



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:  
“ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ”  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ  
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ**

ΥΠΟ  
**Νικόλαου Αρβανιτόπουλου**



Βόλος, 2020

© 2020 Νικόλαος Αρβανιτόπουλος

Η έγκριση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδη για τις χρήσιμες παρατηρήσεις, καθοδήγηση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής την Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Θεοφάνη Γραμμένο για τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους και την βοήθειά τους. Θα ήθελα, τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξή της όλο αυτό το διάστημα μέχρι την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

# Συστήματα ενεργειακών γεωθερμικών υποδομών και γεωθερμικές σήραγγες

**Νικόλαος Αρβανιτόπουλος**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία μελετάει και αναλύει την έννοια της γεωθερμίας και των εφαρμογών της σε συστήματα ενεργειακών υποδομών και τις γεωθερμικές σήραγγες. Αρχικά γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις διαθέσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα, την περιβαλλοντική αλλαγή κι άλλα ενεργειακά θέματα. Στη συνέχεια περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και οι θέσεις των ενεργειακών πεδίων καθώς και οι μέθοδοι απαγωγής γεωθερμικής ενέργειας. Μετά παρουσιάζεται η αβαθής γεωθερμία καθώς αποτελεί σήμερα τον πιο διαδεδομένο τρόπο αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας για την ψύξη/θέρμανση επιφανειακών κτηρίων και δομών. Ακολούθως παρουσιάζεται η βαθιά γεωθερμία που είναι σαφώς πιο αποδοτική ώστε να μπορεί να παραχθεί ακόμη και ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος, παρουσιάζονται οι γεωθερμικές σήραγγες. Γενικά, οι σήραγγες είναι επιμήκεις κατασκευές και περίπλοκα τεχνικά έργα και μία από τις χρήσεις τους είναι ότι εντάσσονται στον κυκλοφοριακό σχεδιασμό μεγάλων πόλεων. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η τοποθέτηση γεωθερμικών συστημάτων, τόσο σε υφιστάμενες όσο και σε νέες, υπό κατασκευή, σήραγγες. Σήμερα τα περιβαλλοντικά προβλήματα αυξάνουν συνεχώς από την ανάγκη εξεύρεσης και κατανάλωσης νέων πόρων ενέργειας. Η χρήση αιφόρων-καθαρών πηγών ενέργειας όπως η γεωθερμική, καθίσταται αναγκαία όσο ποτέ.

# **Geothermal energy infrastructure systems and geothermal tunnels**

**Nikolaos Arvanitopoulos**

Department of Civil Engineering, University of Thessaly

## **Abstract**

The present master thesis studies and analyzes the concept of geothermal energy and its applications in energy infrastructure systems and geothermal tunnels. A bibliographical review of available renewable energy sources, the global energy problem, the environmental change, and other energy issues is initially undertaken. Then, the characteristics and positions of the energy fields, as well as, the methods of geothermal energy extraction, are described. Furthermore the shallow geothermal energy is presented, as it is today the most popular way of utilizing geothermal energy for cooling / heating surface buildings and structures. What follows is the description of deep geothermal energy that is clearly more efficient so that even electricity can be produced. Finally, the geothermal tunnels are presented. In general, tunnels are linear constructions and complex technical projects and one of their uses is that they are integrated into the traffic planning of large cities. The present master thesis describes the installation of geothermal systems in existing tunnels as well as new, under construction, tunnels. Nowadays environmental problems are constantly increasing due to the need to find and consume new energy sources. The use of sustainable-clean energy sources such as geothermal is as necessary as ever.

## Περιεχόμενα

<b>1. Εισαγωγή</b> .....	6
<b>2. Περιβαλλοντικά Θέματα</b> .....	14
2.1. Το Παγκόσμιο Ενεργειακό Πρόβλημα .....	14
2.2. Αντιμετώπιση Κλιματικών Αλλαγών.....	17
2.3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	18
<b>3. Γεωθερμία</b> .....	21
3.1. Γενικά.....	21
3.2 Γεωθερμικά Πεδία .....	25
3.3 Συστήματα Αβαθούς Γεωθερμίας.....	26
3.4 Συστήματα Βαθείας Γεωθερμίας.....	33
<b>4. Εφαρμογές</b> .....	40
4.1 Μηχανική Γεωθερμίας .....	40
4.2 Περιβαλλοντικές Επίπτωσης Χρήσης Γεωθερμίας.....	42
4.3 Αντιμετώπιση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Χρήσης Γεωθερμίας.....	46
4.4 Γεωθερμικές Σήραγγες.....	53
4.5 Γεωθερμικό σύστημα σε υπό κατασκευή σήραγγα .....	54
4.6 Γεωθερμικό σύστημα σε υφιστάμενη σήραγγα .....	58
<b>5 Συμπεράσματα</b> .....	62
<b>6 Βιβλιογραφία</b> .....	64

## 1. Εισαγωγή

Η γεωθερμική ενέργεια από θερμές πηγές και φυσικές μικρές λίμνες, έχει χρησιμοποιηθεί από αρχαιοτάτων χρόνων για οικιακή χρήση (π.χ. μαγείρεμα, καθαριότητα, θέρμανση). Υπάρχουν ενδείξεις ότι οι Ιθαγενείς Αμερικανοί χρησιμοποιούσαν γεωθερμική ενέργεια για οικιακή χρήση πριν από 10.000 χρόνια. Στην αρχαιότητα, λουτρά που θερμαίνονταν από θερμές πηγές χρησιμοποιήθηκαν από τους Έλληνες και τους Ρωμαίους και τα παραδείγματα της γεωθερμικής θέρμανσης χώρων χρονολογούνται τουλάχιστον από τη ρωμαϊκή πόλη της Πομπηίας κατά τον 1ο αιώνα μ.Χ. Οι θέσεις των δομών που χρησιμοποιούσαν τη γεωθερμική ενέργεια, εξαρτιόνταν από την προσβασιμότητα στην εν λόγω ενέργεια.

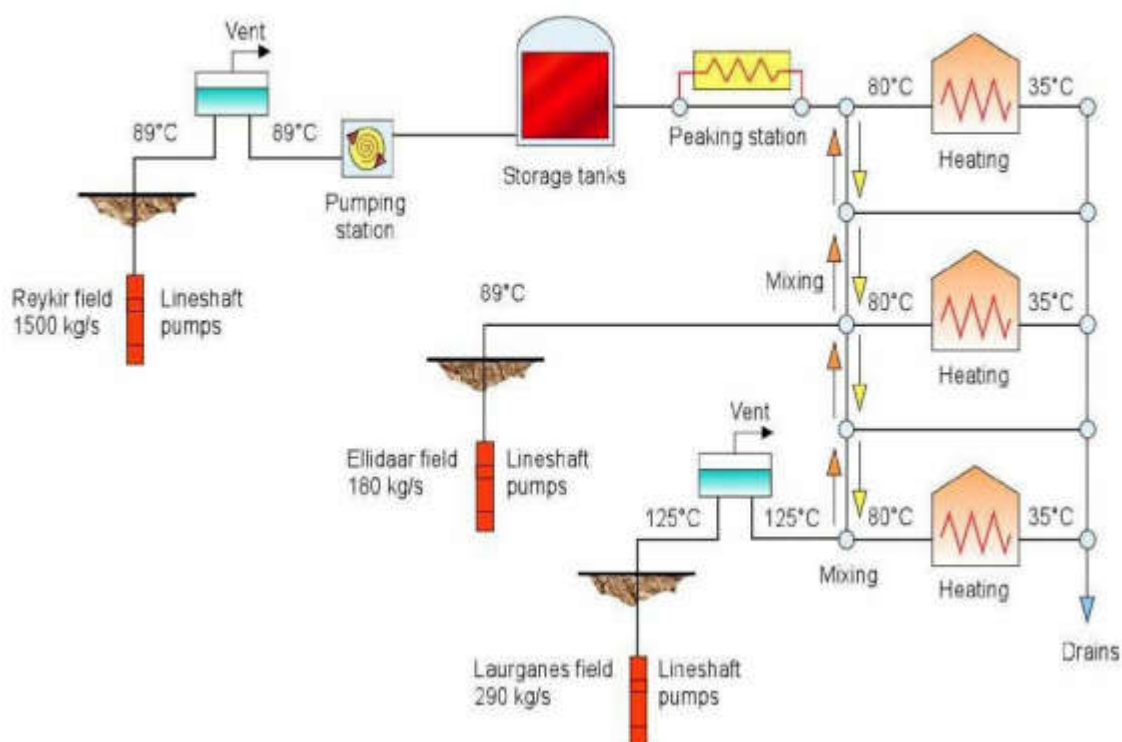
Παρόλο που το πρώτο σύστημα θέρμανσης στον κόσμο εγκαταστάθηκε στο Chaudes-Aigues της Γαλλίας τον 14ο αιώνα, οι πόλεις και οι βιομηχανίες άρχισαν να συνειδητοποιούν τις οικονομικές δυνατότητες των γεωθερμικών πόρων στα τέλη του 19ου αιώνα. Στις Ηνωμένες Πολιτείες και συγκεκριμένα στο Αϊντάχο το 1892 δόθηκε για οικιστική χρήση γεωθερμική θερμότητα που χρησιμοποιήθηκε από το μεγαλύτερο μέρος της πόλης μέχρι το 1970. Στην Ισλανδία (σεισμογενής- ηφαιστειακά ενεργή χώρα), έχει εγκατασταθεί από το 1930 το μεγαλύτερο γεωθερμικό σύστημα τηλεθέρμανσης. Το ζεστό ρευστό (νερό) χρησιμοποιείται από το 99% των δομών του Ρέικιαβικ για θέρμανση. Οι πρώτες βιομηχανικές εφαρμογές άμεσης χρήσης περιελάμβαναν την εξαγωγή βορικών ενώσεων από γεωθερμικά υγρά στο Larderello της Ιταλίας, στις αρχές του 19ου αιώνα.

Σε ότι αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση γεωθερμίας, αυτή ξεκίνησε πειραματικά στην Ιταλία το 1904 (Larderello). Ήταν το 1913 όταν για πρώτη φορά κατασκευάστηκε εργοστάσιο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ονομαστική ισχύς της παραγόμενης εμπορικής ενέργειας, ήταν 250 κιλοβάτ (kW). Παρόμοια εργοστάσια κατασκευάστηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1960 και στη Νέα Ζηλανδία το 1958. Ο ηλεκτρισμός παραγόταν από ατμό που με σωλήνες έφτανε στην επιφάνεια και κινούσε στροβίλους που με τη σειρά τους παρήγαγαν ηλεκτρισμό. Σήμερα τέτοιου τύπου εργοστάσια έχουν τρόπο να αυξήσουν την παραγωγή ενέργειας, θερμαίνοντας επιπλέον και το ζεστό νερό που υπάρχει στις ίδιες γεωτρήσεις. Το υπερθερμασμένο νερό από το έδαφος, διαχωρίζεται από το μείγμα και θερμαίνεται επιπλέον ( $\Delta T$ ) έως ότου μετατραπεί σε ατμό. Τα περισσότερα γεωθερμικά εργοστάσια, επί του παρόντος, είναι αυτού του τελευταίου τύπου «υγρού ατμού»

Μέχρι το 2015, περισσότερες από 80 χώρες χρησιμοποιούσαν τη γεωθερμική ενέργεια, είτε άμεσα, είτε σε συνδυασμό με τις αντλίες θερμότητας με κινητήρες αερίου, με πρωτοπόρες χώρες την Κίνα, την Τουρκία, την Ισλανδία, την Ιαπωνία, την Ουγγαρία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς για άμεση χρήση το 2015 ήταν περίπου 73,290 μεγαβάτ θερμικής ισχύος (MWt), χρησιμοποιώντας περίπου 163,273 GWh (γιγαβατώρες) ετησίως, παράγοντας ένα ετήσιο συντελεστή χρήσης, που προκύπτει από την ετήσια ενέργεια που παράγεται από το εργοστάσιο σε MWh (μεγαβατώρες) διαιρούμενη με την εγκατεστημένη ισχύ του εργοστασίου [σε μεγαβάτ (MW)] πολλαπλασιασμένη με 8.760 ώρες. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο ετήσιος συντελεστής χρήσης προκύπτει ότι είναι 28% για τη λειτουργία



θέρμανσης. Η γεωθερμία στη θέρμανση κατοικιών και εμπορικών χώρων καθώς και στη τηλεθέρμανση, έχει εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα στην Ισλανδία, όπου η συνολική ισχύς του γεωθερμικού συστήματος τηλεθέρμανσης ανέρχονταν, στα τέλη του 1999, σε περίπου 1200 MWt.

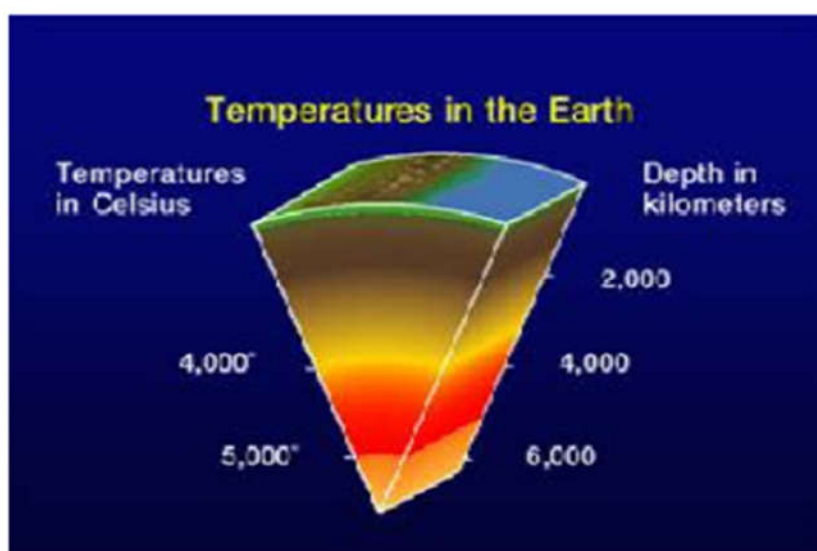


Σχ. 1.1 Σύγχρονο σύστημα εκμετάλλευσης γεωθερμικής ενέργειας

Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η διάταξη τηλεθέρμανσης σε διάφορα σημεία της Ισλανδίας όπου ζεστό νερό αντλείται από γεώτρηση και με κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό (κυκλοφορητής-δεξαμενή) παράγεται ηλεκτρική ενέργεια ή θερμαίνονται κτήρια. Το νερό εισάγεται στο σύστημα θέρμανσης στους 80 °C και αποβάλλεται στους 35 °C.

Η συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, το 2016, ήταν περίπου 13.400 MW παράγοντας περίπου 75.000

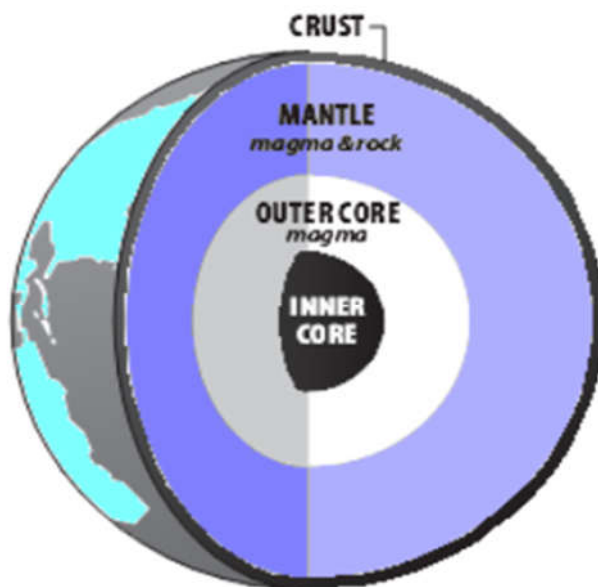
GWh (γιγαβατώρες) το χρόνο. Αυτό ανάγεται σε έναν συντελεστή χρήσης 71%, που ισοδυναμεί με 6.220 ώρες λειτουργίας πλήρους φορτίου ετησίως. Στα περισσότερα εντοπισμένα γεωθερμικά πεδία ο συντελεστής αυτός, έπειτα από μετρήσεις, φτάνει στο 95% απόδοσης, αυτό αντιστοιχεί σε 8.322 ώρες λειτουργίας πλήρους φορτίου ετησίως. Εάν τα παραπάνω συγκριθούν με αποδόσεις άλλων μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, διαπιστώνεται η υψηλότερη απόδοσή τους.



Σχήμα 1.2 Ζώνες θερμοκρασίας στο εσωτερικό της Γης. (researchgate.net)

Η γεωθερμική ενέργεια, ταξινομείται ως ανανεώσιμη ενέργεια, επειδή προέρχεται από πηγές που είναι ανεξάντλητα ορυκτά καύσιμα. Περίπου 6500 Km κάτω από την επιφάνεια της γης υπάρχει ο πυρήνας (βλ. Σχήμα 1.2), ο οποίος από δύο τμήματα: το εξωτερικό περίβλημα (εξωτερικός πυρήνας) αποτελείται από υλικό σε ρευστή (υγρή) κατάσταση και περιβάλλει το εσωτερικό τμήμα του πυρήνα (εσωτερικός πυρήνας) το οποίο βρίσκεται σε στερεή κατάσταση. Ο πυρήνας είναι μεταλλικής σύστασης, δηλ. αποτελείται βασικά από σίδηρο, και σε μικρότερο ποσοστό από άλλα ελαφρότερα στοιχεία

όπως νικέλιο, πυρίτιο, θείο κλπ. Η θερμοκρασία του πυρήνα υπολογίζεται από 2800° C έως 6000° C. Μία από τις επικρατούσες απόψεις είναι ότι αυτή η συνεχής παραγωγή θερμότητας παράγεται από την αργή διάσπαση των ραδιενεργών σωματιδίων.



