



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

**Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής  
Ενέργειας Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ Α. ΜΑΝΤΗΚΟΣ

**Επιβλέπων :** Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011





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

## Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ Α. ΜΑΝΤΗΚΟΣ

Επιβλέπων : Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... 2011.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Πάυλος Γεωργιάκης

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011

.....  
ΑΝΤΩΝΙΟΣ Α. ΜΑΝΤΗΚΟΣ

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

Copyright © ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΜΑΝΤΗΚΟΣ 2011.

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

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση και η προσομοίωση της λειτουργίας ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικας προσομοίωσης της ετήσιας λειτουργίας τέτοιων σταθμών σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

Στα πλαίσια αυτά επιχειρήθηκε αρχικά μια συνοπτική ανασκόπηση των γενικών χαρακτηριστικών όπως και των διαφορετικών κύριων τεχνολογιών των ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, έγινε αναφορά στην παρούσα κατάσταση και τις προοπτικές της διεθνούς αγοράς στο πεδίο αυτό αλλά και στο υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα που αφορά τη λειτουργία τέτοιων σταθμών.

Στη συνέχεια, η μελέτη επικεντρώθηκε στην εμπορικά επικρατέστερη έως τώρα τεχνολογία των παραβολικών κατόπτρων. Περιγράφηκαν τα επιμέρους υποσυστήματα που συνθέτουν έναν ηλιοθερμικό σταθμό αυτής της τεχνολογίας, ενώ παρατέθηκαν και οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του κάθε υποσυστήματος.

Έπειτα, μελετήθηκε η διασύνδεση των παραπάνω υποσυστημάτων στην ενιαία λειτουργία του σταθμού και παρουσιάστηκε ο ενιαίος τρόπος λειτουργίας σε καθημερινή βάση ενός ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων ο οποίος είναι εφοδιασμένος με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και βοηθητικό καυστήρα συμβατικού καυσίμου. Ως τοποθεσία εγκατάστασης για το σταθμό αυτό θεωρήθηκε το νησί της Κρήτης. Διερευνήθηκαν διάφορα θέματα που σχετίζονται με την επιλογή συγκεκριμένων στρατηγικών λειτουργίας του σταθμού ενώ ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην παρουσίαση δύο εναλλακτικών τρόπων χρήσης του βοηθητικού καυστήρα.

Οι παραπάνω εξισώσεις και στρατηγικές λειτουργίας ενσωματώθηκαν στον κώδικα προσομοίωσης, ο οποίος παρήγαγε αναλυτικά αποτελέσματα για την ετήσια λειτουργία του σταθμού που επιλέχθηκε να μελετηθεί δεδομένης της ηλιοφάνειας της επιλεγμένης τοποθεσίας εγκατάστασης. Παρατέθηκαν διαγράμματα και χαρακτηριστικά μεγέθη της ετήσιας λειτουργίας για τις εναλλακτικές στρατηγικές χρήσης του βοηθητικού καυστήρα όπως και για διαφορετικές διαστασιολογήσεις του ίδιου σταθμού.

Τέλος, επιχειρήθηκε προσεγγιστικά η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης για τον υπό προσομοίωση ηλιοθερμικό σταθμό στην Κρήτη. Μέσω κατάλληλου λογιστικού κώδικα που αναπτύχθηκε στο MATLAB υπολογίστηκαν το αρχικό κόστος επένδυσης του έργου, ορισμένοι δείκτες οικονομικής αξιολόγησης της επένδυσης καθώς και το σταθμισμένο κόστος ενέργειας.

**Λέξεις κλειδιά:** ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής, σταθμός παραβολικών κατόπτρων, μοντέλο προσομοίωσης, εξισώσεις λειτουργίας, στρατηγικές λειτουργίας, σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, βοηθητικός καυστήρας, διαγράμματα λειτουργίας, οικονομική αξιολόγηση



## Abstract

The scope of this diploma thesis is the analysis and simulation of the operation of solar thermal power plants based on the parabolic trough technology. For this purpose, a proper code was developed in MATLAB programming environment, for the simulation of the annual operation of such power plants.

In this context, a brief overview of the general characteristics and the different main technologies of solar thermal power plants was attempted. Furthermore, reference was made to the present situation and prospects of the international market in this area and to the existing regulatory framework in Greece related to the operation of such power plants.

Then, the study focused on the commercially prevailing technology of parabolic trough mirrors. The various subsystems that constitute a solar thermal power plant of this technology were described, while the equations governing the operation of each subsystem were cited.

Also, we studied the interconnection of the above subsystems in the overall operation of the plant, and presented the overall operation mode on a daily basis of a parabolic trough power plant, which is equipped with a thermal energy storage system and an auxiliary burner with conventional fuel. The location of this plant was considered to be the island of Crete. Various issues related to the selection of specific operational strategies for the plant were investigated while increased emphasis was placed on the presentation of two alternative ways to use the auxiliary burner.

The above equations and operational strategies were incorporated in the simulation code, which produced detailed results for the annual operation of the plant under study, given the sunshine of the selected site. Charts and characteristic features of the annual operation were cited, both for the alternative usage strategies of the auxiliary burner and for different sizing of the same station.

Finally, an attempt was made for an approximate economic evaluation of the investment required for the solar thermal power plant under simulation in Crete. Through an appropriate accounting code, developed in MATLAB, we calculated the initial capital cost of the project, specific economic evaluation indices and, also, the levelized cost of energy.

**Keywords:** concentrating solar power (CSP), parabolic trough, simulation model, operation equations, operational strategy, thermal energy storage, auxiliary burner, operation charts, economic evaluation





# Ευχαριστίες

Η ενασχόλησή μου με το αντικείμενο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ειδικότερα με την ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής υπήρξε για μένα άκρως ενδιαφέρουσα. Ο ιδιαίτερα ελπιδοφόρος και καινοτόμος τομέας της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής επιλέχθηκε ως αντικείμενο της διπλωματικής μου εργασίας μετά από προτροπή του επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σταύρου Παπαθανασίου. Θα ήθελα να του εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου τόσο διότι μου έδωσε τη δυνατότητα να εκπονήσω αυτή τη διπλωματική εργασία που ανταποκρίνεται πλήρως στα ερευνητικά μου ενδιαφέροντα, αλλά και για τις κατευθυντήριες γραμμές που μου έδωσε και την ουσιαστική υποστήριξη που μου παρείχε. Θα ήθελα ακόμη να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα για την ευκαιρία που μου έδωσε να παρουσιάσω ένα τμήμα αυτής της εργασίας στο 4<sup>ο</sup> Συνέδριο Φοιτητών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, το Νοέμβριο του 2010.

Στα πλαίσια της ενασχόλησής μου με το αντικείμενο της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ με τον κ. Κωνσταντίνο Παπασταμούλο, ο οποίος έχει ασχοληθεί επισταμένα με την τεχνολογία αυτή σε συνεργασία με τον καθηγητή κ. Παπαθανασίου. Η υποστήριξη του ήταν πολύπλευρη και καθοριστική, βοηθώντας με να κατανοήσω καλύτερα πτυχές του αντικειμένου, και παροτρύνοντάς με να εξερευνήσω κι άλλες. Πολλές από τις ιδέες που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία προέκυψαν κατά τη διάρκεια των πολύωρων συζητήσεών μας. Για όλα αυτά τον ευχαριστώ πολύ.

Φυσικά, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου, τον αδερφό μου και τους γονείς μου. Η αγάπη και η στήριξη που μου παρέχουν απλόχερα, αποτελούν κύριο εφόδιο για την επίτευξη κάθε στόχου που θέτω.

Τέλος, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου εντός και εκτός Πολυτεχνείου, για τα υπέροχα φοιτητικά χρόνια που μοιράστηκα μαζί τους. Η γνωριμία και οι σχέσεις που ανέπτυξα μαζί τους είναι μεταξύ των βασικών που αποκόμισα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.



# Περιεχόμενα

---

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>15</b>
1.1	Ηλιοθερμική Τεχνολογία Ηλεκτροπαραγωγής- Μια νέα μορφή αξιοποίησης του ηλιακού δυναμικού .....	15
1.2	Αντικείμενο και Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας.....	17
1.3	Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας.....	18
<b>2</b>	<b>Ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής</b>	<b>21</b>
2.1	Γενικά χαρακτηριστικά της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής.....	21
2.2	Οικονομοτεχνική προσέγγιση της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής.....	25
2.2.1	Υφιστάμενο Θεσμικό Πλαίσιο στην Ελλάδα.....	26
2.3	Ανασκόπηση των κύριων τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.....	27
2.3.1	Τεχνολογία Παραβολικών Κατόπτρων (Parabolic Trough systems).....	29

2.3.2	Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου ή Κεντρικού Δέκτη (Power Tower/Central Receiver systems).....	37
2.3.3	Τεχνολογία Παραβολικών Δίσκων (Parabolic Dish systems).....	45
2.3.4	Τεχνολογία Κατόπτρων Fresnel (Linear Fresnel Reflector systems).....	48
2.4	Συστήματα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (Thermal Energy Storage-TES).....	52
2.4.1	Αποθήκευση με τη χρήση τηγμένων αλάτων.....	54
2.4.2	Άμεση αποθήκευση ατμού.....	57
2.4.3	Έμμεση αποθήκευση με σκυρόδεμα.....	58
2.4.4	Έμμεση αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials-PCMs).....	59
<b>3</b>	<b>Περιγραφή του υπό προσομοίωση σταθμού και Εξισώσεις λειτουργίας</b>	<b>61</b>
3.1	Περιγραφή του ηλιακού πεδίου.....	61
3.1.1	Εξισώσεις λειτουργίας του ηλιακού πεδίου.....	65
3.2	Περιγραφή του συστήματος αποθήκευσης θερμότητα....	75
3.2.1	Εξισώσεις λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας.....	77
3.3	Περιγραφή του κύκλου ισχύος.....	80
3.3.1	Εξισώσεις λειτουργίας του κύκλου ισχύος.....	86
3.4	Περιγραφή του βοηθητικού συστήματος λέβητα- καυστήρα συμβατικού καυσίμου.....	89

<b>4</b>	<b>Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του υπό προσομοίωση σταθμού- Στρατηγικές λειτουργίας</b>	<b>91</b>
4.1	Λειτουργία κατά τις πρώτες πρωινές ώρες- Έναρξη ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού.....	91
4.2	Λειτουργία ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού κατά τις πρωινές ώρες (Χωρίς περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος).....	95
4.3	Λειτουργία ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού κατά τις ώρες που υπάρχει περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος.....	99
4.4	Λειτουργία ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού κατά τις απογευματινές ώρες μείωσης της ηλιοφάνειας.....	102
4.5	Λειτουργία του σταθμού μετά τη δύση του ηλίου.....	104
4.6	Λειτουργία του σταθμού για μέγιστη χρήση του συμβατικού καυστήρα.....	106
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα προσομοίωσης και Διαγράμματα λειτουργίας</b>	<b>109</b>
5.1	Διαγράμματα λειτουργίας.....	110
5.1.1	Λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού με συντηρητική χρήση του συμβατικού καυστήρα.....	110
5.1.2	Λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού με μέγιστη χρήση του συμβατικού καυστήρα.....	132
5.2	Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας και σύγκριση των δύο στρατηγικών λειτουργίας του βοηθητικού καυστήρα...	144

<b>6</b>	<b>Οικονομοτεχνική ανάλυση</b>	<b>151</b>
6.1	Απαιτούμενο κεφάλαιο επένδυσης.....	151
6.2	Υπολογισμός ετήσιας καθαρής ταμειακής ροής μετά από φόρους.....	155
6.2.1	Ετήσιο κόστος λειτουργίας.....	155
6.2.2	Ετήσια έσοδα.....	157
6.2.3	Υπολογισμός ετήσιου φόρου.....	158
6.2.4	Ετήσια καθαρή ταμειακή ροή μετά από φόρους.....	159
6.3	Υπολογισμός βασικών κριτηρίων αξιολόγησης επενδυτικού σχεδίου.....	159
6.4	Υπολογισμός σταθμισμένου κόστους ενέργειας (Levelized Cost of Energy-LCOE).....	164
<b>7</b>	<b>Επίλογος</b>	<b>167</b>
7.1	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	167
7.2	Συμβολή της διπλωματικής εργασίας και μελλοντικές κατευθύνσεις.....	169

## Βιβλιογραφία

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

---

### *1.1 Ηλιοθερμική Τεχνολογία Ηλεκτροπαραγωγής-Μια νέα μορφή αξιοποίησης του ηλιακού δυναμικού*

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εντατικοποιείται η εκμετάλλευση των πηγών αυτών με σκοπό την αποτροπή της επαπειλούμενης κλιματικής αλλαγής, η οποία προκαλείται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η κυριότερη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς στον τομέα αυτόν τα περιθώρια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι πολύ μεγάλα. Μια τέτοια πηγή ενέργειας με τεράστια αποθέματα είναι ο ήλιος. Η γη δέχεται περισσότερη ενέργεια από τον ήλιο σε μια ώρα από όσο καταναλώνει ο πληθυσμός της σε έναν ολόκληρο χρόνο. Παρόλα αυτά, η ηλιακή ενέργεια καταλαμβάνει στις μέρες μας ένα πολύ μικρό ποσοστό στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Όπως συνεπάγεται από τα παραπάνω, η μαζική εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι μονόδρομος και η ευρεία ενσωμάτωσή της στο ηλεκτρικό δίκτυο θα αποτελέσει ένα σημαντικό βήμα στον αγώνα για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την αποφυγή της κλιματικής αλλαγής.

Μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που κάνει χρήση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής (CSP-Concentrating Solar Power), η οποία βρίσκει εφαρμογή στους ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί

ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν μία νέα μορφή αξιοποίησης του ηλιακού δυναμικού για ηλεκτροπαραγωγή, μετά τα φωτοβολταϊκά. Ενώ μέχρι πρόσφατα τα φωτοβολταϊκά συστήματα ήταν απόλυτα κυρίαρχα στον τομέα της ηλιακής ενέργειας, τα τελευταία χρόνια η ηλιοθερμική τεχνολογία έχει συγκεντρώσει εκτενή έρευνα γνωρίζοντας μεγάλη ανάπτυξη.

Η γενική αρχή λειτουργίας των ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι η συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από κατάλληλα κάτοπτρα προς παραγωγή υψηλών θερμοκρασιών και η εκμετάλλευση της συλλεγόμενης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαια, η ιδέα της συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας για τη δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι γνωστή εδώ και πάνω από έναν αιώνα. Για πρώτη φορά όμως αξιοποιήθηκε εμπορικά στις ΗΠΑ μετά την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του '70. Τη δεκαετία του 1980 κατασκευάστηκε το SEGS (Solar Electric Generating System), ο πρώτος ηλιοθερμικός σταθμός μεγάλης κλίμακας στην έρημο Mojave της Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Στη συνέχεια ακολούθησε μια μακρά περίοδος χωρίς να κατασκευαστούν νέοι σταθμοί. Κύριοι λόγοι ήταν τόσο η κυριαρχία στην αγορά των φθηνών συμβατικών καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο, όσο και το υψηλό κόστος της ηλιοθερμικής τεχνολογίας, κάτι που έκανε αυτές τις επενδύσεις λιγότερο ελκυστικές. Όμως, με τη συνεχή έρευνα στην οποία βοήθησε και η εμπειρία από τη λειτουργία του SEGS οι προοπτικές της τεχνολογίας βελτιώνονταν συνεχώς. Είναι χαρακτηριστικό ότι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των σταθμών του SEGS έχει μειωθεί τουλάχιστον κατά ένα τρίτο από τα πρώτα χρόνια λειτουργίας τους [1],[2]. Επιπρόσθετα, η βιομηχανία παραγωγής των συστατικών μερών αυτών των σταθμών αποκτούσε καλύτερη τεχνογνωσία παράγοντας διαρκώς βελτιωμένα και φθηνότερα εξαρτήματα. Ταυτόχρονα, η υπερθέρμανση του πλανήτη, η οποία στο μεγαλύτερο βαθμό οφείλεται στην καύση ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό με τις συχνές διακυμάνσεις στις τιμές των ορυκτών καυσίμων επανέφερε το ενδιαφέρον και κατέστησε ελκυστικές τις επενδύσεις στην ηλιοθερμική τεχνολογία. Πλέον, τα τελευταία χρόνια, έχει καταστεί υπό προϋποθέσεις μια οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία, η οποία δημιουργεί μεγάλες προσδοκίες. Αρκετοί εμπορικοί σταθμοί είναι υπό λειτουργία ενώ ακόμη περισσότεροι βρίσκονται στο στάδιο της κατασκευής ή του προγραμματισμού. Το πλέον θετικό είναι το γεγονός πως τέτοια έργα εξασφαλίζουν επαρκή χρηματοδότηση και έλκουν μεγάλες επενδύσεις. Σύμφωνα με ένα αισιόδοξο σενάριο, το οποίο προϋποθέτει μεγάλη ανάπτυξη αυτής της βιομηχανίας και υψηλά επίπεδα ενεργειακής απόδοσης, κάτι που είναι εφικτό, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί θα είναι σε θέση να παράγουν το 7% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών μέχρι το 2030 και το 25% μέχρι το 2050 [3].



## 1.2 Αντικείμενο και Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εντάσσεται στη μελέτη της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής, μιας τεχνολογίας Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, η οποία γνωρίζει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και βρίσκεται στο επίκεντρο διεθνούς έρευνας. Η τεχνολογία των παραβολικών κατόπτρων αποτελεί την περισσότερο αποδεδειγμένη εμπορικά και πιο διαδεδομένη υλοποίηση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και επιλέχθηκε για εκτενέστερη μελέτη. Η τεχνολογία αυτή ενδείκνυται για μεγάλης κλίμακας ηλεκτροπαραγωγή και μπορεί να συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην επίτευξη των στόχων που έχει θέσει η Ελλάδα για τη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας. Το γεγονός αυτό όπως και οι ελπιδοφόρες προοπτικές μιας σχετικά πρόσφατα αναπτυσσόμενης τεχνολογίας αποτέλεσαν το γενικότερο ερέθισμα για την ενασχόληση με το πεδίο αυτό.

Κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η προσομοίωση της λειτουργίας ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων. Μόνο μέσω της αναλυτικής προσομοίωσης της λειτουργίας ενός τέτοιου σταθμού είναι εφικτή η σε βάθος μελέτη της συμπεριφοράς του καθόλη τη διάρκεια του έτους. Το μοντέλο προσομοίωσης μπορεί, ακόμη, να αποτελέσει πεδίο δοκιμών των διαφορετικών δυνατών τρόπων λειτουργίας ενός τέτοιου σταθμού με στόχο την αναζήτηση της βέλτιστης εφαρμογής. Επιπλέον, στα ετήσια αποτελέσματα λειτουργίας που μας παρέχει η προσομοίωση μπορεί να βασιστεί η οικονομική αξιολόγηση τέτοιων επενδύσεων, η οποία θα καταδείξει την οικονομική βιωσιμότητά τους.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, επιθυμούμε αρχικά να περιγράψουμε αναλυτικά τα επιμέρους υποσυστήματα αυτών των σταθμών και να παραθέσουμε τις εξισώσεις λειτουργίας τους. Στη συνέχεια, επιχειρούμε να διερευνήσουμε τους πιθανούς τρόπους λειτουργίας ενός τέτοιου σταθμού. Η εργασία επικεντρώνεται στη διαμόρφωση ενός προτεινόμενου τρόπου λειτουργίας για έναν ηλιοθερμικού σταθμό παραβολικών κατόπτρων με επιλεγμένη τοποθεσία εγκατάστασης το νησί της Κρήτης. Με βάση το γενικό πλαίσιο λειτουργίας αναπτύσσονται εναλλακτικές στρατηγικές λειτουργίας για επιμέρους υποσυστήματα του σταθμού.

Η υλοποίηση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη κατάλληλου κώδικα σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, ο οποίος αποδίδει την ετήσια λειτουργία του σταθμού σε ωριαία βάση. Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην αποτελεσματική απεικόνιση της λειτουργίας του σταθμού σε διάφορες συνθήκες καθόλη τη διάρκεια του έτους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν διάφορα είδη διαγραμμάτων που παρήχθησαν μέσω του προγράμματος MATLAB.

Στο τέλος, προβαίνουμε στην τεχνική και οικονομική αξιολόγηση συγκεκριμένων υλοποιήσεων σταθμών παραβολικών κατόπτρων στην επιλεγμένη τοποθεσία εγκατάστασης. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ετήσιας ηλιοφάνειας της περιοχής και βασιζόμενοι στο υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα, στοχεύουμε να μελετήσουμε τη σκοπιμότητα της εγκατάστασης ενός παρόμοιου σταθμού σε μια ιδιαίτερως ευνοϊκή περιοχή της νότιας ελληνικής επικράτειας.

### 1.3 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται μια ανασκόπηση των διαφορετικών τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως και των βασικών χαρακτηριστικών της ηλιοθερμικής τεχνολογίας εν γένει. Επίσης, δίνεται μια εικόνα της υπάρχουσας κατάστασης στην αγορά όπως και της προοπτικής που υπάρχει στην κατασκευή ηλιοθερμικών σταθμών. Αναφορά γίνεται και στο υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα που αφορά τους ηλιοθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων. Περιγράφονται εκτενέστερα τα επιμέρους υποσυστήματα ενός ηλιοθερμικού σταθμού αυτής της τεχνολογίας και παρατίθενται οι εξισώσεις που διέπουν τη γενική λειτουργία αυτών των συστημάτων.

Στο κεφάλαιο 4 επιχειρείται μια ενιαία περιγραφή του τρόπου λειτουργίας σε καθημερινή βάση του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων που έχει επιλεγθεί να προσομοιωθεί. Τα επιμέρους τμήματα του σταθμού που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάζονται πλέον ως διασυνδεδεμένα μεταξύ τους, υπό το πλαίσιο που καθορίζουν οι διάφορες στρατηγικές λειτουργίας του σταθμού. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη στρατηγική χρήσης του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας και του βοηθητικού καυστήρα.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται υπό μορφή διαγραμμάτων η καθημερινή λειτουργία σε ωριαία βάση του υπό μελέτη ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων, όπως αυτή προέκυψε από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του. Εν συνεχεία, παρατίθενται διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη της ετήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού, τα οποία προέκυψαν ως αποτελέσματα της προσομοίωσης. Γίνεται διάκριση των δύο στρατηγικών λειτουργίας του βοηθητικού καυστήρα που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4 και διενεργείται σύγκριση μεταξύ των αντίστοιχων διαγραμμάτων και αποτελεσμάτων.

Στο κεφάλαιο 6 επιχειρείται μια προσέγγιση των οικονομικών μεγεθών του υπό εξέταση ηλιοθερμικού σταθμού. Μέσω κατάλληλου λογιστικού κώδικα που αναπτύχθηκε στο MATLAB, υπολογίζονται το αρχικό κόστος επένδυσης, η ετήσια καθαρή ταμειακή ροή μετά φόρων καθώς και κάποιοι βασικοί δείκτες αξιολόγησης της επένδυσης για διάφορες υλοποιήσεις ενός τέτοιου σταθμού. Επίσης, αποτιμάται η χρήση διαφορετικών συμβατικών καυσίμων στο βοηθητικό καυστήρα του σταθμού μέσω του υπολογισμού της επίδρασης στους δείκτες οικονομικής αξιολόγησης. Τέλος, υπολογίζεται και το σταθμισμένο κόστος ενέργειας στον υπό μελέτη ηλιοθερμικό σταθμό παραβολικών κατόπτρων.

Στο κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται ορισμένα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διενεργούμενη προσομοίωση. Επίσης, προτείνονται ορισμένες κατευθύνσεις έρευνας στον τομέα της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής.



## Κεφάλαιο 2

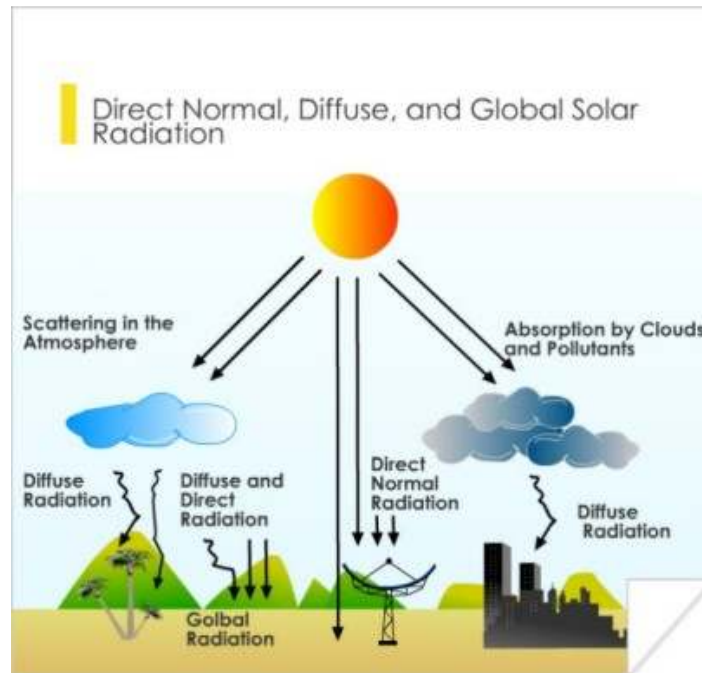
# Ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής

---

### 2.1 Γενικά χαρακτηριστικά της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής

Σε γενικές γραμμές, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παράγουν θερμότητα και εν συνεχεία ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας εκατοντάδες κατάλληλα κάτοπτρα για να συγκεντρώσουν τις ακτίνες του ήλιου σε σημεία όπου αναπτύσσεται πολύ υψηλή θερμοκρασία, συνήθως μεταξύ 400°C και 1000°C. Η λειτουργία των ηλιοθερμικών σταθμών είναι απλή. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται από κάτοπτρα και αποδίδεται σε ένα μέσο μεταφοράς θερμότητας όπως συνθετικό λάδι, υγροποιημένο άλας, μείγμα νερού-ατμού, αέρα κ.α. Τα μέσα αυτά οδηγούνται στη συνέχεια σε εναλλάκτες θερμότητας αποδίδοντας την ενέργεια που έχει απορροφηθεί σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή ατμού. Όταν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται το μείγμα νερού-ατμού, τότε αυτό οδηγείται κατευθείαν στον στρόβιλο και δεν παρεμβάλλεται εναλλάκτης. Εάν ο ηλιοθερμικός σταθμός αποτελείται από μηχανές Stirling (θα εξεταστούν αναλυτικά παρακάτω), τότε κάποιο αέριο παίζει το ρόλο του μέσου μεταφοράς θερμότητας και οδηγείται κατευθείαν στους κυλίνδρους της μηχανής, προς παραγωγή μηχανικής ενέργειας.

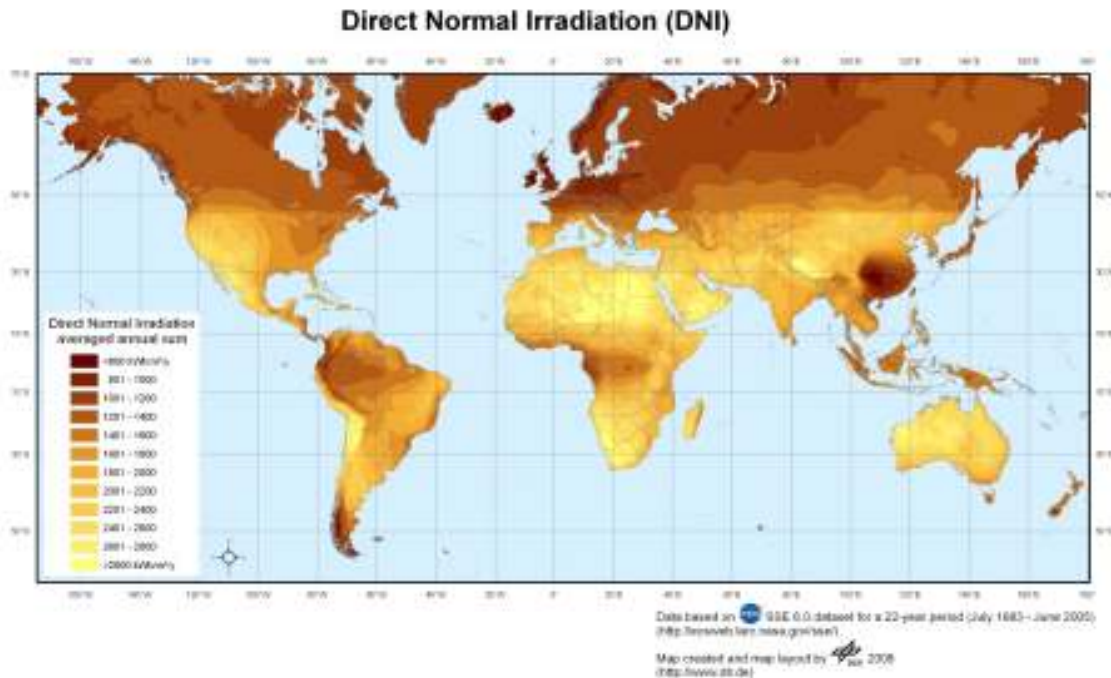
Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ηλιοθερμικής τεχνολογίας είναι ότι, σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούν και τη διάχυτη ακτινοβολία για να παράγουν ηλεκτρισμό, τα ηλιοθερμικά συστήματα χρησιμοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία καθώς η διάχυτη δεν μπορεί να συγκεντρωθεί. Αυτή η ηλιακή ακτινοβολία είναι η συνιστώσα του ηλιακού φωτός που δεν διαχέεται από σύννεφα, αέρια και σκόνες στην ατμόσφαιρα και φτάνει στην επιφάνεια της γης απευθείας από τον ήλιο σε δέσμες παράλληλων ακτίνων.



**Σχήμα 2.1 Άμεση, διάχυτη και ολική ηλιακή ακτινοβολία [4]**

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 (Direct Normal Irradiation-DNI). Το δυναμικό DNI σε κάθε περιοχή του πλανήτη φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Κατάλληλες περιοχές είναι αυτές οι οποίες δέχονται τουλάχιστον 1650kWh άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο ετησίως. Οι ιδανικότερες τοποθεσίες για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών δέχονται περισσότερες από 2000kWh/m<sup>2</sup> ετησίως. Συνεπώς, κατάλληλες τοποθεσίες για εκμετάλλευση αυτής της τεχνολογίας είναι οι μεσογειακές χώρες της Ευρώπης, οι νοτιοδυτικές περιοχές των ΗΠΑ, η κεντρική και νότια Αμερική, η Βόρεια και Νότια Αφρική, η Εγγύς και η Μέση Ανατολή, το Ιράν, οι ερημικές πεδιάδες της Ινδίας, το Πακιστάν, η πρώην Σοβιετική Ένωση, η Κίνα και η Αυστραλία και αποτελούν τη λεγόμενη «ηλιακή ζώνη» (sun belt). Για την Ελλάδα ειδικότερα οι περιοχές που

μπορούν να φιλοξενήσουν ανάλογα έργα ΑΠΕ με υψηλή ενεργειακή απόδοση είναι οι περιοχές της Κρήτης, της Ρόδου και της Νοτιοανατολικής Πελοποννήσου [3][46].



**Σχήμα 2.2 Δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας παγκοσμίως**

Βέβαια, το ηλιακό δυναμικό κάποιων ιδιαίτερα ηλιόλουστων περιοχών ξεπερνά κατά πολύ την τοπική ζήτηση. Έτσι, θα υπάρχει η δυνατότητα, εφόσον κάτι τέτοιο κρίνεται οικονομικά συμφέρον, να εξαγεται ενέργεια από σταθμούς που βρίσκονται στις χώρες αυτές προς άλλες χώρες με υψηλή κατανάλωση ενέργειας αλλά χαμηλό δυναμικό DNI. Εάν οι χώρες της ηλιακής ζώνης εκμεταλλευτούν την ηλιακή τους ενέργεια κατά αυτόν τον τρόπο, θα συνεισφέρουν τα μέγιστα στην προστασία του παγκόσμιου κλίματος. Ήδη, έχει αναπτυχθεί μια διεθνής πρωτοβουλία, το πρόγραμμα DESERTEC, γενική ιδέα του οποίου είναι η ικανοποίηση μεγάλου ποσοστού της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από την αξιοποίηση της άφθονης ηλιακής ενέργειας στις ερήμους του πλανήτη. Χώρες όπως η Γερμανία ήδη εξετάζουν σοβαρά το ενδεχόμενο να εισάγουν «ηλιακή» ηλεκτρική ενέργεια από τη βόρεια Αφρική και τη νότια Ευρώπη για να κάνουν τον ενεργειακό τους τομέα περισσότερο βιώσιμο. Βεβαίως, για κάθε νέο αναπτυξιακό έργο η ικανοποίηση της εγχώριας ζήτησης θα είναι η πρώτη προτεραιότητα [5].

Υπάρχουν διάφορα σχήματα κατόπτρων που χρησιμοποιούνται στους ηλιοθερμικούς σταθμούς για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως και διάφορες εκδοχές στη διαδικασία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, όμως όλοι οι ηλιοθερμικοί σταθμοί λειτουργούν με την ίδια βασική αρχή. Η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται μετατρέπεται σε θερμική και, εν συνεχεία, σε ηλεκτρική ενέργεια. Η εν λόγω τεχνολογία ενδείκνυται για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρισμού και, έτσι, το τυπικό μέγεθος των σταθμών αυτών είναι μεταξύ 50 και 280 MW, με προοπτική να κατασκευαστούν και ακόμη μεγαλύτεροι σταθμοί [3].

Τα βασικά επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται ένας ηλιοθερμικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- οι συλλέκτες ή συγκεντρωτήρες (collectors)
- ο δέκτης (receiver)
- το μέσο μεταφοράς ή/και αποθήκευσης της θερμότητας, και
- το σύστημα μετατροπής της ενέργειας (power conversion system).

Οι συλλέκτες με το δέκτη και το μέσο μεταφοράς της θερμότητας απαρτίζουν το *ηλιακό πεδίο* του σταθμού, όπου γίνεται η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας και η συλλογή της θερμικής ενέργειας. Το σύστημα μετατροπής της ενέργειας είναι ένας κύκλος ισχύος όπου παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια, ενώ περιέχει και το σύστημα ψύξης του κύκλου.

Διακρίνονται 4 κύριες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής:

- α. Η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων (Parabolic Trough systems),
- β. Η τεχνολογία ηλιακού πύργου, ή αλλιώς κεντρικού δέκτη (Power Tower/Central Receiver systems),
- γ. Η τεχνολογία παραβολικών δίσκων (Parabolic Dish systems),
- δ. Η τεχνολογία κατόπτρων Fresnel (Linear Fresnel Reflector systems).

Σταθμός ηλιοθερμικής τεχνολογίας είναι και ο σταθμός τεχνολογίας «καμινάδας». Διαφοροποιείται από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες ως προς το ότι δεν γίνεται συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μέσο μεταφοράς θερμότητας, αλλά γίνεται εκμετάλλευση της θερμότητας για θέρμανση αέρα και κίνηση αυτού μέσω της καμινάδας/πύργου. Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε τις τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Με βάση τις παραπάνω τεχνολογίες γίνεται και η κυριότερη διάκριση των ηλιοθερμικών σταθμών.

Εκτός της κλασικής λειτουργίας όπου η μόνη πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή ενέργεια (solar-only solar thermal power plants) υπάρχει και η δυνατότητα *υβριδικής λειτουργίας* των ηλιοθερμικών σταθμών, όπου χρησιμοποιείται η καύση



ορυκτών καυσίμων (π.χ. φυσικό αέριο) όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί. Ανάλογα με το ποσοστό διεύδυσης του συμβατικού καυσίμου στην παραγωγή του σταθμού γίνεται λόγος για βοηθητική ή κύρια λειτουργία του εγκατεστημένου συμβατικού λέβητα. Μια ιδιαίτερα σημαντική λειτουργία, η οποία εφαρμόζεται κυρίως στους σταθμούς που εκμεταλλεύονται αποκλειστικά την ηλιακή ενέργεια (solar-only) ή περιλαμβάνουν και βοηθητική λειτουργία συμβατικού λέβητα, είναι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας, η οποία επεκτείνει τον ετήσιο χρόνο λειτουργίας του σταθμού (σε πολλές περιπτώσεις κατά 100%) αυξάνοντας κατακόρυφα το συντελεστή χρησιμοποίησης. Με την υπάρχουσα τεχνολογία, η αποθήκευση θερμότητας είναι πολύ φθηνότερη και πιο αποδοτική από την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και, καθώς, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παράγουν σε πρώτο στάδιο θερμότητα, η αποθήκευση της ενέργειας σε αυτή τη μορφή είναι μια ιδανική λύση. Οι δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, δηλαδή οι σταθμοί με υβριδική λειτουργία και οι αμιγώς ηλιοθερμικοί σταθμοί με αποθήκευση θερμικής ενέργειας αποτελούν τις δύο κυρίαρχες τάσεις για την μεγάλης κλίμακας ηλεκτροπαραγωγή με την εν λόγω τεχνολογία. Κι αυτό διότι εγγυώνται σταθερή ισχύ χωρίς διακοπές και κατανεμημένη παροχή ισχύος ανάλογα με τη ζήτηση, δηλαδή αυξάνουν την αξιοπιστία του συστήματος. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι είναι κατάλληλοι για την κάλυψη τόσο του φορτίου βάσης όσο και της αιχμής.

Τα κυριότερα συγκριτικά πλεονεκτήματα που παρέχουν οι ηλιοθερμικοί σταθμοί έναντι άλλων υφιστάμενων συστημάτων ΑΠΕ (π.χ. φωτοβολταϊκά) είναι η δυνατότητα απλής και οικονομικής αποθήκευσης της ενέργειας καθώς και η δυνατότητα περιορισμού αλλά και χρονικής κατανομής της ισχύος εξόδου τους, παρέχοντας ευελιξία στο Διαχειριστή του Συστήματος.

## 2.2 Οικονομοτεχνική προσέγγιση της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής

Βέβαια, κανένα από τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της ηλιοθερμικής τεχνολογίας δεν θα έχει ιδιαίτερη σημασία εάν αφενός το κόστος της είναι απαγορευτικό και αφετέρου δεν υπάρχει ένα κατάλληλο θεσμικό πλαίσιο που να ευνοεί αυτές τις επενδύσεις. Έτσι, είναι πολύ σημαντικό ότι το κόστος ηλεκτροπαραγωγής για την τεχνολογία αυτή βαίνει μειούμενο. Σύμφωνα με προβλέψεις, το γεγονός αυτό θα καταστήσει σύντομα την ηλιοθερμική τεχνολογία ανταγωνιστική σε επίπεδο κόστους, με τους μεσαίου μεγέθους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς φυσικού αερίου [6]. Ορισμένοι παράγοντες που συμβάλλουν στη μείωση του κόστους είναι η αύξηση του μεγέθους των σταθμών, η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα, ο αυξημένος ανταγωνισμός στην αγορά και ο μεγάλος όγκος παραγωγής

των διαφόρων εξαρτημάτων των σταθμών. Αυτό όμως που έδωσε ώθηση για επενδύσεις στην ηλιοθερμική τεχνολογία τα τελευταία χρόνια είναι τα επενδυτικά και φορολογικά κίνητρα από τις κυβερνήσεις σε συνδυασμό με ένα σταθερό και μακρόπνοο θεσμικό πλαίσιο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η κυβέρνηση της Ισπανίας η οποία από το 2004 θέσπισε μια υψηλή εγγυημένη τιμή αγοράς για την ηλεκτρική ενέργεια από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με αποτέλεσμα να γίνουν μεγάλες επενδύσεις και ήδη μέσα σε δύο χρόνια αρκετοί σταθμοί βρίσκονταν υπό κατασκευή. Προκειμένου όλες οι χώρες της «ηλιακής ζώνης» να εκμεταλλευτούν το ηλιακό δυναμικό τους θα πρέπει οι κυβερνήσεις τους να πάρουν μια σειρά από μέτρα για να προσελκύσουν επενδύσεις και να καταστήσουν τους ηλιοθερμικούς σταθμούς οικονομικά βιώσιμους. Ιδιαίτερης σημασίας είναι να θέσουν έναν εθνικό στόχο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιοθερμικούς σταθμούς και να θεσπίσουν μια ικανοποιητική εγγυημένη τιμή αγοράς. Αν συμβούν τα παραπάνω θα υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες η ηλιοθερμική τεχνολογία να εκμεταλλευτεί την προοπτική της.

### *2.2.1 Υφιστάμενο Θεσμικό Πλαίσιο στην Ελλάδα*

Στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μία συνεχής αύξηση του ενδιαφέροντος για επενδύσεις στον τομέα των ηλιοθερμικών σταθμών, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αυξημένη τιμή πώλησης της ενέργειας που προέρχεται από αυτούς, όπως ορίστηκε από τον Ν.3468/27.06.2006. Ειδικότερα, σύμφωνα με τον νόμο αυτόν κάθε παραγόμενη MWh από ηλιοθερμικούς σταθμούς τιμολογούνταν προς 230 ευρώ, εάν ο σταθμός είχε ισχύ μεγαλύτερη των 5 MW και βρισκόταν στο ηπειρωτικό σύστημα, και προς 250 ευρώ εάν ήταν εγκατεστημένος σε Μη Διασυνδεδεμένο Νησί. Σε περίπτωση που η ισχύς του σταθμού ήταν μικρότερη των 5 MW, οι αντίστοιχες τιμές ήταν 250 και 270 ευρώ/MWh. Ο Ν.3468/27.06.2006 όμως δεν έδινε σαφές δικαίωμα στους ηλιοθερμικούς σταθμούς να παράγουν ενέργεια από συμβατικά καύσιμα, όπως ίσχυε σε άλλες χώρες (π.χ. Ισπανία). Επιπλέον, σύμφωνα με το Άρθρο 25 του ίδιου νόμου οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιβαρύνονται, από την έναρξη της εμπορικής τους λειτουργίας, με ειδικό τέλος. Το τέλος αυτό αντιστοιχεί σε ποσοστό 3% επί της, προ Φ.Π.Α., τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στον Διαχειριστή του Συστήματος ή του Δικτύου ή των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών. Το ποσό αυτό αποδίδεται κατά κύριο λόγο στους Οργανισμούς Τοπικής Αυτοδιοίκησης (Ο.Τ.Α.). [7]

Σε αναθεώρηση του Ν.3468 ψηφίστηκε ο νόμος υπ' αριθμόν 3851/04.06.2010 με θέμα την «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής». Σύμφωνα με

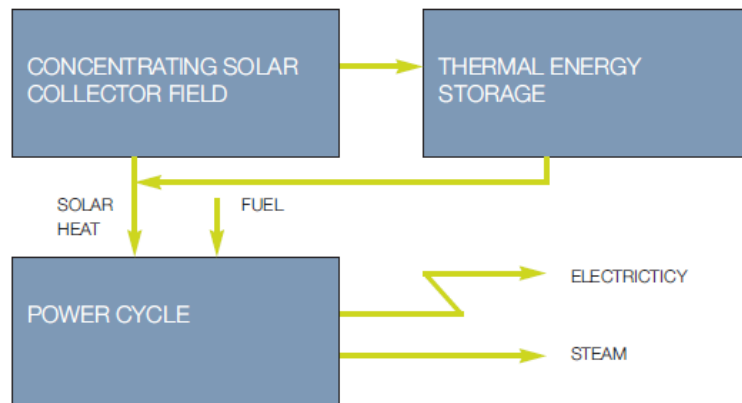
το νέο νόμο γίνεται διάκριση στην τιμολόγηση ηλιοθερμικού σταθμού με σύστημα αποθήκευσης και σταθμού χωρίς σύστημα αποθήκευσης, αποτιμώντας σε χρηματική αξία την ευελιξία που προσφέρει ένας ηλιοθερμικός σταθμός με αποθήκευση θερμότητας στο Διαχειριστή του Συστήματος εξαιτίας της δυνατότητας χρονικής κατανομής της παραγόμενης ισχύος. Η παραγόμενη ενέργεια από έναν ηλιοθερμικό σταθμό με σύστημα αποθήκευσης μικρότερο των 2 ωρών τιμολογείται προς 264,85 ευρώ/MWh, ανεξαρτήτως της περιοχής εγκατάστασης, ενώ για σταθμούς με σύστημα αποθήκευσης το οποίο εξασφαλίζει τουλάχιστον 2 ώρες λειτουργίας στο ονομαστικό φορτίο η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τιμολογείται προς 284,85 ευρώ/MWh. Η σύμβαση πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ισχύει για 25 έτη και μπορεί να παρατείνεται υπό προϋποθέσεις. Επίσης «επιτρέπεται στους ηλιοθερμικούς σταθμούς να χρησιμοποιούν και ενέργεια που προέρχεται από φυσικό αέριο, LPG, ντίζελ, βιοντίζελ ή άλλα βιοκαύσιμα, εφόσον η χρήση της ενέργειας αυτής κρίνεται αναγκαία για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Η χρησιμοποιούμενη ενέργεια που προέρχεται από φυσικό αέριο, LPG ή ντίζελ δεν μπορεί να υπερβαίνει το 15% επί της συνολικής ενέργειας που παράγεται σε ετήσια βάση, από τις μονάδες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Το όριο αυτό μπορεί να προσαυξάνεται κατά 5% εάν χρησιμοποιείται βιοντίζελ ή άλλα βιοκαύσιμα». Όσον αφορά το ειδικό τέλος που αποδίδεται στους Ο.Τ.Α. αυτό παραμένει όπως προβλεπόταν από το νόμο 3468/2006. [8]

Είναι αναμενόμενο ότι η αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από ηλιοθερμικούς σταθμούς, όπως αυτή καθορίστηκε από το νέο νόμο, καθώς και το δικαίωμα που δίνεται για καύση συμβατικού καυσίμου, θα οδηγήσει σε περαιτέρω αύξηση του ενδιαφέροντος και των επενδύσεων στον τομέα αυτό.

### *2.3 Ανασκόπηση των κύριων τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής*

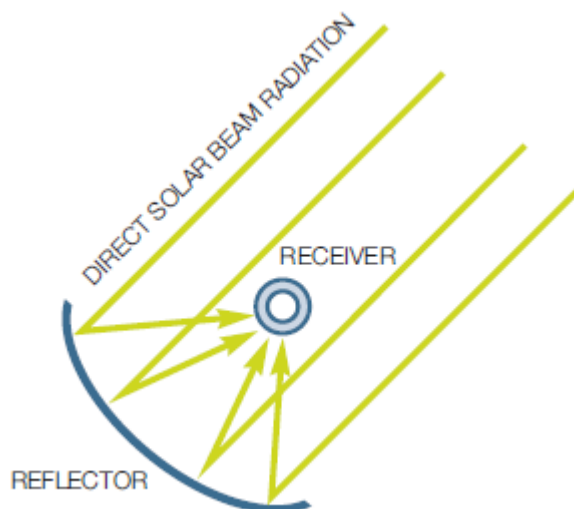
Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί λειτουργούν όπως και οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μόνη διαφορά την πρωτεύουσα πηγή θερμότητας, η οποία είναι η ενέργεια του ήλιου αντί για τη θερμότητα από την καύση κάποιου ορυκτού καυσίμου. Η λειτουργία των ηλιοθερμικών σταθμών είναι απλή. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται από καθρέπτες και αποδίδεται σε ένα κατάλληλο μέσο μεταφοράς θερμότητας όπως είναι το συνθετικό λάδι, το υγροποιημένο άλας, το μείγμα νερού-ατμού, ο αέρας κ.α. Τα μέσα αυτά οδηγούνται στη συνέχεια σε εναλλάκτες θερμότητας (εάν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται το μείγμα νερού-ατμού δεν παρεμβάλλεται εναλλάκτης)

αποδίδοντας την ενέργεια που έχει απορροφηθεί σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή υπέρθερμου, κορεσμένου ατμού. Στους υβριδικούς σταθμούς υπάρχει και η εφεδρεία του ορυκτού καυσίμου όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται με τις γνωστές, μέχρι τώρα μεθόδους, όπως για παράδειγμα με ατμοστρόβιλο, με αεριοστρόβιλο ή με κινητήρα κύκλου Stirling. Η ηλιακή θερμική ενέργεια που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί επίσης να αποδοθεί σε μονάδες αποθήκευσης θερμαίνοντας κατάλληλα υγρά ή στερεά μέσα όπως τηγμένα άλατα, κεραμικά, σκυρόδεμα ή μίγματα αλάτων εναλλασσόμενης φάσης. Τη νύχτα, αυτή η θερμότητα μπορεί να εξάγεται από το μέσο αποθήκευσης έτσι ώστε να συνεχίζεται η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού [3].



Σχήμα 2.3 Σχηματικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής [3]

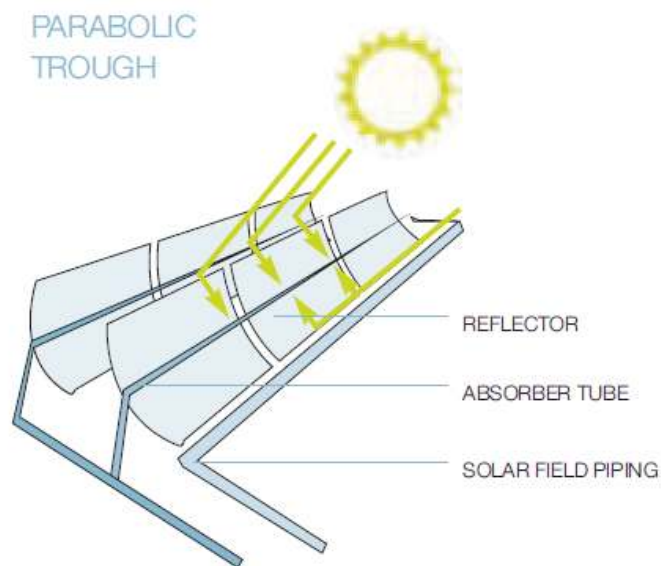
Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένα εστιακά σημεία όπου και αναπτύσσονται οι επιθυμητές υψηλές θερμοκρασίες (στη διπλανή εικόνα απεικονίζεται η συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από ένα συγκεντρωτικό κάτοπτρο [3]). Τα συστήματα συγκεντρωτικών κατόπτρων που χρησιμοποιούνται στους ηλιοθερμικούς σταθμούς είναι συστήματα είτε σημειακής είτε γραμμικής εστίασης. Τα συστήματα γραμμικής εστίασης συγκεντρώνουν την ακτινοβολία περίπου 100



φορές και επιτυγχάνουν θερμοκρασίες λειτουργίας μέχρι 550°C, ενώ τα συστήματα που εστιάζουν σε σημείο συγκεντρώνουν περισσότερο από 1000 φορές την ακτινοβολία με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται να ξεπερνούν τους 1000°C. Τέσσερις είναι οι επικρατούσες τεχνολογίες που παρουσιάζουν και εμπορικό ενδιαφέρον: τα κυλινδρο-παραβολικά κάτοπτρα και τα γραμμικά συστήματα Fresnel, που εφαρμόζουν γραμμική εστίαση καθώς και οι κεντρικοί δέκτες και οι παραβολικοί δίσκοι που εφαρμόζουν σημειακή εστίαση. Τα συστήματα με κεντρικό δέκτη ονομάζονται αλλιώς και ηλιακοί πύργοι [3].

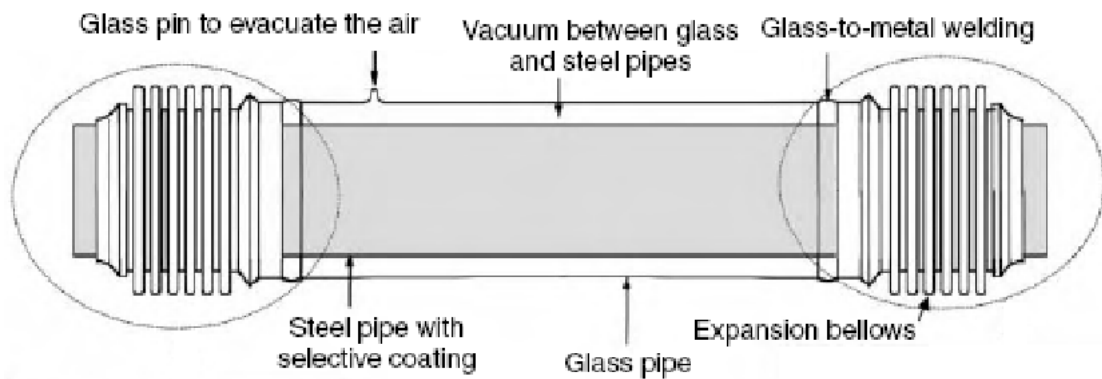
### 2.3.1 Τεχνολογία Παραβολικών Κατόπτρων (Parabolic Trough systems)

Αυτή είναι η πιο ώριμη από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες και αυτό αποδεικνύεται και από την εμπορική της εφαρμογή έως τώρα. Η συλλογή και η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιείται σε έναν υπαίθριο χώρο μεγάλης έκτασης που καλείται ηλιακό πεδίο. Το ηλιακό πεδίο αυτών των σταθμών αποτελείται από μακριές παράλληλες σειρές από πανομοιότυπα συγκε-



ντρωτικά στοιχεία, για τα οποία χρησιμοποιούνται κοίλα κάτοπτρα (όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα [3]). Οι σειρές των κατόπτρων στηρίζονται στο έδαφος μέσω ατσάλινων βάσεων ή βάσεων αλουμινίου. Στους εμπορικούς σταθμούς έως τώρα για την επιφάνεια των κατόπτρων χρησιμοποιείται κυρίως θερμοπλαστικό γυαλί πάχους 4mm, το οποίο είναι και αρκετά βαρύ αλλά και ακριβό. Σύγχρονες εφαρμογές σκοπεύουν να μειώσουν το βάρος και το κόστος χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές και υλικά όπως είναι το στιλβωμένο αλουμίνιο αντί για το γυαλί. Οι παράλληλες σειρές των κατόπτρων είναι διατεταγμένες με προσανατολισμό Βορρά-Νότου και περιστρέφονται ακολουθώντας την πορεία του ήλιου από Ανατολή προς Δύση. Τα παραβολικά κάτοπτρα συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία στους σωλήνες απορρόφησης (absorber tubes, βλ. και παραπάνω σχήμα), που αποτελούν τους δέκτες και βρίσκονται κατά μήκος της εστιακής ευθείας των καναλιών. Οι

δέκτες είναι σχεδιασμένοι ώστε να απορροφούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που εστιάζεται σε αυτούς. Για το σκοπό αυτό, οι σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από ατσάλι και έχουν μια ειδική μαύρη επίστρωση ενώ περιβάλλονται από προστατευτικό γυάλινο κυλινδρικό περίβλημα. Ο ενδιάμεσος χώρος είναι αερόκενος διότι το κενό αέρος μειώνει σημαντικά την απώλεια θερμότητας δια συναγωγής. Στο δέκτη γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται ο σωλήνας απορρόφησης και τα κύρια στοιχεία του.



**Σχήμα 2.4** Σωλήνας απορρόφησης [9]

Μια αντι-ανακλαστική επίστρωση μπορεί να προστεθεί στο γυάλινο περίβλημα για περαιτέρω αύξηση της απόδοσης του δέκτη.



Source: TU Ilmenau.

**Σχήμα 2.5** Σωλήνας από βοριοπυριτικό γυαλί χωρίς αντι-ανακλαστική επίστρωση (αριστερά) και με αντι-ανακλαστική επίστρωση (δεξιά)

Τα παραβολικά κανάλια είναι εφοδιασμένα με σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου από την ανατολή στη δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να εστιάζονται συνεχώς στο γραμμικό δέκτη. Η ημερήσια τροχιά του ήλιου θα πρέπει να είναι κάθετη στα παραβολικά κανάλια έτσι ώστε στρεφόμενα τα κάτοπτρα γύρω από τον άξονα του (νοητού) κυλίνδρου να διατηρούν την εστίαση στο δέκτη. Οι εποχιακές αλλαγές της γωνίας της ηλιακής ακτινοβολίας παράλληλα με το κανάλι δεν απαιτεί ιχνηλάτηση, διότι απλά η συγκέντρωση της ακτινοβολίας θα μετατοπίζεται κατά μήκος του δέκτη. Για το λόγο αυτό η σχεδίαση με παραβολικά κανάλια δεν απαιτεί σύστημα παρακολούθησης με δεύτερο άξονα [10].

Σε αυτούς τους σταθμούς, επιτυγχάνεται συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από 70 έως 100 φορές στους σωλήνες απορρόφησης, όπου και αναπτύσσονται θερμοκρασίες μεταξύ 350 και 550 °C. Στους δέκτες αλλά και σε ένα γενικευμένο δίκτυο σωληνώσεων κυκλοφορεί ένα θερμοαγωγό υγρό (heat transfer fluid-HTF) το οποίο απορροφά τη θερμότητα, τη μεταφέρει με τη βοήθεια αντλιών, και την αποδίδει μέσα από εναλλάκτες θερμότητας στο θερμοδυναμικό κύκλο λειτουργίας ενός τυπικού ατμοστρόβιλου. Κατά τη λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού, το συνθετικό έλαιο εισέρχεται συνήθως στο ηλιακό πεδίο με θερμοκρασία τάξεως 290°C και εξέρχεται από αυτό σε θερμοκρασία που αγγίζει τους 390°C. Στη συνέχεια το ψυγμένο πλέον θερμοαγωγό υγρό επανακυκλοφορεί στο δίκτυο σωληνώσεων του ηλιακού πεδίου. Στο θερμοδυναμικό κύκλο, η απορροφημένη θερμότητα αποδίδεται σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή υπέρθερμου ατμού σε υψηλή πίεση. Ο υπέρθερμος ατμός (πίεσης 90-100 bar και θερμοκρασίας 370-375°C) εκτονώνεται σε στροβιλογεννήτρια προς παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας και στη συνέχεια συμπυκνώνεται μέσω κατάλληλων συστημάτων ψύξης, οδηγούμενος εκ νέου στους εναλλάκτες (κύκλος Rankine). Το σύστημα ψύξης τέτοιων σταθμών μπορεί να είναι είτε υδρόψυκτο με την κατασκευή πύργου ψύξης είτε αερόψυκτο με τη χρήση ανεμιστήρων [3],[5],[11]-[13].

Σε περίπτωση που ο ηλιοθερμικός σταθμός διαθέτει και μονάδα αποθήκευσης, τότε το μέσο μεταφοράς της θερμότητας, μέσω εναλλακτών (εάν απαιτούνται), μπορεί να αποδώσει την απορροφηθείσα θερμική ενέργεια στο μέσο αποθήκευσης, όπως είναι στις περισσότερες εφαρμογές το υγροποιημένο άλας.

Στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων ως μέσο μεταφοράς θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνθετικό έλαιο, μείγμα νερού-ατμού, υγροποιημένο άλας κ.α. Μέχρι σήμερα στην πλειονότητα των περιπτώσεων χρησιμοποιείται κατάλληλο συνθετικό έλαιο με μεγάλη αγωγιμότητα της θερμότητας. Το συνθετικό έλαιο μπορεί να θερμανθεί ασφαλώς μέχρι τους 400°C. Αυτή η μέγιστη θερμοκρασία θέτει ένα όριο στην απόδοση μετατροπής του κύκλου λειτουργίας του στροβίλου, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της θερμής πηγής. Για θερμοκρασίες του θερμοαγωγού υγρού μέχρι 600°C χρησιμοποιείται ο

ατμοστρόβιλος με απόδοση που φτάνει μέχρι και το 41% ενώ για υψηλότερες θερμοκρασίες ο αεριοστρόβιλος μπορεί να είναι πιο αποδοτικός [14]. Έτσι, για αύξηση της απόδοσης, η βιομηχανία επενδύει στην έρευνα για προηγμένα θερμαγωγά υγρά. Κάποιες εναλλακτικές προτάσεις είναι η άμεση παραγωγή ατμού μέσα στους σωλήνες απορρόφησης καθώς και η χρήση τηγμένου άλατος ως ρευστό λειτουργίας (working fluid). Η χρήση τηγμένου άλατος επιτρέπει μεγαλύτερη απόδοση του κύκλου λειτουργίας σε σχέση με το συνθετικό έλαιο καθώς η δική του μέγιστη θερμοκρασία ασφαλείας φτάνει τους 560 °C. Από την άλλη, η άμεση παραγωγή ατμού (συστήματα DSG-Direct Steam Generation) μέσα στους σωλήνες απορρόφησης του ηλιακού πεδίου εξαλείφει την ανάγκη ύπαρξης των θερμικών εναλλακτών, καθώς ο παραγόμενος ατμός οδηγείται απευθείας στον ατμοστρόβιλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους του σταθμού καθώς και την αύξηση της απόδοσής του κατά 15-20% κυρίως διότι παρακάμπτονται οι απώλειες των εναλλακτών. Από την άλλη όμως απαιτούνται αυστηρότερες τεχνικές προδιαγραφές έτσι ώστε να ελεγχθεί η ποιότητα του παραγόμενου και μεταφερόμενου ατμού κατά μήκος του δικτύου σωληνώσεων του σταθμού. Οι παραπάνω εναλλακτικές προτάσεις έχουν ήδη υιοθετηθεί κυρίως από πειραματικούς σταθμούς που βρίσκονται υπό κατασκευή [3].

