



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ /
TECHNICAL
UNIVERSITY
OF CRETE



Αξιοποίηση γεωθερμικής ενέργειας υπό το πρίσμα των συστημάτων ελέγχου και της μελέτης εφαρμογών

Χριστονάκης Αντώνιος

Επιβλέπων Καθηγητής
Ιψάκης Δημήτριος

Χανιά, 2022

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως κύριο στόχο την ανάλυση των συστημάτων εκμετάλλευσης της γεωθερμίας και των απαιτούμενων συστημάτων ελέγχου για τη βέλτιστη και αυτόνομη λειτουργία αυτών.

Στο πρώτο κεφάλαιο, αποδίδεται αρχικά ο ορισμός της γεωθερμίας και οι λόγοι που την καθιστούν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται οι τρόποι εκμετάλλευσης της γεωθερμίας, οι οποίοι περιληπτικά είναι τα γεωθερμικά συστήματα άμεσης χρήσης χαμηλής θερμοκρασίας, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και τα γεωθερμικά εργοστάσια ηλεκτρισμού. Παράλληλα, αναφέρονται συνοπτικά τα σημεία στα οποία απαιτείται έλεγχος της μονάδες αξιοποίησης της γεωθερμίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζεται αρχικά η σημασία του αυτόματου ελέγχου για τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Ακολουθεί η περιγραφή των συστημάτων ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε έναν τέτοιο σταθμό, στα οποία περιλαμβάνονται ο ορισμός και η κατηγοριοποίηση, η διαμόρφωση, η ιεραρχική δομή και η εφεδρεία. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την εμβάθυνση στα συστήματα ελέγχου των επιμέρους υποσυστημάτων της Μονάδας Δυναμικού Κύκλου (Binary Cycle Plant).

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι τρόποι εγκατάστασης συστημάτων θέρμανσης και ψύξης σε ιδιωτικούς και δημόσιους χώρους, είτε με άμεση χρήση της γεωθερμίας είτε με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Επιπλέον, εξετάζονται η αυτόνομη λειτουργία, αλλά και οι περιορισμοί οι οποίοι εμφανίζονται κατά τη λειτουργία των παραπάνω συστημάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό και περιγραφή εγκαταστάσεων γεωθερμικών συστημάτων μικρής και μεγάλης κλίμακας, ενώ στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας, καταγράφονται τα συμπεράσματα, αλλά και τα επόμενα βήματα για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων αξιοποίησης και ελέγχου σε εφαρμογές που αφορούν τη γεωθερμική ενέργεια.

Λέξεις κλειδιά: γεωθερμία, εκμετάλλευση γεωθερμικής ενέργειας, γεωθερμικά εργοστάσια ηλεκτρισμού, συστήματα ελέγχου, γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης

Abstract

The main purpose of this Thesis is to analyze the geothermal systems and the control systems that are required for their optimal and autonomous operation.

In the first chapter, the definition of geothermal energy and the reasons that make it a renewable energy source are discussed. Then, the various ways of exploiting geothermal energy are developed, which are summarized as geothermal systems using direct low temperature, geothermal heat pumps and geothermal power plants. Finally, the control systems and peripheral units that are required in geothermal energy plants are summarized.

In the second chapter, the importance of control in power plants is primarily presented. A description of the control system used in such a plant, which include definition and categorization, configuration, hierarchical structure and redundancy, is presented in details. The chapter concludes with an in-depth development at the control systems of a Binary Cycle Plant.

In the third chapter the ways for installing heating and cooling systems in private and public constructions are described, either by direct use of geothermal energy or by geothermal heat pumps. In addition, the autonomous operation and the limitations required for the operation of such systems are discussed.

In the fourth chapter a description of small- and large-scale geothermal system installations are presented, while in the fifth and last chapter of the Thesis, the conclusions and the next steps for the optimization, utilization and control in geothermal energy applications are recorded.

Key words: geothermal energy, geothermal energy exploitation, geothermal power plants, control systems, geothermal heating/cooling systems

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, κλείνει ένας πολύ όμορφος κύκλος πέντε ετών της ζωής μου. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Επίκουρο καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, Ιψάκη Δημήτριο. Η καθοδήγησή και η βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια των περασμένων μηνών, ήταν πολύτιμη και με ώθησε στο να καταφέρω να ολοκληρώσω το έργο που είχα μπροστά μου.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι βρίσκονταν πάντοτε δίπλα μου και στα καλά και στα άσχημα. Τέλος, θα ήθελα να πω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και κυρίως στους γονείς μου, για τις θυσίες και τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή στη γεωθερμία	7
1.1 Γενικές πληροφορίες	7
1.1.1 Ορισμός της γεωθερμίας	7
1.1.2 Η γεωθερμία ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας	10
1.2 Εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας	11
1.2.1 Γεωθερμικά Συστήματα Άμεσης Χρήσης Χαμηλής Θερμοκρασίας	11
1.2.2 Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας	13
1.2.3 Γεωθερμικά Εργοστάσια Ηλεκτρισμού	14
1.3 Έλεγχος στις μονάδες αξιοποίησης της γεωθερμίας	20
1.4 Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας	21
Κεφάλαιο 2 ^ο : Συστήματα ελέγχου σε γεωθερμικά εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής	22
2.1 Η σημασία του ελέγχου	22
2.2 Συστήματα ελέγχου	23
2.2.1 Ορισμός και κατηγοριοποίηση	23
2.2.2 Διαμόρφωση	24
2.2.3 Ιεραρχική δομή	25
2.2.4 Εφεδρικά συστήματα	26
2.3 Παρουσίαση συστημάτων ελέγχου στα επιμέρους εξαρτήματα ενός Σταθμού Δυναμικού Κύκλου (Binary Cycle Plant)	26
2.3.1 Ατμοστρόβιλος (Steam Turbine)	27
2.3.2 Ηλεκτρική Γεννήτρια (Electric Generator)	30
2.3.3 Εναλλάκτης Θερμότητας (Heat Exchanger)	31
2.3.4 Συμπυκνωτής (Condenser)	36
2.3.5 Πύργος Ψύξης (Cooling Tower)	39
2.3.6 Πηγάδια Παραγωγής και Έγχυσης (Production and Reinjection Wells)	40
2.4 Σύνοψη	41
Κεφάλαιο 3 ^ο : Γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης σε ιδιωτικές και δημόσιες κατασκευές	43
3.1 Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας και μέθοδοι εγκατάστασης	43
3.1.1 Συστήματα Ανοικτού Βρόχου (Open Loop Systems)	46
3.1.2 Συστήματα Κλειστού Βρόχου (Closed Loop Systems)	48
3.1.3 Ειδικές Μορφές	53
3.2 Αυτόνομη Λειτουργία και Έλεγχος	54

3.3 Περιορισμοί	57
Κεφάλαιο 4 ^ο : Εφαρμογές γεωθερμίας σε Ελλάδα και σε Παγκόσμια κλίμακα	59
4.1 Εγκατάσταση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας στο κτίριο της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας.....	59
4.2 Ξενώνας Λουτρών Τραϊανούπολης	62
4.3 Εγκατάσταση συστήματος γεωθερμίας σε οικία στη Βυτίνα στην ορεινή Αρκαδία	64
4.4 Μονάδα δυαδικού κύκλου στο εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής στο Ελ Σαλβαδόρ.....	68
4.5 Εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τηλεθέρμανσης Hellisheidi στην Ισλανδία	70
4.6 Περισσότερες εφαρμογές αξιοποίησης της γεωθερμίας	72
Κεφάλαιο 5 ^ο : Αποτίμηση και Συμπεράσματα	73
5.1 Σύνοψη της Διπλωματικής.....	73
5.2 Μελλοντικά βήματα.....	74
Βιβλιογραφία	75

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή στη γεωθερμία

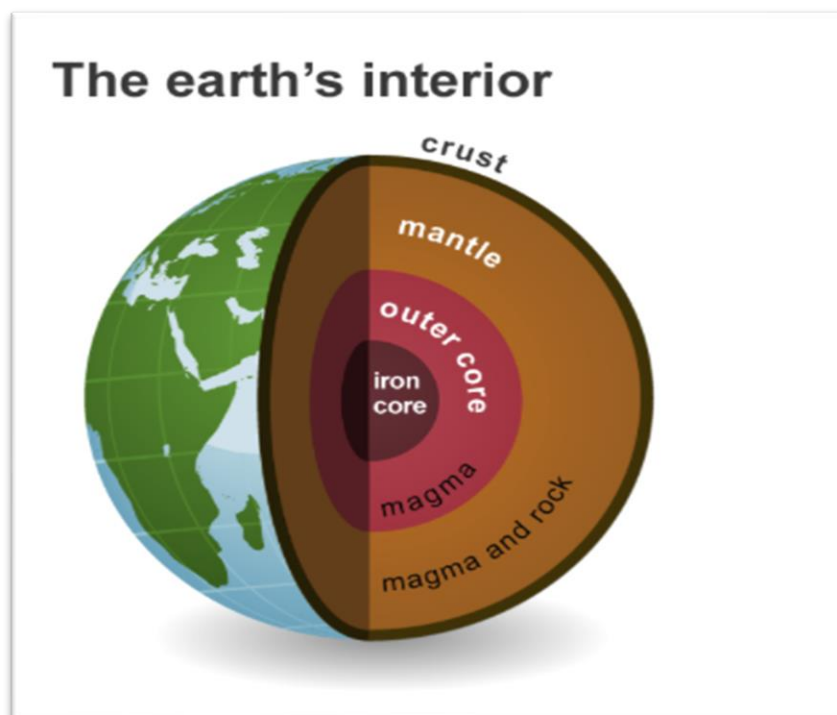
1.1 Γενικές πληροφορίες

1.1.1 Ορισμός της γεωθερμίας

Γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η φυσική θερμική ενέργεια της γης, η οποία αντλείται από τον πυρήνα της. Προέρχεται από τη θερμότητα που παράχθηκε κατά τη διάρκεια του αρχικού σχηματισμού του πλανήτη καθώς και από τη ραδιενεργή αποσύνθεση σωματιδίων. Η συγκεκριμένη θερμική ενέργεια βρίσκεται αποθηκευμένη σε πετρώματα και σε ρευστά στο κέντρο της γης.

Η Γη αποτελείται από τέσσερα κυρίως στρώματα, τα οποία είναι τα εξής:

- Έναν εσωτερικό στερεό πυρήνα, με διάμετρο περίπου ίση με 2.400 χιλιόμετρα.
- Έναν εξωτερικό πυρήνα αποτελούμενο από μάγμα, ο οποίος έχει πάχος περίπου ίσο με 2.400 χιλιόμετρα.
- Ένα μανδύα που αποτελείται από μάγμα και πετρώματα και περιβάλλει τον εξωτερικό πυρήνα, με πάχος που πλησιάζει τα 2.900 χιλιόμετρα.
- Ένα φλοιό από στερεά πετρώματα ο οποίος σχηματίζει τις ηπείρους και τον πυθμένα των ωκεανών και έχει πάχος 25 έως 55 χιλιόμετρα κάτω από τις ηπείρους και 5 έως 8 χιλιόμετρα κάτω από τους ωκεανούς.



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση του εσωτερικού του πλανήτη Γη [1]

Η σύγχρονη επιστήμη έχει ανακαλύψει πως η θερμοκρασία που επικρατεί στον εσωτερικό πυρήνα της γης ισούται περίπου με 6.000°C , όση δηλαδή είναι και η θερμοκρασία στην επιφάνεια του ήλιου. Επιπλέον, οι θερμοκρασίες στο μανδύα, κυμαίνονται από 200°C στα σύνορα με το φλοιό της γης έως και 4.000°C στα όρια με τον εξωτερικό πυρήνα του πλανήτη.

Η διαφορά στη θερμοκρασία μεταξύ του εσωτερικού στερεού πυρήνα και της επιφάνειας της γης, οδηγεί στη μεταβίβαση θερμικής ενέργειας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του πλανήτη. Εξαιτίας, των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων που επικρατούν στο κέντρο της, ορισμένα πετρώματα λιώνουν σχηματίζοντας μάγμα, καθώς επίσης ο μανδύας αρχίζει να συμπεριφέρεται πλαστικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κομμάτια μάγματος που βρίσκονταν αρχικά στο μανδύα να μετακινούνται με κατεύθυνση προς την επιφάνεια της γης.

Ο φλοιός της γης είναι σπασμένος σε τεράστια κομμάτια τα οποία ονομάζονται τεκτονικές πλάκες. Καθώς το μάγμα που πλησιάζει την επιφάνεια της γης, φτάνει στις άκρες των τεκτονικών πλακών, αρχίζει να θερμαίνει το νερό που βρίσκεται εγκλωβισμένο σε πορώδεις βράχους ή ρέει σε ρήγματα, δημιουργώντας έτσι δεξαμενές γεωθερμικής ενέργειας. Οι δεξαμενές αυτές είναι στην πραγματικότητα πηγές υδροθερμικών πόρων και εντοπίζονται σε μεγάλο βάθος κάτω από τη γη. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η ανίχνευση των πηγών αυτών συνήθως δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί πάνω από το έδαφος.

Οι δεξαμενές γεωθερμίας εμφανίζονται στην επιφάνεια της γης με τρεις διαφορετικές μορφές, οι οποίες αναφέρονται παρακάτω:

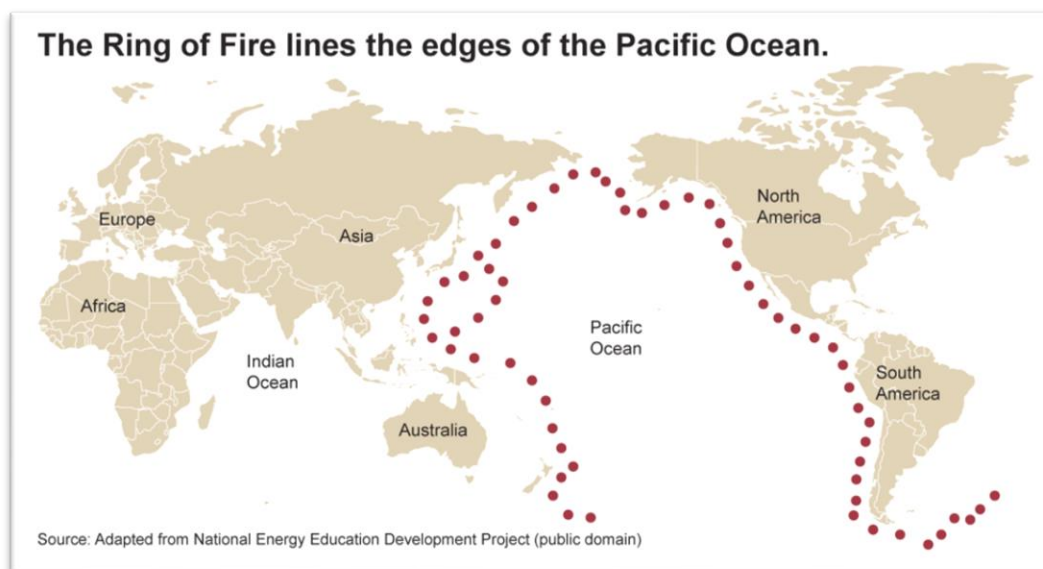
- Ηφαίστεια (Volcanoes)
- Θερμές πηγές (Hot springs)
- Θερμοπίδακες (Geysers)



Εικόνα 1.2: Έκρηξη θερμοπίδακα [2]

Για την εύρεση των δεξαμενών γεωθερμίας, οι γεωλόγοι έχουν στη διάθεσή τους μία πληθώρα τεχνικών. Ωστόσο, η πιο αξιόπιστη προσέγγιση για τον εντοπισμό τους, είναι η γεώτρηση ενός πηγαδιού στο έδαφος σε βάθος τουλάχιστον 2 χιλιομέτρων και ο έλεγχος της θερμοκρασίας κοντά στον πυθμένα αυτού.

Οι κυριότερες γεωθερμικές δεξαμενές εντοπίζονται κατά μήκος των μεγαλύτερων τεκτονικών πλακών, εκεί όπου τα περισσότερα ηφαιστεια είναι σχηματισμένα. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αποτελεί το “Δακτυλίδι της Φωτιάς” (Ring of Fire), όπως ονομάζεται, το οποίο κυκλώνει τον Ειρηνικό Ωκεανό και είναι μία από τις πιο ενεργές γεωθερμικές ζώνες του πλανήτη. Η Αλάσκα, η Ιαπωνία, πολλά νησιά του Ειρηνικού Ωκεανού αλλά και η δυτική ακτή της Βόρειας και Νότιας Αμερικής συνθέτουν το μεγαλύτερο κομμάτι της περιμέτρου του Δακτυλιδιού της Φωτιάς. Σε όλες τις προαναφερθείσες περιοχές παρατηρείται μεγάλος αριθμός ηφαιστειών.



Εικόνα 1.3: Το Δακτυλίδι της Φωτιάς που περικλείει τον Ειρηνικό Ωκεανό [3]

Η γεωθερμία είναι αποδεδειγμένα μία μορφή ενέργειας που βρίσκει εφαρμογές, ακόμα και από την αρχαιότητα. Πριν από χιλιάδες χρόνια, οι άνθρωποι ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν τις θερμές πηγές για θέρμανση, στη μαγειρική αλλά και ως ιαματικά λουτρά, εξαιτίας των θεραπευτικών ιδιοτήτων που πιστεύαν ότι έχει το πλούσιο σε μέταλλα νερό των πηγών, εφαρμογές οι οποίες έχουν απήχηση έως και σήμερα. Επιπλέον στη σύγχρονη εποχή, υπόγειες δεξαμενές γεωθερμικής ενέργειας ατμού και θερμού νερού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη θέρμανση και την ψύξη ενός ή και περισσότερων κτιρίων, μέσω ενός συστήματος τηλεθέρμανσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης της τηλεθέρμανσης αποτελεί η πρωτεύουσα της Ισλανδίας, η πόλη Ρέικιαβικ και για την Ελλάδα οι περιοχές της Δυτικής Μακεδονίας (π.χ. Πτολεμαΐδα, Κοζάνη).

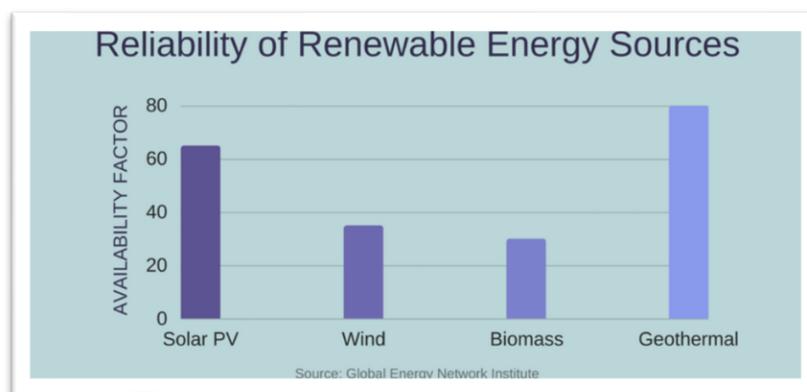
Εκτός από τη θέρμανση και την ψύξη εσωτερικών χώρων, η γεωθερμία έχει εφαρμογές και σε άλλους τομείς. Εξαιρετικά σημαντική είναι η εκμετάλλευση της με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, υπόγειες υδροθερμικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται για το λιώσιμο του πάγου σε οδικά δίκτυα αρκετών χωρών κατά τη χειμερινή περίοδο. Περαιτέρω εφαρμογές της γεωθερμίας περιλαμβάνουν τον τομέα της γεωργίας, την απορρόφηση υγρασίας από τρόφιμα, την παστερίωση του γάλακτος, την εξόρυξη χρυσού, τη θέρμανση του νερού σε ιχθυοκαλλιέργειες, την απευθείας θέρμανση θερμοκηπίων και τη θέρμανση του νερού σε πισίνες. Τέλος, λιγότερο δημοφιλείς εφαρμογές είναι η αφαλάτωση του νερού και η παραγωγή βαρέως ύδατος για πυρηνικούς αντιδραστήρες.

1.1.2 Η γεωθερμία ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας

Η γεωθερμία αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η οποία δημιουργείται από τη θερμότητα που παράγεται στον εσωτερικό πυρήνα της γης. Τεράστια ποσά θερμότητας παράγονται διαρκώς στο εσωτερικό του πλανήτη, χάρη στη ραδιενεργή αποσύνθεση σωματιδίων. Επομένως, για όσα εκατομμύρια χρόνια ο πλανήτης παραμένει ενεργός, θα υπάρχει θερμότητα προερχόμενη από τη γη, την οποία θα μπορεί να εκμεταλλεύεται ο άνθρωπος, ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του.

Οι εγκαταστάσεις γεωθερμικής ενέργειας αντλούν θερμό νερό από δεξαμενές γεωθερμίας, το οποίο εν συνεχεία θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Με το πέρασμα του χρόνου όμως, ενδέχεται να υπάρξει ελάττωση των επιπέδων του νερού εντός της δεξαμενής. Ωστόσο, το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί άμεσα, με την εξωτερική προσθήκη νερού μέσα στη δεξαμενή έτσι ώστε η εγκατάσταση να συνεχίσει τη λειτουργία της με τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Έτσι, οι εγκαταστάσεις γεωθερμίας μπορούν να επιτελούν το έργο τους, δηλαδή την παραγωγή ενέργειας, πρακτικά επ' άπειρον.

Αξίζει να σημειωθεί ακόμη, πως το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της γεωθερμικής ενέργειας είναι πολύ χαμηλό. Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις αν και δε χρειάζονται καύσιμη ύλη για να παράγουν ενέργεια, μπορεί να απελευθερώσουν μικρές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και διοξειδίου του θείου (SO_2). Παρόλα αυτά, εκπέμπουν 97% λιγότερες θειούχες ενώσεις, υπεύθυνες για πρόκληση όξινης βροχής, και 99% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα, σε σύγκριση με εγκαταστάσεις όμοιας κλίμακας που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Τέλος, η πλειονότητα των γεωθερμικών εγκαταστάσεων, στέλνει το νερό και τον ατμό που χρησιμοποιεί πίσω στη γη. Χάρη σε αυτή την ανακύκλωση, επιτυγχάνεται η αναπλήρωση της γεωθερμικής δεξαμενής και η μείωση εκπομπής ρύπων.



Διάγραμμα 1.1: Διαθεσιμότητα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [4]

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, είναι το γεγονός πως η γεωθερμία πλεονεκτεί ως προς τη διαθεσιμότητα της απέναντι σε άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική και η βιομάζα. Η γεωθερμική ενέργεια, είναι μία διαρκής πηγή ενέργειας, γεγονός που σημαίνει ότι δεν εξαρτάται από τον ήλιο ή τον άνεμο, όπως αντίστοιχα η ηλιακή και η αιολική. Το πλεονέκτημα της γεωθερμίας απέναντι στις προηγούμενες μορφές ενέργειας, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1.1, είναι πως είναι διαθέσιμη προς χρήση καθόλη τη διάρκεια του χρόνου. Βέβαια, αυτή η άποψη πολλές φορές εμφανίζει αντίθεση από υποστηρικτές της ηλιακής και αιολικής ενέργειας.

1.2 Εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας

Η εκμετάλλευση της γεωθερμίας είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με διαφορετική μέθοδο κάθε φορά, ανάλογα με την εφαρμογή που θα έχει στο μέλλον. Ορισμένες από αυτές στηρίζονται μόνο στις θερμοκρασίες της γης κοντά στην επιφάνειά της, ενώ άλλες απαιτούν τη γεώτρηση αρκετών χιλιομέτρων κάτω από το έδαφος. Τα συστήματα γεωθερμικής ενέργειας, χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, οι οποίες θα αναλυθούν ξεχωριστά στη συνέχεια και είναι οι εξής:

- Γεωθερμικά Συστήματα Άμεσης Χρήσης Χαμηλής Θερμοκρασίας (Low Temperature-Geothermal Direct Use Systems)
- Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (Geothermal Heat Pumps-GHP)
- Γεωθερμικά Εργοστάσια Ηλεκτρισμού (Geothermal Power Plants)

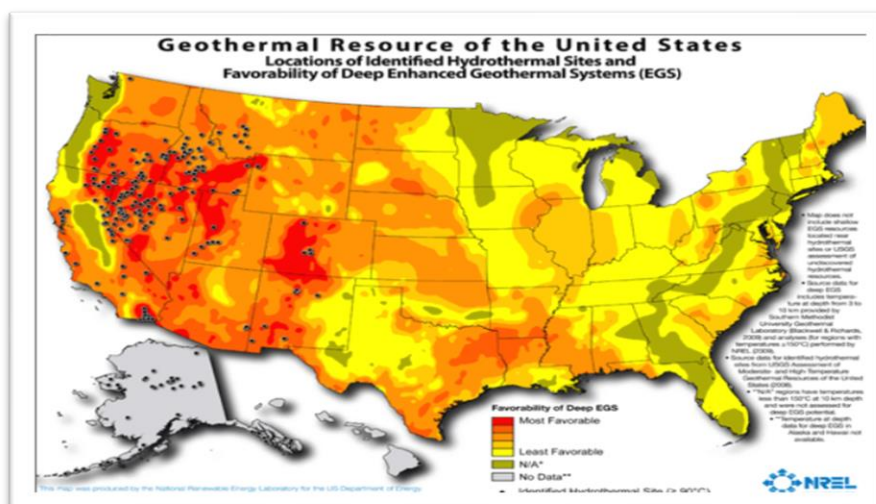
1.2.1 Γεωθερμικά Συστήματα Άμεσης Χρήσης Χαμηλής Θερμοκρασίας

Ο όρος "άμεση" ή "μη-ηλεκτρική" χρήση γεωθερμικής ενέργειας αναφέρεται στη χρήση θερμικής ενέργειας χωρίς μετατροπή της σε άλλη μορφή, όπως η ηλεκτρική ενέργεια. Η θέρμανση πισινών και λουτρών (για θεραπευτική χρήση), η θέρμανση και η ψύξη χώρων, συμπεριλαμβανομένης της τηλεθέρμανσης, η γεωργία (κυρίως η θέρμανση θερμοκηπίων, η ξήρανση καλλιεργειών και ορισμένες κτηνοτροφικές δραστηριότητες), η υδατοκαλλιέργεια (κυρίως η θέρμανση λιμνών και ιχθυοτροφείων), οι βιομηχανικές διεργασίες και οι αντλίες θερμότητας είναι οι πιο συνηθισμένες μορφές άμεσης χρήσης (τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη). Σε γενικές γραμμές, οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για την άμεση χρήση θερμότητας είναι χαμηλότερες από εκείνες που απαιτούνται για την οικονομικά αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

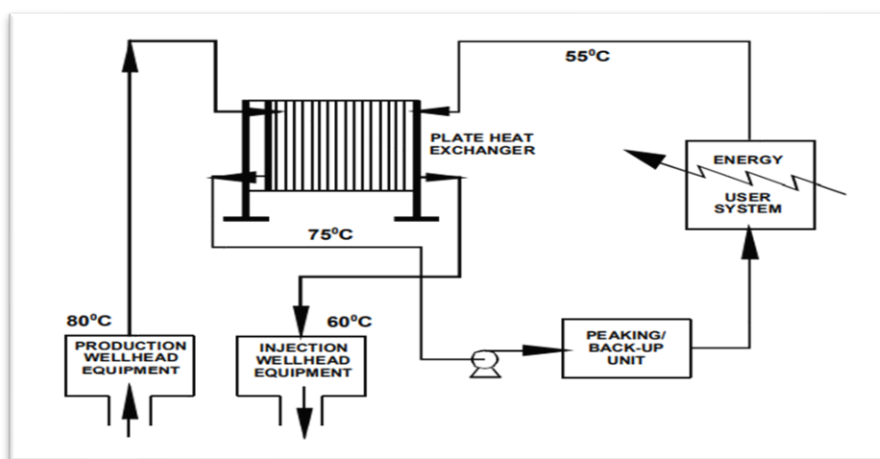
Στις περισσότερες εφαρμογές άμεσης χρήσης χρησιμοποιούνται γεωθερμικά ρευστά σε χαμηλές έως μέτριες θερμοκρασίες μεταξύ 50°C και 150°C, και γενικά, η εκμετάλλευση των δεξαμενών μπορεί να υλοποιηθεί με συμβατικό γεωτρητικό εξοπλισμό. Τα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας είναι επίσης πιο συνηθισμένα από τα συστήματα υψηλής θερμοκρασίας (μεγαλύτερη των 150°C). Στις Ηνωμένες Πολιτείες, για παράδειγμα, το 5% των 1.350 γνωστών γεωθερμικών συστημάτων είναι άνω των 150°C, ενώ το 85% είναι κάτω των 50°C. Η πλειονότητα των γεωθερμικών πόρων βρίσκεται στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες, όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη της Εικόνας 1.4 στα σημεία με το κόκκινο και το πορτοκαλί χρώμα. Τέλος, είναι γεγονός πως σχεδόν σε κάθε χώρα ανά τον κόσμο υπάρχουν συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας, ενώ μόνο ορισμένες έχουν πρόσβαση σε συστήματα υψηλής θερμοκρασίας.

Η κλίμακα του έργου επηρεάζει την αξιολόγηση των γεωθερμικών πόρων για άμεση χρήση. Για μικρότερα έργα, όπως μεμονωμένες κατοικίες, διαμερίσματα και επιχειρήσεις, καθώς και για μικρά θερμοκήπια και υδατοκαλλιέργειες, διερευνώνται δεδομένα για την τοπική γεολογία και πληροφορίες σχετικά με κοντινά πηγάδια (εάν υπάρχουν). Εάν τα δεδομένα φαίνονται ελπιδοφόρα, πραγματοποιείται μια ερευνητική γεώτρηση, με την προσδοκία ότι τελικά αυτή θα χρησιμοποιηθεί ως πηγάδι παραγωγής.

Αντίθετα, για έργα μεγαλύτερης κλίμακας, όπως η τηλεθέρμανση ή βιομηχανικές εφαρμογές, απαιτείται η διεξαγωγή γεωφυσικών ερευνών, όπως σεισμικές έρευνες ή έρευνες αντίστασης. Χάρη σε αυτές θα προσδιοριστούν υπόγειες δομές, παραδείγματος χάρη ρήγματα και πιθανές δεξαμενές που μπορεί να περιέχουν γεωθερμικά ρευστά. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται γεωτρήσεις σε μικρό βάθος (έως 150 μέτρα) για να προσδιοριστούν οι γεωθερμικές βαθμίδες στις περιοχές που υποδυκνούνται από τις γεωφυσικές έρευνες. Εάν τα δεδομένα αυτά είναι θετικά, τότε πραγματοποιείται δοκιμαστική γεώτρηση στο βάθος της δεξαμενής για τον προσδιορισμό της χωρητικότητας και της θερμοκρασίας. Τέλος, εάν η δοκιμή αυτή αποδειχθεί επιτυχής, τότε πραγματοποιούνται γεωτρήσεις παραγωγής και έγχυσης.



