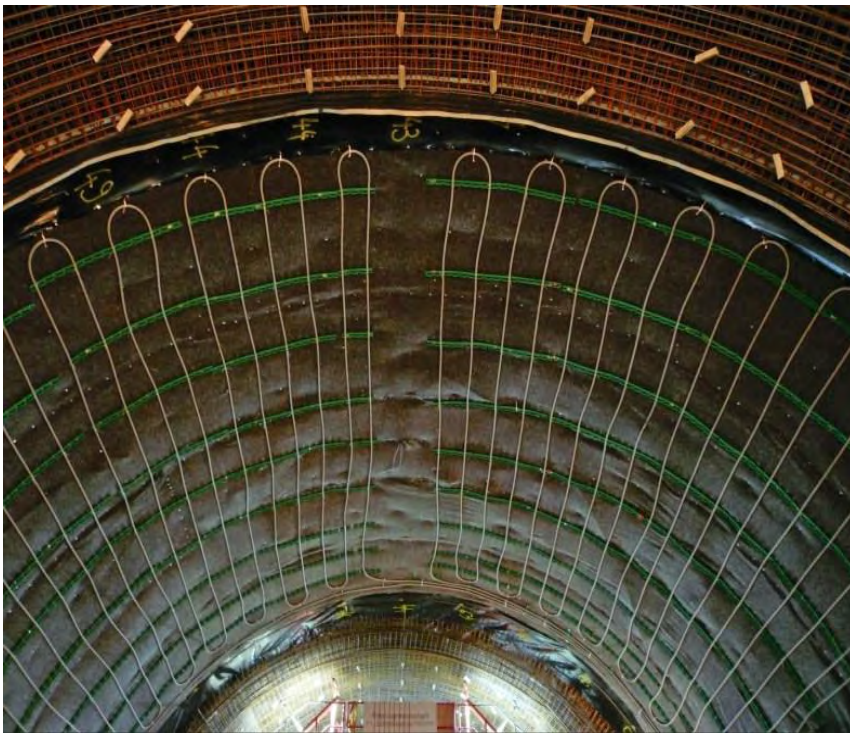




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΔΥΜΟ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

ΚΑΛΥΒΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΑΙΜΙΛΙΟΣ Μ. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:

ΚΑΛΥΒΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΑΙΜΙΛΙΟΣ Μ. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ D.E.A, Ph.D.

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ &

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΠΘ.

ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝΤΑΝ ΑΠΟ:

ΑΙΜΙΛΙΟΣ ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΦΡΑΙΜΙΔΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΟΥΛΥΞΕΝΗ ΚΑΛΛΙΟΓΛΟΥ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ

.....
ΑΙΜΙΛΙΟΣ ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ

.....
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΦΡΑΙΜΙΔΗΣ

.....
ΠΟΥΛΥΞΕΝΗ ΚΑΛΛΙΟΓΛΟΥ

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

Copyright © Καλύβας Ευάγγελος, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος "Ανάλυση και σχεδιασμός κατασκευών ενεργειακών υποδομών" του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018.

Πριν την παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας, των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω τους παράγοντες που συντέλεσαν στην εκπόνησή της.

Αρχικά, οφείλω ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον κ. Αιμίλιο Κωμοδρόμο για το ενδιαφέρον του, τη διάθεσή του, την υπομονή του και την πολύτιμη βοήθειά του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους φίλους και συναδέλφους μου, που ήταν κοντά μου σε οποιαδήποτε στιγμή χρειάστηκα τη βοήθειά ή τη στήριξή τους. Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, που μου προσέφερε την απαραίτητη ηθική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ABSTRACT

Using geothermal systems, geothermal energy can be used to heat and cool buildings. With these systems, taking advantage of the reusable geothermal energy, it is possible to reduce the initial cost of the building and furthermore to reduce the CO₂ emissions, fact that concern us every day more and more. Despite all the advantages that the usage of geothermal systems have, there are not yet well known and there for there are not used enough.

First of all, in this thesis we have made a brief mention in geothermal energy, geothermal classification and we have mentioned the ways that geothermal energy can be used. Then we focused in shallow geothermal energy, how can a geothermal system be installed around a tunnel and work efficiently. Furthermore, we have mentioned examples where geothermal systems have installed successfully, highlighting their performance and the need to be used more frequently.

Following the theoretical background of the thesis, we have carried out an analysis of a geothermal system that is installed in two neighbor tunnels, in order to understand the conductions of the geothermal systems, and how is the ground and the tunnel's lining influenced. The system was subjected to twelve months thermal flux injection and extraction simulating the heating and the cooling of the ground respectively.

After analyzing the model, our results conclude that the installation of a geothermal system in a tunnel lining, does not significantly affect the mechanical properties of underground soil and the tunnel itself, and does not affect remarkably the temperature change of the underground soil.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με τη εγκατάσταση των γεωθερμικών συστημάτων, χρησιμοποιείται η γεωθερμική ενέργεια για την θέρμανση και ψύξη των κτιρίων. Με την χρήση των συστημάτων αυτών και με την εκμετάλλευση της ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, είναι εφικτό να μειωθεί το ενεργειακό κόστος της κατασκευής και επίσης να περιοριστεί η εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, κάτι που μας απασχολεί όλο και περισσότερο. Παρόλα τα οφέλη της εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας, τα γεωθερμικά συστήματα δεν χρησιμοποιούνται όσο θα έπρεπε, καθώς η χρήση τους και τα πλεονεκτήματά τους δεν είναι τόσο διαδεδομένα.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, αρχικά έγινε μια σύντομη αναφορά στη γεωθερμική ενέργεια, στη γεωθερμική ταξινόμηση και στο τρόπο αξιοποίησης της ανανεώσιμης αυτής ενέργειας. Έπειτα, επικεντρωθήκαμε στην αβαθή γεωθερμία, στις σήραγγες και στο πως μπορεί ένα γεωθερμικό σύστημα να εγκατασταθεί, να λειτουργήσει και να αποδώσει την ενέργεια που απορροφά από το έδαφος. Επίσης, δόθηκαν επιτυχημένα παραδείγματα εφαρμογών γεωθερμικών συστημάτων, που αποδεικνύουν την απόδοσή τους και καταδεικνύουν την αναγκαιότητα να χρησιμοποιηθούν σε μεγαλύτερο ποσοστό.

Μετά το θεωρητικό κομμάτι, έγινε μία ανάλυση ενός γεωθερμικού συστήματος που είναι εγκατεστημένο σε δύο γειτονικές σήραγγες, έτσι ώστε να μελετηθεί κατά πόσο η λειτουργία του μπορεί να επηρεάσει το έδαφος και το περίβλημα των ίδιων των σηράγγων. Η ανάλυση έγινε για χρονική διάρκεια ενός έτους, όπου το σύστημα πέρασε και από τη φάση εισαγωγής και απαγωγής θερμότητας.

Μετά την ανάλυση του μοντέλου, τα αποτελέσματα μας δίνουν το συμπέρασμα ότι η εγκατάσταση ενός γεωθερμικού συστήματος στο περίβλημα μιας σήραγγας, δεν επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους αλλά και της ίδιας της σήραγγας και δεν επηρεάζει την αλλαγή της θερμοκρασίας του ευρύτερου περιβάλλοντος χώρου.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ.....	1
1.1 Η έννοια της γεωθερμίας	1
1.2 Η γεωθερμία ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας	2
1.3 Οι κυριότερες εφαρμογές της γεωθερμίας	4
1.4 Η γεωθερμία στην Ελλάδα και στο εξωτερικό.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	10
2.1 Κατηγορίες γεωθερμικών πεδίων	10
2.2 Βασικά μέρη ενός γεωθερμικού συστήματος.....	12
2.3 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων	13
2.3.1 Υδροθερμικά συστήματα	14
2.3.2 Αβαθής γεωθερμία.....	14
2.3.3 Προχωρημένα γεωθερμικά συστήματα.....	14
2.3.4 Γεωπεπιεσμένα γεωθερμικά συστήματα.....	14
2.3.5 Μαγματικά γεωθερμικά συστήματα	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	18
3.1 Γεωεναλλάκτες	18
3.1.1 Γεωεναλλάκτες ανοιχτού κυκλώματος	18
3.1.2 Γεωεναλλάκτες κλειστού κυκλώματος.....	19
3.1.3 Παράγοντες λειτουργίας γεωεναλλακτών	20
3.2 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας	21
3.3 Συστήματα διανομής θερμικών-ψυκτικών φορτίων	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	26
4.1 Εισαγωγή.....	26
4.2 Σχεδιασμός σηράγγων	27
4.3 Συστήματα γεωθερμίας σε σήραγγες	30
4.4 Παραδείγματα τοποθέτησης γεωθερμικών συστημάτων σε σήραγγες.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΛΑΙΣΙΟ- ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗΣ	36
5.1 Εισαγωγή.....	36
5.2 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας	36

5.2.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή	36
5.2.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή	37
5.2.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	38
5.3 Μεταφορά θερμότητας στους εδαφικούς σχηματισμούς	38
5.4 Θερμική αγωγιμότητα εδαφικών σχηματισμών και σκυροδέματος.....	39
5.5 Μεταφορά θερμότητας στο κέλυφος της σήραγγας.....	40
5.6 Θερμική διαστολή των εδαφικών σχηματισμών	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΦΑΡΓΟΓΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΕ ΣΗΡΡΑΓΑ	43
6.1 Δεδομένα- Περιγραφή εφαρμογής- Προσομοίωση	43
6.1.1 Προσομοίωση.....	43
6.1.2 Ιδιότητες εδάφους - σήραγγας	44
6.1.3 Συνοριακές και αρχικές συνθήκες του αριθμητικού μοντέλου	45
6.2 Στάδια εφαρμογής θερμικής φόρτισης	47
6.3 Αποτελέσματα πολυσταδιακής αριθμητικής επίλυσης.....	48
6.4 Αποτίμηση επιπτώσεων στη μηχανικής συμπεριφορά της σήραγγας	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

1.1 Η έννοια της γεωθερμίας

Γεωθερμία ή Γεωθερμική ενέργεια ονομάζουμε τη φυσική θερμική ενέργεια της Γης που ρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια, είτε μέσω ηφαιστειακών εκροών, είτε μέσω ρηγμάτων του υπεδάφους, από τα οποία αναβλύζουν ατμοί και θερμό νερό. Μεταφέρεται στην επιφάνεια με θερμική επαγωγή και με την είσοδο στον φλοιό της γης λειωμένου μάγματος από τα βαθύτερα στρώματά της. Συνήθως όμως, ο όρος «γεωθερμική ενέργεια» χρησιμοποιείται σήμερα για να δηλώσει εκείνο το τμήμα της γήινης θερμότητας που βρίσκεται αποθηκευμένο με τη μορφή θερμού νερού, ατμού ή θερμών πετρωμάτων σε ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες, δηλαδή που μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο.

Η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνεται με το βάθος του από την επιφάνειά του. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος από την επιφάνεια της γης είναι γνωστός με τον όρο γεωθερμική βαθμίδα. Η τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας κυμαίνεται από 5 μέχρι 70°C/km, με μέση τιμή τους 30°C/km ή 1°C ανά 30cm. Περιοχές στις οποίες η τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας είναι υψηλή, είτε εξαιτίας ηφαιστειότητας σε πρόσφατη γεωλογική περίοδο είτε λόγω ανόδου ζεστού νερού από μεγάλα βάθη μέσω ρηγμάτων, η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας είναι εξαιρετικά συμφέρουσα.

Με βάση το είδος των γεωθερμικών πόρων, η γεωθερμική ενέργεια διακρίνεται σε πέντε κατηγορίες γεωθερμικών συστημάτων: τα υδροθερμικά συστήματα, την αβαθή γεωθερμία (earth energy), τα προχωρημένα συστήματα (enhanced geothermal systems), τα γεωπεπιεσμένα συστήματα (geopressured systems) και τα μαγματικά συστήματα (magma systems). Οι πέντε αυτές κατηγορίες γεωθερμικών συστημάτων παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω.

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 100m από την επιφάνεια της γης ή με την κυκλοφορία υπόγειων νερών ή και νερών από τις λίμνες, τα ποτάμια και τη θάλασσα.

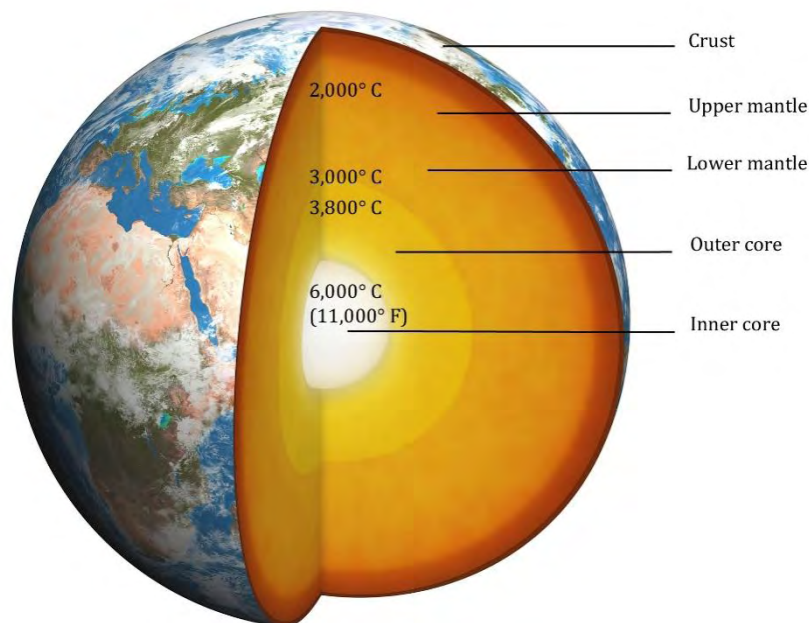
Πιο συγκεκριμένα, στα μικρότερα βάθη, δηλαδή από 6 έως 100 μέτρα, η θερμοκρασία του ρευστού και γενικά του εδάφους είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους και ισούται περίπου με την ετήσια μέση θερμοκρασία του αέρα κάθε περιοχής. Η τιμή της θερμοκρασίας αυτής είναι περίπου 18-20°C. Η διατήρηση της θερμοκρασίας σταθερής, οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την

διάρκεια του καλοκαιριού ο ήλιος ζεσταίνει την επιφάνεια του εδάφους, το οποίο απορροφά στο βάθος την θερμότητα που του παρέχεται, ενώ στη διάρκεια του χειμώνα η ίδια επιφάνεια ψύχεται και αφαιρεί θερμότητα από εκείνη που είχε συσσωρευτεί στο υπέδαφος. Αυτό όμως γίνεται πολύ αργά και με μεγάλη διαφορά φάσης, έτσι ώστε ενώ στην επιφάνεια του εδάφους η θερμοκρασία παρουσιάζει σημαντική διακύμανση, όσο προχωρούμε σε βάθος η διακύμανση αυτή στη διάρκεια ενός έτους γίνεται μικρότερη και ουσιαστικά κάτω από τα 5 μ. σχεδόν εξαφανίζεται. Έτσι αποκαθίσταται μια κατάσταση ισορροπίας στο επίπεδο των 18-20°C. Στις βόρειες χώρες, όπως στη Σουηδία και στον Καναδά, αυτή η ισορροπία αποκαθίσταται σε χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας.

Τέλος, όσον αφορά τις περιοχές της γης όπου υπάρχουν γεωθερμικά ρευστά σε ικανοποιητική ποσότητα, θερμοκρασία και μικρό σχετικά βάθος, λέγονται γεωθερμικά πεδία. Αυτά, 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 μέση 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.

1.2 Η γεωθερμία ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια, είναι η ενέργεια που προέρχεται από τη θερμότητα του εσωτερικού της Γης και αυτή η θερμότητα είναι απεριόριστη. Σύμφωνα με μελέτες η θερμοκρασία στο εσωτερικό της Γης κυμαίνεται από 1000 έως 3000°C στη περιοχή του μανδύα και μεγαλύτερη από 4000°C στον πυρήνα. Ως γεωθερμική ενέργεια, εκτός από την θερμική ενέργεια που απορροφάτε από τον πυρήνα της γης, είναι και η ενέργεια που αποθηκεύεται στο έδαφος από την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή είναι και η έννοια της αβαθής γεωθερμίας. Η αβαθής γεωθερμία είναι αυτή που εκμεταλλεύεται περισσότερο για καθώς λόγω του μικρού βάθους είναι η πιο εύκολα αξιοποιήσιμη. Η θερμοκρασία στα βάθη αυτά, φυσικά είναι πολύ πιο μικρά από τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα μεγαλύτερα βάθη και στο εύρος της βαθειάς γεωθερμίας. Η θερμοκρασία των εδαφών σε μικρά βάθη είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και η τιμή της διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Το βάθος από το οποίο και κάτω η θερμοκρασία σταθεροποιείται είναι περίπου τα 6 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Συνήθης τιμή, κυρίως στον ελλαδικό χώρο, είναι 18°C με 20°C. Σε βορειότερες χώρες όπως η Σουηδία και ο Καναδάς η θερμοκρασία είναι αρκετά χαμηλότερη.



