



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

**Ανάλυση Λειτουργίας Ηλιοθερμικών Σταθμών και  
Επιπτώσεις στην Αξιοπιστία των Συστημάτων  
Ηλεκτρικής Ενέργειας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ Η. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ**

**Επιβλέπων :** Ευάγγελος Διαλυνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Ανάλυση Λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού και Επιπτώσεις στην Αξιοπιστία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

**ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ Η. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ**

**Επιβλέπων :** Ευάγγελος Διαλυνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την..... .

(Υπογραφή)

.....  
Ευάγγελος Διαλυνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Παύλος Γεωργιάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2013

(Υπογραφή)

.....

**ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ Η. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ 2013.

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 Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της λειτουργίας ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η επίπτωσή τους στην αξιοπιστία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ιδιαίτερα, μελετάται η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων και χρησιμοποιείται το μαθηματικό μοντέλο, που διέπει τη λειτουργία τέτοιου τύπου σταθμών.

Για το σκοπό αυτό, αφού γίνεται αναφορά στη σημασία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) στη σύγχρονη κοινωνία, η μελέτη επικεντρώνεται στην ηλιοθερμική τεχνολογία. Αναλύονται εκτενώς οι τρεις ηλιοθερμικές τεχνολογίες: παραβολικά κάτοπτρα, παραβολικό πιάτο, ηλιακός πύργος και καταγράφονται οι εγκατεστημένοι σταθμοί ανά τον κόσμο. Αναφέρονται οι στρατηγικές λειτουργίας των σταθμών, για την καλύτερη δυνατή απόδοση σε σχέση με τα καιρικά φαινόμενα και τη θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

Στη συνέχεια, για την τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων γίνεται μελέτη της παραγωγής για ένα έτος, και έπειτα η προαναφερθείσα επαναλαμβάνεται χίλιες φορές εισάγοντας τον παράγοντα της τυχαίας νέφωσης. Για τη μελέτη αυτή επιλέχθηκε σταθμός με συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά ο οποίος θεωρείται ότι βρίσκεται σε περιοχή με τα κλιματικά και γεωγραφικά δεδομένα της Αθήνας.

Έπειτα, μελετώνται οι διάφοροι τύποι αποθηκευτικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε ηλιοθερμικούς σταθμούς. Για το αποθηκευτικό σύστημα της θερμοκλίνης ωστόσο, γίνεται μια σύντομη μαθηματική ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της μελέτης του κυρίως συστήματος.

Ακόμη, αναφέρονται οι υβριδικοί σταθμοί, η σημασία τους και ο τρόπος λειτουργίας τους, όπως επίσης τα πεδία εφαρμογής των ηλιοθερμικών σταθμών καθώς και οι δυνατότητες χρησιμοποίησής τους στην Ελλάδα και στην Κύπρο. Τέλος, παρατίθενται κάποια συμπεράσματα που αφορούν την λειτουργία και την αξιοπιστία του σταθμού που μελετήθηκε.

**Λέξεις Κλειδιά:** ηλιοθερμική τεχνολογία, στρατηγική λειτουργίας, σταθμός παραβολικών κατόπτρων, εξισώσεις λειτουργίας, αποθηκευτικό σύστημα, θερμοκλίνη, υβριδικοί σταθμοί, πεδία εφαρμογής ηλιοθερμικών σταθμών, αξιοπιστία.



## Abstract

The purpose of this thesis is the analysis of the operation of solar thermal power plants and their impact on the reliability of electric power systems. The technology of parabolic trough collectors is particularly studied and the mathematical model that governs the operation of this type of plants is used.

To this end, having made reference to the importance of Renewable Energy Sources (RES) in modern society, the study focuses on solar thermal technology. The three solar thermal technologies are analyzed in detail: parabolic mirrors, parabolic dish, solar tower and the established stations around the world are reported. Indicate the operating strategies of plants, for the best performance in relation to weather and the position of the sun during a day.

Then, for the parabolic mirror technology a study is conducted for the production of one year, and then the above one is repeated for a thousand times introducing the factor of random cloud. For this study, a station is selected with specific technical features which are considered located in an area with climatic and geographic data of Athens.

Then the different types of storage systems that are used in solar thermal power plants are studied. However, for the thermocline storage system, a brief mathematical analysis is made, taking into account the results of the study of the main system.

Also hybrid plants, their importance and how they operate are referred, as well as the fields of application of solar thermal power plants and ways to use them in Greece and Cyprus. Finally, some conclusions are listed, concerning the operation and the reliability of the station studied.

**Keywords:** solar thermal technology, operating strategy, parabolic trough power plant, operation equations, storage system, thermocline, hybrid plants, application fields of solar thermal power plants, reliability.





## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Καταρχήν, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ευάγγελο Διαλυνά για την ανάθεση και την επίβλεψη της εργασίας. Ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να με συμβουλευτεί και να με καθοδηγήσει. Ακόμη, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον διδάκτορα κ. Λουκά Δαούτη για την εξειδικευμένη γνώση που μου παρείχε, προκειμένου όπως ολοκληρωθεί η παρούσα μελέτη.

Στη συνέχεια, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου, εντός και εκτός του ακαδημαϊκού περιβάλλοντος, που έκαναν τα φοιτητικά μου χρόνια αξέχαστα. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ, βέβαια, το οφείλω στους γονείς μου, Ηλία και Μαρία, στα αδέρφια μου και στο σύζυγό μου Επαμεινώνδα, που στήριζαν την προσπάθειά μου όλα τα χρόνια των σπουδών μου.



Στο σύζυγό μου Επαμεινώνδα,

Με αγάπη αφιερώνεται...



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>15</b>
1.1.	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	15
1.2.	Ήλιος και Ηλιοθερμική Ενέργεια.....	19
1.3.	Σκοπός της Εργασίας.....	22
<b>2</b>	<b>Τεχνολογίες Ηλιοθερμικών Σταθμών.....</b>	<b>24</b>
2.1.	Εισαγωγή.....	24
2.2.	Ηλιοθερμικοί Σταθμοί με Συλλέκτες Τύπου Σκάφης (trough).....	25
2.3.	Ηλιοθερμικοί Σταθμοί με Παραβολικά Πιάτα ως Συλλέκτες.....	31
2.4.	Ηλιοθερμικοί Σταθμοί με Ηλιακό Πύργο.....	38
2.5.	Σταθμοί Συνδυασμένου Κύκλου.....	46
2.6.	Ενδιάμεσο Σύστημα.....	47
2.7.	Σύγκριση Τεχνολογιών.....	48
<b>3</b>	<b>Χαρακτηριστικά Λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού.....</b>	<b>51</b>
3.1.	Χειρισμός του Ηλιοθερμικού Σταθμού.....	51
3.1.1.	Έναρξη Λειτουργίας του Σταθμού.....	51
3.1.2.	Λειτουργία του Σταθμού το Πρωί.....	52
3.1.3.	Λειτουργία του Σταθμού κατά τις Απογευματινές Ώρες.....	55
3.1.4.	Λειτουργία του Σταθμού με Βοηθητικό Καυστήρα.....	57
3.2.	Μετεωρολογική Πρόβλεψη Καιρού.....	57
3.3.	Λειτουργία του Σταθμού με Ισχυρούς Ανέμους.....	58
3.4.	Καθαρισμός Κατόπτρων.....	59
<b>4</b>	<b>Μαθηματική Ανάλυση για την Τεχνολογία Συλλεκτών Τύπου Σκάφης.....</b>	<b>60</b>
4.1.	Εισαγωγή.....	60
4.2.	Εξισώσεις Λειτουργίας Ηλιακού Πεδίου.....	63
4.3.	Εξισώσεις Λειτουργίας του Κύκλου Ισχύος.....	72

4.4. Παράθεση Αποτελεσμάτων.....	74
<b>5 Αποθήκευση.....</b>	<b>91</b>
5.1. Εισαγωγή.....	91
5.2. Τύποι Αποθηκευτικών Συστημάτων.....	93
5.2.1. Αποθήκευση με Αισθητή Θερμότητα.....	94
5.2.2. Αποθήκευση με Λανθάνουσα Θερμότητα.....	104
5.2.3. Θερμοχημική Αποθήκευση.....	106
5.3. Σύστημα Αποθήκευσης με Θερμοκλίνη.....	107
5.3.1. Εξισώσεις Λειτουργίας Συστήματος Αποθήκευσης με Θερμοκλίνη.....	110
5.3.2. Παράθεση Αποτελεσμάτων.....	113
<b>6 Υβριδικοί Σταθμοί και Προοπτικές της Ηλιοθερμικής Τεχνολογίας.....</b>	<b>115</b>
6.1. Υβριδικοί Σταθμοί.....	115
6.2. Συνδεδεμένη Λειτουργία Σταθμών ΑΠΕ.....	118
6.3. Πεδία Εφαρμογής Ηλιοθερμικών Σταθμών.....	119
6.4. Προοπτικές Χρήσης της Ηλιοθερμικής Τεχνολογίας σε Ελλάδα και Κύπρο.....	121
6.5. Προϋποθέσεις για την Εισαγωγή στην Αγορά.....	123
<b>7 Επίλογος.....</b>	<b>127</b>
7.1. Σύνοψη.....	127
7.2. Συμπεράσματα.....	128
<b>Παράρτημα.....</b>	<b>131</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>153</b>

# 1

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*

Η ενέργεια θεωρείται πρωταρχικό μέσο στη δημιουργία πλούτου και ένας σημαντικός παράγοντας στην οικονομική ανάπτυξη. Η σημασία της ενέργειας στην οικονομική ανάπτυξη αναγνωρίζεται παγκοσμίως και ιστορικά δεδομένα πιστοποιούν ότι υπάρχει μια δυνατή σχέση μεταξύ της διαθεσιμότητας της ενέργειας και της οικονομικής δραστηριότητας[1].

Το μέλλον του ενεργειακού εφοδιασμού της ανθρωπότητας χαρακτηρίζεται από την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας που οφείλεται στην αύξηση του πληθυσμού, στον περιορισμό των ορυκτών πόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ενεργειακής χρήσης. Επίσης ο αντίκτυπος της εκτεταμένης χρήσης ορυκτών πόρων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ιδιαίτερης σημασίας. Η μόλυνση εξαρτάται από την κατανάλωση ενέργειας. Σήμερα η καθημερινή παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου είναι πολύ μεγάλη και παρά τις πολύ γνωστές συνέπειες της καύσης ορυκτών καυσίμων στο περιβάλλον, αυτή η κατανάλωση αναμένεται να αυξηθεί πάρα πολύ μέχρι το 2025. Επιπλέον, οι πολιτικές των κυβερνήσεων που αφορούν την ενέργεια και τις εξελίξεις στην παγκόσμια αγορά ενέργειας σίγουρα θα παίξουν ρόλο κλειδί στο μελλοντικό επίπεδο και πρότυπο της παραγωγής και της κατανάλωσης ενέργειας. Η επίτευξη λύσεων σε περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα σήμερα, απαιτεί μακροπρόθεσμα σχέδια για βιώσιμη ανάπτυξη. Εν προκειμένω, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φαίνεται ότι είναι μία από τις πιο αποδοτικές και αποτελεσματικές λύσεις.

Με το τεράστιο δυναμικό της, η αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά σε ένα βιώσιμο, παγκόσμιο σύστημα ενεργειακού εφοδιασμού. Εκτός αυτού, οι ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες γίνονται ολοένα και πιο ανταγωνιστικές. Η εξέλιξη αυτή οφείλεται στις σημαντικές μειώσεις των τιμών που έχουν επιτευχθεί σε ορισμένες τεχνολογίες τα τελευταία χρόνια, καθώς και στην αυξανόμενη

αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία τους. Την ίδια στιγμή, οι τιμές των ορυκτών καυσίμων αυξάνονται και αναμένεται να παραμείνουν σε υψηλό επίπεδο.

Η έκρηξη στην αγορά της αιολικής ενέργειας σημειώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 και η ανοδική πορεία προβλέπεται να συνεχιστεί και στο μέλλον. Μεγάλα αιολικά πάρκα ισχύος από 50 έως 100 MW κατασκευάζονται όλο και πιο συχνά. Υπεράκτια αιολικά πάρκα ακόμη μεγαλύτερης ισχύος αναμένεται να κατασκευαστούν μέσα στα επόμενα χρόνια.

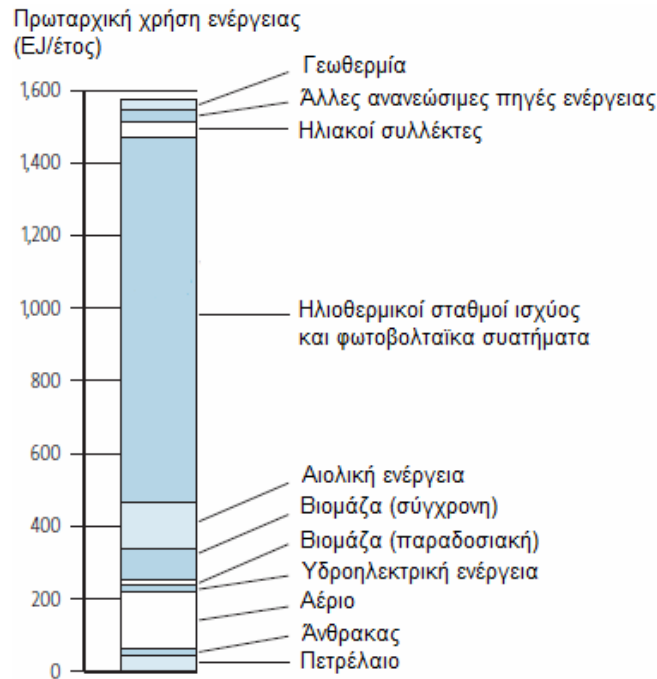
Συστήματα ανεμογεννητριών σε συνδυασμό με γεννήτριες πετρελαίου, καθώς και φωτοβολταϊκά συστήματα – οικιακής χρήσης- μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ηλεκτροδότηση αγροτικών περιοχών στις αναπτυσσόμενες χώρες. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν επίσης να συνδεθούν στο δίκτυο, είτε ενσωματωμένα σε κτίρια, είτε ως μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα σε ανοικτές εκτάσεις.

Η βιομάζα, με τη μορφή ενεργειακών καλλιιεργειών ή καταλοίπων, μπορεί να υποβληθεί σε καύση, αεριοποίηση ή ζύμωση με σκοπό την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, ή μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία με σκοπό την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων. Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού, είτε άμεσα για θέρμανση ή για βιομηχανικές διεργασίες.

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό με σταθμούς παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου ( φυσικού αερίου ή πετρελαίου).

Η πρόβλεψη για την κατανομή της χρήσης της ενέργειας μέχρι το 2100 απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, είτε με φωτοβολταϊκά πάρκα είτε με ηλιοθερμικούς σταθμούς θα παίξει πρωταγωνιστικό ρόλο στα ερχόμενα χρόνια.





**Σχήμα 1.1: Δείγμα παγκόσμιου ενεργειακού μείγματος το έτος 2100.**

Σε παγκόσμιο επίπεδο οι ΑΠΕ συνεισφέρουν περίπου στο 18% της παραγωγής ενέργειας. Εξαπλώνονται συνεχώς και οι τεχνολογίες αναπτύσσονται έτσι ώστε να μπορούν να συνεισφέρουν όσο το δυνατόν σε περισσότερους τομείς αντικαθιστώντας τα συμβατικά καύσιμα. Όσον αφορά την Ευρώπη κατέχοντας ηγετική θέση στην εισαγωγή καυσίμων από τρίτες χώρες προσπαθεί να ανεξαρτητοποιηθεί προωθώντας όλο και περισσότερο τη χρήση των ΑΠΕ. Με σύνθημα το 20-20-20 όλα τα κράτη μέλη υποχρεούνται να επιτύχουν την μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στο 20% και τη συμμετοχή των ΑΠΕ στο 20% μέχρι το 2020. Ακόμη σκοπεύει να έχει ένα ελάχιστο μερίδιο των βιοκαυσίμων της τάξεως του 10% στη συνολική κατανάλωση βενζίνης για μεταφορές της ΕΕ και της χρήσης ντίζελ μέχρι τότε. Επιπλέον η Ε.Ε έχει θέσει στόχους για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, της αιολικής, της υδραυλικής και της βιομάζας ξεχωριστά. Κάποιοι από τους στόχους βρίσκονται κοντά στην πραγματοποίηση άλλοι όμως απέχουν.

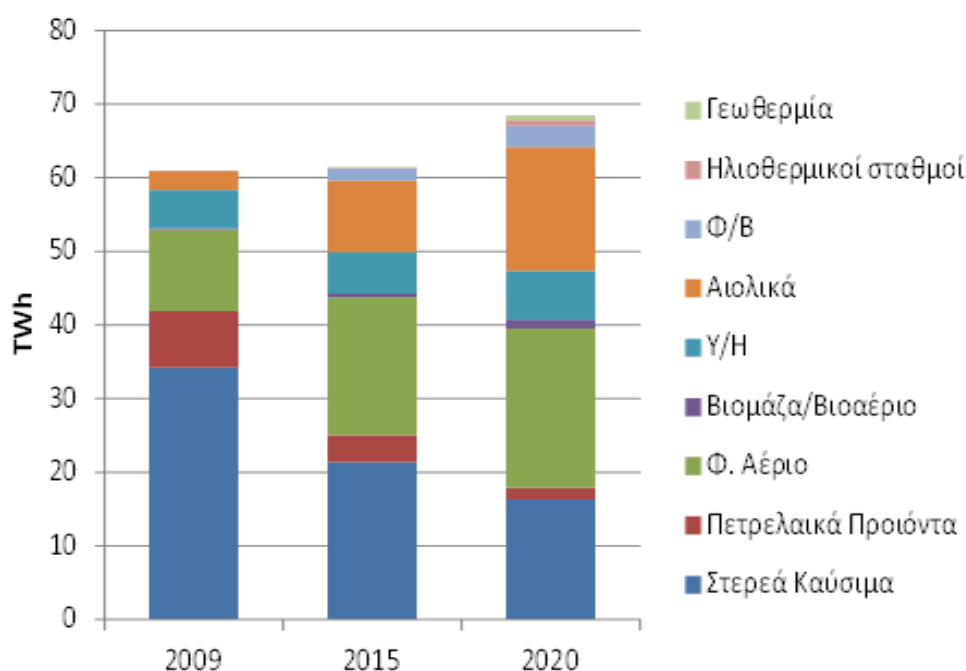
Η Ευρωπαϊκή Ένωση για να ενθαρρύνει περισσότερο την χρήση των ΑΠΕ, λόγω της καινούργιας τους φυσιογνωμίας δίνει επιχορηγήσεις, για να παροτρύνει τα κράτη μέλη της [2].

Η Ελλάδα αποτελεί ιδανικό τόπο για ευρεία χρήση των ΑΠΕ. Τα ιδιαίτερα φυσικά μορφολογικά χαρακτηριστικά της, σε συνδυασμό με τα ποικιλόμορφα κλιματολογικά στοιχεία της ικανοποιούν την αναγκαία συνθήκη, για την ανάπτυξη κάθε εφαρμογής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η γεωγραφική της θέση εξασφαλίζει μια εκτεταμένη περίοδο ηλιοφάνειας, προσφέροντας την δυνατότητα μιας ουσιαστικής αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Επίσης, η διάσπαρτη παρουσία μιας πλειάδας μικρών αλλά ορμητικών ποταμών, λόγω του έντονου τοπογραφικού της ανάγλυφου, επιτρέπει την αξιοποίηση της διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας ως συνέπεια της φυσικής ροής του ύδατος προς κατώτερα υψομετρικά επίπεδα. Τέλος, η συνύπαρξη ηπειρωτικού - νησιωτικού τοπίου προσφέρει φυσικές διόδους στην νομοτελειακή μετακίνηση μεγάλων αέριων μαζών, διαμορφώνοντας ένα ιδιαίτερα αξιόλογο αιολικό δυναμικό κυρίως στις παράκτιες περιοχές.

Βέβαια, πέρα των φυσικών χαρακτηριστικών, μια σειρά άλλων παραμέτρων καθορίζει την δυνατότητα εφαρμογής των ΑΠΕ, όπως για παράδειγμα το διαθέσιμο δίκτυο μεταφοράς και η περιορισμένη ζήτηση των νησιών (αυτόνομα δίκτυα), που θέτει όρια στην αξιοποίηση των ΑΠΕ [3].

Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η κατανομή της ηλεκτρικής παραγωγής, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι της Ελλάδας μέχρι το 2020.



**Σχήμα 1.2: Εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά καύσιμο, για την επίτευξη των εθνικών στόχων έως το 2020.**

Αξιοσημείωτη είναι η σταδιακή εμφάνιση νέων τεχνολογιών ΑΠΕ στο μείγμα της ηλεκτροπαραγωγής (γεωθερμία, ηλιοθερμικοί σταθμοί), οι οποίες αναμένεται σε μακροπρόθεσμο επίπεδο να έχουν ολοένα και πιο μεγάλο μερίδιο συμμετοχής.

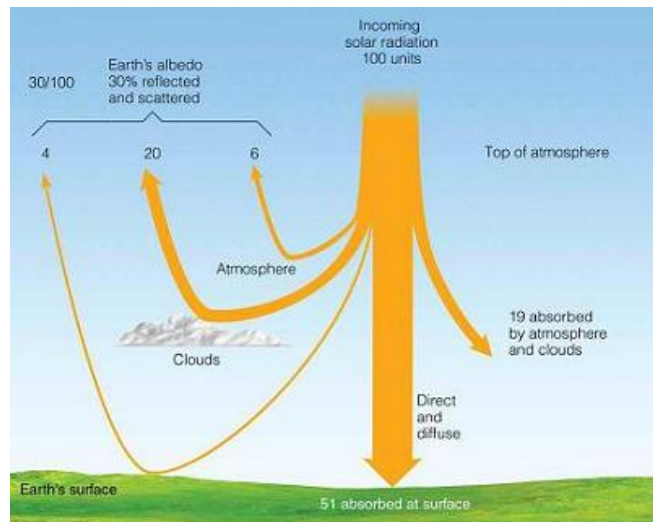
## 1.2 Ήλιος και Ηλιοθερμική Ενέργεια

Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι, με μάζα  $2 \times 10^{30}$  kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία  $5 \times 10^9$  χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι  $\sim 5.800$  K, ενώ η εσωτερική, περίπου, 15.000.000 K. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κατά τις οποίες μετατρέπεται το υδρογόνο σε ήλιο.

Ο ήλιος ακτινοβολεί ενέργεια προς τη γη εκ της οποίας το ένα τρίτο ανακλάται πάλι προς το διάστημα. Επιπλέον αυτή η ηλιακή ακτινοβολία τροποποιείται από τους μηχανισμούς απορρόφησης και σκέδασης, όπου στην μεν απορρόφηση η προσπίπτουσα ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα, στη δε σκέδαση αλλάζει η κατεύθυνση της ακτινοβολίας.

Εξαιτίας των επιδράσεων της ατμόσφαιρας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αποτελείται από μια συνιστώσα άμεσης δέσμης, μια συνιστώσα διάχυσης και μια συνιστώσα albedo (ή ανάκλασης από το έδαφος). Ακόμα και σε μια ηλιόλουστη ημέρα υπάρχει κάποια συνιστώσα διάχυσης (της τάξεως του 10%), και σε μια εντελώς συννεφιασμένη ημέρα η άμεση συνιστώσα θα είναι μηδενική. Η διάχυτη ακτινοβολία συναποτελείται από τρεις συνιστώσες: κοντά στον Ήλιο, στο οριζόντιο επίπεδο (το οποίο θεωρεί ότι η Γη βρίσκεται στο κέντρο του σύμπαντος, το επίπεδο αναφοράς είναι αυτό που εφάπτεται στην επιφάνεια της Γης στην τοποθεσία του παρατηρητή και η θέση του Ήλιου καθορίζεται από δυο γωνίες: το ύψος  $\beta$  (υπεράνω του ορίζοντα), και το αζιμούθιο  $Z$ ) και στο υπόλοιπο του ουρανού. Η άμεση δέσμη ή κανονική ακτινοβολία αναφέρεται στην ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο χωρίς να διασκορπίζεται από την ατμόσφαιρα. Στις περισσότερες εφαρμογές λαμβάνεται υπόψη η άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας προκειμένου να προσανατολίζονται οι ηλιακοί συλλέκτες[4], [5], [6].

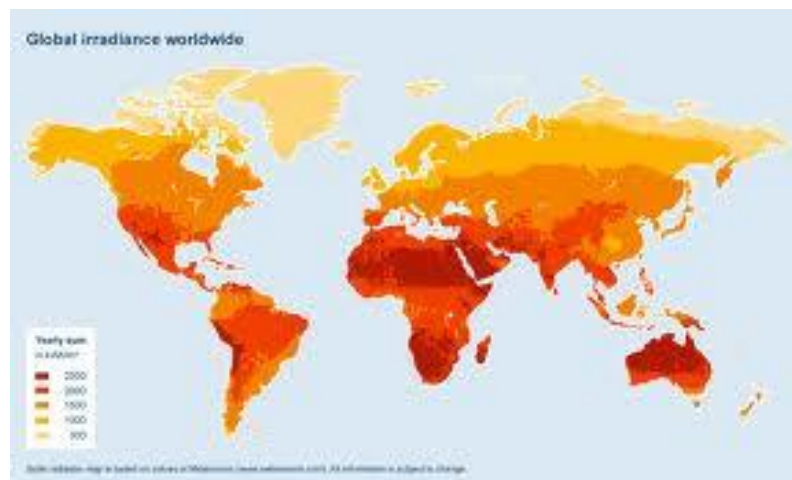
Το σχήμα 1.3 δίνει μια εικόνα των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας, μέχρι τη γη.



**Σχήμα 1.3: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.**

Όσον αφορά την παγκόσμια κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στη Γη, η μέση ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη κοντά στους τροπικούς παρά στον ισημερινό, εξαιτίας των νεφώσεων που σκεπάζουν αυτές τις περιοχές. Στα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη η ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρότερη εξαιτίας του χαμηλότερου ύψους στο οποίο βρίσκεται ο ήλιος. Η γωνία του αζιμούθιου θα επηρεάσει την ημερήσια κατανομή της ακτινοβολίας. Οι πληροφορίες σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία σε μια τοποθεσία δίνονται με τη μορφή της συνολικής (άμεσης και διάχυτης) ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια. Το albedo σε γενικές γραμμές δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί μπορεί να βρεθεί μόνο όταν είναι γνωστό το ακριβές περιβάλλον[4], [5].

Στο σχήμα 1.4 φαίνεται η παγκόσμια κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και αμέσως μετά, στο σχήμα 1.5 συγκεκριμένα η ακτινοβολία στην Ελλάδα.



**Σχήμα 1.4: Παγκόσμιος χάρτης ηλιακής ακτινοβολίας.**



**Σχήμα 1.5: Χάρτης ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα.**

Η ιδέα της χρήσης συλλεκτών ηλιακής ενέργειας για να εγκλωβίσει την ισχύ του ήλιου καταγράφηκε από το 212π.Χ όταν ο Έλληνας φυσικός Αρχιμήδης τους χρησιμοποίησε για να κάψει τα πλοία των Ρωμαίων. Ακόμη οι αρχαίοι Έλληνες άναβαν την Ολυμπιακή φλόγα χρησιμοποιώντας έναν καθρέφτη. Ο Leonardo Da Vinci πρότεινε μια τεχνική συγκόλλησης χαλκού χρησιμοποιώντας συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία τον 15<sup>ο</sup> αιώνα.

Κατά τη διάρκεια του 19<sup>ου</sup> αιώνα οι προσπάθειες να μετατραπεί η ηλιακή ενέργεια σε άλλες μορφές στηρίχθηκε στην παραγωγή ατμού χαμηλής πίεσης για το χειρισμό ατμομηχανών. Παρόλα αυτά, όταν το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο έγιναν διαθέσιμα να χρησιμεύσουν ως καύσιμα για το χειρισμό μηχανών, το ενδιαφέρον για τους ηλιακούς συγκεντρωτές υψηλής θερμότητας εξαφανίστηκε για προφανείς λόγους. Στο τέλος της δεκαετίας του 60 και στις αρχές της δεκαετίας του 70 , όταν έγινε ξεκάθαρο ότι οι πηγές ορυκτών καυσίμων είναι περιορισμένες και η μη ισοκατανομή τους οδηγούν σε σοβαρές εξαρτήσεις, συστηματική έρευνα ξεκίνησε σε έναν αριθμό βιομηχανοποιημένων χωρών.

Έτσι, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 ετών πολλές εναλλακτικές σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας συγκεντρωτικούς συλλέκτες ως μέσο θέρμανσης του εργαζόμενου μέσου (υγρό) που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή ισχύος. Οι δυο πρωταρχικές ηλιακές τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι κεντρικοί συλλέκτες και οι συλλέκτες που χρησιμοποιούν πολλαπλά σημεία για να συγκεντρώσουν την ηλιακή ακτινοβολία. Στην πρώτη κατηγορία ανήκει ο ηλιακός πύργος και στην δεύτερη τα παραβολικά πιάτα και οι συλλέκτες τύπου σκάφης (parabolic troughs). Οι σημερινές σκέψεις βασίζονται στις εμπειρίες που έχουν αποκτηθεί από πρωτότυπα και ερευνητικές εγκαταστάσεις που έγιναν κυρίως στις δεκαετίες του 1970 και του 1980. Τα πρώτα εμπορικά συστήματα τέθηκαν σε λειτουργία στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα [1], [7].

Η παραγωγή ηλεκτρισμού από την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μια ακριβής διαδικασία: άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να συγκεντρωθεί για να παράγει μέση και υψηλής θερμοκρασίας θερμότητα. Αυτό γίνεται με τη χρήση εκατοντάδων κατάλληλων κατόπτρων τα οποία συγκεντρώνουν τις ακτίνες του ήλιου σε σημεία που αναπτύσσεται πολύ υψηλή θερμοκρασία, συνήθως μεταξύ 400°C και 1000°C. Αυτή η θερμότητα που παράγεται τελικά χρησιμοποιείται για το χειρισμό ενός συμβατικού κύκλου ισχύος, για παράδειγμα , μέσω ενός αμοστρόβιλου ή μιας μηχανής Stirling. Η ηλιακή θερμότητα που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σε υγρό ή στερεό μέσο όπως λιωμένα άλατα, κεραμικά, τσιμεντένια ή μίγματα αλάτων που αλλάζουν φάσεις. Τη νύχτα αυτή η θερμότητα μπορεί να αφαιρεθεί από το αποθηκευτικό μέσο ,και έτσι, να συνεχιστεί ο χειρισμός της τουρμπίνας.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ηλιοθερμικής τεχνολογίας είναι ότι, σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούν και τη διάχυτη ακτινοβολία για να παράγουν ηλεκτρισμό, τα ηλιοθερμικά συστήματα χρησιμοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία καθώς η διάχυτη δεν μπορεί να συγκεντρωθεί. Έτσι, είναι προφανές ότι η κατασκευή ενός ηλιοθερμικού σταθμού θα αποτελεί μια αποδοτική και συμφέρουσα λύση για τις χώρες με μεγάλη ηλιοφάνεια και ειδικά με υψηλό δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί μπορούν να σχεδιαστούν για λειτουργία είτε αποκλειστικά ηλιακή, είτε υβριδική, όπου φυσικό καύσιμο χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις χαμηλότερης έντασης ακτινοβολίας για να εξασφαλιστεί αξιόπιστη παροχή φορτίου αιχμής. Τα αποθηκευτικά συστήματα θερμικής ενέργειας επεκτείνουν τη λειτουργία των ηλιοθερμικών σταθμών έως 100% της ηλιακής μετοχής[8].

### ***1.3 Σκοπός της Εργασίας***

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ηλιοθερμικής τεχνολογίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί η λειτουργία ηλιοθερμικών σταθμών με παραβολικά κάτοπτρα (τύπου σκάφης ή trough), ηλιακό πύργο και παραβολικά πιάτα. Και οι τρεις τεχνολογίες χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ατμού και εν συνεχεία την κίνηση ενός ή περισσότερων αμοστρόβιλων. Ειδικότερα η δομή της εργασίας είναι η εξής:

Το πρώτο κεφάλαιο είναι η εισαγωγή που παρατέθηκε προηγουμένως.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στις τρεις τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών. Γίνεται μια ανασκόπηση των χαρακτηριστικών των διαφορετικών συστημάτων που τους απαρτίζουν και ακόμη αναφέρονται παραδείγματα σταθμών που έχουν ήδη τεθεί σε λειτουργία σε όλο τον κόσμο. Τέλος, γίνεται μια σύγκριση των τριών τεχνολογιών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η στρατηγική λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού. Γίνεται αναφορά στο χειρισμό του σταθμού ανάλογα με την ώρα της ημέρας και τις καιρικές συνθήκες, ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο καταγράφονται οι μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία ενός ηλιοθερμικού σταθμού με παραβολικά κάτοπτρα και δίνεται μια πλήρη ανάλυση της λειτουργίας ενός σταθμού με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για τέσσερις ημέρες του έτους. Ακόμη παρατίθενται διαγράμματα που δείχνουν την πορεία των διαφόρων μεγεθών κατά τη διάρκεια της ημέρας ή κατά τη διάρκεια του έτους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι αποθηκευτικών συστημάτων που έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα. Επίσης γίνεται μια ανάλυση της λειτουργίας του αποθηκευτικού συστήματος της θερμοκλίνης χρησιμοποιώντας και τις μαθηματικές εξισώσεις λειτουργίας της.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους υβριδικούς σταθμούς και τις δυνατότητες χρήσης τους. Επίσης, εξετάζονται οι προοπτικές εφαρμογής της ηλιοθερμικής τεχνολογίας στην Ελλάδα και την Κύπρο, αλλά και οι προϋποθέσεις για την εισαγωγή της στην αγορά γενικά.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται κάποια συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα μελέτη για τη λειτουργία του σταθμού και για την επίπτωση που έχει αυτή η λειτουργία σε μεγαλύτερα ηλεκτρικά συστήματα.

# 2

## *Τεχνολογίες Ηλιοθερμικών Σταθμών*

### *2.1 Εισαγωγή*

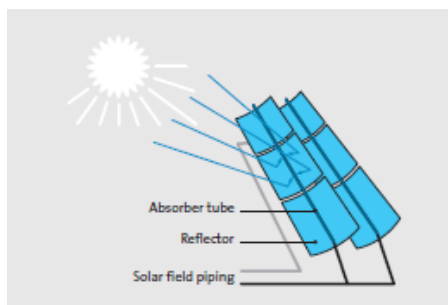
Ένας ηλιοθερμικός σταθμός συμπεριφέρεται όπως ένας συμβατικός θερμικός σταθμός, αλλά χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια αντί του ορυκτού καυσίμου σαν πηγή θερμότητας για την παραγωγή ατμού. Παρόλο που είναι μηδενικού κόστους, η ηλιακή ενέργεια έχει δύο αξιοσημείωτα μειονεκτήματα: την πυκνότητα ενέργειας και την διαθεσιμότητα. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι σχεδίασης, κατασκευής και χειρισμού ενός ηλιοθερμικού σταθμού. Συνήθως, τα στοιχεία του συστήματος είναι αυτά που προσδιορίζουν το σχεδιασμό.

Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται οι εξής σχεδιασμοί ηλιοθερμικών σταθμών:

- Ηλιοθερμικοί σταθμοί με συλλέκτες τύπου σκάφης.
- Ηλιοθερμικοί σταθμοί με παραβολικά πιάτα ως συλλέκτες.
- Ηλιοθερμικοί σταθμοί με ηλιακό πύργο.



## 2.2 Ηλιοθερμικοί Σταθμοί με Συλλέκτες Τύπου Σκάφης (trough)



Σχήμα 2.1: Συλλέκτες τύπου σκάφης.

### ➤ Συλλέκτες

Ένας συλλέκτης τύπου σκάφης είναι μια τεχνολογία χαμηλού κόστους, η οποία κατεργάζεται θερμικές εφαρμογές από 50 °C έως 400°C. Είναι σχεδιασμένος να συγκεντρώνει τις ηλιακές ακτίνες μέσω παραβολικών ηλιακών ανακλαστήρων σε έναν απορροφητή θερμότητας - ένα λήπτη - που είναι τοποθετημένος στην οπτική γραμμή συγκέντρωσης του συλλέκτη.

Οι συλλέκτες τύπου σκάφης κατασκευάζονται με τη κάμψη ενός φύλλου από ανακλαστικό υλικό σε παραβολοειδές σχήμα. Ένας μαύρος μεταλλικός σωλήνας, καλυμμένος με έναν γυάλινο σωλήνα ώστε να μειώνονται οι απώλειες θερμότητας, τοποθετείται κατά μήκος της γραμμής εστίασης του λήπτη. Ένα μειονέκτημα της γυάλινης επικάλυψης είναι ότι το ανακλώμενο φως από τον συγκεντρωτή πρέπει να περάσει το γυαλί για να φτάσει στον απορροφητή, προσθέτοντας επιπλέον απώλειες μετάδοσης. Το γυάλινο περίβλημα συνήθως έχει μια αντιανακλαστική επένδυση για να βελτιωθεί η μεταδοτικότητα. Ένας τρόπος για περαιτέρω μείωση των απωλειών ενέργειας εκ μεταφοράς από το λήπτη και επομένως αύξηση της επίδοσης του συλλέκτη, ιδίως για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, αποτελεί η εκκένωση του διαστήματος μεταξύ του γυάλινου σωλήνα και του λήπτη. Όταν το παραβολοειδές είναι στραμμένο προς τον ήλιο, παράλληλες ακτίνες που προσπίπτουν στον ανακλαστήρα ανακλώνται προς τον σωλήνα του λήπτη. Αυτός ο σωλήνας περιέχει ένα υγρό που μεταφέρει τη θερμότητα.

Ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι η μέγιστη θερμοκρασία εισόδου στο σύστημα ισχύος περιορίζεται από την υψηλότερη θερμοκρασία, που μπορεί να έχει το εργαζόμενο υγρό (working fluid). Παρόλο που υπάρχουν κάποιες εναλλακτικές λύσεις στο παραπάνω πρόβλημα, όπως για παράδειγμα η χρήση υγροποιημένου άλατος στους

συλλέκτες, ωστόσο καμία από αυτές δεν έχει εφαρμοστεί σε εμπορικό επίπεδο. Εκτός των άλλων, όλες αυτές οι επιλογές απαιτούν μια γεννήτρια επαναφοράς θερμότητας, μεταξύ του ηλιακού πεδίου και του συστήματος ισχύος, η οποία εισάγει πρόσθετες απώλειες θερμότητας και πτώση της πίεσης στην ολική επίδοση.

Η άμεση παραγωγή ατμού θεωρείται μια υποσχόμενη προοπτική για την αύξηση της απόδοσης στα συστήματα με συλλέκτες τύπου σκάφης, όχι μόνο επειδή δεν υπάρχει ανάγκη για εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του πεδίου και του συστήματος ισχύος, αλλά επίσης επειδή μπορεί να επιτύχει τις υψηλότερες δυνατές θερμοκρασίες του ηλιακού συλλέκτη [1],[9],[10].

#### ➤ **Συσκευές παρακολούθησης**

Αυτοί οι ηλιοθερμικοί σταθμοί διαθέτουν επίσης και συσκευές παρακολούθησης της πορείας του ήλιου (tracking system). Η εφαρμογή ενός συστήματος παρακολούθησης σε έναν άξονα συλλεκτών είναι επαρκής και έτσι παράγονται μοντέλα μεγάλου μήκους. Η συσκευή παρακολούθησης κάνει τους ηλιακούς συλλέκτες να ακολουθούν τον ήλιο συνεχώς, όλη την ημέρα. Ο συλλέκτης μπορεί να τοποθετηθεί σε κατεύθυνση ανατολής - δύσης, ακολουθώντας τον ήλιο από το βορρά στο νότο ή να προσανατολιστεί σε κατεύθυνση βορρά - νότου και να ακολουθεί τον ήλιο από την ανατολή στη δύση. Σε διάστημα ενός χρόνου, ένα οριζόντιο ηλιακό πεδίο βορρά - νότου συνήθως συλλέγει ελαφρώς περισσότερη ενέργεια από ένα οριζόντιο ηλιακό πεδίο ανατολής - δύσης. Πιο συγκεκριμένα, το πεδίο βορρά - νότου συλλέγει αρκετή ενέργεια το καλοκαίρι και πολύ λιγότερη το χειμώνα, ενώ το πεδίο ανατολής - δύσης περισσότερη ενέργεια το χειμώνα και λιγότερη το καλοκαίρι, παρέχοντας ένα πιο συνεχές ετήσιο αποτέλεσμα. Έτσι, η επιλογή του προσανατολισμού συνήθως εξαρτάται από την εφαρμογή και από το αν χρειάζεται περισσότερη ενέργεια το καλοκαίρι ή το χειμώνα. Ένας μηχανισμός παρακολούθησης πρέπει να είναι αξιόπιστος και ικανός να ακολουθεί τον ήλιο με έναν ορισμένο βαθμό ακρίβειας, να τον ακολουθεί κατά τη διάρκεια περιόδων με διακοπόμενη νέφωση και να επιστρέφει το συλλέκτη στην αρχική του θέση, στο τέλος της ημέρας. Επιπρόσθετα, οι μηχανισμοί παρακολούθησης χρησιμοποιούνται για την προστασία των συλλεκτών, στρέφοντας το συλλέκτη εκτός εστίασης, για να τον προστατέψουν από επικίνδυνες καιρικές και λειτουργικές συνθήκες (όπως ριπές ανέμων, υπερθέρμανση και αποτυχία του μηχανισμού ροής του θερμικού υγρού). Η απαιτούμενη ακρίβεια του μηχανισμού παρακολούθησης εξαρτάται από τη γωνία αποδοχής του συλλέκτη.

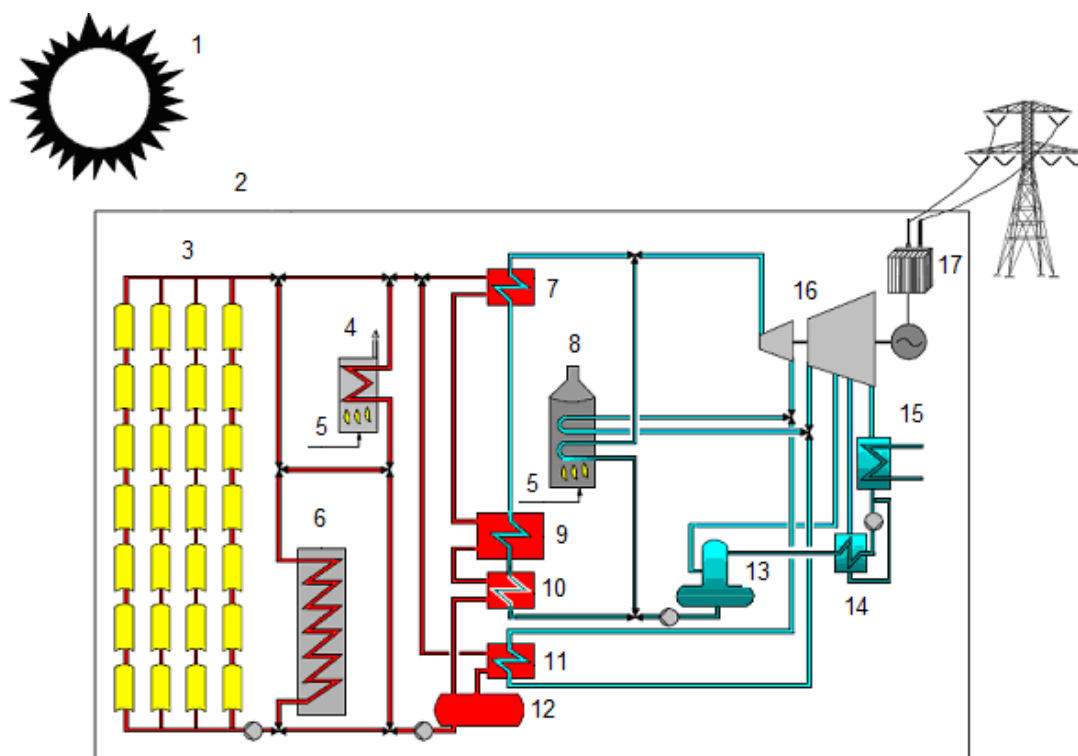
Πολλά είδη μηχανισμών παρακολούθησης, που κυμαίνονται από σύνθετα έως πολύ απλά, έχουν προταθεί. Μπορούν να διαχωριστούν σε δυο ευρείες κατηγορίες: στα μηχανικά

συστήματα και στα ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά συστήματα. Τα ηλεκτρονικά συστήματα γενικά παρουσιάζουν βελτιωμένη αξιοπιστία και ακρίβεια παρακολούθησης [1].

### ➤ Σύστημα αποθήκευσης

Τέλος, το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας κάνει τον ηλιοθερμικό σταθμό να συνεχίζει τη λειτουργία του, χρησιμοποιώντας την αποθηκευμένη ενέργεια όταν η ημέρα δεν είναι καθαρή ή κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Ένας ηλιοθερμικός σταθμός, που χρησιμοποιεί ηλιακούς συλλέκτες τύπου σκάφης φαίνεται στο Σχήμα 2.2:



**Σχήμα 2.2: Ηλιοθερμικός σταθμός με συλλέκτες τύπου σκάφης.**

Όπου: (1) η ηλιακή ακτινοβολία, (2) τα όρια συστήματος, (3) το ηλιακό πεδίο, (4) θέρμανση του μέσου μεταφοράς θερμότητας (προαιρετικά), (5) το καύσιμο, (6) η αποθήκη θερμότητας (προαιρετικά), (7) ο ηλιακός υπερθερμαντής, (8) ο ατμοπαραγωγός καυσίμου (προαιρετικά), (9) ο ηλιακός ατμοπαραγωγός, (10) ο ηλιακός προθερμαντήρας, (11) ο ηλιακός αναθερμαντής, (12) η δεξαμενή διαστολής, (13) ο απαιρωτής, (14) ο προθερμαντήρας χαμηλής πίεσης, (15) ο συμπυκνωτής, (16) ο αμοστρόβιλος, (17) υποσταθμός [11].

Η τεχνολογία των συλλεκτών με παραβολικά κάτοπτρα (trough collectors). έχει εφαρμοστεί ήδη στην πλειοψηφία των ηλιοθερμικών σταθμών. Σε παγκόσμιο επίπεδο οι εγκαταστάσεις ξεπερνούν το 1 GW ετησίως.

Στη νότια Καλιφόρνια η λειτουργία τέτοιων σταθμών ξεκίνησε από το 1984 με τον SEGS I, ο οποίος έχει ονομαστική ισχύ 13.8 MW και παράγει 30,1 GWh ετησίως σε έκταση 29 εκταρίων και ακολούθησε μια εξελιγμένη σειρά τέτοιων σταθμών, όπως φαίνεται παρακάτω:

SEGS II: Πρώτο έτος λειτουργίας το 1985, με εγκατεστημένη ισχύ 30 MW και παραγωγή 80.5 GWh/ έτος, σε έκταση 67 εκταρίων.

SEGS III: Λειτούργησε το 1986 έχοντας ονομαστική ισχύ 30 MW και παραγωγή 91.3 GWh το χρόνο, σε έκταση 80 εκταρίων.

SEGS IV: Η λειτουργία του ξεκίνησε επίσης, το 1986, με την ίδια ισχύ των 30 MW και την ίδια παραγωγή ισχύος με τον SEGS III, σε έκταση 80 εκταρίων.

SEGS V: Ξεκίνησε να λειτουργεί το 1987. Η ονομαστική του ισχύς είναι 30 MW και παράγει 99.2 GWh/ χρόνο, σε 87 εκτάρια.

SEGS VI: Λειτούργησε το 1988 και έχει εγκατεστημένη ισχύ 30 MW, παράγοντας 90.9 GWh το χρόνο, σε έκταση 66 εκταρίων.

SEGS VII: Από το 1988 άρχισε να λειτουργεί έχοντας ισχύ 30 MW και παράγοντας 92.6 GWh το χρόνο, σε έκταση 68 εκταρίων.

SEGS VIII: Πρώτο έτος λειτουργίας το 1989, με ονομαστική ισχύ 80 MW και παραγωγή ηλεκτρισμού 252.8 GWh ετησίως, σε έκταση 162 εκταρίων.

SEGS IX: Η λειτουργία του ξεκίνησε το 1990, με ονομαστική ισχύ 80 MW και παραγωγή ηλεκτρισμού 256.1 GWh /έτος, σε έκταση 169 εκταρίων.

Το σύνολο των εννέα αυτών σταθμών αποτελεί σήμερα, το μεγαλύτερο σύμπλεγμα ηλιακής ενέργειας, συνολικής ισχύος 354 MW και καταλαμβάνει πάνω από 6.400 στρέμματα γης, ενώ όλο το ηλιακό πεδίο του SEGS περιλαμβάνει πάνω από δυο εκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα επιφάνειας παραβολικών κατόπτρων. Ένας τέτοιος σταθμός φαίνεται στο Σχήμα 2.3:



**Σχήμα 2.3: Άποψη σταθμού SEGS.**

Ακόμη, στις ΗΠΑ το 2007 και πιο συγκεκριμένα στη Νεβάδα ξεκίνησε τη λειτουργία του, ο σταθμός Nevada Solar One. Η εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς είναι 64 MW, παράγοντας 130 GWh ετησίως. Ο σταθμός αυτός καταλαμβάνει 1.600 στρέμματα, ενώ η επιφάνεια του ηλιακού του πεδίου είναι 357.000 τετραγωνικά μέτρα. Μπορεί να τροφοδοτήσει 14.000 νοικοκυριά ετησίως.

Στην Ευρώπη, τα πρωτεία σε αυτή την τεχνολογία τα κατέχει η Ισπανία έχοντας κατασκευάσει αρκετούς σταθμούς παραβολικών κατόπτρων.

Ο πρώτος σταθμός που κατασκευάστηκε είναι ο Andasol Solar Power, στην επαρχία της Γρενάδας. Αποτελείται από δύο όμοιους σταθμούς, τον Andasol 1 και τον Andasol 2 ισχύος 50 MW και με παραγωγή 180 KWh ετησίως, ο καθένας. Καταλαμβάνει περίπου 2.000 στρέμματα γης και έχει 510.120 τ. μ. έκταση ηλιακού πεδίου έκαστος. Ακόμη διαθέτει δυο δεξαμενές τηγμένων αλάτων για αποθήκευση.

Αυτό το σύμπλεγμα των σταθμών φαίνεται στο Σχήμα 2.4:



**Σχήμα 2.4: Οι σταθμοί με παραβολικά κάτοπτρα Andasol 1 και 2 .**

Από το 2009 λειτουργεί και ο σταθμός Ibersol Ciudad Real ισχύος 50 MW, ο οποίος έχει σύστημα αποθήκευσης με δεξαμενές τηγμένων αλάτων.

Τον ίδιο χρόνο λειτούργησε και ο σταθμός Alvarado 1 ισχύος 50 MW, στην Extremadura της Ισπανίας, ο οποίος καταλαμβάνει 1.300 στρέμματα γης.

Ο σταθμός Solnova κατασκευάστηκε το 2010 στην περιοχή της Σεβίλλης και αποτελείται από τους Solnova1,3 και 4, όπου ο καθένας έχει εγκατεστημένη ισχύ 50 MW. Ο Solnova1 έχει 260.000 m<sup>2</sup> ηλιακού πεδίου, ενώ καλύπτει 1.200 στρέμματα και παράγει 115 GWh ετησίως. Ο σταθμός αυτός περιλαμβάνει βοηθητικό λέβητα φυσικού αερίου.

Το 2010 επίσης, κατασκευάστηκε και ο Extresol Solar Power Station, που αποτελείται από τους Extresol 1 και 2, και βρίσκεται στην επαρχία της Μπανταγιόζ στην Ισπανία. Ο Extresol 1 έχει ονομαστική ισχύ 50 MW και παράγει περίπου 178 GWh ετησίως. Το ηλιακό του πεδίο είναι 510.120 τετραγωνικά μέτρα και έχει έκταση περίπου 2.000 στρέμματα.

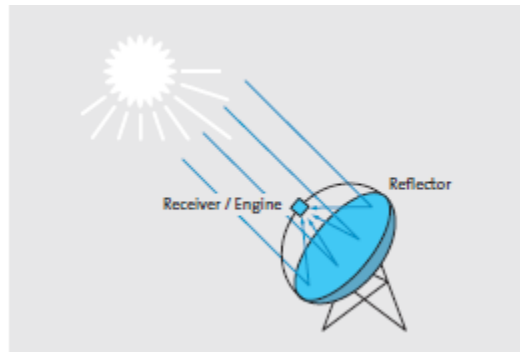
Το 2010 πραγματοποιήθηκε η κατασκευή και άλλων σταθμών στην Ισπανία μεγέθους 50 MW.