Εικόνα 1.4: Χάρτης γεωθερμικών πηγών στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής [5]



Διάγραμμα 1.2: Γεωθερμικό σύστημα άμεσης χρήσης [6]

Τα κύρια εξαρτήματα των περισσότερων συστημάτων άμεσης χρήσης είναι οι αντλίες γεώτρησης και κυκλοφορίας, οι αγωγοί μετάδοσης και διανομής, οι εγκαταστάσεις αιχμής ή εφεδρείας και διάφορες μορφές εξοπλισμού εξαγωγής θερμότητας. Η διάθεση του ρευστού είναι είτε επιφανειακή είτε υπόγεια (έγχυση). Επιπροσθέτως, ένα σύστημα αιχμής είναι

απαραίτητο για την κάλυψη του μέγιστου φορτίου. Αυτό μπορεί να γίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού ή με την παροχή δεξαμενών αποθήκευσης. Αμφότερες οι επιλογές μειώνουν τον αριθμό των γεωτρήσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν. Επιπλέον, όταν η θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού είναι κάτω από 50°C, χρησιμοποιούνται αντλίες θερμότητας. Συνολικά, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε έργα άμεσης χρήσης αντιπροσωπεύει αρκετές μονάδες λειτουργιών, ενώ πολλές φορές είναι σημαντικό και το κόστος λειτουργίας και εγκατάστασης.

1.2.2 Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (GHP) χρησιμοποιούν τη θερμότητα της γης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Οι γεωτρήσεις για τις αντλίες αυτές πραγματοποιούνται σε βάθος 3 έως 90 μέτρων κάτω από το έδαφος, το οποίο είναι σημαντικά μικρότερο από το αντίστοιχο των περισσότερων πηγαδιών πετρελαίου και φυσικού αερίου. Για την πρόσβαση στην πηγή ενέργειας, οι γεωθερμικές αντλίες δεν απαιτούν τη διάτρηση βραχώδους υποστρώματος.

Ένας αγωγός που συνδέεται με γεωθερμικές αντλίες, δύναται να σχηματίζει έναν συνεχή βρόχο, γνωστό ως "βρόχος Slinky", ο οποίος περιστρέφεται κάτω και πάνω από το έδαφος, συνήθως σε όλη την έκταση μιας κατασκευής. Επιπλέον, ο βρόχος μπορεί να είναι ολοκληρωτικά θαμμένος κάτω από τη γη, για τη θέρμανση παραδείγματος χάρη ενός χώρου στάθμευσης οχημάτων.

Σε αυτό το σύστημα, νερό ή άλλα υγρά, όπως γλυκερίνη (το αντιψυκτικό των αυτοκινήτων), περνούν μέσα από την αντλία. Κατά τη χειμερινή περίοδο, το υγρό συλλέγει θερμότητα υπογείως και στη συνέχεια τη μεταφέρει προς τα πάνω μέσα στο κτίριο και τη διανέμει σε όλους τους χώρους μέσω ενός συστήματος αγωγών. Ακόμα, οι ίδιοι θερμαινόμενοι σωλήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη θέρμανση δεξαμενών, ελαττώνοντας έτσι το κόστος θέρμανσης του νερού. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, το σύστημα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας λειτουργεί αντίστροφα. Η θερμότητα του κτιρίου θερμαίνει το υγρό στους αγωγούς, το οποίο με τη σειρά του μεταφέρει τη θερμότητα υπογείως για να ψυχθεί.

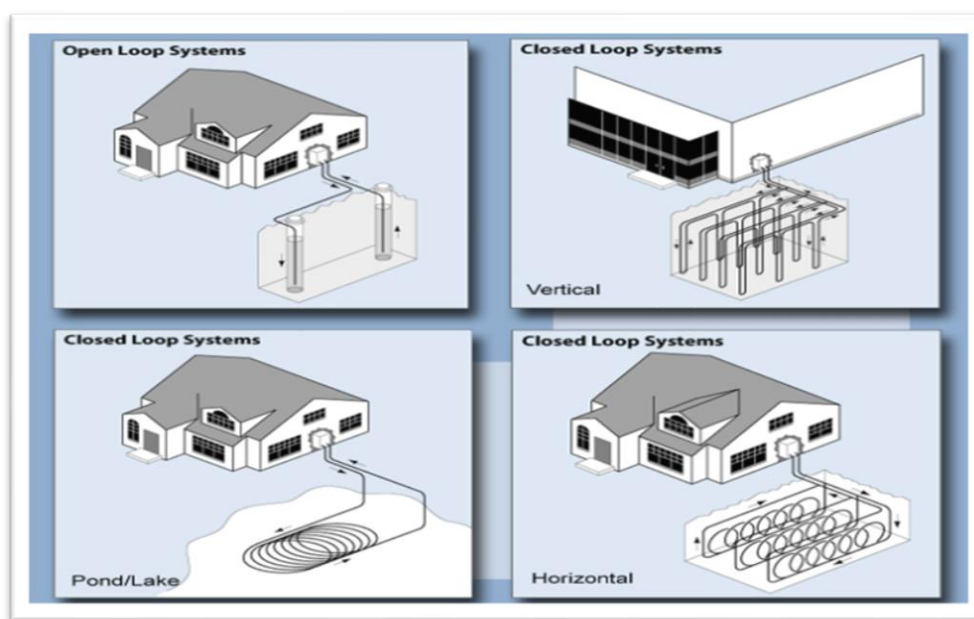
Γενικά υπάρχουν διάφορα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, ή συστήματα βρόχων. Ορισμένα είναι συστήματα ανοικτού βρόχου και άλλα είναι συστήματα κλειστού βρόχου, τα οποία μπορεί να είναι με οριζόντιες, κατακόρυφες ή διαμορφώσεις λίμνης. Στα συστήματα ανοικτού βρόχου, ο κύριος βρόχος ψυκτικού είτε προσθέτει ή αφαιρεί θερμότητα. Για την παραγωγή θερμότητας, ένας δεύτερος βρόχος μεταφέρει φυσικό νερό από μία γεωθερμική πηγή σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Θα πρέπει επίσης, η απόσταση μεταξύ των σωληνώσεων προσαγωγής και επιστροφής να είναι επαρκής, ώστε το νερό που απορρίπτεται να ανακτήσει θερμική απόδοση. Επιπρόσθετα, τα υψηλά επίπεδα αλάτων, τα μέταλλα, τα μικρόβια και το υδροθείο μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στα συστήματα ανοικτού βρόχου, καθιστώντας αναγκαίο τον περιοδικό όξινο καθαρισμό. Αντιθέτως, ένα σύστημα κλειστού βρόχου θα ήταν μια καλύτερη εναλλακτική λύση εάν τα επίπεδα αυτά είναι πολύ υψηλά. Τα συστήματα κλειστού βρόχου μεταφέρουν τη θερμότητα με διαφορετικό τρόπο, καθώς πρέπει να περάσει μέσα από στρώματα εδάφους και πρόσθετα στρώματα σωληνώσεων.

Στα συστήματα κλειστού βρόχου η θερμότητα μεταφέρεται μέσω του αντιψυκτικού διαλύματος σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Το αντιψυκτικό διάλυμα κυκλοφορεί μέσω

σωληνώσεων που είναι είτε θαμμένες στο έδαφος ή βυθισμένες στο νερό. Για την τοποθέτησή τους, μία τάφρος ανοίγεται σε βάθος από 1,2 έως 2,5 μέτρα. Εάν υπάρχει αρκετός χώρος, οι οριζόντιες διατάξεις θεωρούνται από τις πιο οικονομικές και αποδοτικές για οικιακές δομές. Ωστόσο, σε περιοχές που δεν είναι δυνατή η χρήση των τυπικών οριζόντιων διατάξεων, ο βρόχος Slinky δίνει τη λύση, καθώς επιτρέπει περισσότερες σωληνώσεις σε μικρότερο όρυγμα με μειωμένο κόστος εγκατάστασης.

Οι κατακόρυφες διαμορφώσεις καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο από ότι οι οριζόντιες και χρησιμοποιούνται σε μέρη όπου δεν υπάρχει αρκετό έδαφος για διάνοιξη τάφρων, όπως μεγάλα εμπορικά κέντρα και σχολεία. Οι κατακόρυφοι βρόχοι συνήθως κυμαίνονται σε βάθος από 30 έως 150 μέτρα και απέχουν μεταξύ τους απόσταση 6 μέτρων. Οι βρόχοι στις κατακόρυφες διαμορφώσεις συνδέονται με έναν οριζόντιο σωλήνα ο οποίος συνδέεται με τη σειρά του, με την αντλία θερμότητας εντός του κτιρίου.

Η τελευταία κατηγορία των συστημάτων κλειστού βρόχου, είναι οι διαμορφώσεις λίμνης. Αυτές διέρχονται κάτω από τα κτίρια εντός των υπόγειων υδάτων και τυλίγονται σε απόσταση τουλάχιστον 2,5 μέτρων από την επιφάνεια, για να αποφευχθεί τυχόν πάγωμα. Οι σπείρες πρέπει να τοποθετούνται μόνο σε δεξαμενές νερού που πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις όγκου, βάθους και ποιότητας. Εάν η παροχή νερού βρίσκεται στην κατάλληλη ποσότητα και βάθος, η συγκεκριμένη διαμόρφωση αποτελεί την πιο οικονομική επιλογή.



Εικόνα 1.5: Αναπαράσταση των διαφόρων συστημάτων των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας [7]

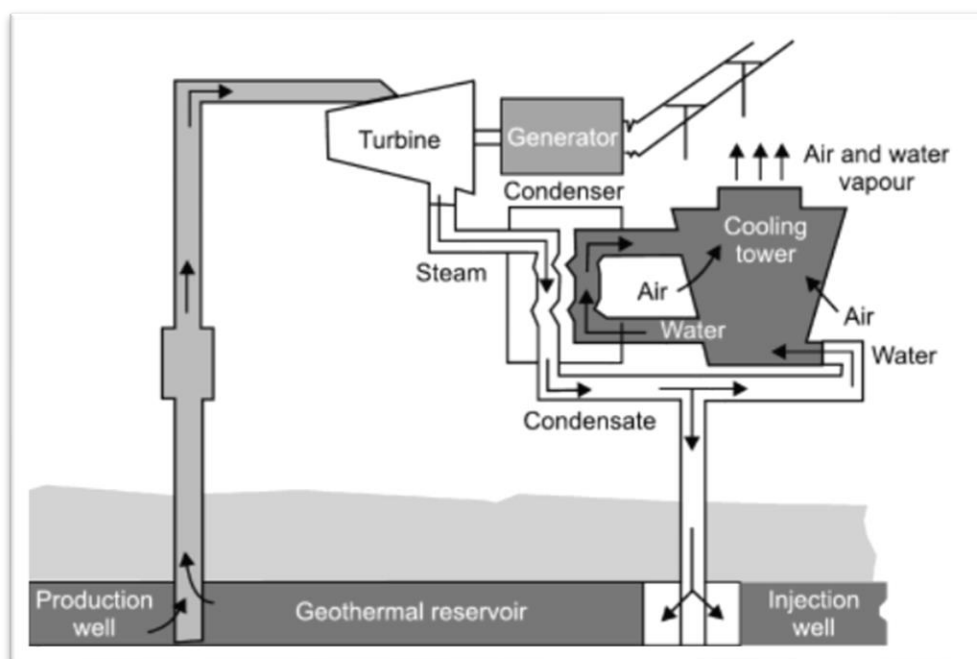
1.2.3 Γεωθερμικά Εργοστάσια Ηλεκτρισμού

Η τρίτη μεγάλη κατηγορία γεωθερμικών συστημάτων, η οποία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, είναι τα γεωθερμικά εργοστάσια ηλεκτρισμού. Στα εργοστάσια αυτά, ο ατμός ή το θερμό νερό από τις γεωθερμικές δεξαμενές παρέχουν την απαιτούμενη ισχύ σε συστήματα ατμοστροβίλου-γεννήτριας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, το ήδη αξιοποιημένο νερό επιστρέφει στη δεξαμενή μέσω ενός πηγαδιού έγχυσης για να

θερμανθεί εκ νέου, για να διατηρηθεί η πίεσή του και να συντηρηθεί η δεξαμενή ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τηλεθέρμανση. Τέλος, ανάλογα με τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις που επικρατούν στη γεωθερμική δεξαμενή, υπάρχουν τέσσερις τύποι γεωθερμικών σταθμών παραγωγής ενέργειας.

Σταθμοί Ξηρού Ατμού (Dry Steam Plants)

Οι σταθμοί ξηρού ατμού είναι εξαιρετικά σπάνιοι, εξαιτίας της περιορισμένης διαθεσιμότητας γεωθερμικών πηγών που παράγουν ξηρό ατμό. Για τη λειτουργία των παραπάνω σταθμών απαιτούνται υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που να ξεπερνούν τους 150°C. Σε περίπτωση που μία γεωθερμική πηγή με κατάλληλη πίεση και θερμοκρασία βρεθεί, η συνολική διαδικασία για την ηλεκτροπαραγωγή γίνεται αρκετά απλή, οικονομική και αποδοτική. Αρχικά, συλλέγεται ατμός μέσα από έναν αριθμό πηγαδιών παραγωγής και αμέσως φιλτράρεται για την απομάκρυνση ομίχλης και διάφορων σωματιδίων. Για το φιλτράρισμα χρησιμοποιούνται διαχωριστές ομίχλης και συσκευές αφαίρεσης σωματιδίων. Στη συνέχεια, ο ατμός εισάγεται στο στρόβιλο ο οποίος ξεκινάει να περιστρέφεται και να παράγει μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Η διαδικασία ολοκληρώνεται στο συμπυκνωτή, ο οποίος συλλέγει τον ψυχρό ατμό και τον στέλνει πίσω στο έδαφος στη μορφή νερού μέσω των πηγαδιών έγχυσης. Στο Διάγραμμα 1.3 φαίνεται η ολοκληρωμένη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μία μονάδα ξηρού ατμού. Επιπλέον, οι υπερβολικές εκπομπές ατμού αφήνουν ένα ποσοστό της τάξεως των 15%-20% του συμπυκνωμένου γεωρευστού διαθέσιμο για επανεισαγωγή. Ωστόσο, η διαρκής χρήση γεωθερμικού ρευστού από μία δεξαμενή, χωρίς την αναπλήρωση του, δύναται να υποβαθμίσει την ποιότητα του ρευστού. Τέλος, η ισχύς που μπορεί να παραχθεί από σταθμούς ξηρού ατμού κυμαίνεται μεταξύ 8 MW και 140 MW.

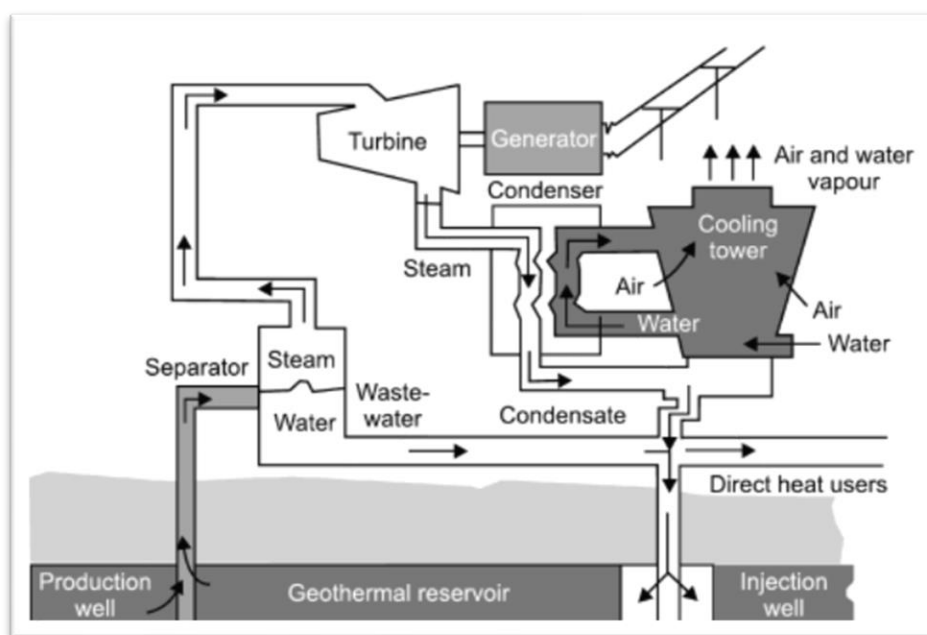


Διάγραμμα 1.3: Κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μία μονάδα ξηρού ατμού [8]

Ο συγκεκριμένος τύπος παραγωγής ηλεκτρισμού με γεωθερμία είναι ο παλαιότερος, με την πρώτη εγκατάσταση να δημιουργείται το 1904, στο Λαρντερέλλο, στην Τοσκάνη της Ιταλίας. Αυτή τη στιγμή, η μεγαλύτερη εγκατάσταση γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ξηρού ατμού παγκοσμίως είναι τα Geysers στη βόρεια Καλιφόρνια, με εγκατεστημένη ισχύ η οποία ξεπερνάει τα 1.300 MW (έτος μέτρησης, 2020).

Σταθμοί Ταχείας Εξάτμισης (Flash Steam Plants)

Πρόκειται για τον πιο κοινό τύπο γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Για τη λειτουργία τους απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες γεωθερμικών πηγών, οι οποίες κυμαίνονται από 180°C έως 260°C. Στις εγκαταστάσεις αυτές, θερμό υγρό νερό αντλείται βαθιά μέσα από το έδαφος, ενώ βρίσκεται αρχικά υπό μεγάλη πίεση μην μπορώντας να φτάσει το σημείο βρασμού του. Ωστόσο, όσο πλησιάζει την επιφάνεια της γης οι πιέσεις του ελαττώνονται γρήγορα, με αποτέλεσμα ποσότητα του υγρού νερού να βράσει και να μετατραπεί πρακτικά σε ατμό. Εν συνεχεία, αφού ο ατμός διαχωριστεί από το υγρό νερό μέσω ενός διαχωριστή ατμού, όπως και στους σταθμούς ξηρού ατμού, προσδίδει δύναμη περιστροφής στο στρόβιλο, που με τη σειρά του δίνει ισχύ στη γεννήτρια για να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Ο κύκλος φτάνει στο τέλος του, με τον ψυχρό ατμό που εξέρχεται από το στρόβιλο να συμπυκνώνεται σε νερό και μαζί με το νερό από το διαχωριστή να διοχετεύονται με έγχυση πίσω στη γη, για τη διατήρηση της δεξαμενής.

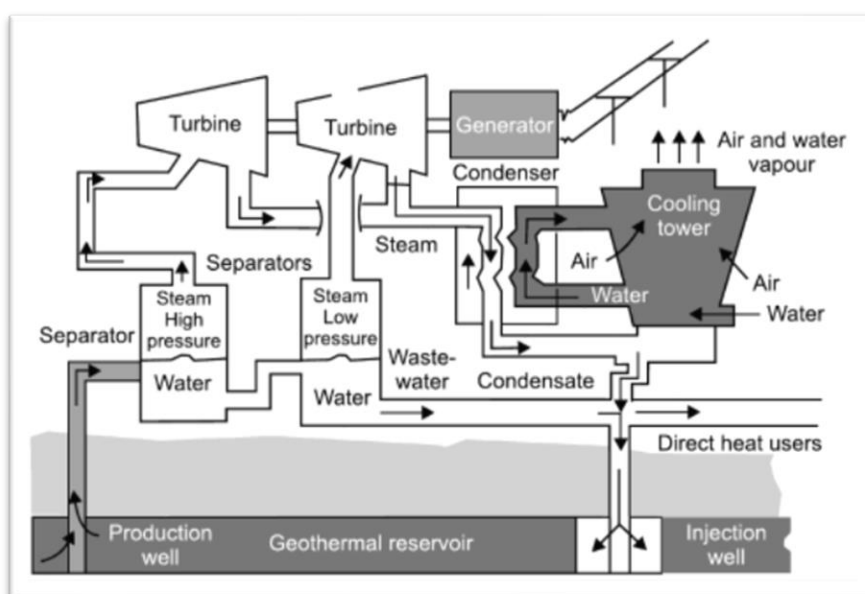


Διάγραμμα 1.4: Κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σταθμό μονής ταχείας εξάτμισης [8]

Οι σταθμοί ταχείας εξάτμισης, χωρίζονται περαιτέρω σε τρεις υποκατηγορίες. Στους σταθμούς μονής, διπλής και σπανιότερα τριπλής ταχείας εξάτμισης. Οι πρώτοι έχουν το χαρακτηριστικό μειονέκτημα πως δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν τη μεγαλύτερη ποσότητα της γεωθερμικής δεξαμενής. Οι σταθμοί διπλής και τριπλής εξάτμισης, είναι κατασκευασμένοι έτσι, ώστε να υπερβαίνουν το προαναφερθέν ζήτημα, με την ακόλουθη διαδικασία.

Ο ατμός διαχωρίζεται για πρώτη φορά από το υγρό νερό στο διαχωριστή και τροφοδοτείται σε ένα στρόβιλο υψηλής πίεσης. Το νερό, διατηρώντας θερμότητα και ενέργεια, προχωράει σε ένα δεύτερο στάδιο διαχωρισμού. Σε αυτό, ο ατμός που συλλέγεται εισέρχεται σε ένα στρόβιλο χαμηλής πίεσης, ενώ το νερό ρέει στο θάλαμο του στροβίλου αυτού (σταθμοί διπλής εξάτμισης). Τα επίπεδα ενέργειας του υγρού ελέγχονται ακόμη μία φορά και εάν είναι επαρκή, υπάρχει ένα τρίτο στάδιο διαχωρισμού (σταθμοί τριπλής εξάτμισης), εναλλακτικά το υγρό νερό διοχετεύεται πίσω στη γη με έγχυση για να ολοκληρωθεί ο κύκλος.

Αν και οι σταθμοί διπλής εξάτμισης έχουν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής σε σύγκριση με τους αντίστοιχους μονής, είναι οι πιο διαδεδομένοι. Ακόμη ένα προτέρημα των συγκεκριμένων μονάδων είναι πως έχουν τη δυνατότητα να παράγουν 25% περισσότερη ενέργεια συγκριτικά με τις μονάδες μονής εξάτμισης, καθώς ακόμα αναπληρώνουν περίπου 85% του ρευστού πίσω στη γεωθερμική δεξαμενή.



Διάγραμμα 1.5: Κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σταθμό διπλής ταχείας εξάτμισης [8]

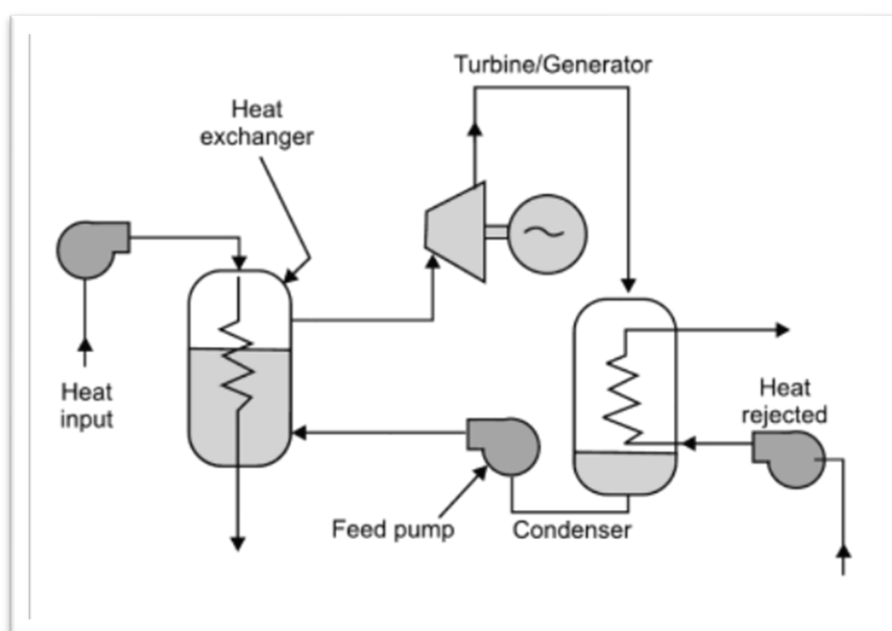
Σταθμοί Δυαδικού Κύκλου (Binary Cycle Plants)

Η τεχνολογία δυαδικού κύκλου είναι η πιο αποδοτική για νερό χαμηλής θερμοκρασίας, μεταξύ 75°C έως 180°C. Σε αυτές τις εγκαταστάσεις, το γεωθερμικό ρευστό εξατμίζει ένα δευτερεύον ρευστό (εργαζόμενο μέσο), το οποίο στη συνέχεια δίνει δύναμη περιστροφής στο σύστημα στρόβιλου-γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την ανάπτυξη ενός σταθμού δυαδικού κύκλου, η επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι υψίστης σημασίας, με τις πιο συνήθεις επιλογές να είναι το ισοβουτάνιο και το ισοπεντάνιο. Οι παράμετροι επιλογής του εργαζόμενου μέσου είναι οι ακόλουθοι:

- Η ικανοποίηση των θερμικών χαρακτηριστικών του δυαδικού συστήματος
- Αμελητέες αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον
- Αμελητέες αρνητικές επιπτώσεις στο ανθρώπινο σώμα
- Εύκολος χειρισμός, όπως μη εύφλεκτο και μη εκρηκτικό
- Οι ιδιότητες του να είναι σταθερές

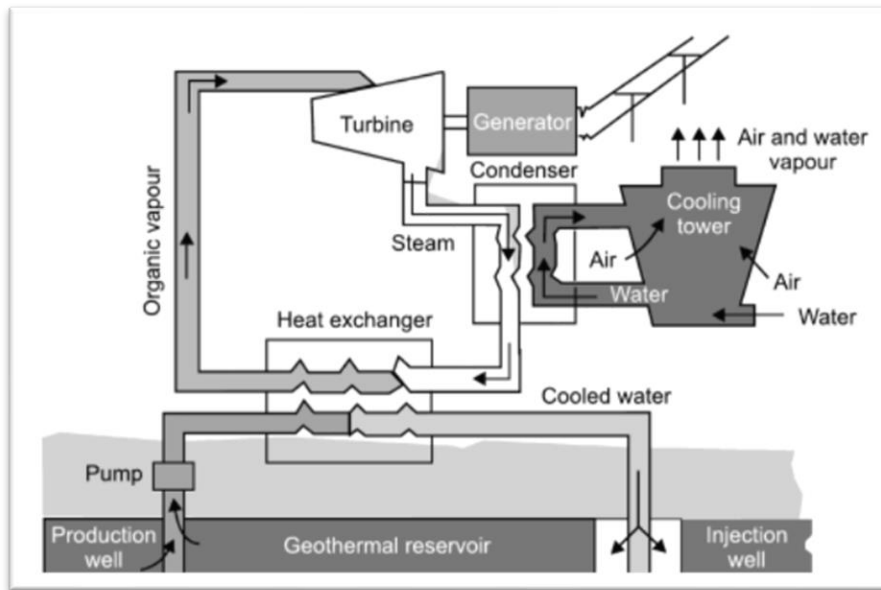
Ένας δυαδικός σταθμός παραγωγής ενέργειας είναι ένας κύκλος που έχει σχεδιαστεί για τη χρήση γεωθερμικών πόρων σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο δυαδικός σταθμός λειτουργεί παρόμοια με ένα σταθμό ατμού, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί ένα οργανικό εργαζόμενο ρευστό με χαμηλότερο σημείο βρασμού από το γεωθερμικό ρευστό. Ο κύκλος ισχύος Rankine αποτελεί τη βάση των σταθμών δυαδικού κύκλου.

Ο κύκλος ξεκινά με τη θέρμανση του οργανικού ρευστού, ακολουθούμενη από την εξατμισμό του σε ατμό. Η μεταφορά θερμότητας από το γεωθερμικό νερό θερμαίνει και εξατμίζει το ρευστό του κύκλου Rankine, το οποίο είναι συνήθως ένας υδρογονάνθρακας ανάλογα με την πηγή θερμότητας. Ο ατμός υπό πίεση διαστέλλεται μέσω των πτερυγίων του στροβίλου, παράγοντας μηχανική ενέργεια για τη στροφή του άξονα της γεννήτριας και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ατμός στη συνέχεια οδηγείται σε έναν συμπυκνωτή, όπου ψύχεται και συμπυκνώνεται σε υγρό χρησιμοποιώντας κρύο νερό, φυσικό ατμοσφαιρικό αέρα ή ανεμιστήρες ψύξης. Για την ανακύκλωση του εργαζόμενου μέσου, το οργανικό υγρό συμπυκνώνεται και ωθείται πίσω στον ατμοποιητή από την αντλία τροφοδοσίας. Ο κύκλος θα συνεχίζεται όσο δεν υπάρχει διαρροή, επομένως οι ανιχνευτές διαρροής είναι σημαντικοί σε αυτό το σύστημα.



Διάγραμμα 1.6: Διάγραμμα λειτουργίας Οργανικού Κύκλου Rankine [8]

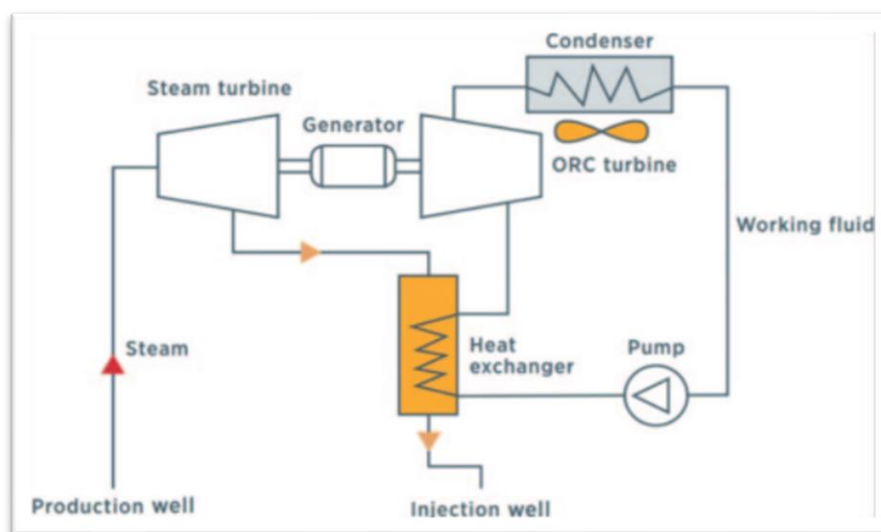
Οι δυαδικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής αναμένεται να γίνουν ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος γεωθερμικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον, με βάση τους ειδικούς. Η ικανότητα τους να χρησιμοποιούν πηγές χαμηλών θερμοκρασιών διευρύνει τον αριθμό και τον τύπο γεωθερμικών δεξαμενών που δύναται να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η χρήση των συγκεκριμένων σταθμών, τόσο βελτιώνεται και η σχετική τεχνολογία. Παραδείγματος χάρη, βελτιώσεις στις αντλίες παραγωγής, επιτρέπουν πλέον την άντληση ρευστών για χρόνια και όχι για μερικούς μήνες όπως ίσχυε παλαιότερα. Ακόμη, τα δυαδικά συστήματα έχουν σήμερα τη δυνατότητα να λειτουργούν σε θερμοκρασίες τόσο χαμηλές που παλαιότερα δε θεωρείτο εφικτό.