Σχήμα 1.3 Η δομή της γήινης σφαίρας, (φλοιός-μανδύας-εξωτερικός και εσωτερικός πυρήνας).(eia.gov)

Ο πυρήνας της γης περιβάλλεται από μανδύα πάχους 2900 Km, (βλ. Σχήμα 1.3), ο οποίος αποτελείται εν μέρει από στερεά συστατικά (πετρώματα) και εν μέρει από μάγμα. Το εξωτερικό στρώμα της γης είναι σαν ένα κέλυφος αυγού, το οποίο είναι μια μονωμένη επιφάνεια και έχει μερικά θραυσμένα κομμάτια που είναι γνωστά ως λιθοσφαιρικές πλάκες. Το θερμό τηγμένο υλικό (στερεά γεωυλικά και μάγμα) του μανδύα και κατ'επέκταση η θερμότητα από το εσωτερικό της γης εξέρχονται στην επιφάνεια της γης, μέσω των διαρρήξεων των λιθοσφαιρικών πλακών, (περιοχές βύθισης και σύγκρουσης λιθοσφαιρικών πλακών και περιοχές δημιουργίας ωκεάνιου φλοιού στις μεσοωκεάνιες ράχες). Στη συνέχεια, το θερμό νερό που υπάρχει στις περιοχές αυτές μπορεί να

αντληθεί μέχρι την επιφάνεια, να συλλεχθεί η θερμότητά του και στη συνέχεια να επιστρέψει στη περιοχή απ' όπου αντλήθηκε. Έτσι, με αυτή την απλή διαδικασία, γίνεται η συλλογή και επαναχρησιμοποίηση της θερμικής ενέργειας από τη γη. Το ενεργειακό αυτό πλεόνασμα που εκφράζεται μέσω της θερμότητας είναι η γεωθερμική ενέργεια. Οι θέσεις που απαντάται είναι πολλές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί-αξιοποιηθεί, από τον άνθρωπο με πολλούς τρόπους. Αυτή η ενέργεια μπορεί να παραχθεί 24 ώρες την ημέρα σε μεγάλη κλίμακα, χωρίς να εκπέμπονται αέρια θερμοκηπίου, γεγονός το οποίο τη καθιστά προσιτή και βιώσιμη λύση για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Όπως ειπώθηκε και στην αρχή, από τους αρχαίους χρόνους, οι Ρωμαίοι, οι Κινέζοι και οι Ιθαγενείς Αμερικανοί χρησιμοποίησαν ζεστό νερό από πηγές για οικιακή χρήση. Στη σύγχρονη εποχή, αυτά τα θερμά νερά χρησιμοποιούνται σε ιαματικές πηγές, τη θέρμανση των κτιρίων, στη γεωργία και στις βιομηχανίες. Το 1904 δημιουργήθηκε στην Ιταλία η πρώτη ηλεκτρική γεννήτρια στον κόσμο, η οποία τροφοδοτείται από το φυσικό ατμό που εκλύεται από τη γη. Το 1922, οι ΗΠΑ πραγματοποίησαν την πρώτη προσπάθεια ανάπτυξης ενός γεωθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής στο Geysers στη βόρεια Καλιφόρνια. Παρόλα αυτά, καθώς ο ατμός περιείχε μιροσωματίδια και διάφορες ακαθαρσίες, οι σωλήνες μεταφοράς και οι στρόβιλοι παραγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος διαβρώθηκαν. Τελικά η προσπάθεια εγκαταλείφθηκε. Αργότερα, το 1960, ένα μικρό επιτυχημένο υδροθερμικό εργοστάσιο χτίστηκε στο Geysers, το οποίο αναπτύχθηκε για ηλεκτρική παραγωγή. Σήμερα λειτουργούν 28 παρόμοιες εγκαταστάσεις.

Έχει βρεθεί ότι η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας για οικιακή θέρμανση και ψύξη είναι η πιο αποδοτική. Αυτή η απόδοση είναι 50% έως 70% υψηλότερη από τα τυπικά συστήματα θέρμανσης και 20% έως 40% υψηλότερη από τα υπάρχοντα συστήματα ψύξης. Σημειώνεται ότι η υψηλή αυτή απόδοση συνδέεται με το πολύ χαμηλό κόστος. Σύμφωνα με τον Σύνδεσμο Γεωθερμικής Ενέργειας (2008), σε περισσότερες από 24 χώρες σε όλο τον κόσμο παρήχθησαν περισσότερα από 8.900 MW γεωθερμικής ενέργειας, εκ των οποίων τα παραγόμενα 3000 MW ήταν σε οκτώ κράτη. Σημειώνεται ότι οι ΗΠΑ είναι η μεγαλύτερη χώρα παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας. Εκτός από τις ΗΠΑ, τα ακόλουθα κράτη παράγουν επίσης τη αμέσως μεγαλύτερη γεωθερμική ενέργεια, με βάση το ποσοστό της συνολικής παραγόμενης ισχύος τους (συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών καυσίμων και άλλων ανανεώσιμων πηγών): 1) Ισλανδία (30%), 2) Φιλιππίνες (27%), 3) Ελ Σαλβαδόρ (25%), 4) Κόστα Ρίκα (14%) και 5) Κένυα (11%).

Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να παρατηρηθεί σε ηφαίστεια και θερμές πηγές προερχόμενη από αρκετά μεγάλα βάθη, στα έγκατα της γης. Οι γεωλόγοι χρησιμοποιούν πολλές μεθόδους για την εξεύρεση γεωθερμικών πόρων, όπως: η μελέτη των αεροφωτογραφιών, οι γεωλογικοί χάρτες, η ανάλυση της χημείας του τοπικού νερού και της συγκέντρωσης μετάλλων στο έδαφος, καθώς και η μέτρηση των μεταβολών της βαρύτητας και του μαγνητικού πεδίου της γης. Αλλά η καλύτερη μέθοδος είναι η διενέργεια γεωτρήσεων σε μεγάλο βάθος στη γη και η επί-τόπου μέτρηση της υπόγειας θερμοκρασίας.

Είναι κοινός τόπος ότι εκεί που εφάπτονται οι λιθοσφαιρικές πλάκες εκλύεται μεγάλο μέρος της ενέργειας της γης είτε με τη μορφή σεισμών ή με την δημιουργία ηφαιστείων. Στην εγγύτητα τέτοιων θέσεων βρίσκονται και οι πιο αξιόλογοι γεωθερμικοί πόροι. Η μεγαλύτερη γεωθερμική δραστηριότητα έχει παρατηρηθεί από τον δακτύλιο της φωτιάς, δηλ. την περιοχή που περιβάλλεται από την Ιαπωνία, τις Φιλιππίνες, τη Βόρεια Αμερική, την Κεντρική Αμερική και τη Νότια Αμερική (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4 Ο δακτύλιος της φωτιάς.(nl.wikipedia.org)

## 2. Περιβαλλοντικά Θέματα

### 2.1. Το Παγκόσμιο Ενεργειακό Πρόβλημα

Είναι γνωστό ότι όλες οι συμβατικές πηγές ενέργειας, η τεχνολογία εκμετάλλευσής τους αλλά και οι μηχανές καύσης έχουν σημαντική αρνητική επίδραση στο περιβάλλον. Στα ορυκτά καύσιμα κατατάσσονται ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η εν γένει χρήση αυτών προκαλεί την ρύπανση του περιβάλλοντος. Στις προκαλούμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανήκουν η ρύπανση του αέρα και των υδάτων, οι επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, η εξαφάνιση ειδών της άγριας πανίδας και χλωρίδας, η απώλεια οικοτόπων, η υπερκατανάλωση της χρήσης ύδατος, της χρήσης γης και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Lemmens, 2016). Ωστόσο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ρυπαίνουν κι αυτές. έχοντας επίσης περιβαλλοντικές επιπτώσεις, μερικές από τις οποίες είναι σημαντικές (Adams, 2006).

Για να προσδιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τόσο ως προς τον τύπο αλλά και ως προς την ένταση, πρέπει να ληφθούν υπ' όψη διάφοροι παράγοντες π.χ. η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ή η γεωγραφική θέση. Είναι λογικό ότι κατανοώντας κανείς τα πραγματικά όσο και τα πιθανά περιβαλλοντικά ζητήματα της κάθε μορφής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, μπορεί να προβεί και στην πρόληψη, την αποφυγή και την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων. Αυτό καθίσταται αναγκαίο καθώς γίνονται μεγαλύτερο τμήμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Quoilin and Lemort, 2009).

### **Αιολική ενέργεια**

Ο άνεμος είναι μία από τις καθαρότερες πηγές που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Δεν ρυπαίνει και η διαδικασία αξιοποίησής του δεν εκπέμπει αέρια του θερμοκηπίου. Ο άνεμος είναι επίσης άφθονος, ανεξάντλητος και προσιτός, γεγονός που τον καθιστά μια βιώσιμη και ευρείας κλίμακας εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα (Lemmens, 2016). Η αιολική ενέργεια φαίνεται να είναι ελκυστική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ωστόσο κατά την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών προκλήσεις για την άγρια φύση και τους βιότοπους (Banks, 2012).

### **Ηλιακή ενέργεια**

Ο ήλιος με την εκπομπή φωτός καθίσταται μια ατελείωτη πηγή καθαρής ανανεώσιμης ενέργειας. Με τους κατάλληλους συλλέκτες αυτή η ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Όπως και με την αιολική ενέργεια η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων δημιουργεί προκλήσεις για την άγρια φύση και τους βιότοπους. Επίσης θέμα ανακύπτει και από την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία κατασκευής των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. (Banks, 2012).

### **Γεωθερμική ενέργεια**

Το υδροθερμικό εργοστάσιο είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος γεωθερμικής μονάδας για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η θέση του είναι συνήθως στην εγγύτητα των γεωθερμικών πεδίων. Τόσο η οριζόντια απόσταση όσο και το βάθος από το γεωθερμικό πεδίο, επηρεάζουν την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η μεγαλύτερη απόσταση απαιτεί μεγαλύτερο μήκος σωλήνων για την μεταφορά του γεωθερμικού ρευστού.



Αντίστοιχα το βάθος προς το γεωθερμικό πεδίο απαιτεί ανόρυξη μεγαλύτερης γεώτρησης και μεγαλύτερο μήκος σωλήνων (Adams, 2006). Στην επιφάνεια και στις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για την απαγωγή της θερμότητας και τη μετατροπή αυτής σε άλλη μορφή ενέργειας, εντοπίζονται και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με αυτά τα συστήματα. Κυρίως στον τρόπο ψύξης του γεωθερμικού ρευστού που γίνεται είτε με νερό είτε με αέρα. (Lemmens, 2016)

### **Βιομάζα για ηλεκτρική ενέργεια**

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα βασίζεται στην καύση. Συνεπώς υπάρχουν παρόμοιες επιπτώσεις με την παραγωγή ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα (παράγωγα καύσης). Ωστόσο η παραγωγή της πρώτης ύλης μπορεί να είναι βιώσιμη ενώ τα ορυκτά καύσιμα είναι μη ανανεώσιμα (Quoilin and Lemort, 2009) Οι πηγές πόρων βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ποικίλες, από καλλιέργειες μέχρι γεωργικά απόβλητα, κοπριά, δασικά προϊόντα και αστικά απόβλητα. Ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται καλλιεργούνται και συγκεντρώνονται, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις χρήσεις της γης και τον υδροφόρο ορίζοντα. Καθώς δεν υπάρχει τέλεια καύση, η χρήση τους για την παραγωγή ενέργειας δημιουργεί ρύπους (Banks, 2012).

### **Υδροηλεκτρική ενέργεια**

Η υδροηλεκτρική ενέργεια περιλαμβάνει μεγάλα αλλά και μικρά υδροηλεκτρικά φράγματα σε ποτάμια. Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά φράγματα συνεχίζουν να αποτελούν αξιόπιστη λύση για την παραγωγή ενέργειας.. (Quoilin and Lemort, 2009). Τα φράγματα εκτρέπουν την ροή των ποταμών στο υδροηλεκτρικό

εργοστάσιο ή δημιουργούν τεχνητές λίμνες από όπου λόγω της υψομετρικής διαφοράς με κατάλληλο εξοπλισμό παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Παρόλα αυτά το μέγεθος της κατασκευής επιδρά, θετικά ή αρνητικά, στα φυσικά οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα

### **Υδροκινητική ενέργεια**

Η υδροκινητική ενέργεια, η οποία περιλαμβάνει την ενέργεια των κυμάτων και της παλίρροιας, περιλαμβάνει μια σειρά ενεργειακών τεχνολογιών, πολλές από τις οποίες βρίσκονται ακόμη στα πειραματικά στάδια ή στα αρχικά στάδια της ανάπτυξης (Adams, 2006).

### **2.2. Αντιμετώπιση Κλιματικών Αλλαγών**

Με τη μεγάλη αύξηση και την εκβιομηχάνιση του παγκόσμιου πληθυσμού και με την άνοδο του βιοτικού επιπέδου των αναπτυσσόμενων εθνών, η ανάγκη της ανθρωπότητας για την ενέργεια έχει φτάσει σε πρωτοφανή επίπεδα. Τα ορυκτά καύσιμα παράγουν πάνω από το ήμισυ της συνολικής χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Εκτιμάται ότι από τότε που ξεκίνησαν οι εμπορικές πετρελαϊκές γεωτρήσεις τη δεκαετία του 1850, έχουν καταναλωθεί πάνω από 135 δισεκατομμύρια τόνοι αργού πετρελαίου, για να οδηγήσουμε τα αυτοκίνητά μας, να τροφοδοτήσουμε τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας και να θερμάνουμε τα σπίτια μας. Αυτός ο αριθμός αυξάνεται καθημερινά (Quoilin and Lemort, 2009).

Το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται ως καύσιμο, ρυπαίνει και αυτό τον πλανήτη. Η χρήση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο)

συντελούν στην αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο το κλίμα στη γη. Οι επιστήμονες σε όλο τον κόσμο συμφωνούν ότι βρισκόμαστε σε μια αρνητική πορεία, η οποία μπορεί να σταματήσει μόνο με την ταχεία μείωση την χρήσης των ορυκτών καυσίμων (Lemmens, 2016). Αυτό βέβαια, θα έχει και το ακόλουθο αντίκτυπο που απασχολεί την διεθνή κοινότητα και σχετίζεται με το μεγαλύτερο ίσως ζήτημα που έθιξαν οι επιστήμονες, οι εμπειρογνώμονες πολιτικής και οι εταιρείες, το οποίο αφορά στο πώς θα αντιμετωπισθεί η άμεση αύξηση των ενεργειακών αναγκών που αναμένεται στις επόμενες δεκαετίες (Banks, 2012).

Στη σημερινή εποχή υπάρχουν περίπου τρία δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο που μαγειρεύουν και θερμαίνουν τα σπίτια τους χρησιμοποιώντας απλές εστίες ή ανοιχτές φωτιές που καίνε ξύλα, κοπριά ζώων ή άνθρακα. Καθώς τα αναπτυσσόμενα έθνη γίνονται πιο βιομηχανοποιημένα, θα χρειαστεί πρόσβαση σε αξιόπιστο εφοδιασμό ηλεκτρικής ενέργειας. Σε χώρες όπου η ανάπτυξη είναι ήδη σε εξέλιξη, η χρήση ενέργειας θα αυξηθεί, καθώς ο αυξανόμενος πλούτος οδηγεί σε άνοδο του βιοτικού επιπέδου η οποία συνοδεύεται από ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις του τρόπου ζωής και κατ'επέκταση ραγδαία αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση (Adams, 2006).

### 2.3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Είναι κοινός τόπος ότι το βασικό συστατικό των αερίων του θερμοκηπίου (GHG - greenhouse gas) είναι το διοξείδιο του άνθρακα, υπάρχει παγκόσμια ανησυχία για την επίτευξη μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Από την άποψη αυτή, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν διαφορετικές πολιτικές για τη

μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, όπως η ενίσχυση της ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η ενθάρρυνση των τεχνολογικών καινοτομιών. Ήδη ανά τον κόσμο εγκαθίστανται και χρησιμοποιούνται τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή ενέργειας. Η σημασία των εναλλακτικών πηγών ενέργειας συνοδεύεται από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής που συνδέονται με την υπερβολική χρήση ορυκτών καυσίμων. Τα κίνητρα που προκρίνουν την ανάπτυξη τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- ενεργειακή ασφάλεια,
- οικονομικές επιπτώσεις,
- μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Ο όρος "ανανεώσιμη ενέργεια" αναφέρεται σε οποιαδήποτε μορφή ενέργειας διαφορετική από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της υδροηλεκτρικής ενέργειας (Healey, 2005).

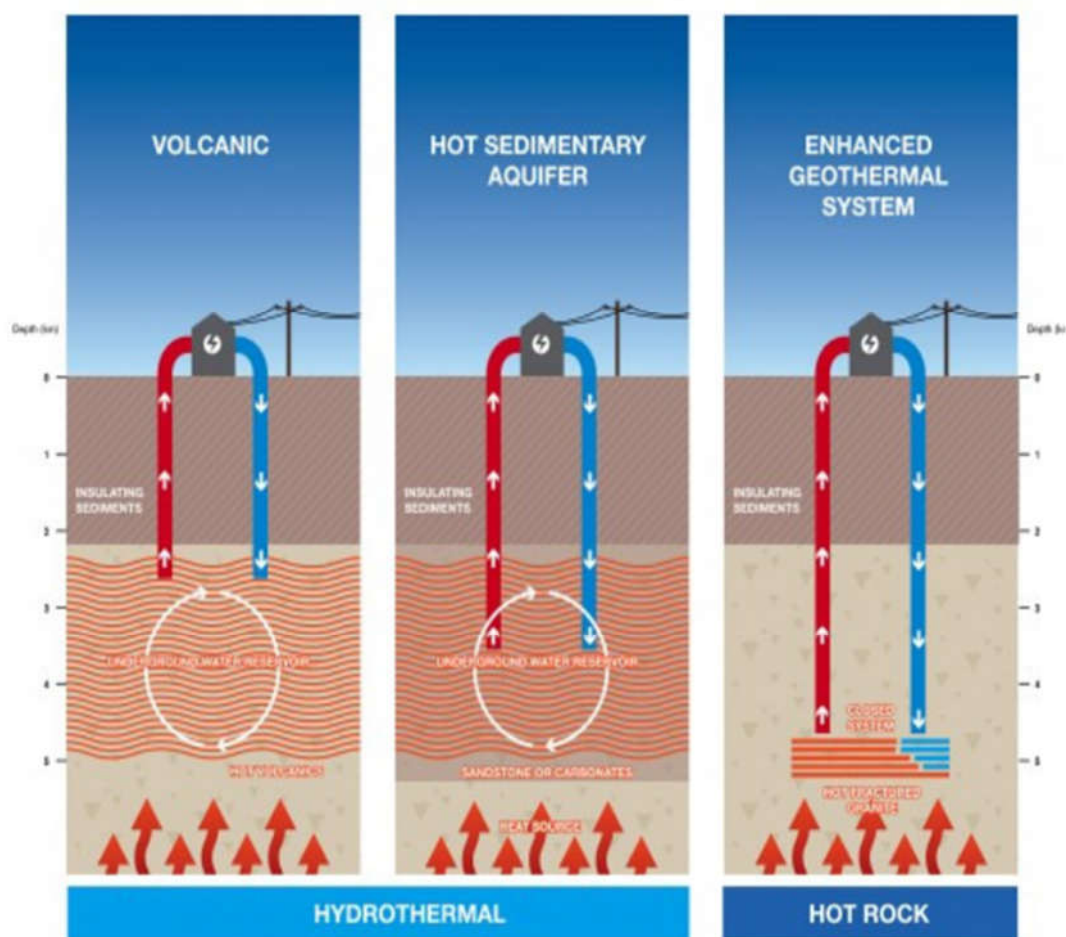
Αξίζει να σημειωθεί εδώ, πώς ο ανανεώσιμος ενεργειακός εφοδιασμός συνεχώς αυξάνεται. Τα τελευταία χρόνια έχουν επενδυθεί μεγάλα ποσά σε αυτή την κατεύθυνση και η πρόοδος της τεχνολογίας επέτρεψε στις χώρες να παράγουν πιο αποδοτική ανανεώσιμη ενέργεια. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά τον κόσμο της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου 20000 TWh (terawatt-ώρες) ενώ η αιολική είναι 250 GW. Προβλέπεται ότι ο αριθμός των χωρών που παράγουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με ισχύ άνω των 100 MW, θα αυξηθεί σημαντικά τις επόμενες δεκαετίες. Δεδομένου των μεγάλων αρνητικών και μη αναστρέψιμων εξωτερικών συνεπειών που προκύπτουν από τη συμβατική παραγωγή ενέργειας, είναι απαραίτητο να προωθηθούν και να

αναπτυχθούν τεχνολογίες εφοδιασμού με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες μπορεί να μην είναι συγκρίσιμες με τα συμβατικά καύσιμα όσον αφορά το κόστος παραγωγής, αλλά θα μπορούσαν να είναι συγκρίσιμες αν λάβουμε υπόψη τις εξωτερικές τους συνέπειες, όπως τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά τους αποτελέσματα. Το κόστος μεταφοράς και διανομής, καθώς και οι τεχνολογίες, δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ των συμβατικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Haugen and Musser, 2012).

