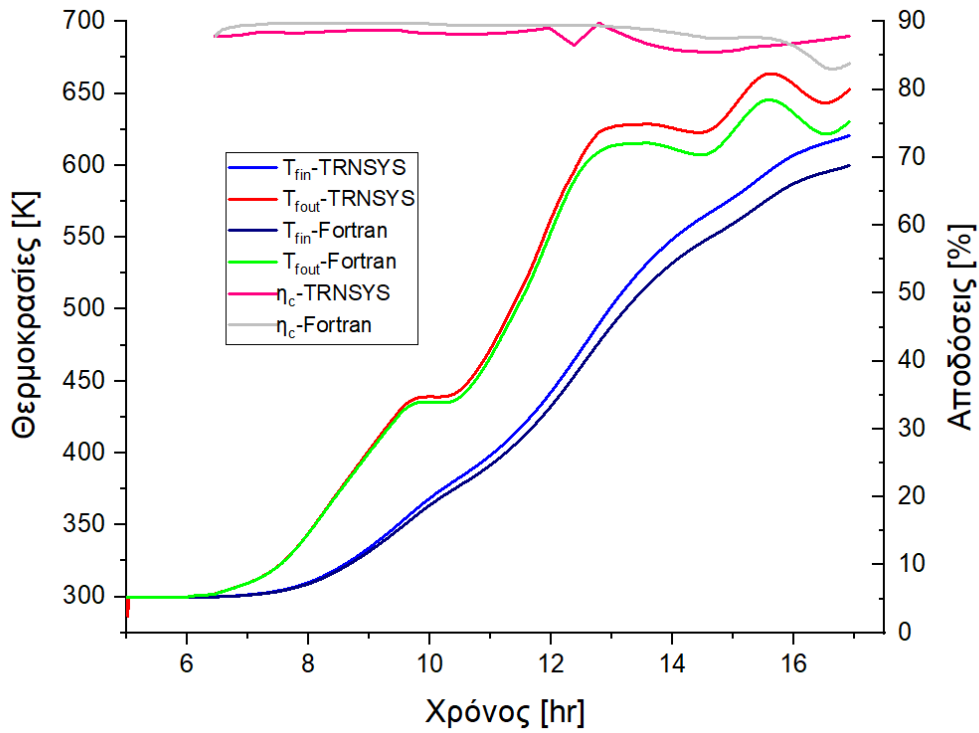
Σχήμα 3.11 Σύγκριση πηγαίου κώδικα SolSys με το λογισμικό TRNSYS για λειτουργία του συστήματος συλλέκτη-δεξαμενής αποθήκευσης κατά την ημέρα εκκίνησης του σταθμού.



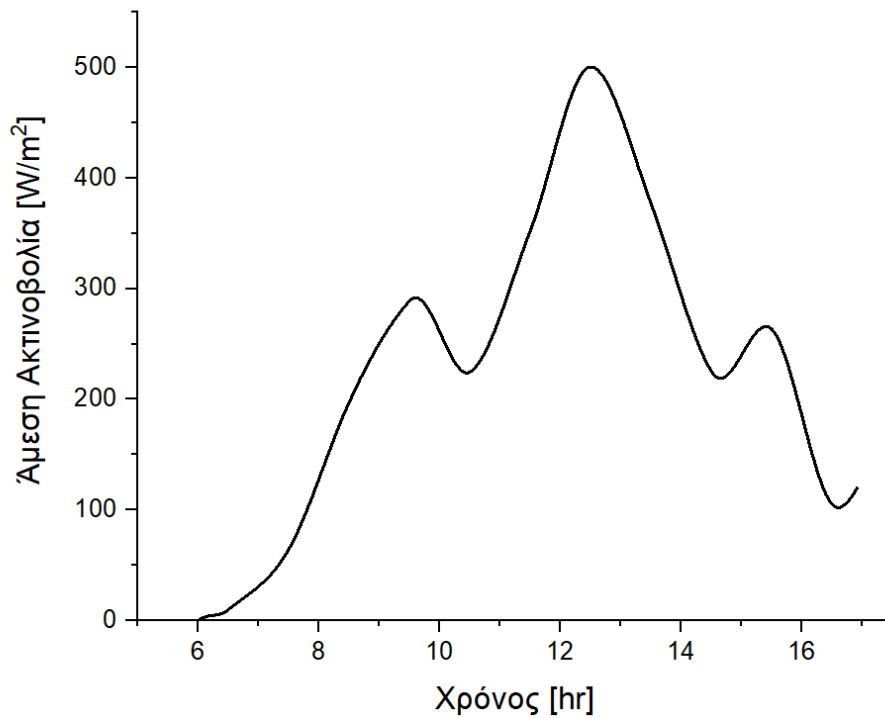
Σχήμα 3.12 Ημιτονοειδής προσομοίωση της ηλιακής ακτινοβολίας της [18].



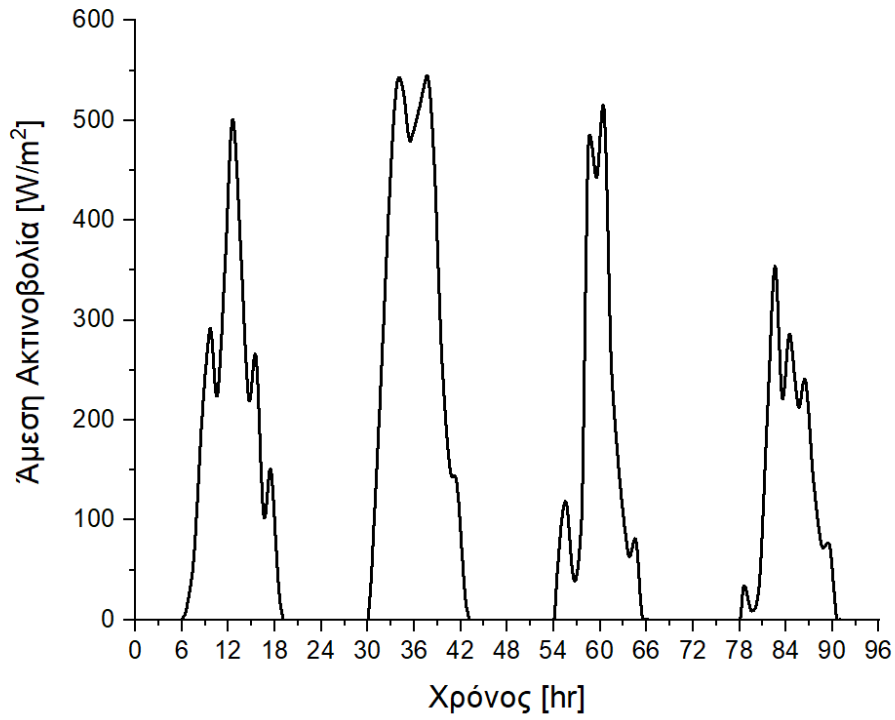
Σχήμα 3.13 Επίλυση του παραδείγματος της αναφοράς [18] με πραγματικά ηλιακά δεδομένα στο λογισμικό TRNSYS.



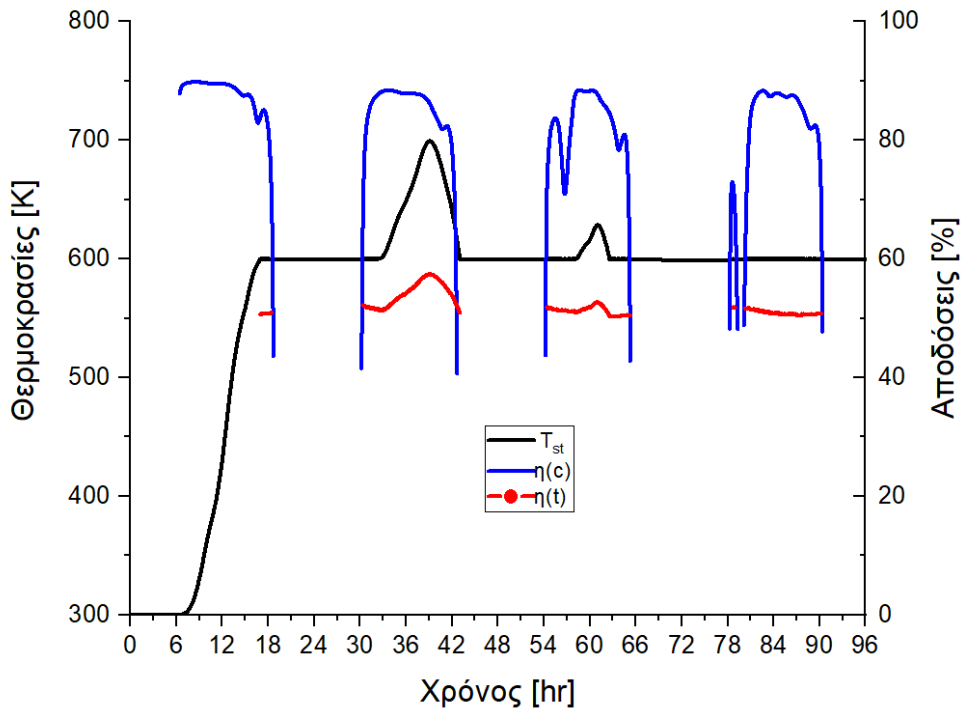
Σχήμα 3.14 Αποκρίσεις των δύο λογισμικών για πραγματικά καιρικά δεδομένα στις 1/5 στην Αθήνα.



Σχήμα 3.15 Άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην Αθήνα (1/5).



Σχήμα 3.16 Άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία στην Αθήνα για τις πρώτες τέσσερις ημέρες του Μαΐου.



Σχήμα 3.17 Απόκριση του σταθμού για τις πρώτες τέσσερις ημέρες του Μαΐου.

Κεφάλαιο 4 Προσομοίωση του Σταθμού SEGS VI με το Λογισμικό TRNSYS

4.1 Το πακέτο TRNSYS

Το λογισμικό πακέτο TRNSYS (Transient Simulation System) δημιουργήθηκε από το Πανεπιστήμιο του Wisconsin-Madison και χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση χρονικά μεταβαλλόμενων ενεργειακών συστημάτων μεγάλου εύρους. Η ποικιλία των συστημάτων προς προσομοίωση περιέχει τον πλήρη ενεργειακό σχεδιασμό κτηρίων, ηλιακά συστήματα όπως φωτοβολταϊκά και ηλιακά θερμικά, αιολικά, συστήματα υδρογόνου, κυψέλες καυσίμου, και διάφορα άλλα, δίνοντας τη δυνατότητα για αναλυτικό και εξελιγμένο σχεδιασμό. Η χρήση της βιβλιοθήκης STEC (Solar Thermal Electric Components) η οποία αναπτύχθηκε από το γερμανικό αεροδιαστημικό κέντρο (DLR) και από τα Εθνικά Εργαστήρια της Sandia (Livermore California, Albuquerque New Mexico) αυξάνει την ποικιλία των προς προσομοίωση συστημάτων, δίνοντας τη δυνατότητα ανάλυσης θερμικών κύκλων όπως ο Brayton και ο Rankine, χρήσης συγκεντρωτικών συλλεκτών ηλιακής ενέργειας (ηλιοστάτες-πύργος-δέκτης, παραβολικών κατόπτρων (PTC)), και εξειδικευμένων δεξαμενών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Οι εξισώσεις που διέπουν τα επιμέρους στοιχεία της βιβλιοθήκης του TRNSYS καθώς και της STEC περιγράφονται στα [30] και [31], αντίστοιχα. Επίσης, το λογισμικό παρέχει διάφορες εφαρμογές και συστήματα προς προσομοίωση για την περεταίρω κατανόηση των επιμέρους στοιχείων του.

4.2 Περιγραφή στοιχείων προσομοίωσης

Διατυπώνονται οι εξισώσεις και τα ισοζύγια που χρησιμοποιούνται από κάθε ένα στοιχείο της προσομοίωσης με σκοπό τη πλήρη κατανόηση του τελικού μοντέλου.

Αναλύονται μόνο οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις και οι παραμέτροι κάθε στοιχείου. Η ενδεδειγμένη αναφορά για τις εισόδους του κάθε στοιχείου θα γίνει στη παράγραφο 4.4. Στο τέλος κάθε στοιχείου παρατίθεται ο πίνακας με τις τιμές των παραμέτρων του. Η πλειοψηφία των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ανήκουν στη βιβλιοθήκη STEC και ο τρόπος λειτουργίας τους περιγράφεται στις αναφορές [8,15,31,32,33,34]. Το λογισμικό TRNSYS παρέχει τη δυνατότητα ανάγνωσης του κώδικα κάθε στοιχείου ο οποίος είναι σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και έτσι προσφέρει καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας τους.

Πεδίο Συλλεκτών Παραβολικών Κατόπτρων (Type 396)

Οι εξισώσεις που διατυπώνονται είναι από τη βιβλιογραφία [8,15,31,33]. Το μοντέλο υπολογίζει την απαιτούμενη παροχή μάζας του φέροντος ρευστού τσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου που ορίζεται από το χρήστη, δεδομένων των παρακάτω ποσοτήτων. Οι σχέσεις του μοντέλου είναι οι εξής

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_{net}}{c_p (T_{fout} - T_{fin})}, \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{pipe},$$

$$\dot{Q}_{abs} = A_{abs} DNI \eta_c,$$

$$\eta_c = K \cdot M \cdot Sh \left[A + B \frac{\Delta T_{out} - \Delta T_{in}}{2} \right] + (C + C_W \cdot W_S) \frac{\Delta T_{out} + \Delta T_{in}}{2 DNI} + D \frac{\Delta T_{out} \cdot \Delta T_{in} + \frac{1}{3} (\Delta T_{out} - \Delta T_{in})^2}{DNI}, \quad (21)$$

όπου

$$K = \cos(\varphi) - 0.0003512\varphi - 0.00003137\varphi^2,$$

ο μετατροπέας της γωνίας πρόσπτωσης,

$$M = \frac{L_{SCA} - z}{L_{SCA}} = 1 - \frac{f \tan(\varphi)}{L_{SCA}},$$

το πραγματικό ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του συλλέκτη το οποίο δέχεται ακτινοβολία λόγω του φαινομένου “end effect” στις άκρες, Sh ο παράγοντας σκίασης παράλληλων σειρών [8], φ η γωνία πρόσπτωσης, f η εστιακή απόσταση, W_s η ταχύτητα του ανέμου και z η απόσταση του δέκτη κατά την οποία επιδρά το “end effect” και δεν ακτινοβολείται από τον ήλιο σύμφωνα με το Σχήμα 4.1. Τέλος $\Delta T_{in}, \Delta T_{out}$ οι θερμοκρασιακές διαφορές των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου με το περιβάλλον και A, B, C, D, C_w , οι συντελεστές θερμικής απόδοσης οι οποίοι έχουν προκύψει από μετρήσεις για τους συλλέκτες του SEGS VI. Ορισμένες τιμές των συντελεστών διακρίνονται στο Σχήμα 4.2. Επίσης, το μοντέλο συμπεριλαμβάνει την παρασιτική ενέργεια που καταναλώνεται για την παρακολούθηση του ηλίου, την έναρξη και τη παύση λειτουργίας και τη λειτουργία της αντλίας του συλλέκτη. Ο συλλέκτης παύει να λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες ανέμου όπου το όριο ορίζεται από το χρήστη, και μπορεί να οριστεί το ποσοστό της μαζικής ροής που θα κυκλοφορεί κατά τη νυχτερινή περίοδο, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 3.5.1. Το Σχήμα 4.3 δείχνει τις παραμέτρους που ορίστηκαν κατά τη προσομοίωση.

Διαχωριστής HTF (Type 352) 


Το στοιχείο αυτό διαχωρίζει τη ροή ενός ρευστού σε δύο εξόδους ανάλογα με το ποσοστό $FRAC$ που ορίζει ο χρήστης. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα να υπάρχει πτώση της πίεσης τους εξόδους των δύο ροών μέσω του συντελεστή kp . Οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι οι παρακάτω. Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται η παράμετρος kp που επιλέχθηκε κατά τη προσομοίωση.

$$\dot{m}_1 = FRAC \cdot \dot{m}_{in} ,$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{in} - \dot{m}_1 ,$$

$$dp = kp \cdot \dot{m}_{in}^2 ,$$

$$P_1 = P_2 = P_{in} - dp .$$

Υπερθερμαντής/Αναθερμαντής (Type 315) 

Αυτό το μοντέλο θεωρεί έναν εναλλάκτη αυλών-κελύφους ο οποίος λειτουργεί με αντιρροή των δύο ρευμάτων. Η αποδοτικότητα του εναλλάκτη υπολογίζεται ως το ποσό της πραγματικής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων προς την μέγιστη που θα μπορούσε να επιτευχθεί δεδομένων των παραμέτρων. Επιπροσθέτως, δίνονται από το χρήστη οι ποσότητες ως παράμετροι $UA_{ref}, UA_{exp}, \dot{m}_{cold,ref}, \Delta p_{ref}, \Delta p_{exp}$ που χρησιμοποιούνται από τις Εξ. (25) και (26). Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη μέθοδο NTU για τους υπολογισμούς των ποσοτήτων $\dot{Q}_{max}, \varepsilon$ και υπολογίζει την θερμική ενέργεια που μεταφέρεται ανάμεσα στα δύο ρεύματα από την εξίσωση [8,15,31,34].

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (22)$$

Επομένως για τον ατμό υπολογίζεται η ενθαλπία εξόδου από το ισοζύγιο ενέργειας

$$h_{st,out} = h_{st,in} + \dot{Q}/\dot{m}_{st}$$

και σε συνδυασμό με τη πίεση εξόδου η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση

$$P_{st,out} = P_{st,in} - k_{st}\dot{m}_{st}^2 , \quad (23)$$

όπου ο συντελεστής k_{st} για τη πτώση πίεσης είναι $0.0023 \left[\text{bar} \times \text{s}^2 / \text{kg}^2 \right]$ για τον υπερθερμαντή και $0.001 \left[\text{bar} \times \text{s}^2 / \text{kg}^2 \right]$ για τον αναθερμαντή στις συνθήκες αναφοράς.

Δύναται να υπολογιστεί τελικά η θερμοκρασία εξόδου από τους πίνακες ατμού

$T_{st,out} = T(P_{st,out}, h_{st,out})$. Για το φέρον ρευστό η ενθαλπία εξόδου δίνεται από το ισοζύγιο

ενέργειας

$$h_{HTF,out} = h_{HTF,in} - \dot{Q}/\dot{m}_{HTF}$$

Δεδομένης της ενθαλπίας εξόδου υπολογίζεται η θερμοκρασία του φέροντος ρευστού

από τη πειραματική σχέση

$$h_{HTF,out} = 1.49937T_{HTF,out} + \left(\frac{0.00269436}{2}\right)T_{HTF,out}^2 + \left(\frac{0.000000165426}{3}\right)T_{HTF,out}^3, \quad (24)$$

όπου η ενθαλπία είναι σε kJ/kg και η θερμοκρασία σε °C. Στο Σχήμα 4.5 δίδεται το διάγραμμα ροής του υπερθερμαντή καθώς και οι παράμετροι της προσομοίωσης στα Σχήματα 4.6 και 4.7, για τον υπερθερμαντή και τον αναθερμαντή αντίστοιχα :

$$UA = UA_{ref} \left(\frac{\dot{m}_{cold}}{\dot{m}_{cold,ref}} \right)^{UA_{exp}} \quad \text{με } 0.1UA \leq UA \leq 2UA_{ref}, \quad (25)$$

$$\Delta p = \Delta p_{ref} \left(\frac{\dot{m}_{cold}}{\dot{m}_{cold,ref}} \right)^{\Delta p_{exp}} \quad \text{με } \Delta p \leq 2\Delta p_{ref}. \quad (26)$$

Εξατμιστής (Type 316)

Το μοντέλο προσομοιώνει έναν βραστήρα νερού υπολογίζοντας τις θερμοκρασίες εξόδου των δύο ρευμάτων σε αντιρροή. Το νερό εισέρχεται στο κέλυφος (ψυχρή πλευρά) ενώ το φέρον ρευστό στους αυλούς (θερμή πλευρά). Οι συνθήκες του νερού ατμού δίνονται συναρτήσει της ποιότητας, της θερμοκρασίας και της πίεσης, ενώ η μεταφορά θερμότητας περιγράφεται από έναν συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας UA , ο οποίος εκτιμάται με τον ίδιο τρόπο που γινόταν και για τον υπερθερμαντή, (Type 315) (βλέπε Εξ. (25)), όπως και η μέθοδος NTU για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας και της πραγματικής ενέργειας \dot{Q} (βλέπε Εξ. (22)), όπου η ελάχιστη χωρητικότητα είναι αυτή του φέροντος ρευστού αφού από τη μεριά του νερού-ατμού η χωρητικότητα είναι θεωρητικά άπειρη λόγω της αλλαγής φάσης, άρα

$$C_{min} = \dot{m}_{HTF} \left(\frac{h_{HTF,in} - h_{HTF,out}}{T_{HTF,in} - T_{HTF,out}} \right).$$

Επίσης, η σχέση που συνδέει τις μονάδες μεταφοράς με την αποδοτικότητα είναι

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}.$$

Το μοντέλο επίσης υπολογίζει την απαιτούμενη μαζική ροή ατμού η οποία δύναται να εξατμιστεί πλήρως ανάλογα με τη διαθέσιμη θερμική ενέργεια από την εξίσωση

$$\dot{m}_d = \frac{\dot{Q}}{(h_{st,out} - h_{water,in})}, \quad (27)$$

όπου η ενθαλπία εξόδου δίνεται από τους πίνακες ατμού δεδομένου ότι

$$P_{st,in} = P_{st,out} \Rightarrow h_{st,out} = h(P_{st,out}, x = 1).$$

Τέλος η θερμοκρασία εξόδου του HTF υπολογίζεται από την ίδια εξίσωση με αυτή του υπερθερμαντή (βλέπε Εξ. (24)), αφού του έχει βρεθεί η ενθαλπία εξόδου από το ισοζύγιο ενέργειας

$$h_{HTF,out} = h_{HTF,in} - \dot{Q}/\dot{m}_{HTF}.$$

Στο Σχήμα 4.8 διακρίνονται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για το παρών μοντέλο.



Προθερμαντής (Type 315)

Ο προθερμαντής είναι ένας εναλλάκτης ο οποίος αυξάνει τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας (ψυχρή πλευρά) μέχρι να επιτύχει τη θερμοκρασία κορεσμού στην απαιτούμενη πίεση εξόδου. Η μοντελοποίηση του προθερμαντή γίνεται με την υπόθεση ότι στην έξοδο της ψυχρής πλευράς θα υπάρχει κορεσμένο νερό με πίεση κορεσμού την $P_{sat} = P_{water,out}$ (πίεση εξόδου). Η εξωτερική πίεση του νερού από τον προθερμαντή υπολογίζεται παρόμοια με αυτή του υπερθερμαντή (βλέπε Εξ. (23)) με τη διαφορά ότι ο συντελεστής για την πτώση πίεσης είναι $k_{water} = 0.000092 [\text{bar} \times \text{s}^2 / \text{kg}^2]$. Η ενθαλπία εξόδου του κορεσμένου νερού υπολογίζεται από τους πίνακες ατμού καθώς

$$h_{water,out} = h(P_{water,out}, x = 0),$$

και ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας από την εξίσωση

$$\dot{Q} = \dot{m}_{water} (h_{water,out} - h_{water,in}).$$

Για την θερμοκρασία εξόδου του φέροντος ρευστού η διαδικασία είναι ίδια με αυτή του υπερθερμαντή και του εξατμιστή, εφαρμόζοντας το ισοζύγιο ενέργειας και χρησιμοποιώντας την εξίσωση εξάρτησης ενθαλπίας-θερμοκρασίας (βλέπε Εξ. (24)).

Στο Σχήμα 4.9 ορίζονται οι παράμετροι που δόθηκαν στον προθερμαντή.

Αναμείκτης HTF (Type 11h)

Το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοιώνει έναν μίκτη δύο ρευμάτων ρευστών με εισόδους την εκάστοτε θερμοκρασία και μαζική ροή τους. Η παράμετρος αυτού του στοιχείου φαίνεται στο Σχήμα 4.10, και οι εξισώσεις που το διέπουν είναι :

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad \text{και} \quad T_{out} = \frac{(T_1\dot{m}_1 + T_2\dot{m}_2)}{\dot{m}_{out}}$$

Μετατροπέας X2H (Type 391)

Το μοντέλο αυτό δέχεται ως εισόδους την πίεση, τη θερμοκρασία και τη ποιότητα του ατμού και χρησιμοποιεί τη ρουτίνα steam2.for η οποία επιστρέφει την αντίστοιχη ενθαλπία και πίεση που αντιστοιχούν σε αυτές τις συνθήκες εισόδου. Δεν υπάρχουν παράμετροι που να χρειάζεται να καθοριστούν σε αυτό το στοιχείο.

Μετατροπέας H2X (Type 392)

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας δέχεται ως εισόδους την πίεση και την ενθαλπία και χρησιμοποιώντας τη ρουτίνα steam3.for επιστρέφει τη θερμοκρασία και τη ποιότητα του ατμού σε αυτή τη κατάσταση. Η έκδοση του TRNSYS 16.1 εμφάνισε μία δυσλειτουργία κατά τη χρησιμοποίηση αυτού του στοιχείου και γενικά της ρουτίνας steam3.for η οποία χρησιμοποιείται και από ένα άλλο στοιχείο. Η αντιμετώπιση της δυσλειτουργίας θα αναλυθεί στην ενότητα 4.3.

Βαθμίδα Στροβίλου (Type 318)

Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει μια βαθμίδα ενός στροβίλου και δέχεται ως εισόδους τη μαζική παροχή την ενθαλπία τον δείκτη παράκαμψης εισόδου καθώς και την πίεση εξόδου. Η πίεση τις περισσότερες φορές συνδέεται με αντίθετη φορά στο TRNSYS σε αρκετά στοιχεία με αποτέλεσμα αυτά να έχουν ως είσοδο τη πίεση εξόδου τους. Επίσης, ορίζονται ως παράμετροι τα $P_{in,ref}$, $P_{out,ref}$, \dot{m}_{ref} που είναι τιμές αναφοράς για τη πίεση εισόδου/εξόδου και για τη μαζική ροή καθώς και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης $\eta_{IT,ref}$, η απόδοση της γεννήτριας η_{gen} , και οι ισεντροπικοί συντελεστές a, b, c . Ο συνολικός ισεντροπικός συντελεστής απόδοσης είναι

$$\eta_{IT} = \eta_{IT,ref} \left(1 + a \cdot f + b \cdot f^2 + c \cdot f^3 \right) \quad \text{με } 0.2 \leq \eta_{IT} \leq 1,$$

$$\text{όπου } f = \frac{\dot{m} - \dot{m}_{ref}}{\dot{m}} \quad \text{με } -0.7 \leq f \leq 0.7.$$

Αρχικά ελέγχεται η τιμή του συντελεστή παράκαμψης εισόδου, ο οποίος εάν ισούται με μηδέν τότε δεν εκτονώνεται ο εισερχόμενος ατμός στο στρόβιλο και η πίεση, η μαζική ροή και η θερμοκρασία του παραμένουν σταθερές. Εάν ο συντελεστής παράκαμψης είναι ίσος με τη μονάδα τότε ο ατμός εκτονώνεται κανονικά και η πίεση εισόδου είναι

$$P_{in} = \sqrt{\left[\left(\frac{\dot{m}_{in}}{\dot{m}_{ref}} \right)^2 \left(P_{in,ref}^2 - P_{out,ref}^2 \right) + P_{out}^2 \right]}.$$

Στη συνέχεια, καλείται η ρουτίνα steam3.for για τον υπολογισμό της εντροπίας για τη κατάσταση του ατμού στην είσοδο $s_{in} = s(P_{in}, h_{in}) = s_{2s}$ και για τη κατάσταση ισεντροπικής εκτόνωσης, όπου υπολογίζεται η ενθαλπία $h_{2s} = h(P_{out}, s_{2s})$, οπότε δύναται ο υπολογισμός της ενθαλπίας εξόδου από την εξίσωση για την ισεντροπική απόδοση

$$\eta_{IT} = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{2s}} \quad (28)$$

Η παραγόμενη ισχύς της τουρμπίνας είναι

$$W_T = \dot{m}_{in} (h_{in} - h_{out}) \eta_{gen}, \quad (29)$$

Όπως προαναφέρθηκε η ρουτίνα steam3.for δεν αποδίδει σωστές τιμές εξόδου σε ορισμένες περιπτώσεις οπότε χρησιμοποιήθηκε μια εναλλακτική προσέγγιση για τον υπολογισμό της ισεντροπικής απόδοσης και της ενθαλπίας. Οι βαθμίδες του στροβίλου είναι συνολικά επτά άρα, οι παράμετροι που ορίστηκαν διακρίνονται στα Σχήματα 4.11, 4.12, 4.13, 4.14.

Διαχωριστής Ατμού (Type 389)

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό της ροής του ατμού καθώς σε κάθε βαθμίδα του στροβίλου απομαστεύεται μία ποσότητα ατμού κάθε φορά με σκοπό τη προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας. Δέχεται ως εισόδους την απαιτούμενη παροχή στην έξοδο 1, τη συνολική εισερχόμενη παροχή, την ενθαλπία εισόδου και τη πίεση της εξόδου 2. Η ενθαλπία παραμένει σταθερή, το ίδιο και η πίεση η οποία δηλώνεται από την έξοδο 2, $P_2 = P_1 = P_{in}$. Τέλος, η απαιτούμενη ροή πηγαίνει στην έξοδο 1, ενώ η εναπομένουσα ροή στη 2. Το στοιχείο S-Split δεν χαρακτηρίζεται από παραμέτρους.

