



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας

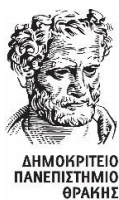
Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

Προσομοίωση λειτουργίας ηλιοθερμικού πεδίου για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα



Διπλωματική Εργασία
Πεχτελίδης Αλέξανδρος
Α.Μ.:91084

Ξάνθη, Ιούλιος 2018



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

Προσομοίωση λειτουργίας ηλιοθερμικού πεδίου για την παραγωγή
θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Πεχτελίδης Αλέξανδρος

A.M.:91084

Διπλωματική εργασία η οποία υποβλήθηκε τον Ιούλιο του 2018 για την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανικού
Παραγωγής και Διοίκησης

Copyright © Πεχτελίδης Αλέξανδρος, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

Πρόλογος

Η προέλευση και η συνέχιση του ανθρώπινου είδους βασίζεται στην ηλιακή ενέργεια. Οι πιο σημαντικές βασικές διαδικασίες ζωτικής σημασίας, όπως η φωτοσύνθεση και ο κύκλος του νερού, εξαρτώνται από την ηλιακή ενέργεια. Από την αρχή κιόλας της ιστορίας, ο άνθρωπος διαπίστωσε πως η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να λειτουργήσει προς όφελος του, όμως μόνο τα τελευταία 40 χρόνια γίνεται εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, ως εναλλακτική μορφή, με τη χρήση εξελιγμένου εξοπλισμού. Η περιβαλλοντική ρύπανση που προκαλείται από την καύση των ορυκτών καυσίμων, που αποτελούν και τη βασική πηγή ενέργειας, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα αποδεδειγμένα αποθέματά τους εξαντλούνται, ώθησαν την παγκόσμια κοινότητα προς την εύρεση εναλλακτικών πηγών ενέργειας και κυρίως προς τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.).

Κάθε χρόνο, η ηλιακή ενέργεια που φθάνει στην επιφάνεια της γη είναι περίπου 60.000 φορές περισσότερη από την τρέχουσα παγκόσμια απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως η ηλιακή ενέργεια έχει το μεγαλύτερο δυναμικό από όλες τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Αυτή η άφθονη επάρκεια ηλιακής ενέργειας, καθιστά τις ηλιακές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μια εναλλακτική λύση, έναντι των παραδοσιακών μονάδων παραγωγής, οι οποίες καίνε ρυπογόνα ορυκτά καύσιμα, όπως άνθρακα. Οι ηλιακοί σταθμοί συνήθως διαθέτουν συγκεντρωτικούς καθρέφτες για τη συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερης ηλιακής ενέργειας και είναι γνωστοί ως συγκεντρωτικά συστήματα ηλιακής ενέργειας (Concentrating Solar Power - CSP). Αυτά τα συστήματα ηλιακής ενέργειας παρέχουν ευνοϊκά περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς φαινομενικά δεν παράγουν σχεδόν καθόλου εκπομπές και δεν καταναλώνουν καύσιμα.

Πολλές φορές οι συγκεκριμένοι σταθμοί συνδυάζονται και με άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως η βιομάζα και η γεωθερμία, με σκοπό, όσο το δυνατόν, να αυξηθεί η απόδοση του σταθμού και να επιτευχθεί η αδιάλειπτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο ίδιο πλαίσιο υλοποιήθηκε και το πιλοτικό έργο «Energeia» (Ελλάδα-Βουλγαρία 2007-2013), στο οποίο η παραγόμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια, προκύπτει από τη συνδυασμένη λειτουργία ενός ηλιοθερμικού πεδίου, συγκεντρωτικών παραβολικών κατόπτρων, ισχύος 234kW_{th} και ενός γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας (θερμοκρασία ρευστού $\approx 60^{\circ}\text{C}$). Σκοπός του πιλοτικού έργου είναι η διερεύνηση της κατάλληλης τεχνικής υβριδοποίησης της ηλιοθερμίας με τη γεωθερμία, προκειμένου να εξυπηρετούνται θερμικά και ηλεκτρικά φορτία.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην κατάσταση του μοντέλου του εν λόγω υβριδικού σταθμού στο υπολογιστικό λογισμικό TRNSYS (της Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI 53703, USA), με σκοπό να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της λειτουργίας του. Οι βασικοί στόχοι της παρούσας εργασίας είναι:

1. ο προσδιορισμός βασικών παραμέτρων λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία των ρευστών, αλλά κυρίως η παραγόμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια και οι αντίστοιχοι συντελεστές απόδοσης, για οποιαδήποτε χρονική περίοδο, λαμβάνοντας υπόψη τα κλιματολογικά δεδομένα της συγκεκριμένης περιοχής και το δεδομένο ηλιακό δυναμικό.
2. η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα του πάρκου, προκειμένου να επαληθευτεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση της ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Εξετάζεται τόσο η εξέλιξη της χρήσης των διαφόρων μορφών ενέργειας από τους τελικούς χρήστες, όσο και η διείσδυση των διαφόρων πηγών ενέργειας, κυρίως των Α.Π.Ε. στο ενεργειακό ισοζύγιο, ενώ ταυτόχρονα γίνεται μια προσπάθεια πρόβλεψης μέχρι το 2040.

Στο 2^ο κεφάλαιο έπεται από μια εισαγωγή γενικά περί της ηλιακής ακτινοβολίας και μια ιστορική αναδρομή, για τους τρόπους με τους οποίους ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε την ηλιακή ενέργεια προς όφελός του, αναλύονται οι σημαντικότεροι τύποι ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως σε ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις και τα πεδία στα οποία εφαρμόζονται.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής περιγραφή των βασικών συστημάτων και των τεχνολογιών που απαντώνται σε έναν τυπικό ηλιοθερμικό σταθμό παραγωγής θερμικής, αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας, κοίλων παραβολικών συλλεκτών. Επίσης γίνεται μια αναφορά στις τάσεις που ακολουθούνται στην κατασκευή σύγχρονων ηλιοθερμικών σταθμών, στους οποίους ένα ηλιοθερμικό πεδίο παραβολικών ηλιακών κατόπτρων συνδυάζεται με ένα συμβατικό σταθμό συνδυασμένου κύκλου ισχύος.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά συστήματα από τα οποία αποτελείται ο ηλιοθερμικός σταθμός παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, που κατασκευάστηκε στα πλαίσια του προαναφερθέντος πιλοτικού έργου «ENERGEIA» και ο τρόπος με τον οποίο αυτά συνεργάζονται μεταξύ τους.

Στο 5^ο κεφάλαιο, αρχικά γίνεται μια εκτενής περιγραφή του σχεδιασμού του μοντέλου του σταθμού στο υπολογιστικό λογισμικό προσομοίωσης TRNSYS. Αναφέρονται αναλυτικά οι τρόποι σύνδεσης των υποσυστημάτων και οι βασικές παράμετροι λειτουργίας τους. Τέλος, πραγματοποιείται η προσομοίωση λειτουργίας τμήματος του υβριδικού σταθμού, δίνοντας προτεραιότητα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο 6^ο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού στο υπολογιστικό μοντέλο TRNSYS, που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και επιπλέον συγκρίνονται με πραγματικά δεδομένα του σταθμού.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από την παρούσα εργασία, καθώς και γίνεται αναφορά σε προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο που εξετάστηκε.

Ευχαριστίες

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Παντελή Ν. Μπότσαρη, Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης και Αναπληρωτή Πρύτανη Έρευνας και Καινοτομίας του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης το Εργαστήριο Μηχανολογικού Σχεδιασμού του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης («Medilab»), για τη παροχή όλου του απαραίτητου εξοπλισμού και των εργαλείων, που χωρίς αυτά δε θα ήταν δυνατή η διεκπεραίωση της εργασίας. Τέλος, τους δικούς μου ανθρώπους για την αστείρευτη υπομονή και συμπαράσταση.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Ευχαριστίες	iii
Πίνακας Εικόνων	viii
Πίνακας Σχημάτων	viii
Κατάλογος Πινάκων	x
Περίληψη	xi
Abstract	xii

Κεφάλαιο 1 - Επισκόπηση της Ενέργειας

1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Παγκόσμια Ενεργειακή Ζήτηση και οικονομικές προοπτικές	1
1.2.1 Παγκόσμια αγορά ενέργειας ανά τύπο καυσίμου	5
1.2.1.1 Υγρά Καύσιμα	7
1.2.1.2 Φυσικό αέριο	8
1.2.1.3 Άνθρακας	9
1.2.1.4 Ηλεκτρική ενέργεια	10
1.2.1.5 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)	11
1.2.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα	13
1.2.2.1 Κτιριακός και Εμπορικός Τομέας	13
1.2.2.2 Βιομηχανικός Τομέας	14
1.2.2.3 Τομέας Μεταφορών	15
1.2.3 Παγκόσμιες Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα	16
1.3 Σύνοψη	17
Αναφορές	17

Κεφάλαιο 2 - Εκμετάλλευση Ηλιακής Ενέργειας

2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Ηλιακή Ακτινοβολία	19
2.2.1 Γενικά	19
2.2.2 Μέτρηση Ηλιακής Ακτινοβολίας	20
2.2.3 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας	21
2.2.4 Ηλιακή ακτινοβολία στον Ελλαδικό χώρο	21
2.2.5 Ιστορική αναδρομή εκμετάλλευσης ηλιακής ακτινοβολίας	22
2.3 Ηλιακοί Συλλέκτες	24
2.3.1 Γενικά	24

2.3.2 Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες	25
2.3.2.1 Γενικά	25
2.3.2.2 Ανάλυση Επίπεδου Ηλιακού Συλλέκτη	25
2.3.2.3 Συλλέκτης Κενού	27
2.3.3 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες – Concentrated Solar Power (CSP)	29
2.3.3.1 Γενικά	29
2.3.3.2 Συστήματα με κοίλους Παραβολικούς Συλλέκτες	30
2.3.3.3 Συστήματα Ηλιακού Πύργου Ισχύος	31
2.3.3.4 Συστήματα Δίσκου Μηχανής	32
2.3.3.5 Συστήματα συλλεκτών τύπου Fresnel	34
2.3.3.6 Σύγκριση τεχνολογιών ηλιακών συλλεκτών	35
2.4 Σύνοψη	35
Αναφορές	36

Κεφάλαιο 3 - Ανασκόπηση των κύριων τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών παραβολικών κατόπτρων

3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Ηλιοθερμικό πεδίο	39
3.2.1 Κοίλος παραβολικός συλλέκτης	39
3.2.1.1 Γεωμετρία συλλέκτη	40
3.2.1.2 Ανακλαστική επιφάνεια	42
3.2.1.3 Δέκτης	44
3.2.1.4 Σύστημα στήριξης	46
3.2.1.5 Θερμικό ρευστό (Heat Transfer Fluid - HTF)	48
3.2.2 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (Thermal Energy Storage -TES)	49
3.2.2.1 Γενικά	49
3.2.2.2 Αποθήκευση με τη χρήση τηγμένων αλάτων	50
3.2.2.3 Άμεση αποθήκευση ατμού	51
3.2.2.4 Έμμεση αποθήκευση με σκυρόδεμα	52
3.2.2.5 Έμμεση αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials-PCMs)	53
3.2.3 Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής Ισχύος	53
3.2.3.1 Εισαγωγή	53
3.2.3.2 Οργανικός Κύκλος Rankine	54
3.2.3.4 Ταξινόμηση μηχανών ORC	58
3.3 Σύγχρονες Τάσεις στους Ηλιοθερμικούς Σταθμούς	61
3.4 Σύνοψη	64
Αναφορές	64

Κεφάλαιο 4 - Μελέτη Περίπτωσης

4.1 Πιλοτικό έργο «ENERGEIA»	67
4.1.1 Εισαγωγή.....	67
4.1.2 Ηλιοθερμικό πεδίο του έργου «ENERGEIA»	69
4.1.2.1 Κοίλος παραβολικός Συλλέκτης	69
4.1.2.2 Μέσο μεταφορά θερμικής ενέργειας (Heat Transfer Fluid - HTF)	71
4.1.2.3 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμότητας – (Thermal Energy Storage - TES).....	72
4.1.2.4 Μονάδα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος.....	73
4.1.2.5 Λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού.....	76
4.2 Σύνοψη.....	77
Αναφορές	79

Κεφάλαιο 5 - Προσομοίωση Λειτουργίας Ηλιοθερμικού Πεδίου

5.1 Εισαγωγή	80
5.2 Εφαρμογή Προσομοίωσης TRNSYS	80
5.3 Ανάλυση Μοντέλου Προσομοίωσης στο TRNSYS	82
5.3.1 Ηλιακά/Κλιματολογικά Δεδομένα («Weather»).....	83
5.3.2 Ηλιοθερμικό Πεδίο («Solar Thermal Field»)	86
5.3.3 Αντλιοστάσιο («Pumping Module»)	88
5.3.4 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμότητας - TES.....	90
5.3.5 Γεννήτρια Παραγωγής ηλεκτρικής Ενέργειας («ORC Generator»).....	92
5.3.6 Σύστημα Τηλεθέρμανσης («District Heating»)	94
5.4 Εκτέλεση προσομοίωσης	97
5.5 Σύνοψη	98
Αναφορές	98

Κεφάλαιο 6 - Αποτελέσματα Προσομοίωσης του Μοντέλου στο TRNSYS

6.1 Εισαγωγή	99
6.2 Ετήσια Αποτελέσματα	99
6.3 Μηνιαία αποτελέσματα	105
6.4 Ημερήσια αποτελέσματα.....	112
6.5 Επαλήθευση Προσομοίωσης	113
6.6 Σύνοψη	115

Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	116
---	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Ιδιότητες Θερμικού Ελαίου (HTF)	120
--	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Αρχείο «output.lst»	121
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Δείγμα δεδομένων εξόδου «TRNSYS».....	140
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – Δείγμα πραγματικών δεδομένων	141

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1: Άποψη Παραβολικού Συλλέκτη	31
Εικόνα 2.2: Εγκατάσταση Ηλιακού Πύργου	32
Εικόνα 2.3: Παραβολικοί δίσκοι μηχανής Stirling	33
Εικόνα 2.4: Άποψη ηλιακού πεδίου με συλλέκτες Fresnel	34
Εικόνα 3.1: Μembrάνη NREL	43
Εικόνα 3.2: Μέρη δέκτη	45
Εικόνα 3.3: Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας δύο δεξαμενών του Andasol.....	51
Εικόνα 3.4: Δεξαμενές αποθήκευσης πεπιεσμένου ατμού ηλιοθερμικού σταθμού	52
Εικόνα 3.5: Πειραματική διάταξη από σκυρόδεμα με δυνατότητα αποθήκευσης 400 kWh θερμικής ενέργειας ...	52
Εικόνα 3.6: Γεννήτρια Tri-O-Gen.....	59
Εικόνα 3.7: Σπειροειδής στρόβιλος.....	61
Εικόνα 4.1: Αεροφωτογραφία του πιλοτικού έργου «ENERGEIA»	68
Εικόνα 4.2: Τμήμα Βάσης Εγκατεστημένου Κοίλου Παραβολικού Συλλέκτη	70
Εικόνα 4.3: Άποψη σειράς εγκατεστημένων παραβολικών συλλεκτών	71
Εικόνα 4.4: Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES).....	73
Εικόνα 4.5: Εγκατεστημένη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τεχνολογίας ORC	75
Εικόνα 5.1: Περιβάλλον εργασίας του TRNSYS Simulation Studio	81
Εικόνα 5.2: Επιλεγμένο αρχείο συλλογής ηλιακών/κλιματολογικών δεδομένων	83
Εικόνα 5.3: Διασύνδεση παραμέτρων «Weather»	85
Εικόνα 5.4: Παράμετροι «Collector Array Shading».....	85
Εικόνα 5.5: Εξισώσεις στο component «solar equations»	86
Εικόνα 5.6: Παράμετροι Ηλιακών Συλλεκτών («Collectors»)	86
Εικόνα 5.7: Παράμετροι Σωληνώσεων («Pipe»)	87
Εικόνα 5.8: Διασύνδεση «Solar Equations» με «Collectors» και «Pipes»	88
Εικόνα 5.9: Παράμετροι λειτουργίας του κυκλοφορητή του θερμικού ελαίου.....	89
Εικόνα 5.10 Τεχνικά χαρακτηριστικά TES	91
Εικόνα 5.11: Εξισώσεις Προσομοίωσης Γεννήτριας Οργανικού Κύκλου Rankine	93
Εικόνα 5.12: Παράμετροι λειτουργίας του κυκλοφορητή της γεννήτριας ORC.....	93
Εικόνα 5.13: Παράμετροι λειτουργίας της υποβρύχιας γεωθερμικής αντλίας.....	94
Εικόνα 5.14: Παράμετροι του υπόγειου σωλήνα «HDPE – Φ75»	94
Εικόνα 5.15: Παράμετροι του «SCHOOL_PUMP».....	95
Εικόνα 5.16: Παράμετροι «PEX-AL-PEX - Φ32»	95
Εικόνα 5.17: Παράμετροι «Load Generator»	96
Εικόνα 5.18: Συνθήκες ελέγχου προσομοίωσης	97
Εικόνα 5.19: Ενδεικτικό διάγραμμα παραμέτρων κατά την προσομοίωση.....	97

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας ανά ομάδα κρατών, 2012–2040	3
Σχήμα 1.2: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, 1990-2040	3
Σχήμα 1.3: Κατανάλωση ενέργειας εντός και εκτός Ο.Ο.Σ.Α., 1990-2040	4
Σχήμα 1.4: Α.Ε.Π. κρατών εντός και εκτός Ο.Ο.Σ.Α., 1990-2040	4

Σχήμα 1.5: Κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή, 1990-2040	5
Σχήμα 1.6: Συνολική Κατανάλωση Ενέργειας ανά ενεργειακή πηγή, 1990 – 2040	6
Σχήμα 1.7: Παραγωγή Πετρελαίου και άλλων Υγρών Καυσίμων ανά περιοχή, 2000 - 2040.....	8
Σχήμα 1.8: Αύξηση της παραγωγής φυσικού αερίου ανά περιοχή, 2012 - 2040	9
Σχήμα 1.9: Κατανάλωση άνθρακα σε Κίνα, Ινδία και Η.Π.Α., 1990-2040	10
Σχήμα 1.10: Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή, 2012 - 2040.....	11
Σχήμα 1.11: Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., 2012-2040	11
Σχήμα 1.12: Πυρηνικό δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά περιοχή, 2012-2040	12
Σχήμα 1.13: Κατανάλωση ενέργειας στον τομέα μεταφορών ανάλογα με την πηγή (2012-2040)	15
Σχήμα 1.14: Εκπομπές CO ₂ ανάλογα με την πηγή (1990-2040)	16
Σχήμα 2.1: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που έχουν σαν βασική προέλευσή τους τον ήλιο.....	19
Σχήμα 2.2: Απεικόνιση της διανομής της ηλιακής ακτινοβολίας σε επικλινή επιφάνεια	21
Σχήμα 2.3: Ετήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδη επιφάνεια στον Ελλαδικό χώρο	22
Σχήμα 2.4: Τομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη	26
Σχήμα 2.5: Τυπική διάταξη συλλέκτη τύπου Heat Pipe.....	28
Σχήμα 2.6: Τυπική διάταξη συλλέκτη τύπου U-tube.....	28
Σχήμα 3.1: Εξέλιξη εγκατεστημένης ηλιοθερμικής ισχύος στην παγκόσμια αγορά ενέργεια	37
Σχήμα 3.2: Σημαντικότερες χώρες με ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής	38
Σχήμα 3.3: Παράμετροι γεωμετρίας παραβολικού κατόπτρου	40
Σχήμα 3.4: Η εστιακή απόσταση ως παράμετρος σχηματισμού της παραβολής	41
Σχήμα 3.5: Η σχέση της γωνίας rim με το εστιακό μήκος για σταθερό άνοιγμα παραβολής	41
Σχήμα 3.6: Πολυστρωματική δομή κατόπτρου	44
Σχήμα 3.7: Πολυστρωματική δομή σωλήνα απορροφητή	45
Σχήμα 3.8: Σωλήνας από βοριοπυριτικό γυαλί χωρίς/με αντι-ανακλαστική επίστρωση	46
Σχήμα 3.9: Παρακολούθηση της θέσης του ήλιου (άξονας εγκατάστασης B-N)	47
Σχήμα 3.10: Κατάταξη βασικών κύκλων βάσει θερμοκρασίας λειτουργίας	54
Σχήμα 3.11: Συμβατικός Κύκλος Rankine σε σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	55
Σχήμα 3.12: Διάγραμμα T - s για ένα απλοποιημένο κύκλο ατμού	56
Σχήμα 3.13: Διάγραμμα T - s για το τολουόλιο	57
Σχήμα 3.14: Σύγκριση θερμοκρασιακού προφίλ.....	58
Σχήμα 3.15: ORC φυγοκεντρικού τύπου αντίστροφης ροής	60
Σχήμα 3.16: Στρόβιλοι Μονού και Διπλού Κοχλίας και τύπου Lysholm	60
Σχήμα 3.17: Πιθανοί κύκλοι (ατμού) με χρήση στροβίλων κοχλίας	61
Σχήμα 3.18: Τυπικό διάγραμμα ενός σταθμού τεχνολογίας ISCC ^[30]	62
Σχήμα 4.1: Κάτοψη Ηλιοθερμικού Πεδίου	69
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Ροής Λειτουργίας Εγκατεστημένης Μονάδας Ηλεκτρικής Ισχύος	74
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Ροής Παραγωγής/Κατανάλωσης Ηλεκτρικής Ενέργειας	76
Σχήμα 4.4: Μονογραμμικό λειτουργικό διάγραμμα πιλοτικού έργου	78
Σχήμα 5.1: Αποτύπωση προσομοίωσης υβριδικού σταθμού στο περιβάλλον του TRNSYS	84
Σχήμα 5.2: Ενδεικτική διασύνδεση βασικών components στο ηλιοθερμικό πεδίο	89
Σχήμα 5.3: Συνδεσμολογία «CSP_PUMP» με τις σωληνώσεις και τον πίνακα ελέγχου	89
Σχήμα 5.4: Διασύνδεση TES με αρχείο καιρού.....	90
Σχήμα 5.5: Διασύνδεση TES με Ηλιοθερμικό Πεδίο	90
Σχήμα 5.6: Διασύνδεση TES με Γεννήτρια ORC.....	92
Σχήμα 5.7: Διασύνδεση TES με Δίκτυο Τηλεθέρμανσης	92
Σχήμα 5.8: Διασύνδεση κυκλοφορητή «ORC_PUMP»	93
Σχήμα 5.9: Διασύνδεση «PEX-AL-PEX -Φ32» και «Assist» με το «SCHOOL»	96
Σχήμα 6.1: Ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ταχύτητας ανέμου	100
Σχήμα 6.2: Ετήσια διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας	100
Σχήμα 6.3: Ετήσια διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμικής ενέργειας	101
Σχήμα 6.4: Ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας ρευστών (μέσες ωριαίες τιμές)	101

Σχήμα 6.5: Ετήσια διακύμανση άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος	102
Σχήμα 6.6: Μηνιαίο ισοζύγιο ενέργειας.....	102
Σχήμα 6.7: Ετήσιο ισοζύγιο ενέργειας	103
Σχήμα 6.8: Διάγραμμα ροής ενέργειας (Sankey)	104
Σχήμα 6.9α: Ημερήσια διακύμανση μορφών ενέργειας	106
Σχήμα 6.9β: Ημερήσια διακύμανση μορφών ενέργειας	107
Σχήμα 6.9γ: Ημερήσια διακύμανση μορφών ενέργειας.	108
Σχήμα 6.10α: Διακύμανση ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία	109
Σχήμα 6.10β: Διακύμανση ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία.....	110
Σχήμα 6.10γ: Διακύμανση ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία	111
Σχήμα 6.11: Ημερήσια διακύμανση μορφών ενέργειας	112
Σχήμα 6.12: Ημερήσια διακύμανση βασικών παραμέτρων αντλιοστασίου.....	112
Σχήμα 6.13: Ημερήσια παραγωγή "ENERGEIA"	114
Σχήμα 6.14: Ημερήσια παραγωγή "TRNSYS"	114

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή	2
Πίνακας 1.2: Εγκατεστημένη ισχύς σε Α.Π.Ε. 2015	12
Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά επίπεδων και Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συλλεκτών	29
Πίνακας 2.2: Βασικές τεχνολογίες συλλεκτών συγκεντρωτικών συστημάτων.....	35
Πίνακας 3.1: Ιδιότητες θερμικών ρευστών.....	48
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα ανάκτησης απορριπτόμενης ενέργειας	58
Πίνακας 4.1: Συνθήκες Αναφοράς.....	69
Πίνακας 4.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κοίλων Παραβολικών Συλλεκτών.....	71
Πίνακας 4.3 Φυσικές, Χημικές και Θερμικές Ιδιότητες του HTF	72
Πίνακας 4.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Δοχείου Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (TES)	73
Πίνακας 4.5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εγκατεστημένης Μονάδας Ηλεκτρικής Ισχύος ORC	74
Πίνακας 5-1: Τύποι «Componets» Προσομοίωσης	82
Πίνακας 6-1: Ημερήσια παραγωγή	113
Πίνακας 6-2: Σύγκριση πραγματικών δεδομένων με αποτελέσματα του TRNSYS	114

Περίληψη

Κανείς δεν μπορεί να αρνηθεί το γεγονός ότι η εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων έχει βοηθήσει στην εκβιομηχάνιση και επομένως στην εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Ωστόσο, με τη συνειδητοποίηση της υποβάθμισης του περιβάλλοντος και της κλιματικής αλλαγής, ανακύπτουν κάποιοι περιορισμοί σχετικοί με το μέλλον της ευημερίας του ανθρώπου. Ως εκ τούτου, πρέπει να ανευρεθούν νέοι πόροι για την επίτευξη αυτής της περιβαλλοντικής ισορροπίας. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αποτελέσει τον εναλλακτικό αυτό πόρο που θα οδηγήσει στην διαφοροποίηση των ενεργειακών επιλογών των χωρών, από το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Για το λόγο αυτό, η χρήση συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέρος των εναλλακτικών αυτών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με σκοπό την παραγωγή θερμικής και κατ' επέκταση ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην κατάστρωση του μοντέλου του υφιστάμενου υβριδικού σταθμού παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, που περιλαμβάνει κοίλους παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες και γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ORC, με τη βοήθεια του υπολογιστικού λογισμικού TRNSYS (της Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI 53703, USA), με σκοπό να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της λειτουργίας του. Το εν λόγω έργο κατασκευάστηκε στο χωριό Ζηλωτή του Νομού Ξάνθης (Ελλάδα), στα πλαίσια του έργου «ENERGEIA». Οι βασικοί στόχοι ήταν ο προσδιορισμός βασικών παραμέτρων λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία των ρευστών, αλλά κυρίως η παραγόμενη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια, για οποιαδήποτε χρονική περίοδο και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα του πάρκου, προκειμένου να επαληθευτεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

Λέξεις Κλειδιά: Κοίλοι Παραβολικοί Συλλέκτες, γεννήτρια ORC, Προσομοίωση, TRNSYS

Abstract

No one can deny the fact that the exploitation of fossil fuels had advanced civilization and industrialization. However, given the awareness of the degradation of the environment and the climate change, limitations in the future welfare for mankind, arise. Therefore, in order to accomplish an environmental balance, new resources must be introduced. Solar energy can be this alternative resource that will lead in diversifying the energy options of the countries, from oil and natural gas. For this reason, the use of concentrating solar collectors can be used as part of these renewable energy sources, for the production of thermal and therefore electrical energy.

The present work focused on building the simulation model of the existing thermal and electric power plant, which utilizes a solar thermal field with parabolic trough solar collectors and an ORC generator, with the help of TRNSYS software (Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI 53703, USA). This project has been constructed in Ziloti village, (Prefecture of Xanthi - Greece), within the project "ENERGEIA". The main objectives were to determine basic operating parameters such as the temperature of the fluids, but mainly the generated thermal and electrical energy, for any time period and the comparison of the simulation results with the actual data of the park in order to confirm the reliability of the model.

Keywords: Parabolic Trough Collectors (PTCs), Rankine (ORC), TRNSYS, Simulation

Κεφάλαιο 1

Επισκόπηση Ενέργειας

Περιεχόμενα

1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Παγκόσμια Ενεργειακή Ζήτηση και οικονομικές προοπτικές	1
1.2.1 Παγκόσμια αγορά ενέργειας ανά τύπο καυσίμου.....	5
1.2.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα	13
1.2.3 Παγκόσμιες Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα.....	16
1.3 Σύνοψη.....	17
1.4 Αναφορές	17

1.1 Εισαγωγή

Ο τομέας της Ενέργειας είναι ίσως ο περισσότερο «παγκοσμιοποιημένος» τομέας των Οικονομιών, με άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις σε όλους τους υπόλοιπους και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στη χάραξη πολιτικών για ενεργοβόρους τομείς όπως οι μεταφορές, οι οικοδομές και η βιομηχανία, στην επίτευξη συγκεκριμένων ρυθμών ανάπτυξης, στην έρευνα και τεχνολογία, αλλά και γενικότερα στην οικονομία.

Η εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος κρίνεται υψίστης σημασίας τόσο σε παγκόσμιο, όσο και σε εθνικό επίπεδο. Οι παράγοντες, τόσο εξωγενείς όσο και σε σχέση με τις πολιτικές και οικονομικές εξελίξεις στο εσωτερικό μιας χώρας, οφείλουν να λαμβάνονται υπόψη, καθώς αυτοί επηρεάζουν τη διαμόρφωση του ενεργειακού μίγματος σε μακροχρόνια βάση.

Σε εθνικό επίπεδο, ο ενεργειακός σχεδιασμός αποσκοπεί στη διερεύνηση του βέλτιστου ενεργειακού μίγματος σε μακροχρόνια βάση, ενώ αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην πορεία υλοποίησης της αναπτυξιακής πολιτικής της εκάστοτε χώρας, καθώς η δρομολόγηση και η επιτυχής υλοποίησή του θα επηρεάσει το σύνολο της οικονομικής δραστηριότητας, αλλά και το πλαίσιο διαμόρφωσης τόσο γεωπολιτικών συνεργασιών, όσο και επενδυτικών δραστηριοτήτων.^[1]

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια επισκόπηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς και παρουσιάζονται κάποιες εκτιμήσεις και τάσεις που αφορούν στο μελλοντικό ενεργειακό ισοζύγιο. Οι εκτιμήσεις επικεντρώνονται αποκλειστικά στις μορφές ενέργειας που είναι διαθέσιμες στην παγκόσμια αγορά ενέργειας.

1.2 Παγκόσμια Ενεργειακή Ζήτηση και οικονομικές προοπτικές

Η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση, για τα 28 έτη από το 2012 μέχρι το 2040, προβλέπεται να παρουσιάσει μια αύξηση της τάξης του 48%. Η παγκόσμια κατανάλωση της εμπορεύσιμης ενέργειας αυξάνεται από 160.9 PWh το 2012 σε 180.3 PWh το 2020 and σε 238.8 PWh το 2040(σχήμα 1.1, σχήμα 1.2, πίνακας 1.1). Άνοδος, η οποία οφείλεται κυρίως στις αυξήσεις που παρατηρούνται σε χώρες εκτός του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Ο.Ο.Σ.Α.)^[2] και ιδιαίτερα στις Ασιατικές χώρες.

Οι Ασιατικές χώρες, μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., συμπεριλαμβανομένης της Κίνας και της Ινδίας, αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το ήμισυ της συνολικής παγκόσμιας αύξησης στην κατανάλωση ενέργειας, κατά την περίοδο 2012-2040. Μέχρι το 2040, η χρήση ενέργειας από τις Ασιατικές χώρες, μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., υπερβαίνει εκείνη του συνόλου των μελών του Ο.Ο.Σ.Α. κατά 11.7 PWh (σχήμα 1.1).

Στο σχήμα 1.2 φαίνεται πως η συνολική παγκόσμια κατανάλωση εμπορεύσιμης ενέργειας αυξάνεται από 161 PWh το 2012, σε 184 PWh το 2020 και σε 239 PWh το 2040, μια αύξηση της τάξης του 48%, όπως περιγράφονται πιο αναλυτικά στον πίνακα 1.1. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης οφείλεται στα κράτη, μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., στα οποία οι σχετικά ισχυροί και μακροπρόθεσμοι ρυθμοί οικονομικής ανάπτυξης, προκαλούν αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση. Η κατανάλωση ενέργειας για τα μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. αυξάνεται κατά 71% μεταξύ του 2012 και του 2040, ενώ αντίστοιχα, για τα κράτη που ανήκουν στον Ο.Ο.Σ.Α. είναι μόλις 18%. Αρχικά, το 2007, η χρήση ενέργειας στις περιοχές εκτός του Ο.Ο.Σ.Α. υπερβαίνει αυτή των περιοχών του Ο.Ο.Σ.Α. και μέχρι το 2012, οι χώρες μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. αντιπροσώπευαν το 57% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Μέχρι το 2040, σχεδόν τα δύο τρίτα της πρωτογενούς ενέργειας του κόσμου θα καταναλώνονται στις οικονομίες κρατών εκτός του Ο.Ο.Σ.Α. (σχήμα 1.3).

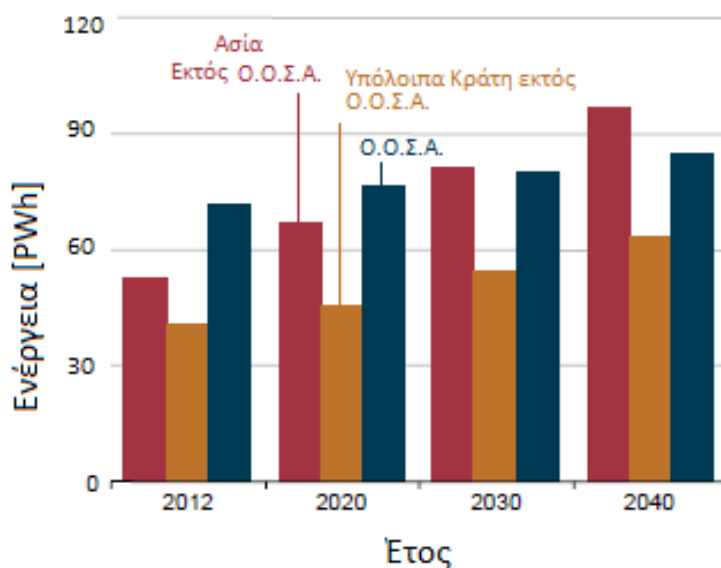
Πίνακας 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή (PWh) ^[1]

Περιοχή	2012	2020	2025	2030	2035	2040	Μέση αύξηση %
Εντός Ο.Ο.Σ.Α.	70	74	76	78	80	83	0.6
Αμερική	35	37	38	38	39	40	0.6
Ευρώπη	24	25	25	26	27	28	0.6
Ασία	11	13	13	13	14	14	0.8
Εκτός Ο.Ο.Σ.Α.	91	110	121	132	144	156	1.9
Ευρώπη/Ευρασία	15	15	16	16	17	17	0.5
Ασία	52	65	72	79	86	94	2.2
Μέση Ανατολή	9	12	13	15	17	18	2.4
Αφρική	6	8	9	10	11	13	2.6
Αμερική	9	10	11	12	13	14	1.5
Παγκόσμιο Σύνολο	161	184	197	210	224	239	1.4

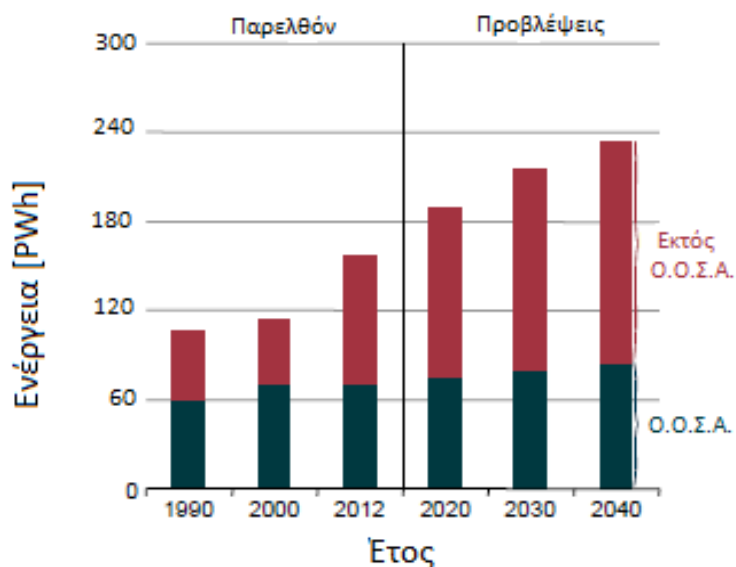
[*] Κράτη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. από την 1η Ιανουαρίου του 2016: Αυστρία, Αυστραλία, Βέλγιο, Καναδάς, Χιλή, Τσεχική Δημοκρατία, Δανία, Εσθονία, Φινλανδία, Γαλλία, Γερμανία, Ελλάδα, Ουγγαρία, Ισλανδία, Ιρλανδία, Ισραήλ, Ιταλία, Ιαπωνία, Λουξεμβούργο, Μεξικό, Ολλανδία, Νέα Ζηλανδία, Νορβηγία, Πολωνία, Πορτογαλία, Σλοβακία, Σλοβενία, Νότια Κορέα, Ισπανία, Σουηδία, Ελβετία, Τουρκία, Ηνωμένο Βασίλειο και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Για στατιστικούς σκοπούς, το Ισραήλ περιλαμβάνεται στις ευρωπαϊκές χώρες του Ο.Ο.Σ.Α.

Η οικονομική ανάπτυξη - όπως προσδιορίζεται σύμφωνα με το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (Α.Ε.Π.), δηλαδή η αξία αγοράς όλων των τελικών αγαθών και υπηρεσιών που παράγονται σε μια χώρα στη διάρκεια μιας ορισμένης χρονικής περιόδου ^[2] - είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για την αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Η οικονομική ανάπτυξη, σε συνδυασμό με τις διαρθρωτικές αλλαγές, επηρεάζουν έντονα την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Καθώς οι χώρες αναπτύσσονται βελτιώνοντας το βιοτικό τους επίπεδο, η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς. Για παράδειγμα, σε χώρες που παρουσιάζουν γρήγορους ρυθμούς οικονομικής ανάπτυξης, το ποσοστό του πληθυσμού που απαιτεί καλύτερη στέγαση - γεγονός που απαιτεί περισσότερη ενέργεια τόσο για την κατασκευή όσο και τη συντήρηση αυτών - συχνά αυξάνεται. Η αυξανόμενη ζήτηση για συσκευές και εξοπλισμό

μεταφορών, καθώς και η αυξανόμενη ικανότητα παραγωγής αγαθών και υπηρεσιών, τόσο για τις εγχώριες, όσο και για τις ξένες αγορές, οδήγησαν επίσης σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. ^[2]



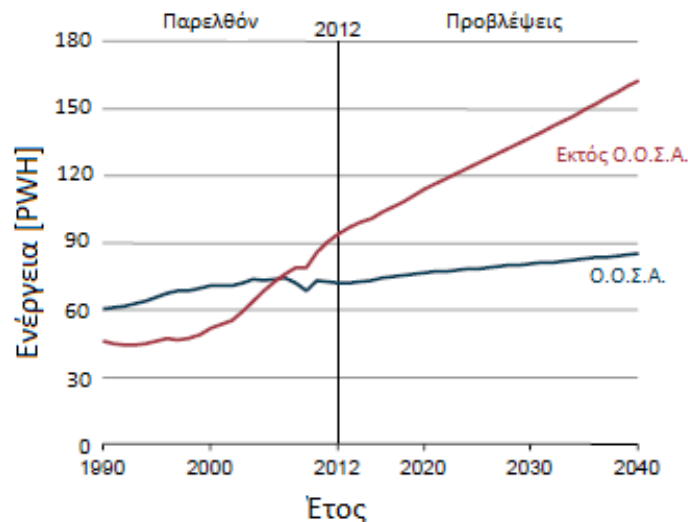
Σχήμα 1.1: Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας ανά ομάδα κρατών, 2012–2040 (PWh) ^[1]



Σχήμα 1.2: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, 1990-2040 (PWh) ^[1]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4, από το 1990 έως το 2012, το πραγματικό Α.Ε.Π. αυξήθηκε κατά 4,9%/έτος, σε χώρες μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., σε σύγκριση με 2,1%/έτος, στις χώρες του Ο.Ο.Σ.Α.. Στο μέλλον, οι διαφορές στο ρυθμού οικονομικής ανάπτυξης μεταξύ μελών του Ο.Ο.Σ.Α. με μέλη εκτός Ο.Ο.Σ.Α., αναμένεται να περιοριστεί, καθώς μετριάζεται η οικονομική ανάπτυξη σε μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. και οι υψηλές ενεργειακής έντασης βιομηχανίες τους αρχίζουν να προσανατολίζονται προς την παροχή κυρίως υπηρεσιών. Από το 2012 έως το 2040 το παγκόσμιο Α.Ε.Π. αυξάνεται κατά 3.3% ανά έτος. Οι ταχύτεροι ρυθμοί ανάπτυξης παρατηρούνται στις αναδυόμενες χώρες, μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., όπου το συνδυασμένο Α.Ε.Π. αυξάνεται κατά 4.2%/έτος. Στις χώρες

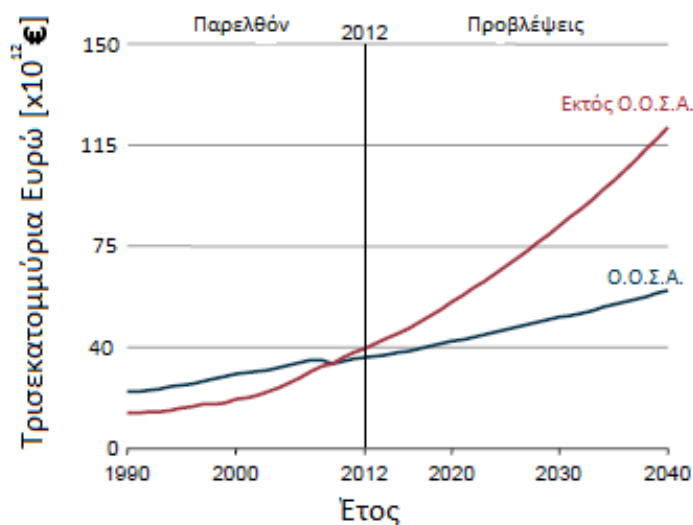
του Ο.Ο.Σ.Α., το Α.Ε.Π. αυξάνεται με πολύ βραδύτερο ρυθμό, 2.0%/έτος, εξαιτίας των πιο ώριμων οικονομιών τους και της αργής ή πτωτικής τάσης της αύξησης του πληθυσμού. Μελλοντικά, οι μεγάλοι προβλεπόμενοι ρυθμοί οικονομικής ανάπτυξης στα κράτη, μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., καθοδηγούν το γρήγορο ρυθμό αύξησης κατανάλωσης ενέργειας.



Σχήμα 1.3: Κατανάλωση ενέργειας εντός και εκτός Ο.Ο.Σ.Α., 1990-2040 (PWh) ^[1]

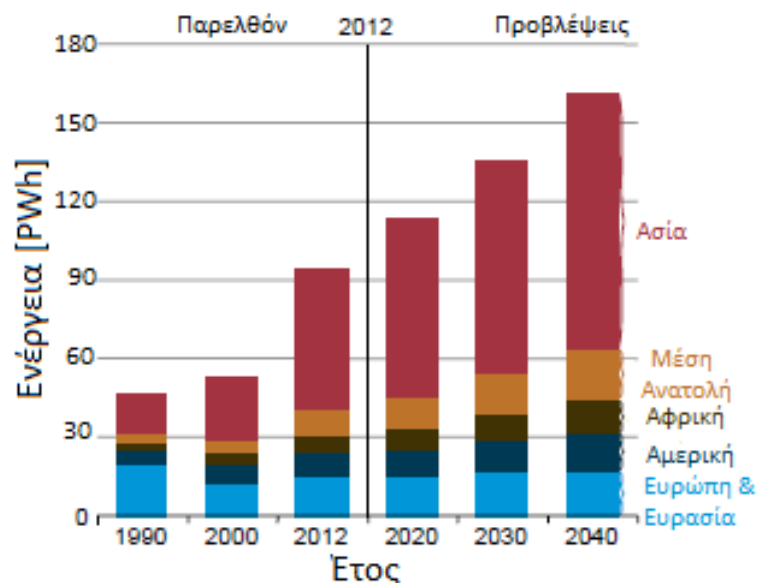
Κατά συνέπεια, η παγκόσμια αύξηση της κατανάλωσης είναι αποτέλεσμα κυρίως των κρατών, μη μελών του Ο.Ο.Σ.Α.. Για πρώτη φορά η κατανάλωση των κρατών εκτός του Ο.Ο.Σ.Α., ξεπέρασε το σύνολο της κατανάλωσης των μελών του Ο.Ο.Σ.Α. το 2007, ενώ το 2040, η συνολική ζήτηση ενέργειας εκτός του Ο.Ο.Σ.Α. αναμένεται να υπερβεί αυτή του Ο.Ο.Σ.Α., συνολικά κατά 89%.

Περισσότερο από το ήμισυ της προβλεπόμενης αύξησης της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας οφείλεται σε μια ομάδα χωρών, της Ασίας, που περιλαμβάνει την Κίνα και την Ινδία και δεν είναι μέλη του Ο.Ο.Σ.Α.. Η ζήτηση ενέργειας σε μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. στην Ασία, από το 2012 έως το 2040, αυξάνεται κατά 83% (ή κατά 42.7 PWh).



Σχήμα 1.4: Α.Ε.Π. κρατών εντός και εκτός Ο.Ο.Σ.Α., 1990-2040 (x10¹²€) ^[1]

Συγκεκριμένα, κατά το μεγαλύτερο μέρος της τελευταίας δεκαετίας, η Κίνα και η Ινδία υπήρξαν μεταξύ των ταχύτερα αναπτυσσόμενων οικονομιών του κόσμου. Παρά το γεγονός ότι, μελλοντικά, αναμένεται να μετριαστούν οι ρυθμοί οικονομικής τους ανάπτυξης, η συμβολή των δύο χωρών, στην αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας παραμένει σημαντική.

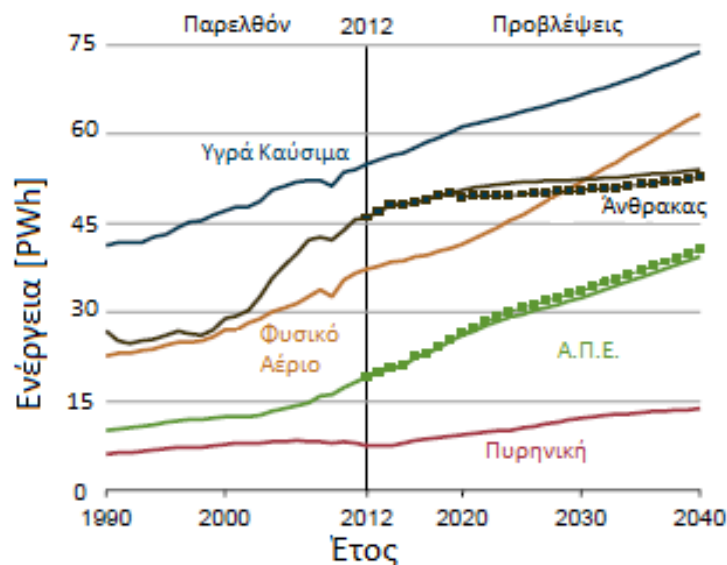


Σχήμα 1.5: Κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή, 1990-2040 (PWh) ^[1]

Εκτός από την αύξηση της ζήτησης ενέργειας σε μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. Ασίας, υπάρχουν κι άλλες περιοχές εκτός Ο.Ο.Σ.Α. που παρουσιάζουν σημαντική αύξηση της ενεργειακής ζήτησης (σχήμα 1.5). Στην περιοχή της Μέσης Ανατολής, ο ταχύς ρυθμός αύξησης του πληθυσμού και η πρόσβαση σε άφθονους εγχώριους πόρους, οδήγησε σε μια συνολική αύξηση κατανάλωσης ενέργειας, της τάξης του 95% (8.8 PWh). Ομοίως, στην Αφρική η κατανάλωση ενέργειας υπερδιπλασιάζεται (συνολικά αύξηση 6.4 PWh) και η χρήση της ενέργειας στην περιοχή της Αμερικανικής ηπείρου, σε κράτη εκτός του Ο.Ο.Σ.Α. αυξάνεται κατά 53% (4.7 PWh). Η μικρότερη συνολική αύξηση της ζήτησης ενέργειας μεταξύ κρατών εκτός Ο.Ο.Σ.Α., είναι 14% και παρατηρείται στην Ευρώπη και την Ευρασία, συμπεριλαμβανομένης της Ρωσίας, καθώς μειώνεται ο πληθυσμός της περιοχής, πετυχαίνοντας ταυτόχρονα σημαντικά οφέλη στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης, που έχουν επιτευχθεί με την αντικατάσταση του ξεπερασμένου πια σοβιετικού εξοπλισμού με πιο αποδοτικό.

1.2.1 Παγκόσμια αγορά ενέργειας ανά τύπο καυσίμου

Η ενεργειακή ανασφάλεια, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις εκπομπές αερίων λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων και η υψηλή τιμή του πετρελαίου, παγκοσμίως και σε μακροπρόθεσμη βάση ενισχύουν τη διεύρυνση της χρήσης των μη ορυκτών πηγών ενέργειας, όπως των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), της πυρηνικής ενέργειας, καθώς επίσης και του φυσικού αερίου, το οποίο είναι ορυκτό καύσιμο με τη χαμηλότερη ένταση σε άνθρακα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6, μέχρι το 2040, προβλέπεται αύξηση στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, προερχομένης από όλες τις πηγές.



Σχήμα 1.6: Συνολική Κατανάλωση Ενέργειας ανά ενεργειακή πηγή, 1990 – 2040 (PWh) [7][8]

[*] Οι καμπύλες με τις κουκίδες δείχνουν τις προβλέψεις με την εφαρμογή του «Clean Power Plan – CPP» των Η.Π.Α. που σκοπός του είναι να μειώσει τη ρύπανση που προέρχεται από τη χρήση άνθρακα στα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, τη μεγαλύτερη πηγή ρύπανσης του έθνους, διατηρώντας παράλληλα την ενεργειακή αξιοπιστία και το προστιτό κόστος της ενέργειας.

Με τις κυβερνητικές πολιτικές και τα κίνητρα για την προώθηση της χρήσης μη ορυκτών πηγών ενέργειας σε πολλές χώρες, οι Α.Π.Ε. παρουσιάζουν την ταχύτερη ανάπτυξη, παγκοσμίως, με μέσο ετήσιο ρυθμό 2,6%/έτος, ενώ η χρήση της πυρηνικής ενέργειας αυξάνεται κατά 2,3%/έτος και η χρήση του φυσικού αερίου αυξάνεται κατά 1,9%/έτος (σχήμα 1.6). Ο άνθρακας είναι η πιο αργά αναπτυσσόμενη μορφή ενέργειας, με μέσο ετήσιο ρυθμό 0,6% /έτος (σε σύγκριση με το μέσο όρο αύξηση της τάξης του 1,4%/έτος στη συνολική ζήτηση ενέργειας παγκοσμίως). Η κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από Α.Π.Ε. αυξάνεται κατά μέσο όρο κατά 2,6%/έτος. Η πυρηνική ενέργεια είναι η δεύτερη ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας στον κόσμο, με αύξηση κατά 2,3%/έτος, κατά την ίδια περίοδο.

Τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν να παρέχουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας ενέργειας. Το 2040, τα υγρά καύσιμα, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας παρέχουν το 78% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Το πετρέλαιο και τα άλλα υγρά καύσιμα παραμένουν η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας, αν και το μερίδιό τους στο συνολικό παγκόσμιο εμπόριο μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας από 33% το 2012 σε 30% το 2040. Σε αυτή την πτώση, συμβάλει και η συνεχώς αυξανόμενη τιμή του πετρελαίου, η οποία οδηγεί πολλούς χρήστες ενέργειας στο να υιοθετήσουν πιο ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες και να στραφούν μακριά από υγρά καύσιμα, όποτε αυτό είναι εφικτό. Σε παγκόσμια βάση, οι τομείς στους οποίους παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση στην κατανάλωση υγρών καυσίμων, είναι αυτοί των μεταφορών και της βιομηχανίας, με μια μικρή αύξηση στον εμπορικό τομέα, ενώ μειώσεις παρατηρούνται στον οικιακό τομέα καθώς και στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι μειώσεις στη χρήση των υγρών καυσίμων στον οικιακό τομέα καθώς και στην παραγωγή ηλεκτρισμού, προκύπτουν από την άνοδο της τιμής του πετρελαίου, παγκοσμίως, η οποία οδηγεί σε μετάβαση από υγρά σε εναλλακτικά καύσιμα, όπου αυτό είναι δυνατό. Αντίθετα, η χρήση υγρών καυσίμων στον τομέα των μεταφορών και των βιομηχανικών τομέα, συνεχίζει να αυξάνει. Η παγκόσμια κατανάλωση υγρών καυσίμων αυξάνεται κατά 1,1%/έτος στον τομέα των μεταφορών και κατά 1,0%/έτος στο βιομηχανικό τομέα, από το 2012 έως το 2040.

Το φυσικό αέριο είναι το ταχύτερα αναπτυσσόμενο ορυκτό καύσιμο. Η παγκόσμια κατανάλωση φυσικού αερίου αυξάνεται κατά 1.9%/έτος, από $340 \times 10^{10} \text{ m}^3$ το 2012, σε $377 \times 10^{10} \text{ m}^3$ το 2020 και σε $575 \times 10^{10} \text{ m}^3$ το 2040. Οι άφθονες πηγές φυσικού αερίου και η εύρωστη παραγωγή, συμβάλλουν στην ισχυρή ανταγωνιστική θέση του, σε σχέση με τα άλλα ορυκτά καύσιμα.

Στο μέλλον, νέες τεχνικές εξόρυξης φυσικού αερίου, όπως η οριζόντια διάτρηση και η υδραυλική ρωγμάτωση, οι οποίες συνέβαλαν στην ταχεία αύξηση της παραγωγής φυσικού αερίου στις Η.Π.Α., θα εφαρμοστούν και σε άλλα μέρη του κόσμου, συμβάλλοντας στην αύξηση της παγκόσμια παραγωγής σε φυσικό αέριο. Από το 2012-2040, η παγκόσμια ζήτηση φυσικού αερίου αυξάνεται σε όλους τους τομείς τελικής χρήσης, με τη μεγαλύτερη να παρατηρείται στον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και το βιομηχανικό τομέα, που από κοινού αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 75% της συνολικής αύξησης στη παγκόσμια κατανάλωση φυσικού αερίου.

1.2.1.1 Υγρά Καύσιμα

Η παγκόσμια κατανάλωση του πετρελαίου και άλλων υγρών καυσίμων αυξάνεται από $14.31 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ το 2012 σε $15.90 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ το 2020 και σε $19.24 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ το 2040. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης αυτής οφείλεται στους τομείς των μεταφορών και της βιομηχανίας.

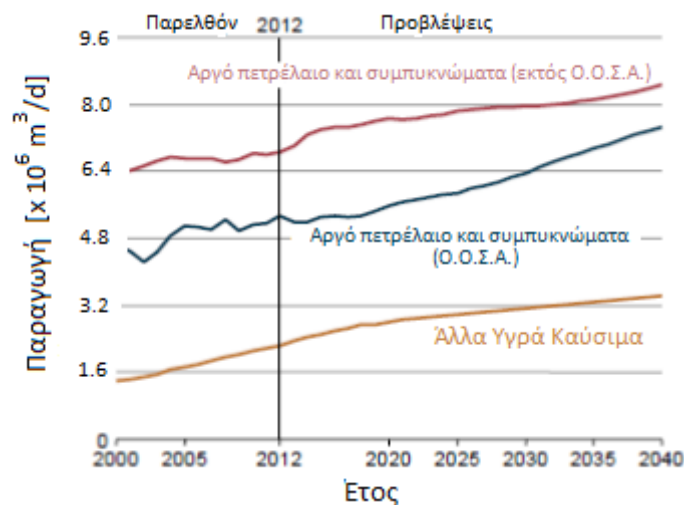
Ιδιαίτερα, στον τομέα των μεταφορών, τα υγρά καύσιμα συνεχίζουν να παρέχουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται. Παρόλο που στις παγκόσμιες μεταφορές, αναμένεται πρόοδος στις τεχνολογίες που αφορούν στη χρήση μη ορυκτών καυσίμων, ωστόσο δεν είναι αρκετή για να αντισταθμίσει την αυξανόμενη ζήτηση για τις μεταφορικές υπηρεσίες. Η κατανάλωση υγρών καυσίμων για τις ανάγκες των μεταφορών, αυξάνεται 1.1%/έτος, κατά μέσο όρο, για τα έτη 2012 έως 2040 και ο τομέας των μεταφορών αντιπροσωπεύει το 62% της συνολικής αύξησης στην χρήση υγρών καυσίμων. Το μεγαλύτερο μέρος της υπόλοιπης αύξησης της κατανάλωσης υγρών καυσίμων, αποδίδεται στο βιομηχανικό τομέα, όπου στη χημική βιομηχανία συνεχίζουν να καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες πετρελαίου. Αντιθέτως, η χρήση των υγρών καυσίμων, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνεται.

Για να ικανοποιηθεί η αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης, σε υγρά καύσιμα, η παραγωγή τους αυξάνεται κατά $4.85 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ από το 2012 μέχρι το 2040, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής του αργού πετρελαίου, καθώς και υγρών που προέρχονται από άλλα καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο (Natural Gas Plant Liquids - NGPLs), τα βιοκαύσιμα, την κηροζίνη, τον άνθρακα (Coal to Liquids – CTLs) και διάφορα αέρια (Gas to Liquids – GTLs).

Σύμφωνα με τις τάσεις που επικρατούν τα τελευταία 15 έτη, οι χώρες του Ο.Ο.Σ.Α., προβλέπεται ότι θα επενδύσουν αυξητικά ώστε να διατηρήσουν το 39-43% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής υγρών καυσίμων, μέχρι το 2040. Όσον αφορά στην παραγωγή του αργού πετρελαίου και των συμπυκνωμάτων (lease condensate), οι παραγωγοί του Ο.Ο.Σ.Α. συμβάλουν κατά $2.10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ στη συνολική αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής υγρών, ενώ οι χώρες εκτός Ο.Ο.Σ.Α. κατά $1.62 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ (σχήμα 1.7).

Για τη δεδομένη περίοδο, οι πηγές από “άλλα” υγρά καύσιμα, για τα κράτη τόσο εντός, όσο και εκτός Ο.Ο.Σ.Α. αυξάνονται κατά μέσο όρο κατά 1.5%/έτος, και επί του παρόντος κατέχουν ένα σχετικά μικρό μερίδιο στην συνολική παγκόσμια ποσότητα πετρελαίου και άλλων υγρών καυσίμων. Από το 16% της συνολικής παραγωγής υγρών καυσίμων, που ήταν το 2012, η παραγωγή άλλων υγρών καυσίμων αναμένεται να αυξηθεί με βραδείς ρυθμούς μέχρι το 18%, το 2040.

Τα υγρά καύσιμα από φυσικό αέριο (NGPLs) είναι η μεγαλύτερη συνιστώσα των “άλλων” υγρών καυσίμων, κατέχοντας ένα μερίδιο της τάξης του 67%, το 2012. Η αύξηση της παραγωγής των NGPLs έχει άμεση σχέση με την αύξηση της παραγωγής φυσικού αερίου, γιατί τα NGPLs είναι συνήθως παραπροϊόντα.



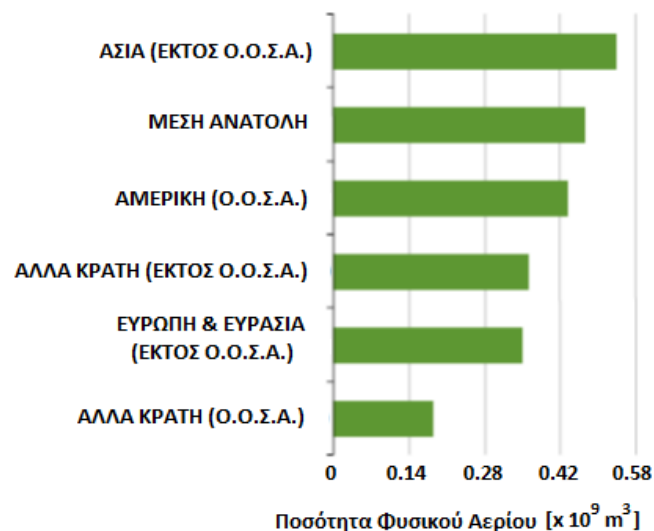
Σχήμα 1.7: Παραγωγή Πετρελαίου και άλλων Υγρών Καυσίμων ανά περιοχή, 2000 - 2040 ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$) ^[1]

Αντίθετα, με εξαίρεση τα NGPLs, η αυξημένη παραγωγή των υπόλοιπων “άλλων” υγρών (πρωτίστως βιοκαυσίμων, CTLs, και GTLs) συμβαίνει εξαιτίας των πόρων που διατίθενται για την επέκταση της παραγωγής τους. Από οικονομικής άποψης, οι χαμηλές τιμές του πετρελαίου στα πρώτα χρόνια της έρευνας, καθιστούν την ανάπτυξη των μη NGPLs λιγότερο ελκυστική. Εκτός του ότι είναι ευαίσθητα στις τιμές, η παραγωγή των βιοκαυσίμων, ειδικότερα, συχνά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εκάστοτε αναπτυξιακές πολιτικές που ακολουθούν οι κυβερνήσεις.

1.2.1.2 Φυσικό αέριο

Η παγκόσμια κατανάλωση φυσικού αερίου αναμένεται να αυξηθεί από $3.4 \times 10^9 \text{ m}^3$ το 2012 σε $5.75 \times 10^9 \text{ m}^3$ το 2040. Ανάλογα με την πηγή ενέργειας, το φυσικό αέριο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση σε κατανάλωση για την παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας. Οι αστεϊρευτές πηγές, καθώς και η εύρωστη παραγωγή του συντελούν στην ανταγωνιστική θέση που βρίσκεται το φυσικό αέριο, σε σχέση με άλλες πηγές. Επιπρόσθετα, αποτελεί το βασικό καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο βιομηχανικό τομέα, παραμένοντας ταυτόχρονα μια ελκυστική επιλογή, εξαιτίας του χαμηλού αρχικού κόστους επένδυσης και της χαμηλής τιμής καυσίμου, σε συνδυασμό με τη χαμηλή κατανάλωση σε καύσιμη ύλη. Επίσης, λόγω του ότι τα κράτη ξεκίνησαν να εφαρμόζουν διεθνείς κανόνες για τη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), το φυσικό αέριο ενδέχεται να εκτοπίσει ευρέως χρησιμοποιούμενα καύσιμα, όπως ο άνθρακας και άλλα υγρά καύσιμα. Προκειμένου να καλυφθεί η αύξηση στην κατανάλωση του φυσικού αερίου προβλέπεται ότι οι παραγωγές χώρες θα αυξήσουν την παραγωγή τους περίπου 69% από το 2012 έως το 2040. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις στην παραγωγή διαφαίνονται στα εκτός Ο.Ο.Σ.Α. κράτη της Ασίας, ($0.53 \times 10^9 \text{ m}^3$), στη Μέση Ανατολή ($0.47 \times 10^9 \text{ m}^3$) και στα κράτη της Αμερικής που ανήκουν στον Ο.Ο.Σ.Α. ($0.44 \times 10^9 \text{ m}^3$) (Σχήμα 1.8). Στην Κίνα, η παραγωγή αναμένεται να αυξηθεί κατά $0.42 \times 10^9 \text{ m}^3$. Στις Η.Π.Α. και στη Ρωσία, η παραγωγή φυσικού αερίου κατά $0.32 \times 10^9 \text{ m}^3$ και $0.28 \times 10^9 \text{ m}^3$, αντίστοιχα.

Γενικότερα, οι Κίνα, Η.Π.Α. και Ρωσία εκπροσωπούν το 44% της συνολικής αύξησης στην παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου, από το 2012 μέχρι το 2040.



Σχήμα 1.8: Αύξηση της παραγωγής φυσικού αερίου ανά περιοχή, 2012 - 2040 ($\times 10^9 \text{ m}^3$) ^[1]

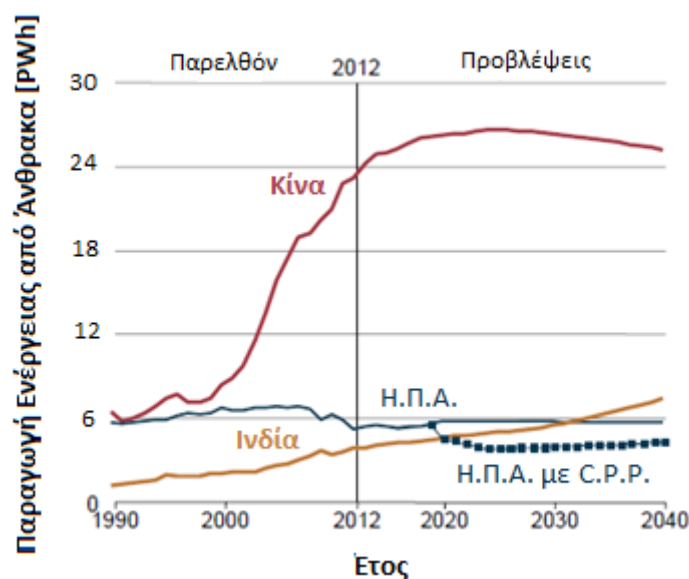
1.2.1.3 Άνθρακας

Ο άνθρακας είναι η πιο αργά αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας, με κατά μέσο όρο αύξηση κατά 0,6%/έτος. Η χρήση του άνθρακα μειώνεται σε κάθε περιοχή του κόσμου από το 2012 έως το 2040.