Σχήμα 1. Μέση θερμοκρασία στρώσεων του φλοιού της Γης

Υπάρχουν αρκετά και σημαντικά πλεονεκτήματα της γεωθερμίας ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Καταρχάς, δίνει τη δυνατότητα για συνεχή παροχή ενέργειας, με υψηλό συντελεστή λειτουργίας (>90°C) και μικρό λειτουργικό κόστος, αν και το κόστος παγίων είναι σημαντικά αυξημένο σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, αντισταθμίζοντας κατά αυτό τον τρόπο το υψηλό αρχικά κόστος. Βασικό, επίσης, πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως αναπτύσσεται σε πεδινές περιοχές με άριστες συνθήκες αξιοποίησης στη σύγχρονη γεωργία, αγροτοβιομηχανία, υδατοκαλλιέργειες, σε αστικές και βιομηχανικές χρήσεις. Παρόλο που οι γεωθερμικοί πόροι δεν είναι ομοιόμορφα διασπαρμένοι, οι αντλίες γεωθερμικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν παντού. Επιπλέον, οι εκπομπές αερίων στο περιβάλλον, από την αξιοποίηση της γεωθερμίας είναι μηδενικές έως ελάχιστες και η απαίτηση επιφάνειας γης είναι μικρή. Ακόμη, η αξιοποίηση της γεωθερμίας συμβάλλει στην επίτευξη των στόχων της Λευκής Βίβλου της Ε.Ε. και του Πρωτοκόλλου του Κιότο. Η γεωθερμία, σε επίπεδο χώρας, ως πηγή ενέργειας, μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης, με τον περιορισμό των εισαγωγών ορυκτών καυσίμων. Και φυσικά σε τοπικό επίπεδο, μπορεί να συμβάλει στην οικονομική ανάπτυξη της εκάστοτε γεωθερμικής περιοχής.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την αβαθή γεωθερμία που είναι αντικείμενο της παρούσας εργασίας, υπάρχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Είναι καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον

- Είναι διαθέσιμη σε οποιοδήποτε σημείο,
- Μπορεί να προσφέρει θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης,
- Είναι οικονομική σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες της τάξης του 70% – 75%
- Εξασφαλίζει πλήρη απεξάρτηση από το πετρέλαιο
- Σε συνδυασμό με μία μικρή εγκατάσταση φωτοβολταϊκών είναι δυνατόν να παράγεται όχι μόνο ψύξη και θέρμανση, αλλά να υπάρχει και οικονομικό κέρδος λόγω του πολύ υψηλού βαθμού απόδοσης των αντλιών θερμότητας
- Συμβάλλει στην αειφόρο ανάπτυξη
- Αναβαθμίζει ένα κτίριο σε ενεργειακή κλάση A+
- Η συντήρηση εκμηδενίζεται λόγω του μικρού αριθμού μηχανικών μερών της αντλίας θερμότητας
- Πρόκειται για μια αξιόπιστη τεχνολογία
- Οι εγκαταστάσεις της δεν είναι εξωτερικές και εμφανείς
- Ο χρόνος εγκατάστασης του μηχανοστασίου είναι πολύ μικρός με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο εμπορεύσιμος χώρος ενός ακινήτου.

Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθούν, ωστόσο, και ορισμένα μειονεκτήματα που αφορούν γενικά την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας, κυρίως όταν γίνεται προσπάθεια εκμετάλλευσης γεωθερμικών ρευστών που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη. Από την αξιοποίηση της, λοιπόν, είναι πιθανό να επηρεαστεί η χλωρίδα και η πανίδα της εκάστοτε γεωθερμικής περιοχής. Προκύπτουν θέματα όπως: σχηματισμός επικαθίσεων (καθαλατώσεις ή αποθέσεις) σε σχεδόν κάθε επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το γεωθερμικό ρευστό, διαβρώσεις μεταλλικών επιφανειών και περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, που σχετίζονται με τον καθαρισμό και τη διάθεση των γεωθερμικών αποβλήτων.

Όλα τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα δεν προκύπτουν κατά την εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμίας η χρήση της οποίας έχει ελάχιστα. Κυριότερο μειονέκτημα της, μπορεί να θεωρηθεί το μεγάλο κόστος εγκατάστασης, γεγονός βέβαια που αποσβένεται άμεσα τα πρώτα χρόνια λειτουργίας και αξιοποίησής της.

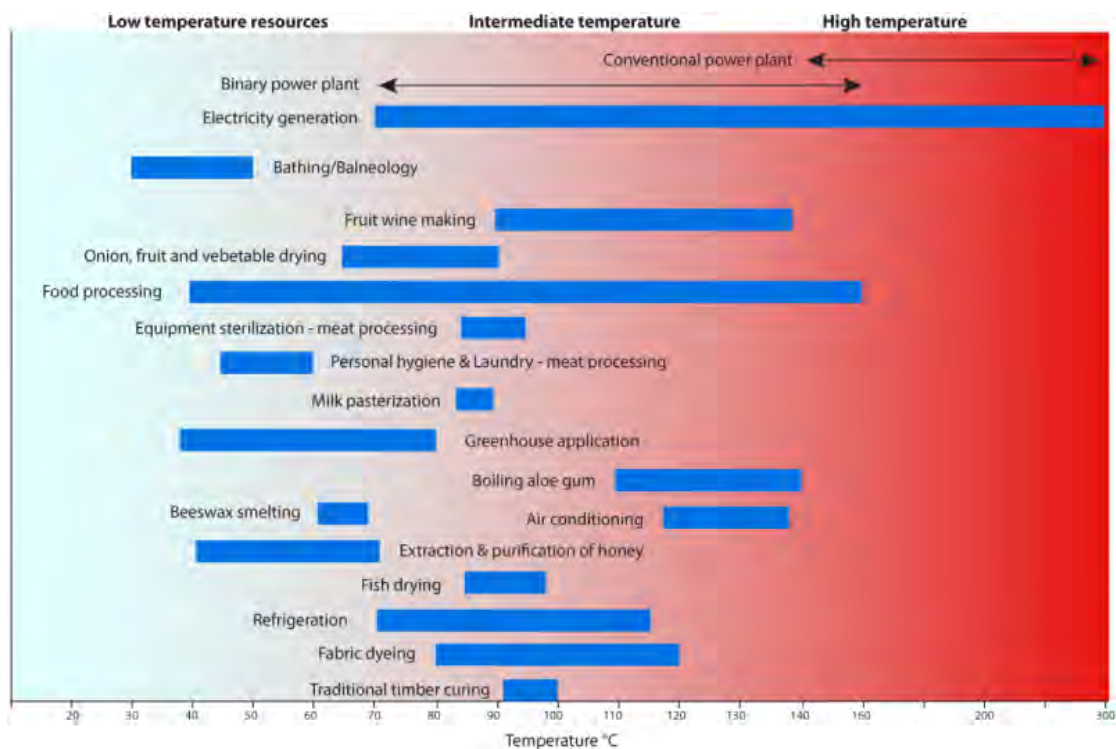
1.3 Οι κυριότερες εφαρμογές της γεωθερμίας

Οι δυνατότητες αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας ποικίλει και έχει άμεση σχέση με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού υγρού. Οι εφαρμογές της, λοιπόν, περιλαμβάνουν:

- Ηλεκτροπαραγωγή
- Συμπαράγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας

- Θέρμανση χώρων (με καλοριφέρ $\theta > 60^{\circ}\text{C}$, με αερόθερμα $\theta > 40^{\circ}\text{C}$, με ενδοδαπέδιο σύστημα $\theta > 25^{\circ}\text{C}$)
- Θέρμανση οικισμών (Η θερμική ενέργεια που δεσμεύεται από τη γεωθερμική πηγή διοχετεύεται προς τους χρήστες με τη βοήθεια ενός συστήματος αγωγών -τηλεθέρμανση)
- Ψύξη και κλιματισμό (Με αντλίες θερμότητας απορρόφησης για $\theta > 60^{\circ}\text{C}$ ή με υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας για $\theta > 30^{\circ}\text{C}$)
- Θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών (επειδή τα φυτά αναπτύσσονται γρηγορότερα και γίνονται μεγαλύτερα με τη θερμότητα- $\theta > 25^{\circ}\text{C}$ - ή και για αντιπαγετική προστασία)
- Ιχθυοκαλλιέργειες ($\theta > 15^{\circ}\text{C}$, επειδή τα ψάρια χρειάζονται ορισμένη θερμοκρασία για την ανάπτυξή τους)
- Βιομηχανικές εφαρμογές (όπως αφαλάτωση βιομηχανικού νερού - $\theta > 60^{\circ}\text{C}$ -, ξήρανση αγροτικών προϊόντων κτλ.)
- Θερμά λουτρά (για $\theta = 25\text{-}40^{\circ}\text{C}$)

Παρακάτω, φαίνεται ένα διάγραμμα χρήσης του γεωθερμικού υγρού ανάλογα με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 2. Χρήση γεωθερμικών ρευστών

1.4 Η γεωθερμία στην Ελλάδα και στο εξωτερικό

Ο ελλαδικός χώρος, εξαιτίας των γεωλογικών συνθηκών, διαθέτει σημαντικές γεωθερμικές πηγές και σε αρκετά οικονομικά βάθη, τόσο ώστε να κάνουν τη γεωθερμική εκμετάλλευση της περιοχής αρκετά οικονομική. Εξαιτίας της έντονης τεκτονικής και μαγματικής δραστηριότητας, έχουμε αυξημένη ροή θερμότητας που δημιουργεί εκτεταμένες θερμικές ανωμαλίες, με μέγιστες τιμές γεωθερμικής βαθμίδας που πολλές φορές ξεπερνούν τους 100°C/km. Η ενέργεια αυτή, κάτω από κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες μπορεί να θερμάνει υπόγειους ταμειυτήρες ρευστών σε θερμοκρασίες μέχρι 100°C σε σχετικά μικρό βάθος. Γενικά στον ελλαδικό χώρο, μετά από έρευνες που έχουν γίνει στο υπέδαφός του, έχει προκύψει ότι διαθέτει σημαντικές γεωθερμικές πηγές και των τριών κατηγοριών, χαμηλής μέσης και υψηλής ενθαλπίας, και σε αρκετά οικονομικά βάθη της τάξεως των 100 έως 1500 μέτρων.

Η έρευνα για αναζήτηση γεωθερμικής ενέργειας άρχισε ουσιαστικά το 1971 με βασικό φορέα τον ΙΓΜΕ και μέχρι το 1979 αφορούσε μόνο περιοχές υψηλής ενθαλπίας. Η ΔΕΗ σαν άμεσα ενδιαφερόμενη για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, ανέλαβε τις γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας και την ανάπτυξη πεδίων, ενισχύοντας οικονομικά την έρευνα σε πεδία όπου πιθανόν να υπήρχαν γεωθερμικά ρευστά.

Στην Ελλάδα υπάρχουν αρκετές περιοχές όπου υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας. Κάποιες από αυτές, είναι τα ηφαιστειακά νησιά του Αιγαίου, Μήλος και Νίσυρος, όπου έχουν γίνει γεωτρήσεις και έχουν μετρηθεί θερμοκρασίες μέχρι και περίπου 350°C σε βάθη από 1000 έως 1500 μέτρα. Επίσης, άλλες περιοχές εντοπίζονται στη Θράκη και στη Μακεδονία, όπου εκεί η γεωθερμία προσφέρεται για θέρμανση, θερμοκήπια κ.α. καθώς οι θερμοκρασία των υπόγειων νερών είναι χαμηλότερη, κοντά στους 70°C.

Η εκμετάλλευση τη γεωθερμικής ενέργειας εντοπίζεται κυρίως στον τομέα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, ο οποίος δεν αποτελεί ουσιαστικά γεωθερμία, καθώς δεν χρησιμοποιεί γεωθερμικά υγρά. Αντίθετα, η γεωθερμία υψηλής ενθαλπίας έχει να επιδείξει μηδενικές εφαρμογές στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρότι πρόκειται για μια ήπια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με τον υψηλότερο συντελεστή χρήσης/ λειτουργίας σε σχέση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται η χιονισμένη κεντρική πλατεία στο Καρπενήσι, στην οποία ξεχωρίζει ένα πεντακάθαρο μονοπάτι. Πρόκειται για ένα παράδειγμα εφαρμογής της γεωθερμίας στην Ελλάδα, η οποία χρησιμοποιήθηκε από τον δήμο στο πλαίσιο της ανάπλασης του κέντρου της πόλης. Κάτω, λοιπόν, από το καινούργιο πεζοδρόμιο, σε μήκος 942 μέτρων (και πλάτος 60

εκατοστών) τοποθετήθηκε ένα σύστημα γεωθερμίας, με σκοπό μια διαδρομή στο κέντρο της πόλης, να μην παγώνει ποτέ και να είναι ασφαλής για τους πεζούς.

Η λειτουργία του συστήματος είναι απλή. Η ενεργειακή «πηγή» του έργου βρίσκεται σε παρακείμενο πάρκινγκ. Εκεί πραγματοποιήθηκαν 18 γεωτρήσεις σε βάθος 100 μέτρων, όπου το νερό έχει μια σταθερή θερμοκρασία 12-14 βαθμών Κελσίου. Σε κάθε γεώτρηση τοποθετήθηκε ένα διπλό κύκλωμα εναλλάκτη, δηλαδή ένα κλειστό σύστημα σωλήνων, που αντλούν και επιστρέφουν το νερό στο εσωτερικό της γης. Μέσω ενός δικτύου το νερό μεταφέρεται σε μια δεξαμενή, όπου με τη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και ηλιακών συλλεκτών θερμαίνεται περαιτέρω στους 30 βαθμούς Κελσίου. Και στη συνέχεια, με μονωμένους αγωγούς διακλαδίζεται κάτω από μια διαδρομή στο κέντρο της πόλης, θερμαίνοντας το πεζοδρόμιο. Το σύστημα ενεργοποιείται αυτόματα: είτε όταν η θερμοκρασία στο έδαφος πέσει κάτω από τους 4 βαθμούς, ή όταν η θερμοκρασία του αέρα πέσει κάτω από τους 7 βαθμούς Κελσίου. Σύμφωνα με τον σχεδιασμό, το έργο θα λειτουργεί αντίστροφα το καλοκαίρι. Όχι, με το να δροσίζει το πεζοδρόμιο, αλλά «επαναφορτίζοντας» το υπέδαφος με το θερμικό δυναμικό που αφαιρεί το χειμώνα.



Σχήμα 3. Θερμαινόμενο πεζοδρόμιο στο Καρπενήσι

Ένα ακόμα παράδειγμα εφαρμογής της γεωθερμίας στην Ελλάδα, αφορά την περιοχή της Χρυσούπολης Καβάλας. Το Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων του ΕΘΙΑΓΕ σε συνεργασία με την

εταιρία Φερσίδου – Λαδά & ΣΙΑ ΕΕ., "FRIGOLAND", μελέτησε, σχεδίασε, εγκατέστησε και παρακολουθεί συστηματικά τη λειτουργία συστημάτων ΓΑΘ (Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας) σε δύο φυτείες λευκού σπαραγγιού έκτασης 10 στρ. η κάθε μία, στην περιοχή Χρυσούπολης Καβάλας. Πρόκειται για ένα φιλόδοξο εγχείρημα, συνολικής θερμικής ισχύος 550 KWth περίπου, το οποίο βασίζεται σε σύστημα δύο ΓΑΘ νερού-νερού τοποθετημένων σε σειρά με αναμενόμενο (συνολικό) συντελεστή απόδοσης 1:5,5. Η πηγή άντλησης θερμικού φορτίου είναι υδρογεώτρηση, που κατασκευάστηκε σε βάθος 100 μ. και παρέχει 50 m³/h νερού με θερμοκρασία 19,5°C. Η θερμοκρασία αυτή θα υποβιβάζεται σε δύο στάδια συνολικά κατά 8-9°C, έτσι ώστε να προσλαμβάνονται από την αντλία 400.000-450.000 Kcal/h (465-520 KWth). Η απορροφούμενη από τις δύο ΓΑΘ ηλεκτρική ισχύς προδιαγράφεται να είναι ίση με 90-100 KWe, η οποία μετατρέπόμενη σε θερμική προστίθεται στο σύστημα με αποτέλεσμα η συνολική αποδιδόμενη θερμική ισχύς στο σπαραγγεώνα να προσεγγίζει τα 550-600 KWth.