Μετατροπέας (Type 58)

Το στοιχείο αυτό δέχεται ως είσοδο δύο ιδιότητες της προεπιλεγμένης ουσίας και επιστρέφει τις υπόλοιπες θερμοδυναμικές ιδιότητες που αντιστοιχούν για τη συνθήκη εισόδου. Περιέχει μια ποικιλία ψυκτικών η οποία καθορίζεται ανάλογα με τη παράμετρο και μπορεί να είναι R-11, R-12, R-13, R-14, R-22, R-114A, R-134A, R-500, R-502, αμμωνία για R-717 και τέλος R-718 για

ατμό. Οι παράμετροι για το (Type 58) φαίνονται στο Σχήμα 4.15 για εισόδους πίεση, ενθαλπία και στο Σχήμα 4.16 για πίεση και εντροπία.

Συμπυκνωτής (Type 383)

Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει τη λειτουργία ενός συμπυκνωτή αυλών κελύφους με μηδενική πτώση πίεσης. Το νερό ψύξης είναι από τη μεριά των αυλών, ενώ ο ατμός της πέμπτης βαθμίδας του στροβίλου χαμηλής πίεσης, από τη μεριά του κελύφους. Ο σκοπός του συμπυκνωτή είναι η πλήρης συμπύκνωση του ατμού με σκοπό την εύκολη προώθηση του νερού τροφοδοσίας στον καυστήρα. Με την υπόθεση ότι δεν συμβαίνει υπόψυξη του νερού η ενθαλπία του συμπυκνώματος στην έξοδο του στοιχείου θα είναι αυτή του κορεσμένου νερού στη πίεση συμπύκνωσης $h_c = h_{liq,sat}(P_{cond}) = h(P_{cond}, x = 0)$. Η απαιτούμενη θερμική ενέργεια του συμπυκνωτή υπολογίζεται από το θερμικό ισοζύγιο

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{st} h_{st} + \dot{m}_c h_c - (\dot{m}_{st} + \dot{m}_c) h_{sat},$$

και δύναται να υπολογιστεί η απαιτούμενη παροχή νερού ψύξης από την εξίσωση

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{Q}_{cond}}{cp_w \Delta T_w},$$

όπου ΔT_w η θερμοκρασιακή άνοδος του νερού ψύξης (παράμετρος 2), ενώ η παράμετρος 1 σχετίζεται με τη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία εξόδου του νερού με τη θερμοκρασία συμπύκνωσης.

$$T_{w,out} = T_{w,in} + \Delta T_w \quad \text{και} \quad T_{cond} = T_{w,out} + \Delta T_{parameter(1)}$$

Στο Σχήμα 4.17 ορίζονται οι παράμετροι για τον συμπυκνωτή ενώ στο Σχήμα 4.18 φαίνεται το διάγραμμα ροής.

Προθερμαντής Νερού Τροφοδοσίας (Type 317) 

Ο προθερμαντής του νερού τροφοδοσίας είναι ένας εναλλάκτης αυλών κελύφους όπου στους αυλούς ρέει το νερό τροφοδοσίας υψηλής πίεσης και σταθερής θερμοχωρητικότητας (ψυχρή πλευρά), ενώ στο κέλυφος συμπυκνώνεται ο ατμός που απομαστεύεται από την εκάστοτε βαθμίδα του στροβίλου σε συνδυασμό με το εισερχόμενο συμπύκνωμα του τυχόν επόμενου προθερμαντή (θερμή πλευρά). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται από την Εξ. (25). Το μοντέλο επίσης υπολογίζει την απαραίτητη παροχή ατμού που χρειάζεται να απομαστευτεί έτσι ώστε το νερό τροφοδοσίας και το εισερχόμενο συμπύκνωμα να έρθουν σε κατάσταση κορεσμού $T_{h,out} = T_{sat} = T(P_{h,in}, x = 0)$, $h_{sat} = h(P_{h,in}, x = 0)$. Η παροχή αυτή προκύπτει από το ισοζύγιο

$$\dot{Q} = \dot{m}_{st,dem} (h_{hot,side} - h_{sat}), \text{ όπου } h_{hot,side} = \frac{\dot{m}_{st,dem} h_{st,in} + \dot{m}_{cond} h_{cond,in}}{\dot{m}_{st,dem} + \dot{m}_{cond}}.$$

Επομένως η σχέση για τη ζήτηση της παροχής του ατμού δίδεται λύνοντας το σύστημα

$$\dot{m}_{st,dem} = \frac{1}{\left[2\dot{m}_{cond} (h_{st,in} - h_{sat}) \right] - \dot{m}_{cond} h_{cond} + \dot{m}_{cond} h_{sat} + \dot{Q} + S},$$

$$S = \sqrt{\left[\dot{m}_{cond}^2 h_{cond}^2 - 2\dot{m}_{cond}^2 h_{cond} h_{sat} - 2\dot{m}_{cond} h_{cond} \dot{Q} + \dot{m}_{cond}^2 h_{sat}^2 - 2\dot{m}_{cond} h_{sat} \dot{Q} + \dot{Q}^2 + 4\dot{Q} \dot{m}_{cond} h_{st,in} \right]}$$

Η ροή θερμότητας προκύπτει από την αποδοτικότητα η οποία υπολογίζεται από την Εξ.

$$\varepsilon = 1 - e^{(-UA/(\dot{m}_{cold} \cdot c_{p,cold}))} \text{ και } \dot{Q} = \varepsilon \dot{m}_{cold} (T_{sat} - T_{c,in}),$$

και τέλος υπολογίζεται η θερμοκρασία κατά την οποία εξέρχεται το νερό τροφοδοσίας

$$T_{c,out} = T_{c,in} + \varepsilon (T_{sat} - T_{c,in}).$$

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για τους πρώτους τρεις προθερμαντές διακρίνονται στο Σχήμα 4.19 και στο Σχήμα 4.20 για τους δύο τελευταίους.

Απαεριοτής (Type 384)



Το μοντέλο προσομοιώνει έναν προθερμαντή ανοιχτού τύπου ο οποίος λειτουργεί σε μόνιμες συνθήκες αναμιγνύοντας τα τρία ρεύματα εισόδου (συμπύκνωμα, νερό τροφοδοσίας, αποστευμένος ατμός). Στην έξοδο το νερό βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού. Επίσης, υπολογίζεται η απαιτούμενη ποσότητα ατμού προς απομάστευση από τη πρώτη βαθμίδα της χαμηλής πίεσης $LP-1$ τέτοια ώστε να θερμάνει τα άλλα δύο ρεύματα σε κατάσταση κορεσμού

$$\dot{m}_{st,dem} = \frac{\dot{m}_{cond} (h_{sat} - h_{cond}) + \dot{m}_{w,in} (h_{sat} - c_p T_{w,in})}{h_{st,in} - h_{sat}},$$

όπου η ενθαλπία κορεσμού υπολογίζεται από πίνακες ατμού για $h_{sat} = h(P_{st,in}, x_{out} = 0)$ και η ενθαλπία του συμπυκνώματος που εισέρχεται στον απαεριοτή υπολογίζεται επίσης από πίνακες για $h_{cond} = h(T_{cond,in}, x_{cond,in})$ αφού αυτές οι ποσότητες δίνονται ως είσοδοι στο στοιχείο. Η θερμοκρασία εξόδου αντιστοιχεί στη κατάσταση κορεσμού $T = T_{sat}$ και η μαζική ροή εξόδου ισούται με

$$\dot{m}_{w,out} = \dot{m}_{cond} + \dot{m}_{st,dem} + \dot{m}_{w,in}.$$

Το μοντέλο προσομοίωσης του απαεριοτή δεν εμπεριέχει παραμέτρους, μόνο μεταβλητές εισόδου. Στο Σχήμα 4.21 διακρίνεται το διάγραμμα ροής του απαεριοτή.

Αντλία (Type 300)



Το στοιχείο της αντλίας χρησιμοποιείται για να προσδώσει κίνηση στη ροή του εκάστοτε ρευστού. Στον υπό προσομοίωση σταθμό υπάρχουν συνολικά τρεις αντλίες, για τη προώθηση του φέροντος ρευστού (HTF-Pump), τη προώθηση του νερού τροφοδοσίας (FeedWater-Pump), και τη προώθηση του συμπυκνώματος (Condensate-Pump). Οι παράμετροι για την εκάστοτε αντλία (Type 300) δίνονται στο Σχήμα 4.22

και καθορίζουν την μέγιστη ροή και ισχύ της αντλίας καθώς και τη θερμοχωρητικότητα του υπό προώθηση ρευστού.

Αναγνώστης Κειμένου (Type 9a)

Ο αναγνώστης κειμένου έχει αναφερθεί στην ενότητα 3.5.2 και χρησιμοποιείται για τη προσθήκη της εκάστοτε άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι τιμές των παραμέτρων του στοιχείου αυτού ορίζονται στο Σχήμα 4.23. Η ακτινοβολία που δόθηκε σαν αρχείο στο στοιχείο Type 9a ήταν σε W/m^2 και για αυτό το λόγο ο παράγοντας πολλαπλασιασμού (έκτη παράμετρος) είναι ίσος με 3.6, καθώς το πεδίο των PTC συλλεκτών δέχεται την άμεση ακτινοβολία σε kJ/hr .

4.3 Περιγραφή ηλιακού θερμικού σταθμού SEGS VI

Όπως έχει αναφερθεί κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση ο σταθμός SEGS VI είναι ονομαστικής ισχύος 30MW και λειτουργεί σε συνδυασμό με συμβατικό καυστήρα πετρελαίου που μπορεί να συνεισφέρει στη παραγωγή ισχύος ως και 25%. Εξετάζεται η μερική συμπεριφορά του σταθμού, δηλαδή χωρίς τη χρήση του εφεδρικού καυστήρα. Ο σταθμός απαρτίζεται από δύο διαφορετικές ροές ρευστών οι οποίες γίνονται διακριτές στο Σχήμα 4.24. Η έντονη γραμμή αναφέρεται στο φέρον ρευστό (HTF) το οποίο χρησιμοποιείται για την προσθήκη θερμότητας στον κύκλο παραγωγής ισχύος που είναι ένας κύκλος Rankine με αναθέρμανση και έξι ροές οι οποίες προθερμαίνουν το ρευστό χρήσης που είναι νερό-ατμός.

Στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης του σταθμού από το λογισμικό TRNSYS. Με κόκκινη γραμμή συμβολίζεται η πορεία του Therminol VP-1, με κίτρινη η ηλιακή ακτινοβολία, με μπλε η πορεία του νερού τροφοδοσίας και με γαλάζιο του ατμού. Η μαύρη γραμμή συμβολίζει συνδέσεις μεταβλητών οι οποίες δεν αντιστοιχούν σε ροή μάζας, αλλά σε μεταφορά ορισμένων δεδομένων απαραίτητων για

να προσομοιωθεί σωστά ο σταθμός SEGS VI. Η αναλυτική περιγραφή των συνδέσεων, των παραμέτρων και των εισόδων του κάθε στοιχείου γίνεται στη παράγραφο 4.4. Επιπροσθέτως, επισυνάπτεται το αρχείο εισόδου (input file) στο Παράρτημα Β το οποίο περιέχει αναλυτικά τις συνδέσεις, τις παραμέτρους, καθώς και τις τιμές εισόδου για κάθε επιμέρους στοιχείο που χρησιμοποιείται κατά τη προσομοίωση. Τα στοιχεία HP-TURBINES και LP-TURBINES είναι macros, μια δυνατότητα που παρέχει το λογισμικό TRNSYS για σύμπτυξη διάφορων στοιχείων. Σε αυτή τη περίπτωση αυτά περιγράφουν τα στάδια του στροβίλου του σταθμού τα οποία χωρίζονται σε δύο υψηλής και πέντε χαμηλής πίεσης. Αναλυτικότερα τα δύο macros διακρίνονται στο Σχήμα 4.25 και Σχήμα 4.27. Με διακεκομμένη μαύρη γραμμή συμβολίζονται οι ροές δεδομένων από και προς τα άλλα επτά συνολικά macros (stage-1, stage-2, stage-LP-1, stage-LP-2, stage-LP-3, stage-LP-4, stage-LP-5), στα οποία γίνεται ο υπολογισμός της ενθαλπίας στην έξοδο κάθε σταδίου του στροβίλου. Οι υπολογισμοί της ενθαλπίας γίνονται με βάση την Εξ. (28)71 που χρησιμοποιεί το στοιχείο “stage” (Type 318) του στροβίλου. Αυτή η διαδικασία έγινε με βάση τη διαπίστωση ότι η έκδοση του TRNSYS 16.1 του εργαστηρίου Θερμοδυναμικής & Θερμικών Μηχανών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας εμφάνιζε λανθασμένα αποτελέσματα όταν χρειαζόταν να υπολογιστεί η ενθαλπία ή η θερμοκρασία στα στοιχεία (Type 318, Type 392) τα οποία καλούσαν την ίδια υπορουτίνα (Steam3.for). Για τον ίδιο λόγο στο macro HP-TURBINES υπάρχουν δύο μετατροπείς στο τέλος (δεξιά) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25, καθώς η ενθαλπία σε συνδυασμό με την πίεση στην έξοδο της HP-2 χρησιμοποιείται από το στοιχείο Type 58-13 για να υπολογίσει σωστά τη θερμοκρασία, ενώ η μαζική ροή και η πίεση μεταφέρεται από το στοιχείο H2X_1, ως είσοδο στον αναθερμαντή. Η μεταφορά της πίεσης και της ροής μάζας κατά μήκος των σταδίων του στροβίλου γίνονται κανονικά από το στοιχείο Type 318.

Το macro που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενθαλπίας είναι πάντα το ίδιο και οι συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων του διακρίνονται στο Σχήμα 4.28. Πέρα από τον υπολογισμό της ενθαλπίας εξόδου από τη βαθμίδα το macro stage υπολογίζει και το παραγόμενο έργο της εκάστοτε βαθμίδας χρησιμοποιώντας την εξίσωση (29) του στοιχείου Type 318. Πιο αναλυτική περιγραφή γίνεται στην παράγραφο 4.4.

4.3.1 Περιγραφή κύκλου μεταφοράς θερμότητας

Γίνεται αναφορά στον κύκλο που ακολουθεί το μέσο μεταφοράς θερμότητας (High Temperature Fluid - HTF) στις τιμές αναφοράς που αντιστοιχούν σε λειτουργία του σταθμού στην ονομαστική του ισχύ. Ο κύκλος μεταφοράς θερμότητας περιλαμβάνει τη διαδρομή του φέροντος ρευστού (Therminol VP-1) παροχής 1427039.98 kg/hr . Αυτό εξέρχεται του ηλιακού πεδίου των συλλεκτών παραβολικών κατόπτρων σε πίεση 50 bar και θερμοκρασία 390.56 °C , και εισέρχεται στον διαχωριστή HTF, όπου το 12.84% της παροχής χρησιμοποιείται για την θέρμανση του ατμού στον αναθερμαντήρα, ενώ το υπόλοιπο 87.16% εισέρχεται στους υπερθερμαντή, εξατμιστή, προθερμαντή σε θερμοκρασίες 390.56 °C , 377.22 °C , 317.78 °C αντίστοιχα. Τέλος, τα δύο ρεύματα εξόδου του HTF από τους αναθερμαντή και προθερμαντή θερμοκρασίας 294 °C και 297.78 °C αντίστοιχα, αναμιγνύονται στον μίκτη HTF και εισέρχονται στην αντλία HTF σε θερμοκρασία 297.29 °C για την επανεισαγωγή τους στο ηλιακό πεδίο. Αυτή η πορεία του Therminol VP-1 διακρίνεται στο Σχήμα 4.29 με κόκκινη γραμμή, ενώ με κίτρινη διακεκομμένη περιγράφεται η ηλιακή ακτινοβολία η οποία δίδεται με αρχείο σε μορφή κειμένου. Όσο αφορά το σύστημα των εναλλακτών θερμότητας χρησιμοποιούνται για την υπερθέρμανση παροχής 140288.41 kg/hr νερού-ατμού σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία 371°C στη ψυχρή πλευρά (γαλάζια γραμμή), ενώ σε αντιρροή βρίσκεται η θερμή πλευρά του

μέσου μεταφοράς θερμότητας (κόκκινη γραμμή). Περαιτέρω αναφορά για τις καταστάσεις του ατμού γίνεται στη παράγραφο 4.3.2 όπου περιγράφεται αναλυτικά η πορεία του στον κύκλο Rankine. Οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του HTF και του ατμού βρίσκονται στους πίνακες 3 και 4 αντίστοιχα.

Πίνακας 3 Τιμές αναφοράς για το μέσο μεταφοράς θερμότητας στους εναλλάκτες θερμότητας.

Εναλλάκτες	$T_{HTF,in} [^{\circ}C]$	$T_{HTF,out} [^{\circ}C]$	$\dot{m}_{HTF} [kg/hr]$
<i>Preheater</i>	317.78	297.78	1243764
<i>Evaporator</i>	377.22	317.78	1243764
<i>Superheater</i>	390.56	377.22	1243764
<i>Reheater</i>	390.56	294	183254.4

Πίνακας 4 Τιμές αναφοράς για το νερό-ατμό στους εναλλάκτες θερμότητας.

Εναλλάκτες	$T_{st,in} [^{\circ}C]$	$T_{st,out} [^{\circ}C]$	$\dot{m}_{steam} [kg/hr]$
<i>Preheater</i>	234.83	313.489	140288.4
<i>Evaporator</i>	313.489	313.489	140288.4
<i>Superheater</i>	313.489	371	140288.4
<i>Reheater</i>	208.67	371	118929.6

4.3.2 Περιγραφή κύκλου παραγωγής ισχύος-Rankine

Ο κύκλος παραγωγής ισχύος περιγράφει τη πορεία του νερού-ατμού στον θερμικό κύκλο Rankine και έχει ως στόχο τη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τις επτά βαθμίδες του στροβίλου. Οι απομαστεύσεις ατμού χρησιμεύουν για την αύξηση της θερμικής απόδοσης του κύκλου και είναι μια διαδικασία η οποία ονομάζεται αναγέννηση. Σε αυτή τη διαδικασία χρησιμεύουν οι κλειστοί προθερμαντές (Type 317) και ο ανοιχτός προθερμαντής (απαεριοτής Type 384) του νερού τροφοδοσίας. Η προσομοίωση του κύκλου παραγωγής ισχύος στο πακέτο TRNSYS διακρίνεται στο Σχήμα 4.30. Τα διαφορετικά χρώματα περιγράφουν τις διαφορετικές ροές/καταστάσεις και είναι ίδιας φιλοσοφίας με τον ολοκληρωμένο μοντέλο του σταθμού του Σχήματος 4.26. Επίσης, περιγράφεται ο κύκλος παραγωγής ισχύος στις τιμές αναφοράς οι οποίες αντιστοιχούν για τη λειτουργία του σταθμού στην ονομαστική του ισχύ, όπως έγινε και

για τον κύκλο μεταφοράς θερμότητας. Υπέρθερμος ατμός παροχής 140288.4 kg/hr , πίεσης 100bar , θερμοκρασίας 371°C και ενθαλπίας 3005 kJ/kg εξέρχεται από τη ψυχρή πλευρά του υπερθερμαντή και οδηγείται στη πρώτη βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου όπου εκτονώνεται σε πίεση 33.61bar και ενθαλπία 2807 kJ/kg . Στην έξοδο της πρώτης βαθμίδας απομαστεύεται ατμός παροχής 10551.96 kg/hr και οδηγείται στον τελικό προθερμαντή του νερού τροφοδοσίας (Preheater-5). Η εναπομένουσα παροχή ατμού 128637.37 kg/hr εκτονώνεται σε πίεση 18.58bar και ενθαλπία 2710 kJ/kg και ύστερα απομαστεύεται ατμός παροχής 10083.24 kg/hr για να προθερμάνει το νερό τροφοδοσίας στον Preheater-4. Ο υπόλοιπος ατμός παροχής 118929.6 kg/hr και ποιότητας 0.95 υπερθερμαίνεται στον αναθερμαντή μέχρι να φτάσει σε συνθήκες θερμοκρασίας 371°C , πίεσης 17.1bar και ενθαλπίας 3190 kJ/kg . Στη συνέχεια εκτονώνεται στη πρώτη βαθμίδα χαμηλής πίεσης του στροβίλου σε πίεση 7.98bar και ενθαλπία 3016 kJ/kg όπου απομαστεύεται ποσότητα 7308 kg/hr ατμού η οποία οδηγείται στον απαεριωτή για πρόσμιξη με το νερό τροφοδοσίας και με το συμπύκνωμα του Preheater-4. Η εναπομένουσα παροχή 110856.96 kg/hr εκτονώνεται στη βαθμίδα LP-2 σε πίεση 2.73bar και ενθαλπία 2798 kJ/kg όπου απομαστεύονται 6336 kg/hr από τον διαχωριστή Ip-Split-2 για να οδηγηθούν στον Preheater-3. Τα υπόλοιπα 104516.64 kg/hr ατμού εκτονώνονται στην LP-3 σε πίεση 0.96bar και ενθαλπία 2624 kJ/kg με τη ποσότητα ατμού που διαχωρίζει ο Ip-Split-3 να είναι 5832 kg/hr . Η εναπομένουσα παροχή 98696.88 kg/hr εκτονώνεται στην LP-4 σε 0.29bar, 2348 kJ/kg αντίστοιχα, ενώ ο τελευταίος διαχωριστής ατμού (Ip-Split-4) οδηγεί τα 2844 kg/hr ατμού στον πρώτο προθερμαντή του νερού τροφοδοσίας. Η τελική ποσότητα ατμού παροχής 95802.113342 kg/hr εκτονώνεται

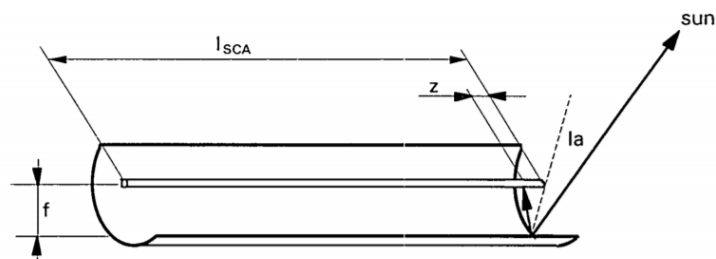
σε πίεση και ενθαλπία 0.08bar, 2325 kJ/kg αντίστοιχα και οδηγείται στον συμπυκνωτή για τη πλήρη υγροποίηση του. Στον συμπυκνωτή η παραπάνω ποσότητα ατμού αναμιγνύεται με το συμπύκνωμα παροχής 16153.56 kg/hr και θερμοκρασίας 52.89°C του πρώτου προθερμαντή (Preheater-1). Έπειτα η συνολική ποσότητα συμπυκνώματος 111955 kg/hr, 41.61°C αναρροφάται από την αντλία (Condensate-Pump) και οδηγείται στον πρώτο προθερμαντή, όπου θερμαίνεται από την απομαστευόμενη ποσότητα ατμού της βαθμίδας LP-4 και αναμιγνύεται με το συμπύκνωμα 12200.76 kg/hr θερμοκρασίας 74.72°C που εξέρχεται από τη θερμή πλευρά του Preheater-2. Στην είσοδο του δεύτερου προθερμαντή το νερό τροφοδοσίας παροχής 6367.32 kg/hr βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού σε θερμοκρασία 64.72°C, θερμαίνεται από τον ατμό της LP-3 ενώ αναμιγνύεται με το συμπύκνωμα παροχής και θερμοκρασίας 6367.32 kg/hr, 105.06°C του τρίτου προθερμαντή. Αντίστοιχα στον τρίτο προθερμαντή το νερό παροχής 111708 kg/hr και θερμοκρασίας 95.11°C θερμαίνεται από τον ατμό της βαθμίδας LP-2 μέχρι να φτάσει σε κατάσταση κορεσμού σε θερμοκρασία 126.72°C και εισέρχεται στον απαερωτή όπου αναμιγνύεται με τον ατμό της LP-1 και με το συμπύκνωμα παροχής 20628 kg/hr και θερμοκρασίας 179.17°C που εξέρχεται από τον Preheater-2. Αντίστοιχη διαδικασία γίνεται και στους δύο τελευταίους προθερμαντές με τον νερό τροφοδοσίας συνολικής παροχής 140288.41 kg/hr και θερμοκρασίας κορεσμού 234.83°C να εξέρχεται από τον τελευταίο προθερμαντή (Preheater-5). Αναλυτικότερες τιμές αναφοράς για τη πορεία του νερού τροφοδοσίας στον κύκλο ισχύος παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

4.4 Λεπτομερής ανάλυση συνδέσεων προσομοίωσης

Μετά τη περιγραφή των δύο κύκλων που απαρτίζουν το σύστημα και κάποιων σημαντικών τιμών αναφοράς οι οποίες ορίζονται ως αρχικές εισόδοι στις μεταβλητές του συστήματος, πρέπει να γίνει μια πλήρης αναφορά στις συνδέσεις των μεταβλητών του κάθε στοιχείου. Οι συνδέσεις παρουσιάζονται σε μορφή εικόνων με τον ίδιο τρόπο που εμφανίζονται στο πακέτο TRNSYS, δηλαδή η αριστερή πλευρά των μεταβλητών αντιστοιχεί στις εξόδους του εκάστοτε στοιχείου, ενώ η δεξιά στις εισόδους. Επίσης, οι τιμές που αναγράφονται στη δεξιά πλευρά από τις μεταβλητές εισόδου αντιστοιχούν στις αρχικές τιμές τους (inputs). Αρχικά παρουσιάζονται οι συνδέσεις των στοιχείων του κύκλου μεταφοράς θερμότητας και πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 4.31 εμφανίζεται η σύνδεση του στοιχείου (Type 9a) με το πεδίο παραβολικών συλλεκτών. Στα Σχήματα 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, 4.40, 4.41 παρουσιάζονται οι συνδέσεις που διέπουν τα στοιχεία του κύκλου μεταφοράς θερμότητας (ροή φέροντος ρευστού). Οι συνδέσεις που ορίζονται ανάμεσα στους τρεις εναλλάκτες που χρησιμοποιούν το φέρον ρευστό HTF για τη τελική θέρμανση του νερού τροφοδοσίας σε υπέρθερμο ατμό διακρίνονται στα Σχήματα 4.43, 4.42, 4.44, 4.45. Οι συνδέσεις του υπερθερμαντή με το macro HP-Turbines και του αναθερμαντή με το macro LP-Turbines διακρίνονται στα Σχήματα 4.46, 4.47 και Σχήματα 4.69, 4.70. Οι συνδέσεις που διέπουν τα στοιχεία που απαρτίζουν το macro HP-Turbines διακρίνονται από το Σχήμα 4.48 μέχρι το Σχήμα 4.63. Τα macros-stage χρησιμοποιούνται για τον σωστό υπολογισμό της ενθαλπίας εξόδου από την εκάστοτε βαθμίδα του στροβίλου και δέχονται ως εισόδους τη πίεση, τη μαζική ροή, και την ενθαλπία εισόδου καθώς και τη πίεση εξόδου. Οι συνδέσεις των επιμέρους στοιχείων του κάθε macro-stage είναι ίδιες και διακρίνονται στα Σχήματα 4.33, 4.34, 4.32, για το macro stage-1. Ειδικότερα ο μετατροπέας H2X μεταφέρει τη πίεση, την ενθαλπία και τη μαζική ροή εισόδου στη πρώτη βαθμίδα του στροβίλου

(macro stage-1-Σχήμα 4.48), όπου γίνονται οι υπολογισμοί της ενθαλπίας εξόδου *h11hrout* χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις και τη μεθοδολογία που ορίστηκε στην ενότητα 4.2 για το στοιχείο (Type-318). Η πίεση εξόδου μεταφέρεται ενώνοντας την πίεση εισαγωγής στη δεύτερη βαθμίδα υψηλής πίεσης με το macro stage-1 (Σχήμα 4.50). Τελικά η ενθαλπία εξόδου δίδεται ως είσοδος στον εκάστοτε διαχωριστή ατμού. Για την ενθαλπία εξόδου της πρώτης βαθμίδας η μεταφορά της ενθαλπίας διακρίνεται στο Σχήμα 4.54. Ομοίως η δεύτερη βαθμίδα δέχεται τη μαζική ροή, και την ενθαλπία εισόδου από το στοιχείο S-split-1 (Σχήμα 4.57), τη πίεση εισόδου από τη βαθμίδα HP-2 (Σχήμα 4.58) και τη πίεση εξόδου από τον μετατροπέα H2X_1 (Σχήμα 4.67). Τα στοιχεία (Type 318) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πίεσης εξόδου και τη μεταφορά της εκάστοτε ροής μάζας, ενώ τα S-split διαχωρίζουν τη ροή και μεταφέρουν πίεση και ενθαλπία. Οι συνδέσεις μεταξύ των διαχωριστών S-split και των στοιχείων (Type 318) διακρίνονται στα Σχήματα 4.52, 4.53, 4.55, 4.56. Όμοιες είναι οι συνδέσεις μεταξύ των προαναφερθέντων στοιχείων και στο macro LP-Turbines. Όσο για τους προθερμαντές του νερού τροφοδοσίας αναφορά γίνεται για τις συνδέσεις που διέπουν τους δύο τελευταίους (Preheater-4 ↔ Preheater-5, Σχήμα 4.81-4.82) και ανάλογες είναι οι συνδέσεις για τους υπόλοιπους τρεις, με εξαίρεση αυτές στις οποίες παρεμβάλλεται ο απαεριοτής όπου διακρίνονται στα Σχήματα 4.76, 4.80, 4.74, 4.75, χαρακτηρίζοντας τη ροή του νερού τροφοδοσίας, του συμπυκνώματος και του απομαστευόμενου ατμού αντίστοιχα. Οι ροές του απομαστευόμενου ατμού από τις βαθμίδες HP-1, HP-2 του τέταρτου και του πέμπτου προθερμαντή διακρίνονται στα Σχήματα 4.70, 4.71, 4.72, 4.73. Οι συνδέσεις που διέπουν τον συμπυκνωτή που βρίσκεται εντός του macro LP-Turbines, με την τελευταία βαθμίδα του στροβίλου χαμηλής πίεσης LP-5, τον πρώτο προθερμαντή (Preheater-1) και την αντλία συμπυκνώματος ορίζονται στα Σχήματα 4.88, 4.89, 4.90, 4.91, 4.92, 4.93. Η ζήτηση

της ροής μάζας του κύκλου ισχύος καθορίζεται από τη σύνδεση της αντλίας του νερού τροφοδοσίας με τον εξατμιστή (Σχήμα 4.78) η οποία παραλαμβάνει την ροή από τον απαεριωτή (Σχήμα 4.77). Τέλος, η αντλία Condensate-Pump παραλαμβάνει τις ροές του συμπυκνώματος από τον συμπυκνωτή (Σχήμα 4.93) και τον πρώτο προθερμαντή (Σχήμα 4.94).