Διάγραμμα 1.7: Κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σταθμό δυαδικού κύκλου [8]

Συνδυασμένος Κύκλος Ατμού Δυαδικού Συστήματος (Flash/Binary Combined Cycle)

Ένας συνδυασμός τεχνολογιών δυαδικού κύκλου και ταχείας εξάτμισης χρησιμοποιείται σε αυτά τα συστήματα για την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν αμφότερες οι τεχνολογίες. Αρχικά, ο ατμός που προέρχεται από την εξάτμιση του νερού, τροφοδοτείται σε έναν ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, ο ατμός χαμηλής πίεσης που εξέρχεται από τον ίδιο ατμοστρόβιλο συμπυκνώνεται σε ένα δυαδικό σύστημα και ακολουθείται η διαδικασία που αναλύθηκε παραπάνω για τους σταθμούς δυαδικού κύκλου.



Διάγραμμα 1.8: Κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συνδυασμό συστημάτων [9]

Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης του συνδυασμού συστημάτων αποτελούν οι μονάδες παραγωγής υδρογόνου με χρήση γεωθερμίας (Green Hydrogen) στην Ισλανδία. Για την παραγωγή του υδρογόνου χρησιμοποιείται κυρίως ηλεκτρόλυση, με σκοπό την αποσύνθεση του νερού στα συστατικά του (υδρογόνο και οξυγόνο). Η διαδικασία που ακολουθείται δε διαφέρει από αυτή του συνδυασμένου κύκλου ατμού δυαδικού συστήματος. Παρόλα αυτά, δύο ακόμα εξαρτήματα εντάσσονται στο συγκεκριμένο σύστημα. Αυτά είναι ο ηλεκτρολύτης και ο προθερμαντήρας νερού. Το νερό που απορρίπτεται από τον εναλλάκτη θερμότητας και από τον ατμοστρόβιλο, αλλά και επιπλέον ποσότητα νερού εισέρχεται στον προθερμαντήρα. Το γεωθερμικό νερό, διοχετεύεται με έγχυση πίσω στη γη, ενώ η προστιθέμενη ποσότητα νερού τροφοδοτείται στην μονάδα ηλεκτρόλυσης. Στη συνέχεια, παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς τόσο από τον ατμοστρόβιλο όσο και από τον στρόβιλο του οργανικού κύκλου Rankine χρησιμοποιείται στην μονάδα ηλεκτρόλυσης, ώστε να ολοκληρωθεί η παραγωγή υδρογόνου.

Διάγραμμα 1.9: Κύκλος παραγωγής πράσινου υδρογόνου με χρήση συνδυασμένου κύκλου ατμού δυαδικού συστήματος [10]

Σε όλες τις μονάδες εκμετάλλευσης της γεωθερμίας για την παραγωγή ενέργειας, απαιτείται έλεγχος. Ο έλεγχος αυτός, πραγματοποιείται, με σκοπό την καλύτερη λειτουργία των εγκαταστάσεων, την πρόληψη και αποφυγή ατυχημάτων, την ασφάλεια των εργαζομένων, αλλά και την προστασία του περιβάλλοντος. Τα σημεία στα οποία γίνεται έλεγχος (είτε έλεγχος ανάδρασης είτε έλεγχος μηχανολογικός) σε μία μονάδα αξιοποίησης της γεωθερμίας είναι τα εξής:

- Η ροή νερού ή ατμού στα πηγάδια παραγωγής και έγχυσης, καθώς και στα συστήματα σωληνώσεων.
- Οι μεταβολές στη θερμοκρασία και στην πίεση των ρευστών στα πηγάδια παραγωγής και έγχυσης.
- Η θερμοδυναμική και χημική εξέλιξη των πηγαδιών υπό συνθήκες λειτουργίας.
- Η επιλογή και η συμπεριφορά των μηχανημάτων που έχουν εγκατασταθεί (ατμοστρόβιλοι, γεννήτριες, εναλλάκτες θερμότητας, συμπυκνωτές) κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους.
- Για παρουσία αλάτων, διαβρώσεων, που προκαλούνται από χημικές ουσίες όπως το υδρόθειο (H_2S), καθώς και προβλήματα στην αγωγιμότητα του ρευστού εντός των πηγαδιών και φρεάτων.
- Η διάρκεια ζωής και η φθορά των αγωγών και των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.
- Τα επίπεδα ρευστού (νερό ή ατμός) σε μία γεωθερμική δεξαμενή, για τυχόν αναπλήρωση.
- Η διατήρηση της ποιότητας των γεωθερμικών ρευστών στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.
- Τα επίπεδα ισχύος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η καταλληλότητα των οργανικών εργαζόμενων ρευστών για τους σταθμούς δυαδικού κύκλου.
- Για διαρροές στους αγωγούς μεταφοράς των γεωθερμικών και οργανικών ρευστών.

1.4 Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία στοχεύει στα εξής:

- Κατανόηση της γεωθερμίας ως Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας και των διαφορετικών μεθόδων εκμετάλλευσής της.
- Εμβάθυνση στα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται στα γεωθερμικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, καθώς και ανάλυση των γεωθερμικών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης εσωτερικών χώρων.
- Περιγραφή εφαρμογών γεωθερμικών συστημάτων τόσο στην Ελλάδα όσο και σε Παγκόσμια κλίμακα.
- Καταγραφή των συμπερασμάτων και ανάπτυξη προτάσεων σχετικά με το μέλλον των μεθόδων αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 2^ο: Συστήματα ελέγχου σε γεωθερμικά εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής

2.1 Η σημασία του ελέγχου

Ο έλεγχος στους σταθμούς εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή (ή/και παροχή θέρμανσης) είναι σημαντικός για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία τους. Διαφορετικές παράμετροι πρέπει να παρακολουθούνται και να εξετάζονται, για να διαπιστώνεται ανά πάσα στιγμή εάν βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων. Επιπλέον, απαιτείται η δημιουργία περιορισμών και η λήψη μετρήσεων με στόχο, τόσο την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όσο και την κατάλληλη λειτουργία των σταθμών.

Από τη μία, οι τιμές ορισμένων χημικών ουσιών όπως το υδρόθειο (H_2S), το οποίο συναντάται στις γεωθερμικές δεξαμενές, θα πρέπει να βρίσκονται υπό συνεχή επίβλεψη, εξαιτίας της πιθανής διάβρωσης και περιβαλλοντικής φθοράς. Σε υψηλές ποσότητες, το υδρόθειο επηρεάζει αρνητικά την ανθρώπινη υγεία και δύναται να προκαλέσει βλάβες στον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Από την άλλη, για τη λειτουργία των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, απαραίτητες κρίνονται οι μετρήσεις των τιμών της πίεσης, της θερμοκρασίας και της ροής των γεωθερμικών ρευστών [11].

Στις γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ενέργειας ο έλεγχος πραγματοποιείται μέσω συστημάτων ελέγχου. Τα συστήματα ελέγχου παρέχουν τα ακόλουθα για τη λειτουργία των μονάδων:

- Διατηρούν επαρκή περιθώρια μεταξύ των συνθηκών λειτουργίας και των περιορισμών ασφάλειας και λειτουργίας.
- Διακόπτουν αυτόματα τη λειτουργία της μονάδας σε περίπτωση παραβίασης σημαντικών περιορισμών.
- Παρακολουθούν τα περιθώρια από τους περιορισμούς και την κανονική λειτουργία της μονάδας, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν άμεσα πληροφορίες για μεταγενέστερη ανάλυση.
- Εφιστούν την προσοχή του χειριστή, μέσω αποτελεσματικού συστήματος συναγερμού, σε οποιαδήποτε απόκλιση από τους περιορισμούς, ώστε εκείνος να μπορεί να λάβει τα κατάλληλα διορθωτικά μέτρα [11].

2.2 Συστήματα ελέγχου

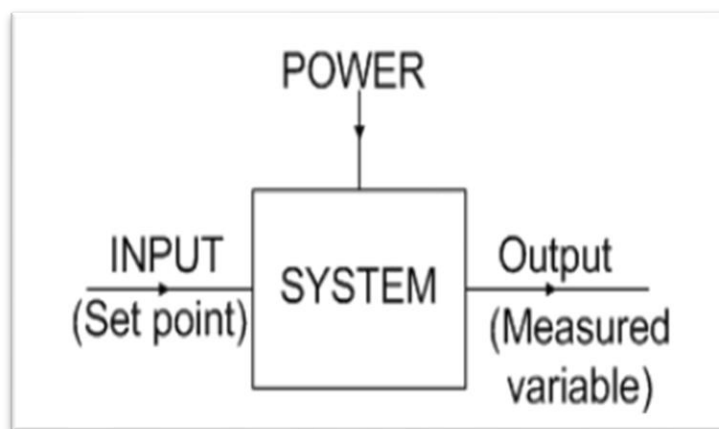
2.2.1 Ορισμός και κατηγοριοποίηση

Ως σύστημα ελέγχου ορίζεται μια ομάδα εξοπλισμού που διαχειρίζεται, δίνει εντολές, κατευθύνει ή ρυθμίζει τη συμπεριφορά άλλων συσκευών ή συστημάτων για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου. Οι βρόχοι ελέγχου, οι οποίοι αποτελούν διεργασίες σχεδιασμένες να διατηρούν μια μεταβλητή διεργασίας σε ένα επιθυμητό σημείο ρύθμισης (set point), είναι το γενικευμένο κύκλωμα με το οποίο ένα σύστημα ελέγχου επιτυγχάνει αυτό το στόχο [12]. Τα συστήματα ελέγχου κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόχου
- Συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου (Συστήματα ανάδρασης, πρόδρασης, συστοιχίας κτλ.)

Συστήματα Ελέγχου Ανοικτού Βρόχου

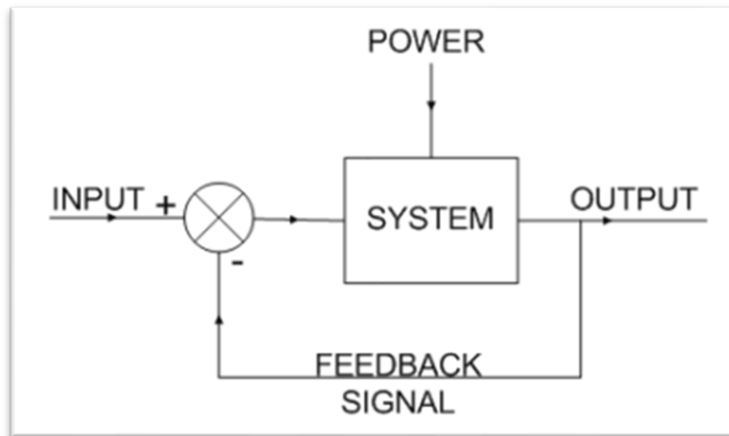
Στη συγκεκριμένη περίπτωση το σήμα εισόδου χειραγωγείται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραχθεί η επιθυμητή τιμή του σήματος εξόδου. Για παράδειγμα, έστω ότι η μεταβλητή εξόδου ενός θερμαντήρα δωματίου ελέγχεται από ένα κουμπί με την επιθυμητή θερμοκρασία δωματίου. Η θερμοκρασία του δωματίου θα είναι η επιθυμητή υπό συνθήκες βαθμονόμησης. Εάν αυτές αλλάξουν, όπως με το άνοιγμα ενός παραθύρου ή με την αύξηση της εξωτερικής ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, η θερμοκρασία του δωματίου θα πάψει να είναι η επιθυμητή. Το παραπάνω ζήτημα διορθώνεται μόνο με την επαναβαθμονόμηση του συστήματος ελέγχου. Γενικότερα, στα συστήματα ανοικτού βρόχου, η έξοδος δεν ανατροφοδοτείται στην είσοδο, οπότε το σήμα εισόδου είναι ανεξάρτητο από το σήμα εξόδου, αλλά είναι συνάρτηση της βαθμονόμησης [11]. Πρακτικά, αυτά τα συστήματα δεν εμφανίζουν έλεγχο λειτουργίας αλλά παρέχουν μία προκαθορισμένη λειτουργία.



Διάγραμμα 2.1: Σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου [11]

Συστήματα Ελέγχου Κλειστού Βρόχου

Στα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου, το σήμα εξόδου ανατροφοδοτείται και συγκρίνεται με το σήμα εισόδου και εάν υπάρχει διαφορά, το σήμα ελέγχου προκαλεί την επιστροφή του σήματος εξόδου στο επιθυμητό επίπεδο. Επομένως, στα συστήματα ανάδρασης, το σήμα εισόδου εξαρτάται από το σήμα εξόδου, καθώς το τελευταίο μπορεί να μεταβάλλεται από το περιβάλλον και από εξωτερικές συνθήκες [11].

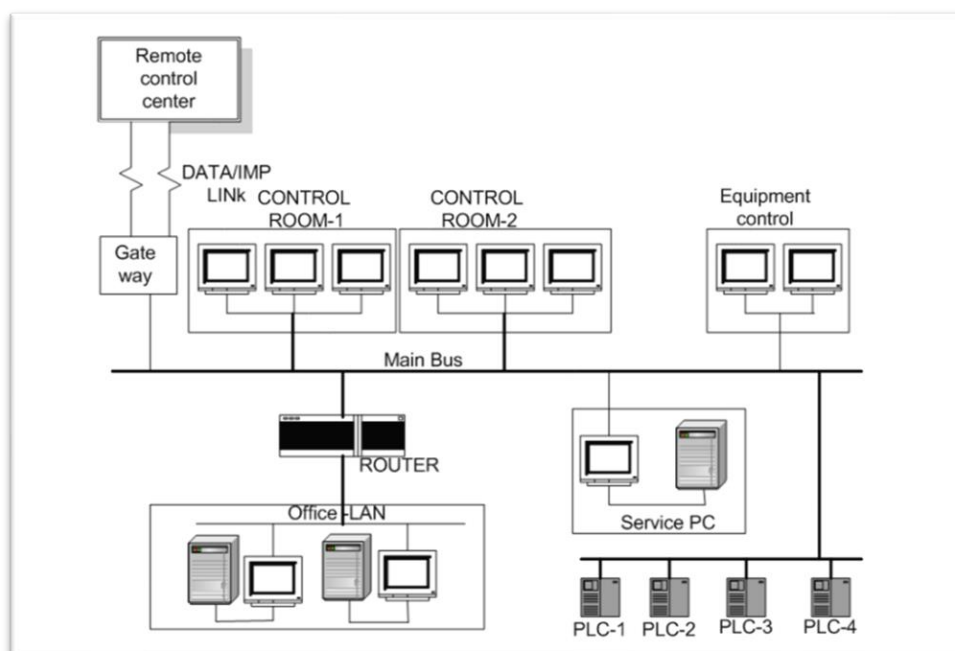


Διάγραμμα 2.2: Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου (σύστημα ανάδρασης) [11]

2.2.2 Διαμόρφωση

Η διαμόρφωση του συστήματος ελέγχου ενός σύγχρονου γεωθερμικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα. Τα κυριότερα εξ αυτών είναι το σύστημα εποπτικού ελέγχου και μεταφοράς (ή ανάκτησης) δεδομένων SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), τα μόντεμ, οι πομποί, οι δέκτες και οι προγραμματιζόμενοι ελεγκτές. Οι συχνότεροι σε χρήση ελεγκτές είναι οι εξής:

- Οι αναλογικοί (Proportional)
- Οι αναλογικοί-ολοκληρωτικοί (Proportional-Integral)
- Οι αναλογικοί-ολοκληρωτικοί-διαφορικοί (Proportional-Integral-Derivative)
- Οι ελεγκτές πρόδρασης (Feed-Forward Controllers)
- Οι PLCs (Programmable Logic Controllers)



Διάγραμμα 2.3: Σύστημα ελέγχου μίας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής με χρήση συστήματος SCADA και ελεγκτών PLC [11]

Η διαμόρφωση του συστήματος ελέγχου αποσκοπεί στην ταχεία απόκριση, την αυξημένη παρακολούθηση και έλεγχο, καθώς και τη σωστή απόκτηση και μετάδοση δεδομένων. Στο Διάγραμμα 2.3 παρουσιάζεται η διαμόρφωση ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο είναι διασυνδεδεμένο με οπτικές ίνες με διαφορετικούς σταθμούς ελέγχου επιτρέποντας έτσι την ευέλικτη λειτουργία της εγκατάστασης. Το πακέτο SCADA και το PLC μπορούν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν ένα ενιαίο σύστημα ελέγχου. Τέλος, άλλα συστήματα, όπως ο ανεμιστήρας καυσαερίων, η πυροπροστασία και οι συμπιεστές είναι δυνατόν να ενσωματωθούν στο κύριο σύστημα ελέγχου μίας εγκατάστασης [11].

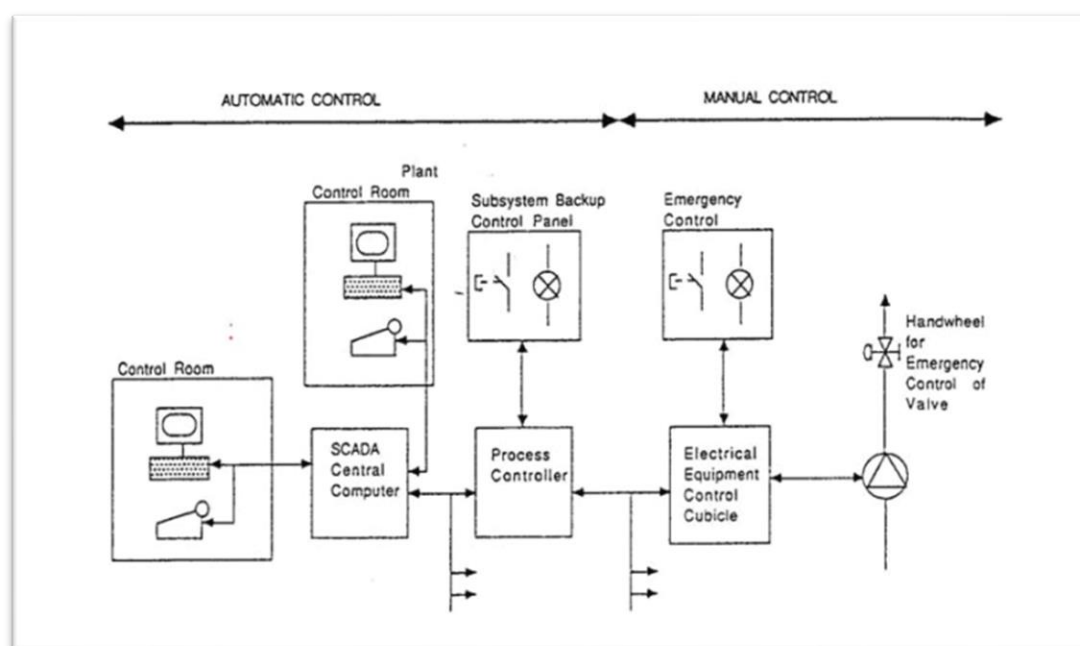
2.2.3 Ιεραρχική δομή

Το σύστημα ελέγχου είναι ένα κρίσιμο στοιχείο κάθε σταθμού παραγωγής ενέργειας. Στους γεωθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να χωριστεί σε τρία επίπεδα, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2.4, τα οποία είναι τα εξής:

- Ο τηλεχειριζόμενος σταθμός
- Ο τοπικός σταθμός ελέγχου
- Ο έλεγχος εφεδρείας

Τα τρία συστήματα ή επίπεδα ελέγχου θα πρέπει να βρίσκονται συγχρόνως σε συνεχή λειτουργία, έτσι ώστε σε περίπτωση βλάβης του ενός, η εγκατάσταση να συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά.

Οι γεωθερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται συχνά σε απομακρυσμένες τοποθεσίες και κατά συνέπεια ελέγχονται συνήθως από ένα σύστημα τηλεχειρισμού. Με εξαίρεση την τοποθεσία, το τοπικό σύστημα ελέγχου είναι συνήθως ένα αντίγραφο του συστήματος τηλεχειρισμού. Επιπροσθέτως, σε περίπτωση που τόσο το σύστημα απομακρυσμένου ελέγχου όσο και το τοπικό σύστημα ελέγχου αποτύχουν, ενεργοποιείται το εφεδρικό σύστημα. Ως αποτέλεσμα, το εφεδρικό σύστημα χρησιμοποιείται σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης και είναι απλούστερο σε σύγκριση με τα δύο προηγούμενα [11].

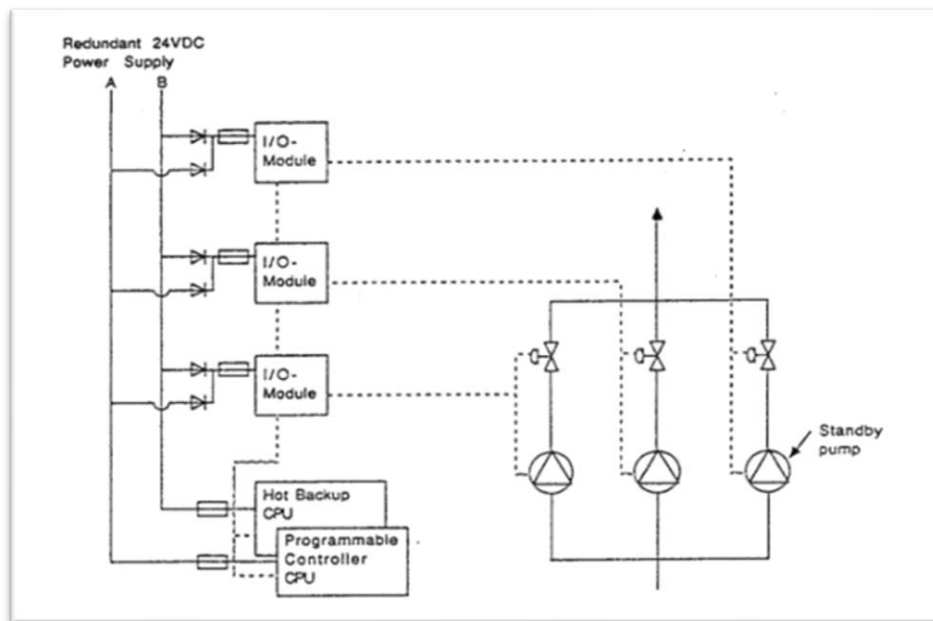


Διάγραμμα 2.4: Παρουσίαση της ιεραρχίας του συστήματος ελέγχου [11]

2.2.4 Εφεδρικά συστήματα

Σε ένα γεωθερμικό εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής, εάν το κύριο σύστημα ελέγχου αποτύχει, τότε η εφαρμογή του χειροκίνητου ελέγχου μπορεί να είναι από δύσκολη έως και αδύνατη. Παραδείγματος χάρη, ο εξοπλισμός ελέγχου για τα υποσυστήματα του ατμοστροβίλου και του εναλλάκτη θερμότητας δεν μπορεί να ελεγχθεί χειροκίνητα, καθώς λειτουργούν με εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα. Κατά συνέπεια, απαιτείται ένα αυτόματο σύστημα ελέγχου. Επομένως, ένα εφεδρικό σύστημα ελέγχου είναι κρίσιμο για την αξιόπιστη και αδιάλειπτη λειτουργία της εγκατάστασης.

Στο Διάγραμμα 2.5 που ακολουθεί, απεικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα εφεδρικού ελέγχου αντλίας ενός γεωθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Όταν μία από τις κύριες αντλίες παρουσιάσει βλάβη, η εφεδρική αντλία τίθεται αυτόματα σε λειτουργία. Η διαμόρφωση των μονάδων Εισόδου/Εξόδου (Input/Output), λαμβάνει υπόψη το σύστημα εφεδρείας. Επιπλέον, μόνο μία αντλία θα είναι εκτός λειτουργίας εάν μία από τις μονάδες I/O αποτύχει. Τέλος, κοινά στοιχεία του συστήματος ελέγχου, όπως ένα τροφοδοτικό ή οι CPUs του PLC δύναται να χρησιμοποιηθούν ως εφεδρικά, για κρίσιμα συστήματα των εγκαταστάσεων [11].



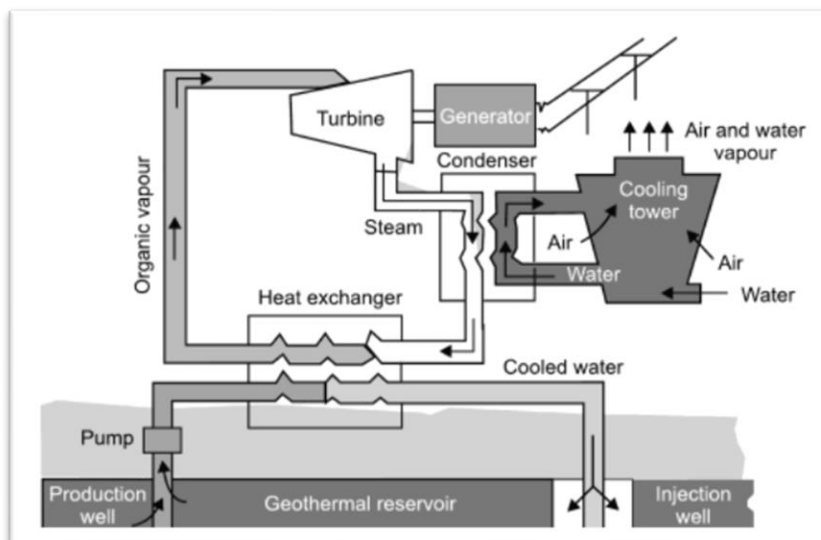
Διάγραμμα 2.5: Παράδειγμα ενός εφεδρικού συστήματος αντλιών ενός γεωθερμικού εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής [11]

2.3 Παρουσίαση συστημάτων ελέγχου στα επιμέρους εξαρτήματα ενός Σταθμού Δυαδικού Κύκλου (Binary Cycle Plant)

Οι γεωθερμικοί σταθμοί δυαδικού κύκλου, αποτελούνται από έναν συγκεκριμένο αριθμό μηχανημάτων-εξαρτημάτων, τα οποία χρειάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2.6, τα μηχανήματα αυτά είναι ο Ατμοστροβίλος (Steam Turbine), η Ηλεκτρική Γεννήτρια (Electric Generator), ο Εναλλάκτης Θερμότητας (Heat Exchanger), ο Συμπυκνωτής (Condenser) και ο Πύργος Ψύξης (Cooling Tower). Επιπλέον, όπως και σε όλους τους τύπους των γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής,

έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση, απαραίτητη είναι η δημιουργία Πηγαδιών Παραγωγής (Production Wells), αλλά και Πηγαδιών Έγχυσης (Reinjection Wells).

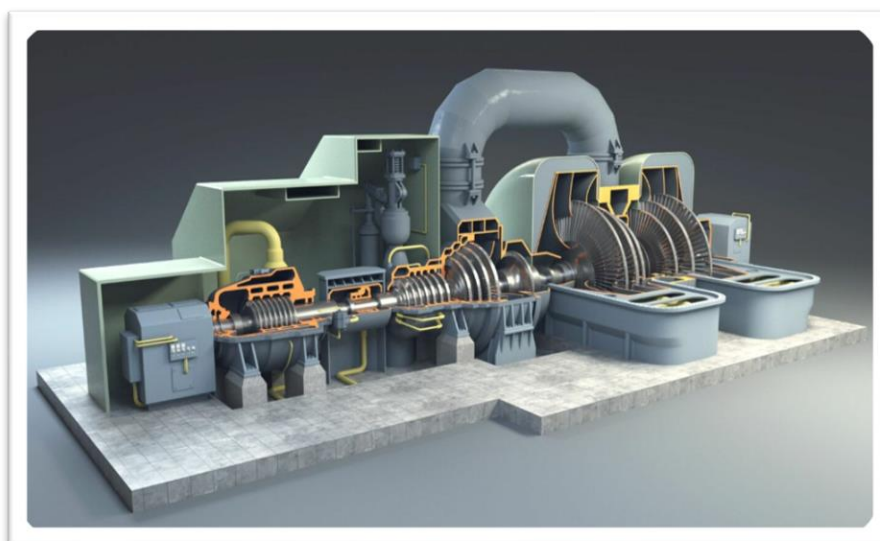
Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα συστήματα ελέγχου, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την ομαλή λειτουργία των μηχανημάτων και των πηγαδιών σε ένα εργοστάσιο δυαδικού κύκλου.



Διάγραμμα 2.6: Κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σταθμό δυαδικού κύκλου [8]

2.3.1 Ατμοστρόβιλος (Steam Turbine)

Ο ατμοστρόβιλος είναι μία μηχανή μετατροπής ενέργειας καθώς εκμεταλλεύεται την ενέργεια από τον ατμό (υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης) και τη μετατρέπει σε ροπή, η οποία στη συνέχεια περιστρέφει τον άξονά του. Το ποσό ενέργειας που χρειάζεται να απορροφήσει ένας ατμοστρόβιλος για τη λειτουργία του αποτελεί συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του ατμού [13].



