



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Π.Ε.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**« ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
ΗΛΙΟΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ »**

ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ:

Χάρη Γεωργίου

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Δρ Κ.Α. ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Π.Ε.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**« ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
ΗΛΙΟΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ »**

ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ :

Χάρη Γεωργίου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την (6^η Οκτωβρίου) 2020.

(Υπογραφή)

Καββαδίας Κοσμάς
Καθηγητής Π.Α.Δ.Α.

(Υπογραφή)

Αλέξης Γεώργιος
Καθηγητής Π.Α.Δ.Α.

(Υπογραφή)

Νίκας Κωνσταντίνος
Καθηγητής Π.Α.Δ.Α.

1. Πίνακας περιεχομένων

2.	ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
3.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
4.	ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ.....	7
4.1.	Ορισμός της Γεωθερμίας	7
4.2.	Σύσταση γεωθερμικού ρευστού.....	7
4.3.	Θερμική ροή από το εσωτερικό της Γης.....	8
4.4.	Υψηλές γεωθερμικές βαθμίδες	8
4.5.	Γεωθερμικές εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο	10
4.6.	Οι Χώρες με τη μεγαλύτερη γεωθερμική ισχύ στον κόσμο	11
4.6.1.	Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ)	11
4.6.2.	Ινδονησία.....	12
4.6.3.	Φιλιππίνες.....	12
4.6.4.	Τουρκία.....	13
4.6.5.	Νέα Ζηλανδία	14
4.7.	Γεωθερμία στην Ευρώπη	15
4.8.	Γεωθερμία στην Ελλάδα.....	18
4.9.	Μετατροπή της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική	20
4.9.1.	Αρχή λειτουργίας της γεωθερμίας.....	20
4.10.	Διατάξεις αξιοποίησης της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή	21
4.10.1.	Με χρήση ξηρού ατμού (Dry Steam)	22
4.10.2.	Με στιγμιαία ατμοποίηση εργαζόμενου μέσου (Flash Steam).....	24
4.10.3.	Οργανικός δυαδικός κύκλος με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα (Binary Cycle)	26
4.10.4.	Με χρήση Συνδυασμένου Κύκλου (Combined Cycle).....	28
4.11.	Ενισχυμένα Γεωθερμικά Συστήματα.....	29
5.	PTC (Parabolic Trough Collector)	31
5.1.	Περιγραφή των PTC	31
5.2.	Δομή ηλιακών κατόπτρων	33
5.3.	Απορροφητής.....	34
5.4.	Μέθοδοι παραγωγής ατμού.....	35
5.5.	Διάταξη ηλιακού πεδίου	38
5.6.	Μέγεθος ηλιακού πεδίου.....	40
5.7.	Διαθέσιμοι παραβολικοί συλλέκτες.....	42

5.7.1.	Συλλέκτες τύπου Luz.....	42
5.7.2.	Συλλέκτης EuroTrough.....	44
5.7.3.	Συλλέκτης Solargenix.....	44
5.7.4.	Συλλέκτης IST.....	45
5.7.5.	Συλλέκτης Heliotrough.....	45
5.7.6.	Συλλέκτης Skytrough.....	46
5.8.	Ηλιακή Ακτινοβολία.....	47
5.8.1.	Γεωμετρικές παράμετροι.....	48
5.8.2.	Σκίαση μεταξύ συστοιχιών.....	52
5.9.	Σταθεροί παράγοντες οπτικών απωλειών.....	53
5.10.	Θερμικές εγκαταστάσεις παραβολικών συλλεκτών (Parabolic Trough Collector) 54	
5.10.1.	ΙΣΠΑΝΙΑ 2,3 GW.....	56
5.10.2.	ΗΠΑ 1,76 GW.....	57
5.10.3.	ΜΑΡΟΚΟ 530 MW.....	57
5.10.4.	ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ 400MW.....	58
5.11.	Θερμικά συστήματα αποθήκευσης.....	59
5.11.1.	Συστήματα άμεσης αποθήκευσης.....	59
5.11.2.	Συστήματα έμμεσης αποθήκευσης.....	62
6.	Υβριδικές ηλιο-γεωθερμικές μονάδες.....	63
6.1.	Διατάξεις υβριδικών ηλιο-γεωθερμικών εγκαταστάσεων.....	63
6.2.	Μαθηματικό Μοντέλο υβριδικών ηλιο-γεωθερμικών εγκαταστάσεων.71	
6.2.1.	Ηλιακό Πεδίο.....	71
6.2.2.	Γεωθερμικός κύκλος.....	72
6.2.3.	Πρόβλεψη ετήσιας ενεργειακής παραγωγής και αποθήκευσης.....	79
7.	Εφαρμογές υβριδικών ηλιο – γεωθερμικών εγκαταστάσεων.....	81
7.1.	Πλεονεκτήματα υβριδικών ηλιο – γεωθερμικών συστημάτων.....	82
7.2.	Μειονεκτήματα υβριδικών ηλιο – γεωθερμικών συστημάτων.....	83
7.3.	Προκλήσεις και τεχνικά προβλήματα των υβριδικών ηλιο – γεωθερμικών συστημάτων.....	83
7.4.	Παραδείγματα υλοποιημένων υβριδικών ηλιο-γεωθερμικών εγκαταστάσεων.....	85
7.5.	Γεωθερμικές μονάδες με προσθήκη φωτοβολταϊκών PV.....	86
7.5.1.	Γεωθερμικό πεδίο «The Geysers», Καλιφόρνια, ΗΠΑ.....	86
7.5.2.	Γεωθερμικό πεδίο «Tungsten Mountain», Νεβάδα, ΗΠΑ.....	87
7.5.3.	Γεωθερμικό πεδίο «Ahuachapan», Ελ Σαλβαδόρ.....	88

7.5.4. Γεωθερμικό πεδίο «Stillwater», Νεβάδα, ΗΠΑ	89
7.6. Παράδειγμα υβριδικής ηλιο-γεωθερμικής εγκατάστασης υπό κατασκευή	93
8. Επίλογος	96
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	98

2. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια συγκεντρωτική αναφορά των υβριδικών εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τη γεωθερμία και τα ηλιακά συγκεντρωτικά κάτοπτρα. Αποτελείται από δύο βασικά μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται εκτενής αναφορά στις δύο τεχνολογίες αυτές (μεμονωμένα) με παράθεση ιστορικών δεδομένων, χαρτογράφηση των εγκαταστάσεων σε όλο τον κόσμο, αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας τους και της δομής τους κατά περίπτωση. Στο δεύτερο μέρος γίνεται αναλυτική περιγραφή των υβριδικών εγκαταστάσεων που συνδυάζουν τις τεχνολογίες αυτές, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο (μαθηματικό μοντέλο) όσο και σε επίπεδο εφαρμογής. Καταγράφονται και περιγράφονται όλες οι πιθανές ηλιο-γεωθερμικές διατάξεις και γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Στο τέλος παρατίθενται οι λόγοι και τα συμπεράσματα που οδηγούν στην επιλογή μιας υβριδικής εγκατάστασης που συνδυάζει την γεωθερμία και τα ηλιακά.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ : Γεωθερμία, Ηλιακά Κάτοπτρα, Υβριδικά Συστήματα Ηλιο-γεωθερμίας

3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαρκώς αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση σε συνδυασμό με τη μείωση των φυσικών πόρων του πλανήτη, οδηγούν στη ανακάλυψη νέων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Όπως είναι φυσικό, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Με γνώμονα τα κλιματικά δεδομένα αλλά και το γεωμορφολογικό της πεδίο, κάθε χώρα επενδύει στη ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Η Ελλάδα, έχει μεγάλες περιόδους ηλιοφάνειας κατά την διάρκεια του έτους και πρόσφορο υπέδαφος σε γεωθερμία. Τα δεδομένα αυτά οδήγησαν στην αναζήτηση βιβλιογραφικού υλικού σχετικά με την ηλιακή ενέργεια και την γεωθερμία καθώς και τον συνδυασμό τους.

Ύστερα από εκτενή έρευνα στην ελληνική βιβλιογραφία παρατηρήθηκε πως δεν υπάρχει συγκεντρωτική αναφορά στις ηλιο-γεωθερμικές εγκαταστάσεις. Η παρούσα διπλωματική αποσκοπεί στην – κατά το δυνατόν – αποκατάσταση του κενού αυτού. Σκοπός της διπλωματικής είναι η αναλυτική περιγραφή των δύο τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, με ηλιακά και γεωθερμία, και κατ'επέκταση η πλήρης περιγραφή των υβριδικών ηλιο-γεωθερμικών εγκαταστάσεων που προκύπτουν από των συνδυασμό τους.

Η διπλωματική εστιάζει σε τρεις ενότητες. Η πρώτη ενότητα αναφέρεται στη γεωθερμία. Αρχικά δίνεται ο ορισμός της γεωθερμίας. Περιγράφεται η μορφή της ενέργειας αυτής καθώς και η σύστασή της. Προσδιορίζεται η γεωμορφολογία του υπεδάφους ολόκληρης της επιφάνειας της γης και εντοπίζονται οι περιοχές με τα μεγαλύτερα κοιτάσματα γεωθερμίας. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στις χώρες με την μεγαλύτερη εκμετάλλευση γεωθερμικής ισχύος ανά τον κόσμο. Εν συνεχεία καταγράφεται το γεωθερμικό δυναμικό της Ευρώπης και ο βαθμός αξιοποίησης του. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική περιγραφή γύρω τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες που υπάρχουν στον Ελλαδικό χώρο, την απόδοσή τους και τις μεθόδους εκμετάλλευσής τους. Η ενότητα αυτή κλείνει με τις διατάξεις αξιοποίησης της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή κατά περίπτωση και σύμφωνα με τη δυναμική κάθε περιοχής.

Η δεύτερη ενότητα της διπλωματικής αποσκοπεί στην αναλυτή περιγραφή των παραβολικών συλλεκτών (Parabolic Trough Collectors). Καταγράφονται τα μέρη από τα οποία αποτελούνται καθώς και ο τρόπος λειτουργίας των επιμέρους εξαρτημάτων. Περιγράφονται οι μέθοδοι παραγωγής ενέργειας από τα ηλιακά συγκεντρωτικά κάτοπτρα και ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται στο εκάστοτε ηλιακό πεδίο. Επίσης παρατίθενται οι διαθέσιμοι παραβολικοί συλλέκτες δίνοντας έμφαση στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Στη συνέχεια αναγράφεται το μαθηματικό μοντέλο με το οποίο προσδιορίζεται η θέση του ηλιακού πεδίου (εγκατάστασης), λαμβάνοντας υπ' όψιν την ηλιακή ακτινοβολία και τις γεωμετρικές παραμέτρους κάθε περιοχής. Επιπλέον καταγράφονται οι χώρες με τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις ηλιακών κατόπτρων στον κόσμο μέχρι και σήμερα. Η ενότητα αυτή ολοκληρώνεται με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας τα οποία διατάσσονται πάντοτε πλησίον των ηλιακών εγκαταστάσεων, καθώς βοηθούν στην εύρυθμη λειτουργία των συλλεκτών και στην αύξηση του βαθμού απόδοσης παραγωγής ενέργειας.

Η τρίτη ενότητα εστιάζει στον βασικότερο σκοπό της διπλωματικής. Στην ενότητα αυτή γίνεται εκτενής αναφορά στις υβριδικές εγκαταστάσεις ηλιο-

του σπουδαστή Χάρη Γεωργίου

γεωθερμίας. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται οι τρεις πιθανές υβριδικές διατάξεις ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εγκατάστασης. Στο δεύτερο μέρος αναγράφεται το μαθηματικό μοντέλο παραγωγής ενέργειας που ακολουθούν οι διατάξεις αυτές. Στο τρίτο μέρος παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και οι προκλήσεις που προκύπτουν από έναν ηλιο-γεωθερμικό σταθμό. Το τέταρτο και τελευταίο μέρος της ενότητας αυτής επισφραγίζεται με παραδείγματα ηλιο-γεωθερμικών εγκαταστάσεων ανά τον κόσμο.

4. ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

4.1. Ορισμός της Γεωθερμίας

Γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται η ροή θερμότητας από το εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια της γης. Η ενέργεια αυτή αποτελεί μέρος της ενεργειακής κληρονομιάς του πλανήτη μας από τη στιγμή που αυτός αποσπάσθηκε από τη συνολική διάπυρη μάζα του ηλιακού μας συστήματος. Η γεωθερμική ενέργεια εκλύεται στην επιφάνεια της γης είτε υπό μορφή ατμού υψηλής πίεσης (ή μείγματος νερού – ατμού) οπότε και αναφερόμαστε σε γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας, είτε υπό μορφή ζεστού νερού υπό πίεση, οπότε και έχουμε γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται η διάνοιξη καταλλήλων γεωτρήσεων ώστε να καταστεί δυνατή η έξοδος του γεωθερμικού ρευστού στην επιφάνεια της γης.

Τα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας είναι εν δυνάμει πηγή παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Φυσικά ακόμα και στην περίπτωση γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας είναι δυνατή η αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών για κάλυψη θερμικών αναγκών, ενώ τα τελευταία χρόνια ερευνάται η δυνατότητα ηλεκτροπαραγωγής με χρήση δυαδικών κύκλων [1]. Επίσης η μορφολογία του υπεδάφους διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Απότοκος αυτού είναι η διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του ρευστού αλλά και της σύστασής του. Οι γεωθερμικές πηγές κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες με βάση τις θερμοκρασίες τους [2].

- Υψηλής ενθαλπίας (>150°C) που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μέσης ενθαλπίας (80 °C έως 150 °C) που χρησιμοποιούνται για θέρμανση, ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων καθώς και για την παραγωγή ηλεκτρισμού με συστήματα παραγωγής ενέργειας οργανικού – δυαδικού κύκλου OCR (binary) που οι απαιτήσεις σε θερμοκρασία είναι μικρότερες.
- Χαμηλής ενθαλπίας (25°C έως 80°C) που χρησιμοποιούνται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες και παραγωγή γλυκού νερού.

4.2. Σύσταση γεωθερμικού ρευστού

Πρόκειται για ρευστό – ατμό υψηλής ενθαλπίας το οποίο αποτελείται κατά κύριο λόγο από:

- Διοξείδιο του άνθρακα σε ποσοστό 90% – 98% (CO₂)
- Σουφλίδιο του υδρογόνου σε ποσοστό 1% –5% (H₂S)
- Υδρογόνο σε ποσοστό 0,1% – 2% (H₂)
- Μεθυλένιο σε ποσοστό μικρότερο του 1% (CH₂)
- Αέριο αζώτου σε ποσοστό μικρότερο του 1% (N₂)

Η σύσταση του γεωθερμικού ρευστού δεν είναι πάντοτε ίδια. Αλλάζει από περιοχή σε περιοχή ανάλογα με τη σύσταση του υπεδάφους, το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο ταμιευτήρας και τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

4.3. Θερμική ροή από το εσωτερικό της Γης

Στις γεωεπιστήμες εξετάζεται η έννοια της θερμικής ροής. Ο όρος αυτός περιγράφει τον ρυθμό με τον οποίο απάγεται η θερμότητα (θερμική ενέργεια) από το εσωτερικό της Γης προς την επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Η εκροή θερμικής ενέργειας από την Γη είναι της τάξης των $40 \times 10^{10} \text{ W}$ και φαντάζει κολοσσιαία. Παρόλα αυτά η μέση θερμική ροή ανά μονάδα επιφάνειας είναι $0,075 \text{ W/m}^2$ [3].

Η θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού (K) είναι ένας συντελεστής που προσδιορίζει την θερμοπερατότητα του υλικού αυτού. Η γεωθερμική βαθμίδα είναι ο ρυθμός με τον οποίο αλλάζει η θερμοκρασία (ΔT) σε σχέση με την αύξηση του βάθους (ΔZ) και μετράται σε βαθμούς ανά χιλιόμετρο ($^{\circ}\text{C/km}$). Η θερμική ροή συνδέεται με την θερμική αγωγιμότητα και την γεωθερμική βαθμίδα με την παρακάτω σχέση (4.3.1)

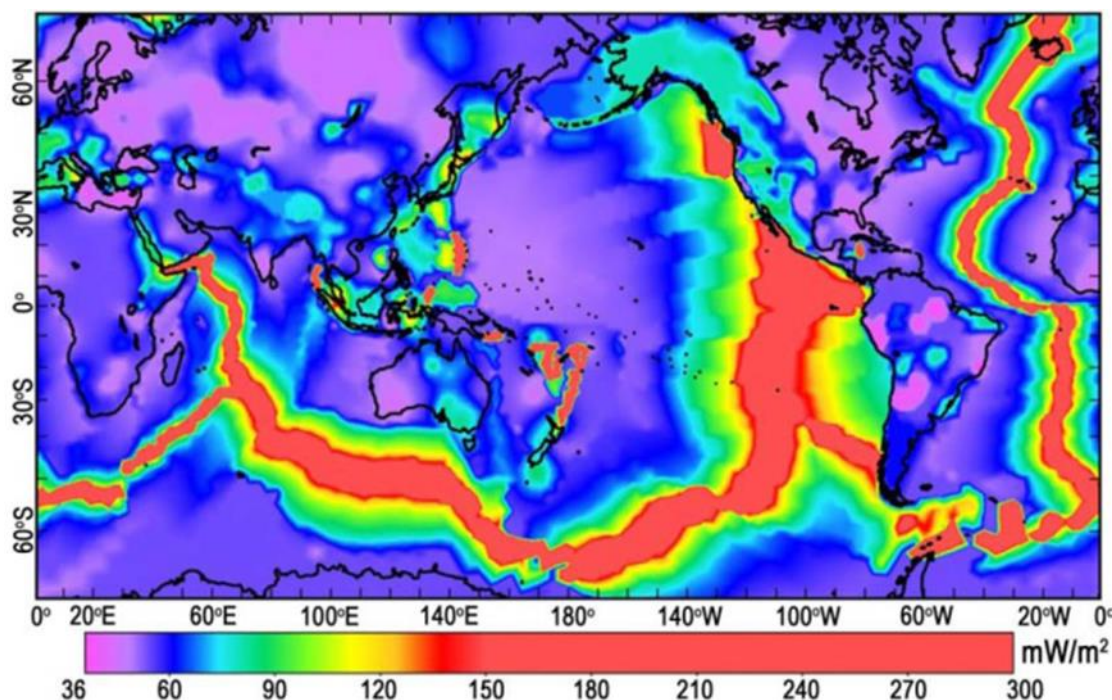
$$Q = K \cdot \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad (4.3.1)$$

Πληκτρολογήστε την εξίσωση εδώ.

4.4. Υψηλές γεωθερμικές βαθμίδες

Σχετικά με τις γεωθερμικές βαθμίδες οι Μπούτσης Βασίλειος και Τανανάκης Βασίλειος [3] αναφέρουν πως «οι υψηλές γεωθερμικές βαθμίδες, μέχρι $200 \text{ }^{\circ}\text{C/km}$, παρατηρούνται κατά μήκος των ωκεάνιων επεκτατικών κέντρων όπως η Μεσατλαντική Ράχη, όπου σχηματίζεται καινούριος ωκεάνιος φλοιός λόγω της απόκλισης (απομάκρυνσης) τεκτονικών πλακών και επακόλουθης εξόδου θερμού μαγματικού υλικού από τον μανδύα. Επίσης παρατηρούνται και κατά μήκος νησιωτικών και ηφαιστειακών τόξων, πίσω από τις ζώνες σύγκλισης (σύγκρουσης) τεκτονικών πλακών, όπως είναι το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου (Νίσυρος – Σαντορίνη – Μήλος – Μέθανα – Σουσάκι Κορινθίας, η Ιαπωνία, Ινδονησία κ.λπ.). Και στην δεύτερη περίπτωση οι υψηλές βαθμίδες οφείλονται σε μάγμα που εξωθείται προς την επιφάνεια.

Χαμηλές γεωθερμικές βαθμίδες παρατηρούνται κατά μήκος των ζωνών σύγκλισης ηπειρωτικών και ωκεάνιων τεκτονικών πλακών και βύθισης (υπαγωγής) του ωκεάνιου φλοιού κάτω από τον ηπειρωτικό και μέσα στον μανδύα» [3].



Σχήμα 4.1 Παγκόσμια Θερμική Ροή ανά μονάδα επιφάνειας.

(πηγή: P. Bird, Z. Liu, και W.K. Rucker, Stresses that drive the plates from below: Definitions, computational path, model optimization, and error analysis, δημοσιευμένη στο J. Geophys. Res., 113{B11}, B11406, 2008 (doi:10.1029/2007JB005460)

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η θερμική ροή βασισμένη στην θερμική αγωγιμότητα των ανώτερων γεωλογικών στρωμάτων. Το γράφημα αυτό βασίστηκε σε περισσότερες από 21000 μετρήσεις ανά τον κόσμο. Τα ψυχρά χρώματα (ιώδες – θαλασσί) αντιπροσωπεύουν περιοχές με χαμηλή θερμική ροή, τα ενδιάμεσα χρώματα (πράσινο – κίτρινο) μέση – αυξημένη θερμική ροή και τα θερμά χρώματα υψηλή θερμική ροή. Η μονάδα μέτρησης της θερμικής ροής για την εικόνα αυτή δίνεται σε (mW) ανά τετραγωνικό μέτρο (m²).

Υψηλή θερμική ροή παρατηρείται στα ενεργά κέντρα απόκλισης τεκτονικών πλακών όπως τα επεκτατικά κέντρα του Ατλαντικού, Ειρηνικού και Ινδικού ωκεανών, καθώς και πίσω από τις ζώνες σύγκλισης πλακών, κατά μήκος μεγάλων νησιωτικών ηφαιστειακών τόξων όπως αυτά του δυτικού Ειρηνικού Ωκεανού (π.χ. Αλεούτιες νήσοι, Ιαπωνία, Πολυνησία – Νέα Ζηλανδία) και ανατολικού Ινδικού Ωκεανού (π.χ. Ινδονησία).

Μέση ως αυξημένη θερμική ροή παρατηρείται στις θερμές κηλίδες και περιοχές σύγκρουσης ηπείρων, όπως η ζώνη Άλπεων – Ποντίδων – Ζάγκρος – Ιμαλαΐων στην οποία ανήκει και η περιοχή της Ελλάδας [3].

4.5. Γεωθερμικές εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο

Η γεωθερμία κατατάσσεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα γεωθερμικά πεδία με τα χρόνια εξασθενούν καθώς το γεωθερμικό ρευστό εξαντλείται. Όμως γεωθερμικοί ταμιευτήρες ανακαλύπτονται και δημιουργούνται συνεχώς καθώς η θερμότητα υπάρχει σε αφθονία στο εσωτερικό του φλοιού της γης. Η χρήση της δεν έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η ευγενής μορφή της καθώς και η μεγάλη παραγωγική της ικανότητα έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα οι οποία την τελευταία δεκαετία έχει επενδύσει στη γεωθερμία και την ανέγερση μεγάλων εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας ανά τον κόσμο. Στον Πίνακα 4.I αναγράφονται οι χώρες που παράγουν ενέργεια από γεωθερμία καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς της κάθε χώρας [2].

Πίνακας 4.I Παγκόσμια εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς.

Country	Capacity (MW)	Capacity (MW)	Capacity (MW)	Capacity (MW)	Capacity (MW)
	2007	2010	2013	2015	2018
USA	2687	3086	3389	3450	3639
Indonesia	992	1197	1333	1340	1948
Philippines	1969.7	1904	1894	1870	1868
Turkey	38	82	163	397	1347
New Zealand	471.6	628	895	1005	1005
Mexico	953	958	980	1017	951
Italy	810.5	843	901	916	944
Iceland	421.2	575	664	665	755
Kenya	128.8	167	215	594	676
Japan	535.2	536	537	519	542
Costa Rica	162.5	166	208	207	
El Salvador	204.4	204	204	204	
Nicaragua	79	82	97	82	
Papua New Guinea	56	56	56	50	
Guatemala	53	52	42	52	
Portugal	23	29	28	29	
Russia	79	79	82	82	
China	27.8	24	27	27	
Germany	8.4	6.6	13	27	
France	14.7	16	15	16	
Ethiopia	7.3	7.3	8	7.3	
Austria	1.1	1.4	1	1.2	
Australia	0.2	1.1	1	1.1	
Thailand	0.3	0.3	0.3	0.3	
Total	9,731.9	10,709.7	11,765	12,635.9	14,369

(πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_power) {2020}

4.6. Οι Χώρες με τη μεγαλύτερη γεωθερμική ισχύ στον κόσμο

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1 υπάρχουν χώρες με εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύ μεγαλύτερη του 1GW στις οποίες γίνεται μια εκτενέστερη αναφορά.

4.6.1. Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ)

Την πρωτοκαθεδρία στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία παγκοσμίως κρατούν οι Ηνωμένες Πολιτείες με ισχύ ηλεκτροπαραγωγής 3639 MW σε συνάθροιση 77 σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους παράγει 16,7 TWh.

Το μεγαλύτερο σύμπλεγμα γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στον κόσμο, βρίσκεται στην Καλιφόρνια βόρεια του San Francisco και ονομάζεται "The Geysers" (Σχήμα 4.2). Πρόκειται για ένα συγκρότημα 22 γεωθερμικών μονάδων που αντλεί γεωθερμικό ρευστό από 350 πηγάδια και τροφοδοτεί με ενέργεια τις κομητείες Sonoma, Lake, Mendocino, Marin και Napa. Το γεωθερμικό συγκρότημα "The Geysers" βρίσκεται πάνω στο Ρήγμα του Αγίου Ανδρέα δεσμεύοντας μια έκταση 78000 στρεμμάτων. Η παραγωγική ικανότητα των "The Geysers" είναι σχεδόν η μισή της συνολικής παραγωγικής ικανότητας από γεωθερμία των ΗΠΑ 1517 MW επί συνόλου 3639 MW. Ο συντελεστής φορτίου (capacity factor) της παραγωγικής ικανότητας δηλαδή η σχέση της πραγματικά παραγόμενης ενέργειας προς τη θεωρητική παραγωγική ικανότητα των "The Geysers" εκτιμάται στο 63% [4].



Σχήμα 4.2 The Geysers (Καλιφόρνια, ΗΠΑ)

(πηγή: <https://www.ncpa.com/about/generation/geothermal/>)

4.6.2. Ινδονησία

Η Ινδονησία κατέγραψε γεωθερμική ισχύ ύψους 1948 MW το 2018, καθιστώντας την τη δεύτερη μεγαλύτερη παραγωγό γεωθερμικής ενέργειας στον κόσμο. Η χώρα διαθέτει σήμερα τέσσερα από τα δέκα κορυφαία εργοστάσια γεωθερμίας στον κόσμο, μεταξύ των οποίων και τα δυο μεγαλύτερα σε εγκατεστημένη ισχύ. Η εγκατάσταση Gunung Salak (Σχήμα 4.3) έχει τη μεγαλύτερη ενεργή χωρητικότητα στον κόσμο με ισχύ 375MW. Η δεύτερη μεγαλύτερη εγκατάσταση είναι το εργοστάσιο Sarulla 1, το οποίο τέθηκε σε λειτουργία το 2017 και έχει ισχύ παραγωγής 330 MW. Εκτιμάται από την επιστημονική κοινότητα πως η Ινδονησία θα ξεπεράσει τις ΗΠΑ σε παραγωγή ενέργειας από γεωθερμία ως το 2027 [4].



Σχήμα 4.3 Gunung Salak (Ινδονησία)

(πηγή: <https://www.southpole.com/blog/project-spotlight-gunung-salak-geothermal-energy-indonesia>)

4.6.3. Φιλιππίνες

Η παραγόμενη ενέργεια από γεωθερμία στη Νοτιανατολική Ασία το 2018 ήταν περίπου 1868 MW, καταλαμβάνοντας την τρίτη θέση σε παγκόσμια κλίμακα ενεργειακού δυναμικού. Τα μεγαλύτερα γεωθερμικά συγκροτήματα των Φιλιππίνων είναι το Makban και το Tiwi (Σχήμα 4.4) με παραγωγική ικανότητα 458 MW και 289 MW αντίστοιχα [4].



Σχήμα 4.4 Tiwi power plant (Φιλιππίνες)

(πηγή: https://geothermalresourcescouncil.blogspot.com/2017/04/philippines-geothermal_27.html)

4.6.4. Τουρκία

Η Τουρκία είναι μια χώρα με τεράστια γεωθερμική ισχύ. Έχει γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας καθώς βρίσκεται πάνω στη ζώνη σύγκλισης των τεκτονικών πλακών Ευρασίας και Αφρικής. Μέχρι το 2018 η εγκατεστημένη ισχύς έφτανε τα 1347MW. Ο μεγαλύτερος γεωθερμικός σταθμός της, βρίσκεται στο Kizildere (Σχήμα 4.5) και έχει ονομαστική ισχύ 95 MW. Ως το 2023, η χώρα στοχεύει στην αύξηση της εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος κατά 600 MW καθώς μετά από χρόνιες μελέτες προχωρά στην εκμετάλλευση του τέταρτου θερμότερου γεωθερμικού πεδίου στον κόσμο. Σε εξέλιξη βρίσκονται επενδύσεις σε 11 πεδία για ηλεκτροπαραγωγή. Στο πλαίσιο της προσπάθειας αυτής εντάσσεται και η πρόσφατη έναρξη λειτουργίας ενός γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας στην πόλη Μανίσα (Μαγνησία) στα δυτικά παράλια της Μικράς Ασίας. Επίσης σύμφωνα με τη Γενική Διεύθυνση Μεταλλευτικών Ερευνών της Τουρκίας, το πεδίο Kavaklıdere Ornekkoy αναπτύσσει θερμοκρασίες που φτάνουν ως και τους 287 °C, γεγονός, που το καθιστά το τέταρτο από πλευράς θερμοκρασίας γεωθερμικό πεδίο στον κόσμο. Το πεδίο έχει ετήσια δυνατότητα ηλεκτροπαραγωγής 100 εκατ. kWh και μπορεί να τροφοδοτήσει 7000 νοικοκυριά. Υπολογίζεται ότι το πεδίο θα μπορούσε να οδηγήσει στην εξοικονόμηση 40 εκατ. δολ. από τις ενεργειακές εισαγωγές της Τουρκίας [4].



Σχήμα 4.5 Kizildere geothermal power plant (Τουρκία)

(πηγή: <https://www.dailysabah.com/energy/2019/09/09/turkey-global-role-model-in-geothermal-power-development>)

4.6.5. Νέα Ζηλανδία

Το 2018 η γεωθερμική δυναμικότητα της Νέας Ζηλανδίας ανήλθε στα 1005MW καθιστώντας την, τελευταία χώρα που διαθέτει εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη του ενός gigawatt. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από γεωθερμία στην χώρα αποτελεί το 13% της συνολικής παραγόμενης ισχύος της χώρας σύμφωνα με την γεωθερμική ένωση Νέας Ζηλανδίας. Τα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας εντοπίζονται κυρίως γύρω από την ηφαιστειακή ζώνη Taupo. Στις μεγαλύτερες γεωθερμικές εγκαταστάσεις της χώρας περιλαμβάνονται ο σταθμός Wairakei (Σχήμα 4.6), ο σταθμός Te Mihi, ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής Nga Awa Purua και ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής Mokai [4].



Σχήμα 4.6 Wairakei geothermal power plant (Νέα Ζηλανδία)

(πηγή: <https://www.thinkgeoenergy.com/breathing-new-life-into-the-iconic-wairakei-geothermal-resource/>)

4.7. Γεωθερμία στην Ευρώπη

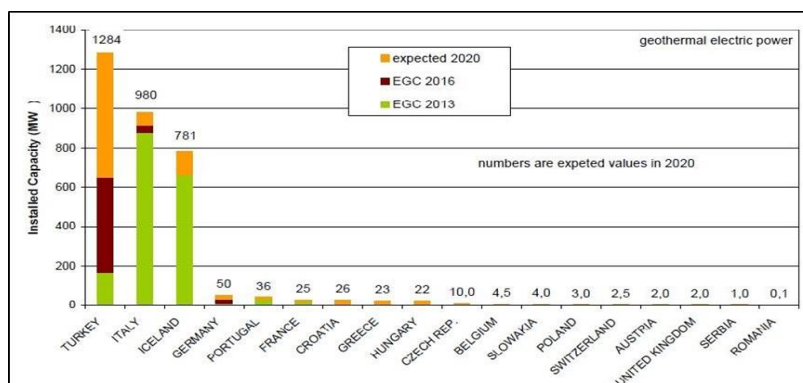
Σύμφωνα με τα δεδομένα του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Γεωθερμικής Ενέργειας (EGEC) [5], στην Ευρώπη υπάρχουν 117 ενεργές γεωθερμικές ηλεκτροπαραγωγικές εγκαταστάσεις με συνολική ισχύ 2,85 GWe που αντιστοιχεί σε παραγωγή μεγαλύτερη των 15 TWh. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει την τέταρτη μεγαλύτερη γεωθερμική ισχύ στον κόσμο – λίγο πάνω από 1 GW, η οποία είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει περίπου δύο εκατομμύρια κατοικίες. Κατά το 2016 η γεωθερμική ενέργεια συνέβαλε στο 3% περίπου της συνολικής πρωτογενούς παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης η Ιταλία έχει τη μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγική ισχύ (915 MW), ακολουθούμενη από τη Γερμανία (38 MW) και την Πορτογαλία (30 MW) σύμφωνα με δεδομένα του 2019. Σε εξέλιξη βρίσκονται 26 έργα νέων εγκαταστάσεων και ακόμα 160 μελέτες διερευνώνται με σκοπό η ηλεκτροπαραγωγική ισχύς να ξεπεράσει τα 3 GWe στα τέλη του 2020.

Σημαντικό ρόλο στη δημιουργία μιας γεωθερμικής εγκατάστασης έχει η γεωγραφική θέση. Η κατανομή της θερμότητας μέσα στο φλοιό της γης μεταβάλλεται κατά μήκος και κατά πλάτος της επιφάνειάς της. Μεγαλύτερα ποσά θερμότητας εντοπίζονται σε περιοχές που έχουν ενεργά τεκτονικά σύνορα πλάκας ή ηφαίστεια. Τα «καντά σημεία» μέσα και γύρω από την Ευρώπη βρίσκονται κυρίως στην Ισλανδία, την Ιταλία και την Τουρκία. Αυτές οι τρεις χώρες συγκαταλέγονται στους

του σπουδαστή Χάρη Γεωργίου

δέκα κορυφαίους παραγωγούς γεωθερμικής ενέργειας στον κόσμο. Το ποσοστό διείσδυσης της γεωθερμίας στο εθνικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ισλανδίας αγγίζει το 27%. Ακολουθούν με πολύ μικρότερο ποσοστό η Τουρκία με 2,5% η Ιταλία με 2,1% και εν συνεχεία η Πορτογαλία, η Γαλλία, η Αυστρία και η Γερμανία με ποσοστά που κυμαίνονται μεταξύ του 0,4 έως το 0,02% [6].



Σχήμα 4.7 Γεωθερμική Ηλεκτροπαραγωγή. Εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς στην Ευρώπη 2012 – 2015, εκτίμηση για το 2020. Κατανομή ανά χώρα.

(πηγή: <https://energypress.gr/news/state-art-gia-tis-hriseis-tis-geothermias-se-eyropi-kai-ellada>)

Στο Σχήμα 4.7 αποτυπώνεται η ανά χώρα εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς αλλά και οι προοπτικές για την δημιουργία νέων εγκαταστάσεων μέχρι το 2020 με βάσει τις νέες μελέτες που βρίσκονται υπό διερεύνηση.

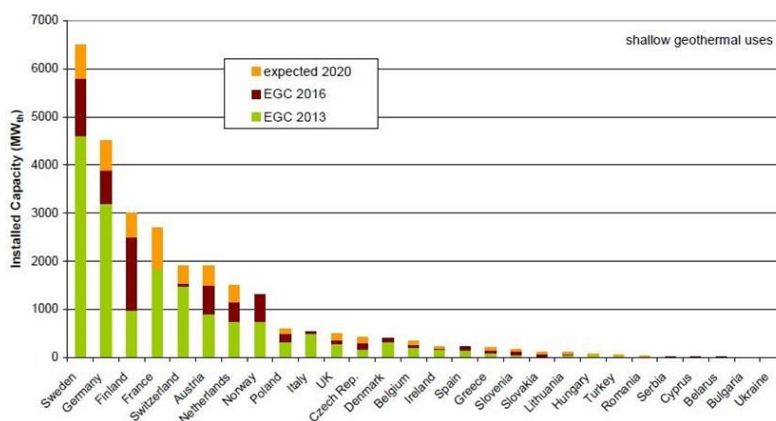
Πριν από το 2000, κυρίαρχουσες οι εγκαταστάσεις με μεγάλους στροβίλους τύπου flash steam. Το σύνολο των δεδομένων δείχνει όμως πως οι καινούργιες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι μικρότερες και λειτουργούν με την τεχνολογία του οργανικού – δυαδικού κύκλου OCR (Organic Rankine Cycle – Binary Cycle) και του τύπου Kalina. Αυτοί οι νέοι τύποι εγκαταστάσεων είναι σε θέση να παράγουν ενέργεια σε χαμηλότερες θερμοκρασίες νερού. Είναι επίσης πιο φιλικές προς το περιβάλλον καθώς το γεωθερμικό ρευστό και το υγρό της διεργασίας διατηρούνται χωριστά καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Επομένως υπάρχουν ελάχιστες ή και καθόλου εκπομπές επιβλαβών αερίων. Οι μονάδες μπορούν επίσης να παραχθούν σε πολύ μικρά μεγέθη, πράγμα που σημαίνει ελάχιστη διαταραχή στο περιβάλλον.

Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η γεωθερμία έχει και άλλες εφαρμογές οι οποίες εντοπίζονται τουλάχιστον σε 28 χώρες. Ένα μεγάλο ποσοστό της τάξεως του 49% χρησιμοποιείται για τηλεθέρμανση (district heating) από 22 χώρες με πρωτοπόρους την Ισλανδία και την Τουρκία. Στην Ευρώπη υπάρχουν συνολικά 300 μονάδες τηλεθέρμανσης εκ των οποίων αρκετές βασίζονται 100% στη γεωθερμία ενώ υπάρχουν και υβριδικές εγκαταστάσεις που την συνδυάζουν με ηλιακή ενέργεια, βιομάζα ή άλλα συμβατικά καύσιμα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από τηλεθέρμανση είναι περίπου 5 GW_{th} και αναμένεται να υπερβεί τα 6,5 GW_{th} μέχρι το τέλος του 2020 [6].

Η γεωθερμία έχει εφαρμογή και στον αγροτικό τομέα (17%) με την Τουρκία να κατέχει την πρώτη θέση με δυναμική 804MW_{th} εγκατεστημένης ισχύος. Δεύτερη έρχεται η Ουγγαρία με ισχύ 325MW_{th} , η οποία δραστηριοποιείται σημαντικά στο χώρο αυτό και τρίτη η Ιταλία με δυναμική 221MW_{th} .

Σημαντική θέση κατέχει και η αξιοποίηση της γεωθερμίας στον τομέα της λουτροθεραπείας με ποσοστό 23%. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, η εγκατεστημένη ισχύς που καλύπτει τα συστήματα αυτά εκτιμάται σε $2,2\text{GW}_{\text{th}}$.

Πολλή σημαντική είναι η χρήση της αβαθούς γεωθερμίας για την λειτουργία γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (ΓΑΘ). Ο αριθμός των εγκατεστημένων μονάδων ξεπερνά τα δύο εκατομμύρια. Πρόκειται για ένα τομέα με τεράστια ανάπτυξη σε όλες τις χώρες της Ευρώπης. Πάνω από 500 χιλιάδες μονάδες βρίσκονται στη Σουηδία. Ακολουθούν η Γερμανία με περισσότερες από 300 χιλιάδες μονάδες, η Γαλλία με 200 χιλιάδες και η Φιλανδία με 100 χιλιάδες [6].



Σχήμα 4.8 Εγκατεστημένη Ισχύς σε γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ) στην Ευρώπη 2012 – 2015, εκτίμηση για το 2020. Κατανομή ανά χώρα.

(πηγή : <https://energyexpress.gr/news/state-art-gia-tis-hriseis-tis-geothermias-se-eyropi-kai-ellada>)

Στο Σχήμα 4.8 αποτυπώνεται η κατανομή των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στις χώρες της Ευρώπης. Συγκεκριμένα καταγράφεται η ισχύς (σε MW_{th}) μέχρι το 2016 και γίνεται μια σχετική εκτίμηση, βάσει των μελετών που βρίσκονται υπό διερεύνηση, μέχρι τα τέλη του 2020.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ) χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη κατοικιών. Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια να εφαρμοστούν και σε μεγαλύτερους χώρους όπως εμπορικά κέντρα, κολυμβητήρια, εκπαιδευτικούς χώρους, την αποπάγωση πεζοδρομίων καθώς και σε ξενοδοχειακά συγκροτήματα [6].

4.8. Γεωθερμία στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, λόγω των γεωμορφολογικών της συνθηκών είναι πλούσια σε γεωθερμική ενέργεια. Γεωθερμικές πηγές εντοπίζονται σχεδόν σε όλη τη χώρα. Οι έρευνες για την αναζήτηση ταμιευτήρων υψηλής ενθαλπίας άρχισαν το 1971 με βασικό φορέα το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), ενώ μετά το 1979 η ΔΕΗ ως άμεσα ενδιαφερόμενη για την ηλεκτροπαραγωγή ανέλαβε την εξέλιξη των εργασιών και την ανάπτυξη των πεδίων χρηματοδοτώντας τις έρευνες.

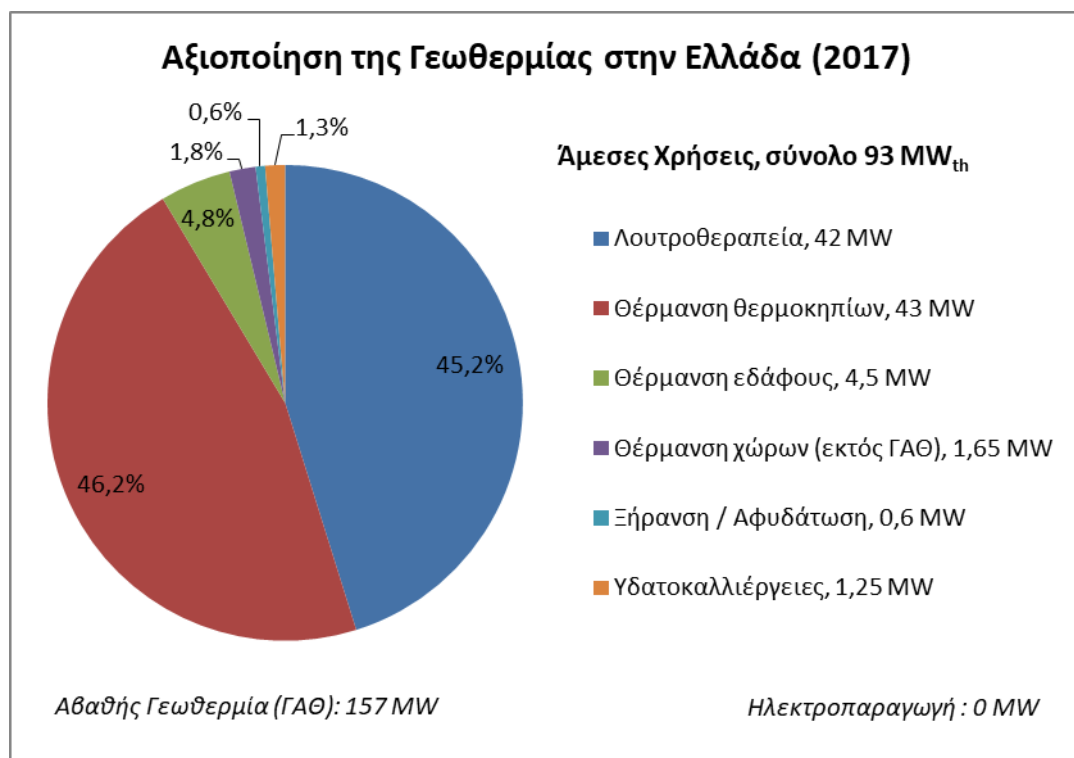
Γεωθερμικό δυναμικό υψηλής ενθαλπίας εντοπίζεται κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου το οποίο απαρτίζεται από τα νησιά Μήλο, Νίσυρο, Κω, Κίμωλο, Σαντορίνη και τον Πολύαιγο. Εντυπωσιακό είναι πως σε μεγάλα βάθη (>1500m) το γεωθερμικό ρευστό των ταμιευτήρων της Μήλου και της Νισύρου φτάνει σε θερμοκρασίες τους 350 °C έως και 400 °C.

Γεωθερμικοί ταμιευτήρες μέσης ενθαλπίας βρίσκονται σε ιζηματογενείς λεκάνες της Βορείου Ελλάδος καθώς και σε κάποια από τα νησιά του Βορείου Αιγαίου. Συγκεκριμένα, εκτεταμένες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί στη Λεκάνη Δέλτα του Έβρου, στο Δέλτα του Νέστου, στη Λέσβο, στη Σαμοθράκη και την Χίο.

Γεωθερμικό ρευστό χαμηλής ενθαλπίας υπάρχει στις περισσότερες περιοχές της Ηπειρωτικής Ελλάδας. Ωστόσο, το συνολικό γεωθερμικό δυναμικό της χώρας δεν έχει προσδιοριστεί. Το κόστος των γεωλογικών ερευνών είναι αρκετά υψηλό και οι βαθιές παραγωγικές γεωτρήσεις πολυδάπανες με αποτέλεσμα τα ερευνητικά στοιχεία να μην επαρκούν [2].

Η ΔΕΗ από το 1975 έως το 1985 έδωσε βαρύτητα στην εξόρυξη γεωθερμικού ρευστού υψηλής ενθαλπίας διανοίγοντας 5 γεωτρήσεις στη Μήλο και 2 στη Νίσυρο. Κατά την διάρκεια των ερευνών στη Μήλο μετρήθηκαν θερμοκρασίες 325°C σε βάθος 1000 μέτρων και στη Νίσυρο 350°C σε βάθος 1400 μέτρων. Το συνολικό δυναμικό στα δύο νησιά υπολογίζεται να είναι της τάξεως των 200 MW και 50 MW αντίστοιχα, ενώ θα μπορούσαν να δημιουργηθούν εγκαταστάσεις των 20 MW και των 5 MW αντίστοιχα. Το 1986 εγκαταστάθηκε μία γεωθερμική μονάδα 2 MW στη Μήλο αλλά λόγω της σύστασης του γεωθερμικού ρευστού το οποίο ήταν πολύ διαβρωτικό και ενός ατυχήματος που προκλήθηκε κατά το 1988 διεκόπη η λειτουργία της και η προσπάθεια για ηλεκτροπαραγωγή εγκαταλείφθηκε από τότε μέχρι και σήμερα [7].

Ωστόσο έχει δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στις άμεσες χρήσεις της. Η συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς στον τομέα αυτό ανέρχεται σε 93MW_{th}, χωρίς να συνυπολογίζονται οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.



Σχήμα 4.9 Αξιοποίηση της Γεωθερμίας στην Ελλάδα (2017)

Στο Σχήμα 4.9 αναγράφονται όλοι οι τρόποι αξιοποίησης της γεωθερμίας στον Ελλαδικό χώρο.

Οι περισσότερες εγκαταστάσεις άμεσης χρήσης βρίσκονται στη Βόρεια Ελλάδα. Παράγουν αρτεσιανά νερά πολύς καλής ποιότητας και παροχής των οποίων η θερμοκρασία αγγίζει και τους 75°C σε πολύ οικονομικά βάθη. Στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας υπάρχουν 15 ενεργές μισθώσεις και στην Περιφέρεια Ανατ. Μακεδονίας και Θράκης 8 μισθώσεις, που αφορούν κυρίως υδατοκαλλιέργειες (καλλιέργεια σπιρουλίνας, στα Θερμά Νιγρίτας Σερρών 75°C), υδροπονικές θερμοκηπιακές μονάδες (καλλιέργειες ντομάτας και αγγουριού, στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης 70°C), πρωίμιση ανοικτών καλλιεργειών – φυτείες σπαραγγιού (Χρυσούπολη Καβάλας 70°C, Μυρωδάτο Ξάνθης 68°C), παραγωγή έρριζων μοσχευμάτων καλλωπιστικών ανθοκομικών φυτών (Ερατεινό Χρυσούπολης Καβάλας 70°C), ξήρανση αγροτικών προϊόντων (Ν.Εράσμιο Ξάνθης 82°C), θερμοκήπια λουλουδιών (Ν.Απολλωνία Θεσσαλονίκης 45°C, Σιδηρόκαστρο Σερρών 75°C), θέρμανση κολυμβητηρίων (Ανθεμόντα Θεσσαλονίκης 40°C), υδροθεραπευτήρια (Αγκιστρο Σερρών 48°C).

Επίσης υπάρχουν μελέτες που βρίσκονται σε εξέλιξη. Στο Αρίστινο Αλεξανδρούπολης κατασκευάζεται θερμικός σταθμός και δίκτυο (18 χιλιομέτρων) τηλεθέρμανσης αγροτικών θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων και κτηρίων. Το γεωθερμικό ρευστό στην περιοχή αυτή έχει θερμοκρασία 90°C. Η θερμική ισχύς του υπολογίζεται στα 10 MW εκ των οποίων τα 9 MW προορίζονται για τηλεθέρμανση θερμοκηπίων και το 1 MW για τηλεθέρμανση 22 δημοτικών κτηρίων και των οικημάτων του Χωριού SOS. (Νοέμβριος 2019) [8].

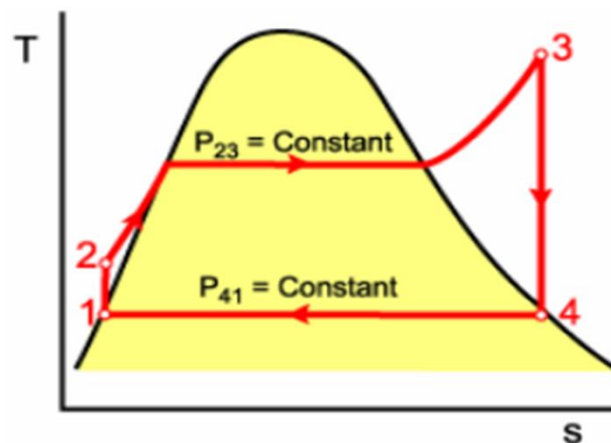
Σε αρχικό στάδιο βρίσκεται η αξιοποίηση της γεωθερμίας στο πεδίο Ακροπόταμου Καβάλας. Η θερμοκρασία στον ταμιευτήρα του φτάνει και τους 90°C και η εκμετάλλευση του δυναμικού του προορίζεται για την κατασκευή θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων και την θέρμανση καλλιεργειών εδάφους [8].

4.9. Μετατροπή της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική

4.9.1. Αρχή λειτουργίας της γεωθερμίας

Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία βασίζεται στη θερμική διεργασία που ονομάζεται κύκλος Rankine. Ο κύκλος Rankine, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10, περιλαμβάνει τις εξής μεταβολές στις οποίες υπόκειται το εργαζόμενο μέσο καθώς διέρχεται μέσα από τις διατάξεις μιας εγκατάστασης παραγωγής [3].

- 1 – 2 : Ισεντροπική Συμπύεση (Αύξηση Πίεσης, Pump)
- 2 – 3 : Ισόθλιπτη Προσθήκη Θερμότητας ($Q_{H,IN}$, Steam Generator)
- 3 – 4 : Ισεντροπική Εκτόνωση ($W_{NET,OUT}$, Turbine)
- 4 – 1 : Ισόθλιπτη Εκτόνωση ($Q_{C,OUT}$, Condenser)

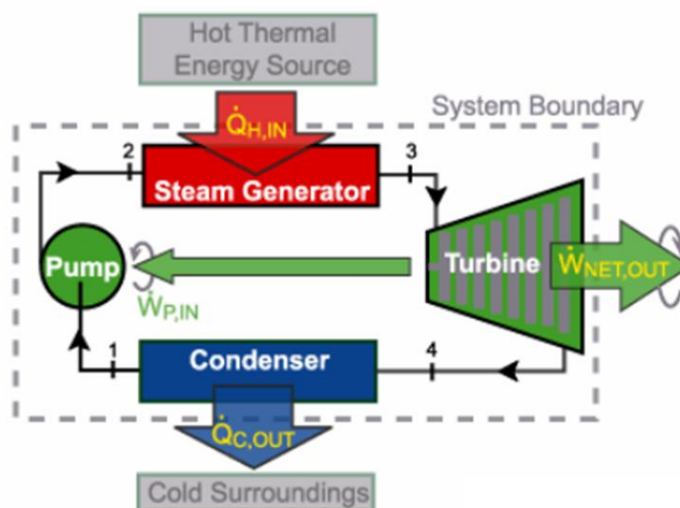


Σχήμα 4.10 Απλός Κύκλος Rankine με υπερθέρμανση

(πηγή: <http://users.ntua.gr/koronaki/RANKINE.pdf?fbclid=IwAR2tBXs196gxMDGKICTmu9SGTIgZF2QqQ1bX70vXguLvlqjba4ZQcCiSXls>)

Στην πρώτη φάση του κύκλου, μια αντλία τροφοδοτεί τον ατμοπαραγωγό με το υγροποιημένο εργαζόμενο μέσο αυξάνοντάς του ταυτόχρονα την πίεση του (σημείο

1-2). Στη δεύτερη φάση ο ατμοπαραγωγός, προσδίδει στο εργαζόμενο μέσο την θερμότητα που χρειάζεται ώστε να ατμοποιηθεί και να έλθει σε κορεσμένη ή υπέρθερμη κατάσταση (σημείο 2-3). Στην τρίτη φάση το εργαζόμενο μέσο διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο όπου και εκτονώνεται ισεντροπικά μέχρι μια συγκεκριμένη πίεση, την πίεση εξόδου (σημείο 3-4). Στην τέταρτη και τελευταία φάση οδηγείται στο συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία (σημείο 4-1) με τη βοήθεια του πύργου ψύξης.



Σχήμα 4.11 Τυπική διάταξη εγκατάστασης ατμοστρόβιλου με αρχή λειτουργίας τον κύκλο Rankine

(πηγή: <http://users.ntua.gr/koronaki/RANKINE.pdf?fbclid=IwAR2tBXs196gxMDGKICTmu9SGTIgZF2QqQ1bX70vXguLvlqjba4ZQcCiSXIs>)

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η ειδοποιός διαφορά μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μία αντίστοιχη που αξιοποιεί τη γεωθερμία είναι η έλλειψη του ατμοπαραγωγού. Αυτό συμβαίνει, διότι στη δεύτερη περίπτωση το εργαζόμενο μέσο δηλαδή το γεωθερμικό ρευστό, με το οποίο τροφοδοτείται η εκάστοτε διάταξη, είναι ήδη υψηλής ενθαλπίας, έχει δηλαδή υψηλή θερμοκρασία και πίεση και δεν είναι απαραίτητη η παροχή επιπλέον θερμικής ενέργειας.

4.10. Διατάξεις αξιοποίησης της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή

Η ηλεκτροπαραγωγή μέσω γεωθερμίας εξαρτάται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού πεδίου της εκάστοτε περιοχής. Λαμβάνοντας υπ'οψιν τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, την πίεση, την περιεκτικότητα του σε αέρια και σε σωματίδια καθώς και την παροχή του (σε tn/h), σχεδιάζεται η αντίστοιχη μονάδα παραγωγής. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι σημαντικότερες διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία.

4.10.1. Με χρήση ξηρού ατμού (Dry Steam)

Η διάταξη παραγωγής με χρήση ξηρού ατμού αποτελεί την απλούστερη και οικονομικά ελκυστικότερη διάταξη αξιοποίησης του γεωθερμικού δυναμικού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 4.12). Βρίσκει εφαρμογή σε περιοχές όπου το γεωθερμικό μέσο λαμβάνεται από το φρεάτιο παραγωγής σε καθαρή αέρια φάση με μικρό ποσοστό υδρατμών.

Στην περίπτωση αυτή λοιπόν, το γεωθερμικό μέσο ταυτίζεται απόλυτα με το εργαζόμενο μέσο, πράγμα το οποίο αποτελεί και την ειδοποιό διάφορα αυτής της διάταξης σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Το γεωθερμικό μέσο, το οποίο αποτελείται από υπέρθερμο ατμό, οδηγείται απευθείας και χωρίς να παρεμβάλλεται καμία επεξεργασία (με εξαίρεση κάποια πιθανή χημική επεξεργασία) στο κατάλληλα διαμορφωμένο ζεύγος ατμοστρόβιλου-ηλεκτρογεννήτριας, στο οποίο εκτονώνεται και ως αποτέλεσμα έχουμε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτού του τύπου η διάταξη μπορεί να λειτουργήσει είτε με συμπυκνωτή, είτε με απευθείας απόρριψη του ατμού στην ατμόσφαιρα.

Στη πρώτη περίπτωση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.12, ο ατμός μετά τον ατμοστρόβιλο οδηγείται στο συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται σε υγρή φάση με τη βοήθεια του πύργου ψύξης. Η διεργασία αυτή συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας η οποία διοχετεύεται στο περιβάλλον μέσω του πύργου ψύξης, όπως ακριβώς και στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Εδώ να σημειώσουμε ότι η συμπύκνωση του ατμού που εξέρχεται από τον ατμοστρόβιλο βελτιώνει το βαθμό απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου, καθώς αυξάνεται η πτώση πίεσης που επιτυγχάνεται στον ατμοστρόβιλο. Επίσης η κατανάλωση ατμού είναι περίπου η μισή σε σχέση με τη διάταξη της απευθείας απόρριψης του ατμού στην ατμόσφαιρα.

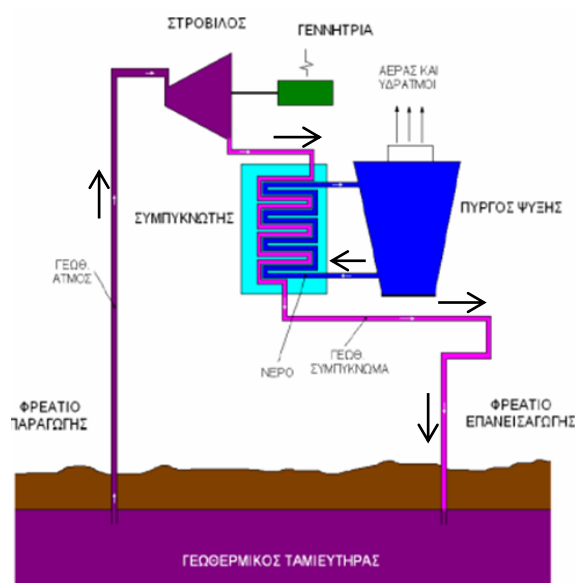
Το μοναδικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι η πολυπλοκότητά της πράγμα που οδηγεί σε αυξημένες απαιτήσεις σε κατασκευαστικό, χωροταξικό και αναπόφευκτα οικονομικό επίπεδο. Απ' την άλλη σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα επανεισαγωγής του υγροποιημένου ατμού πίσω στο γεωθερμικό ταμιευτήρα μέσω του φρεατίου επανεισαγωγής, μετά τη συμπύκνωση του.

Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση της πίεσης του γεωθερμικού ρευστού σε υψηλά επίπεδα για μεγάλο χρονικό διάστημα εκμετάλλευσης του αντίστοιχου γεωθερμικού πεδίου. Συνήθως η εγκατεστημένη ισχύς μονάδων παραγωγής ξηρού τύπου με συμπυκνωτή κυμαίνεται μεταξύ 55 - 60 MW, πρόσφατα βέβαια έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν σταθμοί ισχύος 110 MW.

Στη δεύτερη περίπτωση, η οποία αποτελεί και την πιο απλή μορφή μονάδας παραγωγής ενέργειας από τις δυο, ο χαμηλής πλέον ενθαλπίας και πίεσης ατμός εξέρχεται από τον ατμοστρόβιλο και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Αν και αυτή η διάταξη χρειάζεται περίπου διπλάσια ποσότητα ατμού σε σχέση με την αντίστοιχη με συμπυκνωτή για την παραγωγή ίσης ποσότητας ενέργειας, έχει ενδιαφέροντα και χρήσιμα πλεονεκτήματα. Αρχικά, χρησιμοποιείται κατά κόρον σε

πιλοτικές και εφεδρικές μονάδες, σε περιπτώσεις μικρών παροχών ατμού καθώς και σε δοκιμές παραγωγής ηλεκτρισμού στα πλαίσια αξιολόγησης της παραγωγής ενός γεωθερμικού πεδίου. Ακόμα η χρήση της είναι επιτακτική σε περιπτώσεις όπου ο ατμός έχει υψηλά ποσοστά (>12% κατά βάρος) περιεκτικότητας μη συμπυκνώσιμων συστατικών.

Τέλος, μια μονάδα παραγωγής που λειτουργεί με ξηρό ατμό ατμοσφαιρικής διάθεσης ατμού μπορεί να κατασκευαστεί και να τεθεί σε λειτουργία σε σύντομο χρονικό διάστημα (13 - 14 μήνες) λόγω της απλότητάς της. Η εγκατεστημένη ισχύς αυτού του είδους των σταθμών είναι μεταξύ 2,5 - 5 MW.



Σχήμα 4.12 Διάταξη ξηρού ατμού σε συμπύκνωση τύπου θερμικού εναλλάκτη.

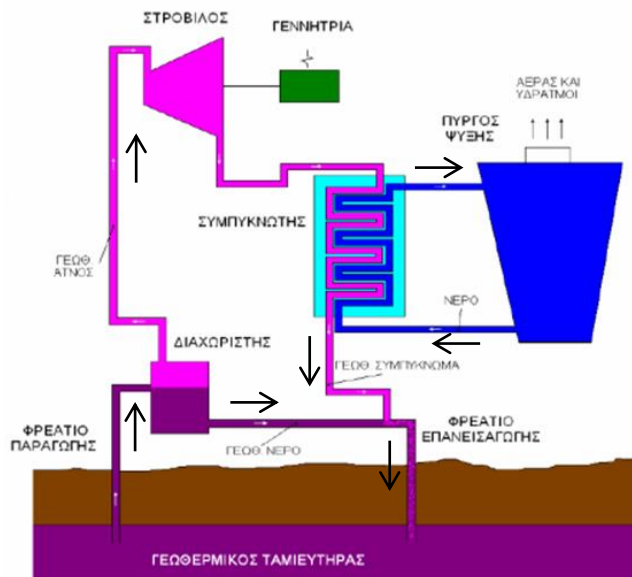
(πηγή: https://gewthermia.blogspot.com/2013/02/blog-post_2738.html?m=1&fbclid=IwAR1zcxdc4RVM2aAORE_SoI7Jr376aY9nysAyo3fgERrKUBi0EaX2-Y8hrdY)

Οι συμβατικοί ατμοστρόβιλοι σε διατάξεις ξηρού ατμού έχουν ως απαίτηση γεωθερμικά πεδία με ατμό ελάχιστης θερμοκρασίας 150 °C. Με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα βέβαια υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης υπέρθερμου γεωθερμικού ατμού θερμοκρασίας έως 300 – 350 °C και ολοένα αυξανόμενης πίεσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, ο οποίος όμως δεν υπερβαίνει το 30%.

Η απαίτηση μιας τυπικής γεωθερμικής μονάδας παραγωγής αυτής της διάταξης σε ξηρό ή υπέρθερμο ατμό είναι περίπου 6,5kg ανά παραγόμενη kWh. Να σημειωθεί βέβαια, ότι τα γεωθερμικά πεδία που παράγουν καθαρό ατμό είναι αρκετά σπάνια και υπάρχουν μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές στο κόσμο [3].

4.10.2. Με στιγμιαία ατμοποίηση εργαζόμενου μέσου (Flash Steam)

Η διάταξη παραγωγής με στιγμιαία ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου (Σχήμα 4.13) είναι η συχνότερα εφαρμοζόμενη διάταξη ηλεκτροπαραγωγής μέσω γεωθερμίας.



Σχήμα 4.13 Διάταξη στιγμιαίας ατμοποίησης εργαζόμενου μέσου με συμπυκνωτή τύπου θερμικού εναλλάκτη

(πηγή: https://gewthermia.blogspot.com/2013/02/blog-post_2738.html?m=1&fbclid=IwAR1zcxdc4RVM2aAORE_SoI7Jr376aY9nysAyo3fgERrKUBi0EaX2-Y8hrdY)

Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου το γεωθερμικό μέσο που λαμβάνεται από το φρεάτιο παραγωγής δεν είναι καθαρός ατμός, αλλά μπορεί να είναι είτε μίγμα νερού – ατμού, είτε ατμός με υψηλό ποσοστό υγρασίας, είτε θερμό νερό σε υψηλή πίεση. Η ιδιαιτερότητα, αυτής της διάταξης εντοπίζεται στην ύπαρξη ενός ειδικού ταμιευτήρα που είναι τοποθετημένος πριν τον ατμοστρόβιλο και ονομάζεται διαχωριστής.

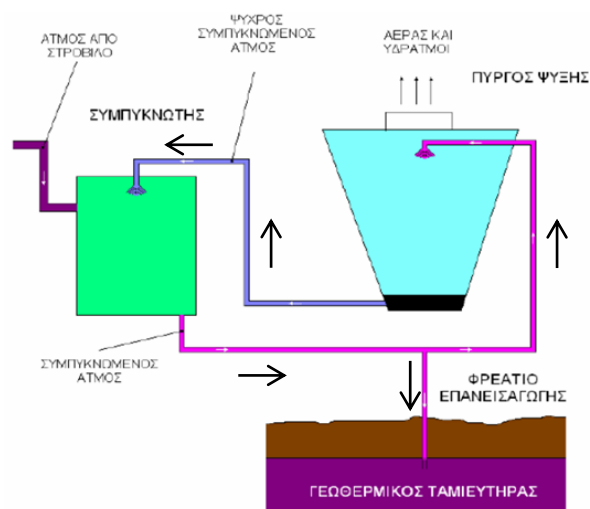
Το γεωθερμικό ρευστό διοχετεύεται, από το φρεάτιο παραγωγής, στο διαχωριστή και χάρη στην απότομη πτώση πίεσης που δημιουργείται στο εσωτερικό του, μέρος του ρευστού ατμοποιείται στιγμιαία. Έτσι καταλήγει στην ύπαρξη καθαρού ατμού (ο οποίος οδηγείται στον ατμοστρόβιλο) και ζεστού νερού που αποτελεί το ποσοστό του γεωθερμικού ρευστού που δεν ατμοποιήθηκε. Τέλος, ο διαχωριστής εκτός του ότι τροφοδοτεί τον ατμοστρόβιλο με το απαραίτητο εργαζόμενο μέσο, τον προστατεύει επίσης από την είσοδο νερού.

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στην ηλεκτρογεννήτρια της μονάδας η οποία είναι συζευγμένη με τον ατμοστρόβιλο, ο οποίος κινείται από τον ατμό που προέρχεται από το διαχωριστή. Ο ατμός μετά τον ατμοστρόβιλο διοχετεύεται στο

συμπυκνωτή, όπου και συμπυκνώνεται δημιουργώντας υποπίεση, αυξάνοντας έτσι τη παραγόμενη ισχύ από τον ατμοστρόβιλο.

Ο συμπυκνωτής μπορεί να είναι τύπου θερμικού εναλλάκτη ή τύπου άμεσου επαφής. Στους συμπυκνωτές άμεσης επαφής το ψυκτικό μέσο (ψυχρός συμπυκνωμένος ατμός) προερχόμενο από το πύργο ψύξης, ψεκάζεται πάνω στον εξερχόμενο από τον ατμοστρόβιλο μίγμα ατμού, προκαλώντας τη συμπύκνωσή του. Ο συμπυκνωμένος ατμός που προκύπτει εξέρχεται από το συμπυκνωτή, και ένα μέρος του οδηγείται μαζί με το γεωθερμικό νερό από το διαχωριστή στο φρεάτιο επανεισαγωγής.

Ο υπόλοιπος συμπυκνωμένος ατμός εισέρχεται στο πύργο ψύξης και αφού ψυχθεί οδηγείται πάλι στο συμπυκνωτή όπου χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο. Ένα μικρό τμήμα του συμπυκνωμένου ατμού που εισέρχεται στο πύργο ψύξης απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα υπό τη μορφή υδρατμών. Το υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα γεωθερμικό νερό που παραμένει υγροποιημένο στο διαχωριστή, πριν διοχετευτεί στο φρεάτιο επανεισαγωγής, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων σε γειτονικούς οικισμούς, έτσι ώστε να αξιοποιηθεί το υψηλό θερμικό του περιεχόμενο.



Σχήμα 4.14 Μονάδα στιγμιαίας ατμοποίησης εργαζόμενη με συμπυκνωτή άμεσου επαφής.

Για την αύξηση της απόδοσης αυτής της διάταξης και ανάλογα πάντα με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού που παρέχει η πηγή μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυο διαχωριστές. Το γεωθερμικό ρευστό εισέρχεται στον πρώτο διαχωριστή όπου ένα μέρος του ατμοποιείται και το υπόλοιπο μέρος, το οποίο αποτελείται ουσιαστικά από ζεστό νερό, διοχετεύεται στον δεύτερο διαχωριστή για περαιτέρω ατμοποίηση. Ο ατμός που παράγεται στον δεύτερο διαχωριστή είναι χαμηλότερης πίεσης.

Για την εκμετάλλευση του ατμού που παρέχεται με δυο διαφορετικές πιέσεις χρησιμοποιείται αμοστρόβιλος διπλής εισόδου. Η διάταξη αυτή ονομάζεται διπλή ατμοποίηση με αποτόνωση και δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης του μεγαλύτερου μέρους του δυναμικού της γεωθερμικής πηγής για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Εάν η πηγή έχει υψηλό επίπεδο αιωρούμενων και διαλυμένων στερεών, μπορεί να είναι αναγκαία η ενσωμάτωση εξοπλισμού ελέγχου των επικαθίσεων στην είσοδο της διάταξης και εξοπλισμού αποκατάστασης των στερεών στην έξοδο αυτής. Αυτό προφυλάσσει τον εξοπλισμό της μονάδας από απόφραξη και διατηρεί το γεωθερμικό ρευστό καθαρό για επανεισαγωγή στον ταμιευτήρα. Επιπροσθέτως, εάν υφίστανται σημαντικές ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων, μπορεί να είναι αναγκαία η εγκατάσταση εξοπλισμού αποβολής των αερίων αυτών από το συμπυκνωτή για να μην αυξηθεί η αντίθλιψη στο σύστημα, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της εγκατάστασης.

Οι μονάδες που χρησιμοποιούν αυτού του είδους τις διατάξεις έχουν ισχύ περίπου 5 – 100 MW. Τα επιθυμητά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του ατμού είναι τα εξής: πίεση 0,5 – 0,6 MPa και θερμοκρασία 155 – 165 °C, οπότε ο στρόβιλος απαιτεί παροχή περίπου 8kg ατμού ανά παραγόμενη kWh [3].

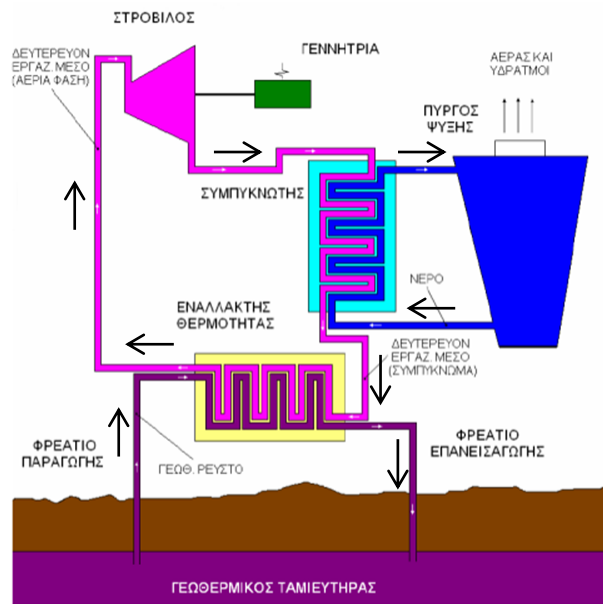
4.10.3. Οργανικός δυαδικός κύκλος με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα (Binary Cycle)

Η διάταξη παραγωγής με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα είναι η πλέον κατάλληλη για περιοχές όπου η θερμοκρασία του γεωθερμικού μέσου δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή (<180°C). Η διάταξη αυτή (Σχήμα 4.15) έχει δύο εργαζόμενα μέσα, το πρωτεύον και το δευτερεύον.

Το πρωτεύον γεωθερμικό μέσο λαμβάνεται μέσω του παραγωγικού φρεατίου και οδηγείται σε κατάλληλο θερμικό εναλλάκτη, όπου αποδίδει μέρος της θερμικής του ενέργειας στο δευτερεύον εργαζόμενο μέσο και στη συνέχεια επιστρέφει στο γεωθερμικό ταμιευτήρα μέσω του φρεατίου επανεισαγωγής. Το γεωθερμικό μέσο μπορεί να αποτελείται από θερμό ατμό, θερμό νερό ή και μίγμα αυτών

Το δευτερεύον εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό οργανικό κύκλο Rankine (OCR). Συγκεκριμένα το ρευστό διερχόμενο από τον εναλλάκτη απορροφά θερμότητα και ατμοποιείται καθώς παρουσιάζει χαμηλό σημείο ζέσεως (<100°C) βάσει και του οποίου και έχει επιλεγεί. Στη συνέχεια, οδηγείται στο ζεύγος αμοστρόβιλου – ηλεκτρογεννήτριας όπου και εκτονώνεται παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια.

Τέλος, αφού εισέλθει στο συμπυκνωτή, ο οποίος είναι τύπου θερμικού εναλλάκτη, και υγροποιηθεί οδηγείται και πάλι στον αρχικό εναλλάκτη εκτελώντας έναν κλειστό θερμοδυναμικό κύκλο. Ως εργαζόμενο μέσο επιλέγονται οργανικές ρευστές ουσίες τύπου υδρογονανθράκων (HFC) που έχουν χαμηλό σημείο ζέσεως και υψηλή τάση ατμών σε χαμηλές θερμοκρασίες (σε σχέση με τον υδάτινο ατμό) και συνήθως χρησιμοποιείται ισοπετάνιο, πεντάνιο ή βουτάνιο.



Σχήμα 4.15 Μονάδα με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα και συμπυκνωτή τύπου θερμικού εναλλάκτη.

(πηγή: https://gewthermia.blogspot.com/2013/02/blog-post_2738.html?m=1&fbclid=IwAR1zcxDC4RVM2aAORE_SoI7Jr376aY9nysAyo3fgERrKUBi0EaX2-Y8hrdY)

Εάν γίνει σωστή επιλογή του δευτερεύοντος ρευστού, η διάταξη αυτή μπορεί να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αξιοποιούνται γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 85 – 170°C. Το ανώτερο όριο εξαρτάται από τη θερμική σταθερότητα του οργανικού ρευστού, ενώ το κατώτατο όριο από οικονομοτεχνικούς παράγοντες, καθώς κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία, εξαιτίας του μεγέθους και της ικανότητας των απαιτούμενων εναλλακτών, το όλο πρόγραμμα ίσως κατέληγε ασύμφορο από οικονομικής απόψεως.

Εκτός από τις περιπτώσεις χαμηλής – μέσης ενθαλπίας, η διάταξη ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εκεί όπου η εφαρμογή της στιγμιαίας ατμοποίησης του ρευστού θα πρέπει να αποφεύγεται (π.χ. για την αποφυγή απόφραξης των γεωτρήσεων). Στην περίπτωση αυτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υποβρύχιες αντλίες, ώστε τα γεωθερμικά ρευστά να παραμένουν υπό σταθερή πίεση και σε υγρή φάση, ενώ η ενέργεια μπορεί να λαμβάνεται και να αξιοποιείται μέσω του δευτερεύοντος εργαζόμενου μέσου.