Ο άνθρακας αποτελεί την πιο βραδέως αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας, παγκοσμίως, παρουσιάζοντας κατά μέσο όρο αύξηση γύρω στο 0.6%/έτος (από 44.84 PWh το 2012 σε 52.75 PWh το 2040), σημαντικά πιο αργή από το μέσο όρο (2,2%/έτος) των τελευταίων 30 ετών. Οι πρώτες τρεις χώρες σε κατανάλωση άνθρακα είναι η Κίνα, οι Η.Π.Α. και η Ινδία, που συνολικά ευθύνονται για το 70% της παγκόσμιας κατανάλωσης άνθρακα. Στην Κίνα, όπου η χρήση του άνθρακα έχει αυξηθεί κατά μέσο όρο περίπου 6,0%/έτος, κατά τα τελευταία 30 χρόνια, παρατηρείται αύξηση μόνο κατά 0,3%/έτος, από το 2012 έως το 2040. Με ανακοίνωση της Κινέζικης κυβέρνησης, το Νοέμβριο 2015, ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της χώρας θα κορυφωθούν το 2030, πρόσφατα, έγιναν κάποιες κινήσεις για τη μείωση της χρήσης του άνθρακα, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η ατμοσφαιρική ρύπανση στα μεγάλα αστικά κέντρα, η οποία θα οδηγήσει σε μείωση της ζήτησης άνθρακα. Στην παρούσα φάση, η Κίνα είναι υπεύθυνη για την μισή περίπου παγκόσμια κατανάλωση, αλλά η εφαρμογή στρατηγικών σχεδίων για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής συμβάλλουν σε μειωμένη κατανάλωση στο μέλλον (σχήμα 1.9).

Συμπεριλαμβανομένου του C.P.P., η παγκόσμια κατανάλωση άνθρακα θα μειωθεί σε 48.35 PWh το 2020 και σε 51.58 PWh το 2040. ^[3]

Η παγκόσμια παραγωγή άνθρακα παρουσιάζει αύξηση από $8.16 \times 10^9 \text{ t}$ το 2012 σε $9.07 \times 10^9 \text{ t}$ το 2040. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη στην παραγωγή άνθρακα παρατηρείται στις Ινδία, Κίνα και Αυστραλία. Το συνδυασμένο μερίδιο των τριών αυτών χωρών, από 60% (2012) αυξάνεται στο 64% της συνολικής παγκόσμιας αύξησης στην παραγωγή ενέργειας από άνθρακα (2040). Σχετικά με τη χώρα που ηγείται της παραγωγής άνθρακα, της Κίνας, εκτιμάται ότι το 2040 θα κατέχει το 44% της παραγωγής, έναντι του 48% που είχε το 2012.



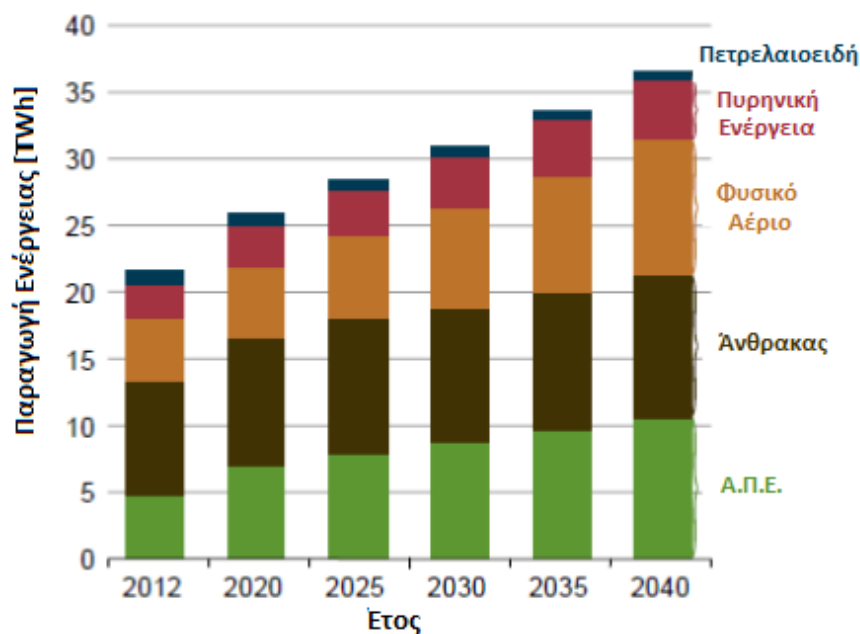
Σχήμα 1.9: Κατανάλωση άνθρακα σε Κίνα, Ινδία και Η.Π.Α., 1990-2040 (PWh) ^[1]

1.2.1.4 Ηλεκτρική ενέργεια

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται κατά 69%, από 21.6×10^{12} kWh το 2012 σε 25.8×10^{12} kWh το 2020 και σε 36.5×10^{12} kWh το 2040. Είναι ένας από τους τομείς που παραμένει μεταξύ των πιο δυναμικά αναπτυσσόμενων τομέων στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά. Από πλευράς τελικής χρήσης, η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή ενέργειας, όπως συμβαίνει άλλωστε τις τελευταίες δεκαετίες. Τα συστήματα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας συνέχισαν να εξελίσσονται από απομονωμένα, μη ανταγωνιστικά δίκτυα, σε ενοποιημένα δίκτυα εθνικής, ακόμα και διεθνούς εμβέλειας. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη παρατηρείται στα αναπτυσσόμενα κράτη εκτός Ο.Ο.Σ.Α., παρουσιάζοντας μια αύξηση περί τα 2.5%/έτος από το 2012 έως το 2040, δεδομένου ότι η βελτίωση του επιπέδου ζωής απαιτεί εκτενή χρήση ηλεκτρονικών συσκευών σε εμπορικές διαδικασίες καθώς και σε όλους τους κτιριακούς τομείς (νοσοκομεία, σχολεία, γραφεία, εμπορικά κέντρα κ.α.). Στα κράτη εντός του Ο.Ο.Σ.Α., όπου οι υποδομές είναι πιο ώριμες και η αύξηση του πληθυσμού είναι μικρή ή και φθίνουσα, η αύξηση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το 2012 μέχρι το 2040 είναι της τάξης του 1.2%/έτος.

Οι προοπτικές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), από φυσικό αέριο και από πυρηνική ενέργεια, είναι πολλά υποσχόμενες και οι διαδικασίες συνεχώς βελτιώνονται (σχήμα 1.10).

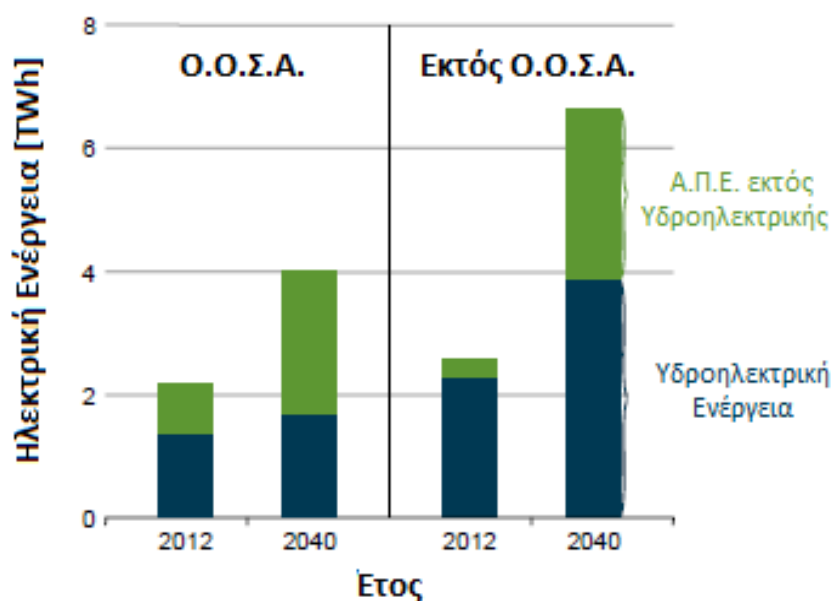
Ειδικότερα οι Α.Π.Ε. αποτελούν τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζοντας μια μέση αύξηση της τάξης του 2.9%/έτος, από το 2012 μέχρι το 2040. Πιο συγκεκριμένα, αν εξαιρέσει κανείς την υδροηλεκτρική ενέργεια, τόσο στα κράτη εντός όσο και εκτός Ο.Ο.Σ.Α., οι ανανεώσιμες πηγές παρουσιάζουν τη ταχύτερα αναπτυσσόμενη παραγωγική ικανότητα, αυξάνοντας το ποσοστό συμμετοχής τους, στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από 5% το 2012 σε 14% το 2040, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας προέρχεται από την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.



Σχήμα 1.10: Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή, 2012 - 2040 (TWh) ^[1]

1.2.1.5 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)

Μετά τις Α.Π.Ε., οι πηγές που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ανάπτυξη είναι αυτές του φυσικού αερίου και της πυρηνικής ενέργειας. Πολλά κράτη, ειδικότερα εντός του Ο.Ο.Σ.Α., έχουν θεσπίσει περιβαλλοντικές πολιτικές και κανόνες που σκοπό έχουν να μειώσουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, που προέρχονται από τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας έτσι την χρήση ορυκτών καυσίμων. Αυτό έχει σαν συνέπεια, ο άνθρακας, να χάνει την κυρίαρχη θέση του στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.11: Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., 2012-2040 (TWh) ^[1]

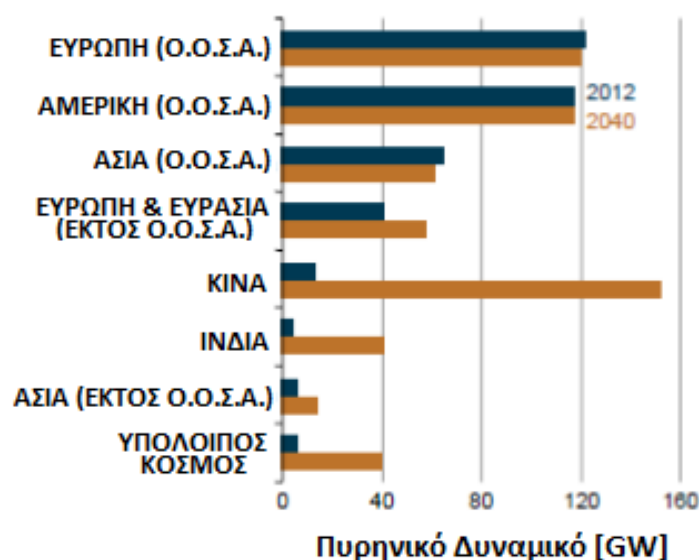
Για τα έτη από 2102 μέχρι 2040, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες που χρησιμοποιούν άνθρακα, σαν καύσιμη ύλη, αυξάνεται κατά 0.8%/έτος, ενώ, αντίθετα, για τις Α.Π.Ε. αυξάνεται κατά 2.9%/έτος. Προβλέπεται πως το 2040, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. θα είναι ίση με αυτή που προέρχεται από τον άνθρακα.

Στον πίνακα 1.2 φαίνεται η συνεισφορά της κάθε μορφής Α.Π.Ε. στα υφιστάμενα έργα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που απαντώνται παγκοσμίως. Η εγκατεστημένη ισχύς έργων που αφορούν στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (Collecting Solar Power – CSP) ανέρχεται σε 4,7GW και αντιστοιχεί στο 0,25% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος έργων Α.Π.Ε.

Πίνακας 1.2: Εγκατεστημένη ισχύς σε Α.Π.Ε. 2015 (GW) ^[4]

Τύπος Εγκατάστασης	Ισχύς [GW]	Ποσοστό [%]
Βιομάζα	106	5,71
Γεωθερμική	13	0,70
Φωτοβολταϊκά	228	12,28
Συγκεντρωτικά Ηλιακά (CSP)	4,7	0,25
Αιολικά	433	23,33
Υδροηλεκτρικά	1071	57,70
Συνολικά εγκατεστημένη ισχύς	1856	

Η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς αυξάνεται από 2.3×10^{12} kWh το 2012, σε 3.1×10^{12} kWh το 2020 και σε 4.5×10^{12} kWh το 2040, καθώς προβληματισμοί σχετικοί με την ενεργειακή εξασφάλιση και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ενισχύουν την ανάπτυξη νέων σταθμών πυρηνικής ενέργειας. Ουσιαστικά, οι νέοι αυτοί σταθμοί αναπτύσσονται στα κράτη εκτός Ο.Ο.Σ.Α., καθοδηγούμενοι από την προσθήκη σταθμών ισχύος 139 GW από την Κίνα. Ανάμεσα στα κράτη του Ο.Ο.Σ.Α. ξεχωρίζει μόνο η Ν. Κορέα, προσθέτοντας 15GW στο δυναμικό της. Η αύξηση αυτή αντισταθμίστηκε, με το παραπάνω, από αντίστοιχες μειώσεις στο δυναμικό του Καναδά, των Ευρωπαϊκών κρατών του Ο.Ο.Σ.Α. και της Ιαπωνίας, μειώνοντας την συνδυασμένη παγκόσμια παραγωγική ισχύ κατά 6GW.



Σχήμα 1.12: Πυρηνικό δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά περιοχή, 2012-2040 (GW) ^[1]

1.2.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα

Προκειμένου να μπορέσει να αξιολογηθεί πλήρως η μελλοντική χρήση της ενέργειας παγκοσμίως, είναι σημαντικό να εξεταστεί το μοτίβο της κατανάλωσης ενέργειας από τους τελικούς χρήστες. Αυτή η ενότητα περιγράφει την κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια, στους τομείς της βιομηχανίας και των μεταφορών. Η κατανάλωση ενέργειας στους τομείς τελικής χρήσης αφορά στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και τη λιανική πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιρουμένων των απωλειών του συστήματος διανομής. Εκτός από τον τομέα των μεταφορών, ο οποίος προς το παρόν κυριαρχείται από την κατανάλωση υγρών καυσίμων, το μείγμα της χρήσης της ενέργειας στον οικιστικό, εμπορικό και βιομηχανικό τομέα ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανά περιοχή, ανάλογα με τον συνδυασμό παραγόντων, όπως είναι η διαθεσιμότητα των ενεργειακών πόρων, τα επίπεδα οικονομικής ανάπτυξης, καθώς και πολιτικούς, κοινωνικούς, και δημογραφικούς παράγοντες.

1.2.2.1 Κτιριακός και Εμπορικός Τομέας

Ο τομέας των κτιρίων, ο οποίος αποτελείται από οικιακούς και εμπορικούς τελικούς χρήστες, αντιπροσωπεύει το 20% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε όλο τον κόσμο. Η χρήση ενέργειας στον οικιακό τομέα ορίζεται ως η ενέργεια που καταναλώνεται από τα νοικοκυριά, εξαιρουμένης αυτής που χρησιμοποιείται για τις μεταφορές. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται σε θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και ζεστό νερό χρήσης (Ζ.Ν.Χ), καθώς και σε πολλές άλλες συσκευές και εξοπλισμό.

Οι τρόποι με τους οποίους καταναλώνεται η ενέργεια στον οικιακό τομέα εξαρτάται από τα επίπεδα εισοδήματος και τις τιμές της ενέργειας, όπως και από διάφορους άλλους παράγοντες, όπως η τοποθεσία, τα χαρακτηριστικά του νοικοκυριού, ο καιρός, ο εξοπλισμός, η πρόσβαση στη διανεμόμενη ενέργεια, η διαθεσιμότητα των πηγών ενέργειας και οι σχετικές πολιτικές που ακολουθούνται. Ως αποτέλεσμα, τα είδη και τα ποσά της χρήσης ενέργειας από τα νοικοκυριά μπορεί να ποικίλουν ευρέως εντός και μεταξύ των περιφερειών και των χωρών.

Υπολογίζεται, πως για το διάστημα 21012 έως 2040 η χρήση ενέργειας στα νοικοκυριά θα αντιπροσωπεύει περίπου το 13% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, παρουσιάζοντας μια αύξηση της τάξης του 1,5%/έτος. Στα μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., η παγκόσμια κατανάλωση οικιακής ενέργειας αυξάνεται κατά 48% στο ίδιο διάστημα και αυτό είναι κυρίως αποτέλεσμα της αυξανόμενης ζήτησης στον οικιστικό τομέα. Εξαιτίας αυτής της οικονομικής ανάπτυξης και της ανόδου του βιοτικού επιπέδου στα κράτη εκτός Ο.Ο.Σ.Α., η οικιακή κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται κατά μέσο όρο 2.1%/έτος, σε αντίθεση με τις οικονομίες του Ο.Ο.Σ.Α., όπου η χρήση ενέργειας εντός των κατοικιών αυξάνεται πολύ πιο αργά, με 0.6%/έτος κατά μέσο όρο, αντίστοιχα. Η χαμηλή αυτή αύξηση οφείλεται κυρίως στους χαμηλούς ρυθμούς αύξησης του Α.Ε.Π. και του πληθυσμού, καθώς επίσης στη βελτίωση της ενεργειακής θωράκισης των κτιρίων και στις αποδοτικότερες συσκευές που χρησιμοποιούνται. Μερικές από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές των κατοικιών στη ζήτηση των καταναλωτών βρίσκονται στις χώρες της μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. Ασίας (συμπεριλαμβανομένης της Κίνας και της Ινδίας), ως αποτέλεσμα της ισχυρής οικονομικής ανάπτυξης και επέκτασης των πληθυσμών σε μεγάλο μέρος της περιοχής. Το 2040, η συνδυασμένη συνολική χρήση κατοικιών ενέργειας της Κίνας και της Ινδίας είναι συνολικά διπλάσια από το 2012 τους και αντιπροσωπεύει το 27% της συνολικής παγκόσμιας οικιακής κατανάλωσης ενέργειας.

Ο εμπορικός τομέας, που αποτελείται από επιχειρήσεις, ιδρύματα και οργανισμούς που παρέχουν υπηρεσίες, περιλαμβάνει πολλούς διαφορετικούς τύπους κτιρίων και ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων που απαιτούν ενέργεια. Συνολικά η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας στον εμπορικό τομέα αυξάνεται κατά μέσο όρο κατά

1,6%/έτος, ενώ το μερίδιο της συνολικής παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης, που αντιστοιχεί σε αυτόν, αυξάνεται από περίπου 7% το 2012 σε περίπου 8% το 2040.

Τόσο η αργή άνοδος του Α.Ε.Π., όσο και η βραδεία άνοδος ή και μείωση του πληθυσμού, σε πολλές χώρες του Ο.Ο.Σ.Α., συμβάλλουν σε βραδύτερους ρυθμούς αύξησης της εμπορική ενεργειακής ζήτησης. Επιπλέον, η συνεχιζόμενη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του εξοπλισμού μετριάξει την αύξηση της ενεργειακής ζήτησης με την πάροδο του χρόνου, καθώς ο λιγότερο αποδοτικός εξοπλισμός αντικαθίσταται με νεότερα και πιο αποδοτικά. Μεταξύ των εθνών του Ο.Ο.Σ.Α., η κατανάλωση ενέργειας στον εμπορικό τομέα αυξάνεται κατά 1,1%/έτος από το 2012 έως το 2040, σε σύγκριση με το μέσο όρο του 0,6%/έτος για τον οικιακό τομέα.

Στα έθνη μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., η οικονομική δραστηριότητα και το εμπόριο αυξάνονται ραγδαία, τροφοδοτώντας την πρόσθετη ζήτηση για ενέργεια στον τομέα των υπηρεσιών. Στα μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., όπου η αύξηση του πληθυσμού είναι επίσης ταχύτερη από ότι στις χώρες του Ο.Ο.Σ.Α., αυξάνονται οι ανάγκες για εκπαίδευση, υγεία, πρόνοια, οι κοινωνικές υπηρεσίες και επομένως και η ενέργεια που απαιτείται για όλα τα παραπάνω. Επιπλέον, καθώς οι αναπτυσσόμενες χώρες ωριμάζουν, μεταβαίνουν όλο και περισσότερο σε επιχειρήσεις παροχής υπηρεσιών, αυξάνοντας τη ζήτηση για ενέργεια στον εμπορικό τομέα. Με σημαντικές ποσότητες ενέργειας να χρειάζονται μελλοντικά στο να τροφοδοτήσουν τα αυξανόμενα σε πλήθος και μέγεθος εμπορικά κτίρια, η συνολική χρήση εμπορικής ενέργειας για τα κράτη μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. αυξάνεται κατά 2,4%/έτος 2012-2040, ποσοστό το οποίο είναι περισσότερο από το διπλάσιο του ποσοστού για τον εμπορικό τομέα εντός του Ο.Ο.Σ.Α.

1.2.2.2 Βιομηχανικός Τομέας

Ο βιομηχανικός τομέας περιλαμβάνει τη βιομηχανία, τη γεωργία, την εξόρυξη και τις κατασκευές, καθώς και ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων, όπως την επεξεργασία και τη συναρμολόγηση, τον κλιματισμό και το φωτισμό χώρων. Η βιομηχανική χρήση της ενέργειας περιλαμβάνει επίσης προϊόντα που προέρχονται από το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για την παραγωγή των προϊόντων, όπως πλαστικά και λιπάσματα. Μεταξύ άλλων παραγόντων, η βιομηχανική ζήτηση ενέργειας διαφέρει μεταξύ των χωρών του κόσμου, ανάλογα με το επίπεδο και τη σύνθεση της οικονομικής δραστηριότητας και της τεχνολογικής ανάπτυξης.

Όσων αφορά στην τελική χρήση ενέργειας μέχρι το 2040, παρόλο που ο βιομηχανικός τομέας συνεχίζει να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μερίδιο (54% - 2012) της συνολική κατανάλωσης ενέργειας, ωστόσο, δεν αποτελεί τον ταχύτερα αναπτυσσόμενο τομέα. Τομείς που ξεπερνούν σε ανάπτυξη, το βιομηχανικό τομέα, είναι αυτοί των κατοικιών, εμπορείου και μεταφορών.

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας στο βιομηχανικό τομέα, αναμένεται να αυξηθεί κατά μέσο όρο κατά 1.2%/έτος. Το μεγαλύτερο μέρος της μακροπρόθεσμης αυτής αύξησης, παρατηρείται σε χώρες μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. Έτσι, από το 2012-2040, σε χώρες μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. αυξάνεται κατά μέσο όρο κατά 1.5%/έτος, σε σύγκριση με 0.5%/έτος στις χώρες του Ο.Ο.Σ.Α. Η διαφορά στα ποσοστά αύξησης αντανάκλα τόσο την ταχύτερη οικονομική ανάπτυξη των κρατών εκτός του Ο.Ο.Σ.Α., όσο και τις διαφορές στη σύνθεση της παραγωγής του βιομηχανικού τομέα. Γενικά οι βιομηχανίες στις οικονομίες εντός του Ο.Ο.Σ.Α. είναι ενεργειακά πιο αποδοτικές από εκείνες στις οικονομίες εκτός Ο.Ο.Σ.Α. και το μίγμα της βιομηχανικής παραγωγής είναι περισσότερο σταθμισμένο προς τη βιομηχανία χαμηλότερης ενεργειακής έντασης. Γενικότερα, κατά μέσο όρο, η βιομηχανική ενεργειακή ένταση (η ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή μιας μονάδας Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος) σε χώρες μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. είναι πολύ υψηλότερο από ό, τι στις χώρες του Ο.Ο.Σ.Α. Παρά την αναμενόμενη αύξηση της χρήσης ενέργειας στο βιομηχανικό τομέα για τα μέλη εκτός του Ο.Ο.Σ.Α., το μερίδιο που αντιστοιχεί στη συνολική κατανάλωση ενέργειας από το βιομηχανικό τομέα, προβλέπεται πως θα μειωθεί, από

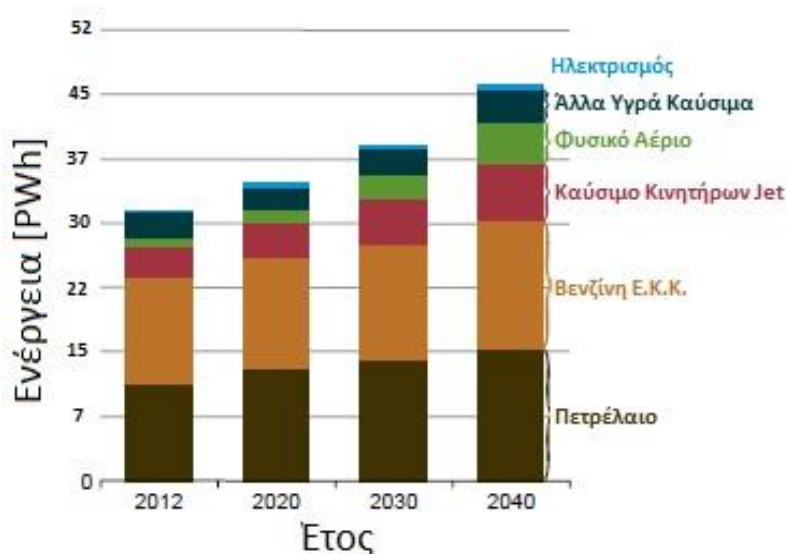
64% που ήταν το 2012 σε 59% το 2040. Αυτό συμβαίνει λόγω της απεξάρτησης από βιομηχανίες ενεργειακά έντονου χαρακτήρα, σε πολλές αναδυόμενες οικονομίες, και της ταχύτερης αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας σε όλους τους άλλους τομείς τελικής χρήσης.

1.2.2.3 Τομέας Μεταφορών

Η χρήση ενέργειας στον τομέα των μεταφορών περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών μέσω οδικών, σιδηροδρομικών, αεροπορικών και υδάτινων αξόνων. Οι ρυθμοί αύξησης της οικονομίας και του πληθυσμού, καθώς και οι τάσεις στην εξοικονόμηση καυσίμου των οχημάτων, είναι οι βασικοί παράγοντες της ενεργειακής ζήτησης στον τομέα των μεταφορών. Η αύξηση της βιομηχανικής παραγωγής, απαιτεί την μετακίνηση πρώτων υλών προς τις βιομηχανικές μονάδες, καθώς και τη διακίνηση των προϊόντων στους τελικούς πελάτες. Επιπλέον, η αύξηση της ζήτησης για προσωπικά ταξίδια είναι ένας πρωταρχικός παράγοντας που συμβάλλει στην υποκείμενη αύξηση της ζήτησης ενέργειας για τις μεταφορές. Οι αυξήσεις στην αστικοποίηση και στα προσωπικά εισοδήματα συμβάλλουν επίσης στην αύξηση των αεροπορικών μεταφορών και της μηχανοκίνησης (περισσότερα αυτοκίνητα ανά κάτοικο) στις αναπτυσσόμενες οικονομίες εκτός Ο.Ο.Σ.Α..

Ο τομέας των μεταφορών αντιπροσώπευε το 25% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας το 2012 και αυξάνεται κατά 1,4%/έτος μέχρι το 2040. Σχεδόν το σύνολο (94%) της αύξησης αυτής λαμβάνει χώρα στις αναπτυσσόμενες οικονομίες εκτός Ο.Ο.Σ.Α., όπου η αύξηση του Α.Ε.Π. και του βιοτικού επιπέδου, οδήγησαν σε αυξανόμενη ζήτηση των καταναλωτών για βελτιωμένα προϊόντα μεταφορών. Έτσι, η χρήση της ενέργειας που απαιτείται για τις μεταφορές σε μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. αυξάνει κατά 2,5%/έτος. Αντιθέτως, σε χώρες του Ο.Ο.Σ.Α., όπου τα καταναλωτικά πρότυπα έχουν ήδη εδραιωθεί και σε συνδυασμό με τους συγκριτικά αργούς ρυθμούς οικονομικής και πληθυσμιακής ανάπτυξης, καθώς και τα λιγότερο ρυπογόνα οχήματα, οδηγούν σε ένα μέσο ρυθμό αύξησης της συνολικής κατανάλωσης της ενέργειας μόλις κατά 0.2%/έτος.

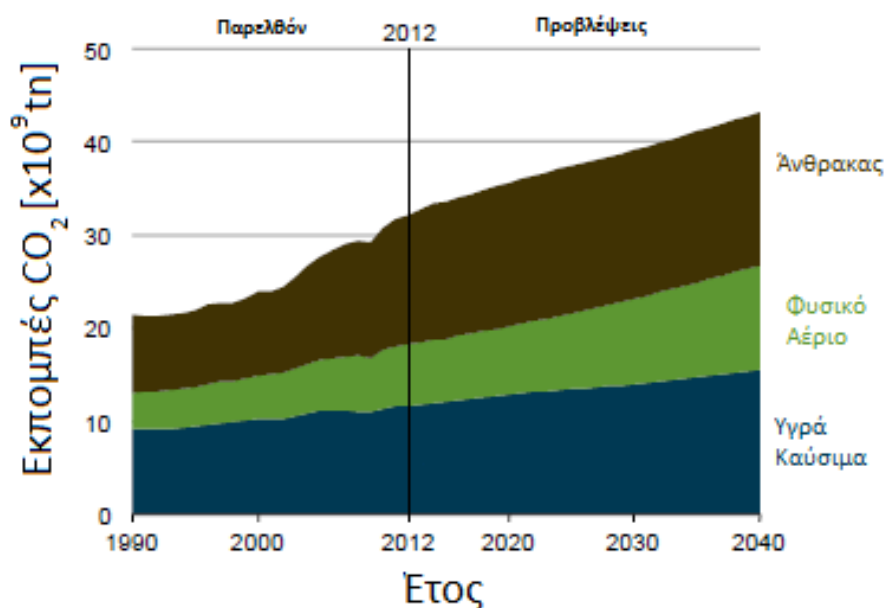
Παγκοσμίως, τα υγρά καύσιμα παραμένουν η κυρίαρχη πηγή ενέργειας για τα μέσα μεταφοράς, αν και το μερίδιό τους επί της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, για τις μεταφορές, μειώνεται από 96% το 2012 σε 88% το 2040.



Σχήμα 1.13: Κατανάλωση ενέργειας στον τομέα μεταφορών ανάλογα με την πηγή (2012-2040) ^[1]

Η παγκόσμια κατανάλωση υγρών καυσίμων αυξάνεται κατά 10.55 PWh, με αυτή του ντίζελ (συμπεριλαμβανομένου του βιοντίζελ) να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση, κατά 3.80 PWh, του καυσίμου τζετ κατά 2.93 PWh και των κινητήρων βενζίνης (συμπεριλαμβανομένων των μιγμάτων της αιθανόλης) κατά 2.63 PWh (σχήμα 1.13). Η βενζίνη παραμένει το καύσιμο που χρησιμοποιείται περισσότερο στις μεταφορές, αλλά το μερίδιό της στη συνολική κατανάλωση μειώνεται από 39% το 2012 σε 33% το 2040.

Το μερίδιο του φυσικού αερίου ως καύσιμο για τις μεταφορές αυξάνεται από 3% το 2012 σε 11% το 2040. Επίσης προβλέπεται μια μεγάλη αύξηση χρήσης φυσικού αερίου από μεγάλα φορτηγά, αυξάνοντας το μερίδιό του επί της συνολικής χρήσης ενέργειας, από 1% το 2012 σε 15% το 2040. Επιπλέον, το 50% της ενέργειας των λεωφορείων προβλέπεται να προέρχεται από το φυσικό αέριο το 2040, καθώς και το 17% των σιδηροδρομικών εμπορευματικών μεταφορών, το 7% των ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων, και 6% των εγχώριων θαλασσίων σκαφών. Αν και η συμβολή της ηλεκτρικής ενέργειας στη μεταφορά επιβατών με σιδηροδρομικά μέσα, είναι σημαντική, η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για λογαριασμό των μεταφορών παγκοσμίως, είναι μηδαμινή. Όσον αφορά στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από ελαφρά οχήματα, εκτιμάται, ότι μέχρι το 2040, θα αυξηθεί στο 1%, της συνολικής κατανάλωσης, καθώς ολοένα και περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα εισχωρούν στους υπάρχοντες στόλους.



Σχήμα 1.14: Εκπομπές CO₂ ανάλογα με την πηγή (1990-2040) ^[1]

1.2.3 Παγκόσμιες Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα

Οι εκπομπές του CO₂, που σχετίζονται με την ενέργεια, παρουσιάζουν μια αύξηση της τάξης του 34%, από 29.2 x 10⁹ t το 2012, σε 32.3 x 10⁹ t το 2020 και σε 39.2 x 10⁹ t το 2040. Ένα μεγάλο μέρος της αύξησης των εκπομπών αποδίδεται στην ανάπτυξη των κρατών εκτός Ο.Ο.Σ.Α., πολλά από τα οποία εξακολουθούν να εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα, προκειμένου να καλύψουν τον ταχύτατο ρυθμό αύξησης της ενεργειακής τους ζήτησης. Τα μη μέλη του Ο.Ο.Σ.Α., το 2040, παρουσιάζουν 51% υψηλότερες εκπομπές CO₂, από ότι το 2012, φτάνοντας τους 26.7 x 10⁹ t. Συγκριτικά, οι συνολικές εκπομπές των μελών του Ο.Ο.Σ.Α. είναι 12.5 x 10⁹ t το 2040

ή περίπου 9% υψηλότερη από τα επίπεδα του 2012. Οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την κατανάλωση υγρών καυσίμων, φυσικού αερίου, καθώς και του άνθρακα, αυξάνονται, με τις σχετικές συνεισφορές των επιμέρους καυσίμων να εναλλάσσονται με την πάροδο του χρόνου (σχήμα 1.14). Το 1990, οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την κατανάλωση υγρών καυσίμων αντιπροσώπευαν το μεγαλύτερο μερίδιο (43%) των παγκόσμιων εκπομπών. Το 2012, οι εκπομπές CO₂, που συνδέονται με την κατανάλωση υγρών καυσίμων μειώθηκε στο 36% των συνολικών εκπομπών και προβλέπεται να παραμείνει σε αυτό το επίπεδο μέχρι το 2040. Το 2006, ο άνθρακας, έγινε η κορυφαία πηγή στην οποία αποδίδεται το μεγαλύτερο μέρος των παγκόσμιων εκπομπών CO₂, που σχετίζονται με την ενέργεια και παραμένει η κύρια πηγή μέχρι το 2040. Ωστόσο, αν και ο άνθρακας αντιπροσώπευε το 39% των συνολικών εκπομπών το 1990 και το 43% το 2012, το μερίδιό του αναμένεται να σταθεροποιηθεί και στη συνέχεια να μειωθεί στο 38% το 2040, όντας ελαφρώς υψηλότερο από αυτό των υγρών καυσίμων. Το μερίδιο των εκπομπών CO₂ από φυσικό αέριο, το οποίο ήταν σχετικά μικρό, 19% το 1990 και 20% το 2012, αυξάνεται στο 26% το 2040.

1.3 Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια επισκόπηση στον παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη. Εξετάστηκε τόσο η εξέλιξη της χρήσης των διαφόρων μορφών ενέργειας από τους τελικούς χρήστες, όσο και η διείσδυση των διαφόρων πηγών ενέργειας, κυρίως των Α.Π.Ε. στο ενεργειακό ισοζύγιο, ενώ ταυτόχρονα έγινε μια προσπάθεια πρόβλεψης μέχρι το 2040. Από την παραπάνω ανάλυση, δε θα μπορούσε να παραληφθεί η εξέλιξη της εκπομπής του CO₂. Ωστόσο, επειδή η εξαγωγή αυτών των πολύπλοκων μελλοντικών ενεργειακών τάσεων, βασίστηκε κυρίως σε μακροοικονομικά μοντέλα και παραδοχές, υπεισέχεται ο παράγοντας της αβεβαιότητας, που ενισχύεται από το κλίμα ανασφάλειας που επικρατεί τα τελευταία χρόνια, λόγω της οικονομικής κρίσης.

Με έργα εγκατεστημένης ισχύος 4,7GW για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (2015), τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλουν στην ανάπτυξη του 2.9%/έτος των έργων Α.Π.Ε., σε παγκόσμιο επίπεδο. Στο επόμενο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά στην ηλιακή ενέργεια και στους τρόπους με τους οποίους ο άνθρωπος την εκμεταλλεύεται διαχρονικά προς όφελός του, καταλήγοντας στα βασικότερα είδη συλλεκτών, αλλά κυρίως στην τεχνολογία των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.

Αναφορές

[1] U.S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy, «International Energy Outlook 2016», Washington, DC 20585, May 2016.

[2] Ευτύχιος Σαρτζετάκης, «Εισαγωγή στην Μακροοικονομική», Τμήμα Λογιστικής και Χρηματοοικονομικής, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Ιούλιος 2011.

[3] U.S. Energy Information Administration, «Analysis of the Impacts of the Clean Power Plan», Washington, DC, May 2015.

[4] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), «Renewables 2017 – Global Status Report», REN21 Secretariat, Paris, France, April 2017.

Κεφάλαιο 2

Εκμετάλλευση Ηλιακής Ενέργειας

Περιεχόμενα

2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Ηλιακή Ακτινοβολία	19
2.2.1 Γενικά	19
2.2.2 Μέτρηση Ηλιακής Ακτινοβολίας	20
2.2.3 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας	21
2.2.4 Ηλιακή ακτινοβολία στον Ελλαδικό χώρο	21
2.2.5 Ιστορική αναδρομή εκμετάλλευσης ηλιακής ακτινοβολίας	22
2.3 Ηλιακοί Συλλέκτες	24
2.3.1 Γενικά	24
2.3.2 Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες	25
2.3.3 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες – Concentrated Solar Power (CSP)	29
2.4 Σύνοψη	35
2.6 Αναφορές	36

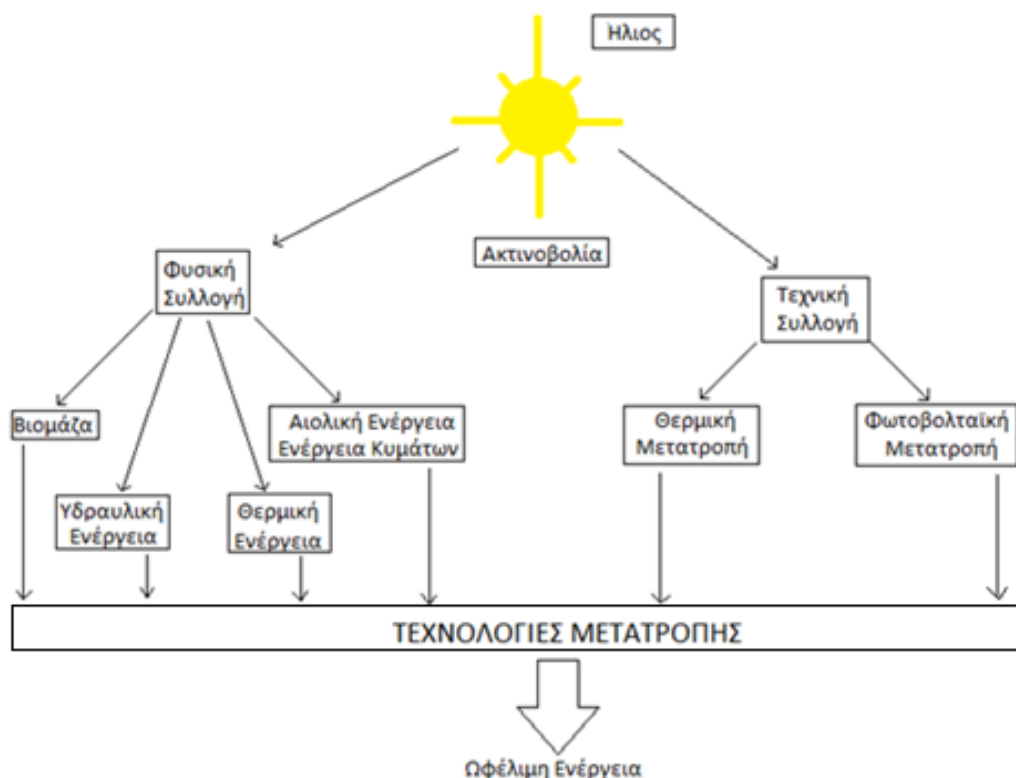
2.1 Εισαγωγή

Ο ήλιος είναι μια ουράνια σφαίρα εξαιρετικά καυτών αερίων, διαμέτρου $1,39 \times 10^9$ m. Η ηλιακή ενέργεια φτάνει στον πλανήτη μας μόλις σε 8 λεπτά και 20 δευτερόλεπτα μετά την έξοδο από τον γιγάντιο αυτό «φούρνο», αν και η απόσταση που μας χωρίζει είναι $1,5 \times 10^{11}$ m. Υπολογίζεται πως ο ήλιος έχει θερμοκρασία μέλανος σώματος 5762 °K, ενώ η θερμοκρασία στην κεντρική περιοχή είναι πολύ υψηλότερη από 8×10^6 έως 40×10^6 °K. Στην πραγματικότητα ο ήλιος είναι ένας αένας αντιδραστήρας σύντηξης στον οποίο το υδρογόνο μετατρέπεται σε ήλιο. Η συνολική απόδοση του ήλιου είναι $3,8 \times 10^{20}$ MW που ισοδυναμεί με 63 MW/m^2 της επιφάνειας του ήλιου. Αυτή την ενέργεια ακτινοβολεί προς τα έξω προς όλες τις κατευθύνσεις. Μόνο ένα μικρό κλάσμα, $1,7 \times 10^{14}$ kW, της συνολικής αυτής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας προσλαμβάνεται από τη γη. ^[1] Ωστόσο, ακόμη και με αυτό το μικρό κλάσμα εκτιμάται ότι 30 λεπτά πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης είναι ίση με την ετήσια παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. ^[2]

Βασικά, όλες οι γνωστές μορφές ενέργειας στον κόσμο είναι ηλιακής προέλευσης. Το πετρέλαιο, ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και τα δάση παράγονται αρχικά με φωτοσυνθετικές διεργασίες, ακολουθούμενες από σύνθετες χημικές αντιδράσεις στις οποίες η υποβαθμισμένη βλάστηση υποβλήθηκε σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και τις πιέσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα. ^[1]

Ακόμη και οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, έχουν σαν βασική προέλευσή τους τον ήλιο (σχήμα 2.1). Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη, παρέχει ενέργεια που αξιοποιείται με διάφορες μορφές. Θερμαίνοντας και εξατμίζοντας μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού δημιουργεί τις λίμνες και τα ποτάμια (υδραυλική ενέργεια). Απορροφούμενη από κατάλληλα υλικά, παράγει ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκή μετατροπή) ή θερμαίνει το νερό (ηλιακή θερμική μετατροπή). Θερμαίνοντας το έδαφος και αυτό με τη σειρά του τον αέρα, δημιουργεί ρεύματα αέρα (αιολική ενέργεια) και τα κύματα (ενέργεια κυμάτων). Η ενέργεια του ανέμου και αυτή της παλίρροιας έχει ηλιακή

προέλευση, καθώς προκαλούνται από διαφορές θερμοκρασίας στις διάφορες περιοχές του γήινου κόσμου. Τέλος συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας και η καύση των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (Βιομάζα).^[3]



Σχήμα 2.1: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που έχουν σαν βασική προέλευσή τους τον ήλιο^[3]

Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να περιγράψει την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και να παρουσιάσει τους διάφορους τύπους συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίηση της, καθώς και τα διάφορα πεδία στα οποία εφαρμόζονται.

2.2 Ηλιακή Ακτινοβολία

2.2.1 Γενικά

Πριν η ηλιακή ενέργεια φτάσει στην επιφάνεια της γης ανακόπτεται τόσο από την ατμόσφαιρα (6% αντανάκλαση και 16% απορρόφηση) όσο και από τα σύννεφα (20% αντανάκλαση και 3% απορρόφηση). Από το γεγονός πως το 51% (89 PW) της συνολικής εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στο έδαφος και στους ωκεανούς, συμπεραίνεται πως η συνολική ποσότητα διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας προς τη γη εξακολουθεί να είναι πολύ μεγάλη, παρά τα εμπόδια που προαναφέρθηκαν. Όμως, λόγω της χαμηλής της πυκνότητας και της διακοπτόμενης εμφάνισής της, η ουσία είναι να μπορέσει αυτή η ενέργεια να συλλεχθεί και να αποθηκευτεί αποτελεσματικά.^[4]

Η ηλιακή ακτινοβολία μεταδίδεται με τη μορφή διακεκριμένων ποσοτήτων ενέργειας, που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα φωτός. Τα φωτόνια κινούνται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός και κάθε ένα από αυτά μεταφέρει ενέργεια E , που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda \text{ [J]} \quad (2.1)$$

όπου:

h [J · s]: σταθερά του Plank (**h = 6,67 · 10⁻³⁴ J · s**)

ν [s⁻¹]: συχνότητα ακτινοβολίας

c [m/s]: ταχύτητα φωτός (**c = 3 · 10⁸ m/s**)

λ [m]: μήκος κύματος

Δεδομένου ότι το μήκος κύματος **λ** εκφράζεται συνήθως σε nm και η ενέργεια φωτονίου **E** σε eV, η παραπάνω σχέση γράφεται ως εξής: ^[3]

$$E = 1240/\lambda \text{ [eV]} \quad (2.2)$$

2.2.2 Μέτρηση Ηλιακής Ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη, μετρίεται με τη βοήθεια οργάνων. Τα σπουδαιότερα όργανα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, είναι τα ακόλουθα: ^[3]

- Πυρανόμετρο

Αποτελείται από δύο πλάκες και ένα μεγάλο αριθμό θερμοηλεκτρικών ζευγών και μετράει την ολική ηλιακή ακτινοβολία με μήκος κύματος $\lambda=0,3\text{-}3\mu\text{m}$. Η πάνω πλάκα έχει μαύρο χρώμα και θερμαίνεται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ενώ εκείνη που βρίσκεται στο εσωτερικό παραμένει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη συνδέονται σε σειρά και οι μισές επαφές τους είναι εντυπωμένες στην πάνω πλάκα και οι άλλες μισές στην κάτω. Ο μεγάλος αριθμός των θερμοηλεκτρικών ζευγών εξασφαλίζει τάση μερικών mV στα δύο ελεύθερα άκρα τους, έτσι ώστε να μπορεί να μετρηθεί με ένα βολτόμετρο.

- Πυροηλεκτρικός κρύσταλλος

Η λειτουργία του βασίζεται στο πυροηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή στην ηλέκτριση ενός διηλεκτρικού υλικού (μονωτή) όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του. Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και το παραγόμενο ρεύμα μετρίεται με ένα αμπερόμετρο.

- Βολτόμετρο

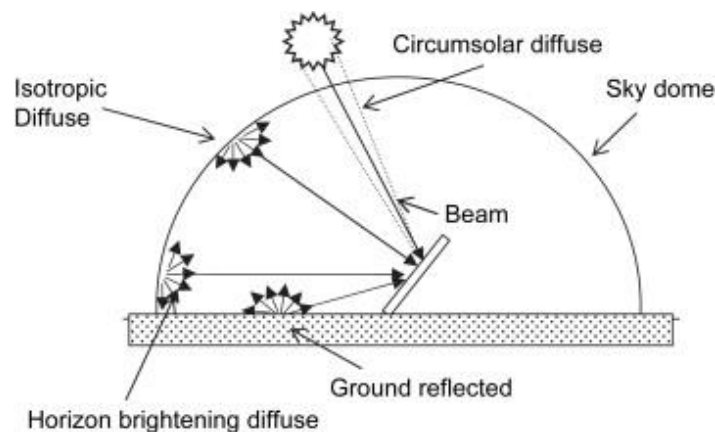
Η λειτουργία του οργάνου βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού (Si, Ge, Bi κ.λπ.) όταν αυξάνεται η θερμοκρασία από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

- Φωτοδίοδος

Είναι μια δίοδος επαφής ημιαγωγών που όταν φωτιστεί στο εσωτερικό της παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο μετρίεται με την βοήθεια αμπερομέτρου. Στο κύκλωμα, εκτός από τη δίοδο, περιλαμβάνονται μια ηλεκτρική πηγή και μια αντίσταση.

2.2.3 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ενέργεια είναι ανανεώσιμη, καθαρή και ελεύθερη μορφή ενέργειας όντας άφθονα διαθέσιμη στη γη. Ωστόσο, η αποδοτική εκμετάλλευσή της απαιτεί λεπτομερή γνώση της διαθεσιμότητας της στην εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος. Γενικά, η ηλιακή ενέργεια που δέχεται μια επιφάνεια αποτελείται από τρία δομικά στοιχεία: i) την άμεση ακτινοβολία (beam radiation), ii) την διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation) και iii) την ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία (ground reflected radiation). Η διάχυτη ακτινοβολία απαρτίζεται, πιο λεπτομερώς, από την ισότροπη (isotropic), την συγκεντρωμένη στο κέντρο του ηλίου (circumsolar brightening) και την συγκεντρωμένη στον ορίζοντα (horizon brightening). Η άμεση και η συγκεντρωμένη ακτινοβολία στο κέντρο του ηλίου είναι έντονα εξαρτώμενες από την θέση του ηλίου στον ουρανό, ενώ η ανακλώμενη από το έδαφος και η ισότροπη ακτινοβολία, εξαρτώνται από την θέση της επιφάνειας και του εδάφους σε σχέση με τον ήλιο. ^[5] Στο σχήμα 2.2 αποτυπώνονται γραφικά οι προαναφερθείσες έννοιες.



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση της διανομής της ηλιακής ακτινοβολίας σε επικλινή επιφάνεια ^[6]

Συνεπώς, η ολική ωριαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο δίνεται από τη σχέση: ^[3]

$$I_T = I_b + I_d \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.3)$$

όπου:

$I_b \text{ [W/m}^2\text{]}$: άμεση ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

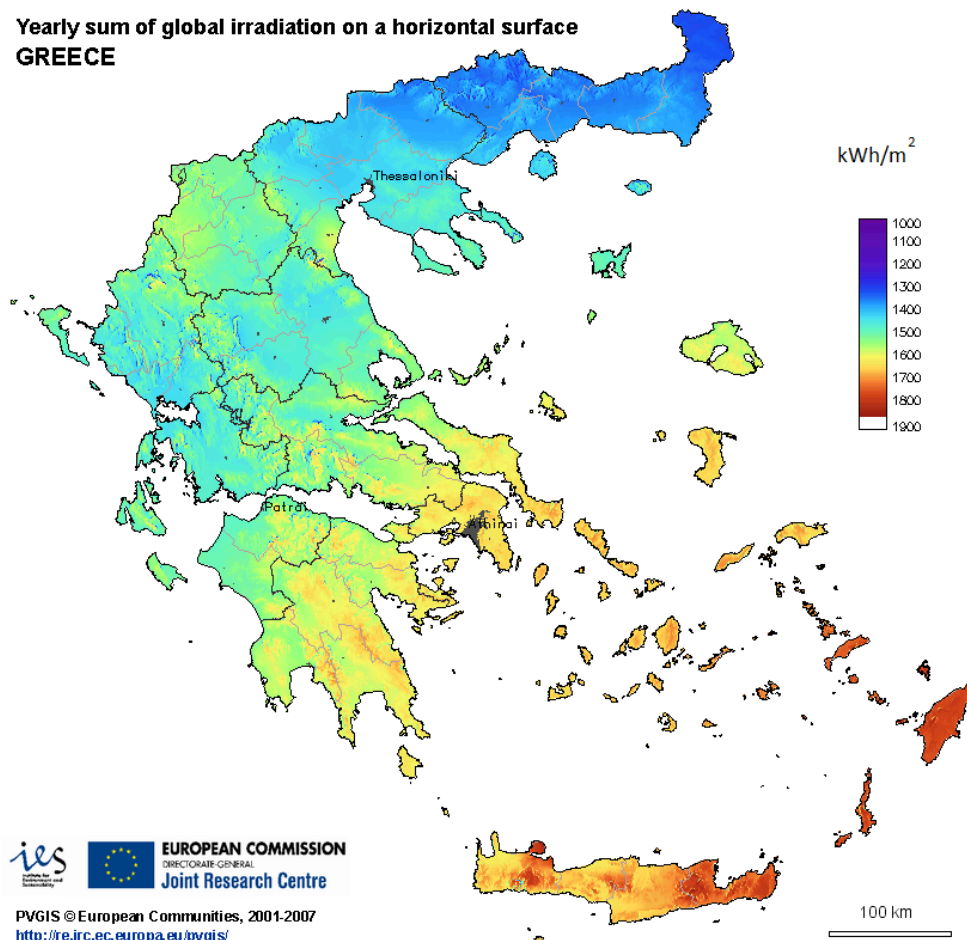
$I_d \text{ [W/m}^2\text{]}$: διάχυτη ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

2.2.4 Ηλιακή ακτινοβολία στον Ελλαδικό χώρο

Είναι προφανές πως η κατασκευή ενός ηλιοθερμικού σταθμού αποτελεί μια αποδοτική και συμφέρουσα λύση για τις περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια και ειδικά με υψηλό δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Direct Normal Irradiation-DNI). Έτσι, κατάλληλες περιοχές είναι αυτές οι οποίες δέχονται ετησίως τουλάχιστον 1.650kWh/m²,

άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, με ιδανικότερες τοποθεσίες αυτές που δέχονται περισσότερες από 2.000kWh/m² ετησίως. Παγκοσμίως, κατάλληλες τοποθεσίες είναι οι μεσογειακές χώρες της Ευρώπης, οι νοτιοδυτικές περιοχές των ΗΠΑ, η κεντρική και νότια Αμερική, η Βόρεια και Νότια Αφρική, η Εγγύς και η Μέση Ανατολή, το Ιράν, οι ερημικές πεδιάδες της Ινδίας, το Πακιστάν, η πρώην Σοβιετική Ένωση, η Κίνα και η Αυστραλία και αποτελούν τη λεγόμενη «ηλιακή ζώνη» (sun belt). [7]

Για την Ελλάδα, ειδικότερα οι περιοχές που μπορούν να φιλοξενήσουν έργα ΑΠΕ με υψηλή ενεργειακή απόδοση, όπως φαίνεται και από το δυναμικό του DNI, στο παραπάνω Σχήμα, είναι κυρίως οι περιοχές της Κρήτης και της Ρόδου, όπου η άμεση ηλιακή ακτινοβολία ξεπερνά τις 1.700kWh ετησίως (σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3: Ετήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδη επιφάνεια στον Ελλαδικό χώρο
(πηγή:<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>)

2.2.5 Ιστορική αναδρομή εκμετάλλευσης ηλιακής ακτινοβολίας

Η ιδέα της χρήσης συλλεκτών ηλιακής ενέργειας για την αξιοποίηση της ηλιακής ισχύος καταγράφεται από τους προϊστορικούς χρόνους. Από την προϊστορία, ο ήλιος αποτέλεσε τη βασική πηγή ζωής για την επιβίωση του ανθρώπου κι έτσι ο άνθρωπος αναγνωρίζει τον ήλιο ως κινητήρια δύναμη πίσω από κάθε φυσικό φαινόμενο. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο πολλά προϊστορικά φύλα θεωρούσαν τον Ήλιο ως «Θεό». Πολλά από τα

γραφτά της αρχαίας Αιγύπτου λένε ότι η Μεγάλη Πυραμίδα, μια από τα μεγαλύτερα τεχνικά επιτεύγματα του ανθρώπου, χτίστηκε ως σκάλες προς τον ήλιο. [8]

Ο άνθρωπος συνειδητοποίησε πως μπορεί να ωφεληθεί από την ηλιακή ενέργεια από τους προϊστορικούς κιόλας χρόνους. Ο Έλληνας ιστορικός Ξενοφώντας στα "Απομνημονεύματα" καταγράφει μερικές από τις διδασκαλίες του Έλληνα φιλόσοφου Σωκράτη (470-399 π.Χ.) σχετικά με τον σωστό προσανατολισμό των κατοικιών, προκειμένου να είναι δροσερά το καλοκαίρι και ζεστά κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Το 212 π.Χ. ο Έλληνας επιστήμονας / ιατρός Αρχιμήδης επινόησε μια μέθοδο για να κάψει τον ρωμαϊκό στόλο. Ο Αρχιμήδης φημολογείται ότι έστρεψε εκατοντάδες στιλβωμένες ασπίδες με τη μορφή κοίλου μεταλλικού καθρέφτη, ώστε όλες να αντικατοπτρίζουν το ίδιο πλοίο. [8] Το βασικό ερώτημα ήταν αν ο Αρχιμήδης ήξερε αρκετά για το την επιστήμη της οπτικής προκειμένου να κατασκευάσει μια συσκευή που μπορεί και συγκεντρώνει το φως του ήλιου σε ένα σημείο. Φημολογείται πως ο Αρχιμήδης είχε γράψει ένα βιβλίο αλλά κανένα αντίγραφο δεν επιβίωσε για να αποδείξει.

Σχεδόν 18 αιώνες μετά τον Αρχιμήδη, ο Αθανάσιος Kircher (1601-1680) διενήργησε μερικά πειράματα με πυρκαγιά πάνω σε ξύλινη σφαίρα από απόσταση για να διαπιστώσει αν η ιστορία του Αρχιμήδη είχε οποιαδήποτε επιστημονική εγκυρότητα, αλλά καμία αναφορά των ευρημάτων του επιβίωσε. [9]

Κατά τη διάρκεια του 18^{ου} αιώνα, οι ηλιακοί κλίβανοι, που χρησιμοποιούνταν σε όλη την Ευρώπη και τη Μέση Ανατολή, κατασκευάζονταν από γυαλισμένο σίδηρο, γυάλινους φακούς και καθρέφτες και ήταν ικανοί να λιώσουν σίδηρο, χαλκό και άλλα μέταλλα. Ένας φούρνος σχεδιασμένος από το Γάλλο επιστήμονα Antoine Lavoisier, έφτασε στην αξιοσημείωτη θερμοκρασία των 1750 °C. Ο κλίβανος χρησιμοποίησε έναν φακό 1,32 m μαζί με ένα δευτερεύον φακό 0,2 m για να επιτευχθεί η παραπάνω θερμοκρασία που αποδείχθηκε ότι ήταν η μέγιστη δυνατή για εκατό χρόνια.

Κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα οι προσπάθειες μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε άλλες μορφές που σκόπευαν στη κυρίως στην παραγωγή ατμού χαμηλής πίεσης, για τη λειτουργία ατμομηχανών. Ο Augustin Mouchot πρωτοστάτησε στον τομέα αυτό κατασκευάζοντας και λειτουργώντας πολλές ηλιακές ατμομηχανές, μεταξύ των ετών 1864 και 1878. [9] Η αξιολόγηση μιας τέτοιας μηχανής από τη γαλλική κυβέρνηση έδειξε ότι η τεχνολογία ήταν πολύ ακριβή ώστε να θεωρείται βιώσιμη. Στην Αλγερία, ο Mouchot (1875) σημείωσε αξιοσημείωτη πρόοδο στην κατασκευή ενός ηλιακού συλλέκτη, σχεδιάζοντας το κάτοπτρο με τη μορφή ενός κολουρου κώνου. Ο συλλέκτης του Mouchot ήταν από επιχρυσωμένες μεταλλικές πλάκες και είχε διάμετρο 5.4 m και συνολική επιφάνεια 18,6 m², ενώ τα κινούμενα μέρη ζύγιζαν 1400 κιλά. Ο Abel Pifre ήταν σύγχρονος του Mouchot, ο οποίος επίσης κατασκεύαζε ηλιακές μηχανές [9,10]. Οι ηλιακοί συλλέκτες του Pifre ήταν παραβολικοί ανακλαστήρες κατασκευασμένοι από πολύ μικρούς καθρέφτες. Το σχήμα τους ήταν παρόμοιο με τους κολουρους κώνους του Mouchot.

Ένα άλλο αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι αυτό του John Ericsson, Σουηδού μετανάστη στις Ηνωμένες Πολιτείες, που το 1870 σχεδίασε και κατασκεύασε έναν ηλιακό συλλέκτη με άνοιγμα 3,25 m² που οδηγούσε μια μικρή μηχανή 373W. Το σύστημα του ηλιακού αυτού συλλέκτη παρήγαγε ατμό κατευθείαν μέσα στον ηλιακό συλλέκτη (αυτό που σήμερα χαρακτηρίζεται Direct Steam Generation). Από το 1872 μέχρι το 1875 ο Ericsson κατασκεύασε άλλα 7 παρόμοια συστήματα, χρησιμοποιώντας τον αέρα ως θερμικό ρευστό. Το 1883 ο Ericsson κατασκεύασε μία μεγάλη «ηλιακή μηχανή», που παρουσιάστηκε στην Νέα Υόρκη. Είχε μήκος 3,35 m και άνοιγμα 4,88 m και συγκέντρωνε την ακτινοβολία σε έναν κυλινδρικό δέκτη διαμέτρου 15,88 cm. Ο δέκτης αποτελούνταν από ξύλινες σανίδες, που στηρίζονταν σε παραβολικά κυρτωμένες ραβδώσεις από σίδηρο, προσαρμοσμένες στις πλευρές του συλλέκτη. Οι πλάκες αντανάκλασης, που ήταν κατασκευασμένες από γυαλί επαργυρωμένο στην κάτω πλευρά, ήταν προσαρμοσμένες στις σανίδες. Ολόκληρη η συσκευή ακολουθούσε τον ήλιο χειροκίνητα. Η μέση

ταχύτητα του κινητήρα κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών δοκιμών ήταν 120 rpm και η απόλυτη πίεση λειτουργίας του εμβόλου 0,24 MPa.^[12]

Το 1901 ο A.G. Eneas εγκατέστησε συγκεντρωτικό συλλέκτη διαμέτρου 10m που τροφοδοτούσε μια συσκευή άντλησης νερού στην Καλιφόρνια. Η συσκευή αποτελούνταν από μια μεγάλη δομή, ανοιχτή σαν ομπρέλα και ανεστραμμένη υπό γωνία για την πλήρη λήψη των ακτίνων του ήλιου από τους 1788 καθρέφτες που κάλυπταν την εσωτερική επιφάνεια. Έτσι, οι ακτίνες του ήλιου συγκεντρώνονταν σε ένα εστιακό σημείο, στο οποίο βρισκόταν ο λέβητας. Το νερό μέσα στο λέβητα θερμαινόταν με σκοπό την παραγωγή ατμού που με τη σειρά του τροφοδοτούσε μια φυγοκεντρική αντλία.^[1,9]

Το 1904 ένας Πορτογάλος ιερέας, ο «πατέρας» Himalaya, έκτισε ένα μεγάλο ηλιακό φούρνο. Αυτό παρουσιάστηκε σε έκθεση στο Σείντ Λούις. Αυτός ο φούρνος ήταν παραβολικός συλλέκτης με αρκετά μοντέρνα δομή και μεγάλου μεγέθους.^[9]

Το 1912 ο Shuman, σε συνεργασία με τους C.V. Boys, ανέλαβε να κατασκευάσει το μεγαλύτερο αντλιοστάσιο στον κόσμο στο Meadi (Αίγυπτος). Το σύστημα τέθηκε σε λειτουργία το 1913 και χρησιμοποίησε μεγάλους παραβολικούς κυλίνδρους για να εστιάσει το ηλιακό φως σε ένα μακρύ απορροφητικό σωλήνα. Κάθε κύλινδρος είχε μήκος 62 m, και η συνολική ανακλαστική επιφάνεια των κυλίνδρων ήταν 1200 m². Ο ηλιακός κινητήρας ανέπτυξε μέχρι και 37-45 kW συνεχώς για μια περίοδο 5 ωρών.^[1,9,10] Παρά την επιτυχία, το εργοστάσιο παραγωγής έκλεισε τελείως το 1915 λόγω της έναρξης του Α' Παγκοσμίου Πολέμου και των φθηνότερων τιμών των καυσίμων.

Τα τελευταία 50 χρόνια, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν πολλές παραλλαγές συγκεντρωτικών συλλεκτών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικότερα είδη, που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα.

2.3 Ηλιακοί Συλλέκτες

2.3.1 Γενικά

Όπως προαναφέρθηκε, ένας ηλιακός συλλέκτης μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία είτε σε θερμική ενέργεια σε ένα ηλιοθερμικό σύστημα, είτε απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών. Στις εφαρμογές ηλιοθερμίας, η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από έναν ηλιακό συλλέκτη ως θερμότητα, η οποία στη συνέχεια αποδίδεται στο ρευστό λειτουργίας του συστήματος (αέριο, νερό ή έλαιο). Η θερμότητα που συγκρατείται στο ρευστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την παροχή ζεστού νερού οικιακής χρήσης/θέρμανσης, είτε για την φόρτιση μιας δεξαμενής αποθήκευσης, μέσω της οποίας μπορεί να αξιοποιηθεί αργότερα (σε νυχτερινές ώρες ή ημέρες χωρίς ηλιοφάνεια). Στις εφαρμογές φωτοβολταϊκών, μία μονάδα φωτοβολταϊκού όχι μόνο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια (συνήθως με χαμηλή απόδοση), αλλά επιπλέον παράγει μεγάλη ποσότητα περίσσειας θερμότητας η οποία μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς θέρμανσης, μέσω της σύνδεσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σωλήνες ανάκτησης από τις οποίες διέρχεται το ρευστό μεταφοράς.^[4] Στη συνέχεια ο όρος «ηλιακός συλλέκτης» ή «συλλέκτης» θα χρησιμοποιείται για τις συσκευές που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε χρήσιμη θερμική ενέργεια.