Εικόνα 2.1: Ατμοστρόβιλος σε ένα σταθμό δυαδικού κύκλου [14]

Τα συστήματα ελέγχου των ατμοστροβίλων ταξινομούνται σε δύο τύπους:

- Συστήματα Ασφαλείας
- Συστήματα Διεργασίας

Συστήματα Ασφαλείας

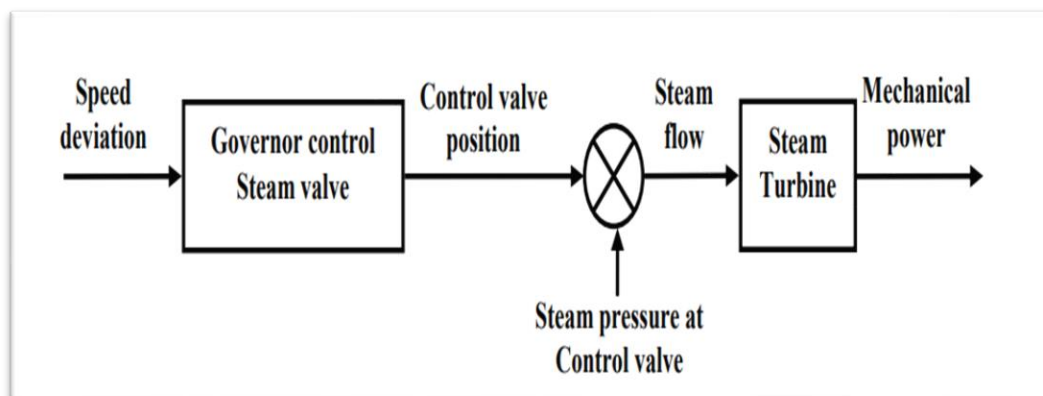
Τα συστήματα ασφαλείας είναι σχεδιασμένα για να εξαλείφουν ή να μειώνουν την πιθανότητα βλάβης του μηχανήματος ή κινδύνου για τον χειριστή. Αποτρέπουν την υπερβολική ταχύτητα του ατμοστροβίλου, παρακολουθούν όλες τις κρίσιμες παραμέτρους του και ενεργοποιούν τον στρόβιλο εάν υπάρχει μια κατάσταση που θα μπορούσε να προκαλέσει βλάβη στον εξοπλισμό. Επιπλέον, το πρωταρχικό στοιχείο ελέγχου ασφαλείας σε έναν ατμοστρόβιλο είναι η βαλβίδα παροχής. Αυτή η βαλβίδα ασφαλείας μπορεί να είναι μια βαλβίδα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης (ON/OFF valve). Τέλος, η λειτουργία διακοπής μπορεί να ενσωματωθεί στα συστήματα ελέγχου της βαλβίδας παροχής ατμού, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ταχύτητας [13].

Συστήματα Διεργασίας

Τα συστήματα διεργασίας ρυθμίζουν τη λειτουργία του ατμοστροβίλου ώστε να διασφαλίζεται ότι ακολουθεί το φορτίο με σταθερό και αποτελεσματικό τρόπο. Ο ατμοστρόβιλος ελέγχεται από το ρυθμιστή (regulator/governor), ο οποίος μπορεί να είναι μηχανικός-υδραυλικός ή ηλεκτρικός. Ο ρυθμιστής διαθέτει έναν ελεγκτή, που διαμορφώνει τη βαλβίδα εισόδου του στροβίλου ώστε να διατηρείται η ταχύτητα του άξονα σταθερή στο σημείο ρύθμισης (set point).

Ένα ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα ελέγχου είναι πιο ευέλικτο, διότι χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά κυκλώματα, αλλά οι συνολικές απαιτήσεις είναι παρόμοιες. Ένα ψηφιακό ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί ψηφιακό ελεγκτή και πολλές λειτουργίες υλοποιούνται μέσω λογισμικού. Ακόμη, και τα προηγμένα συστήματα ελέγχου συνήθως θέτουν σε λειτουργία τις βαλβίδες υψηλής και χαμηλής πίεσης μέσω των υφιστάμενων ηλεκτροϋδραυλικών χειριστηρίων του στροβίλου.

Ένα τυπικό μοντέλο ρυθμιστή ατμοστροβίλου έχει δύο κύρια τμήματα. Το πρώτο αποτελείται από το ρυθμιστή και τη βαλβίδα ελέγχου ατμού, η έξοδος των οποίων είναι η περιοχή της βαλβίδας ελέγχου σε απόκριση στην απόκλιση της ταχύτητας της μηχανής. Το δεύτερο είναι ένα τμήμα που μοντελοποιεί το στρόβιλο, η είσοδος του οποίου είναι η ροή ατμού και η έξοδος του είναι η μηχανική ισχύς που εφαρμόζεται στο ρότορα [13].

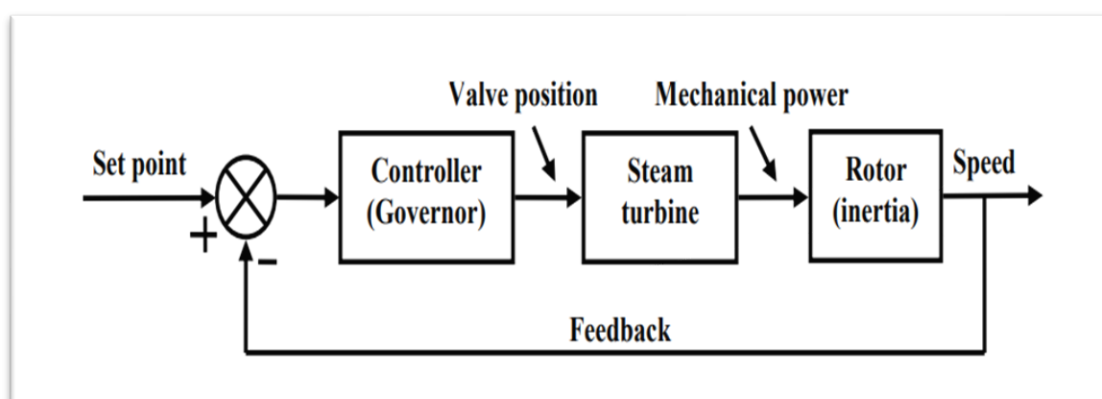


Διάγραμμα 2.7: Τυπικό μοντέλο ελέγχου ατμοστροβίλου [13]

Στο Διάγραμμα 2.7, η ροή του ατμού προς τον στρόβιλο είναι γινόμενο της επιφάνειας της βαλβίδας και της πίεσης του στραγγαλιστικού επιστομίου. Κατά συνέπεια, εάν η πίεση της στρόφιγγας μειωθεί λόγω αυξημένης ζήτησης για ροή ατμού, το εμβαδόν της βαλβίδας πρέπει να αυξηθεί ακόμη περισσότερο για να διατηρηθεί η ίδια ροή όπως στο παραπάνω μοντέλο.

Γενικά, το σύστημα ελέγχου του ατμοστροβίλου είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Η πιο βασική εφαρμογή του είναι αυτή κατά την οποία ένας ατμοστροβίλος χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός ρότορα με σταθερή ταχύτητα, όπως στο Διάγραμμα 2.8. Ο ελεγκτής ανιχνεύει την ταχύτητα του άξονα και τη συγκρίνει με το επιθυμητό σημείο ρύθμισης. Εάν υπάρχει διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της επιθυμητής ταχύτητας, ο ελεγκτής στέλνει σήμα στον ενεργοποιητή που χειρίζεται τη βαλβίδα ατμού, ο οποίος ρυθμίζει την ταχύτητα μέχρι οι δύο ταχύτητες να εξισορροπηθούν ξανά.

Οι μεταβολές στο φορτίο, που προκαλούνται από τη φόρτιση του άξονα ή από μεταβολές στην παροχή πίεσης, επηρεάζουν την ισορροπία μεταξύ της ενέργειας που παρέχεται στον στρόβιλο από το σύστημα ατμού και του έργου που αφαιρείται από τον άξονα του στροβίλου. Εάν διατίθεται περισσότερη ενέργεια από όση χρησιμοποιείται, ο άξονας θα επιταχυνθεί. Ο ελεγκτής θα ανιχνεύσει αυτή την αύξηση της ταχύτητας και θα ενεργήσει για την εξάλειψή της. Για να το υλοποιήσει αυτό, ο άξονας μειώνει την ενέργεια που παρέχεται στον ατμοστροβίλο κλείνοντας τη βαλβίδα παροχής. Αντιθέτως, εάν η καθαρή μεταβολή του ενεργειακού ισοζυγίου ήταν αρνητική, ο άξονας θα επιβραδυνόταν και ο ελεγκτής θα ανταποκρινόταν ανοίγοντας τη βαλβίδα παροχής ατμού [13].



Διάγραμμα 2.8: Διάταξη συστήματος ελέγχου ατμοστροβίλου [13]

Σε έναν ατμοστροβίλο, δύο τύποι ελέγχου ξεχωρίζουν:

- Ο έλεγχος Droop, επίσης γνωστός ως αναλογικός έλεγχος (P), ο οποίος ορίζεται από μείωση της ταχύτητας με αύξηση του φορτίου και παράγει μία αλλαγή στη θέση της βαλβίδας ανάλογη του σήματος μεταξύ του σημείου ρύθμισης της ταχύτητας και της πραγματικής ταχύτητας. Το κύριο μειονέκτημα του ελέγχου αυτού είναι ότι δεν μπορεί να εξαλείψει πλήρως το σφάλμα που προκαλείται από μία αλλαγή στο φορτίο.
- Ο Ισόχρονος έλεγχος, ο οποίος δεν ορίζεται από μείωση της ταχύτητας με αύξηση του φορτίου και διατηρεί την ταχύτητα περιστροφής του άξονα σταθερή ανεξάρτητα από το φορτίο. Για την εξάλειψη των σφαλμάτων και την ελαχιστοποίηση της υπέρβασης στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιούνται αναλογικοί-ολοκληρωτικοί-διαφορικοί (PID) ελεγκτές ατμού.

Τέλος, ένας ατμοστροβίλος μπορεί να χρησιμοποιεί πολλούς βρόχους ελέγχου, καθένας από τους οποίους απαιτεί έναν βρόχο ανάδρασης, ανάλογα με τον απαιτούμενο έλεγχο και τον αριθμό των βαλβίδων [13].

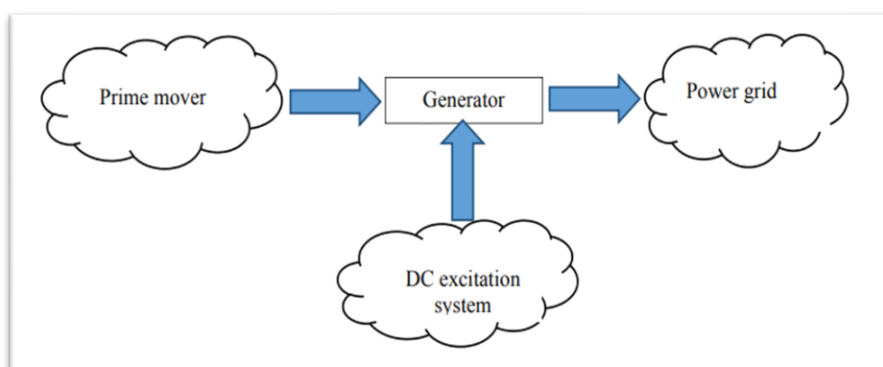
2.3.2 Ηλεκτρική Γεννήτρια (Electric Generator)

Η γεννήτρια είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο άξονας, ο διεγέρτης, ο ρότορας και ο στάτορας είναι τα τέσσερα βασικά εξαρτήματα της γεννήτριας. Η περιστροφή των πτερυγίων του ατμοστροβίλου κινεί τον διεγέρτη, ο οποίος στέλνει ηλεκτρικό ρεύμα και στρέφει το ρότορα με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το μέγεθος παραγωγής των γεννητριών κυμαίνεται από 1 MW έως 600 MW. Λόγω σχεδιαστικών περιορισμών στα συστήματα μόνωσης των γεννητριών, οι παραγόμενες τάσεις περιορίζονται γενικά στην περιοχή από 6,6 kV έως 33 kV. Ως αποτέλεσμα, απαιτούνται συχνά μετασχηματιστές ανύψωσης για τη σύνδεση της γεννήτριας με το σύστημα μεταφοράς ή το δίκτυο [15].



Εικόνα 2.2: Ηλεκτρική γεννήτρια σε γεωθερμικό εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής [16]

Οι γεννήτριες των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής πρέπει να προστατεύονται από μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές βλάβες που προκαλούνται από μη φυσιολογικές συνθήκες στη μονάδα ή στο σύστημα υποστήριξης με το οποίο είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη η μονάδα. Η προστασία μιας γεννήτριας είναι πολύ δύσκολη, λόγω των συνδέσεων του συστήματος σε τρεις διαφορετικές πλευρές, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2.11.



Διάγραμμα 2.9: Συνδέσεις συστήματος ηλεκτρικής γεννήτριας [15]

Από τη μία πλευρά, συνδέεται με την κινητήρια μηχανή (prime mover). Από την άλλη πλευρά, πρέπει να λειτουργεί συγχρονισμένα με το δίκτυο (power grid). Σε μια άλλη (τρίτη) πλευρά, συνδέεται με την πηγή διέγερσης συνεχούς ρεύματος (DC excitation system). Επομένως, είναι προφανές ότι η προστασία της γεννήτριας είναι πολύ πιο περίπλοκη σε σύγκριση με την προστασία άλλων στοιχείων ενός εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής.

Τα κύρια συστήματα ελέγχου και προστασίας μίας ηλεκτρικής γεννήτριας είναι τα εξής:

- Μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης (Current & voltage transformers). Σκοπός τους είναι να μειώνουν το ρεύμα ή την τάση μιας συσκευής σε τιμές εντός του εύρους μέτρησης των οργάνων, δηλαδή 1 A ή 5 A για τους μετασχηματιστές ρεύματος (Current Transformers) και 110 V ή 100 V για τους μετασχηματιστές τάσης (ή δυναμικού) (Voltage Transformers/Potential Transformers). Ως αποτέλεσμα, οι είσοδοι προστατευτικού εξοπλισμού τυποποιούνται εντός του ανωτέρου εύρους τιμών.
- Ηλεκτρονόμοι προστασίας (Protective relays). Πρόκειται για έξυπνες ηλεκτρονικές συσκευές που λαμβάνουν μετρούμενα σήματα από τη δευτερεύουσα πλευρά των μετασχηματιστών ρεύματος και τάσης. Επίσης, καθορίζουν εάν η προστατευόμενη μονάδα καταπονείται ή όχι (με βάση τον τύπο και τη διαμόρφωση της). Τέλος, εάν κρίνεται απαραίτητο, οι ηλεκτρονόμοι προστασίας στέλνουν σήμα ενεργοποίησης στους διακόπτες ισχύος για να αποσυνδέσουν τα ελαττωματικά στοιχεία από το σύστημα ισχύος.
- Διακόπτες κυκλώματος (Circuit breakers). Όταν ανιχνεύονται σφάλματα, ανταποκρίνονται στις εντολές ανοίγματος που αποστέλλονται από τους ηλεκτρονόμους προστασίας και ανταποκρίνονται στις εντολές κλεισίματος όταν εκκαθαρίζονται τα σφάλματα. Είναι ακόμη εφικτό το χειροκίνητο άνοιγμά τους για την απομόνωση ενός εξαρτήματος, παραδείγματος χάρι για τη συντήρησή του [15].

2.3.3 Εναλλάκτης Θερμότητας (Heat Exchanger)

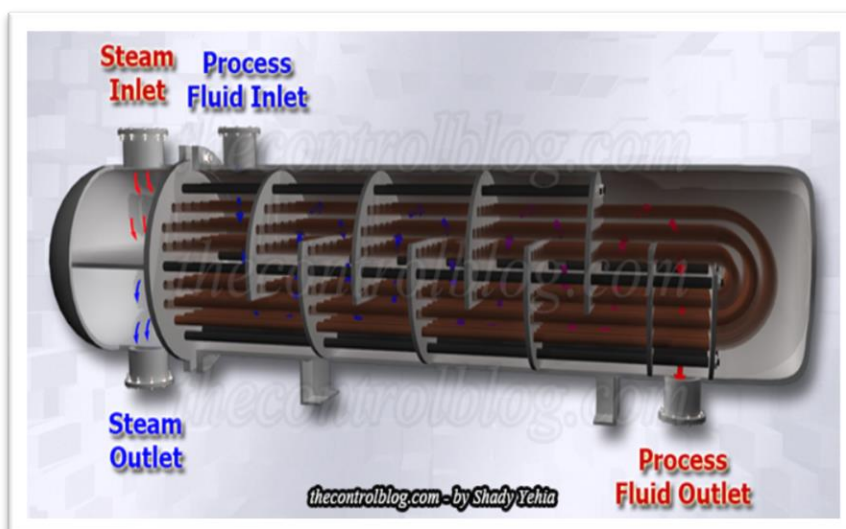
Ο εναλλάκτης θερμότητας μεταφέρει θερμότητα μεταξύ δύο ρευστών χωρίς να τα αναμειγνύει. Η δυναμική της θερμότητας του εναλλάκτη εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η διαφορά θερμοκρασίας, η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, ο ρυθμός ροής των ρευστών και τα μοτίβα ροής [18]. Ο συνηθέστερος τύπος εναλλάκτη θερμότητας σε γεωθερμικά εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής, είναι ο εναλλάκτης κελύφους και σωλήνα (shell and tube). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4, αποτελείται από ένα εξωτερικό κέλυφος με μια δέσμη σωλήνων στο εσωτερικό του, οι οποίοι διατρέχουν ευθεία ή έχουν σχήμα "U". Για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών, το πρώτο ρέει μέσω των σωλήνων και το δεύτερο ρέει μέσω του κελύφους που τους περιβάλλει [19].

Η θερμότητα μεταφέρεται από το ένα ρευστό στο άλλο μέσω των τοιχωμάτων του σωλήνα, είτε από το ρευστό του σωλήνα στο ρευστό του κελύφους ή αντίστροφα. Τα ρευστά τόσο στο κέλυφος όσο και στο σωλήνα μπορεί να είναι υγρά ή αέρια. Προκειμένου να μεταφερθεί αποτελεσματικά η θερμότητα χρησιμοποιούνται πολλοί σωλήνες για να αυξηθεί η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών.

Με σκοπό την ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης στρατηγικής ελέγχου για οποιονδήποτε βρόχο ελέγχου, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η μεταβλητή διεργασίας ή η ελεγχόμενη μεταβλητή, η μεταβλητή χειρισμού και οι διάφορες μεταβλητές διαταραχής που επηρεάζουν άμεσα την ελεγχόμενη μεταβλητή.



Εικόνα 2.3: Εναλλάκτης θερμότητας σε εργοστάσιο γεωθερμίας [17]

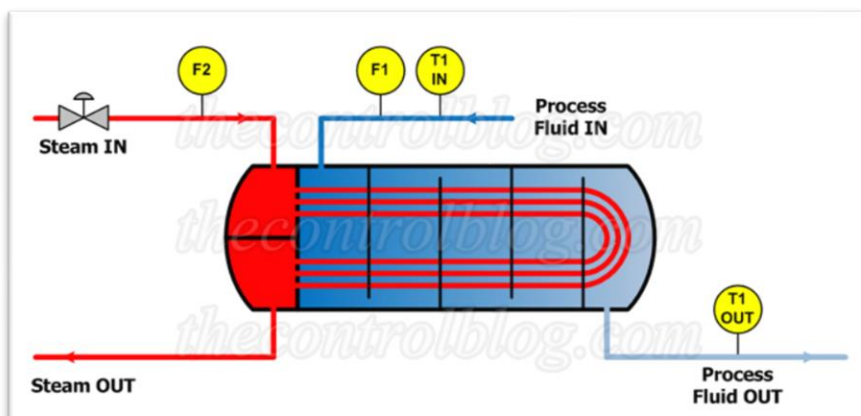


Εικόνα 2.4: Διατομή σε εναλλάκτη θερμότητας κελύφους και σωλήνα, με διαμόρφωση U [19]

Στο Διάγραμμα 2.10, το ρευστό στην πλευρά του κελύφους είναι το ρευστό διεργασίας που πρέπει να θερμανθεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο ρύθμισης θερμοκρασίας (set point). Επιπλέον, η θερμοκρασία μετράται στην έξοδο T1-OUT του εναλλάκτη θερμότητας (ελεγχόμενη μεταβλητή).

Η θερμότητα μεταφέρεται στο ρευστό διεργασίας με τη διέλευση ατμού από την πλευρά των σωλήνων. Ισχύει, ότι όσο περισσότερος ατμός περνάει από τους σωλήνες, τόσο περισσότερη θερμότητα μεταφέρεται στο ρευστό διεργασίας και αντίστροφα. Ο έλεγχος της

ροής ατμού F2 (μεταβλητή χειρισμού) επιτυγχάνεται με στραγγαλισμό του επιστομίου που είναι εγκατεστημένο στην πλευρά εισόδου του ατμού.



Διάγραμμα 2.10: Λειτουργία εναλλάκτη θερμότητας [19]

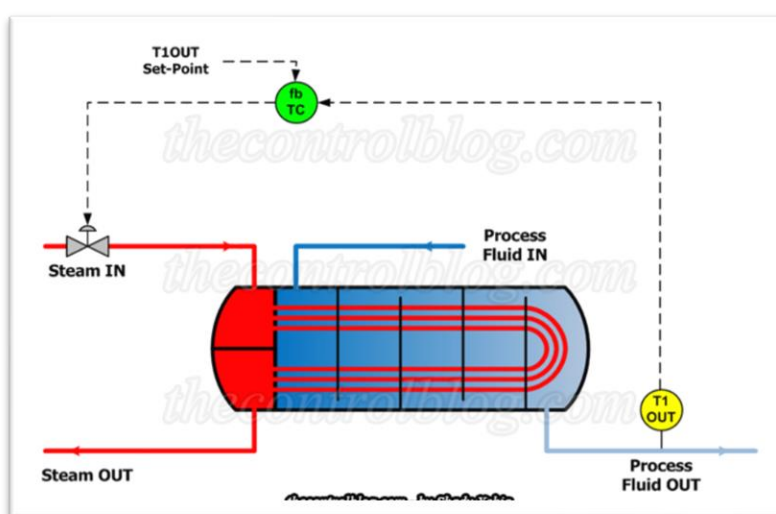
Η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού διεργασίας μπορεί να επηρεαστεί από τρεις κύριες διαταραχές:

- Μεταβολές του ρυθμού ροής του ρευστού διεργασίας, F1
- Μεταβολές της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού διεργασίας, T1-IN
- Μεταβολές στην πίεση του ατμού, προκαλώντας μεταβολές στην παροχή ατμού, F2

Ο στόχος του ελέγχου είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού διεργασίας T1-OUT στο επιλεγμένο σημείο ρύθμισης (set point) παρά τις όποιες διαταραχές, ρυθμίζοντας την παροχή ατμού F2. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τέσσερις κατηγορίες ελέγχου, οι οποίες είναι οι εξής:

- Έλεγχος Ανάδρασης (Feedback Control)
- Έλεγχος Συστοιχίας (Cascade Control)
- Έλεγχος Πρόδρασης (Feed-Forward Control)
- Ολοκληρωμένος Έλεγχος (Integrated Control)

Έλεγχος Ανάδρασης (Feedback Control)



Διάγραμμα 2.11: Διάταξη ελέγχου ανάδρασης εναλλάκτη θερμότητας [19]

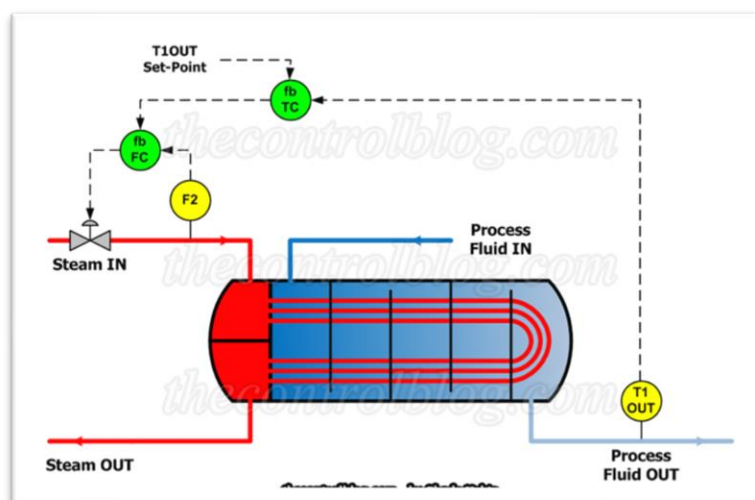
Η μεταβλητή διεργασίας, T1-OUT, μετράται και οδηγείται προς σύγκριση με το επιθυμητό σημείο ρύθμισης. Στην συνέχεια ένας PID ελεγκτής προκαλεί την απαιτούμενη ενέργεια ελέγχου, η οποία είναι είτε να ανοίξει περισσότερο ή λιγότερο το επιστόμιο ελέγχου ατμού.

Ο έλεγχος ανατροφοδότησης απαιτεί πολύ λίγη γνώση της διεργασίας. Ωστόσο, το μειονέκτημα του ελέγχου ανατροφοδότησης είναι η αδυναμία του να ανταποκριθεί σε διαταραχές, μέχρι να επηρεαστεί ήδη η ελεγχόμενη μεταβλητή. Τέλος, εάν εμφανιστούν πάρα πολλές διαταραχές με σημαντικό μέγεθος, μπορούν να θέσουν τη διαδικασία εκτός ελέγχου οπότε απαιτείται έλεγχος πρόδρασης σε αυτή την περίπτωση [19].

Έλεγχος Συστοιχίας (Cascade Control)

Αντί να τροφοδοτεί απευθείας την έξοδο του ελεγκτή θερμοκρασίας PID στο επιστόμιο ελέγχου, το σύστημα ελέγχου συστοιχίας την τροφοδοτεί ως σημείο ρύθμισης σε έναν ελεγκτή ροής ατμού με ανατροφοδότηση PID (fbFC). Αυτός ο δεύτερος βρόχος είναι υπεύθυνος για τη διασφάλιση ότι η παροχή ατμού δεν μεταβάλλεται λόγω οποιουδήποτε ανεξέλεγκτου παράγοντα, όπως μεταβολές της πίεσης ατμού ή προβλήματα στο επιστόμιο.

Έστω ότι ο εναλλάκτης θερμότητας του Διαγράμματος 2.12, βρίσκεται σε σταθερή λειτουργία με τη θερμοκρασία εξόδου να ταιριάζει με το σημείο ρύθμισης, η έξοδος του ελεγκτή fbTC είναι σταθερή και μια ξαφνική αύξηση της πίεσης του ατμού προκαλεί την αύξηση της παροχής ατμού F2. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της ελεγχόμενης μεταβλητής με την πάροδο του χρόνου και όχι αμέσως. Χωρίς το βρόχο ελέγχου ροής, το fbTC δεν θα λάβει καμία διορθωτική ενέργεια έως ότου η θερμοκρασία εξόδου τεθεί σε κίνδυνο.



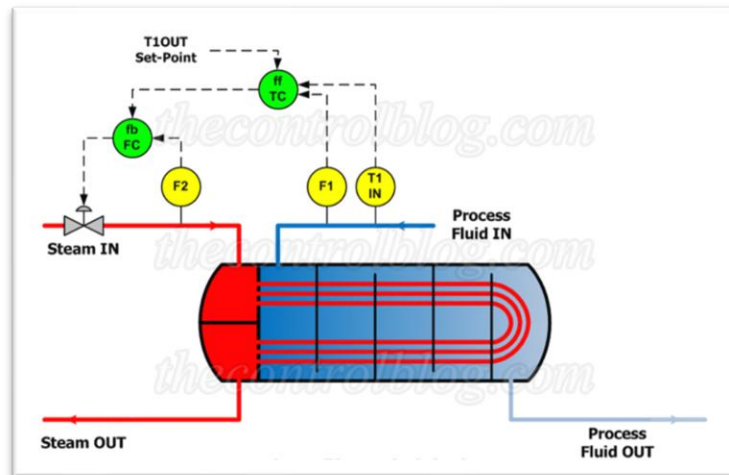
Διάγραμμα 2.12: Διάταξη ελέγχου συστοιχίας εναλλάκτη θερμότητας [19]

Με την εφαρμογή του ελέγχου συστοιχίας, ο βρόχος ελέγχου ροής με ανάδραση "fbFC" θα προσαρμόσει αμέσως τη θέση του επιστομίου μόλις αλλάξει η παροχή ατμού για να επαναφέρει τη ροή στην προηγούμενη σταθερή κατάσταση, αποτρέποντας την εμφάνιση αλλαγής στη θερμοκρασία εξόδου.

Αξίζει να σημειωθεί ακόμα, ότι ο βρόχος ελέγχου ροής πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα, για να λειτουργεί ταχύτερα από τον βρόχο ελέγχου θερμοκρασίας, έτσι ώστε η μεταβολή της ροής να ακυρώνεται πριν επηρεάσει τη θερμοκρασία εξόδου του ρευστού διεργασίας [19].

Έλεγχος Πρόδρασης (Feed-Forward Control)

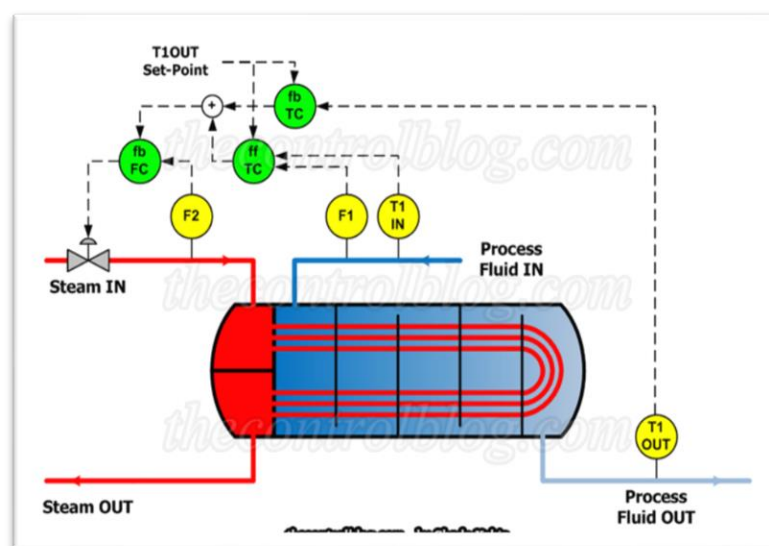
Σε αντίθεση με τον έλεγχο ανατροφοδότησης, ο έλεγχος πρόδρασης αναλαμβάνει διορθωτική δράση ταυτόχρονα με την εμφάνιση μιας διαταραχής. Ο έλεγχος πρόδρασης δεν βλέπει τη μεταβλητή της διεργασίας, αλλά βλέπει μόνο τις διαταραχές και ανταποκρίνεται σε αυτές καθώς εμφανίζονται. Αυτό επιτρέπει στον ελεγκτή πρόδρασης να αντισταθμίζει την επίδραση μιας διαταραχής γρήγορα και άμεσα.



Διάγραμμα 2.13: Διάταξη ελέγχου πρόδρασης εναλλάκτη θερμότητας [19]

Το προφανές πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι διορθώνει το πρόβλημα πριν διαταραχθεί η διαδικασία. Από την άλλη πλευρά, απαιτεί υψηλό λειτουργικό κόστος, επειδή κάθε διαταραχή πρέπει να μετράται, αυξάνοντας τον αριθμό των οργάνων και το σχετικό κόστος μηχανικής. Επιπλέον, η προσέγγιση αυτή απαιτεί βαθύτερη κατανόηση της διεργασίας [19].

