



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ  
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μητσοπούλου Αγλαΐα

Πάλλιου Αλεξάνδρα

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Δέρβος Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα Ιούλιος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ  
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μητσοπούλου Αγλαΐα

Πάλλιου Αλεξάνδρα

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Δέρβος Κωνσταντίνος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... Ιουλίου 2014

.....

Μητσοπούλου Αγλαΐα

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Η/Υ

Πάλλιου Αλεξάνδρα

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Η/Υ

Copyright © Μητσοπούλου Αγλαΐα, Πάλλιου Αλεξάνδρα 2014

ΜΕ ΕΠΙΦΥΛΑΞΗ ΠΑΝΤΟΣ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΟΣ. ALL RIGHTS RESERVED.

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

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



## Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, υβριδικών και μη, τα οποία τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται ραγδαία και για τα οποία οι εκτιμήσεις προβλέπουν σημαντικό μελλοντικό μερίδιο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και η κατανόησή τους μέσω της παρουσίασης αναλυτικών στοιχείων που αφορούν τη λειτουργία και την παραγωγή ήδη εγκατεστημένων σταθμών παγκοσμίως, με τις ΗΠΑ και την Ισπανία να πρωτοπορούν στον τομέα αυτό. Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται κάποια γενικά στοιχεία για την ηλιακή ενέργεια, περιλαμβάνοντας υπολογισμούς που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία και τη γεωμετρία Ήλιου-γης. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται ένα γενικό πλαίσιο των αρχών λειτουργίας των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, το οποίο είναι κοινό σε όλες τις διαφορετικές τεχνολογίες και αφορά τη διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε μηχανική, ενώ περιγράφεται και ο μηχανισμός παρακολούθησης του ήλιου τον οποίο χρησιμοποιούν οι διάφορες τεχνολογίες. Τα συγκεντρωτικά συστήματα είναι τεσσάρων ειδών: τα παραβολικά κοίλα, οι πύργοι ισχύος, τα γραμμικά Fresnel συστήματα και τα συστήματα δίσκου-μηχανής. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των συστημάτων των παραβολικών κοίλων συλλεκτών και παρατίθενται στοιχεία της λειτουργίας κάποιων αντιπροσωπευτικών σταθμών της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των συστημάτων των πύργων ισχύος και παρατίθενται στοιχεία της λειτουργίας κάποιων αντιπροσωπευτικών σταθμών της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των συστημάτων των γραμμικών συστημάτων Fresnel και παρατίθενται στοιχεία της λειτουργίας κάποιων αντιπροσωπευτικών σταθμών της συγκεκριμένης τεχνολογίας, ενώ επιχειρείται και μία σύγκριση τους με τα συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών και των πύργων ισχύος. Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται τα συστήματα δίσκου-μηχανής και τα εξαρτήματά τους, ενώ αναφέρονται και κάποιοι πειραματικοί σταθμοί που δεν βρίσκονται πια σε λειτουργία καθώς η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η λιγότερο αναπτυγμένη. Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύονται τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης, τα διαφορετικά είδη και τα κριτήρια σχεδιασμού του κατάλληλου συστήματος ανάλογα με το είδος του σταθμού ισχύος όπου ενσωματώνεται. Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κατηγορίες και οι διάφορες τεχνικές υβριδοποίησης σταθμών συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων καθώς και ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών. Στο ένατο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην κατάσταση της αγοράς συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων βάσει περιοχής και στις πολιτικές που ακολουθούνται. Στο δέκατο κεφάλαιο περιγράφονται περιληπτικά οι τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων που παρουσιάστηκαν και παρατίθενται κάποια συμπεράσματα που μπορούν να προκύψουν από τη μελέτη και τη σύγκριση τους.

**Λέξεις κλειδιά:** Ηλιακή γεωμετρία, Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (CSP), Παραβολικοί κοίλοι συλλέκτες, Πύργοι ισχύος, Γραμμικοί συλλέκτες Fresnel, Συστήματα δίσκου-μηχανής, Συστήματα θερμικής αποθήκευσης, Υβριδοποίηση, Feed-in-tariff (FiT)

## Abstract

The purpose of this study is the research of Concentrated Solar Power systems, hybrid or not, which are growing rapidly in recent years and for which assessments predict an important future share in electricity generation, and the comprehension of them through the presentation of detailed data on the operation and production of stations already installed worldwide, with the USA and Spain being at the forefront in this area. The first chapter presents some general information about solar energy, including calculations regarding solar radiation and the Earth-Sun geometry. In the second chapter a general framework of the principles of operation of Concentrated Solar Power systems is given, which is common in all different technologies and involves the conversion process of solar energy into mechanical while the sun-tracking mechanism is described as well, which is used by all different technologies. The CSP systems are of four types: parabolic trough collectors, power tower, linear Fresnel collectors and dish-engine systems. The third chapter describes the characteristics of the parabolic trough collectors and provides data of some representative plants of this technology which are in operation. The fourth chapter describes the characteristics of power towers and provides data of some representative plants of this technology which are in operation. The fifth chapter describes the characteristics of linear fresnel reflector systems and provides data of some representative plants of this technology which are in operation, while attempting a comparison with parabolic trough collectors and power tower systems. The sixth chapter describes the dish-engine systems and their components, mentioning also some experimental stations that are no longer in operation as this technology is less developed than the others. The seventh chapter analyzes thermal energy storage systems, the different types and design criteria of the optimum system depending on the type of power station into which it is integrated. The eighth chapter presents the categories and various hybridization techniques of concentrated solar power plants as well as some application examples. The ninth chapter refers to existing market conditions of concentrated solar power systems, based on the region, and the policies pursued. The tenth chapter briefly describes the concentrated solar power technologies, presented in this study, and provides some conclusions that can be derived from the study and comparison of them.

**Keywords:** Solar geometry, Concentrated solar power (CSP), Parabolic trough collectors, Power towers, Linear Fresnel reflectors, dish-engine systems, Thermal energy storage systems, Hybridization, Feed-in-tariff (FiT)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή .....	14
1.1 Ηλιακή ενέργεια .....	14
1.1.1 Πλεονεκτήματα χρήσης ηλιακής ενέργειας .....	15
1.2 Γεωμετρία Ήλιου - Γης .....	16
1.2.1 Κινήσεις γης .....	16
1.2.2 Απόκλιση ήλιου .....	17
1.2.3 Γεωγραφικό πλάτος .....	18
1.2.4 Γεωγραφικό μήκος .....	19
1.2.5 Εξίσωση χρόνου .....	19
1.2.6 Γωνίες θέσης ήλιου .....	20
1.2.7 Γωνίες επιφάνειας .....	23
1.3 Ηλιακή ακτινοβολία .....	26
1.3.1 Μορφές και υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας .....	27
1.3.2 Απόσβεση ηλιακής ακτινοβολίας εξαιτίας της ατμόσφαιρας .....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα (Σ.Η.Σ.) .....	32
2.1 Ιστορική περιγραφή της μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε θερμική .....	32
2.2 Περιγραφή αρχών λειτουργίας των Σ.Η.Σ. ....	33
2.3 Μηχανισμός παρακολούθησης του ήλιου (sun tracking) .....	37
2.3.1 Παρακολούθηση σε έναν άξονα .....	38
2.3.2 Παρακολούθηση σε δύο άξονες .....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών (Parabolic Trough Collector systems, PTCs) .....	42
3.1 Γενικά .....	42
3.2 Παραγωγή ηλεκτρισμού με PTCs .....	43
3.3 Περιγραφή λειτουργίας με χρήση του παραδείγματος των σταθμών SEGS .....	43
3.3.1 Γενική περιγραφή .....	43



3.3.2 Περιγραφή των επιμέρους στοιχείων .....	45
3.3.3 Κύρια χαρακτηριστικά σταθμών SEGS .....	47
3.4 Πειραματικοί και εμπορικοί σταθμοί που έχουν κατασκευαστεί παγκοσμίως .....	48
3.4.1 Nevada Solar One .....	48
3.4.2 Solnova Solar Power Station .....	52
3.4.3 Solana Generating Station .....	54
3.5 Τεχνολογίες ISCCS .....	56
3.6 Κύκλος Rankine .....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Συστήματα πύργων ισχύος (Power Tower systems) .....	61
4.1 Περιγραφή αρχών λειτουργίας και συστατικών στοιχείων .....	61
4.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των πύργων ισχύος .....	63
4.3 Πειραματικοί και εμπορικοί σταθμοί που έχουν κατασκευαστεί παγκοσμίως .....	64
4.3.1 PS10-PS20 .....	64
4.3.2 Συστήματα τηγμένου άλατος .....	67
4.3.3 Gemasolar Thermosolar Plant .....	69
4.3.4 Inavah Solar Electric Generating System .....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Γραμμικοί ανακλαστές freshnel (Linear Freshnel Reflectors LFRs) .....	75
5.1 Γενική περιγραφή .....	75
5.2 Είδη συγκροτημάτων δέκτη .....	76
5.3 Ιστορική εξέλιξη LFRs .....	77
5.4 Τεχνολογία SOTA (State Of The Art) .....	80
5.5 Πειραματικοί και εμπορικοί σταθμοί που έχουν κατασκευαστεί παγκοσμίως .....	80
5.5.1 Puerto Erado 1 / Puerto Erado 2 (PE1 / PE2) .....	80
5.5.2 Kimberlina Solar Thermal Energy Plant .....	83
5.5.3 Συλλέκτες freshnel με τηγμένα άλατα .....	84
5.5.4 Σύγκριση LFRs με PTCs .....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συστήματα (παραβολικού) δίσκου/μηχανής (Dish/Engine) .....	90

6.1 Γενική περιγραφή και αρχές λειτουργίας .....	90
6.2 Βασικά χαρακτηριστικά .....	91
6.2.1 Συγκεντρωτές .....	91
6.2.2 Δέκτες .....	93
6.2.3 Μηχανές .....	94
6.2.4 Βοηθητικός εξοπλισμός .....	96
6.3 Παραδείγματα εφαρμοσμένων σταθμών .....	97
6.3.1 DISTAL 1 .....	98
6.3.2 DISTAL 2 .....	99
6.3.3 EURODISH .....	100
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Τεχνολογίες και συστήματα αποθήκευσης θερμότητας (TES) για CSPs .....</b>	<b>103</b>
7.1 Μέρη συστήματος αποθήκευσης .....	103
7.2 Προϋποθέσεις βελτίωσης αποθήκευσης και μακροζωίας του συστήματος και κριτήρια σχεδιασμού .....	103
7.3 Σχεδιασμός σταθμών CSP με συστήματα TES .....	105
7.3.1 Επίπεδα σχεδιασμού .....	105
7.3.2 Ενσωμάτωση συστήματος TES .....	107
7.3.3 Κριτήρια επιλογής κατάλληλου TES .....	110
7.4 Κατηγορίες TES βάσει του τρόπου αποθήκευσης .....	113
7.4.1 Ενεργητική αποθήκευση .....	113
7.4.2 Παθητική αποθήκευση .....	116
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Υβριδοποίηση .....</b>	<b>121</b>
8.1 Αναγκαιότητα εφαρμογής της τεχνικής της υβριδοποίησης .....	121
8.2 Υβριδικές κατηγορίες .....	123
8.2.1 Ελαφρές υβριδικές συνέργειες .....	123
8.2.2 Μέτριες υβριδικές συνέργειες .....	123

8.2.3	Ισχυρές υβριδικές συνέργειες .....	124
8.3	Ο ρόλος των διαφορετικών τεχνολογιών συγκέντρωσης .....	124
8.4	Επιλογές υβριδοποίησης .....	125
8.4.1	Ηλιακά υποβοηθούμενοι σταθμοί παραγωγής ισχύος με καύση άνθρακα .....	126
8.4.1.1	Διαδικασία και διατάξεις υβριδισμού .....	127
8.4.2.2	Παραδείγματα .....	128
8.4.2	Εφεδρεία και ενίσχυση των ηλιακών θερμοηλεκτρικών σταθμών με ορυκτά καύσιμα .....	132
8.4.2.1	Οικονομική επίδραση .....	132
8.4.3	Υβριδοποίηση τεχνολογιών CSP με συστήματα φυσικού αερίου .....	133
8.4.3.1	Προηγμένα συστήματα υβριδοποίησης .....	134
8.4.4	Υβριδοποίηση τεχνολογιών CSP με βιομάζα και απόβλητα υλικά .....	138
8.4.5	Υβριδοποίηση τεχνολογιών CSP με γεωθερμική ενέργεια .....	142
8.4.6	Υβριδοποίηση τεχνολογιών CSP με αιολική ενέργεια .....	144
8.5	Συμπεράσματα .....	146
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Τρέχουσα κατάσταση στην αγορά CSP τεχνολογιών βάσει περιοχής .....</b>		<b>149</b>
9.1	Ισπανία .....	149
9.2	Ίταλια .....	152
9.3	Γαλλία .....	153
9.4	Πορτογαλία .....	154
9.5	Έλλαδα .....	155
9.6	Κύπρος .....	155
9.7	Βόρεια Αφρική .....	156
9.8	Αίγυπτος .....	157
9.9	Νότια Αφρική .....	158
9.10	Αυστραλία .....	159
9.11	Ινδία .....	160

9.12 Κίνα .....	161
9.13 Ισραήλ .....	162
9.14 Τουρκία .....	163
9.15 Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα .....	163
9.16 Ιράν .....	164
9.17 Η.Π.Α. ....	164
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. Συμπεράσματα .....	167
10.1 Γενικά .....	167
10.2 Σύντομη ανασκόπηση των CSP τεχνολογιών και σύγκριση των χαρακτηριστικών και της παρούσας χρήσης της κάθε μιας στην αγορά .....	168
10.3 Ανάπτυξη/πρόοδος των CSP τεχνολογιών παγκοσμίως και μελλοντικά σενάρια εξέλιξής τους .....	170
Βιβλιογραφία .....	174



# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται στον ήλιο. Φτάνει σχεδόν αμετάβλητη στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας, διαμέσου του διαστήματος, και στη συνέχεια κατά τη διέλευσή της από την ατμόσφαιρα υπόκειται σε σημαντικές αλλαγές, που οφείλονται στην σύσταση της ατμόσφαιρας. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σημείο στην επιφάνεια της γης μια δεδομένη χρονική στιγμή χαρακτηρίζεται από την ένταση και την διεύθυνση πρόσπτωσης. Στην επιφάνεια της γης φτάνει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας που προέρχεται άμεσα από τον ήλιο (άμεση ηλιακή ακτινοβολία), ενώ το υπόλοιπο είτε απορροφάται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας είτε ανακλάται πάλι προς το διάστημα ή προς την επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετά από διαδοχικές ανακλάσεις δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και καλείται διάχυτη ακτινοβολία.

Η γη δέχεται ετήσια ηλιακή ενέργεια με ακτινοβολία της τάξης του  $173 \times 10^{15} \text{W}$ . Σε ένα 24ωρο κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας της γης δέχεται κατά μέσο όρο 4-6 KWh ηλιακής ενέργειας με ακτινοβολία 800-2500 Kwh/m ετησίως. Η ποσότητα αυτή είναι περίπου η διπλάσια από αυτή που θα μπορούσε ποτέ να ληφθεί από το σύνολο των μη ανανεώσιμων πηγών της Γης (πχ. Φυσικό αέριο, άνθρακα κτλ ) και περισσότερη από αυτή που καταναλώνει σήμερα ο άνθρωπος σε ένα χρόνο. Γι αυτό κρίνεται σκόπιμη η πρακτική εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

1. την **άμεση παραγωγή θερμότητας**, με ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα. Αν η παραγόμενη θερμότητα είναι υψηλής θερμοκρασίας, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού και στη συνέχεια μηχανικής ενέργειας (με ατμοστρόβιλους). Η μηχανική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτή τη περίπτωση αναφερόμαστε σε θερμική παραγωγή ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια.

2. την **άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας** με δύο τρόπους: Θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η θερμική αξιοποίηση περιλαμβάνει συλλογή της ηλιακής ενέργειας για να παραχθεί θερμότητα κυρίως για θέρμανση νερού και μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση ατμοστρόβιλων. Ενώ στη δεύτερη εφαρμογή τα συστήματα μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών. Αυτή η τεχνολογία που εμφανίστηκε στις αρχές του 1970 στα διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ έχει μειώσει το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού με αυτόν τον τρόπο από \$300 σε \$4 το Watt. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι πολύ ακριβή. Αν και όλη η γη δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, η ποσότητά της εξαρτάται κυρίως από τη γεωγραφική θέση, την ημέρα, την εποχή και τη νεφοκάλυψη. Για παράδειγμα, η έρημος δέχεται περίπου το διπλάσιο ποσό ηλιακής ενέργειας από άλλες περιοχές.

### 1.1.1. Πλεονεκτήματα χρήσης της ηλιακής ενέργειας

- Αποτρέπεται η κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και κατά συνέπεια οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που προκαλούν τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές. Η ηλιακή ενέργεια λειτουργεί ενάντια στην υπερθέρμανση του πλανήτη και "συμβάλλει" στη μείωση της παραγωγής των αερίων του θερμοκηπίου.
- Το φως του ήλιου είναι δωρεάν και διαθέσιμο σε όλο τον πλανήτη. Είναι ανανεώσιμη πηγή και δεν πρόκειται να εξαντληθεί.
- Η ηλιακή θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να απελευθερώνεται αργά και σταδιακά.
- Η τοποθέτηση ενός ηλιακού συστήματος είναι απλή. Η δε συντήρηση που απαιτεί είναι ελάχιστη ενώ η ανθεκτικότητα τους φτάνει τα 25 και άνω έτη λειτουργίας.
- Πρόκειται για απλή και συμφέρουσα λύση καθώς με τη πάροδο του χρόνου τα ηλιακά συστήματα τείνουν να "πληρώνονται μόνα τους" .( μέσος χρόνος αποπληρωμής 4 ετών).
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε μηχανήματα μικρής κλίμακας όσο και μεγάλης.
- Είναι η εναλλακτική ενέργεια που φαίνεται ότι μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα στις ανάγκες του μέλλοντος.
- Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας είναι γενικώς αθόρυβα.
- Τα black-out συμβαίνουν πολύ σπάνια.
- Πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να επανατροφοδοτήσει το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.
- Το κόστος δε μεταβάλλεται με τη πάροδο του χρόνου όπως συμβαίνει πχ. με τα ορυκτά καύσιμα.
- Η ηλιακή τεχνολογία είναι μια καθ'όλα ώριμη, δοκιμασμένη και αξιόπιστη τεχνολογία.
- Είναι ιδανική για απομονωμένες περιοχές, μακριά από γεννήτριες.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρισμού ακόμα κι όταν έχει συννεφιά.
- Η ενέργεια δε χάνεται κατά τη μεταφορά από τα κεντρικά σημεία, όταν τα κατανεμημένα συστήματα βρίσκονται σε λειτουργία.

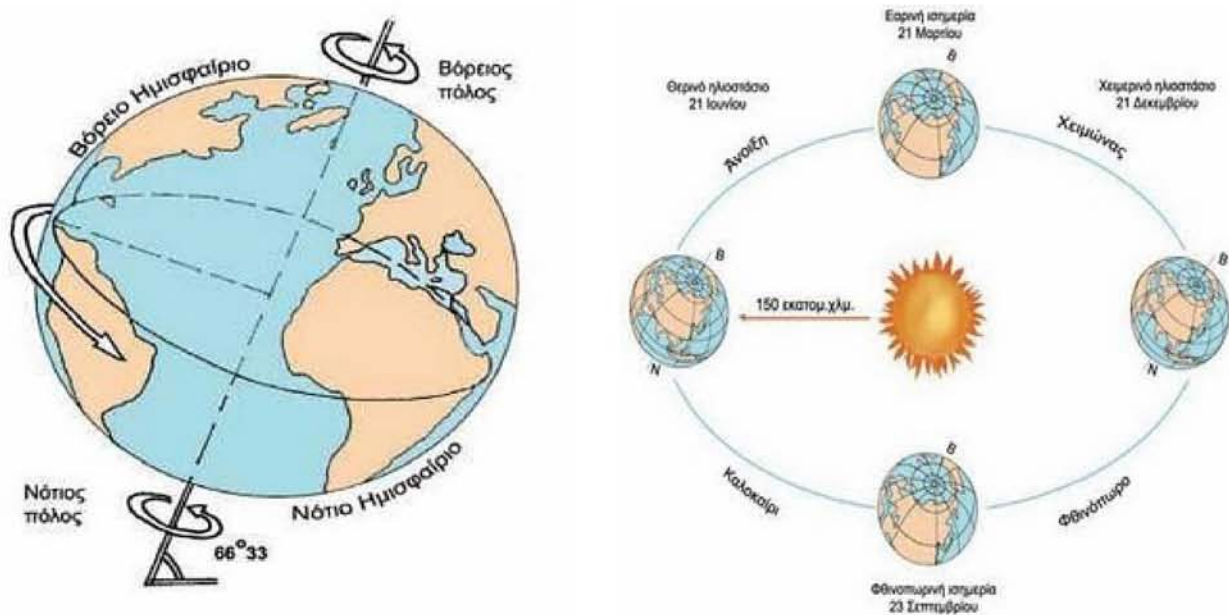
## 1.2. Γεωμετρία ήλιου-γης

Για να εκμεταλλευτούμε όσο γίνεται πιο αποδοτικά την ηλιακή ενέργεια, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας πως μεταβάλλεται η θέση του ήλιου στη διάρκεια της ημέρας, του μήνα και τού έτους. Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας απαιτεί το υπολογισμό της ακριβούς θέσης του ήλιου ως προς τη θέση μιας επιφάνειας πάνω στην οποία προσιπτεί η ηλιακή ακτινοβολία. Ο προσδιορισμός της βασίζεται στον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων που προκύπτουν από την ηλιακή γεωμετρία και περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

### 1.2.1 Οι κινήσεις της γης

Η ηλιακή γεωμετρία συνδέεται με τις δύο κύριες κινήσεις της γης:

- την ημερήσια περιστροφή γύρω από τον άξονα Β-Ν από τα δυτικά προς τα ανατολικά η οποία διαρκεί 24 ώρες.
- Την ετήσια κίνηση γύρω από τον ήλιο, που γίνεται με μέση ωριαία ταχύτητα 106.000 km/h και διαρκεί 365 μέρες, 5 ώρες, 48 λεπτά και 46 δευτερόλεπτα (δηλαδή ένα έτος).



Σχήμα 1. Οι δυο βασικές κινήσεις της γης.

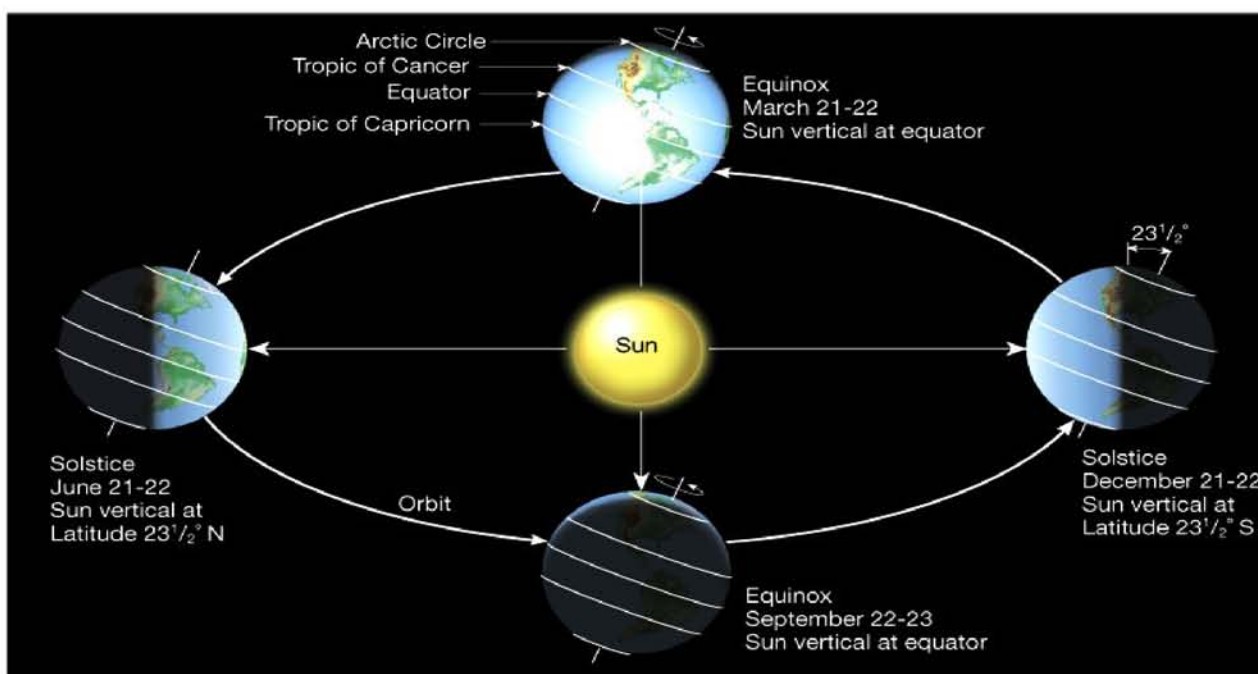
Η γη κινείται γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά και με μεταβλητή ταχύτητα (ανάλογα με την απόστασή της από τον ήλιο), όμως, για απλότητα στους υπολογισμούς, θεωρούμε την τροχιά ως κυκλική και την ταχύτητα σταθερή. Λόγω της μεγάλης ακτίνας (περίπου 150,000,000 km) οι ηλιακές ακτίνες που φτάνουν στη γη είναι σχεδόν παράλληλες (σηματίζουν γωνία μικρότερη από  $0,5^{\circ}$ ).



## 1.2.2 Απόκλιση ηλίου

Ο άξονας Β-Ν της γης αποκλίνει από την κάθετο στο επίπεδο της ελλειπτικής τροχιάς κατα σταθερή γωνία  $23,45^\circ$  περίπου. Έτσι, η γωνία μεταξύ του άξονα Β-Ν και των ηλιακών ακτίνων (απόκλιση-declination) μεταβάλλεται στη διάρκεια του έτους από  $90^\circ + 23,45^\circ = 113,45^\circ$  έως  $90^\circ - 23,45^\circ = 66,55^\circ$ . Ορισμένες στιγμές του έτους η απόκλιση της γής έχει ειδικές τιμές:

- στις 21/12 έχει τη μέγιστη τιμή (Χειμερινό Ηλιοστάσιο)
- στις 21/6 έχει την ελάχιστη τιμή (Θερινό Ηλιοστάσιο)
- στις 21/3 και 21/9 είναι  $90^\circ$  (Εαρινή και Φθινοπωρινή Ισημερία).

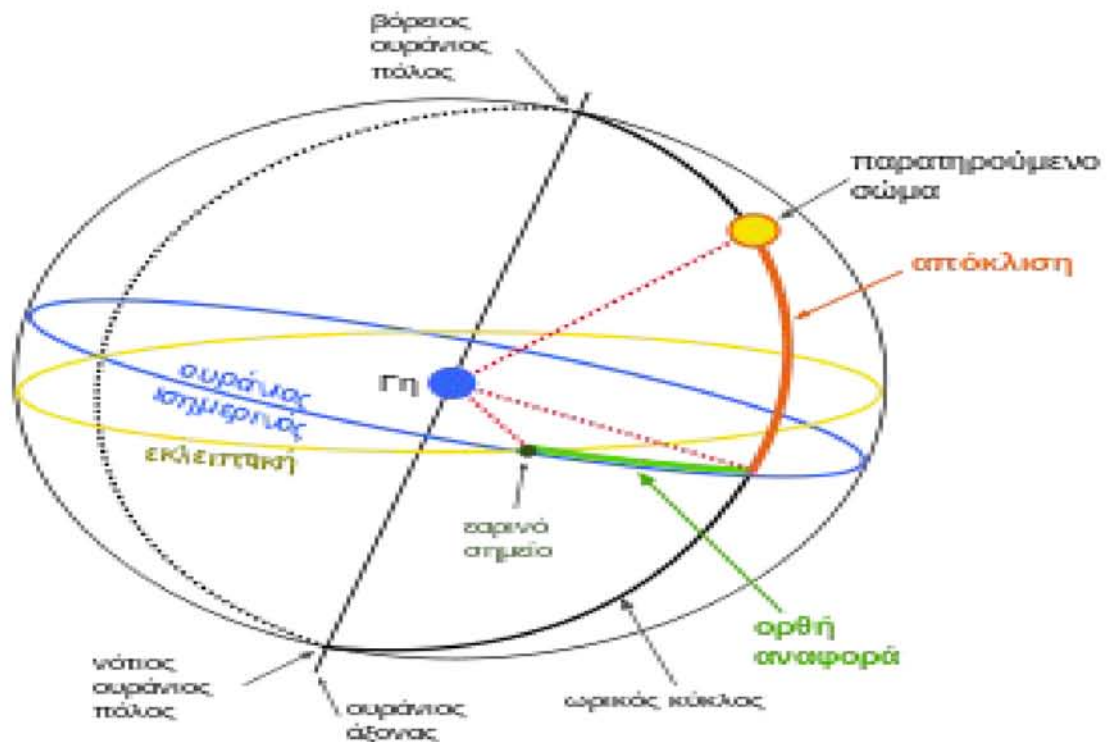


Σχήμα 2. Ηλιοστάσια και Ισημερίες

Η αυξομείωση της απόκλισης μεταβάλλει την κατανομή της ηλιακής πρόσπτωσης στην επιφάνεια της γής με αποτέλεσμα την εναλλαγή των εποχών που εμφανίζονται στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο κατά αντίστροφο τρόπο και τη διακύμανση των χρονικών διαστημάτων ημέρας και νύχτας εντός του έτους. Οι τιμές της απόκλισης του ηλίου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο.

Η **απόκλιση του ηλίου** δίνεται από τη σχέση:

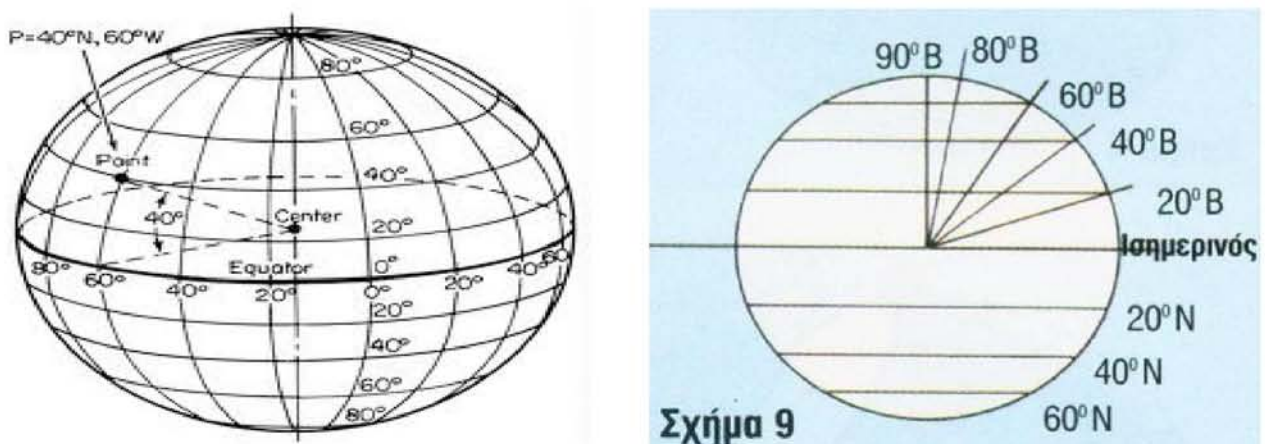
$$\delta = 23,45 \cdot \sin [360 \cdot (n + 284) / 365] , \text{ όπου } n \text{ είναι η τρέχουσα ημέρα του έτους.}$$



Σχήμα 3. Απεικόνιση της ηλιακής απόκλισης,  $\delta$ .

### 1.2.3. Γεωγραφικό πλάτος

Γεωγραφικό πλάτος (latitude),  $\phi$ , ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία που σχηματίζει η κατακόρυφος του τόπου με το επίπεδο του ισημερινού. Το γεωγραφικό πλάτος χαρακτηρίζεται Βόρειο Β (North N) ή Νότιο Ν (South S) ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο και μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών, πρώτα και δεύτερα από  $0^\circ - 90^\circ$  Β ή  $0^\circ - 90^\circ$  Ν (ξεκινώντας τη μέτρηση από τον ισημερινό του οποίου το γεωγραφικό πλάτος είναι  $0^\circ$ ).



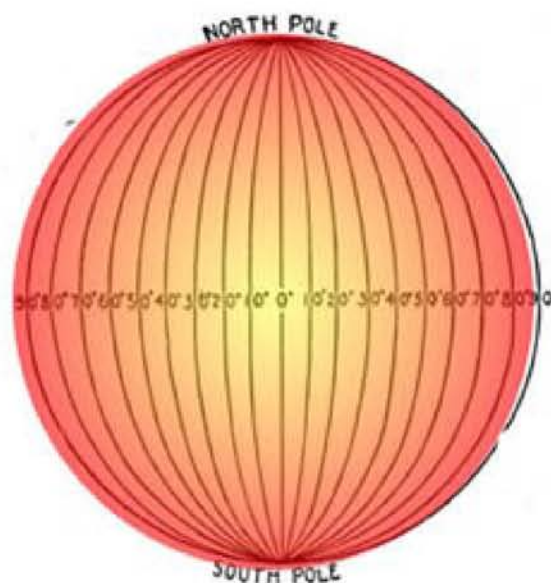
Σχήμα 4. Εικονική αναπαράσταση γεωγραφικού πλάτους.

#### 1.2.4. Γεωγραφικό μήκος

Γεωγραφικό μήκος (longitude),  $\lambda$ , ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η στερεή γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού που διέρχεται από το εν λόγω σημείο με το επίπεδο του πρώτου μεσημβρινού. Το γεωγραφικό μήκος χαρακτηρίζεται Ανατολικό A (East E) ή Δυτικό (West W) ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο και μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών, πρώτα και δεύτερα από  $0^\circ - 180^\circ$  A ή  $0^\circ - 180^\circ$  Δ (ξεκινώντας τη μέτρηση από τον πρώτο μεσημβρινό του οποίου το γεωγραφικό μήκος είναι  $0^\circ$  - Μεσημβρινός του Greenwich).



Σχήμα 5. Εικονική αναπαράσταση υπολογισμού του γεωγραφικού μήκους.



#### 1.2.5. Εξίσωση χρόνου

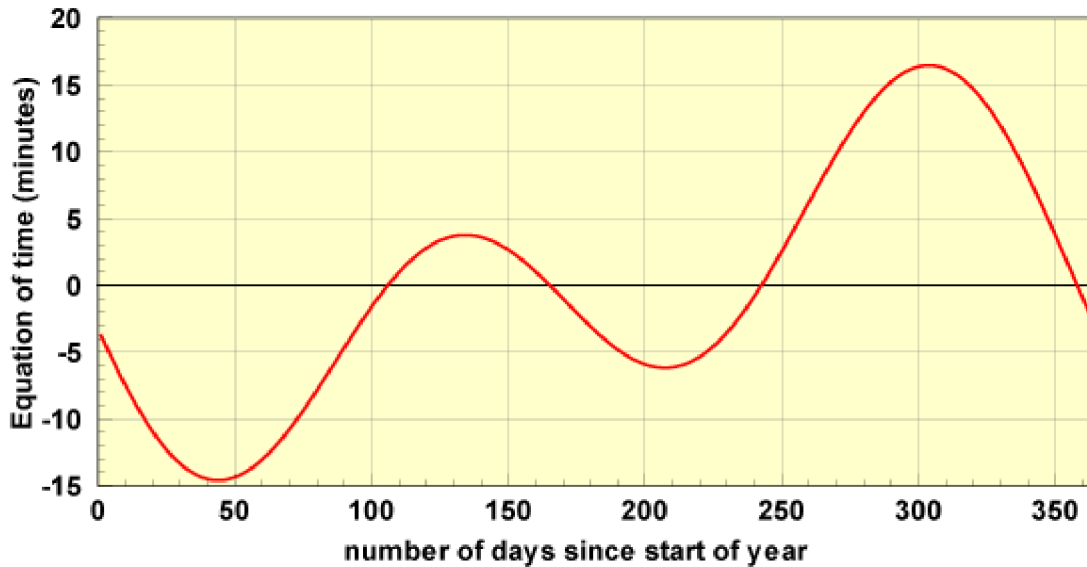
Η τροχιά της γης είναι ελλειπτική, έτσι όταν η γη είναι στο πιο κοντινό σημείο της με τον ήλιο (περιήλιο) κινείται πιο γρήγορα, ενώ όταν είναι στο πιο απόμακρο (αφήλιο) κινείται πιο αργά. Η ηλιακή ημέρα είναι ο χρόνος μεταξύ των μεσημβρινών μεταβάσεων του ηλίου.

Τα πραγματικά ρολόγια βασίζονται σε έναν ομοιόμορφα κινούμενο ήλιο, στο μέσο ήλιο, που ινείται κατά μήκος του Ουράνιου Ισημερινού σε μια καθορισμένη τιμή  $360^\circ$  ανά 365,2564 ημέρες. Η απόκλιση μεταξύ του πραγματικού ηλιακού χρόνου και του χρόνου του μέσου ήλιου ονομάζεται **εξίσωση χρόνου** και δίνεται από τη σχέση:

$$E_T = 2,2918 \cdot [0,0075 + 0,1868 \cdot \cos(\Gamma) - 3,2077 \cdot \sin(\Gamma) - 1,4615 \cdot \cos(2\Gamma) -$$

$$4,089 \cdot \sin(2\Gamma)]$$

όπου  $\Gamma = 360^\circ \cdot [(n - 1)/365]$  και  $n$  ο τρέχων αριθμός ημέρας του έτους.



Σχήμα 6. Διάγραμμα της εξίσωσης του χρόνου συναρτήσει των ημερών του έτους.

Έτσι, αφού υπολογίσουμε την εξίσωση χρόνου και έχοντας ως δεδομένο τον τοπικό χρόνο  $t_{std}$  (ο χρόνος που αναγράφεται στο ρολόι), υπολογίζουμε τον πραγματικό ηλιακό χρόνο από τη σχέση:

$$t_{sol} = t_{std} + [(L_{loc} - L_{std})/15^\circ/h] + (E_t / 60/h) ,$$

όπου  $L_{loc}$  : το γεωγραφικό μήκος της θέσης μελέτης

και  $L_{std}$  : η ζώνη ώρας της θέσης μελέτης (με θετικό πρόσημο ανατολικά του Greenwich και αρνητικό δυτικά του).

### 1.2.6. Γωνίες της θέσης του ηλίου

• **Ύψος του ηλίου ( $\alpha$ ):** είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ηλίου και στο οριζόντιο επίπεδο. Το ηλιακό ύψος (altitude)  $\alpha$  σε δεδομένη χρονική στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$\sin(\alpha) = \cos(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\lambda) \cdot \sin(\delta) ,$$

όπου  $\lambda$  το γεωγραφικό πλάτος του σημείου μελέτης,  $\delta$  η τρέχουσα απόκλιση του ήλιου και

$\omega$  η τρέχουσα ωριαία γωνία.

• **Αζιμούθιο του ηλίου ( $\gamma$ ):** είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ηλίου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Το αζιμούθιο (azimuth) είναι:

->  $\gamma = 0$  , για νότιο προσανατολισμό

->  $\gamma > 0$  , για γωνίες δυτικά από το νότο

->  $\gamma < 0$  , για γωνίες ανατολικά από το νότο

και σε δεδομένη χρονική στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$\sin(\gamma) = [\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)] / \cos(\beta)$$

• **Γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ ):** είναι η συμπληρωματική γωνία του ύψους, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο. Ζενίθ (zenith) είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου. Σε δεδομένη χρονική στιγμή, η γωνία ζενίθ του ηλίου δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha$$

• **Ωριαία γωνία ( $\omega$ ):** ορίζεται ως η γωνιακή απόσταση του ήλιου από την ηλιακή μεσημβρία λόγω περιστροφής της γης γύρω από τον άξονά της. Στην ηλιακή μεσημβρία  $\omega = 0^\circ$  ενώ κάθε ώρα η  $\omega$  μεταβάλλεται κατά  $15^\circ$ . Τις πρωινές ώρες η  $\omega$  είναι αρνητική και κατά τις απογευματινές γίνεται θετική. Η ωριαία γωνία (siderial angle), γενικά, δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = (t_{sol} - 12) \cdot 15^\circ , \text{ όπου } t_{sol} \text{ είναι ο πραγματικός ηλιακός χρόνος}$$

Πιο συγκεκριμένα, κατά την ανατολή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_{sr} = \cos^{-1} (-\tan\lambda \cdot \tan\delta) ,$$

όπου  $\lambda$  το γεωγραφικό πλάτος στη θέση μελέτης και  $\delta$  η απόκλιση του ηλίου

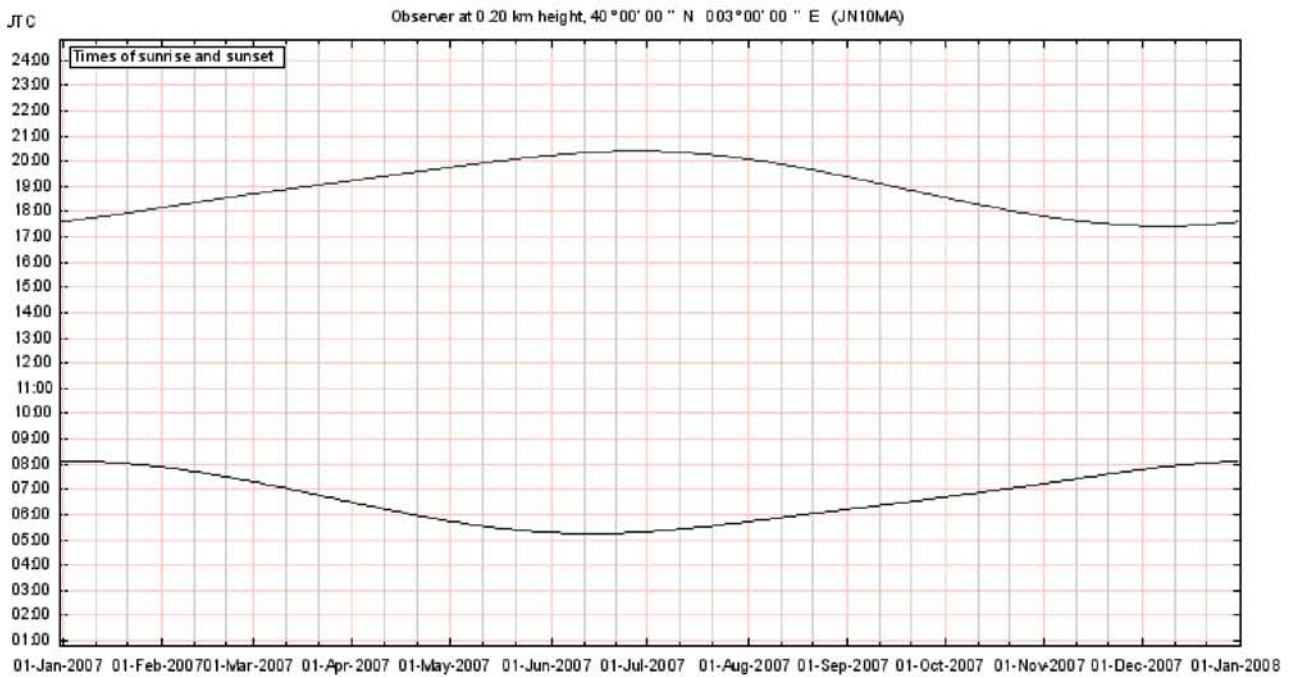
και κατά τη δύση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_{ss} = -\omega_{sr}$$

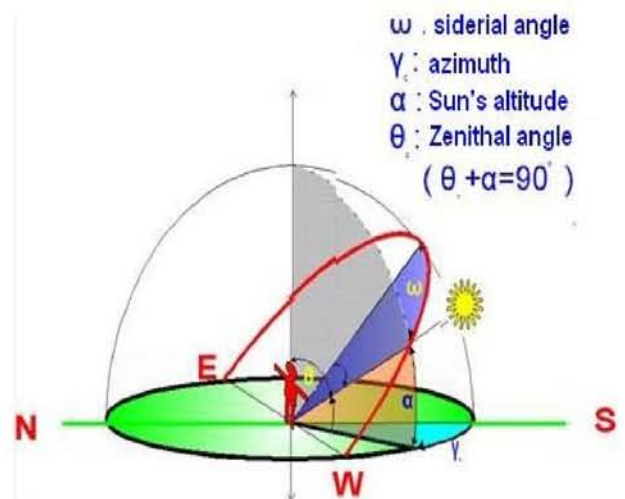
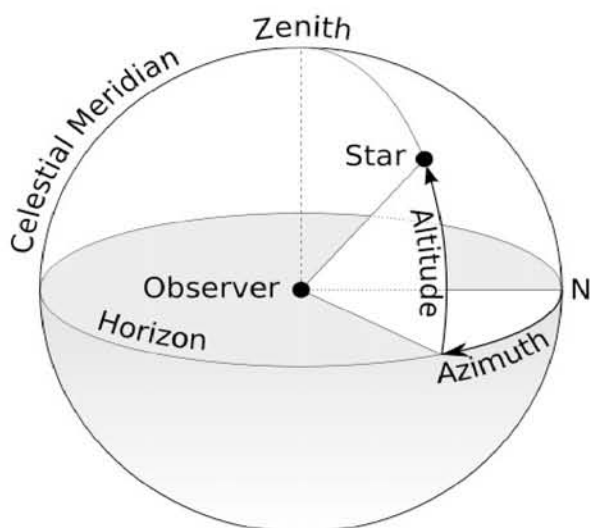
Να σημειωθεί, εδώ, ότι ο ηλιακός χρόνος ανατολής και δύσης του ηλίου δίνονται από της σχέσεις:

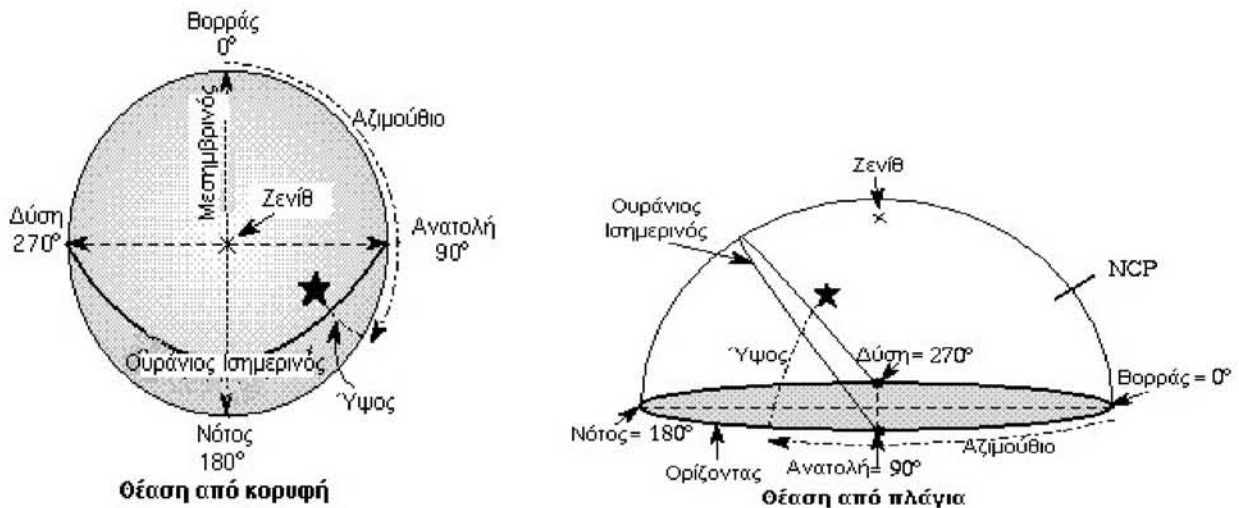
$$t_{sr} = 12 - (24/360) \cdot \omega_{sr} \quad \text{και} \quad t_{ss} = 12 - (24/360) \cdot \omega_{ss}$$

αντίστοιχα.



Σχήμα 7. Διάγραμμα απεικόνισης του ηλιακού χρόνου ανατολής και δύσης του ηλίου. Η πάνω γραμμή απεικονίζει τον ηλιακό χρόνο δύσης και η κάτω τον ηλιακό χρόνο ανατολής.

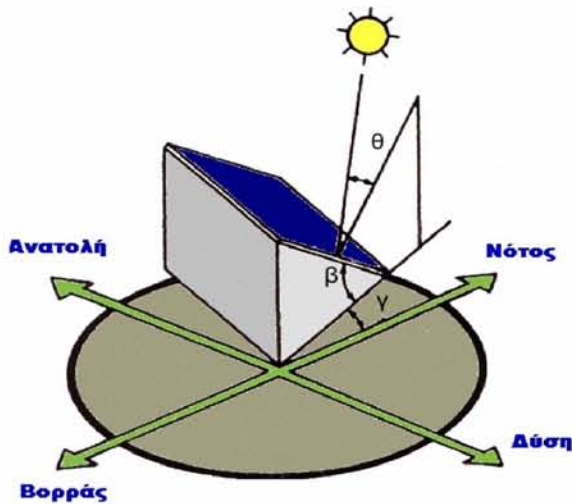




Σχήμα 8. Απεικόνιση των γωνιών θέσης του ήλιου (α: ύψος ήλιου, γ: αζιμούθιο, ω: ωριαία γωνία,  $\theta_z$ : γωνία ζενίθ).

### 1.2.7. Γωνίες της επιφάνειας

• **Αζιμούθια γωνία επιφάνειας ( $\varphi$ ):** είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου της επιφάνειας και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Πάιρνει τιμές από  $-180^\circ$  μέχρι  $+180^\circ$ . Η γωνία  $-180^\circ$  (που συμπίπτει με την  $+180^\circ$ ) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση της επιφάνειας προς το βορρά, η γωνία  $-90^\circ$  προς την ανατολή, η γωνία  $0^\circ$  προς το νότο και η γωνία  $+90^\circ$  προς τη δύση.



Σχήμα 9. Απεικόνιση αζιμούθιας γωνίας επιφάνειας ( $\varphi$ )

• **Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας ( $\theta_i$ )** σε επιφάνεια: δίνεται από τη σχέση

$$\cos(\theta_i) = \cos(\beta) \cdot \sin(\theta_p) \cdot \cos(\gamma_{\text{ολ}}) + \sin(\beta) \cdot \cos(\theta_p)$$

όπου  $\theta_p$  η γωνία κλίσης της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο,  $\gamma_{\text{ολ}}$  το αζιμούθιο ηλίου-επιφάνειας  $\gamma - \varphi$

Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\theta_p$ ) προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συλλογή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\lambda$ ). Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου η βέλτιστη γωνία κλίσης πρέπει να είναι περίπου  $10^\circ$ - $15^\circ$  μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\lambda$ ), ενώ κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου πρέπει να είναι περίπου  $10^\circ$ - $15^\circ$  μεγαλύτερη. Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση.

Για τις υπόλοιπες μορφές ηλιακής ακτινοβολίας- από ενεργειακή άποψη, λιγότερο σημαντικές- ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο επίπεδο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό. Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10-15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι ο συλλέκτης αντικρύζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

Συντελεστής ανάκλασης επιφάνειας : Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα ανάκλασης εκφράζεται από ένα συντελεστή (συντελεστής ανάκλασης επιφάνειας) που κυμαίνεται από 0, για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1, για πλήρη ανάκλαση.



Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Νερό, θάλασσα	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,07
Σκούρος αγρός	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Παλιό τσιμέντο	0,24
Νέο τσιμέντο	0,3
Χιόνι	0,6

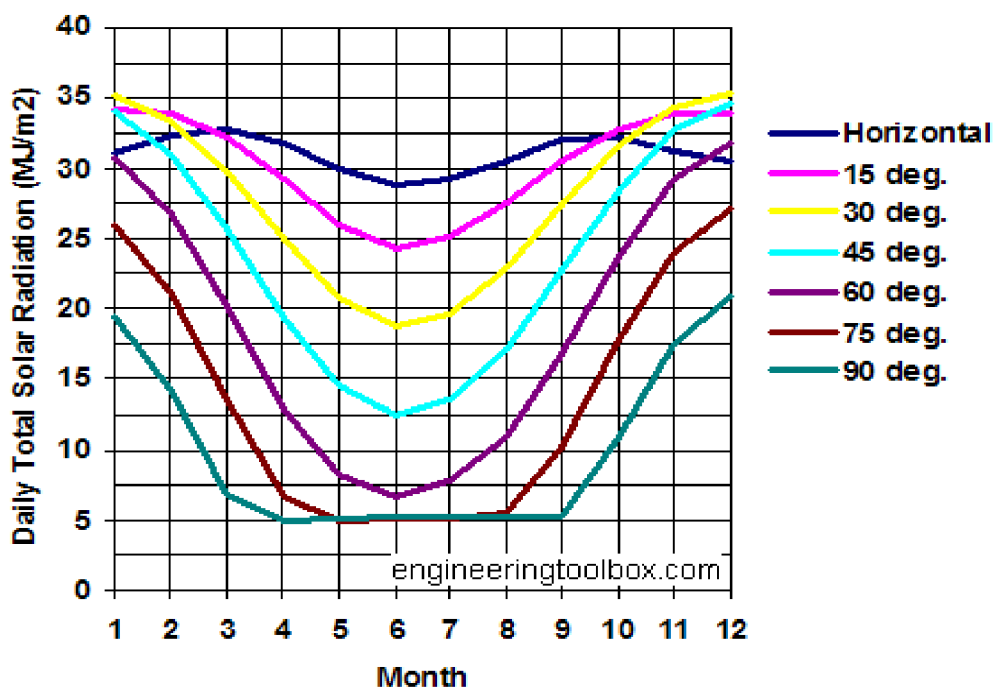
Πίνακας 1. Συντελεστές ανάκλασης διαφόρων επιφανειών.

### 1.3. Ηλιακή ακτινοβολία

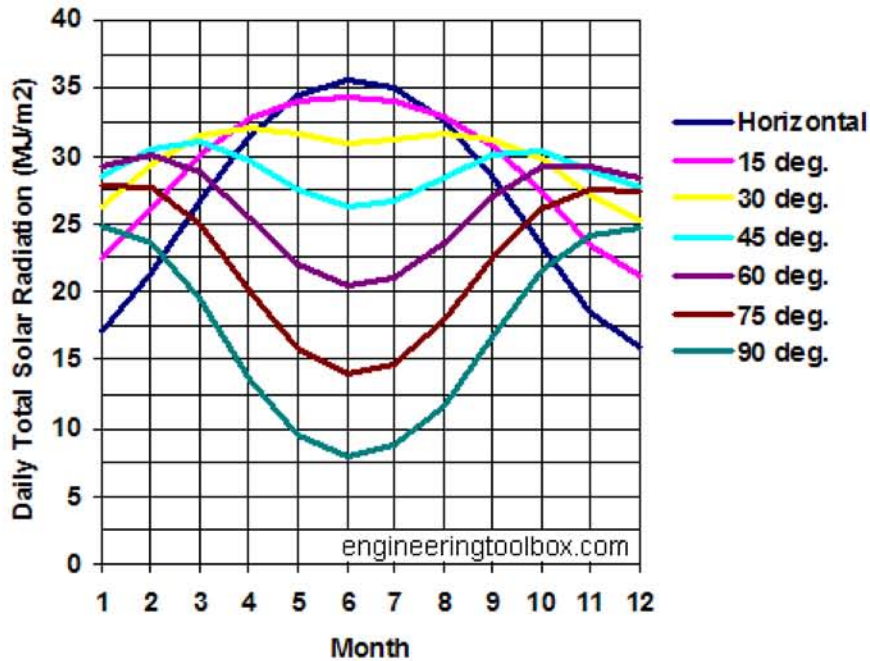
Η ηλιακή ακτινοβολία έξω από την επιφάνεια της γης λαμβάνεται από τη σχέση:

$I_0 = \{1 + 0,033 \cdot \cos[360^\circ \cdot (n - 3)/365]\} \cdot 1,373 \text{ (W/m}^2\text{)}$ , όπου  $n$  ο τρέχων αριθμός της ημέρας.

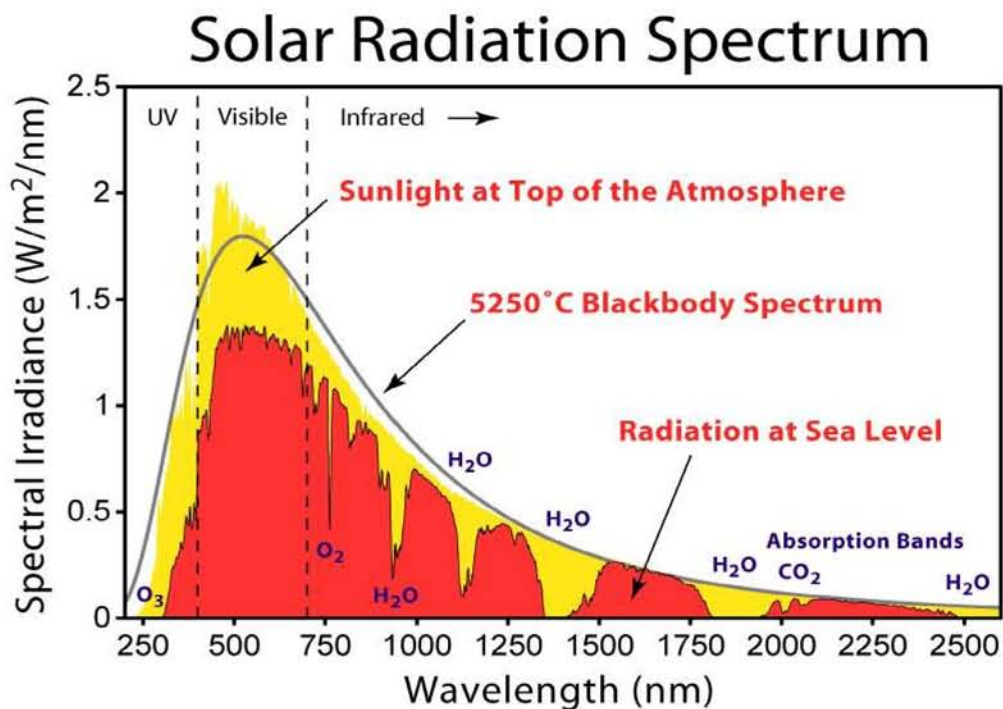
Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίζεται στην άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία. Η στιγμιαία ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μετριέται σε  $W/m^2$ . Η προσπίπτουσα ενέργεια σε μια επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας, για μια χρονική περίοδο, μετριέται σε  $J/m^2$ .



Σχήμα 10. Διάγραμμα ηλιακής ακτινοβολίας σε γεωγραφικό πλάτος 0°.



Σχήμα 11. Διάγραμμα ηλιακής ακτινοβολίας σε γεωγραφικό πλάτος 30 ° , στο βόρειο ημισφαίριο.



Σχήμα 12. Διάγραμμα απεικόνισης του φάσματος ηλιακής ακτινοβολίας.

### 1.3.1 Μορφές και υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας

- **Διάχυτη ακτινοβολία ( $I_{dif}$ ):** Διάχυτη ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνσή της από ανάκλαση ή σκέδαση στην

ατμόσφαιρα και από ανάκλαση στην επιφάνεια της γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από:

- > το ύψος του ήλιου,
- > το υψόμετρο του τόπου,
- > τη λευκαύγεια (δηλαδή το συντελεστή ανάκλασης του εδάφους) του εδάφους,
- > το ποσό και το είδος των νεφών,
- > το ποσό και το είδος των σωματιδίων και των αερίων της ατμόσφαιρας.

Έστω  $I_{glo}$  η πυκνότητα ακτινοβολίας στη θέση μελέτης (σε  $W/m^2$ ), η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{dif}/I_{glo} = 1,00 - 0,09 \cdot K_T \quad \text{για } 0 \leq K_T \leq 0,22$$

$$I_{dif}/I_{glo} = 0,9511 - 0,1604 \cdot K_T + 4,388 \cdot K_T^2 - 16,638 \cdot K_T^3 + 12,336 \cdot K_T^4 \quad \text{για } 0,22 \leq K_T \leq 0,8$$

$$I_{dif}/I_{glo} = 0,165 \quad \text{για } K_T > 0,8$$

όπου  $K_T = (I_{glo}/I_o) \cdot (1/\cos\theta_z)$  ( $\theta_z$  η γωνία ζενίθ του ήλιου)

• **Άμεση ακτινοβολία ( $I_{dir}$ ):** Άμεση ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης με ελέγχιση ή χωρίς καθόλου σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια, εξαρτάται από:

- > την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα,
- > το ύψος του ηλίου,
- > το γεωγραφικό πλάτος του τόπου,
- > το υψόμετρο του τόπου,
- > την κλίση της επιφάνειας,
- > την απόσταση ηλίου-γης,
- > την απόκλιση,  $\delta$ , του ήλιου.

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{dir} = I_{glo} - I_{dif}$$

• **Ολική ακτινοβολία:** Ολική ορίζουμε το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια ( $I_{glo,p}$ ) υπό κλίση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{glo,p} = I_{dir} \cdot (\cos\theta_i / \cos\theta_z) + I_{dif} \cdot F_{sky} + I_{glo,hor} \cdot \rho_g \cdot F_{grd}$$

όπου:

$$F_{sky} = (1 + \cos\theta_p)/2$$

$$= (1 - \cos\theta_p)/2$$

$\rho_g$  : συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους

$\theta_p$  : γωνία κλίσης επιφάνειας.

### 1.3.2 Απόσβεση ηλιακής ακτινοβολίας εξαιτίας της ατμοσφαιρας

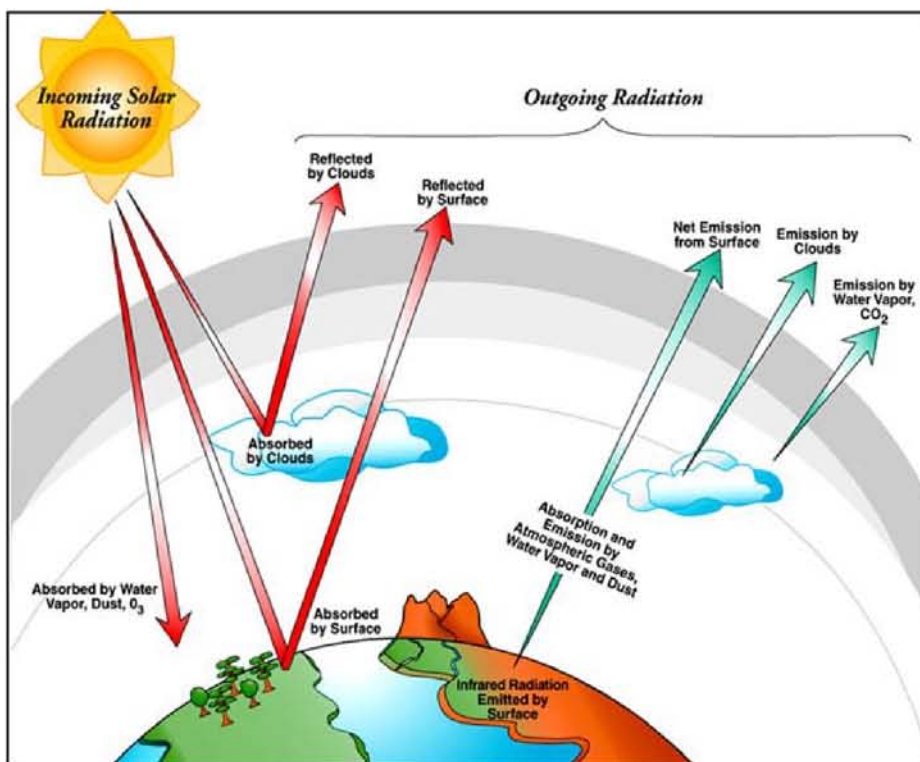
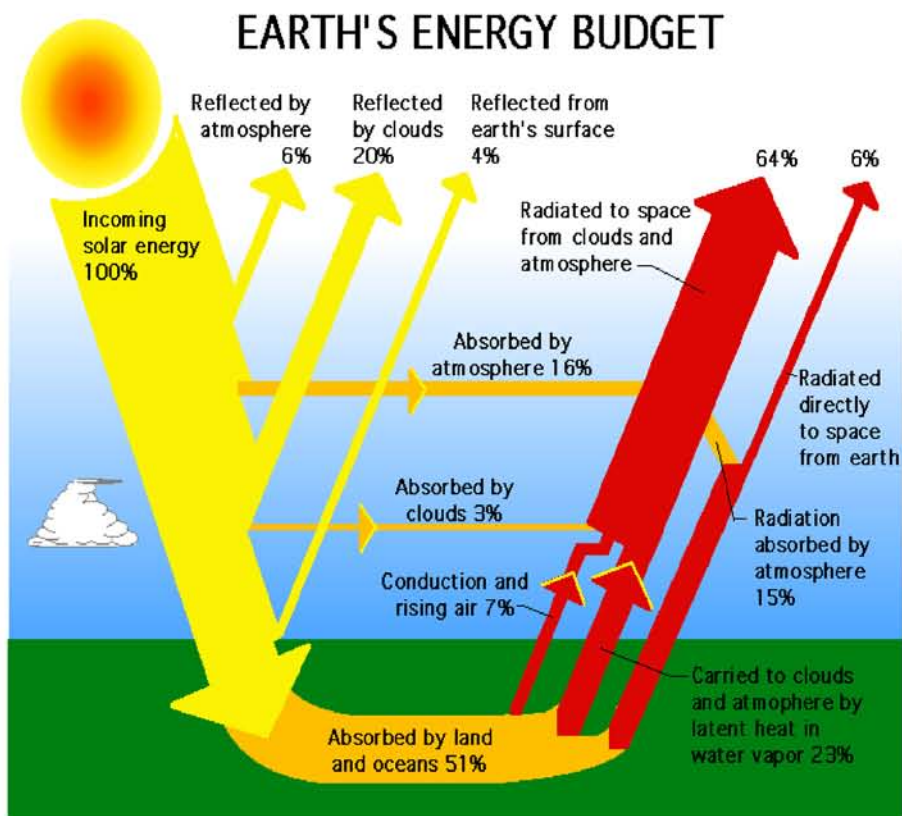
Η ηλιακή ακτινοβολία σε κάθετη πρόπτωση σε μία επιφάνεια πάνω στην επιφάνεια

της γης υπόκειται σε ίδιες αιτίες διακύμανσης, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα, με την ακτινοβολία που προσπίπτει εξωτερικά της ατμόσφαιρας και σε δύο επί πρόσθετα και πιο σημαντικά φαινόμενα, αυτά (1) της ατμοσφαιρικής σκέδασης από μόρια του αέρα, νερού και σκόνης και (2) της ατμοσφαιρικής απορρόφησης από το  $O_3$ , το  $H_2O$  και το  $CO_2$ .

