ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"

ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΙΣ ΧΩΡΕΣ ΤΟΥ ΚΟΛΠΟΥ

Αντώνιος Α. Μαντήκος

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία η οποία υποβάλλεται για εκπλήρωση των απαιτήσεων για το Διεπιστημονικό - Διατμηματικό Δίπλωμα Ειδίκευσης του Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Πολυτεχνείου "Περιβάλλον και Ανάπτυξη"

Περιβάλλον και Ανάπτυξη

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2012

Επιβλέπων: Καθηγητής Ι. Ψαρράς

Επιτροπή Παρακολούθησης:

Καθηγητής Ι. Ψαρράς
Καθηγητής Β. Ασημακόπουλος
Αν. Καθηγητής Δ. Ασκούνης

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"

ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΙΣ ΧΩΡΕΣ ΤΟΥ ΚΟΛΠΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Α. Μαντήκος

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ……2012.

……	……	……
Ιωάννης Ψαρράς	Βασίλειος Ασημακόπουλος	Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2012

……

ΑΝΤΩΝΙΟΣ Α. ΜΑΝΤΗΚΟΣ

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

Copyright © ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΜΑΝΤΗΚΟΣ 2012.

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 μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου. Ταυτόχρονα, μελετώνται τα περιβαλλοντικά θέματα που ανακύπτουν από τη χρησιμοποίηση της εν λόγω τεχνολογίας.

Στα πλαίσια αυτά παρουσιάστηκαν αρχικά τα γενικά χαρακτηριστικά της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής και τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και οι δυνατότητες αξιοποίησης της εν λόγω τεχνολογίας στις χώρες του Κόλπου. Επιπλέον, έγινε αναφορά με διάφορα στοιχεία στη νέα βιώσιμη ενεργειακή πολιτική που προωθείται στις χώρες αυτές.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε μια ανασκόπηση των διαφορετικών τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως και των κυριότερων περιβαλλοντικών θεμάτων που σχετίζονται με την κατασκευή, τη λειτουργία και τον παροπλισμό των σταθμών αυτών.

Έπειτα, περιγράφηκε αναλυτικότερα ο υπό μελέτη ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο για τη διερεύνηση της αποδοτικότητας τέτοιων σταθμών στις χώρες του Κόλπου. Εκτενέστερα παρουσιάστηκε ο τρόπος καθημερινής λειτουργίας του υπό μελέτη σταθμού παραβολικών κατόπτρων.

Έμφαση δόθηκε στη χωροθέτηση ηλιοθερμικών σταθμών παραβολικών κατόπτρων στις χώρες του Κόλπου. Περιγράφηκε η διαδικασία επιλογής κατάλληλων τοποθεσιών για την εγκατάσταση τέτοιων σταθμών και ακολούθως πραγματοποιήθηκε η αιτιολογημένη επιλογή ενδεικτικών τοποθεσιών σε κάθε μια από τις χώρες του Κόλπου.

Στο τέλος, πραγματοποιείται η εφαρμογή του εργαλείου προσομοίωσης στις επιλεγμένες τοποθεσίες. Η διαμόρφωση του κάθε σταθμού επιλέγεται με βάση τις ιδιαιτερότητες της κάθε τοποθεσίας. Παρατίθενται χαρακτηριστικά διαγράμματα λειτουργίας για τον κάθε σταθμό όπως και πίνακες με τα βασικά αριθμητικά αποτελέσματα της ετήσιας λειτουργίας του.

Λέξεις κλειδιά: ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής, χώρες του Κόλπου, σταθμός παραβολικών κατόπτρων, περιβαλλοντικές επιπτώσεις ηλιοθερμικών σταθμών, χωροθέτηση ηλιοθερμικών σταθμών, προσομοίωση λειτουργίας, διαγράμματα λειτουργίας.

Abstract

The scope of this postgraduate diploma thesis is to investigate the potential use of concentrating solar power (CSP) technology in the Gulf Cooperation Council countries (GCC countries). At the same time, it examines the environmental issues arising from the use of this technology.

In this context, the general characteristics of the CSP technology are initially presented, together with the comparative advantages and development potential of this particular technology in GCC countries. In addition, reference was made to the new sustainable energy policy being promoted in these countries.

Then, an overview of different main technologies of solar thermal power plants was attempted. It was followed by the major environmental issues associated with the construction, operation and decommissioning of these plants.

Afterwards, the CSP parabolic trough plant, which was used as a model plant in order to investigate the effectiveness of such stations in the Gulf region, was described in detail. Also, the daily operation mode of the CSP plant under study was extensively presented.

Emphasis was placed on the site selection for parabolic trough CSP plants in the GCC countries. The suitable site selection procedure for such plants was presented, followed by a reasoned choice of indicative locations in each of the GCC countries.

In the end, the CSP plant simulation tool was applied for the selected sites. The configuration of each station was based on the specific characteristics of each location. Characteristic charts of daily operation for each plant were cited, as well as tables with key figures of the annual operation.

Keywords: concentrating solar power (CSP), GCC countries, solar thermal power plant, parabolic trough, CSP environmental impacts, site selection, plant simulation, operation charts.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου Καθηγητή Ιωάννη Ψαρρά για την εμπιστοσύνη του και την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω τη μεταπτυχιακή διπλωματική μου εργασία σε ένα θέμα που αποτελεί κύριο μέρος των ενδιαφερόντων μου. Η άψογη συνεργασία και οι κατευθυντήριες γραμμές που μου έδωσε υπήρξαν για μένα σημαντικά εφόδια για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Στα πλαίσια της εργασίας μου, είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ με το διδάκτορα Χάρη Δούκα. Η συνεργασία μας ήταν άριστη και η βοήθειά του πολύτιμη σε οποιοδήποτε θέμα προέκυπτε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Για την υποστήριξη και την καθοδήγησή του θέλω να τον ευχαριστήσω.

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

Περιεχόμενα

Περίληψη 5

Abstract 7

Ευχαριστίες 9

Περιεχόμενα 11

Περιεχόμενα Εικόνων 15

Περιεχόμενα Πινάκων 19

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή 21

1.1 Νέες δυνατότητες στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και η αναδυόμενη αγορά των Χωρών του Κόλπου 21

1.2 Αντικείμενο και Στόχοι της Εργασίας 23

1.3 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας 25

Κεφάλαιο 2

Η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής στις Χώρες του Κόλπου 27

2.1 Γενικά χαρακτηριστικά της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής 27

2.2 Συγκριτικά πλεονεκτήματα και δυνατότητες αξιοποίησης της τεχνολογίας στις Χώρες του Κόλπου 33

2.3 Νέα ενεργειακή πολιτική στις Χώρες του Κόλπου 41

Κεφάλαιο 3

Κύριες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και περιβαλλοντική αποτίμηση 43

3.1 Τεχνολογία Παραβολικών Κατόπτρων 45

3.2 Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου ή Κεντρικού Δέκτη 52

3.3 Τεχνολογία Παραβολικών Δίσκων.....58

3.4 Τεχνολογία Κατόπτρων Fresnel.....59

3.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ηλιοθερμικών σταθμών 62

Κεφάλαιο 4

Ο υπό μελέτη ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων 71

4.1 Ηλιακό πεδίο.....71

4.2 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας 73

4.3 Κύκλος ισχύος 75

4.4 Περιγραφή λειτουργίας του υπό μελέτη ηλιοθερμικού σταθμού ..81

Κεφάλαιο 5

Χωροθέτηση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου 87

5.1 Διαδικασία χωροθέτησης ηλιοθερμικού σταθμού.....88

5.2 Ενδεικτικές τοποθεσίες ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής για την εφαρμογή του εργαλείου προσομοίωσης. 94

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογή Εργαλείου Προσομοίωσης..... 101

6.1 Ηλιοθερμικός σταθμός στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα 102

6.2 Ηλιοθερμικός σταθμός στη Σαουδική Αραβία 104

6.3 Ηλιοθερμικός σταθμός στο Ομάν..... 107

6.4 Ηλιοθερμικός σταθμός στο Κατάρ 110

6.5 Ηλιοθερμικός σταθμός στο Μπαχρέιν 112

6.6 Ηλιοθερμικός σταθμός στο Κουβέιτ..... 114

Κεφάλαιο 7

Επίλογος 117

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα 117

7.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις 120

Βιβλιογραφία 121

Περιεχόμενα Εικόνων

Κεφάλαιο 2	**Η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής στις Χώρες του Κόλπου**	**27**
Εικόνα 2.1	Άμεση, διάχυτη και ολική ηλιακή ακτινοβολία	28
Εικόνα 2.2	Δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας παγκοσμίως	29
Εικόνα 2.3	Δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στις χώρες της Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής	30
Εικόνα 2.4	Προβλεπόμενο δίκτυο ηλεκτρικών διασυνδέσεων σύμφωνα με το πρόγραμμα DESERTEC	31
Εικόνα 2.5	Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στο Μπαχρέιν	37
Εικόνα 2.6	Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στο Κατάρ	37
Εικόνα 2.7	Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στα Η.Α.Ε.	38
Εικόνα 2.8	Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στο Κουβέιτ	38
Εικόνα 2.9	Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στο Ομάν	38
Εικόνα 2.10	Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στη Σαουδική Αραβία	39
Εικόνα 2.11	Διαφορετικές διαμορφώσεις συστημάτων αφαλάτωσης – ηλιοθερμικών σταθμών	40
Κεφάλαιο 3	**Κύριες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και περιβαλλοντική αποτίμηση**	**43**
Εικόνα 3.1	Διασύνδεση των επί μέρους τμημάτων ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής	44
Εικόνα 3.2	Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας ηλιακού πεδίου με παραβολικά κάτοπτρα.	45
Εικόνα 3.3	Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης ενός παραβολικού κατόπτρου	46
Εικόνα 3.4	Ο σωλήνας απορρόφησης SCHOTT PTR 70 της εταιρείας SCHOTT Solar	46
Εικόνα 3.5	Λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και βοηθητικό καυστήρα	48
Εικόνα 3.6	Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παραβολικών κατόπτρων Andasol 1 και 2 στην Ισπανία.	50
Εικόνα 3.7	Ο ηλιοθερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής Shams 1 υπό κατασκευή.	51
Εικόνα 3.8	Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας ηλιακού πεδίου με ηλιοστάτες	52
Εικόνα 3.9	Γενικό λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού κεντρικού δέκτη	53

Εικόνα 3.10	Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού τεχνολογίας πύργου PS10 (μείγμα νερού-ατμού ως μέσο μεταφοράς θερμότητας)	54
Εικόνα 3.11	Σχηματικό διάγραμμα λειτουρτγίας του ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής κεντρικού δέκτη Gemasolar	56
Εικόνα 3.12	Τεχνολογία παραβολικών δίσκων	58
Εικόνα 3.13	Σχηματικό διάγραμμα ηλιακού πεδίου με επίπεδα κάτοπτρα Fresnel.	60
Εικόνα 3.14	Άποψη του ηλιοθερμικού σταθμού Puerto Errado	61
Εικόνα 3.15	Επιπτώσεις και κατανάλωση πόρων για κάθε τμήμα του σταθμού και φάσεις κύκλου ζωής του σταθμού αντίστοιχα (CEE cumulated energy expenditure)	66
Κεφάλαιο 4	**Ο υπό μελέτη ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων**	**71**
Εικόνα 4.1	Διάταξη του ηλιακού πεδίου για τον υπό μελέτη σταθμό παραβολικών κατόπτρων	72
Εικόνα 4.2	Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας δύο δεξαμενών του Andasol. Στην ένθετη φωτογραφία φαίνεται η θέση του συστήματος αποθήκευσης στον ηλιοθερμικό σταθμό	74
Εικόνα 4.3	Πρόσοψη και κάτοψη του συστήματος αποθήκευσης δύο δεξαμενών του ηλιοθερμικού σταθμού Andasol	75
Εικόνα 4.4	Διάγραμμα του θερμικού εναλλάκτη του κύκλου ισχύος	76
Εικόνα 4.5	Σχηματική απεικόνιση του υδρόψυκτου συστήματος ψύξης με πύργο	77
Εικόνα 4.6	Αερόψυκτος συμπυκνωτής. Πηγή: Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου	78
Εικόνα 4.7	Υβριδικό (υδρόψυκτο/αερόψυκτο) παράλληλο σύστημα ψύξης	79
Εικόνα 4.8	Σχηματική απεικόνιση του κύκλου ισχύος	80
Εικόνα 4.9	Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού τις πρωινές ώρες (η αποθήκη είναι άδεια)	83
Εικόνα 4.10	Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων κατά το μεσημέρι (η αποθήκη «φορτίζεται»)	84
Εικόνα 4.11	Απεστιασμένος συλλέκτης παραβολικών κατόπτρων για απόρριψη ενέργειας	85
Εικόνα 4.12	Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων κατά το απόγευμα (η αποθήκη «εκφορτίζεται»)	86
Κεφάλαιο 5	**Χωροθέτηση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου**	**87**
Εικόνα 5.1	Χάρτης των χωρών του Κόλπου	88
Εικόνα 5.2	Ετήσιο δυναμικό DNI παγκοσμίως	91
Εικόνα 5.3	Περιοχές αποκλεισμού για εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής	93

Εικόνα 5.4	Χωροθέτηση του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων Shams 1, στο Εμιράτο του Άμπου Ντάμπι	94
Εικόνα 5.5	Τοποθεσία προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων στην επαρχία Najran της Σαουδικής Αραβίας	95
Εικόνα 5.6	Τοποθεσία προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων στην περιοχή Wilayat Duqm του Ομάν	96
Εικόνα 5.7	Επιλογή τοποθεσίας προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων στο Εμιράτο του Κατάρ	97
Εικόνα 5.8	Ενδεικτική τοποθεσία προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με παραβολικά κάτοπτρα στο Μπαχρέιν	98
Εικόνα 5.9	Ενδεικτική τοποθεσία προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με παραβολικά κάτοπτρα στο Κουβέιτ	99
Κεφάλαιο 6	**Εφαρμογή Εργαλείου Προσομοίωσης**	**101**
Εικόνα 6.1	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	102
Εικόνα 6.2	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	103
Εικόνα 6.3	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	105
Εικόνα 6.4	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	106
Εικόνα 6.5	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	108
Εικόνα 6.6	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	108
Εικόνα 6.7	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	110
Εικόνα 6.8	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	111
Εικόνα 6.9	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	112
Εικόνα 6.10	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	113
Εικόνα 6.11	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	115
Εικόνα 6.12	Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του	115

Περιεχόμενα Πινάκων

Κεφάλαιο 2	**Η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής στις Χώρες του Κόλπου**	**27**
Πίνακας 2.1	Δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στις χώρες του Κόλπου	36
Κεφάλαιο 5	**Χωροθέτηση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου**	**87**
Πίνακας 5.1	Βήμα προς βήμα η διαδικασία επιλογής τοποθεσιών για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής	89
Πίνακας 5.2	Υποχρεωτικά και προαιρετικά κριτήρια αποκλεισμού περιοχών για εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής	92
Κεφάλαιο 6	**Εφαρμογή Εργαλείου Προσομοίωσης**	**101**
Πίνακας 6.1	Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στα Η.Α.Ε.	104
Πίνακας 6.2	Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στη Σαουδική Αραβία	106
Πίνακας 6.3	Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στο Ομάν	109
Πίνακας 6.4	Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στο Κατάρ	111
Πίνακας 6.5	Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στο Μπαχρέιν	114
Πίνακας 6.6	Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στο Κουβέιτ	116

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Νέες δυνατότητες στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και η αναδυόμενη αγορά των Χωρών του Κόλπου

Η ολοένα αυξανόμενη έρευνα που συντελείται στους τομείς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η εντατικοποίηση στην αξιοποίηση των πηγών αυτών αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα «όπλα» της ανθρωπότητας ενάντια στην επαπειλούμενη κλιματική αλλαγή, η οποία προκαλείται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα παγκόσμια ηλεκτρικά δίκτυα έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο σύγχρονο μοντέλο της ηλεκτροπαραγωγής, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα σημαντική μείωση στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου ενώ οι εξελίξεις στο άμεσο μέλλον προβλέπονται ακόμη ταχύτερες.

Μια από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με τεράστια αποθέματα είναι η ηλιακή ενέργεια. Η γη δέχεται περισσότερη ενέργεια από τον ήλιο σε μια ώρα από όσο καταναλώνει ο πληθυσμός της σε έναν ολόκληρο χρόνο. Γίνεται κατανοητό ότι η ευρεία ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στον παγκόσμιο ηλεκτρικό ενεργειακό χάρτη, με έναν τρόπο αποδοτικό, αξιόπιστο και συμφέρον, μπορεί να διασφαλίσει σε ένα μεγάλο ποσοστό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών αποτελώντας την ίδια στιγμή μια σημαντική κίνηση στον αγώνα για την αποφυγή της κλιματικής αλλαγής.

Ενώ μέχρι πρόσφατα η μόνη αποδεδειγμένη τεχνολογία αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας ήταν η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, μεγάλη δυναμική παρουσιάζει κατά την τελευταία δεκαετία η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής, (CSP-Concentrating Solar Power), η οποία βρίσκει εφαρμογή στους ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το πεδίο εφαρμογών έχει

συγκεντρώσει εκτενή έρευνα και ανάπτυξη και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εγκαθίστανται όλο και περισσότεροι ηλιοθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής.

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][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, η εν λόγω τεχνολογία έχει καταστεί υπό προϋποθέσεις μια οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία, η οποία δημιουργεί μεγάλες προσδοκίες λόγω και των συγκριτικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει. Αρκετοί εμπορικοί σταθμοί είναι υπό λειτουργία ενώ ακόμη περισσότεροι βρίσκονται στο στάδιο της κατασκευής ή του προγραμματισμού. Είναι γεγονός ότι η υφιστάμενη παγκόσμια οικονομική κρίση έχει προκαλέσει δυσχέρειες στην ομαλή και επαρκή χρηματοδότηση τόσο μεγάλων επενδύσεων, δεδομένου ότι πρόκειται για μεγάλες επενδύσεις υψηλής έντασης κεφαλαίου όπως υπαγορεύεται από τις οικονομίες κλίμακας. Όμως, το θετικό στοιχείο πλέον είναι το γεγονός πως οι καταγραφόμενες επιδόσεις των ηλιοθερμικών σταθμών που βρίσκονται σε λειτουργία εδώ και αρκετά χρόνια αποδεικνύουν την οικονομική βιωσιμότητα τέτοιων εγχειρημάτων ανοίγοντας το δρόμο για νέες επενδύσεις αλλά και τροφοδοτούν την αντίστοιχη έρευνα με πολύτιμα πραγματικά δεδομένα. 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].

Έως τώρα τη μεγαλύτερη ανάπτυξη στον τομέα της ηλιοθερμικής τεχνολογίας έχουν σημειώσει οι Η.Π.Α. και η Ισπανία, στα εδάφη των οποίων βρίσκεται εγκατεστημένη η συντριπτική πλειοψηφία των ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως. Μια νέα αγορά, η οποία εισέρχεται με πολύ καλές προϋποθέσεις και υψηλές προσδοκίες στον τομέα της ηλιακής ενέργειας είναι αυτή της Μέσης Ανατολής με πρωτοστατούντες τις λεγόμενες χώρες του Κόλπου (GCC countries). Αν και φαινομενικά είναι παράδοξο οι χώρες αυτές να στρέφονται σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας για την ηλεκτροπαραγωγή λόγω των σημαντικών κοιτασμάτων πετρελαίου και αερίου που διαθέτουν, ωστόσο υπάρχουν επαρκείς λόγοι που καθιστούν τη στροφή μέρους των επενδύσεων στον τομέα αυτόν ιδιαίτερης σημασίας και οφέλους για τις συγκεκριμένες χώρες. Οι χώρες που αποτελούν το Συμβούλιο Συνεργασίας του Κόλπου (Gulf Cooperation Council – Μπαχρέιν, Κουβέιτ, Ομάν, Κατάρ, Σαουδική Αραβία και Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα) επιδιώκουν να δραστηριοποιηθούν στον πολλά υποσχόμενο τομέα της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής αξιοποιώντας το πλούσιο ηλιακό δυναμικό τους σε μια προσπάθεια να ελέγξουν και να διατηρήσουν μακροπρόθεσμα τα αποθέματά τους σε υδρογονάνθρακες, στην εξαγωγή των οποίων έχει βασιστεί η αλματώδης ανάπτυξη των χωρών του Κόλπου τα τελευταία χρόνια. Κινούμενες προς αυτή την κατεύθυνση, οι κυβερνήσεις των χωρών αυτών έχουν στρέψει την προσοχή τους προς τη διαμόρφωση αντίστοιχου θεσμικού πλαισίου το οποίο θα προβλέπει την επιδότηση και την παροχή οικονομικών κινήτρων για τις επενδύσεις στην ηλιακή βιομηχανία. Η πολιτική βούληση, το πλούσιο ηλιακό δυναμικό και η οικονομική ευρωστία των χωρών του Κόλπου σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής είναι ικανοί παράγοντες για να αναδείξουν την αγορά της περιοχής αυτής ως την πλέον σημαντική και ανερχόμενη στον εν λόγω τομέα κατά τα επόμενα χρόνια παγκοσμίως.

1.2 Αντικείμενο και Στόχοι της 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. Κύριος στόχος της εργασίας είναι η μελέτη αξιοποίησης της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής στις Χώρες του Κόλπου. Για την επίτευξη του στόχου αυτού επιχειρείται ο προσδιορισμός της απόδοσης και της λειτουργίας ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής

τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων σε ορισμένες κατάλληλα επιλεγμένες περιοχές χωροθέτησης. Στο πλαίσιο αυτό, μελετώνται επίσης τα περιβαλλοντικά θέματα που ανακύπτουν και σχετίζονται με τους ηλιοθερμικούς σταθμούς.

Η τεχνολογία των παραβολικών κατόπτρων αποτελεί την περισσότερο αποδεδειγμένη εμπορικά και πιο διαδεδομένη υλοποίηση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ως ενδεικτική τεχνολογία για τους σκοπούς της μελέτης. Η τεχνολογία αυτή ενδείκνυται για μεγάλης κλίμακας ηλεκτροπαραγωγή και μπορεί να συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην αξιόπιστη κάλυψη σημαντικού ποσοστού των αυξανόμενων ηλεκτρικών αναγκών των χωρών του Κόλπου.

Προς την κατεύθυνση που τέθηκε από τους παραπάνω στόχους, αρχικά επιχειρείται η περιγραφή εν συντομία των κυριότερων τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής καθώς και αναλυτικότερα των επιμέρους υποσυστημάτων ενός σταθμού τεχνολογίας παραβολικών κατόπτρων. Στη συνέχεια, ακολουθεί η περιγραφή της λειτουργίας ενός τέτοιου σταθμού στην οποία βασίζεται η διαμόρφωση του εργαλείου προσομοίωσης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των επιδόσεων λειτουργίας των σταθμών.

Έπεται η επιλογή των κατάλληλων περιοχών χωροθέτησης των ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες του Κόλπου. Μελετώνται και εφαρμόζονται τα κριτήρια χωροθέτησης για την εγκατάσταση αυτών των σταθμών και επιλέγονται ορισμένες ενδεικτικές τοποθεσίες όπου και με την εφαρμογή του εργαλείου προσομοίωσης προσδιορίζονται οι δυνατότητες ηλεκτροπαραγωγής των υπό μελέτη σταθμών. Λαμβανομένου υπόψη του γεγονότος ότι για την εγκατάσταση των εν λόγω σταθμών δεσμεύονται μεγάλες ενιαίες εκτάσεις είναι ιδιαίτερης σημασίας οι τοποθεσίες που θα επιλεγούν να πληρούν τα απαραίτητα κριτήρια έτσι ώστε να αξιοποιούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια προκαλώντας ταυτόχρονα τη μικρότερη δυνατή όχληση στο περιβάλλον.

Με την εφαρμογή του εργαλείου προσομοίωσης επιδιώκεται ο προσδιορισμός της ετήσιας λειτουργίας των ηλιοθερμικών σταθμών και η συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών διαμορφώσεων των σταθμών αυτών. Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην αποτελεσματική απεικόνιση της ημερήσιας λειτουργίας των σταθμών σε ενδεικτικές ημερομηνίες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν διάφορα είδη διαγραμμάτων που παρήχθησαν μέσω του προγράμματος MATLAB. Επιπρόσθετα, παρατίθενται τα βασικότερα αριθμητικά στοιχεία που προκύπτουν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας των σταθμών.

Μέσω της αξιολόγησης της λειτουργίας των σταθμών σε διαφορετικές περιοχές της Αραβικής Χερσονήσου, απώτερος στόχος είναι να μελετηθεί η σκοπιμότητα της εγκατάστασης ενός ηλιοθερμικού σταθμού σε μια ιδιαιτέρως ευνοϊκή περιοχή του παγκόσμιου χάρτη.

1.3 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο *κεφάλαιο 1* γίνεται μια εισαγωγή στις δυνατότητες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας μέσω της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής και στην αναδυόμενη αγορά των χωρών του Κόλπου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται το αντικείμενο και οι στόχοι της εργασίας.

Στο *κεφάλαιο 2* παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής και τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και οι δυνατότητες αξιοποίησης της εν λόγω τεχνολογίας στις Χώρες του Κόλπου. Επιπλέον, γίνεται αναφορά με διάφορα στοιχεία στη νέα βιώσιμη ενεργειακή πολιτική που προωθείται στις χώρες αυτές.

Στο *κεφάλαιο 3* παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των διαφορετικών τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως και των κυριότερων περιβαλλοντικών θεμάτων που σχετίζονται με την κατασκευή, τη λειτουργίας και τον παροπλισμό των σταθμών αυτών.

Στο *κεφάλαιο 4* περιγράφεται αναλυτικότερα ο υπό μελέτη ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί ως μοντέλο για τη διερεύνηση της αποδοτικότητας τέτοιων σταθμών στις χώρες του Κόλπου. Μετά την περιγραφή των επιμέρους υποσυστημάτων του σταθμού, παρουσιάζεται εκτενώς ο τρόπος καθημερινής λειτουργίας του.

Στο *κεφάλαιο 5* επιχειρείται η χωροθέτηση ηλιοθερμικών σταθμών παραβολικών κατόπτρων στις χώρες του Κόλπου. Περιγράφεται η διαδικασία επιλογής κατάλληλων τοποθεσιών για την εγκατάσταση τέτοιων σταθμών και ακολουθεί η αιτιολογημένη επιλογή ενδεικτικών τοποθεσιών σε κάθε μια από τις Χώρες του Κόλπου.

Στο *κεφάλαιο 6* πραγματοποιείται η εφαρμογή του εργαλείου προσομοίωσης στις επιλεγμένες τοποθεσίες. Η διαμόρφωση του κάθε σταθμού επιλέγεται με βάση τις ιδιαιτερότητες της κάθε τοποθεσίας. Παρατίθενται χαρακτηριστικά διαγράμματα λειτουργίας για τον κάθε σταθμό όπως και πίνακες με τα βασικά αριθμητικά αποτελέσματα της ετήσιας λειτουργίας του.

Στο *κεφάλαιο 7* συνοψίζονται τα αποτελέσματα της εργασίας, παρουσιάζονται ορισμένα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν και προτείνονται ορισμένες κατευθύνσεις για την περαιτέρω διερεύνηση της χρησιμότητας της ηλιοθερμικής τεχνολογίας στις χώρες του Κόλπου.

Κεφάλαιο 2

Η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής στις Χώρες του Κόλπου

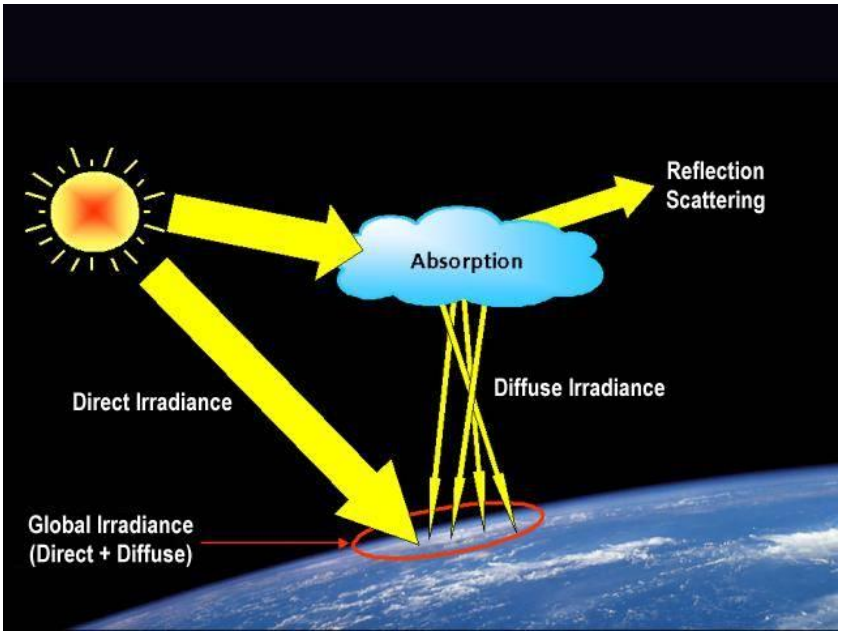
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν μία νέα μορφή αξιοποίησης του ηλιακού δυναμικού, μετά τα φωτοβολταϊκά. Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία παράγουν απευθείας ηλεκτρική ενέργεια όταν προσπίπτει σε αυτά ηλιακή ακτινοβολία (φωτοβολταϊκό φαινόμενο), οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παράγουν αρχικά θερμότητα, συγκεντρώνοντας τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες, και εν συνεχεία ηλεκτρική ενέργεια σε έναν συμβατικό θερμοδυναμικό κύκλο ισχύος. Ουσιαστικά, η βασική διαφορά μεταξύ ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής και ενός συμβατικού ατμοηλεκτρικού σταθμού είναι η πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται με σκοπό την παραγωγή θερμότητας και την ατμοποίηση του νερού. Στον ηλιοθερμικό σταθμό η πηγή αυτή είναι η ηλιακή ενέργεια ενώ στο συμβατικό σταθμό η απαιτούμενη θερμότητα προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων.

Η βασική αρχή λειτουργίας των ηλιοθερμικών σταθμών είναι απλή. Με τη χρήση εκατοντάδων κατάλληλων κατόπτρων επιτυγχάνεται η συγκέντρωση των ηλιακών ακτίνων σε σημεία όπου αναπτύσσεται πολύ υψηλή θερμοκρασία, συνήθως μεταξύ 400°C και 1000°C. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που συγκεντρώνεται από τα κάτοπτρα, αποδίδεται σε ένα μέσο μεταφοράς της θερμότητας, το οποίο μπορεί να

είναι συνθετικό λάδι, υγροποιημένο άλας, μείγμα νερού-ατμού, αέρας 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. [4]

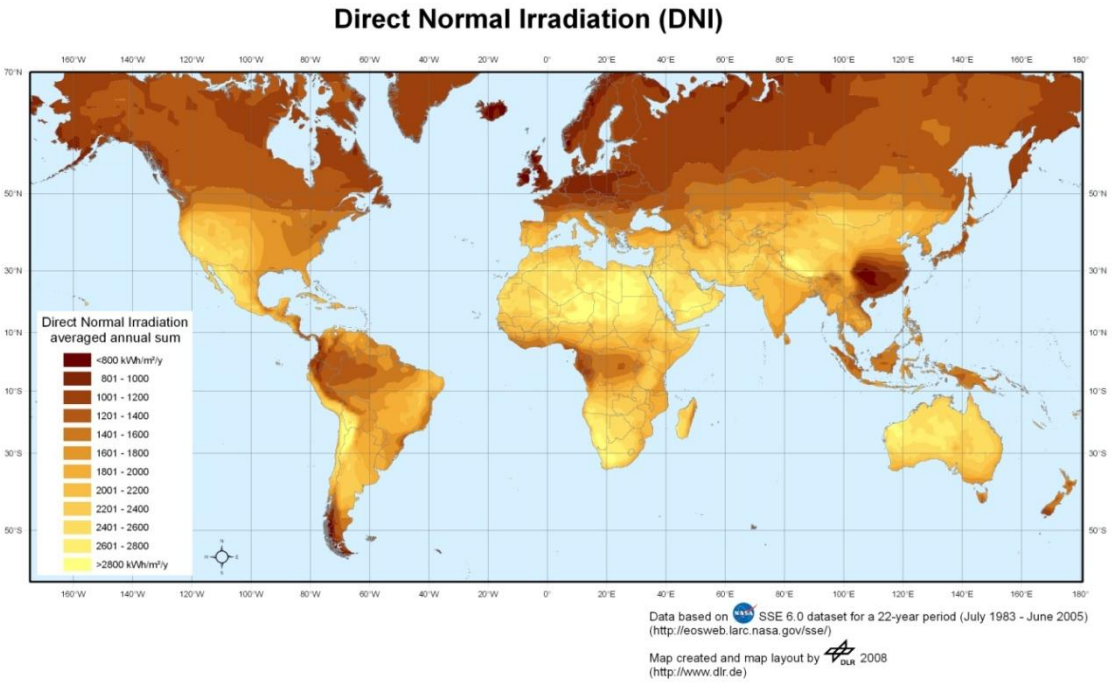
Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ηλιοθερμικής τεχνολογίας είναι ότι, σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούν και τη διάχυτη ακτινοβολία για να παράγουν ηλεκτρισμό, τα ηλιοθερμικά συστήματα χρησιμοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI- Direct Normal Irradiance) καθώς η διάχυτη δεν βρίσκεται σε δέσμες παράλληλων ακτίνων και έτσι δεν μπορεί να συγκεντρωθεί αποτελεσματικά. Η άμεση 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.