Η διάταξη αυτή, των ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων, λόγω της παράλληλης και ξεχωριστής λειτουργίας του δευτερεύοντος εργαζόμενου μέσου, επιτρέπει την αξιοποίηση γεωθερμικών ρευστών τα οποία είναι χημικά ακάθαρτα και σε αντίθετη περίπτωση θα δημιουργούσαν επικαθίσεις αλάτων και φθορά στις σωληνώσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια, είναι η διατήρηση των σωληνώσεων των παραγωγικών φρεατίων υπό πίεση, ώστε να αποφύγουμε την ατμοποίηση του γεμάτου προσμίξεις γεωθερμικού ρευστού.

Παρόλο που βρίσκονται σε λειτουργία περίπου 60 μονάδες παραγωγής παγκοσμίως με ξεχωριστά εργαζόμενα μέσα, τα λειτουργικά κόστη είναι αρκετά υψηλά. Η διατήρηση του γεωθερμικού μέσου υπό υψηλή πίεση και η αύξηση της πίεσης του δευτερεύοντος εργαζόμενου μέσου μετά το συμπυκνωτή καταναλώνει περίπου το 30% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας της μονάδας, καθώς για τις ενέργειες αυτές απαιτούνται αντλίες μεγάλης ισχύος. Οπότε, η διάταξη αυτή πρέπει να διαχειρίζεται μεγάλες ποσότητες γεωθερμικού μέσου, ώστε να λειτουργεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης [3].

4.10.4. Με χρήση Συνδυασμένου Κύκλου (Combined Cycle)

Μονάδες τέτοιου τύπου συνδυάζουν τις διατάξεις συμβατικού αμοστροβίλου και ξεχωριστού εργαζόμενου μέσου. Ο ατμός, ο οποίος έχει προέλθει είτε κατευθείαν από το φρεάτιο παραγωγής, είτε μέσω στιγμιαίας ατμοποίησης στο διαχωριστή, εκτονώνεται στον πρώτο αμοστρόβιλο και στη συνέχεια οδηγείται σε ένα θερμικό εναλλάκτη, στον οποίο χρησιμοποιείται ως πρωτεύον εργαζόμενο μέσο σε μια διάταξη δύο εργαζόμενων μέσων. Στον εναλλάκτη αυτόν, ο ατμός αποδίδει θερμότητα στο δευτερεύον εργαζόμενο μέσο, το οποίο ατμοποιείται και οδηγείται στο δεύτερο αμοστρόβιλο. Οι δύο αμοστρόβιλοι είναι συνδεδεμένοι με μια ηλεκτρογεννήτρια την οποία και στρέφουν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην περίπτωση συνδυασμού διατάξεων στιγμιαίας ατμοποίησης και ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων, η απόδοση θερμότητας στη δεύτερη διάταξη γίνεται μέσω ενός πιο πολύπλοκου θερμικού εναλλάκτη. Στον εναλλάκτη αυτόν εκτός από τον ατμό που προέρχεται από τον πρώτο αμοστρόβιλο, ως πρωτεύον εργαζόμενο μέσο λειτουργεί και το θερμό νερό που έχει παραμείνει στο διαχωριστή μετά τη διαδικασία της ατμοποίησης.

Ο συμβατικός αμοστρόβιλος λειτουργεί αποδοτικότερα όταν τροφοδοτείται με ατμό υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, ενώ η διάταξη ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων έχει μεγαλύτερη απόδοση όταν χρησιμοποιεί πρωτεύον εργαζόμενο μέσο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Οι δύο αυτές συνθήκες πληρούνται σε μια διάταξη συνδυασμένου κύκλου, επιτυγχάνοντας έτσι αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης στην εγκατάσταση.

Τέλος, σε μια συμβατική γεωθερμική μονάδα παραγωγής, αντί η θερμότητα συμπύκνωσης του εργαζόμενου μέσου να απελευθερώνεται στο περιβάλλον, υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσής της για επιπρόσθετη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με αντικατάσταση του συστήματος συμπυκνωτή- πύργου ψύξης με μια διάταξη ξεχωριστών εργαζόμενων μέσων [3].



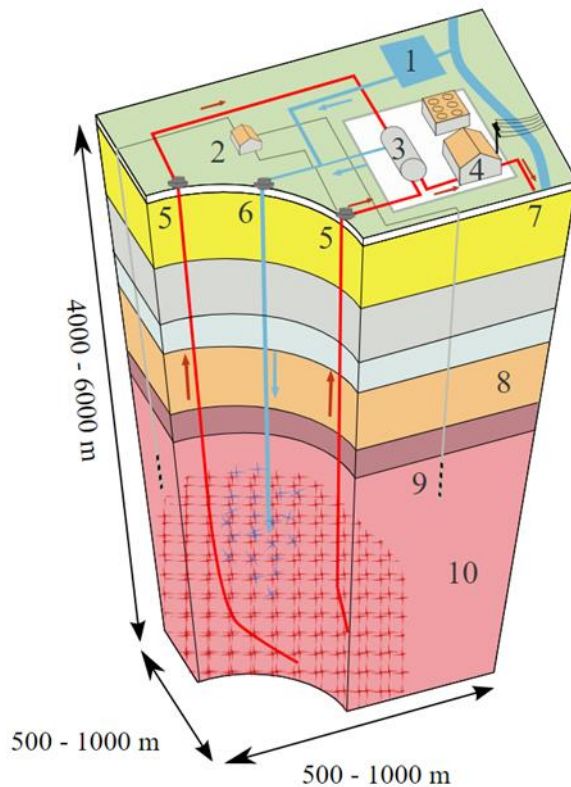
Σχήμα 4.16 Ανά τον κόσμο κατανομή των γεωθερμικών εγκαταστάσεων σύμφωνα με την τεχνολογία παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν. (2019)

πηγή : <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/earths-geothermal-hotspots-new-dataset-launched>

4.11. Ενισχυμένα Γεωθερμικά Συστήματα

Η τεχνολογία των Ενισχυμένων Γεωθερμικών Συστημάτων (Enhanced Geothermal Systems), πρώην Θερμά Ξηρά Πετρώματα (Θ.Ξ.Π.), γνωρίζει μεγάλη άνθιση τα τελευταία χρόνια. Πρόκειται για μια μορφή τεχνολογίας που μπορεί να βρει εφαρμογή σε ηπειρωτικές περιοχές σε βάθη 5000 μέτρων. Εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές που δεν διαθέτουν υδροθερμικό ταμιευτήρα (ατμό ή νερό) ή οι ποσότητες δεν επαρκούν [9].

Στα γεωθερμικά συστήματα αυτά δημιουργούνται τεχνητές συνθήκες κυκλοφορίας ρευστού (υπόγειοι ταμιευτήρες). Ο λόγος της απουσίας ρευστού στις περιπτώσεις αυτές είναι η μικρή διαπερατότητα των πετρωμάτων. Μέσω γεώτρησης με την τεχνική της υδραυλικής θραύσης (hydraulic fracturing) ή της διέγερσης (stimulation) εισπίζεται στις ρωγμές των πετρωμάτων ηλεκτρολύτης με θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του πετρώματος. Κατά αυτόν τον τρόπο προκαλείται η συστολή και θραύση (διάνοιξη) των πετρωμάτων. Ο ηλεκτρολύτης διαποτίζει τις ρωγμές δημιουργώντας ένα τεχνητό ταμιευτήρα από τον οποίο με δεύτερη γεώτρηση αντλείται το ρευστό. Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζονται τα μέρη από τα οποία απαρτίζεται το σύστημα αυτό [6].



Σχήμα 4.17 Ενισχυμένο Γεωθερμικό Σύστημα (Enhanced Geothermal Systems, EGS). Η διάταξη ενός ενισχυμένου γεωθερμικό σύστημα αποτελείται : 1.δεξαμενή, 2.αντλιοστάσιο, 3.εναλλάκτη θερμότητας, 4.αίθουσα στροβίλων, 5.πηγάδι παραγωγής, 6.φρεάτιο έγχυσης, 7.ζεστό νερό, 8.πορώδη ιζήματα, 9.παρατηρητήριο, 10.κρυσταλλικό υπόβαθρο.

(πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced_geothermal_system)

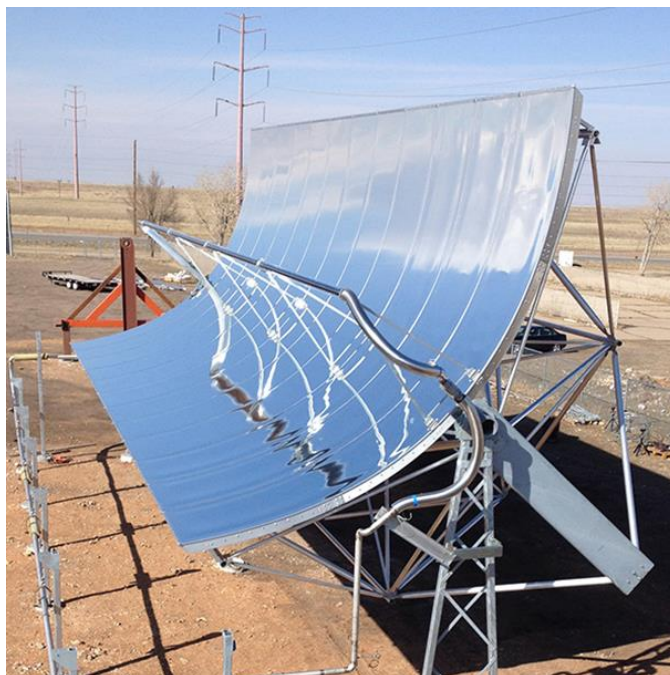
Τα ενισχυμένα συστήματα γεωθερμίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στον τεχνητό ταμιευτήρα, αλλά και για την θέρμανση θερμοκηπίων, τηλεθέρμανση, θέρμανση εδάφους, ιχθυοκαλλιέργειες κλπ [6].

Τα αποτελέσματα της τεχνολογίας αυτής είναι πολύ θετικά και οι προσδοκίες ακόμα μεγαλύτερες. Η εφαρμογή της τεχνολογίας EGS αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια μεγαλύτερη των 10 GWe και σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Διεθνή Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Association I.E.A.) θα φτάσουν στα 150 GWe μέχρι το 2050 [6].

5. PTC (Parabolic Trough Collector)

5.1. Περιγραφή των PTC

Οι διατάξεις PTC (Parabolic Trough Collector) είναι συστήματα παραβολικών συλλεκτών σε συστοιχίες τα οποία έχουν την δυνατότητα παραγωγής θερμικής ενέργειας υψηλών θερμοκρασιών. Η θερμοκρασίες που μπορούν να επιτύχουν είναι μεταξύ των 100°C – 450°C. Πρόκειται για τεράστια ποσά θερμότητας που με κατάλληλη επεξεργασία δίνουν αξιόλογα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα PTC σύστημα αποτελείται από ένα παραβολικό κοίλο κάτοπτρο που ανακλά την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία και τη συγκεντρώνει σε ένα σωληνοειδή απορροφητή που βρίσκεται στην εστιακή γραμμή της παραβολής. Η συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μειώνει την επιφάνεια απορρόφησης σε σχέση με την περιοχή ανοίγματος του συλλέκτη και συνεπώς μειώνει σημαντικά τις συνολικές θερμικές απώλειες. Η συμπυκνωμένη ακτινοβολία θερμαίνει το ρευστό που κυκλοφορεί μέσω του σωληνοειδούς απορροφητή, μετατρέποντας έτσι την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική ενέργεια με τη μορφή της αισθητής θερμότητας του ρευστού.



Σχήμα 5.1 Ηλιακό κάτοπτρο PTC

(πηγή : <http://www.skyfuel.com/projects/>)

Τα PTC είναι δυναμικά συστήματα, καθώς έχουν την ιδιότητα να περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα, το λεγόμενο άξονα παρακολούθησης, ακολουθώντας την ημερήσια κίνηση του ήλιου. Η περιστροφή του συλλέκτη γύρω από τον άξονά του, απαιτεί την ύπαρξη ιχνηλάτη. Ιχνηλάτης είναι η συσκευή ανίχνευσης – παρακολούθησης της θέσης του ηλίου. Ένας ιχνηλάτης επαρκεί για αρκετά

παραβολικά μοντέλα συνδεδεμένα σε σειρά τα οποία αποτελούν ένα συλλέκτη. Ο τύπος του ιχνηλάτη εξαρτάται από το μέγεθος και τις διαστάσεις του συλλέκτη. Οι ιχνηλάτες αποτελούνται από έναν ηλεκτροκινητήρα και ένα κιβώτιο ταχυτήτων και κατευθύνουν ισχυρούς υδραυλικούς βραχίονες που τοποθετούνται στις βάσεις περιστροφής των συλλεκτών, ώστε να έχουν το βέλτιστο προσανατολισμό προς τον ήλιο. Οι trackers που τοποθετούνται στον κεντρικό πυλώνα, καθοδηγούνται από μια τοπική μονάδα ελέγχου, ώστε να παρακολουθείται και να εστιάζεται ο ήλιος με μέγιστη ακρίβεια.

Οι τοπικές μονάδες ελέγχου που διατίθενται σήμερα στην αγορά μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες:

1. μονάδες ελέγχου που βασίζονται σε αισθητήρες ήλιου και
2. μονάδες ελέγχου που βασίζονται σε αστρονομικούς αλγόριθμους.

Τα PTC εγκαθίστανται κατά βάση με προσανατολισμό του άξονα περιστροφής, είτε στο Βορρά – Νότο, είτε στην Ανατολή – Δύση, αν και οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση θα ήταν εφικτή. Ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται από το σχήμα και τη διάταξη του χώρου όπου έχουν εγκατασταθεί. Ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη επηρεάζει τη γωνία της ηλιακής πρόσπτωσης στην επιφάνεια του συλλέκτη μεταβάλλοντας ανάλογα και την απόδοση του συλλέκτη. Οι εποχιακές διακυμάνσεις στην απόδοση του συλλέκτη που προσανατολίζεται στο Βορρά – Νότο μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες. Τρεις με τέσσερις φορές περισσότερη ενέργεια παρέχεται καθημερινά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες σε σχέση με το χειμώνα, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τις τοπικές καιρικές συνθήκες. Οι εποχιακές διακυμάνσεις στην παροχή ενέργειας είναι πολύ μικρότερες για έναν συλλέκτη προσανατολισμού Ανατολής – Δύσης, συνήθως λιγότερες από 50%. Παρ' όλα αυτά, ο συλλέκτης που προσανατολίζεται στο Βορρά – Νότο παρέχει περισσότερη ενέργεια σε ετήσια βάση. Η ημερήσια διακύμανση της γωνίας πρόσπτωσης είναι πάντα μεγαλύτερη για τον «ανατολικό – δυτικό» τύπου συλλέκτη, με μέγιστες τιμές κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου και τουλάχιστον 0° κάθε μέρα στο ηλιακό μεσημέρι [10].

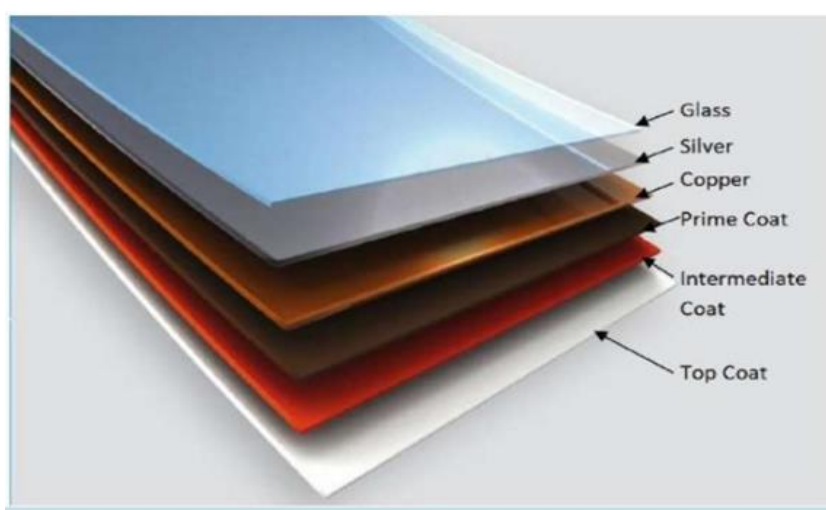
Ως εκ τούτου, ο προσανατολισμός του άξονα περιστροφής είναι πολύ σημαντικός για την απόδοση του συλλέκτη και η επιλογή του καλύτερου προσανατολισμού εξαρτάται από τις απαντήσεις στις ακόλουθες ερωτήσεις:

1. Ποια εποχή του χρόνου θα πρέπει το ηλιακό πεδίο να παράγει την περισσότερη ενέργεια; Αν απαιτείται περισσότερη ενέργεια το καλοκαίρι από τον χειμώνα, ο καταλληλότερος προσανατολισμός είναι βορρά – νότου.

2. Είναι καλύτερα για την ενέργεια να κατανέμεται ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια του έτους, ενώ το χειμώνα η παραγωγή είναι σημαντικά μικρότερη από ό, τι το καλοκαίρι ; Εάν η απάντηση είναι "ναι", ο καλύτερος προσανατολισμός είναι ανατολικά – δυτικά.

5.2. Δομή ηλιακών κατόπτρων

Τα παραβολικά κάτοπτρα είναι υαλοπίνακες (καθρέφτες) με επίστρωση αργύρου (silver coated glass mirror). Για την παρασκευή τους ακολουθείτε μια διαδικασία αρκετά λεπτομερής. Αρχικά ταινίες γυαλιού επιπλέουν σε τήγμα Zn κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι ένα γυαλί λεπτό και λείο χωρίς οπτικές παραμορφώσεις με ανθεκτικότητα στη διάβρωση και ευκολία στη μορφοποίηση για την κατασκευή μεγάλου μεγέθους καθρεπτών. Στη συνέχεια, ένα προστατευτικό στρώμα χαλκού αγκαλιάζει την επαργυρωμένη επιφάνεια. Στο τρίτο και τελικό στάδιο προστίθενται τρεις στρώσεις εποξικών υλικών. Τα υλικά αυτά έχουν πολλαπλές ιδιότητες που προσδίδουν στην παρασκευή σκληρότητα, μεγάλη μηχανική αντοχή σε ελαστικές παραμορφώσεις, αντοχή στις συγκολλήσεις, υψηλή χημική αντίσταση και μόνωση [10].



Σχήμα 5.2 Υαλοπίνακας με επίστρωση αργύρου και προστατευτικά στρώματα (Flabeg)

(πηγή : <https://www.slideshare.net/100001884522163/parabolic-trough-solar-collectors-power-plants-designe>)

Οι PTC ανακλαστήρες έχουν υψηλή κατοπτρική ανακλαστικότητα ώστε να αντανακλούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία. Οι ηλιακοί ανακλαστήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως για τα PTC είναι γυάλινοι καθρέφτες επαργυρωμένοι στο πίσω μέρος. Η ανθεκτικότητα και η ηλιακή φασματική ανακλαστικότητα τους είναι καλύτερη από το γυαλισμένο αλουμίνιο και τα επιμεταλλωμένα ακρυλικά κάτοπτρα. Η ηλιακή φασματική ανακλαστικότητα τους είναι τυπικά 0,93 για τα επαργυρωμένα γυάλινα (κεραμικά) κάτοπτρα και 0,87 για το γυαλισμένο αλουμίνιο. Για τη βέλτιστη απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας από τους επαργυρωμένους γυάλινους ανακλαστήρες και το γυάλινο σωλήνα δέκτη, χρησιμοποιείται γυαλί κατασκευασμένο από διοξείδιο του πυριτίου με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξείδια του σιδήρου.

Υπάρχουν βέβαια και άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή παραβολικών συλλεκτών, τα οποία όμως δεν συναντούμε συχνά καθώς παρουσιάζουν μειονεκτήματα όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 5.1. Χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις μικρότερης κλίμακας ή βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο μέχρι να τελειοποιηθούν και να αποκτήσουν την προσδοκώμενη απόδοση και αξιοπιστία.

Πίνακας 5.1 Τύποι ηλιακών κατόπτρων.

Τύπος	Ανακλαστικότητα (%)	Κόστος (\$/m ²)	Προβλήματα
Flabeg Thick Glass	94	40	Κόστος, θραύσεις
Thin Glass	93 – 96	15 – 40	Θραύσεις
All – Polymeric	99	10	Απαιτείται προστατευτική στρώση ακτινοβολίας UV
ReflecTeck Laminate	>93	10 – 15	Σε κατάσταση δοκιμής
SAIC Super Thin Glass	>95	10	
Alamod	~90	< 20	Χαμηλή ανακλαστικότητα

5.3. Απορροφητής

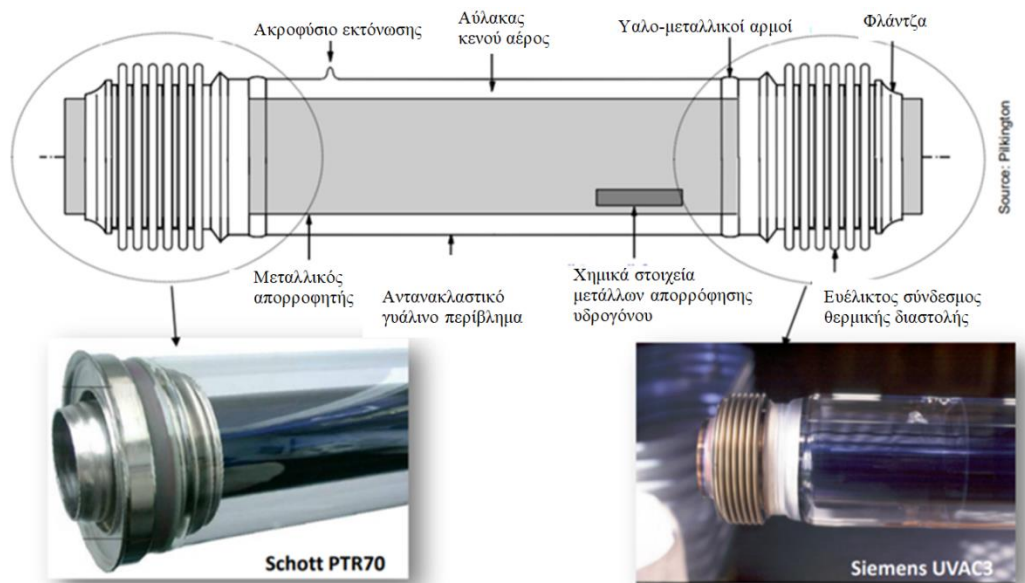
Ο απορροφητής της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφά την θερμότητα χωρίς να ακτινοβολεί ο ίδιος, με υψηλό συντελεστή απορρόφησης στο φάσμα της ορατής ακτινοβολίας και ταυτόχρονα χαμηλό συντελεστή εκπομπής στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Ο τυπικός απορροφητής PTC αποτελείται από έναν εσωτερικό σωλήνα απορρόφησης από ανοξείδωτο ατσάλι καλυμμένο εξωτερικά από μια επένδυση τριών στρωμάτων. Το εσωτερικό στρώμα είναι είτε από χαλκό, είτε αλουμίνιο ή μόλυβδο, το ενδιάμεσο στρώμα αποτελείται από μία κεραμομεταλλουργική σύνθεση και το εξωτερικό επίστρωμα είναι κεραμικό (από γυαλί). Ο απορροφητής έχει αρκετά υψηλή απορροφητικότητα (μεγαλύτερη από 96%) και ο συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας δεν ξεπερνά το 0,1 σε θερμοκρασίες 400 °C.

Το Σχήμα 5.3 δείχνει έναν τυπικό κενό σωλήνα του απορροφητή PTC. Ο εξωτερικός γυάλινος – κεραμικός σωλήνας είναι συνδεδεμένος με τον εσωτερικό χαλύβδινο σωλήνα μέσω μεταλλικών ευέλικτων αρμών σύνδεσης που αντισταθμίζουν τη διαφορετική θερμική διαστολή από γυαλί και ατσάλι, όταν ο σωληνοειδής απορροφητής λειτουργεί στην ονομαστική θερμοκρασία. Μεταξύ των δύο κυλίνδρων υπάρχει κενό το οποίο συμβάλλει στο να αποφευχθούν οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον.

Η συγκόλληση που χρησιμοποιείται μεταξύ γυαλιού και μετάλλου αποτελεί αδύναμο σημείο στο σωλήνα. Ο απορροφητής πρέπει να προστατεύεται από την ολική (άμεση και διάχυτη) ηλιακή ακτινοβολία για να αποφευχθεί η υψηλή θερμική και μηχανική καταπόνηση που θα μπορούσαν να βλάψουν τη συγκόλληση. Επίσης

επίστρωση αλουμινίου τοποθετείται πάνω στην άρθρωση για την προστασία των συγκολλήσεων.



Σχήμα 5.3 Τυπικός σωληνοειδής απορροφητής PTC

(πηγή : <https://www.pilkington.com/en/us>)

Μεταξύ του χαλύβδινου σωλήνα – απορροφητή και του γυάλινου καλύμματος (στο κενό) τοποθετούνται χημικά στοιχεία μετάλλων που απορροφούν τα μόρια υδρογόνου που παράγονται κατά την διάσπαση του υγρού μεταφοράς θερμότητας. Η ύπαρξη του υδρογόνου επηρεάζει αρνητικά τη διάταξη διότι διαπερνά τα τοιχώματα του σωλήνα και εισέρχεται στο μεταξύ τους κενό. Μειώνοντας τη θερμική μόνωση και αυξάνοντας τις θερμικές απώλειες.

Στο εσωτερικό του ατσάλινου απορροφητή κυκλοφορεί θερμοαγωγό ρευστό που συλλέγει τη θερμική ενέργεια και τη μεταφέρει στη μονάδα παραγωγής ισχύος (ατμοστρόβιλος). Για την ομαλή κυκλοφορία του ρευστού στον ατσάλινο σωλήνα χρησιμοποιείται σύστημα αντλιών το οποίο ρυθμίζει την παροχή του στην είσοδο και την έξοδο του δέκτη [10],[11].

5.4. Μέθοδοι παραγωγής ατμού

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την παραγωγή ατμού στις διατάξεις των παραβολικών κατόπτρων, η άμεση και η έμμεση. Κατά την άμεση παραγωγή ατμού ο ίδιος ο ατμός χρησιμοποιείται ως ρευστό της εγκατάστασης. Αφού διασχίσει κατά μήκος τον απορροφητή μεταβάλλοντας την πίεση του και αυξάνοντας τη θερμοκρασία του εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο. Η άμεση παραγωγή ατμού αυξάνει το κόστος των σωληνώσεων εξαιτίας της υψηλής πίεσης του ρευστού (άνω των 100 bar). Παρόλ' αυτά το συνολικό κόστος της εγκατάστασης μειώνεται καθώς η άμεση χρήση του ατμού δεν απαιτεί εναλλάκτη θερμότητας σε αντίθεση με τη διάταξη έμμεσης παραγωγής ατμού, ενώ παράλληλα η απόδοση του συστήματος αυξάνεται με την

εξάλειψη της διαδικασίας συναλλαγής θερμότητας μεταξύ θερμοαγωγού ρευστού και ατμού.

Η άμεση παραγωγή ατμού δοκιμάστηκε με επιτυχία στο Plataforma Solar de Almeria (PSA) της Ισπανίας (Σχήμα 5.4). Πρόκειται για ένα χώρο έρευνας και δοκιμών ηλιακών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας. Οι δοκιμές έγιναν σε θερμοκρασία 400 °C σε πίεση 100 bar. Επόμενος στόχος είναι η παραγωγή ατμού 550 °C στα 120 bar και η δυνατότητα αποθήκευσης του διότι μέχρι σήμερα δεν υπάρχει τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας που να συνδυάζεται με εγκατάσταση άμεσης παραγωγής ατμού. Σε μεγαλύτερη κλίμακα εγκατάστασης, η τεχνολογία άμεσης παραγωγής ατμού εφαρμόστηκε στο εργοστάσιο παραγωγής TSEI της Ταϊλάνδης το 2012 [10].



Σχήμα 5.4 Η εγκατάσταση Plataforma Solar de Almeria (PSA) στην Ισπανία.

(πηγή: <http://helioscsp.com/save-the-largest-concentrated-solar-power-research-center-in-spain-plataforma-solar-de-almeria/>)

Κατά την έμμεση παραγωγή ατμού, χρησιμοποιείται θερμοαγωγό ρευστό το οποίο κυκλοφορεί στο σωλήνα απορρόφησης και εν συνεχεία εισέρχεται σε εναλλάκτη θερμότητας για να παράξει ατμό για τον κύκλο Rankine (Σχήμα 5.5). Τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιεί το ρευστό είναι :

1. Να έχει επαρκώς υψηλή θερμοκρασία εξάτμισης σε φυσιολογικές πιέσεις. Το κριτήριο αυτό καθορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου του στροβίλου και κατά συνέπεια και την μέγιστη απόδοση μετατροπής του. Ο βαθμός απόδοσής του αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της θερμής πηγής.

2. Να έχει χαμηλό ιξώδες (δηλαδή να μην είναι πηκτό), υψηλή αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα (για να διευκολυνθεί η διαδικασία ανταλλαγής θερμότητας στον εναλλάκτη).

3. Να έχει χαμηλή θερμοκρασία πήξης ώστε να μην χρειάζεται προστασία κατά τις περιόδους χαμηλών θερμοκρασιών.

4. Να είναι κατά το δυνατόν λιγότερο εύφλεκτο ή εκρηκτικό και οικονομικό.

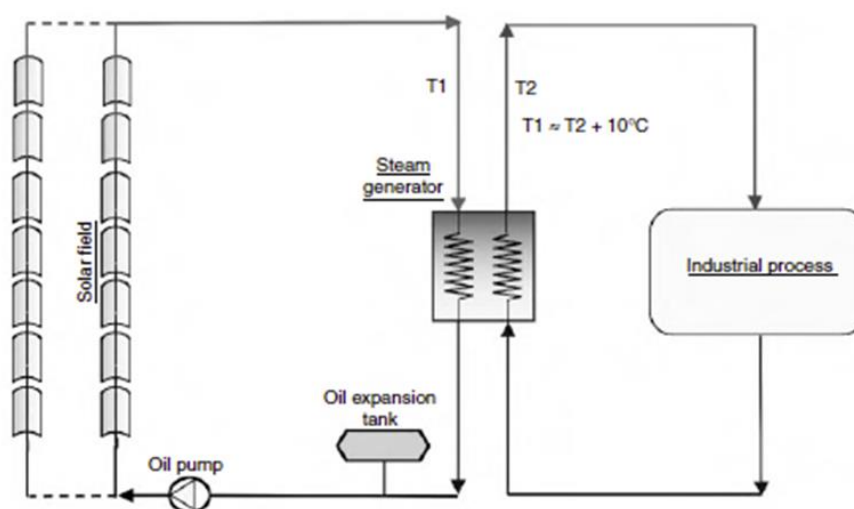
Στις διατάξεις των παραβολικών κατόπτρων PTC χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο συνθετικά έλαια τα οποία μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες (έως και 400°C). Τα συνθετικά έλαια αποτελούν εξέλιξη των ορυκτών ελαίων που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες εγκαταστάσεις τη δεκαετία του 1980. Εκτός από τα έλαια, σε αρκετές εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται το τηγμένο νιτρώδες αλάτι. Το χαρακτηριστικό που το διακρίνει είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του, όπου πολλές φορές αγγίζει τους 560°C. Το τηγμένο άλας είναι οικονομικότερο και έχει τεράστια θερμοχωρητικότητα επιτρέποντας την άμεση θερμική αποθήκευσή του. Παρόλα αυτά με την δυνατότητα επίτευξης υψηλότερων θερμοκρασιών αυξάνονται και οι θερμικές απώλειες του ρευστού. Λόγω της μορφής του είναι αρκετά διαβρωτικό και επιπλέον έχει υψηλότερη θερμοκρασία πήξης σε σύγκριση με τα έλαια. Απόρροια αυτού είναι η αναγκαία χρήση συστήματος αντιπηκτικής προστασίας καθώς και ο τακτικότερος έλεγχος στα εξαρτήματα της εγκατάστασης για επικείμενες φθορές.

Στον Πίνακα 5.Π αναγράφονται τα διαθέσιμα ρευστά που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εγκαταστάσεις και οι ιδιότητές τους. Σύμφωνα με τις ιδιότητές τους αλλά και το κόστος γίνεται η επιλογή του κατάλληλου ρευστού για την εκάστοτε περίπτωση εγκατάστασης parabolic through system (PTC). Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι η ποιότητα του ρευστού η οποία επηρεάζει και καθορίζει την απόδοση της εγκατάστασης [10].

Πίνακας 5.Π Ρευστά και οι ιδιότητές τους

Ρευστό	Θερμοκρασιακά Όρια (°C)	Ιδιότητες
Συνθετικό λάδι (π.χ. VP – 1)	12 – 400	Σχετικά ψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, εύφλεκτο
Ορυκτό έλαιο	-10 – 300	Σχετικά φτηνό, εύφλεκτο
Νερό / Ατμός	0 → 500	Απαίτηση υψηλής πίεσης και τοιχωμάτων μεγάλου πάχους
Λάδι σιλικόνης	-40 – 400	Άοσμο, μη τοξικό, ακριβό, εύφλεκτο

Νιτρικό άλας Hitec	142 – 538	Υψηλή θερμοκρασία πήξης και λειτουργίας, διαβρωτικό
Νιτρικό άλας Hitec XL	120 – 500	Υψηλή θερμοκρασία πήξης και λειτουργίας, διαβρωτικό
Νιτρικό άλας Hitec Solar Salt	238 – 593	Υψηλή θερμοκρασία πήξης και λειτουργίας, διαβρωτικό
Ιονικά υγρά	-75 – 416	Καλές θερμικές ιδιότητες, ακριβό



Σχήμα 5.5 Διάταξη έμμεσης παραγωγής ατμού

5.5. Διάταξη ηλιακού πεδίου

Η διάταξη και ο τρόπος που τοποθετούνται τα ηλιακά κάτοπτρα εξαρτάται από την παραγόμενη ισχύ της μονάδας παραγωγής δηλαδή την ονομαστική ισχύ λειτουργίας της, από το ενεργό μέσο που χρησιμοποιείται (το ρευστό) και επιπλέον από τη μέθοδο παραγωγής (άμεση ή έμμεση παραγωγή ατμού).

Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η δομή του ηλιακού πεδίου μιας εγκατάστασης με ονομαστική ισχύ μεταξύ 30 MW και 100 MW με έμμεση παραγωγή ατμού με έλαιο ως θερμαγωγό ρευστό.

Στο ηλιακό πεδίο μιας τέτοιας μονάδας, τα ηλιακά κάτοπτρα διατάσσονται σε ορθογωνική δομή, σχεδόν τετραγωνική. Συνηθίζεται η μονάδα παραγωγής να βρίσκεται στο κέντρο του ηλιακού πεδίου ή κοντά σε αυτό. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μείωση των θερμικών απωλειών καθώς οι αγωγοί είναι μικρότεροι (διανύουν μικρότερη απόσταση για να φτάσουν στην μονάδα παραγωγής). Ένας

του σπουδαστή Χάρη Γεωργίου

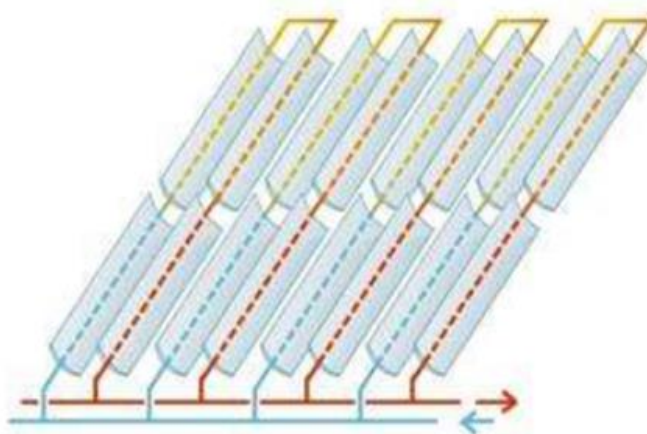
αγωγός οδηγεί το θερμό ρευστό μεταφοράς θερμότητας από το ηλιακό πεδίο προς το κεντρικό μπλοκ, ενώ ένας δεύτερος αγωγός οδηγεί το ρευστό προς τα ηλιακά κάτοπτρα ακολουθώντας την ίδια κυκλική διαδικασία.



Σχήμα 5.6 Μονάδα Παραγωγής στο κέντρο της εγκατάστασης (Solana Solar Power Generation, Arizona)

(πηγή : <https://greenlivingaz.com/sun-dark-aps-energy-storage-strategy/>)

Μια συστοιχία συλλεκτών από 8 έως 12 κάτοπτρα τοποθετούνται σε σειρά η οποία φτάνει σε μήκος τα 100m έως 200m. Ο αριθμός συλλεκτών που συνδέονται σε σειρά σε κάθε γραμμή εξαρτάται από την αύξηση της θερμοκρασίας που πρέπει να επιτευχθεί μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της γραμμής. Η συστοιχία κινείται παράλληλα με την βοήθεια ενός ιχνηλάτη. Παράλληλες συστοιχίες συλλεκτών δημιουργούν ένα βρόγχο. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η θερμοκρασία του ενεργού μέσου κατά την κυκλοφορία του στις σωληνώσεις. Ο βρόγχος τις περισσότερες φορές ξεπερνά τα 300m μήκος και το ρευστό διανύει σχεδόν την διπλάσια απόσταση 600m για να θερμανθεί. Η μία άκρη του βρόγχου συνδέεται στο θερμό σωλήνα του κυκλώματος που δημιουργείται και η άλλη στον ψυχρό. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται μια τυπική διάταξη των βρόγχων.