Στους σταθμούς αυτούς συνηθίζεται, εκτός της εγκατάστασης μονάδας αποθήκευσης, η εγκατάσταση συμβατικού λέβητα που βοηθά την ομαλή λειτουργία του σταθμού. Ειδικότερα ο λέβητας αυτός επιτρέπει:

- τη βελτίωση της απόδοσης του σταθμού και την επέκταση της λειτουργίας του ακόμη και μετά τη δύση του ήλιου,
- τη διατήρηση της συνεχούς και ομαλής λειτουργίας του σταθμού σε μικρές περιόδους συννεφιάς ή υψηλών ταχυτήτων ανέμου,
- στον ηλιοθερμικό σταθμό να αποδίδει την ονομαστική του ισχύ σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα τις πρώτες πρωινές ώρες, και
- να διατηρείται η λειτουργικότητα των συστημάτων που συνθέτουν τον σταθμό σε περίοδο του έτους που θα μπορούσε να ήταν καταστροφικές για αυτά, όπως είναι οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ιδίως κατά την περίοδο του χειμώνα, με κίνδυνο καταστροφής του συνθετικού ελαίου (Heat Transfer Fluid) ή των υγροποιημένων αλάτων των δεξαμενών αποθήκευσης. [46][99]

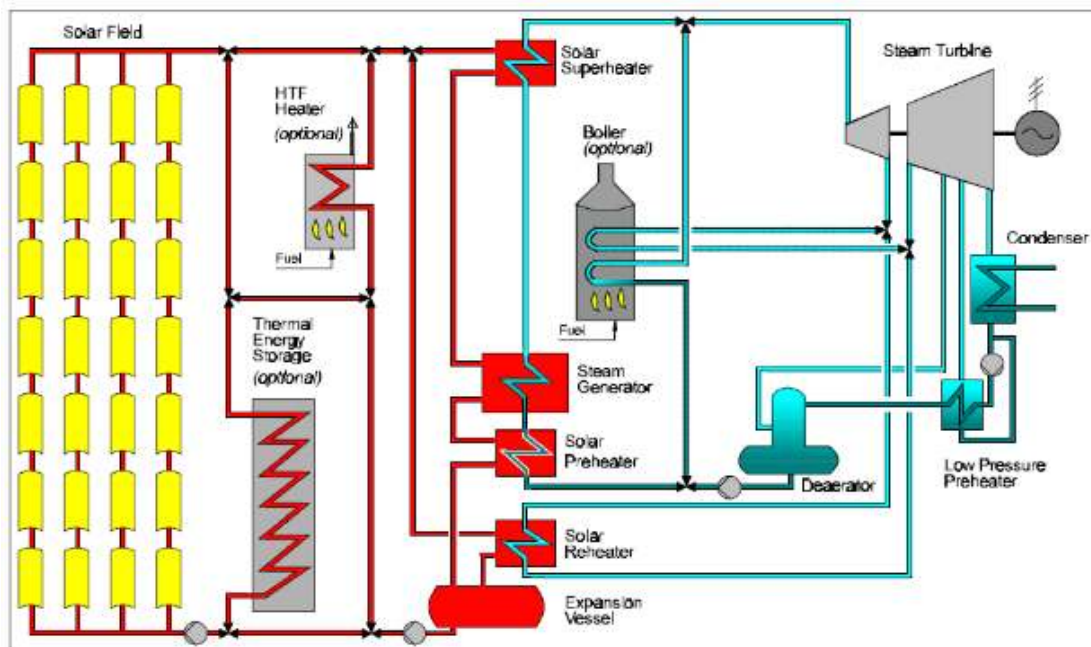
Πρέπει να σημειωθεί ότι σήμερα έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν ηλιοθερμικοί σταθμοί παραβολικών κατόπτρων (Μαρόκο, Αλγερία, Αίγυπτος) που χρησιμοποιούν τον συμβατικό λέβητα για παραγωγή ατμού, συμπληρωματικά με το ηλιακό πεδίο. Σε αυτούς τους σταθμούς (*Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS)*) ο συμβατικός λέβητας έχει ικανότητα παραγωγής ατμού συγκρίσιμη με αυτή που προέρχεται από το ηλιακό πεδίο και παίζει ρόλο κύριας και όχι συμπληρωματικής λειτουργίας. Ένας τέτοιος σταθμός εκμεταλλεύεται το συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου και ατμοστρόβιλου. Η καύση φυσικού αερίου τροφοδοτεί τον αεριοστρόβιλο ενώ η απαγόμενη θερμότητα στην έξοδο του



αεριοστροβίλου μαζί με τη συλλεγόμενη θερμική ισχύ από το ηλιακό πεδίο παράγουν ατμό που τροφοδοτεί τον ατμοστρόβιλο ([3],[5],[11]-[13],[15]-[17]).

Βοηθητικός καυστήρας μικρότερης ισχύος εγκαθίσταται συνήθως και στον κύκλο ισχύος του ηλιοθερμικού σταθμού έτσι ώστε να λειτουργήσει σε περίπτωση βλάβης του κεντρικού θερμικού εναλλάκτη ελαίου-νερού για μην διακοπεί απότομα η λειτουργία της γεννήτριας.

Στο σχηματικό διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται ο κύκλος λειτουργίας ενός ηλιοθερμικού σταθμού με παραβολικά κάτοπτρα εφοδιασμένου με (προαιρετικό) σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και (προαιρετικούς) βοηθητικούς καυστήρες συμβατικού καυσίμου.



**Σχήμα 2.6** Γενικό λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων Πηγή: ECOSTAR [9]

Οι απαιτούμενες εκτάσεις γης για την εγκατάσταση των σταθμών παραβολικών κατόπτρων κυμαίνονται περίπου από 18-40 m<sup>2</sup>/kW και εξαρτώνται από την ένταση της άμεσης ακτινοβολίας στο χώρο εγκατάστασης του ηλιοθερμικού σταθμού, αλλά και από το μέγεθος της αποθήκης που θα επιλεγεί να εγκατασταθεί. Εάν εγκατασταθεί μονάδα αποθήκευσης, το ηλιακό πεδίο υπερδιαστασιολογείται ώστε η μονάδα αποθήκευσης να «φορτίζεται» όταν ο σταθμός λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ [13].

Η πλειονότητα των εν λειτουργία ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής έχει υιοθετήσει την τεχνολογία των παραβολικών κατόπτρων για διάφορους λόγους. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αυτού του είδους των σταθμών παγκοσμίως ξεπερνάει το 1GW το έτος 2011 [18]. Πρόκειται για συστήματα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο τα οποία παράγουν ηλεκτρική ισχύ μεγάλης κλίμακας. Από το 1984 ως το 1991, στη νότια Καλιφόρνια, κατασκευάστηκαν και διασυνδέθηκαν στο δίκτυο εννέα σταθμοί (SEGS) αυτού του τύπου, που ήταν και οι πρώτοι εμπορικοί ηλιοθερμικοί σταθμοί μεγάλης κλίμακας. Το SEGS (Solar Energy Generating System) είναι ένα σύμπλεγμα εννέα σταθμών με συνολική ισχύ εξόδου 354 MW. Αποτελεί προς το παρόν το μεγαλύτερο σύστημα ηλιακής ενέργειας γενικότερα. Το ηλιακό πεδίο ολόκληρου του συστήματος SEGS περιλαμβάνει πάνω από 2 εκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα επιφάνειας παραβολικών κατόπτρων ενώ όλο το SEGS εκτείνεται σε πάνω από 6.400 στρέμματα γης. Μετά από αρκετά χρόνια η κατασκευή νέων σταθμών συνεχίστηκε με το έργο Nevada Solar One της εταιρείας Acciona στην κοιλάδα El Dorado στη Νεβάδα των ΗΠΑ. Ο σταθμός αυτός με παραβολικά κάτοπτρα, ο οποίος ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2007, έχει εγκατεστημένη ονομαστική ισχύ 64 MW και παράγει περίπου 130 GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως, με ένα συντελεστή χρησιμοποίησης περίπου 23%. Ο σταθμός είναι εφοδιασμένος με βοηθητικό συμβατικό λέβητα. Η συνολική επιφάνεια των κατόπτρων του φτάνει τις 357.000 τ.μ. ενώ ο σταθμός καταλαμβάνει 1.600 στρέμματα γης [3],[6],[13].

Το πρώτο σύστημα αυτού του τύπου στην Ευρώπη είναι το Andasol Solar Power Station στην επαρχία της Granada, στην Ανδαλουσία της Ισπανίας. Η γερμανική εταιρεία Solar Millennium έχει ολοκληρώσει την κατασκευή δύο όμοιων σταθμών μεγέθους 50 MW ο καθένας, με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας 7.5 ωρών σε μείγμα τηγμένων αλάτων. Ο Andasol 1 συνδέθηκε στο δίκτυο το 2008, ο Andasol 2 το 2009. Ένας παρόμοιος σταθμός, ο Andasol 3 έχει σχεδόν ολοκληρωθεί και υπολογίζεται να συνδεθεί με το δίκτυο μέσα στο 2011. Το ηλιακό πεδίο καθενός σταθμού απαρτίζεται από 624 συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων διατεταγμένων σε 156 βρόχους με συνολική επιφάνεια κατόπτρων 510.120 τ.μ. Κάθε σταθμός καταλαμβάνει 2000 στρέμματα γης. Ο σταθμός Andasol 1 εκτιμάται ότι έχει μια ετήσια ηλεκτρική παραγωγή 179GWh. Επίσης είναι ο πρώτος σταθμός ο οποίος περιλαμβάνει δύο δεξαμενές αποθήκευσης τηγμένων αλάτων για αποθήκευση θερμότητας [11],[13],[19].

Εντός του 2009 ξεκίνησε η λειτουργία άλλων δύο σταθμών στην Ισπανία. Ο σταθμός Ibersol Ciudad Real μεγέθους 50MW κατασκευάστηκε από την εταιρεία Iberdrola Renovables στο Puertollano της Ισπανίας και ξεκίνησε τη λειτουργία του το Μάιο του 2009. Διαθέτει 576 συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων διατεταγμένους σε 216 βρόχους των 4 συλλεκτών. Ο σταθμός περιλαμβάνει σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας σε δύο δεξαμενές τηγμένων αλάτων [13],[18]. Επιπλέον, ο σταθμός Alvarado 1 μεγέθους 50MW κατασκευάστηκε στην Extremadura της Ισπανίας από την ισπανική εταιρεία Acciona, η οποία κατασκεύασε και το σταθμό Nevada Solar

One στις ΗΠΑ. Ο Alvarado 1 χρησιμοποιεί την ίδια τεχνολογία με τον Nevada One, καλύπτει 1300 στρέμματα γης, διαθέτει 184.320 τμήματα κατόπτρων (modules) στοιχισμένα σε σειρές ενώ η κατασκευή του ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2009 [18],[20].

Το 2010 ολοκληρώθηκε η κατασκευή ενός ακόμη μεγάλου έργου στην Ισπανία, του ηλιοθερμικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής Solnova. Αποτελείται από τρεις σταθμούς (Solnova 1, 3 και 4) μεγέθους 50MW έκαστος και βρίσκεται στην τοποθεσία Sanlucar de Mayor στη Σεβίλλη. Στους σταθμούς αυτούς έχει προβλεφθεί αυξημένος χώρος μεταξύ των παράλληλων σειρών των κατόπτρων έτσι ώστε να μειωθούν οι απώλειες λόγω σκίασης και να διευκολυνθεί η λειτουργία και η συντήρηση. Η συνολική επιφάνεια κατόπτρων του Solnova 1 είναι 260.000 τ.μ. και η συνολική έκταση γης που καταλαμβάνει είναι 1200 στρέμματα. Ο Solnova 1 δύναται να παράγει περίπου 115GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως με συνολική απόδοση του σταθμού στο 19% περίπου. Σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας, συμμετέχει στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ κατά 12-15% ένας βοηθητικός λέβητας φυσικού αερίου [13],[20],[21].

Εντός του 2010 ολοκληρώθηκε η κατασκευή πλήθους ηλιοθερμικών σταθμών παραβολικών κατόπτρων στην Ισπανία φανερώνοντας τόσο την ανάπτυξη και ωρίμανση της συγκεκριμένης τεχνολογίας όσο και την κατεύθυνση της Ισπανικής κυβέρνησης προς μια στρατηγική ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και επένδυσης πάνω στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Τέτοιοι σταθμοί είναι ο Extresol Solar Power Station (Extresol 1&2) μεγέθους 100MW καθώς και οι σταθμοί Central Solar Termoelectrica La Dehesa, Central Solar Termoelectrica La Florida, PL. Termoelectrica de Palma del Rio II και Termoelectrica de Majadas όλοι μεγέθους 50MW [18],[22].

Επιπλέον, ήδη λειτουργούν και ορισμένοι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου (ISCC). Ο μεγαλύτερος από αυτούς είναι και ο μοναδικός στις ΗΠΑ και έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Florida Power & Light Company. Ο σταθμός Martin Next Generation Solar Energy Center, ισχύος 75MW, που βρίσκεται στη Φλόριδα των ΗΠΑ αποτελεί τμήμα του συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού φυσικού αερίου Martin County Power Plant, ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος θερμοηλεκτρικός σταθμός των ΗΠΑ με εγκατεστημένη ισχύ 3705MW. Η συλλεγόμενη θερμότητα διοχετεύεται στον υπάρχοντα ατμοηλεκτρικό σταθμό και έχει δυνατότητα συμμετοχής στην τελική παραγωγή ως και 18MW ηλεκτρικής ισχύος. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται σε λειτουργία από το Νοέμβριο του 2010 [23]. Άλλοι δύο παρόμοιοι σταθμοί στο Μαρόκο και την Αίγυπτο οι οποίοι βρίσκονται σε λειτουργία είναι, αντίστοιχα, οι σταθμοί Beni Mathar Plant και Kuraymat Plant, ισχύος 20MW και οι δύο [18],[22].

Ακόμη περισσότεροι σταθμοί βρίσκονται υπό κατασκευή, με την Ισπανία και τις ΗΠΑ να διατηρούν την πρωτοκαθεδρία στο χώρο. Πάνω από 20 σταθμοί αυτού του

τύπου είναι υπό κατασκευή στην Ισπανία, ενδεικτικό των τάσεων που δημιουργήσε στην αγορά η θέσπιση υψηλής εγγυημένης τιμής αγοράς της ενέργειας από αυτούς τους σταθμούς, από την Ισπανική κυβέρνηση. Στη μεγάλη πλειοψηφία τους οι νέοι σταθμοί θα είναι ισχύος 50MW [18]. Από τα τέλη του 2010 έχουν ξεκινήσει οι εργασίες για την κατασκευή του μεγαλύτερου ηλιακού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, του Blythe Solar Power Plant. Το έργο αυτό, που κατασκευάζεται από την εταιρεία Solar Trust of America στην κομητεία του Riverside στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, θα αποτελείται από τέσσερις σταθμούς ισχύος 242MW έκαστος, με συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 968MW. Εκτιμάται ότι τα έργα θα διαρκέσουν έξι χρόνια ενώ ο σταθμός θα καλύπτει μια συνολική έκταση 28000 στρεμμάτων [20],[24],[25]. Ένας δεύτερος μεγάλος ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων που βρίσκεται υπό κατασκευή στις ΗΠΑ είναι ο σταθμός Solana της εταιρείας Abengoa με μέγεθος 280 MW. Θα κατασκευαστεί στην Αριζόνα των ΗΠΑ και υπολογίζεται να ξεκινήσει τη λειτουργία του το 2012. Επιπλέον, δύο ακόμη σταθμοί τεχνολογίας ISCC βρίσκονται υπό κατασκευή σε Αλγερία και Σαουδική Αραβία. Συνολικά, πάνω από 2 GW εγκατεστημένης ισχύος τέτοιων σταθμών είναι υπό κατασκευή ενώ μελέτες για περισσότερα από 15 GW έχουν ανακοινωθεί παγκοσμίως [18].



Sources: SMI, 2010.

**Σχήμα 2.7** Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παραβολικών κατόπτρων Andasol 1 (μπροστά) και Andasol 2 (πίσω) στην Ισπανία. Ο σταθμός παραγωγής ισχύος και το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας βρίσκονται στο κέντρο καθενός ηλιακού πεδίου [26]

Τα πλεονεκτήματα εγκατάστασης ενός σταθμού παραβολικών κατόπτρων είναι:

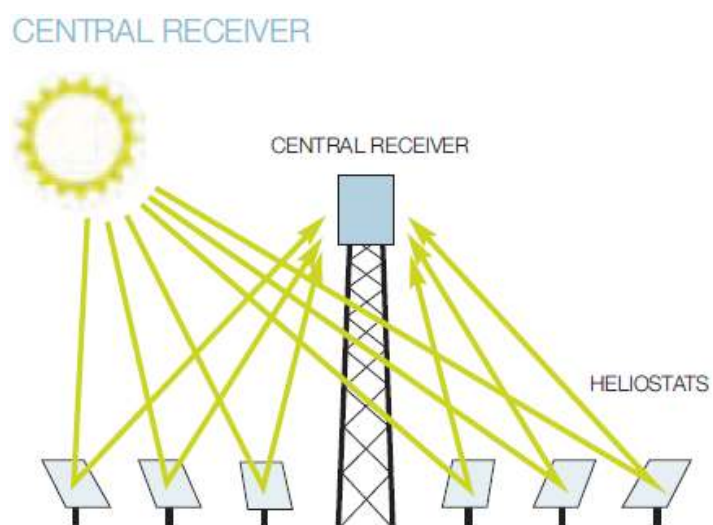
- Το μέγεθος των σταθμών αυτών είναι στην πλειονότητα των περιπτώσεων μεγαλύτερο των 40 MW, με τον μεγαλύτερο σταθμό σε λειτουργία να είναι της τάξεως των 80 MW.
- Έχουν μεγάλο αριθμό ωρών εμπορικής λειτουργίας με παραγωγή περισσότερων των 12.000 GWh.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας τους μπορεί να προσεγγίσει τους 500°C (οι σταθμοί που είναι σε εμπορική λειτουργία λειτουργούν σε θερμοκρασίες τάξεως 400°C).
- Αποδεδειγμένη ετήσια απόδοση τάξεως 14%-16% (καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς ηλιακή ενέργεια).
- Εμφανίζουν ικανοποιητικό βαθμό χρήσης γης, εν συγκρίσει με τις άλλες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής.
- Δίνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας.
- Υπάρχουν αποδεδειγμένα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας. [46]

Τα μειονεκτήματα ενός σταθμού παραβολικών κατόπτρων είναι:

- Η μέχρι σήμερα εμπορική λειτουργία σταθμών που χρησιμοποιούν συνθετικό έλαιο με θερμοκρασία που αγγίζει τους 400 °C οδηγεί σε παραγωγή ατμού «μέτριας» ποιότητας.
- Το υψηλό κόστος εγκατάστασης. [46]

### 2.3.2 Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου ή Κεντρικού Δέκτη (Power Tower/Central Receiver systems)

Το ηλιακό πεδίο των ηλιοθερμικών σταθμών τεχνολογίας ηλιακού πύργου ή αλλιώς κεντρικού δέκτη αποτελείται από μεμονωμένα μεγάλα κάτοπτρα, που ονομάζονται ηλιοστάτες, σε κυκλική διάταξη. Οι ηλιοστάτες, των οποίων η επιφάνεια μπορεί να ξεπερνάει ακόμη και τα 100 τ.μ., ανακλούν τις ηλιακές ακτίνες σε έναν κεντρικό



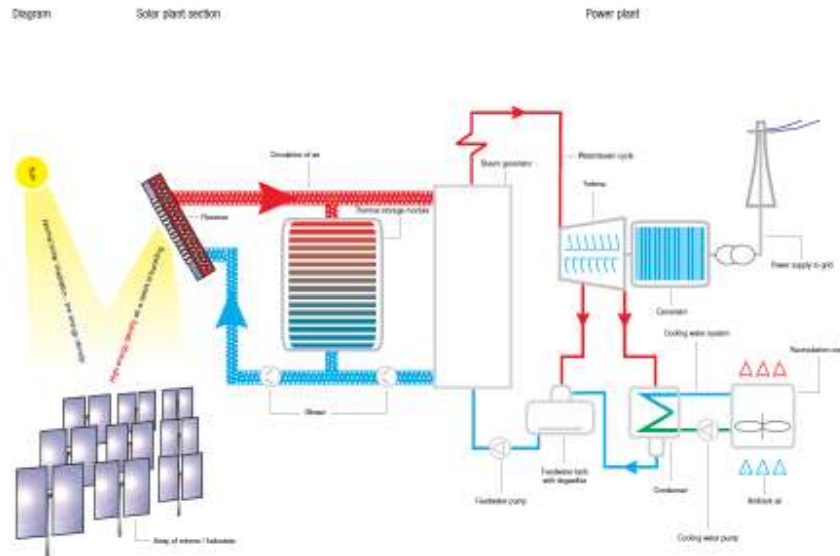
δέκτη που είναι ενσωματωμένος στην κορυφή ενός πύργου (όπως φαίνεται στην πλαϊνή εικόνα [3]). Το ύψος του κεντρικού πύργου μπορεί να προσεγγίσει ακόμη και τα 200 μ. ανάλογα με το μέγεθος του σταθμού. Ο κάθε ηλιοστάτης είναι εφοδιασμένος με σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου δύο αξόνων. Η θερμική ενέργεια που συγκεντρώνεται στον κεντρικό δέκτη αποδίδεται στο μέσο μεταφοράς θερμότητας, κατά τρόπο αντίστοιχο με το σταθμό παραβολικών κατόπτρων. Η ηλιακή ενέργεια απορροφάται υπό μορφή θερμότητας από το ρευστό ή το αέριο λειτουργίας και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού ο οποίος κινεί ένα συμβατικό στρόβιλο. Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί υγροποιημένο άλας, αέρας κ.α., ενώ σε περίπτωση χρήσης νερού-ατμού δεν χρησιμοποιούνται εναλλάκτες, αλλά ο παραγόμενος ατμός από τον συλλέκτη οδηγείται απ' ευθείας στον στρόβιλο. Στην τεχνολογία ηλιακού πύργου μπορούν να επιτευχθούν πολύ υψηλές τιμές συγκέντρωσης ακτινοβολίας, μέχρι και 600 έως 1000 φορές, και ως εκ τούτου υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που επιτυγχάνονται στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων. Αυτό οφείλεται στο ότι ως μέσο μεταφοράς θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί υγροποιημένο άλας ή αέρας, σε αντίθεση με το συνθετικό έλαιο των σταθμών παραβολικών κατόπτρων, που έχει ανώτερη θερμοκρασία λειτουργίας τους 400°C, περιορίζοντας έτσι την ποιότητα του παραγόμενου ατμού. Η θερμοκρασία που μπορεί να αποδοθεί στο μέσο μεταφοράς θερμότητας έχει αποδειχτεί από σταθμούς σε εμπορική λειτουργία ότι μπορεί να προσεγγίσει τους 565°C, ενώ πειραματικά έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να αγγίξει ακόμη και τους 1000°C. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που είναι διαθέσιμες στους ηλιακούς πύργους, αυτοί οι σταθμοί μπορούν να συνδυαστούν εκτός από αμοστρόβιλο, και με αεριοστρόβιλο αλλά και με σύστημα συνδυασμένου κύκλου. Αν, για παράδειγμα, χρησιμοποιηθεί πεπιεσμένο αέριο πολύ υψηλής θερμοκρασίας περίπου 1000°C ή περισσότερο ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας, τότε μπορεί να αντικαταστήσει άμεσα το φυσικό αέριο σε έναν αεριοστρόβιλο, κάνοντας χρήση του εξαιρετικού συνδυασμένου κύκλου αερίου και ατμού (απόδοση της τάξης του 60%). Τέτοιοι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου μπορούν να επιτύχουν απόδοση από ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια μέχρι και 35% στην αιχμή και μέχρι 25% ετησίως. Με πάνω από 15 χρόνια πειραμάτων παγκοσμίως, έχει αποδειχθεί ότι τέτοιοι ηλιοθερμικοί σταθμοί με διαφορετικά μέσα μεταφοράς της θερμότητας και με διαφορετικά είδη σχεδίασης ηλιοστατών είναι τεχνικά εφικτοί [3],[5],[14],[17],[27-29].

Επιπλέον, στους σταθμούς ηλιακού πύργου, όπως και στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων, εγκαθίστανται συνήθως συμβατικοί λέβητες και συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας ανάλογα πλεονεκτήματα στη λειτουργία τους όπως περιγράφηκαν παραπάνω για τους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων.

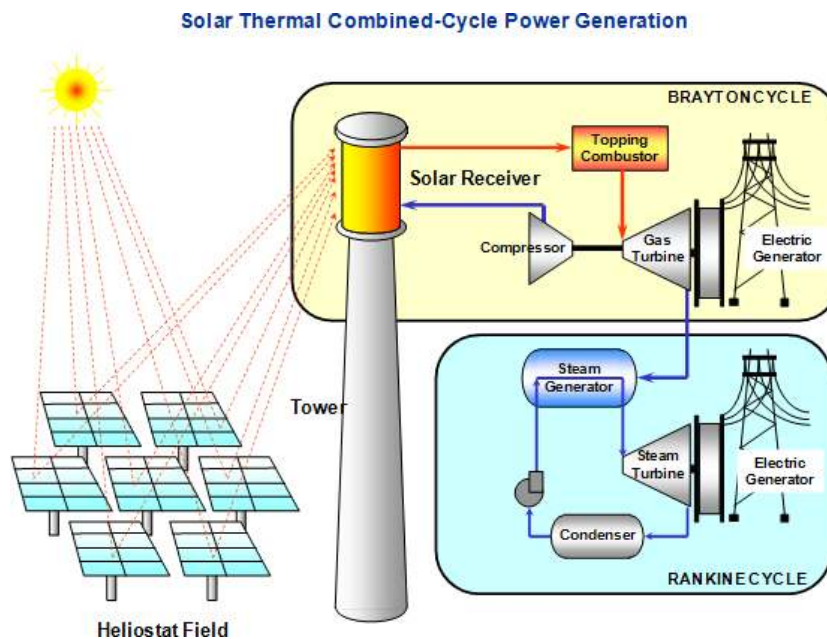
Σε ένα τέτοιο σταθμό ηλιακού πύργου, ο συντελεστής χρησιμοποίησης, για δεδομένη ισχύ στροβίλου, μπορεί να μεταβληθεί με τις ακόλουθες εργασίες:

- α. με αύξηση του αριθμού των ηλιοστατών,
- β. με αύξηση του μεγέθους των δεξαμενών αποθήκευσης,
- γ. με αύξηση του ύψους του ηλιακού πύργου,
- δ. με αύξηση των διαστάσεων του κεντρικού συλλέκτη. [27]

Παρακάτω παρουσιάζονται τα λειτουργικά διαγράμματα ηλιοθερμικών σταθμών με ηλιακό πύργο, ενός με ατμοστρόβιλο κι ενός με συνδυασμένο κύκλο αερίου ατμού (συνδυασμός κύκλων Brayton και Rankine).



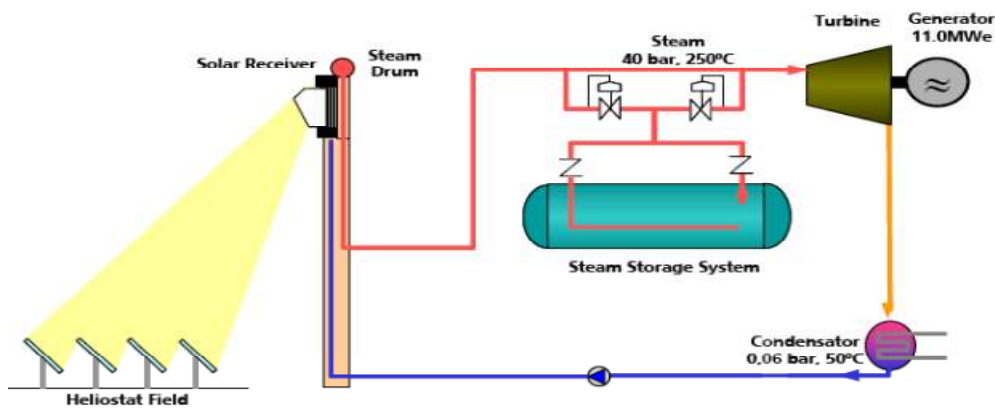
Σχήμα 2.8 Γενικό λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού κεντρικού δέκτη με κύκλο Rankine [30]



Σχήμα 2.9 Λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού κεντρικού δέκτη με συνδυασμένο κύκλο Brayton-Rankine [31]

Ακολούθως περιγράφεται η λειτουργία του σταθμού ηλιακού πύργου σε περίπτωση χρήσης υγροποιημένου άλατος και μείγματος νερού-ατμού ως μέσου μεταφοράς θερμότητας.

**Χρήση μείγματος νερού-ατμού ως μέσου μεταφοράς θερμότητας.** Το PS10 στην Ισπανία είναι ένας σταθμός ηλιακού πύργου που λειτουργεί με απ' ευθείας παραγωγή κορεσμένου ατμού στον κεντρικό δέκτη του πύργου, χωρίς την παρεμβολή θερμικών εναλλακτών. Ο ατμός που παράγεται έχει θερμοκρασία 250°C και πίεση 40 bar και μετά τον κεντρικό δέκτη οδηγείται στη στροβιλογεννήτρια του σταθμού προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



**Σχήμα 2.10** Ηλιοθερμικός Σταθμός Τεχνολογίας Πύργου (μείγμα νερού-ατμού ως μέσο μεταφοράς θερμότητας) [28][29]

Το PS10 έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης του πλεονάζοντος ατμού σε δεξαμενές πεπιεσμένου ατμού για επιπλέον λειτουργία 1-2 ωρών (όχι σε πλήρες φορτίο), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο διαχειριστή του σταθμού να διατηρεί σταθερή την ηλεκτρική παραγωγή του ακόμη και σε περιόδους συννεφιάς, αλλά και να προστατεύει τη λειτουργικότητα του στροβίλου και των άλλων συστημάτων του σταθμού.

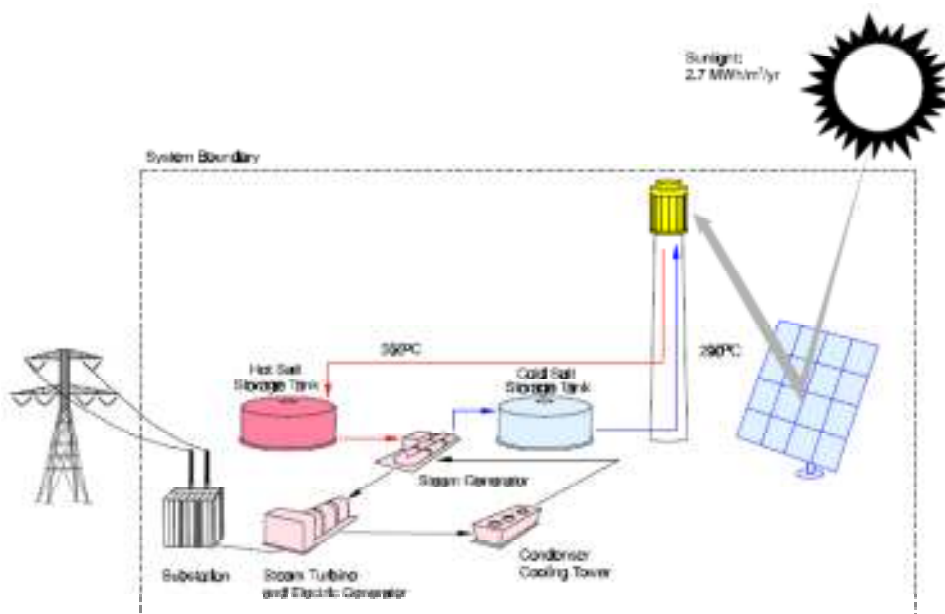
Η απόδοση ενός ηλιοθερμικού σταθμού τεχνολογίας πύργου (καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία) με απ' ευθείας παραγωγή ατμού, όπως προκύπτει από τα στοιχεία του σταθμού PS10, εκτιμάται στο 17%. [3],[5][12],[13],[17][27-29]

**Χρήση υγροποιημένου άλατος ως μέσου μεταφοράς θερμότητας.** Έργα, όπως ο σταθμός Gemasolar που ξεκίνησε τη λειτουργία του το Μάιο του 2011, που χρησιμοποιούν υγροποιημένο άλας ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, συνδυάζοντας τη λειτουργία του σταθμού με δεξαμενές αποθήκευσης υγροποιημένου άλατος, έχουν παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με τους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων.



Το πλεονέκτημά τους, σε σύγκριση με αυτούς που χρησιμοποιούν μείγμα νερού/ατμού ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, είναι ότι έχουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης αφού το υγροποιημένο άλας μπορεί να θερμανθεί σε θερμοκρασίες που προσεγγίζουν ακόμη και τους 565°C. Επίσης μπορούν να αποθηκεύουν άμεσα ενέργεια στις δεξαμενές χωρίς την παρεμβολή εναλλακτών θερμότητας (όπως στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων).

Το μέσο μεταφοράς θερμότητας, αφού απορροφήσει τη θερμική ενέργεια μέσα στον κεντρικό δέκτη του πύργου και αποκτήσει θερμοκρασία που προσεγγίζει τους 565 °C, οδηγείται σε εναλλάκτες θερμότητας, αποδίδοντας τη θερμική ενέργεια σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή κορεσμένου ατμού υψηλής ποιότητας. [13][17][27][32]



**Σχήμα 2.11 Ηλιοθερμικός Σταθμός Τεχνολογίας Πύργου (υγροποιημένο άλας ως μέσο μεταφοράς θερμότητας) [27]**

Όσον αφορά την ιστορία των ηλιοθερμικών σταθμών ηλιακού πύργου, πειραματικοί σταθμοί με ηλιακό πύργο κατασκευάστηκαν τις δεκαετίες του 1980 και 1990 στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ. Σε αυτούς ανήκαν ο SOLGATE στον οποίο θερμαινόταν πεπιεσμένος αέρας και ο GAST στην Ισπανία. Ο πρώτος πιλοτικός σταθμός μεγάλης κλίμακας ήταν ο Solar One στην Καλιφόρνια. Λειτουργήσε από το 1982 ως το 1986 με εγκατεστημένη ισχύ 10MW και το 1995 τροποποιήθηκε και λειτουργήσε ξανά ως Solar Two. Στον Solar Two χρησιμοποιήθηκε τηγμένο άλας ως μέσο μεταφοράς αλλά και αποθήκευσης της θερμότητας και προσφέροντας μεγάλης διάρκειας και οικονομικά αποδοτική αποθήκευση θερμότητας απέδειξε ότι η τεχνολογία αυτή ήταν έτοιμη για εμπορική χρήση. Λειτουργήσε έως το 1999 ενώ

το 2009 κατεδαφίστηκε ενόψει ενός μεγαλύτερου ηλιοθερμικού σταθμού. Η ιδέα του ογκομετρικού δέκτη αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1990 με το έργο RHOEBUS, όπου χρησιμοποιήθηκε ένα μεταλλικό πλέγμα άμεσα εκτεθειμένο στην προσπίπτουσα ακτινοβολία το οποίο και ψύχονταν με ροή αέρα. Ο δέκτης αυτός, στον οποίο επιτυγχάνονταν θερμοκρασίες 800°C, χρησιμοποιήθηκε για τη λειτουργία ενός συστήματος 1MW [3].

Με τη εν λόγω τεχνολογία να έχει δοκιμαστεί και αναπτυχθεί, υπάρχουν πλέον κάποιες εμπορικές εφαρμογές της στην Ισπανία και στις ΗΠΑ. Ο πρώτος εμπορικός ηλιοθερμικός σταθμός αυτής της τεχνολογίας παγκοσμίως είναι ο σταθμός PS10 που αναφέρθηκε και παραπάνω. Ο σταθμός PS10, που ανήκει στην εταιρεία Abengoa Solar, βρίσκεται στην τοποθεσία Sanlucar la Mayor κοντά στη Σεβίλλη της Ισπανίας και παράγει ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 11MW. Ο σταθμός ξεκίνησε να λειτουργεί το 2007 και αποθηκεύει θερμότητα σε πεπιεσμένο ατμό μέσα σε δεξαμενές για επιπλέον λειτουργία μίας έως δύο ωρών ενώ διαθέτει και βοηθητικό συμβατικό λέβητα φυσικού αερίου. Το ηλιακό πεδίο του σταθμού, ο οποίος συνολικά καλύπτει μια έκταση 600 στρεμμάτων, αποτελείται από 624 ηλιοστάτες επιφάνειας 120τ.μ. έκαστος ενώ ο κεντρικός πύργος έχει ύψος 115μ. Με ετήσιο δυναμικό DNI 2100 kWh/τ.μ. ο σταθμός μπορεί να παράγει 24,3GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως με ένα συντελεστή χρησιμοποίησης κοντά στο 25%. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του PS10 είναι περίπου 17% [13],[33],[63].

Δίπλα στο σταθμό PS10 κατασκευάστηκε στη συνέχεια από την ίδια εταιρεία ο PS20, ο οποίος με ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 20MW αποτελεί το μεγαλύτερο σταθμό του είδους του στον κόσμο. Ο σταθμός PS20, που ξεκίνησε τη λειτουργία του τον Ιούλιο του 2009, έχει τη δυνατότητα παραγωγής 114,6GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως. Διαθέτει πιο προηγμένη τεχνολογία από τον PS10 όπως υψηλότερο βαθμό απόδοσης του δέκτη, διάφορες βελτιώσεις στον έλεγχο και στα λειτουργικά συστήματα και ένα βελτιωμένο σύστημα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Το ηλιακό του πεδίο αποτελείται από 1255 ηλιοστάτες και το ύψος του πύργου είναι 160m. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του PS20 είναι περίπου 19% [13],[34].

Ένας νέος καινοτόμος σταθμός ηλιακού πύργου βρίσκεται σε λειτουργία από το Μάιο του 2011 στην τοποθεσία Fuentes de Andalucía κοντά στη Σεβίλλη της Ισπανίας. Πρόκειται για το σταθμό Gemasolar της εταιρείας Torresol Energy, ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος 19,9MW, και είναι ο πρώτος εμπορικός σταθμός ηλιακού πύργου που χρησιμοποιεί υγροποιημένο άλας ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Ο σταθμός, του οποίου η λειτουργία περιγράφηκε παραπάνω, έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει θερμική ενέργεια για έως και 15 ώρες ονομαστική λειτουργία χωρίς ηλιοφάνεια, γεγονός που θα του επιτρέπει να λειτουργεί 24 ώρες την ημέρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Διαθέτει 2480 ηλιοστάτες με συνολική επιφάνεια κατόπτρων περίπου 300.000 τ.μ. ενώ καταλαμβάνει μια συνολική έκταση 1420 στρεμμάτων [13],[18],[20],[61].

Ο μοναδικός ηλιοθερμικός σταθμός ηλιακού πύργου στις ΗΠΑ είναι ο Sierra SunTower της εταιρείας eSolar. Ο σταθμός, που ξεκίνησε τη λειτουργία του την άνοιξη του 2010, βρίσκεται στο Lancaster της νότιας Καλιφόρνιας, έχει εγκατεστημένη ισχύ 5MW ενώ καταλαμβάνει μια έκταση 81 στρεμμάτων [35].



**Σχήμα 2.12** Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί ηλιακού πύργου PS20 (μπροστά) και PS10 (πίσω) στη Σεβίλλη της Ισπανίας [36]

Ενδεικτικό των προοπτικών που διαθέτει η εν λόγω τεχνολογία είναι το γεγονός ότι αναμένονται αρκετοί τέτοιοι σταθμοί και μεγαλύτερου μεγέθους. Στις ΗΠΑ βρίσκεται υπό κατασκευή το μεγαλύτερο έργο ηλιακού πύργου παγκοσμίως. Πρόκειται για το σταθμό Ivanpah Solar Electric Generating System, της εταιρείας BrightSource Energy, συνολικής εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος 392MW. Ο σταθμός αυτός, που κατασκευάζεται βόρεια της πόλης Ivanpah στη νοτιοανατολική Καλιφόρνια, αναμένεται να ξεκινήσει τη λειτουργία του το 2013. Το έργο θα αποτελείται από τρεις ξεχωριστούς σταθμούς με τον πρώτο που κατασκευάζεται να έχει ονομαστική ισχύ 123MW. Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας θα χρησιμοποιείται μείγμα νερού-ατμού. Ο Ivanpah θα χρησιμοποιεί συνολικά 347.000 ηλιοστάτες ενώ θα καταλαμβάνει μια έκταση 16000 στρεμμάτων [37].

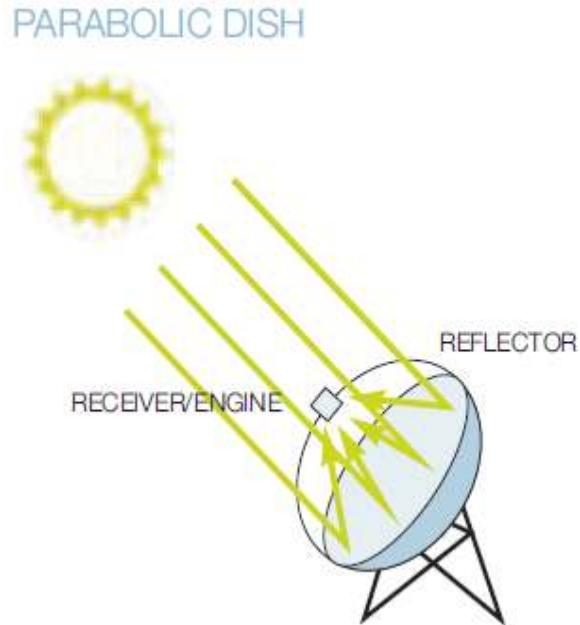
Στη φάση του σχεδιασμού βρίσκεται πλήθος σταθμών παγκοσμίως. Σε αυτή τη φάση βρίσκονται στις ΗΠΑ σταθμοί συνολικής εγκατεστημένης ισχύος που φτάνει το 1,5GW. Στην Ισπανία έχει ανακοινωθεί η κατασκευή τέτοιων σταθμών με συνολική ισχύ πάνω από 100MW. Και η Κίνα αναμένεται να αποκτήσει μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ από ηλιοθερμικούς σταθμούς ηλιακού πύργου. Ένα πολύ μεγάλο έργο έχει αναλάβει η αμερικανική εταιρεία eSolar στην έρημο της

Μογγολίας στην Κίνα. Η εταιρεία έχει υπογράψει συμφωνία να κατασκευάσει μια σειρά από σταθμούς συνολικού μεγέθους 2GW [18],[38].

Συγκρίνοντας την υλοποίηση ηλιοθερμικών σταθμών με ηλιακό πύργο με αυτήν με παραβολικά κάτοπτρα το βασικό πλεονέκτημα των πρώτων είναι η υψηλότερη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο δέκτη. Η θερμική ενέργεια σε υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να μετατραπεί αποδοτικότερα σε ηλεκτρική ενέργεια αλλά και να αποθηκευτεί φθηνότερα για μετέπειτα χρήση. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο σταθμός Gemasolar αποθηκεύει τρεις φορές περισσότερη θερμική ενέργεια ανά κιλό τηγμένου αλάτος σε σχέση με το σταθμό παραβολικών κατόπτρων Andasol, διότι η θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής τηγμένων αλάτων αυτού του σταθμού είναι 565°C ενώ του Andasol είναι 384 °C [13]. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των σταθμών αυτών, οι οποίοι επιτυγχάνουν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, είναι το γεγονός πως είναι καταλληλότεροι για εφαρμογή αερόψυκτου συστήματος ψύξης αντί για υδρόψυκτο σε σχέση με τους σταθμούς γραμμικής εστίασης. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς κατά βάση οι καταλληλότερες τοποθεσίες για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών λόγω ηλιοφάνειας είναι, ταυτόχρονα, και σχετικά φτωχές σε υδάτινα αποθέματα [3],[39],[40]. Επιπλέον, υπάρχουν καλύτερες προϋποθέσεις για εγκατάστασή τους σε ανισόπεδες εκτάσεις [3]. Για παράδειγμα ένας τέτοιος σταθμός μπορεί να χτιστεί και σε μια πλαγιά, καθώς αρκεί τα κάτοπτρα να είναι επίπεδα και να εστιάζουν στην κορυφή του πύργου ενώ οι υδραυλικές εγκαταστάσεις βρίσκονται στον πύργο. Βέβαια, ενώ τα επίπεδα κάτοπτρα είναι φθηνότερα από τα παραβολικά, κάθε ηλιοστάτης πρέπει να έχει ένα δικό του σύστημα ελέγχου δύο αξόνων για να συγκεντρώνει συνεχώς τις ακτίνες του ήλιου στο δέκτη ενώ στους σταθμούς με παραβολικά κάτοπτρα ένας άξονας αρκεί για τον έλεγχο μιας μεγάλης σειράς από καθρέπτες. Το κυριότερο, όμως, μειονέκτημα των σταθμών αυτών είναι η βραχυχρόνια εμπειρία από τη λειτουργία εμπορικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας με ό,τι αυτό μπορεί να συνεπάγεται σε κόστη και τεχνογνωσία. Παρόλα αυτά, οι σταθμοί αυτοί εμφανίζουν πολύ καλές προοπτικές και η μαζική παραγωγή και ανάπτυξη φθηνών και ανθεκτικών εξαρτημάτων θα συμβάλει στη μείωση του κόστους. Μια έρευνα σύγκρισης κόστους και απόδοσης μεταξύ των δύο παραπάνω τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών, η οποία διενεργήθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας (NREL) των ΗΠΑ, εκτιμά ότι μέχρι το 2020 το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι 5,47 U.S. cents/kWh για τα συστήματα με κεντρικό δέκτη και 6,21 U.S. cents/kWh για τα συστήματα με παραβολικά κάτοπτρα. Σύμφωνα με την έρευνα, ο συντελεστής χρησιμοποίησης θα φτάσει το 72,9% για τα πρώτα και το 56,2% για τα δεύτερα [14],[41].

### 2.3.3 Τεχνολογία Παραβολικών Δίσκων (Parabolic Dish systems)

Τα συστήματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούν για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας ένα μεγάλο, αντανακλαστικό, παραβολικό δίσκο. Ο δίσκος συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται στο εστιακό του σημείο, όπου βρίσκεται ο δέκτης (όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα [3]). Η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το δέκτη προκειμένου να θερμανθεί ένα ρευστό ή ένα αέριο σε θερμοκρασία περίπου 750°C. Όταν χρησιμοποιείται αέριο στις έως τώρα εφαρμογές, αυτό είναι συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Μια θερμική μηχανή εκμεταλλεύεται αυτή τη θερμότητα για να παρέχει μηχανική κίνηση σε μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Στην περίπτωση των παραβολικών δίσκων η θερμική μηχανή είναι συνήθως ένας ειδικός τύπος μηχανής που καλείται μηχανή Stirling και η οποία έχει ιδιαίτερα υψηλή απόδοση. Θεωρητικά η απόδοση μιας τέτοιας μηχανής μπορεί να φτάσει και το 40% αλλά στην πράξη οι μηχανές Stirling σήμερα επιτυγχάνουν ένα βαθμό μετατροπής της ενέργειας κοντά στο 30%. Αντί για μηχανή τύπου Stirling, είναι επίσης δυνατή η εγκατάσταση ενός μικρού αεριοστροβίλου ([3],[13],[14],[47]).



Οι τυπικές διαστάσεις ενός παραβολικού δίσκου είναι από 5 έως 10 μ. σε διάμετρο με επιφάνεια κατόπτρων από 40 έως 120 τ.μ., αν και έχουν κατασκευαστεί δίσκοι επιφάνειας ως και 400 τ.μ. Διάφοροι περιορισμοί των υλικών μπορεί να θέτουν ένα άνω όριο στο μέγεθος του δίσκου, αν και έχει ανακοινωθεί η κατασκευή δίσκων διαμέτρου ως και 15μ. οι οποίοι θα παράγουν μέχρι και 50kW ηλεκτρικής ισχύος. Προς το παρόν, οι μηχανές Stirling που χρησιμοποιούνται παράγουν ως και 25kW. Οι μικροί αεριοστροβίλοι μπορούν να παράγουν μεγαλύτερη ισχύ αλλά με σημαντικά μικρότερη απόδοση από τις μηχανές Stirling [13].

Όπως συμβαίνει και με τους συλλέκτες στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων και ηλιακού πύργου, τα ηλιακά αυτά «πίατα» πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου έτσι ώστε να επιτύχουν μέγιστη απόδοση. Ο μηχανισμός παρακολούθησης πρέπει να είναι δύο αξόνων και καθώς έχει να κινήσει ένα ιδιαίτερα βαρύ πλαίσιο έχει αρκετά υψηλό κόστος. Μια

μεταλλική βάση στηρίζει ένα μεταλλικό κιγκλίδωμα πάνω στο οποίο είναι στερεωμένοι πολλοί μεμονωμένοι κοίλοι καθρέπτες οι οποίοι σχηματίζουν ολόκληρο τον παραβολικό δίσκο. Οι καθρέπτες αυτοί μπορεί να είναι είτε από γυαλί είτε από στιλβωμένο μέταλλο και έχουν σχήμα κυκλικό ή τετράγωνο [13].

Κάθε μονάδα παραβολικού δίσκου είναι ένα ξεχωριστό σύστημα με δική του θερμική μηχανή και αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρισμού. Ως εκ τούτου η εν λόγω τεχνολογία είναι άκρως δομοστοιχειωτής φύσης, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για διεσπαρμένη παραγωγή. Αρκετοί δοκιμαστικοί παραβολικοί δίσκοι έχουν λειτουργήσει επιτυχημένα τα τελευταία δέκα χρόνια, με ποικίλα μεγέθη από 10kW (εταιρεία Schlaich, Bergermann and Partner), 25kW (εταιρεία SAIC) μέχρι και πάνω από 100kW (το «Big Dish» του Εθνικού Πανεπιστημίου της Αυστραλίας-ANU). Εξαιτίας του μεγέθους τους αλλά και της δομοστοιχειωτής τους φύσης, οι παραβολικοί δίσκοι είναι κατάλληλοι για αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος και για απομονωμένα, αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [3].

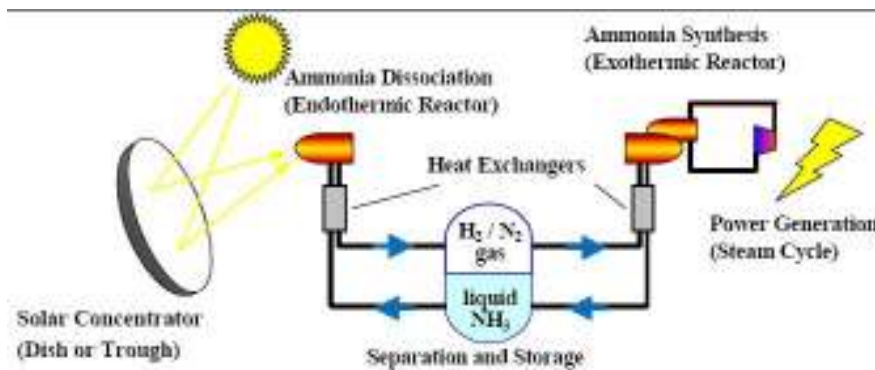


**Σχήμα 2.13** Έξι παραβολικοί δίσκοι με μηχανές Stirling σε λειτουργία στο ερευνητικό κέντρο *Plataforma Solar de Almería* της Ισπανίας. Κάθε δίσκος παράγει 10kW ηλεκτρικής ισχύος [42].

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος EURO-DISH, ένας οικονομικά αποδοτικός δίσκος 10kW με κινητήρα Stirling (Dish-Stirling engine) για

αποκεντρωμένη ηλεκτροπαραγωγή αναπτύχθηκε από μια ευρωπαϊκή κοινοπραξία με εταίρους από το χώρο της βιομηχανίας και της έρευνας. Αντίθετα, η σχεδίαση που προωθείται από την εταιρεία Stirling Energy Systems (SES) καλείται “SunCatcher” και είναι ένα σύστημα 25kW που αποτελείται από ένα δίσκο διαμέτρου 38 ποδιών στον οποίο εδράζονται 82 κοίλα κάτοπτρα, διαστάσεων 3 επί 4 πόδια το καθένα. Η γεννήτρια οδηγείται από έναν τετρακύλινδρο παλινδρομικό κινητήρα κύκλου Stirling, παράγοντας 25kW σε κάθε παραβολικό δίσκο. Το 2008, η εταιρεία SES επιχείρησε να καταγράψει ρεκόρ στην απόδοση μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια, επιτυγχάνοντας καθαρή απόδοση 31,25% στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ [3]. Το Μάρτιο του 2010 τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το Maricopa Solar, το πρώτο παγκοσμίως εμπορικό ηλιοθερμικό πάρκο με παραβολικούς δίσκους στην Αριζόνα των ΗΠΑ από την εταιρεία SES. Έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 1,5MW και αποτελείται από 60 παραβολικούς δίσκους SunCatcher [43].

Η τεχνολογία του Big Dish εισάγεται στην αγορά από την εταιρεία Wizard Power. Το μοντέλο αυτό που έχει επιφάνεια 500m<sup>2</sup>, χρησιμοποιεί ένα σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας που βασίζεται στη θερμοχημική διαδικασία της διάσπασης και σύνθεσης της αμμωνίας (ενδόθερμη και εξώθερμη αντίδραση, αντίστοιχα). Με τον τρόπο αυτό, ο δίσκος λειτουργεί και τη νύχτα ή υπό άσχημες καιρικές συνθήκες, τροφοδοτώντας συνεχώς το φορτίο βάσης ή βάσει ζήτησης το φορτίο αιχμής. Η εταιρεία Wizard Power προτίθεται να κατασκευάσει ένα ηλιοθερμικό πάρκο 100MW κοντά στην πόλη Whyalla της νότιας Αυστραλίας [3].



**Σχήμα 2.14 Σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας σε ενδόθερμη θερμοχημική διαδικασία [44]**

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας δίσκων Stirling είναι:

- Οι νεότερες μονάδες αυτού του τύπου εμφανίζουν υψηλή απόδοση μετατροπής, μέχρι 31,5%, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται στο εσωτερικό των μηχανών.

- Δεν έχουν ανάγκη συστήματος ψύξης, όπως συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες όπου εγκαθίσταται ατμοστρόβιλος, κάτι που οφείλεται στο ότι το θερμαινόμενο αέριο προκαλεί κίνηση μέσω της διαστολής του.

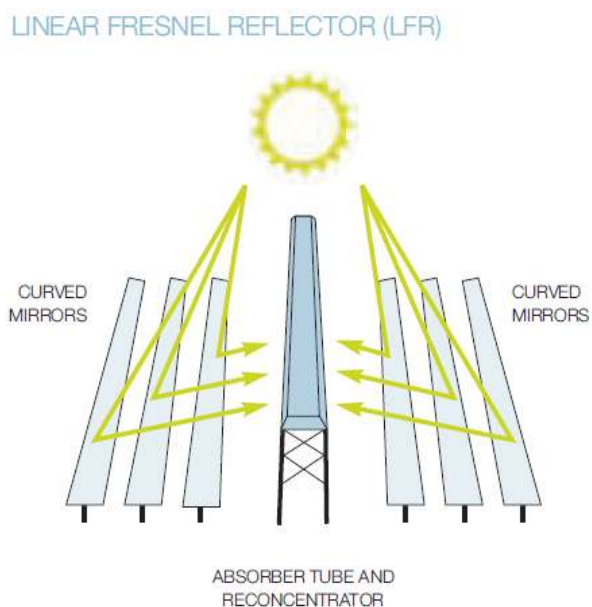
Μειονεκτήματα της τεχνολογία αυτής είναι ότι:

- Εμφανίζουν μικρή εγκατεστημένη ισχύ ανά παραβολικό δίσκο που κυμαίνεται από 3-25 kW.
- Εμφανίζουν προβλήματα αξιοπιστίας ενώ είναι σε ερευνητικό στάδιο η δυνατότητα λειτουργία τους παράλληλα με συμβατική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. [45],[46]

Είναι γεγονός ότι, πρόσφατα, επενδύσεις σε αυτή την τεχνολογία έχουν συναντήσει προβλήματα στη χρηματοδότηση καθώς ακόμη δεν έχει αποδεδειγμένη τιμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ελκυστική για τους επενδυτές, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια στασιμότητα στη συγκεκριμένη αγορά.

### 2.3.4 Τεχνολογία Κατόπτρων Fresnel (Linear Fresnel Reflector systems)

Πρόκειται για τη δεύτερη τεχνολογία ηλιοθερμικών συστημάτων που εφαρμόζουν γραμμική εστίαση. Αυτοί οι σταθμοί χρησιμοποιούν σειρές από μακρόστενα κάτοπτρα, είτε επίπεδα είτε με πολύ μικρή καμπυλότητα, τα οποία εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν ή περισσότερους γραμμικούς δέκτες που είναι τοποθετημένοι πάνω από τα κάτοπτρα (όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα [3]). Η τεχνολογία LFR έχει χαμηλότερη οπτική απόδοση και θερμική παραγωγή, γεγονός που αντισταθμίζεται από τα χαμηλότερα κόστη επένδυσης αλλά και συντήρησης και λειτουργίας. Συνήθως, πάνω από το δέκτη εγκαθίσταται ένας μικρός παραβολικός καθρέφτης για επιπλέον συγκέντρωση του φωτός [3],[14].



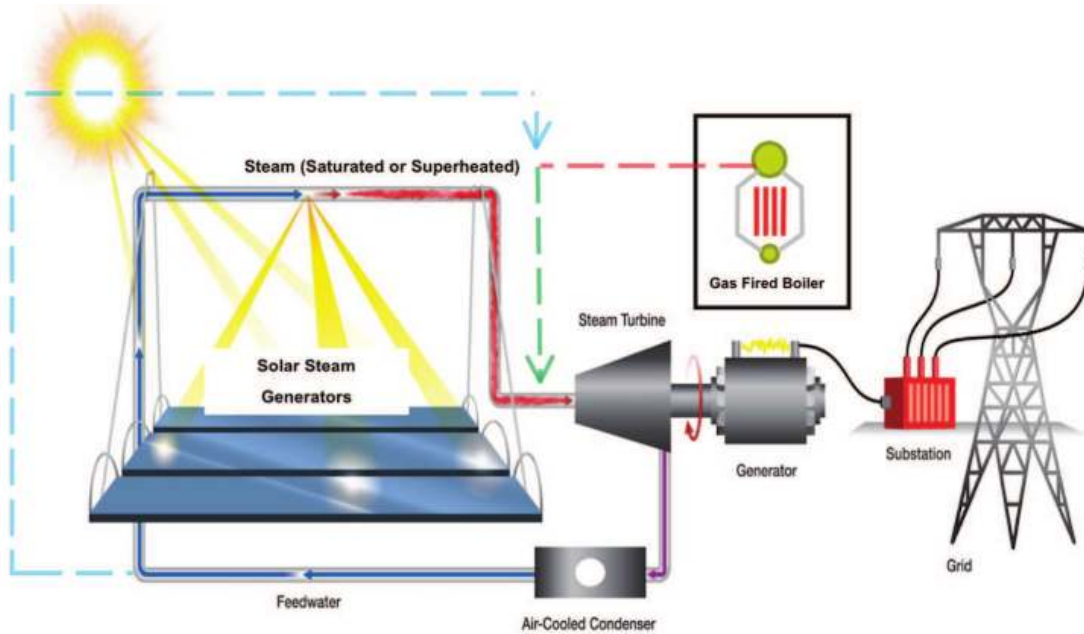
Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι η χρήση των αντανακλαστικών κατόπτρων Fresnel. Τα κάτοπτρα αυτά κάνουν χρήση του



φαινομένου του φακού Fresnel, το οποίο επιτρέπει την κατασκευή συγκεντρωτικών κατόπτρων με μεγάλο διάφραγμα και μικρή εστιακή απόσταση μειώνοντας ταυτόχρονα τον απαιτούμενο όγκο υλικού. Αυτό μειώνει το κόστος του συστήματος αφού τα καμπυλωτά παραβολικά κάτοπτρα είναι αρκετά ακριβότερα. Τα συστήματα LFR στοχεύουν στη μείωση του συνολικού κόστους με το να μοιράζεται ένας δέκτης μεταξύ πολλών κατόπτρων σε αντίθεση με τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων και δίσκων, ενώ παράλληλα συνεχίζεται να χρησιμοποιείται η απλή γεωμετρία της γραμμικής εστίασης με το σύστημα ιχνηλάτησης ενός άξονα όπως και στα παραβολικά κάτοπτρα. Τα κάτοπτρα είναι στοιχισμένα με προσανατολισμό βορά-νότου ώστε με το ελεγχόμενο σύστημα ιχνηλάτησης να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου από την ανατολή ως τη δύση. Ο δέκτης στα συστήματα LFR είναι τοποθετημένος σε σταθερή θέση και έτσι δεν απαιτούνται υδραυλικές συμπλέξεις. Επιπλέον, τα κάτοπτρα δεν χρειάζεται να στηρίζουν το δέκτη και ως εκ τούτου είναι κατασκευαστικά απλούστερα [3],[14].

Όταν χρησιμοποιούνται κατάλληλες τεχνικές στόχευσης της ακτινοβολίας, όπως για παράδειγμα τα κάτοπτρα να στοχεύουν σε διαφορετικούς δέκτες σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, γίνεται εφικτή η πυκνότερη τοποθέτηση κατόπτρων στη διαθέσιμη έκταση εδάφους. Μια βασική δυσκολία που προκύπτει στα συστήματα LFR είναι η αποφυγή αφενός της σκίασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και αφετέρου του μπλοκαρίσματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας από τα παρακείμενα κάτοπτρα. Η σκίαση και το μπλοκάρισμα μπορούν να μειωθούν τοποθετώντας υψηλότερα το σωλήνα απορρόφησης θερμότητας ή αυξάνοντας το μέγεθός του, κάτι που θα επιτρέψει μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των κατόπτρων μακριά από το σωλήνα απορρόφησης. Και οι δύο αυτές λύσεις αυξάνουν το κόστος, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη έκταση γης [14].