Η **σκέδαση** της ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της μέσα από την ατμόσφαιρα οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις αυτής με μόρια του αέρα, νερού (ατμού ή σταγονίδια), και σκόνης. Ο βαθμός της σκέδασης είναι συνάρτηση του μήκους της διαδρομής μέσω της οποίας η ακτινοβολία περνάει και του μεγέθους των σωματιδίων σχετικά με το  $\lambda$ , το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Το μήκος της διαδρομής μέσω της οποίας η ακτινοβολία περνάει μετράται με την αέρια μάζα ( $m$ ). Ο αριθμός των μορίων του νερού και της σκόνης που συναντά η ακτινοβολία κατά το πέρασμά της εξαρτάται λοιπόν τόσο από την αέρια μάζα όσο και από τις ποσότητες σκόνης και υγρασίας της ατμόσφαιρας οι οποίες είναι συνάρτηση της συγκεκριμένης περιοχής και της ώρας.

Η **απορρόφηση** της ακτινοβολίας στο φάσμα της ηλιακής ενέργεια οφείλεται κυρίως στο όζον για το φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας και στο νερό και διοξείδιο του άνθρακα για το φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Υπάρχει σχεδόν απόλυτη απορρόφηση των χαμηλού-μήκους κύματος ακτινοβολιών από το όζον στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας σε μήκη κύματος μικρότερα από 0,29  $\mu m$ . Η απορρόφηση του όζοντος μειώνεται όσο αυξάνεται το  $\lambda$  σε τιμές μεγαλύτερες από 0,29  $\mu m$ , ενώ σε μεγαλύτερες τιμές από 0,35  $\mu m$  είναι μηδενική. Υπάρχει επίσης μια ασθενής ζώνη απορρόφηση του όζοντος κοντά στα 0,6  $\mu m$ .

Οι υδρατμοί απορροφούν κυρίως στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας με ισχυρές απορροφητικές ζώνες με κέντρα στα 1.0, 1.4 και 1.8  $\mu m$ . Πέρα από τα 2.5  $\mu m$ , η περατότητα της ατμόσφαιρας είναι μικρή εξαιτίας της απορρόφησης από το  $H_2O$  και το  $CO_2$ . Εξάλλου, η ενέργεια στο φάσμα της ακτινοβολίας της εξωτερικά από την ατμόσφαιρα για  $\lambda$  μεγαλύτερα από 2,5  $\mu m$  είναι λιγότερη από 5% της ολικής ενέργειας, έτσι και η ενέργεια που λαμβάνεται από το έδαφος για αυτά τα μήκη κύματος είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 13. Απεικόνιση της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στη γη, της ανάκλασης και της σκέδασης της.



## 2. Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα

### 2.1. Σύντομη ιστορική περιγραφή εφαρμογών μετατροπής ηλιακής σε θερμική ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί μία εξαιρετική πηγή ενέργειας, υψηλής θερμοκρασίας και εξέργειας στον τόπο καταγωγής της, τον Ήλιο, η ροή της όμως μειώνεται δραματικά μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια της Γης. Συγκεκριμένα ο Ήλιος εκπέμπει ενέργεια με ρυθμό  $3,8 \cdot 10^{23}$  kW από τα οποία περίπου  $1,8 \cdot 10^{14}$  kW κατακρατούνται από τη Γη, η οποία βρίσκεται σε απόσταση 150.000.000 km από τον Ήλιο. Από αυτά, περίπου το 60% καταλήγει στην επιφάνεια της Γης, δηλ.  $1,08 \cdot 10^{14}$  kW. Το υπόλοιπο ανακλάται πίσω στο διάστημα και απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Με μέτρο την εκπεμπόμενη ενέργεια ανά  $m^2$ , από τον Ήλιο εκπέμπονται  $63 \text{ MW}/m^2$  ενώ η διαθέσιμη ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης είναι μόλις  $1 \text{ kW}/m^2$ . Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να απαλειφθεί σε συνθήκες υψηλής ηλιακής ροής με τη χρήση συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική.

Εφαρμογές μετατροπής ηλιακής σε θερμική ενέργεια εντοπίζονται ήδη από το 18<sup>ο</sup> αιώνα: ηλιακοί φούρνοι ικανοί να λιώνουν σίδηρο, χαλκό και άλλα μέταλλα κατασκευάζονταν από στιλβωμένο σίδηρο, γυάλινους φακούς και καθρεύτες. Οι φούρνοι αυτοί χρησιμοποιούνταν ευρέως σε ολόκληρη την Ευρώπη και τη Μέση Ανατολή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο φούρνος που σχεδιάστηκε από τον Γάλλο επιστήμονα Francois Lavoisier που αποκτούσε την αξιοθαύμαστη θερμοκρασία των  $1750^\circ\text{C}$ . Κατά τη διάρκεια του 19<sup>ου</sup> αιώνα οι προσπάθειες επικεντρώθηκαν στην παραγωγή χαμηλής πίεσης ατμού που θα τροφοδοτούσε ατμομηχανές. Σε αυτή την ιδέα βασίστηκε το πιεστήριο που παρουσίασε ο Mouchot στην έκθεση του Παρισιού το 1872, που αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα των προσπαθειών αυτών.

Οι περισσότερες από τις πρώτες εφαρμογές συστημάτων μετατροπής ηλιακής σε θερμική-μηχανική ενέργεια αφορούσαν μικρής κλίμακας παραγωγή της τάξης των 100 kW, συστήματα άντλησης νερού για παράδειγμα. Τα τελευταία 40 χρόνια όμως διάφορα έργα μεγάλης κλίμακας έχουν κατασκευαστεί σε πειραματικό επίπεδο αρχικά, με αποτέλεσμα σήμερα να λειτουργούν πάρα πολλοί εμπορικοί σταθμοί παραγωγής στις ΗΠΑ, την Ισπανία που μέσα στο 2013 συνέδεσε στο δίκτυο της 2400 MW, την Κίνα, το Ίσραηλ, την Αλγερία, την Ινδία, την Αυστραλία και την Ιταλία, και αρκετοί ακόμη είναι υπό κατασκευή ή έχουν ανακοινωθεί. Μόνο στη Νότια Ευρώπη το τεχνικό δυναμικό είναι πάνω από 1000 GW ενώ στη Νότια Αφρική είναι τεράστιο.

Παγκοσμίως η εκμετάλλευση ενός ποσοστού μικρότερου από 1% του συνολικού δυναμικού για ηλιακούς θερμικούς σταθμούς θα επαρκούσε για να ικανοποιήσει τις συστάσεις της Διακυβερνητικής Επιτροπής των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Άλλαξη για μακροπρόθεσμη κλιματική σταθεροποίηση. Χαρακτηριστικά 1 MW εγκατεστημένης ηλιακής θερμικής ισχύος αποφεύγει ετησίως 688 tn  $\text{CO}_2$  συγκριτικά με ένα συμβατικό σταθμό συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο και 1360 tn  $\text{CO}_2$  συγκριτικά



με ένα συμβατικό σταθμό άνθρακα/ατμού. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας [International Energy Agency(IEA)] στο Energy Technology Perspectives 2010 θεωρεί ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από μετατροπή ηλιακής σε θερμική ενέργεια θα παίζει σημαντικό ρόλο ανάμεσα στις απαραίτητες ενεργειακές τεχνολογίες ώστε να μειωθούν στο μισό οι παγκόσμιες ενεργειακές εκπομπές CO<sub>2</sub> μέχρι το 2050 και το σενάριο αυτό θα απαιτούσε αύξηση της ισχύος κατά 14 GW/χρόνο (55 νέοι ηλιακοί θερμικοί σταθμοί των 250 MW ο καθένας).

## **2.2. Περιγραφή αρχών λειτουργίας των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων**

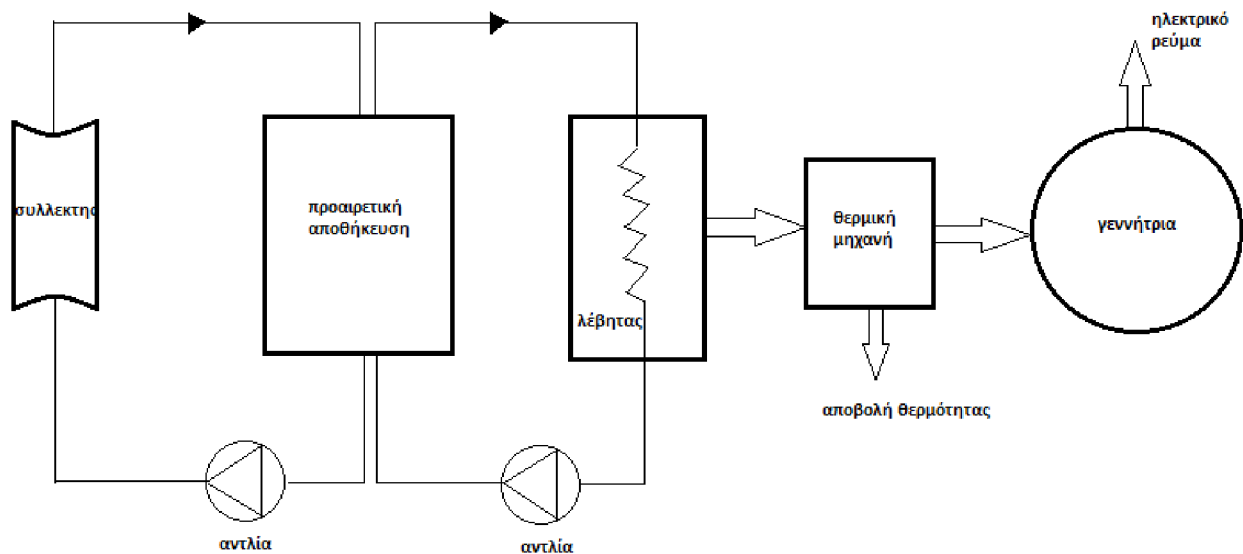
Η διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε μηχανική και ηλεκτρική με θερμικά μέσα είναι θεμελιωδώς όμοια με τις παραδοσιακές θερμικές διαδικασίες, με τη διαφορά ότι αναπτύσσει πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες.

Εμείς θα μελετήσουμε τα συστήματα που βασίζονται σε συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες και θερμικές μηχανές. Στα συστήματα αυτά η ηλιακή θερμική ενέργεια συλλέγεται από συγκεντρωτικούς συλλέκτες και χρησιμοποιείται για τη λειτουργία θερμικών μηχανών, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που επιτρέπει τη λειτουργία τους κατά τη διάρκεια της νύχτας ή μιας συννεφιασμένης μέρας. Η μεγαλύτερη πρόκληση στο σχεδιασμό αυτών των συστημάτων είναι η επιλογή της κατάλληλης θερμοκρασίας λειτουργίας, καθώς η απόδοση της θερμικής μηχανής αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για τις θερμικές μηχανές είναι και ο λόγος για τη χρησιμοποίηση συγκεντρωτικών συλλεκτών, αφού η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των flat-plate συλλεκτών είναι συγκριτικά χαμηλή με αποτέλεσμα χαμηλές αποδόσεις για το σύστημα.

Η βασική διαδικασία μετατροπής ηλιακής σε μηχανική ενέργεια φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 10).

Τα συστήματα με συγκεντρωτικούς συλλέκτες [στο υπόλοιπο του κειμένου θα αναφέρονται ως CSP (concentrating solar power)] αποτελούνται από μία μεγάλη ανακλαστική επιφάνεια που συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία και την εστιάζει σε έναν ηλιακό δέκτη με μικρή επιφάνεια ανοίγματος. Ο ηλιακός δέκτης είναι ένας υψηλής απορροφητικότητας εναλλάκτης θερμότητας που μιμείται κατά το μέγιστο δυνατό τη συμπεριφορά ενός ακτινοβόλου μέλανου σώματος. Ένας ιδανικός ηλιακός δέκτης έχει αμελητέες απώλειες μεταφοράς. Στο δέκτη η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται σε ένα θερμικό υγρό σε τέτοια θερμοκρασία εξόδου ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει μία θερμική μηχανή ή μία τουρμπίνα για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το ηλιακό πεδίο συνήθως σχεδιάζεται για φυσιολογική προσπίπτουσα ακτινοβολία της τάξης των 800-900 W/m<sup>2</sup>. Η ετήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία κυμαίνεται μεταξύ 1.600 kW/m<sup>2</sup> και 2.800 kW/m<sup>2</sup>,

επιτρέποντας ετήσια από 2.000 ως 3.500 ώρες λειτουργίας πλήρους φορτίου με το ηλιακό στοίχειο να εξαρτάται από τη διάθεσιμη ακτινοβολία στη συγκεκριμένη περιοχή.



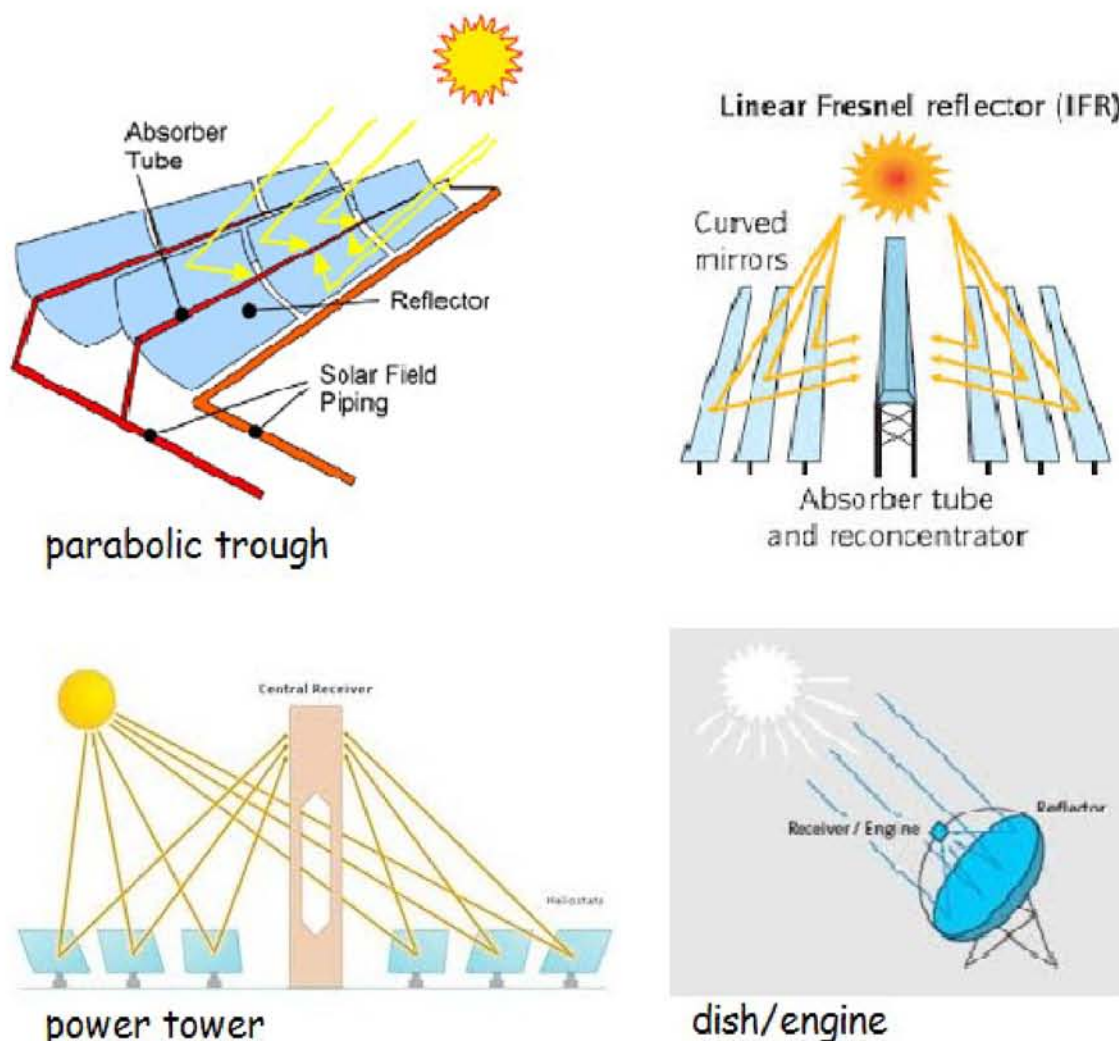
Σχήμα 14. Σχηματικό διάγραμμα μετατροπής ηλιακής σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια

Οι ηλιακοί ανακλαστικοί συλλέκτες υπακούουν στις βασικές αρχές του νόμου του Snell για την ανάκλαση. Στις κατοπτρικές επιφάνειες όπως οι καθρέυτες που χρησιμοποιούνται στα CSP συστήματα, η γωνία ανάκλασης είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης. Παρόλο που υπάρχουν συσκευές που χρησιμοποιούν φακούς ή σύνθετους παραβολικούς συλλέκτες η πιο απλή και πρακτική γεωμετρία είναι η παραβολή και οι ανακλαστικοί παραβολικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες είναι αυτοί με τη μέγιστη δυνατότητα για κλιμάκωση σε λογικό κόστος. Όσον αφορά το ηλιακό πεδίο,  $1 \text{ m}^2$  καθρέυτη παράγει  $400 \text{ kWh}$  ηλεκτρικού ρεύματος το χρόνο, συμβάλλει στην εξοικονόμηση εκπομπής  $12 \text{ tn CO}_2$  συγκριτικά με ένα συμβατικό σταθμό άνθρακα/ατμού και συνεισφέρει στην εξοικονόμηση  $2,5 \text{ tn}$  ορυκτών καυσίμων κατά την 25ετή διάρκεια ζωής τους. Ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα CSP συστήματα είναι λιγότερο από 1 έτος, και τα περισσότερα υλικά και δομές που χρησιμοποιούνται στο ηλιακό πεδίο είναι ανακυκλώσιμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλους σταθμούς.

Εξαιτίας της μεγάλης έκτασης που απαιτείται για σταθμούς παραγωγής CSP, συνήθως επιλέγονται απομονωμένες, άγονες περιοχές όπως οι έρημοι. Σύμφωνα με την Trans-Mediterranean Renewable Energy Corporation (TREN),  $1 \text{ m}^2$  ερημικού εδάφους δέχεται ηλιακή ενέργεια ισοδύναμη ενεργειακά με  $1,5$  εκατομμύριο βαρέλια πετρελαίου. Τα κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας είναι η κλίση του εδάφους, η χρήση της γης (δάσος, έρημος, κλπ), γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, υδατογραφικά χαρακτηριστικά, η εγγύτητα σε υποδομές (ηλεκτρικές γραμμές, δρόμους, κλπ) και φυσικά

η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται η συγκεκριμένη περιοχή.

Οι αρχιτεκτονικές δομές που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται σήμερα σε πειραματικό και εμπορικό επίπεδο είναι τέσσερις : parabolic trough collectors (PTCs), linear fresnel reflectors (LFRs), power towers (PTs) και dish/engine systems (D/E). (Σχήμα 11)



Σχήμα 15. Σχηματικά διαγράμματα των τεσσάρων CSP τεχνολογιών

Στα PTC και LFR συστήματα η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται πάνω σε μία εστιακή γραμμή από καθρέυτες με έναν άξονα παρακολούθησης του ήλιου. Μπορούν να συγκεντρώνουν τη ροή ηλιακής ακτινοβολίας 30-80 φορές, θερμαίνουν το θερμικό υγρό στους 450 °C με τις μονάδες μετατροπής ενέργειας να έχουν μέγεθος της τάξης των 30-280 MW. Στους πύργους ισχύος (power towers) ο δέκτης βρίσκεται στην κορυφή ενός πύργου και η ακτινοβολία συγκεντρώνεται μέσω ενός μεγάλου παραβολοειδούς που διακρίτοποιείται σε ένα πεδίο καθρευτών που έχουν σύστημα παρακολούθησης του ήλιου δύο αξόνων. Οι συντελεστές συγκέντρωσης κυμαίνονται από

200 ως 1.000, το μέγεθος των μονάδων από 10 ως 200 MW και καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα θερμικά ρευστά -κορεσμένο νερό, υπερθερμανσμένος ατμός, ατμοσφαιρικός αέρας, πεπιεσμένος αέρας, τετηγμένα άλατα- οι θερμοκρασίες φτάνουν από 300 ως 1.000 °C. Τέλος στα D/E συστήματα, το πιάτο (dish) είναι ένας παραβολικός συγκεντρωτής με υψηλούς συντελεστές συγκέντρωσης που κυμαίνονται μεταξύ 1.000-3.000 και μέγεθος μονάδων μεταξύ 5 και 25 kW. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μια σύγκριση των αρχιτεκτονικών αυτών όπως δημοσιεύτηκε στο roadmap του Διεθνή Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency-IEA) το 2010.

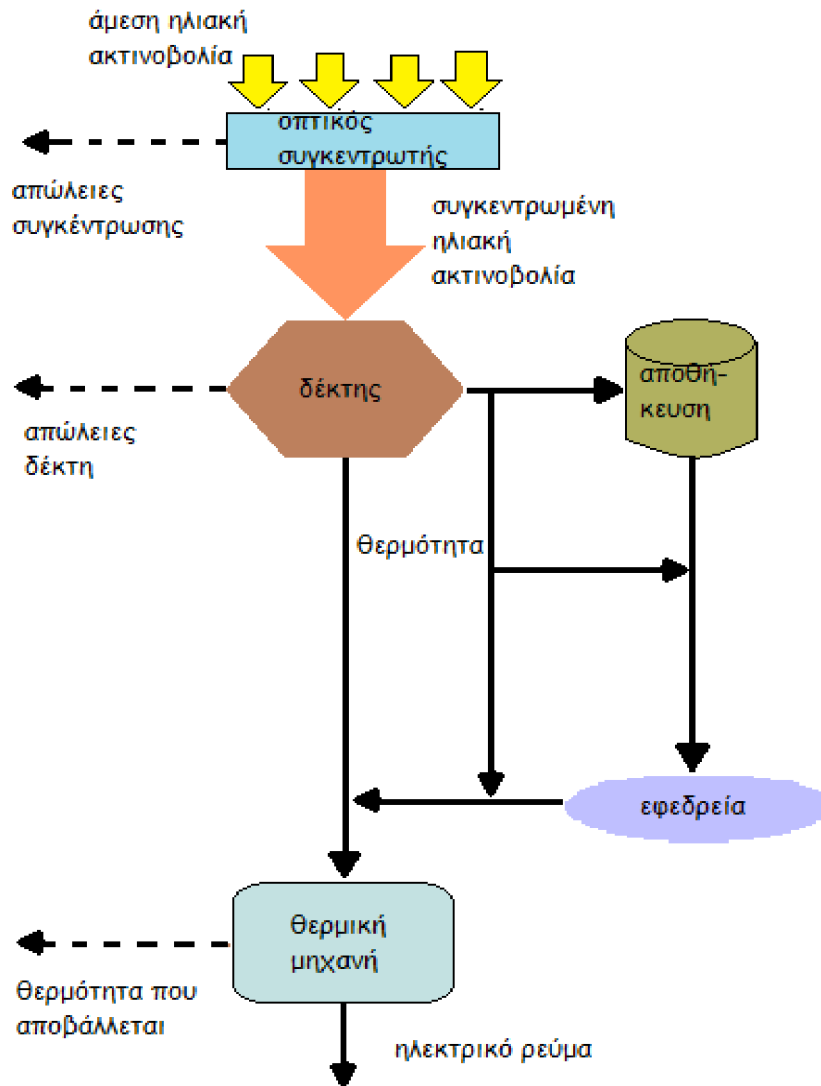
τεχνο- λογία	οπτική απόδοση	ετήσια ηλιακή σε ηλεκτρική απόδοση	εδάφικη κατοχή	ψύξη νερού(L/ MWh)	δυνατότητα αποθήκευσης	δυνατότητα υβριδοποίησης	ηλιακά καύσιμα	προοπτικές βελτίωσης
PTCs	**	15%	μεγάλη	3 000 ή ξηρό	ναι αλλά όχι με DSG ακόμη	ναι	όχι	περιορισμένη
LFR	*	8-10%	μέτρια	3 000 ή ξηρό	ναι αλλά όχι με DSG ακόμη	ναι	όχι	σημαντική
Power towers	**	20-35%	μέτρια	2 000 ή ξηρό	εξαρτάται από το σχεδιασμό του σταθμού	ναι	ναι	πολυ σημαντι- κή
D/E	***	25-30%	μικρή	καθόλου	εξαρτάται από το σχεδιασμό του σταθμού	ναι σε λίγες περιπτώσεις	ναι	μέσω μαζικής παραγωγής

Πίνακας 2. Σύγκριση CSP αρχιτεκτονικών

\*Ως οπτική απόδοση ορίζεται η ενέργεια που απορροφάται από το δέκτη προς την ενέργεια που δέχεται ολόκληρη η συσκευή.

Οι ετήσιοι συντελεστές απόδοσης προκύπτουν μεταξύ τιμών κοντά στο 20% για συστήματα χωρίς αποθήκευση θερμικής ενέργειας και γύρω στο 70% για συστήματα με μεγάλες μονάδες αποθήκευσης. Με τα δεδομένα επενδυτικά κόστη, όλες οι CSP τεχνολογίες φαίνεται να χρειάζονται στρατηγική δημόσιας οικονομικής στήριξης για την ανάπτυξη της αγοράς. Σήμερα, το κόστος ενός CSP σταθμού παραγωγής υπολογίζεται δύο με τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό ενός συμβατικού σταθμού παραγωγής με ορυκτά καύσιμα, όμως βιομηχανικά roadmaps εκτιμούν ότι το κόστος θα μειωθεί κατά 60% πριν το 2025. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ενός τυπικού σταθμού παραγωγής με μετατροπή ηλιακής σε θερμική ενέργεια.

Κάθε τετραγωνικό μέτρο του CSP πεδίου παράγει έως 1.200 kWh θερμικής ενέργειας ή έως 400 kWh ηλεκτρικού ρεύματος το χρόνο.



Σχήμα 16. Διάγραμμα ροής τυπικού ηλιακού-θερμικού σταθμού παραγωγής

### 2.3. Μηχανισμός παρακολούθησης του Ήλιου (tracking)

Στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συχνά χρησιμοποιείται κάποια μορφή μηχανισμού παρακολούθησης, που προσανατολίζει το ωφέλιμο φορτίο/συλλέκτη προς τον ήλιο. Οι συλλέκτες στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής δέχονται την άμεση συνιστώσα του ηλιακού φωτός και ως εκ τούτου πρέπει να είναι προσανατολισμένοι σωστά για να συλλέγουν τη βέλτιστη ποσότητα ενέργειας.

Το φως του ήλιου έχει δύο συνιστώσες, την "άμεση δέσμη" που περιέχει περίπου το 90% της ηλιακής ενέργειας, και τη "διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία" που περιέχει το υπόλοιπο - η διάχυτη είναι το γαλάζιο του ουρανού σε μια καθαρή ημέρα και αυξάνεται αναλογικά στις συννεφιασμένες ημέρες. Καθώς η μεγαλύτερη ποσότητα της ενέργειας είναι στην άμεση δέσμη, για να μεγιστοποιηθεί η ποσότητα που

συγκεντρώνεται/συλλέγεται απαιτείται να είναι άμεσα ορατός ο ήλιος στα πάνελ για όσο το δυνατόν περισσότερη ώρα. Η ενέργεια που συνεισφέρει η άμεση δέσμη, μειώνεται με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ του εισερχόμενου φωτός και του πάνελ. Επιπλέον, η ανάκλαση (κατά μέσο όρο σε όλες τις πολώσεις) είναι περίπου σταθερή για γωνίες πρόσπτωσης έως περίπου 50 °. Για παράδειγμα, οι μηχανισμοί παρακολούθησης που έχουν ακρίβεια της τάξης των  $\pm 5^\circ$  μπορούν να προσφέρουν περισσότερο από το 99,6% της ενέργειας που παρέχεται από την άμεση δέσμη συν 100% της ενέργειας που παρέχεται από το διάχυτο φως.

Ο ήλιος ταξιδεύει κατά 360 μοίρες από τα ανατολικά προς τα δυτικά την ημέρα, αλλά, κοιτώντας από οποιαδήποτε σταθερή θέση, το ορατό τμήμα είναι 180 μοίρες κατά τη διάρκεια μιας μέσης περιόδου μισής μέρας (περισσότερο την άνοιξη και το καλοκαίρι, λιγότερο το φθινόπωρο και το χειμώνα). Ένα ηλιακό πάνελ με ένα σταθερό προσανατολισμό μεταξύ της ανατολής και της δύσης θα "βλέπει" μια κίνηση 75 μοίρες προς κάθε πλευρά, και ως εκ τούτου, θα χάσει το 75% της ενέργειας το πρωί και το βράδυ. Ο ήλιος κινείται επίσης κατά 46 μοίρες από το βορρά και νότο κατά τη διάρκεια ενός έτους. Το σύνολο των πάνελ που είναι τοποθετημένο στο μέσο μεταξύ των δύο αυτών ακραίων σημείων θα "βλέπει" τον ήλιο να κινείται κατά 23 μοίρες και στις δύο πλευρές, προκαλώντας απώλειες 8,3%.

Ο βαθμός ακρίβειας και οι τρόποι παρακολούθησης διαφέρουν ανάλογα με το είδος του μηχανισμού. Τα συστήματα παρακολούθησης χαρακτηρίζονται ανάλογα με τον τρόπο της κίνησής τους, η οποία μπορεί να είναι σε έναν ή σε δύο άξονες.

### 2.3.1 Παρακολούθηση σε έναν άξονα

Ο άξονας περιστροφής των μηχανισμών παρακολούθησης σε έναν άξονα είναι τυπικά ευθυγραμμισμένος κατά μήκος ενός πραγματικού βόρειου μεσημβρινού, και είναι δυνατόν να ευθυγραμμιστεί με οποιαδήποτε θεμελιώδη κατεύθυνση με τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων παρακολούθησης. Τα συνήθη συστήματα παρακολούθησης σε έναν άξονα είναι τα εξής:

- Συστήματα με οριζόντιο άξονα (Horizontal single axis tracker, HSAT): Ο άξονας περιστροφής σε αυτά τα συστήματα είναι οριζόντιος σε σχέση με το έδαφος. Οι θέσεις σε κάθε άκρο του άξονα περιστροφής μπορούν να μοιραστούν για τη μείωση του κόστους εγκατάστασης. Η δομή του πεδίου είναι αρκετά ευέλικτη. Με κατάλληλη απόσταση μπορεί να μεγιστοποιηθεί η αναλογία της παραγωγής ενέργειας με το κόστος, το οποίο εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες, το έδαφος και τη σκίαση και την αξία της παραγόμενης ενέργειας ανά ημέρα. Τα συστήματα οριζόντιας παρακολούθησης έχουν συνήθως την πρόσοψη της μονάδας προσανατολισμένη παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής, σαρώνοντας έναν κύλινδρο που περιστρέφεται συμμετρικά γύρω από τον άξονα περιστροφής. Διαθέτουν ένα μακρύ οριζόντιο σωλήνα που στηρίζεται σε ρουλεμάν τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω σε πυλώνες ή πλαίσια, με τον άξονα του σωλήνα να είναι

παράλληλος σε μια νοητή γραμμή βορρά-νότου.

- Συστήματα με κατακόρυφο άξονα (Vertical single axis tracker, VSAT) : Ο άξονας περιστροφής για τα συστήματα αυτά είναι κατακόρυφος ως προς το έδαφος. Περιστρέφονται από την Ανατολή στη Δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας και είναι πιο αποτελεσματικά σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη συγκριτικά με αυτά με τον οριόντιο άξονα περιστροφής. Στη μελέτη για τη δομή του πεδίου πρέπει να εξεταστεί η σκίαση για να αποφευχθούν οι περιττές απώλειες ενέργειας και να βελτιστοποιηθεί η αξιοποίηση της γης. Τα συστήματα κατακόρυξης παρακολούθησης έχουν συνήθως την πρόσοψη της μονάδας προσανατολισμένη με βάση μία γωνία ως προς τον άξονα περιστροφής. Η μονάδα αυτή σαρώνει έναν κώνο που είναι περιστροφικά συμμετρικός γύρω από τον άξονα περιστροφής.

- Συστήματα με κεκλιμένο άξονα (Tilted single axis tracker, TSAT) : Είναι όλα τα συστήματα με άξονες περιστροφής μεταξύ οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Οι γωνίες κλίσης συχνά περιορίζονται με σκοπό τη μείωση του ανέμου και του αυξημένου ύψους των άκρων. Στη μελέτη για τη δομή του πεδίου πρέπει να εξεταστεί η σκίαση για να αποφευχθούν οι περιττές απώλειες ενέργειας και να βελτιστοποιηθεί η αξιοποίηση της γης. Μπορούν να στοιβάζονται χωρίς σκίαση κάθετα προς τον άξονα περιστροφής τους σε οποιαδήποτε πυκνότητα, ωστόσο, η στοίβαξη παράλληλα στους άξονες περιστροφής τους περιορίζεται από τη γωνία κλίσης και το γεωγραφικό πλάτος. Τα συστήματα παρακολούθησης με κεκλιμένο άξονα έχουν συνήθως την πρόσοψη της μονάδας προσανατολισμένη παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής, σαρώνοντας έναν κύλινδρο που περιστρέφεται συμμετρικά γύρω από τον άξονα περιστροφής.

- Συστήματα με πολικά ευθυγραμμισμένο άξονα (Polar aligned single axis trackers, PASAT) : Αυτή η μέθοδος είναι επιστημονικά γνωστή ως η πρότυπη μέθοδος στερέωσης ενός τηλεσκοπίου σε μια δομή υποστήριξης. Η κλίση του άξονα περιστροφής ευθυγραμμίζεται με αυτή του πολικού αστέρα. Αυτά τα συστήματα αποτελούν μία συγκεκριμένη εφαρμογή των συστημάτων με κεκλιμένο άξονα. Η γωνία κλίσης είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Αυτό ευθυγραμμίζει τον άξονα περιστροφής αυτού του συστήματος παρακολούθησης με τον άξονα της περιστροφής της Γης.

### 2.3.2 Παρακολούθηση σε δύο άξονες

Σε αυτού του τύπου την παρακολούθηση υπάρχει περιστροφή ως προς δύο άξονες. Ο ένας άξονας είναι σταθερός σε σχέση με το έδαφος και μπορεί να θεωρηθεί ως ο πρωτεύων άξονας. Ο άλλος άξονας έχει ως ανάφορά τον πρωτεύοντα άξονα και θεωρείται ο δευτερεύων άξονας. Τα συστήματα παρακολούθησης σε δύο άξονες έχουν συνήθως τις μονάδες τους προσανατολισμένες παράλληλα προς τον δευτερεύοντα άξονα περιστροφής. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν βέλτιστα επίπεδα ηλιακής ενέργειας, γεγονός που οφείλεται στην ικανότητά τους να ακολουθούν τον ήλιο κάθετα και οριζόντια. Ανεξάρτητα από τη θέση στην οποία βρίσκεται ο ήλιος στον ουρανό, τα συστήματα διπλής

παρακολούθησης έχουν τη δυνατότητα να στρίψουν τον εαυτό τους ώστε να είναι σε άμεση επαφή με τον ήλιο. Η ταξινόμηση τους γίνεται με κριτήριο τον προσανατολισμό των πρωτεύοντων αξόνων τους σε σχέση με το έδαφος στους εξής τύπους:

- Συστήματα με άξονα κεκλιμένου άκρου (Tip-tilt dual axis tracker, TTDAT) : Ονομάζονται έτσι επειδή η συστοιχία πάνελ είναι τοποθετημένη στην κορυφή ενός στύλου. Κανονικά η κίνηση ως προς Ανατολή-Δύση οδηγείται με περιστροφή της συστοιχίας γύρω από την κορυφή του στύλου. Στην κορυφή του περιστρεφόμενου ρουλεμάν είναι ένας μηχανισμός σχήματος Τ ή Η που επιτρέπει την κάθετη περιστροφή των πάνελ και παρέχει τα κύρια σημεία στερέωσης για τη συστοιχία.

Κάποια τέτοιου τύπου συστήματα (TTDAT) έχουν ως πρωτεύοντα έναν οριζόντιο άξονα και ως εξαρτώμενο (δευτερεύοντα) έναν ορθογώνιο άξονα. Ο κατακόρυφος άξονας, δηλαδή ο αζιμουθιακός, είναι σταθερός. Αυτό επιτρέπει μεγάλη ευελιξία της σύνδεσης του ωφέλιμου φορτίου στον εξοπλισμό που είναι τοποθετημένος στο έδαφος επειδή δεν υπάρχει καμία συστοιχία της καλωδίωσης γύρω από τον πόλο. Κανονικά οι μηχανισμοί παρακολούθησης θα πρέπει να τοποθετούνται με αρκετά μικρή πυκνότητα, προκειμένου να αποφευχθεί η σκίαση μεταξύ τους, όταν ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ουρανό. Οι άξονες περιστροφής των συστημάτων αυτών ευθυγραμμίζονται συνήθως είτε κατά μήκος ενός πραγματικού βόρειου μεσημβρινού είτε ανατολικά-δυτικά της γραμμής του γεωγραφικού πλάτους.

- Συστήματα με άξονα ανύψωσης-αζιμούθιου (Azimuth-altitude dual axis tracker, AADAT) : Τα συστήματα αυτά έχουν ως πρωτεύοντα έναν άξονα κάθετο στο έδαφος (άξονας αζιμούθιου) και ως δευτερεύοντα τον άξονα ανύψωσης. Είναι παρόμοια σε λειτουργία με τα συστήματα κεκλιμένου άκρου, αλλά διαφέρουν ως προς τον τρόπο περιστροφής στην καθημερινή παρακολούθηση. Αντί της περιστροφής της διάταξης γύρω από την κορυφή του στύλου, τα συστήματα AADAT μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα μεγάλο δακτύλιο τοποθετημένο στο έδαφος με τη συστοιχία των πάνελ τοποθετημένη σε μια σειρά από κυλίνδρους. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι το βάρος της συστοιχίας διανέμεται επί ενός τμήματος του δακτυλίου, σε αντίθεση με το ενιαίο σημείο φόρτωσης του πόλου στο TTDAT. Αυτό επιτρέπει σε ένα σύστημα AADAT να υποστηρίξει πολύ μεγαλύτερες σειρές.



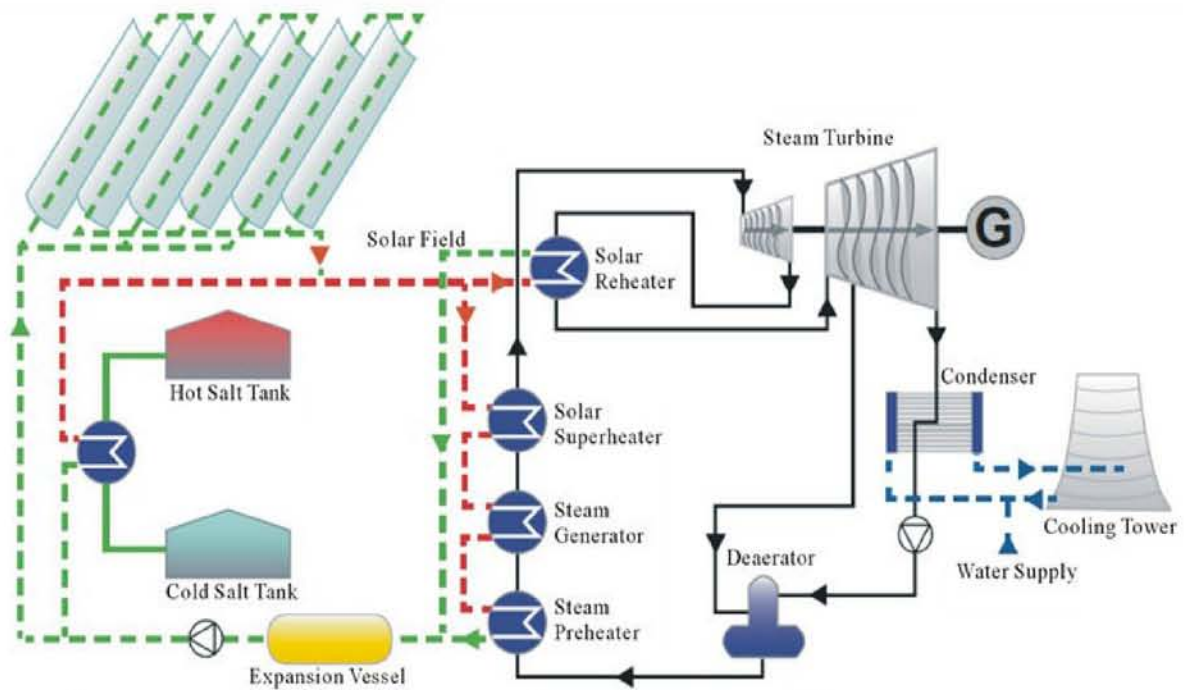


### 3. Συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών (Parabolic trough collector systems)

#### 3.1. Γενικά

Όπως έχει αναφερθεί, οι parabolic trough collectors είναι η πιο προωθημένη τεχνολογία για την παραγωγή θερμότητας σε θερμοκρασίες έως 400 °C. Οι παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες συγκεντρώνουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μία εστιακή γραμμή στον άξονα του συλλέκτη. Ένας σωλήνας-δέκτης, στο εσωτερικό του οποίου κυκλοφορεί κάποιο ρευστό, απορροφά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια μέσα στο σωλήνα καθώς το κυκλοφορούν ρευστό θερμαίνεται. Οι PTCs χρησιμοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που δεν εκτρέπεται από τα σύννεφα ή τη σκόνη μέσα στην ατμόσφαιρα και φθάνει στην επιφάνεια της γης ως παράλληλη δέσμη. Στη συνέχεια το ρευστό διοχετεύεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας για την παραγωγή ατμού που οδηγεί ένα συμβατικό σύστημα τουρμπίνας-γεννήτριας παραγωγής ηλεκτρισμού. Όπως και στις υπόλοιπες τεχνολογίες ΑΠΕ, δεν εκπέμπονται ρύποι κατά την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι μονάδες παραγωγής ρεύματος με PTC συνήθως διαθέτουν και ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης που λειτουργεί με ορυκτά καύσιμα ως εφεδρεία, ώστε να εξασφαλίζεται η παραγωγή ηλεκτρισμού όταν η άμεση ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι επαρκής ή καθόλου διαθέσιμη, όπως τις συννεφιασμένες μέρες ή κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ωστόσο, η παραγωγή ρεύματος από το εφεδρικό σύστημα περιορίζεται σε κάποιο λογικό όριο το οποίο διαφέρει από χώρα σε χώρα : 25% στην Καλιφόρνια (ΗΠΑ), 15% στην Ισπανία και μηδενικό όριο στην Αλγερία. Οι σταθμοί μπορούν να παρέχουν ισχύ αιχμής χρησιμοποιώντας μόνο ηλιακή ενέργεια, μόνο ορυκτά καύσιμα ή ένα συνδυασμό και των δύο ανεξάρτητα από την ώρα ή τον καιρικές συνθήκες. Η πιο κρίσιμη περίοδος για την παραγωγή και διανομή ισχύος, της οποίας η τιμή πώλησης ανα κιλοβατώρα είναι μέγιστη, είναι τους καλοκαιρινούς μήνες από Ιούνιο μέχρι Σεπτέμβριο από το μεσημέρι μέχρι τις 6μμ. Ο στρατηγικός σχεδιασμός είναι τέτοιος ώστε να μεγιστοποιεί τη χρήση της ηλιακής ενέργειας. Επειδή η απόδοση της τουρμπίνας είναι καλύτερη στο πλήρες φορτίο, η εφεδρεία των ορυκτών καυσίμων χρησιμοποιείται ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργία πλήρους φορτίου μεγιστοποιώντας έτσι την απόδοση του σταθμού.



Σχήμα 17. Απλοποιημένο σχήμα τυπικού σταθμού παραγωγής με PTCs ενσωματωμένων σε ένα κύκλο Rankine

### 3.2. Παραγωγή ηλεκτρισμού με PTCs

Υπάρχουν δύο τρόποι ενσωμάτωσης ενός PTC ηλιακού πεδίου σε ένα σταθμό με τουρμπίνες ατμού. Ο πρώτος είναι άμεσα, παράγοντας δηλαδή ατμό στο ηλιακό πεδίο (Direct steam generation τεχνολογία - DSG) και ο δεύτερος έμμεσα, θερμαίνοντας το ρευστό στο ηλιακό πεδίο και χρησιμοποιώντας το για την παραγωγή ατμού σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (Heat transfer fluid τεχνολογία-HTF). Και στις δύο περιπτώσεις το ηλιακό πεδίο μπορεί να κινήσει αμοστροβίλους οποιουδήποτε κύκλου, Rankine με υπερθέρμανση (RS), Rankine με αναθέρμανση (RR), Rankine με αναπαραγωγή (RRg). Η τεχνολογία που είναι διαθέσιμη σε εμπορικό επίπεδο αυτή τη στιγμή είναι η HTF, που χρησιμοποιεί το ρευστό ως φορέα θερμότητας από το ηλιακό πεδίο στην παραγωγή ισχύος. Περιγραφή του κύκλου Rankine ακολουθεί στο τέλος του υποκεφαλαίου.

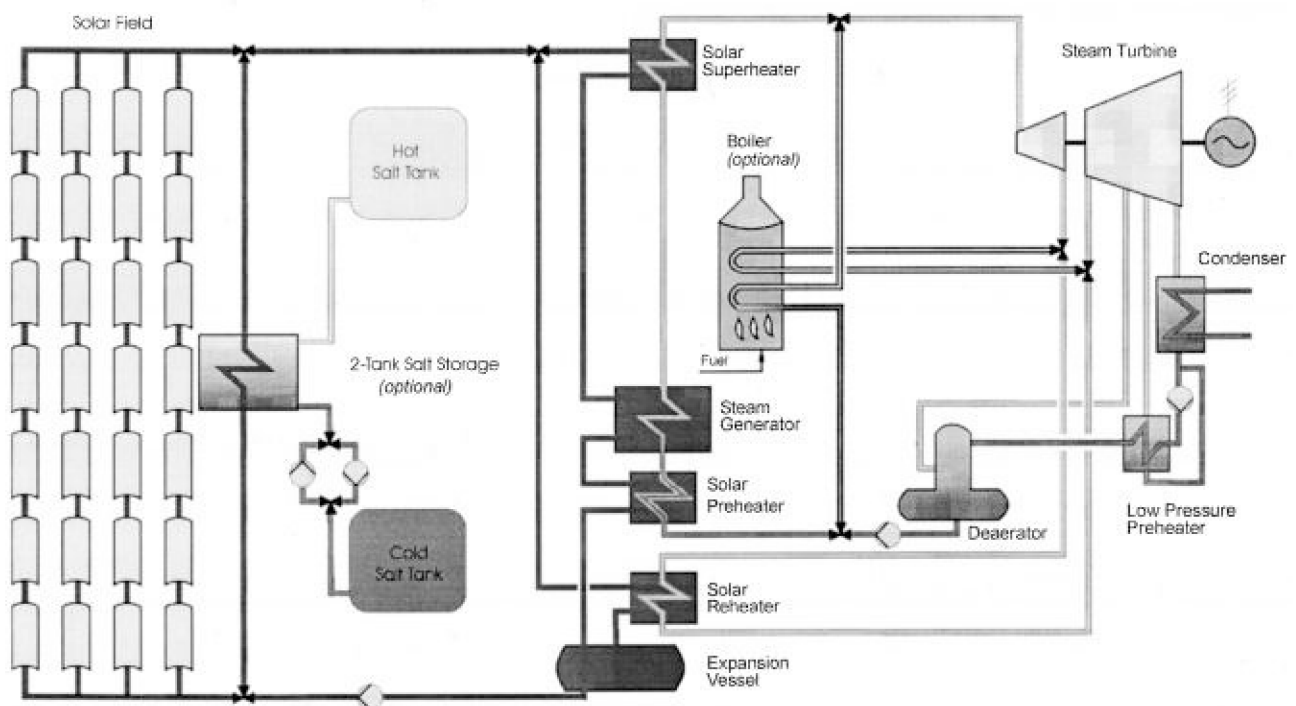
### 3.3. Περιγραφή λειτουργίας με χρήση του παραδείγματος των σταθμών SEGS(solar electric generating systems)

#### 3.3.1. Γενική περιγραφή

Οι σταθμοί παραγωγής με PTC είναι η πιο αποδεδειγμένη και αξιόπιστη τεχνολογία CSP εξαιτίας των σταθμών SEGS που λειτουργούν στην έρημο Μοχάβι της Καλιφόρνια (όπου η μέση ετήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία φτάνει τις 2727 kWh/m<sup>2</sup>) ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '80. Οι σταθμοί αυτοί, που αναπτύχθηκαν από την Luz International Ltd., κυμαίνονται στο μέγεθος από 14 έως 80 MW<sub>e</sub> και αντιπροσωπεύουν

εγκατεστημένη ισχύ 354 MWe. Περιγράφοντας αναλυτικά τη δομή και τη λειτουργία των σταθμών αυτών θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα της PTC τεχνολογίας για την παραγωγή ηλιακού ρεύματος.

Στους σταθμούς αυτούς μεγάλα πεδία από PTC συλλέκτες παρέχουν τη θερμική ενέργεια που χρειάζεται για την παραγωγή ατμού που παρέχεται σε έναν κύκλο Rankine για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Κάθε συλλέκτης έχει ένα γραμμικό παραβολικό ανακλαστή που εστιάζει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε ένα γραμμικό δέκτη τοποθετημένο στο επίκεντρο της παραβολής. Στο σχ.5 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής αντιπροσωπευτικό της πλειοψηφίας των σταθμών που λειτουργούν σήμερα στην Καλιφόρνια.



Σχήμα 18. Διάγραμμα ροής ενός σταθμού SEGS

Το πεδίο των συλλεκτών αποτελείται από πολλούς μεγάλους PTC συλλέκτες με έναν άξονα παρακολούθησης, συνδεδεμένους σε παράλληλες σειρές ευθυγραμμισμένους στον οριζόντιο άξονα βορρά-νότου που ακολουθούν την πορεία του ήλιου από την ανατολή στη δύση, γεγονός που έχει ως συνέπεια λιγότερη προσπίπτουσα ενέργεια στη διάρκεια του χρόνου αλλά ευνοεί την καλοκαιρινή λειτουργία, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη και τα έσοδα από την πώληση αυξημένα. Ένα ρευστό κυκλοφορεί μέσα στο δέκτη, όπου θερμαίνεται από την ηλιακή ενέργεια και επιστρέφει μέσω μίας σειράς από εναλλάκτες θερμότητας για την παραγωγή υψηλής πίεσης υπερθερμανσμένου ατμού πίσω στο ηλιακό πεδίο. Ο ατμός χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό σύστημα στροβίλου-γεννήτριας αναθέρμανσης ατμού για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 18, από την τουρμπίνα ο ατμός διοχετεύεται σε έναν πρότυπο συμπυκνωτή και επιστρέφει

στους εναλλάκτες θερμότητας με αντλίες ώστε να μετατραπεί και πάλι σε ατμό. Ο τύπος του συμπυκνωτή εξαρτάται από το αν είναι διαθέσιμη μεγάλη ποσότητα νερού κοντά στο σταθμό. Επειδή στην Καλιφόρνια όλοι οι σταθμοί είναι εγκατεστημένοι στην έρημο, η ψύξη γίνεται μέσω μηχανικά σχεδιασμένων πύργων υγρής ψύξης.

### 3.3.2. Περιγραφή των επιμέρους στοιχείων



Εικόνα1. Φωτογραφία σταθμού SEGS

Οι σταθμοί είναι σχεδιασμένοι να χρησιμοποιούν κυρίως την ηλιακή ενέργεια για τη λειτουργία τους. Εάν είναι επαρκής, η ενέργεια αυτή μπορεί να λειτουργήσει τους σταθμούς σε πλήρη ισχύ. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες οι σταθμοί λειτουργούν σε πλήρη ηλεκτρική ισχύ (έξοδος) για 10/12 ώρες την ημέρα. Όλοι οι

σταθμοί στην Καλιφόρνια έχουν υβριδισποιηθεί ώστε να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ως εφεδρεία για την παραγωγή ηλεκτρισμού που συμπληρώνει την ηλιακή παραγωγή σε περιόδους με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ο θερμαντήρας φυσικού αερίου τοποθετείται παράλληλα στο ηλιακό πεδίο και αντίστοιχα ο προαιρετικός λέβητας αερίου τοποθετείται παράλληλα στους ηλιακούς εναλλάκτες θερμότητας, ώστε να επιτρέπεται η λειτουργία είτε με οποιονδήποτε είτε και με τους δύο ενεργειακούς πόρους.



Εικόνα 2. Φωτογραφία του συστήματος ισχύος ενός σταθμού SEGS

Ένα συνθετικό ρευστό θερμαίνεται στους συλλέκτες και διοχετεύεται στην ηλιακή γεννήτρια ατμού και στον υπερθερμαντήρα, όπου παράγει τον ατμό που θα τροφοδοτήσει την τουρμπίνα. Σημαντικό ρόλο στην επιτυχία των

σταθμών παίζουν οι κυκλοφορητές, καθώς πρέπει να αντέχουν τις υψηλές θερμοκρασίες του κυκλοφορούντος ρευστού και την κυκλική μεταβολή της θερμοκρασίας.

Η φυσιολογική θερμοκρασία του ρευστού που επιστρέφει στο ηλιακό πεδίο είναι 304 °C ενώ αυτού που φεύγει από το ηλιακό πεδίο είναι 390 °C. Η εμπειρία δείχνει ότι η διαθεσιμότητα των πεδίων συλλέκτη είναι περίπου 99%.

Οι ανακλαστές είναι κατασκευασμένοι από μαύρα-επαργυρωμένα, χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο πάνελα από λευκασμένο γυαλί, διαμορφωμένοι σε παραβολικό σχήμα. Προστατευτικές επιστρώσεις μετάλλου και βερνικιού εφαρμόζονται στο πίσω μέρος της επάργυρης επιφάνειας, χωρίς να έχει παρατηρηθεί κάποια μετρήσιμη υποβάθμιση των ανακλαστικών υλικών. Το γυαλί είναι τοποθετημένο σε δικτυώματα ως μεγάλες συστάδες από μονάδες που ρυθμίζονται από υδραυλικούς κινητήρες. Η ανακλαστικότητα των καθρευτών όταν είναι καθαροί είναι 0,94. Καθώς η διατήρηση μεγάλης ανακλαστικότητας είναι σημαντική για τη λειτουργία του σταθμού και λαμβάνοντας υπόψη την τεράστια συνολική επιφάνεια των καθρευτών, ο καθαρισμός γίνεται με μηχανικό εξοπλισμό σε τακτά διαστήματα, περίπου ανά δύο εβδομάδες, και περιλαμβάνει κατακλυσμιαίο πλύσιμο και απευθείας, παλλόμενους ψεκασμούς υψηλής πίεσης που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Οι δέκτες είναι ασάλινοι σωλήνες διαμέτρου 70mm με τσιμεντένιες επιλεκτικές επιφάνειες που περιβάλλονται από κενούς γυάλινους μανδύες, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες. Οι επιλεκτικές επιφάνειες έχουν συντελεστή απορρόφησης 0,96 και συντελεστή εκπομπής 0,19 στους 350 °C.

Η κίνηση των συλλεκτών ελέγχεται από ένα σύστημα που χρησιμοποιεί ένα οπτικό σύστημα ώστε να εστιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε δύο φωτοευαίσθητους αισθητήρες. Κάθε διαταραχή της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στους αισθητήρες προκαλεί διορθώσεις στη θέση των συλλεκτών. Υπάρχει ένας αισθητήρας και ένας ρυθμιστής σε κάθε συγκρότημα συλλεκτών, με την ανάλυση του αισθητήρα να ισούται με 0,5°.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 18, το σύστημα παραγωγής ισχύος αποτελείται από μία συμβατική τουρμπίνα αναθέρμανσης ατμού με κύκλο Rankine με υδροδοτούμενους θερμαντήρες, εξαερωτήρες και άλλο πρότυπο εξοπλισμό. Το νερό ψύξης του συμπυκνωτή ψύχεται στους σχεδιασμένους πύργους ψύξης.

Ο εξατμιστήρας παράγει κορεσμένο ατμό και απαιτεί υδροδότηση από την αντλία υδροδότησης. Σε μία γεννήτρια ατμού το υγρό μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται για να παράγει ελαφρά υπερθερμανσμένο ατμό σε πίεση 5-10 MPa (50-100 bar), ο οποίος τροφοδοτεί μία τουρμπίνα ατμού συνδεδεμένη σε μία γεννήτρια που παράγει ηλεκτρικό ρεύμα.

Συνήθως οι σταθμοί SEGS ενσωματώνουν μία τουρμπίνα που έχει στάδια υψηλής και χαμηλής πίεσης, με την αναθέρμανση του ατμού να πραγματοποιείται μεταξύ των δύο

σταδίων. Οι ελάχιστοι λειτουργικοί περιορισμοί της τουρμπίνας είναι 16,2 bar όσον αφορά την πίεση ατμού και 22,2 °C όσον αφορά την υπερθέρμανση. Όταν δεν ικανοποιούνται αυτές οι συνθήκες, ο ατμός περιστρέφεται γύρω από την τουρμπίνα στον συμπυκνωτή μέσω ενός κυκλώματος παράξαμψης και ενός κλασματικού διαχωριστή. Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης ή του τερματισμού, το μέρισμα που στέλνεται στην τουρμπίνα μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ 0 και 1. Μία βαλβίδα επιτάχυνσης στο βρόχο παράκαμψης παρέχει την ισοδύναμη πτώση πίεσης που θα παρείχε η τουρμπίνα κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Οι υδροδοτούμενοι θερμαντήρες είναι εναλλάκτες θερμότητας που συμπυκνώνουν τον ατμό που εξάγεται από την τουρμπίνα σε θερμό νερό τροφοδοσίας, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του κύκλου Rankine.

Ο απαερωτήρας είναι είδος υδροδοτούμενου θερμαντήρα όπου ο ατμός αναμιγνύεται με υποψυχθέντα συμπυκνώματα για να παράγει κορεσμένο νερό στην έξοδο. Αυτό συμβάλλει στην αφαίρεση του οξυγόνου από το νερό τροφοδοσίας, ελέγχοντας έτσι τη διάβρωση. Ο ατμός που εξέρχεται από την τουρμπίνα συμπυκνώνεται ώστε να μπορεί να αντληθεί μέσω του συστήματος παραγωγής ατμού.

### 3.3.3. Κύρια χαρακτηριστικά σταθμών SEGS

Οι σταθμοί SEGS με την καθημερινή τους λειτουργία και έκταση συλλεκτών πάνω από 2,2 εκατομμύρια m<sup>2</sup> αποτελούν την καλύτερη απόδειξη εμπορικής αξιοπιστίας της PTC τεχνολογίας. Η διαθεσιμότητα των σταθμών είναι πάνω από 98% και η ετήσια απόδοση μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό κυμαίνεται από 14% ως 18% με μέγιστη απόδοση 22%. Εξαιτίας των συνεχών βελτιώσεων των σταθμών SEGS, το συνολικό κόστος του SEGS I των \$0,22/kWh<sub>e</sub> για το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μειώθηκε στα \$0,16/kWh<sub>e</sub> στον SEGS II και στα \$0,09/ kWh<sub>e</sub> στον SEGS IX μέχρι το 1996.

Στον παρακατώ πίνακα παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των εννέα σταθμών SEGS που λειτουργούν στην Καλιφόρνια.

SEGS	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Τοποθεσία	Daggett	Daggett	Kramer	Kramer	Kramer	Kramer	Kramer	Harper lake	Harper lake
Ιος χρόνος λειτουργίας	1984	1985	1986	1986	1987	1988	1988	1989	90
Καθαρή ισχύς παραγωγής(MWe)	13.8	30	30	30	30	30	30	80	80
Καθαρή παραγωγή ηλεκτρισμού(GWh/έτος)	30.1	80.5	91.3	91.3	99.2	90.9	92.6	252.8	256.1
Έκταση(ha)	29	67	80	80	87	66	68	162	169
Έκταση ηλιακού πεδίου(ha)	8.3	19.0	23.0	23.0	25.1	18.8	19.4	46.4	48.4
Συλλέκτες	LS1/LS2	LS1/LS2	LS2	LS2	LS2	LS2	LS2/LS3	LS3	LS3
Θερμοκρασία εξόδου ηλιακού πεδίου(C)	307	321	349	349	349	391	391	391	391
Ετήσια θερμική απόδοση ηλιακού πεδίου(%)	35	43	43	43	43	43	43	53	50
Υγρό μεταφοράς θερμότητας(HTF) *	ESSO 500	VP1	VP1	VP1	VP1	VP1	VP1	VP1	VP1
Μικτή παραγωγή τουρμπίνας(MWe)	14.7	33	33	33	33	33	33	89	89
Υγρό ισχύος	ατμός	ατμός	ατμός	ατμός	ατμός	ατμός	ατμός	ατμός	ατμός
Πίεση υγρού ισχύος(MPa)	3.53	2.72	4.35	4.35	4.35	10	10	10	10
Θερμοκρασία υγρού ισχύος(C) *	415	360	327	327	327	371	371	371	371
Κύκλος ισχύος	RS/RRg	RS/RRg	RS/RRg	RS/RRg	RS/RRg	RS/RRg/RR	RS/RRg/RR	RS/RRg/RR	RS/RRg/RR
Μέση ετήσια συνολική απόδοση(%)	9.7	12.4	10.7	10.7	10.2	12.3	13.4	13.9	13.9
Χρόνος ζωής(έτη)	20	25	30	30	30	30	30	30	30

Πίνακας. 3 Κύρια χαρακτηριστικά των σταθμών SEGS

\*VP1: συνθετικό, έυτηκτο μίγμα από 73,5% διφαινυλοξείδιο (DPO) και 26,5% βιφαινύλιο

Θερμοκρασιακό εύρος χρήσης ως υγρού 12 °C ως 400 °C

Θερμοκρασιακό εύρος χρήσης ως ατμού 260 °C ως 400 °C

\*\* Ο ατμός που παράγεται από την ηλιακή ενέργεια και υπερθερμαίνεται από το φυσικό αέριο (18% της ενέργειας εισόδου)

### 3.4. Πειραματικοί και εμπορικοί σταθμοί που έχουν κατασκευαστεί παγκοσμίως

#### 3.4.1. Nevada Solar One (NSO)

Με την αναβίωση από το 2006 των εμπορικών CSP έργων κυρίως στην Ισπανία και τις ΗΠΑ, μία νέα γενιά σταθμών παραγωγής τύπου SEGS έρχεται στο προσκήνιο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο σταθμός Nevada Solar One που βρίσκεται στην κοιλάδα Eldorado, νοτιοδυτικά της πόλης Boulder στη Nevada. Έχει ονομαστική ισχύ 64 MW και μέγιστη ισχύ 75 MW, εκτείνεται σε 400 στρέμματα και ξεκίνησε τη λειτουργία του τον Ιούνιο του 2007, ενώ η αρχική επένδυση άγγιξε τα \$266.000.000. Μία σειρά από εταιρίες συνδύασαν τους πόρους τους ώστε να φέρουν εις πέρας το έργο, σύντομα όμως η Ισπανική εταιρία Acciona αγόρασε την πλειοψηφία των μετοχών στην Solargenix, πρώην Duke Solar και κατέχει σήμερα το 95% του έργου.





Εικόνα 3. Φωτογραφία από αέρος του Nevada Solar One

Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρισμού υπολογίζεται στις 134.000 kWh και αντιστοιχεί σε μείωση εκπομπών  $CO_2$  που ισοδυναμεί με την απόσυρση 20.000 αυτοκινήτων ετησίως. Ο NSO κατασκευάστηκε στην Ζώνη Ενεργειακών Πόρων της πόλης, όπου η αδειοδότηση σταθμών απαιτεί ανανεώσιμη παραγωγή, ως κομμάτι ενός μεγαλύτερου έργου που ξεκίνησε από την Duke Energy και προσδωκούσε την κατασκευή εγκαταστάσεων που θα παράγαν 1GW ηλεκτρικού ρεύματος στην περιοχή του Eldorado.



Εικόνα 4. Σειρά καθρευτών, τμήμα του ηλιακού πεδίου

Ο Nevada Solar One χρησιμοποιεί ειδική τεχνολογία για να ακολουθεί την πορεία του Ήλιου και να συγκεντρώνει τις ακτίνες του κατά τη διάρκεια των ωρών ζήτησης αιχμής. Χρησιμοποιεί 760 PTC συλλέκτες με περισσότερους από 182.000 καθρέυτες να συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε περισσότερους από 18.240 σωλήνες δέκτες, τοποθετημένους στον εστιακό άξονα των συλλεκτών, όπου ρέει ένα υγρό μεταφοράς θερμότητας. Το υγρό που θερμαίνεται μέχρι τους 391 °C χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού που οδηγεί έναν αμοστρόβιλο Siemens SST-700, προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις της CSP τεχνολογίας, που με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος σε μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια στοιχεία για τη λειτουργία του NSO από το 2007 μέχρι σήμερα όπως δημοσιεύονται στην ιστοσελίδα της Υπηρεσίας Ενεργειακών Πληροφοριών των Ηνωμένων Πολιτειών (Energy Information Administration).