Ολοκληρωμένος Έλεγχος (Integrated Control)



Διάγραμμα 2.14: Συνδυασμένη προσέγγιση για τον έλεγχο του εναλλάκτη θερμότητας [19]

Στο Διάγραμμα 2.14, απεικονίζεται μια συνδυαστική προσέγγιση που χρησιμοποιεί ανατροφοδότηση, πρόδραση και έλεγχο συστοιχίας για την κάλυψη των αναγκών ελέγχου ενός συστήματος εναλλάκτη θερμότητας:

- Ο βρόχος πρόδρασης θα χειριστεί τις σημαντικότερες διαταραχές του ρευστού της διεργασίας.
- Ο βρόχος ελέγχου ροής συστοιχίας θα χειριστεί θέματα με την πίεση του ατμού και τα επιστόμια.
- Όλα τα υπόλοιπα θα τα χειρίζεται ο βρόχος ανατροφοδότησης.

Ο συνδυασμός των τριών συστημάτων ελέγχου που περιεγράφηκαν παραπάνω για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του εναλλάκτη θερμότητας συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης της διαδικασίας από το επιθυμητό αποτέλεσμα [19].

2.3.4 Συμπυκνωτής (Condenser)

Ο συμπυκνωτής αποτελεί ένα ακόμη σύστημα εναλλάκτη θερμότητας στον δυαδικό κύκλο. Ο συμπυκνωτής ανταλλάσσει θερμότητα μεταξύ του κύκλου ψυκτικού ρευστού και των ατμών του εργαζόμενου ρευστού. Οι ατμοί που εξέρχονται από τον ατμοστρόβιλο οδηγούνται στον συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνονται από το ψυκτικό ρευστό. Για τη συμπύκνωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ψύξη με νερό ή αέρα και η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση (ισοβαρής συμπύκνωση) [20].



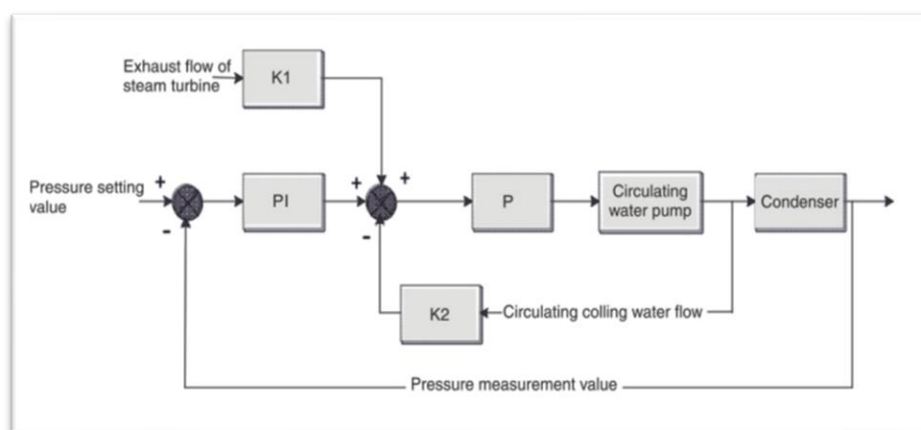
Εικόνα 2.5 Συμπυκνωτής σε μία γεωθερμική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής [21]

Τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ενός συμπυκνωτή αφορούν τα ακόλουθα ζητήματα:

- Την πίεση του μηχανήματος
- Το βαθμό υπόψυξης του νερού συμπύκνωσης
- Τα επίπεδα και τη ροή του νερού που κυκλοφορεί στο εσωτερικό του

Σύστημα ελέγχου πίεσης συμπυκνωτή

Όταν ένας σταθμός δυαδικού κύκλου βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, η πίεση στο συμπυκνωτή θα πρέπει να διατηρείται σταθερή. Ως αποτέλεσμα, ο συμπυκνωτής μπορεί να παρέχει σταθερή αντίθλιψη για τον ατμοστρόβιλο, εξασφαλίζοντας την απόδοση και τη σταθερότητα του σταθμού. Συνήθως, το σύστημα ελέγχου της πίεσης του συμπυκνωτή χρησιμοποιεί αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή PI. Ο ελεγκτής διατηρεί μια σταθερή πίεση μεταβάλλοντας τη ροή του νερού ψύξης που κυκλοφορεί με τη ρύθμιση της ταχύτητας της αντλίας κυκλοφορίας του νερού. Στο Διάγραμμα 2.15 απεικονίζεται το σύστημα ελέγχου της πίεσης του συμπυκνωτή.



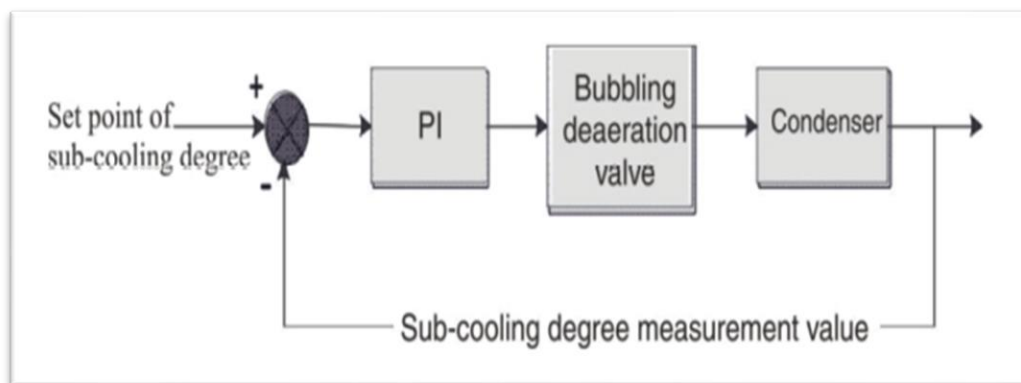
Διάγραμμα 2.15: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ελέγχου πίεσης ενός συμπυκνωτή [22]

Το σύστημα υιοθετεί τις μεθόδους του ελέγχου συστοιχίας (cascade control) και του ελέγχου πρόδρασης (feed-forward control). Το σήμα ροής καυσαερίων χρησιμοποιείται ως σήμα πρόδρασης για την ταχεία προσαρμογή του κυκλοφορούντος νερού ψύξης. Η ροή του νερού ψύξης που κυκλοφορεί χρησιμοποιείται ως σήμα ανατροφοδότησης για να υπερβεί τη διαταραχή της ταχύτητας της αντλίας κυκλοφορίας. Το σήμα μέτρησης της τιμής της πίεσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόκλισης της πίεσης. Ο κύριος ελεγκτής είναι ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής PI και ο δευτερεύων ελεγκτής είναι ένας αναλογικός ελεγκτής P [22].

Σύστημα ελέγχου βαθμού υπόψυξης νερού συμπύκνωσης

Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας κορεσμού και της θερμοκρασίας του νερού συμπύκνωσης αναφέρεται ως βαθμός υπόψυξης του νερού συμπύκνωσης. Η ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας της μεμβράνης συμπυκνώματος και η αντίσταση του αερίου στην πλευρά του κελύφους αποτελούν τις αιτίες εμφάνισης του βαθμού υποψύξης. Ο υψηλός βαθμός υπόψυξης θα οδηγήσει σε υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο στο νερό συμπύκνωσης και εκείνη με τη σειρά της θα απειλήσει την ασφάλεια των συσκευών και των συστημάτων. Επιπρόσθετα, ο χαμηλός βαθμός υπόψυξης μπορεί να προκαλέσει αεριοποίηση του νερού συμπυκνώματος, η οποία θα βλάψει την αντλία συμπύκνωσης. Επομένως, ο βαθμός υπόψυξης του νερού συμπύκνωσης πρέπει να ελέγχεται σε ένα καθορισμένο σημείο. Στο Διάγραμμα

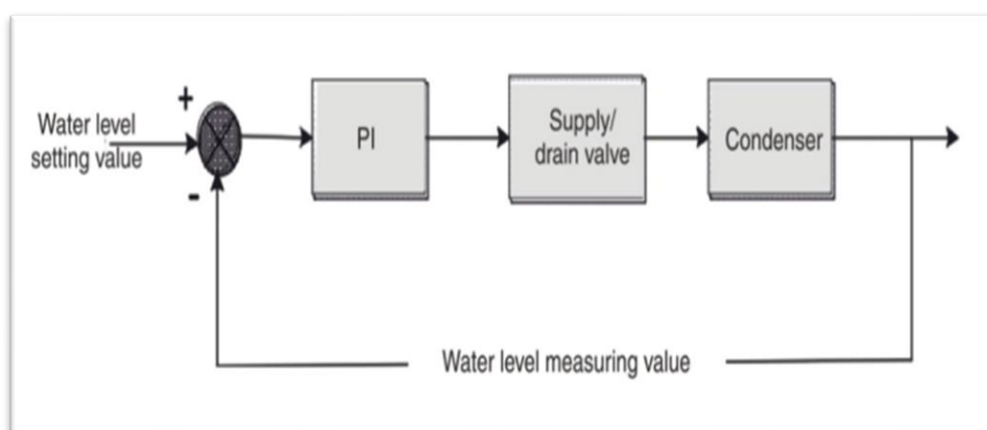
2.16 απεικονίζεται το σχήμα του συστήματος ελέγχου του βαθμού υποψύξης του νερού συμπύκνωσης. Ο ρυθμός ροής του ατμού εξατμίσης για τη θέρμανση του συμπυκνώματος ελέγχεται με τη ρύθμιση του ανοίγματος της βαλβίδας απαερισμού φυσαλίδων και ο βαθμός υποψύξης του συμπυκνώματος μπορεί στη συνέχεια να ελεγχθεί σε ένα καθορισμένο σημείο [22].



Διάγραμμα 2.16: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ελέγχου βαθμού υπόψυξης συμπυκνωμένου νερού σε συμπυκνωτή [22]

Σύστημα ελέγχου επιπέδου και ροής νερού

Τα υψηλά επίπεδα νερού στο συμπυκνωτή μπορεί να βυθίσουν τους σωλήνες νερού ψύξης, επηρεάζοντας τη συμπύκνωση του ατμού και προκαλώντας υποψύξη του νερού συμπύκνωσης. Αντιθέτως, τα χαμηλά επίπεδα νερού μπορεί να προκαλέσουν σπηλαιώση στην αντλία συμπύκνωσης, με αποτέλεσμα την αστοχία της. Οπότε, η στάθμη του νερού πρέπει να διατηρείται εντός ενός συγκεκριμένου εύρους. Στο σύστημα ελέγχου χρησιμοποιείται ο αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής PI και η στάθμη του νερού ελέγχεται με τη ρύθμιση του ανοίγματος της βαλβίδας παροχής/αποστράγγισης. Στο Διάγραμμα 2.17 απεικονίζεται το σχήμα του συστήματος ελέγχου της στάθμης του νερού [22].



Διάγραμμα 2.17: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ελέγχου επιπέδου και ροής νερού που κυκλοφορεί στο συμπυκνωτή [22]

Ο συμπυκνωτής ενός γεωθερμικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια συσκευή πολλαπλών μεταβλητών. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, τα τρία συστήματα ελέγχου λειτουργούν ταυτόχρονα και τα ελεγχόμενα αντικείμενα τους, έχουν τις ακόλουθες σύνθετες σχέσεις σύζευξης:

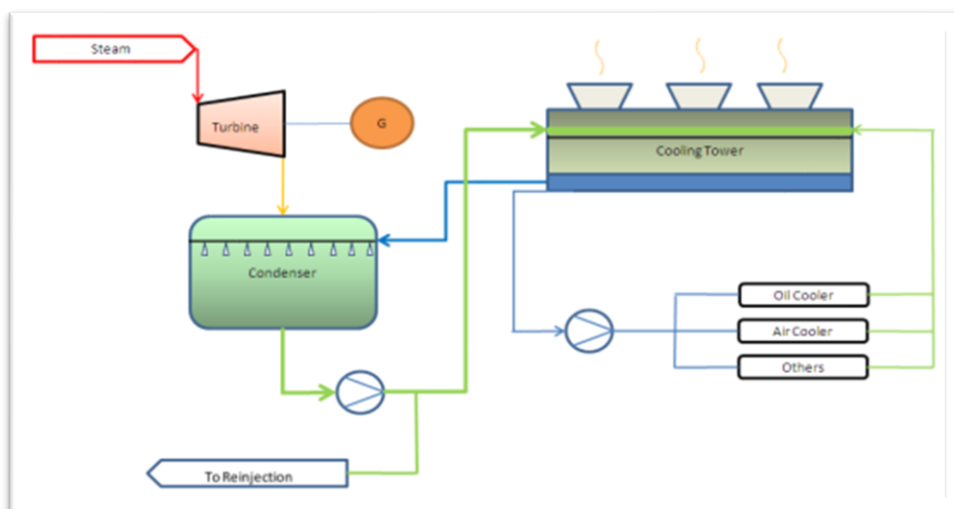
- Πρώτον, η αλλαγή της πίεσης προκαλεί την αλλαγή της θερμοκρασίας κορεσμού, η οποία οδηγεί στη μεταβολή του βαθμού υπόψυξης του νερού συμπύκνωσης.
- Δεύτερον, η αλλαγή στον ρυθμό ροής της κυκλοφορούσας ψύξης θα έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της ποσότητας συμπυκνωμένου ατμού, η οποία τελικά θα μεταβάλει τη στάθμη του νερού.
- Τρίτον, ο ρυθμός ροής παροχής/αποστράγγισης προκαλεί τη μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, η οποία οδηγεί στην αλλαγή του βαθμού υπόψυξης του νερού συμπύκνωσης.
- Τέλος, ο ρυθμός ροής του ατμού εξάτμισης με φυσαλίδες μπορεί να προκαλέσει αναβρασμό του νερού συμπύκνωσης και αλλαγή της πίεσης [22].

2.3.5 Πύργος Ψύξης (Cooling Tower)

Κάθε σύστημα ψύξης νερού περιλαμβάνει μια λεκάνη, η οποία συλλέγει το ψυχρό νερό από τον πύργο ψύξης, ενώ ταυτόχρονα χρησιμεύει ως αποθήκη νερού του συνολικού συστήματος ψύξης νερού. Το νερό ψύξης ρέει από τη λεκάνη του πύργου ψύξης στον συμπυκνωτή ψεκασμού, ο οποίος διατηρείται υπό κενό. Ο συμπυκνωτής ψεκασμού, ψεκάζει το νερό ψύξης στο συμπυκνωτή για να έρθει σε επαφή και να συμπυκνώσει τον κορεσμένο ατμό που εξάγεται από τον ατμοστρόβιλο. Ο συνδυασμός του νερού ψύξης και του συμπυκνωμένου ατμού αντλείται στη συνέχεια στον πύργο ψύξης, όπου η θερμότητα απομακρύνεται μέσω εξάτμισης και μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή πριν επαναληφθεί η διαδικασία. Στο Διάγραμμα 2.18 απεικονίζεται η βασική διαδικασία ψύξης με νερό [24]. Τέλος, οι πύργοι ψύξης αποτελούν ξεχωριστές ογκώδεις κατασκευές, η λειτουργία των οποίων χαρακτηρίζεται σε μεγάλο βαθμό από αυτονομία.



Εικόνα 2.6: Πύργοι ψύξης εργοστασίου εκμετάλλευσης της γεωθερμίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [23]



Διάγραμμα 2.18: Απλουστευμένες ροές διεργασίας νερού ψύξης σε γεωθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής [24]

2.3.6 Πηγάδια Παραγωγής και Έγχυσης (Production and Reinjection Wells)

Για την αξιοποίηση της γεωθερμίας με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή θέρμανσης, είναι απαραίτητη η γεώτρηση και η διάνοιξη πηγαδιών έως το βάθος των γεωθερμικών δεξαμενών. Τα πηγάδια που δημιουργούνται είναι παραγωγής (production wells) για την αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών, αλλά και έγχυσης (reinjection wells) για την αναπλήρωση και διατήρηση της πίεσης εντός της δεξαμενής.



Εικόνα 2.7: Πηγάδια παραγωγής και έγχυσης σε γεωθερμικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής [25]

Τα γεωθερμικά πηγάδια διακρίνονται σε δύο κύριους τύπους, υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας (high & low temperature). Από τη μία, ο σχεδιασμός των γεωτρήσεων υψηλής θερμοκρασίας παγκοσμίως είναι αξιοσημείωτα παρόμοιος όσον αφορά τα προφίλ και τα υλικά του περιβλήματος. Από την άλλη, τα πηγάδια χαμηλής θερμοκρασίας έχουν μόνο δύο ή τρεις σειρές περιβλήματος. Το βάθος του περιβλήματος διέπεται από τη θερμοκρασία-στόχο και τα γεωλογικά κριτήρια, καθώς ο κίνδυνος ανεξέλεγκτης ροής δεν είναι τόσο μεγάλος όσο για τα πηγάδια υψηλής θερμοκρασίας [26].

Συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου εγκαθίστανται στο πλαίσιο εκμετάλλευσης κάθε ταμιευτήρα. Πρωταρχικός στόχος τους είναι η παροχή δεδομένων, σχετικά με το παραγόμενο και επανεγχυόμενο ρευστό, αλλά και η μακροπρόθεσμη παρακολούθηση των φυσικών και χημικών μεταβολών που συμβαίνουν. Η κατανόηση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα απαιτεί την ερμηνεία αυτών των δεδομένων, καθώς και τη μοντελοποίηση του. Επιπλέον, τα δεδομένα αυτά είναι πολύ χρήσιμα στην καθημερινή λειτουργία του εργοστασίου, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι παραγωγής και να εντοπιστούν τυχόν ανωμαλίες στο πηγάδι ή στη λειτουργία του, οι οποίες μπορεί να απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση. Τα κύρια συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται είναι:

- Ηλεκτρονικοί αισθητήρες (electronic sensors) και μετρητές, οι οποίοι υπολογίζουν διαρκώς τις τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας στην κεφαλή, αλλά και εντός των πηγαδιών.
- Βαλβίδες και επιστόμια ελέγχου ροής, με ηλεκτρικό ή υδραυλικό κινητήρα.
- Μετρητές ροής των γεωθερμικών ρευστών (νερό ή ατμός). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ισχύς του στροβίλου (MWe) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ροής ατμού, καθώς ο στροβίλος είναι ένας αρκετά καλός "μετρητής ατμού". Ακόμα, η θέση των βαλβίδων ελέγχου (άνοιγμα της βαλβίδας), καταγράφεται ενίοτε ως ένδειξη της ροής.
- Μικροί δειγματοληπτικοί διαχωριστές φάσης ατμού και νερού, οι οποίοι λαμβάνουν χημικά δείγματα μέσα από τα πηγάδια.
- Δειγματολήπτες, οι οποίοι λαμβάνουν τακτικά δείγματα ατμού από την είσοδο του στροβίλου για τη μέτρηση των μη συμπυκνωμένων αερίων και επιλεγμένων ορυκτών για τον προσδιορισμό της καθαρότητας του ατμού.
- Κουπόνια διάβρωσης, τα οποία τοποθετούνται στην κεφαλή των φρεατίων παραγωγής και έγχυσης για την παρακολούθηση της κατάστασης διάβρωσης/αποσάθρωσης [26].

2.4 Σύνοψη

Στην Ενότητα 2.3 πραγματοποιήθηκε ανάλυση στα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε κάθε υποσύστημα ενός γεωθερμικού εργοστασίου δυαδικού κύκλου. Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί, γίνεται μία σύνοψη σε όσα αναλύθηκαν παραπάνω. Αρχικά, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός, δηλαδή τα υποσυστήματα του σταθμού. Στη συνέχεια καταγράφονται η ελεγχόμενη μεταβλητή και η μεταβλητή χειραγώγησης, η ρύθμιση της οποίας γίνεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η ελεγχόμενη μεταβλητή να φτάνει πάντα στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Τέλος, στην τελευταία στήλη του πίνακα, σημειώνονται τα

μηχανολογικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα που επιτρέπουν τη ρύθμιση της εκάστοτε μεταβλητής χειραγώγησης.

Πίνακας 2.1: Καταγραφή του ελέγχου στα στοιχεία του εξοπλισμού μίας μονάδας δυαδικού κύκλου

Εξοπλισμός	Ελεγχόμενη Μεταβλητή	Μεταβλητή Χειραγώγησης	Εξαρτήματα
Ατμοστρόβιλος	Ταχύτητα του άξονα	Παροχή ατμού	Βαλβίδα παροχής
Ηλεκτρική Γεννήτρια	Ένταση και τάση ρεύματος	Στροφές του ρότορα	Μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης
			Ηλεκτρονόμοι προστασίας
			Διακόπτες κυκλώματος
Εναλλάκτης Θερμότητας	Θερμοκρασία εξόδου	Παροχή εργαζόμενου ρευστού	Επιστόμιο παροχής
		Θερμοκρασία εισόδου εργαζόμενου ρευστού	
		Παροχή ατμού	
Συμπυκνωτής	Πίεση εξόδου	Παροχή ατμού από τον ατμοστρόβιλο	Αντλία κυκλοφορίας νερού
	Βαθμός υπόψυξης νερού συμπύκνωσης		Βαλβίδα απαερισμού φυσαλίδων
	Ροή νερού	Παροχή νερού στην έξοδο	Βαλβίδα παροχής/αποστράγγισης
Πύργος Ψύξης	--	--	--
Πηγάδια Παραγωγής και Έγχυσης	Πίεση γεωθερμικού ρευστού	Παροχή γεωθερμικού ρευστού από ταμειυτήρα	Βαλβίδες και επιστόμια παροχής
	Θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού		
	Ροή γεωθερμικού ρευστού		Βαλβίδες και επιστόμια ελέγχου ροής

Κεφάλαιο 3^ο: Γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης σε ιδιωτικές και δημόσιες κατασκευές

3.1 Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας και μέθοδοι εγκατάστασης

Η θέρμανση και η ψύξη χώρων αποτελεί έναν από τους πιο κοινούς και διαδεδομένους τρόπους εκμετάλλευσης των γεωθερμικών πόρων, αντιπροσωπεύοντας περισσότερο από το 37% της συνολικής άμεσης χρήσης της γεωθερμίας παγκοσμίως. Εάν ακόμη συμπεριληφθούν και οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, τότε η θέρμανση/ψύξη χώρων καλύπτει ποσοστό μεγαλύτερο από το 50% όλων των μη-ηλεκτρικών γεωθερμικών χρήσεων [27].

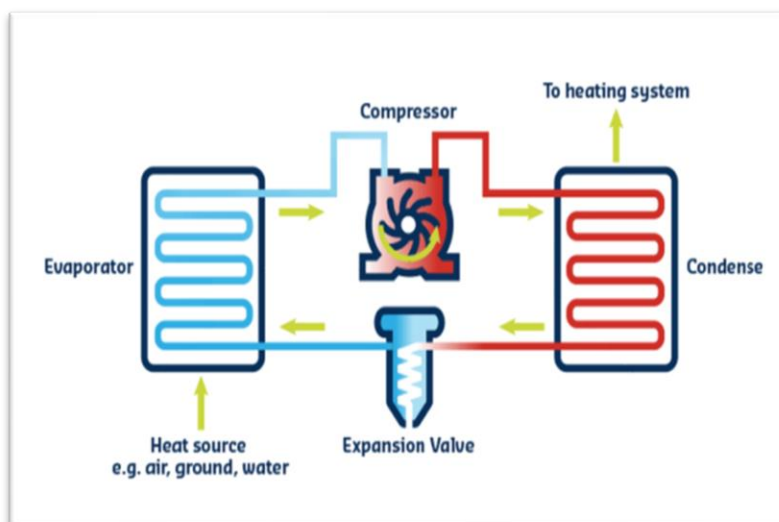
Για την επίτευξη της θέρμανσης ή του κλιματισμού κατασκευών χρησιμοποιούνται συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας αποτελούν μια ανανεώσιμη και ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο έδαφος για να παρέχει θερμική άνεση στους ανθρώπους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, μπορεί να λειτουργήσει ως σύστημα θέρμανσης ή ψύξης, με τη μεταφορά θερμότητας από τη γη στο κτίριο το χειμώνα και από το κτίριο στο έδαφος το καλοκαίρι για τη διατήρηση ενός δροσερού περιβάλλοντος, αντίστοιχα.

Μία γεωθερμική αντλία θερμότητας αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία:

- Ένα πρωτεύον κύκλωμα, επίσης γνωστό ως εναλλάκτης θερμότητας που αντιπροσωπεύει το σύστημα σύνδεσης με τη γη
- Ένα σύστημα διανομής ή δευτερεύον κύκλωμα
- Μία απλή αντλία θερμότητας, η οποία μεταφέρει θερμότητα από το εργαζόμενο ρευστό που ρέει στο πρωτεύον κύκλωμα, στο σύστημα διανομής μέσω ενός κύκλου εξάτμισης, συμπίεσης, συμπύκνωσης και εκτόνωσης ή το αντίστροφο, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας

Το πρωτεύον κύκλωμα ή ο εναλλάκτης θερμότητας εγκαθίσταται υπόγεια και αποτελείται από σωλήνες κλειστού βρόχου διαφόρων προσανατολισμών, καθώς και από ορισμένα άλλα εξαρτήματα, όπως πλάκες βάσης, γεωτρήσεις και διαφραγματικά τοιχώματα που υποστηρίζουν και βοηθούν στην ανταλλαγή θερμότητας με την αντλία θερμότητας. Μία απλή αντλία θερμότητας αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα, τα οποία είναι:

- ο εξατμιστής (evaporator),
- ο συμπυκνωτής (condenser),
- ο συμπιεστής (compressor) και
- η βαλβίδα εκτόνωσης (expansion/relief valve).



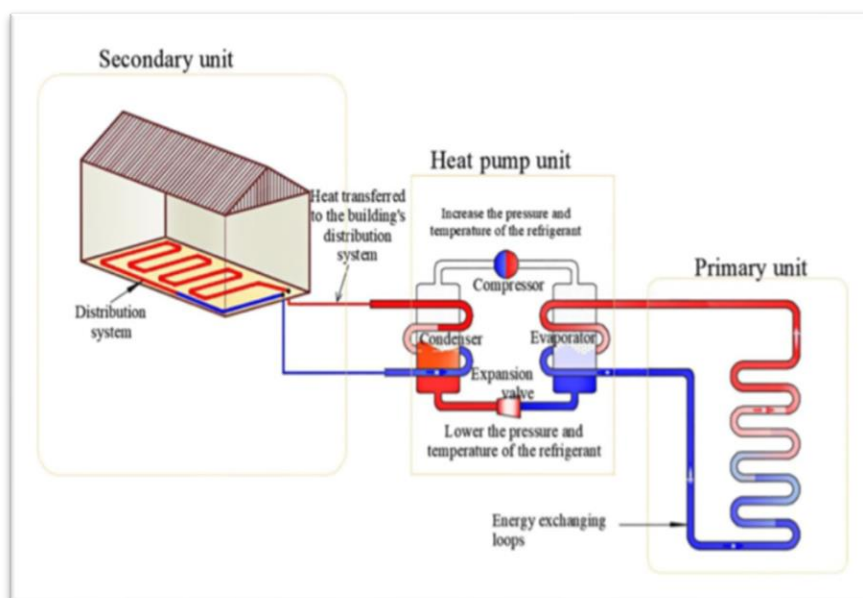
Διάγραμμα 3.1: Κύκλος λειτουργίας αντλίας θερμότητας (λειτουργία θέρμανσης) [28]

Ο τρόπος λειτουργίας μίας απλής αντλίας θερμότητας, περιγράφεται στη συνέχεια:

1. Αρχικά, η αντλία θερμότητας εξατμίζει ένα ρευστό που απορροφά θερμότητα, την οποία και ελευθερώνει κατά τη συμπύκνωσή του.
2. Σε λειτουργία θέρμανσης, η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται στο ρευστό που κυκλοφορεί στο εξωτερικό πηνίο, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι ο εξατμιστής.
3. Στη συνέχεια, καθώς το εργαζόμενο ρευστό εισέρχεται στο συμπιεστή, συμπιέζεται με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί υπέρθερμος ατμός, ο οποίος περνάει μέσα από το συμπυκνωτή. Σε εκείνο το σημείο πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας από τον υπέρθερμο ατμό, ο οποίος έχει υψηλότερη πίεση και θερμοκρασία από τη θερμική καταβόθρα, στους χώρους του κτιρίου. Επιπρόσθετα, η συμπύκνωση του ατμού γίνεται σε σταθερή πίεση.
4. Ακόμα, το ψυκτικό υγρό εισέρχεται σε μία βαλβίδα εκτόνωσης σε μορφή διφασικού μίγματος (ατμός/νερό). Κατά τη διάρκεια αυτής της αδιαβατικής διαδικασίας, η ειδική ενθαλπία παραμένει σταθερή.
5. Τέλος, το ψυχρό εργαζόμενο μέσο, ρέει μέσω της βαλβίδας εκτόνωσης πίσω στον εξατμιστή, για να αρχίσει εκ νέου ο κύκλος.

Η διαδικασία θέρμανσης ενός χώρου απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.2. Ξεκινάει με την άντληση του ρευστού φορέα θερμότητας στον εναλλάκτη θερμότητας και την εξαγωγή θερμότητας από το έδαφος. Η ενέργεια που λαμβάνεται από το έδαφος μεταφέρεται στο ψυκτικό μέσο και από εκεί στον εξατμιστή της μονάδας αντλίας θερμότητας. Ως αποτέλεσμα, το ψυκτικό μέσο συμπυκνώνεται και εισέρχεται στον συμπιεστή ως ατμός χαμηλής πίεσης. Επειδή ο ατμός χαμηλής πίεσης συμπιέζεται, η πίεση και η θερμοκρασία του αυξάνονται. Εν συνεχεία, ο ατμός εξόδου, υψηλής πίεσης, διέρχεται από τον συμπυκνωτή και μεταφέρει θερμότητα στη δευτερεύουσα μονάδα, επιτρέποντας στο ψυκτικό μέσο να συμπυκνωθεί σε

υγρό και να εισέλθει στη βαλβίδα εκτόνωσης, έτοιμο για τον επόμενο κύκλο. Η δευτερεύουσα μονάδα αντλεί θερμότητα από τον συμπυκνωτή και τη διοχετεύει μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων σε ένα σύστημα διανομής θερμότητας. Αυτοί οι σωλήνες μπορούν να εγκατασταθούν στο έδαφος, σε τοίχους ή οροφές και να χρησιμοποιηθούν ακόμη και ως θερμαντικά σώματα. Τέλος, όσον αφορά την ψύξη, η διαδικασία αντιστρέφεται, με τη δευτερεύουσα μονάδα να λειτουργεί ως πηγή θερμότητας και την πρωτεύουσα μονάδα να λειτουργεί ως απαγωγός θερμότητας [28].



Διάγραμμα 3.2: Σύστημα λειτουργίας μίας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας [28]

Τα συστήματα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Συστήματα Ανοικτού Βρόχου (Open Loop Systems)
- Συστήματα Κλειστού Βρόχου (Closed Loop Systems)

Ο τύπος του συστήματος που επιλέγεται για εγκατάσταση καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η γεωλογία και η υδρογεωλογία του εδάφους, αφού ο αγωγός θα θαφτεί υπογείως, ο τύπος του εδάφους και η θερμική αγωγιμότητα, η διαθεσιμότητα του εδάφους και της επιφάνειας και η παρουσία μιας πιθανής γεωθερμικής δεξαμενής στην περιοχή. Επιπλέον, το μήκος των σωλήνων ποικίλλει ανάλογα με τη διαμόρφωση του βρόχου, την κατάσταση του εδάφους και τα φορτία θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου ή της κατοικίας.