Σχήμα 5.7 Δομή βρόγχων (σε δυάδες συστοιχιών)

Οι παράλληλες συστοιχίες συλλεκτών θα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους μικρή απόσταση καθώς με τον τρόπο αυτό μειώνονται τα μήκη σωληνώσεων και κατ'επέκταση οι θερμικές απώλειες. Από την άλλη θα πρέπει να αποφεύγονται οι μεταξύ τους σκιάσεις. Μια καλή απόσταση μεταξύ των σειρών είναι περίπου τρεις φορές το άνοιγμα της παραβολής [10].

5.6. Μέγεθος ηλιακού πεδίου

Πρόκειται για τη συνολική επιφάνεια των παραβολικών κατόπτρων καθώς και η έκταση γης που καταλαμβάνουν. Το άνοιγμα των κατόπτρων καθορίζεται από διάφορες παραμέτρους οι οποίες μεταβάλλονται με την ισχύ του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές είναι :

- Η ονομαστική ισχύ της μονάδας που μπορεί να θεωρηθεί ως δεδομένη.
- Η τιμή της διαθέσιμης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας η οποία καθορίζεται από την επιλογή της περιοχής όπου εγκαθίσταται ο σταθμός.
- Ο βαθμός απόδοσης των κατόπτρων που δίνεται από το πηλίκο της ηλιακής προς την ηλεκτρική ενέργεια της μονάδας παραγωγής. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης σε νέα εργοστάσια με χρήση παραβολικών κατόπτρων είναι περίπου 25% ή λίγο υψηλότερα 28% (όπως στο εργοστάσιο Andasol στην Ανδαλουσία της Ισπανίας) . Η μέση ετήσια απόδοση βρίσκεται στο 12% έως 16%. Η συνολική απόδοση των μονάδων εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, οι οποίες περιλαμβάνουν :
 1. Την απόδοση του συλλέκτη, δηλαδή το ποσό της ακτινοβολίας που ανακλάται στον σωλήνα απορρόφησης και το ποσοστό αυτής που απορροφάται από το θερμοαγωγό ρευστό.
 2. Τις θερμικές απώλειες στο ηλιακό πεδίο.

- Οι γεννήτριες ατμού και τα χαρακτηριστικά τους. Δηλαδή :
 1. τη θερμική απόδοση της μηχανής.
 2. την αποδοτικότητα της γεννήτριας.
 3. την κατανάλωση ενέργειας από τον ίδιο το σταθμό.

- Ο συντελεστής Solar Multiple (SM) ή αλλιώς ηλιακή πολλαπλότητα που ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της θερμικής ενέργειας που παράγεται από το ηλιακό πεδίο στο σημείο του σχεδιασμού προς τη θερμική ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία της μονάδας σε ονομαστική φόρτιση, στο σημείο σχεδιασμού του πεδίου.

$$SM = \frac{Q_{th,solar\ field}}{Q_{th,power\ block}} \quad (5.6.1)$$

Όταν το $SM = 1$ αντιπροσωπεύει την επιφάνεια του ηλιακού πεδίου που, όταν εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία ίση με την τιμή ακτινοβολίας με βάση την οποία σχεδιάστηκε, παράγει την ποσότητα θερμικής ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία του σταθμού στην ονομαστική του ηλεκτρική ισχύ, λαμβάνοντας υπόψη τις θερμικές και οπτικές απώλειες.

Σημειωτέον, ότι σε οποιαδήποτε τοποθεσία, οι ώρες ανά έτος κατά τις οποίες η πραγματική ηλιακή ακτινοβολία ισούται με την τιμή βάσης της οποίας σχεδιάστηκε είναι πιθανό να είναι λίγες, ένα ηλιακό πεδίο με $SM = 1$ σπάνια θα οδηγήσει στη λειτουργία του μπλοκ παραγωγής ισχύος στην ονομαστική του ισχύ. Έτσι, για να λειτουργούν οι εγκαταστάσεις βασιζόμενες κυρίως στον ήλιο και λιγότερο σε άλλα εφεδρικά καύσιμα, απαιτείται ο συντελεστής αυτός να είναι μεγαλύτερος από 1.

Εκτιμήσεις οικονομικής βελτιστοποίησης που αναφέρονται ειδικά στο ζήτημα του ποιες συνθήκες ακτινοβολίας λαμβάνονται υπ'όψιν στο σημείο σχεδιασμού. Εάν επιλεγεί σημείο σχεδιασμού του εργοστασίου να είναι ένα μέρος όπου πολύ υψηλή άμεση ακτινοβολία επιτυγχάνεται μόνο λίγες φορές το καλοκαίρι, τότε η μονάδα σχεδόν πάντα λειτουργεί υπό συνθήκες μερικού φορτίου, κάτι που μειώνει την αποτελεσματικότητα της μονάδας. Αν αντίθετα, το σημείο σχεδιασμού επιλέγεται ώστε να είναι σε αρκετά αδύναμες συνθήκες ακτινοβολίας, τότε το ηλιακό πεδίο θα πρέπει να πάρει πολύ μεγάλες διαστάσεις, άρα και να αυξηθεί το επενδυτικό κόστος. Η ακόλουθη εξίσωση προσδιορίζει την απαιτούμενη συνολική επιφάνεια μιας μονάδας ηλιακών κατόπτρων.

$$A_{ap} = \frac{P_{el} \cdot SM}{\eta \cdot G_{b,ap} \cdot \eta_{loop,tot}} \quad (5.6.2)$$

Όπου P_{el} η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς, SM ο συντελεστής ηλιακής πολλαπλότητας που κυμαίνεται περίπου στο 20%, $G_{b,ap}$ η τιμή αναφοράς της άμεσης ακτινοβολίας στο σημείο σχεδιασμού και $\eta_{loop,tot}$ η οπτική απόδοση του συλλέκτη.

Ένα σωστά διαστασιολογημένο ηλιακό πεδίο:

- Μεγιστοποιεί το χρόνο λειτουργίας που το πεδίο παράγει επαρκή θερμική ενέργεια ώστε να παράγεται από τη μονάδα ισχύος η ονομαστική ισχύς. Κατά συνέπεια μειώνει το ισοσταθμισμένο κόστος.
- Ελαχιστοποιεί το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.
- Χρησιμοποιεί λιγότερο τη θερμική αποθήκευση και το ορυκτό καύσιμο. Η συνολική έκταση που απαιτείται εξαρτάται κυρίως από το συνολικό άνοιγμα των κατόπτρων. Όπως σημειώθηκε πιο πάνω, η απόσταση ανάμεσα στους άξονες των σειρών των συλλεκτών είναι περίπου 3 φορές το πλάτος του ανοίγματος της παραβολής. Λαμβάνοντας υπ'όψιν και τις οδούς των σωληνώσεων, το συνολικό μέγεθος γίνεται 3,5 φορές το άνοιγμα, ενώ τέλος συμπεριλαμβάνοντας και την έκταση της μονάδας μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια το συνολικό εμβαδό της εγκατάστασης μπορεί να φτάσει και 4 φορές το συνολικό εμβαδόν ανακλαστικής επιφάνειας [10],[12].

5.7. Διαθέσιμοι παραβολικοί συλλέκτες

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά και περιγραφή των βασικότερων συλλέκτες που έχουν εφαρμογή σε μεγάλες ηλιακές εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο.

5.7.1. Συλλέκτες τύπου Luz

Οι συλλέκτες Luz (Σχήμα 5.8) αποτελούν το πρότυπο με το οποίο συγκρίνονται όλοι οι άλλοι συλλέκτες. Υπάρχουν δύο τύποι συλλεκτών του συστήματος Luz: LS-2 και LS-3. Η βιομηχανική φύση αυτών των συλλεκτών – κατασκευασμένων από γαλβανισμένο ατσάλι τους καθιστά κατάλληλους για εμπορικές εφαρμογές. Έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αξιόπιστοι. Για παράδειγμα, τα περισσότερα από τα συστήματα SEGS (ηλιακό σύστημα ηλεκτρικής παραγωγής) χρησιμοποιούσαν συλλέκτες Luz [11].

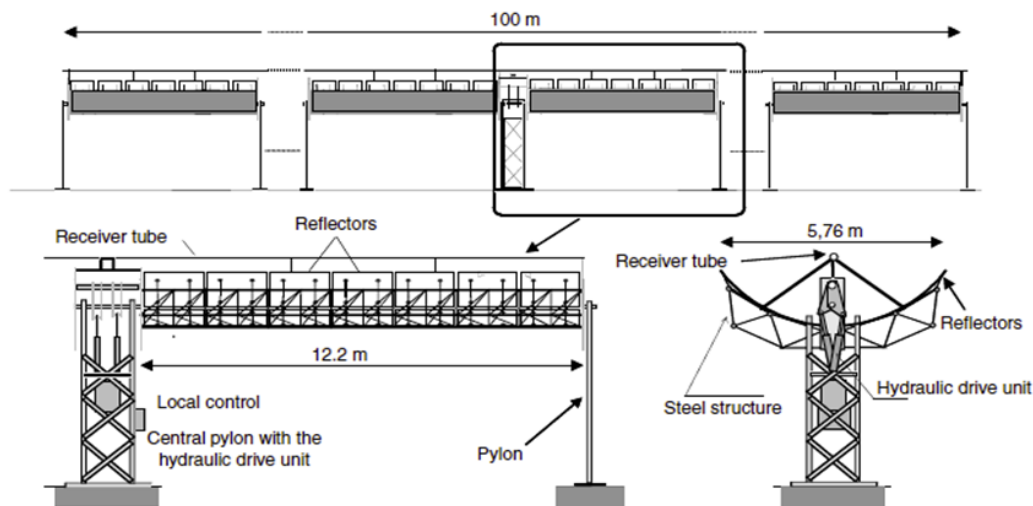
Ο LS-2 συλλέκτης έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με μέγιστη ακρίβεια. Η δομή του άξονα ροπής τον καθιστά ικανό να ανυψώνεται και του παρέχει στρεπτική ακαμψία. Κάθε άξονας ροπής έχει δύο απορροφητήρες με μήκος τέσσερα μέτρα. Δυστυχώς, ο άξονας ροπής χρησιμοποιεί πολύ υλικό από χάλυβα για την κατασκευή του καθιστώντας την παραγωγή του σε κόστος αρκετά ακριβή [11].



Σχήμα 5.8 LS-2.

(πηγή : <https://www.mtholyoke.edu/~wang30y/csp/PTPP.html>)

Για τη μείωση του κόστους παραγωγής, η Luz σχεδίασε το ακόμα μεγαλύτερο LS-3 (Σχήμα 5.9) για να μειώσει την ανοχή κατασκευής και τις απαιτήσεις σε χάλυβα. Το LS-3 χρησιμοποιεί μια δομή γέφυρας ζεύξης στη θέση του άξονα ροτής. Με τον τρόπο αυτό δημιουργεί ένα συγκρότημα κατόπτρων. Κάθε συγκρότημα έχει τρεις, τετράμετρους, απορροφητήρες. Ο σχεδιασμός της ζεύξης του LS-3 δεν μείωσε το κόστος παραγωγής όσο αναμενόταν. Επίσης υπέφερε από ανεπαρκή στρεπτική ακαμψία, η οποία οδήγησε σε χαμηλότερη από τα αναμενόμενα οπτική και θερμική απόδοση [11].



Σχήμα 5.9 Διαστάσεις LS-3.

(πηγή : <http://energyfuture.wikidot.com/solar-resources>)

5.7.2. Συλλέκτης EuroTrough

Μετά τη διάλυση της Luz, μια ευρωπαϊκή κοινοπραξία, η EuroTrough ξεκίνησε την ανάπτυξη ενός νέου σχεδιασμού συλλέκτη με στόχο να αξιοποιήσει τα πλεονεκτήματα του LS-2 και LS-3. Ο συλλέκτης EuroTrough χρησιμοποίησε σχεδιασμό πλαισίου ροπής για να ενσωματώσει τη στρεπτική ακαμψία του σωλήνα ροπής και την μικρότερη περιεκτικότητα σε χάλυβα ενός σχεδίου τύπου ζεύξης [11].



Σχήμα 5.10 Συλλέκτης EuroTrough.

(πηγή : <https://www.semanticscholar.org/paper/EUROTROUGH-DESIGN-ISSUES-AND-PROTOTYPE-TESTING-AT-L%C3%BCpfertGeyer/19534a46155f706d9d48207cb2ab8efb61914b66>)

5.7.3. Συλλέκτης Solargenix

Η Solargenix Energy (πρώην Duke Solar Energy) και η NREL ανέπτυξαν το συλλέκτη SGX. Ο συλλέκτης SGX είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο. Χρησιμοποιεί μια μοναδική οργανική δομή κέντρων δικτύου, η οποία αναπτύχθηκε από την Gossamer Spaceframes αρχικά για κτίρια και γέφυρες [11].

Η νέα σχεδίαση :

- Ζυγίζει λιγότερο από τα σχέδια με χάλυβα.
- Απαιτεί πολύ λίγους συνδετήρες (εξαρτήματα).
- Δεν απαιτεί καμία συγκόλληση ή εξειδικευμένη κατασκευή.
- Συναρμολογείται εύκολα.
- Δεν απαιτεί καμία ευθυγράμμιση πεδίου.

5.7.4. Συλλέκτης IST

Η Industrial Solar Technology παρήγαγε τους παραβολικούς συλλέκτες IST που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών. Βρίσκονται σε στάδιο βελτίωσης ώστε να μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά και σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η εταιρία χρησιμοποιεί ως υλικό κατασκευής το γαλβανισμένο ατσάλι αντί του αλουμινίου. Επίσης αντικαθιστά τα κάτοπτρα με λεπτό επαργυρωμένο γυαλί. Η αλλαγή αυτή μειώνει το κόστος του συλλέκτη κατά 15% και αυξάνει την απόδοσή του κατά 12%, μειώνοντας το κόστος της παρεχόμενης ενέργειας [11].

5.7.5. Συλλέκτης Heliotrough

Η Flagsol GmbH ανέπτυξε τον συλλέκτη Heliotrough (Σχήμα 5.11) που χρησιμοποιεί ένα σωλήνα ροπής ως κεντρικό στοιχείο. Ο Heliotrough είναι ένα από τα πρώτα σχέδια με μεγαλύτερο πλάτος ανοίγματος σε σχέση με τους προηγούμενους συλλέκτες και ταυτόχρονα μεγαλύτερες διαμέτρους σωλήνα απορρόφησης. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του Heliotrough είναι ότι ο συλλέκτης δεν έχει κενά καθρέφτη στους στις βάσεις στήριξής του. Η κατοπτρική επιφάνεια καλύπτει συνεχώς την φέρουσα δομή. Με τον τρόπο αυτό εκμεταλλεύεται πλήρως όλο το μήκος του δέκτη (σωλήνα) μειώνοντας τις απώλειες ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιεί λιγότερο χώρο σε έκταση γης. Οι συλλέκτες Heliotrough χρησιμοποιούνται και αυτοί στα εργοστάσια SEGS [11].



Σχήμα 5.11 Συλλέκτης Heliotrough.

(πηγή: <http://www.heliotrough.com/english/history/history.html>)

5.7.6. Συλλέκτης Skytrough

Ο συλλέκτης της αμερικανικής εταιρείας SkyFuel (Σχήμα 5.12) είναι μία κατασκευή ελαφριά και χαμηλή σε κόστος που χρησιμοποιεί ReflecTech® Mirror film. Στηρίζεται σε ελαφρύ δικτύωμα αλουμινίου. Το άνοιγμα του συλλέκτη αυτού είναι μεγαλύτερο από τους προηγούμενους τύπους συλλεκτών. Με σχεδόν διπλάσιο εμβαδό, μπορεί να επιτύχει μεγάλες αποδόσεις εξοικονομώντας χώρο και έκταση ηλιακού πεδίου μειώνοντας παράλληλα το κόστος κατασκευής του. Τα παραβολικά κάτοπτρα της SkyFuel βρίσκονται σε εφαρμογή στο SEGS II (Καλιφόρνια, ΗΠΑ) [11].



Σχήμα 5.12 Συλλέκτης Skytrough της εταιρείας SkyFuel.

(πηγή: <http://helioscsp.com/concentrated-solar-power-skyfuel-completes-efficiency-testing-of-the-skytrough-dsp-collector/>)

Στον Πίνακα 5.ΙΙΙ καταγράφονται με χρονολογική σειρά οι παραβολικοί συλλέκτες που διατίθενται καθώς και κάποια κύρια χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 5.ΙΙΙ Τα είδη των ηλιακών κατόπτρων και τα χαρακτηριστικά τους.

Συλλέκτης	LS-2	LS-3	Euro trough	ENEA
Χρονολογία	1985	1989	2002	2004
Άνοιγμα (m)	5	5.7	5.76	5.77
Μήκος συστοιχίας (m)	47	99	100 - 150	100
Εγκατάσταση όπου χρησιμοποιήθηκε	SEGS (ΗΠΑ)	SEGS (ΗΠΑ)	SEGS V (ΗΠΑ) Andasol (Ισπανία) Kuraymat (Αίγυπτος)	Archimede power plant (Ιταλία)
Διάμετρος σωλήνα απορρόφησης	0.07	0.07	0.07	

Συλλέκτης	SGX-2	Sener trough	Helio trough	Sky trough	Solel/ Siemens LS - 6
Χρονολογία	2005	2005	2009	2010	
Άνοιγμα (m)	5.76	5.76	6.77	6	5.77
Μήκος συστοιχίας (m)	100 - 150	150	191	115	99
Εγκατάσταση όπου χρησιμοποιήθηκε	Saguaro (ΗΠΑ) Neada Solar One (ΗΠΑ)	Extresol (Ισπανία)	Test loop SEGS (ΗΠΑ)	Test loop SEGS (ΗΠΑ)	Lebrija (Ισπανία)
Διάμετρος σωλήνα απορρόφησης	0.07	0.07	0.09	0.08	

5.8. Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται με την ηλιακή ακτινοβολία από τον ήλιο ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση $149,6 \cdot 10^6$ km από τη γη. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, χωρίζεται σε άμεση και διάχυτη, ενώ το άθροισμά τους είναι η ολική ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία συμβολίζεται με **G** σε (W/m^2) όταν η έντασή της μετράται στιγμιαία. Αντίστοιχα με **I** σε (J/m^2) περιγράφεται η ωριαία ποσότητα ηλιακής ενέργειας, ενώ με **H** σε (J/m^2) συμβολίζεται η ημερήσια ή μηνιαία ηλιακή ενέργεια.

Άμεση ακτινοβολία καλείται η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει κατευθείαν στην επιφάνεια της γης χωρίς σκέδαση κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα και συμβολίζεται με το δείκτη **b**, (π.χ. G_b). Η αριθμητική τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση ηλίου – γης, την ηλιακή απόκλιση **δ**, το ηλιακό ύψος **α**, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου **φ**, το υψόμετρο του τόπου **z**, την κλίση του εδάφους καθώς και την απορρόφηση και τη διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα.

Διάχυτη ακτινοβολία καλείται η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνσή της λόγω ανάκλασης ή σκέδασης μέσα στην ατμόσφαιρα. Το τμήμα της διάχυτης ακτινοβολίας συμβολίζεται με δείκτη **s** (π.χ. I_s σε J/m^2). Το υπόλοιπο της διάχυτης ακτινοβολίας προέρχεται από ανάκλαση στην επιφάνεια της γης και συμβολίζεται με δείκτη **r** (π.χ. I_r σε J/m^2). Η συνολική διάχυτη ακτινοβολία είναι το επί μέρους άθροισμα των I_s και I_r και περιγράφεται με το δείκτη **d** (π.χ. G_d). Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ηλιακό ύψος, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από την παρουσία των σωματιδίων και αερίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Ολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας και συμβολίζεται με **G** ή **I** ή **H**. Παραδείγματος χάριν σε μια οριζόντια επιφάνεια η ωριαία ηλιακή ακτινοβολία δίνεται από την εξίσωση (5.8.1)

$$I = I_b + I_d \quad (5.8.1)$$

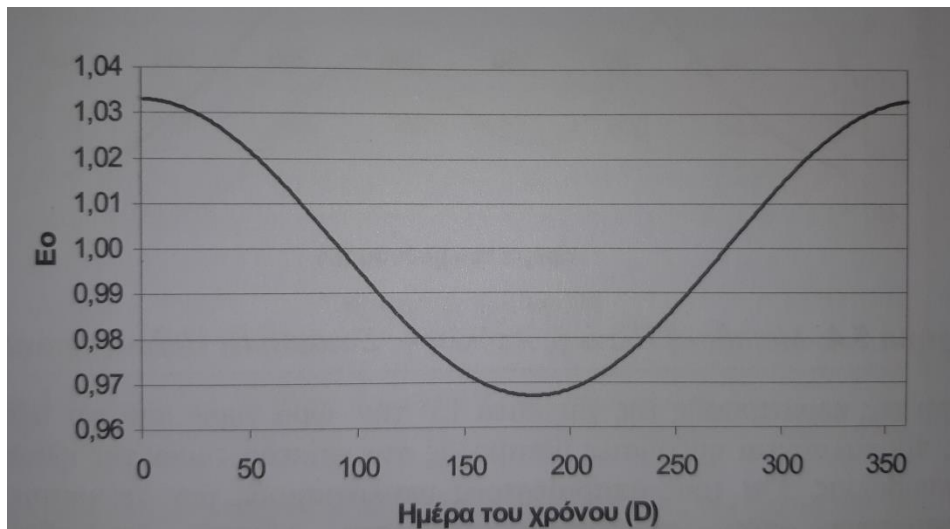
5.8.1. Γεωμετρικές παράμετροι

Η τροχιά περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο είναι ελλειπτική με μικρή εκκεντρότητα. Λόγω εκκεντρότητας της γης ορίζεται ο διορθωτικός συντελεστής E_o ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση (5.8.2)

$$E_o = 1 + 0,033 \cdot \sigma\nu\left(\frac{360 \cdot D}{365}\right) \quad (5.8.2)$$

όπου **D** είναι η μέρα του χρόνου (κατά το Ιουλιανό ημερολόγιο)

Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η μεταβολή του διορθωτικού συντελεστή E_o λόγω της εκκεντρότητας της γης σε συνάρτηση με την ημέρα του χρόνου **D**, μετά από εφαρμογή της εξίσωσης (5.8.2).



Σχήμα 5.13 Διορθωτικός συντελεστής λόγω εκκεντρότητας της Γης.

(πηγή: Καλδέλλης, Ιωάννης Κ and Καββαδίας, Κοσμάς Α, Εργαστηριακές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας.

Οι εποχιακές αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλονται στη γωνία που σχηματίζει ο άξονας της γης με τον κάθετο στην ελλειπτική τροχιά της άξονα. Αν και η γωνία είναι σταθερή, η περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο δημιουργεί μεταβολή στη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα της γης – ήλιου με το ελλειπτικό επίπεδο, μεταβάλλοντας τη γωνιακή θέση του ήλιου σε

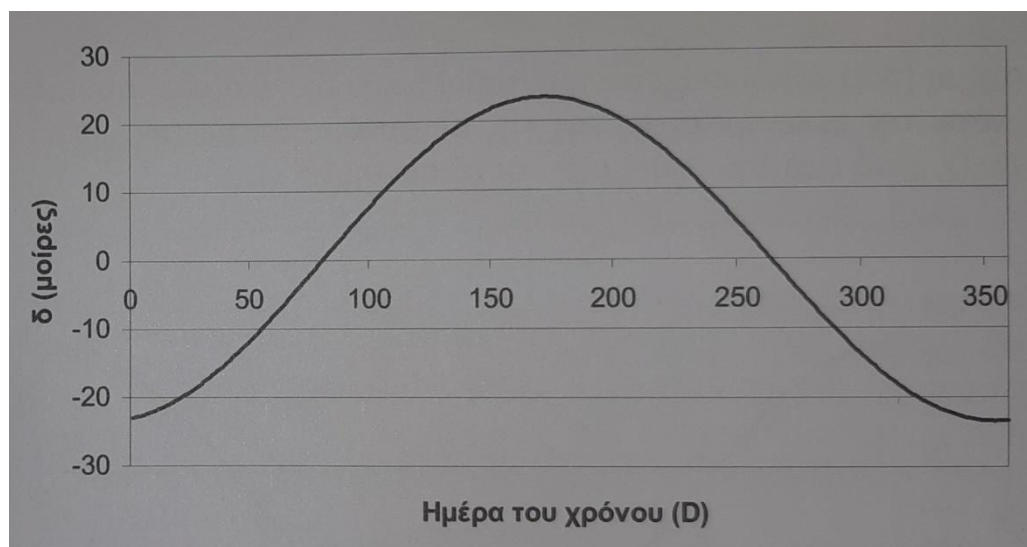
του σπουδαστή Χάρη Γεωργίου

σχέση με το επίπεδο του ισημερινού κατά το ηλιακό μεσημέρι. Η γωνία αυτή καλείται ηλιακή απόκλιση, συμβολίζεται με δ και μεταβάλλεται από $23,5^\circ$ (θερινό ηλιοστάσιο μέχρι $-23,5^\circ$ (χειμερινό ηλιοστάσιο).

Ο υπολογισμός της ηλιακής απόκλισης δ βασίζεται στην ανάλυση Cooper και δίνεται από την εξίσωση (5.8.3):

$$\delta = 23.45 \cdot \eta\mu\left[360 \cdot \left(\frac{D + 284}{365}\right)\right] \quad (5.8.3)$$

Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται η μεταβολή της ηλιακής απόκλισης σε συνάρτηση με την ημέρα του χρόνου D, όπως προκύπτει από την εξίσωση (5.8.3).



Σχήμα 5.14 Μεταβολή ηλιακής απόκλισης συναρτήσει ημέρας χρόνου.

(πηγή: Καλδέλλης, Ιωάννης Κ and Καββαδίας, Κοσμάς Α, Εργαστηριακές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας.

Λόγω της περιστροφής της γης κατά 15° την ώρα γύρω από τον άξονα της, προκαλούνται ημερήσιες μεταβολές στα επίπεδα τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας. Για τους απαραίτητους υπολογισμούς των γεωμετρικών παραμέτρων που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται ο πραγματικός ηλιακός χρόνος. Ο τοπικός χρόνος κάθε περιοχής βασίζεται σε σταθερό μεσημβρινό. Για το λόγο αυτό, ο ηλιακός χρόνος δε συμπίπτει πάντοτε με τον τοπικό χρόνο, υπολογίζεται δε από την εξίσωση (5.8.4)

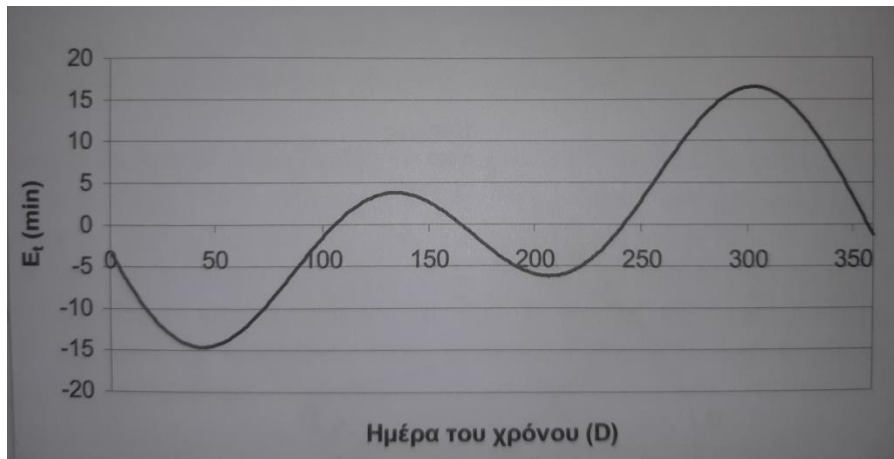
$$HX = TX \pm 4 \cdot (L_{στ} - L_{τ}) + E_{τ} \quad (5.8.4)$$

Όπου το (+) αναφέρεται στο δυτικό ημισφαίριο και (-) στο ανατολικό ημισφαίριο, $L_{στ}$ είναι ο μεσημβρινός στον οποίο αναφέρεται η τοπική ώρα και $L_{τ}$ είναι ο τοπικός μεσημβρινός. $E_{τ}$ είναι η διορθωτική εξίσωση του χρόνου καθώς η πλήρης περιστροφή της γης δεν πραγματοποιείται ακριβώς σε 24ώρες αλλά εξαρτάται από την εποχή του έτους. Η τιμή διορθωτική τιμή του χρόνου δίνεται από την εξίσωση (5.8.5).

$$E_{\tau} = 9,87 \cdot \eta\mu(2B) - 7,53 \cdot \sigma\upsilon\nu(B) - 1,5 \cdot \eta\mu(B) \quad (5.8.5)$$

όπου :

$$B = \left[\frac{360 \cdot (D - 81)}{364} \right] \quad (5.8.6)$$



Σχήμα 5.15 Εξίσωση χρόνου συναρτήσει της ημέρας του έτους.

(πηγή: Καλδέλλης, Ιωάννης Κ and Καββαδίας, Κοσμάς Α, Εργαστηριακές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας.

Ο νοητός άξονας που τέμνει κάθετα τον ορίζοντα μιας περιοχής και που εκτείνεται μέχρι τον ουράνιο θόλο, ονομάζεται τοπικό ζενίθ. Η γωνία μεταξύ του τοπικού ζενίθ και της ευθείας που ενώνει τη θέση του παρατηρητή ή μιας επιφάνειας με τον ήλιο καλείται ζενιθιακή γωνία θ_z , και παίρνει τιμές από 0° ως 90° .

Το ηλιακό ύψος α , είναι η γωνία που σχηματίζει ο ορίζοντας με την ευθεία που ενώνει τον ήλιο με τον παρατηρητή ή μία επιφάνεια. Η γωνία α είναι συμπληρωματική της ζενιθιακής γωνίας και ως εκ τούτου παίρνει τιμές από 0° ως 90° .

Η αζιμούθια γωνία γ είναι η γωνία μεταξύ του τοπικού μεσημβρινού και της προβολής της καθέτου ευθείας μιας επιφάνειας πάνω στην οριζόντια. Η αζιμούθια γωνία μιας επιφάνειας καθορίζει τον προσανατολισμό της. Αντίστοιχα η ηλιακή αζιμούθια γωνία γ_s , είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου του μεσημβρινού του παρατηρητή και του επιπέδου, που ορίζεται από τον κύκλο που περνάει από το τοπικό ζενίθ και τον ήλιο. Οι τιμές των αζιμούθιων γωνιών είναι $0^\circ - 180^\circ$, με αρνητικές τιμές στα ανατολικά, θετικές τιμές στα δυτικά και σημείο αναφοράς των μετρήσεων το νότο.

του σπουδαστή Χάρη Γεωργίου

Η ωριαία γωνία απόκλισης του ήλιου ω , μετριέται στους πόλους του θόλου μεταξύ του τοπικού μεσημβρινού του παρατηρητή και του ηλιακού μεσημβρινού. Η γωνιαία απόκλιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, εξ αιτίας της περιστροφής της γης εκφράζεται με την ωριαία γωνία ω . Η γωνία αυτή μεταβάλλεται κατά 15° ανά ώρα, με αρνητικές τιμές το πρωί, θετικές το απόγευμα και μηδέν κατά τη μεσημβρία. Οι μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν όλες τις γεωμετρικές παραμέτρους για μια δοσμένη επιφάνεια είναι:

$$\omega = 15^\circ \cdot (HX - 12:00) \quad (5.8.7)$$

$$\text{συν}\theta_z = (\eta\mu\delta \cdot \eta\mu\varphi) + (\text{συν}\delta \cdot \text{συν}\varphi \cdot \text{συν}\omega) = \eta\mu\alpha \quad (5.8.8)$$

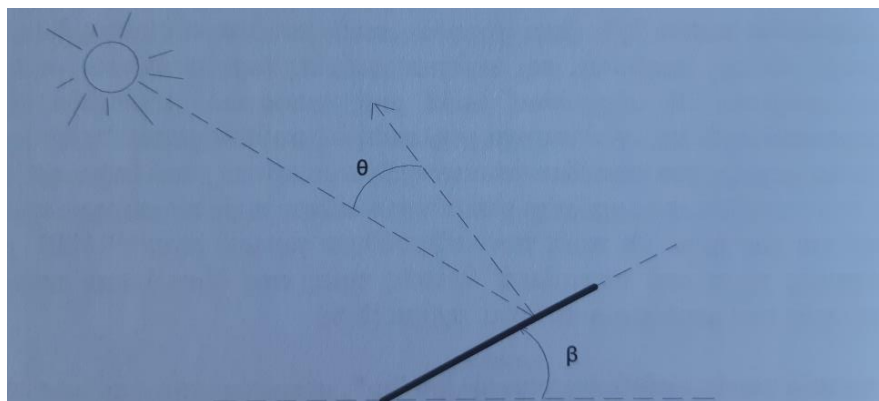
$$\text{συν}\gamma = \frac{\eta\mu\alpha \cdot \eta\mu\varphi - \eta\mu\delta}{\text{συν}\alpha \cdot \text{συν}\varphi} \quad (5.8.9)$$

$$\eta\mu\gamma = (\text{συν}\delta \cdot \eta\mu\omega) / \text{συν}\alpha \quad (5.8.10)$$

Όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος της εκάστοτε περιοχής, με θετικές τιμές για περιοχές του βορείου ημισφαιρίου.

Η γωνία κλίσης β μιας επιφάνειας σε σχέση με τον ορίζοντα, είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η γωνία πρόσπτωσης θ , είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει ένα σημείο μιας κεκλιμένης επιφάνειας με τον ήλιο και από την κάθετη ευθεία την κεκλιμένη επιφάνεια, (Σχήμα 5.16).



Σχήμα 5.16 Προσδιορισμός γωνιών κλίσης – πρόσπτωσης.

(πηγή: Καλδέλλης, Ιωάννης Κ and Καββαδίας, Κοσμάς Α, Εργαστηριακές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας.

Για κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό, δηλαδή, $\gamma = 0$ και με κλίση επιφανείας β , η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται από την εξίσωση (5.8.11).

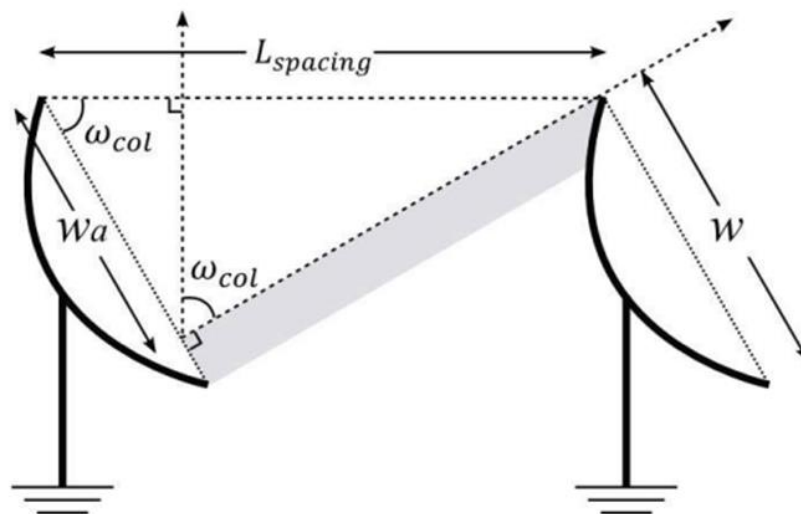
$$\text{συν}\theta = (\text{συν}\delta \cdot \text{συν}\omega \cdot \text{συν}(\varphi - \beta)) + (\eta\mu\delta \cdot \eta\mu(\varphi - \beta)) \quad (5.8.11)$$

Στη γενικότερη περίπτωση, για κεκλιμένες επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό ($\gamma \neq 0$) και με κλίση επιφανείας β , ισχύει η ακόλουθη εξίσωση (5.8.12).

$$\begin{aligned} \text{συν}\theta = \eta\mu\delta \cdot \eta\mu\varphi \cdot \text{συν}\beta - \eta\mu\delta \cdot \text{συν}\varphi \cdot \eta\mu\beta \cdot \text{συν}\gamma + \text{συν}\delta \cdot \text{συν}\varphi \\ \cdot \text{συν}\beta \cdot \text{συν}\omega + \text{συν}\delta \cdot \eta\mu\varphi \cdot \eta\mu\beta \cdot \text{συν}\gamma \cdot \text{συν}\omega \\ + \text{συν}\delta \cdot \eta\mu\beta \cdot \eta\mu\gamma \cdot \eta\mu\omega \end{aligned} \quad (5.8.12)$$

5.8.2. Σκίαση μεταξύ συστοιχιών

Σκίαση μεταξύ των συστοιχιών παρατηρείται κατά τη δύση και την ανατολή του ηλίου όταν η σκιά που προκαλείται από τον συλλέκτη που βρίσκεται πιο κοντά στον ήλιο επικαλύπτει τμήμα του επεκείμενου συλλέκτη. Το Σχήμα 5.17 δείχνει τη γεωμετρία των ακτινών του ηλίου και τις γωνίες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια του φαινομένου αυτού [12].



Σχήμα 5.17 Δύο παρακείμενες σειρές συλλεκτών μπορεί να σκιάζουν η μία την άλλη εάν η γωνία παρακολούθησης είναι λανθασμένη. Η σκίαση εξαρτάται από το πλάτος του ανοίγματος του συλλέκτη, το διάστημα (από το κέντρο στο κέντρο) και από τη γωνία παρακολούθησης των συλλεκτών.