Μετά από πέντε συνεχή έτη παραγωγικής διαδικασίας καταδεικνύεται ότι μια "νοικοκυρεμένη" θερμαινόμενη φυτεία σπαραγγιού μπορεί να έχει έξτρα-αποδόσεις της τάξης των 12.000 € ανά 10 στρ. Με μέσο κόστος εγκατάστασης περί τις 2.500 €/στρ. και ετήσιο λειτουργικό κόστος περί τα 250-300 €/στρ. (αφορά κύρια στην κατανάλωση ρεύματος), απαιτούνται περί τα δύο παραγωγικά έτη για να αποσβεστεί κατά 100% η επένδυση. Το τελευταίο χωρίς καμία επιχορήγηση αν και τέτοιου είδους καινοτόμα έργα εντάσσονται εύκολα στα σχέδια βελτίωσης με ποσοστά επιχορήγησης της τάξης του 35-40%. Η παραπάνω τεχνογνωσία μπορεί πολύ εύκολα να εφαρμοστεί στη θέρμανση και πρώιμη παραγωγή αγροτικών προϊόντων με αντίστοιχες θερμικές απαιτήσεις μ' αυτές του σπαραγγιού όπως: το μαρούλι, το μπρόκολο, η φράουλα, το φασολάκι, το καρπούζι και άλλα. Πρώιμες παραγωγές για προϊόντα όπως: το μαρούλι, το φασολάκι και το καρπούζι υπό χαμηλή κάλυψη έχουν δοκιμαστεί ήδη με επιτυχία στο γεωθερμικό πεδίο Νέου Ερασμίου Ξάνθης.

Όσο αφορά το εξωτερικό, η πρώτη εφαρμογή γεωθερμικής ενέργειας έγινε στα μέσα του 18^{ου} αιώνα, στο Λαρνταρέλλο της Ιταλίας. Εκεί χρησιμοποιούνταν φυσικός ατμός για να εξατμίσει τα νερά που περιείχαν βορικό οξύ αλλά και για να θερμαίνει διάφορα κτίρια. Στη συγκεκριμένη πόλη, το 1911, για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε γεωθερμική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Μεγάλη αύξηση στην αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας έχει παρουσιαστεί από το 1995 και έπειτα, όπου είχαν αναφερθεί γεωθερμικές εφαρμογές σε 28 χώρες, ενώ το 2005 οι χώρες αυξήθηκαν σε 72. Η εγκατεστημένη ισχύς των γεωθερμικών μονάδων μέσης και χαμηλής

ενθαλπίας στο 2007 ανήλθε στα 28,3 GW, προσαυξημένη δηλαδή κατά 75% σε σχέση με το 2000, και αντίστοιχα η χρήση ενέργειας στο ίδιο χρονικό διάστημα αυξήθηκε κατά 43%.

Όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικές εφαρμογές, γίνεται σε 24 χώρες με τη συνολική ισχύ να ξεπερνάει τα 12GW, ενώ εκτιμάται να φτάσει έως και τα 17,6GW μέχρι το 2020. Το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως από γεωθερμικές εφαρμογές το κατέχουν οι Ηνωμένες Πολιτείες, η τιμή του οποίου είναι περίπου 28%. Αξίζει να αναφερθεί ότι σπουδαία είναι η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας από την Ισλανδία, όπου καλύπτει ένα πολύ μεγάλο μέρος των αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση.

Η εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμική ενέργειας έχει βρει εφαρμογή και στο κέλυφος των υπόγειων σηράγγων όπου με τη βοήθειά της εξασφαλίζεται η ψύξη και η θέρμανση της ίδιας της σήραγγας και γειτονικών κτιρίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Κατηγορίες γεωθερμικών πεδίων

Σε περιοχές με σχετικά πρόσφατη ηφαιστειότητα παρουσιάζεται το φαινόμενο διάπυρο υλικό από το εσωτερικό της Γης να έχει κινηθεί προς την επιφάνεια και το υπέδαφος να έχει θερμανθεί. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται σε τυχόν υδροφόρους σχηματισμούς της περιοχής. Τα νερά θερμαίνονται και κυκλοφορούν μέσα στα πετρώματα, φτάνοντας σε πολλές περιπτώσεις μέχρι την επιφάνεια, αφού προηγουμένως έχουν εμπλουτιστεί από άλατα των πετρωμάτων. Κάποιες άλλες φορές τα νερά εγκλωβίζονται σε μη υδατοπερατά πετρώματα και αποκτούν θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 350°C.

Περιοχές της γης στις οποίες υπάρχουν γεωθερμικά ρευστά σε ικανοποιητική ποσότητα και θερμοκρασία σε μικρό σχετικό βάθος ονομάζονται γεωθερμικά πεδία. Οι προϋποθέσεις για την ύπαρξη ενός γεωθερμικού πεδίου είναι: η πηγή θερμότητας, η τροφοδοσία με νερό, ο γεωθερμικός ταμιευτήρας και το κάλυμμα. Τα γεωθερμικά πεδία χωρίζονται σε τρεις διαφορετικούς τύπους ανάλογα με τη θερμοκρασία του ρευστού. Έτσι λοιπόν, έχουμε τα πεδία χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας.

Συγγραφέας	(a)	(b)	(c)	(d)	(ε)
Χαμηλής θερμ.	< 90°C	< 125	< 100	=150	≥25 & <90
Μέσης θερμ.	90-150	125 -225	100 -200	-	-
Υψηλής θερμ.	> 150	> 225	> 200	> 150	≥90

(a) Muffler and Cataldi (1978).
 (b) Hochstein (1990).
 (c) Benderitter and Cormy (1990).
 (d) Nicholson (1993).
 (ε) ελληνική νομοθεσία

Σχήμα 4. Ταξινόμηση γεωθερμικών πεδίων

Ένα γεωθερμικό πεδίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως χαμηλής ενθαλπίας όταν το ρευστό παρουσιάζει θερμοκρασίες από 25°C έως 100°C. Στα πεδία αυτά, απουσιάζει η μαγματική πηγή θερμότητας. Το υπόγειο νερό, ουσιαστικά, θερμαίνεται λόγω της φυσιολογικής αύξησης της θερμοκρασίας εξαιτίας του βάθους. Η θερμική ανωμαλία που σημειώνεται είναι πολύ μικρή έως

ανύπαρκτη. Τα γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας συναντώνται σε εκτεταμένες περιοχές ανά τον κόσμο, ιδιαίτερα μάλιστα, σε μεγάλες ιζηματογενείς λεκάνες και ζώνες ενεργούς τεκτονικής. Χρήση τέτοιων ρευστών γίνεται για τη θέρμανση κατοικιών σε αγροτικές ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις, θερμοκηπίων, ιχθυοκαλλιεργειών κ.α. Η ιδιαίτερα γενικευμένη χρήση τους οφείλεται σε επιτυχείς εγκαταστάσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε αρκετές χώρες, όπως η Ουγγαρία, η Ισλανδία, η Ρωσία.

Όσο αφορά τα γεωθερμικά πεδία μέσης ενθαλπίας, τα ρευστά που συναντώνται σε αυτά χαρακτηρίζονται από θερμοκρασίες μεταξύ 100°C και 150°C. Αυτές οι τιμές θερμοκρασίας δεν κρίνονται επαρκείς ώστε να δίνεται η δυνατότητα άμεσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Προκύπτει, δηλαδή, ανάγκη για μεσολάβηση πτητικών ρευστών, όπως για παράδειγμα η αμμωνία ή το ισοβουτάνιο κ.α. Βέβαια, παρά τις όποιες τεχνικές δυσκολίες, υπάρχουν εγκαταστάσεις αυτού του τύπου στην Ρωσία, στις Η.Π.Α., στην Κίνα και έχουν στόχο την θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων.

Τέλος, τα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας είναι υπέρθερμα πεδία στα οποία η θερμοκρασία του ρευστού ξεπερνά τους 180°C, σε βάθος έως και 3 km. Ένα κέντρο που βρίσκεται σε σχετικά μικρό βάθος μέσα στον φλοιό της Γης κι έχει υψηλή θερμοκρασία αποτελεί τη βάση όλων των μοντέλων των γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας. Τα πεδία τέτοιου τύπου, προσφέρονται ιδανικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε σχετικά μεγάλες μονάδες, με τη διαδικασία του κύκλου Rankin.

Ανάλογα με το είδος του παραγόμενου προϊόντος στην επιφάνεια τα γεωθερμικά πεδία κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Σήμερα εμπορικά εκμεταλλεύσιμοι τύποι:

- Πεδία ζεστού νερού.
- Πεδία υγρού ατμού.
- Πεδία ξηρού ατμού.

Αξίζει να αναφερθεί η ύπαρξη τριών ακόμα κατηγοριών, που με τα σημερινά δεδομένα τα πεδία αυτά δεν είναι εκμεταλλεύσιμα, παρουσιάζουν όμως επιστημονικό και τεχνικό, στο μέλλον λογικά και οικονομικό ενδιαφέρον. Μελλοντικά εκμεταλλεύσιμοι τύποι:

- Γεωπιεσμένα συστήματα.
- Μαγματικοί θάλαμοι.
- Θερμά ξηρά πετρώματα (Hot Dry Rock).

Όσο αφορά την Ελλάδα, μέσα στα χρόνια αναζήτησης, έρευνας και μελέτης που πέρασαν, ήρθε στο φως το σύνολο των γνωστών γεωθερμικών πεδίων της χώρας, τόσο υψηλής

θερμοκρασίας (κατάλληλα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας), όσο και χαμηλής θερμοκρασίας (κατάλληλα για άμεση χρήση της θερμικής ενέργειας). Σήμερα αξιοποιούνται μόνο τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας σε μεγάλη ποικιλία χρήσεων, όπως σε θερμοκήπια λαχανικών και ανθέων, σε παραγωγή του φύκου *Spirulina*, στην ξήρανση αγροτικών προϊόντων (λιαστή τομάτα), σε ιχθυοκαλλιέργειες, θέρμανση κτιρίων και ιαματικά λουτρά. Υπάρχουν, βέβαια, μεγάλα περιθώρια παραπέρα αξιοποίησής τους.



Σχήμα 5. Γεωθερμικά πεδία στον ελλαδικό χώρο

2.2 Βασικά μέρη ενός γεωθερμικού συστήματος

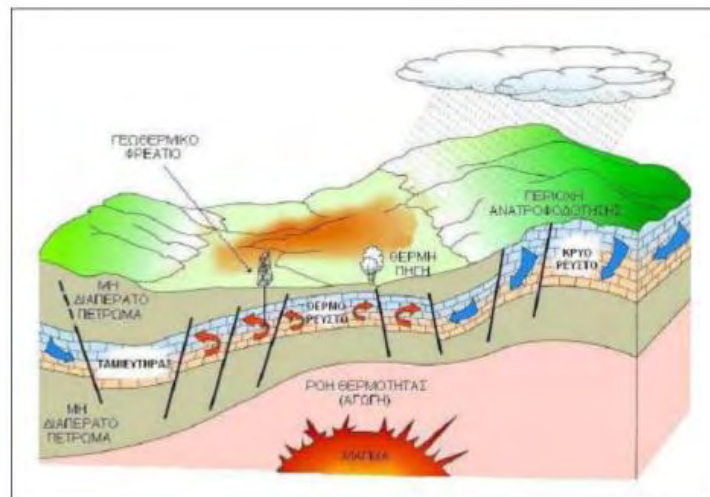
Με τον όρο γεωθερμικό σύστημα, εννοούμε περιοχή στην οποία η θερμική ενέργεια της Γης είναι επαρκώς συγκεντρωμένη, ώστε να δημιουργεί μια εκμεταλλεύσιμη ενεργειακή πηγή. Τα γεωθερμικά συστήματα, όπως θα δούμε παρακάτω, ταξινομούνται βάσει των γεωλογικών, υδρολογικών και θερμικών χαρακτηριστικών τους.

Η συγκέντρωση της θερμότητας από τα πετρώματα, όπου βρίσκεται διάχυτη, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός ενδιάμεσου ρευστού (νερό, ατμός), το οποίο να την συλλέγει και να την μεταφέρει, δημιουργώντας υπό κατάλληλες συνθήκες έναν γεωθερμικό ταμειυτήρα ή συλλέκτη.

Η κυκλοφορία του ρευστού είναι δυνατή λόγω των διαφορών πυκνότητας μεταξύ των ψυχρότερων ανωτέρων μαζών του ενδιάμεσου ρευστού, που κατεισδύουν προς το συλλέκτη, και των θερμότερων μαζών του γεωθερμικού ρευστού, που ανέρχονται προς την επιφάνεια λόγω άνωσης. Θεωρείται δεδομένο ότι η κυκλοφορία και συγκέντρωση του γεωθερμικού ρευστού διευκολύνεται, όταν εκτός από υψηλό πορώδες, υπάρχει και υψηλή διαπερατότητα (υδραυλική αγωγιμότητα) των πετρωμάτων του ταμιευτήρα.

Σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές, τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από θετικές γεωθερμικές ανωμαλίες, η δημιουργία των οποίων εξαρτάται από διαφορετικούς συνδυασμούς γεωλογικών και υδρολογικών παραγόντων, τοπικού ή περιφερειακού χαρακτήρα. Οι σπουδαιότερες γεωθερμικές ανωμαλίες συνδέονται με πρόσφατη μαγματική ή/και ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Στην παρακάτω εικόνα, αναπαρίσταται το ιδεατό γεωθερμικό σύστημα. Στην απλοποιημένη αυτή αναπαράσταση, η πηγή θερμότητας αντιπροσωπεύεται από πρόσφατη μαγματική διείσδυση. Διακρίνονται οι ενεργές διαρρήξεις, οι οποίες ελέγχουν την κυκλοφορία και εκφόρτιση των γεωθερμικών ρευστών. Τα ερυθρά βέλη σημειώνουν τις περιοχές εμφάνισης και κυκλοφορίας των γεωθερμικών ρευστών. Τα μπλε βέλη σημειώνουν τις οδούς τροφοδοσίας του συστήματος με νερό, το οποίο συνήθως έχει μετεωρική προέλευση (βρόχινο) και κατεισδύει από τοπογραφικά υψηλότερες περιοχές.



Σχήμα 6. Σχηματική αναπαράσταση ενός ιδανικού γεωθερμικού συστήματος

2.3 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση διάφορα κριτήρια. Κάποια από αυτά τα κριτήρια είναι: το είδος των γεωθερμικών πόρων, ο τύπος και η θερμοκρασία των

ρευστών, ο τύπος του πετρώματος που φιλοξενεί τα ρευστά, το είδος της εστίας θερμότητας και το εάν κυκλοφορούν ή όχι ρευστά στο γεωθερμικό ταμιευτήρα.

Με βάση το είδος των γεωθερμικών πόρων, η γεωθερμική ενέργεια διακρίνεται σε πέντε κατηγορίες γεωθερμικών συστημάτων: τα υδροθερμικά συστήματα, την αβαθή γεωθερμία (earth energy), τα προχωρημένα συστήματα (enhanced geothermal systems), τα γεωπεπιεσμένα συστήματα (geopressured systems) και τα μαγματικά συστήματα (magma systems). Οι πέντε αυτές κατηγορίες γεωθερμικών συστημάτων παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω.

2.3.1 Υδροθερμικά συστήματα

Τα υδροθερμικά συστήματα είναι, στην ουσία, τα φυσικά υπόγεια θερμά ρευστά που βρίσκονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες, θερμαίνονται από μία εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζονται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα συστήματα αυτά ταυτίζονται με το σύνολο σχεδόν των γεωθερμικών πεδίων, καθώς είναι γεγονός πως αποτελούν ουσιαστικά τα μόνα συστήματα που αξιοποιούνται σήμερα.

2.3.2 Αβαθής γεωθερμία

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 100m από την επιφάνεια της γης ή με την κυκλοφορία υπόγειων νερών ή και νερών από τις λίμνες, τα ποτάμια και τη θάλασσα.

2.3.3 Προχωρημένα γεωθερμικά συστήματα

Τα λεγόμενα προχωρημένα γεωθερμικά συστήματα αναφέρονται στα θερμά πετρώματα, από τα οποία μπορεί να ανακτηθεί ενέργεια και βρίσκονται σε βάθος από 2km έως 10km. Στα συστήματα αυτά χρησιμοποιείται νερό, το οποίο διοχετεύεται από την επιφάνεια, με τη βοήθεια κατάλληλων γεωτρήσεων και ανακτάται αρκετά θερμότερο με τη μορφή νερού και πάλι ή ατμού μέσω άλλων γεωτρήσεων.

2.3.4 Γεωπεπιεσμένα γεωθερμικά συστήματα

Τα γεωπεπιεσμένα γεωθερμικά συστήματα αποτελούνται από ρευστά, τα οποία είναι εγκλεισμένα σε μεγάλο βάθος και περιορισμένα από μη περατά πετρώματα. Επιπλέον, τα ρευστά αυτού του είδους χαρακτηρίζονται από πίεση που υπερβαίνει την υδροστατική.

2.3.5 Μαγματικά γεωθερμικά συστήματα

Τα μαγματικά γεωθερμικά συστήματα είναι αυτά τα οποία αναφέρονται στην απόληψη θερμότητας μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων σε μαγματικές διεισδύσεις, οι οποίες βρίσκονται σε σχετικά μικρό βάθος.

Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με ρυθμό $0,04-0,06\text{W/m}^2$
- Με ρεύματα μεταφοράς που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα σύνορα των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.

Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία αφορά κυρίως την αβαθή γεωθερμία, στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούμε εκτενέστερα σε αυτήν. Είναι απλό να κατανοήσουμε την ύπαρξη της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας. Είναι γνωστό ότι τα πηγάδια έχουν ζεστό νερό το χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι το ίδιο νερό είναι δροσερό. Βέβαια, το νερό δεν αλλάζει θερμοκρασία, όμως στο βάθος που ρέει, η θερμοκρασία της γης είναι περίπου σταθερή ανεξάρτητα αν είναι καλοκαίρι ή χειμώνας. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι σε βάθος από 6 μ. έως 100 μ. η θερμοκρασία παραμένει σταθερή και είναι περίπου ίση με την μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα για τον συγκεκριμένο τόπο. Στην χώρα μας αυτό σημαίνει ότι σε τέτοιο βάθος η θερμοκρασία βρίσκεται ανάμεσα στους $18-20^\circ\text{C}$.

Η διατήρηση της θερμοκρασίας αυτής οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια του καλοκαιριού ο ήλιος ζεσταίνει την επιφάνεια του εδάφους, το οποίο απορροφά στο βάθος την θερμότητα που του παρέχεται, ενώ στη διάρκεια του χειμώνα η ίδια επιφάνεια ψύχεται και αφαιρεί θερμότητα από εκείνη που είχε συσσωρευτεί στο υπέδαφος. Αυτό όμως γίνεται πολύ αργά και με μεγάλη διαφορά φάσης, έτσι ώστε ενώ στην επιφάνεια του εδάφους η θερμοκρασία παρουσιάζει σημαντική διακύμανση, όσο προχωρούμε σε βάθος η διακύμανση αυτή στη διάρκεια ενός έτους γίνεται μικρότερη και ουσιαστικά κάτω από τα 5 μ. σχεδόν εξαφανίζεται. Έτσι αποκαθίσταται μια κατάσταση ισορροπίας στο επίπεδο των $18-20^\circ\text{C}$. Σε βόρειες χώρες, όπως η Σουηδία ή ο Καναδάς αυτή η ισορροπία αποκαθίσταται σε χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας.

Λόγω της πολύ μεγάλης θερμοχωρητικότητας του υπεδάφους η αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση κατοικιών και γενικά χώρων. Η δυνατότητα αυτή έχει εξαιρετικό ενδιαφέρον, γιατί εξοικονομείται έτσι σημαντική ποσότητα καυσίμου για την θέρμανση κατοικημένων χώρων προς όφελος της οικονομίας, αλλά και του περιβάλλοντος, αφού όπως ξέρουμε η χρήση του

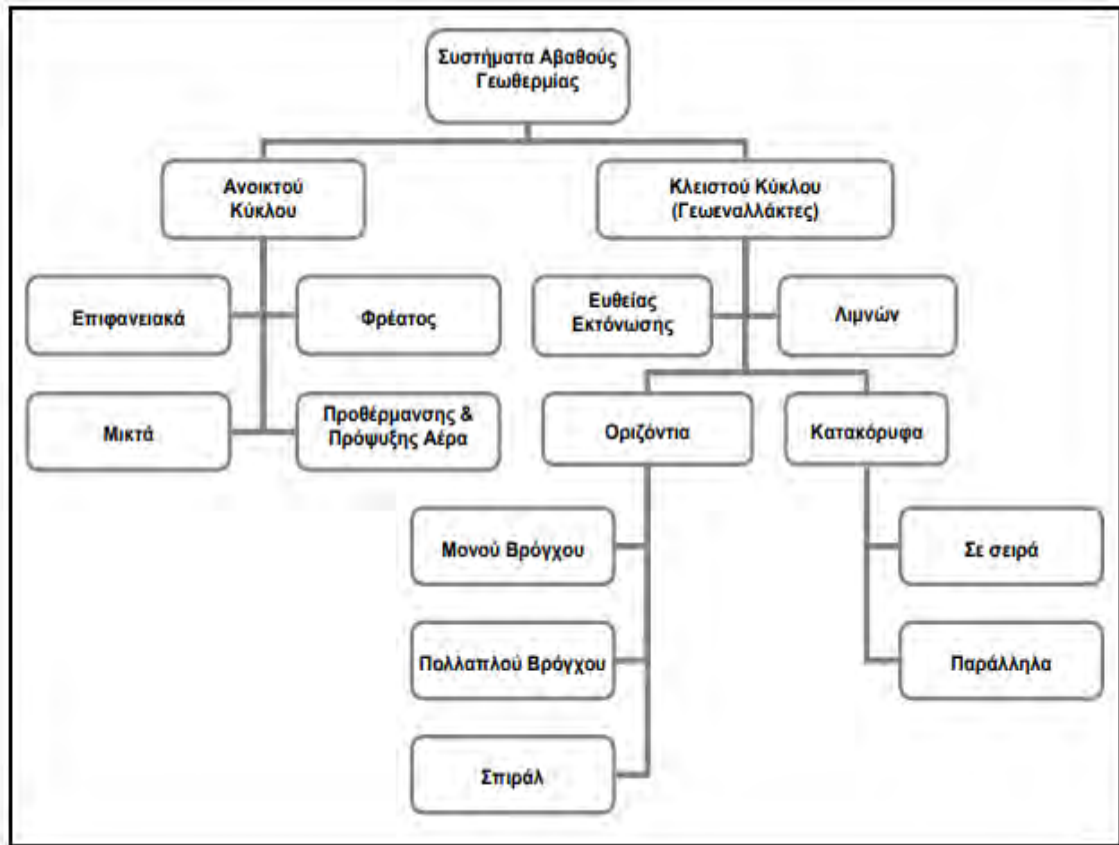
οποιοδήποτε καυσίμου οδηγεί αναπόφευκτα και σε ατμοσφαιρική ρύπανση. Πολλές χώρες ανάμεσά τους οι Σκανδιναβικές, ο Καναδάς και οι Ηνωμένες Πολιτείες αξιοποιούν τη δυνατότητα αυτή για θέρμανση τον χειμώνα. Βέβαια, στη διάρκεια του καλοκαιριού θα πρέπει να φροντίσει κανείς για την επαναφόρτιση του ταμιευτήρα αυτού θερμότητας, δηλαδή του υπεδάφους, ώστε κατά την επόμενη θερμαντική περίοδο να ξεκινήσει η θέρμανση από το ίδιο θερμοκρασιακό επίπεδο. Η επαναφόρτιση αυτή γίνεται σχετικά εύκολα. Στην εύκρατο ζώνη η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας έχει ακόμη μεγαλύτερη σημασία, διότι παρέχει τη δυνατότητα θέρμανσης τον χειμώνα και ψύξης το καλοκαίρι. Εφαρμογές, λοιπόν, στην ελληνική επικράτεια παρουσιάζουν το πλεονέκτημα αξιοποίησής της σε όλη τη διάρκεια του έτους, και επειδή περίπου όση ενέργεια καταναλώνεται στην περίοδο της θέρμανσης αποδίδεται κατά την περίοδο της ψύξης, δεν υπάρχει ανάγκη αποκατάστασης ισορροπίας του αβαθούς γεωθερμικού πεδίου. Για έναν παραπάνω λόγο λοιπόν, προσφέρεται η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας στην χώρα μας σε σχέση με τις βόρειες χώρες που έχουν σήμερα ήδη σχετική πρωτοπορία.

Τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας αποτελούν εκείνες τις ολοκληρωμένες τεχνικές εφαρμογές, στις οποίες οι Γ.Α.Θ (Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας), μέσω ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος γεωεναλλακτών, μεταφέρουν θερμότητα από και προς το υπέδαφος με σκοπό την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών κτιρίων. Η βασική αρχή λειτουργίας των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε, η αξιοποίηση της φυσικής θερμοκρασίας των σχηματισμών του υπεδάφους – έως 400 m – ή της θερμοκρασίας του νερού του υδροφόρου οριζοντα, ως πηγής θερμότητας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και ως αποθήκης θερμότητας κατά τη διάρκεια της ψύξης ενός κτιρίου (Sanner 2000 & 2001; Rahud, 2002; Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004). Διακρίνονται δυο βασικές κατηγορίες συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας:

- κλειστού βρόχου: η θερμότητα του υπεδάφους μεταφέρεται μέσω ρευστού που κυκλοφορεί εντός οριζόντιων ή κατακόρυφων γεωεναλλακτών

- ανοικτού βρόχου: αξιοποιείται η θερμοκρασία του νερού του υδροφόρου οριζοντα.

Παρακάτω φαίνεται η σχηματική παράσταση των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας, τα οποία χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, με τέσσερις υποκατηγορίες το καθένα:



Σχήμα 7. Σχηματική παράσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Γεωεναλλάκτες

Τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας, στην οποία αναφερθήκαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελούν ολοκληρωμένες τεχνικές εφαρμογές, στις οποίες οι αντλίες θερμότητας, μέσω ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος γεωεναλλακτών, μεταφέρουν θερμότητα από και προς το υπέδαφος με σκοπό τόσο την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών κατοικιών, μεγάλων δημοσίων και ιδιωτικών κτιρίων, όσο και άλλων ειδικών εφαρμογών, όπως οι υδατοκαλλιέργειες, η τηλεθέρμανση, η θέρμανση θερμοκηπίων κ.α. Ιδιαίτερα τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η χρήση των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας παρουσιάζει ραγδαία αύξηση σε όλες σχεδόν τις χώρες του κόσμου, γεγονός που οφείλεται στην οικονομική και ενεργειακά αποδοτική λειτουργία τους, αλλά και στα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν απ' αυτήν.

Για να χρησιμοποιηθεί η θερμική ενέργεια του εδάφους, προκειμένου να πετύχουμε τη θέρμανση ή ψύξη ενός αντικειμένου, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η σύζευξη αυτών των δυο. Αυτό πετυχαίνετε με τους λεγόμενους γεωεναλλάκτες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Οι γεωεναλλάκτες είναι συστήματα τα οποία είναι τοποθετημένα στο υπέδαφος και μέσα στα οποία κυκλοφορεί νερό, ψυκτικό υγρό ή αέρας, δημιουργώντας ένα κύκλωμα ή βρόγχο. Ανάλογα τον τύπο της σύνδεσης του γεωεναλλάκτη με το θερμική ενέργεια του εδάφους, οι γεωεναλλάκτες χωρίζονται σε κλειστού και ανοικτού βρόγχου ή κυκλώματος.

3.1.1 Γεωεναλλάκτες ανοικτού κυκλώματος

Οι γεωεναλλάκτες ανοικτού κυκλώματος εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που είναι αποθηκευμένη σε υπόγειους ταμιευτήρες ή στον επιφανειακό υδροφόρο ορίζοντα. Όταν χρησιμοποιούνται υπόγειοι ταμιευτήρες, απαιτούνται τουλάχιστον δύο γεωτρήσεις για την εισαγωγή και εξαγωγή νερού από το σύστημα. Στην αντίθετη περίπτωση, αρκούν δύο σωλήνες για εισαγωγή και εξαγωγή νερού, κάτι που το κάνει και πιο απλοϊκό. Είναι προφανές ότι για να λειτουργήσει ένα ανοιχτό γεωθερμικό σύστημα, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η υψηλή υπόγεια ή επιφανειακή υδροφορία.

Η λειτουργία ενός ανοικτού συστήματος περιλαμβάνει την άντληση νερού από τον γειτονικό υδροφορέα (υπόγειο ή επιφανειακό), το οποίο διέρχεται από τον γεωεναλλάκτη στην αντλία θερμότητας όπου και αποφορτίζεται και έπειτα απομακρύνεται στο έδαφος. Η

απομάκρυνση του νερού μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, είτε επιφανειακά σε περιοχές όπως λίμνες ή ποτάμια, είτε υπόγεια σε μια συγκεκριμένη περιοχή αποστράγγισης, επαναφορτίζοντας ή όχι τον ίδιο φορέα από όπου έγινε αρχικά η άντλησή του. Επίσης, εξαιτίας της διαφορετικής ποιότητας νερού που μπορεί υπάρχει ανά περιοχή, καλό είναι να χρησιμοποιούνται και ενδιάμεσοι εναλλάκτες για την προστασία της αντλίας.

Με την εγκατάσταση ενός ανοιχτού συστήματος, αξίζει να σημειωθεί ότι δεν προκύπτει καμία περιβαλλοντική ζημιά, δεδομένου ότι το νερό που αντλείται, επιστρέφεται ξανά στον υδροφόρο. Η μόνη διαφορά είναι ότι υπάρχει μια μικρή διαφορά θερμοκρασίας του νερού άντλησης με το νερό που επιστρέφεται ξανά στο περιβάλλον.

3.1.2 Γεωεναλλάκτες κλειστού κυκλώματος

Οι γεωεναλλάκτες αυτού του τύπου, εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στο έδαφος. Σε αυτά τα συστήματα δεν έχουμε γεωτρήσεις ή άντληση νερού από τον επιφανειακό υδροφόρο ορίζοντα, αλλά έχουμε γεωεναλλάκτες που τοποθετούνται ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους σε οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη. Η διάταξή τους εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους της περιοχής αλλά και από τη διαθεσιμότητα του περιβάλλοντα χώρου σε κάθε περίπτωση.

Τα οριζόντια κλειστά συστήματα εγκαθίστανται όταν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χώρος τοποθέτησης, αλλά και αν το έδαφος είναι κατάλληλο για να γίνει εκσκαφή υπόγειων τάφρων. Το βάθος εκσκαφής είναι μικρό, περίπου 2 μέτρα κάτω από την επιφάνεια, και αφού τοποθετηθούν οι αγωγοί γίνεται επιχωμάτωση των υπόγειων τάφρων με προσοχή για να μην προκληθεί κάποια ζημιά, συνήθως με αμμοχάλικο. Η έκταση που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος, είναι περίπου 150 με 300 m² ανά τόνο θερμικής/ ψυκτικής ικανότητας, ενώ αποτελείται από αγωγούς συνολικού μήκους περίπου 200 m.

Στη περίπτωση όπου ο χώρος είναι περιορισμένος ή στη περίπτωση που η μορφολογία του εδάφους δεν βοηθάει στην εκσκαφή μεγάλων τάφρων, οι αγωγοί τοποθετούνται σε κατακόρυφη διάταξη. Σε αυτή τη περίπτωση πραγματοποιούνται γεωτρήσεις από 50 έως 150 μέτρα όπου και τοποθετούνται οι αγωγοί. Το σύστημα αυτό είναι αρκετά πιο ακριβό, όμως είναι πιο αποτελεσματικό, καθώς η θερμοκρασία του εδάφους όσο μεγαλώνει το βάθος, είναι και πιο σταθερή. Η απαίτηση σε μήκος αγωγού ενός τέτοιου συστήματος είναι από 250 έως 200 m ανά τόνο θερμικού φορτίου, ενώ ταυτόχρονα απαιτούνται μία με δύο γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις πρέπει να απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον 5 μέτρα προκειμένου να μην υπάρχει θερμική αγωγιμότητα μεταξύ τους.

3.1.3 Παράγοντες λειτουργίας γεωεναλλακτών

Στη σωστή λειτουργία ενός συστήματος γεωεναλλακτών, συμβάλλουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη μελέτη και πριν την εγκατάστασή του. Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους είναι ο εγκιβωτισμός τους, καθώς παίζει μεγάλο ρόλο στο να δράσει η γεώτρηση αποδοτικά ως πηγή θερμότητας. Όπου ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας είναι κοντά στην επιφάνεια, τότε ο εγκιβωτισμός της γεώτρησης μπορεί να γίνει με χαλίκι ή με κόκκο μικρής διαμέτρου ή αμμοχάλικο, το οποίο επιτρέπει την κυκλοφορία του υπόγειου νερού γύρω από τον αγωγό. Στη περίπτωση που το έδαφος είναι ξηρό ή παρατηρείται μεγάλη διακύμανση του υδροφόρου ορίζοντα ανά εποχή ή ακόμα όταν οι τοπικοί κανονισμοί απαιτούν μόνιμο σφράγισμα γεωτρήσεων, τότε ο εγκιβωτισμός των αγωγών θα πρέπει να γίνεται με θερμικά ενισχυμένο ένεμα.

Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει το είδος του ρέοντος υγρού, αν δηλαδή είναι απλά νερό ή έχει χρησιμοποιηθεί κάποια αντιψυκτική προστασία. Αυτό κρίνεται από το είδος του εδάφους, το είδος της διάταξης αλλά και τη γεωγραφική θέση του συστήματος. Το απλό νερό προτιμάται καθώς δεν προκαλεί κανένα περιβαλλοντικό κίνδυνο αλλά, όταν κριθεί απαραίτητο, υπάρχουν δυο είδη αντιψυκτικών υγρών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Αυτά είναι η γλυκόλη προπυλενίου και η μεθυλική αλκοόλη, τα οποία αναμιγνύονται με το νερό και δημιουργούν το κατάλληλο μίγμα ανάλογα με τις απαιτήσεις που μπορεί να υπάρχουν. Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι αγωγοί είναι πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, το οποίο προσφέρει εγγύηση χρήσης πάνω από 200 χρόνια.