Σχήμα 4.1 Απώλειες στα άκρα του παραβολικού συλλέκτη λόγω του φαινομένου “end effect” [8].

	A	B	C	D
Cermet, vacuum	73.3	-0.007276	-0.496	-0.0691
Cermet, air	73.4	-0.004683	-14.40	-0.0637
Cermet, bare	74.7	$-0.042-0.00927*v_{wind}/K$	0.00	$-0.000731*I$
Black Chrome, Vacuum	73.6	-0.004206	7.44	-0.0958
Black Chrome, air	73.8	-0.006460	-12.16	-0.0641

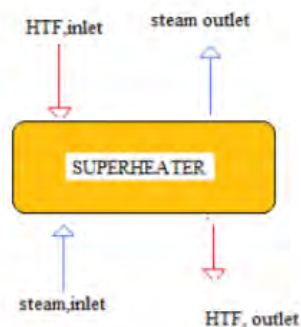
Σχήμα 4.2 Τιμές των συντελεστών απόδοσης για διάφορα είδη παραβολικών συλλεκτών που προέκυψαν από μετρήσεις [8].

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	A - Loss coef.	73.6	-			More...
2	B - Loss coef.	-0.0042	-			More...
3	C - Loss coef.	7.40	-			More...
4	Cw- Loss coef.	0	-			More...
5	D - Loss coef.	-0.096	-			More...
6	Clean Reflectivity	0.935	-			More...
7	Broken Mirror Fraction	0.0	-			More...
8	Length of SCA	50	m			More...
9	Aperature Width of SCA	4.83	m			More...
10	Focal Length of SCA	5	m			More...
11	Rowspacing	13	m			More...
12	Total Field Area	182000	m ²			More...
13	Pump Max Power	5759999.847412	kJ/hr			More...
14	Pump Max Flow Rate	1427039.978027	kg/hr			More...
15	Pump Power Coeff. 1	1.308	any			More...
16	Pump Power Coeff. 2	4.28E-3	any			More...
17	Pump Power Coeff. 3	1.99E-5	any			More...
18	Tank Heat Loss Rate at 275 C	0	W			More...
19	Piping Heat Loss/Area at 343C	20	W/m ²			More...
20	Field Tracking Parasitics/Area	0.86	W/m ²			More...
21	Stow Energy for Each m2 Field Area	11250	kJ			More...
22	Wind Speed Limit for Tracking	13.7	m/s			More...

Σχήμα 4.3 Οι παράμετροι που ορίστηκαν για το στοιχείο Type 396 κατά τη προσομοίωση.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	kp	0	-			More...

Σχήμα 4.4 Παράμετρος του στοιχείου HTF-Split κατά τη προσομοίωση.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα που περιγράφει τις ροές στον υπερθερμαντή [34].

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Counter flow mode	2	-	More...		
2	Overall heat transfer coefficient of exchanger	1051199.972153	kJ/hr.K	More...		
3	Reference press loss cold side	0	BAR	More...		
4	Reference cold side flow	139836.593628	kg/hr	More...		
5	power law exp for UA	0	-	More...		
6	power law exp for DP	0	-	More...		

Σχήμα 4.6 Οι παράμετροι για το στοιχείο Superheater (Type 315).

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Counter flow mode	2	-	More...		
2	Overall heat transfer coefficient of exchanger	1720799.9225	kJ/hr.K	More...		
3	Reference press loss cold side	0	BAR	More...		
4	Reference cold side flow	118929.597473	kg/hr	More...		
5	power law exp for UA	0	-	More...		
6	power law exp for DP	0	-	More...		

Σχήμα 4.7 Οι παράμετροι για το στοιχείο Reheater (Type 315).

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	overall heat transfer factor	7383599.804401	kJ/hr.K	More...		
2	blowdown fraction	0.0	-	More...		
3	reference pressure loss	0	BAR	More...		
4	reference flow rate	139836.593628	kg/hr	More...		
5	power law exp for UA	0	-	More...		
6	power law exp for dp	0	-	More...		

Σχήμα 4.8 Οι παράμετροι του Evaporator (Type 316).

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Counter flow mode	2	-			More...
2	Overall heat transfer coefficient of exchanger	175708.795345			kJ/hr.K	More...
3	Reference press loss cold side	0			BAR	More...
4	Reference cold side flow	140288.406372			kg/hr	More...
5	power law exp for UA	0			-	More...
6	power law exp for DP	0			-	More...

Σχήμα 4.9 Οι παράμετροι του Preheater (Type 315).

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Tee piece mode	1	-			More...

Σχήμα 4.10 Παράμετρος για HTF-Mix (Type 11h).

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	design inlet pressure	100	33.61		BAR	More...
2	design outlet pressure	33.61	18.58		BAR	More...
3	design flow rate	140288.406372	128637.364197		kg/hr	More...
4	design inner efficiency	0.8376	0.8463		-	More...
5	generator efficiency	0.95	0.95		-	More...
6	coef. for inner eff eq	0.0	0.0		-	More...
7	b coeff for inner eff	0.0	0.0		-	More...
8	c coeff for inner eff	0.0	0.0		-	More...

Σχήμα 4.11 Παράμετροι που αντιστοιχούν στις βαθμίδες υψηλής πίεσης HP-1, HP-2 του στροβίλου.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	design inlet pressure	17.10	7.98		BAR	More...
2	design outlet pressure	7.98	2.73		BAR	More...
3	design flow rate	118104.483032	110856.960297		kg/hr	More...
4	design inner efficiency	0.8623	0.917		-	More...
5	generator efficiency	0.95	0.95		-	More...
6	coef. for inner eff eq	0.0	0.0		-	More...
7	b coeff for inner eff	0.0	0.0		-	More...
8	c coeff for inner eff	0.0	0.0		-	More...

Σχήμα 4.12 Παράμετροι που αντιστοιχούν στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης LP-1, LP-2 του στροβίλου.

Parameter						
1	design inlet pressure	2.73	0.96	BAR	More...	
2	design outlet pressure	0.96	0.29	BAR	More...	
3	design flow rate	104516.640472	98696.880341	kg/hr	More...	
4	design inner efficiency	0.9352	0.88	-	More...	
5	generator efficiency	0.95	0.95	-	More...	
6	coef. for inner eff eq	0.0	0.0	-	More...	
7	b coeff for inner eff	0.0	0.0	-	More...	
8	c coeff for inner eff	0.0	0.0	-	More...	

Σχήμα 4.13 Παράμετροι που αντιστοιχούν στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης LP-3, LP-4 του στροβίλου.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	design inlet pressure	0.29	BAR	More...		
2	design outlet pressure	0.08	BAR	More...		
3	design flow rate	95802.106476	kg/hr	More...		
4	design inner efficiency	0.6445	-	More...		
5	generator efficiency	0.95	-	More...		
6	coef. for inner eff eq	0.0	-	More...		
7	b coeff for inner eff	0.0	-	More...		
8	c coeff for inner eff	0.0	-	More...		

Σχήμα 4.14 Οι παράμετροι της τελευταίας βαθμίδας LP-5 του στροβίλου.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Refrigerant for state	718	-	More...		
2	1st property type for state	2	-	More...		
3	2nd property type for state	3	-	More...		

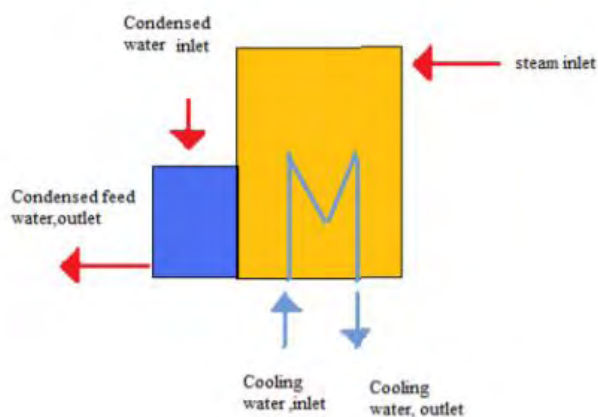
Σχήμα 4.15 Παράμετροι για είσοδο P, h .

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Refrigerant for state	718	-	More...		
2	1st property type for state	2	-	More...		
3	2nd property type for state	4	-	More...		

Σχήμα 4.16 Παράμετροι για είσοδο P, s .

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	dT Cool water out+condensing temp	5.0	deltaC	More...		
2	temp increase in cool. water	5.0	deltaC	More...		

Σχήμα 4.17 Ορισμός παραμέτρων $\Delta T_{parameter(1)}$, ΔT_w για τον συμπυκνωτή.



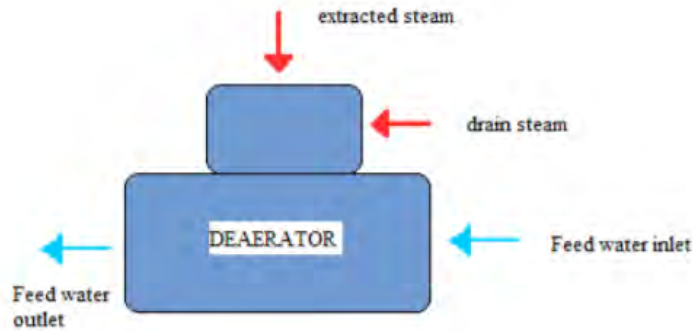
Σχήμα 4.18 Διάγραμμα ροής του συμπυκνωτή [34].

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	cold fluid spcf. heat capacity	4.18	4.18	4.21	kJ/kg.K	More...
2	overall heat transfer factor	1644332.35644	2312341.100418	690184.837966	kJ/hr.K	More...
3	cold sid ref flow rate	111708.002472	111708.002472	111708.002472	kg/hr	More...
4	power law exp for UA	0	0	0	-	More...

Σχήμα 4.19 Ορισμός παραμέτρων για τους Preheater-1, Preheater-2, Preheater-3.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	cold fluid spcf. heat capacity	4.38	4.51		kJ/kg.K	More...
2	overall heat transfer factor	3023466.894905	2387213.93676		kJ/hr.K	More...
3	cold sid ref flow rate	140288.406372	140288.406372		kg/hr	More...
4	power law exp for UA	0	0		-	More...

Σχήμα 4.20 Παράμετροι προσομοίωσης για τους Preheater-4, Preheater-5.



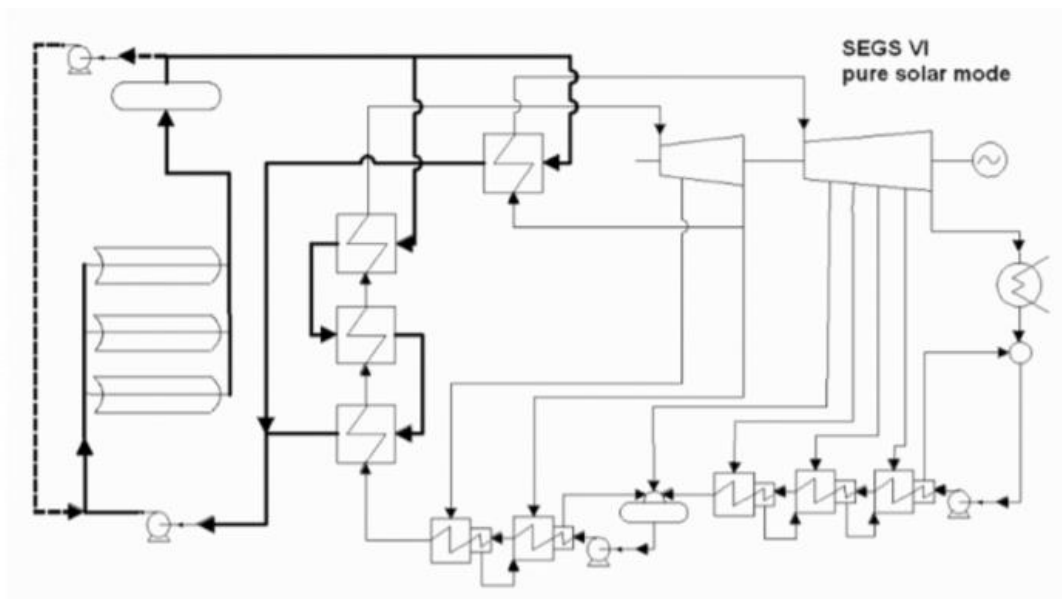
Σχήμα 4.21 Διάγραμμα ροής για τον απαερωτή [34].

Parameter						
1	Maximum flow rate	111488.399506	140288.406372	1427039.978027	kg/hr	More...
2	Fluid specific heat	4.190	4.190	2.59	kJ/kg.K	More...
3	Maximum power	683999.98188	3167999.916077	5759999.847412	kJ/hr	More...
4	Conversion coefficient	0	0	0	-	More...
5	Power coefficient	0.5	0.5	0.5	-	More...

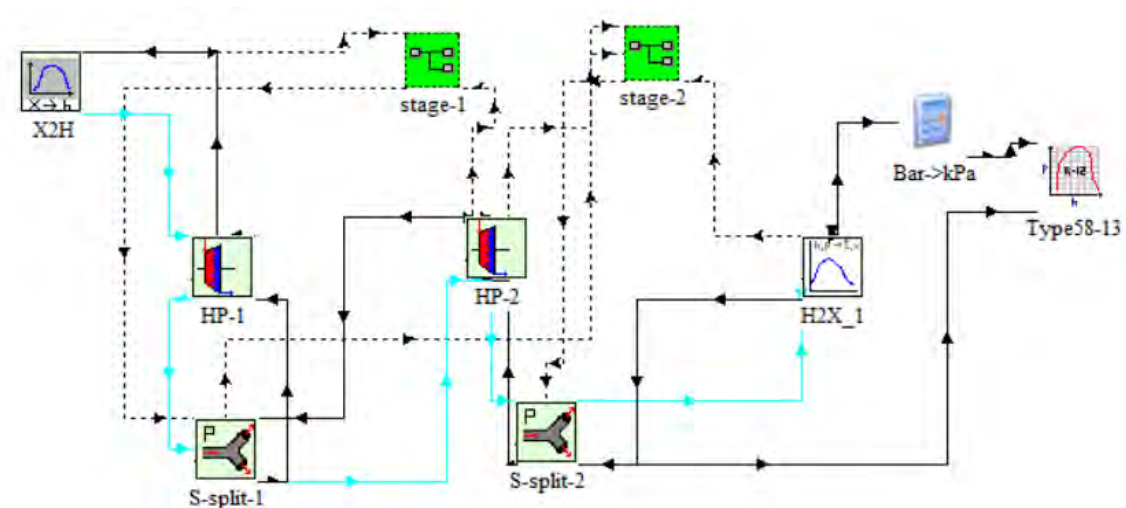
Σχήμα 4.22 Παράμετροι προσομοίωσης για την αντλία συμπυκνώματος, την αντλία νερού τροφοδοσίας και την αντλία HTF, αντίστοιχα.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Mode	2	-			More...
2	Header Lines to Skip	0	-			More...
3	No. of values to read	1	-			More...
4	Time interval of data	1	hr			More...
5	Interpolate or not?	1	-			More...
6	Multiplication factor	3.6	-			More...
7	Addition factor	0	-			More...
8	Average or instantaneous value	1	-			More...
9	Logical unit for input file	30	-			More...
10	Free format mode	-1	-			More...

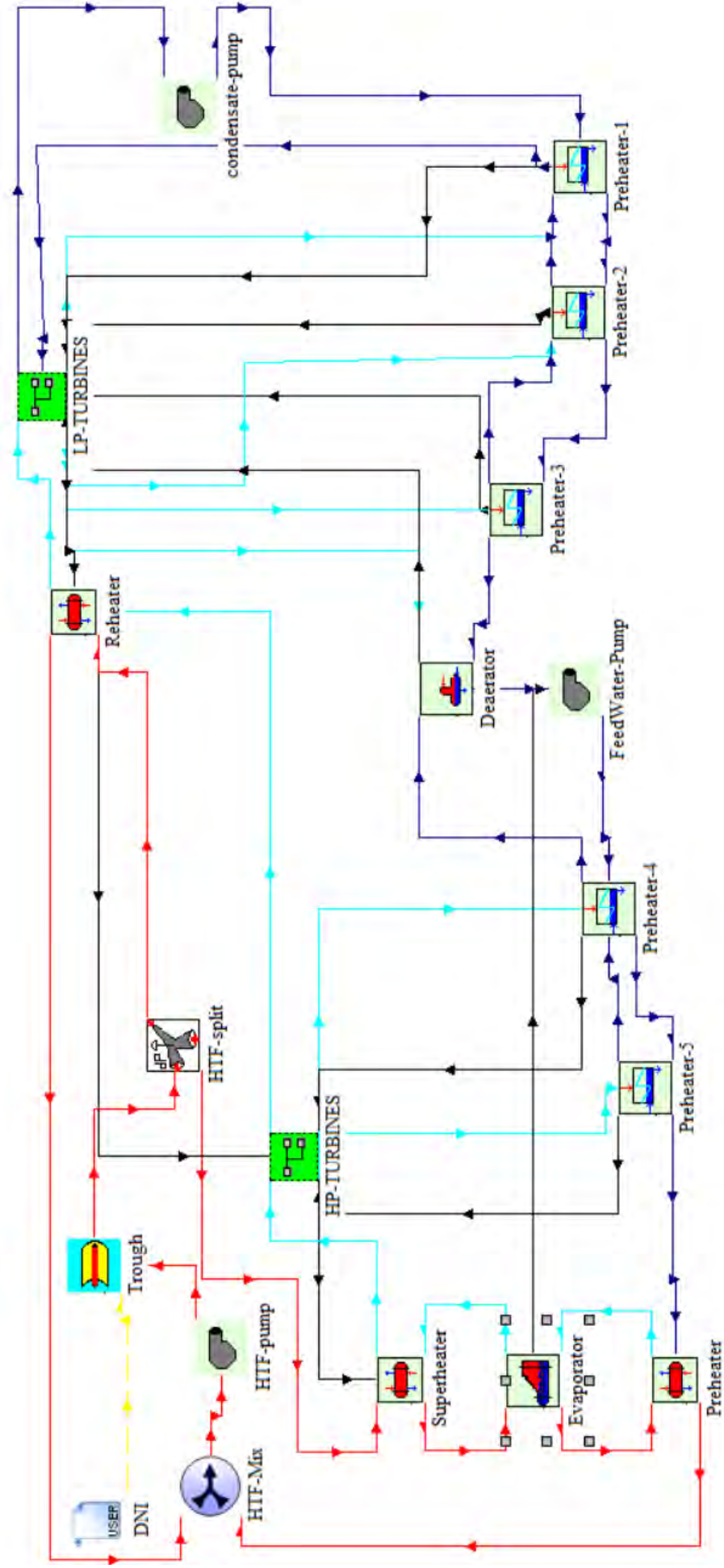
Σχήμα 4.23 Παράμετροι για το στοιχείο Type 9a.



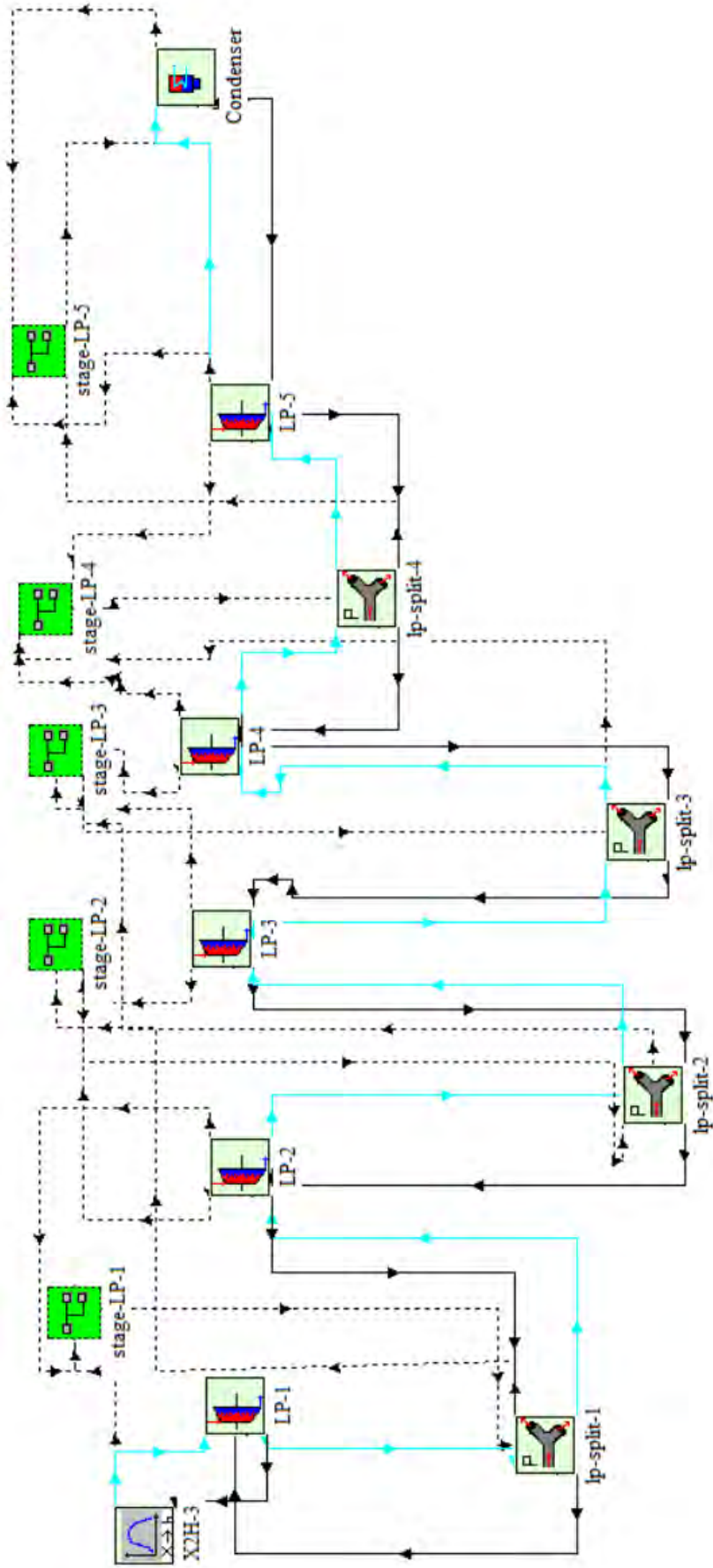
Σχήμα 4.24 Απεικόνιση του κύκλου μεταφοράς θερμότητας και του κύκλου παραγωγής ισχύος [35].



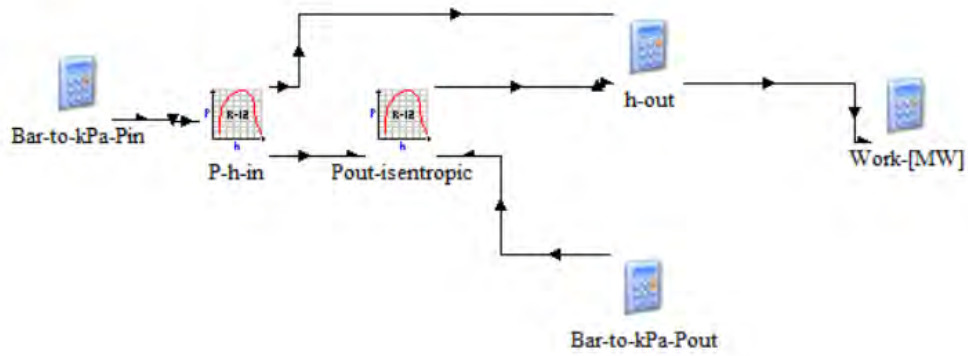
Σχήμα 4.25 Βαθμίδες υψηλής πίεσης στο macro HP-TURBINES.



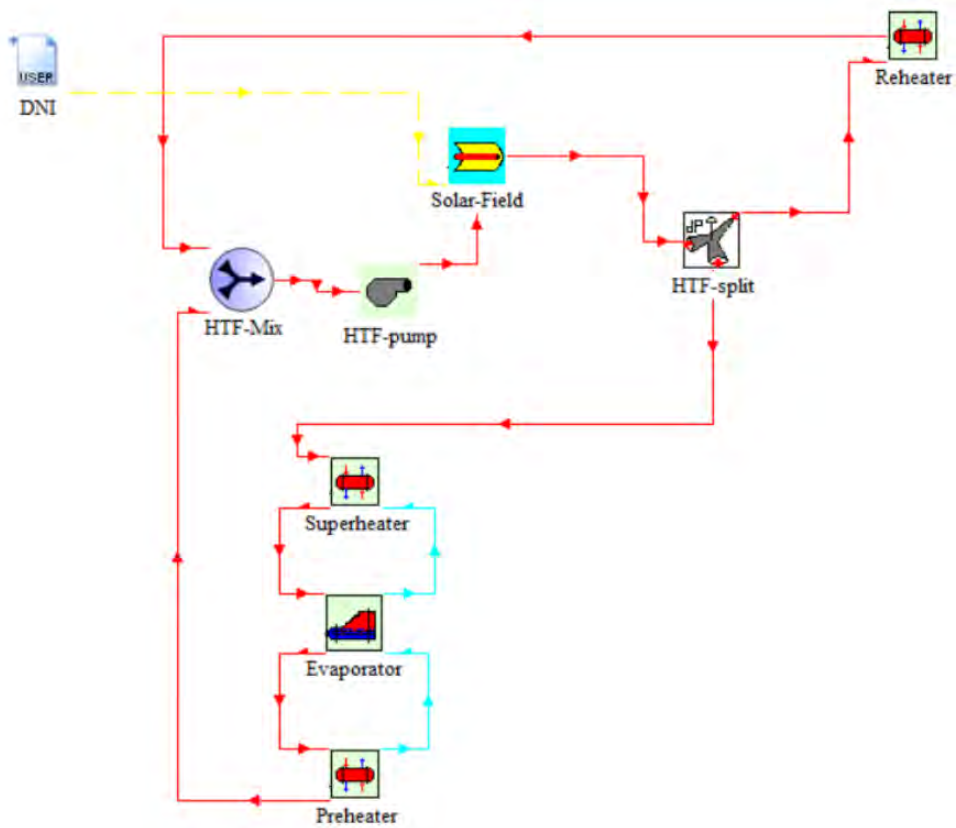
Σχήμα 4.26 Μοντέλο TRNSYS του σταθμού SEGS VI.



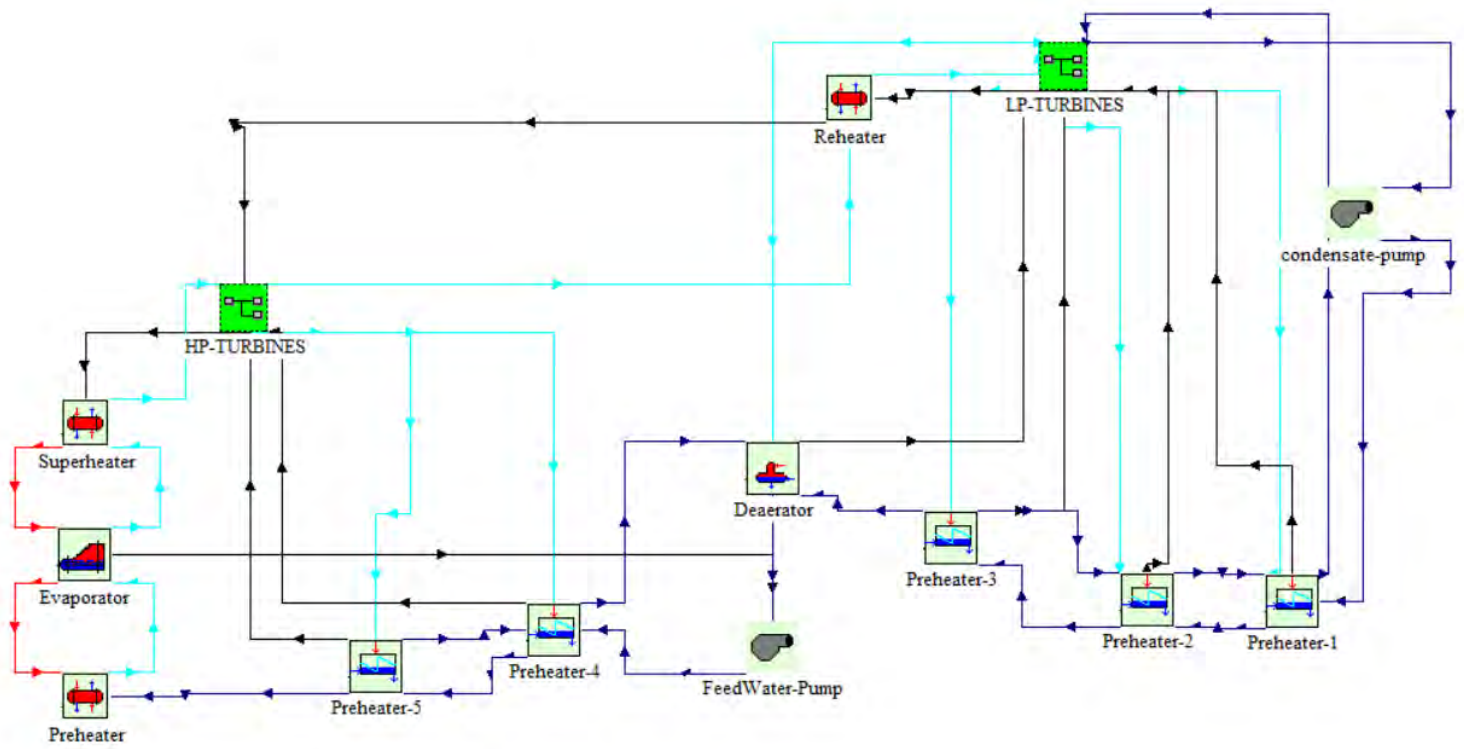
Σχήμα 4.27 Βαθμίδες χαμηλής πίεσης και συμπυκνωτής στο macro LP-TURBINES.