(πηγή: <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/51825.pdf> Technical Manual for the SAM Physical Trough Model)

Η επίδραση της σκίασης μεταξύ των συστοιχιών εξαρτάται από τη γεωμετρία των συλλεκτών. Σχεδιάζοντας τις δύο σειρές όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.17, δημιουργείται ορθογώνιο τρίγωνο με υποτείνουσα $L_{spacing}$ ίση με την απόσταση των κορυφών, των συλλεκτών και μικρή πλευρά w_a ίση με το μη σκιασμένο πλάτος ανοίγματος τους.

$$w_a = \cos(\omega_{col}) \cdot L_{spacing} \quad (5.8.13)$$

Η απόδοση της σκίασης ισούται με την αναλογία του μη σκιασμένου ανοίγματος w_a προς το συνολικό πλάτος ανοίγματος, w , όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.8.14). Οι τιμές της περιορίζονται μεταξύ των τιμών 0,5 και 1,0. Εάν η απόδοση σκίασης είναι μικρότερη από 0,5, το ηλιακό πεδίο είναι απίθανο να λειτουργήσει επιτυχώς, επομένως η συνολική οπτική απόδοση ορίζεται κοντά στο μηδέν.

$$\eta_{shadow} = \frac{w_a}{w} = |\cos(\omega_{col})| \cdot \frac{L_{spacing}}{w} \quad (5.8.14)$$

5.9. Σταθεροί παράγοντες οπτικών απωλειών

Η συνολική οπτική απόδοση ενός παραβολικού κατόπτρου υπολογίζεται συναρτήσει της ηλιακής θέσης και των διαφόρων σταθερών οπτικών απωλειών. Οι σταθερές οπτικές απώλειες περιλαμβάνουν σφάλματα παρακολούθησης, ελαττώματα στην γεωμετρία των συλλεκτών, σφάλματα ανάκλασης του καθρέφτη, λόγω καθαρότητας και γενικότερα σφάλματα που δεν καταγράφονται από τα άλλα στοιχεία. Επειδή το μαθηματικό μοντέλο πολλαπλασιάζει τους παράγοντες απώλειας μαζί για να υπολογίσει έναν συνολικό παράγοντα απώλειας, η τιμή κάθε μεμονωμένου παράγοντα απώλειας δεν είναι τόσο σημαντική όσο η αξία του συνόλου τους. Στον παρακάτω πίνακα περιγράφεται η φυσική διάσταση του κάθε παράγοντα απώλειας [12].

Πίνακας 5.IV

Όνομα Σφάλματος	Συμβολ.	Περιγραφή
Σφάλμα παρακολούθησης	η_{track}	Αδυναμία του συλλέκτη να προσανατολιστεί τέλεια κατά μήκος της γωνίας παρακολούθησης, συστροφή του συλλέκτη γύρω από τον κατά μήκος άξονα.
Ελαττώματα Γεωμετρίας	η_{geo}	Κακή ευθυγράμμιση των συλλεκτών, απόκλιση στη θέση του δέκτη από την οπτική εστίαση, στρέβλωση ή ασυνέχεια κατά μήκος της ανακλαστικής επιφάνειας.
Ανακλαστικότητα Κατόπτρων	ρ_m	Ειδική ανάκλαση κωνικής γωνίας που ορίζεται από τη γεωμετρία του συλλέκτη και του δέκτη.

Καθαρότητα Κατόπτρων	η_{soil}	Ρύπανση της ανακλαστικής επιφάνειας που εμποδίζει την αντανάκλαση της ακτινοβολία προς το δέκτη.
Γενικό Σφάλμα	η_{gen}	Κάθε αποτέλεσμα που δεν έχει συμπεριληφθεί εντός των προηγούμενων κατηγοριών.

(πηγή : <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/51825.pdf> Technical Manual for the SAM Physical Trough Model)

Η συνολική οπτική απόδοση δίνεται από την εξίσωση (5.9.1) ενώ η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στο πεδίο υπολογίζεται από την εξίσωση (5.9.2).

$$\eta_{opt}(\theta, \omega_{col}) = \eta_{endLoss}(\theta) \cdot \eta_{shadow}(\omega_{col}) \cdot \eta_{IAM}(\theta) \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{geo} \cdot \rho_m \cdot \eta_{soil} \cdot \eta_{gen} \quad (5.9.1)$$

$$q_{inc,sf} = I_{bn} \cdot A_{ap,tot} \cdot \eta_{opt}(\theta, \omega_{col}) \quad (5.9.2)$$

5.10. Θερμικές εγκαταστάσεις παραβολικών συλλεκτών (Parabolic Trough Collector)

Τα ηλιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας PTC έχουν μεγάλη εφαρμογή ανά τον κόσμο. Το δυναμικό τους αυξάνεται κάθε χρόνο. Στον Πίνακα 5.V αναγράφονται όλες οι εγκατεστημένες μονάδες PTC (ανά τον κόσμο) με παραγωγή σε ηλεκτρική ενέργεια 50 MW και άνω.

Πίνακας 5.V Operational solar thermal power stations (of at least 50 MW capacity)

Electrical capacity (MW)	Name	Country	Location	Technology type
510	Noor / Ouarzazate Solar Power Station	Morocco	Ghassate (Ouarzazate)	Parabolic trough and solar power tower
310	Solar Energy Generating Systems (SEGS)	USA	MojaveDesert, California	Parabolic trough
280	MojaveSolar Project	USA	Barstow, California	Parabolic trough
280	Solana Generating Station	USA	GilaBend, Arizona	Parabolic trough
280	Genesis Solar Energy Project	USA	Blythe, California	Parabolic trough
200	Solaben Solar Power Station	Spain	Logrosán	Parabolic trough
150	Solnova Solar Power Station	Spain	SanlúcarlaMayor	Parabolic trough
150	Andasol Solar Power Station	Spain	Guadix	Parabolic trough
150	Extresol Solar Power Station	Spain	Torre de MiguelSesmero	Parabolic trough
121	Ashalim Power Station (Negev Energy)	Israel	Ashalim	Parabolic trough
100	Kathu Solar Park	South Africa	NorthernCape	Parabolic trough

100	KaXu Solar One	South Africa	Pofadder, NorthernCape	Parabolic trough
100	Xina Solar One	South Africa	Pofadder, NorthernCape	Parabolic trough
100	Manchasol Power Station	Spain	Alcázar de SanJuan	Parabolic trough
100	Valle Solar Power Station	Spain	SanJosédelValle	Parabolic trough
100	Helio energy Solar Power Station	Spain	Écija	Parabolic trough
100	Aste Solar Power Station	Spain	Alcázar de SanJuan	Parabolic trough
100	Solacor Solar Power Station	Spain	ElCarpio	Parabolic trough
100	Helios Solar Power Station	Spain	PuertoLápice	Parabolic trough
100	Shams Solar Power Station	UAE	AbuDhabi MadinatZayed	Parabolic trough
100	Termosol Solar Power Station	Spain	Navalvillar de Pela	Parabolic trough
100	Palma del Río I & II	Spain	PalmadelRío	Parabolic trough
100	Ilanga 1	South Africa	NorthernCape (Upington)	Parabolic trough
75	Nevada Solar One	USA	BoulderCity, Nevada	Parabolic trough
50	Guzmán	Spain	PalmadelRío	Parabolic trough
50	Bokpoort	South Africa	Grobliershoop	Parabolic trough
50	Puertollano Solar Thermal Power Plant	Spain	Puertollano, Ciudad Real	Parabolic trough
50	Alvarado I	Spain	Badajoz	Parabolic trough
50	LaFlorida	Spain	Alvarado (Badajoz)	Parabolic trough
50	Arenales PS	Spain	Morón de la Frontera (Seville)	Parabolic trough
50	Casablanca	Spain	Talarrubias	Parabolic trough
50	Majadas de Tiétar	Spain	Caceres	Parabolic trough
50	LaDehesa	Spain	LaGarrovilla (Badajoz)	Parabolic trough
50	Lebrija-1	Spain	Lebrija	Parabolic trough
50	Astexol 2	Spain	Badajoz	Parabolic trough
50	Morón	Spain	Morón de laFrontera	Parabolic trough
50	La Africana	Spain	Posada	Parabolic trough
50	Olivenza 1	Spain	Olivenza	Parabolic trough
50	Orellana	Spain	OrellanalVieja	Parabolic trough
50	Godawari Green Energy Limited	India	NokhVillage,Rajasthan	Parabolic trough
50	Enerstar Villena Power Plant	Spain	Villena	Parabolic trough
50	Megha Solar Plant	India	Anantapur	Parabolic trough
50	Delingha Solar Plant	China	Delingha	Parabolic trough
50	Shagaya CSP	Kuwait	Shagaya	Parabolic trough

(πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations)

Στις εγκαταστάσεις συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας (CSP) παρατηρείται αύξηση 24,43 % σύμφωνα με τον ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (Compound Annual Growth Rate C.A.G.R.) από 765 MW το 2009 σε 5,4 GW το 2018. Μόνο η Ισπανία αντιπροσωπεύει πάνω από το 42% των εγκαταστάσεων CSP που υπάρχουν στον κόσμο. Παρακάτω η συνολική ηλιοθερμική ισχύς των τεσσάρων χωρών με το μεγαλύτερο εγκατεστημένο ενεργειακό δυναμικό σε PTC [13].

5.10.1. ΙΣΠΑΝΙΑ 2,3 GW

Η Ισπανία έχει κατασκευάσει 53 σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ηλιακά κάτοπτρα. Ο μεγαλύτερος σταθμός ονομάζεται Solaben Solar Power Station (Σχήμα 5.18) με εγκατεστημένη ισχύ της τάξεως των 200 MW, βρίσκεται στο Logrosan της Ισπανίας (από το 2012). Η Ισπανία σχεδιάζει να υπερδιπλασιάσει το ενεργειακό δυναμικό της σε CSP έως το 2025 αγγίζοντας τα 4,8 GW, με ένα δεκαετές ενεργειακό πλάνο, ενώ σκοπεύει να φτάσει τα 73,3 GW εγκατεστημένης ισχύος μέχρι το 2030 [14].



Σχήμα 5.18 Solaben Solar Power Station, Logrosan (Ισπανία)

(πηγή : <https://www.dreamstime.com/logrosan-extremadura-spain-march-view-concentrators-solar-panels-thermal-power-plant-solaben-image157134488>)

5.10.2. ΗΠΑ 1,76 GW

Οι ΗΠΑ έχουν συνολικά 52 σταθμούς CSP. Ο μεγαλύτερος σταθμός παραβολικών κατόπτρων ονομάζεται SEGS, έχει ισχύ 354 MW και βρίσκεται στην Καλιφόρνια. Αποτελεί τον δεύτερο μεγαλύτερο σταθμό σε παγκόσμια κλίμακα [14].



Σχήμα 5.19 Solar Energy Generating Systems (SEGS), Καλιφόρνια (ΗΠΑ)

(πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems)

5.10.3. ΜΑΡΟΚΟ 530 MW

Το Μαρόκο διαθέτει το μεγαλύτερο σταθμό CSP στον κόσμο (Σχήμα 5.20), ο οποίος βρίσκεται κοντά στην πόλη Ouarzazate και έχει εγκατεστημένη ισχύ 510 MW. Τέθηκε σε λειτουργία το Φεβρουάριο του 2016. Καταλαμβάνει μια έκταση 6000 στρεμμάτων και αποτελείται από τέσσερις φάσεις κατασκευής:

- Το Noor 1 με ισχύ 160 MW από παραβολικά κάτοπτρα.
- Το Noor 2 με ισχύ 200 MW από παραβολικά κάτοπτρα.
- Το Noor 3 με ισχύ 150 MW από πύργο ηλιακής ενέργειας.
- Το Noor 4 με ισχύ 70 MW από φωτοβολταϊκά και είναι υπό κατασκευή.

Το κόστος της εγκατάστασης αυτής ανέρχεται στα 9 δισεκατομμύρια δολάρια και καλύπτει το 6% των ενεργειακών απαιτήσεων της χώρας [14],[15].

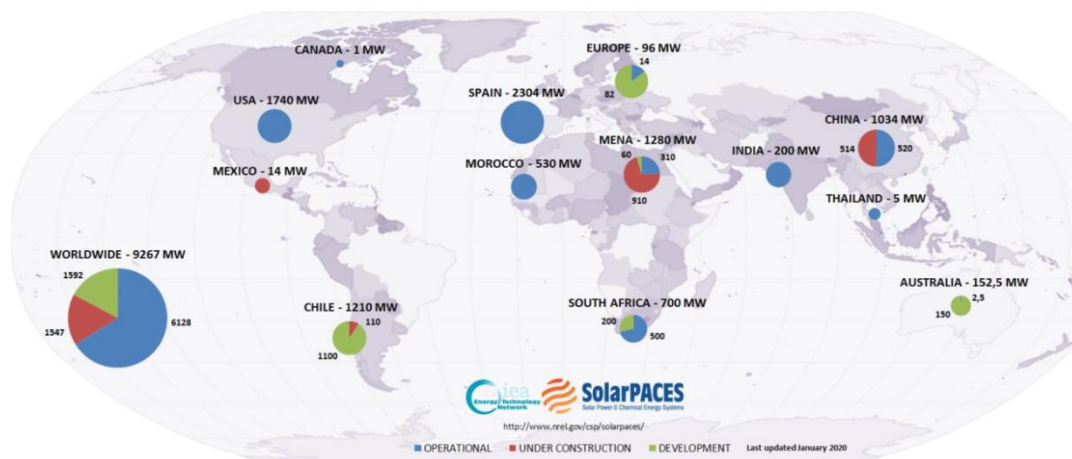


Σχήμα 5.20 Noor Power Plant, Μαρόκο

(πηγή: <https://www.wsj.com/articles/a-solar-project-worth-watching-in-morocco-1473818401>)

5.10.4. ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ 400MW

Τα CSP (Concentrated Solar Power Plants) αποτελούν το 13,5% της συνολικής δυναμικότητας σε ηλιακά της Νότιας Αφρικής. Το 2018 προστέθηκαν 100MW ηλιακών συγκεντρωτικών συλλεκτών αυξάνοντας την δυναμικότητα στα 400MW ενώ μέχρι το 2030 υπάρχει πρόβλεψη επέκτασης της ενεργειακής ισχύος κατά 1GW από CSP [14].



Σχήμα 5.21 Στον παραπάνω χάρτη καταγράφονται με ποσοστά οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής από CSP που βρίσκονται σε λειτουργία, που είναι υπό κατασκευή ή που προβλέπεται να κατασκευασθούν.

(πηγή: <https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>)

Είναι εμφανές πως πρόκειται για μια τεχνολογία με μεγάλη εξέλιξη και εφαρμογή στο χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα PTC αποδίδουν τεράστια ποσά ενέργειας και εναρμονίζονται απόλυτα με το περιβάλλον χωρίς να προκαλούν μόλυνση ή επιβάρυνση σε αυτό.

5.11. Θερμικά συστήματα αποθήκευσης

Το κύριο πρόβλημα που διακρίνεται στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ενέργειας, είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν μόνο με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Για να αγγίξουν το μέγιστο βαθμό της απόδοσής τους θα πρέπει να υπάρχει πλήρης διαύγεια και έλλειψη νεφώσεων. Τα ηλιακά κάτοπτρα θα πρέπει να περιστρέφονται με ακρίβεια προς τον ήλιο. Επομένως για να επιτευχθεί η βέλτιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας τα ηλιακά συστήματα συνοδεύονται από τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης [10].

Κατά τη διάρκεια της νύχτας δεν παράγεται θερμική ενέργεια από τις PTC τεχνολογίες. Στην περίπτωση όμως, που η βιομηχανική διαδικασία πρέπει να τροφοδοτείται και κατά τη διάρκεια περιόδων χωρίς άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ένα σύστημα αποθήκευσης, αποθηκευθεί τη θερμική ενέργεια που παρέχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες κατά τις ώρες της ηλιοφάνειας, καλύπτοντας την ζήτηση.

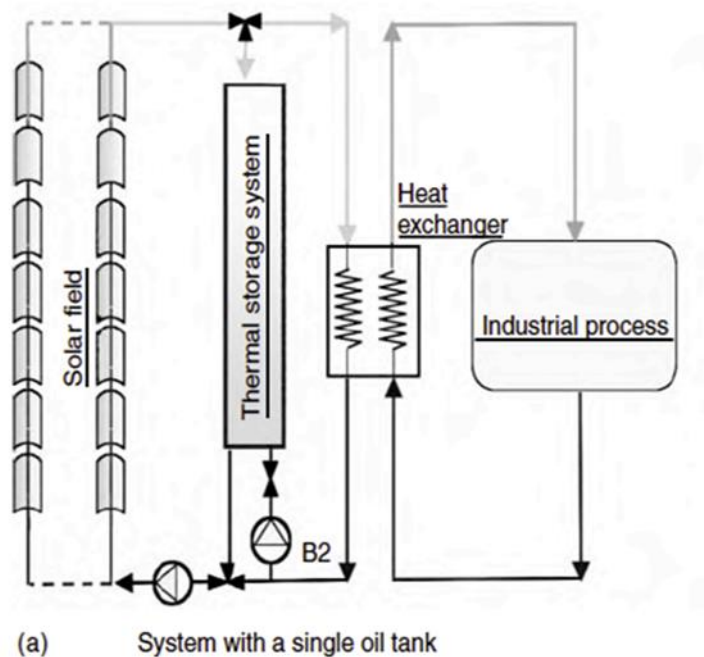
Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης έχουν δύο βασικά πλεονεκτήματα:

1. Η ηλιοθερμική ενέργεια μπορεί να παρέχεται κατά την διάρκεια της ημέρας σε διαστήματα με μικρή ηλιοφάνειας αλλά και κατά τη διάρκεια της νύχτας.
2. Συμβάλουν στην εύρυθμη λειτουργία των συγκεντρωτικών κατόπτρων (PTC) καθώς χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας στην είσοδο των παραβολικών συλλεκτών όταν υπάρχουν μικρές αποκλίσεις από το σημείο λειτουργίας τους.

5.11.1. Συστήματα άμεσης αποθήκευσης

Στα άμεσα συστήματα το μέσο αποθήκευσης είναι ίδιο με το ρευστό που κυκλοφορεί στους παραβολικούς συλλέκτες (Σχήμα 5.22). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ορυκτό έλαιο ως θερμοαγωγό ρευστό άρα και ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Υπάρχουν δύο πιθανές διατάξεις. Η μία αποτελείται από μια δεξαμενή λαδιού ενώ η δεύτερη από δύο.

Η μονή δεξαμενή λαδιού χρησιμοποιείται κυρίως σε χαμηλής δυναμικότητας συστήματα αποθήκευσης. Η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται σε μία ενιαία δεξαμενή στην οποία το έλαιο είναι τοποθετημένο κατά στρώματα ανάλογα με την θερμοκρασία. Στο Σχήμα 5.22 παρουσιάζεται αναλυτικά την παρούσα διάταξη.



Σχήμα 5.22 Σύστημα αποθήκευσης με μία δεξαμενή λαδιού

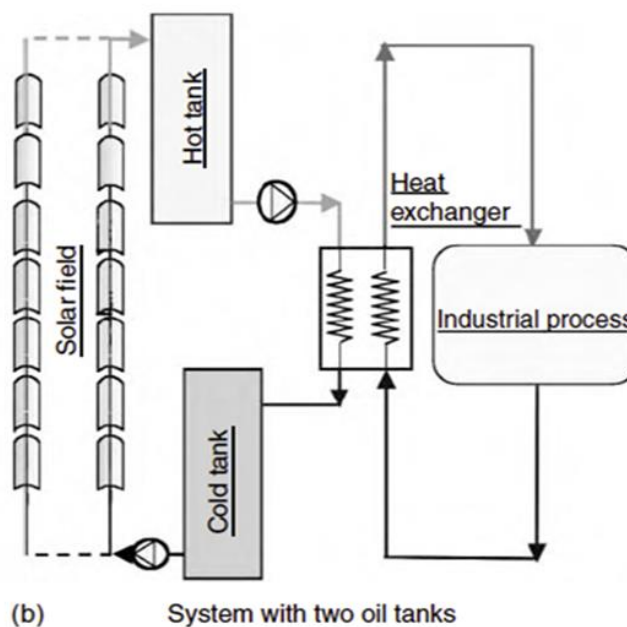
Σύμφωνα με το κύκλωμα το έλαιο θερμαίνεται από τα ηλιακά κάτοπτρα και στη συνέχεια εισάγεται στη δεξαμενή αποθήκευσης μέσω μιας τριόδου βάννας, εγκατεστημένης στην έξοδο του ηλιακού πεδίου. Η βάννα ρυθμίζει την ποσότητα θερμού ρευστού που θα εισαχθεί στο σύστημα αποθήκευσης και τη διάταξη παραγωγής ενέργειας μέσω του εναλλάκτη, σύμφωνα με τη ζήτηση. Αντίστοιχη βάννα υπάρχει και στην είσοδο του ηλιακού πεδίου και ρυθμίζει την ποσότητα του ψυχρού ρευστού που θα εισαχθεί για αναθέρμανση από τον εναλλάκτη και την δεξαμενή ελαίου. Επίσης όπως φαίνεται και από Σχήμα 5.22 ο εναλλάκτης θερμότητας παρέχει τη θερμική ενέργεια που απαιτείται για την θερμική διεργασία και τροφοδοτείται είτε από το ηλιακό πεδίο είτε από τη δεξαμενή αποθήκευσης ανάλογα με τη θέση της βάννας τριών δρόμων.

Η πυκνότητα του λαδιού μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Λόγω της πυκνότητάς του το θερμό έλαιο παραμένει στα ανώτερα στρώματα της δεξαμενής αποθήκευσης, ενώ το ψυχρό λάδι οδηγείται προς το κατώτερο μέρος της δεξαμενής. Επομένως όταν εκκενώνεται το σύστημα αποθήκευσης, το θερμό έλαιο εξέρχεται από την κορυφή της πολλαπλής εξαγωγής της δεξαμενής και επιστρέφει στο κατώτατο μέρος της μετά την έξοδό του από τον εναλλάκτη. Αντίθετα το ψυχρό έλαιο εξέρχεται από το κάτω μέρος της δεξαμενής αποθήκευσης και οδηγείται στο ηλιακό πεδίο κατά τη διάρκεια των ωρών της ημέρας για να θερμανθεί και στη συνέχεια να επιστρέψει ανώτερα στρώματα της δεξαμενής αποθήκευσης.

Η αντλία εξαναγκασμένη ροής B2 που φαίνεται και στο Σχήμα 5.22 χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για να τροφοδοτήσει τον εναλλάκτη με θερμό έλαιο από τη δεξαμενή αποθήκευσης, όταν το ηλιακό πεδίο δεν είναι σε λειτουργία.

Το σύστημα αποθήκευσης είναι έχει μέγιστη απόδοση όταν το έλαιο που αποθηκεύεται στη δεξαμενή έχει θερμανθεί πλήρως στο σύνολό του. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η χρήση μιας ενιαίας δεξαμενή αποθήκευσης είναι εφικτή μόνο για μικρά συστήματα αποθήκευσης. Για μεγάλης χωρητικότητας συστήματα είναι απαραίτητες δύο ξεχωριστές δεξαμενές ψυχρού και θερμού ελαίου αντίστοιχα.

Στις διατάξεις όπου υπάρχουν δύο ελαιοδεξαμενές ο εναλλάκτης τροφοδοτείται πάντα από τη θερμή δεξαμενή. Το έλαιο μεταφέρει τη θερμότητα στο νερό - ατμό που βρίσκεται στον εναλλάκτη και εν συνεχεία οδηγείται στην ψυχρή δεξαμενή. Η δεξαμενή αυτή τροφοδοτεί το ηλιακό πεδίο, το οποίο κατά τον ίδιο χρόνο τροφοδοτεί τη θερμή δεξαμενή με το λάδι που θερμαίνεται από τους ηλιακούς συλλέκτες (Σχήμα 5.23).



Σχήμα 5.23 Σύστημα αποθήκευσης με δύο δεξαμενές λαδιού

Το έλαιο σαν μέσο αποθήκευσης έχει αρκετά μειονεκτήματα. Τα θερμικά έλαια πρέπει να διατηρούνται σε πίεση ατμού πάνω από την πίεση που αντιστοιχεί στη μέγιστη θερμοκρασία για να αποτραπεί η μετατροπή του ελαίου σε αέριο. Ευτυχώς, η πίεση των θερμικών ελαίων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτά είναι συνήθως χαμηλή για το εύρος θερμοκρασίας 100°C – 400°C και αυτή η πίεση μπορεί εύκολα να συντηρείται με την έγχυση αργού ή αζώτου. Αυτή η αδρανής ατμόσφαιρα που δημιουργείται, αποτρέπει τον κίνδυνο της έκρηξης ή ανάφλεξης της δεξαμενής, από την πίεση σταγονιδίων, τα οποία είναι εκρηκτικά κατά την άμεση επαφή τους με τον αέρα.

Επομένως, στις διατάξεις που χρησιμοποιούν έλαιο είναι αναγκαία η ύπαρξη συστήματος πυρόσβεσης, καθώς και μιας δεξαμενής λαδιού για τη συλλογή τυχόν διαρροών ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση. Είναι κατανοητό πως όλος ο συμπληρωματικός εξοπλισμός που απαιτείται για στην ασφαλή λειτουργία του συστήματος με ενεργό μέσο το λάδι, αυξάνει το κόστος της συνολικής εγκατάστασης. Αξίζει να σημειωθεί πως η φωτιά που προκλήθηκε μετά από βλάβη στην λειτουργία της προστατευτικής ατμόσφαιρας της δεξαμενής σε ένα από τα εργοστάσια SEGS στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ καταστρέφοντας το σύστημα αποθήκευσης, κατέστησε την χρήση ελαίου απαγορευτική για τις επόμενες εγκαταστάσεις [10].

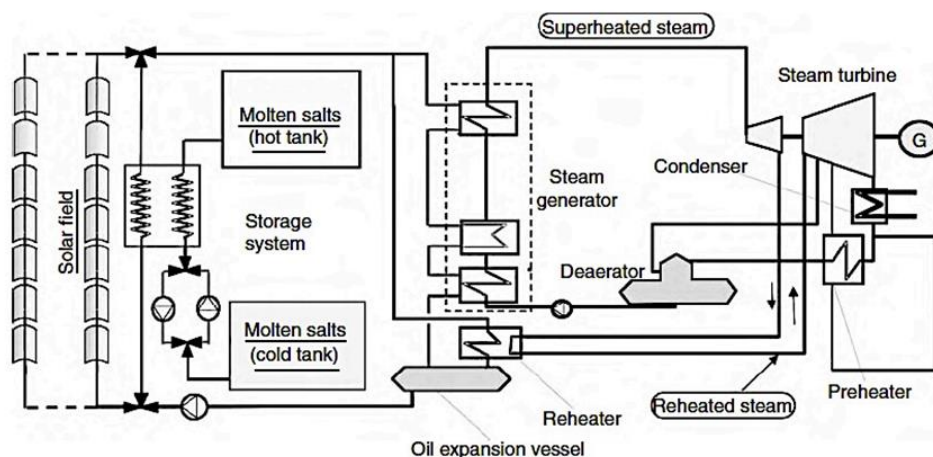
5.11.2. Συστήματα έμμεσης αποθήκευσης

Συστήματα με διπλό μέσο αποθήκευσης είναι εκείνα στα οποία η θερμότητα αποθηκεύεται σε ένα μέσο διαφορετικό από το εργαζόμενο μέσο που θερμαίνεται στους ηλιακούς συλλέκτες.

Πλάκες σιδήρου, κεραμικά υλικά, τηγμένο άλας, ή σκυρόδεμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο αποθήκευσης. Στα συστήματα αυτά, το έλαιο χρησιμοποιείται συνήθως ως μέσο μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ηλιακού πεδίου και του υλικού στο οποίο αποθηκεύεται η θερμική ενέργεια υπό μορφή αισθητής θερμότητας.

- Στην περίπτωση της αποθήκευσης θερμότητας σε πλάκες σιδήρου, λάδι κυκλοφορεί μέσω των καναλιών που υπάρχουν μεταξύ των πλακών χυτού σιδήρου που είναι τοποθετημένες μέσα σε ένα θερμικά μονωμένο δοχείο, μεταφέροντας θερμική ενέργεια σε αυτές (διαδικασία φόρτισης) ή λαμβάνοντας από αυτές (διαδικασία εκφόρτισης).
- Τηγμένο άλας (ένα ευτηκτικό μείγμα του νατρίου και του νιτρικού καλίου), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διπλά θερμικά συστήματα αποθήκευσης στα PTC. Το τηγμένο άλας δεν είναι εύφλεκτο ούτε τοξικό και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται στις περισσότερες εγκαταστάσεις που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον μπορεί να αποθηκεύσει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας με ασφάλεια σε σχέση με τα ορυκτά έλαια. Στην περίπτωση αυτή χρειάζονται δύο δεξαμενές. Η μία για το ψυχρό άλας και η δεύτερη για το θερμό. Προφανώς, η χαμηλότερη θερμοκρασία είναι πάντα πάνω από το σημείο τήξης του άλατος (περίπου 250°C). Στη διάταξη αυτή απαιτείται ένας εναλλάκτης θερμότητας για τη μεταφορά ενέργειας από το έλαιο που χρησιμοποιείται στο ηλιακό πεδίο (μέσο μεταφοράς θερμότητας) στο λιωμένο αλάτι που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση (μέσο αποθήκευσης).

Το Σχήμα 5.24 δείχνει ένα απλοποιημένο σύστημα παραβολικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με θερμικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας τηγμένου άλατος. Αυτό το είδος του συστήματος θερμικής αποθήκευσης φέρεται να είναι η πιο αποδοτική επιλογή για μεγάλες εμπορικές μονάδες παραγωγής ηλιακής ενέργειας [10].



Σχήμα 5.24 Παραβολικά κάτοπτρα με αποθηκευτικό σύστημα τηγμένου άλατος

6. Υβριδικές ηλιο-γεωθερμικές μονάδες

6.1. Διατάξεις υβριδικών ηλιο-γεωθερμικών εγκαταστάσεων

Η βασική ιδέα πίσω από μία υβριδική εγκατάσταση είναι η επίτευξη ενός συνδυαστικού αποτελέσματος όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που προκύπτει, να υπερέχει έναντι της αντίστοιχης ενέργειας των μεμονωμένων μερών (ηλιακού, γεωθερμικού) του υβριδικού συστήματος. Δηλαδή, η υβριδική μονάδα θα πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι δύο πηγές ενέργειας να υποβοηθούν η μία την άλλη. Ιδανικό δε, θα ήταν αυτές οι δύο πηγές να είναι διαθέσιμες σε μόνιμη βάση ώστε να επιτευχθεί σε μεγαλύτερο βαθμό ο συγκερασμός τους.

Για τα υβριδικά συστήματα που εξετάζονται στην παρούσα έρευνα, η ηλιακή ενέργεια δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερή πηγή ενέργειας, σε αντίθεση με τη γεωθερμία. Η ύπαρξη της εξαρτάται από την παρουσία ηλίου (μέρα – νύχτα) και των δυσμενών συνθηκών, όπως η ακραία νέφωση που εμποδίζει σχεδόν εξολοκλήρου την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό θέτει σοβαρούς πρακτικούς περιορισμούς σε επικείμενα υβριδικά σχέδια, λόγω του ότι η οργάνωση της παραγωγής εξαρτάται από την πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών.

Από οικονομικής άποψης, οι ηλιοθερμικές και οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις έχουν σημαντικές διαφορές, με την ηλιακή ενέργεια να είναι ξεκάθαρα πιο ακριβή από τη γεωθερμική. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπ'όψιν τις θερμοδυναμικές και οικονομικές τους αποδόσεις, είναι φανερό πως σε οποιαδήποτε προσπάθεια υβριδοποίησης τους θα ευνοούνταν σημαντικά η γεωθερμία. Ωστόσο, δεδομένου του ότι η οικονομική προσέγγιση εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους (κόστος εργασίας, κόστος υλικών, οικονομικών κινήτρων, κρατικών επιδοτήσεων κ.α) οι οποίες ποικίλουν ανά τον κόσμο, θα ήταν σάφρων να εξετασθούν πιθανές υβριδικές διαμορφώσεις, όπου θα μπορούσαν να θεωρηθούν θερμοδυναμικά και οικονομικά βιώσιμες [16].

του σπουδαστή Χάρη Γεωργίου

Όπως γίνεται κατανοητό, το στοίχημα ενός ηλιο-γεωθερμικού υβριδικού σταθμού είναι η δυνατότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με οικονομικά βιώσιμο τρόπο. Πλεονέκτημα ως προς αυτήν την κατεύθυνση, αποτελεί το γεγονός ότι ο ηλιοθερμικός σταθμός, δεν χρειάζεται μονάδα μετατροπής ενέργειας, εφόσον με κατάλληλες διατάξεις που θα παρουσιαστούν παρακάτω, μπορεί άμεσα να παρέχει το θερμικό του φορτίο μέσω εναλλακτών στο γεωθερμικό σύστημα τροφοδοσίας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μία εξοικονόμηση κεφαλαίων σε αντίθεση με τη γεωθερμική μονάδα, που λόγω της χαμηλής απόδοσης της, στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική, κρίνεται σχετικώς ασύμφορη [17].

Παρόλα αυτά, ο πιο θερμοδυναμικά αποδοτικός και οικονομικά προσοδοφόρος τρόπος συνδυασμού των δύο τεχνολογιών είναι η ενσωμάτωση του ηλιακού πεδίου σε μία γεωθερμική εγκατάσταση με στιγμιαία ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου (Flash Steam). Σε αυτήν, η προσθήκη του ηλιακού πεδίου θα μπορούσε να προσδώσει επιπλέον θερμικό φορτίο στο προσαχθέν γεωθερμικό ρευστό, το οποίο θα οδηγούνταν σε έναν υψηλής απόδοσης θερμικό κύκλο Rankine [18].

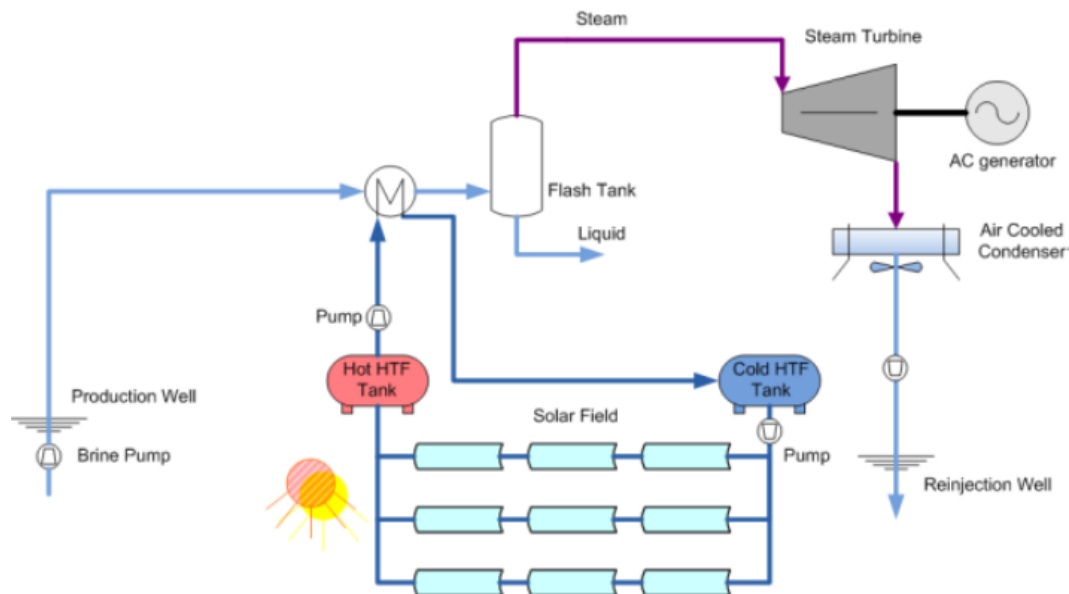
Σε αυτήν την ενότητα διερευνώνται διάφορα σενάρια ενσωμάτωσης της ηλιοθερμικής ενέργειας σε μία μονάδα στιγμιαίας ατμοποίησης μέσω διαχωριστή (Flash Steam). Όλες οι παρακάτω προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμοστούν εξίσου αποδοτικά και σε μία μονάδα οργανικού δυαδικού κύκλου (Organic Rankine Cycle O.R.C.) [19]. Τρεις από τις βασικότερες προσεγγίσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.Ι. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα παρακάτω σενάρια μπορεί να εισαχθεί και σύστημα θερμικής αποθήκευσης του εργαζόμενου μέσου του ηλιακού πεδίου με χρήση δεξαμενών θερμού και ψυχρού μέσου [20].

Πίνακας 6.1 Πιθανά σενάρια ενσωμάτωσης του ηλιακού πεδίου σε μονάδα στιγμιαίας ατμοποίησης (flash steam) [21].