Σημαντικότερο παράγοντα στη λειτουργία των γεωεναλλακτών αποτελούν τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ του γεωεναλλάκτη και του εδάφους προέρχεται κυρίως από θερμική αγωγιμότητα και κατά ένα βαθμό από τη μετανάστευση της υγρασίας. Συνεπώς, η μετάδοση θερμότητας εξαρτάται απόλυτα από το είδος του εδάφους και από τον βαθμό υγρασίας.

Προκειμένου, λοιπόν, να γίνει μια εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος γεωεναλλακτών, θα πρέπει να είναι γνωστή η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους. Σύμφωνα με το νόμο της θερμότητας, ο ρυθμός μετάδοσης ή αλλιώς η ροή θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Όπου

k: θερμική αγωγιμότητα

A: το εμβαδόν της διατομής μέσω της οποίας έχουμε αγωγή

$\Delta T/\Delta x$: η μεταβολή θερμοκρασίας σε απόσταση Δx κατά τη φορά αγωγής

Προκειμένου να υπολογιστούν οι θερμικές ιδιότητες του εδάφους απαιτείται ενδελεχής έρευνα. Είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η περιεκτικότητα σε άμμο ή άργιλο, η ξηρή πυκνότητα και η περιεκτικότητα του εξεταζόμενου εδάφους σε υγρασία

3.2 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

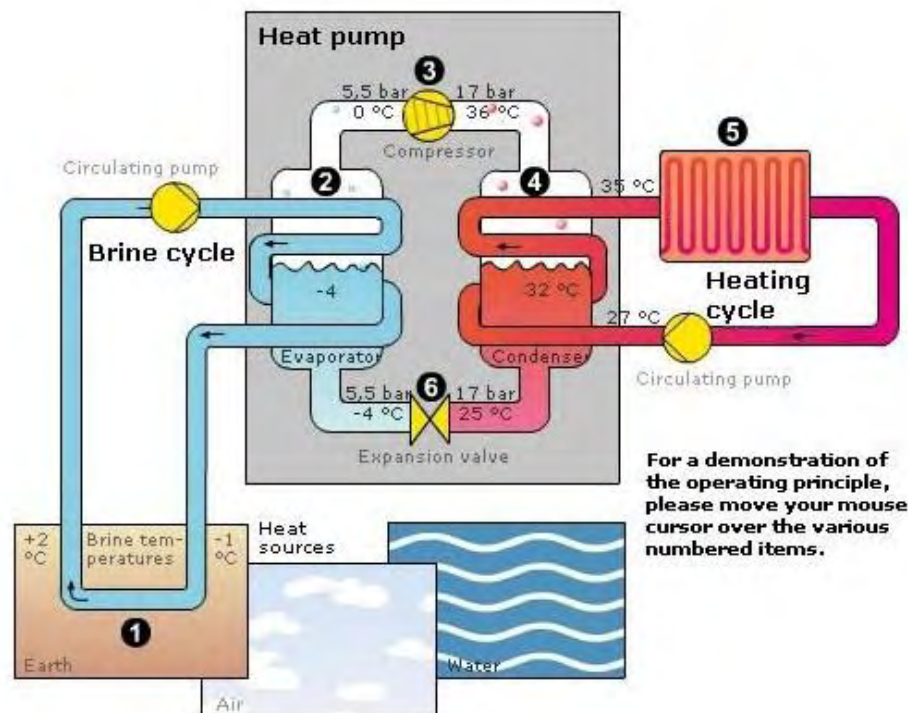
Η φυσική ροή θερμότητας, είναι από σώματα υψηλής θερμοκρασίας σε σώματα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Μια γεωθερμική αντλία θερμότητας, αυτό που επιτυγχάνει είναι να αντιστρέφει αυτή τη ροή και να μεταφέρει θερμότητα από σώματα χαμηλότερης θερμοκρασίας σε σώματα υψηλότερης θερμοκρασίας. Οι αντλίες θερμότητας μπορούν να παράσχουν θερμότητα αποτελεσματικά και οικονομικά με χαμηλές εκπομπές αερίων μη φιλικών προς το περιβάλλον. Η έννοια των αντλιών θερμότητας έχει αναγνωριστεί από τη δεκαετία του 1800.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας την ηλιακή ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο έδαφος. Η λειτουργία της βασίζεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του εδάφους μετά από κάποιο βάθος παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια του χρόνου. Έτσι για παράδειγμα το χειμώνα, αντλεί θερμότητα από το έδαφος και τη διοχετεύει σε ένα κτίριο για να θερμανθεί, ενώ το καλοκαίρι αντλεί θερμότητά από το κτίριο και τη διοχετεύει στο έδαφος πετυχαίνοντας έτσι την ψύξη του. Έτσι λοιπόν, αυτές οι μηχανές δεν παράγουν θερμότητα, όπως άλλα συστήματα θέρμανσης ή ψύξης, αλλά μεταφέρουν τη θερμότητα από ένα σώμα σε ένα άλλο, είτε είναι από σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε σώμα χαμηλής θερμοκρασίας ή το αντίθετο. Το ηλεκτρικό ρεύμα δηλαδή, δεν χρησιμοποιείται ως πηγή για τη δημιουργία θέρμανσης ή ψύξης και γι' αυτό η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας είναι πολύ μικρή, σε σχέση με το αποτέλεσμα που παίρνουμε σε ψύξη ή θέρμανση. Για παράδειγμα, αν αντλήσουμε 3kWh ενέργειας από το περιβάλλον συν 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρειαστούμε για τη μετατροπή θα έχουμε συνολικά 4kWh ωφέλιμης θερμικής ενέργειας.

Οι περισσότερες αντλίες θερμότητας θεωρούνται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (με βαθμό αποδοτικότητας πάνω από 3,3) καθώς αντλούν τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας που απαιτούν από το περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά, τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης καίνε ορυκτά καύσιμα, όπως πετρέλαιο ή φυσικό αέριο που επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον και ο βαθμός απόδοσης τους δεν μπορεί να ξεπεράσει την μονάδα (100%).

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας είναι πολυάριθμα και πολύ σημαντικά. Κάποια από αυτά παρατίθενται παρακάτω:

- Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας παρέχεται δωρεάν από το περιβάλλον (70-80%)
- Έχουμε μηδενικές εκπομπές CO₂ και καταργείται η χρήση πετρελαίου
- Δεν απαιτείται δεξαμενή καυσίμου και καμινάδα
- Έχουμε μεγάλη εξοικονόμηση χώρου καθώς απαιτείται μόνο μια αντλία μικρών διαστάσεων και για θέρμανση και για ψύξη
- Οι γεωεναλλάκτες δεν απαιτούν καμία συντήρηση ενώ η αντλία θερμότητας χρειάζεται απλά έναν περιοδικό έλεγχο
- Η λειτουργία της είναι αθόρυβη και δεν χρειάζεται πυροπροστασία
- Το σύστημα της αντλίας θερμότητας μπορεί να συνδυαστεί μέσω του boiler και με άλλες μορφές ενέργειας όπως για παράδειγμα με ηλιακούς συλλέκτες.



Σχήμα 8. Αρχή λειτουργίας αντλίας θερμότητας

Υπάρχουν διαφορετικά είδη αντλιών θερμότητας που το καθένα χρησιμοποιείται ανάλογα τη περίπτωση για καλύτερη απόδοση. Τα είδη αυτά είναι:

- Αντλίες θερμότητας αέρα -αέρα (αερόψυκτες)

Ο αέρας αποτελεί την πηγή θερμότητας και χρησιμοποιείται πάλι αέρας για να διοχετευθεί η ψύξη ή η θέρμανση. Με τον τρόπο αυτόν λειτουργούν τα γνωστά σε όλους μας κλιματιστικά τοίχου.

- Αντλίες θερμότητας αέρα -νερού (αερόψυκτες)
Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο αέρας ως πηγή θερμότητας και το νερό χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς.
- Αντλίες θερμότητας νερού (για γεωεναλλάκτη) -αέρα
Η θερμότητα αντλείται από το νερό και ο αέρας αποτελεί το μέσο μεταφοράς.
- Αντλίες θερμότητας νερού (για γεωεναλλάκτη) -νερού
Στην τελευταία κατηγορία η θερμότητα αντλείται από το νερό και το νερό αποτελεί το μέσο μεταφοράς της.

Η λειτουργία των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας είναι απλή. Αρχικά η θερμική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο έδαφος εξάγεται και μεταφέρεται στον εξατμιστή. Εκεί, σε μια συνθήκη υγρού αερίου όπου το υγρό στοιχείο κυριαρχεί, η θερμότητα που μεταφέρεται προκαλεί στο ψυκτικό υγρό άνοδο της θερμοκρασίας του, να βράσει και να γίνει ατμός χαμηλής πίεσης. Ο ατμός στην συνέχεια εισέρχεται σε έναν ηλεκτροκίνητο συμπιεστή όπου ο η πίεση αυξάνεται προκαλώντας ένα αέριο υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Ο ατμός υψηλής θερμοκρασίας εισέρχεται στον συμπυκνωτή όπου επειδή η θερμοκρασίας του είναι υψηλότερη από αυτή του χώρου προκαλεί μεταφορά θερμότητας από το ψυκτικό μέσο στο κτίριο. Το ψυκτικό υγρό ψύχεται και συμπυκνώνεται αποδίδοντας νερό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας το οποίο έπειτα περνάει μέσα από μια βαλβίδα εκτόνωσης που μειώνει την πίεση με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας. Το ψυκτικό υγρό εισέρχεται ξανά στον εξατμιστή όπου και αρχίζει ένας καινούριος κύκλος.

Πολλά συστήματα περιλαμβάνουν ένα τρόπο ψύξης που αφαιρεί τη θερμική ενέργεια από έναν χώρο και την διοχετεύει στο έδαφος. Κατά τη λειτουργία ψύξης, χρησιμοποιείται μια βαλβίδα αναστροφής για τη κίνηση του υγρού στην αντίθετη κατεύθυνση του κύκλου. Οι γεωεναλλάκτες θερμότητας αντιστρέφονται με τον εναλλάκτη θερμότητας του εδάφους να γίνεται ο συμπυκνωτής και του κτιρίου ο εξατμιστής. Ορισμένα συστήματα περιλαμβάνουν έναν απορροφητήρα ο οποίος είναι βοηθητικός εναλλάκτης θερμότητας που τροφοδοτεί θερμότητα σε μια δεξαμενή ζεστού νερού. Βρίσκεται στην έξοδο του συμπιεστή και μεταφέρει θερμότητα από το συμπιεσμένο ατμό στο νερό που κυκλοφορεί μέσω μια δεξαμενής ζεστού νερού, μειώνοντας ή εξαλείφοντας την ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση του νερού. Οι αντλίες θερμότητας παράγουν περισσότερη θερμότητα εξόδου από τη θερμότητα εισόδου, πράγμα που μεταφράζεται σε συντελεστή απόδοσης πάνω από 100%. Οι τιμές του συντελεστή απόδοσης που των αντλιών θερμότητας (COP), κυμαίνεται από 3 έως 6, με τη τιμή του να εξαρτάται από τις

ρυθμίσεις τη σύνδεσης, τα μεγέθη του συστήματος, τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους, τα βάθη της εγκατάστασης, το τοπικό κλίμα και άλλα χαρακτηριστικά.

3.3 Συστήματα διανομής θερμικών-ψυκτικών φορτίων

Όταν αναφερόμαστε στα συστήματα διανομής θερμικών- ψυκτικών φορτίων στο εσωτερικό ενός κτιρίου, εννοούμε το σύνολο των εξαρτημάτων και των αυτοματισμών που χρησιμοποιούνται προκειμένου να διανεμηθεί η παραγόμενη θερμότητα ή ψύξη από το έδαφος στο εσωτερικό ενός κτιρίου. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν τη δυνατότητα άμεσης απόδοσης της θερμότητας σε συστήματα αέρα ή νερού. Το πιο συνηθισμένο σύστημα είναι το σύστημα νερού - αέρα όπου ένα κύμα αέρα θερμαίνει το κτίριο αφού πρώτα θερμανθεί από μια αντλία θερμότητας. Τα συγκεκριμένα συστήματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τα κοινά σε όλους καλοριφέρ, καθώς αυτά απαιτούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες νερού. Έτσι, με τις αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούμε είτε σώματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας, ή αλλιώς fan coils, ή ενδοδαπέδια/ επιτοιχία θέρμανση. Το πιο ενδεδειγμένο σύστημα είναι η ενδοδαπέδια θέρμανση, καθώς εξασφαλίζει βέλτιστες συνθήκες θερμικής άνεσης αλλά και μπορεί ταυτόχρονα να εκμεταλλευτεί και άλλα συστήματα όπως ηλιακούς συλλέκτες.

Η εγκατάσταση ενδοδαπέδιας θέρμανσης θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες κάθε είδους κτιρίου. Με το σύστημα αυτό έχουμε ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στο χώρο από το δάπεδο προς τη κορυφή, κάτι που επιτρέπει τη θέρμανση χώρων και με μεγάλο ύψος, όπως για παράδειγμα βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Το σύστημα αυτό, δουλεύει με νερό χαμηλής σχετικά θερμοκρασίας από 30°C έως 45°C, το οποίο κυκλοφορεί στους σωλήνες που βρίσκονται στο δάπεδο. Η θερμότητα μεταφέρεται από το νερό στο μπετόν που το περιβάλλει και έπειτα το μπετό με τη μέθοδο της ακτινοβολίας μεταφέρει τη θερμότητα στο περιβάλλον. Ουσιαστικά οπότε το θερμαντικό σώμα είναι το ίδιο το έδαφος, πράγμα που από μόνο του δίνει πολλά πλεονεκτήματα στη χρήση ενός τέτοιου συστήματος. Δημιουργεί μια ομοιόμορφη θέρμανση του χώρου, ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες δεν ξηραίνουν το περιβάλλον όπως τα κοινά σώματα καλοριφέρ. Με τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος μειώνουμε τη κατανάλωση καυσίμου έως και πάνω από 30%, έχουμε μειωμένη κτιριακή συντήρηση, μηδενικό κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των θερμαντικών συστημάτων και αύξηση του χρόνου ζωής του καυστήρα, καθώς λειτουργεί λιγότερες ώρες.

Παρόμοιο σύστημα με την ενδοδαπέδια θέρμανση, είναι τα σώματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας ή αλλιώς fan coils. Αυτά περιλαμβάνουν ένα πηνίο για θέρμανση ή ψύξη κι έναν ανεμιστήρα. Θερμαίνεται ή ψύχεται ανάλογα το ψυκτικό μέσο του κυκλώματος, το οποίο με τη

σειρά του θερμαίνει ή ψύχει ανάλογα τον αέρα που κυκλοφορεί και με τη χρήση του ανεμιστήρα διανέμεται στο χώρο. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται αντλία θερμότητας, η θέρμανση ή ψύξη του ψυκτικού υγρού, προέρχεται από εκεί. Συγκρίνοντας το σύστημα αυτό με την ενδοδαπέδια θέρμανση, προκύπτει ότι στην περίπτωση των fan coils, η αντλία θερμότητας έχει μικρότερη απόδοση, γεγονός που προκύπτει και από το γεγονός ότι απαιτούνται μεγαλύτερες θερμοκρασίες για την λειτουργία τους. Αντιθέτως, σε σχέση με τα ένα κοινό κλιματιστικό, είναι έως και 35% λιγότερο δαπανηρό, ενώ σε σχέση με ένα σύστημα καυστήρα-λέβητα, το κόστος που μπορεί να εξοικονομηθεί είναι έως 55%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΗΡΑΓΓΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Η ζήτηση ενέργειας στον κόσμο συνεχώς αυξάνεται. Έως τώρα οι ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται κυρίως από το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τον άνθρακα. Την ίδια στιγμή, τα υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η έλλειψη χώρων πρασίνου στις μεγάλες πόλεις, επιβάλλουν τη μείωση παραγωγής του διοξειδίου του άνθρακα και δημιουργούν την ανάγκη ανάπτυξης τοπικών και περιφερειακών ενεργειακών πόρων, με χαμηλό περιβαλλοντικό κόστος. Σαν αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν αποκτήσει μεγάλη σημασία. Εκτός από τον ήλιο και τον άνεμο, η γεωθερμία μπορεί, επίσης, να παίξει ένα σημαντικό ρόλο.