#### Ηλιακό πεδίο

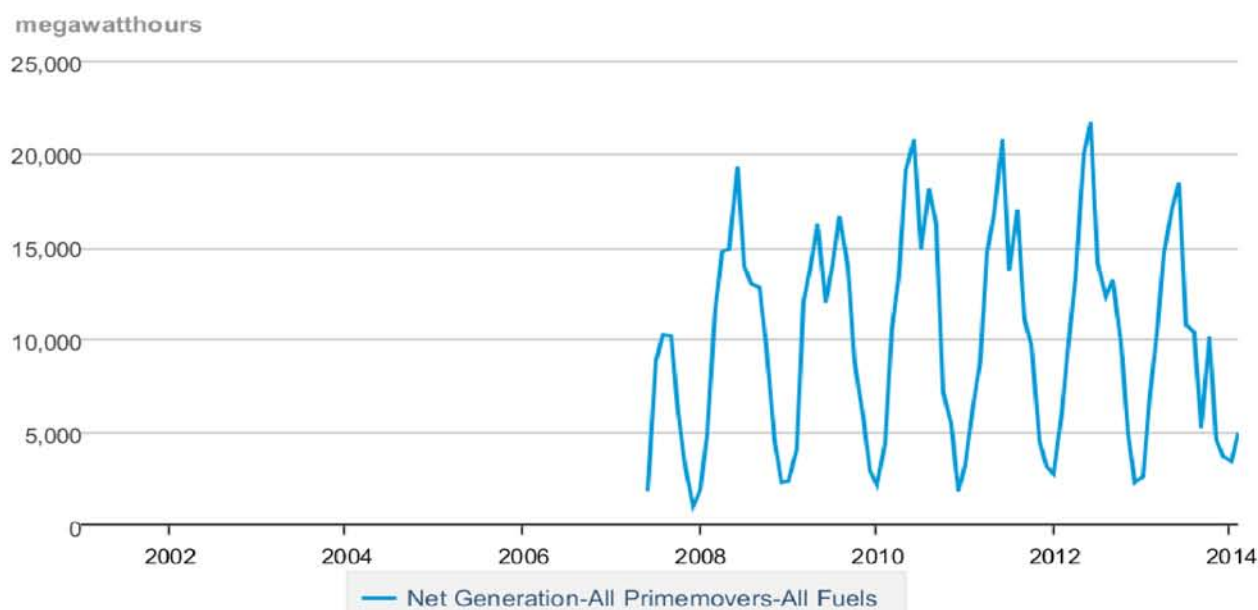
Συγκροτήματα ηλιακών συλλεκτων	760
Επιφάνεια ανοίγματος(μ)	5
Επιφάνεια ανοίγματος(τμ)	470
Μήκος(μ)	100
Συντελεστής συγκέντρωσης	71
Οπτική απόδοση	0.77
Καθρέυτες(μονάδες)	182.400
Σωλήνες δέκτες(μονάδες)	18.240
Έκταση πεδίου(τμ)	357.200
Συνολική έκταση(τχμ)	1.62
Θερμοκρασία εισόδου(C)	300
Θερμοκρασία εξόδου(C)	390

#### Σύστημα ισχύος

Μικτή παραγωγή τουρμπίνας-γεννήτριας	75MWe
Καθαρή παραγωγή	72MWe
Πίεση εισόδου ηλιακού ατμού	86.1bar
Πίεση αναθέρμανσης ηλιακού ατμού	19.5bar
Θερμοκρασία εισόδου ηλιακού ατμού	371C

Πίνακας4. κύρια χαρακτηριστικά του NSO

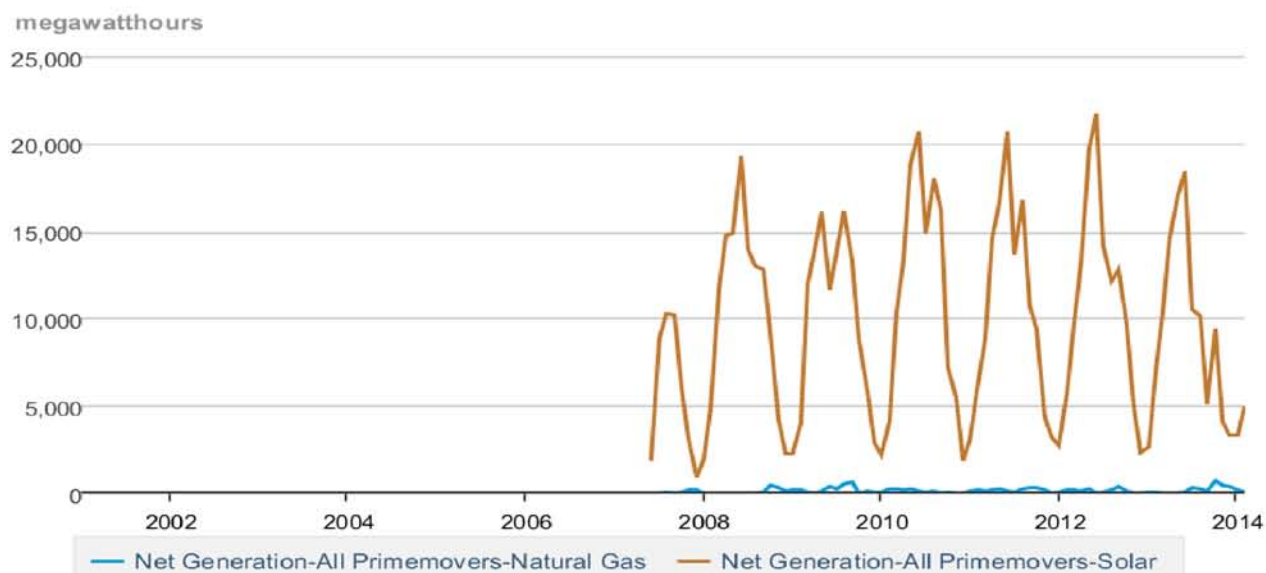
## Nevada Solar One, Monthly



eia Source: U.S. Energy Information Administration

Σχήμα 19. Μηνιαία καθαρή παραγωγή (MWh) με χρήση όλων των ειδών καυσίμων (ηλιακή ενέργεια και βοηθητικό σύστημα φυσικού αερίου)

## Nevada Solar One, Monthly

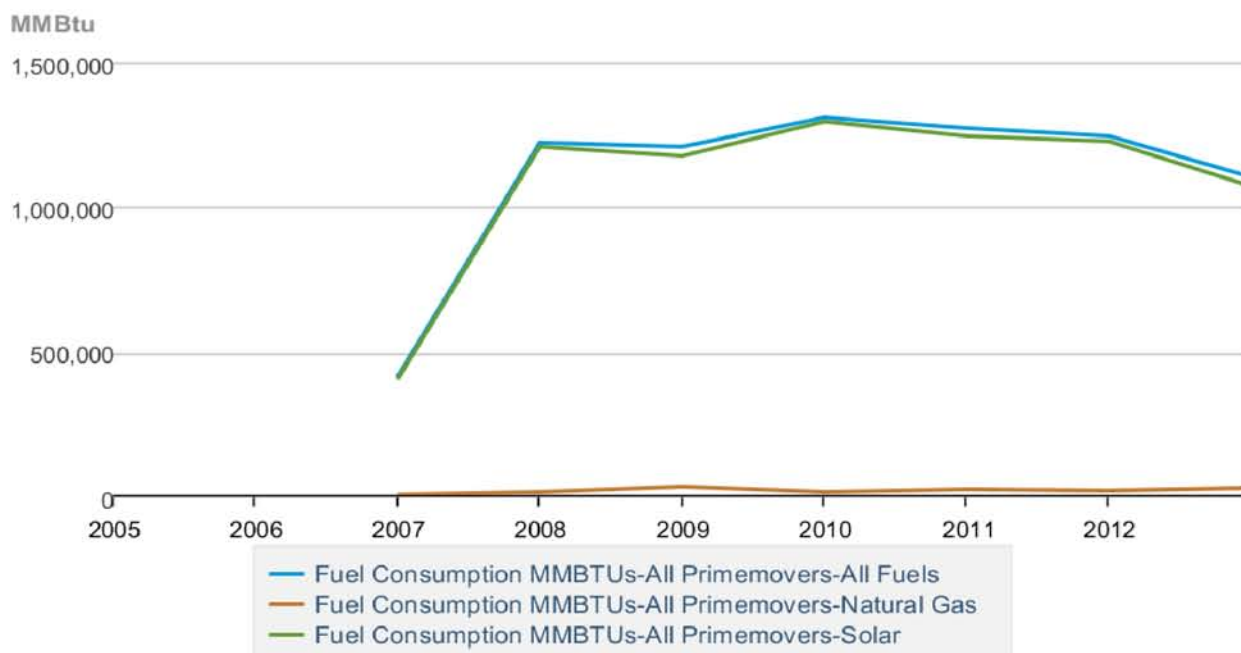


Data source: U.S. Energy Information Administration

Σχήμα 20. Συνεισφορά ηλιακής ενέργειας και φυσικού αερίου στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα εύκολα βλέπουμε ότι η συνεισφορά του εφεδρικού συστήματος με φυσικό αέριο στην παραγωγή ηλεκτρισμού είναι πολύ μικρή.

## Nevada Solar One, Annual



Data source: U.S. Energy Information Administration

Σχήμα 21. Ετήσια κατανάλωση καυσίμων σε MMBTUs

Η παραγωγή του NSO επαρκεί για την ηλεκτροδότηση περίπου 20.000 σπιτιών. Δεδομένης της γης και της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στη Νεβάδα, η πολιτεία αυτή θεωρητικά έχει τη δυνατότητα να παράξει περισσότερα από 600 GW ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιώντας ηλιακούς θερμικούς συγκεντρωτές όμοιους με αυτούς του NSO. Έχει προταθεί ότι η μαζική εξάπλωση ηλιακών σταθμών σαν τον NSO έχει τη δυνατότητα να παρέχει επαρκές ηλεκτρικό ρεύμα για την ηλεκτροδότηση ολόκληρων των ΗΠΑ.

### 3.4.2. Solnova Solar Power Station

Ο ηλιακός σταθμός Solnova βρίσκεται στη Σεβίλλη στην Ισπανία και αποτελεί μέρος του Solucar Complex που περιλαμβάνει και δύο πύργους ισχύος, τον PS10 και τον PS20. Ο σταθμός αποτελείται από τρεις ξεχωριστές μονάδες, ισχύος 50 MW η καθεμία, που ολοκληρώθηκαν το 2010.

Κάθε ένας από τους σταθμούς Solnova I, III, IV αποτελείται από έκταση καθρευτών περίπου 3,23 εκατομμύρια τετραγωνικά πόδια (ή 290.700 τμ) που καλύπτουν περίπου 280 στρέμματα. Η παραγωγή κάθε μονάδας ισοδυναμεί με τις ανάγκες για ηλεκτροδότηση 25.700 νοικοκυριών, ενώ αποτρέπει την απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα 31.400 τη CO<sub>2</sub> κάθε χρόνο. Οι σταθμοί διαθέτουν επίσης εφεδρικό σύστημα καυσίμων με φυσικό αέριο για την παραγωγή ηλεκτρισμού όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί.



Εικόνα 5. Οι σταθμοί Solnova I,III και IV

Ακολουθεί ένας πίνακας με τα κύρια χαρακτηριστικά των τριών μονάδων.

	<b>Solnova I,III,IV</b>
Εκκίνηση παραγωγής	1/1/2009
Έκταση (εκτάρια)	115
Ηλιακοί πόροι(kWh/τμ/έτος)	2.012
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	113.520
<b>Ηλιακό πεδίο</b>	
Έκταση πεδίου(τμ)	300.000
Συγκροτήματα ηλιακών συλλεκτων	360
Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτων (τμ)	833
Μήκος ηλιακών συλλεκτών(μ)	150
Συλλέκτες θερμότητας(μονάδες)	12960
HTF	θερμικό έλαιο
Θερμοκρασία εξόδου(C)	393
<b>Σύστημα ισχύος</b>	
Ισχύς τουρμπίνας-μικτή(MW)	50
Ισχύς τουρμπίνας-καθαρή(MW)	50
Είδος εξόδου	ατμός Rankine
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	100bar
Μέθοδος ψύξης	υγρή ψύξη
Είδος εφεδρικού συστήματος	HTF λέβητας

Η ενεργειακή χρέωση σύμφωνα με την PPA(power purchase agreement, δεσμευτική συμφωνία ανάμεσα στον πωλητή της ενέργειας και τον αγοραστή που παρέχει ασφάλεια για τα έσοδα του πωλητή και την προμήθεια του αγοραστή)είναι 27,1188 euro cents/kWh.

Η ενεργειακή χρέωση περιλαμβάνει διάφορα κόστη αναφορικά με την παραγωγή της ενέργειας που παραδίδεται:

-επιβαρύνσεις για κάθε μονάδα καυσίμου που καταναλώνεται, συμπεριλαμβανομένου του κόστους καυσίμου και μεταφοράς του στο σταθμό

-διάφορα κόστη λειτουργίας και συντήρησης (ανταλλακτικά, λιπαντικά και άλλα αναλώσιμα)

Πίνακας 5. κύρια χαρακτηριστικά των Solnova

-ένα σημαντικό τοκοχρεωλυτικόποσό για το κόστος συντήρησης της τουρμπίνας με βάση τη χρήση.

### 3.4.3. Solana Generating Station

Ο σταθμός Solana βρίσκεται 70 μίλια νοτιοδυτικά του Φοίνιξ στην Αριζόνα. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2010 και ο σταθμός ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2013. Έχει συνολική ισχύ 280 MW και είναι ο μεγαλύτερος ηλιακός σταθμός PTC με αποθήκευση θερμικής ενέργειας διάρκειας 6 ωρών. Η παραγωγή του είναι ικανή να ηλεκτροδοτήσει 70.000 σπίτια ενώ παράλληλα αποτρέπει ετησίως την εκπομπή 475.000 tη CO<sub>2</sub>.



Εικόνα 6. Solana generating station



Εικόνα 7. Φωτογραφία του σταθμού πριν ολοκληρωθεί

στο σταθμό Solana με την υπογραφή συμφωνίας PPA με διάρκεια ισχύος 30 χρόνια.

Το κόστος του σταθμού ανήλθε στα \$2,000,000 από τα οποία τα \$1.450.000 προσφέρθηκαν στην Abengoa Solar, την εταιρία που κατασκεύασε το έργο, με τη μορφή δανειακών εγγυήσεων από το Τμήμα Ενέργειας των ΗΠΑ (U.S. Department of Energy-DOE).

Η Δημόσια Υπηρεσία της Αριζόνα (APS) αγοράζει όλο το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται

Η τιμή αγοράς του ρεύματος από την APS έχει καθοριστεί στα \$0,14/kWh. Το ρεύμα μεταφέρεται από τον υποσταθμό του έργου στον κοντινό υποσταθμό Panda που ανήκει στην APS για να ενσωματωθεί στο εθνικό δίκτυο. Οι δύο υποσταθμοί απέχουν μεταξύ τους 30km περίπου.

Όπως περιγράφηκε παραπάνω για τους σταθμούς PTC έτσι και ο Solana χρησιμοποιεί παραβολικούς καθρεύτες-συλλέκτες, εφοδιασμένους με μηχανισμό παρακολούθησης του ήλιου, που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε σωλήνες-δέκτες μέσα στους οποίους ρέει ένα συνθετικό λάδι. Το λάδι αυτό που θερμαίνεται μέχρι τους 390 °C μεταφέρεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας για την παραγωγή ατμού, ο οποίος κινεί δύο τουρμπίνες 140 MW για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η κατασκευή του επιπλέον επιτρέπει στο θερμικό υγρό να ρέει μέσα στις δεξαμενές αποθήκευσης και να θερμαίνει τα λιωμένα άλατα, διατηρώντας έτσι τη θερμότητα έως 6 ώρες ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν δεν υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια. Το σύστημα αποθήκευσης περιλαμβάνει έξι ζεύγη από θερμές και ψυχρές δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 125.000 μετρικών τόνων (1 μετρικός τόνος=1000 kg) λιωμένου άλατος, το οποίο διατηρείται στην ελάχιστη θερμοκρασία των 276,67 °C. Χάρη στη δυνατότητα αποθήκευσης ο σταθμός παράγει το 38% της ονομαστικής του χωρητικότητας κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Στη συνέχεια παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα κύρια χαρακτηριστικά του σταθμού, καθώς και ένα διάγραμμα που αναπαριστά την παραγωγή του σταθμού σε MW την εβδομάδα 14-21/3/2014.

<b>Solana Generating Station</b>	
Εκκίνηση παραγωγής	7/10/2013
Έκταση (εκτάρια)	780
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	944000
<b><u>Ηλιακό πεδίο</u></b>	
Αριθμός καθρευτών	2700
Έκταση πεδίου	711
Μήκος συλλέκτη	121.92
Πλάτος συλλέκτη	5.49
Ύψος συλλέκτη	5.79
HTF	Therminol VP-1
Θερμοκρασία εξόδου(C)	390.56
<b><u>Σύστημα ισχύος</u></b>	
Ισχύς τουρμπίνας-μικτή(MW)	280
Ισχύς τουρμπίνας-καθαρή(MW)	250
Περιγραφή τουρμπίνας	2x140MWe gross
Είδος εξόδου	ατμός Rankine
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	100 bar
Μέθοδος ψύξης	υγρή ψύξη
Είδος εφεδρικού συστήματος	φυσικό αέριο
<b><u>Θερμική αποθήκευση</u></b>	
Τύπος αποθήκευσης	2-δεξαμενες έμμεση
Δυνατότητα αποθήκευσης(ώρες)	6
Περιγραφή	τηγμένα άλατα
Χωρητικότητα(μετρικοί τόνοι άλατος)	125000
Ελάχιστη θερμοκρασία(C)	276.67

Πίνακας 6. Κύρια χαρακτηριστικά του Solana Generating System

Ο συντελεστής ισχύος ισούται με 41% και οι ηλιακοί πόροι με 2,303 kWh/m<sup>2</sup>/έτος.



Σχήμα 22. Παραγόμενη ισχύς του σταθμού Solana την εβδομάδα 14-21/3/2014

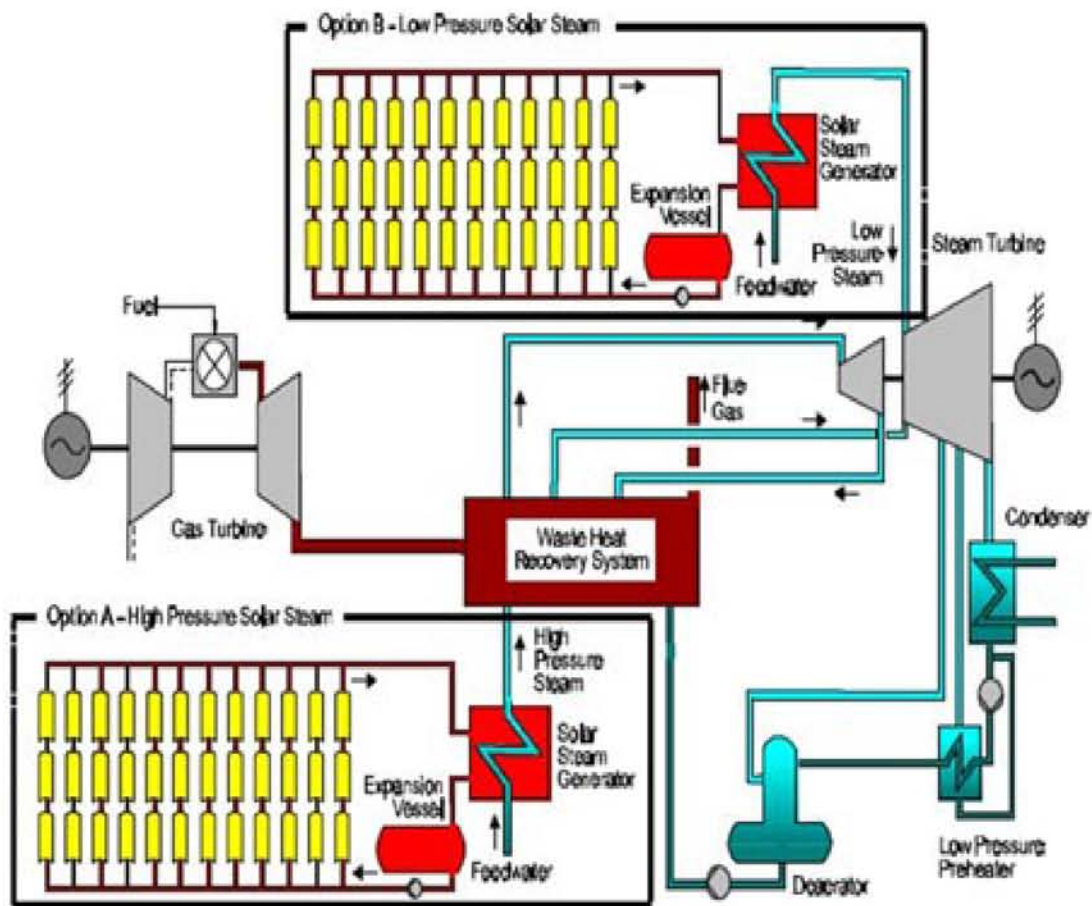
### 3.5. Τεχνολογία ISCCS (Integrated solar combined cycle system)

Παρά το γεγονός ότι οι CSP σταθμοί υπερτερούν όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, υπάρχουν ακόμη κάποια εμπόδια στην ευρεία εμπορική τους χρήση όπως το υψηλό εμμενδυτικό κόστος, που προς το παρόν κυμαίνεται από 2.500-5.000 \$/KW εξαρτώμενο από το μέγεθος του σταθμού και τη χωρητικότητα αποθήκευσης, και το ελάχιστο μέγεθος του συστήματος ισχύος που εξασφαλίζει υψηλή θερμοδυναμική απόδοση.

Ένας τρόπος για να μετριαστεί η αντίληψη του κινδύνου και να αυξηθεί ο συντελεστής ισχύος του συστήματος ισχύος είναι η ενσωμάτωση ενός PTC σταθμού σε ένα συνδυασμένο κύκλο όπου δύο διαφορετικοί θερμοδυναμικοί κύκλοι, ένας ατμοστρόβιλος κύκλου Rankine και ένας αεριοστρόβιλος κύκλου Brayton, συνδυάζονται σε ένα και μόνο σύστημα μέσω μίας ατμογεννήτριας ανάκτησης θερμότητας (HRSG). Το καύσιμο καίγεται στον αεριοστρόβιλο με τον συμβατικό τρόπο και το θερμό αέριο της καύσης περνάει από την HRSG γεννήτρια. Εδώ η ενέργεια από το αέριο παράγει και υπερθερμαίνει ατμό ώστε να χρησιμοποιηθεί στον κάτω κύκλο της ατμογεννήτριας. Η ηλιακή ενέργεια από το ηλιακό πεδίο μπορεί να ενσωματωθεί είτε σε υψηλή πίεση στην HRSG είτε σε χαμηλότερη πίεση απευθείας στο περίβλημα χαμηλής πίεσης της ατμοτουρμπίνας. Η γενική ιδέα είναι μία μεγάλου μεγέθους ατμοτουρμπίνα που χρησιμοποιεί την ηλιακή θερμότητα για την παραγωγή ατμού και μία αεριοτουρμπίνα αποβολής θερμότητας για την προθέρμανση και υπερθέρμανση του ατμού.



Καθώς ο ηλιακός ατμός τροφοδοτεί μόνο τον ατμοστρόβιλο συνδυασμένου κύκλου που αποτελεί το 1/3 της συνολικής ισχύος, η ηλιακή συμμετοχή είναι περίπου 10%. Κάποιες μελέτες ισχυρίζονται ότι η ISCCS διαμόρφωση μπορεί να μειώσει το κόστος της ηλιακής ισχύος μέχρι και 22% επί του μικτού κόστους (22% ορυκτά) της ισχύος από ένα συμβατικό CSP σταθμό ίδιου μεγέθους. Επιπλέον, προσφέρει τρία πλεονεκτήματα ακόμη: η μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια έχει μεγαλύτερη απόδοση, το πρόσθετο κόστος για μεγαλύτερο ατμοστρόβιλο είναι μικρότερο από το συνολικό μοναδιαίο κόστος σε έναν αποκλειστικά ηλιακό σταθμό και τέλος ένας ολοκληρωμένος σταθμός δεν έχει τις θερμικές ανεπάρκειες που σχετίζονται με τις καθημερινές εκκινήσεις και απενεργοποιήσεις του ατμοστρόβιλου.



Σχήμα 23. Σχηματικό διάγραμμα ενός ISCCS σταθμού

Ένα παράδειγμα σταθμού συνδυασμένου κύκλου είναι η εγκατάσταση Martin Next Generation Solar Energy Center στη Φλόριντα, που αποτελεί την πρώτη υβριδική εγκατάσταση παγκοσμίως όπου μία ηλιακή εγκατάσταση συνδέθηκε σε έναν υπάρχον σταθμό συνδυασμένου κύκλου. Ο ISCCS σταθμός αποτελεί τμήμα του Martin Plant που περιλαμβάνει συνολικά 5 μονάδες. Οι μονάδες 1 και 2 είναι ατμο-ηλεκτρικές μονάδες

παραγωγής 800 MW που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο και χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο υπολειμματικό έλαιο. Οι μονάδες 3 και 4 είναι μονάδες συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο ισχύος 500 MW. Η μονάδα 8 είναι μονάδα 4-σε-1 συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο με ονομαστική ισχύ 1.150 MW. Ελαφρύ πετρέλαιο χρησιμοποιείται ως εφεδρεία. Η μονάδα 8, που είναι συνδεδεμένη με τον ηλιακό σταθμό 75 MW, διαθέτει τέσσερις αεριοτουρμπίνες 170 MW, μία ατμοτουρμπίνα 470 MW και ένα ενιαίο συμπυκνωτή και πύργο ψύξης. Το ενιαίο κύκλωμα του ηλιακού πεδίου θερμαίνει τέσσερις ατμογεννήτριες, μετά από κάθε αεριοστρόβιλο. Η ηλιακή θερμική εγκατάσταση είναι σχεδιασμένη για να παρέχει ατμό στη μονάδα 8 με στόχο τη μείωση της χρήσης φυσικού αερίου και σε καμία περίπτωση δεν αυξάνει την ισχύ του σταθμού.



Εικόνα 8. Martin Next Generation Solar Energy Center

Το κέντρο ηλιακής ενέργειας έχει περίπου 190.000 παραβολικούς καθρέυτες (PTCs) πάνω σε έκταση περίπου 500 στρεμμάτων. Οι ηλιακοί συλλέκτες τροφοδοτούν με θερμότητα τον υπάρχοντα σταθμό ατμού, παράγοντας ηλεκτρισμό με ρυθμό 155.000 MWh/έτος. Ο συντελεστής ισχύος ισούται περίπου με 24% (ηλιακοί πόροι 2.026 kWh/m<sup>2</sup>/έτος) ενώ το συνολικό κόστος ανήλθε στα \$476.300.000.

Η εταιρία FPL που κατασκεύασε το έργο εκτιμά ότι ο ηλιακός σταθμός θα μειώσει την κατανάλωση φυσικού αερίου του σταθμού συνδυασμένου κύκλου κατά 37 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> το χρόνο που σημαίνει εξοικονόμηση \$178.000.000 από τα κόστη καυσίμων και λιγότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 2.750.000 tn στην τριακονταετή διάρκεια ζωής του έργου.

### 3.6. Κύκλος Rankine

ΙΔΑΝΙΚΟΣ: Ο κύκλος Rankine είναι ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται για να προβλέψει την απόδοση των κινητήρων ατμού. Ο κύκλος Rankine είναι ένας εξιδανικευμένος θερμοδυναμικός κύκλος μιας θερμικής μηχανής που μετατρέπει τη θερμότητα σε μηχανικό έργο. Η θερμότητα παρέχεται εξωτερικά σε ένα κλειστό βρόχο, ο οποίος χρησιμοποιεί συνήθως νερό ως ρευστό λειτουργίας. Ο κύκλος Rankine περιγράφει στενά τη διαδικασία με την οποία οι θερμικές μηχανές ατμού, που βρίσκονται συνήθως σε εγκαταστάσεις παραγωγής θερμικής ενέργειας, παράγουν ενέργεια. . Οι πηγές θερμότητας που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως η πυρηνική σχάση ή η καύση των ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο. Το ρευστό λειτουργίας σε ένα κύκλο Rankine ακολουθεί ένα κλειστό βρόχο και επαναχρησιμοποιείται συνεχώς. Οι υδρατμοί με συμπυκνωμένα σταγονίδια που συχνά αναδύονται από σταθμούς παραγωγής ενέργειας, έχουν δημιουργηθεί από τα συστήματα ψύξης (όχι απευθείας από τον κύκλο ισχύος κλειστού βρόχου Rankine) και αντιπροσωπεύουν το μέσο για (χαμηλή θερμοκρασία) την έξοδο της απορριπτόμενης θερμότητας από το σύστημα, επιτρέποντας την προσθήκη (υψηλότερη θερμοκρασία) θερμότητας που μπορεί στη συνέχεια να μετατραπεί σε χρήσιμο έργο (ισχύς). Πύργοι ψύξης λειτουργούν ως μεγάλοι εναλλάκτες θερμότητας, απορρόφουν τη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης του υγρού λειτουργίας και ταυτόχρονα εξατμίζεται το νερό ψύξης στην ατμόσφαιρα. Πολλές ουσίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως ρευστό λειτουργίας του κύκλου Rankine, ωστόσο, το νερό είναι συνήθως το υγρό της επιλογής λόγω των ευνοϊκών ιδιοτήτων του, όπως η μη-τοξική και μη δραστική χημική του σύσταση, η αφθονία, και το χαμηλό κόστος, καθώς και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του. Με συμπύκνωση του ατμού σε υγρό, η πίεση στην έξοδο του στροβίλου χαμηλώνει και η ενέργεια που απαιτείται από την αντλία τροφοδοσίας καταναλώνει μόνο 1% έως 3% της ισχύος εξόδου του στροβίλου και αυτοί οι παράγοντες συμβάλλουν στην μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα του κύκλου. Το όφελος από αυτό αντισταθμίζεται από τις χαμηλές θερμοκρασίες του ατμού που εισάγεται στην τουρμπίνα. Αεριοστροβίλοι, για παράδειγμα, έχουν θερμοκρασία εισόδου στροβίλου που πλησιάζει τους 1,500 ° C.

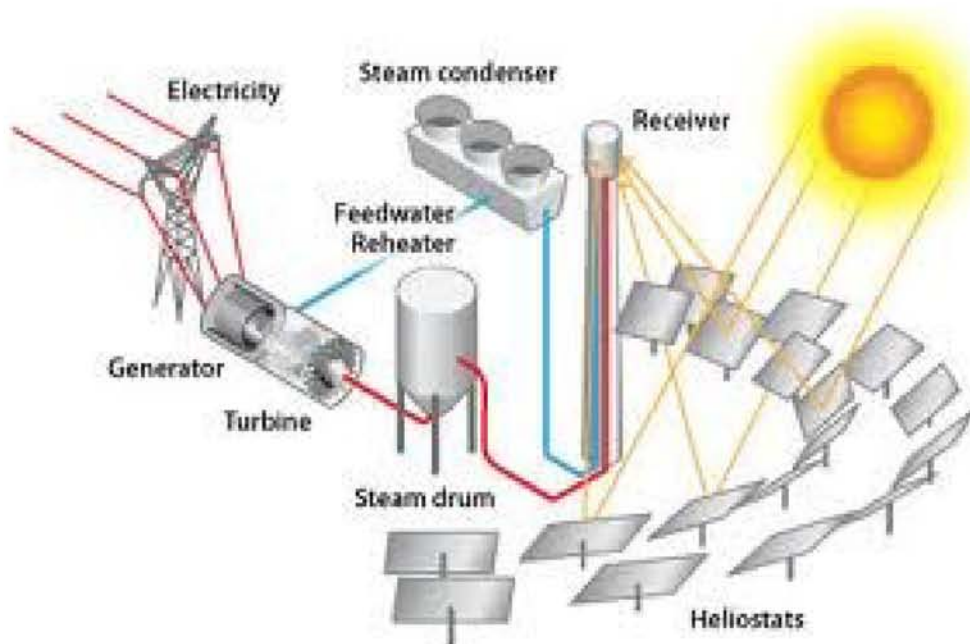
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ: Σε έναν πραγματικό κύκλο σταθμού παραγωγής (η ονομασία «Rankine κύκλος» χρησιμοποιείται μόνο για τον ιδανικό κύκλο), η συμπίεση από την αντλία και την επέκταση της τουρμπίνας δεν είναι ισεντροπική. Με άλλα λόγια, αυτές οι διεργασίες είναι μη αναστρέψιμες και η εντροπία αυξάνεται κατά τη διάρκεια των δύο διαδικασιών. Αυτό αυξάνει κάπως την ισχύ που απαιτείται από την αντλία και μειώνει την ενέργεια που παράγεται από το στροβίλο. Ειδικότερα, η απόδοση του στροβίλου ατμού θα πρέπει να περιορίζεται από το σχηματισμό σταγονιδίων νερού. Καθώς το νερό συμπυκνώνεται, σταγονίδια νερού χτυπούν τα πτερύγια του στροβίλου με υψηλή ταχύτητα και προκαλεί σκασίματα και διάβρωση, μειώνει σταδιακά τη ζωή των πτερυγίων του στροβίλου και την αποτελεσματικότητά του. Ο ευκολότερος τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι με την υπερθέρμανση του ατμού.



## 4. Συστήματα πύργων ισχύος (Power tower systems)

### 4.1. Περιγραφή των αρχών λειτουργίας και των συστατικών στοιχείων ενός πύργου ισχύος

Οι ΡΤ χρησιμοποιούν χιλιάδες μεμονομένους καθρεύτες, που ονομάζονται ηλιοστάτες (heliostats), για να ανακλούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα δέκτη τοποθετημένο στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο δέκτης συλλέγει τη θερμότητα που μεταφέρεται με ένα υγρό μεταφοράς θερμότητας (HTF), που ρέει μέσα στο δέκτη. Από εκεί διοχετεύεται προαιρετικά για αποθήκευση και τελικά σε ένα σύστημα μετατροπής ισχύος που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρισμό και την προμηθεύει στο δίκτυο. Έτσι, τα κύρια συστατικά ενός ΡΤ είναι πέντε: οι ηλιοστάτες, ο δέκτης, η μεταφορά και μετατροπή της θερμότητας, η θερμική αποθήκευση και οι έλεγχοι. Η υψηλή ηλιακή ροή που προσπίπτει στον δέκτη (κατά μέσο όρο 300 έως 1.000 kW/m<sup>2</sup>) επιτρέπει τη λειτουργία σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 1000 °C και πάνω και την ένταξη της θερμικής ενέργειας σε πιο αποδοτικούς κύκλους σε μία προσέγγιση βήμα-βήμα. Οι σταθμοί είναι αρκετά μεγάλοι, συνήθως 10 MW<sub>e</sub> και πάνω, ενώ το βέλτιστο μέγεθος κυμαίνεται μεταξύ 50 και 400 MW. Οι σταθμοί με ΡΤ μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν με διάφορους τρόπους σε σταθμούς με ορυκτά για υβριδική λειτουργία και έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρισμό με υψηλούς ετήσιους συντελεστές ισχύος λόγω της δυνατότητας της θερμικής αποθήκευσης. Με την αποθήκευση οι σταθμοί είναι ικανοί να λειτουργούν πάνω από 4.500 ώρες το χρόνο σε ονομαστική ισχύ.



Σχήμα 24. Απλοποιημένο σχήμα τυπικού ΡΤ σταθμού

Η θερμική ενέργεια του ΗΤΦ χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού που κινεί μία

συμβατική γεννήτρια ατμού, τοποθετημένη στη βάση του πύργου, για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Το σύστημα αποθήκευσης διατηρεί τη θερμότητα αποτελεσματικά ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από ώρες ή και μέρες.

Το πεδίο των συλλεκτών αποτελείται από πολύ μεγάλο αριθμό ηλιοστατών οι οποίοι έχουν σύστημα παρακολούθησης του ήλιου δύο αξόνων και τοπικό σύστημα ελέγχου ώστε να συγκεντρώνουν διαρκώς την άμεση ηλιακή ακτινοβολία πάνω στο δέκτη. Επειδή ο ηλιακός δέκτης είναι τοποθετημένος σε σταθερή θέση, ολόκληρο το πεδίο των συλλεκτών πρέπει να παρακολουθεί τον ήλιο με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε ηλιοστάτης ξεχωριστά να τοποθετεί την επιφάνειά του κάθετα στη διχοτόμο της γωνίας που σχηματίζεται από τον ήλιο και τον ηλιακό συλλέκτη.

Η οπτική απόδοση του πεδίου των ηλιοστατών περιλαμβάνει την επίδραση του συνημιτόνου, τη σκίαση, τον αποκλεισμό, την ανακλαστικότητα των καθρευτών, την ατμοσφαιρική εξασθένηση και τη διαρροή του δέκτη. Εξαιτίας της μεγάλης έκτασης γης που απαιτείται, διάφοροι περίπλοκοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της ετήσιας ενέργειας που παράγεται από μία μονάδα γης και οι ηλιοστάτες πρέπει να τοποθετούνται όσο το δυνατόν πλησιέστερα ώστε ο δέκτης να είναι μικρός και η συγκέντρωση υψηλή. Επειδή η ανακλαστική επιφάνεια του ηλιοστάτη δεν είναι κάθετη στις προσπίπτουσες ακτίνες, η αποτελεσματική του περιοχή μικραίνει από την επίδραση του συνημιτόνου της γωνίας πρόσπτωσης. Φυσικά η ετήσια μέση τιμή του συνημιτόνου εξαρτάται σημαντικά από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Έτσι, κοντά στον Ισημερινό ένα περιβάλλοντα πεδίο είναι το καταλληλότερο για βέλτιστη χρήση της γης και μείωση του ύψους του πύργου. Όσο το γεωγραφικό πλάτος αυξάνεται, στο βόρειο ημισφαίριο, όλοι οι ηλιοστάτες τοποθετούνται στη βόρεια πλευρά του πύργου, ενώ αντίστοιχα στο νότιο ημισφαίριο το πεδίο τοποθετείται στη νότια πλευρά του πύργου. Ο συνδυασμός όλων των παραγόντων που αναφέρθηκαν και επηρεάζουν την επίδοση των ηλιοστατών βελτιστοποιείται με διάφορες προσεγγίσεις ώστε να σχεδιαστεί η κατάλληλη διάταξη και να καθοριστεί η ακτινική και αζιμουθιακή απόσταση των ηλιοστατών και των σειρών.

Στους PTs ο δέκτης είναι ο εναλλάκτης θερμότητας όπου η συγκεντρωμένη ακτινοβολία συλλαμβάνεται και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια χρήσιμη σε θερμοδυναμικούς κύκλους. Η ακτινική ροή και θερμοκρασία είναι ουσιαστικά μεγαλύτερη από αυτή στους PTCs και γι αυτό υψηλή τεχνολογία συμπεριλαμβάνεται στο σχεδιασμό και πρέπει να επιλέγονται υλικά υψηλής επίδοσης. Ο ηλιακός δέκτης πρέπει να μιμείται ένα μέλαν σώμα ελαχιστοποιώντας τις απώλειες ακτινοβολίας. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται κοιλότητες, πλαίσια σωλήνων μαύρου χρώματος ή πορώδεις απορροφητές ικανοί να παγιδεύουν τα προσπίπτοντα φωτόνια. Στους περισσότερους σχεδιασμούς, ο δέκτης είναι μία ατόφια μονάδα που συγκεντρώνει όλη την ενέργεια που συλλέγεται από το μεγάλο πεδίο καθρευτών και γι αυτό απαιτούνται υψηλές διαθεσιμότητες και αντοχή. Οι τυπικές θερμοκρασίες λειτουργίας του δέκτη απορροφητή κυμαίνονται από 500 °C ως 1.200 °C ενώ η προσπίπτουσα ροή καλύπτει ένα ευρύ φάσμα μεταξύ 200 και πάνω από 1.000 kW/m<sup>2</sup>.

Μία μεγάλη ποικιλία σχημάτων δέκτη έχει εξεταστεί, μεταξύ των οποίων ο κυλινδρικός και ο κοίλος δέκτης. Το κατάλληλο σχήμα είναι συνάρτηση της ακτινοβολίας που συλλαμβάνεται και απορροφάται, των θερμικών απωλειών, του κόστους και του σχεδιασμού του πεδίου ηλιοστατών. Για μεγάλη έκταση πεδίου κατάλληλος είναι ο κυλινδρικός δέκτης σε συνδυασμό με μηχανή κύκλου Rankine. Εάν χρησιμοποιούνται τουρμπίνες κύκλου Brayton που απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες, κατάλληλος είναι ο κοίλος δέκτης σε συνδυασμό με μεγαλύτερη αναλογία ύψους πύργου προς πεδίο ηλιοστατών.

Ένας ΡΤ χαρακτηρίζεται από το υγρό μεταφοράς θερμότητας (HTF), το μέσο θερμικής αποθήκευσης και τον κύκλο μετατροπής ισχύος που χρησιμοποιεί. Το ΗΤF μπορεί να είναι νερό-ατμός, υγρό νάτριο, λιωμένο νιτρικό άλας (νιτρικό κάλιο-νιτρικό νάτριο) ή ογκομετρικός αέρας ενώ το μέσο θερμικής αποθήκευσης μπορεί να είναι έλαιο αναμειγμένο με θρυμματισμένη πέτρα, τηγμένο νιτρικό άλας ή υγρό νάτριο. Οι μηχανές κύκλου Brayton παρέχουν υψηλές αποδόσεις αλλά περιορίζονται από το γεγονός ότι απαιτούν κοίλο δέκτη, ο οποίος μειώνει τον αριθμό των ηλιοστατών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Οι μηχανές κύκλου Rankine, που κινούνται από τον ατμό που παράγεται μέσα στο δέκτη και λειτουργούν στους 500-550 °C, παρουσιάζουν δύο σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις μηχανές κύκλου Brayton: οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας μέσα στη γεννήτρια ατμού είναι υψηλοί επιτρέποντας τη χρήση υψηλής πυκνότητας ενέργειας και μικρότερου δέκτη, και χρησιμοποιούν κυλινδρικούς δέκτες που σημαίνει μεγαλύτερο πεδίο ηλιοστατών.

Προς το παρόν το ΗΤF που επιλέγεται για την πρώτη γενιά εμπορικών σταθμών ΡΤ είναι το νερό-ατμός και τα τηγμένα άλατα.

#### **4.2. Σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των πύργων ισχύος**

Ο πρώτος μεγάλης κλίμακας σταθμός κατασκευάστηκε από το Τμήμα Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) σε συνεργασία με μία κοινοπραξία αμερικανικών εταιριών κοινής ωφέλειας και τη βιομηχανία στην Καλιφόρνια. Ο Solar One, όπως ονομάστηκε, λειτούργησε επιτυχώς από το 1982 ως το 1988 και είχε την ικανότητα να παράγει ισχύ μέχρι 10 MW. Χρησιμοποιούσε υπερθερμανσμένο ατμό ως μέσο μεταφοράς θερμότητας μέσα στο δέκτη, γεγονός που δημιουργούσε σημαντικά προβλήματα σχετικά με τον έλεγχο ζωνών με διαφορετικούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας όπως οι λέβητες και οι υπερθερμαντήρες. Καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με τη διάρκεια ζωής των απορροφητών και τη δυνατότητα ελέγχου έχουν αναφερθεί για τους δέκτες με κορεσμένο ατμό. Παρόλο όμως που οι τεχνικοί κίνδυνοι μειώνονται, οι θερμοκρασίες εξόδου είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές του υπερθερμανσμένου ατμού, κάνοντας έτσι απαραίτητες εφαρμογές όπου η θερμική αποθήκευση αντικαθίσταται από εφεδρικό σύστημα ορυκτών καυσίμων.

Στους αρχικούς σταθμούς χρησιμοποιήθηκαν δέκτες από δέσμες ατσάλινων

σωλήνων για την απορρόφηση της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Στην Ευρώπη ο αέρας προτιμάται ως μέσο μεταφοράς θερμότητας αλλά οι δέκτες σωλήνων δεν είναι κατάλληλοι για αυτο το σκοπό εξαιτίας του χαμηλού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και της τοπικής υπερθέρμανσης των σωλήνων. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων μία βιομηχανική κοινοπραξία που ονομάστηκε RHOEBUS ανέπτυξε έναν ογκομετρικό δέκτη που χρησιμοποιούσε έναν συρμάτινο πλέγμα εκτεθειμένο απευθείας στην προσπίπτουσα ακτινοβολία και ψυχόμενο από αέρα που έρεε μέσα στο σύρμα. Ο δέκτης αυτός αποκτούσε θερμοκρασία 800 °C και χρησιμοποιούνταν για την τροφοδότηση ενός κύκλου ατμού 1 MW. Μία κεραμική θερμική αποθήκη χρησιμοποιούνταν για τη νυχτερινή λειτουργία. Ένας μεγαλύτερος σταθμός ισχύος 2.5 MW<sub>th</sub> βασισμένος σε αυτή την τεχνολογία δοκιμάστηκε στο ερευνητικό κέντρο Plataforma Solar στην Almeria. Στο σταθμό αυτό, η ηλιακή ακτινοβολία συλλέγεται από 350 ηλιοστάτες, επιφάνειας 40 m<sup>2</sup> ο καθένας. Για ακόμη υψηλότερες θερμοκρασίες το συρμάτινο πλέγμα αντικαθίσταται από δομές πορώδους SiC Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

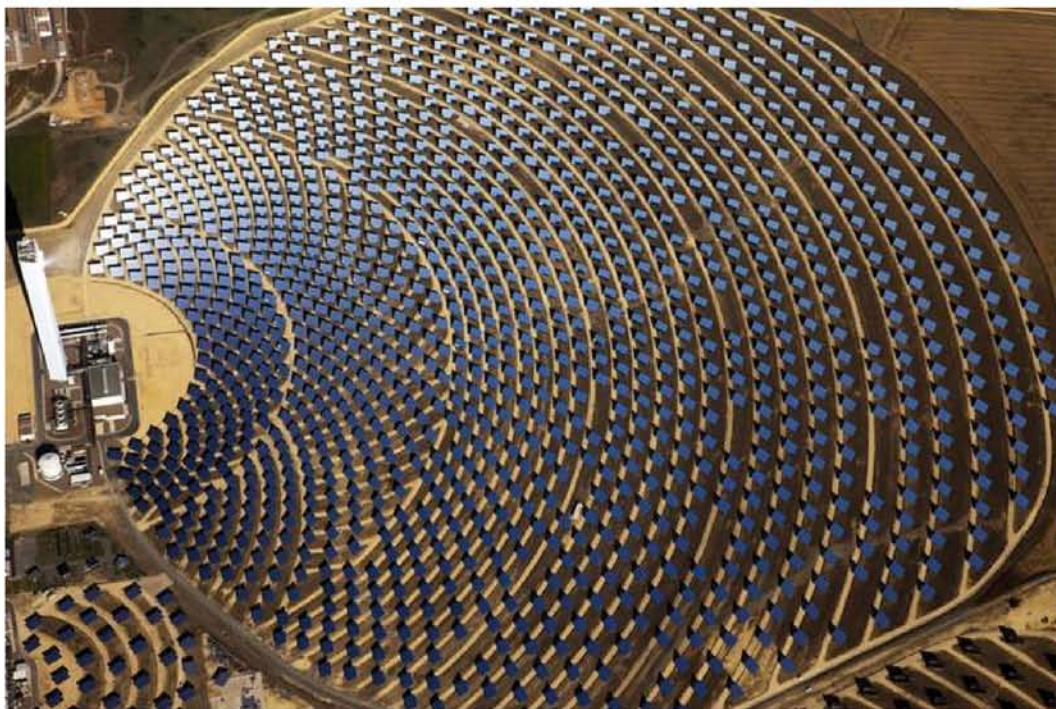
Η κοινοπραξία RHOEBUS πρωτοπορεί στα συστήματα που βασίζονται στον αέρα. Οι δέκτες μεταφοράς θερμότητας με αέρα επιτρέπουν τη λειτουργία σε σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου, απαιτούν υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας αλλά έχουν σχετικά υψηλές θερμικές απώλειες συγκριτικά με τους δέκτες νερού-ατμού. Για τους λόγους αυτούς η κοινοπραξία RHOEBUS ανέπτυξε ένα νέο δέκτη ογκομετρικού αέρα που διανείμει την επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας σε έναν τρισδιάστατο όγκο και λειτουργεί σε τιμές πίεσης πειβάλλοντος. Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η απλότητα και η ασφάλεια, που την καθιστούν κατάλληλη για εφαρμογές σε αναπτυσσόμενες χώρες.

### **4.3. Πειραματικοί και εμπορικοί σταθμοί που έχουν κατασκευαστεί παγκοσμίως**

#### **4.3.1. Planta Solar 10 (PS10) / Planta Solar 20 (PS20)**

Ο PS10, που ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2007 και είναι ο πρώτος εμπορικός σταθμός παγκοσμίως, υιοθέτησε το συντηρητικό σχήμα της χρήσης κορεσμένου ατμού στο δέκτη για τον περιορισμό των τεχνολογικών κινδύνων. Ο σταθμός ονομαστικής ισχύος 11 MW, που βρίσκεται δίπλα στη Σεβίλλη στην Ισπανία (που δέχεται τουλάχιστον 9 ώρες την ημέρα ηλιακή ακτινοβολία 320 ημέρες το χρόνο και φτάνει μέχρι 15 ώρες στο μέσο του καλοκαιριού) σχεδιάστηκε για να πετύχει ετήσια παραγωγή ηλεκτρισμού 23 GWh/έτος με επενδυτικό κόστος μικρότερο από 3.500 €/kW για τις οποίες λαμβάνει 271 €/MWh σύμφωνα με την PPA που έχει συναφθεί.





Εικόνα 9. Φωτογραφία του PS10

Το έργο χρησιμοποίησε διαθέσιμες, αποδεδειγμένες τεχνολογίες όπως ηλιοστάτες γυαλιού μετάλλου και κοίλους δέκτες με κορεσμένο ατμό για να παράγει ατμό σε πίεση 40 bar και θερμοκρασία 250 °C. Διαθέτει σύστημα θερμικής αποθήκευσης με κορεσμένο ατμό

### PS10

Έκταση(εκτάρια)	55
Ηλιακοί πόροι(kWh/τμ/έτος)	2012
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	23400
Έναρξη παραγωγής	25/6/2007
<b>Ηλιακό πεδίο</b>	
Συνολική Επιφάνεια ηλιοστατών(τμ)	75000
Αριθμός ηλιοστατών	624
Επιφάνεια ηλιοστάτη(τμ)	120
Περιγραφή ηλιοστάτη	γυαλιού-μετάλλου
Ύψος πύργου(μ)	115
Τύπος δέκτη	κοίλος
HTF	νερό
Θερμοκρασία εξόδου δέκτη(C)	250-300
<b>Συγκρότημα ισχύος</b>	
Ισχύς τουρμπίνας(μικτή)(MW)	11.02
Ισχύς τουρμπίνας(καθαρή)(MW)	11
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	45
Μέθοδος ψύξης	υγρή ψύξη
Περιγραφή μεθόδου ψύξης	πύργος ψύξης
Εφεδρικό σύστημα	φυσικό αέριο

ικανό να υποστηρίξει τη λειτουργία του σταθμού για 50 λεπτά σε φορτίο 50%. Το σύστημα χρησιμοποιεί 624 ηλιοστάτες εμβαδού 121 m<sup>2</sup> ο καθένας, κατανεμημένους σε πεδίο στη βόρεια πλευρά του πύργου, έναν πύργο ύψους 100 m, ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης 15 MWh και ένα κοίλο δέκτη με τέσσερις σωληνοειδείς συλλέκτες 4,8x12 m.

Παρόλο που το σύστημα χρησιμοποιεί τουρμπίνα κορεσμένου ατμού που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία, η ονομαστική απόδοση του συγκροτήματος ισχύος είναι σχετικά καλή (30.7%). Αυτό είναι αποτέλεσμα της βελτιστοποιημένης

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά στοιχεία του σταθμού PS10

διαχείρισης της απορριπτόμενης θερμότητας στον θερμοδυναμικό κύκλο.

Ο συνδυασμός της οπτικής απόδοσης, της απόδοσης του δέκτη και της απόδοσης του συγκροτήματος ισχύος δίνει συνολική ονομαστική απόδοση στο σημείο σχεδιασμού του 21,7%. Η συνολική ετήσια απόδοση μειώνεται σε 15,4%, αν συμπεριληφθούν και οι λειτουργικές απώλειες και οι διακοπές λειτουργίας.

Το 2006 ακολούθησε η κατασκευή ενός σταθμού 20 MW<sub>e</sub> στον ίδιο χώρο που ονομάστηκε PS20 και χρησιμοποίησε την ίδια τεχνολογία παρουσιάζοντας κάποιες βελτιώσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονται δέκτης με μεγαλύτερη απόδοση, διάφορες βελτιώσεις στα συστήματα ελέγχου και λειτουργίας και καλύτερο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Ο πύργος ύψους 165 m σχεδιάστηκε για να μειώνει την οπτική επίδραση του ύψους του.

Το ηλιακό πεδίο αποτελείται από 1.255 ηλιοστάτες επιφάνειας 120 m<sup>2</sup> ο καθένας. Η ετήσια παραγωγή του σταθμού, που ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2009, ανέρχεται στις 48.000 MWh για τις οποίες λαμβάνει 271 €/MWh σύμφωνα με την συμφωνία (PPA) που έχει υπογράψει. Οι εγκαταστάσεις των δύο σταθμών αποτελούν κομμάτι του Solucar Complex, του συγκροτήματος που περιλαμβάνει και τους PTC σταθμούς Solnova 1, 3, 4. Ακολουθεί πίνακας με τα χαρακτηριστικά στοιχεία του σταθμού.



Εικόνα 10. Ο πύργος του σταθμού PS20

### PS10

Έκταση(εκτάρια)	80
Ηλιακοί πόροι(kWh/τμ/έτος)	2012
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	48000
Έναρξη παραγωγής	22/4/2009
<b>Ηλιακό πεδίο</b>	
Συνολική Επιφάνεια ηλιοστατών(τμ)	155000
Αριθμός ηλιοστατών	1255
Επιφάνεια ηλιοστάτη(τμ)	120
Περιγραφή ηλιοστάτη	γαλιού-μετάλλου
Ύψος πύργου(μ)	165
Τύπος δέκτη	κοίλος
HTF	νερό
Θερμοκρασία εξόδου δέκτη(C)	250-300
<b>Συγκρότημα ισχύος</b>	
Ισχύς τουρμπίνας(μικτή)(MW)	20
Ισχύς τουρμπίνας(καθαρή)(MW)	20
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	45
Μέθοδος ψύξης	υγρή ψύξη
Περιγραφή μεθόδου ψύξης	πύργος ψύξης
Εφεδρικό σύστημα	φυσικό αέριο

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά στοιχεία του PS20

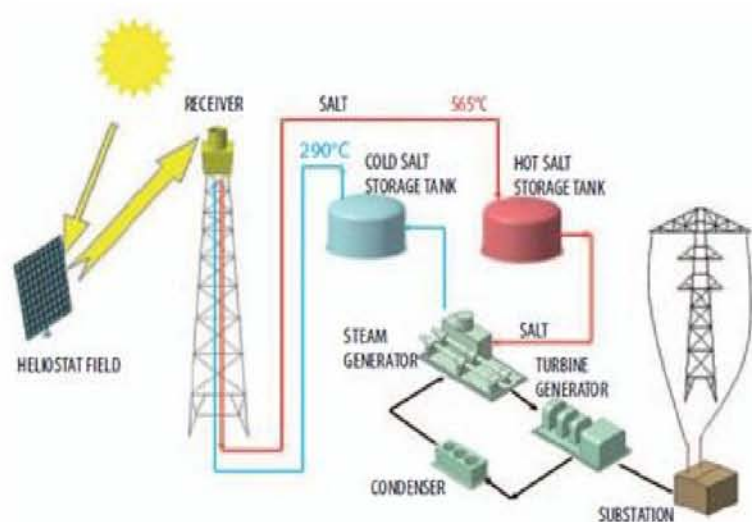


Εικόνα 11. Φωτογραφία του Solnova Complex

#### 4.3.2 Συστήματα τηγμένου άλατος

Για υψηλούς ετήσιους συντελεστές ισχύος οι σταθμοί που χρησιμοποιούν μόνο ηλιακή ενέργεια πρέπει να διαθέτουν ένα ενσωματωμένο, οικονομικά αποδοτικό σύστημα θερμικής αποθήκευσης. Ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιεί τηγμένο νιτρικό άλας ως υγρό μεταφοράς θερμότητας στο δέκτη και ως μέσο θερμικής αποθήκευσης. Για να είναι χρήσιμο το τηγμένο άλας, ένα μίγμα από 60% νιτρικό νάτριο και 40% νιτρικό κάλιο, πρέπει το εύρος λειτουργίας του να είναι αντίστοιχο των θερμοκρασιών λειτουργίας των τουρμπίνων κύκλου Rankine.

Το ψυχρό αλάτι θερμοκρασίας 290 °C αντλείται από μία δεξαμενή στο έδαφος και διοχετεύεται στο δέκτη που βρίσκεται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου, όπου θερμαίνεται από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία στους 565 °C. (Σχήμα 25) Στη συνέχεια ρέει πάλι προς το έδαφος όπου



Σχήμα 25. Σταθμός ΡΤ με τηγμένο άλας

εισέρχεται σε άλλη δεξαμενή. Για την παραγωγή ηλεκτρισμού το άλας διοχετεύεται από τη θερμή δεξαμενή σε μία γεννήτρια ατμού για να παράγει υπερθερμανσμένο ατμό, ο οποίος τροφοδοτεί μία τουρμπίνα κύκλου Rankine. Από τη γεννήτρια ατμού το αλάτι επιστρέφει στην ψυχρή δεξαμενή όπου αποθηκεύεται για να αναθερμανθεί στον δέκτη. Το πεδίο των συλλεκτών μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να συλλέγει περισσότερη ενέργεια από αυτή που χρειάζεται η γεννήτρια ατμού και το επιπλέον αλάτι συσσωρεύεται στη θερμή δεξαμενή αποθήκευσης. Με αυτό το σύστημα αποθήκευσης ηλιακοί σταθμοί ισχύος μπορούν να κατασκευαστούν με ετήσιους συντελεστές ισχύος μεγαλύτερους από 70%, καθώς το τηγμένο άλας έχει μεγάλη χωρητικότητα ενεργειακής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου (500-700 kWh/m<sup>3</sup>). Παρόλο που το νιτρικό αλάτι έχει μικρότερη ειδική θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου από τα ανθρακικά άλατα, είναι ικανό να αποθηκεύει 250 kWh/m<sup>3</sup>. Η μέση θερμική αγωγιμότητα των νιτρικών αλάτων είναι 0,52 W/mK και η θερμική τους χωρητικότητα είναι περίπου 1,6 kJ/kg K, ενώ παράλληλα αποτελούν μία φθηνή λύση για μεγάλα αποθηκευτικά συστήματα.

Το μεγαλύτερο μη εμπορικό έργο με τέτοιο σύστημα αποθήκευσης κατασκευάστηκε στην Καλιφόρνια για να βελτιώσει τα προβλήματα που παρουσίαζε ο Solar One και ονομάστηκε Solar Two. Ο σκοπός του έργου ισχύος 10 MW ήταν να επικυρώσει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη και του συστήματος αποθήκευσης που χρησιμοποιούν τηγμένα άλατα, να βελτιώσει την ακρίβεια των οικονομικών προβλέψεων για τα εμπορικά έργα αυξάνοντας τη βάση δεδομένων του επενδυτικού κεφαλαίου και του κόστους συντήρησης και λειτουργίας και να παρέχει πληροφορίες στη βιομηχανία και τις εταιρίες κοινής ωφέλειας ώστε να αυξήσει το ενδιαφέρον για εμπορικά έργα.

Ο σταθμός ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1996 και διέθετε 1818 ανακλαστές κατασκευασμένους από γυαλί επαργυρωμένο στην πίσω πλευρά, καθένας από τους οποίους αποτελείται από 12 κοίλους συλλέκτες με συνολική επιφάνεια 39,13 m<sup>2</sup> και συνολική επιφάνεια καθρευτών 71.000 m<sup>2</sup>. Ο δέκτης είναι ένας κυλινδρικός, μονής διέλευσης υπέρθερμος λέβητας ύψους 13,7 m και διαμέτρου 7 m. Είναι ένα συγκρότημα 24 στοιχείων πλάτους 0,9 m και μήκους 13,7 m. Έξι από τα στοιχεία που βρίσκονται στη νότια πλευρά, η οποία δέχεται τη λιγότερη ακτινοβολία, χρησιμοποιούνται ως υδροδοτούμενοι προθερμαστές και τα υπόλοιπα ως λέβητες. Ο πύργος έχει ύψος 90 m. Ο δέκτης σχεδιάστηκε ώστε να παράγει 50.900 kg/h ατμού στους 565 °C με τον απορροφητή να λειτουργεί στους 620 °C. Το σύστημα αποθήκευσης με δύο δεξαμενές τηγμένου αλάτος έχει ισχύ 110 MW<sub>th</sub>, ο δέκτης 42 MW<sub>th</sub> και η γεννήτρια ατμού 35 MW<sub>th</sub> (535 °C, 100 bar).

Ο σταθμός σταμάτησε τη λειτουργία του τον Ιούνιο του 1999 αφού ολοκληρώθηκε ο έλεγχος και η αξιολόγηση της λειτουργίας του. Κάποια από τα βασικά αποτελέσματα ήταν: η απόδοση του δέκτη μετρήθηκε στο 88%, η κυκλική απόδοση του αποθηκευτικού συστήματος πάνω από 97% και η μικτή απόδοση της τουρμπίνας κύκλου Rankine στο 34%. Όλες αυτές οι μετρήσεις ανταπεξέρχονταν στις προβλέψεις.



Εικόνα 12. Ο πύργος ισχύος του Solar Two

#### 4.3.3. Gemasolar Thermosolar Plant



Εικόνα 13. Πανοραμική φωτογραφία του Gemasolar

Ο σταθμός Gemasolar είναι ο πρώτος εμπορικός σταθμός που εφάρμοσε τις πρωτοπόρες ιδέες που εξετάστηκαν στους πειραματικούς σταθμούς Solar One, Solar Two, χρησιμοποιώντας τηγμένα άλατα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας και ως μέσο αποθήκευσης. Ο σταθμός ισχύος μόλις  $17 \text{ MW}_e$ , που βρίσκεται στη Σεβίλλη, συνδέθηκε στο δίκτυο το καλοκαίρι του 2011 και σχεδιάστηκε για να παράγει  $110 \text{ GWh/έτος}$ , που ισοδυναμεί με

$6.500 \text{ h}$  λειτουργίας πλήρους φορτίου ή συντελεστή χρησιμοποίησης  $74\%$ . Η ισχύς αυτή είναι ικανή να ηλεκτροδοτήσει με ασφάλεια  $25.000$  σπίτια και να μειώσει τις ετήσιες εκπομπές  $\text{CO}_2$  κατά  $30.000 \text{ tn}$ .

Το πεδίο των ηλιοστατών συνολικής επιφάνειας  $304.750 \text{ m}^2$  είναι υπερμεγέθες ώστε να τροφοδοτεί το σύστημα θερμικής αποθήκευσης ικανό να διατηρεί τη θερμότητα για  $15 \text{ h}$ , ώστε να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή μιας

συννεφιασμένης μέρας. Αυτή η αποθηκευτική ικανότητα κάνει την ηλιακή του ενέργεια διαχειρίσιμη ώστε να προμηθεύεται βάση της ζήτησης. Έτσι, ο σταθμός είναι σχεδιασμένος ώστε να λειτουργεί ολόκληρη την ημέρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, έχοντας ως αποτέλεσμα ετήσιο συντελεστή ισχύος 75%.



Εικόνα 14. Ο πύργος του Gemasolar

#### **Gemasolar**

Έκταση(εκτάρια)	195
Ηλιακοί πόροι(kWh/τμ/έτος)	2172
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	110000
Έναρξη παραγωγής	Απρίλιος 2011

#### **Ηλιακό πεδίο**

Συνολική Επιφάνεια ηλιοστατών(τμ)	304750
Αριθμός ηλιοστατών	2650
Επιφάνεια ηλιοστάτη(τμ)	120
Ύψος πύργου(μ)	140
HTF	τηγμένα άλατα
Θερμοκρασία εισόδου δέκτη(C)	290
Θερμοκρασία εξόδου δέκτη(C)	565

#### **Συγκρότημα ισχύος**

Ισχύς τουρμπίνας(μικτή)(MW)	19.9
Ισχύς τουρμπίνας(καθαρή)(MW)	19.9
Μέθοδος ψύξης	υγρή ψύξη
Εφεδρικό σύστημα	φυσικό αέριο
Ποσοστό εφεδρείας	15%

#### **Σύστημα αποθήκευσης**

Τύπος	άμεση με 2 δεξαμενές
Ικανότητα	15 ώρες
Θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής	290
Θερμοκρασία θερμής δεξαμενής	565

Πίνακας 9. Στοιχεία του Gemasolar

Τα ισοσταθμισμένα ενεργειακά κόστη εκτιμώνται περίπου στα 0,16 \$/kWh, ενώ το συνολικό κόστος του έργου ανήλθε στα 230.000.000€ από τα οποία τα 5 εκατομμύρια επιδοτήθηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τα 80 εκατομμύρια δόθηκαν ως δάνειο από την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων.