Σήμερα κατασκευάζονται κι άλλοι ηλιοθερμικοί σταθμοί, κυρίως στις ΗΠΑ και στην Ισπανία. Στην Ισπανία προωθεί σε αυτό το στόχο και η κυβέρνηση, καθώς εγγυάται την αγορά της ενέργειας από τέτοιους σταθμούς, σε καλές τιμές.

Στις ΗΠΑ κατασκευάζεται ο σταθμός Solana μεγέθους 280 MW στην Αριζόνα. Ακόμη, στην Καλιφόρνια ένας πολύ μεγάλος σταθμός βρίσκεται υπό κατασκευή, αποτελούμενος από τέσσερις σταθμούς των 242 MW ο καθένας.

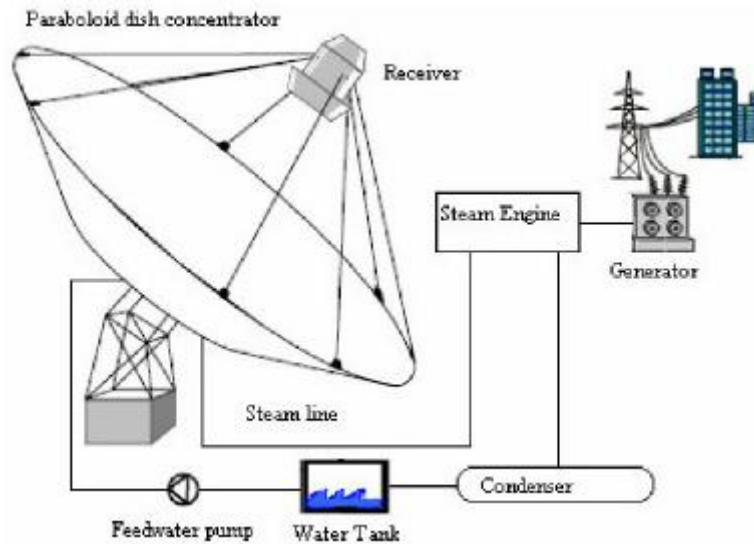
Όμως κι άλλες χώρες, κυρίως οι αραβικές αρχίζουν να κατασκευάζουν ηλιοθερμικούς σταθμούς, ενώ τέλος και στην Ελλάδα γίνονται κάποιες προσπάθειες, για την υλοποίηση του σταθμού Θησέας στην Κρήτη [2],[11],[12],[13],[14].

## 2.3 Ηλιοθερμικοί Σταθμοί με Παραβολικά Πιάτα ως Συλλέκτες



**Σχήμα 2.5: Παραβολικό πιάτο.**

Το σύστημα αυτό συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία στο σημείο εστίασης του παραβολικού πιάτου. Τότε ο λήπτης, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο σημείο εστίασης, συλλέγει την θερμική ενέργεια για να ζεστάνει το εργαζόμενο υγρό. Το υγρό κινεί μια τουρμπίνα για να παράγει ηλεκτρισμό. Το σύστημα του πιάτου μπορεί επίσης να παράγει ηλεκτρισμό χρησιμοποιώντας μια μηχανή Stirling που είναι εγκατεστημένη στο σημείο εστίασης. Η μηχανή Stirling είναι ο πιο κοινός τύπος θερμικής μηχανής που χρησιμοποιείται στα συστήματα πιάτου. Το όλο σύστημα συμπεριλαμβάνει το παραβολικό πιάτο, τον λήπτη, τη συσκευή παρακολούθησης και το σύστημα συσσώρευσης ενέργειας. Το σύστημα μπορεί να παράγει μια ασυνήθιστη θερμοκρασία των  $750^{\circ}\text{C}$ , εξαιτίας του παραβολικού πιάτου. Η φωτοθερμική απόδοση μπορεί να φτάσει το 85%, ποσοστό το οποίο είναι το υψηλότερο από τις τρεις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν και στην αρχή. Το σύστημα του πιάτου μπορεί να είναι ανεξάρτητο με ισχύ 10-25kW, αλλά και σε μορφή παράλληλης σύνδεσης, για να συνθέσει έναν σταθμό [9]. Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται και στο Σχήμα 2.6:

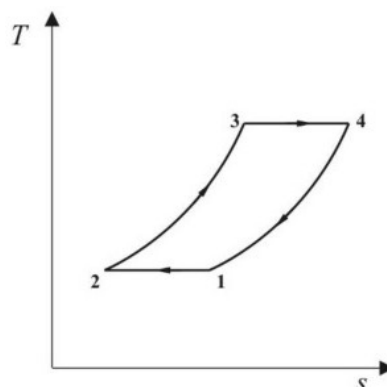


Σχήμα 2.6: Ηλιοθερμικός σταθμός με παραβολικό πιάτο [15].

Όπως φαίνεται ο ατμός κινεί τον ατμοστρόβιλο και μετά μέσω ενός συμπυκνωτή το υγρό επιστρέφει στον λήπτη. Στη συνέχεια αναλύεται λίγο περισσότερο το σύστημα του πιάτου:

### ➤ Μηχανή Stirling

Η μηχανή Stirling κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1816, από τον Reverend Robert Stirling. Είναι μια ερμητικά σφραγισμένη εμβολοφόρα μηχανή, που δουλεύει με την επαναλαμβανόμενη θέρμανση και ψύξη μιας ποσότητας εργαζόμενου αερίου, συνήθως κοινού αέρα ή άλλου κατάλληλου αερίου όπως υδρογόνο ή ήλιο. Η αναπαράσταση θερμοκρασίας - εντροπίας του κύκλου Stirling φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα λειτουργίας Θερμοκρασίας (T) – Εντροπίας (s) του κύκλου Stirling.



Στον ιδανικό κύκλο Stirling η θερμότητα (δηλαδή η ενέργεια) μεταφέρεται στο εργαζόμενο υγρό μέσω της αλληλουχίας 2→3→4. Αντιστρόφως, θερμότητα (ενέργεια) εξάγεται από το εργαζόμενο υγρό κατά τη διάρκεια της σειράς 4→1→2. Αυτό σημαίνει ότι (ιδανικά) θερμότητα εισάγεται από μια εξωτερική πηγή μόνο κατά τη διάρκεια της ισοθερμικής αλληλουχίας 3→4 και ότι θερμότητα εκλύεται στο περιβάλλον μόνο στο ισοθερμικό κομμάτι 1→2. Η μεγαλύτερη πρόκληση που αφορά τον κύκλο Stirling σχετίζεται με την εσωτερική ανταλλαγή θερμότητας [7].

### ➤ **Ηλιακοί συλλέκτες**

Το μέγεθος του ηλιακού συλλέκτη (δηλαδή του συγκεντρωτή), των συστημάτων πιάτου με μηχανή Stirling προσδιορίζεται από την επιθυμητή ισχύ εξόδου στα μεγαλύτερα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, όπως επίσης και από την απόδοση του συλλέκτη και την απόδοση της μετατροπής της ενέργειας (θερμική σε ηλεκτρική). Με τις παρούσες τεχνολογίες ένα σύστημα πιάτου - Stirling των 5 kWe απαιτεί ένα πιάτο με διάμετρο περίπου 5,5m, ενώ για ένα σύστημα των 25 kWe είναι απαραίτητη, η εγκατάσταση ενός πιάτου με διάμετρο περίπου 10 m.

Κάνοντας μία αναφορά στο παρελθόν, ως ανακλαστές χρησιμοποιούνταν λεπτοί γυάλινοι καθρέπτες με μια επαργυρωμένη πίσω επιφάνεια. Κάποιοι πιο πρόσφατοι σχεδιασμοί χρησιμοποιούν πολυμερείς μεμβράνες με αλουμίνιο ή άργυρο δημιουργώντας μια ανακλαστική επιφάνεια.

Το ιδανικό σχήμα για τις ανακλαστικές επιφάνειες ενός ηλιακού συλλέκτη είναι παραβολοειδές. Παρόλα αυτά, στην πράξη είναι ευκολότερο να κατασκευαστούν σφαιρικά σχηματισμένες επιφάνειες. Οι σφαιρικές επιφάνειες επίσης συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία, όταν η απόσταση του σημείου εστίασης είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μην σκιάζει πολύ την επιφάνεια του καθρέπτη, επειδή η παραβολή μπορεί να προσεγγιστεί σε τόσο μικρό τμήμα.

Μερικοί συλλέκτες, για τα συστήματα πιάτου – Stirling, χρησιμοποιούν πολλαπλές έδρες από σφαιρικούς καθρέπτες, που υποστηρίζονται από μια δομή στήριξης, με κάθε έδρα να στοχεύει μεμονωμένα, έτσι ώστε αθροιστικά να προσεγγίζεται ένα παραβολοειδές. Αυτή η προσέγγιση στο σχεδιασμό των συλλεκτών δημιουργεί πολύ μεγάλη ακρίβεια εστίασης. Παράδειγμα ενός τέτοιου συλλέκτη φαίνεται στο Σχήμα 2.8:



**Σχήμα 2.8: Παραβολικό πιάτο με πολλές έδρες και μηχανική υποστήριξη.**

Μια πρόσφατη καινοτομία στο σχεδιασμό των ηλιακών συλλεκτών είναι η χρήση τεντωμένων μεμβρανών. Εδώ, μια μικρή ανακλαστική μεμβράνη τεντώνεται κατά μήκος ενός χείλους (ή στεφάνης) και μια δεύτερη μεμβράνη χρησιμοποιείται για να κλείσει το διάστημα από πίσω. Ένα μερικό κενό συντάσσεται σε αυτό το διάστημα, φέρνοντας την ανακλαστική μεμβράνη σε ένα σχεδόν σφαιρικό σχήμα. Αν χρησιμοποιούνται πολλές έδρες, η περιοχή εστίασης θα είναι πολύ μακριά και το σφαιρικό σχήμα των εδρών παρέχει μια επαρκή ηλιακή συγκέντρωση για τις εφαρμογές πιάτου-Stirling.

Αν μόνο μία ή λίγες τεντωμένες μεμβράνες χρησιμοποιούνται, το σχήμα της επιφάνειας θα πρέπει να προσεγγίζει παραβολοειδές. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να επιτευχθεί με την εξαρχής διάπλαση της μεμβράνης σε παραβολοειδές σχήμα και χρησιμοποιώντας τη διαφορά πίεσης μεταξύ του μπροστινού και του πίσω μέρους για να στηριχτεί η επιφάνεια και να διατηρήσει το σχήμα της [7].

#### ➤ **Συσκευή παρακολούθησης**

Για τη δυνατότητα ανίχνευσης του ήλιου, οι συγκεντρωτές πρέπει να είναι ικανοί να κινούνται πάνω σε δύο άξονες. Γενικά, υπάρχουν δύο τρόποι για να εφαρμοστεί αυτό, έχοντας τα ανάλογα πλεονεκτήματα:

- *Αζιμουθιακή- ανυψωτική ανίχνευση:* το πιάτο περιστρέφεται σε ένα επίπεδο παράλληλο με τη γη (αζιμούθιο) και σε ένα άλλο επίπεδο κάθετο σε αυτό (ανύψωση). Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο συλλέκτη για περιστροφές πάνω ή κάτω και αριστερά ή δεξιά. Οι

τιμές περιστροφής και στους δυο άξονες ποικίλουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά είναι προβλέψιμες.

- *Πολική ανίχνευση:* ο συλλέκτης περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα παράλληλο με τον άξονα περιστροφής της γης. Ο συλλέκτης περιστρέφεται σε μια σταθερή τιμή των 15 μοιρών ανά ώρα, με την ίδια τιμή περιστροφής, όπως η γη. Ο άλλος άξονας περιστροφής, που λέγεται άξονας απόκλισης, είναι κάθετος στον πολικό άξονα. Η κίνηση σε αυτόν τον άξονα γίνεται αργά και κυμαίνεται στις  $\pm 23,5$  μοίρες σε έναν χρόνο (με μέγιστη τιμή τις 0,016 μοίρες την ώρα) [7].

### ➤ *Λήπτης*

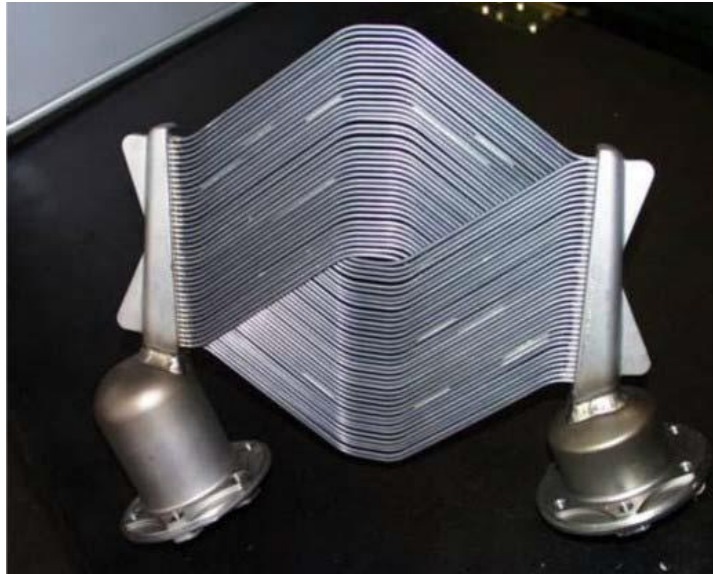
Η συγκεντρωμένη ακτινοβολία κατευθύνεται σε ένα λήπτη, ο οποίος έχει δύο βασικές λειτουργίες :

- (1) να απορροφά όσο περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται από τον συγκεντρωτή και
- (2) να μεταφέρει αυτή την ενέργεια ως θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο της μηχανής.

Οι λήπτες, για τα συστήματα πιάτου/ Stirling είναι συνήθως κοίλοι, με ένα μικρό άνοιγμα (οπή), μέσω του οποίου εισέρχεται το συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Ο απορροφητής είναι τοποθετημένος πίσω από την οπή, ώστε να περιορίζεται η πυκνότητα της ροής εκεί. Η μονωμένη κοιλότητα μεταξύ της οπής και του απορροφητή μειώνει το ποσό της απώλειας θερμότητας. Η οπή του λήπτη έχοντας βελτιστοποιηθεί, είναι αρκετά μεγάλη για να λάβει το περισσότερο από το προσπίπτων ηλιακό φως, αλλά αρκετά μικρή, με σκοπό να περιορίζονται οι απώλειες ακτινοβολίας και διάδοσης θερμότητας.

Σε ένα λήπτη χρησιμοποιούνται δυο μέθοδοι μεταφοράς ηλιακής ακτινοβολίας προς το εργαζόμενο αέριο μίας μηχανής Stirling.

Στην πρώτη, όπου υπάρχει ένας λήπτης με ευθέως φωτιζόμενο σωλήνα, μικροί σωλήνες μέσω των οποίων το εργαζόμενο αέριο της μηχανής ρέει, τοποθετούνται κατευθείαν στην περιοχή του λήπτη με τη συγκεντρωμένη ηλιακή ροή. Αυτοί οι σωλήνες σχηματίζουν την επιφάνεια του απορροφητή, όπως φαίνεται και στο παράδειγμα του Σχήματος 2.9:



**Σχήμα 2.9: Ο λήπτης του Eurodish, ένα παράδειγμα λήπτη με ευθέως φωτιζόμενο σωλήνα.**

Στη δεύτερη, οι λήπτες με αγωγούς θερμότητας χρησιμοποιούν νάτριο ή ένα μείγμα νατρίου και καλίου, για τη μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια του λήπτη στην κεφαλή θέρμανσης της μηχανής. Οι αγωγοί θερμότητας χρησιμοποιούν ένα τριχοειδές φυτίλι για να διανείμουν το υγρό μέταλλο πάνω από την πίσω επιφάνεια του απορροφητή. Το υγρό μέταλλο εξατμίζεται, ο ατμός μεταφέρεται στην κεφαλή θέρμανσης της μηχανής, όπου συμπυκνώνεται και το υγρό μέταλλο ξαναρρέει στον απορροφητή. Σε αυτούς τους λήπτες, το υγρό μέταλλο συμπυκνώνεται σε μια σταθερή θερμοκρασία παρέχοντας μια ομοιόμορφη θέρμανση στη μηχανή Stirling. Αντιθέτως, οι λήπτες με ευθεία ακτινοβολήση μπορούν να έχουν μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας σε διαφορετικά μέρη της οπής ή κατά μήκος των σωλήνων του λήπτη. Τα υλικά του λήπτη τυπικά περιορίζουν την μέγιστη θερμοκρασία του λήπτη και επομένως και την απόδοση.

Συμπερασματικά, τα συστήματα πιάτου/Stirling έχουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά, εξαιτίας της υψηλής επίδοσης του συγκεντρωτή και της μηχανής και εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αδράνειας που επιτρέπει ένα γρήγορο ξεκίνημα, συγκρινόμενα με ηλιοθερμικά συστήματα μεγάλης κλίμακας [7].

Υπάρχουν αρκετά μικρά συστήματα παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία, από 10 KW έως και πάνω από 100 KW (όπως για παράδειγμα, το Big Dish του Εθνικού Πανεπιστημίου της Αυστραλίας – ANU). Οι περισσότερες εφαρμογές είναι εκτός δικτύου και χρησιμοποιούνται για απομονωμένες περιοχές.

Τα συστήματα πιάτου/μηχανής Stirling έχουν εξαιρετικές προοπτικές, σε υψηλούς βαθμούς απόδοσης - μετατροπής των υψηλών θερμοκρασιών, που επιτυγχάνονται στη μηχανή.

Πρωτότυπα συστήματα πιάτου/μηχανής έχουν επιτυχημένα λειτουργήσει τα τελευταία χρόνια στις ΗΠΑ, με ισχύ από 7 έως 25 KW.

Ένας οικονομικά αποδοτικός δίσκος αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος EURO-DISH, ισχύος 10 KW.

Ένα άλλο σύστημα πιάτου που σχεδιάζεται ονομάζεται SunCatcher και είναι ένα σύστημα των 25 KW, που αποτελείται από ένα δίσκο διαμέτρου 38 ποδιών, που έχει 82 κούλα κάτοπτρα, διαστάσεων 3 επί 4 πόδια το καθένα. Το πρώτο εμπορικό πάρκο τέτοιας τεχνολογίας είναι το Maricopa Solar στην Αριζόνα. Έχει ισχύ 1.5 MW και αποτελείται από 60 πιάτα SunCatcher.

Το σύστημα Big Dish είναι ένα πιάτο επιφάνειας 400 τετραγωνικών μέτρων, το οποίο έχει 54 τριγωνικά πάνελ καθρεπτών που στηρίζονται σε έναν πλαίσιο εξαγωνικού σχήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Χρησιμοποιείται υψομετρικό σύστημα ανίχνευσης ήλιου, με τον οριζόντιο άξονα κοντά στη βάση του πιάτου, έτσι ώστε να μπορεί να σταματά στην οριζόντια θέση κοντά στο έδαφος. Αυτό το βοηθά να μειώσει τις πιέσεις από τους ανέμους και έτσι να «επιβιώνει» από πολύ ισχυρές καταιγίδες. Ακόμη χρησιμοποιεί ένα σύστημα αποθήκευσης, που βασίζεται στη θερμοχημική διαδικασία της διάσπασης και σύνθεσης της αμμωνίας. Με αυτόν τον τρόπο, ο δίσκος λειτουργεί σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας, αλλά και σε νυχτερινές ώρες.



**Σχήμα 2.10: Το σύστημα ηλιακού πιάτου Big Dish.**

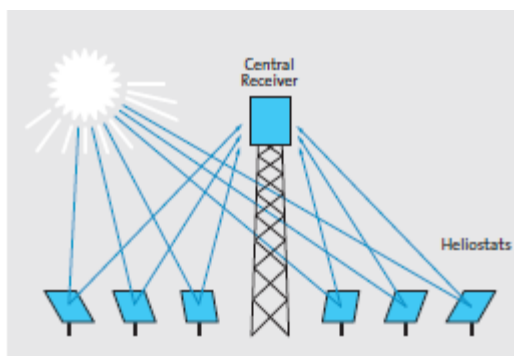
Το 2011, το Ιράν εγκαινίασε το μεγαλύτερο ηλιοθερμικό σταθμό στη Μασάντ, που παράγει 72MWh ετησίως.

Στην Ισπανία λειτουργεί ένας σταθμός έξι πιάτων με μηχανή Stirling. Τα συστήματα έχουν παραγωγή ισχύος 10kW [11],[14],[16],[17]. Ο σταθμός αυτός φαίνεται στο σχήμα 2.11:



Σχήμα 2.11: Ο σταθμός έξι πιάτων στην Ισπανία.

## 2.4 Ηλιοθερμικοί Σταθμοί με Ηλιακό Πύργο



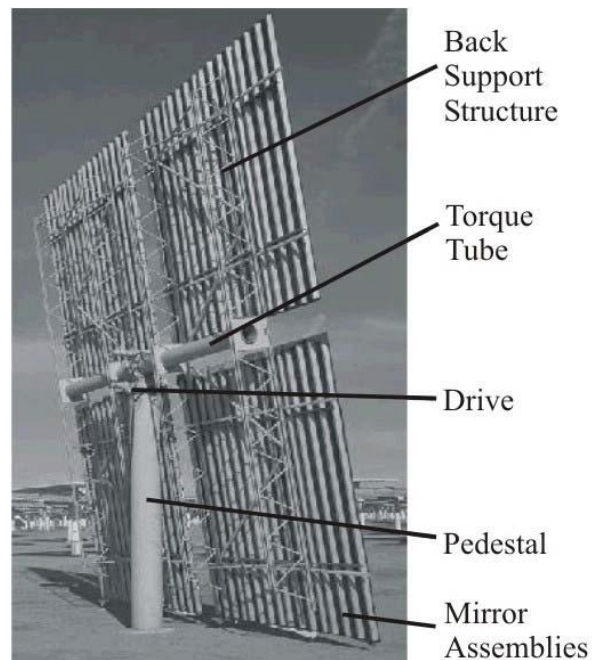
Σχήμα 2.12: Ηλιακός πύργος.

Το σύστημα του πύργου λειτουργεί επίσης με συγκεντρωμένη ηλιοθερμική ισχύ. Στα συστήματα πύργου ή κεντρικού λήπτη, ο ηλιακός λήπτης βρίσκεται στην κορυφή ενός πύργου και το ηλιακό φως συγκεντρώνεται με τη βοήθεια ενός τεράστιου παραβολοειδούς, που διαχωρίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό από ηλιοστάσια. Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στο λήπτη, και η ενέργεια αυτή μεταφέρεται στο εργαζόμενο υγρό. Εν συνέχεια, το υγρό αυτό κινεί μία τουρμπίνα παράγοντας ηλεκτρισμό. Τα μεγέθη των σταθμών που επιλέγονται είναι της τάξεως των 10 έως 200 MW εξαιτίας οικονομικών περιορισμών, παρόλο που ολοκληρωμένα σχέδια υποστηρίζουν οικονομικές απόψεις για μικρότερες μονάδες επίσης. Οι μεγάλες ηλιακές διακυμάνσεις που προσκρούουν στο λήπτη (μέσες τιμές μεταξύ  $300\text{-}1000\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) επιτρέπουν τη λειτουργία σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες περίπου  $1000^{\circ}\text{C}$  και την ενσωμάτωση θερμικής ενέργειας, σε πιο αποδοτικούς κύκλους. Τα συστήματα αυτά μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε σταθμούς, που λειτουργούν με ορυκτό καύσιμο, με σκοπό την υβριδική λειτουργία σε μια

μεγάλη ποικιλία από εκδοχές ή ακόμη έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρισμό με μεγάλους ετήσιους παράγοντες απόδοσης χρησιμοποιώντας θερμική αποθήκευση. Πιο αναλυτικά, η λειτουργία του συστήματος έχει ως εξής:

### ➤ **Ηλιοστάσια**

Το σύστημα περιλαμβάνει εκατοντάδες ηλιοστάσια, λήπτη, παραγωγό ατμού, σύστημα συσσώρευσης θερμότητας και τη μονάδα της τουρμπίνας. Ένα ηλιοστάσιο αποτελείται από επίπεδο καθρέπτη, τη συσκευή παρακολούθησης, και το σύστημα στήριξης. Οι επιφάνειες των καθρεφτών φτιάχνονται από λεπτό επάργυρο γυαλί, το οποίο μπορεί να έχει μικρό ποσό σιδήρου, που προκαλεί μια ενισχυμένη ανακλαστικότητα, μια υψηλότερη αντίσταση στην οξείδωση και επομένως μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Για ένα ηλιοστάσιο είναι σημαντικό, οι όψεις των καθρεπτών να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι εικόνες τους να εστιάζονται στην κορυφή του πύργου. Τα μεγαλύτερα ζητήματα για τον σχεδιαστή των ηλιοστασίων είναι η διατήρηση της ευθυγράμμισης του καθρέπτη με τον ήλιο και η παροχή δομικής στερεότητας. Μέχρι τώρα οι πιο κοινοί τύποι στήριξης από το έδαφος είναι η στήριξη επί τόπου σε ένα σωληνοειδές βάθρο. Για την παρακολούθηση του ήλιου, χρησιμοποιήθηκαν δομές με γωνιόμετρο πολικής ανίχνευσης. Οι έλεγχοι ανίχνευσης πραγματοποιούνται με τα ηλεκτρονικά και τους αλγορίθμους ελέγχου, που χρησιμοποιούνται για να καθοδηγούν τα μοτέρ οδήγησης, για τη διατήρηση της θέσης του συγκεντρωτή σχετική με τον ήλιο. Κάθε ηλιοστάσιο ελέγχεται από υπολογιστή. Ο οδηγός (drive) του συγκεντρωτή προκαλεί το ηλιοστάσιο να κινηθεί σε δυο άξονες, αζιμούθιου και ανύψωσης, για να απεικονίσει την εικόνα του ήλιου σε μια κάθετη τοποθεσία στον πύργο. Στο σχήμα 2.13 απεικονίζονται κάποια εξαρτήματα του ηλιοστασίου.



**Σχήμα 2.13: Τα σημαντικότερα εξαρτήματα ενός ηλιοστασίου.**

Το πεδίο των ηλιοστασίων συγκεντρώνει ηλιακό φως και η συγκέντρωση αυτή είναι ικανή να επιτύχει θερμοκρασίες πάνω από 1200 °C στο λήπτη. Για παράδειγμα, ένας σταθμός 100MW απαιτεί περίπου ένα εκατομμύριο m<sup>2</sup> γυάλινων ηλιοστασίων. Τα ηλιοστάσια αντιπροσωπεύουν περίπου το 40-50% του κόστους του σταθμού, συνεπώς πρέπει να είναι σχετικά χαμηλού κόστους έτσι, ώστε το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από έναν τέτοιο σταθμό να μπορεί να ανταγωνιστεί με το αντίστοιχο κόστος των σταθμών με ορυκτό καύσιμο. Κατά το σχεδιασμό του ηλιακού πεδίου ενός ηλιακού πύργου λαμβάνονται υπόψη παράγοντες, όπως το ύψος του πύργου, η κλίση και το μέγεθος του λήπτη, η απόσταση μεταξύ των ηλιοστασίων που διαμορφώνουν και το τελικό σχέδιο του πεδίου. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ετήσια απόδοση για κάθε έναν από τους πιθανούς συνδυασμούς των παραπάνω παραγόντων. Ο αριθμός των ηλιοστασίων εξαρτάται από τις απαιτήσεις στο σχεδιασμό της ισχύος εξόδου, από την τοπική ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και την οπτική απόδοση του ηλιακού πεδίου [7],[9],[18],[19].

#### ➤ *Λήπτης*

Ο λήπτης είναι το κλειδί του συστήματος, καθώς μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα του εργαζόμενου υγρού, δηλαδή λειτουργεί σαν εναλλάκτης ενέργειας. Οι λήπτες αυτοί κατασκευάζονται από υλικό, το οποίο είναι ανθεκτικό σε μεγάλες θερμοκρασιακές αλλαγές και σε υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Κεραμικές ή μεταλλικές δομές είναι οι πιο κατάλληλες για αυτή την εφαρμογή. Υπάρχουν δύο διαφορετικά σχέδια λήπτη για ηλιακό



πύργο, το εξωτερικό και το κοίλο σχέδιο. Στους κοίλους λήπτες, οι απορροφητές θερμότητας τοποθετούνται μέσα σε μια μονωμένη κοιλότητα. Το σημείο εστίασης του πεδίου των ηλιοστατών συμπίπτει με την οπή της κοιλότητας. Στους εξωτερικούς λήπτες οι επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας εκτίθενται στο περιβάλλον και τοποθετούνται ευθέως στο σημείο εστίασης του πεδίου των ηλιοστατών. Ένα σημαντικό κριτήριο για το σχεδιασμό του λήπτη είναι το επιλεγμένο υγρό μεταφοράς θερμότητας [7],[19].

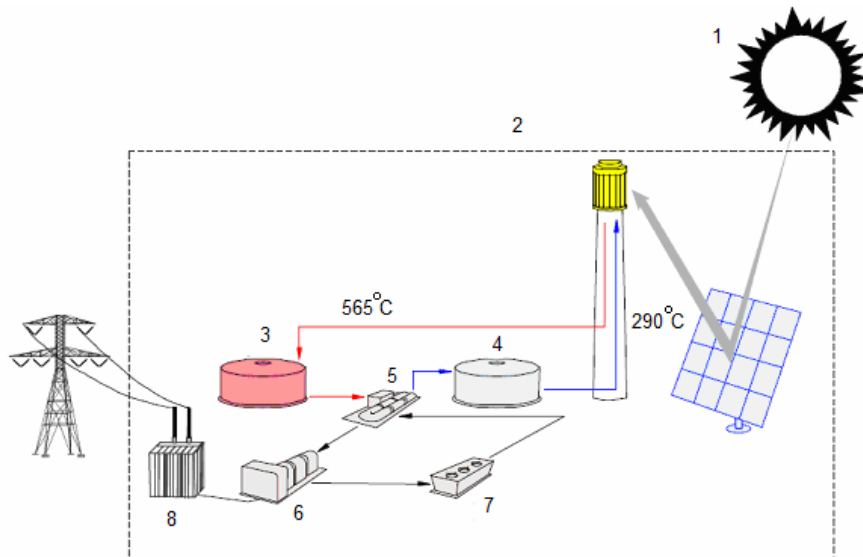
➤ ***Μέσα μεταφοράς θερμότητας***

Το νερό/ατμός είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν στον κύκλο του αμμοτροβίλου, χωρίς περαιτέρω ανταλλαγή θερμότητας. Η εξάτμιση του νερού επίσης, προσφέρει χαρακτηριστικά άριστης μεταφοράς θερμότητας, γεγονός που κάνει τους λήπτες νερού/ατμού να μπορούν να εφαρμοστούν για υψηλή ηλιακή συγκέντρωση. Τα υγροποιημένα νιτρικά άλατα είναι υγρά, σχετικά χαμηλού κόστους, αποτελώντας ως σύνολο, ένα άριστο μέσο μεταφοράς θερμότητας και ένα τέλειο υγρό για την αποθήκευση ενέργειας σε υψηλή θερμοκρασία. Τέλος, ο αέρας είναι μη τοξικός, δεν έχει τυπικούς περιορισμούς στη υψηλή θερμοκρασία και είναι διαθέσιμος με μηδενικό κόστος [7].

➤ ***Σύστημα αποθήκευσης***

Το σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας αποθηκεύει τη θερμική ενέργεια. Διατηρεί την ισορροπία παροχής και ζήτησης ενέργειας του συστήματος, όσο το δυνατόν καλύτερα, όπως γίνεται και στο σταθμό με συλλέκτες τύπου σκάφης. Μπορεί να βασίζεται είτε σε σχεδιασμούς άμεσης αποθήκευσης, όπου το μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται και σαν μέσο αποθήκευσης, είτε σε σχεδιασμούς έμμεσης αποθήκευσης, όπου η θερμότητα μεταφέρεται από το μέσο μεταφοράς θερμότητας στο μέσο αποθήκευσης, το οποίο μπορεί να είναι υγρό ή στερεό. Τα υγροποιημένα νιτρικά άλατα είναι ευνοϊκά υγρά, για άμεση αποθήκευση. Η άμεση αποθήκευση με νερό/ατμό απαιτεί δοχεία υψηλής πίεσης, όπου κορεσμένος υδρατμός μπορεί να αποθηκευτεί. Ο αέρας απαιτεί έμμεση αποθήκευση χρησιμοποιώντας στερεά ως μέσο αποθήκευσης. Οι σταθμοί κεντρικού συλλέκτη έχουν την ικανότητα να λειτουργούν περισσότερο από 4500 ώρες το χρόνο στο πλήρες φορτίο.

Ένας τέτοιος σταθμός φαίνεται πιο κάτω, στο Σχήμα 2.14:



**Σχήμα 2.14: Ηλιοθερμικός σταθμός με ηλιακό πύργο.**

Όπου: (1) η ηλιακή ακτινοβολία, (2) τα όρια συστήματος, (3) η θερμή δεξαμενή αποθήκευσης, (4) η ψυχρή δεξαμενή αποθήκευσης, (5) ο ατμοπαραγωγός, (6) ο ατμοστρόβιλος, (7) ο συμπυκνωτής, (8) ο υποσταθμός [7],[11].

Παρόλο που έχουν γίνει πολλές προσπάθειες, για συστήματα κεντρικού συλλέκτη, μόνο λίγες έχουν μεσουρανήσει στην κατασκευή ολόκληρων πειραματικών συστημάτων. Στον πίνακα 2.1 φαίνονται τα συστήματα σε όλο τον κόσμο που έχουν δοκιμαστεί. Γενικά, μπορεί να παρατηρηθεί ότι μπορούν να χαρακτηρισθούν ως μικρά συστήματα επίδειξης, ανάμεσα στα 0.5MW και στα 10MW, ενώ τα περισσότερα λειτούργησαν τη δεκαετία του 1980. Τα θερμικά υγρά που χρησιμοποιήθηκαν στο λήπτη ήταν υγρό νάτριο, κορεσμένος ή υπερθερμασμένος ατμός, νιτρικά άλατα και αέρας. Η πιο εκτεταμένη εμπειρία έχει συλλεχθεί από πολλά Ευρωπαϊκά προγράμματα στην Ισπανία στην Plataforma Solar de Almeria και στις ΗΠΑ στους σταθμούς των 10 MW Solar One και Solar Two. Η πρώτη γενιά εμπορικών σταθμών μελετήθηκε εκτενώς στη δεκαετία του '90, όπου μια συλλογική μελέτη ΗΠΑ-Γερμανίας εμφάνισε το ενδεχόμενο για σταθμούς τηγμένου άλατος και αερόψυκτους σταθμούς. Πολλές στρατηγικές έχουν προταθεί από τότε, και πολύ περισσότερες μπορεί να αναπτυχθούν στο μέλλον, καθώς οι ηλιακοί πύργοι έχουν το πλεονέκτημα να επιτρέπουν ένα πολύ ευρύ σχέδιο ένταξης, που να βασίζεται σε σενάρια καταναμημένων φορτίων, παράγοντες ετήσιας απόδοσης και σχέδια υβριδοποίησης.

**Πίνακας 2.1: Πειραματικοί σταθμοί ισχύος ανά τον κόσμο [20].**

Πειραματικός Σταθμός	Πρώτο Έτος Λειτουργίας	Χώρα	Ονομαστική Ισχύς (MW)	Μέσο Μεταφοράς Θερμότητας	Μέσο Αποθήκευσης
SSPS	1981	Ισπανία	0.5	Υγρό Νάτριο	Νάτριο
EURELIOS	1981	Ιταλία	1	Ατμός	Νιτρικό Άλας/Νερό
SUNSHINE	1981	Ιαπωνία	1	Ατμός	Νιτρικό Άλας/Νερό
Solar One	1982	ΗΠΑ	10	Ατμός	Έλαιο/ Πέτρα
CESA-1	1983	Ισπανία	1	Ατμός	Νιτρικό Άλας
MSEE/Cat B	1984	ΗΠΑ	1	Υγροποιημένο Άλας	Νιτρικό Άλας
THEMIS	1984	Γαλλία	2.5	Hi-Tec Salt	Hi-Tec Salt
SPP-5	1986	Ρωσία	5	Ατμός	Νερό / Ατμός
TSA	1993	Ισπανία	1	Αέρας	Κεραμικά
Solar Two	1996	ΗΠΑ	10	Υγροποιημένο Άλας	Νιτρικό Άλας

Ο πιο μεγάλος σταθμός από αυτούς είναι ο Solar One στην Καλιφόρνια, ο οποίος λειτούργησε για τέσσερα χρόνια. Το 1996 τροποποιήθηκε και επαναλειτούργησε ως Solar Two. Η τροποποίηση είχε να κάνει με τη χρησιμοποίηση τηγμένου άλατος, ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας και τη μη χρησιμοποίηση νερού και ατμού, σε κανένα κομμάτι της διαδικασίας. Από εκεί διαφάνηκε ότι είναι ένα πολύ καλό μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Ο σταθμός αυτός κατεδαφίστηκε το 2009 προκειμένου να χτιστεί μεγαλύτερος.

Ο σταθμός Solar Two φαίνεται στο σχήμα 2.15:



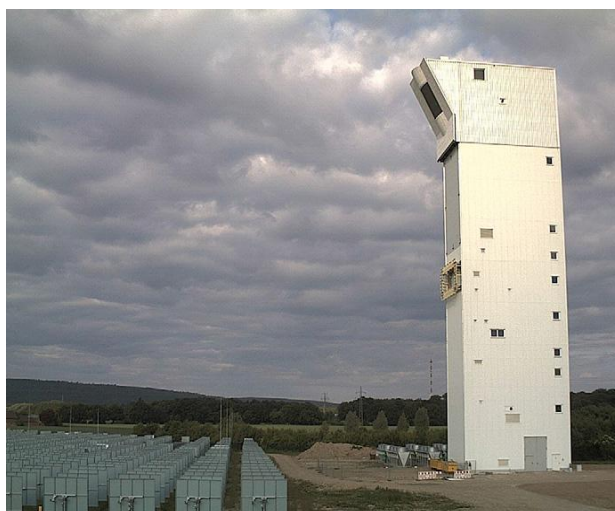
**Σχήμα 2.15: Ο σταθμός Solar Two στις ΗΠΑ.**

Η τεχνολογία του ογκομετρικού δέκτη χρησιμοποιεί ένα μεταλλικό πλέγμα, στο οποίο προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία άμεσα και ψύχεται με τη ροή του αέρα. Αυτό δοκιμάστηκε πρώτη φορά τη δεκαετία του 1990, με το έργο PHOEBUS, για τη λειτουργία συστήματος 1 MW.

Με αυτή την τεχνολογία έχει δημιουργηθεί ο σταθμός PS10. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται κοντά στη Σεβίλλη, στην περιοχή Sanlucar la Mayor. Έχει ονομαστική ισχύ 11.02 MW και παράγει 24.3 GWh/ έτος. Ο πρώτος χρόνος λειτουργίας του ήταν το 2007 και χρησιμοποιεί για αποθήκευση, δεξαμενές πεπιεσμένου ατμού, ενώ διαθέτει και βοηθητικό συμβατικό λέβητα φυσικού αερίου. Η έκταση του σταθμού είναι 600 στρέμματα, έχει 624 ηλιοστάτες, 120 τετραγωνικών μέτρων ο καθένας και το ύψος του πύργου είναι 100.5 μέτρα. Ο βαθμός απόδοσης αυτού του σταθμού είναι 17 %.

Το 2009 λειτούργησε δίπλα στον PS10, ο PS20, με ονομαστική ισχύ 20 MW, γεγονός που τον καθιστά πρώτο στο είδος του. Παράγει 114.6 GWh ετησίως, διαθέτοντας 1255 ηλιοστάτες και το ύψος του πύργου είναι 160 μέτρα. Ο βαθμός απόδοσης του PS20 είναι 19%.

Ακόμη και στη Γερμανία, με σχετικά χαμηλό ηλιακό δυναμικό, η πρώτη κατασκευή ενός ηλιοθερμικού σταθμού, ισχύος 1.5 MWe άρχισε το 2008 και την άνοιξη του 2009 ξεκίνησε να παράγει ηλεκτρισμό. Το όνομά του είναι Test and Demonstration Power Plant Julich. Χρησιμοποιείται τόσο για τη παροχή ηλεκτρισμού στην τοπική κοινωνία, όσο και για επιστημονική και βιομηχανική έρευνα. Είναι ο πρώτος σταθμός παγκοσμίως που χρησιμοποιεί τον αέρα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας και η συνολική επιφάνεια του πεδίου του είναι περίπου 18000 m<sup>2</sup>. Ο σταθμός αυτός φαίνεται στο σχήμα 2.16:



**Σχήμα 2.16: Ηλιακός πύργος Julich.**

Ο σταθμός Gemasolar κοντά στη Σεβίλλη (Σχήμα 2.17), με αρχικό όνομα Solar Tres, λειτούργησε το 2011 και χρησιμοποιεί υγροποιημένο άλας, ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Αυτό του δίνει τη δυνατότητα μεγάλης αποθήκευσης (έως 15 ώρες), πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το καλοκαίρι μπορεί να λειτουργεί σε μόνιμη βάση. Η εγκατεστημένη ισχύς του είναι 17 MW και έχει συνολική επιφάνεια ηλιακού πεδίου 300.000 τετραγωνικά μέτρα, σε έκταση 1420 στρέμματα.



**Σχήμα 2.17: Ηλιακός πύργος Gemasolar.**

Στις ΗΠΑ ο μόνος σταθμός που λειτουργεί από το 2010 είναι ο Sierra SunTower, στη νότια Καλιφόρνια. Η ισχύς του είναι 5 MW και καταλαμβάνει έκταση 81 στρεμμάτων.

Ωστόσο στις ΗΠΑ είναι υπό κατασκευή, ο μεγαλύτερος σταθμός ηλιακού πύργου στον κόσμο. Είναι ο σταθμός Ivanpah Solar Electric Generating System, με ισχύ 392 MW. Θα έχει τρεις σταθμούς σε έκταση 16.000 στρεμμάτων με 347.000 ηλιοστάτες.

Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι σταθμοί που κατασκευάζονται σήμερα, τόσο στις ΗΠΑ, όσο και στην Ισπανία αλλά και στην Κίνα.

Όσον αφορά την απόδοση, οι προβλέψεις λένε ότι έως το 2030, οι ετήσιες αποδόσεις θα αγγίξουν το 20% [2],[11],[14],[19],[20],[21].

Οι τεχνολογικές εξελίξεις πρέπει να επικεντρωθούν στη βελτίωση των αποδόσεων των διαφορετικών εξαρτημάτων, την εκτίμηση της βέλτιστης ολοκλήρωσης με το θερμοδυναμικό κύκλο, τη μείωση του κόστους και την αύξηση της αξιοπιστίας τους και της ανθεκτικότητάς τους.

## 2.5 Σταθμοί Συνδυασμένου Κύκλου

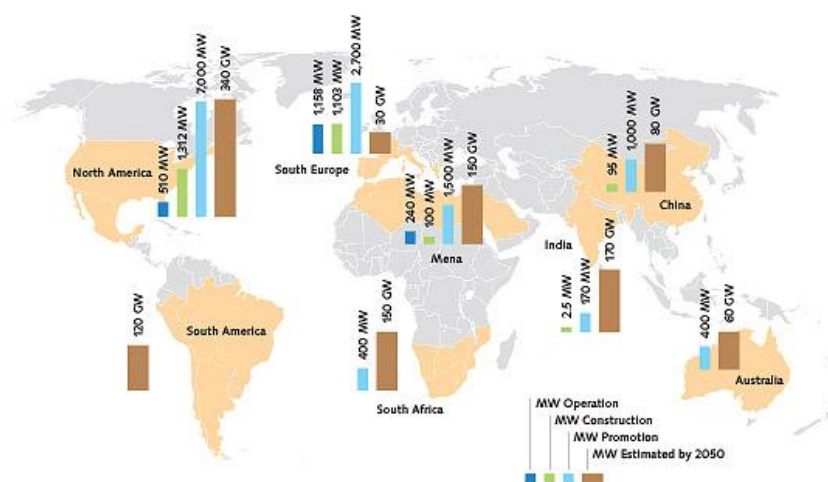
Ο μεγαλύτερος σταθμός συνδυασμένου κύκλου είναι ο Martin Next Generation Solar Energy Center, με ισχύ 75 MW, που βρίσκεται στη Φλόριντα των ΗΠΑ και είναι τμήμα του συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού φυσικού αερίου Martin County Power Plant, εγκατεστημένης ισχύος 3705 MW.

Υπάρχουν άλλοι δυο παρόμοιοι σταθμοί στο Μαρόκο και στην Αίγυπτο ισχύος 20 MW και οι δύο.

Και στην Ευρώπη όμως, υπάρχουν υβριδικόι σταθμοί όπως ο σταθμός Solgate, στον οποίο συνδυάζεται ηλιακή ενέργεια με ορυκτό καύσιμο.

Παράδειγμα υβριδικού σταθμού με παραβολικό πιάτο και μηχανή Stirling, συνδυασμένο με καύσιμο αποτελεί ο σταθμός HYPHIRE, με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί συνεχής αποδοτική λειτουργία, ακόμη και για εφαρμογές που δεν είναι διασυνδεδεμένες στο δίκτυο – κάτι που θα μπορούσε βοηθήσει μικρές απομονωμένες κοινωνίες [2],[14].

Όπως δείχνει και το παρακάτω γράφημα, υπολογίζεται ότι μέχρι το 2050, το παγκόσμιο δυναμικό ενέργειας από ηλιοθερμικούς σταθμούς θα φτάνει τα 1100 GW. 17,7 GW είναι τώρα σε λειτουργία ή υπό κατασκευή.

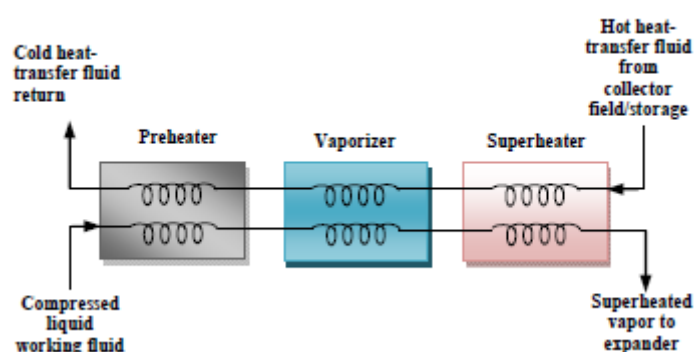


Σχήμα 2.18: Χάρτης προβλεπόμενων ηλιοθερμικών σταθμών το 2050.

## 2.6 Ενδιάμεσο Σύστημα

Κάτι που δεν έχει αναφερθεί καθόλου μέχρι τώρα είναι το ενδιάμεσο σύστημα μεταξύ του ηλιακού πεδίου και του συστήματος ισχύος, αλλά και μεταξύ αυτών των δύο και του συστήματος αποθήκευσης. Το ενδιάμεσο σύστημα είναι μια αλληλουχία από αντλίες και εναλλάκτες θερμότητας. Για τις αντλίες υπάρχουν κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά και επιλέγονται με βάση την επιθυμητή λειτουργία τους από τον χειριστή.

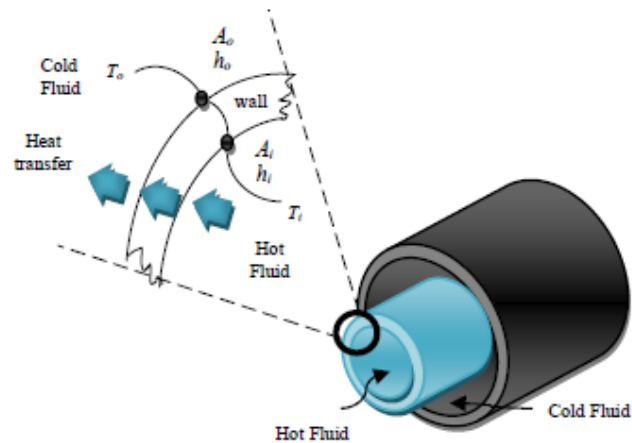
Ο εναλλάκτης θερμότητας, από τη άλλη μεριά, είναι ένα μέσο μετάδοσης της θερμότητας από το ζεστό ρευστό στο κρύο, το οποίο θα κινήσει την τουρμπίνα. Συνήθως, συμπεριλαμβάνει μεταγωγή σε κάθε υγρό και αγωγιμότητα διαμέσου του τείχους, που διαχωρίζει τα δυο υγρά. Αυτές οι επιδράσεις λαμβάνονται υπόψη από έναν ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για τον εναλλάκτη, ο οποίος βασίζεται στις μεμονωμένες αντιστάσεις, λόγω μεταγωγής και αγωγιμότητας μέσω των αντλιών και του τείχους, αλλά και στη γεωμετρία του εναλλάκτη [6]. Υπάρχουν τρία στάδια της διαδικασίας εναλλαγής θερμότητας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:



**Σχήμα 2.19: Στάδια εναλλαγής θερμότητας από το ζεστό στο ψυχρό υγρό.**

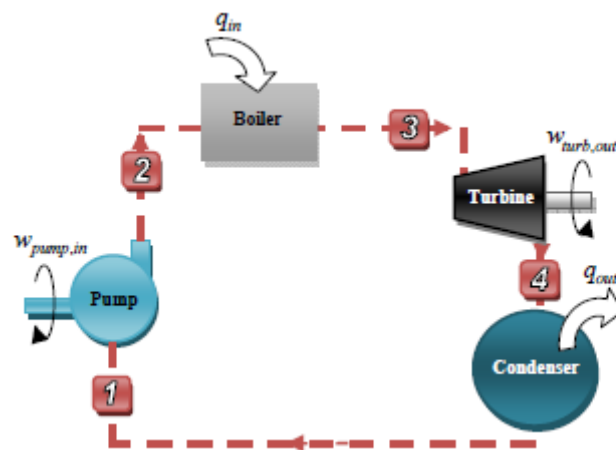
Πιο αναλυτικά, στο Σχήμα 2.20 φαίνεται η αγωγιμότητα της θερμότητας μέσω του διαχωριστικού τείχους, όπου με το σύμβολο  $i$  θεωρούνται οι αντιστάσεις (ενθαλπία, θερμοκρασία και επιφάνεια) εσωτερικά του τείχους και με  $\theta$  τα αντίστοιχα μεγέθη εξωτερικά του τείχους.





Σχήμα 2.20: Στάδια αγωγιμότητας της θερμότητας.

Ένα ακόμη σημαντικό κομμάτι στη λειτουργία του σταθμού είναι ο θερμοδυναμικός κύκλος. Ο κύκλος Rankine είναι ο πιο διαδεδομένος κύκλος για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Έχει αποδειχτεί ότι είναι ο ιδανικός κύκλος, για σταθμούς με ατμό. Καθώς όλα του τα εξαρτήματα (αντλίες, καυστήρας, τουρμπίνα και συμπυκνωτής) είναι διατάξεις σταθερής ροής, ο κύκλος μπορεί να αναλυθεί μέσω εξισώσεων σταθερής ροής ανά μονάδα μάζας ατμού[6]. Σε αυτήν τη μελέτη βέβαια, δε θα αναλυθεί διεξοδικά ο κύκλος Rankine, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 2.21:



Σχήμα 2.21: Ο κύκλος Rankine σχηματικά.

## 2.7 Σύγκριση Τεχνολογιών

Στον πίνακα, που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των τριών τεχνολογιών:



**Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά των τριών συστημάτων [9].**

Χαρακτηριστικό	Σύστημα με trough	Ηλιακός Πύργος	Σύστημα πιάτου
Καλύτερη κλίμακα	≥80 MW	≥100MW	≥100KW
Ποσοστό Συγκέντρωσης*	10~30	500~3000	500~6000
Θερμοκρασία Εργασίας	200~400	500~2000	800~1000
Εργαζόμενο Υγρό	Λάδι, Νερό	Υγροποιημένο Άλας, Νερό, Αέρας	Λάδι, Ήλιο
Συσκευή Ευθυγράμμισης	Ένας Άξονας	Δύο Άξονες	Δύο Άξονες
Αποθήκευση Ενέργειας	Ναι	Ναι	Ναι
Βοηθητική Ενέργεια	Ναι	Ναι	Ναι
Συνεχής Λειτουργία	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Ναι
Υψηλότερη Απόδοση	28	28	29,4

\*Ποσοστό συγκέντρωσης αριθμητικά είναι το κλάσμα του μήκους του λήπτη, διά της διαμέτρου του. Αυτό μπορεί να αλλάζει χρησιμοποιώντας ένα λήπτη με διαφορετική διάμετρο. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συγκέντρωσης, τόσο μεγαλύτερη θερμοκρασία μπορεί να έχει το εργαζόμενο μέσο, με ελάχιστες θερμικές απώλειες. Όμως αυτό απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατασκευή.