### 3. Γεωθερμία

#### 3.1. Γενικά

Οι τέσσερις τύποι γεωθερμικών πόρων (Σχ. 3.1) είναι οι ακόλουθοι: α) υδροθερμικοί πόροι, β) γεωθερμικοί πόροι (αναφέρονται σε θερμό αλατόνερο κορεσμένο με μεθάνιο που έχει θερμοκρασία από 90 °C – 200 °C και βρίσκεται σε βάθος 3 Km - 6 Km κάτω από την επιφάνεια της γης), γ) θερμοί ξηροί βράχοι (βράχοι με θερμοκρασία 200 °C -300 °C μπορούν να βρεθούν σε βάθος 5 Km κάτω από την επιφάνεια), και δ) το μάγμα (βρίσκεται σε βάθη 3Km -10Km., και έχει θερμοκρασία από 700 °C έως 1200 °C).



Σχ. 3.1. Γεωθερμικοί πόροι: α) υδροθερμικοί (ηφαιστειακοί και θερμού ιζηματογενούς υδροφόρου ορίζοντα), β) θερμού πετρώματος. (agea.org.au)

Μόνο οι υδροθερμικοί πόροι χρησιμοποιούνται ευρύτατα, ενώ οι υπόλοιποι τρεις τύποι βρίσκονται στο ερευνητικό στάδιο. Για τους υδροθερμικούς πόρους, το νερό και η θερμότητα είναι τα κύρια συστατικά. Όταν το μάγμα έρχεται κοντά στα υπόγεια ύδατα, τότε η θερμότητα παγιδεύεται στο νερό, το θερμαίνει και παράγει ζεστό ατμό. Οι υδροθερμικοί αυτοί πόροι και το ύψος της θερμοκρασίας τους, τους καθιστούν χρήσιμους σε διάφορους ενεργειακούς σκοπούς. Για παράδειγμα, πόροι χαμηλής θερμοκρασίας (δηλ. 10 °C) χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση (π.χ. θέρμανση κτιρίων, spa, καλλιέργειες, θερμές λίμνες κλπ.). Οι υδροθερμικοί πόροι υψηλής θερμοκρασίας (δηλαδή 105 °C έως 537 °C) χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ξηροί ατμοί και το ζεστό νερό είναι δύο βασικοί τύποι υδροθερμικών πόρων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού (Quoilin and Lemort, 2009).

Η εγκλωβισμένη ενέργεια από το εσωτερικό της Γης παράγει επιφανειακά φαινόμενα όπως ρεύματα λάβας, φουμαρόλες, θερμές πηγές κ.α.. Η θερμότητα παράγεται κυρίως από τη ραδιενεργή διάσπαση του καλίου, του θορίου και του ουρανίου στο φλοιό και το μανδύα της Γης, καθώς επίσης και από την τριβή που δημιουργείται κατά μήκος των ορίων των ηπειρωτικών λιθοσφαιρικών πλακών. Η επακόλουθη ετήσια χαμηλή ροή θερμότητας στην επιφάνεια υπολογίζεται κατά μέσο όρο μεταξύ 50 mW και 70 mW (milwatt) ανά τετραγωνικό μέτρο παγκοσμίως. Η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη, έχει μετρηθεί, και μπορεί να παρέχει 342 Watt ανά τετραγωνικό μέτρο ετησίως. Αντίστοιχα η γεωθερμική ενέργεια είναι διαθέσιμη σε όλο το υπέδαφος της γης και μπορεί να έρθει στην επιφάνεια προς αξιοποίηση με τα κατάλληλα τεχνικά

έργα. Η εκτιμώμενη γεωθερμική ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί στην επιφάνεια είναι περίπου  $1,4 \times 10^6$  terawatt-έτη, που ισοδυναμεί με περίπου την τριπλάσια ετήσια κατανάλωση όλων των τύπων ενέργειας στον κόσμο.

Η ποσότητα χρησιμοποιήσιμης ενέργειας από γεωθερμικές πηγές ποικίλλει ανάλογα με το βάθος και τη μέθοδο εξαγωγής. Η αύξηση της θερμοκρασίας των πετρωμάτων και άλλων γεωυλικών κάτω από το έδαφος είναι κατά μέσο όρο  $20\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ανά χιλιόμετρο βάθους στο άνω μέρος της λιθόσφαιρας. Συνήθως ο ρυθμός αύξησης είναι πολύ μεγαλύτερος στις περισσότερες περιοχές της Γης. Κανονικά, η εξαγωγή θερμότητας απαιτεί ένα ρευστό (ή ατμό) που μέσω ενός τεχνικού έργου θα μεταφέρει την ενέργεια στο επιθυμητό σημείο. Ο εντοπισμός και η ανάπτυξη των γεωθερμικών πόρων μπορεί να αποτελέσει πρόκληση. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τους πόρους υψηλής θερμοκρασίας που απαιτούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στα γεωθερμικά πεδία όπου έχουν εγκατασταθεί εργοστάσια αξιοποίησης και παραγωγής ενέργειας θα πρέπει ο ρυθμός εξαγωγής της γεωθερμικής ενέργειας να μην υπερβαίνει αυτόν της φυσικής αναπλήρωσης. Έτσι εξασφαλίζεται η βιώσιμη διαχείριση του πόρου.

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν κάτω από τους χλοοτάπητες (under soil heating), σε ανοιχτούς χώρους, στις εθνικές οδούς ή ακόμη και σε ένα υπάρχον σπίτι μπορεί να προστεθεί ένα γεωθερμικό σύστημα χρησιμοποιώντας αγωγό. Υπάρχουν τρία στοιχεία που είναι απαραίτητα για τα γεωθερμικά συστήματα (Lemmens, 2016):

- μια υπόγεια πηγή θερμότητας,



- υγρό για τη μεταφορά της θερμότητας,
- ασυνέχειες και ρήγματα σε υπόγεια πετρώματα που επιτρέπουν στο θερμαινόμενο υγρό να ρέει από την πηγή θερμότητας στην επιφάνεια.

Ο πρώτος βασικός παράγοντας είναι να προσδιοριστεί η κλίση της θερμοκρασίας μιας θέσης, η οποία δημιουργείται από τη ροή θερμότητας της γης. Ένας άλλος παράγοντας είναι η ανίχνευση της θερμικής αγωγιμότητας των πετρωμάτων και η θερμοχωρητικότητά τους. Είναι φυσικό η υψηλή ροή θερμότητας να δημιουργεί υψηλή θερμοκρασία και τα ιζηματογενή πετρώματα πάνω από την πηγή θερμότητας λειτουργούν ως μόνωση που παγιδεύει αυτή τη θερμότητα. Για παράδειγμα, διαπιστώθηκε ότι οι λεπτόκοκκοι ιζηματογενείς βράχοι λειτουργούν καλύτερα ως μονωτικά υλικά από ότι οι ψαμμίτες. Έτσι, η υψηλότερη θερμική κλίση εντοπίζεται σε μέρη όπου υπάρχει υψηλή ροή θερμότητας αλλά και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (Quoilin and Lemort, 2009).

Για το υδροθερμικό σύστημα πρέπει πρώτα να εντοπιστούν οι υδροθερμικές δεξαμενές, οι οποίες βρίσκονται σε διαρρηγμένα ηφαιστειακά πετρώματα όπου οι θερμοκρασίες είναι σχετικά υψηλές κοντά στην επιφάνεια ή σε μη ηφαιστειακές περιοχές όπου η ροή θερμότητας της επιφάνειας μπορεί να παράγει πολύ υψηλές θερμοκρασίες και τα πετρώματα είναι διαπερατά για να επιτρέπουν την παραγωγή μεγάλων όγκων γεωθερμικών ρευστών. Τα υδροθερμικά συστήματα μπορούν να επικεντρωθούν σε συστήματα θερμών ιζηματογενών υδροφορέων (HSA) ή σε ηφαιστειακά συστήματα (Lemmens, 2016).

### 3.2 Γεωθερμικά Πεδία

Πρόκειται για πεδία που χαρακτηρίζονται από υψηλή και ανώμαλη ροή θερμότητας. Επιλέγονται για την αξιοποίηση καθώς εκλύουν μεγαλύτερη αναλογικά ενέργεια. Το μέσο μεταφοράς της θερμότητας που είναι συνήθως το νερό, έρχεται σε επαφή με το έδαφος και θερμαίνεται. Δεδομένων συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης δύναται να μετατραπεί και σε ατμό. Για να κατανοήσουμε τα φαινόμενα σε αυτές τις ανώμαλα ζεστές ζώνες, πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι η θερμοκρασία στην οποία το νερό μετατρέπεται σε ατμό εξαρτάται από την πίεση: όταν η πίεση μετρά 1 atm, η θερμοκρασία εξάτμισης είναι, όπως γνωρίζουμε, στους 100 °C, αλλά στα 10 atm (ίση με την πίεση μιας στήλης νερού 100 m, περίπου 30 m βράχου), φτάνει τους 180 °C. Με τον τρόπο αυτό, συνεπώς, οι υψηλές πιέσεις διατηρούν το νερό σε υγρή κατάσταση ακόμη και σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές 100 °C που συνδέουμε με ένα νερό που βράζει σε ένα σκεύος (Lemmens, 2016).

Οι περιοχές όπου μια υψηλή ροή θερμότητας θερμαίνει τα υπόγεια ύδατα ονομάζονται γεωθερμικά πεδία. Ανάλογα με τη θερμοκρασία του υγρού χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Τα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας, στα οποία η θερμοκρασία του ρευστού κυμαίνεται από 150°C έως 400°C, τα πεδία μέσης ενθαλπίας, στα οποία η θερμοκρασία του ρευστού κυμαίνεται από 100°C έως 150°C και τα πεδία χαμηλής ενθαλπίας, στα οποία η θερμοκρασία του ρευστού κυμαίνεται από 25°C έως 100°C. Στις περιοχές αυτές, είναι δυνατόν, με τις σωστές τεχνολογίες, να αξιοποιηθεί η φυσική ενέργεια της Γης για την παραγωγή ηλεκτρισμού, οικιακής θέρμανσης και για πολλές άλλες βιομηχανικές χρήσεις: μια δωρεάν διαθέσιμη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Δυστυχώς, τα γεωθερμικά πεδία που είναι σε θέση να παράγουν μια καλή ποσότητα ενέργειας δεν είναι πολλά στον κόσμο (Quoilin and Lemort, 2009).

Οι δομές ενός γεωθερμικού συστήματος μοιάζουν με τις παγίδες υδρογονανθράκων και οι τεχνικές για την εξατομίκευση τους, οι οποίες χρησιμοποιούν τη γεωφυσική διασκόπηση, είναι επίσης πολύ παρόμοιες με εκείνες που χρησιμοποιούνται στην έρευνα πετρελαίου. Ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από (Quoilin and Lemort, 2009):

1. μια πηγή θερμότητας (για παράδειγμα, το μάγμα που υποβάλλεται σε διαδικασία ψύξης).
2. έναν υδροφορέα (aquifer), ο οποίος είναι ένας διαπερατός γεωλογικός σχηματισμός, όπου το νερό μπορεί να διεισδύσει και να κυκλοφορεί ελεύθερα μέσω πόρων ή ρηγματώσεων.
3. ένα στεγανό βράχο κάλυψης που λειτουργεί ως «παγίδα» για τα ζεστά νερά, εμποδίζοντας τη διασπορά τους στην επιφάνεια και κρατώντας τους υπό πίεση.

### 3.3 Συστήματα Αβαθούς Γεωθερμίας

Παρόλο που η αιολική και η ηλιακή ενέργεια παρέχουν εξαιρετικές βιώσιμες επιλογές παραγωγής ενέργειας, τα συστήματα γεωθερμικής ενέργειας είναι εξίσου αποτελεσματικά και οικονομικά. Οι συλλέκτες ηλιακής και αιολικής ενέργειας είναι ειδικά μέσα για τον κλάδο των ενεργειακών συστημάτων. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν αποδίδουν πολύ ενέργεια στις βόρειες γεωγραφικά περιοχές λόγω του χαμηλού ποσοστού ηλιοφάνειας. Η έκταση που απαιτείται για την εγκατάσταση αιολικού πάρκου και την συλλογή αιολικής

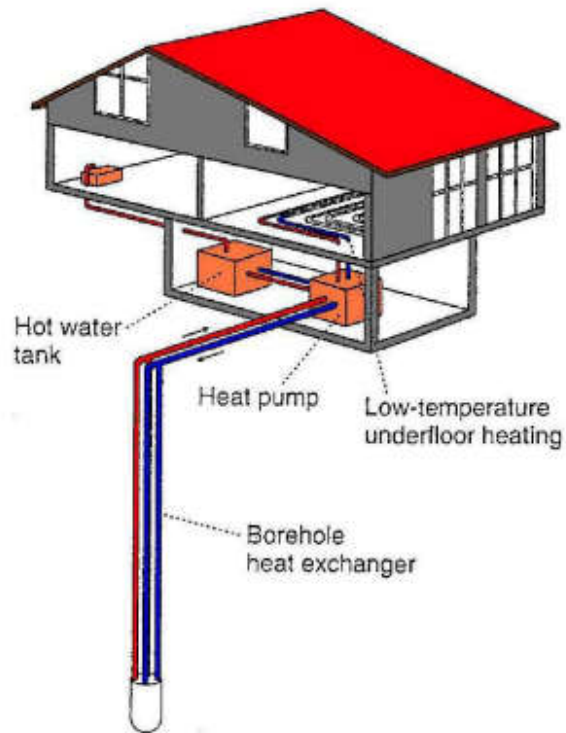
ενέργειας δεν μπορεί να εξασφαλιστεί σε μεγάλες πόλεις. Από την άλλη μεριά, τα γεωθερμικά συστήματα δεν καταλαμβάνουν οικοδομήσιμο χώρο στο επίπεδο του εδάφους, ούτε έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις για την τοποθεσία ή το κλίμα. Η θερμοκρασία της γης είναι αμετάβλητη καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και μπορεί να αξιοποιηθεί από γεωθερμικά συστήματα, όπου, και αν τοποθετηθούν αυτά. (Quoilin and Lemort, 2009).

Η αβαθής γεωθερμία αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή γεωθερμικής ενέργειας. Είναι αυτή μέσω της οποίας λαμβάνονται ή και απορρίπτονται ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη. Αυτό μπορεί να συμβεί με την ανακυκλοφορία νερού στα πρώτα 200m από την επιφάνεια της γης ή με την κυκλοφορία υπόγειων νερών ή και νερών από τις λίμνες, τα ποτάμια και τη θάλασσα.

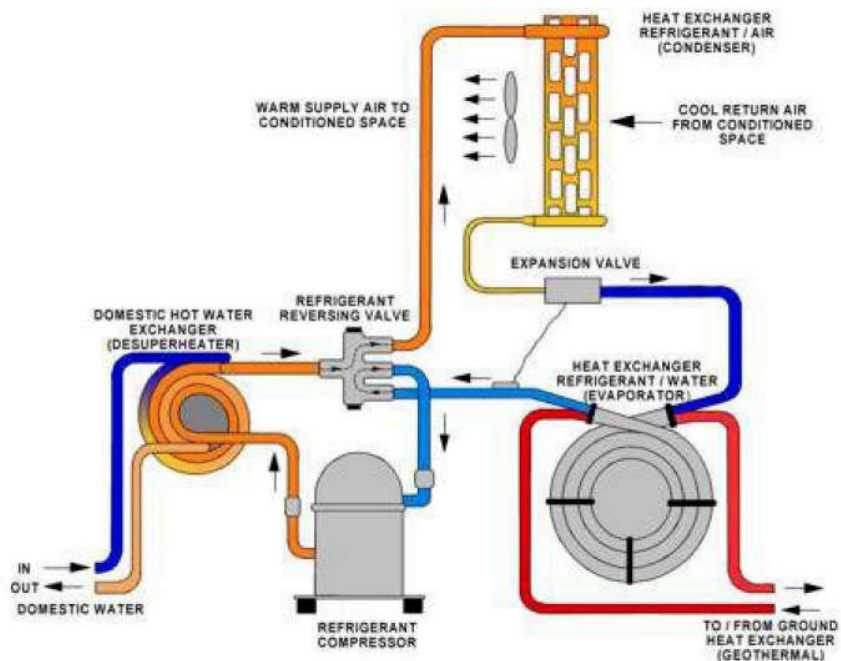
Η θερμοκρασία που έχουν τα πετρώματα και τα υπόγεια νερά, εξαιτίας της ομαλής θερμικής ενέργειας βαθών 0-200m, είναι κατά κύριο λόγο κάτω από 25°C. Η ενέργεια αυτή δημιουργείται όταν η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την επιφάνεια της γης (σχεδόν το 50% από τη συνολική ποσότητα που φθάνει στη Γη). Αυτή διατηρείται, στην εύκρατη ζώνη, περίπου σταθερή (10°C -18°C) καθ' όλο το έτος. Μπορεί να γίνει χρήση αυτής της σταθερής και μόνιμης ενέργειας, κατά τις ψυχρότερες περιόδους του έτους, ώστε να θερμανθεί το νερό στην κεντρική θέρμανση έως 50°C, και τα καλοκαίρια για να ψυχθεί το νερό κλιματισμού έως 10X, όπως επίσης και για χρήση ζεστού νερού όλο το χρόνο (Καρυδάκης, 2005).