Οι ηλιακοί συλλέκτες, ανάλογα με το ρευστό που απάγει τη θερμότητα, η οποία παράγεται στην επιφάνεια που προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία (δέκτης), χωρίζονται σε συλλέκτες υγρού και συλλέκτες αερίου. Η σημαντικότερη όμως κατηγοριοποίηση γίνεται ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, κατά τον οποίο διακρίνονται στους επίπεδους και στους συγκεντρωτικούς, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.^[3]

2.3.2 Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες

2.3.2.1 Γενικά

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες παράγουν αναπτύσσουν χαμηλές θερμοκρασίες, που αξιοποιούνται για τη παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (Ζ.Ν.Χ.) και τη θέρμανση των χώρων κτιριακών εγκαταστάσεων. Η σχετικά χαμηλή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη και οι αυξημένες θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον, λόγω των μεγάλων επιφανειών, δε επιτρέπουν την επίτευξη θερμοκρασιών μεγαλύτερων από 150 °C. Η συνήθης περιοχή λειτουργίας είναι από 40 °C έως 100°C.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (άμεσης και διάχυτης) απορροφάται από μια επιφάνεια, που συμπεριφέρεται σαν μέλαν (μαύρο) σώμα στην ηλιακή ακτινοβολία. Ένα μέρος της απορροφούμενης ενέργειας μεταφέρεται σε κάποιο ρευστό, ενώ το υπόλοιπο χάνεται στο περιβάλλον. Το ποσόν της θερμότητας που απάγεται από το ρευστό είναι το ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος του συλλέκτη. Το κέρδος αυτό για έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη είναι 350-400kWh/m².year για ετήσια ηλιακή ακτινοβολία 1000kWh/m².year. [3]

2.3.2.2 Ανάλυση Επίπεδου Ηλιακού Συλλέκτη

Ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4:

- Απορροφητική επιφάνεια ή απορροφητήρας

Αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα του συλλέκτη και είναι συνήθως μια μεταλλική επιφάνεια με υψηλή θερμική αγωγιμότητα (συνήθως από χαλκό ή αλουμίνιο) και σκουρόχρωμη επιφάνεια.

- Σωλήνες ή αεραγωγούς

Οι σωλήνες ή οι αεραγωγοί κατασκευάζονται συνήθως από χαλκό και είναι σε επαφή με τον απορροφητήρα. Μέσα σε αυτούς κυκλοφορεί το ρευστό που απάγει τη θερμότητα από τον απορροφητήρα.

- Διαφανές Κάλυμμα

Το διαφανές κάλυμμα τοποθετείται προς την πλευρά που είναι εκτεθειμένη στον ήλιο και αποτελείται από μία ή δύο γυάλινες ή πλαστικές επιφάνειες, οι οποίες παγιδεύουν την ηλιακή ακτινοβολία (φαινόμενο του θερμοκηπίου).

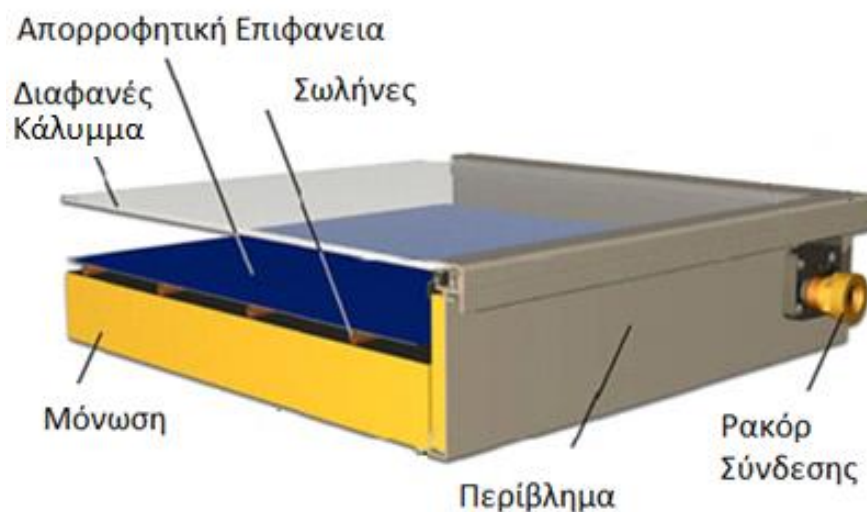
- Μόνωση

Τοποθετείται στην πίσω πλευρά και στις παράπλευρες επιφάνειες του συλλέκτη, έτσι ώστε να περιορίζει τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον.

- Περίβλημα

Είναι μεταλλικό ή πλαστικό, που ενοποιεί την κατασκευή και προστατεύει το συλλέκτη από τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Το διαφανές κάλυμμα του συλλέκτη θα πρέπει να επιτρέπει να περάσει το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας και παράλληλα να απορροφά και να ανακλά το μικρότερο τμήμα της. Δηλαδή, θα πρέπει να έχει μεγάλο συντελεστή διαπερατότητας και μικρούς συντελεστές απορροφητικότητας και ανακλαστικότητας. Η διερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται χρήσιμη και απορροφάται στη συνέχεια από τον απορροφητήρα, οποίος βρίσκεται κάτω από το διαφανές κάλυμμα. Η αύξηση της θερμοκρασίας του απορροφητήρα προκαλεί εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας, την οποία θα πρέπει να εμποδίσει το διαφανές κάλυμμα να απομακρυνθεί από το συλλέκτη. Συνεπώς το κάλυμμα ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη θα πρέπει να είναι διαφανές για ακτινοβολίες από 0,2 μm έως 2,7 μm και αδιαφανές για ακτινοβολίες μεγαλύτερου μήκους κύματος.



Σχήμα 2.4: Τομή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τον απορροφητήρα έχει μήκη κύματος μικρότερα των 3 μm σε ποσοστό 98% και προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας του στους 200 °C. Αυτό που επιδιώκεται από τον απορροφητήρα είναι μεγάλος συντελεστής απορροφητικότητας για τα μικρά μήκη κύματος και μικρός συντελεστής εκπομπής για τα μεγάλα μήκη κύματος. Η επιφάνεια που παρουσιάζει τις παραπάνω ιδιότητες ονομάζεται επιλεκτική και κατασκευάζεται:

- i. με βαφή, όπως βαφή οξειδίου του χαλκού πάνω σε αλουμίνιο ή χαλκό και βαφή θειούχου νικελίου και θειούχου ψευδαργύρου πάνω σε γαλβανισμένο σίδηρο
- ii. με ηλεκτρολυτική απόθεση νικελίου ή χρωμίου πάνω σε μεταλλική βάση, όπως επινικελωμένος σίδηρος με 2 στρώματα μαύρου νικελίου, επινικελωμένος σίδηρος ή χαλκός με στρώμα μαύρου χρωμίου και επιφάνεια TINOX (στρώμα τιτανίου, αζώτου και οξυγόνου πάνω σε χαλκό

Η απόσταση μεταξύ των σωλήνων είναι συνήθως 100-120mm και η καλή επαφή με τον απορροφητήρα εξασφαλίζει τη μέγιστη μετάδοση θερμότητας στο ρευστό που κυκλοφορεί μέσα σε αυτούς. Το ρευστό θα πρέπει να έχει τρεις βασικές ιδιότητες: α) υψηλή θερμοχωρητικότητα, β) υψηλή θερμική αγωγιμότητα και γ) χαμηλό ιξώδες. Συνήθως το ρευστό που χρησιμοποιείται είναι νερό με προσθήκη προπυλενογλυκόλης σε διάφορα ποσοστά. Με την προσθήκη αυτή το σημείο πήξης του νερού μειώνεται σημαντικά (-23 °C με 40% περιεκτικότητα), ενώ το σημείο

βρασμού αυξάνεται εξίσου σημαντικά (150 °C με 40% περιεκτικότητα). Αντιθέτως όμως, μειώνεται η θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα, αυξάνεται το ιξώδες, ενώ το μίγμα γίνεται πιο διαβρωτικό και απαιτείται ο εμπλουτισμός του μίγματος με επιπλέον ουσίες που θα προστατέψουν τις σωληνώσεις από τη διάβρωση.^[3]

2.3.2.3 Συλλέκτης Κενού

Ένας βελτιωμένος τύπος επίπεδου συλλέκτη είναι ο συλλέκτης κενού. Η ανάγκη για μείωση των θερμικών απωλειών του συλλέκτη, τόσο κατά τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας, όσο και κατά τη μετάδοση της θερμότητας από τον απορροφητήρα στο ρευστό, οδήγησε στην επιινόηση των συλλεκτών του συγκεκριμένου είδους. Βασική ιδέα της κατασκευής είναι η δημιουργία κενού αέρα μεταξύ της διαφανούς και της απορροφητικής επιφάνειας, το οποίο μειώνει τις θερμικές απώλειες και αυξάνει το βαθμό απόδοσης του συλλέκτη. ^[3]

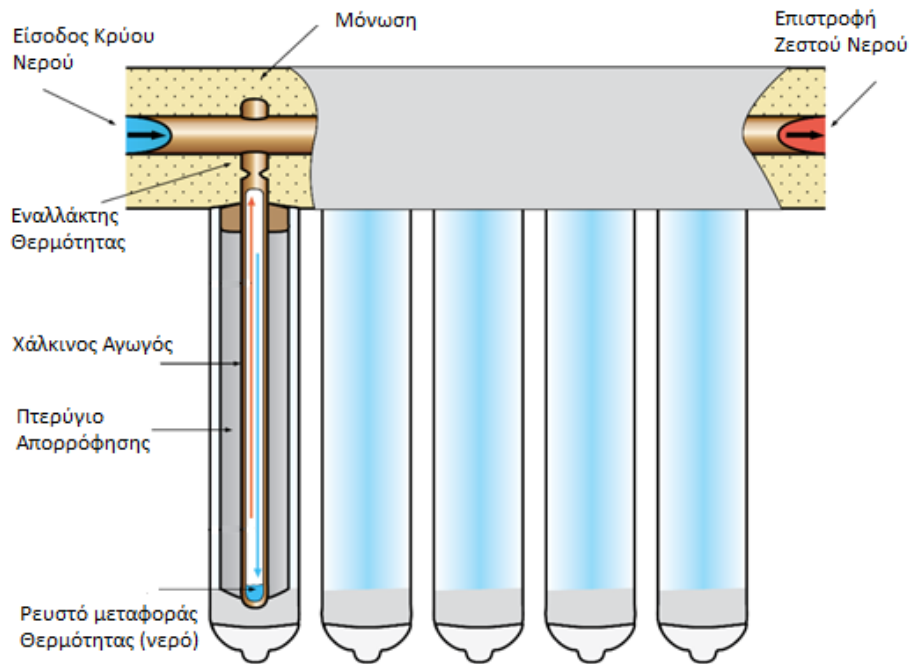
Οι δύο συνήθεις τύποι συλλεκτών κενού είναι οι συλλέκτες με αγωγούς θερμότητας (heat pipe) και οι U-tube, οι οποίοι φαίνονται στα σχήματα 2.5 και 2.6 αντίστοιχα. Αμφότεροι αποτελούνται από μια συστοιχία παράλληλων σωλήνων που συνδέονται σε ένα σωλήνα πολλαπλής εισαγωγής μέσω του οποίου διέρχεται το ρευστό μεταφοράς της θερμικής ενέργειας (νερό ή μίγμα νερού-γλυκόλης). Το θερμοαπορροφητικό υλικό είναι τοποθετημένο εσωτερικά ενός σωλήνα διπλής υάλωσης, ενδιάμεσα της οποίας υπάρχει κενό αέρος. Το εσωτερικό τζάμι του σωλήνα έχει συγκεντρωτική επιφάνεια προκειμένου να μπορεί να απορροφήσει την ηλιακή ενέργεια. Η θερμότητα μεταφέρεται στην εσωτερική γυάλινη επιφάνεια και απομακρύνεται μέσω ενός αγωγού θερμότητας (heat pipe) ή ενός χάλκινου σωλήνα. Οι απώλειες θερμότητας εξαλείφονται λόγω του κενού αέρος και ως εκ τούτου μπορεί να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες ρευστού έως και 120 °C. ^[10]

- Συλλέκτες με αγωγούς θερμότητας (heat pipe)

Ένας συλλέκτης με αγωγό θερμότητας χρησιμοποιεί αυτούς τους σωλήνες για να μεταφέρει την συγκεντρωμένη ηλιακή θερμότητα από τον αγωγό (tube) στο ρευστό του σωλήνα πολλαπλής εισαγωγής (manifold). Οι αγωγοί θερμότητας αποτελούνται από χάλκινους σωλήνες, οι οποίοι περιέχουν μια πολύ μικρή ποσότητα νερού σε κενό αέρος. Ο αγωγός θερμότητας εμπεριέχεται στον εσωτερικό γυάλινο σωλήνα.

Καθώς ο αγωγός θερμότητας θερμαίνεται, η μικρή ποσότητα νερού στο εσωτερικό του εξατμίζεται και ανυψώνεται στην κορυφή του, στον εναλλάκτη θερμότητας του σωλήνα πολλαπλής εισαγωγής. Το κρύο νερό θερμαίνεται καθώς ρέει εντός του σωλήνα και την ίδια στιγμή ψύχει τον ατμό στο εσωτερικό του αγωγού θερμότητας, ο οποίος συμπυκνώνεται και ρέει στο κάτω μέρος του αγωγού θερμότητας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, συνεπώς δημιουργεί μια ιδιαίτερα αποδοτική διαδικασία μεταφοράς της ηλιακής ενέργειας, η οποία φτάνει στους αγωγούς εντός του ρευστού.

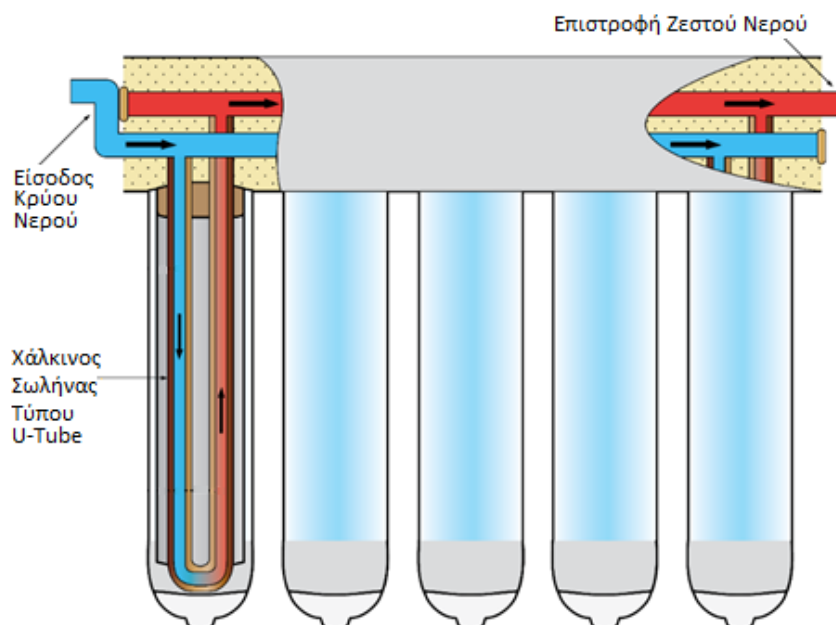
Οι συλλέκτες με αγωγούς θερμότητας δεν είναι κατάλληλοι για οριζόντια εγκατάσταση, καθώς η κλίση τους πρέπει να είναι κατά ελάχιστο 25 μοίρες. ^[10]



Σχήμα 2.5: Τυπική διάταξη συλλέκτη τύπου Heat Pipe ^[10]

- Συλλέκτες τύπου U-tube

Στους συλλέκτες τύπου U-tube το ρευστό θερμαίνεται καθώς ρέει σε ένα χάλκινο σωλήνα μορφής «U» εντός γυάλινων αγωγών.



Σχήμα 2.6: Τυπική διάταξη συλλέκτη τύπου U-tube ^[10]

2.3.3 Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες – Concentrated Solar Power (CSP)

2.3.3.1 Γενικά

Στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες αξιοποιείται μόνο η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, η οποία συλλέγεται από μια μεγάλης έκτασης επιφάνεια και με τη βοήθεια κατάλληλων οπτικών συστημάτων συγκεντρώνεται για να απορροφηθεί από μια επιφάνεια πολύ μικρότερης έκτασης (σε μερικές περιπτώσεις η εστίαση μπορεί να είναι και σημειακή). Η συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας επιτρέπει τη συλλογή θερμότητας σε θερμοκρασίες πού υψηλότερες σε σχέση με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, η οποία χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές χρήσεις και στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Στη συνέχεια γίνεται μια εκτενέστερη περιγραφή των συστημάτων στα οποία εγκαθίστανται συλλέκτες τέτοιου είδους, ενώ στον πίνακα 2.1, συνοψίζονται οι βασικές διαφορές μεταξύ των επίπεδων και συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών, όσων αφορά στα τεχνικά τους χαρακτηριστικά.

Όπως προαναφέρθηκε, η βασική αρχή λειτουργίας των συστημάτων αυτών, είναι η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σ' ένα σημείο ή μια γραμμή εστίασης με τελικό σκοπό να τη μετατρέψουν σε θερμική ενέργεια. Οι συλλέκτες των συστημάτων αυτών αποτελούνται από το οπτικό μέρος ή συγκεντρωτήρα και τον δέκτη. Ο συγκεντρωτήρας δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, τη συγκεντρώνει και την οδηγεί στο δέκτη, ο οποίος την απορροφά. Η πολλαπλασιασμένη ένταση της προσπίπτουσας στο δέκτη ακτινοβολίας, συνεπάγεται μικρότερη επιφάνεια για ένα δεδομένο ποσό ενέργειας, άρα και μειωμένες απώλειες προς το περιβάλλον. Όπως περιγράφεται και στη συνέχεια ο συγκεντρωτήρας μπορεί να είναι καθρέφτης και να ανακλά την ηλιακή ακτινοβολία ή φακός και να τη διαθλά. Ακόμη μπορεί να είναι επίπεδος, παραβολικός και κινούμενος (που ακολουθεί την πορεία του ήλιου).^[3]

Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά επίπεδων και Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συλλεκτών^[3]

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Επίπεδος	Συγκεντρωτικός
Αξιοποίηση ηλιακής ακτινοβολίας	Άμεση + Διάχυτη	Άμεση
Επιφάνεια συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας	Ίση με την επιφάνεια απορρόφησης	Μεγαλύτερη από την επιφάνεια απορρόφησης
Θερμικές απώλειες	Μεγάλες	Μικρότερες
Θερμοκρασία λειτουργίας	<150 °C	>200 °C
Αντοχή και ποιότητα υλικών	Μέτριες απαιτήσεις	Υψηλές απαιτήσεις
Κινούμενα μέρη	Όχι	Ναι
Κόστος κατασκευής	Μικρό	Μεγάλο
Κόστος συντήρησης	Μικρό	Μεγάλο
Ευπάθεια σε καιρικές συνθήκες	Μικρή	Μεγάλη

Χαρακτηριστικό μέγεθος των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι ο δείκτης συγκέντρωσης C , που ορίζεται ως το πηλίκο της επιφάνειας του συγκεντρωτήρα F_a προς την επιφάνεια του δέκτη F_r :

$$C = F_a / F_r \quad (2.4)$$

Στο εμπόριο είναι διαθέσιμοι πολλοί τύποι τέτοιων συστημάτων, παρόλα αυτά, οι βασικότεροι και πολλά υποσχόμενοι, είναι οι εξής:

1. Σύστημα κοίλων παραβολικών συλλεκτών (Parabolic Trough Collectors – PTC)
2. Σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος ή σύστημα κεντρικού δέκτη (Power Tower or Central Receiver Systems – CRS)
3. Συστήματα δίσκου μηχανής (Dish/Engine Systems, DE)
4. Σύστημα γραμμικών ανακλαστήρων τύπου Fresnel (Linear Fresnel reflector system – LF)

Στην πράξη ο δείκτης συγκέντρωσης κυμαίνεται από 1.5 έως 10000. Όσο αυξάνεται ο δείκτης συγκέντρωσης αυξάνεται η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, η ακρίβεια κατασκευής και η ποιότητα του οπτικού συστήματος και επομένως το κόστος.

2.3.3.2 Συστήματα με κοίλους Παραβολικούς Συλλέκτες

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων είναι αυτή των κοίλων ευθύγραμμων παραβολικών συλλεκτών (εικόνα 2.1). Έχουν τομή σχήματος παραβολής και ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτήρων με καθρέφτη. Πολλοί τέτοιοι συλλέκτες συνδυάζονται μαζί, σχηματίζοντας σειρές μήκους ακόμη και 300-600m (σε μεγάλης κλίμακας ηλιακά πάρκα).^[3] Έτσι, η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται, μέσω ανάκλασης, στην εστιακή γραμμή τους. Στον διαμήκη αυτό άξονα είναι τοποθετημένος ο δέκτης, ο οποίος διαρρέεται από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας και με τη σειρά του θερμαίνεται από την άμεση ακτινοβολία του ήλιου. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που κυκλοφορεί μέσα στο δέκτη, προσλαμβάνει τη θερμική ενέργεια και καταλήγει σε μία σειρά εναλλακτών θερμότητας (γεννήτριες ατμού) θερμαίνοντας νερό (θερμοκρασίας κοντά στους 400°C) για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Ο ατμός τροφοδοτεί έναν ατμοστρόβιλο και εκτελώντας έναν θερμοδυναμικό κύκλο, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια^[11].

Ο δείκτης συγκέντρωσης C της ηλιακής ακτινοβολίας, στους συλλέκτες αυτούς πλησιάζει το 100^[3], ενώ ο ετήσιος βαθμός απόδοσης είναι περίπου στο 15%. Τα συγκεκριμένα συστήματα είναι δύο διαστάσεων, οι συλλέκτες περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα προσανατολισμένο με κατεύθυνση ανατολή-δύση, παρακολουθώντας τον ήλιο από το βορρά στο νότο ή το αντίθετο. Με αυτό το σύστημα δε χρειάζεται ιδιαίτερη ρύθμιση του συλλέκτη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε διάστημα ενός χρόνου, ο προσανατολισμός βορρά-νότου είναι πιο αποδοτικός σε σύγκριση με τον ανατολής-δύσης. Με τον πρώτο συλλέγεται περισσότερη ενέργεια το καλοκαίρι, ενώ με τον δεύτερο το χειμώνα. Η επιλογή του κατάλληλου προσανατολισμού εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή (αν η ενέργεια χρειάζεται το χειμώνα ή το καλοκαίρι). Οι περισσότερες υπάρχουσες εγκαταστάσεις είναι υβριδικές, αφού διαθέτουν εφεδρικό λέβητα που λειτουργεί με ορυκτά καύσιμα για τη θέρμανση του ρευστού σε περιόδους με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης, είναι δυνατή και η χρήση θερμοκλινών για την αποθήκευση την θερμικής ενέργειας.^[11]

Τα πλεονεκτήματα των παραβολικών συλλεκτών είναι τα εξής:

- Εμπορικά Ωριμη τεχνολογία
- Απόδοση 14% (Μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια)
- Εμπορικά αποδεδειγμένο κόστος επένδυσης και λειτουργίας
- Συναρμολογησιμότητα
- Καλύτερη εκμετάλλευση γης
- Χαμηλότερη απαίτηση σε υλικά

- Δυνατότητα εφαρμογής υβριδικής τεχνολογίας
- Δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας



Εικόνα 2.1: Αποψη παραβολικού συλλέκτη ^[13]

2.3.3.3 Συστήματα Ηλιακού Πύργου Ισχύος

Ο Πύργος Ηλιακής Ισχύος (εικόνα 2.2) αποτελεί το πιο περίπλοκο σύστημα ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων. Ο συγκεντρωτής είναι μη συνεχής, δηλαδή αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κατόπτρων ή αλλιώς ηλιοστάτες, τα οποία ανακλούν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία προς έναν κεντρικό δέκτη τοποθετημένο σε πύργο. Το ύψος του κεντρικού πύργου μπορεί να προσεγγίσει ακόμη και τα 200m, ανάλογα με το μέγεθος του σταθμού. Το ηλιοστατικό πεδίο βρίσκεται γύρω ή βόρεια του πύργου και αποτελείται από εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες κάτοπτρα τα οποία κατά την εγκατάστασή τους διατάσσονται στο χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε να μη σκιάζονται μεταξύ τους, ούτε να παρεμβάλλονται στην πορεία της ανακλώμενης ακτινοβολίας, εμποδίζοντας τη να φτάσει στον δέκτη. Κάθε κάτοπτρο μπορεί να είναι επίπεδο ή ελαφρώς κυρτό και διαθέτει σύστημα δύο αξόνων παρακολούθησης του ήλιου, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη συγκέντρωση ακτινοβολίας στον κεντρικό δέκτη που είναι εγκαταστημένος στην κορυφή του πύργου. Ο δέκτης είναι σχεδιασμένος ώστε να απορροφά την προσπίπτουσα ακτινοβολία, αναπτύσσοντας υψηλές θερμοκρασίες. Εκεί η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική, καθώς θερμαίνεται ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας σε θερμοκρασίες που φτάνουν ακόμη και τους 850°C. Το τελευταίο μετατρέπεται σε ατμό ή θερμαίνει ένα εργαζόμενο μέσο με εναλλάκτη θερμότητας και εισέρχεται σε ατμοστρόβιλο ο οποίος κινεί μία γεννήτρια και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτώντας το δίκτυο. ^[11]



Εικόνα 2.2: Εγκατάσταση Ηλιακού Πύργου PS10 ^[13]

Στην τεχνολογία ηλιακού πύργου μπορούν να επιτευχθούν πολύ υψηλές τιμές συγκέντρωσης ακτινοβολίας ($C=300-1500$). ^[3] Αυτού του είδους οι μονάδες είναι πιο κατάλληλες για μονάδες ισχύος της τάξης των 30 - 400MW_e. Οι πύργοι ηλιακής ισχύος για να είναι οικονομικοί πρέπει να είναι μεγάλοι σε ισχύ άρα και έκταση. Δεν γίνεται να δημιουργηθούν σε μικρότερη κλίμακα όπως τα υπόλοιπα είδη ηλιοθερμικών συστημάτων και να παραμείνουν οικονομικά αποδοτικοί. Κατάλληλες περιοχές είναι αυτές με άφθονη ηλιακή ακτινοβολία και φθηνό κόστος γης.

Τα κύρια πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν αυτές οι εγκαταστάσεις είναι τα εξής:

- Συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια οπτικά και τη μεταφέρουν σε ένα ενιαίο δέκτη ελαχιστοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις μεταφοράς της θερμικής ενέργειας.
- Πετυχαίνουν λόγους συγκέντρωσης της τάξης 300-1500 και επομένως είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στη συλλογή ενέργειας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρισμό.
- Μπορούν εύκολα να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια.
- Πρόκειται γενικά για μεγάλες εγκαταστάσεις (>10 MW_e) και επωφελούνται από τις οικονομίες κλίμακας. Συνήθως είναι της τάξης των 30-400 MW_e.

2.3.3.4 Συστήματα Δίσκου Μηχανής

Τα συστήματα δίσκου μηχανής (εικόνα 2.3) ανήκουν στην κατηγορία των συγκεντρωτών με είδωλο. Χρησιμοποιούν ένα κοίλο κάτοπτρο και αξιοποιώντας μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, την συγκεντρώνουν σε ένα εστιακό σημείο, τον δέκτη, ο οποίος μπορεί να είναι σφαιρικός, επίπεδος ή κοίλος. Ο δέκτης απορροφώντας την ακτινοβολία του ήλιου την μετατρέπει σε θερμική ενέργεια του κυκλοφορούντος μέσου το οποίο μπορεί να

είναι υγρό ή αέριο. Τα συστήματα είναι αποδοτικά στη συλλογή ηλιακής ενέργειας σε υψηλές θερμοκρασίες. Διαθέτουν δύο άξονες κίνησης για την ανάκλαση της δέσμης φωτός ενώ για την επίτευξη του βέλτιστου προσανατολισμού θα πρέπει το κέντρο της επιφάνειας του δίσκου να είναι πάντα κάθετο στην ευθεία με το κέντρο του ήλιου. Εξασφαλίζουν έτσι, μεγάλους λόγους συγκέντρωσης (1000 – 4000) με επακόλουθο πολύ μεγάλους βαθμούς απόδοσης, έως και 29,4%, αναφορά η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από όλα τα συστήματα μετατροπής ενέργειας.

Η κύρια χρήση αυτού του τύπου συγκεντρωτή είναι η παραγωγή θερμικής ενέργειας για μετατροπή της σε ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας μια διάταξη μηχανής – γεννήτριας συνδεδεμένη απευθείας στο δέκτη, που συνήθως είναι μια μηχανή Stirling ή ένας αεριοστρόβιλος. Πολύ σημαντικό παράγοντα αποτελεί η κατασκευή του, η οποία μπορεί να αποτελείται από πολλαπλά κάτοπτρα, και αυτό καθιστά τέτοια συστήματα ικανά για αυτόνομες απομακρυσμένες εφαρμογές αλλά και την ομαδοποίηση τους για χρήση σε απομονωμένα σημεία του δικτύου. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα υβριδικής λειτουργίας με χρήση συμβατικών καυσίμων. Ο μεγάλος βαθμός απόδοσής τους είναι ο λόγος για τον οποίο έχουν το δυναμικό να καταστούν μια από τις λιγότερο ακριβές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας. Παρόλα αυτά, η χρήση τους είναι πολύ περιορισμένη και χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας ως και 25kW. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της εξέλιξης, καθώς το κόστος είναι απαγορευτικό για τη μαζική παραγωγή τους.

Τα κύρια πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν αυτά τα συστήματα είναι τα εξής:

- Πολύ υψηλός βαθμός απόδοσης περίπου 30%
- Συναρμολογησιμότητα
- Δυνατότητα εφαρμογής υβριδικής τεχνολογίας



Εικόνα 2.3: Παραβολικοί δίσκοι μηχανής Stirling (Plataforma Solar de Almeria) ^[13]

2.3.3.5 Συστήματα συλλεκτών τύπου Fresnel

Ο συλλέκτης Fresnel (εικόνα 2.4) ανήκει στην τεχνολογία ηλιοθερμικών συστημάτων που εφαρμόζουν γραμμική εστίαση και μπορεί να θεωρηθεί ως ένας «κατακερματισμένος» ανακλαστής παραβολικού κατόπτρου. Αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές ανακλαστήρων που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη τοποθετημένο κατά μήκος των σειρών αυτών και αρκετά μέτρα ψηλότερα. Οι ανακλαστήρες αυτοί είναι γνωστοί ως πρωτοβάθμιοι για να μη συγχέονται με ένα δευτεροβάθμιο ανακλαστήρα που είναι τοποθετημένος στο επάνω μέρος του δέκτη και κατευθύνει όλες τις εισερχόμενες ακτίνες στο σωλήνα απορρόφησης. Ο δεύτερος που είναι τοποθετημένος πάνω από το δέκτη, έχει στόχο όχι μόνο να αυξήσει το στόχο για τους ανακλαστήρες Fresnel, αλλά να λειτουργήσει και ως μόνωση για τον απορροφητήρα. Στο πίσω μέρος διαθέτει αδιαφανή μόνωση και στο μπροστινό μέρος έναν υαλοπίνακα, ο οποίος περιορίζει τις απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής.

Το σύστημα των συλλεκτών Fresnel είναι πανομοιότυπο με αυτό των παραβολικών κοίλων συλλεκτών καθώς χρησιμοποιεί σωληνωτό δέκτη που είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής του συλλέκτη. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου συστήματος είναι το αρκετά χαμηλότερο κόστος της κατασκευής αλλά και του συστήματος παρακολούθησης του ήλιου, αφού τα κάτοπτρα τοποθετούνται με τρόπο που επιτρέπει στις σειρές να συζευχθούν και να κινούνται από μία μόνο μηχανή. Όσον αφορά την απλότητα της κατασκευής, ο δέκτης είναι τοποθετημένος σε σταθερή θέση και έτσι δεν απαιτούνται υδραυλικές συμπλέξεις ενώ παράλληλα τα κάτοπτρα δεν χρειάζεται να στηρίζουν το δέκτη.



Εικόνα 2.4: Άποψη ηλιακού πεδίου με συλλέκτες Fresnel ^[13]

Επίσης, πλεονεκτεί έναντι των παραβολικών κοίλων συστημάτων ως προς τη χωροθέτηση, αφού είναι δυνατή η τοποθέτηση των συλλεκτών σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους.

Η πιο βασική διαφορά όμως βρίσκεται στην λειτουργία του. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας στο δέκτη είναι νερό, αφού η παραγωγή του ατμού γίνεται απευθείας στον σωλήνα απορρόφησης. Αυτό, αποτελεί μεγάλο

πλεονέκτημα, αφού το σύστημα δεν απαιτεί γεννήτρια ατμού. Συνεπώς, τα συστήματα γραμμικών ανακλαστήρων Fresnel θεωρούνται μια οικονομική λύση αλλά με αμφισβητήσιμη αξιοπιστία, λόγω χαμηλότερων βαθμών απόδοσης και ανεπάρκειας στην απόδοση μεγάλης ισχύος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των γραμμικών συλλεκτών Fresnel είναι τα εξής:

- Χρησιμοποιούνται οικονομικά επίπεδα κάτοπτρα και απλό σύστημα παρακολούθησης του ήλιου.
- Δε χρειάζεται τεχνολογία κενού, ούτε υάλινο κάλυμμα.
- Διαθέτουν σταθερό σωλήνα απορρόφησης, χωρίς να χρειάζονται εύκαμπτες συνδέσεις υψηλής πίεσης.
- Λόγω της επιπεδότητας του ανακλαστήρα, τα φορτία του ανέμου είναι περιορισμένα.
- Λόγω της άμεσης παραγωγής ατμού, δε χρειάζεται η χρήση εναλλάκτη θερμότητας.
- Αποτελεσματική χωροθέτησή τους, αφού μπορούν να τοποθετηθούν ο ένας δίπλα στον άλλο.

2.3.3.6 Σύγκριση τεχνολογιών ηλιακών συλλεκτών

Σύμφωνα με έκθεση της Διεθνούς Υπηρεσίας Ενέργειας (International Energy Agency, IEA), προκύπτει ο Πίνακας 2.2, όπου συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων τεχνολογιών σχετικών με τα είδη συλλεκτών που εγκαθίστανται στα ηλιοθερμικά πάρκα παραγωγής κυρίως θερμικής, αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας. ^[13]

Πίνακας 2.2: Βασικές τεχνολογίες συλλεκτών συγκεντρωτικών συστημάτων ^[13]

Τεχνολογία	Κοίλων Παραβολικών	Πύργοι Κεντρικού Δέκτη	Δίσκου Μηχανής	Ανακλαστήρες Fresnel
Οπτικός Βαθμός Απόδοσης	**	**	***	*
Ετήσιος Βαθμός απόδοσης (ηλιακή/ηλεκτρική ενέργεια)	15%	20-35%	25-30%	8-10%
Απαιτούμενη Έκταση	Μεγάλη	Μεσαία	Μικρή	Μεσαία
Απαιτούμενο Νερό Ψύξης (lit/MWh)	3000 ή ξηρή	2000 ή ξηρή	Μηδενική	3000 ή ξηρή
Δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας	Ναι	Ναι	Αναλόγως με τη διάταξη	Ναι
Δυνατότητα Χρήσης Καυσίμου-Υβριδισμού	Ναι	Ναι	Ναι (σπάνιο)	Ναι
Παραγωγή Καυσίμου	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι
Συντελεστής Μετατροπής (ηλιακής/θερμικής)	24-50%	24-70%	25%	24%
Προοπτικές Βελτίωσης	Περιορισμένες	Πολύ Σημαντικές	Μέσω μαζικής παραγωγής	Σημαντικές

2.4 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό αφού πρώτα έγινε μια εισαγωγή γενικά περί της ηλιακής ακτινοβολίας και μια ιστορική αναδρομή, για τους τρόπους με τους οποίους ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε την ηλιακή ενέργεια προς όφελός του, στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι σημαντικότεροι τύποι ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως σε ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα πεδία στα οποία εφαρμόζονται. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μια εκτενής περιγραφή των επιμέρους τμημάτων από τα οποία αποτελείται ένας τυπικός ηλιοθερμικός σταθμός παραγωγής θερμικής, αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας, κοίλων παραβολικών συλλεκτών.

Αναφορές

- [1] Kreith F, Kreider JF. «Principles of solar engineering», McGraw-Hill, New York, 1978.
- [2] Soteris A. Kalogirou, «Solar thermal collectors and applications», Department of Mechanical Engineering, Higher Technical Institute, Elsevier, Nicosia, Cyprus, February 2004.
- [3] Πέρδιος Σταμάτης Δ., Ηλιοθερμικές Εγκαταστάσεις, Τ-εκδοτική, Αθήνα, 2009.
- [4] Y. Tian, C.Y. Zhao, «A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications», Applied Energy, P. 104 538-553.
- [5] Naveed ur Rehman, Mubashir Ali Siddiqui, « A novel method for determining sky view factor for isotropic diffuse radiations for a collector in obstacles-free or urban sites», Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2015.
- [6] Dorota A. Chwieduk, «Recommendation on modelling of solar energy incident on a building envelope», Renewable Energy P. 736-741.
- [7] Μαντήκος Α. Αντώνιος, «Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
- [8] Anderson B. «Solar energy: fundamentals in building design», New York: McGraw-Hill, 1977.
- [9] Meinel AB, Meinel MP, «Applied solar energy: an introduction», MA: Addison-Wesley, 1976.
- [10] Γούλας Χρήστος, «Προσομοίωση Λειτουργίας Ηλιακού Θερμικού Πεδίου Τμήματος Υβριδικού Ενεργειακού Πάρκου», Διπλωματική εργασία, Δ.Π.Θ. Ξάνθη, 2018.
- [11] Τσεμπερλίδου Διονυσία, «Μελέτη και ανάλυση λειτουργίας ηλιακού θερμικού πάρκου συγκεντρωτικών κατόπτρων με χρήση θερμογραφίας», Διπλωματική εργασία, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 2017.
- [12] A. Fernandez Garcia, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Perez, «Parabolic-trough solar collectors and their applications», Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2010.
- [13] Κρασσάς Ν. Βασίλειος, «Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, μια οικονομοτεχνική μελέτη για την ελληνική επικράτεια», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2011.

Κεφάλαιο 3

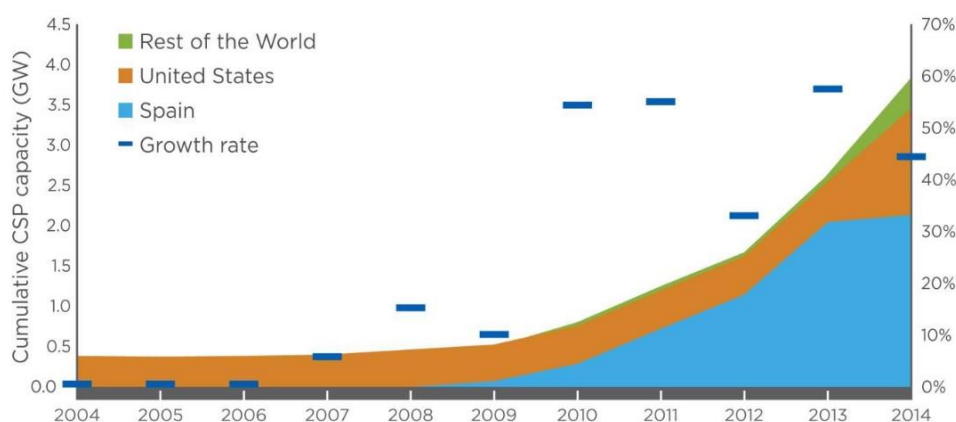
Ανασκόπηση των κύριων τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών παραβολικών κατόπτρων

Περιεχόμενα

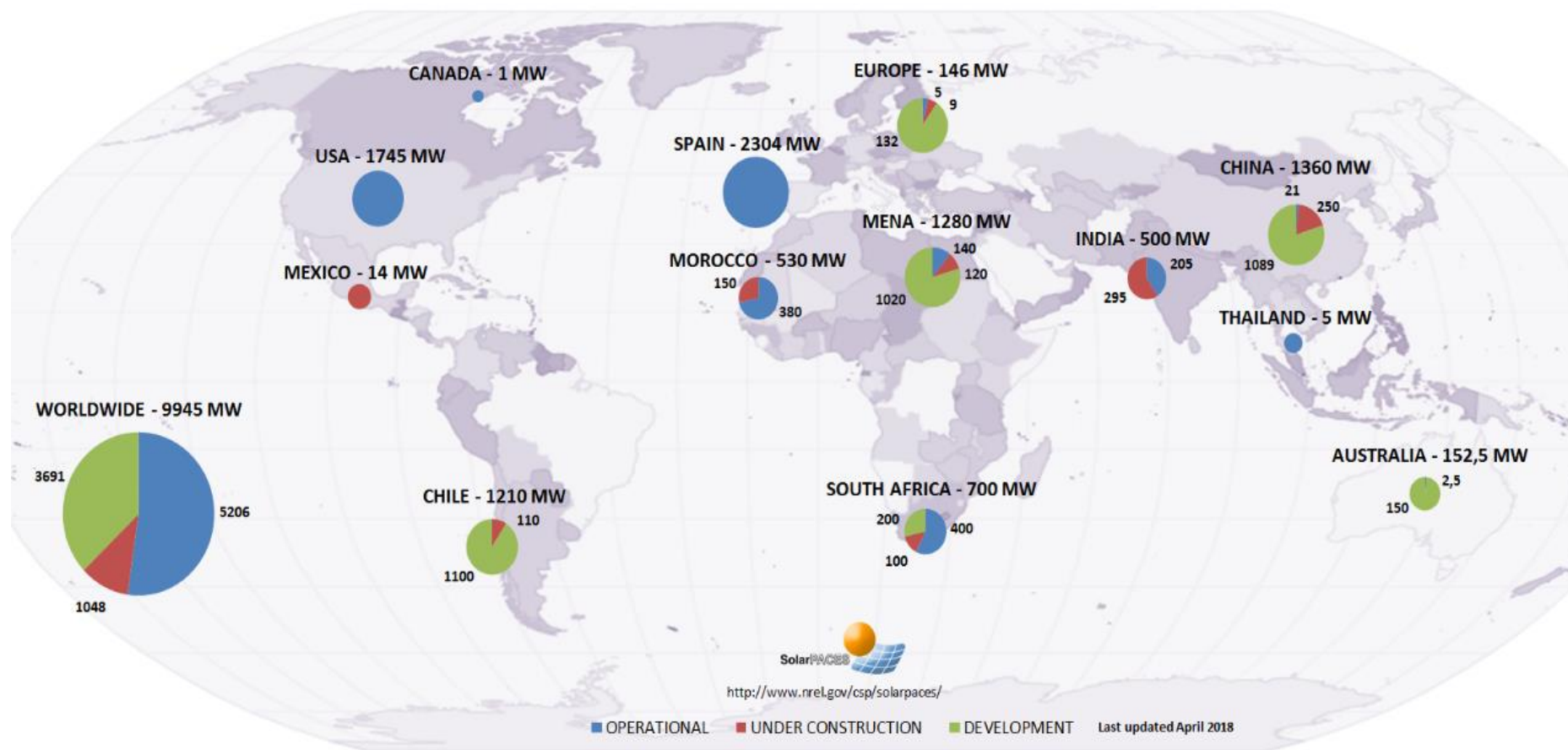
3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Ηλιοθερμικό πεδίο	39
3.2.1 Κοίλος παραβολικός συλλέκτης	39
3.2.2 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (Thermal Energy Storage -TES)	49
3.2.3 Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος	53
3.3 Σύγχρονες Τάσεις στους Ηλιοθερμικούς Σταθμούς	61
3.4 Σύνοψη	64
Αναφορές	64

3.1 Εισαγωγή

Μεταξύ του 1985 και του 1991, στη Ν. Καλιφόρνια εγκαταστάθηκαν ηλιοθερμικοί σταθμοί, τεχνολογίας παραβολικών συλλεκτών, ισχύος περίπου 354MW. Οι σταθμοί αυτοί λειτουργούν μέχρι και σήμερα, αποδεικνύοντας τη διαχρονική δυναμική της βιωσιμότητας των συστημάτων CSP. Η αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τη συγκεκριμένη τεχνολογία, συνέβη κυρίως στις αγορές ενέργειας των Η.Π.Α., Ισπανίας, Ν. Αφρικής, Ινδίας – Μέσης Ανατολής και της περιοχής της Β. Αφρικής. Μέχρι το τέλος του 2015 η εγκατάσταση CSP σε παγκόσμιο επίπεδο έφτασε τα 4.500MW. Από το 2009 και έπειτα η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε ραγδαία (σχήμα 3.1 - IEA, 2014). Η ανάπτυξη εμφανίζεται κυρίως στην Ισπανία και στις Η.Π.Α., καθώς και σε άλλες χώρες, οι οποίες ξεκίνησαν να αυξάνουν την εγκατεστημένη ισχύ τους δυναμικά από το 2013. Κατά τη διάρκεια της παραπάνω περιόδου οι επενδύσεις στο τομέα αυτό αυξήθηκαν κοντά στο 280% στα 6,9 δισεκατομμύρια δολάρια.



Σχήμα 3.1: Εξέλιξη εγκατεστημένης ηλιοθερμικής ισχύος στην παγκόσμια αγορά ενέργειας



Σχήμα 3.2: Σημαντικότερες χώρες με ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Στο σχήμα 3.2 φαίνονται τα διάφορα παγκόσμια έργα που αφορούν σε ηλιοθερμικούς σταθμούς των διαφόρων τεχνολογιών που εφαρμόζονται (παραβολικά, Fresnel, ηλιακός πύργος, δίσκου-μηχανής), κάποια από τα οποία βρίσκονται ακόμη στη φάση της μελέτης.

Έτσι λοιπόν, σε έναν ηλιοθερμικό σταθμό, η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε εστιακά σημεία (περίπτωση συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών), οδηγεί στην επίτευξη των επιθυμητών υψηλών θερμοκρασιών. Στη συνέχεια, η θερμότητα αυτή αποδίδεται σε ένα κατάλληλο μέσο μεταφοράς θερμότητας, που μπορεί να είναι ένα συνθετικό λάδι, τηγμένο άλας, το μείγμα νερού-ατμού, ο αέρας κ.α. Τα μέσα αυτά οδηγούνται στη συνέχεια σε εναλλάκτες θερμότητας (εάν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται το μείγμα νερού-ατμού δεν παρεμβάλλεται εναλλάκτης) αποδίδοντας την ενέργεια που έχει απορροφηθεί σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή υπέρθερμου, κορεσμένου ατμού. Στους υβριδικούς σταθμούς υπάρχει και η εφεδρεία του ορυκτού καυσίμου όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται με τις γνωστές, μέχρι τώρα μεθόδους, όπως για παράδειγμα με ατμοστρόβιλο ή με αεριοστρόβιλο. Η ηλιακή θερμική ενέργεια που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί επίσης να αποδοθεί σε μονάδες αποθήκευσης θερμαίνοντας, κατάλληλα υγρά ή στερεά μέσα όπως τηγμένα άλατα, κεραμικά, σκυρόδεμα ή μίγματα αλάτων εναλλασσόμενης φάσης. Τη νύχτα, αυτή η θερμότητα μπορεί να εξάγεται από το μέσο αποθήκευσης έτσι ώστε να συνεχίζεται η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού. ^[1]

Γενικότερα, τα βασικά μέρη που απαρτίζουν έναν ηλιοθερμικό σταθμό συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας κοίλων παραβολικών συλλεκτών είναι τα εξής:

1. Ηλιοθερμικό Πεδίο
2. Σύστημα Αποθήκευσης (Thermal Energy Storage -TES)
3. Μονάδα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος

Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται η περιγραφή ενός ηλιοθερμικού σταθμού συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ) κοίλων παραβολικών συλλεκτών και γενικότερα περιγράφονται τεχνολογίες των υποσυστημάτων που εφαρμόζονται σε ηλιοθερμικούς σταθμούς.

3.2 Ηλιοθερμικό πεδίο

Ένα τυπικό ηλιοθερμικό πεδίο αποτελείται από: i) τον ηλιακούς συλλέκτες (στην προκειμένη περίπτωση τους κοίλους παραβολικούς συλλέκτες, Parabolic Trough Collectors – PTCs), ii) το σύστημα στήριξης και iii) το θερμικό ρευστό (Heat Transfer Fluid – HTF).

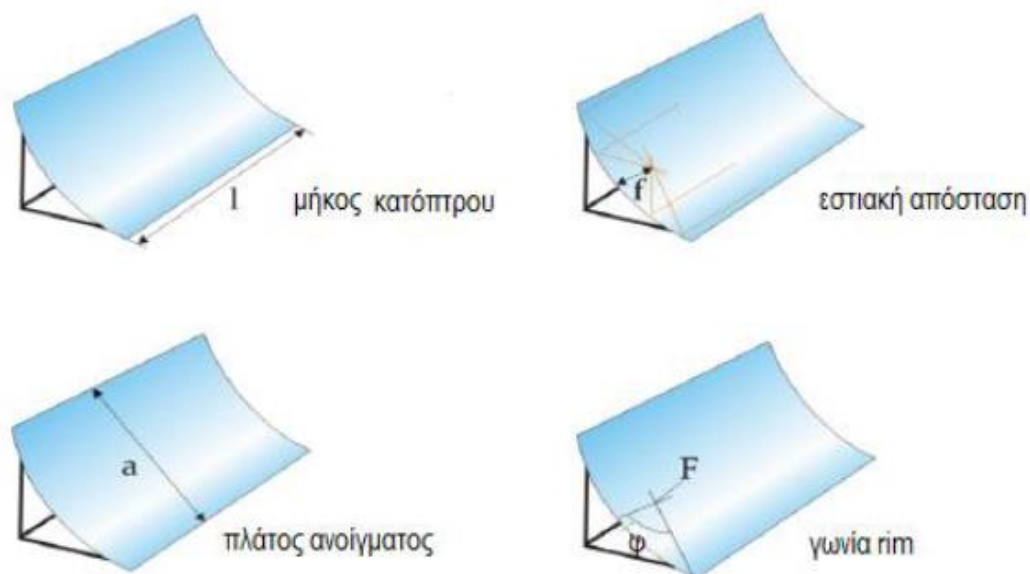
3.2.1 Κοίλος παραβολικός συλλέκτης

Οι τεχνολογία των κοίλων παραβολικών συλλεκτών (PTCs) είναι η πιο ώριμη από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες και αυτό αποδεικνύεται και από την εμπορική της εφαρμογή έως τώρα. Η συλλογή και η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιείται σε έναν υπαίθριο χώρο μεγάλης έκτασης που καλείται ηλιακό πεδίο. Το ηλιακό πεδίο αυτών των σταθμών αποτελείται από μακριές παράλληλες σειρές από πανομοιότυπα συγκεντρωτικά στοιχεία. Συνήθως, οι σειρές των κατόπτρων στηρίζονται στο έδαφος μέσω ασφάλινων βάσεων ή βάσεων αλουμινίου. ^[2]

3.2.1.1 Γεωμετρία συλλέκτη

Οι παραβολικοί συλλέκτες αποτελούνται από ανακλαστές που καμπυλώνονται γύρω από έναν άξονα σε ένα γραμμικό παραβολικό σχήμα. Αυτή η διάταξη έχει τη δυνατότητα να συλλέγει τις παράλληλες ακτίνες κατά μήκος μιας μόνο γραμμής εστίασης, σε ένα σωληνοειδή δέκτη που βρίσκεται τοποθετημένος κατά μήκος της γραμμής εστίασης. Αυτού του είδους οι συλλέκτες απαιτούν σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αντανάκλαση των ακτινών στο δέκτη. Ο σωληνοειδής δέκτης αποτελείται από έναν κυλινδρικό μεταλλικό απορροφητή και ένα γυάλινο περίβλημα. Ανάμεσα στον απορροφητή και το περίβλημα υπάρχει κενό αέρας, έτσι ώστε να μειώνονται οι απώλειες λόγω συναγωγής.

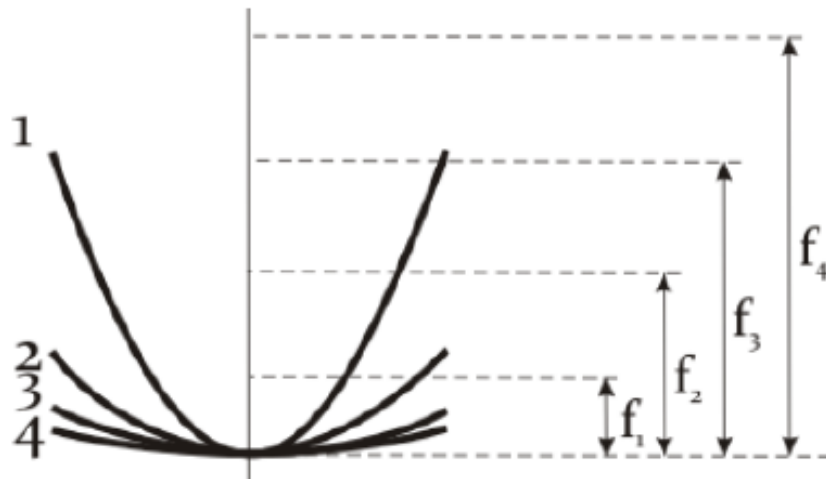
Για να περιγραφεί ένα παραβολικό κάτοπτρο γεωμετρικά πρέπει να προσδιοριστεί η παραβολή, το τμήμα της που καλύπτεται από τους καθρέφτες όπως και το μήκος της. Οι ακόλουθες τέσσερις παράμετροι χρησιμοποιούνται συνήθως για τον χαρακτηρισμό της μορφής και του μέγεθος ενός παραβολικού κοίλου: μήκος, εστιακή απόσταση, πλάτος ανοίγματος, και γωνία rim (σχήμα 3.3).^[3]



Σχήμα 3.3: Παράμετροι γεωμετρίας παραβολικού κατόπτρου^[3]

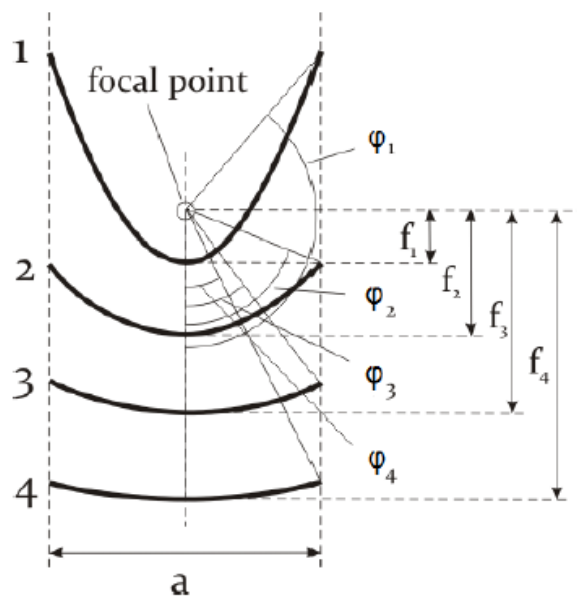
Το μήκος του κατόπτρου δεν παρουσιάζει κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ούτε χρήζει περαιτέρω ανάλυσης. Η εστιακή απόσταση, δηλαδή η απόσταση μεταξύ του εστιακού σημείου και της κορυφής της παραβολής, είναι μια παράμετρος που καθορίζει την παραβολή.

Η γωνία rim, δηλαδή η γωνία μεταξύ του οπτικού άξονα και της γραμμής μεταξύ του σημείου επαφής και της άκρης του κατόπτρου, καθορίζει την τομή ενός παραβολικού κοίλου. Αυτό σημαίνει ότι οι τομές των παραβολικών κατόπτρων με την ίδια γωνία rim είναι γεωμετρικά όμοιες. Εάν αυτό που ενδιαφέρει είναι το σχήμα της τομής ενός κατόπτρου, αλλά όχι το απόλυτο μέγεθος, τότε η γωνία rim είναι επαρκής δείκτης. Δύο από τις προαναφερθείσες παραμέτρους είναι επαρκείς για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας ενός παραβολικού κοίλου και ως προς το σχήμα αλλά και ως προς το μέγεθος. Αυτό σημαίνει επίσης ότι δύο από αυτά αρκούν, για να υπολογιστεί το τρίτο.



Σχήμα 3.4: Η εστιακή απόσταση ως παράμετρος σχηματισμού της παραβολής ^[3]

Η γωνία ϕ_{rim} σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ των διάφορων τμημάτων του κατόπτρου και της εστιακής γραμμής. Λαμβάνοντας μία σταθερή τιμή για το πλάτος ανοίγματος της παραβολής προκύπτει το σχήμα 3.5, για τη σχέση της γωνίας και του εστιακού μήκους: ^[3]



Σχήμα 3.5: Η σχέση της γωνίας ϕ_{rim} με το εστιακό μήκος για σταθερό άνοιγμα παραβολής ^[3]

Η γωνία ϕ_{rim} είναι ένα πολύ σημαντικό γνώρισμα των συλλεκτών. Κατ' αρχάς, σχετίζεται με το συντελεστή συγκέντρωσης ακτινοβολίας και την ηλιακή ακτινοβολία ανά μέτρο απορροφητή $[W/m]$. Ποιοτικά, με τον εξής τρόπο, προκύπτει ότι πρέπει να υπάρχει κάποιο ιδανικό εύρος γωνίας ϕ_{rim} και ότι δεν πρέπει ούτε να είναι πολύ μικρή ούτε πολύ μεγάλη: ^[3]

- Οι ανακλαστικές επιφάνειες θεωρούνται τέλειες, μη λαμβάνοντας υπ' όψιν πιθανά ελαττώματα. Εάν η γωνία θ_{im} είναι πολύ μικρή, τότε η ανακλαστική επιφάνεια είναι πολύ στενή και μια πιο πλατιά θα συνέβαλε στην ενίσχυση της προσλαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Από την άλλη, εάν η γωνία θ_{im} είναι πολύ μεγάλη, τότε υπάρχει μικρός συντελεστής συγκέντρωσης, καθώς η ακτινοβολία χρειάζεται να καλύψει μεγαλύτερη απόσταση.
- Επιπλέον, θεωρηθεί πως πραγματικές κατασκευές έχουν κάποια γεωμετρική ανακρίβεια, τότε είναι σημαντικό να διατηρηθεί μια μικρή απόσταση από τον αποδέκτη Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από τον αποδέκτη, τόσο εντονότερη είναι η εκτροπή της ακτινοβολίας λόγω σφαλμάτων στην κλίση της επιφάνειας.
- Τέλος, υπάρχει μια οικονομική πτυχή που περιορίζει τη γωνία θ_{im} : Σε μεγάλες γωνίες θ_{im} τα ακριανά τμήματα δεν συμβάλλουν αρκετά στην ενεργειακή απόδοση σε σχέση με την ανακλαστική επιφάνεια. Αυτό σημαίνει, οικονομικά μεγάλες επενδύσεις με ενεργειακά μικρή απόδοση.

Έτσι, υπάρχουν πολλά κριτήρια, τα οποία καθορίζουν τη συγκεκριμένη γωνία. Η γωνία θ_{im} είναι συνήθως περίπου 80° . Το πλάτος του ανοίγματος των περισσότερων συλλεκτών ανέρχεται σε περίπου 6m, το εστιακό μήκος είναι (αντίστοιχα με τη γωνία χείλος και τιμές πλάτους ανοίγματος) περίπου 1,75m, και το μήκος της μονάδας μεταξύ 12-14m. Υπάρχουν συλλέκτες με μικρότερα ή μεγαλύτερα πλάτη ανοίγματος με αντίστοιχα διαφορετικά εστιακά μήκη.

3.2.1.2 Ανακλαστική επιφάνεια

Η βασική απαίτηση από το υλικό κατασκευής του κατόπτρου, είναι οι ανακλαστικές του ιδιότητες. Η ανακλαστικότητα μιας επιφάνειας εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια. Επομένως, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι, η ανακλαστικότητα είναι διαφορετική για διαφορετικά μήκη κύματος. Στην περίπτωση των ηλιακών εφαρμογών αυτό που ενδιαφέρει είναι το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Γενικά, αναφερόμαστε σε μια «ηλιακά-σταθμισμένη ανακλαστικότητα», που συνυπολογίζει το γεγονός της ύπαρξης διαφορετικών περιεχομένων ενέργειας σε διαφορετικά μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος. Συνεπώς, η σταθμισμένη αυτή ανακλαστικότητα, προσδιορίζει το κλάσμα της ηλιακής ενέργειας που αντανακλάται από ένα κάτοπτρο.

Επιπλέον, το φως μπορεί να ανακλαστεί κατοπτρικά (όπως στους καθρέφτες) ή να διαχυθεί. Ο τρόπος με τον οποίο ανακλάται το φως εξαρτάται από το υλικό την ανακλαστικής επιφάνειας. Η κατεύθυνση του εισερχόμενου φωτός και η κατεύθυνση του εξερχόμενου φωτός έχουν την ίδια γωνία σε σχέση με την νοητή κάθετο στην επιφάνεια του καθρέφτη. Στην περίπτωση της διάχυσης, η προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται σε ένα φάσμα κατευθύνσεων. Σε εφαρμογές όπως τα παραβολικά κάτοπτρα, ενδιαφέρει μόνο η κατοπτρική ανάκλαση, επειδή η ανακλώμενη ακτινοβολία απαιτείται να ακολουθεί μια καθορισμένη κατεύθυνση.

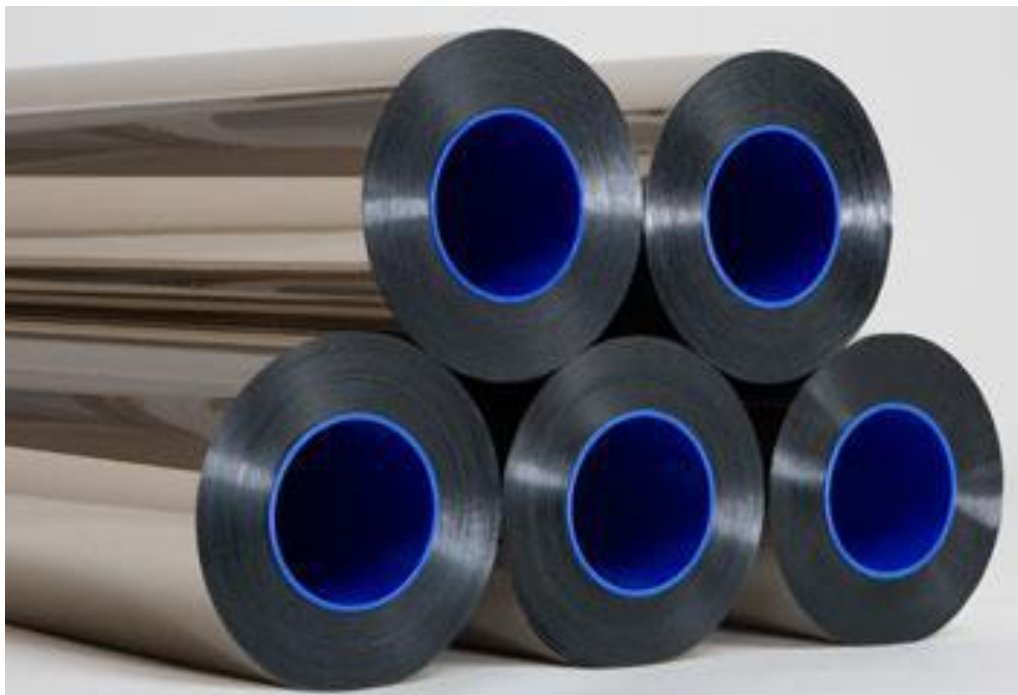
Τα περισσότερα παραβολικά κάτοπτρα έχουν μια ασημένια επίστρωση γυαλιού. Υπάρχει εμπειρία με αυτού του είδους τα κάτοπτρα από τις πρώτες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που δημιουργήθηκαν στη δεκαετία του 1980. Το συγκεκριμένο είδος κατόπτρων έχει αποδειχθεί ανθεκτικό, γιατί και μετά από δεκαετίες λειτουργίας η μείωση της κατοπτρικής ανακλαστικότητας ήταν αμελητέα.