Όπως και στα συστήματα παραβολικών κατόπτρων και σε αυτούς τους σταθμούς χρησιμοποιείται κάποιο ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, όπως για παράδειγμα συνθετικό έλαιο, μείγμα νερού-ατμού ή υγροποιημένο άλας. Η πιο διαδομένη εφαρμογή είναι με χρήση μείγματος νερού-ατμού. Το μέσο αυτό θερμαίνεται σε πίεση περί τα 50-60 bar προς παραγωγή κορεσμένου ατμού θερμοκρασίας 280°C που ακολούθως οδηγείται σε ατμοστρόβιλο [47]. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα λειτουργίας ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής τεχνολογίας Fresnel με άμεση παραγωγή ατμού. Η άμεση παραγωγή ατμού καθιστά απλή την ενσωμάτωση τέτοιων συστημάτων σε υπάρχοντα συμβατικά θερμοηλεκτρικά συστήματα.



**Σχήμα 2.15 Σχηματικό διάγραμμα υβριδικού ηλιοθερμικού σταθμού LFR με φυσικό αέριο. [48]**

Μια ειδική υλοποίηση της τεχνολογίας αυτής είναι η συνεπτυγμένη μορφή της που ονομάζεται CLFR (Concentrating LFR ή αλλιώς Compact LFR). Σε ένα κλασικό σύστημα LFR υπάρχει μόνο ένας γραμμικός δέκτης σε έναν απλό γραμμικό οδηγό. Έτσι, η διεύθυνση προσανατολισμού καθενός κατόπτρου στοχεύει συνεχώς στο συγκεκριμένο δέκτη χωρίς περιθώριο επιλογής. Αντίθετα, σύμφωνα με την τεχνολογία CLFR τοποθετούνται πολλαπλοί δέκτες στην εγγύτερη περιοχή των κατόπτρων. Άρα, εάν οι δέκτες είναι αρκετά κοντά, κάθε μεμονωμένο κάτοπτρο θα έχει τη δυνατότητα επιλογής της κατεύθυνσης της ανακλώμενης από αυτό ακτινοβολίας μεταξύ τουλάχιστον δύο σωλήνων απορρόφησης. Ο επιπρόσθετος αυτός παράγοντας δίνει μια λύση στο προαναφερθέν πρόβλημα των LFR συστημάτων και δίνει τη δυνατότητα για πυκνότερη τοποθέτηση των συστοιχιών κατόπτρων, μιας και οι διατάξεις των εναλλακτικών γωνιών κλίσης κάθε κατόπτρου μπορούν να ρυθμιστούν συνδυαστικά έτσι ώστε να αποφεύγεται η σκίαση και το μπλοκάρισμα της ανακλώμενης ακτινοβολίας μεταξύ των γειτονικών κατόπτρων. Δηλαδή, ανά πάσα στιγμή μεταξύ των επιλογών στόχευσης που έχει το κάθε κάτοπτρο, επιλέγεται για το καθένα ξεχωριστά ένας συγκεκριμένος δέκτης ώστε να αποφεύγονται τα γνωστά προβλήματα. Ακόμη, η πυκνότερη τοποθέτηση των κατόπτρων συνεπάγεται μικρότερο συνολικό μήκος των σωλήνων απορρόφησης, κάτι που μειώνει τόσο τις θερμικές απώλειες μέσω των δεκτών όσο και το συνολικό κόστος του συστήματος. Βασικό χαρακτηριστικό των CLFR συστημάτων είναι η άμεση παραγωγή ατμού [49],[98].



**Σχήμα 2.16** Ο ηλιοθερμικός σταθμός τεχνολογίας CLFR Kimberlina Solar Thermal Energy Plant. [50]

Τα ηλιοθερμικά συστήματα LFR προσελκύουν αυξανόμενο ενδιαφέρον. Η εταιρεία Ausra (πλέον ονομάζεται Areva Solar μετά την εξαγορά της από τη γαλλική AREVA) κατασκεύασε ένα ηλιοθερμικό σύστημα κατόπτρων Fresnel στο New South Wales στα ανατολικά της Αυστραλίας, το οποίο παρέχει ατμό απευθείας στον ήδη υπάρχοντα ατμοηλεκτρικό σταθμό άνθρακα Liddell Power Station. Από το 2008 βρίσκεται σε λειτουργία ο σταθμός Kimberlina Solar Thermal Energy Plant, ο μεγαλύτερος μέχρι τώρα σταθμός LFR μεγέθους 5MW, ο οποίος κατασκευάστηκε από την ίδια εταιρεία. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται στο Bakersfield της Καλιφόρνια και είναι ο πρώτος του είδους του στη Βόρεια Αμερική αλλά και ο πρώτος εμπορικός ηλιοθερμικός σταθμός που τέθηκε σε λειτουργία στην Καλιφόρνια μετά από το SEGS. Οι σειρές των κατόπτρων του Kimberlina, ο οποίος χρησιμοποιεί την τεχνολογία CLFR, κατασκευάστηκαν κατά παραγγελία στο εργοστάσιο ηλιοθερμικής ενέργειας της Ausra στο Λας Βέγκας της Νεβάδα. Αυτές οι γραμμές ηλιακών συλλεκτών παράγουν έως και 25MW θερμικής ισχύος που οδηγούν τον ατμοστρόβιλο του παρακείμενου σταθμού ηλεκτρικής ενέργειας. [50]-[52]

Ο τρίτος σταθμός με αντανακλαστικά κάτοπτρα Fresnel που βρίσκεται σε λειτουργία είναι ο Puerto Errado 1 (PE 1), ο οποίος μελετήθηκε και κατασκευάστηκε από τη γερμανική εταιρεία Novatec Solar. Ο σταθμός, ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία από τον Απρίλιο του 2009, βρίσκεται στην Calasparra της Murcia στην Ισπανία και είναι διασυνδεδεμένος με το ισπανικό ηλεκτρικό δίκτυο. Ο PE 1 είναι τεχνολογίας άμεσης παραγωγής ατμού (direct steam) και έχει εγκατεστημένη ισχύ 1,4MW. Η συνολική επιφάνεια των κατόπτρων του είναι περίπου 18000τ.μ. ενώ ο γραμμικός δέκτης βρίσκεται 7,4μ. πάνω από το έδαφος. Ένας σωλήνας

απορρόφησης είναι τοποθετημένος στην εστιακή ευθεία του ηλιακού πεδίου, μέσα στον οποίον το νερό θερμαίνεται από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέπεται σε κορεσμένο ατμό θερμοκρασίας 270°C και πίεσης 55bar. Υπό κατασκευή βρίσκεται στην ίδια περιοχή και ένας δεύτερος σταθμός ίδιας τεχνολογίας μεγέθους 30MW. Ο σταθμός θα ονομάζεται Puerto Errado 2 (PE 2) και η κατασκευή του αναμένεται να ολοκληρωθεί το Μάρτιο του 2012. Τέλος, στη φάση του σχεδιασμού βρίσκονται δύο σταθμοί τεχνολογίας Fresnel στην Αυστραλία. Πρόκειται για τους σταθμούς Solar Dawn και Kogan Kreek Solar Boost Fresnel Power Plant μεγέθους 250 και 44 MW αντιστοίχως. [14],[20],[22]

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Fresnel είναι τα εξής:

- Έχουν μικρότερο κόστος εγκατάστασης από τις άλλες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών.
- Είναι δυνατή η υβριδική λειτουργία τους με χρήση συμβατικού λέβητα. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού και την παροχή του συμπληρωματικά τόσο σε συμβατικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς όσο και σε βιομηχανικές διαδικασίες που απαιτούν ατμό.

Μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι:

- Τα λίγα και μικρής ισχύος υπό λειτουργία έργα.
- Ο μικρός βαθμός απόδοσης παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. [46]

## 2.4 Συστήματα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (Thermal Energy Storage- TES)

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

της ηλιακής ενέργειας και να διασφαλίσουν αξιόπιστη λειτουργία και αυξημένη ποιότητα παρεχόμενης ισχύος (χωρίς έντονες διακυμάνσεις) σε συνθήκες συννεφιάς αλλά και λειτουργία ακόμη και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ένα άλλο πλεονέκτημα που παρέχει η αποθήκευση της θερμότητας στους σταθμούς αυτούς είναι η δυνατότητα χρονικής μετατόπισης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος τους από τη φυσική αιχμή της ηλιοφάνειας στην αιχμή της ζήτησης όπου, σε μια ευέλικτη αγορά, η ηλεκτρική ενέργεια πωλείται ακριβότερα, αυξάνοντας έτσι τα περιθώρια κέρδους του σταθμού. Επιπλέον, η αποθήκευση καθιστά δυνατή τη σχεδόν ακαριαία διανομή της ισχύος ανάλογα με τη ζήτηση (on demand), έτσι ώστε να ικανοποιούνται αναμενόμενες και μη καταναλώσεις φορτίου. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι παρέχεται στο Διαχειριστή του Συστήματος η ευελιξία να ρυθμίζει τη διείσδυση και των άλλων ΑΠΕ περιορίζοντας, αν χρειάζεται, την ισχύ εξόδου των ηλιοθερμικών σταθμών. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα της θερμικής αποθήκευσης έχουν σαν αποτέλεσμα έναν αρκετά υψηλότερο συντελεστή χρησιμοποίησης και ένα μειωμένο χρόνο απόσβεσης της επένδυσης [3],[5],[9],[12],[26],[54].

Η γενική ιδέα της αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας είναι ότι η θερμότητα από τον ήλιο που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας αντί να χρησιμοποιηθεί εξ ολοκλήρου για άμεση ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να αποθηκευτεί σε ορισμένα μέσα αποθήκευσης, όπως για παράδειγμα τηγμένα άλατα. Στους ηλιοθερμικούς σταθμούς με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας υπερδιαστασιολογείται το ηλιακό πεδίο έτσι ώστε ο σταθμός κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας να μπορεί να βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία και ταυτόχρονα να αποθηκεύει το πλεόνασμα ηλιακής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συνθήκες συννεφιάς η θερμότητα αποδίδεται από το μέσο στο οποίο βρίσκεται αποθηκευμένη μέσω εναλλάκτη θερμότητας στο μέσο μεταφοράς θερμότητας του σταθμού προκειμένου να διατηρηθεί η λειτουργία του στροβίλου. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί με αποκλειστική χρήση ηλιακής ενέργειας (solar-only) λειτουργούν ιδανικά για να καλύψουν τις μεγάλες αιχμές ζήτησης τα μεσημέρια των θερινών μηνών σε περιοχές με σημαντικές καταναλώσεις κλιματισμού. Με ενσωματωμένη τη θερμική αποθήκευση αυτοί οι σταθμοί μπορούν να λειτουργούν περισσότερο, ικανοποιώντας ακόμη και το φορτίο βάσης [53].

Οι διαφορετικές διατάξεις ηλιοθερμικών σταθμών απαιτούν ανάλογες λύσεις θερμικής αποθήκευσης προσαρμοσμένες στη συγκεκριμένη τεχνολογία του εκάστοτε σταθμού. Για την εφαρμογή, δηλαδή, του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το μέσο μεταφοράς θερμότητας, η θερμοκρασία και η πίεση λειτουργίας, το μέγεθος του σταθμού και ο όγκος του τροφοδοτούμενου φορτίου. Έτσι υπάρχει μια ποικιλία τεχνολογιών αποθήκευσης, υλικών και μεθόδων λειτουργίας έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι διαφορετικές απαιτήσεις κάθε σταθμού [3].

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Έμμεση αποθήκευση σημαίνει ότι το μέσο αποθήκευσης δεν θερμαίνεται απευθείας από

τους συλλέκτες. Σε αυτά τα συστήματα από τους συλλέκτες θερμαίνεται άμεσα το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, συνήθως συνθετικό έλαιο, το οποίο στη συνέχεια διέρχεται από εναλλάκτες θερμότητας για να θερμάνει τελικά έμμεσα το μέσο αποθήκευσης. Τα μέσα αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται είναι υλικά με υψηλή θερμική χωρητικότητα όπως συμπιεσμένος ατμός, σκυρόδεμα, μια ποικιλία από υλικά αλλαγής φάσης και κυρίως τηγμένα άλατα, όπως για παράδειγμα νιτρικό νάτριο και νιτρικό κάλιο. Έμμεση αποθήκευση εφαρμόζεται όταν το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι πολύ ακριβό (όπως το συνθετικό έλαιο) ή δύσκολο να αποθηκευτεί (όπως ο αποπιεσμένος ατμός). Το πλεονέκτημα της έμμεσης μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος του μέσου αποθήκευσης, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό κόστος του εναλλάκτη θερμότητας αλλά και οι απώλειες θερμότητας σε αυτόν [3][55][56].

Στην άμεση αποθήκευση το μέσο μεταφοράς της θερμότητας αποθηκεύεται απευθείας σε θερμικά μονωμένες δεξαμενές, παίζοντας ταυτόχρονα και το ρόλο του μέσου αποθήκευσης. Για να εφαρμοστεί ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης θα πρέπει το μέσο μεταφοράς της θερμότητας να είναι οικονομικό και να έχει υψηλή θερμική χωρητικότητα προκειμένου να μειωθεί το κόστος της δεξαμενής. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η σταθερή θερμοκρασία του θερμού μέσου τόσο στη μεταφορά όσο και στην αποθήκευση της θερμότητας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επικρατούσες εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης [3][55][56].

### *2.4.1 Αποθήκευση με τη χρήση τηγμένων αλάτων*

Διάφορα ρευστά έχουν δοκιμαστεί για να αποθηκεύσουν τη θερμότητα του ήλιου, όπως νερό, αέρας, έλαιο και νάτριο αλλά το υγροποιημένο άλας έχει επιλεγεί ως το καταλληλότερο και αποτελεί το επικρατέστερο μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας προς το παρόν. Το τηγμένο άλας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε σύστημα άμεσης αποθήκευσης σε ηλιοθερμικούς σταθμούς με ηλιακό πύργο επειδή είναι υγρό στην ατμοσφαιρική πίεση, αλλά επικρατεί κυρίως στα συστήματα έμμεσης αποθήκευσης. Είναι ένα ιδιαίτερα αποδοτικό αλλά και οικονομικό μέσο αποθήκευσης. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του είναι συμβατές με τους σύγχρονους ατμοστροβίλους υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας, ενώ δεν είναι εύφλεκτο ούτε τοξικό. Επιπρόσθετα, υπάρχει μια σχετική εμπειρία και από τη χρήση του σε μη ηλιακά συστήματα καθώς χρησιμοποιείται ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας σε χημικές και μεταλλουργικές βιομηχανίες [14].

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

αποθήκευσης στο τέλος της διάρκειας ζωής του, τα άλατα μπορούν να κρυσταλλωθούν και να απομακρυνθούν στη στερεά τους μορφή για να επαναχρησιμοποιηθούν σε άλλες διαδικασίες, όπως για παράδειγμα στη γεωργία [11],[57].

Μια ενδεικτική εφαρμογή έμμεσης αποθήκευσης με τηγμένο άλας είναι στους ηλιοθερμικούς σταθμούς Andasol οι οποίοι προαναφέρθηκαν. Σε κάθε σταθμό χρησιμοποιούνται 28.500 τόνοι τηγμένου άλατος, οι οποίοι είναι αποθηκευμένοι υπό ατμοσφαιρική πίεση σε ένα σύστημα δύο δεξαμενών, μιας ψυχρής και μιας θερμής. Οι διαστάσεις των κυλινδρικών δεξαμενών είναι 14m σε ύψος και 36m σε διάμετρο [11].

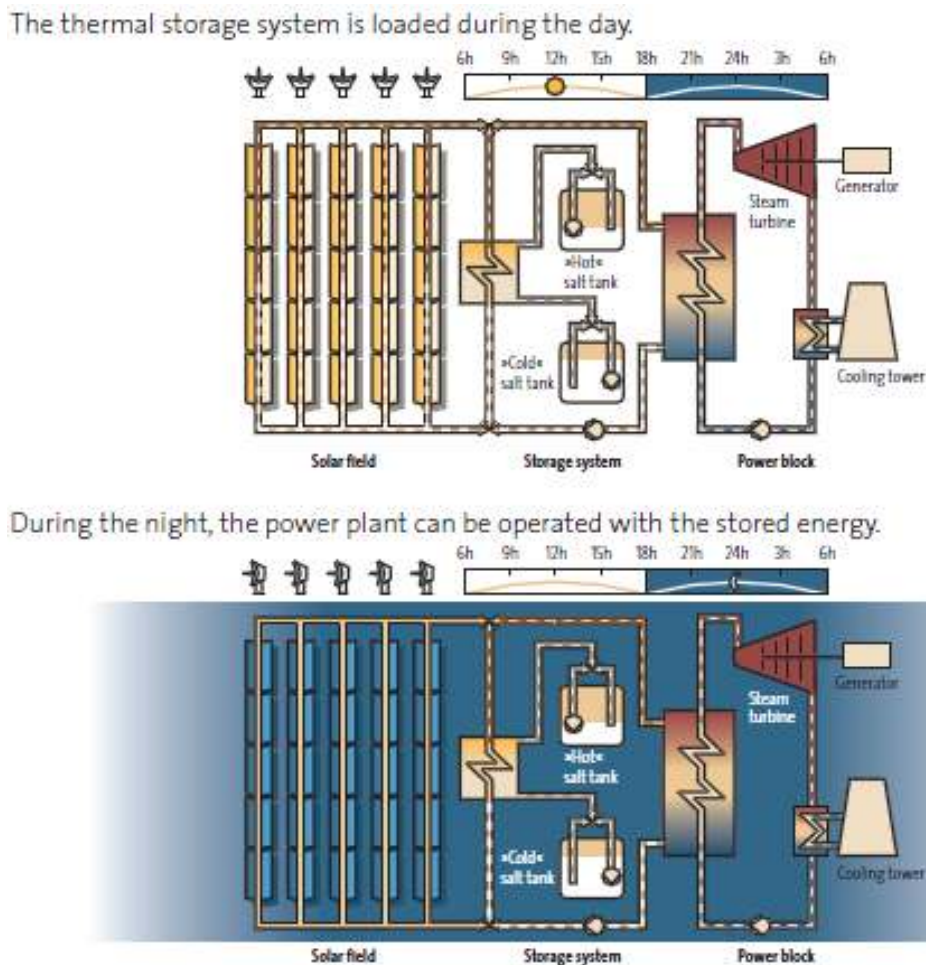


**Σχήμα 2.17 Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας δύο δεξαμενών του Andasol. Στην ένθετη φωτογραφία φαίνεται η θέση του συστήματος αποθήκευσης στον ηλιοθερμικό σταθμό. [58]**

Κατά τη διάρκεια της ημέρας τηγμένο άλας από την ψυχρή δεξαμενή όπου διατηρείται στη θερμοκρασία των 291°C περίπου θερμαίνεται περνώντας από εναλλάκτη θερμότητας με το συνθετικό έλαιο, το οποίο έχει θερμανθεί στο ηλιακό πεδίο, και αποθηκεύεται στη θερμή δεξαμενή στους 384°C περίπου για μετέπειτα χρήση. Οι δεξαμενές είναι πολύ καλά μονωμένες και σε αυτές το τηγμένο άλας μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία του ακόμη και για αρκετές εβδομάδες (η θερμοκρασιακή απώλεια είναι της τάξης του ενός με δύο βαθμούς Κελσίου

ημερησίως [59]). Κατά την αντίστροφη διαδικασία, θερμό τηγμένο άλας αποδίδει θερμότητα στο συνθετικό έλαιο μέσα από τον εναλλάκτη και στη συνέχεια περνάει στην ψυχρή δεξαμενή. Μια γεμάτη δεξαμενή αποθήκευσης εξασφαλίζει την ονομαστική λειτουργία του στροβίλου του σταθμού για περίπου 7,5 ώρες. Προκειμένου να γεμίζει η δεξαμενή αποθήκευσης και παράλληλα να λειτουργεί και ο στροβίλος το ηλιακό πεδίο έχει διαστασιοποιηθεί σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό ενός σταθμού χωρίς αποθήκευση. Κατά αυτόν τον τρόπο οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του σταθμού κατά τις περιόδους αιχμής φορτίου μπορούν σχεδόν να διπλασιαστούν. Πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι το συνθετικό έλαιο που παραμένει το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας είναι μια δοκιμασμένη και ελεγμένη τεχνολογία ενώ μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι οι απαιτούμενοι εναλλάκτες θερμότητας είναι ακριβοί και αυξάνουν το κόστος επένδυσης [3],[11],[13],[60].

Στα δύο επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η λειτουργία του σταθμού Andasol κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας.



**Σχήμα 2.18** Επάνω: Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας φορτίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κάτω: Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο ηλιοθερμικός σταθμός μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την αποθηκευμένη θερμότητα. [11]



Ένα παράδειγμα άμεσης αποθήκευσης σε σύστημα με ηλιακό πύργο είναι η περίπτωση του σταθμού Gemasolar, μεγέθους 19,9MW, ο οποίος αναφέρθηκε παραπάνω. Ο σταθμός αυτός χρησιμοποιεί ένα πρωτοποριακό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε υψηλής θερμοκρασίας τηγμένο άλας που φτάνει σε θερμοκρασίες πάνω από 500°C. Σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι το τηγμένο άλας χρησιμοποιείται τόσο ως μέσο αποθήκευσης αλλά και ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας. 6250 τόνοι τηγμένου αλάτος μπορούν να αποθηκευτούν στις δεξαμενές αποθήκευσης, εξασφαλίζοντας στο σταθμό μια αυτονομία περίπου 15 ωρών. Έτσι, ο Gemasolar μπορεί να λειτουργεί 24 ώρες την ημέρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ενώ εκτιμάται ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησής του θα φτάσει το 75% [13],[61],[62].



**Σχήμα 2.19** Εργασίες κατασκευής των δεξαμενών αποθήκευσης τηγμένων αλάτων του ηλιοθερμικού σταθμού Gemasolar. [58]

#### 2.4.2 Άμεση αποθήκευση ατμού

Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης εφαρμόζεται σε εμπορική χρήση στην περίπτωση του σταθμού με ηλιακό πύργο PS10 στην Ισπανία, όπως έχει προαναφερθεί. Στον PS10 αποθηκεύεται θερμότητα σε δεξαμενές ως συμπιεσμένος ατμός στα 50bar και στους 285°C. Ο ατμός συμπυκνώνεται κατά την αποθήκευση και κατά τη χρήση επιστρέφει στην αέρια κατάσταση ελαττώνοντας την πίεση. Η χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης είναι περιορισμένη εξαιτίας του υψηλού κόστους των δεξαμενών συμπίεσης για μεγάλο όγκο ατμού. Αυτή η μέθοδος είναι μια συμβατική

τεχνολογία, η οποία είναι γνωστή ως αποθήκευση Ruth. Η ιδανικότερη χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι ως αποθήκευση ανάγκης για την αιχμή του φορτίου. [3],[13]



**Σχήμα 2.20** Οι δεξαμενές αποθήκευσης πεπιεσμένου ατμού του ηλιοθερμικού σταθμού PS10. [59]

### 2.4.3 Έμμεση αποθήκευση με σκυρόδεμα

Η χρησιμοποίηση σκυροδέματος ως μέσου αποθήκευσης βρίσκεται σε διαφορετικά στάδια σε πειραματικές εφαρμογές με θετικές έως τώρα ενδείξεις. Η αποθήκευση γίνεται σε θερμοκρασίες 400-500 °C. Είναι μια δομοστοιχειωτή σχεδίαση μεταβλητού μεγέθους όπου η θερμότητα αποθηκεύεται σε ένα δίκτυο στερεών πλακών. Προς το παρόν το κόστος επένδυσης είναι περίπου 30€/kWh, αλλά ο στόχος είναι να μειωθεί κάτω από τα 20€/kWh. Η πρώτη γενιά στοιχείων αποθήκευσης περιλαμβάνει στοιχεία με χωρητικότητα 300 και 400 kWh. Συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη είναι αναγκαία για να φτάσει αυτή η τεχνολογία στην εμπορική χρήση [3].



**Σχήμα 2.21** Πειραματική διάταξη από σκυρόδεμα με δυνατότητα αποθήκευσης 400 kWh θερμικής ενέργειας. [54]

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

Η τεχνολογία αυτή, που βρίσκεται υπό ανάπτυξη, προσφέρει μια εναλλακτική λύση στην αποθήκευση της ενέργειας σε ηλιοθερμικούς σταθμούς. Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν την προοπτική να παρέχουν πιο αποδοτική αποθήκευση. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι οργανικά ή ανόργανα και χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμοκρασία τήξης. Υγροποιούνται και στερεοποιούνται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, και είναι ικανά να αποθηκεύουν και να εκλύουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Η βασική αρχή χρήσης τους στην αποθήκευση θερμότητας είναι ότι απορροφάται θερμότητα κατά την αλλαγή από τη στερεά στην υγρή κατάσταση και εκλύεται κατά την αντίστροφη πορεία. Η μεγαλύτερη ενθαλπία στα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης καθιστά τα ένυδρα άλατα ιδανικό μέσο αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Στα συστήματα αυτά, το θερμό ρευστό μεταφοράς της θερμότητας ρέει μέσω ενός διανομέα που είναι ενσωματωμένος στα υλικά αλλαγής φάσης, μεταφέροντας τη θερμότητά του στο υλικό αποθήκευσης. Η μέθοδος έχει δοκιμαστεί προς το παρόν σε διάφορα πρωτότυπα συστήματα, αλλά όχι σε εμπορικές εφαρμογές. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης και το χαμηλό κόστος των μέσων αποθήκευσης. Ωστόσο υπάρχουν ορισμένα εμπόδια στην ανάπτυξη αυτής της μεθόδου, όπως είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα αυτών των υλικών, τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου να αποτελέσει μια εμπορικά βιώσιμη λύση [3][14][55].



**Σχήμα 2.21** Πειραματικός σταθμός με δυνατότητα αποθήκευσης 200kWh σε PCMs στο γερμανικό κέντρο ερευνών DLR. [59]

## Κεφάλαιο 3

# Περιγραφή του υπό προσομοίωση σταθμού και Εξισώσεις λειτουργίας

---

### 3.1 Περιγραφή του ηλιακού πεδίου

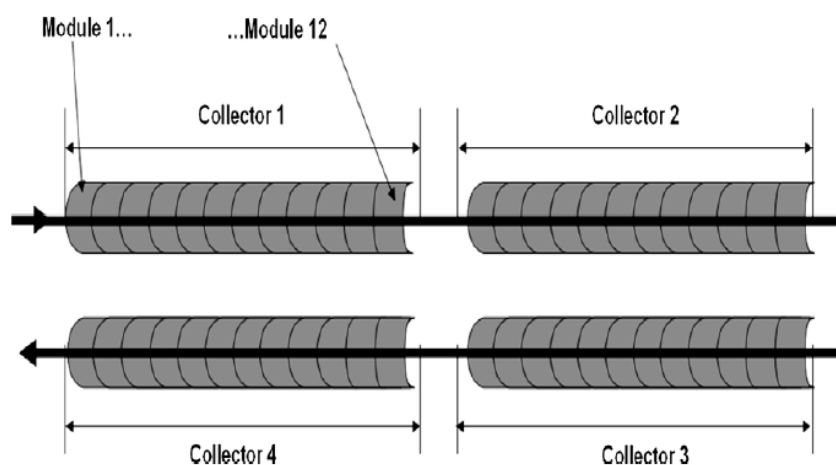
Ο ηλιοθερμικός σταθμός που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία ανήκει στην τεχνολογία των παραβολικών κατόπτρων και έχει εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ εξόδου 50MWe. Το ηλιακό του πεδίο αποτελείται από παράλληλες συστοιχίες παραβολικών κατόπτρων, ευθυγραμμισμένες στον άξονα βορρά-νότου και εφοδιασμένες με σύστημα ιχνηλάτησης του ήλιου, έτσι ώστε τα κάτοπτρα να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου από την ανατολή ως τη δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μια γενική άποψη της διάταξης ενός παρόμοιου ηλιακού πεδίου δίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Σχήμα 3.1** Γενική άποψη του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων Andasol 1. [64]

Το μοντέλο παραβολικού κατόπτρου που χρησιμοποιείται για τον υπό προσομοίωση σταθμό είναι το μοντέλο ET-150 τύπου EuroTrough. Οι παράλληλες συστοιχίες είναι συνδεδεμένες ανά δύο σχηματίζοντας βρόχους. Κάθε βρόχος αποτελείται από 4 δομικές μονάδες συλλεκτών (SCA: Solar Collector Assembly) ET150, διατεταγμένες σε δύο παράλληλες σειρές των δύο συλλεκτών η κάθε μία. Ο συλλέκτης ET-150 αποτελείται από 12 στοιχεία κατόπτρου μήκους 12,27μ. έκαστο. Έτσι, το συνολικό μήκος κάθε βρόχου είναι 600μ. [65][66]

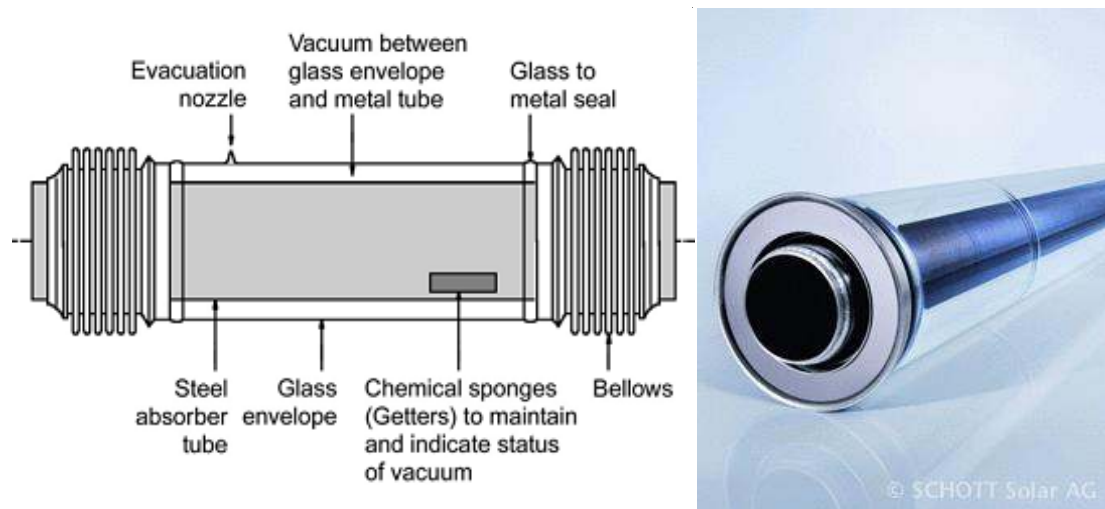
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διάταξη ενός βρόχου συλλεκτών αυτού του τύπου.



**Σχήμα 3.2** Διάταξη ενός βρόχου συλλεκτών ET-150 του υπό μελέτη ηλιακού πεδίου. [66]

Η απόσταση μεταξύ των παράλληλων συστοιχιών των συλλεκτών διατηρείται έτσι ώστε να μειώνεται σε μεγάλο βαθμό το φαινόμενο της σκίασης μεταξύ γειτονικών συστοιχιών αλλά και για να διευκολύνονται οι εργασίες κατασκευής και συντήρησης του ηλιακού πεδίου. Η επίδραση του φαινομένου αυτού στη συλλογή της θερμικής ισχύος καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας θα αναλυθεί παρακάτω. Από την άλλη πλευρά, η απόσταση μεταξύ των γειτονικών παράλληλων σειρών επιλέγουμε στη διενεργούμενη προσομοίωση να μην αυξηθεί περισσότερο τόσο για λόγους οικονομίας γης όσο και λόγω του γεγονότος ότι η εγγύτητα των σειρών παραβολικών κατόπτρων τους προσφέρει μια προστασία έναντι των ανέμων. Οι εξωτερικές σειρές κατόπτρων προστατεύονται επιπλέον από έναν ανεμοφράκτη ο οποίος περικλείει το ηλιακό πεδίο [24].

Κατά μήκος της εστιακής ευθείας των συλλεκτών είναι τοποθετημένος ο δέκτης, ο οποίος αποτελείται από το σωλήνα απορρόφησης της θερμότητας, μέσα στον οποίο ρέει το μέσο μεταφοράς της θερμότητας, και από το γυάλινο περίβλημα που τον περιβάλλει. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένας τέτοιος δέκτης.



**Σχήμα 3.3** Αριστερά: Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός δέκτη (*Heat Collection Element*) [67]. Δεξιά: Ο δέκτης *Schott PTR 70* της εταιρείας *SCHOTT Solar* [68].

Ο σωλήνας απορρόφησης είναι επενδυμένος με μια επιλεκτική επιφάνεια η οποία ευνοεί τη συγκέντρωση και απορρόφηση της ακτινοβολίας. Μεταξύ του σωλήνα και του γυάλινου περιβλήματος υπάρχει κενό αέρος έτσι ώστε να εμποδίζονται οι απώλειες θερμότητας δια συναγωγής [9].

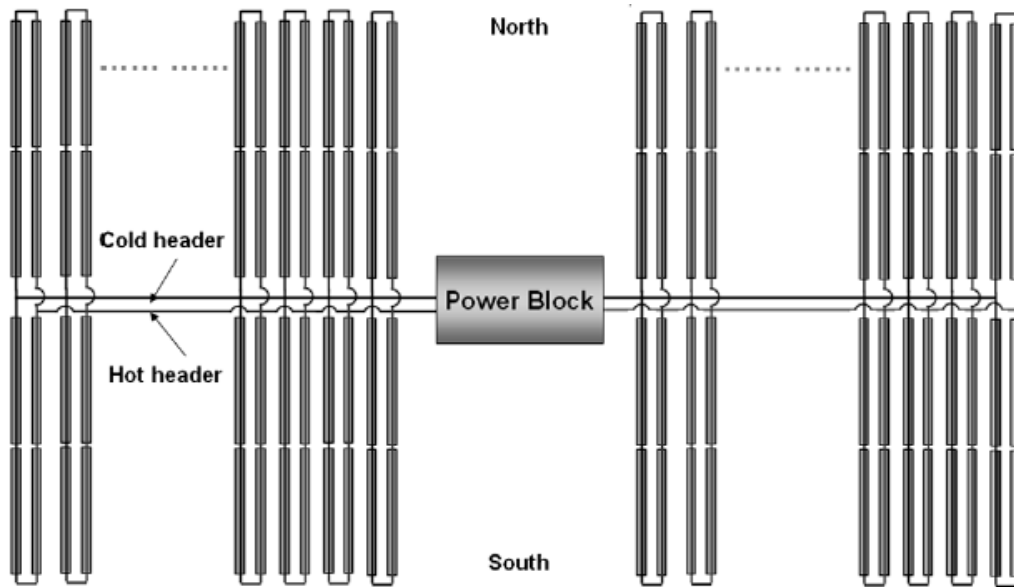
Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη που χρησιμοποιείται.

Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα απορρόφησης (m)	0.07
Εσωτερική διάμετρος του σωλήνα απορρόφησης (m)	0.065
Εξωτερική διάμετρος του γυάλινου περιβλήματος (m)	0.115
Εσωτερική διάμετρος του γυάλινου περιβλήματος (m)	0.109

**Πίνακας 3.2** Κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δέκτη που μελετάται. [66]

Ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας στον εν λόγω σταθμό χρησιμοποιείται το συνθετικό έλαιο Therminol VP-1. Το Therminol VP-1 είναι ένα ευτηκτικό μείγμα από 73.5% διφαινυλοξείδιο και 26.5% διφαινύλιο, το οποίο έχει σημείο πήξης τους 12°C, σημείο βρασμού τους 257°C στα 1013mbar ενώ παρουσιάζει εξαιρετική θερμική ευστάθεια για μακρά λειτουργία σε θερμοκρασίες μέχρι 400°C [69]. Ως εκ τούτου είναι ιδανικό για τη χρήση και τις θερμοκρασίες που το χρειαζόμαστε. Η θερμοκρασία εισόδου του συνθετικού ελαίου (Tinlet) στο ηλιακό πεδίο κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος είναι περίπου 290°C. Η αντίστοιχη θερμοκρασία εξόδου (Toutlet) του ελαίου είναι περίπου 390°C, κάτι που σημαίνει ότι το υγρό μεταφοράς της θερμότητας αυξάνει τη θερμοκρασία του κατά περίπου 100°C κατά τη διέλευσή του από το ηλιακό πεδίο. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Tamb) έχει υποτεθεί στους 25°C. Το συνθετικό έλαιο κυκλοφορεί στο δέκτη αλλά και σε ένα ευρύτερο δίκτυο σωληνώσεων με τη βοήθεια κατάλληλων αντλιών. Υπάρχουν δύο κεντρικοί σωλήνες μεταφοράς του ελαίου από και προς το θερμικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος, οι οποίοι διατρέχουν το ηλιακό πεδίο σε ευθεία, κάθετα συνήθως προς τις παράλληλες συστοιχίες των συλλεκτών. Κατά μήκος του κεντρικού σωλήνα που επιστρέφει το έλαιο από το θερμικό εναλλάκτη περίπου στους 290°C υπάρχουν συνεχόμενες έξοδοι προς τις εισόδους των βρόχων. Το έλαιο διατρέχει πρώτα τη μία πλευρά του βρόχου, στη συνέχεια περνάει μέσω ένωσης στην παράλληλη σειρά κατόπτρων του ίδιου βρόχου και αφού διατρέξει και αυτήν έχοντας πλέον αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία εισέρχεται στην αντίστοιχη είσοδο του άλλου κεντρικού σωλήνα με ροή προς το θερμικό εναλλάκτη. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται μια τυπική διάταξη ενός ηλιακού πεδίου παραβολικών κατόπτρων. [46],[65],[66]





**Σχήμα 3.4 Θεωρούμενη διάταξη του ηλιακού πεδίου για τον υπό μελέτη σταθμό παραβολικών κατόπτρων. [66]**

Η κυκλοφορία του συνθετικού ελαίου στο ηλιακό πεδίο επιτυγχάνεται μέσω των αντλιών ελαίου (HTF Pumps). Ανάλογα με τη μέγιστη ροή μάζας του ελαίου που πρόκειται να επιτευχθεί στο σταθμό εγκαθίσταται ανάλογος αριθμός μονάδων αντλιών σταθερής ή μεταβλητής ταχύτητας, οι οποίες λειτουργούν σε σειρά. Πάντα τοποθετείται και μια εφεδρική αντλία για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Ανάλογα με την απαιτούμενη κάθε φορά ισχύ αντλιών τίθενται σε λειτουργία οι αντλίες που απαιτούνται για να επιτευχθεί η κατάλληλη ροή μάζας στο μέσο μεταφοράς της θερμότητας [70][71].

Οι παρασιτικές ηλεκτρικές καταναλώσεις του ηλιακού πεδίου απαρτίζονται κατά κύριο λόγο από την κατανάλωση των αντλιών ελαίου, από την κατανάλωση του συστήματος ιχνηλάτησης των κατόπτρων και από λοιπές μικρές καταναλώσεις.

### 3.1.1 Εξισώσεις λειτουργίας του ηλιακού πεδίου

Στη συνέχεια επιχειρείται μια αναλυτική περιγραφή των εξισώσεων που διέπουν τη λειτουργία του ηλιακού πεδίου του σταθμού.

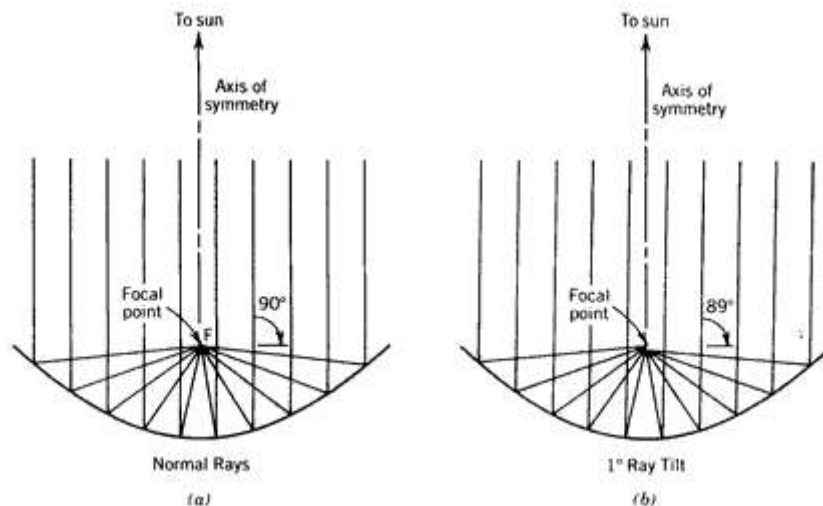
Η προσομοίωση της λειτουργίας του ηλιακού πεδίου συνίσταται κυρίως στον υπολογισμό της συνολικής θερμικής ισχύος η οποία συλλέγεται από το ηλιακό πεδίο και αποδίδεται αρχικά στο μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Το αρχικά υπολογιζόμενο μέγεθος είναι η απορροφούμενη θερμική ισχύς από το μέσο

μεταφοράς της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας κατόπτρων. Η ισχύς αυτή είναι ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ισχύος της άμεσης ακτινοβολίας και προκύπτει ως εξής [71]:

$$\dot{Q}_{absorbed} = DNI * \cos \theta * IAM * RowShadow * EndLoss * n_{field} * n_{HCE} \quad (3.1)$$

όπου  $\dot{Q}_{absorbed}$  είναι η απορροφούμενη θερμική ισχύς σε  $W/m^2$  της επιφάνειας κατόπτρων και DNI είναι η πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας ομοίως σε  $W/m^2$  της επιφάνειας κατόπτρων. Οι υπόλοιποι συντελεστές της σχέσης (3.1), οι οποίοι εξηγούνται στη συνέχεια, προσδιορίζουν το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας που απορροφάται από το συνθετικό έλαιο και ορίζουν το βαθμό απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας.

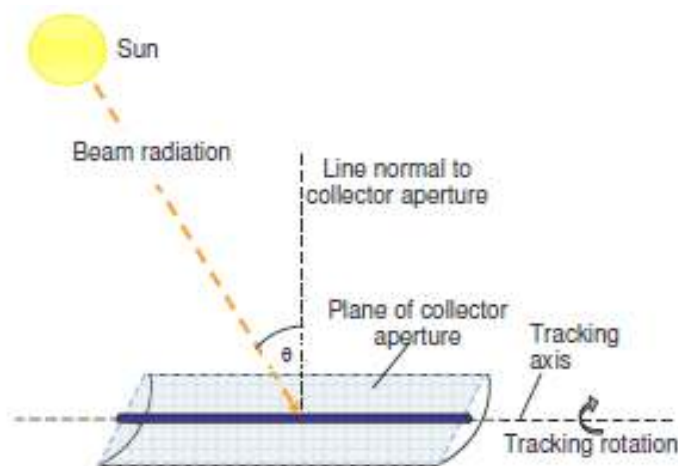
**Cos(θ)** είναι το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$ , της άμεσης ακτινοβολίας στα παραβολικά κάτοπτρα. Μόνο η άμεση ακτινοβολία που είναι κάθετη στην επιφάνεια ανοίγματος του συλλέκτη μπορεί να εστιαστεί και έτσι να συγκεντρωθεί στο κατάλληλο σημείο για να θερμάνει το μέσο μεταφοράς της θερμότητας [72]. Όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα, εάν η προσπίπτουσα ακτινοβολία δεν είναι ακριβώς κάθετη στο επίπεδο του παραβολικού κατόπτρου, οι δέσμες φωτός μετά την εστίαση διασπείρονται γύρω από το εστιακό σημείο.



**Σχήμα 3.5** Εστίαση δέσμης ακτίνων σε παραβολικό κάτοπτρο, (a) για δέσμη παράλληλη στον άξονα συμμετρίας, (b) για δέσμη που παρεκκλίνει  $1^\circ$  από τον άξονα συμμετρίας. [73]

Όσο η παράλληλη δέσμη των ακτίνων αποκλίνει από την κάθετη στο επίπεδο που ορίζει το παραβολικό κάτοπτρο, ελαττώνεται η κάθετη συνιστώσα της και έτσι

μειώνεται η εστιαζόμενη θερμική ισχύς. Η γωνία πρόσπτωσης μεταβάλλεται διαρκώς κατά τη διάρκεια της ημέρας (αλλά και ολόκληρου του έτους), παρά το γεγονός ότι τα κάτοπτρα παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου, και επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των συλλεκτών. Η γωνία αυτή είναι αποτέλεσμα της σχέσης μεταξύ της θέσης του ήλιου και του προσανατολισμού των συλλεκτών για μια δοσμένη τοποθεσία, έχοντας ως δεδομένο ότι οι παράλληλες γραμμές των συλλεκτών είναι τοποθετημένες κατά μήκος του άξονα βορρά-νότου και διαθέτουν σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου έτσι ώστε να παρακολουθούν την πορεία του από την ανατολή ως τη δύση σε καθημερινή βάση.

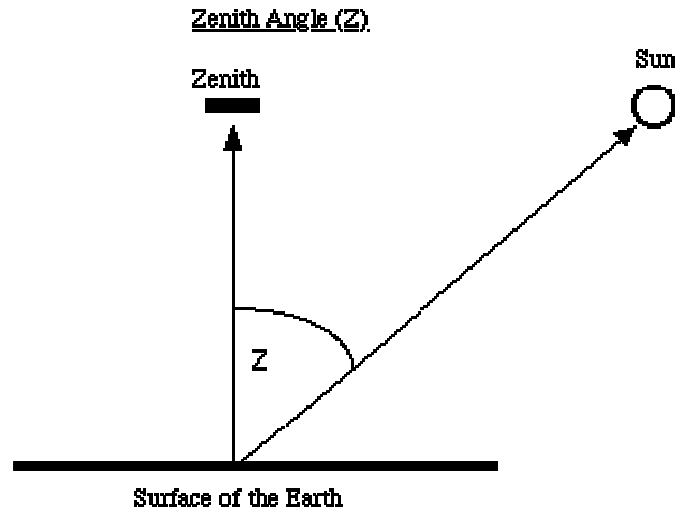


**Σχήμα 3.6 Η γωνία πρόσπτωσης σε ένα συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου. [71]**

Το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης εξαρτάται από τη γωνία της ζενιθιακής απόστασης, από τη γωνία απόκλισης της τροχιάς της γης καθώς και από τη γωνία της ώρας.

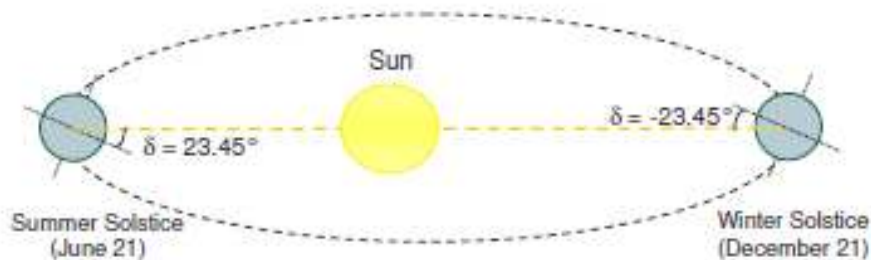
Η γωνία της ζενιθιακής απόστασης αντιπροσωπεύει την απόκλιση της στιγμιαίας θέσης του ήλιου από την κατακόρυφη ευθεία και εξαρτάται από τη γωνία απόκλισης, από τη γωνία της ώρας και από το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας [72].

Ο ήλιος φτάνει σε πολύ υψηλότερη θέση πάνω από τον ορίζοντα το καλοκαίρι σε σύγκριση με το χειμώνα. Το φυσικό αυτό φαινόμενο έχει μεγάλη επίδραση στο ηλιακό δυναμικό που συλλέγεται από το πεδίο κατά τους χειμερινούς μήνες σε σύγκριση με τους καλοκαιρινούς [71].



Σχήμα 3.7 Η γωνία ζενιθιακής απόστασης. [74]

Η γωνία απόκλισης είναι η γωνία που σχηματίζεται κατά το ηλιακό μεσημέρι μεταξύ της ευθείας που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου και του επιπέδου του ισημερινού. Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο εκλειπτικό επίπεδο (επίπεδο που περιέχει την τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο) και τον πολικό άξονα (άξονας περιστροφής της γης) είναι ίση με  $23^{\circ}.45'$ . Επειδή αυτή η γωνία δεν είναι μηδενική η γωνία απόκλισης αλλάζει διαρκώς κατά τη διάρκεια ενός έτους [71][72].



Σχήμα 3.8 Η γωνία απόκλισης λόγω της κλίσης της Γης. [71]

Η γωνία απόκλισης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σταθερή στη διάρκεια μιας ημέρας για τους υπολογισμούς, δεδομένου ότι αλλάζει κατά λιγότερο από  $0.5^{\circ}$  ανά ημέρα. Κατά τη διάρκεια ενός έτους μεταβάλλεται από τις  $-23.45^{\circ}$  έως τις  $23.45^{\circ}$  και για κάθε ημέρα υπολογίζεται σε μοίρες από την ακόλουθη εξίσωση του Cooper (1969):

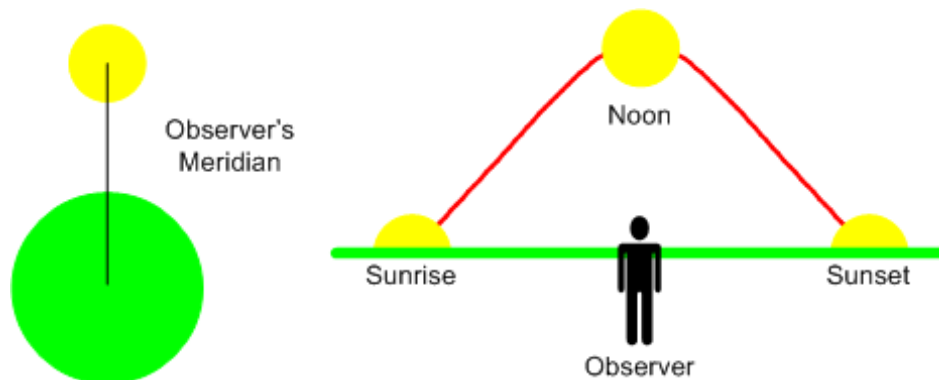
$$\delta = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{365} * (DOY + 284)\right] \quad (3.2)$$

όπου DOY είναι η ημέρα του έτους (Day of Year), η οποία μεταβάλλεται από 1 ως 365. Η γωνία  $\delta$  είναι μηδέν και στις δύο ισημερίες,  $+23.45^\circ$  κατά το θερινό ηλιοστάσιο και  $-23.45^\circ$  κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο. [72]

Η θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας καταδεικνύεται από την γωνία ώρας  $\omega$ , δηλαδή τη γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά από τον τοπικό μεσημβρινό. Η γωνία ώρας είναι αρνητική όταν ο ήλιος βρίσκεται ανατολικά του τοπικού μεσημβρινού (το πρωί), θετική όταν ο ήλιος βρίσκεται δυτικά του τοπικού μεσημβρινού (το απόγευμα) και μηδέν όταν ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς στην ευθεία του τοπικού μεσημβρινού (στο ηλιακό μεσημέρι). Η γωνία ώρας, η οποία προκύπτει από το γεγονός ότι η γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της με ρυθμό  $15^\circ$  ανά ώρα, δίνεται σε μοίρες από την παρακάτω σχέση:

$$\omega = (SolarTime - 12) * 15 \quad (3.3)$$

όπου SolarTime είναι η ηλιακή ώρα. Η ώρα που ως αναφορά της έχει τον ήλιο δεν συμπίπτει με την τοπική ώρα (StandardTime). Στην ηλιακή ώρα, ο ήλιος ευθυγραμμίζεται με τον τοπικό μεσημβρινό ακριβώς στις 12 η ώρα το μεσημέρι. [71][72]



**Σχήμα 3.9** Κατά το ηλιακό μεσημέρι ο παρατηρητής βλέπει τον ήλιο στο υψηλότερο σημείο της τροχιάς του. [75]

Εκτός από τις απώλειες λόγω μη μηδενικής γωνίας πρόσπτωσης, υπάρχουν κι άλλες απώλειες στους συλλέκτες οι οποίες συσχετίζονται με τη γωνία πρόσπτωσης.

Οι απώλειες αυτές είναι αποτέλεσμα πρόσθετης αντανάκλασης καθώς και απορρόφησης από το γυάλινο περίβλημα του δέκτη, όταν η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται. Ο συντελεστής **IAM** (Incidence Angle Modifier) αποδίδει την επίδραση αυτών των απωλειών και εξαρτάται από το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης καθώς και από μια εμπειρική συνάρτηση  $K(\theta)$  της γωνίας πρόσπτωσης η οποία προκύπτει από πειραματικές μετρήσεις για κάποιο συγκεκριμένο τύπο συλλεκτών. Ο συντελεστής IAM ορίζεται ως το πηλίκο του  $K(\theta)$  προς το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης ως εξής:

$$IAM = \frac{K(\theta)}{\cos \theta} \quad (3.4)$$

Ο συντελεστής σκίασης **RowShadow** αποδίδει τη μείωση στην απορροφούμενη θερμική ισχύ λόγω της σκίασης γειτονικών παράλληλων σειρών συλλεκτών, η οποία συμβαίνει κατά το πρωί και το απόγευμα. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω οι συλλέκτες είναι εφοδιασμένοι με σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου. Κατά τις πρώτες στιγμές της ηλιοφάνειας, νωρίς το πρωί, οι συλλέκτες είναι εντελώς στραμμένοι προς την ανατολή. Εξαιτίας του γεγονότος ότι τότε ο ήλιος βρίσκεται πολύ χαμηλά, οι πρώτες σειρές από ανατολικά θα δέχονται εξ ολοκλήρου την ηλιακή ακτινοβολία και ταυτόχρονα θα σκιάζουν όλες τις παρακείμενες σειρές προς τη δύση. Καθώς ο ήλιος ανεβαίνει στον ουρανό ακολουθώντας την τροχιά του, το φαινόμενο της σκίασης θα εξασθενεί έως ότου ο ήλιος φτάσει σε μια κρίσιμη γωνία ζενιθιακής απόστασης οπότε και το φαινόμενο θα εξαφανιστεί πλήρως. Από τη στιγμή εκείνη (αργά το πρωί) έως νωρίς το απόγευμα δεν παρατηρείται το φαινόμενο της σκίασης στο ηλιακό πεδίο. Μόλις όμως το ύψος του ήλιου ξαναγίνει χαμηλό οδεύοντας προς τη δύση του, η σκίαση επανεμφανίζεται. Η εικόνα που ακολουθεί απεικονίζει το φαινόμενο της σκίασης κατά την παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου από τους συλλέκτες από νωρίς το πρωί μέχρι να σταματήσει η σκίαση αργότερα το πρωί. [71][76]

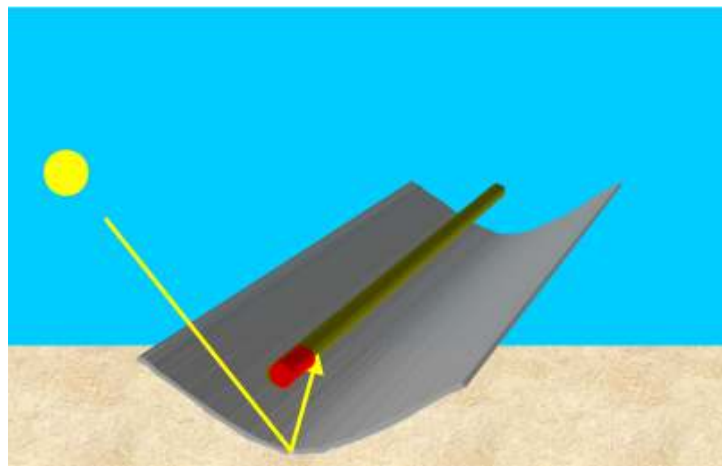


**Σχήμα 3.10 Παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου από τους συλλέκτες, από νωρίς το πρωί, όπου φαίνεται η σταδιακή υπέρβαση του εμποδίου της σκίασης όσο περνάει η ώρα. [71]**

Η σκίαση μειώνει την απορροφούμενη θερμική ισχύ αφού μεγάλο τμήμα της δέσμης προσπίπτουσας ακτινοβολίας αποκρύπτεται από τις σειρές κατόπτρων. Το εύρος του ανοίγματος του κατόπτρου που δέχεται ακτινοβολία (δηλαδή δεν είναι σκιασμένο) ορίζεται ως «ενεργό εύρος κατόπτρου». Ο συντελεστής σκίασης RowShadow είναι ο λόγος του ενεργού προς το πραγματικό εύρος κατόπτρου.

$$RowShadow = \frac{W_{eff}}{W} \quad (3.5)$$

Ο συντελεστής **EndLoss** αποδίδει τις απώλειες στα άκρα του δέκτη, όπου, για μη μηδενική γωνία πρόσπτωσης, ένα ακριανό τμήμα του σωλήνα απορρόφησης δεν ακτινοβολείται από την ανακλώμενη άμεση ακτινοβολία. Οι απώλειες αυτές αυξάνονται για μεγαλύτερη εστιακή απόσταση. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το φαινόμενο των απωλειών στα άκρα ενός δέκτη για μη μηδενική γωνία πρόσπτωσης. [71][76]



Σχήμα 3.11 Απώλειες στο άκρο του δέκτη. [71]

Οι δύο τελευταίοι συντελεστές της σχέσης (3.1),  $\eta_{field}$  και  $\eta_{HCE}$ , αφορούν τις επιφανειακές ιδιότητες και τις αστοχίες των υλικών των παραβολικών κατόπτρων, του σωλήνα απορρόφησης και του γυάλινου περιβλήματός του. Η ακτινοβολία ενδέχεται να απορροφηθεί ή να σκεδαστεί από σκόνη και άλλες ακαθαρσίες πάνω στα κάτοπτρα αλλά και να μην εστιάζεται τέλεια λόγω είτε μικρών ατελειών στη σχεδίαση (κυρίως στην εστίαση) των κατόπτρων είτε σφαλμάτων στην παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου. Επίσης, η διαπερατότητα του γυάλινου περιβλήματος του δέκτη, η απορροφητικότητα του επιλεκτικού επιστρώματος του σωλήνα απορρόφησης καθώς και άλλες ιδιότητες της επιφάνειας συνεισφέρουν στον υπολογισμό των παραπάνω συντελεστών. Ο προσεγγιστικός προσδιορισμός

αυτών των συντελεστών επιχειρήθηκε με βάση διάφορες βιβλιογραφικές αναφορές και μελέτες. ([41][65][66][71][77][78]).

Θα πρέπει ακόμη να αναφερθεί ότι, προκειμένου να διατηρούνται τα κάτοπτρα όσο το δυνατόν καθαρότερα, οι ανακλαστικές επιφάνειες πλένονται με νερό ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Η αρχικά απορροφούμενη θερμική ισχύς από το μέσο μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό του δέκτη, υπόκειται στη συνέχεια σε θερμικές απώλειες τόσο κατά τη διάρκεια κυκλοφορίας του συνθετικού ελαίου στους σωλήνες απορρόφησης της θερμότητας όσο και στο γενικότερο σύστημα σωληνώσεων από και προς το ηλιακό πεδίο. Οι θερμικές αυτές απώλειες προς το περιβάλλον αιτιολογούνται λόγω των αρκετά υψηλότερων θερμοκρασιών που επικρατούν στο συνθετικό έλαιο κατά τη λειτουργία του σταθμού σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενώ διαρκές αντικείμενο έρευνας αποτελεί ο περιορισμός τους [71][76].

Οι θερμικές απώλειες στο δέκτη πραγματοποιούνται μέσω τριών μηχανισμών μεταφοράς της θερμότητας: με ακτινοβολία από το σωλήνα απορρόφησης στο εσωτερικό του γυάλινου περιβλήματος κι από εκεί στο περιβάλλον, με ρεύματα αέρα κατά τις ίδιες διαδρομές και με επαφή μέσω του γυάλινου περιβλήματος. Οι παραπάνω μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας επηρεάζονται από διάφορα μεγέθη. Για παράδειγμα, μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου θα επιταχύνει την απώλεια θερμότητας μέσω ρευμάτων. Ουσιαστικά όμως ο κρίσιμος παράγοντας είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του περιβάλλοντος και του συνθετικού ελαίου και οι εν λόγω απώλειες εξαρτώνται πρακτικά μόνο από τη διαφορά αυτή. Προφανώς, όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος τόσο θα μεγαλώνει η διαφορά θερμοκρασίας με το συνθετικό έλαιο και κατ' επέκταση και οι απώλειες θερμότητας. [71],[76]

Προκειμένου να υπολογίσουμε μια μέση τιμή αυτών των απωλειών ανά τετραγωνικό μέτρο ( $W/m^2$ ), θα πρέπει να ολοκληρώσουμε τις απώλειες που αφορούν μια συγκεκριμένη θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς της θερμότητας, για θερμοκρασίες συνθετικού ελαίου από τη θερμοκρασία εισόδου του στο ηλιακό πεδίο ( $T_{inlet}$ ) έως τη θερμοκρασία εξόδου του από αυτό ( $T_{outlet}$ ), και να διαιρέσουμε με τη διαφορά των θερμοκρασιών αυτών. [71]

$$RecHL = \frac{\int_{T_{inlet}}^{T_{outlet}} RecHL_{m^2}}{T_{outlet} - T_{inlet}} \quad (3.6)$$

όπου  $RecHL_{m^2}$  οι θερμικές απώλειες στο δέκτη ανά τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας κατόπτρων.