Συγκεκριμένα η απόδοσή τους φαίνεται στον Πίνακα 2.3:

**Πίνακας 2.3: Απόδοση των τριών τεχνολογιών [22].**

Τεχνολογία	Μέγιστη απόδοση(%)	Ετήσια απόδοση(%)
Trough	21	10-12 έως 14-18
Ηλιακός Πύργος	23	14-19
Πιάτο	29	18-23

Τέλος, μια καλή σύγκριση όσον αφορά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σταθμών γίνεται στον Πίνακα 2.4:

Πίνακας 2.4: Σύγκριση των τριών τεχνολογιών [22].

	<b>Trough</b>	<b>Κεντρικός Συλλέκτης</b>	<b>Παραβολικό Πιάτο</b>
<b>Εφαρμογές</b>	Διασυνδεδεμένοι στο δίκτυο σταθμοί, μέση προς υψηλή κατεργασία θερμότητας (80MWe)	Διασυνδεδεμένοι στο δίκτυο σταθμοί, υψηλή κατεργασία θερμότητας (10MWe)	Στέκονται μόνα, μικρά μη διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα ή συγκεντρωμένα σε μεγαλύτερα και συνδεδεμένα (μεγέθους 25KWe)
<b>Πλεονεκτήματα</b>	<p>Εμπορικά διαθέσιμα με θερμοκρασία λειτουργίας έως 500°C</p> <p>Αποδεδειγμένα σε εμπορικό επίπεδο έχουν απόδοση 14%</p> <p>Έχουν αποδειχθεί εμπορικά τα κόστη της επένδυσης και της λειτουργίας.</p> <p>Αρθρωτή κατασκευή</p> <p>Καλύτερη χρήση της γης από όλες τις ηλιακές τεχνολογίες</p> <p>Χαμηλότερη ζήτηση υλικών</p> <p>Υβριδικός σχεδιασμός</p> <p>Ικανότητα αποθήκευσης</p>	<p>Καλές μεσοπρόθεσμες προοπτικές για υψηλή απόδοση μετατροπής, δυναμική θερμοκρασία λειτουργίας πάνω από 1000°C.</p> <p>Αποθήκευση σε υψηλές θερμοκρασίες</p> <p>Πιθανή υβριδική λειτουργία</p>	<p>Πολύ υψηλές αποδόσεις μετατροπής</p> <p>Μέγιστη απόδοση μετατροπής από ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια πάνω από 30%</p> <p>Αρθρωτή κατασκευή</p> <p>Πιθανή υβριδική λειτουργία</p> <p>Εμπειρία λειτουργίας από τα πρώτα σχέδια επίδειξης</p>
<b>Μειονεκτήματα</b>	<p>Η χρήση μέσου μεταφοράς θερμότητας που βασίζεται σε έλαιο περιορίζει την θερμοκρασία λειτουργίας στους 400°C , συμβάλλοντας στη μέτρια ποιότητα ατμού.</p>	<p>Οι σχεδιασμένες ετήσιες τιμές απόδοσης, το κόστος επένδυσης και λειτουργίας ακόμη πρέπει να αποδειχτούν σε εμπορικό επίπεδο.</p>	<p>Η αξιοπιστία χρειάζεται να αποδειχτεί</p> <p>Οι στόχοι για τα κόστη μαζικής παραγωγής πρέπει να επιτευχθούν</p>

# 3

## *Χαρακτηριστικά Λειτουργίας Ηλιοθερμικού Σταθμού*

### *3.1 Χειρισμός του ηλιοθερμικού σταθμού*

#### *3.1.1. Έναρξη λειτουργίας του σταθμού*

Τις πρώτες πρωινές ώρες η θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας είναι χαμηλή διότι έχει μεσολαβήσει η νύχτα κατά την οποία φυσικά δεν υπάρχει η πηγή θερμότητας (ήλιος) και ο σταθμός είναι εκτός λειτουργίας.

Το μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι το Therminol VP 1, όπως έχει προαναφερθεί. Η θερμοκρασία πήξεως του υγρού είναι 12 °C, επομένως πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η θερμοκρασία του υγρού είναι πάντα πάνω από 12°C. Έτσι, οι αντλίες του ελαίου δουλεύουν με μια ελάχιστη κατανάλωση όλη τη νύχτα ώστε το έλαιο να κινείται έστω και λίγο, και να μην είναι στατικό. Η ελάχιστη θερμοκρασία που φτάνει το συνθετικό έλαιο πριν ξεκινήσει πάλι η διαδικασία θέρμανσής του το πρωί είναι περίπου 80°C για κλίματα όπως το ελληνικό. Ακόμη κι έτσι βέβαια υπάρχει κάποιο σύστημα θέρμανσης του ελαίου σε περιπτώσεις παρατεταμένης κακοκαιρίας. Το σύστημα αυτό στο σύστημα που εξετάζεται θεωρείται ότι είναι ένας βοηθητικός καυστήρας συμβατικού καυσίμου ο οποίος ζεσταίνει απευθείας το υγρό μεταφοράς θερμότητας.

Επίσης τα ίδια ισχύουν και για το μέσο αποθήκευσης. Αν χρησιμοποιηθεί μείγμα τηγμένων αλάτων, αυτό σταθεροποιείται στους 220°C. Έτσι, όταν η δεξαμενή εκφορτίζεται, αυτό διατηρείται στους 290°C, οπότε δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί, εφόσον και οι δεξαμενές είναι καλά μονωμένες. Και πάλι όμως υπάρχει ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης των αλάτων, ώστε να είναι απολύτως ασφαλές το σύστημα.

Το πρωί η θερμοκρασία του υγρού πρέπει να ανέβει στα φυσιολογικά της επίπεδα για τη λειτουργία του σταθμού πριν αυτό να πάει στον εναλλάκτη ελαίου- νερού για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Αυτό συμβαίνει για την καλύτερη λειτουργία του ατμοστροβίλου, ο οποίος προκειμένου να υποστεί λιγότερες φθορές, θα πρέπει να έχει από την αρχή υψηλής ποιότητας ατμό.

Όταν ο ήλιος ανατείλει το πρωί, τα κάτοπτρα στρέφονται προς αυτόν. Όμως το πρωί η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή και επιπρόσθετα είναι μεγάλο το ποσοστό της σκίασης. Έτσι, η συλλογή θερμότητας είναι χαμηλή. Επομένως, η ηλιακή ακτινοβολία που συλλέγεται από τους ηλιακούς συλλέκτες του πεδίου νωρίς το πρωί είναι ανεπαρκής για τη γρήγορη θέρμανση του ελαίου. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται και ο βοηθητικός καυστήρας συμβατικού καυσίμου για να ανέβει η θερμοκρασία πιο γρήγορα.

Τελικά, από την ανατολή του ήλιου έως την έναρξη της λειτουργίας του σταθμού απαιτούνται μία με δύο ώρες. Η ροή μάζας του ελαίου αυξάνεται και η θερμική ενέργεια συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του ελαίου.

Αν όμως τα μετεωρολογικά δεδομένα κάποιας ημέρας είναι τέτοια που καθυστερούν την έναρξη λειτουργίας πολύ ή την καθιστούν πολύ δύσκολη, τότε επιλέγεται να μην λειτουργήσει καθόλου ο σταθμός για την συγκεκριμένη ημέρα για οικονομικούς λόγους. Το ίδιο συμβαίνει και όταν προβλέπεται ότι η συνολική ισχύς που θα παραχθεί από το σταθμό είναι λιγότερη από το 25% της ονομαστικής ισχύος του σταθμού. Ο περιορισμός αυτός υπάρχει γιατί μπορεί να δημιουργηθεί τεχνικό πρόβλημα και να καταστραφεί σταδιακά ο στρόβιλος.

Όλα αυτά βέβαια είναι πιο πιθανά κατά τους χειμερινούς μήνες. Όταν υπάρχει καλοκαιρία δεν υπάρχουν τέτοια ζητήματα [9],[14].

### **3.1.2. Λειτουργία του σταθμού το πρωί**

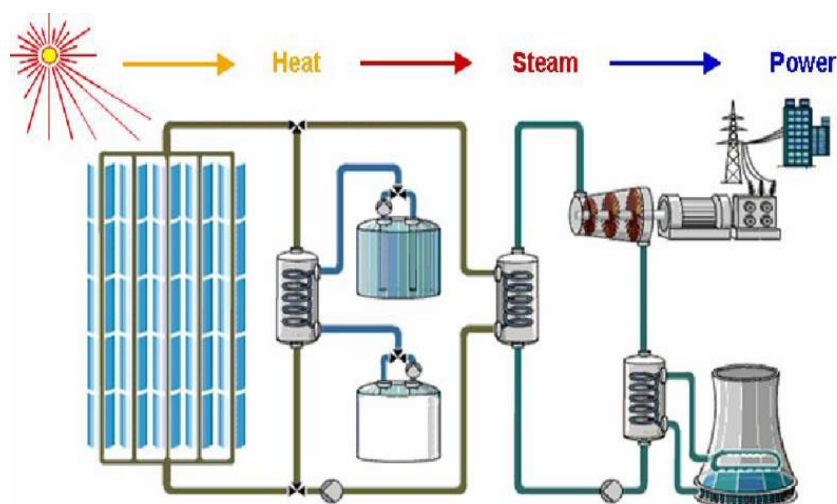
#### **➤ Χωρίς περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος**

Έχοντας κάνει τη διαδικασία της προηγούμενης ενότητας, το έλαιο έχει πια τη θερμοκρασία λειτουργίας του. Έτσι, πηγαίνει στον κεντρικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος για να παράγει υπέρθερμο ατμό για τον ατμοστρόβιλο. Επομένως αρχίζει η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος άμεσα. Όσο η ηλεκτροπαραγωγή είναι μικρότερη της ονομαστικής ισχύος, το σύστημα αποθήκευσης παραμένει ανενεργό. Όταν υπάρχει περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος, αυτή κατευθύνεται προς τις δεξαμενές αποθήκευσης. Για να υπάρχει η δυνατότητα φόρτισης

της δεξαμενής, χρησιμοποιείται μεγαλύτερο ηλιακό πεδίο από αυτό που είναι επαρκές για την απλή λειτουργία του σταθμού, ώστε να συλλέγεται περισσότερη θερμική ισχύς.

Βέβαια, πολύ σημαντικά για τον καθορισμό λειτουργίας του σταθμού, είναι τα οικονομικά κριτήρια. Δηλαδή, ίσως κάποιες φορές να συμφέρει οικονομικά να γίνεται κατευθείαν αποθήκευση παρά άμεση ηλεκτροπαραγωγή, αν και γενικά αυτό δεν συνηθίζεται ιδιαίτερα. Με βάση τα νομοθετικά δεδομένα της Ελλάδας δίνεται προτεραιότητα στην άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, συνήθως οι διαστάσεις του σταθμού είναι μεγαλύτερες από τις επαρκείς για την ονομαστική λειτουργία του σταθμού, έτσι ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες του δικτύου οποιαδήποτε στιγμή. Οι διαστάσεις κάθε σταθμού εξαρτώνται από την περιοχή και τον τρόπο λειτουργίας του, έχοντας πάντα βέβαια υπόψη και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας.



**Σχήμα 3.1: Διάγραμμα λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων.**

Όπως είναι αναμενόμενο, περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος είναι πιο δύσκολο να υπάρχει το χειμώνα και ιδιαίτερα τις πρωινές ώρες. Για να επιτευχθεί όμως η επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου του ελαίου από το ηλιακό πεδίο, μπορεί να ρυθμιστεί η ροή της μάζας του ελαίου, μέσω κατάλληλων αντλιών. Έτσι, το πρωί που η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή, θα υπάρχει μικρότερη ροή μάζας ελαίου για να είναι πιο εύκολο να ζεσταθεί έως τη θερμοκρασία εξόδου. Άρα, η θερμική ισχύς του σταθμού είναι πάντα ανάλογη της ροής μάζας του ελαίου. Έτσι, αργότερα που ο ήλιος ανεβαίνει σιγά σιγά και υπάρχει μεγαλύτερη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και μικρότερη σκίαση μεταξύ των κατόπτρων, η ροή μάζας ελαίου αυξάνεται και η ηλεκτροπαραγωγή το ίδιο. Το σύστημα αποθήκευσης παραμένει ανενεργό, και ο βοηθητικός καυστήρας τίθεται σε λειτουργία για τυχόν βυθίσεις

της ηλεκτρικής ισχύος οι οποίες είναι εύκολο να συμβούν ( π.χ. παροδική συννεφιά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2).



**Σχήμα 3.2:** Εικόνα παραβολικών κατόπτρων με παροδική συννεφιά.

Ο βοηθητικός καυστήρας μπαίνει σε λειτουργία βάσει μετεωρολογικών προγνώσεων. Όμως για μια παρατεταμένη συννεφιά η οποία συνεπάγεται μια παρατεταμένη βύθιση, δεν χρησιμοποιείται γιατί δεν υπάρχει λόγος να καίγεται συμβατικό καύσιμο. Ο καυστήρας αυτός συμβάλλει στην σταθερή παραγωγή ισχύος, δηλαδή στην παραγωγή καλής ποιότητας ισχύος, που είναι πολύ σημαντικό [9],[14].

➤ ***Με περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος***

Σύμφωνα και με προηγούμενη ενότητα, το ηλιακό πεδίο κατασκευάζεται υπερδιαστασιολογημένο. Έτσι, τις περισσότερες ημέρες έχει για αρκετές ώρες περισσότερη θερμική ισχύ από την απαιτούμενη για τη λειτουργία του σταθμού. Η επιπλέον αυτή θερμική ισχύς κατευθύνεται στη δεξαμενή αποθήκευσης και τη φορτίζει. Δηλαδή, όταν η συλλεγόμενη θερμική ισχύς είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική, μπορεί να θερμάνει μεγαλύτερη ροή μάζας από την ονομαστική στην επιθυμητή θερμοκρασία ( που στο σύστημα που εξετάζεται είναι  $390^{\circ}\text{C}$ ). Στην έξοδο του ηλιακού πεδίου τότε, γίνεται διαχωρισμός και η

ροή μάζας που αντιστοιχεί στην ονομαστική κατευθύνεται προς τον κεντρικό εναλλάκτη ελαίου-νερού, ώστε να παραχθεί τελικά η ονομαστική ισχύς στην έξοδο. Η ροή μάζας που περισσεύει οδηγείται προς το θερμικό εναλλάκτη ελαίου-πληρωτικού υλικού του συστήματος αποθήκευσης. Η θερμική ισχύς της ροής μάζας αποδίδεται σε υλικό (υγροποιημένο άλας ή έλαιο ή κάποιο άλλο μέσο), που έρχεται από την ψυχρή δεξαμενή στον θερμικό εναλλάκτη. Το υλικό αυτό έπειτα αφού έχει αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία, κατευθύνεται στην ζεστή δεξαμενή για αποθήκευση. Η διάρκεια της φόρτισης της αποθήκης εξαρτάται από την ποσότητα του μέσου αποθήκευσης και από την θερμική ισχύ της ροής μάζας ελαίου που κατευθύνεται προς τα εκεί κάθε στιγμή. Όταν όλη η ποσότητα του υλικού αποθήκευσης μεταφερθεί από την ψυχρή στη θερμή δεξαμενή, τότε το σύστημα αποθήκευσης είναι πλήρως φορτισμένο.

Είναι αναμενόμενο κάποιες μέρες του έτους, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, να υπάρχει περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος και μετά τη φόρτιση του αποθηκευτικού συστήματος. Αυτή η ισχύς δεν έχει που να διοχετευτεί, γι' αυτό στην περίπτωση αυτή τίθενται κάποια κάτοπτρα εκτός λειτουργίας, δηλαδή στρέφονται σε άλλη κατεύθυνση από τον ήλιο.

Αυτό συνεπάγεται ότι ο βοηθητικός καυστήρας παραμένει τις ώρες αυτές εκτός λειτουργίας. Οι ανάγκες του συστήματος, ακόμη και βύθιση να υπάρξει, καλύπτονται από το ίδιο το σύστημα. Βέβαια, αν η βύθιση αυτή είναι πολύ έντονη, τότε μπαίνει σε λειτουργία ο καυστήρας για να έχει πάλι το σύστημα ονομαστική ισχύ στην έξοδο. Στις περιπτώσεις αυτές, όπου υπάρχει αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιείται ο βοηθητικός καυστήρας, διότι έτσι παραμένει η αποθηκευμένη ενέργεια για χρήση μετά τη δύση του ηλίου. Ένας άλλος λόγος είναι ότι συνήθως η απόκριση του καυστήρα είναι πιο γρήγορη από το σύστημα αποθήκευσης. Παρόλα αυτά, δύναται να χρησιμοποιηθεί η αποθηκευμένη ενέργεια, ιδίως αν το χρονικό διάστημα της βύθισης είναι μεγάλο[9],[14].

### **3.1.3 Λειτουργία του σταθμού κατά τις απογευματινές ώρες**

Τις απογευματινές ώρες η ηλιοφάνεια είναι λιγότερη καθώς ο ήλιος οδεύει προς τη δύση του. Αυτό συνεπάγεται και μειωμένη θερμική ισχύ. Αυτές τις ώρες η λειτουργία του σταθμού από τη ύπαρξη ή όχι αποθηκευμένης ενέργειας.

Όταν το σύστημα αποθήκευσης είναι αφόρτιστο, η παραγόμενη ισχύς του σταθμού πέφτει καθώς πέφτει και η ηλιοφάνεια. Η ηλεκτροπαραγωγή σταματά όταν φτάσει στο κατώτερο τεχνικό όριο κάτω από το οποίο μπορούν να προκληθούν τεχνικές βλάβες. Για να αποφευχθεί κάποιο πρόβλημα στην περίπτωση που πέσει ξαφνικά η παραγωγή κάτω από αυτό το όριο,

χρησιμοποιείται και ο βοηθητικός καυστήρας για να γίνει ομαλός ο τερματισμός του συστήματος.

Όταν το σύστημα αποθήκευσης είναι φορτισμένο, η θερμότητά του αρχίζει να αξιοποιείται από τη στιγμή που η συλλεγόμενη θερμική ισχύς από το ηλιακό πεδίο πέσει κάτω από την ονομαστική της τιμή μέχρι και το σημείο που θα μηδενιστεί. Δηλαδή λειτουργεί παράλληλα με το ηλιακό πεδίο και εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα συμπληρώνει ώστε ο σταθμός να λειτουργεί με την ονομαστική του ισχύ. Η αποθήκη εκφορτίζεται και το υλικό αποθήκευσης κατευθύνεται από τη θερμή δεξαμενή στην ψυχρή. Η ροή μάζας του υλικού είναι και πάλι ανάλογη της θερμικής ισχύος που απαιτείται να καλυφθεί από το σύστημα αποθήκευσης.

Ακολουθείται αυτή η διαδικασία διότι στόχος είναι να λειτουργεί ο σταθμός στο πλήρες φορτίο όσο το δυνατόν περισσότερο γιατί έτσι έχει την καλύτερη απόδοση. Για το λόγο αυτό γίνεται προσπάθεια το απόγευμα να διατηρηθεί η απόδοση του σταθμού στο πλήρες φορτίο για όσο το δυνατόν περισσότερο.

Πρέπει να εξεταστεί ωστόσο και η λειτουργία του σταθμού αργά το απόγευμα, που ο ήλιος έχει δύσει. Είναι πολύ πιθανό, ιδίως το καλοκαίρι, να υπάρχει περίσσεια αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας και μετά τη δύση του ήλιου. Τότε δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο για τη συνέχιση της λειτουργίας του σταθμού περίπου στην ονομαστική τιμή μέχρι να εκφορτιστεί η αποθήκη. Και πάλι βέβαια στο τέλος χρησιμοποιείται ο βοηθητικός καυστήρας για τον ομαλό τερματισμό του στροβίλου. Έπειτα, τα κάτοπτρα στρέφονται με τα κοίλα προς τα κάτω για να περιοριστεί η επικάθιση σκόνης και για τη γενικότερη προφύλαξή τους.

Βέβαια κατά τη λειτουργία του σταθμού, όταν ως πηγή θερμικής ισχύος είναι μόνο η αποθήκη, δεν είναι δυνατόν να δουλέψει στην ονομαστική τιμή γιατί η θερμοκρασία του υλικού στη θερμή δεξαμενή είναι μικρότερη από αυτή στην οποία φτάνει το έλαιο από το ηλιακό πεδίο. Επιπλέον το υλικό αποθήκευσης περνά και από το θερμικό εναλλάκτη ελαιού-υλικού και έχει επιπλέον απώλειες. Έτσι, το συνθετικό έλαιο έχει θερμοκρασία περίπου 380°C. Μια λύση στην περίπτωση αυτή θα ήταν να αυξηθεί η ροή μάζας υλικού αλλά υπάρχουν κι εκεί περιορισμοί. Εξαρτάται από τη ισχύ των αντλιών και από τις σωληνώσεις. Επομένως η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται στο τέλος είναι λίγο μικρότερη από την ονομαστική.

Η απόφαση για την χρησιμοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας εξαρτάται πάντα από οικονομικούς παράγοντες, δηλαδή είτε ανάλογα με τη ζήτηση, είτε με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γενικά. Για την Ελλάδα συνήθως ισχύει η δεύτερη περίπτωση, δηλαδή η τελική παραγωγή ενέργειας, γι' αυτό και η εκφόρτιση της αποθήκης γίνεται σύντομα, για να λειτουργεί ο σταθμός με την καλύτερη δυνατή απόδοση, δηλαδή κοντά στην ονομαστική



του τιμή. Όταν εκφορτιστεί πλήρως η αποθήκη το υλικό κατευθύνεται στην ψυχρή δεξαμενή, στους 290<sup>0</sup>C περίπου, και η λειτουργία του σταθμού τερματίζεται.

Οι τεχνικοί που μελετούν όλη την εγκατάσταση ενός ηλιοθερμικού σταθμού προσπαθούν να δημιουργήσουν τις βέλτιστες διαστάσεις και στο ηλιακό πεδίο και στην αποθήκη, ώστε να λειτουργεί για περισσότερο χρόνο ο σταθμός στο ονομαστικό φορτίο[9],[14].

### ***3.1.4 Λειτουργία του σταθμού με βοηθητικό καυστήρα***

Η χρήση του βοηθητικού καυστήρα όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως περιορίζεται στην εκκίνηση και τον τερματισμό της λειτουργίας του σταθμού και στις ώρες που προβλέπεται κάποια βύθιση στην συλλεγόμενη θερμική ισχύ. Έτσι επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του σταθμού, χωρίς απότομες μεταβολές στην παραγόμενη ισχύ. Η περαιτέρω λειτουργία του εξαρτάται από το χειριστή του σταθμού, ο οποίος εξετάζει βέβαια και τους οικονομικούς παράγοντες. Οι σταθμοί που χρησιμοποιούν βοηθητικό καυστήρα ονομάζονται υβριδικοί σταθμοί.

## ***3.2 Μετεωρολογική Πρόβλεψη Καιρού***

Η ακριβής πρόβλεψη του καιρού έχει μεγάλη αξία και για τη λειτουργία του σταθμού αλλά και για τη συντήρησή του. Για να γίνει η συντήρηση, μια ειδοποίηση λίγων ημερών για τον καιρό μπορεί να επιτρέψει το σχεδιασμό μικρών διακοπών κατά τη διάρκεια σαββατοκύριακων ή καθημερινών ημερών όταν ο καιρός είναι άσχημος ή τον περιορισμό της παραγωγής. Ακόμη μπορεί να αποτρέψει την διακοπή της λειτουργίας του σταθμού για συντήρηση όταν ο καιρός είναι καλός. Επιπρόσθετα μια στρατηγική χρήσης υβριδικού σταθμού με καυστήρα είτε φυσικού αερίου είτε άλλου καυσίμου θα βοηθούσε πολύ καλύτερα στη λειτουργία του συστήματος. Για παράδειγμα, αν υπάρχει πρόβλεψη για άσχημο καιρό, ο καυστήρας αυτός θα ετοιμαστεί για λειτουργία. Ακόμη, το σχέδιο για την επόμενη μέρα βασίζεται και στην πρόγνωση για την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Για τον υπολογισμό της κανονικής και της παγκόσμιας ακτινοβολίας στο επίπεδο της επιφάνειας της γης, είναι απαραίτητες ακριβείς πληροφορίες για τα σύννεφα, τα αερολύματα, τους υδρατμούς και το όζον. Για νεφελώδεις ουρανοί, η γνώση της νεφοκάλυψης είναι η πιο σημαντική για τον προσδιορισμό των τιμών της ακτινοβολίας. Η πληροφορία της νεφοκάλυψης είναι επίσης σημαντική για τον διαχωρισμό μεταξύ των νεφελωδών και των καθαρών καταστάσεων. Στην περίπτωση του καθαρού ουρανού, ωστόσο, η ακριβής

πληροφορία για τα αερολύματα είναι απαραίτητη για την χορήγηση ακριβών προβλέψεων ακτινοβολίας, καθώς έχει αναφερθεί εξάλειψη κανονικής ακτινοβολίας πάνω από 20%-30% για περιπτώσεις με υψηλή εμφάνιση σωματιδίων. Το γεγονός ότι υπάρχει μια εστίαση της βιομηχανίας ηλιακής ενέργειας σε περιοχές με σχετικά λίγη νέφωση, όπως είναι η περιοχή της Μεσογείου, εξηγεί γιατί οι υπολογισμοί με καθαρό ουρανό είναι τόσο σημαντικοί για την πρόβλεψη καιρού [23],[24].

### **3.3 Λειτουργία του Σταθμού με Ισχυρούς Ανέμους**

Η λειτουργία του σταθμού γίνεται μια πρόκληση κατά τη διάρκεια ανέμων υψηλών ταχυτήτων. Οι καθρέπτες μπορεί να σπάσουν από τη δύναμη του ανέμου και συνεπώς να ξεκινήσει ένα περιορισμένο διαδοχικό αποτέλεσμα, κομμάτια σπασμένου γυαλιού από τους συλλέκτες και περισσότεροι καθρέπτες. Για την προστασία του σταθμού, οι τεχνικοί στρέφουν τους καθρέπτες στο πεδίο σε μια θέση όπου θα είναι ασφαλείς από τους ανέμους όταν οι άνεμοι έχουν εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα. Από στοιχεία που εξετάστηκαν στους σταθμούς στην Kramer Junction οι απώλειες ενέργειας που προκλήθηκαν από τη μη λειτουργία του πεδίου λόγω των ισχυρών ανέμων ήταν αξιοσημείωτες. Η λειτουργία για περισσότερες ώρες χωρίς συνολική διακοπή του πεδίου μπορεί να είναι εφικτή αν μια στρατηγική αντιμετώπισης δυνατών ανέμων μπορούσε να επινοηθεί όπου συγχρόνως θα προστατεύει το πεδίο από ζημιές και θα επιτρέπει στο περισσότερο από το πεδίο να συνεχίζει να λειτουργεί.

Το κλειδί στην ανάπτυξη μιας βελτιστοποιημένης στρατηγικής λειτουργίας για τους ισχυρούς ανέμους ήταν μια βαθιά κατανόηση του φορτίου των ανέμων πάνω στους συλλέκτες. Ειδικά όργανα εφαρμόστηκαν σε ένα συλλέκτη στην περιοχή του πεδίου που ήταν προς τον άνεμο και μια σειρά πειραμάτων αξιολόγησαν δέκα διαφορετικά σχέδια για την προστασία του πεδίου. Το σχέδιο που φαίνεται να λειτουργεί καλύτερα ήταν να 'στοιχίζονται' οι συλλέκτες ανά τέταρτη σειρά. Παρόλα αυτά εξαιτίας πολλών αβεβαιοτήτων που αφορούν τη δύναμη του ανέμου αλλά και τα μοτίβα του ανέμου, η επιλεγόμενη στρατηγική πρέπει ακόμη να ενσωματώνει ένα αξιοσημείωτο περιθώριο συντηρητισμού.

Εκτός της 'στοίχισης' του ελάχιστου αριθμού των συλλεκτών κατά τη διάρκεια των ισχυρών ανέμων, άλλος ένας τρόπος να βελτιωθεί η επίδοση στο ηλιακό πεδίο είναι να μειωθεί η ροή του θερμαινόμενου μέσου στις σειρές που έχουν 'στοιχηθεί'. Αυτό θα μειώσει την μίξη μεγάλων ποσοτήτων κρύου υγρού που απορρέει από τις 'στοιχισμένες' σειρές με ζεστό υγρό που βρίσκεται στις σειρές που ακολουθούν τον ήλιο. Για να επιτραπεί αυτή η πιθανότητα

χρειάζεται να τοποθετηθούν βαλβίδες για μοτέρ λειτουργίας στις σειρές που πρόκειται να 'στοιχηθούν'. Έχουν γίνει δοκιμές για τον έλεγχο από απόσταση αυτών των βαλβίδων αλλά και για την ακριβή ροή του υγρού στον SEGS V. Από τις δοκιμές αυτές βγήκε το συμπέρασμα ότι υπάρχει καθαρό πλεονέκτημα στη επίδοση με τον αυτόματο έλεγχο παρά με χειροκίνητο έλεγχο τις μέρες με ανέμους. Παρόλα αυτά, η πλήρης εφαρμογή του αυτόματου έλεγχου προσθέτει πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό και ένα άγνωστο αποτέλεσμα στο κόστος. Επομένως, η τοποθέτηση ή όχι αυτόματου έλεγχου ροής θα εξαρτηθεί από τα οικονομικά δεδομένα[23].

### ***3.4 Καθαρισμός Κατόπτρων***

Η απόδοση του ηλιακού πεδίου και επομένως τα έσοδα από τις πωλήσεις ενέργειας εξαρτώνται άμεσα από την ανακλαστικότητα των καθρεπτών. Οικονομικές αναλύσεις που έχουν γίνει, επισημαίνουν ότι είναι οικονομικά αποδοτικό να συντηρείται η ανακλαστικότητα του πεδίου πάνω από 90%. Για την επίτευξη αυτού του στόχου απαιτείται συχνό πλύσιμο των καθρεπτών. Η αποτελεσματικότητα του πλυσίματος διαφέρει ανάλογα με τη θέση του καθρέπτη ( π.χ. εγγύτητα σε περιοχές με υψηλή ρύπανση, όπως δρόμοι ή πύργοι ψύξεως) και την εποχή του έτους [23]. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται ο καθαρισμός ενός κατόπτρου.



**Σχήμα 3.3: Καθαρισμός των κατόπτρων με νερό υψηλής πίεσης.**

# 4

## *Μαθηματική Ανάλυση για την Τεχνολογία Συλλεκτών Τύπου Σκάφης*

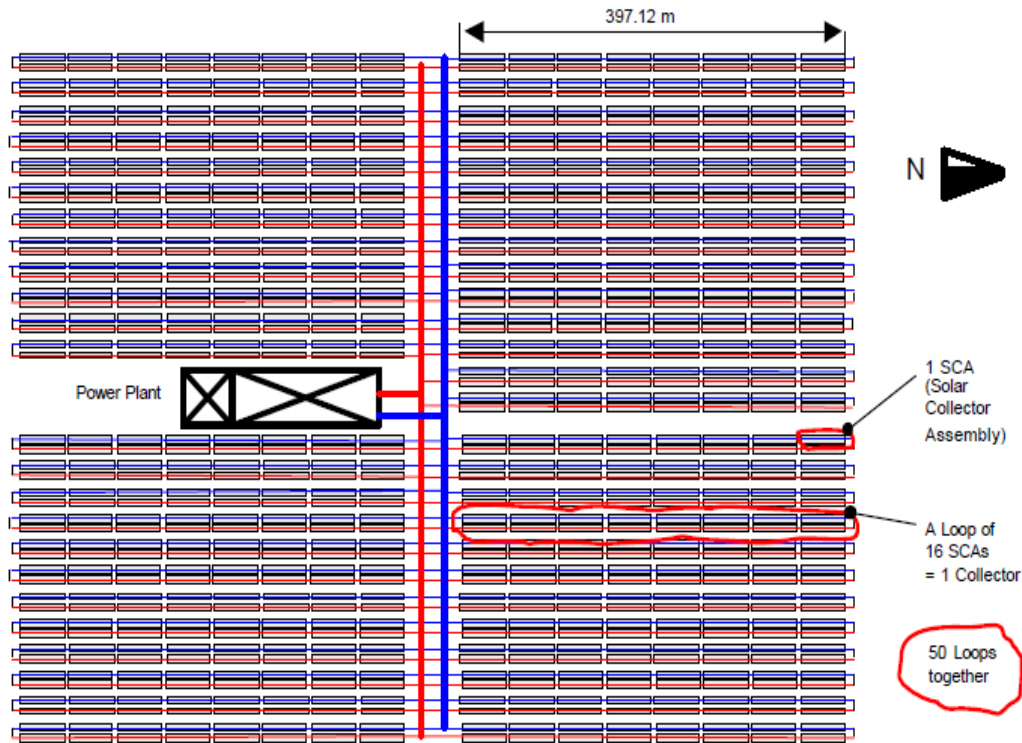
### *4.1 Εισαγωγή*

Ο ηλιοθερμικός σταθμός που θα μελετηθεί είναι στα πρότυπα του σταθμού SEGS-VI που βρίσκεται στη περιοχή Mojave Desert, Kramer Junction στην California των Ηνωμένων Πολιτειών, αλλά υπό τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην Αθήνα. Ο σταθμός αυτός έχει ονομαστική ισχύ εξόδου περίπου 30 MW και χρησιμοποιεί ηλιακούς συλλέκτες τύπου LS-2 οι οποίοι έχουν τα εξής χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον Πίνακα 4.1:

**Πίνακας 4.1: Ηλιακός συλλέκτης LS-2 [12].**

Εύρος ανοίγματος συλλέκτη	5m
Μήκος εστίασης συλλεκτών	5m
Μήκος μιας μονάδας στοιχείου συλλογής θερμότητας	50m
Απόσταση μεταξύ κατόπτρων	15m

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται μια απεικόνιση του σταθμού SEGS VI.



Σχήμα 4.1 : Κάτοψη σταθμού SEGS VI [12].

Τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της Αθήνας φαίνονται στον Πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2: Γεωγραφικά χαρακτηριστικά της Αθήνας

Γεωγραφικό πλάτος	38°B
Γεωγραφικό μήκος μεσημβρινού	30°

Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας θα χρησιμοποιηθεί το συνθετικό έλαιο Therminol VP-1 το οποίο έχει τα χαρακτηριστικά που αναγράφονται στον Πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3: : Χαρακτηριστικά συνθετικού ελαίου Therminol VP-1 [25].

Θερμοκρ.	Πυκνότη.	Θερμ.Αγωγ.	Θερμοχωρ	Ιξώδεις		Πίεσηατμ	Ενθαλπία
				Dynamic mPa.s	Kinematic mm <sup>2</sup> /s**		
°C	kg/m <sup>3</sup>	W/m.K	kJ/kg.K			kPa*	kJ/kg
12	1071	0,137	1,523	5,48	5,12	-	0
20	1064	0,136	1,546	4,29	4,03	-	12,3
30	1056	0,135	1,575	3,28	3,10	-	27,9
40	1048	0,134	1,604	2,60	2,48	-	43,8
50	1040	0,133	1,633	2,12	2,03	-	60,0
60	1032	0,132	1,662	1,761	1,707	-	76,4
70	1024	0,131	1,690	1,492	1,458	-	93,2
80	1015	0,130	1,719	1,284	1,265	-	110,3
90	1007	0,129	1,747	1,119	1,111	-	127,6
100	999	0,128	1,775	0,985	0,986	0,5	145,2
110	991	0,126	1,803	0,875	0,884	0,8	163,1
120	982	0,125	1,831	0,784	0,798	1	181,3
130	974	0,124	1,858	0,707	0,726	2	199,7
140	965	0,123	1,886	0,642	0,665	3	218,4
150	957	0,121	1,913	0,585	0,612	5	237,4
160	948	0,120	1,940	0,537	0,566	7	256,7
170	940	0,118	1,968	0,494	0,526	9	276,2
180	931	0,117	1,995	0,457	0,491	13	296,0
190	922	0,115	2,021	0,424	0,460	18	316,1
200	913	0,114	2,048	0,395	0,432	24	336,5
210	904	0,112	2,075	0,368	0,407	32	357,1
220	895	0,111	2,101	0,345	0,385	42	378,0
230	886	0,109	2,128	0,324	0,366	54	399,1
240	877	0,107	2,154	0,305	0,348	68	420,5
250	867	0,106	2,181	0,288	0,332	86	442,2
260	857	0,104	2,207	0,272	0,317	108	464,1
270	848	0,102	2,234	0,258	0,304	133	486,3
280	838	0,100	2,260	0,244	0,292	163	508,8
290	828	0,098	2,287	0,232	0,281	198	531,6
300	817	0,096	2,314	0,221	0,271	239	554,6
310	806	0,095	2,341	0,211	0,262	286	577,8
320	796	0,093	2,369	0,202	0,254	340	601,4
330	784	0,091	2,397	0,193	0,246	401	625,2
340	773	0,089	2,425	0,185	0,239	470	649,3
350	761	0,086	2,454	0,177	0,233	548	673,7
360	749	0,084	2,485	0,170	0,227	635	698,4
370	736	0,082	2,517	0,164	0,222	732	723,4
380	723	0,080	2,551	0,158	0,218	840	748,8
390	709	0,078	2,588	0,152	0,214	959	774,4
400	694	0,076	2,628	0,146	0,211	1090	800,5
410	679	0,073	2,674	0,141	0,208	1230	827,0
420	662	0,071	2,729	0,137	0,206	1390	854,0
425	654	0,070	2,760	0,134	0,205	1470	867,7

Αρχικά θα αναλυθεί το μοντέλο της ηλιακής ακτινοβολίας έτσι, ώστε να υπολογιστεί η άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI) που προσπίπτει στην επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών, το σύνολο των οποίων αποτελεί το ηλιακό πεδίο του σταθμού. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η ενέργεια του ήλιου που απορροφάται από το μέσο μεταφοράς θερμότητας, οι απώλειες από το ηλιακό πεδίο και οι απώλειες που προκύπτουν από τη μεταφορά του μέσου μεταφοράς θερμότητας στις σωληνώσεις. Τέλος θα υπολογιστεί η τελική ενέργεια που συλλέγεται και η παραγόμενη ισχύς.

## 4.2 Εξισώσεις Λειτουργίας Ηλιακού Πεδίου

### ➤ Άμεση κανονική ακτινοβολία

Για να υπολογιστεί η άμεση κανονική ακτινοβολία πρέπει να προηγηθεί μια σειρά από υπολογισμούς κάποιων άλλων μεγεθών.

Αρχικά υπολογίζεται η ηλιακή απόκλιση  $\delta$ , δηλαδή η γωνία κλίσης του ήλιου.

Συγκεκριμένα η γωνία  $\delta$  είναι 0 και στις δυο ισημερίες και κυμαίνεται από  $-23,27^\circ$  έως  $23,27^\circ$ . Οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν στις μέρες που ο ήλιος είναι ανατολικά του τοπικού μεσημβρινού και ανάποδα. Για τη γωνία  $\delta$  ισχύει:

$$\delta = 23,45 * \sin\left[\frac{360}{365} * (284 + n)\right] \quad (4.1)$$

Όπου n: η ημέρα του έτους με τιμές 1-365.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η γωνία ώρας ήλιου τη στιγμή της δύσης  $\Omega_s$ :

$$\Omega_s = a \cos(-\tan \phi * \tan \delta) \quad (4.2)$$

Όπου  $\phi$ : το γεωγραφικό πλάτος το οποίο όπως αναφέρθηκε είναι ίσο με  $38^\circ$ .

Αφού έχουν υπολογιστεί τα δύο αυτά μεγέθη, στη συνέχεια υπολογίζεται το ποσό της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο αλλά έξω από την ατμόσφαιρα της γης,  $H_o$ , σε  $\text{Joule/m}^2$ :

$$H_o = \left(\frac{24}{\pi}\right) * G_{sc} * 3600 * \left(1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right)\right) * \left[\cos \phi * \cos \delta * \sin \Omega_s + \left(\frac{2 * \pi * \Omega_s}{360}\right) * \sin \phi * \sin \delta\right] \quad (4.3)$$

Όπου  $G_{sc}$ : ηλιακή σταθερά ίση με  $1367\text{W/m}^2$  [26].

Έπειτα, γίνεται ο υπολογισμός του ποσού της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας, σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης, H.

Για το H όμως υπάρχουν κάποιες δεδομένες τιμές για την περιοχή των Αθηνών, οι οποίες αναγράφονται στον Πίνακα 4.4:

Πίνακας 4.4: Μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία για την περιοχή των Αθηνών [27].

Μήνας	Μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία (kWh/m <sup>2</sup> )	H(Joule/m <sup>2</sup> )
Ιανουάριος	63	7316129,032
Φεβρουάριος	79	10157142,86
Μάρτιος	117,7	13668387,1
Απρίλιος	154,3	18516000
Μάιος	195,4	23448000
Ιούνιος	214	25680000
Ιούλιος	222,4	26688000
Αύγουστος	202,7	23539354,84
Σεπτέμβριος	152,6	18312000
Οκτώβριος	109	12658064,52
Νοέμβριος	70,7	8484000
Δεκέμβριος	55,7	6468387,097

Από τα δύο αυτά μεγέθη υπολογίζεται για κάθε μήνα ο μέσος ημερήσιος δείκτης αιθριότητας,  $K_t$ , ως εξής:

$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad (4.4)$$

Όμως, η γνώση της ωριαίας τιμής της άμεσης κανονικής ακτινοβολίας διευκολύνει τον υπολογισμό και άλλων βασικών μεγεθών τα οποία είναι σημαντικά, για τον τελικό υπολογισμό της ισχύος. Έτσι υπολογίζεται αρχικά η μέση γωνία ώρας ήλιου,  $\Omega$ , η οποία υπολογίζεται για την ώρα  $i$  έως  $i+1$ :

$$\Omega = [(i + 0,5) - 12] * 15 \quad (4.5)$$

Τώρα είναι εύκολο να βρεθεί η μέση ωριαία ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την επιφάνεια της γης,  $I_0$ .

$$I_0 = G_{sc} * [1 + 0,033 * \cos(\frac{360 * n}{365})] * [\sin \phi * \sin \delta + \cos \phi * \cos \delta * \cos \Omega] \quad (4.6)$$

Για την εύρεση του ωριαίου δείκτη αιθριότητας,  $k$ , χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$k = K_t * (a + b * \cos \Omega) \quad (4.7)$$

Τα μεγέθη  $a, b$  είναι συντελεστές για τους οποίους ισχύουν οι σχέσεις:



$$\begin{aligned}
 a &= 0,409 + 0,5016 * \sin(\Omega_{\zeta} - 60) \\
 b &= 0,6609 - 0,4767 * \sin(\Omega_{\zeta} - 60)
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Όμως για τον ωριαίο δείκτη αιθριότητας ισχύει και η εξής σχέση:

$$k = \frac{I}{I_0}
 \tag{4.9}$$

Όπου  $I$  είναι η μέση ωριαία ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στη γη σε  $W/m^2$ , είναι δηλαδή η άμεση κανονική ακτινοβολία.

Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο υπολογίστηκε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης για κάθε ώρα του έτους.

Να σημειωθεί ότι οι παράγοντες  $\tan\delta$ ,  $\sin\delta$  και  $\cos\delta$ ,  $\tan\phi$ ,  $\cos\phi$  και  $\sin\phi$  καθώς και τα ημίτονα και συνημίτονα που αφορούν τα  $\Omega_{\zeta}$  και  $\Omega$ , αλλά και όλα τα ημίτονα και συνημίτονα υπολογίζονται σε deg.

#### ➤ *Απώλειες Ηλιακού Πεδίου*

Για τον υπολογισμό των απωλειών του ηλιακού πεδίου πρέπει να υπολογίζεται κάθε φορά η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας  $\theta$ .

$$\cos \theta = \sqrt{\cos^2 \theta_Z + \cos^2 \delta * \sin^2 \omega}
 \tag{4.10}$$

Όπου με  $\theta_Z$  συμβολίζεται η γωνία ζενίθ. Η γωνία ζενίθ είναι η γωνία που προκύπτει από την τομή στον ορίζοντα της ουράνιας σφαίρας, με το επίπεδο αναφοράς του παρατηρητή (είναι το επίπεδο που εφάπτεται με την επιφάνεια της γης στην τοποθεσία του παρατηρητή όπως αναφέρεται και στο δεύτερο κεφάλαιο).

$$\cos \theta_Z = \cos \delta * \cos \phi * \cos \omega + \sin \delta * \sin \phi
 \tag{4.11}$$

Ένα άλλο μέγεθος που μελετάται όσον αφορά τις απώλειες είναι οι απώλειες αντανάκλασης και απορρόφησης από το γυάλινο περίβλημα, όταν αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης. Για την αποφυγή μεγάλων απωλειών υπάρχει ο μετατροπέας γωνίας πρόσπτωσης, ένα μέγεθος το οποίο είναι διαφορετικό για κάθε τύπο συλλέκτη, καθώς εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη.

Για τους συλλέκτες LS-2 που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη ο μετατροπέας γωνίας πρόσπτωσης είναι:

$$K = \cos \theta + 0,000884 * \theta - 0,00005369 * \theta^2 \quad (4.12)$$

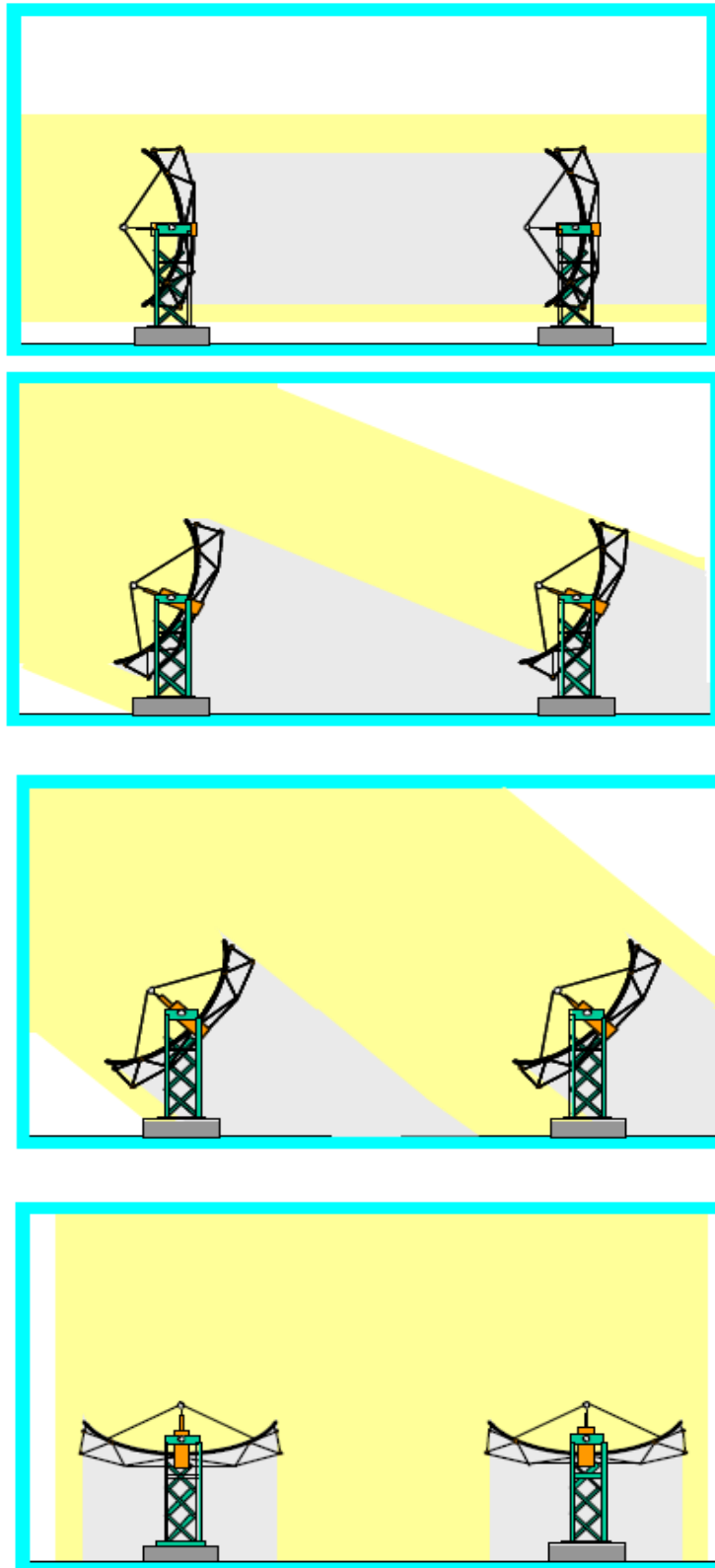
Όμως για να γίνεται διαχωρισμός του μετατροπέα γωνίας πρόσπτωσης, λόγω της γωνίας πρόσπτωσης και λόγω των διορθώσεων της αντανάκλασης και απορρόφησης, που εμπειρικά σχετίζονται με τη γωνία πρόσπτωσης, ορίζεται τελικά ως μετατροπέας της γωνίας πρόσπτωσης το μέγεθος:

$$IAM = \frac{K}{\cos \theta} \quad (4.13)$$

Ένα άλλο μέγεθος, που είναι πολύ σημαντικό στη δημιουργία απωλειών είναι η σκίαση που δημιουργείται μεταξύ των παράλληλων σειρών των κατόπτρων.

Ο συντελεστής σκίασης σειράς απεικονίζει την μείωση στην απορροφημένη θερμική ισχύ λόγω αυτής της σκίασης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως το πρωί και το απόγευμα όπου ο ήλιος σχηματίζει μεγάλη γωνία με τις επιφάνειες των κατόπτρων ( και μικρή γωνία ηλιακού ύψους). Τα κάτοπτρα διαθέτουν μηχανισμό παρακολούθησης του ήλιου. Όμως επειδή κατά τις πρωινές ώρες ο ήλιος βρίσκεται πολύ χαμηλά οι πρώτες σειρές από ανατολικά θα σκιάζουν όλες τις σειρές πίσω τους. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και κατά τη δύση του ηλίου [11],[28].

Η σκίαση που γίνεται πάνω στους ηλιακούς συλλέκτες, από την ανατολή τους έως και τη δύση τους φαίνεται στο Σχήμα 4.2 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση φυσικής σκίασης όταν υπάρχουν πολλές σειρές συλλεκτών [12].

Στον σταθμό SEGS-VI η απόσταση μεταξύ της κάθε σειράς είναι περίπου 15m και ο κάθε συλλέκτης έχει εύρος ανοίγματος 5m. Ο τύπος που δίνει αυτό το μέγεθος είναι:

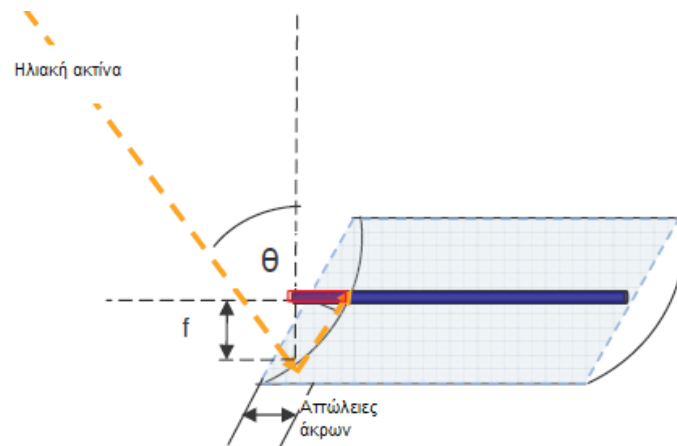
$$RowShadow = \frac{W_{eff}}{W} = \frac{L_{spacing}}{W} * \frac{\cos \theta_Z}{\cos \theta} \quad (4.14)$$

όπου

$W_{eff}$  είναι το ασκίαστο εύρος του κατόπτρου,  $L_{spacing}$  είναι το μήκος της απόστασης μεταξύ των κατόπτρων και  $W$  το εύρος ανοίγματος συλλέκτη.

Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από 0 έως 1. Μηδέν όταν σκιάζεται όλο το άνοιγμα του συλλέκτη και 1 όταν δεν σκιάζεται καθόλου [11].

Ακόμη θα πρέπει να υπολογιστούν οι απώλειες άκρων σε W/m, δηλαδή οι απώλειες στα άκρα του στοιχείου συλλογής θερμότητας, όπου για μια μη μηδενική γωνία πρόσπτωσης, ορισμένο μήκος του απορροφητικού σωλήνα δεν φωτίζεται από την ηλιακή ακτινοβολία που αντανακλάται από τα κάτοπτρα. Το φαινόμενο αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3 και προσεγγίζεται από τον αμέσως ακόλουθο τύπο.



Σχήμα 4.3: Απώλειες άκρων ηλιακού συλλέκτη [28].

$$Απώλειες \ Άκρων = 1 - \frac{f \tan \theta}{L_{\text{συλλέκτη}}} \quad (4.15)$$

Όπου με  $f$  συμβολίζεται το μήκος εστίασης των συλλεκτών και με  $L_{\text{συλλέκτη}}$  το μήκος εστίασης μιας μονάδας ηλιακού συλλέκτη, Για τον συγκεκριμένο σταθμό το  $f = 5\text{m}$  και  $L_{\text{συλλέκτη}} = 50\text{m}$ .

Τέλος δύο άλλα μεγέθη που παίζουν σημαντικό ρόλο για τον υπολογισμό της ενέργειας που απορροφάται από το ηλιακό πεδίο είναι η αποδοτικότητα πεδίου και η αποδοτικότητα στοιχείου συλλογής θερμότητας.

Τα μεγέθη αυτά σχετίζονται με τις επιφανειακές ιδιότητες και τις ατέλειες των κατόπτρων του συλλέκτη, του γυάλινου περιβλήματος και των υλικών των σωλήνων απορρόφησης. Για παράδειγμα η μεταδοτικότητα του γυάλινου περιβλήματος, ή η απορροφητικότητα του εκλεκτικού επιχρίσματος του σωλήνα απορρόφησης επηρεάζουν την απορρόφηση της ακτινοβολίας. Τυχόν ακαθαρσίες στα κάτοπτρα μπορούν να προκαλέσουν τον διασκορπισμό της ακτινοβολίας, επομένως τη μη σωστή απορρόφησης της. Για τον λόγο αυτό πλένονται συχνά τα κάτοπτρα. Ακόμη, λάθη μπορούν να γίνουν και κατά την παρακολούθηση του ηλίου.

Σε περίπτωση που στο σταθμό υπάρχουν περισσότεροι του ενός τύποι συλλεκτών, οι επιφανειακές ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορεί να είναι διαφορετικές από τύπο σε τύπο. Στην παρούσα εργασία έχει υποθεθεί ο σταθμισμένος μέσος της απόδοσης, για κάθε έναν από αυτούς.

Επομένως, η αποδοτικότητα πεδίου είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται από τον αριθμό των διαφορετικών τύπων συλλέκτη στο πεδίο και το ποσοστό αυτών, από τα σφάλματα παρακολούθησης του ήλιου, από την ανακλαστικότητα και την καθαρότητα των κατόπτρων αλλά και από την γεωμετρία των κατόπτρων. Τυπικές τιμές για αυτά τα μεγέθη δίνουν ότι:

$$\eta_{\text{πεδίου}} = 0,857$$

Αντίστοιχα η αποδοτικότητα του στοιχείου συλλογής θερμότητας (HCE) εξαρτάται από τον αριθμό των διαφορετικών τύπων στοιχείων συλλογής θερμότητας καθώς και το ποσοστό του καθενός. Ακόμη, από τις απώλειες εξαιτίας σκίασης από σκόνη στο περίβλημα και από απώλειες άκρων από σκίαση που προκαλούν τα καλύμματα. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εξαρτάται από τη μεταδοτικότητα του γυάλινου περιβλήματος, από την απορροφητικότητα του εκλεκτικού επιχρίσματος και από έναν συντελεστή που προσαρμόζει τις διάφορες απώλειες [11]. Τυπικές τιμές για αυτά τα μεγέθη δίνουν ότι:

$$\eta_{HCE} = 0,832$$

Από όλα αυτά τα μεγέθη μπορεί πλέον να υπολογιστεί η ενέργεια που απορροφάται από τα στοιχεία συλλογής θερμότητας. Ο τύπος που δίνει αυτή την ενέργεια σε  $W/m^2$  είναι ο ακόλουθος:

$$\dot{Q}_{απορροφώμενη} = DNI * \cos \theta * IAM * RowShadow * Απώλειες \acute{Ακρων} * \eta_{πεδίου} * \eta_{HCE} * Διαθεσιμότητα \quad (4.16)$$

Όλοι οι όροι της εξίσωσης έχουν αναλυθεί παραπάνω εκτός από τον όρο Διαθεσιμότητα, που εκφράζει το ποσοστό του ηλιακού πεδίου που βρίσκεται σε λειτουργία. Σε αυτή τη μελέτη θεωρείται ότι η Διαθεσιμότητα είναι 100% [11],[28].

#### ➤ Εύρεση συλλεγόμενης ακτινοβολίας

##### **Βήμα 1**

Το μέσο μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή το συνθετικό έλαιο σε αυτή την περίπτωση, απορροφά ενέργεια καθώς ρέει μέσα στους σωλήνες του δέκτη και ανεβαίνει η θερμοκρασία του. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει μια θερμοκρασιακή διαφορά με το περιβάλλον και έτσι να προκύπτουν απώλειες θερμότητας από τον σωλήνα του δέκτη προς το γυάλινο περίβλημα και από το γυάλινο περίβλημα προς το περιβάλλον. Ουσιαστικά μεγάλη σημασία έχει η διαφορά θερμοκρασίας του συνθετικού ελαίου με το περιβάλλον, και αυτό συνεπάγεται ότι όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μικρή προκύπτουν και περισσότερες απώλειες.

Για τον υπολογισμό μιας μέσης τιμής αυτών των απωλειών σε  $W/m^2$ , θα πρέπει να γίνει ολοκλήρωση των απωλειών για θερμοκρασίες συνθετικού ελαίου από τη θερμοκρασία εισόδου του στο ηλιακό πεδίο ( $T_{inlet}$ ) έως τη θερμοκρασία εξόδου του από αυτό ( $T_{outlet}$ ), και στη συνέχεια να διαιρεθεί με τη διαφορά των θερμοκρασιών αυτών [11]. Δηλαδή:

$$Απώλειες_{Πεδίου} = \frac{\int_{T_{inlet}}^{T_{outlet}} HeatLoss}{T_{outlet} - T_{inlet}} \quad (4.17)$$

Όπου

$$HeatLoss = \alpha_0 + \alpha_1 * T + \alpha_2 * T^2 + \alpha_3 * T^3 + DNI * (b_0 + b_1 * T^2) \quad (4.18)$$

Ο Πίνακας 4.5 απεικονίζει τις τιμές των συντελεστών της εξίσωσης 4.18:

**Πίνακας 4.5: Συντελεστές για τις απώλειες [11].**

Συντελεστής ( $\alpha_n, b_n$ )	Τιμή
$a_0$	-9,463033
$a_1$	0,3029616
$a_2$	-1,386833*10 <sup>-3</sup>
$a_3$	6,929243*10 <sup>-6</sup>
$b_0$	7,64961*10 <sup>-2</sup>
$b_1$	1,12818*10 <sup>-7</sup>

Ο σταθμισμένος μέσος των απωλειών (εφόσον θεωρείται ότι υπάρχει ένα είδος HCE στο πεδίο) είναι:

$$\text{Μέσες Απώλειες} = \frac{\text{Απώλειες Πεδίου}}{\text{Πλάτος}} \quad (4.19)$$

Όπου πλάτος είναι το πλάτος ανοίγματος του κατόπτρου [28].

### **Βήμα 2**

Απώλειες θερμότητας δημιουργούνται και από τις σωληνώσεις όπου ρέει το υγρό από και προς το ηλιακό πεδίο. Οι θερμικές απώλειες είναι γενικά μικρές και τις δίνει η σχέση:

$$\text{ΑπΣωληνώσεων} = 0,01693 * \Delta T - 0,0001683 * \Delta T^2 + 6,78 * 10^{-7} * \Delta T^3 \quad (4.20)$$

$$\text{Όπου } \Delta T = \frac{T_{outlet} - T_{inlet}}{2} - T_{ambient} \quad (4.21)$$

με  $T_{ambient}$  τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου θεωρούνται σταθερές με τιμές  $T_{inlet} = 290^\circ\text{C}$  και  $T_{outlet} = 390^\circ\text{C}$  αντίστοιχα [11].

Οι τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για την περιοχή της Αθήνας ισχύουν οι τιμές που αναγράφονται στον Πίνακα 4.6:

**Πίνακας 4.6: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στην Αθήνα [27].**

Μήνας	Θερμοκρασία (°C)
Ιανουάριος	10,3
Φεβρουάριος	10,6
Μάρτιος	12,3
Απρίλιος	16
Μάιος	20,7
Ιούνιος	25,4
Ιούλιος	28,1
Αύγουστος	28
Σεπτέμβριος	24,3
Οκτώβριος	19,6
Νοέμβριος	15,4
Δεκέμβριος	12

Η καθαρή ενέργεια που συλλέγεται από το μέσο μεταφοράς θερμότητας σε  $W/m^2$  δίνεται από τον τύπο 4.22:

$$\dot{Q}_{\text{συλλεγόμενη}} = \dot{Q}_{\text{απορροφώμενη}} - \frac{(\text{Μέσες Απώλειες} + \text{ΑπΣωληνώσεων})}{1000} \quad (4.22)$$

Αν η  $\dot{Q}_{\text{συλλεγόμενη}} < 0$  τότε θεωρείται βέβαια ότι η συλλεγόμενη ενέργεια είναι ίση με το μηδέν [11],[28].

### 4.3 Εξισώσεις Λειτουργίας Κύκλου Ισχύος

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ισχύος εξόδου. Αρχικά όμως θα πρέπει να είναι γνωστή η ροή μάζας του μέσου μεταφοράς θερμότητας. Η ροή μάζας και η συλλεγόμενη ενέργεια συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta h_{\text{πεδίου}} = \frac{\dot{Q}_{\text{συλλεγόμενη}} * \text{πλάτος} * L_{\text{μονάδας}} * N_{\text{μονάδων}}}{\dot{V}_{\text{υγρού}} * \rho(T_1)} \quad (4.23)$$

Όπου:

$\Delta h_{\text{πεδίου}}$  η διαφορά στην ενθαλπία από την είσοδο μέχρι την έξοδο. Η διαφορά αυτή θεωρείται σταθερή και ίση με 242,8 εφόσον υποθεθεί Ενθαλπία Εισόδου=531,6 και Ενθαλπία Εξόδου=744,4.



$L_{μονάδας}$  το μήκος μιας μονάδας ηλιακού συλλέκτη

$N_{μονάδων}$  ο αριθμός των συστημάτων ηλιακής συλλογής στο πεδίο όπου έχει υποτεθεί ότι

$N_{μονάδων} = 100$ .

$\dot{V}_{υγρού}$  η παροχή όγκου του μέσου μεταφοράς θερμότητας στο πεδίο.

$\rho(T_1)$  η πυκνότητα του υγρού στην είσοδο του ηλιακού πεδίου στην θερμοκρασία εισόδου

Ο τύπος αυτός συνδέει την διαφορά στην ενθαλπία του ρευστού κατά την είσοδο και κατά την έξοδο από το πεδίο με την συλλεγόμενη ενέργεια και την παροχή μάζας του υγρού [11],[28].

Η πυκνότητα του Therminol VP-1 δίνεται από τη σχέση [25]:

$$\rho(T) = -0,90797 * T + 0,00078116 * T^2 - 2,367 * 10^{-6} * T + 1083,25 \quad (4.24)$$

Ωστόσο η ροή της μάζας του υγρού ρυθμίζεται με αντλίες στις σωληνώσεις του υγρού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί υποτίθεται ότι η θερμοκρασία εξόδου είναι ίση με 390°C. Από τις προηγούμενες σχέσεις συμπεραίνεται ότι η ροή μάζας εξαρτάται από την συλλεγόμενη θερμική ενέργεια. Ακόμη παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συλλεγόμενη θερμική ισχύς, τόσο μεγαλύτερο όγκο υγρού μπορεί να καλύψει. Αντίθετα, όταν η συλλεγόμενη θερμική ισχύς είναι χαμηλή θα απαιτείται μείωση της ροής μάζας του ελαίου για να είναι εφικτή η απαιτούμενη θερμοκρασιακή του αύξηση. Βέβαια, υπάρχει ένα άνω τεχνικό όριο το οποίο τίθεται από την εγκατεστημένη ισχύ των αντλιών ελαίου καθώς και από τις αντοχές των σωληνώσεων.

Τέλος, η σχέση που δίνει την τελική ισχύ είναι η ακόλουθη:

$$\dot{W} = a_0 + a_1 * \dot{m} + a_2 * \dot{m}^2 + a_3 * P + a_4 * T + a_5 * T^2 + a_6 * \dot{m} * P + a_7 * \dot{m} * T + a_8 * P * T \quad (4.25)$$

Όπου  $\dot{W}$  η παραγόμενη ισχύς σε MW

$\dot{m}$  η παροχή μάζας σε kg/s

$P$  η πίεση συμπίκνωσης σε bar την οποία θεωρείται  $P = 0,006\text{bar}$  και

Τ η θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας που εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας (σε °C).

Οι τιμές των συντελεστών της σχέσης 4.25 αναφέρονται στον Πίνακα 4.7 που ακολουθεί :

**Πίνακας 4.7: Συντελεστές για την ισχύ εξόδου [11].**

Συντελεστής ( $a_n$ )	Τιμή
$a_0$	48,00749
$a_1$	$-7,447271 \cdot 10^{-2}$
$a_2$	$-4,850291 \cdot 10^{-5}$
$a_3$	25,41367
$a_4$	-0,3353077
$a_5$	$6,0322502 \cdot 10^{-4}$
$a_6$	$-2,142849 \cdot 10^{-2}$
$a_7$	$4,322630 \cdot 10^{-4}$
$a_8$	-0,101981

Το μοντέλο αυτό ισχύει για πιέσεις συμπύκνωσης από 0,003-1,5 bar, για παροχές μάζας υγρού από 150-500 kg/sec και θερμοκρασίες εξόδου από το ηλιακό πεδίο από 250-400°C [11],[28].

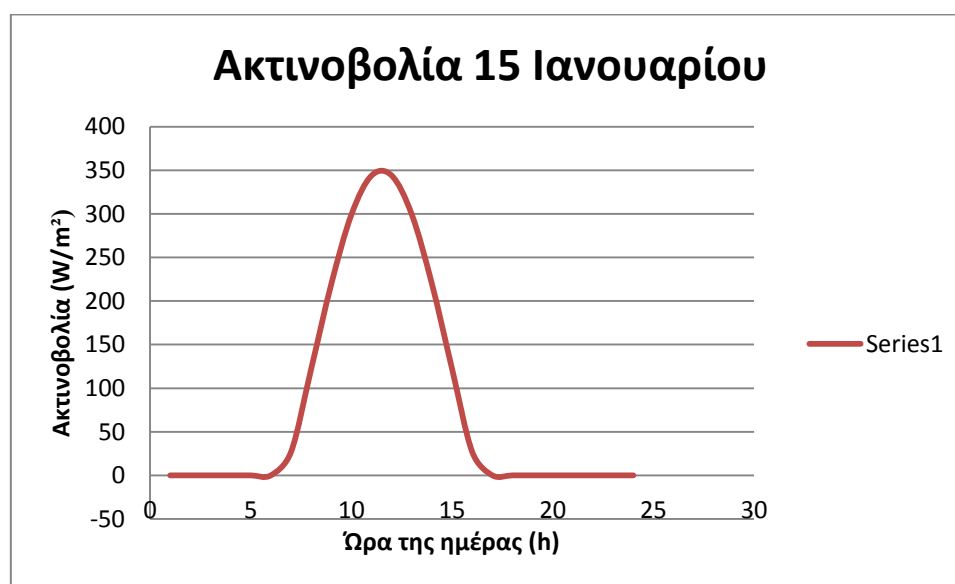
#### **4.4 Παράθεση Αποτελεσμάτων**

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις και ακολουθώντας όλη την διαδικασία λήφθηκαν κάποιες μετρήσεις. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στα αποτελέσματα της ακτινοβολίας και της συλλεγόμενης ενέργειας, ενώ μεγάλη σημασία έχει και η απόσταση μεταξύ των κατόπτρων που επηρεάζει τη σκίαση και επομένως και την απόδοση του συστήματος. Τα αποτελέσματα για όλο το έτος και για κάθε ώρα του έτους παρουσιάζονται στη συνέχεια. Επειδή, όμως δεν είναι εύκολο να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για κάθε ώρα του έτους, παρατίθενται μόνο τα αποτελέσματα για τέσσερις ημέρες του έτους, που αντιπροσωπεύουν τις τέσσερις εποχές, και για κάποιες διαφορετικές ώρες.

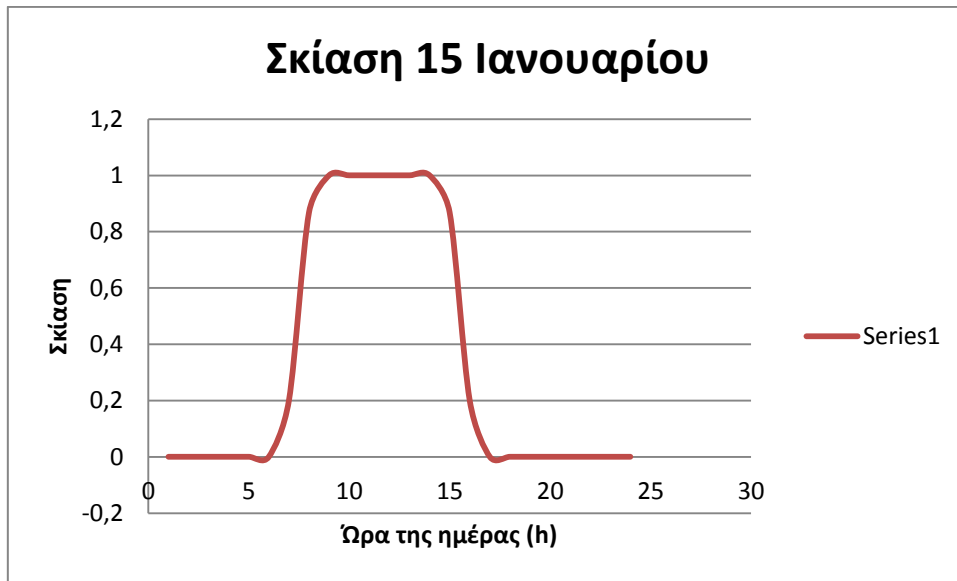
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα για την 1<sup>η</sup> Ημέρα: 15 Ιανουαρίου

Τοπική Ώρα	8:00	12:00	17:00
Ημέρα του Έτους(n)	15	15	15
T <sub>inlet</sub> (°C)	290	290	290
T <sub>outlet</sub> (°C)	390	390	390
T <sub>ambient</sub> (°C)	10,3	10,3	10,3
Ηλιακή Απόκλιση (δ) (deg)	-21,26947391	-21,26947391	-21,26947391
Γωνία Ώρας Ήλιου στη Δύση (Ως) (deg)	72,2941306	72,2941306	72,2941306
H <sub>0</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	4,501839807	4,501839807	4,501839807
H (kW/m <sup>2</sup> )	2,032	2,032	2,032
Kτ	0,451371014	0,451371014	0,451371014
Μέση Γωνία Ώρας Ήλιου (Ω) (deg)	-52,5	7,5	82,5
Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	121,971469	343,98818	0
Γωνία πρόπτωσης (deg)	0,68815948	1,024918425	0,369062136
Σκίαση	0,868834911	1	0
Απώλειες Άκρων (W/m)	0,917775345	0,835376826	0,96132154
Συλλεγόμενη Ενέργεια (W/m <sup>2</sup> )	0	12,69409227	0
Παροχή Μάζας Υγρού (Kg/sec)	0	383,3194844	0
Πίεση συμπίκνωσης (bar)	0,006	0,006	0,006
Παραγόμενη Ισχύς (MW)	0	30	0

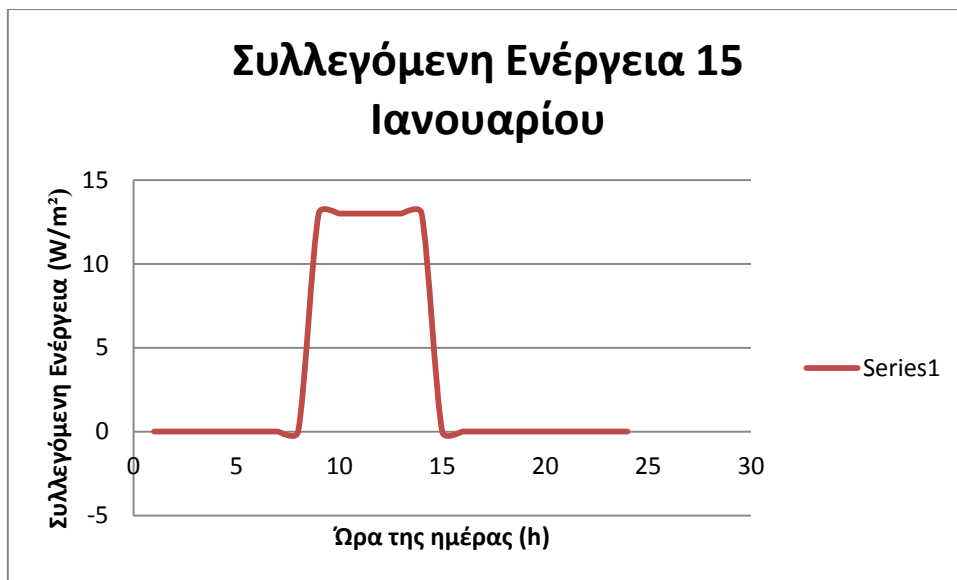
Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα με τις σημαντικότερες παραμέτρους για την 15<sup>η</sup> Ιανουαρίου.



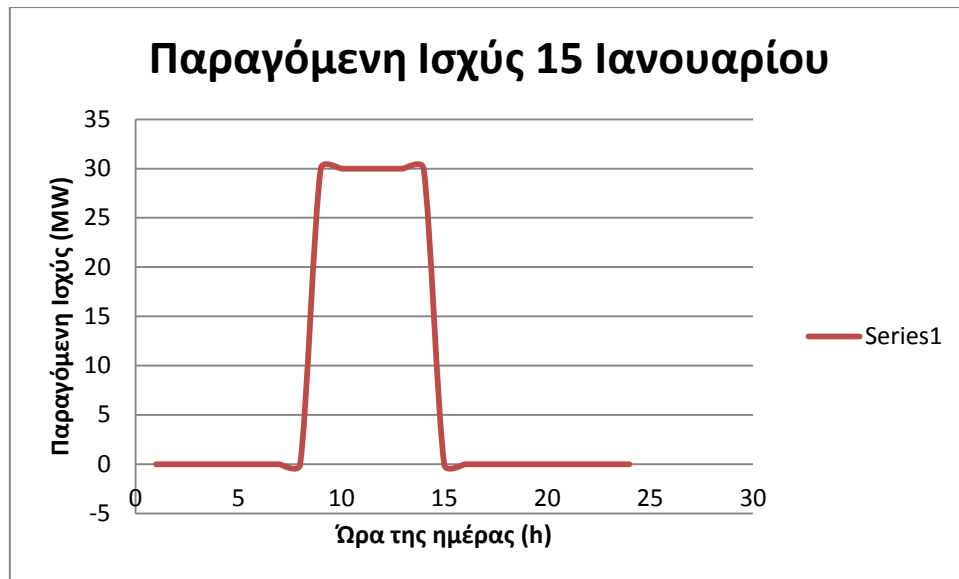
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας για την 15<sup>η</sup> Ιανουαρίου.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα σκίασης των συλλεκτών κατά τη διάρκεια της ημέρας για την 15<sup>η</sup> Ιανουαρίου.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα συλλεγόμενης ενέργειας για την 15<sup>η</sup> Ιανουαρίου.



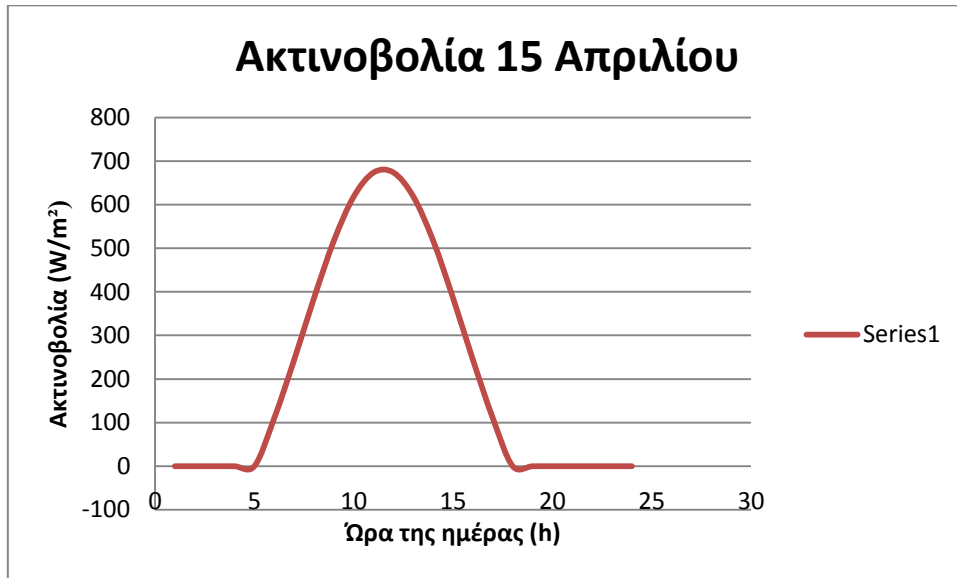
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την 15<sup>η</sup> Ιανουαρίου.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για την 2<sup>η</sup> ημέρα που θα παρουσιαστεί, την 15<sup>η</sup> Απριλίου.

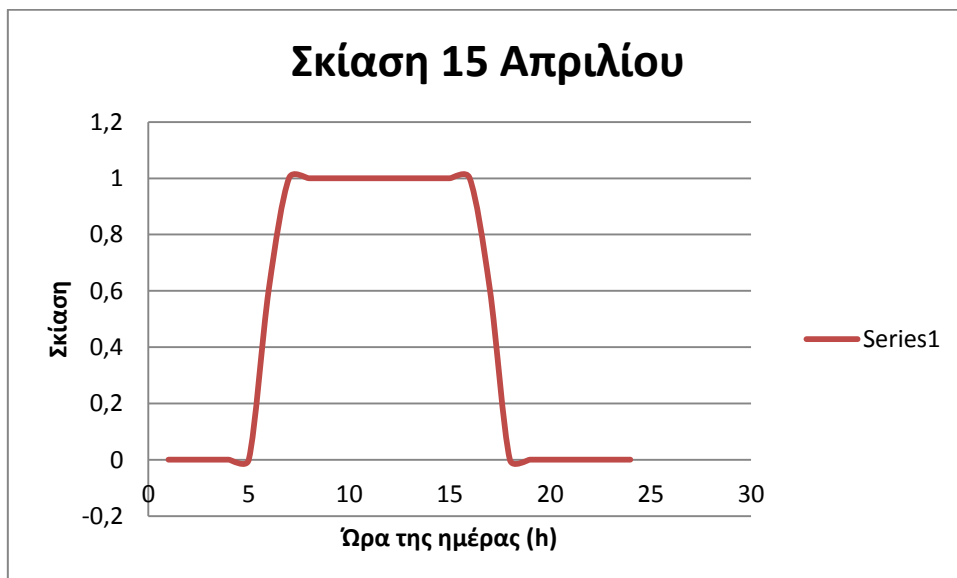
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα για την 2<sup>η</sup> Ημέρα: 15 Απριλίου

Τοπική Ώρα	8:00	12:00	17:00
Ημέρα του Έτους (n)	105	105	105
Tinlet (oC)	290	290	290
Toutlet (oC)	390	390	390
Tambient (oC)	16	16	16
Ηλιακή Απόκλιση (δ) (deg)	9,414893347	9,414893347	9,414893347
Γωνία Ώρας Ήλιου στη Δύση (Ως) (deg)	97,44356952	97,44356952	97,44356952
Ho (kW/m <sup>2</sup> )	9,762589864	9,762589864	9,762589864
H (kW/m <sup>2</sup> )	5,143	5,143	5,143
Kτ	0,526806931	0,526806931	0,526806931
Μέση Γωνία Ώρας Ήλιου (Ω) (deg)	-52,5	7,5	82,5
Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	385,4702374	673,6972133	110,1463759
Γωνία πρόπτωσης (deg)	0,243228873	0,492996294	0,049647614
Σκίαση	1	1	0,60729407
Απώλειες Ακρων (W/m)	0,975185834	0,946275693	0,995031155
Συλλεγόμενη Ενέργεια (W/m <sup>2</sup> )	12,69409227	12,69409227	0
Παροχή Μάζας Υγρού (Kg/sec)	383,3194844	383,3194844	0
Πίεση συμπίκνωσης (bar)	0,006	0,006	0,006
Παραγόμενη Ισχύς (MW)	30	30	0

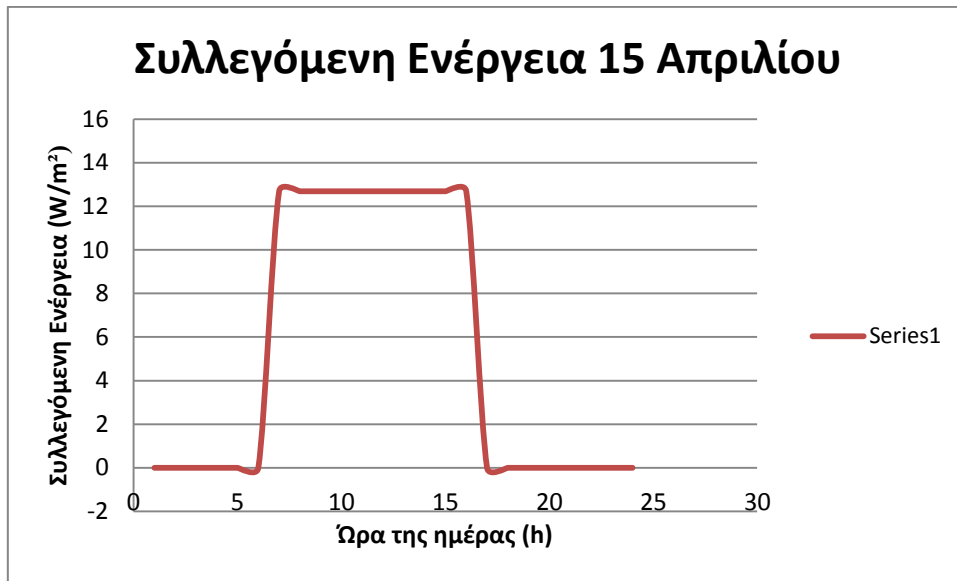
Όπως και προηγουμένως, στη συνέχεια παρατίθενται κάποια διαγράμματα για την 15<sup>η</sup> Απριλίου.



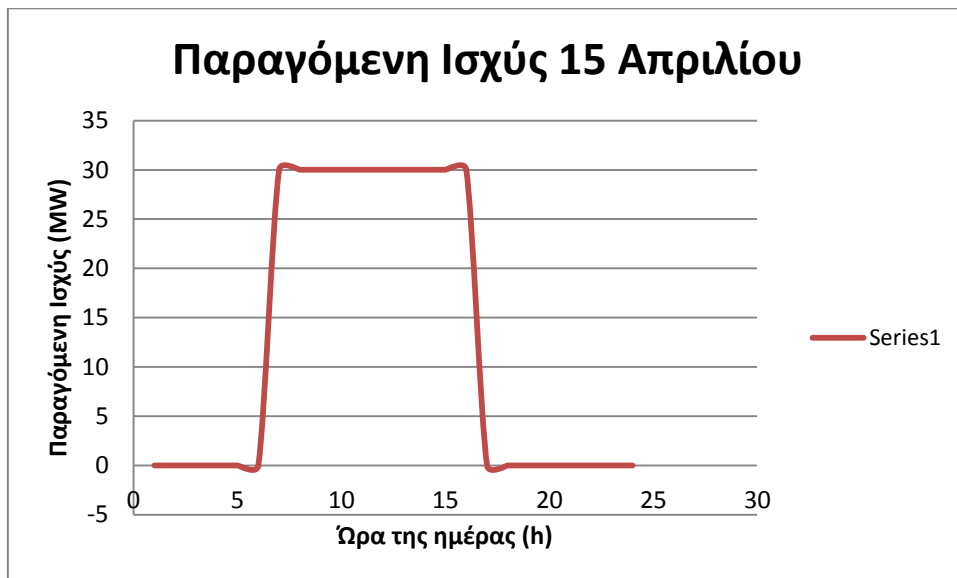
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ακτινοβολίας για την 15<sup>η</sup> Απριλίου.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα σκίασης στους ηλιακούς συλλέκτες για τη 15<sup>η</sup> Απριλίου.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα της συλλεγόμενης ενέργειας για την 15<sup>η</sup> Απριλίου.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την 15<sup>η</sup> Απριλίου.

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα για την 3<sup>η</sup> Ημέρα: 15 Ιουλίου

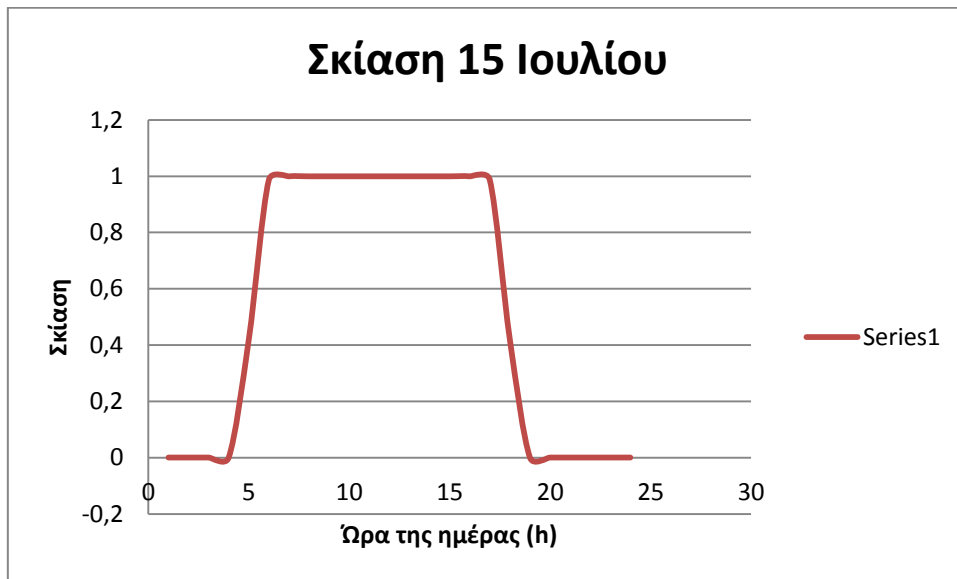
Τοπική Ώρα	8:00	12:00	17:00
Ημέρα του Έτους (n)	196	196	196
Tinlet (oC)	290	290	290
Toutlet (oC)	390	390	390
Tambient (oC)	28,1	28,1	28,1
Ηλιακή Απόκλιση (δ) (deg)	21,51733603	21,51733603	21,51733603
Γωνία Ώρας Ήλιου στη Δύση (Ως) (deg)	107,9405311	107,9405311	107,9405311
Ho (kW/m <sup>2</sup> )	11,34960369	11,34960369	11,34960369
H(kW/m2)	7,174	7,174	7,174
Kτ	0,632092555	0,632092555	0,632092555
Μέση Γωνία Ώρας Ήλιου (Ω) (deg)	-52,5	7,5	82,5
Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	544,2602319	865,0358159	220,879111
Γωνία πρόπτωσης (deg)	0,059677198	0,28257061	0,215943736
Σκίαση	1	1	0,987438603
Απώλειες Άκρων (W/m)	0,994025186	0,970966044	0,978063584
Συλλεγόμενη Ενέργεια (W/m2)	12,69409227	12,69409227	12,69409227
Παροχή Μάζας Υγρού (Kg/sec)	383,3194844	383,3194844	383,3194844
Πίεση συμπύκνωσης (bar)	0,006	0,006	0,006
Παραγόμενη Ισχύς (MW)	30	30	30

Τα διαγράμματα, που αντιστοιχούν στις 15 Ιουλίου είναι αυτά που ακολουθούν:



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα ακτινοβολίας για την 15<sup>η</sup> Ιουλίου.

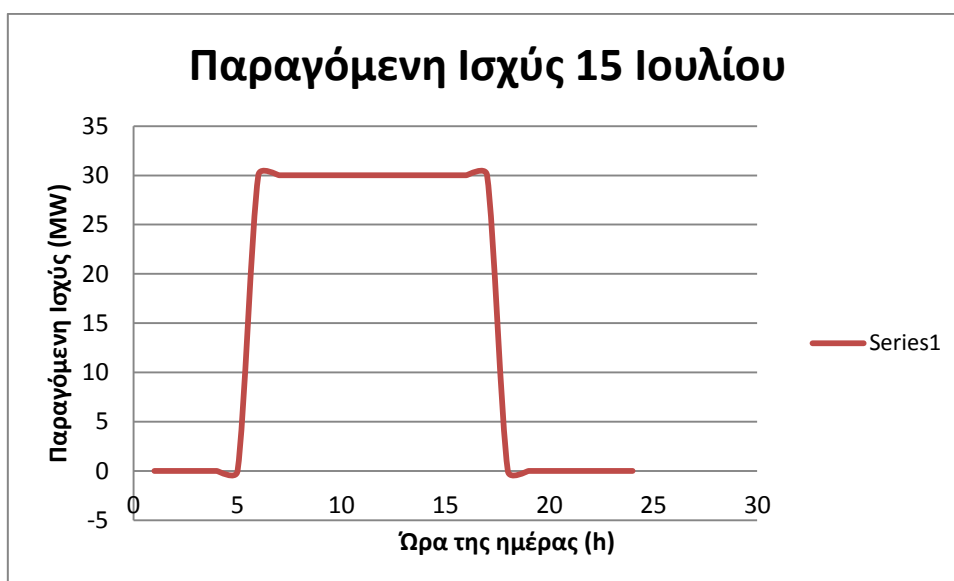




Σχήμα 4.13: Διάγραμμα σκίασης στους ηλιακούς συλλέκτες για την 15<sup>η</sup> Ιουλίου.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα συλλεγόμενης ενέργειας για την 15<sup>η</sup> Ιουλίου.

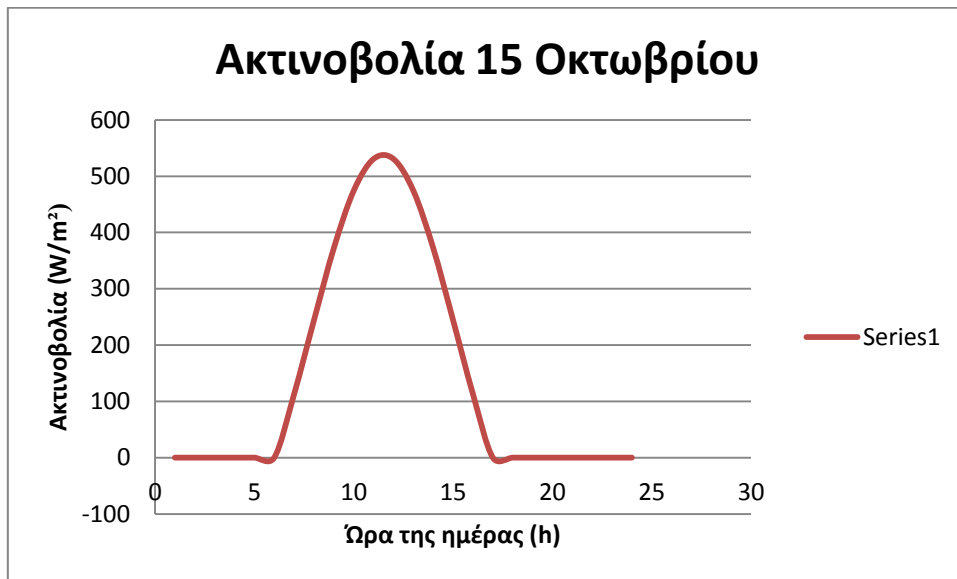


Σχήμα 4.15: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την 15<sup>η</sup> Ιουλίου.

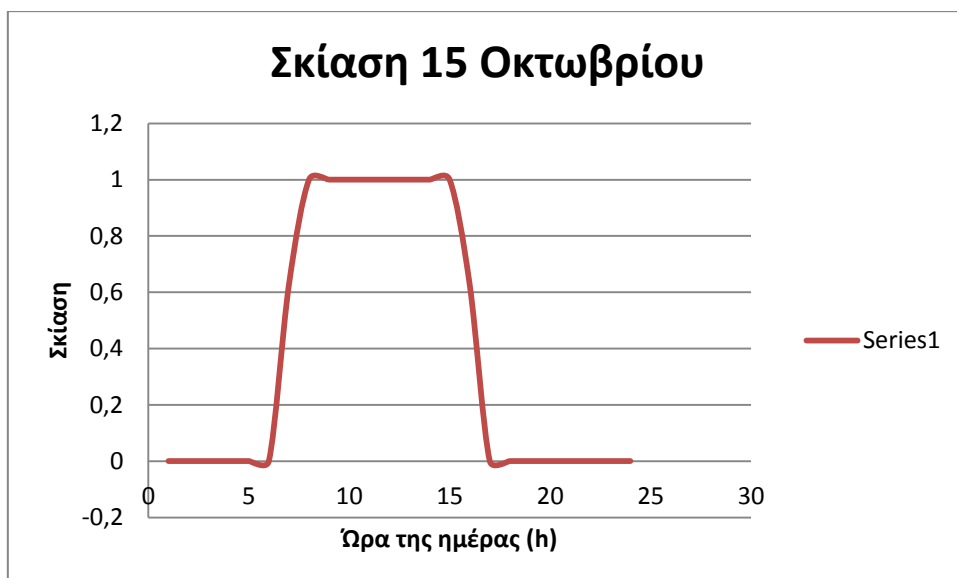
Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα για την 4<sup>η</sup> Ημέρα: 15 Οκτωβρίου

Τοπική Ώρα	8:00	12:00	17:00
Ημέρα του Έτους (n)	288	288	288
Tinlet (oC)	290	290	290
Toutlet (oC)	390	390	390
Tambient (oC)	19,6	19,6	19,6
Ηλιακή Απόκλιση (δ) (deg)	-9,599397234	-9,599397234	-9,599397234
Γωνία Ώρας Ήλιου στη Δύση (Ως) (deg)	82,40695211	82,40695211	82,40695211
Ho (kW/m <sup>2</sup> )	6,552947974	6,552947974	6,552947974
H (kW/m <sup>2</sup> )	3,516	3,516	3,516
Kτ	0,536552406	0,536552406	0,536552406
Μέση Γωνία Ώρας Ήλιου (Ω) (deg)	-52,5	7,5	82,5
Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	244,2054086	530,8000272	0
Γωνία πρόπτωσης (deg)	0,524696609	0,823096666	0,212231774
Σκίαση	1	1	0
Απώλειες Ακρων (W/m)	0,942118502	0,892161071	0,978452328
Συλλεγόμενη Ενέργεια (W/m <sup>2</sup> )	12,69409227	12,69409227	0
Παροχή Μάζας Υγρού (Kg/sec)	383,3194844	383,3194844	0
Πίεση συμπίκνωσης (bar)	0,006	0,006	0,006
Παραγόμενη Ισχύς (MW)	30	30	0

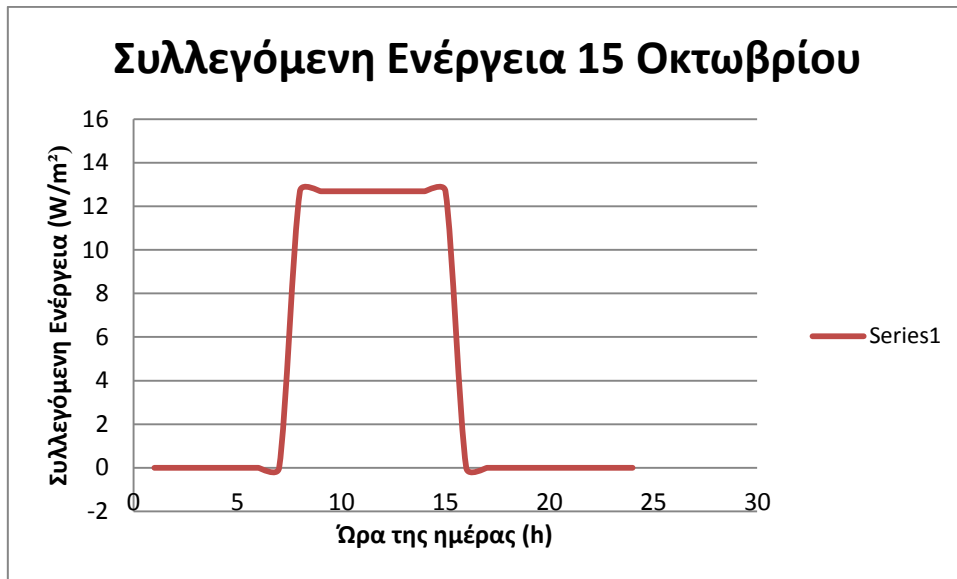
Ακολουθούν τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στην 15<sup>η</sup> Οκτωβρίου.



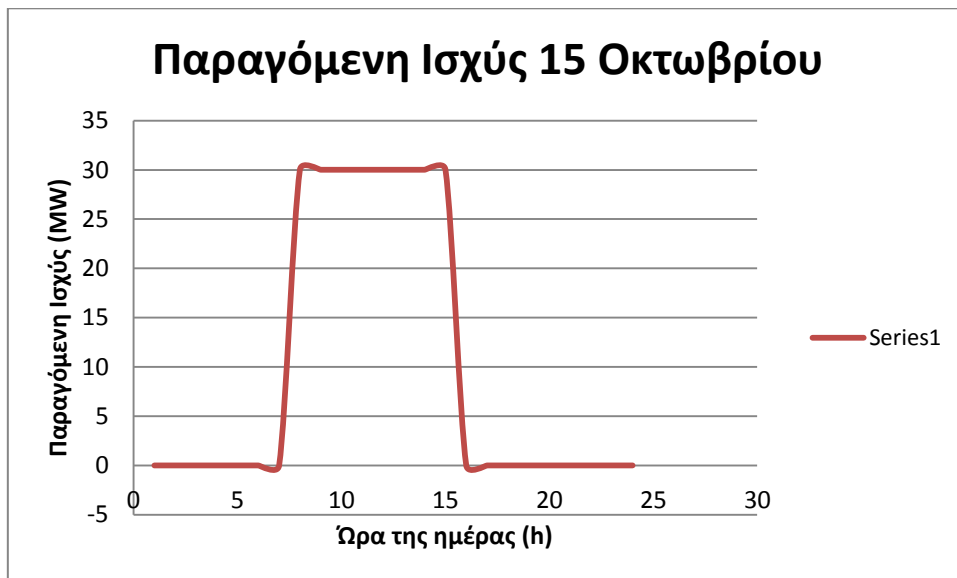
Σχήμα 4.16: Διάγραμμα ακτινοβολίας για την 15<sup>η</sup> Οκτωβρίου.



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα σκίασης στους ηλιακούς συλλέκτες για την 15<sup>η</sup> Οκτωβρίου.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα συλλεγόμενης ενέργειας για την 15<sup>η</sup> Οκτωβρίου.



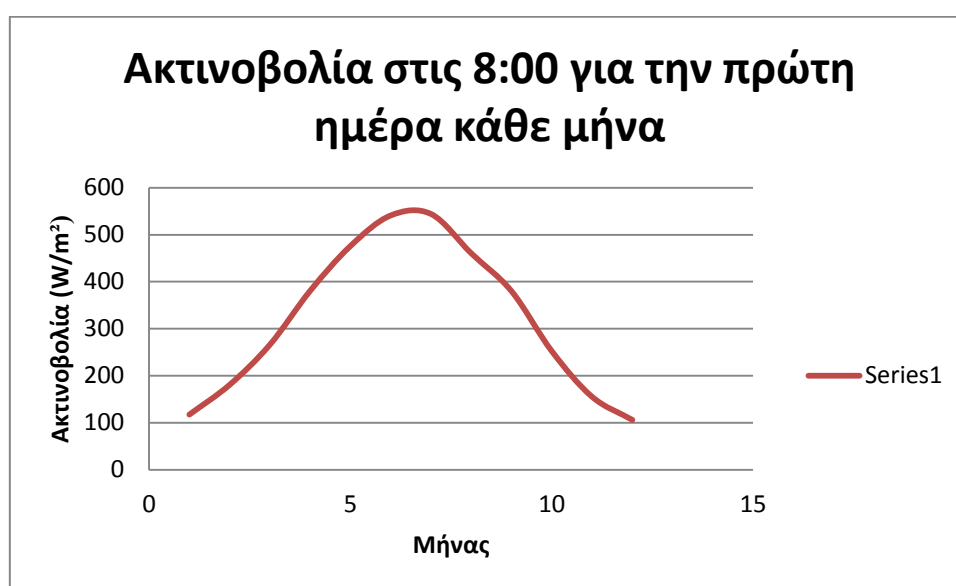
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για την 15<sup>η</sup> Οκτωβρίου.

Παρατηρείται ότι, το χρονικό εύρος λειτουργίας του σταθμού είναι μεγαλύτερο το καλοκαίρι, όπου λειτουργεί περίπου από τις 5:00 έως τις 18:00, παρά το χειμώνα που λειτουργεί από τις 7:00 έως τις 16:00. Επομένως συμπεραίνεται ότι η απόδοση είναι αρκετά μεγαλύτερη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, κάτι που ήταν αναμενόμενο φυσικά.

Από τα διαγράμματα εκπονείται το συμπέρασμα ότι η συλλεγόμενη ενέργεια έχει κορυφή τα  $13\text{W/m}^2$  και η παροχή μάζας τα  $392\text{ kg/sec}$ . Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η ροή μάζας του θερμαινόμενου μέσου ρυθμίζεται με αντλίες. Έτσι, ρυθμίζεται σε αυτή την παροχή για να λειτουργεί το σύστημα στην ονομαστική έξοδο και η ενέργεια που περισσεύει τροφοδοτεί την αποθήκη.

Για να γίνει κατανοητή η εξέλιξη του συστήματος, κατά τη διάρκεια του έτους παρατίθενται κάποια διαγράμματα για τη μεταβολή της ακτινοβολίας και της ισχύος, για την ίδια ώρα κάθε πρώτη του μήνα. Πιο συγκεκριμένα:

Στο διάγραμμα 4.20 φαίνεται η ακτινοβολία για κάθε πρώτη του μήνα στις 8:00.



**Σχήμα 4.20: Διάγραμμα ακτινοβολίας για κάθε πρώτη του μήνα στις 8:00.**

Παρατηρείται ότι η ακτινοβολία είναι πολύ μεγαλύτερη το καλοκαίρι ακόμα και τις πρωινές ώρες.

Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα 4.21 για την μεταβολή της ισχύος για κάθε πρώτη του μήνα στις 6:00, όπου κάποιους μήνες παράγεται ισχύς και κάποιους όχι.



**Σχήμα 4.21:** Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για κάθε πρώτη του μήνα στις 6:00.

Παρατηρείται ότι το χειμώνα αυτή την ώρα δεν παράγεται καθόλου ισχύς, στις αρχές της άνοιξης παράγεται λίγο λιγότερη από την ονομαστική και το καλοκαίρι λειτουργεί στο πλήρες φορτίο. Κάτι αντίστοιχο αναμένεται και στο διάγραμμα 4.22 που είναι για τις απογευματινές ώρες.

Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται η ισχύς για κάθε πρώτη του μήνα στις 17:00, όπου πάλι βρίσκεται στο τέλος της λειτουργίας, ο σταθμός για κάποιους μήνες.