Τα συστήματα γεωθερμικής θέρμανσης και ψύξης παρέχουν κλιματισμό χώρου και σε ορισμένες περιπτώσεις θέρμανση νερού. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν με τη μετάδοση της θερμότητας, παρά με τη μετατροπή της χημικής ενέργειας στη θερμότητα όπως σε έναν κλίβανο (Lemmens, 2016). Η έννοια του γεωθερμικού κλιματισμού (θέρμανση και ψύξη) χώρων άρχισε να αναπτύσσεται σημαντικά από τη δεκαετία του 1980, ακολουθώντας την εμφάνιση και την ευρεία διάδοση των αντλιών θερμότητας (heat pumps) (Σχήμα 3.2). Οι πολλοί διαθέσιμοι τύποι αντλιών θερμότητας επιτρέπουν την απόληψη και χρήση με οικονομικό τρόπο του θερμικού περιεχομένου των σωμάτων χαμηλής θερμοκρασίας, όπως είναι το έδαφος ή οι ρηχοί υδροφόροι χώροι, τεχνητές ή φυσικές συγκεντρώσεις νερού (ponds), κλπ.

Συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (Σχήμα 3.3) κλειστού κυκλώματος που είναι συνδεδεμένες με το υπέδαφος (ground-coupled) και αντλιών επιφανειακού ή υπεδάφου νερού (ground-water) βρίσκονται σήμερα εγκατεστημένα σε 27 χώρες, με συνολική θερμική ισχύ που ανήλθε σε 6.875 MWt κατά το έτος 2000.

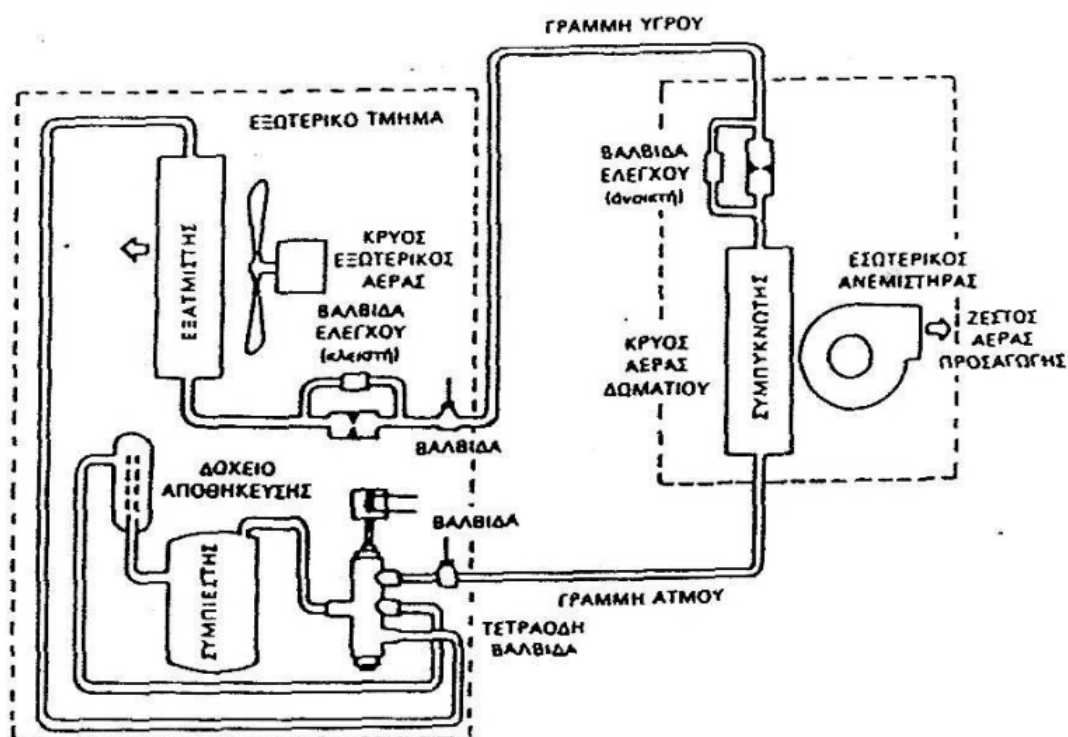


Σχήμα 3.2: Διάταξη κλειστού τύπου με αντλία θερμότητας (researchgate.net).



Σχήμα 3.3 Διάταξη ψύξης θέρμανσης με γεωεναλλάκτη.

Το γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από το γεωθερμικό βρόχο. Συνήθως ένας επιμήκης σπειροειδούς μορφής πλαστικός σωλήνας τοποθετημένος στο φρεάτιο.. Μια αντλία θερμότητας (Σχήμα 3.4) που ουσιαστικά θερμαίνει περεταίρω το ρευστό στην επιθυμητή θερμοκρασία και τέλος ένα σύστημα διανομής της ενέργειας στον χώρο που πρόκειται να θερμανθεί. Κατά τη θέρμανση του κτιρίου, το σύστημα λειτουργεί με κυκλοφορία ενός ρευστού μέσω του βρόχου και αντλώντας θερμότητα από το έδαφος.



Σχήμα 3.4: Κύκλος αντλίας θερμότητας για θέρμανση.

Στη συνέχεια, το υγρό ωθείται μέσω κυκλοφορητή στην αντλία θερμότητας που θερμαίνεται κατά  $\Delta T$  (διαφορά θερμοκρασίας). Στη συνέχεια ο εναλλάκτης θερμότητας αποδίδει την θέρμανση στο χώρο. Κατά την ψύξη ενός κτιρίου, η διαδικασία αντιστρέφεται για να τραβήξει θερμότητα από το κτίριο. Σε συστήματα ανοιχτού βρόχου, αυτή η θερμότητα εκκενώνεται στον εξωτερικό

αέρα, ενώ σε συστήματα κλειστού βρόχου, η θερμότητα μεταφέρεται στο έδαφος. Αυτό καθίσταται δυνατό λόγω της σχετικά σταθερής θερμοκρασίας λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια της γης, η οποία κυμαίνεται στους 17°C (Quoilin and Lemort, 2009).

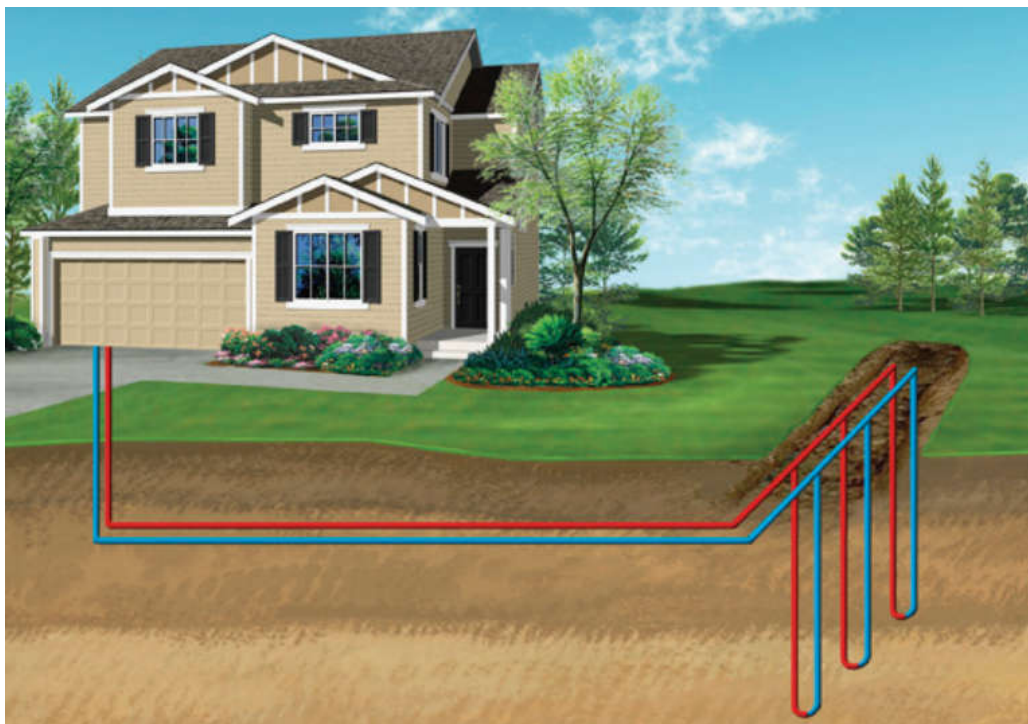
Το χειμώνα η γη χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας και το καλοκαίρι λειτουργεί ως νεροχύτης θερμότητας. Η ενέργεια των γεωθερμικών συστημάτων μπορεί να προέρχεται από πολλές πηγές: από μαγματικές ή υδροθερμικές περιοχές, ή από υψηλές - ζώνες ροής θερμότητας που χρησιμοποιούν συν-παραγόμενα υγρά από ενεργά ή εγκατάλειψη κοιλοτήτων πετρελαίου ή αερίου και από θερμούς ξηρούς βράχους που βρίσκονται σε βαθιές γεωλογικές ζώνες με υψηλή ροή θερμότητας (Lemmens, 2016).

Η τεχνολογική πρόοδος στον έλεγχο της ανάπτυξης ρωγμών στην περιβάλλουσα βραχώμαζα έχουν καταστήσει τα ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα πρακτικά. Η χρήση συστημάτων εναλλαγής θερμότητας δυαδικού κύκλου έχουν καταστήσει οικονομικά συμφέρουσες τις γεωθερμικές πηγές με θερμοκρασία 100 °C (Quoilin and Lemort, 2009). Οι εγκαταστάτες βρόχου χρησιμοποιούν εξοπλισμό εκσκαφής, όπως trenchers ή μηχανικούς εκσκαφείς για τις τάφρους με βάθος περίπου 1,50 m-2,50 m. Τα μήκη κυμαίνονται από 30 m έως 100 m, ανάλογα με το σχεδιασμό και την εφαρμογή του βρόχου (Σχήμα 3.5).





Σχήμα 3.5: Γεωθερμικό σύστημα οριζόντιου βρόχου (hydro.mb.ca).



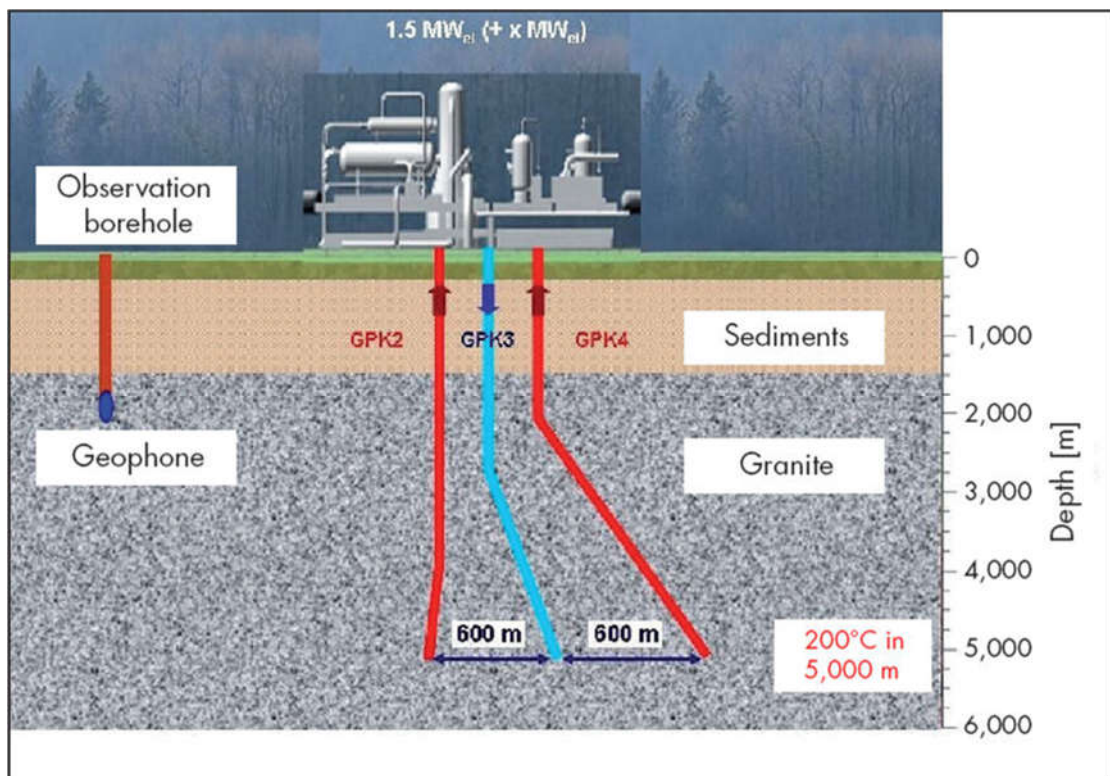
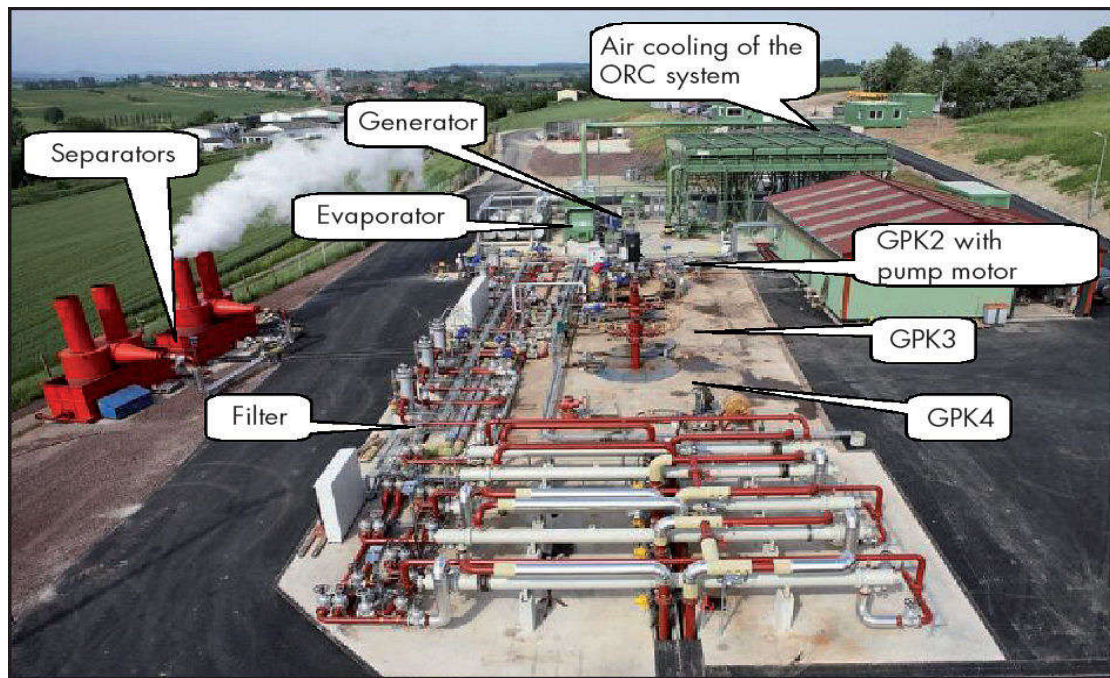
Σχήμα 3.6: Γεωθερμικό σύστημα κάθετου βρόχου (hydro.mb.ca).

Στο γεωθερμικό σύστημα κάθετου βρόχου, ένα εξάρτημα γεώτρησης χρησιμοποιείται για την δημιουργία οπών σε βάθος από 40,00 m έως 60,00 m. Ο βρόχος είναι σχήματος U ή σπειροειδής από σωλήνα υψηλής πυκνότητας και εισάγεται στην οπή διάτρησης. Οι οπές στη συνέχεια γεμίζονται με ένα διάλυμα σφράγισης. Καθώς το ρευστό κινείται εντός του σχηματισμού αποκτά και την σταθερή θερμοκρασία του εδάφους.(Σχήμα 3.6).

### 3.4 Συστήματα Βαθείας Γεωθερμίας

Οι ερευνητικές μελέτες που βασίζονται σε γεωθερμικούς σταθμούς με βαθιά γεωθερμία είναι πολύ περιορισμένες σε σύγκριση με αυτές για τους ρηχούς γεωθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παρόμοιο σύστημα βαθιάς γεωθερμικής ενέργειας εγκατεστημένο στη Γαλλία (Φυτίκας, 2014).

Το γεωθερμικό έργο στη περιοχή Soultz-sous Forets, δημιούργησε τον βαθύτερο γεωθερμικό μετατροπέα θερμότητας παγκοσμίως (Σχήμα 3.7). Για να γίνει αυτό έγινε χρήση των μεγάλων υφιστάμενων οικογενειών ασυνεχειών εντός της βραχώμαζας και υδάτων σε μεγάλο βάθος που αποθηκεύονται σε αυτά για τη διαδικασία μετατροπής θερμότητας. Σε αντίθεση με άλλους γεωθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, ο σταθμός αυτός χρησιμοποιεί φυσικές πηγές ζεστού νερού ή ατμού και υφιστάμενες ρωγμές μέχρι τη μέγιστη θερμοκρασία 1750°C σε θερμό γρανίτη, οι οποίοι επεκτάθηκαν σε βάθος 5000 m (Riva, Forapedretti, Carolis, Γιακουμέλος, Μαλαματένιος, Signanini, Crema, Fazio, Gajdos, Rucinsky, 2005).



Σχήμα 3.7 Γεωθερμικές εγκαταστάσεις στο Soultz-sous Forets  
(researchgate.net).

Αυτός ο γεωθερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής βασίζεται σε τρία φρεάτια. Δύο φρεάτια αντλούν το ζεστό νερό χρησιμοποιώντας αντλίες προς τα κάτω.