Προκειμένου να εξουδετερωθούν, όσο γίνεται, οι παραπάνω μηχανισμοί απώλειας της θερμότητας, τοποθετείται γύρω από το σωλήνα απορρόφησης



επιλεκτική επιφάνεια από κεραμικό-μεταλλικό υλικό (CERMET) και, επίσης, περιβάλλεται ο σωλήνας απορρόφησης από κενό αέρος μεταξύ αυτού και του γυάλινου περιβλήματος. Με το κενό αέρος εμποδίζονται οι απώλειες θερμότητας μέσω ρευμάτων. Όμως, με την πάροδο των ετών μικρές ποσότητες αέρα από το περιβάλλον μπορεί να εισέλθουν στο χώρο του κενού από φθορές στο δέκτη. Ακόμη, στο χώρο αυτό μπορεί να διεισδύσει υδρογόνο από το συνθετικό έλαιο μέσω του σωλήνα απορρόφησης. Οι παραπάνω διαδικασίες καταστρέφουν το κενό αέρος και έτσι αυξάνονται, με την πάροδο του χρόνου, οι θερμικές απώλειες στο ηλιακό πεδίο. Στην παρούσα προσομοίωση, έχουμε πάρει ως υπόθεση εργασίας ότι το κενό αέρος δεν αλλοιώνεται. Οι θερμικές απώλειες ανά τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας του δέκτη διαφέρουν ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο δέκτη. [9],[71],[76]

Επιπρόσθετα, θερμικές απώλειες υπάρχουν και στο δίκτυο σωληνώσεων από και προς το ηλιακό πεδίο. Αυτές οι απώλειες, ομοίως, εξαρτώνται πρακτικά μόνο από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του συνθετικού ελαίου και του περιβάλλοντος, ενώ είναι αρκετά μικρότερες από τις απώλειες στο δέκτη [71].

Εν τέλει, η τελικά συλλεγόμενη θερμική ισχύς από το ηλιακό πεδίο, η οποία και κατευθύνεται προς το θερμικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος, προκύπτει εάν από την απορροφούμενη θερμική ισχύ στους συλλέκτες αφαιρεθούν οι θερμικές απώλειες που υπολογίστηκαν παραπάνω.

Μετά την εύρεση της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος ένα άλλο σημαντικό μέγεθος στην προσομοίωση του ηλιακού πεδίου είναι η ροή μάζας του μέσου μεταφοράς θερμότητας. Η ροή μάζας του συνθετικού ελαίου είναι μεταβλητό μέγεθος και ρυθμίζεται από τις αντλίες του συστήματος σωληνώσεων. Καθώς υπάρχουν διάφορες στρατηγικές λειτουργίας του ηλιακού πεδίου των ηλιοθερμικών σταθμών παραβολικών κατόπτρων, στη συγκεκριμένη προσομοίωση επιλέχθηκε να ρυθμίζεται κατάλληλα η ροή μάζας του συνθετικού ελαίου έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία εξόδου του ελαίου στους 390 °C περίπου. Η απαιτούμενη θερμική ενέργεια ανά kg ελαίου που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του εξαρτάται αποκλειστικά από τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ελαίου, οι οποίες καθορίζουν την ενθαλπία του ελαίου στις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Δεδομένων των δύο αυτών θερμοκρασιών, η απαιτούμενη ροή μάζας του συνθετικού ελαίου θα εξαρτάται από τη συλλεγόμενη θερμική ισχύ. Είναι προφανές ότι μεγαλύτερη συλλεγόμενη θερμική ισχύς μπορεί να καλύψει την απαιτούμενη αύξηση της θερμοκρασίας μιας μεγαλύτερης παροχής ελαίου. Βέβαια, υπάρχει ένα άνω τεχνικό όριο το οποίο τίθεται από την εγκατεστημένη ισχύ των αντλιών ελαίου καθώς και από τις αντοχές των σωληνώσεων. 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 κατά τη διέλευσή του από το ηλιακό πεδίο. Στις περιόδους που ταυτόχρονα με το ηλιακό πεδίο λειτουργεί είτε η αποθήκη θερμικής ενέργειας (εκφόρτιση) είτε ο βοηθητικός

λέβητας συμβατικού καυσίμου, η πηγή θέρμανσης του ελαίου δεν θα είναι αποκλειστικά η συλλεγόμενη θερμική ισχύς εκείνη την ώρα αλλά και η θερμική ισχύς από τις άλλες δύο πηγές. Στη σχέση υπολογισμού της ροής μάζας θα συμμετέχουν τότε και οι άλλες πηγές θέρμανσής του.

Η απαιτούμενη ενέργεια για συγκεκριμένη αύξηση της θερμοκρασίας ανά κιλό συνθετικού ελαίου ισούται με τη διαφορά των ενθαλπιών μεταξύ τελικής και αρχικής θερμοκρασίας. Η ενθαλπία εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του ελαίου και παρέχεται από πίνακες ιδιοτήτων του συγκεκριμένου μέσου μεταφοράς της θερμότητας [69].

Η ροή μάζας του ελαίου, σε kg/s, για δεδομένη αύξηση της θερμοκρασίας του κατά τη διέλευσή του από το ηλιακό πεδίο, και δεδομένη συνολικά συλλεγόμενη θερμική ισχύ δίνεται από τον τύπο που ακολουθεί:

$$\dot{m}_{HTF} = \frac{\dot{Q}_{collected} * TotalApertureArea}{\Delta h} \quad (3.7)$$

όπου η  $\dot{Q}_{collected}$  είναι η συλλεγόμενη θερμική ισχύς σε W/m<sup>2</sup>,  $\Delta h$  είναι η αντίστοιχη αύξηση της ενθαλπίας σε J/kg ενώ *TotalApertureArea* είναι η συνολική επιφάνεια κατόπτρων του ηλιακού πεδίου του σταθμού, σε m<sup>2</sup>, η οποία ισούται με:

$$TotalApertureArea = loops * LAA \quad (3.8)$$

όπου *loops* είναι ο αριθμός των βρόχων του ηλιακού πεδίου και *LAA* (LAA-Loop Aperture Area) είναι η επιφάνεια κατόπτρων του ενός βρόχου σε m<sup>2</sup>.

Η πυκνότητα του συνθετικού ελαίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Ως εκ τούτου μια συγκεκριμένη ογκομετρική ροή του ελαίου ισοδυναμεί με διαφορετικές ροές μάζας σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η πυκνότητα του Therminol VP-1 παρέχεται ομοίως από πίνακες δεδομένων του χρησιμοποιούμενου μέσου μεταφοράς της θερμότητας [69].

Κατά τον κύκλο διέλευσης του συνθετικού ελαίου από το ηλιακό πεδίο η πίεσή του μειώνεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η πτώση της πίεσής του τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ισχύς των αντλιών σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο [71]:

$$\Delta P_{HTF} = \frac{n_{HTFpump} \cdot \dot{W}_{HTFpump}}{\dot{V}_{HTF}} \quad (3.9)$$

όπου  $n_{HTFpump}$  είναι ο βαθμός απόδοσης των αντλιών,  $\dot{W}_{HTFpump}$  είναι η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνουν οι αντλίες σε W και  $\dot{V}_{HTF}$  είναι η ογκομετρική ροή του συνθετικού ελαίου. Όταν οι αντλίες λειτουργούν σε μέγιστη ισχύ, ο βαθμός απόδοσης των αντλιών έχει υποτεθεί ίσος με 0,6. Διαφορετικά, για ροή μάζας του ελαίου μικρότερη από τη μέγιστη, ο βαθμός απόδοσης των αντλιών υπολογίζεται από τον παρακάτω προσεγγιστικό τύπο:

$$\frac{n_{HTFpump}}{n_{HTFpump,ref}} = e_{mo} + 2(1 - e_{mo}) \cdot \frac{\dot{m}_{HTF}}{\dot{m}_{HTF,max}} - (1 - e_{mo}) \cdot \left( \frac{\dot{m}_{HTF}}{\dot{m}_{HTF,max}} \right)^2 \quad (3.10)$$

όπου  $n_{HTFpump,ref} = 0.6$  είναι η απόδοση των αντλιών για μέγιστη ισχύ και  $\dot{m}_{HTF,max}$  είναι η μέγιστη ροή μάζας του ελαίου που επιτυγχάνεται στο σταθμό. Η σταθερή μεταβλητή  $e_{mo}$  έχει τιμή -0,4 για αντλίες μεταβλητής ταχύτητας και τιμή 0 για αντλίες σταθερής ταχύτητας. [66],[70],[71]

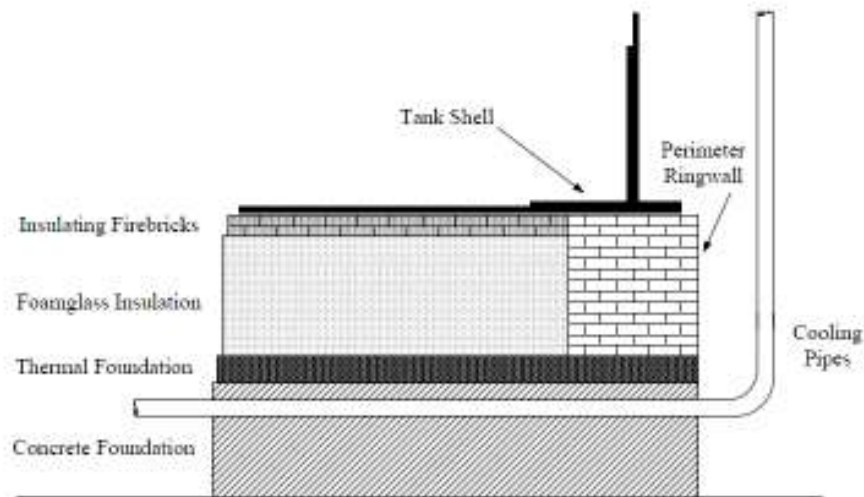
### 3.2 Περιγραφή του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας

Ο υπό προσομοίωση ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων είναι εφοδιασμένος με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Η τεχνολογία αποθήκευσης που χρησιμοποιείται είναι έμμεση αποθήκευση με τη χρήση μείγματος τηγμένων αλάτων κατά τα πρότυπα του ηλιοθερμικού σταθμού Andasol στην Ισπανία. Το σύστημα αποθήκευσης αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια στοιχεία: το μέσο αποθήκευσης δηλαδή το μείγμα τηγμένων αλάτων, τις δύο δεξαμενές αποθήκευσης, τους θερμικούς εναλλάκτες ελαίου-αλάτων και τις αντλίες των τηγμένων αλάτων.

Το μείγμα τηγμένων αλάτων που χρησιμοποιείται, αποτελείται κατά 60% από νιτρικό νάτριο και κατά 40% από νιτρικό κάλιο. [11]

Ο πυρήνας του συστήματος αποθήκευσης είναι οι δύο μεγάλες κυλινδρικές δεξαμενές, μία θερμή και μία ψυχρή, στις οποίες βρίσκεται αποθηκευμένο το μείγμα των τηγμένων αλάτων. Οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από ανθρακούχο χάλυβα ενώ οι οροφές τους είναι αυτοφερόμενες. Τόσο τα τοιχώματα όσο και η οροφή κάθε δεξαμενής είναι μονωμένα με πλάκες πετροβάμβακα και μπλοκ πυριτικού ασβεστίου αντίστοιχα. Η μονωμένη θεμελίωση των δεξαμενών αποτελείται από τα ακόλουθα στρώματα (από το έδαφος προς τα πάνω): (1)

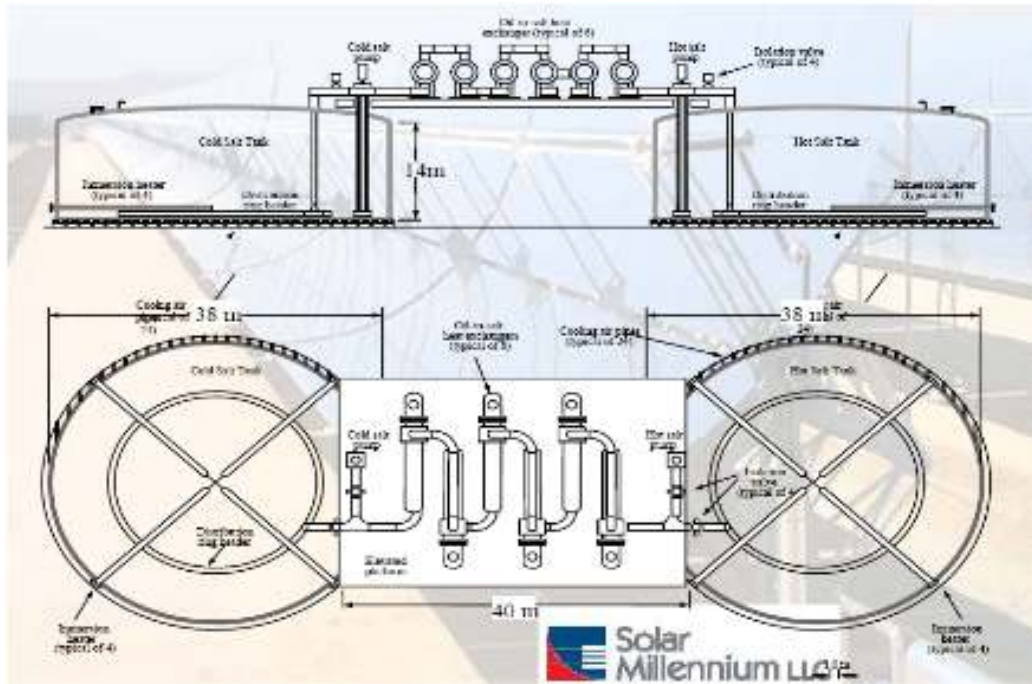
τσιμεντένια πλάκα, (2) πλάκα από μονωτικό σκυρόδεμα, (3) μονωτικό στρώμα από κυψελοειδή ύαλο (αφρισμένο γυαλί), (4) μονωτικά πυρότουβλα, (5) λεπτή επένδυση από ατσάλινη πλάκα, και (6) άμμο. Ένας περιμετρικός δακτυλιοειδής τοίχος από μονωτικά πυρότουβλα υποστηρίζει το βάρος των τοιχωμάτων της δεξαμενής και της οροφής. [81]



**Σχήμα 3.12 Θεμελίωση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας. [82]**

Εφόσον η αποθήκευση που υλοποιείται είναι έμμεση απαιτείται η χρησιμοποίηση θερμικών εναλλακτών για τη μετάδοση της θερμότητας από το συνθετικό έλαιο στα άλατα αλλά και αντίστροφα. Ο τύπος θερμικού εναλλάκτη ελαίου-αλάτων που χρησιμοποιείται είναι ο συμβατικός εναλλάκτης σωληνοειδούς δέσμης (shell and tube). Το υψηλής πίεσης συνθετικό έλαιο διέρχεται από τις σωληνώσεις του εναλλάκτη (tube side), ενώ το υγροποιημένο άλας γεμίζει τον κελυφοειδή χώρο που περιβάλλει τις σωληνώσεις (shell side). [81],[82]

Οι αντλίες των τηγμένων αλάτων είναι κατασκευασμένες σε κατακόρυφη διάταξη και τραβούν την παροχή τους από τον πυθμένα των δεξαμενών. Χρησιμοποιούν ένα επιμηκυμένο στέλεχος που τις επιτρέπει να στηρίζονται σε μια διάταξη πάνω από τις δεξαμενές όπου βρίσκονται και οι κινητήρες των αντλιών. Η εγκατεστημένη ισχύς των αντλιών αλάτων εξαρτάται από την ποσότητα του μείγματος των αλάτων στο σύστημα αποθήκευσης η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τις επιθυμητές ώρες αυτοδυναμίας του σταθμού. [81],[82]



**Σχήμα 3.13 Πρόσοψη και κάτοψη του συστήματος αποθήκευσης δύο δεξαμενών του ηλιοθερμικού σταθμού Andasol. [59]**

Στο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας του υπό προσομοίωση σταθμού έχει θεωρηθεί ότι η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται στα τηγμένα άλατα σε θερμοκρασία 385°C στη «θερμή» δεξαμενή ενώ η θερμοκρασία των αλάτων στην «ψυχρή» δεξαμενή είναι 290°C.

### 3.2.1 Εξισώσεις λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας

Στη συνέχεια επιχειρείται μια περιγραφή των εξισώσεων που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας.

Κατά τη διαδικασία φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης το συνθετικό έλαιο που διέρχεται από τον εναλλάκτη ελαίου-αλάτων αποδίδει τη θερμότητά του στο μείγμα τηγμένων αλάτων της ψυχρής δεξαμενής, το οποίο στη συνέχεια

αποθηκεύεται στη θερμή δεξαμενή έχοντας αυξήσει τη θερμοκρασία του. Η θερμική ισχύς που αποδίδει το συνθετικό έλαιο κατά τη διέλευσή του από τον εναλλάκτη ( $\dot{Q}_{forStorage}$ ) εξαρτάται από τη θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ελαίου από το ηλιακό πεδίο καθώς και από τη ροή μάζας της ποσότητας ελαίου που φορτίζει την αποθήκη του σταθμού ( $\dot{m}_{HTFst}$ ), σύμφωνα με την παρακάτω σχέση [83].

$$\dot{Q}_{forStorage} = (h_{out} - h_{in}) * \dot{m}_{HTFst} \quad (3.11)$$

όπου  $\dot{Q}_{forStorage}$  σε W,  $\dot{m}_{HTFst}$  σε kg/s ενώ  $h_{out}$  και  $h_{in}$  είναι οι ενθαλπίες του συνθετικού ελαίου στις θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου του στο ηλιακό πεδίο, αντίστοιχα, σε J/kg.

Στο θερμικό εναλλάκτη έχουμε θερμικές απώλειες και έτσι η θερμική ισχύς που απορροφούν εν τέλει τα τηγμένα άλατα ( $\dot{Q}_{toStorage}$ ) είναι η εξής:

$$\dot{Q}_{toStorage} = n_{HXos} * \dot{Q}_{forStorage} \quad (3.12)$$

όπου  $n_{HXos}$  είναι ο βαθμός απόδοσης του θερμικού εναλλάκτη ελαίου-αλάτων.

Η ροή μάζας του μείγματος αλάτων, η οποία διέρχεται από τον εναλλάκτη με κατεύθυνση προς τη «θερμή» δεξαμενή εξαρτάται από τη θερμική ισχύ που αποδίδει το έλαιο αλλά και από τις ενθαλπίες του μείγματος αλάτων στις δύο δεξαμενές. Υπολογίζεται, σε kg/s, από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{m}_{ms} = \frac{\dot{Q}_{toStorage}}{h_{sh} - h_{sc}} \quad (3.13)$$

όπου  $\dot{Q}_{toStorage}$  είναι σε W ενώ  $h_{sh}$  και  $h_{sc}$  είναι οι ενθαλπίες του μείγματος αλάτων στη «θερμή» και στην «ψυχρή» δεξαμενή, αντίστοιχα, σε J/kg. [83]

Για δεδομένη μάζα αλάτων που πρέπει να μεταφερθεί στη «θερμή» δεξαμενή και με την υπόθεση ότι η αποδιδόμενη θερμική ισχύς στην αποθήκη του συστήματος είναι σταθερή, μπορούμε να προσδιορίσουμε μια ενδεικτική χρονική διάρκεια φόρτισης της αποθήκης.

Κατά τη διαδικασία εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης, το υγροποιημένο άλας ρέει από τη «θερμή» στην «ψυχρή» δεξαμενή αποδίδοντας την αποθηκευμένη ενέργεια στο συνθετικό έλαιο μέσω του θερμικού εναλλάκτη ελαίου-αλάτων. Η

Θερμική ισχύς που αποδίδεται από μια συγκεκριμένη ροή μάζας αλάτων ( $\dot{m}_{ms}$ ) στο θερμικό εναλλάκτη είναι η εξής:

$$\dot{Q}_{forHTF} = (h_{sh} - h_{sc}) * \dot{m}_{ms} \quad (3.14)$$

όπου  $\dot{Q}_{forHTF}$  σε W,  $\dot{m}_{ms}$  σε kg/s ενώ η διαφορά των ενθαλπιών ( $h_{sh} - h_{sc}$ ) είναι σε J/kg. [83]

Ομοίως με παραπάνω, η θερμική ισχύς, σε W, που φτάνει εν τέλει στο συνθετικό έλαιο ( $\dot{Q}_{toHTF}$ ) το οποίο διαρρέει τον εναλλάκτη θα είναι:

$$\dot{Q}_{toHTF} = n_{HXos} * \dot{Q}_{forHTF} \quad (3.15)$$

Για συγκεκριμένες θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του συνθετικού ελαίου από το θερμικό εναλλάκτη κατά την εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης, η ροή μάζας του ελαίου από τον εναλλάκτη ( $\dot{m}_{HTFfromSt}$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{m}_{HTFfromSt} = \frac{\dot{Q}_{toHTF}}{h_{HTF2} - h_{HTF1}} \quad (3.16)$$

όπου  $\dot{m}_{HTFfromSt}$  είναι σε kg/s,  $\dot{Q}_{toHTF}$  σε W, και  $h_{HTF2}, h_{HTF1}$  είναι οι ενθαλπίες του ελαίου στην έξοδο και στην είσοδο του εναλλάκτη, αντίστοιχα, σε J/kg.

Ο ειδικός όγκος του μείγματος των αλάτων εξαρτάται από τη θερμοκρασία τους και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

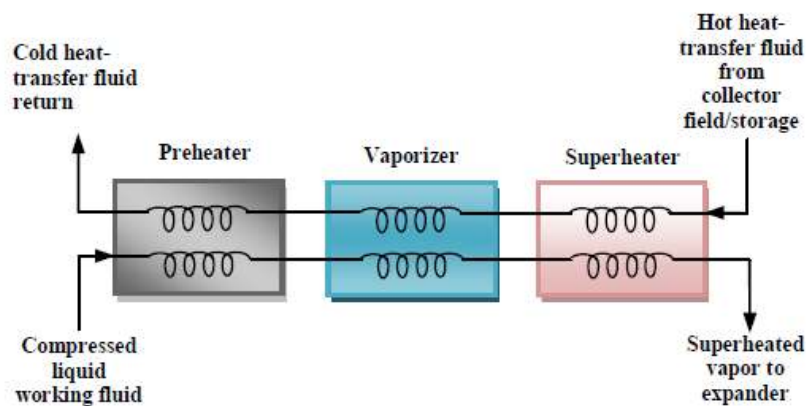
$$v_l(T) = \frac{1}{2090 - 0,636T} \quad (3.17)$$

όπου η θερμοκρασία είναι σε βαθμούς Κελσίου και ο ειδικός όγκος σε m<sup>3</sup>/kg [84].

### 3.3 Περιγραφή του κύκλου ισχύος

Στον υπό προσομοίωση ηλιοθερμικό σταθμό έχουμε θεωρήσει ότι υλοποιείται ο αναγεννητικός θερμοδυναμικός κύκλος Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Η μεταφορά της θερμότητας του συνθετικού ελαίου στο μείγμα νερού-ατμού του κύκλου ισχύος προς παραγωγή του υπέρθερμου ατμού πραγματοποιείται στον εναλλάκτη θερμότητας του κύκλου ισχύος. Ο εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται από έναν προθερμαντήρα, μια γεννήτρια ατμού κι έναν υπερθερμαντήρα, σε σειρά.



**Σχήμα 3.14** Διάγραμμα του θερμικού εναλλάκτη του κύκλου ισχύος. [85]

Μέσα από αυτά τα διαδοχικά βήματα παράγεται υπέρθερμος ατμός θερμοκρασίας περίπου 370°C και πίεσης 100bar υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας. Ο υπέρθερμος ατμός διοχετεύεται αρχικά στη βαθμίδα υψηλής πίεσης του ατμοστροβίλου, όπου εκτονώνεται και κινεί τα πτερύγια της τουρμπίνας. Δύο απομαστεύσεις ατμού πραγματοποιούνται από το στρόβιλο υψηλής πίεσης. Αυτές οι λήψεις οδηγούν μέρος του ατμού από το στρόβιλο υψηλής πίεσης σε δύο θερμομαντήρες νερού-ατμού κλειστού τύπου για να προθερμάνουν την παροχή του νερού πριν την είσοδό του στον κεντρικό θερμικό εναλλάκτη ελαίου-μείγματος νερού-ατμού. Οι προθερμαντήρες κλειστού τύπου είναι κι αυτοί εναλλάκτες θερμότητας σωληνοειδούς δέσμης (shell and tube). Η υψηλής πίεσης παροχή νερού διέρχεται από τις σωληνώσεις του εναλλάκτη (tube side), ενώ ο εξαγόμενος ατμός γεμίζει τον κελυφοειδή χώρο που περιβάλλει τις σωληνώσεις (shell side). Η απομάστευση του ατμού αυξάνει τη θερμοκρασία του νερού πριν τη γεννήτρια ατμού κι έτσι αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου ισχύος καθώς μειώνεται η απαιτούμενη θερμική ισχύς που εισέρχεται στον κύκλο. [71][76]



Μετά την έξοδο από το στρόβιλο υψηλής πίεσης ο ατμός διέρχεται από έναν αναθερμαντήρα όπου και υπερθερμαίνεται μέχρι την ίδια θερμοκρασία περίπου που είχε πριν την είσοδό του στο στρόβιλο υψηλής πίεσης. Ο αναθερμαντήρας είναι κι αυτός ένας θερμικός εναλλάκτης όπου συνθετικό έλαιο θερμαίνει το μείγμα νερού-ατμού από την έξοδο του στροβίλου υψηλής πίεσης. Έτσι, υπό ονομαστικές συνθήκες, υπέρθερμος ατμός θερμοκρασίας περίπου 370°C και πίεσης περίπου 17bar εισέρχεται στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης, όπου εκτονώνεται ξανά περιστρέφοντας τα περύγια του στροβίλου. Το μηχανικό έργο που παράγεται στον περιστρεφόμενο άξονα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της συνδεδεμένης γεννήτριας. [71],[76]

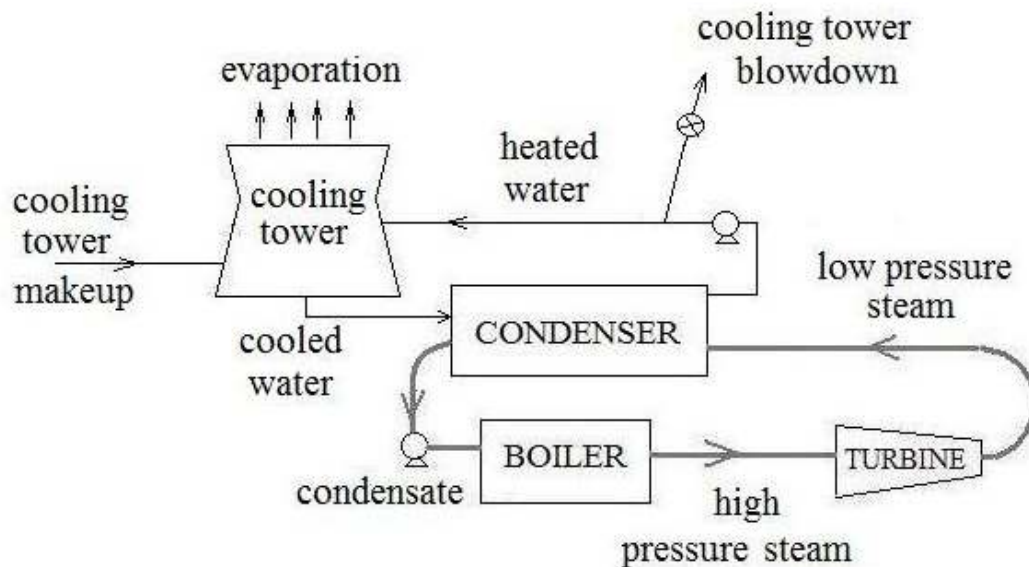


**Σχήμα 3.15** Ο εμπορικά επιτυχημένος ατμοστρόβιλος SST-600 της Siemens, ιδανικός για ηλιοθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. [86]

Από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης λαμβάνονται τέσσερις απομαστεύσεις ατμού. Η μία από αυτές κατευθύνεται στον εξαερωτήρα ενώ οι άλλες τρεις οδηγούν τον ατμό σε θερμοαντλήρες της παροχής νερού κλειστού τύπου. Ο εξαερωτήρας είναι ένας θερμοαντλήρας ανοικτού τύπου, όπου σε αντίθεση με τους θερμοαντλήρες κλειστού τύπου ο απομαστευόμενος ατμός αναμειγνύεται άμεσα με την παροχή του νερού. Είναι πιο αποδοτικός από το θερμοαντλήρα κλειστού τύπου, όμως η πίεση εξόδου της παροχής νερού δεν μπορεί να υπερβεί την πίεση του απομαστευόμενου ατμού. Για αυτό απαιτείται μια επιπλέον αντλία στην έξοδο της παροχής νερού, η οποία αυξάνει την πίεση του νερού στην πίεση βρασμού. Οι τρεις προθερμαντήρες κλειστού τύπου προθερμαίνουν την παροχή νερού πριν τον εξαερωτήρα. [71][76]

Από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης εξέρχεται μείγμα νερού-ατμού σε πίεση 0,08bar, που είναι και η πίεση συμπύκνωσης υπό την οποία ψύχεται ο ατμός. Στην έξοδο του στροβίλου έχουμε υγρό ατμό και ως εκ τούτου η θερμοκρασία του είναι η

Θερμοκρασία βρασμού του νερού σε πίεση 0,08bar, η οποία είναι 41,53°C. Η ξηρότητα του ατμού στην έξοδο του στροβίλου είναι κοντά στο 90%. Ο υγρός αυτός ατμός συμπυκνώνεται στη συνέχεια σε έναν επιφανειακό συμπυκνωτή όπου η θερμότητά του απάγεται από το νερό κυκλοφορίας του συστήματος ψύξης.



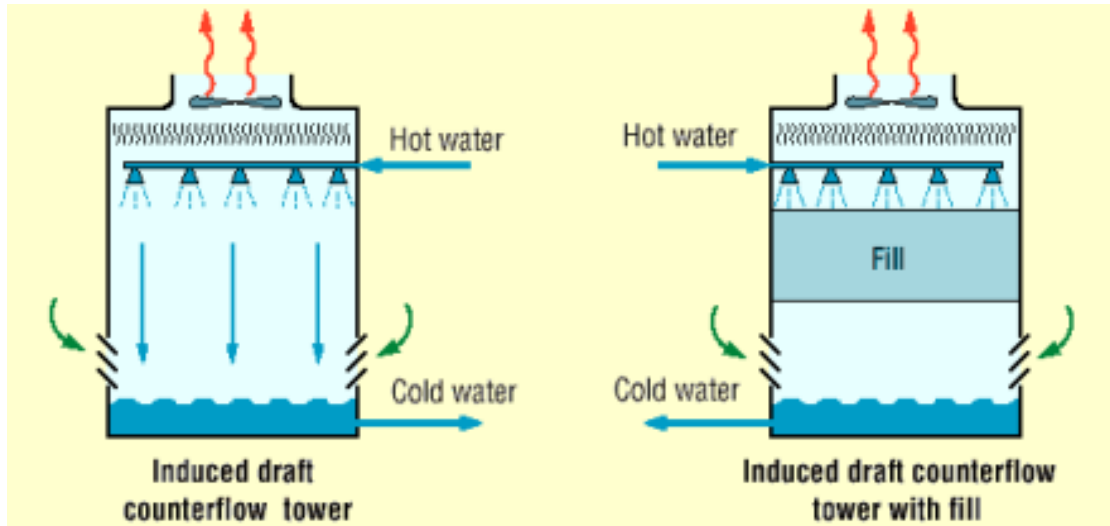
**Σχήμα 3.16** Σχηματική απεικόνιση κύκλου ισχύος με υδρόψυκτο σύστημα ψύξης με πύργο. [87]

Το σύστημα ψύξης που εφαρμόζεται στον υπό προσομοίωση σταθμό είναι υδρόψυκτο σύστημα με πύργο ψύξης με εξαναγκασμένο αερισμό. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται πύργος ψύξης με αναρρόφηση (induced draft cooling tower).



**Σχήμα 3.17 Οι πύργοι ψύξης με αναρρόφηση του πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής Vermont Yankee στις ΗΠΑ. [88]**

Ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στον πύργο από αεραγωγούς στα πλαϊνά του. Το ζεστό νερό κυκλοφορίας, που επιστρέφει από τον συμπυκνωτή, οδηγείται σε σύστημα σωληνώσεων στην κορυφή του πύργου από όπου και αφήνεται να πέσει ως τον πυθμένα, διασχίζοντας τον πύργο όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί. Ο ατμοσφαιρικός αέρας που έλκεται από το κάτω μέρος του πύργου με κατεύθυνση προς την έξοδο στην οροφή του πύργου απάγει θερμότητα μαζί με υγρασία ψύχοντας το υπόλοιπο νερό που πέφτει στον πυθμένα του πύργου. Δύο μεγάλοι ανεμιστήρες στην οροφή του πύργου, έλκουν τον αέρα μέσα από τον πύργο προς το εξωτερικό περιβάλλον. Οι ανεμιστήρες απάγουν τον ζεστό και υγρό αέρα από το εσωτερικό του πύργου. Ως αποτέλεσμα, η ταχύτητα εξόδου του αέρα από τον πύργο είναι 3-4 φορές υψηλότερη από την ταχύτητα του αέρα κατά την είσοδό του στον πύργο. Έτσι μειώνεται η πιθανότητα της επανακυκλοφορίας του αέρα, όπου απαγόμενος ζεστός αέρας εισέρχεται ξανά στον πύργο από τον αεραγωγό εισαγωγής. [89]



Σχήμα 3.18 Πύργος ψύξης εξαναγκασμένου αερισμού αντίθετης ροής. [89]

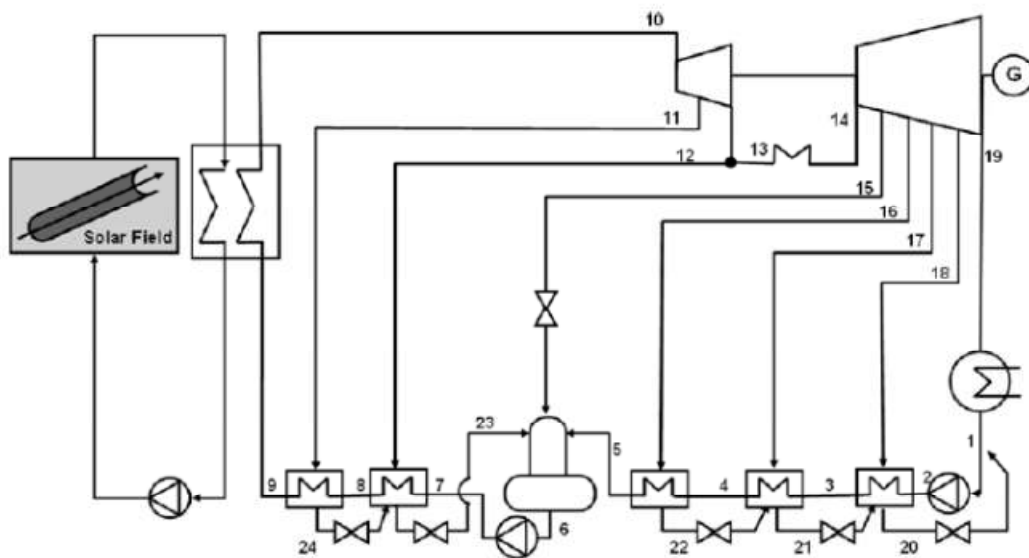
Κατά την ψύξη του νερού κυκλοφορίας στον πύργο ένα ποσοστό αυτού εξατμίζεται στο περιβάλλον. Ως εκ τούτου πρέπει συνεχώς να συμπληρώνεται το νερό κυκλοφορίας ισοσταθμίζοντας τις απώλειες λόγω εξάτμισης. Η κατανάλωση νερού του συστήματος ψύξης, η οποία είναι αρκετά μεγάλη, αποτελεί ένα σημαντικό θέμα για το σταθμό και θα πρέπει να ελέγχονται τα αποθέματα νερού της περιοχής που επιλέγεται για την εγκατάσταση του σταθμού. [80],[87],[89]

Οι κύριες παρασιτικές καταναλώσεις του συστήματος ψύξης είναι οι ηλεκτρικές καταναλώσεις των ανεμιστήρων του πύργου ψύξης της αντλίας του νερού κυκλοφορίας στην έξοδο από τον επιφανειακό συμπυκνωτή καθώς και των αντλιών του συστήματος γεώτρησης από όπου το σύστημα ψύξης εξασφαλίζει συνήθως τις απαιτούμενες ποσότητες νερού. Η εγκατεστημένη ισχύς αυτών των συστημάτων όπως και το συνολικό κόστος του συστήματος ψύξης εξαρτώνται από την ποσότητα της θερμικής ισχύος που πρέπει να απάγεται από τον κύκλο ισχύος του σταθμού καθώς και από τη μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Συνήθως, εγκαθίσταται στον πύργο και ένα σύστημα θέρμανσης διότι εάν πέσει η θερμοκρασία κάτω από τους 4°C υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας πάγου με καταστροφικά αποτελέσματα για τον πύργο [90].

Ένας εναλλακτικός τρόπος ψύξης για να μειωθεί η κατανάλωση νερού είναι η χρήση αερόψυκτου αντί υδρόψυκτου συστήματος ψύξης. Όμως, το αρχικό του κόστος είναι υψηλό ενώ, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες, δεν καταφέρνει να ψύξει το νερό το ίδιο αποτελεσματικά με το υδρόψυκτο σύστημα με αποτέλεσμα να μειώνεται θερμοδυναμική απόδοση του κύκλου ισχύος του σταθμού. Το κόστος του αερόψυκτου πύργου ψύξης κυμαίνεται μεταξύ 18 και 47 εκατ. δολαρίων ενώ το αρχικό κόστος που απαιτείται για έναν υδρόψυκτο πύργο ψύξης είναι μεταξύ 2,7

και 4,1 εκατ. δολαρίων. Η μείωση που επιτυγχάνεται στην κατανάλωση νερού είναι περίπου 90% με 95% σε σχέση με το υδρόψυκτο σύστημα ψύξης. [80]

Στην έξοδο του επιφανειακού συμπυκνωτή ο υγρός ατμός έχει πλέον μετατραπεί σε κορεσμένο νερό πίεσης 0,08bar. Η παροχή αυτή του νερού συμπιέζεται μέσω αντλίας σε μια επαρκώς υψηλή πίεση (περίπου 15bar) έτσι ώστε να μπορέσει να διέλθει μέσω των τριών θερμαντήρων χαμηλής πίεσης και του εξαερωτήρα, μετά τον οποίο βρίσκεται άλλη αντλία. Στην αντλία μετά τον εξαερωτήρα η παροχή του νερού συμπιέζεται σε μια πίεση ελαφρώς υψηλότερη από την πίεση του μείγματος νερού-ατμού στην ατμογεννήτρια (125bar, υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας). Έπειτα το νερό διέρχεται από τους δύο θερμαντήρες υψηλής πίεσης προτού εισέλθει στον προθερμαντήρα του θερμικού εναλλάκτη του κύκλου ισχύος, κλείνοντας έτσι έναν κύκλο. [71][76]

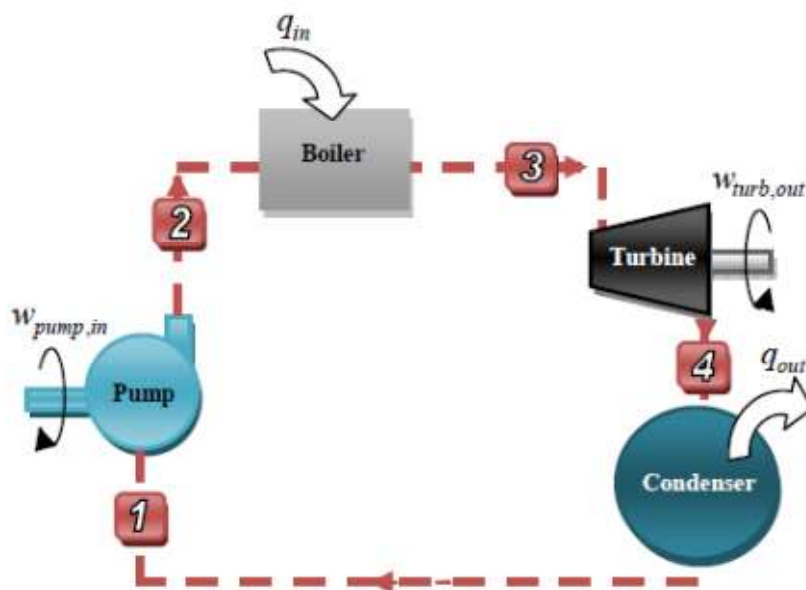


**Σχήμα 3.19** Σχηματικό διάγραμμα του κύκλου ισχύος για τον ηλιοθερμικό σταθμό παραβολικών κατόπτρων ισχύος 50 MW<sub>e</sub>. [66]

Οι κυριότερες ηλεκτρικές παρασιτικές καταναλώσεις του σταθμού στον κύκλο ισχύος του περιλαμβάνουν τις καταναλώσεις των αντλιών νερού-ατμού, τις παρασιτικές καταναλώσεις του συστήματος ψύξης καθώς και διάφορες καταναλώσεις συστημάτων ελέγχου, ηλεκτρικού εξοπλισμού όπως και παρασιτικές απώλειες στο στρόβιλο.

### 3.3.1 Εξισώσεις λειτουργίας του κύκλου ισχύος

Προκειμένου να προσομοιώσουμε τη λειτουργία ενός τέτοιου σταθμού προσεγγίζουμε πιο μακροσκοπικά το θερμοδυναμικό του κύκλου χωρίς να προβαίνουμε στον υπολογισμό των επιμέρους απομαστευόμενων παροχών ατμού και θεωρώντας μια ενιαία μονάδα στροβίλου. Έτσι, λαμβάνουμε έναν απλοποιημένο κύκλο Rankine, ο οποίος θεωρούμε ότι έχει τον ίδιο βαθμό απόδοσης με τον κανονικό σύνθετο κύκλο, ο οποίος είναι γνωστός και σταθερός στο πλήρες φορτίο. Θεωρούμε γνωστή και σταθερή υπό ονομαστικές συνθήκες και την ποιότητα του ατμού τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο της ενιαίας μονάδας στροβίλου. Σταθερή λαμβάνεται και η πίεση κατά την ισοβαρή συμπύκνωση του ατμού στα 0,08bar. Δεδομένου ότι η προσομοίωση δεν υπεισέρχεται σε ανάλυση των απομαστεύσεων ατμού και των χρήσεων που αυτές έχουν στους διάφορες προθερμαντήρες, των διαφορετικών βαθμίδων στροβίλου αλλά ούτε και της διαδικασίας της αναθέρμανσης, ο υπολογισμός της ονομαστικής ροής μάζας του μείγματος νερού-ατμού είναι προσεγγιστικός, καθώς δεν μπορεί να είναι ο ίδιος σε όλα τα στάδια του κύκλου. Συνεπώς, το απλοποιημένο μοντέλο δεν μπορεί αυθαίρετα να χρησιμοποιηθεί ολοκληρωτικά ως αντιπροσωπευτικό της πραγματικής λειτουργίας του κύκλου ισχύος, για αναλυτική μελέτη όλων των σταδίων του. Η χρησιμοποίηση του συνίσταται στον προσδιορισμό της ποιότητας του μείγματος νερού-ατμού σε συγκεκριμένα επιβεβαιωμένα στάδιά του και στον υπολογισμό συγκεκριμένων μεγεθών που μας ενδιαφέρουν.



Σχήμα 3.20 Σχηματικό διάγραμμα του απλοποιημένου κύκλου Rankine. [85]

Η ονομαστική παροχή του μείγματος νερού-ατμού στον κύκλο ισχύος ( $\dot{m}_{st,nom}$ ) υπολογίζεται προσεγγιστικά σε kg/s από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{m}_{st,nom} = \frac{\dot{W}_{turb,nom}}{h_3 - h_{4,nom}} \quad (3.18)$$

όπου  $\dot{W}_{turb,nom}$  είναι η ονομαστική μηχανική ισχύς στην ενοποιημένη μονάδα στροβίλου σε W ενώ  $h_3, h_4$  είναι οι ονομαστικές ενθαλπίες του ατμού πριν και μετά την εκτόνωσή του στον ενιαίο στρόβιλο, σε J/kg.

Η ονομαστική ισχύς στο στρόβιλο ( $\dot{W}_{turb,nom}$ ) εξαρτάται από την ονομαστική ηλεκτρική ισχύ που παράγει ο σταθμός ( $\dot{W}_{gross,nom}$ ) καθώς και από την απόδοση της γεννήτριας σε πλήρες φορτίο ( $n_{gen,nom}$ ) ως εξής:

$$\dot{W}_{turb,nom} = \frac{\dot{W}_{gross,nom}}{n_{gen,nom}} \quad (3.19)$$

Η απόδοση της γεννήτριας σε κάθε στιγμή εξαρτάται από το λόγο μεταξύ της στιγμιαίας και της ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος που παράγει ο σταθμός. Η απόδοση αυτή είναι μέγιστη σε πλήρες φορτίο.

Η ονομαστική θερμική ισχύς που εισέρχεται στον κύκλο ισχύος ( $\dot{Q}_{in,nom}$ ) υπολογίζεται από τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης του κύκλου ισχύος ( $n_{pc,nom}$ ), που θεωρείται γνωστός, και την ονομαστική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\dot{Q}_{in,nom} = \frac{\dot{W}_{gross,nom}}{n_{pc,nom}} \quad (3.20)$$

Όσον αφορά την ενιαία μονάδα στροβίλου, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσής της σε πλήρες φορτίο υπολογίζεται ως εξής:

$$n_{turb,nom} = \frac{h_3 - h_{4,nom}}{h_3 - h_{4,s}} \quad (3.21)$$

όπου  $h_{4,s}$  είναι η ενθαλπία του μείγματος νερού-ατμού στην έξοδο του στροβίλου που αντιστοιχεί στην ιδανική περίπτωση της ισεντροπικής εκτόνωσης. Οι ενθαλπίες του μείγματος νερού-ατμού προσδιορίζονται από τους αντίστοιχους πίνακες ιδιοτήτων νερού-υδρατμού και το διάγραμμα Mollier.

Οι ενθαλπίες στις παραπάνω σχέσεις που περιγράφουν την ποιότητα του μείγματος νερού-ατμού σε συγκεκριμένα στάδια του κύκλου ισχύος δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενιαία μελέτη του απλοποιημένου κύκλου Rankine, καθώς επιτυγχάνονται μόνο στον πραγματικό σύνθετο κύκλο, αλλά μόνο για τον προσεγγιστικό υπολογισμό και σύγκριση της θερμικής ισχύος που εισέρχεται στο θερμοδυναμικό κύκλο ( $\dot{Q}_{in}$ ) και της μηχανικής ισχύος στο στρόβιλο ( $\dot{W}_{turb}$ ).

Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί ότι στο βαθμό απόδοσης του κύκλου ισχύος που χρησιμοποιείται παραπάνω δεν συμπεριλαμβάνεται η απόδοση του θερμικού εναλλάκτη ελαίου-νερού του κύκλου ισχύος, η οποία πρέπει να προσμετράται κατά τον υπολογισμό του ολικού βαθμού απόδοσης του ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής.

Όσον αφορά στις συνθήκες μερικού φορτίου (part-load conditions), μειώνεται ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας (σύμφωνα με [79]), ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου και ως εκ τούτου μειώνεται και ο βαθμός απόδοσης του κύκλου ισχύος.

Η μηχανική ισχύς στην ενιαία μονάδα στροβίλου ( $\dot{W}_{turb}$ ) σε συνθήκες μερικού φορτίου υπολογίζεται προσεγγιστικά από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{st} \cdot (h_3 - h_4) \quad (3.22)$$

όπου  $\dot{m}_{st}$  είναι η ροή μάζας του μείγματος νερού-ατμού σε kg/s σε συνθήκες μερικού φορτίου, η  $\dot{W}_{turb}$  είναι σε kW ενώ οι ενθαλπίες είναι σε kJ/kg.

Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η θερμοκρασία του συνθετικού ελαίου στην έξοδο του θερμικού εναλλάκτη, δηλαδή κατά την είσοδό του στο ηλιακό πεδίο προκύπτει από ένα ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ της ροής μάζας του ελαίου που εξέρχεται από τον προθερμαντήρα του κεντρικού θερμικού εναλλάκτη του κύκλου ισχύος και της ροής μάζας του ελαίου που εξέρχεται από τον αναθερμαντήρα. Η ενθαλπία του ελαίου που επιστρέφει στο ηλιακό πεδίο είναι ο σταθμισμένος μέσος των ενθαλπιών αυτών των δύο ροών. Με καλή προσέγγιση, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία του ελαίου που επιστρέφει στο ηλιακό πεδίο εξαρτάται μόνο από τη ροή μάζας του συνθετικού ελαίου και τη θερμοκρασία του



συνθετικού ελαίου που εισέρχεται στο θερμικό εναλλάκτη, η οποία θεωρείται σταθερή περίπου στους 390°C όταν βρίσκεται σε λειτουργία το ηλιακό πεδίο. [71]

Η παραπάνω μακροσκοπική μελέτη του κύκλου ισχύος του ηλιοθερμικού σταθμού που προσομοιώνεται επιτρέπει μια πολύ καλή προσέγγιση των μεγεθών που υπολογίζονται και μελετώνται στην προσομοίωση.

### *3.4 Περιγραφή του βοηθητικού συστήματος λέβητα-καυστήρα συμβατικού καυσίμου*

Στον υπό προσομοίωση σταθμό είναι εγκατεστημένος ένας βοηθητικός λέβητας συμβατικού καυσίμου. Το σύστημα του βοηθητικού λέβητα μαζί με τον καυστήρα είναι τοποθετημένο από την πλευρά του ηλιακού πεδίου αποδίδοντας στο συνθετικό έλαιο θερμότητα που προέρχεται από την καύση συμβατικού καυσίμου. Οι βοηθητικές χρήσεις που προσφέρει το σύστημα αυτό έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.



**Σχήμα 3.21 Βοηθητικός λέβητας θέρμανσης του μέσου μεταφοράς της θερμότητας για ηλιοθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής της εταιρείας SUGIMAT. [91]**

Η ετήσια κατανάλωση συμβατικού καυσίμου εξαρτάται από την απαιτούμενη χρήση του βοηθητικού λέβητα, από την απόδοση του συστήματος λέβητα-καυστήρα και από τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Επιπλέον, η μέγιστη επιτρεπτή χρήση συμβατικού καυσίμου οριοθετείται για τη συγκεκριμένη περίπτωση στη χώρα μας από το νόμο 3851/2010 όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2.

Στην προσομοίωση που διενεργήθηκε μελετήθηκε και αξιολογήθηκε η χρήση τόσο υγραερίου (LPG) όσο και πετρελαίου diesel.

## Κεφάλαιο 4

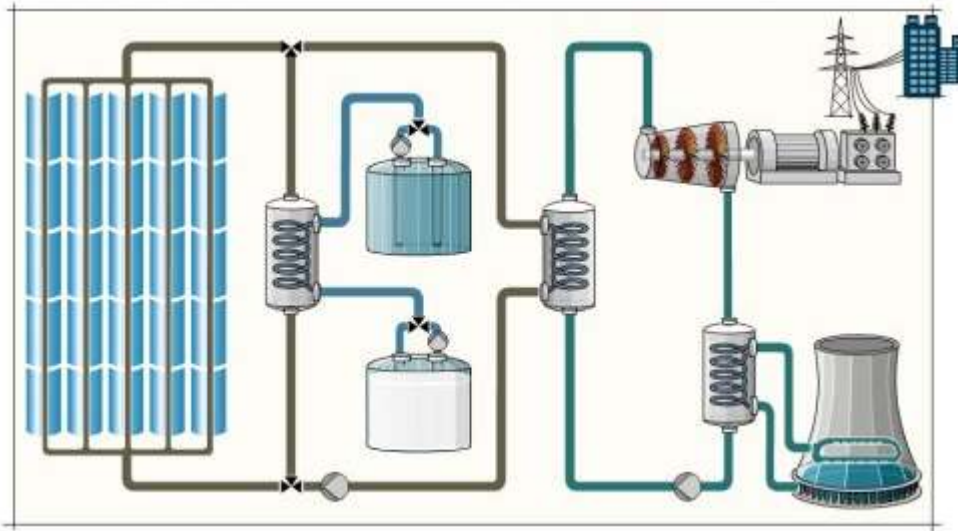
# Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του υπό προσομοίωση σταθμού-Στρατηγικές λειτουργίας

---

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται μια ενιαία περιγραφή του τρόπου λειτουργίας σε καθημερινή βάση του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων που προσομοιώνεται. Τα επιμέρους τμήματα του σταθμού που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάζονται πλέον ως διασυνδεδεμένα μεταξύ τους υπό το πλαίσιο που καθορίζουν οι διάφορες στρατηγικές λειτουργίας του σταθμού.

### *4.1 Λειτουργία κατά τις πρώτες πρωινές ώρες- Έναρξη ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού*

Η λειτουργία των ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής σταματάει καθημερινά μετά από κάποιο χρονικό διάστημα από τη δύση του ηλίου ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι συστήματος αποθήκευσης θερμότητας και με τις ώρες αυτοδυναμίας που αυτό παρέχει στο σταθμό. Μετά το τέλος της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από το σταθμό και κατά τη διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς της θερμότητας στο ηλιακό πεδίο μειώνεται.



**Σχήμα 4.1 Διάγραμμα του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων πριν την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής. [64]**

Το συνθετικό έλαιο που χρησιμοποιείται στον υπό προσομοίωση σταθμό, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι το Therminol VP-1. Το συνθετικό αυτό έλαιο αρχίζει να στερεοποιείται στη θερμοκρασία των  $12^{\circ}\text{C}$ . Συνεπώς, είναι καίριας σημασίας για το σταθμό η διατήρηση της θερμοκρασίας του συνθετικού ελαίου σε ένα επίπεδο ασφαλείας πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία πήξης του καθώς πιθανή πήξη του συνθετικού ελαίου θα έχει καταστροφικά αποτελέσματα για ηλιακό πεδίο του σταθμού. Σε μια περαιτέρω προσπάθεια διατήρησης της υγρής φάσης του μέσου μεταφοράς της θερμότητας, κατά τη διάρκεια της νύχτας οι αντλίες του ελαίου δουλεύουν σε μια ελάχιστη κατανάλωση έτσι ώστε το έλαιο να διατηρείται σε μια κίνηση, έστω αρκετά χαμηλής ροής μάζας περίπου στο 10% της ονομαστικής ροής μάζας του ελαίου, και να μην είναι στατικό. Η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία φτάνει το συνθετικό έλαιο μέχρι να το θερμάνει ξανά η πρωινή ηλιακή ακτινοβολία είναι, σύμφωνα με δεδομένα λειτουργίας σταθμών παραβολικών κατόπτρων σε κλίματα παρόμοια με το ελληνικό, της τάξης των  $80^{\circ}\text{C}$  περίπου [71]. Παρόλο που η θερμοκρασία αυτή είναι αρκετά πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία των  $12^{\circ}\text{C}$ , υπάρχει η πρόβλεψη σε τέτοιους σταθμούς για ένα σύστημα θέρμανσης του ελαίου σε έκτακτες περιπτώσεις όπως είναι για παράδειγμα μια παρατεταμένη περίοδος κακοκαιρίας. Στον υπό προσομοίωση σταθμό αυτό το ρόλο τον έχει αναλάβει ο βοηθητικός καυστήρας συμβατικού καυσίμου, ο οποίος παρέχει θερμική ισχύ απευθείας στο μέσο μεταφοράς της θερμότητας.

Ένα άλλο συστατικό του σταθμού το οποίο είναι απαραίτητο να διατηρεί τη θερμοκρασία του πάνω από ένα ορισμένο επίπεδο είναι το μείγμα των τηγμένων αλάτων του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Το μείγμα των τηγμένων αλάτων που χρησιμοποιείται στερεοποιείται στη θερμοκρασία των  $220^{\circ}\text{C}$ . Το μείγμα αυτό, μετά την εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης, διατηρείται στην «ψυχρή» δεξαμενή στους  $290^{\circ}\text{C}$ . Στην περίπτωση αυτή είναι πιο δύσκολο να

προκύψει πρόβλημα μιας και οι δεξαμενές είναι πολύ καλά μονωμένες περιορίζοντας την πτώση της θερμοκρασίας σε 1-2°C περίπου ακόμη και στη διάρκεια μιας ολόκληρης ημέρας [59]. Παρόλα αυτά υπάρχει στη δεξαμενή ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης των αλάτων για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης προσφέροντας μια περεταίρω ασφάλεια στο υψηλού κόστους σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Και ο συμβατικός λέβητας μπορεί να παρέχει τέτοιου είδους προστασία στο σύστημα αποθήκευσης σε έκτακτες περιπτώσεις.

Τις πρώτες πρωινές ώρες, για να ξεκινήσει ομαλά η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από το σταθμό θα πρέπει η θερμοκρασία του υγρού μεταφοράς της θερμότητας να αυξηθεί στα επίπεδα κανονικής λειτουργίας του, πριν αυτό μεταφερθεί στον κεντρικό εναλλάκτη ελαίου-νερού του κύκλου ισχύος προς παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Ένας από τους κύριους λόγους για αυτή την απαίτηση είναι πως ο ατμοστρόβιλος του κύκλου ισχύος κατά την έναρξη της λειτουργίας του το πρωί θα πρέπει να τροφοδοτηθεί με υψηλής ποιότητας υπέρθερμο ατμό, σε μια προσπάθεια να μειωθούν οι φθορές του από τον καθημερινό διακοπτόμενο τρόπο λειτουργίας του [92].



**Σχήμα 4.2** Θέση αναμονής των παραβολικών κατόπτρων. [93]

Με την ανατολή του ηλίου νωρίς το πρωί τα παραβολικά κάτοπτρα μετακινούνται από τη θέση αναμονής στην οποία τίθενται το βράδυ και στρέφονται προς τη θέση του ήλιου. Όμως, αφενός η χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία νωρίς το πρωί με την ανατολή του ήλιου και αφετέρου το φαινόμενο της σκίασης των γειτονικών σειρών παραβολικών κατόπτρων λόγω του ότι ο ήλιος βρίσκεται ακόμη πολύ χαμηλά στον ουρανό, έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη συλλογή θερμικής ισχύος κατά τις πρώτες πρωινές ώρες. Συνεπώς, η θέρμανση του συνθετικού ελαίου μόνο από το ηλιακό πεδίο θα απαιτούσε ένα σημαντικό χρονικό διάστημα κατά το οποίο

δεν θα υπήρχε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το σταθμό. Για το λόγο αυτό, ταυτόχρονα με τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας από τους συλλέκτες, χρησιμοποιείται και ο βοηθητικός καυστήρας συμβατικού καυσίμου προκειμένου να επιταχυνθεί η θέρμανση του ελαίου στην επιθυμητή θερμοκρασία. Με τη βοήθεια του συμβατικού καυστήρα, επιτυγχάνεται η έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής στο σταθμό συνήθως σε 1 έως 2 ώρες από την έναρξη της ηλιοφάνειας. Σε αυτό το χρονικό διάστημα η ροή μάζας του συνθετικού ελαίου αυξάνεται σε σχέση με το βράδυ και όλη η θερμική ενέργεια αξιοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του ελαίου.

Όσον αφορά τη χρήση του βοηθητικού καυστήρα για τη θέρμανση του ελαίου το πρωί, αυτή περιορίζεται σε 2 ώρες κατά μέγιστο στο μοντέλο προσομοίωσης, ακόμη κι αν χρειαστούν περισσότερες ώρες για την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό το όριο τίθεται στην προσομοίωση ως ένα είδος περιορισμού στη χρήση συμβατικού καυσίμου προκειμένου να μην ξεπεραστεί το όριο που θέτει ο ισχύων νόμος στη χρήση του. Επιπλέον, εάν από τον προγραμματισμό της λειτουργίας του σταθμού κατά την επόμενη ημέρα, που επιτρέπει η πρόγνωση της ηλιοφάνειας από διάφορα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής (θεωρούμε τέλεια μετεωρολογική πρόβλεψη για την επόμενη ημέρα), προκύπτει είτε ότι ο σταθμός θα καθυστερήσει ασυνήθιστα πολλές ώρες την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής του είτε ότι θα λειτουργήσει για λιγότερο από δύο ώρες, τότε επιλέγεται ο σταθμός να μην λειτουργήσει καθόλου κατά τη συγκεκριμένη μέρα με βάση οικονομικά κριτήρια συνυπολογίζοντας και τη φθορά των εξαρτημάτων του σταθμού από μια σύντομη περίοδο έναρξης και παύσης της λειτουργίας τους. Σε παρόμοια απόφαση καταλήγει το μοντέλο της προσομοίωσης σε περίπτωση που προβλέπεται ότι κατά την επόμενη ημέρα παρόλο που θα συλλεγεί σχετικά σύντομα η απαραίτητη ενέργεια για την έναρξη της λειτουργίας του σταθμού, η συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς καθόλη τη διάρκεια της ημέρας δεν θα υπερβεί ένα ελάχιστο ποσοστό, κοντά στο 25% της ονομαστικής ισχύος, που αποτελεί και το τεχνικό ελάχιστο του σταθμού. Το τεχνικό αυτό ελάχιστο τίθεται από τις ανάγκες λειτουργίας του στροβίλου, καθώς χαμηλής ποιότητας ατμός είναι πιθανό να οδηγήσει σε καταστροφή του στροβίλου. Οι παραπάνω περιπτώσεις μπορεί να εμφανιστούν σε ορισμένες αρκετά ψυχρές ημέρες της χειμερινής περιόδου.

Σε όλες τις άλλες ημέρες του έτους μόλις συλλεχθεί η απαραίτητη ενέργεια και το συνθετικό έλαιο αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία, η παροχή του θα κατευθυνθεί προς τον κεντρικό εναλλάκτη ελαίου-νερού.

## 4.2 Λειτουργία ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού κατά τις πρωινές ώρες (Χωρίς περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος)

Σε συνέχεια της προηγούμενης ενότητας, το συνθετικό έλαιο με την κατάλληλη θερμοκρασία λειτουργίας κατευθύνεται στον κεντρικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος προς παραγωγή υπέρθερμου ατμού για εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο.