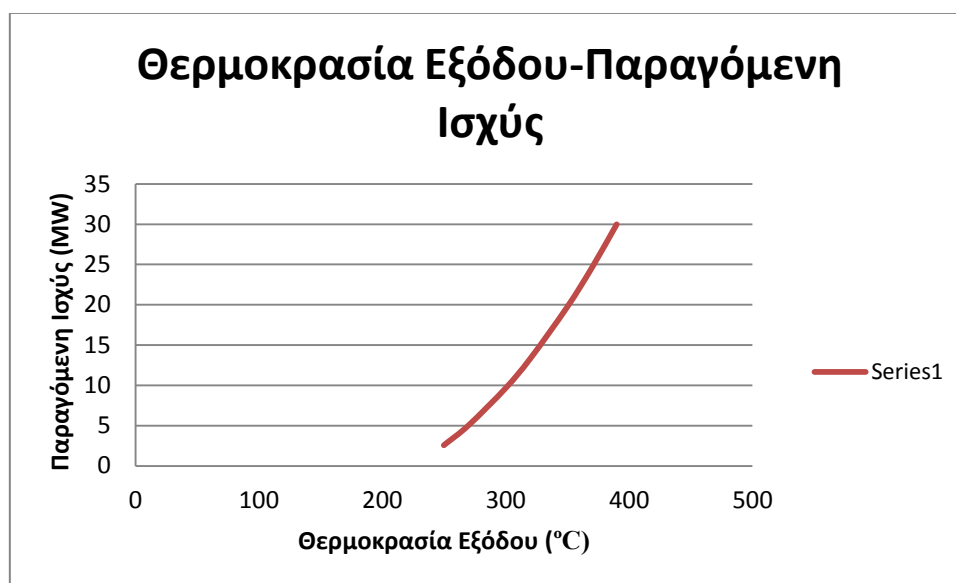
**Σχήμα 4.22:** Διάγραμμα της ισχύος εξόδου για κάθε πρώτη του μήνα στις 17:00.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως παρατηρείται ότι το χειμώνα ο σταθμός δεν λειτουργεί αυτή την ώρα σε αντίθεση με τους καλοκαιρινούς μήνες. Όλα αυτά βέβαια ήταν αναμενόμενα να συμβούν.

Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια διαγράμματα ώστε να γίνει κατανοητό πως μεταβάλλεται η ισχύς εξόδου της γεννήτριας σε σχέση με διάφορους παράγοντες που μπορούν να μεταβληθούν στο σύστημα και να την επηρεάσουν.

Σύμφωνα με το σύστημα που εξετάζεται οι εξισώσεις λειτουργίας ισχύουν μόνο για θερμοκρασίες εξόδου 250-400°C και για πιέσεις συμπύκνωσης 0,003-1,5bar. Επομένως τα επόμενα διαγράμματα κινούνται σε αυτές τις τιμές σε αυτές τις τιμές.

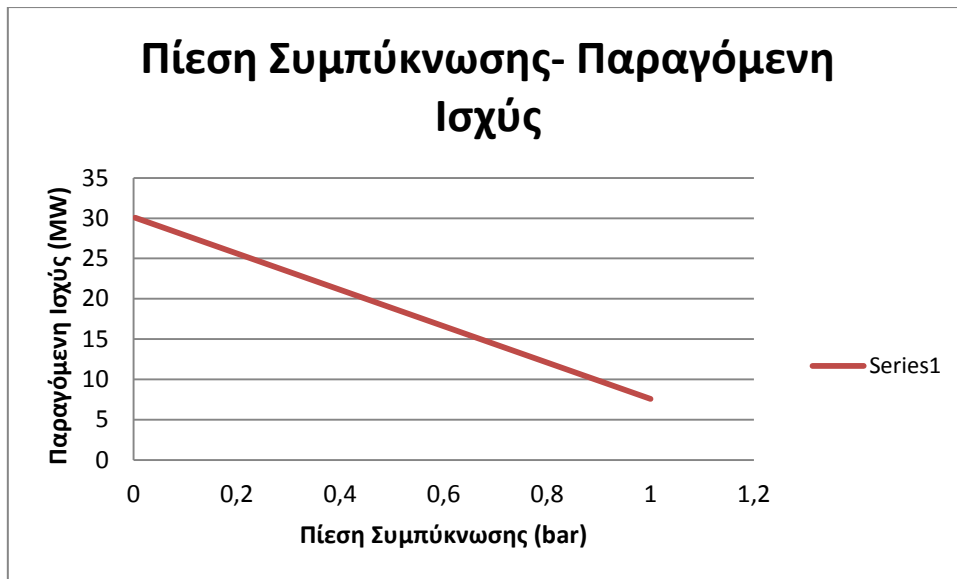
Αρχικά παρουσιάζεται η μεταβολή της ισχύς στην έξοδο του συστήματος σε μια διαφορετική θερμοκρασία εξόδου του υγρού από το ηλιακό πεδίο. Τα υπόλοιπα μεγέθη παραμένουν σταθερά.



**Σχήμα 4.23: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του υγρού από το ηλιακό πεδίο με την ισχύ εξόδου.**

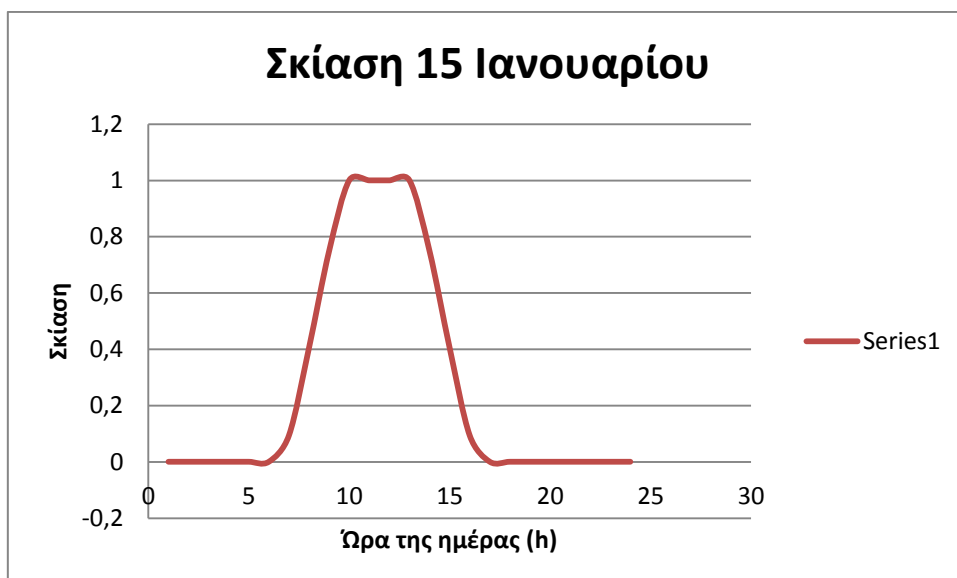
Παρατηρείται ότι καθώς η θερμοκρασία είναι πιο υψηλή και η έξοδος του συστήματος είναι μεγαλύτερη. Η θερμοκρασία ρυθμίζεται έτσι ώστε να λειτουργεί με την επιθυμητή έξοδο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση που έχει η πίεση συμπύκνωσης του υγρού στην ισχύ στην έξοδο του συστήματος, αν όλα τα υπόλοιπα μεγέθη μείνουν ανεπηρέαστα.



**Σχήμα 4.24:** Διάγραμμα της πίεσης συμπύκνωσης του υγρού με την ισχύ στην έξοδο.

Ακολούθως παρατηρείται πως επηρεάζεται η σκίαση, και επομένως και η ισχύς στην έξοδο, αν μειωθεί η απόσταση μεταξύ των κατόπτρων. Για να είναι καλύτερη η σύγκριση, η μελέτη θα γίνει για μια μέρα από τις προηγούμενες τέσσερις, που εξετάστηκαν προηγουμένως. Θα υποτεθεί η 15<sup>η</sup> Ιανουαρίου. Το εύρος ανοίγματος του συλλέκτη είναι 5m επομένως τα 15m που έχουν απόσταση μεταξύ τους είναι μια αρκετά ασφαλής επιλογή. Για να φανεί καλύτερα η διαφορά θα επιλέγεται να έχουν 7m απόσταση μεταξύ τους.

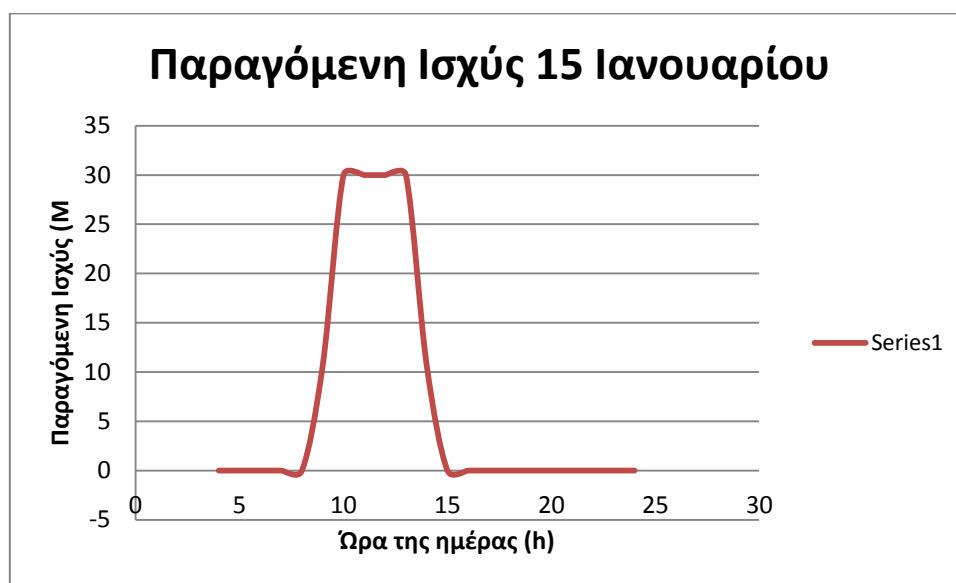


**Σχήμα 4.25:** Διάγραμμα σκίασης για τις 15 Ιανουαρίου όταν έχει μειωθεί η απόσταση μεταξύ των κατόπτρων στα 7 από τα 15m.



Παρατηρείται ότι είναι αρκετά μικρότερο το χρονικό διάστημα που δεν σκιάζονται καθόλου οι συλλέκτες, δηλαδή που έχει η σκίαση την τιμή 1, από την προηγούμενη περίπτωση. Για το λόγο αυτό, πρέπει πάντα τα κάτοπτρα να έχουν αρκετή απόσταση το πρώτο με το επόμενο, ώστε να ελαχιστοποιείται η μεταξύ τους σκίαση.

Τέλος, εξετάζεται η επίδραση αυτής της μεταβολής της σκίασης και στην ισχύ εξόδου.



**Σχήμα 4.26: Διάγραμμα παραγόμενης ισχύος όταν έχει μειωθεί η απόσταση μεταξύ των κατόπτρων.**

Αυτό που φαίνεται περίεργο είναι ότι δεν παρατηρείται καμία μεταβολή στην ισχύ. Όμως, οι συνθήκες που επικρατούν είναι για ηλιοφάνεια, οπότε και η λιγότερη επιφάνεια των καθρεπτών, που είναι διαθέσιμη αρκεί για την παραγωγή ισχύος πλήρους φορτίου, τις ίδιες ώρες με πριν. Στην πραγματικότητα λόγω των νεφώσεων, ακόμη κι αν είναι παροδικές, χρειάζεται να διατίθεται όσο το δυνατόν περισσότερο ηλιακό πεδίο. Έτσι, εξασφαλίζεται η απόσταση, ώστε να σκιάζονται μόνο κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου. Αν δεν γίνει αυτό θα χρειαστούν περισσότεροι συλλέκτες, για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, κάτι που δεν συμφέρει οικονομικά.

Τέλος, πραγματοποιείται μια μελέτη του προαναφερθέντος συστήματος για χίλιες επαναλήψεις, όπου μεταβάλλεται η μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης, ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη παραμένουν ως έχουν. Έτσι, προσομοιώνεται η τυχαία νέφωση που ενδέχεται να υπάρξει. Για το σκοπό αυτό το μέγεθος αυτό μεταβλήθηκε με διασπορά 40% γύρω από κανονική κατανομή.

Από τη μελέτη αυτή παρατηρείται ότι ο ετήσιος συντελεστής χρησιμοποίησης είναι 83%, με το ποσοστό αυτό να μειώνεται τους χειμερινούς μήνες και να αυξάνεται τους θερινούς αγγίζοντας το 94%. Ακόμη, η συνολική ετήσια παραγωγή ξεπερνά τις 92000 MWh και ο σταθμός λειτουργεί συνολικά για 3704 h. Πιο συγκεκριμένα, το 79% από την παραγόμενη αυτή ηλεκτρική ενέργεια βρίσκεται κοντά στο πλήρες φορτίο με μέση τιμή 28,07MW.

Τέλος, τους καλοκαιρινούς μήνες πραγματοποιείται λειτουργία πλήρους φορτίου για αρκετές ώρες της ημέρας, ενώ η λειτουργία του κορυφώνεται τον Ιούνιο, όπου λειτουργεί για 360 h κοντά στο πλήρες φορτίο με μέση τιμή 28,42 MW.

Πιο αναλυτικά, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης παρατίθενται στο παράρτημα.

# 5

## *Αποθήκευση*

### *5.1 Εισαγωγή*

Με την συνεχιζόμενη τεχνολογική ανάπτυξη των χωρών σε συνδυασμό με τον επανακαθορισμό του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων, η διαφορά μεταξύ «κορυφών» και «κοιλάδων» στις απαιτήσεις ισχύος του κάθε ηλεκτρικού δικτύου γίνεται όλο και πιο έντονη. Σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει στο 30% του μέγιστου φορτίου και σε άλλες, ακόμη και το 50%. Η εύρεση μεθόδων ώστε να μειωθεί αυτή η αντίφαση θεωρείται εξαιρετικά σημαντικό.

Αν και η αιχμή του φορτίου φαίνεται να εμφανίζεται γύρω στις οχτώ το απόγευμα, ένας ηλιοθερμικός σταθμός είναι δύσκολο να λειτουργεί αποδοτικά την ίδια χρονική περίοδο. Έτσι, η διαφορά μεταξύ «κορυφής» και «κοιλάδας» του δικτύου θα είναι πιο έντονη. Με την μέθοδο της αποθήκευσης, ο σταθμός αρχίζει να συλλέγει θερμική ενέργεια αμέσως μετά την ανατολή του ηλίου και αποθηκεύει μέρος της ενέργειας αυτής σε μια ζεστή δεξαμενή. Επιπλέον εξαιτίας της αποθήκευσης, η ισχύς εξόδου από τη γεννήτρια παραμένει σταθερή, παρά τις διακυμάνσεις στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μέχρι να τελειώσει όλη η αποθηκευμένη ενέργεια [9]. Τέλος, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας επιτρέπει στην παραγωγή να μετατοπιστεί σε περιόδους ανεξάρτητες από τη φάση της παραγωγής της ηλιακής πηγής και να παρέχει εφεδρική ενέργεια, κατά τη διάρκεια περιόδων με μειωμένο ηλιακό φως (πχ νέφωση). Ως μέσο αποθήκευσης χρησιμοποιείται συνήθως κάποιο υγροποιημένο άλας, το οποίο έχει εξαιρετικά υψηλές επιδόσεις στα μέχρι τώρα συστήματα που προβάλλονται.

Η χρήση αποθηκευτικού συστήματος προσθέτει μεγαλύτερη ενεργειακή και οικονομική αξία στον σταθμό και αυτό γιατί, ο σταθμός με αποθήκευση μπορεί να μεταφέρει την παραγωγή ηλεκτρισμού σε περιόδους με υψηλότερες τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, συγκριτικά

με έναν σταθμό που δύναται να παρέχει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η αποθήκευση μπορεί να παρέχει αμετάβλητη δυναμικότητα στο σύστημα ισχύος, αντικαθιστώντας τους συμβατικούς σταθμούς ισχύος.

Η κατασκευή ενός σταθμού με σύστημα αποθήκευσης θέτει ορισμένα προαπαιτούμενα για το μέγεθος του σταθμού, καθώς ο σταθμός ουσιαστικά αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες αλλά αλληλένδετες συνιστώσες, τα μεγέθη των οποίων μπορούν να εξετασθούν ξεχωριστά:

- Το σύστημα ισχύος
- Το ηλιακό πεδίο
- Η δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης.

Το μέγεθος του συστήματος ισχύος εξαρτάται από την ονομαστική τιμή ισχύος της ατμογεννήτριας και τυπικά μετράται είτε στην ονομαστική είσοδο του συστήματος ισχύος σε MW θερμικής ενέργειας (MW-t), είτε στην ονομαστική έξοδο του συστήματος ισχύος, σε MW ηλεκτρικής ενέργειας (MW-e).

Το μέγεθος του ηλιακού πεδίου, σε συνδυασμό με την ηλιακή ακτινοβολία, προσδιορίζει το ποσό της θερμικής ενέργειας που θα είναι διαθέσιμο στο σύστημα ισχύος. Το μέγεθος του ηλιακού πεδίου είναι μια σημαντική παράμετρος, το οποίο σε σχέση με το σύστημα ισχύος θα προσδιορίσουν το συντελεστή ικανότητας του σταθμού ανάλογα με το ποσοστό της θερμικής ενέργειας η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί. Η μία περίπτωση είναι το μέγεθος του πεδίου να είναι μικρότερο. Αυτό θα συντελέσει στην υποχρησιμοποίηση του συστήματος ισχύος και επομένως ο σταθμός θα έχει χαμηλό συντελεστή απόδοσης. Αυτό μπορεί να προκύψει εξαιτίας της έλλειψης θερμικής ενέργειας στην διάρκεια των ωρών, εκτός αυτών με την υψηλότερη ακτινοβολία. Η άλλη περίπτωση είναι το μέγεθος του ηλιακού πεδίου να είναι μεγαλύτερο, κάτι το οποίο θα οδηγήσει στη μη αξιοποίηση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας, από το σύστημα ισχύος, ιδιαίτερα στις ώρες υψηλής παραγωγής.

Το μέγεθος της αποθήκευσης προσδιορίζει πρώτον, τη δυναμικότητα των εναλλακτών θερμότητας, μεταξύ της δεξαμενής αποθήκευσης και του υγρού μεταφοράς θερμότητας, μετρημένη σε MW-t και δεύτερον, την ολική χωρητικότητα ενέργειας της δεξαμενής αποθήκευσης. Παρόλο που η χωρητικότητα της ενέργειας στη δεξαμενή αποθήκευσης μπορεί να μετρηθεί σε MW-t, συχνά είναι πιο πρακτικό να μετριέται σε ώρες αποθήκευσης. Η χωρητικότητα της αποθήκης προσδιορίζεται ως ο αριθμός των ωρών που η δεξαμενή αποθήκευσης μπορεί να φορτίσει στη μέγιστη χωρητικότητα, μέγεθος το οποίο είναι πολύ κοντά στον αριθμό των ωρών της ικανότητας εκφόρτισης, καθώς η απόδοση του συστήματος αποθήκευσης για μια πλήρη φόρτιση - εκφόρτιση είναι περίπου 98,5%. Σύμφωνα με τα παραπάνω άλλο ένα πλεονέκτημα της προσθήκης συστήματος αποθήκευσης σε έναν ηλιοθερμικό σταθμό, είναι η δυνατότητα αύξησης του ηλιακού πεδίου σε σχέση με το

σύστημα ισχύος, χωρίς να ελαττώνεται ο βαθμός απόδοσης, καθώς περίσσεια θερμικής ενέργειας μπορεί να τοποθετηθεί στο σύστημα αποθήκευσης, για μετέπειτα χρήση [29].

Όσον αφορά τα μέσα αποθήκευσης υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία υλικών, τα οποία θα πρέπει να πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Κατάλληλη θερμοκρασία μετατροπής.
- Υψηλή λανθάνουσα θερμοκρασία μετατροπής.
- Κατάλληλη θερμική αγωγιμότητα.
- Μη τοξικό.
- Μη εύφλεκτο.
- Χαμηλό ποσοστό εκτόνωσης όγκου.
- Μεγάλη πυκνότητα.
- Να είναι κοινό (εύκολο να βρεθεί) [30].

Για έναν σχεδιαστή ενός εμπορικού σταθμού, η επιλογή της κλίμακας του σταθμού και η απόφαση για την κατασκευή του, θα εξαρτηθούν όχι μόνο από το διαθέσιμο ποσό της ηλιακής ενέργειας, αλλά και με το κατά πόσο αυτή συσχετίζεται με τις τρέχουσες τιμές αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Προφανώς, οι υψηλές τιμές ηλεκτρισμού σε συνδυασμό με την αφθονία της ηλιακής πηγής είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για έναν προσοδοφόρο σταθμό καθώς η κακή συσχέτιση μεταξύ ηλιακή διαθεσιμότητας και τιμών ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να κάνει την κατασκευή ηλιοθερμικού σταθμού ασύμφορη. Ευνόητο είναι ότι σύστημα αποθήκευσης μπορεί επίσης να αυξήσει τις προοπτικές κέρδους ενός σταθμού, παρέχοντας την παραγόμενη ενέργεια σε ώρες με υψηλότερες τιμές. Η διαδικασία βεβαίως αυτή, προσθέτει επιπλέον κόστος και απαιτούμενο κεφάλαιο καθώς επίσης και κάποιες απώλειες στην απόδοση της ενέργειας, κατά τη διάρκεια μεταφοράς της στο σύστημα αποθήκευσης.

## ***5.2 Είδη αποθηκευτικών συστημάτων***

Η επιλογή του κατάλληλου αποθηκευτικού συστήματος, για έναν ηλιοθερμικό σταθμό εξαρτάται από ένα συνδυασμό σχεδιαστικών παραμέτρων, όπως επίσης και έπειτα από την αξιολόγηση πιθανών πλεονεκτημάτων, που θα προκύψουν από το ισοζύγιο της οριακής αύξησης του κόστους από την προσθήκη ενός αποθηκευτικού συστήματος. Για την σύγκριση και την τελική απόφαση επιλογής των αποθηκευτικών συστημάτων, πρέπει εκ των προτέρων να καθοριστούν οι απαιτήσεις του συστήματος. Αυτά περιλαμβάνουν την κανονική

θερμοκρασία λειτουργίας του μέσου μεταφοράς θερμότητας στο ηλιακό πεδίο, τη μέγιστη ισχύς στην έξοδο που απαιτείται από τον σταθμό, τον επιθυμητό τρόπο λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης καθώς και τον τρόπο με τον οποίο το αποθηκευτικό σύστημα θα ενσωματωθεί με το ηλιακό πεδίο και το σύστημα ισχύος. Πρωταρχικής σημασίας χαρακτηριστικό, που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι η θερμοχωρητικότητα του συστήματος ή αλλιώς το μέγιστο ποσό ενέργειας που μπορεί να παρέχει το σύστημα αποθήκευσης. Φυσικά πολλοί άλλοι παράγοντες πρέπει να εξετασθούν κατά τη σύγκριση των συστημάτων θερμικής αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων και των παρακάτω:

- Πυκνότητα ενέργειας του υλικού αποθήκευσης.
- Ικανότητα μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στο υλικό αποθήκευσης και στο υγρό μεταφοράς θερμότητας στο ηλιακό πεδίο.
- Διάρκεια ζωής των στοιχείων του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας.
- Συμβατικότητα μεταξύ του υγρού μεταφοράς θερμότητας, του μέσου αποθήκευσης και του εναλλάκτη θερμότητας.
- Κυκλική θερμική απόδοση του συστήματος αποθήκευσης.
- Ευκολία στο χειρισμό [31].

### **5.2.1 Αποθήκευση με αισθητή θερμότητα**

Η αποθήκευση με αισθητή θερμότητα επιτυγχάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενός υγρού ή στερεού υλικού, χωρίς να γίνεται αλλαγή φάσης του υλικού. Η αποθηκευμένη ενέργεια προσδιορίζεται από το προϊόν της μάζας, τη μέση ειδική θερμότητα και την αλλαγή θερμοκρασίας του υλικού. Για την αποθήκευση με αισθητή θερμότητα, οι σημαντικές φυσικές ιδιότητες του υλικού που πρέπει να εξετάζονται είναι: η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα του υλικού αποθήκευσης, οι θερμοκρασίες λειτουργίας, η θερμική αγωγιμότητα και διάχυση, η πίεση του ατμού, ο συντελεστής απωλειών και το κόστος.

#### ***Υγρά μέσα***

Τα συνθετικά οργανικά έλαια και τα νιτρικά άλατα είναι τα πιο κοινά υγρά μέσα αποθήκευσης, που χρησιμοποιούνται σε ηλιοθερμικά συστήματα. Οι μέσες θερμοδυναμικές ιδιότητες, για υποψήφια υγρά μέσα αποθήκευσης, με αισθητή αποθήκευση θερμότητας φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Το ανώτατο όριο θερμοκρασίας αναφέρεται στην υψηλότερη θερμοκρασία, που μπορεί να αντέξει το υλικό πριν αρχίσει φυσιολογικά να καταρρέει, ενώ το χαμηλό και υψηλό θερμοκρασιακό όριο αναφέρεται στα τυπικά όρια λειτουργίας του υλικού κατά την αποθήκευση. Όταν αυτά τα θερμοκρασιακά όρια συνδυάζονται με τη μέση

πυκνότητα του υγρού και τη θερμοχωρητικότητα, τότε οδηγούν στην ογκομετρική θερμοχωρητικότητα. Παρόλο, που το νερό φαίνεται ότι έχει τη μεγαλύτερη ογκομετρική θερμοχωρητικότητα ανά βαθμό Κελσίου, από οποιοδήποτε από τα έλαια και τα νιτρικά άλατα, περιορίζεται σε μια πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία (λόγω εξάτμισης) και επομένως μπορεί να αποθηκεύσει πολύ λιγότερη ενέργεια, ανά μονάδα όγκου στην τυπική θερμοκρασία λειτουργίας σε σχέση με άλλα υγρά. Η θερμοχωρητικότητα είναι ένα σημαντικό μέγεθος για την ποσότητα της ενέργειας, που μπορεί ένα υλικό να αποθηκεύσει ανά μονάδα όγκου. Η υψηλή ογκομετρική θερμοχωρητικότητα αντιστοιχεί σε μικρότερα συστήματα αποθήκευσης, τα οποία είναι και πιο φθηνά και απαιτούν λιγότερο βοηθητικό εξοπλισμό και σωληνώσεις.

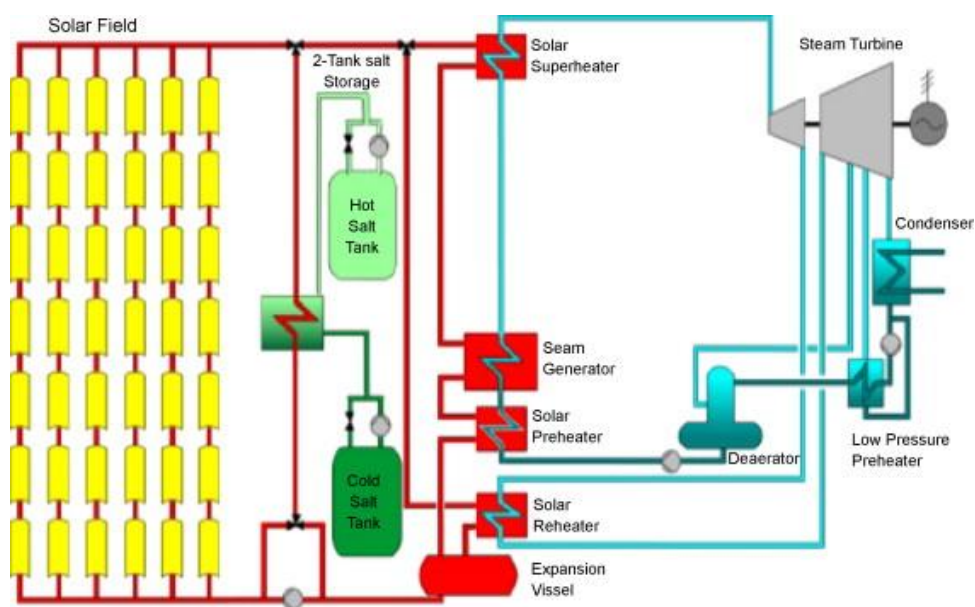
**Πίνακας 5.1: Θερμοδυναμικές ιδιότητες των υγρών μέσω αποθήκευσης [31].**

Υγρό	Hitec	Hitec XL	Binary Nitrate Salt	Therminol VP-1	Caloria HT-43	Xceltherm 600	Water
Σημείο Πήξης (°C)	142	120	210	12	12	20	0
Άνω Θερμοκρασιακό Όριο (°C)	530	500	650	400	315	316	100
Ψυχρή Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	290	290	290	290	200	200	50
Θερμή Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	500	500	565	390	290	290	100
Μέση Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	1790	1913	1818	768	715	715	975
Μέση Θερμική Αγωγιμότητα (W/m-C)	0,332	0,519	0,524	0,089	0,090	0,118	0,663
Μέση Θερμοχωρητικότητα (J/kg-C)	1560	1415	1517	2449	2557	2762	4193
Πυκνότητα ενέργειας Ειδικού όγκου (kWh/m <sup>3</sup> )	306	297	327	178	124	134	85

Τα συστήματα με υγρά μέσα αποθήκευσης, συνήθως βασίζονται είτε σε σύστημα δύο δεξαμενών, είτε σε σύστημα με μία δεξαμενή που να εμπεριέχει το μέσο αποθήκευσης και το οποίο συνδυάζεται με το πεδίο των συλλεκτών άμεσα ή έμμεσα. Οι επόμενες ενότητες περιγράφουν μερικούς από τους πιο συνηθισμένους σχεδιασμούς αποθηκευτικών συστημάτων.

### A. Έμμεση αποθήκευση δυο δεξαμενών

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του συστήματος έμμεσης αποθήκευσης δυο δεξαμενών, είναι ότι το υγρό μεταφοράς θερμότητας που κυκλοφορεί για τη συλλογή θερμότητας από το ηλιακό πεδίο είναι διαφορετικό από το μέσο που βρίσκεται στις δεξαμενές αποθήκευσης. Το υγρό μεταφοράς θερμότητας είναι συνήθως ένα συνθετικό έλαιο όπως το Therminol VP-1 (το οποίο τώρα χρησιμοποιείται στους σταθμούς SEGS στην California) ή το Dowtherm και το μέσο αποθήκευσης συνήθως είναι υδροποιημένο άλας. Το σύστημα αποτελείται από μια ψυχρή δεξαμενή, που τυπικά λειτουργεί στους 290°C ή λιγότερο, μια δεύτερη ψυχρή δεξαμενή, που τυπικά λειτουργεί στους 390°C, το μέσο αποθήκευσης, τους εναλλάκτες θερμότητας για τη μεταφορά της θερμότητας από το ζεστό υγρό μεταφοράς στο μέσο αποθήκευσης (και αντίστροφα), τις αντλίες του μέσου αποθήκευσης, και τα σχετιζόμενα παρελκόμενα του εξοπλισμού του συστήματος. Τέτοια είναι το σύστημα ελλιπούς φορτίου του αερίου και ο ηλεκτρικός εντοπισμός θερμότητας για όλα τα συστατικά του υδροποιημένου άλατος. Ο ηλεκτρικός εντοπισμός θερμότητας χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του αποθέματος στην περίπτωση παρατεταμένης διακοπής λειτουργίας του σταθμού, ενώ το σύστημα ελλιπούς φορτίου του αερίου αποτρέπει την οξείδωση του μέσου αποθήκευσης. Ένα σχηματικό διάγραμμα του συστήματος με έμμεση αποθήκευση δυο δεξαμενών φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα [31].



Σχήμα 5.1: Σύστημα έμμεσης αποθήκευσης δύο δεξαμενών.

Το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας φορτίζεται παίρνοντας ζεστό υγρό μεταφοράς θερμότητας από το ηλιακό πεδίο μεταφέροντάς το στους εναλλάκτες θερμότητας ελαιού-άλατος. Στους εναλλάκτες θερμότητας το άλας και το υγρό ρέουν σε μια διάταξη αντιρροής.



Θερμότητα μεταφέρεται από το υγρό στο ψυχρό άλας ρέοντας μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας μετατρέποντας το ψυχρό άλας σε ζεστό το οποίο αποθηκεύεται στη θερμή δεξαμενή. Όταν απαιτείται η ενέργεια της αποθήκης, οι ροές του υγρού και του άλατος αντιστρέφονται στους εναλλάκτες με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του υγρού. Το ξαναζεσταμένο υγρό στη συνέχεια χρησιμοποιείται στο σύστημα ισχύος, για την παραγωγή ατμού και τη λειτουργία του σταθμού.

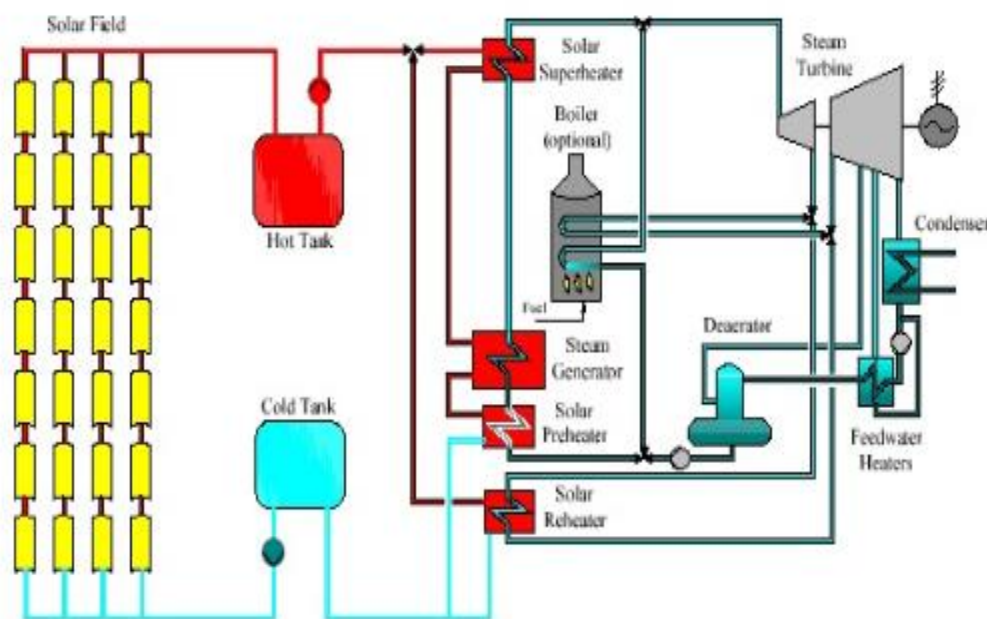
Η χρήση της έμμεσης αποθήκευσης έχει δοκιμαστεί και προς το παρόν έχει το χαμηλότερο τεχνικό ρίσκο. Παρόλα αυτά η μεταφορά ενέργειας από το υγρό στο άλας κατά τη φόρτιση και η μεταφορά ενέργειας από το άλας στο υγρό κατά την εκφόρτιση, απαιτούν πτώση της θερμοκρασίας μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας. Έτσι η θερμοκρασία του υγρού που πηγαίνει στο σύστημα ισχύος αφού μεσολαβήσει η διαδικασία της αποθήκευσης είναι κατά 10 έως 20°C χαμηλότερη από την απευθείας απόδοσή της από το ηλιακό πεδίο. Εξαιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας αλλά και της μείωσης της απόδοσης που σχετίζεται με την χρήση του εναλλάκτη θερμότητας κατά την έμμεση αποθήκευση, η έξοδος και η απόδοση του κύκλου Rankine είναι αναπόφευκτα και αυτές χαμηλότερες. Μια τυπική απόδοση για ένα σύστημα έμμεσης αποθήκευσης δυο δεξαμενών είναι περίπου 93% , ενώ ένας μελλοντικός σταθμός με παραβολικούς συλλέκτες και σύστημα με άμεση αποθήκευση δυο δεξαμενών υγροποιημένου άλατος που θα αναφερθεί παρακάτω μπορεί να έχει απόδοση 98%. Αυτά τα αποτελέσματα ισχύουν και για άλλους τύπους αποθήκευσης που απαιτούν μια θερμοκρασιακή διαφορά για την φόρτιση και την εκφόρτιση , όπως τα στερεά μέσα και τα συστήματα αλλαγής φάσης.

Σήμερα έμμεσο αποθηκευτικό σύστημα δυο δεξαμενών χρησιμοποιείται στους σταθμούς Andasol 1,2, και 3, ενώ με την ίδια μέθοδο θα λειτουργεί ο υπό κατασκευή σταθμός APS Solana. Πρόκειται για το σύστημα με τα περισσότερα χρόνια λειτουργίας και μπορεί να θεωρηθεί το σήμα κατατεθέν για τα θερμικά αποθηκευτικά συστήματα. Ο υπολογισμός του κόστους της έμμεσης θερμικής αποθήκευσης που έγινε από την εταιρία Nexant το 2006 έδειξε ότι ένα σύστημα των 800MWh κοστίζει περίπου 30\$ / KWh. Οι εμπορικές τιμές βέβαια έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια και ο λόγος αυτός μπορεί να διαφοροποιείται [31].

### ***B. Άμεση αποθήκευση δυο δεξαμενών***

Σε ένα σύστημα άμεσης αποθήκευσης δυο δεξαμενών, το υγρό που κυκλοφορεί στο ηλιακό πεδίο επίσης χρησιμοποιείται και ως μέσο αποθήκευσης. Όπως στο έμμεσο σύστημα, το άμεσο σύστημα αποτελείται από μια ψυχρή και μια θερμή δεξαμενή, το μέσο αποθήκευσης, και τα σχετιζόμενα παρελκόμενα του εξοπλισμού του συστήματος, όπως το σύστημα ελλειπούς φορτίου του αερίου και τους ηλεκτρικούς θερμαντήρες για τη διατήρηση του

αποθέματος κατά τη διάρκεια παρατεταμένης διακοπής λειτουργίας του σταθμού. Παρόλα αυτά, αντίθετα με το έμμεσο σύστημα, ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί το ίδιο υγρό και για το ηλιακό πεδίο και για το σύστημα αποθήκης, το οποίο εξαλείφει την ανάγκη ύπαρξης δεύτερου συστήματος εναλλακτών θερμότητας. Στην περίπτωση αυτή, με υγροποιημένο άλας ως μέσο αποθήκευσης, οι ψυχρές και οι θερμές δεξαμενές μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες περίπου 290°C και 565°C αντίστοιχα. Ένα σχηματικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



**Σχήμα 5.2: Σύστημα άμεσης αποθήκευσης δύο δεξαμενών.**

Για τη φόρτιση του συστήματος, υγρό από την ψυχρή δεξαμενή κυκλοφορεί στο ηλιακό πεδίο και επιστρέφει στη θερμή δεξαμενή. Για την εκφόρτιση, υγρό από την ζεστή δεξαμενή ρέει μέσα από τη γεννήτρια ατμού και επιστρέφει στην ψυχρή δεξαμενή. Εξαρτώμενη από το χρόνο διαμονής στη δεξαμενή η θερμοκρασία του υγρού που αφήνει τη δεξαμενή είναι από 0 έως 1,5 °C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία που είχε κατά την είσοδο στη δεξαμενή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η λειτουργία του κύκλου Rankine σε σταθμό με άμεση αποθήκευση δυο δεξαμενών να είναι ουσιαστικά η ίδια από άποψη απόδοσης, σαν αυτή που θα είχε αν ο σταθμός δεν είχε καθόλου αποθήκευση.

Μπορεί κάποιος να ισχυριστεί ότι μόνο μια δεξαμενή χρειάζεται για το φορτισμένο μέσο αποθήκευσης, αλλά η ψυχρή δεξαμενή είναι απαραίτητη για να κρατά τον όγκο του υγρού που έχει ήδη εκφορτιστεί από τη γεννήτρια ατμού. Κατά την εκφόρτιση το πεδίο των

συλλεκτών πιθανόν δεν θα λαμβάνει ηλιακή ενέργεια, παρόλο που είναι δυνατό να φορτίζει και να εκφορτίζει ταυτόχρονα, όπως έγινε στο σταθμό Solar Two.

Τα συστήματα άμεσης αποθήκευσης δυο δεξαμενών ίσως είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούν υγροποιημένο άλας ως μέσο αποθήκευσης. Τα νιτρικά άλατα παρόλο που είναι φθηνά και μπορούν να έχουν αποθηκευτική ικανότητα από 3 έως 16 ώρες με λειτουργία στο πλήρους φορτίου, εμπεριέχουν και κάποια μειονεκτήματα. Το πρωταρχικό μειονέκτημα σε ένα σύστημα αποθήκευσης υγροποιημένου άλατος είναι το σχετικά υψηλό σημείο πήξης των νιτρικών αλάτων. Έτσι, έμφαση πρέπει να δοθεί για να εξασφαλιστεί ότι το άλας δεν παγώνει στο ηλιακό πεδίο ή κάπου αλλού στο σύστημα. Για το λόγο αυτό, πρέπει να γίνει εγκατάσταση ενός συστήματος ηλεκτρικού εντοπισμού θερμότητας σε όλο τον εξοπλισμό που έρχεται σε επαφή με το άλας. Έτσι προκύπτουν και άλλα μειονεκτήματα, όπως υψηλότερες απώλειες θερμότητας, μικρότερη ανθεκτικότητα της επικάλυψης στους λήπτες και ανάγκη για ακριβότερο εξοπλισμό.

Μέχρι σήμερα η τεχνολογία αυτή, έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετούς σταθμούς. Το σύστημα του σταθμού SEGS I περιλαμβάνει άμεση αποθήκευση δυο δεξαμενών και λειτούργησε από το 1985 έως το 1999. Ο SEGS I χρησιμοποίησε το έλαιο Caloria τόσο ως υγρό μεταφοράς θερμότητας στο ηλιακό πεδίο όσο και σαν μέσο αποθήκευσης. Στους σταθμούς SEGS II-IX το Caloria αντικαταστάθηκε από το υψηλότερης θερμοκρασίας έλαιο Therminol, αλλά καθώς το έλαιο αυτό είναι δύσκολο να αποθηκευτεί εξαιτίας της υψηλής πίεσης ατμού στις θερμοκρασίες λειτουργίας του σταθμού, οι μεταγενέστεροι SEGS δεν συμπεριλάμβαναν αποθηκευτικό σύστημα. Στο σχήμα 5.3 φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα άμεσης αποθήκευσης δύο δεξαμενών.



**Σχήμα 5.3: Άμεσο σύστημα αποθήκευσης δυο δεξαμενών.**

Αποθηκευτικό σύστημα δυο δεξαμενών τηγμένου άλατος χρησιμοποιήθηκε αρχικά στο σταθμό Solar Two, ο οποίος είναι σταθμός με κεντρικό λήπτη και είναι σημείο αναφοράς για τα μέχρι τώρα συστήματα δυο δεξαμενών τηγμένου άλατος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του τηγμένου άλατος σε σταθμούς με παραβολικά κάτοπτρα είναι πολύ δύσκολη καθώς υπάρχει ο κίνδυνος της ψύξεως του άλατος στο πεδίο των συλλεκτών. Σε αρκετές χώρες

γίνονται έρευνες για την ανάπτυξη και παραγωγή αλάτων με χαμηλό σημείο τήξεως, καθώς και ανάπτυξη αποδοτικότερου εξοπλισμό για τα συστήματα με παραβολικά κάτοπτρα με σκοπό να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα [31].

### ***Γ. Αποθήκευση με ζεστό νερό***

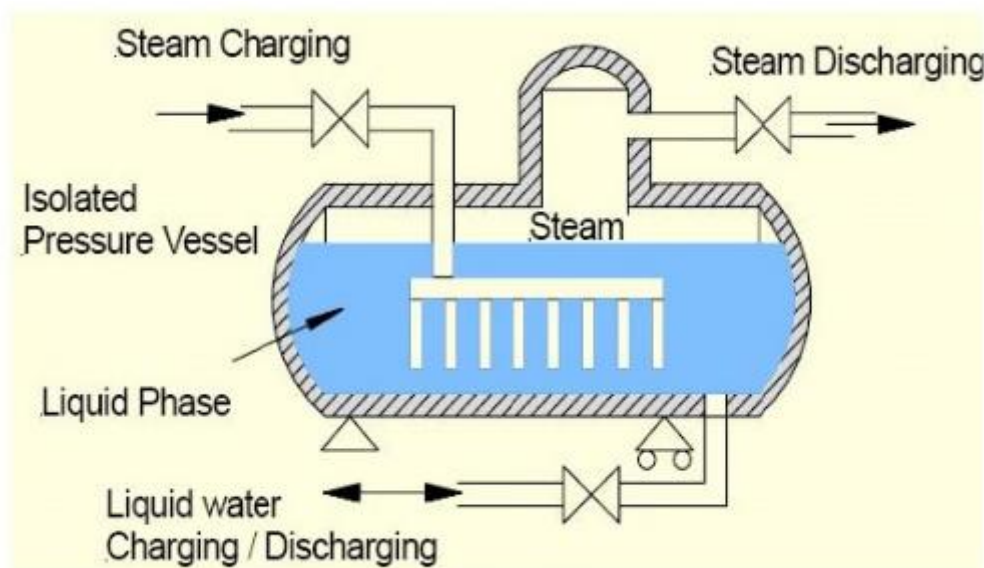
Ένα σύστημα αποθήκης με ζεστό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε σύστημα δυο δεξαμενών, είτε για μια θερμοκλίνη στην οποία το νερό αντικαθιστά το υγροποιημένο άλας ως μέσο αποθήκευσης. Η αντικατάσταση του υγροποιημένου άλατος από νερό θα μείωνε σημαντικά την πολυπλοκότητα και το κόστος του αποθηκευτικού συστήματος, εξαλείφοντας την ανάγκη για ηλεκτρική θέρμανση και για σύστημα ελλιπούς φορτίου του αερίου. Το νερό για το σύστημα θα μπορούσε να προέρχεται από τον εκάστοτε δήμο, μειώνοντας ακόμη περισσότερο το κόστος για το αποθηκευτικό σύστημα.

Ωστόσο το μεγαλύτερο μειονέκτημα που σχετίζεται με τη χρήση του νερού ως μέσο αποθήκευσης είναι η χαμηλή μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Σε ατμοσφαιρική πίεση, το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε θερμοκρασίες έως περίπου 100°C. Το οποίο θα έχει σημαντική επίπτωση στην απόδοση του κύκλου ισχύος. Οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας οδηγούν στην ανάγκη μεγαλύτερου όγκου αποθήκης, από ότι στα μέσα με υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Ακόμη αν το ζεστό νερό χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με ένα υγρό μεταφοράς θερμότητας υψηλότερης θερμοκρασιακής λειτουργίας, όπως ένα οργανικό έλαιο, η μεταφορά της θερμικής ενέργειας από το υγρό στο νερό θα έχει μια μεγάλο θερμικό κόστος εξαιτίας του γεγονότος ότι μεγάλο ποσοστό της ενέργεια του υγρού θα χαθεί αναγκαστικά για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του νερού. Το ζεστό νερό ως μέσο αποθήκευσης, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα άμεσο ή έμμεσο αποθηκευτικό σύστημα που λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες [31].

### ***Δ. Συσσωρευτής ατμού***

Μια άλλη εκδοχή χρήσης ζεστού νερού είναι ο συσσωρευτής ατμού πολλαπλών πιέσεων. Μπορεί να χρησιμοποιεί ως αποθηκευτικό μέσο χρησιμοποιώντας πεπιεσμένο, κορεσμένο, υγρό νερό, κερδίζοντας από την υψηλή ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης του υγρού νερού και κάνοντας παράλληλα χρήση της ικανότητα να παρέχει κορεσμένο ατμό σε ένα εύρος 100-300°C σε πιέσεις πάνω από 100 bar. Το ζεστό πεπιεσμένο νερό αποτελεί το 59 έως 90% του όγκου του συσσωρευτή πολλαπλών πιέσεων, ο οποίος βασίζεται στην αλλαγή της πίεσης στο δοχείο αποθήκευσης και κατά συνέπεια τη μετατροπή του νερού σε ατμό. Υψηλές τιμές εκφόρτισης και ταχεία πλήρωση του αποθηκευτικού συστήματος είναι δυνατή, όταν το

νερό χρησιμοποιείται και ως μέσο αποθήκευσης αλλά και ως λειτουργικό μέσο, κάνοντας τον συσσωρευτή ατμού τον ιδανικό υποψήφιο για βραχυπρόθεσμα συστήματα αποθήκευσης. Το παρακάτω σχηματικό διάγραμμα δείχνει έναν συσσωρευτή ατμού.



**Σχήμα 5.4: Συσσωρευτής ατμού πολλαπλών πιέσεων.**

Όπως παρατηρούμε, για τη φόρτιση του συσσωρευτή ατμού, ατμός εισέρχεται στο ζεστό νερό του δοχείου. Ακολουθώντας τον κανόνα της θερμοδυναμικής ισορροπίας στο δοχείο, ο ατμός συμπυκνώνεται και αυξάνει τη θερμοκρασία του νερού ή περνά μέσα από το νερό και αυξάνει τον όγκο του ατμού. Αν ο όγκος του ατμού αυξηθεί, η πίεση στο δοχείο αυξάνεται με μικρή μείωση στη μάζα του υγρού. Η αυξημένη πίεση λόγω του όγκου του αερίου συνεπάγεται μεγαλύτερη θερμοκρασία κορεσμού. Κατά την εκφόρτιση, ο ατμός εξάγεται από το δοχείο αποθήκευσης, προκαλώντας την πτώση της πίεσης στο δοχείο και επομένως το υπόλοιπο νερό του δοχείου μετατρέπεται σε ατμό. Καθώς το δοχείο αδειάζει, η πίεση και η θερμοκρασία μέσα στο δοχείο μειώνονται και η πίεση του ατμού που εξάγεται από τον συσσωρευτή πέφτει.

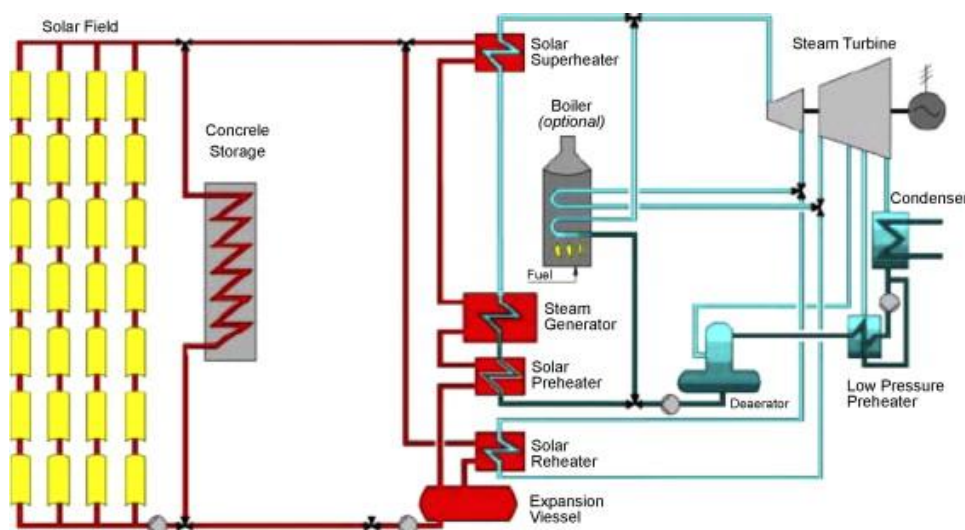
Για παράδειγμα ο σταθμός κεντρικού λήπτη PS10 στην Ισπανία χρησιμοποιεί συσσωρευτές ατμού που παρέχουν 20 MWh αποθήκευσης, αρκετές για να τροφοδοτήσουν την τουρμπίνα σε μερικό φορτίο έως 1 ώρα. Το σύστημα αυτό αποτελείται από 4 δεξαμενές οι οποίες εκφορτίζονται διαδοχικά.

## Στερεά Μέσα

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας με στερεά μέσα αποτελεί μια δεύτερη περίπτωση τεχνολογίας, η οποία βασίζεται στην αισθητή μεταφορά θερμότητας για την φόρτιση και την εκφόρτιση της αποθήκης. Αντίθετα με την αποθήκευση με υγρά μέσα η αποθήκευση με στερεά μέσα αποτελεί πρωταρχικά μια παθητική μορφή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, στην οποία το μέσο μεταφοράς θερμότητας περνά απευθείας στο στερεό μέσο αφού ζεσταθεί εξαιτίας του ηλιακού πεδίου. Πολλά διαφορετικά στερεά υλικά θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως υλικά αποθήκευσης.