Η γεωθερμία, σε επίπεδο χώρας, ως πηγή ενέργειας, μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης, με τον περιορισμό των εισαγωγών ορυκτών καυσίμων. Φυσικά, σε τοπικό επίπεδο, μπορεί να συμβάλει στην οικονομική ανάπτυξη της εκάστοτε γεωθερμικής περιοχής.

Οι δυνατότητες αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας ποικίλουν και έχουν άμεση σχέση με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού υγρού. Οι εφαρμογές της, λοιπόν, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, περιλαμβάνουν:

- Ηλεκτροπαραγωγή
- Συμπαγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας
- Θέρμανση χώρων (με καλοριφέρ $\theta > 60^{\circ}\text{C}$, με αερόθερμα $\theta > 40^{\circ}\text{C}$, με ενδοδαπέδιο σύστημα $\theta > 25^{\circ}\text{C}$)
- Θέρμανση οικισμών (Η θερμική ενέργεια που δεσμεύεται από τη γεωθερμική πηγή διοχετεύεται προς τους χρήστες με τη βοήθεια ενός συστήματος αγωγών -τηλεθέρμανση)
- Ψύξη και κλιματισμό (Με αντλίες θερμότητας απορρόφησης για $\theta > 60^{\circ}\text{C}$ ή με υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας για $\theta > 30^{\circ}\text{C}$)
- Θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών (επειδή τα φυτά αναπτύσσονται γρηγορότερα και γίνονται μεγαλύτερα με τη θερμότητα- $\theta > 25^{\circ}\text{C}$ - ή και για αντιπαγετική προστασία)
- Ιχθυοκαλλιέργειες ($\theta > 15^{\circ}\text{C}$, επειδή τα ψάρια χρειάζονται ορισμένη θερμοκρασία για την ανάπτυξή τους)
- Βιομηχανικές εφαρμογές (όπως αφαλάτωση βιομηχανικού νερού - $\theta > 60^{\circ}\text{C}$ -, ξήρανση αγροτικών προϊόντων κτλ.)
- Θερμά λουτρά (για $\theta = 25\text{-}40^{\circ}\text{C}$)

Για να χρησιμοποιηθεί η θερμική ενέργεια του εδάφους, προκειμένου να πετύχουμε τη θέρμανση ή ψύξη ενός αντικειμένου, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η σύζευξη αυτών των δυο. Αυτό πετυχαίνεται με τους λεγόμενους γεωεναλλάκτες. Οι γεωεναλλάκτες είναι συστήματα τα οποία είναι τοποθετημένα στο υπέδαφος και μέσα στα οποία κυκλοφορεί νερό, ψυκτικό υγρό ή αέρας, δημιουργώντας ένα κύκλωμα ή βρόγχο.

Η θερμότητα στο έδαφος μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά, χρησιμοποιώντας δομές που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, όπως για παράδειγμα οι σήραγγες (τούνελ). Οι σήραγγες κατασκευάζονται σε μεγάλα βάθη και έχουν μεγάλο όγκο, κάτι που ισοδυναμεί με μεγάλη επιφάνεια επαφής με το υπέδαφος, δηλαδή με το ενεργειακά εκμεταλλεύσιμο μέσο. Τα τελευταία χρόνια, έχει εφαρμοστεί η εγκατάσταση ενός γεωθερμικού συστήματος στο περίβλημα κάποιων σηράγγων, με σκοπό την χρήση της γεωθερμικής ενέργειας για τη ψύξη ή θέρμανση των ίδιων των σηράγγων ή κτιρίων που βρίσκονται στην επιφάνεια πάνω από αυτές.

Η εφαρμογή γεωθερμικών συστημάτων σε σήραγγες δεν έχει συμβεί σε μεγάλο βαθμό, κυρίως λόγω του κόστους εγκατάστασης. Ωστόσο, οι περιορισμένες εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια, στα πλαίσια της γενικότερης αναζήτησης για αξιοποίηση εναλλακτικής ενέργειας, φανερώνουν ότι παρά το κόστος εγκατάστασης, το ποσοστό εξοικονόμησης της ενέργειας, σε βάθος χρόνου, είναι περισσότερο από ικανοποιητικό.

4.2 Σχεδιασμός σηράγγων

Σήραγγα είναι ένα επίμηκες, στενό, ουσιαστικά γραμμικό σκαμμένο υπόγειο άνοιγμα, με μήκος που υπερβαίνει κατά πολύ το πλάτος ή το ύψος της. (Wahkstrom, 1973). Οι σήραγγες θεωρούνται από τα δυσκολότερα έργα των πολιτικών μηχανικών, με πολλές παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη, προκειμένου να κατασκευαστούν επιτυχώς. Κατασκευάζονται από μικρά έως πολύ μεγάλα βάθη και το μήκος τους κυμαίνεται από μερικά μέτρα έως αρκετά χιλιόμετρα.

Μία σήραγγα μπορεί να αποτελεί δίοδο για πεζούς, ποδηλάτες, μηχανοκίνητα οχήματα, για μεταφορικά μέσα σταθερής τροχιάς ή για πλοία. Μερικές χρησιμοποιούνται ως υδραγωγεία, κατασκευασμένες αποκλειστικά για την μεταφορά νερού, για κατανάλωση, για υδροηλεκτροπαραγωγή ή σαν αποχετευτικός αγωγός, ενώ άλλες παρέχουν άλλες υπηρεσίες, όπως την φιλοξενία τηλεπικοινωνιακών καλωδίων. Υπάρχουν ακόμα και σήραγγες για την διέλευση ορισμένων σημείων από ζώα υπό εξαφάνιση. Μερικές μυστικές σήραγγες έχουν κατασκευαστεί ως μέσο για την είσοδο ή διαφυγή από μια περιοχή.

Οι πρώτες σήραγγες που έχουν κατασκευαστεί, ήταν στη λίθινη εποχή όπου ο άνθρωπος προκειμένου να εξορύξει υλικά από το υπέδαφος για την κατασκευή ισχυρών εργαλείων είχε δημιουργήσει υποτυπώδη φρεάτια και υπόγειες σήραγγες. Η διάνοιξη των σηράγγων εκείνα τα χρόνια γινόταν με την χρησιμοποίηση διάφορων κοπτικών εργαλείων που φτιάχνονταν από πυρόλιθο ξύλο ή και από οστά ζώων. Επόμενη τεχνική δημιουργίας σηράγγων χρησιμοποιήθηκε τον 17^ο αιώνα, όπου για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικά για τη διάνοιξη τους. Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, πλέον, άρχισαν να χρησιμοποιούνται τα γνωστά έως σήμερα TBM (Tunnel Boring Machines). Με την εξέλιξη αυτή της τεχνολογίας και της μηχανικής, έχουμε καταφέρει να κατασκευάσουμε σήραγγες που φτάνουν τα 57 χιλιόμετρα. Αυτό είναι και το μήκος της μεγαλύτερης πλέον σήραγγας στον κόσμο όπου δόθηκε σε κυκλοφορία το 2016 και ενώνει τις πόλεις Ζυρίχη-Λουγκάνο και διασχίζει το βουνό Σεν Γκοτάρ στις Άλπεις.

Οι σήραγγες ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις υπόγειες και τις υποβρύχιες. Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, οι υπόγειες διανοίγονται στη ξηρά ενώ οι υποβρύχιες κάτω από υδάτινους όγκους. Η καθεμιά από τις κατηγορίες αυτές ταξινομείται σε επιμέρους υποκατηγορίες. Οι μεν υπόγειες χωρίζονται στις σήραγγες διάτρησης, υπόγειας εκσκαφής- κοπής και επίχωσης. Οι δε υποβρύχιες, ανάλογα με τον τρόπο έδρασής τους, διακρίνονται σε επιπυθμένες, πλωτές και υποπυθμένες.

Οι σήραγγες κατασκευάζονται με διάφορους τύπους υλικών, από μαλακό πηλό μέχρι σκληρά πετρώματα και η μέθοδος εκσκαφής εξαρτάται από τις συνθήκες του εδάφους. Για τον σχεδιασμό μιας σήραγγας, απαιτούνται μια σειρά από μελέτες μέχρι την οριστικοποίηση της θέσης της και του τρόπου κατασκευής της. Η ανάλυση αυτής της μελέτης θα οδηγήσει σε καλύτερη επιλογή των μηχανημάτων και των μεθόδων διάνοιξης. Στα αρχικά στάδια, ο οριζόντιος και ο κάθετος προσανατολισμός της σήραγγας θα βελτιστοποιηθεί βάση της γεωτεχνικής μελέτης ώστε να αποφευχθεί το ασταθές ή πολύ σκληρό έδαφος, όπως επίσης και θύλακες νερού.

Πρέπει, με άλλα λόγια, να ληφθεί υπόψη η γεωλογία της περιοχής. Η γεωλογία της περιοχής επηρεάζει τον τρόπο εκσκαφής, την ακριβή θέση της σήραγγας και το βάθος της, τον φόρτο τον οποίο θα μπορεί να εξυπηρετήσει αλλά και το κόστος της. Η αναγνώριση του υπεδάφους της περιοχής, γίνεται με τη μελέτη παλαιότερων γεωλογικών εκθέσεων, αλλά και με την εκτέλεση νέων γεωτεχνικών ερευνών, μέσα από επιτόπιες ή εργαστηριακές δοκιμές.

Η χάραξη της σήραγγας γίνεται με τη βοήθεια τοπογραφικών σχεδίων, τα οποία πρέπει να έχουν υψηλή ακρίβεια (μηκοτομή και οριζοντιογραφία). Πλέον, η εν λόγω χάραξη γίνεται με τη βοήθεια προγραμμάτων που βοηθάνε στην αποφυγή λαθών και στη βελτίωση της απόδοσης.

Στα πλαίσια της μελέτης, είναι επίσης πολύ σημαντικό να ληφθούν υπόψη γειτονικά έργα και να διαπιστωθεί τυχόν αλληλεπίδραση τους με τη νέα κατασκευή. Αυτό είναι απαραίτητο καθώς οι τάσεις που μπορούν να αναπτυχθούν είναι μεγάλες και τυχόν αμέλειες σε αυτό το κομμάτι μπορεί να προκαλέσουν ολοκληρωτική καταστροφή της νέας ή και των υφιστάμενων κατασκευών.

Ενδεικτικά, μία απλή μέθοδος κατασκευής σηράγγων, σε μικρή απόσταση από το έδαφος είναι αυτή της εκσκαφής και της επανεπίχωσης. Οι ρηχές σήραγγες είναι συχνά εκσκαφής και επικάλυψης, ενώ για μεγαλύτερα βάθη χρησιμοποιείται μηχανήμα διάνοιξης με ασπίδα εκσκαφής. Η εκσκαφή και επανεπίχωση είναι μια απλή μέθοδος κατασκευής σηράγγων σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια, όπου πρώτα σκάβεται ένα όρυγμα και μετά τοποθετείται από πάνω η οροφή. Η αντοχή της οροφής και του συστήματος στήριξης θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει στο βάρος των υλικών επικάλυψης, των δρόμων και οτιδήποτε βρίσκεται στην επιφάνεια. Είναι διαθέσιμες δύο βασικές μορφές της εκσκαφής και επικάλυψης:

- *Μέθοδος από την βάση (bottom-up):* Ένα όρυγμα σκάβεται, με υποστήριξη του εδάφους όπου χρειάζεται, και η σήραγγα κατασκευάζεται μέσα σε αυτό. Η σήραγγα μπορεί να αποτελείται από σκυροδέμα που χυτεύεται επιτόπου, προκατασκευασμένα κομμάτια σκυροδέματος, προκατασκευασμένα τόξα, ασφάλινα τόξα. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν τούβλα για την κατασκευή. Το όρυγμα στην συνέχεια επικαλύπτεται με προσοχή στην εξισορρόπηση της συμπίεσης των υλικών επικάλυψης και η επιφάνεια αποκαθίσταται.
- *Μέθοδος από την οροφή (top-down):* Σε αυτή την μέθοδο, αρχικά κατασκευάζονται διαφραγματικοί, πλευρικοί τοίχοι και πάνω σε αυτούς στηρίζονται δοκοί στήριξης στο επίπεδο του εδάφους. Στην συνέχεια γίνεται μια ρηχή εκσκαφή ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή της οροφής με προκατασκευασμένα τόξα ή με χύτευση σκυροδέματος επιτόπου. Η επιφάνεια αποκαθίσταται εκτός από ορισμένα ανοίγματα. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την διάνοιξη της σήραγγας κατεβαίνουν μέσω των ανοιγμάτων και ξεκινούν την εκσκαφή κάτω από την μόνιμη οροφή, μέχρι την βάση της σήραγγας. Αυτό επιτρέπει την γρήγορη επαναχρησιμοποίηση των δρόμων ή άλλων υπηρεσιών που βρίσκονται στην επιφάνεια. Με αυτή την μέθοδο κατασκευάζονται οι σταθμοί και η σήραγγα του Μετρό Θεσσαλονίκης.

Σε μεγαλύτερα βάθη, χρησιμοποιούνται τα μηχανήματα εκσκαφής σηράγγων ή TBM όπως ονομάζονται από το αγγλικό αρκτικόλεξο (Tunnel boring machines). Τα συγκεκριμένα σχετίζονται

με πολλά συμπληρωματικά στοιχεία που μπορούν να αυτοματοποιήσουν ολόκληρη την διαδικασία εκσκαφής της σήραγγας. Υπάρχουν πολλών ειδών TBM που λειτουργούν σε ένα εύρος συνθηκών, από σκληρά πετρώματα μέχρι έδαφος με θύλακες νερού. Ορισμένοι τύποι TBM έχουν διαμερίσματα υπό πίεση στο μπροστινό μέρος, επιτρέποντας τα να χρησιμοποιούνται σε δύσκολες συνθήκες όπως κάτω από υδάτινο πυθμένα. Αυτό συμπιέζει το έδαφος μπροστά από την κεφαλή εκσκαφής του TBM για να αντισταθμίσει στην πίεση του νερού. Ο χειριστής εργάζεται υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση πίσω από το συμπιεσμένο διαμέρισμα, αλλά μπορεί να χρειαστεί να εισέλθει στο συμπιεσμένο διαμέρισμα για να αλλάξει ή να επιδιορθώσει τους κόφτες. Αυτό απαιτεί ειδικές προφυλάξεις, όπως τοπική προεργασία του εδάφους ή την ακινητοποίηση του TBM σε περιοχή χωρίς νερό. Παρ' όλες τις δυσκολίες, σήμερα προτιμούνται τα TBM από την προηγούμενη μέθοδο της εκσκαφής σε ατμόσφαιρα υπό πίεση, με έναν θάλαμο απομόνωσης και αποσυμπίεσης σε κάποια απόσταση από το TBM, η οποία απαιτεί να εργάζονται οι χειριστές σε υψηλή πίεση και να πρέπει να περνούν από θάλαμο αποσυμπίεσης στο τέλος της βάρδιας τους, όπως οι δύτες.

Μέχρι πρόσφατα, το μεγαλύτερο TBM που κατασκευάστηκε, χρησιμοποιήθηκε για την διάνοξη της σήραγγας Green Heart Tunnel στην Ολλανδία το οποίο είχε διάμετρο 14,87 μέτρα. Σήμερα υπάρχουν ακόμα μεγαλύτερα μηχανήματα, όπως για παράδειγμα τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του περιφερειακού δρόμου της Μαδρίτης στην Ισπανία και της σήραγγας Χονγκ Μινγκ στην Σαγκάη στην Κίνα.

4.3 Συστήματα γεωθερμίας σε σήραγγες

Η ανάγκη για παραγωγή ενέργειας ανά τον κόσμο αυξάνεται συνεχώς και επί του παρόντος ικανοποιείται κυρίως από το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, όπως ήδη αναφέρθηκε. Την ίδια στιγμή, η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι αυτή που οδηγεί στην αναζήτηση άλλων μεθόδων παραγωγής ενέργειας που είναι φιλικές προς το περιβάλλον όπως η γεωθερμική ενέργεια. Η θερμότητα στο έδαφος μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά, χρησιμοποιώντας δομές που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, όπως για παράδειγμα οι σήραγγες (τούνελ). Οι σήραγγες είναι μεγάλα τεχνικά έργα που εκτελούνται σε βάθη στα οποία υπάρχουν πολλές ιδιότητες και καταστάσεις που μένουν συνήθως ανεκμετάλλευτες. Μία από αυτές είναι η σταθερή θερμοκρασία του εδάφους κατά τη διάρκεια του χρόνου, μια κατάσταση που εκμεταλλεύονται τα γεωθερμικά συστήματα.