#### **4.3.4 Invarah Solar Electric Generating System**

Ο σταθμός Invarah που βρίσκεται στην έρημο Μοχάβι στην Καλιφόρνια ολοκληρώθηκε στις 13/2/2014. Διαθέτει 173.500 ηλιοστάτες με δύο καθρέυτες ο καθένας που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε δέκτες που βρίσκονται στην κορυφή τριών πύργων, ύψους 140 m. Η μονάδα 1 συνδέθηκε στο δίκτυο το Σεπτέμβριο του 2013 σε μία αρχική δοκιμή συγχρονισμού, ενώ και οι τρεις μονάδες θα λειτουργούν πλήρως μέχρι τα τέλη του 2014.

Το έργο ισχύος 392MW κόστισε συνολικά 2,2 δισεκατομμύρια δολάρια από τα οποία τα 1.6 δόθηκαν με μορφή δανειακών εγγυήσεων από το Τμήμα Ενέργειας των ΗΠΑ. Το εκτιμώμενο κόστος κατασκευής στα 5,561€/kWh κυμαίνεται μεταξύ του κόστους

κατασκευής των σταθμών άνθρακα και των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ισχύος αλλά

το γεγονός αυτό δεν αντισταθμίζει τον αρκετά χαμηλότερο συντελεστή ισχύος της ηλιακής ισχύος. Η τελική έγκριση για το έργο δόθηκε τον Οκτώβριο του 2010 ενώ η κατασκευή σταμάτησε προσωρινά την άνοιξη του 2011 λόγω αντιδράσεων που πρόβαλλαν ειδικοί για την επίδραση που θα είχε στις χελώνες της ερήμου.



Εικόνα 15. Πανοραμική φωτογραφία του σταθμού Ιναραχ

Οι ηλιοστάτες ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία στους δέκτες οι οποίοι είναι γεμάτοι με νερό. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που αποκτούν, το νερό θερμαίνεται και παράγει ατμό εξαιρετικά υψηλής θερμοκρασίας που στη συνέχεια διοχετεύεται σε μία συμβατική τουρμπίνα που παράγει ηλεκτρισμό. Η πρώτη μονάδα του σταθμού χρησιμοποιεί το μεγαλύτερο σύστημα αμοστρόβιλου-γεννήτριας που τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια αποκλειστικά.

Κατά τη λειτουργία του σταθμού οι δέκτες αποκτούν εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία έτσι ώστε φεγγοβολούν κάνοντας αρκετά εντυπωσιακό το θέαμα τους.

Η μονάδα Ιναραχ 1 έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 126MW ενώ οι μονάδες 2 και 3 από 133MW η καθεμία.



Εικόνα 16. Δέκτης του σταθμού Ιναραχ σε λειτουργία

Ο συντελεστής ισχύος εκτιμάται περίπου στο 31% ενώ η συνολική ετήσια παραγωγή αναμένεται στις 1.000 MWh περίπου, ικανή να τροφοδοτήσει επαρκώς περισσότερα από 140.000 σπίτια. Η λειτουργία του σταθμού αναμένεται να συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά περισσότερους από 400.000 tη ετήσιως.

Ο σταθμός έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις χάρη στην αποδοτικότητα της χρήσης της γης, τη μειωμένη χρήση νερού και το σχεδιασμό του ηλιακού πεδίου έτσι ώστε να ακολουθεί τις φυσικές καμπύλες του εδάφους και να αποφεύγει σημαντικό τομέα της βλάστησης. Με χρήση της μεθόδου ξηρής ψύξης επιτυγχάνεται μείωση της χρήσης νερού κατά 90% συγκριτικά με τη συμβατική μέθοδο υγρής ψύξης. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται αέρας αντί νερού για τη συμπύκνωση του ατμού. Ο κύκλος παραγωγής ατμού είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου

όπου το νερό ανακυκλώνεται μέσα στο σύστημα ενώ γενικά μέτρα διατήρησης βοηθούν στην περαιτέρω μείωση της χρήσης νερού, το οποίο στο σταθμό αυτό καταναλώνεται αποκλειστικά για τον καθαρισμό των καθρευτών. Οι πυλώνες των ηλιοστατών εισάγονται κετευθείαν στο έδαφος αποφεύγοντας τα εκτεταμένα θεμέλια από τσιμέντο επιτρέποντας έτσι στη βλάστηση να συνυπάρχει μέσα στο ηλιακό πεδίο και να αναπτύσσεται ανάμεσα στους καθρευτές.



Εικόνα 17. Ηλιοστάτες στο σταθμό Invarah

Παρόλες όμως τις προσπάθειες για μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αντιδράσεις συνεχίζουν να εγείρονται από ειδικούς για την επίπτωση της λειτουργίας του σταθμού στην πανίδα της περιοχής. Οι χελώνες που εντοπίστηκαν στην περιοχή του σταθμού μετακινήθηκαν σε άλλα μέρη της ερήμου Μοχάβι, περιβαλλοντολόγοι όμως θεωρούν ότι οι χελώνες αυτές είναι μάλλον απίθανο να επιβιώσουν λόγω των καταπονήσεων. Επιπλέον, κατά τη δοκιμή του σταθμού το 2013 βρέθηκαν νεκρά 34 πουλιά από τα οποία τα 15 είχαν βαριά εγκαύματα στα φτερά τους, τα οποία καίγονταν και απανθρακώνονταν από την έντονη ακτινοβολία που αντανακλούν οι καθρευτές του ηλιακού πεδίου. Στρατηγικές μείωσης του θανάτου των πουλιών εξετάζονται ενώ οι ειδικοί προσπαθούν να καθορίσουν πόσοι θάνατοι μπορούν να θεωρηθούν υπερβολικοί ώστε να οδηγήσουν στο προσωρινό κλείσιμο του σταθμού.

Καθένας καθρευτής ηλιοστάτη διαθέτει ανακλαστική επιφάνεια  $7,02 \text{ m}^2$  με συνολική επιφάνεια ανά ηλιοστάτη  $14,05 \text{ m}^2$ . Η συνολική ανακλαστική επιφάνεια του ηλιακού πεδίου είναι  $173.500 * 14,05 = 2.437.144 \text{ m}^2$ . Εξαρτώμενη από την ακτινοβολία, η ηλιακή ενέργεια που δεσμεύεται είναι  $2.437.144 \text{ m}^2 * 2.717 \text{ kWh/m}^2/\text{έτος}$  (ηλιακό δυναμικό) =  $6.621.720 \text{ MWh}$  ετήσιως. Η θερμική απόδοση λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες ανάκλασης, μετάδοσης και απορρόφησης είναι περίπου 55% έχοντας ως αποτέλεσμα



είσοδο θερμικής ισχύος στις τουρμπίνες ατμού 3.641.946 MWh<sub>th</sub> (0,55 \* 6.621.720 MWh). Η αναμενόμενη απόδοση είναι 28,72% που σημαίνει αναμενόμενη έξοδο ίση με 1.045.967 MWh/έτος δηλαδή περίπου 1,05 TWh/έτος. Η έλλειψη όμως δημοσιευμένων δεδομένων για την επίδοση του σταθμού προκαλεί εικάσιες για μη εκπλήρωση των στόχων, αν και πιθανώς είναι πολύ νωρίς για την εξαγωγή οποιουδήποτε συμπεράσματος. Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά στοιχεία λειτουργίας του σταθμού.

<b>Invarah Solar Electric Generating System</b>	
Έκταση(στρέμματα)	3500
Ηλιακοί πόροι(kWh/τμ/έτος)	2717
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	1079232
Εκκίνηση παραγωγής	13/02/2013
Κόστος(\$)	2.2 δις
<b>Ηλιακό πεδίο</b>	
Έκταση ανοίγματος ηλιακού πεδίου(τμ)	2600000
Αριθμός ηλιοστατών	175000
Έκταση ανοίγματος ηλιοστάτη(τμ)	15
Περιγραφή ηλιοστάτη	καθένας έχει 2 καθρεύτες
Ύψος πύργου(ft)	459
Είδος δέκτη	γεννήτρια ατμού
Είδος HTF	νερό
Θερμοκρασία εισόδου δέκτη(C)	248.89
Θερμοκρασία εξόδου δέκτη(C)	565.56
<b>Μπλοκ ισχύος</b>	
Μικτή ισχύς τουρμπίνας(MW)	392
Καθαρή ισχύς τουρμπίνας(MW)	377
Είδος εξόδου	ατμός Rankine
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	160
Είδος ψύξης	ξηρή ψύξη
Ετήσια απόδοση(μικτή)	28.72%
Είδος εφεδρικού συστήματος	φυσικό αέριο
<b>Θερμική αποθήκευση</b>	
Είδος αποθήκευσης	κανένα

Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά στοιχεία του Invarah



## 5. Γραμμικοί ανακλαστές fresnel (Linear fresnel reflectors, LFRs)

### 5.1. Γενική περιγραφή

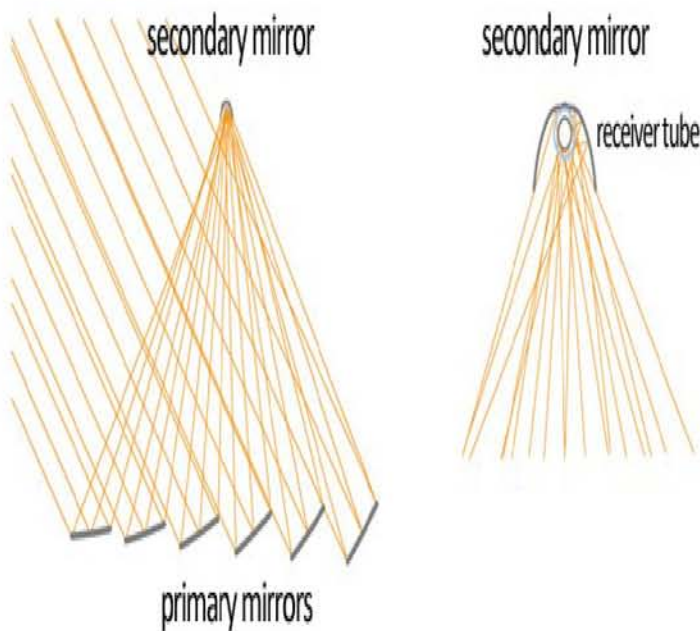
Οι LFRs αποτελούνται από μία σειρά επίπεδων ή ελάχιστα λυγισμένων λωρίδων καθρεύτη που κινούνται ανεξάρτητα και εστιάζουν πάνω σε ένα σταθερό συγκρότημα δεκτών που μπορεί να περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους γραμμικούς σωλήνες δέκτες και έναν προαιρετικό δευτερεύοντα ανακλαστή. Οι ανακλαστές ακολουθούν τον ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς περιστρέφονται γύρω από ανεξάρτητους παράλληλους άξονες, ενώ ο δέκτης παραμένει σταθερός. Αρχικά, η ιδέα προτάθηκε ως εναλλακτική των συστημάτων των πύργων ισχύος: ένα μεγάλο πεδίο γραμμικών συλλεκτών Fresnel θα συγκέντρωνε την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν μοναδικό γραμμικό δέκτη τοποθετημένο σε μεγάλο ύψος (61 m). Ωστόσο, η σύγκριση με τα συστήματα πύργων ισχύος αποδείχτηκε δυσμενής, καθώς ο συντελεστής συγκέντρωσης είναι χαμηλότερος, η προσπίπτουσα ακτινοβολία δεν μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά (λόγω του μονοαξονικού μηχανισμού παρακολούθησης) και ο γραμμικός δέκτης έχει μεγαλύτερες θερμικές απώλειες από τον κεντρικό δέκτη του πύργου ισχύος. Ωστόσο, αναγνωρίστηκε το πλεονέκτημα του χαμηλότερου κόστους κατασκευής και διατήρησης του σταθμού.

Στη συνέχεια, η ιδέα προτάθηκε όχι σαν εναλλακτική των πύργων ισχύος αλλά σε μικρότερη κλίμακα ως εναλλακτική των συστημάτων των παραβολικών κοίλων συλλεκτών (PTCs). Σήμερα λοιπόν, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel θεωρούνται ανταγωνιστές των παραβολικών κοίλων συλλεκτών.

Το βασικό συστατικό που διαφοροποιεί τους γραμμικούς συλλέκτες Fresnel από τους παραβολικούς κοίλους συλλέκτες είναι η χρήση των "ανακλαστών Fresnel". Οι ανακλαστές αυτοί κάνουν χρήση της επίδρασης του φακού Fresnel ο οποίος επιτρέπει τη χρήση συγκεντρωτή καθρεύτη με μεγάλη επιφάνεια ανοίγματος και μικρό εστιακό μήκος ενώ συγχρόνως μειώνει τον όγκο του υλικού που απαιτείται για τον ανακλαστή συγκριτικά με ένα φακό συμβατικού σχεδιασμού. Ένας φακός fresnel μπορεί να δεσμεύσει περισσότερο πλάγιο φως από μία πηγή φωτός. Αυτό μειώνει σημαντικά το κόστος καθώς οι παραβολικοί συλλέκτες καμπύλου γυαλιού.

Στους γραμμικούς συλλέκτες Fresnel τα ανακλαστικά τμήματα βρίσκονται πολύ κοντά στο έδαφος και μπορούν να συναρμολογηθούν με συμπαγή τρόπο μέχρι 1 ha(εκτάριο)/m<sup>2</sup>. Ο δεύτερος ανακλαστής κατευθύνει όλες τις εισερχόμενες ακτινοβολίες πάνω στο σωλήνα απορρόφησης διευρύνοντας έτσι το στόχο για τους ανακλαστές, αλλά και μονώνει το σωλήνα απορρόφησης. Η τεχνολογία αυτή έχει στόχο να επιτύχει την επίδοση των PTCs με χαμηλότερο κόστος. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την αύξηση του ρυθμού συγκέντρωσης χωρίς να αυξάνει τη ροπή του ανέμου, που αλλιώς είναι η περίπτωση των παραβολικών εγχαράξεων (parabolic troughs) και των υπερμεγέθων ηλιοστατικών καθρευτών στους πύργους ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ροπή

του ανέμου είναι περίπου ανάλογη προς το τετράγωνο του ύψους του καθρεύτη. Παρόλα αυτά, η οπτική απόδοση είναι χαμηλότερη από αυτή των PTCs εξαιτίας της μεγαλύτερης επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης και του παράγοντα του συνημιτόνου. Συνεπώς, η θερμοκρασία λειτουργίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας είναι συνήθως χαμηλότερη και κυμαίνεται μεταξύ 150°C και 350°C. Γι αυτό το λόγο ιστορικά οι γραμμικοί Fresnel έχουν εφαρμοσθεί για την παραγωγή κορεσμένου ατμού μέσω άμεσης παραγωγής ατμού μέσα στο σωλήνα.



Εικόνα 18. LFR με δευτερεύον ανακλαστή που περιβάλλει το σωλήνα-δέκτη

Γενικά, τα διάφορα σχέδια των γραμμικών Fresnel διαφοροποιούνται βάσει του σχεδιασμού του συγκροτήματος του δέκτη και της διάταξης των σειρών των καθρευτών. Η διάταξη του δέκτη μπορεί να είναι οριζόντια, κατακόρυφη ή τριγωνική στη διαμόρφωση. Συγκεκριμένα, οι συμπαγείς γραμμικοί Fresnel (compact linear fresnel reflectors -CLFR) μπορούν να χρησιμοποιούν δύο πύργους-δέκτες με τον κάθε καθρεύτη να εντοπίζει

οποιοδήποτε από τους δύο δέκτες καθόλη τη διάρκεια της ημέρας ανάλογα με το ποια επιλογή έχει ως αποτέλεσμα λιγότερες απώλειες σκίασης και αποκλεισμού. Ο σχεδιασμός αυτός συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της οπτικής απόδοσης με τίμημα όμως την πολυπλοκότητα στη σχεδίαση του μηχανισμού κίνησης.

## 5.2. Είδη συγκροτημάτων δέκτη

Πολλές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στο σχεδιασμό του δέκτη με στόχο την αύξηση της οπτικής απόδοσης του συλλέκτη. Μία σειρά από σωλήνες δέκτες μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για έναν, αυξάνοντας έτσι τη δεκτική επιφάνεια που οδηγεί στην αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τραπεζοειδείς κοίλοι δέκτες χρησιμοποιούν μη-κενούς σωλήνες απορροφητές, ενώ μόνωση στα πλευρικά τοιχώματα μειώνει τις

Θερμικές απώλειες. Παρόλα αυτά, οι μη-κενοί σωλήνες είναι κατάλληλοι για σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες λόγω των σχετικά υψηλών συντελεστών θερμικών απωλειών. Οι θερμικές απώλειες αυξάνονται σημαντικά για θερμική έξοδο μεγαλύτερη των 400 °C.

Συχνά όταν χρησιμοποιείται μόνο ένας σωλήνας-δέκτης ώστε να μειωθεί το κόστος κατασκευής και υλικού, ένας δευτερεύον ανακλαστής προστίθεται για να βελτιωθεί η οπτική επίδοση του συλλέκτη. Ο κατάλληλος σχεδιασμός του δευτερεύοντα ανακλαστή είναι μία περίπλοκη διαδικασία και μπορεί να εξαρτάται από το σχεδιασμό του υπόλοιπου συλλέκτη. Διαφορετικές απλουστευτικές παραδοχές που υιοθετούνται στην οπτική ανάλυση μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικούς σχεδιασμούς και δεν υπάρχει ομοφωνία όσον αφορά τη βέλτιστη μορφή του δευτερεύοντα ανακλαστή. Οι παραδοσιακοί δευτερεύοντες ανακλαστές είχαν την τάση να ακολουθούν το σχήμα των σύνθετων παραβολικών συγκεντρωτών (CPC). Στους CPC η ανακλαστική επιφάνεια μπορεί να είναι παραβολή ή μία εξελιγμένη καμπύλη, εξαρτάται από το σχήμα του δέκτη που χρησιμοποιείται. Στους LFR γενικά, χρησιμοποιούνται ένας ή πολλαπλοί κυκλικοί σωλήνες-απορροφητές. Βέβαια, υπάρχουν αρκετές αντιρρήσεις ότι ένας δευτερεύον ανακλαστής μπορεί να μην είναι απαραίτητος εξαιτίας της πρόσθετης κατασκευαστικής πολυπλοκότητας και των επιπλέον απαιτήσεων συντήρησης, ειδικά όταν χρησιμοποιείται μεγάλου μεγέθους δέκτης-σωλήνας κενού.

### 5.3 Ιστορική εξέλιξη των LFRs

Μία αξιοσημείωτη έκθεση που χρηματοδοτήθηκε από το Τμήμα Ενέργειας των ΗΠΑ (US Department of Energy-DOE) τη δεκαετία 1970 βασίστηκε σε εκταταμένη μελέτη της τεχνολογίας των LFR και υποδείκνυε ότι είναι εμπορικά βιώσιμη τεχνολογία. Συνεπώς, ενδιαφέρον εκδηλώθηκε από όλο τον κόσμο με προτάσεις και αναλύσεις ενός αριθμού διαφόρων θεωρητικών σχεδιασμών, και αρκετοί από αυτούς προχώρησαν σε μηχανολογικό σχεδιασμό και προτυποποίηση. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη πολλές οικονομικές και τεχνικές πτυχές της τεχνολογίας LFR που δεν κατανοηθεί και ερευνηθεί πλήρως.

Η πρώτη ουσιαστική προσπάθεια πραγματοποιήθηκε από τον Giorgio Francia στην Ιταλία το 1964, ο οποίος ανέπτυξε συστήματα γραμμικών ανακλαστών Fresnel με διαξονικό μηχανισμό εντοπισμού. Από τότε λόγω της απλής έννοιας της δομής τους, μία σειρά από γραμμικούς συλλέκτες Fresnel σχεδιάστηκαν και δοκιμάστηκαν.

Η πρώτη σοβαρή εξέλιξη που αφορούσε τους CLFRs (Compact Linear Fresnel Reflectors) προτάθηκε στο Πανεπιστήμιο του Σιδνεϋ το 1993. Η ιδέα περιλάμβανε ένα ενιαίο πεδίο ανακλαστών μαζί με πολλαπλούς γραμμικούς δέκτες. Κάθε ανακλαστής μπορεί να αλλάζει το εστιακό του σημείο από τον ένα δέκτη στον άλλο κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε να αποφεύγεται η σκίαση στο πυκνό πεδίο των ανακλαστών. Το σύστημα αυτό καλύπτει περίπου το 71% του εδάφους συγκριτικά με το 33% στην τεχνολογία των PTCs. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα για πολύ πιο πυκνό πεδίο, άρα μικρότερη έκταση γής,

και χαμηλότερο ύψος του πύργου όπου βρίσκεται ο δέκτης με αποτέλεσμα μείωση του συνολικού κόστους αν ληφθούν υπόψη τα κόστη προετοιμασίας του εδάφους, υποδομής των συστοιχιών, κατασκευής του πύργου, το κόστος και οι θερμικές απώλειες της γραμμής ατμού. Εάν η τεχνολογία πρόκειται να εγκατασταθεί σε περιορισμένης έκτασης γη, όπως σε αστικές περιοχές ή δίπλα σε υπάρχοντες σταθμούς ισχύος, πυκνά τοποθετημένες συστοιχίες ανακλαστών μπορούν να οδηγήσουν στη μέγιστη παραγωγή του συστήματος για δεδομένη έκταση εδάφους.

Οι περισσότεροι αναπτυγμένοι και κατασκευασμένοι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel περιλαμβάνουν μία συστοιχία από ανακλαστές τοποθετημένους κοντά στο έδαφος και μία ενιαία διάταξη δέκτη που απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό το μηχανισμό εντοπισμού.



Εικόνα 19. Πρότυπος συλλέκτης Solar mundo

Το 2000 η εταιρία Solar mundo κατασκεύασε ένα πεδίο πρότυπων συλλεκτών έκτασης 2.400 m<sup>2</sup> στο Βέλγιο αλλά τα αποτελέσματα των δοκιμών δε δημοσιεύτηκαν ποτέ. Ο Solar mundo χρησιμοποιεί έναν ανακλαστή στο εσωτερικό της κοιλότητας και έναν μόνο σωληνοειδή απορροφητή και ένα γυάλινο δευτερεύοντα ανακλαστή που λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Το περισσότερο από το ηλιακό φως δεσμεύεται για τη θέρμανση του απορροφητή.

Ο απορροφητής κινείται στα πλαίσια θερμικής διαστολής και υποστηρίζεται από μία κατασκευή σχήματος-U και κινούμενα στηρίγματα. Η εταιρία ισχυρίζεται ετήσια απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια της τάξης του 10-12%, ποσοστό χαμηλότερο από αυτό στα συστήματα PTC όπου κυμαίνεται μεταξύ 14-16%.

Ένας πιλοτικός συλλέκτης γραμμικών Fresnel 800 kW έχει ήδη δοκιμαστεί στο ερευνητικό κέντρο Plataforma Solar de Almeria (PSA) στην Ισπανία. Ο συλλέκτης, μήκους 100 m και πλάτους 21 m, έχει συνολική ανακλαστική επιφάνεια 1.433 m<sup>2</sup> διαμοιρασμένη σε 1.200 έδρες τοποθετημένες σε 25 παράλληλες σειρές που εκτείνονται κατά μήκος του βρόχου. Το σύστημα αυτό έχει σχεδιαστεί για άμεση παραγωγή ατμού σε μέγιστη πίεση 100 bar και μέγιστη θερμοκρασία 450 °C.



Εικόνα 20. Συλλέκτης FRESDEMO στο ερευνητικό κέντρο PSA

Ένας άλλος συλλέκτης κατασκευάστηκε στη Σεβίλλη στην Ισπανία για την ψύξη κτιρίων. Ο συλλέκτης αυτός λειτουργούσε υπό το καθε-στώς υδατικής φάσης και η θερμοκρασία λειτουργίας του περιορίζεται στους 200 °C. Τελευταία έχει αναπτυχθεί επιπλέον ώστε να παρέχει θερμική επεξεργασία ατμού μέχρι τους 400 °C από την Industrial Solar. Τα άλλα έργα μπορεί να πετυχαίνουν σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες (από 300 °C έως 426 °C) επιτρέποντας ροή δύο φάσεων ατμού/νερού μέσα στο δέκτη.

Η θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη ποικίλλει ανάλογα με την επιλογή του σχεδιαστή αναφορικά με τη στρατηγική λειτουργίας/ελέγχου, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF) και το είδος των σωλήνων δέκτη.

Το πιο συνηθισμένο HTF που χρησιμοποιείται σε συλλέκτες μέσης θερμοκρασίας είναι το νερό/ατμός. Οι LFR είναι κατάλληλοι για παραγωγή θερμού ατμού είτε μέσω της ρύθμισης παραμέτρων μία φορά είτε μέσω ανακυκλούμενης διαμόρφωσης. Η πρώτη παράγει ατμό από υδροδότηση μέσω ενός σωλήνα ροής μονής κατεύθυνσης ενώ η δεύτερη ανακυκλώνει το νερό στο τμήμα βρασμού του δέκτη και στη συνέχεια κατευθύνει τον κορεσμένο ατμό στο τμήμα υπερθέρμανσης. Οι σωλήνες δέκτες μπορεί να είναι κενού ή μη-κενού. Το μήκος και η αναλογία συγκέντρωσης των LFR μπορεί να είναι ευέλικτα ώστε να πετυχαίνουν διαφορετικά επίπεδα των επιδιωκόμενων θερμοκρασιών, παρέχοντας έτσι πρακτική προσαρμοστικότητα στη χρήση.

## **5.4. Τεχνολογία State of the art (SOTA)**

Εξαιτίας της απαίτησης η ηλιακή ενέργεια να παίζει σημαντικό ρόλο στην αγορά ενέργειας βιομηχανικής κλίμακας, η τρέχουσα τεχνολογία SOTA στοχεύει σε κύκλους ισχύος υψηλών θερμοκρασιών. Η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να αυξήσει την απόδοση μετατροπής ενέργειας των κύκλων ισχύος και να μειώσει σημαντικά το κόστος της θερμικής αποθήκευσης, που οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος και παρέχει στις τεχνολογίες συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας την δυνατότητα να ανταγωνιστούν οικονομικά τους σταθμούς ισχύος ορυκτών καυσίμων. Προς το παρόν, οι εταιρίες Novatec Solar και Areva Solar δείχνουν το δρόμο στην ανάπτυξη γραμμικών συλλεκτών Fresnel υψηλής θερμοκρασίας.

## **5.5. Πειραματικοί και εμπορικοί σταθμοί που έχουν κατασκευαστεί παγκοσμίως**

### **5.5.1. Puerto Erado1/Puerto Erado 2 (PE1/PE2)**

Το 2009 η γερμανική εταιρία Novatec Biosol που μετονομάστηκε σε Novatec Solar κατασκεύασε τον πρώτο σταθμό ισχύος με γραμμικούς συλλέκτες Fresnel που συνδέθηκε στο δίκτυο. Ο σταθμός, που βρίσκεται στην Ισπανία και ονομάστηκε Puerto Erado1 (PE1), έχει ονομαστική ισχύ 1,4 MW και συνδέθηκε στο τοπικό δίκτυο το Μάρτιο του 2009. Ο σταθμός χρησιμοποιεί το συλλέκτη Nona-1 που κατασκευάστηκε για να παράγει ατμό στους 270 °C. Ο σταθμός περιλαμβάνει έναν ηλιακό λέβητα με συνολική ανακλαστική επιφάνεια περίπου 18.000 m<sup>2</sup>. Ο ατμός παράγεται συγκεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας πάνω σε ένα γραμμικό δέκτη που βρίσκεται σε ύψος 7,40 m πάνω από το έδαφος. Ένας σωλήνας απορροφητής είναι τοποθετημένος στην εστιακή γραμμή του πεδίου των καθρευτών όπου το νερό θέρμνεται και μετατρέπεται σε κορεσμένο ατμό 270 °C. Στη συνέχεια ο ατμός τροφοδοτεί μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Ο σταθμός διαθέτει 2 σειρές από γραμμικούς συλλέκτες Fresnel με κορεσμένο ατμό, μία σειρά με υπερθερμανσμένο ατμό και ένα συμβατικό σύστημα ατμοστρόβιλου-γεννήτριας.





Εικόνα 21. Πανοραμική φωτογραφία του PE1



Εικόνα 22. Τμήμα του ηλιακού πεδίου του PE1

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στο σταθμό PE1 πωλείται προς 0,269375 €/kWh για τα πρώτα 25 χρόνια και στη συνέχεια προς 0,215495 €/kWh σύμφωνα με την PPA που έχει υπογραφεί.

Η εμπορική επιτυχία του PE1 οδήγησε την εταιρία στην κατασκευή του σταθμού Puerto Erado 2 (PE2) ισχύος 30 MW το Φεβρουάριο του 2012. Ο PE2 χρησιμοποιεί την ίδια τεχνολογία όπως και ο PE1 και διαθέτει συνολική ανακλαστική επιφάνεια 302.000 m<sup>2</sup> χαρακτηρίζοντας τον έτσι ως το μεγαλύτερο σταθμό γραμμικών συλλεκτών Fresnel σε λειτουργία παγκοσμίως. Ο σταθμός παράγει ηλεκτρική ενέργεια ίση με περίπου 50.000 MWh/έτος που ισοδυναμεί με μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> πάνω από 16.000 μετρικούς τόνους ετησίως και επαρκεί για την ηλεκτροδότηση 12000 νοικοκυριών. Αποτελείται από 28 σειρές γραμμικών συλλεκτών Fresnel και ένα συμβατικό σύστημα αμμοστρόβιλου-γεννήτριας. Η ενέργεια που παράγεται στον PE2 πωλείται προς 0,268717 €/kWh για τα πρώτα 25 χρόνια και στη συνέχεια προς 0,215495 €/kWh.

Και οι δύο σταθμοί χρησιμοποιούν τη μέθοδο της άμεσης παραγωγής ατμού (direct steam generation-DSG) και δε διαθέτουν θερμική αποθήκευση μεγάλης κλίμακας. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος DSG είναι ότι εξαλείφει το κόστος του εναλλάκτη θερμότητας που απαιτείται στις άλλες τεχνολογίες CSP όπου χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα ρευστά μεταφοράς θερμότητας. Επιπλέον, η χρήση του νερού ως μέσο στο ηλιακό πεδίο απλοποιεί σημαντικά τη λειτουργία και τη διατήρηση των βρόχων ηλιακών συλλεκτών και μειώνει τους λειτουργικούς κινδύνους. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι υπάρχει δυνατότητα προσθήκης βραχυπρόθεσμης θερμικής αποθήκευσης, δεν είναι καθόλου συμφέρουσα οικονομικά αλλά και τεχνικά εύκολη η ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας θερμικής αποθήκευσης ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις βασικού φορτίου.

Ακολουθούν πίνακες με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα στοιχεία λειτουργίας των

σταθμών PE1 και PE2.



Εικόνα 23. Πανοραμική φωτογραφία του σταθμού PE2

	PE1	
Έκταση(τμ)	50000	
Ηλιακοί πόροι(kWh/τμ/έτος)	2100	
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	2000	
Εκκίνηση παραγωγής	19/03/2009	
<b>Ηλιακό πεδίο</b>		
Αριθμός σειρών	2	
Μήκος σειράς(μ)	806	
Πλάτος καθρέυτη(μ)	16	
HTF	νερό	
Θερμοκρασία εισόδου(C)	140	
Θερμοκρασία εξόδου(C)	270	
<b>Μπλοκ ισχύος</b>		
Μικτή ισχύς τουρμπίνας(MW)	14	
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	55	
Μέθοδος ψύξης	ξηρή ψύξη	
Περιγραφή μεθόδου ψύξης	αερόψυκτοι συμπυκνωτές	
Σημεία λειτουργίας	270C,55bar	
<b>Θερμική αποθήκευση</b>		
Είδος αποθήκευσης	θερμοκλίνη μονής δεξαμενής	
Περιγραφή	δεξαμενή Ruths	

Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά στοιχεία PE1

	PE2	
Έκταση(τμ)	70000	
Ηλιακοί πόροι(kWh/τμ/έτος)	2095	
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	49000	
Εκκίνηση παραγωγής	31/03/2012	
<b>Ηλιακό πεδίο</b>		
Αριθμός σειρών	28	
Μήκος σειράς(μ)	940	
Πλάτος καθρέυτη(μ)	16	
HTF	νερό	
Θερμοκρασία εισόδου(C)	140	
Θερμοκρασία εξόδου(C)	270	
<b>Μπλοκ ισχύος</b>		
Μικτή ισχύς τουρμπίνας(MW)	30	
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	55	
Μέθοδος ψύξης	ξηρή ψύξη	
Περιγραφή μεθόδου ψύξης	αερόψυκτοι συμπυκνωτές	
Σημεία λειτουργίας	270C,55bar	
<b>Θερμική αποθήκευση</b>		
Είδος αποθήκευσης	θερμοκλίνη μονής δεξαμενής	
Περιγραφή	δεξαμενή Ruths	
Χωρητικότητα	0.5 ώρες	

Πίνακας 13. Χαρακτηριστικά στοιχεία PE2

Ο τελευταίος συλλέκτης που σχεδιάστηκε από τη Novatec, ο Super Nova, χρησιμοποιεί δέκτες-σωλήνες κενού με δευτερεύοντα ανακλαστή και έχει παράξει ατμό σε θερμοκρασίες πάνω από 520 °C. Η δυνατότητα των συλλεκτών να επιτύχουν υψηλότερες

Θερμοκρασίες εξαρτάται από την οπτική επίδοση και την αξιοπιστία των σωλήνων-δέκτων.

Τελευταία η Novatec προωθεί σταθμούς ισχύος 50 MW συνδυάζοντας πεδία PTC και LFR, όπου οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel παρέχουν την προθέρμανση και την εξάτμιση και οι παραβολικοί την υπερθέρμανση. Η εταιρία ισχυρίζεται ότι αυτού του είδους η υβριδοποίηση έχει ως αποτέλεσμα 22% λιγότερη χρήση γης και υψηλότερη κερδοφορία.

### 5.5.2. Kimberlina Solar Thermal Energy Plant

Ο σταθμός Kimberlina που βρίσκεται στην Καλιφόρνια είναι ο πρώτος εμπορικός σταθμός που κατασκευάστηκε από την εταιρία Areva Solar. Έχει ονομαστική ισχύ 5 MW και χρησιμοποιεί την τεχνολογία CLFR (compact linear fresnel reflector) για την παραγωγή υπερθερμανσμένου ατμού. Ο συλλέκτης χρησιμοποιεί



Εικόνα 24. Σταθμός Kimberlina

ένα συγκρότημα δέκτη που περιλαμβάνει ατσάλινους μη κενούς σωλήνες δέκτες. Κάθε ηλιακός λέβητας έχει ένα σύνολο από 13 στενούς, επίπεδους καθρεύτες που ακολουθούν τον ήλιο μεμονωμένα και εστιάζουν την ακτινοβολία του σε εναέριους σωλήνες μέσα στους οποίους ρέει νερό. Το νερό μετατρέπεται απευθείας σε ατμό (τεχνολογία άμεσης παραγωγής ατμού-DSG) ο οποίος στη συνέχεια μπορεί να κινεί μία τουρμπίνα για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία σε διαδικασίες επεξεργασίας τροφίμων, λαδιών ή αφαλάτωσης. Ο σταθμός παράγει υπερθερμανσμένο ατμό θερμοκρασίας μέχρι 480 °C ενώ ο νέος ηλιακός λέβητας που είναι υπό κατασκευή είναι σχεδιασμένος να πετυχαίνει θερμοκρασίες έως και 620 °C υπερθερμανσμένου ατμού.

Ακολουθεί πίνακας με τα κύρια χαρακτηριστικά του σταθμού.

<b>Kimberlina</b>	
Έκταση(τμ)	48562
Ηλιακοί πόροι(kWh/τμ/έτος)	2059
Κόστος(\$)	10 εκατ.
Εκκίνηση παραγωγής	10/2008
<b>Ηλιακό πεδίο</b>	
Επιφάνεια ανοίγματος (τμ)	25988
Αριθμός καθρευτών/γραμμή	10
Αριθμός σειρών	3
Μήκος σειράς(μ)	385
Πλάτος καθρεύτη(μ)	2
HTF	νερό
Μήκος δέκτη(μ)	385
Θερμοκρασία εξόδου (C)	300
<b>Μπλοκ ισχύος</b>	
Μικτή ισχύς τουρμπίνας(MW)	5
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	40
Είδος εξόδου	ατμός Rankine
<b>Θερμική αποθήκευση</b>	
Είδος αποθήκευσης	καμία

Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά στοιχεία Kimberlina

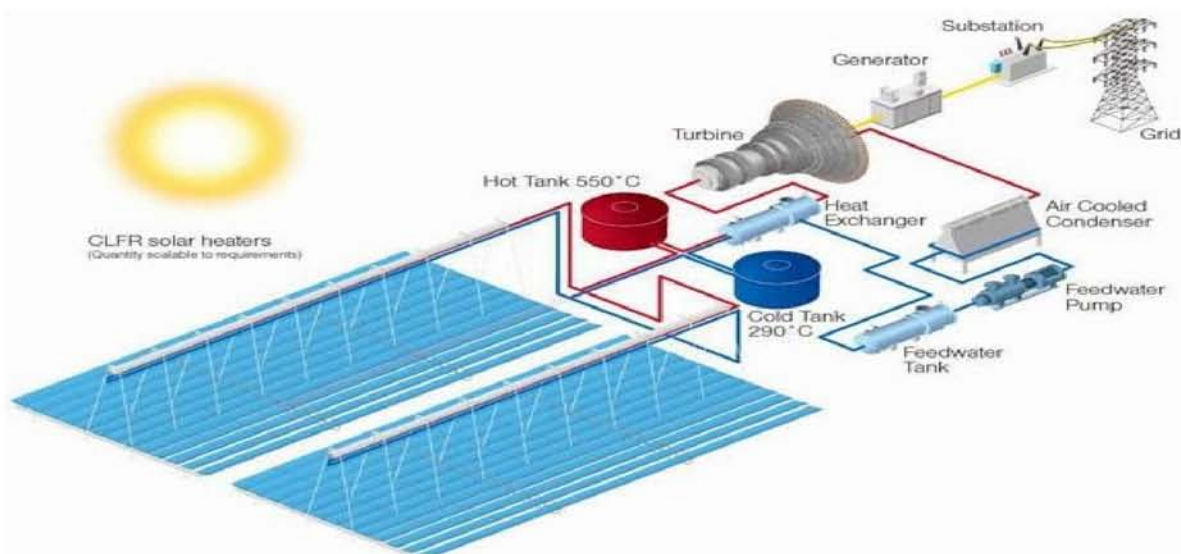
### 5.5.3. Συλλέκτες Fresnel με τηγμένα άλατα

Τα τελευταία χρόνια ολοένα και περισσότερες εταιρίες έχουν διερευνήσει την εφαρμογή των γραμμικών συλλεκτών Fresnel στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η εταιρία Skyfuel Inc., παρόλο που τα κύρια προϊόντα της είναι παραβολικοί PTC συλλέκτες, έχει κάνει προσπάθειες να αναπτύξει υψηλής θερμοκρασίας γραμμικούς συλλέκτες Fresnel με μέσο μεταφοράς θερμότητας λιωμένα άλατα και δυνατότητα αποθήκευσης ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργία βασικού φορτίου. Η προσπάθεια αυτή χρηματοδοτήθηκε από το Τμήμα Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) και εισήχθη στη φάση προτυποποίησης του μηχανολογικού σχεδιασμού του συλλέκτη, αλλά η εταιρία τελικά προτίμησε να αναστείλει τις εργασίες της στον τομέα αυτό για να εστιάσει την προσοχή της σε τεχνολογία PTC. Η επιδιωκόμενη θερμοκρασία κατά το σχεδιασμό του συλλέκτη της Skyfuel ήταν πάνω από 500 °C και τα λιωμένα άλατα θα χρησιμοποιούνταν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας στο ηλιακό πεδίο αλλά και στη θερμική αποθήκευση. Η τεχνολογία σχεδιάστηκε ώστε να χρησιμοποιεί σωλήνες-δέκτες μεγάλης διαμέτρου, γεγονός που αποδείχτηκε αρκετά σημαντικό δεδομένης της έλλειψης διαθεσιμότητας τέτοιου είδους σωλήνων.

Πάνω σε αυτό τον τομέα, η εταιρία Areva συνεργάστηκε με τα εργαστήρια Sandia

National Laboratories, οι εγκαταστάσεις των οποίων βρίσκονται στο Νέο Μεξικό, και ενσωμάτωσε τη δική της τεχνολογία συμπαγούς γραμμικού συλλέκτη Fresnel (CLFR) στο αποδεδειγμένο σύστημα αποθήκευσης με τηγμένα άλατα του Sandia. Ένας τέτοιος σταθμός φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σε ένα τέτοιο σταθμό, μία σειρά καθρευτών συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν υπερυψωμένο δέκτη-σωλήνα κενού για τη θέρμανση ενός ρευστού. Το ρευστό που χρησιμοποιείται είναι τηγμένο άλας. Το σύστημα αντλεί το αλάτι από μία ψυχρή δεξαμενή (290 °C), χρησιμοποιεί τη θερμότητα που προέρχεται από το ηλιακό πεδίο για να το θερμάνει στους 550 °C και οδηγεί το ζεστό αλάτι σε μία άλλη δεξαμενή για αποθήκευση. Όταν χρειάζεται, το τηγμένο άλας υψηλής θερμοκρασίας περνάει από έναν εναλλάκτη θερμότητας για την παραγωγή ατμού που στη συνέχεια κινεί μία γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Στη συνέχεια επιστρέφει στην ψυχρή δεξαμενή και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την παραγωγή ηλεκτρισμού έως και 16 ώρες. Ένα παράδειγμα τέτοιου σταθμού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. (Σχήμα 26)

Παρόλο που το σύστημα άμεσης παραγωγής ατμού (DSG) που χρησιμοποιεί το νερό ως μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι πιο συμφέρον οικονομικά όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σύστημα αποθήκευσης με τηγμένα άλατα έχει τη δυνατότητα να παρέχει την επιλογή βασικού φορτίου για το ηλεκτρικό δίκτυο με σημαντικά οικονομικά οφέλη. Μία σημαντική διαφορά με το σύστημα DSG είναι η προσθήκη του εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του τηγμένου άλατος του ηλιακού πεδίου και του εργαζόμενου ρευστού στην τουρμπίνα. Ένα αποθηκευτικό σύστημα που χρησιμοποιεί απευθείας τηγμένο άλας μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στο σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος σχεδιασμός των γραμμικών συλλεκτών Fresnel εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία εισόδου στην τουρμπίνα και μπορεί να διαφέρει σημαντικά από σταθμό σε σταθμό. Το σύστημα γραμμικών συλλεκτών Fresnel έχει αποδειχθεί θεωρητικά εφικτό και μπορεί να έχει εξαιρετικά οικονομικά πλεονεκτήματα.



Σχήμα 26. Μοντέλο σταθμού παραγωγής ηλεκτρισμού με CLFR και σύστημα αποθήκευσης τηγμένων αλάτων που προωθείται από την εταιρία Arena

Παρόλο που το σύστημα άμεσης παραγωγής ατμού (DSG) που χρησιμοποιεί το νερό ως μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι πιο συμφέρον οικονομικά όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σύστημα αποθήκευσης με τηγμένα άλατα έχει τη δυνατότητα να παρέχει την επιλογή βασικού φορτίου για το ηλεκτρικό δίκτυο με σημαντικά οικονομικά οφέλη. Μία σημαντική διαφορά με το σύστημα DSG είναι η προσθήκη του εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του τηγμένου άλατος του ηλιακού πεδίου και του εργαζόμενου ρευστού στην τουρμπίνα. Ένα αποθηκευτικό σύστημα που χρησιμοποιεί απευθείας τηγμένο άλας μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στο σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος σχεδιασμός των γραμμικών συλλεκτών Fresnel εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία εισόδου στην τουρμπίνα και μπορεί να διαφέρει σημαντικά από σταθμό σε σταθμό.

#### **5.5.4. Σύγκριση γραμμικών συλλεκτών Fresnel με τους παραβολικούς κοίλους συλλέκτες και τους πύργους ισχύος**

Συγκριτικά με τους παραβολικούς συλλέκτες PTC οι γραμμικοί Fresnel πάσχουν από χαμηλή οπτική απόδοση. Ωστόσο, η τεχνολογία των γραμμικών Fresnel χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα αύξησης της αναλογίας συγκέντρωσης (και της θερμοκρασίας του δέκτη) αυξάνοντας την επιφάνεια ανοίγματος των ανακλαστών χωρίς ταυτόχρονα να αυξηθούν οι απαιτήσεις σχεδιασμού του συστήματος. Επιπλέον, η τοποθέτηση των συλλεκτών σε μικρό ύψος κοντά στο έδαφος προσφέρει μερικές μοναδικές δυνατότητες συγκριτικά με τους παραβολικούς:

- δεν παρουσιάζει καμία μηχανική δυσκολία στην αύξηση της γεωμετρικής αναλογίας συγκέντρωσης του συλλέκτη (η αναλογία του ανοίγματος των καθρευτών προς το άνοιγμα του δέκτη) διευκολύνοντας έτσι υψηλές θερμοκρασίες εξόδου που με τη σειρά τους προκαλούν υψηλή απόδοση του κύκλου ισχύος και κατ'επέκταση σημαντική μείωση στο κόστος του συστήματος αποθήκευσης.
- οδηγεί σε χαμηλότερες απαιτήσεις ροπής ανέμου και έτσι χαμηλότερου κόστους σχεδιασμό των συγκροτημάτων των καανακλαστήρων.
- βοηθά στη μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης του σταθμού παραγωγής
- η σταθερή θέση του συγκροτήματος του δέκτη μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο διαρροής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και την προκύπτουσα εργασία συντήρησης
- η διαμόρφωση των γραμμικών Fresnel προσφέρεται τεχνικά δέκτες μεγαλύτερου μεγέθους. Το αυξημένο μέγεθος του δέκτη μπορεί να βελτιώσει την οπτική απόδοση του συλλέκτη και να μειώσει σημαντικά την παρασιτική ισχύ άντλησης στο ηλιακό πεδίο

Συγκριτικά με την τεχνολογία πύργων ισχύος, οι γραμμικοί Fresnel επιδεικνύουν επίσης αρκετές δυνατότητες:

- η γραμμική φύση των συλλεκτών επιτρέπει πολύ χαμηλότερα κόστη λειτουργίας και διατήρησης και είναι θεωρητικά φιλικό σε μηχανισμούς αυτόματου καθαρισμού
- η χαμηλού-ύψους τοποθέτηση των καθρευτών μπορεί να διευκολύνει το σχεδιασμό χαμηλού κόστους συστήματος καθρευτών και να μεγιστοποιήσει την περιοχή των καθρευτών που μοιράζονται το ίδιο σύστημα κίνησης
- το σύστημα κίνησης και ελέγχου για μονοαξονική παρακολούθηση των γραμμικών Fresnel συλλεκτών παρέχει μία απλούστερη και πιο αποδοτική οικονομικά επιλογή συγκριτικά με τους σταθμούς πύργων ισχύος. Η τεχνολογία πύργων ισχύος απαιτεί σύστημα διαξονικής παρακολούθησης και ελέγχου, και το κόστος του συνήθως υπερβαίνει το κόστος ενός ηλιοστάτη. (σημειώνεται το γεγονός ότι ακόμη και με διαξονικό σύστημα εντοπισμού, οι ηλιοστάτες πάσχουν από απώλειες λόγω της επίδρασης του συνημιτόνου εξαιτίας του γεγονότος ότι στοχεύουν σε ίση απόσταση μεταξύ του ήλιου και του δέκτη)
- η αναλογία συγκέντρωσης μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα κατάλληλο φάσμα για τη σχεδιασμένη θερμοκρασία ενός συστήματος γραμμικών Fresnel. Σε αντίθεση, εξαιτίας του γεγονότος ότι απαιτείται ένα ενιαίο μπλοκ ισχύος μεγάλης χωρητικότητας για κάθε πύργο ισχύος, απαιτείται ένα αρκετά μεγάλο πεδίο ηλιοστατών για να παρέχει επαρκή ενέργεια στο μπλοκ ισχύος. Αυτό συνήθως οδηγεί σε μία αρκετά μεγάλη αναλογία συγκέντρωσης για το δέκτη ενός πύργου ισχύος έχοντας έτσι ως αποτέλεσμα δύσκολες απαιτήσεις αναφορικά με τα υλικά του δέκτη.
- τα ηλιακά πεδία των γραμμικών Fresnel μπορούν εύκολα να αναβαθμιστούν ώστε να αντεπεξέλθουν στις απαιτήσεις ενός πολυ μεγάλου μεγάλου μπλοκ ισχύος όπως για παράδειγμα έναν κύκλο ισχύος 400MW υπερκριτικού ατμού/διοξειδίου του άνθρακα ή άλλα είδη προηγμένων κύκλων ισχύος υψηλής απόδοσης.

Συγχρόνως, αρκετές προκλήσεις παραμένουν στην ανάπτυξη των γραμμικών συλλεκτών Fresnel:

- η αύξηση/διατήρηση της οπτικής απόδοσης του συστήματος αυξάνοντας παράλληλα την αναλογία συγκέντρωσης
- τα υψηλής επίδοσης υλικά επικάλυψης των απορροφητών σωλήνων περιορίζονται τυπικά στους 450 έως 550 °C θεωρώντας διάρκεια ζωής 20 έως 30 ετών, κάνοντας έτσι αναγκαία μία μελλοντική επαναστατική ανακάλυψη ώστε να βελτιωθούν περαιτέρω τα υλικά επικάλυψης για να διατηρούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες των 600-700 °C.
- οι υψηλής θερμοκρασίας ηλιακός βρόχος και αποθήκευση τηγμένου άλατος θέτει πρόσθετα λειτουργικά ζητήματα σε πρακτικό επίπεδο, όπως η αποκατάσταση ψύξης

Επιπλέον, η δομή των γραμμικών Fresnel είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για το συνδυασμό τεχνολογιών συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας (CSP), ηλιακής θέρμανσης/ψύξης, φωτοβολταϊκών (PV) ή/και συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (CPV) εξαιτίας της ευελιξίας του σχεδιασμού του σταθερού συγκροτήματος του δέκτη. Σε αντίθεση, η έλλειψη δευτερεύοντος ανακλαστή και η κίνηση ολόκληρης της κατασκευής των συλλεκτών προσθέτει σημαντικά ζητήματα σχεδιασμού στο συνδυασμό PV/CPV με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες (PTC) και η ισχύς των PV/CPV δεν μπορεί να κλιμακωθεί οικονομικά εξαιτίας του περιορισμένου μεγέθους του ανοίγματος του δέκτη στους πύργους ισχύος.





## 6. Συστήματα (παραβολικού) δίσκου-μηχανής (Dish/Engine)

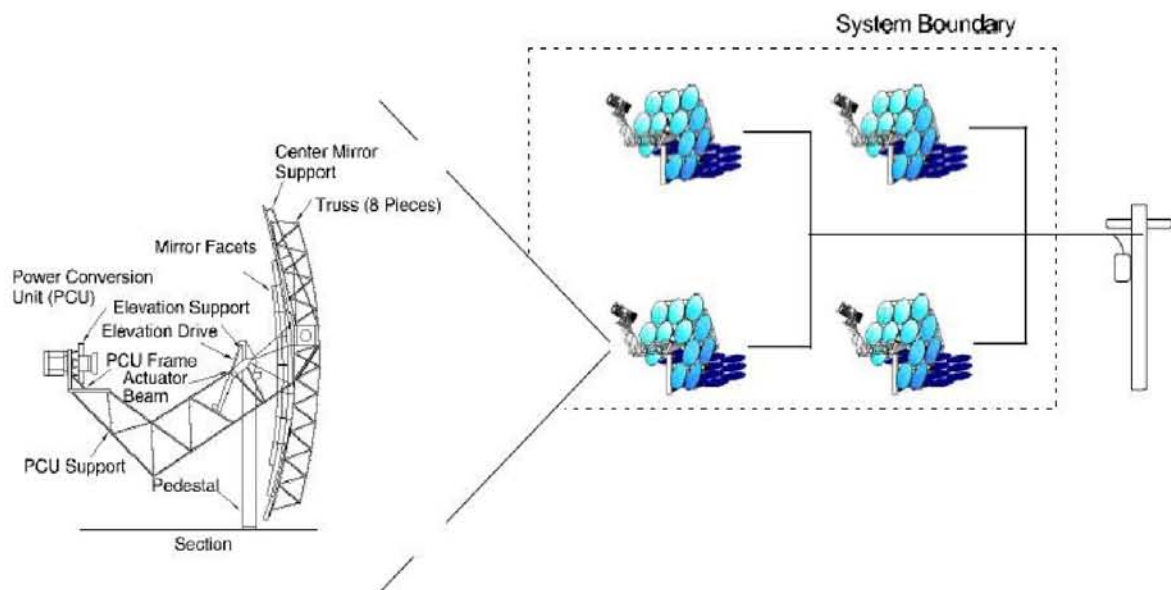
### 6.1. Γενική περιγραφή και αρχές λειτουργίας

Οι ηλιακές θερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μπορεί επίσης να εφαρμοστούν για την αποκεντρωμένη παραγωγή μέσω παραβολικών δίσκων στους οποίους επισυνάπτεται ένα σύστημα Power Conversion Unit ( PCU ) απευθείας στο συμπυκνωτή. Παρά το γεγονός ότι υπήρξαν και άλλες αρθρωτού συστήματος PCU στο παρελθόν, όπως ο δίσκος Brayton που δοκιμάστηκε από την Cummins και DLR ή η χρήση εκτάσεων με δίσκους για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού σχεδιασμένων για τροφοδοσία ενός κεντρικού Rankine κύκλου στη Γεωργία, το σύστημα δίσκου/μηχανής έχει από τα υψηλότερα μέγιστα αποδόσεων στη μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική σε ποσοστό άνω του 30% και ένα καθημερινό μέσο όρο μέχρι 25%.

Οι δίσκοι/μηχανές μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική σχεδόν με τον ίδιο τρόπο με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Είναι σαν μία ηλεκτρική γεννήτρια που χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία, αντί για αργό πετρέλαιο ή άνθρακα, για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Ένα σύστημα δίσκου/μηχανής είναι μία αυτόνομη μονάδα που αποτελείται κυρίως από ένα συλλέκτη/συγκεντρωτή, ένα δέκτη και μία μηχανή, όπως φαίνεται και στο σχήμα ? . Χρησιμοποιούν μια σειρά καθρέφτες που ανακλούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και την συγκεντρώνουν (την ανακλώμενη) στον δέκτη που είναι τοποθετημένος στο επίκεντρο του παραβολικού δίσκου. Ο δέκτης απορροφά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια,τη μετατρέπει σε θερμική η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σαν θερμότητα ή να τροφοδοτήσει τη μηχανή. Στη μηχανή η θερμότητα μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια με την εξής διαδικασία: συμπιέζεται το κυκλοφορούν υγρό ( με το οποίο δουλεύει η μηχανή ) όταν είναι κρύο, στη συνέχεια θερμαίνεται το συμπιεσμένο υγρό και αποσυμπιέζεται μέσω ενός στροβίλου ή ενός εμβόλου για να παραχθεί η μηχανική ενέργεια. Μέσω μίας ηλεκτρικής γεννήτριας η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται, τελικά ,σε ηλεκτρική. Ο κινητήρας/γεννήτρια μπορεί να είναι είτε κεντρικός και "εξωτερικά" συνδεδεμένος στην υπόλοιπη διάταξη, είτε τοπικός συζευγμένος με τον δέκτη.

Τα συστήματα δίσκου/μηχανής χρησιμοποιούν μηχανισμό παρακολούθησης παρόμοιους με αυτούς που περιγράφησαν παραπάνω του ήλιου σε δύο άξονες, έτσι οι δίσκοι είναι πάντα επικεντρωμένοι στον ήλιο γι'αυτο είναι και οι πιο αποδοτικοί συλλέκτες. Οι αναλογίες συγκέντρωσης κυμαίνονται από 600 άως 2000 ,ενώ μπορούν να επιτύχουν θερμοκρασίες της τάξεως των 1500 °C και άνω. Παρ'ότι και οι μηχανές κύκλου Brayton, κύκλου Rankine, νατρίου-θερμότητας θεωρούνται συστήματα που χρησιμοποιούν μηχανές με τοποθετημένο δίσκο, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται, κυρίως, στον δίσκο/Striling.



Σχήμα 27. Σύστημα δίσκου/μηχανής. Ο συνδυασμός των τεσσάρων μονάδων 25 kW που παρουσιάζεται εδώ είναι αντιπροσωπευτική της εφαρμογής.

Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, σπονδυλωτή διάταξη, αυτόνομη λειτουργία και μια εγγενή υβριδική ικανότητα, δηλαδή την ικανότητα να λειτουργούν ή με ηλιακή ενέργεια, ή με ορυκτά καύσιμα, ή και με τα δύο. Τα συστήματα αυτά, λόγω της υψηλής τους απόδοσης έχουν τη δυνατότητα να γίνουν μια από τις χαμηλότερου κόστους ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

## 6.2. Βασικά χαρακτηριστικά

### 6.2.1. Συγκεντρωτές

Οι δίσκοι/μηχανές χρησιμοποιούν συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες που ακολουθούν τον ήλιο σε δύο άξονες. Η ανακλαστική τους επιφάνεια, που είναι

παραβολικού σχήματος και κατασκευάζεται από αλουμίνιο ή ασήμι τοποθετημένο πάνω σε γυαλί ή πλαστικό, ανακλά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και την συγκεντρώνει στο επίκεντρό της. Το μέγεθος του συγκεντρωτή καθορίζεται από τη μηχανή με την οποία συνδέεται ο δίσκος. Για παράδειγμα, για μία μέγιστη ονομαστική, άμεσα προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία της τάξεως των 1000 W/m, ο συγκεντρωτής του συστήματος δίσκου/Stirling των 25 kW, πρέπει να έχει διάμετρο περίπου 10 m.

Λόγω του χαμηλού σημείου εστίασης των συγκεντρωτών, απαιτούνται καθρέφτες σχετικά μικρού πάχους - της τάξης του 1 mm - για να επιτευχθεί η απαραίτητη καμπυλότητα. Επίσης, είναι προτιμότερη η χρήση μετάλλων με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο διότι παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανακλαστική ικανότητα. Το μικρό πάχος και η χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο του συνδυασμού ασήμι-γυαλί καθιστούν τις ανακλαστικές επιφάνειες που κατασκευάζονται από καθρέφτες, αυτής της σύνθεσης υλικών, τις πιο ανθεκτικές και αποδοτικές, με τιμές ηλιακής ανάκλασης εύρους 90-94%.

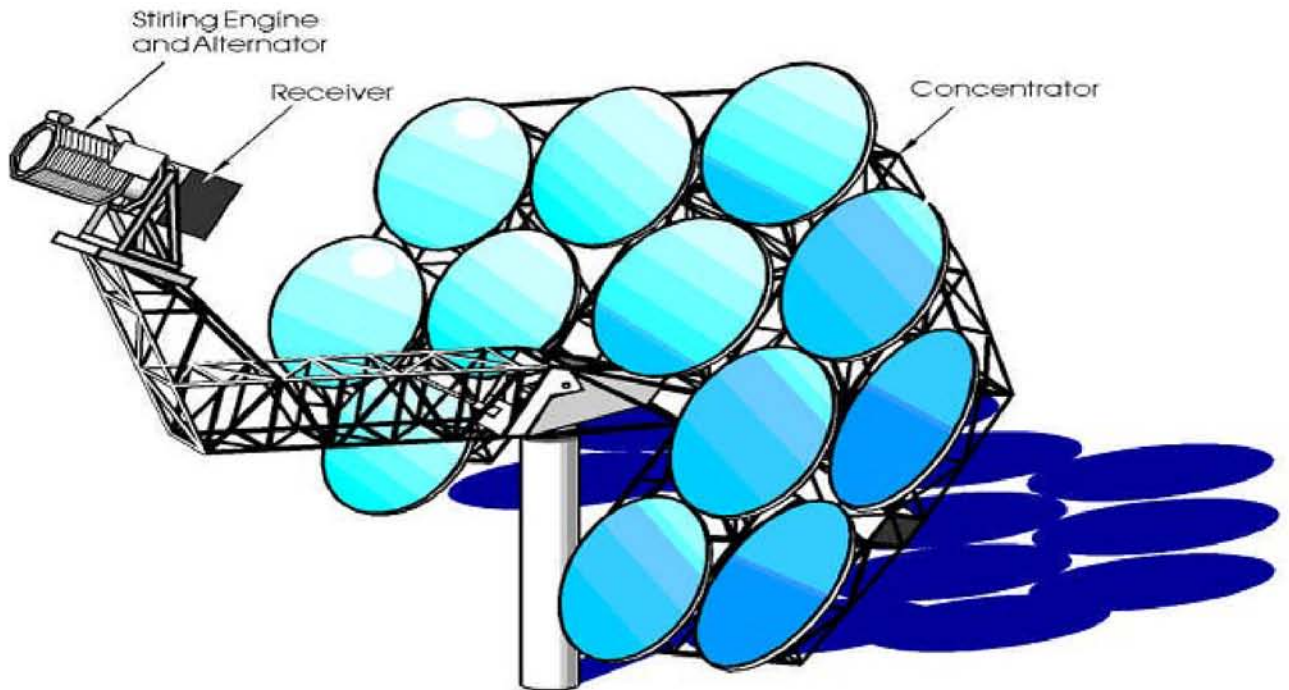
Μία καινοτόμια στον τομέα σχεδιασμού του ηλιακού συγκεντρωτή είναι η χρήση της τεχνικής της τεντωμένης μεμβράνης. Μία μεμβράνη τεντώνεται στο "χείλος" της στεφάνης του δίσκου και μία δεύτερη χρησιμοποιείται για να καλυφθεί το κενό από πίσω. Ο οπτικός σχεδιασμός και η ακρίβεια του συγκεντρωτή καθορίζουν και την αναλογία συγκέντρωσης, η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της μέσης ηλιακής ροής από το άνοιγμα του δέκτη δια την άμεση κανονική ηλιακή ακτινοβολία και συνήθως ξεπερνά τις 2.000. Το κλάσμα τομής, που ορίζεται ως το κλάσμα της ανακλώμενης ηλιακής ροής που περνά μέσα από το άνοιγμα του δέκτη, είναι συνήθως πάνω από 95%.

Βασικά τους ιδιότητα είναι η ικανότητα παρακολούθησης τού ήλιου σε δύο άξονες, το οποίο γίνεται με έναν από τους εξής δύο τρόπους :

- παρακολούθηση ως προς αζιμούθιο-ανύψωση : Ο δίσκος περιστρέφεται σ' ένα επίπεδο παράλληλο στη γη (αζιμούθιο) και σ' ένα άλλο επίπεδο κάθετο σε αυτή (ανύψωση). Η ταχύτητα περιστροφής ποικίλλει κατά τη διάρκεια της μέρας, αλλά μπορεί εύκολα να υπολογιστεί.

- πολική παρακολούθηση : Ο δίσκος περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα παράλληλο στον άξονα περιστροφής της γης, με μία σταθερή ταχύτητα  $15^\circ / \text{hr}$  για να ταιριάζει με την ταχύτητα περιστροφής της γης, και από έναν άλλο άξονα ο οποίος ονομάζεται άξονας κλίσης και είναι κάθετος στον πολικό άξονα. Η κίνηση γύρω από τον άξονα αυτό γίνεται αργά και ποικίλλει ανάλογα με το  $+ / - 23^\circ$  το χρόνο.

Η πρώτη μέθοδος παρακολούθησης συνηθίζεται σε μεγάλους δίσκους/μηχανές, ενώ η δεύτερη σε μικρούς.



Σχήμα 28. Σχηματική απεικόνιση δίσκου/μηχανής με καθρέφτες τεντωμένης μεμβράνης.

### 6.2.2. Δέκτες

Ο δέκτης απορροφά την ανακλώμενη -από τον συγκεντρωτή- ενέργεια, και τη μεταφέρει στη μηχανή. Η απορροφητική επιφάνεια τοποθετείται πίσω από το επίκεντρο του συγκεντρωτή για να μειώσει την ένταση της προσίπτουσας ροής. Ένα άνοιγμα τοποθετείται στο επίκεντρο με σκοπό τη μείωση των απωλειών θερμότητας κατά τη μεταγωγή.

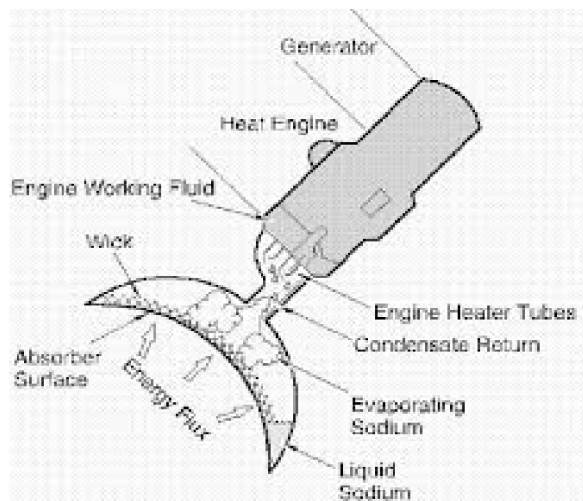
Για τις μηχανές Striling υπάρχουν δύο γενικοί τύποι δεκτών :

- οι δέκτες απευθείας φωτισμού (direct-illumination receivers, DIR) , οι οποίοι προσαρμόζουν τους σωλήνες θέρμανσης της μηχανής ώστε να απορροφήσουν τη συγκεντρωμένη ηλιακή ροή. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, της μεγάλης ταχύτητας και της υψηλής πίεσης του ηλίου ή του υδρογόνου ( τα οποία είναι τα συνήθη ρευστά λειτουργίας των μηχανων Striling ), οι DIR δέκτες έχουν την ικανότητα να απορροφούν πολύ μεγάλες ποσότητες της ηλιακής ροής, περίπου  $75 \text{ W/cm}^2$ .