Σχήμα 4.28 Υπολογισμός ενθαλπίας εξόδου και έργου της εκάστοτε βαθμίδας του στροβίλου από το macro “stage”.



Σχήμα 4.29 Κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας του υπό προσομοίωση μοντέλου.



Σχήμα 4.30 Ο κύκλος παραγωγής ισχύος του σταθμού SEGS VI.

Classic | Table

Select variable filter : All

Output 1	Demanded Outlet Temperature	390.56
Output 2	Inlet Temperature Solar Field	295.8
Output 3	Cleanliness Solar Field	0.951
Output 4	Specific Heat HTF	2.35
Output 5	Sun Azimuth	0
Output 6	Sun Zenith	0
Output 7	DNI- Direct Normal Radiation	3114
Output 8	Wind Speed	0
Output 9	Ambient Temperature	25
Output 10	Tracking Fraction of Field	1.0
Output 11	Available Fraction of Field	0.99
Output 12	Night Flow Ratio (min Flow)	0.1
Output 13	Rampdown Time	1
Output 14	Rampdown Ratio	0.1

Σχήμα 4.31 Σύνδεση της άμεσης ακτινοβολίας του αναγνώστη κειμένου με το στοιχείο Type 396.

Classic | Table

Select variable filter : All

Temperature at state	1st property for state	3361
Pressure at state	2nd property for state	6.07
Enthalpy at state		
Entropy at state		

Σχήμα 4.32 Μεταφορά της ενθαλπίας εισόδου από τον μετατροπέα P-h-in στον P_{out}-isentropic.

Classic | Table

Select variable filter : All

phpo	1st property for state	10000
	2nd property for state	3005

Σχήμα 4.33 Μεταφορά της πίεσης εισόδου στον μετατροπέα P-h-in.

Classic | Table

Select variable filter : All

phpr	1st property for state	3361
	2nd property for state	6.07

Σχήμα 4.34 Μεταφορά της πίεσης εξόδου στον μετατροπέα P_{out}-isentropic.

Variable	Value
Outlet fluid temperature	390.56
Outlet flow rate	295.8
Power consumption	0.931
Demanded Outlet Temperature	390.56
Inlet Temperature Solar Field	295.8
Cleanliness Solar Field	0.931

Σχήμα 4.35 Σύνδεση της αντλίας HTF με το στοιχείο Type396.

Variable	Value
Flow Rate Solar Field	1427039.978027
Outlet Temperature Solar Field	390.56
Efficiency Solar Field (%)	50
Total Parasitics	1427039.978027
Power Lost to Defocus	2.59
FRAC	0.12841573
temp	390.56
press	50
flow_rate	1427039.978027
cp	2.59
FRAC	0.12841573

Σχήμα 4.36 Σύνδεση του Type 396 με τον διαχωριστή HTF.

Variable	Value
temp_1	390.56
press_1	50.903997
flow_rate_1	118929.597473
cp_1	2.59
temp_2	208.67
press_2	118929.597473
flow_rate_2	118929.597473
cp_2	2.59
Hot side inlet temperature	390.56
Hot side flow rate	50.903997
Cold side inlet temperature	208.67
Cold side flow rate	118929.597473
Cold side quality	0.95
cold side outlet pressure	17.10
hot side specific heat	2.59

Σχήμα 4.37 Σύνδεση του HTF-Split με τον αναθερμαντή.

Variable	Value
temp_1	390.56
press_1	396.4
flow_rate_1	140288.406372
cp_1	2.59
temp_2	313.489
press_2	100
flow_rate_2	140288.406372
cp_2	2.59
Hot side inlet temperature	390.56
Hot side flow rate	396.4
Cold side inlet temperature	313.489
Cold side flow rate	140288.406372
Cold side quality	1
cold side outlet pressure	100
hot side specific heat	2.59

Σχήμα 4.38 Σύνδεση του HTF-Split με τον υπερθερμαντή.

Variable	Value
Hot-side outlet temperature	294
Hot-side flow rate	183254.38385
Cold-side outlet temperature	297.8
Cold-side flow rate	1243764
Temperature at inlet 1	294
Flow rate at inlet 1	183254.38385
Temperature at inlet 2	297.8
Flow rate at inlet 2	1243764

Σχήμα 4.39 Σύνδεση του αναθερμαντή με το HTF-Mix.

Variable	Value
Hot-side outlet temperature	294
Hot-side flow rate	183254.38385
Cold-side outlet temperature	297.8
Cold-side flow rate	1243764
Temperature at inlet 1	294
Flow rate at inlet 1	183254.38385
Temperature at inlet 2	297.8
Flow rate at inlet 2	1243764

Σχήμα 4.40 Σύνδεση του προθερμαντή με το HTF-Mix.

Variable	Value
Outlet temperature	297.29
Outlet flow rate	1427039.978027
Inlet fluid temperature	297.29
Inlet mass flow rate	1427039.978027
desired mass flow rate	1427039.978027

Σχήμα 4.41 Σύνδεση του HTF-Mix με την αντλία HTF.

Variable	Value
Hot side outlet temperature	390.56
Hot side outlet flow rate	396.4
Cold side outlet temperature	313.489
Cold side inlet pressure	140288.406372
Cold side outlet quality	1
Cold side flow rate demand	100
Cold side outlet flow rate	140288.406372
Transferred Power	2.59
Effectiveness	2.59
Hot side inlet temperature	390.56
Hot side flow rate	396.4
Cold side inlet temperature	313.489
Cold side flow rate	140288.406372
Cold side quality	1
cold side outlet pressure	100
hot side specific heat	2.59

Σχήμα 4.42 Σύνδεση του εξατμιστή με το στοιχείο του υπερθερμαντή.

Variable	Value
Hot-side outlet temperature	377.22
Hot-side flow rate	1243764
Cold-side outlet temperature	313.489
Cold-side flow rate	140288.406372
Heat transfer rate	103.42
Effectiveness	0.0
Cold side Outlet quality	0.0
Cold Side Inlet pressure	2.4
Hot side inlet temperature	377.22
Hot side flow rate	1243764
Cold side inlet temperature	313.489
Cold side outlet pressure	103.42
Cold side inlet quality	0.0
Hot side specific heat capacity	2.4

Σχήμα 4.43 Σύνδεση του υπερθερμαντή με το στοιχείο του εξατμιστή.

Variable	Value
Hot side outlet temperature	317.78
Hot side outlet flow rate	1243764
Cold side outlet temperature	234.83
Cold side inlet pressure	140288.406372
Cold side outlet quality	0.0
Cold side flow rate demand	103.42
Cold side outlet flow rate	140288.406372
Transferred Power	2.36
Effectiveness	2.36
Hot side inlet temperature	317.78
Hot side flow rate	1243764
Cold side inlet temperature	234.83
Cold side flow rate	140288.406372
Cold side quality	0.0
cold side outlet pressure	103.42
hot side specific heat	2.36

Σχήμα 4.44 Σύνδεση του εξατμιστή με τον προθερμαντή.

Classic Table

Select variable filter: All

Hot-side outlet temperature	Hot side inlet temperature	377.22
Hot-side flow rate	Hot side flow rate	1243764
Cold-side outlet temperature	Cold side inlet temperature	313.489
Cold-side flow rate	Cold side outlet pressure	103.42
Heat transfer rate	Cold side inlet quality	0.0
Effectiveness	Hot side specific heat capacity	2.4
Cold side Outlet quality		
Cold Side Inlet pressure		

Σχήμα 4.45 Σύνδεση του προθερμαντή με τον εξατμιστή.

Classic Table

Select variable filter: All

Hot-side outlet temperature	X2H->Steam temperature	371
Hot-side flow rate	X2H->Steam pressure	100
Cold-side outlet temperature	X2H->Steam quality	1
Cold-side flow rate	X2H->Steam flow rate	140288.406372
Heat transfer rate	HP-1->Turbine outlet pressure	33.61
Effectiveness	HP-1->Turbine inlet flow rate	140288.406372
Cold side Outlet quality	HP-1->Turbine inlet enthalpy	3005
Cold Side Inlet pressure	HP-1->Bypass indicator	1

Σχήμα 4.46 Σύνδεση του υπερθερμαντή με το macro HP-Turbines (στοιχείο H2X).

Classic Table

Select variable filter: All

X2H->steam enthalpy	Hot side inlet temperature	390.56
X2H->steam pressure	Hot side flow rate	396.4
X2H->steam flow rate	Cold side inlet temperature	313.489
HP-1->turbine inlet pressure	Cold side flow rate	140288.406372
HP-1->turbine outlet flowrate	Cold side quality	1
HP-1->turbine outlet enthalpy	cold side outlet pressure	100
HP-1->turbine power	hot side specific heat	2.59

Σχήμα 4.47 Σύνδεση του macro HP-Turbines(στοιχείο H2X) με τον υπερθερμαντή.

Classic Table

Select variable filter: All

steam enthalpy	Equa-11->phpv	
steam pressure	Type58-5->1st property for state	10000
steam flow rate	Type58-5->2nd property for state	3005
	Type58-6->1st property for state	3361
	Type58-6->2nd property for state	6.07
	Equa-12->php00	
	Equa-13->hlhp1s	
	Equa-13->hlhp1in	
	Equa-13->mlhp1in	

Σχήμα 4.48 Σύνδεση του στοιχείου H2X με το macro stage-1.

Classic Table

Select variable filter: All

turbine inlet pressure	Steam temperature	371
turbine outlet flowrate	Steam pressure	100
turbine outlet enthalpy	Steam quality	1
turbine power	Steam flow rate	140288.406372
outlet bypass indicator		
turbine inner efficiency		

Σχήμα 4.49 Σύνδεση της βαθμίδας HP-1 με τον μετατροπέα H2X.

Classic Table

Select variable filter: All

turbine inlet pressure	Equa-11->phpv	
turbine outlet flowrate	Type58-5->1st property for state	10000
turbine outlet enthalpy	Type58-5->2nd property for state	3005
turbine power	Type58-6->1st property for state	3361
outlet bypass indicator	Type58-6->2nd property for state	6.07
turbine inner efficiency	Equa-12->php00	

Σχήμα 4.50 Σύνδεση του στοιχείου HP-2 με το macro stage-1.

Classic Table

Select variable filter: All

steam enthalpy	Turbine outlet pressure	33.61
steam pressure	Turbine inlet flow rate	140288.406372
steam flow rate	Turbine inlet enthalpy	3005
	Bypass indicator	1

Σχήμα 4.51 H2X → HP-1.

Classic Table

Select variable filter: All

turbine inlet pressure	Demanded Flow Out 1	10551.95961
turbine outlet flowrate	inlet flow rate	139109.394836
turbine outlet enthalpy	outlet pressure 2	33.61
turbine power	inlet enthalpy	2807
outlet bypass indicator		
turbine inner efficiency		

Σχήμα 4.52 HP-1 → S-split-1.

Classic Table

Select variable filter: All

outlet flow rate 1	Turbine outlet pressure	33.61
outlet pressure 1	Turbine inlet flow rate	140288.406372
outlet flow rate 2	Turbine inlet enthalpy	3005
inlet pressure	Bypass indicator	1
outlet enthalpy 1		
outlet enthalpy 2		

Σχήμα 4.53 S-split-1 → HP-1.

Classic Table

Select variable filter: All

Equa-11->phpo	Demanded Flow Out 1	10551.95961
Type58-5->Temperature at state	inlet flow rate	139109.394836
Type58-5->Pressure at state	outlet pressure 2	33.61
Type58-5->Enthalpy at state	inlet enthalpy	2807
Type58-5->Entropy at state		
Type58-5->Quality at state		
Type58-5->Specific volume at state		
Type58-5->Internal energy at state		
Type58-6->Temperature at state		
Type58-6->Pressure at state		
Type58-6->Enthalpy at state		
Type58-6->Entropy at state		
Type58-6->Quality at state		
Type58-6->Specific volume at state		
Type58-6->Internal energy at state		
Equa-12->phpr		
Equa-13->hlhpout		

Σχήμα 4.54 stage-1 → S-split-1.

Classic Table	
Select variable filter : All	
outlet flow rate 1	Turbine outlet pressure 18.58
outlet pressure 1	Turbine inlet flow rate 128637.364197
outlet flow rate 2	Turbine inlet enthalpy 2807
inlet pressure	Bypass indicator 1
outlet enthalpy 1	
outlet enthalpy 2	

Σχήμα 4.55 S-split-1 → HP-2.

Classic Table	
Select variable filter : All	
outlet flow rate 1	Turbine outlet pressure 18.58
outlet pressure 1	Turbine inlet flow rate 128637.364197
outlet flow rate 2	Turbine inlet enthalpy 2807
inlet pressure	Bypass indicator 1
outlet enthalpy 1	
outlet enthalpy 2	

Σχήμα 4.60 S-split-2 → HP-2.

Classic Table	
Select variable filter : All	
turbine inlet pressure	Demanded Flow Out 1 10051.95961
turbine outlet flowrate	inlet flow rate 139109.394836
turbine outlet enthalpy	outlet pressure 2 33.61
turbine power	inlet enthalpy 2807
outlet bypass indicator	
turbine inner efficiency	

Σχήμα 4.56 HP-2 → S-split-1.

Classic Table	
Select variable filter : All	
Equa->php2x	Demanded Flow Out 1 10083.239937
Type58->Temperature at state	inlet flow rate 128637.364197
Type58->Pressure at state	outlet pressure 2 18.58
Type58->Enthalpy at state	inlet enthalpy 2807
Type58->Entropy at state	
Type58->Quality at state	
Type58->Specific volume at state	
Type58->Internal energy at state	
Type58-2->Temperature at state	
Type58-2->Pressure at state	
Type58-2->Enthalpy at state	
Type58-2->Entropy at state	
Type58-2->Quality at state	
Type58-2->Specific volume at state	
Type58-2->Internal energy at state	
Equa-3->p02	
Equa-4->hl2hpout	

Σχήμα 4.61 stage-2 → S-split-2.

Classic Table	
Select variable filter : All	
outlet flow rate 1	Equa->php2z
outlet pressure 1	Type58->1st property for state 3361
outlet flow rate 2	Type58->2nd property for state 2807
inlet pressure	Type58-2->1st property for state 1858
outlet enthalpy 1	Type58-2->2nd property for state 6.15
outlet enthalpy 2	Equa-3->p01
	Equa-4->hlhp2s
	Equa-4->hlhp2in
	Equa-4->mlinhp2

Σχήμα 4.57 S-split-1 → stage-2.

Classic Table	
Select variable filter : All	
outlet flow rate 1	1st property for state 1858
outlet pressure 1	2nd property for state 2807
outlet flow rate 2	
inlet pressure	
outlet enthalpy 1	
outlet enthalpy 2	

Σχήμα 4.62 S-split-2 → Type58-13.

Classic Table	
Select variable filter : All	
turbine inlet pressure	Equa->php2z
turbine outlet flowrate	Type58->1st property for state 3361
turbine outlet enthalpy	Type58->2nd property for state 2807
turbine power	Type58-2->1st property for state 1858
outlet bypass indicator	Type58-2->2nd property for state 6.15
turbine inner efficiency	Equa-3->p01

Σχήμα 4.58 HP-2 → stage-2.

Classic Table	
Select variable filter : All	
mass flow	Demanded Flow Out 1 10083.239937
press	inlet flow rate 128637.364197
enth	outlet pressure 2 18.58
temperature	inlet enthalpy 2807
steam quality	

Σχήμα 4.63 H2X_1 → S-split-2.

Classic Table	
Select variable filter : All	
turbine inlet pressure	Demanded Flow Out 1 10083.239937
turbine outlet flowrate	inlet flow rate 128637.364197
turbine outlet enthalpy	outlet pressure 2 18.58
turbine power	inlet enthalpy 2807
outlet bypass indicator	
turbine inner efficiency	

Σχήμα 4.59 HP-2 → S-split-2.

Classic Table	
Select variable filter : All	
p16	1st property for state 1858
	2nd property for state 2807

Σχήμα 4.64 Bar-to-kPa → Type58-13.

Classic Table

Select variable filter: All

outlet flow rate 1	flow rate	118929.597473
outlet pressure 1	pressure	18.58
outlet flow rate 2	enthalpy	2807
inlet pressure		
outlet enthalpy 1		
outlet enthalpy 2		

Σχήμα 4.65 S-split-2 → H2X_1.

Classic Table

Select variable filter: All

mass flow		
press	p15	
enth		
temperature		
steam quality		

Σχήμα 4.66 H2X_1 → Type58-13.

Classic Table

Select variable filter: All

mass flow	Equa->php2z	
press	Type58->1st property for state	3361
enth	Type58->2nd property for state	2807
temperature	Type58-2->1st property for state	1858
steam quality	Type58-2->2nd property for state	6.15
	Equa-3->p01	
	Equa-4->hlhp2s	
	Equa-4->hlhp2in	
	Equa-4->mlnhp2	
	Equa-5->turb1hp2	

Σχήμα 4.67 H2X_1 → stage-2.

Classic Table

Select variable filter: All

H2X_1->mass flow	Hot side inlet temperature	390.56
H2X_1->press	Hot side flow rate	50.903997
H2X_1->enth	Cold side inlet temperature	208.67
H2X_1->temperature	Cold side flow rate	118929.597473
H2X_1->steam quality	Cold side quality	0.95
Type58-13->Temperature at state	cold side outlet pressure	17.10
	hot side specific heat	2.59

Σχήμα 4.68 HP-Turb → Reheater.

Classic Table

Select variable filter: All

Hot-side outlet temperature	H2X_1->flow rate	118929.597473
Hot-side flow rate	H2X_1->pressure	18.58
Cold-side outlet temperature	H2X_1->enthalpy	2807
Cold-side flow rate		
Heat transfer rate		
Effectiveness		
Cold side Outlet quality		
Cold Side Inlet pressure		

Σχήμα 4.69 Σύνδεση του αναθερμαντή με το macro HP-Turbines.

Classic Table

Select variable filter: All

S-split-1->outlet flow rate 1	Hot side inlet enthalpy	2807
S-split-1->outlet pressure 1	Hot side inlet pressure	33.612
S-split-1->outlet flow rate 2	Cold side inlet temperature	203.61
S-split-1->inlet pressure	Cold side inlet flow rate	140288.406372
S-split-1->outlet enthalpy 1	Condensate inlet temperature	0
S-split-1->outlet enthalpy 2	Condensate inlet flow rate	0
	Condensate inlet quality	0.0
	on/off	1.0

Σχήμα 4.70 HP-Turb → Preheater-5.

Classic Table

Select variable filter: All

Demanded hot inlet flow rate	X2H->Steam temperature	371
Cold side outlet temperature	X2H->Steam pressure	100
Cold side outlet flow rate	X2H->Steam quality	1
Hot side outlet temperature	X2H->Steam flow rate	140288.406372
Hot side outlet flow rate	HP-1->Turbine outlet pressure	33.61
Hot side outlet quality	HP-1->Turbine inlet flow rate	140288.406372
Transferred Power	HP-1->Turbine inlet enthalpy	3005
Effectiveness	HP-1->Bypass indicator	1
	S-split-1->Demanded Flow Out 1	10551.95961

Σχήμα 4.71 Preheater-5 → HP-Turb.

Classic Table

Select variable filter: All

Demanded hot inlet flow rate	S-split-2->Demanded Flow Out 1	10083.239937
Cold side outlet temperature	S-split-2->inlet flow rate	128637.364197
Cold side outlet flow rate	S-split-2->outlet pressure 2	18.58
Hot side outlet temperature	S-split-2->inlet enthalpy	2807
Hot side outlet flow rate		
Hot side outlet quality		
Transferred Power		
Effectiveness		

Σχήμα 4.72 Preheater-4 → HP-Turb.

Classic Table

Select variable filter: All

S-split-2->outlet flow rate 1	Hot side inlet enthalpy	2709.6
S-split-2->outlet pressure 1	Hot side inlet pressure	18.581
S-split-2->outlet flow rate 2	Cold side inlet temperature	169.22
S-split-2->inlet pressure	Cold side inlet flow rate	140288.406372
S-split-2->outlet enthalpy 1	Condensate inlet temperature	213.67
S-split-2->outlet enthalpy 2	Condensate inlet flow rate	10551.95961
	Condensate inlet quality	0.0
	on/off	1.0

Σχήμα 4.73 HP-Turb → Preheater-4.

Classic Table

Select variable filter: All

lp-split-1->outlet flow rate 1	Feed Water in tmp	126.72
lp-split-1-> outlet pressure 1	Feed Water flow rate	111722.401428
lp-split-1->outlet flow rate 2	steam inlet enthalpy	3029.4
lp-split-1->inlet pressure	steam inlet pressure	7.33
lp-split-1->outlet enthalpy 1	condesate inlet temperature	179.17
lp-split-1->outlet enthalpy 2	Condesate inlet flow rate	20628.000069
	Condesate inlet quality	0.0
	Deaerator on/off	1.0

Σχήμα 4.74 LP-Turb → Deaerator .

Classic Table

Select variable filter: All

Feed water out temp	lp-split-1->Demanded Flow Out 1	7308
required steam flow rate	lp-split-1->inlet flow rate	118104.483032
Feed Water out flow rate	lp-split-1->outlet pressure 2	7.97
	lp-split-1->inlet enthalpy	3190

Σχήμα 4.75 Deaerator → LP-Turb .

Classic Table

Select variable filter: All

Demanded hot inlet flow rate	Feed Water in tmp	126.72
Cold side outlet temperature	Feed Water flow rate	111722.401428
Cold side outlet flow rate	steam inlet enthalpy	3029.4
Hot side outlet temperature	steam inlet pressure	7.33
Hot side outlet flow rate	condesate inlet temperature	179.17
Hot side outlet quality	Condesate inlet flow rate	20628.000069
Transferred Power	Condesate inlet quality	0.0
Effectiveness	Deaerator on/off	1.0

Σχήμα 4.76 Preheater-3 → Deaerator .

Classic Table

Select variable filter: All

Feed water out temp	Inlet fluid temperature	166.89
required steam flow rate	Inlet mass flow rate	140288.406372
Feed Water out flow rate	desired mass flow rate	140288.406372

Σχήμα 4.77 Deaerator → FeedWater-Pump .

Classic Table

Select variable filter: All

Hot side outlet temperature	Inlet fluid temperature	166.89
Hot side outlet flow rate	Inlet mass flow rate	140288.406372
Cold side outlet temperature	desired mass flow rate	140288.406372
Cold side inlet pressure		
Cold side outlet quality		
Cold side flow rate demand		

Σχήμα 4.78 Evaporator → FeedWater-Pump .

Classic Table

Select variable filter: All

Outlet fluid temperature	Hot side inlet enthalpy	2709.6
Outlet flow rate	Hot side inlet pressure	18.581
Power consumption	Cold side inlet temperature	169.22
	Cold side inlet flow rate	140288.406372

Σχήμα 4.79 FW-Pump → Preheater-4 .

Classic Table

Select variable filter: All

Demanded hot inlet flow rate	Feed Water in tmp	126.72
Cold side outlet temperature	Feed Water flow rate	111722.401428
Cold side outlet flow rate	steam inlet enthalpy	3029.4
Hot side outlet temperature	steam inlet pressure	7.33
Hot side outlet flow rate	condesate inlet temperature	179.17
Hot side outlet quality	Condesate inlet flow rate	20628.000069
Transferred Power	Condesate inlet quality	0.0
Effectiveness	Deaerator on/off	1.0

Σχήμα 4.80 Preheater-4 → Deaerator .

Classic Table

Select variable filter: All

Demanded hot inlet flow rate	Hot side inlet enthalpy	2807
Cold side outlet temperature	Hot side inlet pressure	33.612
Cold side outlet flow rate	Cold side inlet temperature	203.61
Hot side outlet temperature	Cold side inlet flow rate	140288.406372
Hot side outlet flow rate	Condesate inlet temperature	0
Hot side outlet quality	Condesate inlet flow rate	0
Transferred Power	Condesate inlet quality	0.0
Effectiveness	on/off	1.0

Σχήμα 4.81 Preheater-4 → Preheater-5 .

Classic Table

Select variable filter: All

Demanded hot inlet flow rate	Hot side inlet enthalpy	2709.6
Cold side outlet temperature	Hot side inlet pressure	18.581
Cold side outlet flow rate	Cold side inlet temperature	169.22
Hot side outlet temperature	Cold side inlet flow rate	140288.406372
Hot side outlet flow rate	Condesate inlet temperature	213.67
Hot side outlet quality	Condesate inlet flow rate	10551.95961
Transferred Power	Condesate inlet quality	0.0
Effectiveness	on/off	1.0

Σχήμα 4.82 Preheater-5 → Preheater-4 .

Classic Table

Select variable filter: All

Demanded hot inlet flow rate	Hot side inlet temperature	317.78
Cold side outlet temperature	Hot side flow rate	1243764
Cold side outlet flow rate	Cold side inlet temperature	234.83
Hot side outlet temperature	Cold side flow rate	140288.406372
Hot side outlet flow rate	Cold side quality	0.0
Hot side outlet quality	cold side outlet pressure	103.42
Transferred Power	hot side specific heat	2.36
Effectiveness		

Σχήμα 4.83 Preheater-5 → Preheater .

Classic Table

Select variable filter: All

Hot-side outlet temperature	LP-1->Turbine outlet pressure	7.98
Hot-side flow rate	LP-1->Turbine inlet flow rate	118104.483032
Cold-side outlet temperature	LP-1->Turbine inlet enthalpy	3190
Cold-side flow rate	LP-1->Bypass indicator	1
Heat transfer rate	X2H-3->Steam temperature	371
Effectiveness	X2H-3->Steam pressure	17.10
Cold side Outlet quality	X2H-3->Steam quality	1
Cold Side Inlet pressure	X2H-3->Steam flow rate	118929.6

Σχήμα 4.84 Σύνδεση του αναθερμαντή με το macro LP-Turbines.

Variable	Value
LP-1->turbine inlet pressure	Hot side inlet temperature 390.56
LP-1->turbine outlet flowrate	Hot side flow rate 30.903997
LP-1->turbine outlet enthalpy	Cold side inlet temperature 208.67
LP-1->turbine power	LP-1->turbine power 118929.597473
LP-1->outlet bypass indicator	Cold side quality 0.95
LP-1->turbine inner efficiency	cold side outlet pressure 17.10
X2H-3->steam enthalpy	hot side specific heat 2.59
X2H-3->steam pressure	

Σχήμα 4.85 Σύνδεση του LP-Turb με τον αναθερμαντή.

Variable	Value
outlet flow rate 1	Equa-27->plf
outlet pressure 1	Type58-14->1st property for state 29
outlet flow rate 2	Type58-14->2nd property for state 2348
inlet pressure	Type58-15->1st property for state 8
outlet enthalpy 1	Type58-15->2nd property for state 2
outlet enthalpy 2	Equa-28->p9f
	Equa-29->hl5s
	Equa-29->hl5in
	Equa-29->ml5in
	Equa-30->turb15

Σχήμα 4.86 lp-split-4 → stage-LP-5.

Variable	Value
turbine inlet pressure	Equa-27->plf
turbine outlet flowrate	Type58-14->1st property for state 29
turbine outlet enthalpy	Type58-14->2nd property for state 2348
turbine power	Type58-15->1st property for state 8
outlet bypass indicator	Type58-15->2nd property for state 2
turbine inner efficiency	Equa-28->p9f

Σχήμα 4.87 LP-5 → stage-LP-5.

Variable	Value
turbine inlet pressure	Cooling water inlet temp 25.5
turbine outlet flowrate	steam enthalpy inlet 2325
turbine outlet enthalpy	steam mass flow rate 95335.2036
turbine power	Condensate inlet flow rate 16153.560448
outlet bypass indicator	Condensate inlet temperature 52.889
turbine inner efficiency	Condensate inlet quality 0.

Σχήμα 4.88 LP-5 → Condenser .

Variable	Value
Condensing Temperature	Turbine outlet pressure 0.08
Condensing pressure	Turbine inlet flow rate 95802.113342
transferred power	Turbine inlet enthalpy 2348
Cooling water outlet temp	Bypass indicator 1
Cooling water flow rate	
Condensate flow rate	

Σχήμα 4.89 Σύνδεση του συμπυκνωτή με τη πέμπτη βαθμίδα του στροβίλου.

Variable	Value
Equa-27->pjff	Cooling water inlet temp 25.5
Type58-14->Temperature at state	steam enthalpy inlet 2325
Type58-14->Pressure at state	steam mass flow rate 95335.2036
Type58-14->Enthalpy at state	Condensate inlet flow rate 16153.560448
Type58-14->Entropy at state	Condensate inlet temperature 52.889
Type58-14->Quality at state	Condensate inlet quality 0.
Type58-14->Specific volume at state	
Type58-14->Internal energy at state	
Type58-15->Temperature at state	
Type58-15->Pressure at state	
Type58-15->Enthalpy at state	
Type58-15->Entropy at state	
Type58-15->Quality at state	
Type58-15->Specific volume at state	
Type58-15->Internal energy at state	
Equa-28->p8f	
Equa-29->hl5out	

Σχήμα 4.90 stage-LP-5 → Condenser .