### A. Σκυρόδεμα υψηλής θερμοκρασίας

Το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής ανέπτυξε μια κατασκευή στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης, για τη δοκιμή ενός τσιμεντένιου συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Εξετάστηκε η επίδοση, η ανθεκτικότητα και το κόστος για τη χρήση του ως αποθηκευτικό σύστημα θερμικής ενέργειας, για ηλιοθερμικούς σταθμούς με παραβολικά κάτοπτρα, που κάνουν χρήση στερεού υλικού ως μέσο αποθήκευσης ( σκυρόδεμα υψηλής θερμοκρασίας ή χυτεύσιμα κεραμικά). Το σύστημα είναι δυνατό να λειτουργήσει σε συνδυασμό με οποιοδήποτε από τα υγρά μεταφοράς θερμότητας στο πεδίο των συλλεκτών. Αφού ζεσταθεί στο ηλιακό πεδίο, το υγρό περνά μέσα από μια σειρά σωληνώσεων που είναι ενσωματωμένες στο στερεό μέσο, για να μεταφέρουν τη θερμική ενέργεια προς και από το μέσο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του σταθμού [31]. Ένα σχηματικό παράδειγμα αυτής της μεθόδου αποθήκευσης φαίνεται στο σχήμα 5.5:



Σχήμα 5.5: Αποθηκευτικό σύστημα με σκυρόδεμα υψηλής θερμοκρασίας.



**Σχήμα 5.6: Αποθήκευση θερμότητας με σκυρόδεμα [32].**

Από τα αρχικά τεστ του γερμανικού αυτού κέντρου διαφάνηκε ότι τα χυτεύσιμα κεραμικά και το σκυρόδεμα υψηλής θερμοκρασίας είναι κατάλληλα για μέσα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Το δεύτερο υλικό όμως είναι προτιμότερο, καθώς έχει χαμηλότερο κόστος, υψηλότερες αντοχές και είναι πιο εύχρηστο, με βασικότερο βέβαια πλεονέκτημα το πρώτο. Τα αποτελέσματα εκτός των άλλων έδειξαν καλή μεταδοτική ικανότητα θερμότητας μεταξύ του εναλλάκτη θερμότητας και του αποθηκευτικού υλικού, αποδεκτά υψηλά επίπεδα ισχύος κατά την ψύχρανση και μηδαμινά προβλήματα κατά τον χειρισμό υψηλών βαθμών θερμοκρασίας μεταξύ του υλικού αποθήκευσης και του ελαίου μεταφοράς θερμότητας. Επιπρόσθετα, εξαιτίας της αρθρωτής φύσης του τιμμεντένιου αποθηκευτικού συστήματος, είναι πιο εύκολο το σύστημα αποθήκευσης να ενσωματωθεί καλύτερα με το ηλιακό πεδίο και τον κύκλο ισχύος επιτρέποντας τη βέλτιστη χρήση του σταθμού. Τα βασικά σημεία στα οποία πρέπει να δοθεί έμφαση στο εν λόγω σύστημα αφορούν την καλή συντήρηση της επαφής μεταξύ του μέσου αποθήκευσης και των εσωτερικών σωληνώσεων λόγω του επαναλαμβανόμενου θερμικού κύκλου και τις τιμές μεταφοράς θερμότητας μέσα και έξω από το στερεό μέσο.

### ***B. Γραφίτης υψηλής καθαρότητας***

Ο γραφίτης αποτελεί άλλη μια επιλογή για αποθήκευση με αισθητή θερμότητα χρησιμοποιώντας ένα στερεό μέσο. Οι θερμικές ιδιότητές του προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η θερμοχωρητικότητα του γραφίτη αυξάνεται όταν η θερμοκρασία του αυξάνει, από 300kWh/ton στους 750°C έως



1000kWh/ton στους 1800 °C. Ο γραφίτης επίσης έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Παρόλα αυτά αν και έχει βελτιωμένη επίδοση σε υψηλές θερμοκρασίες, ο γραφίτης δεν θα είναι κατάλληλος για τις σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, που υπάρχουν στις ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις, εκτός και αν εξαλειφθεί το υγρό μεταφοράς θερμότητας και η ηλιακή ακτινοβολία εστιαστεί κατευθείαν στο γραφίτη. Αλλά ακόμα και υπό αυτές τις συνθήκες, δεν θα φτάσει σε πολύ υψηλές τιμές θερμοκρασίας. Τέλος, ενώ ο κοινός γραφίτης είναι πολύ σύνθετος υλικό και γενικά φθινό, ο γραφίτης υψηλής καθαρότητας που θα ήταν ιδανικός για την αποθήκη, είναι αρκετά πιο ακριβός και δυσεύρετος.

### ***Γ. Βιομηχανοποιημένο κεραμικό στερεό μέσο***

Τα κεραμικά έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν μεγάλο ποσό ενέργειας σε μικρό όγκο και έχουν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας. Οι ιδιότητες των υλικών των βιομηχανοποιημένων κεραμικών μπορούν να προσαρμοστούν, ώστε να αντέχουν στη διάβρωση και να έχουν υψηλή μηχανική αντοχή. Επιπλέον, τα υλικά μπορούν να διαμορφωθούν σε μια ποικιλία σχημάτων και μεγεθών για τη μείωση της πτώσης της πίεσης και τη μεγιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας. Τα κεραμικά επίσης παρέχουν εξαιρετική θερμική και χημική σταθερότητα, ενώ παράλληλα μπορούν να διατηρήσουν επί μακρόν την επίδοσή τους κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ηλιακής εγκατάστασης. Όπως και στην περίπτωση του σκυροδέματος τα κεραμικά μπορούν να έρθουν απευθείας σε επαφή με το υγρό μεταφοράς θερμότητας εξαλείφοντας την ανάγκη εναλλάκτη θερμότητας. Τέλος μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλες ποσότητες και οικονομικά.

### ***5.2.2 Αποθήκευση με λανθάνουσα θερμότητα***

Στα συστήματα αποθήκευσης με λανθάνουσα θερμότητα η θερμική ενέργεια από το πεδίο των συλλεκτών μεταφέρεται στο μέσο αποθήκευσης μέσω ενός συμπλέγματος εναλλακτών θερμότητας. Αυτό γίνεται κατά κάποιο τρόπο όπως και σε ένα σύστημα αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα, αλλά αντί να αλλάζει η θερμοκρασία στο μέσο αποθήκευσης, προκαλείται αλλαγή φάσης με αποτέλεσμα η φόρτιση ή η εκφόρτιση της αποθήκης να απαιτεί πολύ μικρότερη θερμοκρασιακή αλλαγή σε σχέση με την αποθήκευση με αισθητή θερμότητα. Η τυπική διαφορά θερμοκρασίας για τη φόρτιση και την εκφόρτιση ενός συστήματος αλλαγής φάσης είναι 100°F ή και περισσότερο. Κάθε αλλαγή φάσης είναι θεωρητικά πιθανή, συμπεριλαμβανομένης της θερμότητας από σύντηξη (μετάβαση από στερεό σε υγρό), θερμότητα από εξάτμιση (υγρό – αέριο) και θερμότητα από μετάβαση στερεού σε κρυσταλλικό στερεό. Οι μεταβάσεις στερεού σε αέριο και υγρού σε αέριο έχουν



μεγάλες θερμότητες μετατροπής, όμως επειδή σχετίζονται με μεγάλες μεταβολές στον όγκο κάνουν τα συστήματα πολύπλοκα και μη πρακτικά. Από την άλλη πλευρά, οι μετατροπές στερεού σε υγρό προκαλούν σχετικά μικρές αλλαγές στον όγκο συγκρινόμενες με το μέγεθος των θερμοκρασιών μετατροπής. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα αλλαγής φάσης στερεού σε υγρό, το μέσο αποθήκευσης αποθηκεύει θερμότητα ως λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης κατά την αλλαγή από στερεό σε υγρό. Όταν η αποθηκευμένη θερμότητα εξάγεται από το φορτίο, το υλικό θα αλλάξει πάλι φάση από υγρό σε στερεό.

Τα αποθηκευτικά συστήματα που χρησιμοποιούν υλικά αλλαγής φάσης τείνουν να είναι μικρότερα από τα συστήματα μονής φάσης με αισθητή θερμότητα επειδή η λανθάνουσα θερμότητα της σύντηξης μεταξύ υγρής και στερεής κατάστασης των υλικών είναι υψηλή, συγκρινόμενη με μια αισθητή αλλαγή θερμοκρασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχει θεωρητικά το χαμηλότερο κόστος για το μέσο αποθήκευσης συγκρινόμενα με τις άλλες μεθόδους. Παρόλα αυτά το μειονέκτημα είναι ότι η επιλογή του μέσου αποθήκευσης και ο σχεδιασμός μεταφοράς θερμότητας είναι πιο πολύπλοκα από τα συστήματα με αισθητή θερμότητα. Ουσιαστικά αυτή η δυσκολία αντισταθμίζει το πλεονέκτημα.



**Σχήμα 5.7: Αποθήκευση θερμότητας με αλάτι αλλαγής φάσης.**

Το άλας ή μίγματα άλατος έχουν αναγνωριστεί ως πιθανά υποψήφια για συστήματα αποθήκευσης με λανθάνουσα θερμότητα. Τα νιτρικά άλατα τείνουν να έχουν υψηλή θερμοχωρητικότητα, γεγονός το οποίο τα κάνει ιδανικά για αποθήκευση και απελευθέρωση θερμικής ενέργειας, άμεσα διαθέσιμα και σχετικά οικονομικά. Τέτοια υλικά είναι επίσης διαθέσιμα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών μετάβασης και έτσι μπορούν να προσαρμοστούν σε συστήματα αποθήκευσης που απαιτούν ποικιλία στις θερμοκρασίες. Ένα από τα

μειονεκτήματα της χρήσης νιτρικών αλάτων είναι ότι έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Μια μέθοδος για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών αλλαγής φάσης είναι να ενσωματωθούν στρώματα από υλικά υψηλής αγωγιμότητας ανάμεσα σε στρώματα υλικών αλλαγής φάσης τα οποία δρουν σαν καταλύτες αύξησης της αγωγιμότητας από τον εναλλάκτη θερμότητας στο υλικό αλλαγής φάσης.

Ένα σύστημα επικαλυπτόμενων (cascading) σετ υλικών αλλαγής φάσης μπορεί άνετα να προταθεί ως σύστημα αποθήκευσης. Σε αυτή την προσέγγιση, το σύστημα φορτίζεται κυκλοφορώντας το υγρό μεταφοράς θερμότητας μέσω του ηλιακού πεδίου και έπειτα διοχετεύεται μέσω μιας σειράς εναλλακτών θερμότητας που περιέχουν υλικά αλλαγής φάσης, τα οποία τήκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Δηλαδή θερμική ενέργεια μεταφέρεται από το υγρό μεταφοράς θερμότητας στο υλικό αλλαγής φάσης προκαλώντας στο τελευταίο τήξη και αποθήκευση θερμότητας ως λανθάνουσα μορφή. Κατά την εκφόρτιση η ροή του υγρού μεταφοράς θερμότητας αντιστρέφεται. Τα υλικά αλλαγής φάσης στερεοποιούνται απελευθερώνοντας τη λανθάνουσα θερμότητά τους και αναθερμαίνουν το υγρό. Το υγρό στη συνέχεια χρησιμοποιείται στο σύστημα ισχύος για την παραγωγή ατμού η οποία είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του σταθμού [31].

### **5.2.3 Θερμοχημική αποθήκευση**

Σε ένα θερμοχημικό αποθηκευτικό σύστημα η θερμική ενέργεια από το ηλιακό πεδίο χρησιμοποιείται για την εκκίνηση μιας ενδοθερμικής χημικής αντίδρασης στο μέσο αποθήκευσης και τα συστατικά του μέσου αποθηκεύονται για επόμενη χρήση. Οι χημικές αντιδράσεις που επιλέγονται για το αποθηκευτικό σύστημα πρέπει απαραίτητα να είναι τελείως αντιστρέψιμες. Όπως στην διαδικασία αποθήκευσης με λανθάνουσα θερμότητα, έτσι και η μέθοδος αυτή λειτουργεί ισοθερμικά κατά τη διάρκεια της αντίδρασης. Η θερμότητα που συλλέγεται από το ηλιακό πεδίο χρησιμοποιείται για να προκαλέσει μια ενδοθερμική χημική αντίδραση, κατά την οποία αποθηκεύεται θερμική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια επανακτάται με την αντίστροφη εξώθερμη αντίδραση.

Τα πλεονεκτήματα σε αυτό το σύστημα εντοπίζονται κυρίως στις υψηλές πυκνότητες αποθηκευμένης ενέργειας και την απεριόριστης διάρκειας αποθήκευση σε σχεδόν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Από την άλλη, τα συστήματα αυτά είναι πολύπλοκα εξαιτίας των αβεβαιοτήτων που εμπεριέχονται στις θερμοδυναμικές ιδιότητες και την κινητικότητα των αντιδράσεων κάτω από ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας [31].

Για παράδειγμα, ένα θερμοχημικό αποθηκευτικό σύστημα που χρησιμοποιεί την αντίδραση διαχωρισμού/ σύνθεσης της αμμωνίας έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Πανεπιστήμιο της Αυστραλίας για να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το παραβολικό πιάτο Big Dish.

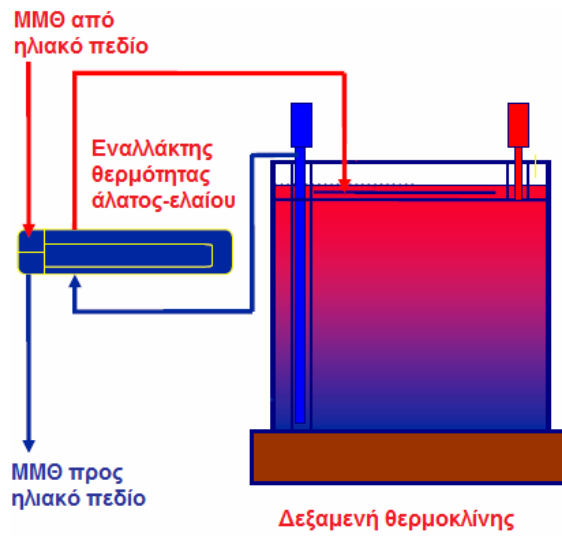
### **5.3 Σύστημα αποθήκευσης με θερμοκλίνη**

Το σύστημα αποθήκευσης με θερμοκλίνη ανήκει στην κατηγορία της αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα χρησιμοποιώντας υγρά μέσα και είναι αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στο σύστημα που θα εξεταστεί. Για την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται μόνο μια δεξαμενή στην οποία η θερμική βαθμίδα είναι αυτή που διαχωρίζει το ζεστό από το κρύο υγρό. Το μεγαλύτερο μέρος της δεξαμενής γεμίζει από κάποιο πληρωτικό υλικό το οποίο αποτελεί και το μέσο αποθήκευσης θερμότητας που μαζί με τις δυνάμεις άνωσης διατηρούν τη θερμική βαθμίδα.

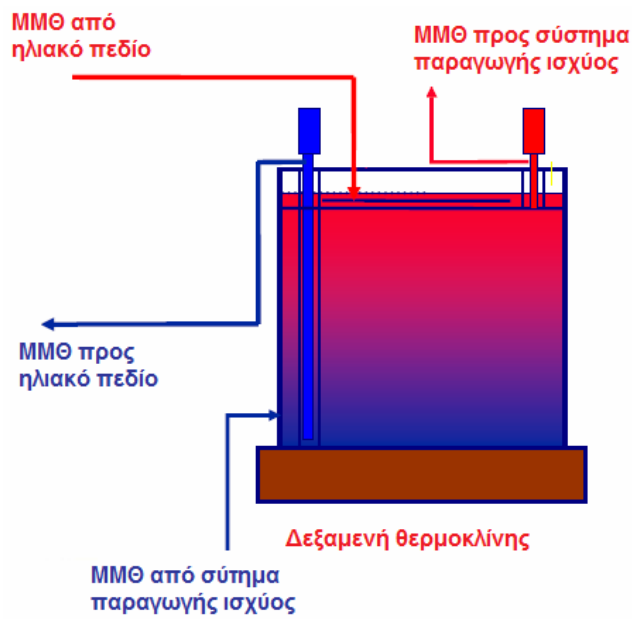
Ως πληρωτικό υλικό χρησιμοποιείται κάποιο υλικό με χαμηλό κόστος και υψηλή διαθεσιμότητα. Άλλο χρήσιμο χαρακτηριστικό, είναι η υψηλή θερμοχωρητικότητα, το μικρό ποσοστό κενού (ώστε να μειωθεί η ποσότητα του ρευστού που απαιτείται το οποίο είναι και το πιο ακριβό υλικό), να είναι συμβατό με νιτρικά άλατα και τέλος να μην είναι επικίνδυνο. Σχετικές δοκιμές για τη χρήση τους ως πληρωτικά έχουν γίνει σε υλικά όπως ο χαλαζίτης, ο τακονίτης, το μάρμαρο, ο ασβεστόλιθος και ο κασσιτερίτης. Από τις δοκιμές αυτές διαπιστώθηκε ότι ο χαλαζίτης και η άμμος πυριτίου αντέχουν σε περιβάλλον υδροποιημένου άλατος χωρίς σημαντική αλλοίωση.

Η λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης με θερμοκλίνη αναλύεται ως εξής: Κατά τη φόρτιση, κρύο ρευστό αντλείται από τον πυθμένα και θερμαίνεται είτε σε κάποιον εναλλάκτη θερμότητας (έμμεση αποθήκευση) , είτε από το ηλιακό πεδίο (άμεση αποθήκευση) και έπειτα επιστρέφει στην κορυφή της δεξαμενής. Αυτή η διαδικασία μετακινεί τη βαθμίδα της θερμοκλίνης προς τα κάτω και προσθέτει θερμική ενέργεια στο σύστημα της αποθήκευσης. Κατά την εκφόρτιση, θερμό ρευστό αντλείται από την κορυφή της δεξαμενής, ψύχεται σε κάποιον εναλλάκτη θερμότητας και επιστρέφει στον πυθμένα. Οι επιδράσεις της άνωσης δημιουργούν μια θερμική διαστρωμάτωση του υγρού μέσα στη δεξαμενή, η οποία βοηθά στη σταθεροποίηση και διατήρηση της θερμοκλίνης [11].

Οι δυο διαδικασίες της έμμεσης και άμεσης αποθήκευσης φαίνονται στα σχήματα 5.8 και 5.9 αντίστοιχα:

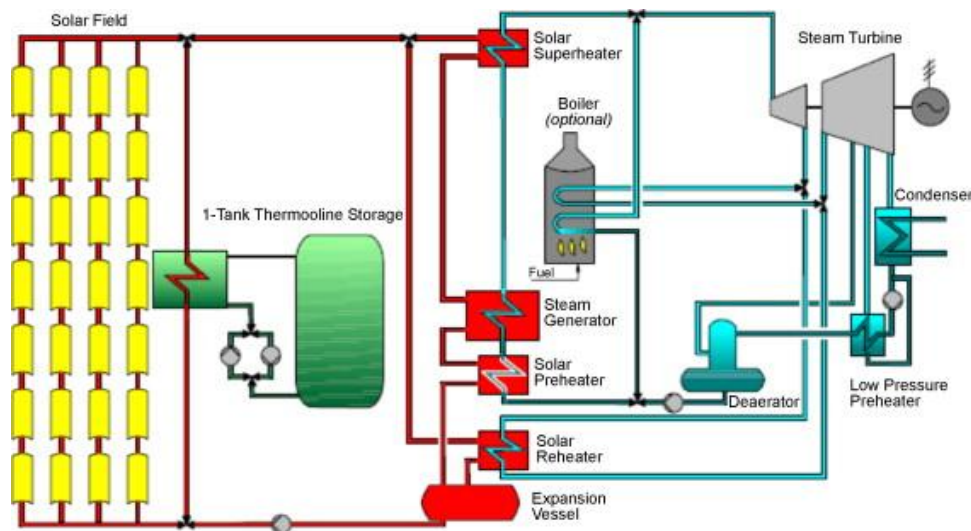


Σχήμα 5.8: Έμμεση αποθήκευση θερμότητας.



Σχήμα 5.9: Άμεση αποθήκευση θερμότητας.

Επίσης ένα ολοκληρωμένο σχηματικό διάγραμμα ενός σταθμού με θερμοκλίνη φαίνεται στο σχήμα 5.10:



**Σχήμα 5.10: Σχηματικό Διάγραμμα Σταθμού που χρησιμοποιεί σύστημα αποθήκευσης με θερμοκλίνη.**

Η χρήση ενός στερεού μέσου αποθήκευσης και η ανάγκη μόνο μιας δεξαμενής που υλοποιεί την παραπάνω μέθοδο, μειώνει το κόστος αυτού του συστήματος συγκριτικά με τα συστήματα με δύο δεξαμενές.

Αξίζει να αναφερθεί ως παράδειγμα το σύστημα αποθήκευσης με θερμοκλίνη μιας δεξαμενής χρησιμοποιώντας θερμικό έλαιο, αντί για τηγμένο άλας που έχει δοκιμασθεί με επιτυχία στην Plataforma Solar de Almeria. Τα συνθετικά οργανικά έλαια, όπως το Therminol, σε υψηλές θερμοκρασίες χρειάζονται μια πεπεσμένη δεξαμενή αποθήκευσης εξαιτίας της μεταβλητότητας των θερμαινόμενων ελαίων. Αυτού του είδους η δεξαμενή είναι λόγω πολυπλοκότητας πιο ακριβή, περιορίζοντας τη χωρητικότητα αποθήκευσης του συστήματος. Μια άμεση θερμοκλίνη ελαίου μπορεί να αποδειχτεί βιώσιμη επιλογή αποθήκευσης για σταθμούς μικρής κλίμακας (1-10 MW) όπως ο 1 MW σταθμός Saguaro επειδή η χαμηλή θερμοκρασία (περίπου 300°C) επιτρέπει τη χρήση δεξαμενής ατμοσφαιρικής πίεσης, που έχει χαμηλό κόστος.

Η χρήση της θερμοκλίνης έγινε και στο σταθμό Solar One τεχνολογίας ηλιακού πύργου. Ως μέσο αποθήκευσης χρησιμοποιήθηκε το συνθετικό έλαιο Caloria. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του συστήματος ήταν ανάμεσα στους 218 °C και 302 °C. Με θερμική χωρητικότητα 182MW<sub>t</sub>. Το έλαιο Caloria όμως έχει κάποιους περιορισμούς στη θερμοκρασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και έτσι δεν ενδείκνυται για αυτού του είδους την τεχνολογία [11],[31].

### 5.3.1 Εξισώσεις λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης με θερμοκλίνη

Στο σύστημα που εξετάζεται θα εφαρμοστεί άμεση αποθήκευση, δηλαδή το ρευστό που θα υφίσταται μέσα στην αποθήκη θα είναι το Therminol VP-1, το ίδιο που θερμαίνεται και στο ηλιακό πεδίο. Παράλληλα θα αναπτυχθεί ένα μοντέλο με το οποίο θα καθορίζεται για κάθε ημέρα του έτους η διαδικασία φόρτισης της αποθήκης. Εκ των προτέρων όμως, θα πρέπει να υπολογιστεί η θερμική ενέργεια που μπορεί να χωρέσει η δεξαμενή θερμοκλίνης. Για τον υπολογισμό αυτό πρέπει να ληφθούν υπόψη συγκεκριμένοι θερμοδυναμικοί παράγοντες και οι διαστάσεις της αποθήκης.

Αρχικά θα υπολογιστεί ο όγκος της δεξαμενής. Έχει υποτεθεί ότι:

Επιφάνεια θερμοκλίνης  $A=729\text{m}^2$

Ύψος θερμοκλίνης  $L=14\text{m}$

Επομένως για τον όγκο της δεξαμενής ισχύει:

$$V = A * L \quad (5.1)$$

Αφού υπολογισθεί ο συνολικός όγκος της δεξαμενής, στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογισθεί ο όγκος του ρευστού μέσα σε αυτή καθώς επίσης και ο όγκος του πληρωτικού υλικού.

Για τους επόμενους υπολογισμούς θα χρησιμοποιείται ο δείκτης  $f$  για τις ιδιότητες του ρευστού και ο δείκτης  $b$  για να υποδηλώσει τις ιδιότητες της κλίνης.

Για τον όγκο του ρευστού στη δεξαμενή ισχύει:

$$V_f = \varepsilon * V \quad (5.2)$$

Όπου  $\varepsilon$  είναι το ποσοστό κενού το οποίο είναι σταθερός αριθμός. Έχει υποτεθεί  $\varepsilon=0,23$ .

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μάζα του ρευστού που βρίσκεται στη δεξαμενή:

$$m_{f2} = \rho_f * V_f \quad (5.3)$$

Όπου  $\rho_f$  είναι η πυκνότητα του ρευστού την για την οποία ισχύει  $\rho_f=770,01\text{kg/m}^3$ .

Έπειτα υπολογίζεται ο όγκος του πληρωτικού υλικού που βρίσκεται στη δεξαμενή:

$$V_b = V - V_f \quad (5.4)$$

Και η μάζα αυτού του πληρωτικού:

$$m_{b2} = \rho_b * V_b \quad (5.5)$$

Όπου  $\rho_b$  είναι η πυκνότητα της κλίνης για την οποία ισχύει  $\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$ .

Ο τύπος για τον υπολογισμό της ενέργειας την οποία χωράει η αποθήκη είναι ο εξής:

$$E = m_{f2} * c_{pf} * (T_1 - T_0) + m_{b2} * c_{pb} * (T_1 - T_0) \quad (5.6)$$

Όπου  $c_{pf}$  είναι η θερμοχωρητικότητα του ρευστού και είναι  $c_{pf} = 2428 \text{ J/Kg}^* \text{K}$

Και  $c_{pb}$  είναι η θερμοχωρητικότητα της κλίνης όπου  $c_{pb} = 1000 \text{ J/Kg}^* \text{K}$ .

Οι θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_0$  είναι οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα στη θερμοκλίνη όπου  $T_1 = 390^\circ \text{C}$  και  $T_0 = 293^\circ \text{C}$ .

Η θερμική συμπεριφορά της δεξαμενής προσομοιώνεται με τις εξισώσεις Schumann οι οποίες περιγράφουν τη μεταφορά της θερμότητας μεταξύ του ρευστού και μιας συμπιεσμένης κλίνης. Οι εξισώσεις αυτές είναι:

$$(\rho * c_p)_f * \varepsilon * \frac{\partial T_f}{\partial \tau} = - \frac{(m * c_p)_f}{A} * \frac{\partial T_f}{\partial y} + h_v * (T_b - T_f) \quad (5.7)$$

Και

$$(\rho * c_p)_b * (1 - \varepsilon) * \frac{\partial T_b}{\partial \tau} = h_v * (T_f - T_b) \quad (5.8)$$

Για να είναι πιο εύκολη η επίλυση του παραπάνω συστήματος πήρε την εξής μορφή:

$$\frac{\partial T_f}{\partial \tau} = -C_1 * \frac{\partial T_f}{\partial y} + C_2 * (T_b - T_f) \quad (5.9)$$

Και

$$\frac{\partial T_b}{\partial \tau} = C_3 * (T_f - T_b) \quad (5.10)$$

$$\text{Όπου } C_1 = \frac{\dot{m}_f}{A * \rho_f * \varepsilon} \quad (5.11)$$

Με  $\dot{m}_f$  συμβολίζεται η ροή της μάζας που μπαίνει στη θερμοκλίνη ανά δευτερόλεπτο.

$$\text{Ακόμη: } C_2 = \frac{h_v}{(\rho * c_p)_f * \varepsilon} \quad (5.12)$$

Με  $h_v$  συμβολίζεται ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και είναι:

$$h_v = \frac{6 * h * (1 - \varepsilon) * a}{D} \quad (5.13)$$

Στη εξίσωση αυτή με  $h$  συμβολίζεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού και της κλίνης και είναι  $h = 183 \text{ W/m}^2 * \text{K}$ .

Ο συντελεστής  $a$  ονομάζεται συντελεστής εμβαδού επιφάνειας σχήματος και ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας ενός σώματος προς την επιφάνεια σφαίρας του ίδιου όγκου. Στο συγκεκριμένο σύστημα το πληρωτικό υλικό αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια και επομένως  $a=1$ .

Το σύμβολο  $D$  αναφέρεται στη διάμετρο του πληρωτικού υλικού για το οποίο ισχύει ότι

$$D = 0,01 \text{ m.}$$

$$\text{Τέλος } C_3 = \frac{h_v}{(\rho * c_p)_b * (1 - \varepsilon)} \quad (5.14)$$



Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Schumann είναι δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου πλήρους φόρτισης της θερμοκλίνης [11], [33].

### **5.3.2 Παράθεση αποτελεσμάτων**

Όπως έχει προαναφερθεί η λειτουργία της αποθήκης συμβάλλει στην συνεχή λειτουργία του σταθμού στο πλήρες φορτίο για κάποιες επιπλέον ώρες. Πολύ σημαντική για την λειτουργία του σταθμού και για την φόρτιση της αποθήκης είναι η πρόγνωση του καιρού ώστε να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος χειρισμός του συστήματος.

Στο μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να εξεταστεί η λειτουργία του κυρίως και του αποθηκευτικού συστήματος, έχουν θεωρηθεί πάντα καλές καιρικές συνθήκες.

Ακολουθώντας το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως και με τα δεδομένα που έχουν υποτεθεί προκύπτει ότι η αποθήκη έχει χωρητικότητα θερμικής ενέργειας  $E=626,44\text{MWh}$ . Αυτό σημαίνει ότι εφόσον οι απώλειες εκφόρτισης του αποθηκευτικού συστήματος είναι πολύ μικρές, το σύστημα μπορεί να λειτουργεί περίπου 4,5 ώρες επιπλέον στο πλήρες φορτίο μετά τη δύση του ήλιου.

Βέβαια χρειάζεται να είναι γνωστός και ο χρόνος που χρειάζεται για να γεμίσει η αποθήκη. Αυτός υπολογίζεται με επίλυση των εξισώσεων Schumann. Από τους συντελεστές που έχουν αυτές οι εξισώσεις φαίνεται ότι ο συντελεστής  $C_1$  εξαρτάται από τη ροή της μάζας του ρευστού μέσα στη θερμοκλίνη. Η ροή όμως της μάζας εξαρτάται από την περίσσεια της συλλεγόμενης θερμικής ενέργειας και αυτό είναι κάτι που διαφέρει κατά τη διάρκεια ενός έτους, από την άποψη ότι το καλοκαίρι υπάρχει πολύ μεγαλύτερη περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ενέργειας από ότι το χειμώνα. Επίσης, η ροή της μάζας του ρευστού στη θερμοκλίνη ρυθμίζεται με χρήση κατάλληλων αντλιών. Με τον τρόπο αυτό, το χειμώνα είναι δυνατή η αξιοποίηση της περίσσειας θερμικής ενέργειας που υπάρχει αλλά το καλοκαίρι δεν είναι δυνατή η απεριόριστη αύξηση της ροής της μάζας στη θερμοκλίνη εξαιτίας συγκεκριμένων τεχνικών περιορισμών.

Επομένως έχει επιλεγεί να υπάρχει μεταβαλλόμενη ροή μάζας ανά μήνα περίπου για την καλύτερη χρήση του αποθηκευτικού συστήματος.

Στον Πίνακα 5.2 αναφέρονται οι αλλαγές που έγιναν στη ροή της μάζας καθώς και η συμβολή αυτής της αλλαγής στην ταχύτητα φόρτισης της αποθήκης.

**Πίνακας 5.2: Χρόνος πλήρης φόρτισης της θερμοκλίνης ανάλογα με την ροή μάζας.**

<b>Μήνας</b>	<b>Ροή Μάζας(kg/sec)</b>	<b>Χρόνος Πλήρης Φόρτισης Αποθήκης (h)</b>
Ιανουάριος	700	4,7
Φεβρουάριος	750	4,4
Μάρτιος	800	4,1
Απρίλιος	850	3,9
Μάιος	900	3,6
Ιούνιος	950	3,4
Ιούλιος	1000	3,3
Αύγουστος	1000	3,3
Σεπτέμβριος	950	3,4
Οκτώβριος	850	3,9
Νοέμβριος	800	4,1
Δεκέμβριος	650	5,1

Όπως φαίνεται από τα δεδομένα του Πίνακα 5.2 η αποθήκη φορτίζει πλήρως το πολύ σε 5,1 ώρες με τις δεδομένες ροές μάζας. Όταν οι καιρικές συνθήκες είναι καλές, τότε η αποθήκη του συστήματος φορτίζει πλήρως και η αποθήκη είναι φορτισμένη στο τέλος της ημέρας.

Όμως, ο πολύ σημαντικός παράγοντας του καιρού αλλάζει πάρα πολύ αυτή την κατάσταση. Κατά τους χειμερινούς μήνες το σύστημα πολλές φορές δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του, και κατ' επέκταση ούτε να φορτίσει την αποθήκη. Από την άλλη, το καλοκαίρι μπορεί κάποιες φορές να είναι τόσο μεγάλη η περίσσεια θερμικής ισχύος ώστε κάποιοι συλλέκτες να στρέφονται εκτός εστίασης για να αποφεύγεται η σπατάλη ενέργειας.

Αυτό που συνήθως προσπαθούν να επιτύχουν οι χειριστές είναι να έχουν μια συνεχή λειτουργία του σταθμού μέχρι κάποια ώρα. Για παράδειγμα το χειμώνα επιδιώκεται με τη χρήση του βοηθητικού καυστήρα και με την αποθήκη να επιτευχθεί συνεχής λειτουργία στο πλήρες φορτίο μέχρι τις 21:00. Αντίστοιχα το καλοκαίρι ο βοηθητικός καυστήρας δεν χρησιμοποιείται σχεδόν καθόλου εφόσον η αποθήκη είναι σχεδόν πάντα φορτισμένη και ο στόχος είναι να μείνει το σύστημα σε λειτουργία πλήρους φορτίου μέχρι τις 22:00 ή και αργότερα.

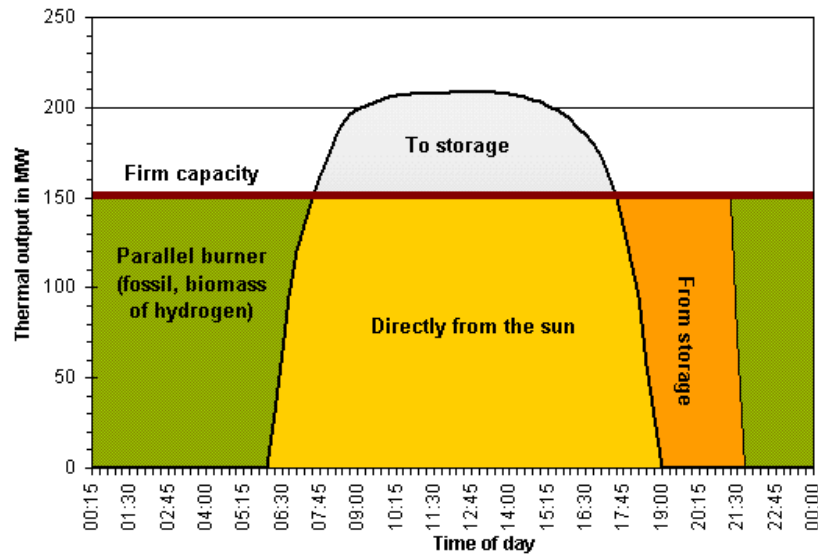
# 6

## *Υβριδικοί Σταθμοί και Προοπτικές της Ηλιοθερμικής Τεχνολογίας*

### *6.1 Υβριδικοί Σταθμοί*

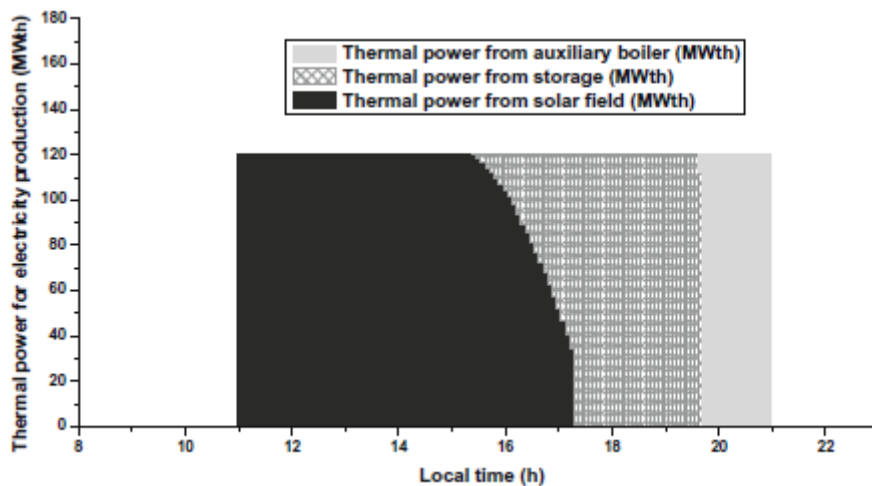
Για μια σωστή σύνδεση μεταξύ ηλιακού πεδίου - συστήματος ισχύος, καθώς και μεταξύ συστήματος ισχύος - δικτύου είναι απαραίτητη η χρήση ενός βοηθητικού καυστήρα καυσίμου, πέραν του συστήματος αποθήκευσης και όλο αυτό ορίζεται ως υβριδικός ηλιοθερμικός σταθμός. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για να ληφθούν υπόψη και τα δύο συστήματα και όχι μόνο το ένα από αυτά. Εάν θεωρηθεί ότι υπάρχει μόνο ο βοηθητικός καυστήρας, ο αριθμός των ωρών λειτουργίας στο ονομαστικό φορτίο θα μειωθεί. Εάν θεωρηθεί μόνο η αποθήκευση θερμικής ενέργειας, θα υπάρχουν διαστήματα χωρίς ηλιοφάνεια, στα οποία ο θερμοδυναμικός κύκλος θα πρέπει να λειτουργεί σε συνθήκες μερικού φορτίου. Όταν θεωρούμε ένα βοηθητικό καυστήρα (π.χ. καυστήρας φυσικού αερίου) αναμένεται ότι, μπορούν να αντιμετωπιστούν αυτές οι διακυμάνσεις στην ηλιοφάνεια, απαλύνοντας αυτές τις αλλαγές για σταθερή λειτουργία του κύκλου. Ακόμη ο βοηθητικός καυστήρας συμβάλλει στην ομαλή εκκίνηση και διακοπή της λειτουργίας του σταθμού χωρίς πολλές απώλειες [10], [34].

Η λειτουργία ενός υβριδικού σταθμού με αποθήκευση φαίνεται στο Σχήμα 6.1:

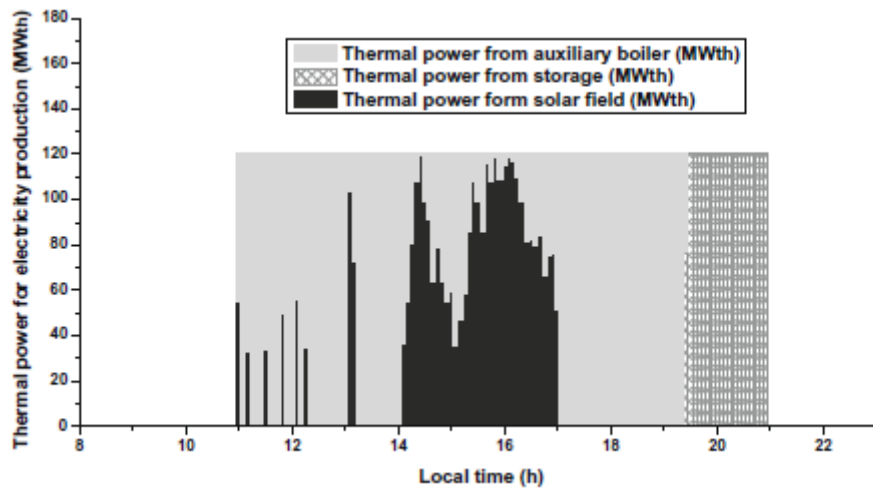


Σχήμα 6.1: Λειτουργία σταθμού με αποθήκη και βοηθητικό καυστήρα.

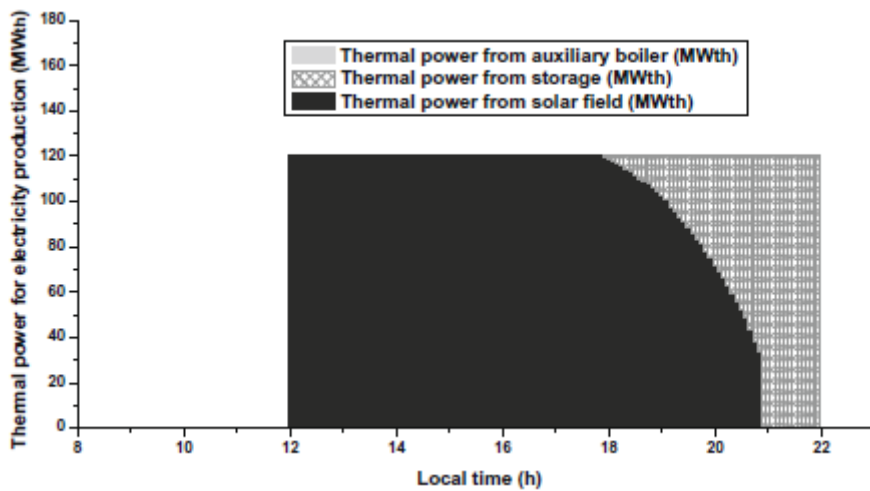
Στα σχήματα 6.2 έως 6.5 που ακολουθούν, φαίνεται αναλυτικότερα η λειτουργία ενός σταθμού με αποθήκευση και βοηθητικό καυστήρα, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τις εποχές του έτους.



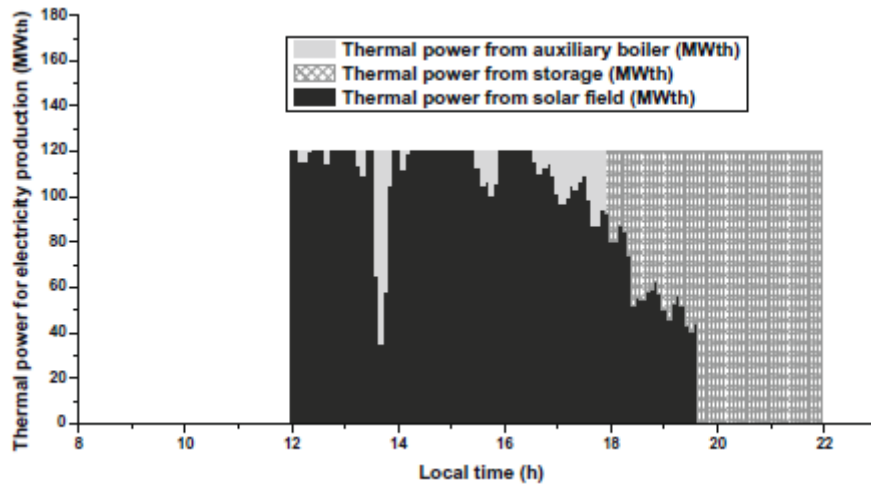
Σχήμα 6.2: Στρατηγική λειτουργίας για μια καθαρή ημέρα, χειμώνας (22 Ιανουαρίου).



Σχήμα 6.3: Στρατηγική λειτουργίας για μια νεφελώδη ημέρα, φθινόπωρο (11 Νοεμβρίου).



Σχήμα 6.4: Στρατηγική λειτουργίας για μια καθαρή ημέρα, καλοκαίρι (19 Ιουνίου).



Σχήμα 6.5: Στρατηγική λειτουργίας για μια νεφελώδη ημέρα, άνοιξη (25 Απριλίου) [10].

## 6.2 Συνδεδεμένη Λειτουργία Σταθμών ΑΠΕ

### ➤ Σταθμός ισχύος βιομάζας με εισαγωγή ηλιακού πεδίου

Ένας ηλιακός συλλέκτης μπορεί να εισαχθεί στον κύκλο νερού/ατμού ενός σταθμού ισχύος με βιομάζα. Τα ακόλουθα πλεονεκτήματα είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού των δυο τεχνολογιών:

- Ο χειρισμός του σταθμού γίνεται αποκλειστικά με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Δεν γίνεται καθόλου παραγωγή CO<sub>2</sub> κατά τη λειτουργία.
- Ο σταθμός μπορεί να λειτουργήσει 24 ώρες την ημέρα χωρίς την ανάγκη αποθήκευσης θερμότητας.
- Συγκρινόμενη με σταθμούς που είναι μόνο ηλιακοί, η απόδοση της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι υψηλότερη σε υβριδικούς σταθμούς καθώς ο κύκλος ατμού γίνεται πάντα στο πλήρες φορτίο.

Και οι δύο πηγές –το ηλιακό πεδίο και ο καυστήρας βιομάζας- συνδέονται παράλληλα. Με σκοπό τη συνεχή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, ο καυστήρας βιομάζας παρέχει το ποσό της θερμικής ενέργειας που δεν μπορεί να παραχθεί από το ηλιακό πεδίο.

Για την εξασφάλιση αξιόπιστης λειτουργίας, ο καυστήρας βιομάζας λειτουργεί στο 50% και παραπάνω του θερμικού φορτίου. Συνεπώς, η ηλιακή θερμική ισχύς αυξάνεται μέχρι 50% στηριζόμενη στη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας [35].

### ➤ *Συνδυασμός ηλιοθερμικής και αιολικής τεχνολογίας*

Ένα σύστημα μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική και ένα ηλιοθερμικό σύστημα μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική συνδέονται παράλληλα μέσω κατάλληλης ηλεκτρικής διεπαφής με ένα σύστημα ελέγχου. Αυτό το συνδυασμένο υβριδικό σύστημα μετατροπής ενέργειας συναντά το τοπικό φορτίο. Το σύστημα ελέγχου μπορεί να είναι συνδεδεμένο (για διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα μετατροπής) ή να μην είναι συνδεδεμένο (για αυτόνομα συστήματα μετατροπής) με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο. Η αλληλεπίδραση με το δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί αμφίδρομη, το οποίο σημαίνει ότι περίσσεια ενέργειας που παράγεται από το υβριδικό σύστημα μετατροπής ενέργειας μπορεί να παροχετευθεί στο δίκτυο ή έλλειμμα ενέργειας μπορεί να αντλείται από το δίκτυο σε περιόδους χαμηλής παραγωγής έτσι ώστε να καλυφθεί η τοπική ζήτηση.

Όσο και οι δύο μονάδες βρίσκονται κάτω από το πεδίο εφαρμογής του ίδιου κέντρου ελέγχου, οι χειριστές μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη συνεργία των δύο πηγών ενέργειας για να διατηρηθεί το ενεργειακό ισοζύγιο και η βέλτιστη κατανομή των ενεργειακών αποθεμάτων [36].

## **6.3 Πεδία Εφαρμογής Ηλιοθερμικών Σταθμών**

Μια πολύ σημαντική εφαρμογή των ηλιοθερμικών σταθμών είναι η αφαλάτωση για την παροχή πόσιμου νερού στα νησιά που έχουν πρόβλημα με τα αποθέματα νερού. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την εκμετάλλευση του πεδίου των ηλιοστασίων για την παραγωγή καθαρού νερού.

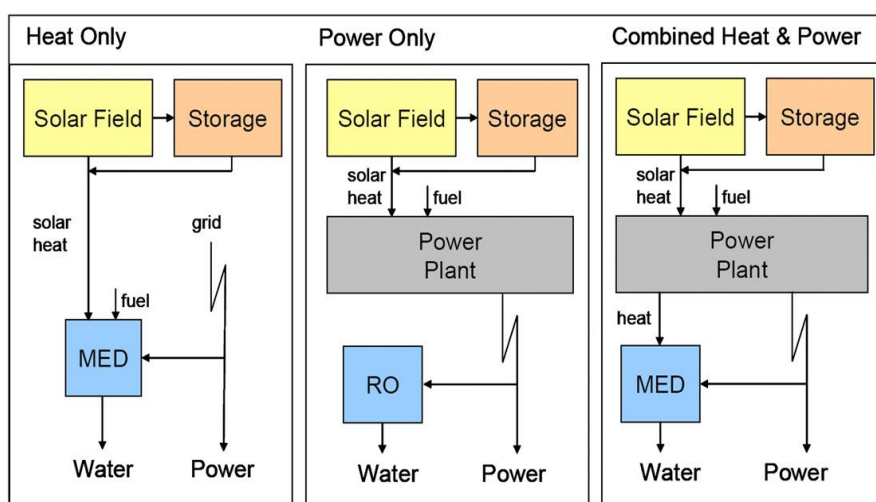
Παγκοσμίως ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών τεχνολογιών αφαλάτωσης είναι διαθέσιμος και εφαρμόζεται. Μόνο μερικές από αυτές τις τεχνολογίες έχουν φτάσει σε ένα ημι-εμπορικό επίπεδο και μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγάλες μονάδες ώστε να μπορούν να συνδυάζονται αποδοτικά με ηλιοθερμικούς σταθμούς. Προς το παρόν χρησιμοποιούνται είτε συστήματα πολλαπλών δράσεων αφαλάτωσης, είτε μονάδες αντίστροφης όσμωσης. Το πρώτο σύστημα χρειάζεται ηλεκτρισμό και θερμότητα ενώ το δεύτερο χρειάζεται μόνο ηλεκτρισμό.

Η αφαλάτωση πολλαπλών δράσεων (MED: Multi-Effect Desalination) είναι μια διαδικασία θερμικής απόσταξης και έχει κερδίσει την προσοχή εξαιτίας της καλύτερης θερμικής απόδοσής της. Οι σταθμοί αυτοί μπορούν να ρυθμιστούν για λειτουργία σε υψηλές

θερμοκρασίες ή σε χαμηλές θερμοκρασίες και μπορεί να συνδυαστούν με ένα συμπυκνωτή από έναν κύκλο ισχύος.

Η αντίστροφη όσμωση (RO: Reverse Osmosis) είναι μια διαδικασία διαχωρισμού της μεμβράνης η οποία ανακτά νερό από ένα αλατούχο διάλυμα που πιέζεται σε ένα σημείο μεγαλύτερο από την οσμωτική πίεση του διαλύματος. Τα επίπεδα των μεμβρανών κρατούν τα ιόντα άλατος από το πεπιεσμένο διάλυμα, αφήνοντας μόνο καθαρό νερό να περάσει.

Το σχήμα 6.6 δείχνει τρία διαφορετικά συστήματα αφαλάτωσης που συνδυάζονται με ένα σύστημα κεντρικού συλλέκτη.



**Σχήμα 6.6: Συστήματα αφαλάτωσης που συνδυάζονται με ηλιακό πύργο.**

Το πρώτο σύστημα αφαλάτωσης σε συνδυασμό με έναν ηλιακό πύργο (σχήμα 6.6, αριστερά) χρησιμοποιεί μόνο τη θερμότητα από τον ηλιακό κύκλο για την παροχή του συστήματος πολλαπλών δράσεων με θερμότητα ενώ τον ηλεκτρισμό τον προμηθεύεται από το δίκτυο. Στο δεύτερο σύστημα ο ηλιακός πύργος παρέχει μόνο την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης (σχήμα 6.6, μέσον). Ο σταθμός αντίστροφης όσμωσης χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα ηλιοθερμικό συγκρότημα για να δουλέψουν οι αντλίες. Τέλος, το τελευταίο σύστημα πολλαπλών δράσεων (σχήμα 6.6, δεξιά), συμπεριλαμβάνει το συμβατικό κύκλο για την παροχή του συστήματος αφαλάτωσης με θερμότητα και ηλεκτρισμό.

Αυτά τα τρία συστήματα μπορούν να βρουν εφαρμογή στα νησιά και τις παράκτιες περιοχές της Ελλάδος και της Κύπρου που αντιμετωπίζουν προβλήματα με τα αποθέματα πόσιμου νερού.



Οι σταθμοί αφαλάτωσης πρέπει να λειτουργούν συνέχεια. Συνεπώς ένας ηλιοθερμικός σταθμός θα πρέπει να λειτουργεί μέρα νύχτα. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό με την προσθήκη συστήματος αποθήκευσης ή με την υβριδοποίηση του σταθμού .

Τα ηλιοθερμικά συστήματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για χημικές αντιδράσεις. Χημικές εφαρμογές που απαιτούν τη συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας συμπεριλαμβάνουν την παραγωγή καυσίμου, όπως για παράδειγμα υδρογόνο, το λιώσιμο μετάλλων τα οποία χρειάζονται υψηλές θερμοκρασίες και την παραγωγή άλλων χημικών συστατικών. Επιπρόσθετες εφαρμογές, που σκοπεύουν σε μεσοπρόθεσμο- έως μακροπρόθεσμο- ορίζοντα, συμπεριλαμβάνουν τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον σε τομείς όπως η αποτοξικοποίηση των χημικών σκουπιδιών και της αποθήκης ενέργειας [2],[19].