- οι έμμεσοι δέκτες, οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα ενδιάμεσο ρευστό για τη μεταφορά θερμότητας.

Υπάρχουν επίσης οι δέκτες υγρού μετάλλου ή θερμαντικού σωλήνα, στους οποίους υγρό νάτριο εξατμίζεται πάνω στην απορροφητική επιφάνεια και συμπυκνώνεται στο

σωλήνα του Θερμαντήρα της μηχανής Striling. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξισορρόπηση της Θερμοκρασίας στους σωλήνες του Θερμαντήρα, επιτρέποντας έτσι υψηλότερη Θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα για ένα δεδομένο υλικό, και ως εκ τούτου μεγαλύτερη απόδοση της μηχανής.



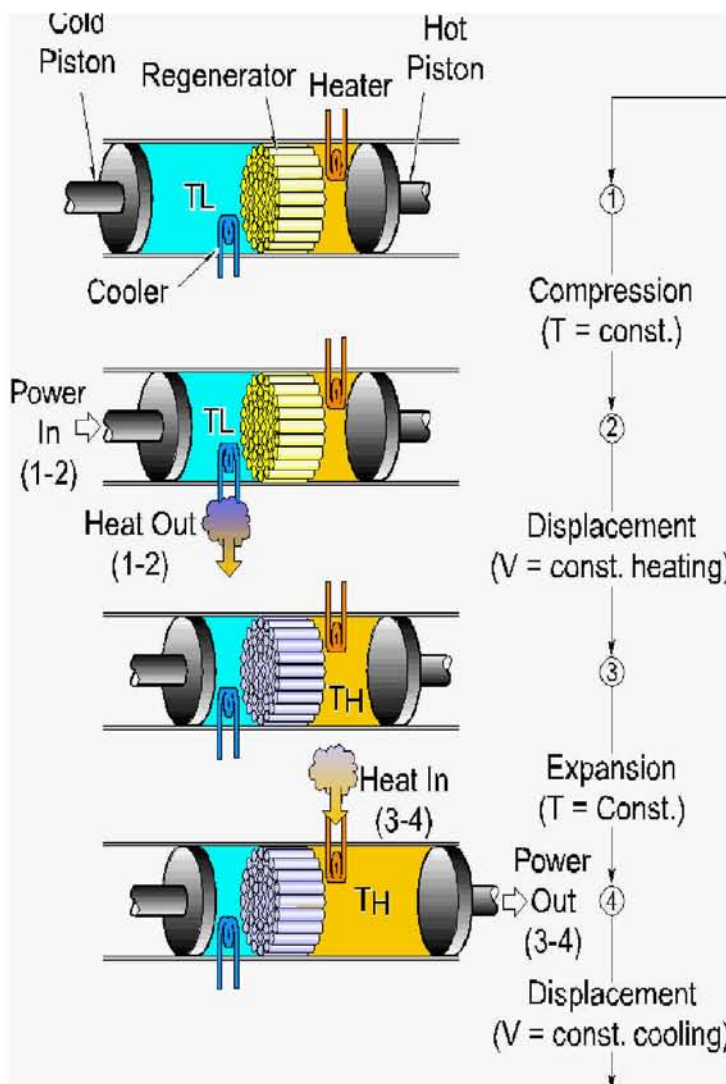
Σχήμα 29. Σχηματική απεικόνιση ενός δέκτη υγρού μετάλλου ή Θερμαντικού σωλήνα, στην οποία φαίνεται η λειτουργία του.

### 6.2.3. Μηχανές

Η μηχανή μετατρέπει τη θερμότητα σε μηχανική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται τον εξής θερμοδυναμικό κύκλο, αρχικά με συμπίεση του ρευστού λειτουργίας της όταν είναι κρύο, στη συνέχεια θερμαίνεται το συμπιεσμένο ρευστό και τέλος εκτονωίνεται μέσω μίας τουρμπίνας ή ενός εμβόλου για να παραχθεί έργο. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη χρήση ηλεκτρικής γεννήτριας ή εναλλάκτη. Το είδος του θερμοδυναμικού κύκλου και του ρευστού λειτουργίας εξαρτάται από τον τύπο της μηχανής που επιλέγεται για το σύστημα δίσκου/μηχανής. Μεταξύ αυτών είναι ο κύκλος-Rankine, ο οποίος χρησιμοποιεί νερό ή άλλο οργανικό υγρό, και οι κύκλοι Brayton και Striling, οι οποίοι προτιμούνται. Η χρήση των μηχανών Otto και Diesel, των συμβατικών αυτοκινήτων, δεν είναι εφικτή εξαιτίας της δυσκολίας στην ενσωμάτωσή τους με τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια. Μπορεί, επίσης, να παρέχεται από έναν συμπληρωματικό καυστήρα αερίου έτσι ώστε να είναι εφικτή η λειτουργία τους κατά της συννεφιάς και της νύχτας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τους δίσκους/μηχανές που είναι ήδη σε λειτουργία είναι περίπου 25 kWe για τα συστήματα δίσκου / Striling και περίπου 30 kWe για τα συστήματα Brayton, υπό εξέταση.

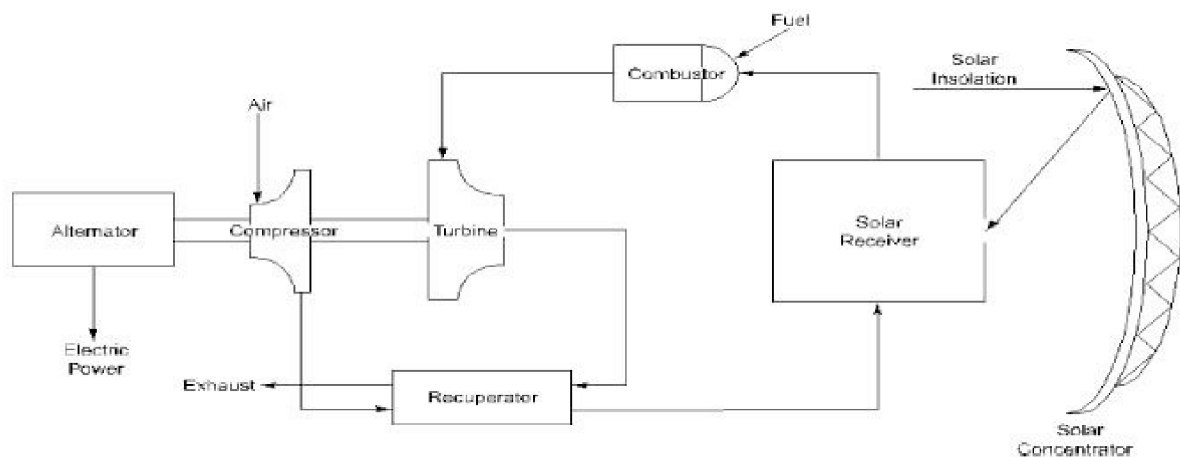
Μχανή Striling : είναι μία κλειστού-κύκλου, υψηλής Θερμοκρασίας και πίεσης Θερμική μηχανή εξωτερικής καύσης, που λειτουργεί με διαδοχική συμπίεση και εκτόνωση,

ψύξη και θέρμανση του αέριου λειτουργίας, το οποίο είναι υδρογόνο ή ήλιο, με διαδικασίες σταθερής θερμοκρασίας και σταθερού όγκου. Οι περισσότερες μηχανικές κατασκευές που επιτυγχάνουν την εφαρμογή αυτών των διαδικασιών (σταθερής θερμοκρασίας και σταθερού όγκου), περιλαμβάνουν τη χρήση εμβόλων και κυλίνδρων. Η μηχανική ενέργεια εξάγεται κινηματικά με την περιστροφή ενός τροφάλου. Τα ελατήρια πετυχαίνουν την αναπήδηση, μπρος-πίσω και η ισχύς εξάγεται από το έμβολο ισχύος, μέσω ενός γραμμικού εναλλάκτη ή μιας αντλίας. Η μηχανή Stirling έχει συνήθως ενσωματωμένη μία αναγεννήτρια ενισχυμένης απόδοσης η οποία συλλαμβάνει την θερμότητα κατά την ψύξη του αερίου, και την αντικαθιστά κατά τη θέρμανσή του. Στις σύγχρονες μηχανές Stirling οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται είναι άνω των 700 °C και πιέσεις της τάξης των 20 Μρα, ενώ η μέγιστη απόδοσή τους είναι 40%. Οι μηχανές Stirling αποτελούν την καλύτερη και προτιμότερη επιλογή για την κατασκευή των συστημάτων δίσκου/μηχανής, λόγω της εξωτερικής θερμότητας, που τις κάνει πιο προσαρμοστικές στη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και της υψηλής τους απόδοσης.



Σχήμα 30. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός κινητήρα Stirling.

**Μηχανή Brayton** : είναι μια μηχανή εσωτερικής καύσης η οποία παράγει ισχύ από την ελεγχόμενη καύση του καυσίμου· συμπιέζεται ο αέρας, προστίθεται το καύσιμο και καιγεται το μείγμα. Η ηλιακή θερμότητα χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει (ή να συμπληρώσει) το καύσιμο. Το προκύπτον θερμό αέριο διαστέλλεται ταχέως και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας είναι το κλειδί για την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης. Ως εκ τούτου, η θερμότητα που αποβάλλεται από το στρόβιλο, χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα από τον συμπιεστή. Οι αποδόσεις των κινητήρων Brayton που χρησιμοποιούνται στα συστήματα δίσκου/μηχανής Brayton είναι πάνω από 30%



Σχήμα 31. Σχηματική αναπαράσταση δίσκου/μηχανής Brayton.

#### 6.2.4. Βοηθητικός εξοπλισμός

**Εναλλάκτης** : είναι η συσκευή μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η επιλογή του είδους της συσκευής, που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα δίσκου/μηχανής, εξαρτάται από το είδος της μηχανής και την εφαρμογή. Στους κινηματικούς κινητήρες Strling χρησιμοποιούνται επαγωγικές γεννήτριες οι οποίες συνδέονται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο κοινής ωφέλειας, συγχρονίζονται με αυτό και μπορούν να παρέχουν μονοφασική ή τριφασική τάση των 230 V ή 460 V (πολική) αντίστοιχα. Οι επαγωγικές γεννήτριες είναι αυτόνομα στοιχεία και έχουν απόδοση περίπου 94%. Οι εναλλάκτες στους οποίους η έξοδος εξαρτάται από την DC μετατροπή και στη συνέχεια αντιστρέφονται για την παραγωγή εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος, χρησιμοποιούνται μερικές φορές για να εξομαλυνθούν οι αναντιστοιχίες στην ταχύτητα μεταξύ της εξόδου του κινητήρα και του ηλεκτρικού δικτύου. Η έξοδος υψηλής ταχύτητας του στρόβιλου αερίου, για παράδειγμα, που έχει μετατραπεί σε AC πολύ υψηλή συχνότητα σε έναν



εναλλάκτη υψηλής ταχύτητας, μετατρέπεται σε DC από έναν ανορθωτή, και στη συνέχεια μετατρέπεται σε 60 hertz μονοφασική ή τριφασική ισχύ με έναν αναστροφέα. Αυτή η προσέγγιση μπορεί επίσης να έχει πλεονεκτήματα απόδοσης για τη λειτουργία του κινητήρα.

**Σύστημα ψύξης :** Οι θερμικές μηχανές χρειάζεται να μεταφέρουν την απορριπτόμενη θερμότητα στο περιβάλλον. Οι κινητήρες Stirling χρησιμοποιούν ένα ψυγείο για την ανταλλαγή θερμότητας από τον κινητήρα στην ατμόσφαιρα, ενώ στον ανοικτό κύκλο των μηχανών Brayton, το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας των αποβλήτων απορρίπτεται στα καυσαέρια.

**Έλεγχος :** Αυτόνομη λειτουργία επιτυγχάνεται με τη χρήση μικροϋπολογιστή, η βάση του οποίου βρίσκεται πάνω στο δίσκο, για τον έλεγχο του συστήματος παρακολούθησης και της λειτουργίας της μηχανής. Μερικά συστήματα χρησιμοποιούν ξεχωριστό σύστημα για τον έλεγχο της μηχανής. Για τις μεγάλες εγκαταστάσεις, χρησιμοποιείται ένα κεντρικό Σύστημα Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων (System Control and Data Acquisition, SCADA) του υπολογιστή για να παρέχει εποπτικό έλεγχο, για την παρακολούθηση και την απόκτηση δεδομένων.

### **6.3. Παραδείγματα εφαρμοσμένων σταθμών**

Οι ιδανικοί συγκεντρωτές έχουν παραβολικό σχήμα που αποτελείται είτε από μία ενιαία ανακλαστική επιφάνεια είτε από πολλαπλούς ανακλαστήρες ( σχήμα ? ). Κάθε δίσκος παράγει 5 έως 25 kW ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσαρμοστικότητα των συστημάτων αυτών τους επιτρέπει να αναπτυχθούν ένα-ένα για απομακρυσμένες εφαρμογές, ή ομαδοποιημένα σε μικρά δίκτυα ( χωριά ενέργειας ) με σκοπό την αύξηση της συνολικής παραγωγικής ικανότητας. Η έκταση που χρειάζεται, για παράδειγμα ένας σταθμός παραγωγής ένας σταθμός παραγωγής 650 kW αποτελούμενος από επιμέρους δίσκους/μηχανές τω 25 kW είναι περίπου 10.000 m<sup>2</sup>.

Η τεχνολογία των συστημάτων δίσκου/μηχανής βρίσκεται στο στάδιο της μηχανικής ανάπτυξης και οι προκλήσεις παραμένουν σχετικά με τα κατασκευαστικά στοιχεία και την εμπορική διαθεσιμότητα των κινητήρων. Στους σταθμούς που βρίσκονται τώρα σε εξέλιξη, στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ευρώπη, η προσόχη στρέφεται σε συστήματα παραγωγής 10 kWe για απομακρυσμένες εφαρμογές.

Από το 1992, τρία συστήματα δίσκου-Stirling έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν συστηματικά στην Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία, τα DISTAL 1, DISTAL 2 και EURODISH.



Εικόνα 25. Σύστημα δίσκων/μηχανής με δίσκο Stirling.

### 6.3.1. DISTAL 1

Ο συγκεντρωτής χρησιμοποιεί την τεχνική της τεντωμένης μεμβράνης, η οποία διατηρεί το παραβολικό σχήμα με μια μικρή αντλία κενού. Έχει 94% ανακλαστικότητα και μπορεί να συγκεντρώσει το φως του ήλιου έως 12.000 φορές στο επίκεντρό του που έχει 12cm διάμετρο. Έχει εστιακή απόσταση 4,5 μέτρων και σύστημα πολιικής ηλιακής παρακολούθησης. Δύο μονάδες DISTAL I αποσυναρμολογήθηκαν κατά το έτος 2000 και αντικαταστάθηκαν από μονάδες EUROdish τρίτης γενιάς. Η εγκατάσταση αυτή αποτελείτο αρχικά από 3 μονάδες παραβολικού δίσκου διαμέτρου 7,5 m, ικανές να συλλέξουν ενέργεια έως 40 kW με έναν κινητήρα Stirling μοντέλου SOLO V160 των 9 kWe, τοποθετημένο στην εστιακή της ζώνη.



Εικόνα 26. Δίσκος DISTAL 1 σε λειτουργία. Τοποθεσία: Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία.

### 6.3.2. DISTAL 2

Ήταν η πρώτη προσπάθεια σε ένα σύστημα με καλύτερα χαρακτηριστικά και κόστος ανά  $kWe$ . Τρεις καινούριοι δίσκοι, με τη τεχνική της τεντωμένης μεμβράνης, κατασκευάστηκαν και τέθηκαν σε καθημερινή λειτουργία κατά τα έτη 1996 και 1997. Η διάμετρός τους είναι 8,5 m, ελαφρώς μεγαλύτερη από των προηγούμενων, οι έχουν ικανότητα συλλογής 50kW ενέργειας. Έχουν εστιακή απόσταση 4,1 m και η μέγιστη συγκέντρωση που μπορούν να επιτύχουν είναι 16.000 SU στο επίκεντρό τους. Ο κινητήρας Striling με τον οποίο συνδέονται οι δίσκοι είναι και αυτός πιο εξελιγμένης τεχνικής, το μοντέλο είναι το SOLO V161 των 10  $kWe$  και το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου είναι ως προς αζιμούθιο-ανύψωση, το οποίο επιτρέπει αυτόματα τη λειτουργία του από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου.



Εικόνα 27. Δίσκος DISTAL 2. Τοποθεσία: Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία.

### 6.3.3. EURODISH

Είναι ένα Ισπανό-Γερμανικό εγχείρημα, κατά το οποίο έχουν σχεδιαστεί και ανεγερθεί δύο δίσκοι/Striling νέου τύπου για τους εξής λόγους :

- Μείωση του κόστους των στοιχείων που το συνθέτουν, χρησιμοποιώντας τυποποιημένα κατασκευαστικά υλικά.
- Ανάπτυξη ενός νέου συστήματος δίσκου παραγωγής, απορρίπτοντας την τεχνολογία της τεντωμένης μεμβράνης και εφαρμόζοντας ένα σύστημα χύτευσης (δηλαδή λιωμένο υλικό που παροχετεύεται σε καλούπι) σύνθετου υλικού.
- Επιπλέον βελτίωση του μοντέλου SOLO V161 του κινητήρα Striling, ιδίως των στοιχείων που συνθέτουν την κοιλότητα του δέκτη.
- Ανάπτυξη μιας νέας βελτιωμένης τεχνικής συναρμολόγησης του συστήματος που χρησιμοποιεί νέα, ειδικά ανεπτυγμένα εργαλεία.
- Τηλεχειρισμός και παρακολούθηση μέσω του World Wide Web.
- Δοκιμή προ-εμπορικών μονάδων ως συστήματα αναφοράς.



Εικόνα 28. Πρόσοψη και πίσω όψη του EURODISH. Τοποθεσία:Πλαταформа Solar de Almeria στην Ισπανία.



## 7. Τεχνολογίες και συστήματα αποθήκευσης θερμότητας για συγκεντρωτικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η διαθεσιμότητα της αποθηκευτικής ικανότητας αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην υιοθέτηση των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συγκεντρωτικούς συλλέκτες (Concentrating Solar Power, CSP) από τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού κοινής ωφέλειας. Με τη σύζευξη ενός συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage, TES) με ένα σταθμό CSP, η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί για μεταγενέστερη χρήση για τη λειτουργία του θερμικού κινητήρα. Ένα σύστημα TES έχει γενικά χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης, καθώς και πολύ υψηλή απόδοση λειτουργίας.

### 7.1. Μέρη συστήματος αποθήκευσης

Ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποτελείται από τρία μέρη:

-> το μέσο αποθήκευσης: εδώ αποθηκεύεται η θερμική ενέργεια είτε υπό τη μορφή αισθητής θερμότητας (αισθητή ονομάζεται η θερμότητα που ανταλλάσσεται από οργανισμό ή θερμοδυναμικό σύστημα που αλλάζει τη θερμοκρασία, και κάποιες μακροσκοπικές μεταβλητές του σώματος, αλλά αφήνει αμετάβλητες ορισμένες άλλες μακροσκοπικές μεταβλητές, όπως είναι ο όγκος ή η πίεση), είτε σαν λανθάνουσα θερμότητα (λανθάνουσα θερμότητα είναι η ενέργεια που εκλύεται ή απορροφάται από ένα σώμα ή ένα θερμοδυναμικό σύστημα κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας σταθερής θερμοκρασίας) ατμοποίησης ή σύντηξης, είτε υπό τη μορφή των αναστρέψιμων χημικών αντιδράσεων. Σήμερα, στα συστήματα που χρησιμοποιούν την μορφή της αισθητής θερμότητας, τα συνθετικά έλαια και τα τηγμένα άλατα είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά αποθήκευσης σε συστήματα CSP μεγάλης κλίμακας, ενώ τα συστήματα που χρησιμοποιούν τη λανθάνουσα θερμότητα, τη θερμοχημική αποθήκευση και τη αποθήκευση με άλλα θερμικά υλικά, είναι ακόμα υπό ανάπτυξη.

-> το μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας: σκοπός αυτού του μηχανισμού είναι παράσχει ή να εξάγει θερμότητα από το μέσο αποθήκευσης.

-> το σύστημα συγκράτησης: το σύστημα αυτό συγκρατεί το μέσο αποθήκευσης καθώς και τον εξοπλισμό μεταφοράς ενέργειας και μονώνει το σύστημα από το περιβάλλον.

### 7.2. Προϋποθέσεις βέλτιστης αποθήκευσης και μακροζωίας του συστήματος/κριτήρια σχεδιασμού

Ανάλογα με το είδος της αποθήκευσης, υπάρχουν αρκετές προϋποθέσεις που

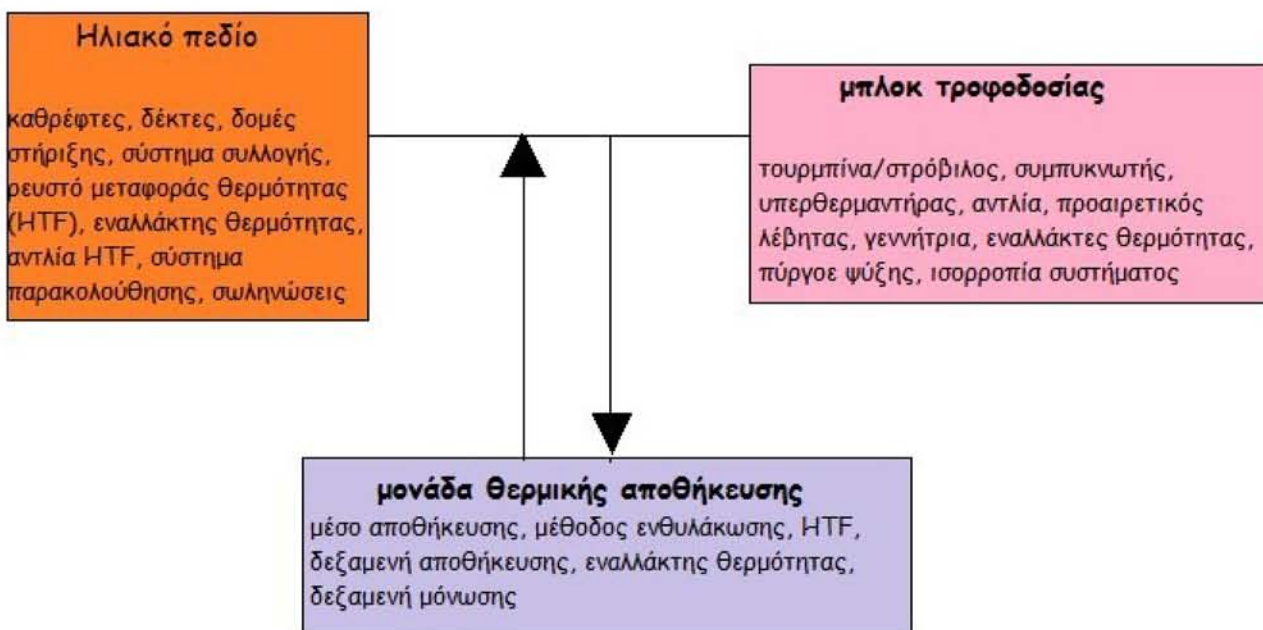
πρέπει να εξεταστούν για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη δυναμική αποθήκευση και μακροζωία. Οι προϋποθέσεις είναι οι εξής:

- Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα του υλικού αποθήκευσης
- Καλή μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ρευστού θερμικής μεταφοράς ( Heat Transfer Fluid, HTF) και του μέσου αποθήκευσης
- Μηχανική και χημική σταθερότητα του υλικού αποθήκευσης
- Χημική συμβατότητα μεταξύ HTF, εναλλάκτη θερμότητας, και μέσου αποθήκευσης
- Πλήρης αναστρεψιμότητα για ένα μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης / αποφόρτισης
- Μικρές θερμικές απώλειες
- Χαμηλό κόστος
- Τις μικρότερες, δυνατές, επιπτώσεις στο περιβάλλον

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας πρέπει να είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να πληρούν ορισμένα κριτήρια, τα οποία εξαρτώνται από τον τύπο, το μέγεθος και σχεδιασμό ενός σταθμού CSP. Συγκεκριμένα:

- Ονομαστική θερμοκρασία και ειδική πτώση ενθαλπίας στο φορτίο (απαλλαγή και πλευρά μετατροπής)
- Μέγιστο φορτίο
- Επιχειρησιακή στρατηγική
- Ένταξη στο σταθμό





Σχήμα 32. Τα κύρια μέρη ενός σταθμού CSP με TES και των επιμέρους στοιχείων τους.

### 7.3. Σχεδιασμός σταθμών CSP με συστήματα TES

Για τον πρακτικό σχεδιασμό ενός σταθμού CSP με σύστημα θερμικής αποθήκευσης (TES) πρέπει να ληφθούν υπόψιν, πρωταρχικά η στρατηγική και ο σχεδιασμός του επιπέδου εγκατάστασης, κατόπιν η επιλογή του υλικού αποθήκευσης και ο σχεδιασμός των συστατικών μερών που περιλαμβάνονται σε αυτά, ο σχεδιασμός του συστήματος που αποτελείται από δεξαμενές αποθήκευσης, εναλλάκτες θερμότητας, σωληνώσεις και αντλίες, αντίστοιχα, που πληρούν τις απαιτήσεις της μονάδας παραγωγής ενέργειας. Ο συνολικός σχεδιασμός του συστήματος TES περιλαμβάνει κριτήρια αποτελεσματικότητας, χώρου και κόστους.

#### 7.3.1. Επίπεδα σχεδιασμού

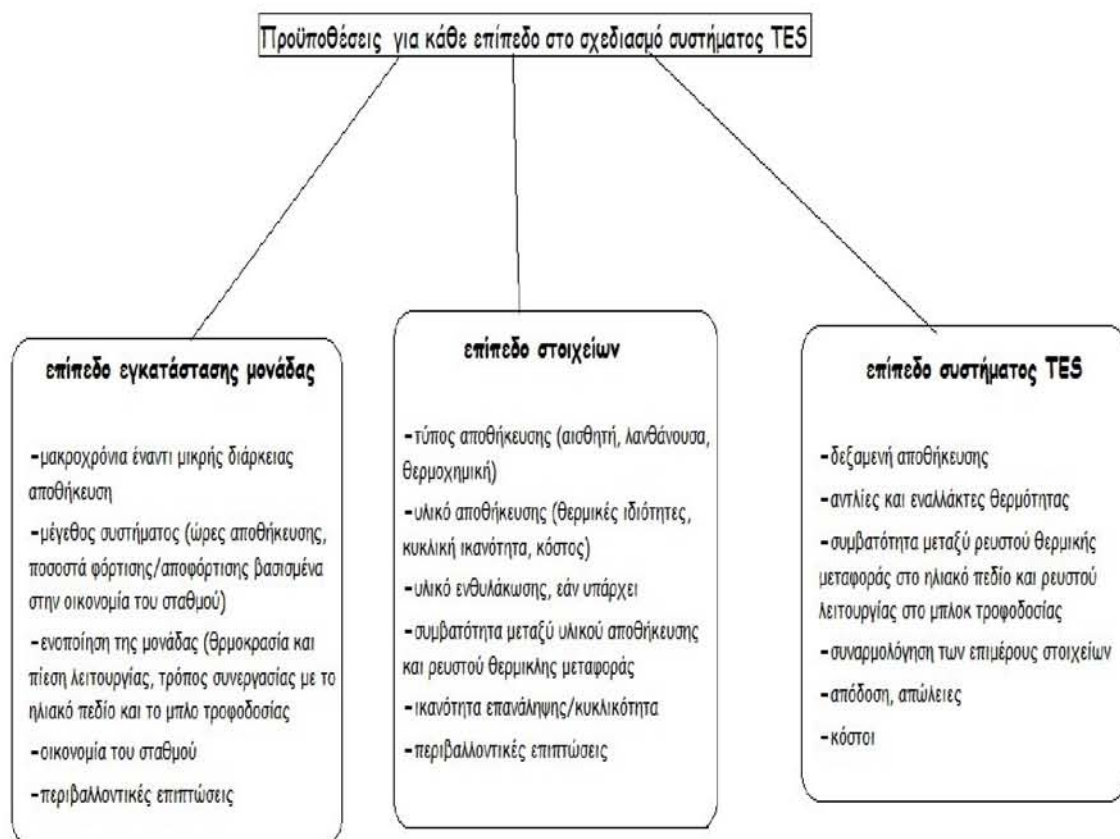
Ο σχεδιασμός μίας μονάδας παραγωγής CSP με σύστημα TES βασίζεται στις εξείς εκτιμήσεις, για κάθε επίπεδο του σχεδιασμού:

Στο επίπεδο εγκατάστασης μονάδας: αυτό το επίπεδο του σχεδιασμού εστιάζει στις γενικές απαιτήσεις των σταθμών CSP, τη στρατηγική του σχεδιασμού για την κάλυψη των απαιτήσεων των σταθμών και την ενσωμάτωση του συστήματος TES στη μονάδα

παραγωγής ενέργειας, καθώς και την ικανότητά της να είναι συμβατή με τις άλλες μονάδες / συστήματα του σταθμού. Είναι απαραίτητη, λοιπόν, η ανάπτυξη ενός σχεδίου και μιας επιχειρησιακής στρατηγικής που να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις για την κατασκευή ενός σταθμού παραγωγής CSP, όπως για παράδειγμα στη μακροχρόνια έναντι της μικρής διάρκειας αποθήκευση, στον αριθμό των ωρών της αποθήκευσης, τα ποσοστά φόρτισης / αποφόρτισης και τον τρόπο σύνδεσης και συνεργασίας της αποθήκευσης από τη μία με τη συλλογή ηλιακής ενέργειας και από την άλλη με το μπλοκ τροφοδοσίας.

Στο επίπεδο στοιχείων: αυτό το επίπεδο του σχεδιασμού σχετίζεται με την επιλογή των βασικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό του θερμικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου του υλικού αποθήκευσης, του είδους της επαφής και μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του υλικού αποθήκευσης και του ρευστού θερμικής μεταφοράς, καθώς και οποιεσδήποτε βελτιώσεις μεταφοράς θερμότητας πρέπει να ενσωματωθούν.

Στο επίπεδο συστήματος TES: Ο σχεδιασμός του συστήματος TES επικεντρώνεται στην ενοποίηση των στοιχείων του συστήματος, δηλαδή της δεξαμενής αποθήκευσης, τις αντλίες και τους εναλλάκτες θερμότητας και του ελέγχου των λειτουργιών φόρτισης και εκφόρτισης, μειώνοντας τις απώλειες σε επίπεδο συστήματος και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και το κόστος του συστήματος.



Σχήμα 33. Διάγραμμα που παρουσιάζει τις προϋποθέσεις για ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης

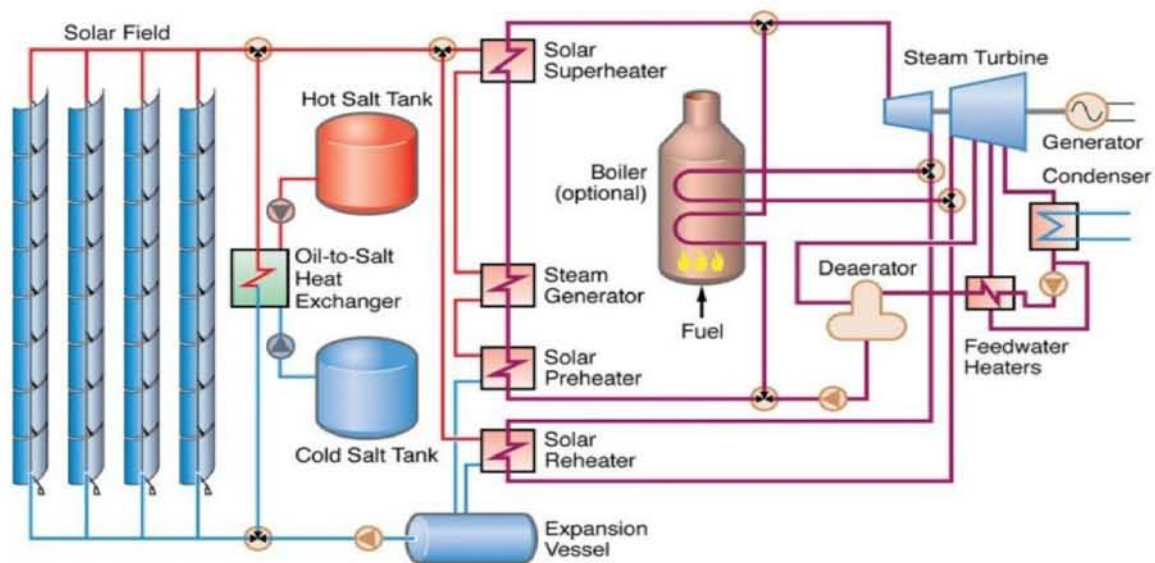
### 7.3.2. Ενσωμάτωση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (TES)

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας μειώνουν την αναντιστοιχία μεταξύ της προμήθειας ενέργειας από τον ήλιο και της ενεργειακής ζήτησης. Ανάλογα με τη διακύμανση στην ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, καθώς και τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα TES ενσωματώνονται σε ένα σταθμό CSP για να εκτελέσουν μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Ρύθμιση/προφύλαξη: Σε περιόδους συννεφιάς ή δυσμενών καιρικών συνθηκών η γεννήτρια-τουρμπίνας εξαναγκάζεται σε μία παροδική κατάσταση, μειώνοντας έτσι την απόδοση του στροβίλου εξαιτίας των απωλειών εκκίνησης. Αν και τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας (HTFs) έχουν κάποια θερμική αδράνεια για να βοηθήσουν τη μονάδα να ανταπεξέλθει σε νεφελώδεις περιόδους μικρής διάρκειας, οι εμπειρίες από εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας έχουν δείξει ότι μπορεί να μην είναι αρκετή για να αποτρέψει τη διακοπή της λειτουργίας της τουρμπίνας. Έτσι, η προσθήκη ενός συστήματος αποθήκευσης μικρής χωρητικότητας, μπορεί να βοηθήσει στη μετρίαση των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων στην ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας.

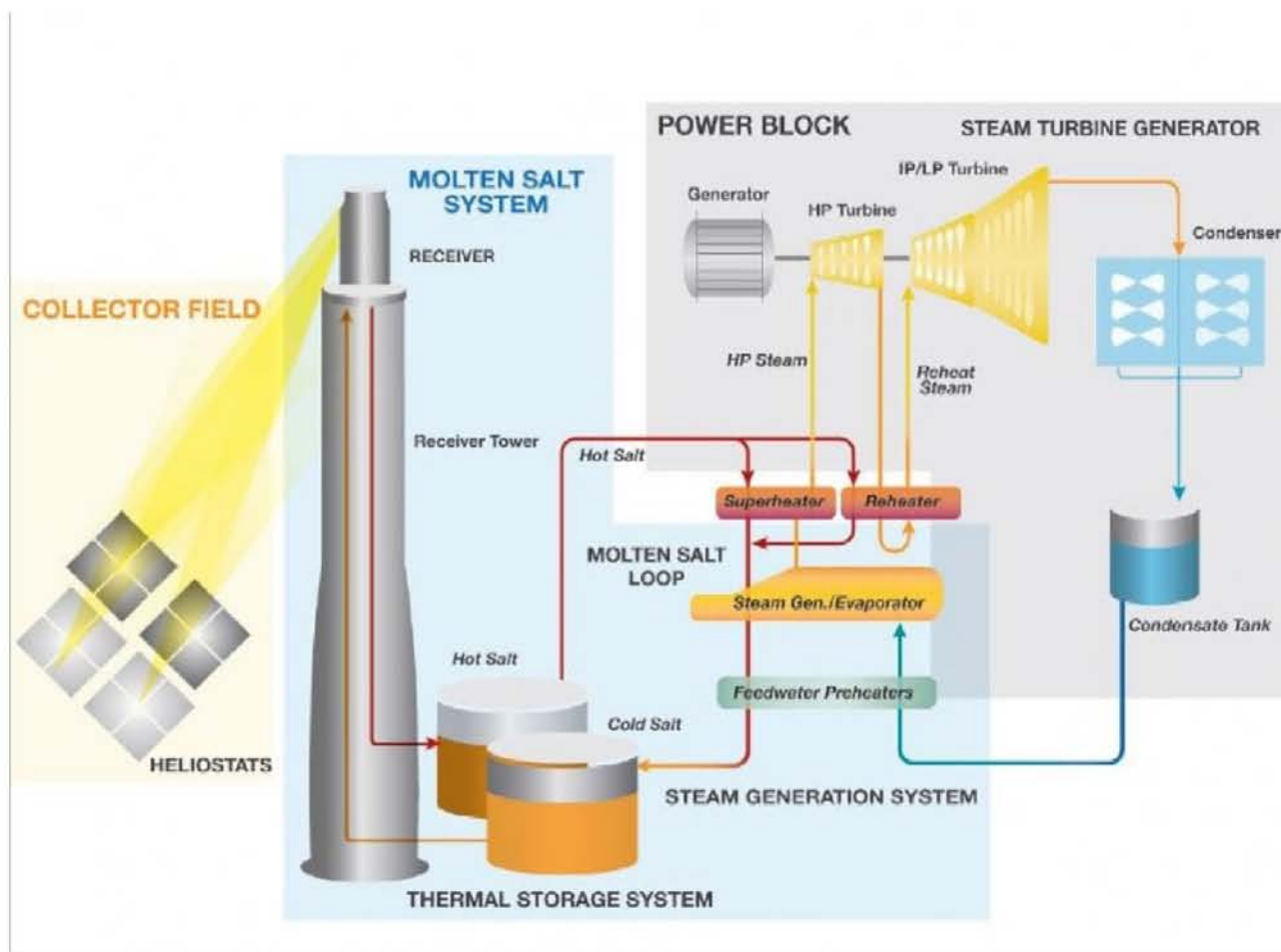
- Μετατόπιση ή επέκταση της προθεσμίας παράδοσης: Η αιχμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μη συμπίπτει με την αιχμή της ηλιακής ακτινοβολίας. Ένα σύστημα TES μπορεί να βελτιώσει την δυνατότητα αποστολής ενός σταθμού συλλέγοντας ενέργεια από το ηλιακό πεδίο κατά τις ώρες εκτός αιχμής, όπως το πρωί, στη συνέχεια με αποφόρτιση ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης, το οποίο μπορεί να επιτύχει αύξηση των **τιμολογίων** ηλεκτρικής ενέργειας.

- Βελτίωση του ετήσιου δείκτη ικανότητας (παράγοντας χωρητικότητας): Ο παράγοντας χωρητικότητας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια παράμετρος επίδοσης που συγκρίνει την καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον σταθμό με την ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί υπό συνεχή λειτουργία πλήρους ισχύος κατά τη διάρκεια της ίδιας χρονικής περιόδου. Δεδομένου ότι η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο κατά τη διάρκεια ενός μέρους της ημέρας, μια μονάδα παραγωγής χωρίς αποθήκευση έχει συντελεστή με πολύ χαμηλή δυναμικότητα. Ένα TES μπορεί να επιτρέψει σε έναν σταθμό να λειτουργήσει όταν ο ήλιος δεν είναι διαθέσιμος, και αν είναι αρκετά μεγάλο, ο σταθμός μπορεί να λειτουργεί για 24 ώρες. Εφτά ώρες αποθήκευσης μπορούν να αυξήσουν το δείκτη ικανότητας από ένα τυπικό 25 έως 28% σε 43%. Τα συστήματα αποθήκευσης που προορίζονται για τη χρήση αυτή απαιτούν ένα μεγαλύτερο ηλιακό πεδίο από αυτό που είναι απαραίτητο για σταθμούς χωρίς σύστημα αποθήκευσης.



Components of a trough-type CSP plant with TES

Σχήμα 34. Σχηματικό διάγραμμα σταθμού παραβολικών-κοίλων συλλεκτών με σύστημα θερμικής αποθήκευσης δύο δεξαμενών τηγμένου άλατος.



Σχήμα 35. Σχηματικό διάγραμμα σταθμού πύργου ισχύος με σύστημα θερμικής αποθήκευσης.

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα σταθμό εξαρτάται από την ετήσια κανονική άμεση ηλιακή ακτινοβολία ( $MWh/m^2$ ) που διατείνεται στο σταθμό, την ετήσια απόδοση συλλογής του ηλιακού πεδίου, τις θερμικές απώλειες, και την καθαρή αποδοτικότητα του κύκλου ισχύος σε συνδυασμό με την αποτελεσματικότητα αποθήκευσης όταν χρησιμοποιείται. Η απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη ορίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης θερμικής ενέργειας που συλλέγεται προς την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια. Η αποδοτικότητα του κύκλου ισχύος είναι η αναλογία της καθαρής ισχύος εξόδου προς στην θερμότητα εισόδου. Ένα σύστημα TES πρέπει να λειτουργήσει σε συνδυασμό τόσο με το ηλιακό πεδίο και το μπλοκ τροφοδοσίας. Η ποσότητα της θερμότητας,  $Q$ , που απαιτείται για να λειτουργήσει το μπλοκ τροφοδοσίας εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα του κύκλου ισχύος. Οι ονομαστικές θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ηλιακού πεδίου, οι οποίες εξαρτώνται από την τεχνολογία CSP και το είδος των HTF που χρησιμοποιούνται, και ο ρυθμός ροής της μάζας του HTF καθορίζουν την θερμότητα που παρέχεται από το ηλιακό πεδίο. Η θερμοκρασία εξόδου του HTF από το ηλιακό πεδίο καθορίζει επίσης την θερμοκρασία φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης.

Μία από τις πρωταρχικές απαιτήσεις για επιλογή ενός κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του HTF του ηλιακού πεδίου. Επιπρόσθετες απαραίτητες προϋποθέσεις περιλαμβάνουν τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται από τη μονάδα, τον επιθυμητό τρόπο λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης, τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα αποθήκευσης θα ενσωματωθεί με το ηλιακό πεδίο και το μπλοκ τροφοδοσίας, και το μέγεθος του ηλιακού πεδίου. Το υγρό αποθήκευσης πρέπει να έχει θερμοκρασία στερεοποίησης που είναι ασφαλώς κάτω από τη χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης και μία θερμοκρασία αποσύνθεσης που είναι ασφαλώς πάνω από την υψηλότερη θερμοκρασία του συστήματος αποθήκευσης. Το μέγεθος του ηλιακού πεδίου πρέπει να αυξηθεί, έτσι ώστε να μπορεί να φορτίσει το σύστημα αποθήκευσης, και ταυτόχρονα να παρέχει θερμική ενέργεια στο μπλοκ τροφοδοσίας. Ο αριθμός των ωρών που το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να λειτουργεί εξαρτάται από το εύρος θερμοκρασίας του, την ποσότητα του υλικού που υπάρχει στο σύστημα αποθήκευσης, καθώς και τις θερμικές ιδιότητες του υλικού, και την απαιτούμενη ενέργεια για το μπλοκ τροφοδοσίας.

Η προσθήκη ενός συστήματος TES έχει ως αποτέλεσμα τα ακόλουθα:

-> Λαμβάνοντας υπόψη τις αποδόσεις όλων των στοιχείων του σταθμού παραγωγής, ένα TES μπορεί να βελτιώσει την ετήσια ηλιακή-προς-ηλεκτρική απόδοση (13,2% έναντι 12,4%), αν και μειώνει ελαφρώς την αποτελεσματικότητα του κύκλου ατμού (37,5% έναντι 37,9%) λόγω της μείωσης των θερμοκρασιών του ατμού που κατά τη διάρκεια λειτουργίας του TES. Οι δύο βασικοί λόγοι για την αύξηση της ετήσιας απόδοσης είναι πρώτον, η μείωση της ποσότητας της απορριπτόμενης ενέργειας κατά τη διάρκεια της περιόδου υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας, και δεύτερον, η μείωση των απωλειών κατά την εκκίνηση της τουρμπίνας από την εξομάλυνση των περιόδων διακοπής.

-> Το ετήσιο ισομοιρασμένο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy, LCOE) μειώνεται κατά 10%, λόγω του υψηλότερου δείκτη ικανότητας. Το LCOE ορίζεται ως το σταθερό κόστος ανά μονάδα (ανά kWh ή MWh) από μια ροή πληρωμών που έχει την ίδια παρούσα αξία με το συνολικό κόστος της κατασκευής και λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής κατά τη διάρκεια ζωής του.

-> Αυξάνει ελαφρώς τις θερμικές απώλειες στον δέκτη λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας επιστροφής του HTF στο ηλιακό πεδίο.

-> Εισάγονται δύο ειδών απώλειες: οι θερμικές απώλειες από το σύστημα αποθήκευσης TES, και οι απώλειες που προκύπτουν όταν το σύστημα αποθήκευσης είναι πλήρες και η μονάδα παραγωγής ενέργειας δεν μπορεί να δεχθεί περισσότερη ενέργεια, επειδή είναι ήδη στο μέγιστο φορτίο.

-> Απαιτείται ένα μεγαλύτερο ηλιακό πεδίο σε σύγκριση με ένα σταθμο χωρίς σύστημα αποθήκευσης.

-> Αυξάνεται το κόστος κεφαλαίου, αλλά παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος της.

-> Τα ηλεκτρικά παράσιτα είναι μειώνονται ελαφρώς με τη χρήση TES, λόγω της υψηλότερης ετήσιας παραγωγής και του χαμηλότερου ποσοστού της παρασιτικής κατανάλωσης στην κατάσταση εκτός λειτουργίας.

-> Κατά την εκκίνηση της τουρμπίνας χρησιμοποιείται ένα μικρότερο μέρος της συνολικής ενέργειας, δεδομένου ότι λειτουργεί για περισσότερες ώρες με λιγότερες εκκινήσεις.

Η ηλιακή ενέργεια είναι ένας μεταβλητός πόρος που απαιτεί σημαντικές ποσότητες αποθήκευσης για να δημιουργηθεί μια αξιόπιστη και συνεπής παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα οφέλη από την προσθήκη οποιασδήποτε ποσότητας αποθήκευσης θα πρέπει να σταθμίζονται με το κόστος.

### 7.3.3 Κριτήρια επιλογής κατάλληλου TES

#### Στο επίπεδο της εγκατάστασης

Όπως και σε οποιονδήποτε σχεδιασμό, είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε πρώτα τις βασικές παραμέτρους του σταθμού παραγωγής, όπως η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου του στριβίλου, η θερμοκρασία εξόδου του ηλιακού πεδίου, η ηλιακή ακτινοβολία και το μέγεθος του σταθμού.

Ο υπολογισμός του μεγέθους του συστήματος TES πρέπει να γίνει κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μονάδα να μπορεί να λειτουργεί συνεχώς χωρίς σπατάλη ενέργειας. Διάφοροι τρόποι έχουν υιοθετηθεί από τους ερευνητές για τη βελτιστοποίηση της

μονάδας παραγωγής ενέργειας με σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

### Στο επίπεδο των στοιχείων

Η απόδοση ενός συστήματος TES εξαρτάται από τον τύπο των στοιχείων που το απαρτίζουν και την ικανότητα απόδοσης τους. Σε αυτό το επίπεδο λαμβάνονται υπόψη η επιλογή του υλικού αποθήκευσης, του υλικού συγκράτησης, του ρευστού μεταφοράς θερμότητας (HTF) και η συμβατότητα μεταξύ των τριών.

• **Επιλογή υλικού αποθήκευσης:** Αυτό το υλικό πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε το κόστος του, οι ιδιότητες του υλικού, η αντιδραστικότητα, και η θερμική καθώς και η χημική σταθερότητα να επιτρέπουν ένα στιβαρό σύστημα που μπορεί να αντέξει χιλιάδες θερμικών κύκλων. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες που είναι σημαντικές για την επιλογή των υλικών αποθήκευσης είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα, η θερμική αγωγιμότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής και κυκλικής σταθερότητας, καθώς και τη διαθεσιμότητα, το κόστος και η μέθοδος παραγωγής.

• **Συμβατότητα υλικών:** Μόλις επιλεγεί το μέσο αποθήκευσης, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για τα υπόλοιπα συστατικά του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της δεξαμενής αποθήκευσης, του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και της ενθυλάκωσης/συγκράτησης, εάν χρησιμοποιείται (σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να μην απαιτείται ενθυλάκωση ή συγκράτηση του υλικού, καθώς το μέσο αποθήκευσης μπορεί να είναι σε άμεση επαφή με το HTF), καθώς και τα υλικά ενίσχυσης μεταφοράς θερμότητας. Εντούτοις, σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, τα υλικά αλλαγής-φάσης (phase-change materials, PCMs) πρέπει να συγκρατούνται από τα HTF για να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης. Το υλικό συγκράτησης πρέπει να είναι συμβατό με το υλικό αποθήκευσης, σταθερό και δεν θα πρέπει να εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του μέσου αποθήκευσης και του ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Τα PCM συγκράτησης θα πρέπει να πληρούν τις εξείς απαιτήσεις, αντοχή, ευκαμψία, αντίσταση στη διάβρωση, καθώς η διάβρωση μειώνει τον κύκλο ζωής του συστήματος και αλλάζει την θερμική απόδοση του, και θερμική σταθερότητα· να ενεργεί ως εμπόδιο για την προστασία από τις επιβλαβείς αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον· να παρέχουν επαρκή επιφάνεια για μεταφορά θερμότητας, δομική σταθερότητα και εύκολο χειρισμό.

• **Δεξαμενή αποθήκευσης:** Μόλις προσδιοριστεί το υλικό της δεξαμενής, τα υπόλοιπα συστατικά του συστήματος δεξαμενής επιλέγονται με βάση την διακύμανση της θερμοκρασίας. Το μονωτικό υλικό θα πρέπει να είναι σε θέση να μονώσει το δοχείο από το περιβάλλον και να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες.

• **Ρευστά μεταφοράς θερμότητας ( HTFs) :** Τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας πρέπει να είναι συμβατά με τα υλικά συγκράτησης, τα μέσα αποθήκευσης και να είναι σε θέση να λειτουργούν με τον απαιτούμενο εύρος θερμοκρασίας. HTF που έχουν ως βάση το οργανικό πετρέλαιο, αέρας , νερό και τετηγμένα άλατα έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά θερμότητας στους σταθμούς CSP. Τα HTF με βάση το οργανικό πετρέλαιο

τείνουν σήμερα να διαλύονται σε υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 400 °C). Τα ανόργανα άλατα, απ' την άλλη, διατήρουν τη σταθερότητά τους σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά στερεοποιούνται εύκολα. Ως εκ τούτου, οι μονάδες που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούν αέρα, ατμό ή τηγμένα άλατα ως ρευστά μεταφοράς θερμότητας. Επί του παρόντος, η έρευνα στον τομέα αυτό επικεντρώνεται στην ανάπτυξη προηγμένων HTF τα οποία μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 80 °C έως 500 °C.

### Στο επίπεδο συστήματος TES

Είναι προφανές ότι η αποτελεσματικότητα και η απόδοση στο επίπεδο συστήματος TES είναι πολύ σημαντική για τον καθορισμό της αποτελεσματικότητας του σταθμού. Το σύνολο των επιλεγμένων στοιχείων παίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη του στόχου που καθορίστηκε για την πυκνότητα αποθήκευσης, των δυνατοτήτων φόρτισης και εκφόρτισης και των απαιτήσεων του κόστους του συστήματος TES. Στο επίπεδο συστήματος, διάφοροι παράγοντες καθορίζουν τη θερμική συμπεριφορά και συνεπώς την αποδοτικότητα της ενέργειας και της εξέργειας της μονάδας. Να σημειωθεί ότι εξέργεια ενός συστήματος ορίζεται ως το μέγιστο δυνατό χρήσιμο έργο κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας που φέρνει το σύστημα σε ισορροπία με μία δεξαμενή θερμότητας, η δυνατότητα του συστήματος να προκαλέσει μια αλλαγή, δεδομένου ότι επιτυγχάνει ισορροπία με το περιβάλλον του, η ενέργεια που είναι διαθέσιμη για να χρησιμοποιηθεί, η διαθέσιμη ενέργεια. Οι κύριες απαιτήσεις για την ανάπτυξη ενός συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι οι εξής:

1. Υψηλή ενεργειακή ικανότητα του υλικού αποθήκευσης
2. Αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας μεταξύ του υλικού αποθήκευσης και του HTF που παρέχεται από ένα κατάλληλα σχεδιασμένο εξοπλισμό ανταλλαγής θερμότητας
3. Γρήγορη αντίδραση στις μεταβολές φορτίου κατά τη φάση της αποφόρτισης
4. Χαμηλή χημική δραστηριότητα του υλικού αποθήκευσης και του HTF προς τα υλικά κατασκευής
5. Καλή χημική σταθερότητα του υλικού αποθήκευσης και του HTF και αναστρεψιμότητα της θερμοκρασίας σε ένα μεγάλο αριθμό θερμικών κύκλων φόρτισης / εκφόρτισης συγκρίσιμη με μια διάρκεια ζωής του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, 30 χρονών
6. Υψηλή θερμική απόδοση και χαμηλή παρασιτική ηλεκτρική ισχύ για το σύστημα
7. Χαμηλή πιθανή μόλυνση του περιβάλλοντος που μπορεί να προκληθεί από τυχαία διαρροή μεγάλων ποσοτήτων χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στο σύστημα TES



8. Χαμηλό κόστος του υλικού αποθήκευσης, λαμβάνοντας υπόψη την ενσωματωμένη ενέργεια (άνθρακας)
9. Ευκολία στη λειτουργία και χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης
10. Σκοπιμότητα κλιμάκωσης στο σχεδιασμό του συστήματος TES, ώστε να παρέχει τουλάχιστον 10 ώρες λειτουργίας στο πλήρες φορτίο για σταθμούς ηλιακής ενέργειας μεγάλης κλίμακας, δυνατότης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης των 50MW και παραπάνω.

#### **7.4. Κατηγορίες συστημάτων TES βάσει του τρόπου αποθήκευσης**

Τα συστήματα TES μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ενεργητική ή παθητική αποθήκευση. Όταν το μέσο αποθήκευσης είναι ένα ρευστό και είναι σε θέση να ρέει μεταξύ των δεξαμενών, τα συστήματα που αναφέρονται ως συστήματα ενεργητικού τύπου. Εάν το μέσο αποθήκευσης χρησιμοποιείται επίσης ως το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το σύστημα αναφέρεται ως άμεσα-ενεργητικό σύστημα. Όταν το υγρό αποθήκευσης και το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι διαφορετικά, είναι απαραίτητος ένας πρόσθετος εναλλάκτης θερμότητας και η μονάδα αναφέρεται ως έμμεσα-ενεργητικού τύπου. Σε περιπτώσεις όπου το μέσο αποθήκευσης είναι στερεό, το HTF περνά μέσα από το υλικό αποθήκευσης μόνο για τη φόρτιση και αποφόρτιση, αυτά ονομάζονται συστήματα παθητικού τύπου. Οι διάφοροι τύποι ενός συστήματος TES περιγράφονται παρακάτω.

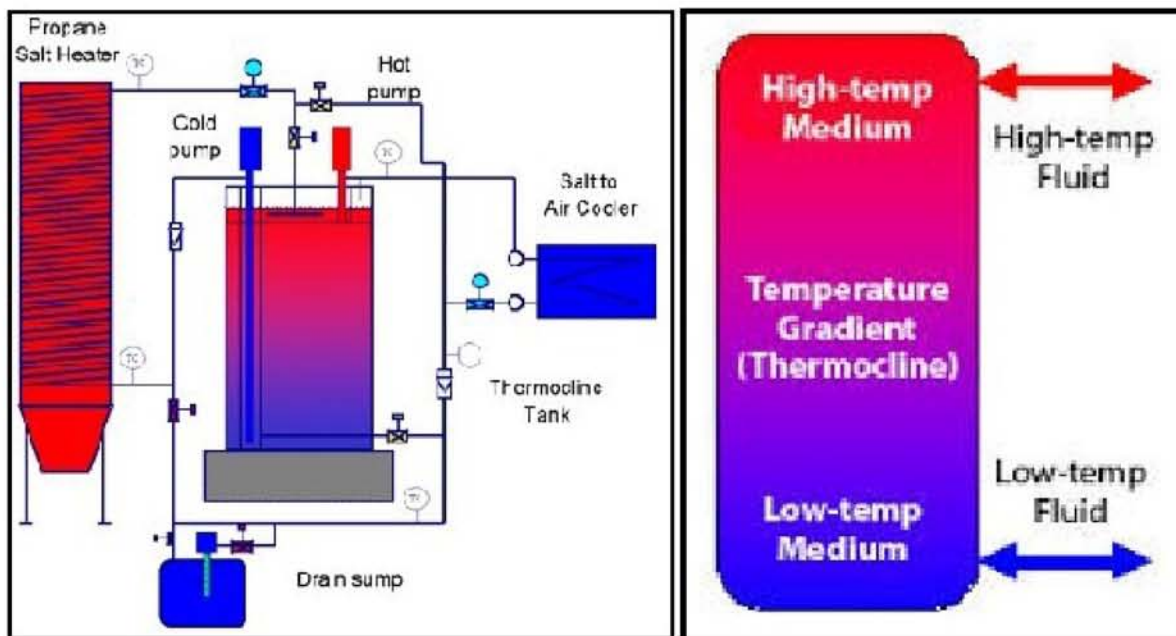
##### **7.4.1. Ενεργητική αποθήκευση**

Σε ένα ενεργητικό σύστημα αποθήκευσης, το ίδιο το υλικό αποθήκευσης κυκλοφορεί μεταξύ των εναλλακτών θερμότητας για τη μεταφορά ενέργειας. Ο αριθμός των απασχολούμενων εναλλακτών θερμότητας μπορεί επίσης να είναι ηλιακοί δέκτες ή γεννήτριες ατμού. Οι τύποι TES ενεργητικής αποθήκευσης είναι οι εξής:

-> Συστήματα δύο δεξαμενών: Τα συστήματα αυτά- που ενσωματώνονται σε σταθμούς CSP υψηλής θερμοκρασίας- χρησιμοποιούν συνήθως τηγμένα άλατα σαν υγρό αποθήκευσης και συνθετικά έλαια σαν υγρό μεταφοράς θερμότητας (HTF). Τα συστήματα δύο δεξαμενών είναι η πιο εμπορικά δοκιμασμένη τεχνολογία και χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία.

-> Θερμοκλινή συστήματα: Είναι συστήματα ενιαίας δεξαμενής που επίσης χρησιμοποιούν υγρά, συγκεκριμένα ένα καυτό ρευστό, όπως συνθετικό λάδι, αντλείται στην κορυφή της δεξαμενής κατά τη λειτουργία φόρτισης, εκτοπίζοντας σταδιακά ένα ψυχρότερο ρευστό. Μια θερμική κλίση αναπτύσσεται εντός του συστήματος- γι' αυτό και ονομάζονται θερμοκλινή- και, ιδανικά, σταθεροποιείται και διατηρείται από την επίδραση της άνωσης. Το θερμό υγρό παραμένει στην κορυφή και το κρύο υγρό παραμένει στο κάτω μέρος,

ωστόσο, σε αυτά τα συστήματα, είναι δύσκολο να διαχωριστεί το θερμό από το κρύο υγρό. Ένα ιδανικό θερμοκλινές σύστημα έχει ένα τέλει στρώμα θερμικής μόνωσης το οποίο κινείται κάθετα και προστατεύει την ανάμειξη των ζεστών υγρών με τα κρύα. Τυπικά, ένα υλικό γεμίματος εισάγεται στο σύστημα. Η παρουσία υλικού αυτού συμβάλλει στη διατήρηση της κλίσης και στη μείωση της φυσικής συναγωγής μέσα στο υγρό.

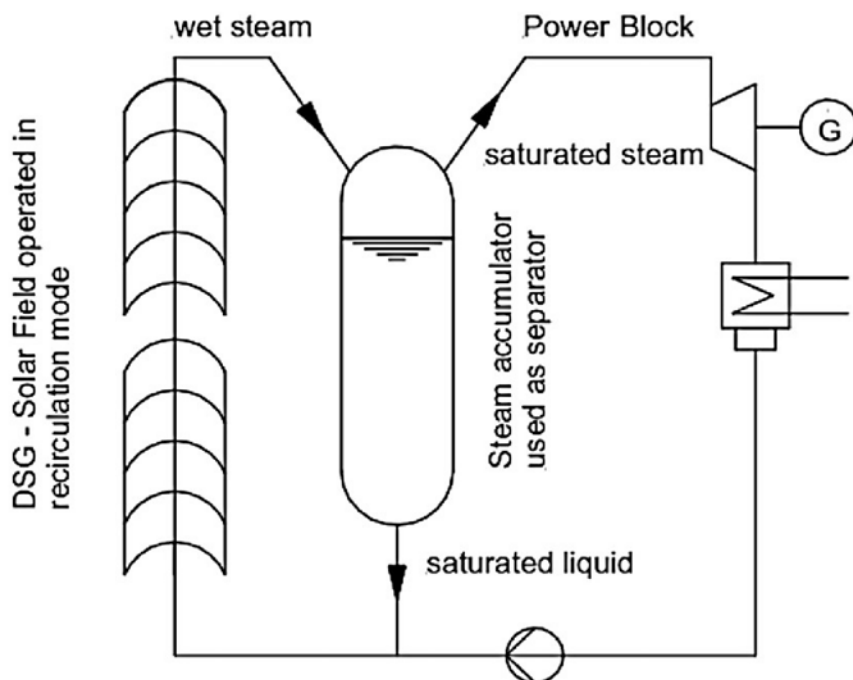


Σχήμα 36. Θερμοκλινές σύστημα αποθήκευσης που χρησιμοποιεί μια ενιαία δεξαμενή που περιέχει και το ζεστό και το κρύο υγρό.

-> Συσσωρευτές ατμού: Εκτός από την χρήση συνθετικών ελαίων και τηγμένων αλάτων, στην ενεργητική αποθήκευση μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί το νερό ως το μέσο αποθήκευσης και τα συστήματα αυτά ονομάζονται συσσωρευτές ατμού. Στα συστήματα αυτά η φόρτιση λαμβάνει χώρα όταν υπέρθερος ατμός ή κορεσμένο νερό εισέρχεται σε μια συμπιεσμένη δεξαμενή αποθήκευσης που αρχικά περιείχε κορεσμένο ατμό και κορεσμένο νερό. Εάν το σύστημα φορτίζεται με υπέρθερο ατμό, η θερμοκρασία και η πίεση του νερού στο δοχείο αυξάνεται, αλλάζοντας έτσι την κατάσταση κορεσμού της αρχικής μάζας. Ενώ εάν χρησιμοποιείται κορεσμένο νερό για τη φόρτιση του συστήματος, η πίεση και η θερμοκρασία παραμένουν σταθερές ακόμη και αν η μάζα του όγκου αυξάνεται. Η διαδικασία εκφόρτισης λαμβάνει χώρα με τη μείωση της πίεσης στη δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτό καταλήγει στην παραγωγή κορεσμένου ατμού που μειώνεται σε πίεση καθώς προχωρεί η διαδικασία εκφόρτισης. Εάν επιθυμείται υπέρθερος ατμός, απαιτείται ένα δευτερεύον σύστημα αποθήκευσης για την αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού. Οι συσσωρευτές ατμού είναι κατάλληλοι για σταθμούς CSP άμεσης παραγωγής ατμού (Direct Steam Generation, DSG), στους οποίους ο ατμός παράγεται απευθείας στο ηλιακό πεδίο και στη συνέχεια χρησιμοποιείται στο μπλοκ τροφοδοσίας για την παραγωγή ενέργειας. Ο ατμός που παράγεται καθ' υπέρβαση του ό, τι χρειάζεται η

τουρμπίνα, μπορεί να εκτραπεί προς την συσσωρευτή ατμού. Τα συστήματα αυτά μπορούν να λειτουργήσουν και ως το σύστημα αποθήκευσης και ως διαχωριστές φάσης στους σταθμούς DSG που δουλεύουν σε λειτουργία ανακυκλοφορίας. Σε αυτή τη λειτουργία, ο κορεσμένος ατμός διαχωρίζεται από κορεσμένο υγρό σε ένα διαχωριστή τυμπάνου και στη συνέχεια αποστέλλεται μέσω ενός άλλου συλλέκτη για να γίνει υπέρθερμος. Αντί να χρησιμοποιούνται δύο διακριτά κομμάτια του εξοπλισμού, ο υγρός ατμός αφήνει το ηλιακό πεδίο και εισέρχεται στο συνδυασμένο συσσωρευτή ατμού / διαχωριστή όπου οι φάσεις διαχωρίζονται και η πίεση παραμένει σταθερή.

Δεδομένου ότι αυτά τα συστήματα απαιτούν συμπίεση, και ως εκ τούτου ακριβές δεξαμενές αποθήκευσης, και ότι διαθέτουν χαμηλή ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας (η ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης για το νερό είναι 20-30 kWh/m<sup>3</sup> σε σύγκριση με περίπου 100 kWh/m<sup>3</sup> που είναι για τα PCMs), είναι χρήσιμα όταν απαιτείται χαμηλή χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης. Προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης, προτείνεται να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το συσσωρευτή ατμού, αποθήκευση με λανθάνουσα θερμότητα. Οι συσσωρευτές ατμού μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στη διαμόρφωση έμμεσης αποθήκευσης, στην οποία ένα ξεχωριστό υγρό μεταφοράς θερμότητας, όπως συνθετικό λάδι εισέρχεται σε ένα εναλλάκτη θερμότητας που είναι σε επαφή με τη μάζα του συσσωρευτή ατμού.



Σχήμα 37. Ενσωμάτωση ενός συσσωρευτή ατμού σε έναν σταθμό CSP άμεσης παραγωγής ατμού. Ο συσσωρευτής ατμού σε αυτό το σχεδιασμό χρησιμεύει επίσης ως το διαχωριστής φάσης.