Όσον αφορά τη διαχείριση της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος ως προς τη φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας του σταθμού, υπάρχουν διάφορες στρατηγικές λειτουργίας. Η επικρατέστερη στους υπό λειτουργία σταθμούς και αυτή που υιοθετείται στη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι η ιεράρχηση της άμεσης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος ως πρώτη προτεραιότητα. Αυτό σημαίνει ότι μόνο κατά την περίπτωση που η συλλεγόμενη θερμική ισχύς υπερβαίνει την ονομαστική της τιμή, η οποία απαιτείται για την παραγωγή της ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος του σταθμού, τότε η περίσσεια της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος διοχετεύεται στο σύστημα αποθήκευσης για θέρμανση των τηγμένων αλάτων. Για να υπάρχει η σχετικά συχνή δυνατότητα φόρτισης της αποθήκης το ηλιακό πεδίο ενός τέτοιου σταθμού είναι υπερδιαστασιοποιημένο σε σχέση με αυτό ενός ηλιοθερμικού σταθμού που δεν διαθέτει σύστημα αποθήκευσης.

Η παραπάνω επιλογή για τις συνθήκες φόρτισης της αποθήκης του εκάστοτε σταθμού υπαγορεύεται κατά βάση από την ισχύουσα τιμολογιακή πολιτική στην πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει ο σταθμός. Με βάση τη λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας διεθνώς, υπάρχουν δύο τιμολογιακές πολιτικές που αφορούν τον τρόπο πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενός ηλιοθερμικού σταθμού. Το επικρατέστερο μοντέλο προς το παρόν διεθνώς είναι το μοντέλο μιας σταθερής εγγυημένης τιμής (tariff model) για την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξάρτητα από το πότε αυτή παράγεται. Το δεύτερο μοντέλο (premium model) επιτρέπει, σε γενικές γραμμές, στο διαχειριστή του ηλιοθερμικού σταθμού να συμμετέχει απευθείας στην απελευθερωμένη αγορά της ενέργειας πωλώντας την ηλεκτρική ενέργεια του σταθμού σε διαφορετική τιμή ανάλογα με την προσφορά και τη ζήτηση ενέργειας που διαμορφώνεται στο σύστημα κάθε στιγμή, προσφέροντας ένα επιπλέον πριμ στην τιμή για τη δυνατότητα ευελιξίας που παρέχει στο Διαχειριστή του Συστήματος αλλά επιβάλλοντας και ανάλογα πρόστιμα όταν δεν τηρείται η συμφωνημένη προσφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι προφανές ότι εφόσον ακολουθείται η δεύτερη τιμολογιακή πολιτική (premium model) οι διαμορφωθείσες τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας θα καθορίζουν και την αντίστοιχη συμφέρουσα χρονική κατανομή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από το σταθμό, δυνατότητα που του παρέχει η

αποθήκευση της θερμότητας. Συνεπώς μπορεί να κρίνεται οικονομικά συμφέρον κάποιες στιγμές η συλλεγόμενη θερμική ενέργεια να αποθηκεύεται σε βάρος της άμεσα παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. [94]

Η δυνατότητα ή όχι επιλογής του πλαισίου πώλησης της παραγόμενης ενέργειας εξαρτάται από το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο κάθε χώρας. Για παράδειγμα στην Ισπανία προσφέρεται η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στις δύο παραπάνω τιμολογιακές πολιτικές και για παράδειγμα ο εμπορικός σταθμός PS10 έχει υιοθετήσει το μοντέλο της ελεύθερης συμμετοχής στο χρηματιστήριο τιμών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (premium model) [94]. Στην Ελλάδα δεν υπάρχει η δυνατότητα επιλογής αλλά παρέχεται στους ηλιοθερμικούς σταθμούς μια σταθερή εγγυημένη τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην προσομοίωση που διενεργήθηκε ακολουθείται το μοντέλο πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με το νομοθετικό πλαίσιο της Ελλάδας. Ως εκ τούτου αυτό που ενδιαφέρει αποκλειστικά είναι η ποσότητα της συνολικής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανεξάρτητα από τη στιγμή διάθεσής της στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό δίνεται προτεραιότητα στην άμεση παραγωγή ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος, αποφεύγοντας τις απώλειες στο θερμικό εναλλάκτη του συστήματος αποθήκευσης, ενώ επιπλέον και ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ηλιοθερμικού σταθμού κάθε στιγμή μειώνεται όσο μικρότερη είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με την ονομαστική. Έτσι, η στρατηγική αυτή λειτουργίας εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Προκειμένου να υπάρχει συχνά πλεόνασμα συλλεγόμενης θερμικής ισχύος, έτσι ώστε να καλύπτονται οι άμεσες ανάγκες του σταθμού για παραγωγή ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος και ταυτόχρονα να φορτίζεται το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, το ηλιακό πεδίο του υπό προσομοίωση σταθμού είναι υπερδιαστασιοποιημένο όπως συμβαίνει και σε κάθε ηλιοθερμικό σταθμό με αποθήκη ενέργειας. Ανάλογα με το ηλιακό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης του σταθμού και τον τρόπο λειτουργίας του σταθμού υπάρχει μια βέλτιστη διαστασιολόγηση του ηλιακού του πεδίου η οποία μεγιστοποιεί τους οικονομικούς δείκτες αξιολόγησης του σταθμού, καθώς η αύξηση του ηλιακού πεδίου συνεπάγεται αφενός αυξημένο κόστος επένδυσης, συντήρησης και λειτουργίας, και αφετέρου (ως ένα οριακό σημείο βέβαια) αύξηση του συντελεστή χρησιμοποίησης και των εσόδων από την αυξημένη ηλεκτρική παραγωγή ενέργειας.

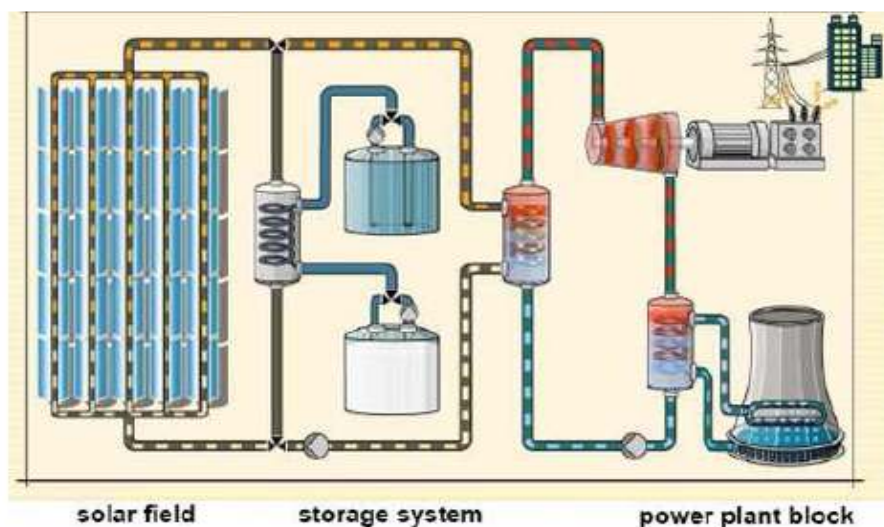
Παρά την υπερδιαστασιολόγηση του πεδίου, κατά τις περισσότερες ημέρες του έτους δεν εμφανίζεται πλεόνασμα συλλεγόμενης θερμικής ισχύος κατά τις πρώτες ώρες από την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού. Στις περισσότερες ημέρες δε της χειμερινής περιόδου η αποθήκη θερμότητας του σταθμού παραμένει αφόρτιστη καθόλη τη διάρκεια της λειτουργίας του σταθμού. Σε αυτές τις πρώτες ώρες της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού η συλλεγόμενη θερμική ισχύς από το



ηλιακό πεδίο διοχετεύεται εξ ολοκλήρου στον κεντρικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος.

Ο έλεγχος της ροής μάζας του μέσου μεταφοράς της θερμότητας κατά τη λειτουργία του σταθμού πραγματοποιείται σύμφωνα με διάφορους τρόπους λειτουργίας του ηλιακού πεδίου. Στην προσομοίωση που διενεργήθηκε έχει επιλεγεί το μοντέλο της μεταβλητής ροής μάζας του συνθετικού ελαίου. Οι αντλίες ελαίου του ηλιακού πεδίου ρυθμίζουν τη ροή μάζας του μέσου μεταφοράς της θερμότητας ανάλογα με την συλλεγόμενη κάθε στιγμή θερμική ισχύ έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου του ελαίου από το ηλιακό πεδίο. Έτσι, όταν η συλλεγόμενη θερμική ισχύς είναι μικρότερη από την ονομαστική και η ροή μάζας του ελαίου θα είναι αντίστοιχα μικρότερη από την ονομαστική της τιμή, καθώς είναι προφανές ότι μικρότερη θερμική ισχύς μπορεί να προσδώσει την περίπου σταθερή επιθυμητή θερμοκρασιακή αύξηση σε μικρότερη ροή μάζας ελαίου. Συμπεραίνουμε ότι η διαθέσιμη θερμική ισχύς κατά τη λειτουργία του σταθμού ανά πάσα στιγμή είναι ανάλογη της ροής μάζας του μέσου μεταφοράς της θερμότητας εκείνη τη στιγμή στο ηλιακό πεδίο.

Έτσι, κατά τις πρώτες ώρες από την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής η ροή μάζας του ελαίου είναι μικρότερη από την ονομαστική της τιμή και κατευθύνεται στο σύνολό της προς τον κεντρικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος όπου και αποθέτει τη θερμική ενέργεια που αποκόμισε κατά την προηγούμενη διέλευσή του από το ηλιακό πεδίο, προς παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Σταδιακά ο ήλιος υψώνεται στον ουρανό και το φαινόμενο σκίασης παύει να επιδρά στις παρακείμενες σειρές των παραβολικών κατόπτρων. Το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αυτές τις ώρες παραμένει ανενεργό.



**Σχήμα 4.3** Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων κατά τις πρώτες ώρες της ηλεκτροπαραγωγής (η αποθήκη είναι άδεια). [46]

Κατά τις ώρες που ο σταθμός παράγει ηλεκτρική ισχύ ο συμβατικός καυστήρας καλείται να λειτουργήσει εκ νέου βοηθητικά. Σκοπός της χρησιμοποίησής του είναι η κάλυψη βυθίσεων στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Εάν η ηλεκτρική ισχύς που παράγει ένας ηλιοθερμικός σταθμός το πρωί προέρχεται αποκλειστικά από το ηλιακό του πεδίο τότε συχνά θα εμφανίζονται βυθίσεις στην παραγόμενη ισχύ που οφείλονται σε αυξομειώσεις στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία λόγω διαφόρων φαινομένων, κυρίως λόγω παροδικής συννεφιάς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη ποιότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος η οποία διοχετεύεται στο δίκτυο.



*Σχήμα 4.4 Συννεφιασμένος ουρανός στο ηλιακό πεδίο των παραβολικών κατόπτρων.*  
[95]

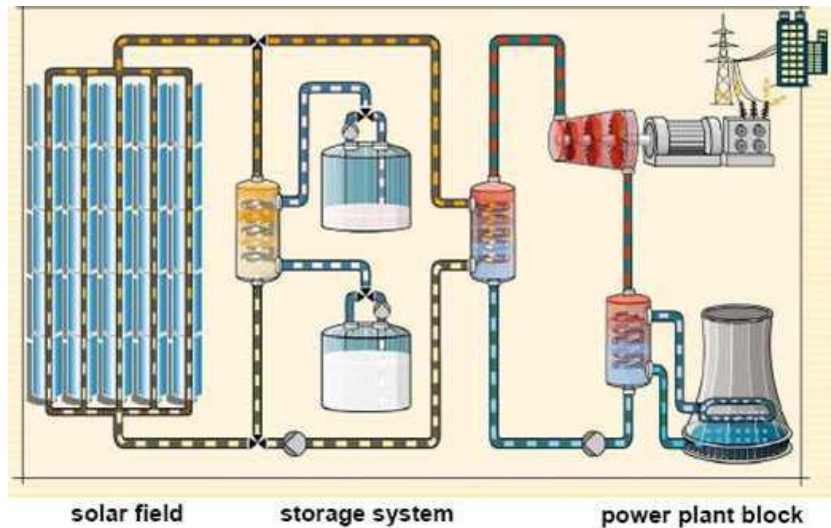
Έτσι, για να αντισταθμιστούν αυτές οι σχετικά σύντομες βυθίσεις της ηλιοφάνειας, χρησιμοποιείται η καύση συμβατικού καυσίμου για να καλυφθούν. Κατά τη βοηθητική λειτουργία του συμβατικού καυστήρα, αυτός θερμαίνει ταυτόχρονα με το ηλιακό πεδίο το συνθετικό έλαιο επιτρέποντας την αύξηση της ροής μάζας του ελαίου με την επιθυμητή θερμοκρασία η οποία κατευθύνεται προς τον κεντρικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος. Ο προγραμματισμός της χρήσης του βοηθητικού καυστήρα γίνεται με βάση την πρόβλεψη ηλιοφάνειας συνήθως από την προηγούμενη ημέρα. Στρατηγική λειτουργίας του υπό προσομοίωση σταθμού είναι η χρήση του συμβατικού καυστήρα να γίνεται εφόσον παρατηρείται πτώση της ενέργειας που προέρχεται από το ηλιακό πεδίο και η οποία προβλέπεται ότι μέσα σε μια περίοδο κάποιων λίγων ωρών, για παράδειγμα τεσσάρων, θα αυξηθεί και πάλι και δεν θα μηδενιστεί. Θεωρείται ότι πτώση της ηλιοφάνειας για πάνω από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια παροδική βύθιση και δεν υπάρχει λόγος να τροφοδοτείται μια παρατεταμένη μείωση της ηλιοφάνειας για αρκετές ώρες από συμβατικό καύσιμο. Επιπλέον, είναι προφανές

ότι η δυνατότητα κάλυψης σημαντικών βυθίσεων της ηλιοφάνειας περιορίζεται από την εγκατεστημένη ισχύ του συμβατικού καυστήρα. Η απλή αυτή χρήση του συμβατικού καυστήρα προσφέρει τη δυνατότητα στους ηλιοθερμικούς σταθμούς να παράγουν σταθερή ηλεκτρική ισχύ καλής ποιότητας, κάτι που αποτελεί κι ένα σημαντικό πλεονέκτημα τους έναντι συστημάτων άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

### *4.3 Λειτουργία ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού κατά τις ώρες που υπάρχει περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος*

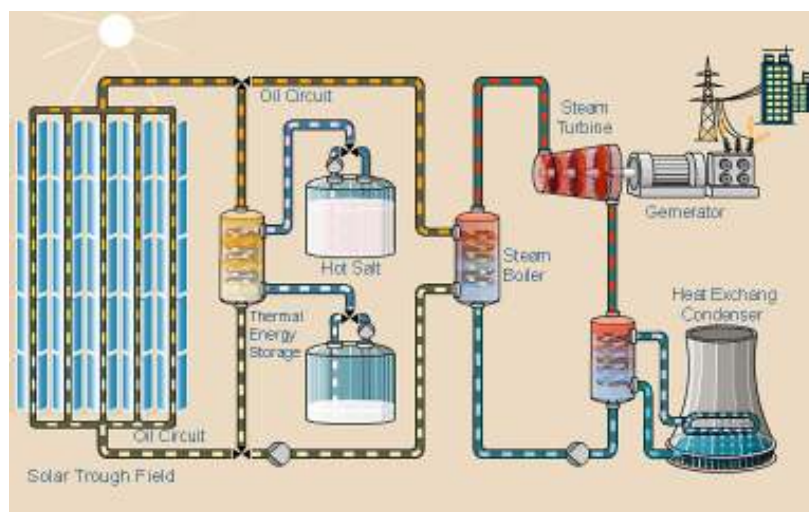
Λόγω της υπερδιαστασιολόγησης του ηλιακού πεδίου του υπό προσομοίωση σταθμού, στη μεγάλη πλειοψηφία των ημερών κυρίως από το Μάρτιο έως και το Σεπτέμβριο παρατηρείται σε αρκετές ώρες την ημέρα περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος στο ηλιακό πεδίο. Σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας του σταθμού, όπως περιγράφηκε παραπάνω, σε αυτή την περίπτωση το πλεόνασμα της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος οδηγείται στην αποθήκη φορτίζοντάς την.

Ειδικότερα, συλλεγόμενη θερμική ισχύς μεγαλύτερη από την ονομαστική μπορεί να θερμάνει στην επιθυμητή θερμοκρασία των 390°C περίπου μια μεγαλύτερη ροή μάζας συνθετικού ελαίου από την ονομαστική. Κατά την έξοδο της από το ηλιακό πεδίο η συνολική ροή μάζας του ελαίου χωρίζεται στην ονομαστική ροή μάζας και στην πλεονάζουσα ροή μάζας. Η ονομαστική ροή μάζας του ελαίου κατευθύνεται στον κεντρικό εναλλάκτη ελαίου-νερού του κύκλου ισχύος αποδίδοντας την ονομαστική θερμική ισχύ για τη λειτουργία του θερμοδυναμικού κύκλου υπό πλήρες φορτίο. Η πλεονάζουσα ροή μάζας του συνθετικού ελαίου οδηγείται στο θερμικό εναλλάκτη ελαίου-αλάτων του συστήματος αποθήκευσης της θερμότητας, όπου αποδίδει την περίσσεια της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος στο υγροποιημένο άλας. Συγκεκριμένα, αυτή η θερμική ισχύς αποδίδεται σε μια ροή μάζας υγροποιημένων αλάτων η οποία προέρχεται από την «ψυχρή» δεξαμενή. Στο θερμικό εναλλάκτη η ροή του «ψυχρού» μείγματος αλάτων αυξάνει στη θερμοκρασία της στο επίπεδο της «θερμής» δεξαμενής όπου και αποθηκεύεται στη συνέχεια για μετέπειτα χρήση.



**Σχήμα 4.5** Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων κατά το μεσημέρι (η αποθήκη «φορτίζεται»). [46]

Όσο συνεχίζεται η ύπαρξη περίσσειας συλλεγόμενης θερμικής ισχύος συνεχίζεται και η φόρτιση της αποθήκης κατά την οποία αδειάζει η «ψυχρή» δεξαμενή και γεμίζει η «θερμή». Η διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού γίνεται με βάση τις επιθυμητές ώρες αυτοδυναμίας του. Η διάρκεια της φόρτισης όμως της αποθήκης εξαρτάται τόσο από την ποσότητα του μείγματος των τηγμένων αλάτων όσο και από τη θερμική ισχύ που κατευθύνεται κάθε στιγμή προς τον εναλλάκτη της αποθήκης. Ανάλογη με τη θερμική ισχύ που φορτίζει την αποθήκη είναι η ροή μάζας των τηγμένων αλάτων που κατευθύνεται από την «ψυχρή» στη «θερμή» δεξαμενή. Όταν όλη η ποσότητα των τηγμένων αλάτων μεταφερθεί στη θερμή δεξαμενή το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας είναι πλήρως φορτισμένο.



**Σχήμα 4.6** Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων με την αποθήκη του να είναι σχεδόν πλήρως «φορτισμένη». [96]

Σε ημέρες με μεγάλη ηλιοφάνεια, συνήθως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, συμβαίνει να συνεχίζεται να υπάρχει η δυνατότητα συλλογής περισσότερης θερμικής ισχύος από την ονομαστική ακόμη και μετά την πλήρη φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Προφανώς, αυτή η περίσσεια θερμικής ισχύος δεν μπορεί να διοχετευτεί ούτε στον κύκλο ισχύος ούτε στην αποθήκη του σταθμού, μιας και εκεί έχει αποθηκευτεί η μέγιστη δυνατή θερμική ενέργεια. Εάν προβλεφθεί ή παρατηρηθεί κάτι τέτοιο λαμβάνονται κάποια μέτρα περιορισμού της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος στο ηλιακό πεδίο καθώς ο σταθμός δεν μπορεί να διαχειριστεί αυτό το πλεόνασμα. Συγκεκριμένα, ένα ποσοστό των παραβολικών κατόπτρων απεστιάζεται και έτσι τα κάτοπτρα αυτά στην ουσία τίθενται εκτός λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό απορρίπτεται ένα μέρος της δυνατής συλλεγόμενης θερμικής ισχύος καθώς ο σταθμός δεν μπορεί να το αξιοποιήσει. Εάν η συνολική ετήσια απορριπτόμενη ενέργεια είναι αρκετά μεγάλη αυτό ίσως σημαίνει ότι θα συνέφερε οικονομικά μια μεγαλύτερη αποθήκη θερμότητας για το ήδη υπάρχον ηλιακό πεδίο του σταθμού.

Όσον αφορά το βοηθητικό καυστήρα του σταθμού, αυτές τις ώρες δεν τίθεται σε λειτουργία. Ακόμα και σε περίπτωση που παρατηρηθεί κάποια βύθιση της ηλιοφάνειας, εάν ακόμη και στο διάστημα της παροδικής αυτής μείωσης η συλλεγόμενη θερμική ισχύς εξακολουθεί να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την ονομαστική της τιμή, τότε δεν υπάρχει λόγος να καλυφθεί αυτή η μείωση από τη χρήση του βοηθητικού καυστήρα μιας και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του σταθμού θα είναι ήδη σταθερή στην ονομαστική της τιμή για όλο αυτό το διάστημα. Η κάλυψη αυτής της βύθισης από τον καυστήρα θα σήμαινε στην πράξη αποθήκευση θερμικής ενέργειας (μιας και η ονομαστική θερμική ισχύς είναι διαθέσιμη από το ηλιακό πεδίο) που προέρχεται από καύση συμβατικού καυσίμου κάτι που είναι μη αποδοτικό αφού αυτή η θερμική ενέργεια μπορεί να είναι άμεσα διαθέσιμη όποτε ζητηθεί και δεν χρειάζεται να αποθηκευτεί έχοντας επιπλέον θερμικές απώλειες στον εναλλάκτη του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας.

Εάν όμως η παροδική βύθιση της ηλιοφάνειας είναι έντονη και η συλλεγόμενη θερμική ισχύς πέφτει κάτω από την ονομαστική της τιμή τότε καλείται ο βοηθητικός καυστήρας να καλύψει το ποσοστό μέχρι την ονομαστική τιμή της θερμικής ισχύος. Σε αυτές τις περιπτώσεις όπου υπάρχει και αποθηκευμένη θερμική ενέργεια έχει επιλεγεί στο συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης να προτιμάται αρχικά η χρήση του καυστήρα για την κάλυψη της βύθισης κυρίως διότι δίνεται ένα επαρκές περιθώριο στη χρήση του συμβατικού καυσίμου από τον ισχύοντα νόμο 3851/10 και έτσι υπάρχει η δυνατότητα να διατηρείται ολόκληρη η αποθηκευμένη ενέργεια για χρήση μετά τη δύση του ηλίου. Επιπλέον, υπό προϋποθέσεις που αφορούν τον εγκατεστημένο καυστήρα, η απόκρισή του μπορεί να είναι αμεσότερη σε σχέση με το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και ως εκ τούτου να λειτουργήσει πιο αποτελεσματικά ειδικά για αρκετά σύντομες βυθίσεις ηλιοφάνειας.

Εφόσον, όμως, υπάρχει ένα ποσό αποθηκευμένης ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης, αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού σε περιπτώσεις όπου προβλέπεται μείωση της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος κάτω από την ονομαστική της τιμή, και αυτή η βύθιση αναμένεται να μην είναι σύντομη.

Επιγραμματικά, μπορούμε να συνοψίσουμε ότι όταν υπάρχει περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος ο σταθμός παράγει την ονομαστική ηλεκτρική ισχύ και η περίσσεια θερμικής ισχύος είτε φορτίζει την αποθήκη είτε απορρίπτεται εάν η αποθήκη έχει ήδη φορτιστεί πλήρως.

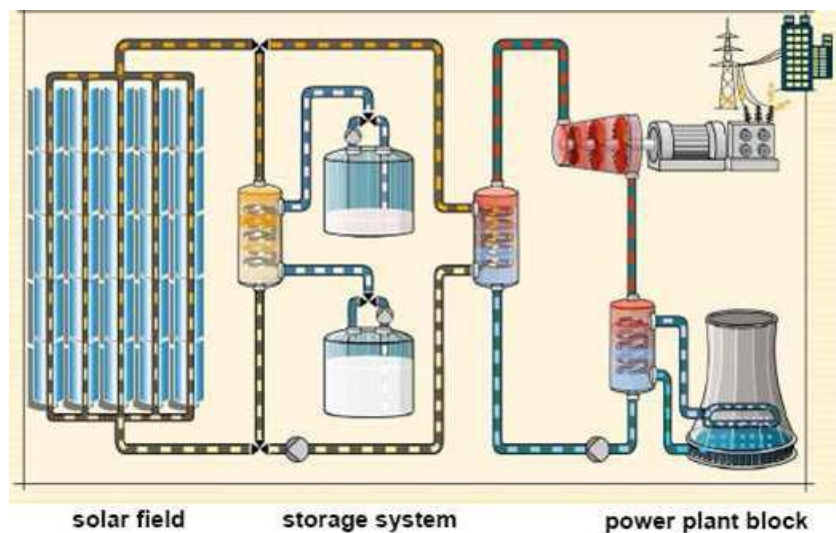
#### *4.4 Λειτουργία ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού κατά τις απογευματινές ώρες μείωσης της ηλιοφάνειας*

Κατά τις απογευματινές ώρες και καθώς ο ήλιος οδεύει προς τη δύση του η ηλιοφάνεια αρχίζει να μειώνεται μέχρι το μηδενισμό της με τη δύση του ηλίου. Ανάλογη πορεία διαγράφει και η συλλεγόμενη θερμική ισχύς από το ηλιακό πεδίο του σταθμού. Τα παραβολικά κάτοπτρα είναι πλέον στραμμένα προς τα δυτικά ακολουθώντας την τροχιά του ήλιου. Σε αυτές τις ώρες διαφοροποιείται η ηλεκτρική παραγωγή του σταθμού ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι φορτισμένης αποθήκης.

Στην περίπτωση που η αποθήκη θερμικής ενέργειας του σταθμού είναι αφόρτιστη η πορεία που ακολουθεί η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι ανάλογη με την πορεία της ηλιοφάνειας. Μόλις η συλλεγόμενη θερμική ισχύς μειωθεί κάτω από την ονομαστική της τιμή, ο σταθμός θα σταματήσει να παράγει την ονομαστική του ισχύ και η παραγωγή θα συνεχίσει να βαίνει μειούμενη έως ότου προσεγγίσει το τεχνικό ελάχιστο του σταθμού κάτω από το οποίο η ηλεκτροπαραγωγή θα τερματιστεί έτσι ώστε να μην προκληθούν σοβαρές φθορές στο στρόβιλο. Για να αποκλειστεί το ενδεχόμενο η λειτουργία του σταθμού να πέσει κάτω από το τεχνικό ελάχιστο αλλά και για να τερματιστεί ομαλότερα η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού, κατά τις τελευταίες ώρες ηλιοφάνειας όπου η συλλεγόμενη θερμική ισχύς είναι χαμηλότερη από το ελάχιστο επιτρεπτό όριο χρησιμοποιείται ο συμβατικός καυστήρας για να διατηρηθεί η λειτουργία του σταθμού σε αποδεκτά επίπεδα και εν συνεχεία να τερματιστεί η ηλεκτροπαραγωγή του.

Εάν όμως υπάρχει διαθέσιμη αποθηκευμένη θερμότητα, αυτή αρχίζει να αξιοποιείται από τη στιγμή που η ηλιοφάνεια ξεκινάει να μειώνεται το απόγευμα σε επίπεδα κάτω από την ονομαστική της τιμή και μέχρι τον τελικό της μηδενισμό.

Έτσι, στο διάστημα αυτό λειτουργούν ταυτόχρονα και το ηλιακό πεδίο και το σύστημα αποθήκευσης του σταθμού τροφοδοτώντας με θερμική ισχύ τον κύκλο ισχύος. Από την έναρξη της πτώσης της ηλιοφάνειας και καθόλη τη διάρκειά της (εφόσον η αποθηκευμένη θερμότητα επαρκεί), η αποθήκη του συστήματος προσφέρει τη θερμική ισχύ που υπολείπεται προκειμένου η ηλεκτρική παραγωγή του σταθμού να διατηρηθεί στην ονομαστική της τιμή. Καθώς η ηλιοφάνεια μειώνεται, αυξάνεται αντίστοιχα το ποσό της θερμικής ισχύος που παρέχεται από την αποθήκη.



**Σχήμα 4.7** Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων κατά την «εκφόρτιση» της αποθήκης με παράλληλη λειτουργία του ηλιακού πεδίου . [46]

Κατά την εκφόρτιση της αποθήκης θερμότητας, η μάζα των τηγμένων αλάτων ακολουθεί την αντίστροφη πορεία, από τη «θερμή» στην «ψυχρή» δεξαμενή. Έτσι από την έναρξη πτώσης της ηλιοφάνειας το απόγευμα αρχίζει να αδειάζει η «θερμή» δεξαμενή και να γεμίζει η «ψυχρή». Η ροή μάζας των τηγμένων αλάτων είναι ανάλογη της θερμικής ισχύος που απαιτείται να καλυφθεί από το σύστημα αποθήκευσης. Η ροή της θερμής μάζας τηγμένων αλάτων αποδίδει θερμική ενέργεια στη μάζα του συνθετικού ελαίου που διέρχεται από τον εναλλάκτη της αποθήκης.

Η συνεισφορά της αποθήκης γίνεται με αυτό τον τρόπο διότι βασικός στόχος του σταθμού είναι να λειτουργεί όσο το δυνατόν περισσότερες ώρες στο ονομαστικό του φορτίο. Κι αυτό διότι η λειτουργία του σταθμού σε πλήρες φορτίο είναι πολύ

πιο αποδοτική κάτι που σημαίνει μεγαλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας και μεγαλύτερη ηλεκτρική παραγωγή αθροιστικά στο τέλος της ημέρας. Έτσι είναι σημαντικό εφόσον διατίθεται αποθήκη στον ηλιοθερμικό σταθμό να διατηρείται η ονομαστική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος το απόγευμα για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο διάστημα.

#### 4.5 Λειτουργία του σταθμού μετά τη δύση του ηλίου

Ακόμη και μετά τη δύση του ηλίου ενδέχεται να υπάρχει επιπλέον αποθηκευμένη θερμική ενέργεια στη «θερμή» δεξαμενή, κάτι που συμβαίνει σε αρκετές ημέρες ιδίως στην περίοδο του καλοκαιριού. Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός συνεχίζει τη λειτουργία του παράγοντας ηλεκτρική ισχύ.

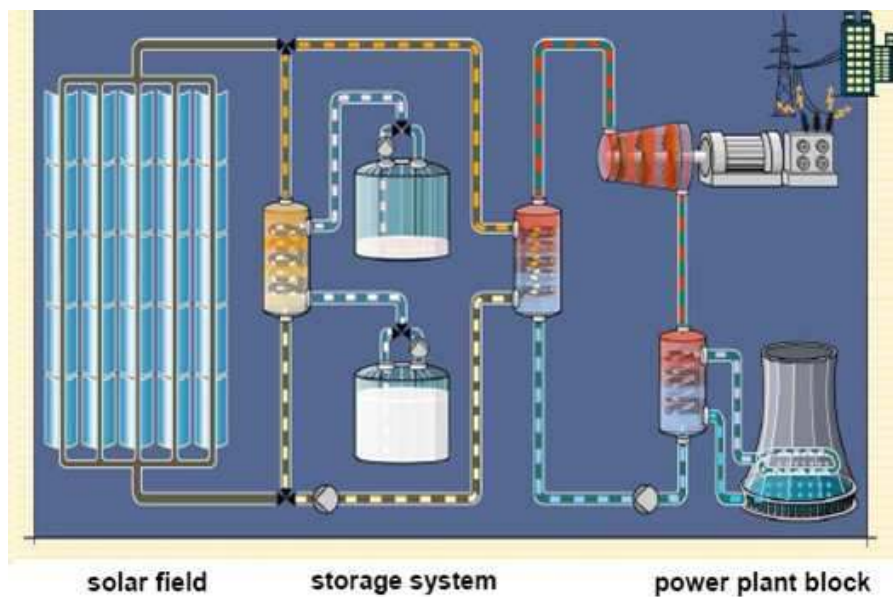
Για όσες ώρες συνεχίσει να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, μοναδική πηγή θερμικής ισχύος είναι το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (προς το τέλος της εκφόρτισης της αποθήκης ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα ο βοηθητικός καυστήρας για την κάλυψη του τεχνικού ελαχίστου). Το ηλιακό πεδίο τίθεται σε κατάσταση αναμονής για την επανέναρξη της λειτουργίας του το επόμενο πρωί. Οι συλλέκτες τίθενται με τα κοίλα τους προς τα κάτω έτσι ώστε να περιοριστεί η επικάλυψη σκόνης και γενικότερα να προφυλαχθούν τα παραβολικά κάτοπτρα.

Η στρατηγική λειτουργίας που έχει επιλεγεί στην προσομοίωση για αυτές τις ώρες, είναι και πάλι να λειτουργεί ο σταθμός, όσο αυτό είναι δυνατόν, κοντά στην ονομαστική του ισχύ για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και παραπάνω. Με βάση την απόφαση αυτή καθορίζεται και ο ρυθμός εκφόρτισης της αποθήκης του συστήματος.

Όταν ο σταθμός λειτουργεί με αποκλειστική πηγή θερμικής ισχύος την αποθήκη του δεν είναι εφικτή η παραγωγή ακριβώς της ονομαστικής του ισχύος. Αυτό συμβαίνει αφενός διότι η θερμοκρασία στην οποία διατηρείται το μείγμα των τηγμένων αλάτων στη «θερμή» δεξαμενή είναι ελαφρώς χαμηλότερη από τη θερμοκρασία την οποία αποκτά συνήθως το συνθετικό έλαιο όταν λειτουργεί το ηλιακό πεδίο. Έτσι και στην προσομοίωση που διενεργήθηκε, η θερμοκρασία στην οποία αποθηκεύονται τα άλατα στη «θερμή» δεξαμενή είναι οι 385°C ενώ η θερμοκρασία στην οποία εξέρχεται το συνθετικό έλαιο από το ηλιακό πεδίο, όταν αυτό λειτουργεί, είναι περίπου οι 390°C. Ένας άλλος λόγος για τον οποίο η θερμική ισχύς που τροφοδοτείται στον κεντρικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος είναι μικρότερη από την ονομαστική, στην περίπτωση που λειτουργεί μόνο το σύστημα αποθήκευσης του σταθμού, είναι ότι μεσολαβεί και ο θερμικός εναλλάκτης ελαίου-αλάτων ο οποίος εισάγει επιπλέον θερμικές απώλειες. Σαν αποτέλεσμα, το



συνθετικό έλαιο που θερμαίνεται στον εναλλάκτη του συστήματος αποθήκευσης έχει αποκτήσει κατά την έξοδό του από αυτόν μια θερμοκρασία περίπου στους 380°C. Η μείωση στη θερμική ισχύ που μεταφέρεται στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να καλυφθεί από ανεξέλεγκτη αύξηση της ροής μάζας του μέσου μεταφοράς της θερμότητας δεδομένου ότι υπάρχει ένα άνω όριο στη ροή μάζας του ελαίου από τον εναλλάκτη ελαίου-αλάτων. Το όριο αυτό τίθεται από τη δεδομένη εγκατεστημένη ισχύ των αντλιών ελαίου αλλά και των αντλιών αλάτων καθώς και από τις δεδομένες προδιαγραφές των σωληνώσεων του ελαίου και του συστήματος αποθήκευσης. Ως εκ τούτου η χαμηλότερη ενθαλπία του ελαίου σε αυτή την περίπτωση λειτουργίας δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από αύξηση της ροής μάζας του ελαίου πάνω από την ονομαστική του τιμή στην οποία έχει προβλεφθεί να λειτουργεί το σύστημα αποθήκευσης. Έτσι, η μικρότερη θερμοκρασία που αποκτά το έλαιο σε σχέση με την ονομαστική λειτουργία του σταθμού, σε συνδυασμό με την αδυναμία αύξησης της ροής μάζας του ελαίου πάνω από μια τιμή έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ελαφρώς χαμηλότερης ηλεκτρικής ισχύος από την ονομαστική όταν ο κύκλος ισχύος τροφοδοτείται από την αποθήκη θερμότητας του σταθμού.



**Σχήμα 4.7** Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων μετά τη δύση του ηλίου. [46]

Βέβαια, η απόφαση για το πότε θα καταναλωθεί η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια καθώς και με ποιο ρυθμό εξαρτάται άμεσα και από το μοντέλο τιμολογιακής πολιτικής που εφαρμόζεται στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από

το σταθμό. Εάν εφαρμόζεται το μοντέλο μεταβλητής τιμής ανάλογα με τη ζήτηση και την προσφορά που διαμορφώνεται στο δίκτυο κάθε στιγμή (premium model) ίσως θα ήταν περισσότερο συμφέρον οικονομικά να αποφορτιστεί σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα η αποθήκη παρέχοντας χαμηλότερη ισχύ για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στο συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης όμως, με την ισχύουσα πολιτική της σταθερής εγγυημένης τιμής που εφαρμόζεται στην Ελλάδα, αυτό που ενδιαφέρει είναι η μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αθροιστικά ανεξάρτητα από το πότε παράχθηκε. Αυτό εξασφαλίζεται λειτουργώντας όσο το δυνατόν περισσότερη ώρα σε ονομαστικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό επιλέγουμε η εκφόρτιση της αποθήκης να γίνει σύντομα αλλά με υψηλό ρυθμό γιατί έτσι εκμεταλλευόμαστε σε μεγαλύτερο ποσοστό την αποθηκευμένη ενέργεια μιας και ο σταθμός παρουσιάζει μεγαλύτερο συνολικό βαθμό απόδοσης όσο πιο κοντά λειτουργεί στο ονομαστικό φορτίο.

Το πόσο θα διαρκέσει η λειτουργία του σταθμού μετά τη δύση του ηλίου εξαρτάται από το μέγεθος της αποθήκης που διαθέτει και από το ποσοστό στο οποίο φορτίστηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την υπερδιαστασιολόγηση του ηλιακού του πεδίου. Σε κάθε σταθμό γίνεται μελέτη για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση τόσο του ηλιακού του πεδίου όσο και της αποθήκης θερμότητάς του, με κριτήριο τη μεγιστοποίηση των δεικτών οικονομικής αξιολόγησης της επένδυσης.

Μόλις εξαντληθεί η θερμική ενέργεια που είχε αποθηκευτεί κατά τη διάρκεια της ημέρας, η ποσότητα των τηγμένων αλάτων έχει πλέον μεταφερθεί στην «ψυχρή» δεξαμενή, όπου διατηρείται στη θερμοκρασία των 290°C περίπου. Ο σταθμός σταματάει πλέον να παράγει ηλεκτρική ισχύ και η λειτουργία του διακόπτεται μέχρι το επόμενο πρωί.

#### *4.6 Λειτουργία του σταθμού για μέγιστη χρήση του συμβατικού καυστήρα*

Στην παραπάνω περιγραφή της καθημερινής λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων του μοντέλου προσομοίωσης παρουσιάστηκε μια συγκεκριμένη στρατηγική για τη χρήση του συμβατικού καυστήρα. Η χρήση που περιγράφηκε παραπάνω περιορίζεται κυρίως στη συμμετοχή της θερμικής ισχύος που προέρχεται από την καύση συμβατικού καυσίμου μόνο για την επίσπευση της έναρξης της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και για τη βελτίωσης της ποιότητας της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος από το σταθμό καλύπτοντας σχετικά σύντομες βυθίσεις της συλλεγόμενης από την ηλιακή

ακτινοβολία θερμικής ισχύος. Η χρήση του συμβατικού καυστήρα το πρωί βοηθάει το σταθμό να ξεκινήσει νωρίτερα τη λειτουργία του και έτσι να αξιοποιήσει μεγαλύτερο ποσοστό της καθημερινής ηλιοφάνειας για ηλεκτροπαραγωγή. Η δεύτερη χρήση του συμβατικού καυστήρα είναι απαραίτητη για την ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος η οποία ειδάλλως θα επηρεαζόταν από τις σύντομες διακυμάνσεις της ηλιοφάνειας.



**Σχήμα 4.8 Βοηθητικός λέβητας θέρμανσης του μέσου μεταφοράς της θερμότητας για ηλιοθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής της εταιρείας SUGIMAT. [91]**

Η χρήση του καυστήρα υπόκειται σε περιορισμούς που θέτει στην Ελλάδα ο νόμος υπ' αριθμόν 3851/10 τόσο ως προς το χρησιμοποιούμενο συμβατικό καύσιμο και βασικά ως προς το ποσοστό της χρησιμοποιούμενης ενέργειας από αυτό επί της συνολικής ενέργειας που παράγεται σε ετήσια βάση από τις μονάδες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Στην προσομοίωση που διενεργήθηκε ως συμβατικό καύσιμο μελετήθηκε το υγροποιημένο αέριο (LPG) και το ντίζελ. Η μέγιστη τιμή του παραπάνω ποσοστού για αυτά τα δύο καύσιμα καθορίζεται από το νόμο στο 15%. [8]

Έτσι εάν από την περιορισμένη λειτουργία του συμβατικού καυστήρα που περιγράφηκε παραπάνω υπάρχει επιπλέον περιθώριο, δίνεται η δυνατότητα για περεταίρω χρήση του συμβατικού καυσίμου. Επειδή όμως ο σκοπός της επιπλέον αυτής χρήσης είναι να γίνει ελκυστικότερη μια τέτοια επένδυση μειώνοντας το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, εξαρτάται και από την εκάστοτε τιμή αγοράς του συμβατικού καυσίμου. Θα πρέπει προφανώς η τιμή αγοράς να είναι τέτοια που να συμφέρει η αύξηση της χρήσης του συμβατικού καυσίμου.

Στο μοντέλο της προσομοίωσης που αναπτύχθηκε υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ της συντηρητικής χρήσης του συμβατικού καυστήρα (περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες) και της μέγιστης χρήσης του. Στη δεύτερη αυτή στρατηγική λειτουργίας του σταθμού χρησιμοποιείται επιπλέον ο συμβατικός καυστήρας κατά τις ώρες λειτουργίας του σταθμού που η θερμική ισχύς η οποία θα ήταν διαθέσιμη για το θερμικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος είναι μικρότερη της ονομαστικής της τιμής. Κατά τις ώρες αυτές ο συμβατικός καυστήρας παρέχει στο συνθετικό έλαιο όση θερμική ισχύ απαιτείται για να καλυφθεί η ονομαστική τιμή, με τεχνικό μέγιστο προφανώς τη δική του εγκατεστημένη θερμική ισχύ. Βέβαια θα πρέπει πάντα να ελέγχεται και να προβλέπεται ασφαλώς ότι η συνολική ετήσια χρήση του συμβατικού καυσίμου δεν θα ξεπερνάει το επιτρεπτό νόμιμο όριο.

## Κεφάλαιο 5

# Αποτελέσματα προσομοίωσης και Διαγράμματα λειτουργίας

---

Στο παρόν κεφάλαιο απεικονίζεται υπό μορφή διαφόρων διαγραμμάτων η καθημερινή λειτουργία ενός ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων, ο οποίος λειτουργεί με τον τρόπο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εν συνεχεία, παρατίθενται διάφορα αποτελέσματα της ετήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού, όπως αυτά προέκυψαν από τη διενεργούμενη προσομοίωση λειτουργίας. Το μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας ενός τέτοιου σταθμού πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab.

Ο κώδικας προσομοίωσης που συντάχθηκε λαμβάνει σαν είσοδο την ωριαία άμεση ακτινοβολία στην περιοχή εγκατάστασης του σταθμού για ένα έτος. Η ετήσια χρονοσειρά της άμεσης ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται παρακάτω, προέρχεται από τη βάση δεδομένων της HelioClim για το νησί της Κρήτης και για το έτος 2005. Η μέτρηση αυτή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας αθροιστικά αποτιμάται ετησίως σε  $2151\text{kWh/m}^2$ . Επίσης, παραμετρικά μεγέθη στο πρόγραμμα προσομοίωσης είναι η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς του σταθμού, ο αριθμός των βρόχων συλλεκτών (Isoors) του ηλιακού πεδίου, η αυτοδυναμία του σταθμού, σε ώρες, που προσφέρει το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, η εγκατεστημένη θερμική ισχύς του βοηθητικού καυστήρα συμβατικού καυσίμου. Η προσομοίωση της λειτουργίας του σταθμού που διενεργήθηκε είναι ωριαία.

## 5.1 Διαγράμματα λειτουργίας

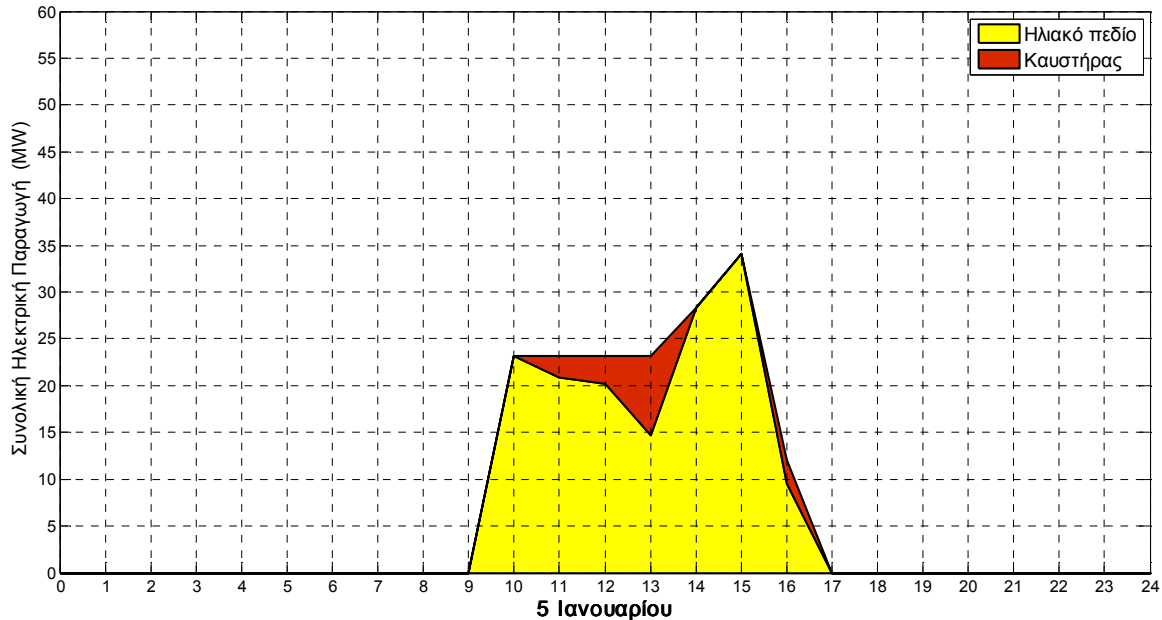
Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό, και τα οποία έχουν προκύψει μέσω του προγράμματος Matlab, αποδίδεται σχηματικά η καθημερινή λειτουργία του σταθμού και οι τιμές που λαμβάνουν ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη σε συγκεκριμένες ημέρες καθόλη τη διάρκεια του έτους. Ο σταθμός που προσομοιώθηκε έχει ονομαστική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ 50MW, 95 βρόχους συλλεκτών με παραβολικά κάτοπτρα τύπου ET-150 ενώ είναι εφοδιασμένος και με βοηθητικό καυστήρα ο οποίος αποδίδει ονομαστική θερμική ισχύ 35MWth στο συνθετικό έλαιο. Επίσης, ο σταθμός διαθέτει σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας δύο δεξαμενών με τηγμένα άλατα, το οποίο του παρέχει αυτοδυναμία δύο ωρών σε πλήρες φορτίο. Η τοποθεσία που έχει επιλεγεί για τον υπό προσομοίωση σταθμό είναι στο νησί της Κρήτης σύμφωνα με τη ληφθείσα χρονοσειρά άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Στην πρώτη ενότητα διαγραμμάτων που ακολουθεί παρουσιάζεται η λειτουργία του εν λόγω ηλιοθερμικού σταθμού εάν εφαρμοστεί η στρατηγική λειτουργίας συντηρητικής χρήσης του βοηθητικού καυστήρα, όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η δεύτερη ενότητα των διαγραμμάτων αφορά τη λειτουργία του υπό προσομοίωση ηλιοθερμικού σταθμού με εφαρμογή της μέγιστης χρήσης του βοηθητικού καυστήρα, όπως αυτή αναλύθηκε στην αντίστοιχη ενότητα του τέταρτου κεφαλαίου.

### 5.1.1 Λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού με συντηρητική χρήση του συμβατικού καυστήρα

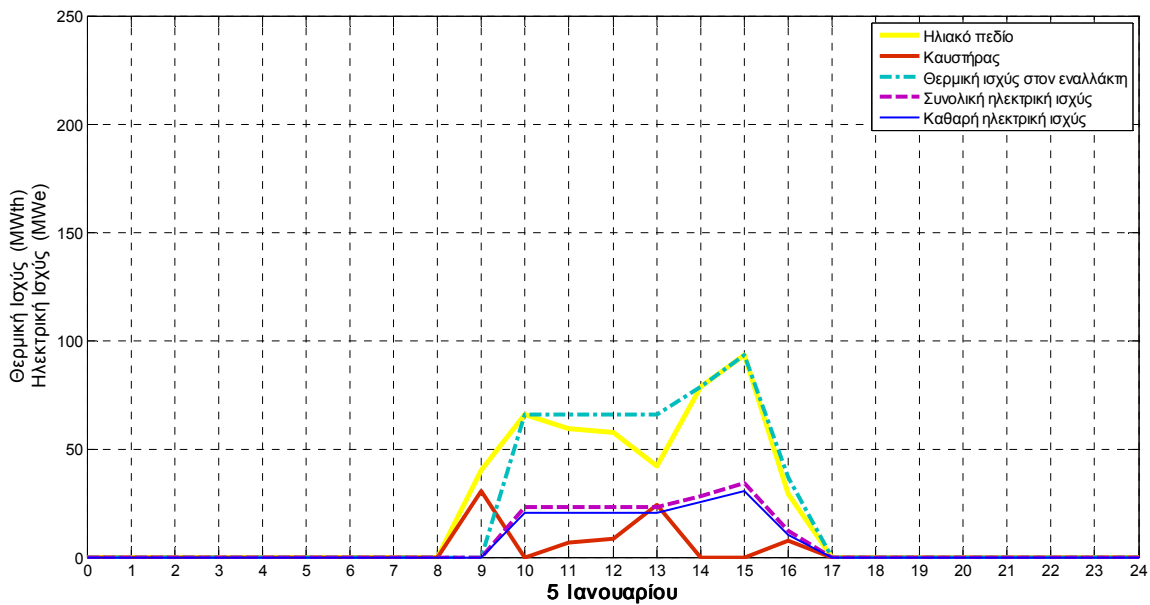
Στο πρώτο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η συμμετοχή των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού (πηγές παροχής θερμικής ισχύος) στην ημερήσια συνολική (gross) παραγωγή του σταθμού για μια χειμωνιάτικη ημέρα, στις 5 Ιανουαρίου. Όπως φαίνεται η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι περίπου 34MW λόγω ανεπαρκούς ηλιοφάνειας. Η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού ξεκινάει μετά τις 09:00 τοπική ώρα. Μετά από τις 10:00 παρατηρείται μια βύθιση της ηλιοφάνειας την οποία καλείται να καλύψει ο βοηθητικός καυστήρας του σταθμού. Η αποθήκη του σταθμού δεν συμμετέχει στη λειτουργία καθώς η ηλιοφάνεια καθόλη τη διάρκεια της ημέρας δεν είναι αρκετή για να φορτιστεί. Μετά από τις 15:00 ξεκινάει η μείωση της παραγόμενης ισχύος, η οποία μηδενίζεται στις 17:00. Παρατηρούμε τη συμμετοχή του συμβατικού καυστήρα λίγο πριν τον

τερματισμό της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού για να διασφαλιστεί η λειτουργία του σταθμού σε επίπεδα πάνω από το αντίστοιχο τεχνικό ελάχιστο.



**Διάγραμμα 5.1 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

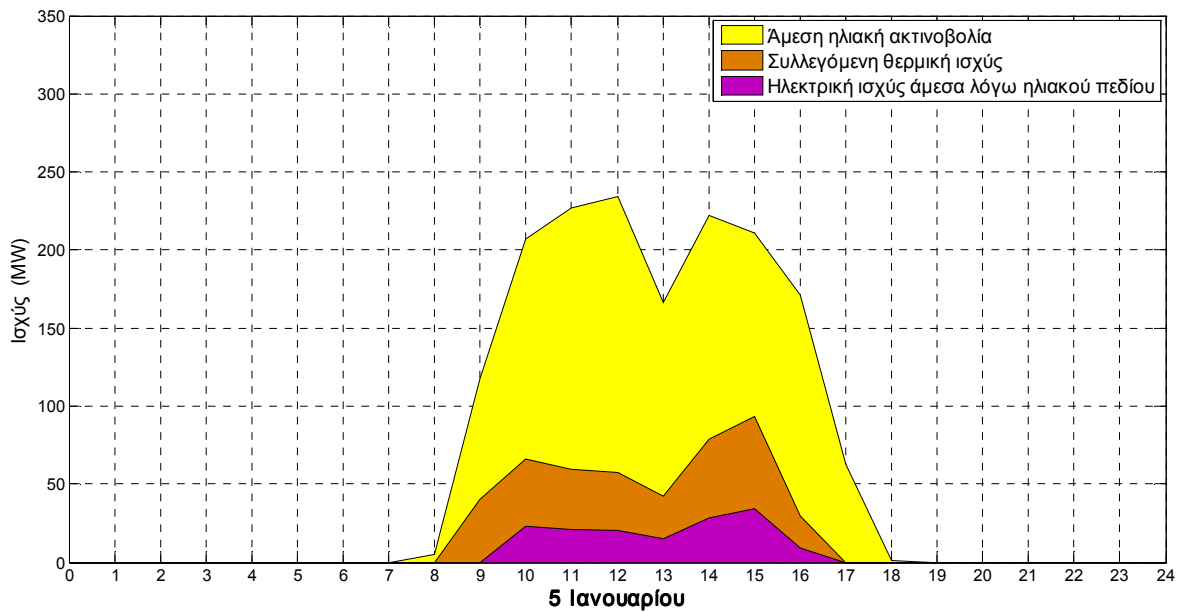
Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται αναλυτικά η διακύμανση περισσότερων μεγεθών στη διάρκεια της ίδιας ημέρας. Απεικονίζονται ανεξάρτητα η συλλεγόμενη θερμική ισχύς από το ηλιακό πεδίο, η αποδιδόμενη θερμική ισχύς από το βοηθητικό καυστήρα στο έλαιο, η συνολική θερμική ισχύς που αποδίδεται στον κεντρικό θερμικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος καθώς και η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τη γεννήτρια του σταθμού όπως και η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, εάν αφαιρεθούν από τη συνολική οι διάφορες παρασιτικές καταναλώσεις του σταθμού. Παρατηρούμε τη λειτουργία του καυστήρα ταυτόχρονα με το ηλιακό πεδίο νωρίς το πρωί πριν την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής, με σκοπό τη θέρμανση του συνθετικού ελαίου. Η επόμενη χρήση του καυστήρα είναι για την κάλυψη της βύθισης της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος, με αποτέλεσμα να ομαλοποιείται η συνολική θερμική ισχύς που φτάνει στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος. Τέλος, χρησιμοποιείται και προς το τέλος της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού για να αποφευχθεί η λειτουργία του σε επίπεδα κάτω από το τεχνικό ελάχιστο.



**Διάγραμμα 5.2** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

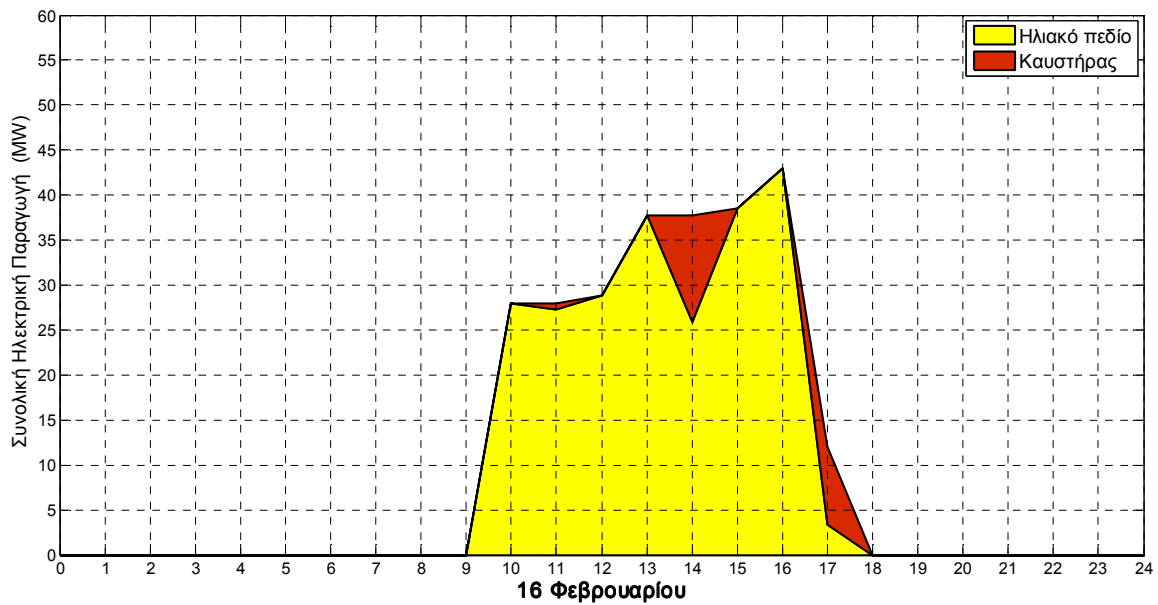
Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται χαρακτηριστικά η ροή της ισχύος με τις απώλειες κατά τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας στο ηλιακό πεδίο και έπειτα το μέρος αυτής που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ από τη γεννήτρια του κύκλου ισχύος. Η κίτρινη περιοχή που προεξέχει από την καφέ περιοχή αντιπροσωπεύει την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στο ηλιακό πεδίο καθόλη τη διάρκεια της ημέρας την οποία δεν καταφέρνει να συλλέξει το ηλιακό πεδίο λόγω απωλειών. Αντίστοιχα, η καφέ περιοχή που προεκτείνεται εκτός της μωβ περιοχής αντιπροσωπεύει τη θερμική ισχύ που έχει συλλεγεί και δεν μετατράπηκε σε ηλεκτρική ισχύ λόγω διαφόρων απωλειών. Τέλος, το εμβαδόν της μωβ περιοχής δίνει τη συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, η οποία οφείλεται σε άμεση εκμετάλλευση της συλλεγόμενης θερμικής ενέργειας. Αυτό είναι ένα ποσοστό της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς ένα τμήμα της οφείλεται σε άμεση χρήση του καυστήρα και ένα άλλο σε χρήση του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Βέβαια, κατά τη συγκεκριμένη χειμωνιάτικη ημέρα δεν λειτουργεί η αποθήκη ούτως ή άλλως. Και σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται η σύντομη βύθιση της ηλιοφάνειας, η οποία επηρεάζει τη συλλεγόμενη θερμική ισχύ, ενώ φαίνεται χαρακτηριστικά και η αντίστοιχη επίδραση που θα είχε στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ εάν δεν υπήρχε ο βοηθητικός καυστήρας να ομαλοποιήσει τη διακύμανση.





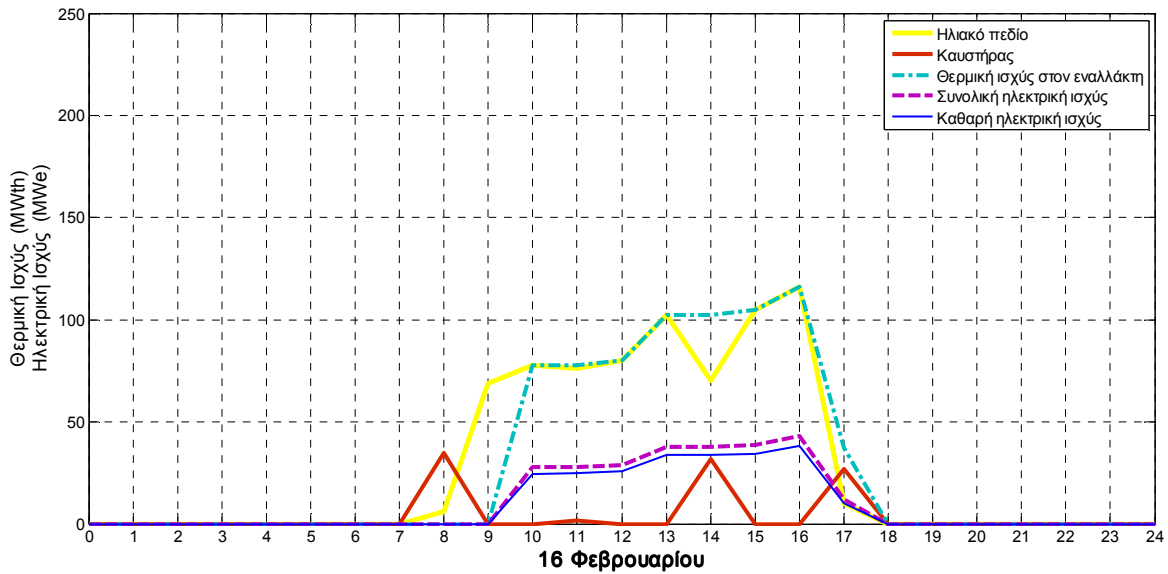
**Διάγραμμα 5.3 Ροή ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία ως την άμεσα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται στο ηλιακό πεδίο.**

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου και του βοηθητικού καυστήρα στην ημερήσια παραγωγή του σταθμού για τις 16 Φεβρουαρίου. Πρόκειται για μια τυπική χειμωνιάτικη μέρα του Φεβρουαρίου όπου συχνές παροδικές βυθίσεις, οι οποίες οφείλονται κυρίως σε παροδικές συννεφίες, επηρεάζουν την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Όπως φαίνεται η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι περίπου στα 43MW χωρίς όμως ποτέ να φτάνει την ονομαστική ισχύ ούτε να λειτουργεί καθόλου το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού ξεκινάει μετά από τις 9 η ώρα το πρωί και κορυφώνεται στις 4 η ώρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρούνται δύο διαφορετικές παροδικές μειώσεις στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ από το ηλιακό πεδίο, μια αρκετά μικρή και μια σχετικά έντονη, οι οποίες καλύπτονται πλήρως από το βοηθητικό καυστήρα. Μετά τις 4 η ώρα το απόγευμα ξεκινάει η οριστική μείωση της παραγόμενης ισχύος, η οποία ενισχύεται με τη χρησιμοποίηση του συμβατικού καυστήρα για να διατηρηθεί η λειτουργία του σταθμού πάνω από το τεχνικό ελάχιστο, και μηδενίζεται οριστικά μετά από δύο ώρες.