Ανάλογα με το αν το σύστημα είναι ανοικτό ή κλειστό, οι κατασκευαστές των βρόχων χρησιμοποιούν διάφορα υλικά για την κατασκευή των αγωγών. Στα συστήματα ανοικτού βρόχου χρησιμοποιούνται χαλκοσωλήνες, οι οποίοι θάβονται υπόγεια για την άμεση μεταφορά θερμότητας. Από την άλλη, το σύστημα σωληνώσεων στα συστήματα κλειστού βρόχου είναι κατασκευασμένο από ανθεκτικό υλικό που επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας. Συνήθως χρησιμοποιούνται πλαστικά, συγκεκριμένα πολυαιθυλένιο ή πολυπροπυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE ή HDPP) και πολυβουτυλένιο (PB). Οι σωλήνες έχουν συνήθως πάχος τοιχώματος από 2,0 έως 2,3 χιλιοστά και ονομαστική εσωτερική διάμετρο από 20 μέχρι 44 χιλιοστά [28].

3.1.1 Συστήματα Ανοικτού Βρόχου (Open Loop Systems)

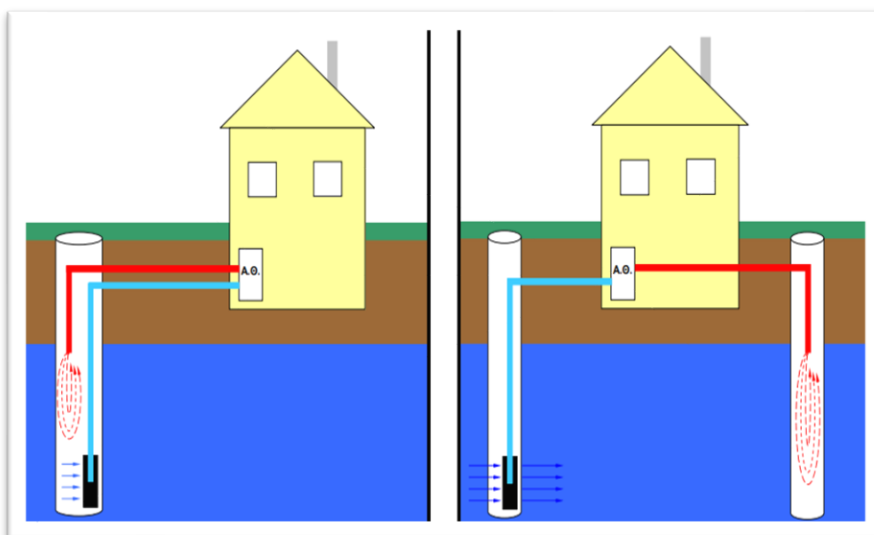
Στα συστήματα ανοικτού βρόχου το πρωτεύον κύκλωμα της γεωθερμικής αντλίας, απορροφά νερό από κάποιον υδροφόρο σχηματισμό. Το νερό χρησιμοποιείται στο δευτερεύον κύκλωμα του συστήματος, για τη θέρμανση ή ψύξη του κτιρίου και στη συνέχεια απορρίπτεται είτε πίσω στην ίδια πηγή είτε σε κοντινό υδροφόρο στρώμα της περιοχής. Επιπλέον, για την αδιάκοπη λειτουργία των συγκεκριμένων συστημάτων, η ποσότητα και η ποιότητα του νερού θα πρέπει να είναι οι κατάλληλες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Τα συστήματα ανοικτού βρόχου διακρίνονται στους εξής τύπους, βάσει της κατασκευής τους:

- Συστήματα Φρέατος
- Επιφανειακά Συστήματα
- Μικτά Συστήματα

Συστήματα Φρέατος

Το νερό στα συστήματα φρέατος αντλείται από έναν υπόγειο υδροφόρο σχηματισμό, μέσω ενός πηγαδιού παραγωγής που έχει δημιουργηθεί με γεώτρηση. Για την απόρριψη του νερού, μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί το ίδιο φρέαρ ή να πραγματοποιηθεί γεώτρηση ενός δεύτερου φρέατος, το οποίο θα βρίσκεται εντός του ίδιου σχηματισμού.

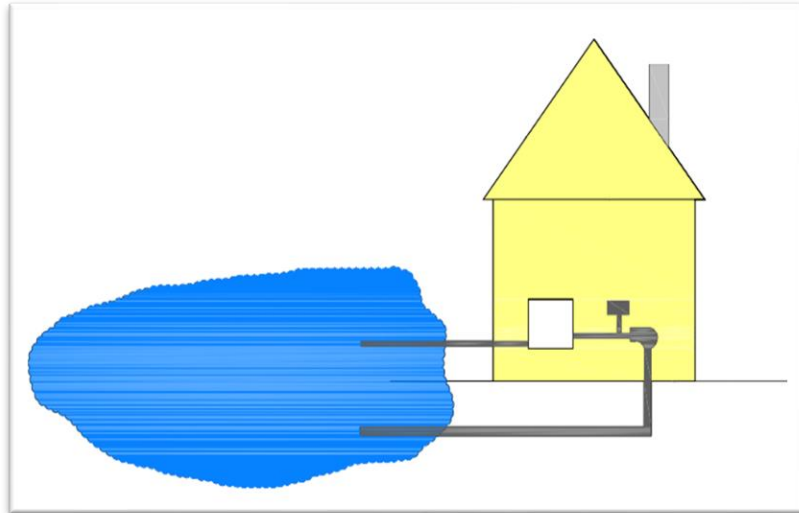
Στην πρώτη περίπτωση, στην οποία το ίδιο φρέαρ χρησιμοποιείται για άντληση και απόρριψη του νερού, θα πρέπει η αντλία αναρρόφησης να τοποθετηθεί στο κατάλληλο βάθος, ώστε να απέχει αρκετά από την αντλία απόρριψης του νερού. Στην περίπτωση γεώτρησης δεύτερου φρέατος για την επανεισαγωγή του νερού στον υδροφόρο σχηματισμό, υφίσταται ένας κατασκευαστικός περιορισμός. Η απόρριψη του νερού θα πρέπει να γίνεται σε σημείο κατάντη του σημείου απορρόφησης, για την αποφυγή της ανάμιξης των δύο ρευμάτων και της άντλησης φυσικού νερού που έχει αναμιχθεί με νερό απόρριψης, γεγονός το οποίο θα υποβαθμίσει τη λειτουργία του συστήματος [29].



Εικόνα 3.1: Συστήματα μονού και διπλού φρέατος [29]

Επιφανειακά Συστήματα

Πρόκειται για συστήματα τα οποία εγκαθίστανται σε κτίρια τα οποία βρίσκονται κοντά σε επιφανειακές πηγές, όπως για παράδειγμα λίμνες ή ποτάμια. Στα συστήματα αυτά, η άντληση και η απόρριψη του νερού, πραγματοποιούνται από και προς την ίδια πηγή αντίστοιχα [29].



Εικόνα 3.2: Επιφανειακό σύστημα ανοικτού βρόχου [29]

Μικτά Συστήματα

Τα μικτά συστήματα ανοικτού βρόχου συνδυάζουν χαρακτηριστικά από τους δύο προηγούμενους τύπους. Στην προκειμένη περίπτωση, το νερό αντλείται και απορρίπτεται σε διαφορετικές πηγές, οι οποίες είναι δυνατόν να βρίσκονται και σε διαφορετικό υψομετρικό επίπεδο [29].



Εικόνα 3.3: Μικτό σύστημα ανοικτού βρόχου [29]

3.1.2 Συστήματα Κλειστού Βρόχου (Closed Loop Systems)

Τα συστήματα κλειστού βρόχου κυκλοφορούν ένα μείγμα αντιψυκτικού διαλύματος και νερού σε σωλήνες θαμμένους στο νερό ή στο έδαφος, οι οποίοι ονομάζονται γεωεναλλάκτες (geo-exchangers), για να μεταφέρουν τη θερμότητα του εδάφους στην αντλία θερμότητας ή αντίστροφα. Σε αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιείται σταθερός όγκος ρευστού μεταφοράς θερμότητας και η ανταλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται μέσω αγωγής από το έδαφος προς τους σωλήνες. Το ρευστό λαμβάνει θερμότητα μέσω συναγωγής και στη συνέχεια τη μεταφέρει στην αντλία θερμότητας μέσω αγωγής καθώς κυκλοφορεί. Με άλλα λόγια, επειδή δεν υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ του εδάφους ή των υπόγειων υδάτων και του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, το σύστημα είναι κλειστό. Τα πιο κοινά εργαζόμενα ρευστά που χρησιμοποιούνται είναι το νερό, αλατούχα διαλύματα και διαλύματα γλυκόλης [28].

Παρόλο που το αντιψυκτικό διάλυμα μειώνει το σημείο πήξης του υγρού, γεγονός που είναι επωφελές σε εξαιρετικά ψυχρά κλίματα, αυξάνει επίσης το ιξώδες, με αποτέλεσμα μία πιο στρωτή ροή, η οποία απαιτεί περισσότερη ενέργεια για την κυκλοφορία. Υπάρχουν διάφορες διατάξεις για τα συστήματα κλειστού βρόχου η εγκατάσταση των οποίων εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα του χώρου, το θερμικό φορτίο, τον τύπο θεμελίωσης του κτιρίου, το κόστος εγκατάστασης και το πότε θα εγκατασταθεί η αντλία θερμότητας στο χώρο, δηλαδή πριν ή μετά από την κατασκευή. Τα συστήματα κλειστού βρόχου κατατάσσονται ανάλογα με τη διαμόρφωσή τους στα εξής:

- Συστήματα Οριζόντιας Διαμόρφωσης
- Συστήματα Κατακόρυφης Διαμόρφωσης
- Συστήματα Διαμόρφωσης Λίμνης

Συστήματα Οριζόντιας Διαμόρφωσης

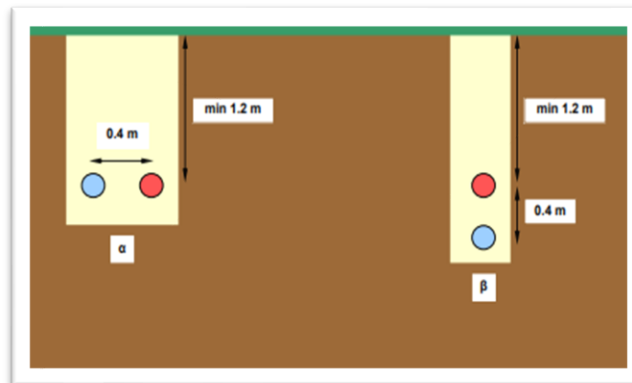
Στα συστήματα οριζόντιας διαμόρφωσης μία τάφρος ανοίγεται σε κατάλληλο βάθος, συνήθως 1,2 έως 2,5 μέτρων, για την τοποθέτηση του γεωεναλλάκτη, ο οποίος είναι παράλληλος με την επιφάνεια του εδάφους. Μετά τη διάνοιξη της, η τάφρος καλύπτεται από ένα στρώμα λεπτόκοκκης άμμου, η οποία θα προστατεύσει το γεωεναλλάκτη από τις όποιες αιχμηρές επιφάνειες εντός της τάφρου. Ακόμα, τοποθετείται η αντλία, γίνονται οι απαιτούμενες συνδέσεις των επιμέρους τμημάτων της και πραγματοποιείται έλεγχος για τυχόν διαρροές. Εν συνεχεία, ο γεωεναλλάκτης καλύπτεται ακόμα μία φορά από στρώμα λεπτόκοκκης άμμου, ενώ στο τέλος η τάφρος σκεπάζεται με τα υλικά της εκσκαφής [29].

Ανάλογα με το είδος των βρόχων του γεωεναλλάκτη, τα οριζόντια συστήματα χωρίζονται σε: α) Διαμορφώσεις μονού βρόχου σε σειρά ή παράλληλες, β) Διαμορφώσεις πολλαπλού βρόχου σε σειρά ή παράλληλες, γ) Διαμορφώσεις βρόχου Slinky.

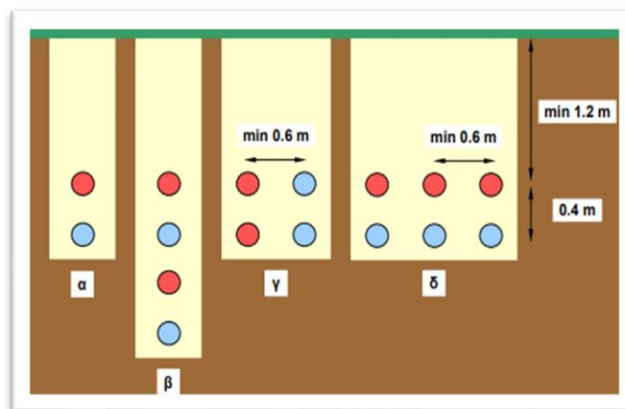
Στις διαμορφώσεις μονού βρόχου, το ρευστό από το πρωτεύον κύκλωμα της αντλίας θερμότητας διέρχεται μέσω του γεωεναλλάκτη σε όλο το μήκος του. Ο γεωεναλλάκτης είναι εγκατεστημένος σε βάθος τουλάχιστον 1,2 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους και η απόσταση μεταξύ των σωλήνων είναι ίση με 0,4 μέτρα. Η τοποθέτηση των σωλήνων του γεωεναλλάκτη είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη, οπότε το έδαφος είναι σημαντικό και η διαθεσιμότητά του αποτελεί θεμελιώδες κριτήριο για την εγκατάσταση του συστήματος.

Σε ένα σύστημα πολλαπλών βρόχων, οι βρόχοι του γεωεναλλάκτη βρίσκονται σε παράλληλη ή κάθετη διάταξη, καθώς τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο με τον ένα βρόχο να διαδέχεται τον άλλο. Ο υδραυλικός σχεδιασμός ενός συστήματος πολλαπλών βρόχων περιλαμβάνει ένα σύστημα στο οποίο το ρευστό ρέει σε όλο το μήκος του εναλλάκτη. Σε αυτή

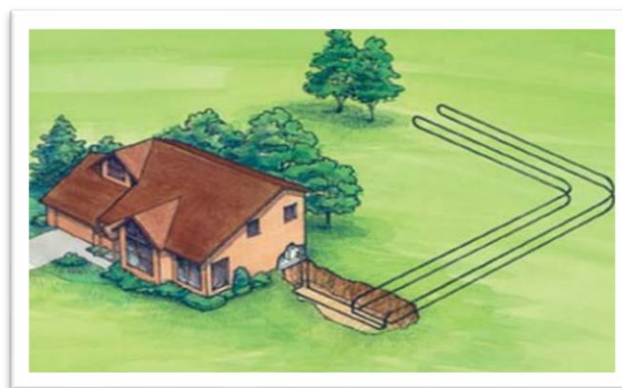
την περίπτωση, ο εναλλάκτης είναι είτε μονής διέλευσης ή ταξιδεύει σε έναν μόνο βρόχο και οδηγείται στην αντλία θερμότητας μέσω του συλλέκτη. Στη δεύτερη περίπτωση, ο γεωεναλλάκτης είναι σε θέση να εναλλάσσεται μεταξύ πολλαπλών διαδρομών [29].



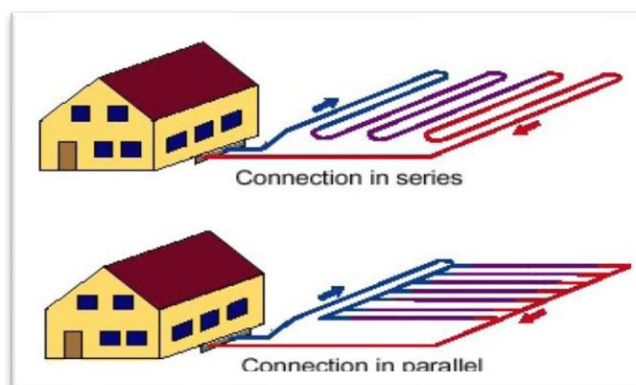
Εικόνα 3.4: Απεικόνιση σωλήνων γεωεναλλάκτη οριζόντιας διαμόρφωσης μονού βρόχου: α) σε οριζόντια διάταξη, β) σε κατακόρυφη διάταξη [29]



Εικόνα 3.5: Απεικόνιση σωλήνων γεωεναλλάκτη οριζόντιας διαμόρφωσης πολλαπλού βρόχου: α),β) σε κατακόρυφη διάταξη και γ),δ) σε οριζόντια διάταξη [29]

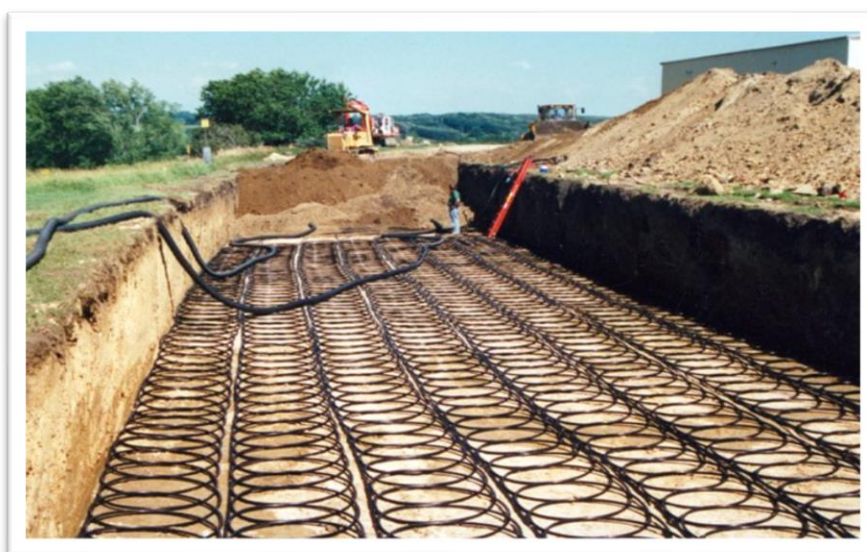


Εικόνα 3.6: Σύστημα οριζόντιας διαμόρφωσης με γεωεναλλάκτη πολλαπλών βρόχων και διαδρομών [29]



Εικόνα 3.7: Συστήματα οριζόντιας διαμόρφωσης σε σειρά και παράλληλα [30]

Τέλος, τα οριζόντια συστήματα με διαμόρφωση βρόχου Slinky με σπειροειδείς γεωεναλλάκτες είναι τα πιο σπάνια σε αυτή την οικογένεια συστημάτων. Τα συστήματα αυτά κατασκευάζονται όταν η διαθέσιμη έκταση γης δεν πληροί τις απαιτήσεις για την εγκατάσταση κάποιου από τα παραπάνω συστήματα. Σε αυτή την περίπτωση, η επιλογή του ελικοειδούς σχήματος του γεωεναλλάκτη μειώνει έως και 70% του απαιτούμενου μήκους του και προσφέρει παρόμοιο θερμικό αποτέλεσμα, αλλά με περισσότερα μέτρα σωληνώσεων. Η κατασκευή των σπειροειδών συστημάτων μπορεί να γίνει με οποιαδήποτε πυκνότητα σπειροειδούς έλικας και η τοποθέτησή τους μπορεί να είναι είτε οριζόντια ή κάθετη ως προς την επιφάνεια του εδάφους [29].



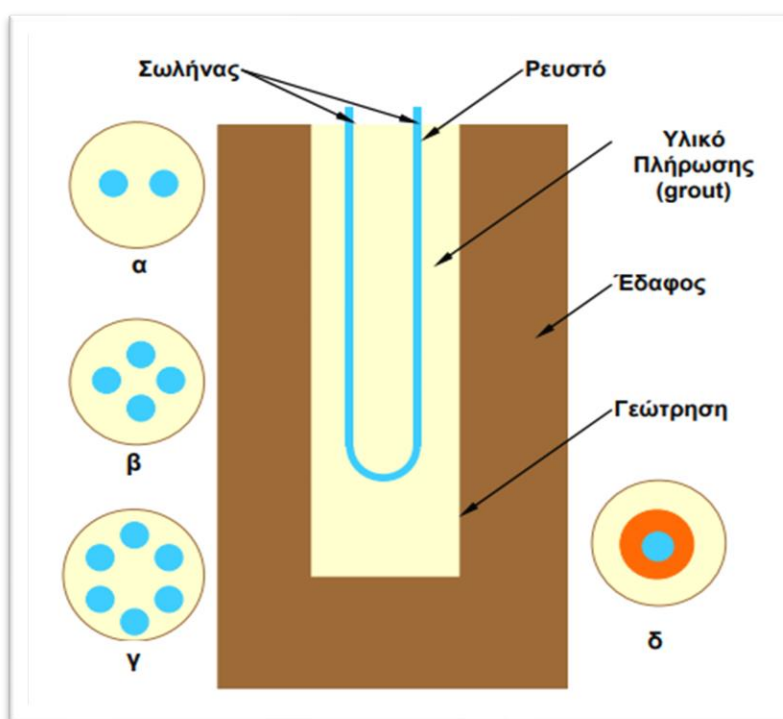
Εικόνα 3.8: Εγκατάσταση οριζόντιου συστήματος με σπειροειδείς γεωεναλλάκτες [31]

Συστήματα Κατακόρυφης Διαμόρφωσης

Στις κατακόρυφες διαμορφώσεις ο γεωεναλλάκτης τοποθετείται κάθετα στην επιφάνεια της γης και έχει συνήθως μήκος από 30 έως 150 μέτρα. Η συγκεκριμένη κατηγορία συστημάτων είναι η πιο διαδεδομένη σε όλη την οικογένεια συστημάτων των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας παγκοσμίως. Για την κατασκευή ενός κατακόρυφου συστήματος, απαιτείται ένας αριθμός γεωτρήσεων σε κατάλληλο βάθος, με την απόσταση μεταξύ τους να

είναι 3 ως 6 μέτρα. Επιπλέον, εντός κάθε γεώτρησης τοποθετείται αγωγός σχήματος “U” πυκνότητας ενός έως και τεσσάρων βρόχων. Η πυκνότητα των βρόχων είναι συνάρτηση των σχεδιαστικών φορτίων που καλείται να αντιμετωπίσει ο γεωεναλλάκτης, αλλά και του εδάφους που είναι διαθέσιμο για την εγκατάσταση του συστήματος. Μία τελευταία εναλλακτική για τη σωλήνωση του γεωεναλλάκτη αποτελεί ο ομοαξονικός σωλήνας, ο οποίος χρησιμοποιείται αρκετά σπάνια. Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζονται οι πιθανές εναλλακτικές μέθοδοι τοποθέτησης συστημάτων γεωεναλλακτών κατακόρυφης διαμόρφωσης.

Με την ολοκλήρωση της τοποθέτησης του γεωεναλλάκτη, η γεώτρηση γεμίζεται με ένα μίγμα τσιμέντου, μπεντονίτη και χαλαζιακής άμμου, το οποίο προστατεύει τον αγωγό από πιθανή καθίζηση, αλλά και ταυτόχρονα βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του εδάφους και του ρευστού που ρέει εντός του γεωεναλλάκτη. Ακόμα, σήμερα υπάρχει μεγάλη ανάπτυξη σε προϊόντα της βιομηχανίας των υλικών, όπως υγρά κονιάματα, τα οποία βελτιώνουν τη ροή θερμότητας από και προς το γεωεναλλάκτη, καθώς παράλληλα αυξάνουν και την απόδοση του συστήματος [29].

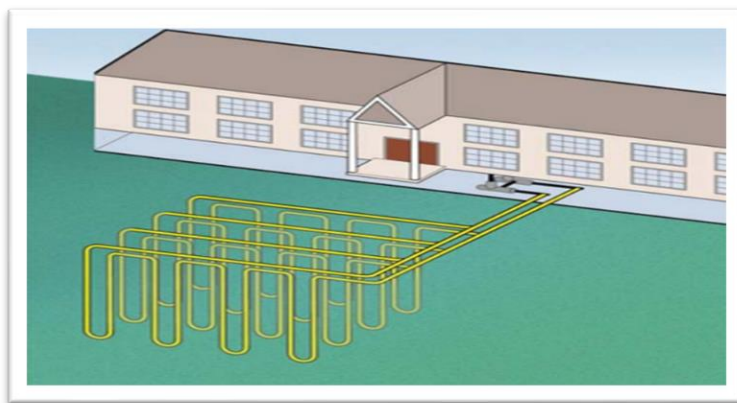


Εικόνα 3.9: Απεικόνιση γεωεναλλάκτη κατακόρυφης διαμόρφωσης σε τομή [29]

Τα συστήματα κατακόρυφης διαμόρφωσης, μπορούν να καταταχθούν και αυτά με τη σειρά τους σε δύο τύπους:

- Κατακόρυφες διαμορφώσεις σε σειρά
- Παράλληλες κατακόρυφες διαμορφώσεις

Στις εν σειρά διαμορφώσεις το ρευστό διαπερνά το γεωεναλλάκτη σε όλο του το μήκος, ενώ στις αντίστοιχες παράλληλες το ρευστό κατανέμεται μέσω συλλέκτη σε ξεχωριστά κατακόρυφα τμήματα του γεωεναλλάκτη και οδηγείται στην αντλία θερμότητας με τη συνδρομή ενός επιπλέον συλλέκτη. Εάν συνδυαστούν οι δύο παραπάνω δομικές μορφές του γεωεναλλάκτη θα προκύψει μία τρίτη ενδιάμεση μορφή μικτού συστήματος. Σε αυτό το μικτό σύστημα το ρευστό διατρέχει περισσότερους από έναν βρόχους μετά το συλλέκτη διανομής, πριν επιστρέψει στο συλλέκτη συλλογής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10 [29].



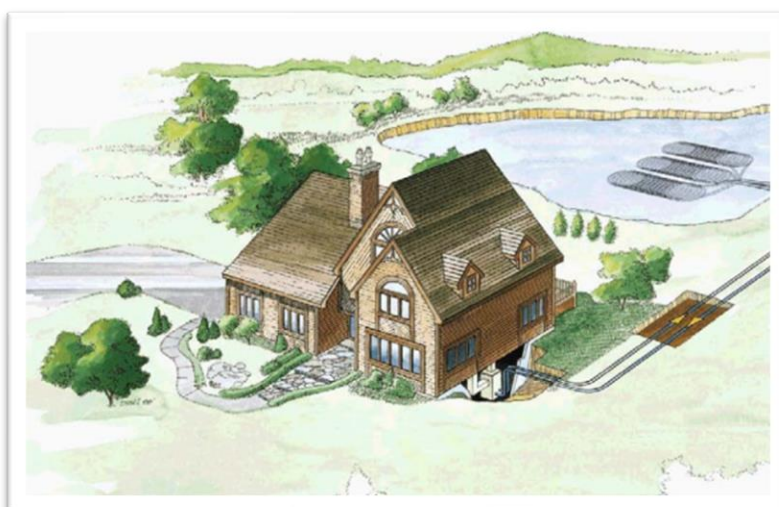
Εικόνα 3.10: Μικτό σύστημα κατακόρυφης διαμόρφωσης [29]

Συστήματα Διαμόρφωσης Λίμνης

Μία διαμόρφωση λίμνης αποτελεί ουσιαστικά ένα οριζόντιο σύστημα με γεωαναλλάκτες σπειροειδούς μορφής βυθισμένους μέσα σε μία λίμνη. Για να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να τηρούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

- Το ελάχιστο βάθος της λίμνης να φτάνει τα 25 μέτρα
- Η προσθήκη αντιπηκτικού διαλύματος να γίνεται σε ποσοστό τουλάχιστον 20% κατ' όγκο
- Η τοποθεσία της εγκατάστασης να είναι σε μικρή απόσταση από τη λίμνη

Σε περίπτωση που η διαμόρφωση λίμνης επιλεγεί για εγκατάσταση, είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψη η επίδραση που αυτή μπορεί να έχει συνολικά στον υδροβιότοπο. Οι αντλίες θερμότητας/κλιματισμού, ενδέχεται να αλλάξουν τις συνθήκες του οικοσυστήματος της λίμνης, προκαλώντας θερμική ρύπανση. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα συχνά απαιτούν πρόσθετα μέτρα ασφαλείας για την αποφυγή διαρροής του αντιπηκτικού διαλύματος, γεγονός που αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης [29].



Εικόνα 3.11: Απεικόνιση συστήματος διαμόρφωσης λίμνης [29]

3.1.3 Ειδικές Μορφές

Συστήματα Απευθείας Εκτόνωσης

Τα συστήματα απευθείας εκτόνωσης (direct expansion-DX systems) αποτελούν την πιο ειδική μορφή συστημάτων κλειστού βρόχου, με ελάχιστες εφαρμογές. Ωστόσο, επειδή διαθέτουν λιγότερα μηχανολογικά μέρη τα συστήματα αυτά έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης και μεγάλη αξιοπιστία. Ο γεωεναλλάκτης των συστημάτων απευθείας εκτόνωσης μπορεί να είναι οριζόντιος, κατακόρυφος ή πλεγματικής μορφής και με οποιαδήποτε διάταξη. Επίσης, το μήκος του δεν είναι μεγαλύτερο από 75 μέτρα και έχει τη λειτουργία του εξατμιστή/συμπυκνωτή της αντλίας θερμότητας. Συνεπώς, οι σωληνώσεις πρέπει να κατασκευάζονται από χαλκό και εντός του εδάφους συνήθως περιβάλλονται από ένα εξωτερικό στρώμα πολυαιθυλενίου, το οποίο τους προστατεύει από διαβρώσεις.

Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι εγκατάστασης των συστημάτων απευθείας εκτόνωσης, οι οποίες δε θα πρέπει να αποκλίνουν σε καμία περίπτωση από τα ορισμένα πρότυπα. Αρχικά, για να αποφευχθούν φαινόμενα καθίζησης ή άλλες εδαφικές ανωμαλίες που ενδέχεται να προκαλέσουν ζημιά στο γεωεναλλάκτη, η περιοχή στην οποία αυτός θα τοποθετηθεί θα πρέπει πρώτα να ισοπεδωθεί και να υποστεί μηχανική συμπίεση. Επιπλέον, εξαιρετικής προσοχής χρήζουν τα όμβρια ύδατα, η συγκέντρωση των οποίων στο χώρο της εγκατάστασης, δύναται να προκαλέσει καθίζηση του εδάφους και να καταστρέψει τον εναλλάκτη. Έτσι λοιπόν, υπάρχει η σύσταση για εγκατάσταση ενός συστήματος απορροής όμβριων. Τέλος, θα πρέπει να ελέγχεται η ροή του ψυκτικού ρευστού, μέσω ηλεκτρομαγνητικής βάνας και ελεγκτή πίεσης στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη, ώστε μία διαρροή να μπορεί να ανιχνευθεί γρήγορα και η παροχή του ψυκτικού να διακοπεί [29].