Οι καθρέπτες έχουν μια πολυστρωματική δομή. Το πρώτο στρώμα κάτω από το γυαλί είναι η ανακλαστική στιβάδα, δηλαδή επίστρωση αργύρου. Ένα προστατευτικό στρώμα χαλκού τοποθετείται κάτω από το στρώμα

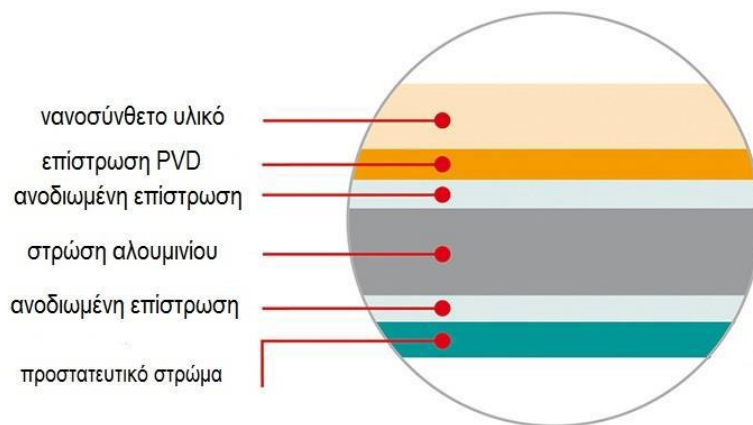
αργύρου, επί του οποίου προστίθενται τρεις εποξειδικές επιστρώσεις. Στα περισσότερα ηλιακά κάτοπτρα, η πρώτη και η δεύτερη επίστρωση περιέχει ένα ορισμένο ποσοστό μόλυβδου. Το πάχος του πλήρους κατόπτρου ανέρχεται από 4 έως 5 mm. [3]

Οι καθρέφτες αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της επένδυσης. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν σε εξέλιξη προσπάθειες για την εξεύρεση εναλλακτικών υλικών που θα μπορούσαν να μειώσουν το κόστος. Δύο εναλλακτικά υλικά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Στη δεκαετία του 1990, το Εθνικό Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των ΗΠΑ - NREL ανέπτυξε μια πολυμερή μεμβράνη με ασημένια επίστρωση (εικόνα 3.1), ως υλικό ανάκλασης σε ηλιακές εφαρμογές. Είναι μια αντανάκλαστική ταινία που μπορεί να επικολληθεί σε οποιοδήποτε λείο, μη πορώδες υλικό. Είναι κατασκευασμένη από πολλαπλά στρώματα πολυμερούς με ένα ανακλαστικό στρώμα αργύρου. Τα συγκεκριμένα κάτοπτρα δοκιμάζονται από το 2002 σε εγκαταστάσεις στην Καλιφόρνια και δεν δείχνουν καμία μείωση της ανακλαστικότητάς τους. Το σημαντικό οικονομικό πλεονέκτημα είναι πως η διαδικασία κατασκευής και συναρμολόγησης μπορεί να επιταχυνθεί. Επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι τα κάτοπτρα δεν είναι ευαίσθητα σε θραύση.
- Προσφέρονται ακόμη επιφάνειες καθρεπτών με αλουμίνιο (σχήμα 3.6). Η στρωματική δομή αυτών των καθρεπτών αποτελείται από ένα ανακλαστικό στρώμα αλουμινίου, μια στρώση ανοδικής οξείδωσης κάτω και πάνω, καθώς και επιπλέον προστατευτικά επιστρώματα. Λόγω του κατώτερου ηλιακού φάσματος ανακλαστικότητας του αλουμινίου σε σύγκριση με τον άργυρο, η ανακλαστικότητα των κατόπτρων αυτών είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την ανακλαστικότητα άλλων τύπων.



Εικόνα 3.1: Μεμβράνη NREL



Σχήμα 3.6: Πολυστρωματική δομή κατόπτρου [5]

3.2.1.3 Δέκτης

Η λειτουργία των δεκτών σε παραβολικά κάτοπτρα είναι η μετατροπή της ακτινοβολίας που συγκεντρώνεται σ' αυτούς σε θερμότητα και η μεταφορά της. Αυτό που επιδιώκεται είναι υψηλή δυνατότητα απορρόφησης ακτινοβολίας και χαμηλές απώλειες θερμότητας. Κατασκευαστική πρόκληση αποτελεί επίσης η θερμική διαστολή του δέκτη, λόγω της μεταβολής των θερμοκρασιών μεταξύ της κατάστασης λειτουργίας και μη λειτουργίας.

Επομένως, ο δέκτης πρέπει να πληροί αρκετές γεωμετρικές και φυσικές απαιτήσεις. Η ανακλώμενη ακτινοβολία πρέπει να συγκεντρωθεί στην επιφάνεια του απορροφητή, πράγμα το οποίο συνεπάγεται γεωμετρικούς περιορισμούς. Η ακτινοβολία πρέπει να μετατραπεί όσο το δυνατόν πληρέστερα σε θερμότητα και οι οπτικές και θερμικές απώλειες στις επιφάνειες των εξαρτημάτων του δέκτη θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Ειδικά επιχρίσματα και μονώσεις βοηθούν σ' αυτή την κατεύθυνση.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο δέκτης πρέπει να κατασκευαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η απορρόφηση της ακτινοβολίας να είναι υψηλή και οι θερμικές απώλειες μικρές. Οι θερμικές απώλειες μπορούν να περιοριστούν, εφόσον περιοριστεί η μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής, ακτινοβολίας και συναγωγής. Στη συνέχεια περιγράφεται πώς και με ποια στοιχεία ο δέκτης πληροί αυτές τις λειτουργικές απαιτήσεις. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ο δέκτης είναι (εικόνα 3.2).

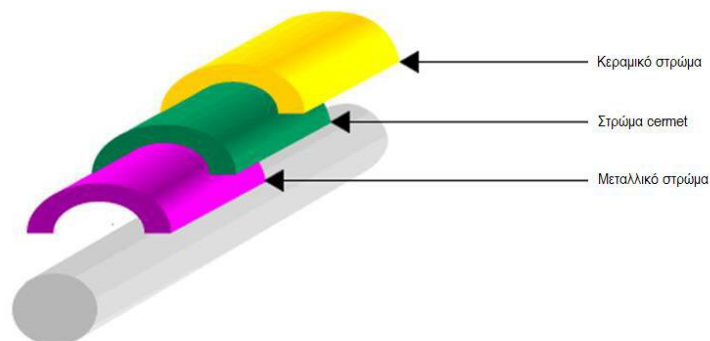
1. ο σωλήνας του απορροφητή
2. το γυάλινο περίβλημα
3. και επιπρόσθετα δομικά στοιχεία όπως: οι συνδέσεις γυαλιού-μετάλλου, χημικός προσροφητής για τη διατήρηση και την ένδειξη της κατάστασης του κενού (getter), οι συνδέσεις θερμικής διαστολής κτλ.

Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή απορρόφηση ακτινοβολίας και χαμηλή απώλεια θερμότητας, ο συντελεστής απορροφητικότητας πρέπει να είναι υψηλός στο ορατό φάσμα φωτός και ο συντελεστής εκπομπής να είναι χαμηλός στο υπέρυθρο φάσμα. Η απορροφητικότητα πρέπει να είναι υψηλή στο φάσμα με μήκος κύματος $250\text{nm} \leq \lambda \leq 2500\text{nm}$ και η ικανότητα ακτινοβολίας πρέπει να είναι χαμηλή στη φασματική περιοχή με $3000\text{nm} \leq \lambda \leq 50000\text{nm}$.



Εικόνα 3.2: Μέρη δέκτη ^[3]

Για την επίτευξη αυτού του σκοπού έχουν αναπτυχθεί διάφορα επιχρίσματα για τους σωλήνες αυτούς (σχήμα 3.7). Οι επιστρωματώσεις αυτές είναι κατασκευασμένες από ένα υλικό που συνδυάζει μεταλλικά νανοσωματίδια σε μια κεραμική μήτρα. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο στρώμα είναι κατασκευασμένο από ένα μέταλλο που είναι έντονα ανακλαστικό στην υπέρυθη περιοχή, για παράδειγμα χαλκό, αλουμίνιο ή μολυβδαίνιο, το δεύτερο στρώμα είναι ένα στρώμα κεραμομέταλλου (cermet), το οποίο μπορεί να διαιρεθεί σε διαφορετικά στρώματα με υψηλότερη και χαμηλότερη περιεκτικότητα σε μέταλλο. Το cermet αποτελείται από ένα οξείδιο όπως το Al_2O_3 ή SiO_2 και ένα μέταλλο, όπως μολυβδαίνιο. Το κεραμικό στρώμα αποτελείται από οξείδια, όπως Al_2O_3 ή SiO_2 . ^[3]

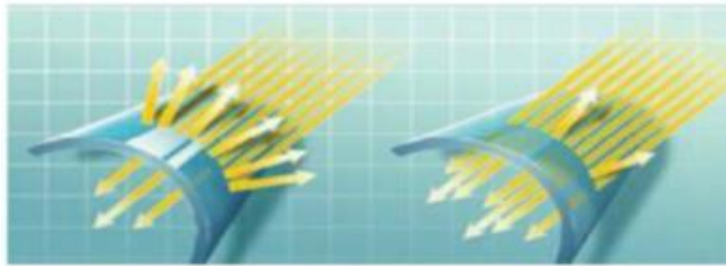


Σχήμα 3.7: Πολυστρωματική δομή σωλήνα απορροφητή ^[3]

Σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του απορροφητή παίζει ο συντελεστής παρεμπόδισης ακτινών (intercept factor). Ο συντελεστής αυτός είναι ο λόγος της ενέργειας που παρεμποδίζεται από τον απορροφητή προς την ενέργεια που ανακλάται από το παραβολικό κάτοπτρο. Η τιμή του εξαρτάται από το μέγεθος του απορροφητή, την γωνία επιφάνειας του κατόπτρου και τη διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η διάμετρος του απορροφητή θα πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη για την επίτευξη ενός υψηλού συντελεστή αλλά όχι πάρα πολύ μεγάλη για τη διατήρηση των θερμικών απωλειών σε χαμηλά επίπεδα.

Προκειμένου να επιτευχθεί μικρή απώλεια θερμότητας ο απορροφητής περικλείεται από ένα γυάλινο περίβλημα, το οποίο εμποδίζει τον αέρα. Επιπλέον, ανάμεσα στο γυαλί και τον απορροφητή υπάρχει κενό αέρος έτσι ώστε, να μειωθεί η μεταφορά θερμότητας. Η οπτική διαπερατότητα των γυάλινων σωλήνων ενδείκνυται να είναι

τουλάχιστον 0,96 για ηλιακή ακτινοβολία. Το γυαλί μπορεί να φέρει επίσης μια ειδική αντανάκλαστική επίστρωση και έχει χαμηλή διαπερατότητα στο υπέρυθρο φάσμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.^[2]



Σχήμα 3.8: Σωλήνας από βοριοπυριτικό γυαλί χωρίς αντι-ανακλαστική επίστρωση (αριστερά) και με αντι-ανακλαστική επίστρωση (δεξιά) ^[2]

Αυτό συμβάλλει ελαφρώς στη μόνωση, επειδή ένα μέρος της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας του απορροφητή διατηρείται στο σύστημα: το γυαλί θερμαίνεται και μειώνεται έτσι η μεταφερόμενη απώλεια θερμότητας από τον απορροφητή στο γυάλινο σωλήνα.

Οι συνδέσεις θερμικής διαστολής παίζουν καθοριστικό ρόλο στην μείωση των τάσεων που αναπτύσσονται λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας στον απορροφητή και στο γυάλινο περίβλημά του. Επιπλέον, για τη διατήρηση του κενού στο γυάλινο σωλήνα υπάρχει ενσωματωμένος ένας χημικός προσροφητής για τη διατήρηση και την ένδειξη της κατάστασης του κενού (getter). Λόγω των διεργασιών πυρόλυσης στο θερμικό έλαιο δημιουργείται υδρογόνο το οποίο μπορεί να επιδράσει αρνητικά στο κενό. Ο χημικός αυτός προσροφητής (μέταλλο) απορροφά το εκλυόμενο υδρογόνο, συμβάλλοντας στη μόνωση του απορροφητή. ^[3]

3.2.1.4 Σύστημα στήριξης

Η δομή συγκράτησης ενός παραβολικού κοίλου πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω λειτουργίες:

1. να συγκρατεί το κάτοπτρο στην επιθυμητή θέση
2. να καθιστά δυνατή την ακριβή παρακολούθηση του ηλίου

Για την σωστή λειτουργία της δομής συγκράτησης, θα πρέπει να πληρούνται ορισμένες κατασκευαστικές προϋποθέσεις. Εξαιτίας του βάρους των παραβολικών κατόπτρων και των ανέμων, υπάρχει πιθανότητα να επηρεαστεί το παραβολικό σχήμα του συλλέκτη. Κάτι τέτοιο θα προκαλούσε μεγάλες απώλειες στην οπτική απόδοση του συστήματος. Επομένως, η δομή συγκράτησης θα πρέπει να είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε να αντέχει αυτά τα φορτία με πολύ μικρές γεωμετρικές αποκλίσεις.

Επιπλέον, ένα επίπεδο υψηλής ακαμψίας επιτρέπει τη μείωση του αριθμού των πυλώνων και των μονάδων παρακολούθησης του ηλίου, γεγονός που μειώνει επίσης και το κόστος της εγκατάστασης. Η ακαμψία πρέπει να συνδυάζεται με κατασκευές από ελαφριά υλικά, οι οποίες επιτρέπουν τη χρήση ελαφρύτερων θεμελίων και μηχανισμών παρακολούθησης. Μια ελαφρά κατασκευή είναι γενικά λιγότερο πιθανό να εμφανίσει παραμορφώσεις λόγω του ίδιου της του βάρους. Επιπλέον, οι ελαφρές κατασκευές καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια κατά την περιστροφή τους για την παρακολούθηση του ηλίου. Μια κατάλληλη κατασκευή συγκράτησης θα πρέπει να έχει χαμηλό κόστος υλικού και παραγωγής. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το ηλιακό πεδίο είναι το

πιο ακριβό μέρος ενός ηλιακού σταθμού παραγωγής ενέργειας (περίπου 30%). Αυτό σημαίνει ότι η μείωση του κόστους του ηλιακού πεδίου έχει σημαντική επίδραση στο συνολικό κόστος μονάδας παραγωγής ενέργειας.

Γενικά, η δομή στήριξης ενός συλλέκτη αποτελείται από: ^[3]

1. ένα κύριο σώμα, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένα δικτύωμα φτιαγμένο από χάλυβα ή αλουμίνιο,
2. βραχίονες στήριξης των κατόπτρων,
3. βραχίονες στήριξης του δέκτη,
4. δομές για την τοποθέτηση των πυλώνων,
5. πυλώνες και θεμέλια.

Λόγω της συνεχούς κίνησης της γης γύρω από τον ήλιο, τα παραβολικά κάτοπτρα πρέπει να έχουν εγκατεστημένο έναν μηχανισμό παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου, ώστε να ακολουθούν την πορεία του. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, οι παραβολικοί συλλέκτες μπορούν να εκμεταλλευτούν μόνο τις ακτίνες που πέφτουν κάθετα στην ανακλαστική επιφάνειά τους. Επομένως, τα συγκεκριμένα συστήματα πρέπει να κινούνται με τέτοιο τρόπο τους παραβολικούς συλλέκτες έτσι ώστε, να ελαχιστοποιείται η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σ' αυτά. Το σχήμα 3.9, που ακολουθεί, δίνει μια γενική ιδέα του τρόπου λειτουργίας ενός μηχανισμού παρακολούθησης μέσα στη μέρα.



Σχήμα 3.9: Παρακολούθηση της θέσης του ήλιου (άξονας εγκατάστασης B-N) ^[3]

Θεωρητικά, τα παραβολικά κάτοπτρα μπορούν να έχουν οποιοδήποτε προσανατολισμό καθώς υπάρχει πάντα η δυνατότητα παρακολούθησης του Ήλιου. Πρακτικά, αυτό που επιλέγεται είναι οι σειρές των κατόπτρων να τοποθετούνται με προσανατολισμό Βορρά- Νότου (B-N) και περιστρέφονται από την Ανατολή προς τη Δύση. Πειραματικά έχει δοκιμαστεί και η εγκατάσταση σε άξονα Ανατολής – Δύσης. Στην περίπτωση αυτή, το προτέρημα είναι η μικρή απαίτηση κίνησης των συλλεκτών κατά τη διάρκεια της μέρας και η μικρότερη διαφορά ενεργειακής απόδοσης ανάμεσα σε καλοκαίρι και χειμώνα (σε σχέση με εγκατάσταση σε άξονα B-N). Τα μειονεκτήματα είναι η μεγάλη διαφορά στην επίδοση του ίδιου συλλέκτη στη διάρκεια μίας ημέρας, λόγω των μεγαλύτερων απωλειών συννημίτονου και η συνολικά χαμηλότερη ετήσια απόδοση, σε σχέση με τον προσανατολισμό Βορρά – Νότου.^[4]

Επειδή πρόκειται για ευθύγραμμους συλλέκτες μεγάλου μήκους, η κατασκευή τέτοιων πεδίων δεν απαιτεί σύστημα παρακολούθησης σε δεύτερο άξονα, διότι απλά η συγκέντρωση της ακτινοβολίας θα μετατοπίζεται κατά μήκος του δέκτη.

3.2.1.5 Θερμικό ρευστό (Heat Transfer Fluid - HTF)

Ο ρόλος του θερμικού ρευστού (HTF) είναι να συγκεντρώνει τη θερμική ενέργεια από τους συλλέκτες και να τη μεταφέρει για να τροφοδοτηθεί η παραγωγή ενέργειας. Για την παραγωγή ενέργειας, υπάρχουν δύο τρόποι:

- Το θερμικό ρευστό μεταφέρει τη θερμική ενέργεια στο ρευστό του κύκλου Rankine. (έμμεση παραγωγή ατμού – Indirect Steam Generation).
- Ο ατμός για τον κύκλο Rankine παράγεται κατευθείαν και μεταφέρεται στον στρόβιλο. (άμεση παραγωγή ατμού – Direct Steam Generation).

Στην πρώτη περίπτωση υπάρχουν δύο θερμικοί κύκλοι, ένας για το θερμικό ρευστό και ένας για το ρευστό του κύκλου Rankine. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει μόνο ένας θερμικός κύκλος εφόσον το θερμικό ρευστό είναι το νερό/ατμός του κύκλου Rankine.

Σε μονάδες παραγωγής ISG, το θερμικό ρευστό πρέπει να είναι υγρό και να έχει υψηλή θερμοκρασία εξάτμισης, ώστε να μην εξατμίζεται στις υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται στο ηλιακό πεδίο. Ακόμα, θα πρέπει να έχει και χαμηλή θερμοκρασία ψύξης, έτσι ώστε να μην χρειάζονται επιπλέον μέτρα προστασίας σε περιπτώσεις που οι θερμοκρασίες στο πεδίο είναι χαμηλές. Σημαντική παράμετρος είναι η θερμική σταθερότητα του ρευστού σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (αντοχή στην πυρόλυση). Η θερμοκρασία εξάτμισης και η θερμική σταθερότητα είναι οι παράγοντες που προσδιορίζουν τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του ρευστού. Για την αποθήκευση και τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας είναι αναγκαίο το ρευστό να έχει υψηλό συντελεστή θερμοχωρητικότητας και θερμικής αγωγιμότητας και μικρό ιξώδες για τη μείωση της ενέργειας των αντλιών. Σημαντικές προϋποθέσεις αποτελούν το κόστος και η διαθεσιμότητα. Τέλος, ρευστά με χαμηλό δείκτη ευφλεκτότητας τις και φιλικά τις το περιβάλλον ρευστά είναι προτιμότερα. Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει τις ιδιότητες ρευστών που θεωρούνται κατάλληλα.

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες θερμικών ρευστών

Μέσο	Μέγιστη Θερμοκρασία [°C]	Θερμοχωρητικότητα [J/kg-K]	Θερμική αγωγιμότητα [W/m.K]	Κόστος
Ορυκτέλαιο	300	2600	0,12	+
Συνθετικό λάδι	400	2300	0,11	-
Έλαιο σιλικόνης	400	2100	0,1	-
Νιτρώδες άλας	450	1500	0,5	Ο
Νιτρικό άλας	565	1600	0,5	+
Ανθρακικό άλας	850	1800	2	-
Νάτριο	850	1300	71	Ο

+: υψηλό κόστος, Ο: μέτριο κόστος, -: χαμηλό κόστος [3]

Στην άμεση παραγωγή ατμού (DSG), ο ατμός παράγεται απευθείας στο ηλιακό πεδίο. Το μέσο μεταφοράς θερμότητας που ρέει μέσα από τους δέκτες του ηλιακού πεδίου είναι ταυτόχρονα και ρευστό του κύκλου Rankine.

Το ρευστό του κύκλου Rankine είναι το νερό, το οποίο είναι πράγματι ένα αρκετά καλό θερμικό ρευστό, σύμφωνα με τα κριτήρια που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Μόνο το κριτήριο της υψηλής θερμοκρασίας εξάτμισης δεν εφαρμόζεται, αλλά δεν προκαλεί πρόβλημα καθώς η εξάτμιση είναι το ζητούμενο. Παρ' όλα αυτά, για μικρά συστήματα και επίπεδα θερμοκρασίας μικρότερα των 400 °C, οργανικά θερμικά μέσα μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτική λύση, καθώς επιτρέπουν υψηλές αποδόσεις και σε χαμηλές θερμοκρασίες. ^[3]

3.2.2 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (Thermal Energy Storage -TES)

3.2.2.1 Γενικά

Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, τα ηλιοθερμικά συστήματα παράγουν σε πρώτη φάση θερμική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια σε ένα συμβατικό στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την αποθήκευση της ενέργειας στο στάδιο της θερμότητας, μια διαδικασία η οποία είναι σχετικά απλή και φτηνή. Η δυνατότητα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας δίνει στην ηλιοθερμική τεχνολογία ένα σημαντικότερο πλεονέκτημα έναντι άλλων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά συστήματα, τα οποία δεν έχουν ακόμη αναπτύξει ανταγωνιστικά συστήματα αποθήκευσης. Κι αυτό διότι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι απλή ως τεχνολογία και σε σύγκριση με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ πιο αποδοτική αλλά και φθηνότερη.

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί με εγκαταστάσεις αποθήκευσης θα μπορούν να ξεπεράσουν τις δυσκολίες της διακοπόμενης φύσης της ηλιακής ενέργειας και να διασφαλίσουν αξιόπιστη λειτουργία και αυξημένη ποιότητα παρεχόμενης ισχύος (χωρίς έντονες διακυμάνσεις) σε συνθήκες συννεφιάς αλλά και λειτουργία ακόμη και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ένα άλλο πλεονέκτημα που παρέχει η αποθήκευση της θερμότητας στους σταθμούς αυτούς είναι η δυνατότητα χρονικής μετατόπισης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος τους από τη φυσική αιχμή της ηλιοφάνειας στην αιχμή της ζήτησης όπου, σε μια ευέλικτη αγορά, η ηλεκτρική ενέργεια πωλείται ακριβότερα, αυξάνοντας έτσι τα περιθώρια κέρδους του σταθμού.

Επιπλέον, η αποθήκευση καθιστά δυνατή τη σχεδόν ακαριαία διανομή της ισχύος ανάλογα με τη ζήτηση (on demand), έτσι ώστε να ικανοποιούνται αναμενόμενες και μη καταναλώσεις φορτίου. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι παρέχεται στο Διαχειριστή του Συστήματος η ευελίξια να ρυθμίζει τη διείσδυση και των άλλων ΑΠΕ περιορίζοντας, αν χρειάζεται, την ισχύ εξόδου των ηλιοθερμικών σταθμών. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα της θερμικής αποθήκευσης έχουν σαν αποτέλεσμα έναν αρκετά υψηλότερο συντελεστή χρησιμοποίησης και ένα μειωμένο χρόνο απόσβεσης της επένδυσης. ^[1,6,7,8,9,10]

Η γενική ιδέα της αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας είναι ότι η θερμότητα από τον ήλιο που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας αντί να χρησιμοποιηθεί εξ ολοκλήρου για άμεση ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να αποθηκευτεί σε ορισμένα μέσα αποθήκευσης, όπως για παράδειγμα τηγμένα άλατα. Στους ηλιοθερμικούς σταθμούς με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας υπερδιαστασιολογείται το ηλιακό πεδίο έτσι ώστε ο σταθμός κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας να μπορεί να βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία και ταυτόχρονα να αποθηκεύει το πλεόνασμα ηλιακής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συνθήκες συννεφιάς η θερμότητα αποδίδεται από το μέσο στο οποίο βρίσκεται αποθηκευμένη μέσω εναλλάκτη θερμότητας στο μέσο μεταφοράς θερμότητας του σταθμού προκειμένου να διατηρηθεί η λειτουργία του στρόβιλου. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί με αποκλειστική χρήση ηλιακής ενέργειας (solar-only) λειτουργούν ιδανικά για να καλύψουν τις μεγάλες αιχμές ζήτησης τα μεσημέρια των θερινών

μηνών σε περιοχές με σημαντικές καταναλώσεις κλιματισμού. Με ενσωματωμένη τη θερμική αποθήκευση αυτοί οι σταθμοί μπορούν να λειτουργούν περισσότερο, ικανοποιώντας ακόμη και το φορτίο βάσης. ^[11]

Οι διαφορετικές διατάξεις ηλιοθερμικών σταθμών απαιτούν ανάλογες λύσεις θερμικής αποθήκευσης προσαρμοσμένες στη συγκεκριμένη τεχνολογία του εκάστοτε σταθμού. Για την εφαρμογή, δηλαδή, του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το μέσο μεταφοράς θερμότητας, η θερμοκρασία και η πίεση λειτουργίας, το μέγεθος του σταθμού και ο όγκος του τροφοδοτούμενου φορτίου. Έτσι υπάρχει μια ποικιλία τεχνολογιών αποθήκευσης, υλικών και μεθόδων λειτουργίας έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι διαφορετικές απαιτήσεις κάθε σταθμού. ^[6]

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Έμμεση αποθήκευση σημαίνει ότι το μέσο αποθήκευσης δεν θερμαίνεται απευθείας από τους συλλέκτες. Σε αυτά τα συστήματα από τους συλλέκτες θερμαίνεται άμεσα το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, συνήθως συνθετικό έλαιο, το οποίο στη συνέχεια διέρχεται από εναλλάκτες θερμότητας για να θερμάνει τελικά έμμεσα το μέσο αποθήκευσης. Τα μέσα αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται είναι υλικά με υψηλή θερμική χωρητικότητα όπως συμπιεσμένος ατμός, σκυρόδεμα, μια ποικιλία από υλικά αλλαγής φάσης και κυρίως τηγμένα άλατα, όπως για παράδειγμα νιτρικό νάτριο και νιτρικό κάλιο. Έμμεση αποθήκευση εφαρμόζεται όταν το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι πολύ ακριβό (όπως το συνθετικό έλαιο) ή δύσκολο να αποθηκευτεί (όπως ο ατμός). Το πλεονέκτημα της έμμεσης μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος του μέσου αποθήκευσης, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό κόστος του εναλλάκτη θερμότητας αλλά και οι απώλειες θερμότητας σε αυτόν.

Στην άμεση αποθήκευση το μέσο μεταφοράς της θερμότητας αποθηκεύεται απευθείας σε θερμικά μονωμένες δεξαμενές, παίζοντας ταυτόχρονα και το ρόλο του μέσου αποθήκευσης. Για να εφαρμοστεί ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης θα πρέπει το μέσο μεταφοράς της θερμότητας να είναι οικονομικό και να έχει υψηλή θερμική χωρητικότητα προκειμένου να μειωθεί το κόστος της δεξαμενής. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η σταθερή θερμοκρασία του θερμού μέσου τόσο στη μεταφορά όσο και στην αποθήκευση της θερμότητας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επικρατούσες εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης. ^{[11][12][13]}

3.2.2.2 Αποθήκευση με τη χρήση τηγμένων αλάτων

Διάφορα ρευστά έχουν δοκιμαστεί για να αποθηκεύσουν τη θερμότητα του ήλιου, όπως νερό, αέρας, έλαιο και νάτριο αλλά το υγροποιημένο άλας έχει επιλεγεί ως το καταλληλότερο και αποτελεί το επικρατέστερο μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας προς το παρόν. Το τηγμένο άλας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε σύστημα άμεσης αποθήκευσης σε ηλιοθερμικούς σταθμούς με ηλιακό πύργο επειδή είναι υγρό στην ατμοσφαιρική πίεση, αλλά επικρατεί κυρίως στα συστήματα έμμεσης αποθήκευσης. Είναι ένα ιδιαίτερα αποδοτικό αλλά και οικονομικό μέσο αποθήκευσης. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του είναι συμβατές με τους σύγχρονους ατμοστροβίλους υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας, ενώ δεν είναι εύφλεκτο ούτε τοξικό. Επιπρόσθετα, υπάρχει μια σχετική εμπειρία και από τη χρήση του σε μη ηλιακά συστήματα καθώς χρησιμοποιείται ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας σε χημικές και μεταλλουργικές βιομηχανίες.

Το χρησιμοποιούμενο τηγμένο άλας είναι ένα μείγμα το οποίο αποτελείται κατά 60% από νιτρικό νάτριο και κατά 40% από νιτρικό κάλιο. Και τα δύο αυτά συστατικά χρησιμοποιούνται και στην παραγωγή τροφίμων ως συντηρητικά αλλά και στη γεωργία ως λιπάσματα. Το μείγμα αυτό ρευστοποιείται στους 220 °C ενώ η μέγιστη ασφαλής θερμοκρασία στην οποία μπορεί να θερμανθεί είναι οι 560 °C. Όταν φτάσει η ώρα να τεθεί εκτός λειτουργίας ένας σταθμός με τέτοιο σύστημα αποθήκευσης στο τέλος της διάρκειας ζωής του, τα άλατα μπορούν

να κρυσταλλωθούν και να απομακρυνθούν στη στερεά τους μορφή για να επαναχρησιμοποιηθούν σε άλλες διαδικασίες, όπως για παράδειγμα στη γεωργία. ^{[14],[16]}

Μια ενδεικτική εφαρμογή έμμεσης αποθήκευσης με τηγμένο άλας είναι στους ηλιοθερμικούς σταθμούς Andasol. Σε κάθε σταθμό χρησιμοποιούνται 28.500 t (τόνοι) τηγμένου αλάτος, οι οποίοι είναι αποθηκευμένοι υπό ατμοσφαιρική πίεση σε ένα σύστημα δύο δεξαμενών, μιας ψυχρής και μιας θερμής. Οι διαστάσεις των κυλινδρικών δεξαμενών είναι 14m σε ύψος και 36m σε διάμετρο. ^[14]

Κατά τη διάρκεια της ημέρας τηγμένο άλας από την ψυχρή δεξαμενή όπου διατηρείται στη θερμοκρασία των 291 °C περίπου θερμαίνεται περνώντας από εναλλάκτη θερμότητας με το συνθετικό έλαιο, το οποίο έχει θερμανθεί στο ηλιακό πεδίο, και αποθηκεύεται στη θερμή δεξαμενή στους 384°C περίπου για μετέπειτα χρήση. Οι δεξαμενές είναι πολύ καλά μονωμένες και σε αυτές το τηγμένο άλας μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία του ακόμη και για αρκετές εβδομάδες (η θερμοκρασιακή απώλεια είναι της τάξης του ενός με 2°C Κελσίου ημερησίως ^[17]). Κατά την αντίστροφη διαδικασία, θερμό τηγμένο άλας αποδίδει θερμότητα στο συνθετικό έλαιο μέσα από τον εναλλάκτη και στη συνέχεια περνάει στην ψυχρή δεξαμενή. Μια γεμάτη δεξαμενή αποθήκευσης εξασφαλίζει την ονομαστική λειτουργία του στρόβιλου του σταθμού για περίπου 7,5 ώρες.



Εικόνα 3.3: Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας δύο δεξαμενών του Andasol ^[16]

Προκειμένου να γεμίζει η δεξαμενή αποθήκευσης και παράλληλα να λειτουργεί και ο στρόβιλος το ηλιακό πεδίο έχει διαστασιολογηθεί σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό ενός σταθμού χωρίς αποθήκευση. Κατά αυτόν τον τρόπο οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του σταθμού κατά τις περιόδους αιχμής φορτίου μπορούν σχεδόν να διπλασιαστούν. Πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι το συνθετικό έλαιο που παραμένει το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας είναι μια δοκιμασμένη και ελεγμένη τεχνολογία ενώ μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι οι απαιτούμενοι εναλλάκτες θερμότητας είναι ακριβοί και αυξάνουν το κόστος επένδυσης. ^{[6],[14],[15],[18]}

3.2.2.3 Άμεση αποθήκευση ατμού

Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης εφαρμόζεται σε εμπορική χρήση στην περίπτωση του σταθμού με ηλιακό πύργο PS10 στην Ισπανία, όπως έχει προαναφερθεί. Στον PS10 αποθηκεύεται θερμότητα σε δεξαμενές ως συμπιεσμένος

ατμός στα 50bar και στους 285 °C. Ο ατμός συμπυκνώνεται κατά την αποθήκευση και κατά τη χρήση επιστρέφει στην αέρια κατάσταση ελαπύνοντας την πίεση. Η χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης είναι περιορισμένη εξαιτίας του υψηλού κόστους των δεξαμενών συμπίεσης για μεγάλο όγκο ατμού. Αυτή η μέθοδος είναι μια συμβατική τεχνολογία, η οποία είναι γνωστή ως αποθήκευση Ruth. Η ιδανικότερη χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι ως αποθήκευση ανάγκης για την αιχμή του φορτίου. [6],[12]



Εικόνα 3.4: Δεξαμενές αποθήκευσης πεπιεσμένου ατμού ηλιοθερμικού σταθμού [17]

3.2.2.4 Έμμεση αποθήκευση με σκυρόδεμα

Η χρησιμοποίηση σκυροδέματος ως μέσου αποθήκευσης βρίσκεται σε διαφορετικά στάδια σε πειραματικές εφαρμογές με θετικές έως τώρα ενδείξεις. Η αποθήκευση γίνεται σε θερμοκρασίες 400-500°C. Είναι μια δομοστοιχειωτή σχεδίαση μεταβλητού μεγέθους όπου η θερμότητα αποθηκεύεται σε ένα δίκτυο στερεών πλακών. Η πρώτη γενιά στοιχείων αποθήκευσης περιλαμβάνει στοιχεία με χωρητικότητα 300 και 400 kWh. Συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη είναι αναγκαία για να φτάσει αυτή η τεχνολογία στην εμπορική χρήση. [6]



Εικόνα 3.5: Πειραματική διάταξη από σκυρόδεμα με δυνατότητα αποθήκευσης 400 kWh θερμικής ενέργειας. [10]

3.2.2.5 Έμμεση αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials-PCMs)

Η τεχνολογία αυτή, που βρίσκεται υπό ανάπτυξη, προσφέρει μια εναλλακτική λύση στην αποθήκευση της ενέργειας σε ηλιοθερμικούς σταθμούς. Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν την προοπτική να παρέχουν πιο αποδοτική αποθήκευση. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι οργανικά ή ανόργανα και χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμοκρασία τήξης. Υγροποιούνται και στερεοποιούνται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, και είναι ικανά να αποθηκεύουν και να εκλύουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Η βασική αρχή χρήσης τους στην αποθήκευση θερμότητας είναι ότι απορροφάται θερμότητα κατά την αλλαγή από τη στερεά στην υγρή κατάσταση και εκλύεται κατά την αντίστροφη πορεία. Η μεγαλύτερη ενθαλπία στα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης καθιστά τα ένυδρα άλατα ιδανικό μέσο αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Στα συστήματα αυτά, το θερμό ρευστό μεταφοράς της θερμότητας ρέει μέσω ενός διανομέα που είναι ενσωματωμένος στα υλικά αλλαγής φάσης, μεταφέροντας τη θερμότητά του στο υλικό αποθήκευσης. Η μέθοδος έχει δοκιμαστεί προς το παρόν σε διάφορα πρωτότυπα συστήματα, αλλά όχι σε εμπορικές εφαρμογές. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης και το χαμηλό κόστος των μέσων αποθήκευσης. Ωστόσο υπάρχουν ορισμένα εμπόδια στην ανάπτυξη αυτής της μεθόδου, όπως είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα αυτών των υλικών, τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου να αποτελέσει μια εμπορικά βιώσιμη λύση. [6][12]

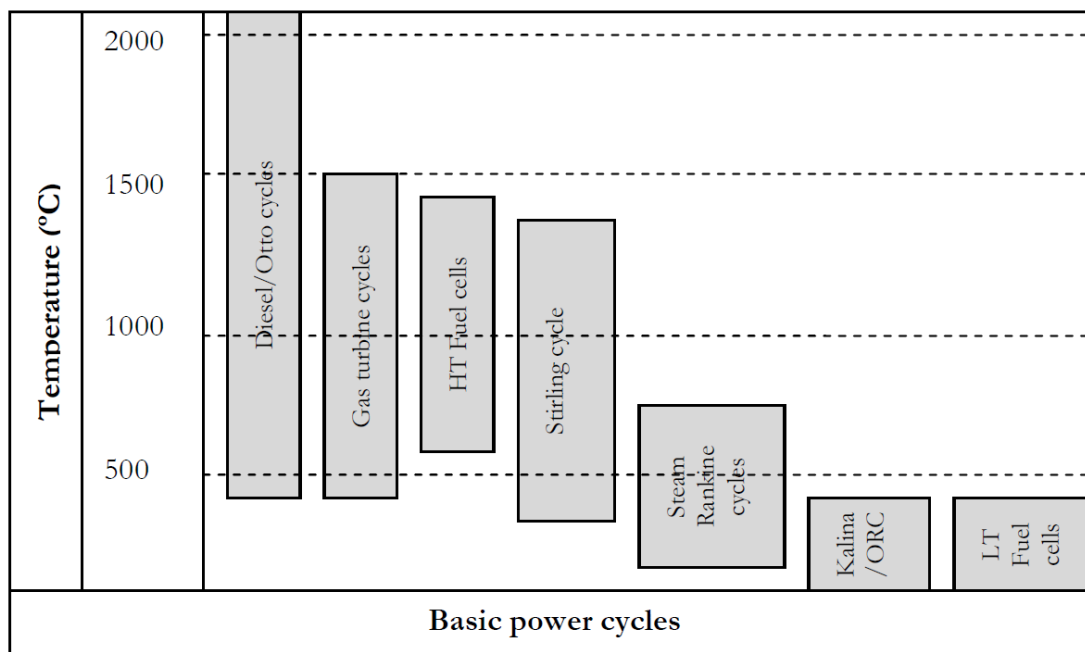
3.2.3 Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος

3.2.3.1 Εισαγωγή

Στην σύγχρονη κοινωνία υπάρχει μεγάλη ζήτηση σε μηχανική και ηλεκτρική ενέργεια. Εκτός από τις ανανεώσιμες πηγές, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται, προέρχεται από την θερμική ενέργεια. Η θερμική αυτή ενέργεια παράγεται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων και από τις πυρηνικές εγκαταστάσεις. Ανάλογα με την εφαρμογή, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικοί θερμοδυναμικοί κύκλοι. Αυτοί που χρησιμοποιούνται συνήθως, είναι: οι κινητήρες εσωτερικής καύσης (βενζίνης, φυσικού αερίου, πετρελαίου), οι αεριοστρόβιλοι και οι ατμοστρόβιλοι (κύκλος Clausius-Rankine). Οι διαδικασίες αυτές χρησιμοποιούν πάντα μια πηγή υψηλών θερμοκρασιών και τυπικά επιτυγχάνουν απόδοση κύκλου (η_{cycle}) μεταξύ 25 και 55%. Όμως ακόμη και σε αυτούς τους κύκλους πραγματοποιείται απόρριψη θερμότητας, συχνά σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (κινητήρες εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλοι). Στην περίπτωση που γίνεται ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας, π.χ. σε μια εγκατάσταση Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας – ΣΗΘ (Combined Heat and Power – CHP), μπορεί να επιτευχθεί ένας υψηλός λόγος χρησιμοποίησης των καυσίμων.

Έτσι, θα ήταν ωφέλιμο να υπάρχει μια διαδικασία που να μετατρέπει την θερμότητα που δεν μπορεί να ανακτηθεί άμεσα, σε μια χρήσιμη θερμική εφαρμογή με πρόσθετη παραγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, ακόμη και χαμηλής θερμοκρασίας βιομηχανική απορριπτόμενη θερμότητα, που δεν μπορεί να ανακτηθεί με άλλο τρόπο, θα μπορούσε να έχει πρακτική εφαρμογή. Ένας κατάλληλος θερμοδυναμικός κύκλος για αυτόν τον σκοπό είναι ο Οργανικός Κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle - ORC). Αυτός ο κύκλος μοιάζει με τον κλασικό κύκλο ατμού που χρησιμοποιείται συνήθως σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Σε εφαρμογές μικρής κλίμακας ή όταν είναι διαθέσιμη μια μόνο πηγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, θα μπορούσε να είναι πλεονεκτική η αντικατάσταση του μίγματος νερού / ατμού από ένα κατάλληλο οργανικό μέσο. Αυτή η τεχνολογία είναι ήδη διαθέσιμη στο εμπόριο και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία τις τελευταίες δεκαετίες, για την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικές γεωτρήσεις (75 - 300 °C). Συστήματα ORC εφαρμόζονται επίσης, αποτελεσματικά, σε σχετικά μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από βιομάζα. ^[19]



Σχήμα 3.10: Κατάταξη βασικών κύκλων βάσει θερμοκρασίας λειτουργίας

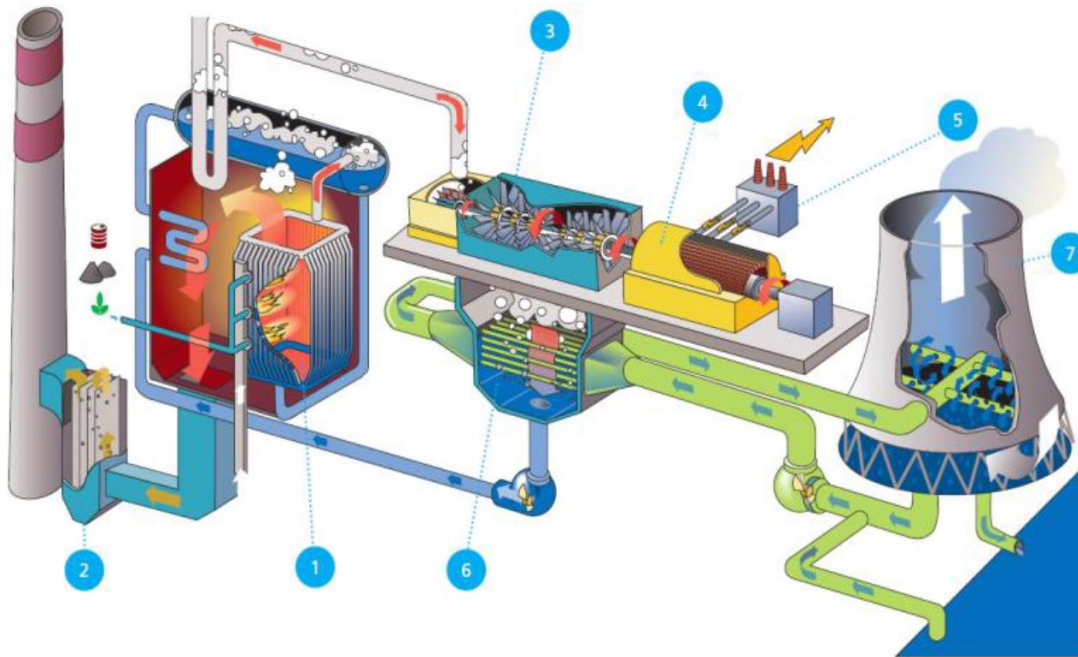
Μια ταξινόμηση των βασικών κύκλων ισχύος, σύμφωνα με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους, πραγματοποιήθηκε από τον Korobitsyn (1998) και απεικονίζεται στο σχήμα 3.10. Εξέτασε, θεωρητικά και πρακτικά, εφικτούς συνδυασμούς κύκλων, όπως: Brayton / Brayton, Otto / Kalina, Rankine / Kalina, κυψελών καυσίμου / Stirling, κ.α. Οι κύκλοι Kalina και ο ORC λειτουργούν στη χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία, καθιστώντας τους δυνητικά κατάλληλους για την ανάκτηση της θερμότητας που προέρχεται από πηγές όπως είναι οι αεριοστρόβιλοι και οι κινητήρες ντίζελ.

Χρησιμοποιώντας απλά ρευστά μεταφοράς θερμότητας, όπως ατμό, υδρογονάνθρακες και ψυκτικά μέσα, η αποτελεσματικότητα του παραδοσιακού κύκλου Rankine μπορεί να αυξηθεί μέσω διεργασιών αναγέννησης. Ο ORC δεδομένου ότι λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία, σε σχέση με τους κύκλους φυσικού αερίου, είναι κατάλληλος για την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας, η οποία οδηγεί σε υψηλότερη συνολική απόδοση και σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων. ^[20]

3.2.3.2 Οργανικός Κύκλος Rankine

Το σχήμα 3.11 δείχνει τα κύρια μέρη ενός κύκλου ατμού σε έναν θερμοηλεκτρικό σταθμό: λέβητας (1), ατμοστρόβιλος (3), γεννήτρια (4), συμπυκνωτής (6), πύργος ψύξης (7) και αντλία τροφοδοσίας.

Αυτός ο θερμοδυναμικός κύκλος εφαρμόζεται με επιτυχία σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας, καθώς η χρήση νερού ως μέσο μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα από μειονεκτήματα.



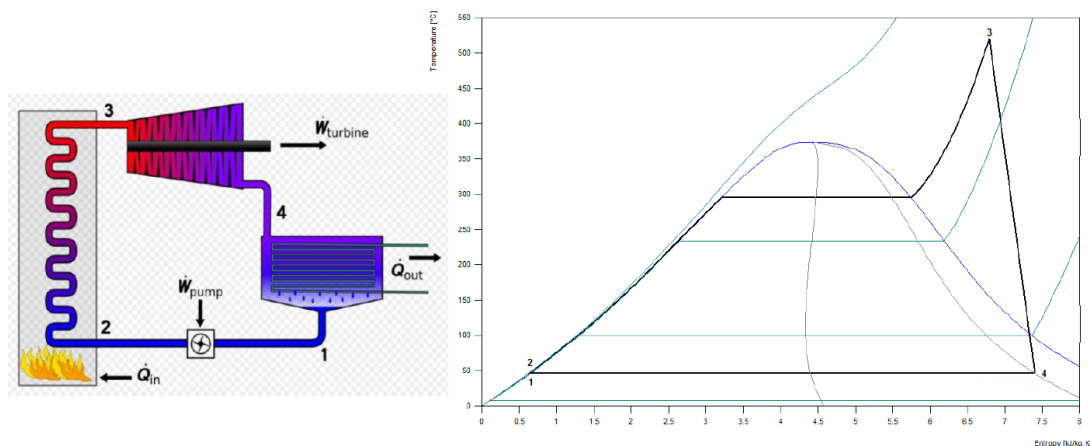
**Σχήμα 3.11: Συμβατικός Κύκλος Rankine σε σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
(πηγή: Electrabel)**

Τα μειονεκτήματα στη χρήση μίγματος νερού / ατμού μπορεί να εξηγηθούν καλύτερα με την εξέταση του διαγράμματος θερμοκρασίας – εντροπίας (T-s), ενός απλοποιημένου κύκλου ατμού (σχήμα 3.12). Αυτός ο κύκλος ατμού χρησιμοποιείται συχνά σε εγκαταστάσεις ισχύος κλίμακας μέχρι μερικά MWe. Τα κύρια μειονεκτήματα για τη χρήση του νερού ως μέσο εργασίας είναι:

- Για μια θερμοκρασία συμπύκνωσης γύρω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, απαιτείται μια πολύ χαμηλή πίεση, π.χ. $T_{\text{cond}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ απαιτεί $P_{\text{cond}} < 0,1\text{ bar}$. Χαμηλή πίεση συνεπάγεται χαμηλή πυκνότητα ή υψηλό ειδικό όγκο στην έξοδο του ατμοστροβίλου και του συμπυκνωτή, καθώς και μεγάλη διάμετρο στο τελικό στάδιο της τουρμπίνας και έναν ογκώδη συμπυκνωτή.
- Λόγω της υψηλής σχέσης πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του ατμοστροβίλου, ο σχεδιασμός του στροβίλου γίνεται πιο πολύπλοκος απαιτώντας πολλαπλά στάδια.
- Για να αποφευχθεί ο σχηματισμός υγρασίας στα τελικά στάδια της τουρμπίνας ατμού, ο ατμός πρέπει να είναι υπέρθερμος σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες έχουν τις επιπτώσεις τους στο σχεδιασμό και την επιλογή υλικού για την τουρμπίνα και τους εναλλάκτες θερμότητας.
- Το νερό έχει επίσης υψηλή θερμότητα εξάτμισης (E_{evap}) και ως εκ τούτου απαιτεί μία πηγή θερμότητας που μπορεί να προσδώσει πολλή θερμική ενέργεια σε υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα.

Από τα μειονεκτήματα αυτά μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή μίγματος νερού / ατμού είναι περιορισμένη όταν πρόκειται για μια βιομηχανική πηγή απορριπτόμενης θερμότητας σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μια καλύτερη εναλλακτική λύση είναι ο Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC). Ο ORC βασίζεται στις ίδιες θερμοδυναμικές αρχές και τα ίδια τμήματα όπως και ένας συμβατικός κύκλος ατμού (εναλλάκτης θερμότητας, διαστολέας, συμπυκνωτής, αντλία τροφοδοσίας), μόνο που εφαρμόζεται διαφορετικό εργασιακό μέσο. Χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά ρευστά, όπως ψυκτικά υγρά (π.χ. R245fa,

τολουόλιο, κυκλο-πεντάνιο ή έλαια σιλικόνης). Αυτά τα υγρά χαρακτηρίζονται ως ξηρά υγρά και έχουν μερικές ενδιαφέρουσες ιδιότητες σε σύγκριση με το μίγμα νερού / ατμού [21-26].



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα T - s για ένα απλοποιημένο κύκλο ατμού

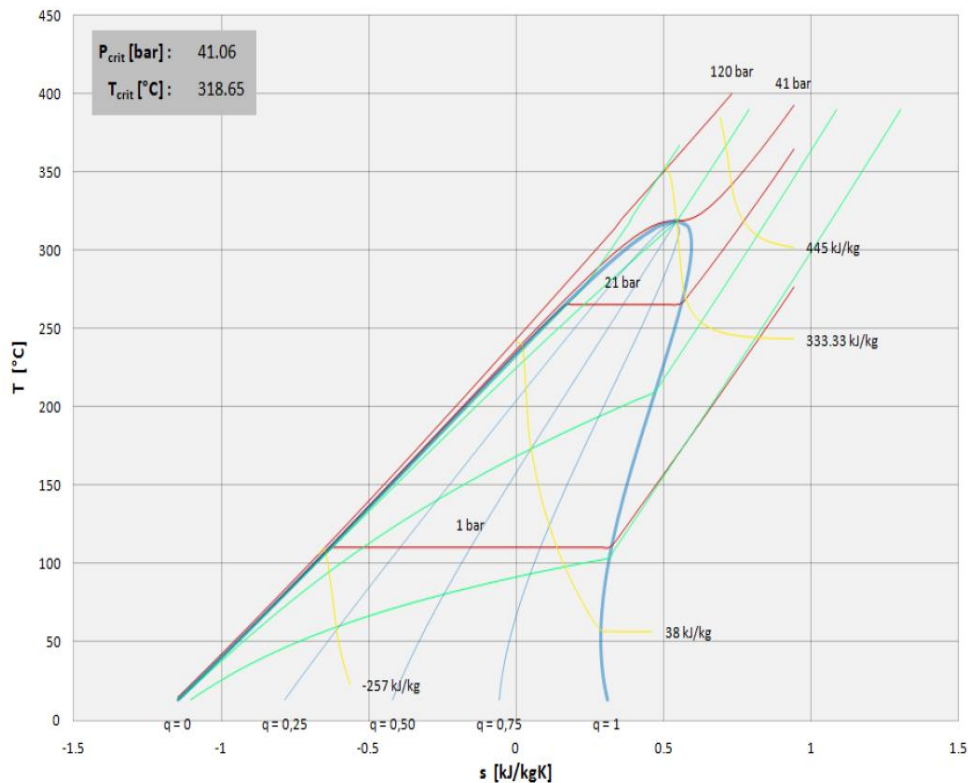
Για παράδειγμα, το διάγραμμα T-s για το τολουόλιο παριστάνεται στο σχήμα 3.13 [26]. Σε ένα διάγραμμα T-s τα ξηρά ρευστά, όπως το τολουόλιο, χαρακτηρίζονται από θετική κλίση της καμπύλης του κορεσμένου ατμού. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού τα ξηρά ρευστά δεν χρειάζεται να είναι υπέρθερμα, διότι μετά την εκτόνωση, ο κορεσμένος ατμός παραμένει στην περιοχή του υπέρθερμου.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των οργανικών υγρών σε σύγκριση με το μίγμα νερού / ατμού μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Τα οργανικά υγρά σε έναν ORC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία εξάτμισης και πίεσης.
- Η υπερθέρμανση δεν απαιτείται, αν και στην πράξη ένας μικρός βαθμός υπερθέρμανσης εφαρμόζεται σε μερικές μονάδες ORC.
- Η θερμότητα εξάτμισης των οργανικών υγρών είναι περίπου 10 φορές μικρότερη σε σχέση με αυτή του νερού.

Όλα αυτά οδηγούν σε μικρότερες θερμοκρασιακές απαιτήσεις από πλευράς της πηγής θερμότητας. Σε υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα, προκειμένου να εξατμιστεί το υγρό, απαιτείται λιγότερη θερμότητα ως είσοδος θερμότητας σε ένα ORC και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί θερμότητα χαμηλής ποιότητας (π.χ. βιομηχανική απορριπτόμενη θερμότητα). Η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να εφαρμοστεί ένας ORC ξεκινά περίπου στους 55 °C. Η αποδοτικότητα του κύκλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εξάτμισης και συμπύκνωσης. Όσο μικρότερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας, τόσο χαμηλότερη θα είναι και η απόδοση του κύκλου.

Επίσης, ένα βασικό ζήτημα είναι η επιλογή του οργανικού ρευστού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα ψυκτικά μέσα είναι αποτελεσματικά μόνο στην χρήση με πηγές θερμότητας χαμηλής ποιότητας. Σε περίπτωση που η απορριπτόμενη θερμότητα είναι υψηλών θερμοκρασιών π.χ. καυσαέρια ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης, χρησιμοποιούνται άλλα οργανικά υγρά όπως το τολουόλιο ή έλαια σιλικόνης. Σε αυτές τις μονάδες ORC, μπορεί να επιτευχθεί αποδοτικότητα κύκλου 20 - 25%.



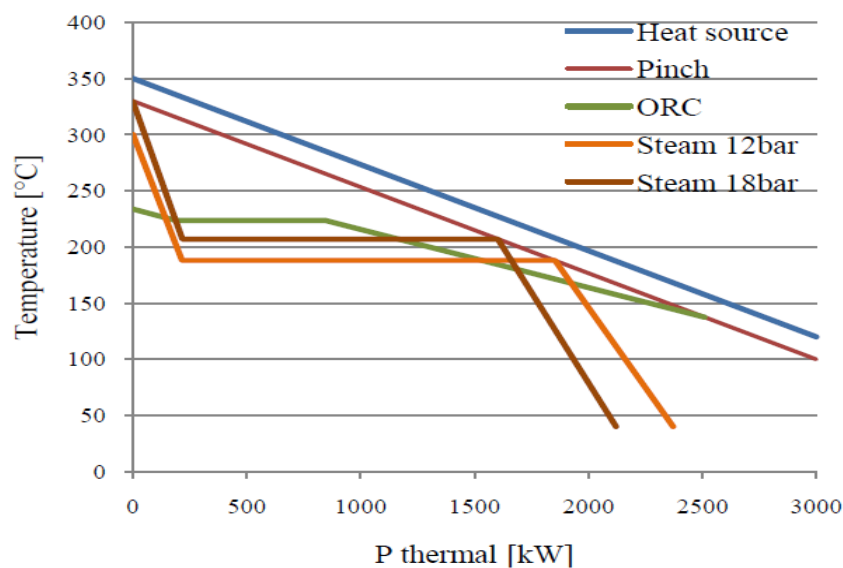
Σχήμα 3.13: Διάγραμμα T - s για το τολουόλιο

Λόγω των χαρακτηριστικών του, ένα σύστημα ORC μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά προκειμένου να ανακτηθεί η απορριπτόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια. Συχνά, με ένα σύστημα ORC μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση σε ηλεκτρική ενέργεια, σε σύγκριση με ένα κύκλο ατμού. Ο πίνακας 3.2 δείχνει τα αποτελέσματα προσομοίωσης για μια αυθαίρετη ροή απορριπτόμενης θερμότητας με μέγιστη θερμοκρασία 350 °C και θερμικής ισχύος 3.000 kW_{th} (κατά την ταπείνωση της θερμοκρασίας στους 120 °C). Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα θερμοκρασιακά προφίλ και τα κρίσιμα σημεία για έναν ORC και έναν κύκλο ατμού. Ο ORC προσομοιώνεται με ένα αναγεννητή και ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται το έλαιο σιλικόνης, εξαμεθυλοδιισιλοξάνη.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2, από τον ORC μπορεί να ανακτηθεί περισσότερη απορριπτόμενη θερμότητα (P_{th recover}). Παρά την χαμηλότερη απόδοση του κύκλου σε σύγκριση με ένα κύκλο ατμού, στη γεννήτρια ενός ORC μπορεί να παραχθεί περισσότερη καθαρή ηλεκτρική ενέργεια. Στο σχήμα 3.14 απεικονίζονται τα αντίστοιχα προφίλ θερμότητας. Ο ORC απαιτεί λιγότερη θερμότητα για την εξάτμιση του οργανικού μέσου, σε σύγκριση με τον κύκλο ατμού και ως αποτέλεσμα μπορεί να εφαρμοστεί υψηλότερη θερμοκρασία εξάτμισης. Από την άλλη πλευρά, ο κύκλος ατμού απαιτεί υψηλότερη θερμοκρασία υπερθέρμανσης, ανάλογα με την πίεση εξάτμισης που χρησιμοποιείται. Για έναν κύκλο ατμού, συχνά, ο παράγοντας που περιορίζει την χρήση του σε εφαρμογές ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλής ποιότητας, είναι ο συνδυασμός της πίεσης εξάτμισης και της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης. Το ποιος κύκλος ατμού ή ποιος ORC, δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το θερμοκρασιακό προφίλ της πηγής της απορριπτόμενης θερμότητας και θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω ανάλογα με την περίπτωση.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα ανάκτησης απορριπτόμενης ενέργειας

Παράμετρος	Μονάδα	ORC	Steam	
$p_{\text{evaporator}}$	[bar]	14	12	18
η_i turbine	[%]	75	75	74
T_{sup}	[°C]	234	300	329
$P_{\text{th recover}}$	[kW _{th}]	2509	2371	2121
$P_{\text{gen,nto}}$	[kW _e]	522	500	473
$\eta_{\text{gen,nto}}$	[%]	20,8	21,1	22,3



Σχήμα 3.14: Σύγκριση θερμοκρασιακού προφίλ

3.2.3.4 Ταξινόμηση μηχανών ORC

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να ταξινομήσει κανείς τις πολύ διαφορετικές εκδόσεις των συστημάτων του ORC. Σε μια ταξινόμηση ανάλογα με το εύρος ισχύος, μπορούν να διακριθούν: τα μικρο-συστήματα (0,5-10 kW_e), τα μικρά συστήματα (10-100 kW_e), τα μεσαίου μεγέθους (100-300 kW_e) και τα μεγάλα συστήματα (300 kW_e - 3 MWe ή μεγαλύτερα). Η απαιτούμενη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας είναι μια άλλη σχετική παράμετρος με την οποία μπορούν να ταξινομηθούν. Έτσι υπάρχουν συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας (55-150 °C), μέσης θερμοκρασίας (150-300 °C) και υψηλής θερμοκρασίας (πάνω από 300 °C). Ανάλογα με την θερμοκρασία του συμπυκνωτή, μπορούν να διακριθούν σε αυτά που λειτουργούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και θερμοκρασία μεταξύ περίπου 50 και 90 °C. Η τεχνολογία του διαστολέα που χρησιμοποιείται είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος, αλλά συνδέεται συχνά με άλλες παραμέτρους όπως η ισχύς και το εύρος θερμοκρασίας.

Επίσης, μια παράμετρος θα μπορούσε να είναι η «ωριμότητα της τεχνολογίας». Παρά την ανάρτηση τους στο διαδίκτυο ή σε άλλα μέσα ενημέρωσης, συχνά με την αλλαγή των χαρακτηριστικών, των τιμών κ.α., η διαθεσιμότητα των διαφόρων μονάδων ORC δεν είναι πάντα σαφής. Μερικές παραμένουν ακόμη μη διαθέσιμες,

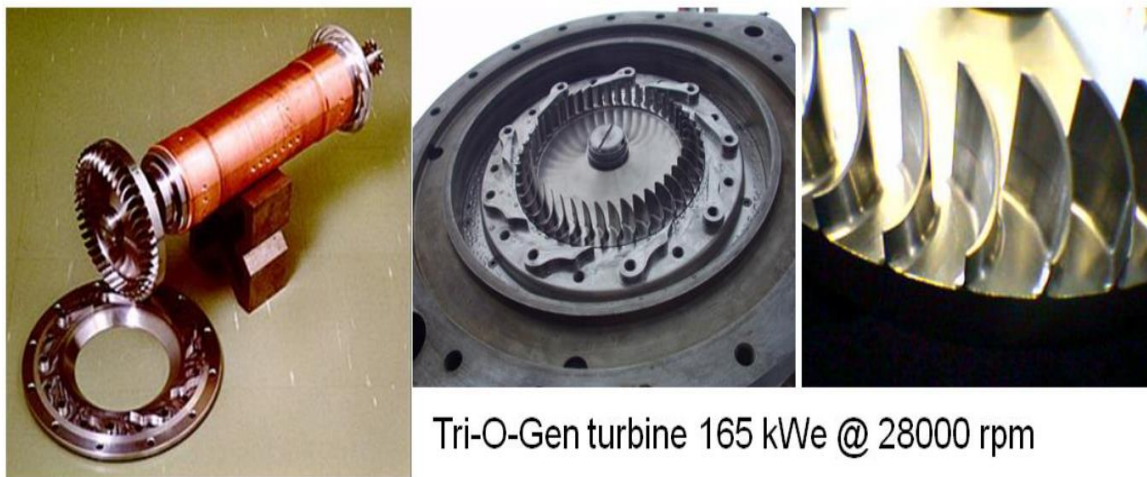
παρά τα πολλά χρόνια “προώθησης”. Οι ταξινομήσεις βάσει αυτής της παραμέτρου είναι: «διαθέσιμες βάσει διαφορετικών γνωστών αναφορών», «πρόωρα εμπορευματοποιημένες μετά από (επιτυχημένες) δοκιμές», «πειραματικές» και «μη αποδεκτές».

Η κατάταξη, ανάλογα με την τεχνολογία στροβίλου είναι η πιο ολοκληρωμένη για να γίνει μια «state of the art» επισκόπηση.

- ORC στροβίλου

Λόγω του αποκλειστικού σχεδιασμού τους, με την εφαρμογή τέτοιου τύπου στροβίλου μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες αποδόσεις. Τέτοιοι τύποι απαντώνται κυρίως σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας.

Για παράδειγμα, η εικόνα 3.6 δείχνει ειδικά σχεδιασμένους στροβίλους που χρησιμοποιούν το τολουόλιο ως ρευστό εργασίας και χρειάζονται πηγή θερμότητας με θερμοκρασία υψηλότερη από 350°C. Επειδή όμως η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου είναι 325 °C, εφαρμόζεται κάποια υπερθέρμανση. Αυτή η ORC είναι καλά προσαρμοσμένη για τη χρήση της θερμότητας των καυσαερίων από κινητήρες εσωτερικής καύσης.



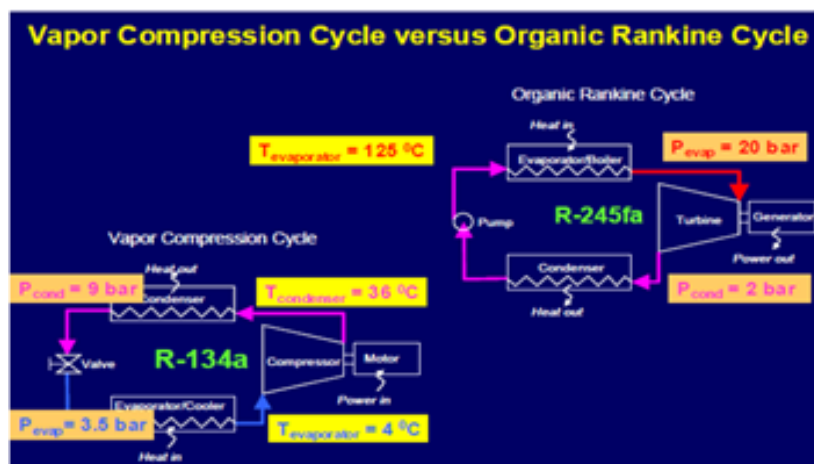
Tri-O-Gen turbine 165 kWe @ 28000 rpm

Εικόνα 3.6: Γεννήτρια Tri-O-Gen

- Φυγοκεντρικοί ψύκτες αντίστροφης ροής

Μερικοί τύποι μηχανών ORC, προκύπτουν από τον εξοπλισμό ψύξης, όπου αρκεί η αντιστροφή του κύκλου ψύξης (σχήμα 15). Για να μετατραπεί ένας φυγοκεντρικός ψύκτης σε κύκλο ισχύος, πρέπει ο συμπιεστής να μετατραπεί σε στρόβιλο, ο κινητήρας να αντικατασταθεί από μια γεννήτρια και η βαλβίδα εκτόνωσης να αντικατασταθεί από μια αντλία. Κρατώντας σαν οργανικό μέσο το R134a, υπάρχει μια ORC μονάδα πολύ χαμηλών θερμοκρασιών (που χρησιμοποιείται σε γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής στην Αλάσκα, όπου μπορεί να επιτευχθεί μια πολύ χαμηλή θερμοκρασία του συμπυκνωτή). Όταν χρησιμοποιείται σαν ρευστό εργασίας το R245fa, αυτός ο τύπος της μηχανής ORC μπορεί να βελτιστοποιηθεί για πηγές θερμότητας μεταξύ 90°C και περίπου 140°C, καθώς σε μία μέγιστη πίεση λειτουργίας της τάξης των 20 bar η θερμοκρασία εξάτμισης είναι περίπου 122 °C.

Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου ORC είναι μια σχετικά χαμηλή τιμή και υψηλή αξιοπιστία. Σχεδόν όλα τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται είναι δοκιμασμένες τεχνολογίας και κυρίως η εγκατάσταση και η συντήρηση μπορούν να πραγματοποιούνται από τους υπάρχοντες κατασκευαστές και τεχνικούς.

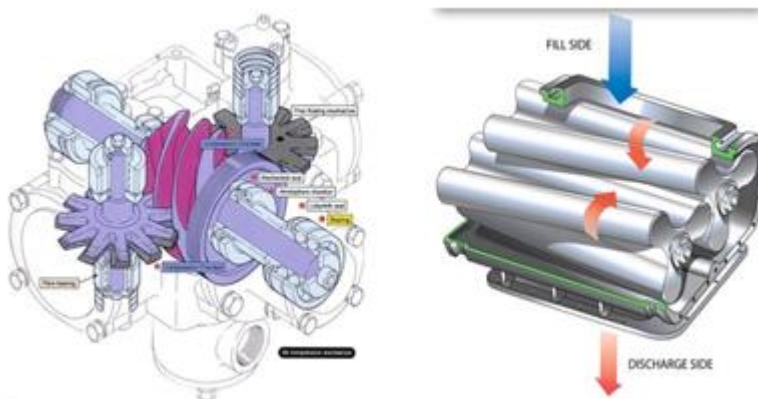


Σχήμα 3.15: ORC φυγοκεντρικού τύπου αντίστροφης ροής

- Στρόβιλοι μονού, διπλού κοχλία και τύπου Lysholm

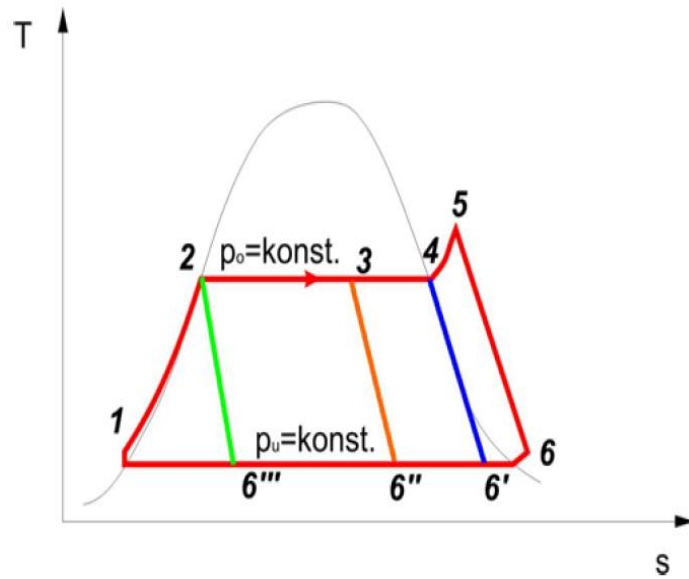
Αυτοί οι τύποι στρόβιλου προέρχονται από την αντιστροφή ογκομετρικών συμπιεστών. Ο συμπιεστής Lysholm (σχήμα 3.16) επινοήθηκε το 1934 για χρήση ως υπερσυμπιεστής σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Τα κύριο θέμα, κατά την χρήση αυτών των τύπων στρόβιλου, ήταν η λίπανση για την αποφυγή της τριβής που προκαλείται από την θερμική διαστολή. Αυτές οι μηχανές ORC μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ως ORC χαμηλής θερμοκρασίας, καθώς η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας δεν πρέπει να υπερβαίνει πάρα πολύ την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του συμπιεστή.

Αυτοί οι στρόβιλοι είναι τόσο ισχυροί που στην είσοδο τους μπορούν να αντέξουν σταγόνες ρευστού, ακόμα και να λειτουργούν με καθαρά ρευστά. Τα σημεία 2, 3, 4 και 5 στο σχήμα 3.17 είναι όλες αποδεκτές συνθήκες εισόδου για τον στρόβιλο. [27,28]



Σχήμα 3.16: Στρόβιλοι Μονού και Διπλού Κοχλία και τύπου Lysholm

Οι στρόβιλοι «Διπλού Κοχλία» είναι διαθέσιμοι στην αγορά για εφαρμογές τις τάξεως των MW, ενώ έχουν ήδη υλοποιηθεί έργα της τάξης των 250 kW.



Σχήμα 3.17: Πιθανοί κύκλοι (ατμού) με χρήση στροβίλων κοχλία

- Σπειροειδείς στρόβιλοι

Οι σπειροειδείς συμπιεστές (εικόνα 3.7) χρησιμοποιούνται ευρέως στον εξοπλισμό ψύξης και κλιματισμού και μπορούν εύκολα να αντιστραφούν ώστε να ενεργούν ως στρόβιλοι. Επίσης, έχουν γίνει γνωστές μερικές εξελίξεις στις μηχανές ORC που χρησιμοποιούν τέτοιο τύπο στροβίλου ^[29]. Το εύρος ισχύος για τους σπειροειδείς διαστολείς περιορίζεται περίπου σε 30kWe και η εμπορευματοποίηση αυτού του τύπου ORC είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο.



Εικόνα 3.7:Σπειροειδής στρόβιλος

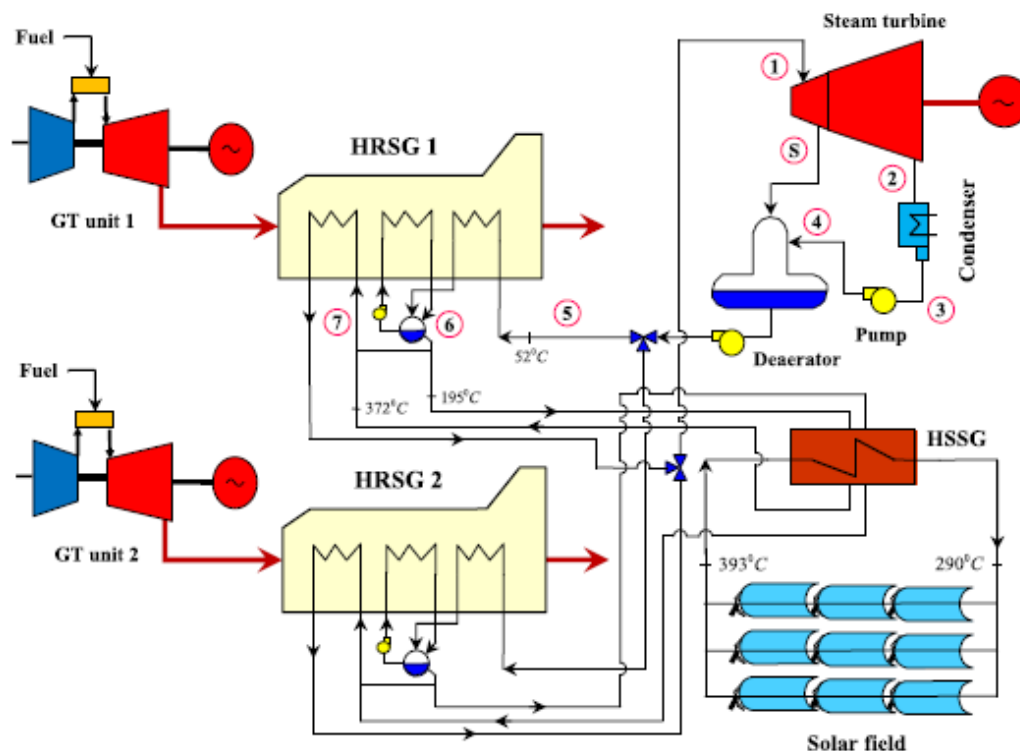
3.3 Σύγχρονες Τάσεις στους Ηλιοθερμικούς Σταθμούς

Ανάμεσα σε όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες μέχρι σήμερα, αυτή του Ολοκληρωμένου Ηλιακού Συνδυασμένου Κύκλου (Integrated Solar Combined Cycle -ISCC) αποτελεί την πιο αποδοτική τεχνολογία μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική. Ένας τέτοιος σταθμός παραγωγής ενέργειας είναι ένας συνδυασμός από ένα ηλιοθερμικό πεδίο παραβολικών ηλιακών κατόπτρων με ένα συμβατικό σταθμό συνδυασμένου κύκλου. Τα

αποτελέσματα από την ανάπτυξη θερμοδυναμικού μοντέλου σε τέτοιο σύστημα (Αλγερία), έδειξαν πως κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου η απόδοση (ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια) μπορεί να φτάσει μέχρι και 14,4% (8% τη χειμερινή περίοδο, εξαιτίας της χαμηλής ακτινοβολίας), ενώ η αντίστοιχη θερμική απόδοση (ηλιακή σε θερμική ενέργεια) περίπου το 60%.^[30]

Μια δεκαετία αργότερα από την κατασκευή των 9 σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας SEGSS στην έρημο της Καλιφόρνια (1980), εμφανίστηκε η τεχνολογία της ενσωμάτωσης των παραβολικών συλλεκτών στους συνδυασμένους κύκλους ορυκτών καυσίμων, προκειμένου να βελτιωθεί η ηλιακή μετατροπή. Την περασμένη δεκαετία, η τεχνολογία αυτή προσέλκυσε το ενδιαφέρον όλο και περισσότερων επενδυτών και ερευνητών. Επιπλέον, μια υβριδική μονάδα παραγωγής ενέργειας όπως ένα σύστημα ISCC, μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση σε ορυκτά καύσιμα, οδηγώντας έτσι στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και συναφών δαπανών. Επίσης, ακόμη και η συμβολή του συστήματος θερμικής αποθήκευσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά ή ακόμη και να παραληφθεί, καθώς για ένα υβριδικό ηλιοθερμικό σύστημα, ακόμη και κάτω από δραματικές μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κύκλος των ορυκτών καυσίμων αποτελεί ένα εύκολο μέσο για την ομαλή διακύμανση της ισχύος. Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων, η ενσωμάτωση της ηλιοθερμίας σε διαφορετικούς τύπους σταθμών παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα προσελκύουν περισσότερη προσοχή από τις βιομηχανίες. Ανάλογα με την ποιότητα της παραγόμενης ενέργειας σε ένα ηλιακό πεδίο, ηλιοθερμική ενέργεια μπορεί να ενσωματωθεί σε έναν αεριοστρόβιλο, σε μια γεννήτρια Rankine που τροφοδοτείται από καύση άνθρακα ή σε συνδυασμένο κύκλο φυσικού αερίου (Natural Gas Combined Cycle - NGCC).^[30]

Ένα τυπικό διάγραμμα λειτουργίας ενός σταθμού που έχει υιοθετήσει τη συγκεκριμένη τεχνολογία φαίνεται στο σχήμα 3.18. Βασικά, αποτελείται από δύο τουρμπίνες αερίου και ένα ηλιοθερμικό πεδίο μεγάλης κλίμακας.



Σχήμα 3.18: Τυπικό διάγραμμα ενός σταθμού τεχνολογίας ISCC^[30]

Όπως φαίνεται και παραπάνω σε μια μονάδα παραγωγής NGCC, ένα σύστημα Ολοκληρωμένου Ηλιακού Συνδυασμένου Κύκλου (ISCC) προσθέτει ατμό που παράγεται από ηλιοθερμική ενέργεια σε γεννήτριες παραγωγής ατμού με ανάκτηση θερμότητας (Heat Recover Steam Generator - HRSG). Η ενσωμάτωση του ηλιακού πεδίου στο παραπάνω σύστημα γίνεται χωρίς προβλήματα και έχει τη δυνατότητα επίτευξης σημαντικών οικονομικών και περιβαλλοντικών οφελών, σε σύγκριση με την ηλιακή ενσωμάτωση σε άλλους τύπους κύκλων ισχύος. Η απόδοση μετατροπής από ηλιακή σε ηλεκτρική μπορεί να φτάσει περίπου το 31% με συμβολή της ηλιακής ενέργειας 10% στο γενικό ισοζύγιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε πολλές έρευνες που έγιναν, διαπιστώνεται η πολύ καλή αποδοτικότητα ενός τέτοιου συστήματος. Η πρώτη φορά που αναλύθηκε ένα σύστημα ISCC (Τυνησία) έδειξε πως είναι πιο κερδοφόρο από τους σταθμούς SEGs. Σε αντίστοιχη έρευνα, συγκρίνοντας συστήματα όπως ISCC με το SEGs και απλού συνδυασμένου κύκλου (Combined Cycle – CC), διαπιστώθηκε πως αυτό του ISCC είναι το πιο αποδοτικό.^[30] Στον Ελλαδικό χώρο σε έρευνα που έγινε από τους Μπάκος και Πάρσα (2013), προσομοιώνοντας εγκατάσταση σταθμού ISCC στο νότιο τμήμα της χώρας, στο TRNSYS-STEC, διαπιστώθηκε πως η εν λόγω τεχνολογία είναι η πιο αποδοτική.^[31]

Στο ίδιο πλαίσιο, πραγματοποιήθηκαν έρευνες του παραπάνω συστήματος, στις οποίες άλλαζαν βασικές παράμετροι, προκειμένου να ελεγχθεί η συμπεριφορά του. Για παράδειγμα, σε μια καινοτόμο έρευνα, όπου το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF) αντικαθίσταται με CO₂, ο συντελεστής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας έφτασε το 25%. Σε άλλη περίπτωση, η απόδοση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μπορεί να ανέβει 1,2%, αν το ηλιοθερμικό πεδίο λειτουργεί σε δύο στάδια αντί για ένα. Επιπλέον, σε περίπτωση ενσωμάτωσης επιπλέον τεχνολογιών, όπως φωτοβολταϊκά ή ψύκτες απορρόφησης, για τη λειτουργία του συστήματος ψύξης των σταθμών, προκύπτει καλύτερη συνολική θερμική απόδοση έναντι ενός συμβατικού συστήματος ISCC. Σε παρόμοια συστήματα, έρευνες έδειξαν πως η απόδοση στη μετατροπή ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να φτάσει το 40-45%, που είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή ενός συμβατικού κύκλου ατμού.^[32]

Πιο πρόσφατα έγινε μια έρευνα για το ποια τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών που υπάρχουν στο εμπόριο (μεταξύ παραβολικών - PTCs, γραμμικούς συλλέκτες Fresnel - LFR και ηλιακού πύργου - CT), είναι η πιο κατάλληλη για ενσωμάτωση σε ένα σύστημα ISCC. Κάθε μία από τις τρεις τεχνολογίες συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας, που αναφέρθηκαν, αναλύθηκε με τους εξής δύο τρόπους: i) άμεση παραγωγή ατμού παράλληλα με τον εξατμιστήρα υψηλής πίεσης της γεννήτριας παραγωγής ατμού με ανάκτηση θερμότητας (DSG) και ii) προθέρμανση του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή του αεριοστρόβιλου (GT). Η προσομοίωση ετήσιας παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, έγινε για δύο διαφορετικές τοποθεσίες (Αλμερία – Ισπανία και Λας Βέγκας – Η.Π.Α.), χωρίς να ληφθούν υπόψη μεταβατικές επιδράσεις λόγω κλιματολογικών μεταβολών (όπως διαλείπουσα νεφοκάλυψη). Από την έρευνα προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:^[33]

- Στους σταθμούς ISCC με άμεση παραγωγή ατμού (DSG) η ηλιακή συμβολή αυξάνει την παραγωγή ατμού και έτσι αυξάνεται η ετήσια παραγωγή. Στην περίπτωση προθέρμανσης του αέρα του αεριοστρόβιλου, αντί για αύξηση στην ετήσια παραγωγή, απλά γίνεται μια μικρή εξοικονόμηση σε καύσιμα.
- Ο βαθμός απόδοσης (μετατροπή ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια) είναι υψηλός σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης, παρουσιάζοντας υψηλότερες τιμές στην περίπτωση προθέρμανσης του αέρα του στρόβιλου.
- Όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, η τεχνολογία των παραβολικών συλλεκτών είναι η καλύτερη τεχνολογία όταν εφαρμόζεται άμεση παραγωγή ατμού. Στην περίπτωση προθέρμανσης του αέρα του

στροβίλου, οι παραβολικές κοιλότητες και οι κεντρικοί πύργοι συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο, ενώ ο συλλέκτης Fresnel παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση.

3.4 Σύνοψη

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί λειτουργούν όπως και οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μόνη διαφορά την πρωτεύουσα πηγή θερμότητας, η οποία είναι η ενέργεια του ήλιου αντί για τη θερμότητα από την καύση κάποιου ορυκτού καυσίμου. Στους υβριδικούς σταθμούς υπάρχει και η εφεδρεία του ορυκτού καυσίμου όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί. Η ηλιακή θερμική ενέργεια που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί επίσης να αποδοθεί σε μονάδες αποθήκευσης θερμαίνοντας κατάλληλα υγρά ή στερεά μέσα όπως τηγμένα άλατα, κεραμικά, σκυρόδεμα ή μίγματα αλάτων εναλλασσόμενης φάσης. Τη νύχτα, αυτή η θερμότητα μπορεί να εξάγεται από το μέσο αποθήκευσης έτσι ώστε να συνεχίζεται η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού.

Επίσης αναλύθηκε εκτενώς ο οργανικός κύκλος Rankine, καθώς και αναλύθηκαν μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του σε σύγκριση, κυρίως, με τον κύκλο ατμού. Η τεχνολογία του ORC μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων. Ουσιαστικά, κάθε πηγή θερμότητας χαμηλής ποιότητας, από περίπου 55°C, μπορεί (τεχνικά) να χρησιμοποιηθεί ως πηγή θερμότητας εισόδου σε μία γεννήτρια ORC. Συνολικά, μια μονάδα ORC είναι μια βιώσιμη και αποτελεσματική εναλλακτική λύση από αυτήν ενός κύκλου ατμού, ιδίως όταν η πηγή απορριπτόμενης θερμότητας είναι χαμηλής ποιότητας, όπως συμβαίνει στην προκειμένη περίπτωση του πιλοτικού υβριδικού πάρκου στον Δήμο Τοπείρου, που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος, έγινε μια σύντομη αναφορά στα συστήματα Ολοκληρωμένου Ηλιακού Συνδυασμένου Κύκλου (Integrated Solar Combined Cycle – ISCC), στα οποία ενσωματώνεται ένα ηλιοθερμικό πεδίο σε κάποιο συμβατικό σταθμό παραγωγής συνδυασμένου κύκλου που χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα. Το βασικό πλεονέκτημα είναι η αδιάλειπτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη μείωση στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και του ενεργειακού αποτυπώματος των μονάδων.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται τα βασικότερα υποσυστήματα του υφιστάμενου υβριδικού πάρκου παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, που έχει κατασκευαστεί στο χωρίο Ζηλωτή του Νέου Ερασμίου, Δήμου Τοπείρου, Νομού Ξάνθης, στο οποίο έχει εγκατασταθεί ηλιοθερμικό πεδίο με ευθύγραμμους παραβολικούς συλλέκτες και γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τεχνολογίας ORC.

Αναφορές

[1] Greenpeace, SolarPACES, and ESTELA, «Concentrating Solar Power: Global Outlook 2009».

[2] Μαντήκος Α. Αντώνιος, «Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2011.

[3] Ισαακίδου Αικατερίνη, «Μελέτη απόδοσης ηλιοθερμικού παραβολικού κατόπτρου», Διπλωματική Εργασία, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 2017.

[4] Matthias Günther, Michael Joemann, Simon Csambor, «Chapter 5: Parabolic Trough Technology. Advanced CSP Teaching Materials», enernena & Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.

[5] <http://alanod-solar.com/en/Reflection/Products>

[6] Greenpeace, European Solar Thermal Industry Association, and IEA, SolarPACES and ESTELA, «Concentrated Solar Thermal Power – Now», 2005.

[7] The World Bank, «Phase I (Part I): Review of CSP Technologies and Cost Drivers Overview», 2010.

[8] Report of European Commission, «Concentrating Solar Power: From research to implementation», 2007.

[9] The World Bank, «Middle East and North Africa Region Assessment of the Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power Projects», January 2011.

[10] R. Tamme, «Storage for Concentrated Solar Power (CSP) Plants», DLRGerman Aerospace Center, 2010.

[11] T.R. Mancini, M. Geyer, «Spain Pioneers Grid-Connected Solar-Tower Thermal Power», SolarPACES, 2006.

[12] http://www.nrel.gov/csp/troughnet/thermal_energy_storage.html

[13] http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/thermal_storage.html

[14] Report of Solar Millennium, «The parabolic trough power plants Andasol 1 to 3. The largest solar power plants in the world –Technology premiere in Europe», AG, 2008.

[15] Andreas Poullikas, Electricity Authority of Cyprus, «Economic analysis of power generation from parabolic trough solar thermal plants for the Mediterranean region—A case study for the island of Cyprus», 2009.

[16] A. Mao, J.H. Park, G.Y. Han, T. Seo, and Y. Kang, «Heat transfer characteristics of high temperature molten salt for storage of thermal energy», Korean J. Chem. Eng., 27(5), 1452-1457, 2010.

[17] «Combined Solar Power and Desalination Plants: Techno-Economic Potential in Mediterranean Partner Countries (MED-CSD)” WP1 Final Report, DLR, June 2009.

[18] U. Herrmann, M. Geyer, and R. Kistner, «The AndaSol Project», Workshop on Thermal Storage for trough Power Systems, February 2002.

[19] BrunoVanslambrouck, Ignace Vankeirsbilck, Sergei Gusev, Michel De Paepe, «Turn waste heat into electricity by using an Organic Rankine Cycle», 2nd European Conference on Polygeneration – Tarragona, Spain (2011).

[20] Alexandros Pechtelidis, «Fostering the use of low temperature geothermal sources through the development of operational exploitation guidelines and green energy solutions of enterprising», «Energeia Project – W.P. 3.1.2, Final Deliverable: «Analysis of Solar Geothermal Hybrid System for Greek common site in the Municipality of Topeiros - utilizing steam turbine -Rankine Cycle», Xanthi, (2015).

- [21] P.J. Mago, L.M. Chamra, K. Srinivasan, C. Somayaji, 2008, "An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids", *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, Jun. 2008, p. 998–1007.
- [22] T. Hung, 2001, "Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids", *Energy Conversion and Management*, vol. 42, Mar. 2001, p. 539–553.
- [23] B. Liu, K. Chien, en C. Wang, 2004, "Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery", *Energy*, vol. 29, Jun. 2004, p. 1207–1217.
- [24] G. Angelino, P. Colonna di Paliano, 1998, "Multi-component Working Fluids For Organic Rankine Cycles (ORCs)", *Energy*, vol. 23, Jun. 1998, p. 449–463.
- [26] P. Colonna, T.P. van der Stelt, 2004, FluidProp: a program for the estimation of thermo physical properties of fluids, Energy Technology Section, Delft University of Technology, The Netherlands (www.FluidProp.com).
- [27] Leibowitz H., Stosic N., Smith I. K., 2006, "Cost effective small scale ORC systems for power recovery from low grade heat sources.", *Proceedings of IMECE 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, November 5-10, 2006, Chicago, Illinois, USA.
- [28] Steidel R. F, Pankow D. H, Brown K. A., 1983, "The empirical modelling of a Lysholm screw expander.", *Proceedings of Eighteenth Intersociety Energy Conversion Conference*, 1983, pp 286-293.
- [29] V. Lemort, S. Quoilin, C. Cuevas, J. Lebrun, 2009, "Testing and modelling a scroll expander integrated into an organic Rankine cycle", *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, 2009, p. 3094–3102.
- [30] Lazhar Achour, Malek Bouharkat , Omar Behar, «Performance assessment of an integrated solar combined cycle in the southern of Algeria», *Elsevier, Energy Reports* 4 (2018) 207–217.
- [31] Bakos, G.C., Parsa, D., 2013. Technoeconomic assessment of an integrated solar combined cycle power plant in Greece using line-focus parabolic trough collectors», *Renew Energy* 60, 598–603.
- [32] Zhu, G., Neises, T., Turchi, C., Bedilion, R., 2015. «Thermodynamic evaluation of solar integration into a natural gas combined cycle power plant» *Renew Energy* 74, 815–824.
- [33] Antonio Rovira, Consuelo Sánchez, Manuel Valdés, Ruben Abbas, Rubén Barbero, María José Montes, Marta Muñoz, Javier Muñoz-Antón, Guillermo Ortega, Fernando Varela, «Comparison of Different Technologies for Integrated Solar Combined Cycles: Analysis of Concentrating Technology and Solar Integration», *Energies* 2018, 11, 1064.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μελέτη Περίπτωσης

Περιεχόμενα

4.1 Πιλοτικό έργο «ENERGEIA»	67
4.1.1 Εισαγωγή.....	67
4.1.2 Ηλιοθερμικό πεδίο του έργου «ENERGEIA»	69
4.2 Σύνοψη	77
Αναφορές	79

4.1 Πιλοτικό έργο «ENERGEIA»

4.1.1 Εισαγωγή

Η μελέτη περίπτωσης για την προσομοίωση της λειτουργίας, στο υπολογιστικό λογισμικό TRNSYS, που πραγματοποιείται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφορά στο υφιστάμενο υβριδικό πάρκο παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο έχει κατασκευαστεί στο χωρίο Ζηλωτή του Νέου Ερασμίου, Δήμου Τοπείρου, Νομού Ξάνθης, στα πλαίσια του έργου «ENERGEIA».

Το εν λόγω έργο, αποτελεί έργο Στρατηγικού Χαρακτήρα το οποίο υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Ευρωπαϊκής Εδαφικής Συνεργασίας Ελλάδα-Βουλγαρία 2007-2013 με τίτλο: «Κοινά πρότυπα αξιοποίησης χαμηλών γεωθερμικών πεδίων για την προώθηση καινοτόμων ενεργειακά επενδύσεων στην διασυνοριακή περιοχή - πιλοτική εφαρμογή», “Fostering the use of low temperature geothermal sources through the development of operational exploitation guidelines and green energy solutions of enterprising” με διακριτικό τίτλο “ENERGEIA”. Στην εικόνα 4.1 φαίνεται μία αεροφωτογραφία του πιλοτικού έργου όπου ξεχωρίζουν τα κύρια μέρη του: ο Οικίσκος Ελέγχου, το Ηλιακό Πεδίο, η Γεννήτρια ORC, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας TES, ο Κομποστοποιητής και τα Θερμοκήπια.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το συνδυασμό ενεργειακών πηγών και ιδιαίτερα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), αποτελεί μια ταχύτατα εξελισσόμενη ερευνητική περιοχή. Κύριος στόχος της υβριδοποίησης των ΑΠΕ αποτελεί η συμπληρωματική λειτουργία των πρωτογενών πηγών ενέργειας για την επίτευξη της αδιάλειπτης λειτουργίας του εκάστοτε σταθμού παραγωγής ενέργειας.

Το έργο “ENERGEIA” εστιάζει στην ενίσχυση της έρευνας και στην ανάλυση γεωθερμικών συστημάτων, μέσω πιλοτικών εφαρμογών και μέσω της ανάπτυξης κατευθυντηρίων γραμμών λειτουργικής εφαρμογής και αποδοτικών τεχνοοικονομικών μελετών ενέργειας, τόσο σε δημόσιο, όσο και σε εμπορικό επίπεδο.

Στη συνέχεια του τρέχοντος κεφαλαίου γίνεται αναφορά στις τεχνικές προδιαγραφές του εξοπλισμού που εγκαταστάθηκε στα πλαίσια του παραπάνω πιλοτικού έργου. Στο επόμενο κεφάλαιο οι προδιαγραφές αυτές χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού, όσον αφορά στην παραγωγή θερμικής ενέργειας αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την εγκατεστημένη γεννήτρια παραγωγής. Θα πρέπει να σημειωθεί πως δε λαμβάνεται υπόψη η συμβολή της γεωθερμίας στο ενεργειακό ισοζύγιο, ούτε τα φορτία από τα θερμοκήπια, το σχολείο και τον κομποστοποιητή.



Εικόνα 4.1: Αεροφωτογραφία του πιλοτικού έργου «ENERGEIA»

4.1.2 Ηλιοθερμικό πεδίο του έργου «ENERGEIA»

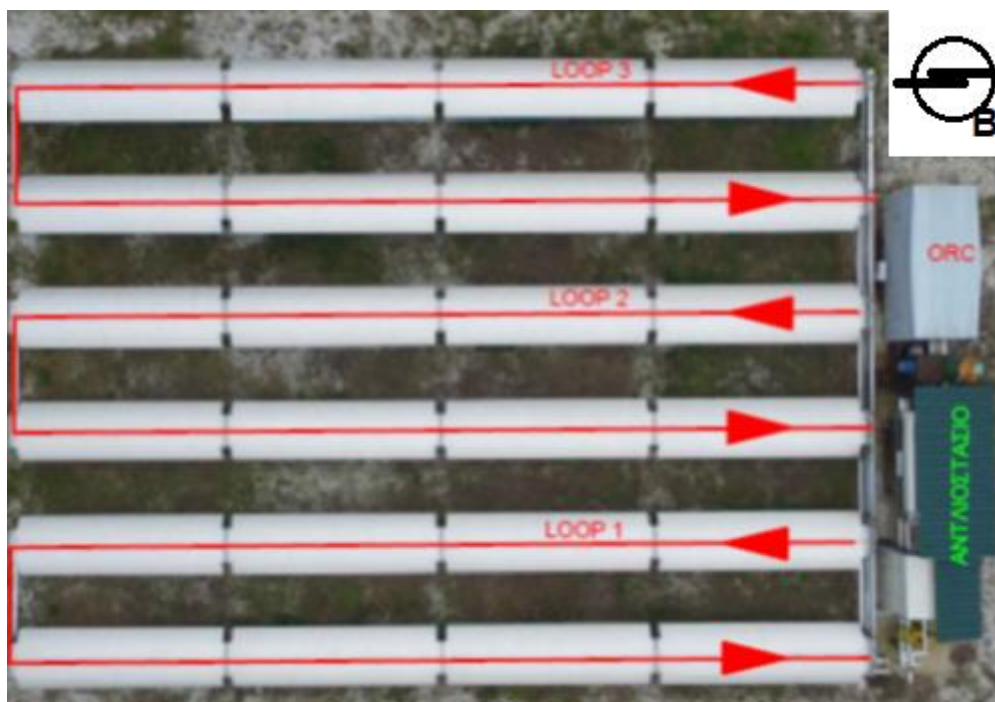
4.1.2.1 Κοίλος παραβολικός Συλλέκτης

Στο ηλιοθερμικό πεδίο του έργου «ENERGEIA» χρησιμοποιήθηκαν ευθύγραμμα κοίλα παραβολικά κάτοπτρα της τεχνολογίας που παρουσιάστηκαν λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3. Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες του πιλοτικού έργου έγινε προμήθεια ηλιακών παραβολικών συλλεκτών συνολικής θερμικής ισχύος 234kWth, σε συνθήκες αναφοράς, όπως φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Συνθήκες Αναφοράς

Περιγραφή	Μονάδα	Συνθήκες Αναφοράς
Γεωγραφικό Πλάτος	°	40
Γεωγραφικό Μήκος	°	26.00
Άμεση Ηλιακή Ακτινοβολία	W/m ²	≥800
Ηλιακή γωνία πρόσπτωσης (ΘL)	°	≤20
Μέση θερμοκρασία Περιβάλλοντος	°C	≥15
Μέση θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου (για T _{in} =100°C και T _{in} =140°C)	°C	120

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, είναι εγκατεστημένα σε 3 βρόγχους των 2 σειρών (εικόνα 4.3) ο καθένας με συνολικά 6 παράλληλες σειρές κατόπτρων μήκους 33,58 m η κάθε μια και ο άξονας εγκατάστασης των συλλεκτών είναι Βορρά – Νότου.



Σχήμα 4.1: Κάτοψη Ηλιοθερμικού Πεδίου

Ο δέκτης, αποτελείται από το σωλήνα απορρόφησης (absorber tube), μέσα στον οποίο κυκλοφορεί το μέσο μεταφοράς της θερμότητας (HTF) και από το γυάλινο περίβλημα και είναι σχεδιασμένος ώστε να απορροφά όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που εστιάζεται από τα παραβολικά κάτοπτρα προς αυτόν. Για το σκοπό αυτό, ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και έχει μια ειδική επιλεκτική μαύρη επίστρωση, για λόγους που εξηγήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, οι συλλέκτες είναι πιστοποιημένοι με το πρότυπο EN12975-2:2006 ή παρόμοιο, ενώ καθένας από αυτούς έχει διαθέτει το σήμα CE.

Το σύστημα έδρασης των συλλεκτών είναι κατασκευασμένο από μια πληθώρα υλικών. Ξεκινώντας από το έδαφος, έχει γίνει μπετόμπεξη ασφάλινων πασσάλων τύπου «H», πάνω στους οποίους βιδώνεται η βάση των συλλεκτών που είναι κατασκευασμένη τμηματικά τόσο από γαλβανισμένο και ανοξείδωτο ασάλι, όσο και από αλουμίνιο (εικόνα 4.2). Η διαστασιολόγηση των βάσεων έγινε με γνώμονα την αντοχή στις ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, όπως ανεμοπείση, χιονόπτωση, σεισμικά φαινόμενα και συστολοδιαστολές λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών.

Το σύστημα ιχνηλάτησης του ήλιου είναι ενός βαθμού ελευθερίας (μονού άξονα) και κατά τη διάρκεια της ημέρας, προσαρμόζει συνεχώς τη γωνία των συλλεκτών προς τη θέση του ήλιου (βάσει ενσωματωμένου αστρονομικού αλγορίθμου), περιστρέφοντας τον διαμήκη άξονα από την Ανατολή ως τη Δύση.



Εικόνα 4.2: Τμήμα Βάσης Εγκατεστημένου Κοίλου Παραβολικού Συλλέκτη

Τα χαρακτηριστικά των παραβολικών συλλεκτών του ηλιοθερμικού πεδίου συνοψίζονται στον πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κοίλων Παραβολικών Συλλεκτών

Μήκος Σειράς	32,20m
Πλάτος Ανοίγματος Παραβολής	2,34m
Επιφάνεια Σειράς	75,36m ²
Συνολική Επιφάνεια Πεδίου	452,16m ²
Απαιτούμενη Έκταση	1031m ²
Εσωτερική διάμετρος μεταλλικού δέκτη	0,0382m
Εξωτερική διάμετρος μεταλλικού δέκτη	0,0422m
Μήκος εστίασης	0,8m
Αντοχή σε άνεμο ταχύτητας	≤8b
Αντοχή σε φορτίο χιονιού	≤1500N/m ²
Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας	≤240 °C
Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας	≤6bar



Εικόνα 4.3: Άποψη σειράς εγκατεστημένων παραβολικών συλλεκτών

4.1.2.2 Μέσο μεταφορά θερμικής ενέργειας (Heat Transfer Fluid - HTF)

Όσων αφορά στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το ρευστό που χρησιμοποιείται για την μεταφορά της θερμότητας (HTF) αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία για την συνολική απόδοση και την αποτελεσματικότητα του συστήματος συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Κάποια χαρακτηριστικά του HTF είναι τα εξής :

1. χαμηλό σημείο τήξεως
2. υψηλό σημείο βρασμού και θερμική σταθερότητα
3. χαμηλή πίεση ατμών (< 1 atm) σε υψηλή θερμοκρασία
4. χαμηλή διάβρωση με τα μεταλλικά κράματα τα οποία το περιέχουν

5. μικρό ιξώδες
6. υψηλή θερμική αγωγιμότητα
7. υψηλή θερμική χωρητικότητα για την αποθήκευση της ενέργειας

Για τεχνικούς λόγους αποφυγής φαινομένων πήξης ή ατμοποίησης του μέσου μεταφοράς εντός του υδραυλικού δικτύου, καθώς επίσης για αποφυγή λειτουργίας του συστήματος σε υψηλές πιέσεις, επιλέγεται η χρήση θερμικού ελαίου ως μέσου μεταφοράς της θερμότητας. Θα πρέπει να αναφερθεί πως το θερμικό έλαιο είναι συμβατό με τους δέκτες των παραβολικών συλλεκτών και τους εναλλάκτες θερμότητας από τους οποίους διέρχεται. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρευστού μεταφοράς θερμότητας περιγράφονται πίνακα 4.3 και η συμπεριφορά του στις διάφορες θερμοκρασίες στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Πίνακας 4.3 Φυσικές, Χημικές και Θερμικές Ιδιότητες του HTF

Σύνθεση		Μίγμα υδρογονανθράκων
Εμφάνιση		Ανοιχτό κίτρινο υγρό
Μέγιστη θερμοκρασία όγκου		315°C
Μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας		335 °C
Κινηματικό ιξώδες (40C)	DIN51562-1	19,00mm ² /s (cSt)
Πυκνότητα (15C)	DIN51757	
Σημείο ανάφλεξης	ISO2592	218 °C
Σημείο αυτανάφλεξης	DIN51794	366 °C
Σημείο ροής	ISO3016	-40 °C
Σημείο βρασμού στα 1013mbar		351 °C
Συντελεστής θερμικής διαστολής		0,00096/°C
Περιεχόμενο υγρασίας	DIN51777-1	<150ppm
Ολική οξύτητα	DIN51558-1	<0,2 mg KOH/g
Περιεχόμενο σε χλώριο	DIN51577-3	<10ppm
Διάβρωση χαλκού	EN ISO 2160	<<1a
Μέσο μοριακό βάρος		320

4.1.2.3 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμότητας – (Thermal Energy Storage - TES)

Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η φύση της ηλιακής ενέργειας είναι μια κυμαινόμενη πηγή ενέργειας και έτσι η δυνατότητα αποθήκευσής της είναι απαραίτητη προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα διασφάλισης παροχής ενέργειας σε ετεροχρονισμένη ζήτηση ακόμη και αδιάλειπτης παροχής ενέργειας. Ένας ακόμη λόγος που κρίθηκε απαραίτητη η εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, στο συγκεκριμένο έργο, δεδομένου του χαρακτήρα του, είναι επειδή απουσίας της αποθήκευσης το ηλιοθερμικό πεδίο δε θα μπορούσε να διοχετεύσει κάπου την περίσσεια ενέργεια και θα αναγκαζόταν να τεθεί σε αναμονή (εκτός λειτουργίας). Συνεπώς θα χανόταν πολύτιμη θερμική ενέργεια.

Έτσι, στο συγκεκριμένο έργο το σύστημα θερμικής αποθήκευσης που εγκαταστάθηκε (εικόνα 4.4) είναι έμμεσης αποθήκευσης και χρησιμοποιεί απλό νερό που προέρχεται από παρακείμενη γεώτρηση. Συνεπώς υπάρχει ένα πρωτεύων υδραυλικό δίκτυο μέσα στο οποίο ρέει το HTF, το οποίο προσδίδει μέσω εναλλάκτη τη θερμότητα που αποκτά από τον ήλιο στο δευτερεύων υδραυλικό δίκτυο, αυτό του νερού που βρίσκεται εντός του δοχείου

αποθήκευσης και το οποίο τροφοδοτεί και τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, όπως αναφέρεται και στη συνέχεια. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του TES συνοψίζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Δοχείου Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (TES)

Υλικό Κατασκευής	Χάλυβας Υψηλής Αντοχής
Όγκος	5 m ³
Σχήμα	Κυλινδρικό
Πλήθος εισόδων ψυχρού νερού	2
Πλήθος εισόδων θερμού νερού	2
Συμβατό με μίγμα νερού γλυκόλης	Ναι
Αριθμός εσωτερικών εναλλακτών θερμότητας	3 (τύπου: κελύφους σωλήνων)
Εσωτερική Επιφάνεια	Συμμόρφωση σύμφωνα με DIN 4753
Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία	200 °C
Μέγιστη επιτρεπτή πίεση λειτουργίας	10bar
Εξωτερική Μόνωση	100mm Πετροβάμβακας Επικάλυψη Φύλλου Αλουμινίου 0,3mm



Εικόνα 4.4: Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES)

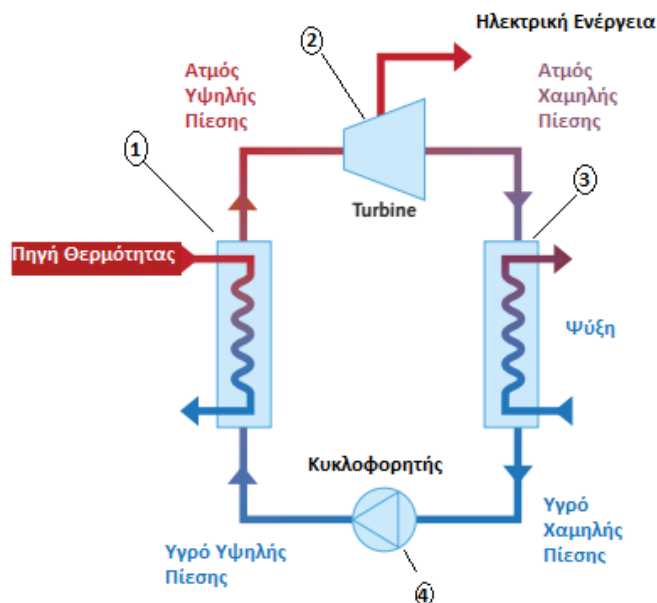
4.1.2.4 Μονάδα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος

Όπως έγινε αντιληπτό, το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συγκεκριμένου ηλιοθερμικού σταθμού, βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα (<200 °C). Έτσι, δεδομένου ότι στο εν λόγω έργο η πηγή θερμότητας είναι χαμηλών θερμοκρασιών, εγκαταστάθηκε μονάδα ισχύος που εφαρμόζει τον Οργανικό Κύκλο Rankine (ORC), αφού

αποτελεί μια καλύτερη τεχνολογία, καθώς χρησιμοποιεί οργανικά υγρά που όχι μόνο έχουν χαμηλότερο σημείο βρασμού, από ότι ο ατμός, αλλά και δεν προκαλούν διάβρωση στα μεταλλικά μέρη του εξοπλισμού. Ένας επιπλέον λόγος είναι επειδή μια μηχανή ORC μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (γύρω στους 66 °C), θερμοκρασίες που είναι συχνά εφικτές κατά τη διάρκεια της έναυσης της λειτουργίας του ηλιοθερμικού ή μιας κρύας χειμερινής μέρας. Στη συνέχεια ακολουθούν τεχνικές προδιαγραφές για τη μονάδα ηλεκτρικής ισχύος που εγκαταστάθηκε (Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4.5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εγκατεστημένης Μονάδας Ηλεκτρικής Ισχύος ORC

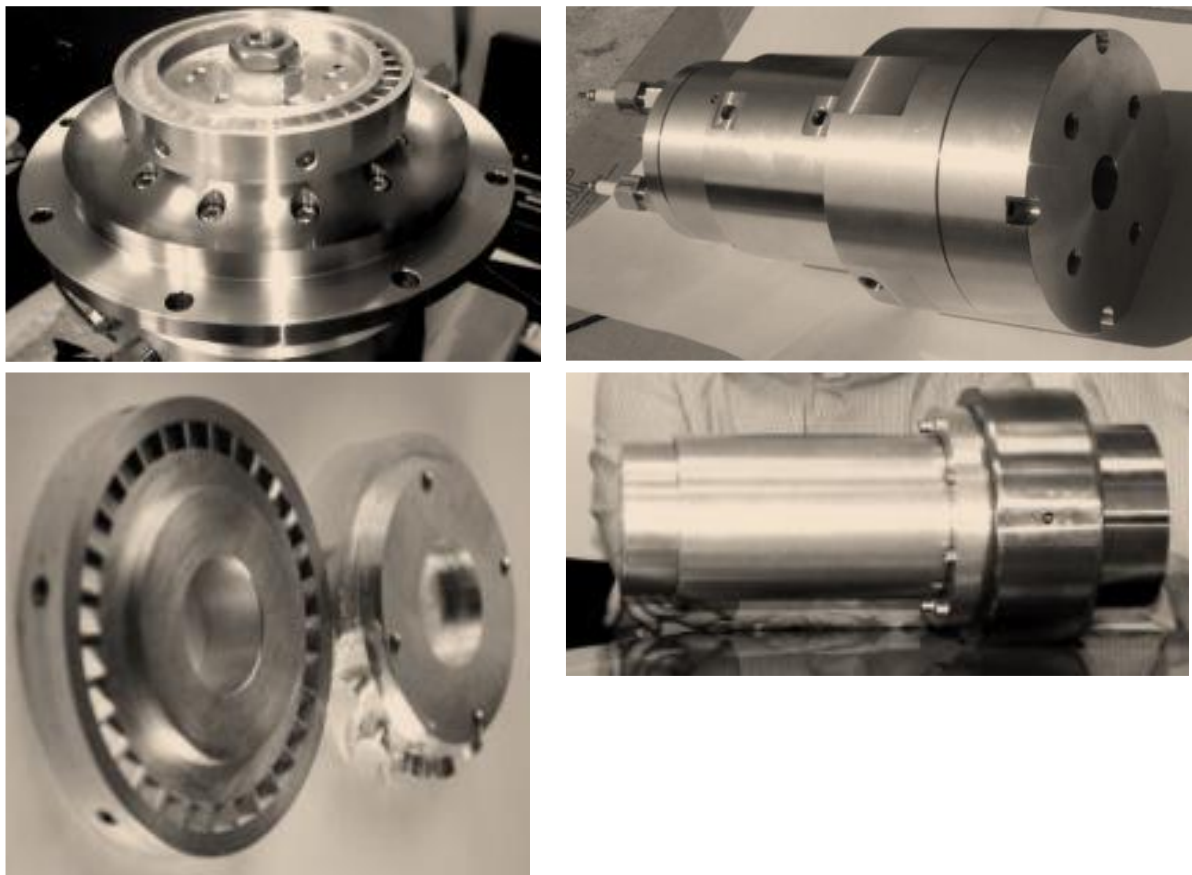
Θερμοδυναμικός Κύκλος	Οργανικός Κύκλος Rankine
Ηλεκτρική Ισχύς	5kW (τροποποιημένη από 10kW)
Βαθμός Απόδοσης (θερμική σε ηλεκτρική)	5-7%
Γεννήτρια Ηλεκτρικού Ρεύματος	Τριφασική, 50Hz 230V – Σύστημα Μόνιμου Μαγνήτη
Τύπος Τουρμπίνας	Μικροστρόβιλος
Θερμοκρασιακό Εύρος Λειτουργίας	80-140°C
Εργαζόμενο/ Ψυκτικό Οργανικό Μέσο	R-245fa
Μέγιστη Πίεση Εργαζόμενου Μέσου	14bar
Επιτρεπτή Εξωτερική Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	0°C με 40°C



Σχήμα 4.2:Διάγραμμα Ροής Λειτουργίας Εγκατεστημένης Μονάδας Ηλεκτρικής Ισχύος

Στο σχήμα 4.2 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ORC που εγκαταστάθηκε. Το εργαζόμενο μέσο αφού θερμανθεί στον εναλλάκτη (1) (από την ενέργεια που απάγει από το νερό του δευτερεύοντος υδραυλικού δικτύου, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στην συνέχεια οδηγείται στον εκτονωτή (2) (εικόνα 4.5), όπου εκτονώνεται παράγοντας μηχανικό έργο, το οποίο μετατρέπεται σε

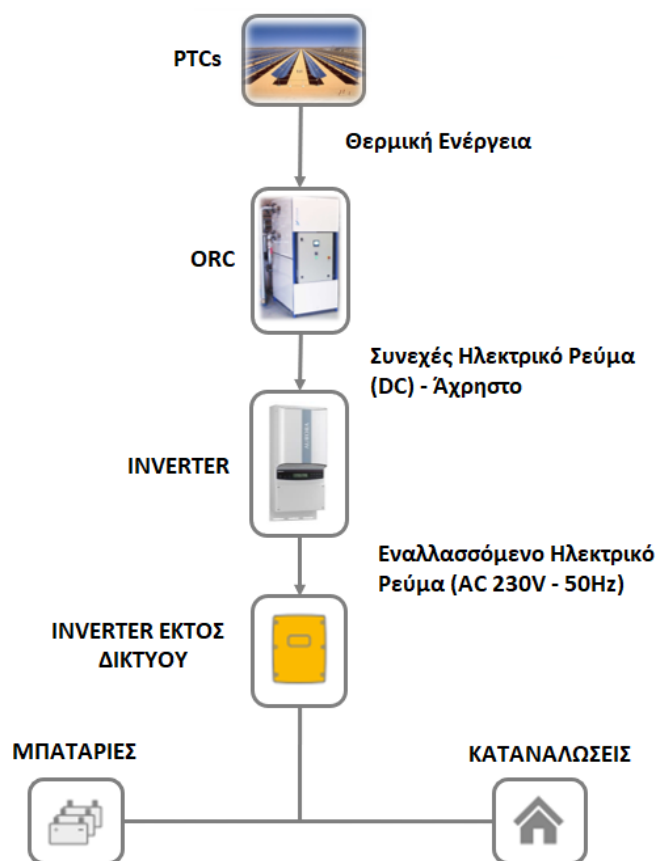
ηλεκτρική ενέργεια. Στην συνέχεια, οδηγείται στον εξατμιστή (3) μέσω κατάλληλου κυκλοφορητή (4). Ο κύκλος ολοκληρώνεται όταν το εργαζόμενο μέσο οδηγηθεί εκ νέου στον εναλλάκτη (1). Η ψύξη της συγκεκριμένης γεννήτριας γίνεται με ψυχρό νερό (θερμοκρασίας περίπου 18°C) που προέρχεται από γεώτρηση.



Εικόνα 4.5: Εγκατεστημένη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τεχνολογίας ORC

Η γεννήτρια εγκαταστάθηκε εντός μεταλλικού κοντέινερ και με τη βοήθεια του συνοδευτικού εξοπλισμού (όπως inverter κ.λπ.). Γενικότερα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3 το ηλιοθερμικό πεδίο τροφοδοτεί τη γεννήτρια με θερμική ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική, συνεχές ρεύμα, το οποίο δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα. Γι' αυτό και εισέρχεται σε αντιστροφέα προκειμένου να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο, το οποίο διαχειρίζεται πλέον ο μετατροπέας του αυτόνομου δικτύου. Είτε τροφοδοτεί συστοιχία μπαταριών, είτε εξυπηρετεί εσωτερικά ηλεκτρικά φορτία του πάρκου, όπως φωτισμός και A/C (12.000BTU).

Η καθημερινή λειτουργία του υβριδικού σταθμού παραγωγής ενέργειας παρακολουθείται και ελέγχεται με τη χρήση ενός συστήματος εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA). Το σύστημα αυτό διασυνδέει όλα τα συστατικά μέρη (δηλ. το ηλιακό πεδίο, τη γεννήτρια ORC, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, τον κομποστοποιητή, τα θερμοκήπια καθώς και μετεωρολογικούς σταθμούς και υποσταθμούς) του ηλιακού πάρκου σε έναν κεντρικό Η/Υ, που παρέχει τη δυνατότητα στο χειριστή να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία του. Το σύστημα παρέχει και αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του ηλιακού πάρκου και έτσι μπορούν να εντοπιστούν αστοχίες ή προβλήματα λειτουργίας συγκεκριμένων κατόπτρων.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Ροής Παραγωγής/Κατανάλωσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

4.1.2.5 Λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού

Το μονογραμμικό σχέδιο του πάρκου φαίνεται στο σχήμα 4.4. και οι βασικές συνθήκες λειτουργίας του είναι:

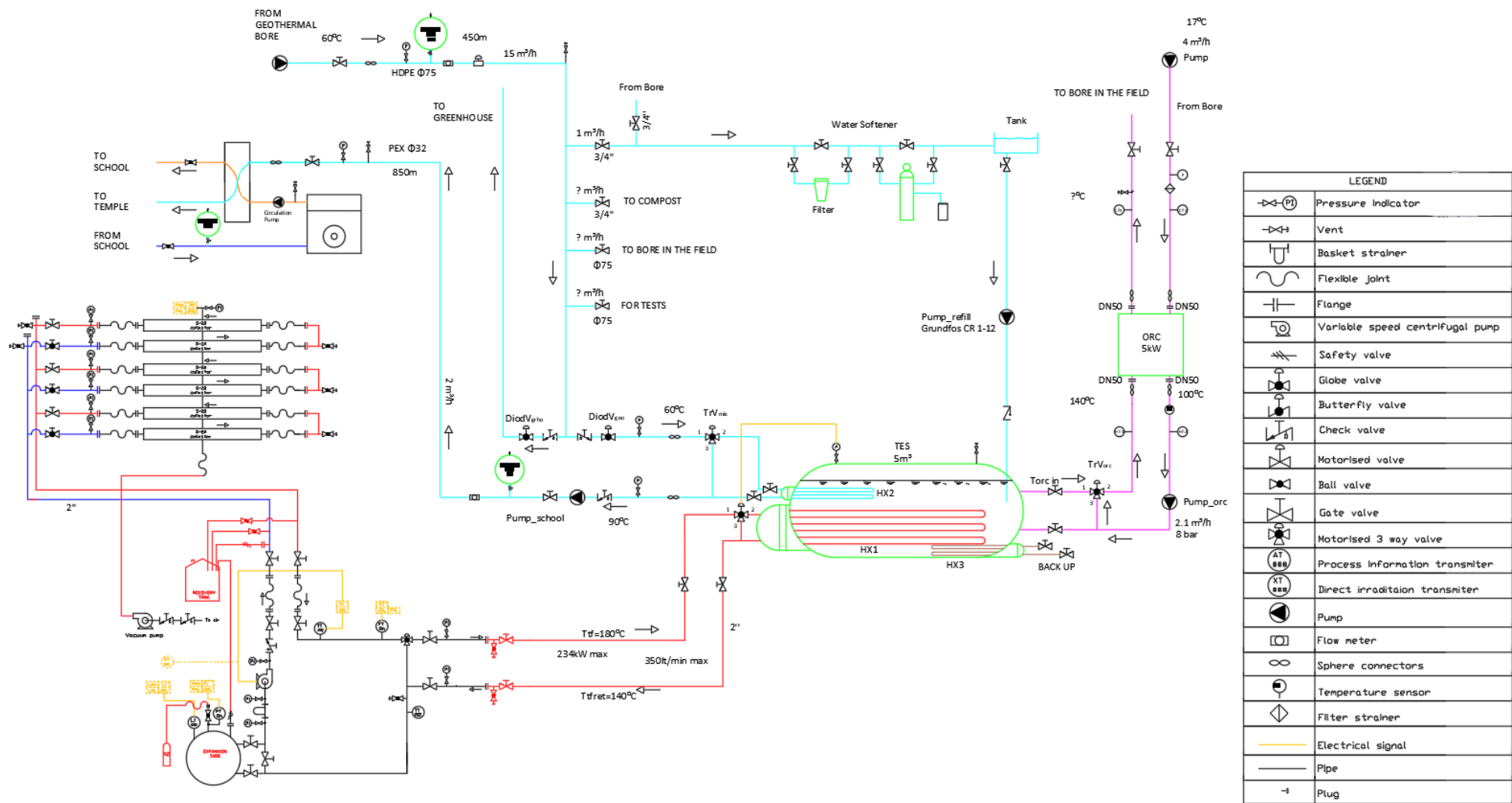
- Η λειτουργία του ηλιακού πεδίου ξεκινά όταν ανιχνευθεί ηλιακή ακτινοβολία μεγαλύτερη από 100 W/m^2 για περισσότερο από 5 λεπτά. Έτσι, ξεκινά η κυκλοφορία του θερμικού ελαίου μέσα στους δέκτες του ηλιακού πεδίου με σκοπό την προθέρμανση του.
- Το θερμικό έλαιο συνεχίζει να κυκλοφορεί μέσα στο ηλιακό πεδίο μέχρις ότου η θερμοκρασία που αποκτήσει είναι κατά 40°C υψηλότερη από την μέση θερμοκρασία του θερμικού δοχείου αποθήκευσης ενέργειας.
- Σε περίπτωση που η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του θερμικού ελαίου και του θερμικού δοχείου είναι μικρότερη από 40°C και εφόσον υπάρχει ηλιοφάνεια ($>100 \text{ W/m}^2$), τότε το σύστημα επανέρχεται σε λειτουργία προθέρμανσης του θερμικού ελαίου μέχρι η διαφορά να γίνει μεγαλύτερη από 40°C και δεν γίνεται ανταλλαγή θερμικής ενέργειας με το θερμικό δοχείο.
- Σε περίπτωση που κατά τη λειτουργία ανιχνευθεί θερμοκρασία θερμικού ελαίου ίση με 200°C , τότε το σύστημα αυτόματα θέτει τη μία σειρά των κατόπτρων εκτός λειτουργίας (ο μηχανισμός περιστροφής όλης της σειράς περιστρέφει τους συλλέκτες προς τα κάτω καθιστώντας αδύνατη πλέον την αύξηση της θερμοκρασίας του θερμικού ελαίου που διέρχεται από τον δέκτη). Για κάθε επιπλέον αύξηση της θερμοκρασίας του θερμικού ελαίου κατά 2°C , το σύστημα προβαίνει σε απενεργοποίηση μιας σειράς κατόπτρων.

- Το ηλιοθερμικό πεδίο σταματά τη λειτουργία του αφού ανιχνευθεί ηλιακή ακτινοβολία μικρότερη από 100 W/m^2 για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 20 λεπτών. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι υπάρχει συννεφιά ή ότι έχει επέλθει η νύχτα.
- Επίσης, το ηλιοθερμικό πεδίο σταματά την λειτουργία του για 2 ώρες σε έκτακτα καιρικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα όταν ανιχνευθούν άνεμοι της τάξης των 70 km/h ($\approx 8 \text{ bft}$).
- Η ORC ξεκινά να λειτουργεί όταν η θερμοκρασία του μέσου αποθήκευσης του TES ξεπεράσει τους 80°C και συνεχίζει έως ότου γίνει μικρότερη από τους 70°C .
- Έτσι, μόλις ανιχνευθεί θερμοκρασία μέσα στο TES υψηλότερη από 80°C , ξεκινά η μεταφορά θερμού νερού προς το εσωτερικό του εναλλάκτη της ORC.
- Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της ORC είναι 140°C . Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκε η κατάλληλη τρίοδη θερμοστατική βαλβίδα η οποία αναμιγνύει ρευστό που προέρχεται από το TES με ρευστό που προέρχεται από την επιστροφή της ORC, το οποίο έχει πλέον αποδώσει τη θερμική του ενέργεια στο οργανικό μέσο της γεννήτριας και είναι «ενεργειακά φτωχότερο».

4.2 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μια λεπτομερής αναφορά σε συγκεκριμένα τεχνικά στοιχεία των βασικών συστημάτων και των τεχνολογιών που εφαρμόζονται στο πάρκο του πιλοτικού έργου «ENERGEIA» και σκοπεύουν στην συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ).

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μια προσπάθεια αποτύπωσης των τεχνικών αυτών στοιχείων σε λογισμικό και συγκεκριμένα στο «TRNSYS Simulation Studio» προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της λειτουργίας του εν λόγω σταθμού.



Σχήμα 4.4: Μονογραμμικό λειτουργικό διάγραμμα πιλοτικού έργου

Αναφορές

- [1] «Hybrid Park Description», Τεχνική Περιγραφή πιλοτικού έργου «ENERGEIA», 2015.
- [2] Ισαακίδου Αικατερίνη, «Μελέτη απόδοσης ηλιοθερμικού παραβολικού κατόπτρου», Διπλωματική Εργασία, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, Μάιος 2017.
- [3] Τσεμπερλίδου Διονυσία, «Μελέτη και ανάλυση λειτουργίας ηλιακού θερμικού πάρκου συγκεντρωτικών κατόπτρων με χρήση θερμογραφίας», Διπλωματική εργασία, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, Μάρτιος 2017.

Κεφάλαιο 5

Προσομοίωση Λειτουργίας Ηλιοθερμικού Πεδίου

Περιεχόμενα

5.1 Εισαγωγή	80
5.2 Εφαρμογή Προσομοίωσης TRNSYS	80
5.3 Ανάλυση Μοντέλου Προσομοίωσης στο TRNSYS	82
5.3.1 Ηλιακά/Κλιματολογικά Δεδομένα («Weather»)	83
5.3.2 Ηλιοθερμικό Πεδίο («Solar Thermal Field»)	86
5.3.3 Αντλιοστάσιο («Pumping Module»)	88
5.3.4 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμότητας - TES	90
5.3.5 Γεννήτρια Παραγωγής ηλεκτρικής Ενέργειας («ORC Generator»)	92
5.3.6 Σύστημα Τηλεθέρμανσης («District Heating»)	94
5.4 Εκτέλεση προσομοίωσης	97
5.5 Σύνοψη	98
Αναφορές	98

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια πρώτη προσπάθεια αποτύπωσης και προσομοίωσης της λειτουργίας του υβριδικού ηλιοθερμικού πάρκου, το οποίο αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με την βοήθεια του λογισμικού TRNSYS (έκδοση 17.02.004). Η προσομοίωση της λειτουργίας του εν λόγω σταθμού, πραγματοποιείται ώστε να υπάρχει δυνατότητα προσδιορισμού βασικών παραμέτρων λειτουργίας, όπως θερμοκρασίες ρευστών, θερμικής και ηλεκτρικής ενέργεια κ.λπ. για οποιαδήποτε χρονική στιγμή απαιτείται, εφόσον επαληθευτεί η αξιοπιστία του μοντέλου, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα από το πάρκο. Έτσι, θα υπάρχει δυνατότητα να προσομοιώνεται η λειτουργία του σταθμού μεταβάλλοντας συνθήκες και παραμέτρους λειτουργίας, που είναι πολύ δύσκολο, ως και αδύνατο να μεταβληθούν στην πράξη.

5.2 Εφαρμογή Προσομοίωσης TRNSYS

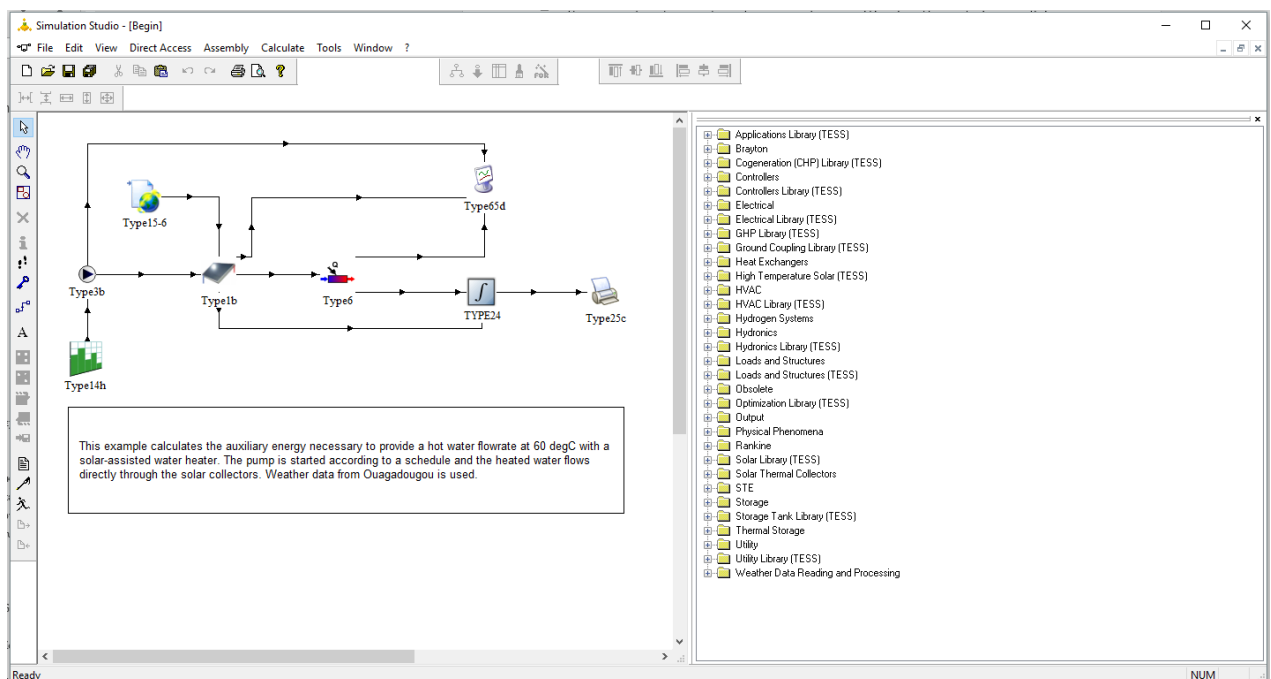
Το TRNSYS είναι ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό πακέτο λογισμικού προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση, την ανάλυση και την αξιολόγηση συστημάτων με χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά. Χρησιμοποιείται κυρίως από μηχανικούς και ερευνητές με σκοπό τη μελέτη νέων ενεργειακών συστημάτων ή τη βελτίωση υφιστάμενων ενεργειακών εγκαταστάσεων.