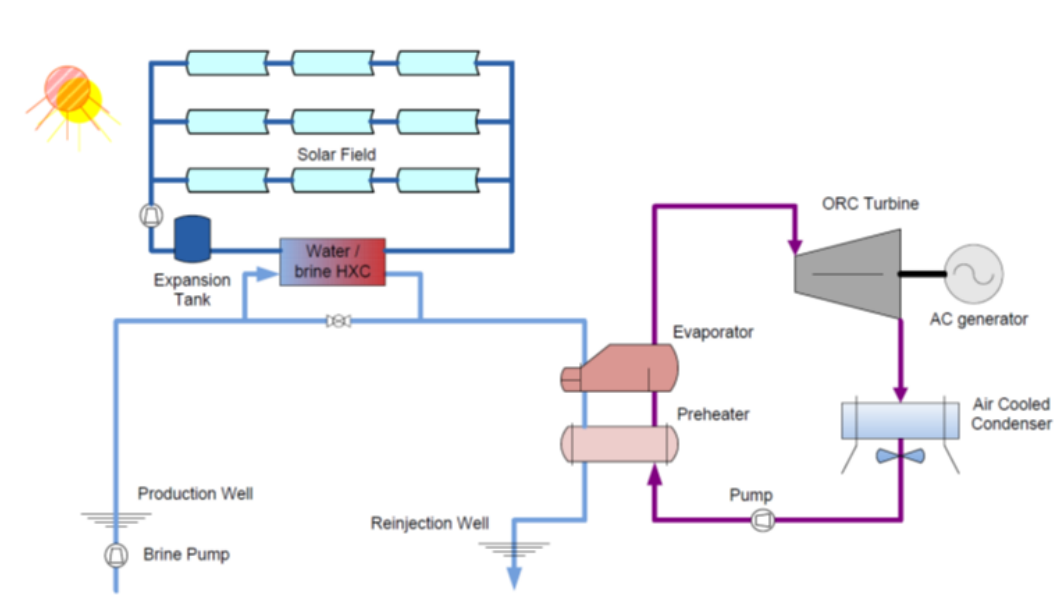
Προθέρμανση του γεωθερμικού ρευστού με ηλιακή ενέργεια	Αναθέρμανση του συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού και επανεισαγωγή του στον θερμικό κύκλο	Άμεση ατμοποίηση του γεωθερμικού ρευστού μέσω του ηλιακού πεδίου και έγχυσή του στον θερμικό κύκλο
Σχήμα 6.1 Σχήμα 6.2	Σχήμα 6.3 Σχήμα 6.4	Σχήμα 6.5 Σχήμα 6.6 Σχήμα 6.7
Πλεονεκτήματα		
Δεν υπάρχει αλλαγή στη ροή μάζας του εργαζόμενου μέσου προς ατμοποίηση	Υψηλή ειδική εντροπία του ρευστού εντός του στοιχείου ατμοποίησης	Δεν υπάρχει αλλαγή στο μέγεθος του στοιχείου ατμοποίησης
Υψηλή ειδική εντροπία του ρευστού εντός του στοιχείου ατμοποίησης	Μεγαλύτερη παραγωγή ατμού στο στοιχείο ατμοποίησης	Η αναθέρμανση του επανεισαγόμενου συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού εμφανίζει μικρότερη πιθανότητα ύπαρξης επικαθίσεων στον εναλλάκτη θερμότητας λόγω της καθαρότητας του
Μεγαλύτερη παραγωγή ατμού στο στοιχείο ατμοποίησης	Η αναθέρμανση του επανεισαγόμενου συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού εμφανίζει μικρότερη πιθανότητα ύπαρξης επικαθίσεων στον εναλλάκτη θερμότητας λόγω της καθαρότητας του	Όλη η παραγόμενη θερμική ενέργεια του ηλιακού πεδίου μεταβιβάζεται άμεσα στο θερμικό κύκλο ως ατμός
Υψηλότερη ροή μάζας ατμού εντός του στροβίλου	Υψηλή διαφορά θερμοκρασίας κατά μήκος του ηλιακού πεδίου	Δυνατότητα παραγωγής άμεσου ατμού εντός του ηλιακού πεδίου και έγχυσής του στο θερμικό κύκλο
Περιορισμοί		
Πιθανότητα επικαθίσεων στερεών σωμάτων στον εναλλάκτη θερμότητας	Υψηλή ροή μάζας του εργαζόμενου μέσου προς ατμοποίηση	Συνιστάται η ύπαρξη εξοπλισμού αποκατάστασης του γεωθερμικού ρευστού πριν την είσοδό του στον ατμοποιητή
Ορισμένη θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του ηλιακού πεδίου που εξαρτάται από τις συνθήκες εισόδου του γεωθερμικού ρευστού	Η ενέργεια του ηλιακού πεδίου δεν μεταβιβάζεται άμεσα στο θερμικό κύκλο αλλά στο γεωθερμικό ρευστό που επανεισάγεται σε αυτόν	

Η επιλογή της προθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού (Σχήμα 6.1) αποτελεί την λιγότερη διεισδυτική λύση, όσον αφορά τον επιπλέον γεωθερμικό εξοπλισμό που απαιτείται, εφόσον η ηλιακή ενέργεια απλά προστίθεται στο εισερχόμενο γεωθερμικό ρευστό μέσω εναλλάκτη. Αυτός ο σχεδιασμός υλοποιήθηκε στον υβριδικό ηλιο-γεωθερμικό σταθμό που εδρεύει στο Stillwater της Nevada U.S.A. της ιταλικής

εταιρείας Enel Green Power [22]. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη μονάδα είναι οργανικού δυαδικού κύκλου αντί για μονάδα στιγμιαίας ατμοποίησης Σχήμα 6.2. Συνεχίζοντας, με την επιλογή προθέρμανσης, δεν παρατηρείται καμία μεταβολή στη ροή μάζας του γεωθερμικού τήγματος. Ενώ, προσδίδοντας επιπλέον ενέργεια, παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα ατμού στο διαχωριστή και κατ' επέκταση στο στρόβιλο. Ωστόσο, η ποσότητα ενέργειας που προστίθεται στο σύστημα, περιορίζεται από τις συνθήκες στις οποίες βρίσκεται το εισερχόμενο τήγμα και κυρίως τη θερμοκρασία. Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο στη μέγιστη ποσότητα θερμικού φορτίου που μπορεί να δοθεί στο σύστημα από το ηλιακό πεδίο έχει και η θερμοκρασία λειτουργίας του διαχωριστή, του στοιχείου ατμοποίησης και του στρόβιλου. Παράλληλα, στους οργανικούς κύκλους, ο περιορισμός του προτιθέμενου θερμικού φορτίου έγκειται στις συνθήκες και το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του οργανικού μέσου (ισοπετάνιο, πεντάνιο, βουτάνιο) [23]. Αξίζει να τονιστεί, ότι η σχετικά μικρή θερμοκρασιακή διαφορά που απαιτείται στην εναλλαγή θερμικού φορτίου στον εναλλάκτη, περιορίζει το θερμοκρασιακό εύρος κατά μήκος του ηλιακού πεδίου. Απότοκος αυτού είναι η υψηλή ροή μάζας του εργαζομένου μέσου των ηλιακών συλλεκτών. Επιπροσθέτως, η τοποθέτηση του εναλλάκτη πριν το θερμικό κύκλο, πιθανόν να προκαλέσει προβλήματα επικαθίσεων των στερεών σωμάτων που ακούσια ρέουν εντός του αντλούμενου γεωθερμικού ρευστού. Γι' αυτό η ύπαρξη εξοπλισμού ελέγχου των επικαθίσεων, κρίνεται απαραίτητη στην είσοδο του ατμοποιητή [24].



Σχήμα 6.1 Προθέρμανση του γεωθερμικού ρευστού με ηλιακή ενέργεια σε μονάδα στιγμιαίας ατμοποίησης (flash steam) [21].

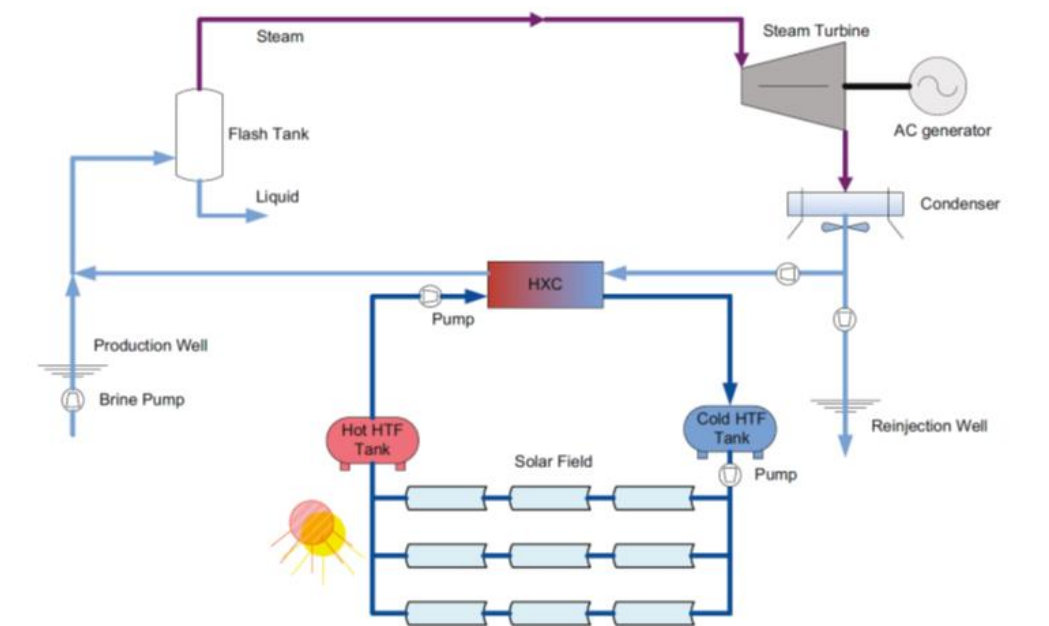


Σχήμα 6.2 Προθέρμανση του γεωθερμικού ρευστού με ηλιακή ενέργεια σε μονάδα οργανικού δυαδικού κύκλου. (Enel's Stillwater hybrid facility) [21].

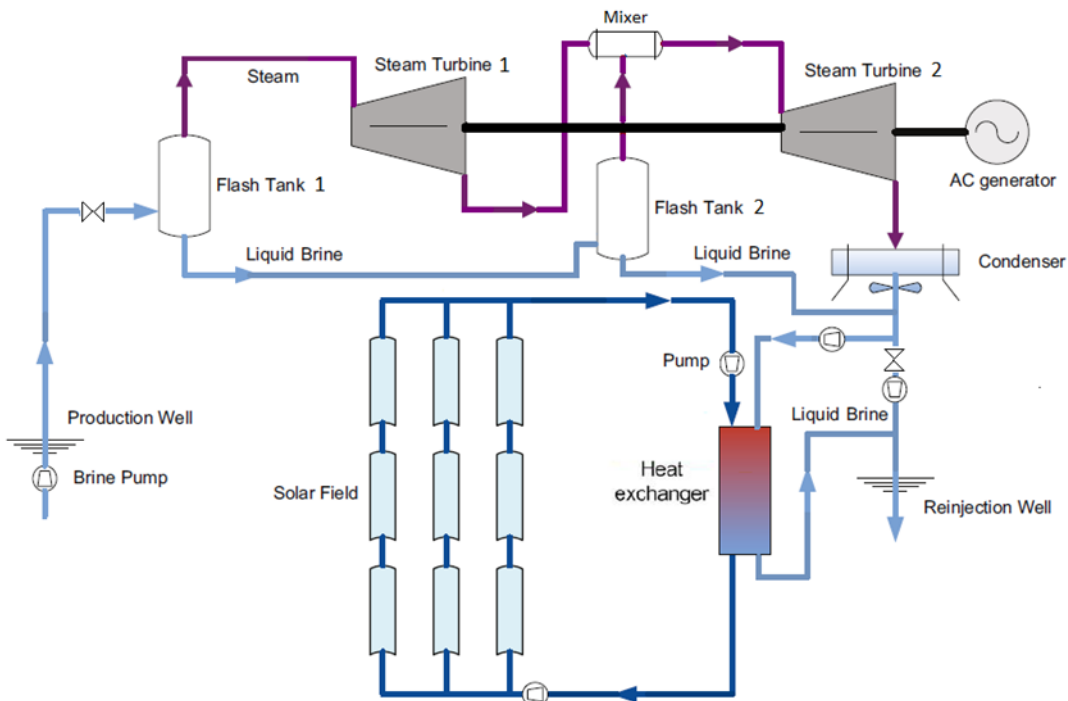
Το σενάριο της αναθέρμανσης του συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού (Σχήμα 6.3) και η επανεισαγωγή του στο θερμικό κύκλο κατέχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την πρώτη επιλογή αλλά δεν ενσωματώνει τους σημαντικούς περιορισμούς της. Με την εγκατάσταση της αναθέρμανσης αντλείται καθαρό νερό από το συμπυκνωτή και αναθερμαίνεται μέχρι να προσεγγίσει τις συνθήκες εισόδου του γεωθερμικού ρευστού. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός επιτρέπει την ύπαρξη ενός μεγαλύτερου θερμοκρασιακού εύρους εντός του ηλιακού πεδίου και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης θερμικής αποθήκευσης. Επίσης, οι επικαθήσεις που προβλέπονται είναι πολύ λίγες, λόγω της σχετικά υψηλής ποιότητας των συμπυκνωμάτων του θερμικού κύκλου. Παρόλα αυτά συστήνεται η ύπαρξη εξοπλισμού αποκατάστασης του γεωθερμικού ρευστού στην έξοδο του συμπυκνωτή για συγκράτηση των στέρεων σωματιδίων.

Μία εναλλακτική διάταξη του σεναρίου της αναθέρμανσης του συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού είναι αυτή του Σχήμα 6.4. Σε αυτήν το γεωθερμικό ρευστό μετά την αναθέρμανση του, δεν αναμιγνύεται με το εισαγόμενο ρευστό από το φρεάτιο παραγωγής αλλά εγχέεται με υψηλή πίεση εντός του φρεατίου επιστροφής. Με αυτόν τον τρόπο ο υπόγειος ταμιευτήρας χρησιμοποιείται ως ένας συσσωρευτής θερμικής ενέργειας με σκοπό την υψηλότερη αποδοτικότητα και μακροβιότητα του, διατηρώντας παράλληλα σε υψηλό επίπεδο το θερμικό του φορτίο. Επίσης παρουσιάζεται η διάταξη διπλού στοιχείου άμεσης ατμοποίησης (Double flash steam) με την ενσωμάτωση δευτέρου στροβίλου, αξιοποιώντας έτσι στο έπακρο τη γεωθερμική πηγή. Επιπλέον, δεν υπάρχει καμία τροποποίηση στο μέγεθος και το θερμοκρασιακό εύρος του ηλιακού πεδίου όπως και στη διαχείριση των επικαθήσεων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι υπάρχει η δυνατότητα συναρμογής των δύο διατάξεων (Σχήμα 6.3 και Σχήμα 6.4) ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν και θερμικές πηγές μικρότερης ισχύος ή για να βελτιστοποιηθούν ήδη υπάρχουσες γεωθερμικές εγκαταστάσεις υψηλής ενθαλπίας που η θερμοκρασία του ταμιευτήρα τους εμφανίζει καθοδική τάση [25]. Δηλαδή γεωτρήσεις που αντλούν για πολλά χρόνια λειτουργίας

μεγάλη παροχή μάζας του γεωθερμικού ρευστού με απότοκο τη θερμική του εξάντληση.



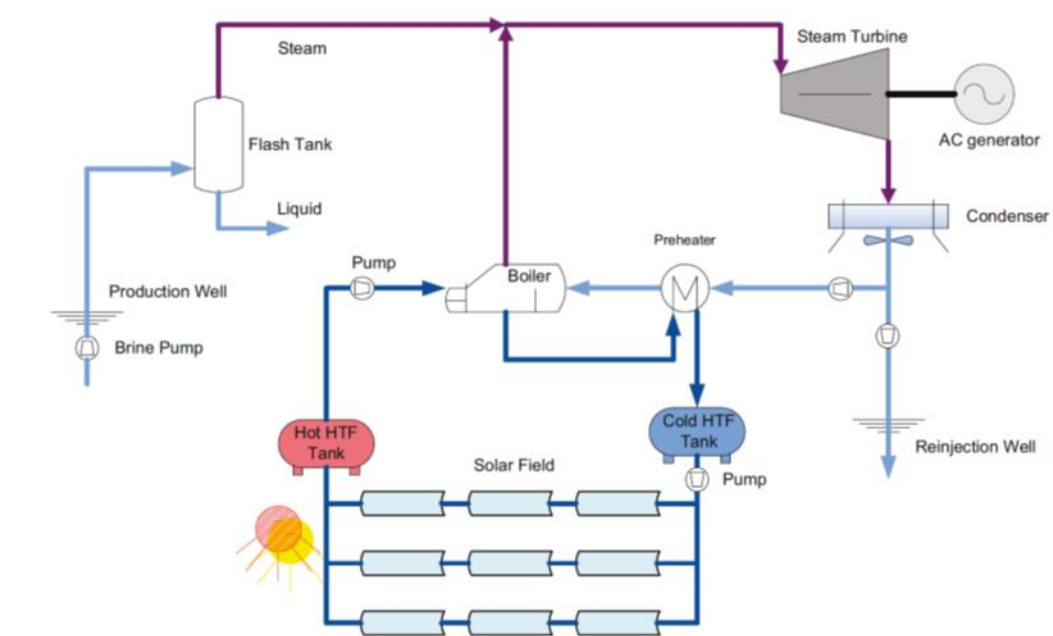
Σχήμα 6.3 Αναθέρμανση του συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού και επανεισαγωγή του στο θερμικό κύκλο [21].



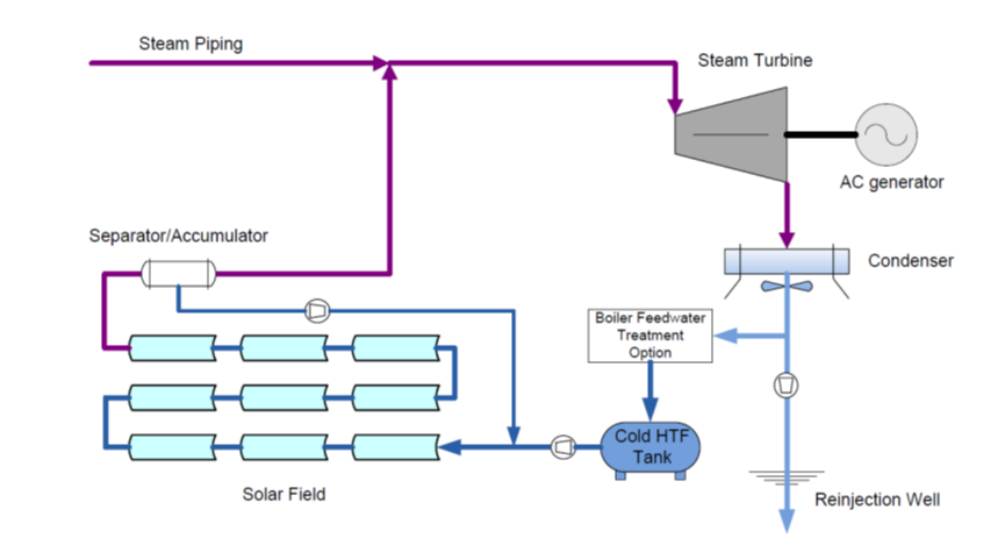
Σχήμα 6.4 Αναθέρμανση του συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού και έγχυση του στο φρέατιο επιστροφής [21].

του σπουδαστή Χάρη Γεωργίου

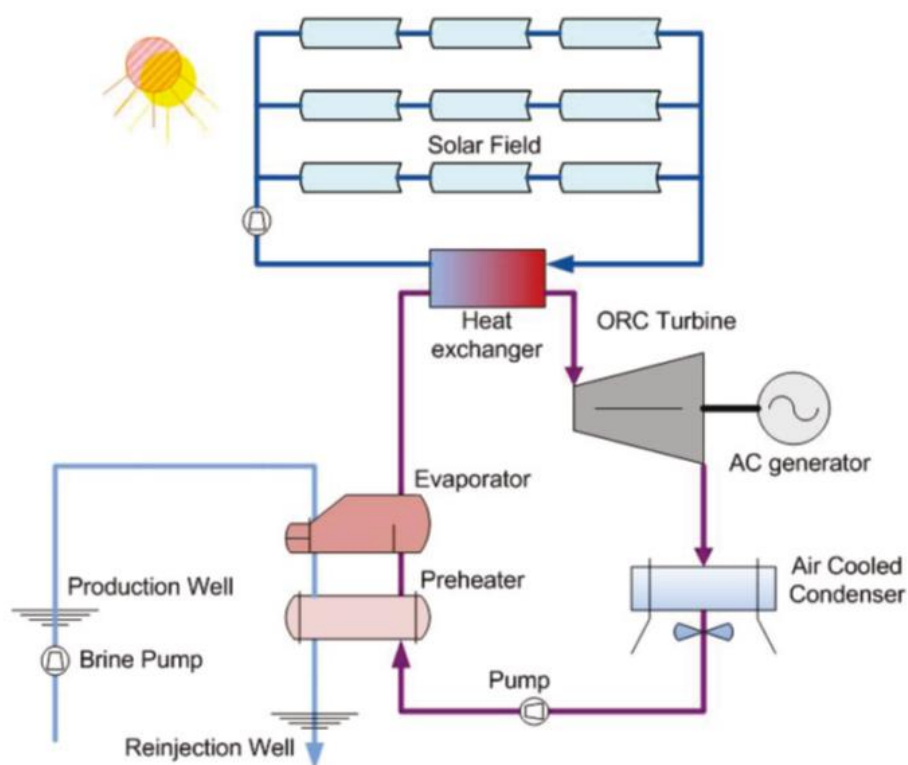
Στο Σχήμα 6.5 και Σχήμα 6.6 παρουσιάζονται δύο παραλλαγές του σεναρίου άμεσης αναθέρμανσης του συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού και επανεισαγωγή του στο θερμικό κύκλο. Σε αυτό το σενάριο, το γεωθερμικό ρευστό μετά τη συμπύκνωση του ατμοποιείται στο στοιχείο ατμοποίησης του ηλιακού πεδίου. Στο πρώτο χρησιμοποιείται μία διάταξη προθερμαντήρα και οικονομητήρα με επιλογή θερμικής αποθήκευσης του εργαζόμενου μέσου [16],[26]. Ενώ στο δεύτερο, το συμπυκνωμένο γεωθερμικό ρευστό ανακτά το θερμικό του φορτίο και τελικά ατμοποιείται, διαμέσου του ηλιακού πεδίου. Το δεύτερο σενάριο ονομάζεται και Άμεση Παραγωγή Ατμού (Direct Steam Generation D.S.G) εντός του ηλιακού πεδίου σύμφωνα με Getem User Manual [21]. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που προσφέρει αυτή η τεχνολογία είναι η άμεση παραγωγή ατμού εκτός του θερμικού κύκλου και η έγχυση του στο δίκτυο εισαγωγής ατμού του στροβίλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα DSG θεωρείται προτιμότερο μεταξύ των δύο, διότι κατά το σχεδιασμό μπορεί να διαστασιοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην απαιτείται η ύπαρξη θερμικής αποθήκευσης του εργαζόμενου μέσου. Η επιλογή αυτή, δεν υλοποιείται κατά το σενάριο του Σχήμα 6.5 διότι η συνθήκες του εργαζόμενου μέσου του ηλιακού πεδίου θα πρέπει να είναι πάντα σταθερές (ροή μάζας, θερμοκρασία, πίεση). Επιπρόσθετα, για το σύστημα DSG προτείνεται η χρήση ενός διαχωριστή πριν την έγχυση στο θερμικό κύκλο, ώστε να προσφέρεται μίας μορφής θερμική αποθήκευση και ασφάλεια στο σύστημα. Ταυτόχρονα πριν την είσοδο του ρευστού στο ηλιακό πεδίο κρίνεται απαραίτητος, έλεγχος επικαθίσεων και αποβολής συμπυκνωμένων αερίων, για την εύρυθμη λειτουργία του κυκλώματος εντός του δικτύου των ηλιακών συλλεκτών. Τέλος στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται το αντίστοιχο σενάριο για οργανικό δυαδικό θερμικό κύκλο, με τη διαφορά ότι η ενέργεια που μεταβιβάζεται από τον εναλλάκτη στο δίκτυο, λειτουργεί ως υπερθερμαντήρας αυτού [27],[28],[29].



Σχήμα 6.5 Ατμοποίηση του συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού μέσω του ηλιακού πεδίου και έγχυσή του στο θερμικό κύκλο [21].



Σχήμα 6.6 Άμεση ατμοποίηση του συμπυκνωμένου γεωθερμικού ρευστού μέσω του ηλιακού πεδίου και έγχυσή του στο θερμικό κύκλο χρησιμοποιώντας το σύστημα DSG με διαχωριστή και μερική επανακυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου [21].



Σχήμα 6.7 Σύστημα άμεσης ατμοποίησης του εργαζόμενου μέσου του οργανικού θερμικού κύκλου μέσω εναλλάκτη αντλώντας θερμότητα από το ηλιακό πεδίο [21].

6.2. Μαθηματικό Μοντέλο υβριδικών ηλιο-γεωθερμικών εγκαταστάσεων

Το μαθηματικό μοντέλο που αναλύεται σε αυτή την ενότητα και στο οποίο στηρίζεται η οποιαδήποτε μοντελοποίηση των παραπάνω ηλιο-γεωθερμικών διατάξεων χωρίζεται σε 3 μεγάλες κατηγορίες. Για την κάθε διάταξη επιλέγονται οι κατάλληλες σχέσεις που ικανοποιούν το εκάστοτε φυσικό φαινόμενο και θερμικό κύκλο. Οι διαφορετικές παράμετροι των διατάξεων και οι παρακάτω μαθηματικές σχέσεις έχουν παρθεί από τις δημοσιεύσεις [30], [31] και [21].

6.2.1. Ηλιακό Πεδίο

Για όλες τις διατάξεις που μελετώνται θεωρούμε ότι το ηλιακό πεδίο λειτουργεί με παραβολικούς συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Για το σχεδιασμό των συλλεκτών και των κατόπτρων έχει γίνει λεπτομερής αναφορά στο κεφάλαιο της θεωρίας για τα Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα. Στη μοντελοποίηση το ηλιακό πεδίο εξετάζεται ως σύνολο και προβλέπεται η θερμική του απόδοση αναλόγως της εκτιμώμενης ωφέλιμης επιφάνειας συναλλαγής των συλλεκτών. Έτσι ο οπτικός βαθμός απόδοσης τους ορίζεται ως:

$$n_0 = \gamma \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot n_t \cdot n_g \cdot n_{MC} \cdot n_{DE} \cdot IAM \quad (6.2.1)$$

Όπου το γ ο συντελεστής ανακοπής, ρ η ανακλαστικότητα, τ η διαπερατότητα, α η απορροφητικότητα, n_t σφάλμα εντοπισμού και περιστροφής, n_g γεωμετρική ακρίβεια, n_{MC} καθαρότητα του καθρέπτη, n_{DE} βαθμός εναπόθεσης σκόνης και άλλων στερεών σωμάτων στο περίβλημα του απορροφητή, IAM ο συντελεστής της γωνίας πρόσπτωσης ως συνάρτηση της εγκάρσιας και διαμήκουσ γωνίας.

Η καθαρή θερμότητα που απορροφήθηκε από το στοιχείο απορρόφησης του συλλέκτη ανά μονάδα επιφάνειας συναλλαγής είναι:

$$q_{abs} = \dot{n}_0 \cdot DNI \quad (6.2.2)$$

όπου DNI (Direct Normal Irradiance) η άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμότητα που χάνεται από τον απορροφητή ανά μονάδα μήκους του υπολογίζεται ως:

$$\varphi = 0.141 \cdot T_m + 6.48 \cdot 10^{-9} \cdot T_m^4 \quad (6.2.3)$$

όπου T_m είναι η μέση θερμοκρασία η οποία δίνεται από :

$$T_m = T_{HTF} - T_{air} \quad (6.2.4)$$

όπου T_{HTF} είναι η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου του ηλιακού πεδίου που είθισται να είναι συνθετικό λάδι για τις περισσότερες εφαρμογές και T_{air} η θερμοκρασία του αέρα.

Η ανηγμένη έκφραση των θερμικών απωλειών του απορροφητή ανά μονάδα επιφάνειας συναλλαγής είναι:

$$q_{rec} = \frac{\varphi}{w} \quad (6.2.5)$$

του σπουδαστή Χάρη Γεωργίου

όπου w το εκτιμώμενο μήκος για τον παραβολικό συλλέκτη. Η θερμικές απώλειες υπολογίζονται σύμφωνα με το [31] ως:

$$q_{pipe} = 10 \cdot (0.001693 \cdot T_m - 1.683 \cdot 10^{-5} \cdot T_m^2 + 6.78 \cdot 10^{-8} \cdot T_m^3) \quad (6.2.6)$$

Η καθαρή εκτιμώμενη επιφάνεια συναλλαγής κατά το σχεδιασμό σύμφωνα με το [31] ορίζεται ως:

$$A_{solar} = \frac{\dot{Q}_D}{q_{abs} - q_{rec} - q_{pipe}} \quad (6.2.7)$$

όπου \dot{Q}_D είναι η ζητούμενη θερμική ενέργεια για τον θερμικό κύκλο κατά το σχεδιασμό. Η κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία των αντλιών του εργαζόμενου μέσου του ηλιακού πεδίου σε kW_e είναι:

$$W_{HTF} = 5.19 \cdot m_{HTF} \quad (6.2.8)$$

6.2.2. Γεωθερμικός κύκλος

Στις υβριδικές ηλιο-γεωθερμικές διατάξεις που μελετώνται σε αυτό το κεφάλαιο παρατηρούνται τριών ειδών γεωθερμικοί κύκλοι. Ο κύκλος άμεσης ατμοποίησης με μία μονάδα διαχωρισμού (flash steam), ο κύκλος διπλής ατμοποίησης με δύο μονάδες διαχωρισμού (double flash steam) και ο οργανικός δυαδικός κύκλος με διαφορετικό εργαζόμενο μέσο ατμοποίησης (organic binary cycle) [32],[33]. Το μαθηματικό μοντέλο και οι θερμοδυναμικοί κύκλοι της κάθε περίπτωσης αναλύονται παρακάτω και έχουν παρατεθεί σύμφωνα με το [30], [31], [34] και [25].

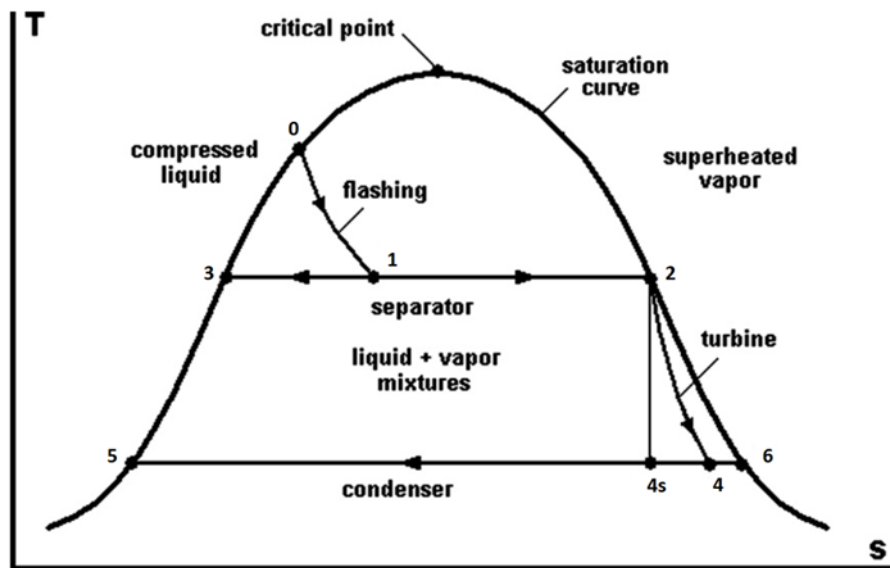
6.2.2.1. Θερμικός κύκλος άμεσης ατμοποίησης μίας μονάδας διαχωρισμού (single flash)

Σε αυτό το θερμικό κύκλο το γεωθερμικό ρευστό από το σημείο 0 όπου απεικονίζεται στο Σχήμα 6.7 πάνω στην καμπύλη κορεσμού, ατμοποιείται με σταθερή ενθαλπία μέχρι το σημείο 1 που είναι ο διαχωριστής. Δεν λαμβάνονται υπ'όψιν μεταβολές της κινητικής ή δυναμικής ενέργεια του ρευστού και η όλη διαδικασία θεωρείτε αδιαβατική. Επίσης θεωρείτε ότι ο διαχωρισμός νερού ατμού γίνεται υπό σταθερή πίεση η οποία απεικονίζεται στο διάγραμμα ως η ευθεία γραμμή 3-2. Η ξηρότητα ή ποιότητα του ατμού μαζί με τη ροή μάζας του καθορίζεται από το ισοζύγιο ενέργειας στο διαχωριστή και ορίζεται ως:

$$m_1 \cdot x_1 = m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 \quad (6.2.9)$$

$$m_1 \cdot h_1 = m_2 \cdot h_2 + m_3 \cdot h_3 \quad (6.2.10)$$

όπου m και h είναι η ροή μάζας και η ενθαλπία του ατμού στα καθορισμένα από τους δείκτες σημεία τους πάνω στο διάγραμμα.



Σχήμα 6.8 Θερμοδυναμικός κύκλος μίας μονάδας ατμοποίησης-διαχωριστή εκφρασμένο σε διάγραμμα θερμοκρασίας - εντροπίας (T - s) [30].

Το έργο που παράγεται από το στρόβιλο δίνεται από:

$$W_{turb} = m_2 \cdot (h_2 - h_4) \quad (6.2.11)$$

$$n_{turb} = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_{4s}} \quad (6.2.12)$$

όπου h_4 και h_{4s} είναι οι τιμές ενθαλπίας για πραγματικές ισεντροπικές διεργασίες.

Η θερμότητα που απορρίπτεται στο περιβάλλον από το συμπυκνωτή υπολογίζεται από:

$$Q_{cond} = m_2 \cdot (h_4 - h_5) \quad (6.2.13)$$

Σε περίπτωση που η ψύξη λειτουργεί μέσω πύργου και δικτύου νερού τότε η παροχή του καθορίζεται από:

$$m_{CW} = \frac{Q_{cond}}{h_8 - h_7} \quad (6.2.14)$$

όπου h_7 και h_8 είναι οι ενθαλπίες στην είσοδο και έξοδο του συμπυκνωτή . Η ενέργεια που καταναλώνει η αντλία του δικτύου ψύξης υπολογίζεται από:

$$W_{cp} = W_{cp,isent} \cdot n_{pump} \quad (6.2.15)$$

$$W_{cp,isent} = v_{cw} \cdot \Delta p_{pump} \quad (6.2.16)$$

Ο βαθμός απόδοσης μίας θερμικής μηχανής ορίζεται ως :

$$n_{law} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (6.2.17)$$

$$Q_{in} = C_p \cdot m_1 \cdot (T_1 - T_{cw1}) \quad (6.2.18)$$

όπου W_{net} είναι το παραγόμενο έργο από το στρόβιλο έχοντας αφαιρέσει το παρασιτικό φορτίο του κύκλου (ηλεκτρική ενέργεια που καταναλίσκεται για τη λειτουργία της μονάδας και των αντλιών). Το Q_{in} είναι η θερμότητα η οποία μεταβιβάζεται από το γεωθερμικό ρευστό στον κύκλο. T_{cw} είναι η θερμοκρασία του εισαγόμενου στο συμπυκνωτή νερού από τον πύργο ψύξης.

Σε περίπτωση ανάλυσης εξέργειας του συστήματος ο βαθμός απόδοσης αυτού υπολογίζεται ως εξής:

$$n_{ex} = \frac{W_{net,ex}}{E_1} \quad (6.2.19)$$

$$E = m \cdot (h - h_0 - T_0 \cdot (S - S_0)) \quad (6.2.20)$$

όπου το T_0 είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, h και s η ενθαλπία και η εντροπία του γεωθερμικού ρευστού σε καθορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας αντίστοιχα.

6.2.2.2. Θερμικός κύκλος διπλής ατμοποίησης με δύο μονάδες διαχωρισμού (double flash)

Ο θερμικός κύκλος διπλής ατμοποίησης αποτελεί βελτίωση του κύκλου μονής ατμοποίησης εφόσον έχει τη δυνατότητα να παράγει 15 – 25% περισσότερη ενέργεια για τις ίδιες συνθήκες γεωθερμικού ρευστού. Πρόκειται για μία πιο πολύπλοκη και δαπανηρή εγκατάσταση με περισσότερη συντήρηση σε σχέση με τις μονάδες single flash που εξισώνεται όμως με την αυξημένη ενεργειακή παραγωγή που προσφέρει. Οι μονάδες double flash έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις single flash, αλλά με βασικές διαφορές όπως η ύπαρξη του δεύτερου διαχωριστή. Το έργο που επιτελεί ο δεύτερος διαχωριστής είναι η επιπρόσθετη παραγωγή ατμού και η εισαγωγή του στο στρόβιλο από το επιστρέφον γεωθερμικό ρευστό χαμηλής πίεσης, του πρώτου διαχωριστή.

Για το μαθηματικό μοντέλο θεωρούμε ότι ο στρόβιλος είναι διπλής εισαγωγής, όπου ο ατμός χαμηλότερης πίεσης εισάγεται στην κατάλληλη βαθμίδα του, ώστε να συγκεραστεί ομαλά με τον ατμό υψηλής πίεσης που εκτονώνεται ταυτόχρονα. Άλλες διαθέσιμες διατάξεις είναι αυτές που εμπεριέχουν δύο στρόβιλους για την υψηλή και τη χαμηλή πίεση του γεωθερμικού ρευστού όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4 της προηγούμενης ενότητας.

Οι διεργασίες του εν λόγω σχεδιασμού διακρίνονται στο διάγραμμα του Σχήμα 6.9. Σε αυτό, το θερμό τμήμα του γεωθερμικού ρευστού που βρίσκεται σε υγρή φάση και έχει αφήσει τον πρώτο διαχωριστή (Σημείο 3), ατμοποιείται στιγμιαία. Αυτό γίνεται μέσω μίας στραγγαλιστικής βαλβίδας και παράγεται μείγμα χαμηλής πίεσης νερού-ατμού, που οδηγείται στο δεύτερο διαχωριστή [35]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία ατμοποίησης θεωρείται ισενθαλπική και γι' αυτό ισχύει ότι:

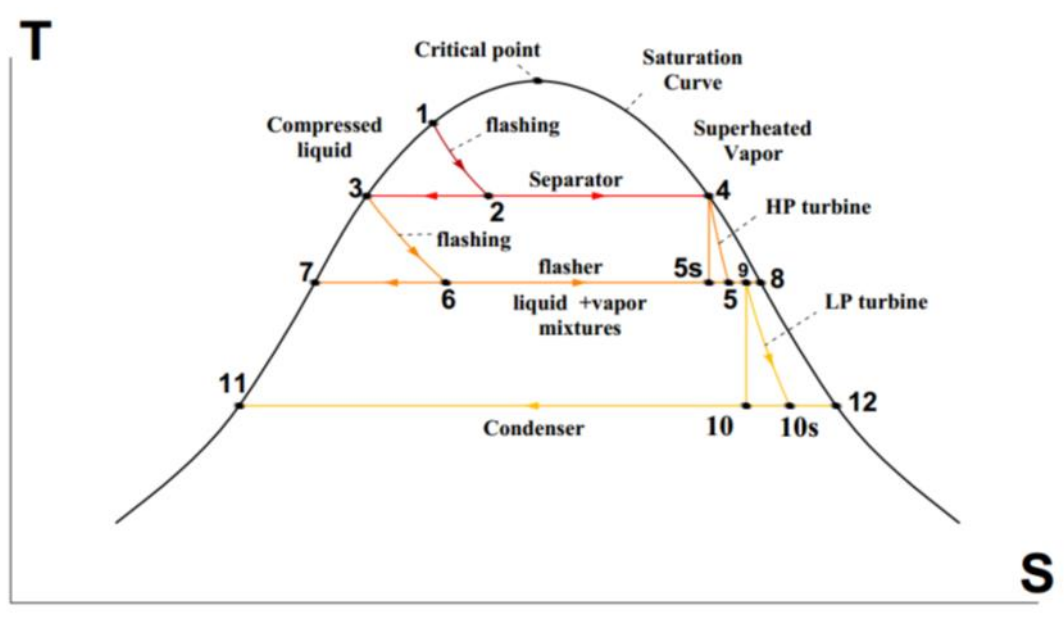
$$h_3 = h_6 \quad (6.2.21)$$

Η ροή μάζας του ατμού χαμηλής πίεσης δίνεται από:

$$m_8 = m_6 \cdot x_6 \quad (6.2.22)$$

όπου η ποιότητα του ατμού στο σημείο 6 είναι:

$$x_6 = \frac{h_6 - h_7}{h_8 - h_7} \quad (6.2.23)$$



Σχήμα 6.9 Θερμοδυναμικός κύκλος διπλής μονάδας ατμοποίησης – διαχωριστή εκφρασμένος σε διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας (T – s) [35].