Υβριδικά Συστήματα

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας συχνά εγκαθίστανται συνδυαστικά με εναλλακτικά συστήματα πρόσδοσης ή απόρριψης θερμότητας, όπως για παράδειγμα θερμαντήρες ή ψύκτες νερού. Τα συστήματα που προκύπτουν από τον παραπάνω συνδυασμό ονομάζονται υβριδικά. Ο στόχος τους είναι η πρόσδοση θερμότητας στο σύστημα, όταν η θερμοκρασία του πρωτεύοντος κυκλώματος του γεωεναλλάκτη πέσει κάτω από το αποδεκτό όριο, δηλαδή την ελάχιστη θερμοκρασία σχεδιασμού και αντίστοιχα η απόρριψη θερμότητας όταν η θερμοκρασία του ρευστού στο γεωεναλλάκτη υπερβεί τη μέγιστη θερμοκρασία σχεδιασμού ή η αποθηκευμένη θερμότητα στο έδαφος για χρήση στην επόμενη χειμερινή περίοδο δεν είναι η επιθυμητή.

Η εγκατάσταση των υβριδικών συστημάτων πραγματοποιείται όταν η διαφορά ανάμεσα στα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου είναι μεγάλη. Εάν επιλεγόταν η εγκατάσταση ενός απλού συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, τότε θα ήταν απαραίτητη η κατασκευή ενός υπερμεγέθους γεωεναλλάκτη για την κάλυψη της μίας μόνο λειτουργίας, ο οποίος ωστόσο θα πρέπει να μπορεί να καλύπτει αμφότερες τις λειτουργίες [29]. Τέλος, τα υβριδικά συστήματα αντλιών θερμότητας, εγκαθίστανται κυρίως σε περιοχές στις οποίες η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για τηλεθέρμανση και τηλεψύξη.

3.2 Αυτόνομη Λειτουργία και Έλεγχος

Ο πρωταρχικός στόχος του αυτόματου ελέγχου των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, είναι η λειτουργία του συστήματος διανομής θερμότητας και κλιματισμού σε θερμοκρασίες οι οποίες πληρούν τις απαιτούμενες συνθήκες άνεσης. Με αυτόν τον τρόπο, ακόμα, μεγιστοποιείται και η αποδοτικότητα των αντλιών θερμότητας [31].

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι ελέγχου για συστήματα που χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη χώρων και είναι οι εξής:

- Μέθοδος Αντιστάθμισης Καιρού (Weather Compensation Method)
- Μέθοδος Αισθητήρα Χώρου (Room Sensor Method)
- Μέθοδος Σταθερής Θερμοκρασίας (Fixed Temperature Method)

Μέθοδος Αντιστάθμισης Καιρού (Weather Compensation Method)

Πρόκειται για την πιο αποτελεσματική μέθοδο ελέγχου. Η θερμοκρασία εξόδου της αντλίας θερμότητας ρυθμίζεται με βάση την εξωτερική ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Καθώς η εξωτερική θερμοκρασία μεταβάλλεται, η θερμοκρασία εξόδου μεταβάλλεται με αντιστρόφως ανάλογο τρόπο. Έτσι, η αντλία θερμότητας δεν αποκλίνει ποτέ από την απαραίτητη θερμοκρασία.

Για τη λειτουργία της μεθόδου απαιτείται η χρήση ενός αισθητήρα και ενός ελεγκτή. Ο αισθητήρας υπολογίζει την εξωτερική θερμοκρασία και στη συνέχεια στέλνει σήμα στον ελεγκτή. Ο τελευταίος ελέγχει αυτόματα τη θερμοκρασία εξόδου με βάση μια εργοστασιακά ρυθμισμένη καμπύλη, η οποία ορίζει τη σχέση μεταξύ της εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα και της θερμοκρασίας εξόδου της αντλίας θερμότητας. Τέλος, γενικά η λειτουργία του συμπιεστή των αντλιών θερμότητας σε συστήματα διανομής νερού ελέγχεται συνήθως σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του νερού επιστροφής, η οποία μειώνεται καθώς αυξάνεται η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα και το αντίστροφο [31].

Μέθοδος Αισθητήρα Χώρου (Room Sensor Method)

Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιούνται δύο αισθητήρες. Ο πρώτος, είναι ένας αισθητήρας θερμοκρασίας χώρου, που τοποθετείται στο κέντρο του χώρου. Από την άλλη, ο δεύτερος πρόκειται για έναν αισθητήρα εξωτερικής θερμοκρασίας ατμοσφαιρικού αέρα, ο οποίος χρησιμοποιείται με σκοπό να επηρεάζει τη λειτουργία ελέγχου καμπύλης ορισμού της σχέσης της εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα και της θερμοκρασίας εξόδου της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας [31].

Μέθοδος Σταθερής Θερμοκρασίας (Fixed Temperature Method)

Στη μέθοδο σταθερής θερμοκρασίας, ένας ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας επιστροφής ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την αντλία θερμότητας, η οποία λειτουργεί πάντα στη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της, όταν πρόκειται για θέρμανση του χώρου και στην

ελάχιστη θερμοκρασία όταν πρόκειται για ψύξη. Ακόμα, η μέθοδος ελέγχου αυτή δεν παρέχει την καλύτερη δυνατή εξοικονόμηση πόρων από την αντλία θερμότητας [31].



Εικόνα 3.12: Αισθητήρας θερμοκρασίας χώρου [32]

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η ρύθμιση της θερμοκρασίας, είναι δυνατόν να πραγματοποιείται αυτόματα από το θερμοστάτη. Ο θερμοστάτης είναι μία συσκευή, η οποία συνδέεται με το σύστημα κεντρικής θέρμανσης του κτιρίου και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της συνολικής θερμοκρασίας του συστήματος, παρακολουθώντας τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα, η συσκευή αυτή ελέγχου της θερμοκρασίας, δύναται να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί το σύστημα κεντρικής θέρμανσης με βάση τη θερμοκρασία του κτιρίου, αλλά και τις ρυθμίσεις της [33].

Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, οι θερμοστάτες αποτελούν ένα καθιερωμένο στοιχείο εσωτερικών χώρων. Αρχικά, επρόκειτο για πολύ απλές ηλεκτρομηχανικές συσκευές, αποτελούμενες μόνο από μία ρύθμιση θερμοκρασίας και έναν διακόπτη. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας, νέοι τύποι θερμοστατών ξεκίνησαν να κατασκευάζονται [34]. Σήμερα υπάρχουν αρκετές κατηγορίες θερμοστατών, οι οποίοι λειτουργούν με μερική ή πλήρη αυτονομία. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι θερμοστάτες είναι οι ακόλουθοι:

- Προγραμματιζόμενος Θερμοστάτης (Programmable Thermostat)
- Ευφυής Θερμοστάτης (Smart Thermostat)

Προγραμματιζόμενος Θερμοστάτης (Programmable Thermostat)

Από την εφεύρεσή τους το 1906, οι προγραμματιζόμενοι θερμοστάτες αποτελούν ακρογωνιαίο λίθο των προγραμμάτων εξοικονόμησης ενέργειας. Η βασική ιδέα είναι η χρήση ενός προγράμματος επαναφοράς για τον έλεγχο του εξοπλισμού θέρμανσης και του κλιματισμού του κτιρίου. Βάσει αυτού, ο χώρος θερμαίνεται/κλιματίζεται σε μια θερμοκρασία ρύθμισης όταν άνθρωποι είναι παρόντες και μεταβαίνει σε μια πιο ενεργειακά αποδοτική

θερμοκρασία επαναφοράς όταν εκείνοι απουσιάζουν ή κοιμούνται, αν πρόκειται για κατοικία [35].



Εικόνα 3.13: Απεικόνιση προγραμματιζόμενων θερμοστατών [34]

Ευφυής Θερμοστάτης (Smart Thermostat)

Ο ευφυής θερμοστάτης έχει τη δυνατότητα αυτόματης ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης της θέρμανσης ή του κλιματισμού, αναλόγως με την παρουσία ή την απουσία ανθρώπων από το χώρο. Το σύστημα χρησιμοποιεί απλούς αισθητήρες κίνησης και διακόπτες επαφής σε πόρτες, οι οποίοι εγκαθίστανται σε όλο το σπίτι. Γενικά, το σύστημα του ευφυή θερμοστάτη χρησιμοποιεί τρεις τεχνικές αυτόνομης λειτουργίας, οι οποίες βασίζονται σε αυτούς τους αισθητήρες. Πρώτον, κάνοντας χρήση του αλγόριθμου γρήγορης αντίδρασης (fast reaction algorithm), το σύστημα επεξεργάζεται τα δεδομένα των αισθητήρων χρησιμοποιώντας ένα πιθανοτικό μοντέλο για να προσδιορίσει γρήγορα αν οι ένοικοι είναι ενεργοί, κοιμούνται ή λείπουν. Επιπλέον, χωρίς να εισάγει ψευδείς ανιχνεύσεις κενών χώρων, ο αλγόριθμος αυτός μπορεί συνήθως να ανταποκριθεί μέσα σε λίγα λεπτά από την αποχώρηση των ενοίκων από το σπίτι ή το κτίριο. Δεύτερον, το σύστημα συνδυάζει ιστορικά πρότυπα πληρότητας με δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο για να καθορίσει εάν ο χώρος πρέπει να προθερμαθεί ή να θερμανθεί μετά την άφιξη των ενοίκων. Τέλος, όταν το σύστημα είναι σίγουρο ότι ο χώρος δεν είναι κατειλημμένος, επιτρέπει στη θερμοκρασία να αποκλίνει από τη θερμοκρασία ρύθμισης. Οι τρεις αυτές τεχνικές επιτρέπουν στο σύστημα να παρέχει άνεση στους ενοίκους, ενώ παράλληλα εξοικονομεί και ενέργεια [35].

Ο ευφυής θερμοστάτης απαιτεί δύο τύπους αισθητήρων για να αναγνωρίζει πότε οι ένοικοι βρίσκονται στο χώρο ή/και πότε κοιμούνται, προκειμένου να ανταποκρίνεται σε αυτούς. Ο πρώτος τύπος είναι οι αισθητήρες κίνησης παθητικής υπέρυθρης ακτινοβολίας (PIR) στα δωμάτια και ο δεύτερος οι μαγνητικοί διακόπτες στις εισόδους. Τόσο οι αισθητήρες PIR, όσο και οι μαγνητικοί διακόπτες είναι απλοί στην εγκατάσταση [35].



Εικόνα 3.14: Απεικόνιση ευφυών θερμοστατών [34]



Εικόνα 3.15: Αισθητήρας κίνησης (αριστερά) και μαγνητικός διακόπτης (δεξιά) [35]

3.3 Περιορισμοί

Σε όλα τα συστήματα υπάρχουν περιορισμοί. Οι περιορισμοί συμβάλλουν στην ομαλή και απρόσκοπτη λειτουργία ενός συστήματος και αναφέρονται σε συγκεκριμένες παραμέτρους, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να αφεθούν χωρίς έλεγχο. Στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης με χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, οι παράμετροι που απαιτούν οριοθέτηση είναι κυρίως η θερμοκρασία, η πίεση και η ροή των ρευστών εντός των σωληνώσεων.

Θερμοκρασία

Όσον αφορά τη θερμοκρασία η οποία αποδίδεται μέσω ενός συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, περιορίζεται εντός ενός εύρους τιμών. Αρχικά, το σύστημα εξάγει θερμότητα από το έδαφος σε βάθος στο οποίο οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 5°C και 14°C, ενώ στη συνέχεια την ενισχύει σε θερμοκρασίες από 20°C έως 25°C. Από την άλλη, η μέγιστη θερμοκρασία την οποία μία γεωθερμική αντλία μπορεί να φτάσει είναι οι 55°C [36].

Ωστόσο, περιορισμοί υφίστανται και στη λειτουργία των θερμοστατών. Οι περισσότεροι θερμοστάτες διαθέτουν μια αυτόματη ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των σημείων ρύθμισης θέρμανσης και ψύξης. Αυτό είναι απαραίτητο, έτσι ώστε η μονάδα να μην εναλλάσσεται συνεχώς μεταξύ θέρμανσης και ψύξης όταν ο θερμοστάτης είναι ρυθμισμένος σε λειτουργία αυτόματης εναλλαγής. Η διαφορά αυτή στη θερμοκρασία είναι γνωστή ως νεκρή ζώνη (dead band) και είναι συνήθως ένας βαθμός της κλίμακας Κελσίου περίπου.

Παραδείγματος χάρι, εάν το σημείο ρύθμισης ψύξης είναι 22°C, το σημείο ρύθμισης θέρμανσης δεν μπορεί να είναι υψηλότερο από 21°C. Εάν στη συνέχεια αυξηθεί το σημείο ρύθμισης θέρμανσης από τους 21°C στους 22°C, τότε το σημείο ρύθμισης ψύξης θα αυξηθεί κατά τους ίδιους δύο βαθμούς φτάνοντας έτσι τους 23°C [37].

Πίεση και Ροή

Η διατήρηση μιας σταθερής διαφοράς πίεσης σε ένα σύστημα θέρμανσης αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για τον περιορισμό μιας σταθερής παροχής. Το έργο αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια ορισμένων βαλβίδων ελεγχόμενης πίεσης. Οι βαλβίδες αυτές είναι διαφόρων τύπων και χρησιμοποιούνται σε γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης/κλιματισμού κατοικιών και σε συστήματα τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης. Οι εφαρμογές τους ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο της κάθε βαλβίδας και δύνανται να είναι οι ακόλουθες:

- Εφαρμογή ως ελεγκτής διαφορικής πίεσης για τη διατήρηση μιας σχετικά σταθερής διαφορικής πίεσης μεταξύ ροής και επιστροφής του συστήματος θέρμανσης.
- Εφαρμογή ως περιοριστής ροής για τον περιορισμό ενός σταθερού ρυθμού ροής.
- Εφαρμογή ως ρυθμιστές αποσυμπίεσης. Οι βαλβίδες αυτές ανοίγουν όταν η διαφορική πίεση αυξάνεται για την ανακούφιση της υψηλής πίεσης ροής και τη διατήρηση μιας σταθερής διαφορικής πίεσης των συστημάτων θέρμανσης.
- Εφαρμογή για τη διατήρηση της αντίθλιψης στα γεωθερμικά συστήματα τηλεθέρμανσης, καθώς το νερό επιστροφής δεν μπορεί να τρέξει απευθείας κάτω από την απαιτούμενη αντίθλιψη. Χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση της πίεσης ροής των χρηστών που βρίσκονται πιο ψηλά σε μεγάλα κτίρια ή των πιο απομακρυσμένων χρηστών σε ένα μεγάλο σύστημα τηλεθέρμανσης [38].

Κεφάλαιο 4^ο: Εφαρμογές γεωθερμίας σε Ελλάδα και σε Παγκόσμια κλίμακα

Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας πραγματοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα. Στην Ελλάδα είναι σαφώς μικρότερη σε σχέση με χώρες του εξωτερικού, αν και η ζήτηση για γεωθερμικές εγκαταστάσεις αυξάνεται ολοένα και περισσότερο. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας αποτελούν αυτή την στιγμή την κύρια μέθοδο εκμετάλλευσης της γεωθερμίας στην ελληνική αγορά, ενώ δεν υπάρχουν εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών γεωθερμίας τόσο από την Ελλάδα, όσο και από όλο τον κόσμο.

4.1 Εγκατάσταση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας στο κτίριο της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας

Το κτίριο τοποθετείται στη Θεσσαλονίκη, βόρεια του εμπορικού λιμανιού της πόλης. Στη θέση αυτή αρχικά είχε κατασκευαστεί το παλιό εργοστάσιο φωταερίου Θεσσαλονίκης, το οποίο λειτούργησε από το 1888 έως και το 1917, οπότε και καταστράφηκε από πυρκαγιά. Από το 1948 το κτίριο φιλοξένησε την Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων, ενώ το 2001 οι εγκαταστάσεις παραχωρήθηκαν στη σημερινή Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας [39].

Το 1994 το Υπουργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού, θεώρησε τρία παλιά κτίρια του εργοστασίου φωταερίου ως ιστορικά διατηρητέα μνημεία. Το πρόγραμμα προέβλεπε, τη χρήση ολόκληρου του συντελεστή δόμησης για την κατασκευή νέων εγκαταστάσεων, αλλά και την αποκατάσταση και ανακαίνιση των διατηρητέων κτιριακών μονάδων, το οποίο θα στεγάζει:

- Διοικητικές Υπηρεσίες της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας στους ορόφους
- Εμπορικό κέντρο στους ισόγειους χώρους, με ιδιοκτήτη τον Ανάδοχο
- Υπόγειο χώρο στάθμευσης οχημάτων
- Αίθουσα του Περιφερειακού Συμβουλίου Κεντρικής Μακεδονίας στο διατηρητέο κτίριο
- Γραφεία και εφεδρικούς χώρους στα διατηρητέα κτίρια

Σήμερα, η Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας στεγάζεται σε ένα υπερσύγχρονο κτίριο, η θέρμανση και ο κλιματισμός του οποίου επιτυγχάνονται κυρίως με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Πρόκειται για το μεγαλύτερο έργο αξιοποίησης γεωθερμίας στην Ελλάδα, με ισχύ που φτάνει τα 850 kW και εξοικονόμηση ενέργειας που αγγίζει σε ποσοστό το 70% [39] συγκριτικά με συμβατικές μεθόδους θέρμανσης (πετρέλαιο και φυσικό αέριο). Επιπροσθέτως, η συμβολή της γεωθερμικής ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου έχει καταλυτικό ρόλο και το τοποθετεί σε ένα από τα πιο πράσινα δημόσια κτίρια της χώρας. Τέλος, το συγκεκριμένο γεωθερμικό σύστημα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς

χρησιμοποιεί καινοτόμες μεθόδους συνδυασμού γεωθερμικών εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι είναι οι ακόλουθοι [39]:

- Σύστημα κλειστού βρόχου, οριζόντιας διαμόρφωσης τύπου Slinky Loop. Εγκαταστάθηκαν 42.000 μέτρα σωληνώσεων κάτω από τα θεμέλια του κτιρίου.
- Σύστημα κλειστού βρόχου κατακόρυφης διάταξης, με ομοαξονικούς γεωεναλλάκτες (coaxial geo-exchangers). Χρησιμοποιούνται τέσσερις ομοαξονικοί γεωεναλλάκτες, βάθους 150 μέτρων ο καθένας.
- Σύστημα ανοικτού βρόχου, με χρήση πηγαδιών παραγωγής αλλά και πηγαδιών έγχυσης, παροχής 45 m³/h.



Εικόνα 4.1: Κτίριο Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας [39]

Στο κτίριο, έχουν εγκατασταθεί δύο γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, συνολικής ισχύς 850 kW, όπως αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Επιπλέον, οι εσωτερικές εγκαταστάσεις αποτελούνται από fan coils και κεντρικές κλιματιστικές μονάδες [40].



Εικόνα 4.2: Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας που χρησιμοποιείται στο κτίριο της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας [40]

Αξίζει να σημειωθεί ακόμα, πως οι ομοαξονικοί γεωεναλλάκτες όπως εκείνοι που εγκαταστάθηκαν στο κτίριο της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, κάνουν πιο ελκυστική τη χρήση γεωθερμικών συστημάτων, τόσο από άποψη απόδοσης όσο και από άποψη κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας. Ο λόγος που συμβαίνει το παραπάνω είναι ο καινοτόμος τρόπος λειτουργίας τους και η διαφορετική γεωμετρία στη δομή τους, έναντι των κλασσικών κατακόρυφων γεωεναλλακτών σχήματος “U” [39].



Εικόνα 4.3: Εγκατάσταση ομοαξονικού γεωεναλλάκτη θερμότητας [40]



Εικόνα 4.4: Σύστημα σωληνώσεων από το μηχανοστάσιο του κτιρίου της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας [40]

4.2 Ξενώνας Λουτρών Τραϊανούπολης

Ο Ξενώνας Λουτρών στην Τραϊανούπολη Έβρου αποτελείται από τέσσερα κτίρια. Κάθε ένα από αυτά περιέχει έντεκα δωμάτια, τα οποία θερμαίνονται και κλιματίζονται μέσω ενός συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Το σύστημα που χρησιμοποιείται είναι ανοικτού βρόχου με διάνοιξη δύο φρεάτων. Από το πρώτο, το οποίο είναι φρέαρ παραγωγής, αντλείται γεωθερμικό νερό με παροχή $60 \text{ m}^3/\text{h}$ και θερμοκρασία 52°C . Το νερό αφού μεταδώσει τη θερμότητά του σε κάθε δωμάτιο του ξενώνα μέσω ενός συστήματος τηλεθέρμανσης, επιστρέφει πίσω στον υδροφόρο ορίζοντα από όπου προήλθε μέσα από το δεύτερο φρέαρ, το οποίο είναι φρέαρ έγχυσης.

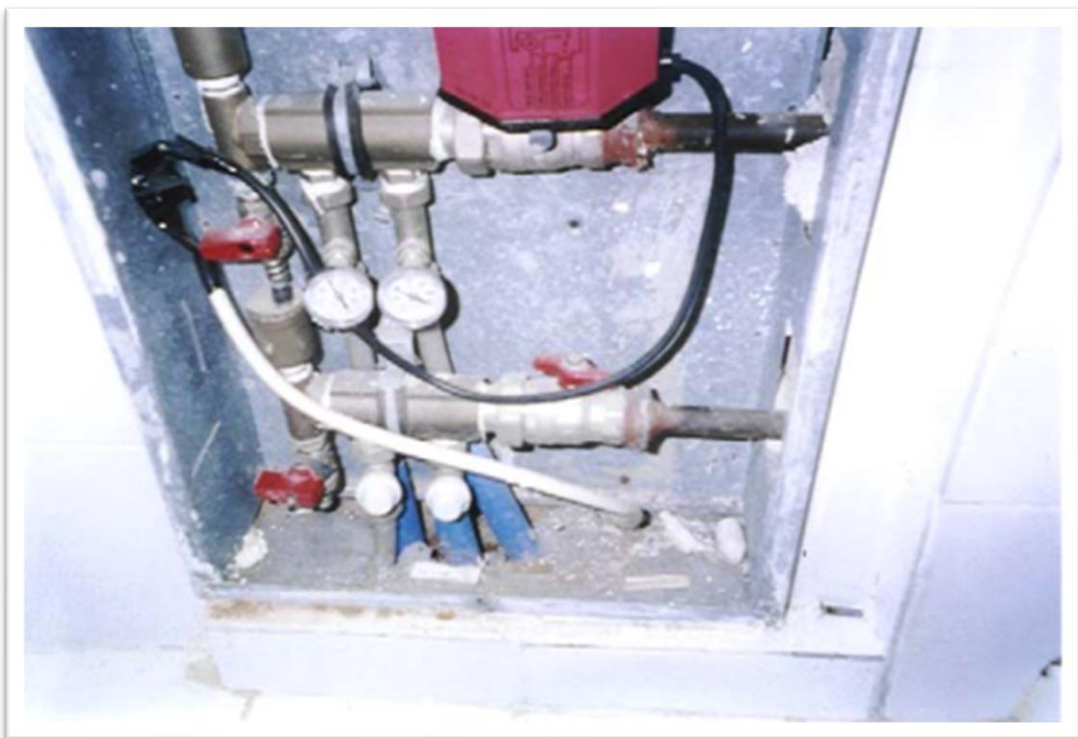
Η μεταφορά θερμότητας από και προς κάθε κτιριακή μονάδα, πραγματοποιείται με συστήματα υπόγειων σωληνώσεων, κατασκευασμένα από υψηλής πυκνότητας πολυπροπυλένιο (HDPP). Επιπλέον, για τη θέρμανσή του, κάθε δωμάτιο διαθέτει ένα αυτόνομο ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης, το οποίο λειτουργεί σε θερμοκρασίες από 30°C έως 40°C , ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται και προθέρμανση ζεστού νερού χρήσης. Τέλος, το σύστημα της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, το οποίο χρησιμοποιείται στον Ξενώνα Λουτρών Τραϊανούπολης, έχει συνολική θερμική ισχύ ίση με 1.050 KW [41].



Εικόνα 4.5: Ξενώνας Λουτρών στην Τραϊανούπολη [42]



Εικόνα 4.6: Κεντρικός εναλλάκτης θερμότητας του ξενώνα [41]



Εικόνα 4.7: Λεπτομέρεια σύνδεσης ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης [41]

4.3 Εγκατάσταση συστήματος γεωθερμίας σε οικία στη Βυτίνα στην ορεινή Αρκαδία

Η οικία στην οποία πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση συστήματος γεωθερμίας, βρίσκεται στην ορεινή Αρκαδία και πιο συγκεκριμένα στη Βυτίνα, μεγέθους 450 τετραγωνικών μέτρων. Στη συγκεκριμένη κατοικία εγκαταστάθηκε σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας κλειστού βρόχου. Επιπλέον, έχει γίνει εφαρμογή συστημάτων “πράσινων τεχνολογιών” δίνοντας έμφαση στην παραγωγή και μετάδοση θερμότητας, καθώς και στο κέλυφος. Ακόμα, στα ανοίγματα εγκαταστάθηκαν κουφώματα θερμοδιακοπής με διπλούς ενεργειακούς υαλοπίνακες.

Η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται μέσω ενός μικτού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης στο οποίο έχει μοιραστεί το βασικό φορτίο της κατοικίας. Επίσης, έχουν εγκατασταθεί επιπλέον σώματα χαμηλής θερμοκρασίας για την κάλυψη της μέγιστης ζήτησης ή την ταχεία απόκριση του συστήματος στις εντολές του χρήστη. Το σύστημα ολοκληρώνεται με την ενδοτοιχία θέρμανση σε σημεία που κρίνεται απαραίτητη. Επιπροσθέτως, έχει γίνει τοποθέτηση ηλιακών συλλεκτών ως βοηθητικό μέσω θέρμανσης, αλλά και για την προθέρμανση ζεστού νερού χρήσης [43].



Εικόνα 4.8: Η κατοικία στη Βυτίνα στην ορεινή Αρκαδία [43]

Για την ολοκληρωμένη κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και κλιματισμού του σπιτιού στη Βυτίνα, πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση δύο γεωθερμικών αντλιών θερμότητας θερμικής ισχύος 20 kW έκαστη. Η πρώτη μονάδα είναι συνδεδεμένη με το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, ενώ η δεύτερη με τα σώματα θέρμανσης.

Στην κατοικία εγκαταστάθηκε σύστημα κλειστού βρόχου κατακόρυφης διαμόρφωσης με πέντε γεωεναλλάκτες υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE), διαμέτρου 35 χιλιοστών και σχήματος διπλού “U”. Οι γεωτρήσεις έγιναν σε βάθος 100 μέτρων η κάθε μία. Ακόμα, οι αντλίες θερμότητας συνδέονται σε έναν κοινό συλλέκτη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρήση όλων των γεωτρήσεων τόσο για κάθε γεωθερμική αντλία ξεχωριστά, όσο και για παράλληλη χρήση. Σημειώνεται ακόμη, πως το υποστηρικτικό σύστημα ηλιακής θέρμανσης, αποτελείται από πέντε ηλιακά πάνελ με συνολική επιφάνεια 12,6 τετραγωνικών μέτρων. Τέλος, για τα

σώματα χαμηλής θερμοκρασίας, καθώς και για την προθέρμανση του ζεστού νερού χρήσης, τοποθετήθηκε δεξαμενή χωρητικότητας 1.000 λίτρων [43].



Εικόνα 4.9: Αντλίες θερμότητας [43]

Το σύστημα συμπληρώνει ο αυτόματος έλεγχος, χάρη στον οποίο ρυθμίζονται:

- Το σημείο ρύθμισης (set point) βάσει της εξωτερικής ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας (αντιστάθμιση), αλλά και η θερμοκρασία προσαγωγής του συστήματος μέσω τρίοδης ρυθμιστικής
- Οι αυτονομίες των χώρων της κατοικίας
- Οι επιλογές λειτουργίας, οι οποίες χωρίζονται με βάση τόσο την εποχή (χειμώνας/καλοκαίρι), όσο και τη χρήση ή μη της κατοικίας. Παραδείγματος χάρη:
 - Τη χειμερινή περίοδο και εάν το σπίτι κατοικείται, η προτεραιότητα της ηλιακής θέρμανσης είναι το ζεστό νερό χρήσης, ενώ έπεται η υποστήριξη θέρμανσης. Τα σημεία ρύθμισης είναι τα ήδη προκαθορισμένα από το χρήστη με τα σώματα σε αναμονή.
 - Εάν η οικία δεν είναι κατειλημμένη, η προτεραιότητα της ηλιακής θέρμανσης γίνεται η υποστήριξη θέρμανσης, ενώ συγχρόνως πραγματοποιείται απενεργοποίηση των σωμάτων και αλλαγή των σημείων ρύθμισης σε πιο χαμηλά επίπεδα.