### 7.4.2. Παθητική αποθήκευση

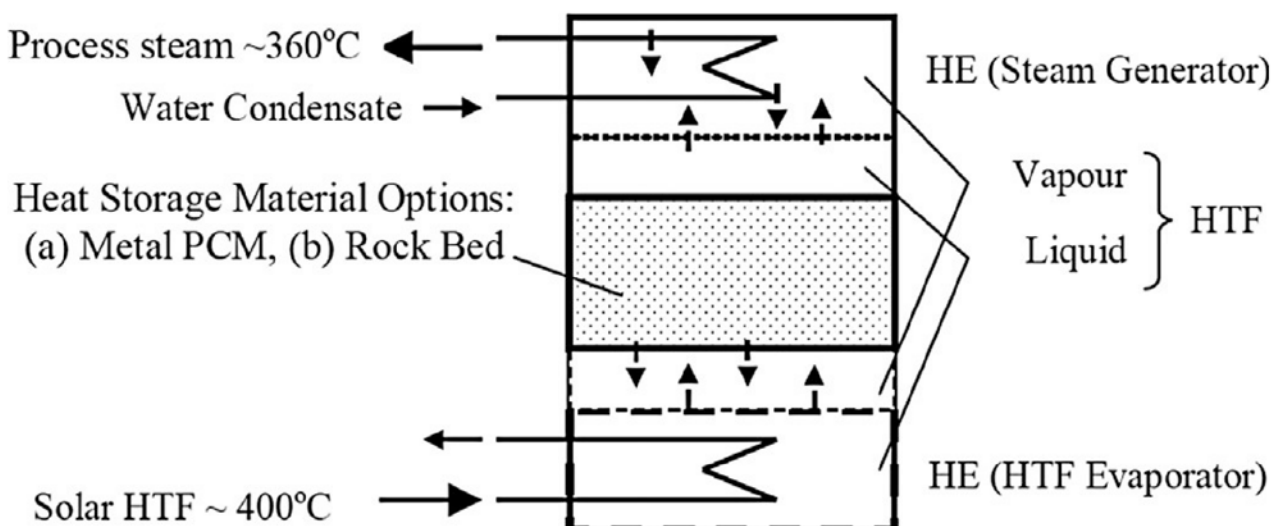
Στα συστήματα παθητικής αποθήκευσης, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF) μεταφέρει την ενέργεια που λαμβάνει από την πηγή ενέργειας στο μέσο αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της φόρτισης και λαμβάνει ενέργεια από το σύστημα αποθήκευσης στην εκφόρτιση (αυτά τα συστήματα ονομάζονται επίσης αναγεννήτριες). Όταν το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι υγρό και η θερμοχωρητικότητα του στερεού στο σύστημα αποθήκευσης δεν είναι αμελητέα, το σύστημα ονομάζεται ένα διπλό σύστημα αποθήκευσης. Τα συστήματα παθητικής αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιούν φθηνά στερεά, όπως πέτρες, άμμο ή σκυρόδεμα για υλικά αποθήκευσης στη αποθήκευση υπό μορφή αισθητής θερμότητας, ή υλικά αλλαγής φάσης (PCM) για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

Η μεταφορά θερμότητας γίνεται πιο προβληματική όταν το μέσο αποθήκευσης είναι σε στερεά φάση και όχι υγρή. Εάν το μέσο αποθήκευσης είναι ένα υλικό αλλαγής φάσης από στερεή σε υγρή, το σκεπτικό του σχεδιασμού θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει το διαχωρισμό του υγρού μέσου από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Οι τύποι παθητικής αποθήκευσης είναι οι εξής:

-> Συστήματα με ενσωματωμένες ή ενισχυμένες δομές μεταφοράς θερμότητας: Εάν χρησιμοποιούνται υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, αυτά πρέπει να είναι συμβατά τόσο με το υλικό αποθήκευσης και το υγρό μεταφοράς θερμότητας. Το θερμαινόμενο μέσο μεταφοράς περνά μέσα από σωλήνες ενσωματωμένους στο σκυρόδεμα αποθήκευσης για να το θερμάνει. Για την αποβολή θερμικής ενέργειας, το κρύο υγρό μεταφοράς ρέει μέσα στο σκυρόδεμα προς την αντίθετη κατεύθυνση και θερμαίνεται. Ένα σωληνοειδές εναλλάκτης θερμότητας ενσωματώνεται στο υλικό αποθήκευσης για την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας. Ο εναλλάκτης θερμότητας απαιτεί ένα σημαντικό μερίδιο του κόστους της επένδυσης. Η τεχνολογία είναι επεκτάσιμη και το κόστος θα μειωθεί σημαντικά, ιδιαίτερα για τις μικρότερες μονάδες (περίπου 10 MW).

Μια οριζόντια δομή μεταφοράς θερμότητας (π.χ. από γραφίτη ή αλουμίνιο) προτείνεται να τοποθετείται μεταξύ των στρωμάτων του προκατασκευασμένου σκυροδέματος, περιβάλλει τους σωλήνες για την καλή επαφή και την υψηλή μεταφορά θερμότητας, στη συνέχεια. Η σκοπιμότητα της χρήσης διαφορετικών υλικών της λεπίδας είτε από γραφίτη ή αλουμίνιο, μελετήθηκε για οικονομικώς αποδοτικά συστήματα αποθήκευσης με λανθάνουσα θερμότητα. Η μονάδα αποθήκευσης θερμότητας τύπου κελύφους και σωλήνα χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας λανθάνουσας θερμότητας, λόγω της υψηλής αποτελεσματικότητάς της και του σχετικά μικρότερου όγκου. Σε αυτή τη μονάδα αποθήκευσης θερμότητας, το υλικό αλλαγής φάσης (PCM) γεμίζει τον δακτυλιοειδή χώρο κελύφους γύρω από τον σωλήνα, ενώ το ρευστό μεταφοράς θερμότητας ρέει μέσα στο σωλήνα και ανταλλάσσει θερμότητα με το PCM.

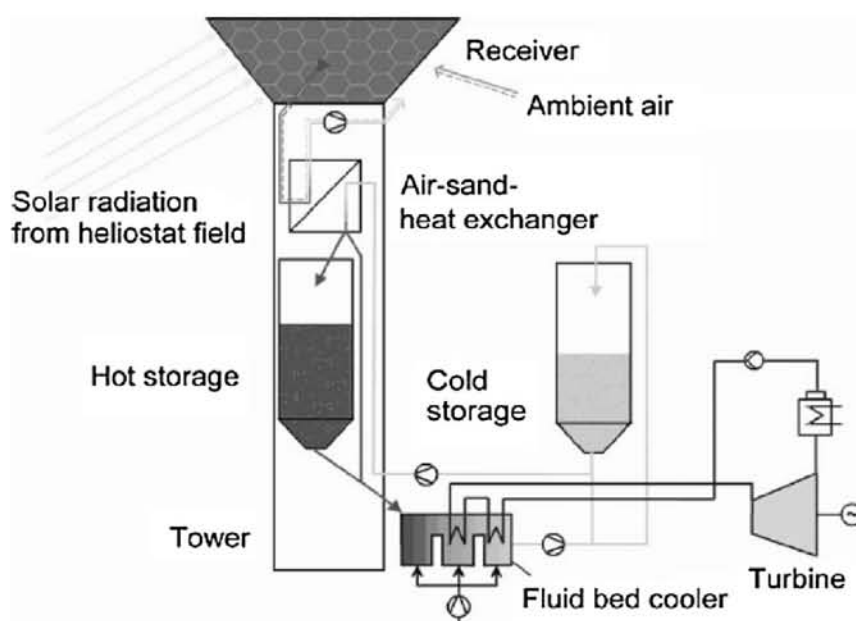
Η μεταφορά θερμότητας μπορεί επίσης να βελτιωθεί με τη χρήση ενός μηχανισμού ανταλλαγής θερμότητας υψηλής αγωγιμότητας. Η χρήση ενσωματωμένων σωλήνων θερμότητας ή θερμοσίφωνων μεταξύ PCM και της HTF ως μέσο ενίσχυσης της θερμικής μεταφοράς ενέργειας μεταξύ τους, διερευνάται. Οι αγωγοί θερμότητας έχουν θερμικές αγωγιμότητες υψηλής αποτελεσματικότητας, μπορούν να συντονιστούν για να λειτουργούν παθητικά σε συγκεκριμένες περιοχές θερμοκρασίας, και να κατασκευαστούν σε μια ποικιλία σχημάτων. Ένα σύστημα TES, που λειτουργεί με αποθήκευση θερμότητας μεταφοράς με παλινδρόμηση (reflux heat transfer storage, RHTS), αναπτύχθηκε για σταθμούς CSP με παραβολικούς-κοίλους συλλέκτες, όπου η θερμοκρασία του συνθετικού ελαίου που θερμαίνεται ηλιακά μπορεί να φτάσει περίπου τους 400 °C. Η λειτουργία του βασίζεται στις συνδυασμένες επιδράσεις των αλλαγών φάσης της τήξης και εξάτμισης που συμβαίνουν στο σύστημα αποθήκευσης ταυτόχρονα. Το HTF εντός του συστήματος χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του υλικού αποθήκευσης (θα μπορούσε να είναι λανθάνουσας ή αισθητής θερμότητας) και των εξωτερικών εναλλακτών θερμότητας με χρήση των αποτελεσμάτων της εξάτμισης από βρασμό και της παλινδρομικής συμπίκνωσης. Αυτό το σύστημα TES τύπου RHTS που μόλις περιγράφηκε, φαίνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 38. Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος TES, παθητικής αποθήκευσης τύπου RHTS.

-> Συστήματα συσκευασμένης κλίνης: Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από στοιχεία- για τα υλικά αποθήκευσης- σε διάφορα σχήματα και μεγέθη και ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας που ρέει μεταξύ αυτών των στοιχείων για τη μεταφορά θερμότητας στο υλικό αποθήκευσης. Δεδομένου ότι το ρευστό μεταφοράς θερμότητας είναι σε άμεση επαφή με το υλικό αποθήκευσης, οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας μπορεί να είναι μεγάλοι. Τα συστήματα αυτά μπορούν να διατηρούν την θερμική κλίση όταν χρησιμοποιούνται πολύ χαμηλά αγώγιμα υλικά όπως πέτρες. Τα θερμοκλινή συστήματα με υλικά γεμίσματος μπορούν να χαρακτηριστούν ως συστήματα συσκευασμένης κλίνης.

Τα περισσότερα συστήματα συσκευασμένης κλίνης είναι συστήματα ενιαίας δεξαμενής που λειτουργούν ως θερμοκλινή, που επειδή χρησιμοποιούν ένα στερεό μέσο αποθηκείσεως και χρειάζονται μία δεξαμενή, μειώνεται το κόστος αυτού του συστήματος στα 2/3 σε σχέση με συστήματα ενεργητικής αποθήκευσης δύο δεξαμενών.



Σχήμα 39. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης συσκευασμένης κλίνης, που χρησιμοποιεί χαλαζιακή άμμο ως μέσο αποθήκευσης, ενσωματωμένο σε ηλεκτροπαραγωγικό σταθμό πύργου ισχύος.

Αν και οι τρεις βασικοί τύποι μέσων αποθήκευσης θερμότητας (αισθητής, λανθάνουσας, θερμοχημικής) έχουν τη δυνατότητα να κάνουν τους ηλιακούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βιώσιμους, απαιτείται περισσότερη έρευνα για να βελτιωθεί της θερμικής απόδοσης και της οικονομίας αυτών των συστημάτων. Οι τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα της θερμικής αποθήκευσης εστιάζουν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που μπορούν να μειώσουν το **ισομοιρασμένο** κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy, LCOE) της θερμικής αποθήκευσης από 5 \$ / kWh

έως 1 ¢ / kWh μέχρι το 2020, με την τρέχουσα τάση να κινείται προς υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι πρόσφατες εξελίξεις χρησιμοποιούν νανο-τεχνολογίες και προηγμένες μεθόδους παραγωγής για την επίτευξη αυτού του στόχου. Οι ερευνητές δίνουν έμφαση στην εξεργειακή αποτελεσματικότητα, κατά το σχεδιασμό των συστημάτων αποθήκευσης. Ένας συνδυασμός διαφορετικών τύπων αποθήκευσης μπορεί να είναι μια λύση για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση των σταθμών παραγωγής ενέργειας με χαμηλό κόστος.





## 8. Υβριδοποίηση

### 8.1. Αναγκαιότητα εφαρμογής της τεχνικής υβριδοποίησης

Γεγονός είναι ότι τις τελευταίες δεκαετίες το κόστος της ηλιακής ενέργειας έχει μειωθεί σημαντικά. Παρόλα αυτά, παραμένει πιο ακριβή συγκριτικά με τις παραδοσιακές πηγές παραγωγής, και τα κίνητρα που δίνονται από τις κυβερνήσεις με τη μορφή φορολογικών ελαφρύνσεων και προτύπων ανανεώσιμου χαρτοφυλακίου οφείλουν να προωθήσουν τα πλεονεκτήματα της αναφορικά με τις σχεδόν μηδενικές εκπομπές, το χαμηλό κόστος διάρκειας ζωής και την ελάχιστη επίδραση στο παγκόσμιο κλίμα.

Στην οικογένεια των διαφορετικών τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρισμού, η βιομηχανία συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας (CSP) έχει αντιμετωπίσει τελευταία αυξανόμενο ανταγωνισμό από τη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών (PV) καθώς τα κόστη κατασκευής της τελευταίας μειώνονται ραγδαία εξαιτίας της μαικής παραγωγής και των αντίστοιχων καμπυλών εκμάθησης. Η μετατροπή σε πρώτη φάση των 500 MW<sub>e</sub> και πιθανά των 1000 MW<sub>e</sub> σε δεύτερη φάση του σταθμού Blythe Solar Power Project στις ΗΠΑ από τεχνολογία παραβολικών κοίλων (PTC) σε τεχνολογία φωτοβολταϊκών (PV) είναι το επιφανέστερο παράδειγμα μέχρι σήμερα. Για να παραμείνει ανταγωνιστική η βιομηχανία CSP πρέπει να δώσει έμφαση στα πλεονεκτήματα της δυνατότητας μεταφοράς της ενέργειας αλλά και την περαιτέρω μείωση του κόστους των σταθμών.

Μία ποικιλία από διαφορετικές τεχνολογίες θεωρούνται ικανοί μέθοδοι για τη βελτίωση της απόδοσης μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια των ηλιακών θερμικών σταθμών παραγωγής και για τη μείωση του κόστους, αλλά οι περισσότερες από αυτές έχουν να αντιμετωπίσουν θεωρητικούς και πρακτικούς περιορισμούς. Όταν η συλλεγόμενη ηλιακή θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σε υψηλότερη θερμοκρασία, ο θερμικός κύκλος έχει υψηλή απόδοση μετατροπής ενώ οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν μειωμένη απόδοση και μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. Αντίθετα, όταν η συλλεγόμενη ηλιακή θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, οι ηλιακοί συγκεντρωτές έχουν μικρότερο κόστος κατασκευής αλλά η απόδοση του θερμικού κύκλου μειώνεται σημαντικά.

Τα πλεονεκτήματα της δυνατότητας μεταφοράς της ενέργειας καταδεικνύονται εύκολα μέσω της θερμικής αποθήκευσης καθώς αρκετοί σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με συστήματα αποθήκευσης 7,5 έως 15 ωρών πλήρους φορτίου. Ωστόσο η θερμική αποθήκευση είναι ακόμη ακριβή με το κόστος να αγγίζει σήμερα τα 90 \$/KW<sub>th</sub>. Το κόστος αυτό αναμένεται να μειωθεί στα 22 \$/KW<sub>th</sub> μέχρι το 2020 λόγω καινοτομιών αλλά και της εμπειρίας που σιγά σιγά αποκτιέται. Συστήματα αποθήκευσης ανταγωνιστικά αναφορικά με το κόστος θα έδιναν στους σταθμούς CSP ένα μοναδικό πλεονέκτημα συγκριτικά με αυτούς των φωτοβολταϊκών αλλά δυστυχώς δεν είναι προς το παρόν διαθέσιμοι. Ένα άλλο βιώσιμο μέσο διευθέτησης του προβλήματος της δυνατότητας μεταφοράς της ενέργειας είναι η ενσωμάτωση ενός σταθμού συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας σε ένα συμβατικό

σταθμό ορυκτών καυσίμων. Η υβριδοποίηση προσφέρει μία εξαιρετική δυνατότητα σχετικά με την οικονομικά αποδοτική εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας σε μία κλίμακα ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις. Ο σταθμός ορυκτών καυσίμων μπορεί να παρέχει την επιπλέον ενέργεια που απαιτείται σε χαμηλότερο κόστος έως ότου αναπτυχθούν ανταγωνιστικά οικονομικά συστήματα θερμικής αποθήκευσης.

Οι υβριδικοί σταθμοί ισχύος μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: αυτούς που χρησιμοποιούν θερμική ενσωμάτωση και αυτούς που χρησιμοποιούν θερμοχημική ενσωμάτωση. Στις διαδικασίες θερμοχημικής ενσωμάτωσης η υβριδοποίηση χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση του νερού, του κορεσμένου ή του υπερθερμανσμένου ατμού σε συνδυασμό με καύση των ορυκτών καυσίμων. Στη θερμοχημική υβριδοποίηση, τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται ως χημικοί αντιδραστήρες ενώ η ηλιακή ενέργεια χρησιμεύει ως θερμική διαδικασία για την αναβάθμιση ή την αποβολή του διοξειδίου του άνθρακα από τα ορυκτά ώστε να παράγει ένα καθαρότερο καύσιμο. Η θερμική υβριδοποίηση χρησιμοποιείται ήδη για βιομηχανικές εφαρμογές ενώ η θερμοχημική βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο.

Συγκριτικά με τους σταθμούς που χρησιμοποιούν μόνο ηλιακή ενέργεια, ένας υβριδικός ηλιακός σταθμός μπορεί να χρησιμοποιήσει την υπάρχουσα υποδομή ενός συμβατικού σταθμού, μειώνοντας έτσι την επένδυση σε εξοπλισμό και κατά συνέπεια ελαττώνοντας και το κόστος παραγωγής ενέργειας. Συγχρόνως επιλύει το πρόβλημα της διαλείπουσας φύσης της ηλιακής ενέργειας ενώ η χρήση της ηλιακής ενέργειας σε υπάρχοντες σταθμούς ορυκτών κατά κάποιο τρόπο συμβάλλει στην εξοικονόμηση ορυκτών καυσίμων και στη μείωση των εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου, κυρίως του CO<sub>2</sub>. Έτσι, βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, η ανάπτυξη υβριδικών σταθμών ηλιακής ενέργειας και ορυκτών καυσίμων είναι ένας πρακτικός τρόπος επιτάχυνσης της υιοθέτησης τεχνολογιών ηλιακής θερμικής ενέργειας σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Εκτός των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι υβριδικοί σταθμοί διευρύνουν το φάσμα καταλληλότητας των περιοχών όπου εγκαθίστανται οι σταθμοί από ξηρές και άνυδρες σε ημι-άνυδρες και αυκρατείς περιοχές. Ενώ οι αυτόνομοι ηλιακοί σταθμοί τυπικά απαιτούν τιμές άμεσης κανονικής ακτινοβολίας (DNI) μεγαλύτερες από 2.000 kWh/m<sup>2</sup>/έτος, οι υβριδικοί CSP σταθμοί μπορούν να εγκατασταθούν σε περιοχές με τιμές μεγαλύτερες από 1.700 kWh/m<sup>2</sup>/έτος. Το γεγονός αυτό τοποθετεί τους CSP σταθμούς έξω από απομονωμένες περιοχές πιο κοντά σε κέντρα φορτίου και πηγές εφεδρικών καυσίμων όπως βιομάα σε γεωργικές περιοχές και απόβλητα υλικά σε αστικές περιοχές.

Αρκετοί σταθμοί ενσωματώνουν κάποιου είδους ορυκτές πηγές ενέργειας για να βοηθούν στην εκκίνηση ή να παρέχουν μία εφεδρική πηγή ενέργειας. Γενικά, η ετήσια συμβολή των ορυκτών καυσίμων στην παραγωγή ηλεκτρισμού είναι μικρή, τυπικά λιγότερο από 15%. Το όριο βασίζεται στην πολιτική και την οικονομία-το φυσικό αέριο για παράδειγμα που καίγεται σε ένα CSP σταθμό έχει θερμική αναλογία που διέπεται από την αποδοτικότητα του κύκλου ατμού. Ένας σύγχρονος σταθμός συνδυασμένου κύκλου μπορεί

να επιτύχει αποδόσεις του θερμικού κύκλου μεγαλύτερες από 55%, ενώ ένας σταθμός παραβολικών κοίλων συλλεκτών έχει αποδόσεις θερμικού κύκλου μικρότερες από 40%. Μία επιτυχής συγχώνευση σταθμών CSP και ορυκτών πρέπει να παρέχει οφέλη και στους δύο συνιστώσες. Γενικά, οι σχεδιασμοί των υβριδικών σταθμών πρέπει να βελτιώνουν την απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια συγκριτικά με έναν αυτόνομο ηλιακό σταθμό, να βελτιώνουν την απόδοση μετατροπής της ενέργειας ορυκτών καυσίμων σε ηλεκτρισμό συγκριτικά με έναν αυτόνομο σταθμό ορυκτών, να μειώνουν το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας συγκριτικά με την ύπαρξη δύο διαφορετικών σταθμών, να πετυχαίνουν υψηλό ετήσιο ηλιακό ποσοστό (μεγαλύτερο από 50%) και να προσφέρει μικρό τεχνικό κόστος μέσω της χρήσης των υπάρχουσών, αποδεδειγμένων τεχνολογιών.

## **8.2. Υβριδικές κατηγορίες**

Καθώς υπάρχει μεγάλη ποικιλία πιθανών επιλογών CSP υβριδοποίησης είναι λογικό να γίνει μία κατηγοριοποίηση ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί καλύτερα ο βαθμός εξάρτησης μεταξύ ανάμεσα στην τεχνολογία CSP και την άλλη συνιστώσα παραγωγής ισχύος. Μία τέτοια κατηγοριοποίηση περιγράφεται παρακάτω.

### **8.2.1. Ελαφρές υβριδικές συνέργειες**

Οι ελαφρά υβριδικοί σταθμοί μοιράονται μόνο ένα μικρό μέρος των υποδομών και η λειτουργία των διαφορετικών μονάδων δεν εξαρτώνται η μία από την άλλη, όπως για παράδειγμα ένας σταθμός CSP κι ένα αιολικό πάρκο που κάνουν από κοινού χρήση του κέντρου διανομής και του υποσταθμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολύ μικρή εξοικονόμηση κόστους εκτός εάν και οι δύο σταθμοί μπορούν να μοιραστούν το κόστος για την κατασκευή νέων υποδομών μεταφοράς, που θα ήταν πολύ μεγάλο όφελος καθώς οι γραμμές μεταφοράς είναι αρκετά κοστοβόρες.

Παρά την μικρή αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών μονάδων, κάθε σταθμός θα μπορούσε να χρησιμοποιεί συγκεκριμένο εξοπλισμό από τον άλλο ώστε να ενισχύσει τη δυνατότητα μεταφοράς/όριο περικοπής της ενέργειας αν ο εξοπλισμός αυτός δε χρησιμοποιείται στο μέγιστο των δυνατοτήτων του τη δεδομένη στιγμή.

### **8.2.2. Μέτριες υβριδικές συνέργειες**

Οι μετρίως υβριδικοί σταθμοί CSP συνδέονται φυσικά μεταξύ τους και μοιράζονται τον βασικό εξοπλισμό όπως την τουρμπίνα ατμού ή τον συμπυκνωτή. Ωστόσο, η CSP συνιστώσα απαιτεί τη λειτουργία του τυπικά πολύ μεγαλύτερου σταθμού ξενιστή ενώ ο ίδιος μπορεί να λειτουργήσει χωρίς τη CSP συνιστώσα. Σήμερα, αυτή είναι η κυρίαρχη μορφή υβριδικών σταθμών CSP, όπου το ηλιακό κομμάτι παρέχει τη θέρμανση του νερού

τροφοδοσίας, την αναθέρμανση του κρύου ατμού ή την ενίσχυση κορεσμένου/υπέρθερμου ατμού. Τέτοια είναι η περίπτωση συνύπαρξης CSP με άνθρακα και φυσικό αέριο.

Εξαιτίας της κοινής χρήσης των ακριβών εργοστασιακών υποδομών, οι μειώσεις στο κόστος μπορεί να είναι σημαντικές αλλά το ηλιακό μερίδιο στην παραγωγή είναι τυπικά μικρότερο από το 10% της εγκατεστημένης ισχύος του σταθμού.

### **8.2.3. Ισχυρές υβριδικές συνέργειες**

Οι ισχυρά υβριδικοί σταθμοί CSP συνδέονται φυσικά μεταξύ τους, μοιράονται τον βασικό εξοπλισμό και έχουν ένα σημαντικό υψηλότερο ηλιακό μερίδιο, μεγαλύτερο από 30%, συγκριτικά με τους μετρίως υβριδικούς CSP. Οι σταθμοί CSP που χρησιμοποιούν άλλο καύσιμο για την περαιτέρω υπερθέρμανση του ατμού εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία, όπως ο 100 MW<sub>e</sub> Shams One που χρησιμοποιεί φυσικό αέριο και ο 22,5 MW<sub>e</sub> Thermosolar Borges που χρησιμοποιεί βιομάζα. Εναλλακτικά, η CSP συνιστώσα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει τις παραμέτρους του ατμού των χαμηλής θερμοκρασίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι γεωθερμικοί σταθμοί. Η ιδέα της εξωτερικής υπερθέρμανσης αυξάνει την απόδοση του σταθμού και ως εκ τούτου μειώνει το κόστος. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται επίσης οι σταθμοί όπου η συγκεντρωτική ηλιακή ακτινοβολία και η άλλη πηγή ενέργειας παρέχουν παρόμοιες ποσότητες παραμέτρων υψηλής θερμοκρασίας/πίεσης ατμού στην κοινή τουρμπίνα.

Αυτού του τύπου οι υβριδικοί σταθμοί μπορούν να μειώσουν σημαντικά το επενδυτικό κεφάλαιο που απαιτείται ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν ηλιακά μερίδια της τάξης του 30-90%.

### **8.3. Ο ρόλος των διαφορετικών τεχνολογιών συγκέντρωσης**

Ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να κατασκευαστεί με την προσθήκη ηλιακών συλλεκτών σε ένα συμβατικό σταθμό ισχύος με ορυκτά καύσιμα. Αυτό παρέχει μόνο ένα μέτριο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που απαιτείται για ένα μεγάλο αυτόνομο σταθμό ισχύος με καύση ορυκτών. Ο οικονομικά αποδοτικός σχεδιασμός του πεδίου του ηλιακού συγκεντρωτή είναι ένα βασικό ζήτημα και συνδέεται άμεσα με την εγκαθίδρυση μίας καλής αντιστοιχίας μεταξύ της ηλιακής θερμότητας, της αναλογίας συγκέντρωσης του συγκεντρωτή και τις απαιτήσεις του σταθμού ισχύος. Συνήθως, η συγκεντρωμένη ηλιακή θερμότητα υψηλότερης θερμοκρασίας (μεγαλύτερη των 500 °C) απαιτεί τεχνολογία δίσκου/μηχανής ή πύργου, ενώ για θερμοκρασίες της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας μικρότερες των 500 °C απαιτείται παραβολικός κούλος ή γραμμικός Fresnel συλλέκτης. Οι διαφορετικές τεχνολογίες συγκεντρωτών περιγράφονται αναλυτικά στα κεφάλαια 3 έως 6.

Η αναγνώριση της κατάλληλης CSP τεχνολογίας για μία συγκεκριμένη τοποθεσία κάποιου σταθμού εξαρτάται σημαντικά από τις τοπικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα η

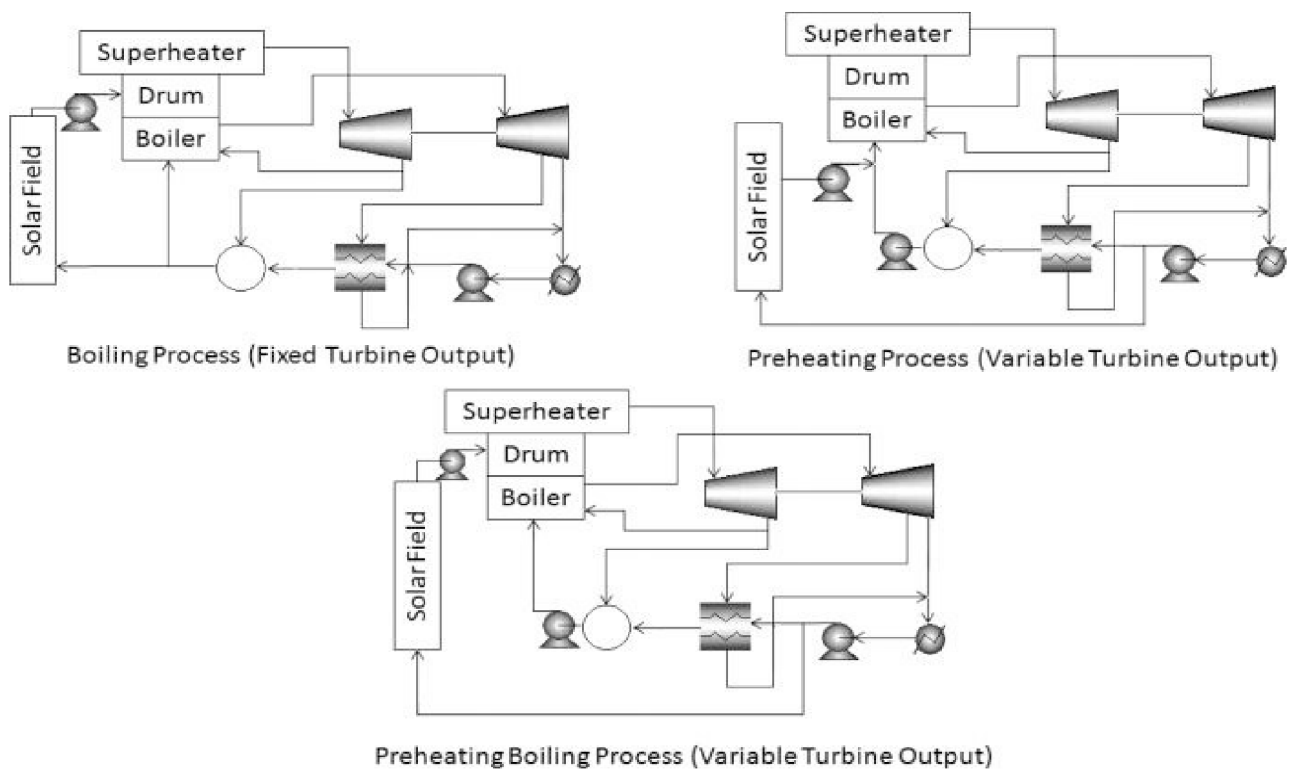
άμεση ακτινοβολία DNI, η διαθεσιμότητα νερού καθώς και η τοπογραφία. Δεδομένου ότι είναι αδύνατο να αξιολογηθούν όλες οι κατάλληλες τοποθεσίες για υβριδικούς σταθμούς CSP με μία μόνο σύγκριση, υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις πολλαπλών κριτηρίων για τον προσδιορισμό της πιο κατάλληλης τεχνολογίας CSP για υβριδοποίηση με σταθμούς ισχύος κύκλου Rankine χρησιμοποιώντας έναν αριθμό καυσίμων.

Μερικά από τα κριτήρια που συχνά χρησιμοποιούνται είναι:

- ευελιξία, η οποία περιλαμβάνει τη μέγιστη απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια, το κατάλληλο εύρος λειτουργίας καθώς και τη μέγιστη κλίση της περιοχής
- μείωση του κινδύνου, που περιλαμβάνει την ωριμότητα της τεχνολογίας, την πολυπλοκότητα του σταθμού και την απλότητα της ενσωμάτωσης
- η μείωση της περιβαλλοντικής επίδρασης, που περιλαμβάνει τη χρήση της γης και την κατανάλωση νερού
- κλιμακούμενο κόστος ενέργειας (LCOE), που σαν έννοια από τη φύση της περιλαμβάνει τις κεφαλαιακές, λειτουργικές και χρηματοδοτικές δαπάνες καθώς και τις παρασιτικές απώλειες

#### **8.4. Επιλογές υβριδοποίησης**

Διάφορες επιλογές υπάρχουν αναφορικά με την ενσωμάτωση ενός σταθμού CSP στον κύκλο Rankine ενός άλλου σταθμού. Περιλαμβάνουν τη θέρμανση του νερού τροφοδοσίας, την αναθέρμανση του ατμού και υψηλής πίεσης/θερμοκρασίας ατμό, σχήμα 40. Ακολουθούν οι περιγραφές των διαφόρων επιλογών οι οποίες έχουν εφαρμοστεί σε σταθμούς αναφοράς σε όλο τον κόσμο, όπως στον Liddell και Kogan Creek στην Αυστραλία, ο Martin Next Generation στις ΗΠΑ και ο Archimede στην Ιταλία.



Σχήμα 40. Απλοποιημένο σχήμα των επιλογών ενσωμάτωσης CSP σε υπάρχοντες σταθμούς. (1) Θέρμανση νερού τροφοδοσίας, (2) ατμός υψηλής πίεσης, (3) γραμμή αναθέρμανσης

#### 8.4.1. Ηλιακά υποβοηθούμενοι σταθμοί παραγωγής ισχύος με καύση άνθρακα

Διάφορες μελέτες ερευνούν τις διαφορετικές επιλογές ένταξης CSP τεχνολογίας σε σταθμούς παραγωγής ισχύος με καύση άνθρακα και από τεχνική και εμπορική άποψη είναι όλες λογικές με θετικά αποτελέσματα αναφορικά με τη μείωση του κόστους των CSP και τις αποδόσεις μετατροπής. Ωστόσο, όταν προτείνονται μετασκευές CSP στους σταθμούς παραγωγής ισχύος με άνθρακα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλα κριτήρια, όπως η ηλικία και ο υπολοιπόμενος χρόνος ζωής του σταθμού, ώστε να αξιολογηθούν οι πραγματικές δυνατότητες μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Με τους σταθμούς καύσης άνθρακα να έχουν από σχεδιασμού τους διάρκεια ζωής 40 περίπου χρόνων και τους σταθμούς CSP να απαιτούν περί τα 20 χρόνια για να αποσβέσουν, οι σταθμοί άνθρακα με μεγαλύτερη ηλικία από 10 με 15 ετών δεν πρέπει να μετασκευάζονται καθώς επεκτείνοντας τη λειτουργία τους μόνο για μία μικρή χρονική περίοδο μπορεί να αντισταθμίσει την εξοικονόμηση εκπομπών αερίου του φαινομένου του θερμοκηπίου από την προσθήκη CSP λόγω της μικρής συνήθως ηλιακής συμβολής, αρκετά μικρότερη από το 10% της δυναμικότητας του σταθμού.

Η υβριδοποίηση της ηλιακής ενέργειας με σταθμούς καύσης άνθρακα μειώνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και δίνει τη δυνατότητα σε ξεπερασμένους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ισχύος να επικαιροποιηθούν. Ενδείκνυται για περιοχές με μεγάλη ποσότητα αποθεμάτων άνθρακα όπως η Κίνα και η Αυστραλία. Η ηλιακή θερμότητα μπορεί

εύκολα να ενσωματωθεί σε σταθμούς καύσης άνθρακα, ώστε να λειτουργεί παράλληλα στο λέβητα ή τους θερμοαντλήρες του νερού τροφοδοσίας.

#### **8.4.1.1. Διαδικασία και διατάξεις υβριδισμού**

Τρεις διαφορετικές διατάξεις χρησιμοποιούνται στους ηλιακά υποβοηθούμενους σταθμούς παραγωγής ισχύος με καύση άνθρακα. (Σχήμα 41)

-Ηλιακά υποβοηθούμενοι με τύμπανο λέβητα :

σε αυτή τη διάταξη υβριδισμού το πεδίο των ηλιακών συλλεκτών λειτουργεί παράλληλα με το λέβητα. Η ηλιακή ενέργεια σε θερμοκρασία περίπου 400 °C μετατρέπει το τροφοδοτικό νερό από τον εξοικονομητή του λέβητα σε κορεσμένο ατμό που στη συνέχεια επιστρέφεται στο τύμπανο του λέβητα ορυκτών καυσίμων.

-Ηλιακή ενέργεια σε συνδυασμό με το νερό τροφοδοσίας :

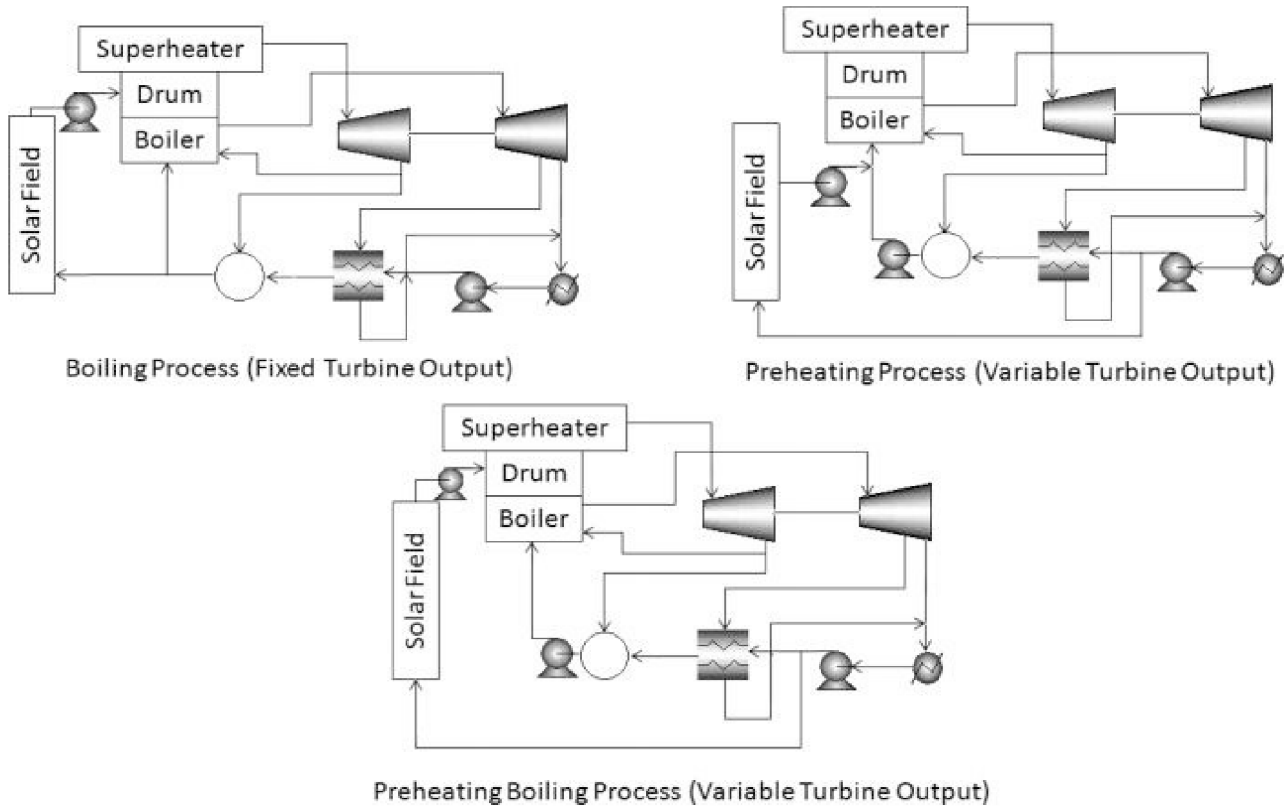
σε αυτή τη διάταξη η ηλιακή ενέργεια σε θερμοκρασία περίπου 300 °C δρα ως πηγή θερμότητας για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας, αντί για τη χρήση του εξαγόμενου από την τουρμπίνα ατμού. Το ηλιακό πεδίο συνδέεται παράλληλα με τους θερμοαντλήρες του νερού τροφοδοσίας του μπλοκ ισχύος. Η ηλιακή θερμότητα στους 300 °C μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας στο επίπεδο που απαιτείται για το λέβητα, συνήθως γύρω στους 220 °C. Ο ατμός που δεν χρειάζεται να εξαχθεί μετατρέπεται περεταίρω στην τουρμπίνα, κι έτσι παράγεται περισσότερο έργο στην έξοδο από τον ατμοστρόβιλο συγκριτικά με την ποσότητα που παράγεται πριν την υβριδοποίηση χρησιμοποιώντας την ίδια ποσότητα άνθρακα στην είσοδο. Με τον τρόπο αυτό ένας συμβατικός σταθμός παραγωγής ισχύος με καύση άνθρακα επικαιροποιείται σε ένα σύστημα μεγαλύτερης δυναμικότητας χωρίς αυτό να συνεπάγεται σημαντικό κόστος.

-Ηλιακά υποβοηθούμενοι με υπερθερμαντήρα :

αυτή η διάταξη περιλαμβάνει τη χρήση της ηλιακής θερμότητας για να παράγει μέρος του υπέρθερμου ατμού ο οποίος στη συνέχεια εγχύεται εντός του ατμοστρόβιλου. Το πεδίο των ηλιακών συλλεκτών λειτουργεί παράλληλα με το λέβητα.

Από τις τρεις αυτές διατάξεις, ο συνδυασμός της ηλιακής θερμότητας με το νερό τροφοδοσίας είναι η πιο εύκολη στην εγγραφή. Αυτή η ηλιακά υποβοηθούμενη τεχνολογία μπορεί να ενημερώσει τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα με ισχύ μικρότερη των 300 MW, αυξάνοντας έτσι την ισχύ τους. Αντίθετα με τους ηλιακά αυτόνομους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, αυτή η τεχνολογία υβριδοποίησης της ηλιακής ενέργειας δεν απαιτεί εξοπλισμό θερμικής αποθήκευσης. Επίσης, οι υπάρχοντες θερμοαντλήρες υδροδότησης λειτουργούν παράλληλα με ένα θερμοαντήρα υδροδότησης οδηγούμενο από ηλιακή ενέργεια. Με τον τρόπο αυτό οι υβριδικοί ηλιακοί σταθμοί μπορούν να εγγυηθούν τη λειτουργία τους σε πλήρη ισχύ ακόμη και στην περίπτωση χαμηλής

ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 41. Σχηματικές αναπαραστάσεις των τριών διαδικασιών ηλιακής ενίσχυσης ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα

πάνω αριστερά:διαδικασία βρασμού

πάνω δεξιά:διαδικασία θέρμανσης νερού τροφοδοσίας

κάτω:διαδικασία βρασμού και θέρμανσης νερού τροφοδοσίας

#### 8.4.1.2. Παραδείγματα

Η πρόσφατη ενίσχυση του σταθμού παραγωγής με καύση άνθρακα Liddell ισχύος 2 GW με 9.3 MW<sub>th</sub> CSP τεχνολογία σε συνδυασμό με νερό τροφοδοσίας είναι ένα ενδιαφέρον παράδειγμα καθώς μειώνει τις εκπομπές αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου κατά περίπου 5000 tη/έτος που ισοδυναμεί μόνο με 2,8 ώρες λειτουργίας πλήρους φορτίου του σταθμού με καύση άνθρακα με ένταση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ίση με 892 kg/MWh.





Εικόνα 29. Φωτογραφία του σταθμού Liddell όπου είναι εμφανές τμήμα του ηλιακού πεδίου

Η πρώτη φάση ξεκίνησε το 2004 με την παραγωγή 1 MW ηλιακά παραγόμενου ατμού για να αυξήσει την παραγωγή του σταθμού άνθρακα και η δεύτερη φάση ξεκίνησε το 2008 και ολοκληρώθηκε το 2011 με την προσθήκη 3 MW συστήματος ηλιακού-θερμικού ατμού.

Για την υβριδοποίηση του σταθμού δόθηκαν 9,23 εκατομμύρια δολάρια ως επιδότηση από το Κυβερνητικό Πρόγραμμα της Νέας Νότιας Ουαλίας για την Κλιματική Αλλαγή και το Ταμείο Ανάπτυξης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NSW Government Climate Change Fund Renewable Energy Development Program).

Η τεχνολογία CSP που χρησιμοποιείται είναι οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel και συγκεκριμένα η τεχνολογία CLFR (compact linear fresnel reflector) με περισσότερους από έναν γραμμικούς δέκτες και τους ανακλαστές να διαθέτουν μηχανισμό εντοπισμού ώστε να εστιάζουν σε οποιοδήποτε δέκτη κατά τη διάρκεια της ημέρας κι έτσι να αποφεύγεται η σκίαση και ο αποκλεισμός μεταξύ των συλλεκτών.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα χαρακτηριστικά και τα στοιχεία λειτουργίας του σταθμού.

### Liddell Power Station

Τεχνολογία	LFR
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	13550
Εκκίνηση παραγωγής	10/2012
Είδος έργου	εμπορικό
<b>Ηλιακό πεδίο</b>	
Έκταση ανοίγματος(τμ)	18490
Αριθμός σειρών	4
Μήκος σειράς(μ)	403
Περιγραφή συλλέκτη	Fresnel
HTF	νερό/ατμός
Θερμοκρασία εισόδου(C)	140
Θερμοκρασία εξόδου(C)	270
<b>Μπλοκ ισχύος</b>	
Μικτή ισχύς τουρμπίνας(MW)	9
Καθαρή ισχύς τουρμπίνας(MW)	9
Περιγραφή τουρμπίνας	ο ηλιακός λέβητας 9 MWth τροφοδοτεί με ατμό τον υπάρχον σταθμό με κάυση άνθρακα ισχύος 2000MW
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	55
Μέθοδος ψύξης	ξηρή ψύξη
Περιγραφή μεθόδου ψύξης	αερόψυκτοι συμπυκνωτές
Συνθήκες σημείου σχεδιασμού	270C, 55 bar, μέγιστη θερμική έξοδος 9.3 MWth

Πίνακας 15. Στοιχεία του υβριδικού σταθμού Liddell

Ένα άλλο παράδειγμα των θετικών οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων της υβριδοποίησης ηλιακής τεχνολογίας με σταθμούς καύσης άνθρακα είναι η ηλιακή ενίσχυση 44 MW<sub>e</sub> του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με άνθρακα ισχύος 750 MW<sub>e</sub> στο Κουίνσλαντ της Αυστραλίας. Ο σταθμός Kogan Creek Solar Boost πρόκειται να γίνει ο μεγαλύτερος υβριδικός σταθμός. Το έργο αποτελείται από ηλιακή-θερμική ενίσχυση του υπάρχοντος σταθμού Kogan Creek Power Station με τεχνολογία CLFR(compact Linear Fresnel Reflector) αυξάνοντας έτσι την ηλεκτρική παραγωγή του σταθμού και την αποδοτικότητα των καυσίμων. Η ηλιακή προσθήκη θα επιτρέψει στο σταθμό, που είναι ένας από τους πιο αποδοτικούς σταθμούς καύσης άνθρακα στην Αυστραλία, να παράγει περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα με την ίδια ποσότητα άνθρακα. Το έργο θα βοηθήσει στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 35.600 tη ετησίως που ισοδυναμεί με την απόσυρση 11.000 αυτοκινήτων από την κυκλοφορία ενώ η παραγωγή του θα είναι ικανή να ηλεκτροδοτήσει 5.000 επιπρόσθετα σπίτια.

Το έργο κόστους περίπου AU\$105 εκατομμυρίων έλαβε χρηματοδότηση από το Πρόγραμμα Επίδειξης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Renewable Energy Demonstration Program) ύψους 34 εκατομμυρίων δολларίων. Ο υβριδικός σταθμός θα ξεκινήσει τη λειτουργία του το 2015 και η ηλεκτρική ενέργεια που θα παράγεται θα γίνει αντικείμενο διαπραγμάτευσης στην Εθνική αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας της Αυστραλίας (Australia's National Electricity Market), ως μέρος της συνολικής παραγωγής του

σταθμού. Ακολουθεί πίνακας με τα κύρια στοιχεία του σταθμού.



Εικόνα 30. Προσομοίωση του σταθμού Kogan Creek μετά την ολοκλήρωσή του

<b>Kogan Creek Solar Boost</b>	
Τεχνολογία	LFR
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	44000
Έκταση(εκτάρια)	30
Εκκίνηση παραγωγής	2015
Είδος έργου	εμπορικό
<b>Ηλιακό πεδίο</b>	
Αριθμός σειρών	14
Μήκος σειρών(μ)	500
Πλάτος καθρέυτη(μ)	36
Περιγραφή συλλέκτη	ένας δέκτης μονής διέλευσης που μεταφέρει υπέρθερμο ατμό νερό/ατμός
HTF	νερό/ατμός
Θερμοκρασία εισόδου(C)	186
Θερμοκρασία εξόδου(C)	370
<b>Μπλοκ ισχύος</b>	
Μικτή ισχύς τουρμπίνας(MW)	44
Καθαρή ισχύς τουρμπίνας(MW)	44
Είδος εξόδου	Ατμός Rankine
Πίεση κύκλου ισχύος(bar)	60
Μέθοδος ψύξης	ξηρή ψύξη
Περιγραφή μεθόδου ψύξης	αερόψυκτοι συμπυκνωτές

Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά στοιχεία του σταθμού KoganCreek

#### **8.4.2. Εφεδρεία και ενίσχυση των ηλιακών θερμοηλεκτρικών σταθμών με ορυκτά καύσιμα**

Πολλοί ηλιακοί θερμοηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα ως εφεδρική πηγή ενέργειας όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί. Αυτή είναι η πιο κοινή μορφή υβριδισμού.

Η πιο γνωστή τεχνολογία εφεδρικού συστήματος με ορυκτά καύσιμα είναι οι εννέα σταθμοί SEGS (Solar Electric Generating Systems) συνολικής ισχύος 354 MW που κατασκευάστηκαν από το 1984 έως το 1991 από την Αμερικάνικη/Ισραηλινή εταιρία Luz International στην έρημο Μοχάβι στην Καλιφόρνια.

Όπως έχει προαναφερθεί, οι σταθμοί αυτοί χρησιμοποιούν την τεχνολογία των παραβολικών κοίλων συλλεκτών (parabolic trough collectors-PTCs) για τη θέρμανση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας (HTF) στους 393 °C το οποίο στη συνέχεια επιστρέφει σε μία σειρά από εναλλάκτες θερμότητας όπου χρησιμοποιείται για την παραγωγή υπερθερμανσμένου ατμού σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία 371 °C. Μετά το πέρασμα του HTF από τους εναλλάκτες θερμότητας, το ψυγμένο HTF επανακυκλοφορεί μέσα στο ηλιακό πεδίο. Ο υπερθερμανσμένος ατμός στη συνέχεια τροφοδοτεί μία συμβατική τουρμπίνα αναθέρμανσης ατμού για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο ατμός που εξατμίζεται από την τουρμπίνα συμπυκνώνεται και επιστρέφει στους εναλλάκτες θερμότητας και τις αντλίες νερού τροφοδοσίας για να μετασχηματιστεί και πάλι σε ατμό. Με επαρκή ηλιακή ακτινοβολία οι σταθμοί μπορούν να λειτουργούν σε πλήρη ισχύ χρησιμοποιώντας αποκλειστικά ηλιακή ενέργεια.

Ωστόσο, η ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί πάντα. Για να μπορούν οι σταθμοί αυτοί να πετυχαίνουν ονομαστική ηλεκτρική έξοδο κατά τη διάρκεια περιόδων με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία, όπως σε συνθήκες συννεφιάς ή τη νύχτα, χρησιμοποιείται εφεδρικό σύστημα φυσικού αερίου το οποίο μπορεί να παρέχει μέχρι και το 25% της ετήσιας ενέργειας των σταθμών. Η εφεδρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υπερθέρμανση του ηλιακά παραγόμενου ατμού (SEGS I) από 307 °C κατά την έξοδο από το ηλιακό πεδίο στους 415 °C, έχοντας ως αποτέλεσμα αυξημένη απόδοση του κύκλου Rankine. Όταν είναι διαθέσιμη ανεπαρκής ηλιακή ενέργεια, η εφεδρική ενέργεια μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε ένα ξεχωριστό λέβητα με καύση ορυκτών για την παραγωγή ατμού (SEGS II-VII), ή να χρησιμοποιηθεί σε ένα θερμαντήρα του HTF παράλληλα με το ηλιακό πεδίο (SEGS VIII-IX).

##### **8.4.2.1. Οικονομική επίδραση**

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται μία σύγκριση της οικονομικής επίδοσης των σταθμών PTC σε κατάσταση λειτουργίας με χρήση αποκλειστικά ηλιακής ενέργειας και υβριδική κατάσταση λειτουργίας. Οι πληροφορίες κόστους που παρουσιάζονται είναι παρωχημένες αλλά παρόλα αυτά κατάλληλες για να πραγματοποιηθεί μία σύγκριση και να

καθορισθεί ο τρόπος που οι διαφορετικές διαμορφώσεις σχετίζονται μεταξύ τους.

Το κόστος ισχύος που αναφέρεται στον 30 MW σταθμό SEGS VI είναι 0,17 \$/kWh για την αποκλειστική χρήση ηλιακής ενέργειας και 0,141 \$/kWh για υβριδική λειτουργία με 25% εφεδρεία κατά το 2002. Στους σταθμούς που σχεδιάονται για το άμεσο μέλλον, η απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια αναμένεται να βελτιωθεί κατά 1/3 περίπου συγκριτικά με αυτή των SEGS, γεγονός που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε νέους ηλιακούς δέκτες και τη διαμόρφωση των συγκροτημάτων σε σφαιρική άρθρωση. Τα μοναδιαία κόστη κεφαλαίου είναι χαμηλότερα εξαιτίας της μεγαλύτερης ισχύος του σταθμού και του αποδοτικότερου ηλιακού πεδίου, που μειώνει το απαιτούμενο μέγεθος του πεδίου. Το κλιμακούμενο κόστος ενέργειας (Levelied Cost of Energy-LCOE) μειώνεται σε 0,11 \$/kWh για αποκλειστική χρήση της ηλιακής ενέργειας και 0,096 \$/kWh για τον υβριδικό σταθμό. Συνολικά, η υβριδοποίηση της ηλιακής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα οδηγεί σε μείωση του κόστους του ηλεκτρισμού από έναν ηλιακό σταθμό ισχύος κατά 12-17% συγκριτικά με την κατάσταση αποκλειστικής χρήσης ηλιακής ενέργειας.

	30MW SEGS VI		Σταθμός PTC στο άμεσο μέλλον	
	αποκλειστική χρήση ηλιακής	υβριδική λειτουργία(25%)	αποκλειστική χρήση ηλιακής	υβριδική λειτουργία(25%)
Μέγεθος σταθμού(MW)	30	30	50	50
Επιφάνεια ανοίγματος συλλέκτη (Τ.ΧΜ)	0.188	0.188	0.312	0.312
Θερμική αποθήκευση(h)	0	0	0	0
Απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική(%)	10.6	10.7	13.9	14.1
Συντελεστής ισχύος σταθμού	22.2	30.4	29.2	39.6
Κόστος κεφαλαίου(\$/kW)	3008	3204	2745	2939
Κόστος λειτουργίας και διατήρησης(\$/kWh)	0.046	0.034	0.024	0.018
Κόστος καυσίμου(\$/kWh)	0	0.013	0	0.01
LCOE 2002(\$/kWh)	0.17	0.141	0.11	0.096

Πίνακας 17. Σύγκριση αποκλειστικής χρήσης ηλιακής ενέργειας και υβριδικής λειτουργίας

#### 8.4.3. Υβριδοποίηση τεχνολογιών CSP με συστήματα φυσικού αερίου

Επί του παρόντος, οι περισσότεροι υβριδικοί σταθμοί CSP λειτουργούν ως σταθμοί ISCC (Integrated Solar Combined Cycle) σε συνδυασμό με σταθμούς τουρμπίνας αερίου συνδυασμένου κύκλου (Combined Cycle Gas Turbine-CCGT) και σταθμοί αναφοράς υπάρχουν στις ΗΠΑ, το Μαρόκο και την Αιγύπτο. Αυτοί οι σταθμοί χρησιμοποιούν τη

συνιστώσα CSP για να παρέχουν επιπρόσθετο κορεσμένο ατμό στο υψηλής πίεσης τύμπανο της γεννήτριας ατμού ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery Steam Generator-HRSG) όπου η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων της τουρμπίνας αερίου υπερθερμαίνει την ποσότητα συνδυασμένου ατμού. Η θέρμανση του νερού τροφοδοσίας θα ήταν μία ακόμη επιλογή αλλά δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμη.

Η συνιστώσα CSP θα μπορούσε να παρέχει παρόμοια παράμετρο ατμού με την HRSG στην υψηλής πίεσης τουρμπίνα ατμού και ο πρώτος σταθμός βρίσκεται στο Priolo Gargallo στη Σικελία. Αυτός ο σταθμός αναφοράς 5 MW<sub>e</sub> χρησιμοποιεί την τεχνολογία παραβολικών κοίλων συλλεκτών με τηγμένα άλατα για να παρέχει ατμό θερμοκρασίας έως και 538°C στην 760 MW<sub>e</sub> τουρμπίνα ατμού της τουρμπίνας αερίου συνδυασμένου κύκλου.

Σχεδόν όλοι οι σταθμοί CSP έχουν ένα θερμαντήρα εκκίνησης/εφεδρείας με καύση φυσικού αερίου αλλά οι θερμαντήρες αυτοί δεν είναι σχεδιασμένοι για να παρέχουν πλήρη ισχύ ή συνεχή λειτουργία αλλά για την έναρξη της μονάδας, τη σταθεροποίηση της παραγωγής και τη λειτουργία έκτακτης ανάγκης. Ωστόσο, ένας λέβητας αερίου πλήρους ισχύος παράλληλα με τη συνιστώσα CSP είναι μία τεχνική επιλογή αλλά θα είχε μικρή απόδοση μετατροπής φυσικού αερίου συγκριτικά με ένα σταθμό τουρμπίνας αερίου συνδυασμένου κύκλου. Γι αυτό το λόγο δεν είναι μία επιλογή που προτείνεται.

Για τους νέους σταθμούς ο συνδυασμός CSP και φυσικού αερίου έχει τη δυνατότητα να μειώσει το LCOE από \$243/MWh σε \$175/MWh. Αυτή η μείωση κόστους κατά 38% είναι σημαντική και ίσως επιταχύνει την ανάπτυξη των CSP τεχνολογιών σε χαμηλής χονδρικής τιμής αγορές ηλεκτρισμού όπως η Αυστραλία. Μετασκευές των CSP σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις τουρμπίνας αερίου συνδυασμένου κύκλου μπορεί να μειώσει ακόμη περισσότερο το LCOE, για παράδειγμα US\$150/MWh. Παρά τη χρήση ενός ορυκτού καυσίμου και ανάλογα με τη διαμόρφωση ISCC που χρησιμοποιείται η ηλιακή συμβολή μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 50% ενώ η χρήση του φυσικού αερίου για την περαιτέρω υπερθέρμανση του ατμού που παράγεται από την τεχνολογία CSP έχει τη δυνατότητα να επιτύχει ηλιακή συμβολή της τάξης του 80% και πάνω.

#### **8.4.3.1. Προηγμένα συστήματα υβριδοποίησης**

Ο όρος αναφέρεται στο συνδυασμό της ηλιακής ενέργειας με ένα κύκλο τουρμπίνας αερίου και περιλαμβάνει δύο κύριες κατηγορίες: τα συστήματα που χρησιμοποιούν την ηλιακή θερμότητα για την προθέρμανση του αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή σε ένα κύκλο τουρμπίνας αερίου και αυτά που χρησιμοποιούν την ηλιακή θερμότητα για την αφαίρεση του άνθρακα από τα ορυκτά καύσιμα για την ηλεκτρική παραγωγή. Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει μάλιστα υψηλής και μέσης θερμοκρασίας θερμοχημικές διαδικασίες υβριδοποίησης. Στο κείμενό μας εστιάζουμε στην ηλιακή προθέρμανση του αέρα και στην τεχνολογία μέσης θερμοκρασίας ηλιακής θερμοχημικής υβριδοποίησης.

- Υψηλής θερμοκρασίας ηλιακή προθέρμανση αέρα

Η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια μπορεί να χησιμοποιηθεί για την προθέρμανση πεπιεσμένου αέρα σε μία τουρμπίνα αερίου πριν εισέλθει στο θάλαμο καύσης. Δεν υπάρχει λοιπόν ανάγκη για χρήση ορυκτων καυσίμων για την προθέρμανση του αέρα από 300 °C σε 1200 °C και η ηλιακή θερμότητα μετατρέπεται με όλη την υψηλή θερμική απόδοση ενός σύγχρονου ανακτηθέντος ή συνδυασμένου κύκλου τουρμπίνας αερίου.

Η ηλιακή προθέρμανση αέρα έχει εξαιρετική δυνατότητα να μειώσει τα κόστη της ηλιακής θερμικής ενέργειας και θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ διάστημα επιπέδων ισχύος (από 1 έως 100 MW). Στη συνέχεια αναφέρονται κάποια προγράμματα που περιλαμβάνουν την ηλιακή προθέρμανση αέρα.

### *Τυπικά προγράμματα*

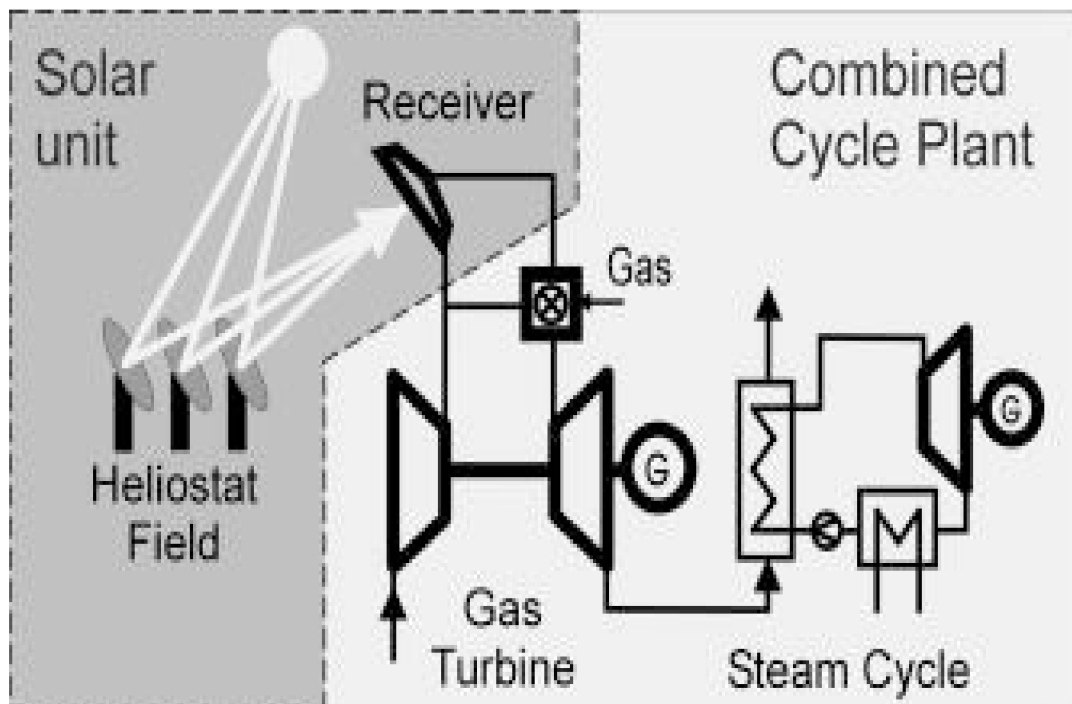
Το πρόγραμμα SOLGATE ερεύνησε τις δυνατότητες συνδυασμού της ηλιακής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα σε έναν υβριδικό σταθμό κι έδειξε την εφικτότητα του αποδεικνύοντας ότι μία τουρμπίνα αερίου μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να υποστηρίξει διπλή λειτουργία. Πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι σε διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας που κατέληξαν σε διαφορετικά ηλιακά μερίδια και ποικίλα κόστη παραγωγής ηλεκτρισμού. Στο πρόγραμμα SOLGATE που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και επιδείχθηκε στο ερευνητικό κέντρο Plataforma Solar de Almeria (PSA), επιτεύχθηκαν στην έξοδο του δέκτη θερμοκρασίες πεπιεσμένου αέρα μέχρι 960 °C.

Ο στόχος του στενά συνδεδεμένου προγράμματος REFOS είναι να αναπτύξει, κατασκευάσει και ελέγξει αρθρωτούς πεπιεσμένους ογκομετρικούς δέκτες υπό συνθήκες λειτουργίας αντιπροσωπευτικές αυτών που συναντώνται όταν οι δέκτες ενσωματώνονται με τουρμπίνες αερίου. Το επίκεντρο του προγράμματος είναι ο έλεγχος της ηλιακής προθέρμανσης του αέρα, συνοδευόμενος από βασική έρευνα στα υλικά. Το πρόγραμμα καθοδηγείται από το Ινστιτούτο Πλανητικής Έρευνας του Γερμανικού Κέντρου Αεροδιαστημικής (DLR) και πραγματοποιείται σε συνεργασία με το ερευνητικό κέντρο CIEMAT στην Ισπανία και τη γερμανική εταιρία G+H. Ένα διάγραμμα της αρχής του έργου REFOS φαίνεται στο Σχήμα 42.

Ένας δέκτης πεπιεσμένου ογκομετρικού αέρα με δευτερεύοντα συγκεντρωτή έχει αναπτυχθεί και ελεγχθεί επιτυχώς στο ερευνητικό κέντρο PSA. Ένας αριθμός από ενότητες δεκτών, καθεμία από τις οποίες αποτελείται από μία μονάδα πεπιεσμένου δέκτη και ένα δευτερεύοντα συγκεντρωτή με εξαγωγικό άνοιγμα εισόδου τοποθετήθηκαν στον πύργο ενός ηλιακού σταθμού.