Ακόμη οι σταθμοί είναι κατάλληλοι για την παραγωγή ατμού, θερμότητας ή ψύξης για βιομηχανικές εφαρμογές.

## ***6.4 Προοπτικές Χρήσης της Ηλιοθερμικής Τεχνολογίας σε Ελλάδα και Κύπρο***

Η Ελλάδα ήταν μια από τους πρωτοπόρους στην Ευρώπη για τις τελευταίες δεκαετίες με περίπου ένα εκατομμύριο εγκατεστημένους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες κάνοντας οικονομία στην ενέργεια αφού χρησιμοποιούσε το ανεξάντλητο ηλιακό δυναμικό. Επίσης στην Κύπρο τέτοια συστήματα έχουν ευρεία εφαρμογή, καθώς το 92% των νοικοκυριών και το 53% των ξενοδοχείων έχουν ηλιακούς θερμοσίφωνες. Σύμφωνα με έρευνα της Ευρωπαϊκής Ένωσης το νησί της Κύπρου είναι πρωτοπόρος στον τομέα των ηλιοθερμικών εφαρμογών με περίπου 1m<sup>2</sup> περιοχή εγκατεστημένου συλλέκτη κατά κεφαλήν.

Η Ελλάδα και η Κύπρος εξαιτίας του υψηλού ηλιακού δυναμικού είναι ιδανικές Ευρωπαϊκές χώρες για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας.

Στην Ελλάδα, η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται από το βορρά στο νότο και από την ηπειρωτική χώρα προς τις ακτές. Το ηλιακό δυναμικό της είναι πολύ υψηλό και υπερβαίνει τις 4200 kWh ανά τετραγωνικό μέτρο κάθε μέρα.

Η Κύπρος έχει υψηλή ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου με μέση ηλιακή ακτινοβολία 9.8 – 14.5 ωρών για πάνω από 300 ημέρες το χρόνο. Η άμεση κανονική ακτινοβολία του νησιού είναι πάνω από 1800 kWh/m<sup>2</sup>a.

Το θεωρητικώς διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας υπολογίζεται ότι είναι  $195 \cdot 10^6$  GWh/a. Αυτό το μέγεθος δεν είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμο. Το οικονομικό ενδεχόμενο των ηλιοθερμικών τεχνολογιών εκτείνεται στις 4000GWh για την Ελλάδα, και στις 20000 GWh για όλη την έκταση της Κύπρου.

Αυτή η διαφορά μεταξύ των δύο χωρών της νοτιοανατολικής Μεσογείου υπάρχει εξαιτίας του υψηλότερου ηλιακού δυναμικού της Κύπρου λόγω της γεωγραφικής θέσης του νησιού [19].

➤ ***Πλεονεκτήματα για Ελλάδα και Κύπρο.***

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, Η Ελλάδα και η Κύπρος είναι ιδανικές Ευρωπαϊκές χώρες για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Η εμπειρία από τις κατασκευές τέτοιων νέων σταθμών στην Ευρώπη, δείχνει μια συνεχή μελλοντική μείωση του κόστους, η οποία θα κυμαίνεται σε επίπεδα κάτω των 0.10 €/kWh. Υπολογισμοί για το έτος 2020 δείχνουν ότι το κόστος για την παραγωγή ηλεκτρισμού θα είναι περίπου 0.05 €/kWh. Η τεχνολογία ηλιακού πύργου έχει πολλά πλεονεκτήματα για την Ελλάδα και την Κύπρο επειδή:

- Επιτυγχάνει περισσότερες ώρες λειτουργίας σε συνδυασμό με υβριδικό σταθμό ή με σύστημα αποθήκευσης
- Συμβάλλει στην παραγωγή ηλεκτρισμού για μη διασυνδεδεμένα συστήματα
- Σύμφωνα με μελέτη του Γερμανικού Αεροδιαστημικού Κέντρου από το έτος 2004 έχει το υψηλότερο πιθανό ενδεχόμενο για λιγότερα κόστη.
- Εξαιτίας υψηλών θερμοκρασιών οι οποίες μπορεί να επιτευχθούν και τη χρήση συμβατικών κύκλων ισχύος, η απόδοση για τεράστιους σταθμούς είναι πολύ υψηλή.
- Μειώνεται η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα.
- Το πεδίο των ηλιοστασίων δεν είναι εις βάρος των καλλιεργειών (λαχανικών) ή των βοσκοτοπιών.
- Είναι φιλικό προς το περιβάλλον χρησιμοποιώντας μέσα μεταφοράς θερμότητας που δεν είναι επιβλαβή.
- Τα περισσότερα από τα εξαρτήματά του είναι από συμβατικούς σταθμούς ισχύος και έτσι έχει μεγάλη αξιοπιστία.
- Η τοποθέτηση μονάδων του σταθμού μπορεί να γίνει ακόμα και σε περιοχές που δεν έχουν χαμηλό υψόμετρο.

Στην Ελλάδα ιδανικές είναι οι περιοχές με χαμηλό υψόμετρο και οι λοφώδεις περιοχές στην νότια ηπειρωτική Ελλάδα, την Κρήτη και τη Ρόδο. Η τεχνολογία των ηλιακών πύργων για συστήματα μεγαλύτερα των 10 MWe μπορεί να εφαρμοστεί στην ηπειρωτική Ελλάδα και την Κρήτη. Στην Κύπρο ιδανικές περιοχές είναι το κέντρο του νησιού και οι παράκτιες περιοχές της Λεμεσού, του Ακρωτηρίου και της Λάρνακας και οι ανατολικές περιοχές έως τη Φαμαγκούστα [19].

➤ ***Πρόταση κανόνων λειτουργίας για την νησιωτική Ελλάδα***

Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται κάποια ενδεικτικά άρθρα του Κώδικα Δικτύου για την ένταξη των ηλιοθερμικών σταθμών στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά:

- Η εγκατεστημένη ισχύς των ηλιοθερμικών σταθμών θα πρέπει να ισούται με το 50% του μέσου όρου της θερινής μεσημβρινής αιχμής.
- Η σειρά προτεραιότητάς τους σε σχέση με άλλους σταθμούς με ΑΠΕ είναι μετά τους αιολικούς και τους φωτοβολταϊκούς, όμως πριν από τους συμβατικούς σταθμούς.
- Κατά τη διάρκεια της θερινής αιχμής, η εγγύηση ισχύος είναι υποχρεωτική, δηλαδή οι ηλιοθερμικοί σταθμοί θα πρέπει να είναι πάντα σε ετοιμότητα για τις 90 μέρες του καλοκαιριού.
- Δίνεται 24ωρη πρόβλεψη με δικαίωμα επανεκτίμησης. Τελευταία οριστική εκτίμηση: 3-4 ώρες πριν την είσοδο ή έξοδο από το ΣΗΕ.
- Προβλέπεται τιμολόγιο ισχύος αντίστοιχο με τους συμβατικούς σταθμούς [37].

## ***6.5 Προϋποθέσεις για την Εισαγωγή στην Αγορά***

Η εισαγωγή της ηλιακής ενέργειας στην αγορά του ηλεκτρισμού απαιτεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις, για να γίνει ελκυστική στους επενδυτές. Τα έργα πρέπει να προσφέρουν:

- Μια αποδεκτή τεχνολογία.
- Ένα αποδεκτό κέρδος.
- Ένα αποδεκτό οικονομικό ρίσκο.

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί με παραβολικούς συλλέκτες trough, μπορούν να προσφέρουν αυτά τα στοιχεία.

Με όρους του κέρδους, η ηλεκτρική ενέργεια από ηλιοθερμικούς σταθμούς δεν είναι ακόμη ανταγωνιστική με τους σταθμούς που χρησιμοποιούν ορυκτό καύσιμο, αλλά είναι πιο κοντά στην ανταγωνιστικότητα από οποιαδήποτε άλλη ηλιακή τεχνολογία. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί έχουν την ίδια διαθεσιμότητα και την ελαστικότητα ισχύος όπως οι συμβατικοί σταθμοί επειδή η επίδοση των ηλιακών συλλεκτών μπορεί να επεκταθεί με τη χρήση αποθήκης θερμικής ενέργειας ή να συμπληρωθεί από έναν εφεδρικό καυστήρα καυσίμου.

Οι σταθμοί με παραβολικούς συλλέκτες τύπου σκάφης μπορούν να ενσωματωθούν σε σταθμούς με κύκλο ατμού ή συνδυασμένου κύκλου. Με την ωριμότητα και την εμπειρία που υπάρχει, αυτοί οι σταθμοί δεν φέρουν μεγάλο τεχνικό ρίσκο για τους επενδυτές. Τα ρίσκα που σχετίζονται με την εξαγωγή αλλά και με το εσωτερικό της χώρας είναι ποιοτικώς τα ίδια με αυτά των συμβατικών σταθμών. Όμως, η μεγάλη επένδυση ανυψώνει ποιοτικά το οικονομικό ρίσκο. Έτσι, ενώ το τεχνικό ρίσκο είναι ήδη αποδεκτό στην περίπτωση των σταθμών με παραβολικά κάτοπτρα, το μειωμένο κέρδος και το οικονομικό ρίσκο απαιτούν περισσότερα μέτρα για την αύξηση της αποδοχής των ηλιοθερμικών σταθμών [38].

Το σύνολο της επένδυσης συμπεριλαμβάνει όλα τα είδη των εξόδων όπως η μηχανική, η ανάπτυξη του έργου, η περιοχή που θα χρησιμοποιηθεί, η σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο, και άλλα απρόβλεπτα έξοδα. Άρα κατά τη λειτουργία ενός τέτοιου σταθμού πρέπει τα έσοδα να φτάνουν για να γίνει σταδιακά απόσβεση της αρχικής επένδυσης, να μπορεί ο σταθμός να συνεχίζει να λειτουργεί και να συντηρείται, και να έχει μια ασφάλιση

Έτσι, για την επίτευξη μια αποδοτικής επέκτασης της αγοράς, οι τιμές του ηλεκτρισμού πρέπει να είναι ανταγωνιστικές ξεκινώντας από τους πρώτους σταθμούς. Επιχορηγήσεις από τα δημόσια χρήματα είναι αιτιολογημένες από έναν αριθμό κοινωνικό-οικονομικών πλεονεκτημάτων όπως για παράδειγμα: η μείωση του σχετιζόμενου με την ενέργεια ρίσκου των δυσμενών επιδράσεων στην υγεία και το περιβάλλον, η διαφοροποίηση των πρωταρχικών πηγών ενέργειας, η ενδεχόμενη εξαγωγή ηλεκτρισμού από ηλιακή ενέργεια σε γειτονικές ή βιομηχανικές χώρες για τις οποίες διακυβεύεται η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, θετικά αποτελέσματα στην απασχόληση, ένα μεγάλο εθνικό περιθώριο παροχής κατά τη διάρκεια κατασκευής σταθμών, η μείωση του ενδεχομένου διεθνούς σύγκρουσης, η οικονομία πολύτιμων πηγών όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο για άλλους σκοπούς εκτός της καύσης και τέλος το βήμα για μια σταθερή οικονομία για τον ηλεκτρισμό.

Η χρηματοδότηση δεν περιορίζεται απαραίτητα στις επιχορηγήσεις. Ένας αριθμός πιθανών μέτρων υποστήριξης αποτρέπουν ταμειακές ροές από μέρος του δωρητή. Για παράδειγμα, υποστήριξη μπορεί να παρέχεται από φορολογικά κίνητρα. Ακόμη και μια εξίσωση του φορολογικού φορτίου από ηλιοθερμικούς σταθμούς και σταθμούς καυσίμου βοηθά στην

επίτευξη της ανταγωνιστικότητας επειδή τα ηλιακά συστήματα εντάσεως κεφαλαίου σήμερα είναι μη προνομιούχα σε πολλά φορολογικά συστήματα. Άλλη μια πιθανότητα στήριξης από την κυβέρνηση είναι η κάλυψη των οικονομικών ρίσκων για τα διεθνή έργα μέσω επιχορηγήσεων και χρηματοδοτήσεων.

Οι εταιρίες ασφάλισης και ανασφάλισης παγκοσμίως συνειδητοποιούν ότι η κλιματική αλλαγή που έχει προκύψει από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα επηρεάσει ευθέως την γραμμή της δουλειάς τους. Χαμηλά τέλη ασφάλισης για σταθμούς χωρίς εκπομπές μπορούν να μειώσουν αρκετά τα κόστη και να επιταχύνουν την διείσδυση στη αγορά.

Ένας συνδυασμός μέτρων ομαδοποιεί τις δυνάμεις της βιομηχανίας, της οικονομίας, της ασφάλισης και της πολιτικής σε ένα μεσοπρόθεσμο πρόγραμμα, δημιουργεί ένα ιδιαίτερα ελκυστικό περιβάλλον για ιδιώτες επενδυτές και μειώνει την ανάγκη για άμεσες επιδοτήσεις [38].

#### ➤ ***Παράγοντες ρίσκου και εμπόδια***

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που πρέπει να υλοποιηθεί για την πραγματοποίηση της επένδυσης είναι οι απαιτήσεις σε γη. Επειδή όμως οι σταθμοί αυτοί κατασκευάζονται σε περιοχές με πολύ μεγάλη ηλιοφάνεια, οι περιοχές αυτές είναι συνήθως τόσο ξηρές που δεν χρησιμοποιούνται για καλλιέργειες ή κατοικίες. Άρα οι εκτάσεις αυτές μπορούν να αγοραστούν ή να ενοικιαστούν σε χαμηλές τιμές.

Άλλο ένα εμπόδιο είναι ότι οι ηλιοθερμικοί σταθμοί μπορούν να κατασκευαστούν σε περιοχές με άμεση ηλιοφάνεια και απουσία νέφωσης για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αυτές οι περιοχές δεν είναι διαθέσιμες σε όλες τις χώρες, ωστόσο υπάρχουν σε πολλές αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες.

Ένας τρίτος παράγοντας που επηρεάζει την κατασκευή είναι οι απαιτήσεις σε νερό κυρίως για την ψύξη των κατόπτρων. Αυτό είναι ένα σημαντικό πρόβλημα καθώς οι περισσότεροι σταθμοί βρίσκονται σε ερημικές περιοχές με λίγο νερό.

Τέλος όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα το τεχνικό ρίσκο παρόλο που είναι αποδεκτό σε κάποιες τεχνολογίες, ωστόσο αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την χρηματοδότησή τους από διάφορους οργανισμούς [39].

#### ➤ ***Προοπτικές***

Οι προοπτικές των ηλιακών θερμικών σταθμών είναι πολύ θετικές. Επιστημονικές μελέτες υποστηρίζουν ότι το κόστος παραγωγής μπορεί να υποχωρήσει από 0,10-0,14€/kWh μέχρι το 2020, ή ακόμη μέχρι τα 0,006€/kWh μέχρι το 2050. Η ηλιακή θερμική ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμη και ανεξάντλητη πηγή και για αυτό είναι πολλά υποσχόμενη. Αν μάλιστα το κόστος μειωθεί στις αναφερόμενες τιμές θα υπάρξει μια μεγάλη ανάπτυξη στους ηλιοθερμικούς σταθμούς. Ακόμη, μέχρι σήμερα οι σταθμοί που έχουν γίνει βρίσκονται στην νότια Ισπανία και στην Δυτική Αμερική. Αν γίνουν οι ίδιοι σταθμοί σε περιοχές όπως η Κίνα, η Ινδία, η Σαχάρα και η Μέση Ανατολή, η απόδοσή τους θα αυξηθεί κατά 15-30% [39].

# 7

## *Επίλογος*

### *7.1 Σύνοψη*

Η ηλιοθερμική τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι μια αξιόπιστη τεχνολογία, η οποία γνωρίζει μεγάλη άνθηση τα τελευταία χρόνια. Ήδη πολλοί σταθμοί έχουν κατασκευαστεί, πολλοί είναι υπό κατασκευή σε διάφορα μέρη του κόσμου, ενώ μελέτες γίνονται για την βελτίωση των επιμέρους συστημάτων, ώστε να αυξηθεί η απόδοσή τους και κατά συνέπεια η συνολική απόδοση και αξιοπιστία του σταθμού με μικρότερο κόστος.

Μέχρι τώρα, η πιο ανεπτυγμένη τεχνολογία είναι η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων, η οποία ήταν και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στην εργασία αυτή περιγράφηκαν τα υποσυστήματα που απαρτίζουν έναν ηλιοθερμικό σταθμό με παραβολικά κάτοπτρα και στη συνέχεια αναλύθηκε το μαθηματικό μοντέλο που διέπει τη λειτουργία του από το στάδιο που ο ήλιος θα ρίξει τις ακτίνες του στα κάτοπτρα, μέχρι το τελικό στάδιο που είναι η παραγωγή της ισχύος. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε και για τις 8760 ώρες του έτους.

Ακόμη, εξετάστηκε η συμπεριφορά του σταθμού σε βάθος χιλίων ετών, με τυχαία παράμετρο την μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητα από το αποθηκευτικό σύστημα και τον βοηθητικό καυστήρα. Επίσης, έγινε μια μελέτη του αποθηκευτικού συστήματος, έτσι ώστε να διαφανεί ο τρόπος λειτουργίας του.

Τέλος αναφέρθηκε η σημασία των υβριδικών σταθμών, ώστε να είναι ομαλή η λειτουργία του σταθμού. Με τον υβριδικό σταθμό, ο χειριστής είναι σε θέση να ελέγξει τη λειτουργία,

ώστε η έξοδος να είναι όσο το δυνατόν πιο σταθερή. Η ύπαρξη αποθηκευτικού συστήματος και καυστήρα του δίνουν αυτή τη δυνατότητα.

Η ηλιοθερμική τεχνολογία έχει πολλές προοπτικές για τη χρησιμοποίησή της σε διάφορες εφαρμογές, σε χώρες με ηλιοφάνεια. Ειδικότερα, η Ελλάδα και η Κύπρος έχουν πολύ κατάλληλο κλίμα για τη χρησιμοποίησή της.

## **7.2 Συμπεράσματα**

Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 4, παρατηρείται ότι ο σταθμός λειτουργεί περισσότερες ώρες το καλοκαίρι, όπου υπάρχει και περισσότερη ακτινοβολία. Για τη λειτουργία του σταθμού έχουν χρησιμοποιηθεί περισσότερα κάτοπτρα από τα επαρκή για την παραγωγή των 30 MW στην έξοδο. Αυτή η τακτική ακολουθείται ώστε μια παροδική συννεφιά, που θα σκιάσει ένα μικρό τμήμα του ηλιακού πεδίου να μην επηρεάζει την έξοδο του συστήματος. Επιπλέον, μεγάλη προσοχή δίνεται στην απόσταση μεταξύ των κατόπτρων, ώστε να μη σκιάζονται μεταξύ τους, όταν οι ακτίνες του ήλιου δεν προσπίπτουν κατακόρυφα στα κάτοπτρα.

Η λειτουργία του αποθηκευτικού συστήματος της θερμοκλίνης είναι βοηθητική ως προς το κυρίως σύστημα. Η θερμοκλίνη παρέχει ενέργεια όταν δεν μπορεί το κυρίως σύστημα να αποδώσει. Για τη φόρτισή της είναι απαραίτητο να υπάρχει περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ενέργειας από το ηλιακό πεδίο. Το τελευταίο συμβαίνει κατά κόρον το καλοκαίρι αλλά και τις ηλιόλουστες ημέρες των άλλων εποχών του έτους.

Επιπλέον, θέτοντας τυχαία μεταβλητή την τιμή της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και με σταθερά τα υπόλοιπα μεγέθη, πραγματοποιήθηκαν χίλιες επαναλήψεις της παραπάνω μελέτης, τα αποτελέσματα της οποίας παρατίθενται στο Παράρτημα. Από τη μελέτη αυτή φαίνεται ότι ο σταθμός λειτουργεί περισσότερο κοντά στο πλήρες φορτίο, παράγοντας συνολικά 92390 MWh ετησίως. Επίσης, καταγράφεται η ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού, καθώς και ο μέσος όρος της ισχύος σε κάθε στάθμη. Συμπεραίνεται ότι όσο πλησιάζει το καλοκαίρι λειτουργεί σχεδόν αποκλειστικά στο πλήρες φορτίο, εκτός ορισμένων εξαιρέσεων που λειτουργεί σε μικρότερο φορτίο λόγω καιρού. Προς το χειμώνα όμως, λειτουργεί περισσότερο γύρω στα 25 MW και λιγότερο στο πλήρες φορτίο. Αυτό συμβαίνει, γιατί η συννεφιά επηρεάζει πολύ τη λειτουργία του σταθμού, καθώς η τεχνολογία αυτή αποδίδει μόνο με την άμεση ακτινοβολία και όχι με τη διάχυτη.



Παρατηρώντας τη συμπεριφορά του σταθμού στο σύνολό της, εκπονείται το συμπέρασμα ότι η ηλιοθερμική τεχνολογία με παραβολικά κάτοπτρα αποτελεί μια αξιόπιστη τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής. Ο συνολικός συντελεστής χρησιμοποίησης είναι 83%. Ακόμη, ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι πιο μεγάλος τους καλοκαιρινούς μήνες, που δύναται να φτάσει το 94%, ενώ το σύστημα παράγει ισχύ πλήρους φορτίου τις μεσημβρινές ώρες, οι οποίες είναι οι ώρες αιχμής του δικτύου. Έτσι, εάν υποθεθεί η σύνδεση του ηλιοθερμικού σταθμού στο δίκτυο, αυτό θα συμβάλλει στη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου.

Ακόμη, με τη βοήθεια του συμβατικού καυστήρα και της αποθήκης της θερμοκλίνης, ο συντελεστής χρησιμοποίησης μπορεί να έχει μια σημαντική αύξηση που βοηθά στην περαιτέρω ενίσχυση της αξιοπιστίας. Με την ορθή χρήση των δύο αυτών υποσυστημάτων επιτυγχάνεται σταθερή ισχύς χωρίς διακοπές. Η ύπαρξη του αποθηκευτικού συστήματος παρέχει τη δυνατότητα στον χειριστή να διοχετεύσει ενέργεια στο δίκτυο τις ώρες που οι απαιτήσεις είναι αυξημένες ή τις βραδινές ώρες. Επίσης, πολύ σημαντική είναι η σωστή και τακτική συντήρηση όλων των υποσυστημάτων ώστε να αποφεύγονται τυχόν απρόβλεπτες διακοπές της λειτουργίας. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι οι ηλιοθερμικοί σταθμοί με παραβολικά κάτοπτρα είναι κατάλληλοι για την κάλυψη του βασικού φορτίου, αλλά και του φορτίου αιχμής.



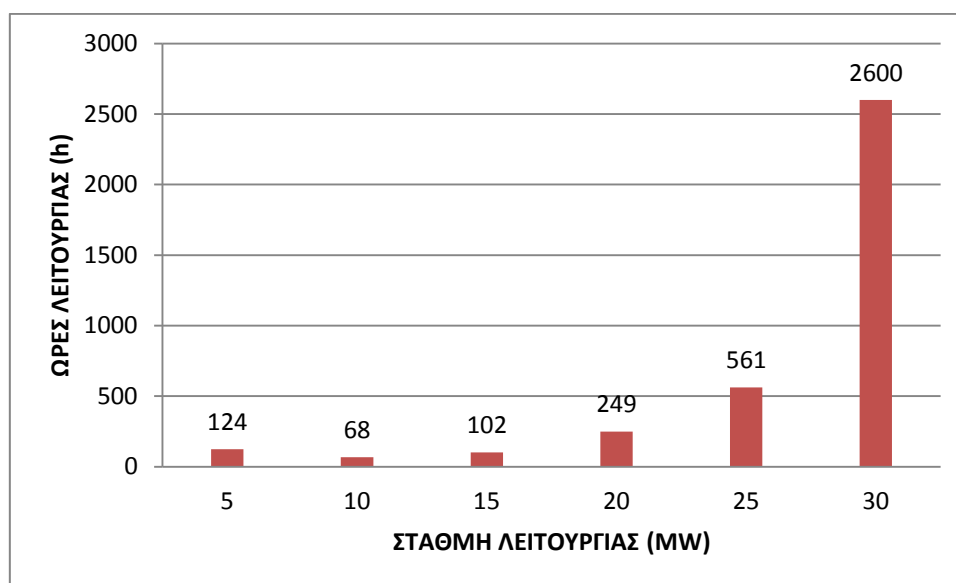
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τα ιστογράμματα και τα δεδομένα που ακολουθούν αντιστοιχούν στη καμπύλη μέσου όρου, που προέκυψε από τη μελέτη λειτουργίας του σταθμού για χίλια έτη.

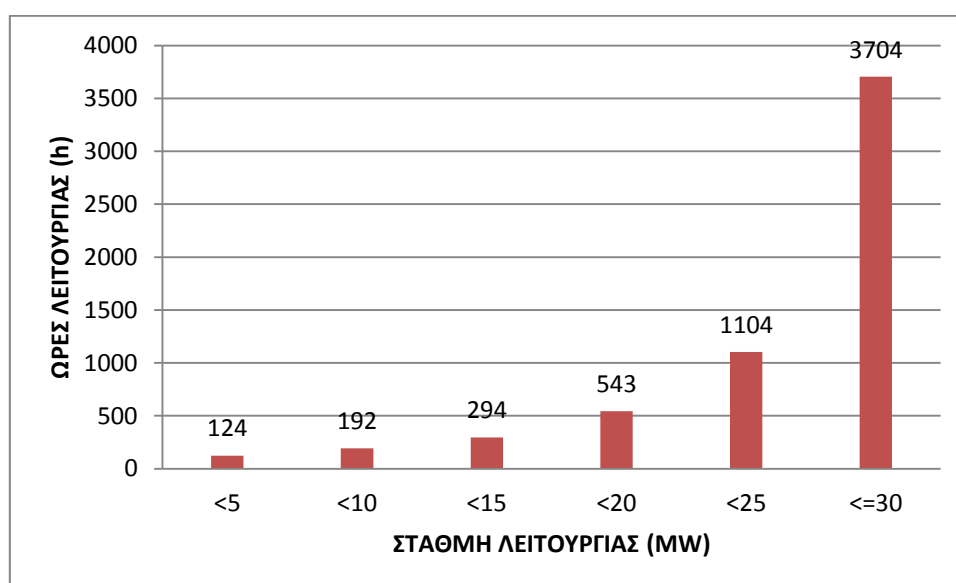
Ετήσια παραγόμενη ενέργεια: 92390 MWh.

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 3704 h.

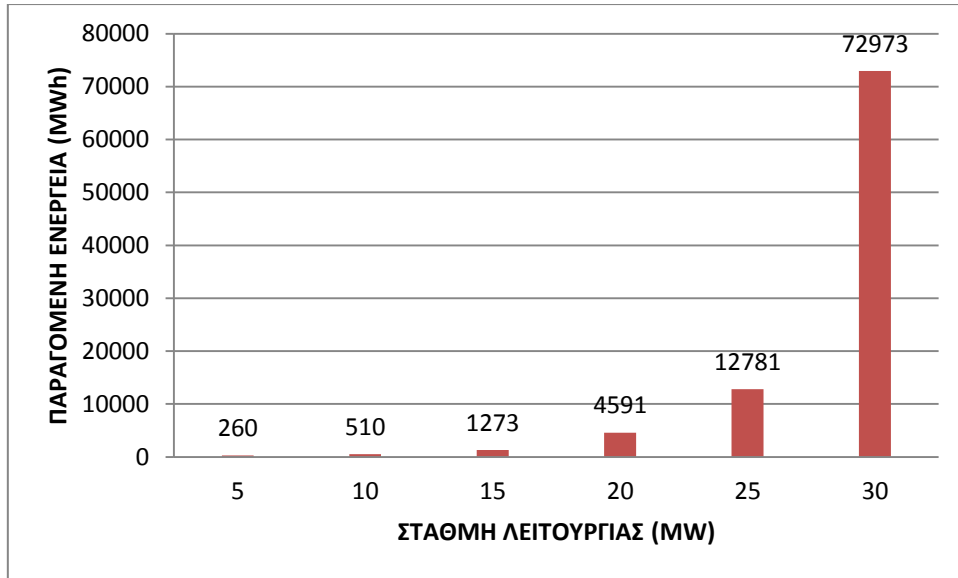
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.Χ. = \frac{E}{30 * 3704} = 0,83$  ή 83%



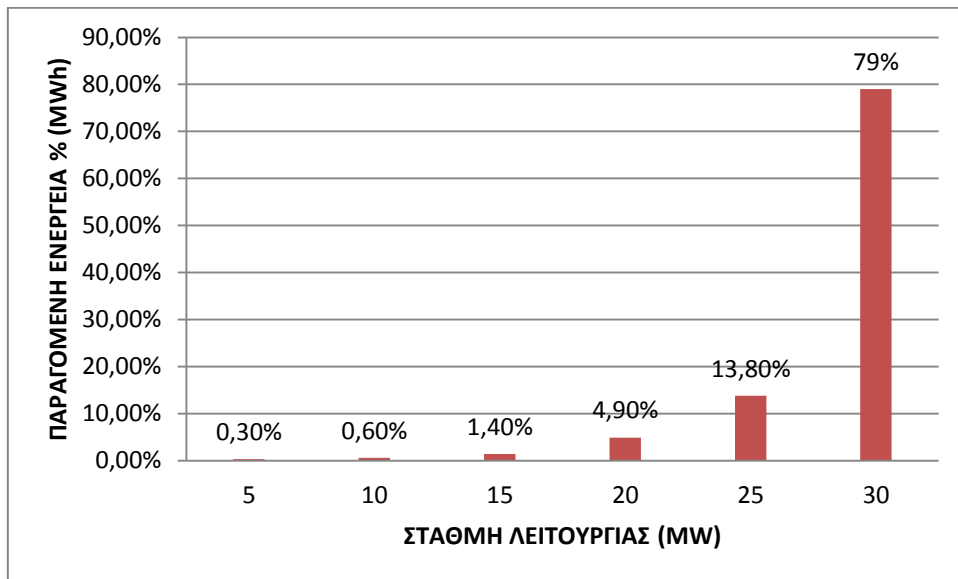
Σχήμα 1: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού.



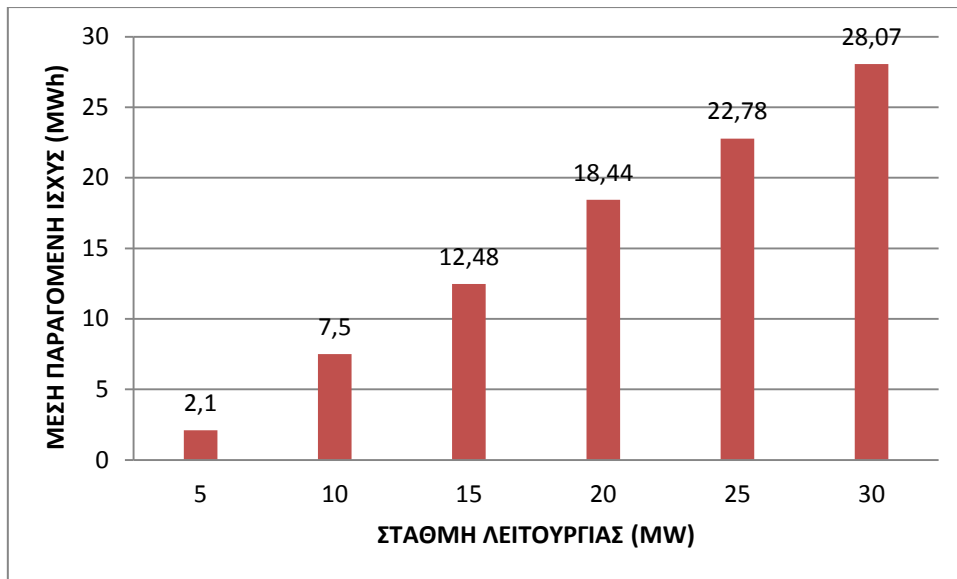
Σχήμα 2: Αθροιστική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού.



Σχήμα 3: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (MWh).



Σχήμα 4: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%).



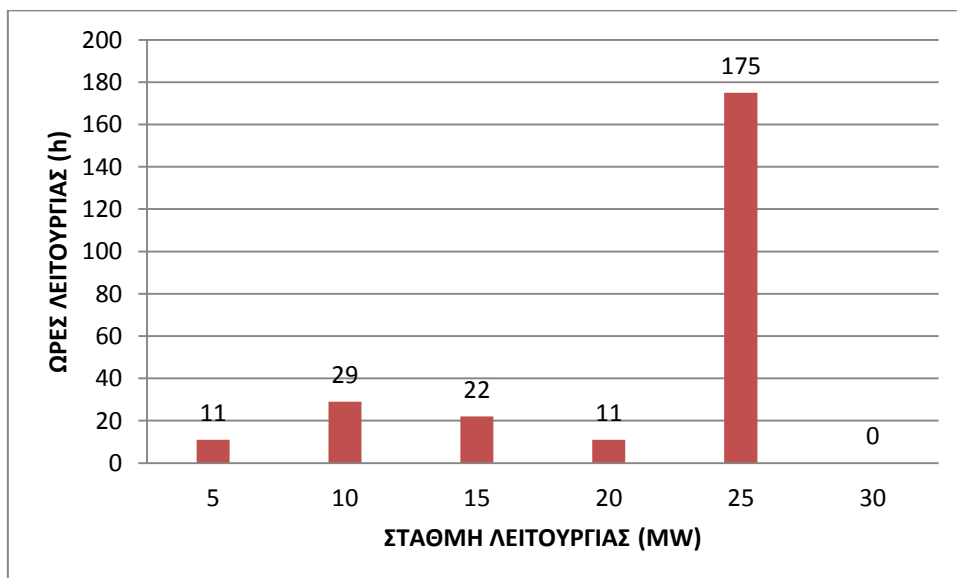
Σχήμα 5: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού.

Ιανουάριος

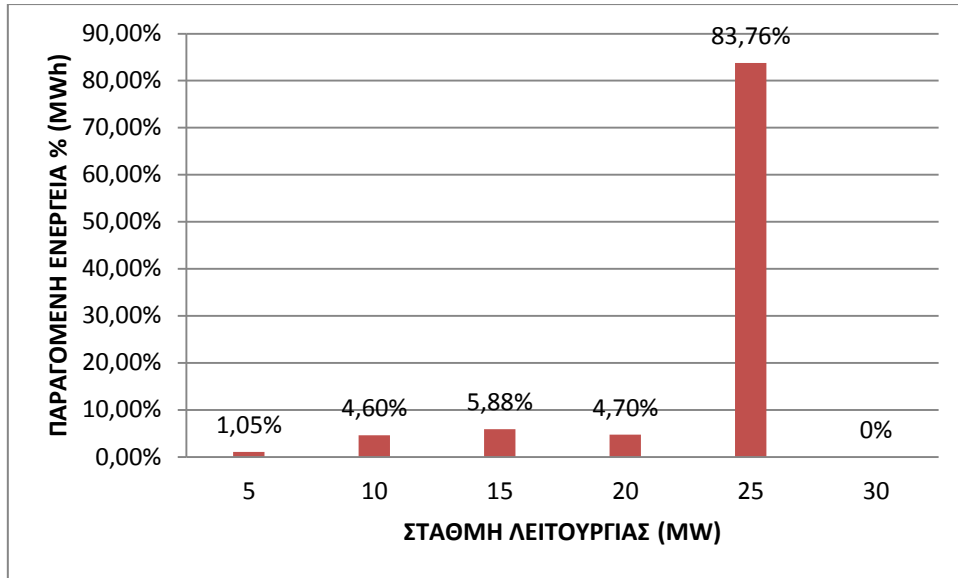
Παραγόμενη Ενέργεια: 4584 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 248 h

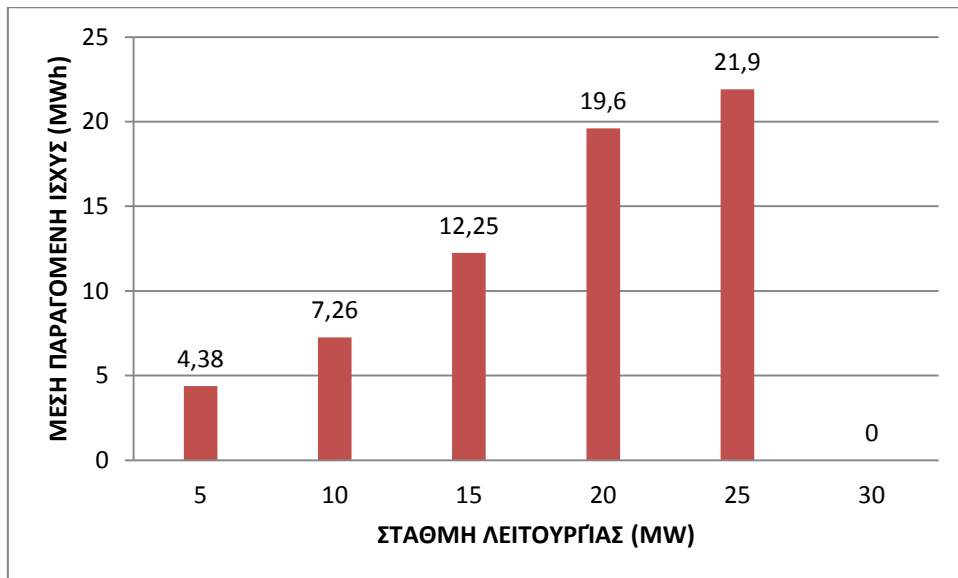
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 248} = 0,61$  ή 61%



Σχήμα 6: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Ιανουάριο.



**Σχήμα 7: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Ιανουάριο.**



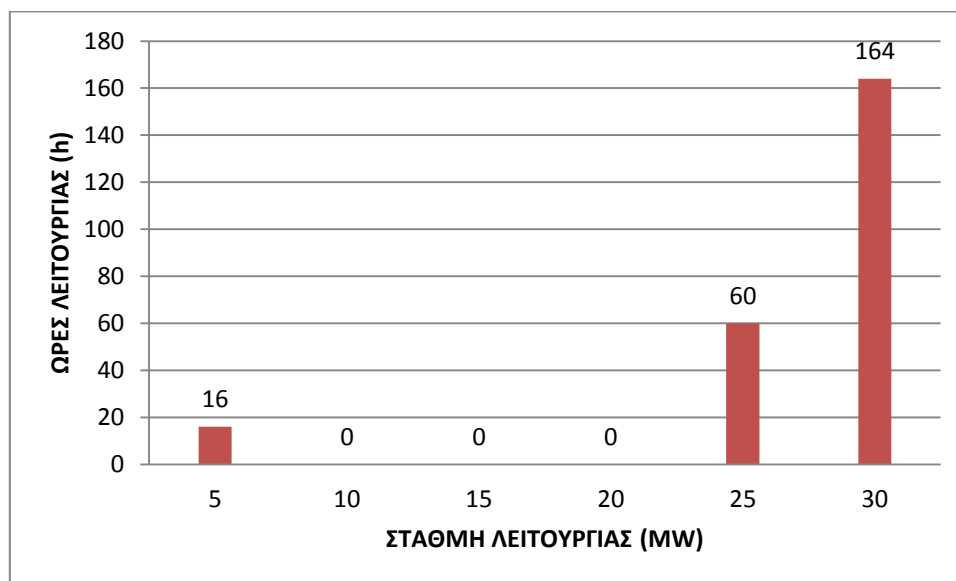
**Σχήμα 8: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Ιανουάριο.**

Φεβρουάριος

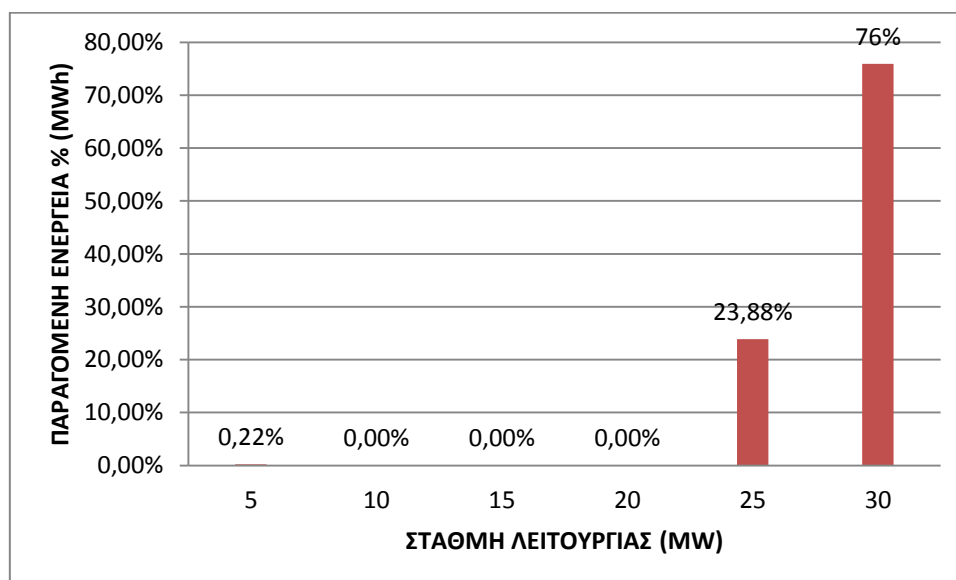
Παραγόμενη Ενέργεια: 5671 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 240 h

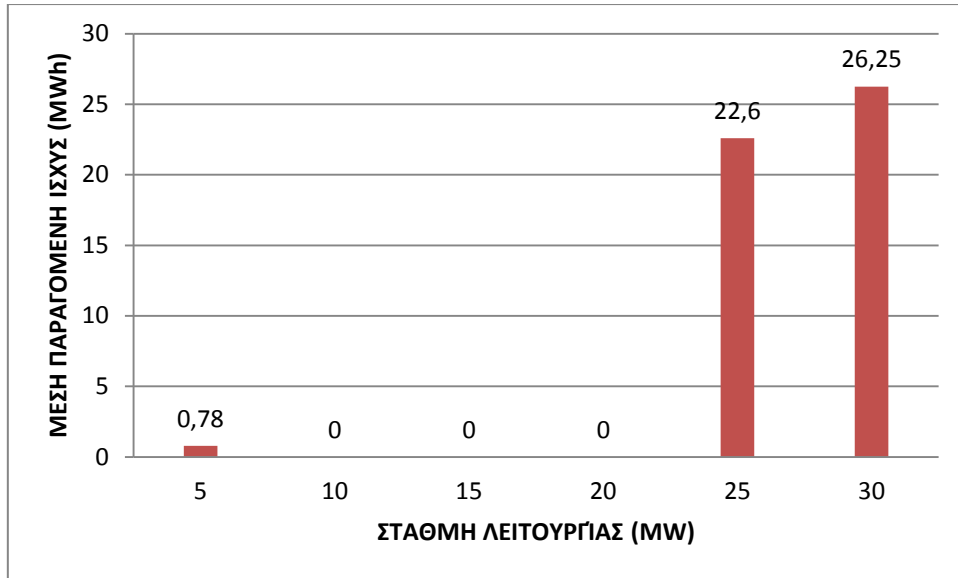
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 240} = 0,78$  ή 78%



**Σχήμα 9: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Φεβρουάριο.**



**Σχήμα 10: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Φεβρουάριο.**



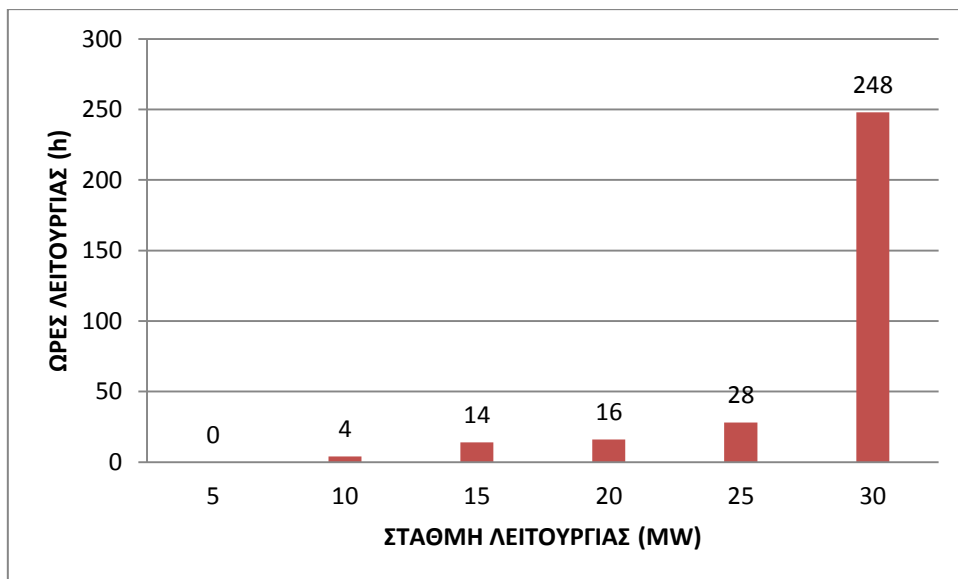
**Σχήμα 11: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Φεβρουάριο.**

Μάρτιος

Παραγόμενη Ενέργεια: 7975 MWh

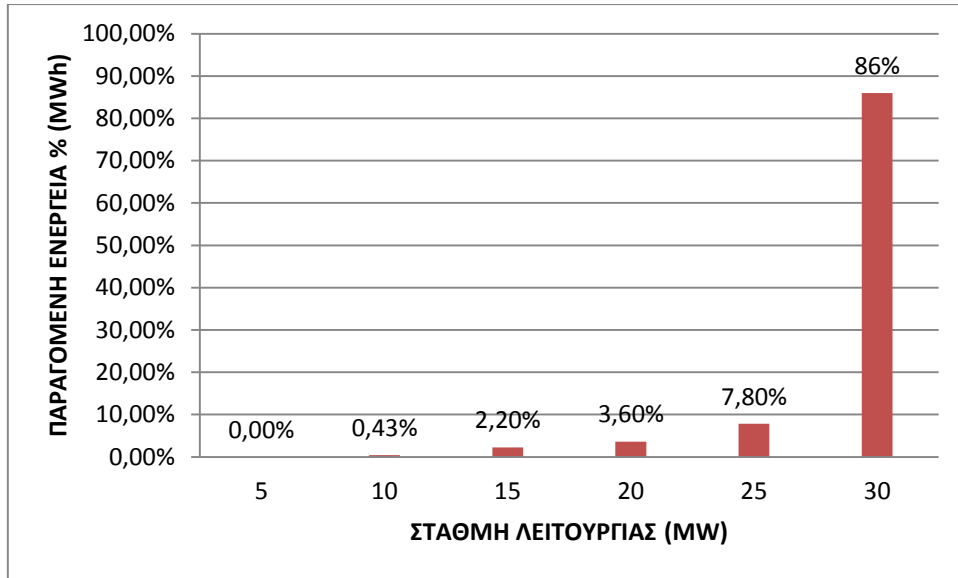
Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 310 h

Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 310} = 0,86$  ή 86%

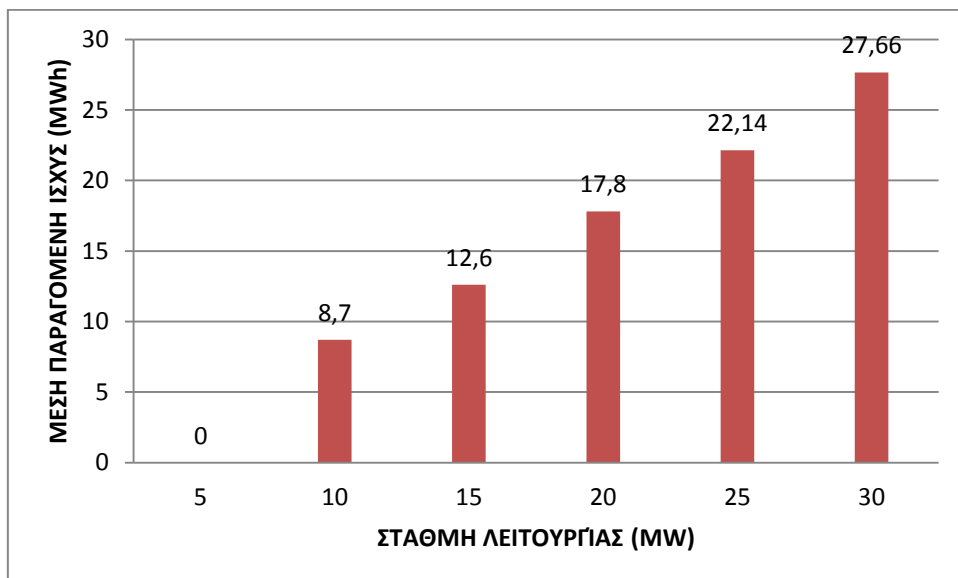


**Σχήμα 12: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Μάρτιο.**





**Σχήμα 13: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Μάρτιο.**



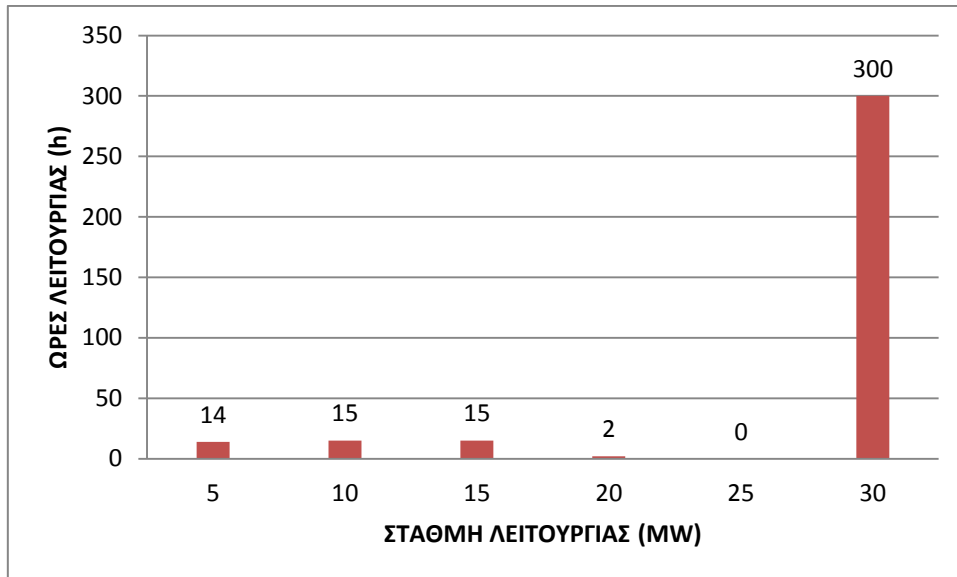
**Σχήμα 14: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Μάρτιο.**

Απρίλιος

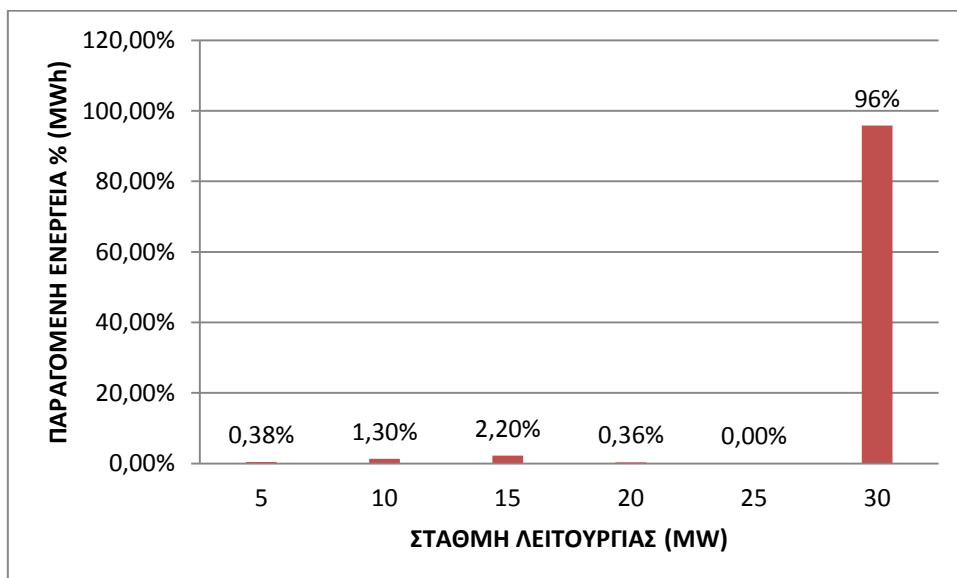
Παραγόμενη Ενέργεια: 8831 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 346 h