Εικόνα 2.1: Άμεση, διάχυτη και ολική ηλιακή ακτινοβολία.
Πηγή: solarinsolation.org

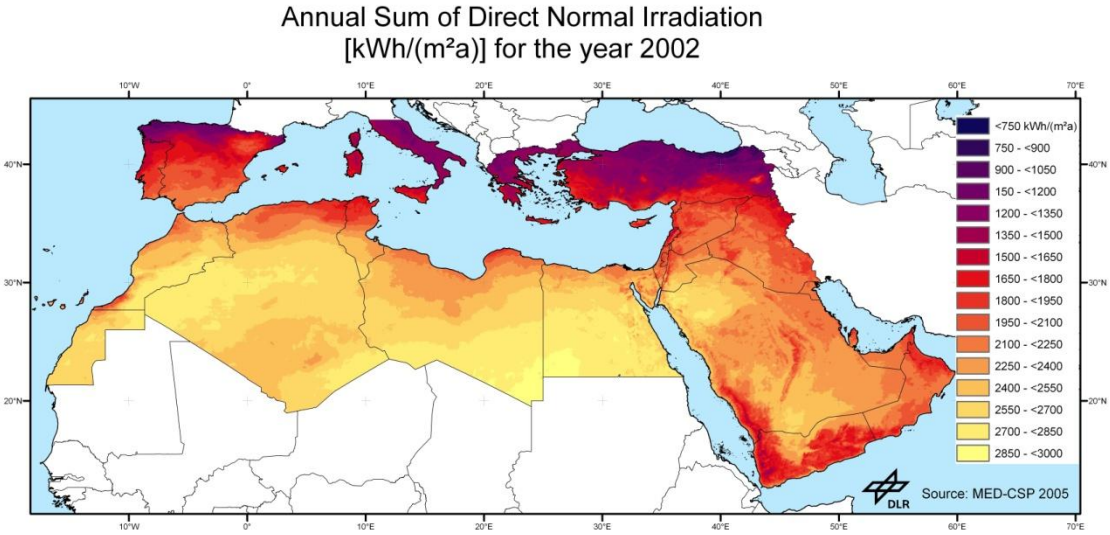
Συνεπώς, είναι προφανές ότι η χωροθέτηση ενός ηλιοθερμικού σταθμού θα πρέπει να γίνεται σε περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια και ειδικά με υψηλό δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) έτσι ώστε μια τέτοια επένδυση να αποτελεί μια

αποδοτική και συμφέρουσα λύση για την εκάστοτε χώρα ή επενδυτή. Το δυναμικό DNI σε κάθε περιοχή του πλανήτη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Κατάλληλες περιοχές για την αξιοποίηση της τεχνολογίας 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^2 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). [3], [5]



Εικόνα 2.2: Δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας παγκοσμίως.
Πηγή: German Aerospace Center (DLR).

Οι χώρες του Κόλπου είναι από τις πλέον κατάλληλες περιοχές για την αξιοποίηση της ηλιοθερμικής τεχνολογίας όσον αφορά το δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές στο σύνολο σχεδόν της Αραβικής Χερσονήσου όπως φαίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στην εικόνα που ακολουθεί.



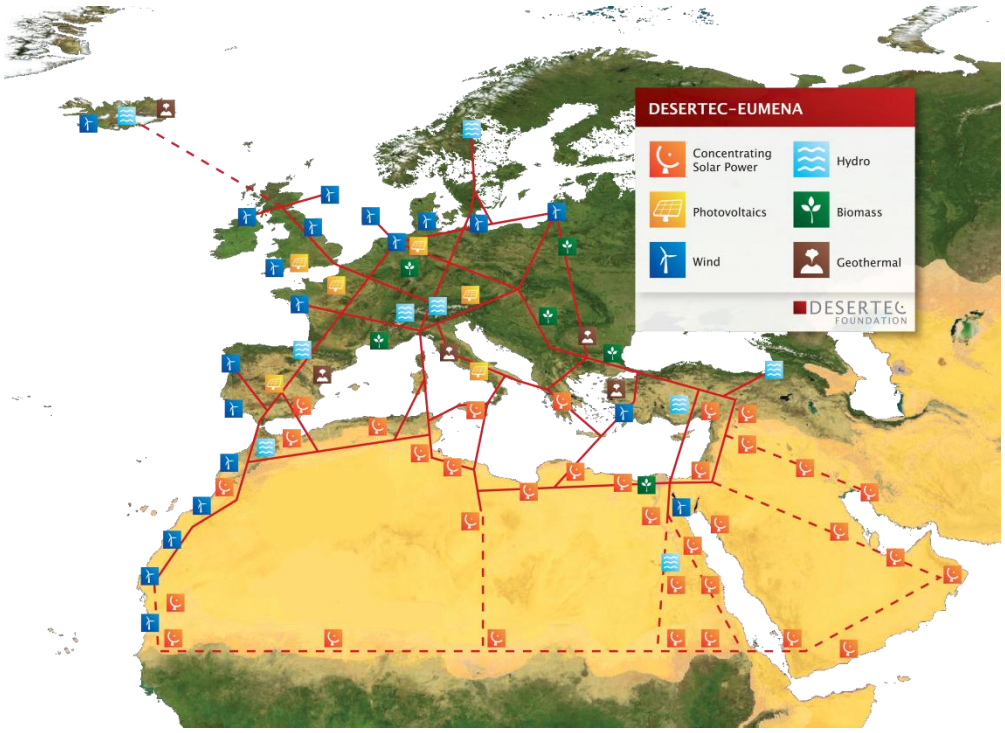
Εικόνα 2.3: Δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στις χώρες της Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής.

Πηγή: German Aerospace Center (DLR), MED CSP 2005.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω δεδομένα ηλιοφάνειας ορισμένες περιοχές διαθέτουν ιδιαίτερα πλούσιο ηλιακό δυναμικό ενώ πολλές άλλες έχουν αρκετά περιορισμένη ηλιοφάνεια. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι δυνατότητες ηλεκτροπαραγωγής που προσφέρει το ηλιακό δυναμικό ιδιαίτερα ηλιόλουστων περιοχών ξεπερνούν κατά πολύ την τοπική ζήτηση. Έτσι, θα υπάρχει η δυνατότητα, εφόσον κάτι τέτοιο κρίνεται οικονομικά συμφέρον, να εξάγεται ενέργεια από σταθμούς που βρίσκονται στις χώρες αυτές προς άλλες χώρες με υψηλή κατανάλωση ενέργειας αλλά χαμηλό δυναμικό DNI. Άλλωστε, το σύγχρονο μοντέλο διεσπαρμένης ηλεκτροπαραγωγής το οποίο χαρακτηρίζεται από βιώσιμη και οικονομική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκεί όπου το αντίστοιχο δυναμικό είναι υψηλό, προβλέπει αυξημένες ηλεκτρικές διασυνδέσεις μεταξύ των χωρών και υψηλές επενδύσεις σε νέα «ευφυή» δίκτυα, τα οποία θα επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση και τον έλεγχο στις αμφίδρομες μεταφορές ηλεκτρικής ενέργειας.

Εάν οι χώρες της ηλιακής ζώνης εκμεταλλευτούν την ηλιακή τους ενέργεια κατά τρόπο αποδοτικό, θα συνεισφέρουν τα μέγιστα στην προστασία του παγκόσμιου κλίματος. Τα τελευταία χρόνια 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, το οποίο και συμπεριλαμβάνει αρκετές εκτάσεις της Αραβικής Χερσονήσου. Αρκετές χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης οι οποίες δεν διαθέτουν υψηλό ηλιακό δυναμικό ήδη εξετάζουν σοβαρά το ενδεχόμενο να εισάγουν «ηλιακή» ηλεκτρική ενέργεια από τη βόρεια Αφρική και τις χώρες της Μέσης Ανατολής για να κάνουν τον ενεργειακό τους τομέα περισσότερο βιώσιμο και να ικανοποιήσουν τους στόχους

που έχουν θέσει για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Βεβαίως, για κάθε νέο αναπτυξιακό έργο η ικανοποίηση της εγχώριας ζήτησης θα είναι η πρώτη προτεραιότητα. [6]



Εικόνα 2.4: Προβλεπόμενο δίκτυο ηλεκτρικών διασυνδέσεων σύμφωνα με το πρόγραμμα DESERTEC.

Πηγή: DESERTEC Foundation, http://www.desertec.org

Εστιάζοντας στον τρόπο αξιοποίησης του ηλιακού δυναμικού από την εν λόγω τεχνολογία, 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, για τη μελέτη σκοπιμότητας της εγκατάστασης ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου θα μελετηθούν οι τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και πιο συγκεκριμένα η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων.

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 διείσδυσης 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) αλλά και σε αυτούς που 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. Πρόκειται ίσως για το σημαντικότερο πλεονέκτημα των σταθμών αυτών καθώς τους δίνει τη δυνατότητα να αποσβαίνουν τις αυξομειώσεις της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και να συνεχίζουν την ηλεκτροπαραγωγή ακόμη και μετά τη δύση του ηλίου. 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. [4]

2.2 Συγκριτικά πλεονεκτήματα και δυνατότητες αξιοποίησης της τεχνολογίας στις Χώρες του Κόλπου

Η βασικότερη προϋπόθεση για να αξιοποιηθεί εμπορικά σε μεγάλο βαθμό η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι αυτή να καταστεί οικονομικά βιώσιμη μέσω της συνεχούς έρευνας και ανάπτυξης, αλλά και μέσω πολιτικών πρωτοβουλιών που θα προσφέρουν οικονομική στήριξη και επενδυτικά κίνητρα. 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.

Είναι 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. [7] 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 την ήλιο και να θεσπίσουν μια ικανοποιητική εγγυημένη τιμή αγοράς. Αν συμβούν τα παραπάνω θα υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες η ηλιοθερμική τεχνολογία να αξιοποιήσει την προοπτική της.

Εστιάζοντας στις Χώρες του Κόλπου, το δυναμικό για ηλεκτροπαραγωγή από τον ήλιο είναι τεράστιο. Κάθε χρόνο, κάθε τετραγωνικό χιλιόμετρο γης δέχεται μια ποσότητα ηλιακής ενέργειας που αντιστοιχεί σε 1,5 εκατομμύρια βαρέλια αργού πετρελαίου. Παρόλα αυτά έως τώρα η ηλιακή ενέργεια δεν συμμετείχε στο ενεργειακό μίγμα των χωρών αυτών μιας και φαινόταν ιδιαίτερα παράδοξο να στραφούν οι συγκεκριμένες πετρελαιοπαραγωγές χώρες σε άλλη πηγή ενέργειας πέραν των υδρογονανθράκων. Τα έξι αραβικά κράτη του Περσικού κόλπου που συγκροτούν το Συμβούλιο Συνεργασίας του Κόλπου (Μπαχρέιν, Κουβέιτ, Ομάν, Κατάρ, Σαουδική Αραβία και Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα) είναι οι κυρίαρχες χώρες στην παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς διαθέτουν περίπου το 40% και το 23,6% αντίστοιχα των παγκόσμιων αποδεδειγμένων διαθεσίμων. Ως αποτέλεσμα, το ενεργειακό σύστημα αυτών των χωρών είναι υπεύθυνο για την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με τη Στατιστική Υπηρεσία των Ηνωμένων Εθνών, οι χώρες του Κόλπου βρίσκονται στις 25 πρώτες χώρες με τις μεγαλύτερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο, με τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και το Κουβέιτ να ηγούνται της λίστας. Οι εκπομπές CO_2 ανά κάτοικο και ανά μονάδα του ΑΕΠ όπως και οι δείκτες ενεργειακής έντασης των χωρών του Συμβουλίου Συνεργασίας του Κόλπου είναι υψηλότεροι από το μέσο όρο των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των χωρών μελών του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι οι χώρες αυτές θα πρέπει να επανεξετάσουν την ενεργειακή τους στρατηγική και να αξιοποιήσουν τις πλούσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που διαθέτουν. [8], [9], [10]

Παράλληλα, η ραγδαία οικονομική ανάπτυξη σε συνδυασμό με την πληθυσμιακή αύξηση στις χώρες του Κόλπου έχουν εκτοξεύσει τη ζήτηση ενέργειας και δοκιμάζονται οι αντοχές των υφιστάμενων υποδομών ενέργειας. Η υπάρχουσα εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς στην περιοχή είναι 75.000 MW αλλά με την ενεργειακή κατανάλωση να αυξάνεται ετησίως με ρυθμό περίπου 9,5%, θα απαιτηθούν έως το 2015 περίπου 55.000 MW επιπρόσθετης ηλεκτρικής εγκατεστημένης ισχύος. Οι επενδύσεις αυτές αναμένεται να κοστίσουν περίπου 80 δισεκατομμύρια δολάρια. [11] Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, η εγχώρια ενεργειακή ζήτηση στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (Η.Α.Ε.) θα υπερδιπλασιαστεί έως το 2020 σε αντίθεση με την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση, η οποία αναμένεται να αυξηθεί κατά 45% έως το 2030. Το Παγκόσμια Συμβούλιο

Ενέργειας εκτιμά ότι οι Χώρες του Κόλπου θα χρειαστούν 100GW επιπρόσθετης ηλεκτρικής ισχύος για να καλύψουν τη ζήτηση. Αυτό μεταφράζεται σε επενδύσεις ύψους 900 εκατομμυρίων δολαρίων για το Μπαχρέιν, 800 εκατομμυρίων για το Ομάν, 600 εκατομμυρίων για το Κατάρ, 15 δισεκατομμυρίων για τη Σαουδική Αραβία και 10 δισεκατομμυρίων για τα Η.Α.Ε. [11]

Επιπλέον, η αλματώδης αύξηση της τιμής του πετρελαίου σε συνδυασμό με την αύξηση στην ενεργειακή ζήτηση των χωρών του Κόλπου επίσπευσε την απόφαση για στροφή της ηλεκτρικής παραγωγής προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς γίνεται αντιληπτό ότι η σωστή διαχείριση των αποθεμάτων και οι εξαγωγές των ορυκτών καυσίμων συμφέρουν περισσότερο τις χώρες αυτές από την εγχώρια κατανάλωση των αποθεμάτων αυτών για παραγωγή ενέργειας. Πέραν, όμως, του οικονομικού οφέλους από τη μείωση των υψηλών επιδοτήσεων για την εγχώρια κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων και την αύξηση των εξαγωγών, οι χώρες του Κόλπου θα έχουν ακόμη ένα μεγάλο όφελος από τη νέα ενεργειακή πολιτική, το οποίο είναι η προετοιμασία του ενεργειακού και γενικότερα του οικονομικού τους τομέα για την «μετά-πετρελαίου» εποχή. Οι ενεργειακές τους υποδομές θα είναι έτοιμες για μια εποχή όπου τα εγχώρια κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου δεν θα επαρκούν για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Κάποιες από τις χώρες του Κόλπου βρίσκονται ήδη, ή θα βρεθούν στο άμεσο μέλλον, αντιμέτωπες με την περιορισμένη διαθεσιμότητα των ορυκτών καυσίμων. Ακόμη, όμως και χώρες όπως το Κατάρ , το οποίο έχει ακόμη πολύ μεγάλα αποθέματα, επιδιώκουν να ξεκινήσουν εγκαίρως τη μερική μεταστροφή του ενεργειακού τους συστήματος, διότι η σταδιακή και ομαλή διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα αποτρέψει τα τεράστια κόστη που θα απαιτούσε μια ραγδαία και αναγκαστική προσαρμογή στο μέλλον. Εν τέλει, μια περισσότερο βιώσιμη ενεργειακή πολιτική θα αποκαθιστούσε τη φήμη των χωρών του Κόλπου στη διεθνή πολιτική σκηνή καθώς πρόσφατα άρθρα με αντικείμενο την περιβαλλοντική πολιτική των χωρών αυτών είναι ιδιαίτερα επικριτικά αποδίδοντας τους τον τίτλο των χειρότερων μολυντών του περιβάλλοντος παγκοσμίως. [8]

Δεδομένων των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η περιοχή των Χωρών του Κόλπου για την αξιοποίηση της ηλιοθερμικής τεχνολογίας αλλά και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της τεχνολογίας αυτής, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν την προτεινόμενη επιλογή της ηλιακής βιομηχανίας των χωρών αυτών για την αξιοποίηση του άφθονου ηλιακού δυναμικού τους και τη μεταστροφή της ενεργειακής πολιτικής τους προς μια βιώσιμη κατεύθυνση [12]. Οι χώρες του Κόλπου βρίσκονται εντός της λεγόμενης «ηλιακής ζώνης», σε μια περιοχή με άφθονη ηλιοφάνεια (περισσότερες από 6 kWh/m^2/ημέρα) και καθαρό ουρανό για περισσότερο από το 80% της διάρκειας του έτους. Πρόκειται για μια ως επί το πλείστον άγονη ζώνη, η οποία εκτείνεται σε γεωγραφικό μήκος από τις 45° έως τις 58° ανατολικά και σε γεωγραφικό πλάτος από 20° έως 30° βόρεια. Πέραν του μεγάλου πλεονεκτήματος σε άμεσο ηλιακό δυναμικό, η τοπογραφία των περιοχών αυτών είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών,

καθώς υπάρχει πληθώρα επίπεδων, εκτεταμένων και ανεκμετάλλευτων περιοχών. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθεται το μέσο άμεσο ηλιακό δυναμικό των χωρών του Κόλπου, το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό των προοπτικών της εν λόγω τεχνολογίας. [9], [13]

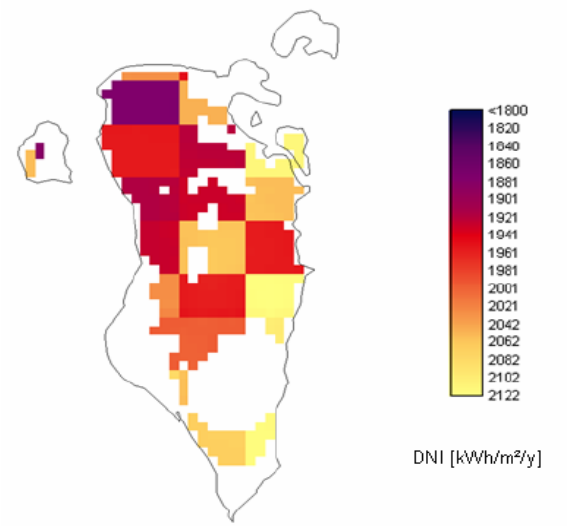
Πίνακας 2.1: Δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στις Χώρες του Κόλπου. [9]

Χώρα	**Δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ($kWh/m^2/y$)**
Μπαχρέιν	2050
Κουβέιτ	2100
Ομάν	2200
Κατάρ	2200
Σαουδική Αραβία	2500
Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	2200

Ο ακριβής προσδιορισμός και η λεπτομερής χαρτογράφηση του ηλιακού δυναμικού των Χωρών του Κόλπου κρίνεται εξαιρετικά σημαντική και αποτελεί προτεραιότητα για τα ερευνητικά ινστιτούτα και τις αντίστοιχες εταιρείες των έξι χωρών. Μια σωστή αξιολόγηση και χαρτογράφηση θα αποτελέσει το απαραίτητο θεμέλιο για την αποδοτικότερη αξιοποίηση του ηλιακού δυναμικού, καθώς θα δώσει τη δυνατότητα στις αρμόδιες αρχές και τους κατασκευαστές να προσδιορίσουν εκείνες τις γεωγραφικές θέσεις που θα επιτρέψουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο χαμηλότερο δυνατό κόστος. Είναι χαρακτηριστική η περίπτωση του υπό ολοκλήρωση ηλιοθερμικού σταθμού Shams 1, στα Η.Α.Ε., τα έργα κατασκευής του οποίου σταμάτησαν για ένα χρόνο και η επένδυση τέθηκε υπό αμφισβήτηση όταν οι λεπτομερείς μετρήσεις του άμεσου ηλιακού δυναμικού προέκυψαν αισθητά χαμηλότερες σε σχέση με τις αρχικά εκτιμώμενες, κάτι που θα οδηγούσε σε μειωμένη παραγωγικότητα κατά 12,5%. [14]. Ενεργώντας προς αυτήν την κατεύθυνση, ο Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), που εδρεύει στο Ντουμπάι, σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Επιστήμης και Τεχνολογίας Masdar, αλλά και ερευνητικούς φορείς από τις έξι χώρες του Κόλπου προανήγγειλαν την κατασκευή ενός εξελιγμένου πληροφοριακού εργαλείου χαρτογράφησης και αξιολόγησης του ηλιακού δυναμικού, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη του τις ιδιαιτερότητες του κλίματος της Αραβικής χερσονήσου. [15]

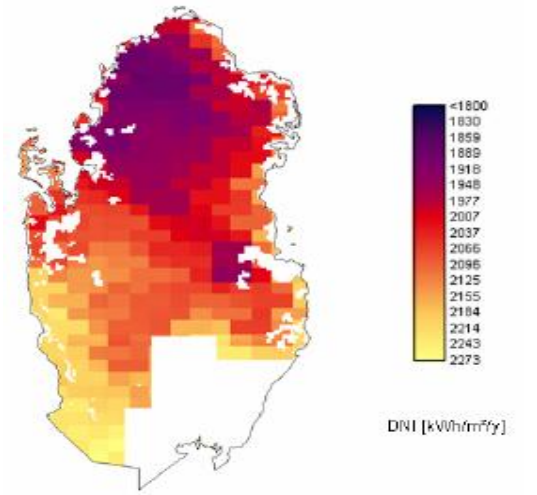
Στη συνέχεια παρατίθενται χαρτογραφημένα τα αποτελέσματα έρευνας του Γερμανικού Κέντρου Αεροδιαστημικής (DLR) που αποδεικνύει τον πλούτο και τη σημασία της ηλιακής ενέργειας για τις χώρες του Κόλπου. Απεικονίζεται αναλυτικά το άμεσο ηλιακό δυναμικό στα εδάφη των έξι χωρών και προσδιορίζεται η μέγιστη δυνατή ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από ηλιοθερμικούς σταθμούς, όπως και η έκταση των κατάλληλων εδαφών. Ακόμη, δίνεται μια μετριοπαθής πρόβλεψη για την πραγματική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργειας από ηλιοθερμικούς σταθμούς το 2050 σε συνδυασμό με την προβλεπόμενη ενεργειακή κατανάλωση για τον ίδιο χρονικό ορίζοντα. Σύμφωνα με τις προβλέψεις του DLR, η διείσδυση της ηλιοθερμικής τεχνολογίας στο ενεργειακό μίγμα των Χωρών του Κόλπου αναμένεται αρκετά μεγάλη.

Όπως προέκυψε από την έρευνα του DLR, η κατάλληλη εδαφική έκταση είναι 707 km^2 και το μέγιστο δυναμικό 36 TWh/y. Το προβλεπόμενο δυναμικό για το 2050 είναι 3,5 TWh/y όταν η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση θα είναι 6,9 TWh/y. [16]



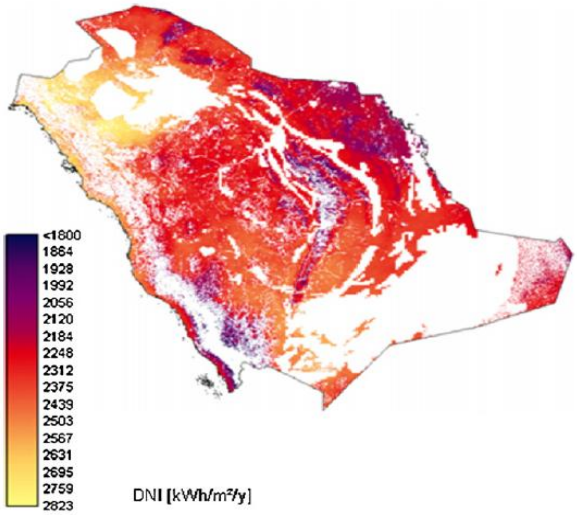
Εικόνα 2.5: Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στο Μπαχρέιν. [16]

Η κατάλληλη εδαφική έκταση είναι 11.437 km^2 και το μέγιστο δυναμικό της ηλιοθερμικής τεχνολογίας 823 TWh/y. Το προβλεπόμενο δυναμικό για το 2050 είναι 2,8 TWh/y όταν η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση θα είναι 5 TWh/y. [16]



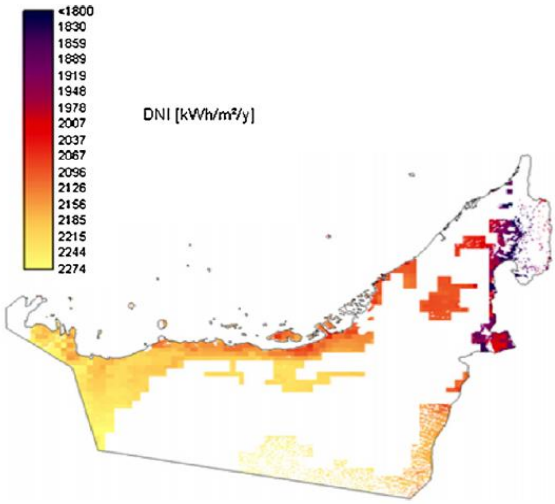
Εικόνα 2.6: Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στο Κατάρ.[16]

Η κατάλληλη εδαφική έκταση είναι 77.700 km^2 και το μέγιστο δυναμικό της ηλιοθερμικής τεχνολογίας 2.078 TWh/y. Το προβλεπόμενο δυναμικό για το 2050 είναι 10 TWh/y όταν η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση θα είναι 24 TWh/y. [16]



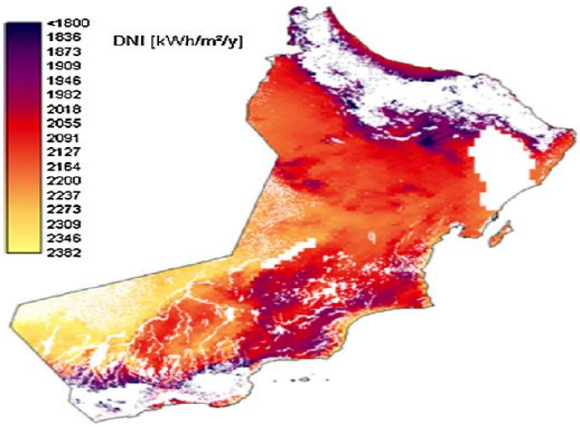
Εικόνα 2.7: Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στα Η.Α.Ε. [16]

Η κατάλληλη εδαφική έκταση είναι 17.818 km^2, ενώ το μέγιστο δυναμικό της ηλιοθερμικής τεχνολογίας 1.525 TWh/y. Το προβλεπόμενο δυναμικό για το 2050 είναι 13 TWh/y όταν η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση θα είναι 30 TWh/y. [16]



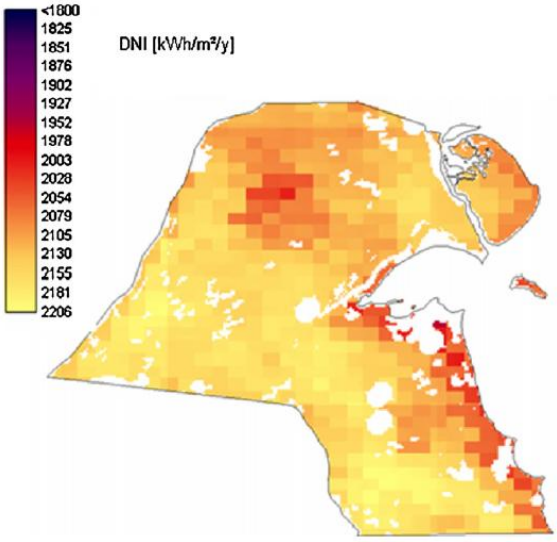
Εικόνα 2.8: Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στο Κουβέιτ. [16]

Η κατάλληλη εδαφική έκταση είναι 212.457 km^2 ενώ το μέγιστο δυναμικό της ηλιοθερμικής τεχνολογίας 20.611 TWh/y. Το προβλεπόμενο δυναμικό για το 2050 είναι 22 TWh/y όταν η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση θα είναι 35 TWh/y. [16]



Εικόνα 2.9: Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στο Ομάν. [16]

Η κατάλληλη εδαφική έκταση είναι 224.000 km^2 και το μέγιστο δυναμικό 125.260 TWh/y. Το προβλεπόμενο δυναμικό για το 2050 είναι 135 TWh/y όταν η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση θα είναι 305 TWh/y. [16]



κ

Εικόνα 2.10: Το ηλιοθερμικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής στη Σαουδική Αραβία. [16]

Εκτός των ευνοϊκών κλιματικών συνθηκών, και τα χαρακτηριστικά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τους ηλιοθερμικούς σταθμούς είναι κατάλληλα για το ενεργειακό τοπίο που διαμορφώνεται στις χώρες του Κόλπου. Η αύξηση που αναμένεται στην ηλεκτρική κατανάλωση κατά τα επόμενα χρόνια είναι σημαντική και η ηλιοθερμική τεχνολογία ενδείκνυται για μεγάλης κλίμακας ηλεκτροπαραγωγή. Το γεγονός ότι υπάρχει η δυνατότητα συμπληρωματικής χρήσης ορυκτών καυσίμων με άμεση απόκριση κατά τις βυθίσεις της ηλιοφάνειας καθιστά τους σταθμούς αυτούς κατάλληλους για την κάλυψη του φορτίου βάσης καθώς μπορούν να παρέχουν μεγάλης κλίμακας ισχύ αξιόπιστα και ανεξάρτητα από τις βραχυπρόθεσμες αυξομειώσεις της ηλιοφάνειας. Ένα άλλο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ηλεκτρικής ζήτησης στις χώρες αυτές είναι η έντονη χρήση κλιματισμού λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών κατά το μεγαλύτερο μέρος του έτους, η οποία συνεχίζεται και μετά τη δύση του ήλιου. Η δυνατότητα απλής και οικονομικής αποθήκευσης της ενέργειας που προσφέρει η ηλιοθερμική τεχνολογία δίνει τη δυνατότητα αξιόπιστης ηλεκτροπαραγωγής καθόλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

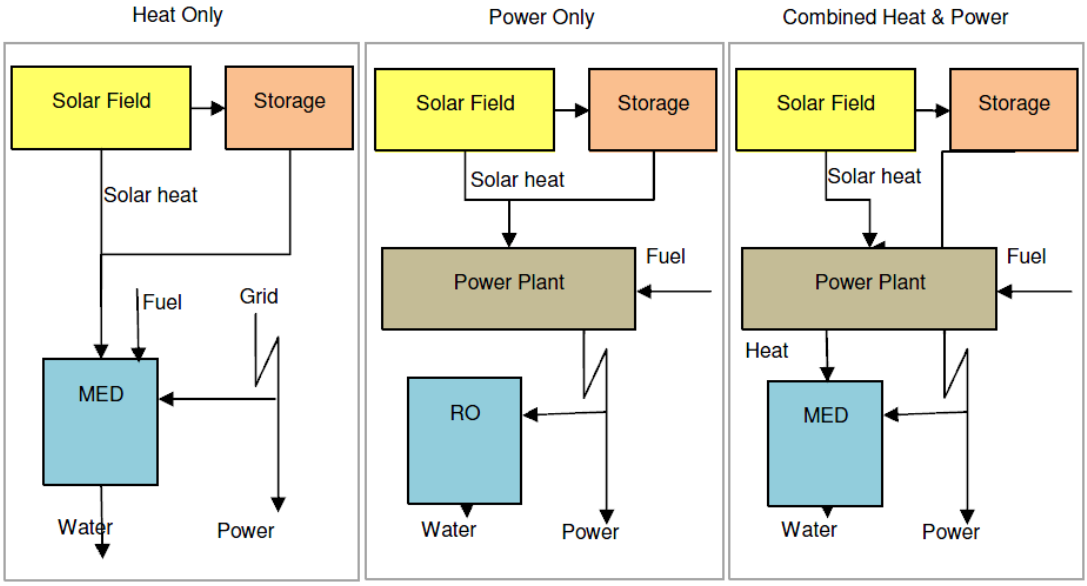
Επιπρόσθετα, η ηλιοθερμική τεχνολογία μπορεί να συνδυαστεί ιδανικά και να τροφοδοτήσει μονάδες αφαλάτωσης. Το νερό βρίσκεται σε εξαιρετικά περιορισμένη διαθεσιμότητα στις χώρες του Κόλπου, καθώς πρόκειται για μια από τις πιο άγονες περιοχές του κόσμου. Η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την πληθυσμιακή διόγκωση απειλούν τα αποθέματα νερού των χωρών αυτών, οι οποίες είναι ήδη εξαρτημένες σε μεγάλο βαθμό από τις μονάδες αφαλάτωσης. [9] Οι μονάδες αυτές εξυπηρετούν περίπου το 70% των αναγκών σε νερό των χωρών του Κόλπου. [17] Οι σταθμοί αφαλάτωσης

είναι πολύ δαπανηροί όχι μόνο κατά την κατασκευή και τη συντήρησή τους, αλλά και όσον αφορά τις μεγάλες ποσότητες καυσίμου που καταναλώνουν κατά τη λειτουργία τους, όντας ιδιαίτερα επιβλαβείς και για το περιβάλλον. Ο συνδυασμός της αφαλάτωσης με την ηλιοθερμική τεχνολογία μπορεί να αποδειχθεί μια βιώσιμη λύση με τις ελάχιστες δυνατές επιπτώσεις στο περιβάλλον και με την εξοικονόμηση των διαθέσιμων ορυκτών καυσίμων. [8]

Σύμφωνα με τη χρηματοδοτούμενη από την Ευρωπαϊκή Ένωση έρευνα MED-CSD, η ηλιοθερμική τεχνολογία είναι η πλέον κατάλληλη βιώσιμη τεχνολογία για την τροφοδοσία σταθμών αφαλάτωσης. Ο μεγάλος συντελεστής χρησιμοποίησης των ηλιοθερμικών σταθμών και η δυνατότητα σταθερής και διαρκούς παραγωγής ισχύος τους καθιστά καταλληλότερους από τους φωτοβολταϊκούς και τους αιολικούς σταθμούς για το συνδυασμό με αφαλάτωση. [18]

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις για το συνδυασμό ηλιοθερμικής τεχνολογίας και αφαλάτωσης, οι οποίες θεωρούνται αποδοτικές και βιώσιμες:

- μικρής κλίμακας διεσπαρμένες μονάδες αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται άμεσα από το ηλιακό πεδίο των ηλιοθερμικών σταθμών,
- ηλιοθερμικοί σταθμοί οι οποίοι ηλεκτροδοτούν εγκατάσταση αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση (CSP/RO), και
- συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για συστήματα αφαλάτωσης πολλαπλής ενέργειας. [19]



Εικόνα 2.11: Διαφορετικές διαμορφώσεις συστημάτων αφαλάτωσης – ηλιοθερμικών σταθμών. [19]

2.3 Νέα ενεργειακή πολιτική στις Χώρες του Κόλπου

Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους, η ηλιοθερμική τεχνολογία έχει προσελκύσει πρόσφατα μεγάλο ενδιαφέρον στις Χώρες του Κόλπου, οι οποίες είναι διατεθειμένες να χαράξουν νέα ενεργειακή πολιτική, περισσότερο βιώσιμη. Για να αξιοποιηθεί το τεράστιο δυναμικό που φαίνεται να έχει η ηλιοθερμική τεχνολογία στις συγκεκριμένες χώρες, απαιτείται η διαμόρφωση ενός σαφούς θεσμικού πλαισίου, το οποίο θα δημιουργεί τις κατάλληλες προϋποθέσεις και θα διευκολύνει την πραγματοποίηση επενδύσεων στον τομέα αυτόν. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσονται σημαντικές κυβερνητικές πρωτοβουλίες στα κράτη αυτά κατά τα τελευταία χρόνια.