Variable	Value
Condensing Temperature	Equa-27->plf
Condensing pressure	Type58-14->1st property for state 29
transferred power	Type58-14->2nd property for state 2348
Cooling water outlet temp	Type58-15->1st property for state 8
Cooling water flow rate	Type58-15->2nd property for state 2
Condensate flow rate	Equa-28->p9f

Σχήμα 4.91 Condenser → stage-LP-5 .

Variable	Value
Demanded hot inlet flow rate	Condens->Cooling water inlet temp 25.5
Cold side outlet temperature	Condens->steam enthalpy inlet 2325
Cold side outlet flow rate	Condens->steam mass flow rate 16153.560448
Hot side outlet temperature	Condens->Condensate inlet flow rate 52.889
Hot side outlet flow rate	Condens->Condensate inlet temperature 52.889
Hot side outlet quality	Condens->Condensate inlet quality 0
Transferred Power	
Effectiveness	

Σχήμα 4.92 Preheater-1 → Condenser .

Variable	Value
Condens->Condensing Temperature	Inlet fluid temperature 41.439
Condens->Condensing pressure	Inlet mass flow rate 111488.399506
Condens->transferred power	desired mass flow rate 111488.399506
Condens->Cooling water outlet temp	
Condens->Cooling water flow rate	
Condens->Condensate flow rate	

Σχήμα 4.93 Condenser → Condensate-Pump.

Variable	Value
Outlet fluid temperature	Hot side inlet enthalpy 2528.1
Outlet flow rate	Hot side inlet pressure 0.2797
Power consumption	Cold side inlet temperature 41.61
	Cold side inlet flow rate 111708.002472
	Condensate inlet temperature 74.722
	Condensate inlet flow rate 12200.760269
	Condensate inlet quality 0.0
	on/off 1.0

Σχήμα 4.94 Condensate-Pump → Preheater-1.

Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα και Σχολιασμός

Έχοντας αναλύσει τους δύο κύκλους που απαρτίζουν το σύστημα, τα βασικά ισοζύγια, τις παραμέτρους, τις συνδέσεις και τις αρχικές τιμές του κάθε στοιχείου της προσομοίωσης, δύναται να παρουσιαστεί η λύση της. Για ευκολία, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χωρίζονται στους δύο διαφορετικούς κύκλους, όπως έχουν προαναφερθεί. Ταυτόχρονα γίνεται και η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία [15], με σκοπό τον έλεγχο της εγκυρότητας. Για τις ανάγκες αυτές χρησιμοποιείται η άμεση ακτινοβολία της περιοχής Daggett της California η οποία απέχει μόλις έξι χιλιόμετρα από την τοποθεσία του σταθμού, για την δέκατη τέταρτη ημέρα του Ιανουαρίου, το έτος 2005 (14/01/2005). Η προσομοίωση στην αναφορά της [15] δεν χρησιμοποιεί αρχείο καιρού το οποίο να περιέχει δεδομένα από θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου, ηλιακές γωνίες (αζιμούθια, ζενιθιακή) παρά μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία για την συγκεκριμένη τοποθεσία. Για μια πιο αναλυτική προσομοίωση αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του πεδίου συλλεκτών άρα και ολόκληρου του συστήματος. Όμως για να επιτευχθεί ακριβής σύγκριση θα χρησιμοποιηθεί μόνο ο αναγνώστης κειμένου (Type 9a) με την προαναφερθείσα άμεση ακτινοβολία. Στο Σχήμα 5.1 διακρίνεται η ηλιακή ενέργεια στην προσπίπτουσα επιφάνεια του πεδίου PTC για τις (14/01/2005) στο Daggett. Όπως γίνεται αντιληπτό οι τιμές της αναφοράς [15] ορίζονται από το σύμβολο του τετραγώνου πάνω στην καμπύλη ενώ αυτές της προσομοίωσης από μια ενιαία καμπύλη διαφορετικού χρώματος. Στην πλειοψηφία των σχημάτων όπου συγκρίνονται πολλές μεταβλητές τα χρώματα των αντίστοιχων καμπυλών είναι ίδια, ενώ η διαφορά έγκειται στον εκάστοτε συμβολισμό. Με τετραγωνικά σύμβολα

χαρακτηρίζονται τα αποτελέσματα της αναφοράς [15] και με ενιαία καμπύλη αυτά της παρούσης προσομοίωσης.

5.1 Κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας

Η πιο σημαντική μεταβλητή του κυκλώματος του φέροντος ρευστού είναι η μαζική παροχή (\dot{m}_{HTF}) η οποία δίνεται στο Σχήμα 5.2. Η παροχή ορίζεται από την Εξ. (20) και είναι προφανής η εξάρτηση της από την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία που συνδέεται με τη μεταβλητή \dot{Q}_{net} . Οι δύο καμπύλες είναι αρκετά κοντά και ακολουθούν την ίδια ακριβώς συμπεριφορά. Το μέγιστο σχετικό σφάλμα είναι 6.9% και εμφανίζεται κατά τη διάρκεια που φτάνουν τη μέγιστη τιμή τους, ενώ τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές παραμένει πολύ μικρό. Παρατηρείται ότι η μέγιστη μαζική ροή για την λειτουργία του σταθμού στις ονομαστικές συνθήκες, δεν επιτυγχάνεται, λογικό καθώς η μέρα που επιλέχθηκε είναι χειμερινή. Σε αντίθετη περίπτωση θα υπήρχε πρόβλημα διαστασιολόγησης του ηλιακού πεδίου καθώς θα χάνονταν σημαντικά ποσά ηλιακής ενέργειας στα διαστήματα που η ακτινοβολία θα ήταν ισχυρότερη. Τέλος, διακρίνεται ότι το ποσοστό της νυχτερινής παροχής (Rampdown-Ratio) είναι της τάξης του 10% της ονομαστικής παροχής.

Στα Σχήματα 5.3, 5.4 δίνονται η θερμοκρασία εξόδου του HTF από τους υπερθερμαντή, εξατμιστή, προθερμαντή και αναθερμαντή αντίστοιχα, με το σχετικό σφάλμα να είναι μηδενικό με εξαίρεση την περίπτωση του αναθερμαντή, όπου εμφανίζεται μία αντίθετη συμπεριφορά στην κλίση των καμπυλών στα χρονικά διαστήματα (7:15–8:15) και (16:45–17:45). Για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και αμελητέο σφάλμα. Στο Σχήμα 5.5 διακρίνονται οι θερμοκρασίες εισόδου/εξόδου από το πεδίο των PTC. Η θερμοκρασία εξόδου του φέροντος ρευστού από τον υπερθερμαντή διατηρείται

σταθερή στους 390.56°C σε μόνιμη κατάσταση λόγω ότι το μοντέλο του πεδίου των συλλεκτών ανυψώνει τη θερμοκρασία σε αυτή την επιθυμητή τιμή και ύστερα μεταβάλλει τη παροχή του. Αυτή η διαδικασία γίνεται διότι το Therminol VP-1 έχει τη βέλτιστη λειτουργία του στο εύρος των θερμοκρασιών ($390^{\circ}\text{C} - 410^{\circ}\text{C}$), και πρέπει να αποφεύγεται η υπερθέρμανση του σε θερμοκρασίες πάνω από τους 420°C . Η ανύψωση της θερμοκρασίας του HTF στο ηλιακό πεδίο είναι της τάξης των 100°C , τιμή συνηθισμένη για πεδίο συλλεκτών PTC. Σε περίπτωση ανάγκης μεγαλύτερης ανύψωσης της θερμοκρασίας θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία του πύργου ισχύος (SPT), ή των συλλεκτών παραβολικών «πιάτων» (PDC).

Το Σχήμα 5.6 περιγράφει την απόδοση του ηλιακού πεδίου η οποία δίδεται από την Εξ. (21). Όπως γίνεται κατανοητό, εξαρτάται από την άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει στο πεδίο και από τη θερμοκρασιακή διαφορά των θερμοκρασιών εισόδου/εξόδου με αυτή του περιβάλλοντος. Η σύγκριση με την αναφορά [15] είναι αποδεκτή. Τέλος ορίζεται και η συνολική μεταφερόμενη θερμική ενέργεια στο φέρον ρευστό (\dot{Q}_{net}) σε μονάδες ισχύος [MW], στον αριστερό άξονα και σε $[\text{W}/\text{m}^2]$, με κόκκινο χρώμα στον δεξιό άξονα. Η \dot{Q}_{net} υπολογίζεται ως η συνολική απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια μείον τις απώλειες θερμότητας στις σωληνώσεις του αγωγού του HTF (Σχήμα 5.17).

5.2 Κύκλωμα παραγωγής ισχύος

Το κύκλωμα παραγωγής ισχύος περιγράφει τη πορεία του νερού/ατμού στον θερμοδυναμικό κύκλο Rankine. Τα αποτελέσματα διαχωρίζονται σε δύο ενότητες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις βαθμίδες υψηλής πίεσης του στροβίλου και η δεύτερη αυτές τις χαμηλής, το συμπυκνωτή και τους προθερμαντές του νερού τροφοδοσίας. Μια σημαντική παράμετρος είναι η μαζική ροή του νερού/ατμού, που διακρίνεται στο

Σχήμα 5.7 και ορίζεται από την Εξ. (27). Παρατηρείται ότι η μαζική ροή είναι μικρότερη από την ονομαστική για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω για το φέρον ρευστό, καθώς η ροή θερμότητας από το HTF δεν επαρκεί για να εξατμίσει το νερό στις τιμές αναφοράς. Επίσης, στα Σχήματα 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες εξόδου του νερού/ατμού από τους τρεις εναλλάκτες θερμότητας. Στο Σχήμα 5.8 η θερμοκρασία εξόδου του ατμού από τον προθερμαντή έχει σφάλμα της τάξης του 18.18% , με αυτή της προσομοίωσης να ανέρχεται μέχρι τους 225K , ενώ της αναφοράς [15] μέχρι τους 275K κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η απόκλιση των τιμών για τον προθερμαντή υποδηλώνει την αδυναμία ανύψωσης της θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού στην επιθυμητή τιμή από το παρών μοντέλο και αυτό διακρίνεται στο Σχήμα 5.19 με τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας να είναι αισθητά χαμηλότερος από αυτόν της [15]. Οι υπόλοιπες συγκρίσεις στα Σχήματα 5.18 και 5.19 είναι πολύ καλές καθώς εμφανίζουν ίδια ποιοτική και ποσοτική συμπεριφορά και μικρά σχετικά σφάλματα, με τις τιμές της προσομοίωσης να είναι ελαφρά υψηλότερες από αυτές της αναφοράς [15] λόγω της μη επαρκούς λειτουργίας του προθερμαντή.

5.2.1 Κύκλωμα υψηλής πίεσης

Οι πιέσεις εισόδου παίζουν καθοριστικό ρόλο διότι από αυτές εξαρτάται η μεταβολή της ενθαλπίας σε κάθε βαθμίδα, άρα και η παραγόμενη ισχύς. Στο Σχήμα 5.10 διακρίνονται οι πιέσεις εισόδου των βαθμίδων υψηλής πίεσης του στροβίλου και στο Σχήμα 5.11 η παραγόμενη ισχύς από τις τρεις πρώτες βαθμίδες. Η πρώτη βαθμίδα χαμηλής πίεσης εισήχθη στο ίδιο διάγραμμα για συντομία καθώς ανήκει στο κύκλωμα χαμηλής πίεσης. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η ισχύς που αναφέρεται στο Σχήμα 5.20 είναι η ηλεκτρική ισχύς, δηλαδή είναι μειωμένη από τη μηχανική αφού συμμετέχει ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας και δίνεται από την Εξ. (29). Επίσης, παρατηρείται

ότι κύριος παράγοντας στη μεταβολή της ισχύος είναι η μεταβολή της μαζικής ροής του ατμού καθώς ο υπερθερμαντής και ο αναθερμαντής λειτουργούν σε σχετικά σταθερές συνθήκες καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

5.2.2 Κύκλωμα χαμηλής πίεσης

Στα Σχήματα 5.12, 5.13 και 5.14 διακρίνονται οι πιέσεις εισόδου και η παραγόμενη ισχύς για τις υπόλοιπες βαθμίδες αντίστοιχα. Η πίεση τελικά πέφτει κάτω από την ατμοσφαιρική στην έξοδο της τελευταίας βαθμίδας και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ενθαλπίας του ατμού. Αυτό όμως έχει σαν συνθήκη η πίεση λειτουργίας του συμπυκνωτή να είναι αντίστοιχη της LP-5, με αποτέλεσμα αυτός να είναι κλειστού τύπου και να καθίσταται αδύνατη η χρήση ατμοσφαιρικού αέρα για ψύξη. Το Σχήμα 5.15 περιγράφει την λειτουργία του συμπυκνωτή με τη πίεση συμπύκνωσης να βαθμονομείται στον αριστερό άξονα και τη θερμοκρασία στον δεξί άξονα. Τα αποτελέσματα της [15] φανερώνουν τη μεταβατική συμπεριφορά του συμπυκνωτή με τις δύο παραπάνω ποσότητες να έχουν μία σταθερή κατώτατη τιμή όταν η ακτινοβολία είναι μηδενική και μία μέγιστη κατά τη διάρκεια της ηλιακής μέρας. Τα αποτελέσματα του παρόντος μοντέλου δεν παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά καθώς οι τιμές και για τις δύο μεταβλητές είναι σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η συμπεριφορά υποδεικνύει κάποιο λάθος στις συνδέσεις των στοιχείων και των εκάστοτε μεταβλητών, το οποίο θα πρέπει να διορθωθεί. Από την άλλη, οι σταθερές τιμές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης βρίσκονται ακριβώς στη μέση τιμή των μέγιστων και ελάχιστων τιμών για τη πίεση και τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, και δεδομένου ότι η μεταβολή αυτή είναι μικρή, τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν απολύτως ικανοποιητικά για την εγκυρότητα της παρούσας προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 5.16 διακρίνονται οι θερμοκρασίες του απομαστευόμενου από τις βαθμίδες ατμού στην έξοδο των προθερμαντών του νερού τροφοδοσίας. Όπως είναι λογικό οι υψηλότερη θερμοκρασία αντιστοιχεί στον τελευταίο προθερμαντή, ενώ το ίδιο ισχύει και για τις υπόλοιπες καμπύλες. Όπως έχει προαναφερθεί οι προθερμαντές χρησιμεύουν στην αύξηση της απόδοσης του κύκλου ισχύος, λόγω της εκμετάλλευσης της υψηλής θερμικής ενέργειας των απομαστευόμενων ροών ατμού.

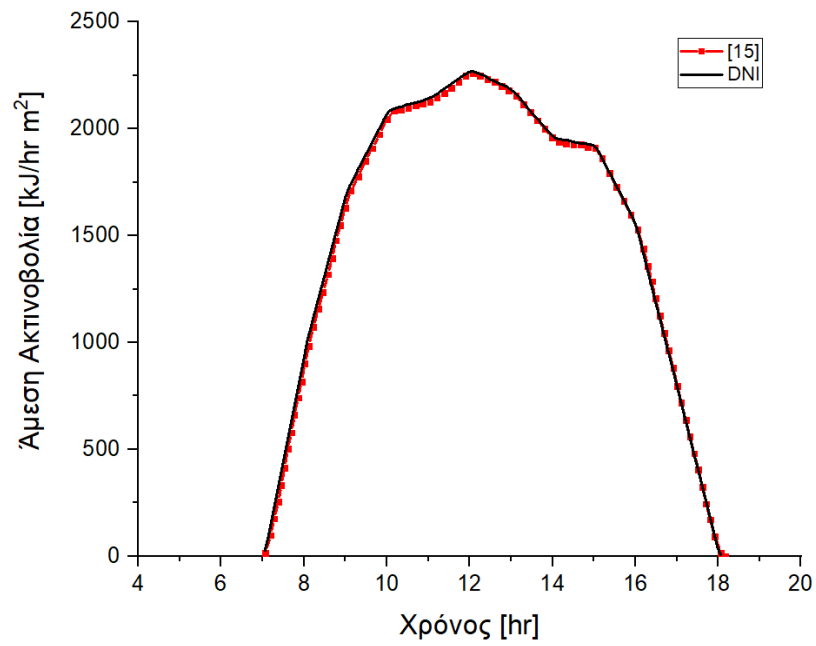
5.3 Συνολική παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης σταθμού

Τέλος, για να ολοκληρωθεί το η ανάλυση του σταθμού πρέπει να παρουσιαστεί η συνολική ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του σταθμού SEGS VI. Το Σχήμα 5.20 παρουσιάζει τη συνολική ηλεκτρική ισχύ [Εξ. (29)] των επτά βαθμίδων του σταθμού. Παρατηρείται ότι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι περίπου 22MW και δεν φτάνει την ονομαστική τιμή των 30MW, όπως συμβαίνει και στις άλλες μεταβλητές του συστήματος. Σε περιπτώσεις τέτοιων καιρικών συνθηκών ο συμβατικός καυστήρας συνεισφέρει ενεργειακά με σκοπό την κάλυψη της ονομαστικής τιμής για παροχή καλύτερης ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος στο σύστημα διανομής. Ο μικτός βαθμός απόδοσης του σταθμού ορίζεται ως η συνολική ηλεκτρική ισχύ προς τη συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία. Δίδεται στο Σχήμα 5.21 και σε γενικές γραμμές κυμαίνεται από (18% – 22%) ανάλογα την ένταση της άμεσης ακτινοβολίας

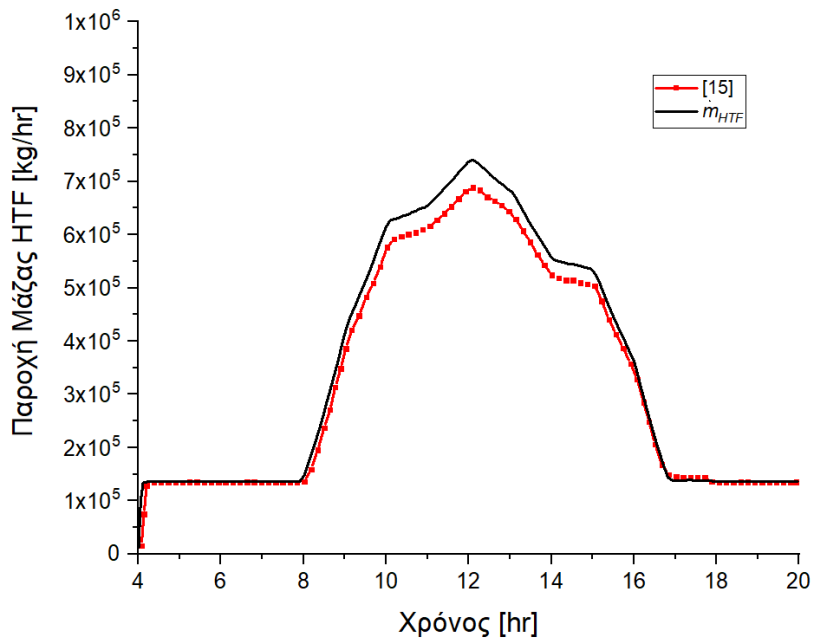
$$\eta_{plant} = \frac{W_{tot}}{A_c DNI}.$$

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πολύ ικανοποιητικά καθώς η πλειοψηφία των ελεγχόμενων μεταβλητών ακολουθεί πιστά τα αποτελέσματα της αναφοράς [15] με εξαίρεση τη συμπεριφορά του συμπυκνωτή και του προθερμαντή οι οποίοι φαίνεται να παρουσιάζουν κάποιο πρόβλημα στη λειτουργία τους. Βέβαια, η παρούσα προσομοίωση είναι διαφορετική από τις αναφορές [15] και [34] λόγω της

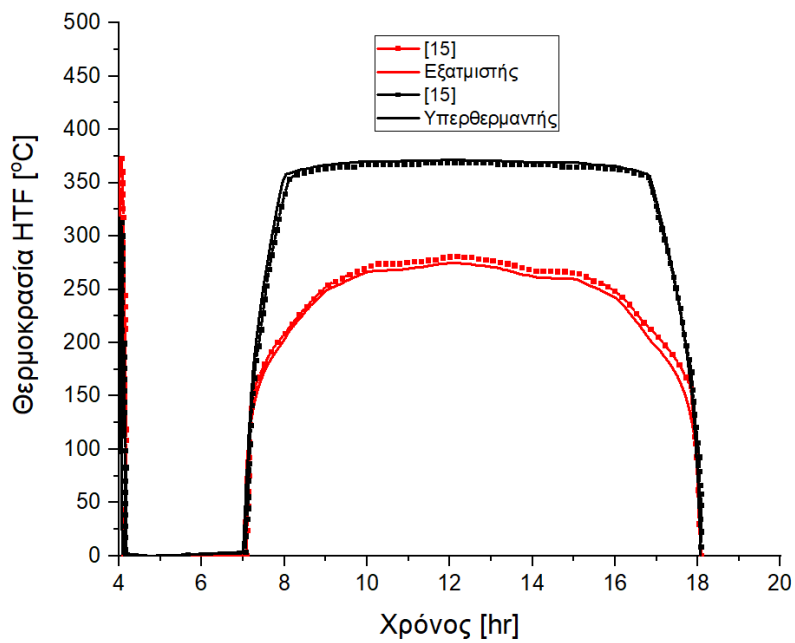
προβληματικής συμπεριφοράς της ρουτίνας steam3.for που χρησιμοποιείται από τα στοιχεία Type 318 και Type 391.



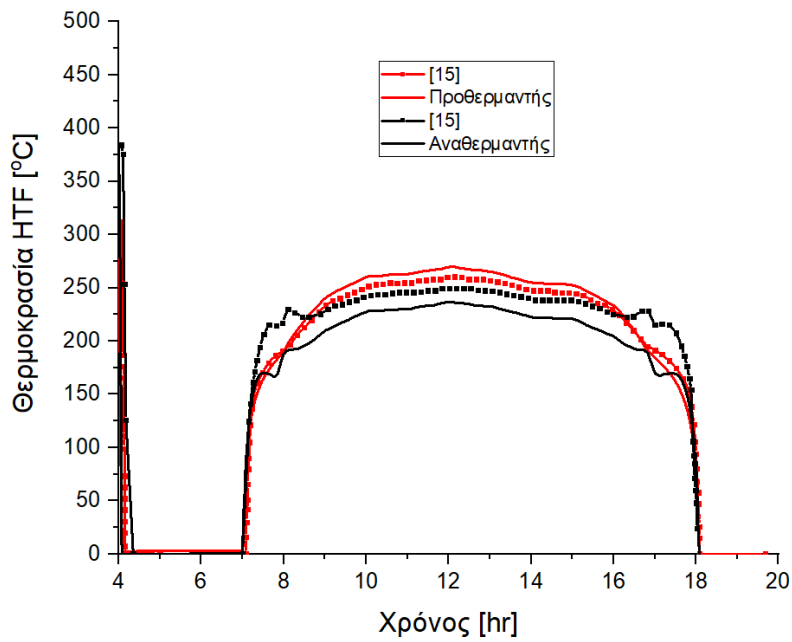
Σχήμα 5.1 Άμεση ακτινοβολία για τη πόλη Daggett στις (14/01/2005).



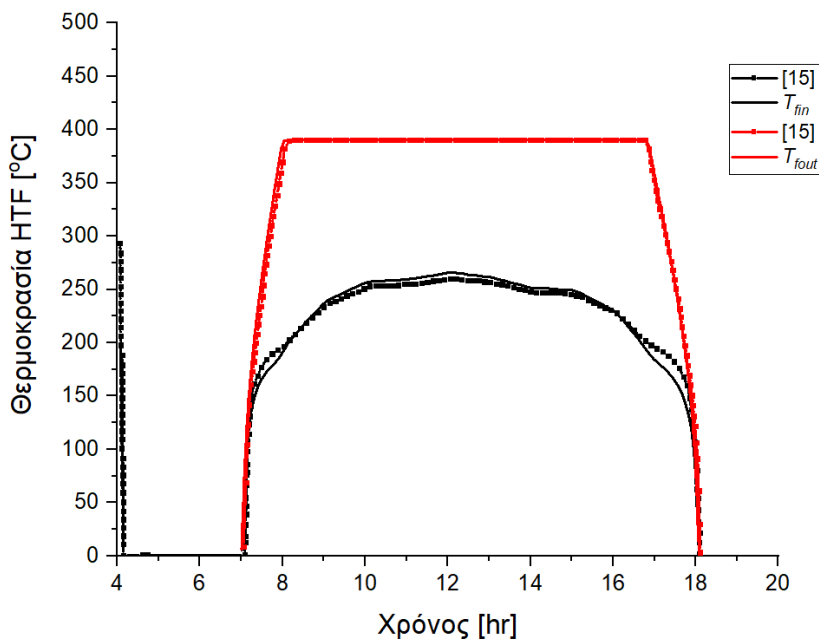
Σχήμα 5.2 Παροχή μάζας του φέροντος ρευστού στο ηλιακό πεδίο.



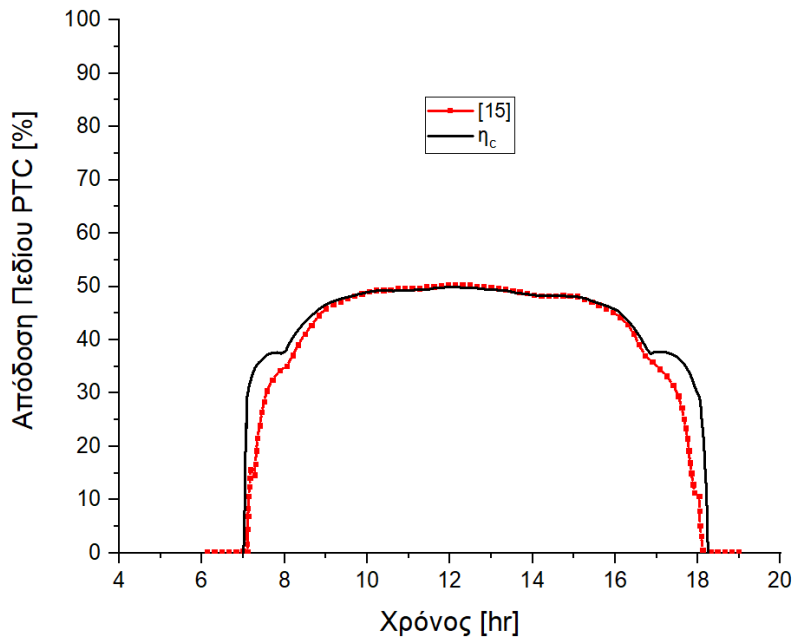
Σχήμα 5.3 Θερμοκρασίες εξόδου του φέροντος ρευστού (HTF) για τον εξατμιστή και τον υπερθερμαντή.



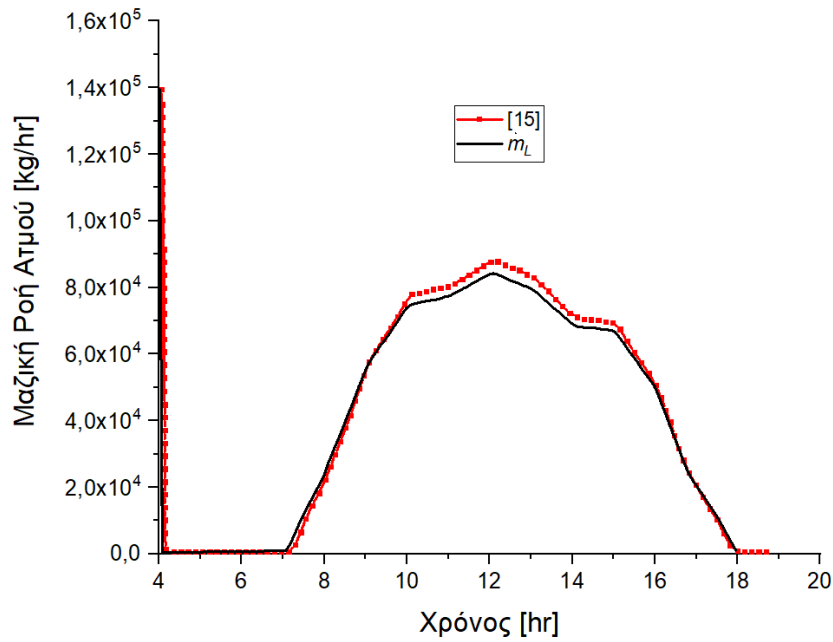
Σχήμα 5.4 Θερμοκρασίες εξόδου του (HTF) για τον προθερμαντή και τον αναθερμαντή.



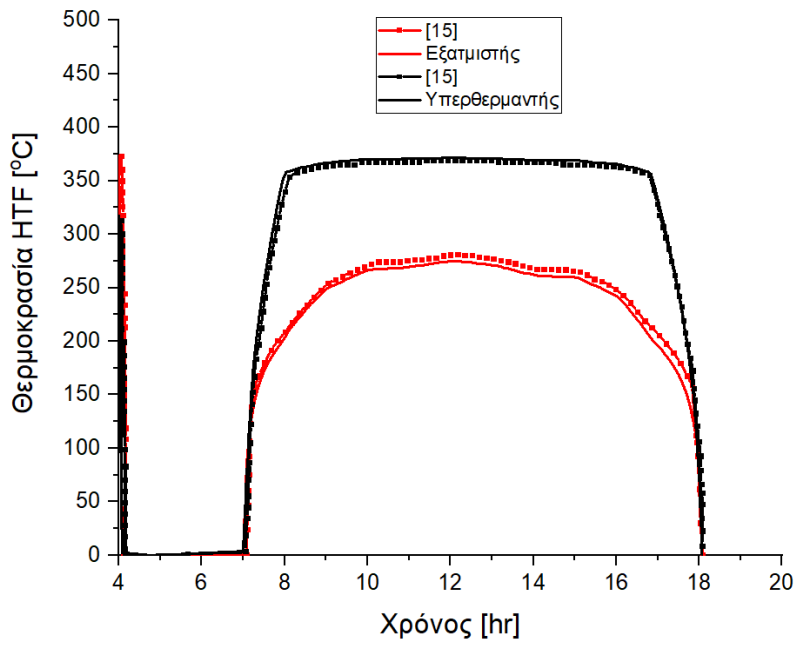
Σχήμα 5.5 Θερμοκρασίες εισόδου/εξόδου του HTF από το πεδίο των PTC's.