Καθώς οι δέκτες πεπιεσμένου αέρα στους σταθμούς ηλιακών πύργων μπορούν να θερμάνουν τον συμπιεσμένο αέρα σε μία τουρμπίνα αερίου σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1.000 °C, είναι θεωρητικά εφικτό ένα ηλιακό μερίδιο της τάξης του 40-90% και ετήσια ηλιακά μερίδια μεγαλύτερα του 30% ως βασικό φορτίο. Τα αποτελέσματα από μία εξέδρα δοκιμών όπου προσομοιώνεται ένας υβριδικός ηλιακός σταθμός με τουρμπίνα

αερίου ισχύος  $30 \text{ MW}_e$  με δέκτη πεπιεσμένου ογκομετρικού αέρα δείχνουν ότι το θερμικό ηλιακό μερίδιο είναι 28,6% για την ημερήσια λειτουργία και 15% για τη λειτουργία πλήρους απασχόλησης. Η αντίστοιχη καθαρή απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 18,1% και 15,3%, αντίστοιχα.



Σχήμα 42. Σύστημα ηλιακής προθέρμανσης αέρα

### Οικονομικές δυνατότητες

Η επένδυση που απαιτείται για ένα υβριδικό σταθμό εξαρτάται από το επίπεδο ισχύος του σταθμού και το ηλιακό μερίδιο που προτείνεται, το οποίο διέπεται από τη μέγιστη θερμοκρασία εξόδου του δέκτη. Η τρέχουσα εκτίμηση δείχνει ότι για ένα υβριδικό ηλιακό σταθμό με τουρμπίνα αερίου ισχύος  $30 \text{ MW}_e$  με δέκτη πεπιεσμένου ογκομετρικού αέρα δείχνουν ότι το δυνητικό ηλιακό LCOE (Levelied Cost Of Electricity) είναι  $\$0,1275-\$0,1367/\text{kWh}$ .

Με τη χρήση σύγχρονων συστημάτων τουρμπίνας αερίου σε λειτουργία ανάκτησης ή συνδυασμένου κύκλου, οι αποδόσεις μετατροπής για την ηλιακή θερμότητα θα αυξηθούν σε ποσοστό μεγαλύτερο από 50%. Για δεδομένο ηλιακό μερίδιο, αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο μέγεθος πεδίου ηλιοστατών και χαμηλότερο συνολικό κόστος για το ηλιακό στοιχείο της επένδυσης συγκριτικά με την επένδυση που απαιτείται για την ηλιακή παραγωγή ατμού. Έτσι τα ηλιακά συστήματα με τουρμπίνες αερίου αναμένεται να έχουν εξαιρετικές δυνατότητες για επιτυχία στην αγορά σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα.



- Ηλιακοί σταθμοί θερμοχημικής υβριδοποίησης

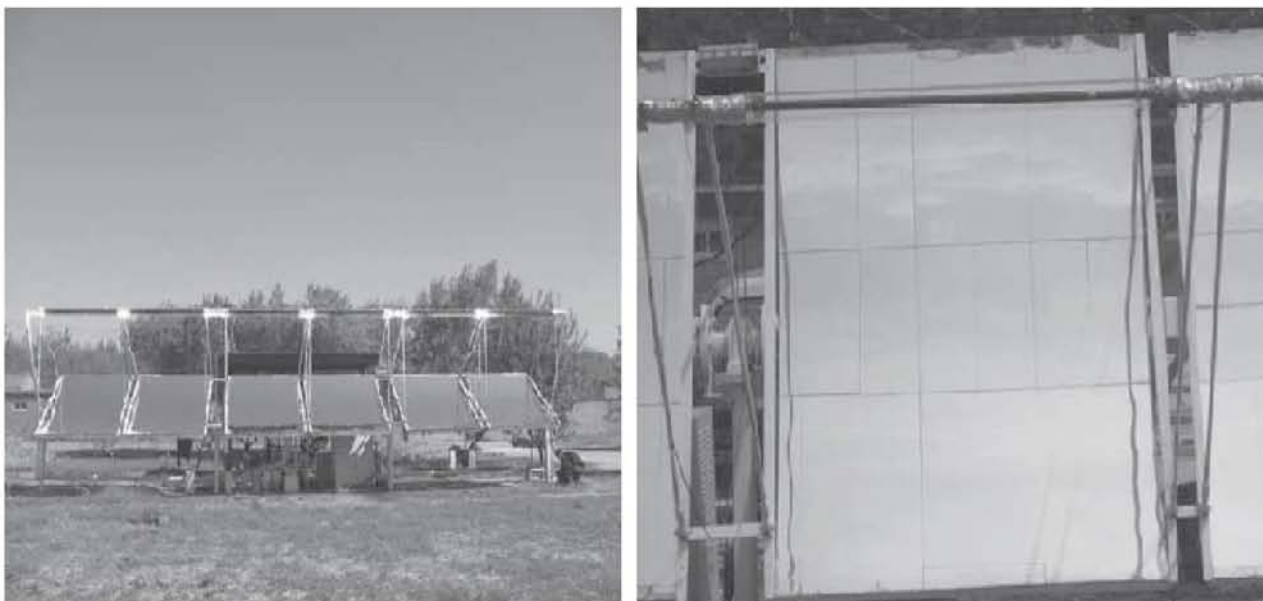
Οποιοδήποτε ηλιακά προερχόμενο καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα σταθμό συνδυασμένου κύκλου με ένα κατάλληλο προσαρμοσμένο σύστημα καύσης. Μία από τις πιο προφανείς στρατηγικές βραχυπρόθεσμα είναι η ηλιακά οδηγούμενη αναμόρφωση φυσικού αερίου. Αυτό θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μαζί με συνδυασμένου κύκλου παραγωγή ισχύος που αλλιώς θα έκαιγε απευθείας φυσικό αέριο.

#### *Περιπτωσιολογική μελέτη μέσης θερμοκρασίας θερμοχημικής υβριδοποίησης*

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται σύντομα ένα παράδειγμα αποδοτικού οικονομικά μέσης θερμοκρασίας ηλιακού θερμοχημικού υβριδικού σταθμού. Αποτελείται από δύο κύριες ολοκληρωμένες διαδικασίες: μία ηλιακή θερμοχημική διαδικασία σε θερμοκρασία περίπου 200 °C έως 300 °C και μία τουρμπίνα αερίου συνδυασμένου κύκλου με παραγωγή ατμού διπλής πίεσης ανάκτησης θερμότητας. Η ηλιακή θερμότητα που συλλέγεται στους 200-300 °C παρέχει τη θερμότητα που απαιτείται για τη διάσπαση της μεθανόλης. Το ηλιακό καύσιμο που παράγεται με συνθετικό αέριο (CO and H<sub>2</sub>) δρα ως καύσιμο για την τροφοδότηση του συνδυασμένου κύκλου, που στη συνέχεια παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η καθαρή απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια αναμένεται να ισούται με 35%, η οποία σχετίζεται με την αναβάθμιση του ενεργειακού επιπέδου της μέσης θερμοκρασίας ηλιακής θερμότητας σε ένα υψηλό επίπεδο χημικής ενέργειας μέσα στο καύσιμο.

Ο παραβολικός σωληνοειδής ηλιακός δέκτης/αντιδραστήρας είναι το πιο σημαντικό συστατικό της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Ένα πρότυπο 15 KW ηλιακού δέκτη/αντιδραστήρα μέσης θερμοκρασίας έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 31.

Το πρότυπο αποτελείται από παραβολικούς κοίλους συλλέκτες (PTCs) επιφάνειας 30 m<sup>2</sup> με αναλογία συγκέντρωσης 30 και έναν αξονικό, χάλκινο σωλήνα-αντιδραστήρα που περικλείεται από ένα κενό, διάφανο, γυάλινο περίβλημα. Ο σωληνοειδής δέκτης/αντιδραστήρας τοποθετείται κατά μήκος της εστιακής γραμμής του παραβολικού κοίλου συγκεντρωτή που διαθέτει μονοαξονικό σύστημα παρακολούθησης και είναι προσανατολισμένος σε μία κατεύθυνση ανατολής-δύσης. Η τεχνολογία αυτή μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε συμπαραγωγή ενέργειας, ψύξης και θέρμανσης χρησιμοποιώντας τουρμπίνες αερίου και μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα βιώσιμο σημείο εκκίνησης για την ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας παραγωγής οικονομικής ηλιακής θερμοχημικής ενέργειας σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα.



Εικόνα 31. Φωτογραφία, μακρινή και κοντινή, του πρότυπου συλλέκτη/αντιδραστήρα 5 kW

#### 8.4.4. Υβριδοποίηση τεχνολογιών CSP με βιομάζα και απόβλητα υλικά

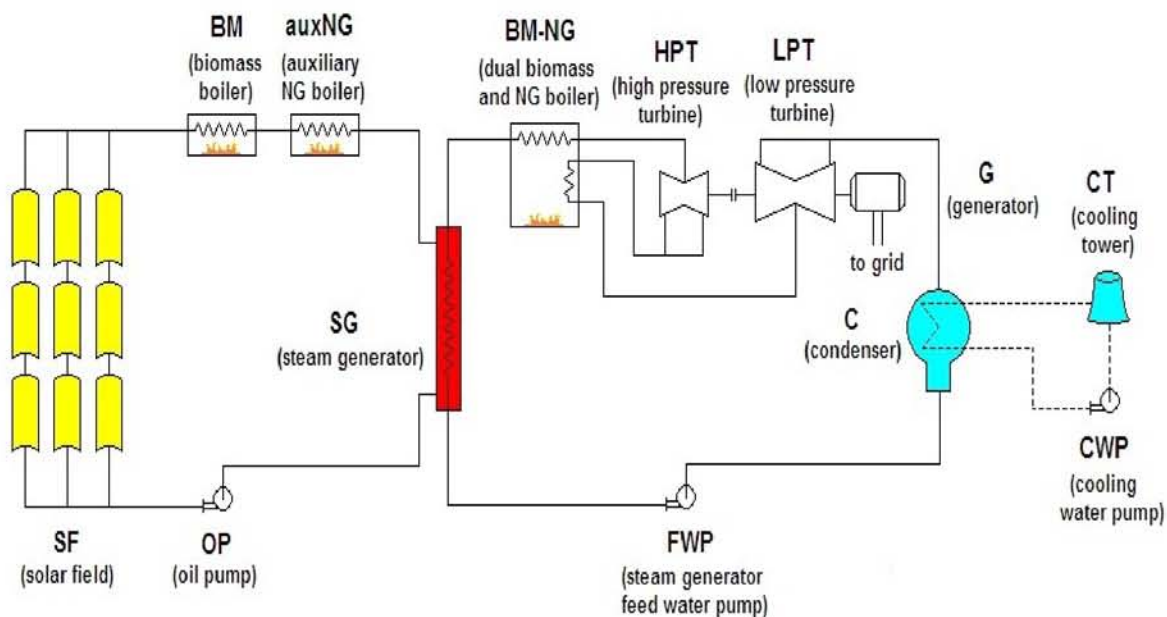
Κάποιες πρώτες προσπάθειες συνδυασμού CSP και βιομάζας συζητήθηκαν κατά τη δεκαετία του 1980 με τα συστήματα πιάτου-μηχανής. Όμως, για διάφορους λόγους κανένας σταθμός δε χτίστηκε και χρειάστηκαν άλλα 25 χρόνια μέχρι την κατασκευή του πρώτου εμπορικού υβριδικού σταθμού CSP με βιομάζα που βρίσκεται στην Ισπανία 150 km δυτικά της Βαρκελώνης. Ο σταθμός Termosolar Borges συνολικής ισχύος 22,5 MW<sub>e</sub> χρησιμοποιεί την τεχνολογία παραβολικών κοίλων συλλεκτών με θερμικό έλαιο ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας.

Ο σταθμός διαθέτει δύο μονάδες βιομάζας (2x22 MW θερμική ισχύς) που εφοδιάζουν την απαιτούμενη θερμική ενέργεια στο μπλοκ ισχύος επιτρέποντας έτσι την ηλεκτρική παραγωγή με ελάχιστη ή και μηδενική ηλιακή ακτινοβολία αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση και κάνοντας δυνατή καλύτερη χρήση του θερμικού μπλοκ αλλά και της ηλεκτρικής υποδομής του σταθμού. Ο σταθμός χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό από απόβλητα δασικής βιομάζας (κύριο καύσιμο) και ενεργειακών φυτών.

Συγκεκριμένα, το θερμικό μπλοκ περιλαμβάνει ένα λέβητα βιομάζας 22 MW<sub>th</sub> (BM), ένα λέβητα βιομάζας και φυσικού αερίου 14 MW<sub>th</sub> (BM-NG), ένα συμβατικό βοηθητικό λέβητα φυσικού αερίου 10 MW<sub>th</sub> (auxNG) και μία γεννήτρια ατμού (SG). Ο BM εισάγεται σε σειρά με το ηλιακό πεδίο. Η καύση του αερίου προορίζεται για τη διαμόρφωση και εφεδρεία της τροφοδότησης.

Το ηλεκτρικό μπλοκ αποτελείται από ένα σύστημα στροβίλου ατμού-γεννήτριας 22 MW<sub>e</sub> κι ένα μετασηματιστή ισχύος. Το ηλεκτρικό μπλοκ μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική στις τουρμπίνες ατμού και στη συνέχεια η γεννήτρια τη μετατρέπει σε

ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 43. Σχηματικό διάγραμμα ενός υβριδικού σταθμού PTC με βιομάζα

Ο σταθμός διαθέτει και βοηθητικά συστήματα για τον τεμαχισμό και την αποθήκευση της βιομάζας καθώς και συστήματα ελέγχου.

Όσον αφορά τη λειτουργία του, οι παραβολικοί συλλέκτες του ηλιακού πεδίου απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία για τη θέρμανση ενός θερμικού ελαίου σε θερμοκρασία μέχρι 400 °C. Στη γεννήτρια ατμού το θερμικό έλαιο παράγει κορεσμένο ατμό σε πίεση 40 bar και ο λέβητας βιομάζας-φυσικού αέριου υπερθερμαίνει τον ατμό αυτό στους 520 °C. Όταν το ηλιακό τμήμα δεν είναι λειτουργικό, σε συνθήκες συννεφιάς ή κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο μεγαλύτερος λέβητας βιομάζας θερμαίνει το θερμικό έλαιο στους 400 °C το οποίο στη συνέχεια οδηγείται στο μπλοκ ισχύος. Ο δεύτερος λέβητας βιομάζας υπερβαίνει το όριο θερμοκρασίας του θερμικού ελαίου των 400 °C, θερμαίνοντας τον παραγόμενο ατμό.

Η σχεδιασμένη είσοδος βιομάζας είναι περίπου 85.000 τη το χρόνο σε υγρασία 45%, που συλλέγεται σε μία εκτεταμένη περιοχή στην Καταλονία, δασικής προέλευσης που προέρχεται από δάση που βρίσκονται κατά προσέγγιση σε ακτίνα 80 km από το σταθμό.



Εικόνα 32. Φωτογραφία του σταθμού Termosolar Borges

Η συνολική ισχύς των λέβητων βιομάζας είναι  $36 \text{ MW}_{\text{th}}$ . Η επιλογή αυτού του επιπέδου ισχύος για το λέβητα έχει ως κίνητρο το να είναι σε θέση να επιτύχει τουλάχιστον το 50% του όγκου εργασίας της τουρμπίνας κατά τη νυχτερινή λειτουργία. Οι λέβητες βιομάζας αποτελούνται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Σύστημα τροφοδοσίας βιομάζας
- Φούρνο για τη βιομάζα
- Ένα σύνολο καυστήρων φυσικού αερίου
- Σύστημα ανάκτησης θερμότητας (εναλλάκτη θερμότητας)

Η λειτουργία του διπλού λέβητα είναι διπλή καθώς μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε βιομάζα είτε φυσικό αέριο ως καύσιμο ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Περίπου  $2,5 \text{ MW}$  από τη μικτή ισχύ λαμβάνεται για τον τεμαχισμό και την αποθήκευση της βιομάζας.

Ο σταθμός διαθέτει κι ένα μικρό βοηθητικό λέβητα ατμού, του οποίου η παραγωγή υπερβαίνει τους  $3 \text{ t/h}$  σε πίεση  $15 \text{ bar}$  ώστε να ικανοποιούνται οι συγκεκριμένες ανάγκες της εγκατάστασης.

Η εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή αγγίζει τις  $44,1 \text{ GWh}$  από την ηλιακή ενέργεια, τις  $47,3 \text{ GWh}$  από τη βιομάζα και τις  $10,2 \text{ GWh}$  από το συμπληρωματικό φυσικό αέριο. Η συνολική μικτή παραγωγή είναι  $101,5 \text{ GWh}$  ενώ η καθαρή είναι  $98 \text{ GWh}$ . Η παραγωγή αυτή είναι ικανή να τροφοδοτεί με ενέργεια φιλική προς το περιβάλλον περίπου  $27.000$

ισπανικά νοικοκυριά αποφεύγοντας ετησίως 24.500 tn CO<sub>2</sub>.

### Termosolar Borges

Τεχνολογία	Parabolic Trough
Είδος σταθμού	Εμπορικός
Έκταση(εκτάρια)	96
Ηλεκτρική παραγωγή(MWh/έτος)	98000
Εκκίνηση παραγωγής	Δεκέμβριος 2012
Κόστος(εκατ.€)	153
Τιμή πώλησης(€cents/kWh)	27
<b>Ηλιακό πεδίο</b>	
Έκταση ανοίγματος(τμ)	183120
Αριθμός συγκροτημάτων ηλιακών συλλεκτών(ΣΗΣ)	336
Αριθμός βρόχων	56
Αριθμός ΣΗΣ/βρόχο	6
Έκταση ανοίγματος ΣΗΣ(τμ)	545
Μήκος ΣΗΣ(μ)	96
Αριθμός συλλεκτών	8064
HTF	Θερμικό λάδι
Θερμοκρασία εισόδου(C)	293
Θερμοκρασία εξόδου(C)	393
<b>Μπλοκ ισχύος</b>	
Μικτή ισχύς τουρμπίνας(MW)	25
Καθαρή ισχύς τουρμπίνας(MW)	22.5
Είδος εξόδου	Ατμός Rankine
Μέθοδος ψύξης	Υγρή ψύξη
Απόδοση τουρμπίνας	37% σε πλήρες φορτίο
Είδος εφεδρικού συστήματος	Βιομάζα(2x22MWh)

Πίνακας 18. Χαρακτηριστικά στοιχεία του Termosolar Borges

Διάφορες άλλες έρευνες αναφορικά με την υβριδοποίηση παραβολικών κοίλων συλλεκτών με βιομάζα έχουν πραγματοποιηθεί αλλά κανένα άλλο έργο δεν έχει μπει σε διαδικασία κατασκευής ακόμη. Εναλλακτικά, μελετάται η υβριδοποίηση τεχνολογίας Fresnel με βιομάζα και απόβλητα υλικά. Το πλεονέκτημα της χρήσης συλλεκτών Fresnel θα ήταν θερμοκρασίες ατμού της τάξης των 500 °C και άνω και ως επακόλουθο υψηλότερες αποδόσεις μετατροπής. Ωστόσο, προς το παρόν δεν υπάρχει κανένας σταθμός αναφοράς. Για υβριδικούς σταθμούς CSP-βιομάζας με παραμέτρους ατμού μεγαλύτερες των 500 °C και 100 bar, οι ηλιακοί πύργοι είναι κατάλληλοι με σύστημα άμεσης παραγωγής ατμού για σταθμούς χωρίς θερμική αποθήκευση και σύστημα τηγμένων αλάτων για σταθμούς με θερμική αποθήκευση. Οι ηλιακοί πύργοι με δέκτες ογκομετρικού αέρα έχουν επίσης ερευνηθεί αλλά είναι πιθανό ότι η εξασφάλιση χρηματοδότησης για ένα τέτοιο έργο είναι πιο περίπλοκη λόγω των περιορισμένων αναφορών.

Ενώ οι περισσότερες έρευνες επικεντρώνουν στην παραγωγή παρόμοιων

παραμέτρων ατμού από τη βιομάζα και την εκάστοτε τεχνολογία CSP, κάποιες δημοσιεύσεις ερευνούν τη χρήση της τεχνολογίας CSP για τη θέρμανση του αέρα και του νερού τροφοδοσίας καθώς και την εξωτερική υπερθέρμανση του ατμού από ενέργεια η οποία προέρχεται από τις εγκαταστάσεις απόβλητων. Ωστόσο, καμία από αυτές τις έρευνες δε θεωρεί παραμέτρους θερμοκρασίας μεγαλύτερες από 430 °C περιορίζοντας έτσι τις αποδόσεις μετατροπής.

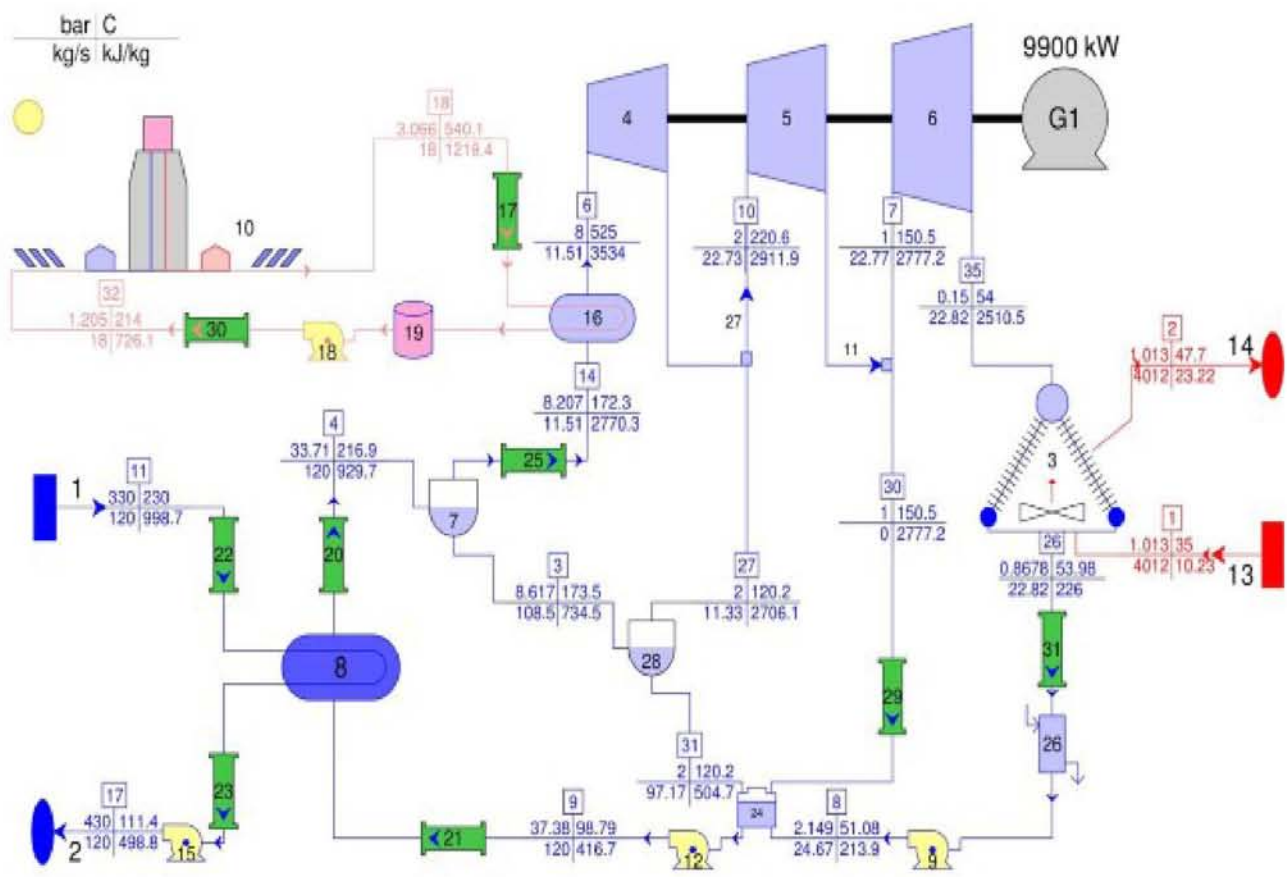
Ενδεικτικά, μία πρόσφατη έρευνα που έγινε στην Αυστραλία και αφορούσε ένα υβριδικό σταθμό συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας και βιομάζας ισχύος 30 MW<sub>e</sub> καταλήγει όσον αφορά το επενδυτικό κόστος σε AU\$4,2m/MW<sub>e</sub> για τη βιομάζα και AU\$7m/MW<sub>e</sub> για την τεχνολογία CSP, ενώ το συνδυασμένο κόστος ανέρχεται στα AU\$5,6m/MW<sub>e</sub>. Ένας αυτόνομος σταθμός CSP με την ίδια ετήσια παραγωγή (26 MW<sub>e</sub> πύργος ισχύος με θερμική αποθήκευση 15 ωρών) θα απαιτούσε AU\$11,2m/MW<sub>e</sub> συμπεριλαμβανομένης της σύνδεσης στο δίκτυο. Αυτό ισοδυναμεί με σημαντική μείωση του κόστους της τάξης του 50% , ποσοστό που καταδεικνύεται και σε άλλες μελέτες αναφορικά με την υβριδοποίηση CSP και βιομάζας. Βέβαια, αυτή η διαφορά ενδέχεται να μειωθεί καθώς αναμένεται να μειωθούν οι τιμές των τεχνολογιών CSP στο μέλλον αλλά δε μπορεί να επιτύχει το ανατγωνιστικό κόστος ενός υβριδικού σταθμού CSP και βιομάζας λόγω των εγγενών υψηλότερων εργασιακών απαιτήσεων για την κατασκευή και την εγκατάσταση συστημάτων CSP συγκριτικά με ένα σταθμό παραγωγής ισχύος με βιομάζα.

#### **8.4.5. Υβριδοποίηση τεχνολογιών CSP με γεωθερμική ενέργεια**

Η αυτόνομη γεωθερμική ενέργεια αλλά και η αυτόνομη συγκεντρωτική ηλιακή ακτινοβολία θεωρούνται σήμερα οι πιο ακριβές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συγκριτικά με τον άνεμο και τη βιομάζα με υψηλές κεφακαιακές απαιτήσεις για στοιχεία όπως το ηλιακό πεδίο και τα φρεάτια παραγωγής και γεώτρησης. Ο συνδυασμός των δύο πηγών δεν παρέχει απλά τη δυνατότητα για κοινή χρήση εξοπλισμού όπως η τουρμπίνα ατμού ή ο συμπυκνωτής αλλά και σημαντικές βελτιώσεις αναφορικά με την απόδοση και την επένδυση.

Η θερμική απόδοση των γεωθερμικών σταθμών είναι σχετικά χαμηλή, περίπου 10-23%, επειδή τα γεωθερμικά υγρά δεν μπορούν να αποκτήσουν τις υψηλές θερμοκρασίες του ατμού από τους λέβητες. Οι νόμοι της θερμοδυναμικής περιορίζουν την απόδοση των θερμικών μηχανών στην εξαγωγή χρήσιμης ενέργειας. Η αύξηση της αποδοτικότητας του κύκλου είναι επιθυμητή και θα προκαλούσε μείωση του αριθμού των οικονομικά απαιτητικών φρεατίων παραγωγής και γεώτρησης, το πιο ακριβό τμήμα ενός γεωθερμικού σταθμού, ή αύξηση της δυναμικότητας της εγκατάστασης με την ίδια ροή αλατούχου διαλύματος. Υπάρχουν διάφορες επιλογές ενσωμάτωσης συστημάτων CSP, που κυμαίνονται από τη θέρμανση του νερού τροφοδοσίας μέχρι την παραγωγή παρόμοιων παραμέτρων ατμού και την υπερθέρμανση του ατμού. Για να περιοριστούν οι αλλαγές στις υπάρχουσες ιδέες σχετικά με τις γεωθερμικές μονάδες παραγωγής αλλά και για να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα του κύκλου, η συγκεντρωτική ηλιακή ακτινοβολία είναι

κατάλληλη για την περαιτέρω υπερθέρμανση του χαμηλής θερμοκρασίας γεωθερμικού ατμού από τυπικά μεταξύ 150 °C και 200 °C σε πίεση 6 έως 10 bar στους 380 °C με τεχνολογία παραβολικών κοίλων συλλεκτών και στους 525 °C με τεχνολογία πύργου ισχύος με τηγμένα άλατα. Το επόμενο σχήμα εξηγεί την ιδέα ενός υβριδικού πύργου ισχύος με γεωθερμική ενέργεια με τα φρεάτια παραγωγής και γεώτρησης (1-2), τον εναλλάκτη θερμότητας αλατούχου διαλύματος-ατμού (8), τις δεξαμενές ανάφλεξης (7,28), τον ηλιακό πύργο με θερμική αποθήκευση (10), τον υπερθερμαντήρα του CSP ατμού (16), την τουρμπίνα ατμού (4-6), τη γεννήτρια (G1), το συμπυκνωτή (3), το σύστημα θέρμανσης νερού τροφοδοσίας (24), καθώς και τις αντλίες του αλατούχου διαλύματος (15), του τηγμένου άλατος (18) και του νερού τροφοδοσίας (9,12).



Σχήμα 44. Διάγραμμα διαδικασίας μίας γεωθερμικής μονάδας με post-flashing υπερθέρμανση ατμού CSP

Η υπερθέρμανση του ατμού απαιτεί μόνο το 20% περίπου της ενέργειας εισόδου ελαχιστοποιώντας έτσι το σύστημα CSP και το κόστος του. Σημαντική θερμική αποθήκευση, όπως 15 ώρες, αυξάνει το ηλιακό μερίδιο και μειώνει τη χρήση εξωτερικής ενέργειας για την υπερθέρμανση του ατμού.

Βάση της ροής του αλατούχου διαλύματος στο σχήμα, η καθαρή ισχύς ενός αυτόνομου γεωθερμικού σταθμού θα ήταν 6,3 MW<sub>e</sub> με καθαρή απόδοση κύκλου της τάξης του 10,2% και ειδική επένδυση AU\$20,5m/MW<sub>e</sub>. Η εξωτερική υπερθέρμανση του ατμού

με σύστημα παραβολικών κοίλων συλλεκτών θα είχε ως αποτέλεσμα καθαρή ισχύ σταθμού  $8,4 \text{ MW}_e$  με καθαρή απόδοση κύκλου  $12,5\%$  και ειδική επένδυση  $\text{AU\$}22,1\text{m}/\text{MW}_e$ . Οι αντίστοιχες τιμές για ένα πύργο ισχύος θα ήταν  $9,9 \text{ MW}_e$ ,  $14,1\%$  και  $\text{AU\$}16,8\text{m}/\text{MW}_e$ . Η ενσωμάτωση συστήματος παραβολικών κοίλων συλλεκτών μπορεί να παρέχει τεχνικά οφέλη αλλά το υψηλό κόστος της θερμικής αποθήκευσης εξαιτίας της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς του τηγμένου άλατος των  $380 \text{ }^\circ\text{C}$  της θερμής δεξαμενής και  $280 \text{ }^\circ\text{C}$  της ψυχρής, στην πραγματικότητα αυξάνει την ειδική επένδυση. Θερμική αποθήκευση μικρότερης δυναμικότητας θα μείωνε το κόστος αλλά θα αύξανε την ανάγκη για εξωτερική υπερθέρμανση με άλλη μορφή ενέργειας. Η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά του συστήματος θερμικής αποθήκευσης σε ένα πύργο ισχύος ( $540 \text{ }^\circ\text{C}$  στη θερμή δεξαμενή,  $280 \text{ }^\circ\text{C}$  στην ψυχρή) μειώνει το κόστος αποθήκευσης κάνοντας τον υβριδικό ηλιακό πύργο με γεωθερμική ενέργεια πιο βιώσιμο οικονομικά αλλά και πετυχαίνει τη βέλτιστη τεχνική επίδοση.

Συμπληρωματικά προς την υπερθέρμανση του ατμού CSP, η παραγωγή πρόσθετου ατμού από το σύστημα της συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας θα μπορούσε να θεωρηθεί ως αντιστάθμιση της μείωσης παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών περιβάλλοντος. Μία αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος από  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  σε  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  μπορεί να μειώσει την παραγωγή του σταθμού μέχρι περίπου  $20\%$  ανάλογα με το σχεδιασμό του συμπυκνωτή.

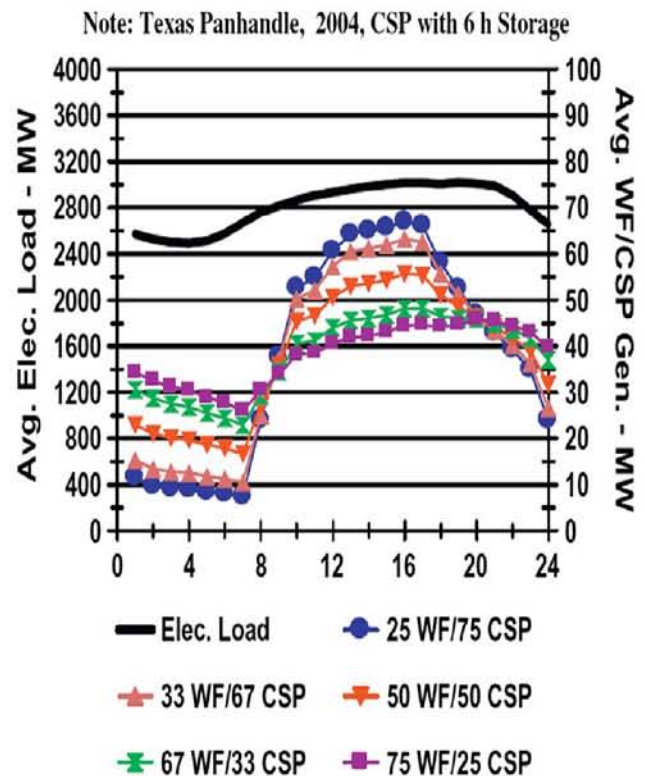
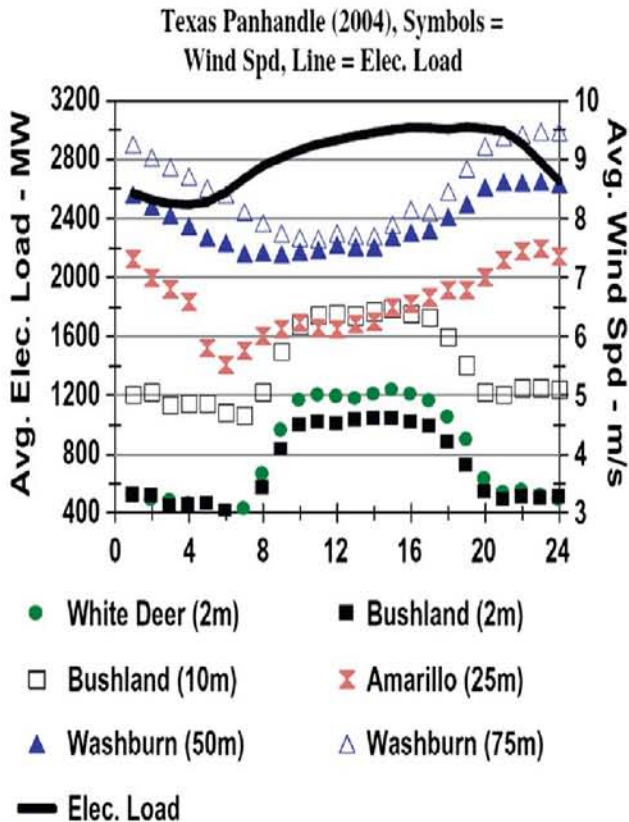
#### **8.4.6. Υβριδοποίηση τεχνολογιών CSP με αιολική ενέργεια**

Ο συνδυασμός της συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας με τον άνεμο, προς το παρόν μία από τις φθηνότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχει ερευνηθεί και το Τέξας των ΗΠΑ και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο συνδυασμός CSP με αιολικά πάρκα παρέχει ορισμένα οφέλη αναφορικά με την προσαρμογή του φορτίου. Συγκεκριμένα, με την αιολική παραγωγή να είναι μικρότερη κατά τη διάρκεια της ημέρας συγκριτικά με τη νύχτα, η προσθήκη συστήματος CSP παρέχει πρόσθετη ημερήσια αλλά και νυχτερινή ισχύ ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση. Το σχήμα::: δείνει το προφίλ παραγωγής για ένα αυτόνομο αιολικό πάρκο και για διαφορετικές υβριδικές διαμορφώσεις αιολικής και συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας.

Εκτός από τη συστέγαση των δύο μορφών ενέργειας, θα μπορούσαν να ενσωματωθούν περισσότερο με την προσθήκη θερμαντήρων ηλεκτρικής αντίστασης στο θερμικό σύστημα αποθήκευσης της CSP μονάδας για την αποθήκευση της αιολικής ενέργειας κατά τις περιόδους χαμηλής τιμής της και τη διάθεση της όταν οι τιμές της είναι υψηλές. Οι ηλεκτρικοί θερμαντήρες είναι σχεδόν  $100\%$  αποδοτικοί και αποτελούν μία αρκετά ώριμη τεχνολογία με χιλιάδες αναφορές σε διάφορες βιομηχανίες. Τυπικά οι τιμές του ηλεκτρισμού είναι χαμηλότερες τη νύχτα κι ένα μέρος της αιολικής ενέργειας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να φορτιστεί πλήρως η θερμική αποθήκευση ώστε να διατεθεί το δυνατόν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια της αιχμής της το πρωί. Κατά τους χειμερινούς μήνες οι σταθμοί CSP σπάνια φορτίζουν τη θερμική



αποθήκευση στο 100% εξαιτίας της λιγότερης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που περιπλέκει τη δυνατότητα διάθεσης ηλεκτρικού ρεύματος για τη συνολική διάρκεια της νυχτερινής περιόδου εκτός αν ο σταθμός διαθέτει ένα πολύ μεγάλο σύστημα θερμικής αποθήκευσης. Με την επιλογή του ηλεκτρικού θερμαντήρα η αιολική ενέργεια μπορεί να φορτίσει πλήρως το σύστημα αποθήκευσης ώστε ο σταθμός να μπορεί να παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα καθόλη τη διάρκεια της νύχτας.



Σχήμα 45. Ημερήσια αντιστοιχία της ταχύτητας του ανέμου και του ηλεκτρικού φορτίου καθώς αυξάνεται το υψόμετρο (αριστερά) και ετήσια φόρτωση δικτύου συγκριτικά με την εκτιμώμενη παραγωγή υβριδικών διαμορφώσεων αιολικών πάρκων με CSP με διάφορες αναλογίες ενσωμάτωσης

Ωστόσο, υποθέτοντας απόδοση 99% για τον ηλεκτρικό θερμαντήρα και 39% απόδοση για τον κύκλο του CSP σταθμού, η διαφορά στην τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης της θερμικής αποθήκευσης θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από 260%. Αυτή είναι μία σημαντική διαφορά τιμής αλλά τέτοια γεγονότα συμβαίνουν σπάνια και θα μπορούσαν να βελτιώσουν την οικονομική βιωσιμότητα της συγκεντρωτικής ηλιακής και της αιολικής παραγωγής. Επιπλέον, περιοχές με συμφόρηση δικτύου θα μπορούσαν να μειώσουν τις περικοπές με την προσωρινή αποθήκευση της αιολικής παραγωγής.

Για τον περιορισμό της επένδυσης και των απωλειών της ανανεώσιμης ενέργειας η ισχύς του ηλεκτρικού θερμαντήρα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5-10% της συνολικής ισχύος του CSP σταθμού. Ο στόχος δεν πρέπει είναι να χρησιμοποιείται η αιολική ενέργεια

για την πλήρη φόρτιση της θερμικής αποθήκευσης αλλά μόνο ως συμπλήρωμα όταν δεν επαρκεί η ηλιακή ακτινοβολία ώστε να μπορεί καλύτερα ο σταθμός να παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα υψηλής τιμής, αυξάνοντας την οικονομική βιωσιμότητα.

Κάποια αιολικά πάρκα και σταθμοί CSP συστεγάζονται ήδη αλλά δεν έχουν ενσωματωθεί, όπως το πάρκο Dolarwind κοντά στους σταθμούς Andasol I-III που χρησιμοποιούν τεχνολογία παραβολικών κοίλων συλλεκτών στην Ισπανία.

## 8.5. Συμπεράσματα

Διάφορες επιλογές υβριδοποίησης σταθμών CSP με διαφορετικές πηγές ενέργειας παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο αυτό και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ανάλογα με τη διαμόρφωση του σταθμού και το συνδυασμό πηγών ενέργειας, το κόστος των υβριδικών μπορεί να είναι μέχρι και 50% χαμηλότερο από αυτό των αυτόνομων σταθμών CSP. Ακόμη, οι υβριδικοί CSP σταθμοί μπορούν να μειώσουν το κόστος και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η γεωθερμική, αυξάνοντας σημαντικά την αποδοτικότητα του κύκλου. Τ οφέλη αυτά, μαζί με τη δυνατότητα για πραγματοποίηση μικρών εγκαταστάσεων συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας, παρά προγράμματα αρκετών εκατομμυρίων ή και δισεκατομμυρίων δολλαρίων, επιτρέπουν στους χρηματοδότες και τους λειτουργούς να καταλάβουν καλύτερα τις διαφορετικές τεχνολογίες CSP και να χρηματοδοτήσουν μεγαλύτερα υβριδικά και αυτόνομα συστήματα στο μέλλον.

Η υβριδοποίηση της ηλιακής τεχνολογίας με συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας είναι ένα εξαιρετικά υποσχόμενο ενεργειακό σύστημα και πιθανό να παρέχει σημαντικό μερίδιο του όγκου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Πρόσφατες έρευνες εκτιμούν ότι τα ετήσια ηλιακά θερμικά μερίδια θα μπορούσαν να φτάνουν σε υψηλό ποσοστό της τάξης του 40-65%, με πολύ χαμηλότερα κλιμακούμενα κόστη ηλιακής ενέργειας συγκριτικά με αυτά της αυτόνομης ηλιακής τεχνολογίας.

Παρόλο που οι πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούν από κοινού με τη συγκεντρωτική ηλιακή ακτινοβολία συστατικά του κύκλου Rankine, όπως το φυσικό αέριο και η βιομάζα, έχουν εγγενώς μεγαλύτερες δυνατότητες για συνέργειες και ως συνέπεια για μειώσεις κόστους, ακόμη και ο συνδυασμός με τον άνεμο παρέχει οφέλη σχετικά με τη βελτιστοποίηση των εσόδων μέσω της αντιστοίχισης της παραγωγής ηλεκτρισμού με τις τιμές της αγοράς.

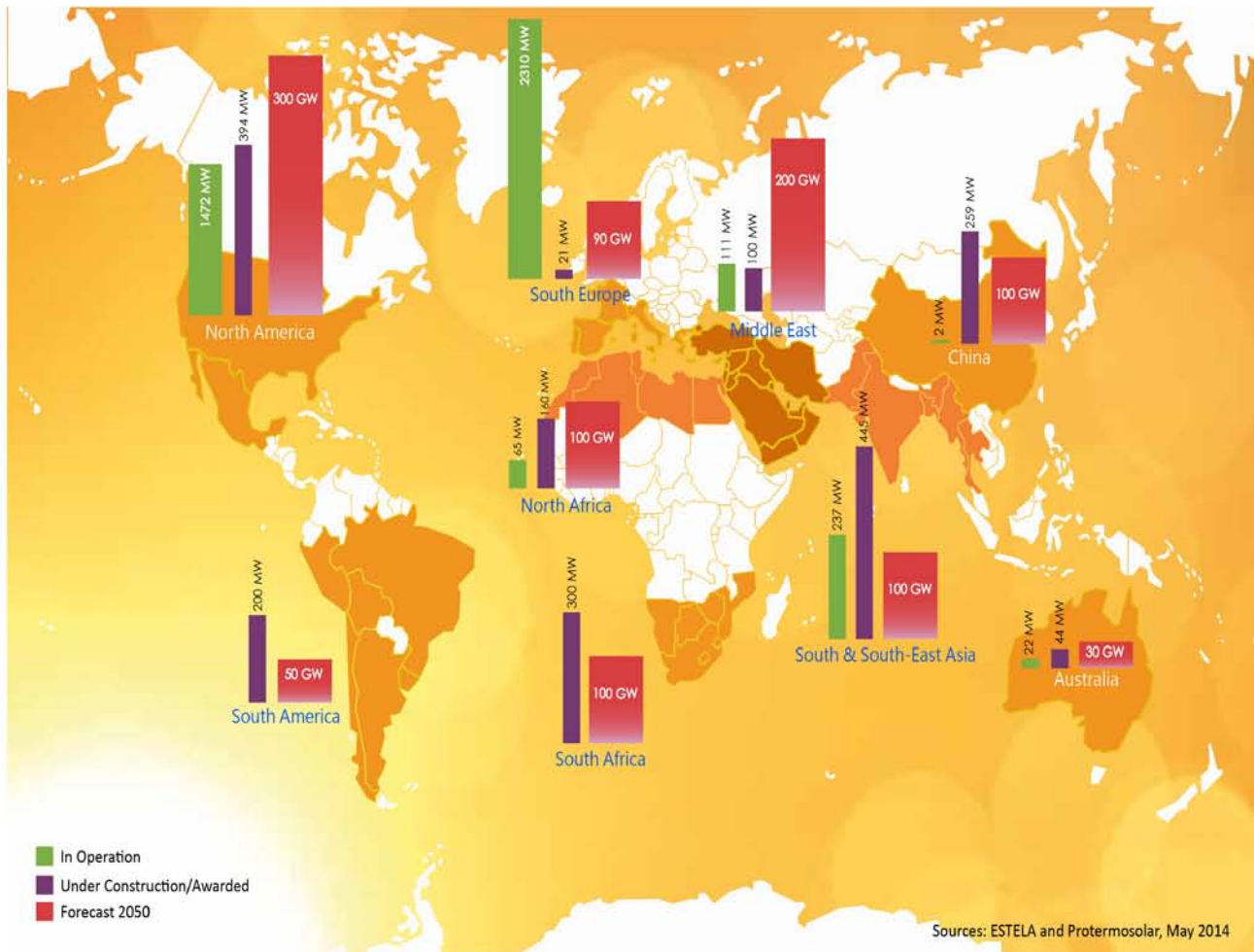
Σήμερα, σχεδόν όλοι οι υπάρχοντες ηλιακοί υβριδικοί σταθμοί με ορυκτά καύσιμα αντιμετωπίζουν την σημαντική δυσκολία της σχετικής δαπάνης της διαδικασίας. Οι μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζουν σήμερα οι ερευνητές και οι μηχανικοί είναι να εργαστούν στην κατεύθυνση μίας πραγματικά τυποποιημένης πρωτογενούς τεχνολογίας για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Οι περιοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερες δυνατότητες για βελτίωση είναι στην απόδοση του ίδιου του συστήματος ενέργειας και στα κατασκευαστικά κόστη των διαφορετικών συστατικών που πρέπει να μειωθούν ουσιαστικά.

Μία από τις πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις είναι η επαναφόρτιση των ήδη υπάρχοντων σταθμών καύσης άνθρακα χρησιμοποιώντας την ηλιακή θερμική ενέργεια για να αντικαταστήσει τον εξαγόμενο ατμό από την τουρμπίνα. Η σημαντικότερη επίδραση θα φανεί σε μεγαλύτερους σταθμούς ισχύος 100 MW και άνω, και αυτό θα μπορούσε να οδογήσει σε ταχεία ανάπτυξη της οικονομικά αποδοτικής εφαρμογής του ηλιακού ηλεκτρικού ρεύματος, ειδικά σε χώρες που διαθέτουν πλούσιους πόρους άνθρακα αλλά και ηλιακής ενέργειας, όπως η Αυστραλία, η Κίνα και οι ΗΠΑ. Το βασικό ζήτημα σε αυτή την προσέγγιση είναι η ενσωμάτωση της συγκεντρωτικής τεχνολογίας και των τουρμπίνων ατμού με ευέλικτη διαμόρφωση του συστήματος. Ο βασικός στόχος είναι η ανάπτυξη επαρκούς και φθηνής τεχνολογίας υβριδικής ηλιακής θερμικής ισχύος με κλιμακούμενες αποδόσεις της τάξης του 15-20% στη μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια.

Αναφορικά με τη μελλοντική ανάπτυξη στον τομέα της υβριδοποίησης, έμφαση πρέπει να δοθεί στα υβριδικά συστήματα ισχυρών συνεργιών, αντί αυτών που απλά προσαρτώνται σε υπάρχοντες σταθμούς. Τα μελλοντικά συστήματα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους υβριδικούς πόρους, την υβριδική μετατροπή ενέργειας και την απλοποίηση του συστήματος, καθώς και τον από κοινού έλεγχο των ρύπων και τη διαδοχική αξιοποίηση τόσο της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας όσο και της ενέργειας των ορυκτών καυσίμων.



## 9. Τρέχουσα κατάσταση στην αγορά CSP τεχνολογιών βάσει περιοχής



Σχήμα 46. Εγκατεστημένη ισχύς σταθμών CSP και πρόβλεψη για το 2050 από την Ευρωπαϊκή Βιομηχανική Ένωση ESTELA (Μάιος 2014).

### 9.1. Ισπανία

Η Ισπανία με άμεση ακτινοβολία  $2000 \text{ kWh/m}^2$  αποτελεί έναν από τους διεθνείς ηγέτες στο χώρο της εφαρμογών τεχνολογιών CSP για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η ισπανική νομοθεσία υιοθέτησε τους Ευρωπαϊκούς στόχους του Σχεδίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, που εγκρίθηκε το 1999 και αναθεωρήθηκε το 2005. Το σχέδιο του 1999 έθετε στόχο ως το τέλος του 2010 να έχουν εγκατασταθεί σταθμοί CSP συνολικής ισχύος  $200 \text{ MW}_e$ , ο οποίος αυξήθηκε στα  $500 \text{ MW}_e$  στο σχέδιο του 2005. Στο σχέδιο του 2005 υιοθετήθηκε και η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2001/77 που καθόριζε το μερίδιο από τις

ανανεωσιμές πηγές ενέργειας στο 29,4% της συνολικής ηλεκτρικής παραγωγής.

Το Ειδικό Καθεστώς για την παραγωγή ηλεκτρισμού από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεσπίστηκε στην Ισπανία το 1998. Ωστόσο, οι σταθμοί CSP δεν προωθήθηκαν μέχρι το 2004, όταν ψηφίστηκε το βασιλικό νομοθετικό διάταγμα R.D.L 436 που καθόριζε την κατάλληλη feed-in-tariff (FiT) ώστε να προχωρήσει η προώθηση των έργων. Η FiT βελτιώθηκε σημαντικά το 2007 με το βασιλικό διάταγμα R.D.L 661, το οποίο πραγματικά ενίσχυσε την προώθηση νέων σταθμών καθώς οι τράπεζες αξιολογούσαν ευνοϊκότερες τις συνθήκες για την χρηματοδότηση των έργων.

Το R.D.L 436 περιλάμβανε τα εξής χαρακτηριστικά:

–οι παραγωγοί ενέργειας μπορούσαν είτε να μεταφέρουν την παραγωγή τους στην εταιρία διανομής ενέργειας, με την τιμή πώλησης να αναφέρεται ως ενιαία ρυθμιζόμενο τιμολόγιο (δασμολογικό μοντέλο) είτε να την πουλήσουν στην ελεύθερη αγορά, στην τρέχουσα τιμή αγοράς συν μία πριμοδότηση (μοντέλο πριμοδότησης)

–μέγιστη ισχύς σταθμού 50 MW<sub>e</sub>. Σταθμοί με μεγαλύτερη ισχύ θα πρέπει να πωλούν στην αγορά

–12% (δασμολογικό μοντέλο) ή 15% (μοντέλο πριμοδότησης) εφεδρεία με φυσικό αέριο ή προπάνιο για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της δεξαμενής αποθήκευσης

–ετήσια προσαρμογή στην Tarifa Media de Referencia, TMR (μέση τιμή αναφοράς) που υπόκειται σε 4-ετή αναθεώρηση

–αναθεώρηση κινήτρων μετά την εφαρμογή των πρώτων 200 MW<sub>e</sub>

Το R.D.L 661 διαφοροποιούταν από το προηγούμενο στα εξής:

–τα κίνητρα αυξήθηκαν

–οποιοδήποτε βοηθητικό καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντιστάθμιση της έλλειψης ηλιακής ακτινοβολίας για τη διατήρησης της θερμοκρασίας του HTF

–ετήσια προσαρμογή στον Δείκτη Τιμών Λιανικής

–αναθεώρηση των συνθηκών μέχρι το 2010 ή μετά την εγκατάσταση 500 MW<sub>e</sub>

Οι CSP εγκαταστάσεις έως 50 MW έχουν έτσι ένα σταθερό δασμό (FiT) ετησίως ίσο με 26,9 c€/kWh για 25 χρόνια με πληθωρισμό μία εκατοστιαία μονάδα. Μετά τα 25 χρόνια η ταρίφα πέφτει στα 21,5 c€/kWh.

Ο πρώτος εμπορικός σταθμός CSP στον κόσμο, ύστερα από μία μεγάλη περίοδο καθώς ο τελευταίος είχε ανατεθεί το 1991 στην Καλιφόρνια, ήταν ο PS10 στη Σεβίλλη. Όπως έχει προαναφερθεί, ο σταθμός αυτός ισχύος 11 MW χρησιμοποιούσε την ιδέα του πύργου ισχύος με κορεσμένο ατμό και μικρή ρυθμιστική αποθήκευση πεπιεσμένου ατμού. Από τότε, η συνολική ισχύς που ανατέθηκε έφτασε τα 61 MW το 2008

(συμπεριλαμβανομένου του πρώτου Ευρωπαϊκού πύργου ισχύος, Andasol 1), τα 331 MW το 2009, τα 532 MW το 2010, τα 999 MW το 2011 και τα 1925 MW το 2012.

Σύμφωνα με το βασιλικό διάταγμα R.D.L 6/2009, εξήντα σταθμοί-συμπεριλαμβανομένων αυτών που ήδη λειτουργούσαν- καταχωρήθηκαν σύμφωνα με το ισχύον πλαίσιο FiT. Όλοι αυτοί οι σταθμοί, συνολικής ισχύος 2475 MW, έπρεπε να ανατεθούν πριν το τέλος του 2013 ώστε να λάβουν την προηγούμενη FiT. Η τρέχουσα ταρίφα για το 2012 για τους σταθμούς αυτούς ήταν 29,89 c€/kWh.

Ως αποτέλεσμα των ευνοϊκότερων οικονομικών συνθηκών, που έτειναν να ανταμείβουν ώριμες τεχνολογίες και σταθμούς μίας ορισμένης κλίμακας, το 94% της ενέργειας παράγεται σε σταθμούς με πύργους ισχύος ενώ οι υπόλοιπες τρεις τεχνολογίες CSP μοιράζονται ένα πολύ μικρό κομμάτι.

Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, που υποβλήθηκε από την Ισπανική Κυβέρνηση στην Επιτροπή της Ε.Ε. το 2010 προέβλεπε συνολική εγκατεστημένη ισχύ 5079 MW έως το 2020. Στο Σχέδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ο αριθμός αυτός μειώθηκε στα 4800 MW.

Στις αρχές του 2012 η Ισπανική Κυβέρνηση εξέδωσε νόμο (R.D.L 1/2012) για τη διακοπή της έγκρισης νέων σταθμών μέχρι την πλήρη επανεξέταση της κατάστασης όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ στο Ισπανικό ηλεκτρικό σύστημα και τον καθορισμό νέας πορείας για την επίτευξη των στόχων του 2020.

Το 2013 συνδέθηκαν στο δίκτυο οι τελευταίοι 7 CSP σταθμοί των 50 MW, που περιέχονταν στο Remuneration Preassignment Register φθάνοντας συνολικά τα 2304 MW εγκατεστημένης ισχύος. Το σύνολο αυτό αποτελείται από 27 σταθμούς παραβολικών κοίλων συλλεκτών χωρίς σύστημα αποθήκευσης και 17 με αποθήκευση, δύο αντιστοιχούν σε πύργους κορεσμένου ατμού 10 MW και 20 MW αντίστοιχα, ένα πύργο ισχύος 20 MW με δέκτη άλατος και άφθονη αποθήκευση, δύο τεχνολογίας γραμμικών Fresnel με κορεσμένο ατμό ισχύος 14 MW και 30 MW αντίστοιχα, και ένα σταθμό παραβολικών κοίλων συλλεκτών με κυλινδρικό δέκτη ισχύος 22,5 MW, υβριδοποιημένο με βιομάζα.

Το 2013, κατά τη διάρκεια των πέντε μηνών του έτους, η ηλιακή θερμική ενέργεια παρείχε κατά μέσο όρο το 3% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της Ισπανίας. Ορισμένες φορές τον Ιούνιο και τον Ιούλιο έφτασε μερίδιο αγοράς 7% και, βλέποντας τις καθημερινές καμπύλες παραγωγής, μπορεί να παρατηρηθεί πόσο καλά ταιριάζουν με τις καμπύλες ημερήσιας ζήτησης.

Η CSP θα είναι η τέταρτη στην κατάταξη για την ενίσχυση της ηλεκτρικής παραγωγής στο Ειδικό Καθεστώς, με λιγότερες από τις μισές πριμοδοτήσεις από τις υπόλοιπες τρεις τεχνολογίες που προηγούνται, συμπεριλαμβανομένης της συμπαραγωγής (CHP-combined heat and power), της αιολικής ενέργειας και των φωτοβολταϊκών (PV).

## 9.2. Ιταλία

Η Ιταλία με άμεση ακτινοβολία DNI ίση περίπου με 2000 kWh/m<sup>2</sup> ετησίως έχει ξεκινήσει την προώθηση της συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας για να αυξήσει το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Το διάταγμα 11/4/2008 που ψηφίστηκε το 2008 καθόριζε τα πλαίσια ανάπτυξης της:

– παραγωγή ηλεκτρισμού από αυτόνομους ή υβριδικούς ηλιακούς θερμικούς σταθμούς χωρίς περιορισμό στο ηλιακό μερίδιο. Οι ταρίφες-κίνητρα για να προστεθούν στην τιμή πώλησης ήταν ανάλογες προς το ηλιακό μερίδιο: 28 c€/kWh<sub>e</sub> για ηλιακό μερίδιο μέχρι 0,15, 25 c€/kWh<sub>e</sub> για μερίδιο 0,15-0,50 και 22 c€/kWh<sub>e</sub> για υψηλότερο μερίδιο.

– Τα κίνητρα παραμένουν τα ίδια για 25 χρόνια, χωρίς καμία προσαρμογή για τον πληθωρισμό, και μπορούν να προστεθούν στην τιμή πώλησης του δικτύου.

– Τα κίνητρα αυτά ισχύουν για τους σταθμούς που λειτουργούσαν πριν από τις 31/12/2012. Οι ταρίφες θα μειώνονται κατά 2% για κάθε ημερολογιακό έτος για τους σταθμούς που θα εκκινήσουν τη λειτουργία τους μεταξύ 1ης Ιανουαρίου 2013 και 31 Δεκεμβρίου 2014. Μετά την ημερομηνία αυτή, οι ταρίφες θα καθορίζονται με βάση το κόστος των συμβατικών καυσίμων και την ηλιακή συνιστώσα

– Αν το ηλιακό στοιχείο είναι ενσωματωμένο με άλλη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (π.χ. βιομάζα), η υβριδική μονάδα δέχεται ένα πράσινο πιστοποιητικό για την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο πλαίσιο του μηχανισμού Πράσινων Πιστοποιητικών (σήμερα στο εύρος των 18-22 c€/kWh<sub>e</sub>.)

– Ο εθνικός στόχος τέθηκε σε συνολική εγκατεστημένη επιφάνεια ανοίγματος ηλιακών συλλεκτών 2 εκατομμυρίων m<sup>2</sup>.

– Όλοι οι σταθμοί, υβριδικοί και αυτόνομοι, πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με σύστημα αποθήκευσης με ενιαία αποθηκευτική ικανότητα όχι μικρότερη από 1,5 kWh<sub>th</sub>/m<sup>2</sup> ανοίγματος.

– Το ελάχιστο άνοιγμα ηλιακού πεδίου είναι 2500 m<sup>2</sup>, ωστόσο δεν υπάρχει ανώτατο όριο στο μέγεθος των σταθμών.

Σύμφωνα με το Έθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας που θεσπίστηκε το Μάρτιο του 2011, οι σταθμοί CSP αναμένεται να φτάσουν τα 600 MW μέχρι το 2020 παράγοντας 1.700 GWh, ή 0,5% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα νέο διάταγμα για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κυκλοφόρησε τον Ιούλιο του 2012 από τον Υπουργό Οικονομικής Ανάπτυξης σε συνεργασία με τον Υπουργό Περιβάλλοντος. Το FiT θα τέθηκε σε ισχύ τον Ιανουάριο του 2013. Το διάταγμα ρυθμίζει ένα νέο σύστημα παροχής κινήτρων για εγκαταστάσεις CSP μεγάλης κλίμακας: 0,32 €/kWh για ηλιακό



μερίδιο μεγαλύτερο από 85%, 0,30 €/kWh για μερίδιο 50-85% και 0,27 €/kWh για μερίδιο μικρότερο από 50%.

Είναι δυνατόν να διατηρηθεί το FiT με πρόσθετη δημόσια χρηματοδότηση. Προκειμένου να επωφεληθούν από τα κίνητρα, πρέπει να πληρούνται δύο προϋποθέσεις: ένα μη-ρυπογόνο σύστημα μεταφοράς θερμότητας πρέπει να χρησιμοποιείται (εκτός αν το σύστημα είναι τοποθετημένο σε βιομηχανική περιοχή) και οι εγκαταστάσεις πρέπει να δείχνουν την ελάχιστη ικανότητα συσσώρευσης που θεσπίστηκε με το διάταγμα. Τα κίνητρα είναι διαθέσιμα για επιφάνεια καθρέφτη μέχρι το ανώτατο όριο των 2,5 εκατ. m<sup>2</sup>.

Για τους CSP σταθμούς μικρής κλίμακας, το νέο διάταγμα ρυθμίζει την ακόλουθη ενημέρωση του συστήματος παροχής κινήτρων: 0,36 €/kWh για ηλιακό μερίδιο μεγαλύτερο από 85%, 0,32 €/kWh για μερίδιο 50-85% και 0,30 €/kWh για μερίδιο μικρότερο από 50%. Τα κίνητρα αυτά ισχύουν για σταθμούς με λιγότερα από 2.500 m<sup>2</sup> εγκατεστημένων ηλιακών συλλεκτών.

Για όλους τους τύπους της σταθμών (τόσο μεγάλης και μικρής κλίμακας), τα κίνητρα, που υπολογίζονται με τους συντελεστές που δίνονται παραπάνω, είναι επιπλέον των εσόδων από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται και τροφοδοτεί το εθνικό δίκτυο. Το FiT θα μειωθεί κατά 5% για τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα σύνδεθουν με το δίκτυο το 2016 και κατά 10% για εκείνους που θα συνδεθούν το 2017. Τα κίνητρα θα πρέπει να καταβάλλονται για 25 χρόνια.

Ο πρώτος σταθμός CSP που χρησιμοποιεί λιωμένο αλάτι ως HTF είναι ήδη σε λειτουργία στην Ιταλία, ισχύος 5 MW. Διαθέτει θερμική αποθήκευση δύο δεξαμενών (290 και 550 °C) και γεννήτρια υπερθερμανσμένου ατμού. Το έργο, που ονομάζεται Αρχιμήδης, αποτελείται από PTC συλλέκτες ενσωματωμένους στο ήδη υπάρχον 370 MW<sub>e</sub> CC (combined cycle) εργοστάσιο στο Priolo Gargallo (Σικελία), όπου η DNI είναι 1725 kWh/m<sup>2</sup>. Μια δυνητική αγορά εκατοντάδων MW αναμένεται στην Ιταλία μέχρι το 2017.

### 9.3. Γαλλία

Σύμφωνα με τη γαλλικό Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας που εγκρίθηκε τον Ιούνιο του 2010, οι σταθμοί CSP εκτιμάται ότι θα φτάσουντα 540 MW παραγωγική ικανότητα μέχρι το 2020, παράγοντας 972 GWh ετησίως ή 0,2% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στη Γαλλία.

Μια μονάδα 12 MW, η Alba Nova<sup>1</sup>, εγκρίθηκε από τη γαλλική κυβέρνηση τον Ιούλιο του 2012. Το εργοστάσιο κατασκευάστηκε στην Κορσική και συνδυάζει γραμμικούς ανακλαστήρες Fresnel, άμεση παραγωγή ατμού και θερμική αποθήκευση. Το γαλλικό κρατικό επενδυτικό ταμείο, στηρίζει οικονομικά το έργο. Είναι το πρώτο έργο CSP που εγκρίθηκε στη Γαλλία μετά από περισσότερα από 30 χρόνια, και χρησιμεύει ως αναφορά

για τη μετατροπή της ενέργειας και την οικονομική απόδοση της ιδιόκτητης τεχνολογίας Fresnel της εταιρίας Solar Euromed. Ένας άλλος 9 MW σταθμός τεχνολογίας γραμμικών Fresnel έχει εγκριθεί στην περιοχή των Πυρηναίων.

Οι FiT είναι σε γενικές γραμμές αρκετά ικανοποιητικές για τις διάφορες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εκτός από τις τεχνολογίες CSP, λόγω των χαμηλών επιπέδων DNI στη χώρα.

## 9.4. Πορτογαλία

Η Πορτογαλία έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες για την εφαρμογή των τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας, δεδομένης της υψηλής ηλιακής διαθεσιμότητας στη χώρα (μία από τις υψηλότερες στην Ευρώπη) και την πολύ καλή αποδοχή τους από το κοινό.