Ο παράγοντας που καθιστά το TRNSYS ένα σημαντικό ερευνητικό εργαλείο προσομοίωσης είναι το γεγονός ότι ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος είναι βασισμένος σε αρχεία *.dll. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να τροποποιήσει τον υπάρχον κώδικα και να τον προσαρμόσει στις εκάστοτε απαιτήσεις και εφαρμογές ή να εισάγει νέα μοντέλα κατασκευασμένα σε κοινές γλώσσες προγραμματισμού όπως Fortran, C, C++, Pascal κλπ. Το TRNSYS χρησιμοποιεί ξεχωριστά μοντέλα προσομοίωσης για κάθε κομμάτι εξοπλισμού ή λειτουργίας.

Επιπρόσθετα, το TRNSYS έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί εύκολα με πολλά άλλα υπολογιστικά προγράμματα για επεξεργασία πριν, μετά ή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (π.χ. Microsoft Excel, Matlab κ.α.) [1].

Κάθε μοντέλο προσομοίωσης (component) του μοντέλου αναφέρεται ως Type και καλεί μια σειρά από μαθηματικές συναρτήσεις μεταγλωττισμένες (compiled) σε αρχεία *.dll. Όλα τα components περιέχουν παραμέτρους, τόσο εισόδου, όσο και εξόδου. Οι παράμετροι εισόδου εισάγονται στις εσωτερικές μαθηματικές εξισώσεις του κάθε μοντέλου, με σκοπό να γίνει ο υπολογισμός των παραμέτρων της εξόδου. Επιπλέον, οι είσοδοι και οι εξοδοι των διαφορετικών στοιχείων μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα αλληλεξαρτώμενο ενεργειακό σύστημα, αποτελούμενο πλέον από τον επιθυμητό αριθμό components [1].

Το TRNSYS Simulation Studio αποτελεί το κεντρικό γραφικό περιβάλλον του TRNSYS, στο οποίο σχεδιάζονται οι προσομοιώσεις των δυναμικών συστημάτων (εικόνα 5.1). Τα διαφορετικά components επιλέγονται από την Βιβλιοθήκη του TRNSYS Simulation Studio και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω γραμμών διασύνδεσης, ανταλλάσσοντας πληροφορίες απαραίτητες για την ορθή λειτουργία του συστήματος, οι οποίες μπορούν να εμφανίζονται τόσο σε μορφή πίνακα όσο και σχήματος. Ταυτόχρονα, το στούντιο δημιουργεί ένα αρχείο με τα δεδομένα του προγράμματος προσομοίωσης της μορφής *.trf και ένα ακόμη αρχείο που περιέχει όλες τις πληροφορίες της προσομοίωσης και ονομάζεται αρχείο εισόδου (input file). Σε αυτά τα αρχεία εξόδου πληροφοριών ο χρήστης έχει πρόσβαση καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, προκειμένου να έχει τη δυνατότητα να τροποποιεί το σύστημα ώστε να ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις του. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη, να προβάλλει σε μορφή διαγραμμάτων τα μεγέθη που τον ενδιαφέρουν, τόσο ζωντανά κατά την προσομοίωση, όσο και μετά το πέρας αυτής, με την εισαγωγή των αποτελεσμάτων σε κάποιο πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων και αποτελεσμάτων.

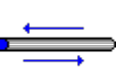


Εικόνα 5.1: Περιβάλλον εργασίας του TRNSYS Simulation Studio

5.3 Ανάλυση Μοντέλου Προσομοίωσης στο TRNSYS

Το παρόν μοντέλο προσομοίωσης που έχει σχεδιαστεί στο TRNSYS Simulation Studio, αποτελείται από την συνεργασία πολλών components και έχει ως στόχο να προσομοιώνει, με μεγάλη προσέγγιση, τις ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, του πιλοτικού έργου «ENERGEIA», όπως περιγράφηκε λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση του συγκεκριμένου συστήματος είναι τα εξής (πίνακας 5.1).

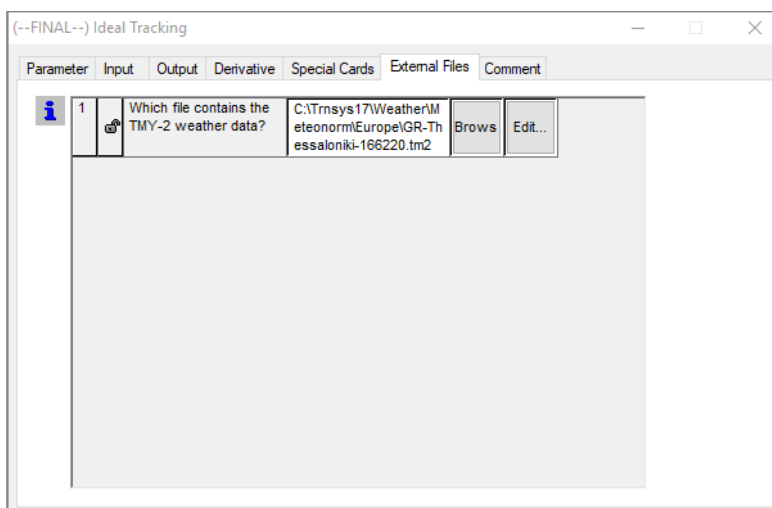
Πίνακας 5.1: Τύποι «Components» Προσομοίωσης

α/α	Εικονίδιο/Τύπος	Περιγραφή	α/α	Εικονίδιο/Τύπος	Περιγραφή
1	 Type15-2	Επεξεργαστής καιρικών δεδομένων	8	 Type533	Σύστημα αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (TES)
2	 Type1262	Προσομοιωτής συστήματος παρακολούθησης της θέσης του ήλιου και υπολογισμός σκίασης	9	 Type 952	Υπόγειος Αγωγός Μεταφοράς Ρευστού (Δίκτυο τηλεθέρμανσης)
3	 Type 1288	Ευθύγραμμος Κοίλος Παραβολικός Συλλέκτης	10	 Type682	Φορτίο Ενέργειας σε Ροή Ρευστού
4	 Type604a	Σωληνώσεις Ηλιακού Πεδίου	11	 Type 686	Χρονοπρόγραμμα εφαρμογής του παραπάνω φορτίου
5	 Type647/649	Διακλαδωτής Ρευστού Μεταφοράς Θερμότητας (λειτουργεί και σαν συλλέκτης)	12	 Equa	Βοηθητικές Εξισώσεις Υπολογισμού
6	 Type3b/d	Κυκλοφορητής Αντλία μεταβλητών στροφών (3b) και σταθερών στροφών (3d)	13	 Type 970	Διαφορικός Ελεγκτής n-σταδίων (θερμοστάτης)
7	 Type 11f	Τρίοδη ηλεκτρονικά ελεγχόμενη βάνα	14	 Type1502/1503	Απλοί Θερμοστάτες Ψύξης (Type 1503) και Θέρμανσης (Type 1502)

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η διάταξη προσομοίωσης του προς μελέτη ηλιοθερμικού συστήματος στο περιβάλλον του TRNSYS Simulation Studio. Είναι ευδιάκριτα τα μέρη από τα οποία αποτελείται. Στα αριστερά βρίσκεται το ηλιοθερμικό πεδίο («Thermal Solar Field»), που αποτελείται από έξι (6) σειρές συλλεκτών, μοιρασμένο σε τρεις παράλληλους βρόγχους και το υδραυλικό δίκτυο σωληνώσεων μεταφοράς του HTF. Στο κέντρο, στο κάτω μέρος βρίσκεται το «αντλιοστάσιο», ή αλλιώς «Pumping Module - PM», στο οποίο γίνονται οι απαραίτητοι έλεγχοι για την εύρυθμη λειτουργία του ηλιοθερμικού και αποτελεί το συνδετήριο «κρίκο» με το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας – «TES». Στα δεξιά του διακρίνεται η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τεχνολογίας ORC («ORC Generator») και επάνω από αυτή το σύστημα της τηλεθέρμανσης («District Heating»). Τέλος, από τα παραπάνω δε θα μπορούσαν να απουσιάζουν components που προσομοιώνουν ηλιακά και κλιματολογικά δεδομένα, «Weather».

5.3.1 Ηλιακά/Κλιματολογικά Δεδομένα («Weather»)

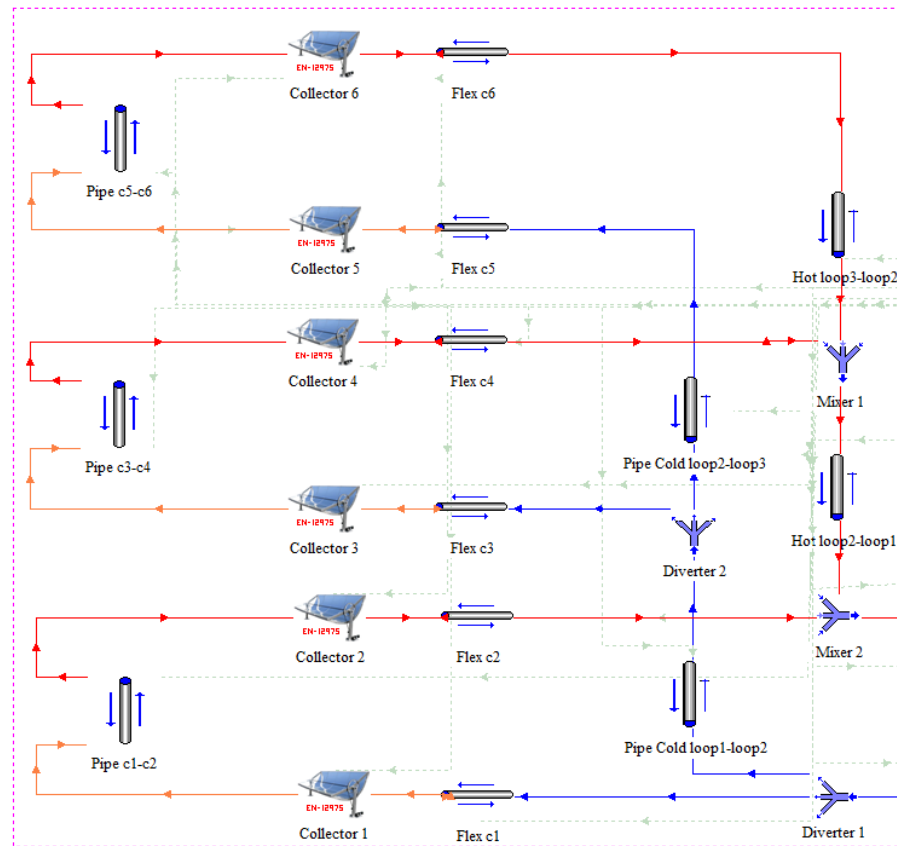
Το στήσιμο του μοντέλου ξεκινά από τη χρήση του component «Ideal Tracking» (Type 15-2), που επεξεργάζεται τα κλιματολογικά δεδομένα, τα οποία αντλεί από εξωτερικό αρχείο καιρού, της επιθυμητής περιοχής. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση το αρχείο καιρού που επιλέχθηκε για την διεξαγωγή της προσομοίωσης αφορά σε δεδομένα της Θεσσαλονίκης, λόγω έλλειψης αντίστοιχων, κυρίως ηλιακών, δεδομένων για την περιοχή της Ξάνθης. Ωστόσο, δεδομένου ότι η περιοχή εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού έχει το ίδιο γεωγραφικό πλάτος με τη Θεσσαλονίκη (40 °), τα ωριαία ηλιακά δεδομένα, κατά τη διάρκεια ενός χρόνου, θεωρούνται παρόμοια. Το αρχείο αυτό επιλέγεται από τη βιβλιοθήκη «Meteonorm» του TRNSYS (εικόνα 5.2).



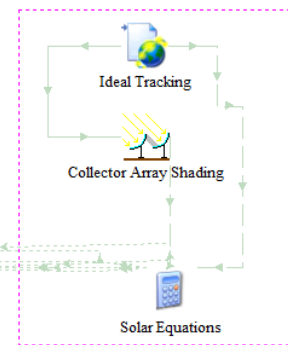
Εικόνα 5.2: Επιλεγμένο αρχείο συλλογής ηλιακών/κλιματολογικών δεδομένων

Έπειτα, συγκεκριμένες παράμετροι εξόδου (όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, κ.λπ.) αποτελούν παραμέτρους εισόδου σε συστήματα όπως αυτό του υπολογισμού της θέσης του ήλιου και της σκίασης «Collector Array Shading» (Type 1262), καθώς και του component στο οποίο εισάγονται βοηθητικές εξισώσεις υπολογισμού «Solar Equations» (Equa). Μεταξύ των δύο προαναφερόμενων components, υπάρχει επίσης συσχέτιση (εικόνα 5.3).

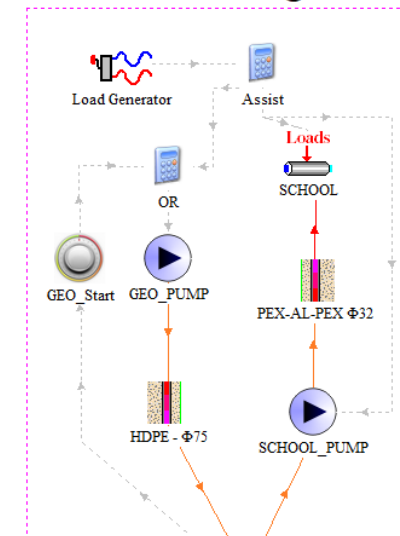
Solar Thermal Field



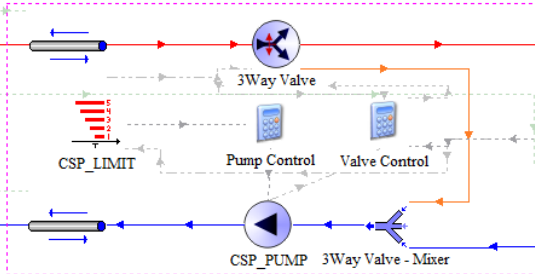
Weather



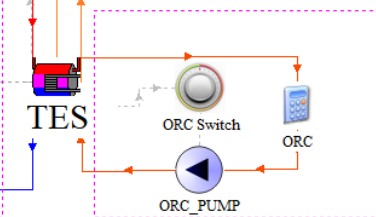
District Heating



Pumping Module



ORC Generator



Σχήμα 5.1: Αποτύπωση προσομοίωσης υβριδικού σταθμού στο περιβάλλον του TRNSYS Simulation Studio

Το component «Collector Array Shading» προσομοιώνει σύστημα παρακολούθησης του ήλιου με ένα βαθμό ελευθερίας, για άξονα τοποθέτησης συλλεκτών Βορρά – Νότου, ώστε να ακολουθείται η θέση του ήλιου από Ανατολή προς Δύση, κατά τη διάρκεια της μέρας. Επίσης, υπολογίζει και τη σκίαση μεταξύ των σειρών των ηλιακών συλλεκτών, έπειτα από την εισαγωγή των παραμέτρων που απεικονίζονται στην εικόνα 5.4, όπως το πλάτος ανοίγματος του συλλέκτη (2,34m) και η απόσταση (4,50m) μεταξύ των 6 παράλληλων σειρών.

	Ideal Tracking	=	Solar Equations
	All		
1	Solar azimuth angle	=	SolarAzimuth
2	Beam radiation for surface	=	Beam_UnShaded
3	Dry bulb temperature	=	DryBulbT
4	Angle of incidence for surface	=	Angle_Inc
5	Wind velocity	=	Wind
	Ideal Tracking	=	Collector Array Shading
	All		
1	Beam radiation for surface	=	Incident beam radiation
2	Solar zenith angle	=	Solar zenith angle
3	Solar azimuth angle	=	Solar azimuth angle
4	Angle of incidence for surface	=	Solar incidence angle
	Collector Array Shading	=	Solar Equations
	All		
1	Shaded beam radiation: middle rows	=	Beam_Shaded
2	Shaded beam radiation: row 1 (east)	=	Beam_1
3	Shaded beam radiation: last row (west)	=	Beam_N
4	Shaded beam radiation: middle rows	=	Beam_Mid

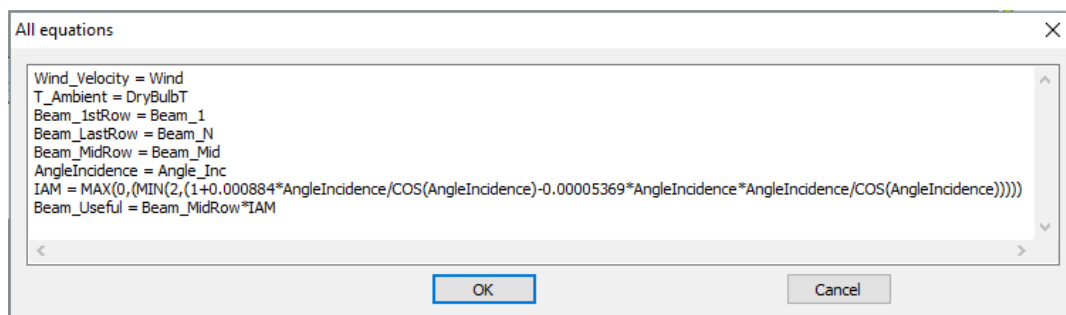
Εικόνα 5.3: Διασύνδεση παραμέτρων «Weather»

Parameter						
Input						
		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Collector aperture width	2.34	m	More...	☒
2		Collector row spacing	4.5	m	More...	☒
3		Number of rows	6	-	More...	☒

Εικόνα 5.4 : Παράμετροι «Collector Array Shading»

Στο component των ηλιακών εξισώσεων «solar equations» γίνονται οι υπολογισμοί κυρίως του συντελεστή IAM και της ωφέλιμης ηλιακής ακτινοβολίας, τα οποία παίζουν ρόλο στην κυκλοφορία του διαθερμικού ρευστού (εικόνα 5.5). Η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή IAM (incidence angle multiplier), δηλαδή του λόγου της απορροφούμενης ακτινοβολίας στην παρούσα γωνία πρόσπτωσης προς την απορροφούμενη ακτινοβολία σε κανονική γωνία πρόσπτωσης, προέκυψε από αναζήτηση σε υφιστάμενα μοντέλα TRNSYS που προσομοιώνουν αντίστοιχα ηλιοθερμικά πάρκα.

Τελικά, τα δεδομένα εξόδου που προκύπτουν από το «Solar Equations» εισάγονται στα περισσότερα από τα components που χρησιμοποιήθηκαν στο συνολικό μοντέλο προσομοίωσης του TRNSYS.



Εικόνα 5.5: Εξισώσεις στο component «solar equations»

5.3.2 Ηλιοθερμικό Πεδίο («Solar Thermal Field»)

Όπως έχει προαναφερθεί το πρωτεύον υδραυλικό δίκτυο, αυτό της κυκλοφορίας του HTF στο ηλιοθερμικό πεδίο, αποτελείται από τρεις (3) βρόγχους, συνδεδεμένους παράλληλα, έκαστος αποτελούμενος από δύο (2) συστοιχίες ευθύγραμμων κοίλων παραβολικών συλλεκτών («Collector 1» έως «Collector 6»), συνδεδεμένων σε σειρά, συμπεριλαμβανομένων των σωληνώσεων («Pipe x») και των διακλαδωτών / μικτών. Οι βασικές πραγματικές παράμετροι για αυτά τα components φαίνονται στις εικόνες 5.6 και 5.7.

--FINAL-- Collector 6

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
Name	Value	Unit	More	Macro		
1 Number in Series	1	-	More...	☒		
2 Collector Array Area	75.36	m ²	More...	☒		
3 Fluid Specific Heat	2.227	kJ/kg.K	More...	☒		
4 Collector F'TauAlpha Product	0.7	-	More...	☒		
5 Logical Unit for IAM Data	110	-	More...	☒		
6 Number of Transverse Angles	8	-	More...	☒		
7 Number of Longitudinal Angles	7	-	More...	☒		
8 IAM for Diffuse Radiation	0.12	-	More...	☒		

Εικόνα 5.6: Παράμετροι Ηλιακών Συλλεκτών («Collectors»)

Ως επίπεδος ηλιακός συλλέκτης επιλέχθηκε το μοντέλο προσομοίωσης ηλιακού θερμικού συλλέκτη Type 1288 που παρέχεται από τη Βιβλιοθήκη TESSLib του TRNSYS. Ο συγκεκριμένος τύπος συλλέκτη επιλέχθηκε έναντι άλλων τύπων, λόγω του ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς την απαίτηση εισαγωγής πολλών κατασκευαστικών παραμέτρων, που πολλές φορές είναι δύσκολο να αποσπαστούν από τις εταιρείες. Όπως φαίνεται και από την

εικόνα 5.6, που αφορά σε μια σειρά συλλεκτών αλλάχθηκε το συνολικό εμβαδό του συλλέκτη σε $2,34 \times 32,2 = 75,36 \text{ m}^2$, όσο είναι και η πραγματική επιφάνεια μιας σειράς εγκατεστημένων ηλιακών συλλεκτών. Ως υλικό κατασκευής των σωληνώσεων θεωρήθηκε ο χάλυβας υψηλής ποιότητας, με μόνωση από πετροβάμβακα πάχους 5cm. Τόσο το μήκος, «Pipe Length» και η διάμετρος «Pipe Inner/Outer Diameter», ποικίλουν ανάλογα με τον κλάδο. Για τους μεν κεντρικούς συλλέκτες η εσωτερική και η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι 4 in και 4,5 in, αντίστοιχα, ενώ για τους σωλήνες που διατρέχουν τις σειρές συλλεκτών, οι αντίστοιχες διαμέτροι είναι 2 in και 2,34 in. Τα χαρακτηριστικά για το θερμικό έλαιο προέκυψαν από το Παράρτημα Α για μια μέση θερμοκρασία 110 °C.

(--FINAL--) Pipe 5

Parameter Input Output Derivative Special Cards External Files Comment

		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Pipe Length	1	m	More...	☒
2		Pipe Inner Diameter	2	in	More...	☒
3		Pipe Outer Diameter	2.34	in	More...	☒
4		Pipe Density	8000	kg/m ³	More...	☒
5		Pipe Thermal Conductivity	14.02	W/m.K	More...	☒
6		Pipe Specific Heat	0.49	kJ/kg.K	More...	☒
7		Insulation Thickness	5	cm	More...	☒
8		Insulation Density	150	kg/m ³	More...	☒
9		Insulation Thermal Conductivity	0.036	W/m.K	More...	☒
10		Insulation Specific Heat	1.03	kJ/kg.K	More...	☒
11		Fluid Density	811	kg/m ³	More...	☒
12		Fluid Thermal Conductivity	0.118	W/m.K	More...	☒
13		Fluid Specific Heat	2.227	kJ/kg.K	More...	☒
14		Fluid Viscosity	0.0238	poise	More...	☒
15		Number of Fluid Nodes	100	-	More...	☒
16		Number of Pipe and Insulation Nodes	10	-	More...	☒

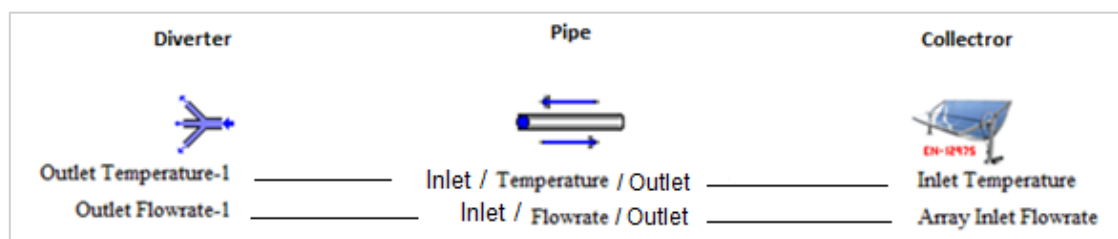
Εικόνα 5.7: Παράμετροι Σωληνώσεων («Pipe»)

Στην εικόνα 5.8 φαίνεται η διασύνδεση μεταξύ του «Solar Equations» με τους «Collectors» και «Pipes», αντίστοιχα. Οι διασυνδέσεις αυτές, μεταξύ παραμέτρων εξόδου/εισόδου, έγιναν για όλους τους ηλιακούς συλλέκτες, καθώς και για τις σωληνώσεις. Κατά την προσομοίωση λήφθηκαν υπόψη τόσο οι θερμικές απώλειες των συλλεκτών, όσο και των σωληνώσεων.

	Solar Equations	=	Collector 6
		All	
1	T_Ambient	=	Ambient Temperature
2	Beam_MidRow	=	Beam Radiation on the Tilted Surface
3	AngleIncidence	=	Incidence Angle
	Solar Equations	=	Pipe 6
		All	
1	T_Ambient	=	Ambient Temperature
2	Wind_Velocity	=	Wind Velocity

Εικόνα 5.8: Διασύνδεση «Solar Equations» με «Collectors» και «Pipes»

Ενδεικτικά, στο σχήμα 5.2 παρατίθεται και ο τρόπος διασύνδεσης κατά την «προσαγωγή - κρία» προς το ηλιοθερμικό πεδίο, δηλαδή ενός διακλαδωτή («Diverter») με σωλήνα και έπειτα με συλλέκτη. Ο διακλαδωτής («diverter») της προηγούμενης περίπτωσης λειτουργεί σαν μίκτης («mixer») κατά την «επιστροφή» του ζεστού HTF από το ηλιοθερμικό πεδίο. Μεταξύ της προσαγωγής («κρύου») και της επιστροφής («ζεστού») παρεμβάλλεται το αντλιοστάσιο του ηλιοθερμικού πεδίου ή αλλιώς «Pumping Module».



Σχήμα 5.2: Ενδεικτική Διασύνδεση βασικών Components στο Ηλιοθερμικό Πεδίο

5.3.3 Αντλιοστάσιο («Pumping Module»)

Η παροχή του θερμικού ελαίου στο δίκτυο του HTF στο ηλιοθερμικό πεδίο επιτυγχάνεται με τη χρήση κυκλοφορητή μεταβλητών στροφών «CSP_PUMP» που βρίσκεται εντός του «Pumping Module». Η βασική συνθήκη λειτουργίας του ηλιοθερμικού πεδίου είναι η θερμοκρασία του θερμικού ελαίου να βρίσκεται κάτω από τους 200°C. Η συνθήκη αυτή εξετάζεται από το component που προσομοιώνει έναν διαφορικό ελεγκτή «CSP_LIMIT». Όταν ικανοποιείται η συνθήκη αυτή, τότε η λειτουργία του κυκλοφορητή του θερμικού ελαίου εξαρτάται από την ωφέλιμη ακτινοβολία, που υπολογίζεται στο «Solar Equations» και έτσι το ποσοστό λειτουργίας του υπολογίζεται από τη σχέση που έχει εισαχθεί στο component «Pump Control», ως εξής: $Y_{Pump} = \min(1, (\max(0.001, (0.0004 * Beam_Useful))))$. Οι παράμετροι λειτουργίας του συγκεκριμένου κυκλοφορητή φαίνονται στην παρακάτω στην εικόνα 5.9, όπου η μέγιστη παροχή του είναι 15500kg/hr, η μέγιστη ισχύς του είναι 7,5kW και η ειδική θερμότητα του HTF είναι 2,227 kJ/kg.K.

Η συνδεσμολογία παραμέτρων εισόδου (π.χ. Temperature και Pump Signal) και εξόδου (π.χ. Flowrate) του κυκλοφορητή «CSP_PUMP», απεικονίζεται σχήμα 5.3.

Κατά την κατάστρωση του μοντέλου λειτουργίας του πάρκου στο TRNSYS, έγινε προσπάθεια να αποτυπωθούν όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκε και η τρίοδη βάνα εκτροπής («3 Way Valve») της ροής προς το TES, σε περίπτωση που η διαφορά θερμοκρασίας

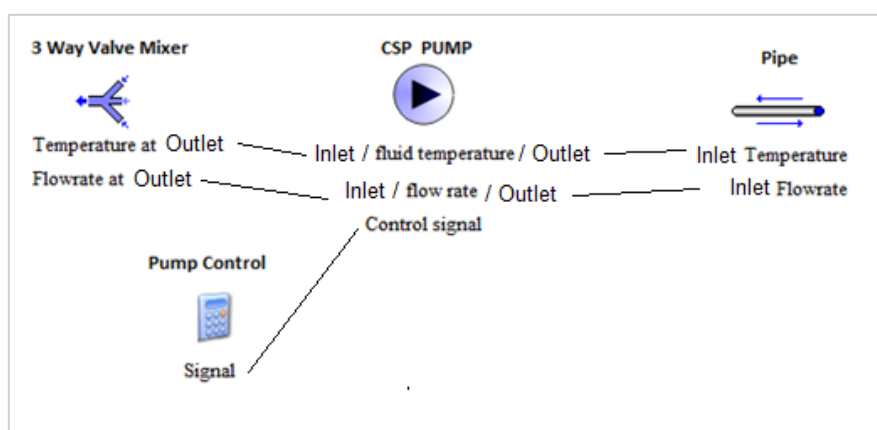
μεταξύ του ζεστού HTF στην έξοδο του ηλιοθερμικού πεδίου με τη μέση θερμοκρασία του TES, είναι μεγαλύτερη από 40°C. Έτσι όταν η παραπάνω διαφορά είναι $\Delta T < 40^\circ\text{C}$ (λειτουργία «preheating»), τότε το θερμικό έλαιο δεν διέρχεται μέσα από τον εναλλάκτη του TES, αλλά η ροή του εκτρέπεται 100% στην προαναφερθείσα τρίοδη βάνα, με σκοπό την επανεισαγωγή στο ηλιακό πεδίο για περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας. Όταν ανιχνευθεί διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T > 40^\circ\text{C}$, τότε η τρίοδη κλείνει και στέλνει όλη την παροχή του θερμικού ρευστού προς τον εσωτερικό εναλλάκτη του TES, με σκοπό τη μετάδοση θερμότητας και επομένως την αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού του δευτερεύοντος κυκλώματος (λειτουργία «transferring»). Συνεπώς, καθοριστικό ρόλο για τη λειτουργία της «3 Way Valve», παίζει το component «Valve Control», μέσα στο οποίο περιγράφονται με τη μορφή εξισώσεων οι παραπάνω συνθήκες λειτουργίας.

(--FINAL2(NO DISTRICT HEATING) outputs--) CSP_PUMP

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Maximum flow rate	15500	kg/hr	More...	☒	
2	Fluid specific heat	2.227	kJ/kg.K	More...	☒	
3	Maximum power	7.5	kW	More...	☒	
4	Conversion coefficient	0.05	-	More...	☒	
5	Power coefficient	0.5	-	More...	☒	

1	How many coefficients in the polynomial relating pump power to fluid flow rate?	1
---	---	---

Εικόνα 5.9: Παράμετροι λειτουργίας του κυκλοφορητή του θερμικού ελαίου

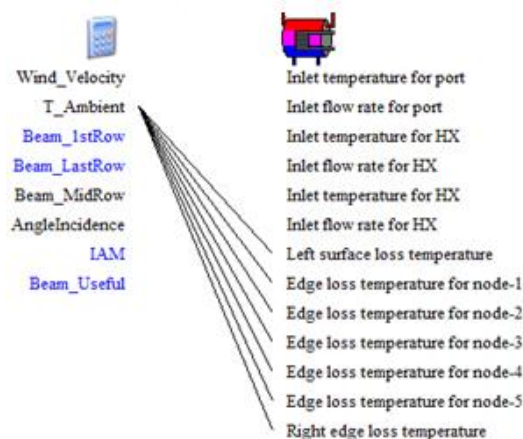


Σχήμα 5.3: Συνδεσμολογία «CSP_PUMP» με τις σωληνώσεις και τον πίνακα ελέγχου

5.3.4 Σύστημα Αποθήκευσης Θερμότητας - TES

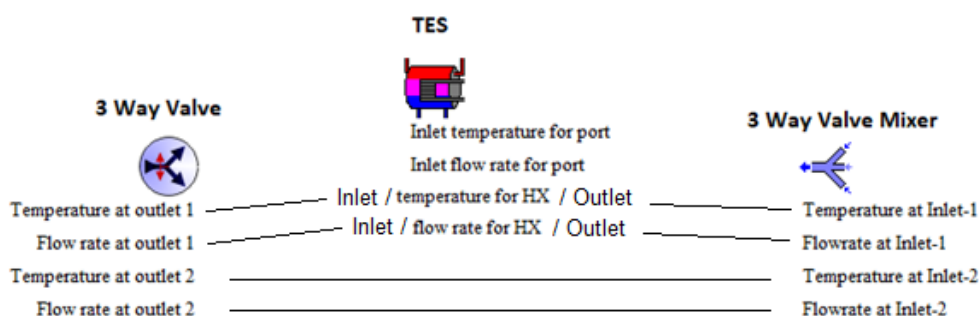
Σε προηγούμενες παραγράφους έγινε αντιληπτό πόσο σημαντικό ρόλο παίζει, σε παρόμοιες ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις, το σύστημα αποθήκευσης της παραγόμενης θερμότητας, αποτελώντας έτσι την «καρδιά» και του συγκεκριμένου σταθμού. Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το component κυλινδρικού δοχείου τοποθετημένο οριζόντια «Type 533», το οποίο επικαλείται ένα εξωτερικό αρχείο *.txt, όπου αναγράφονται όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δοχείου, όπως ο όγκος του, βασικά χαρακτηριστικά των εσωτερικών εναλλακτών, προδιαγραφές των ρευστών σε πρωτεύον και δευτερεύον δίκτυο κ.λπ. Το ρευστό του δευτερεύοντος δικτύου αποτελεί και το μέσο αποθήκευσης και μέσα στο δοχείο, διαχωρίζεται σε πέντε (5) θερμικές διαστρωματώσεις ίσου πάχους. Ο χρήστης του TRNYS μπορεί να προβάλλει όλα αυτά τα χαρακτηριστικά εντός του Simulation Studio, ωστόσο δεν ενδείκνυται η αλλαγή των μεταβλητών απευθείας μέσα από το αναδυόμενο αυτό παράθυρο (εικόνα 5.10).

Το δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας συνδέεται και με το component «Solar Equations», ώστε να συνυπολογιστούν από το μοντέλο και οι θερμικές απώλειες, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Διασύνδεση TES με αρχείο καιρού

Το TES συνδέεται μέσω του πρωτεύοντος δικτύου με το ηλιοθερμικό πεδίο, με τη χρήση του πρώτου εναλλάκτη θερμότητας με επιφάνεια επαφής 5m^2 , μέσα από τον οποίο διέρχεται το HTF, ζεσταίνοντας το μέσο αποθήκευσης, που είναι καθαρό νερό (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5: Διασύνδεση TES με Ηλιοθερμικό Πεδίο

Type 533

File Properties
File Name: [C:\Users\p3xt3114\Desktop\SDS Example_533_ Browse]

Tank Properties
Number of Tank Nodes 5
Tank Volume 5 m3
Tank Length 5 m
Left Surface Loss Coefficient 12,5 kJ/hr-m2-K
Right Surface Loss Coefficient 12,5 kJ/hr-m2-K
Additional Thermal Conductivity 0 kJ/hr-m2-K
Edge Loss
Node # 1
Nodal Edge Loss Coefficient 12,5 kJ/hr-m2-K
Edge Loss Temperature* 20
Left Surface Loss Temperature* 20 C
Right Surface Loss Temperature* 20 C
Flue Loss Temperature* 20 C
Inversion Mixing Flow Rate* -1 kg/hr
Tank Fluid
Tank Fluid Pure Water
Nodal Parameters
Tank Node # 1
Overall Flue Heat Loss Coefficient 0 kJ/hr-K
Auxiliary Heat Rate* 0 kJ/hr
Initial Tank Node Temperature 55 C

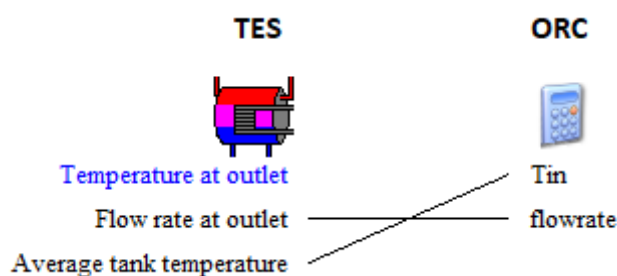
Paired Inlet/Outlet Ports
Number of Ports 1 Port # 1
Inlet Flow Mode Locations of Inlets and Outlets Provided
Entry Node 1
Exit Node 5
Temperature at Inlet* 20 C
Flow Rate at Inlet* 0 kg/hr
Miscellaneous Heat Gains
Number of Misc Heat Gains 0
* This item is an INPUT to the model and may be connected to other components in the Simulation Studio. Failure to connect this input will result in the specified value being used as a constant input throughout the simulation.

Immersed Heat Exchangers
Number of Immersed Heat Exchangers 2
Heat Exchanger # 1
Heat Exchanger Type Horizontal Tube Bank
Number of Heat Exchanger Nodes 5
Heat Exchanger Fluid
HX Fluid User-Provided Properties
Fluid Specific Heat 2,227 kJ/kg-K
Fluid Density 811 kg/m3
Fluid Thermal Conductivity 0,4248 kJ/hr-m-K
Fluid Viscosity 9 kg/m/hr
Multiplier for Natural Convection Correlation 0,6
Exponent for Rayleigh Number 0,25
Geometry Factor 1
Geometry Factor Exponent 0
Tube Inner Diameter 0,01 m
Tube Outer Diameter 0,013 m
Wall Conductivity 125 kJ/hr-m-K
Tube Length 2 m
Number of Tubes 30
Header Volume 0,03 m3
Cross Sectional Area 5 m2
Placement Parameters
Tank Node # 1
Fraction of HX Tube in Node 1
Temperature at Inlet* 20 C
Flow Rate at Inlet* 0 kg/hr

Immersed Heat Exchangers
Number of Immersed Heat Exchangers 2
Heat Exchanger # 2
Heat Exchanger Type Horizontal Tube Bank
Number of Heat Exchanger Nodes 1
Heat Exchanger Fluid
HX Fluid Pure Water
Multiplier for Natural Convection Correlation 0,6
Exponent for Rayleigh Number 0,25
Geometry Factor 1
Geometry Factor Exponent 0
Tube Inner Diameter 0,01 m
Tube Outer Diameter 0,03 m
Wall Conductivity 125 kJ/hr-m-K
Tube Length 2 m
Number of Tubes 15
Header Volume 0,015 m3
Cross Sectional Area 2,5 m2
Placement Parameters
Tank Node # 1
Fraction of HX Tube in Node 0
Temperature at Inlet* 0 C
Flow Rate at Inlet* 0 kg/hr

OK Cancel Help

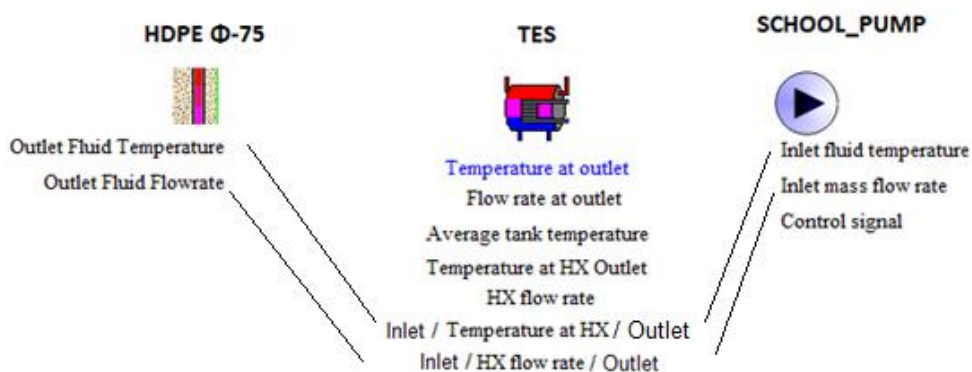
Εικόνα 5.10: Τεχνικά χαρακτηριστικά TES



Σχήμα 5.6: Διασύνδεση TES με Γεννήτρια ORC

Το ρευστό αποθήκευσης τροφοδοτεί και τη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τεχνολογίας ORC (σχήμα 5.6).

Τέλος, ο δεύτερος εναλλάκτης θερμότητας, με επιφάνεια επαφής $2,5\text{m}^2$ και ρευστό μεταφοράς καθαρό νερό, εξυπηρετεί το δίκτυο τηλεθέρμανσης που έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (σχήμα 5.7).

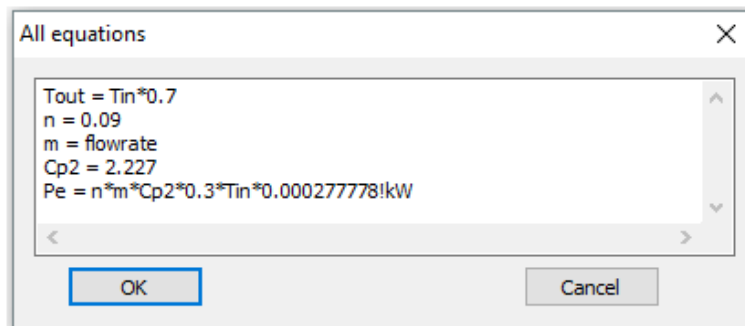


Σχήμα 5.7: Διασύνδεση TES με Δίκτυο Τηλεθέρμανσης

5.3.5 Γεννήτρια Παραγωγής ηλεκτρικής Ενέργειας («ORC Generator»)

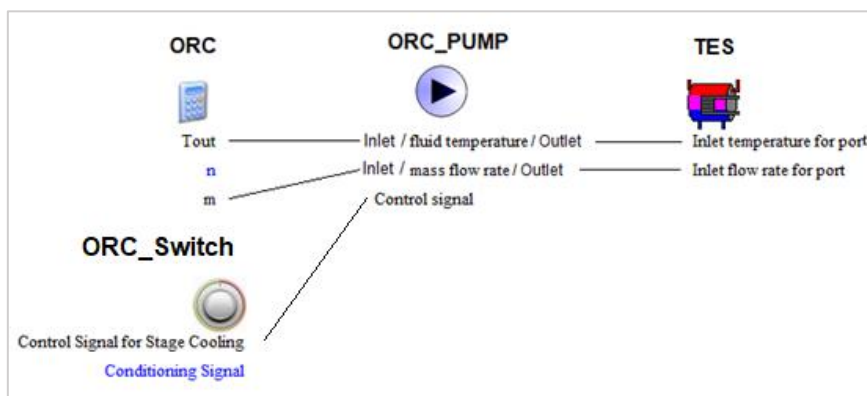
Το να μοντελοποιηθεί μια γεννήτρια αυτής της τεχνολογίας είναι από μόνο του μια πρόκληση, καθώς είναι πολύ δύσκολο να συγκεντρώσεις τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές που απαιτούνται από τα έτοιμα components του TRNSYS. Συνήθως οι γεννήτριες αυτές αποτελούν «μαύρα κουτιά», που αν ανοιχτούν μπορεί να χαθεί η εγγύηση του μηχανήματος, καθώς υπάρχει συμφωνητικό εμπιστευτικότητας με την εταιρεία κατασκευής. Το ίδιο ισχύει και για την εγκατεστημένη στο υβριδικό πάρκο γεννήτρια τεχνολογίας ORC.

Για τους παραπάνω λόγους, έγινε προσπάθεια η λειτουργία της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να προσομοιωθεί με τη χρήση απλουστευμένων εξισώσεων, που βασίστηκαν περισσότερο σε εμπειρικές παραδοχές, έπειτα από μετρήσεις στο πεδίο. Οι παραδοχές ήταν οι εξής: i) θερμοκρασία εξόδου ρευστού $T_{out} = 0.7 \cdot T_{in}$ (θερμοκρασία εισόδου ρευστού) ii) θερμοκρασία ρευστού πρωτεύοντος ίδια με αυτή του οργανικού μέσου (δευτερεύοντος ρευστού), iii) συντελεστής $\eta = 9\%$ ώστε να μπορούν να επιτευχθούν τιμές ηλεκτρικής ισχύος που πλησιάζουν τις πραγματικές τιμές ($\leq 5\text{kW}$). Έτσι προκύπτουν οι εξισώσεις που εισάγονται στο component «ORC», όπως απεικονίζονται στην εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11: Εξισώσεις Προσομοίωσης Γεννήτριας Οργανικού Κύκλου Rankine

Η γεννήτρια ORC συνδέεται με τον κυκλοφορητή σταθερών στροφών του πρωτεύοντος ρευστού – νερού «ORC_PUMP», όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Διασύνδεση κυκλοφορητή «ORC_PUMP»

Ο κυκλοφορητής με τη σειρά του τίθεται σε λειτουργία όταν η μέση θερμοκρασία του TES ξεπεράσει τους 80°C, που είναι και η θερμοκρασία πάνω από την οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Τη συνθήκη αυτή την ελέγχει το component «ORC_Switch», το οποίο αποτελεί απλό θερμοστάτη που διαβάζει την εσωτερική μέση θερμοκρασία του TES και ανάλογα ανοιγοκλείνει την «ORC_PUMP». Οι παράμετροι λειτουργίας του εν λόγω κυκλοφορητή απεικονίζονται στην εικόνα 5.12.

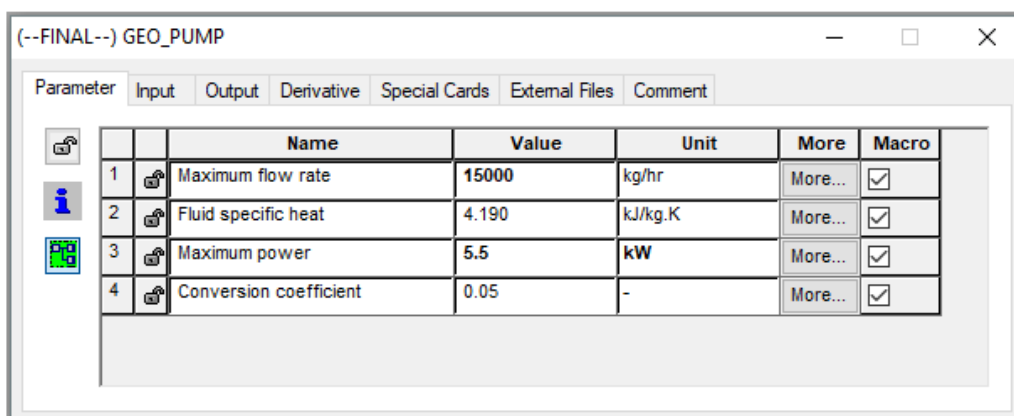
(--FINAL--) ORC_PUMP

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Maximum flow rate	3000	kg/hr	More...	☒	
2	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...	☒	
3	Maximum power	1.1	W	More...	☒	
4	Conversion coefficient	0.05	-	More...	☒	

Εικόνα 5.12: Παράμετροι λειτουργίας του κυκλοφορητή της γεννήτριας ORC

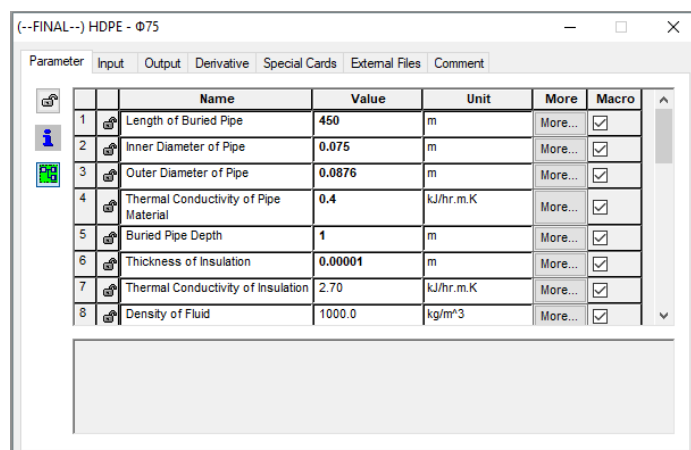
5.3.6 Σύστημα Τηλεθέρμανσης («District Heating»)

Στο συγκεκριμένο πιλοτικό έργο, το σύστημα τηλεθέρμανσης, όπως έχει κατασκευαστεί, «παντρεύει» τη γεωθερμική ενέργεια που πηγάζει από το βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο του Ν. Ερασμίου με την ηλιοθερμική ενέργεια που παράγεται στο ηλιακό πεδίο. Η υβριδοποίηση των δύο αυτών πηγών ενέργειας είναι υπό διερεύνηση για το βαθμό με τον οποίο συμβάλλουν στην τηλεθέρμανση του δημόσιου Σχολείου, αλλά και στην υποβοήθηση της λειτουργίας του ηλιοθερμικού πεδίου με το γεωθερμικό ρευστό θερμοκρασίας $\approx 60^{\circ}\text{C}$ που αντλείται στο πάρκο. Στην παρούσα παράγραφο γίνεται μια πρώτη προσέγγιση αποτύπωσης της εγκατάστασης της τηλεθέρμανσης στο λογισμικό TRNYS.



	Name	Value	Unit	More	Macro
1	Maximum flow rate	15000	kg/hr	More...	☒
2	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...	☒
3	Maximum power	5.5	kW	More...	☒
4	Conversion coefficient	0.05	-	More...	☒

Εικόνα 5.13: Παράμετροι λειτουργίας της υποβρύχιας γεωθερμικής αντλίας



	Name	Value	Unit	More	Macro
1	Length of Buried Pipe	450	m	More...	☒
2	Inner Diameter of Pipe	0.075	m	More...	☒
3	Outer Diameter of Pipe	0.0876	m	More...	☒
4	Thermal Conductivity of Pipe Material	0.4	kJ/hr.m.K	More...	☒
5	Buried Pipe Depth	1	m	More...	☒
6	Thickness of Insulation	0.00001	m	More...	☒
7	Thermal Conductivity of Insulation	2.70	kJ/hr.m.K	More...	☒
8	Density of Fluid	1000.0	kg/m³	More...	☒

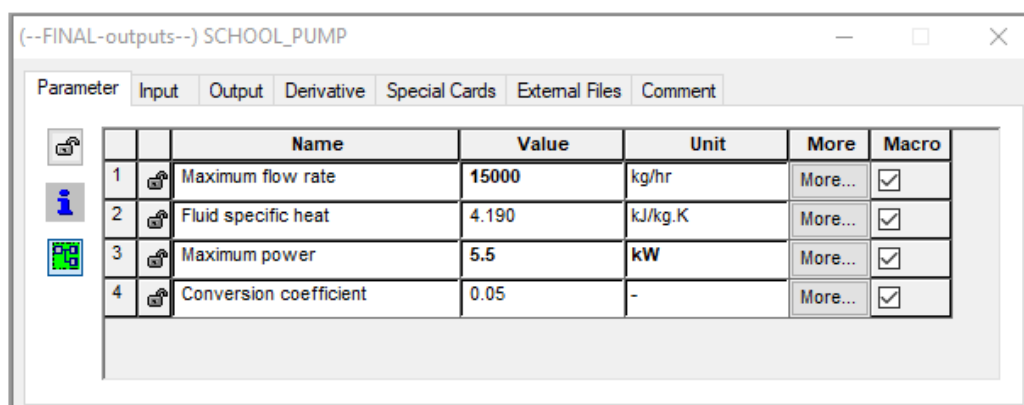
Εικόνα 5.14: Παράμετροι του υπόγειου σωλήνα «HDPE – Φ75»

Η εγκατάσταση ξεκινά με την υποβρύχια γεωθερμική αντλία «GEO_PUMP» σταθερών στροφών, η οποία βρίσκεται σε βάθος περίπου 100m και αντλεί το γεωθερμικό ρευστό σε θερμοκρασία $\approx 60^{\circ}\text{C}$, με παραμέτρους που φαίνονται στην εικόνα 5.13. Η συνθήκες ώστε να λειτουργήσει η συγκεκριμένη αντλία είναι είτε να πέσει η μέση θερμοκρασία του νερού μέσα στο TES κάτω από τους 50°C (την οποία ελέγχει το component «GEO_Start»), είτε να πάρει μπροστά η αντλία του σχολείου «SCHOOL_PUMP» (που ελέγχεται από το component «Assist»). Τα

σήματα που προκύπτουν από τα δύο προαναφερθέντα components εισάγονται στο component «OR», απ' όπου εξάγεται το τελικό σήμα προς την «GEO_PUMP». Με αυτό τον τρόπο συμβάλει και στη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του TES σε υψηλά επίπεδα, ακόμη και σε περιόδους εκτεταμένου ψύχους ελλείψει ηλιοφάνειας.

Το γεωθερμικό ρευστό μεταφέρεται μέσω υπόγειου αμόνωτου σωλήνα «HDPE – Φ75» κατασκευασμένο από πολυαιθυλένιο, τα χαρακτηριστικά του οποίου περιγράφονται στην εικόνα 5.14.

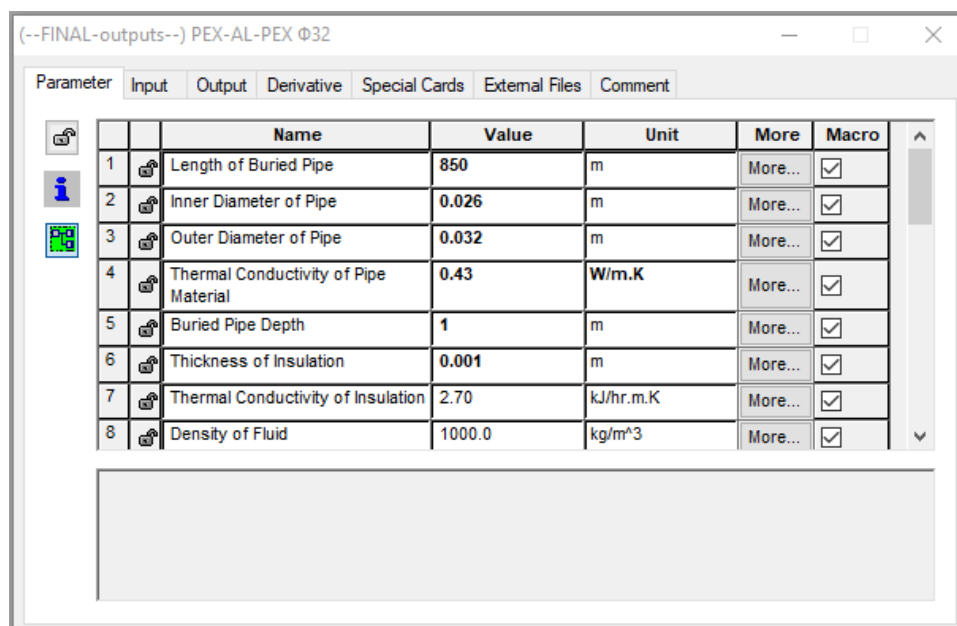
Έπειτα εισάγεται στον δεύτερο εσωτερικό εναλλάκτη του TES, σύμφωνα με το σχήμα 5.6 και αφού απορροφήσει θερμότητα από το μέσο αποθήκευσης θερμότητας του TES, φτάνοντας στην επιθυμητή θερμοκρασία (>70°C), οδηγείται προς τον κυκλοφορητή του σχολείου «SCHOOL_PUMP» (εικόνα 5.15).



		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Maximum flow rate	15000	kg/hr	More...	☒
2		Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...	☒
3		Maximum power	5.5	kW	More...	☒
4		Conversion coefficient	0.05	-	More...	☒

Εικόνα 5.15: Παράμετροι του «SCHOOL_PUMP»

Στη συνέχεια, μέσω του υπόγειου αμόνωτου πολυστρωματικού αγωγού «PEX-AL-PEX – Φ32» (εικόνα 5.16) οδηγείται προς το σχολείο («SCHOOL») με σκοπό να συμβάλει στη θέρμανση του κτιρίου.



		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Length of Buried Pipe	850	m	More...	☒
2		Inner Diameter of Pipe	0.026	m	More...	☒
3		Outer Diameter of Pipe	0.032	m	More...	☒
4		Thermal Conductivity of Pipe Material	0.43	W/m.K	More...	☒
5		Buried Pipe Depth	1	m	More...	☒
6		Thickness of Insulation	0.001	m	More...	☒
7		Thermal Conductivity of Insulation	2.70	kJ/hr.m.K	More...	☒
8		Density of Fluid	1000.0	kg/m^3	More...	☒

Εικόνα 5.16: Παράμετροι «PEX-AL-PEX - Φ32»

Στο component «Load Generator» (οι βασικότερες παράμετροι φαίνονται στην εικόνα 5.17) γίνεται εισαγωγή της μέγιστης απαίτησης σε θερμική ισχύ (30kW_{th}), ώστε να υπολογιστούν τα ωριαία θερμικά φορτία του σχολείου κατά τη διάρκεια της μέρας, για την χειμερινή περίοδο.

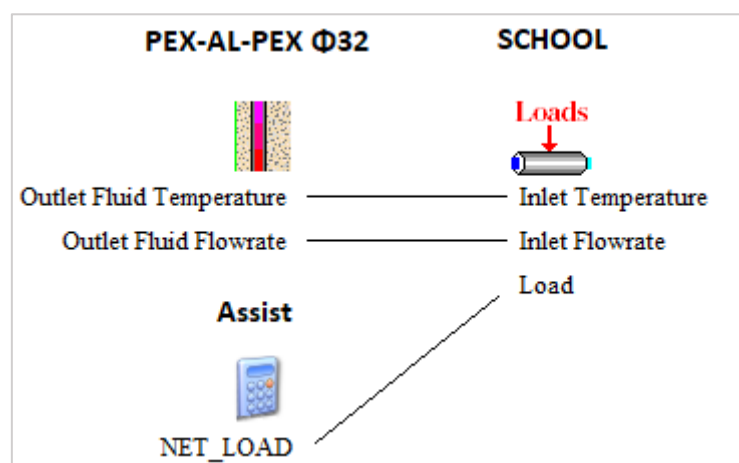
(--FINAL-outputs--) Load Generator

Parameter Input Output Derivative Special Cards External Files Comment

		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Which Day of the Week is Sunday?	7	-	More...	☒
2		Peak Cooling Load Hour	0	hr	More...	☒
3		Peak Heating Load Hour	8	hr	More...	☒
4		Start of Cooling Season	2160	hr	More...	☒
5		End of Cooling Season	6552	hr	More...	☒
6		Start of Heating Season	6552	hr	More...	☒
7		End of Heating Season	2160	hr	More...	☒
8		Weekday Offset for Cooling	0.5	-	More...	☒

Εικόνα 5.17: Παράμετροι «Load Generator»

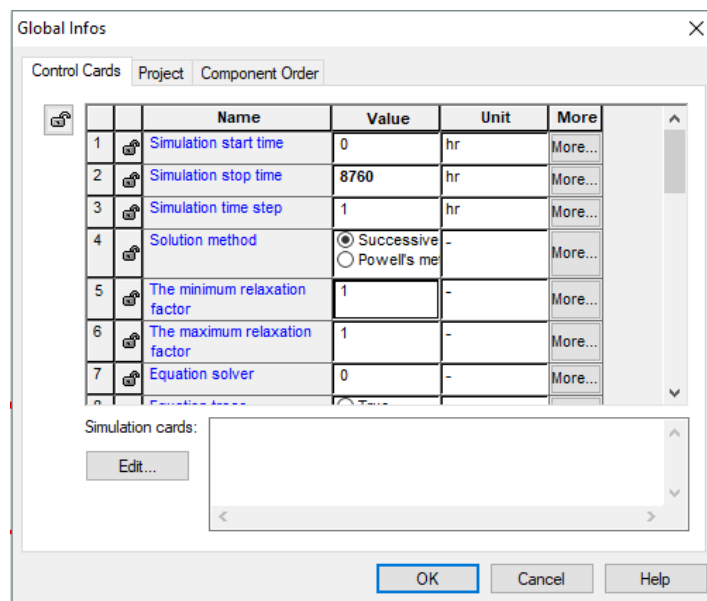
Έπειτα με τη βοήθεια του «Assist» που περιέχει βοηθητική εξίσωση μετατροπής, προκύπτει το ωριαίο θερμικό φορτίο προς το «SCHOOL», για το χρονικό διάστημα από 1 Οκτωβρίου έως και 31 Μαρτίου (Start of Heating Season: 6552hr – End of Heating Season: 2160hr) και συνδέεται ως εξής:



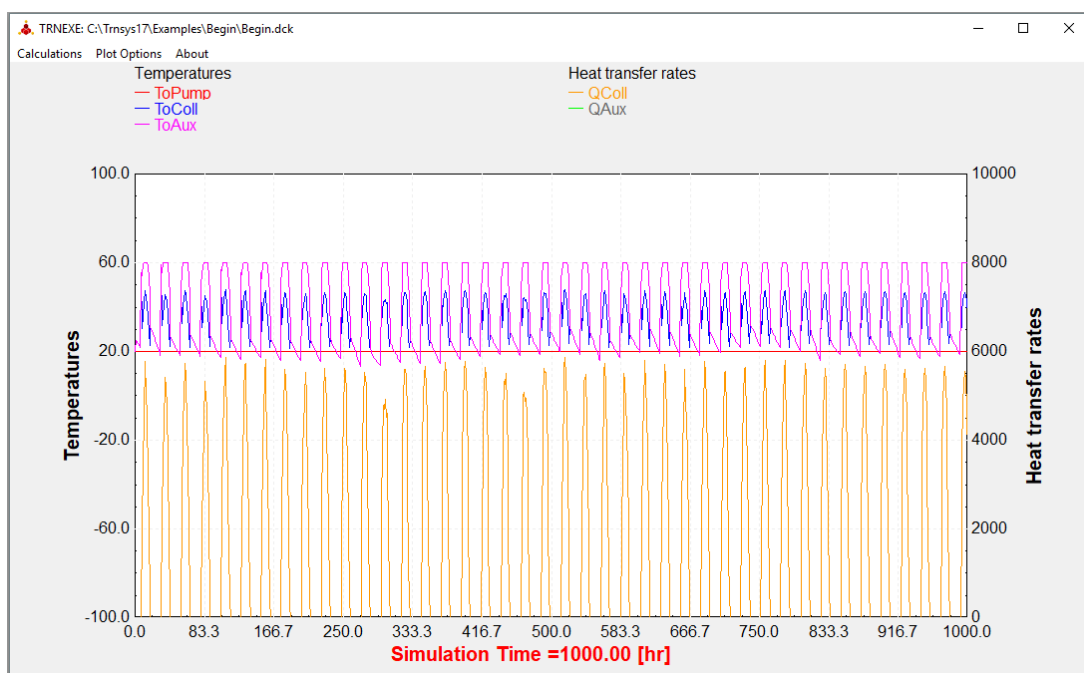
Σχήμα 5.9: Διασύνδεση «PEX-AL-PEX -Φ32» και «Assist» με το «SCHOOL»

5.4 Εκτέλεση προσομοίωσης

Μετά την κατάστρωση του μοντέλου, όπως αναλύθηκε παραπάνω, μπορεί να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση, για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα μέσα σε ένα έτος και με χρονικά βήματα που μπορούν να είναι υποδιαιρέσεις της μιας ώρας. Η συγκεκριμένη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για το διάστημα ενός έτους με χρονικό βήμα τη μία ώρα (εικόνα 5.18).



Εικόνα 5.18: Συνθήκες ελέγχου προσομοίωσης



Εικόνα 5.19: Ενδεικτικό διάγραμμα παραμέτρων κατά την προσομοίωση

Επίσης, κατά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης και χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία, μπορεί να προβληθεί, κατά βούληση, σε ζωντανό χρόνο οποιαδήποτε παράμετρος εξόδου των components, σε μορφή διαγράμματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.19.

Τέλος, κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης το λογισμικό δημιουργεί ένα αρχείο κειμένου «output.lst» που περιλαμβάνει βασικά στοιχεία και όλες τις παραμέτρους και τη συνδεσμολογία για κάθε τύπο component, όπως περιγράφηκε στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, ενδεικτικό παράδειγμα του οποίου παρατίθεται στο Παράρτημα Β. Επίσης, οι τιμές των παραμέτρων εξόδου των components που χρησιμοποιήθηκαν, κατά την προσομοίωση του συγκεκριμένου μοντέλου, αποθηκεύτηκαν σε μορφή αρχείου κειμένου για περαιτέρω επεξεργασία και εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

5.5 Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο, έγινε μια εκτενής παρουσίαση της ανάπτυξης του μοντέλου, που αφορά στο υφιστάμενο πιλοτικό πάρκο παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, εντός του λογισμικού προσομοίωσης TRNSYS, και ειδικότερα του Simulation Studio. Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκε ο τρόπος σχεδιασμού των επιμέρους υποσυστημάτων που το απαρτίζουν, παρουσιάστηκαν τα components που επιλέχθηκαν για τον σχεδιασμό αυτό και παρουσιάστηκαν οι παράμετροι λειτουργίας τους. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της εν λόγω προσομοίωσης.

Αναφορές

[1] Γούλας Χρήστος, «Προσομοίωση Λειτουργίας Ηλιακού Θερμικού Πεδίου Τμήματος Υβριδικού Ενεργειακού Πάρκου», Διπλωματική εργασία, Δ.Π.Θ. Ξάνθη, Απρίλιος 2018.

[2] Solar Energy Laboratory, TRNSYS 17 Documentation (Volume 1 – Volume 8), University of Wisconsin-Madison, USA, 2014.

[3] Thermal Energy System Specialists, LLC, TESSLibs 17 Documentation (Volume 1 – Volume 14), Madison, Wisconsin, USA, 2014.

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα Προσομοίωσης του Μοντέλου στο TRNSYS

Περιεχόμενα

6.1 Εισαγωγή	99
6.2 Ετήσια Αποτελέσματα	99
6.3 Μηνιαία αποτελέσματα	105
6.4 Ημερήσια αποτελέσματα	112
6.5 Επαλήθευση Προσομοίωσης	113
6.6 Σύνοψη	115

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (ένα πολύ μικρό δείγμα παρατίθεται στο Παράρτημα Γ), που προέκυψαν από την προσομοίωση στο λογισμικό TRNSYS, σε μορφή γραφημάτων συναρτήσεως του χρόνου.