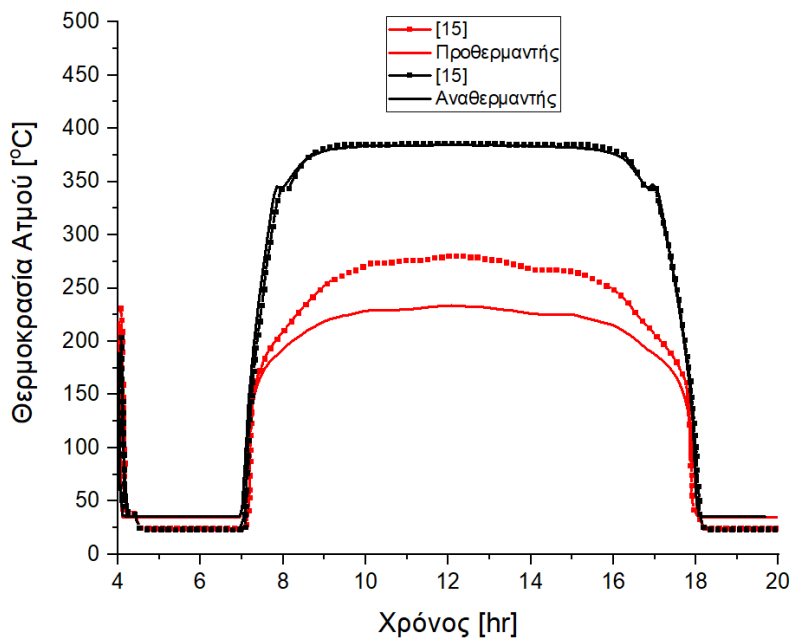
Σχήμα 5.6 Απόδοση του πεδίου των παραβολικών συλλεκτών.



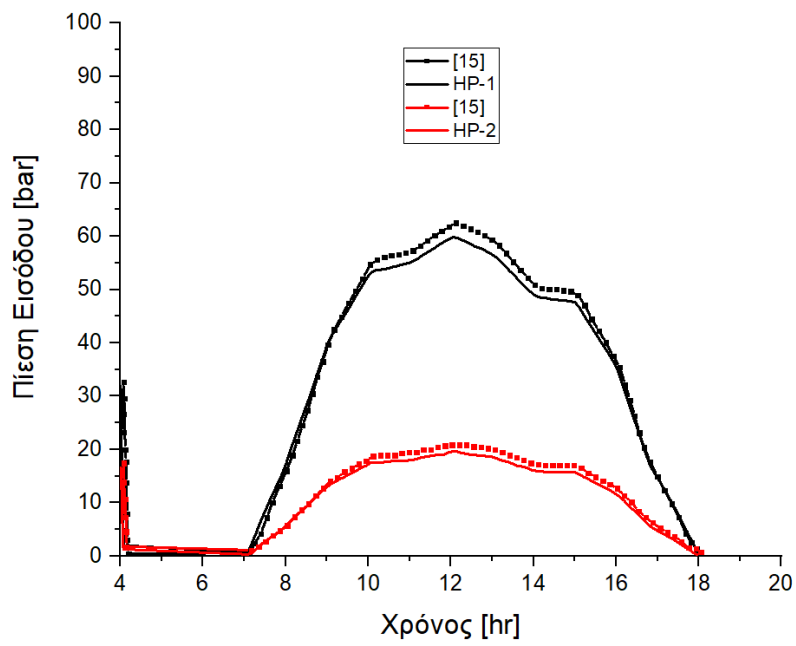
Σχήμα 5.7 Μαζική παροχή νερού/ατμού στον κύκλο παραγωγής ισχύος.



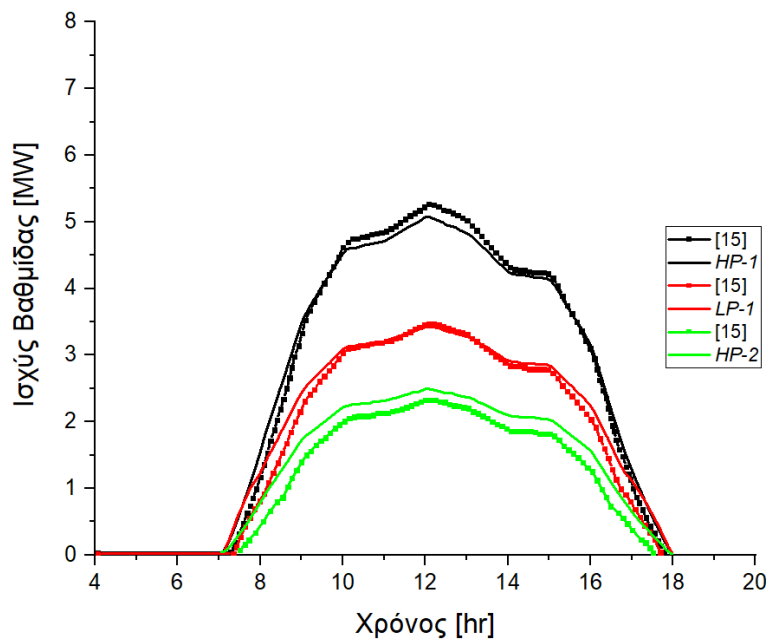
Σχήμα 5.8 Θερμοκρασίες εξόδου του ατμού για τον εξατμιστή και τον υπερθερμαντή.



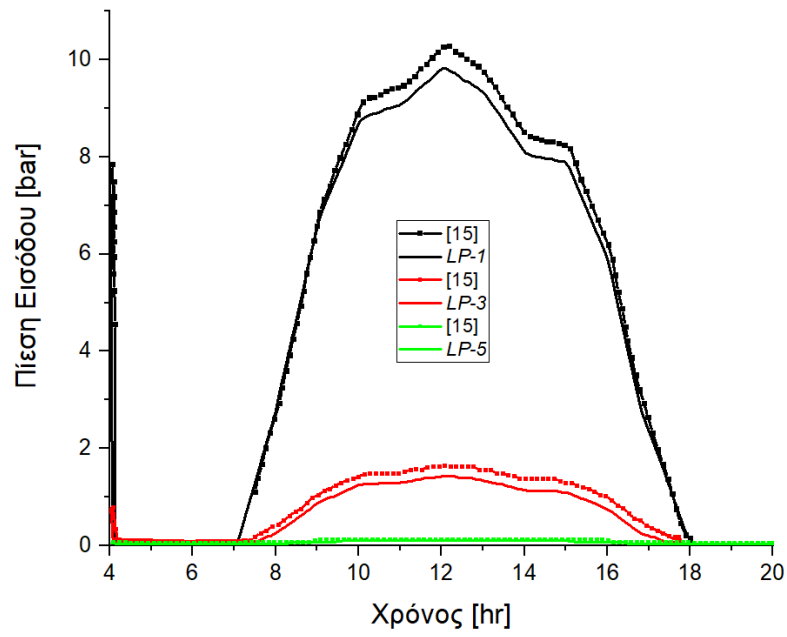
Σχήμα 5.9 Θερμοκρασίες εξόδου του ατμού για τον προθερμαντή και τον αναθερμαντή.



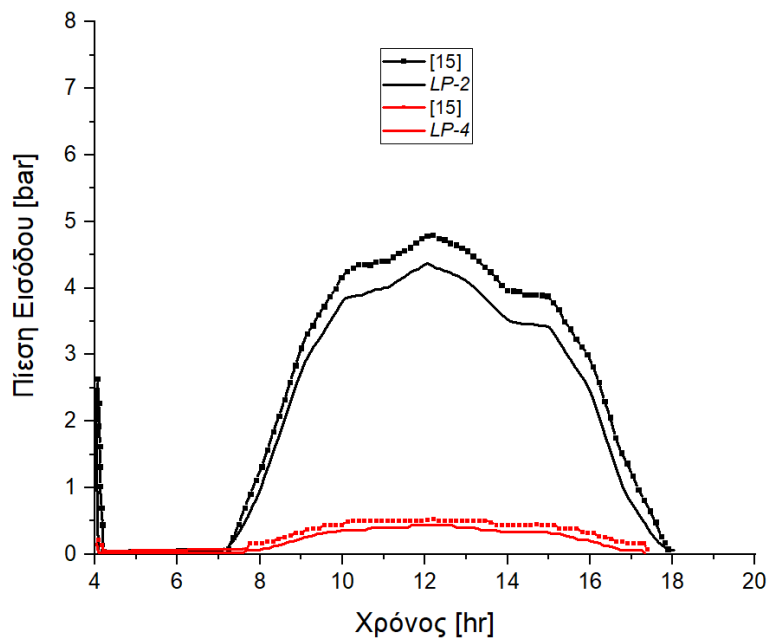
Σχήμα 5.10 Πιέσεις εισόδου των βαθμίδων υψηλής πίεσης HP-1, HP-2.



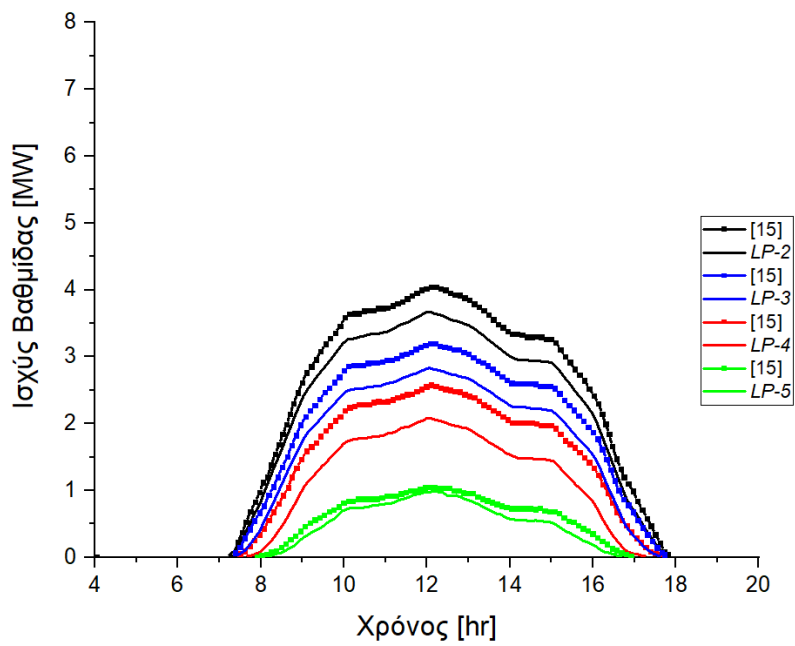
Σχήμα 5.11 Παραγόμενη ισχύς των βαθμίδων HP-1, LP-1, HP-2.



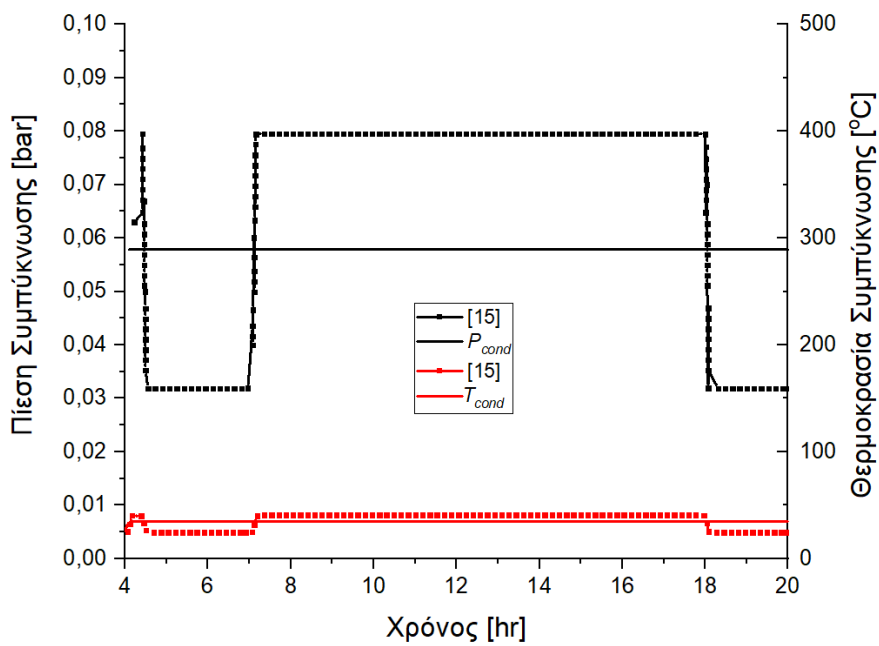
Σχήμα 5.12 Πιέσεις εισόδου των βαθμίδων χαμηλής πίεσης LP-1, LP-3, LP-5.



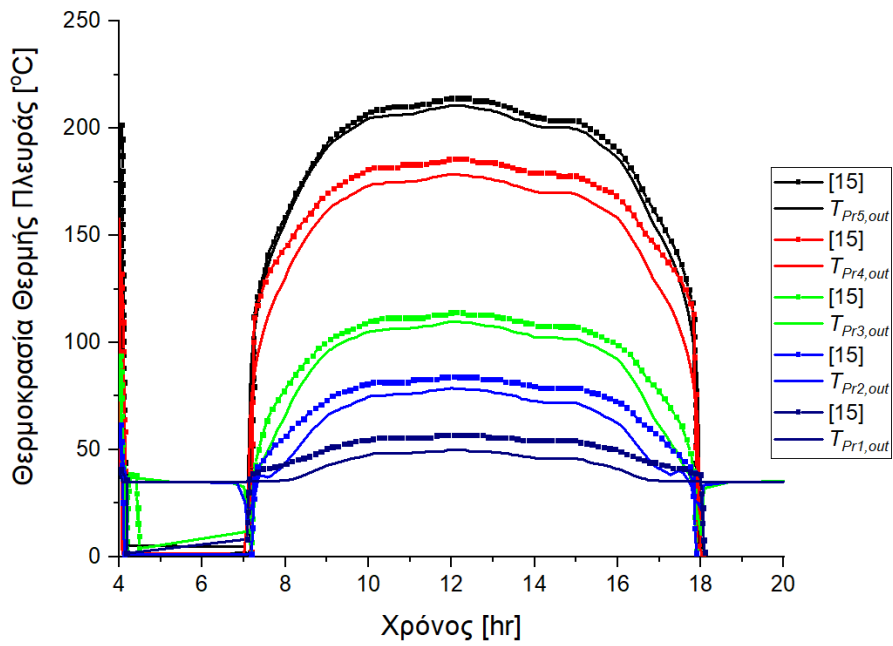
Σχήμα 5.13 Πιέσεις εισόδου των βαθμίδων χαμηλής πίεσης LP-2, LP-4.



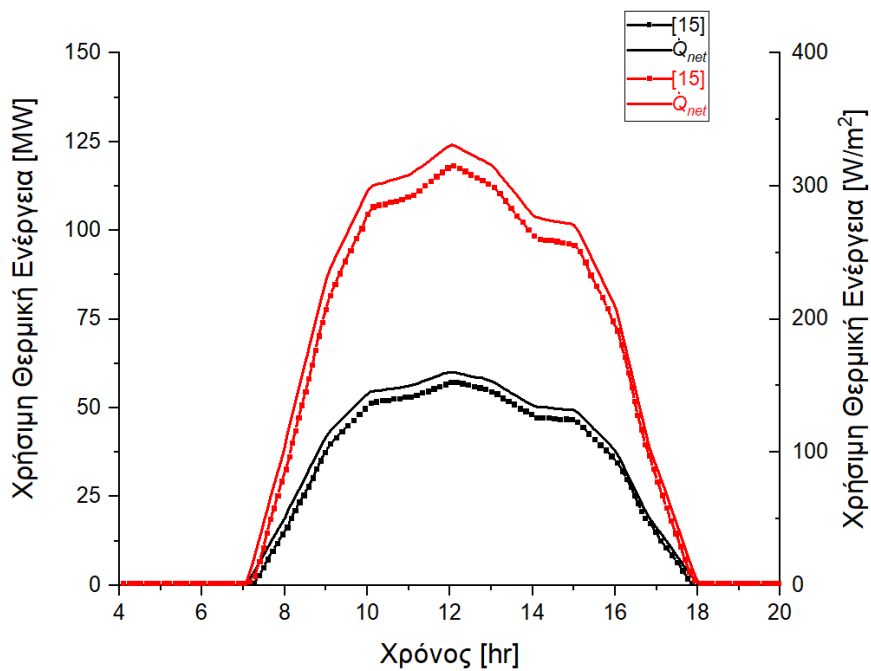
Σχήμα 5.14 Παραγόμενη ισχύς των βαθμίδων LP-2, LP-3, LP-4, LP-5.



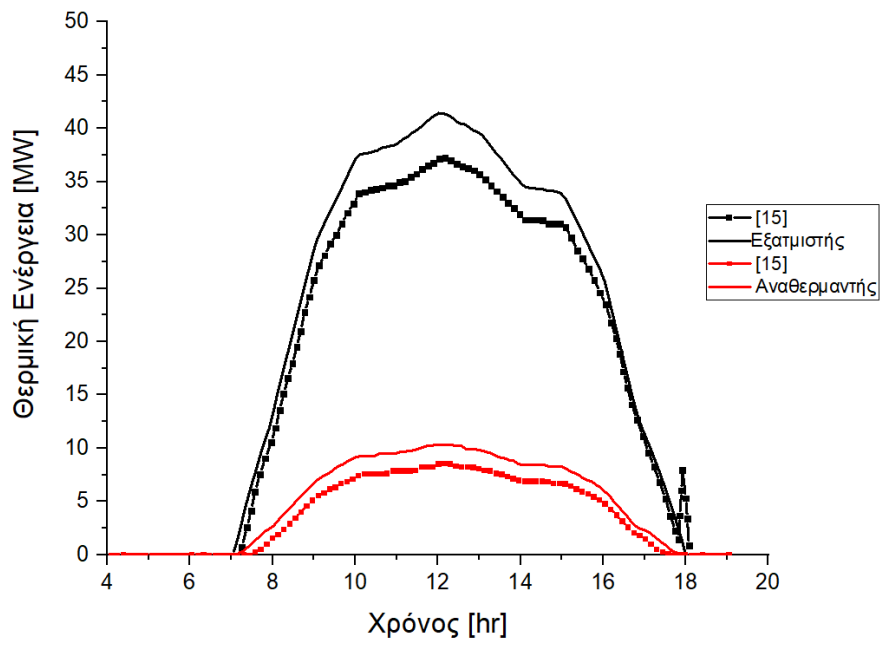
Σχήμα 5.15 Πίεση συμπύκνωσης και θερμοκρασία συμπύκνωσης.



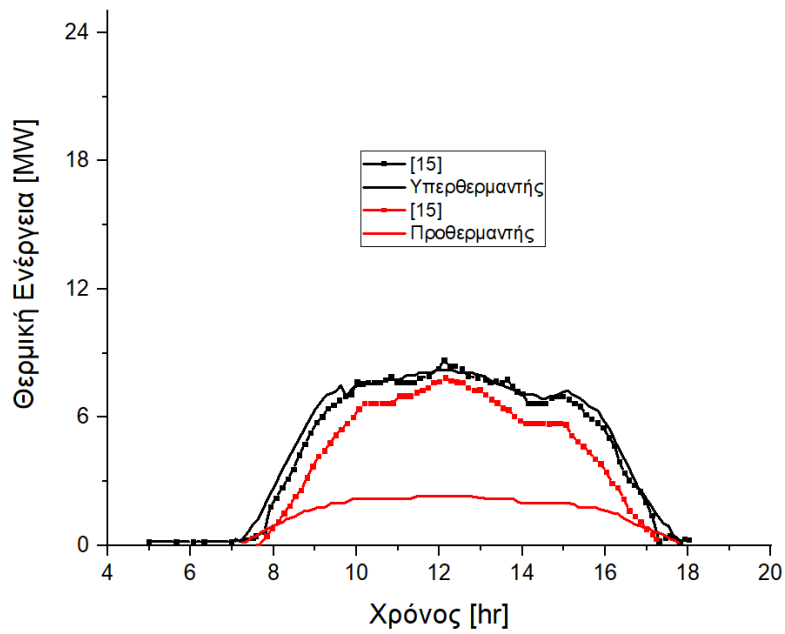
Σχήμα 5.16 Θερμοκρασίες εξόδου του απομαστευμένου ατμού των βαθμίδων από τους προθερμαντές.



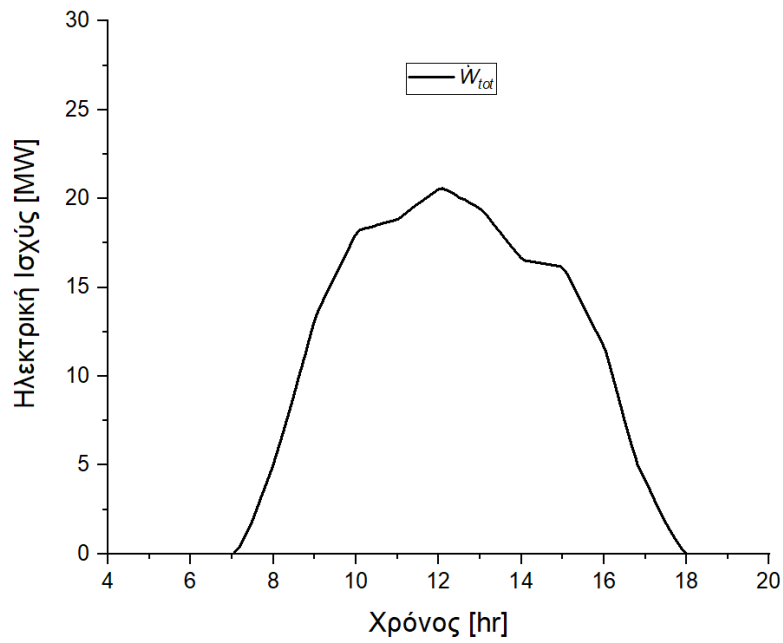
Σχήμα 5.17 Χρήσιμη θερμική ενέργεια που μεταφέρει το πεδίο στο HTF, σε MW στον αριστερό άξονα (\dot{Q}_{net}) και σε W/m^2 στο δεξιό (\dot{Q}_{net}).



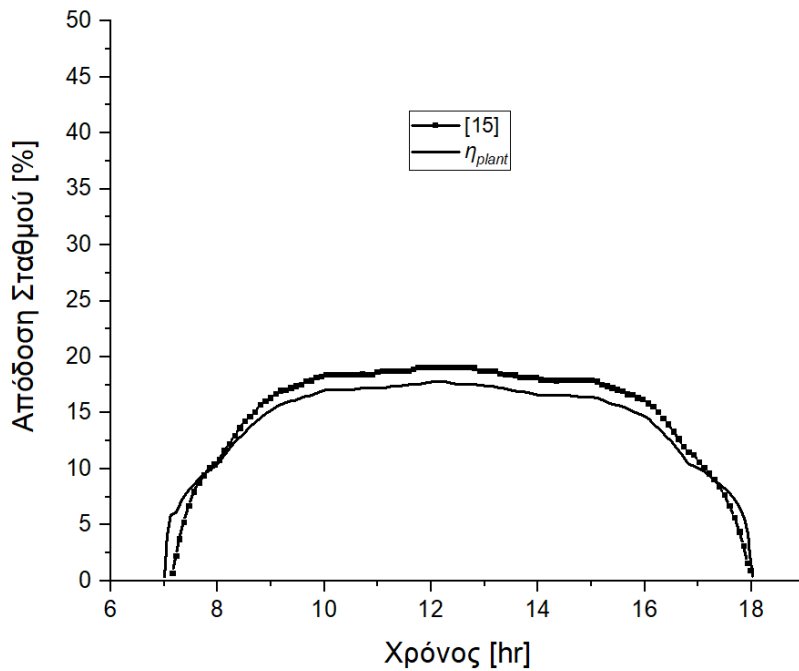
Σχήμα 5.18 Ρυθμός μεταφοράς θερμικής ενέργειας για τον εξατμιστή και τον αναθερμαντή.



Σχήμα 5.19 Ρυθμός μεταφοράς θερμικής ενέργειας για τον υπερθερμαντή και τον προθερμαντή.



Σχήμα 5.20 Συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για τις (14/01/2005).



Σχήμα 5.21 Θερμικός βαθμός απόδοσης του σταθμού.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας η διπλωματική εργασία έχει στόχο τη κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τη λειτουργία των ηλιακών θερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, τη μεθοδολογία προσομοίωσης με υπολογιστικό πακέτο, καθώς και τη μέθοδο ανάλυσης και εξαγωγής ορθών αποτελεσμάτων.

Τα κεφάλαια 1 και 2 παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τους ηλιακούς θερμικούς σταθμούς και πιο συγκεκριμένα για τον τρόπο λειτουργίας και τις εξισώσεις που διέπουν τους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες.

Στο κεφάλαιο 3 μοντελοποιείται ένα σύστημα Η.Θ.Σ. που λειτουργεί με πεδίο ηλιοστατών και πύργο ισχύος, δίνοντας παροχή ατμού σε έναν θεωρητικό κύκλο Carnot. Οι εξισώσεις που διατυπώνονται όμως τους ηλιοστάτες, αφορούν το γενικό σύνολο των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν διαφέρουν με αυτά ενός πιο πολύπλοκου συστήματος. Εξετάζεται η απόκριση του συστήματος με τη μεταβολή μεταβλητών όπως, η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης, η ισχύς εξόδου του θερμικού κύκλου και ο λόγος των επιφανειών (C) του συλλέκτη. Σημαντική ήταν η διαφορά στην απόκριση του συστήματος ανάμεσα σε ημιτονοειδή (θεωρητική) ακτινοβολία και σε πραγματική με δεδομένα ενός τυπικού μετεωρολογικού χρόνου, για την Αθήνα τις πέντε πρώτες μέρες του Μαΐου. Γίνεται αντιληπτή η αναγκαιότητα του συμβατικού λέβητα ώστε να μην χάνονται σημαντικές ποσότητες ηλιακής ενέργειας και το σύστημα να μπορεί να λειτουργήσει επαρκώς ιδίως τις μέρες με χαμηλά ποσά άμεσης ακτινοβολίας.

Στο κεφάλαιο 4 μελετήθηκε ο ηλιακός θερμικός σταθμός παραγωγής ισχύος SEGS VI με πραγματικά ηλιακά δεδομένα, αυξάνοντας τη πολυπλοκότητα του συστήματος με το λογισμικό πακέτο TRNSYS. Περιγράφονται αναλυτικά τα

ισοζύγια και οι εξισώσεις που διέπουν το κάθε στοιχείο της προσομοίωσης, καθώς και οι αρχικές τιμές, οι παράμετροι και οι συνδέσεις μεταξύ τους. Δεδομένου απρόβλεπτων προβλημάτων με τη ρουτίνα Steam3.for, αντικαταστάθηκαν κάποιοι μετατροπείς και με τη δημιουργία των macro stages τα οποία αντικαθιστούν τον υπολογισμό της ενθαλπίας εξόδου από τη βαθμίδα του στροβίλου, με αποτέλεσμα να επιτύχει η προσομοίωση.

Στο κεφάλαιο 5, τα αποτελέσματα ακολουθούν παρόμοια μορφή με αυτά του κεφαλαίου 3, καθώς τέτοιας φύσεως σταθμοί είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Ο μικτός βαθμός απόδοσης του σταθμού είναι σχετικά χαμηλός (18% – 22%) και αυτό οφείλεται στην αρκετά χαμηλή θερμική απόδοση του κύκλου Rankine, και όχι στην απόδοση του πεδίου των PTC συλλεκτών, που φτάνει σε πιο υψηλές τιμές (κοντά στο 50%).