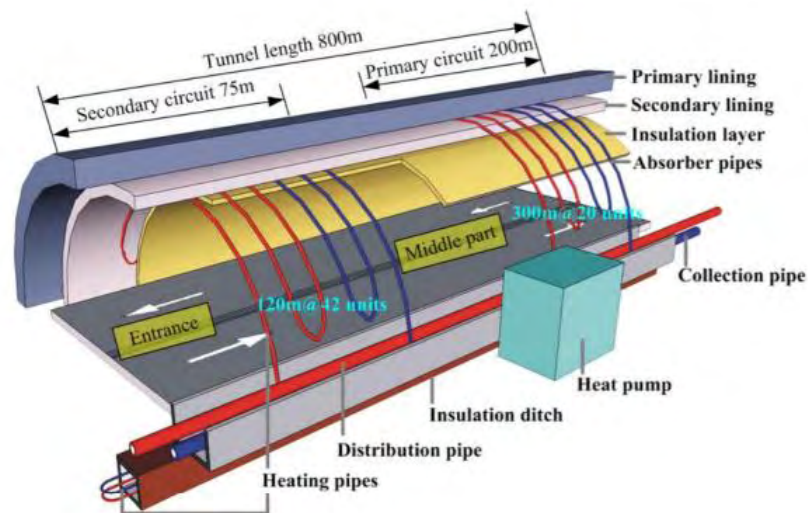
Γενικότερα, όπως περιγράφεται από τους Brandl (2006), Adam και Markiewicz (2009), όλες οι γεωτεχνικές δομές, όπως οι διαφραγματικοί τοίχοι, οι πλάκες υπογείων και οι σήραγγες,

μπορούν να γίνουν ενεργειακές γεωδομές. Τα τελευταία χρόνια πολλοί είναι οι ερευνητές που προτείνουν τη συγκεκριμένη εφαρμογή, με έμφαση στις σήραγγες (Brandl, 2006; Franzius και Pralle, 2011; Lee κ.α., 2012; Markiewicz και Αδάμ, 2003; Nicholson κ.ά., 2013; Schneider and Moormann, 2010; Wilhelm και Rybach, 2003; Zhang κ.ά., 2013).

Οι σήραγγες κατασκευάζονται σε μεγάλα βάθη και έχουν μεγάλο όγκο, κάτι που ισοδυναμεί με μεγάλη επιφάνεια επαφής με το υπέδαφος, δηλαδή με το ενεργειακά εκμεταλλεύσιμο μέσο. Τα τελευταία χρόνια, έχει εφαρμοστεί η εγκατάσταση ενός γεωθερμικού συστήματος στο περίβλημα κάποιων σηράγγων, με σκοπό την χρήση της γεωθερμικής ενέργειας για τη ψύξη ή θέρμανση των ίδιων των σηράγγων ή κτιρίων που βρίσκονται στην επιφάνεια πάνω από αυτές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μπορεί το κόστος εφαρμογής ενός τέτοιου συστήματος να είναι πολύ μεγάλο, αλλά το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται είναι περισσότερο από ικανοποιητικό.

Η τεχνολογία επένδυσης της σήραγγας για τη συλλογή γεωθερμικής ενέργειας βασίζεται στα παραδοσιακά συστήματα γεωθερμικής ενέργειας. Η μοναδική διαφορά έγκειται στο ότι το σύστημα των σωλήνων εγκαθίσταται στην επένδυση της σήραγγας και όχι κατά μήκος ή κάθετα στο έδαφος. Δύο είναι οι απαραίτητες προϋποθέσεις για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

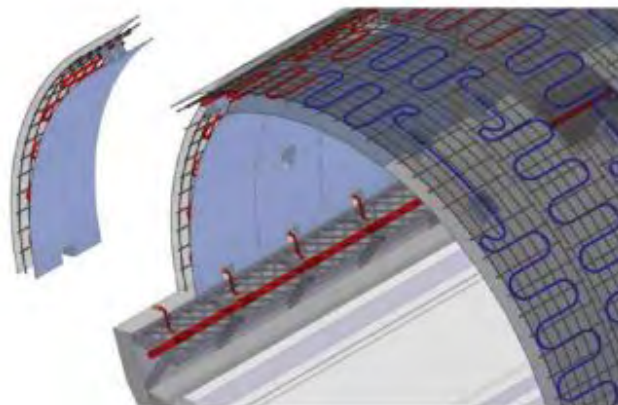
Η πρώτη αφορά το βάθος της σήραγγας. Η σήραγγα πρέπει να κατασκευαστεί σε αρκετά μεγάλο βάθος, για να εξασφαλιστεί έτσι η σταθερή θερμοκρασία στη διάρκεια του έτους. Αυτή η σταθερή θερμοκρασία αποτελεί πηγή ψύξης το καλοκαίρι και πηγή θέρμανσης το χειμώνα. Η δεύτερη προϋπόθεση αφορά το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται στη σήραγγα. Το σκυρόδεμα λειτουργεί ως ένας εξαιρετικός γεωεναλλάκτης θερμότητας, καθώς έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και ικανότητα θερμικής αποθήκευσης.



Σχήμα 9. Εγκατάσταση γεωθερμικού συστήματος σε σήραγγα

Το παραπάνω σχήμα δείχνει όλα τα κύρια μέρη της επένδυσης της σήραγγας. Όπως σε όλα τα συστήματα γεωθερμικής ενέργειας, η επένδυση της σήραγγας αποτελείται από ένα πρωτεύον κύκλωμα, ένα δευτερεύον κύκλωμα και μια θερμική αντλία. Το πρωτεύον κύκλωμα είναι οι σωλήνες απορρόφησης. Αυτοί οι σωλήνες απορρόφησης συνδέονται με τη θερμική αντλία μέσω ενός κλειστού βρόχου. Ο βρόχος περιέχει ένα μη-ψυκτικό υγρό για να αποφευχθεί η κατάψυξη του τον χειμώνα. Το υγρό εξαγει τη γεωθερμική ενέργεια στον βρόχο και θερμαίνεται από αυτόν. Το θερμαινόμενο υγρό μεταφέρεται στη συνέχεια μέσω μίας θερμικής αντλίας, όπου και θερμαίνεται περαιτέρω. Μέσω ενός σωλήνα διανομής το θερμαινόμενο υγρό διοχετεύεται στο δευτερεύον κύκλωμα, που αποτελείται από σωλήνες θέρμανσης.

Μια σήραγγα είναι μια περίπλοκη δομή. Η σχηματική όψη της σήραγγας που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, μας βοηθά να κατανοήσουμε ίσως καλύτερα την επένδυση της σήραγγας.



Σχήμα 10. Εγκατάσταση γεωθερμικού συστήματος σε σήραγγα

Επί του παρόντος μπορούν να υιοθετηθούν δύο κύριοι μέθοδοι ενεργειακής επένδυσης μιας σήραγγας ανάλογα με τη μέθοδο εκσκαφής. Κατά την πρώτη μέθοδο, οι σωληνώσεις απορρόφησης εγκαθίστανται μέσα στα προκατασκευασμένα τμήματα της σήραγγας, γεγονός που εφαρμόζεται όταν η εκσκαφή διεξάγεται με μηχανή εξόρυξης TBM. Η πρώτη γεωθερμική αντλία θερμότητας τέτοιου τύπου, εγκαταστάθηκε και λειτουργεί στη σήραγγα Jenbach στην Αυστρία. Η δεύτερη μέθοδος με την οποία γίνεται η εγκατάσταση των σωληνώσεων είναι η τοποθέτησή τους μεταξύ της κύριας επένδυσης της σήραγγας και του γεωυφάσματος. Αυτή είναι μία πολύτιμη εναλλακτική λύση όταν χρησιμοποιούνται τρυπάνια ή μηχανές ακρίβειας για να γίνει η εκσκαφή της σήραγγας. Τέτοια περίπτωση εγκατάστασης σωληνώσεων έχει εφαρμοστεί στη Γερμανία στη Στουτγάρδη, στον υπόγειο σταθμό Fasanenhof.

Καταλήγοντας, παρά τα πρώτα ελπιδοφόρα παραδείγματα από την εφαρμογή γεωθερμικών συστημάτων σε σήραγγες, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες (σχεδιασμός, ικανότητα ποσοτικοποίησης της παραγόμενης θερμότητας, μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του συστήματος κ.α.) που είναι καθοριστικοί και πρέπει να διερευνηθούν, πριν θεωρήσουμε βέβαιο ότι οι «ενεργειακές σήραγγες» μπορούν να υπάρξουν αποδοτική εναλλακτική λύση έναντι των παραδοσιακών συστημάτων θέρμανσης.

4.4 Παραδείγματα τοποθέτησης γεωθερμικών συστημάτων σε σήραγγες

Η εφαρμογή γεωθερμικών συστημάτων σε σήραγγες δεν έχει συμβεί σε μεγάλο βαθμό, κυρίως λόγω του κόστους εγκατάστασης. Ωστόσο, οι περιορισμένες εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια, στα πλαίσια της γενικότερης αναζήτησης για αξιοποίηση εναλλακτικής ενέργειας, φανερώνουν ότι παρά το κόστος εγκατάστασης, το ποσοστό εξοικονόμησης της ενέργειας, σε βάθος χρόνου, είναι περισσότερο από ικανοποιητικό.

Κατά τη διάρκεια της αναβάθμισης της σιδηροδρομικής διαδρομής από το Μόναχο στη Βερόνα, ένα τμήμα σήραγγας στην περιοχή Jenbach στο Tyρόλο ε νεργοποιήθηκε θερμικά για την παροχή γεωθερμικής ενέργειας στο κοντινό κέντρο εξυπηρέτησης. Αυτό πρόκειται για ένα από τα πλέον γνωστά παραδείγματα εφαρμογής γεωθερμικού συστήματος σε σήραγγα. Στη σήραγγα του Jenbach συνδέθηκαν 13 κύκλοι θέρμανσης με τη συνολική επιφάνεια του συλλέκτη-σήραγγα. Η αξιολόγηση των δεδομένων που συλλέχθηκαν σε διάστημα άνω των δέκα μηνών για τη γεωθερμική εκμετάλλευση της σήραγγας Jenbach, έδειξε θετικό ισοζύγιο για το λειτουργικό κόστος του κέντρου εξυπηρέτησης στο Jenbach: η θερμότητα που εξάγεται από την επένδυση γεωθερμικής σήραγγας καλύπτει τα αναγκαία επενδυτικά έξοδα σε ένα παρόμοια με τα

συμβατικά ρηχά γεωθερμικά συστήματα εδάφους. Το πλεονέκτημα των γεωθερμικών επενδύσεων, όπως προκύπτει είναι το γεγονός ότι η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να εξαχθεί σε περιοχές όπου δεν μπορούν να εγκατασταθούν κλασικά γεωθερμικά συστήματα, όπως οι πυκνοκατοικημένες περιοχές της πόλης.

Όπως αποδεικνύεται από την πρακτική εμπειρία του Jenbach, η ενεργειακή ενεργοποίηση ενός τμήματος σήραγγας αποτελεί μια πολύ καλή ευκαιρία για την εκμετάλλευση αυτής της ελεύθερα διαθέσιμης γεωθερμικής ενέργειας, προκειμένου να εξοικονομηθεί σημαντικό κόστος θέρμανσης και ψύξης. Αν η θερμότητα που απορροφάται από το κτίριο το καλοκαίρι μεταφέρεται στην κρύα σήραγγα και στο περιβάλλον έδαφος, η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χειμερινή λειτουργία θέρμανσης. Αυτό επιπλέον βελτιώνει την σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Για τις κρύες και θερμές σήραγγες, οι χρόνοι απόσβεσης είναι συγκρίσιμοι με τις συμβατικές γεωθερμικές εφαρμογές.

Ιδιαίτερα οι σήραγγες στις αστικές περιοχές προσφέρουν μεγάλες δυνατότητες γεωθερμικής εκμετάλλευσης λόγω της παρουσίας των καταναλωτών που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση.

Μελέτες που έχουν γίνει σε τούνελ επιβεβαιώνουν τα παραπάνω. Ειδικότερα, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, έχουν γίνει μια σειρά από μελέτες σε τούνελ της Ελβετίας τα οποία δυνητικά θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως γεωεναλλάκτες. Σε ορισμένα από αυτά, έχει ήδη εγκατασταθεί γεωθερμικό σύστημα. Για παράδειγμα στο St. Gotthard highway tunnel, το γεωθερμικό σύστημα που είναι εγκατεστημένο, αποδίδει περίπου 1800 kW. Αντίστοιχα δεδομένα υπάρχουν και για τα τούνελ Ricken και Furka. Εάν η ενεργειακή ενεργοποίηση των σήραγγων θεωρείται σε πρώιμο στάδιο του σχεδιασμού των αστικών περιοχών και του σχεδιασμού των σήραγγων, ένα τέτοιο σύστημα είναι εύκολο να ενσωματωθεί στη διαδικασία σχεδιασμού.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα μελετών εγκατάστασης γεωθερμικών συστημάτων σε τούνελ

Name	Canton	Type of tunnel	Water discharge [l/min]	Temperature of water [°C]	Heating capacity [kWth] (1)
Ascona	TI	Road	360	12	150
Furka (2)	VS	Railway	5400	16	3'758
Frutigen	BE	Investigation tunnel	800	17	612
Gotthard (2)	TI	Road (N2)	7200	15	4'510
Grenchenberg (South portal)	SO	Railway	18000	10	11'693
Hauenstein (Base tunnel)	SO	Railway	2500	19	2'262
Islà Bella	GR	Road	800	15	501
Lotschberg	VS	Railway	731	12	305
Mappo-Moretina (2)	TI	Road	983	16	684
Mauvoisin	VS	Investigation tunnel	600	20	584
Polmengo	TI	Investigation adit	600	20	584
Rawyl	VS	Investigation adit	1200	24	1'503
Ricken (2)	SG	Railway	1200	12	501
Simplon (Portal Brigue)	VS	Railway	1380	13	672
Vereina	GR	Railway	2100	17	1'608
Total					29'927

(1) Potential at the portal of the tunnel, without heat pump, cooling to 6°C

(2) Operating

Το πλεονέκτημα την ενσωμάτωσης ενεργών γεωθερμικών συστημάτων σε γεωτεχνικές δομές όπως είναι οι σήραγγες, είναι ότι οι κατασκευές γίνονται ούτως ή άλλως με έτσι το πρόσθετο κόστος είναι αμελητέο σε σχέση με το αρχικό. Συνεπώς, η θερμική ενεργοποίηση των σηράγγων είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα ευκαιρία που θα μπορούσε να επιτρέψει την εκμετάλλευση της αποθηκευμένης στο έδαφος ενέργειας με σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΛΑΙΣΙΟ- ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Πριν γίνει η περιγραφή του μοντέλου και της αριθμητικής ανάλυσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος και των αποτελεσμάτων. Παρακάτω περιγράφονται οι κύριοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε κάποιο μέσο, στους εδαφικούς σχηματισμούς και στο σκυρόδεμα, και αναφέρονται επίσης οι κύριες θερμικές ιδιότητες των εδαφικών σχηματισμών και του σκυροδέματος όπως η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής θερμικής διαστολής,

5.2 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι τρεις δυνατοί τρόποι μεταφοράς θερμότητας. Αυτοί είναι με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή θα αναπτυχθεί εκτενέστερα καθώς αποτελεί και τον κύριο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας στους εδαφικούς σχηματισμούς.

Κάθε σώμα εμπεριέχει μια συγκεκριμένη ποσότητα εσωτερικής θερμότητας η οποία σχετίζεται με την άτακτη κίνηση των ατομικών σωματιδίων (κινητική και δυνητική ενέργεια) και τη φάση του (υγρό, στερεό, αέριο). Αυτή η εσωτερική θερμότητα ονομάζεται θερμική ενέργεια ενός σώματος και η μεταφορά της από ένα σώμα σε ένα άλλο ονομάζεται θερμότητα και έχει μονάδα μέτρησης το joule (J).

5.2.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Όταν έχουμε διαφορά θερμοκρασίας σε ένα σώμα ή ανάμεσα σε δύο σώματα που βρίσκονται σε επαφή, τότε η θερμότητα ρέει από το σώμα με την υψηλότερη θερμοκρασία στο σώμα με τη χαμηλότερη θερμοκρασία εξαιτίας της αλληλεπίδρασης και της κίνησης των μορίων. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό και ως μεταφορά θερμότητας με αγωγή.

Η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής ορίζεται στην σταθερή κατάσταση εφόσον ο ρυθμός της μεταφοράς θερμότητας δεν αλλάζει με τον χρόνο (η ποσότητα της θερμότητας που εισρέει στο σώμα είναι ίση με την θερμότητα που εξέρχεται από αυτό). Στην σταθερή κατάσταση, η εμπειρία έχει δείξει ότι η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής εκφράζεται με τον νόμο του Fourier, ο οποίος στην μια διάσταση είναι:

$$\frac{Q}{A} = -k * \frac{dT}{dx}$$

Σύμφωνα με τον νόμο του Fourier, ο ρυθμός της μεταφοράς θερμότητας μέσα σε ένα υλικό, Q/A , είναι ανάλογος με το μέγεθος της θερμοκρασιακής μεταβολής, Dt/dx . Η σταθερά, k (W/mK), ονομάζεται θερμική αγωγιμότητα και εκφράζει την ικανότητα ενός συγκεκριμένου υλικού να άγει θερμότητα.