Ο επαναπροσδιορισμός της ενεργειακής στρατηγικής των Χωρών του Κόλπου δεν έχει μεταφραστεί ακόμη στην ανάπτυξη και τη χάραξη συγκεκριμένων θεσμικών πλαισίων. Καμία χώρα δεν έχει υιοθετήσει σχέδια εγγυημένης τιμή πώλησης για ηλιακά συστήματα και συστήματα ΑΠΕ γενικότερα, ούτε συστήματα ανωτάτων ορίων και δικαιωμάτων εμπορίας εκπομπών. Αντί για αυτές τις πολιτικές, υπάρχει μια ισχυρή δυναμική για την προώθηση μεμονωμένων έργων. [8]

Στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, υπάρχει μια ισχυρή πολιτική ώθηση για να πρωτοστατήσει η χώρα στις ενεργειακές εξελίξεις στην περιοχή. Το Άμπου Ντάμπι σχεδιάζει να εισάγει ένα σύστημα επιδοτήσεων των επενδύσεων στην ηλιακή ενέργεια. Στην προσπάθεια αυτή, το Υπουργείο Οικονομικής Ανάπτυξης εργάζεται πάνω σε ένα θεσμικό πλαίσιο για ένα σύστημα επιδοτήσεων από το 2008. Το Άμπου Ντάμπι είναι η πρώτη περιοχή στις Χώρες του Κόλπου η οποία επιχειρεί μια συγκεκριμένη στρατηγική προσέγγιση στο θέμα. Το εμιράτο έχει θέσει ως στόχο την παραγωγή του 7% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως και τη μείωση κατά 7% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως το 2020. Επίσης, το Άμπου Ντάμπι βρίσκεται στο προσκήνιο με τη χρηματοδότηση και υλοποίηση της πόλης Masdar, η οποία είναι μια νέα πρότυπη πόλη η οποία ηλεκτροδοτείται εξ ολοκλήρου από την ηλιακή ενέργεια και άλλες ΑΠΕ, και θα αποτελεί κέντρο έρευνας και εφαρμογών της ηλιακής τεχνολογίας. [8]

Το Κατάρ, επίσης εμφανίζεται διατεθειμένο να αξιοποιήσει επαρκώς το ηλιακό του δυναμικό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο τέλος του 2011, το Ερευνητικό Ινστιτούτο Περιβάλλοντος και Ενέργειας του Κατάρ υπέγραψε μια συμφωνία με το Ισπανικό Ερευνητικό Κέντρο για την Ενέργεια, το Περιβάλλον και την Τεχνολογία με στόχο την προώθηση της έρευνας στον τομέα της ηλιακής τεχνολογίας. [12] Το Κατάρ στοχεύει στην εγκατάσταση περίπου 3.500 MW ηλεκτρικής ισχύος από ηλιακούς σταθμούς έως το 2030. [20]

Η Σαουδική Αραβία πρόσφατα ανακοίνωσε τα φιλόδοξα σχέδια της για επενδύσεις ύψους 109 δισεκατομμυρίων δολαρίων στην ηλιακή βιομηχανία με στόχο την κάλυψη του 30% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή

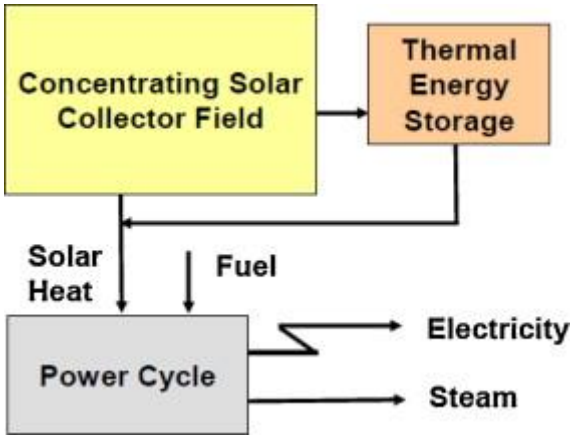
έως το 2032. Το πλάνο προβλέπει την κατασκευή ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 25.000 MW. [21]

Επιπλέον, το Μπαχρέιν και το Κουβέιτ προσανατολίζονται στη στήριξη της ηλιακής βιομηχανίας με ένα πλάνο για 5% συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας στην εθνική ηλεκτρική κατανάλωση. Τέλος, το Σουλτανάτο του Ομάν στοχεύει στην κάλυψη του 10% των ενεργειακών του αναγκών από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και κυρίως από την ηλιακή. [20]

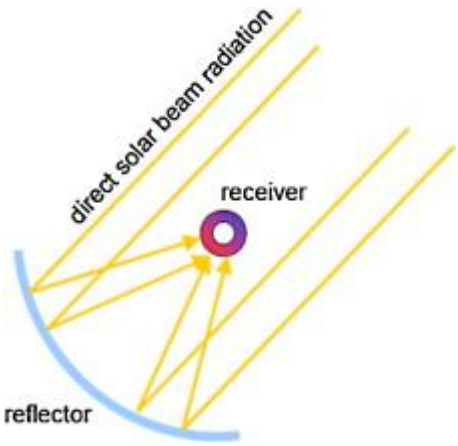
Κεφάλαιο 3

Κύριες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και περιβαλλοντική αποτίμηση

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]



Εικόνα 3.1: Διασύνδεση των επί μέρους τμημάτων ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. [22]

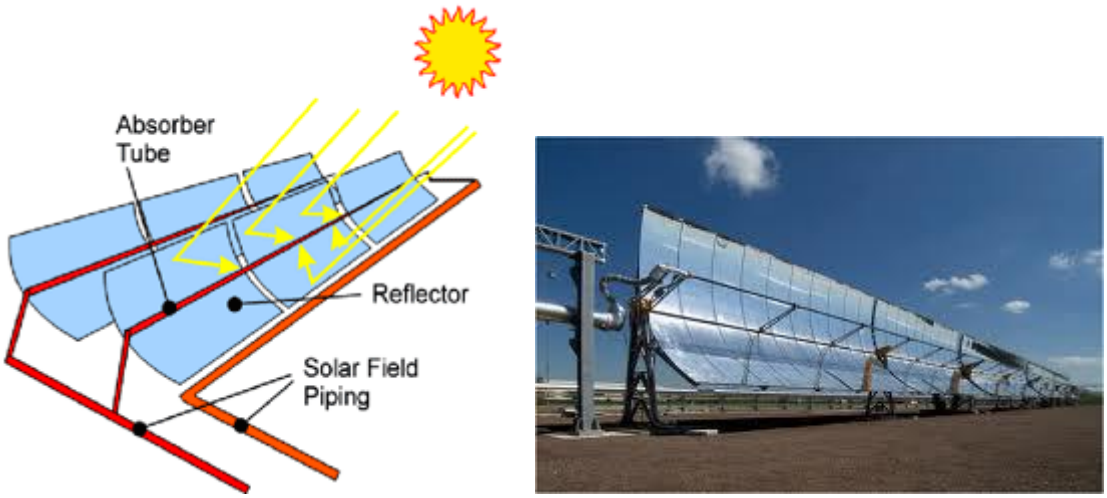


Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένα εστιακά σημεία όπου και αναπτύσσονται οι επιθυμητές υψηλές θερμοκρασίες (στη διπλανή εικόνα απεικονίζεται η συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από ένα συγκεντρωτικό κάτοπτρο, [22]). 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]

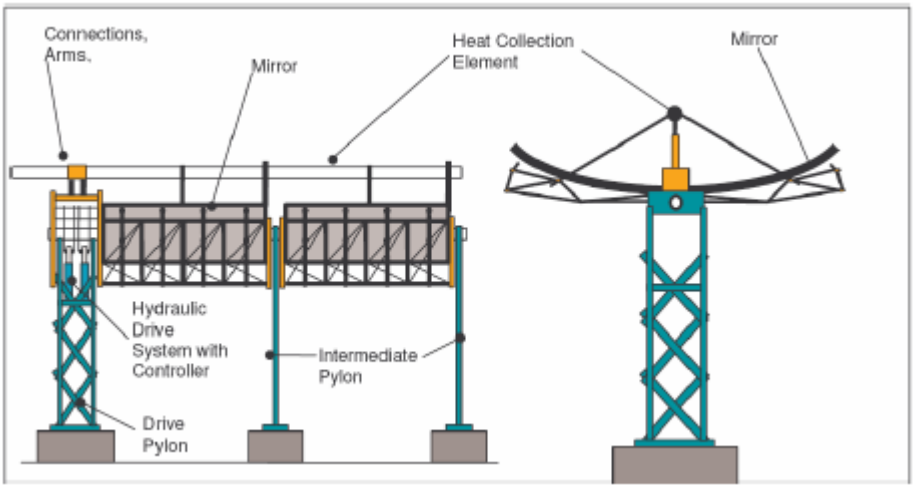
3.1 Τεχνολογία Παραβολικών Κατόπτρων

Πρόκειται για την πιο ώριμη και εμπορικά διαδεδομένη τεχνολογία ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, μιας και η πλειονότητα των εν λειτουργία σταθμών έχει υιοθετήσει την τεχνολογία των παραβολικών κατόπτρων.

Η συλλογή και η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιείται σε έναν υπαίθριο χώρο μεγάλης έκτασης που καλείται ηλιακό πεδίο και αποτελεί τον πυρήνα του ηλιοθερμικού σταθμού. Το ηλιακό πεδίο αποτελείται από σειρές κοίλων καθρεπτών, διατεταγμένες με προσανατολισμό Βορρά-Νότου, που περιστρέφονται ακολουθώντας την πορεία του ήλιου από Ανατολή προς Δύση. 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. Από την εστιακή ευθεία των κοίλων καθρεπτών διέρχεται σωλήνας που διαρρέεται από υγρό μέσο μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Fluid - HTF), συνήθως συνθετικό έλαιο, και απορροφά την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία προς παραγωγή θερμικής ενέργειας.

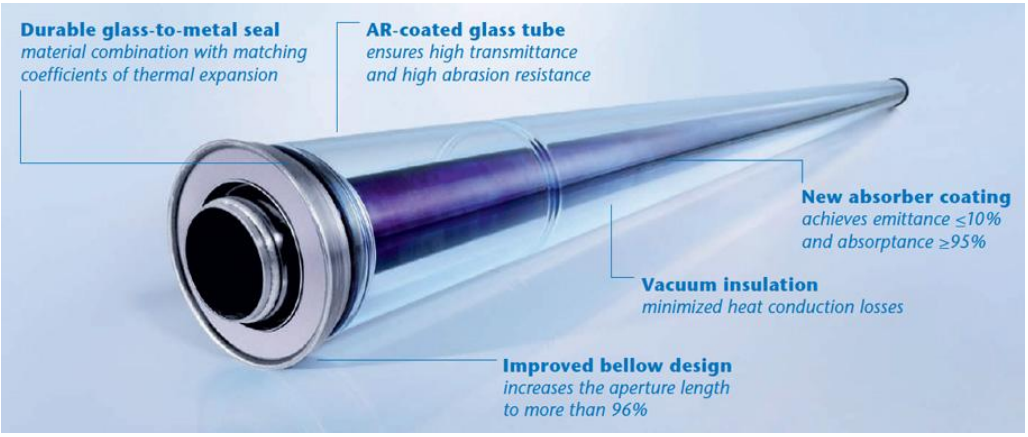


Εικόνα 3.2: Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας ηλιακού πεδίου με παραβολικά κάτοπτρα.
Πηγή: National Renewable Energy Laboratory (www.nrel.gov) (αριστερά) Archimede Solar Energy (archimedesolarenergy.it) (δεξιά)



Εικόνα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης ενός παραβολικού κατόπτρου. [5]

Οι σωλήνες απορρόφησης-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. [3]



Εικόνα 3.4: Ο σωλήνας απορρόφησης SCHOTT PTR 70 της εταιρείας SCHOTT Solar.
Πηγή: EXPO21XX www.expo21xx.com

Στους δέκτες αλλά και σε ένα γενικευμένο δίκτυο σωληνώσεων κυκλοφορεί ένα θερμαγωγό 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 ατμοστροβίλου. Το συνθετικό έλαιο, το οποίο χρησιμοποιείται ως πει το πλείστον ως υγρό μεταφοράς της θερμότητας, εισέρχεται συνήθως στο ηλιακό πεδίο με θερμοκρασία περί τους 290oC και εξέρχεται από αυτό σε θερμοκρασία περίπου 390oC. Στη συνέχεια οδηγείται, μέσω αντλιών, σε εναλλάκτες θερμότητας, αποδίδοντας την απορροφηθείσα ενέργεια σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Ο ατμός, πίεσης 90-100 bar και θερμοκρασίας 370-375 oC, εκτονώνεται σε στροβιλογεννήτρια 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. [4]

Εάν ο ηλιοθερμικός σταθμός διαθέτει μονάδα αποθήκευσης, τότε το συνθετικό έλαιο, μέσω εναλλακτών, μπορεί να αποδώσει την απορροφηθείσα θερμική ενέργεια σε μέσο αποθήκευσης, όπως το υγροποιημένο άλας.

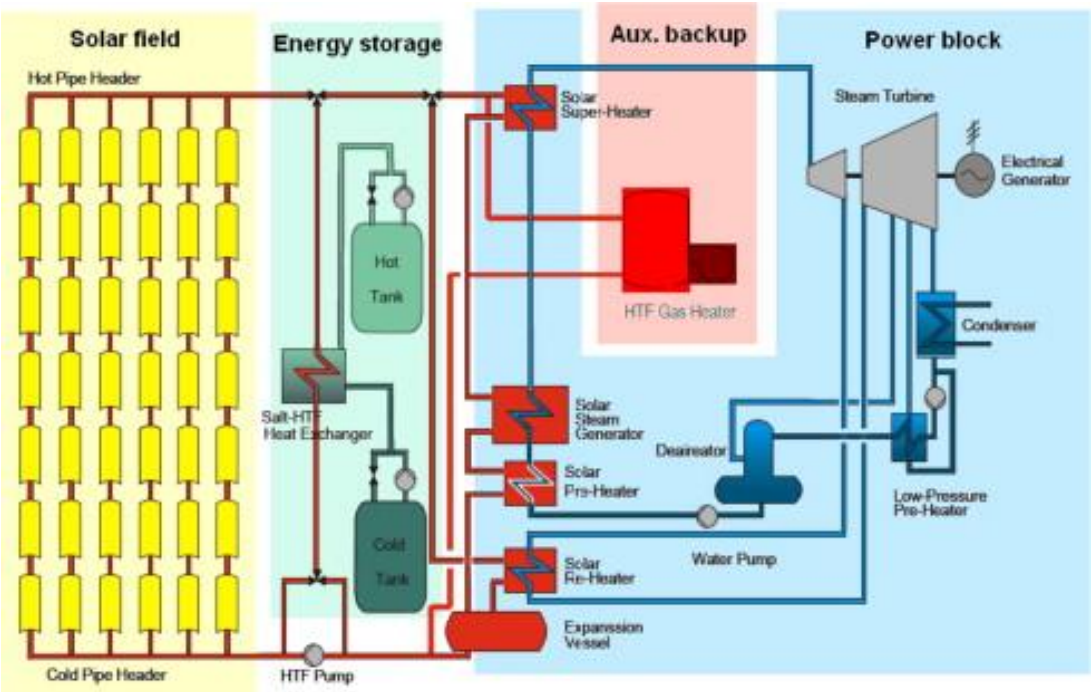
Στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων ως μέσο μεταφοράς θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνθετικό έλαιο, μείγμα νερού-ατμού, υγροποιημένο άλας κ.α. Μέχρι σήμερα στην πλειονότητα των περιπτώσεων χρησιμοποιείται κατάλληλο συνθετικό έλαιο με μεγάλη αγωγιμότητα της θερμότητας. Το συνθετικό έλαιο μπορεί να θερμανθεί ασφαλώς μέχρι τους 400oC. Σημειώνεται ότι, αντί συνθετικού ελαίου, έχει χρησιμοποιηθεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας και ο ατμός, κυρίως σε πειραματική λειτουργία. Το μείγμα νερού-ατμού περνώντας από το ηλιακό πεδίο γίνεται υπέρθερμος ατμός και ακολούθως οδηγείται κατευθείαν στον στρόβιλο χωρίς να παρεμβάλλονται εναλλάκτες θερμότητας. [4]

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. [5], [23]

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 αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου. 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], [6], [24]-[29]

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.



Εικόνα 3.5: Λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και βοηθητικό καυστήρα. [30]

Οι απαιτούμενες εκτάσεις γης για την εγκατάσταση των σταθμών παραβολικών κατόπτρων κυμαίνονται περίπου από 18-40 m^2/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. [26]

Η μεγάλη πλειοψηφία των ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν σήμερα, είναι σταθμοί παραβολικών κατόπτρων. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αυτού του είδους των σταθμών παγκοσμίως ανέρχεται σε περίπου 1,5 GW το έτος 2012. [31] 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.

Η πλειονότητα των εν λειτουργία ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής έχει υιοθετήσει την τεχνολογία των παραβολικών κατόπτρων για διάφορους λόγους. 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. [26]

Το πρώτο σύστημα αυτού του τύπου στην Ευρώπη είναι το Andasol Solar Power Station στην επαρχία της Granada, στην Ανδαλουσία της Ισπανίας. Αποτελείται από τρεις όμοιους σταθμούς μεγέθους 50 MW ο καθένας, με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας 7,5 ωρών σε μείγμα τηγμένων αλάτων. Η κατασκευή του Andasol 1 ολοκληρώθηκε το 2008, του Andasol 2 το 2009 και του Andasol 3 το 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. [24], [26], [31], [32]

Εικόνα 3.6: Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παραβολικών κατόπτρων Andasol 1 και 2 στην Ισπανία.

Πηγή: www.rechargenews.com

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. [26], [33], [34]

Αρκετοί σταθμοί βρίσκονται επίσης υπό κατασκευή, οι οποίοι θα υπερδιπλασιάσουν την παγκόσμια εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ από ηλιοθερμική τεχνολογία. Οι ΗΠΑ και η Ισπανία διατηρούν την πρωτοκαθεδρία στο χώρο.

Ο πρώτος ηλιοθερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου, βρίσκεται υπό κατασκευή στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία κατά το τέλος του 2012. Ο σταθμός παραβολικών κατόπτρων Shams με εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 100 MW θα αποτελεί το μεγαλύτερο μεμονωμένο ηλιοθερμικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στον κόσμο, με τον προϋπολογισμό του να

ανέρχεται στα 600 εκατομμύρια δολάρια. Βρίσκεται στην περιοχή Madinat Zayed στο Εμιράτο του Άμπου Ντάμπι, περίπου 120 χλμ. νοτιοδυτικά της πρωτεύουσας και καταλαμβάνει έκταση 2,5 τ.χλμ. Το ηλιακό του πεδίο αποτελείται από 768 συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων με συνολική επιφάνεια κατόπτρων 627.000 τ.μ. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις η συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του Shams 1 θα φτάνει τις 210 GWh ετησίως με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση 175.000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα ετησίως. Τον Οκτώβριο του 2010 αναφέρθηκε ότι λόγω της έντονης ατμοσφαιρικής σκόνης, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στους συλλέκτες του Shams 1 θα ήταν λιγότερη από την αναμενόμενη με αποτέλεσμα να απαιτηθούν επιπλέον ηλιακοί συλλέκτες για την παραγωγή της προβλεπόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Μετά την ολοκλήρωση του Shams1, αναμένεται να δρομολογηθεί η κατασκευή άλλων δύο παρόμοιων σταθμών, των Shams 2 και 3. [35], [36]

Εικόνα 3.7: Ο ηλιοθερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής Shams 1 υπό κατασκευή. [35]

Τα πλεονεκτήματα εγκατάστασης ενός σταθμού παραβολικών κατόπτρων είναι:

- Το μέγεθος των σταθμών αυτών είναι στην πλειονότητα των περιπτώσεων μεγαλύτερο των 40 MW, με τους περισσότερους εν λειτουργία σταθμούς να διαθέτουν εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 50 MW.
- Έχουν μεγάλο αριθμό ωρών εμπορικής λειτουργίας με παραγωγή περισσότερων των 12.000 GWh.

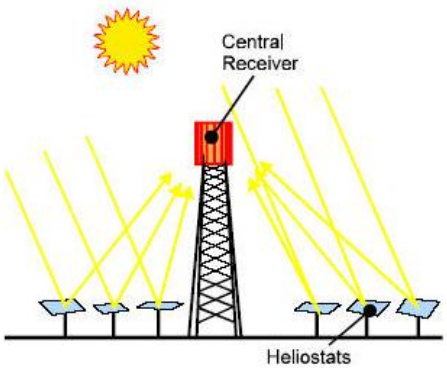
- Η θερμοκρασία λειτουργίας τους μπορεί να προσεγγίσει τους 500°C (οι σταθμοί που είναι σε εμπορική λειτουργία λειτουργούν σε θερμοκρασίες τάξεως 400°C).
- Αποδεδειγμένη ετήσια απόδοση τάξεως 14%-16% (καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς ηλιακή ενέργεια).
- Εμφανίζουν ικανοποιητικό βαθμό χρήσης γης, εν συγκρίσει με τις άλλες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής.
- Δίνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας.
- Υπάρχουν αποδεδειγμένα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας. [5]

Τα μειονεκτήματα ενός σταθμού παραβολικών κατόπτρων είναι:

- Η μέχρι σήμερα εμπορική λειτουργία σταθμών που χρησιμοποιούν συνθετικό έλαιο με θερμοκρασία που αγγίζει τους 400 ^{o}C οδηγεί σε παραγωγή ατμού «μέτριας» ποιότητας.
- Το υψηλό κόστος εγκατάστασης. [5]

3.2 Τεχνολογία Ηλιακού Πύργου ή Κεντρικού Δέκτη

Στους ηλιοθερμικούς σταθμούς τεχνολογίας ηλιακού πύργου, ένας κεντρικός δέκτης τοποθετείται στην κορυφή ενός πύργου, που μπορεί να προσεγγίσει ακόμα και τα 200 m, ανάλογα με το μέγεθος του σταθμού. Γύρω από τον πύργο εκτείνονται μεγάλα επίπεδα κάτοπτρα (ηλιοστάτες), με επιφάνεια τάξεως ακόμη και 100 m^2, που ανακλούν τις ακτίνες του ήλιου και τις συγκεντρώνουν στον κεντρικό δέκτη. Ο κάθε ηλιοστάτης είναι εφοδιασμένος με σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου δύο αξόνων.

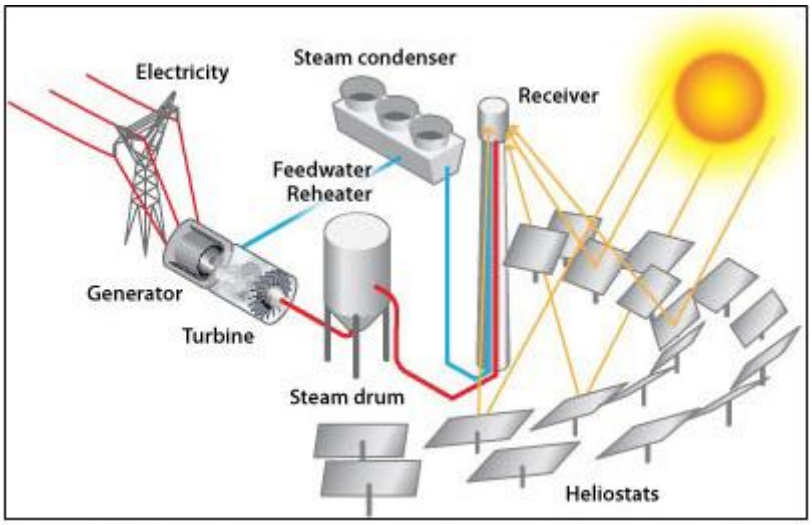


Εικόνα 3.8: Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας ηλιακού πεδίου με ηλιοστάτες.
Πηγή: www.solarpaces.org (αριστερά), solareis.anl.gov (δεξιά)

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 στο 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.

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.



Εικόνα 3.9: Γενικό λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού κεντρικού δέκτη

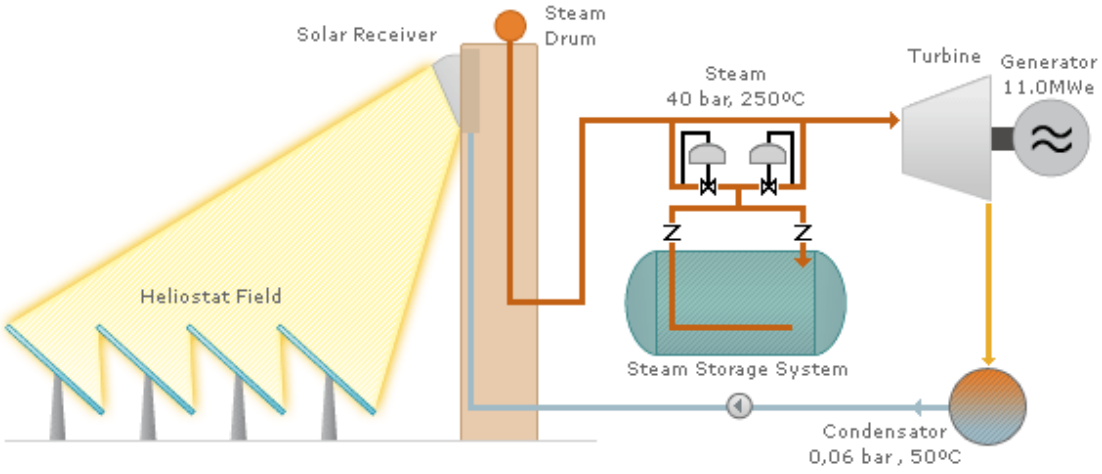
Πηγή: webservices.itcs.umich.edu

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. [37]

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.



Εικόνα 3.10: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού τεχνολογίας πύργου PS10 (μείγμα νερού-ατμού ως μέσο μεταφοράς θερμότητας)

Πηγή: www.technolister.com

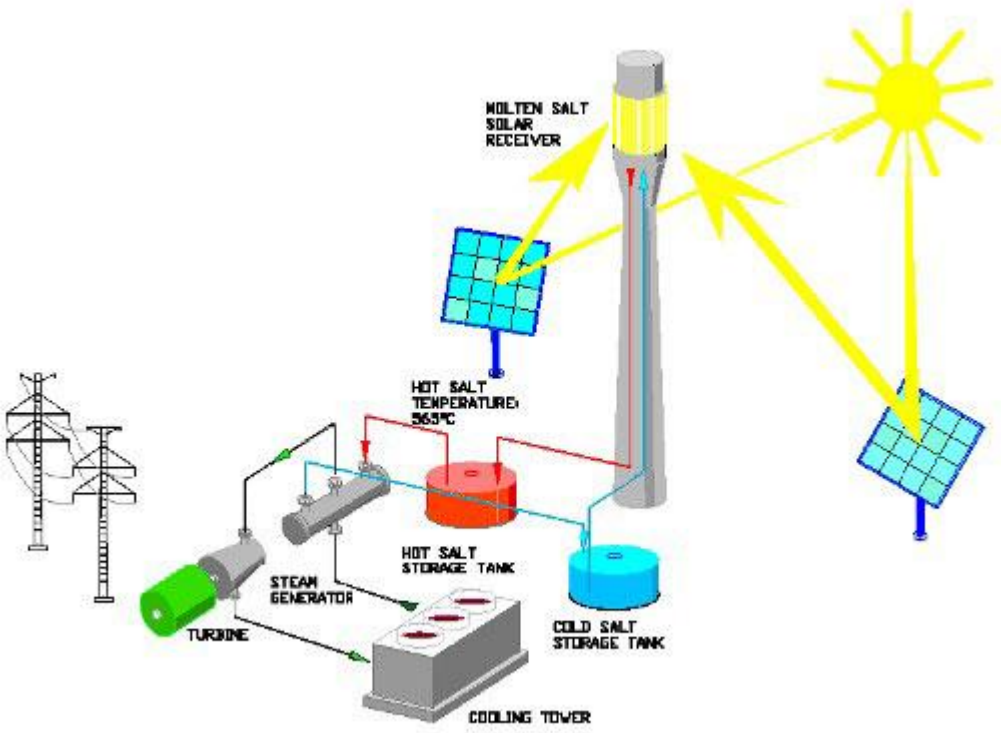
Το PS10 έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης του πλεονάζοντος ατμού σε δεξαμενές πεπιεσμένου ατμού για επιπλέον λειτουργία 1-2 ωρών (όχι σε πλήρες φορτίο), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο διαχειριστή του σταθμού να διατηρεί σταθερή την ηλεκτρική παραγωγή του ακόμη και σε περιόδους συννεφιάς, αλλά και να προστατεύει 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], [6], [25], [26], [29], [37]-[39]

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 ^{o}C, οδηγείται σε εναλλάκτες θερμότητας, αποδίδοντας τη θερμική ενέργεια σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή κορεσμένου ατμού υψηλής ποιότητας. [26], [29], [37], [40]

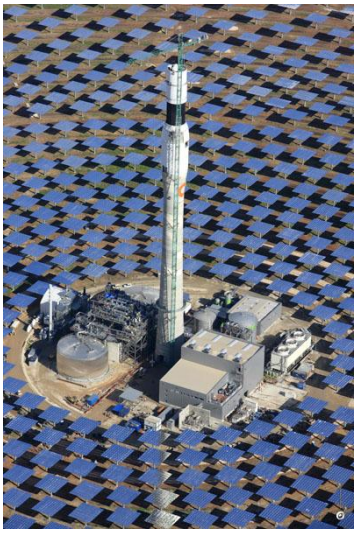


Εικόνα 3.11: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής κεντρικού δέκτη Gemasolar.

Πηγή: solarserver.com

Ο πρώτος εμπορικός ηλιοθερμικός σταθμός αυτής της τεχνολογίας παγκοσμίως είναι ο σταθμός PS10 ο οποίος φαίνεται στη διπλανή εικόνα (Πηγή: www.solarpaces.org). 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%. [26], [41], [42]

Ένας νέος καινοτόμος σταθμός ηλιακού πύργου βρίσκεται σε λειτουργία από το Μάιο του 2011 στην τοποθεσία Fuentes de Andalucia κοντά στη Σεβίλλη της Ισπανίας. Πρόκειται για το σταθμό Gemasolar (Πηγή: www.giann.net) 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. [26], [31], [33], [43]



Τα πλεονεκτήματα ενός ηλιοθερμικού σταθμού τύπου πύργου είναι:

- Έχει εκτιμηθεί πειραματικά ότι είναι δυνατόν να επιτευχθούν θερμοκρασίες τάξεως 1000 oC (έχει αποδειχτεί ότι μπορούν να προσεγγίσουν τους 565 oC).
- Είναι δυνατή η αποθήκευση ενέργειας σε υψηλές τιμές θερμοκρασιών.
- Είναι δυνατή η υβριδική λειτουργία του σταθμού με χρήση συμβατικού λέβητα.