Ο χαμηλής πίεσης ατμός προερχόμενος από τον πρώτο διαχωριστή προστίθεται εντός του στροβίλου ταυτόχρονα με τον ατμό υψηλής πίεσης που εκτονώνεται σταδιακά στο σημείο 5. Έπειτα εφαρμόζεται το ισοζύγιο ενέργειας για το σημείο 9 όπου ο μερικώς εκτονωμένος ατμός υψηλής πίεσης (σημείο 5) και ο χαμηλής πίεσης ξηρός κεκορεσμένος ατμός (σημείο 8) συνυπάρχουν εντός των χαμηλής πίεσης βαθμίδων του στροβίλου. Άρα:

$$m_9 = m_8 + m_5 \quad (6.2.24)$$

$$m_9 \cdot h_9 = m_8 \cdot h_8 + m_5 \cdot h_5 \quad (6.2.25)$$

Το παραγόμενο έργο από το στρόβιλο για τις δύο καταστάσεις υπολογίζεται ως:

$$W_{HPT} = m_4 \cdot (h_4 - h_5) \quad (6.2.26)$$

$$W_{LPT} = m_9 \cdot (h_9 - h_{10}) \quad (6.2.27)$$

Σύμφωνα με τον [30] οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης των στροβίλων υψηλής και χαμηλής πίεσης είναι:

$$\eta_{HPT} = \eta_{td} \cdot \left(\frac{x_4 + x_5}{2} \right) \quad (6.2.28)$$

$$\eta_{LPT} = \eta_{td} \cdot \left(\frac{x_9 + x_{10}}{2} \right) \quad (6.2.29)$$

Όπου η η_{td} ονομαστική απόδοση του στροβίλου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή στο 85%.

Επιπλέον θεωρούμε ότι το συνολικό έργο που παράγεται από τους στροβίλους ή το στρόβιλο διπλής εισαγωγής είναι:

$$W_{gross} = W_{HPT} + W_{LPT} \quad (6.2.30)$$

Από την άλλη το καθαρό παραγόμενο έργο της γεωθερμικής μονάδας ορίζεται ως

$$W_{net} = W_{gross} - W_{CP} - W_{pump} \quad (6.2.31)$$

όπου το W_{CP} είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια για το σύστημα ψύξης.

Σε περίπτωση που το σύστημα ψύξης είναι αερόψυκτο τότε το W_{CP} ορίζεται ως:

$$W_{CP} = W_{ACC} = \frac{m_{air} \cdot \Delta P}{\eta_{isen} \cdot \eta_{motor}} \quad (6.2.32)$$

όπου το m_{air} είναι η ροή μάζας που διαπερνά τον αερόψυκτο εναλλάκτη, το ΔP είναι η διαφορά πίεσης του αέρα μεταξύ εισόδου και εξόδου, η_{isen} ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και το η_{motor} ο βαθμός απόδοσης των ανεμιστήρων του εναλλάκτη.

Τέλος ο βαθμός απόδοσης του κύκλου υπολογίζεται από :

$$\eta = \frac{W_{net}}{m_{w,f} \cdot (h_{in} - h_{out})} \quad (6.2.33)$$

όπου $m_{w,f}$ είναι η ροή μάζας του γεωθερμικού ρευστού μέσα στο διαχωριστή, h_{in} και h_{out} οι ενθαλπίες εισόδου και εξόδου του γεωθερμικού ρευστού.

6.2.2.3. Οργανικός δυαδικός γεωθερμικός κύκλος

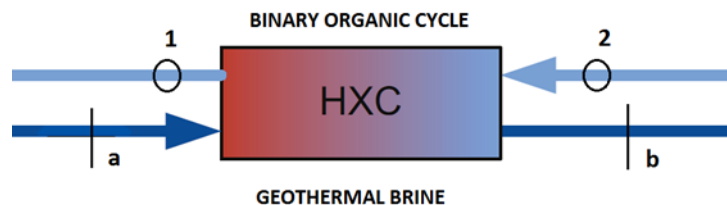
Στον οργανικό γεωθερμικό κύκλο, το γεωθερμικό ρευστό από το φρεάτιο εισαγωγής ανταλλάσει ποσά θερμότητας, μέσω εναλλάκτη, με το εργαζόμενο μέσο του οργανικού κύκλου που συνήθως είναι ρευστά με πιο βελτιωμένες θερμοδυναμικές ιδιότητες απ' ότι το νερό. Παράδειγμα, αποδίδουν ικανοποιητικά σε εγκαταστάσεις που το γεωθερμικό ρευστό είναι χαμηλής ενθαλπίας ή υπάρχει περιορισμός στην παροχή μάζας του από τον ταμιευτήρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το γεωθερμικό ρευστό δεν αλλάζει φάση από υγρό σε ατμό κατά την συναλλαγή του με το εργαζόμενο μέσο εντός του εναλλάκτη. Περισσότερες λεπτομέρειες γι' αυτόν τον θερμικό κύκλο μπορείτε να αναζητήσετε στο κεφάλαιο της γεωθερμίας στο [30] και στα [36],[37].

Αυτό που θα αναλυθεί σε αυτό το σημείο είναι η διεργασία στον εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του γεωθερμικού ρευστού και του εργαζόμενου μέσου του κύκλου όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10.

Εφαρμόζοντας λοιπόν το ισοζύγιο ενέργειας στον εναλλάκτη έχουμε:

$$m_b \cdot (h_a - h_b) = m_{w,f} \cdot (h_1 - h_2) \quad (6.2.34)$$

όπου m_b είναι η ροή μάζας του γεωθερμικού ρευστού, $m_{w,f}$ η ροή μάζας του εργαζόμενου μέσου και h_a, h_b, h_1 και h_2 οι ενθαλπίες των αντίστοιχων ρευμάτων όπως φαίνονται στο Σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10 Εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ γεωθερμικού ρευστού και εργαζόμενου μέσου δυαδικού οργανικού κύκλου.

Η ροή θερμότητας στην επιφάνεια συναλλαγής του εναλλάκτη μεταξύ των δύο ρευστών υπολογίζεται ως εξής:

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD \quad (6.2.35)$$

όπου U ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, A η επιφάνεια του εναλλάκτη και $LMTD$ η μέση λογαριθμική θερμοκρασία που βρίσκεται από:

$$LMTD = \frac{(T_a - T_1) - (T_b - T_2)}{\ln \frac{T_a - T_1}{T_b - T_2}} \quad (6.2.36)$$

Εν τέλει ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q} \quad (6.2.37)$$

6.2.2.4. Διαστασιολόγηση εναλλάκτη ηλιακού πεδίου και γεωθερμικού ρευστού (για όλες τις διατάξεις)

Η διάσταση (UA) ενός εναλλάκτη καθορίζεται κυρίως από τη θερμοκρασιακή διαφορά εισόδου και εξόδου του εργαζόμενου μέσου του ηλιακού πεδίου και του απαιτούμενου ποσού θερμότητας που πρέπει να μεταβιβαστεί στο γεωθερμικό ρευστό. Το απαιτούμενο ποσό θερμότητας καθορίζεται από το ρυθμό απορρόφησής της από το γεωθερμικό κύκλο (W_{des}/η_{des}) και τη δυνητικά παραγόμενη θερμική ενέργεια του ηλιακού πεδίου στο σημείο σχεδιασμού.

Η ηλιακή πολλαπλότητα (solar multiple ή SM) εκφράζει το λόγο της παραγόμενης θερμικής ισχύος από το ηλιακό πεδίο ($q_{sf,des}$) προς την ονομαστική τιμή της απορροφούμενης θερμικής ενέργειας από το γεωθερμικό ρευστό (Q_{des}). Έτσι :

$$q_{duty} = q_{sf,des} - Q_{des} = (SM - 1) \cdot Q_{des} \quad (6.2.38)$$

Όπως σε όλους τους εναλλάκτες, η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο συναλλασσόμενων ρευμάτων, καθορίζεται από τις επιμέρους θερμοκρασιακές διαφορές τους, όπως φαίνεται εδώ:

$$\Delta T_{hx,top} = T_{hot,in} - T_{cold,out} \quad (6.2.39)$$

$$\Delta T_{hx,bot} = T_{hot,out} - T_{cold,in} \quad (6.2.40)$$

Οι ροές μάζας του θερμού (ηλιακού πεδίου) και του ψυχρού ρεύματος (γεωθερμικό ρευστό) καθορίζονται από τη διακύμανση της θερμοκρασίας και την απαιτούμενη θερμική ενέργεια μεταβίβασης στο σημείο σχεδιασμού. Επίσης, η ειδική θερμότητα του εργαζόμενου μέσου του ηλιακού πεδίου υπολογίζεται από τη μέση τιμή της θερμοκρασίας του ρεύματος του. Άρα:

$$m_{hx,hot} = \frac{q_{duty}}{C_{hot} \cdot (T_{hot,in} - T_{hot,out})} \quad (6.2.41)$$

$$m_{hx,cold} = \frac{q_{duty}}{C_{cold} \cdot (T_{cold,out} - T_{cold,in})} \quad (6.2.42)$$

Σύμφωνα με [38] η μέθοδος αποτελεσματικότητας $\epsilon - NTU$ χρησιμοποιεί το ρυθμό θερμοχωρητικότητας (που ορίζεται ως το γινόμενο της ροής μάζας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του κάθε ρευστού) για το θερμό και ψυχρό ρεύμα. Βασικό μέγεθος για τον υπολογισμό του εναλλάκτη είναι ο ρυθμός

θερμοχωρητικότητας εφόσον οι ελάχιστες τιμές του δευτέρου καθορίζουν το ιδανικό μέγεθος του πρώτου. Οπότε ο λόγος θερμοχωρητικότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$q_{hx,max} = C_{min} \cdot (T_{hot,in} - T_{cold,in}) \quad (6.2.43)$$

$$C_R = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (6.2.44)$$

Η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη θερμότητας (ϵ) ποσοτικοποιεί το λόγο της πραγματικής προς την ονομαστική συναλλασσόμενη θερμική ενέργεια. Το μη διαστασιολογημένο μέγεθος του εναλλάκτη δίνεται, με σκοπό την εξακρίβωση των τιμών που λαμβάνει το ϵ μέσω ημι-εμπειρικών σχέσεων για κάθε είδος εναλλάκτη. Για παράδειγμα, η παρακάτω εμπειρική εξίσωση εκφράζει το συσχετισμό μεταξύ ϵ -NTU για εναλλάκτη αντιροής σύμφωνα με [31].

$$NTU = \frac{\log \frac{1-(\epsilon \cdot C_R)}{(1-\epsilon)}}{1 - C_R} \quad (6.2.45)$$

Θεωρούμε ότι η παραπάνω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο αν έχουν οριστεί οι περιορισμοί για το λογάριθμο και τον παρανομαστή. Επιπλέον, αν θεωρηθεί ότι ο ρυθμός θερμοχωρητικότητας ισούται με 1 τότε το NTU υπολογίζεται ως εξής:

$$NTU = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \quad (6.2.46)$$

Αφού επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος – συσχέτιση για τον εύρεση του NTU, ανάλογα με το είδος του εναλλάκτη, υπολογίζεται το διαστασιολογημένο μέγεθος του (UA). Το μέγεθος του UA είναι ανάλογο με το συσχετισμό NTU και την ελάχιστη θερμοχωρητικότητα και ορίζεται από τη σχέση.

$$UA = NTU \cdot C_{min} \quad (6.2.47)$$

Τέλος για διατάξεις όπου ο εναλλάκτης θερμότητας απαιτείται να είναι μεγαλύτερος από το σημείο σχεδιασμού, όπως στην περίπτωση της αναθέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού Σχήμα 6.3 και Σχήμα 6.4 υπολογίζεται σύμφωνα με [25].

$$\frac{UA_{design}}{UA_{off-design}} = \frac{m_{design}}{m_{off-design}}^{0.8} \quad (6.2.48)$$

όπου m η ροή μάζας του ηλιακού πεδίου.

6.2.3. Πρόβλεψη ετήσιας ενεργειακής παραγωγής και αποθήκευσης

Στην περίπτωση υβριδικών διατάξεων παραγωγής ενέργειας, όπως αυτές που μελετώνται στην παρούσα έκθεση, κρίνεται απαραίτητη η παράθεση μαθηματικού μοντέλου για την πρόβλεψη της παραγωγής. Αυτό διότι στόχος στις εγκαταστάσεις αυτές, είναι η εύρυθμη λειτουργία τους, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, χωρίς διακοπές ή οποιαδήποτε άλλη παρεμβολή που θα κλυδώνιζε την αξιοπιστία τους.

Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στη διάταξη όπου ο υπόγειος ταμιευτήρας χρησιμοποιείται και ως συσσωρευτής θερμικής ενέργειας εφόσον χρειάζεται να καθοριστεί η ροή μάζας και όγκου που συναλλάσσει με τον θερμικό κύκλο.

Η πρόβλεψη της ετήσιας παραγωγής θεωρούμε ότι γίνεται σε ωριαία βάση με σύνολο 8760 τιμών. Για κάθε ωριαία τιμή λοιπόν, ισχύει ότι η θερμική ενέργεια που αποδίδει το ηλιακό πεδίο είναι:

$$q_{solar} = SM \cdot A_{solar} \cdot (q_{abs} - q_{res} - q_{pipe}) \quad (6.2.49)$$

όπου SM είναι η ηλιακή πολλαπλότητα και εκφράζει το λόγο της παραγόμενης θερμικής ισχύος από το ηλιακό πεδίο προς την ονομαστική τιμή της ζητούμενης θερμικής ενέργειας από το γεωθερμικό ρευστό.

Η καθαρή ροή μάζας του θερμού γεωθερμικού ρεύματος που προκύπτει από την ανταλλαγή ποσών θερμότητας (προθερμασμένο ή αναθερμασμένο) είναι:

$$m_w = \frac{q_{solar}}{h_{in} - h_{out}} \quad (6.2.50)$$

Η ροή μάζας του γεωθερμικού ρευστού που έρχεται από το φρεάτιο παραγωγής ορίζεται ως:

$$m_{geo} = m_w - m_{w,f} \quad (6.2.51)$$

όπου $m_{w,f}$ είναι η ροή μάζας του γεωθερμικού ρευστού μέσα στο διαχωριστή.

Ο όγκος του επιστρέφοντος γεωθερμικού ρευστού που αποθηκεύεται στον υπόγειο ταμιευτήρα στην περίπτωση της αναθέρμανσης είναι:

$$V_w[i] = V_w[i - 1] + \left(\frac{3600 \cdot m_{w,geo}}{\rho_w} \right) \quad (6.2.52)$$

θεωρούμε ότι i είναι μία οποιαδήποτε χρονική στιγμή και $i - 1$ η αμέσως προηγούμενη της. Στην παραπάνω σχέση, όπου ρ_w είναι η πυκνότητα του νερού.

Η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια του θερμικού κύκλου είναι συνάρτηση της ροής μάζας του γεωθερμικού ρευστού εντός του διαχωριστή $m_{w,f}$ και της θερμοκρασίας του Τα. Έτσι η ετήσια ηλεκτρική παραγόμενη ενέργεια της υβριδικής εγκατάστασης δίνεται από τον τύπο:

$$E = \sum_{i=1}^{i=8760} (W_{gross,annual} - W_{CP} - W_{pump,geo}) \quad (6.2.53)$$

Ο αριθμός των απαιτούμενων φρεατίων για την παραγωγή προκύπτει από:

$$N_{hotwell} = \left(\frac{max \cdot (m_{w,geo}[i]_{i=1}^{i=8760})}{m_{w,well,max}} \right) \quad (6.2.54)$$

όπου $m_{w,well,max}$ είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ροή μάζας ανά φρεάτιο παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί, ότι θα πρέπει να ανοιχτούν, αντίστοιχου αριθμού φρεάτια επανεισαγωγής, ώστε να λειτουργεί εύρυθμα η υβριδική εγκατάσταση, χωρίς μεταβολές στη ροή μάζας του γεωθερμικού ρευστού.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπ'όψιν και χρησιμοποιείται ευρέως για τη διαστασιολόγηση των μονάδων CSP, είναι η ώρες αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας (H). Αυτός ο όρος είναι απαραίτητος, ιδίως για τις διατάξεις αναθέρμανσης, όπου το επιστρεφόμενο γεωθερμικό ρευστό φέρει επιπρόσθετη θερμική ενέργεια από το ηλιακό πεδίο. Ορίζεται ως ο αριθμός των ωρών λειτουργίας της εγκατάστασης σε πλήρες φορτίο κατά την περίοδο που δεν συνδράμουν με θερμική ενέργεια τα CSP.

Η σχέση είναι ως εξής:

$$H = \frac{max \cdot (V_w[i]_{i=1}^{i=8760})}{\frac{3600 \cdot m_{w,f,D}}{\rho_w}} \quad (6.2.55)$$

7. Εφαρμογές υβριδικών ηλιο - γεωθερμικών εγκαταστάσεων

Όπως γίνεται διακριτό από το κεφάλαιο 6, οι διατάξεις των υβριδικών ηλιο-γεωθερμικών μονάδων ποικίλουν ανάλογα με το είδος της γεωθερμικής πηγής (υψηλής ή χαμηλής ενθαλπίας) και τη διαθεσιμότητα, του προς εκμετάλλευση χώρου για τη διάνοξη των φρεατίων και την εγκατάσταση των ηλιακών συλλεκτών. Προκειμένου να επιτευχθεί η υβριδοποίηση των δύο τεχνολογιών κρίνεται απαραίτητο η ύπαρξη εγγύτητας των δύο εγκαταστάσεων (ηλιοθερμική και γεωθερμική μονάδα) σε κοινό χώρο ιδίως για τις περιπτώσεις στις οποίες οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για την υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου του θερμικού κύκλου.

Όπως προαναφέρθηκε, η υβριδοποίηση των δύο τεχνολογιών αποτελεί ιδανική λύση λόγω της υψηλής διαθεσιμότητας και του ισχυρού συσχετισμού τους μέσω της άμεσης παραγωγής θερμικής ενέργειας. Όμως για την καλύτερη κατανόηση του θέματος κρίνεται απαραίτητη η παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του συνδυασμού των δύο τεχνολογιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι μία εκτενής τεχνικοοικονομική ανάλυση κρίνεται απαραίτητη με σκοπό την αποσαφήνιση των λεπτομερειών, που θα κρίνουν μία εγκατάσταση τέτοιου είδους επενδυτικά ελκυστική ή όχι.

7.1. Πλεονεκτήματα υβριδικών ηλιο - γεωθερμικών συστημάτων

Με βάση λοιπόν τις [26],[39],[40] μέσω των υβριδικών ηλιο-γεωθερμικών μονάδων δύναται :

- Να αυξηθεί η θερμοκρασία του εισαγόμενου γεωθερμικού ρευστού ή του παραγόμενου ατμού στην περίπτωση της υπερθέρμανσης. Για παράδειγμα οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες μπορούν να προσεγγίσουν θερμοκρασίες άνω των 500°C, με απότοκο την αναλογική αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού στην είσοδο του στροβίλου.
- Να αυξηθεί η ολική απόδοση των γεωθερμικών μονάδων με την αντίστοιχη αύξηση θερμοκρασίας στο εισαγόμενο γεωθερμικό τήγμα (προθέρμανση) .
- Να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς και κατ' επέκταση η ενεργειακή παραγωγή.
- Να αυξηθεί ο βαθμός εκμετάλλευσης των γεωθερμικών πόρων, αξιοποιώντας πηγές χαμηλότερης ενθαλπίας, μέσω της διαθέσιμης θερμικής ενίσχυσης των ηλιακών συλλεκτών.
- Να αξιοποιηθεί το γεωθερμικό ρευστό ως μέσο αποθήκευσης της παραγόμενης θερμικής ενέργειας των ηλιακών συλλεκτών [25].
- Να αυξηθεί ο συντελεστής ισχύος (capacity factor) της εγκατάστασης μέσω της αύξησης της παροχής του παραγόμενου ατμού από την προσθήκη της ηλιακής θερμικής ενέργειας.
- Να ελαχιστοποιήσει το φαινόμενο της διακοπτόμενης λειτουργίας της μεμονωμένης μονάδας γεωθερμίας, μέσω προσαρμογής του παραγόμενου φορτίου σε συνδυασμό με την προσθήκη των ηλιακών συλλεκτών. Συγκεκριμένα, για τις μονάδες του δυαδικού οργανικού κύκλου (O.R.C.) που συνήθως χρησιμοποιούν αερόψυκτους συμπυκνωτές, το απαγόμενο φορτίο τους τείνει να μειώνεται τη διάρκεια της ημέρας και να αυξάνεται τη νύχτα που ο αέρας ψυχραίνει. Με την προσθήκη των ηλιακών συλλεκτών αυξάνεται η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας της υβριδικής μονάδας ιδιαίτερα μέσα στη μέρα που υπάρχει και η μεγαλύτερη ζήτηση.
- Να βελτιστοποιηθεί το χωροταξικό πρόβλημα που προκύπτει από τις μεμονωμένες μονάδες των ηλιακών συλλεκτών. Με την υβριδοποίηση των δύο τεχνολογιών, μειώνεται ο χώρος που απαιτείται για να παράγεται η ίδια ισχύς με το να λειτουργούσε μόνο η ηλιο-θερμική εγκατάσταση.
- Να προληφθεί η επικάλυψη των στερεών αλάτων και μετάλλων, που συνηθίζεται στις γεωθερμικές εγκαταστάσεις, διότι αυξάνεται η διαλυτότητα τους με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- Να μειωθεί το διακύβευμα της αβεβαιότητας που προκαλείται από τη σταδιακή μείωση της αποδοτικότητας του γεωθερμικού ταμιευτήρα, μέσω της αναλογικής επέκτασης του ηλιακού πεδίου. Μία τέτοια ενέργεια τείνει να

του σπουδαστή Χάρη Γεωργίου

αυξήσει την ευελιξία της υβριδικής εγκατάστασης εφόσον η παραγόμενη ισχύς δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωθερμική πηγή, με όλα τα αρνητικά στοιχεία που υπεισέρχονται σε αυτήν.

- Να μειώσει το λειτουργικό κόστος, το κόστος συντήρησης και το ολικό κόστος, εφόσον δε θα χρειάζονται να κατασκευαστούν δύο ξεχωριστές εγκαταστάσεις αλλά μία με πολλά μέρη κοινά (μονάδα παραγωγής-ισχύος, βοηθητικές κατασκευές, διοικητικό κτήριο, σύστημα ψύξης, προσωπικό).

7.2. Μειονεκτήματα υβριδικών ηλιο – γεωθερμικών συστημάτων

Παρόλα τα οφέλη που εντοπίζονται και προτρέπουν την κατασκευή ηλιο-γεωθερμικών σταθμών, τέτοιου είδους εγχειρήματα, δεν παύει να εμφανίζουν και μειονεκτήματα. Τα σημαντικότερα από αυτά καταγράφονται παρακάτω.

- Η πολυπλοκότητα των υβριδικών συστημάτων, στη παραγωγή ενέργειας, μπορεί να επιφέρει αύξηση στο κόστος συντήρησης.
- Κατά τη λειτουργία μίας τέτοιας μονάδας, θεωρείτε υποχρεωτική η συνεχής παρακολούθηση και προσαρμογή της γεωθερμικής ενέργειας από το φρεάτιο παραγωγής σε σχέση με την ηλιο-θερμική ενέργεια που προσάγεται στο σύστημα από το ηλιακό πεδίο. Μία τέτοια ενέργεια στην πράξη αποδεικνύεται πολύπλοκη και απαιτεί προηγμένο εξοπλισμό και συστήματα ελέγχου.
- Το αρχικό κόστος της επένδυσης τείνει να είναι αρκετά υψηλό με απόρροια το εγχείρημα να θεωρηθεί μη ανταγωνιστικό βραχυπρόθεσμα.
- Το κόστος των ηλιο-γεωθερμικών συστημάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ένας από τους σημαντικότερους είναι ότι η χαμηλή πίεση και θερμοκρασία του υπόγειου ταμιευτήρα, μπορεί να χρειαστεί περισσότερη ενέργεια από το ηλιακό πεδίο και κατ'επέκταση να απαιτείται η κατασκευή μεγαλύτερου πεδίου συλλεκτών. Αυτό δύναται να αυξήσει τα επενδυτικά κεφάλαια ιδίως αν χρησιμοποιηθεί μονάδα παραγωγής δυαδικού οργανικού κύκλου.

7.3. Προκλήσεις και τεχνικά προβλήματα των υβριδικών ηλιο – γεωθερμικών συστημάτων

Από την παραπάνω ανάλυση μπορούμε να συνοψίσουμε, ότι οι υβριδικές ηλιο-γεωθερμικές μονάδες συγκεντρώνουν πολλά οφέλη και μπορούν να θεωρηθούν αρκετά ανταγωνιστικές έναντι των υπολοίπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, είναι αποδοτικότερες από τις αντίστοιχες μεμονωμένες γεωθερμικές και ηλιοθερμικές μονάδες, εφόσον αθροίζουν τα πλεονεκτήματα τους και επικαλύπτουν

τα αρνητικά τους στοιχεία, σε όρους οικονομικού κέρδους και θερμικής απόδοσης. Μολαταύτα, υβριδικές μονάδες τέτοιου τύπου δεν έχουν υλοποιηθεί πέραν ελαχίστων, που θα παρατεθούν στην επόμενη ενότητα. Αυτό, διότι αυτές οι μονάδες αντιμετωπίζουν σημαντικές τεχνικές και μη προκλήσεις και αγκυλώσεις που τις καθιστούν εξαιρετικά δύσκολες στο σχεδιασμό και στη λειτουργία. Κάποιες από αυτές είναι:

- Όπως παρατηρήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι διατάξεις των υβριδικών μονάδων ποικίλουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού πεδίου και το συσχετισμό τους με τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Παρά τις εκτενείς μελέτες σχεδιασμού τέτοιων μονάδων, που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια, η υλοποίηση τους παραμένει σε χαμηλό επίπεδο κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας τους και του υψηλού αρχικού κόστους.
- Ο κύριος μηχανισμός μιας υβριδικής εγκατάστασης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του προσαχθέντος ή επιστρέφοντος γεωθερμικού ρευστού, από ή προς τον θερμικό κύκλο και η διατήρηση του συντελεστή ισχύος (capacity factor) του ηλιακού πεδίου σε υψηλά επίπεδα. Ωστόσο καθορίζεται πάντα στους υπολογισμούς, κατά τη σχεδίαση, η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού στην οποία μπορεί να ανέλθει, χωρίς να σημειωθούν σημαντικά προβλήματα επικαθίσεων. Σημαντικό εμπόδιο αποτελεί το υψηλό κόστος των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, ώστε να αντέχουν και να διατηρούν τις υψηλές θερμοκρασίες που θα αναπτυχθούν στο ηλιακό πεδίο και στα επιμέρους στοιχεία της γεωθερμικής μονάδας.
- Παρόλο που τα ηλιο-γεωθερμικά συστήματα μπορούν να αυξήσουν το συντελεστή ισχύος των ηλιοθερμικών μονάδων, παραμένουν εξαρτώμενα στη μεταβολή των καιρικών συνθηκών και ιδίως στη διαθεσιμότητα του ηλίου. Επίσης, εγκυμονεί ο κίνδυνος εμφάνισης ζημίας στην επένδυση σε περιπτώσεις παρατεταμένης νέφωσης, για μεγάλο χρονικό διάστημα, που δεν θα επιτρέπει τη λειτουργία του ηλιακού πεδίου ούτε μέχρι τα τεχνικά ελάχιστα όρια.
- Μεγάλη πρόκληση αποτελεί και η ενσωμάτωση του ηλιακού πεδίου σε Ενισχυμένα Γεωθερμικά Συστήματα (Enhanced Geothermal Systems) εφόσον αυτά, όπως έγινε αναφορά στο κεφάλαιο της Γεωθερμίας, σχετίζονται με πολλές γεωθερμικές πηγές που δεν διαθέτουν κατάλληλες διαμορφώσεις ρηγματώσεων ή ταμιευτήρα για να φιλοξενήσουν επαρκή ποσότητα γεωθερμικού ρευστού που θα μπορούσε να λειτουργήσει μία μονάδα παραγωγής ενέργειας. Η πρόκληση σε αυτό το σχεδιασμό είναι και πάλι το υψηλό κόστος εκκίνησης, καθώς ένα EGS απαιτεί επιπρόσθετη ποσότητα νερού, ώστε να αυξηθούν τα κοιτάσματα ρευστού εντός του πεδίου. Για την επέκταση αυτή και την ορθή λειτουργία του συστήματος αυτού απαιτείται διάνοιξη περισσότερων φρεατίων αυξάνοντας το συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Η προσθήκη του ηλιακού πεδίου θα μπορούσε να μειώσει το ολικό κόστος της εγκατάστασης, λόγω της σημαντικής

ενίσχυσης του με θερμικό φορτίο. Δυστυχώς όμως, η μείωση του κόστους μπορεί να μην επαρκεί ώστε να χαρακτηριστεί μία τέτοια υβριδική μονάδα, οικονομικά βιώσιμη.

- Αδιαμφισβήτητη η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία ήπια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ορισμένα ηλιακά συστήματα όμως, όπως PFC και HFC, μπορούν να προκαλέσουν περιβαλλοντικά προβλήματα κυρίως στα πτηνά. Ένα φαινόμενο βέβαια που μπορεί να προκληθεί από οποιαδήποτε επιφάνεια κατοπτρισμού του ηλίου, που εντείνεται όμως στα ηλιακά συστήματα λόγω της εκτεταμένης συσσώρευσης κατόπτρων προς μία κατεύθυνση σε μεγάλη πυκνότητα.

Όπως είναι ξεκάθαρο από τα προηγούμενα, τα ηλιο-γεωθερμικά συστήματα συγκεντρώνουν πλήθος πλεονεκτημάτων συγκρινόμενα με τις μεμονωμένες μονάδες ηλιοθερμίας και γεωθερμίας. Για την υλοποίηση τους βέβαια χρειάζεται να προσπελαστούν διάφορες προκλήσεις και προβλήματα που προαναφέρθηκαν. Παρόλα αυτά στις μέρες μας, ελάχιστες εγκαταστάσεις αυτού του τύπου έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν σε δοκιμαστική φάση. Παρόμοιες εγκαταστάσεις θα μπορούσαν να μας προμηθεύσουν με πλήθος παρατηρήσεων και δεδομένων με σκοπό την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας τους. Στην επόμενη ενότητα διακρίνονται ορισμένες από αυτές.

7.4. Παραδείγματα υλοποιημένων υβριδικών ηλιο-γεωθερμικών εγκαταστάσεων

Οι περισσότερες πρόσφατες έρευνες και δημοσιεύσεις [21],[16],[26],[39],[40] επικεντρώνονται κυρίως σε υποθετικά μοντέλα, παρά σε διερεύνηση πραγματικών εγκαταστάσεων. Αυτό συμβαίνει, διότι πρέπει να προσπελαστούν όλες εκείνες οι προκλήσεις και τα προβλήματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν συντόμως οι υλοποιημένες υβριδικές εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο, αλλά και μία που βρίσκεται στη φάση των ερευνών και τη διάνοιξη φρεατίων. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε αυτές που έχουν άμεση και έμμεση συσχέτιση μεταξύ τους. Οι άμεσης συσχέτισης είναι οι εγκαταστάσεις όπου η γεωθερμική μονάδα συνδυάζεται με ένα ηλιοθερμικό σύστημα τύπου CSP, δηλαδή συγκεντρωτικών συλλεκτών όπου η έξοδος τους είναι θερμική ενέργεια. Οι έμμεσης συσχέτισης από την άλλη είναι οι εγκαταστάσεις όπου γίνεται απλά μια προσθήκη ενός φωτοβολταϊκού πάρκου σε κοινό χώρο με τη γεωθερμική μονάδα και συνεισφέρει, είτε στο παρασιτικό φορτίο της μονάδας ισχύος, είτε στην ολική έξοδο ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης.

7.5. Γεωθερμικές μονάδες με προσθήκη φωτοβολταϊκών PV

7.5.1. Γεωθερμικό πεδίο «The Geysers», Καλιφόρνια, ΗΠΑ

Σύμφωνα με τη δημοσίευση [41] των Eneedy and Rudisill (2009), στο γεωθερμικό πεδίο The Geysers στην Καλιφόρνια έγινε προσθήκη φωτοβολταϊκού πάρκου μεγέθους 1MW (Σχήμα 7.2), ώστε να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τις αντλίες της γεωθερμικής μονάδας. Η προσθήκη βέβαια αυτή, δεν πετυχαίνει περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού, αλλά συνδράμει αποτελεσματικά στην αύξηση της καθαρής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της ανανεώσιμης πηγής. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε θετική οικονομική απόδοση της επένδυσης, ιδίως τις περιόδους όπου η διαρκείς ηλιοφάνεια επέτρεπε υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό πάρκο.



Σχήμα 7.1 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στο The Geysers στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ. (Eneedy and Rudisill (2009)) [41].



Σχήμα 7.2 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στο The Geysers στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ. (Eneedy and Rudisill (2009)) [41]

7.5.2. Γεωθερμικό πεδίο «Tungsten Mountain», Νεβάδα, ΗΠΑ

Η εταιρία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας Ormat Technologies Inc. ανήγγειλε στις 1 Ιουλίου 2019 την έναρξη της δοκιμαστικής λειτουργίας του νέου της φωτοβολταϊκού πάρκου 7 MW (φάτο 1.2) που προστέθηκε στην ήδη υπάρχουσα γεωθερμική εγκατάσταση των 26 MW, στο βουνό Tungsten της Νεβάδα. Η προσθήκη του φωτοβολταϊκού πάρκου εξυπηρετεί την κάλυψη του παρασιτικού φορτίου της γεωθερμικής εγκατάστασης κατά 25% μέσα στο χρόνο, αυξάνοντας έτσι την καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη γεωθερμική πηγή. Αυτός ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών αποτελεί την πρώτη απόπειρα της εταιρείας Ormat και σύμφωνα με το διευθύνοντα σύμβουλό της, Isaac Angel, θα αποτελέσει πρότυπο για τα μελλοντικά υβριδικά έργα που σχεδιάζει να υλοποιήσει προς αυτή την κατεύθυνση [42].



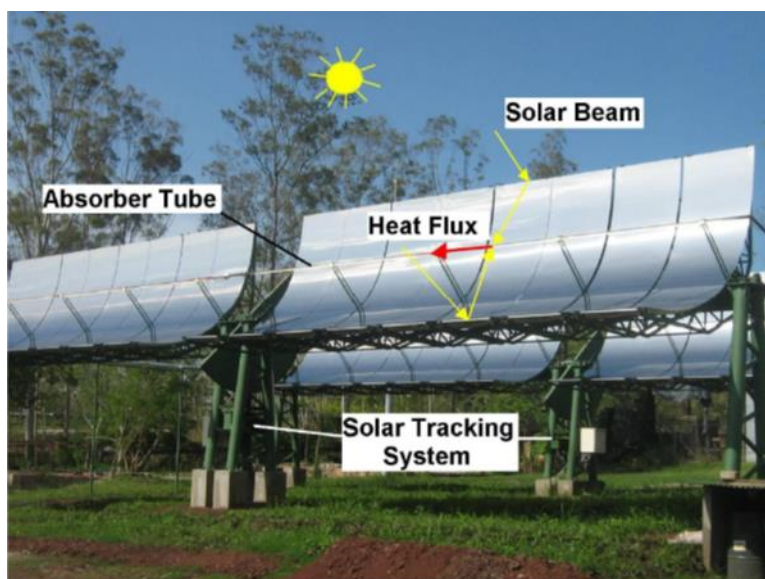
Σχήμα 7.3 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στο Tungsten Mountain της Νεβάδα, ΗΠΑ [42].