Μέχρι το 2000, η πορτογαλική κυβέρνηση διατήρησε τα ρυθμιζόμενα τιμολόγια για τους τελικούς καταναλωτές κάτω από το πραγματικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα "τιμολογιακό χρέος" στη συνέχεια συσσωρεύτηκε και χρηματοδοτούταν ετησίως με εγγύηση από την κυβέρνηση. Ωστόσο, το μερίδιο του εν λόγω δασμολογικού χρέους που αναλογεί σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (κυρίως για την αιολική ενέργεια) έχει αποδειχθεί ότι είναι μικρό (λιγότερο από 15%). Μετά από σημαντικές αναβαθμίσεις σε FiT συστήματα, η Ιβηρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας MIBEL τέθηκε σε λειτουργία το 2007. Προσφορές για την ηλιακή τεχνολογία ξεκίνησαν το 2009, ακόμα και αν ορισμένες κοινοπραξίες επιχείρησαν να ζητήσουν πιστοποιητικά CSP ήδη από το 2007.

Το 2007, το Υπουργείο Οικονομίας και Καινοτομίας της Πορτογαλίας πέρασε το νομοθετικό διάταγμα 225.2007, το οποίο αναθεώρησε την FiT που νομοθετικού διατάγματος με αριθ. 33 A/2005 σε 29,3 c€/kWh<sub>e</sub> για σταθμούς CSP ισχύος κάτω από 10MW<sub>e</sub> και 15-20 c€/kWh<sub>e</sub> για σταθμούς ισχύος πάνω από 10MW<sub>e</sub>.

Η κρίση του 2008 οδήγησε σε αύξηση των επιτοκίων, επιδεινώνοντας την επιβάρυνση που εκπροσωπούσε το συσσωρευμένο δασμολογικό χρέος στην εθνική οικονομία. Μετά την κορύφωσή του το 2009, το συνολικό δασμολογικό χρέος έγινε σταδιακά μικρότερο ξεκινώντας από το 2010. Η πτώση της κυβέρνησης το Μάιο του 2011 ακολουθήθηκε από μία προσπάθεια οικονομικής διάσωσης της χώρας. Ένα Μνημόνιο συμφωνήθηκε με την ΕΕ, και αυτό απαιτούσε επίσης μια αναθεώρηση των καθεστώτων στήριξης των ΑΠΕ.

Το 2010 η κυβέρνηση εξέδωσε άδειες για 10 έργα επίδειξης CSP (δύο έργα 4 MW<sub>e</sub> το καθένα για τις τεχνολογίες παραβολικών κοίλων συλλεκτών, πύργου ισχύος και γραμμικών συλλεκτών Fresnel και τέσσερα έργα μέχρι 1,5 MW<sub>e</sub> για την τεχνολογία παραβολικού δίσκου). Το 2012, λόγω των αβεβαιοτήτων ως προς την ενεργειακή πολιτική για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και ιδίως για την συγκεντρωτική ηλιακή

ακτινοβολία, κανένα από αυτά τα έργα δεν είχε μπει σε εφαρμογή. Στην πραγματικότητα, μερικές από τις άδειες χάθηκαν, μετά από μια προθεσμία θεσπίστηκε από DGGE για την επιβεβαίωση της πρόθεσης να προχωρήσουν. Το Μάιο του 2012, η κυβέρνηση ανακοίνωσε ρυθμιστικές αλλαγές στους κανόνες που αφορούν τις ΑΠΕ, αξιοποιώντας τις αβεβαιότητες στη νομοθεσία για να τροποποιήσει τους όρους των FiT.

Σε κάθε περίπτωση, ο πορτογαλικός στόχος που θεσπίστηκε από το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία για το 2020 έχει μειωθεί από 500 MW σε 50 MW. Η FiT εκχώρησης νέων αδειών σύνδεσης στο δίκτυο για τις ΑΠΕ έχει ανασταλεί μέχρι το 2014/2015. Εν τω μεταξύ, η κυβέρνηση εξακολουθεί να υποστηρίζει την ανάπτυξη των εν εξελίξει, εξουσιοδοτημένων και ήδη εκχωρημένων έργων ΑΠΕ. Τα περισσότερα από αυτά τα έργα είναι έργα αιολικής ενέργειας.

## 9.5. Ελλάδα

Σύμφωνα με το Ελληνικό Σχέδιο Δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που εγκρίθηκε τον Ιούνιο του 2010, οι σταθμοί CSP αναμένεται να φτάσουν τα 250 MW μέχρι το 2020, παράγοντας 714 GWh, ή 1% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ελλάδα χορηγεί μια FiT των 26,5 c€/kWh, η οποία ανέρχεται σε 28,5 c€/kWh, αν ενσωματωθούν τουλάχιστον 2 ώρες αποθήκευσης. Η FiT αυτή είναι καταβλητέα για 20 χρόνια. Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης θα αποτελέσει τη βάση για μια υπουργική απόφαση που θα καταναείμει τους στόχους εγκατεστημένης ισχύος για το 2020 στους διάφορους τομείς των ΑΠΕ. Μια αλλαγή στο μηχανισμό στήριξης δεν προβλέπεται: αναμένεται ότι θα παραμείνει σταθερή FiT.

Ο νόμος για την "Επιτάχυνση της ανάπτυξης των ΑΠΕ" απλοποιεί τις διοικητικές διαδικασίες και διευθετεί τα τοπικά εμπόδια για την ανάπτυξη των ΑΠΕ. Επιπλέον, η νέα κυβέρνηση έχει συγχωνεύσει αρκετές διοικήσεις στο ΥΠΕΚΑ (Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής), που τώρα λειτουργεί ως υπηρεσία-μιας-στάσης για την αδειοδότηση των ΑΠΕ. Με το νόμο Χωροταξιακού σχεδιασμού (2008), το ΥΠΕΚΑ δίνει προτεραιότητα σε έργα ΑΠΕ σε σχέση με άλλες χρήσεις γης και καθορίζει τους περιορισμένους καθώς και τους τομείς προτεραιότητας για την ανάπτυξη.

Ένας σταθμός τεχνολογίας πιάτου/μηχανής Stirling μεγάλης κλίμακας ισχύος (75,3 MW) και ένας σταθμός 50MW τεχνολογίας πύργου ισχύος με υπέρθερμο ατμό έχουν ανατεθεί στην Ελλάδα, στο πλαίσιο της πρώτης πρόσκλησης του Ευρωπαϊκού χρηματοδοτικού προγράμματος NER 300.

## 9.6. Κύπρος

Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Δράσης της Κύπρου, που εγκρίθηκε τον Ιούνιο του 2010, η ισχύς των σταθμών CSP αναμένεται να φτάσει τα 75 MW μέχρι το 2020, παράγοντας 224 GWh, ή το 3% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα. Υπάρχει μια ένδειξη ότι οι μελλοντικές τροποποιήσεις του νόμου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ο νόμος που επηρεάζει τη FiT) μπορούν να αποκαταστήσουν την ασφάλεια των επενδύσεων για το μεγαλύτερο μέρος του κλάδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η Κύπρος έχει αναλάβει, από την πρώτη πρόσκληση του NER 300, μια μεγάλης κλίμακας μονάδα παραγωγής ενέργειας τεχνολογίας δισκού/μηχανής Stirling ισχύος 50,76 MW.

Ο Κυπριακός Σύνδεσμος Επιχειρήσεων ΑΠΕ πιστεύει ότι η Κύπρος μπορεί να επιτύχει πολύ περισσότερα από το δεσμευτικό στόχο του 13% παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μέχρι το 2020, όπως προβλέπεται στην οδηγία για τις ΑΠΕ. Ωστόσο, αυτό θα απαιτήσει κάποια κυβερνητική, οικονομική και διοικητική προσπάθεια.

## 9.7. Βόρεια Αφρική

Η δρομολόγηση πρωτοβουλιών όπως το MSP (Mediterranean Solar Plan-Μεσογειακό Ηλιακό Σχέδιο) έχει ήδη τοποθετήσει τις τεχνολογίες CSP στην κορυφή της ατζέντας των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας, των κυβερνήσεων και των φορέων λήψεως αποφάσεων.

Το MSP αποσκοπεί στην αύξηση της χρήσης της ηλιακής ενέργειας και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το βασικό στοιχείο της πρότασης είναι η δημιουργία ενός κοινού νομικού, ρυθμιστικού και επενδυτικού πλαισίου για την ανάπτυξη 20 GW νέας δυναμικότητας από ανανεώσιμες πηγές στις χώρες γύρω από τη Μεσόγειο μέχρι το 2020. Για το σκοπό αυτό, το MSP θα αξιοποιήσει το τεράστιο δυναμικό που διατίθεται για τις ανανεώσιμες πηγές ηλεκτροπαραγωγής σε αυτές τις χώρες, κυρίως μέσω της ανάπτυξης των τεχνολογιών CSP, αλλά και μέσα από άλλες διαθέσιμες και ώριμες τεχνολογίες όπως φωτοβολταϊκά και αιολική ενέργεια.

Το MSP πρέπει να ξεπεράσει το σημαντικό ζήτημα της μεταφοράς ενέργειας καθώς και διοικητικά και νομικά εμπόδια. Μέχρι σήμερα, υπάρχουν τρεις ολοκληρωμένοι ηλιακοί σταθμοί συνδυσμένου κύκλου (ISCC) στο Μαρόκο, την Αλγερία και την Αίγυπτο με ισοδύναμη ηλεκτρική ισχύ περίπου 25 MW η κάθε μία. Η ηλιακή συνεισφορά σε αυτές τις εγκαταστάσεις, αποτελεί σημαντική εξοικονόμηση φυσικού αερίου.

**Αλγερία:** Η Αλγερία έχει το υψηλότερο ηλιακό δυναμικό στη λεκάνη της Μεσογείου.

Οι παράκτιες περιοχές στην Αλγερία λαμβάνουν ετήσια ηλιακή ακτινοβολία 1700 kWh/m<sup>2</sup>/έτος, ενώ οι ορεινές περιοχές και η Σαχάρα λαμβάνουν 1900 kWh/m<sup>2</sup>/έτος και 2650 kWh/m<sup>2</sup>/έτος αντίστοιχα. Έχει υπολογιστεί ότι το 82% της συνολικής έκτασης είναι διαθέσιμο για εγκατάσταση μονάδων CSP. Σε εθνικό επίπεδο, υπάρχει ένας στόχος για την παροχή του 10% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μέχρι το 2025.

**Μαρόκο:** Το Μαρόκο, το οποίο δέχεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία περίπου 2000 kWh/m<sup>2</sup>/έτος στο 30% περίπου του εδάφους της, προσφέρει επίσης πολλές δυνατότητες για CSP. Στόχος του Μαρόκου ήταν και παραμένει η αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από 0,24% το 2003 σε 10% το 2011 και κοντά στο 20% το 2020.

Το Μαρόκο έχει ξεκινήσει ένα από τα μεγαλύτερα έργα ηλιακής ενέργειας στον κόσμο, το οποίο κόστισε περίπου 9 δισεκατομμύρια δολάρια. Ο στόχος του έργου είναι η δημιουργία 2.000 MW ικανότητας παραγωγής μέχρι το έτος 2020. Πέντε σταθμοί ηλιακής ενέργειας πρόκειται να κατασκευαστούν. Ο Οργανισμός του Μαρόκου για την Ηλιακή Ενέργεια, μια δημόσια-ιδιωτική επιχείρηση, έχει αναλάβει να οδηγήσει το έργο. Η πρώτη μονάδα θα τεθεί σε λειτουργία το 2015, και το σύνολο του έργου το 2019. Μόλις ολοκληρωθεί, το ηλιακό έργο θα παρέχει το 18% της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Μαρόκου.

Το Μαρόκο, η μόνη αφρικανική χώρα που μπορεί να συνδέσει το καλώδιο τροφοδοσίας στην Ευρώπη, έχει ως στόχο να επωφεληθεί από τα 400 δισ. € (\$ 573.8bn) που αναμένεται να προέλθουν από το φιλόδοξο πανηπειρωτική κοινοπραξία Desertec Industrial Initiative.

Ο Οργανισμός του Μαρόκου για την Ηλιακή Ενέργεια προσκάλεσε εκδήλωση ενδιαφέροντος στο σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση και τη χρηματοδότηση του πρώτου από τους πέντε προγραμματισμένους σταθμούς ηλιακής ενέργειας, τη μονάδα 500 MW στη νότια πόλη του Ouarzazate. Η πρώτη φάση 160 MW ανατέθηκε στην ACWA Power, μια κοινοπραξία της οποίας ηγείται η Σαουδική Αραβία, που θα πωλεί την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται για \$ 0.19/kWh. Η κατασκευή του άρχισε επίσημα στις 10 Μαΐου 2013.

## 9.8. Αίγυπτος

Στόχος είναι το 20% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μέχρι το 2020, από το οποίο το 12% από την αιολική ενέργεια, το 5,8% από την υδροηλεκτρική και το 2,2% από την ηλιακή. Το εθνικό σχέδιο προβλέπει την εγκατάσταση ηλιακών σταθμών ισχύος 3500 MW τεχνολογίας

φωτοβολταϊκών και συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι το 2027.

Προς το παρόν λειτουργεί ένας σταθμός ISCC με τεχνολογία παραβολικών κοίλων συλλεκτών συνολικής ισχύος 140 MW, ενώ προετοιμάζονται άλλος ένας σταθμός CSP ισχύος 100MW και δύο σταθμοί φωτοβολταϊκών ισχύος 20 MW ο καθένας.

Το 1995, η Αρχή Νέων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (New and Renewable Energy Authority-NREA) και η Αιγυπτιακή Αρχή Ηλεκτρισμού (Egyptian Electricity Authority-EEA) χρηματοδότησαν μια τεχνολογική μελέτη δυνατότητας κατασκευής σταθμού ISCCS στην Αίγυπτο, όπου περισσότερο από το 95% του εδάφους λαμβάνει πάνω από 2000 kWh/m<sup>2</sup>/ έτος DNI, και περίπου το 80% της γης είναι διαθέσιμο για χρήση. Τρεις ηλιακές τεχνολογίες θεωρήθηκαν ώριμες για εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα, πο παραβολικοί κοίλοι συλλέκτες, ο πύργος ισχύος με δέκτη αέρα και ο πύργος ισχύος με δέκτη τηγμένου άλατος. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι ISCCS με PTCs ή πύργο με δέκτη αέρα είναι εξίσου ελκυστικοί. Το Υπουργείο Ηλεκτρισμού και Ενέργειας (Ministry of Electricity and Energy-MOEE) ανέθεσε σε μια κοινή επιτροπή των NREA, MOEE και EAA την αξιολόγηση των δυνατοτήτων για την ενσωμάτωση των τεχνολογιών CSP στο αιγυπτιακό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιτροπή κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ISCCS με PTC είναι η πιο οικονομική βραχυπρόθεσμη προσέγγιση για την έναρξη εφαρμογής της ηλιακής θερμικής ενέργειας στην Αίγυπτο.

Η πρώτη φάση του έργου ολοκληρώθηκε το 2000 και ακολούθησαν και άλλοι υποψήφιοι επενδυτές το 2001. Το έργο καθυστέρησε λόγω της υψηλής ισοτιμίας δολαρίου και της αιγυπτιακής λίρας.

Στα μέσα του 2003, η Παγκόσμια Τράπεζα αποφάσισε να αλλάξει την προσέγγισή της, επιτρέποντας τη συμμετοχή και του ιδιωτικού τομέα. Τον Φεβρουάριο του 2004, 35 επιχειρήσεις εκδήλωσαν το ενδιαφέρον τους σε μια γενική προκήρυξη διαγωνισμού. Στα μέσα του 2003, η Παγκόσμια Τράπεζα αποφάσισε να αλλάξει την προσέγγισή της, επιτρέποντας τη συμμετοχή και του ιδιωτικού τομέα. Τον Φεβρουάριο του 2004, 35 επιχειρήσεις εκδήλωσαν το ενδιαφέρον τους σε μια γενική προκήρυξη διαγωνισμού. Το 2007 οι συμβάσεις χορηγήθηκαν στην Iberdrola και την Mitsui για τον Συνδυασμένο Κύκλο Ισχύος και σε μια κοινοπραξία των Orascom και Flagsol για την κατασκευή του ηλιακού πεδίου.

Η Αίγυπτος έχει μεγάλες δυνατότητες για ανάπτυξη στον τομέα αυτό λόγω της υψηλής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, του μεγάλου ακατοίκητου επιπέδου στην έρημο που είναι διαθέσιμο και του διευρυμένου εθνικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και του δικτύου αγωγών φυσικού αερίου.

## 9.9. Νότια Αφρική

Τον Μάρτιο του 2009, η Εθνική Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας της Νότιας Αφρικής (NERSA) ενέκρινε τα τιμολόγια τροφοδότησης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας REFIT. Η ταρίφα (FIT) για το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, ορίστηκε 2,10 R/kWh για συγκεντρωτική ηλιακή ενέργεια με διάρκεια ισχύος 20 χρόνια.

Μέσα στα επόμενα έτη, η νοτιοαφρικανική επιχείρηση ηλεκτρισμού Eskom θα μπορούσε να λειτουργήσει το μεγαλύτερο πύργο ισχύος στον κόσμο. Η Eskom ανέλαβε μια μελέτη ενός 100 MW πιλοτικού έργου πύργου ισχύος με δέκτη τηγμένου άλατος στα μέσα του 2008. Η Eskom είχε μελετήσει στο παρελθόν τόσο τεχνολογίες παραβολικών κοίλων συλλεκτών όσο και πύργου ισχύος για να καθορίσει ποια είναι η φθηνότερη από τις δύο. Τελικά, η απόφαση θα πρέπει να βασίζεται σε μια ποικιλία παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του κόστους καθώς και της δυνατοότητας κατασκευής του αντίστοιχου εργοστασίου με τα τοπικά μέσα. Για την περαιτέρω ανάπτυξη των CSP, η κυβέρνηση στηρίζει την έρευνα μέσω του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας, παρέχοντας χρηματοδότηση στα πανεπιστήμια γιαυτό.

Το πρόγραμμα REFIT (στο πλαίσιο των καθεστώτων FiT) προβλέπει 1.200 MW τεχνολογιών CSP για το 2030. Παρ' όλα αυτά, το πρόγραμμα θα αναθεωρείται περιοδικά και το μερίδιο μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών μπορεί να εναλλάσσεται ανάλογα με τις εξελίξεις της τεχνολογίας και της πολιτικές θεωρήσεις.

Τα πρώτα τρία έργα ανατέθηκαν πρόσφατα και περιλαμβάνουν ένα σταθμό παραβολικών κοίλων συλλεκτών ισχύος 100 MW με θερμική αποθήκευση διάρκειας 3 ωρών, έναν άλλο ίδιας τεχνολογίας ισχύος 50 MW με θερμική αποθήκευση 9.3 ωρών και ένα πύργο ισχύος 50 MW με υπέρθερμο ατμό. Επιπλέον, η δημόσια κοινοφελής επιχείρηση εκπονεί μελέτες για να ξεκινήσει μια διαδικασία διαγωνισμού για συνολικά 150 MW σε σύντομο χρονικό διάστημα.

## 9.10. Αυστραλία

Ο συνδυασμός του ξηρού κλίματος και του γεωγραφικού πλάτους της Αυστραλίας της δίνουν υψηλά οφέλη και δυνατότητες για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος της αυστραλιανής ηπείρου λαμβάνει πάνω από 4 kWh/m<sup>2</sup>/ημέρα ηλιακή ακτινοβολία κατά τους χειμερινούς μήνες, με μια περιοχή στο βόρειο τμήμα που υπερβαίνει τις 6 kWh/m<sup>2</sup>/ημέρα. Η ηλιακή ακτινοβολία της Αυστραλίας υπερβαίνει κατά πολύ τις μέσες τιμές στην Ευρώπη, τη Ρωσία, και το μεγαλύτερο μέρος της Βόρειας Αμερικής. Ωστόσο, οι περιοχές της Αυστραλίας με την υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία είναι στο εσωτερικό, μακριά από τα πληθυσμιακά κέντρα.

Ο Υποχρεωτικός Στόχος ΑΠΕ της Ομοσπονδιακής Κυβέρνησης (Mandatory Renewable Energy Target-MRET) θα διασφαλίσει ότι οι ανανεώσιμες πηγές θα

αποκτήσουν μερίδιο 20% στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2020. Ο στόχος θα αυξηθεί από 9500 GWh σε 45000 GWh μέχρι το 2020 και το πρόγραμμα θα διαρκέσει μέχρι το 2030.

Τεχνικά, υπάρχουν τρεις κύριοι τομείς της παραγωγής ηλιακής θερμικής ηλεκτρικής ενέργειας στην Αυστραλία. Οι πιο εμπορικά προηγμένες από αυτές είναι τα συστήματα Fresnel (Compact Linear Fresnel Reflector-CLFR), τα οποία πλέον ενσωματώνουν ένα υπάρχον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την κάυση άνθρακα, που παράγει ατμό για να τροφοδοτήσει την κύρια θερμική γεννήτρια. Τέτοιοι σταθμοί είναι ο Kogan Creek Solar Boost και ο Liddell Power Station, οι οποίοι έχουν αναφερθεί και περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Το Εθνικό Πανεπιστήμιο της Αυστραλίας (ANU) ανέπτυξε σε συνεργασία με την εταιρία Wizard Power τον μεγαλύτερο ηλιακό συγκεντρωτή παραβολικού δίσκου με επιφάνεια 489 m<sup>2</sup>. Το πιάτο αυτό είναι ένα πρότυπο σχέδιο (το «Generation II Big Dish»), που προορίζεται για χρήση σε συστήματα μεγάλης κλίμακας παραγωγής ηλιακής θερμικής ενέργειας, όπου μεγάλες συστοιχίες των πιάτων συνδέονται για να τροφοδοτήσουν με ενέργεια μια κεντρική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πρωτοβουλία Clean Energy στο πλαίσιο του προγράμματος Solar Flagships έχει ξεκινήσει με ηλιακά έργα συνολικού ύψους 1.000 MW. Η πρώτη πρόσκληση για 400 MW (PV και CSP) έχει κλείσει. Ο νέος οργανισμός ARENA έχει καταστήσει σαφές ότι η ηλιακή θερμική ανάπτυξη της ηλεκτρικής ενέργειας είναι στα άμεσα σχέδιά του, και έχει διαμορφώσει την αρχικές στρατηγικές προτεραιότητες του με έναν τρόπο που θα είναι ευνοϊκός για τα έργα CSP. Μια πρόσφατη μελέτη υπολογίζει σταθμούς CSP ισχύος τουλάχιστον 2000 MW έως το 2020.

## 9.11. Ινδία

Στην Ινδία, υπάρχει ένα πολύ ελπιδοφόρο ηλιακό δυναμικό, με ετήσια ακτινοβολία μεταξύ 1600 και 2200 kWh/m<sup>2</sup>, η οποία είναι χαρακτηριστική των τροπικών και υποτροπικών περιοχών. Η εκτίμηση της ινδικής κυβέρνησης είναι ότι μόλις το 1% της ξηράς της Ινδίας θα μπορούσε να ανταποκριθεί στις ενεργειακές απαιτήσεις μέχρι το 2030. Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Κλιματική Αλλαγή προτείνει ορισμένα συγκεκριμένα μέτρα πολιτικής, συμπεριλαμβανομένων των έρευνών και της ανάπτυξης για να μειωθεί το κόστος παραγωγής και συντήρησης και έχει θεσπίσει ένα κέντρο έρευνας ηλιακής ενέργειας με στόχο τη δημιουργία τουλάχιστον 1000MW συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας στην Ινδία ως το 2017.

Ο στόχος της Solar Mission είναι η ανάπτυξη των τιμών βασικού φορτίου και η παραδοτέα συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια να είναι οικονομικά ανταγωνιστική έναντι των



ορυκτών καυσίμων μέσα σε 20 - 25 χρόνια. Η ινδική κυβέρνηση δοκιμάζει FiT για την ηλιακή ενέργεια μέχρι 10 ρουπίες ανά kWh (19 σεντ ΗΠΑ) για 10 έτη λειτουργίας, με όριο 10 MW για κάθε περιοχή . Φαίνεται να έχει ανανεωθεί το διεθνές ενδιαφέρον για την Ινδία. Τον Μάρτιο του 2009 , η eSolar από την Καλιφόρνια ανακοίνωσε μια συμφωνία για άδεια χρήσης της ηλιακής ενέργειας για την κατασκευή μέχρι 1 GW ηλιακών φωτοβολταϊκών πάρκων στην Ινδία κατά την επόμενη δεκαετία.

Υπάρχει μια τεράστια ανάγκη για πρόσθετη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα αυτή. Μια φιλόδοξη ατζέντα έχει ήδη προγραμματιστεί, με στόχο την παραγωγή 20 GW τόσο από CSP όσο και από φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μέχρι το 2022. Οι αναθέσεις για τα πρώτα 500 MW σταθμών CSP έχουν δοθεί σε τοπικούς φορείς στο πλαίσιο ενός συνδυασμένου συστήματος υποβολής προσφορών / Fit, και πολλοί από αυτούς έχουν ήδη αρχίσει την κατασκευή.

## 9.12. Κίνα

Για να προωθήσει την ανάπτυξη των CSP η Κίνα, το Πρόγραμμα Κλιμάκωσης ΑΠΕ (China Renewable Energy Scale up Programme-CRESP) κυκλοφόρησε μια έκθεση για τις πολιτικές οικονομικών κινήτρων παραγωγής ηλιακής ενέργειας. Η έκθεση πρότεινε μέτρα, συμπεριλαμβανομένης της φορολογίας και των οικονομικών προτιμήσεων, έκπτωση δανείων και περιλαμβανόμενων πληροφοριών σχετικά με τις πολιτικές τιμών προτίμησης και διαχείρισης, την αύξηση της τεχνολογικής έρευνας και της ανάπτυξη επενδύσεων και την ενίσχυση της ερευνητικής (Research and Development-R&D) ικανότητας, για τη θέσπιση τεχνικών προτύπων, τη διαχείριση των κανονισμών και ένα σύστημα ελέγχου ταυτότητας.

Η Εθνική Επιτροπή Ανάπτυξης και Μεταρρυθμίσεων (National Development and Reform Commission-NDRC) έχει αναλάβει επίσης την έρευνα σχετικά με τις feed-in-tariff πολιτικές της ηλιακής θερμικής μονάδας παραγωγής ενέργειας. Είναι αναμενόμενο ότι η 4 Yuan/kWh προμοδότηση θα πρέπει να εφαρμοστεί σε κάποιο σύστημα επιδειξης συστήματος ηλιακής ενέργειας τοποθετημένο στην έρημο σύντομα.

Σύμφωνα με τις τελευταίες αναφορές, η Κίνα αναμένεται να έχει ισχύ 1.000 MW (ή 1 GW) συγκεντρωμένης ηλιακής θερμικής ενέργειας (CSP) έως το 2015 και 3 GW έως το 2020. Μέχρι το 2015, η Κίνα σχεδιάζει να έχει εγκαταστήσει περισσότερη ισχύ CSP από τον υπόλοιπο κόσμο μαζί. Αυτό θα έχει δραματικές επιπτώσεις στη μείωση του κόστους, τόσο για την Κίνα όσο και για άλλες χώρες.

Μέχρι στιγμής το μεγαλύτερο έργο που ανακοινώθηκε στην Κίνα είναι μια συμφωνία που επετεύχθη τον Ιανουάριο του 2010 με την αμερικανική εταιρία eSolar (με έδρα στην Πασαντίνα, Καλιφόρνια) για την κατασκευή μίας σειράς θερμικών ηλιακών πάρκων ύψους

2GW μέχρι το 2020. Η εταιρεία eSolar χρησιμοποιεί μια αρθρωτή τεχνολογία που βασίζεται σε μονάδες 46MW και περιλαμβάνει συστοιχίες πεδίων μικρών επίπεδων κατόπτρων που γέρνουν προς προς τον ήλιο και έναν πύργο ισχύος - μια μονάδα που μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές.

Αυτή τη στιγμή, υπάρχουν σταθμοί CSP ισχύος 250 MW έτοιμοι να ξεκινήσουν την κατασκευή. Υπάρχει μια σειρά έργων υπό ανάπτυξη που υπερβαίνει τα 4.000 MW, αν και οι συνθήκες στήριξης δεν έχουν ακόμη καθοριστεί με σαφήνεια. Διεθνείς αναφορές επιτυχίας μπορεί να επιταχύνουν τα σχέδια αυτά.

### 9.13. Ισραήλ

Το πλαίσιο της ισραηλινής αγοράς ανανεώσιμων πηγών ορίστηκε κατά τα τελευταία πέντε χρόνια με δύο κύριες αποφάσεις της κυβέρνησης:

- Αριθμός απόφασης 4450 από τον Ιανουάριο του 2009 - η οποία περιελάμβανε ένα στόχο του 10% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μέχρι το 2020.
- Αριθμός απόφασης 3484 από τον Ιούλιο του 2011, το οποίο επικύρωσε το στόχο που καθορίστηκε το 2009, καθώς επίσης και όρισε συγκεκριμένες ποσοτώσεις για τις εγκαταστάσεις κάθε τεχνολογίας.

Η Αρχή Δημόσιων Επιχειρήσεων Κοινής Ωφέλειας (Public Utilities Authority-PUA) επιφορτίστηκε με την υλοποίηση των αποφάσεων αυτών. Ο οικονομικός μηχανισμός που χρησιμοποιήθηκε αρχικά για να ενθαρρύνει τα άτομα και τις επιχειρήσεις όσον αφορά την εγκατάσταση τεχνολογιών ΑΠΕ ήταν η Feed-in-tariff (FIT), που συνοδεύεται από μια σειρά ποσοτώσεων για τις εγκαταστάσεις. Η νομοθεσία και ο σχεδιασμός σχετίζονταν με τέσσερα διαφορετικά μεγέθη των εγκαταστάσεων: κατοικιών (μέχρι 15 KWp), εμπορική (μέχρι 50 KWp), μεσαία κλίμακα δικτύου (έως 12 MWp) και μεγάλη κλίμακα δικτύου (άνω των 12 MWp).

Ένα ηλιακό πάρκο 250 MW στο Ashalim, μια περιοχή στη βόρεια Negev, ήταν στο στάδιο του σχεδιασμού για πάνω από πέντε χρόνια, αλλά ο σταθμός αναμένεται να αρχίσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2017. Ο σταθμός θα συνδυάζει 3 είδη ενέργειας: ηλιακή θερμική ενέργεια, φωτοβολταϊκή ενέργεια και φυσικό αέριο. Μια μονάδα 30MW φωτοβολταϊκών έχει προγραμματιστεί, καθώς και ένας σταθμός CSP ισχύος 121 MW, από τη Megalim Solar Power, μια κοινοπραξία μεταξύ της BrightSource και Alstom. Ένας δεύτερος σταθμός CSP θα κατασκευαστεί επίσης. Έχουν ανακοινωθεί αλλά δεν έχουν ξεκινήσει να κατασκευάζονται ακόμη άλλοι δύο σταθμοί CSP ισχύος 120 MW ο ένας και 60 MW ο άλλος.

## 9.14. Τουρκία

Η Τουρκία βρίσκεται σε πλεονεκτική θέση στην Ευρώπη αναφορικά με την ηλιακή ενέργεια. Σε σύγκριση με την υπόλοιπη Ευρώπη, οι τιμές της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλότερες και οι προϋποθέσεις για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας είναι συγκρίσιμες με την Ισπανία. Η μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία είναι 1311 kWh/m<sup>2</sup>/έτος. Η κυβέρνηση έχει θέσει στόχο για τουλάχιστον 3GW μέχρι το 2023.

Η Τουρκία θέσπισε το δεύτερο Νόμο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, νόμος αριθ. 6094, όσον αφορά τη χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας, το 2010. Οι πηγές ηλιακής ενέργειας καλύπτονται από τον παρόντα νόμο, ο οποίος αποφασίζει ότι οι εγκαταστάσεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα πρέπει να χορηγούνται με πιστοποιητικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (πιστοποιητικά RER), δίνοντάς τους το δικώμα να επωφεληθούν από τα κίνητρα που παρέχονται από το νόμο. Η Emra είναι η αρμόδια αρχή για τη χορήγηση των πιστοποιητικών RER. Μη αδειοδοτημένα συστήματα που παράγουν έως 1 MW ενέργειας και είναι συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο είναι επιλέξιμα για ενισχύσεις της τάξης \$0.133/kWh.

Η Τουρκία είναι ήδη στο πλέγμα ισοτιμίας για τα νοικοκυριά και τους εμπορικούς χρήστες. Κατά τα επόμενα χρόνια η ηλιακή ενέργεια θα είναι εφικτή χωρίς μηχανισμό feed-in-tariff. Για την ηλιακή ενέργεια η FiT είναι 9.66 ¢€/kWh με έξτρα επίδομα για τα εξαρτήματα που είναι κατασκευασμένα στην Τουρκία ως εξής: σωλήνας θερμότητας 1.74 ¢€/kWh, καθρέυτες 0.44 ¢€/kWh, μηχανισμός παρακολούθησης 0.44 ¢€/kWh, μηχανικά εξαρτήματα θερμικής αποθήκευσης 0.94 ¢€/kWh, μηχανικά εξαρτήματα θερμικής συγκέντρωσης 1.74 ¢€/kWh, μηχανή Striling 0.94 ¢€/kWh και ενσωμάτωση πίνακα και μηχανικές κατασκευές 4.36 ¢€/kWh.

Αυτή τη στιγμή λειτουργούν στην Τουρκία δύο σταθμοί CSP. Ο ένας χρησιμοποιεί τεχνολογία πύργου ισχύος με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 5 MW και ο άλλος έχει ισχύ 1 MW και χρησιμοποιεί γραμμικούς συλλέκτες Fresnel.

## 9.15. Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα

Τα ΗΑΕ, ιδιαίτερα το Αμπού Ντάμπι, έχουν αρχίσει μια σημαντική πρωτοβουλία για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που είναι υπό ανάπτυξη, που θα βοηθήσει στην ανάπτυξη στο μέλλον της παγκόσμιας οικονομίας. Τα ΗΑΕ προσφέρουν εξαιρετικό ηλιακό δυναμικό για CSP, καθώς δέχονται κατά μέσο όρο DNI περίπου 2200 kWh/m<sup>2</sup>/έτος. Η

ανάπτυξη επιδιώκεται κυρίως από την εταιρία Masdar η οποία έχει δρομολογήσει διάφορα έργα ΑΠΕ. Από το Μάρτιο 2013 λειτουργεί ένας σταθμός 100 MW που χρησιμοποιεί την τεχνολογία παραβολικών κοίλων συλλεκτών (PTCs), και θα ακολουθηθεί από την κατασκευή άλλων δύο μονάδων.

### 9.16. Ιράν

Το Ιράν προωθούσε ένα εργοστάσιο CSP από το 1994, όταν μια κοινή ομάδα Γερμανών και Ιρανών εμπειρογνομώνων για την ηλιακή θερμική ενέργεια, που χρηματοδοτούταν από το Γερμανικό Ομοσπονδιακό Υπουργείο Περιβάλλοντος και την Ιρανική Εταιρία Ανάπτυξης Ενέργειας (Iranian Power Development Company-IPDC), έκανε μια σχεδιαστική μελέτη για ένα 100 MW<sub>e</sub> εργοστάσιο CSP. Το 1996 η IPDC επικοινωνήσε με το GEF (Global Environment Facility) για τη χρηματοδότηση του πρόσθετου κόστους του ηλιακού πεδίου, ωστόσο η GEF δεν ήταν σε θέση να διαθέσει τους πρόσθετους πόρους που απαιτούνταν. Μια μελέτη εφικτότητας για σταθμό ISCC με PTC έγινε από τα Niroo Research Institute, FLABEG Solar και Fichtner Solar. Το Yazd επιλέχθηκε ως η πλέον προτιμώμενη θέση με άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI) ίση με 2511 kWh/m<sup>2</sup>/έτος.

Λόγω της έλλειψης χρηματοδότησης, το Ιράν αναγκάστηκε να αλλάξει τη διαμόρφωση της εγκατάστασης το 2005. Έτσι, σήμερα στο Yazd λειτουργεί από το 2009 ένας υβριδικός σταθμός συνδυασμένου κύκλου με ηλιακή ενέργεια και φυσικό αέριο, που μάλιστα ήταν και ο πρώτος σταθμός παγκοσμίως του είδους του που κατασκευάστηκε. Ο σταθμός, που χρησιμοποιεί παραβολικούς κοίλους συλλέκτες, έχει συνολική ονομαστική ισχύ 467 MW ενώ το ηλιακό πεδίο έχει ισχύ 17 MW.

Μία ακόμη μονάδα παραβολικών κοίλων συλλεκτών λειτουργεί στο, Ιράν ισχύος 0.5 MW ενώ έχει ανακοινωθεί και ένας σταθμός ισχύος 72 MW με τεχνολογία παραβολικού δίσκου.

Το Ιράν έχει ορίσει κοινή FiT για όλες τις μορφές ΑΠΕ που εξαρτάται από την ώρα της ημέρας. Συγκεκριμένα, η προμηθευτική ισχύς με 9.04 c€/kWh για το μέσο φορτίο και το φορτίο αιχμής συνολικής διάρκειας 20 ωρών και 6.26 c€/kWh για το χαμηλό φορτίο διάρκειας 4 ωρών.

### 9.17. Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

Οι Ηνωμένες Πολιτείες διεξήγαγαν πολύ νωρίς έρευνα στα φωτοβολταϊκά και τη

συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια. Οι ΗΠΑ είναι μια από τις κορυφαίες χώρες στον κόσμο στην ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον ήλιο και αρκετές από τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις κλίμακας δικτύου στον κόσμο βρίσκονται στην έρημο Νοτιοδυτικά. Το παλαιότερη ηλιακή μονάδα παραγωγής ενέργειας στον κόσμο είναι ο σταθμός 354 MW SEGS, στην Καλιφόρνια. Ο σταθμός Inanrah Solar Electric Generating System είναι ένας ηλιακός θερμικός σταθμός στην έρημο Μοχάβι στην Καλιφόρνια, 40 μίλια (64 χλμ.) νοτιοδυτικά του Λας Βέγκας, με μικτή χωρητικότητα 392 μεγαβάτ (MW). Ο σταθμός Solana Generating Station ισχύος 280 MW είναι μια ηλιακή μονάδα παραγωγής ενέργειας στην Αριζόνα, περίπου 70 μίλια (110 χιλιόμετρα) νοτιοδυτικά του Φοίνιξ, που ολοκληρώθηκε το 2013. Όταν ανατέθηκε ήταν ο μεγαλύτερος σταθμός PTC στον κόσμο και η πρώτη ηλιακή μονάδα των ΗΠΑ με αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τηγμένα άλατα.

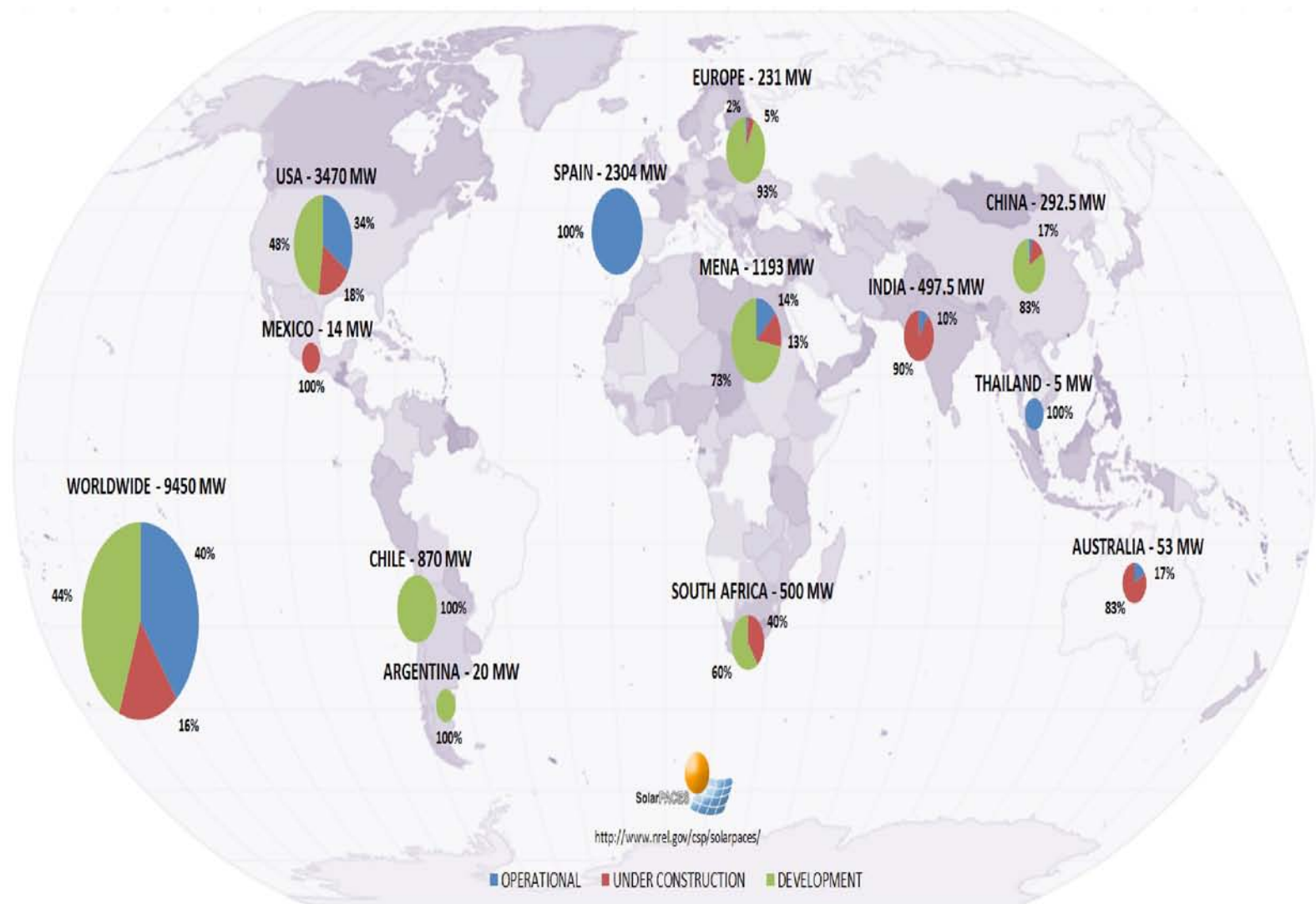
Υπάρχουν σχέδια για την κατασκευή πολλών άλλων μεγάλων ηλιακών εγκαταστάσεων στις Ηνωμένες Πολιτείες. Πολλές πολιτείες έχουν θέσει επιμέρους στόχους για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με την ηλιακή ενέργεια να περιλαμβάνεται σε διάφορες αναλογίες. Ο κυβερνήτης Jerry Brown υπέγραψε νομοθεσία που απαιτεί οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας της Καλιφόρνια να αποκτήσουν το 33% της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μέχρι το τέλος του 2020. Συνολικά 4324 MW σταθμοί ηλιακής ενέργειας κλίμακας δικτύου είναι υπό κατασκευή και επιπλέον 25926 MW είναι υπό ανάπτυξη, με 19.060 MW να βρίσκονται υπό κατασκευή ή ανάπτυξη στην Καλιφόρνια.



## 10. Συμπεράσματα

### 10.1 Γενικά

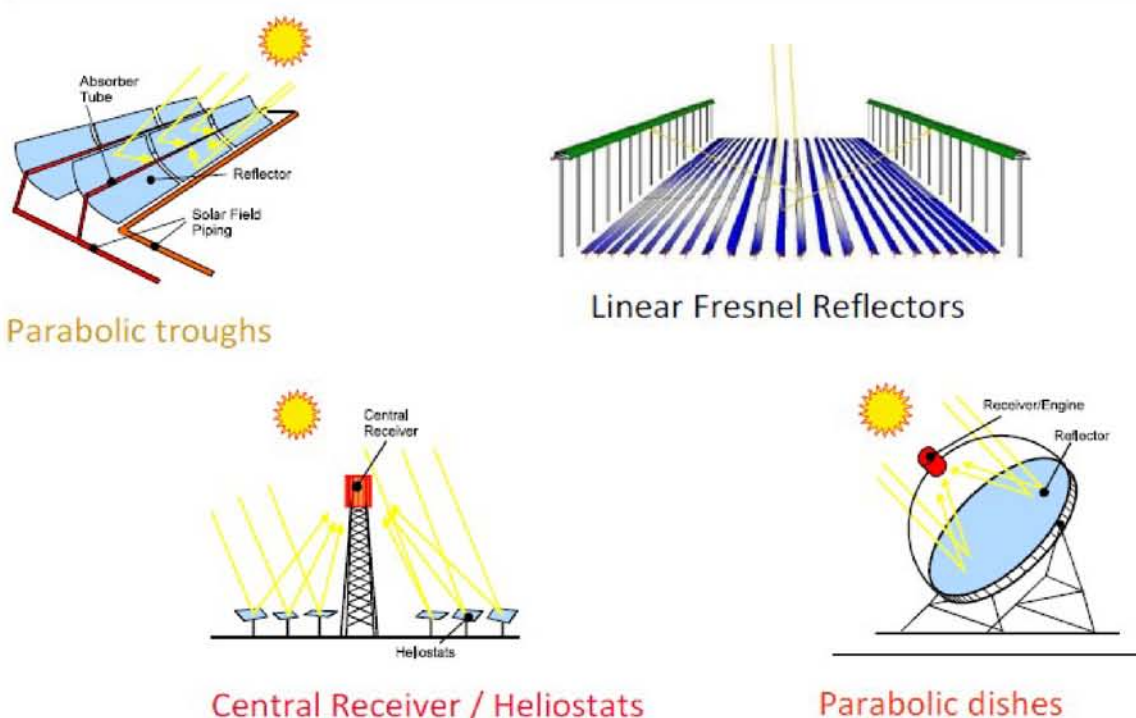
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύνοψη των κυριότερων συμπερασμάτων από την διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη των Συγκεντρωτικών (Θερμικών) Ηλιακών Συστημάτων, υβριδικών και μη, η κατανόησή τους μέσω της παρουσίασης αναλυτικών στοιχείων που αφορούν τη λειτουργία και την παραγωγή είδη εγκατεστημένων σταθμών παγκοσμίως και η περιγραφή της παρούσας κατάστασης- παγκοσμίως- όσων αφορά την εξέλιξη και τη λειτουργία τους.



Σχήμα 47. Παγκόσμιος χάρτης με επι τοις εκατο ποσοστο για καθε χωρα.

## 10.2 Σύντομη ανασκόπηση των CSP τεχνολογιών και σύγκριση των χαρακτηριστικών και της παρούσας χρήσης της κάθε μιας στην αγορά

Τα Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα (ΣΗΣ) είναι διατάξεις που συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια εστιάζοντας την ηλιακή ακτινοβολία σ' ένα σημείο ή μια γραμμή εστίασης. Βρίσκονται ήδη στο στάδιο της εμπορευματοποίησης, και μονάδες ισχύος πολλών MW παράγουν τη φθηνότερη ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως τα τελευταία 15 έτη. Τα τελικά στάδια ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ΣΗΣ είναι όμοια με αυτά της συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής, καθώς η τελική διεργασία ενεργειακής μετατροπής βασίζεται στη χρήση ατμού ή αερίου για την περιστροφή στροβίλων ή την κίνηση ενός εμβόλου σε μια μηχανή Stirling. Σε ένα σύστημα ΣΗΣ ο ατμός ή το θερμό αέριο παράγεται μέσω της συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Όλες οι τεχνολογίες ηλιακής θερμικής ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνουν έναν αριθμό βασικών σταδίων: Συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός συστήματος συλλεκτών. Συγκέντρωση (ή εστίαση) της ακτινοβολίας σε έναν δέκτη. Μετατροπή της από το δέκτη σε θερμική ενέργεια. Μεταφορά της θερμικής ενέργειας στο σύστημα ενεργειακής μετατροπής. Μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Πολλά τέτοια συστήματα είναι δυνατά, τα οποία μάλιστα μπορούν να συνδυάζονται με άλλες ανανεώσιμες και μη τεχνολογίες σε υβριδικά συστήματα. Ωστόσο θεωρείται ότι οι τέσσερις πολλά υποσχόμενες αρχιτεκτονικές θερμικής ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την τεχνική που χρησιμοποιείται για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, είναι: οι παραβολικοί κοίλοι συλλέκτες (Parabolic Trough Collectors, PTCs), οι ηλιακοί πύργοι ισχύος (Power Towers / Central Receivers), τα συστήματα (παραβολικού) δίσκου/μηχανής (parabolic Dish/Engine) και οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel (Linear Fresnel Receivers, LFRs).



Σχήμα 48. Τα τέσσερα βασικά είδη των CSP τεχνολογιών.



Τα συστήματα PTC και LFR είναι συγκεντρωτικά συστήματα δύο διαστάσεων (2D) στα οποία η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται επάνω σε μια εστιακή γραμμή από κάτοπτρα, με μηχανισμό παρακολούθησης του ήλιου σε έναν άξονα. Είναι σε θέση να συγκεντρώνουν την ροή της ηλιακής ακτινοβολίας 30-80 φορές, θερμαίνοντας το θερμικό ρευστό λειτουργίας έως τους 450 °C, με μονάδα μετατροπής ισχύος ικανότητας 30-280 MW, και ως εκ τούτου, είναι κατάλληλα για την κεντρική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αγορές με δυνατότητα μεταφοράς με ατμοστροβίλου/γεννήτρια κύκλου Rankine.

Η τεχνολογία των πύργων ισχύος είναι πιο περίπλοκη, καθώς ο ηλιακός δέκτης είναι τοποθετημένος στην κορυφή ενός πύργου και το ηλιακό φως συγκεντρώνεται με τη βοήθεια ενός μεγάλου παραβολοειδούς που διακριτοποιείται σε ένα πεδίο ηλιοστατών. Αυτός ο συγκεντρωτής τριών διαστάσεων (3D) είναι, συνεπώς, εκτός άξονα και οι ηλιοστάτες απαιτούν παρακολούθηση του ήλιου σε δύο άξονες. Οι συντελεστές συγκέντρωσης είναι μεταξύ 200 και 1000 και τα μεγέθη της μονάδας μετατροπής ισχύος είναι μεταξύ 10 και 200 MW, και ως εκ τούτου, τα συστήματα πύργου ισχύος είναι κατάλληλα για αγορές με δυνατότητα μεταφοράς και ολοκλήρωση σε προηγμένους θερμοδυναμικούς κύκλους. Στα συστήματα αυτά χρησιμοποιείται μια ευρεία ποικιλία θερμικών ρευστών λειτουργίας, όπως κορεσμένος ατμός, υπέρθερμος ατμός, τηγμένα άλατα, ατμοσφαιρικός αέρας, ή πεπιεσμένος αέρας, και θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 300 °C και 1000 °C.

Τέλος, τα συστήματα (παραβολικού) Δίσκου/Μηχανής είναι μικρές αρθρωτές μονάδες με αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μηχανές Stirling ή Brayton μικροστροβίλων που βρίσκονται τοποθετημένες στο σημείο εστίασης. Οι δίσκοι είναι παραβολικοί συγκεντρωτές τριών διαστάσεων (3D) με υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης (1000-3000) και ικανότητα μονάδας μετατροπής ισχύος 5-25 kW. Η τρέχουσα θέση τους στην αγορά είναι τόσο σε συνδεδεμένες σε δίκτυο όσο και σε απομακρυσμένες / μη-συνδεδεμένες σε δίκτυο (αυτόνομες) εφαρμογές ισχύος.

Η τυπική ονομαστική απόδοση μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να κινηθεί μεταξύ 20% για PTC και LFR συστήματα, 23% για συστήματα πύργου ισχύος και 30% για συστήματα δίσκου/μηχανής. Οι ετήσιοι δείκτες δυναμικότητας μπορούν να κινηθούν μεταξύ των τιμών της τάξης του 20% για συστήματα χωρίς αποθήκευση θερμικής ενέργειας και πάνω από 70% για την κατασκευή συστημάτων με χρήση μεγάλων μονάδων αποθήκευσης. Κάθε τετραγωνικό μέτρο πεδίου CSP μπορεί να παράγει μέχρι και 1200 kWh θερμικής ενέργειας ετησίως ή μέχρι 400 kWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως. Αυτό σημαίνει μια σωρευτική εξοικονόμηση μέχρι και 12 τόνους διοξειδίου του άνθρακα και 2,5 τόνους ορυκτών καυσίμων ανά τετραγωνικό μέτρο του συστήματος CSP κατά τη διάρκεια 25 χρόνων ζωής του.

Τα συστήματα παραβολικών κοίλων συλλεκτών (PTCs) είναι κυρίως η τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρέως στις μέρες μας σε εμπορικά έργα. Είναι η πιο ώριμη ηλιακή τεχνολογία με σταθμούς σε λειτουργία από το 1985 και μεγάλο αριθμό σταθμών σε λειτουργία μέχρι σήμερα (συνολική ισχύ σταθμών υπό λειτουργία πάνω από GW<sub>e</sub>). Ωστόσο

και οι άλλες τεχνολογίες, κυρίως οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel και οι πύργοι ισχύος, αναπτύσσουν τα πρώτα διασυνδεδεμένα σε δίκτυο έργα και αποκαλύπτουν πολλά υποσχόμενες επιπτώσεις στη μείωση του κόστους.

Παράμετροι	Τεχνολογίες Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων			
	Παραβολικοί κοίλοι συλλέκτες (PTCs)	Πύργοι ισχύος (Solar Towers)	Γραμμικοί συλλέκτες freshnel (LFRs)	Δίσκος/Μηχανή (Dish/Engine)
Απαραίτητη ηλιακή ακτινοβολία	1800 kWh/m <sup>2</sup>	1800 kWh/m <sup>2</sup>	1800 kWh/m <sup>2</sup>	1800 kWh/m <sup>2</sup>
εδαφική έκταση	Τυπικά 20.234 - 28.238 m <sup>2</sup> /MW			
Τυπικό σχήμα ηλιακού σταθμού	ορθογώνιο παραλληλόγραμμο	τομέας κύκλου/ορθογώνιο παραλληλόγραμμο	ορθογώνιο παραλληλόγραμμο	ορθογώνιο παραλληλόγραμμο
Αναγκαιότητα νερού	Τυπικά 4 m <sup>3</sup> /MWh			
Μέγιστη θερμοκρασία	400 C	270 C - δυνατότητα μέχρι 560 C	400 C	800 C
Αποδοτικότητα	14%	17 % - δυνατότητα μέχρι 22%	15%	22-24%
Κόστος σταθμού		μικρότερο από τα PTCs	μικρότερο από τα PTCs	πολύ μεγάλο
κατάσταση ανάπτυξης	πιο αποδεδειγμένη/εφαρμοσμένη απ'όλες	ώριμη	πειραματικοί σταθμοί	πειραματικοί σταθμοί
Πάροχοι τεχνολογίας	- Sener - Solar Millenium - Abengoa - ACS-Cobra - Solaj	- Abengoa - eSolar - Sener - BrightSource - Torresol	- Austra - MAN Ferrostaal	- Stirling Energy - Systems

Πίνακας 19. Χαρακτηριστικά / Σύγκριση των τεχνολογιών CSP.

### 10.3 Ανάπτυξη/πρόοδος των CSP τεχνολογιών παγκοσμίως και μελλοντικά σενάρια εξέλιξής τους

Από τη δεκαετία του εβδομήντα ως τη δεκαετία του ενενήντα, η ανάπτυξη των τεχνολογιών CSP παρέμεινε περιορισμένη σε λίγες χώρες και συμμετείχαν μόνο λίγα, αν και σημαντικά, ερευνητικά ιδρύματα και βιομηχανίες. Η κατάσταση έχει αλλάξει δραματικά από το 2006, με την έγκριση των ειδικών feed-in-τιμολογίων (τυποποιημένες συμβάσεις προσφοράς) ή τις συμφωνίες αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ισπανία και τις ΗΠΑ. Και οι δύο χώρες με περισσότερα από 6 GW έργων υπό ανάπτυξη και πάνω από 2 GW σε λειτουργία στο τέλος του 2012 οδηγούν αναμφίβολα στην εμπορευματοποίηση των CSP. Οι ΗΠΑ και η Ισπανία είναι πρωτοπόρες (τόσο χρονολογικά όσο και ποσοτικά) στην κατασκευή και λειτουργία σταθμών CSP, όμως στην πορεία οι CSP τεχνολογίες έχουν

υιοθετηθεί και εξελίσσονται και σε άλλες χώρες όπως η Ινδία, η Κίνα, η Αυστραλία και η Ιταλία. Όμαδες ανθρώπων με ποικιλία ειδικοτήτων, όπως μηχανικές και κατασκευαστικές εταιρείες, σύμβουλοι, τεχνολόγοι και προγραμματιστές- που ασχολούνται στην έρευνα και τη δημιουργία μελλοντικών σχεδίων για την κατασκευή και την λειτουργία των σταθμών CSP- είναι ραγδαία αναπτυσσόμενες.

Μια σαφής ένδειξη της παγκοσμιοποίησης της εμπορικής ανάπτυξης των CSP για το μέλλον, είναι το σενάριο της ενέργειας που έχει εκπονηθεί από τον ΔΟΕ (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας). Το σενάριο αυτό προβλέπει οι σταθμοί CSP να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο μεταξύ του απαραίτητου μείγματος των ενεργειακών τεχνολογιών για την μείωση κατά το ήμισυ της παγκόσμιας ενέργειας που σχετίζεται με τις εκπομπές CO<sub>2</sub> έως το 2050. Αυτό το σενάριο θα απαιτούσε προσθήκη δυναμικότητας περίπου 14 GW / έτος (δηλαδή 55 νέα ηλιακά θερμικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας από 250MW το κάθε ένα). Ωστόσο, αυτή η νέα ευκαιρία εισάγει ένα σημαντικό άγχος για τους προγραμματιστές των CSP. Σε μια περίοδο μικρότερη των 5 ετών, σε διάφορα μέρη του κόσμου, αυτές οι προγραμματιστές των CSP αναγκάζονται να μετακινηθούν από στρατηγικές προσανατολισμένες στην πρώιμη εμπορευματοποίηση των αγορών με βάση τα ειδικά τιμολόγια, σε στρατηγικές προσανατολισμένες σε μια μαζική παραγωγή των συστατικών και στην ανάπτυξη μεγάλης ποσότητας έργων με λιγότερο επικερδή τιμολόγια. Η κατάσταση αυτή επιταχύνει την εφαρμογή τεχνολογιών δεύτερης γενιάς, όπως τα συστήματα άμεσης παραγωγής ατμού ή τα συστήματα τηγμένου άλατος, μολονότι σε ορισμένες περιπτώσεις, ακόμη, ορισμένες καινοτομίες είναι υπό αξιολόγηση ως προς πρώιμη εμπορευματοποίηση των σταθμών.

Με τις σημερινές επενδυτικές δαπάνες, όλες οι τεχνολογίες CSP γενικά πιστεύεται ότι απαιτούν δημόσια στρατηγική οικονομικής στήριξης για την ανάπτυξη της αγοράς. Επί του παρόντος, το άμεσο κόστος κεφαλαίου των CSP και το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται ότι είναι δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερα από εκείνα των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα, ωστόσο, ο βιομηχανικός σχεδιασμός προβλέπει 60% μείωση του κόστους πριν από 2025. Στην πραγματικότητα, οι κυβερνήσεις σε ορισμένες χώρες, όπως η Ισπανία, έχουν ήδη επιταχύνει τις διαδικασίες για τη δραστική μείωση των δασμών με στόχο τα συστήματα CSP τα φωτοβολταϊκά και η αιολική ενέργεια να φτάσουν σε ισοδύναμο κόστος σε λιγότερο από μία δεκαετία.

Η μείωση του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι μια συνέπεια, όχι μόνο της μαζικής παραγωγής, αλλά και της αναβάθμισης, τη έρευνας και της ανάπτυξης (Research & Development , R&D). Ένας τεχνολογικός χάρτης πορείας που προωθεί η Ευρωπαϊκή Ένωση Βιομηχανιών ESTELA10 αναφέρει ότι μέχρι το 2015, όταν οι περισσότερες από τις βελτιώσεις στο στάδιο της ανάπτυξης αναμένεται να εφαρμοστούν σε νέες εγκαταστάσεις, αναμένεται να επιτευχθεί αύξηση της παραγωγής ενέργειας περισσότερο από 10% και μείωση του κόστους έως και 20%. Επιπλέον, οι οικονομίες κλίμακας (economies of scale) που προκύπτουν από την αύξηση του μεγέθους των σταθμών θα συμβάλουν επίσης στη μείωση των καιφαλαιακών δαπανών των σταθμών (CAPital Expenditure, CAPEX) ανά εγκατεστημένο MW έως και 30%. Η ανάπτυξη των

CSP σταθμών σε περιοχές με πολύ υψηλή ηλιακή ακτινοβολία συμβάλλει περαιτέρω στην επίτευξη ανταγωνιστικότητας του κόστους αυτών των τεχνολογιών, με τη μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας έως και 25%. Όλοι αυτοί οι παράγοντες, λοιπόν, μπορούν να οδηγήσουν στην εξοικονόμηση κόστους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως και 30% έως το 2015 και έως 50% μέχρι το 2025, φθάνοντας σε ανταγωνιστικά επίπεδα με τις συμβατικές πηγές (π.χ. άνθρακας / αέριο με σταθερό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας < 10 € c / kWh).



## Βιβλιογραφία

- **"Solar Energy Engineering: Processes and systems"**, Soteris Kalogirou, 2009
- **"Concentrating Solar Power Technology: Principles, developments and applications"**, Keith Lovegrove, Wes Stein, 2012
- **"Solar thermal CSP technology"**, Manuel Romero, Jose Gonzalez-Aguilar  
WIREs energy Environ 2014, vol.3, 42-59
- **"Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough power plants"**, Gabriel Morin, Jurgen Dersch, Werner Platzer, Markus Eck, Andreas Haberle  
Solar Energy, vol.86 (2012), 1-12
- **"History, current state and future of Linear Fresnel concentrating solar collectors"**, Guangdong Zhu, Tim Vendelin, Michael J. Wagner, Chuck Kutser  
Solar Energy, vol.103 (2014), 639-652
- **"Parabolic trough solar collectors and their applications"**, A.Fernandez-Garcia, E. Zarza, L. Velenzuela, M. Perez  
Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.14 (2010), 1695-1721
- **"Solar thermal collectors and applications"**, Soteris A. Kalogirou  
Progress in Energy and Combustion Science, vol.30 (2004), 231-295
- **"Solar linear fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid"**, Roberto Grena, Pietro Tarquini  
Energy, vol.36 (2011), 1048-1056
- **"Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants"**, Sarada Kuravi, Jamie Trahan, D. Yogi Goswami, Muhammad M. Rahman, Elias K. Stefanakos  
Progress in Energy and Combustion Science, vol.39 (2013), 285-319
- **"Concentrated solar power hybrid plants, which technologies are best suited foe hybridisation"**, Juergen H. Petersein, Stuart White, Amir Tadros, Udo Hellwig  
Renewable Energy, vol.57 (2013), 520-532
- **"Concentrating solar power hybrid plants-Enabling cost effective synergies"**, Juergen H. Petersein, Stuart White, Amir Tadros, Udo Hellwig  
Renewable Energy, vol.67 (2014), 178-185

- **"Technology Roadmap: Concentrating Solar Power"** International Energy Agency, [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Concentrating Solar Power Projects by Project Name, National Renewable Energy Laboratory, [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)
- **"Feed-in Tariff as a Tool for Motivating the use of renewable energy"**, Dr.Ahmad Hourri, 2012, [www.css.escwa.org.lb](http://www.css.escwa.org.lb)
- European Solar Thermal Electricity Association, [www.estelasolar.en](http://www.estelasolar.en)
- **"Solar engineering of thermal process"**, J. A. Duffie, W. A. Beckman, Wiley 1991
- **"Συμβατικές και Ήπιες μορφές ενέργειας"**, Κ. Α. Μπαλάρας, Α. Α. Αργυρίου, Φ. Ε. Καραγιάννης, Αθήνα 2006
- **"Ηλιακή Ενέργεια"**, Δ. Κατσαπρακάκης  
Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, ΤΕΙ Κρήτης
- **"Solar Thermal Electricity: Strategic Research Agenda 2020-2025"**, Estela, 2012
- **"CLFR Molten Salt Storage for Reliable, Dispatchable CSP Generation"**, Areva Solar, 2012, [www.areva.com](http://www.areva.com)
- **"Nevada Solar One powering America"**, 2013, [www.nevadasolarone.net](http://www.nevadasolarone.net)
- Electricity Data Browser, U.S. Energy Information Administration, [www.eia.gov](http://www.eia.gov)
- Gemasolar Power Plant, Torresol energy, [www.torresolenergy.com](http://www.torresolenergy.com)
- Ivanpah Solar Electric Generating System, [www.ivanpahsolar.com](http://www.ivanpahsolar.com)
- [www.solarpaces.org/csp-technology/csp-technology-general-information](http://www.solarpaces.org/csp-technology/csp-technology-general-information)
- [www.therminol.com/pages/products/vp-1.asp](http://www.therminol.com/pages/products/vp-1.asp)
- en.wikipedia.org : List of solar thermal power stations, Ivanpah Solar Power Facility, Solana Generating Station, Solnova Solar Power Station, Andasol solar power station, Shams solar power station, Martin Next Generation Solar Energy Center, Nevada solar one, Puerto Errado, Termosolar Borges, PS20 solar power plant, Gemasolar Thermosolar Plant, PS10 solar power plant, Kimberlina Solar Thermal Energy Plant, Archimede solar power plant, Liddell Power Station, Rankine Cycle, Stirling Engine, Stirling cycle, Brayton cycle, Solar Power in the United states, Solar Power in India, Solar power in Australia, Solar Power in Spain, Solar Power in Israel, Solar Power in China,

Solar Power in Italy, Solar Power in Greece, Solar Power in France, Solar Power in Turkey, Solar Power in Morocco, Solar Power in Cyprus, Solar Power in South Africa, Solar Power in Saudi Arabia, Kogan Creek Solar Boost, Sunlight