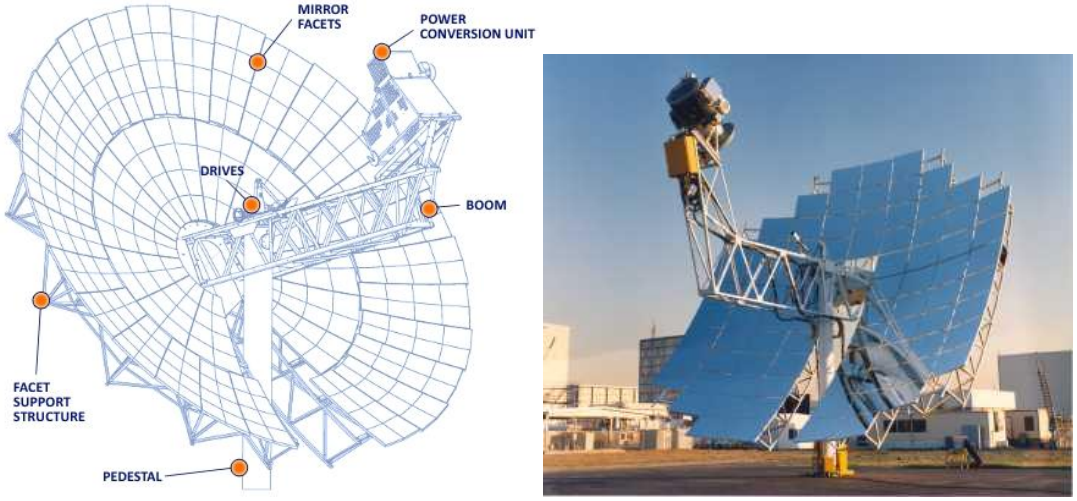
Αντίθετα, το κύριο μειονέκτημα των σταθμών τεχνολογίας πύργου είναι ότι τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας τους δεν είναι επιβεβαιωμένα από τους σε εμπορική λειτουργία σταθμούς. [3], [6]

Προς το παρόν η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς των ηλιοθερμικών σταθμών κεντρικού δέκτη ανέρχεται σε περίπου 50 MW. [31] Όμως οι προοπτικές που παρουσιάζει η εν λόγω τεχνολογία είναι μεγάλες και ενδεικτικό αυτού είναι το γεγονός ότι βρίσκονται υπό κατασκευή δύο πολύ μεγάλα ηλιακά πάρκα με τεχνολογία ηλιακού πύργου στις ΗΠΑ. Το ηλιοθερμικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής Ivanpah Solar Electric Generating System αποτελείται από τρεις ηλιοθερμικούς σταθμούς κεντρικού δέκτη με συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 392 MW. Το έργο Ivanpah βρίσκεται στην έρημο Mojave της Καλιφόρνια και η κατασκευή του αναμένεται να ολοκληρωθεί εντός του 2013. Ο σταθμός, το συνολικό κόστος του οποίου αναμένεται να φτάσει τα 2,18 δισεκατομμύρια δολάρια, αναπτύσσεται από τις εταιρείες BrightSource Energy και Bechtel ενώ στο πρότζεκτ συμμετέχουν μεγάλες εταιρείες όπως η NRG Energy και η Google. [44] Το έργο Crescent Dunes Solar Energy Project, το οποίο βρίσκεται κοντά στην πόλη Tonopah της Νεβάδα, αναμένεται να ξεκινήσει τη λειτουργία του στα τέλη του 2013. Περιλαμβάνει 17.500

ηλιοστάτες οι οποίοι συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν ηλιακό πύργο ύψους 200 μ. για την παραγωγή 110 MW ηλεκτρικής ισχύος. [45]

3.3 Τεχνολογία Παραβολικών Δίσκων

Η τεχνολογία των παραβολικών δίσκων με μηχανή Strirling περιλαμβάνει μία μεγάλη δισκοειδή επιφάνεια καθρεπτών που στηρίζονται σε μεταλλική βάση με δυνατότητα κίνησης σε σύστημα δύο αξόνων, ακολουθώντας τον ήλιο από την ανατολή μέχρι τη δύση του. Οι ανακλώμενες ακτίνες οδηγούνται σε μηχανή-γεννήτρια τύπου Stirling που βρίσκεται στο κέντρο του καθρέπτη.



Εικόνα 3.12: Τεχνολογία παραβολικών δίσκων.
Πηγή: diygreenguides.com (αριστερά) και voxsolaris.com (δεξιά)

Η ηλιακή ακτινοβολία που συγκεντρώνεται στο δέκτη/γεννήτρια θερμαίνει ένα υγρό ή αέριο στους 750oC περίπου. Στη συνέχεια αυτό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μία γεννήτρια τύπου Stirling που είναι σε επαφή με το συλλέκτη.

Αντί για μηχανή τύπου Striling, είναι επίσης δυνατή η εγκατάσταση ενός μικρού αεριοστροβίλου. Οι μικροί αεροστρόβιλοι μπορούν να παράγουν μεγαλύτερη ισχύ αλλά είναι λιγότερο αποδοτικοί από τις μηχανές Stirling. [5]

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.

Το Μάρτιο του 2010 τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το Maricopa Solar, το πρώτο και μοναδικό έως τώρα παγκοσμίως εμπορικό ηλιοθερμικό πάρκο με παραβολικούς δίσκους στην Αριζόνα των ΗΠΑ από την εταιρεία Stirling Energy Systems. Έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 1,5MW και αποτελείται από 60 παραβολικούς δίσκους τύπου SunCatcher. [46], [31]

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.

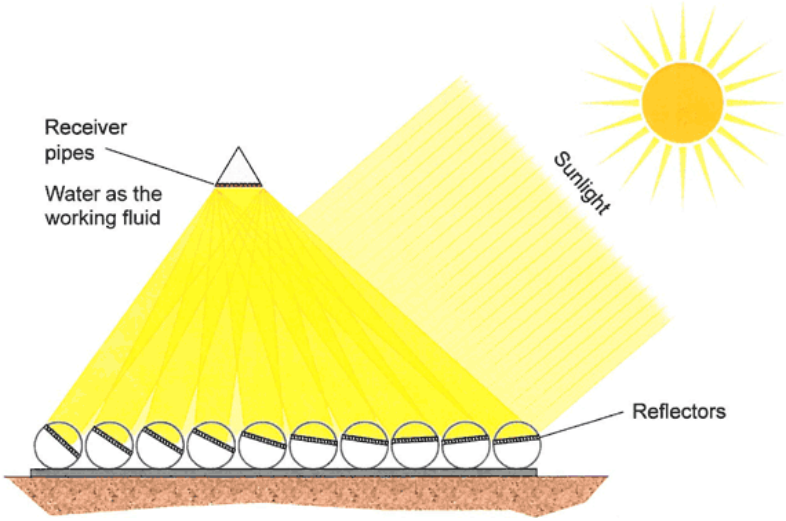
Μειονεκτήματα της τεχνολογία αυτής είναι ότι:

- 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. [5], [47]

Οι 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.

3.4 Τεχνολογία Κατόπτρων Fresnel

Η τεχνολογία καθρεπτών Fresnel μοιάζει με αυτή των παραβολικών κατόπτρων, αφού αποτελείται από καθρέπτες που ακολουθούν τον ήλιο με σύστημα κίνησης ενός άξονα και συγκεντρώνουν την ανακλώμενη ακτινοβολία σε σωλήνες που διαρρέονται από το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνολογιών είναι ότι ο συλλέκτης είναι στερεωμένος πάνω από το επίπεδο των καθρεπτών και δεν κινείται μαζί με αυτούς κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 3.13: Σχηματικό διάγραμμα ηλιακού πεδίου με επίπεδα κάτοπτρα Fresnel.
Πηγή: ausra.com

Η οπτική απόδοση του συστήματος αυτού είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των παραβολικών κατόπτρων, αλλά το μειωμένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας τους εν συγκρίσει με τις άλλες τεχνολογίες ηλιοθερμικών συστημάτων αφήνει υποσχέσεις περαιτέρω ανάπτυξης.

Μια διαδομένη εφαρμογή είναι με χρήση μείγματος νερού-ατμού ως μέσου μεταφοράς θερμότητας. Το μέσο αυτό θερμαίνεται σε πίεση περί τα 50 bar προς παραγωγή κορεσμένου ατμού θερμοκρασίας τάξεως 280oC, που ακολούθως οδηγείται σε στροβιλογεννήτρια. [3], [6], [25], [47], [48]

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. [5]

Η τεχνολογία των κατόπτρων Fresnel προσελκύει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον και φαίνεται ότι εκμεταλλευόμενη τα πλεονεκτήματά της μπορεί να επιβιώσει στο σκληρό ανταγωνισμό με τις δύο κυρίαρχες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς παγκοσμίως ανέρχεται σε περίπου 40 MW. Ο πρώτος εμπορικός ηλιοθερμικός σταθμός που τέθηκε σε λειτουργία στην Καλιφόρνια μετά από το SEGS είναι ο σταθμός Kimberlina Solar Thermal Energy Plant, τεχνολογίας κατόπτρων Fresnel, μεγέθους 5 MW. [49], [50] Το Φεβρουάριο του 2012 τέθηκε σε λειτουργία ο μεγαλύτερος σταθμός αυτής της τεχνολογίας παγκοσμίως στη Murcia της Ισπανίας. Ο σταθμός Puerto Errado 2, με εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 30MW, αναμένεται να παράγει 49 GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως. Μαζί με τον προϋπάρχοντα σταθμό Puerto Errado 1, ο οποίος παράγει 1,4 MW ηλεκτρικής ισχύος, καταλαμβάνουν συνολική έκταση 750 στρεμμάτων. [48]

Εικόνα 3.14: Άποψη του ηλιοθερμικού σταθμού Puerto Errado 2.
Πηγή: www.puertoerrado2.com

3.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ηλιοθερμικών σταθμών

Όλες οι τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής, συμπεριλαμβανομένης και της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ έχουν κάποιες αρνητικές επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και την κοινωνία. Η κατασκευή και λειτουργία των ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να οδηγήσει σε μια πληθώρα περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων. Αυτές πρέπει κάθε φορά να προσδιορίζονται, να αξιολογούνται, να παρακολουθούνται και να μετριάζονται. Ο προσεκτικός σχεδιασμός των σταθμών θα καταστήσει τις συνέπειες αυτές διαχειρίσιμες. [51], [16]

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

1. Προβλήματα με την έλλειψη νερού

Η λειτουργία των ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί μεγάλες ποσότητες άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και ως εκ τούτου, οι ιδανικές περιοχές για να κατασκευστούν είναι οι άνυδρες, άγονες ή ημι-άγονες περιοχές, όπως είναι οι περιοχές των χωρών του Κόλπου που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Ταυτόχρονα, η λειτουργία των ηλιοθερμικών σταθμών που χρησιμοποιούν υδρόψυκτο σύστημα ψύξης στο τελικό στάδιο του θερμικού κύκλου απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού.

Οι απαιτήσεις σε νερό για έναν ηλιοθερμικό σταθμό δε διαφέρουν από τις αντίστοιχες απαιτήσεις των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με εξαίρεση τις απαιτήσεις για τον καθαρισμό, θέμα που χρήζει προσεκτικής εξέτασης λόγω της χωροθέτησης των εν λόγω σταθμών σε άγονες περιοχές. Συνεπώς, ένα από τα βασικά ζητήματα που εξετάζεται κατά τη μελέτη εγκατάστασης ενός ηλιοθερμικού σταθμού είναι η διαθεσιμότητα του νερού στην περιοχή, διότι αυτό μπορεί να εκλείπει ή εάν υπάρχει να είναι ιδιαίτερα ακριβό λόγω της μικρής διαθεσιμότητάς του.

Στις χώρες του Κόλπου, η άντληση των ανανεώσιμων υδάτινων πόρων αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό μεγαλύτερο από 70%, δηλαδή βρίσκονται κοντά στην εξάντλησή τους. Η άντληση νερού για τη γεωργία στην περιοχή ήταν 188,3 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα το 2002, ενώ το αντίστοιχο ποσό για το βιομηχανικό τομέα το ίδιο έτος στην περιοχή ήταν μόνο 7,9 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα.

Ένας τυπικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων ισχύος 50 MW χρησιμοποιεί περίπου 0,4-0,5 εκατομμύρια m^3 νερού ανά έτος για την ψύξη του. Η ποσότητα αυτή είναι περίπου ίδια με αυτή που θα χρειαζόταν για την άρδευση μιας γεωργικής καλλιέργειας με έκταση αντίστοιχη με εκείνη που κατέχει η εγκατάσταση του ηλιοθερμικού σταθμού σε μια περιοχή με ημίξηρο κλίμα.

Η προοπτική της άντλησης μεγάλης ποσότητας γλυκού νερού για το σύστημα ψύξης των σταθμών δεν είναι ευνοϊκή, ιδιαίτερα όταν η ζήτηση νερού στην περιοχή του Κόλπου αναμένεται, με μια συντηρητική προσέγγιση, σχεδόν να διπλασιαστεί κατά την περίοδο 2000-2050. Το νερό χρησιμοποιείται επίσης για τον καθαρισμό των κατόπτρων, για τη διατήρηση της υψηλής ανακλαστικότητα τους, ωστόσο το νερό που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό είναι τυπικά εκατό φορές λιγότερο από εκείνο που χρησιμοποιείται για την ψύξη. Όμως, σε περιοχές της ερήμου, οι απαιτήσεις σε νερό για τον καθαρισμό μπορεί να είναι υψηλότερες, καθώς οι θύελλες σκόνης μπορεί να απαιτήσουν πιο συχνό καθαρισμό και η σχετική κατανάλωση νερού είναι αρκετά υψηλότερη σε σύγκριση με τις βροχοπτώσεις.

Εάν οι απαιτήσεις νερού δεν μπορέσουν να ικανοποιηθούν επιτυχώς στην περιοχή, τότε θα πρέπει να προτιμηθεί η εφαρμογή άλλων τεχνολογιών με μικρότερες απαιτήσεις.

Η χρήση του νερού μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας αερόψυκτο σύστημα ψύξης. Μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε από το αμερικανικό Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (US National Renewable Energy Laboratory) δείχνει ότι η μετάβαση στο αερόψυκτο σύστημα για μια εγκατάσταση παραβολικών κατόπτρων ισχύος 100 MW μπορεί να μειώσει τις απαιτήσεις σε νερό από 3,6 l/kWh σε 0,25 l/kWh. Η πρόσθετη εξοικονόμηση νερού που παράγεται από τα υβριδικά και αερόψυκτα συστήματα ψύξης υπερκαλύπτουν τη μικρή μείωση απόδοσης και το πρόσθετο κόστος που συνδέονται με αυτή την τεχνολογία. Παρόλα αυτά, η απόφαση για την επιλογή τεχνολογίας ψύξης πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη το κόστος και την τοπική διαθεσιμότητα νερού για κάθε περίπτωση.

Μια άλλη λύση για την κάλυψη των απαιτήσεων σε νερό είναι η υδροδότηση του συστήματος ψύξης από παραπλήσια μονάδα αφαλάτωσης. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί μπορούν να συνδυαστούν με τέτοιες μονάδες παρέχοντάς τους την απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία τους και χρησιμοποιώντας μέρος της παραγωγής τους για την ψύξη τους.

Ενώ η περιοχή των χωρών του Κόλπου αντιμετωπίζει σημαντικό πρόβλημα λειψυδρίας, οι τεχνικές αφαλάτωσης έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα στην περιοχή. Το εγκατεστημένο δυναμικό αφαλάτωσης αναμένεται να αυξηθεί, σχεδόν να διπλασιαστεί σε σχέση με το 2006. Δεδομένων των αυξανόμενων απαιτήσεων νερού σε ολόκληρη την περιοχή, η αύξηση των αντίστοιχων εγκαταστάσεων αναμένεται να συνεχιστεί μέχρι το 2025.

Ωστόσο το να φτάσουμε σε επίπεδα κατάλληλα για κατανάλωση από τον άνθρωπο ή για βιομηχανικούς σκοπούς είναι μια ιδιαίτερα ενεργοβόρα διαδικασία και για αυτό το λόγο πραγματοποιείται μόνο σε περιοχές με σοβαρό πρόβλημα έλλειψης νερού.

Ταυτόχρονα, η διαδικασία της αφαλάτωσης συνδέεται με ορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις:

- Η πρόσληψη θαλασσινού νερού για αφαλάτωση και για το σύστημα ψύξης μπορεί να προκαλέσει πρόσκρουση και παράσυρση οργανισμών,
- εκπομπές αέριων ρύπων και διοξειδίου του άνθρακα προκαλούνται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας που απαιτούνται για την τροφοδότηση των μονάδων αφαλάτωσης (εφόσον αυτές δεν τροφοδοτούνται από σταθμούς ΑΠΕ),
- χημικά πρόσθετα και βιοκτόνα που χρησιμοποιούνται για την αποφυγή ρύπανσης, αφρισμού και διάβρωσης των μονάδων αφαλάτωσης μπορούν τελικά να εμφανίζονται στην άλμη,
- απόρριψη θερμής άλμης με υψηλή συγκέντρωση αλάτων στη θάλασσα μπορεί να επηρεάσει τους θαλλάσιους οργανισμούς.

Τέλος, υπάρχουν κάποιες άλλες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών που έχουν εγγενώς χαμηλές απαιτήσεις σε γλυκό νερό, όπως σταθμοί ηλιακού πύργου με αεριοστρόβιλο και οι παραβολικοί δίσκοι με μηχανές Stirling. [16], [19], [52], [53]

2. Χρήση γης και οπτικές επιπτώσεις

Η χρήση γης αναφέρεται στην περιοχή που άμεσα καταλαμβάνεται για το σταθμό. Για έναν ηλιοθερμικό σταθμό, το ηλιακό πεδίο κυριαρχεί. Συγκριτικά αναφέρουμε ότι για τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνεται και η περιοχή για την εξόρυξη του καυσίμου, ενώ για τους σταθμούς χρήσης βιομάζας και οι φυτείες που θα χρησιμοποιηθούν για τη βιομάζα. Η χρήση γης εκφράζεται σε σχέση με την ενέργεια που παράγεται ετησίως από κάθε σταθμό, και ως εκ τούτου εκφράζεται σε $m^2/(MWh/y)$.

Η "οπτική επίπτωση" δίνει την έκταση κατά την οποία μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής διαταράσσει την όψη, διά την ενέργεια που παράγεται ετησίως από τη μονάδα (και ως εκ τούτου, εκφράζεται επίσης σε μονάδες $m^2/(MWh/y)$). Η οπτική όχληση είναι περισσότερο αισθητή για τους ηλιοθερμικούς σταθμούς με ηλιακό πύργο, λόγω της ύπαρξης πολύ φωτεινών σημείων σε περιοχές υπαίθρου. Ωστόσο, λόγω των σύγχρονων κοινωνικών απόψεων αυτές δεν απορρίπτονται από τον τοπικό πληθυσμό, καθώς θεωρούνται τεχνική καινοτομία και σημάδι προόδου.

Ένα πλεονέκτημα των ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής είναι το γεγονός ότι κατασκευάζονται σε περιοχές περιορισμένης αισθητικής αξίας. Η χρήση μιας έκτασης ερήμου για την κατασκευή των σταθμών θεωρείται προτιμότερη επιλογή από από τη χρήση μιας γεωργικής καλλιεργίσιμης έκτασης για την παραγωγή ενέργειας από βιομάζα. Επιπλέον, οι περιοχές που είναι διαθέσιμες παγκοσμίως για

την ανάπτυξη της ηλιοθερμικής τεχνολογίας υπερβαίνουν κατά πολύ τις παρούσες ανάγκες.

Παρόλα αυτά και οι άγονες περιοχές έχουν περιβαλλοντική αξία και πιθανώς περιέχουν βιότοπους ή είδη που απειλούνται. Ταυτόχρονα, το κλίμα της ερήμου καθιστά μακροχρόνια για την κοινότητα του βιότοπου την ανάκαμψη από τις συνέπειες μιας ενδεχόμενης διαταραχής. Επιπλέον, η μαζική εγκατάσταση ηλιακών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής σε μια περιοχή μπορεί να επηρεάσει τους ζωικούς ή φυτικούς πληθυσμούς αποκόπτοντας τους δρόμους επικοινωνίας και απομονώνοντας μερικώς τους πληθυσμούς μεταξύ τους. Αυτό, βέβαια, δεν αφορά αποκλειστικά τους ηλιοθερμικούς σταθμούς, ωστόσο απαιτείται κάποια προσοχή. [53]

Γενικά, η προσεκτική αξιολόγηση εναλλακτικών τοποθεσιών, η αξιολόγηση των σχετικών επιπτώσεων των υποδομών (π.χ. των γραμμών μεταφοράς), η αποφυγή των χώρων υψηλής αισθητικής αξίας και η διαβούλευση με τις τοπικές κοινότητες θεωρούνται απαραίτητα κατά τη μελέτη σχεδίασης ενός σταθμού προς αποφυγή των προαναφερθέντων δυσάρεστων επιπτώσεων. [52]

3. *Χρήση ενέργειας και υλικών*

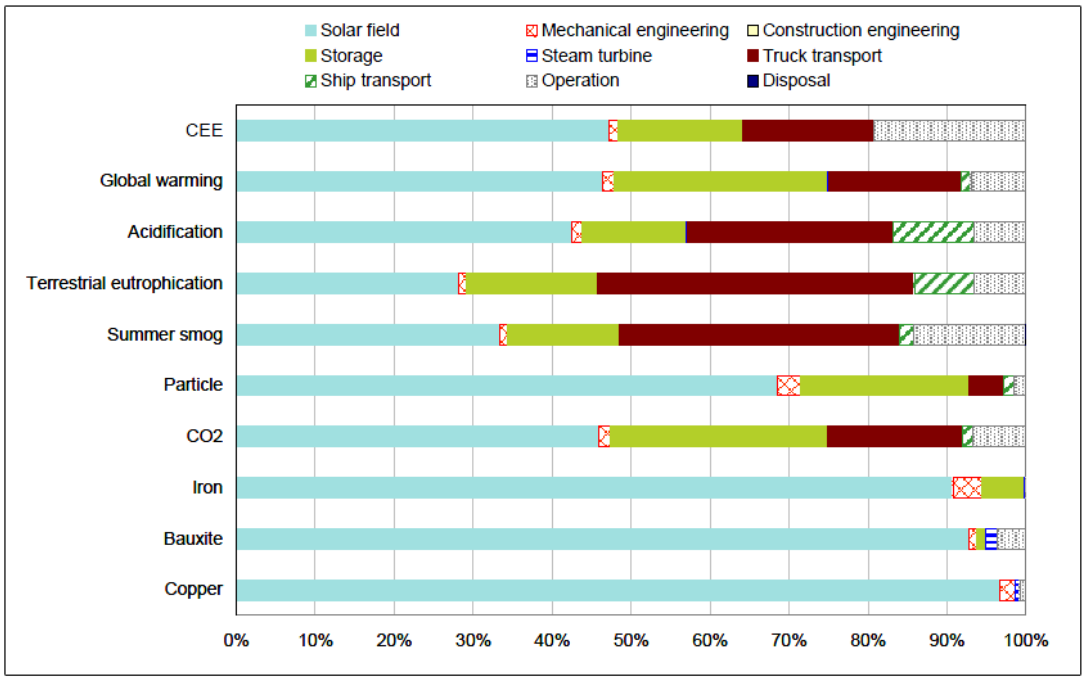
Για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής χρήσιμη είναι η σύγκριση του ενεργειακού ισοζυγίου και της χρήσης υλικών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους σε σχέση με άλλες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής. Μια αξιολόγηση κύκλου ζωής του ηλιοθερμικού σταθμού δείχνει ότι η αθροιστική (μη ανανεώσιμη) πρωτογενής ενέργεια που χρησιμοποιείται στην κατασκευή και τη λειτουργία του σταθμού κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής του μπορεί να επιστραφεί ως ανανεώσιμη ενέργεια σε λιγότερο από ένα έτος υποθέτοντας χρόνο ζωής ίσο με 30 χρόνια. Έτσι προκύπτει τιμή ενεργειακής απόδοση της επένδυσης (EROI) περίπου ίση με 30.

Η αθροιστική (μη ανανεώσιμη) πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλιοθερμικού σταθμού είναι συγκρίσιμη με εκείνη μέσω αιολικής ενέργειας και πολύ μικρότερου μεγέθους από εκείνη μέσω καύσης ορυκτών καυσίμων σε συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. [53]

Στους ηλιοθερμικούς σταθμούς χρησιμοποιείται μεγάλη ποσότητα υλικού σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται είναι συνηθισμένα υλικά όπως χάλυβας, γυαλί και σκυρόδεμα, των οποίων το ποσοστό ανακύκλωσης είναι υψηλό: τυπικά μπορεί να είναι πάνω από 95% για το γυαλί, το ατσάλι και άλλα μέταλλα. Υλικά που δεν μπορούν να ανακυκλωθούν είναι κυρίως αδρανή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά πλήρωσης (π.χ. κατασκευή

δρόμων) ή μπορούν να ταφούν στο έδαφος με ασφάλεια και συγκεκριμένες προδιαγραφές.

Οι αρνητικές επιπτώσεις και η κατανάλωση πόρων προκαλούνται κυρίως από τη διαδικασία παραγωγής του ηλιακού πεδίου, το οποίο απαιτεί μια σημαντική δαπάνη υλικού λόγω του μεγέθους του. Συνολικά, το 91% του σιδήρου που χρησιμοποιείται απαιτείται για την παραγωγή των δοκών χάλυβα για το ηλιακό πεδίο και το 97% του χαλκού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των αντλιών και των γραμμών ελέγχου. Περίπου 93% του βωξίτη προορίζεται για το κράμα χάλυβα υψηλής ποιότητας, το οποίο ως επί το πλείστον απαιτείται για τον σωλήνα απορρόφησης. Οι δαπάνες υλικού για τα υπόλοιπα συστατικά της εγκατάστασης είναι χαμηλές σε σύγκριση με αυτές για το ηλιακό πεδίο (Εικόνα 3.15). [51]



Εικόνα 3.15: Επιπτώσεις και κατανάλωση πόρων για κάθε τμήμα του σταθμού και φάσεις κύκλου ζωής του σταθμού αντίστοιχα (CEE cumulated energy expenditure). [51]

Υπάρχουν μερικές τοξικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στους εν λόγω σταθμούς. Το συνθετικό οργανικό ρευστό μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται κατά κόρον στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων, ένα μίγμα διφαινυλοξειδίου και διφαινυλίου, είναι η πιο σημαντική. Εξαιτίας αυτών μπορεί να προκληθεί διαρροή και ανάφλεξη, να μολυνθεί το έδαφος και να δημιουργηθούν περιβαλλοντικά προβλήματα. Για αυτό και πρέπει να αντιμετωπίζονται ως επικίνδυνα απόβλητα. Ωστόσο οι διαρροές του συνθετικού ελαίου καθώς και οσμές που έχουν παρατηρηθεί είναι προβλήματα που έχουν καταστεί διαχειρίσιμα. Οι διαρροές ελέγχονται από νέα στοιχεία διασύνδεσης ενώ το μολυσμένο έδαφος μπορεί να ανακτηθεί με βακτηριολογική απολύμανση.

Για αυτούς τους λόγους, ένας από τους στόχους της τρέχουσας ερευνητικής δραστηριότητας είναι η αντικατάσταση του τοξικού ρευστού μεταφοράς θερμότητας με νερό (σταθμοί άμεσης παραγωγής ατμού-direct steam generation) ή μίγμα τηγμένων αλάτων. Τα τελευταία έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να θερμανθούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, δίνοντας καλύτερη απόδοση και μειωμένες ειδικές εκπομπές. [16], [53]

4. *Εκπομπές*

Δεδομένου ότι οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου και δε μολύνουν τον αέρα κατά τη λειτουργία τους, τα πρωταρχικά ζητήματα σχετικά με τις επιπτώσεις στο περιβάλλλον , την υγεία και την ασφάλεια αφορούν τον τρόπο που έχουν κατασκευαστεί, εγκατασταθεί και πώς τελικά γίνεται η διάθεση των αποβλήτων. Για την κατασκευή και την εγκατάσταση των εξαρτημάτων των σταθμών απαιτείται ενέργεια και τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό θα δημιουργήσουν εκπομπές. Έτσι, ένα σημαντικό ερώτημα είναι ποια είναι η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή της εν λόγω ενέργειας συγκριτικά με την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων σε συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και αυτό ποικίλλει ανάλογα με την τεχνολογία και το κλίμα, το ενεργειακό ισοζύγιο είναι γενικά ευνοϊκό για τις τεχνολογίες ηλιακών συστημάτων όπου αυτά είναι οικονομικά αποδοτικά, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται με τις τεχνολογίες νέας γενιάς. [16]

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συνδέονται στενά με την αθροιστική (μη ανανεώσιμη) κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τους ηλιοθερμικούς σταθμούς εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 15-20 γραμμαρίων CO_2-equivalent/kWh, πολύ χαμηλότερες από τις εκπομπές CO_2 που προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων στους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που είναι 400-1000 g/kWh.

Χρησιμοποιώντας μίγμα τηγμένων αλάτων ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας και/ή μέσο αποθήκευσης δημιουργούνται εκπομπές κύκλου ζωής οξειδίου του αζώτου (N_2O). Παρά το γεγονός ότι τα ποσά είναι περίπου 500-1000 φορές μικρότερα από αυτά των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα, δεν είναι αμελητέα καθώς το N_2O είναι περίπου 300 φορές ισχυρότερο από το CO_2 ως αέριο του θερμοκηπίου. [53]

Επίσης, η κατασκευή του συστήματος θερμικής αποθήκευσης, η μεταφορά των υλικών και η λειτουργία του κύκλου ισχύος δίπλα στο ηλιακό πεδίο συμμετέχουν στις εκπομπές. [51]

5. Επιπτώσεις στη χλωρίδα και πανίδα

Οι τοπικές επιπτώσεις των ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στο περιβάλλον συνδέονται με την κυκλοφορία, τις οικοδομικές εργασίες, τη διατάραξη του οικοσυστήματος, καθώς και την απώλεια των λειτουργιών του. Οι επιπτώσεις αφορούν στην έμμεση θνησιμότητα της τοπικής πανίδας σε βαθμό ανάλογο με την επιφάνεια της εγκατάστασης και τον τύπο της χρήσης γης πριν από την κατασκευή της εγκατάστασης.

Οι θάνατοι που προκαλούνται στα σπονδυλωτά είναι η κυριότερη ανησυχία όσον αφορά τις τοπικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ηλιοθερμικών σταθμών. Οι άμεσοι θάνατοι λαμβάνουν χώρα υπό τις εξής συνθήκες: σύγκρουση με τα κάτοπτρα και τα κτήρια (κυρίως τον πύργο), και θερμικό σοκ ή καύση σε συγκεντρωμένες ακτίνες φωτός. Όταν η ορατότητα είναι καλή τα πτηνά σπάνια συγκρούονται στους σταθμούς, ενώ αντίθετα το φαινόμενο έχει παρατηρηθεί όταν η ορατότητα είναι μειωμένη.

Σπανιότερα, τα πτηνά μπορεί να χτυπήσουν σε έναν κακώς φωτισμένο ηλιακό πύργο κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα πτηνά μπορεί να μπερδέψουν τις ανακλαστικές επιφάνειες για αέρα ή νερό και να συγκρουστούν με αυτές, για παράδειγμα όταν πετούν από το έδαφος. Επίσης, τα έντομα μπορεί να εκλάβουν τις γυάλινες επιφάνειες για νερό και να σκοτωθούν, ή να χάσουν τα αυγά που μεταφέρουν στις προσπάθειές τους να εισέλθουν στις επιφάνειες αυτές.

Εάν μια μονάδα έχει κατασκευαστεί σε πρώην γεωργικές εκτάσεις, διαθέσιμες θρεπτικές ουσίες στο έδαφος μπορεί να ευνοήσουν την ανάπτυξη βλάστησης μέχρι 1 m σε ύψος κάτω από και μεταξύ των ηλιακών συλλεκτών. Στα μεσογειακά κλίματα η βλάστηση μπορεί να ξηραθεί και να συντελέσει στον κίνδυνο πυρκαγιάς. Ζιζανιοκτόνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόληψη ανάπτυξης της βλάστησης, αλλά αυτά συνήθως έχουν τοξικές συνέπειες σε κάποιο βαθμό, εξακολουθούν να υπάρχουν στο έδαφος, και μπορούν να εξαχθούν με την απορροή. Εναλλακτική επεξεργασία της επιφάνειας του εδάφους που εμποδίζει την εμφάνιση βλάστησης είναι η συμπύκνωση του εδάφους, η ανάπτυξη εδαφικής επιφανειακής κρούστας ή η προσθήκη χαλικιού.

Το νερό που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των κατόπτρων στάζει πάνω σε μια στενή «υγρή ζώνη», στη βάση των συλλεκτών, περιοχή ίση με περίπου το 15-25% της συνολικής επιφάνειας των συλλεκτών. Η παροχή νερού για τον καθορισμό στην υγρή ζώνη μπορεί να κυμανθεί από 10 έως 20 mm/έτος, ποσό το οποίο μπορεί να είναι σημαντικό κατά τη διάρκεια ξηρών καλοκαιρινών μηνών (ιδιαίτερα στις περιοχές της ερήμου) για την τόνωση και/ή τη διατήρηση της ανάπτυξης των φυτών.

Αν και οι ηλιοθερμικοί σταθμοί έχουν αρκετές επιπτώσεις στο τοπικό περιβάλλον, σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, ιδίως με τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση ορυκτών καυσίμων, αυτές είναι σχετικά ήπιες.