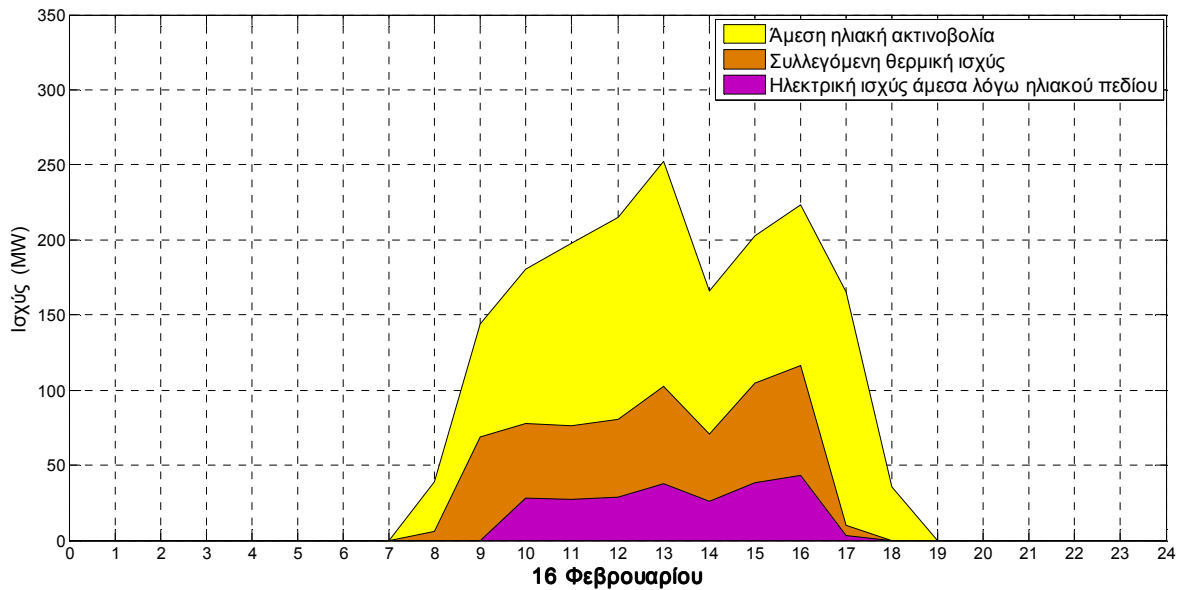
**Διάγραμμα 5.4 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Παρακάτω απεικονίζεται η διακύμανση περισσότερων μεγεθών, όπως στο διάγραμμα 5.2, για την ίδια ημέρα όπως και πριν. Όσον αφορά στη λειτουργία του καυστήρα, αυτός χρησιμοποιείται τόσο το πρωί για την προθέρμανση του ελαίου καθώς και στη διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού για την κάλυψη των δύο βυθίσεων και τη διατήρηση της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού κατά τις τελευταίες απογευματινές ώρες όπου διαφορετικά αυτή θα τερματιζόταν λόγω του περιορισμού του τεχνικού ελαχίστου στη λειτουργία του σταθμού. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η θερμική ισχύς που καταλήγει στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος είναι το άθροισμα της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος από το ηλιακό πεδίο και της θερμικής ισχύος του καυστήρα, για το διάστημα μετά την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής.



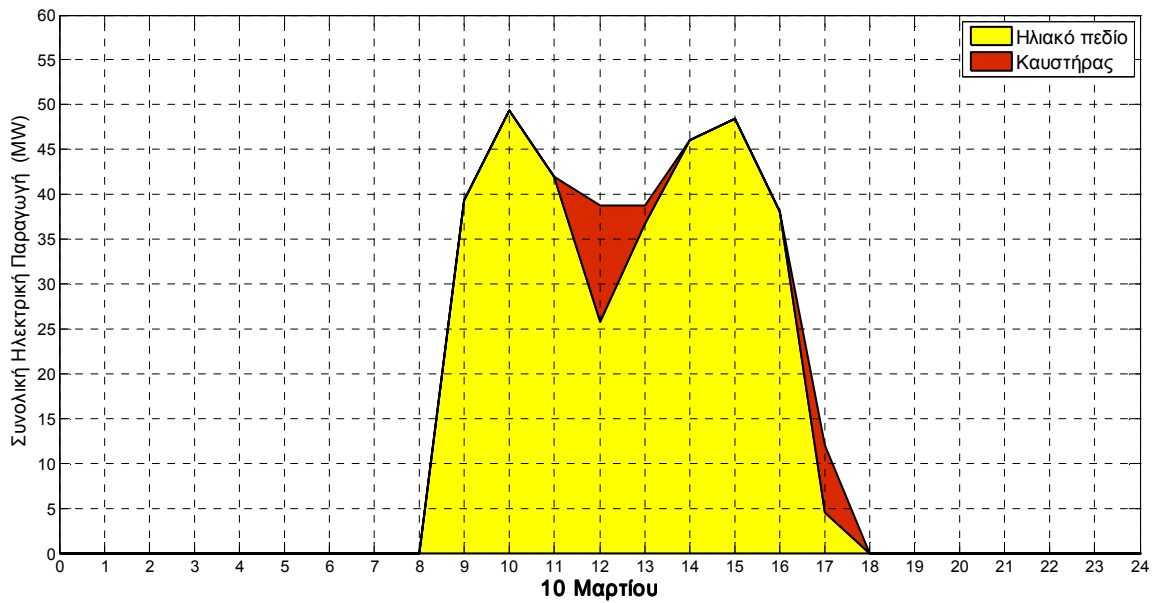
**Διάγραμμα 5.5** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

Στη συνέχεια απεικονίζεται χαρακτηριστικά η ροή της ισχύος, από την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, με τον ίδιο τρόπο όπως και στο διάγραμμα 5.3, αλλά για τις 16 Φεβρουαρίου. Και σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται η μετάδοση του φαινομένου της βύθισης από την ηλιοφάνεια μέχρι το τμήμα της ηλεκτρικής παραγωγής που προέρχεται άμεσα από τη συλλεγόμενη θερμική ισχύ στο ηλιακό πεδίο. Φαίνεται ακόμη, χαρακτηριστικά, η διακύμανση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος που οφείλεται μόνο στο ηλιακό πεδίο και αναδεικνύεται η αναγκαιότητα της χρήσης του βοηθητικού καυστήρα για τη βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος. Παρατηρούμε, ακόμη, ότι η πρώτη μικρή βύθιση στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ δεν συνοδεύεται από βύθιση και στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Συνεπώς, η βύθιση αυτή δεν οφείλεται σε συννεφιά αλλά σε λιγότερο αποτελεσματική παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου εκείνη τη στιγμή.



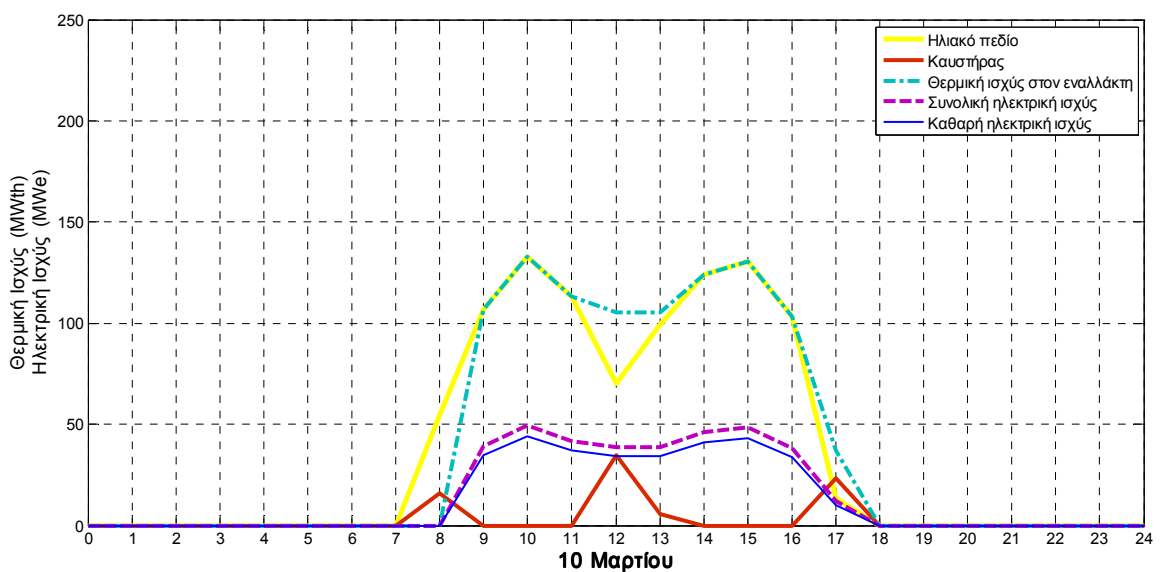
**Διάγραμμα 5.6 Ροή ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία ως την άμεσα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται στο ηλιακό πεδίο.**

Στη συνέχεια απεικονίζεται η λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού στη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας με αυξημένη ηλεκτρική παραγωγή αλλά όπου ακόμη δεν λειτουργεί η αποθήκη ενέργειας του συστήματος. Στο διάγραμμα 5.7 που ακολουθεί φαίνεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου και του βοηθητικού καυστήρα στην ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού στις 10 Μαρτίου. Η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς κινείται κατά το μεγαλύτερο διάστημα της ηλιοφάνειας πάνω από τα 40MW ενώ ξεπερνάει για περισσότερες από δύο ώρες και τα 45MW. Επίσης, το διάστημα της ηλεκτροπαραγωγής είναι αυξημένο σε σχέση με τις προηγούμενες χειμωνιάτικες ημέρες καθώς ο σταθμός παράγει ηλεκτρική ισχύ μετά από τις 8 η ώρα το πρωί έως μετά τις 5 το απόγευμα. Και πάλι γίνεται χρήση του καυστήρα για την κάλυψη μιας βύθισης της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας όπως και πριν το τέλος της ηλεκτροπαραγωγής του.



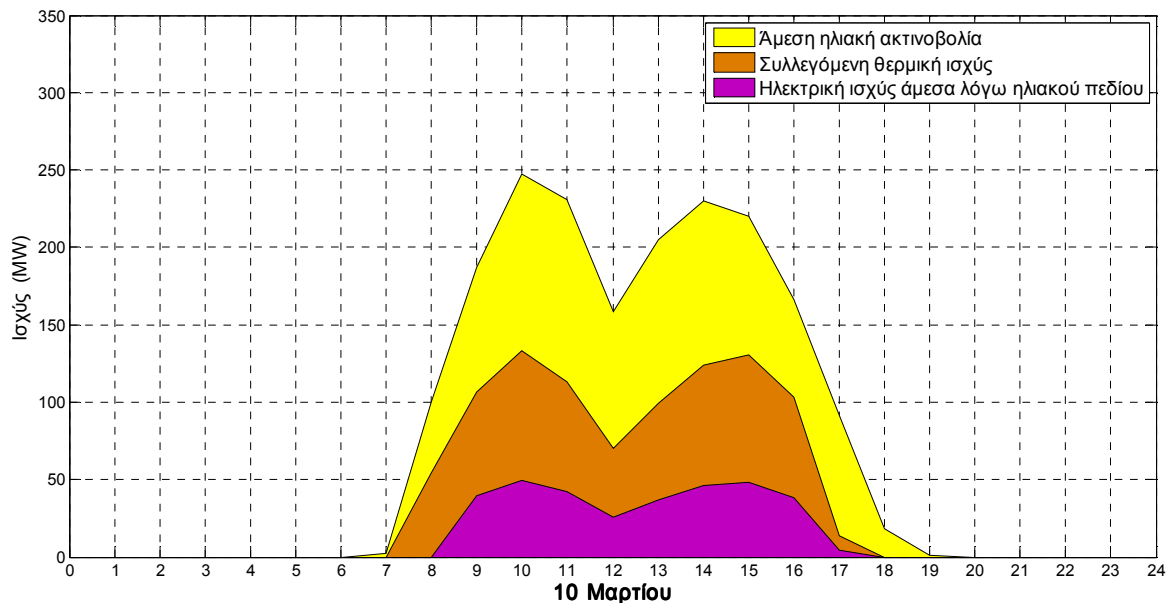
**Διάγραμμα 5.7 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η διακύμανση διάφορων χαρακτηριστικών μεγεθών του σταθμού, για τη λειτουργία του σταθμού στις 10 Μαρτίου. Εδώ εκτός από τη λειτουργία του καυστήρα κατά την ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού, φαίνεται και η λειτουργία του νωρίς το πρωί για την προθέρμανση του ελαίου.



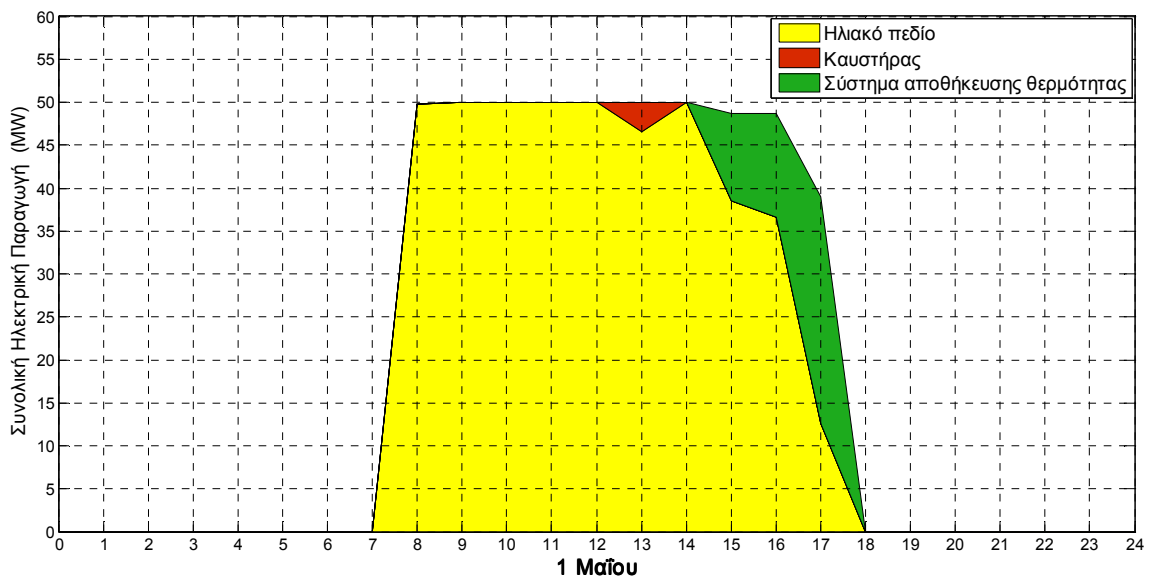
**Διάγραμμα 5.8 Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.**

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η ροή της ισχύος για τις 10 Μαρτίου, με τον τρόπο που έχει αποδοθεί και σε προηγούμενα διαγράμματα. Και σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται η μετάδοση του φαινομένου της βύθισης από την ηλιοφάνεια μέχρι το τμήμα της ηλεκτρικής παραγωγής που προέρχεται άμεσα από τη συλλεγόμενη θερμική ισχύ στο ηλιακό πεδίο. Παρατηρούμε ότι πριν τις 7 η ώρα το πρωί παρόλο που υπάρχει μια πολύ μικρή ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας το ηλιακό πεδίο δεν λειτουργεί. Αυτό συμβαίνει διότι η θερμική ισχύς που επρόκειτο να συλλεχθεί θα ήταν μικρότερη από τις θερμικές απώλειες του ελαίου στο ηλιακό πεδίο κατά τη λειτουργία του. Είναι, επίσης, χαρακτηριστικό ότι σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα για τις 5 Ιανουαρίου προκύπτει ότι η προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται αρκετά αποτελεσματικότερα στις 10 Μαρτίου για λόγους που έχουν να κάνουν με την τροχιά και τη θέση του ήλιου. Δηλαδή, η απόδοση του ηλιακού πεδίου είναι αυξημένη σε σχέση με τη χειμωνιάτικη ημέρα. Για αυτό και παρατηρούμε ότι παρόλο που η ηλιοφάνεια φτάνει περίπου σε ίδιες τιμές, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς είναι μεγαλύτερη.



**Διάγραμμα 5.9 Ροή ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία ως την άμεσα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται στο ηλιακό πεδίο.**

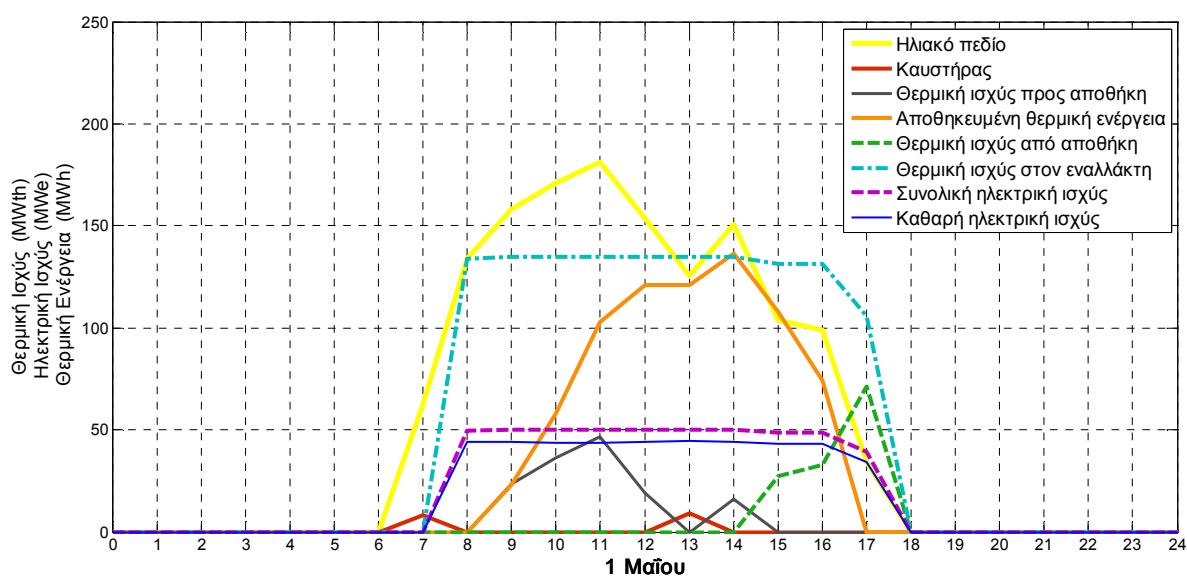
Στο διάγραμμα 5.10 απεικονίζεται η συμμετοχή των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτρική παραγωγή του σταθμού για μια πιο θερμή ανοιξιάτικη ημέρα, στη 1 Μαΐου. Παρατηρούμε, ότι πλέον συμμετέχει και το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού. Η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού ξεκινάει μετά τις 7 η ώρα το πρωί και σταθεροποιείται αμέσως στην μέγιστη δυνατή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ των 50MW, για έξι περίπου ώρες. Στη μία το μεσημέρι η συλλεγόμενη θερμική ισχύς παρουσιάζει μια μικρή βύθιση την οποία καλύπτει πλήρως ο βοηθητικός καυστήρας. Μετά, τις 2 η ώρα το μεσημέρι μειώνεται σταδιακά η συλλεγόμενη θερμική ισχύς από το ηλιακό πεδίο, μέχρις ότου μηδενιστεί στις 6 η ώρα. Ταυτόχρονα, με τη μείωση της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος αρχίζει να λειτουργεί η αποθήκη θερμότητας για να καλύψει τη μείωση αυτή και να ομαλοποιηθεί η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς προς το τέλος της λειτουργίας του σταθμού. Με τον τερματισμό της λειτουργίας του ηλιακού πεδίου σταματάει και η λειτουργία της αποθήκης καθώς έχει αποφορτιστεί πλήρως και δεν έχει τη δυνατότητα να συνεχίσει να τροφοδοτεί μόνη της το σταθμό.



**Διάγραμμα 5.10 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται αναλυτικά η διακύμανση διαφόρων μεγεθών στη διάρκεια της λειτουργίας του σταθμού στη 1 Μαΐου. Συμπεριλαμβάνονται οι γραφικές παραστάσεις της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος από το ηλιακό πεδίο, της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος από το βοηθητικό καυστήρα στο έλαιο, της περίσσειας θερμικής ισχύος η οποία κατευθύνεται προς την αποθήκη, της αποθηκευμένης κάθε στιγμή θερμικής ενέργειας στην αποθήκη του συστήματος

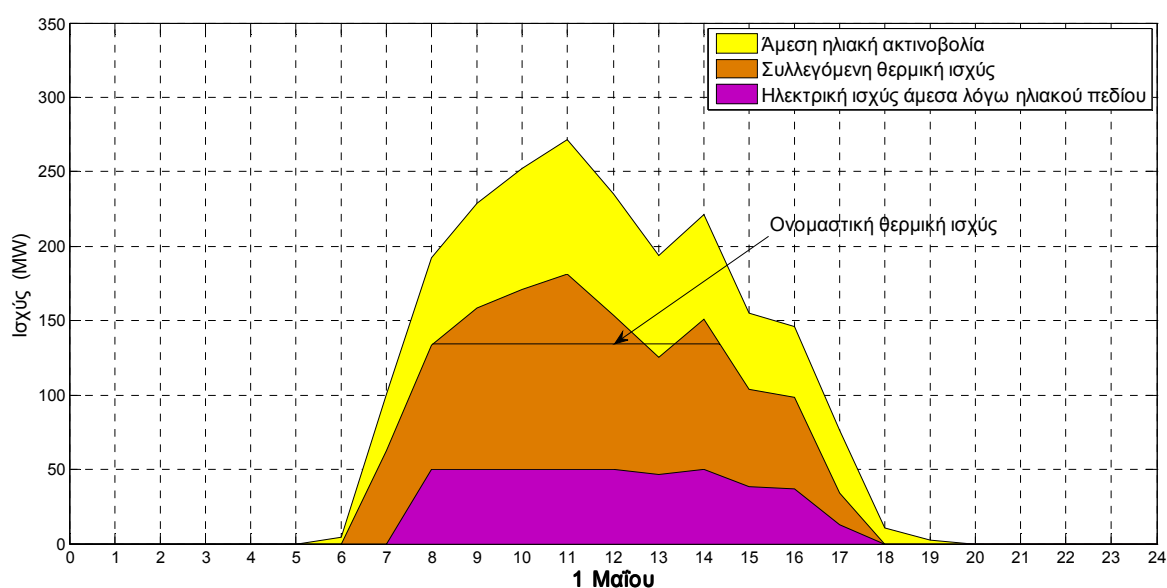
(state of charge-SOC), της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος από το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας στο έλαιο, της συνολικής θερμικής ισχύος που αποδίδεται στον κεντρικό θερμικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος καθώς και της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τη γεννήτρια του σταθμού όπως και της καθαρής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Νωρίς το πρωί, παρατηρούμε την ταυτόχρονη λειτουργία ηλιακού πεδίου και βοηθητικού καυστήρα για την προθέρμανση του συνθετικού ελαίου. Πολύ σύντομα μετά την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς ξεπερνά την ονομαστική της τιμή, με αποτέλεσμα και να παράγεται η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς και να υπάρχει περίσσεια θερμικής ισχύος για να φορτίζει την αποθήκη. Φαίνεται χαρακτηριστικά και στο διάγραμμα, ότι κατά τη διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής όταν η θερμική ισχύς από το ηλιακό πεδίο ξεπερνά τη θερμική ισχύ που κατευθύνεται προς τον εναλλάκτη, εμφανίζεται η περίσσεια ως θερμική ισχύς προς την αποθήκη. Παρατηρούμε, επίσης, ότι όσο υπάρχει θερμική ισχύς προς την αποθήκη αυξάνεται η θερμική ενέργεια που βρίσκεται κάθε στιγμή αποθηκευμένη στη «θερμή» δεξαμενή. Κατά τη βύθιση της ηλιοφάνειας γύρω στη μία η ώρα το μεσημέρι, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς μειώνεται κάτω από την ονομαστική της τιμή οπότε και σταματάει προσωρινά η φόρτιση της αποθήκης του σταθμού. Κατά το διάστημα αυτό, το επίπεδο φόρτισης της αποθήκης παραμένει σταθερό, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα. Στη συνέχεια, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς αυξάνεται και πάλι πάνω από την ονομαστική της τιμή και η αποθήκη φορτίζεται για ακόμη ένα διάστημα. Μετά τις δύο το μεσημέρι, μόλις αρχίσει η εκφόρτιση της αποθήκης («θερμική ισχύς από αποθήκη») αρχίζει και η πτώση του επιπέδου φόρτισής της.



Διάγραμμα 5.11 Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.



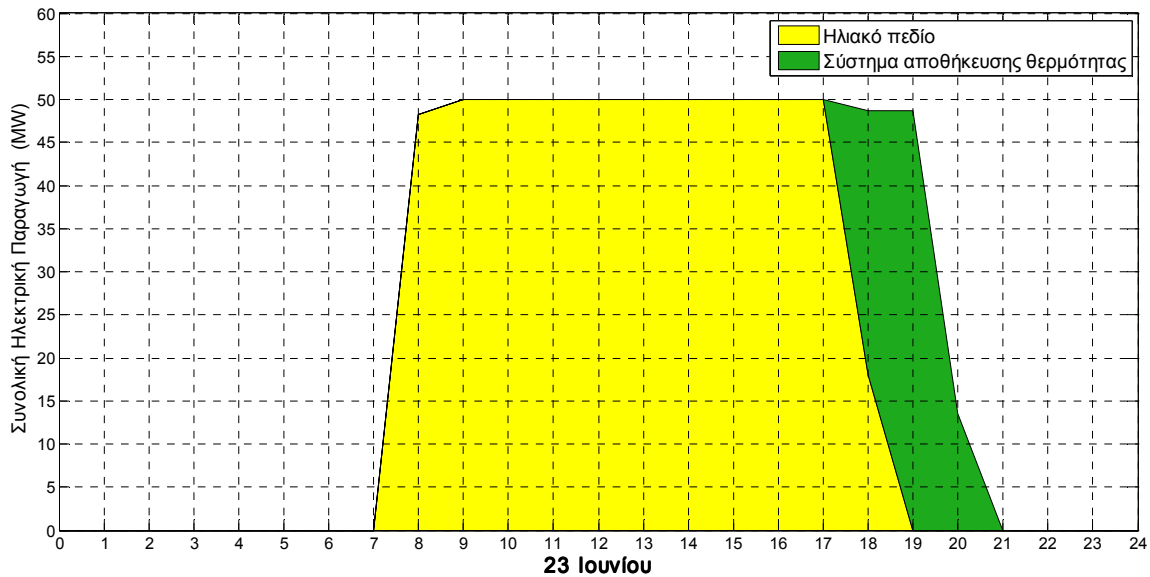
Στη συνέχεια απεικονίζεται η ροή της ισχύος, από την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, με τον ίδιο τρόπο όπως και στο διάγραμμα 5.3, αλλά τώρα για τη 1 Μαΐου. Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζει την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται άμεσα μόνο στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ εκείνη τη στιγμή από το ηλιακό πεδίο. Η περιοχή της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος πάνω από τη γραμμή της ονομαστικής θερμικής ισχύος αφού έχει ξεκινήσει η ηλεκτροπαραγωγή, αντιπροσωπεύει την περίσσεια της συλλεγόμενης θερμικής ενέργειας, η οποία αποθηκεύεται στη «θερμή» δεξαμενή.



**Διάγραμμα 5.12 Ροή ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία ως την άμεσα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται στο ηλιακό πεδίο.**

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου και του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας στη συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στη διάρκεια μιας ιδιαιτέρως ηλιόλουστης ημέρας όπως η 23<sup>η</sup> Ιουνίου. Λόγω εποχής η ηλιοφάνεια διαρκεί περισσότερο και έτσι η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού ξεκινάει νωρίς, μετά τις 7 το πρωί, ενώ ο σταθμός συνεχίζει να παράγει ηλεκτρική ισχύ μέχρι νωρίς το βράδυ στις 9 η ώρα. Επίσης, για το μεγαλύτερο διάστημα όπου λειτουργεί αποκλειστικά το ηλιακό πεδίο (πάνω από 9 ώρες) ο σταθμός παράγει ακριβώς την ονομαστική του ισχύ, ενώ και κατά τις ώρες λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι πολύ κοντά στην

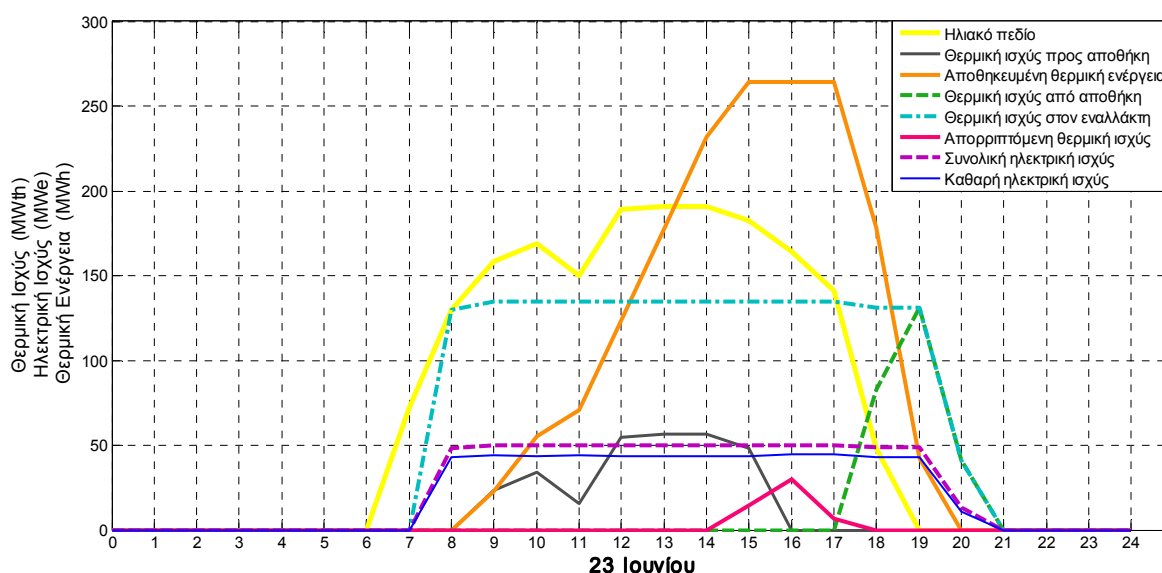
ονομαστική, με εξαίρεση την τελευταία ώρα που είναι περίπου στα 13,5MW. Έτσι, ο σταθμός μπορεί και παράγει ηλεκτρική ισχύ περίπου 50 MW συνεχόμενα για ένα διάστημα περίπου 11 ωρών. Η συμμετοχή του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας ξεκινάει μετά τις 5 η ώρα το απόγευμα, καλύπτοντας το κενό που αφήνει η μείωση της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος, και στο τέλος ο σταθμός λειτουργεί αποκλειστικά από την αποθήκη του για περίπου δύο ώρες.



**Διάγραμμα 5.13 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται αναλυτικά η διακύμανση διαφόρων μεγεθών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του σταθμού στις 23 Ιουνίου. Παρατηρούμε την απουσία της χρήσης του βοηθητικού καυστήρα ακόμη και από τη διαδικασία προθέρμανσης του ελαίου νωρίς το πρωί. Αυτό συμβαίνει διότι από την έναρξη της ηλιοφάνειας, αυτή είναι αυξημένη με αποτέλεσμα σε περίπου μια ώρα το έλαιο να φτάνει στην επιθυμητή θερμοκρασία μόνο με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας. Πολύ σύντομα από την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς ξεπερνάει την ονομαστική της τιμή και τότε αρχίζει η φόρτιση της αποθήκης. Παρόλο που στις 11 η ώρα παρουσιάζεται μια βύθιση της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος, αυτή παραμένει πάνω από την ονομαστική της τιμή και έτσι η φόρτιση της αποθήκης συνεχίζεται, αλλά με μειωμένο ρυθμό. Στις τρεις η ώρα περίπου το μεσημέρι, η αποθήκη θερμότητας του σταθμού έχει φορτιστεί πλήρως, έχοντας αποθηκεύσει πάνω από 260MWh θερμικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς συνεχίζει να παρουσιάζει πλεόνασμα το οποίο όμως δεν μπορεί ούτε να αποθηκευτεί ούτε να διοχετευτεί στον κύκλο ισχύος. Για

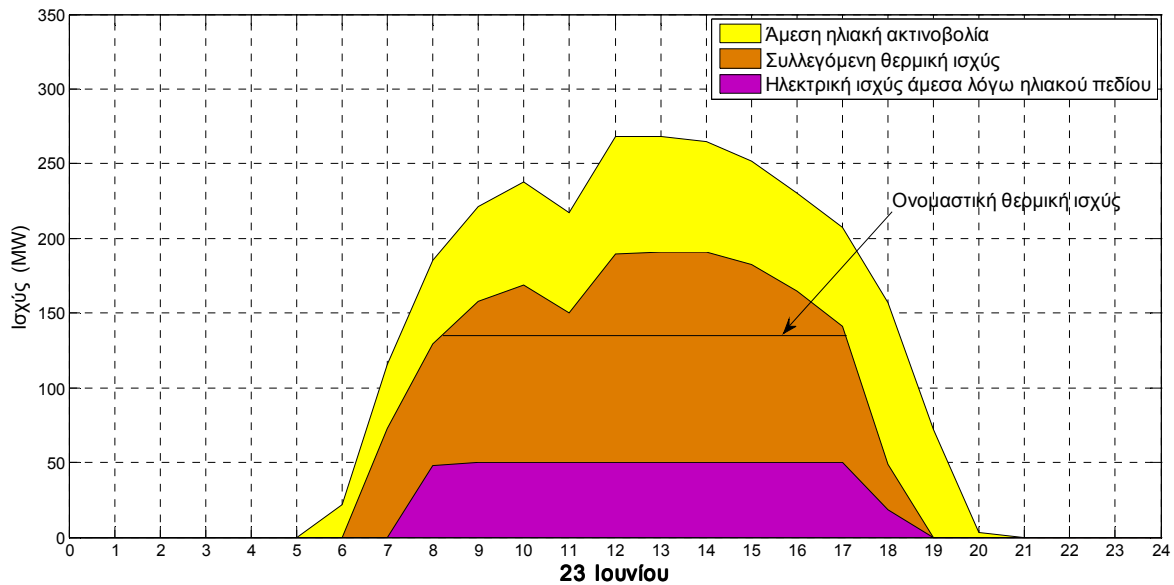
το λόγο αυτό ένα τμήμα των συλλεκτών του ηλιακού πεδίου απεστιάζεται «απορρίπτοντας» στην ουσία τη θερμική ισχύ την οποία ο σταθμός δεν μπορεί να αξιοποιήσει. Το εμβαδόν της περιοχής που περικλείει η αντίστοιχη γραμμή του διαγράμματος (απορριπτόμενη θερμική ισχύς) αντιπροσωπεύει την συνολική απορριπτόμενη ενέργεια καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Η αποθήκη του συστήματος ξεκινά να εκφορτίζεται μόλις η συλλεγόμενη θερμική ισχύς μειωθεί κάτω από την ονομαστική της τιμή. Τέλος, παρατηρούμε τη σταθερή διαφορά μεταξύ της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και της καθαρής παραγόμενης ισχύος που αντιπροσωπεύει τις παρασιτικές καταναλώσεις του σταθμού κατά το διάστημα αυτό.



**Διάγραμμα 5.14** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

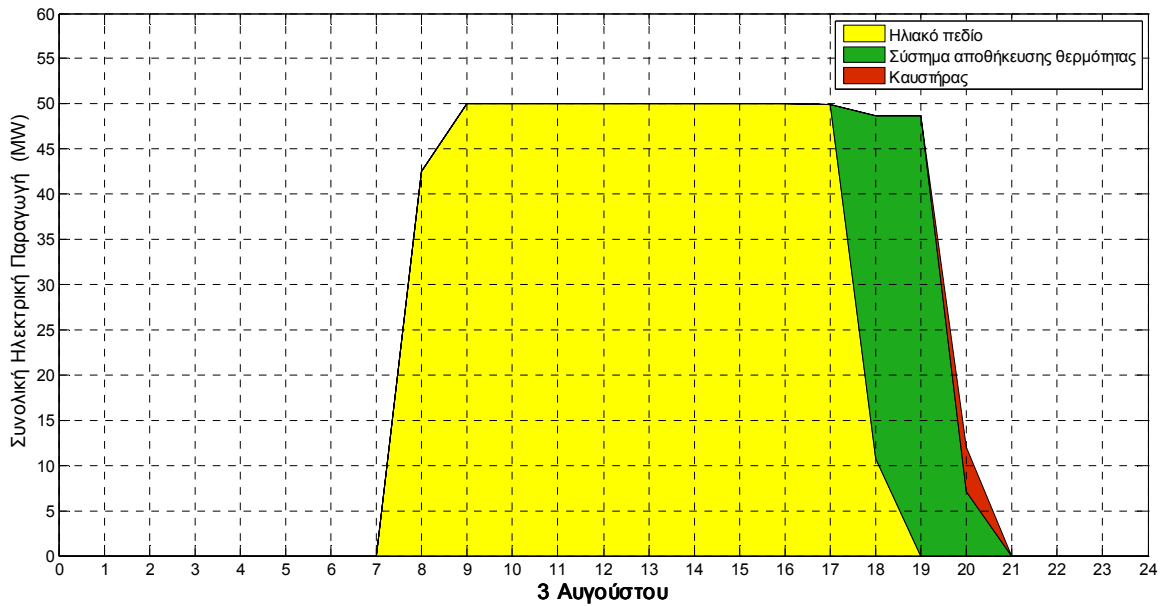
Στο διάγραμμα 5.15 παρουσιάζεται για τις 23 Ιουνίου η ροή της ισχύος, από την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται άμεσα μόνο στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ εκείνη τη στιγμή από το ηλιακό πεδίο. Η περιοχή της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος πάνω από τη γραμμή της ονομαστικής θερμικής ισχύος αφού έχει ξεκινήσει η ηλεκτροπαραγωγή, αντιπροσωπεύει το πλεόνασμα της συλλεγόμενης θερμικής ενέργειας. Κατά τη συγκεκριμένη ημέρα, όπως φάνηκε και στο προηγούμενο διάγραμμα, ένα μέρος του πλεονάσματος αυτού αποθηκεύεται στη «θερμή» δεξαμενή του σταθμού ενώ το υπόλοιπο μέρος δεν μπορεί να αξιοποιηθεί από το σταθμό και απορρίπτεται. Παρατηρούμε ακόμη, ότι η βύθιση της ηλιοφάνειας στις 11 η ώρα δεν επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ

αφού η συλλεγόμενη θερμική ισχύς παραμένει μεγαλύτερη από την ονομαστική της τιμή.



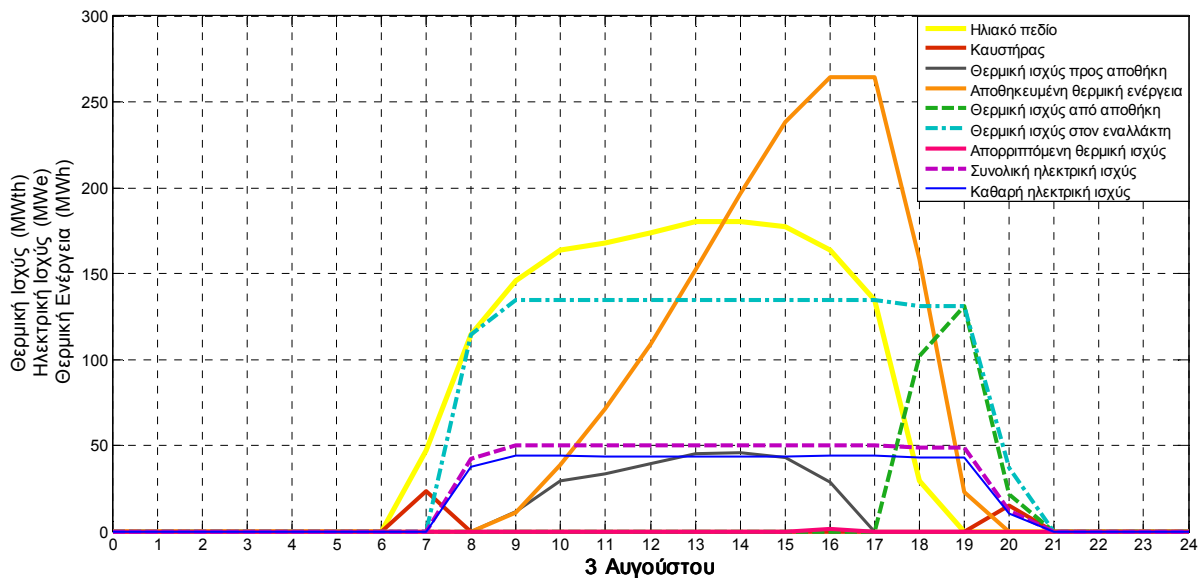
**Διάγραμμα 5.15 Ροή ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία ως την άμεσα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται στο ηλιακό πεδίο.**

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή του ηλιοθερμικού σταθμού στις 3 Αυγούστου. Όπως φαίνεται, μέχρι τις απογευματινές ώρες η λειτουργία αποκλειστικά του ηλιακού πεδίου επαρκεί για λειτουργία του σταθμού υπό πλήρες φορτίο. Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος ξεκινά μετά τις 7 η ώρα το πρωί, φτάνει στην ονομαστική της τιμή στις 9 η ώρα και διατηρείται σε αυτήν έως τις 5 η ώρα το απόγευμα, οπότε και αρχίζει η πτώση της ηλιοφάνειας με ταυτόχρονη έναρξη της εκφόρτισης της αποθήκης θερμότητας. Παρατηρούμε χαρακτηριστικά, ότι κατά την έναρξη της εκφόρτισης της αποθήκης η θερμική ισχύς που φτάνει στον κεντρικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος προέρχεται από το ηλιακό πεδίο και την αποθήκη, στη συνέχεια λειτουργεί αποκλειστικά μόνη της η αποθήκη θερμότητας ενώ στο τέλος η θερμική ισχύς προέρχεται από την αποθήκη θερμότητας και το συμβατικό καυστήρα, ο οποίος καλείται να καλύψει το κενό μέχρι το τεχνικό ελάχιστο που τίθεται στη λειτουργία του σταθμού από την ανάγκη προστασίας του ατμοστροβίλου.



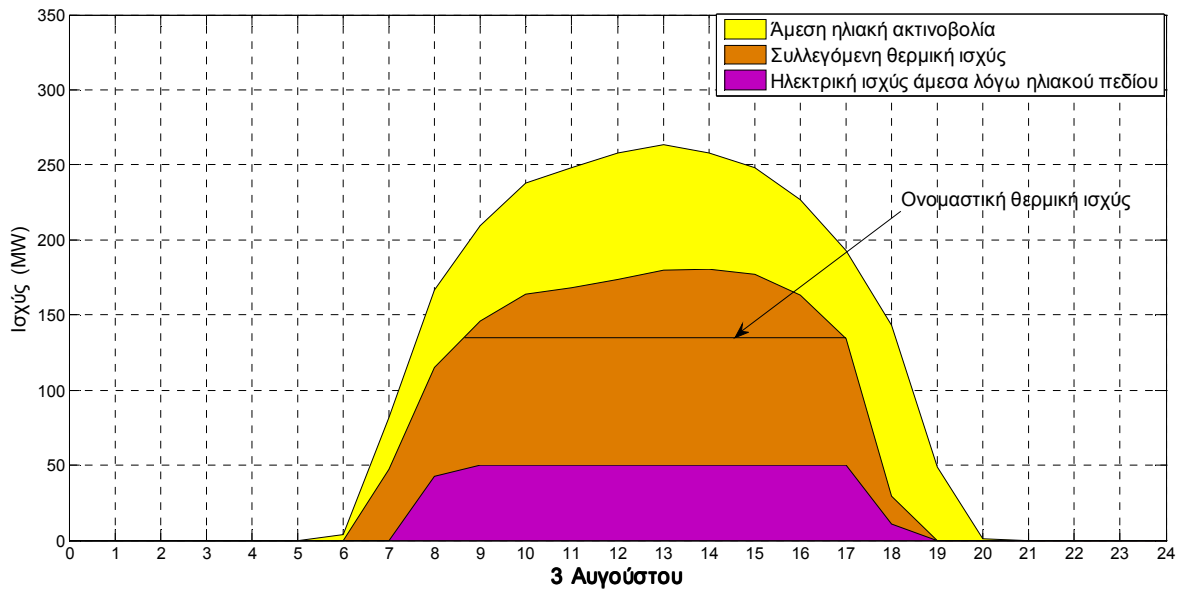
**Διάγραμμα 5.16 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Στο διάγραμμα 5.17 που ακολουθεί απεικονίζονται οι διακυμάνσεις σημαντικών μεγεθών της λειτουργίας του σταθμού κατά τη διάρκεια της 3<sup>ης</sup> Αυγούστου. Παρατηρούμε ότι ο καυστήρας χρησιμοποιείται μόνο πριν την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού για την προθέρμανση του ελαίου καθώς και προς το τέλος της, ταυτόχρονα με την αποθήκη θερμότητας, για την κάλυψη του τεχνικού ελαχίστου στη λειτουργία του σταθμού. Όσον αφορά την απόρριψη ενέργειας, παρατηρείται περίπου στις 4 η ώρα το απόγευμα μια ιδιαίτερα μικρή τιμή απορριπτόμενης θερμικής ισχύος. Είναι επίσης εμφανές ότι περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος υπάρχει κατά το μεγαλύτερο διάστημα της ηλιοφάνειας με αποτέλεσμα η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια να φτάνει το άνω όριο της στις 4 η ώρα περίπου το απόγευμα.



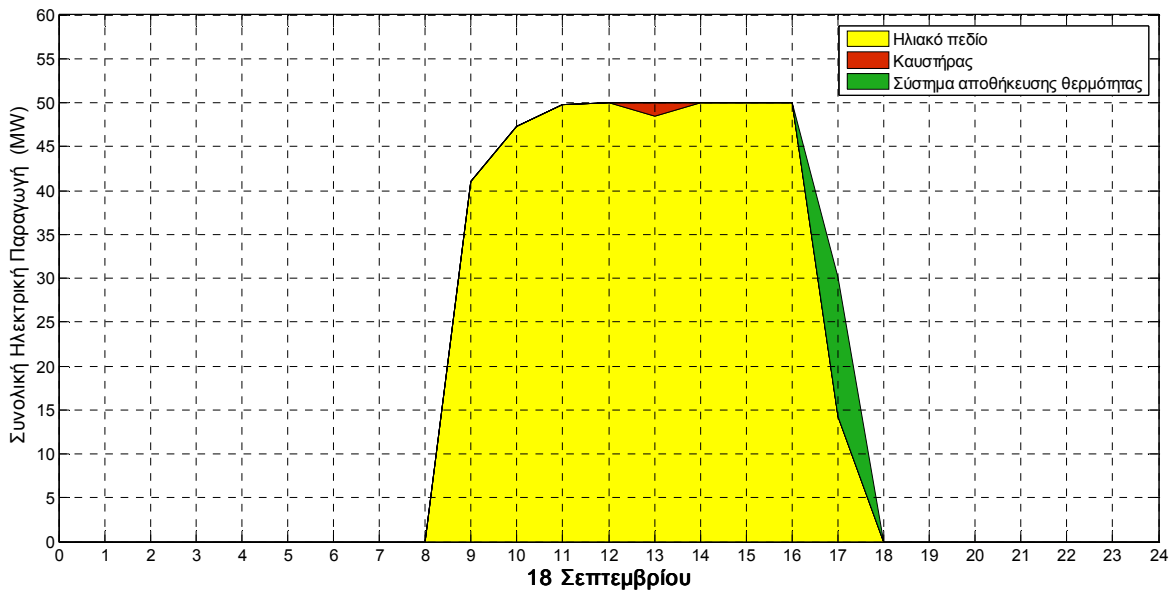
Διάγραμμα 5.17 Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται για τις 3 Αυγούστου, όπως και στα αντίστοιχα διαγράμματα προηγούμενων ημερών, η ροή της ισχύος από το δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται άμεσα και αποκλειστικά στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ εκείνη τη στιγμή από το ηλιακό πεδίο. Η περιοχή της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος πάνω από τη γραμμή της ονομαστικής θερμικής ισχύος αφού έχει ξεκινήσει η ηλεκτροπαραγωγή, αντιπροσωπεύει το πλεόνασμα της συλλεγόμενης θερμικής ενέργειας. Σχεδόν ολόκληρη η ενέργεια που αντιστοιχεί στο πλεόνασμα αποθηκεύεται ως θερμότητα στις δεξαμενές αλάτων του σταθμού και μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό του πλεονάσματος απορρίπτεται όπως φάνηκε από το προηγούμενο διάγραμμα.



**Διάγραμμα 5.18 Ροή ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία ως την άμεσα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται στο ηλιακό πεδίο.**

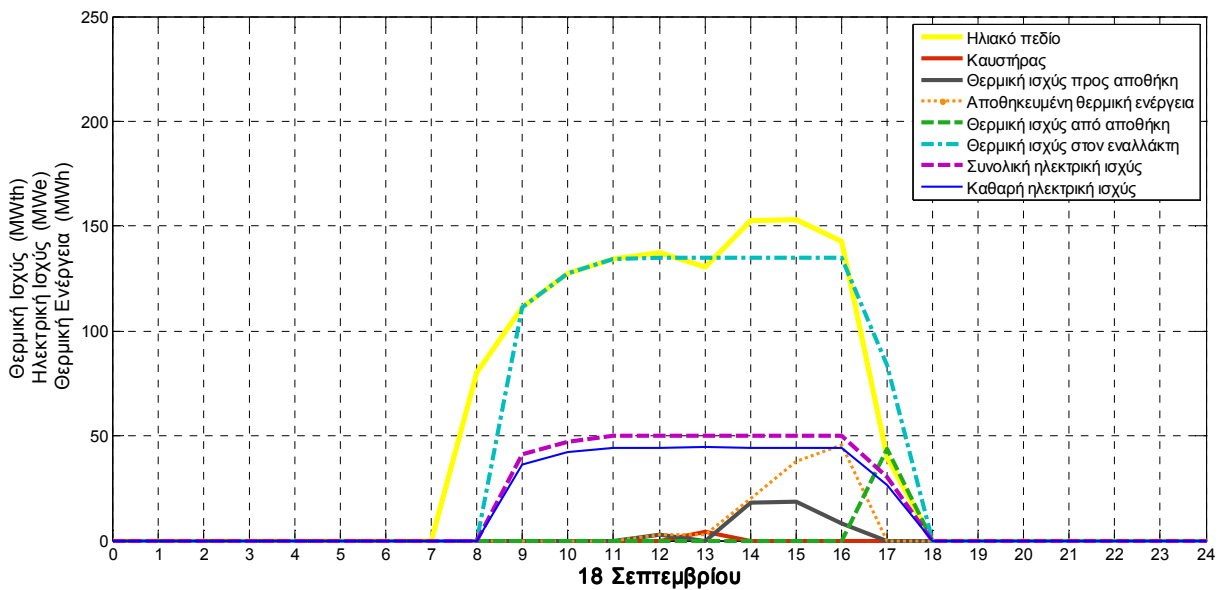
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου, του βοηθητικού καυστήρα και του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας στη συνολική ηλεκτρική παραγωγή του ηλιοθερμικού σταθμού κατά την 18<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου. Παρατηρούμε ότι η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού ξεκινά μετά τις 8 η ώρα το πρωί. Γύρω στη μία η ώρα παρουσιάζεται μια σύντομη και μικρή βύθιση στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ την οποία καλύπτει πλήρως ο βοηθητικός καυστήρας. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς βρίσκεται στην ονομαστική της τιμή μέχρι τις 4 η ώρα περίπου το απόγευμα και στη συνέχεια μειώνεται αρκετά. Μετά την έναρξη της πτώσης της ηλιοφάνειας, προσφέρεται θερμική ισχύς και από την αποθήκη έτσι ώστε η πτώση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος να είναι λιγότερο απότομη. Η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού τερματίζεται οριστικά στις έξι το απόγευμα.



**Διάγραμμα 5.19 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

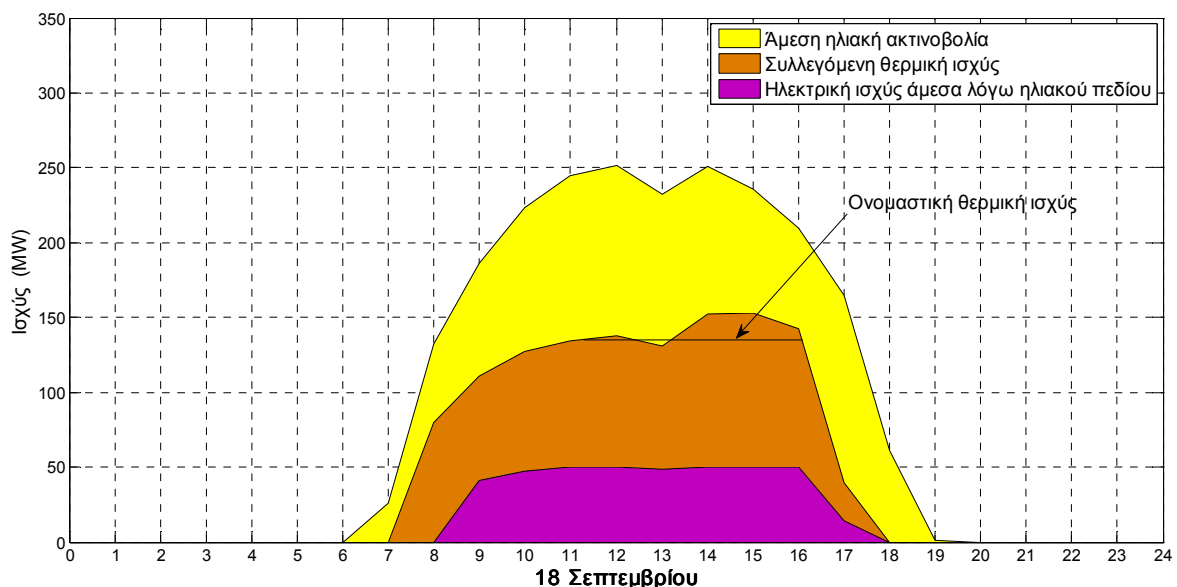
Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται αναλυτικά η διακύμανση διαφόρων μεγεθών, αντιπροσωπευτικών της λειτουργίας του σταθμού κατά τις 18 Σεπτεμβρίου. Παρατηρούμε ότι η θέρμανση του ελαίου το πρωί, προκειμένου να ξεκινήσει η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού, πραγματοποιείται μόνο από το ηλιακό πεδίο, αφού αυτό επαρκεί για να θερμανθεί μέσα σε μία ώρα το μέσο μεταφοράς της θερμότητας στην επιθυμητή θερμοκρασία. Στις 12 η ώρα παρατηρείται μια μικρή περίσσεια συλλεγόμενης θερμικής ισχύος με αποτέλεσμα αυτή να οδηγείται στην αποθήκη και να αποθηκεύεται θερμική ενέργεια. Αυτή η διαδικασία διακόπτεται στη συνέχεια για μία περίπου ώρα όταν κατά τη βύθιση της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος αυτή μειώνεται κάτω από την ονομαστική της τιμή. Εκείνο το διάστημα η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια παραμένει σταθερή ενώ λειτουργεί ο βοηθητικός καυστήρας για να καλύψει τη βύθιση. Στη συνέχεια, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς αυξάνεται και πάλι πάνω από την ονομαστική της τιμή και έτσι έχουμε ξανά ροή ισχύος προς την αποθήκη, της οποίας το επίπεδο φόρτισης αυξάνεται πλέον με γρηγορότερο ρυθμό. Μετά τις τέσσερις το απόγευμα αρχίζει η εκφόρτιση της αποθήκης.





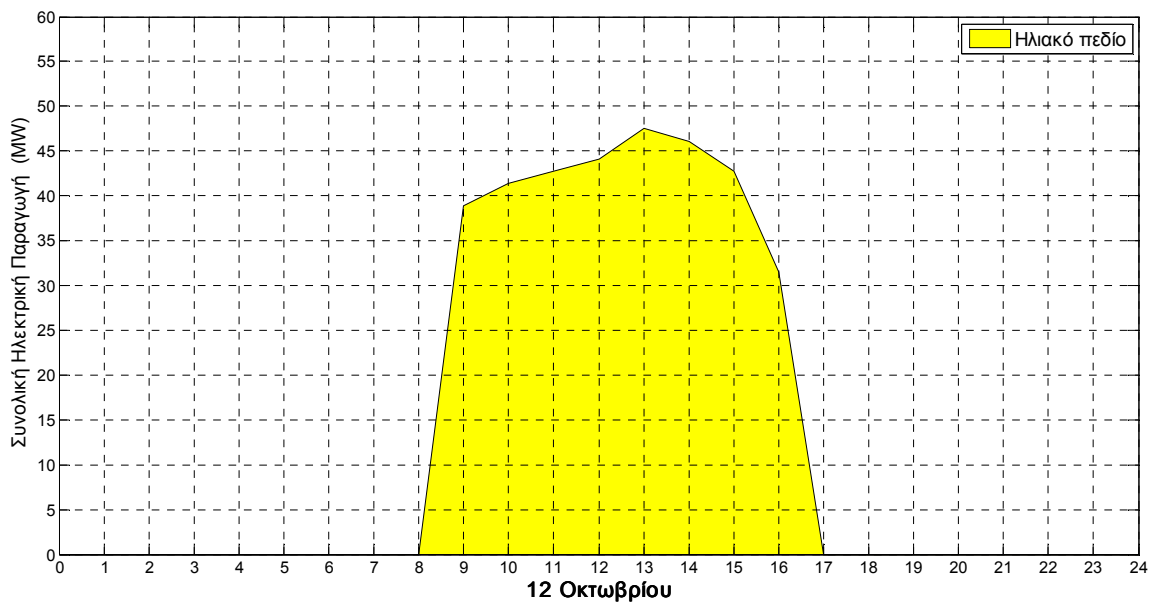
**Διάγραμμα 5.20** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

Στη συνέχεια απεικονίζεται η ροή της ισχύος, από την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, η οποία οφείλεται άμεσα στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ εκείνη τη στιγμή από το ηλιακό πεδίο. Το διάγραμμα αφορά τη λειτουργία του σταθμού στις 18 Σεπτεμβρίου. Η περιοχή της συλλεγόμενης θερμικής ισχύος πάνω από τη γραμμή της ονομαστικής θερμικής ισχύος αφού έχει ξεκινήσει η ηλεκτροπαραγωγή, αντιπροσωπεύει την περίσσεια της συλλεγόμενης θερμικής ενέργειας, η οποία αποθηκεύεται στη «θερμή» δεξαμενή.



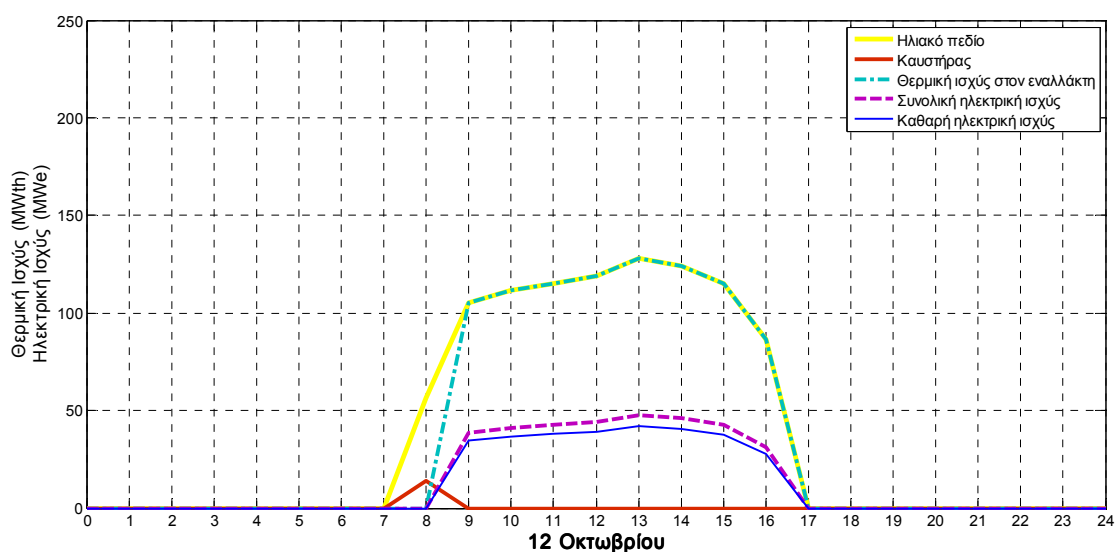
**Διάγραμμα 5.21** Ροή ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία ως την άμεσα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται στο ηλιακό πεδίο.