Τα βαθιά νερά είναι διαβρωτικά και περιέχουν περίπου 100gm/L διαλυμένων αλάτων και αερίων, ιδιαίτερα του N<sub>2</sub> και του CO<sub>2</sub>. Το τρίτο φρεάτιο χρησιμοποιείται για την επαναφορά του ζεστού νερού πίσω στο σύστημα. Το ζεστό νερό ρέει μέσα από το σύστημα των ρωγμών στη βραχώμαζα, θερμαίνεται και επιστρέφει στην περιοχή των φρεατίων εκχύλισης, όπου εισέρχεται. Αυτός ο κλειστός βρόχος αποτρέπει τις αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Πάνω από την επιφάνεια, η θερμότητα μεταφέρεται σε οργανικό μέσο σε έναν 2ο κλειστό βρόχο μέσω σωληνωτών μετατροπών θερμότητας. Το μέσο αυτό επεκτείνεται μέσω τουρμπίνας με συνδεδεμένη γεννήτρια και στη συνέχεια ψύχεται και υγροποιείται σε σύστημα ψύξης αέρα με ανεμιστήρες. Αυτή η ειδική μονάδα παραγωγής ενέργειας ονομάζεται Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC). Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η τεχνολογία ORC επιτρέπει θερμότητα σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, περίπου 90 °C (Φυτίκας, 2014).

Σε θερμοκρασίες  $\leq 100$  °C, το γεωθερμικό ρευστό δεν είναι ικανό να εξατμίζει το νερό. Για αυτό τον λόγο, αντί ενός συμβατικού ατμοστρόβιλου χρησιμοποιείται ένα σύστημα ORC, το οποίο εκτός από έναν ατμοστρόβιλο που αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος, χρησιμοποιείται οργανικό υλικό (π.χ. ισοπεντάνιο), αντί του νερού. Στη συνέχεια ένας μετατροπέας θερμότητας μεταφέρει τη θερμότητα μέσω του γεωθερμικού κύκλου στο οργανικό υγρό το οποίο εξατμίζεται υπό υψηλή πίεση σε θερμοκρασία  $< 100$  °C. Το νερό μπορεί να κυκλοφορεί και να θερμαίνεται από γεωεναλλάκτη μέσω πολλαπλών οπών διάτρησης. Η θερμική ενέργεια που συνδέεται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επιφάνεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για

την παροχή θερμότητας. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως τεχνολογία θερμού ξηρού βράχου (HDR). Το κύριο πλεονέκτημα αυτού είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλες περιοχές, ανεξάρτητα από πηγές νερού και ατμού (Riva, Forrapedretti, Carolis, Γιακουμέλος, Μαλαματένιος, Signanini, Crema, Fazio, Gajdos, Rucinsky, 2005).

Ο Diersch (2010) πρότεινε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για συστήματα γεωεναλλακτών (Borehole Heat Exchangers). Θεώρησε ένα ρηχό σύστημα όπου το βάθος ήταν 100 μέτρα. Συγκρίθηκαν διαφορετικά αριθμητικά και αναλυτικά αποτελέσματα για μια κατάσταση σταθερών όρων και μια δεδομένη θερμοκρασία. Η εξίσωση μεταφοράς που χρησιμοποιείται είναι γραμμένη ως (Φυτίκας, 2014):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial z} - D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \phi(T - T_s) = 0, \quad (1)$$

όπου  $T$  = Θερμοκρασία ρευστού στην σωλήνωση,  $u$  = ταχύτητα ρευστού ψυκτικού,  $\phi$  = Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας,  $z$  = Κατακόρυφη συντεταγμένη,  $T_s$  = Κατακόρυφη θερμοκρασία εδάφους,  $D$  = Βάθος,  $t$  = χρόνος.

Τα προφίλ της αναλυτικής και αριθμητικής επίλυσης της αύξησης της θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος συγκρίθηκαν και απεικονίστηκαν γραφικά. Παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα των δύο επιλύσεων συνέκλιναν τόσο μεταξύ τους, αλλά και με την επίλυση Heidemann που αφορούσε ένα σύστημα ομοαξονικού σωλήνα δακτυλιοειδούς εισόδου για στρωτή ροή.

Ο Ozgener και ο Hepbasli (2005) εργάστηκαν για τη μοντελοποίηση και την αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων αντλίας θερμότητας εδάφους

(γεωθερμική), η οποία ασχολείται με την ενεργειακή μοντελοποίηση των συστημάτων αντλίας θερμότητας εδάφους (GSHP ground source heat pump) για την ανάλυση του συστήματος και την αξιολόγηση της απόδοσής τους. Η ανάλυση καλύπτει δύο GSHP: συγκεκριμένα, μια ηλιακή υποβοηθούμενη κάθετη GSHP και μια οριζόντια GSHP. Ορισμένες θερμοδυναμικές παράμετροι, όπως ο λόγος εξάντλησης καυσίμου, η σχετική μη αναστρεψιμότητα και η παραγωγικότητα, διερευνήθηκαν για κάθε σύστημα (Φυτίκας, 2014).

Ο Bauer (2010) αναφέρθηκε στην ανάπτυξη και εφαρμογή μιας προσωρινής τρισδιάστατης (3D) ανάλυσης ενός μοντέλου μετατροπεία θερμότητας γεώτρησης. Το μοντέλο του περιελάμβανε τις θερμικές ικανότητες των εξαρτημάτων της γεωτρήσεως προκειμένου να εξεταστούν οι μεταβατικές επιδράσεις της μεταφοράς θερμότητας και μαζών στο εσωτερικό της γεωτρήσεως. Χρησιμοποίησε απλοποιημένα μοντέλα θερμικής αντίστασης και δυναμικότητας (TRCM) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πολύπλοκους υπολογισμούς όπως μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (FE finite element). Συγκρίθηκαν επίσης τα αποτελέσματα με αναλυτικές επιλύσεις και έδειξαν το πλεονέκτημα του τρισδιάστατου μεταβατικού μοντέλου (Τζάνη, 2010).

Ο Teza (2012) ανέλυσε την απόδοση ενός μακροχρόνιου, ακανόνιστου σχήματος συστήματος ανταλλαγής θερμότητας γεώτρησης με πραγματικό πρότυπο και συστηματική προσέγγιση του πλέγματος. Συζήτησε τις επιδόσεις του BHE και τα πρότυπα (π.χ. ορθογώνια, με σχήμα L, με σχήμα T κ.λπ.) που χρησιμοποιούνται συχνά στα πεδία BHE (Borehole Heat Exchanger). Προκειμένου να αξιολογηθεί η εγκυρότητα του συστήματος, διεξήχθησαν

προσομοιώσεις χρονικού διαστήματος 25 ετών με μοντελοποίηση 2D πεπερασμένων στοιχείων. Έδειξαν επίσης ότι ένα BHE κανονικού σχήματος μπορεί να είναι λογικό κάτω από συνθήκες ροής υπόγειου νερού ή ελάχιστης ροής υπόγειου νερού, αλλά σε περίπτωση εμφάνισης ανισορροπίας θέρμανσης ή ψύξης, το θερμικό αποτύπωμα ενός BHE μπορεί να είναι πολύ εκτεταμένο. Αυτό θα εμπόδιζε την εγκατάσταση μελλοντικών συστημάτων BHE σε κοντινή απόσταση (Φυτίκας, 2014).

Ο Valladares (2005) συζήτησε την αριθμητική μοντελοποίηση των διαδικασιών ροής μέσα στα γεωθερμικά φρέατα, η οποία είναι μια προσέγγιση για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών παραγωγής με αβεβαιότητες. Χρησιμοποιήθηκε μονοδιάστατη σταθερή και παροδική αριθμητική μοντελοποίηση για την περιγραφή της δυναμικής μεταφοράς θερμότητας και υγρών μέσα σε γεωθερμικά φρεάτια. Ένας μονοδιάστατος προσομοιωτής, GEOWELLS, αναπτύχθηκε για τη μελέτη των εξισώσεων ροής ρευστού και θερμικής αγωγιμότητας μέσα στο γεωθερμικό φρεάτιο. Στις περισσότερες εφαρμογές, τα αποτελέσματα προσομοίωσης που παρείχε το GEOWELLS ήταν σε συμφωνία με τα δεδομένα τα οποία μετρήθηκαν στο πεδίο και υποστηρίχθηκαν από τη στατιστική ανάλυση. Ανέφερε ότι απαιτείται πρόσθετες πειραματικές και υπολογιστικές διεργασίες για να συμπεριληφθούν οι κατάλληλες θερμοφυσικές ιδιότητες και να δοκιμαστεί το πόσο ευαίσθητη είναι αυτή η προσέγγιση. Ανέφερε επίσης ότι μια ολοκληρωμένη γνώση των σφαλμάτων θα επιτευχθεί μόνο εάν συλλεχτεί μεγάλος αριθμός μετρήσεων (Τζάνη, 2010).

Ο Paly (2012) εργάστηκε με γραμμικό προγραμματισμό για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας σε κλειστά γεωθερμικά συστήματα βάθους περίπου 400 m. Ασχολήθηκε ερευνητικά με αβαθείς γεωθερμικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούν άμεσα τη γεωθερμική ενέργεια που αποθηκεύεται κάτω από την επιφάνεια της γης. Για την εξαγωγή της ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν αντλίες θερμότητας και χρησιμοποιήθηκε ένα κλειστό σύστημα GSHP με επίγεια σύζευξη όπου τοποθετήθηκαν πολλαπλοί γειτονικοί μετατροπείς θερμότητας σε γεωτρήσεις (BHEs borehole heat exchangers), οι οποίοι λειτουργούν με φορτία μεταβλητής ενέργειας.



## 4. Εφαρμογές

### 4.1 Μηχανική Γεωθερμίας

Η γεωθερμική ενέργεια εντοπίζεται σε περιοχές με έντονες θερμικές μεταβολές. Αυτές οι μεταβολές υφίστανται σε περιοχές που επηρεάζονται από πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα, σε περιοχές που βρίσκονται κατά μήκος των ορίων των τεκτονικών πλακών. Οι γεωθερμικές δεξαμενές που συνδέονται με αυτές τις περιοχές πρέπει να έχουν μία πηγή θερμότητας, επαρκή επαναφόρτιση νερού, δεξαμενή με επαρκή διαπερατότητα ή ρωγμές που επιτρέπουν στα ρευστά να ανεβαίνουν κοντά στην επιφάνεια και αδιαπέραστα σκληρά πετρώματα για την αποτροπή της διαφυγής της θερμότητας. Επιπλέον, οι εν λόγω δεξαμενές πρέπει να βρίσκονται εντός του εύρους των γεωτρήσεων (Francalanci, Vougioukalakis, Perini and Manetti, 2005).

Το θερμαινόμενο υγρό από ένα γεωθερμικό πόρο αντλείται με γεώτρηση, μερικές φορές σε βάθος 9,100 m, και εξάγεται με άντληση ή με φυσική αρτεσιανή ροή (όπου το βάρος του νερού το ωθεί στην επιφάνεια). Το νερό και ο ατμός διοχετεύονται σε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω μονωμένων αγωγών, οι οποίοι τοποθετούνται υπόγεια ή πάνω από το έδαφος, για χρήση σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης. Για να ελαχιστοποιηθεί οι απώλειες θερμότητας, οι αγωγοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν μέγιστο μήκος περίπου 1,6 Km. Ωστόσο, έχουν εγκατασταθεί αγωγοί που το μήκος τους φτάνει τα δεκάδες χιλιόμετρα και εντούτοις παρουσιάζουν σχετικά μικρή απώλεια θερμοκρασίας (< 2 °C - 5 °C). Οι πιο οικονομικά αποδοτικές εγκαταστάσεις βρίσκονται κοντά στη γεωθερμική πηγή και έτσι με αυτό τον τρόπο μειώνεται σε μεγάλο βαθμό το κόστος κατασκευής των αγωγών. Στην

περίπτωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος μπορεί να μειωθεί με το να βρίσκεται η εγκατάσταση κοντά σε ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς για τη μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά (Bertermann, Bialas, Psyk and Morper-Busch, 2013).

Σημειώνεται ότι ο ρυθμός εξόρυξης των γεωθερμικών πόρων δεν πρέπει να υπερβαίνει το ρυθμό επαναφοράς της φυσικής θερμότητας. Αν δεν ισχύει αυτή η ανίσωση τότε οι γεωθερμικοί πόροι μπορεί να εξαντληθούν. Με ορθολογική χρήση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για 20 έως 30 χρόνια. Ωστόσο, η παραγωγή ενέργειας μπορεί να μειωθεί με τον καιρό, καθιστώντας τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη αντισυμβατική. Υπάρχουν βέβαια και οι περιπτώσεις της γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγονται συνεχώς από τα γεωθερμικά πεδία: α) στο Larderello από τις αρχές της δεκαετίας του 1900 και β) στο Geysers από το 1960. Σε αυτές τις δύο περιοχές το πρόβλημα εξάντλησης των γεωθερμικών πόρων αντιμετωπίστηκε, εν μέρει, με τη διάνοιξη νέων φρεατίων και με την επαναφόρτιση της παροχής νερού. Στο Geysers, η ηλεκτρική ισχύς μειώθηκε από 1.800 MW σε περίπου 1.000 MW, αλλά ανακτήθηκαν περίπου 200 MW δυναμικότητας από την κατασκευή αγωγών για την παροχή αποβλήτων για επαναφόρτιση της δεξαμενής. Έργα όπως το σύστημα θέρμανσης του Reykjavík λειτουργούν από τη δεκαετία του 1930 με μικρή αλλαγή στην παραγωγή και το γεωθερμικό σύστημα θέρμανσης του Ινστιτούτου Τεχνολογίας του Όρεγκον λειτουργεί από τη δεκαετία του 1950 χωρίς να αλλάζει η παραγωγή. Έτσι, με ορθολογική διαχείριση, οι γεωθερμικοί πόροι μπορεί να αποδίδουν για μεγάλο χρονικό διάστημα και επίσης μπορούν

να ανακάμψουν, αν ανασταλεί η χρήση τους για κάποιο χρόνο (Lemmens, 2016).

#### 4.2 Περιβαλλοντικές Επίπτωσης Χρήσης Γεωθερμίας

Η χρήση γεωθερμικής ενέργειας μπορεί να διαχωριστεί ως εξής:

- εφαρμογές άμεσης χρήσης,
- γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (GHP),
- παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

##### **Άμεσες χρήσεις**

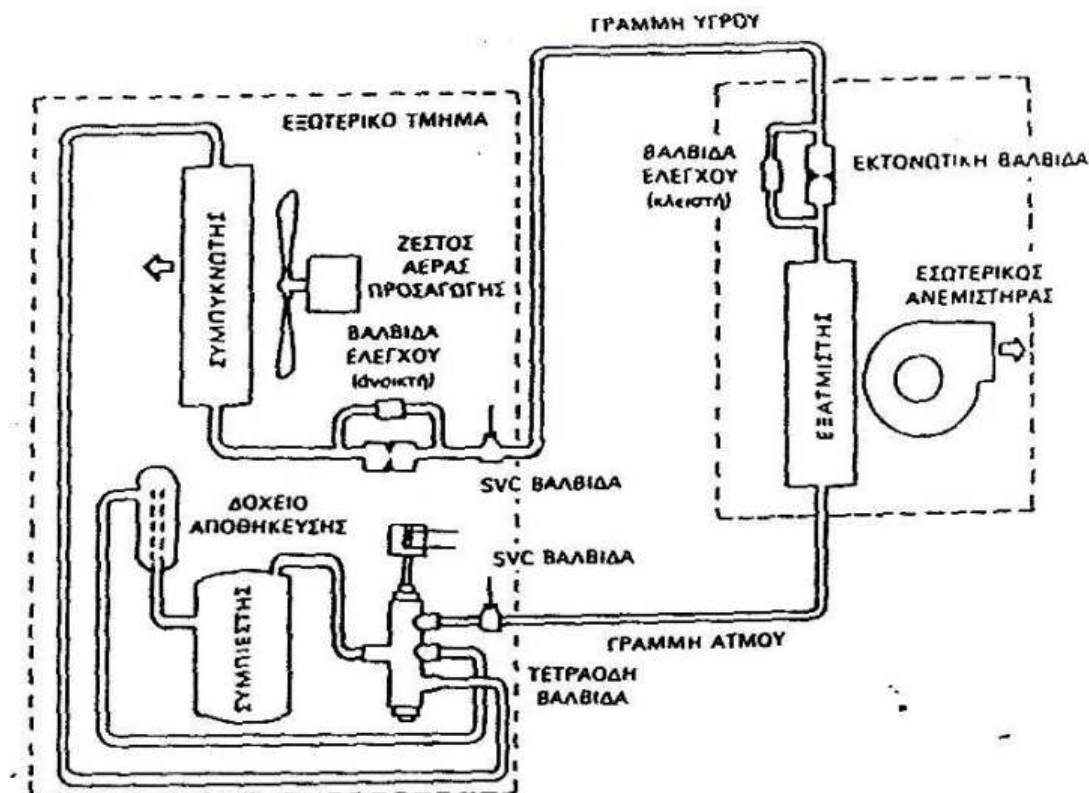
Η πιο συνηθισμένη πρακτική αφορά την άμεση χρήση ζεστού νερού από το έδαφος χωρίς ειδικό εξοπλισμό. Οι εφαρμογές άμεσης χρήσης συνδέονται με γεωθερμικούς πόρους χαμηλής ενθαλπίας, οι οποίοι κυμαίνονται μεταξύ 50 °C και 150 °C. Τα γεωθερμικά ύδατα χαμηλής θερμοκρασίας και ο ατμός χρησιμοποιούνται για την θέρμανση κτιρίων, κατοικιών καθώς και ολόκληρων οικοδομικών τετραγώνων που θερμαίνονται από μια κεντρική πηγή τροφοδοσίας. Άλλες άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας περιλαμβάνουν οικιακή χρήση, βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. ξήρανση φρέσκων τροφίμων και ξυλείας), παστερίωση γάλακτος κ.α. Στις περισσότερες περιπτώσεις το ζεστό νερό χρησιμοποιείται απευθείας στο σύστημα θέρμανσης. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με έναν μετατροπέα θερμότητας, στην περίπτωση που στο γεωθερμικό ρευστό εκτός του νερού αναμιγνύονται μη επιθυμητές ουσίες (π.χ. υδρόθειο) (Francalanci, Vougioukalakis, Perini and Manetti, 2005).

## Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας GHP (geothermal heat pump) εκμεταλλεύονται τις σχετικά σταθερές τιμές μέσης θερμοκρασίας που επικρατεί σε βάθος έως 300 m από την επιφάνεια της γης. Η θερμοκρασία αυτή είναι ικανή, για την θέρμανση των κτιρίων το χειμώνα και για την ψύξη τους το καλοκαίρι. Σε μικρότερα βάθη, όπου βρίσκονται τα περισσότερα GHP, (π.χ. 6 m από την επιφάνεια του εδάφους), η θερμοκρασία έχει μια σχεδόν σταθερή τιμή από 10 °C έως 16 °C. Με αυτόν τον τρόπο, η θερμότητα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει ώστε να θερμαίνονται τα κτίρια τους ψυχρούς μήνες του έτους, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι μικρότερη από εκείνη του εδάφους. Ομοίως, κατά τη διάρκεια των θερμών μηνών του έτους, ζεστός αέρας μπορεί να αντληθεί από ένα κτίριο και να διοχετευθεί στο έδαφος, όπου εκεί χάνει μεγάλο μέρος της θερμότητας του και στη συνέχεια επιστρέφεται με μικρότερη θερμοκρασία (Lemmens, 2016).

Ένα σύστημα GHP αποτελείται από έναν μετατροπέα θερμότητας, ένα βρόχο σωλήνων που τοποθετούνται στο έδαφος και μια αντλία. Ο μετατροπέας θερμότητας μεταφέρει θερμική ενέργεια από το υπέδαφος στην επιφάνεια του εδάφους, μέσω ενός ρευστού που κυκλοφορεί στους σωλήνες μεταφοράς. Το χρησιμοποιούμενο υγρό είναι συχνά νερό ή συνδυασμός νερού με αντιψυκτικό. Κατά τους θερμότερους μήνες, η θερμότητα από τον θερμό αέρα εντός των κτιρίων μεταφέρεται στον μετατροπέα θερμότητας και στη συνέχεια στο γεωθερμικό ρευστό. Καθώς μεταφέρεται μέσω των σωλήνων, η θερμότητα εκλύεται στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα. Η αντλία αντιστρέφει τη λειτουργία

της κατά τους ψυχρότερους μήνες, η θερμική ενέργεια του σχετικά ζεστού υπεδάφους αυξάνει τη θερμοκρασία του υγρού, το οποίο με τη σειρά του μεταφέρει αυτή την ενέργεια στην αντλία θερμότητας, η οποία θερμαίνει τον αέρα μέσα στο κτίριο (Bertermann, Bialas, Psyk and Morper-Busch, 2013).



Σχήμα 4.1 Κύκλος αντλίας θερμότητας για ψύξη.

Τα GHP έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης. Έχουν μεγαλύτερη απόδοση, δαπανούν 25%-50% λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια και ρυπαίνουν λιγότερο (Dehner, 2007). Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, που συνδέεται με τα GHP, αντιστοιχεί σε μείωση κατά 44% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τις συμβατικές αντλίες θερμότητας με πηγή αέρα (οι οποίες μεταφέρουν θερμότητα μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού αέρα). Επιπλέον, σε σύγκριση με τα συστήματα θέρμανσης με ηλεκτρική αντίσταση (τα οποία μετατρέπουν την ηλεκτρική

ενέργεια στη θερμότητα) σε συνδυασμό με τα συνηθισμένα συστήματα κλιματισμού, τα GHP εκπέμπουν 72% λιγότερα αέρια θερμοκηπίου.

### **Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**

Η γεωθερμική ενέργεια, ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη ροή ρευστού (ατμού), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με τρεις τρόπους, οι οποίοι συνδέονται με τη συμπεριφορά του ατμού και τον χρησιμοποιούν ενεργοποιούν ηλεκτρικές γεννήτριες. (Dehner, 2007). Ορισμένες γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συλλέγουν απλώς τον ατμό που βγαίνει από το έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση η λειτουργία θεωρείται «ξηρού ατμού» και ο θερμαινόμενος υδρατμός καταλήγει κατευθείαν σε έναν στρόβιλο που κινεί μια ηλεκτρική γεννήτρια. Άλλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που έχουν κατασκευαστεί για να την χρήση ατμού και δυαδικού κύκλου, χρησιμοποιούν μείγμα ατμού και θερμού νερού (υγρό/ατμός) που εξάγεται από το έδαφος (Francalanci, Vougioukalakis, Perini and Manetti, 2005).

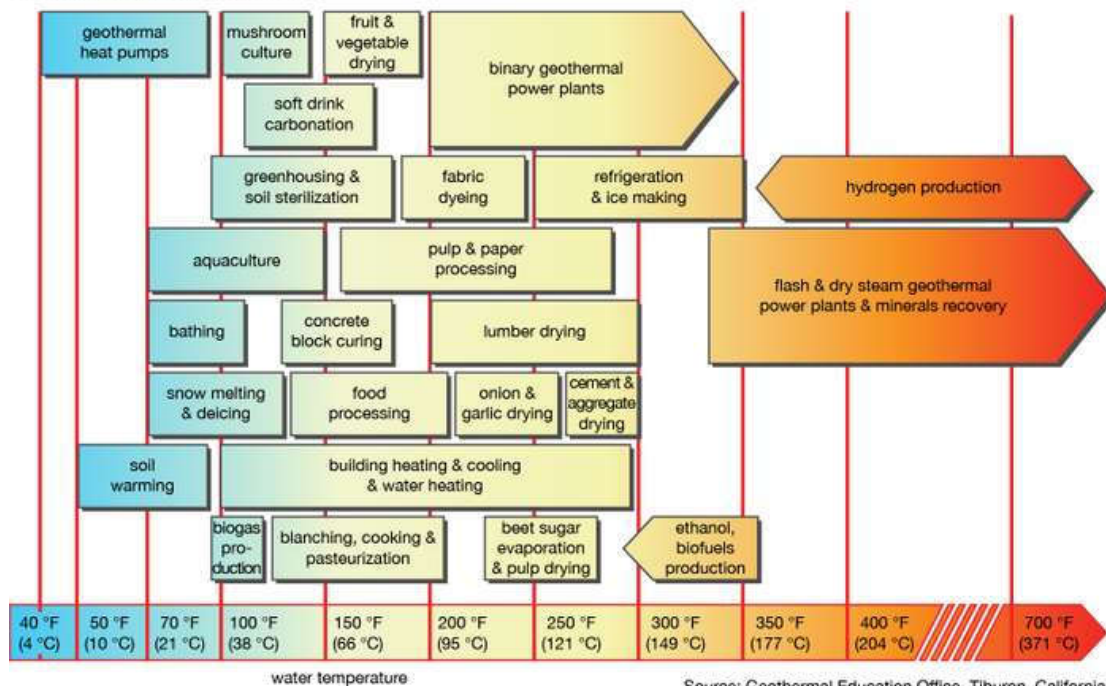
Σε μονάδες παραγωγής ατμού με καύση, το υπό πίεση νερό υψηλής θερμοκρασίας αντλείται από το υπέδαφος, σε δοχεία που είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια (ονομάζονται δεξαμενές φλας), όπου η απότομη μείωση της πίεσης αναγκάζει το υγρό νερό να εξατμιστεί σε ατμό. Με τον ατμό στη συνέχεια τροφοδοτείται η τουρμπίνα, και ως εκ τούτου, η γεννήτρια. Αντίθετα, οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής δυαδικού κύκλου χρησιμοποιούν ατμό που εκπέμπεται από ένα δευτερεύον ρευστό (π.χ. αμμωνία και υδρογονάνθρακες) που

περιέχεται μέσα σε ένα κλειστό βρόχο σωλήνων τροφοδοσίας. Σε αυτή τη διαδικασία, το γεωθερμαινόμενο νερό διοχετεύεται μέσω ενός διαφορετικού συνόλου σωλήνων και μεγάλο μέρος της ενέργειας που αποθηκεύεται στο θερμό νερό μεταφέρεται στο ρευστό μέσω ενός μετατροπέα θερμότητας. Στη συνέχεια το υγρό εξατμίζεται. Αφού ο ατμός από το υγρό περάσει από τον στρόβιλο, επανασυμπυκνώνεται και διοχετεύεται πίσω στον μετατροπέα θερμότητας (Bertermann, Bialas, Psyk and Morper-Busch, 2013). Η ηλεκτρική ισχύς συνήθως απαιτεί θερμοκρασία νερού, για να είναι οικονομικό, πάνω από 175 °C. Σε γεωθερμικές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν τον κύκλο ORC (Organic Rankine Cycle), ένας ειδικός τύπος τεχνολογίας δυαδικού κύκλου που χρησιμοποιεί πηγές θερμότητας χαμηλότερης θερμοκρασίας (όπως καύση βιομάζας και βιομηχανικά απόβλητα), χρησιμοποιούνται θερμοκρασίες νερού < 85 ° - 90 °C (Dehner, 2007).

#### 4.3 Αντιμετώπιση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Χρήσης Γεωθερμίας

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωθερμικής ανάπτυξης και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν τις μεταβολές στη χρήση γης που συνδέονται με την κατασκευή των εγκαταστάσεων, τη ρύπανση από το θόρυβο, την εκκένωση νερού και αερίων, την παραγωγή παρασιτικών οσμών και την καθίζηση του εδάφους. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές τις επιπτώσεις μπορούν να μετριαστούν με την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Έτσι ώστε οι γεωθερμικές χρήσεις θα έχουν ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

## Geothermal energy uses



Σχήμα 4.2 Χρήσεις γεωθερμικής ενέργειας: Διάγραμμα διαφόρων χρήσεων γεωθερμικής ενέργειας ανάλογα με τη θερμοκρασία ύδατος του γεωθερμικού πόρου. (Encyclopædia Britannica, Inc, Lemmens, 2016).

Πρέπει να τονιστεί ότι, τα GHP έχουν ελάχιστη επίδραση στο περιβάλλον, επειδή χρησιμοποιούν αβαθείς γεωθερμικούς πόρους σε βάθη έως 100 m από την επιφάνεια. Η μόνη επιβάρυνση στο περιβάλλον είναι ότι τα GHP προκαλούν μικρές αλλαγές θερμοκρασίας στα υπόγεια ύδατα, στα πετρώματα και στο έδαφος. Σε συστήματα κλειστού βρόχου η θερμοκρασία εδάφους, γύρω από τις κατακόρυφες γεωτρήσεις, ελαφρώς αυξάνεται ή μειώνεται, η φορά της αλλαγής θερμοκρασίας εξαρτάται από το αν το σύστημα θερμαίνει (που θα συνέβαινε στις ψυχρότερες περιοχές) ή ψύχει (κάτι που θα συνέβαινε στις πιο θερμές περιοχές). Αν τα φορτία θέρμανσης και ψύξης είναι ισορροπημένα τότε οι θερμοκρασίες εδάφους θα παραμείνουν σταθερές. Ομοίως, τα συστήματα ανοιχτού βρόχου που χρησιμοποιούν υπόγεια ύδατα θα είχαν ελάχιστη



επίδραση στη θερμοκρασία, ειδικά σε περιοχές που επικρατούν υψηλές ροές υπόγειων υδάτων (Francalanci, Vougioukalakis, Perini and Manetti, 2005).

Συγκρίνοντας τη γεωθερμική ενέργεια με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το κύριο πλεονέκτημα της είναι ότι είναι διαθέσιμη 24 ώρες το 24ωρο, 7 ημέρες την εβδομάδα. Σημειώνεται ότι η ηλιακή ενέργεια και ο άνεμος διατίθενται μόνο για το ένα τρίτο του χρόνου. Επιπλέον, το κόστος της γεωθερμικής ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10 cent ανά KWh, γεγονός που την κάνει ανταγωνιστική με άλλες πηγές ενέργειας.

Το κύριο μειονέκτημα της ανάπτυξης της γεωθερμικής ενέργειας είναι το υψηλό αρχικό κόστος για την κατασκευή των εγκαταστάσεων και των υποδομών και ο υψηλός κίνδυνος εξασφάλισης των πόρων. Οι γεωθερμικοί πόροι εντοπίζονται συχνά σε πετρώματα μικρής διαπερατότητας και πολλές φορές ερευνητικά φρεάτια παράγουν ατμό σε ποσότητες πολύ χαμηλές για να αξιοποιηθούν οικονομικά). Ωστόσο, μόλις εξασφαλιστεί ο πόρος, το ετήσιο κόστος του γεωθερμικού ρευστού (δηλαδή του ζεστού νερού και του ατμού) είναι σχετικά χαμηλό (Haugen and Musser, 2012). Πρέπει πάντως να λαμβάνεται υπόψη και το κόστος συντήρησης το οποίο μπορεί να είναι αρκετά υψηλό.

### **Εκπομπές αερίων**

Η διάκριση μεταξύ συστημάτων ανοιχτού και κλειστού βρόχου σχετίζεται με τις εκπομπές αερίων. Σε συστήματα κλειστού βρόχου, τα αέρια που απομακρύνονται από το φρεάτιο δεν εκτίθενται στην ατμόσφαιρα και εισάγονται ξανά στο έδαφος αφού μεταδώσουν τη θερμότητά τους, με αποτέλεσμα οι

εκπομπές αερίων να είναι ελάχιστες. Αντίθετα, τα συστήματα ανοιχτού βρόχου εκπέμπουν επικίνδυνα αέρια (κυρίως υδρόθειο αλλά και διοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, μεθάνιο, βόριο). (Bertermann, Bialas, Psyk and Morper-Busch, 2013). Μόλις φτάσει στην ατμόσφαιρα, το υδρόθειο μετατρέπεται σε διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) και αυτό με τη σειρά του συμβάλλει στο σχηματισμό μικρών όξινων σωματιδίων που μπορούν να απορροφηθούν από τον ανθρώπινο οργανισμό με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία του. Επίσης, το διοξείδιο του θείου προκαλεί όξινη βροχή, η οποία καταστρέφει τις καλλιέργειες, τα δάση, τα εδάφη, και οξύνει τις λίμνες και τα ρέματα. Ωστόσο, οι εκπομπές SO<sub>2</sub> από τα γεωθερμικά εργοστάσια είναι περίπου 30 φορές χαμηλότερες ανά MWh από ό,τι στα εργοστάσια άνθρακα, που αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή SO<sub>2</sub>. Ορισμένες γεωθερμικές εγκαταστάσεις παράγουν επίσης μικρές ποσότητες εκπομπών υδραργύρου, οι οποίες πρέπει να μετριάζονται με τη χρήση τεχνολογίας φίλτρου υδραργύρου. Οι καθαριστές μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές στην ατμόσφαιρα, αλλά παράγουν υδαρή ιλύ που περιέχουν επιβλαβή στοιχεία, όπως θείο, βανάδιο, ενώσεις πυριτίου, χλωριούχα άλατα, αρσενικό, υδράργυρο, νικέλιο και άλλα βαρέα μέταλλα. Αυτή η τοξική ιλύς πρέπει να απορρίπτεται σε ειδικούς χώρους επικίνδυνων αποβλήτων (Haugen and Musser, 2012).

Παρόλο που η συγκέντρωση αυτής της εκπομπής αερίων είναι σημαντικά μικρότερη από μια συμβατική μονάδα παραγωγής με καύσιμα, η μείωση της εκπομπής υδρόθειου εξακολουθεί να είναι επιθυμητή για οποιοσδήποτε συνθήκες. Οι τύποι των συμπυκνωτών που είναι εγκατεστημένοι στο σχεδιασμό καθορίζουν την αναλογία μεταξύ του συμπυκνωμένου και του μη-

συμπυκνωμένου αερίου. Κατά συνέπεια, με τη σωστή επιλογή του συμπυκνωτή καθώς και με την εφαρμογή άλλων σχεδίων μείωσης, όπως η εγκατάσταση πύργου προσρόφησης κ.λπ., θα μπορούσε να ελαχιστοποιηθεί η εκπομπή υδρόθειου.

Η γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται ως «πράσινη ενέργεια», με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα περίπου 5%, 1% υδρόθειο, 1% διοξείδιο του θείου και λιγότερο από 1% του οξειδίου του αζώτου από ότι ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα ή άνθρακα. Οι συγκεντρώσεις κάθε αερίου που διασπάται από το περιβάλλον ελέγχονται από τη θερμοκρασία, τη σύνθεση του υγρού και τη γεωλογική κατάσταση. Παρόλο που οι περισσότερες από τις εκπομπές αερίων σε γεωθερμικές εγκαταστάσεις προέρχονται από το υπάρχον φυσικό αέριο των γεωθερμικών πόρων, κάποιο ποσοστό εκπομπών αερίων προέρχεται επιπροσθέτως από τις διαδικασίες της μετατροπής της γεωθερμικής ενέργειας σε άλλη μορφή ενέργειας (Lemmens, 2016).

Σύμφωνα με διάφορες μελέτες, ο τύπος του σχεδιασμού των γεωθερμικών σταθμών επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό παραγωγής των προαναφερθέντων αερίων. Η επιλογή μεταξύ ανοικτού βρόχου και κλειστού (δυναμικού) συστήματος είναι απαραίτητη, λαμβάνοντας υπόψη την εκπομπή αερίων. Τα γεωθερμικά εργοστάσια μέχρι σήμερα είναι χωρισμένα σε τρεις βασικούς τύπους: ξηρού ατμού, θερμού ατμού και δυναμικό. Τα πρώτα δύο παράγουν σε μεγάλο βαθμό αέρια θερμοκηπίου (GHG) σε σχέση με τον τρίτο τύπο. Σε ένα σύστημα δυναμικού βρόχου, τα αέρια θερμότητας που απομακρύνονται από το

σύστημα δεν μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα, αλλά μετά την μεταφορά τους, επιστρέφουν πίσω στο έδαφος και έτσι προκύπτει ελάχιστη ατμοσφαιρική ρύπανση. Αντίθετα, το σύστημα ανοιχτού βρόχου εκπέμπει στην ατμόσφαιρα όλα τα αέρια που περιέχονται.

## **Χρήση της γης**

Η έκταση γης που απαιτείται από ένα γεωθερμικό εργοστάσιο ποικίλλει ανάλογα με την ισχύ του αποθέματος των γεωθερμικών πόρων, τον τύπο του συστήματος μετατροπής ενέργειας, τον τύπο του συστήματος ψύξης, τη διάταξη των φρεατίων και των συστημάτων σωληνώσεων, τον υποσταθμό και τις βοηθητικές εγκαταστάσεις. Η καθίζηση του εδάφους, ένα φαινόμενο στο οποίο καταβυθίζεται η επιφάνεια του εδάφους, προκαλείται μερικές φορές από την απομάκρυνση του υπόγειου νερού από τις γεωθερμικές δεξαμενές. Οι περισσότερες γεωθερμικές εγκαταστάσεις αντιμετωπίζουν αυτόν τον κίνδυνο επανεισάγοντάς τα υδροθερμικά ρευστά πίσω στις γεωθερμικές δεξαμενές μετά τη άντληση της θερμότητας του νερού.