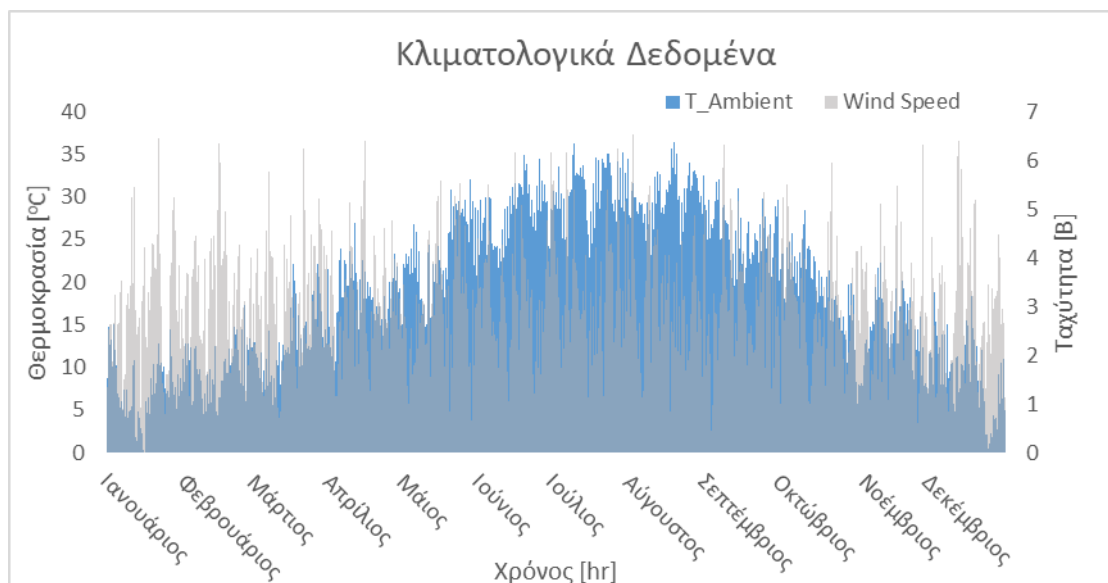
Έπειτα από την εξαγωγή των δεδομένων του TRNSYS σε αρχεία κειμένου .dat, τα αποτελέσματα εισήχθησαν σε υπολογιστικά φύλλα Excel, προκειμένου να γίνει η ανάλυση τους και η περαιτέρω επεξεργασία τους.

Θα πρέπει να επισημανθεί πως στην προσομοίωση δεν λήφθηκε υπόψη καθόλου το σύστημα της τηλεθέρμανσης, που είχε αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο βασικός λόγος είναι το γεγονός ότι οι μετρούμενες θερμοκρασίες στον τελικό αποδέκτη του δικτύου τηλεθέρμανσης (σχολείο), ήταν χαμηλότερες από το αναμενόμενο και θεωρήθηκε ότι δεν συνέβαλαν καθόλου στη θέρμανση του κτιρίου. Αυτό μπορεί να αποδοθεί κυρίως στην συγκεκριμένη υφιστάμενη εγκατάσταση του δικτύου τηλεθέρμανσης, από την οποία δεν υπάρχουν και καταγεγραμμένα δεδομένα ώστε να υπάρχει δυνατότητα επαλήθευσης του μοντέλου. Συνεπώς, δόθηκε προτεραιότητα μόνο στο σενάριο παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για έναν ολόκληρο χρόνο και σκοπό είχε όχι τόσο την ποσοτική, όσο την ποιοτική προσέγγιση στην λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

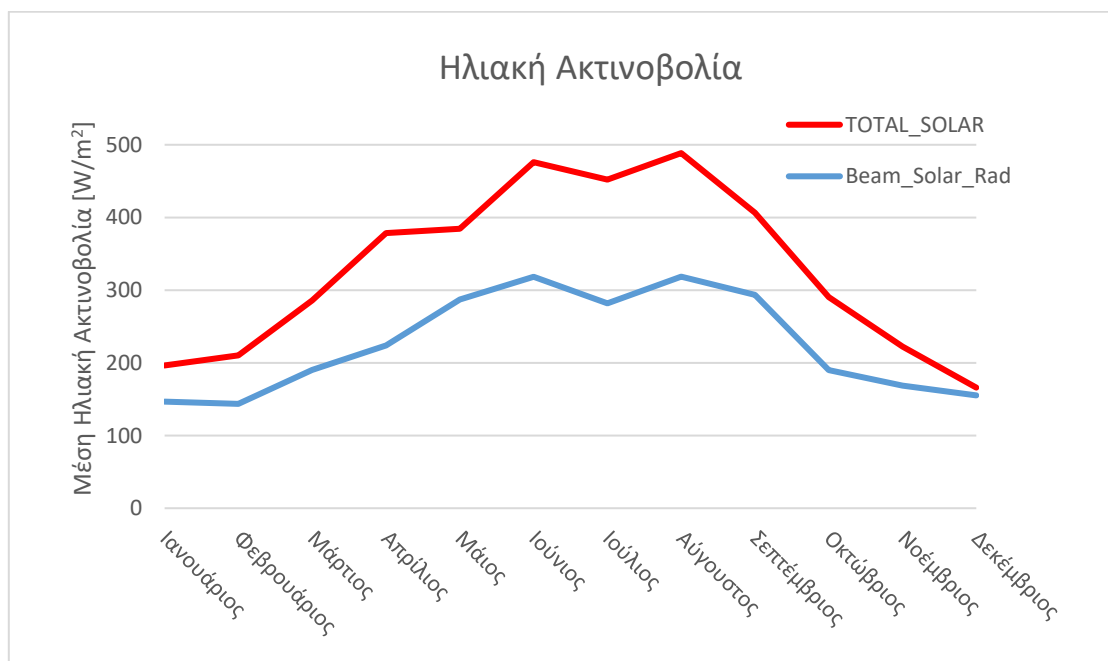
6.2 Ετήσια Αποτελέσματα

Στο διάγραμμα στο σχήμα 6.1 απεικονίζεται η ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($T_{Ambient}$) και της ταχύτητας του ανέμου (V_{wind} - Wind Speed) σε ωριαίες τιμές. Το προφίλ της θερμοκρασίας χαρακτηρίζεται τυπικό για τη συγκεκριμένη περιοχή με μέγιστες θερμοκρασίες $\approx 35^{\circ}\text{C}$ τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο. Η ταχύτητα του ανέμου, ανεξαρτήτως εποχής, παρουσιάζει μέγιστη τιμή $\approx 6,5 \text{ beaufort}$.



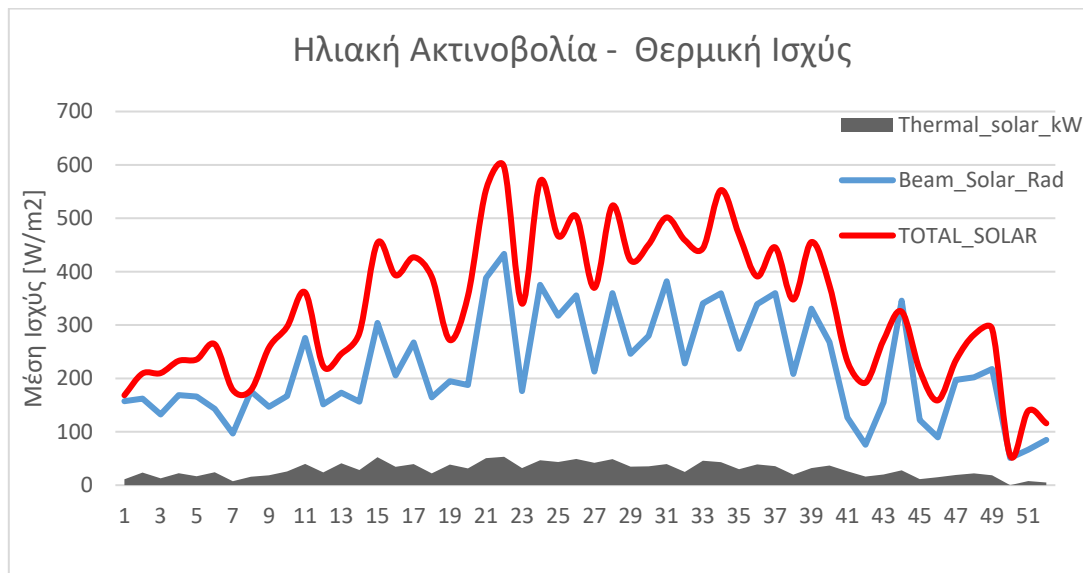
Σχήμα 6.1: Ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ταχύτητας ανέμου (μέσες ωριαίες τιμές)

Η ετήσια διακύμανση των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας, που απαντώνται στην περιοχή, παρουσιάζονται στο σχήμα 6.2. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία (TOTAL_SOLAR) που αποτελεί το σύνολο της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Beam_Solar_Rad) και των απωλειών, όπως η διάχυτη και η ανακλώμενη, λαμβάνει τιμές μέχρι 500 W/m^2 . Αυτό συμβαίνει επειδή οι τιμές του διαγράμματος προκύπτουν από τον μέσο όρο των μη μηδενικών ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας, για κάθε μήνα του έτους. Έτσι, κατά τη διάρκεια ενός μήνα, οι παρατεταμένες χαμηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας σε μέρες με νεφοκάλυψη, ρίχνουν κατά πολύ τη μέση μηνιαία τιμή ηλιακής ακτινοβολίας.



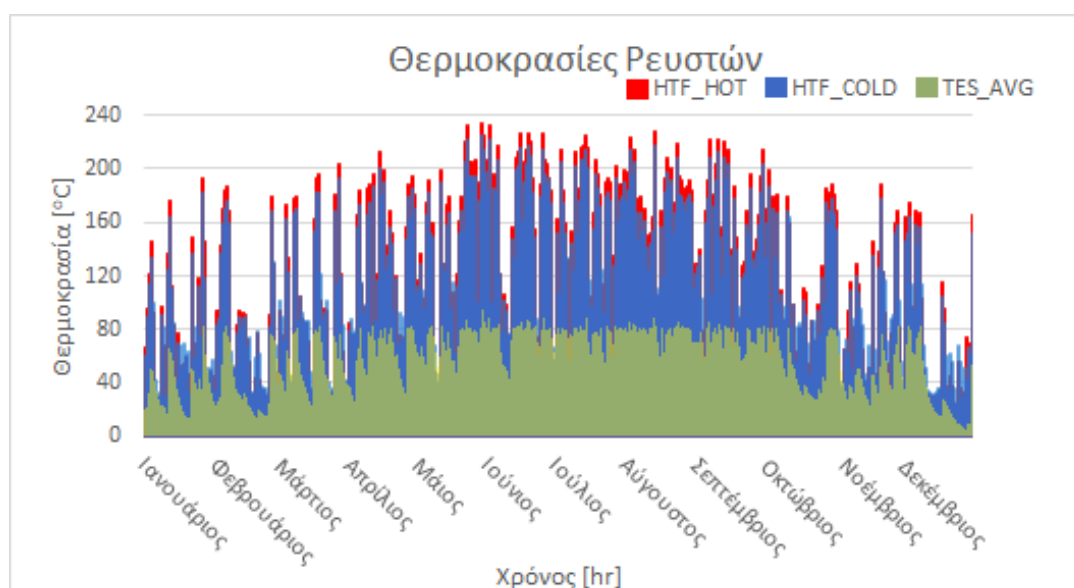
Σχήμα 6.2: Ετήσια διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας (μέσες μηνιαίες τιμές)

Η ετήσια διακύμανση των ίδιων μεγεθών, που εξήχθησαν βάσει των μέσων εβδομαδιαίων τιμών, συμπεριλαμβανομένης της θερμικής ισχύος του ηλιοθερμικού πεδίου, απεικονίζονται στο σχήμα 6.3. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, η μέγιστη τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας είναι υψηλότερη από αυτή του προηγούμενου διαγράμματος, αγγίζοντας τα 600W/m^2 . Μερικές μέρες νεφοκάλυψης που παρατηρούνται μια εβδομάδα δεν επηρεάζουν τη μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας της επόμενης εβδομάδας, όπως συνέβαινε στην προηγούμενη περίπτωση την μέσης μηνιαίας τιμής.



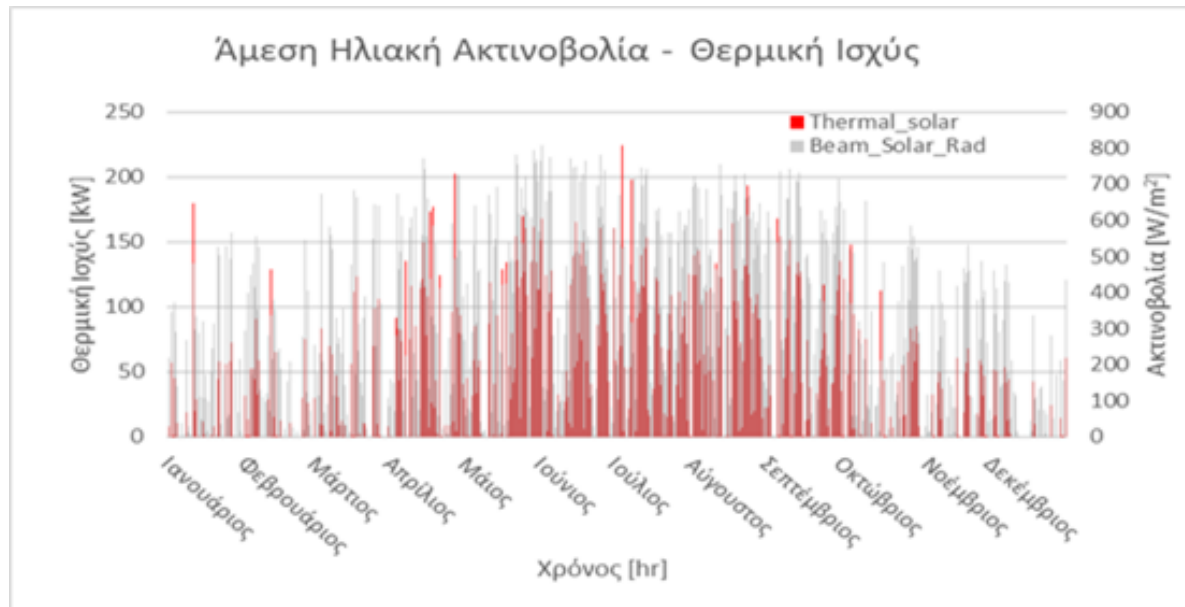
Σχήμα 6.3: Ετήσια διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμικής ενέργειας (μέσες εβδομαδιαίες τιμές)

Οι ετήσιες διακυμάνσεις θερμοκρασίας που αναπτύσσουν τόσο το θερμικό έλαιο (HTF), όσο και το μέσο αποθήκευσης του TES (νερό), φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 6.4. Είναι εύκολα αντιληπτό πως το HTF αγγίζει θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 200°C , ενώ η μέση θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης παραμένει μικρότερη από τους 100°C , λόγω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



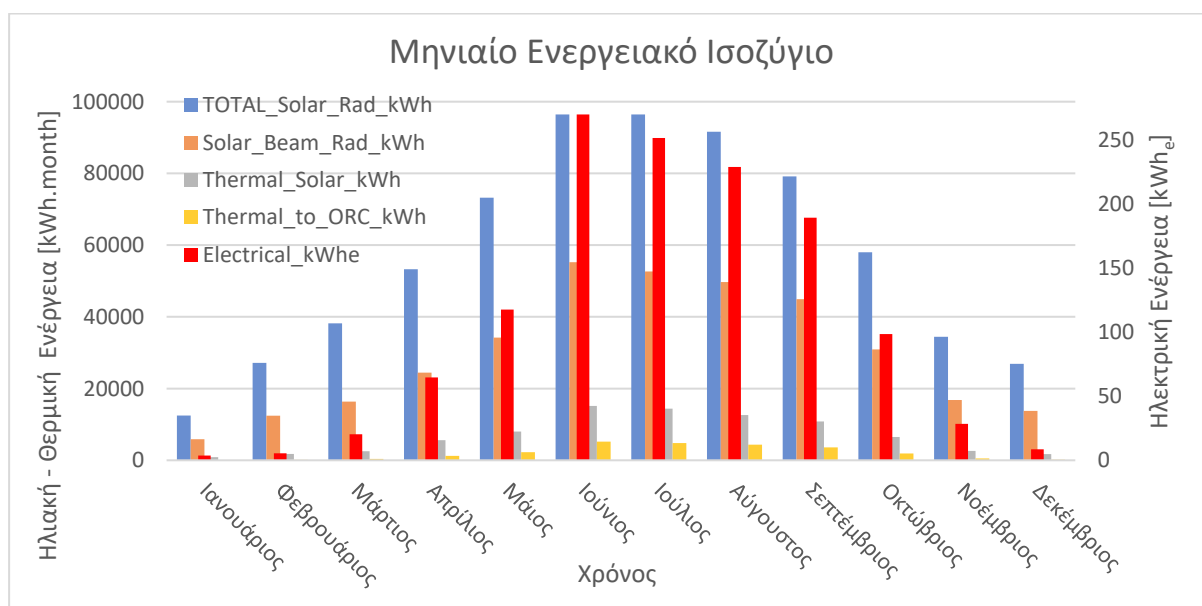
Σχήμα 6.4: Ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας ρευστών (μέσες ωριαίες τιμές)

Στο σχήμα 6.5, διακρίνεται η θερμικής ισχύς (Thermal_solar) σε σχέση με την αντίστοιχη άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Beam_Solar_Rad) που προσπίπτει στον ανακλαστήρα του παραβολικού συλλέκτη. Οι τιμές της θερμικής ισχύος αγγίζουν τα 225kW, τιμή που πλησιάζει την ονομαστική θερμική ισχύ που δίνει ο κατασκευαστής των συλλεκτών.



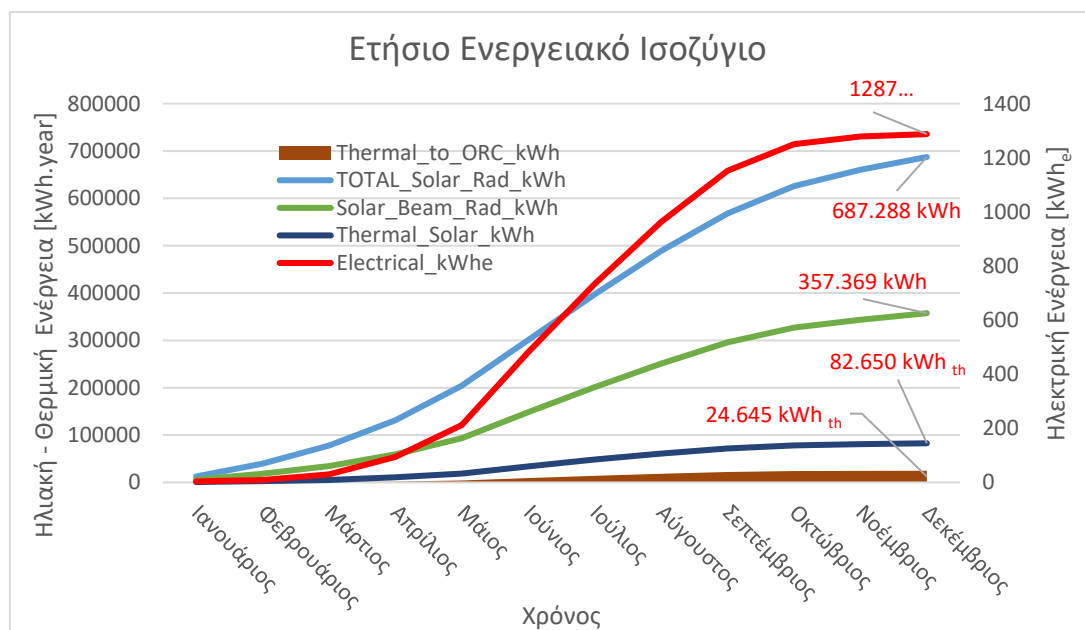
Σχήμα 6.5: Ετήσια διακύμανση άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμικής ισχύος (μέσες ωριαίες τιμές)

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του μοντέλου για ένα χρόνο, προκύπτουν οι μηνιαίες ποσότητες ενέργειας που προέρχονται από την κάθε πηγή (σχήμα 6.6).

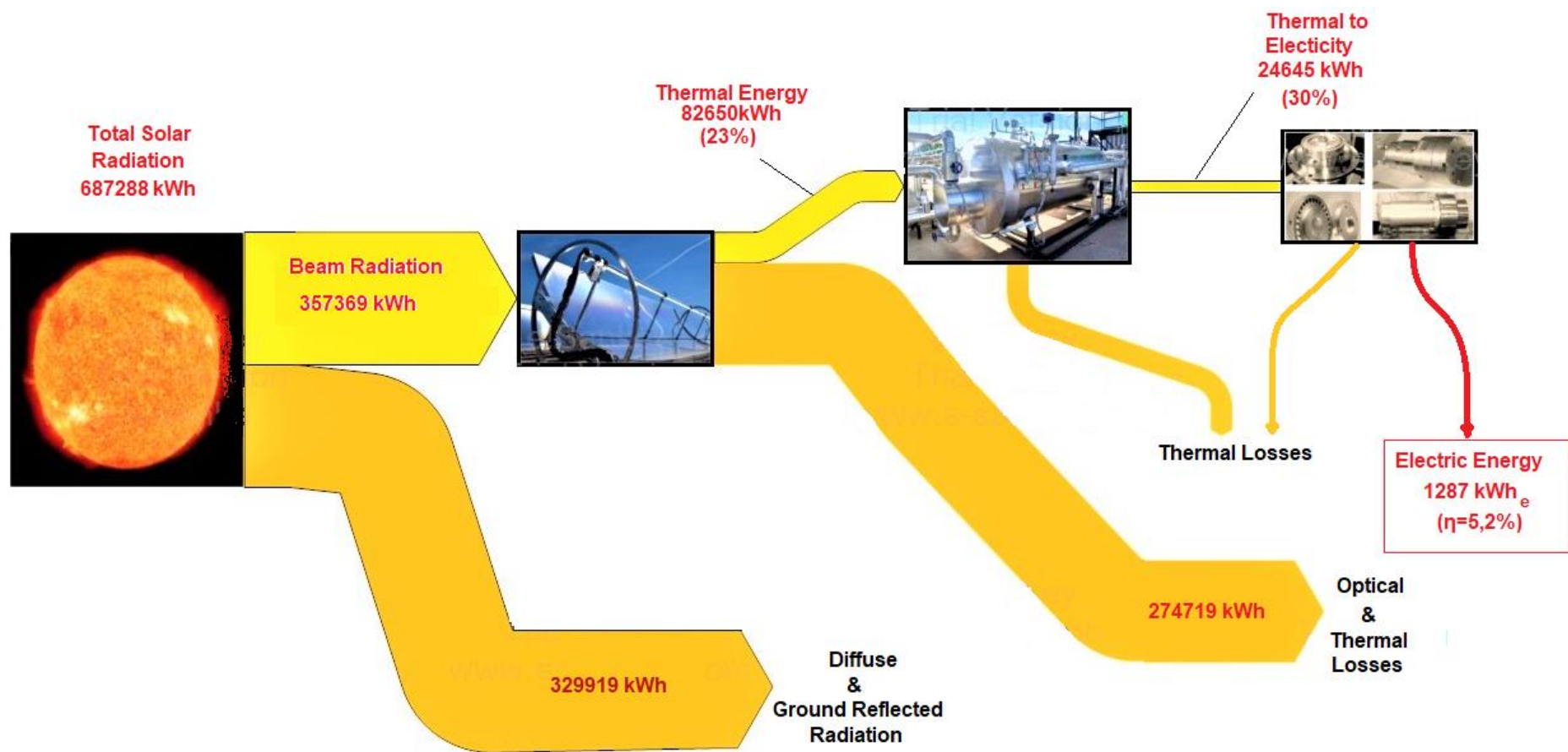


Σχήμα 6.6: Μηνιαίο ισοζύγιο ενέργειας

Συγκεντρώνοντας, τις παραπάνω μηνιαίες τιμές προκύπτει το συνολικό ετήσιο ισοζύγιο ενέργειας (σχήμα 6.7), καθώς και το διάγραμμα ροής ενέργειας - Sankey (σχήμα 6.8). Από τις 687.288kWh της ολικής ηλιακής ενέργειας της περιοχής, η άμεση ηλιακή ενέργεια η οποία προσπίπτει στον ανακλαστήρα του ηλιακού συλλέκτη είναι 357.369kWh. Από αυτές το 23% (82.650 kWh_{th}) μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια μέσω των συγκεντρωτικών παραβολικών κατόπτρων, η οποία προσδίδεται στο μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας του TES. Οι 24.645kWh_{th} της θερμικής αυτής ενέργειας απορρίπτονται προς τη γεννήτρια ORC, με σκοπό την παραγωγή 1.287kWh_e ηλεκτρικής ενέργειας, με συντελεστή μετατροπής θερμικής σε ηλεκτρική ενέργεια 5,2%.



Σχήμα 6.7:Ετήσιο ισοζύγιο ενέργειας



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα ροής ενέργειας (Sankey)

6.3 Μηνιαία αποτελέσματα

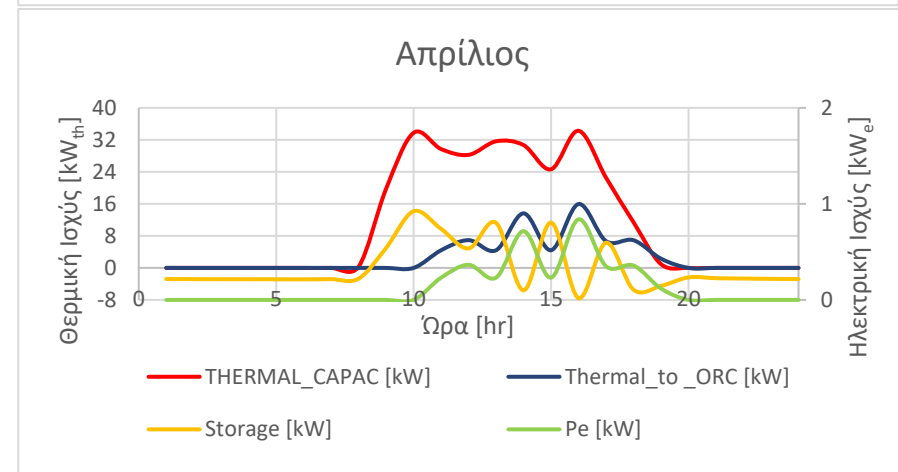
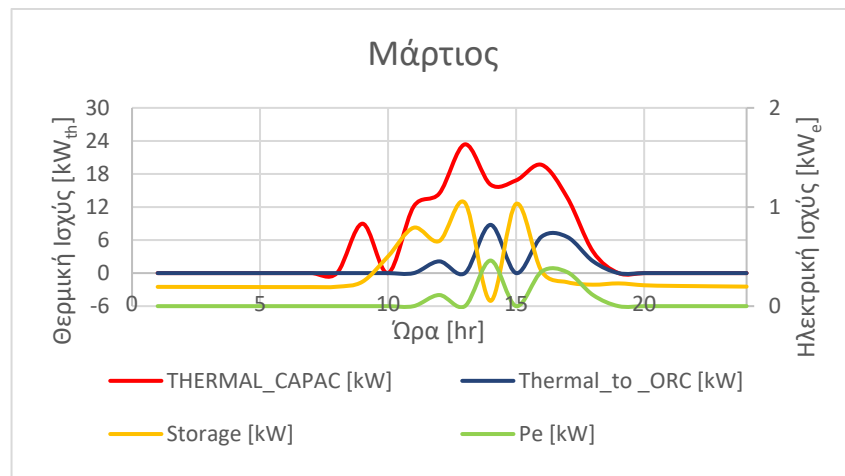
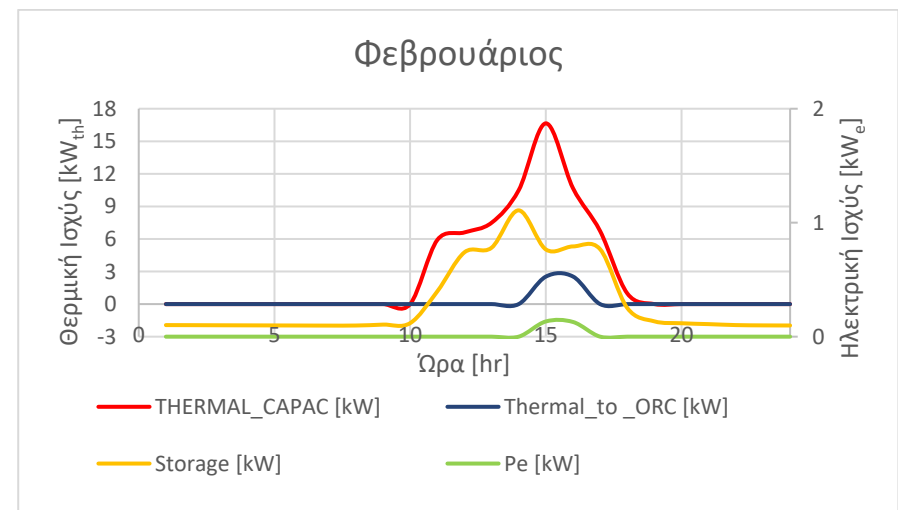
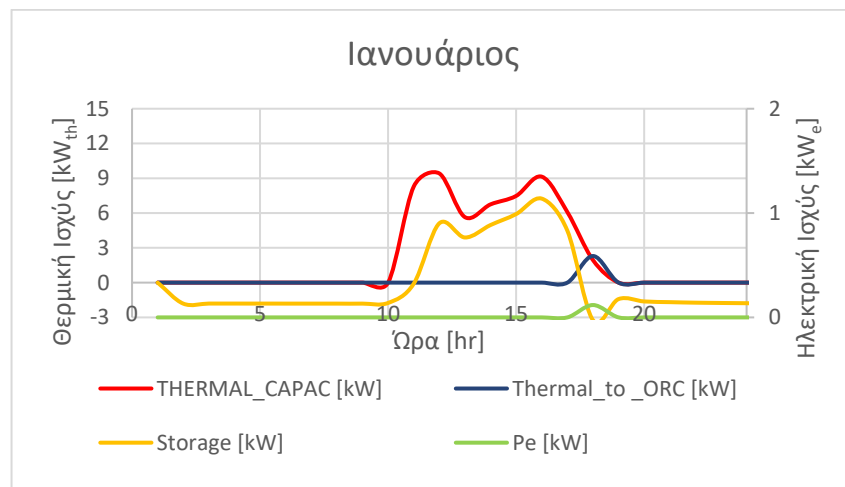
Στη συνέχεια ακολουθούν διαγράμματα που προέκυψαν από τις ωριαίες τιμές της προσομοίωσης που αντιστοιχούν σε μια μέση μέρα, για κάθε μήνα.

Όσον αφορά στην θερμική ισχύ (THERMAL_CAPAC) του ηλιοθερμικού πεδίου, είναι αντιληπτό πως τους καλοκαιρινούς μήνες παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές που ξεπερνούν τα 55kW_{th} (Ιούνιος και Ιούλιος). Αντίθετα, οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται κατά τους χειμερινούς μήνες, κυρίως Δεκέμβρη και Ιανουάριο ($<10\text{kW}_{\text{th}}$). Συγκρίνοντας τους μήνες της άνοιξης με τους φθινοπωρινούς, η θερμική ισχύς εμφανίζει υψηλότερες τιμές κατά την περίοδο της άνοιξης, με το προφίλ του Μαΐου να είναι παρόμοιο με αυτό του Σεπτεμβρίου. Επίσης από τον Απρίλιο και έπειτα, μέχρι και τον Οκτώβριο, η παραγωγή της θερμικής ενέργειας ξεκινά νωρίτερα και σταματά αργότερα, κατά τη διάρκεια της μέρας, παρουσιάζοντας πιο ήπιες διακυμάνσεις (σχήματα 6.9α, 6.9β, 6.9γ).

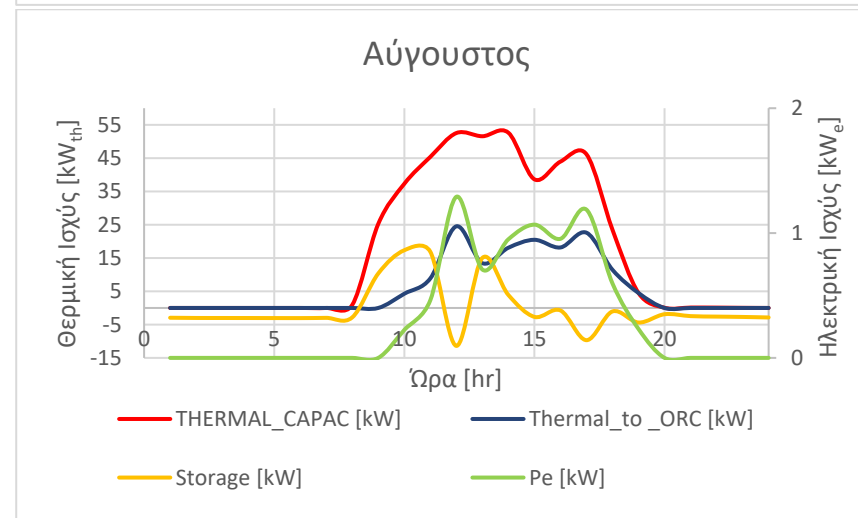
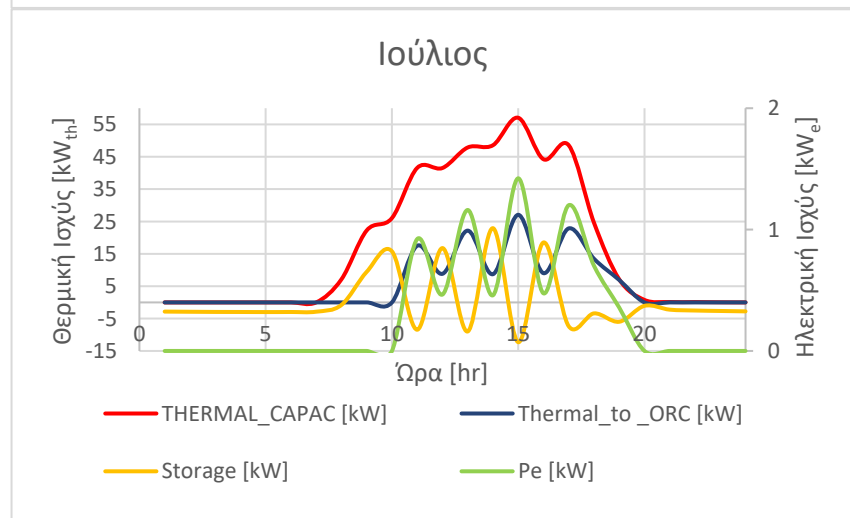
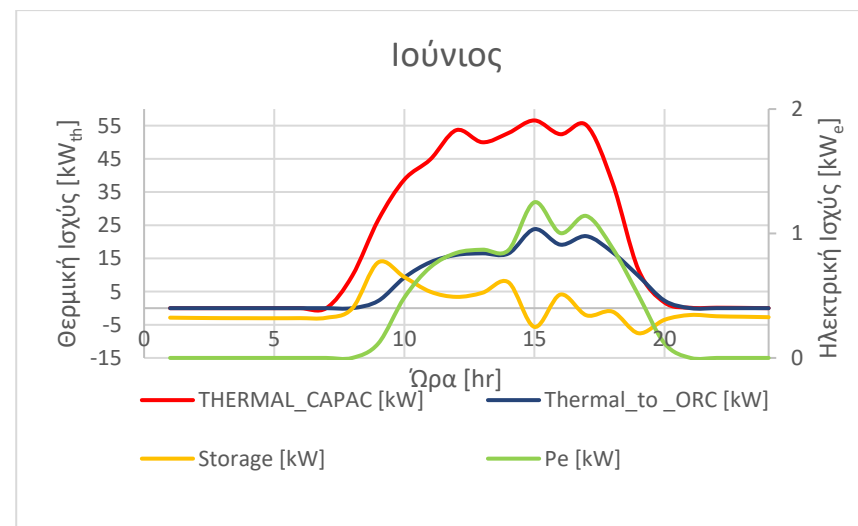
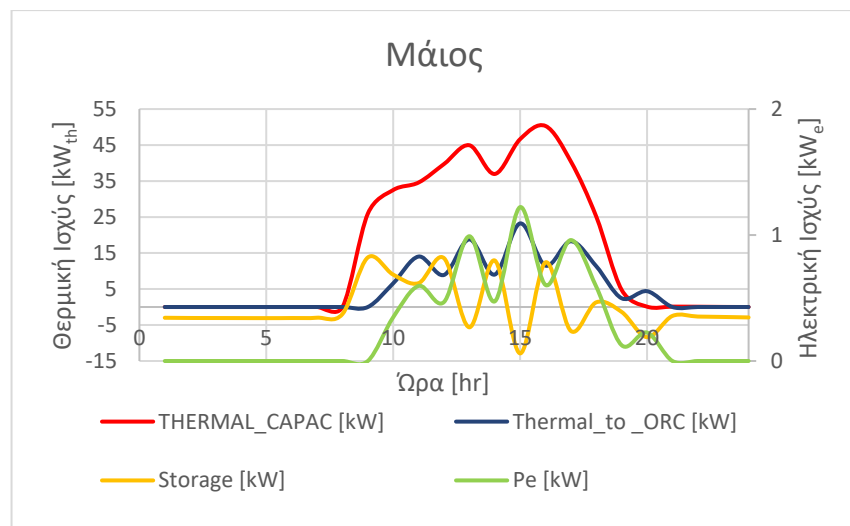
Κατά τους μήνες Νοέμβριο μέχρι και Φεβρουάριο, παρόμοιο προφίλ με αυτό της θερμικής ισχύος (με μια χρονική υστέρηση στη απόδοση της θερμότητας) παρουσιάζει και ο ρυθμός φόρτισης του δοχείου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (Storage). Τους υπόλοιπους μήνες παρουσιάζει έντονη διακύμανση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όταν η θερμοκρασία εντός του TES ξεπεράσει τους 80°C , ξεκινά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να «εκφορτίζεται» το δοχείο. Εφόσον όμως υπάρχει ηλιοφάνεια και συνεχίζει η παραγωγή θερμικής ενέργειας από το CSP, τότε το Storage ξαναποκτά ανοδική πορεία («φόρτιση» TES) και κοκ. Πολλές φορές η τιμή του ρυθμού αποθήκευσης παίρνει και αρνητικές τιμές (σχήματα 6.9α, 6.9β, 6.9γ).

Οι καμπύλες της θερμικής ισχύος που προσδίδεται στην γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ORC (Thermal_to_ORC) και αυτή που αφορά στην ηλεκτρική ισχύ (P_e) παρουσιάζουν παρόμοιο προφίλ (επίσης με μια χρονική υστέρηση), το οποίο είναι αντίθετο από αυτό του ρυθμού αποθήκευσης στο δοχείο (Storage). Δηλαδή παρουσιάζουν ελάχιστο στη μέγιστη τιμή του ρυθμού αποθήκευσης και μέγιστο στην ελάχιστη τιμή του ρυθμού αποθήκευσης. Κατά το μήνα Μάιο, παρατηρείται σε έντονο βαθμό, πως οι καμπύλες Thermal_to_ORC και P_e έχουν θετικές τιμές ακόμη και μετά από την παύση της παραγωγής θερμικής ενέργειας. Αυτό σημαίνει πως ακόμη και αφού σταματήσει η φόρτιση του TES, λόγω απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας, υπάρχει απόθεμα σε θερμική ενέργεια, εντός του δοχείου, που μπορεί να τροφοδοτήσει την γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (σχήματα 6.9α, 6.9β, 6.9γ).

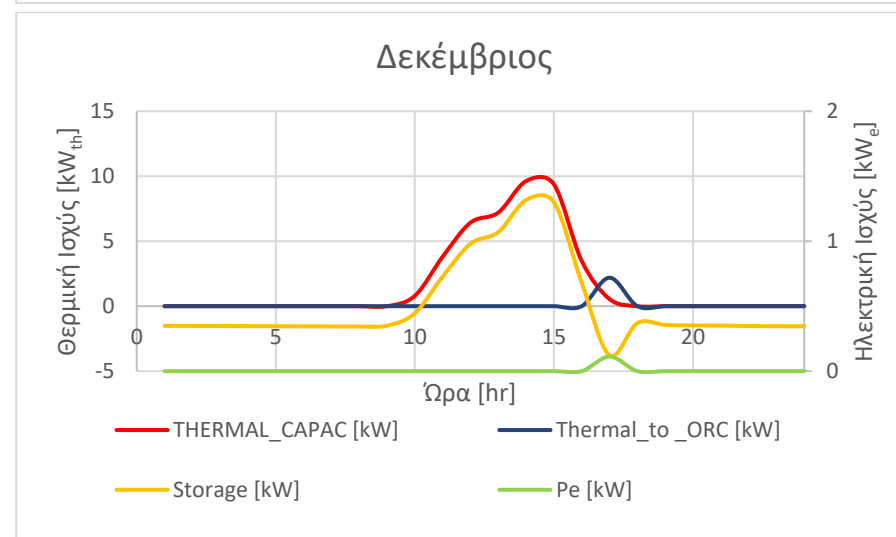
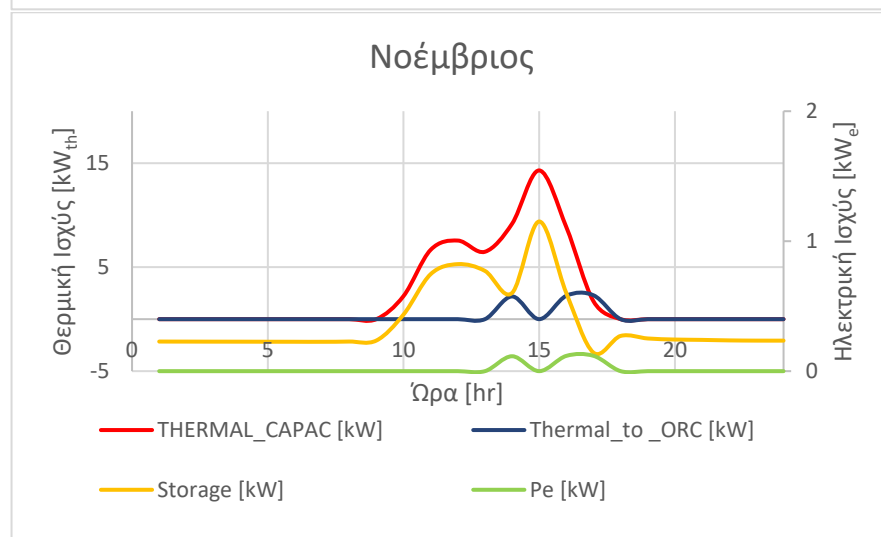
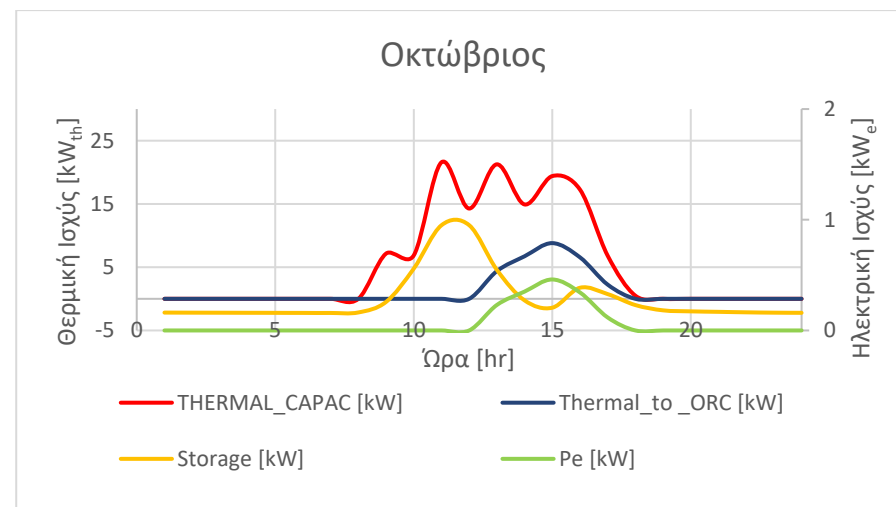
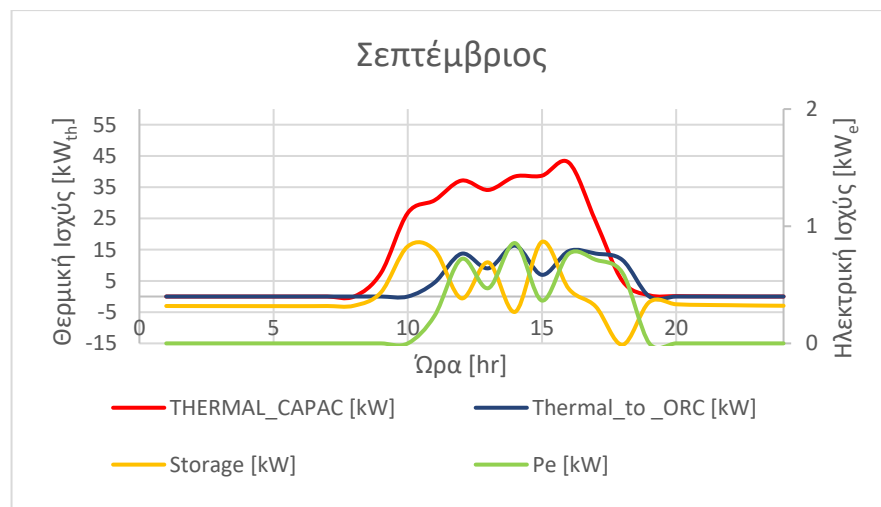
Στη συνέχεια ακολουθούν διαγράμματα όπου απεικονίζεται η ηλεκτρική ισχύς (P_e) από τη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ORC ανάλογα με τη διακύμανση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Beam_RAD) που προσπίπτει στον ηλιακό συλλέκτη κατά τη διάρκεια μιας μέσης μέρας, για κάθε μήνα (σχήματα 6.10α, 6.10β, 6.10γ). Το χειμώνα η παραγωγή είναι ελάχιστη και παρατηρείται πως είναι μετατοπισμένη προς το τέλος της μέρας (Δεκέμβριος και Ιανουάριος). Όπως αναμενόταν η ηλεκτρική ισχύς αυξάνεται σημαντικά και σε απόλυτη τιμή, αλλά και σε διάρκεια παραγωγής, τους καλοκαιρινούς κυρίως μήνες. Η τιμή της κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο πλησιάζει το $1,5\text{kW}_e$ και είναι ορατές οι έντονες διακυμάνσεις καθ' όλη τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, γεγονός που οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στην «φορτιση-εκφορτιση» του TES, ακόμη και τέσσερις φορές, σε μια μέρα (σχήμα 6.9β - Ιούλιος).



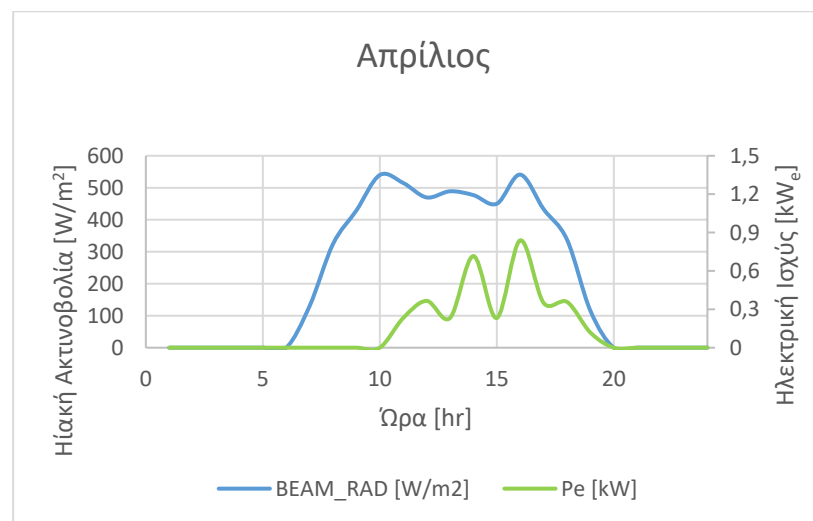
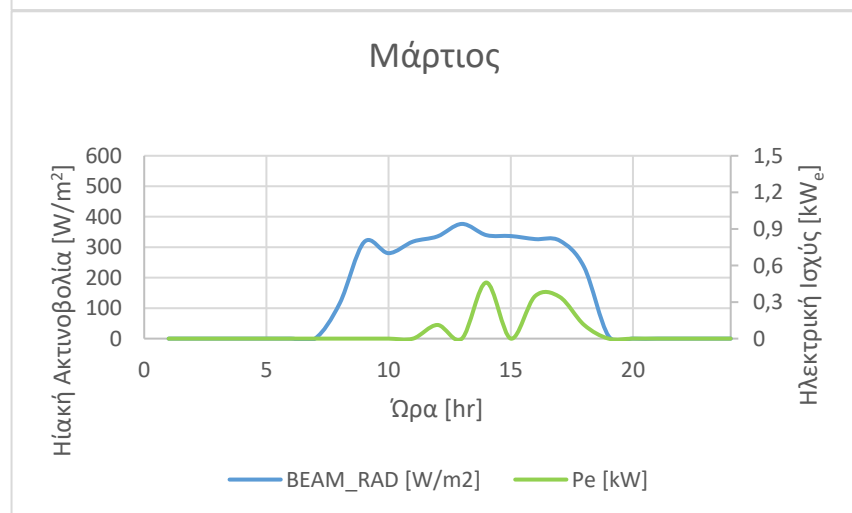
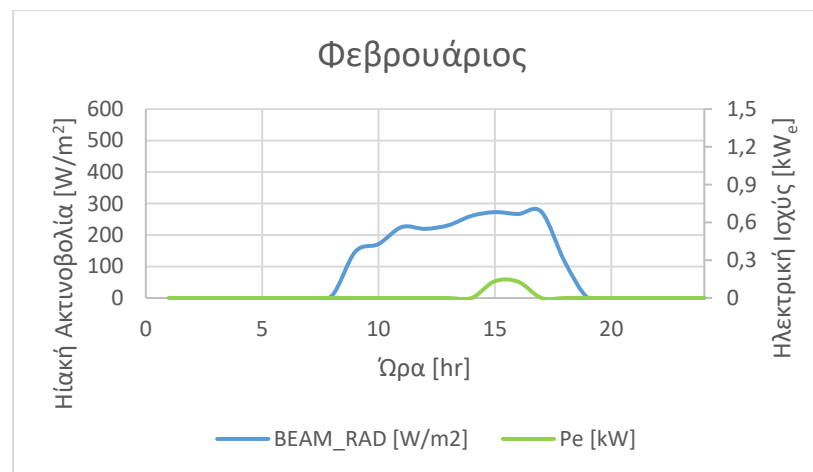
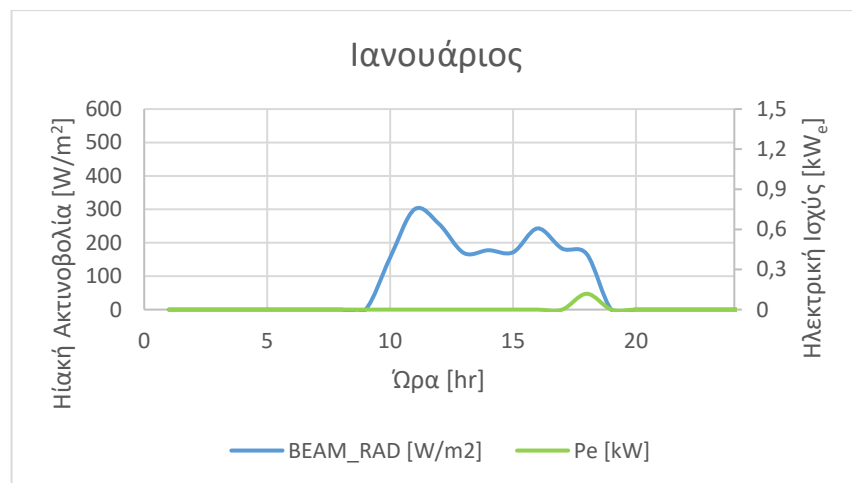
Σχήμα 6.9α : Διακυμάνσεις Ισχύος μέσης μηνιαίας μέρας



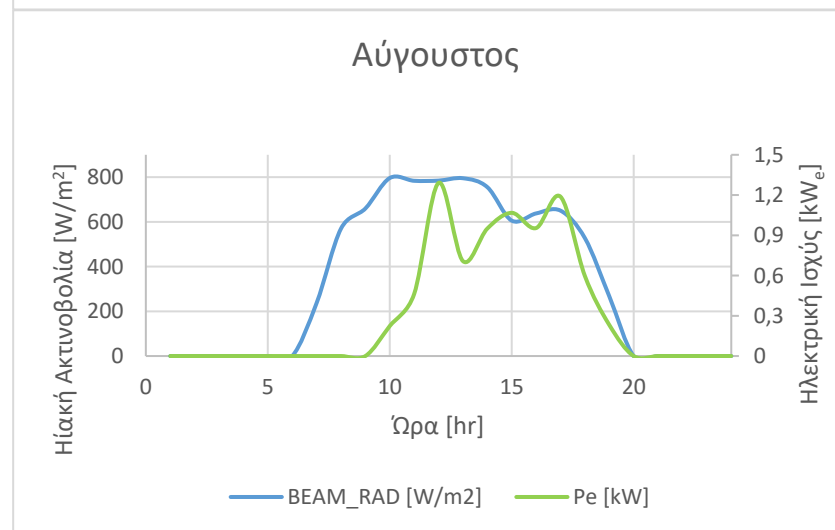
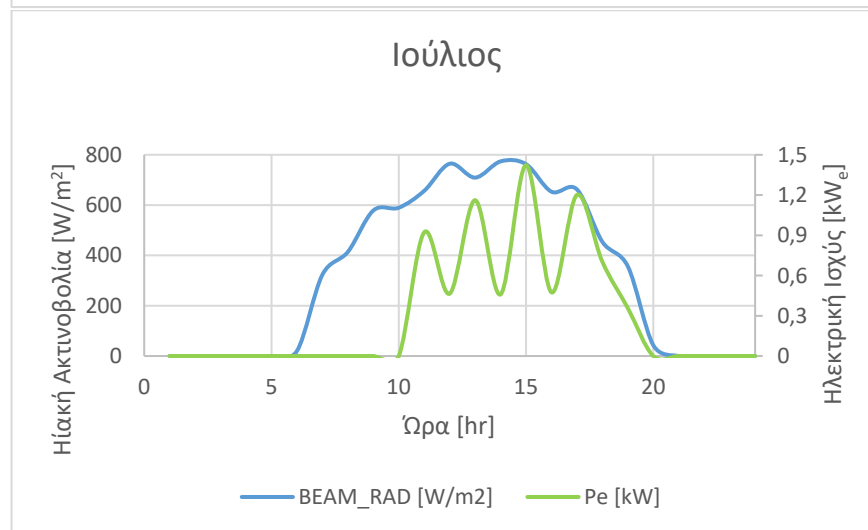
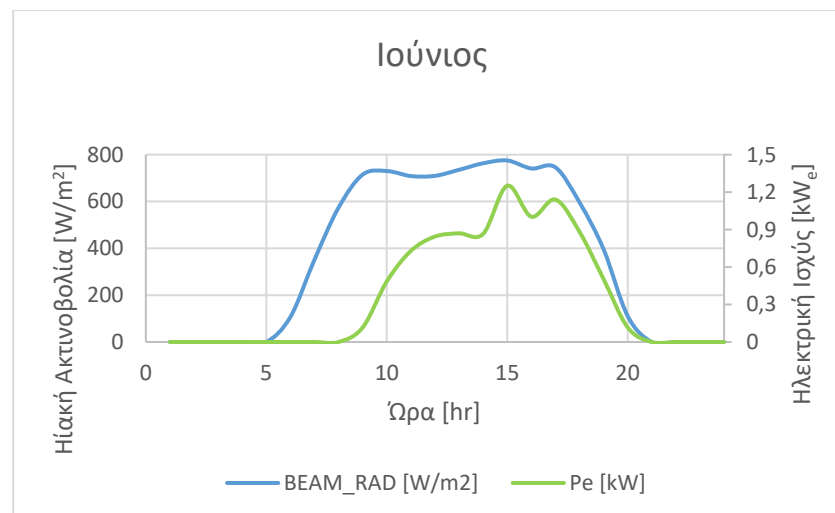
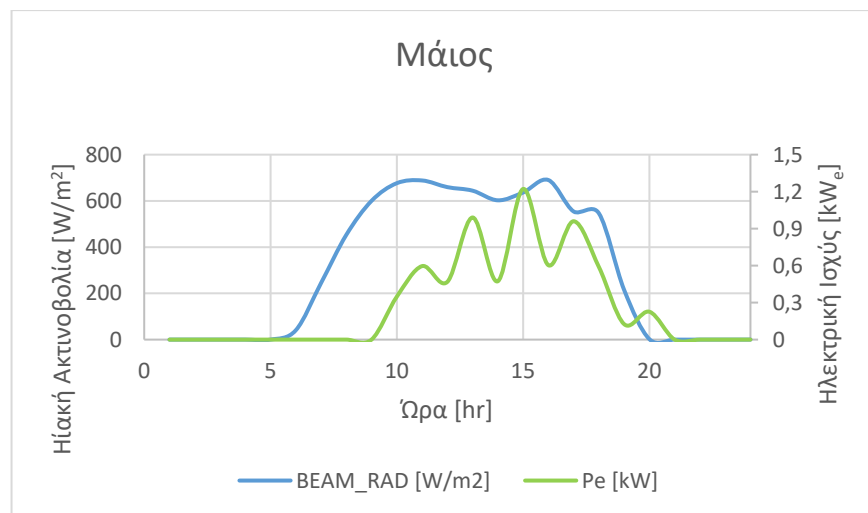
Σχήμα 6.9β : Διακυμάνσεις Ισχύος μέσης μηνιαίας μέρας



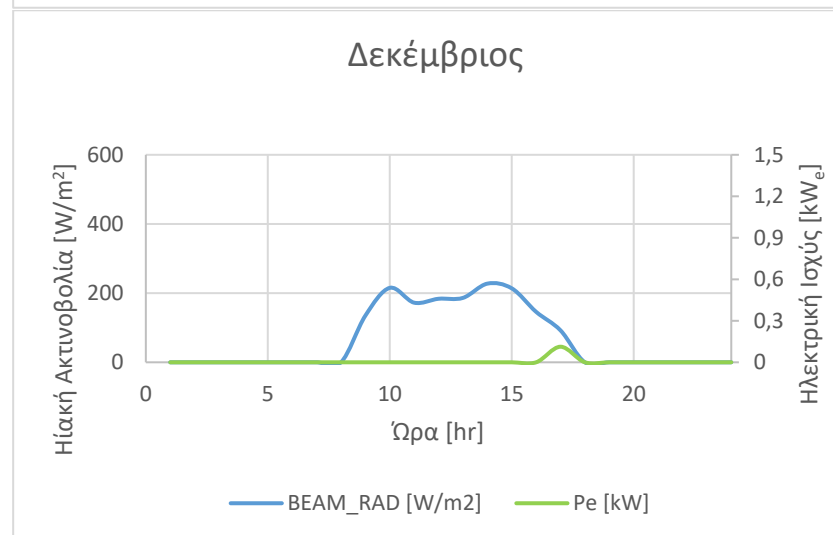
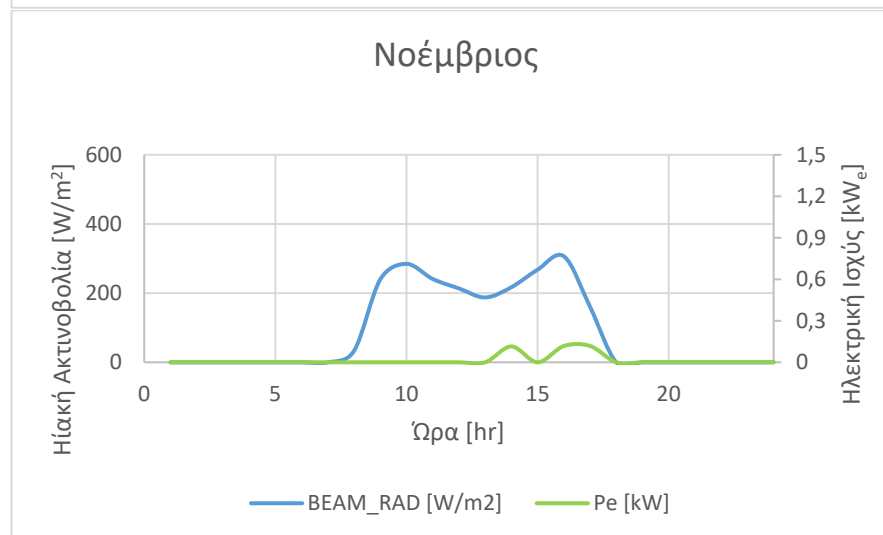
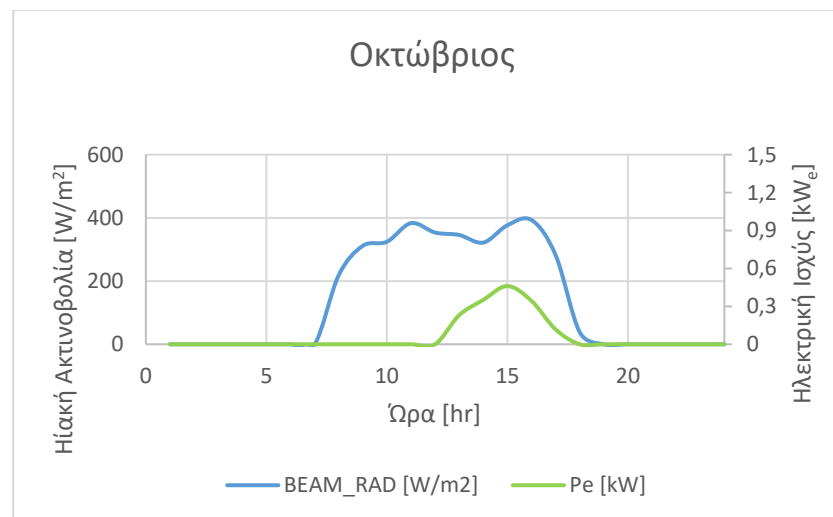
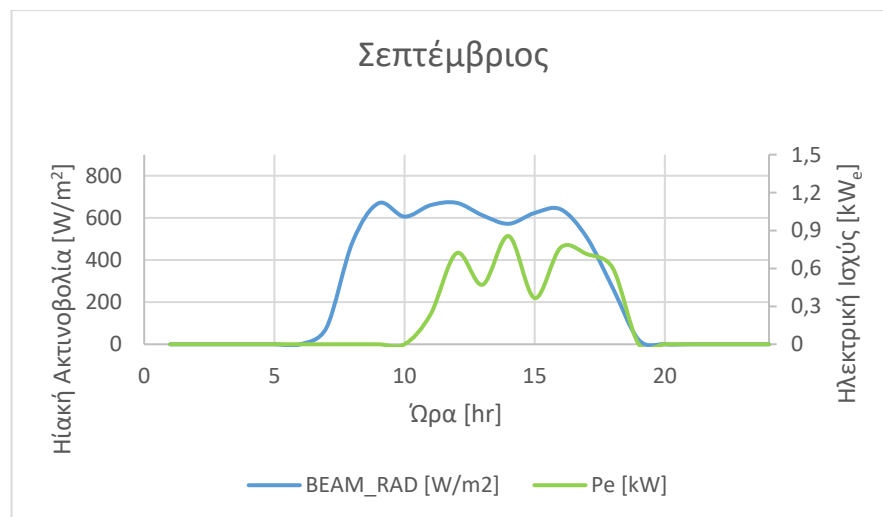
Σχήμα 6.9γ : Διακυμάνσεις ισχύος μέσης μηνιαίας μέρας



Σχήμα 6.10α : Διακύμανση ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία



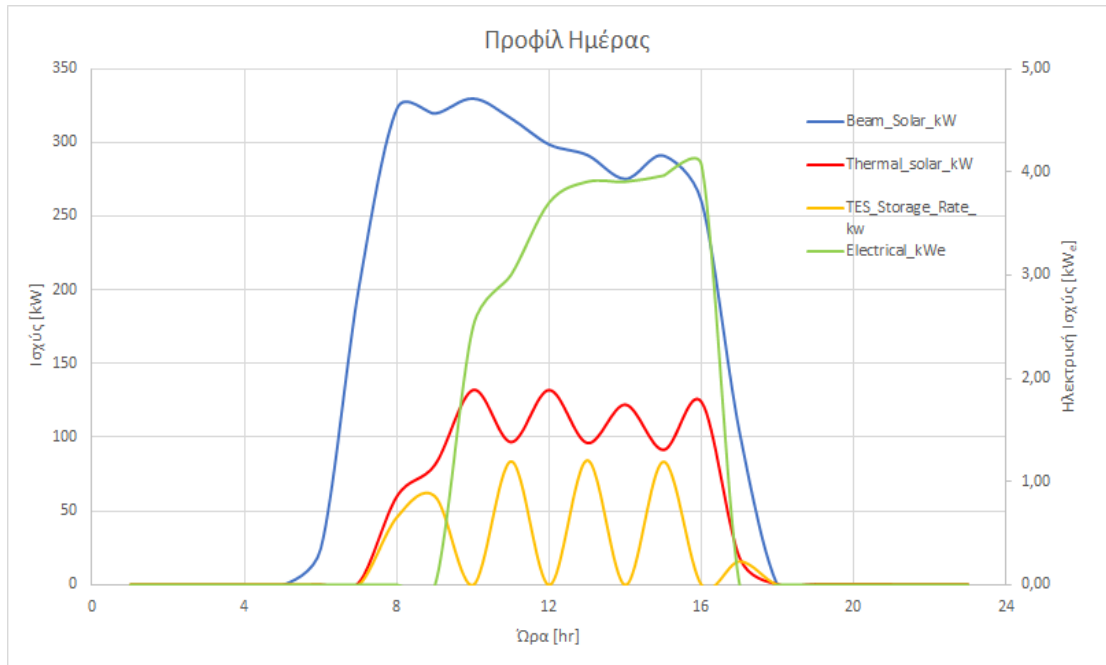
Σχήμα 6.10β : Διακύμανση ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία



Σχήμα 6.10γ : Διακύμανση ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία

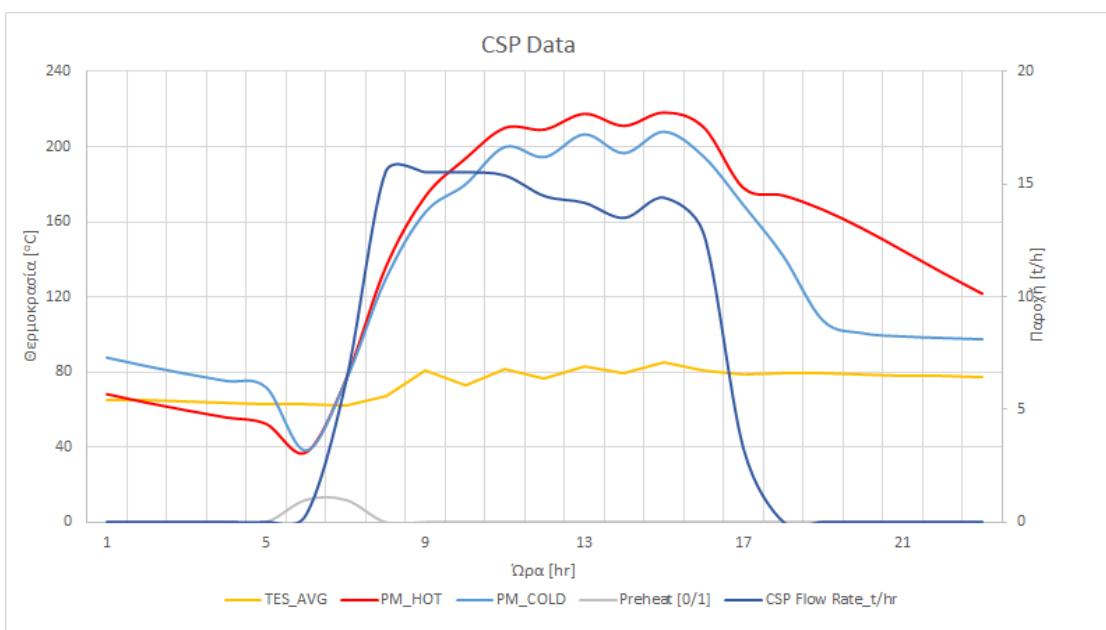
6.4 Ημερήσια αποτελέσματα

Ενδεικτικά παρατίθενται διαγράμματα με τα αποτελέσματα που αφορούν στις σημαντικότερες παραμέτρους λειτουργίας του σταθμού, για μια μέρα. (22 Αυγούστου).