Στο διάγραμμα της 12<sup>ης</sup> Οκτωβρίου που ακολουθεί φαίνεται η ηλεκτροπαραγωγή του ηλιοθερμικού σταθμού κατά τη διάρκεια της μέρας αυτής. Είναι χαρακτηριστικό ότι στην ηλεκτροπαραγωγή καθόλη τη διάρκεια της ημέρας συμμετέχει αποκλειστικά το ηλιακό πεδίο. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς κορυφώνεται στη μία η ώρα το μεσημέρι, όπου φτάνει τα 47,5MW. Έπειτα, ακολουθεί σταθερά μια πτωτική πορεία, χωρίς την εμφάνιση παροδικών βυθίσεων. Η ηλεκτροπαραγωγή τερματίζεται στις 5 η ώρα το απόγευμα.



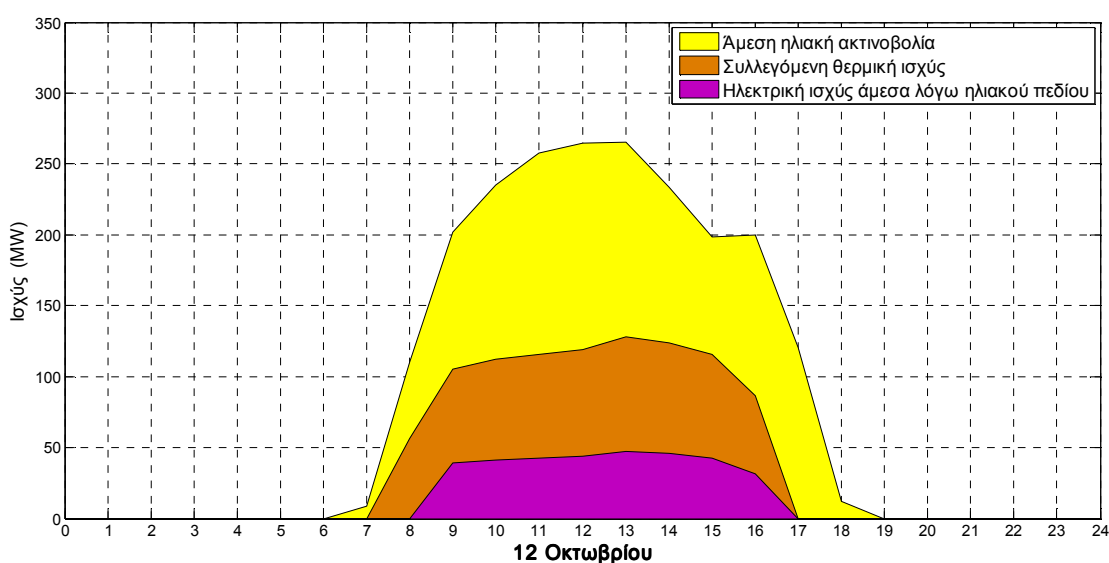
**Διάγραμμα 5.22 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται αναλυτικά η διακύμανση διαφόρων μεγεθών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του σταθμού στις 12 Οκτωβρίου. Παρατηρούμε ότι ο βοηθητικός καυστήρας χρησιμοποιείται μόνο για την προθέρμανση του ελαίου νωρίς το πρωί προκειμένου το έλαιο να αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία μέσα σε μια ώρα. Μετά την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς και η θερμική ισχύς που φτάνει στον κεντρικό θερμικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος ταυτίζονται.



**Διάγραμμα 5.23** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

Στο διάγραμμα 5.21 απεικονίζεται η ροή της ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται άμεσα στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ. Παρατηρούμε εδώ ότι αν και η προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρότερη τις πρώτες ώρες μετά τη μία το μεσημέρι από ότι τις ακριβώς προηγούμενες ώρες πριν τη μία, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς είναι λίγο μεγαλύτερη. Αυτή η δυσανάλογη σχέση οφείλεται στην καλύτερη αξιοποίηση της ηλιοφάνειας το μεσημέρι από το ηλιακό πεδίο κατά τη συγκεκριμένη ημέρα για λόγους που έχουν να κάνουν με τη θέση του ήλιου στον ουρανό όπως και με το φαινόμενο της σκίασης.

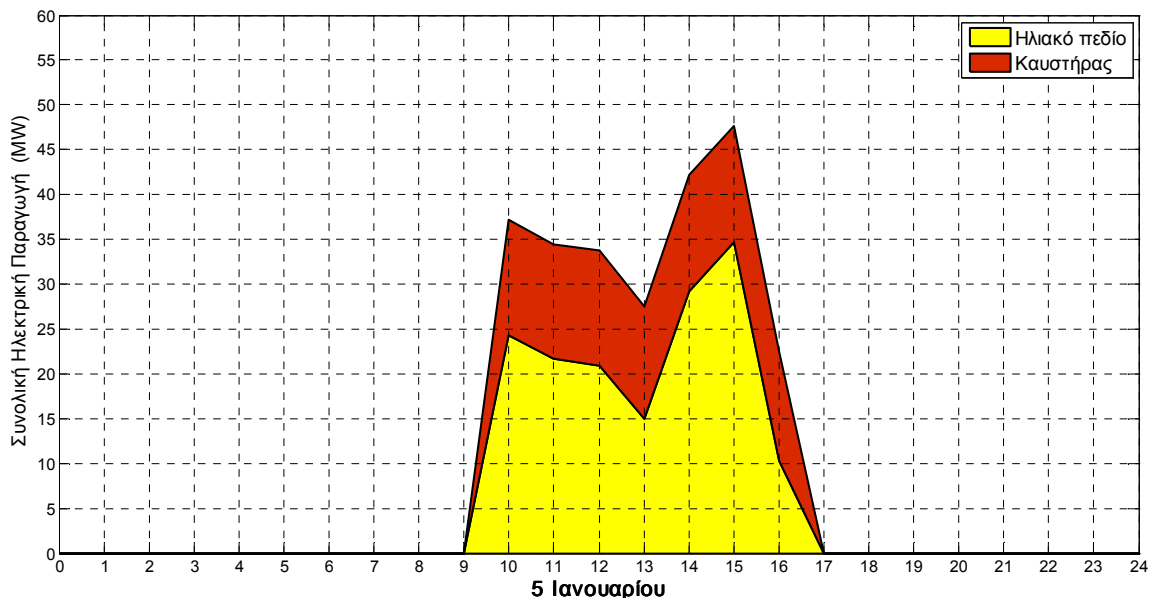


**Διάγραμμα 5.24** Ροή ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία ως την άμεσα παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που οφείλεται στο ηλιακό πεδίο.

### 5.1.2 Λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού με μέγιστη χρήση του συμβατικού καυστήρα

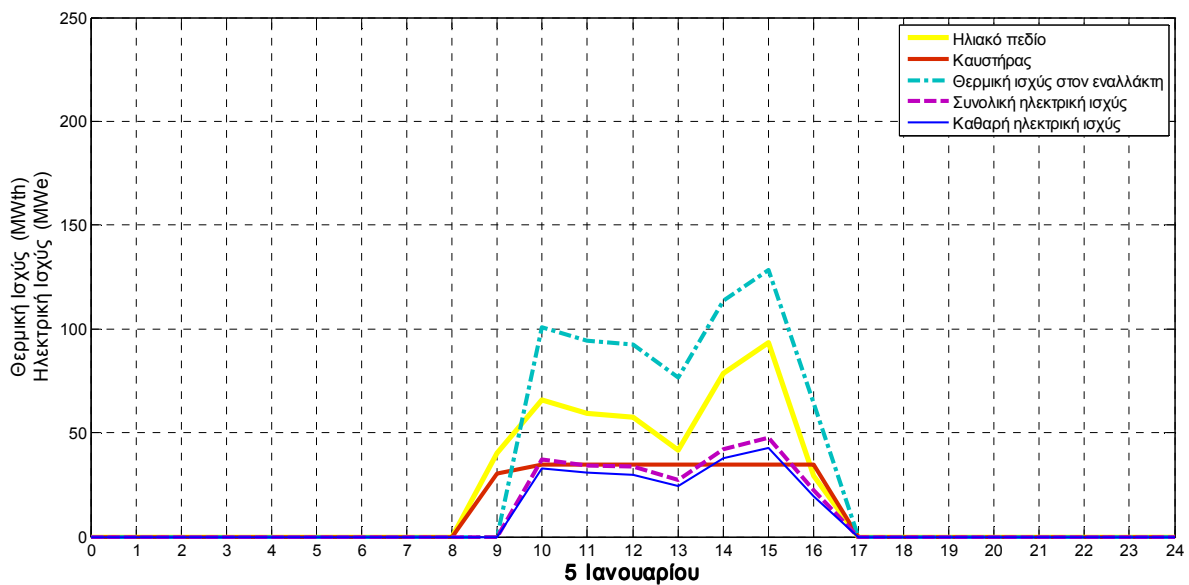
Στην ενότητα αυτή, για λόγους αποτελεσματικότερης σύγκρισης των δύο στρατηγικών λειτουργίας του βοηθητικού καυστήρα, παρατίθενται τα διαγράμματα λειτουργίας του σταθμού κατά τις ίδιες ημέρες όπως και προηγουμένως. Σε αυτή τη στρατηγική λειτουργίας, πρώτη προτεραιότητα της λειτουργίας του συμβατικού καυστήρα κατά την ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού αποτελεί η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και όχι τόσο η ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Στο διάγραμμα 5.22 απεικονίζεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου αλλά και του συμβατικού καυστήρα στην ηλεκτρική παραγωγή του σταθμού για τις 5 Ιανουαρίου. Ο βοηθητικός καυστήρας προσφέρει ανά πάσα στιγμή τη μέγιστη δυνατή θερμική ισχύ με αποτέλεσμα η αιχμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος να φτάνει τα 47,5MW στις τρεις το μεσημέρι. Το χρονικό διάστημα της ηλεκτροπαραγωγής δεν αλλάζει σε σχέση με την προηγούμενη λειτουργία. Η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού ξεκινάει μετά τις 09:00 τοπική ώρα. Η αποθήκη του σταθμού δεν συμμετέχει στη λειτουργία του σταθμού για τη μέρα αυτή. Μετά από τις 15:00 ξεκινάει η οριστική μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.



**Διάγραμμα 5.25 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

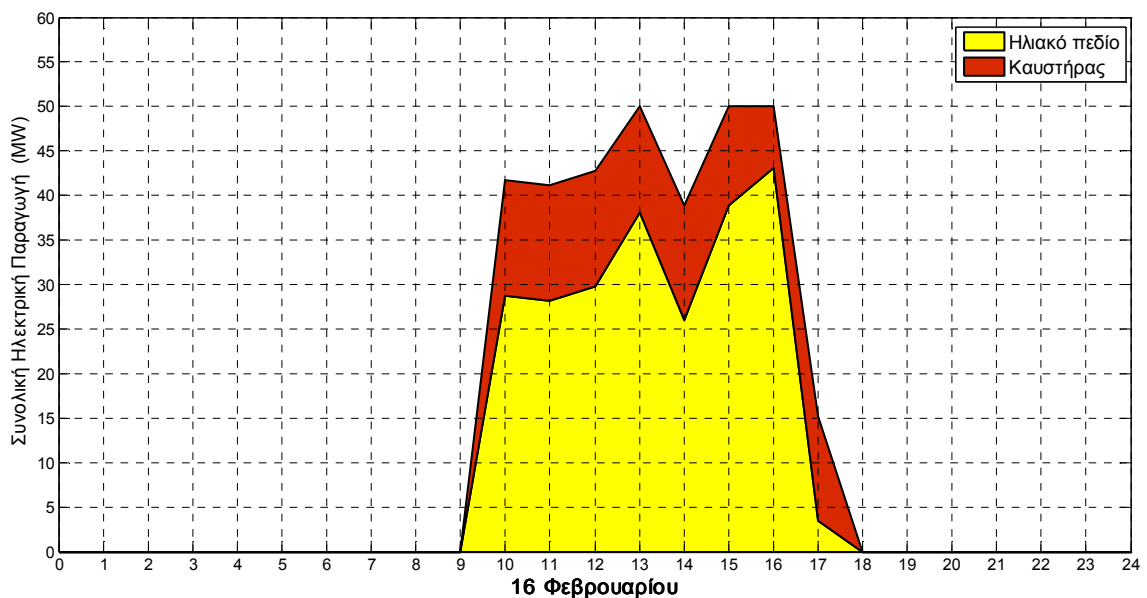
Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται αναλυτικά η διακύμανση περισσότερων μεγεθών στη διάρκεια της ίδιας ημέρας. Απεικονίζονται ανεξάρτητα η συλλεγόμενη θερμική ισχύς από το ηλιακό πεδίο, η αποδιδόμενη θερμική ισχύς από το βοηθητικό καυστήρα στο έλαιο, η συνολική θερμική ισχύς που αποδίδεται στον κεντρικό θερμικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος καθώς και η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τη γεννήτρια του σταθμού όπως και η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, εάν αφαιρεθούν από τη συνολική οι διάφορες παρασιτικές καταναλώσεις του σταθμού. Παρατηρούμε ότι ο βοηθητικός καυστήρας αρχίζει να λειτουργεί το πρωί για να προθερμάνει το έλαιο και συνεχίζει να λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ καθόλη τη διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής για να αυξήσει τη θερμική ισχύ που κατευθύνεται στον κεντρικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος.



**Διάγραμμα 5.26** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

Τα διαγράμματα που παρατέθηκαν στην παραπάνω ενότητα και παρουσιάζουν τη ροή της ισχύος από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ, με τις απώλειες κατά τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας στο ηλιακό πεδίο, και έπειτα το μέρος αυτής που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ από τη γεννήτρια του κύκλου ισχύος, δεν έχει νόημα να παρατεθούν και σε αυτή την ενότητα καθώς δεν αλλάζει τίποτα σε αυτά από τη διαφορετική στρατηγική λειτουργίας που ακολουθείται στη χρήση του συμβατικού καυστήρα.

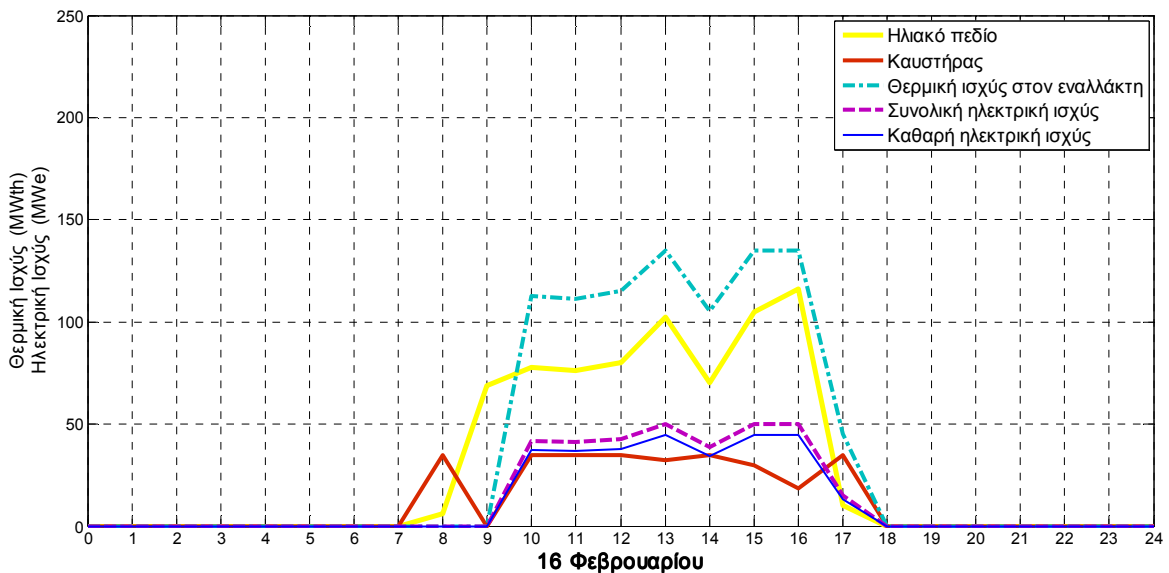
Στο διάγραμμα 5.24 που ακολουθεί, απεικονίζεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου και του βοηθητικού καυστήρα στην ημερήσια παραγωγή του σταθμού για τις 16 Φεβρουαρίου. Παρατηρούμε ότι η εκτεταμένη χρήση του συμβατικού καυστήρα αυξάνει αισθητά το επίπεδο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα για κάποιες ώρες να παράγεται ακόμη και η ονομαστική ισχύς των 50MW. Είναι προφανές ότι ακόμη και η μέγιστη χρήση του καυστήρα περιορίζεται στην επίτευξη της ονομαστικής θερμικής ισχύος, αφού θα ήταν ασύμφορο να αποθηκεύουμε θερμική ενέργεια που προέρχεται από τον καυστήρα μιας και μπορούμε να την έχουμε άμεσα, όποτε την χρειαζόμαστε, χωρίς τις απώλειες που θα μεσολαβούσαν στην αποθήκευση. Η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού ξεκινάει μετά από τις 9 η ώρα το πρωί, ενώ μετά τις 4 η ώρα το απόγευμα ξεκινάει η οριστική μείωση της παραγόμενης ισχύος, η οποία μηδενίζεται μετά από δύο ώρες.



**Διάγραμμα 5.27 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

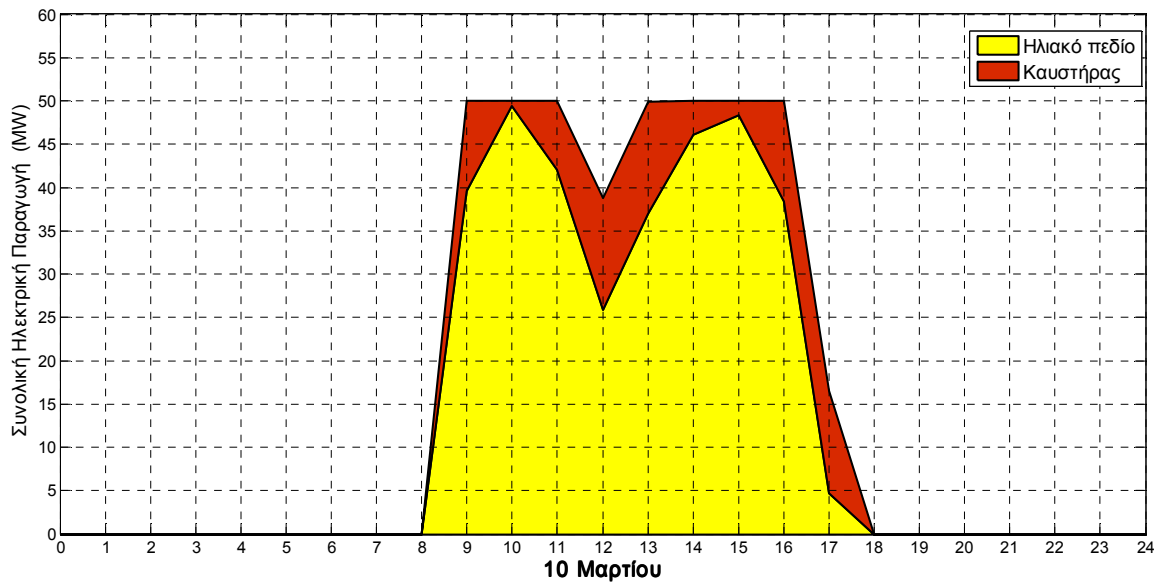
Παρακάτω απεικονίζεται η διακύμανση περισσότερων μεγεθών, όπως στο διάγραμμα 5.2, για την ίδια ημέρα όπως και πριν. Όσον αφορά στη λειτουργία του καυστήρα, αυτός χρησιμοποιείται τόσο το πρωί για την προθέρμανση του ελαίου καθώς και στη διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού για την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την προθέρμανση του ελαίου το πρωί που διαρκεί δύο ώρες, την πρώτη ώρα θερμαίνουν το έλαιο ταυτόχρονα το ηλιακό πεδίο και ο συμβατικός καυστήρας, ενώ τη δεύτερη ώρα είναι αρκετή η λειτουργία μόνο

του ηλιακού πεδίου. Παρατηρούμε τη μείωση της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος από το βοηθητικό καυστήρα κατά τις ώρες που ο σταθμός παράγει την ονομαστική του ηλεκτρική ισχύ λόγω του περιορισμού της ονομαστικής θερμικής ισχύος που αναφέρθηκε προηγουμένως.



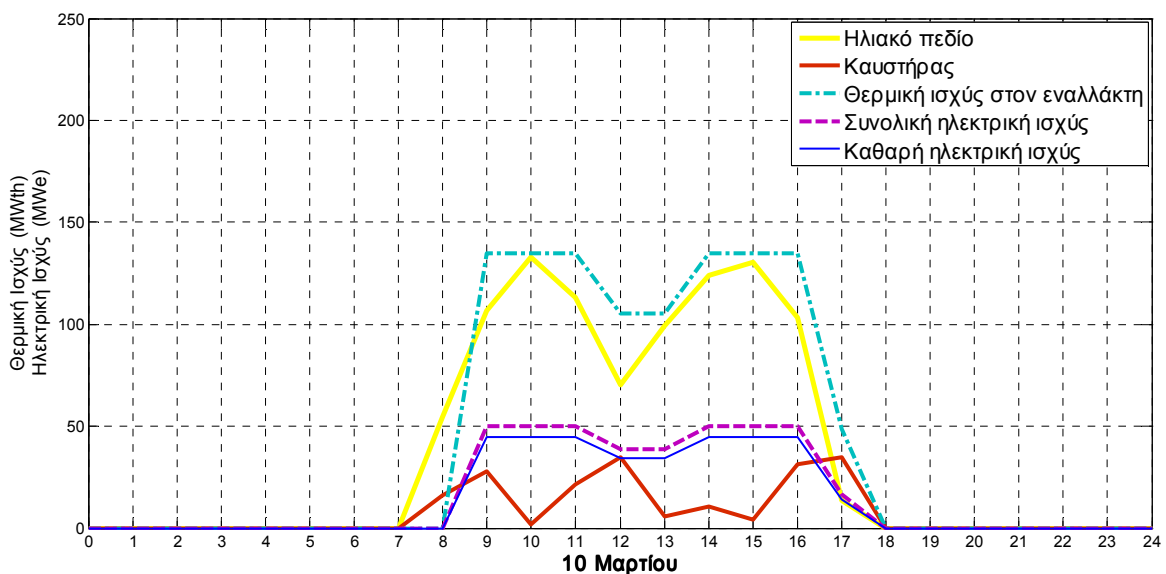
**Διάγραμμα 5.28** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

Στο παρακάτω διάγραμμα που αφορά τη λειτουργία ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού στις 10 Μαρτίου φαίνεται η συμμετοχή σε αυτήν τόσο του ηλιακού πεδίου όσο και του βοηθητικού καυστήρα. Με την εκτεταμένη πλέον χρήση του καυστήρα, ο ηλιοθερμικός σταθμός έχει τη δυνατότητα να παράγει την ονομαστική του ηλεκτρική ισχύ για περίπου πέντε ώρες. Κατά τη διάρκεια της βύθισης η παραγόμενη ισχύς μειώνεται κοντά στα 40MW. Το χρονικό διάστημα της ηλεκτροπαραγωγής δεν αλλάζει λόγω της νέας χρήσης του συμβατικού καυστήρα, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.



**Διάγραμμα 5.29 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

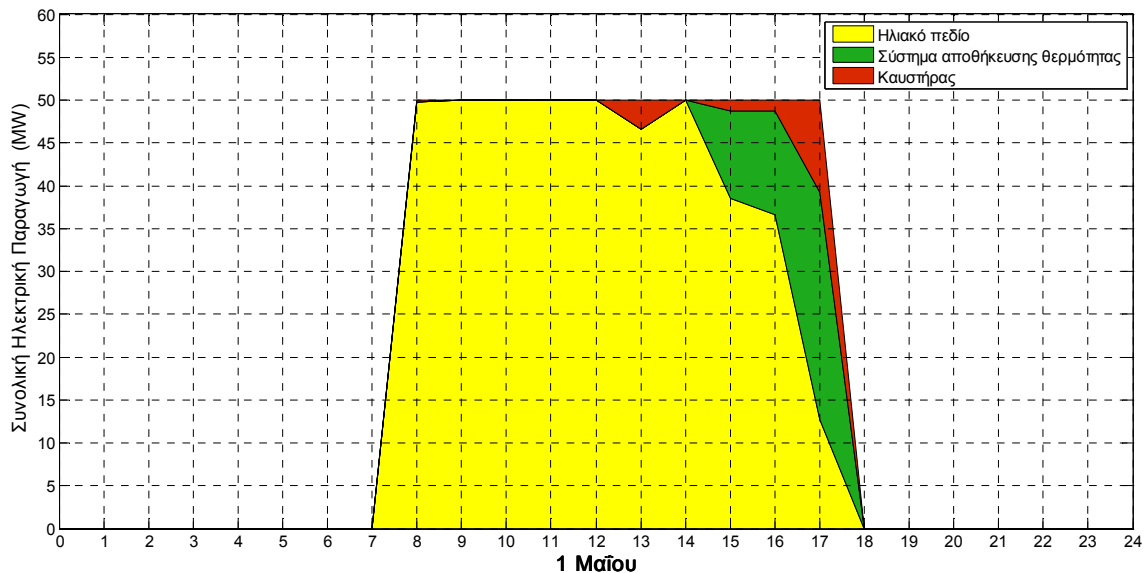
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η διακύμανση διάφορων χαρακτηριστικών μεγεθών του σταθμού, για τη λειτουργία του σταθμού στις 10 Μαρτίου. Εδώ φαίνεται και η λειτουργία του καυστήρα νωρίς το πρωί για την προθέρμανση του ελαίου.



**Διάγραμμα 5.30 Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.**

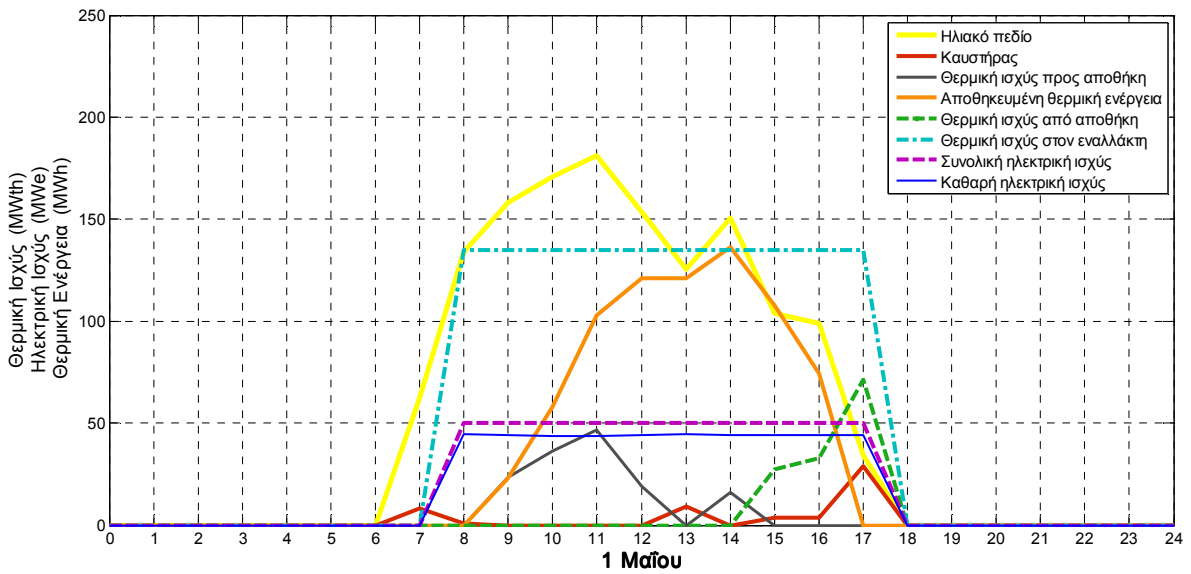


Στο διάγραμμα 5.28 απεικονίζεται η συμμετοχή των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτρική παραγωγή του σταθμού για μια πιο θερμή ανοιξιάτικη ημέρα, στη 1 Μαΐου. Ενώ στο αντίστοιχο διάγραμμα με τη συντηρητική χρήση του συμβατικού καυστήρα, αυτός συμμετείχε στην ηλεκτροπαραγωγή μόνο καλύπτοντας τη βύθιση γύρω από τη μία το μεσημέρι, τώρα συμμετέχει επιπρόσθετα και στην αρχή αλλά και στο τέλος της ηλεκτροπαραγωγής προκειμένου ο σταθμός να παράγει συνεχώς την ονομαστική του ηλεκτρική ισχύ. Από την έναρξη της πτώσης της ηλιοφάνειας μετά τις δύο το μεσημέρι και έως τη λήξη της ηλεκτροπαραγωγής συμμετέχουν σε αυτή ταυτόχρονα το ηλιακό πεδίο, ο συμβατικός καυστήρας και το σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας. Έτσι, ο ηλιοθερμικός σταθμός έχει τη δυνατότητα να παράγει σταθερά για εννιά περίπου ώρες την ονομαστική του ισχύ.



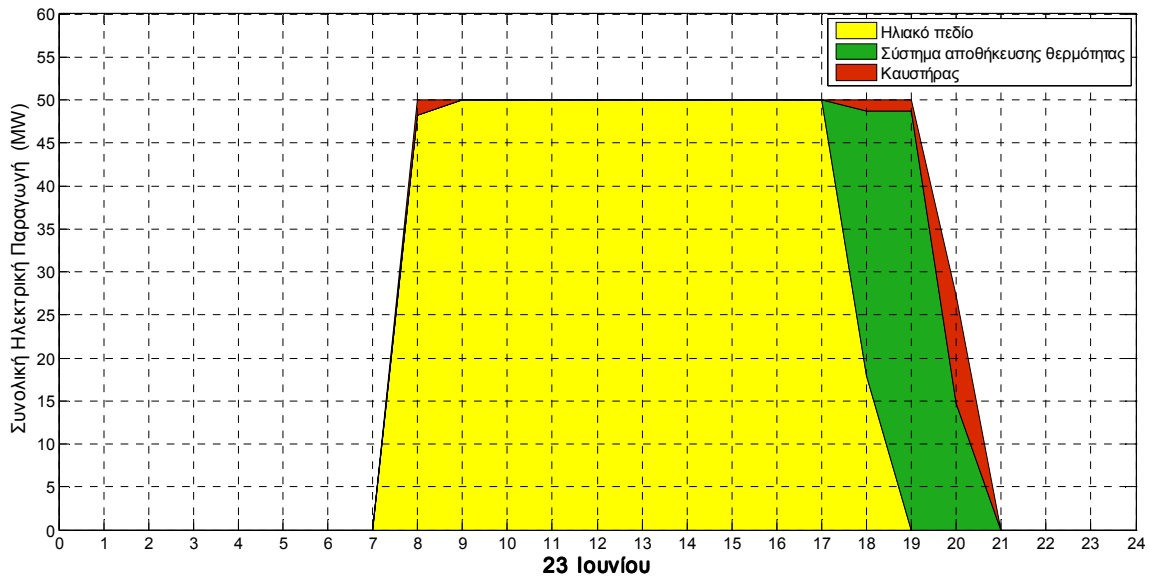
**Διάγραμμα 5.31 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται αναλυτικά η διακύμανση διαφόρων μεγεθών στη διάρκεια της λειτουργίας του σταθμού στη 1 Μαΐου. Η μόνη διαφορά με το αντίστοιχο διάγραμμα για τη συντηρητική χρήση του βοηθητικού καυστήρα έγκειται στη λειτουργία του τελευταίου η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση τόσο της θερμικής ισχύος προς τον εναλλάκτη όσο και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στην ονομαστική τους τιμή.



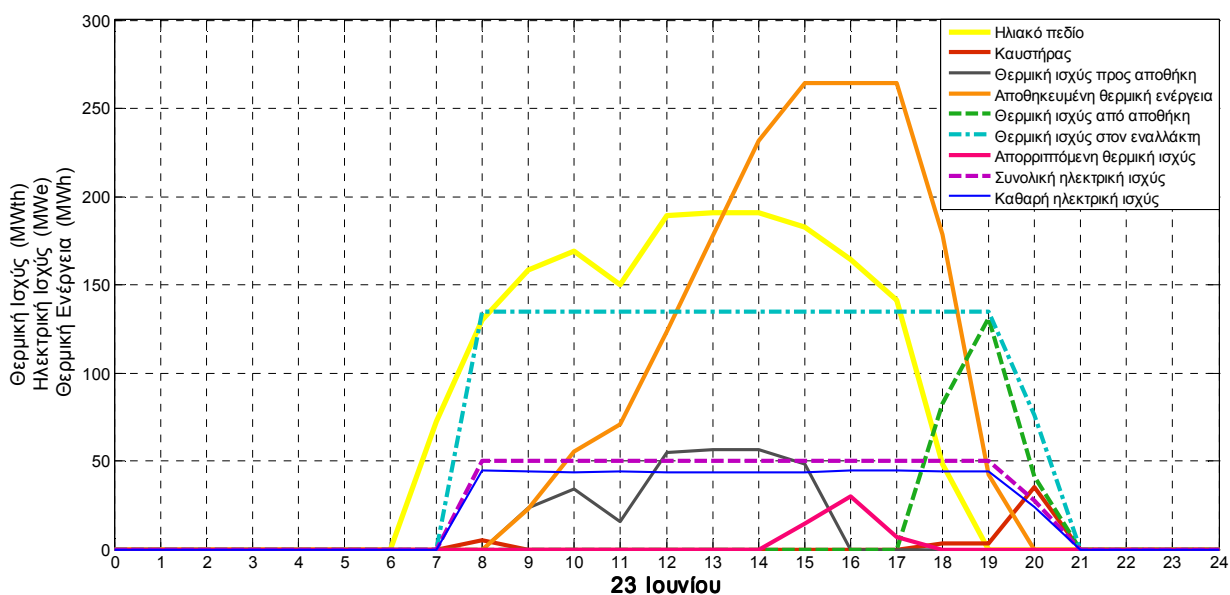
**Διάγραμμα 5.32** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου και του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας στη συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ κατά τη διάρκεια μιας ιδιαίτερως ηλιόλουστης ημέρας όπως η 23<sup>η</sup> Ιουνίου. Ο βοηθητικός καυστήρας χρειάζεται να λειτουργήσει μόνο κατά την έναρξη και το τέλος της ηλεκτροπαραγωγής καθώς για όλο το υπόλοιπο διάστημα η ηλιοφάνεια επαρκεί για την ονομαστική λειτουργία του σταθμού. Με τη χρήση και του καυστήρα, παρατηρούμε ότι ο σταθμός μπορεί και παράγει για ένα συνεχόμενο διάστημα 11 περίπου ωρών την ονομαστική ηλεκτρική ισχύ. Μετά τις πέντε το απόγευμα και για δύο ώρες λειτουργούν ταυτόχρονα το ηλιακό πεδίο, ο καυστήρας και το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Μετά τις επτά η ώρα σταματάει η λειτουργία του ηλιακού πεδίου και για το υπόλοιπο διάστημα ο σταθμός τροφοδοτείται από το βοηθητικό καυστήρα και την αποθήκη του.



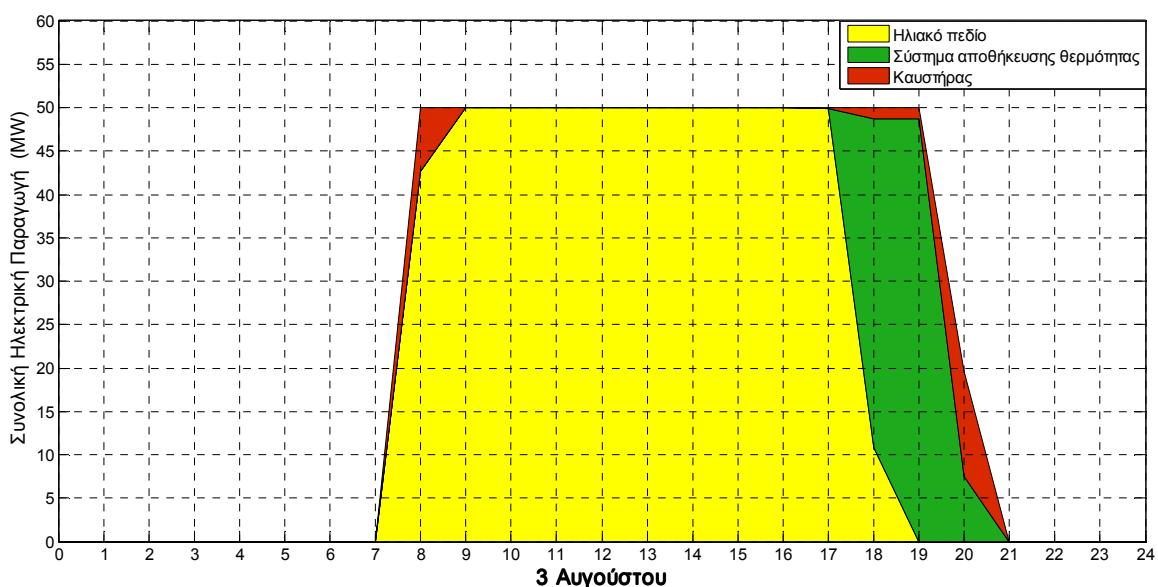
**Διάγραμμα 5.33 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται αναλυτικά η διακύμανση διαφόρων μεγεθών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του σταθμού στις 23 Ιουνίου. Παρατηρούμε την απουσία της χρήσης του βοηθητικού καυστήρα από τη διαδικασία προθέρμανσης του ελαίου νωρίς το πρωί και τη μετέπειτα χρήση του κατά τη διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής. Η λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας δεν αλλάζει σε σχέση με τη λειτουργία του σταθμού σε ελάχιστη χρήση του καυστήρα. Ίδια παραμένει και η απορριπτόμενη θερμική ενέργεια.



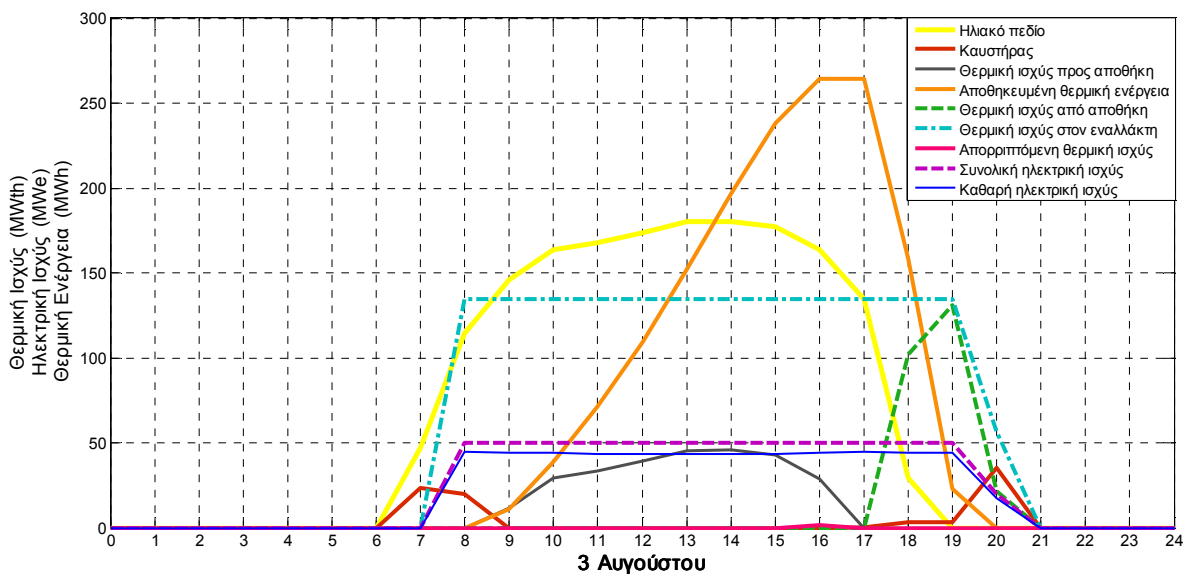
**Διάγραμμα 5.34** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου, του βοηθητικού καυστήρα και του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας στη συνολική ηλεκτροπαραγωγή του ηλιοθερμικού σταθμού στις 3 Αυγούστου ακολουθώντας τη λειτουργία μέγιστης χρήσης του συμβατικού καυστήρα. Η λειτουργία κατά τη διάρκεια της ημέρας αυτής είναι παρόμοια με την αντίστοιχη λειτουργία στις 23 Ιουνίου που παρουσιάστηκε στο Διάγραμμα 5.33 με τη διαφορά ότι εδώ η συμμετοχή του συμβατικού καυστήρα είναι ελαφρώς αυξημένη τις ώρες που αυτός λειτουργεί.



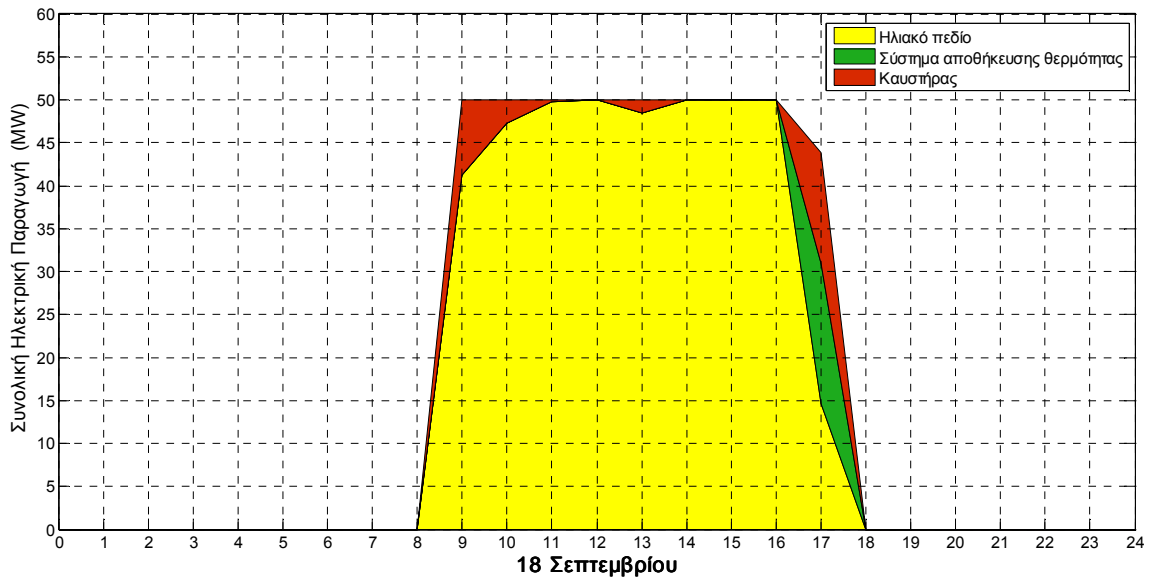
**Διάγραμμα 5.35** Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.

Στο παρακάτω Διάγραμμα 5.46 απεικονίζονται οι διακυμάνσεις σημαντικών μεγεθών της λειτουργίας του σταθμού κατά τη διάρκεια της 3<sup>ης</sup> Αυγούστου. Παρατηρούμε ότι ακολουθώντας την στρατηγική μέγιστης χρήσης του καυστήρα, ο ηλιοθερμικός σταθμός είναι ικανός να παράγει σχεδόν από την αρχή έως το τέλος της ηλεκτροπαραγωγής του την ονομαστική του ισχύ. Η χρήση του καυστήρα ξεκινά από την προθέρμανση του ελαίου νωρίς το πρωί και σταματά μόλις η συλλεγόμενη θερμική ισχύς φτάσει την ονομαστική της τιμή. Ακόμη ο συμβατικός καυστήρας λειτουργεί και παράλληλα με την αποθήκη θερμότητας για να μεγιστοποιήσει την παραγόμενη ισχύ.



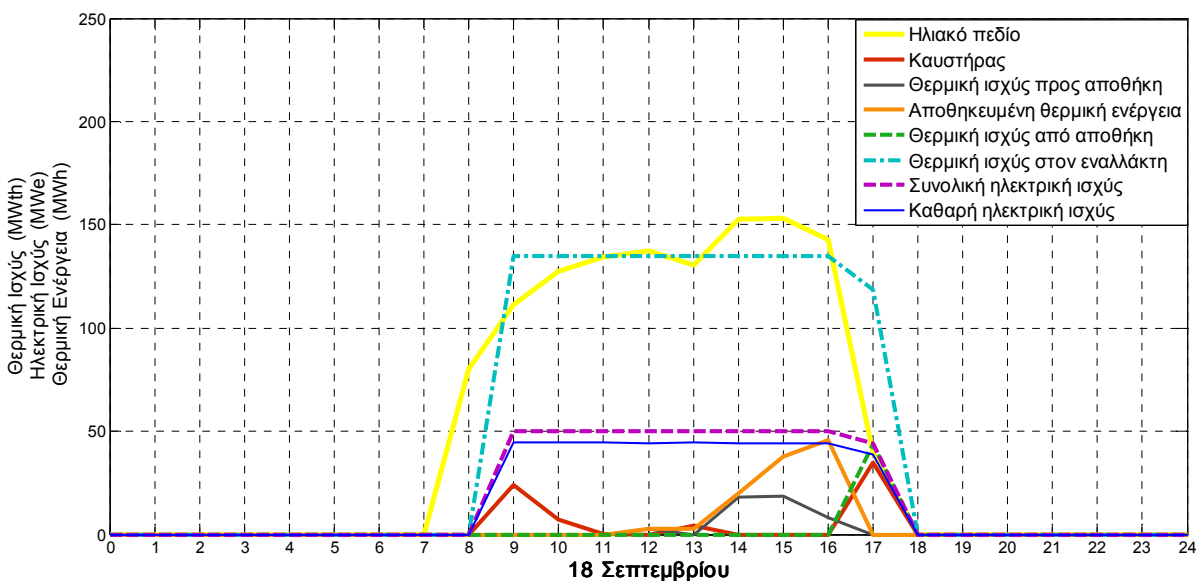
**Διάγραμμα 5.36** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου, του βοηθητικού καυστήρα και του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας στη συνολική ηλεκτρική παραγωγή του ηλιοθερμικού σταθμού κατά τη 18<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου για μέγιστη χρήση του συμβατικού καυστήρα. Και εδώ η χρήση του βοηθητικού καυστήρα έχει σαν αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο επίπεδο της ονομαστικής της τιμής για περίπου επτά ώρες. Έτσι, σε σύγκριση με τη λειτουργία του σταθμού κατά την ίδια ημέρα με ελάχιστη χρήση του καυστήρα, πλέον η ηλεκτρική ισχύς φτάνει πολύ πιο γρήγορα στην ονομαστική της τιμή ενώ και ο τερματισμός της ηλεκτροπαραγωγής γίνεται πιο ομαλά.



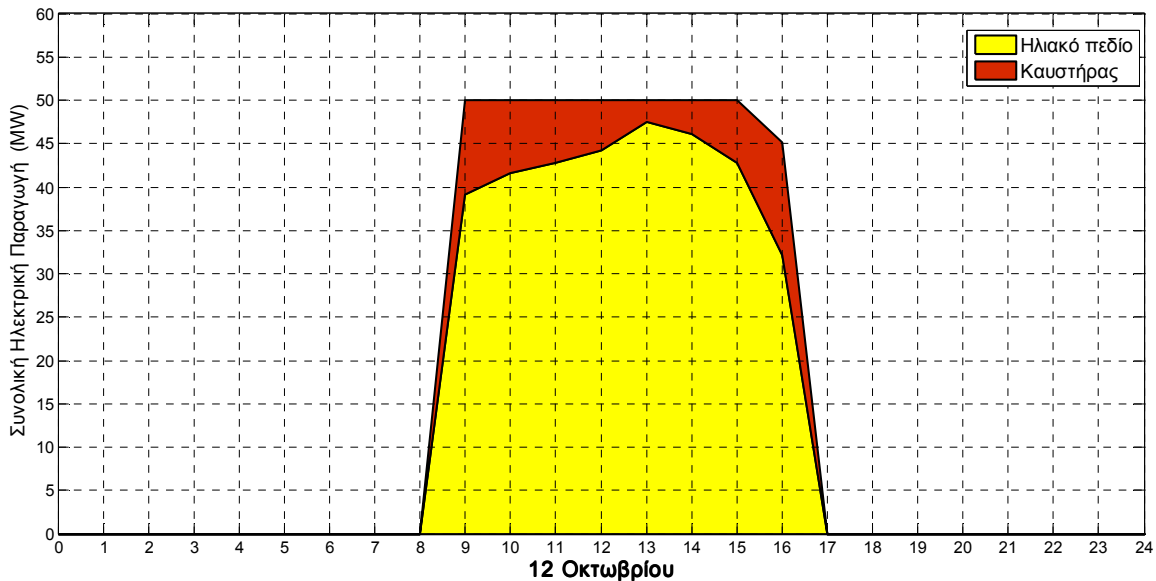
**Διάγραμμα 5.37 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται η διακύμανση διάφορων χαρακτηριστικών μεγεθών του σταθμού, για τη λειτουργία του σταθμού στις 18 Σεπτεμβρίου. Εδώ εκτός από τη λειτουργία του καυστήρα για την κάλυψη της βύθισης γύρω στη μία η ώρα το μεσημέρι, φαίνεται και η εκτεταμένη χρήση του κατά τη διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής.



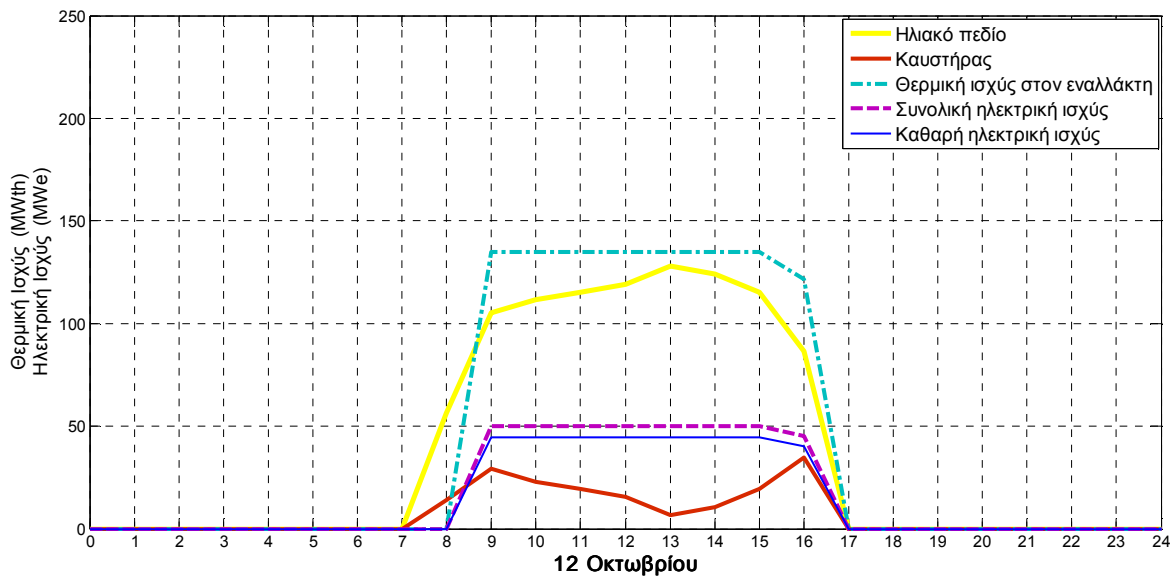
**Διάγραμμα 5.38 Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.**

Στο διάγραμμα 5.34 παρουσιάζεται η συμμετοχή του ηλιακού πεδίου και του βοηθητικού καυστήρα κατά την ηλεκτροπαραγωγή στη διάρκεια της 12<sup>ης</sup> Οκτωβρίου. Η στρατηγική μέγιστης χρήσης που εφαρμόζεται για τον καυστήρα επιτρέπει την παραγωγή της ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος του σταθμού για έξι ώρες συνεχόμενα. Έπειτα η παραγωγή εμφανίζει μια πτώση για να μηδενιστεί οριστικά στις πέντε το απόγευμα.



**Διάγραμμα 5.39 Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια συνολική (gross) ηλεκτροπαραγωγή.**

Στο τελευταίο διάγραμμα της ενότητας αυτής, απεικονίζεται αναλυτικά η διακύμανση πέντε χαρακτηριστικών μεγεθών της λειτουργίας του σταθμού κατά τη διάρκεια της 12<sup>ης</sup> Οκτωβρίου. Παρατηρούμε τη διαρκή λειτουργία του καυστήρα από την προθέρμανση του ελαίου μέχρι και τη λήξη της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού το απόγευμα.



**Διάγραμμα 5.40** Απεικόνιση ημερήσιας λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού.

## 5.2 Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας και σύγκριση των δύο στρατηγικών λειτουργίας του βοηθητικού καυστήρα

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού για διάφορες ημέρες καθόλη τη διάρκεια του έτους, όταν εφαρμόζεται η στρατηγική μέγιστης λειτουργίας του βοηθητικού καυστήρα αυξάνεται η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού σε σύγκριση με τη λειτουργία του σταθμού σε στρατηγική ελάχιστης χρήσης του καυστήρα. Για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως καταναλώνεται σαφώς μεγαλύτερη ποσότητα συμβατικού καυσίμου ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό γίνεται εν μέρει σε βάρος της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος.

Από το «τρέξιμο» της ετήσιας προσομοίωσης λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού που περιγράφηκε στην αρχή του κεφαλαίου και για τις δύο στρατηγικές λειτουργίας του βοηθητικού καυστήρα όπως και για την περίπτωση λειτουργίας του



σταθμού χωρίς βοηθητικό καυστήρα, σε περιβάλλον Matlab, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Στρατηγική λειτουργίας του καυστήρα	Μηδενική	Συντηρητική	Μέγιστη
Συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	110,64	121,06	134,99
Ποσοστό ενέργειας από συμβατικό καύσιμο επί της συνολικής ετήσιας (%)	0	4,66	14,91

**Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα από την ετήσια προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού.**

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι απουσία συμβατικού καυστήρα, όταν, ειδικά προς το τέλος της ημερήσιας ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς από το ηλιακό πεδίο μειωθεί σε επίπεδα κάτω από τον περιορισμό του τεχνικού ελαχίστου λειτουργίας του σταθμού, η λειτουργία του κύκλου ισχύος τερματίζεται για να αποφευχθούν σοβαρές φθορές στον ατμοστρόβιλο. Όταν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του καυστήρα και η εγκατεστημένη θερμική του ισχύς μπορεί να καλύψει το κενό που υπολείπεται έως το τεχνικό ελάχιστο η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού παρατείνεται και τερματίζεται εν συνεχεία ομαλότερα.

Ο περιορισμός της εγκατεστημένης ισχύος του βοηθητικού καυστήρα στα 35MW (αποδιδόμενη θερμική ισχύς στο έλαιο) έγινε έτσι ώστε η χρησιμοποιούμενη ενέργεια που προέρχεται από το συμβατικό καύσιμο να μην υπερβαίνει το 15% επί της συνολικής ενέργειας που παράγεται σε ετήσια βάση, από το ηλιακό πεδίο. Για τον υπολογισμό αυτού του ποσοστού χρησιμοποιούμε αφενός την ετήσια θερμική ενέργεια που παρέχει ο συμβατικός καυστήρας στο συνθετικό έλαιο και αφετέρου τη συνολική ετήσια συλλεγόμενη θερμική ενέργεια από το ηλιακό πεδίο τόσο κατά την προθέρμανση του ελαίου το πρωί όσο και κατά τη διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής (προφανώς αφαιρείται η απορριπτόμενη θερμική ενέργεια).

Αντίστοιχα, υπάρχει διαφορά και στην καθαρή ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία προκύπτει εάν από τη συνολική ενέργεια αφαιρεθούν οι ετήσιες παρασιτικές καταναλώσεις των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα συγκεκριμένα αποτελέσματα από την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Στρατηγική λειτουργίας του καυστήρα	Μηδενική	Συντηρητική	Μέγιστη
Καθαρή ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	97,30	106,44	118,99
Ποσοστό παρασιτικής ενέργειας επί της συνολικής ετήσιας (%)	13,6	13,2	12,8

**Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα από την ετήσια προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού.**

Οι παρασιτικές καταναλώσεις του ηλιοθερμικού σταθμού, οι οποίες έχουν συμπεριληφθεί στην ετήσια προσομοίωση λειτουργίας είναι:

- όσον αφορά το ηλιακό πεδίο, η ηλεκτρική κατανάλωση των αντλιών ελαίου καθώς και διάφορες λοιπές παρασιτικές καταναλώσεις του ηλιακού πεδίου όπως του συστήματος ιχνηλάτησης των συλλεκτών,
- όσον αφορά το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, η κατανάλωση των αντλιών αλάτων, και
- όσον αφορά τον κύκλο ισχύος, η ηλεκτρική κατανάλωση των αντλιών νερού, η κατανάλωση του συστήματος ψύξης καθώς και διάφορες παρασιτικές καταναλώσεις του κύκλου ισχύος.

Οι τιμές της εγκατεστημένης ισχύος των παραπάνω παρασιτικών καταναλώσεων, οι οποίες έχουν υποτεθεί για την ετήσια προσομοίωση του εν λόγω ηλιοθερμικού σταθμού παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί και έχουν θεωρηθεί βάσει διάφορων βιβλιογραφικών αναφορών και τηρουμένων των αναλογιών για τις διαστάσεις του υπό προσομοίωση σταθμού [41][71][81]:

<b>Εγκατεστημένη ισχύς παρασιτικών καταναλώσεων ηλιακού πεδίου και συστήματος αποθήκευσης θερμότητας (kW)</b>	4300
<b>Εγκατεστημένη ισχύς παρασιτικών καταναλώσεων κύκλου ισχύος (kW)</b>	3000

**Πίνακας 5.3 Θεωρούμενες παρασιτικές καταναλώσεις του σταθμού.**

Ένας συντελεστής, ο οποίος έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη λειτουργία του σταθμού είναι ο συντελεστής χρησιμοποίησης (capacity factor). Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται αυτοί οι συντελεστές όπως προέκυψαν από την προσομοίωση και για τις δύο στρατηγικές λειτουργίας του βοηθητικού καυστήρα, τόσο για τον εν λόγω σταθμό όσο και για σταθμούς με διαφορετικό αριθμό ωρών αυτοδυναμίας.

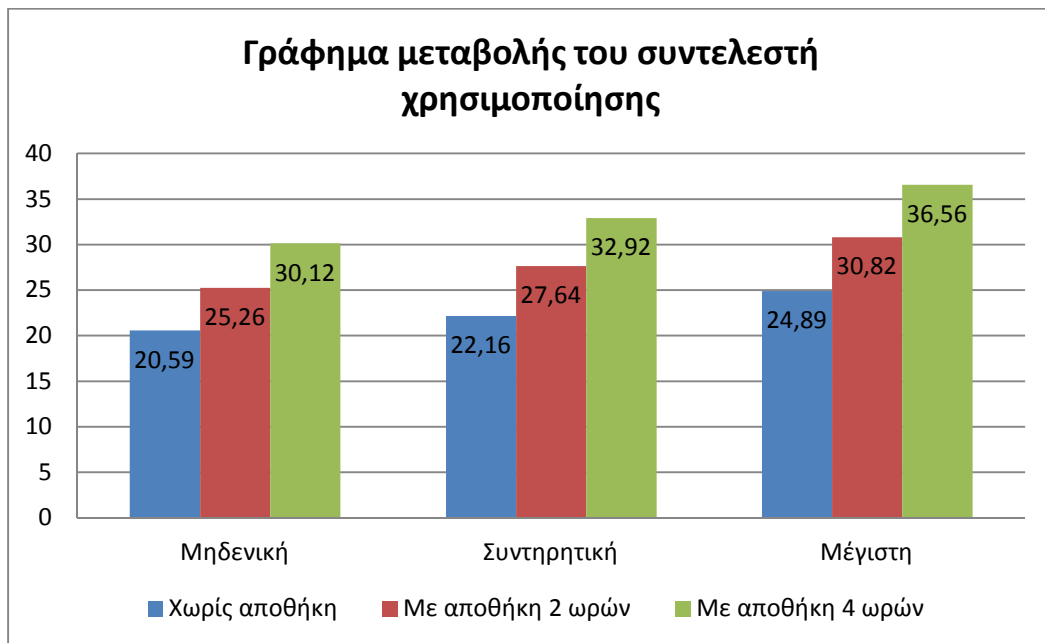
Στρατηγική λειτουργίας του καυστήρα	Μηδενική	Συντηρητική	Μέγιστη
<b>Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*</b>	20,59%	22,16%	24,89%
<b>Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)</b>	<b>25,26%</b>	<b>27,64%</b>	<b>30,82%</b>
<b>Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**</b>	30,12%	32,92%	36,56%

**Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα για τον συντελεστή χρησιμοποίησης από την ετήσια προσομοίωση λειτουργίας του σταθμού.**

\* στην προσομοίωση σταθμού χωρίς αποθήκη θερμότητας χρησιμοποιήθηκε μικρότερο ηλιακό πεδίο, αποτελούμενο από 80 βρόχους, και μικρότερος βοηθητικός καυστήρας των 20MWth διότι με μεγαλύτερο η συμμετοχή του στη συνολική ενέργεια θα ξεπερνούσε το όριο του 15%

\*\* στην προσομοίωση σταθμού με αποθήκη θερμότητας που προσφέρει αυτοδυναμία 4 ωρών χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο ηλιακό πεδίο με 115 βρόχους (μεγαλύτερη υπερδιαστασιολόγηση για να μπορεί να φορτίζεται η μεγαλύτερη αποθήκη) και μεγαλύτερος βοηθητικός καυστήρας των 50MWth

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζονται σχηματικά τα αποτελέσματα που περιέχονται στον προηγούμενο Πίνακα 5.4 έτσι ώστε να αποδοθεί χαρακτηριστικά η μεταβολή του συντελεστή χρησιμοποίησης του σταθμού λόγω διαφορετικής στρατηγικής λειτουργίας του καυστήρα και λόγω διαφορετικής διαστασιολόγησης του συστήματος αποθήκευσης (με το αντίστοιχο ηλιακό πεδίο).