Τα υδροθερμικά εργοστάσια τοποθετούνται σε γεωλογικά «θερμά σημεία», τα οποία αρκετές φορές βρίσκονται σε σεισμικά ενεργές περιοχές. Έρευνες έχουν δείξει ότι υπάρχουν ενδείξεις ότι τα υδροθερμικά εργοστάσια επιβαρύνουν την σεισμικότητα της περιοχής. Τα ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα (θερμός στεγανός βράχος) μπορούν επίσης να αυξήσουν τον κίνδυνο μικρών σεισμών. Στη διαδικασία αυτή, το νερό αντλείται με υψηλή πίεση για να θραύσει υπόγεια αποθέματα θερμού πετρώματος, παρόμοια με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην υδραυλική θραύση με φυσικό αέριο. Ο κίνδυνος σεισμού

που σχετίζεται με ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί αν οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις τοποθετηθούν σε κατάλληλη απόσταση από σεισμικά ρήγματα. Όταν ένα γεωθερμικό σύστημα βρίσκεται κοντά σε μια περιοχή με μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα, είναι απαραίτητη η διαρκής παρακολούθηση και επικοινωνία με τις τοπικές κοινότητες.

### **Οι εκπομπές θέρμανσης από τον κύκλο ζωής**

Σε γεωθερμικά συστήματα ανοιχτού βρόχου, περίπου το 10% των εκπομπών αερίων είναι το διοξείδιο του άνθρακα, ενώ μικρότερη ποσότητα εκπομπών είναι το μεθάνιο, ένα πιο ισχυρό αέριο που προκαλεί υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι εκτιμήσεις για τις εκπομπές θέρμανσης του πλανήτη από συστήματα ανοιχτού βρόχου είναι περίπου 0,045 kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ανά κιλοβατώρα (KWh). Σε συστήματα κλειστού βρόχου, αυτά τα αέρια δεν απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν κάποιες εκπομπές που σχετίζονται με την κατασκευή των εγκαταστάσεων και τις γύρω υποδομές (Francalanci, Vougioukalakis, Perini and Manetti, 2005). Τα ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα, τα οποία απαιτούν ενέργεια για την γεώτρηση και άντληση νερού σε δεξαμενές θερμών πετρωμάτων, έχουν συνολικές εκπομπές αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά περίπου 0,091 kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ανά κιλοβατώρα (KWh).

Για την σύγκριση, οι εκτιμήσεις των εκπομπών για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο κυμαίνονται μεταξύ 0.272 και 0.91kg ισοδυνάμου

διοξειδίου του άνθρακα ανά κιλοβατώρα (KWh) και οι εκτιμήσεις για την ηλεκτρική ενέργεια από άνθρακα είναι 0.635 και 1.632 kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα κιλοβατώρα (KWh).

#### 4.4 Γεωθερμικές Σήραγγες

Μπορεί να υπάρξει αποτελεσματική αξιοποίηση της θερμότητας του εδάφους, με την χρήση δομών επαπτόμενων του εδάφους, όπως παραδείγματος χάρη των σηράγγων (τούνελ). Η κατασκευή των σηράγγων γίνεται σε μεγάλο βάθος και ο μεγάλος τους όγκος ισούται με μεγάλη επιφάνεια επαφής με το υπέδαφος, δηλαδή του ενεργειακά εκμεταλλεύσιμου μέσου. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, έχουν εφαρμοστεί οι εγκαταστάσεις γεωθερμικών συστημάτων στα περιβλήματα κάποιων σηράγγων, με στόχο να χρησιμοποιηθεί η γεωθερμική ενέργεια έτσι ώστε να ψυχθούν ή να θερμανθούν οι ίδιες σήραγγες ή κτίρια της επιφάνειας πάνω από αυτές. Τα γεωθερμικά συστήματα σηράγγων δεν έχουν εφαρμοστεί ευρέως, κατά κύριο λόγο εξαιτίας του κόστους της εγκατάστασής τους. Παρόλα αυτά, όσα έχουν εφαρμοστεί κατά την διάρκεια των τελευταίων χρόνων, χάρη στην γενικότερη αναζήτηση για την αξιοποίηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας, έχουν δείξει πως παρά τα κόστη για την εγκατάσταση, η εξοικονόμηση σε ενέργεια μακροπρόθεσμα, είναι παραπάνω του ικανοποιητικού.

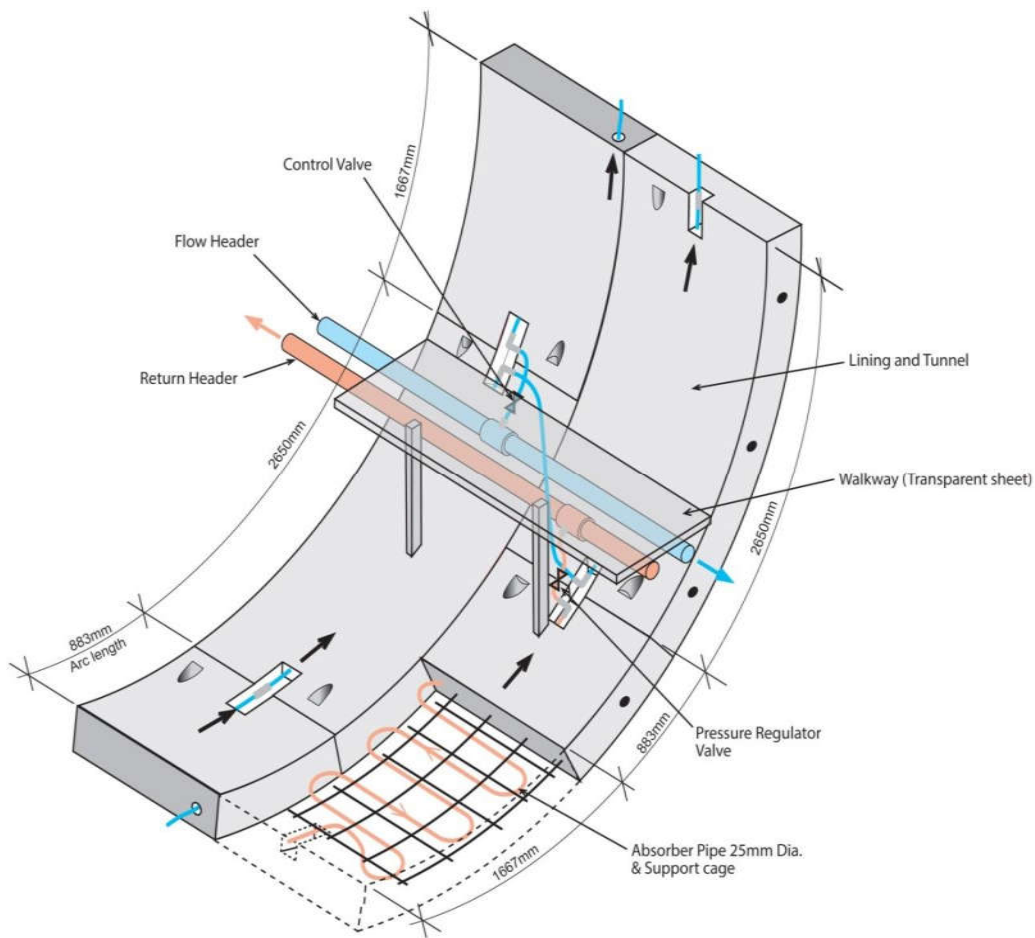
Οι σήραγγες είναι επιμήκη, στενά, στην ουσία γραμμικά σκαμμένα υπόγεια ανοίγματα, μήκους μεγαλύτερου κατά πολύ του πλάτους ή του ύψους τους. Μία σήραγγα θεωρείται δύσκολο έργο για τους πολιτικούς μηχανικούς, εξαιτίας των πολλών παραμέτρων που πρέπει να εξεταστούν, για την επιτυχή κατασκευή

της. Οι σήραγγες μπορούν να αποτελούν δίοδους πεζών, ποδηλατών, μηχανοκίνητων οχημάτων, μεταφορικών μέσων σταθερή τροχιά ή πλοίων. (Francalanci, Vougioukalakis, Perini and Manetti, 2005).

Μία σήραγγα είναι ένα μεγάλο τεχνικό έργο, του οποίου η εκτέλεση γίνεται σε βάθος με την ύπαρξη πολλών ιδιοτήτων και εγκαταστάσεων, συνήθως ανεκμετάλλεωτων. Παραδείγματος χάρη, δεν γίνεται εκμετάλλευση της σταθερής θερμοκρασίας στο έδαφος κατά τη διάρκεια του έτους. Γενικά, όπως έχει περιγραφεί από τους Brandl (2006), Adam και Markiewicz (2009), κάθε γεωτεχνική δομή, όπως ένας διαφραγματικός τοίχος, κάθε υπόγεια πλάκα και σήραγγα, μπορεί να γίνει ενεργειακή γεωδομή. Πλήθος ερευνητών κατά τα τελευταία έτη προτείνουν τις συγκεκριμένες εφαρμογές, με έμφαση να δίνεται στις σήραγγες. Σε πόλεις όπου κατασκευάζονται νέες γραμμές υπόγειων μέσων σταθερής τροχιάς, είναι δυνατόν να τοποθετηθούν γεωθερμικά συστήματα που θα τροφοδοτούν τα υπερκείμενα κτήρια με γεωθερμική ενέργεια. Το κόστος τοποθέτησης ενός τέτοιου συστήματος αποσβένεται από την εμπορική χρήση της παραγόμενης προς διάθεση γεωθερμικής ενέργειας.

#### 4.5 Γεωθερμικό σύστημα σε υπό κατασκευή σήραγγα

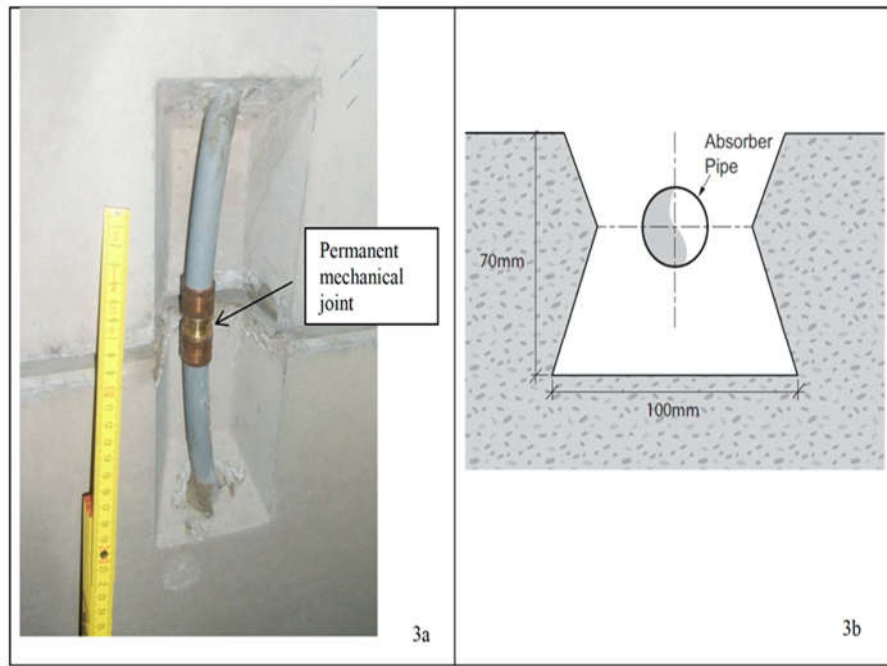
Καθώς η θερμοκρασία του εδάφους σταθεροποιείται σε βάθη μεγαλύτερα των 10m-15m, το γεωθερμικό σύστημα θα πρέπει να τοποθετηθεί σχεδόν σε επαφή με το έδαφος. Αυτή η σταθερή θερμοκρασία αποτελεί πηγή ψύξης το καλοκαίρι και πηγή θέρμανσης το χειμώνα και κατατάσσεται στην αβαθή γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας.



Σχήμα 4.3 Φέρον οργανισμός σήραγγας με ενσωματωμένο γεωθερμικό σύστημα (ice publishing).

Πρέπει να θεωρηθεί ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο φέρει τις ωθήσεις γαιών του υπερκείμενου εδάφους, είναι καλός αγωγός θερμότητας ικανής θερμοχωρητικότητας. Ένας πλαστικός σωλήνας κατάλληλης διατομής θα πρέπει να τοποθετηθεί στον φέροντα οργανισμό της σήραγγας και με τον κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό το ρευστό εντός του σωλήνα να απάγει την προσφερόμενη θερμότητα-ψύξη του εδάφους. Σε αυτά τα βάθη η σήραγγα κατασκευάζεται με μηχανήματα εκσκαφής που είναι γνωστά ως μετροπόντικες ή Tunnel Boring Machines (TBM).



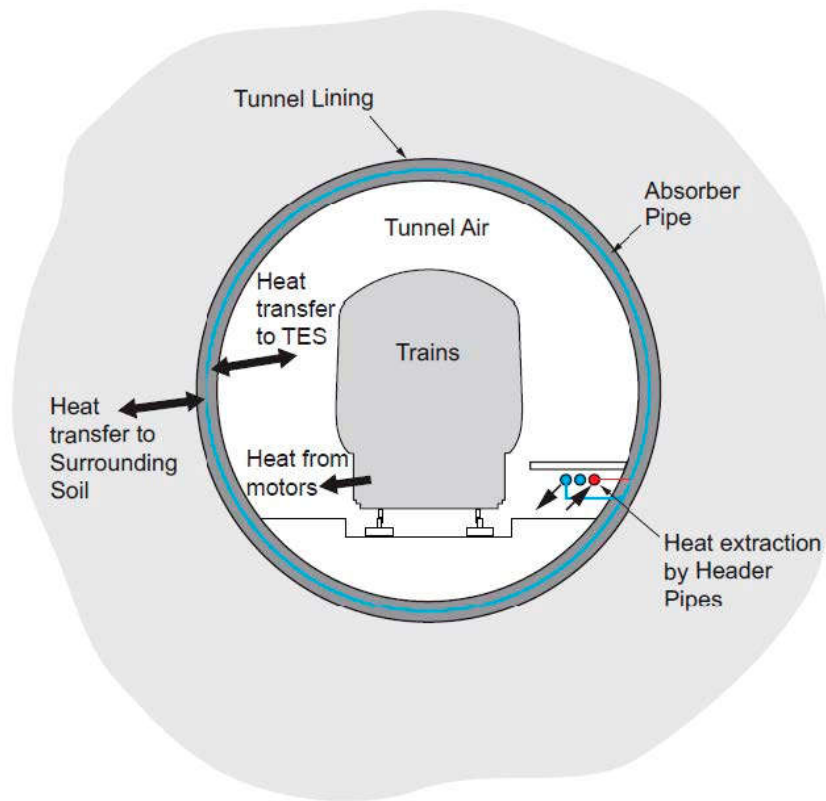


Σχήμα 4.4 Λεπτομέρεια μηχανικού συνδέσμου αποκατάστασης της συνέχειας βρόχου (ice publishing).

Κατά την εκσκαφή-διάτρηση με αυτή τη μέθοδο, το περίβλημα κατασκευάζεται από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Σε αυτά έχει ήδη τοποθετηθεί ο πλαστικός σωλήνας διέλευσης του ρευστού (Σχήμα 4.3). Για την απρόσκοπτη διέλευση του ρευστού που είτε θερμαίνεται είτε ψύχεται, υπάρχουν ειδικοί σύνδεσμοι αποκατάστασης της συνέχειας (Σχήμα 4.4).

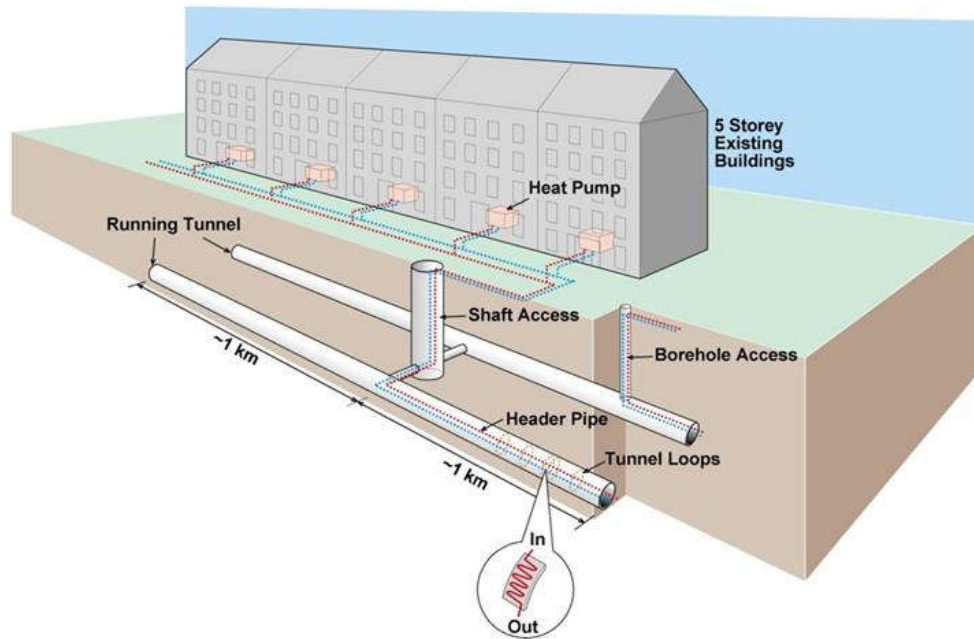
Ειδικά σε σήραγγες που περνά σταθερό μέτρο τροχιάς (μετρό) υπάρχουν μήκη και θέσεις όπου παράγεται περαιτέρω θερμότητα. Αυτό συμβαίνει κοντά σε σταθμούς επιβίβασης/αποβίβασης καθώς ο συρμός για να ελαττώσει ταχύτητα φρενάρει, ενώ επιταχύνοντας, το έργο του κινητήρα αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία. Επομένως υπάρχουν περιοχές στις σήραγγες που έχουν βελτιωμένη απόδοση. Με κατάλληλη επιλογή των θέσεων αυτών, το

γεωθερμικό σύστημα είναι αποδοτικότερο και δεν κρίνεται αναγκαίο να εκτείνεται σε όλο το μήκος της σήραγγας (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5 Τομή σήραγγας μέσω σταθερής τροχιάς (ice publishing).

Εκτός από το όφελος ψύξης και θέρμανσης εντός της σήραγγας το θερμαινόμενο ρευστό, με κατάλληλο σχηματισμό και μηχανολογικό εξοπλισμό, οδηγείται σε κεντρικό αγωγό που με τα κατάλληλα φρεάτια μπορεί να θερμάνει και να ψύξει υπερκείμενα κτήρια στην εγγύτητα όδευσης της σήραγγας (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6 Διάταξη φρεάτων για την θέρμανση ψύξη υπερκείμενου κτηρίου  
(ice publishing).