Λογική επέκταση της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή του του κώδικα SolSys σε πιο ρεαλιστικούς θερμοδυναμικούς κύκλους παραγωγής ισχύος, όπως ο κύκλος Rankine, με εφαρμογή των απαραίτητων ισοζυγίων. Επίσης, κρίνεται απαραίτητη η μοντελοποίηση ενός συμβατικού καυστήρα σε συνδυασμό με την υπόλοιπη εγκατάσταση έτσι ώστε να αξιολογούνται ρεαλιστικές διατάξεις τέτοιων σταθμών. Με αυτό τον τρόπο το εργαστήριο Φυσικών και Χημικών διεργασιών θα έχει στη διάθεση του ένα πιο ισχυρό εργαλείο για μελέτη και έρευνα. Όσο αφορά τη χρήση του λογισμικού TRNSYS, η μελλοντική χρήση μπορεί να επικεντρωθεί σε πραγματικές καιρικές συνθήκες (άμεσης ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμους, ηλιακές γωνίες, θερμοκρασίας περιβάλλοντος) από το TRNSYS σε κάποιας περιοχής (της Ελλάδας) και στη μελέτη της βιωσιμότητας ενός τέτοιου σταθμού, τόσο από οικονομική σκοπιά, όσο και λόγω προδιαγραφών (π.χ. ελάχιστο ποσοστό συμμετοχής συμβατικού καυστήρα, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τιμή πώλησης της παραγόμενης

ενέργειας, κ.ά.). Κρίνεται αναγκαία μια πλήρης τεχνοοικονομική ανάλυση έτσι ώστε να εξεταστεί εάν είναι εφικτή και προσοδοφόρα μια τέτοια επένδυση. Τέλος, η προσομοίωση ηλιακών σταθμών που χρησιμοποιούν διαφορετική τεχνολογία, όπως το σύστημα ηλιοστατών πύργου-δέκτη, ή το σύστημα με συλλέκτες παραβολικών πιάτων σε συνδυασμό με μηχανή Stirling, ή με χρήση γραμμικών ανακλαστήρων Fresnel, θα βοηθούσε στην ακριβή σύγκριση και στην εξαγωγή αρκετά σημαντικών αποτελεσμάτων όσο αφορά τους ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- [1] Pavlović, T., Radonjić, I., Milosavljević, D. and Pantić, L. (2012). A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), pp.3891-3902.
- [2] Masters, G. (2019). *Συστήματα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος Από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. Πεδίο
- [3] Cengel, Y., Boles, M. and Kanoglu, M. (2019). *Thermodynamics*. New York: McGraw-Hill.
- [4] Δούλος, Η. (2019). *Η ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας – Υφιστάμενη κατάσταση και εξελίξεις*. [Online] Users.itia.ntua.gr. Available at: http://users.itia.ntua.gr/dk/courses/ape/slides/HW_REN18_Economics.pdf
- [5] Ec.europa.eu. (2019). *Renewable Energy | Energy - Research and Innovation – European Commission*. [Online] Available at: https://ec.europa.eu/research/energy/index.cfm?pg=area&areaname=renewable_solar
- [6] Camacho, Olmos. (2019). [Online] Europarl.europa.eu. Available at: <http://www.europarl.europa.eu/activities/committees/studies.do?language=EN>
- [7] Solarpaces.org. (2019). *Concentrating Solar Power Global Outlook 09*. [Online] Available at: <http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/concentrating-solar-power-2009.pdf>
- [8] Patnode, A. (2006). *Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants*. UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON.
- [9] Power Technology | Energy News and Market Analysis. (n.d.). *The Andasol Solar Power Station Project - Power Technology | Energy News and Market Analysis*.

- [Online] Available at: <https://www.power-technology.com/projects/andasolsolarpower/>.
- [10] Μαντικός, Α. (2011). *Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [11] En.wikipedia.org. (n.d.). *Ivanpah Solar Power Facility*. [Online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Ivanpah_Solar_Power_Facility#Description
- [12] Brightsourceenergy.com. (n.d.). *Ivanpah | World's Largest Solar Plant in California Desert*. [Online] Available at: <http://www.brightsourceenergy.com/ivanpah-solar-project#.XQGdPIgzZPZ>
- [13] Anon, (n.d.). [Online] Available at: <http://www.nurenergie.com/index.php/english/projects/greece>.
- [14] Power Technology | Energy News and Market Analysis. (n.d.). *Aurora Solar Energy Project - Power Technology | Energy News and Market Analysis*. [Online] Available at: <https://www.power-technology.com/projects/aurora-solar-energy-project/>.
- [15] Ι. Καραθανάσης, "Ηλιακή Θερμική Παραγωγή Έργου με χρήση του Κύκλου Rankine", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.
- [16] "First Suncatcher solar dishes to be used in Arizona", *Newatlas.com*. [Online]. Available: <https://newatlas.com/suncatcher-solar-power-generation/12684/>.
- [17] H. Zhang, J. Baeyens, J. Degreève and G. Cacères, "Concentrated solar power plants: Review and design methodology", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 466-481, 2013. Available: 10.1016/j.rser.2013.01.032
- [18] J. Howell, R. Bannerot and G. Vliet, *Solar-Thermal Energy Systems*. McGraw Hill, 1982.

- [19] S. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes & Systems*. Elsevier Inc., 2014.
- [20] Σημειώσεις-Μαθήματος, *Ηλιακά Θερμικά Συστήματα*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2019.
- [21] J. Duffie and W. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. Somerset: Wiley, 1991.
- [22] <https://www.researchgate.net>. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/A-Evacuated-tube-collector-49_fig5_309433095.
- [23] "Cross sectional schematic of parabolic receiver tube with thermal resistances", <https://www.researchgate.net>. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Cross-sectional-schematic-of-parabolic-receiver-tube-with-thermal-resistances-and-heat_fig7_278123749.
- [24] A. Markus, "Creative Commons", <http://flibs.sourceforge.net>. [Online]. Available: <http://flibs.sourceforge.net/newton.f90>.
- [25] Z. Yao, Z. Wang, Z. Lu and X. Wei, "Modeling and simulation of the pioneer 1MW solar thermal central receiver system in China", *Renewable Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 2437-2446, 2009. Available: 10.1016/j.renene.2009.02.022.
- [26] H. Raza, S. Sultan, S. ul Haq, A. Hussain, A. Janjua and A. Bashir, "Modeling of 1 MW solar thermal tower power plant using TRNSYS", *2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG)*, 2018. Available: 10.1109/icpesg.2018.8384499.
- [27] <http://www.ypeka.gr>, 2010. [Online]. Available: <http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=pnhppGnURds%3D>.
- [28] F. Trieb, J. Scharfe, J. Kern and T. Nieseor, "Combined Solar Power and Desalination Plants: Techno-Economic Potential in Mediterranean Partner

- Countries (MED-CSD)", *Solarthermalworld.org*, 2009. [Online]. Available: <https://www.solarthermalworld.org/sites/gstec/files/Technology%20Review%20and%20Selection%20of%20CSP%20and%20Desalination%20Configurations.pdf>.
- [29] *Steam turbines for CSP plants*. SIEMENS, 2010.
- [30] TRNSYS-Mathematical References Volume 2, Madison: University of Wisconsin-Madison Solar Energy Lab, 2007.
- [31] P. Schwarzbözl, A TRNSYS Model Library for Solar Thermal Electric Components STEC, Köln, Germany: DLR, 2006.
- [32] S. Jones, R. Pitz-Paal, P. Schwarzbözl and N. Blair, "TRNSYS MODELING OF THE SEGS VI PARABOLIC TROUGH SOLAR ELECTRIC GENERATING SYSTEM", *Solar Energy: The Power to Choose*, 2001.
- [33] F. Lipkie, "Simulation of the Part Load Behavior of 30 MW SEGS Plant", 1995.
- [34] Y. Usta, "SIMULATIONS OF A LARGE SCALE SOLAR THERMAL POWER PLANT IN TURKEY USING CONCENTRATING PARABOLIC COLLECTORS", Middle East Technical University, 2010.
- [35] University of Wisconsin, «<http://sel.me.wisc.edu>,» [Online]. Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnlib/stec/stec.htm>.

Παραρτήματα

Α) Υπολογισμός των Ημερήσιων Ποσοτήτων $q_{s,ref}(i)$, $T_{amb}(i)$

```
open(8,file='Qs.txt')
open(9,file='Ta.txt')
open(11,file='qsref(i).txt')
open(21,file='Tamb(i).txt')
open(31,file='DNI.txt')
open(41,file='AMB.txt')

if(monthly==1)then
  t=1
  do while(t<=Tm)
    sum_Ta=0
    p=1e-6
    if(t<=Tm) then
      do i=1,1440
        read(9,*)Ta
        sum_Ta=sum_Ta+Ta
        AMB(t,i)=Ta
        read(8,*)Qs
        DNI(t,i)=Qs
        if(Qs>p)then
          p=Qs
        endif
      end do
    end if
    qsref(t)=p
    Tamb(t)=sum_Ta/1440
    t=t+1
  end do
  do i=1,Tm
    write(11,'(1F14.2)')qsref(i)
    write(21,'(1F14.2)')Tamb(i)
    do t=1,1440
      write(31,'(1F14.2)')DNI(i,t)
      write(41,'(1F14.2)')AMB(i,t)
    end do
  end do
end if
```

B) Αρχείο Εισόδου στο Πακέτο TRNSYS

Στο Παράρτημα Β επισυνάπτεται το αρχείο εισόδου του TRNSYS (input file .dck) το οποίο περιέχει όλες τις παραμέτρους, τις συνδέσεις και τις αρχικές τιμές εισόδου για κάθε μεταβλητή της προσομοίωσης.

```
VERSION          16
*****
*** TRNSYS input file (deck) generated by TrnsysStudio
***
***
*** If you edit this file, use the File/Import TRNSYS Input File function in
TrnsysStudio to update the project
***.
***
If you have problems, questions or suggestions please contact your local
*** TRNSYS distributor or mailto:software@cstb.fr
***
*****
*** Units
*****
*** Control cards
*****
* START, STOP and STEP

CONSTANTS      3
  START=4
  STOP=20
  STEP=0.08333331
* User defined CONSTANTS
! Start time   End time   Time step

SIMULATION      4.000000000000000E+00   2.000000000000000E+01
8.3333331000000010E-02
! Integration  Convergence

TOLERANCES      1.000000000000000E-03   1.000000000000000E-03
! Max iterations   Max warnings   Trace limit

LIMITS          30      30      31
! TRNSYS numerical integration solver method

DFQ             1
! TRNSYS output file width, number of characters

WIDTH           80
! NOLIST statement

LIST
! MAP statement
! Solver statement   Minimum relaxation factor   Maximum relaxation factor

SOLVER          0
  1.000000000000000
  1.000000000000000
! Nan DEBUG statement

NAN_CHECK       0
! Overwrite DEBUG statement

OVERWRITE_CHECK 0
! disable time report

TIME_REPORT     0
! EQUATION SOLVER statement

EQUATION SOLVING METHOD      0
```

```

* Model "DNI" (Type 9)
*

UNIT 37 TYPE 9
*$UNIT_NAME DNI
*$MODEL .\Utility\Data Readers\Generic Data Files\First Line is Simulation Start\Free
Format\Type9a.tmf
*$POSITION 38 106
*$LAYER Weather - Data Files #
PARAMETERS 10
! 1 Mode
! 2 Header Lines to Skip
! 3 No. of values to read
! 4 Time interval of data
! 5 Interpolate or not?
! 6 Multiplication factor
! 7 Addition factor
! 8 Average or instantaneous value
! 9 Logical unit for input file
! 10 Free format mode
2.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00 1.0000000000000000E+00
1.0000000000000000E+00 1.0000000000000000E+00
3.6000000000000001E+00 0.0000000000000000E+00 1.0000000000000000E+00
3.0000000000000000E+01 -1.0000000000000000E+00
*** External files
ASSIGN C:\Users\ftzia\Desktop\Karathanasis\Alex\14-1-2005.txt 30
*|? Input file name |1000
*-----
* Model "Trough" (Type 396)
*

UNIT 11 TYPE 396
*$UNIT_NAME Trough
*$MODEL .\STEC Library\STE\Trough\Trough.tmf
*$POSITION 201 104
*$LAYER Main #
PARAMETERS 22
! 1 A - Loss coef.
! 2 B - Loss coef.
! 3 C - Loss coef.
! 4 Cw- Loss coef.
! 5 D - Loss coef.
! 6 Clean Reflectivity
! 7 Broken Mirror Fraction
! 8 Length of SCA
! 9 Aperature Width of SCA
! 10 Focal Length of SCA
! 11 Rowspacing
! 12 Total Field Area
! 13 Pump Max Power
! 14 Pump Max Flow Rate
! 15 Pump Power Coeff. 1
! 16 Pump Power Coeff. 2
! 17 Pump Power Coeff. 3
! 18 Tank Heat Loss Rate at 275 C
! 19 Piping Heat Loss/Area at 343C
! 20 Field Tracking Parasitics/Area
! 21 Stow Energy for Each m2 Field Area
! 22 Wind Speed Limit for Tracking
7.3599999999999994E+01 -4.2000000000000006E-03 7.4000000000000004E+00
0.0000000000000000E+00 -9.6000000000000016E-02
9.3500000000000005E-01 0.0000000000000000E+00 5.0000000000000000E+01
4.8300000000000001E+00 5.0000000000000000E+00
1.3000000000000000E+01 1.8200000000000000E+05 5.7599998474119995E+06
1.4270399780269999E+06 1.3080000000000001E+00
4.2800001913309129E-03 1.9900001482665586E-05 0.0000000000000000E+00
2.0000000000000000E+01 8.6000000000000010E-01
1.1250000000000000E+04 1.3699999999999999E+01
INPUTS 14
! [unconnected] Demanded Outlet Temperature
! HTF-pump:Outlet fluid temperature ->Inlet Temperature Solar Field
! [unconnected] Cleanliness Solar Field
! [unconnected] Specific Heat HTF
! [unconnected] Sun Azimuth
! [unconnected] Sun Zenith
! DNI:Output 1 ->DNI- Direct Normal Radiation
! [unconnected] Wind Speed

```



```

! [unconnected] Ambient Temperature
! [unconnected] Tracking Fraction of Field
! [unconnected] Available Fraction of Field
! [unconnected] Night Flow Ratio (min Flow)
! [unconnected] Rampdown Time
! [unconnected] Rampdown Ratio
CONST          CONST          9,1          CONST
CONST          CONST          37,1         CONST
CONST          CONST          CONST        CONST
CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
3.9056000000000000E+02  2.9580000000000000E+02  9.5100000000000000E-01
2.3499999999999999E+00  0.0000000000000000E+00
0.0000000000000000E+00  3.1140000000000000E+03  0.0000000000000000E+00
2.5000000000000000E+01  1.0000000000000000E+00
9.8999999999999999E-01  1.0000000000000000E-01  1.0000000000000000E+00
1.0000000000000000E-01
*-----
* EQUATIONS "Equa-2"
*
EQUATIONS 2
Qs = [37,1]/3.6
Qnet = [11,7]*2.777777777777778E-07
*$UNIT_NAME Equa-2
*$LAYER Main
*$POSITION 124 10
*-----
* EQUATIONS "Equa-31"
*
EQUATIONS 3
Wtot = (Wlhp1+Wlhp2+Wl1+Wl2+Wl3+Wl4+Wl5)*(10**6)
nth1 = Wtot/((182000*Qbeam)+(1e-6))
Qbeam = [37,1]/3.6
*$UNIT_NAME Equa-31
*$LAYER Main
*$POSITION 635 10
*-----
* Model "HTFspl_1" (Type 352)
*
UNIT 51 TYPE 352
*$UNIT_NAME HTFspl_1
*$MODEL .\STEC Library\STE\HTF\HTFspl_1.tmf
*$POSITION 347 157
*$LAYER Main #
PARAMETERS 1
! 1 kp
0.0000000000000000E+00
INPUTS 5
! Trough:Outlet Temperature Solar Field ->temp
! [unconnected] press
! Trough:Flow Rate Solar Field ->flow_rate
! [unconnected] cp
! [unconnected] FRAC
11,2          CONST          11,1
CONST          CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
3.9056000000000000E+02  5.0000000000000000E+01  3.9639999999999998E+02
2.5899999999999999E+00  1.2841573000000000E-01
*-----
* Model "Reheater" (Type 315)
*
UNIT 13 TYPE 315
*$UNIT_NAME Reheater
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Steamgen\Eco_sh.tmf
*$POSITION 632 91
*$LAYER Main #
PARAMETERS 6
! 1 Counter flow mode
! 2 Overall heat transfer coefficient of exchanger
! 3 Reference press loss cold side
! 4 Reference cold side flow

```

```

! 5 power law exp for UA
! 6 power law exp for DP
      2.0000000000000000E+00      1.7207999225000001E+06      0.0000000000000000E+00
1.1892959747299999E+05      0.0000000000000000E+00
      0.0000000000000000E+00
      INPUTS      7
! HTFspl_1:temp_1 ->Hot side inlet temperature
! HTFspl_1:flow_rate_1 ->Hot side flow rate
! Type58-13:Temperature at state ->Cold side inlet temperature
! H2X_1:mass flow ->Cold side flow rate
! [unconnected] Cold side quality
! X2H-3:steam pressure ->cold side outlet pressure
! [unconnected] hot side spedific heat
      51,1      51,3      97,1
56,1      CONST
      57,2      CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      3.9056000000000000E+02      1.8325438384999998E+05      2.0866999999999999E+02
1.1892959747299999E+05      9.5000000000000000E-01
      1.7100000000000001E+01      2.5899999999999999E+00
*-----
* Model "Superheater" (Type 315)
*
      UNIT      4      TYPE 315
*$UNIT_NAME Superheater
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Steamgen\Eco_sh.tmf
*$POSITION 126 306
*$LAYER Main #
      PARAMETERS      6
! 1 Counter flow mode
! 2 Overall heat transfer coefficient of exchanger
! 3 Reference press loss cold side
! 4 Reference cold side flow
! 5 power law exp for UA
! 6 power law exp for DP
      2.0000000000000000E+00      1.0511999721530001E+06      0.0000000000000000E+00
1.3983659362800000E+05      0.0000000000000000E+00
      0.0000000000000000E+00
      INPUTS      7
! HTFspl_1:temp_2 ->Hot side inlet temperature
! HTFspl_1:flow_rate_2 ->Hot side flow rate
! Evaporator:Cold side outlet temperature ->Cold side inlet temperature
! Evaporator:Cold side outlet flow rate ->Cold side flow rate
! Evaporator:Cold side outlet quality ->Cold side quality
! X2H:steam pressure ->cold side outlet pressure
! [unconnected] hot side spedific heat
      51,5      51,7      3,3
3,7      3,5
      24,2      CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      3.9056000000000000E+02      1.4270399780269999E+06      3.1348899999999998E+02
1.4028840637200000E+05      1.0000000000000000E+00
      1.0000000000000000E+02      2.5899999999999999E+00
*-----
* Model "LP-1" (Type 318)
*
      UNIT      55      TYPE 318
*$UNIT_NAME LP-1
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\Stage.tmf
*$POSITION 126 144
*$LAYER Main #
      PARAMETERS      8
! 1 design inlet pressure
! 2 design outlet pressure
! 3 design flow rate
! 4 design inner efficiency
! 5 generator efficiency
! 6 coef. for inner eff eq
! 7 b coeff for inner eff
! 8 c coeff for inner eff
      1.7100000000000001E+01      7.9800000000000004E+05      1.1810448303199999E+05
8.6230000000000007E-01      9.5000000000000007E-01
      0.0000000000000000E+00      0.0000000000000000E+00      0.0000000000000000E+00
      INPUTS      4
! lp-split-1:inlet pressure ->Turbine outlet pressure

```

```

! X2H-3:steam flow rate ->Turbine inlet flow rate
! X2H-3:steam enthalpy ->Turbine inlet enthalpy
! [unconnected] Bypass indicator
      59,4                57,3                57,1
CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      7.9800000000000004E+00    1.1810448303199999E+05    3.1900000000000000E+03
1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "X2H-3" (Type 391)
*

      UNIT 57      TYPE 391
*$UNIT_NAME X2H-3
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Utility\X2H.tmf
*$POSITION 47 91
*$LAYER Main #
      INPUTS      4
! Reheater:Cold-side outlet temperature ->Steam temperature
! LP-1:turbine inlet pressure ->Steam pressure
! Reheater:Cold side Outlet quality ->Steam quality
! Reheater:Cold-side flow rate ->Steam flow rate
      13,3                55,1                13,7
13,4
*** INITIAL INPUT VALUES
      3.7100000000000000E+02    1.7100000000000001E+01    1.0000000000000000E+00
1.1892960000000001E+05
*-----
* Model "LP-2" (Type 318)
*

      UNIT 58      TYPE 318
*$UNIT_NAME LP-2
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\Stage.tmf
*$POSITION 271 147
*$LAYER Main #
      PARAMETERS  8
! 1 design inlet pressure
! 2 design outlet pressure
! 3 design flow rate
! 4 design inner efficiency
! 5 generator efficiency
! 6 coef. for inner eff eq
! 7 b coeff for inner eff
! 8 c coeff for inner eff
      7.9800000000000004E+00    2.7300000000000000E+00    1.1085696029699998E+05
9.1700000000000004E-01    9.5000000000000007E-01
0.0000000000000000E+00    0.0000000000000000E+00    0.0000000000000000E+00
      INPUTS      4
! lp-split-2:inlet pressure ->Turbine outlet pressure
! lp-split-1:outlet flow rate 2 ->Turbine inlet flow rate
! lp-split-1:outlet enthalpy 2 ->Turbine inlet enthalpy
! [unconnected] Bypass indicator
      60,4                59,3                59,6
CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.7300000000000000E+00    1.1085696029699998E+05    3.0160000000000000E+03
1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "lp-split-1" (Type 389)
*

      UNIT 59      TYPE 389
*$UNIT_NAME lp-split-1
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\S-split.tmf
*$POSITION 118 243
*$LAYER Main #
      INPUTS      4
! Deaerator:required steam flow rate ->Demanded Flow Out 1
! LP-1:turbine outlet flowrate ->inlet flow rate
! LP-2:turbine inlet pressure ->outlet pressure 2
! Equa-8:hllout ->inlet enthalpy
      20,2                55,2                58,1
HL1OUT
*** INITIAL INPUT VALUES
      7.3080000000000000E+03    1.1810448303199999E+05    7.9700000000000006E+00
3.1900000000000000E+03

```

```

*-----
* Model "lp-split-2" (Type 389)
*
UNIT 60 TYPE 389
*$UNIT_NAME lp-split-2
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\S-split.tmf
*$POSITION 315 244
*$LAYER Main #
INPUTS 4
! Preheater-3:Demanded hot inlet flow rate ->Demanded Flow Out 1
! LP-2:turbine outlet flowrate ->inlet flow rate
! LP-3:turbine inlet pressure ->outlet pressure 2
! Equa-17:hl2out ->inlet enthalpy
99,1 58,2 76,1
HL2OUT
*** INITIAL INPUT VALUES
6.336000000000000E+03 1.1085696029999999E+05 2.730000000000000E+00
3.016000000000000E+03
*-----
* EQUATIONS "Equa-6"
*
EQUATIONS 1
po = [57,2]*100
*$UNIT_NAME Equa-6
*$LAYER Main
*$POSITION 70 29
*-----
* EQUATIONS "Equa-7"
*
EQUATIONS 1
pr = [58,1]*100
*$UNIT_NAME Equa-7
*$LAYER Main
*$POSITION 336 96
*-----
* Model "Type58-3" (Type 58)
*
UNIT 63 TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-3
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 158 50
*$LAYER Main #
PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
7.180000000000000E+02 2.000000000000000E+00 3.000000000000000E+00
INPUTS 2
! Equa-6:po ->1st property for state
! X2H-3:steam enthalpy ->2nd property for state
PO 57,1
*** INITIAL INPUT VALUES
1.710000000000000E+03 3.190000000000000E+03
*-----
* Model "Type58-4" (Type 58)
*
UNIT 64 TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-4
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 254 50
*$LAYER Main #
PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
7.180000000000000E+02 2.000000000000000E+00 4.000000000000000E+00
INPUTS 2
! Equa-7:pr ->1st property for state
! Type58-3:Entropy at state ->2nd property for state
PR 63,4

```

```

*** INITIAL INPUT VALUES
      7.9800000000000000E+02      7.1399999999999997E+00
-----
* EQUATIONS "Equa-8"
*
EQUATIONS 3
  hllout = [63,3]-(Hls1*([63,3]-[64,3]))
  Hls1 = 0.8623
  powerlpl = [57,3]*([63,3]-hllout)*0.95
*$UNIT_NAME Equa-8
*$LAYER Main
*$POSITION 390 42
-----
* EQUATIONS "Equa-9"
*
EQUATIONS 1
  Wll = (powerlpl/3600000)
*$UNIT_NAME Equa-9
*$LAYER Main
*$POSITION 550 42
-----
* EQUATIONS "Equa-15"
*
EQUATIONS 1
  pg = [58,1]*100
*$UNIT_NAME Equa-15
*$LAYER Main
*$POSITION 70 29
-----
* EQUATIONS "Equa-16"
*
EQUATIONS 1
  p5 = [76,1]*100
*$UNIT_NAME Equa-16
*$LAYER Main
*$POSITION 336 96
-----
* Model "Type58-7" (Type 58)
*
UNIT 70      TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-7
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 158 50
*$LAYER Main #
  PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
      7.1800000000000000E+02      2.0000000000000000E+00      3.0000000000000000E+00
INPUTS 2
! Equa-15:pg ->1st property for state
! lp-split-1:outlet enthalpy 2 ->2nd property for state
PG 59,6
*** INITIAL INPUT VALUES
      7.9800000000000000E+02      3.0160000000000000E+03
-----
* Model "Type58-8" (Type 58)
*
UNIT 71      TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-8
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 254 50
*$LAYER Main #
  PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
      7.1800000000000000E+02      2.0000000000000000E+00      4.0000000000000000E+00
INPUTS 2

```

```

! Equa-16:p5 ->1st property for state
! Type58-7:Entropy at state ->2nd property for state
      P5              70,4
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.7300000000000000E+02   2.1000000000000001E+00
-----
* EQUATIONS "Equa-17"
*
      EQUATIONS      3
      hl2out = [70,3]-(Hls2*([70,3]-[71,3]))
      Hls2 = 0.917
      powerlp2 = [59,3]*([70,3]-hl2out)*0.95
*$UNIT_NAME Equa-17
*$LAYER Main
*$POSITION 390 42
-----
* EQUATIONS "Equa-18"
*
      EQUATIONS      1
      Wl2 = (powerlp2/3600000)
*$UNIT_NAME Equa-18
*$LAYER Main
*$POSITION 550 42
-----
* Model "LP-3" (Type 318)
*
      UNIT 76      TYPE 318
*$UNIT_NAME LP-3
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\Stage.tmf
*$POSITION 410 136
*$LAYER Main #
      PARAMETERS      8
! 1 design inlet pressure
! 2 design outlet pressure
! 3 design flow rate
! 4 design inner efficiency
! 5 generator efficiency
! 6 coef. for inner eff eq
! 7 b coeff for inner eff
! 8 c coeff for inner eff
      2.7300000000000000E+00   9.6000000000000008E-01   1.0451664047200000E+05
9.35200000000000003E-01   9.5000000000000007E-01
      0.0000000000000000E+00   0.0000000000000000E+00   0.0000000000000000E+00
      INPUTS      4
! lp-split-3:inlet pressure ->Turbine outlet pressure
! lp-split-2:outlet flow rate 2 ->Turbine inlet flow rate
! lp-split-2:outlet enthalpy 2 ->Turbine inlet enthalpy
! [unconnected] Bypass indicator
      77,4              60,3              60,6
CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      9.6000000000000008E-01   1.0451664047200000E+05   2.7980000000000000E+03
1.0000000000000000E+00
-----
* Model "lp-split-3" (Type 389)
*
      UNIT 77      TYPE 389
*$UNIT_NAME lp-split-3
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\S-split.tmf
*$POSITION 443 232
*$LAYER Main #
      INPUTS      4
! Preheater-2:Demand hot inlet flow rate ->Demanded Flow Out 1
! LP-3:turbine outlet flowrate ->inlet flow rate
! LP-4:turbine inlet pressure ->outlet pressure 2
! Equa-21:hl3out ->inlet enthalpy
      96,1              76,2              85,1
HL3OUT
*** INITIAL INPUT VALUES
      5.8320000169999994E+03   1.0451664047200000E+05   9.6000000000000008E-01
2.7980000000000000E+03
-----
* EQUATIONS "Equa-19"

```

```

*
EQUATIONS 1
  px = [76,1]*100
*$UNIT_NAME Equa-19
*$LAYER Main
*$POSITION 70 29
*-----
* EQUATIONS "Equa-20"
*
EQUATIONS 1
  p7 = [85,1]*100
*$UNIT_NAME Equa-20
*$LAYER Main
*$POSITION 336 96
*-----
* Model "Type58-9" (Type 58)
*
UNIT 79 TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-9
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 158 50
*$LAYER Main #
  PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
  7.180000000000000E+02 2.000000000000000E+00 3.000000000000000E+00
  INPUTS 2
! Equa-19:px ->1st property for state
! lp-split-2:outlet enthalpy 2 ->2nd property for state
  PX 60,6
*** INITIAL INPUT VALUES
  2.730000000000000E+02 2.798000000000000E+03
*-----
* Model "Type58-10" (Type 58)
*
UNIT 80 TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-10
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 254 50
*$LAYER Main #
  PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
  7.180000000000000E+02 2.000000000000000E+00 4.000000000000000E+00
  INPUTS 2
! Equa-20:p7 ->1st property for state
! Type58-9:Entropy at state ->2nd property for state
  p7 79,4
*** INITIAL INPUT VALUES
  9.800000000000000E+01 2.100000000000000E+00
*-----
* EQUATIONS "Equa-21"
*
EQUATIONS 3
  hl3out = [79,3]-(Hls3*([79,3]-[80,3]))
  Hls3 = 0.9352
  powerlp3 = [60,3]*([79,3]-hl3out)*0.95
*$UNIT_NAME Equa-21
*$LAYER Main
*$POSITION 390 40
*-----
* EQUATIONS "Equa-22"
*
EQUATIONS 1
  w13 = (powerlp3/3600000)
*$UNIT_NAME Equa-22
*$LAYER Main