Η άμεση βλάβη είναι χαμηλή: σε ένα παρακολουθούμενο ηλιοθερμικό σταθμό με ηλιακό πύργο που λειτουργεί από το 2007 στην Ισπανία έχουν καταγραφεί μέχρι σήμερα μόνο δύο θάνατοι πουλιών. Ακόμη και σε μια πολύ μεγαλύτερη εγκατάσταση, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις δεν θα είναι της ίδιας κλίμακας με τις επιπτώσεις, άμεσες και έμμεσες, των συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, παράδειγμα των οποίων είναι η πετρελαϊκή καταστροφή Deepwater Horizon στον Κόλπο του Μεξικού το 2010. [53]

Κοινωνικές επιπτώσεις

Κατά την κατασκευή ενός ηλιοθερμικού σταθμού είναι πιθανό να προκύψουν θέματα δικαιωμάτων γαιοκτησίας και ιδιοκτησίας καθώς επίσης και να χρειαστεί απαλλοτρίωση και επανεγκατάσταση του πληθυσμού που ζει στην περιοχή που θα κατασκευαστεί ο σταθμός. Για αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη αποζημιώσεων καθώς και ένα πλαίσιο επανεγκατάστασης για τους κατοίκους της περιοχής. Επιπρόσθετα, πιθανή είναι και η ύπαρξη επιπτώσεων στις υπάρχουσες υποδομές, οι οποίες μπορεί να κατεδαφιστούν για την κατασκευή του σταθμού. Σημειώνεται ότι τα προβλήματα αυτά είναι πιο πιθανό να προέλθουν από τις υποδομές που συνδέονται με τον υπό κατασκευή σταθμό (π.χ. γραμμές μεταφοράς) παρά από την εγκατάσταση του ίδιου του σταθμού. Παράλληλα, προβλήματα στις τοπικές κοινωνίες μπορεί να δημιουργηθούν από την εισροή μεγάλου αριθμού εργαζομένων σε περιπτώσεις όπου δεν έχει γίνει πρόβλεψη για ύπαρξη ειδικών, κυρίως σε θέματα υγείας. Τέλος, το ζήτημα της απώλειας μέσων διαβίωσης για τον τοπικό πληθυσμό εξαιτίας της μη δυνατότητας χρήσης γης στην περιοχή όπου κατασκευάστηκε ο σταθμός χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και καθιστά επιτακτική την ανάγκη προώθησης προγραμμάτων ενθάρρυνσης εναλλακτικών βιοτικών πόρων για τις τοπικές κοινωνίες. [52]

Για όλα αυτά τα ζητήματα τεχνικές λύσεις και λύσεις ενεργειακής πολιτικής είναι διαθέσιμες ή υπό ανάπτυξη. Οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις ποικίλλουν ανάλογα με την εφασμοζόμενη τεχνολογία και την περίοδο του χρόνου. Δεδομένης της αυξανόμενης και συνεχούς έρευνας και ανάπτυξης της ηλιοθερμικής τεχνολογίας αναμένεται μεγάλη εξέλιξή τους με καινοτομίες και βελτίωση της απόδοσής τους και συνεπώς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι πιθανό να περιοριστούν (ακόμη) περισσότερο με την πάροδο του χρόνου.

Κεφάλαιο 4

Ο υπό μελέτη ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων

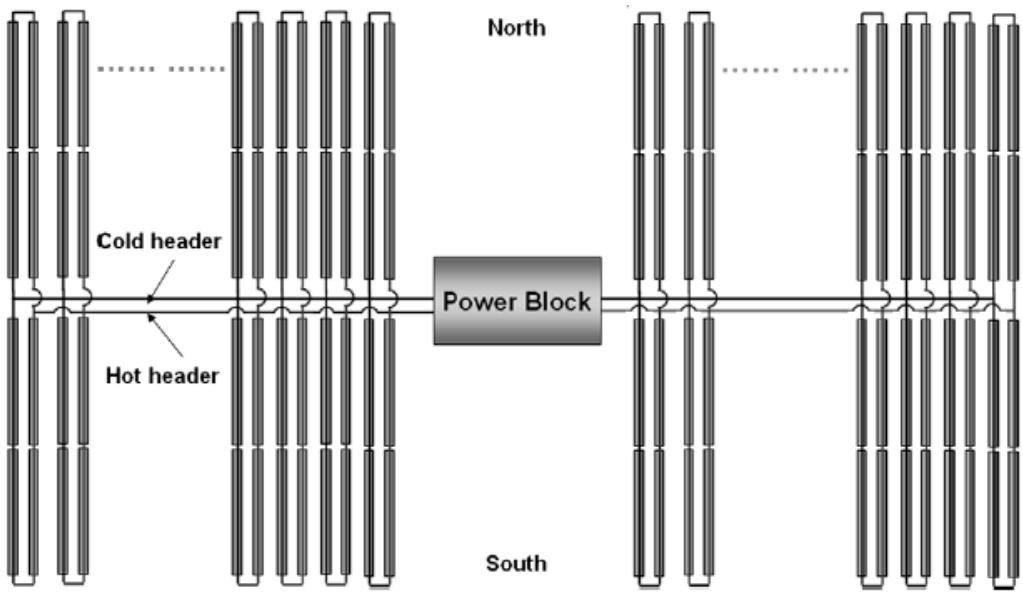
Για τη μελέτη χρησιμότητας της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου, χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο ο ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων, που είναι και ο εμπορικά επικρατέστερος.

4.1 Ηλιακό πεδίο

Το μοντέλο παραβολικού κατόπτρου που χρησιμοποιείται για τον υπό προσομοίωση σταθμό είναι ο συλλέκτης ASTRO της Abengoa Solar. Μεταξύ των παράλληλων συστοιχιών των συλλεκτών διατηρείται μια απόσταση 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. Ως σωλήνας απορρόφησης επιλέγεται ο δέκτης Schott PTR 70, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί και στον ηλιοθερμικό σταθμό παραβολικών κατόπτρων Shams 1 στο Άμπου Ντάμπι.

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. [77] Ως εκ τούτου είναι ιδανικό για τη χρήση και τις θερμοκρασίες που το χρειαζόμαστε. Η θερμοκρασία εισόδου του συνθετικού ελαίου στο ηλιακό πεδίο κατά την παραγωγή

ηλεκτρικής ισχύος είναι περίπου 290°C. Η αντίστοιχη θερμοκρασία εξόδου 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. 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. [5], [54], [55]



Εικόνα 4.1: Διάταξη του ηλιακού πεδίου για τον υπό μελέτη σταθμό παραβολικών κατόπτρων. [55]

Η κυκλοφορία του συνθετικού ελαίου στο ηλιακό πεδίο επιτυγχάνεται μέσω των αντλιών ελαίου. Ανάλογα με τη μέγιστη ροή μάζας του ελαίου που πρόκειται να επιτευχθεί στο σταθμό εγκαθίσταται ανάλογος αριθμός μονάδων αντλιών. Πάντα τοποθετείται και μια εφεδρική αντλία για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. [56], [57]

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.

Επιπρόσθετα, 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. 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.

4.2 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας

Για τον ηλιοθερμικό σταθμό παραβολικών κατόπτρων που μελετάται, προβλέπεται η δυνατότητα χρήσης συστήματος αποθήκευσης θερμότητας. Η τεχνολογία αποθήκευσης που χρησιμοποιείται είναι έμμεση αποθήκευση (δηλαδή το υγρό μεταφοράς της θερμότητας είναι διαφορετικό από το μέσο αποθήκευσης της θερμότητας) 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. [24]

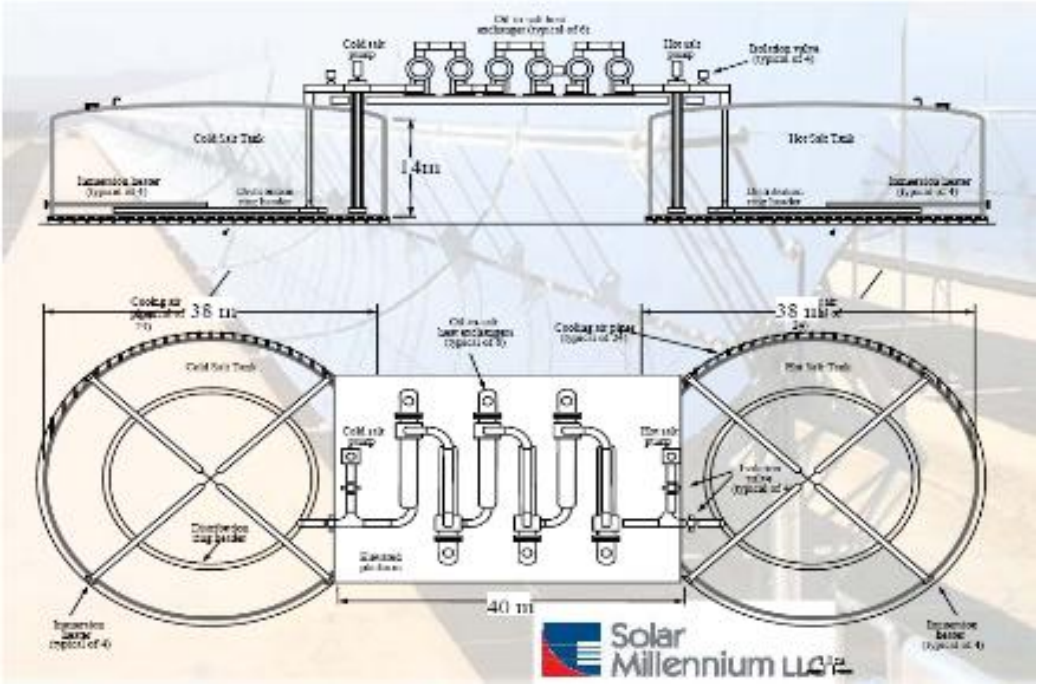
Ο πυρήνας του συστήματος αποθήκευσης είναι οι δύο μεγάλες κυλινδρικές δεξαμενές, μία θερμή και μία ψυχρή, στις οποίες βρίσκεται αποθηκευμένο το μείγμα των τηγμένων αλάτων. Οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από ανθρακούχο χάλυβα ενώ οι οροφές τους είναι αυτοφερόμενες. [58]

Εικόνα 4.2: Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας δύο δεξαμενών του Andasol. Στην ένθετη φωτογραφία φαίνεται η θέση του συστήματος αποθήκευσης στον ηλιοθερμικό σταθμό.

Πηγή: www.flickr.com/photos/beyondzeroemissions

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.

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. [58], [59]

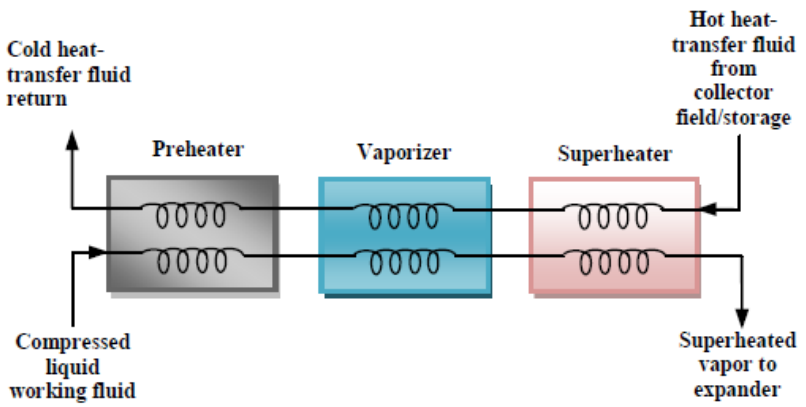


Εικόνα 4.3: Πρόσοψη και κάτοψη του συστήματος αποθήκευσης δύο δεξαμενών του ηλιοθερμικού σταθμού Andasol. [60]

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.

4.3 Κύκλος ισχύος

Ο κύκλος ισχύος που υλοποιείται στον υπό μελέτη ηλιοθερμικό σταθμό για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος είναι ο αναγεννητικός θερμοδυναμικός κύκλος Rankine. 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.



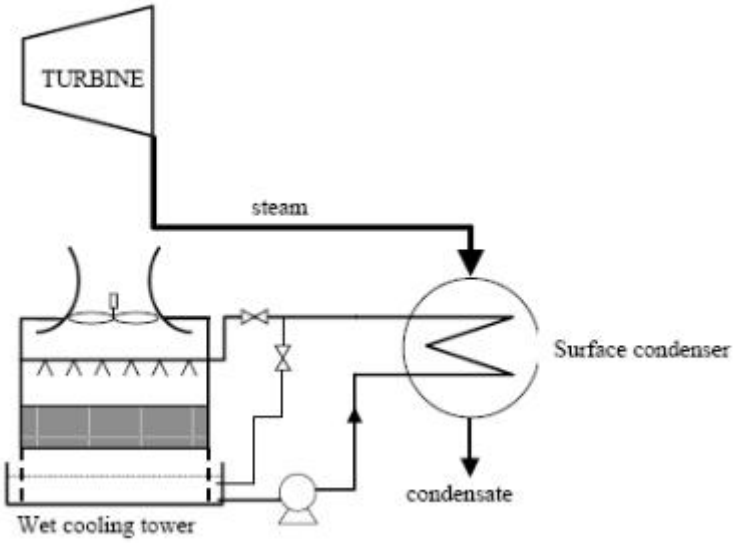
Εικόνα 4.4: Διάγραμμα του θερμικού εναλλάκτη του κύκλου ισχύος. [61]

Στο θερμικό εναλλάκτη 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 θερμαντήρες νερού-ατμού κλειστού τύπου για να προθερμάνουν την παροχή του νερού πριν την είσοδό του στον κεντρικό θερμικό εναλλάκτη ελαίου-μείγματος νερού-ατμού. 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. [57], [62]

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 πτερύγια του στροβίλου. Το μηχανικό έργο που παράγεται στον περιστρεφόμενο άξονα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της συνδεδεμένης γεννήτριας. Από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης λαμβάνονται τέσσερεις απομαστεύσεις ατμού. Η μία από αυτές κατευθύνεται στον εξαερωτήρα ενώ οι άλλες τρεις οδηγούν τον ατμό σε θερμαντήρες της παροχής νερού κλειστού τύπου. Οι τρεις προθερμαντήρες κλειστού τύπου προθερμαίνουν την παροχή νερού πριν τον εξαερωτήρα. [57], [62]

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^{o}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.



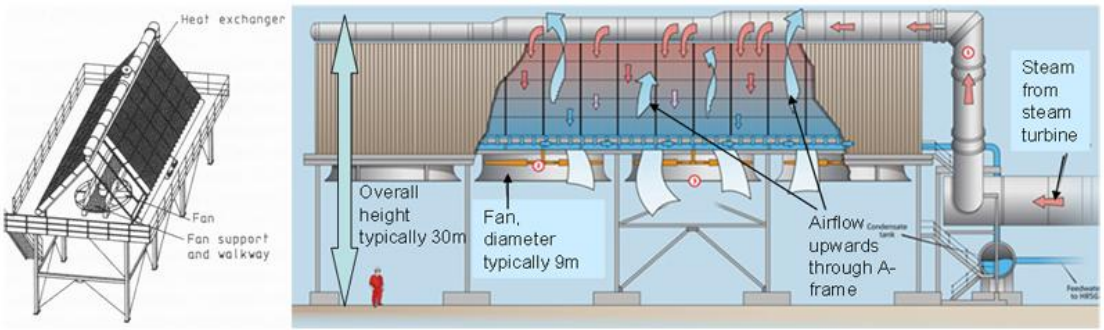
Εικόνα 4.5: Σχηματική απεικόνιση του υδρόψυκτου συστήματος ψύξης με πύργο. [63]

Η μια επιλογή για το σύστημα ψύξης του υπό προσομοίωση σταθμού είναι το υδρόψυκτο σύστημα με πύργο ψύξης με εξαναγκασμένο αερισμό. 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. [64], [65], [66] Σε περίπτωση που η χωροθέτηση πτυ σταθμού γίνεται σε παράκτια τοποθεσία, αυτός μπορεί να συνδυαστεί με ένα σταθμό αφαλάτωσης (όπως αναφέρθηκε παραπάνω) και να χρησιμοποιεί μέρος του παραγόμενου νερού για το σύστημα ψύξης του. Υπάρχει, ακόμη, η δυνατότητα το σύστημα ψύξης του ηλιοθερμικού σταθμού να τροφοδοτείται από εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων σε περίπτωση που ο σταθμός βρίσκεται κοντά σε αστικά κέντρα με τέτοιες μονάδες επεξεργασίας. [67], [68]

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

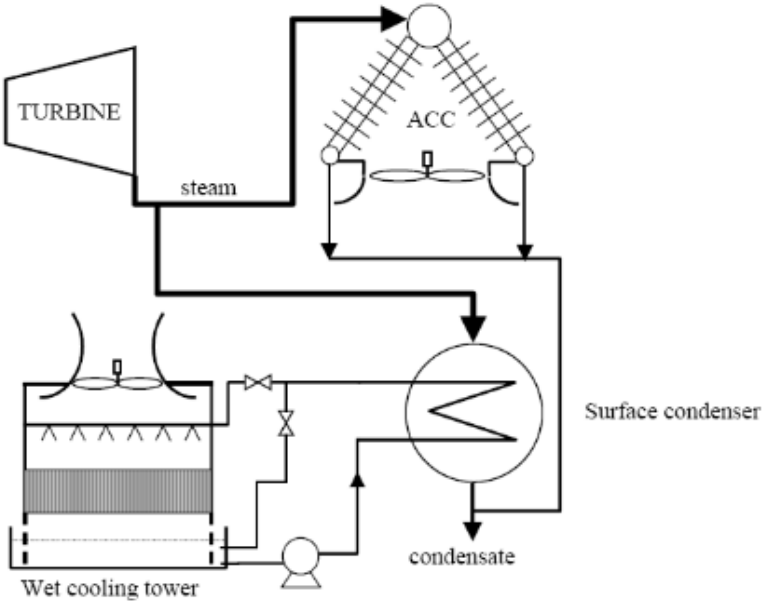
όπως και το συνολικό κόστος του συστήματος ψύξης εξαρτώνται από την ποσότητα της θερμικής ισχύος που πρέπει να απάγεται από τον κύκλο ισχύος του σταθμού καθώς και από τη μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Συνήθως, εγκαθίσταται στον πύργο και ένα σύστημα θέρμανσης διότι εάν πέσει η θερμοκρασία κάτω από τους 4°C υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας πάγου με καταστροφικά αποτελέσματα για τον πύργο. [69]

Ο εναλλακτικός τρόπος ψύξης για να μειωθεί η κατανάλωση νερού είναι η χρήση αερόψυκτου αντί υδρόψυκτου συστήματος ψύξης. Η μείωση που επιτυγχάνεται στην κατανάλωση νερού είναι περίπου 90% με 95% σε σχέση με το υδρόψυκτο σύστημα ψύξης. Το κόστος του αερόψυκτου πύργου ψύξης είναι υψηλότερο και 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. [64] Επίσης, το αερόψυκτο σύστημα ψύξης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του σταθμού κατά 4,5-5%. [52]



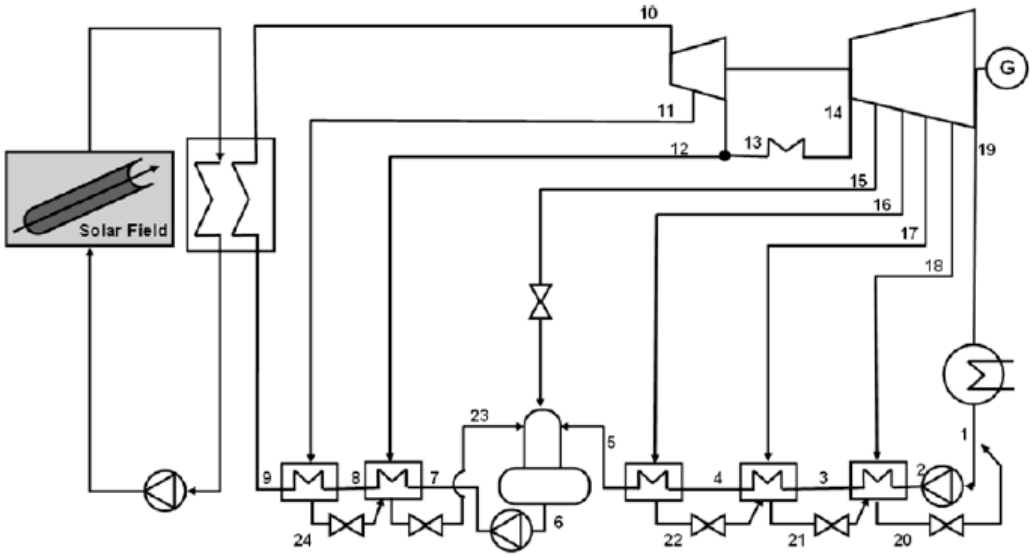
Εικόνα 4.6: Αερόψυκτος συμπυκνωτής.
Πηγή: Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου www.eac.com.cy

Αρκετό ενδιαφέρον προσελκύει το υβριδικό σύστημα ψύξης, το οποίο λειτουργεί κατά βάση ως αερόψυκτο σύστημα και χρησιμοποιεί το υδρόψυκτο σύστημα ψύξης κατά τις περιόδους αρκετά υψηλών θερμοκρασιών, οπότε και ο αερόψυκτος συμπυκνωτής δεν είναι πολύ αποτελεσματικός. Το υβριδικό σύστημα ψύξης καταναλώνει το 10% περίπου του νερού που θα απαιτούσε ένα αποκλειστικά υδρόψυκτο σύστημα. Η μείωση στην απόδοση του σταθμού ανέρχεται σε περίπου 1-3%. [52], [67]



Εικόνα 4.7: Υβριδικό (υδρόψυκτο/αερόψυκτο) παράλληλο σύστημα ψύξης. [70]

Στην έξοδο του συστήματος ψύξης, 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. [57], [62]



Εικόνα 4.8: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου ισχύος. [55]

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.

4.4 Περιγραφή λειτουργίας του υπό μελέτη ηλιοθερμικού σταθμού

Πιο κάτω παρουσιάζεται μια ενιαία περιγραφή του τρόπου λειτουργίας σε καθημερινή βάση του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων που προσομοιώνεται. Σε γενικές γραμμές ανάλογος τρόπος λειτουργίας ισχύει και για τους σταθμούς τεχνολογίας πύργου.

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.

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. [71] 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.

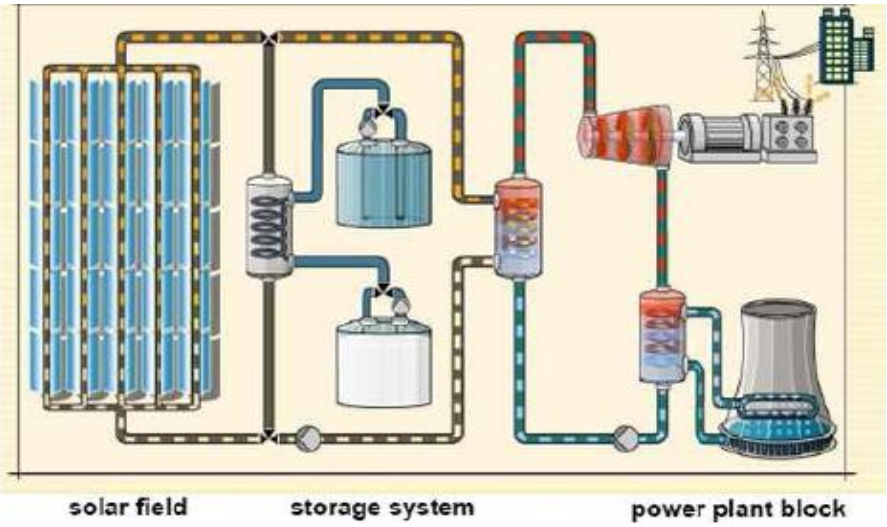
Εάν από τον προγραμματισμό της λειτουργίας του σταθμού κατά την επόμενη ημέρα, που επιτρέπει η πρόγνωση της ηλιοφάνειας από διάφορα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής (θεωρούμε τέλεια μετεωρολογική πρόβλεψη για την επόμενη ημέρα), προκύπτει είτε ότι ο σταθμός θα καθυστερήσει ασυνήθιστα πολλές ώρες την 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 εργαλείο 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. Το συνθετικό έλαιο με την κατάλληλη θερμοκρασία λειτουργίας κατευθύνεται στον κεντρικό εναλλάκτη του κύκλου ισχύος προς παραγωγή υπέρθερμου ατμού για εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

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. 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 υπερδιαστασιολογημένο 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.

Κατά τις πρώτες ώρες από την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής η ροή του συνθετικού ελαίου κατευθύνεται 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. Συνήθως, το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αυτές τις πρώτες ώρες παραμένει ανενεργό.



Εικόνα 4.9 : Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού τις πρωινές ώρες (η αποθήκη είναι άδεια). [5]

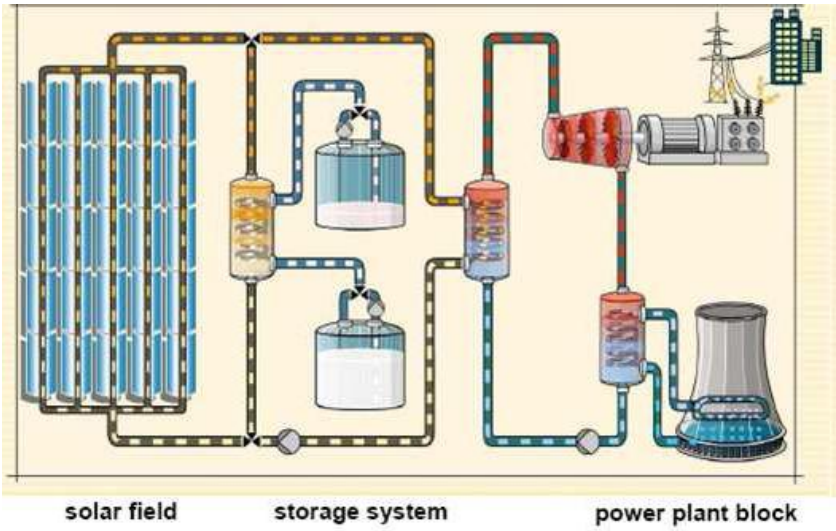
Κατά τις ώρες που ο σταθμός παράγει ηλεκτρική ισχύ ο συμβατικός καυστήρας καλείται να λειτουργήσει εκ νέου βοηθητικά για την κάλυψη βυθίσεων στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Κατά τη διάρκεια της ημέρας συχνά εμφανίζονται βυθίσεις στη συλλεγόμενη θερμική ισχύ που οφείλονται σε αυξομειώσεις στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία λόγω διαφόρων ατμοσφαιρικών φαινομένων, κυρίως λόγω παροδικής συννεφιάς. Εάν οι βυθίσεις στη θερμική ισχύ δεν καλυφθούν με κάποιο συμπληρωματικό μέσο (όπως ο συμβατικός καυστήρας) τότε η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, η οποία διοχετεύεται στο δίκτυο, θα έχει μειωμένη ποιότητα. 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. 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.

Δεδομένης της μεγάλης διαθεσιμότητας και της χαμηλής τιμής των ορυκτών καυσίμων στις χώρες του Κόλπου, ο συμβατικός καυστήρας χρησιμοποιείται επιπλέον κατά τις ώρες λειτουργίας του σταθμού που η συλλεγόμενη θερμική ισχύς δεν επαρκεί για την παραγωγή της ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος του σταθμού. 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. Η χρήση του συμβατικού καυστήρα παραμένει σε λογικά όρια και οπωσδήποτε θεωρείται συμπληρωματική προς τη λειτουργία του ηλιακού πεδίου.

Σε περίπτωση που το επίπεδο της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) είναι υψηλό και ο σταθμός έχει φτάσει στην ονομαστική του λειτουργία, τότε η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια οδηγείται στο σύστημα αποθήκευσης. Η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια του μέσου μεταφοράς θερμότητας αποδίδεται μέσω εναλλακτών στο μείγμα των τηγμένων αλάτων. Το αλάτι της ψυχρής δεξαμενής, θερμαίνεται και οδηγείται στη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας αποθηκεύοντας την ενέργεια στους κρυστάλλους του. Με αυτόν τον τρόπο η αποθήκη ενέργειας «φορτίζεται», με τη μία δεξαμενή να γεμίζει και την άλλη να αδειάζει. [5]



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων κατά το μεσημέρι (η αποθήκη «φορτίζεται»). [5]

Εάν το ηλιακό πεδίο είναι αρκετά υπερδιαστασιολογημένο, τότε κατά τις ημέρες με μεγάλη ηλιοφάνεια παρατηρείται ύπαρξη περίσσειας θερμικής ισχύος 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. Εάν προβλεφθεί ή παρατηρηθεί κάτι τέτοιο λαμβάνονται 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 δυνητικά 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.

Εικόνα 4.11: Απεστιασμένος συλλέκτης παραβολικών κατόπτρων για απόρριψη ενέργειας.

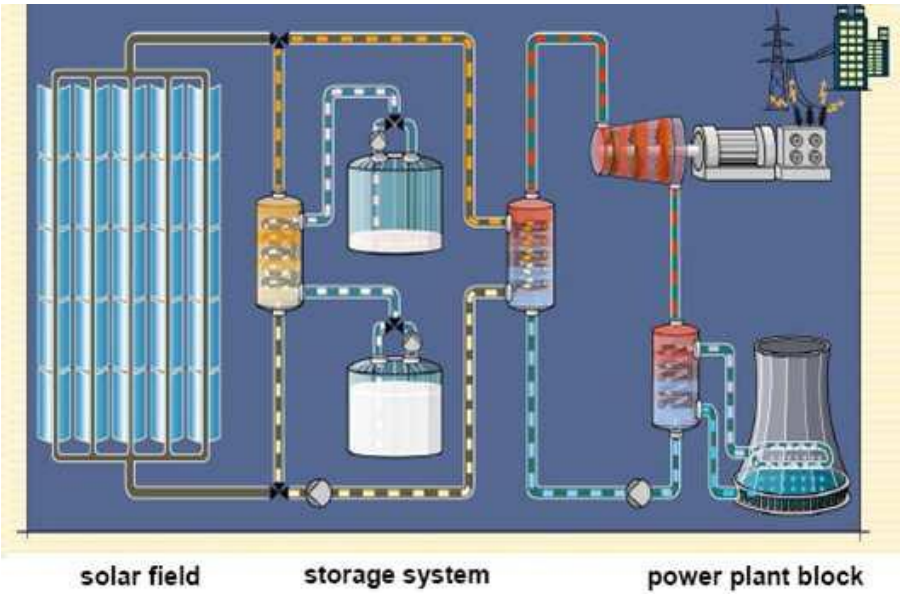
Πηγή: Wikipedia/David Shankbone

Κατά τις απογευματινές ώρες, 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. Η ηλεκτροπαραγωγή θα συνεχίσει να βαίνει μειούμενη έως ότου προσεγγίσει το τεχνικό ελάχιστο του σταθμού κάτω από το οποίο αυτή θα τερματιστεί έτσι ώστε να μην προκληθούν σοβαρές φθορές στο στρόβιλο. Για τον ομαλότερο τερματισμό της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού χρησιμοποιείται και ο συμβατικός καυστήρας, για να διατηρηθεί η λειτουργία του σταθμού πάνω από το τεχνικό ελάχιστο και εν συνεχεία να τερματιστεί η ηλεκτροπαραγωγή του.

Εάν όμως διατίθεται φορτισμένη αποθήκη, 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 ο σταθμός λειτουργεί απορροφώντας ενέργεια που προέρχεται από το ηλιακό πεδίο, σε συνδυασμό με αυτή που είναι αποθηκευμένη στη μονάδα αποθήκευσης υγροποιημένων αλάτων. Κατά την εκφόρτιση της αποθήκης το άλας της θερμής δεξαμενής αποδίδει την απορροφηθείσα ενέργεια μέσω εναλλακτών στο μέσο μεταφοράς θερμότητας, και στη συνέχεια οδηγείται προς την ψυχρή δεξαμενή.

Μετά τη δύση του ηλίου ο σταθμός μπορεί να λειτουργεί με ενέργεια που προέρχεται εξ ολοκλήρου από το σύστημα αποθήκευσης, εφόσον υπάρχει απόθεμα αποθηκευμένης θερμότητας. Όταν ο σταθμός λειτουργεί με πηγή θερμικής ισχύος την αποθήκη του δεν είναι εφικτή η παραγωγή ακριβώς της ονομαστικής του ισχύος. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας επιπλέον θερμοκρασιακών απωλειών (κυρίως στον εναλλάκτη ελαίου-αλάτων) οι οποίες δεν μπορούν να αντισταθμιστούν πλήρως δεδομένου ότι υπάρχει ένα άνω όριο στη ροή μάζας του ελαίου. Ως αποτέλεσμα, ο σταθμός παράγει ελαφρώς χαμηλότερη ηλεκτρική ισχύ από την ονομαστική του, όταν ο κύκλος ισχύος τροφοδοτείται από την αποθήκη θερμότητας του σταθμού.



Εικόνα 4.12: Διάγραμμα της λειτουργίας του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων κατά το απόγευμα (η αποθήκη «εκφορτίζεται»). [5]

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 και, φυσικά, από την ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συνεπώς είναι δυνατή η λειτουργία του σταθμού σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, εάν το ηλιακό πεδίο και το σύστημα αποθήκευσης του σταθμού έχουν διαστασιολογηθεί για αυτόν τον σκοπό.

Κεφάλαιο 5

Χωροθέτηση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου

Στον παρόν κεφάλαιο προσεγγίζεται και αναλύεται η διαδικασία επιλογής κατάλληλων τοποθεσιών για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η χωροθέτηση είναι από τις πλέον σημαντικές φάσεις στη διαδικασία υλοποίησης ενός ηλιοθερμικού σταθμού. Τα εδάφη των χωρών του Κόλπου προσφέρουν αρκετές επιλογές για την τοποθέτηση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής καθώς υπάρχει πληθώρα αναξιοποίητων εκτάσεων ενώ και το άμεσο ηλιακό δυναμικό είναι ιδιαίτερα ευνοϊκό στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Για την εφαρμογή του εργαλείου προσομοίωσης και την εξαγωγή των ζητούμενων συμπερασμάτων επιλέγονται συγκεκριμένες τοποθεσίες σε όλες τις χώρες του Κόλπου ως ενδεικτικοί τόποι εγκατάστασης ηλιοθερμικών σταθμών παραβολικών κατόπτρων.