**Γράφημα 5.1 Μεταβολή του συντελεστή χρησιμοποίησης.**

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη του ηλιακού πεδίου του συγκεκριμένου ηλιοθερμικού σταθμού που μελετάται, τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του.

<b>Αριθμός βρόχων συλλεκτών</b>	95
<b>Συνολική επιφάνεια κατόπτρων (m<sup>2</sup>)</b>	310650
<b>Ονομαστική θερμική ισχύς (MW)</b>	134,64
<b>Ονομαστική ροή μάζας ελαίου (kg/s)</b>	551
<b>Μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης ηλιακού πεδίου</b>	54,61%

**Πίνακας 5.5 Χαρακτηριστικά μεγέθη και αποτελέσματα της προσομοίωσης της ετήσιας λειτουργίας του σταθμού.**

Στη συνέχεια, παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας του εν λόγω σταθμού, το οποίο του παρέχει μια αυτοδυναμία δύο ωρών.

<b>Μέγιστη δυνατή αποθηκευμένη θερμική ενέργεια (MWh)</b>	264,28
<b>Συνολική μάζα τηγμένων αλάτων (tn)</b>	6864
<b>Συνολικός όγκος τηγμένων αλάτων στη «θερμή» δεξαμενή (m<sup>3</sup>)</b>	3720

**Πίνακας 5.6 Χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας του σταθμού.**

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται δύο χαρακτηριστικά μεγέθη του κύκλου ισχύος του ηλιοθερμικού σταθμού από την ετήσια προσομοίωση λειτουργίας που διενεργήθηκε.

<b>Ονομαστική ροή μάζας νερού-ατμού (kg/s)</b>	72,52
<b>Ονομαστική απόδοση του κύκλου ισχύος</b>	38,44%

**Πίνακας 5.7 Χαρακτηριστικά μεγέθη του κύκλου ισχύος του σταθμού.**

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα της προσομοίωσης και δεδομένου ότι η απόδοση του κεντρικού θερμικού εναλλάκτη του κύκλου ισχύος έχει θεωρηθεί ίση με 96,6%, ο συνολικός βαθμός απόδοσης λειτουργίας του σταθμού υπολογίζεται ως εξής:

*Συνολικός βαθμός απόδοσης*

= Μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης ηλιακού πεδίου

× Βαθμός απόδοσης θερμικού εναλλάκτη

× Ονομαστική απόδοση κύκλου ισχύος  $\cong 20,28\%$

Τέλος, ένα σημαντικό μέγεθος που αφορά τη λειτουργία ενός ηλιοθερμικού σταθμού, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το σύστημα ψύξης του κύκλου ισχύος είναι υδρόψυκτο, είναι η συνολική ετήσια κατανάλωση νερού, για το πλύσιμο της επιφάνειας των κατόπτρων και κυρίως για τη λειτουργία του συστήματος ψύξης. Για τον ηλιοθερμικό σταθμό που μελετάται, η κατανάλωση νερού που προέκυψε ως αποτέλεσμα από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Στρατηγική λειτουργίας του καυστήρα	Μηδενική	Συντηρητική	Μέγιστη
Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού (m <sup>3</sup> )	346490	378480	421250

*Πίνακας 5.8 Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού στο σταθμό.*



## Κεφάλαιο 6

# Οικονομοτεχνική ανάλυση

---

Ένας ηλιοθερμικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πέρα από τα περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρει ως σταθμός ΑΠΕ και τα οποία συνήθως δεν αποτιμούνται οικονομικά, αποτελεί κατά βάση μια οικονομική επένδυση, και μάλιστα μεγάλου μεγέθους. Ως εκ τούτου, η οικονομοτεχνική ανάλυση και η χρηματοοικονομική αξιολόγηση μιας τέτοιας επένδυσης είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποτελούν τα πλέον σημαντικά κριτήρια για το εάν θα κατασκευαστεί εν τέλει ένας τέτοιος σταθμός σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται μια προσέγγιση των οικονομικών μεγεθών του υπό εξέταση ηλιοθερμικού σταθμού καθώς και κάποιων δεικτών αξιολόγησης της επένδυσης.

### 6.1 Απαιτούμενο κεφάλαιο επένδυσης

Το αρχικό κόστος επένδυσης του υπό προσομοίωση ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων διακρίνεται στη συγκεκριμένη μελέτη στα εξής επιμέρους κόστη:

- Συνολικό κόστος ηλιακού πεδίου, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται κυρίως οι συλλέκτες με τα παραβολικά κάτοπτρα, οι δέκτες, το συνθετικό έλαιο, οι αντλίες ελαίου, το δίκτυο σωληνώσεων και το σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου στους συλλέκτες.
- Συνολικό κόστος κύκλου ισχύος, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται κατά κύριο λόγο ο θερμικός εναλλάκτης του κύκλου ισχύος, ο ατμοστρόβιλος με τη γεννήτρια, οι αντλίες νερού και το υδρόψυκτο σύστημα ψύξης με τον πύργο ψύξης, οι σωληνώσεις και τα συστήματα ελέγχου του κύκλου ισχύος.
- Συνολικό κόστος συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, το οποίο αποτελείται κυρίως από το κόστος του μείγματος τηγμένων αλάτων, των δεξαμενών αποθήκευσης, του εναλλάκτη ελαίου-αλάτων και των αντλιών αλάτων.
- Κόστος αγοράς και εγκατάστασης του βοηθητικού καυστήρα συμβατικού καυσίμου.
- Κόστος αγοράς γης μαζί με τα έργα ομαλοποίησης και διαμόρφωσης του εδάφους.
- Κόστος κατασκευής, μελέτης, αδειών και ατυχιών που μπορεί να συμβούν κατά την κατασκευή του σταθμού, τα οποία ανέρχονται σε περίπου 20% του συνολικού κόστους.

Τα παραπάνω επιμέρους κόστη τα οποία θεωρήθηκαν για τον υπό προσομοίωση ηλιοθερμικό σταθμό και άλλους δύο παρόμοιους, σύμφωνα με διάφορες βιβλιογραφικές αναφορές ([13],[41],[65],[66],[81],[97],[100]-[105]), παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί. Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι τα διάφορα κόστη των ηλιοθερμικών σταθμών μόνο κατά προσέγγιση μπορούν να θεωρηθούν καθώς πρόκειται για μια τεχνολογία που αναπτύσσεται διαρκώς τα τελευταία χρόνια και τα κόστη παραγωγής των διαφόρων εξαρτημάτων ενός τέτοιου σταθμού αλλάζουν διαρκώς και δεν μπορεί να είναι απόλυτα επιβεβαιωμένα σε επίπεδο θεωρητικής μελέτης.



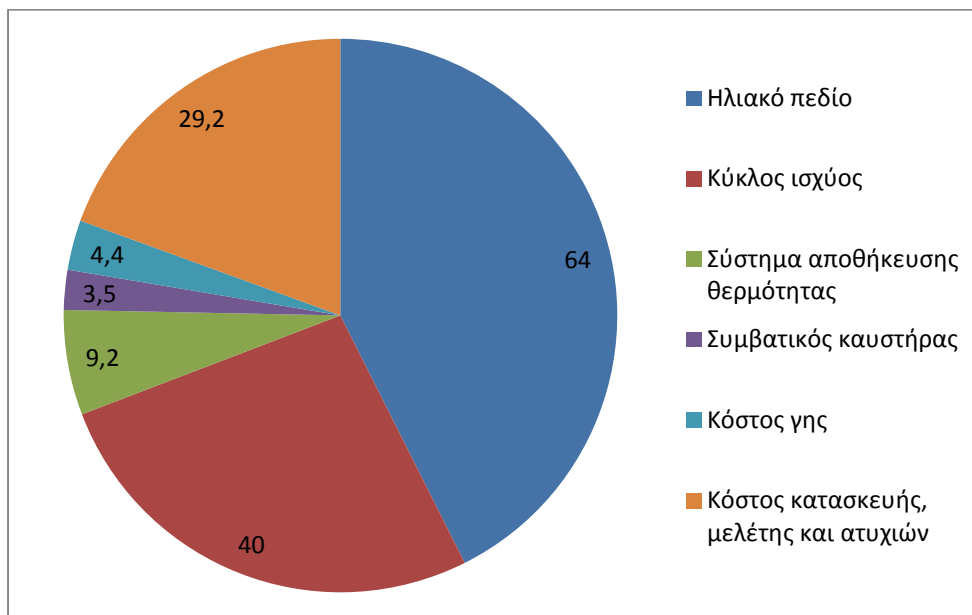
ΚΟΣΤΗ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
Κόστος του ηλιακού πεδίου	53,9	64	77,5
Κόστος του κύκλου ισχύος	40	40	40
Κόστος του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας	0	9,2	17,9
Κόστος συμβατικού καυστήρα	2	3,5	5
Κόστος γης	3,7	4,4	5,3
Κόστος κατασκευής, μελέτης και ατυχιών	24	29,2	35,1
<b>Συνολικό κόστος επένδυσης</b>	<b>123,6</b>	<b>150,3</b>	<b>180,8</b>

**Πίνακας 6.1 Αρχικά κόστη επένδυσης για το σταθμό (σε εκατομμύρια ευρώ).**

\* στην προσομοίωση σταθμού χωρίς αποθήκη θερμότητας χρησιμοποιήθηκε μικρότερο ηλιακό πεδίο των 80 βρόχων και μικρότερος βοηθητικός καυστήρας των 20MWth διότι με μεγαλύτερο η συμμετοχή του στη συνολική ενέργεια θα ξεπερνούσε το όριο του 15%

\*\* στην προσομοίωση σταθμού με αποθήκη θερμότητας που προσφέρει αυτοδυναμία 4 ωρών χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο ηλιακό πεδίο των 115 βρόχων (μεγαλύτερη υπερδιαστασιολόγηση για να μπορεί να φορτίζεται η μεγαλύτερη αποθήκη) και μεγαλύτερος βοηθητικός καυστήρας των 50MWth

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται σχηματικά πώς συμμετέχουν τα επιμέρους κόστη στο συνολικό αρχικό κεφάλαιο επένδυσης για τον υπό προσομοίωση ηλιοθερμικό σταθμό με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας που του παρέχει αυτοδυναμία δύο ωρών.



**Γράφημα 6.1 Αρχικό κεφάλαιο επένδυσης για τον υπό προσομοίωση ηλιοθερμικό σταθμό (σε εκατ. €).**

Όσον αφορά την έκταση της γης που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων θεωρήθηκε ότι αυτή θα είναι ανάλογη της συνολικής επιφάνειας κατόπτρων του ηλιακού του πεδίου και θα είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερη από αυτήν. Έτσι, η έκταση γης που απαιτείται για τους τρεις παραπάνω σταθμούς θα είναι:

ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
<b>Απαιτούμενη έκταση γης</b>	1050	1250	1500

**Πίνακας 6.2 Απαιτούμενη έκταση γης για το σταθμό (σε στρέμματα).**

(για \* και \*\* βλ. επεξήγηση Πίνακα 6.1)

## 6.2 Υπολογισμός ετήσιας καθαρής ταμειακής ροής μετά από φόρους

### 6.2.1 Ετήσιο κόστος λειτουργίας

Αρχικά, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του ετήσιου κόστους λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού. Τα ετήσια έξοδα λειτουργίας διακρίνονται στη συγκεκριμένη μελέτη στα εξής επιμέρους:

- Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης του σταθμού, το οποίο υπολογίζεται ως περίπου το 1% του συνολικού κόστους επένδυσης
- Ετήσιο κόστος του ανθρώπινου δυναμικού του σταθμού
- Ετήσιο κόστος κατανάλωσης συμβατικού καυσίμου
- Ετήσιο κόστος κατανάλωσης νερού, για το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί η τιμή 0,32€/m<sup>3</sup> [80]
- Ετήσιο κόστος ασφάλισης του σταθμού, το οποίο θεωρείται περίπου το 1% του συνολικού κόστους επένδυσης

Οι τιμές για τα παραπάνω κόστη έχουν υποτεθεί σύμφωνα με διάφορες βιβλιογραφικές αναφορές ([13],[41],[65],[66],[81],[97],[100]-[105]).

Όσον αφορά το ανθρώπινο δυναμικό που απαιτείται για τη λειτουργία και τη συντήρηση του σταθμού, θεωρείται ότι χρειάζονται 40 άτομα ενώ το μέσο ετήσιο κόστος εργασίας τους είναι 48000€ κατ' άτομο [66].

Το ετήσιο κόστος κατανάλωσης του συμβατικού καυσίμου εξαρτάται από το συμβατικό καύσιμο που θα επιλεγεί καθώς και από τη στρατηγική λειτουργίας του βοηθητικού καυστήρα που θα εφαρμοστεί. Ο σχετικός νόμος επιτρέπει τη χρήση συγκεκριμένων καυσίμων. Από αυτά στη συγκεκριμένη προσομοίωση έχει μελετηθεί η χρήση diesel και LPG. Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου έχει θεωρηθεί η απόδοση του λέβητα-καυστήρα ίση με 0,8 ενώ για τη θερμογόνο δύναμη των καυσίμων έχουν ληφθεί οι παρακάτω τιμές.

Συμβατικό καύσιμο	Θερμογόνος δύναμη
LPG	12800 kWh/tn
Diesel	10024 kWh/m <sup>3</sup>

**Πίνακας 6.3** Θερμογόνος δύναμη συμβατικών καυσίμων.

Οι τιμές αγοράς των δύο αυτών καυσίμων που έχουν χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς είναι οι εξής:

Συμβατικό καύσιμο	Κόστος αγοράς
LPG	600 €/tn
Diesel	955 €/m <sup>3</sup>

**Πίνακας 6.4 Τιμές αγοράς συμβατικών καυσίμων.**

Τα ετήσια κόστη λειτουργίας για τους τρεις παραπάνω σταθμούς, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας τους, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΕΤΗΣΙΑ ΚΟΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
Κόστος συντήρησης και λειτουργίας	1,24	1,50	1,81
Κόστος ανθρώπινου δυναμικού	1,92	1,92	1,92
Κόστος καυσίμου diesel για συντηρητική χρήση καυστήρα	1,41	1,93	2,29
Κόστος καυσίμου diesel για μέγιστη χρήση καυστήρα	4,71	6,18	7,13
Κόστος καυσίμου LPG για συντηρητική χρήση καυστήρα	0,70	0,95	1,13
Κόστος καυσίμου LPG για μέγιστη χρήση καυστήρα	2,32	3,04	3,51
Κόστος νερού για συντηρητική χρήση καυστήρα	0,10	0,12	0,14
Κόστος νερού για μέγιστη χρήση καυστήρα	0,11	0,13	0,16
Κόστος ασφάλισης	1,24	1,50	1,81

**Πίνακας 6.5 Ετήσια κόστη λειτουργίας του σταθμού (σε εκατομμύρια ευρώ).**

(για \* και \*\* βλ. επεξήγηση Πίνακα 6.1)

### 6.2.2 Ετήσια έσοδα και Ειδικό Τέλος Ο.Τ.Α.

Τα ετήσια έσοδα του ηλιοθερμικού σταθμού προέρχονται από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει εάν από τη συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αφαιρεθούν οι ετήσιες παρασιτικές καταναλώσεις του σταθμού. Όπως προβλέπει ο νόμος 3851/2010, η παραγόμενη ενέργεια από έναν ηλιοθερμικό σταθμό με σύστημα αποθήκευσης μικρότερο των 2 ωρών τιμολογείται προς 264,85 ευρώ/MWh, ενώ για σταθμούς με σύστημα αποθήκευσης το οποίο εξασφαλίζει τουλάχιστον 2 ώρες λειτουργίας στο ονομαστικό φορτίο η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τιμολογείται προς 284,85 ευρώ/MWh [8]. Τα έσοδα αυτά για τους τρεις παραπάνω σταθμούς όπως προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας τους είναι τα εξής:

Στρατηγική λειτουργίας βοηθητικού καυστήρα	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
<b>Μηδενική</b>	20,80	27,24	32,20
<b>Συντηρητική</b>	22,45	29,95	35,36
<b>Μέγιστη</b>	25,30	33,52	39,47

**Πίνακας 6.6 Ετήσια έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας (σε εκατομμύρια ευρώ).**

(για \* και \*\* βλ. επεξήγηση Πίνακα 6.1)

Τα ετήσια έσοδα είναι ανεξάρτητα από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται.

Το ειδικό τέλος που αποδίδεται στους Ο.Τ.Α. υπολογίζεται ως το 3% επί των ετήσιων, προ Φ.Π.Α., εσόδων του σταθμού από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται το ειδικό τέλος για κάθε μια από τις περιπτώσεις λειτουργίας που προσομοιώθηκαν.

Στρατηγική λειτουργίας βοηθητικού καυστήρα	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
<b>Μηδενική</b>	0,62	0,82	0,97
<b>Συντηρητική</b>	0,67	0,90	1,06
<b>Μέγιστη</b>	0,76	1,01	1,18

**Πίνακας 6.7** Ετήσιο ειδικό τέλος από προς Ο.Τ.Α. (σε εκατομμύρια ευρώ).

(για \* και \*\* βλ. επεξήγηση Πίνακα 6.1)

### 6.2.3 Υπολογισμός ετήσιου φόρου

Στη συγκεκριμένη μελέτη έχει γίνει η παραδοχή ότι το συνολικό κόστος επένδυσης καλύπτεται από ίδια κεφάλαια και έτσι δεν υπεισέρχονται τόκοι δανειακών κεφαλαίων και χρεολύσια στους υπολογισμούς. Σαν ετήσια απόσβεση κεφαλαίου έχει θεωρηθεί το πηλίκο του συνολικού κόστους επένδυσης δια της συνολικής διάρκειας ζωής του σταθμού, η οποία έχει ληφθεί ως 25 χρόνια όση είναι και η διάρκεια της σύμβασης πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που προβλέπει ο νέος νόμος [8]. Ο φορολογικός συντελεστής λαμβάνεται 25%. Η ετήσια φορολογία που προέκυψε για τους τρεις σταθμούς είναι η εξής:

Στρατηγική λειτουργίας βοηθητικού καυστήρα/Καύσιμο	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
<b>Μηδενική</b>	2,73	3,91	4,68
<b>Συντηρητική/LPG</b>	2,91	4,26	5,07
<b>Μέγιστη/LPG</b>	3,19	4,60	5,47
<b>Συντηρητική/Diesel</b>	2,73	4,02	4,78
<b>Μέγιστη/Diesel</b>	2,60	3,82	4,56

**Πίνακας 6.8** Ετήσιοι φόροι του σταθμού (σε εκατομμύρια ευρώ).

(για \* και \*\* βλ. επεξήγηση Πίνακα 6.1)

### 6.2.4 Ετήσια καθαρή ταμειακή ροή μετά από φόρους

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ετήσια καθαρή ταμειακή ροή μετά από φόρους (καθαρά κέρδη μετά από φόρους + αποσβέσεις) για τους τρεις ηλιοθερμικούς σταθμούς.

Στρατηγική λειτουργίας βοηθητικού καυστήρα/Καύσιμο	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
<b>Μηδενική</b>	13,02	17,57	21,01
<b>Συντηρητική/LPG</b>	13,68	18,79	22,43
<b>Μέγιστη/LPG</b>	14,52	19,82	23,62
<b>Συντηρητική/Diesel</b>	13,14	18,06	21,56
<b>Μέγιστη/Diesel</b>	12,73	17,46	20,91

*Πίνακας 6.9 Ετήσια καθαρή ταμειακή ροή μετά φόρων του σταθμού (σε εκατομμύρια ευρώ).*

(για \* και \*\* βλ. επεξήγηση Πίνακα 6.1)

## 6.3 Υπολογισμός βασικών κριτηρίων αξιολόγησης επενδυτικού σχεδίου

Η καθαρή ετήσια ταμειακή ροή μετά από φόρους αποτελεί τη βάση για την αξιολόγηση του επενδυτικού σχεδίου ενός ηλιοθερμικού σταθμού από την πλευρά της επιχείρησης. Τα δυο συνηθέστερα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι [106]:

- το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value – NPV) και
- το κριτήριο της Εσωτερικής Απόδοσης επί του Κεφαλαίου (Internal Rate of Return – IRR)

Η **Καθαρά Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)** ορίζεται ως η διαφορά της παρούσας αξίας των ετήσιων εισοδημάτων μείον την παρούσα αξία των ετήσιων εξόδων, συμπεριλαμβανομένων των επενδύσεων. Στην πράξη, η ΚΠΑ υπολογίζεται ως η

διαφορά των χρηματικών εισροών (καθαρών ταμειακών ροών μετά φόρων) μείον το κόστος των επενδύσεων, όπως, δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [106]:

$$ΚΠΑ = \sum_{\tau=1}^{\nu} \frac{ΚΤΡ_{\tau}}{(1+\varepsilon)^{\tau}} - E_0$$

όπου: ΚΠΑ = η Καθαρά Παρούσα Αξία του ηλιοθερμικού σταθμού

ΚΤΡ= η Καθαρή Ταμειακή Ροή μετά από φόρους το έτος τ

$E_0$  = η αρχική επένδυση το χρόνο  $\tau=0$

$\nu$  = η διάρκεια ζωής του επενδυτικού σχεδίου, η οποία έχει θεωρηθεί 25 χρόνια

$\varepsilon$  = το επιτόκιο προεξόφλησης, το οποίο έχει θεωρηθεί 8%

Όταν το επιτόκιο προεξόφλησης για μια συγκεκριμένη χρηματοροή αυξάνει, η ΚΠΑ αξία της χρηματοροής μειώνεται. Ο **Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (EBA)** του κεφαλαίου μπορεί να οριστεί ως το επιτόκιο προεξόφλησης που μηδενίζει τη χρηματοροή, δηλ. εκείνο το επιτόκιο που εξισώνει την αρχική επένδυση με την αξία όλων των μελλοντικών ταμειακών ροών. Η διαφορά μεταξύ του επιτοκίου που δίνεται από τον EBA και του επιτοκίου της προεξόφλησης έγκειται στο γεγονός ότι το πρώτο προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά οικονομικά μεγέθη του σταθμού που υπολογίστηκαν παραπάνω (για το λόγο αυτό καλείται και εσωτερική απόδοση) ενώ το επιτόκιο προεξόφλησης καθορίζεται εξωγενώς από τον επενδυτικό φορέα.

Ο τύπος που δίνει τον EBA είναι ο ακόλουθος [106]:

$$ΚΠΑ = 0 = \sum_{\tau=1}^{\nu} \frac{ΚΤΡ_{\tau}}{(1+EBA)^{\tau}} - E_0$$

όπου:  $ΚΤΡ_{\tau}$  = η Καθαρή Ταμειακή Ροή το έτος τ

$E_0$  = η αρχική επένδυση το χρόνο  $\tau=0$

$\nu$  = η διάρκεια ζωής του επενδυτικού σχεδίου

EBA = το επιτόκιο προεξόφλησης που καθιστά την ΚΠΑ = 0

Όταν εξετάζεται ένα εναλλακτικό σχέδιο ανεξάρτητα από εναλλακτικές επιλογές, τότε οι όροι αποδοχής ή απόρριψής του σε σχέση με τα δύο αυτά κριτήρια διαμορφώνονται ως εξής:

α. Για την Καθαρά Παρούσα Αξία

- ΚΠΑ > 0, η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα
- ΚΠΑ = 0, το οικονομικό αποτέλεσμα της επένδυσης είναι οριακό
- ΚΠΑ < 0, η επένδυση απορρίπτεται

β. Για τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης του κεφαλαίου:



- EBA > από το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης, η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα
- EBA = με το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης, η επένδυση θεωρείται οριακή, εφαρμόζεται όταν δεν υπάρχει καλύτερη εναλλακτική λύση
- EBA < από το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης, η επένδυση απορρίπτεται.

Ανεξαρτήτως χρησιμοποιούμενου κριτηρίου, όταν πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ δύο ή περισσότερων εναλλακτικών επενδυτικών σχεδίων προκρίνεται το σχέδιο που εμφανίζει την καλύτερη απόδοση, δηλαδή την υψηλότερη ΚΠΑ ή τον υψηλότερο EBA. Όπως αναφέρθηκε και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα και μάλιστα σε συνδυασμό, καθώς κάθε μία από τις δύο μεθόδους εμφανίζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. [106]

Στους πίνακες 6.10 και 6.11 παρατίθενται οι τιμές των δύο παραπάνω δεικτών που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης για καθέναν από τους τρεις παραπάνω ηλιοθερμικούς σταθμούς.

Στρατηγική λειτουργίας βοηθητικού καυστήρα/Καύσιμο	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
<b>Μηδενική</b>	17,95	41,79	49,84
<b>Συντηρητική/LPG</b>	22,54	50,48	58,75
<b>Μέγιστη/LPG</b>	31,51	61,40	71,48
<b>Συντηρητική/Diesel</b>	16,79	42,64	49,34
<b>Μέγιστη/Diesel</b>	12,34	36,28	42,49

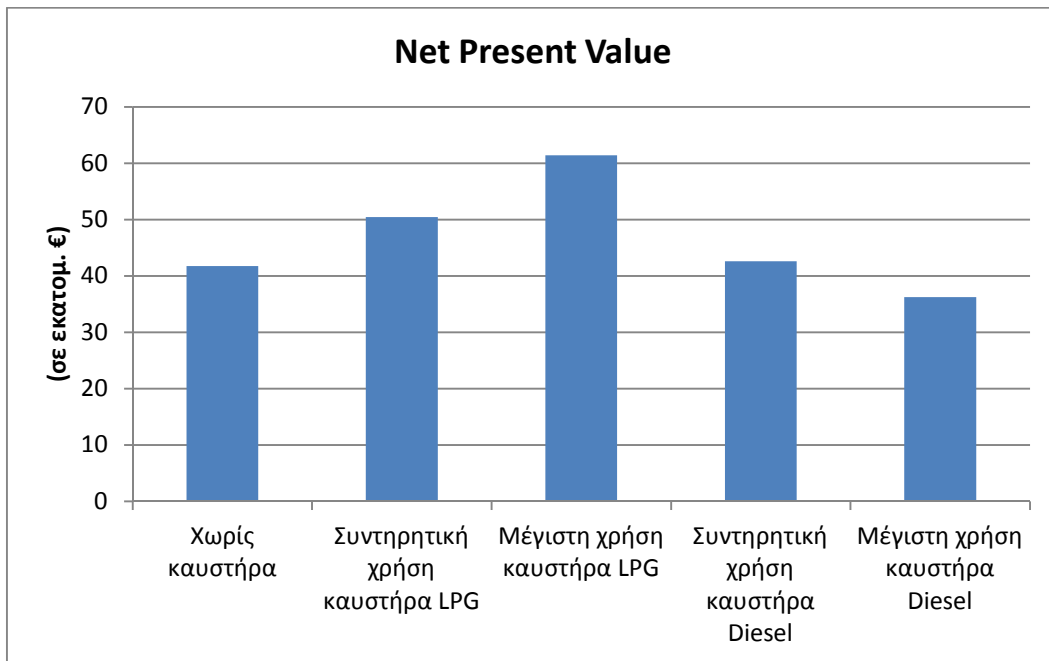
**Πίνακας 6.10 Καθαρή Παρούσα Αξία (σε εκατομμύρια ευρώ).**

Στρατηγική λειτουργίας βοηθητικού καυστήρα/Καύσιμο	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
<b>Μηδενική</b>	9,69	11,21	11,20
<b>Συντηρητική/LPG</b>	10,07	11,74	11,62
<b>Μέγιστη/LPG</b>	10,87	12,51	12,36
<b>Συντηρητική/Diesel</b>	9,55	11,18	11,07
<b>Μέγιστη/Diesel</b>	9,15	10,72	10,65

**Πίνακας 6.11 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (σε επί τοις εκατό ποσοστό).**

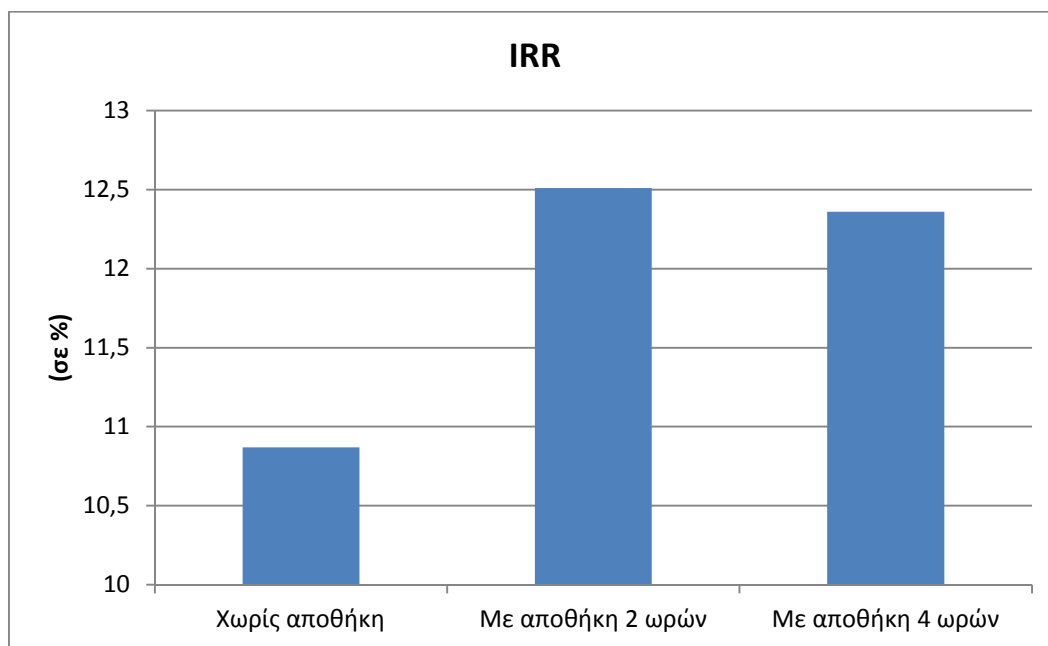
(για \* και \*\* βλ. επεξήγηση Πίνακα 6.1)

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται χαρακτηριστικά για τον ηλιοθερμικό σταθμό με αποθήκευση θερμότητας δύο ωρών η μεταβολή της Καθαρής Παρούσας Αξίας σε σχέση με τις διαφορετικές στρατηγικές λειτουργίας του καυστήρα καθώς και με τη χρήση διαφορετικού συμβατικού καυσίμου.



**Γράφημα 6.2 Καθαρή Παρούσα Αξία για τον υπό προσομοίωση ηλιοθερμικό σταθμό με αποθήκη 2 ωρών (σε εκατ. €).**

Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται χαρακτηριστικά η μεταβολή του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης για την περίπτωση της μέγιστης λειτουργίας καυστήρα LPG, για τις διαφορετικές διαστασιολογήσεις του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (αντιστοίχως και του ηλιακού πεδίου).



**Γράφημα 6.3 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης για την περίπτωση μέγιστης χρήσης του βοηθητικού καυστήρα LPG (σε επί τοις εκατό ποσοστό).**

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των δύο κριτηρίων, οι παραπάνω επενδύσεις θεωρούνται συμφέρουσες. Σύμφωνα με τη διαφορετική έννοια των δύο αυτών κριτηρίων, η ΚΠΑ μετράει το απόθεμα του πλούτου και αυξάνει για σχέδια μεγαλύτερου μεγέθους ενώ ο ΕΒΑ αναδεικνύει την αποτελεσματικότητα της χρήσης του κεφαλαίου και είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος της αρχικής επένδυσης. Με βάση αυτά συμπεραίνουμε ότι ο σταθμός με την αποθήκη 4 ωρών και μέγιστη χρήση LPG προσφέρει σε απόλυτα μεγέθη περισσότερα κέρδη αλλά η χρήση του κεφαλαίου είναι πιο αποτελεσματική στον ηλιοθερμικό σταθμό με αποθήκη 2 ωρών και μέγιστη χρήση LPG.

Όσον αφορά τα δύο καύσιμα, με τις δεδομένες τιμές, προκρίνεται η χρήση του LPG από οικονομική άποψη. Παρατηρούμε, επίσης, ότι με την τιμή αγοράς του diesel που έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μελέτη, η μέγιστη χρήση του μειώνει αντί να αυξάνει τα κέρδη σε σχέση με τη συντηρητική του χρήση, κι αυτό συμβαίνει διότι η τιμή του είναι υψηλή και δεν συμφέρει να χρησιμοποιηθεί για μεγιστοποίηση των κερδών. Μάλιστα, η χρήση του diesel προέκυψε λιγότερο συμφέρουσα ακόμη και από τη λειτουργία χωρίς βοηθητικό καυστήρα. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση ή μη συμβατικού καυσίμου, ποιου καυσίμου και σε ποιο βαθμό είναι μια επιλογή η οποία καθορίζεται από τις εκάστοτε τιμές αγοράς των συμβατικών καυσίμων αλλά και από τις απαιτήσεις του Διαχειριστή του Συστήματος για την ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

## 6.4 Υπολογισμός σταθμισμένου κόστους ενέργειας (Levelized Cost of Energy-LCOE)

Τέλος, υπολογίστηκε και ο δείκτης του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας (LCOE), οποίος υπολογίζει το σταθμισμένο κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής του ηλιοθερμικού σταθμού, ενσωματώνοντας τα επί μέρους κόστη (κόστος επένδυσης, λειτουργίας, καυσίμου, ασφάλισης κλπ.) εκφρασμένα σε τιμές παρούσας αξίας. Υπολογίζεται ως εξής [107][108]:

$$\text{LCOE} = \frac{\text{total lifetime expenses}}{\text{total expected output}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

όπου:

$I_t$  = κόστος επένδυσης κατά το έτος  $t$  (στην παρούσα μελέτη υπάρχει μόνο αρχικό κόστος επένδυσης δηλαδή  $I_0$  ενώ για κάθε επόμενο έτος αφαιρείται η απόσβεση κεφαλαίου).

$M_t$  = ετήσια έξοδα εκτός από το κόστος καυσίμου κατά το έτος  $t$  (στην παρούσα μελέτη θεωρούνται ίδια για κάθε έτος)

$F_t$  = κόστος καυσίμου κατά το έτος  $t$  (στην παρούσα μελέτη θεωρείται ίδιο για κάθε έτος)

$E_t$  = συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά το έτος  $t$  (στην παρούσα μελέτη θεωρείται ίδια για κάθε έτος)

$r$  = επιτόκιο αναγωγής (8%)

$n$  = διάρκεια ζωής του σταθμού (25 έτη)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο δείκτης LCOE σε τιμές €/kWh για τους τρεις ηλιοθερμικούς σταθμούς όπως προέκυψε από το πρόγραμμα προσομοίωσης.

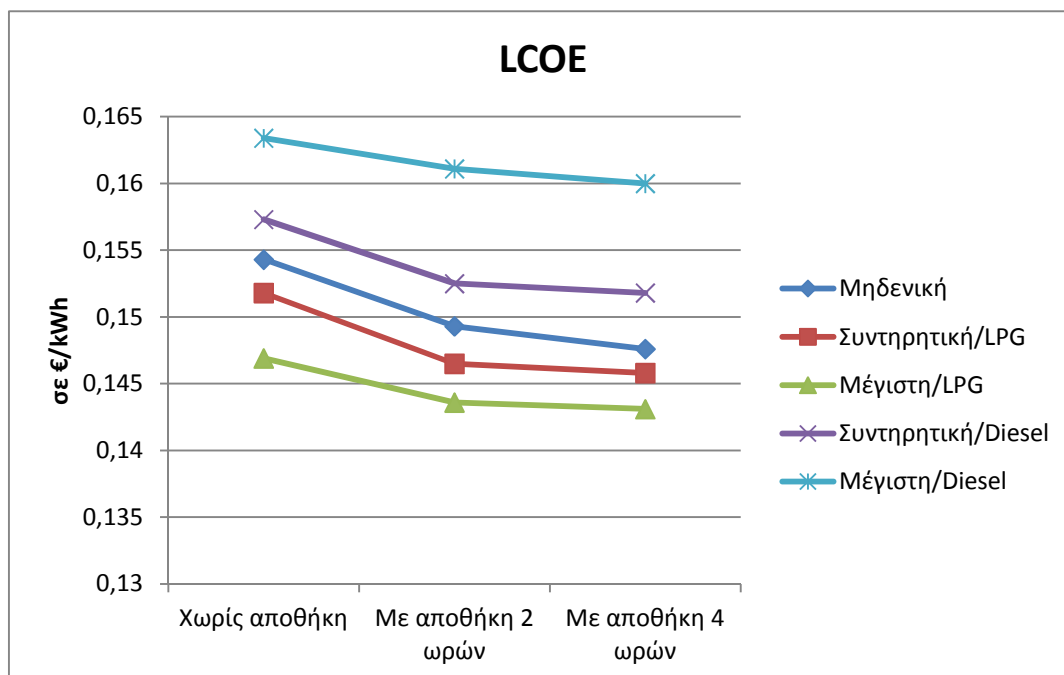
Στρατηγική λειτουργίας βοηθητικού καυστήρα/Καύσιμο	Χωρίς αποθήκευση θερμότητας*	Με αποθήκευση θερμότητας 2 ωρών (ο σταθμός που μελετάται)	Με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών**
<b>Μηδενική</b>	0,1543	0,1493	0,1476
<b>Συντηρητική/LPG</b>	0,1518	0,1465	0,1458
<b>Μέγιστη/LPG</b>	0,1469	0,1436	0,1431
<b>Συντηρητική/Diesel</b>	0,1573	0,1525	0,1518
<b>Μέγιστη/Diesel</b>	0,1634	0,1611	0,1600

**Πίνακας 6.12 Σταθμισμένο κόστος ενέργειας (σε €/kWh) .**

(για \* και \*\* βλ. επεξήγηση Πίνακα 6.1)

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι ο ηλιοθερμικός σταθμός με αποθήκευση θερμότητας 4 ωρών και μέγιστη χρήση καυστήρα LPG παρουσιάζει το χαμηλότερο σταθμισμένο κόστος ενέργειας.

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται χαρακτηριστικά η μεταβολή του σταθμισμένου κόστους ενέργειας για κάθε συνδυασμό στρατηγικής λειτουργίας βοηθητικού καυστήρα και συμβατικού καυσίμου ανάλογα με τη διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (αντιστοίχως και του ηλιακού πεδίου).



**Γράφημα 6.4 Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας για τον υπό προσομοίωση ηλιοθερμικό σταθμό με αποθήκη 2 ωρών (σε €/kWh).**



# Κεφάλαιο 7

## Επίλογος

---

### 7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής εμφανίζει εξαιρετικές προοπτικές για την παραγωγή μεγάλης κλίμακας ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια αυτή η τεχνολογία γνωρίζει ταχεία ανάπτυξη ενώ η ανάγκη για εφαρμοσμένη έρευνα είναι συνεχής ώστε να αυξηθεί η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και να μειωθούν τα κόστη προκειμένου οι ηλιοθερμικοί σταθμοί να γίνουν ανταγωνιστικοί προς τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

Η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων είναι η πιο ανεπτυγμένη τεχνολογία ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής αυτή τη στιγμή και κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο τόσο στους ήδη υπάρχοντες ηλιοθερμικούς σταθμούς όσο και σε αυτούς που βρίσκονται υπό κατασκευή. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτέλεσε το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Περιγράφηκαν τα κύρια υποσυστήματα που συνθέτουν ένα τέτοιο σταθμό όπως είναι το ηλιακό πεδίο, το θερμοηλεκτρικό σύστημα, το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και ο βοηθητικός καυστήρας συμβατικού καυσίμου, και παρατέθηκαν οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία των επιμέρους υποσυστημάτων και του ηλιοθερμικού σταθμού εν γένει.

Αναπτύχθηκε, επίσης, ένας προτεινόμενος τρόπος λειτουργίας για έναν ηλιοθερμικό σταθμό παραβολικών κατόπτρων με επιλεγμένη τοποθεσία εγκατάστασης το νησί της Κρήτης. Έμφαση δόθηκε στον τρόπο συμμετοχής του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας και του βοηθητικού καυστήρα στη

λειτουργία του σταθμού. Ιδιαίτερα όσον αφορά το βοηθητικό καυστήρα παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν δύο διαφορετικές στρατηγικές λειτουργίας, συντηρητικής και μέγιστης χρήσης του.

Στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab κατάλληλο μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων. Από τις προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας κατέστη δυνατή η αναλυτική μελέτη της ετήσιας λειτουργίας αυτού του σταθμού, σε ωριαία βάση, όπως και η συμπεριφορά του σε διάφορες καιρικές συνθήκες. Για την απεικόνιση της λειτουργίας του υπό προσομοίωση ηλιοθερμικού σταθμού παρήχθησαν, μέσω του προγράμματος Matlab, ωριαία διαγράμματα της ημερήσιας λειτουργίας του για χαρακτηριστικές περιπτώσεις που αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία του σταθμού καθόλη τη διάρκεια του έτους.

Ιδιαίτερα αναδείχθηκε η σημασία της συμμετοχής τόσο του βοηθητικού καυστήρα όσο και του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας στη λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού. Ο συμβατικός καυστήρας, αν και με σχετικά μικρή συμμετοχή, οδηγεί σε αυξημένη και αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας (γρηγορότερη έναρξη της ημερήσιας ηλεκτροπαραγωγής-παράταση της ημερήσιας ηλεκτροπαραγωγής προς τη λήξη της στην περίπτωση τεχνικού ελαχίστου) ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος εξομαλύνοντας τις διακυμάνσεις λόγω της διακοπτόμενης φύσης της ηλιακής ενέργειας. Μελετήθηκε και η στρατηγική μέγιστης χρήσης του για συνολική αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής. Όσον αφορά το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, αυτό αυξάνει σημαντικά το συντελεστή χρησιμοποίησης του σταθμού, προσφέροντας με σχετικά χαμηλό κόστος τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη και μετά τη δύση του ηλίου ενώ παράλληλα παρέχει ευελιξία στο Διαχειριστή του Συστήματος εξαιτίας της δυνατότητας χρονικής κατανομής της παραγόμενης ισχύος.

Μεγάλη έμφαση δόθηκε στην απεικόνιση της λειτουργίας των δύο παραπάνω συστημάτων, στα διαγράμματα λειτουργίας που παρουσιάστηκαν, όσο και στη σύγκριση των ετήσιων αποτελεσμάτων λειτουργίας του σταθμού μεταξύ διαφορετικών περιπτώσεων όσον αφορά τη διαστασιολόγηση και τον τρόπο χρήσης του βοηθητικού καυστήρα και του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Στα διάφορα διαγράμματα που παρατέθηκαν εξετάστηκαν όλες οι δυνατές περιπτώσεις χρήσης των δύο αυτών συστημάτων με αναφορά στα πλεονεκτήματα που προσδίδουν στη λειτουργία του σταθμού.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας καταδεικνύουν το μέγεθος της ηλεκτροπαραγωγής από έναν τέτοιο σταθμό και την αποδοτικότητα του στη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολία και στη μετατροπή της σε ηλεκτρική ισχύ. Από τη συγκριτική παρουσίαση τεχνικών χαρακτηριστικών της ετήσιας λειτουργίας για διάφορες υλοποιήσεις σταθμών



παραβολικών κατόπτρων κατέστη δυνατή η ποσοτικοποίηση της επίδρασης που έχει η μεταβολή ορισμένων χαρακτηριστικών του σταθμού στην ετήσια λειτουργία του.

Από την οικονομική αξιολόγηση μιας τέτοιας επένδυσης που επιχειρήθηκε κατά προσέγγιση, προέκυψε ως σημαντικό συμπέρασμα η οικονομική βιωσιμότητα ενός τέτοιου έργου. Επιπρόσθετα, χρήσιμα συμπεράσματα, από επενδυτική σκοπιά, προήλθαν από τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών σταθμών παραβολικών κατόπτρων αλλά και μεταξύ διαφορετικών στρατηγικών λειτουργίας του ίδιου σταθμού.

Συμπερασματικά, υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις για την κατασκευή ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής στην ελληνική επικράτεια. Η Ελλάδα, με το υψηλό δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που χαρακτηρίζει ιδιαίτερα το νότιο τμήμα της, έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει πεδίο εφαρμογής και ανάδειξης των ηλιοθερμικών τεχνολογιών, οι οποίες μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην επίτευξη των εθνικών στόχων για τη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας.

## 7.2 Συμβολή της διπλωματικής εργασίας και μελλοντικές κατευθύνσεις

Η προσομοίωση της λειτουργίας ενός ηλιοθερμικού σταθμού αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για τη δοκιμή και σύγκριση διαφόρων χαρακτηριστικών και τρόπων λειτουργίας του σταθμού όπως και για τη μελέτη της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας ενός τέτοιου έργου. Δεδομένου του μεγάλου μεγέθους μιας επένδυσης για την κατασκευή ενός ηλιοθερμικού σταθμού, η αξιόπιστη προσομοίωση της λειτουργίας του αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για μια ρεαλιστική εκτίμηση της αποδοτικότητας ενός μελλοντικού έργου.

Όπως προέκυψε από την περιγραφή των επιμέρους υποσυστημάτων ενός ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων, πρόκειται για συστήματα μεγάλου μεγέθους με πληθώρα διατάξεων. Η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία και ως εκ τούτου απαιτείται εξειδικευμένη έρευνα πάνω στα διάφορα αυτά υποσυστήματα με σκοπό την αύξηση της απόδοσης λειτουργίας των επιμέρους διεργασιών. Ορισμένα πεδία στα οποία διενεργείται σημαντική έρευνα είναι η αποδοτικότερη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας, νέα μέσα μεταφοράς της θερμότητας [109], νέοι τρόποι και υλικά αποτελεσματικότερης αποθήκευσης της θερμότητας, η υβριδοποίηση ηλιοθερμικών σταθμών με συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, η άμεση παραγωγή ατμού στο ηλιακό πεδίο, η βέλτιστη διαστασιολόγηση του ηλιακού πεδίου,

αποτελεσματικότερα αερόψυκτα συστήματα ψύξης με χαμηλότερη κατανάλωση νερού και πολλά άλλα. Ειδικότερα στο πεδίο της μοντελοποίησης και προσομοίωσης θα παρουσίαζε ενδεχομένως ενδιαφέρον η προσομοίωση της λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού ανά χρονικά διαστήματα μικρότερα της μιας ώρας για την αποτελεσματικότερη ανάδειξη ορισμένων διεργασιών και την ακριβέστερη μελέτη της λειτουργίας του σταθμού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι υπόλοιπες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών, οι οποίες παρουσιάστηκαν περιληπτικά στο Κεφάλαιο 2. Κάθε μια έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και διαφορετικά πλεονεκτήματα που την καθιστούν κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές. Η ανάπτυξη αποτελεσματικών εργαλείων μοντελοποίησης και προσομοίωσης της λειτουργίας των διαφόρων ηλιοθερμικών σταθμών αποτελεί σημαντικό βήμα για τη μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών χαρακτηριστικών κάθε τεχνολογίας στον τελικό στόχο κάθε σταθμού, ο οποίος είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία σε ανταγωνιστικό κόστος.

# Βιβλιογραφία

---

- [1] J. Mariyappan, Solar Thermal Thematic Review, Draft Report. London: Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2001.
- [2] G. Cohen, D. Kearney, and G. Kolb, “Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for CSP Plants”, Report No. SAND99-1290, Sandia National Laboratory: Albuquerque, NM, 1999.
- [3] Greenpeace, SolarPACES, and ESTELA, “Concentrating Solar Power: Global Outlook 2009”.
- [4] [http://www.enertglobal.com/technology\\_e.html](http://www.enertglobal.com/technology_e.html)
- [5] Greenpeace, European Solar Thermal Industry Association, and IEA SolarPACES and ESTELA, “Concentrated Solar Thermal Power – Now!”, 2005.
- [6] [http://www.gigatonthrowdown.org/concentrating\\_solar\\_power.php](http://www.gigatonthrowdown.org/concentrating_solar_power.php)
- [7] Νόμος 3468/2006, Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης και λοιπές διατάξεις, Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Πρώτο, Αρ. Φύλλου 129, 27 Ιουνίου 2006.
- [8] Νόμος 3851/2010, Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Πρώτο, Αρ. Φύλλου 85, 4 Ιουνίου 2010.

- [9] The World Bank, “Phase I (Part I): Review of CSP Technologies and Cost Drivers Overview”, 2010.
- [10] <http://www.exergy.in/st/parabolic.php>
- [11] “The parabolic trough power plants Andasol 1 to 3. The largest solar power plants in the world –Technology premiere in Europe”, Report of Solar Millennium AG, 2008.
- [12] “Concentrating Solar Power: From research to implementation”, Report of European Commission, 2007.
- [13] Andreas Poullikas, Electricity Authority of Cyprus, “Economic analysis of power generation from parabolic trough solar thermal plants for the Mediterranean region—A case study for the island of Cyprus”, 2009.
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_thermal\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_energy)
- [15] “Parabolic trough power plant with thermal storage”, Solar Millennium AG.
- [16] “Solar Parabolic Trough”, Solar Paces Overview.
- [17] “Cost Reduction study for solar thermal power plants.”, Enermodal Engineering Limited, 1999.
- [18] [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_thermal\\_power\\_stations](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations)
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Andasol\\_solar\\_power\\_station](http://en.wikipedia.org/wiki/Andasol_solar_power_station)
- [20] <http://www.sunwindenergy.com>
- [21] [http://en.wikipedia.org/wiki/Solnova\\_Solar\\_Power\\_Station](http://en.wikipedia.org/wiki/Solnova_Solar_Power_Station)
- [22] “CSP World Plant Locations”, CSP Today, 2011.
- [23] [http://en.wikipedia.org/wiki/Martin\\_Next\\_Generation\\_Solar\\_Energy\\_Center](http://en.wikipedia.org/wiki/Martin_Next_Generation_Solar_Energy_Center)
- [24] “Blythe Solar Power Project Description”, Solar Millennium, 2009.
- [25] [http://en.wikipedia.org/wiki/Blythe\\_Solar\\_Power\\_Project](http://en.wikipedia.org/wiki/Blythe_Solar_Power_Project)

- [26] “MENA Assesment of the Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power Projects”, <http://arabworld.worldbank.org>
- [27] “Solar Tower”, Solar Paces Overview.
- [28] “10 MW Solar Thermal Power Plant for Southern Spain”, Final Technical Progress Report.
- [29] “Solutions to Global Climate Change Power Tower Plants”, Abengoa Solar.
- [30] “Solar Tower Plant”, Kraftanlagen München GmbH.
- [31] <http://www.pre.ethz.ch/research/projects/?id=solarcombinedcycle>
- [32] Ortega, J. Ignacio, J. Ignacio Burgaleta, and Felix M. Tellez. “Central Receiver System (CRS) Solar Power Plant Using Molten Salt as Heat Transfer Fluid.” Journal of Solar Energy Engineering, May 2008, Volume 130, Issue 2 024501-6.
- [33] [http://en.wikipedia.org/wiki/PS10\\_solar\\_power\\_tower](http://en.wikipedia.org/wiki/PS10_solar_power_tower)
- [34] [http://en.wikipedia.org/wiki/PS20\\_solar\\_power\\_tower](http://en.wikipedia.org/wiki/PS20_solar_power_tower)
- [35] [http://en.wikipedia.org/wiki/Sierra\\_SunTower](http://en.wikipedia.org/wiki/Sierra_SunTower)
- [36] <http://www.trec-uk.org.uk>
- [37] [http://en.wikipedia.org/wiki/Ivanpah\\_Solar\\_Power\\_Facility](http://en.wikipedia.org/wiki/Ivanpah_Solar_Power_Facility)
- [38] <http://articles.latimes.com/2010/jan/09/business/la-fi-solar9-2010jan09>
- [39] [http://www.trec-uk.org.uk/csp/no\\_water.html](http://www.trec-uk.org.uk/csp/no_water.html)
- [40] <http://social.csptoday.com/industry-insight/dry-cooling-slaking-thirst-concentrated-solar-power>
- [41] “Assesment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts”, Sargent & Lundy LLC Consulting Group, 2003.
- [42] [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy)
- [43] <http://www.stirlingenergy.com/maricopasolar>

- [44] <http://solar-thermal.anu.edu.au>
- [45] “Concentrated Solar Power: Focusing the sun’s energy for large-scale power generation”, Environmental and Energy Study Institute, 2009.
- [46] Κ. Παπασταμούλος, Α. Μαντήκος, Στ. Παπαθανασίου, “Τεχνολογίες Ηλιοθερμικών Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής”. 4<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Φοιτητών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών – ΣΦΗΜΜΥ 4, Πάτρα, Νοέμβριος 2010.
- [47] Κ. Παπασταμούλος, Α. Μαντήκος, Στ. Παπαθανασίου, “Τεχνολογίες Ηλιοθερμικών Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής”. Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση, Τεύχος 229, Ιούνιος 2011.
- [48] <http://www.areva.com>
- [49] <http://en.wikipedia.org/wiki/CLFR>
- [50] <http://www.ausra.com.au/>
- [51] [http://en.wikipedia.org/wiki/Liddell\\_Power\\_Station,\\_New\\_South\\_Wales](http://en.wikipedia.org/wiki/Liddell_Power_Station,_New_South_Wales)
- [52] [http://en.wikipedia.org/wiki/Kimberlina\\_Solar\\_Thermal\\_Energy\\_Plant](http://en.wikipedia.org/wiki/Kimberlina_Solar_Thermal_Energy_Plant)
- [53] T.R. Mancini, M. Geyer, “Spain Pioneers Grid-Connected Solar-Tower Thermal Power”, SolarPACES, 2006.
- [54] R. Tamme, “Storage for Concentrated Solar Power (CSP) Plants”, DLR-German Aerospace Center, 2010.
- [55] [http://www.nrel.gov/csp/troughnet/thermal\\_energy\\_storage.html](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/thermal_energy_storage.html)
- [56] [http://www.eere.energy.gov/basics/renewable\\_energy/thermal\\_storage.html](http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/thermal_storage.html)
- [57] A. Mao, J.H. Park, G.Y. Han, T. Seo, and Y. Kang, “Heat transfer characteristics of high temperature molten salt for storage of thermal energy”, Korean J. Chem. Eng., 27(5), 1452-1457, 2010.
- [58] <http://www.flickr.com/photos/beyondzeroemissions>
- [59] “Combined Solar Power and Desalination Plants: Techno-Economic Potential in Mediterranean Partner Countries (MED-CSD)” WP1 Final Report, DLR, June 2009.

- [60] U. Herrmann, M. Geyer, and R. Kistner, “The AndaSol Project”, Workshop on Thermal Storage for trough Power Systems, February 2002.
- [61] <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/gemasolar-plant/en>
- [62] <http://www.forbes.com/sites/tonyseba/2011/06/21/the-worlds-first-baseload-247-solar-power-plant/>
- [63] “Solutions to Global Climate Change - Power Tower Plants”, Abengoa Solar.
- [64] <http://www.solarmillennium.de>
- [65] M. Geyer, E. Lüpfert, R. Osuna, A. Esteban, W. Schiel, A. Schweitzer, E. Zarza, P. Nava, J. Langenkamp, and E. Mandelberg, “EUROTROUGH – Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation”, 11<sup>th</sup> Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, September 4-6, 2002, Zürich, Switzerland.
- [66] M.J. Montes, A. Abánades, J.M. Martínez-Val, and M. Valdés, “Solar Multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors”, Solar Energy 83, 2165-2176, 2009.
- [67] <http://www.mtholyoke.edu>
- [68] <http://www.schott solar.com>
- [69] “THERMINOL VP-1”, Solutia, 12/98.
- [70] F. Lippke, “Simulation of the Part-Load Behaviour of a 30 MWe SEGS Plant”, Report No. SAND95-1293, SNL, Albuquerque, NM, USA.
- [71] A.M. Patnode, “Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants”, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, USA, 2009.
- [72] J.A. Duffie, and W.A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes”, Second Edition.
- [73] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>

- [74] <http://education.gsfc.nasa.gov/experimental/July61999siteupdate/inv99Project.Site/Pages/solar.insolation.html>
- [75] [http://www.brighton-webs.co.uk/energy/solar\\_earth\\_sun.htm](http://www.brighton-webs.co.uk/energy/solar_earth_sun.htm)
- [76] T.A. Stuetzle, "Automatic Control of the 30 MWe SEGS VI Parabolic Trough Plant", Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, USA, 2002.
- [77] M. Scheffler, "Investigation of the Feasibility of a Parabolic Trough Driven Solar Energy Storage System using Ammonia", Diploma Thesis, Universität Stuttgart and The Australian National University, 2001.
- [78] M.J. Brooks, "Performance of a Parabolic Trough Solar Collector", Master Thesis, University of Stellenbosch, 2005.
- [79] R.L. Bartlett, "Steam Turbine Performance and Economics", McGraw-Hill, New York, USA, 1958.
- [80] K.E. Holbert, C.J. Haverkamp, "Impact of Solar Thermal Power Plants on Water Resources and Electricity Costs in the Southwest", North American Power Symposium (NAPS), 2009.
- [81] U. Herrmann, B. Kelly, and H. Price, "Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants", Energy 29, 883-893, 2004.
- [82] B. Kelly, and D. Kearney, "Thermal Storage Commercial Plant Design Study for a 2-Tank Indirect Molten Salt System – Final Report", NREL/SR-550-40166, July 2006.
- [83] J.M. Andújar, F. Rosa, and M. Geyer, "CESA-1 Thermal Storage System Evaluation", Solar Energy, Vol. 46, No. 5, pp. 305-312, 1991.
- [84] R. Ferri, A. Cammi, and D. Mazzei, "Molten salt mixture properties in RELAP5 code for thermodynamic solar applications", International Journal of Thermal Sciences 47 1676-1687, 2008.
- [85] E.I. Ortiz-Rivera, and L.I. Feliciano-Cruz, "Performance Evaluation and Simulation of a Solar Thermal Power Plant", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) IEEE, 2009.
- [86] "The dawn of sustainable clean energy", Focus, December 2009.
- [87] <http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/64576.aspx>



- [88] <http://www.consumerenergyreport.com>
- [89] “Electrical Energy Equipment: Cooling Towers”, Energy Efficiency Guide for Industry in Asia, <http://www.energyefficiencyasia.org/>
- [90] “Operating Cooling Towers In Freezing Weather”, SPX Cooling Technologies, January 2007.
- [91] <http://www.sugimat.com>
- [92] “Steam turbines for CSP plants”, Siemens, 2010.
- [93] <http://www.abengoasolar.com/>
- [94] M. Wittmann, H. Breitkreuz, M. Schroedter-Homscheidt, and M. Eck, “Case Studies on the Use of Solar Irradiance Forecast for Optimized Operation Strategies of Solar Thermal Power Plants”, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 1, No. 1, March 2008.
- [95] <http://www.cosmeo.com>
- [96] <http://newenergynews.blogspot.com>
- [97] N. Caldés, M. Varela, M. Santamaría, and R. Sáez, “Economic impact of solar thermal electricity deployment in Spain”, Energy Policy 37, 1628-1636, 2009.
- [98] D.R. Mills, and G.L. Morrison, “Compact Linear Fresnel Reflector Solar Thermal Power Plants”, Solar Energy, Vol. 68, No. 3, pp. 263-283, 2000.
- [99] Tai Lv, and Nan Li, “Study on the Continuous and Stable Running Mode of Solar Thermal Power Plant”, Power and Energy Engineering Conference, APPEEC, Asia-Pacific, 2009.
- [100] H. Price, and D. Kearney, “Reducing the Cost of Energy from Parabolic Trough Solar Power Plants-Preprint”, NREL, International Solar Energy Conference Hawaii Island, Hawaii, March 2003.
- [101] I. Purohit, and P. Purohit, “Techno-economic evaluation of concentrating solar power generation in India”, Energy Policy 38, 3015-3029, 2010.

- [102] T. Tsoutsos, V. Gekas, and K. Marketaki, "Technical and economical evaluation of solar thermal power generation", *Renewable Energy* 28, 873-886, 2003.
- [103] K. Ummel, and D. Wheeler, "Desert Power: The Economics of Solar Thermal Electricity for Europe, North Africa, and the Middle East", Center for Global Development, Working Paper Number 156, December 2008.
- [104] A.M. Al-Nasser, "Performance and Economics of a Solar Thermal Power Generation Plant in Jubail, Saudi Arabia: Parabolic Trough Collector", 2010 IEEE International Energy Conference.
- [105] "Οδηγός Αξιολόγησης Έργων Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Συγκέντρωση Ηλιακής Ακτινοβολίας", Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, Έκδοση 1.0, Νοέμβριος 2010.
- [106] Δ. Καλιαμπάκος, και Δ. Δαμίγος, "Χρηματοοικονομική και κοινωνικοοικονομική αξιολόγηση επενδύσεων", Σημειώσεις Μαθήματος "Οικονομικά του Περιβάλλοντος και των Υδάτινων Πόρων", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008.
- [107] Α. Φλάμος, "Ανάλυση Οικονομικών Στοιχείων Ενεργειακού Συστήματος", Σημειώσεις Μαθήματος Τεχνοοικονομική Ενεργειακών Συστημάτων, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- [108] "The Drivers of the Levelized Cost of Electricity for Utility-Scale Photovoltaics", SUNPOWER Corporation, August 2008.
- [109] M. Eck, and K. Hennecke, "Heat Transfer Fluids for Future Parabolic Trough Solar Thermal Power Plants", Proceedings of ISES World Congress 2007.