Σχήμα 6.11: Ημερήσια διακύμανση μορφών ενέργειας

Από το σχήμα 6.11 είναι εμφανείς οι διακυμάνσεις που αφορούν στη θερμική ισχύ (Thermal_solar) και στο ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης του δοχείου (TES_Storage_Rate). Επίσης, όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, η ηλεκτρική ισχύς P_e υπερβαίνει τα 4kW, πλησιάζοντας την ονομαστική ισχύ που δίνει ο κατασκευαστής της εγκατεστημένης γεννήτριας ORC.



Σχήμα 6.12: Ημερήσια διακύμανση βασικών παραμέτρων αντλιοστασίου

Στο σχήμα 6.12, απεικονίζονται οι διακυμάνσεις βασικών παραμέτρων του αντλιοστασίου, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.3.3. Η παροχή του θερμικού ελαίου (CSP Flow Rate) επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του εγκατεστημένου κυκλοφορητή και είναι ανάλογη της ηλιακής ακτινοβολίας, φτάνοντας ακόμη και τους 15,5t/hr. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα είναι εμφανές και το χρονικό διάστημα, στη διάρκεια του οποίου γίνεται η προθέρμανση του θερμικού ελαίου («preheat»), προτού αυτό αρχίσει να προσδίδει τη θερμική του ενέργεια στο μέσο αποθήκευσης του TES («transferring»), όπως ακριβώς λειτουργεί στο πραγματικό σύστημα. Δηλαδή, μόλις η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας εξόδου του HTF από το ηλιοθερμικό πεδίο (PM_HOT) και της μέσης θερμοκρασίας του TES ξεπεράσει τους 40°C, τότε το σύστημα από τη συνθήκη «preheat», μεταβαίνει στη συνθήκη «transferring». Οι διακυμάνσεις στην καμπυλη της μέσης θερμοκρασίας του δοχείου αποθήκευσης οφείλονται στην παροχή θερμικής ενέργειας προς τη γεννήτρια ORC, όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Στον πίνακα 6.1 αναγράφεται η ημερήσια παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την προστίπτουσα άμεση ηλιακή ενέργεια. Έτσι η ο συντελεστής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική είναι 31,5%, ενώ ο συντελεστής μετατροπής από τη θερμική ενέργεια που τροφοδοτεί τη γεννήτρια σε ηλεκτρική είναι 5,2%.

Πίνακας 6.1: Ημερήσια παραγωγή

Μορφή Ενέργειας	Ποσότητα	Απόδοση
Άμεση Ηλιακή Ενέργεια	3037,55 kWh	
Θερμική Ενέργεια	957,60 kWh _{th}	31,5%
Ηλεκτρική Ενέργεια	15,54 kWh _e	5,2%

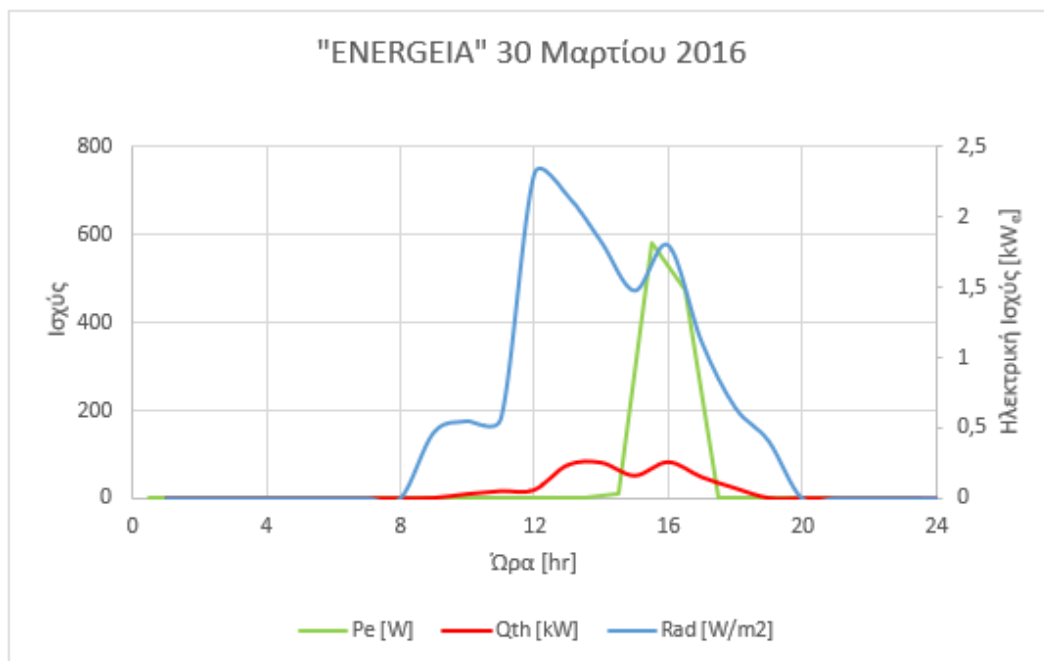
6.5 Επαλήθευση Προσομοίωσης

Προκειμένου να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του μοντέλου προσομοίωσης έγινε μια προσπάθεια επαλήθευσης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα αρχεία δεδομένων εξόδου του TRNSYS με πραγματικά δεδομένα (ένα πολύ μικρό δείγμα παρατίθεται στο Παράρτημα Δ), που έχουν καταγραφεί από το σύστημα καταγραφής του υβριδικού πάρκου. Θα πρέπει αν επισημανθεί πως δεν υπάρχει ποιοτική βάση πραγματικών δεδομένων από το ηλιοθερμικό πεδίο του έργου «ENERGEIA», καθώς κατά την εκπόνηση της διπλωματικής παρουσιαζόντουσαν συνεχώς προβλήματα τεχνικής φύσης που αφορούσαν την λειτουργία του σταθμού, αλλά κυρίως την γεννήτρια ORC. Επειδή ο όγκος των δεδομένων και από τις δύο πηγές είναι πολύ μεγάλος, κάνοντας εξαιρετικά δύσκολη την επεξεργασία τους. Για τους λόγους αυτούς, επιλέχθηκε μια ημέρα με ολοκληρωμένα δεδομένα από το πάρκο και μια ημέρα στο TRNSYS με παρόμοια προστίπτουσα ηλιακή ενέργεια και ενδεικτικά παρατίθενται δύο ημερήσια διαγράμματα διακύμανσης της θερμικής και ηλεκτρικής ισχύος (σχήματα 6.13 και 6.14), προκειμένου να συγκριθούν.

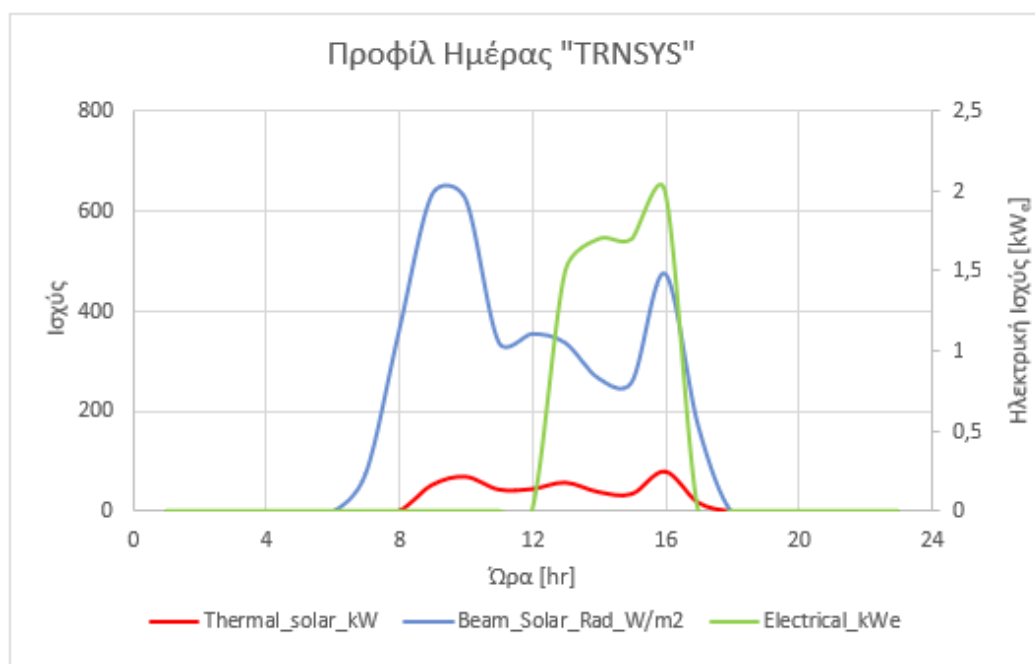
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πίνακα 6.2, όσων αφορά στην απόδοση του ηλιοθερμικού πεδίου, ο συντελεστής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική είναι σχεδόν ίδιος, με το μοντέλο προσομοίωσης να παρουσιάζει ≈1,7% μεγαλύτερη απόδοση. Σχετικά με το συντελεστή μετατροπής από θερμική σε ηλεκτρική ενέργεια, το μοντέλο του TRNSYS δίνει σχεδόν διπλάσια απόδοση, 5,04 % έναντι 2,7% της απόδοσης από τα πραγματικά δεδομένα του «ENERGEIA». Θα πρέπει να επισημανθεί πως το 2,7% απέχει πολύ από την απόδοση 5-7% που δίνει ο κατασκευαστής της γεννήτριας ORC για θερμοκρασίες ρευστού 80 -90°C.

Πίνακας 6.2: Σύγκριση πραγματικών δεδομένων με αποτελέσματα του TRNSYS

	«ENERGEIA»		«TRNSYS»	
Μορφή Ενέργειας	Ποσότητα	Απόδοση	Ποσότητα	Απόδοση
Άμεση Ηλιακή Ενέργεια	1775,51 kWh		1766,90 kWh	
Θερμική Ενέργεια	403,66 kWh _{th}	22,73 %	431,67 kWh _{th}	24,43%
Ηλεκτρική Ενέργεια	3,33 kWh _e	2,7 %	6,90 kWh _e	5,04%



Σχήμα 6.13: Ημερήσια παραγωγή "ENERGEIA"



Σχήμα 6.14: Ημερήσια παραγωγή "TRNSYS"

Η διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των αποτελεσμάτων του TRNSYS με τα πραγματικά δεδομένα, μπορεί να οφείλονται στους εξής λόγους:

1. στα τεχνικά προβλήματα της εγκατάστασης και κυρίως της γεννήτριας ORC την περίοδο καταγραφής των δεδομένων, με ενδεχόμενο να μην έφτανε στη μέγιστη απόδοσή της.
2. στις διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες μεταξύ αυτών της προσομοίωσης και των πραγματικών που επικρατούν στην εγκατάσταση, που επηρεάζουν άμεσα τη μέση θερμοκρασία του TES και επομένως το πότε ξεκινά να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Σημειώνεται πως τα πραγματικά δεδομένα αφορούν μέρα μέσα στο Μάρτιο, ενώ τα δεδομένα του μοντέλου αφορούν μέρα εντός του Αυγούστου, που απλά παρουσιάζει παρόμοια ηλιακή προσπίπτουσα ενέργεια.
3. στις παραδοχές που έγιναν στις εξισώσεις που αφορούν στη μοντελοποίηση της λειτουργίας του κυκλοφορητή του ηλιοθερμικού πεδίου, αλλά κυρίως στη μοντελοποίηση της γεννήτριας ORC στο TRNSYS.
4. στη γενικότερη μοντελοποίηση των υποσυστημάτων του πάρκου και κυρίως στη μοντελοποίηση των αυτοματισμών που είναι εγκατεστημένοι.
5. στην καταλληλότητα κάποιων component, όπως για παράδειγμα του απλοποιημένου μοντέλου του παραβολικού συλλέκτη «Type 1288» ή στην αδυναμία πλήρους παραμετροποίησης κάποιων εξ αυτών που χρησιμοποιήθηκαν.

6.6 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της λειτουργίας του υφιστάμενου υβριδικού σταθμού παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (κατασκευασμένου στα πλαίσια του πιλοτικού έργου «ENERGEIA») στο λογισμικό υπολογιστικό πρόγραμμα TRNSYS. Όπως διαφαίνεται από τα παραπάνω, το συγκεκριμένο λογισμικό δύναται να αποτυπώσει τις τιμές από οποιαδήποτε παράμετρο των components, που χρησιμοποιήθηκαν μέσα στο μοντέλο, προκειμένου να επεξεργαστούν, με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την εικονική λειτουργία του σταθμού.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με πραγματικά δεδομένα, παρουσιάζονται κάποιες αποκλίσεις, ειδικά στην απόδοση της γεννήτριας της ORC, που μπορεί να οφείλονται σε τεχνικά θέματα της υφιστάμενης εγκατάστασης, σε διαφορετικά δεδομένα καιρού του μοντέλου από τα πραγματικά, στην καταλληλότητα και στην παραμετροποίηση ορισμένων components που χρησιμοποιήθηκαν, στη γενικότερη μοντελοποίηση των εγκατεστημένων υποσυστημάτων και κυρίως των αυτοματισμών που απαντώνται στο πάρκο και σε παραδοχές που έγιναν κατά την κατάσταση του μοντέλου.

Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η προσομοίωση της λειτουργίας του υφιστάμενου υβριδικού σταθμού παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευασμένου στο χωρίο Ζηλωτή του Νέου Ερασμίου, Δήμου Τοπείρου, Νομού Ξάνθης, στα πλαίσια του έργου «ENERGEIA», με τη βοήθεια του υπολογιστικού λογισμικού TRNSYS (της Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI 53703, USA).

Στην εν λόγω προσομοίωση δεν συμπεριλήφθηκαν τα θερμοκήπια, που ούτως ή άλλως δεν σχεδιάστηκαν στο μοντέλο. Επίσης, από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξαιρέθηκε το σύστημα της τηλεθέρμανσης, που αν και αποτυπώθηκε στο μοντέλο, τα αποτελέσματα δεν κρίθηκαν αποδεκτά και επίσης δεν υπήρχαν πραγματικά δεδομένα ώστε να επαληθευτούν.

Γενικότερα, από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, συμπεραίνεται πως, ποιοτικά το μοντέλο παρουσιάζει κατά μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας, καθώς παράμετροι όπως θερμοκρασίες ρευστών (π.χ. του HTF και του μέσου αποθήκευσης του TES), παρουσιάζουν τιμές παρόμοιες με τις πραγματικές που επικρατούν στο πεδίο. Για παράδειγμα στο μοντέλο η θερμοκρασία του θερμικού ελαίου HTF_HOT ξεπερνά τους 200°C και γενικά από τις τιμές που λαμβάνει το μέγεθος Thermal_Solar [kW] επαληθεύεται και η ονομαστική ισχύς του ηλιοθερμικού πεδίου ($\approx 234 \text{ kW}_{th}$), που δίνει ο κατασκευαστής του. Επίσης, από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται πως η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας αυξάνεται σημαντικά και σε απόλυτη τιμή, αλλά και σε διάρκεια παραγωγής, τους καλοκαιρινούς κυρίως μήνες. Όπως ακριβώς συμβαίνει και στην πραγματικότητα, στο μοντέλο προσομοιώνεται επιτυχώς και η «φορτίση-εκφορτίση» του TES, ακόμη και τέσσερις φορές, σε μια μέρα (σχήμα 6.9β - Ιούλιος). Τέλος, υπάρχουν περιπτώσεις όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια ακόμη και όταν έχει σταματήσει η παραγωγή θερμικής ενέργειας από το ηλιοθερμικό πεδίο και επομένως η «φόρτιση» του TES. Προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του ενεργειακού μοντέλου του TRNSYS και η ποιότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτή, με πραγματικά δεδομένα από τον εν λειτουργία σταθμό. Θα πρέπει να επισημανθεί πως ήταν δύσκολο να ανακτηθούν ποιοτικά πραγματικά δεδομένα για παραγωγή θερμικής αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας για μια ολόκληρη μέρα, εξαιτίας τεχνικών προβλημάτων και διακοπών στη λειτουργία του πάρκου. Έτσι επιλέχθηκε μια ενδεικτική ημέρα στην οποία υπήρχε παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας και συγκρίθηκε με μια μέρα από τα δεδομένα εξόδου του TRNSYS, με γνώμονα μόνο την παρόμοια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια και όχι γενικότερα τα καιρικά δεδομένα. Θα μπορούσε να επαληθευτεί πλήρως η αξιοπιστία του μοντέλου εφόσον τα δεδομένα από το πάρκο είχαν διάρκεια τουλάχιστον ενός έτους, ούτως ώστε να συγκριθούν οι παραγωγές θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας για το διάστημα ενός ολόκληρου έτους.

Προσεγγίζοντας το μοντέλο ποσοτικά, δε μπορούν να βγουν κάποια συμπεράσματα για μεγάλη χρονική περίοδο, καθώς, όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχουν ποιοτικά πραγματικά δεδομένα, χωρίς κενά. Από την προσπάθεια σύγκρισης μεταξύ των αποτελεσμάτων του TRNSYS με πραγματικά δεδομένα για μια μέρα, μπορεί να συμπεράνει κανείς πως η παραγωγή θερμικής ενέργειας για την ίδια ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών είναι σχεδόν ίδια, με το μοντέλο του TRNSYS να δίνει 1,7% υψηλότερο συντελεστή μετατροπής της προσπίπτουσας ηλιακής σε θερμική ενέργεια. Όσον αφορά στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, το μοντέλο παρουσιάζει σχεδόν διπλάσιο συντελεστή μετατροπής της θερμικής σε ηλεκτρική (5,04% έναντι 2,70%). Οι αποκλίσεις αυτές μπορεί να οφείλονται:

1. σε τεχνικά προβλήματα της εγκατάστασης και κυρίως της γεννήτριας ORC, με ενδεχόμενο να μην έφτανε στη μέγιστη απόδοσή της. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι η απόδοση της γεννήτριας, βάσει των πραγματικών δεδομένων, για την ημέρα σύγκρισης είναι μόλις 2,70% (ενώ ο κατασκευαστής δίνει 5-7%).
2. σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες μεταξύ της προσομοίωσης και των πραγματικών που επικρατούν στην εγκατάσταση.
3. στις παραδοχές που έγιναν στις εξισώσεις που αφορούν στη λειτουργία του κυκλοφορητή του ηλιοθερμικού πεδίου, αλλά κυρίως στη μοντελοποίηση της γεννήτριας ORC.
4. στη γενικότερη μοντελοποίηση των υποσυστημάτων του πάρκου και κυρίως στη μοντελοποίηση των αυτοματισμών που είναι εγκατεστημένοι.
5. στην καταλληλότητα κάποιων component, όπως για παράδειγμα του απλοποιημένου μοντέλου του παραβολικού συλλέκτη «Type 1288» ή στην αδυναμία πλήρους παραμετροποίησης κάποιων εξ αυτών που χρησιμοποιήθηκαν.

Παρατηρήθηκε, λοιπόν, ότι το μοντέλο που σχεδιάστηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα TRNSYS παρουσιάζει αρκετά αξιόπιστη λειτουργία, η οποία θα μπορέσει να επαληθευτεί πλήρως αν συλλεχθούν πραγματικά δεδομένα για έναν ολόκληρο χρόνο και συγκριθούν με αυτά του μοντέλου. Παρόλα' αυτά, χρίζει βελτίωσης προκειμένου να βελτιστοποιηθεί, ώστε να είναι πιο αξιόπιστο και να χαρακτηρίζεται από ρεαλιστικότερη λειτουργία. Με τον τρόπο αυτό, από την εκτέλεση της προσομοίωσης του συγκεκριμένου ενεργειακού μοντέλου, θα είναι εφικτή η εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων που αφορούν στη λειτουργία του σταθμού. Διαπιστώνεται, επίσης, ότι για το σχεδιασμό και την προσομοίωση συστημάτων που χαρακτηρίζονται από τέτοια πολυπλοκότητα, απαιτούνται συνεχείς δοκιμές και βελτιώσεις του μοντέλου προκειμένου τα αποτελέσματα να θεωρηθούν αξιόπιστα.

Μελλοντικά, το μοντέλο που καταστρώθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, μπορεί να υποστεί κάποιες βασικές βελτιώσεις, κυρίως στην παραμετροποίηση κάποιων component που χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να βελτιστοποιηθούν οι εξισώσεις λειτουργίας του κυκλοφορητή ώστε να είναι δυνατή η πλήρης εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας από τους παραβολικούς συλλέκτες. Επίσης, στο ίδιο πλαίσιο, για μεγαλύτερη ακρίβεια, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός και πιο αναλυτικός τύπος παραβολικού συλλέκτη, ο οποίος θα απαιτούσε μεν περισσότερες παραμέτρους για να λειτουργήσει, αλλά θα έδινε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Τέλος, εφόσον, συγκεντρώνοντας όλα τα απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιώντας κάποια από τα υπάρχοντα components του TRNSYS, γίνει η παραμετροποίηση της γεννήτριας ORC, τότε ενδεχομένως να επιτευχθεί πλήρης συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα πραγματικά δεδομένα.

Επιπρόσθετα, για να μπορούσε να συνυπολογιστεί και το σύστημα τηλεθέρμανσης στην προσομοίωση απαιτούνται πραγματικές τιμές λειτουργίας της υφιστάμενης εγκατάστασης, προκειμένου να επαληθευτούν οι τιμές που δίνει το λογισμικό προσομοίωσης. Επίσης, θα ήταν ορθότερο στο μοντέλο να προστεθούν και τα υφιστάμενα θερμοκήπια, ακόμη και ο κομποστοποιητής, καθώς τα θερμικά τους φορτία επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό το δίκτυο της τηλεθέρμανσης και γενικότερα το ενεργειακό ισοζύγιο του υβριδικού πάρκου, κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο. Στις παραπάνω περιπτώσεις, είναι υποχρεωτική η προσθήκη επιπλέον αυτοματισμών και ελεγκτών στο μοντέλο, καθώς πλησιάζοντας ακόμη περισσότερο στην πραγματική εγκατάσταση, γίνεται ακόμη πιο πολύπλοκο. Επιπλέον, θα ήταν σημαντικό για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων σχετικά με την ποιότητα του μοντέλου να επαναληφθεί η προσομοίωση του συστήματος με τη χρήση των πραγματικών κλιματολογικών δεδομένων της περιοχής της Ζηλωτής.

Εν κατακλείδι, αν έπειτα από την απαιτούμενη έρευνα τροποποιηθεί το υπάρχον μοντέλο (όπως περιγράφηκε παραπάνω), συλλεχθεί το απαραίτητο πλήθος πραγματικών δεδομένων από το σύστημα καταγραφής του πάρκου, προκειμένου να επαληθευτεί πλήρως η αξιοπιστία του, τότε θα παρουσιαστεί μια πληθώρα δυνατοτήτων.

Μια από αυτές θα είναι ο έλεγχος της λειτουργίας του σταθμού, μέσω του μοντέλου σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας στους διαχειριστές τη δυνατότητα πρόβλεψης μιας ενδεχόμενης βλάβης, ώστε να προληφθούν ενδεχόμενες δυσμενείς καταστάσεις.

Επίσης, με κάποιες παραλλαγές στο μοντέλο, π.χ. ενός component με κάποιο πιο σύγχρονο ή κάποιων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES), θα μπορούν να εξαχθούν μοντέλα πρόβλεψης βιωσιμότητας των διαφόρων παραλλαγών της εγκατάστασης.

Τέλος, θα υπάρχει η δυνατότητα περαίωσης των σκοπών για τους οποίους κατασκευάστηκε το συγκεκριμένο πιλοτικό έργο, που είναι:

1. η διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από τον συνδυασμό ηλιακών παραβολικών κατόπτρων και γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας.
2. η βελτιστοποίηση της τεχνικής υβριδοποίησης των δύο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προκειμένου να εξυπηρετηθούν τα ηλεκτρικά και θερμικά φορτία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Ιδιότητες Θερμικού Ελαίου (HTF)

Temperature °C	Density kg/m ³	Thermal Conductivity W/m.K	Heat Capacity kJ/kg.K	Viscosity		Vapour pressure (absolute) kPa*
				Dynamic mPa.s	Kinematic mm ² /s**	
-10	892	0.132	1.798	308.6	346	-
0	885	0.131	1.834	143.3	162	-
10	878	0.130	1.870	73.8	84	-
20	872	0.128	1.906	41.6	47.70	-
30	865	0.127	1.942	25.2	29.10	-
40	858	0.126	1.978	16.3	18.99	-
50	852	0.125	2.013	11.1	13.05	-
60	845	0.124	2.049	7.90	9.39	-
70	838	0.123	2.085	5.90	7.02	-
80	831	0.122	2.120	4.50	5.43	-
90	825	0.120	2.156	3.56	4.32	-
100	818	0.119	2.191	2.88	3.52	-
110	811	0.118	2.227	2.38	2.93	-
120	804	0.117	2.262	2.00	2.49	-
130	797	0.116	2.297	1.71	2.14	0.1
140	790	0.115	2.333	1.48	1.87	0.2
150	783	0.113	2.368	1.29	1.65	0.3
160	777	0.112	2.403	1.14	1.47	0.5
170	770	0.111	2.438	1.02	1.32	0.7
180	762	0.110	2.474	0.91	1.20	1.1
190	755	0.109	2.509	0.82	1.09	1.5
200	748	0.107	2.544	0.75	1.00	2.2
210	741	0.106	2.579	0.68	0.92	3.0
220	734	0.105	2.614	0.63	0.85	4.1
230	726	0.104	2.649	0.57	0.79	5.5
240	719	0.103	2.684	0.53	0.74	7.4
250	711	0.102	2.719	0.49	0.69	9.8
260	704	0.100	2.755	0.45	0.64	12.8
270	696	0.099	2.790	0.42	0.60	16.6
280	688	0.098	2.825	0.39	0.56	21.3
290	680	0.097	2.860	0.36	0.53	27.2
300	672	0.096	2.896	0.33	0.50	34.4
310	663	0.094	2.932	0.31	0.47	43.1
320	655	0.093	2.967	0.29	0.44	53.7
330	646	0.092	3.003	0.27	0.42	66.3
335	642	0.091	3.022	0.26	0.40	73.6

* 1 bar = 100 kPa - ** 1 mm²/s = 1 cSt

Note: Values quoted are typical values obtained in the laboratory from production samples. Other samples might exhibit slightly different data. Specifications are subject to change. Write to Solutia for current sales specifications.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Αρχείο «output.lst»

TRNSYS - the TRAnsient SYstem Simulation program

The Solar Energy Lab at the University of Wisconsin - Madison, USA

Le Centre Scientifique et Technique du Batiment, Sophia Antipolis, France

Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart, Germany

Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison Wisconsin, USA

Release 17.02.0004

Listing file for: "****.dck"

*** Notice at time : 0.000000

Generated by Unit : Not applicable or not available

Generated by Type : Not applicable or not available

Message : The TRNSYS Executable (TRNExe.exe) and main DLL (TRNDll.dll) are located in "C:\Trnsys17\Exe"

*** Pre-Processing the TRNSYS EQUATIONS and CONSTANTS to check for fatal errors.

*** Pre-Processing of EQUATIONS and CONSTANTS completed with no fatal errors found.

*** Evaluating the EQUATIONS and CONSTANTS to determine their initial values.

*** Finished evaluating the EQUATIONS and CONSTANTS and ready to begin processing the remainder of the TRNSYS input file.

VERSION 17

*** TRNSYS input file (deck) generated by TrnsysStudio

*** on Thursday, June 28, 2018 at 17:47

*** from TrnsysStudio project: E:\-(CLOUD APPS)--(GoogleDrive)\-(1.Διπλωματική At last\1.TRNSYS\1.Final\1.---FINAL(NO_DISTRICT)---\--FINAL2(NO DISTRICT HEATING) outputs--.tpf

*** 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=0

```

STOP=8760

STEP=1

! Start time  End time  Time step
SIMULATION    0.000000000000000E+00  8.760000000000000E+03  1.000000000000000E+00

! Integration Convergence
TOLERANCES    1.000000000000000E-03  1.000000000000000E-03

! Max iterations      Max warnings      Trace limit
LIMITS    30  2000  51

! 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

* User defined CONSTANTS
* Model "Collector 1" (Type 1288)
*
UNIT  2  TYPE 1288  1
*$UNIT_NAME Collector 1
*$MODEL .\Solar Library (TESS)\Concentrating Collectors\Parabolic Trough Collectors\EN12975 Dynamic Efficiency Approach\Type1288_Concentrator.tmf
*$POSITION 317 813
*$LAYER Main #
PARAMETERS  16

! 1 Number in Series
! 2 Collector Array Area
! 3 Fluid Specific Heat

```

```

! 4 Collector F*TauAlpha Product
! 5 Logical Unit for IAM Data
! 6 Number of Transverse Angles
! 7 Number of Longitudinal Angles
! 8 IAM for Diffuse Radiation
! 9 Collector Efficiency Coefficient c1
! 10 Collector Efficiency Coefficient c2
! 11 Collector Efficiency Coefficient c3
! 12 Collector Efficiency Coefficient c4
! 13 Collector Efficiency Coefficient c5
! 14 Collector Efficiency Coefficient c6
! 15 Number of Nodes per Collector
! 16 Initial Collector Temperature
    1.000000000000000E+00  7.535999999999999E+01  2.227000000000000E+00  7.000000000000000E-01  1.060000000000000E+02
    8.000000000000000E+00  7.000000000000000E+00  1.200000000000000E-01  1.944000000000000E+00  1.152000000000000E-02
    0.000000000000000E+00  0.000000000000000E+00  7.799999999999998E+00  0.000000000000000E+00  5.000000000000000E+01
    2.000000000000000E+01
INPUTS  13
! Flex c1:Temperature at Outlet A ->Inlet Temperature
! Flex c1:Flowrate at Outlet A ->Array Inlet Flowrate
! Solar Equations:T_Ambient ->Ambient Temperature
! [unconnected] Sky Temperature
! Solar Equations:Beam_MidRow ->Beam Radiation on the Tilted Surface
! [unconnected] Sky Diffuse Radiation on Tilt
! [unconnected] Ground Diffuse Radiation on Tilt
! [unconnected] Collector Slope
! Solar Equations:AngleIncidence ->Incidence Angle
! [unconnected] Collector Azimuth Angle
! [unconnected] Solar Zenith Angle
! [unconnected] Solar Azimuth Angle
! [unconnected] Wind Velocity
    7,1      7,2      T_AMBIENT      CONST      BEAM_MIDROW
    CONST      CONST      CONST      ANGLEINCIDENCE      CONST
    CONST      CONST      CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
    2.000000000000000E+01  1.000000000000000E+02  1.000000000000000E+01  1.000000000000000E+01  0.000000000000000E+00
    0.000000000000000E+00  0.000000000000000E+00  4.500000000000000E+01  4.500000000000000E+01  0.000000000000000E+00
    4.500000000000000E+01  4.500000000000000E+01  0.000000000000000E+00
*** External files

```

ASSIGN C:\Trnsys17\Tess Models\SampleCatalogData\Bi-Axial IAMs\Typical_LinearFresnel_IAM_2d.dat 106

*|? Which file contains the IAM data for this collector? |1000

*-----

* Model "Pipe c1-c2" (Type 604)

*

UNIT 4 TYPE 604 c1-c2

*\$UNIT_NAME Pipe c1-c2

*\$MODEL .\Hydronics Library (TESS)\Circular Pipe\Isothermal Node Approach\Calculate External Convection Coefficient\Type604a.tmf

*\$POSITION 142 732

*\$LAYER Main #

PARAMETERS 23

! 1 Pipe Length

! 2 Pipe Inner Diameter

! 3 Pipe Outer Diameter

! 4 Pipe Density

! 5 Pipe Thermal Conductivity

! 6 Pipe Specific Heat

! 7 Insulation Thickness

! 8 Insulation Density

! 9 Insulation Thermal Conductivity

! 10 Insulation Specific Heat

! 11 Fluid Density

! 12 Fluid Thermal Conductivity

! 13 Fluid Specific Heat

! 14 Fluid Viscosity

! 15 Number of Fluid Nodes

! 16 Number of Pipe and Insulation Nodes

! 17 Initial Fluid Temperature

! 18 Initial Pipe Temperature

! 19 Initial Insulation Temperature

! 20 Surface Emissivity

! 21 Contact Resistance

! 22 Convection Mode

! 23 Pipe Orientation

6.500000000000000E+00	5.080000000000000E-02	5.943600000000000E-02	8.000000000000000E+03	5.047200000000000E+01
4.900000000000000E-01	5.000000000000000E-02	1.500000000000000E+02	1.295999999999999E-01	1.030000000000000E+00
8.110000000000000E+02	4.248000000000000E-01	2.227000000000000E+00	8.568000199999998E+01	1.000000000000000E+02
1.000000000000000E+01	2.000000000000000E+01	2.000000000000000E+01	2.000000000000000E+01	9.000000000000000E-01
0.000000000000000E+00	1.000000000000000E+00	1.000000000000000E+00		

```

INPUTS 7
! Collector 1:Outlet Temperature ->Temperature at Inlet A
! Collector 1:Outlet Flowrate ->Flowrate at Inlet A
! [unconnected] Temperature at Inlet B
! [unconnected] Flowrate at Inlet B
! Solar Equations:T_Ambient ->Ambient Temperature
! [unconnected] Ambient Pressure
! Solar Equations:Wind_Velocity ->Wind Velocity
      2,1      2,2      CONST      CONST      T_AMBIENT
      CONST      WIND_VELOCITY
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.000000000000000E+01  0.000000000000000E+00  2.000000000000000E+01  0.000000000000000E+00  2.000000000000000E+01
      1.000000000000000E+00  1.000000000000000E+01

*-----
* Model "Mixer 2" (Type 649)
*
UNIT 6 TYPE 649 2
*$UNIT_NAME Mixer 2
*$MODEL .\Hydronics Library (TESS)\Valves\Mixing Valve (100 Ports)\Other Fluids\Type649.tmf
*$POSITION 758 653
*$LAYER Main #
*$# Mixing Valve
      PARAMETERS 1
! 1 Number of Inlets
      2.000000000000000E+00
      INPUTS 4
! Flex c2:Temperature at Outlet A ->Temperature at Inlet-1
! Flex c2:Flowrate at Outlet A ->Flowrate at Inlet-1
! Pipe Hot loop2-loop1:Temperature at Outlet A ->Temperature at Inlet-2
! Pipe Hot loop2-loop1:Flowrate at Outlet A ->Flowrate at Inlet-2
      8,1      8,2      24,1      24,2
*** INITIAL INPUT VALUES
      2.000000000000000E+01  2.000000000000000E+02  2.000000000000000E+01  2.000000000000000E+02
*-----

* Model "Ideal Tracking" (Type 15)
*
UNIT 26 TYPE 15 Tracking

```



```

*$UNIT_NAME Ideal Tracking

*$MODEL .\Weather Data Reading and Processing\Standard Format\TMY2\Type15-2.tmf

*$POSITION 970 285

*$LAYER Main #

PARAMETERS 9

! 1 File Type

! 2 Logical unit

! 3 Tilted Surface Radiation Mode

! 4 Ground reflectance - no snow

! 5 Ground reflectance - snow cover

! 6 Number of surfaces

! 7 Tracking mode

! 8 Slope of surface

! 9 Azimuth of surface

2.000000000000000E+00 1.120000000000000E+02 3.000000000000000E+00 2.000000000000001E-01 7.000000000000007E-01

1.000000000000000E+00 3.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00

*** External files

ASSIGN C:\Trnsys17\Weather\Meteonorm\Europe\GR-Thessaloniki-166220.tm2 112

*]? Which file contains the TMY-2 weather data? |1000

*-----

* Model "Collector Array Shading" (Type 1262)

*

UNIT 27 TYPE 1262 Array Shading

*$UNIT_NAME Collector Array Shading

*$MODEL .\High Temperature Solar (TESS)\Array Shading\Type1262.tmf

*$POSITION 971 360

*$LAYER Weather - Data Files #

*$# Parabolic Trough Shading: East-West Tracking

PARAMETERS 3

! 1 Collector aperture width

! 2 Collector row spacing

! 3 Number of rows

2.339999999999999E+00 4.500000000000000E+00 6.000000000000000E+00

INPUTS 4

! Ideal Tracking:Beam radiation for surface ->Incident beam radiation

! Ideal Tracking:Solar zenith angle ->Solar zenith angle

! Ideal Tracking:Solar azimuth angle ->Solar azimuth angle

! Ideal Tracking:Angle of incidence for surface ->Solar incidence angle

26,25 26,16 26,17 26,29

```

```

*** INITIAL INPUT VALUES

    0.000000000000000E+00  3.000000000000000E+01  0.000000000000000E+00  3.000000000000000E+01

*-----

* EQUATIONS "Solar Equations"

*

EQUATIONS  8

Wind_Velocity = [26,8]

T_Ambient = [26,1]

Beam_1stRow = [27,1]

Beam_LastRow = [27,5]

Beam_MidRow = [27,3]

AngleIncidence = [26,29]

IAM = MAX(0,(MIN(2,(1+0.000884*AngleIncidence/COS(AngleIncidence)-0.00005369*AngleIncidence*AngleIncidence/COS(AngleIncidence)))))

Beam_Useful = Beam_MidRow*IAM

*$UNIT_NAME Solar Equations

*$LAYER Main

*$POSITION 991 530

*-----

* Model "Diverter 2" (Type 647)

*

UNIT  31  TYPE  647  2

*$UNIT_NAME Diverter 2

*$MODEL .\Hydronics Library (TESS)\Valves\Diverting Valve (100 Ports)\Other Fluids\Type647.tmf

*$POSITION 645 565

*$LAYER Water Loop #

*$# Flow Diverter

PARAMETERS  1

! 1 Number of Outlet Ports

    2.000000000000000E+00

INPUTS  4

! Pipe Cold loop1-loop2:Temperature at Outlet A ->Inlet Temperature

! Pipe Cold loop1-loop2:Flowrate at Outlet A ->Inlet Flowrate

! [unconnected] Fraction of Flow to Outlet -1

! [unconnected] Fraction of Flow to Outlet -2

    9,1          9,2          CONST          CONST

*** INITIAL INPUT VALUES

    2.000000000000000E+01  1.000000000000000E+03  5.000000000000000E-01  5.000000000000000E-01

*-----

* EQUATIONS "Pump Control"

```

```

*

EQUATIONS 2

Y_Pump = MIN(1,(MAX(0.001,(0.0004*Beam_Useful))))

Signal = MIN(Y_PUMP,[49,1])

*$UNIT_NAME Pump Control

*$LAYER Main

*$POSITION 1008 729

*-----

* Model "CSP_PUMP" (Type 3)

*

UNIT 37 TYPE 3

*$UNIT_NAME CSP_PUMP

*$MODEL .\Hydronics\Pumps\Variable Speed\Type3b.tmf

*$POSITION 1072 792

*$LAYER Main #

PARAMETERS 5

! 1 Maximum flow rate
! 2 Fluid specific heat
! 3 Maximum power
! 4 Conversion coefficient
! 5 Power coefficient

1.5552000618000000E+04 2.2270000000000003E+00 2.7000000000000000E+04 5.0000000000000010E-02 5.0000000000000000E-01

INPUTS 3

! 3Way Valve - Mixer:Outlet Temperature ->Inlet fluid temperature
! 3Way Valve - Mixer:Outlet Flowrate ->Inlet mass flow rate
! Pump Control:Signal ->Control signal

52,1 52,2 SIGNAL

*** INITIAL INPUT VALUES

2.0000000000000000E+01 1.0000000000000000E+02 1.0000000000000000E+00

*-----

* Model "TES" (Type 533)

*

UNIT 43 TYPE 533

*$UNIT_NAME TES

*$MODEL .\Storage Tank Library (TESS)\Cylindrical Storage Tank\Horizontal Cylinder\Type533.tmf

*$POSITION 1338 726

*$LAYER Main #

PARAMETERS 5

! 1 Logical unit for data file

```

```

! 2 # of tank nodes

! 3 Number of ports

! 4 Number of immersed heat exchangers

! 5 Number of miscellaneous heat flows

1.160000000000000E+02 5.000000000000000E+00 1.000000000000000E+00 1.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00

INPUTS 18

! ORC_PUMP:Outlet fluid temperature ->Inlet temperature for port

! ORC_PUMP:Outlet flow rate ->Inlet flow rate for port

! 3Way Valve:Temperature at outlet 1 ->Inlet temperature for HX

! 3Way Valve:Flow rate at outlet 1 ->Inlet flow rate for HX

! Solar Equations:T_Ambient ->Left surface loss temperature

! Solar Equations:T_Ambient ->Edge loss temperature for node-1

! Solar Equations:T_Ambient ->Edge loss temperature for node-2

! Solar Equations:T_Ambient ->Edge loss temperature for node-3

! Solar Equations:T_Ambient ->Edge loss temperature for node-4

! Solar Equations:T_Ambient ->Edge loss temperature for node-5

! Solar Equations:T_Ambient ->Right edge loss temperature

! [unconnected] Gas flue temperature

! [unconnected] Inversion mixing flow rate

! [unconnected] Auxiliary heat input for node-1

! [unconnected] Auxiliary heat input for node-2

! [unconnected] Auxiliary heat input for node-3

! [unconnected] Auxiliary heat input for node-4

! [unconnected] Auxiliary heat input for node-5

55,1      55,2      51,1      51,2      T_AMBIENT
T_AMBIENT T_AMBIENT T_AMBIENT T_AMBIENT T_AMBIENT
T_AMBIENT CONST   CONST   CONST   CONST
CONST     CONST   CONST

*** INITIAL INPUT VALUES

2.000000000000000E+01 0.000000000000000E+00 2.000000000000000E+01 0.000000000000000E+00 2.000000000000000E+01
2.000000000000000E+01 2.000000000000000E+01 2.000000000000000E+01 2.000000000000000E+01 2.000000000000000E+01
2.000000000000000E+01 2.000000000000000E+01 -1.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00

DERIVATIVES 5

! 1 Initial Tank Temperature-1

! 2 Initial Tank Temperature-2

! 3 Initial Tank Temperature-3

! 4 Initial Tank Temperature-4

! 5 Initial Tank Temperature-5

```

```

2.000000000000000E+01 2.000000000000000E+01 2.000000000000000E+01 2.000000000000000E+01 2.000000000000000E+01
*** External files
ASSIGN C:\Users\p3xt3r14\Desktop\SOS Example_533_534.dat 116
*]? Which file contains the parameter values for this component? |1000
*-----
* EQUATIONS "Valve Control"
*
EQUATIONS 4
Cp = 2.227
Heat_Source = Cp*[37,2]*( [25,1]-[37,1])*0.0002777778
DT = [25,1]-[43,3]
COND = LE(DT,40)
*** Warning at time : 0.000000
Generated by Unit : Not applicable or not available
Generated by Type : Not applicable or not available
TRNSYS Message 11 : The TRNSYS processor has reported an illegal variable name in an EQUATIONS or CONSTANTS card. Equations or constants
must not begin with END, INC, EQU or CON as these are protected codes required when reading the TRNSYS input file. The offending variable name is
listed below.
Reported information : COND
*$UNIT_NAME Valve Control
*$LAYER Water Loop
*$POSITION 1092 727
*-----
* Model "CSP_LIMIT" (Type 970)
*
UNIT 49 TYPE 970
*$UNIT_NAME CSP_LIMIT
*$MODEL .\Controllers Library (TESS)\N-Stage Differential Controllers\Multiple-Setpoints Multiple-Deadbands with Time Delay\Heating Model\Type970.tmf
*$POSITION 935 738
*$LAYER Main #
PARAMETERS 5
! 1 Number of Levels
! 2 # Oscillations Permitted
! 3 On-Time Delay
! 4 Off-Time Delay
! 5 Controller Dead Band
1.000000000000000E+00 5.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 5.000000000000000E+00
INPUTS 2
! TES:Average tank temperature ->Value to Watch
! [unconnected] Setpoint

```

```

43,3          CONST
*** INITIAL INPUT VALUES
2.000000000000000E+01  1.600000000000000E+02
*-----
* Model "3Way Valve" (Type 11)
*
UNIT 51  TYPE 11  Valve
*$UNIT_NAME 3Way Valve
*$MODEL .\Hydronics\Flow Diverter\Other Fluids\Type11f.tmf
*$POSITION 1074 648
*$LAYER Main #
PARAMETERS 1
! 1 Controlled flow diverter mode
2.000000000000000E+00
INPUTS 3
! Pipe PM Hot:Temperature at Outlet A ->Inlet temperature
! Pipe PM Hot:Flowrate at Outlet A ->Inlet flow rate
! Valve Control:COND ->Control signal
25,1          25,2          COND
*** INITIAL INPUT VALUES
2.000000000000000E+01  1.000000000000000E+02  5.000000000000000E-01
*-----
* EQUATIONS "ORC"
*
EQUATIONS 5
Tout = [43,3]*0.7
n = 0.09
m = [43,2]
Cp2 = 2.227
!kW
Pe = n*m*Cp2*0.3*[43,3]*0.000277778
*$UNIT_NAME ORC
*$LAYER Main
*$POSITION 1322 511
*-----
* Model "Type1503" (Type 1503)
*
UNIT 48  TYPE 1503

```

```

*$UNIT_NAME Type1503

*$MODEL .\Controllers Library (TESS)\Simple Thermostat\Simple Cooling Thermostat\Type1503.tmf

*$POSITION 1320 607

*$LAYER Main #

PARAMETERS 4

! 1 Number of Cooling Stages

! 2 # Oscillations Permitted

! 3 Temperature Dead Band

! 4 Number of Stage Exceptions

1.000000000000000E+00 5.000000000000000E+00 5.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00

INPUTS 3

! TES:Average tank temperature ->Fluid Temperature

! [unconnected] Lockout Signal

! [unconnected] Setpoint Temperature for Stage

43,3 CONST CONST

*** INITIAL INPUT VALUES

5.000000000000000E-01 0.000000000000000E+00 8.000000000000000E+01

*-----

* EQUATIONS "Equa-3"

*

EQUATIONS 12

Cp_water = 4.190

Cp_HTF = 2.227

Flow_CSP = [37,2]

Flow_ORC = [55,2]

!kW

Q_thermal_solar = [37,2]*Cp_HTF*([25,1]-[37,1])*0.0002777778

!kW

Q_thermal_ORC = [55,2]*Cp_water*([43,1]-[55,1])*0.0002777778

!kW

Solar_Rad = 452.16*[26,25]*0.0002777778

!kW

Solar_Total = 452.16*[26,24]*0.0002777778

!w/m2

Q_per_m2 = [37,2]*Cp_HTF*([25,1]-[37,1])*0.2777778/452.16

!W/m2

Solar_per_m2 = [26,25]*0.2777778

!W/m2

Solar_TOTAL_m2 = [26,24]*0.2777778

```

```

!kw

TES_Storage_Rate = [43,12]*0.0002777778

*$UNIT_NAME Equa-3

*$LAYER Main

*$POSITION 959 863

*-----

* Model "General/Capacity" (Type 65)

*

UNIT 42 TYPE 65

*$UNIT_NAME General/Capacity

*$MODEL .\Output\Online Plotter\Online Plotter With File\No Units\Type65c.tmf

*$POSITION 1155 1076

*$LAYER Main #

PARAMETERS 12

! 1 Nb. of left-axis variables

! 2 Nb. of right-axis variables

! 3 Left axis minimum

! 4 Left axis maximum

! 5 Right axis minimum

! 6 Right axis maximum

! 7 Number of plots per simulation

! 8 X-axis gridpoints

! 9 Shut off Online w/o removing

! 10 Logical Unit for output file

! 11 Output file units

! 12 Output file delimiter

7.000000000000000E+00 8.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 1.000000000000000E+03 0.000000000000000E+00

1.000000000000000E+03 1.000000000000000E+00 1.200000000000000E+01 0.000000000000000E+00 1.170000000000000E+02

0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00

INPUTS 15

! Pipe PM Hot:Temperature at Outlet A ->Left axis variable-1

! CSP_PUMP:Outlet fluid temperature ->Left axis variable-2

! TES:Average tank temperature ->Left axis variable-3

! Solar Equations:Wind_Velocity ->Left axis variable-4

! Solar Equations:T_Ambient ->Left axis variable-5

! Equa-3:Solar_Total ->Left axis variable-6

! Equa-3:Solar_TOTAL_m2 ->Left axis variable-7

! CSP_PUMP:Outlet flow rate ->Right axis variable-1

! Equa-3:Solar_Rad ->Right axis variable-2

```


! Equa-3:Q_thermal_solar ->Right axis variable-3

! Equa-3:Q_thermal_ORC ->Right axis variable-4

! ORC:Pe ->Right axis variable-5

! Equa-3:TES_Storage_Rate ->Right axis variable-6

! Equa-3:Solar_per_m2 ->Right axis variable-7

! Equa-3:Q_per_m2 ->Right axis variable-8

25,1	37,1	43,3	WIND_VELOCITY	T_AMBIENT	
SOLAR_TOTAL	SOLAR_TOTAL_M2	37,2	SOLAR_RAD	Q_THERMAL_SOLAR	
Q_THERMAL_ORC	PE	TES_STORAGE_RATE	SOLAR_PER_M2	Q_PER_M2	

*** INITIAL INPUT VALUES

PM_HOT	PM_COLD	TES_AVG	Wind_	Velocity	T_Ambient
TOTAL_SOLAR_kW		TOTAL_SOLAR_W/m	2	CSP_Flowra	te
Thermal_solar_kW					Solar
Thermal_to_Electr_kW		Electrical_kWe	TES_Storag	e_Rate	Solar
Thermal_Capacity_W/m	2				_Rad_W/m2

LABELS 3

Temperatures

Heat transfer rates

Graph 1

*** External files

ASSIGN general-capacity.plt 117

*[? What file should the online print to? |1000

*-----

* Model "Integrator" (Type 24)

*

UNIT 45 TYPE 24

*\$UNIT_NAME Integrator

*\$MODEL .\Utility\Integrators\Quantity Integrator\Type24.tmf

*\$POSITION 963 980

*\$LAYER Main #

PARAMETERS 2

! 1 Integration period

! 2 Relative or absolute start time

8.760000000000000E+03 0.000000000000000E+00

INPUTS 8

! Equa-3:Solar_Rad ->Solar

! Equa-3:Q_thermal_solar ->Thermal_solar

! Equa-3:Q_thermal_ORC ->Thermal_to_Electr

! ORC:Pe ->Electrical

! Equa-3:Solar_per_m2 ->Solar_Rad_W/m2

```

! Equa-3:Q_per_m2 ->Thermal_Capacity_W/m2
! Equa-3:Solar_Total ->Solar_Total_Rad
! Equa-3:Solar_TOTAL_m2 ->Solar_TOTAL-m2

      SOLAR_RAD      Q_THERMAL_SOLAR      Q_THERMAL_ORC      PE      SOLAR_PER_M2
      Q_PER_M2      SOLAR_TOTAL      SOLAR_TOTAL_M2

*** INITIAL INPUT VALUES

      0.000000000000000E+00  0.000000000000000E+00  0.000000000000000E+00  0.000000000000000E+00  0.000000000000000E+00
      0.000000000000000E+00  0.000000000000000E+00  0.000000000000000E+00

*-----
* Model "Weekly" (Type 55)
*
UNIT 46  TYPE 55
*$UNIT_NAME Weekly
*$MODEL .\Utility\Integrators\Periodic Integrator\Type55.tmf
*$POSITION 739 980
*$LAYER Main #
PARAMETERS 35
! 1 Integrate or sum input-1
! 2 Relative starting hour for input-1
! 3 Duration for input-1
! 4 Cycle repeat time for input-1
! 5 Reset time for input-1
! 6 Absolute starting hour for input-1
! 7 Absolute stopping hour for input -1
! 8 Integrate or sum input-2
! 9 Relative starting hour for input-2
! 10 Duration for input-2
! 11 Cycle repeat time for input-2
! 12 Reset time for input-2
! 13 Absolute starting hour for input-2
! 14 Absolute stopping hour for input -2
! 15 Integrate or sum input-3
! 16 Relative starting hour for input-3
! 17 Duration for input-3
! 18 Cycle repeat time for input-3
! 19 Reset time for input-3
! 20 Absolute starting hour for input-3
! 21 Absolute stopping hour for input -3
! 22 Integrate or sum input-4

```

! 23 Relative starting hour for input-4
! 24 Duration for input-4
! 25 Cycle repeat time for input-4
! 26 Reset time for input-4
! 27 Absolute starting hour for input-4
! 28 Absolute stopping hour for input -4
! 29 Integrate or sum input-5
! 30 Relative starting hour for input-5
! 31 Duration for input-5
! 32 Cycle repeat time for input-5
! 33 Reset time for input-5
! 34 Absolute starting hour for input-5
! 35 Absolute stopping hour for input -5

1.000000000000000E+00	0.000000000000000E+00	1.680000000000000E+02	1.680000000000000E+02	1.680000000000000E+02
0.000000000000000E+00	8.760000000000000E+03	1.000000000000000E+00	0.000000000000000E+00	1.680000000000000E+02
1.680000000000000E+02	1.680000000000000E+02	0.000000000000000E+00	8.760000000000000E+03	1.000000000000000E+00
0.000000000000000E+00	1.680000000000000E+02	1.680000000000000E+02	1.680000000000000E+02	0.000000000000000E+00
8.760000000000000E+03	1.000000000000000E+00	0.000000000000000E+00	1.680000000000000E+02	1.680000000000000E+02
1.680000000000000E+02	0.000000000000000E+00	8.760000000000000E+03	1.000000000000000E+00	0.000000000000000E+00
1.680000000000000E+02	1.680000000000000E+02	1.680000000000000E+02	0.000000000000000E+00	8.760000000000000E+03

INPUTS 5

! Equa-3:Solar_Rad ->Input-1
! Equa-3:Q_thermal_solar ->Input-2
! Equa-3:Q_thermal_ORC ->Input-3
! ORC:Pe ->Input-4
! Equa-3:Solar_Total ->Input-5

SOLAR_RAD	Q_THERMAL_SOLAR	Q_THERMAL_ORC	PE	SOLAR_TOTAL
-----------	-----------------	---------------	----	-------------

*** INITIAL INPUT VALUES

0.000000000000000E+00	0.000000000000000E+00	0.000000000000000E+00	0.000000000000000E+00	0.000000000000000E+00
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

*-----

* EQUATIONS "Diverter"

*

EQUATIONS 3

Flow_out1 = 0.3333*[29,2]

Flow_out2 = 0.6667*[29,2]

T_out = [29,1]

*\$UNIT_NAME Diverter

*\$LAYER Main

*\$POSITION 647 788

*-----

*-----

* Model "Monthly" (Type 55)

*

UNIT 57 TYPE 55

*\$UNIT_NAME Monthly

*\$MODEL .\Utility\Integrators\Periodic Integrator\Type55.tmf

*\$POSITION 815 980

*\$LAYER Main #

PARAMETERS 35

! 1 Integrate or sum input-1

! 2 Relative starting hour for input-1

! 3 Duration for input-1

! 4 Cycle repeat time for input-1

! 5 Reset time for input-1

! 6 Absolute starting hour for input-1

! 7 Absolute stopping hour for input -1

! 8 Integrate or sum input-2

! 9 Relative starting hour for input-2

! 10 Duration for input-2

! 11 Cycle repeat time for input-2

! 12 Reset time for input-2

! 13 Absolute starting hour for input-2

! 14 Absolute stopping hour for input -2

! 15 Integrate or sum input-3

! 16 Relative starting hour for input-3

! 17 Duration for input-3

! 18 Cycle repeat time for input-3

! 19 Reset time for input-3

! 20 Absolute starting hour for input-3

! 21 Absolute stopping hour for input -3

! 22 Integrate or sum input-4

! 23 Relative starting hour for input-4

! 24 Duration for input-4

! 25 Cycle repeat time for input-4

! 26 Reset time for input-4

! 27 Absolute starting hour for input-4

! 28 Absolute stopping hour for input -4

! 29 Integrate or sum input-5

! 30 Relative starting hour for input-5

! 31 Duration for input-5

! 32 Cycle repeat time for input-5

! 33 Reset time for input-5

! 34 Absolute starting hour for input-5

! 35 Absolute stopping hour for input -5

```
1.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00 -1.0000000000000000E+00 -1.0000000000000000E+00 -1.0000000000000000E+00
0.0000000000000000E+00 8.7600000000000000E+03 1.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00 1.6800000000000000E+02
1.6800000000000000E+02 1.6800000000000000E+02 0.0000000000000000E+00 8.7600000000000000E+03 1.0000000000000000E+00
0.0000000000000000E+00 1.6800000000000000E+02 1.6800000000000000E+02 1.6800000000000000E+02 0.0000000000000000E+00
8.7600000000000000E+03 1.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00 1.6800000000000000E+02 1.6800000000000000E+02
1.6800000000000000E+02 0.0000000000000000E+00 8.7600000000000000E+03 1.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00
-1.0000000000000000E+00 -1.0000000000000000E+00 -1.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00 8.7600000000000000E+03
```

INPUTS 5

! Equa-3:Solar_Rad ->Input-1

! Equa-3:Q_thermal_solar ->Input-2

! Equa-3:Q_thermal_ORC ->Input-3

! ORC:Pe ->Input-4

! Equa-3:Solar_Total ->Input-5

SOLAR_RAD	Q_THERMAL_SOLAR	Q_THERMAL_ORC	PE	SOLAR_TOTAL
-----------	-----------------	---------------	----	-------------

*** INITIAL INPUT VALUES

0.0000000000000000E+00	0.0000000000000000E+00	0.0000000000000000E+00	0.0000000000000000E+00	0.0000000000000000E+00
------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------

*-----

* Model "Type573" (Type 573)

*

UNIT 60 TYPE 573

*\$UNIT_NAME Type573

*\$MODEL .\Utility Library (TESS)\Monthly Average Day Profiler\Type573.tmf

*\$POSITION 1393 970

*\$LAYER Main #

*\$# To use this component to the fullest extent, first run the simulation. When the simulation is finished, right click

*\$# on the icon for this component in the assembly panel window of IISiBat and choose the menu option

*\$# "Open in Spreadsheet". Assuming you have specified that Microsoft Excel is your spreadsheet application,

*\$# using the mouse highlight the spreadsheet cells from A1 to the last row containing data that you'd like to plot

*\$# in column D (from A1 to D25 for example plots only the data in January). Under the "Insert" menu in Excel

*\$# choose the "Chart" option and then pick a chart type of "column". A plot showing each hour of the average

*\$# day for each of the two alternatives will appear for each month of the selected data.

PARAMETERS 1

! 1 Logical Unit for Output File

1.2300000000000000E+02

INPUTS 2

! Equa-3:Solar_TOTAL_m2 ->TOTAL_SOLAR_m2

! Equa-3:Solar_per_m2 ->BEAM_RAD_m2

SOLAR_TOTAL_M2 SOLAR_PER_M2

*** INITIAL INPUT VALUES

0.0000000000000000E+00 0.0000000000000000E+00

*** External files

ASSIGN avg_day_month_Solar.txt 123

*-----

END

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Δείγμα δεδομένων εξόδου «TRNSYS»

Πολύ μικρό δείγμα από ωριαίες τιμές βασικότερων παραμέτρων εξόδου της προσομοίωσης από την ώρα «0» μέχρι την ώρα «8760» (προσομοίωση ενός χρόνου).

TIME	HTF_HOT	HTF_COL D	TES_AV G	Wind_Ve locity	T_Ambient	CSP_FI owrate	Beam_ Solar	Thermal_ solar	Thermal_t o_Electr_k W	Electrical_ kWe	TES_Storage _Rate	Thermal_ Capacity
0	20,00	20,00	20,00	0,40	3,70	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	19,86	39,35	19,92	0,95	6,25	15,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	19,45	38,94	19,77	1,30	8,70	15,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	18,80	38,29	19,64	0,95	8,55	15,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	18,01	37,50	19,51	0,95	8,40	15,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8754	14,27	33,76	18,86	1,60	8,05	15,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8755	25,02	25,21	18,74	2,40	9,50	1576,52	53,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8756	62,39	59,04	19,43	3,05	11,55	3993,10	99,44	8,27	0,00	0,00	8,03	18,29
8757	57,25	57,60	20,08	2,55	13,05	849,45	24,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8758	66,72	59,09	20,63	2,65	14,05	1458,25	45,55	6,89	0,00	0,00	6,10	15,23
8759	64,32	52,88	21,49	3,15	14,70	581,08	16,72	4,11	0,00	0,00	3,97	9,09
8760	59,11	60,01	21,81	3,05	14,60	335,30	8,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – Δείγμα πραγματικών δεδομένων

Πολύ μικρό δείγμα πραγματικών δεδομένων βασικών παραμέτρων του πάρκου για τις 30/03/216 (όπως φαίνεται οι τιμές καταγράφονται ανά 2, πολλές φορές και 1sec)

1	Date	Time	SUNSHINE [R]	TES TEMP [R]	FLOW FLUID [R]	ORC ENERGY [R]	PM HOT TEMP [R]	PM COLD TEMP [R]	POWER SOURCE [R]
2	30/3/2016	3:00:00	0	49,5	0	0	11,474998	17,279999	0
3	30/3/2016	3:00:02	0	49,5	0	0	11,445	17,220001	0
4	30/3/2016	3:00:04	0	49,599998	0	0	11,445	17,220001	0
5	30/3/2016	3:00:05	0	49,599998	0	0	11,445	17,220001	0
6	30/3/2016	3:00:07	0	49,599998	0	0	11,504997	17,25	0
7	30/3/2016	3:00:09	0	49,599998	0	0	11,504997	17,25	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
41840	31/3/2016	2:59:48	0	95	0	0	14,385002	20,415001	0
41841	31/3/2016	2:59:49	0	95	0	0	14,385002	20,415001	0
41842	31/3/2016	2:59:53	0	95	0	0	14,385002	20,384995	0
41843	31/3/2016	2:59:54	0	95	0	0	14,385002	20,384995	0
41844	31/3/2016	2:59:58	0	95	0	0	14,385002	20,415001	0
41845	31/3/2016	2:59:59	0	95	0	0	14,385002	20,415001	0