Εικόνα 5.1: Χάρτης των χωρών του Κόλπου. [11]

5.1 Διαδικασία χωροθέτησης ηλιοθερμικού σταθμού

Η επιλογή της ιδανικής τοποθεσίας για την κατασκευή ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής απαιτεί ξεχωριστή και λεπτομερή μελέτη. Αποτελείται από μια σειρά βημάτων που πρέπει να εφαρμοστούν, ενώ λαμβάνει υπόψη το συνδυασμό μιας πληθώρας κριτηρίων, τεχνικά, κοινωνικά ή πολιτικά. Για κάθε αγορά και για κάθε εφαρμογή η στάθμιση των κριτηρίων επιλογής των κατάλληλων τοποθεσιών είναι διαφορετική.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται βηματικά η διαδικασία επιλογής πιθανών τοποθεσιών για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών.

Πίνακας 5.1: Βήμα προς βήμα η διαδικασία επιλογής τοποθεσιών για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής [72]

Εργασία	**Αποτέλεσμα**
Ανάλυση της αγοράς	→ αντίληψη του έργου
Ανάλυση της χώρας/περιοχής	→ αναγνώριση των κατάλληλων περιοχών
Έλεγχος και επαλήθευση των τοποθεσιών	→ καθορισμός των τοποθεσιών
Αρχικός έλεγχος της τοποθεσίας • **Ανάλυση του μοιραίου λάθους**	→ κατάταξη και επιλογή τοποθεσίων
Ανάλυση προκαταρκτικής σκοπιμότητας • **Ελέγχει και σταθεροποιεί τις λεπτομέρειες του έργου**	→ ιδανική τοποθεσία
Ανάλυση σκοπιμότητας **1. Μέτρηση & αξιολόγηση ηλιακών πόρων** **2. Εφαρμογή τεχνικής (Τεχνο-οικονομική βελτιστοποίηση)** **3. Προσδιορισμός οικονομικών μεγεθών και προϋπολογισμού του έργου**	→ έγκριση/άδεια έναρξης εφαρμογές και επεξεργασία → δημοπρασίες/ διαδικασία υποβολής προσφορών

Τα τεχνικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή των ιδανικών θέσεων εγκατάστασης είναι:

- Η ηλιακή ακτινοβολία και άλλες μετεωρολογικές παράμετροι
- Η καταλληλότητα της γης (διαθεσιμότητα, τοπογραφία, έδαφος, προσβασιμότητα)
- Η πρόσβαση στο δίκτυο
- Η διαθεσιμότητα νερού (σύστημα ψύξης/ καθαρισμός κατόπτρων)
- Η εκτίμηση του κινδύνου (φυσικές καταστροφές)
- Ο πληθυσμός (διαθεσιμότητα του εργατικού δυναμικού για την κατασκευή και λειτουργία)
- Οι ανάγκες λειτουργίας και συντήρησης.

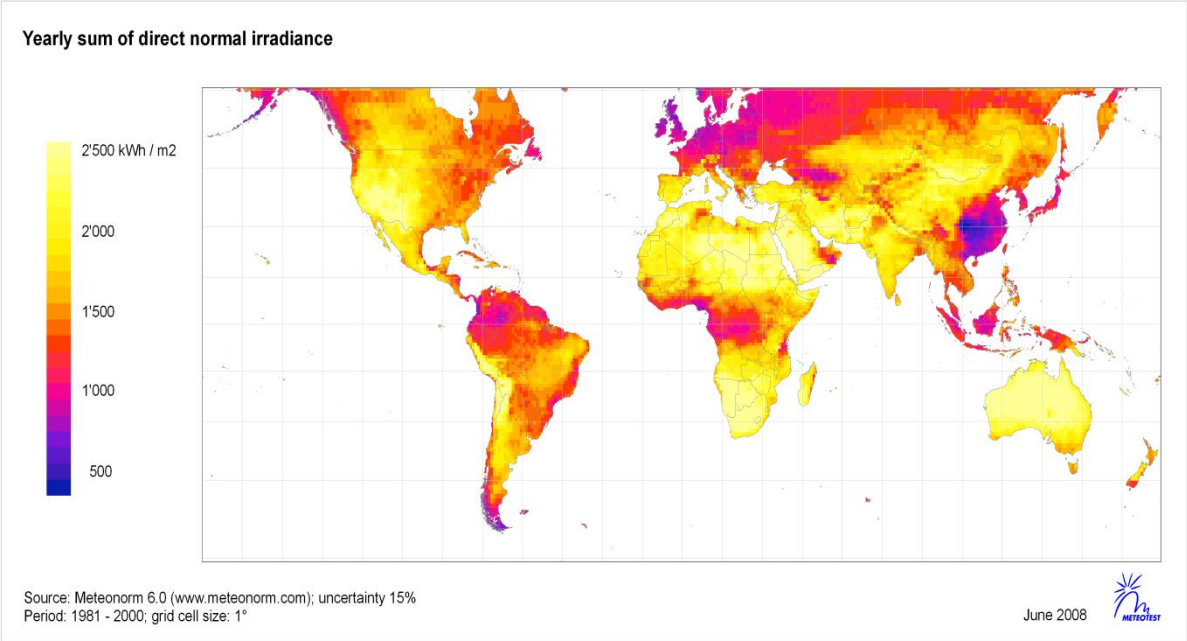
Τα κοινωνικά και πολιτικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή των ιδανικών θέσεων εγκατάστασης είναι:

- Η υποστήριξη από το δήμο, περιφέρεια, τοπική κοινωνία
- Τα πιθανά οφέλη για την περιοχή και το δήμο. [72]

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI), η οποία χαρακτηρίζεται ως το "καύσιμο" του ηλιοθερμικού σταθμού, είναι καίριας σημασίας για την ανάλυση αυτή. Για τον υπολογισμό της DNI ακτινοβολίας χρησιμοποιείται μια μέθοδος που μοντελοποιεί λεπτομερώς την οπτική διαφάνεια της ατμόσφαιρας ποσοτικοποιώντας εκείνα τα ατμοσφαιρικά συστατικά που απορροφούν ή αντανακλούν το ηλιακό φως, όπως το νέφος, τα αερολύματα, τους υδρατμούς, το όζον, τα καυσαέρια και άλλα. Οι περισσότερες από αυτές οι πληροφορίες προέρχονται από δορυφορική τηλεπισκόπηση / SOLEMI 2004 /.

Οι μετερεωλογικοί δορυφόροι, όπως ο Meteosat-7 από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Εκμετάλλευση Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT), είναι γεωστατικοί δορυφόροι σε απόσταση 36.000 χιλιομέτρων σε ένα σταθερό σημείο πάνω από τη Γη που στέλνουν κάθε μισή ώρα εικόνες για την πρόγνωση του καιρού και άλλους σκοπούς. Από αυτές τις εικόνες μπορεί να προκύψει το οπτικό πάχος των νεφών αποκτώντας ανά μισή ώρα τιμές για το νέφος για κάθε τοποθεσία. Από όλα τα ατμοσφαιρικά συστατικά, το νέφος έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Ως εκ τούτου, η πολύ υψηλή χωρική (5x5km) και χρονική (μισή ώρα) ανάλυση που παρέχεται από τον METEOSAT είναι απαραίτητη για αυτό το ατμοσφαιρικό συστατικό.

Τα αερολύματα, οι υδρατμοί, το όζον κ.λπ. έχουν μικρότερη επίδραση στην ηλιακή ακτινοβολία. Το υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, καθώς καθορίζει το πάχος της ατμόσφαιρας και εκτιμάται από ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο με 1x1km χωρική ανάλυση. Όλα τα στρώματα συνδυάζονται για να αποδώσουν τη συνολική οπτική διαφάνεια της ατμόσφαιρας για κάθε ώρα του έτους. Γνωρίζοντας την εξωγήινη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και την κυμαινόμενη γωνία πρόσπτωσης, η DNI ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί για κάθε χώρο και για κάθε ώρα του έτους. Ηλεκτρονικοί χάρτες και δεδομένα GIS του ετήσιου ποσού της DNI ακτινοβολίας μπορούν τώρα να παραχθούν καθώς και ωριαίες χρονοσειρές για κάθε χώρο. Το μέσο σφάλμα μεροληψίας του ετήσιου ποσού της DNI ακτινοβολίας- η οποία είναι καθοριστικής σημασίας για την οικονομική αξιολόγηση - είναι συνήθως της τάξης του ± 5%.



© ***METEOTEST***; based on www.*meteonorm*.com

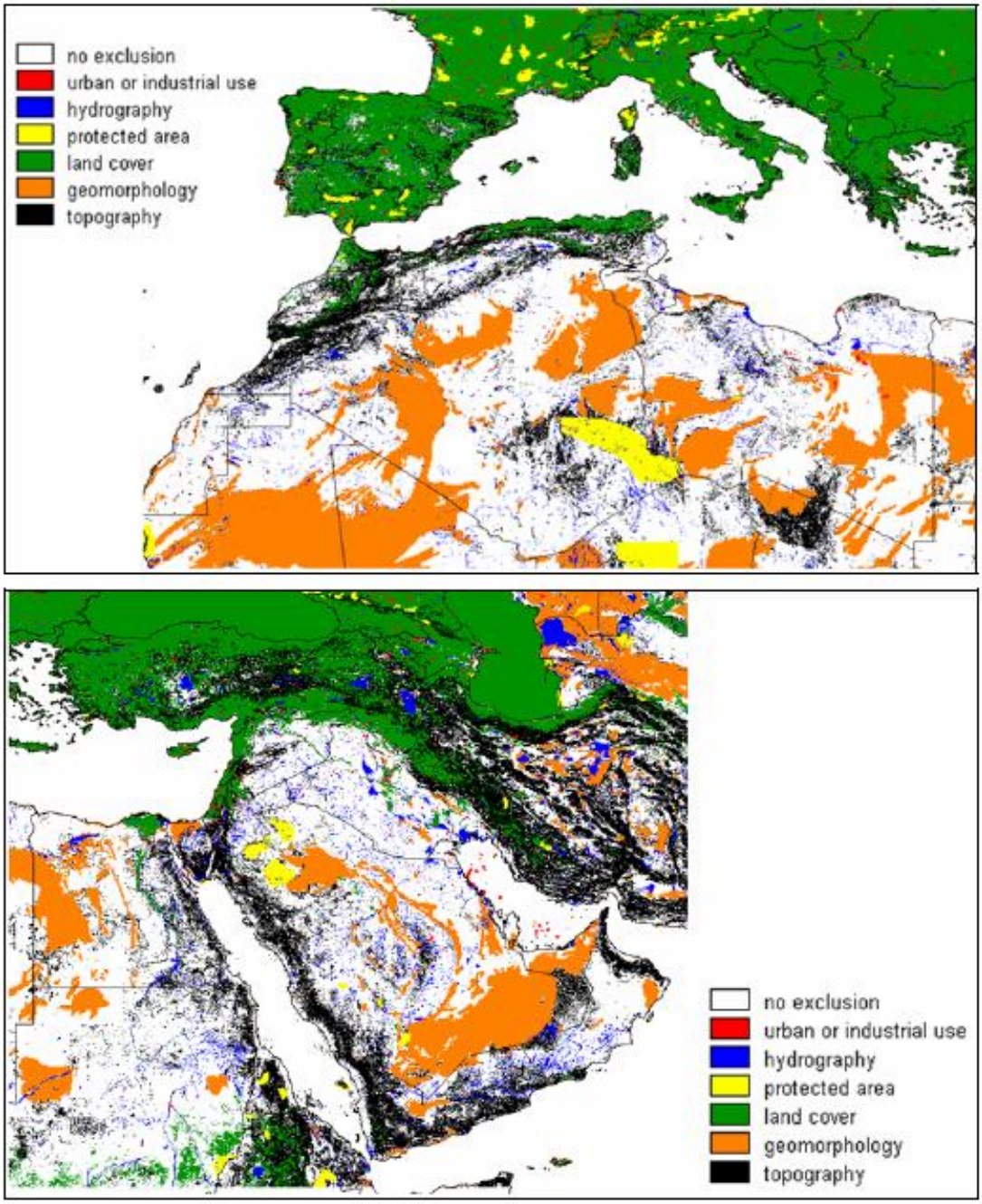
Εικόνα 5.2: Ετήσιο δυναμικό DNI παγκοσμίως.

Για την ανάπτυξη μεγάλων ηλιοθερμικών σταθμών μια βάση ενός έτους δεν είναι επαρκής, καθώς οι ετήσιες κλιματικές διακυμάνσεις μπορεί να είναι της τάξης του ±15%. Για τους σκοπούς της ανάπτυξης του έργου, δεδομένα τουλάχιστον 5-15 ετών θα πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία. Ωστόσο, για την αξιολόγηση του εθνικού δυναμικού ηλιακής ενέργειας και της γεωγραφικής κατανομής του, η βάση αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική, ειδικά επειδή στις περισσότερες χώρες του Κόλπου, το συνολικό δυναμικό της ηλιακής ενέργειας είναι μερικές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από τη ζήτηση.

Το επόμενο βήμα είναι η ανίχνευση των εδαφικών πόρων που επιτρέπουν την τοποθέτηση του ηλιακού πεδίου. Αυτό επιτυγχάνεται αποκλείοντας όλες τις περιοχές που είναι ακατάλληλες για την ανέγερση του ηλιακού πεδίου λόγω της δομής του εδάφους, υδάτινων ρευμάτων, της κλίσης, αμμόλοφων, προστατευόμενων περιοχών, δασών, καλλιεργήσιμων εκτάσεων κλπ. Τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά προέρχονται από δεδομένα τηλεπισκόπησης και αποθηκεύονται σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS). Τέλος, τα εν λόγω σύνολα δεδομένων συνδυάζονται για να παράγουν μια μάσκα κριτηρίων αποκλεισμού για μια ολόκληρη περιοχή ή χώρα (Εικόνα 5.3). Οι υπόλοιποι χώροι είναι καταρχήν πιθανές τοποθεσίες εγκατάστασης ηλιοθερμικών σταθμών όσον αφορά την εφαρμογή των κριτηρίων αποκλεισμού. Όλα τα κριτήρια αποκλεισμού τοποθεσιών παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Υποχρεωτικά και προαιρετικά κριτήρια αποκλεισμού περιοχών για εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. [16]

Κριτήρια αποκλεισμού	**υποχρεωτικό**	**προαιρετικό**
Κλίση του εδάφους > 2,1%	x	
Κάλυψη γης		
Θάλασσα	x	
Εσωτερικά ύδατα	x	
Δάσος		x
Βάλτος	x	
Καλλιεργήσιμη έκταση		x
Υδρολογία		
Μόνιμα εσωτερικά ύδατα	x	
Μη μόνιμα εσωτερικά ύδατα		x
Περιοχή που πλημμυρίζει συχνά		x
Γεωμορφολογία		
Μετατοπίσεις άμμου, αμμόλοφοι	x	
Ζώνες ασφαλείας 10km για μετατοπίσεις άμμου		x
Αλυκές		x
Παγετώνες	x	
Ζώνες ασφαλείας για παγετώνες		x
Χρήση γης		
Οικισμοί		x
Αεροδρόμια		x
Κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου		x
Ορυχείο, λατομείο		x
Μονάδα αφαλάτωσης		x
Προστατευόμενη/απαγορευμένη περιοχή		x



Εικόνα 5.3: Περιοχές αποκλεισμού για εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. [16]

Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να παραχθούν οι χάρτες της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στις υπόλοιπες εναπομείναντες θέσεις για κάθε περιοχή. Οι χάρτες αυτοί αναλύονται στατιστικά και έτσι προκύπτει ο αριθμός των διαθέσιμων θέσεων σε κάθε χώρα με συγκεκριμένη άμεση ηλιακή ακτινοβολία. [16]

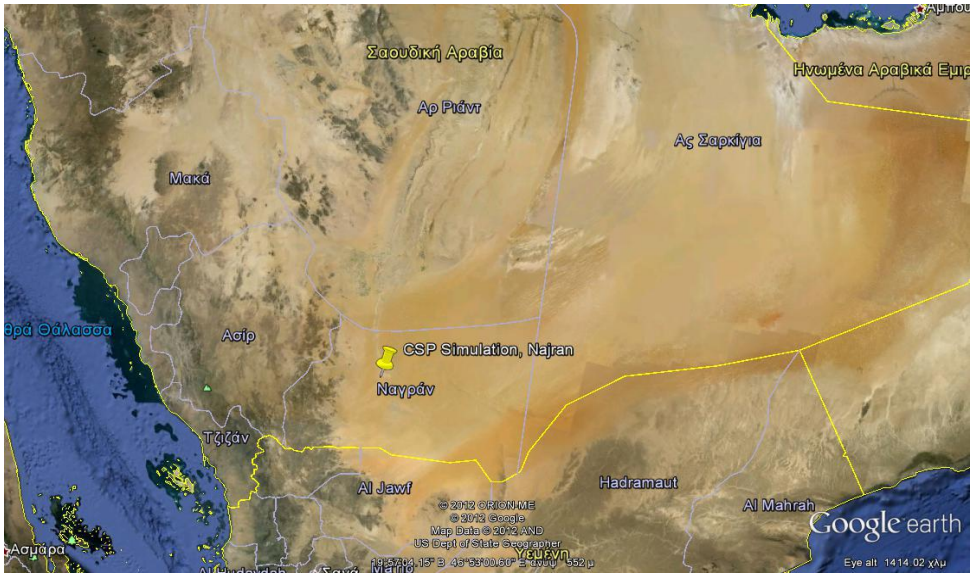
5.2 Ενδεικτικές τοποθεσίες ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής για την εφαρμογή του εργαλείου προσομοίωσης.

Ως πρώτη τοποθεσία για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής παραβολικών κατόπτρων επιλέγεται η ευρύτερη περιοχή εγκατάστασης του σταθμού Shams 1, του πρώτου σταθμού αυτού του είδους στις Χώρες του Κόλπου, στο Εμιράτο του Άμπου Ντάμπι. Η τοποθεσία αυτή βρίσκεται 120 χμ. νοτιοδυτικά του Άμπου Ντάμπι, κοντά στην πόλη Madinat Zayed. Το ετήσιο δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας όπως προέκυψε από τη ληφθείσα ωριαία χρονοσειρά DNI από τη SoDa Service είναι περίπου 1958kWh/m^2/y.

Εικόνα 5.4: Χωροθέτηση του ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων Shams 1, στο Εμιράτο του Άμπου Ντάμπι. [73]

Όσον αφορά τον τύπο του συστήματος ψύξης του σταθμού, αν και υπάρχει η δυνατότητα τροφοδοσίας υδρόψυκτου συστήματος ψύξης από παρακείμενη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, εντούτοις επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί αερόψυκτο σύστημα καθώς η διασύνδεση με τη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων κρίθηκε ασύμφορη στην περίπτωση του Shams 1.

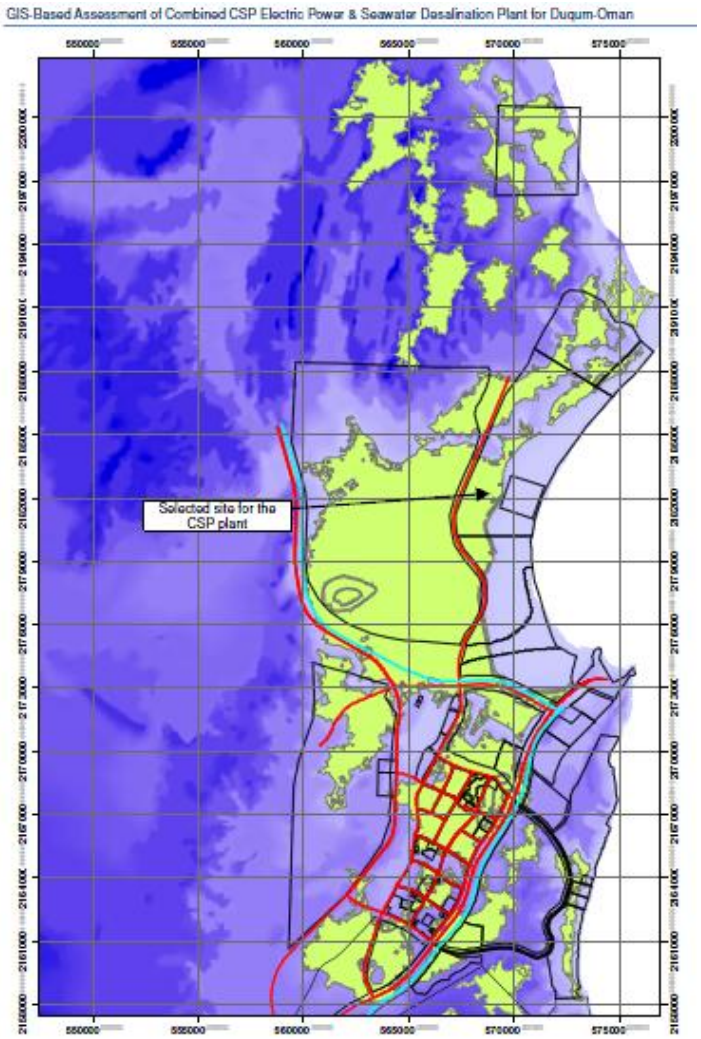
Για τη χωροθέτηση ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων στη Σαουδική Αραβία επιλέχθηκε μια τοποθεσία στην ευρύτερη περιοχή της τεράστιας ερήμου Rub' al Khali. Η έρημος αυτή, η οποία ονομάζεται και Empty Quarter, καταλαμβάνει περίπου το 1/5 της Αραβικής Χερσονήσου και εκτείνεται σε έκταση περίπου 650.000 τ.χμ. Συγκεκριμένα, η τοποθεσία επιλέχθηκε στην επαρχία Najran της Σαουδικής Αραβίας, σε κοντινή απόσταση από τις εγκαταστάσεις της βιομηχανίας τσιμέντου Najran Cement Company.



Εικόνα 5.5: Τοποθεσία προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων στην επαρχία Najran της Σαουδικής Αραβίας.

Το ετήσιο δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, όπως προέκυψε από τη ληφθείσα ωριαία χρονοσειρά DNI από τη SoDa Service, είναι περίπου 1947kWh/m^2/y. Λόγω της έλλειψης επαρκών υδάτινων πόρων στην περιοχή, το σύστημα ψύξης που θα εγκατασταθεί στον ηλιοθερμικό σταθμό επιλέγεται να είναι αερόψυκτο.

Στο Ομάν υπάρχουν σχέδια για αξιοποίηση του πλούσιου ηλιακού δυναμικού της περιοχής με την κατασκευή ηλιοθερμικών σταθμών. [20] Η επιλογή της τοποθεσίας προσομοίωσης σταθμού παραβολικών κατόπτρων βασίστηκε σε μελέτη του Πανεπιστημίου Sultan Qaboos για την αξιολόγηση και χωροθέτηση ηλιοθερμικού σταθμού σε συνδυασμό με μονάδα αφαλάτωσης στην περιοχή Wilayat Duqm του Ομάν με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS. [19] Πρόκειται για μια παραθαλάσσια περιοχή με ιδιαίτερα αυξημένο ηλιακό δυναμικό.

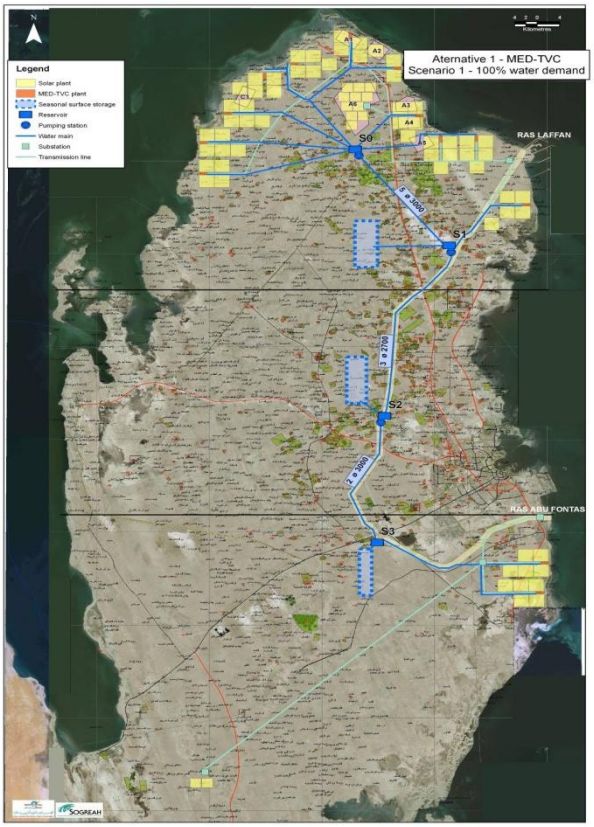


Εικόνα 5.6: Τοποθεσία προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων στην περιοχή Wilayat Duqm του Ομάν. [19]

Το ετήσιο δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, όπως προέκυψε από τη ληφθείσα ωριαία χρονοσειρά DNI από τη SoDa Service, είναι περίπου 2257kWh/m^2/y. Στην διενεργούμενη προσομοίωση, η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θεωρείται ξεχωριστή μονάδα η οποία τροφοδοτείται με ηλεκτρισμό από το σταθμό. Από τη μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτείται το υδρόψυκτο σύστημα ψύξης του σταθμού παραβολικών κατόπτρων.

Το Εμιράτο του Κατάρ έχει εξαιρετικές προοπτικές στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας σύμφωνα με τον υπεύθυνο του Τμήματος Ενέργειας του Γερμανικού Κέντρου Αεροδιαστημικής (DLR). Το DLR έχει καταστεί υπεύθυνο από το Εθνικό Πρόγραμμα Ασφάλειας Τροφίμων του Κατάρ (QNSFP) για την εύρεση κατάλληλων τοποθεσιών για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. [33] Η επιλογή της τοποθεσίας για τη διενεργούμενη προσομοίωση βασίστηκε σε μελέτη της Επιχείρησης Ηλεκτρισμού και Νερού του Κατάρ (Qatar General Electricity and

Water Corporation) για το συνδυασμό της ηλιοθερμικής-τεχνολογίας και της αφαλάτωσης. [74]



Εικόνα 5.7: Επιλογή τοποθεσίας προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων στο Εμιράτο του Κατάρ. [74]

Το ετήσιο δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, όπως προέκυψε από τη ληφθείσα ωριαία χρονοσειρά DNI από τη SoDa Service, είναι περίπου 1748kWh/m^2/y. Στη διενεργούμενη προσομοίωση, η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θεωρείται ξεχωριστή μονάδα η οποία τροφοδοτείται με ηλεκτρισμό από το σταθμό. Από τη μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτείται το υδρόψυκτο σύστημα ψύξης του σταθμού παραβολικών κατόπτρων.

Η επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής στο Μπαχρέιν έγινε σύμφωνα με το χάρτη άμεσου ηλιακού δυναμικού του Μπαχρέιν από το Γερμανικό Ινστιτούτο Αεροδιαστημικής. [16] Η τοποθεσία επιλέχθηκε στην ευρύτερη περιοχή του τεχνητού συγκροτήματος Durrat Al Bahrain, δίπλα στο σταθμό αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης που σχεδιάζεται για την υδροδότηση του τεχνητού συμπλέγματος νησιών. [75] Ο ηλιοθερμικός σταθμός θα μπορεί να καλύπτει τις αυξημένες ενεργειακές ανάγκες του τεχνητού συγκροτήματος και της μονάδας αφαλάτωσης με βιώσιμο τρόπο.

Εικόνα 5.8: Ενδεικτική τοποθεσία προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με παραβολικά κάτοπτρα στο Μπαχρέιν.

Το ετήσιο δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, όπως προέκυψε από τη ληφθείσα ωριαία χρονοσειρά DNI από τη SoDa Service, είναι περίπου 2014kWh/m^2/y. Στη διενεργούμενη προσομοίωση, η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θεωρείται ξεχωριστή μονάδα η οποία τροφοδοτείται με ηλεκτρισμό από το σταθμό. Από τη μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτείται το υδρόψυκτο σύστημα ψύξης του σταθμού παραβολικών κατόπτρων.

Η ηλιοθερμική τεχνολογία παρουσιάζεται ως η πιο ενδεδειγμένη, βιώσιμη λύση στο αυξανόμενο ενεργειακό έλλειμμα του Κουβέιτ. Το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας δίνει τη δυνατότητα για προγραμματιζόμενη και αξιόπιστη παροχή υψηλής ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη σταθερότητα ενός σχετικά μικρού ηλεκτρικού δικτύου όπως του Κουβέιτ. Η επιλογή της ενδεικτικής τοποθεσίας για την προσομοίωση ηλιοθερμικού σταθμού στο Κουβέιτ βασίστηκε στα σχέδια της κυβέρνησης να κατασκευή μια μονάδα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας στην περιοχή Abdaliyah, που βρίσκεται νοτιοδυτικά της πρωτεύουσας. [14], [76]

Εικόνα 5.9: Ενδεικτική τοποθεσία προσομοίωσης ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με παραβολικά κάτοπτρα στο Κουβέιτ.

Το ετήσιο δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, όπως προέκυψε από τη ληφθείσα ωριαία χρονοσειρά DNI από τη SoDa Service, είναι περίπου 1956kWh/m^2/y. Ο ηλιοθερμικός σταθμός που θα προσομοιωθεί θα είναι εφοδιασμένος με αερόψυκτο σύστημα ψύξης.

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογή Εργαλείου Προσομοίωσης

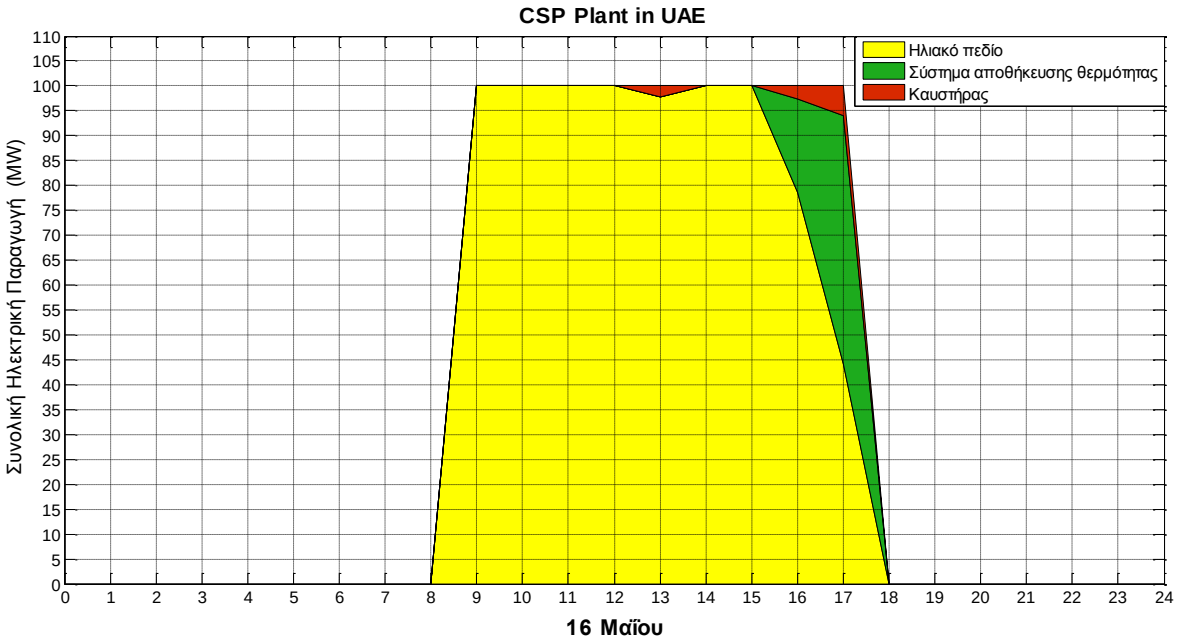
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής παραβολικών κατόπτρων, σε επιλεγμένες τοποθεσίες των χωρών του Κόλπου που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρατίθενται ενδεικτικά διαγράμματα της ημερήσιας λειτουργίας των διαφόρων σταθμών, καθώς και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των σταθμών αυτών όπως και αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργία τους. Το εργαλείο προσομοίωσης υλοποιήθηκε με τη χρήση κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab. Το εργαλείο προσομοίωσης λαμβάνει σαν είσοδο, σε συνδυασμό με τις γεωγραφικές συντεταγμένες, του σταθμού, την ωριαία χρονοσειρά της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας για ένα ολόκληρο έτος, στην περιοχή εγκατάστασης του σταθμού. Οι διάφορες χρονοσειρές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τις επιλεγμένες τοποθεσίες στις Χώρες του Κόλπου ανακτήθηκαν από το διαδικτυακό τόπο της SoDa Service (http://www.soda-is.com). Άλλες παραμετρικές είσοδοι του εργαλείου προσομοίωσης είναι η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς του σταθμού, η συνολική επιφάνεια των παραβολικών κατόπτρων του ηλιακού πεδίου, η αυτοδυναμία του σταθμού, σε ώρες λειτουργίας υπό πλήρες φορτίο, που προσφέρει το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και η εγκατεστημένη θερμική ισχύς του βοηθητικού καυστήρα.

6.1 Ηλιοθερμικός σταθμός στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα

Στην επιλεγμένη τοποθεσία Madinat Zayed του Εμιράτου του Άμπου Ντάμπι, επιλέγεται να προσομοιωθεί ένας ηλιοθερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής παραβολικών κατόπτρων με ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 100MW. Ο σταθμός επιλέγεται να είναι εφοδιασμένος με αποθήκη θερμότητας, η οποία του προσφέρει αυτοδυναμία λειτουργίας 2 ωρών υπό πλήρες φορτίο. Επίσης ο σταθμός είναι εφοδιασμένος με βοηθητικό καυστήρα συμβατικού καυσίμου. Ο καυστήρας, οποίος βρίσκεται τοποθετημένος από την πλευρά του ηλιακού πεδίου, έχει εγκατεστημένη θερμική ισχύ 70MWth. Η συνολική επιφάνεια παραβολικών κατόπτρων του ηλιακού πεδίου ανέρχεται σε 637650 τ.μ. Η συνολική έκταση γης που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός τέτοιου σταθμού είναι της τάξης των 2,5 τ.χλμ. Το σύστημα ψύξης με το οποίο είναι εφοδιασμένος ο σταθμός είναι αερόψυκτο.