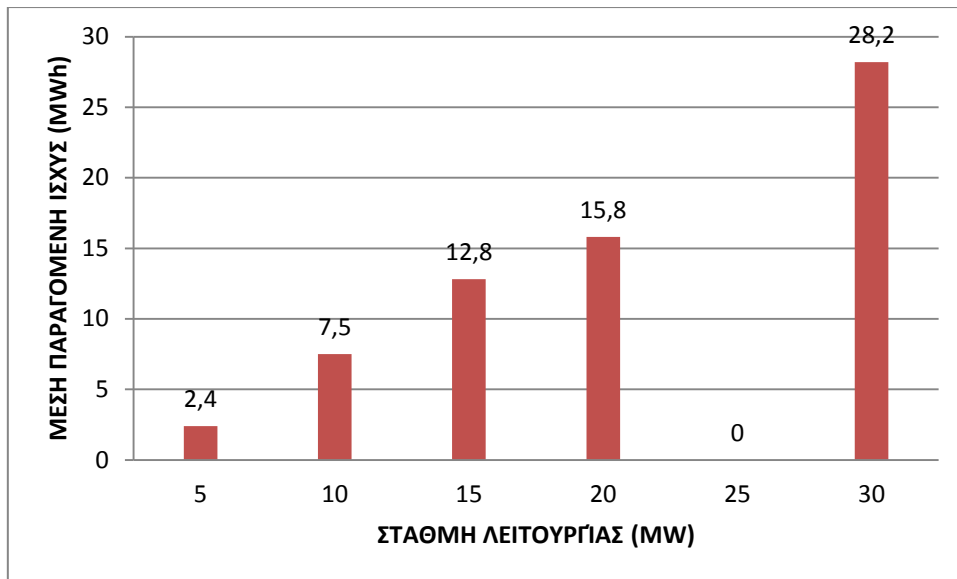
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 346} = 0,85$  ή 85%



**Σχήμα15: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Απρίλιο.**



**Σχήμα 16: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Απρίλιο.**



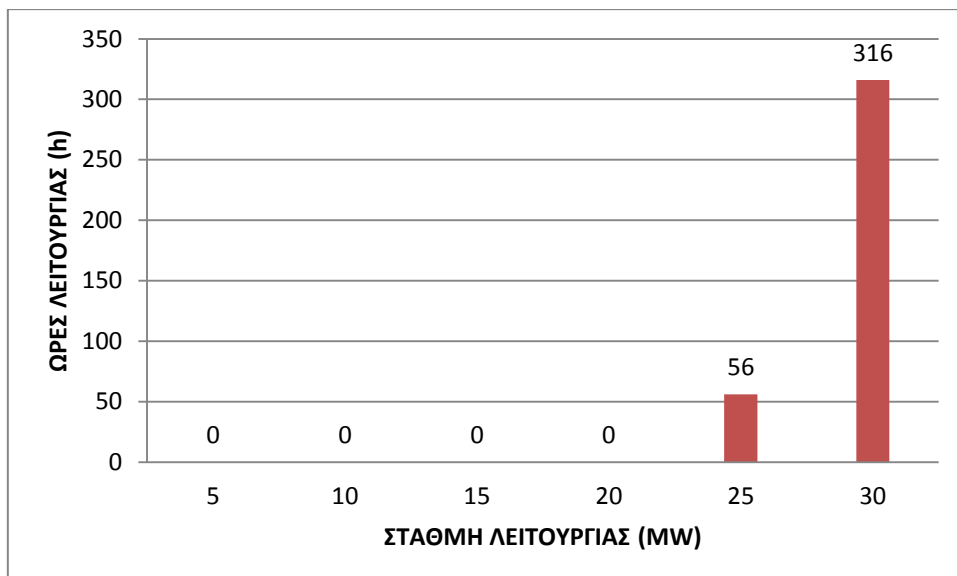
**Σχήμα 17: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Απρίλιο.**

Μάιος

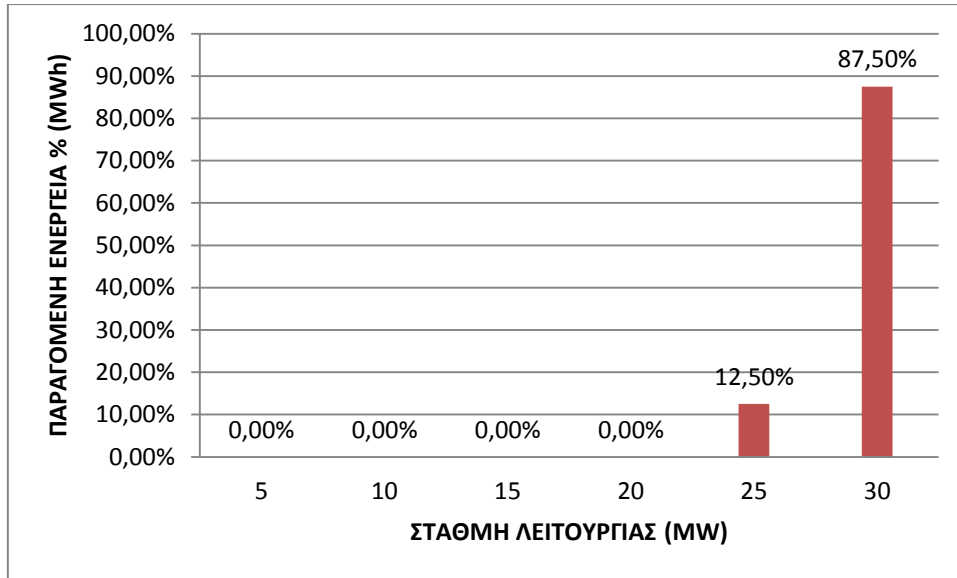
Παραγόμενη Ενέργεια: 10336 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 372 h

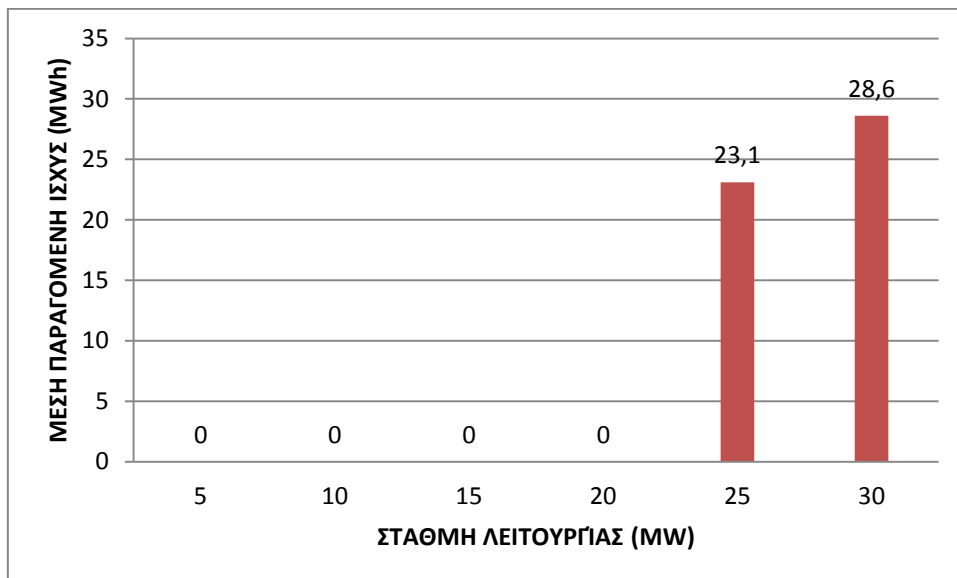
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 372} = 0,93$  ή 93%



**Σχήμα 18: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Μάιο.**



**Σχήμα 19: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Μάιο.**



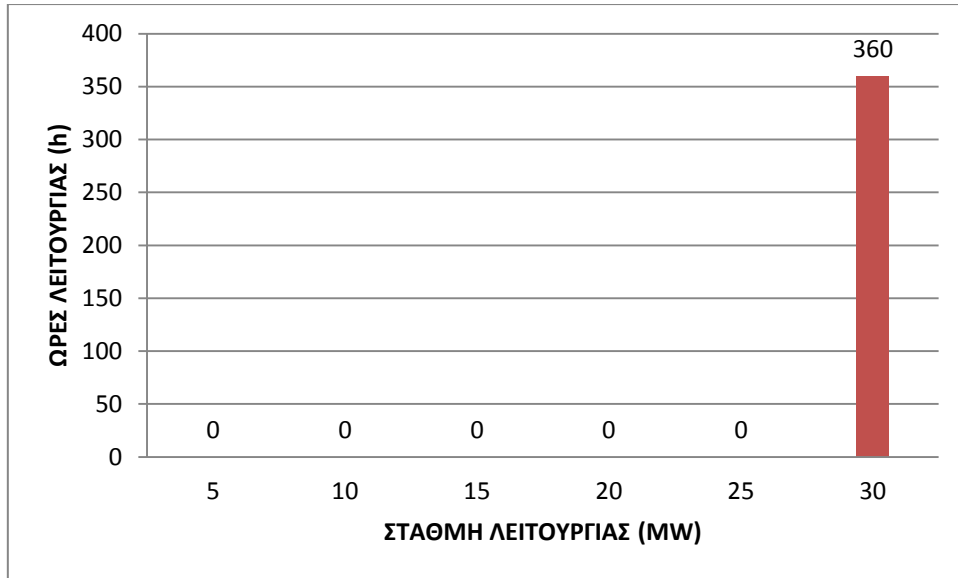
**Σχήμα 20: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Μάιο.**

### Ιούνιος

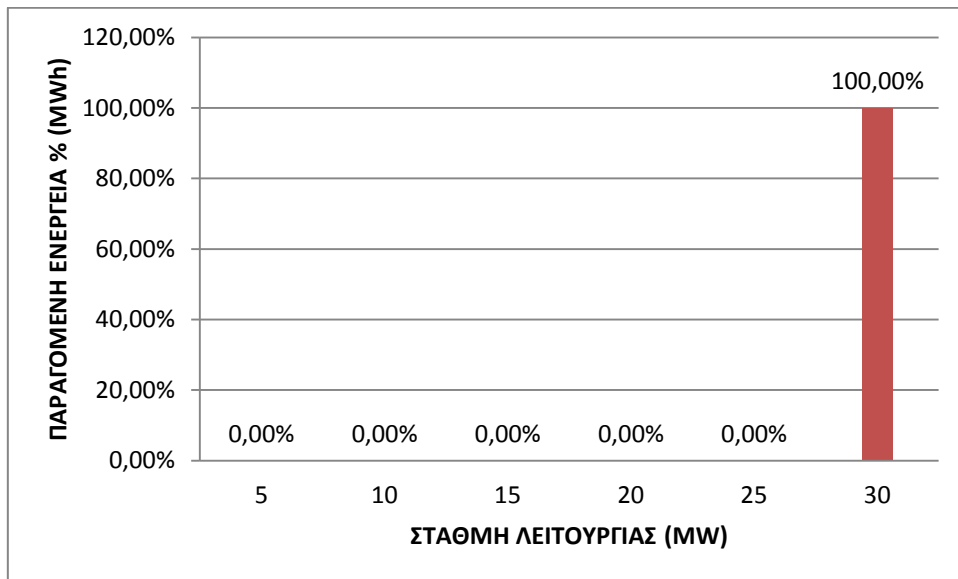
Παραγόμενη Ενέργεια: 10232 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 360 h

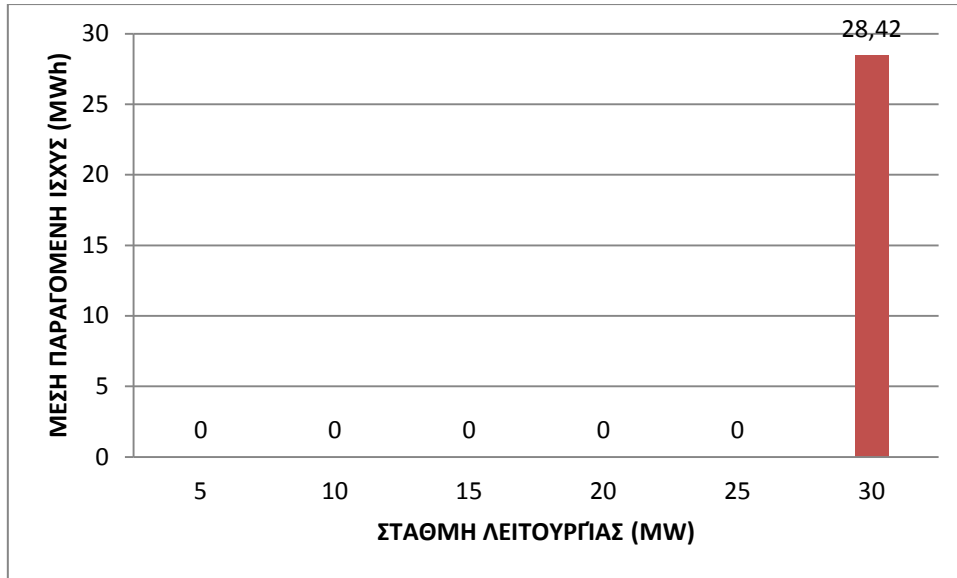
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.Χ. = \frac{E}{30 * 360} = 0,94$  ή 94%



**Σχήμα 21: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Ιούνιο.**



**Σχήμα 22: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Ιούνιο.**



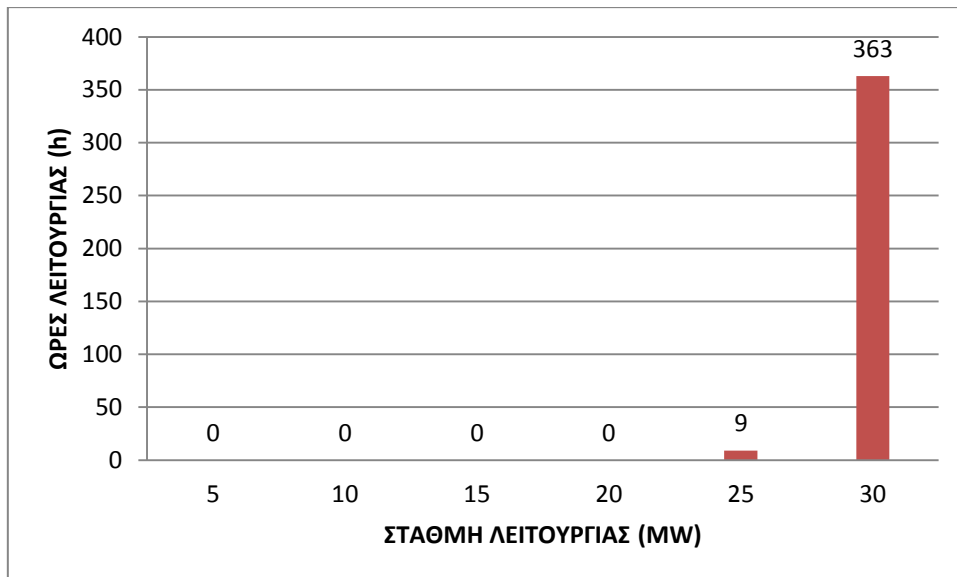
**Σχήμα 23: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Ιούνιο.**

#### Ιούλιος

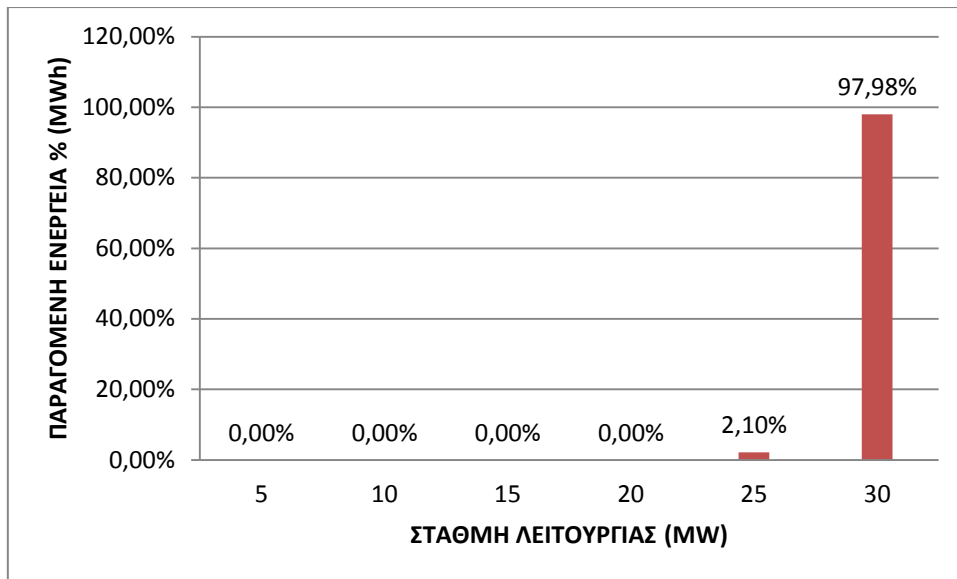
Παραγόμενη Ενέργεια: 10554 MWh

Ώρες μη μηδενικής παραγωγής: 372 h

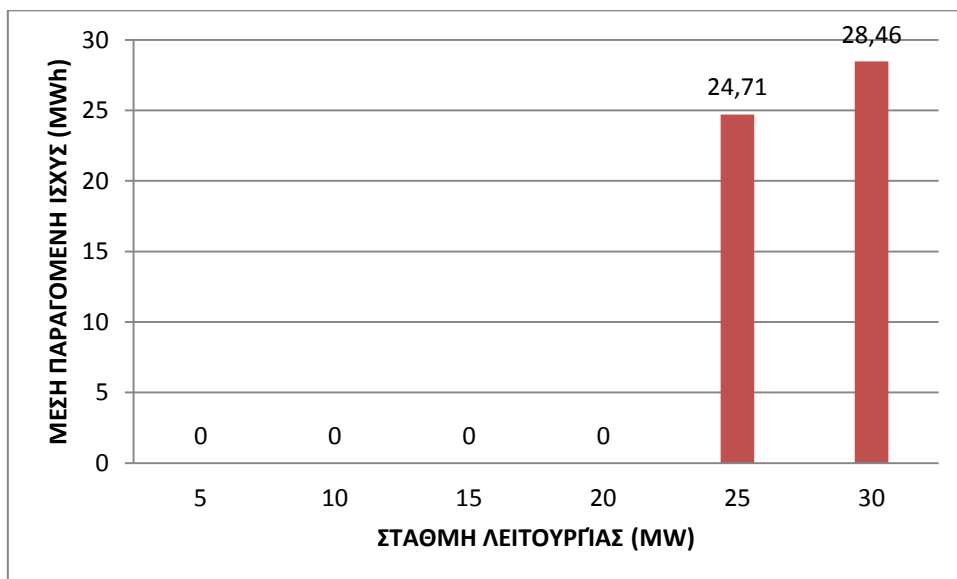
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 372} = 0,94$  ή 94%



**Σχήμα 24: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Ιούλιο.**



**Σχήμα 25: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Ιούλιο.**



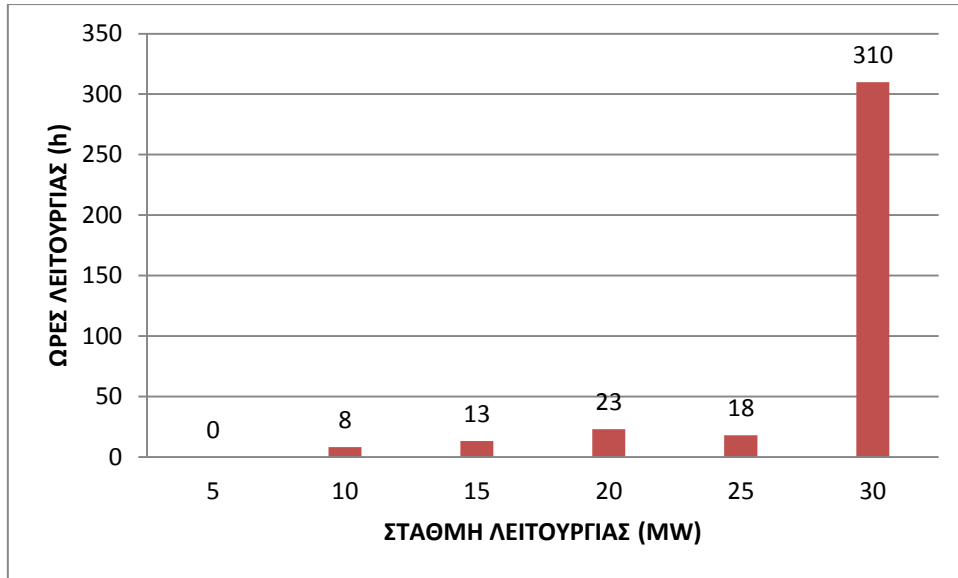
**Σχήμα 26: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Ιούλιο.**

#### Αύγουστος

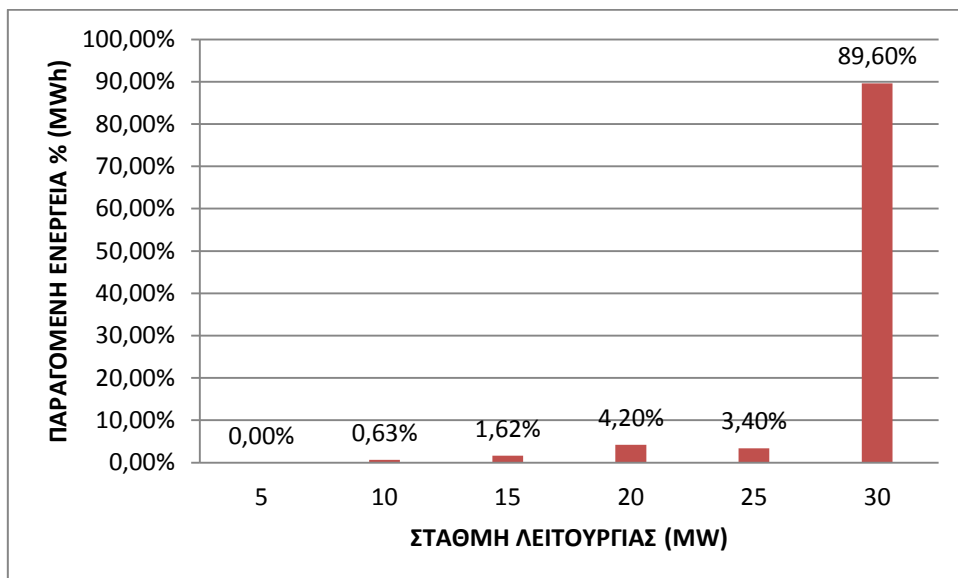
Παραγόμενη Ενέργεια: 9904 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 372 h

Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 372} = 0,89$  ή 89%

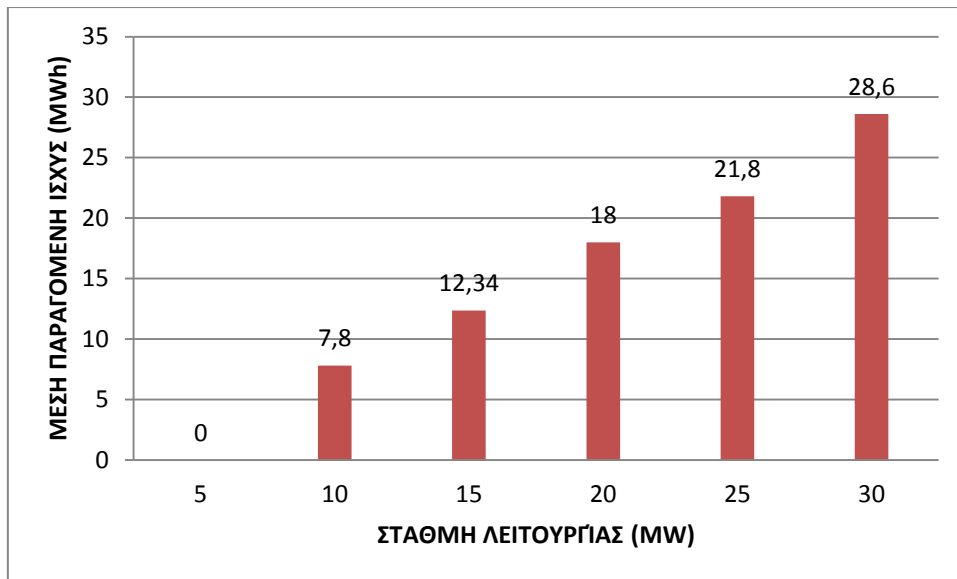


**Σχήμα 27: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Αύγουστο.**



**Σχήμα 28: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Αύγουστο.**





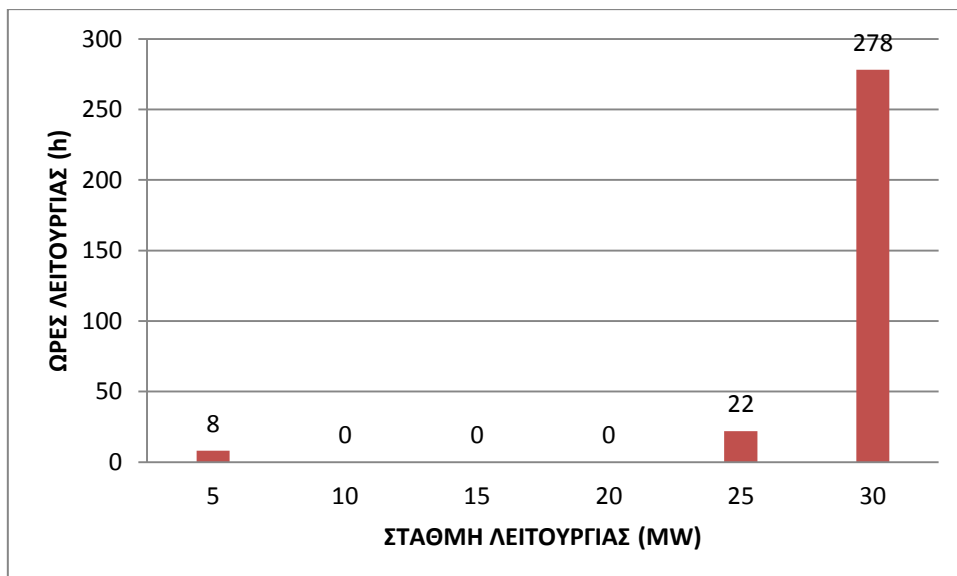
**Σχήμα 29: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Αύγουστο.**

Σεπτέμβριος

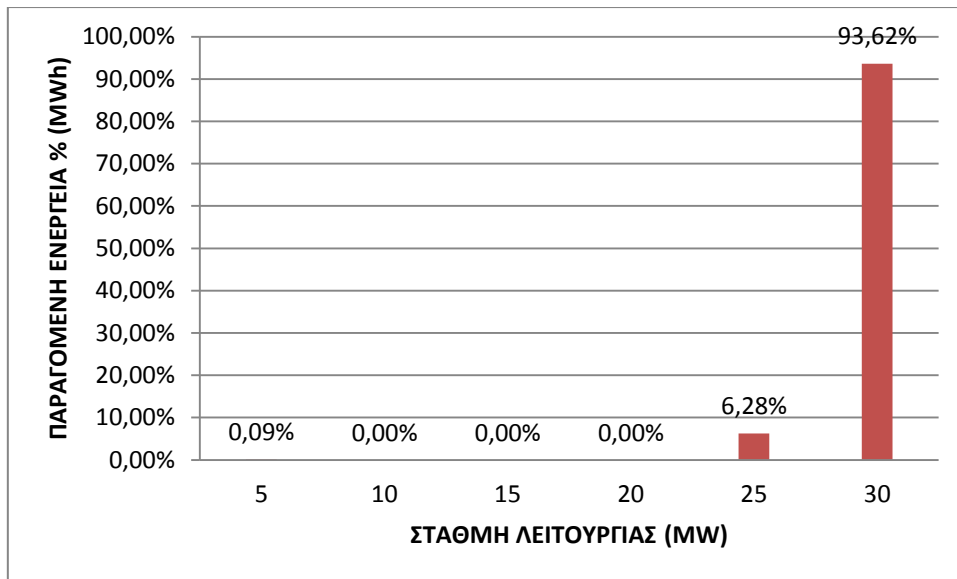
Παραγόμενη Ενέργεια: 8364 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 308 h

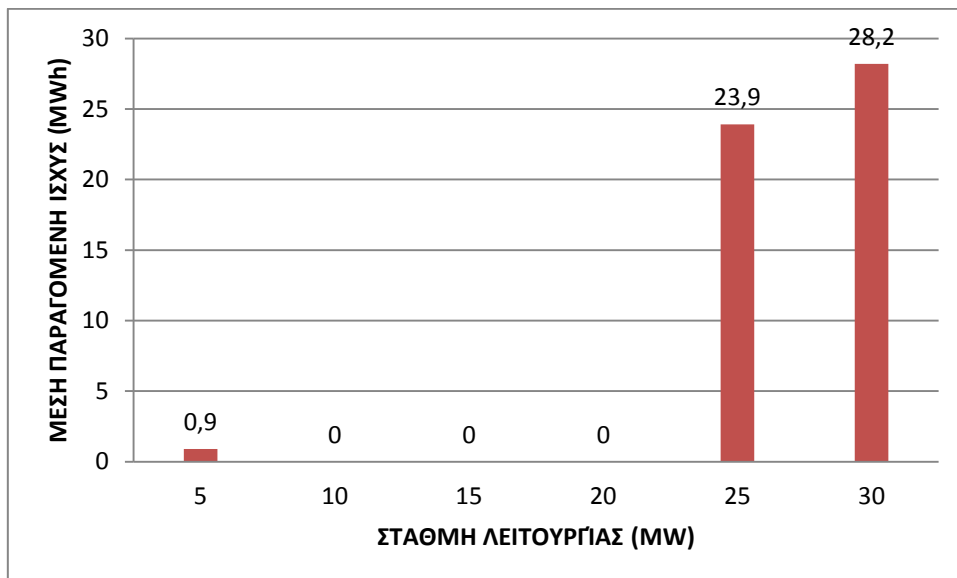
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 308} = 0,9$  ή 90%



**Σχήμα 30: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Σεπτέμβριο.**



**Σχήμα 31: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Σεπτέμβριο.**



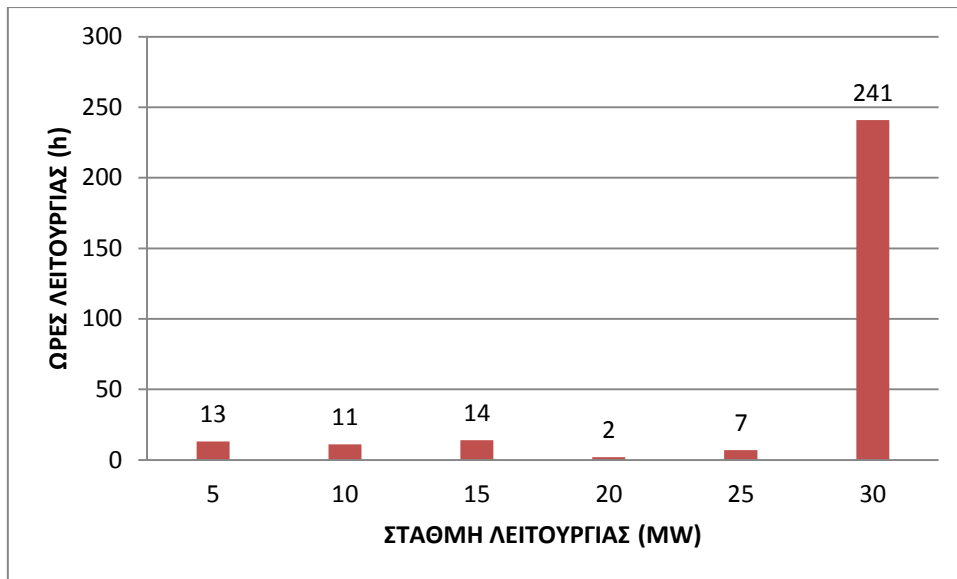
**Σχήμα 32: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Σεπτέμβριο.**

Οκτώβριος

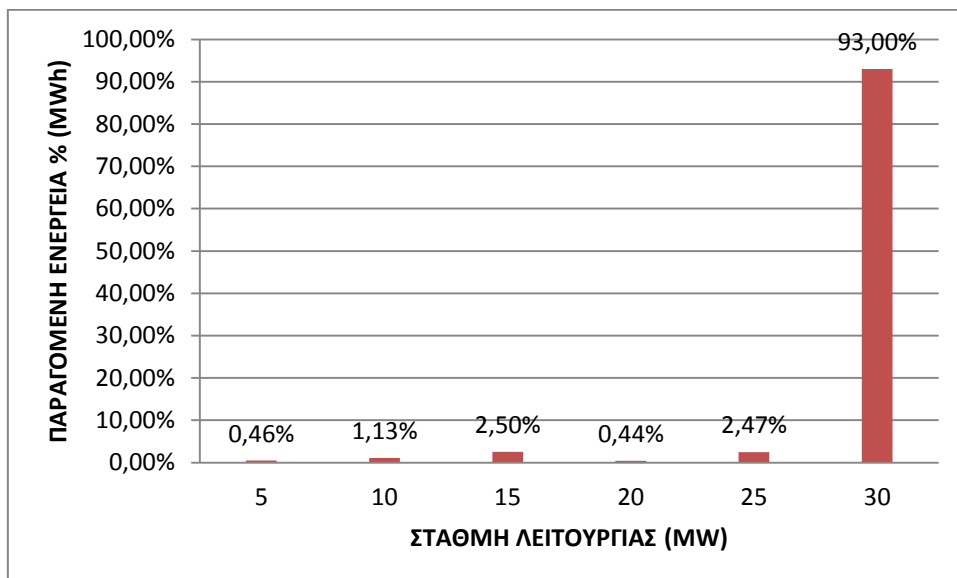
Παραγόμενη Ενέργεια: 7018 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 288 h

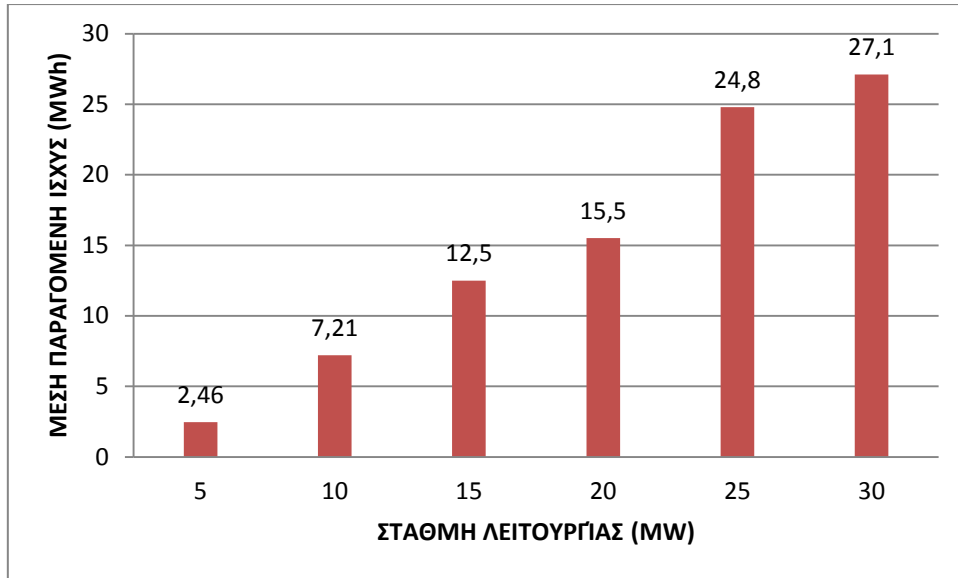
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 288} = 0,81$  ή 81%



**Σχήμα 33: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Οκτώβριο.**



**Σχήμα 34: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Οκτώβριο.**



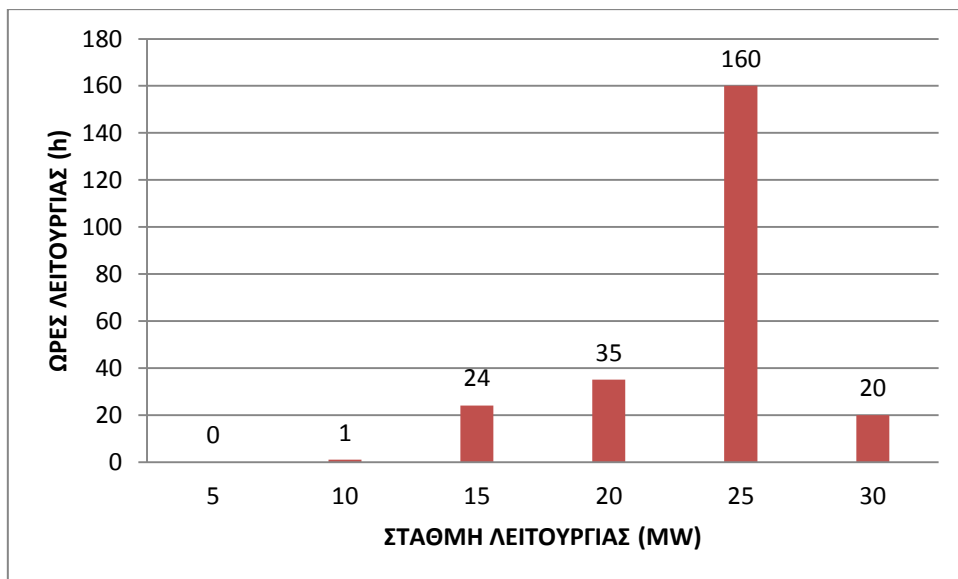
**Σχήμα 35: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Οκτώβριο.**

Νοέμβριος

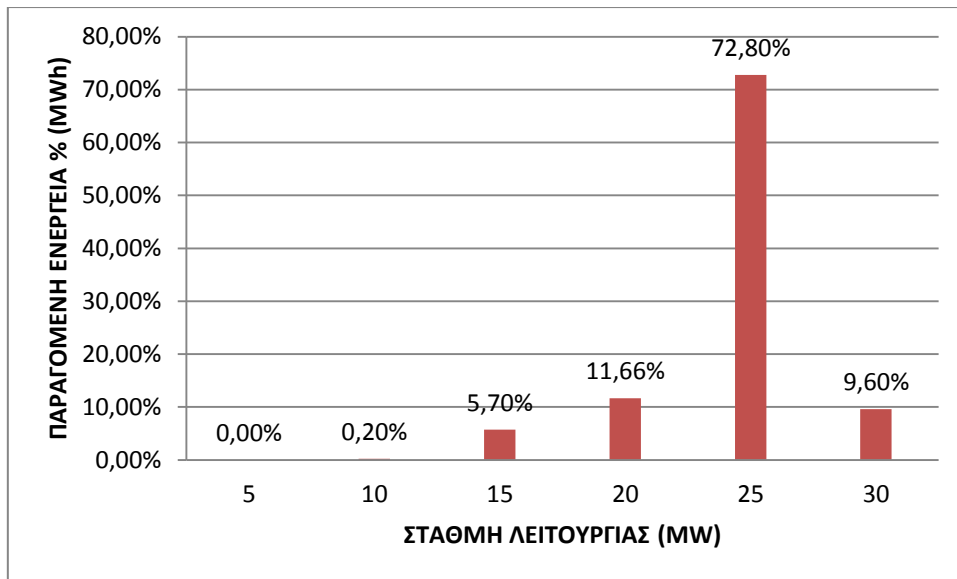
Παραγόμενη Ενέργεια: 5261 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 239 h

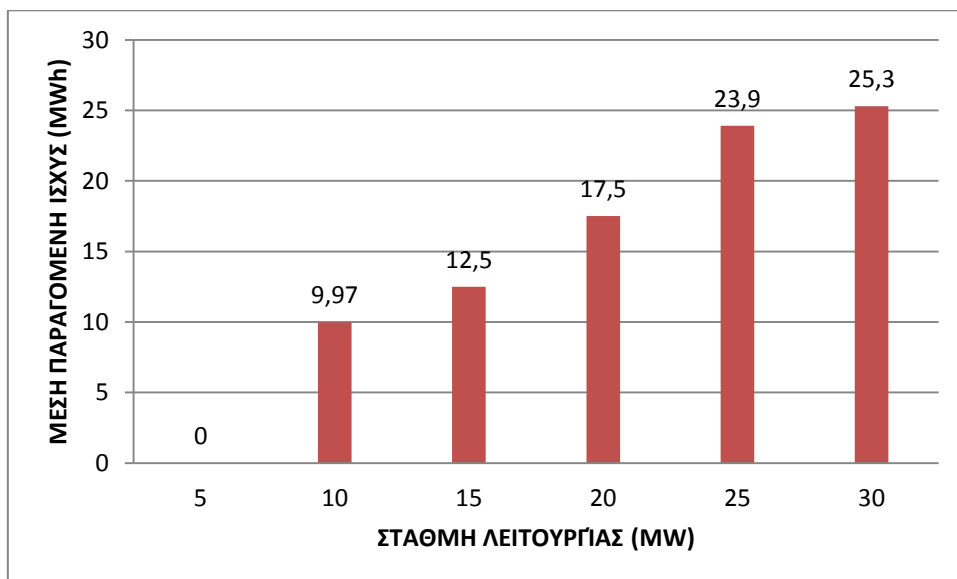
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.X. = \frac{E}{30 * 239} = 0,73$  ή 73%



**Σχήμα 36: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Νοέμβριο.**



**Σχήμα 37: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Νοέμβριο.**



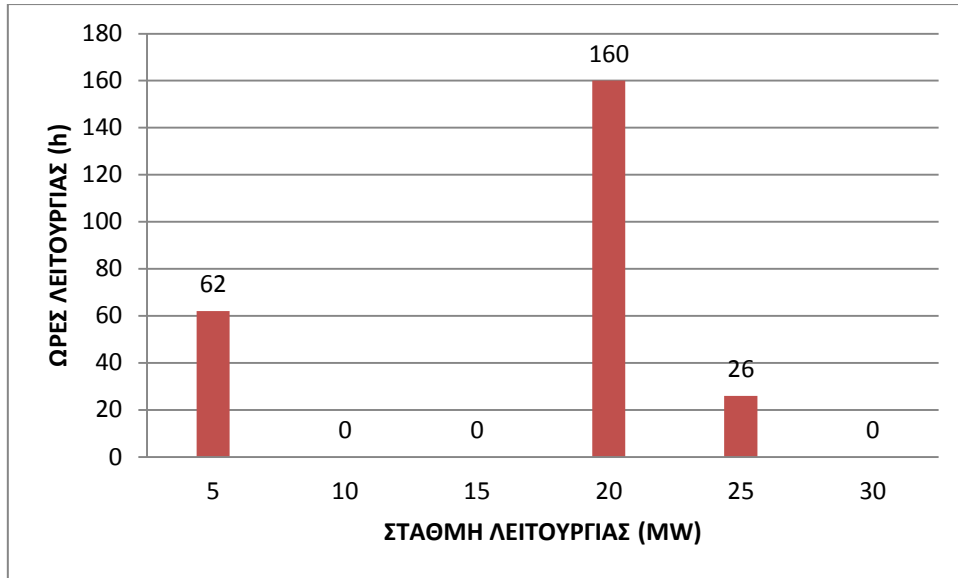
**Σχήμα 38: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Νοέμβριο.**

#### Δεκέμβριος

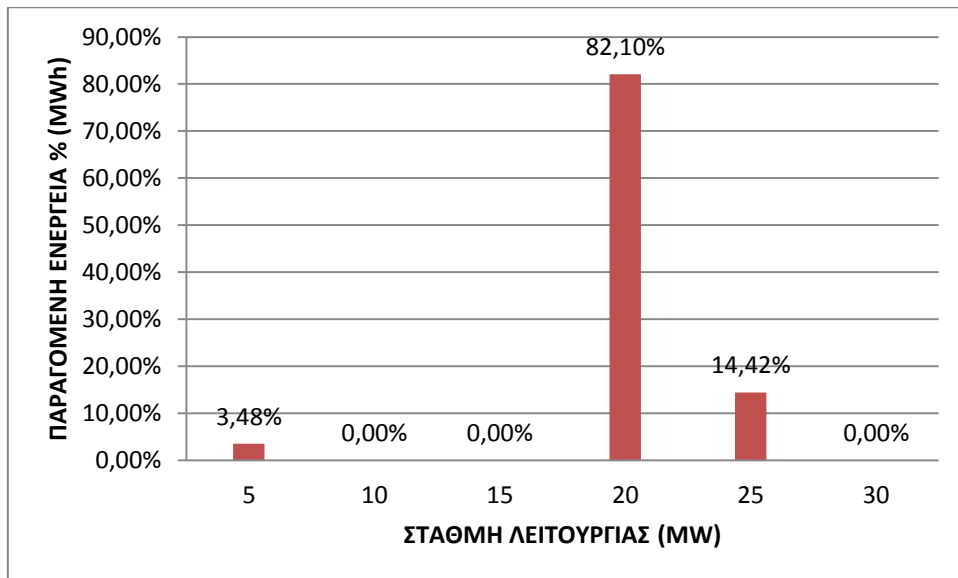
Παραγόμενη Ενέργεια: 3655 MWh

Ωρες μη μηδενικής παραγωγής: 248 h

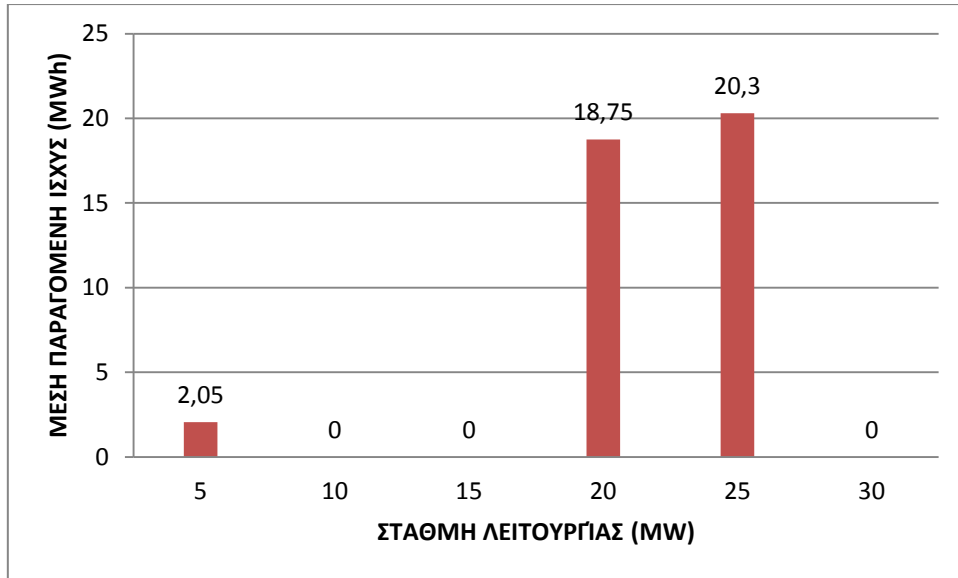
Συντελεστής Χρησιμοποίησης:  $\Sigma.Χ. = \frac{E}{30 * 248} = 0,49$  ή 49%



**Σχήμα 39: Ατομική πιθανότητα εμφάνισης στάθμης λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Δεκέμβριο.**



**Σχήμα 40: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού (%) για το μήνα Δεκέμβριο.**



**Σχήμα 41: Μέση παραγόμενη ισχύς ανά στάθμη λειτουργίας του σταθμού για το μήνα Δεκέμβριο.**





## **Βιβλιογραφία**

- [1] S.A. Kalogirou, Progress in Energy and Combustion Science 30, 2004.
- [2] Concentrating Solar Power: From Research to Implementation: Report of European Commission, 2007.
- [3] [www.retd.gr/index.php?cat=2&page=4&language=gr](http://www.retd.gr/index.php?cat=2&page=4&language=gr)
- [4] Κ.Θ. Δέρβος, Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις, 2010.
- [5] Σταμάτιος Κοιλάκος, «Παραμετρική Μελέτη Μηδενισμού Σκίασης Ηλιακών Συλλεκτών-Κώδικας-Εφαρμογές», 2010.
- [6] Eduardo I. Ortiz-Rivera and Luisa I. Feliciano-Cruz, Performance Evaluation and Simulation of a Solar Thermal Power Plant, 2009.
- [7] Robert Pitz-Paal, High Temperature Solar Concentrators, in solar energy conversion and photoenergy systems, 2007.
- [8] Concentrated Solar Thermal Power- Now! , Report of Greenpeace, ESTIA and IEA SolarPACES Implementing Agreement, 2005.
- [9] Tai Lv and Nan Li, Study on the Continuous and Stable Running Mode of Solar Thermal Power Plant, 2009
- [10] M. J. Montes, Performance of a direct steam generation solar thermal power plant for electricity production as a function of the solar multiple, 2009.
- [11] Ευστράτιος Παπουτσής, «Προσομοίωση της Συμπεριφοράς Θερμοηλιακών Σταθμών και των Θερμοκλινών Αποθήκευσης», 2010.
- [12] Thesis by Thorsten Stuetzle , Automatic Control of the 30 MWe SEGS VI Parabolic Trough Plant, 2002.
- [13] Report of Solar Millennium AG, The Parabolic Trough Power Plants 1 to 3. The largest solar power plants in the world- Technology premiere in Europe, 2008.
- [14] Αντώνιος Μαντήκος, Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων, 2011.
- [15] Fausto Cavallaro and Luigi Ciruolo, A life Cycle Assessment (LCA) of a Paraboloidal- Dish Solar Thermal Power Generation System, 2006.
- [16] P. Siangsukone and K. Lovegrove, Modelling of a 400 m<sup>2</sup> steam based Paraboloidal Dish concentrator for solar thermal power production, 2003.
- [17] [www.eai.in/ref/global/ae/sol/csp/csp.html](http://www.eai.in/ref/global/ae/sol/csp/csp.html)

- [18] Xindong Wei, A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant, 2010.
- [19] Spiros Alexopoulos, Solar tower power plant in Germany and future perspectives of the development of the technology in Greece and Cyprus , 2010.
- [20] Manuel Romero, Reiner Buck and James Pacheco, An update on Solar Central Receiver Systems, Projects and Technologies, 2002.
- [21] New Technologies in Spain, Technology Review, published by MIT.
- [22] 15-CSP Technologies, ECEGR 491, Renewable Energy Systems, 2010.
- [23] Gilbert E. Cohen, David N. Kearney and Gregory J. Kolb, Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for Concentrating Solar Power Plants, 1999.
- [24] Michael Wittman, Hanne Breitzkreuz, Marion Schroedter- Homscheidt and Markus Eck, Case Studies on the Use of Solar Irradiance Forecast for Optimized Operation Strategies of Solar Thermal Power Plants, 2008.
- [25] THERMINOL VP-1, Heat Transfer Fluids by SOLUTA.
- [26] Γιάννης Δημακόπουλος, Εμπειρικές Σχέσεις Παγκόσμιας Εμβέλειας για τον Υπολογισμό Ηλιακών Μεγεθών καθώς και Προσαρμογή και Αξιολόγηση της Ακρίβειάς τους στην Περιοχή των Αθηνών, 2008.
- [27] Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-3/ 2010. Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών, 2010.
- [28] Angela M. Patnode, Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plant, 2006.
- [29] Ramteen Sioshansi and Paul Denholm, The Value of Concentrating Solar Power and Thermal Energy Storage, 2010.
- [30] Guoging Shen, Yongxing Lv and Tai Lv, Stable Operation Mode Discussion on Steam Storage Technology in Solar Power Plant, 2010.
- [31] EPRI Project Manager: C. Libby, Program on Technology Innovation: Evaluation of Concentrating Solar Thermal Energy Storage Systems, 2009:  
[www.slideshare.net/abusseem/energia-solar-thermal-energy-storage-systems](http://www.slideshare.net/abusseem/energia-solar-thermal-energy-storage-systems)
- [32] Prof. Hans Müller- Steinhagen. Solar Thermal Power Plants- On the Way to Commercial Market Introduction
- [33] James E. Pacheco, Steven K. Showalter and William J. Kolb, Development of a Molten- Salt Thermocline Thermal storage System for Parabolic Trough Plants, 2001.
- [34] Peter Schwarzbozt, Solar gas turbine systems: Design, cost and perspectives, 2006.

- [35] Dr. Stefan Bockamp, *Solar Thermal Power Generation*, 2003
- [36] Subhadarshi Sarkar and Venkataramana Ajjarapu, *MW Resource Assessment Model for a Hybrid Energy Conversion System with Wind and Solar Resources*, 2011.
- [37] Αλέξης Φωκάς- Κοσμετάτος, *Κανόνες Λειτουργίας Ηλιοθερμικών Σταθμών στη Νησιωτική Ελλάδα*, 2010.
- [38] Franz Trieb, *Competitive Solar Thermal Power Stations until 2010- The Challenge of Market Introduction*, 1998.
- [39] Έκτορας Α. Βισβάρδης- Καραΐσκος, *Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση Επενδύσεων σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα και Ηλιακούς Θερμικούς Σταθμούς*, 2010.