7.5.3. Γεωθερμικό πεδίο «Ahuachapan», Ελ Σαλβαδόρ

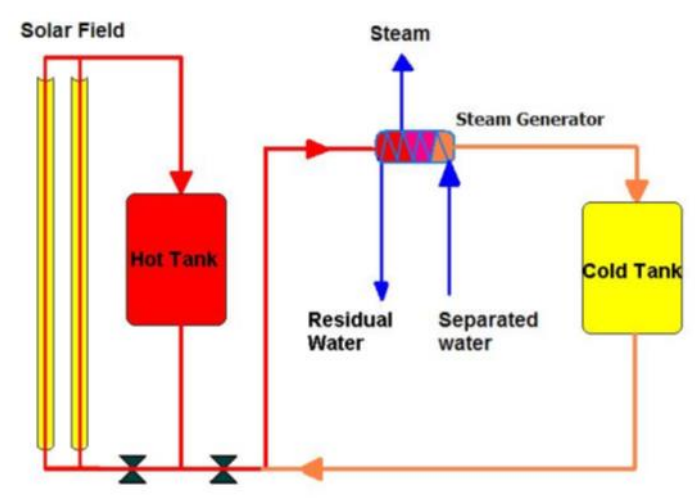
Η παλαιότερη υλοποιημένη προσπάθεια συνδυασμού μίας γεωθερμικής μονάδας με μία συστοιχία παραβολικών ηλιακών συλλεκτών για θερμική ενίσχυση της πρώτης, πραγματοποιήθηκε το 2008 στο γεωθερμικό πεδίο Ahuachapan του Ελ Σαλβαδόρ από τη δημόσια επιχείρηση ηλεκτρισμού Lageo [43]. Η μέγιστη θερμοκρασία του ταμιευτήρα του πεδίου κυμαίνεται στους 225 °C, με τη γεωθερμική μονάδα να παράγει 95MW χρησιμοποιώντας δύο single flash και μία double flash ως διατάξεις ατμοποίησης του θερμικού κύκλου[30],[35]. Οι συνθήκες στις οποίες βρίσκεται το γεωθερμικό ρευστό στα πηγάδια παραγωγής είναι:

- Πίεση: 4 έως 7 bar
- Θερμοκρασία ρευστού: 154 – 160 °C
- Ποιότητα εισερχόμενου ατμού (ξηρότητα- λόγος ατμού/νερού): 15-20%

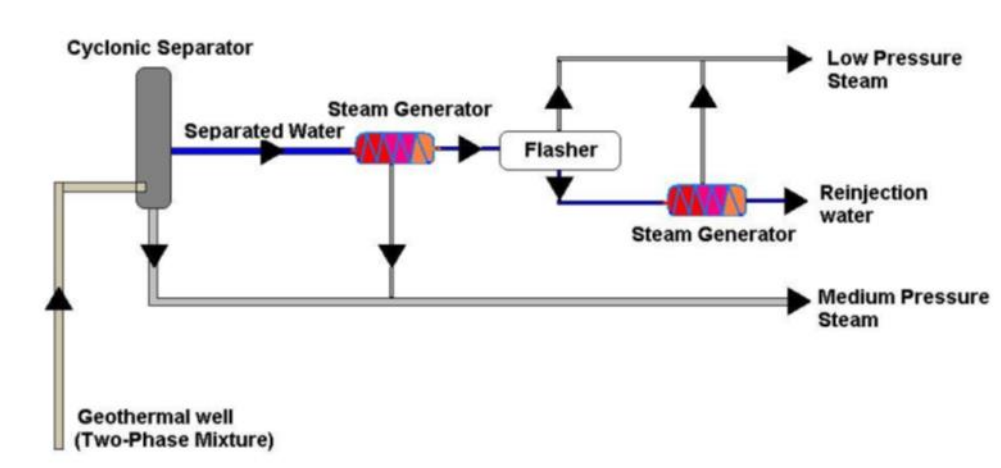
Η διάταξη των παραβολικών συλλεκτών αποτελείται από ένα ηλιακό πεδίο διαστάσεων 300m * 400m (Σχήμα 7.4) όπου παράγεται ατμός με ρυθμό 5,8 kg/s λειτουργώντας από τις 9 το πρωί μέχρι τις 5 το απόγευμα. Κατ' αναλογία, το ηλιακό πεδίο, αν λειτουργούσε αυτόνομα με ξεχωριστή μονάδα ισχύος, θα μπορούσε να παράξει 2,5 MWe, αν θεωρήσουμε ότι ο ατμοστρόβιλος έχει πίεση εισόδου 4,4 bar. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο παραγόμενος ατμός από το ηλιακό πεδίο προστίθεται στο διαχωρισμένο ξηρό ατμό από τα φρεάτια παραγωγής της γεωθερμικής μονάδας αυξάνοντας έτσι την ποσότητα του ατμού που φθάνει στο στρόβιλο (Σχήμα 7.5 & Σχήμα 7.6) . Αξίζει να σημειωθεί, ότι λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας (4,7 kWh/m²) και της μεγάλης διάρκειας ηλιοφάνεια (12 ώρες), σε συνδυασμό με την πλούσια γεωθερμική ενέργεια που διαθέτει το Ελ Σαλβαδόρ, ευνοείται η δημιουργία υβριδικών εγκαταστάσεων με τη χρήση συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.



Σχήμα 7.4 Εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών στο Ahuachapan στο Ελ Σαλβαδόρ [43].



Σχήμα 7.5 Σκαρίφημα κυκλώματος του εργαζόμενου μέσου του Heating transfer fluid (HTF) ηλιακού πεδίου [43].



Σχήμα 7.6 Σκαρίφημα κυκλώματος ηλιο-γεωθερμικής εγκατάστασης στο Ahuachapan, στο Ελ Σαλβαδόρ [43].

7.5.4. Γεωθερμικό πεδίο «Stillwater», Νεβάδα, ΗΠΑ

Η εγκατάσταση της Enel Green Power στο Stillwater της Νεβάδα αποτελεί την πρώτη υβριδική εγκατάσταση στον κόσμο που συνδυάζει τρεις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας στον ίδιο χώρο, τη γεωθερμική (δυναμικού οργανικού κύκλου), την ηλιοθερμική και τη φωτοβολταϊκή ενέργεια (Σχήμα 7.10). Το 2015 έγινε η προσθήκη του ηλιακού πεδίου συγκεντρωτικών συλλεκτών 17 MWth στην κύρια γεωθερμική εγκατάσταση των 33 MWe που προϋπήρχε. Με αυτόν τον τρόπο, προστέθηκαν αναλογικά άλλα 2 MWe στην ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση.

Το σύστημα των συγκεντρωτικών συλλεκτών αποτελείται από παραβολικά κάτοπτρα, τα οποία εστιάζουν την ακτινοβολία του ηλίου σε έναν κεντρικό σωλήνα κενού, απ' όπου το απομεταλλωμένο νερό που τον διαρρέει μεταφέρει τη θερμική

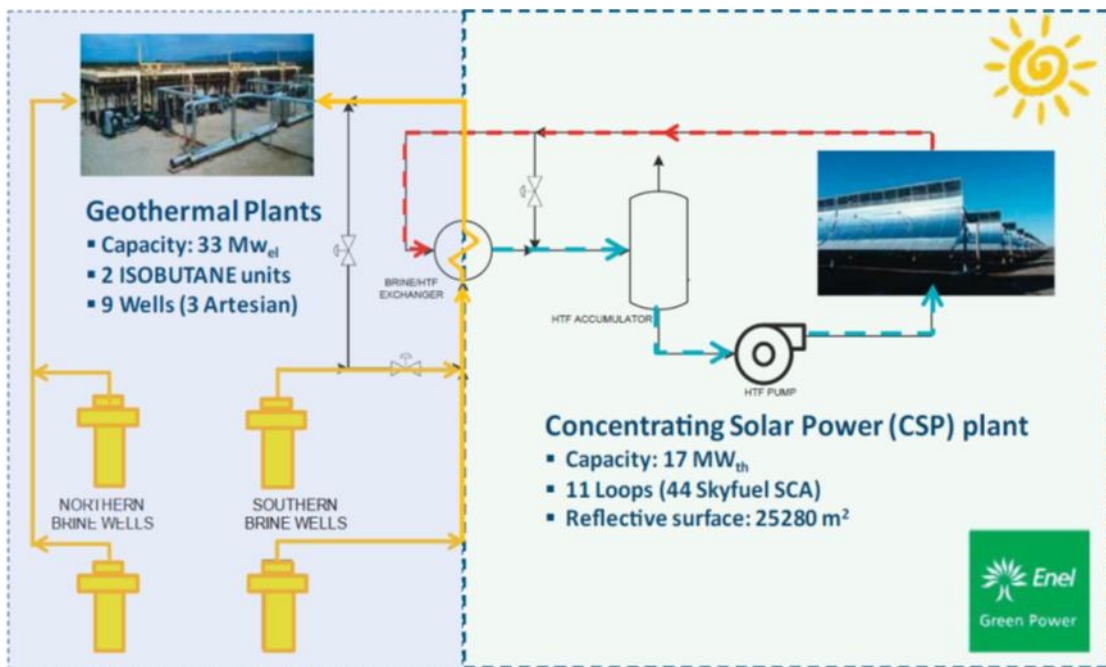
ενέργεια στο σύστημα τροφοδοσίας του γεωθερμικού κύκλου. Η θερμική ενέργεια που συλλέγεται προστίθεται στο εισαγόμενο γεωθερμικό ρευστό από τα φρεάτια παραγωγής, ώστε να ενισχυθεί το ολικό θερμικό φορτίο που θα φτάσει τελικά στο δυαδικό οργανικό κύκλο, με εργαζόμενο μέσο το ισοβουτάνιο (Σχήμα 7.7).

Συγκεκριμένα, το ηλιακό πεδίο των παραβολικών συλλεκτών αποτελείται από:

- 22 γραμμές (11 βρόχοι) παραβολικών συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών. Η κάθε γραμμή είναι 200 μέτρα και κάθε παραβολικό κάτοπτρο 6 μέτρα. Η ολική επιφάνεια του έργου μαζί με τα παρελκόμενα είναι 80937m².
- 2772 κομμάτια καθρεπτών
- 24778m² καθαρής ανακλώμενης επιφάνειάς παραβολικών κατόπτρων που έχουν τη δυνατότητα να συγκεντρώνουν τις ακτίνες του ηλίου μέχρι 75 φορές πάνω στον απορροφητή.

Σύμφωνα με [21],[22],[44], η εταιρεία Enel ξεκίνησε αυτό το εγχείρημα ως απόρροια των προσπαθειών του τμήματος καινοτομίας της. Σκοπός του ήταν να εντείνει τις προσπάθειες του, πάνω στις υβριδικές εφαρμογές που θα αύξαναν τη διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στον ίδιο χώρο είναι εγκατεστημένο από το 2012 και ένα φωτοβολταϊκό πάρκο 26 MW που αναπτύχθηκε με την ίδια σκοπιμότητα. Οι απολαβές από την προσθήκη των CSP είναι αρκετές με τις σημαντικότερες να είναι:

- Η αύξηση της παραγωγής, όταν η θερμική απόδοση της εγκατάστασης είναι στο ελάχιστο
- Δυνατότητα μεγαλύτερης παροχής ενέργειας της περιόδους υψηλής ζήτησης
- Μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και μείωση των εκπεμπόμενων αερίων
- Βέλτιστη διαχείριση της γεωθερμικής πηγής και μακροπρόθεσμη μείωση του λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης.



Σχήμα 7.7 Σκαρίφημα διάταξης των ηλιακών συλλεκτών της μονάδας παραγωγή ενέργειας Stillwater της Νεβάδα, ΗΠΑ. (Stillwater Hybrid Geo) [21].



Σχήμα 7.8 Ηλιακό πεδίο παραβολικών συγκεντρωτικών συλλεκτών (CSP) στο Stillwater της Νεβάδα, ΗΠΑ. (Enel's Stillwater video snapshot) [45].



Σχήμα 7.9 Πεδίο φωτοβολταϊκών πλαισίων στο Stillwater της Νεβάδα, ΗΠΑ. (Enel's Stillwater video snapshot) [45].



Σχήμα 7.10 Εγκατάσταση τριών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο Stillwater της Νεβάδα, ΗΠΑ. (Enel's Stillwater video snapshot) [45].

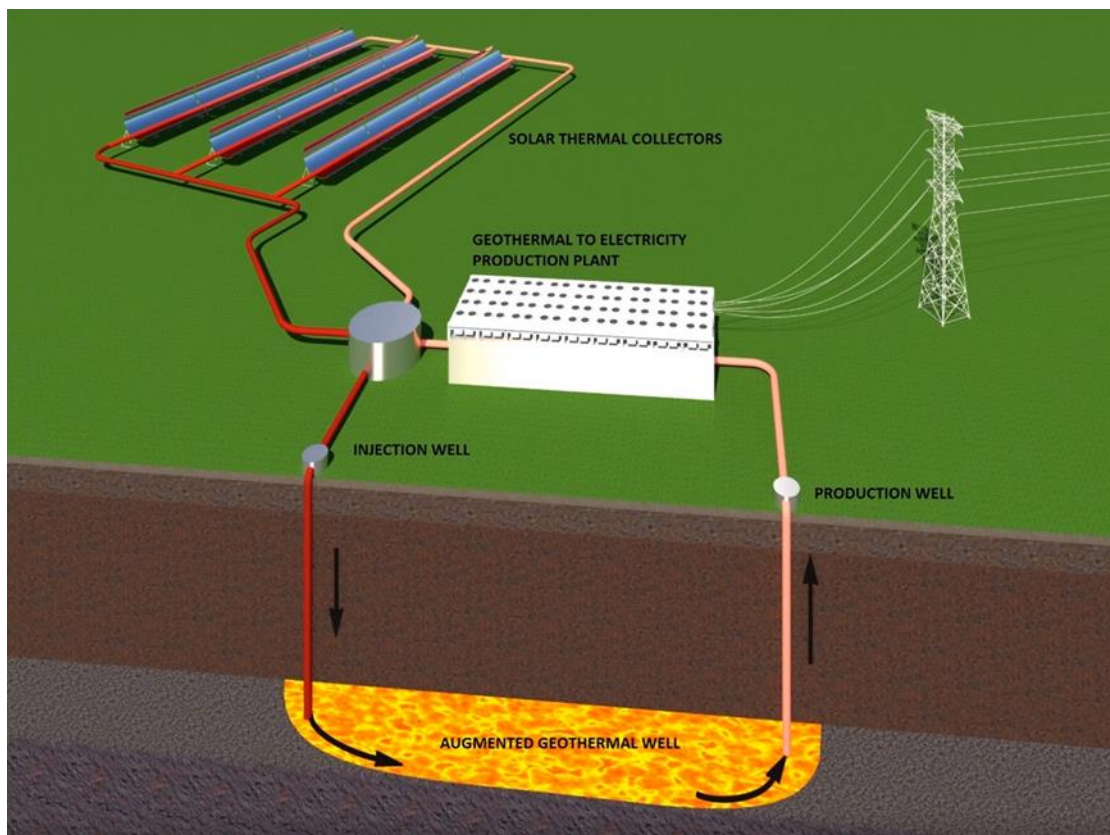
7.6. Παράδειγμα υβριδικής ηλιο-γεωθερμικής εγκατάστασης υπό κατασκευή.

Εν αντιθέσει με τους παραπάνω υλοποιημένους σχεδιασμούς, πολλές πρωτοποριακές ιδέες για την υβριδοποίηση των δύο τεχνολογιών παραμένουν στην αδράνεια, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής τους. Οι κύριοι λόγοι γι' αυτό, σχετίζονται άμεσα με το υψηλό κόστος εκκίνησης, την έλλειψη εμπιστοσύνης των επενδυτών, λόγω του υψηλού ρίσκου και τα υπόλοιπα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν.

Παρόλα αυτά, το Μάιο του 2019 δημοσιεύτηκε η [25] από το Εθνικό Εργαστήριο του Αϊντάχο (INL) των ΗΠΑ, όπου επηρέασε σημαντικά μία μερίδα επιστημόνων που ασχολούνται με τη γεωθερμία. Οι τελευταίοι, έχοντας ως βάση την ερευνά του εργαστηρίου, ίδρυσαν την εταιρία UC-Won με σκοπό τη δημιουργία μίας σειράς υβριδικών έργων παρόμοιων με εκείνων που παρουσιάζονται στην έκθεση του INL.

Η πρωτοποριακή τεχνολογία της UC-Won ονομάζεται RenewGeo και έχει ως στόχο τη συλλογή ηλιακής ενέργειας σε μορφή θερμότητας και την εισαγωγή της στο υπέδαφος. Με αυτόν τον τρόπο, δύναται να δημιουργήσουν μία σύνθετη γεωθερμική πηγή, η οποία θα αποθηκεύει θερμότητα στις υπόγειες κοιλότητες του εδάφους, δημιουργώντας έτσι μία θερμική μπαταρία. Αυτού του είδους η θερμική αποθήκευση θεωρείται μη επιζήμια για το περιβάλλον, διότι σε κανένα στάδιο της λειτουργίας της δεν εκλύονται επικίνδυνα αέρια. Επίσης δεν απαιτείται η εξόρυξη επικίνδυνων υλικών και μετάλλων, όπως συμβαίνει με τις ηλεκτροχημικές μπαταρίες, που μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό και το περιβάλλον.

Σύμφωνα με τους υπεύθυνους του προγράμματος η εταιρεία έχει αποκτήσει δικαιώματα για εκμετάλλευση ήδη υπαρχόντων γεωτρήσεων στην περιοχή της Νεβάδα των ΗΠΑ έκτασης 14km² που πληρούν τις προϋποθέσεις του σχεδίου. Επιπρόσθετα, βρίσκεται σε διαπραγματεύσεις με εταιρεία γεωθερμικών ερευνών, ώστε να προμηθευτεί τον απαραίτητο εξοπλισμό για τις αντλητικές διατάξεις της για να ξεκινήσουν οι πρώτες δοκιμές αξιοπιστίας των φρεατίων.



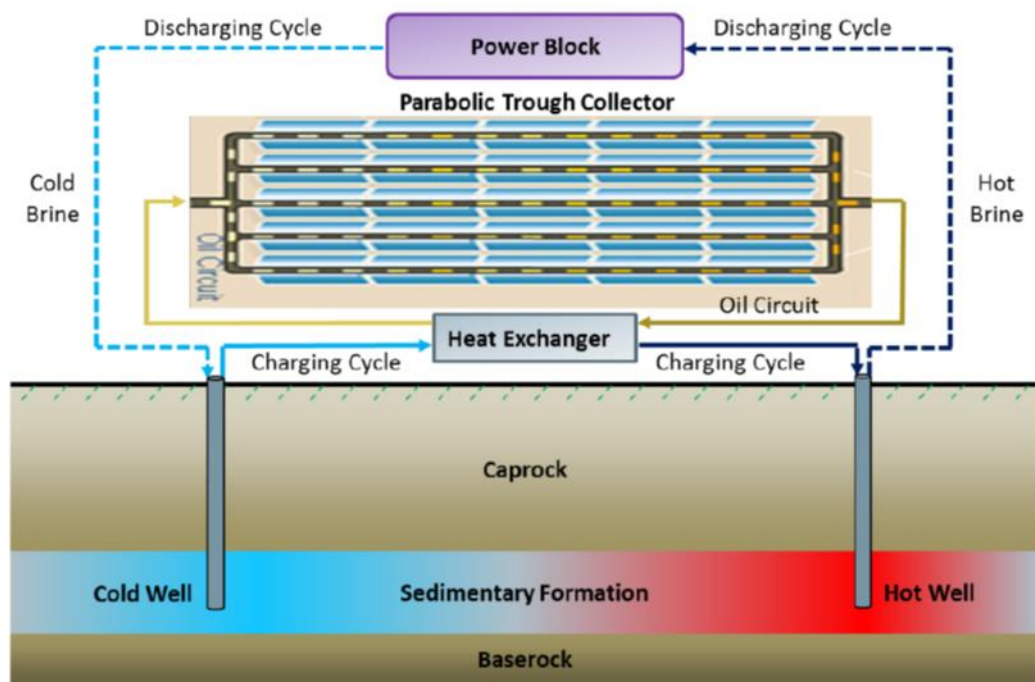
Σχήμα 7.11 Σχηματική απεικόνιση προτεινόμενης εγκατάστασης RenewGeo σύμφωνα με (RenewGeo) [46].

Η δημοσίευση αναφοράς του INL [25] που βασίστηκε η UC-Won για το RenewGeo ονομάζει την τεχνολογία ως GeoTES (Thermal Energy Storage). Σκοπός της εργασίας ήταν η εκμετάλλευση παλαιών γεωτρήσεων με γεωλογικό ενδιαφέρον που δεν πληρούσαν όμως τις προδιαγραφές για να λειτουργήσουν ως φρεάτια παραγωγής βιομηχανικής κλίμακας. Σύμφωνα με τη μελέτη τους, η ΗΠΑ διαθέτουν πληθώρα κατάλληλων υπόγειων κοιλοτήτων που θα μπορούσε να εφαρμοστεί μία τέτοια ενέργεια.

Ενδιαφέρον έχει η περιγραφή της προτεινόμενης εγκατάστασης του INL εν συντομία ώστε να αποσαφηνιστεί ο τρόπος λειτουργίας της.

Αρχικά, ο 24ωρος κύκλος λειτουργίας διακρίνεται σε τρεις περιόδους. Το πρώτο δωρο από την ανατολή του ηλίου ονομάζεται περίοδος φόρτισης, όπου το γεωθερμικό ρευστό αντλείται από τα «ψυχρά φρεάτια» και λαμβάνει θερμική ενέργεια από το ηλιοθερμικό πεδίο μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Η ροή μάζας του ρευστού είναι 40kg/s με θερμοκρασία 250° και αφού θερμανθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία επανεισάγεται στον υπόγειο ταμιευτήρα από τα «θερμά φρεάτια». Η δεύτερη περίοδος διαρκεί 10 ώρες και ονομάζεται περίοδος παραγωγής, όπου το γεωθερμικό ρευστό με ρυθμό 32kg/s εξάγεται από τις γεωτρήσεις παραγωγής και οδηγείται στη μονάδα ισχύος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το επιστρέφον γεωθερμικό

ρευστό σε θερμοκρασία 70° διοχετεύεται στον υπόγειο ταμιευτήρα μέσω των «ψυχρών» πηγαδιών, όπου θα μείνει σε αδράνεια για τις υπόλοιπες 6 ώρες που αποτελούν και την τρίτη περίοδο του κύκλου λειτουργίας που ονομάζεται αποφόρτιση. Στο Σχήμα 7.12 παρουσιάζεται η παραπάνω διάταξη. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κύκλοι «φόρτισης» και «αποφόρτισης» μπορούν να εναλλάσσονται συνεχώς μέσα στη διάρκεια της ημέρας από το να είναι ορισμένης διάρκειας. Η επιλογή του τρόπου λειτουργίας της εγκατάστασης έγκειται στις συνθήκες περιβάλλοντος (ηλιοφάνεια, νεφώσεις) της περιοχής αλλά και στη χωρητικότητα και διαθεσιμότητα του ταμιευτήρα.



Σχήμα 7.12 Σχηματική απεικόνιση προτεινόμενης εγκατάστασης GeTES σύμφωνα με (Flexible) [25].

8. Επίλογος

Συνοψίζοντας, στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία εκτενής αναφορά στην υβριδοποίηση δύο βασικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της ηλιοθερμίας (συγκεντρωτικών παραβολικών κατόπτρων) και της γεωθερμίας. Στα πρώτα δύο κεφάλαια έγινε αναλυτική περιγραφή των δύο τεχνολογιών, όσων αφορά τον τρόπο λειτουργίας τους, την αξιοποίηση τους σε παγκόσμιο επίπεδο και τις διαφορετικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή. Τα ακόλουθα κεφάλαια 3 και 4 εστιάζουν στις υποθετικές υβριδικές διατάξεις των παραπάνω τεχνολογιών που πάρθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία και συνοδεύονται από αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο για την κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα, στο 4ο κεφάλαιο απαριθμούνται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υβριδικών διατάξεων καθώς και οι τεχνικές δυσκολίες που δυσχεραίνουν την υλοποίηση τους. Στην τελευταία ενότητα παρουσιάζονται ολοκληρωμένες υβριδικές ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες ανά την υφήλιο, όπου η γεωθερμία έχει συνδυαστεί αποτελεσματικά είτε με φωτοβολταϊκή είτε με ηλιοθερμική ενέργεια.

Όπως έγινε αντιληπτό, η γεωθερμία αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η οποία χαρακτηρίζεται από σχετικά σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλό συντελεστή φορτίου, για όλο το έτος και ανεξαρτήτως καιρού. Αυτή της η ιδιότητα, την καθιστά ιδανική για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βασικού φορτίου. Με την ανάλυση των διαφορετικών υβριδικών προσεγγίσεων που εξετάστηκαν, έγινε κατανοητό ότι η πρόσθετη θερμική ενέργεια από το ηλιακό πεδίο μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία και την παροχή του ατμού, αυξάνοντας το βαθμό απόδοσης του στροβίλου και κατ' επέκταση του θερμικού κύκλου. Ειδικότερα, στις εφαρμογές άμεσης ατμοποίησης (single-double flash), παρατηρήθηκε βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας τους, προσδίδοντας περισσότερη θερμική ενέργεια στο σύστημα, απαιτώντας παράλληλα μικρότερη έκταση για την ανέγερση των ηλιοθερμικών συγκεντρωτικών κατόπτρων. Επιπρόσθετα, στις εφαρμογές των οργανικών δυαδικών κύκλων (organic-binary Rankine cycle), τα οφέλη είναι πολλαπλά, εφόσον επιτρέπουν στον οργανικό κύκλο να λειτουργεί στον υπέρθερμο με ανάλογη αύξηση της απόδοσης και της παραγόμενης ενέργειας του, ακόμα και από πηγές χαμηλής ενθαλπίας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σύμφωνα με [31] για την σύγκριση υποθετικών σεναρίων υβριδοποίησης προκύπτει ότι ο υβριδικός υπέρθερμος οργανικός κύκλος συγκεντρώνει τα περισσότερα οφέλη σύμφωνα με αξιολογήσεις που έγιναν πάνω στην αποδοτικότητα, το κόστος και την εφαρμοστικότητα των επιμέρους διατάξεων (ORC, Single-Double Flash κ.α.). Βέβαια, υπάρχουν πολλές τεχνικές δυσκολίες, όπως προαναφέρθηκαν, που πρέπει να ξεπεραστούν, ώστε να υλοποιηθούν αυτά τα σενάρια. Οι ευκαιρίες για την πραγματοποίηση ηλιο-γεωθερμικών εγκαταστάσεων στο μέλλον θα είναι πολλές, ιδίως αν εγκριθούν πιλοτικές εφαρμογές αυτού του μεγέθους από την πολιτεία.

Εν τέλει, με μία κριτική σκοπιά της διπλωματικής οι βασικές παρατηρήσεις μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Είναι εφικτή η υβριδοποίηση των δύο τεχνολογιών, εφόσον υπάρχουν πολλές διαθέσιμες περιοχές στο πλανήτη και την Ελλάδα που έχουν ηλιοθερμική και γεωθερμική επάρκεια.

2. Το πρόβλημα της διαλειμματικής λειτουργίας των ηλιοθερμικών συστημάτων, ισοφαρίζεται από τον υψηλό συντελεστή φορτίου της γεωθερμικής εγκατάστασης που συγκεράζεται.

3. Η ποσότητα και ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται έπειτα από τη βελτιστοποίηση των υβριδικών διατάξεων και ιδίως από τη θέρμανση του γεωθερμικού ρευστού χαμηλής ενθαλπίας μέσω την ηλιακής ενέργειας.

4. Τα υβριδικά συστήματα αποδίδουν καλύτερα από τις μεμονωμένες διατάξεις γεωθερμίας και ηλιοθερμίας από πλευράς οικονομικού κέρδους και βαθμού απόδοσης του κύκλου.

5. Βραχυπρόθεσμα οι υβριδικές διατάξεις είναι λιγότερο ελκυστικές επενδύσεις από τις μεμονωμένες μονάδες γεωθερμίας και ηλιοθερμίας λόγω του υψηλότερου κόστους επένδυσης τους. Αλλά κρίνονται αρκετά ανταγωνιστικές σε μακροχρόνια βάση, λόγω της μεγαλύτερης ενεργειακής παραγωγής τους.

6. Παρόλο που οι υβριδικοί ηλιο-γεωθερμικοί σταθμοί εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα, οι τρέχουσες δημοσιεύσεις επικεντρώνονται σε θεωρητικά μοντέλα χωρίς πρακτική εφαρμογή. Αυτό οφείλεται στο υψηλό επενδυτικό κόστος αυτών των διατάξεων και στην πολυπλοκότητα των απαιτούμενων συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Ένα πολύ σημαντικό σημείο όπου οι περισσότερες έρευνες αποτυγχάνουν να αποσαφηνίσουν.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Καλδέλλης, Ιωάννης Κ and Καββαδίας, Κοσμάς Α, *Εργαστηριακές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας: αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, υδάτινο δυναμικό, βιομάζα, γεωθερμία* /. 2001.
- [2] wikipedia, “Γεωθερμία,” *Βικιπαίδεια*. Jan. 28, 2020, Accessed: Apr. 30, 2020. [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%93%CE%B5%CF%89%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%AF%CE%B1&oldid=8003964>.
- [3] “012013040.pdf.” Accessed: Apr. 30, 2020. [Online]. Available: <http://digilib.teiemt.gr/jspui/bitstream/123456789/1440/1/012013040.pdf>.
- [4] Shankar Besta, “Profiling the top geothermal power producing countries in the world,” Jan. 08, 2020. <https://www.nsenergybusiness.com/features/top-geothermal-power-producing-countries/> (accessed Apr. 30, 2020).
- [5] “EGEC - The Voice of Geothermal in Europe,” *EGEC - European Geothermal Energy Council*. <https://www.egec.org/> (accessed May 12, 2020).
- [6] Τζεφέρης Πέτρος, “Το «state of the art» για τις χρήσεις της Γεωθερμίας σε Ευρώπη και Ελλάδα,” *energypress.gr*, Oct. 01, 2018. <https://energypress.gr/news/state-art-gia-tis-hriseis-tis-geothermias-se-eyropi-kai-ellada> (accessed Apr. 30, 2020).
- [7] Energy Press, “Κατηγορηματικό «όχι» στη γεωθερμία λέει η Μήλος,” *energypress.gr*, Apr. 20, 2011. <https://energypress.gr/news/katigorimatiko-ohi-sti-geothermia-leei-i-milos> (accessed Apr. 30, 2020).
- [8] Εύρης Τσουμής, “Φθηνή ενέργεια και θέρμανση από τη γεωθερμία!,” *Έθνος*, Oct. 16, 2019. https://www.ethnos.gr/oikonomia/66969_alexandroypoli-fthini-energeia-kai-thermansi-apo-ti-geothermia (accessed May 12, 2020).
- [9] wikipedia, “Enhanced geothermal system,” *Wikipedia*. Apr. 30, 2020, Accessed: Apr. 30, 2020. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Enhanced_geothermal_system&oldid=953967669.
- [10] Χατζηαθανασίου Λώρα, “Μελέτη Ηλιοθερμικής Μονάδας Παραβολικών Κατόπτρων 50MW - ΙΚΕΕ / Αριστοτελείο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης - Βιβλιοθήκη,” 2016. <http://ikee.lib.auth.gr/record/292103?ln=el> (accessed May 13, 2020).
- [11] Α. Φ. Δάρλας and Α. F. Darlas, “Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα,” *Concentrated Solar Power Systems*, Jul. 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.10511>.
- [12] M. J. Wagner and P. Gilman, “Technical Manual for the SAM Physical Trough Model,” NREL/TP-5500-51825, 1016437, Jun. 2011. doi: 10.2172/1016437.
- [13] wikipedia, “List of solar thermal power stations,” *Wikipedia*. May 03, 2020, Accessed: May 13, 2020. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_solar_thermal_power_stations&oldid=954665450.

- [14] NS Energy Staff Writer, “Top concentrated solar power producing countries,” Apr. 26, 2019. <https://www.nsenergybusiness.com/features/concentrated-solar-power-countries/> (accessed May 13, 2020).
- [15] KiAfrica, *The BIGGEST Concentrated Solar Plant in the World is in Africa I Morocco*. 2018.
- [16] N. Garapati *et al.*, “A Hybrid Geothermal Energy Conversion Technology - A Potential Solution for Production of Electricity from Shallow Geothermal Resources,” *Energy Procedia*, vol. 114, pp. 7107–7117, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1852.
- [17] R. Venegas, S. Kuravi, K. Kota, and M. McCay, “Comparative Analysis of Designing Solar and Geothermal Power Plants: A Case Study,” *Int. J. Renew. Energy Res. IJRES*, vol. 8, no. 1, pp. 625–634, Mar. 2018.
- [18] J. D. P. McTigue *et al.*, “Hybridizing a Geothermal Plant with Solar and Thermal Energy Storage to Enhance Power Generation,” NREL/TP--5500-70862, 1452695, Jun. 2018. doi: 10.2172/1452695.
- [19] N. DeLovato, K. Sundarnath, L. Cvijovic, K. Kota, and S. Kuravi, “A review of heat recovery applications for solar and geothermal power plants,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, p. 109329, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109329.
- [20] D. Wendt, G. Mines, C. Turchi, and G. Zhu, “Geothermal Risk Reduction via Geothermal/Solar Hybrid Power Plants. Final Report,” INL/EXT--15-37307, 1245529, Nov. 2015. doi: 10.2172/1245529.
- [21] “inl_ext-16-38751 GETEM User Manual Final.pdf.” Accessed: May 11, 2020. [Online]. Available: https://workingincaes.inl.gov/SiteAssets/CAES%20Files/FORGE/inl_ext-16-38751%20GETEM%20User%20Manual%20Final.pdf.
- [22] H. Gurgenci, “Options to Use Solar Heat to Enhance Geothermal Power Plant Performance,” p. 6.
- [23] N. Bonyadi, E. Johnson, and D. Baker, “Technoeconomic and exergy analysis of a solar geothermal hybrid electric power plant using a novel combined cycle,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 156, pp. 542–554, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.11.052.
- [24] A. Greenhut *et al.*, “Solar-Geothermal Hybrid Cycle Analysis for Low Enthalpy Solar and Geothermal Resources,” p. 10.
- [25] G. Dimarzio, L. Angelini, B. Price, S. Harris, and C. Chin, “The Stillwater Triple Hybrid Power Plant: Integrating GeoThermal, Solar Photovoltaic and Solar Thermal Power Generation,” p. 5.
- [26] J. Mctigue *et al.*, “Techno-economic Assessment of Geothermal Power Plants Hybridized with Solar Heat and Thermal Storage,” p. 11.
- [27] P. Wan, L. Gong, and Z. Bai, “Thermodynamic analysis of a geothermal-solar flash-binary hybrid power generation system,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 3–8, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.023.

- [28] D. M. Cakici, A. Erdogan, and C. O. Colpan, “Thermodynamic performance assessment of an integrated geothermal powered supercritical regenerative organic Rankine cycle and parabolic trough solar collectors,” *Energy*, vol. 120, pp. 306–319, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.11.083.
- [29] J. M. Cardemil, F. Cortés, A. Díaz, and R. Escobar, “Thermodynamic evaluation of solar-geothermal hybrid power plants in northern Chile,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 123, pp. 348–361, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.06.032.
- [30] M. Sander, “Combining Renewable Energy Technologies - With a Geothermal Focus,” p. 4.
- [31] K. Li, C. Liu, S. Jiang, and Y. Chen, “Review on hybrid geothermal and solar power systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 250, p. 119481, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119481.
- [32] J. D. McTigue, D. Wendt, K. Kitz, J. Gunderson, N. Kincaid, and G. Zhu, “Assessing geothermal/solar hybridization – Integrating a solar thermal topping cycle into a geothermal bottoming cycle with energy storage,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 171, p. 115121, May 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115121.
- [33] C. Zhou, E. Doroodchi, and B. Moghtaderi, “An in-depth assessment of hybrid solar–geothermal power generation,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 74, pp. 88–101, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2013.05.014.
- [34] F. Heberle, M. Hofer, and D. Brüggemann, “A Retrofit for Geothermal Organic Rankine Cycles based on Concentrated Solar Thermal Systems,” *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 692–699, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.148.
- [35] Y. Alvarenga, S. Handal, and M. Recinos, “Solar Steam Booster in the Ahuachapán Geothermal Field,” p. 7.
- [36] F. Ren, J. Wang, S. Zhu, and Y. Chen, “Multi-objective optimization of combined cooling, heating and power system integrated with solar and geothermal energies,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 197, p. 111866, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111866.
- [37] T. Williams, N. Snyder, and W. Gosnold, “Low-Temperature Projects of the Department of Energy’s Geothermal Technologies Program: Evaluation and Lessons Learned,” National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), NREL/PR-6A10-67402, Oct. 2016. Accessed: May 11, 2020. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/1334739-low-temperature-projects-department-energy-geothermal-technologies-program-evaluation-lessons-learned>.
- [38] ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΣΤΕΦΑΝΟΣ, Παν. ΝΙΚΑΣ, and Ε. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ, *ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ Συνοπτική Θεωρία και Ασκήσεις*, 1st ed. Αθήνα 2010: ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕ, 2010.

- [39] H. Ghasemi, E. Sheu, A. Tizzanini, M. Paci, and A. Mitsos, “Hybrid solar–geothermal power generation: Optimal retrofitting,” *Appl. Energy*, vol. 131, pp. 158–170, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.06.010.
- [40] Ö. Ç. Kuyumcu, U. Z. D. Solaroğlu, S. Akar, and O. Serin, “Hybrid Geothermal and Solar Thermal Power Plant Case Study, Gumuskoy GEPP,” p. 6, 2013.
- [41] A. G. Olabi, M. Mahmoud, B. Soudan, T. Wilberforce, and M. Ramadan, “Geothermal based hybrid energy systems, toward eco-friendly energy approaches,” *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 2003–2012, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.140.
- [42] Alexander Richter, “Ormat starts operation at unique hybrid geothermal-solar power plant in Nevada,” *Think GeoEnergy - Geothermal Energy News*, Aug. 05, 2019. <https://www.thinkgeoenergy.com/oramat-starts-operation-at-unique-hybrid-geothermal-solar-power-plant-in-nevada/> (accessed May 12, 2020).
- [43] D. Wendt *et al.*, “Flexible Geothermal Power Generation utilizing Geologic Thermal Energy Storage,” p. 85.
- [44] M. Ciani Bassetti, D. Consoli, G. Manente, and A. Lazzaretto, “Design and off-design models of a hybrid geothermal-solar power plant enhanced by a thermal storage,” *Renew. Energy*, vol. 128, pp. 460–472, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.05.078.
- [45] Enel Green Power, *Stillwater Solar Geothermal Hybrid Project in Fallon, USA (ENG)*. 2016.
- [46] “RenewGeo.pdf.” Accessed: Apr. 30, 2020. [Online]. Available: <http://www.renewgeo.com/resource/RenewGeo.pdf>.