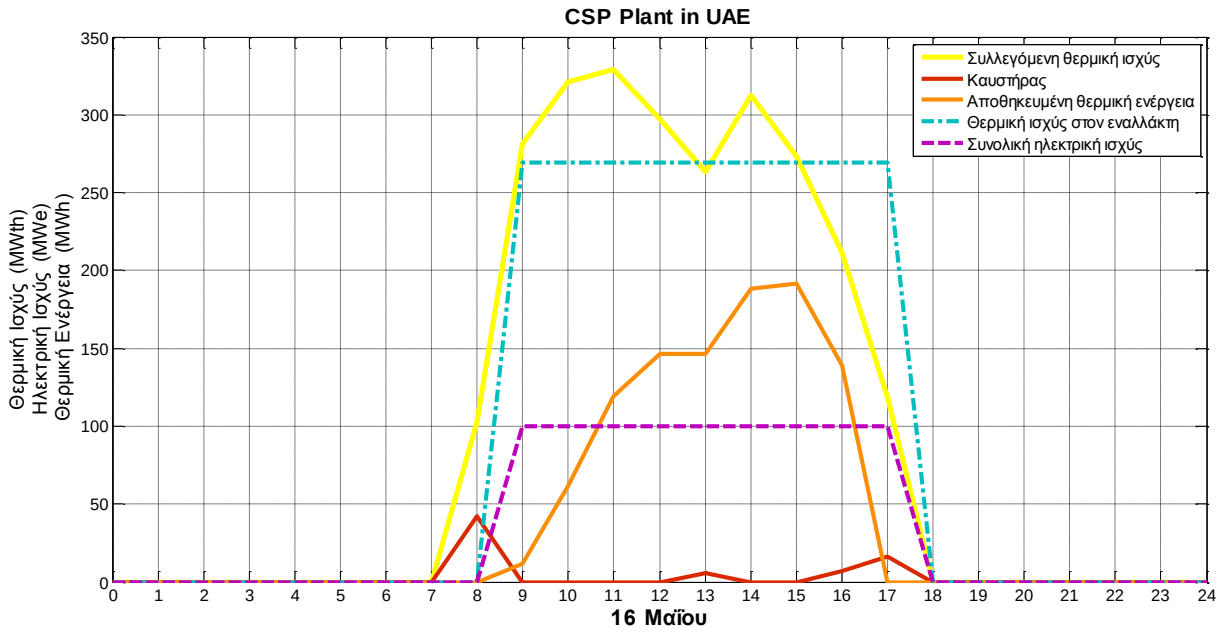
Αναφορικά με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ως είσοδος χρησιμοποιήθηκε ωριαία χρονοσειρά DNI ετήσιας διάρκειας, η οποία ανακτήθηκε από τη SoDa Service. Το αθροιστικό ετήσιο δυναμικό DNI ανήλθε περίπου σε 1958kWh/m^2/y.

Στα επόμενα δύο διαγράμματα παρουσιάζεται η ωριαία λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού κατά τη διάρκεια μιας ενδεικτικής ημέρας του Μαΐου. Συγκεκριμένα στο πρώτο απεικονίζεται η συμμετοχή των συστημάτων του σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή. Στο δεύτερο διάγραμμα απεικονίζεται αναλυτικά η ωριαία διακύμανση χαρακτηριστικών μεγεθών της λειτουργίας του σταθμού κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 6.1: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Παρατηρούμε ότι λόγω της αυξημένης ηλιοφάνειας ο σταθμός παράγει την ονομαστική του ισχύ σε όλο σχεδόν το διάστημα της λειτουργίας του. Παρατηρούμε, επίσης, τη λειτουργία της αποθήκης θερμότητας η οποία συνδράμει στην ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού κατά τις απογευματινές ώρες. Ο βοηθητικός καυστήρας χρησιμοποιείται για την κάλυψη μιας σύντομης βύθισης στην ηλιοφάνεια κατά το μεσημέρι και επιπλέον για την ομαλοποίηση του τερματισμού της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού.



Εικόνα 6.2: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η διακύμανση σημαντικών μεγεθών της λειτουργίας του σταθμού. Αναλυτικά φαίνεται η λειτουργία του καυστήρα και το πρωί, πριν την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού, για την ταχεία προθέρμανση του συνθετικού ελαίου. Χαρακτηριστικό μέγεθος της λειτουργίας του σταθμού είναι και το ωριαίο επίπεδο φόρτισης της αποθήκης θερμότητας (State Of Charge-SOC). Έτσι, η γραμμή της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας δείχνει τις αποθηκευμένες MWh θερμότητας που βρίσκονται ανά πάσα στιγμή στο σύστημα αποθήκευσης. Παρατηρούμε ότι όταν η συλλεγόμενη θερμική ισχύς στο ηλιακό πεδίο ξεπερνάει την ονομαστική θερμική ισχύ του σταθμού που μπορεί να οδηγηθεί στον εναλλάκτη του κύκλου ισχύος τότε η περίσσεια αυτή διοχετεύεται στην αποθήκη φορτίζοντάς την.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά μεγέθη που προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του σταθμού.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στα Η.Α.Ε.

Συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	259,27
Καθαρή ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	231,37
Συντελεστής χρησιμοποίησης	30,99%
Ποσοστό ενέργειας από το συμβατικό καύσιμο επί της συνολικής ετήσιας	11,60%
Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού (m^3)	84.751

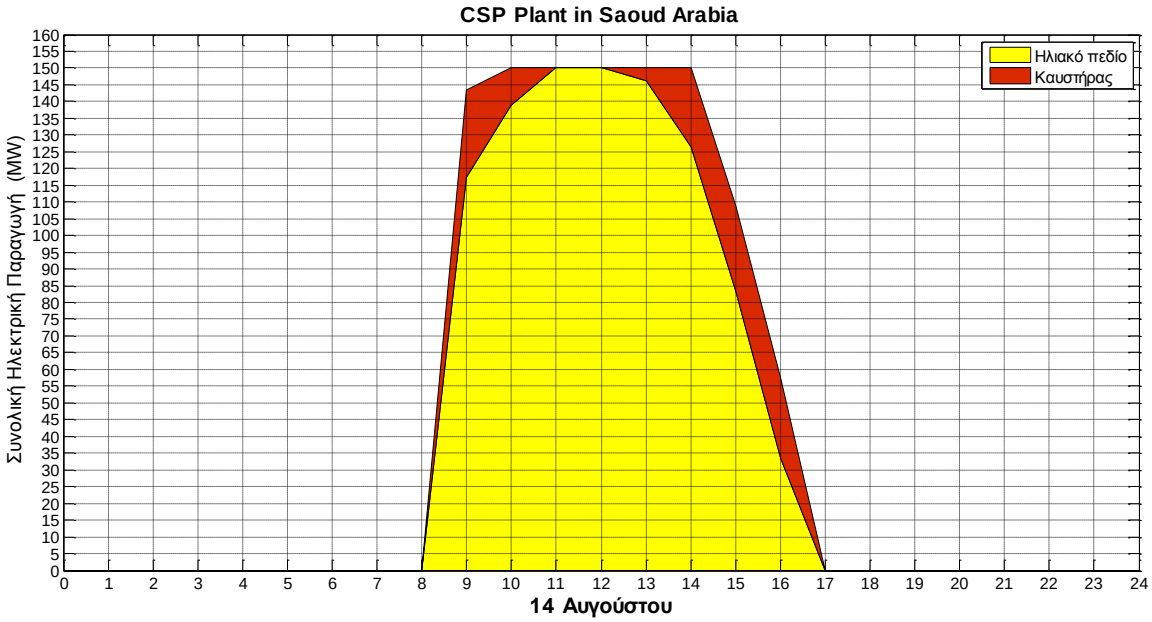
Η διαφορά μεταξύ της συνολικής και της καθαρής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, οφείλεται στις ετήσιες παρασιτικές καταναλώσεις των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού. Παρατηρούμε ότι η ετήσια κατανάλωση νερού είναι σχετικά μικρή λόγω της χρήσης αερόψυκτου συστήματος για την ψύξη του κύκλου ισχύος του σταθμού.

6.2 Ηλιοθερμικός σταθμός στη Σαουδική Αραβία

Ο ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων που επιλέγεται να προσομοιωθεί στην επαρχία Najran της Σαουδικής Αραβίας έχει ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 150 MW. Επιλέγεται επίσης ο υπό προσομοίωση σταθμός να μην διαθέτει σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, καθώς το ηλεκτρικό δίκτυο της Σαουδικής Αραβίας είναι αρκετά μεγάλο για να μπορεί να απορροφήσει και να εξισορροπήσει τις όποιες διακυμάνσεις στην παρεχόμενη ισχύ. Ο σταθμός είναι, όμως, εφοδιασμένος με σύστημα βοηθητικού λέβητα/καυστήρα, το οποίο έχει εγκατεστημένη θερμική ισχύ 70 MWth. Η συνολική επιφάνεια κατόπτρων του ηλιακού πεδίου ανέρχεται σε 784800 τ.μ. ενώ η συνολική εδαφική έκταση που απαιτείται για την εγκατάσταση του σταθμού είναι της τάξης των 3,1 τ.χλμ. Το αερόψυκτο σύστημα ψύξης επιτρέπει τη χαμηλή κατανάλωση νερού που είναι κρίσιμη για μια σχετικά άνυδρη περιοχή όπως η συγκεκριμένη.

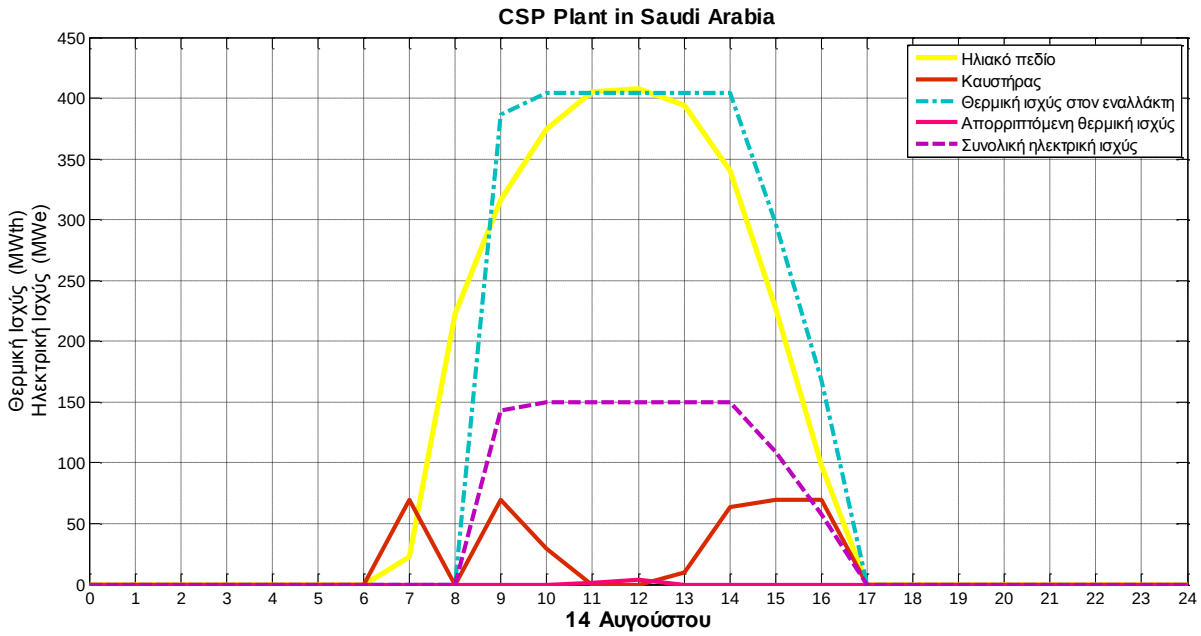
Αναφορικά με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ως είσοδος χρησιμοποιήθηκε ωριαία χρονοσειρά DNI ετήσιας διάρκειας, η οποία ανακτήθηκε από τη SoDa Service. Το αθροιστικό ετήσιο δυναμικό DNI ανήλθε περίπου σε 1947kWh/m^2/y.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα λειτουργίας του εν λόγω σταθμού όπως προέκυψαν από την προσομοίωση της λειτουργίας του για μια αντιπροσωπευτική θερμή ημέρα κατά τη θερινή περίοδο.



Εικόνα 6.3: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στο παραπάνω διάγραμμα λειτουργίας παρατηρούμε ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του σταθμού κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα κατά το μεγαλύτερο διάστημα της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού, λόγω της υψηλής ηλιοφάνειας και της συμπληρωματικής λειτουργίας του συμβατικού καυστήρα. Παρόλο που ο σταθμός δεν είναι εφοδιασμένος με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, η ηλεκτροπαραγωγή του τερματίζεται ομαλά χάρη και στη λειτουργία του καυστήρα.



Εικόνα 6.4: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στην Εικόνα 6.4 φαίνεται αναλυτικότερα η λειτουργία του καυστήρα και πριν την έναρξη της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού, όπου λειτουργεί ταυτόχρονα με το ηλιακό πεδίο για την ταχύτερη θέρμανση του συνθετικού ελαίου έτσι ώστε να ξεκινήσει γρηγορότερα ο σταθμός να παράγει ηλεκτρική ισχύ. Παρατηρούμε επίσης ότι στην αιχμή της ημερήσιας ηλιοφάνειας, η συλλεγόμενη θερμική ισχύς ξεπερνά ελαφρώς την ονομαστική θερμική ισχύ που μπορεί να τροφοδοτηθεί στον κύκλο ισχύος και, ελλείψει αποθήκης θερμότητας, απορρίπτεται με την απεστίαση ορισμένων συλλεκτών. Αξίζει να αναφερθεί ότι το ηλιακό πεδίο έχει διαστασιολογηθεί καταλλήλως, δεδομένης της απουσίας αποθήκης, έτσι ώστε να μην απορρίπτονται μεγάλα ποσά ενέργειας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά μεγέθη που προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του σταθμού.

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στη Σαουδική Αραβία

Συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	342,12
Καθαρή ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	308,09
Συντελεστής χρησιμοποίησης	27,26%
Ποσοστό ενέργειας από το συμβατικό καύσιμο επί της συνολικής ετήσιας	19,84%
Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού (m^3)	111.710

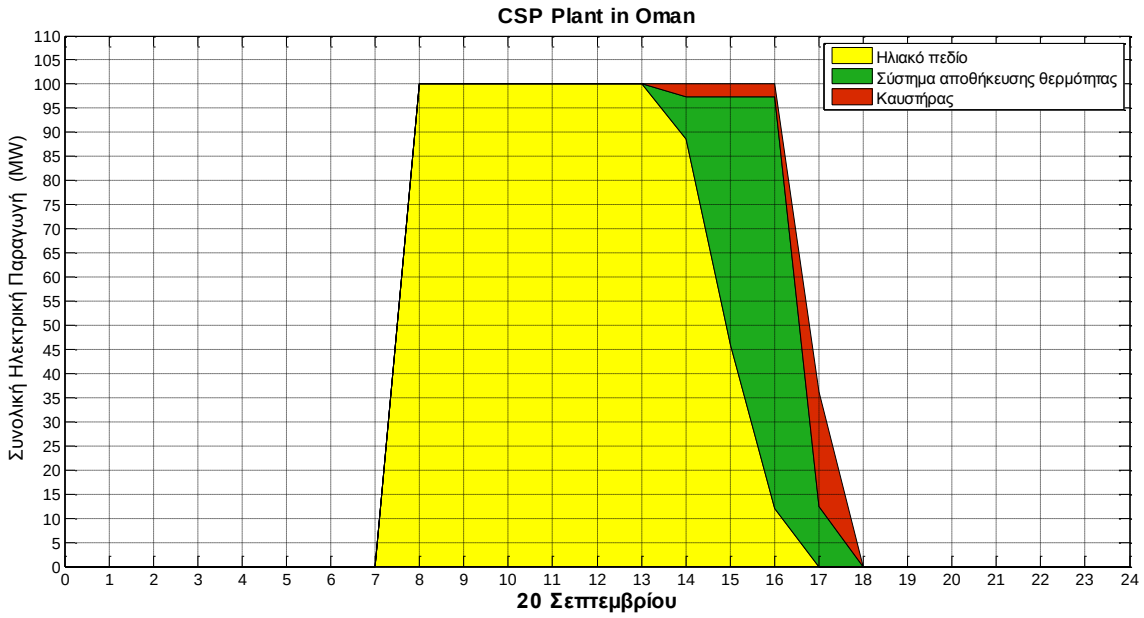
Η διαφορά μεταξύ της συνολικής και της καθαρής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, οφείλεται στις ετήσιες παρασιτικές καταναλώσεις των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού. Παρατηρούμε ότι λόγω της απουσίας συστήματος αποθήκευσης θερμότητας ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι μικρότερος σε σχέση με τον προηγούμενο σταθμό στα ΗΑΕ και επίσης η επί τοις εκατό συμβολή του συμβατικού καυστήρα στην ετήσια ηλεκτροπαραγωγή έχει αυξηθεί. Η ετήσια κατανάλωση νερού είναι σχετικά μικρή λόγω της χρήσης αερόψυκτου συστήματος για την ψύξη του κύκλου ισχύος του σταθμού.

6.3 Ηλιοθερμικός σταθμός στο Ομάν

Στην παραθαλάσσια τοποθεσία στην περιοχή Wilayat Duqm του Ομάν επιλέγεται να προσομοιωθεί η λειτουργία ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων με εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 100 MW. Ο υπό προσομοίωση σταθμός θα διαθέτει σύστημα αποθήκευσης θερμότητας ικανό να του παρέχει 2 ώρες αυτοδυναμίας. Ο σταθμός είναι επιπλέον εφοδιασμένος, στην πλευρά του ηλιακού του πεδίου, με σύστημα βοηθητικού λέβητα/καυστήρα, το οποίο έχει εγκατεστημένη θερμική ισχύ 70 MWth. Η συνολική επιφάνεια κατόπτρων του ηλιακού πεδίου ανέρχεται σε 637650 τ.μ. ενώ η συνολική εδαφική έκταση που απαιτείται για την εγκατάσταση του σταθμού είναι της τάξης των 2,5 τ.χλμ. Ο κύκλος ισχύος του ηλιοθερμικού σταθμού ψύχεται με υδρόψυκτο σύστημα ψύξης το οποίο υδροδοτείται από την παρακείμενη μονάδα αφαλάτωση.

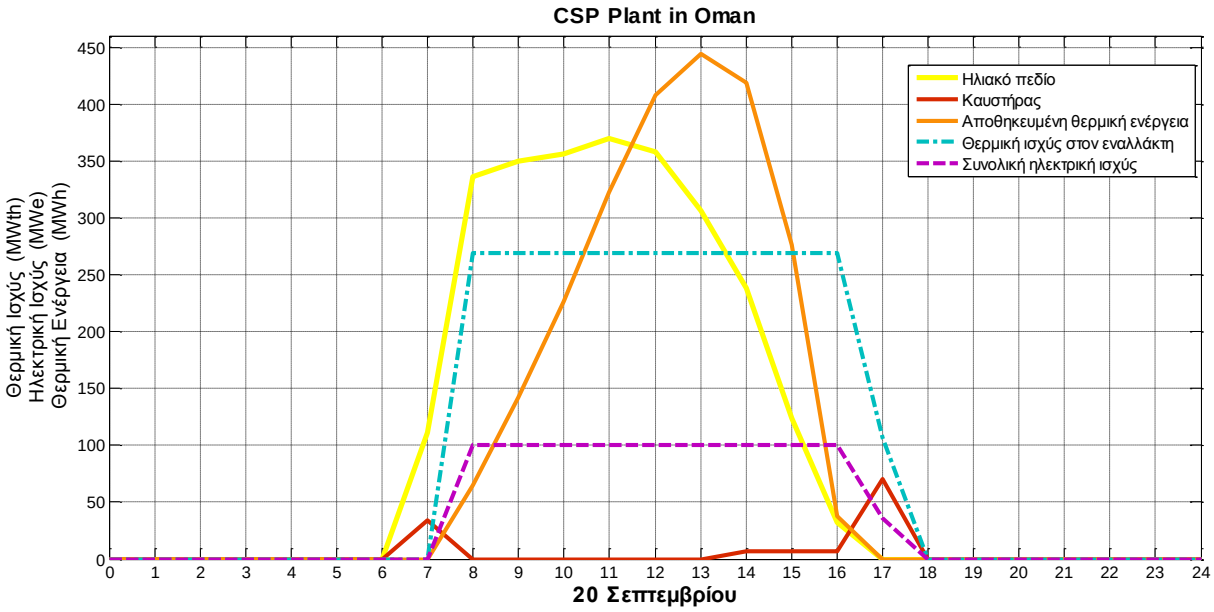
Αναφορικά με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ως είσοδος χρησιμοποιήθηκε ωριαία χρονοσειρά DNI ετήσιας διάρκειας, η οποία ανακτήθηκε από τη SoDa Service. Το αθροιστικό ετήσιο δυναμικό DNI ανήλθε περίπου σε 2257kWh/m^2/y.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα λειτουργίας του εν λόγω σταθμού όπως προέκυψαν από την προσομοίωση της λειτουργίας του για μια αντιπροσωπευτική ημέρα του Σεπτεμβρίου.



Εικόνα 6.5: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στην Εικόνα 6.5 παρατηρούμε χαρακτηριστικά ότι η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού διαρκεί πάνω από δέκα ώρες και σχεδόν σε όλο αυτό το διάστημα ο σταθμός παράγει την ονομαστική του ισχύ. Κατά την πτώση της ηλιοφάνειας συνεχίζεται η παραγωγή της ονομαστικής ισχύος με τη βοήθεια της αποθηκευμένης θερμότητας και του συμβατικού καυστήρα.



Εικόνα 6.6: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στο παραπάνω διάγραμμα λειτουργίας απεικονίζεται η διακύμανση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών του σταθμού κατά τις 20 Σεπτεμβρίου. Φαίνεται η λειτουργία του καυστήρα το πρωί κατά την προθέρμανση του ελαίου όπως επίσης απεικονίζεται και η αποθηκευμένη ενέργεια στην αποθήκη του σταθμού ανά πάσα στιγμή. Παρατηρούμε ότι η αποθήκη αρχίζει να φορτίζεται όταν η συλλεγόμενη θερμική ισχύς στο ηλιακό πεδίο υπερβεί την ονομαστική της τιμή ενώ η εκφόρτιση ξεκινάει με την έναρξη της φθίνουσας πορείας της ηλιοφάνειας. Το μέγιστο επίπεδο φόρτισης που επιτυγχάνεται τη συγκεκριμένη ημέρα ανέρχεται στο 85% περίπου καθώς η μέγιστη δυνατή αποθηκευμένη θερμότητα είναι περίπου 528MWh.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά μεγέθη που προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του σταθμού.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στο Ομάν

Συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	307,64
Καθαρή ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	274,11
Συντελεστής χρησιμοποίησης	35,12%
Ποσοστό ενέργειας από το συμβατικό καύσιμο επί της συνολικής ετήσιας	6,67%
Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού (m^3)	958.480

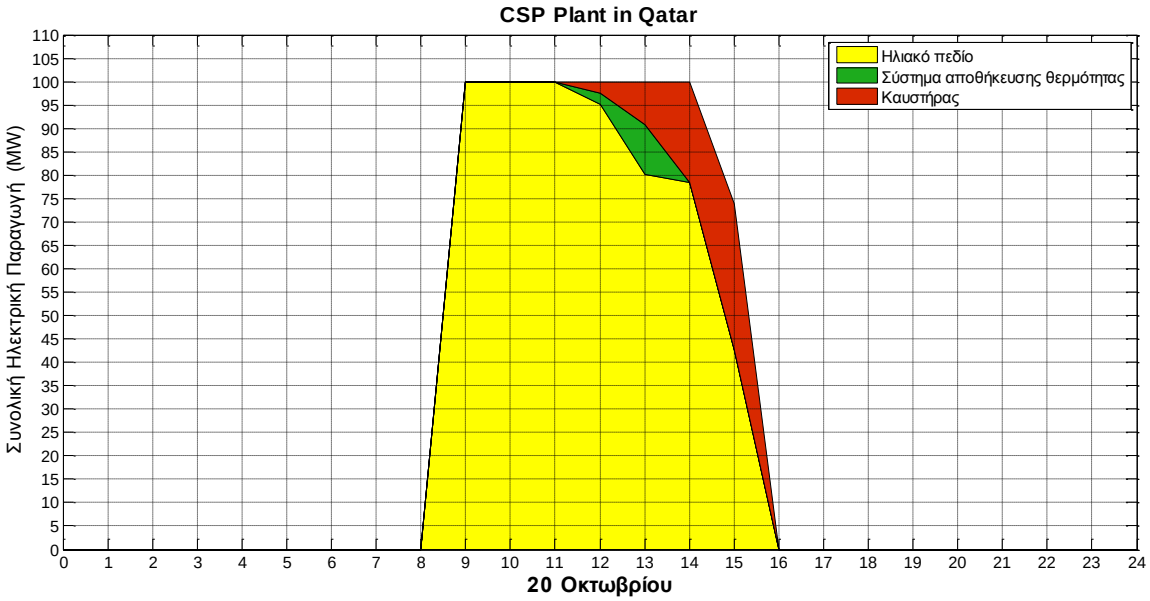
Η διαφορά μεταξύ της συνολικής και της καθαρής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, οφείλεται στις ετήσιες παρασιτικές καταναλώσεις των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού. Η ιδιαίτερα υψηλή ηλιοφάνεια σε συνδυασμό με την ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης θερμότητας, συμβατικού καυστήρα και υδρόψυκτου συστήματος ψύξης αυξάνει το συντελεστή χρησιμοποίηση σε 35,12%. Όμως, η ετήσια κατανάλωση νερού είναι αυξημένη λόγω του συστήματος ψύξης που χρησιμοποιείται.

6.4 Ηλιοθερμικός σταθμός στο Κατάρ

Στο Κατάρ επιλέγεται να προσομοιωθεί η λειτουργία ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων με ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 100 MW. Ο σταθμός είναι εφοδιασμένος με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε τηγμένα άλατα που του παρέχει αυτονομία 3 ωρών. Στο ηλιακό πεδίο του σταθμού είναι εγκατεστημένος συμβατικός καυστήρας με ονομαστική θερμική ισχύ 40 MWth. Η συνολική επιφάνεια κατόπτρων του ηλιακού πεδίου ανέρχεται σε 703050 τ.μ. ενώ η συνολική εδαφική έκταση που απαιτείται για την εγκατάσταση του σταθμού είναι της τάξης των 2,8 τ.χλμ. Το σύστημα ψύξης του ηλιοθερμικού σταθμού είναι υδρόψυκτο και υδροδοτείται από παρακείμενη μονάδα αφαλάτωσης.

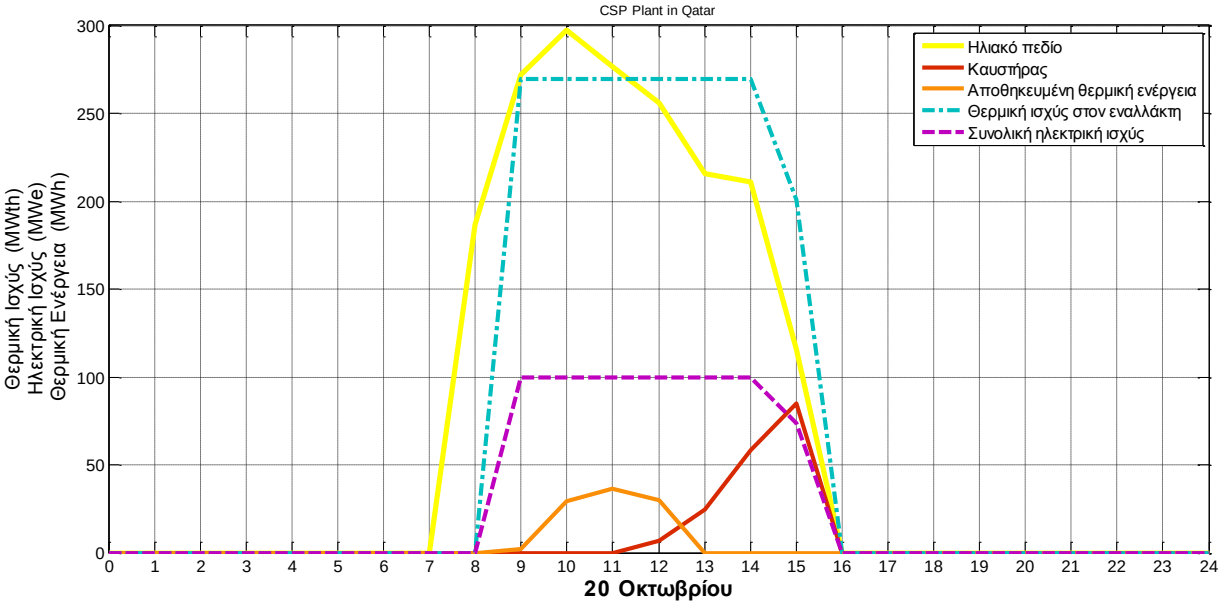
Αναφορικά με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ως είσοδος χρησιμοποιήθηκε ωριαία χρονοσειρά DNI ετήσιας διάρκειας, η οποία ανακτήθηκε από τη SoDa Service. Το αθροιστικό ετήσιο δυναμικό DNI ανήλθε περίπου σε 1748kWh/m^2/y.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα λειτουργίας του εν λόγω σταθμού όπως προέκυψαν από την προσομοίωση της λειτουργίας του για μια ενδεικτική ημέρα του Οκτωβρίου.



Εικόνα 6.7: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στην Εικόνα 6.7 παρατηρούμε τη συμμετοχή των διαφόρων συστημάτων του σταθμού κατά την ηλεκτροπαραγωγή του στις 20 Οκτωβρίου. Ενδεικτικό της σχετικά μειωμένης ηλιοφάνειας την ημέρα αυτή είναι η μικρή συμμετοχή του συστήματος αποθήκευσης το οποίο δεν έχει φορτιστεί επαρκώς. Παρόλα αυτά ο ηλιοθερμικός σταθμός παράγει την ονομαστική του ηλεκτρική ισχύ κατά το μεγαλύτερο διάστημα της ηλεκτροπαραγωγής του.



Εικόνα 6.8: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στην Εικόνα 6.8 φαίνεται χαρακτηριστικά ότι η συλλεγόμενη θερμική ισχύς του ηλιακού πεδίου του σταθμού υπερβαίνει την αντίστοιχη ονομαστική ισχύ μόνο για ένα μικρό διάστημα κατά το οποίο η περίσσεια ισχύος οδηγείται στην αποθήκη και θερμαίνει το μείγμα των τηγμένων αλάτων. Απεικονίζεται και η χρήση του καυστήρα ο οποίος επεμβαίνει προς τη λήξη της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού για να διατηρήσει την παρατείνει για ένα διάστημα την παραγωγή ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος και εν συνεχεία να τερματίσει ο σταθμός ομαλά τη λειτουργία του.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά μεγέθη που προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του σταθμού.

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στο Κατάρ

Συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	257,78
Καθαρή ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	229,55
Συντελεστής χρησιμοποίησης	29,43%
Ποσοστό ενέργειας από το συμβατικό καύσιμο επί της συνολικής ετήσιας	14,68%
Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού (m^3)	806.850

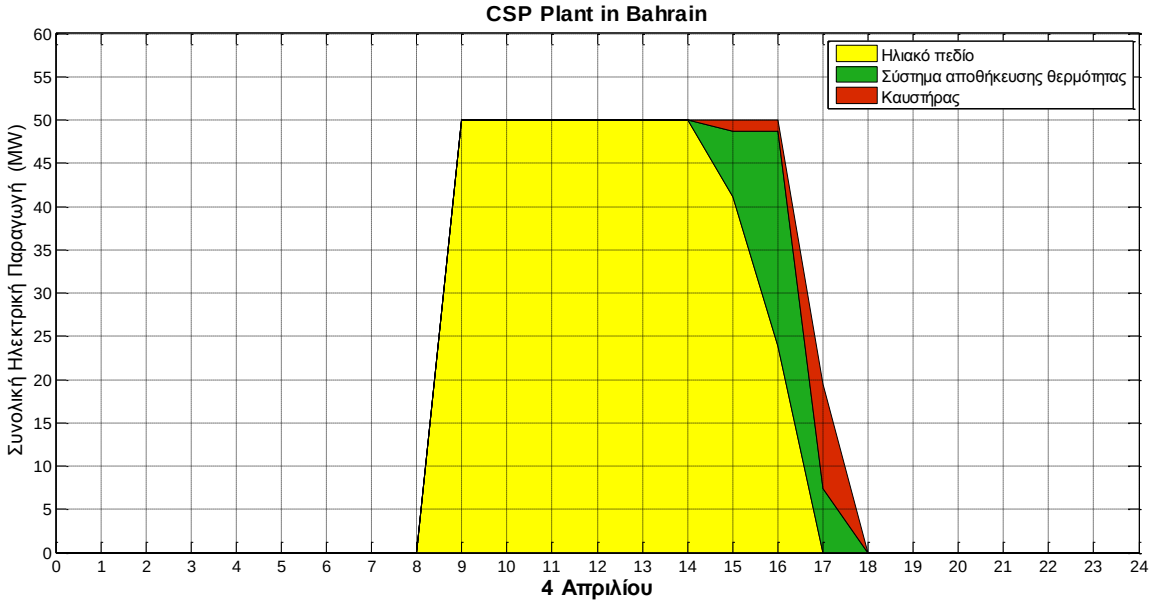
Η διαφορά μεταξύ της συνολικής και της καθαρής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, οφείλεται στις ετήσιες παρασιτικές καταναλώσεις των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού. Η ετήσια κατανάλωση νερού είναι υψηλή εξαιτίας του υδρόψυκτου συστήματος ψύξης του σταθμού.