```

```

*$POSITION 550 42
*-----
* Model "LP-4" (Type 318)
*
UNIT 85 TYPE 318
*$UNIT_NAME LP-4
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\Stage.tmf
*$POSITION 527 129
*$LAYER Main #
PARAMETERS 8
! 1 design inlet pressure
! 2 design outlet pressure
! 3 design flow rate
! 4 design inner efficiency
! 5 generator efficiency
! 6 coef. for inner eff eq
! 7 b coeff for inner eff
! 8 c coeff for inner eff
9.60000000000000008E-01 2.9000000000000004E-01 9.8696880340999996E+04
8.8000000000000000E-01 9.5000000000000007E-01
0.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00
INPUTS 4
! lp-split-4:inlet pressure ->Turbine outlet pressure
! lp-split-3:outlet flow rate 2 ->Turbine inlet flow rate
! lp-split-3:outlet enthalpy 2 ->Turbine inlet enthalpy
! [unconnected] Bypass indicator
87,4 77,3 77,6
CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
2.9000000000000004E-01 9.8696880340999996E+04 2.6240000000000000E+03
1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "LP-5" (Type 318)
*
UNIT 86 TYPE 318
*$UNIT_NAME LP-5
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\Stage.tmf
*$POSITION 666 126
*$LAYER Main #
PARAMETERS 8
! 1 design inlet pressure
! 2 design outlet pressure
! 3 design flow rate
! 4 design inner efficiency
! 5 generator efficiency
! 6 coef. for inner eff eq
! 7 b coeff for inner eff
! 8 c coeff for inner eff
2.9000000000000004E-01 8.0000000000000016E-02 9.5802106476000001E+04
6.4450000000000007E-01 9.5000000000000007E-01
0.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00
INPUTS 4
! Condens:Condensing pressure ->Turbine outlet pressure
! lp-split-4:outlet flow rate 2 ->Turbine inlet flow rate
! lp-split-4:outlet enthalpy 2 ->Turbine inlet enthalpy
! [unconnected] Bypass indicator
107,2 87,3 87,6
CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
8.0000000000000016E-02 9.5802113341999997E+04 2.3480000000000000E+03
1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "lp-split-4" (Type 389)
*
UNIT 87 TYPE 389
*$UNIT_NAME lp-split-4
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\S-split.tmf
*$POSITION 613 222
*$LAYER Main #
INPUTS 4
! Preheater-1:Demanded hot inlet flow rate ->Demanded Flow Out 1
! LP-4:turbine outlet flowrate ->inlet flow rate
! LP-5:turbine inlet pressure ->outlet pressure 2
! Equa-25:hl4out ->inlet enthalpy

```



```

          95,1                85,2                86,1
HL4OUT
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.8440000770000001E+03    9.8696880340999996E+04    2.9000000000000004E-01
2.3480000000000000E+03
*-----*
* EQUATIONS "Equa-23"
*
      EQUATIONS 1
      pj = [85,1]*100
*$UNIT_NAME Equa-23
*$LAYER Main
*$POSITION 70 29
*-----*
* EQUATIONS "Equa-24"
*
      EQUATIONS 1
      p8 = [86,1]*100
*$UNIT_NAME Equa-24
*$LAYER Main
*$POSITION 336 96
*-----*
* Model "Type58-11" (Type 58)
*
      UNIT 89      TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-11
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 158 50
*$LAYER Main #
      PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
      7.1800000000000000E+02    2.0000000000000000E+00    3.0000000000000000E+00
      INPUTS 2
! Equa-23:pj ->1st property for state
! lp-split-3:outlet enthalpy 2 ->2nd property for state
      PJ                      77,6
*** INITIAL INPUT VALUES
      9.6000000000000000E+01    2.6240000000000000E+03
*-----*
* Model "Type58-12" (Type 58)
*
      UNIT 90      TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-12
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 254 50
*$LAYER Main #
      PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
      7.1800000000000000E+02    2.0000000000000000E+00    4.0000000000000000E+00
      INPUTS 2
! Equa-24:p8 ->1st property for state
! Type58-11:Entropy at state ->2nd property for state
      P8                      89,4
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.9000000000000000E+01    2.0000000000000000E+00
*-----*
* EQUATIONS "Equa-25"
*
      EQUATIONS 3
      hl4out = [89,3]-(Hls4*([89,3]-[90,3]))
      Hls4 = 0.88
      powerlp4 = [77,3]*([89,3]-hl4out)*0.95
*$UNIT_NAME Equa-25
*$LAYER Main
*$POSITION 390 40
*-----*

```

```

* EQUATIONS "Equa-26"
*
EQUATIONS 1
  Wl4 = (powerlp4/3600000)
*$UNIT_NAME Equa-26
*$LAYER Main
*$POSITION 550 42
-----
* EQUATIONS "Equa-27"
*
EQUATIONS 1
  pjf = [86,1]*100
*$UNIT_NAME Equa-27
*$LAYER Main
*$POSITION 70 29
-----
* EQUATIONS "Equa-28"
*
EQUATIONS 1
  p8f = [107,2]*100
*$UNIT_NAME Equa-28
*$LAYER Main
*$POSITION 336 96
-----
* Model "Type58-14" (Type 58)
*
UNIT 101 TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-14
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 158 50
*$LAYER Main #
PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
  7.1800000000000000E+02 2.0000000000000000E+00 3.0000000000000000E+00
INPUTS 2
! Equa-27:pjf ->1st property for state
! lp-split-4:outlet enthalpy 2 ->2nd property for state
  PJF 87,6
*** INITIAL INPUT VALUES
  2.9000000000000000E+01 2.3480000000000000E+03
-----
* Model "Type58-15" (Type 58)
*
UNIT 102 TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-15
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 254 50
*$LAYER Main #
PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
  7.1800000000000000E+02 2.0000000000000000E+00 4.0000000000000000E+00
INPUTS 2
! Equa-28:p8f ->1st property for state
! Type58-14:Entropy at state ->2nd property for state
  P8F 101,4
*** INITIAL INPUT VALUES
  8.0000000000000000E+00 2.0000000000000000E+00
-----
* EQUATIONS "Equa-29"
*
EQUATIONS 3
  hl5out = [101,3]-(Hls4*([101,3]-[102,3]))
  Hls5 = 0.6445
  powerlp5 = [87,3]*([101,3]-hl5out)*0.95
*$UNIT_NAME Equa-29

```

```

*$LAYER Main
*$POSITION 390 40
*-----
* EQUATIONS "Equa-30"
*
    EQUATIONS 1
        W15 = (powerlp5/3600000)
*$UNIT_NAME Equa-30
*$LAYER Main
*$POSITION 550 40
*-----
* Model "Condens" (Type 383)
*
    UNIT 107      TYPE 383
*$UNIT_NAME Condens
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Condenser\Condens.tmf
*$POSITION 855 115
*$LAYER Main #
    PARAMETERS 2
! 1 dT Cool water out+condensing temp
! 2 temp increase in cool. water
        5.0000000000000000E+00    5.0000000000000000E+00
    INPUTS 6
! [unconnected] Cooling water inlet temp
! Equa-29:hl5out ->steam enthalpy inlet
! LP-5:turbine outlet flowrate ->steam mass flow rate
! Preheater-1:Hot side outlet flow rate ->Condensate inlet flow rate
! Preheater-1:Hot side outlet temperature ->Condensate inlet temperature
! Preheater-1:Hot side outlet quality ->Condensate inlet quality
        CONST                HL5OUT                86,2
95,5                        95,4
        95,6
*** INITIAL INPUT VALUES
        2.5500000000000000E+01    2.3250000000000000E+03    2.6482000999999997E+01
1.6153560448000002E+04    5.2888999999999996E+01
        0.0000000000000000E+00
*-----
* Model "X2H" (Type 391)
*
    UNIT 24      TYPE 391
*$UNIT_NAME X2H
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Utility\X2H.tmf
*$POSITION -243 59
*$LAYER Main #
    INPUTS 4
! Superheater:Cold-side outlet temperature ->Steam temperture
! HP-1:turbine inlet pressure ->Steam pressure
! Superheater:Cold side Outlet quality ->Steam quality
! Superheater:Cold-side flow rate ->Steam flow rate
        4,3                25,1                4,7
4,4
*** INITIAL INPUT VALUES
        3.7100000000000000E+02    1.0000000000000000E+02    1.0000000000000000E+00
1.4028840637200000E+05
*-----
* Model "HP-1" (Type 318)
*
    UNIT 25      TYPE 318
*$UNIT_NAME HP-1
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\Stage.tmf
*$POSITION -144 166
*$LAYER Main #
    PARAMETERS 8
! 1 design inlet pressure
! 2 design outlet pressure
! 3 design flow rate
! 4 design inner efficiency
! 5 generator efficiency
! 6 coef. for inner eff eq
! 7 b coeff for inner eff
! 8 c coeff for inner eff
        1.0000000000000000E+02    3.3609999999999999E+01    1.4028840637200000E+05
8.3760000000000012E-01    9.5000000000000007E-01

```

```

0.0000000000000000E+00  0.0000000000000000E+00  0.0000000000000000E+00
INPUTS  4
! S-split-1:inlet pressure ->Turbine outlet pressure
! X2H:steam flow rate ->Turbine inlet flow rate
! [unconnected] Turbine inlet enthalpy
! [unconnected] Bypass indicator
26,4 24,3 CONST
CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
3.3609999999999999E+01  1.4028840637200000E+05  3.0050000000000000E+03
1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "S-split-1" (Type 389)
*

UNIT 26 TYPE 389
*$UNIT_NAME S-split-1
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\S-split.tmf
*$POSITION -145 272
*$LAYER Main #
INPUTS 4
! Preheater-5:Demanded hot inlet flow rate ->Demanded Flow Out 1
! HP-1:turbine outlet flowrate ->inlet flow rate
! HP-2:turbine inlet pressure ->outlet pressure 2
! Equa-13:hllhpout ->inlet enthalpy
18,1 25,2 36,1
HLLHPOUT
*** INITIAL INPUT VALUES
1.0551959609999998E+04  1.3910939483599996E+05  3.3609999999999999E+01
2.8070000000000000E+03
*-----
* EQUATIONS "Equa-11"
*

EQUATIONS 1
phpo = [24,2]*100
*$UNIT_NAME Equa-11
*$LAYER Main
*$POSITION 70 29
*-----
* EQUATIONS "Equa-12"
*

EQUATIONS 1
phpr = [36,1]*100
*$UNIT_NAME Equa-12
*$LAYER Main
*$POSITION 336 96
*-----
* Model "Type58-5" (Type 58)
*

UNIT 28 TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-5
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 158 50
*$LAYER Main #
PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
7.1800000000000000E+02  2.0000000000000000E+00  3.0000000000000000E+00
INPUTS 2
! Equa-11:phpo ->1st property for state
! X2H:steam enthalpy ->2nd property for state
PHPO 24,1
*** INITIAL INPUT VALUES
1.0000000000000000E+04  3.0050000000000000E+03
*-----
* Model "Type58-6" (Type 58)
*

UNIT 29 TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-6
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf

```

```

*$POSITION 254 50
*$LAYER Main #
  PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
  7.180000000000000E+02 2.000000000000000E+00 4.000000000000000E+00
  INPUTS 2
! Equa-12:phpr ->1st property for state
! Type58-5:Entropy at state ->2nd property for state
  PHPR 28,4
*** INITIAL INPUT VALUES
  3.361000000000000E+03 6.070000000000000E+00
-----
* EQUATIONS "Equa-13"
*
  EQUATIONS 3
  h1hpout = [28,3]-(H1s1*([28,3]-[29,3]))
  H1shp1 = 0.8376
  power1php1 = [24,3]*([28,3]-h1hpout)*0.95
*$UNIT_NAME Equa-13
*$LAYER Main
*$POSITION 390 42
-----
* EQUATIONS "Equa-14"
*
  EQUATIONS 1
  W1hp1 = (power1php1/3600000)
*$UNIT_NAME Equa-14
*$LAYER Main
*$POSITION 550 42
-----
* Model "HP-2" (Type 318)
*
  UNIT 36 TYPE 318
*$UNIT_NAME HP-2
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\Stage.tmf
*$POSITION 15 155
*$LAYER Main #
  PARAMETERS 8
! 1 design inlet pressure
! 2 design outlet pressure
! 3 design flow rate
! 4 design inner efficiency
! 5 generator efficiency
! 6 coef. for inner eff eq
! 7 b coeff for inner eff
! 8 c coeff for inner eff
  3.360999999999999E+01 1.857999999999998E+01 1.2863736419700000E+05
8.463000000000000E-01 9.500000000000000E-01
0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
  INPUTS 4
! S-split-2:inlet pressure ->Turbine outlet pressure
! S-split-1:outlet flow rate 2 ->Turbine inlet flow rate
! [unconnected] Turbine inlet enthalpy
! [unconnected] Bypass indicator
  41,4 26,3 CONST
CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
  1.857999999999998E+01 1.2863736419700000E+05 2.807000000000000E+03
1.000000000000000E+00
-----
* Model "S-split-2" (Type 389)
*
  UNIT 41 TYPE 389
*$UNIT_NAME S-split-2
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Turbine\S-split.tmf
*$POSITION 41 262
*$LAYER Main #
  INPUTS 4
! Preheater-4:Demand hot inlet flow rate ->Demanded Flow Out 1
! HP-2:turbine outlet flowrate ->inlet flow rate
! H2X_1:press ->outlet pressure 2

```

```

! Equa-4:h12hpout ->inlet enthalpy
      19,1                36,2                56,2
HL2HPOUT
*** INITIAL INPUT VALUES
      1.0083239937000000E+04    1.2863736419700000E+05    1.8579999999999998E+01
2.8070000000000000E+03
*-----
* EQUATIONS "Equa"
*
      EQUATIONS 1
      php2x = [36,1]*100
*$UNIT_NAME Equa
*$LAYER Main
*$POSITION 70 29
*-----
* EQUATIONS "Equa-3"
*
      EQUATIONS 1
      p02 = [56,2]*100
*$UNIT_NAME Equa-3
*$LAYER Main
*$POSITION 336 96
*-----
* Model "Type58" (Type 58)
*
      UNIT 44      TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 158 50
*$LAYER Main #
      PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
      7.1800000000000000E+02    2.0000000000000000E+00    3.0000000000000000E+00
      INPUTS 2
! Equa:php2x ->1st property for state
! S-split-1:outlet enthalpy 2 ->2nd property for state
      PHP2X                26,6
*** INITIAL INPUT VALUES
      3.3609999999999999E+01    2.8070000000000000E+03
*-----
* Model "Type58-2" (Type 58)
*
      UNIT 45      TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-2
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 254 50
*$LAYER Main #
      PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
      7.1800000000000000E+02    2.0000000000000000E+00    4.0000000000000000E+00
      INPUTS 2
! Equa-3:p02 ->1st property for state
! Type58:Entropy at state ->2nd property for state
      P02                44,4
*** INITIAL INPUT VALUES
      1.8579999999999998E+01    6.1499999999999995E+00
*-----
* EQUATIONS "Equa-4"
*
      EQUATIONS 3
      hl2hpout = [44,3]-([hlshp2*([44,3]-[45,3])])
      hlshp2 = 0.8463
      power1php2 = [26,3]*([44,3]-hl2hpout)*0.95
*$UNIT_NAME Equa-4
*$LAYER Main
*$POSITION 390 42

```

```

*-----
* EQUATIONS "Equa-5"
*
EQUATIONS 1
  Wlhp2 = (powerlphp2/3600000)
*$UNIT_NAME Equa-5
*$LAYER Main
*$POSITION 550 42
*-----
* Model "H2X_1" (Type 392)
*
UNIT 56 TYPE 392
*$UNIT_NAME H2X_1
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Utility\H2X_1.tmf
*$POSITION 208 166
*$LAYER Main #
  INPUTS 3
! S-split-2:outlet flow rate 2 ->flow rate
! Reheater:Cold Side Inlet pressure ->pressure
! S-split-2:outlet enthalpy 2 ->enthalpy
  41,3 13,8 41,6
*** INITIAL INPUT VALUES
  1.1892959747299999E+05 1.8579999999999999E+01 2.8070000000000000E+03
*-----
* Model "Type58-13" (Type 58)
*
UNIT 97 TYPE 58
*$UNIT_NAME Type58-13
*$MODEL .\Physical Phenomena\Thermodynamic Properties\Refrigerant and Steam
Properties\Type58.tmf
*$POSITION 348 114
*$LAYER Main #
  PARAMETERS 3
! 1 Refrigerant for state
! 2 1st property type for state
! 3 2nd property type for state
  7.1800000000000000E+02 2.0000000000000000E+00 3.0000000000000000E+00
  INPUTS 2
! Equa-10:p16 ->1st property for state
! S-split-2:outlet enthalpy 2 ->2nd property for state
  p16 41,6
*** INITIAL INPUT VALUES
  1.8580000000000000E+03 2.8070000000000000E+03
*-----
* EQUATIONS "Equa-10"
*
EQUATIONS 1
  p16 = [56,2]*100
*$UNIT_NAME Equa-10
*$LAYER Main
*$POSITION 270 82
*-----
* Model "Type11h" (Type 11)
*
UNIT 47 TYPE 11
*$UNIT_NAME Type11h
*$MODEL .\Hydronics\Tee-Piece\Other Fluids\Type11h.tmf
*$POSITION 56 181
*$LAYER Water Loop #
  PARAMETERS 1
! 1 Tee piece mode
  1.0000000000000000E+00
  INPUTS 4
! Reheater:Hot-side outlet temperature ->Temperature at inlet 1
! Reheater:Hot-side flow rate ->Flow rate at inlet 1
! Preheater:Hot-side outlet temperature ->Temperature at inlet 2
! Preheater:Hot-side flow rate ->Flow rate at inlet 2
  13,1 13,2 2,1
2,2
*** INITIAL INPUT VALUES
  2.9400000000000000E+02 1.8325438384999999E+05 2.9780000000000001E+02
1.2437640000000000E+06

```

```

*-----
* Model "Evaporator" (Type 316)
*
UNIT 3 TYPE 316
*$UNIT_NAME Evaporator
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Steamgen\Evaporator.tmf
*$POSITION 125 393
*$LAYER Main #
PARAMETERS 6
! 1 overall heat transfer factor
! 2 blowdown fraction
! 3 reference pressure loss
! 4 reference flow rate
! 5 power law exp for UA
! 6 power law exp for dp
7.3835998044010000E+06 0.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00
1.3983659362800000E+05 0.0000000000000000E+00
0.0000000000000000E+00
INPUTS 6
! Superheater:Hot-side outlet temperature ->Hot side inlet temperature
! Superheater:Hot-side flow rate ->Hot side flow rate
! Preheater:Cold-side outlet temperature ->Cold side inlet temperature
! Superheater:Cold Side Inlet pressure ->Cold side outlet pressure
! Preheater:Cold side Outlet quality ->Cold side inlet quality
! [unconnected] Hot side specific heat capacity
4,1 4,2 2,3
4,8 2,7
CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
3.7721999999999997E+02 1.2437640000000000E+06 3.1348899999999998E+02
1.0342000000000000E+02 0.0000000000000000E+00
2.3999999999999999E+00
*-----
* Model "Preheater-2" (Type 317)
*
UNIT 96 TYPE 317
*$UNIT_NAME Preheater-2
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\preheating\Preheater.tmf
*$POSITION 829 423
*$LAYER Main #
PARAMETERS 4
! 1 cold fluid spgef. heat capacity
! 2 overall heat transfer factor
! 3 cold sid ref flow rate
! 4 power law exp for UA
4.1799999999999997E+00 2.3123411004180000E+06 1.1170800247199999E+05
0.0000000000000000E+00
INPUTS 8
! lp-split-3:outlet enthalpy 1 ->Hot side inlet enthalpy
! lp-split-3: outlet pressure 1 ->Hot side inlet pressure
! Preheater-1:Cold side outlet temperture ->Cold side inlet temperature
! Preheater-1:Cold side outlet flow rate ->Cold side inlet flow rate
! Preheater-3:Hot side outlet temperature ->Condensate inlet temperature
! Preheater-3:Hot side outlet flow rate ->Condensate inlet flow rate
! Preheater-3:Hot side outlet quality ->Condensate inlet quality
! [unconnected] on/off
77,5 77,2 95,2
95,3 99,4
99,5 99,6 CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
2.6244000000000001E+03 9.6250000000000002E-01 6.4721999999999994E+01
1.1170800247199999E+05 1.0506000000000000E+02
6.3673200130000005E+03 0.0000000000000000E+00 1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "Preheater-3" (Type 317)
*
UNIT 99 TYPE 317
*$UNIT_NAME Preheater-3
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\preheating\Preheater.tmf
*$POSITION 699 382
*$LAYER Main #
PARAMETERS 4
! 1 cold fluid spgef. heat capacity
! 2 overall heat transfer factor

```



```

! 3 cold sid ref flow rate
! 4 power law exp for UA
    4.2100000000000000E+00    6.9018483796600008E+05    1.1170800247199999E+05
0.0000000000000000E+00
    INPUTS    8
! lp-split-2:outlet enthalpy 1 ->Hot side inlet enthalpy
! lp-split-2: outlet pressure 1 ->Hot side inlet pressure
! Preheater-2:Cold side outlet temperture ->Cold side inlet temperature
! Preheater-2:Cold side outlet flow rate ->Cold side inlet flow rate
! [unconnected] Condensate inlet temperature
! [unconnected] Condensate inlet flow rate
! [unconnected] Condensate inlet quality
! [unconnected] on/off
    60,5    60,2    96,2
96,3
    CONST    CONST    CONST    CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
    2.7981999999999998E+03    2.7276000000000002E+00    9.5111000000000004E+01
1.1170800247199999E+05    0.0000000000000000E+00
    0.0000000000000000E+00    0.0000000000000000E+00    1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "Deaerator" (Type 384)
*
    UNIT 20    TYPE 384
*$UNIT_NAME Deaerator
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\preheating\Deaerator.tmf
*$POSITION 581 336
*$LAYER Main #
    INPUTS    8
! Preheater-3:Cold side outlet temperture ->Feed Water in tmp
! Preheater-3:Cold side outlet flow rate ->Feed Water flow rate
! lp-split-1:outlet enthalpy 1 ->steam inlet enthalpy
! lp-split-1: outlet pressure 1 ->steam inlet pressure
! Preheater-4:Hot side outlet temperature ->condesate inlet temperature
! Preheater-4:Hot side outlet flow rate ->Condensate inlet flow rate
! Preheater-4:Hot side outlet quality ->Condensate inlet quality
! [unconnected] Dearator on/off
    99,2    99,3    59,5
59,2
    19,4    19,6    CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
    1.2672000000000000E+02    1.1172240142800001E+05    3.0294000000000001E+03
7.3300000000000000E+00    1.7916999999999999E+02
    2.0628000068999998E+04    0.0000000000000000E+00    1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "condensate-pump" (Type 300)
*
    UNIT 108    TYPE 300
*$UNIT_NAME condensate-pump
*$MODEL .\STEC Library\STE\Utility\Saltpu_1.tmf
*$POSITION 965 167
*$LAYER Main #
    PARAMETERS    5
! 1 Maximum flow rate
! 2 Fluid specific heat
! 3 Maximum power
! 4 Conversion coefficient
! 5 Power coefficient
    1.1148839950600000E+05    4.1899999999999995E+00    6.8399998188000009E+05
0.0000000000000000E+00    5.0000000000000000E-01
    INPUTS    3
! Condens:Condensing Temperature ->Inlet fluid temperature
! Condens:Condesate flow rate ->Inlet mass flow rate
! [unconnected] desired mass flow rate
    107,1    107,6    CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
    4.1439000000000000E+01    1.1148839950600000E+05    1.1148839950600000E+05
*-----
* Model "Preheater-1" (Type 317)
*
    UNIT 95    TYPE 317
*$UNIT_NAME Preheater-1
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\preheating\Preheater.tmf
*$POSITION 925 424

```

```

*$LAYER Main #
  PARAMETERS 4
! 1 cold fluid spgef. heat capacity
! 2 overall heat transfer factor
! 3 cold sid ref flow rate
! 4 power law exp for UA
      4.1799999999999997E+00    1.6443323564400002E+06    1.1170800247199999E+05
0.0000000000000000E+00
  INPUTS 8
! lp-split-4:outlet enthalpy 1 ->Hot side inlet enthalpy
! lp-split-4: outlet pressure 1 ->Hot side inlet pressure
! condensate-pump:Outlet fluid temperature ->Cold side inlet temperature
! condensate-pump:Outlet flow rate ->Cold side inlet flow rate
! Preheater-2:Hot side outlet temperature ->Condensate inlet temperature
! Preheater-2:Hot side outlet flow rate ->Condensate inlet flow rate
! Preheater-2:Hot side outlet quality ->Condensate inlet quality
! [unconnected] on/off
      87,5                87,2                108,1
108,2                96,4
      96,5                96,6                CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.5280999999999999E+03    2.7970000000000000E-01    4.1609999999999999E+01
1.1170800247199999E+05    7.4721999999999994E+01
      1.2200760269000000E+04    0.0000000000000000E+00    1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "Preheater-5" (Type 317)
*

  UNIT 18    TYPE 317
*$UNIT_NAME Preheater-5
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\preheating\Preheater.tmf
*$POSITION 318 467
*$LAYER Main #
  PARAMETERS 4
! 1 cold fluid spgef. heat capacity
! 2 overall heat transfer factor
! 3 cold sid ref flow rate
! 4 power law exp for UA
      4.5099999999999998E+00    2.3872139367600000E+06    1.4028840637200000E+05
0.0000000000000000E+00
  INPUTS 8
! S-split-1:outlet enthalpy 1 ->Hot side inlet enthalpy
! S-split-1: outlet pressure 1 ->Hot side inlet pressure
! Preheater-4:Cold side outlet temperture ->Cold side inlet temperature
! Preheater-4:Cold side outlet flow rate ->Cold side inlet flow rate
! [unconnected] Condensate inlet temperature
! [unconnected] Condensate inlet flow rate
! [unconnected] Condensate inlet quality
! [unconnected] on/off
      26,5                26,2                19,2
19,3                CONST                CONST                CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.8070000000000000E+03    3.3612000000000002E+01    2.0360999999999999E+02
1.4028840637200000E+05    0.0000000000000000E+00
      0.0000000000000000E+00    0.0000000000000000E+00    1.0000000000000000E+00
*-----
* Model "Preheater-4" (Type 317)
*

  UNIT 19    TYPE 317
*$UNIT_NAME Preheater-4
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\preheating\Preheater.tmf
*$POSITION 436 443
*$LAYER Main #
  PARAMETERS 4
! 1 cold fluid spgef. heat capacity
! 2 overall heat transfer factor
! 3 cold sid ref flow rate
! 4 power law exp for UA
      4.3799999999999999E+00    3.0234668949049995E+06    1.4028840637200000E+05
0.0000000000000000E+00
  INPUTS 8
! S-split-2:outlet enthalpy 1 ->Hot side inlet enthalpy
! S-split-2: outlet pressure 1 ->Hot side inlet pressure
! FeedWater-Pump:Outlet fluid temperature ->Cold side inlet temperature
! FeedWater-Pump:Outlet flow rate ->Cold side inlet flow rate

```

```

! Preheater-5:Hot side outlet temperature ->Condensate inlet temperature
! Preheater-5:Hot side outlet flow rate ->Condensate inlet flow rate
! Preheater-5:Hot side outlet quality ->Condensate inlet quality
! [unconnected] on/off
      41,5              41,2              21,1
21,2              18,4              18,6              CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.709599999999999E+03      1.858100000000000E+01      1.692200000000000E+02
1.4028840637200000E+05      2.136699999999999E+02
      1.0551959609999998E+04      0.000000000000000E+00      1.000000000000000E+00
*-----
* Model "HTF-pump" (Type 300)
*
      UNIT 9 TYPE 300
*$UNIT_NAME HTF-pump
*$MODEL .\STEC Library\STE\Utility\Saltpu_1.tmf
*$POSITION 147 188
*$LAYER Main #
      PARAMETERS 5
! 1 Maximum flow rate
! 2 Fluid specific heat
! 3 Maximum power
! 4 Conversion coefficient
! 5 Power coefficient
      1.4270399780269999E+06      2.589999999999999E+00      5.7599998474119995E+06
0.000000000000000E+00      5.000000000000000E-01
      INPUTS 3
! Typellh:Outlet temperature ->Inlet fluid temperature
! Typellh:Outlet flow rate ->Inlet mass flow rate
! [unconnected] desired mass flow rate
      47,1              47,2              CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.972899999999999E+02      1.4270399780269999E+06      1.4270399780269999E+06
*-----
* Model "Preheater" (Type 315)
*
      UNIT 2 TYPE 315
*$UNIT_NAME Preheater
*$MODEL .\STEC Library\Rankine\Steamgen\Eco_sh.tmf
*$POSITION 126 487
*$LAYER Main #
      PARAMETERS 6
! 1 Counter flow mode
! 2 Overall heat transfer coefficient of exchanger
! 3 Reference press loss cold side
! 4 Reference cold side flow
! 5 power law exp for UA
! 6 power law exp for DP
      2.000000000000000E+00      1.7570879534500005E+05      0.000000000000000E+00
1.4028840637200000E+05      0.000000000000000E+00
      0.000000000000000E+00
      INPUTS 7
! Evaporator:Hot side outlet temperture ->Hot side inlet temperature
! Evaporator:Hot side outlet flow rate ->Hot side flow rate
! Preheater-5:Cold side outlet temperture ->Cold side inlet temperature
! Preheater-5:Cold side outlet flow rate ->Cold side flow rate
! [unconnected] Cold side quality
! Evaporator:Cold side inlet pressure ->cold side outlet pressure
! [unconnected] hot side spedific heat
      3,1              3,2              18,2
18,3              CONST
      3,4              CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
      3.1777999999999997E+02      1.2437640000000000E+06      2.3483000000000001E+02
1.4028840637200000E+05      0.000000000000000E+00
      1.034200000000000E+02      2.359999999999999E+00
*-----
* Model "FeedWater-Pump" (Type 300)
*
      UNIT 21 TYPE 300
*$UNIT_NAME FeedWater-Pump
*$MODEL .\STEC Library\STE\Utility\Saltpu_1.tmf
*$POSITION 581 421

```

```

*$LAYER Main #
PARAMETERS 5
! 1 Maximum flow rate
! 2 Fluid specific heat
! 3 Maximum power
! 4 Conversion coefficient
! 5 Power coefficient
1.4028840637200000E+05 4.1899999999999995E+00 3.1679999160769996E+06
0.0000000000000000E+00 5.0000000000000000E-01
INPUTS 3
! Deaerator:Feed water out temp ->Inlet fluid temperature
! Deaerator:Feed Water out flow rate ->Inlet mass flow rate
! Evaporator:Cold side flow rate demand ->desired mass flow rate
20,1 20,3 3,6
*** INITIAL INPUT VALUES
1.6689000000000001E+02 1.4028840637200000E+05 1.4028840637200000E+05
*-----

```

END