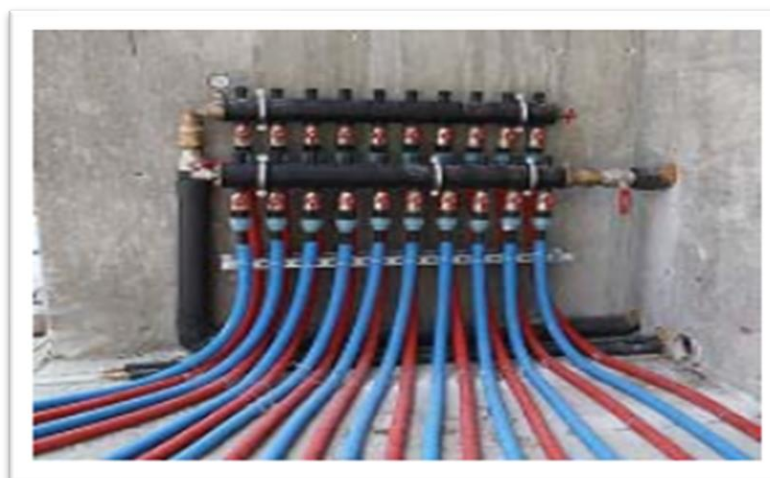
Εικόνα 4.10: Ηλιακά πάνελ στην οικία στη Βυτίνα ορεινής Αρκαδίας [43]

Στην κατοικία επίσης, έχει γίνει εγκατάσταση ενός συστήματος απομακρυσμένου ελέγχου των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας διαμέσου web-server, με τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Ενεργοποίησης/απενεργοποίησης μονάδας (unit remote on/off)
- Ελέγχου και διόρθωσης τυχόν σφαλμάτων (remote reset)
- Ενεργοποίησης/απενεργοποίησης κυκλοφορητών
- Ελέγχου λειτουργίας κυκλοφορητών
- Ελέγχου προσαγωγών/επιστροφών και εξισορρόπησης θερμοκρασίας
- Μεταβολής εποχικής λειτουργίας (remote winter/summer)
- Αλλαγής του σημείου ρύθμισης των μονάδων
- Μεταβολής του τρόπου αντιστάθμισης
- Ελέγχου της διάρκειας λειτουργίας του συστήματος
- Λήψης και ανάλυσης στοιχείων και δεδομένων



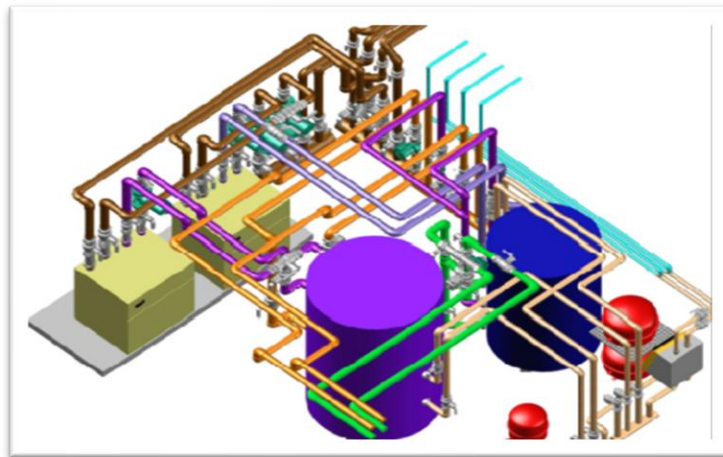
Εικόνα 4.11: Σύστημα απομακρυσμένου ελέγχου γεωθερμικών αντλιών θερμότητας [43]



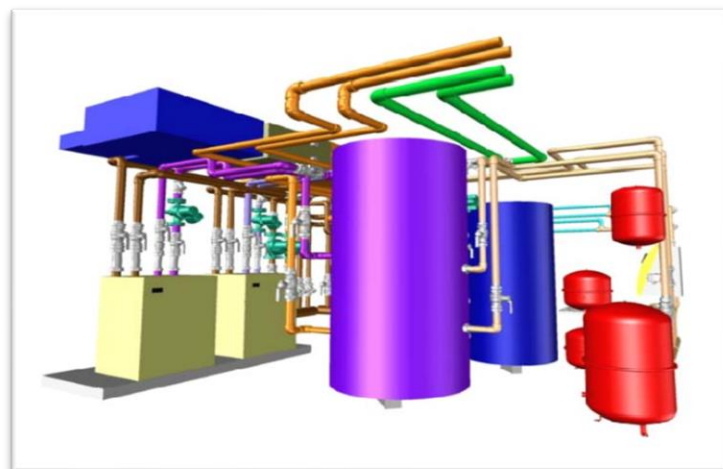
Εικόνα 4.12: Συνδεσμολογία σωληνώσεων μεταφοράς γεωθερμικού νερού [43]



Εικόνα 4.13: Μηχανοστάσιο [43]



Εικόνα 4.14: Τρισδιάστατη απεικόνιση μηχανοστασίου (κάτοψη) [43]



Εικόνα 4.15: Τρισδιάστατη απεικόνιση μηχανοστασίου (πρόοψη) [43]

4.4 Μονάδα δυαδικού κύκλου στο εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής στο Ελ Σαλβαδόρ

Το Ελ Σαλβαδόρ, είναι μία μικρή χώρα της Κεντρικής Αμερικής, η οποία έχει έκταση 21.040 τετραγωνικά χιλιόμετρα και πληθυσμό 6,3 εκατομμύρια. Η χώρα αυτή βρίσκεται στην ακτή του Ειρηνικού, κατά μήκος του "Δακτυλιδιού της Φωτιάς", όπου συγκρούονται οι τεκτονικές πλάκες Κόκος και Καραϊβικής. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η σεισμικότητα που συνδέονται με τις παραπάνω πλάκες είναι σημαντικές για την ανάπτυξη του γεωθερμικού δυναμικού της χώρας. Ακόμα, το Ελ Σαλβαδόρ ήταν η πρώτη χώρα στην Κεντρική Αμερική που χρησιμοποίησε τη γεωθερμική ενέργεια [44].

Στο γεωθερμικό πεδίο του δήμου Βερολίνου, στην περιοχή Ουσουλουτάν, έχει εγκατασταθεί ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το εργοστάσιο διαθέτει επί του παρόντος τέσσερις μονάδες, τα στοιχεία των οποίων παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.1: Παρουσίαση στοιχείων για τις μονάδες του εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής στο Βερολίνο του Ελ Σαλβαδόρ [44]

Φάση	Έτος Λειτουργίας	Τεχνολογία	Αριθμός Μονάδων	MWe/Μονάδα
Μονάδες 1 & 2	1999	Μονάδα μονής ταχείας εξάτμισης	2	28
Μονάδα 3	2005	Μονάδα μονής ταχείας εξάτμισης	1	44
Μονάδα 4	2007	Μονάδα δυαδικού κύκλου	1	9,2



Εικόνα 4.16: Γεωθερμικό πεδίο στο Ελ Σαλβαδόρ [45]

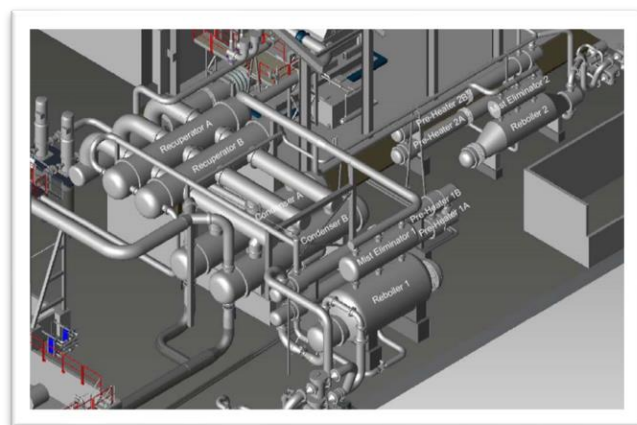
Η μονάδα δυαδικού κύκλου ή μονάδα 4, όπως διαφορετικά ονομάζεται βρίσκεται στην πλατφόρμα γεώτρησης TR-9. Η κατασκευή της ξεκίνησε το 2005 και ολοκληρώθηκε το 2007. Ο σκοπός δημιουργίας της μονάδας 4 ήταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η βελτίωση της απόδοσης του γεωθερμικού πεδίου και η συμβολή στην τοπική βιώσιμη ανάπτυξη. Η μονάδα αυτή ήταν η πρώτη στο Ελ Σαλβαδόρ που χρησιμοποίησε την τεχνολογία του δυαδικού κύκλου.

Οι γεωθερμικοί πόροι στο Βερολίνο παράγουν ένα διφασικό μίγμα, ατμού και νερού. Ο σταθμός δυαδικού κύκλου έχει σχεδιαστεί για την εξαγωγή εσωτερικής ενέργειας από το γεωθερμικό νερό πριν από την επανεισαγωγή του σε θερμοκρασία 180°C με τελικό στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεωθερμικό νερό που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μονάδα προέρχεται από δύο πηγές, τα οποία συμβολίζονται ως TR4/5 και TR2/9. Ο ατμός από αυτά τα πηγές χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις μονάδες 1 και 2. Στη μονάδα 4, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται χρησιμοποιώντας τον οργανικό κύκλο Rankine. Το εργαζόμενο ρευστό σε αυτή τη μονάδα είναι το ισοπεντάνιο.

Η ακαθάριστη ισχύς της μονάδας δυαδικού κύκλου είναι 9,2 MWe. Ωστόσο, η ενέργεια που χρησιμοποιείται από τις αντλίες κυκλοφορίας, τις αντλίες ψύξης νερού, τους ανεμιστήρες του πύργου ψύξης και άλλο ηλεκτρικό και βοηθητικό εξοπλισμό παρέχεται από την ίδια παραγωγή. Ως αποτέλεσμα, η καθαρή ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο από τη συγκεκριμένη μονάδα είναι 7,8 MWe [44].



Εικόνα 4.17: Αντλιοστάσιο της μονάδας δυαδικού κύκλου [46]



Εικόνα 4.18: Υποσύστημα εναλλάκτη θερμότητας της μονάδας δυαδικού κύκλου [44]

4.5 Εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τηλεθέρμανσης Hellisheidi στην Ισλανδία

Ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής Hellisheidi βρίσκεται περίπου 18 χιλιόμετρα έξω από την πρωτεύουσα της Ισλανδίας, το Ρέικιαβικ. Η πρώτη φάση του σταθμού τέθηκε σε λειτουργία το 2006, αφού η κατασκευή του ξεκίνησε το 2005. Είχε εκτιμηθεί πως σε πλήρη ανάπτυξη, η δυναμικότητα του σταθμού θα είναι 300 MW ηλεκτρικής ενέργειας και 400 MW θερμικής ενέργειας, με δυνατότητα επέκτασης με σύνδεση σε παρακείμενες περιοχές. Στόχος του εργοστασίου είναι η κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στον βιομηχανικό τομέα, καθώς και η χρήση ζεστού νερού για θέρμανση χώρων στον οικιακό τομέα [47].

Ο γεωθερμικός σταθμός Hellisheidi είναι σταθμός διπλής ταχείας εξάτμισης. Η έκταση του είναι 8 τετραγωνικά χιλιόμετρα, διαθέτει 30 πηγάδια παραγωγής, καθώς και 3 υποσυστήματα διαχωριστών ατμού/νερού [46]. Επιπλέον, υπάρχουν 6 ατμοστροβίλοι υψηλής πίεσης, ισχύος 45 MW και ένας ατμοστροβίλος χαμηλής πίεσης, ισχύος 35 MW. Ακόμα, η δυναμικότητα του εργοστασίου το 2008 έφτανε τα 215 MW, ενώ όταν αναπτύχθηκε πλήρως, από το 2010 και έπειτα, η ισχύς αυξήθηκε στα 300 MW. Τέλος, ο σταθμός συνδέεται με τον υποσταθμό του εθνικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος βρίσκεται περίπου 1 χιλιόμετρο από το εργοστάσιο [47].

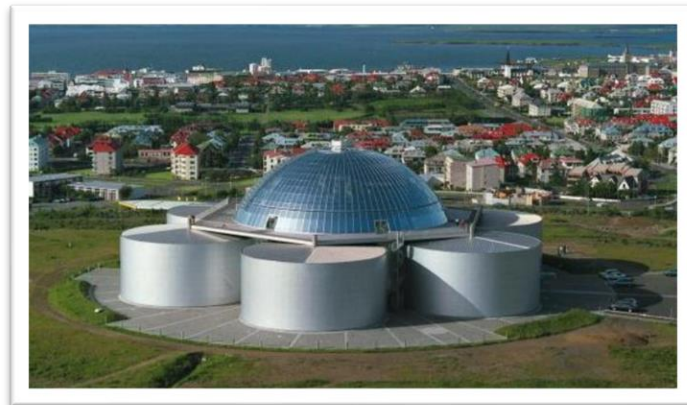


Εικόνα 4.19: Εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής Hellisheidi, Ισλανδία [47]

Σημαντική είναι ακόμη, η συμβολή του εργοστασίου σε θέματα θέρμανσης. Το 2009 ολοκληρώθηκε η εγκατάσταση ενός αγωγού μεταφοράς ζεστού νερού που επεκτείνεται από το Hellisheidi ως το Ρέικιαβικ. Η θερμική ισχύς του αγωγού είναι 400 MW και έως το 2024 η χωρητικότητά του αναμένεται να είναι επαρκής για να καλύψει τις αυξήσεις στη ζήτηση ζεστού νερού για θέρμανση χώρων.

Η μονάδα χρησιμοποιεί φρέσκο υπόγειο νερό που έχει θερμανθεί στους 50°C με τη χρήση ατμού από τους ατμοστροβίλους. Στη συνέχεια, το νερό θερμαίνεται για δεύτερη φορά

μέσω του εναλλάκτη θερμότητας στους 83°C περίπου. Για τη μεταφορά του νερού χρησιμοποιείται υπόγειος, μονωμένος σωλήνας. Το νερό ταξιδεύει 18 χιλιόμετρα μέχρι τις δεξαμενές ζεστού νερού του Ρέικιαβικ [47].



Εικόνα 4.20: Δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού νερού “Το μαργαριτάρι”, στο Ρέικιαβικ [47]



Εικόνα 4.21: Σταθμός διαχωριστή ατμού/νερού στο Hellisheidi [48]



Εικόνα 4.22: Υποσύστημα ατμοστροβίλου υψηλής πίεσης στο Hellisheidi [48]

4.6 Περισσότερες εφαρμογές αξιοποίησης της γεωθερμίας

Υπάρχουν ακόμη πολλά παραδείγματα γεωθερμικών εφαρμογών τα οποία θα μπορούσαν να παρουσιαστούν, όμως δεν είναι αυτός ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας. Ωστόσο, παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά επιπλέον εφαρμογές αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας από την Ελλάδα και τον κόσμο.

Γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης

- Ευρωπαϊκό Κέντρο Δημοσίου Δικαίου, στα Λεγραινά Αττικής [41]
- Γραφεία ΚΑΠΕ στο Πικέρμι Αττικής [41]
- Παιδικός σταθμός στο δήμο Αλεξανδρούπολης
- Επαγγελματικό Λύκειο (ΕΠΑΛ) στην κοινότητα Γρεβενών
- Κτίριο Μεταλλειολόγων στην Πολυτεχνειούπολη, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στην Αθήνα [41]
- Σύστημα τηλεθέρμανσης στην πόλη του Μιλάνο, στην Ιταλία

Γεωθερμικά εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής

- Σύμπλεγμα γεωθερμικών σταθμών ξηρού ατμού Geysers, στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής [49]
- Σύμπλεγμα γεωθερμικών σταθμών ξηρού ατμού στο Λαρντερέλλο, στην Ιταλία [49]
- Σύμπλεγμα γεωθερμικών σταθμών Cerro Prieto, στο Μεξικό [49]
- Γεωθερμικό εργοστάσιο Aluto-Langano, στην Αιθιοπία
- Γεωθερμικό σύμπλεγμα μονάδων Makban, στις Φιλιππίνες [49]
- Γεωθερμικό εργοστάσιο στην περιοχή Nesjavellir, στην Ισλανδία
- Γεωθερμικό εργοστάσιο στο δήμο Ahuacharán, στο Ελ Σαλβαδόρ [44]
- Γεωθερμικό εργοστάσιο Darajat, στην Ινδονησία [49]
- Γεωθερμικό εργοστάσιο Svartsengi, στην Ισλανδία [44]

Κεφάλαιο 5^ο: Αποτίμηση και Συμπεράσματα

5.1 Σύνοψη της Διπλωματικής

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία είχε ως στόχο, την βιβλιογραφική μελέτη των μεθόδων αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας, καθώς και την εμβάθυνση στα απαραίτητα για τη λειτουργία τους, συστήματα ελέγχου.

Αρχικά, δόθηκαν ο ορισμός και γενικές πληροφορίες για τη γεωθερμία, ενώ στη συνέχεια, καταγράφηκαν οι λόγοι που την καθιστούν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε περιγραφή των τρόπων εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας από τον άνθρωπο, οι οποίοι εν συντομία είναι, τα γεωθερμικά συστήματα άμεσης χρήσης χαμηλής θερμοκρασίας, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και τα γεωθερμικά εργοστάσια ηλεκτρισμού. Το πρώτο κεφάλαιο ολοκληρώθηκε με την καταγραφή τόσο των σημείων που χρήζουν ελέγχου στις μονάδες αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας.

Το κύριο μέρος της εργασίας αφιερώθηκε στις εφαρμογές της γεωθερμίας, που αφορούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη θέρμανση/ψύξη εσωτερικών χώρων. Το δεύτερο κεφάλαιο ξεκίνησε με μία αναφορά στη σημασία, την οποία έχει ο έλεγχος σε ένα εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής. Έπειτα, καταγράφηκαν τα συστήματα ελέγχου που απαιτούνται για τη λειτουργία ενός τέτοιου εργοστασίου. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία εις βάθος ανάλυση στα συστήματα ελέγχου, καθενός υποσυστήματος ενός Σταθμού Δυαδικού Κύκλου (Binary Cycle Plant), τα οποία είναι τα εξής:

- Ο Ατμοστρόβιλος (Steam Turbine)
- Η Ηλεκτρική Γεννήτρια (Electric Generator)
- Ο Εναλλάκτης Θερμότητας (Heat Exchanger)
- Ο Συμπυκνωτής (Condenser)
- Ο Πύργος Ψύξης (Cooling Tower)
- Τα Πηγάδια Παραγωγής και Έγχυσης (Production and Reinjection Wells)

Στη συνέχεια, αναλύθηκε ο κύκλος λειτουργίας των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και τον κλιματισμό εσωτερικών χώρων. Ακολούθησε, η κατηγοριοποίηση τους σε συστήματα ανοικτού και κλειστού βρόχου, καθώς και η καταγραφή των διαφορετικών παραμέτρων που είναι απαραίτητες για την εγκατάστασή τους, όπως για παράδειγμα η μορφολογία του εδάφους, η ποιότητα-ποσότητα του νερού ενός υδροφόρου ορίζοντα ή η διαθέσιμη έκταση της γης. Επιπλέον, έγινε περιγραφή της αυτόνομης λειτουργίας των συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση διαφόρων τύπων θερμοστάτη. Τέλος, παρουσιάστηκαν οι απαραίτητοι περιορισμοί σε θερμοκρασία, πίεση και ροή, οι οποίοι συμβάλλουν στην ομαλή λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης εσωτερικών χώρων.

Η Διπλωματική ολοκληρώθηκε με την παρουσίαση πραγματικών εφαρμογών γεωθερμίας από την Ελλάδα, αλλά και το εξωτερικό. Πιο συγκεκριμένα, δόθηκαν τρία παραδείγματα γεωθερμικών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης σε ιδιωτικά και δημόσια κτίρια στην Ελλάδα και δύο παραδείγματα εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής από το Ελ Σαλβαδόρ και την Ισλανδία αντίστοιχα. Πραγματοποιήθηκε σύντομη περιγραφή των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά (τύπος γεωεναλλάκτη, τύπος σταθμού παραγωγής ενέργειας),

καταγράφηκε η δυναμικότητα και η ισχύς του εκάστοτε συστήματος, καθώς παρουσιάστηκε και φωτογραφικό υλικό από την κάθε εγκατάσταση.

5.2 Μελλοντικά βήματα

Η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, η οποία χάρη στη σύγχρονη τεχνολογία μπορεί να καλύπτει ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη, αλλά και να χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα, η εκμετάλλευσή της πραγματοποιείται σε παγκόσμιο επίπεδο, αν και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται επιδέχονται βελτίωσης.

Παρακάτω, παρουσιάζονται ορισμένες πιθανές βελτιώσεις σε συστήματα αξιοποίησης και ελέγχου της γεωθερμικής ενέργειας. Αυτές θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες σε εταιρείες, οι οποίες ασχολούνται με εγκαταστάσεις γεωθερμικών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης σε κτίρια ή με τη δημιουργία μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.

- Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα ελέγχει εξολοκλήρου τη λειτουργία των γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.
- Ανάπτυξη γενετικού αλγορίθμου για τη συνεργασία της γεωθερμίας με άλλες μορφές ΑΠΕ, όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια και η βιομάζα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υψηλής ισχύος (π.χ. αυτόματος έλεγχος με την χρήση νευρωνικών δικτύων).
- Τεχνοοικονομική μελέτη και σύγκριση απόδοσης μεταξύ γεωθερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και άλλων πηγών ενέργειας, είτε ανανεώσιμων (αιολικής, ηλιακής, κτλ.) ή συμβατικών (λιγνίτη, φυσικό αέριο, πετρέλαιο).
- Εξερεύνηση πλούσιων γεωθερμικά περιοχών, οι οποίες έως τώρα έχουν μείνει ανεκμετάλλευτες και μπορούν να αποδειχθούν υψηλά αποδοτικές για εφαρμογές θέρμανσης/ψύξης ή και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οικονομική σύγκριση συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας με άλλα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για θέρμανση/κλιματισμό κτιρίων.
- Δημιουργία διαδικτυακής εφαρμογής, χάρη στην οποία θα μπορεί ο χρήστης να ελέγχει τη θερμοκρασία της οικίας ή του κτιρίου στο οποίο έχει πραγματοποιηθεί εγκατάσταση γεωθερμικών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης.
- Συνδυαστική χρήση γεωθερμικών συστημάτων με άλλα συστήματα ΑΠΕ, όπως τα φωτοβολταϊκά, με σκοπό την ενίσχυση της αποτελεσματικότητάς τους.

Βιβλιογραφία

- [1] Geothermal explained - U.S. Energy Information Administration (EIA).
<https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/> (Accessed 4 May 2022)
- [2] TWI. "What is Geothermal Energy? How Does it Work?" <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/geothermal-energy/> (Accessed 4 May 2022)
- [3] Where geothermal energy is found - U.S. Energy Information Administration (EIA).
<https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/where-geothermal-energy-is-found.php/>
(Accessed 4 May 2022)
- [4] GrennMatch (2022). "Geothermal Energy: Advantages & Disadvantages".
<https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/04/advantages-and-disadvantages-of-geothermal-energy/> (Accessed 4 May 2022)
- [5] Independent Statistics and Analysis - U.S. Energy Information Administration (EIA).
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=3970> (Accessed 4 May 2022)
- [6] Lund, J. W. (2010). "Direct utilization of geothermal energy", *Energies*, 3(8):1443-1471.
- [7] Pinterest. "Geothermal Heat Pumps | Geothermal heat pumps, Heat pump system, Heat pump". <https://gr.pinterest.com/pin/367184175853428291/> (Accessed 5 May 2022)
- [8] Bhatia S. C., ed. (2014), "Advanced Renewable Energy Systems, (Part 1 and 2), 1st ed., New Delhi, India: WPI Publishing".
- [9] Muhammad K., Muhammad R.F., ed. (2021), "Renewable energy conversion systems, 1st ed. San Diego, U.S.A: Elsevier Science Publishing Co Inc".
- [10] Mahmoud, M., Ramadan, M., Naher, S., Pullen, K., Ali Abdelkareem, M., & Olabi, A. G. (2021). "A review of geothermal energy-driven hydrogen production systems", *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 22, 1 May 2021.

- [11] Kedebe, H. (2002). "STUDY OF GEOTHERMAL POWER PLANT ELECTRICAL AND CONTROL SYSTEM WITH EMPHASIS ON RELIABILITY ASPECTS", United Nations University – Geothermal Training Programme.

- [12] Electrical4U (2020). "What is a Control System? (Open Loop & Closed Loop Control Systems Explained)". <https://www.electrical4u.com/control-system-closed-loop-open-loop-control-system/> (Accessed 7 June 2022)

- [13] Dulau, M. and Bica, D. (2013). "Simulation of Speed Steam Turbine Control System", The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2013).

- [14] Lin quip (2021). "Types of Steam Turbine: Impulse & Reaction Turbine". <https://www.linquip.com/blog/types-of-steam-turbine/> (Accessed 7 June 2022)

- [15] Gorfie Beyene, D. (2015). "Electrical control and protection system of geothermal power plants", United Nations University – Geothermal Training Programme.

- [16] For Geothermal Power Plants | Thermal and Geothermal Power Generation | Fuji Electric Global. (Accessed 9 June 2022) from https://www.fujielectric.com/products/thermal_power_generation/geothermal_power/index.html

- [17] Xin, S., Liang, H., Hu, B., Li, K. (2012). "ELECTRICAL POWER GENERATION FROM LOW TEMPERATURE CO-PRODUCED GEOTHERMAL RESOURCES AT HUABEI OILFIELD", PROCEEDINGS, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 30 – February 1, 2012.

- [18] Padhee, S. (2014). "Controller Design for Temperature Control of Heat Exchanger System: Simulation Studies", WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL.

- [19] Yehia, S. (2015). "Heat Exchanger Control Strategies – Integrating Feedback, Feedforward and Cascade Control – The Control Blog". <https://thecontrolblog.com/2015/08/27/heat-exchanger-control-strategies-integrating-feedback-feedforward-and-cascade-control/> (Accessed 9 June 2022)

- [20] Parada, M. and Fernando, A. (2014). "Geothermal binary cycle power plant principles, operation and maintenance", United Nations University – Geothermal Training Programme.

- [21] UBio Access | DongHwa Entec | Surface Condenser.
<https://ubioaccess.com/products/surfacecondenser> (Accessed 11 June 2022)
- [22] Zhi, C., Li, Y., Huang, K. and Xiao, K. (2020). "Optimal design of a nuclear power plant condenser control system based on multi-objective optimization algorithm", Nuclear Technology & Radiation Protection: Year 2020, Vol. 35, No. 2, pp. 95-102.
- [23] Commercial Risk (2021). "Economic recovery will depend on the energy crisis says risk manager". <https://www.commercialriskonline.com/economic-recovery-will-depend-on-the-energy-crisis-says-risk-manager-2/> (Accessed 11 June 2022)
- [24] Richardson, I., Addison, S. and Addison D. (2012) "Biological Control of Cooling Water in Geothermal Power Generation", New Zealand Geothermal Workshop, Auckland, New Zealand, 2012.
- [25] ThinkGeoEnergy - Geothermal Energy News (2020).
<https://www.thinkgeoenergy.com/geosmart-project-targets-improvement-of-flexibility-and-efficiency-of-geothermal-plants/> (Accessed 11 June 2022)
- [26] Polharsson, S. (2003). "Geothermal well operation and maintenance", United Nations University – Geothermal Training Programme.
- [27] Gordon Bloomquist, R. (2013). "Geothermal Space Heating", Geothermics, Volume 32, Issues 4–6, Pages 513-526, August - December 2003.
- [28] El Haj Assad, M., Almallahi, M. N., Ramadan, A., Mohamed A. A., Rejeb, O. and AlShabi, M. (2022). "Geothermal Heat Pumps: Principles and Applications", Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), (2022).
- [29] Μιχόπουλος, Α. Κ., Βούλγαρη, Β., & Ζαχαριάδης, Θ. (2015). "Οδηγός Σχεδιασμού και Εγκατάστασης Συστημάτων Αβαθούς Γεωθερμίας."
- [30] Boljevic, S. "GeoAtlantic Boosting local ecosystem for the use of geothermal energy in the communities Geothermal Energy", PowerPoint Presentation.

- [31] Energy Saving Trust (2007). "Domestic Ground Source Heat Pumps: Design and installation of closed-loop systems-A guide for specifiers, their advisors and potential users CE82 Domestic Ground Source Heat Pumps: Design and installation of closed-loop systems". https://www.icax.co.uk/pdf/Domestic_Ground_Source_Heat_Pumps_Design_Installation.pdf (Accessed 27 August 2022)
- [32] E+E. "Room Temperature Sensor". <https://www.epluse.com/products/temperature-measurement/temperature-sensors-hvac/ee10-t/> (Accessed 27 August 2022)
- [33] Mr Central Heating. "How Does a Thermostat Work in Your Home?" <https://www.mrcentralheating.co.uk/blog/how-does-a-thermostat-work-at-home/> (Accessed 27 August 2022)
- [34] Tamas, R., O'Brien, W. and Quintero M. S. (2021). "Residential thermostat usability: Comparing manual, programmable, and smart devices", Building and Environment, Volume 203, October 2021.
- [35] Jiakang, L., Sookoor, T. I., Srinivasan, V., Gao, G., Holben, B., Stankovic, J., et. al. (2010). "The smart thermostat", Proceedings of the 8th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys 2010, Zurich, Switzerland, November 3-5, 2010.
- [36] Best Home Heating. "What Temperature Does a Ground Source Heat Pump Produce? - besthomeheating.com". <https://besthomeheating.com/ground-source-heat-pump-temperature/> (Accessed 27 August 2022)
- [37] York Install Confidence. "Geothermal Owner's Manual Residential Products". <https://www.yorkgeothermal.com/downloads/literature/om1500mk6-yorkownersmanual.pdf> (Accessed 27 August 2022)
- [38] Youji, L. (1993). "Control system for geothermal house heating", United Nations University – Geothermal Training Programme.
- [39] TEE/TKM (2016). "Το νέο κτίριο της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας". <https://www.teetkm.gr/%CF%84%CE%BF-%CE%BD%CE%AD%CE%BF-%CE%BA%CF%84%CE%AF%CF%81%CE%B9%CE%BF-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%86%CE%AD%CF%81%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82-%CE%BA%CE%B5%CE%BD%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA/> (Accessed 1 August 2022)

- [40] Μπαϊρακλίδης, Α. "ΘΕΡΜΑΝΣΗ-ΨΥΞΗ ΜΕ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ", Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.
- [41] Μενδρινός, Δ., & Καρύτσας, Κ. (2005). "ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ, ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΚΑΠΕ", Επιθεώρηση Μεταλλευτικής, Γεωτεχνικής και Μεταλλουργικής Επιστήμης, Τόμος 15, Ιούλιος – Δεκέμβριος 2005.
- [42] e-evros.gr. "Ιαματικά λουτρά Τραιανούπολης". <https://www.e-evros.gr/gr/epaggelmatikos-odhgos/2/iamatika-loytra-traianopolhs/post19987> (Accessed 3 August 2022)
- [43] Τομαράς, Κ. "ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ", Μηχανικός ERGON EQUIPMENT AETE.
- [44] Fernando Monroy Parada, A. (2013). "GEOTHERMAL BINARY CYCLE POWER PLANT PRINCIPLES, OPERATION AND MAINTENANCE", United Nations University – Geothermal Training Programme.
- [45] Think Geoenergy (2021). "International cryptocurrency investors visit Berlin geothermal plant, El Salvador." <https://www.thinkgeoenergy.com/international-cryptocurrency-investors-visit-berlin-geothermal-plant-el-salvador/> (Accessed 27 August 2022)
- [46] Guidos, J. and Burgos, J. (2012). "GEOTHERMAL ACTIVITY AND DEVELOPMENT IN EL SALVADOR-PRODUCING AND DEVELOPING", Presented at "Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells", organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador, March 11-17, 2012.
- [47] Jonsson, A. T., & Sigurjonsson, G. F. (2008). "CASE STUDY: HELLISHEIDI POWER PLANT, COMBINED HEAT AND POWER", Proceedings of the 8th Asian Geothermal Symposium, December 9-10, 2008.
- [48] Hallgrímsdóttir, E., Ballzus, C. and Hrólfsson, I. (2012). "The Geothermal Power Plant at Hellisheiði, Iceland", GRC Transactions, Vol. 36, 2012.
- [49] Power Technology (2013). "The top 10 biggest geothermal power projects in the world - Power Technology." <https://www.power-technology.com/analysis/feature-top-10-biggest-geothermal-power-plants-in-the-world/> (Accessed 29 August 2022)