6.5 Ηλιοθερμικός σταθμός στο Μπαχρέιν

Στην επιλεγμένη τοποθεσία του Μπαχρέιν θα προσομοιωθεί η λειτουργία ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων με εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 50 MW. Ο υπό προσομοίωση σταθμός θα είναι εφοδιασμένος με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας το οποίο θα του παρέχει 2 ώρες αυτονομίας. Ο σταθμός είναι επιπλέον εφοδιασμένος, στην πλευρά του ηλιακού του πεδίου, με σύστημα βοηθητικού λέβητα/καυστήρα, το οποίο έχει εγκατεστημένη θερμική ισχύ 35 MWth. Η συνολική επιφάνεια κατόπτρων του ηλιακού πεδίου ανέρχεται σε 310650 τ.μ. ενώ η συνολική εδαφική έκταση που απαιτείται για την εγκατάσταση του σταθμού είναι της τάξης των 1,2 τ.χλμ. Ο κύκλος ισχύος του ηλιοθερμικού σταθμού ψύχεται με υδρόψυκτο σύστημα ψύξης το οποίο υδροδοτείται από την παρακείμενη μονάδα αφαλάτωσης.

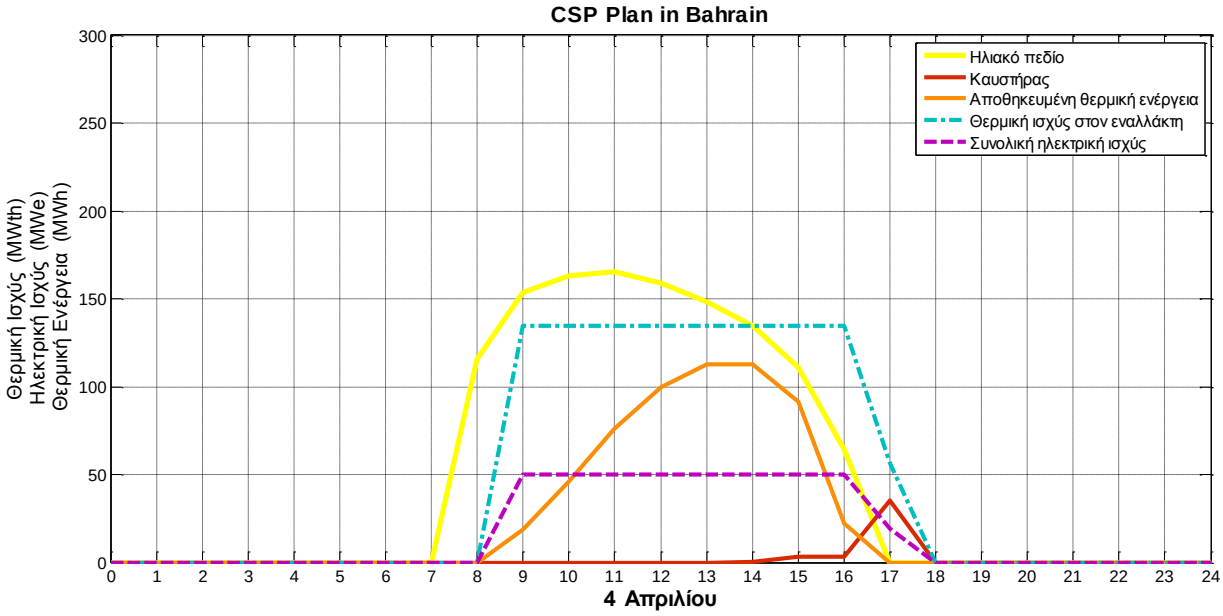
Αναφορικά με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ως είσοδος χρησιμοποιήθηκε ωριαία χρονοσειρά DNI ετήσιας διάρκειας, η οποία ανακτήθηκε από τη SoDa Service. Το αθροιστικό ετήσιο δυναμικό DNI ανήλθε περίπου σε 2014kWh/m^2/y.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα λειτουργίας του εν λόγω σταθμού όπως προέκυψαν από την προσομοίωση της λειτουργίας του για μια ενδεικτική ημέρα του Απριλίου.



Εικόνα 6.9: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στο παραπάνω διάγραμμα ηλεκτροπαραγωγής του ηλιοθερμικού σταθμού παρατηρούμε την συνεισφορά του ηλιακού πεδίου, του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και του βοηθητικού καυστήρα στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού κατά τις 4 Απριλίου. Παρατηρούμε ότι κατά την τελευταία ώρα της λειτουργίας του, ο σταθμός παράγει ηλεκτρική ισχύ αποκλειστικά από την αποθηκευμένη θερμότητα και το βοηθητικό καυστήρα.



Εικόνα 6.10: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στην Εικόνα 6.10 φαίνεται χαρακτηριστικά η ημερήσια διακύμανση της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας στα τηγμένα άλατα της θερμής δεξαμενής. απεικονίζεται η διακύμανση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών του σταθμού κατά τις 20 Σεπτεμβρίου. Παρατηρούμε επίσης ότι ο βοηθητικός καυστήρας δεν χρησιμοποιείται το πρωί για τη θέρμανση του συνθετικού ελαίου καθώς επαρκεί η συλλεγόμενη θερμική ισχύς στο ηλιακό πεδίο για την έγκαιρη έναρξη της ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού. Παρατηρούμε ότι η αποθήκη αρχίζει να φορτίζεται όταν η συλλεγόμενη θερμική ισχύς στο ηλιακό πεδίο υπερβεί την ονομαστική της τιμή. Το μέγιστο επίπεδο φόρτισης που επιτυγχάνεται τη συγκεκριμένη ημέρα ανέρχεται στο 41% περίπου καθώς η μέγιστη δυνατή αποθηκευμένη θερμότητα είναι περίπου 264MWh.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά μεγέθη που προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του σταθμού.

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στο Μπαχρέιν

Συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	130,61
Καθαρή ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	115,31
Συντελεστής χρησιμοποίησης	29,82%
Ποσοστό ενέργειας από το συμβατικό καύσιμο επί της συνολικής ετήσιας	12,01%
Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού (m^3)	407.790

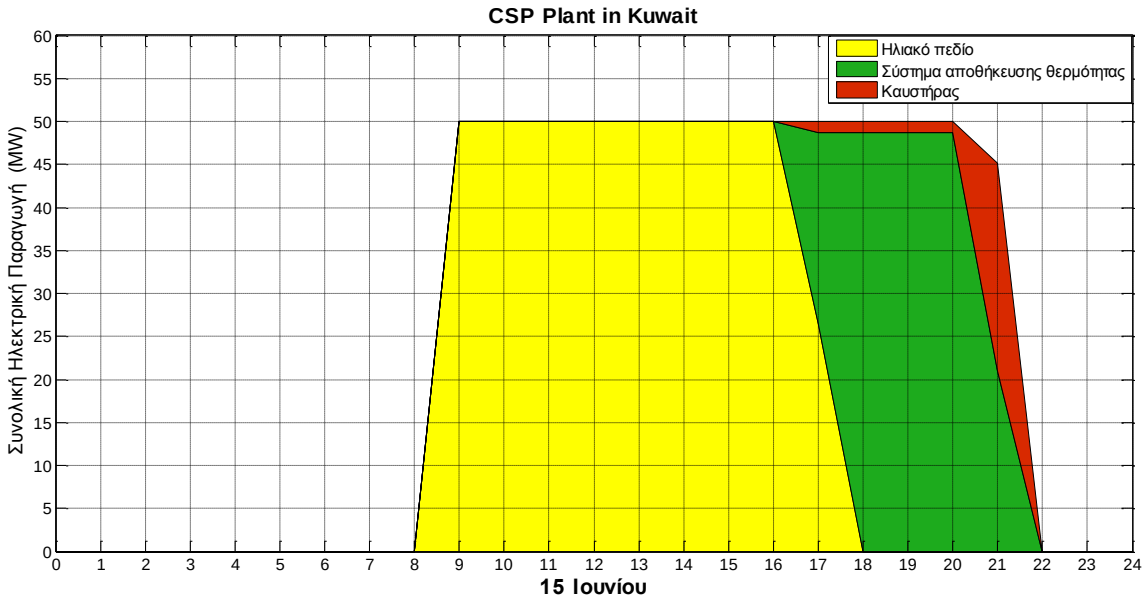
Η διαφορά μεταξύ της συνολικής και της καθαρής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, οφείλεται στις ετήσιες παρασιτικές καταναλώσεις των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού. Η ετήσια κατανάλωση νερού είναι σχετικά αυξημένη λόγω του υδρόψυκτου συστήματος ψύξης που χρησιμοποιεί ο σταθμός.

6.6 Ηλιοθερμικός σταθμός στο Κουβέιτ

Στην περιοχή Abdaliyah του Κουβέιτ επιλέγεται να προσομοιωθεί ηλιοθερμικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ονομαστική ισχύ 50 MW. Για το σταθμό προβλέπεται αυτονομία 4 ωρών την οποία θα του παρέχει σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με τηγμένα άλατα. Στην πλευρά ου ηλιακού του πεδίου είναι εγκατεστημένος συμβατικός καυστήρας με ονομαστική θερμική ισχύ 65MWth. Το υπερδιαστασιολογημένο ηλιακό πεδίο του σταθμού, λόγω της μεγάλης αποθήκης του, αποτελείται από παραβολικά κάτοπτρα με συνολική επιφάνεια 425100 τ.μ. Συνολικά ο ηλιοθερμικός σταθμός απαιτεί μια εδαφική έκταση της τάξης των 1,7 τ.χλμ. Το σύστημα ψύξης του ηλιοθερμικού σταθμού είναι αερόψυκτο.

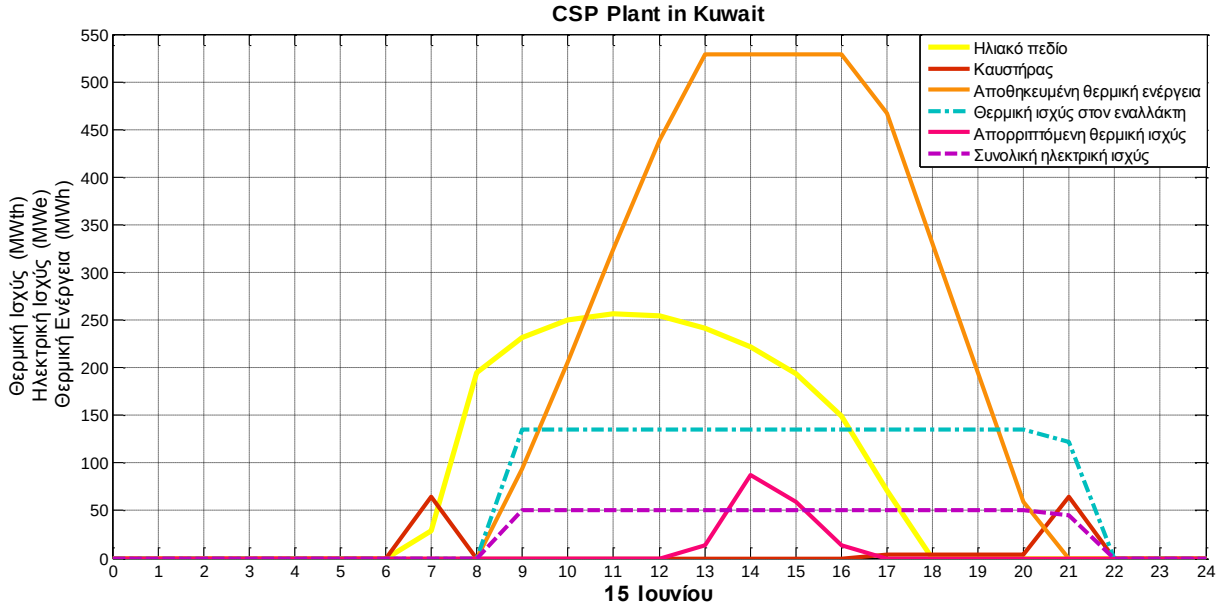
Αναφορικά με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ως είσοδος χρησιμοποιήθηκε ωριαία χρονοσειρά DNI ετήσιας διάρκειας, η οποία ανακτήθηκε από τη SoDa Service. Το αθροιστικό ετήσιο δυναμικό DNI ανήλθε περίπου σε 1956kWh/m^2/y.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα λειτουργίας του εν λόγω σταθμού όπως προέκυψαν από την προσομοίωση της λειτουργίας του για μια ενδεικτική θερμή ημέρα του Ιουνίου.



Εικόνα 6.11: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στο παραπάνω διάγραμμα λειτουργίας παρατηρούμε τη συμμετοχή των διαφόρων συστημάτων του σταθμού κατά την ηλεκτροπαραγωγή του στις 15 Ιουνίου. Ενδεικτικό της υψηλής ηλιοφάνειας την ημέρα αυτή είναι η μεγάλη συνεισφορά του συστήματος αποθήκευσης το οποίο έχει φορτιστεί πλήρως. Παρατηρούμε χαρακτηριστικά ότι το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με τη βοήθεια και του καυστήρα παρατείνει την ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού για 4 ώρες, με αποτέλεσμα ο σταθμός να παράγει ηλεκτρική ισχύ έως τις 22:00 περίπου.



Εικόνα 6.12: Συμμετοχή των συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού στην ημερήσια ηλεκτροπαραγωγή του.

Στην Εικόνα 6.12 φαίνεται χαρακτηριστικά η κατάσταση του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Παρατηρούμε ότι καθώς η συλλεγόμενη θερμική ισχύς υπερβαίνει κατά πολύ και για μεγάλο χρονικό διάστημα την αντίστοιχη ονομαστική ισχύ, η αποθήκη ενέργειας του σταθμού φορτίζεται πλήρως κατά το μεσημέρι με περίπου 529MWh. Καθώς η συλλεγόμενη θερμική ισχύς συνεχίζει να υπερβαίνει για κάποιο διάστημα την ονομαστική θερμική ισχύ του σταθμού, κατά το διάστημα αυτό απεστιάζονται ορισμένα κάτοπτρα καθώς η περίσσεια αυτή ισχύος δεν θα μπορούσε να διοχετευθεί πουθενά και θα προκαλούσε προβλήματα υπερθέρμανσης στο σταθμό. Ως αποτέλεσμα παρατηρούμε και στο παραπάνω γράφημα την απορριπτόμενη θερμική ισχύ κατά τις μεσημεριανές ώρες. Παρουσιάζεται επίσης η χρήση του συμβατικού καυστήρα για τη γρήγορη προθέρμανση του ελαίου το πρωί όπως και προς το τέλος της ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά μεγέθη που προέκυψαν από την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του σταθμού.

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικού σταθμού στο Κουβέιτ

Συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	160,46
Καθαρή ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (GWh)	139,58
Συντελεστής χρησιμοποίησης	38,36%
Ποσοστό ενέργειας από το συμβατικό καύσιμο επί της συνολικής ετήσιας	10,50%
Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού (m^3)	52.518

Η διαφορά μεταξύ της συνολικής και της καθαρής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, οφείλεται στις ετήσιες παρασιτικές καταναλώσεις των διαφόρων συστημάτων του ηλιοθερμικού σταθμού. Η μεγάλη αποθήκη θερμότητας του σταθμού σε συνδυασμό με την υψηλή ηλιοφάνεια και την ύπαρξη του συμβατικού καυστήρα αυξάνουν το συντελεστή χρησιμοποίησης σε 38,36%. Η ετήσια κατανάλωση νερού είναι σχετικά χαμηλή ως αποτέλεσμα του αερόψυκτου συστήματος ψύξης του κύκλου ισχύος.

Κεφάλαιο 7

Επίλογος

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια η ηλιοθερμική τεχνολογία γνωρίζει ταχεία ανάπτυξη, γίνεται ευρέως γνωστή και ανακτά ολοένα και σημαντικότερη θέση στον παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη. Αφενός προσελκύει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για έρευνα και αφετέρου η τεχνογνωσία που αποκτάται και βελτιώνεται μεταφέρεται σε πραγματικές και μεγάλες επενδύσεις σε διάφορες χώρες. Η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής εμφανίζει εξαιρετικές προοπτικές για την παραγωγή μεγάλης κλίμακας ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σύγχρονο ενεργειακό τοπίο, γίνεται προσπάθεια για μεγαλύτερη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο ενώ η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας μετακινείται στις περιοχές με υψηλό δυναμικό και ενισχύονται οι διεθνείς διασυνδέσεις. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η ηλιοθερμική τεχνολογία προσφέροντας αξιόπιστη παροχή υψηλής ποιότητας και μεγάλης κλίμακας ισχύος, απαλλαγμένης από τις διακυμάνσεις της φυσικής πηγής ενέργειας, την καθιστούν ιδανική τεχνολογία σύμφωνα με τις επιδιώξεις της σύγχρονης ενεργειακής εποχής.

Είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρο για την ηλιοθερμική τεχνολογία ότι χώρες όπως αυτές του Συμβουλίου Συνεργασίας του Κόλπου (GCC countries) χαράσσουν προσφάτως νέα ενεργειακή πολιτική, η οποία περιλαμβάνει πολύ ψηλά στις προτεραιότητες της την εν λόγω τεχνολογία. Η απεξάρτηση σε κάποιο βαθμό από την καύση των υδρογονανθράκων για την κάλυψη των τοπικών αναγκών, θα ισχυροποιήσει μακροπρόθεσμα τη θέση των χωρών αυτών, αυξάνοντας τις δυνατότητες εξαγωγής πετρελαίου και αερίου αλλά και έχοντας αποκτήσει την απαραίτητη τεχνογνωσία και υποδομές για την μετά-πετρελαίου εποχή. Το άμεσο ηλιακό δυναμικό στις περιοχές αυτές είναι ιδιαίτερα υψηλό ενώ και η διαγραφόμενη αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης καθιστά αναγκαία μια

βιώσιμη λύση για μεγάλη ηλεκτροπαραγωγή, όπως είναι η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής.

Σε αυτό το πλαίσιο, εξετάστηκε στην παρούσα εργασία η τεχνική απόδοση ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου δίνοντας έμφαση σε κρίσιμα περιβαλλοντικά ζητήματα που ανακύπτουν όπως η υψηλή κατανάλωση νερού. Αφού παρουσιάστηκαν τα γενικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας, αναλύθηκαν τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι χώρες του Κόλπου στην αξιοποίησή της, και η στροφή των χωρών αυτών στην ηλιακή ενέργεια, και συγκεκριμένα στην ηλιοθερμική τεχνολογία.

Περιγράφηκαν οι επικρατέστερες τεχνολογίες των ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως και τα περιβαλλοντικά θέματα που ανακύπτουν από την κατασκευή, λειτουργία και τον παροπλισμό αυτών των σταθμών.

Η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων είναι η επικρατέστερη 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. Στην τεχνολογία αυτή βασίστηκε η μελέτη σκοπιμότητας που διενεργήθηκε για τις προοπτικές της ηλιοθερμικής τεχνολογίας στις χώρες του Κόλπου.

Στην κατεύθυνση αυτή περιγράφηκε εκτενέστερα η διαμόρφωση ενός σταθμού παραβολικών κατόπτρων και ο τρόπος καθημερινής λειτουργίας του σταθμού, ο οποίος ακολουθείται στην προσομοίωση που διενεργήθηκε. Έμφαση δόθηκε στο σύστημα αποθήκευσης θερμότητας του σταθμού, το οποίο του παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η αποθήκη θερμότητας 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.

Έμφαση δόθηκε στη διαδικασία επιλογής κατάλληλων τοποθεσιών για την εγκατάσταση ενός ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων. Οι χώρες του Κόλπου διαθέτουν μεγάλες αναξιοποίητες εκτάσεις με πλούσια ηλιοφάνεια και κατάλληλα χαρακτηριστικά, οι οποίες ενδείκνυνται για την εγκατάσταση αυτών των σταθμών. Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε μια αιτιολογημένη επιλογή συγκεκριμένων ενδεικτικών τοποθεσιών, σε κάθε μια από τις χώρες του Κόλπου, για τη μελέτη της αποδοτικότητας ενός ηλιοθερμικού σταθμού.

Στις επιλεγμένες τοποθεσίες έγινε η εφαρμογή του εργαλείου προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες ωριαίες χρονοσειρές της ετήσιας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Η διαμόρφωση του κάθε σταθμού (εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς, ώρες αυτονομίας, επιφάνεια κατόπτρων, υδρόψυκτο ή αερόψυκτο σύστημα ψύξης) επιλέχθηκε με βάση τις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής. Παρατέθηκαν χαρακτηριστικά διαγράμματα λειτουργίας για τον κάθε σταθμό όπως και πίνακες με

τα πλέον σημαντικά αποτελέσματα της ετήσιας λειτουργίας του (συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, συντελεστής χρησιμοποίησης, ποσοστό χρήσης συμβατικού καυσίμου και κατανάλωση νερού). Αναδείχθηκε, η ομαλή λειτουργία αυτών των σταθμών και η παροχή υψηλής ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος. Η υψηλή ηλιοφάνεια κατά το μεγαλύτερο διάστημα του έτους σε συνδυασμό με τα βοηθητικά υποσυστήματα του σταθμού είχαν ως αποτέλεσμα μεγάλη ηλεκτροπαραγωγή και υψηλό συντελεστή χρησιμοποίησης.

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. Η ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με την ταυτόχρονη υπερδιαστασιολόγηση του ηλιακού πεδίου αυξάνει σημαντικά το συντελεστή χρησιμοποίησης του σταθμού. Μια αποθήκη αρκετών ωρών μπορεί με την κατάλληλη διαστασιολόγηση να αποτελέσει σημαντικό πλεονέκτημα για το σταθμό παρέχοντας υψηλή ευελιξία και αξιοπιστία, ενώ αποτελεί και σταθεροποιητικό παράγοντα για ένα σχετικά μικρό δίκτυο αποσβαίνοντας τις διακυμάνσεις της ηλιοφάνειας και αυξάνοντας σημαντικά την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος.

Όπως προέκυψε επίσης, η επιλογή αερόψυκτου συστήματος ψύξης μειώνει σημαντικά την κατανάλωση νερού με ένα μικρό τίμημα στην παραγωγή του σταθμού. Παρόλα αυτά όταν η χωροθέτηση του σταθμού επιτρέπει οικονομική προσβασιμότητα σε επαρκές νερό ψύξης, προτιμάται το υδρόψυκτο σύστημα ψύξης το οποίο ανταποκρίνεται καλύτερα σε ιδιαιτέρως υψηλές θερμοκρασίες.

Συμπερασματικά, υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις για την κατασκευή ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στις χώρες του Κόλπου. Η ηλεκτροπαραγωγή τους είναι υψηλή ενώ και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που τη συνοδεύουν είναι ιδιαιτέρως ελκυστικά. Το βασικό στοίχημα που απομένει να κερδηθεί είναι η οριστική λήψη αξιόλογων και αποφασιστικών πολιτικών πρωτοβουλιών για τη σαφή πορεία των χωρών αυτών προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο με τη θέσπιση συγκεκριμένων εθνικών στόχων για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργεια. Επιπρόσθετα, η προσέλκυση επενδύσεων στον τομέα της ηλιοθερμικής τεχνολογίας θα επισπευσθεί με τη χάραξη ενός συγκεκριμένου και σταθερού θεσμικού πλαισίου για την οικονομική διασφάλιση τέτοιων κινήσεων (π.χ. εγγυημένες τιμές πώλησης).

7.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις

Η προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας ηλιοθερμικών σταθμών και η αποτίμηση της αποδοτικότητάς τους σε επιλεγμένες τοποθεσίες των χωρών του Κόλπου αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο βήμα για τη διερεύνηση των προοπτικών της αξιοποίησης της ηλιοθερμικής τεχνολογίας στην περιοχή αυτή.

Οι χώρες του Κόλπου αποτελούν μια αναδυόμενη και πολλά υποσχόμενη αγορά για την ηλιοθερμική τεχνολογία και θα πρέπει να γίνουν προσεκτικές κινήσεις για να διασφαλιστεί η αξιοποίηση του πλούσιου ηλιακού δυναμικού. Η αποσαφήνιση των θεσμικών και χρηματοδοτικών όρων στο οικονομικό πεδίο θα δώσει τη δυνατότητα για έναν σχετικά ακριβή προσδιορισμό των δεικτών οικονομικής αξιολόγησης τέτοιων επενδύσεων. Η θέσπιση συγκεκριμένων εθνικών στόχων για τη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο αλλά και αυστηρών περιβαλλοντικών προδιαγραφών για τις ενεργειακές μονάδες θα δώσει τη δυνατότητα να εσωτερικευθούν τα εξωτερικά κόστη από τους ρυπογόνους σταθμούς ενέργειας και να πραγματοποιηθούν κοινωνικές αναλύσεις κόστους-οφέλους που θα αναδεικνύουν το πραγματικό όφελος από τη στροφή στην ηλιακή ενέργεια και την ηλιοθερμική τεχνολογία.

Η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία και σημαντική έρευνα διενεργείται σε πολλά πεδία για την επίτευξη του τελικού στόχου, ο οποίος είναι η παραγωγή υψηλής ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος σε ανταγωνιστικό κόστος. Όσον αφορά το άμεσο ηλιακό δυναμικό, γίνονται συντονισμένες δράσεις για την ακριβέστερη καταγραφή του. Ταυτόχρονα, σημαντικές προοπτικές παρουσιάζουν και οι υπόλοιπες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών, πέραν των παραβολικών κατόπτρων. Σε κάθε περίπτωση, οι προβλέψεις είναι ελπιδοφόρες και νέες αγορές όπως αυτή των χωρών του Κόλπου αναμένεται να πρωταγωνιστήσουν στο εγγύς μέλλον.

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] Κ. Παπασταμούλος, Α. Μαντήκος, Στ. Παπαθανασίου, "Τεχνολογίες Ηλιοθερμικών Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής". Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση, Τεύχος 229, 2011.

[5] Κ. Παπασταμούλος, Α. Μαντήκος, Στ. Παπαθανασίου, "Τεχνολογίες Ηλιοθερμικών Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής". 4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φοιτητών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών – ΣΦΗΜΜΥ 4, Πάτρα, 2010.

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

[7] Gigaton Throwdown Initiative, "Concentrating Solar Power", www.gigatonthrowdown.org

[8] Danyel Reiche, "Energy Policies of Gulf Cooperation Council (GCC) countries — possibilities and limitations of ecological modernization in rentier states", Energy Policy 38, p. 2395-2403, 2010.

[9] W.E. Alnaser, N.W. Alnaser countries", Renewable and Sustainable, "The status of renewable energy in the GCC Energy Reviews 15, p. 3074-3098, 2011.

[10] H. Doukas, K.D. Patlitzianas, A. Kagiannas, J. Psarras, "Renewable energy sources and rational use of energy development in the countries of the GCC: myth or reality?" Renewable Energy 31, p. 755–770, 2006.

[11] OSEC, "Cleantech Business in the GCC – Market Assessment Report", 2009.

[12] TheEDGE, "Electrifying the Gulf: The GCC's power paradox", www.theedge.me, 2012.

[13] BGreen, "A concentrated vision", www.buildgreen.ae, 2012.

[14] CSP Today, "MENA: CSP markets gain monentum", social.csptoday.com, 2011.

[15] Saudi Gazette, "Resource mapping critical to GCC renewable energy quest", www.saudigazette.com.sa, 2012.

[16] German Aerospace Center (DLR), "Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region – Final Report", 2005.

[17] CSP Today, "Is CSP the solution to water poverty in MENA?", social.csptoday.com, 2011.

[18] Dr. Houda Ben Jannet Allal, "Combined solar power and desalination plants: Techno-economic potential in Mediterranean Partner Countries", www.med-csd-ec.eu, 2010.

[19] Dr. A. Gastli, Dr. Y. Charabi, "GIS-Based Assessment Of Combined CSP Electric Power & Seawater Desalination Plant For Duqum-Oman", Renewable & Sustainable Energies Research Group, Sultan Qaboos University, 2009.

[20] ProtermoSolar, "Saudi Arabia to unveil first tender for solar power in early 2013", www.helioscsp.com, 2012.

[21] ProtermoSolar, "Oman plans a 200 megawatts Concentrated Solar Power Plant", www.helioscsp.com, 2012.

[22] A.M.K. El-Ghonemy, "Water desalination systems powered by renewable energy sources: Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, p. 1537-1556, 2012.

[23] 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.

[24] "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.

[25] "Concentrating Solar Power: From research to implementation", Report of European Commission, 2007.

[26] 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.

[27] "Parabolic trough power plant with thermal storage", Solar Millennium AG.

[28] "Solar Parabolic Trough", Solar Paces Overview.

[29] "Cost Reduction study for solar thermal power plants.", Enermodal Engineering Limited, 1999.

[30] J. Garcia-Barberena, P. Garcia, M. Sanchez, M.J. Blanco, C. Lasheras, A. Padros, J. Arraiza, "Analysis of the influence of operational strategies in plant performance using SimulCET, simulation software for parabolic trough power plants", Solar Energy 86, p. 53-63, 2012.

[31] Wikipedia, "List of solar thermal power stations", en.wikipedia.org

[32] Wikipedia, "Andasol Solar Power Station", en.wikipedia.org

[33] SUN & WIND ENERGY, www.sunwindenergy.com

[34] Wikipedia, "Solnova Solar Power Station", en.wikipedia.org

[35] Dr. Olaf Goebel, "Masdar's Renewable Energy projects in Abu Dhabi", EU-GCC Clean Energy Network – REN Discussion Group, 2012.

[36] Wikipedia, "Shams Solar Power Station", en.wikipedia.org

[37] "Solar Tower", Solar Paces Overview.

[38] "10 MW Solar Thermal Power Plant for Southern Spain", Final Technical Progress Report.

[39] "Solutions to Global Climate Change Power Tower Plants", Abengoa Solar.

[40] 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.

[41] Wikipedia, "PS10 Solar Power Tower", en.wikipedia.org

[42] "Solutions to Global Climate Change - Power Tower Plants", Abengoa Solar.

[43] Torresol Energy, www.torresolenergy.com

[44] Ivanpah Solar Energy Generating System, ivanpahsolar.com

[45] Tonopah Solar Energy, www.tonopahsolar.com

[46] http://energydeals.wordpress.com/

[47] "Concentrated Solar Power: Focusing the sun's energy for large-scale power generation", Environmental and Energy Study Institute, 2009.

[48] National Renewable Eenrgy Laboratory, www.nrel.gov

[49] AREVA, www.areva.com

[50] Wikipedia, "Kimberlina Solar Thermal Energy Plant", en.wikipedia.org

[51] German Aerospace Center (DLR), "Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power – Final Report", 2006.

[52] Climate Investment Funds, "Clean Technology Fund Investment Plan for Concentrated Solar Power in the Middle East and North Africa Region Executive Summary", Inter-sessional Meeting of the CTF Trust Fund Committee, Washington D.C., 2009.

[53] ProtermoSolar, "Environmental Impacts of CSP: Water, Land, Materials, Emissions, Flora and Fauna", www.helioscsp.com, 2012.

[54] 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", 11th Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies, September 4-6, 2002, Zürich, Switzerland.

[55] 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.

[56] F. Lippke, "Simulation of the Part-Load Behaviour of a 30 MWe SEGS Plant", Report No. SAND95-1293, SNL, Albuquerque, NM, USA.

[57] A.M. Patnode, "Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants", Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, USA, 2009.

[58] U. Herrmann, B. Kelly, and H. Price, "Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants", Energy 29, 883-893, 2004.

[59] 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.

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

[61] 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.

[62] T.A. Stuetzle, "Automatic Control of the 30 MWe SEGS VI Parabolic Trough Plant", Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, USA, 2002.

[63] J. Dersch, "Water saving heat rejection for solar thermal power plants", Institute of Technical Thermodynamics, DLR, 2007.

[64] 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.

[65] Bright Hub Engineering, "Steam Power Plant Condenser Cooling - Part 1: Introduction to Alternatives", www.brighthubengineering.com, 2010.

[66] "Electrical Energy Equipment: Cooling Towers", Energy Efficiency Guide for Industry in Asia, www.energyefficiencyasia.org

[67] CSP Today, "CSP cooling options: Workarounds for water scarcity", social.csptoday.com, 2010.

[68] U.S. Depertment of Energy-National Eenrgy Technology Laboratory, "Use of Non-Traditional Water for Power Plant Applications: An Overview of DOE/NETL R&D Efforts", 2009.

[69] "Operating Cooling Towers In Freezing Weather", SPX Cooling Technologies, January 2007.

[70] U.S. Department of Energy, "Concentrating Solar Power Commercial Application Study: reducing Water Consumption of Concentrating Solar Power Electricity Generation", Report to Congress.

[71] "Steam turbines for CSP plants", Siemens, 2010.

[72] M. Schlecht, "Selection of Promising CSP Sites", 2nd Concentrated Solar Thermal Power Summit India, 2011.

[73] Yousif Al Ali, Presentation for Masdar Power.

[74] Qatar General Electricity and Water Corporation, "Feasibility study on combined CSP-Seawater Desalination technology", Strategic Direction: 6th World Water Forum SD.

[75] Water Technology, "Durrat Al Bahrain Desalination Plant, Bahrain", www.water-technology.net

[76] CSP Today, "Kuwait: Letting CSP slip through its fingers", social.csptoday.com, 2011.

[77] Solutia, "THERMINOL VP-1", 12/98.