#### 4.6 Γεωθερμικό σύστημα σε υφιστάμενη σήραγγα

Σε, ήδη, κατασκευασμένες σήραγγες υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης γεωθερμικού συστήματος σε μεταγενέστερο χρόνο. Θεωρείται, όπως, προαναφέρθηκε, ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα που συγκρατεί την εδαφόμαζα, είναι καλός αγωγός της θερμικής ενέργειας αλλά και ότι έχει ικανή θερμοχωρητικότητα. Η πλαστική σωλήνα τοποθετείται εν επαφή στην επιφάνεια του σκυροδέματος ενώ τοποθετείται επίσης θερμομονωτική επικάλυψη ώστε να μην υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας με τον αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας.



Σχήμα 4.7 Γεωθερμικό σύστημα σε επαφή με την επένδυση της σήραγγας.

Το ρευστό εντός της σωλήνας θερμαίνεται αρχικά από την γεωθερμία έως ένα σημείο, ενώ μια αντλία θερμότητας αυξάνει περαιτέρω την θερμοκρασία του ρευστού σε αυτή που χρειάζεται για την λειτουργία του συστήματος θέρμανσης ή ψύξης. Χρησιμοποιείται δηλαδή και δεύτερη μορφή ενέργειας συνήθως ηλεκτρική για την θέρμανση ή ψύξη της διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta T$ . Η επιλογή της εγκατάστασης του γεωθερμικού συστήματος θα πρέπει να γίνεται έπειτα από μελέτη και προσδιορισμό του συντελεστή απόδοσης Coefficient of Performance (COP). Αυτός ο συντελεστής δεν είναι άλλο από το λόγο των KWh που αποδίδονται-παράγονται (από το γεωθερμικό σύστημα) προς τις KWh που καταναλώνονται (από την αντλία θερμότητας).

Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στο έδαφος είναι μεταβλητή. Περιοδικά και κατά τη διάρκεια του έτους ενδέχεται η στάθμη του να αυξάνεται ή να υποβιβάζεται. Οι υπόγειες κατασκευές ενδέχεται να έχουν κατασκευαστεί σε βάθος μεγαλύτερο από αυτό του υδροφόρου ορίζοντα. Σε υφιστάμενες

σήραγγες στις οποίες για διάφορους λόγους παρατηρείται εισροή υπόγειων υδάτων, αυτά πρέπει να διαχειρίζονται και να απομακρύνονται αφού αποτελούν κίνδυνο για την εύρυθμη λειτουργία της υποδομής.

Στην Γλασκώβη της Σκωτίας η υπόγεια σήραγγα μέσου σταθερής τροχιάς κατασκευάστηκε το 1896 και είναι το τρίτο παλαιότερο μετρό του κόσμου. Εκτείνεται σε μήκος περίπου 10Km και το μέσο βάθος είναι περί τα 10-12m. Έχει κυκλική τροχιά και υπόκειται σε δύο σημεία του ποταμού Clyde. Υπόκειται της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και τόσο η παλαιότητα της σήραγγας όσο και ο τρόπος κατασκευής της, την καθιστούν ευάλωτη σε ότι αφορά την εισροή υπόγειων υδάτων.



Σχήμα 4.8 Σύστημα θερμικής αντλίας νερού (WSHP) (ice publishing).

Έτσι αναπτύχθηκε ένα σύστημα συγκέντρωσης και απομάκρυνσης των εισερχόμενων υδάτων τα οποία με κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό και διάταξη φρεατίων παροχετεύονται στην επιφάνεια. Έπειτα από μετρήσεις της

θερμοκρασίας των εισερχόμενων υδάτων, εκτιμήθηκε ότι η γεωθερμική τους ενέργεια ήταν αρκετή ώστε να εγκατασταθεί ένα γεωθερμικό σύστημα για την εκμετάλλευσή της (Hytiris et al.,2016). Σχεδιάστηκε ένα σύστημα που αντί να παροχετεύει στην επιφάνεια το ρευστό, αυτό οδηγούνταν σε μια αντλία θερμότητας νερού (WSHP, water source heat pump) Σχήμα 4.8. Η εγκατάσταση λειτούργησε στην αρχή πιλοτικά, και σε σύντομο χρονικό διάστημα, διαπιστώθηκε η εξαιρετική απόδοση της διάταξης του γεωθερμικού συστήματος.

## 5 Συμπεράσματα

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που έχει χρησιμοποιηθεί οικονομικά σε πολλά μέρη του κόσμου για δεκαετίες. Η χρήση της Γεωθερμίας είναι επικερδής για τους χρήστες, λόγω της χαμηλού κόστους ενέργειας που προσφέρει. Παράλληλα, σε επίπεδο εθνικής οικονομίας, η χρήση της γεωθερμίας έχει οικονομικά οφέλη, λόγω της μείωσης της χρήσης συμβατικών πηγών ενέργειας (π.χ. πετρέλαιο, λιγνίτης). Η τεχνολογία αξιοποίησης της έχει πλέον εξελιχθεί με γρήγορους ρυθμούς, ως αποτέλεσμα της προόδου της έρευνας και της συσσώρευσης πολυετούς εμπειρίας. Συγχρόνως, υπάρχει μεγάλη προοπτική για εκτεταμένη αύξηση (παγκοσμίως) της χρήσης γεωθερμικής ενέργειας, η οποία αποτελεί μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας που εξυπηρετεί τόσο εφαρμογές άμεσης χρήσης όσο και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο τομέας της γεωθερμικής αξιοποίησης, που αναπτύσσεται ταχύτερα, είναι οι εφαρμογές αντλίας θερμότητας. Η μεγαλύτερη απόδοση αλλά και η μείωση του κόστους προμήθειάς τους, κάνουν τη γεωθερμία ακόμη πιο ελκυστική ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Οι συνδυασμένες μονάδες παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού κερδίζουν σε δημοτικότητα, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση της εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας. Επίσης, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, έχει φέρει δυνατότητες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε χώρες που δεν διαθέτουν πεδία υψηλής ενθαλπίας. Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες ενισχυμένων γεωθερμικών συστημάτων (EGS enhanced geothermal systems), όπου εξάγεται θερμότητα από βαθύτερα σημεία του

εδάφους σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Εάν η EGS αποδειχθεί οικονομικά κερδοφόρα σε εμπορικές κλίμακες, οι αναπτυξιακές δυνατότητες της γεωθερμικής ενέργειας θα είναι απεριόριστες σε πολλές χώρες του κόσμου. Το κόστος εγκατάστασης γεωθερμικών συστημάτων είναι υπολογίσιμο, ειδικά εάν περιλαμβάνει και ανόρυξη γεώτρησης και θα πρέπει να διερευνηθεί κατά πόσο αποσβένεται σε σχέση με την παραγόμενη ενέργεια και την επιφάνεια των υπό θέρμανση-ψύξη δομών.

Η κατασκευή υπόγειων σηράγγων είναι σύνθετα και ακριβά έργα υποδομής. Σε μεγάλες πόλεις όπου και κατασκευάζονται για την διέλευση μέσω σταθερής τροχιάς συντελούν στην αποσυμφόρηση του κυκλοφοριακού προβλήματος. Το δε μήκος των κατασκευών αυτών τις φέρνουν σε εγγύτητα με μεγάλο αριθμό υπερκείμενων δομών-κτηρίων. Η τοποθέτηση εγκαταστάσεων αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας καθιστά τις σήραγγες δυνητικούς τροφοδότες ενέργειας των υπερκείμενων δομών. Στην Ελλάδα θα μπορούσε να εφαρμοστεί η γεωθερμία σηράγγων στο μετρό της Αθήνας αλλά και στο, υπό κατασκευή, μετρό της Θεσσαλονίκης. Μεγάλος αριθμός κτιρίων μπορεί να επωφεληθεί ενεργειακά σε περιοχές (στην Αθήνα αλλά και στη Θεσσαλονίκη) που η χρήση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων προκαλεί περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα. Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η μελέτη των γεωθερμικών πεδίων στο λεκανοπέδιο της αττικής καθώς και η εγκατάσταση γεωθερμικού συστήματος σε υφιστάμενες σήραγγες του αττικού μετρό.



## 6 Βιβλιογραφία

- Adams, W. M. (2006). *The Future of Sustainability, Re-thinking Environment and Development*. Zurich: The World Conservation Union.
- Arriaga, M-C.S., Tsompanakis, Y., Samaniego, F., (2008), Geothermal manifestations and earthquakes in the caldera of Santorini, Greece: An historical perspective, *Proceedings of the 33rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 28-30 2008.
- Banks, D., (2012). *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. John Wiley & Sons.
- Bertermann, D. and Jordan, G., (2011), “Geothermal Energy Resource Exploitation in the EU: ThermoMap”, *European Geologist*, 32, pp. 29-32.
- Bertermann, D., Bialas, Ch., Morper-Busch, L., Klug, H., Rohn, J., Stollhofen, H., Psyk M., Jaudin, F., Maragna, Ch., Einarsson, G. M., Vikingsson, S., Orosz, L., Jordan, G., Vijdea, A.-M., Lewis, M., Lawley, R. S., Latham, A., Declercq, P.-Y., Petitclerc, E., Zacherl, A., Arvanitis, A. A., and Stefouli, M., (2013), “ThermoMap - An Open-Source Web Mapping Application for Illustrating the very Shallow Geothermal Potential in Europe and Selected Case Study Areas”, *Proc. European Geothermal Congress, Pisa, Italy, 3-7 June 2013*, Paper SG3-05, 8 p.

- Bertermann, D., Bialas, Ch., Psyk, M., and Morper-Busch, L., (2013), “ThermoMap MapViewer Technical Guidelines”, <http://geoweb2.sbg.ac.at/thermomap/>, 6 p.
- Blake, M.C., Bonneau, M., Geussant, J., Kienast, J.R., Lepvier, C., Maluski, H., Papanikolaou, D., (1981), A geologic reconnaissance of the Cycladic blueschists belt, Greece, Geological Society of America Bulletin, 92, 247-254.
- Bosselmann, K. (2002). The Concept of Sustainable Development. In K. Bosselmann, & D. Grinlinton, Environmental Law for a Sustainable Society (pp. 81-96). Auckland: NZCEL Monograph Series.
- CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI), SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1: Processed Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data version 4.1, Resampled global SRTM data to 500 m and 1 km resolutions, <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Dehner, U., (2007), “Bestimmung der thermischen Eigenschaften von Böden als Grundlage für die Erdwärmenutzung”, Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen, 35, Mainz, pp. 159- 186.
- Druitt, T.H., Edwards, L., Mellors, R.M., Pyle, D.M., Sparks, R.S.J., Lanphere, M., Davies, M. and Barreirio, B., (1999). Santorini Volcano. Geol. Soc. Mem., 19:165.
- European Environment Agency (EEA), (2011), Nationally Designated Areas (National - CDDA-1) from European Topic Centre on Biological Diversity (ETC/BD) based on country deliveries - National protected sites of Europe with Iceland,

<http://www.eea.europa.eu/dataand-maps/data/nationally-designated-areas-national-cdda-5>.

- Konstantinos Ninikas, Nicholas Hytiris, Rohinton Emmanue, Bjorn Aaen., (2017) Heat energy from a shallow geothermal system in Glasgow, UK: performance evaluation design.
- European Environment Agency (EEA), (2012), "Natura 2000" from Unit Nature & Biodiversity, DG Environment, European Commission - generalized to a scale of 1: 100,000, Birds directive and Habitats directive for Central Europe (EU25, EU27, EU12, EU15), <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/natura-2>.
- Francalanci L., Vougioukalakis, G.E., Perini G., Manetti, P., (2005), A West-East Traverse along the magmatism of the south Aegean volcanic arc in the light of volcanological, chemical and isotope data, in: M. Fytikas, G.E. Vougioukalakis (eds), The South Aegean Active Volcanic Arc, Present Knowledge and Future Perspectives, Developments in Volcanology, Elsevier, Amsterdam.
- Fytikas, M., Karydakis, G., Kavouridis, Th., Kolios, N., Vougioukalakis, G., (1990a), Geothermal research on Santorini, in: Hardy D.A., Keller J., Galanopoulos, V.P., Fleming, N.C., Druitt, T.H. (eds), Thera and the Aegean World III, The Thera Foundation, London, 2, 241-249.
- Fytikas, M., Kolios, N., Vougioukalakis, G.E., (1990b), Post-Minoan volcanic activity of the Santorini Volcano. Volcanic Hazard and Risk. Forecasting possibilities, in: Hardy D.A., Keller J., Galanopoulos,

V.P., Fleming N.C., Druitt, T.H. (eds), Thera and the Aegean World III, The Thera Foundation, London, 2, 183-198.

- Haugen, D. and Musser, S. (2012). Renewable energy. Detroit: Greenhaven Press.
- Healey, J. (2005). Renewable energy. Thirroul, N.S.W.: Spinney Press.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. and Jarvis, A., (2005), "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas", International Journal of Climatology, 25, pp. 1965-1978.
- IUSS Working Group WRB, (2006), "World Reference Base for Soil Resources 2006", World Soil Resources Reports, 103, Rome, pp. 1-132
- Karytsas, C., Kontoleonos, E. and Mendrinis, D., (2009). Electricity generation from low enthalpy geothermal fluids. Geothermal Energy in the spotlight, Thessaloniki, Greece, 11-22 December 2009.
- Kersten, M.S., (1949), "Thermal Properties of Soil", Bulletin 28, LII/21, Minneapolis, pp. 1-227.
- Lemmens, S., (2016). Cost engineering techniques and their applicability for cost estimation of organic Rankine cycle systems. Energies, 9(7), p.485.
- Mendrinis, D., Choropanitis, I., Polyzou, O., Karytsas, C., (2010), Exploring for geothermal resources in Greece, Geothermics, 39, 124-137.
- Morper-Busch, L., (2013), "Instructions for using the ThermoMap Map Viewer", Instruction Manual, <http://geoweb2.sbg.ac.at/thermomap/>, 11 p.

- Morper-Busch, L., (2013), "Instructions for using the ThermoMap vSGP Calculator", Instruction Manual, <http://geoweb2.sbg.ac.at/thermomap/>, 13 p.
- Mountrakis D, Pavlides S., Chatzipetros A, Meletlidis S, Tranos M, Viougioukalakis G and Kiliass A, (1998). Active deformation of Santorini. In: European Laboratory Volcanoes, Proceedings of the 2nd workshop on European Laboratory Volcanoes, eds: R. Casale, M. Fytikas, G. Sigvaldasson and G. Vougioukalakis, European Commission, Sci. Res. Development, p. 13-22.
- Museum of Vertebrate Zoology, University of California, Berkeley (2012): WorldClim, Monthly precipitation and mean and min temperature data for current conditions (~1950- 2000), Interpolated data of global weather stations, <http://www.worldclim.org/>.
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A. and Montanarella, L., (2012), "European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements", Land Use Policy, 29/2, Amsterdam, pp. 329-338 [11] European Soil Data Centre (ESDAC): European Commission - Joint Research Centre (JRC) - Institute for Environment and Sustainability (IES). ESDAC MapViewer: <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/wrb/>.
- Papastamatiou, J. (1958). Sur l'âge des calcaires cristallines del' ile de Thera (Santorin). Bull. Geol. Soc. Greece, 3: 104-113.
- Pavlides S., Mountrakis D., Fytikas M., Chatzipetros A., Christou O., Meletlidis S., Tranos M. and Vougioukalakis G. (1997). Neotectonic

map of Santorini, Volcanoes, Earthquakes and Archaeology, London, United Kingdom, 28-29 April 1997, abstract volume, 31-32.

- Perissoratis, C., (1995), The Santorini volcanic complex and its relation to the stratigraphy and structure of the Aegean arc, Greece, Marine Geology, 128, 37-58.
- Quoilin, S. and Lemort, V., (2009). Technological and economical survey of organic Rankine cycle systems. In European Conference on Economics and Management of Energy in Industry 2009, Vilamoura, Portugal, April 2009
- Riva G., Foppapedretti E., Carolis de C., Γιακουμέλος Ε, Μαλαματένιος Χ., Signanini P., Crema G., Fazio Di M., Gajdos J., Rucinsky R., (2005). "Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας". Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ). Αθήνα.
- Schreiber, D., (1973), "Entwurf einer Klimaeinteilung für landwirtschaftliche Belange", Bochumer Geo-graphische Arbeiten, 3, Bochum, pp.1-104.
- Skarpelis, N., Liati, A., (1990), The prevolcanic basement of Thera at Athinios: Metamorphism, Plutonism and Mineralization, in: Hardy D.A., Keller J., Galanopoulos, V.P., Fleming N.C., Druitt, T.H. (eds), Thera and the Aegean World III, The Thera Foundation, London, 2, 172-182.
- Tataris, A., (1964). The iron and manganese in the sands of Thera coasts, Bulletin of Greek Geological Society, 6(1), 65-83.
- Καρυδάκης Γ.Ι., (2005). "Γεωθερμική Ενέργεια". Εκδόσεις Αθλότυπο. Αθήνα.

- Τζάνη Α., (2010). "Σημειώσεις για την έρευνα γεωθερμικών πεδίων". Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Αθήνα.
- Φραγκογιάννης, Γ., (2011), «Αναλυτικός Σχεδιασμός και Πειραματική Ανάλυση Συστημάτων Αβαθούς Γεωθερμίας με Κατακόρυφους Γεωεναλλάκτες. Πειραματική Διερεύνηση του Θερμικού Δυναμικού του Υπεδάφους», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π., Αθήνα, σελ. 284.
- Φραγκογιάννης, Γ.Ι., Παπαθεοδώρου, Ν.Γ., Σταματάκη, Σ.Κ., και Ρόζος, Δ.Ε., (2010), «Πειραματικός Προσδιορισμός της Θερμικής Αγωγιμότητας Εδαφών - Συσχέτιση με Χαρακτηριστικές Ιδιότητες των Εδαφικών Υλικών», 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ 29/09-1/10/2010, Βόλος, σελ. 8.
- Φυτίκας Μ., (2014). "Γεωθερμία στην Ελλάδα :Δυναμικό, Εφαρμογές, Προοπτικές". ΕΕΠΠ. Σειρά Εισηγήσεων Βιοκλιματικού Σχεδιασμού "Γεωθερμία, η μεγάλη αγνοούμενη ΑΠΕ στην Ελλάδα". Αθήνα.
- Ψαρράς, Ν., (2012), «Γεωθερμία και Κλιματισμός - Θεωρητικοί και Πρακτικοί Κανόνες», Εκδόσεις SHARE Τεχνικές Εκδόσεις ΕΠΕ, Αθήνα, σελ. 187.