Όταν οι θερμοκρασίες αλλάζουν με τον χρόνο και κατά συνέπεια και οι θερμοκρασιακές μεταβολές δεν είναι σταθερές, η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής βρίσκεται σε προσωρινή κατάσταση. Σε αυτήν την κατάσταση η εξίσωση δεν ισχύει και η μαθηματική επίλυση είναι πιο περίπλοκη καθώς τις περισσότερες φορές απαιτούνται αριθμητικές μέθοδοι ή θεωρίες προσέγγισης. Στην προσωρινή κατάσταση, η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής μπορεί να περιγραφεί με την εξίσωση διάχυσης θερμότητας:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{\rho c}{k} * \frac{dT}{dt} = \frac{1}{D} * \frac{dT}{dt}$$

Όπου ρ (kg/m³) είναι η πυκνότητα, και c (J/kgK) η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού (η ενέργεια ανά μονάδα μάζας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος κατά έναν βαθμό). Η θερμική διαχυτότητα, D (m²/s)=($k/\rho c$), είναι μια μονάδα μέτρησης που δείχνει πόσο γρήγορα ένα υλικό ανταποκρίνεται στις θερμοκρασιακές μεταβολές.

5.2.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Κατά τη διαδικασία αυτή, εννοούμε τη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα από ένα στερεό και ένα ρευστό και ειδικότερα όταν ένα ρευστό κινείται πάνω σε μια επιφάνεια ενός στερεού. Ο μηχανισμός της μεταφοράς της θερμότητας είναι η γρήγορη διάχυση της στο ρευστό λόγω αυξημένης διάχυσης της ορμής του. Δηλαδή η θερμότητα αφού μεταφερθεί στο ρευστό διαχέεται σε μεγαλύτερη έκταση του ρευστού και οι θερμοκρασιακές διαφορές επιφάνειας-ρευστού μένουν αυξημένες. Η τριβή που δημιουργεί η κίνηση του ρευστού καθιστούν στην αγωγή μεγαλύτερη θερμοροή λόγω της καλύτερης επαφής της επιφάνειας με το ρευστό. Έτσι γενικά η συναγωγή είναι ένας τρόπος μετάδοσης που περιλαμβάνει το φαινόμενο της αγωγής και τα φαινόμενα της διάχυσης ορμής του ρευστού. Η συναγωγή μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{Q}{A} = h * (T - T_f)$$

Όπου h (W/m²K) είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Αυτή η παράμετρος εξαρτάται από τις ιδιότητες του υγρού, όπως το ιξώδες, η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα καθώς και από τις ιδιότητες της επιφάνειας, όπως από την τραχύτητα και την γεωμετρία της διεπιφάνειας. T και T_f είναι η θερμοκρασία του υγρού και της επιφάνειας αντίστοιχα.

5.2.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Ως θερμική ακτινοβολία ονομάζεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος λόγω της θερμοκρασίας του. Η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα αντιστοιχεί σε συχνότητες ολόκληρου του φάσματος ακτινοβολίας αφού προέρχεται από τη θερμική, «τυχαία», κίνηση των συστατικών της ύλης. Μερικά παραδείγματα είναι η υπέρυθη ακτινοβολία (μη ορατή) που εκπέμπεται από τα σώματα καλοριφέρ καθώς και η ακτινοβολία που εκπέμπει μια εστία φωτιάς. Ο νόμος των Stefan- Boltzmann δίνει την συνολική ενέργεια που εκπέμπεται ανά μονάδα επιφάνειας και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

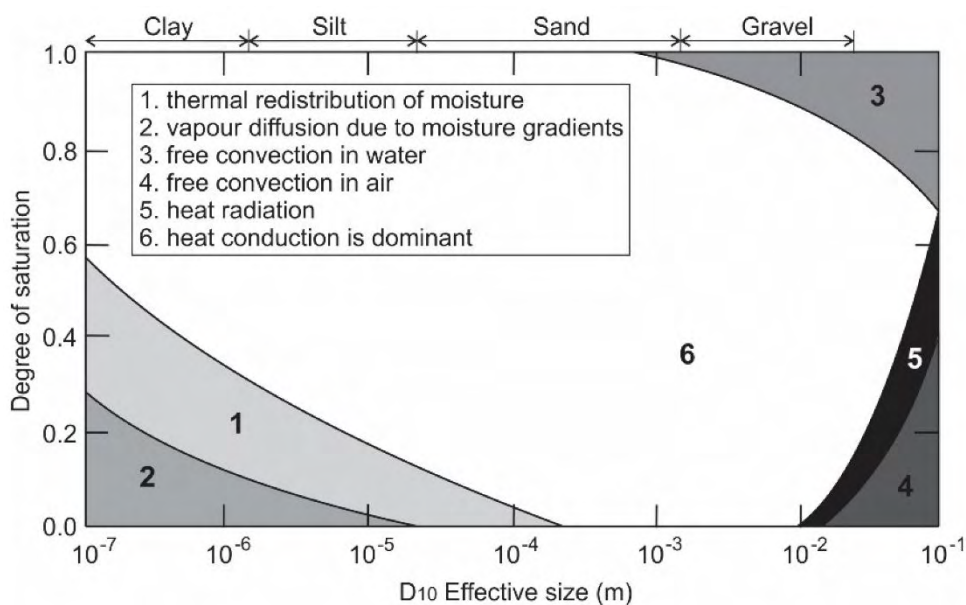
$$\frac{Q}{A} = \sigma * T^4$$

Όπου σ είναι η σταθερά του Stefan-Boltzmann και ισούται με $5.670400 * 10^{-8}$ W/m²K⁴ και T η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin, K. Καθώς τα περισσότερα σώματα δεν είναι μαύρα ο ακριβής υπολογισμός της ακτινοβολουμένης θερμότητας είναι δύσκολο να μετρηθεί και θα είναι μικρότερη από αυτή του νόμου Stefan Boltzmann. Για τον προσδιορισμό της ακτινοβολουμένης θερμότητας ενός μη μαύρου σώματος, το αποτέλεσμα της εξίσωσης συνήθως πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα εκπεψιμότητας, ο οποίος στην περίπτωση του σκυροδέματος είναι μεταξύ 0,85-0,94.

5.3 Μεταφορά θερμότητας στους εδαφικούς σχηματισμούς

Σε ένα εδαφικό μέσο, λαμβάνουν χώρα όλοι οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, όμως κυρίαρχος μηχανισμός είναι αυτός της αγωγής, ενώ η συναγωγή και η ακτινοβολία έχουν πολύ μικρή επιρροή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου το

έδαφος είναι κορεσμένο και χονδρόκοκκο, η συναγωγή γίνεται ο πιο σημαντικός μηχανισμός καθώς αναμένουμε ουσιαστική διήθηση του νερού μέσα στον εδαφικό σχηματισμό. Στα ακόρεστα εδάφη, η αποδόμηση της υγρασίας της εξάτμισης και της επακόλουθης συμπύκνωσης, ίσως αποτελεί την πιο σημαντική διεργασία μιας και εισάγει αλλαγές φάσεων στο έδαφος και έτσι επηρεάζει τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους μεταβάλλοντας κυρίως τον βαθμό κορεσμού του. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει μερικές από τις περιπτώσεις αυτές σύμφωνα με το βαθμό κορεσμού και το μέγεθος των κόκκων, όταν οι κυρίαρχοι μηχανισμοί μεταφοράς είναι η συναγωγή ακτινοβολία καθώς και η αποδόμηση της υγρασίας.



Σχήμα 11. Κυρίαρχοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας στα εδάφη

5.4 Θερμική αγωγιμότητα εδαφικών σχηματισμών και σκυροδέματος

Η θερμική αγωγιμότητα είναι μια παράμετρος που δύσκολα μπορεί να μετρηθεί ή να εκτιμηθεί καθώς εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψιν συνδυαστικά. Κάποιοι από αυτούς είναι η θερμική αγωγιμότητα των επιμέρους φάσεων του εδαφικού υλικού, η κοκκομετρία του εδάφους (το μέγεθος και σχήμα των κόκκων), η ορυκτολογική σύσταση των κόκκων, η θερμοκρασία του εδάφους, η υγρή πυκνότητα του εδάφους, η ξηρή πυκνότητα του εδάφους, το μοναδιαίο ειδικό βάρος των κόκκων, η υγρασία, ο κορεσμός σε νερό, η κατ' όγκον περιεκτικότητα αέρα και το πορώδες. Με τον συνδυασμό όλων αυτών λοιπόν εκτιμάται η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους.

Πίνακας 2. Σύνηθες τιμές θερμικής αγωγιμότητας εδαφικών σχηματισμών

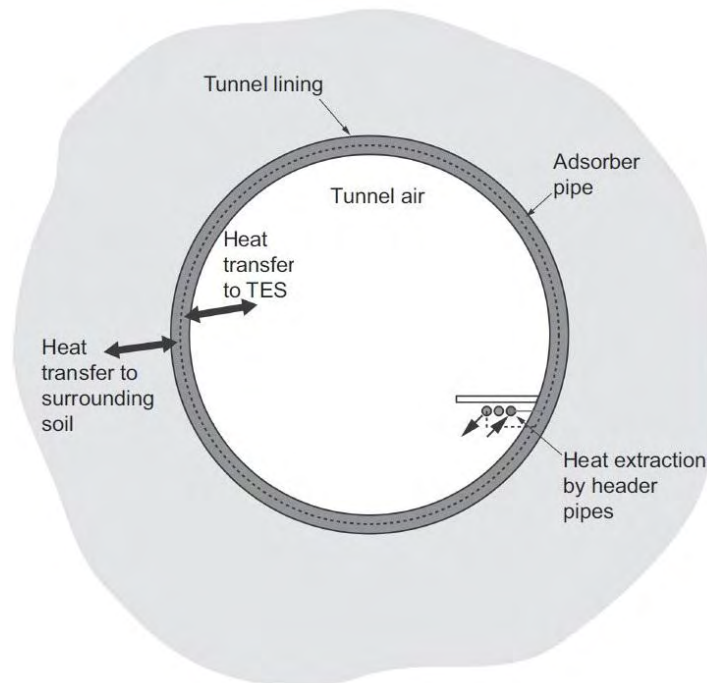
	Type of rock	Thermal conductivity in W/(m K)		Volume-related specific heat capacity in MJ/(m ³ ·K)	Density in 10 ³ kg/m ³
			Recommended value		
Unconsolidated	clay/silt, dry	0,4–1,0	0,5	1,5–1,6	1,8–2,0
	clay/silt, water-saturated	1,1–3,1	1,8	2,0–2,8	2,0–2,2
	sand, dry	0,3–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2
	sand, moist	1,0–1,9	1,4	1,6–2,2	1,9–2,2
	sand, water-saturated	2,0–3,0	2,4	2,2–2,8	1,9–2,3
	gravel/stones, dry	0,4–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2
	gravel/stones, water-saturated	1,6–2,5	1,8	2,2–2,6	1,9–2,3
	till/loam	1,1–2,9	2,4	1,5–2,5	1,8–2,3
	peat, soft lignite	0,2–0,7	0,4	0,5–3,8	0,5–1,1
Sedimentary rock	clay/silt stone	1,1–3,4	2,2	2,1–2,4	2,4–2,6
	sandstone	1,9–4,6	2,8	1,8–2,6	2,2–2,7
	conglomerate/breccia	1,3–5,1	2,3	1,8–2,6	2,2–2,7
	marlstone	1,8–2,9	2,3	2,2–2,3	2,3–2,6
	limestone	2,0–3,9	2,7	2,1–2,4	2,4–2,7
	dolomitic rock	3,0–5,0	3,5	2,1–2,4	2,4–2,7
	sulphate rock (anhydrite)	1,5–7,7	4,1	2,0	2,8–3,0
	sulphate rock (gypsum)	1,3–2,8	1,6	2,0	2,2–2,4

Το σκυρόδεμα, όπως και το έδαφος αποτελείται από διάφορα υλικά που το καθένα από αυτά έχει διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Συνεπώς, η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από τις θερμικές και φυσικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών του, όπως το τσιμέντο, τα αδρανή και τα πρόσθετα. Αυτό που επίσης επηρεάζει τη θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία και η θερμοκρασία του. Οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος κυμαίνεται από 1 W/mK έως 4 W/mK.

5.5 Μεταφορά θερμότητας στο κέλυφος της σήραγγας

Στη περίπτωση λειτουργίας ενός γεωθερμικού συστήματος σε μία σήραγγα, οι κύριες διεργασίες μεταφοράς ενέργειας που παρατηρούμε είναι η συναγωγή και η αγωγή. Καθώς το νερό κυκλοφορεί μέσα στους σωλήνες, ανταλλάσσει θερμότητα με τα τοιχώματα του σωλήνα με συναγωγή. Εξαιτίας των μοριακών δονήσεων και της αλληλεπίδρασής τους, τα τοιχώματα των σωληνώσεων ανταλλάσσουν θερμότητα με το σκυρόδεμα και αυτό με το έδαφος με αγωγή. Το σκυρόδεμα, το έδαφος αλλά και το πλαστικό, υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως για τις σωληνώσεις των γεωθερμικών συστημάτων, παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας και ειδικής θερμότητας. Στο σχήμα παρακάτω, φαίνεται μια τυπική τομή μιας

σήραγγας, στην οποία απεικονίζεται η μεταφορά της θερμότητας από το κέλυφος της σήραγγας στο έδαφος.



Σχήμα 12. Τυπική τομή υπόγειας σήραγγας

5.6 Θερμική διαστολή των εδαφικών σχηματισμών

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής ενός υλικού, περιγράφει την τάση ενός υλικού να μεταβάλλει τον όγκο του όταν υποβάλλεται σε αλλαγή της θερμοκρασίας του και ορίζεται ως η κλασματική αύξηση του μήκους ανά μονάδα αύξησης της θερμοκρασίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό των υλικών, όταν θερμαίνονται αυξάνεται ο όγκος τους λόγω της αυξημένης θερμικής δόνησης των ατόμων. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει πάντα, και αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ότι δεν συμβαίνει στα εδάφη τα οποία μπορούν υπό την αύξηση της θερμοκρασίας να παρουσιάσουν συσταλτική συμπεριφορά.

Η θερμικές παραμορφώσεις των εδαφών εξαιτίας θερμικού φορτίου, εξαρτώνται από τη θερμική διαστολή και συστολή των κόκκων των εδαφών και των πόρων του νερού. Εξαιτίας των διαφορετικών θερμικών συντελεστών διαστολής των επιμέρους υλικών του εδάφους, συσσωρεύεται περίσσεια πίεση πόρων, και προκαλείται αναδιάταξη του στερεού σκελετού του εδάφους. Μεγάλη επιρροή στις θερμικές μεταβολές του όγκου των αργίλων, έχει ο λόγος υπερστερεοποίησης (OCR). Η κανονική υπερστερεοποιημένη άργιλος, όταν υποβάλλεται σε

θέρμανση, τότε παρουσιάζει πλαστική συμπεριφορά, ενώ ο άργιλος υψηλής OC ελαστική διασταλτική συμπεριφορά η οποία αυξάνει με το OCR και ακολουθείται από πλαστική συστολή. Αυτό σημαίνει ότι οι άργιλοι μπορούν να παρουσιάσουν θετικό ή αρνητικό συντελεστή θερμικής διαστολής ανάλογα με τις τιμές OCR του, την ορυκτολογική τους ιδιότητα και την θερμοκρασία που υφίστανται.

Σε αντίθεση με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για το έδαφος και τη θερμική διαστολή του, το σκυρόδεμα όπως και με τα περισσότερα υλικά, παρουσιάζει πάντοτε θετικό συντελεστή θερμικής διαστολής. Αυτό σημαίνει ότι ο όγκος του αυξάνεται όταν θερμαίνεται και μειώνεται όταν ψύχεται. Αυτό που έχει πολύ σημαντικό ρόλο στη θερμική διασταλτική συμπεριφορά του σκυροδέματος, είναι τα αδρανή, που είναι και το κύριο συστατικό του σκυροδέματος. Διάφοροι τύποι αδρανών υλικών, παρουσιάζουν διαφορετική ορυκτολογική σύσταση, η οποία τα καθιστά περισσότερο ή λιγότερο θερμικά διασταλτικά. Για παράδειγμα, τα πυριτικά αδρανή, παρουσιάζουν υψηλή θερμική διαστολή και κατά συνέπεια, το σκυρόδεμα που τα περιέχει, θα παρουσιάζει επίσης υψηλή θερμική διαστολή. Επίσης στο σκυρόδεμα, η αναλογία νερού/τσιμέντου επηρεάζει σημαντικά τη τιμή της θερμικής του διαστολής. Γενικά, όσο μειώνεται η αναλογία νερού/τσιμέντου, ο συντελεστής θερμικής διαστολής του σκυροδέματος αυξάνεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΦΑΡΓΟΓΗΣ

ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΕ ΣΗΡΡΑΓΑ

6.1 Δεδομένα- Περιγραφή εφαρμογής- Προσομοίωση

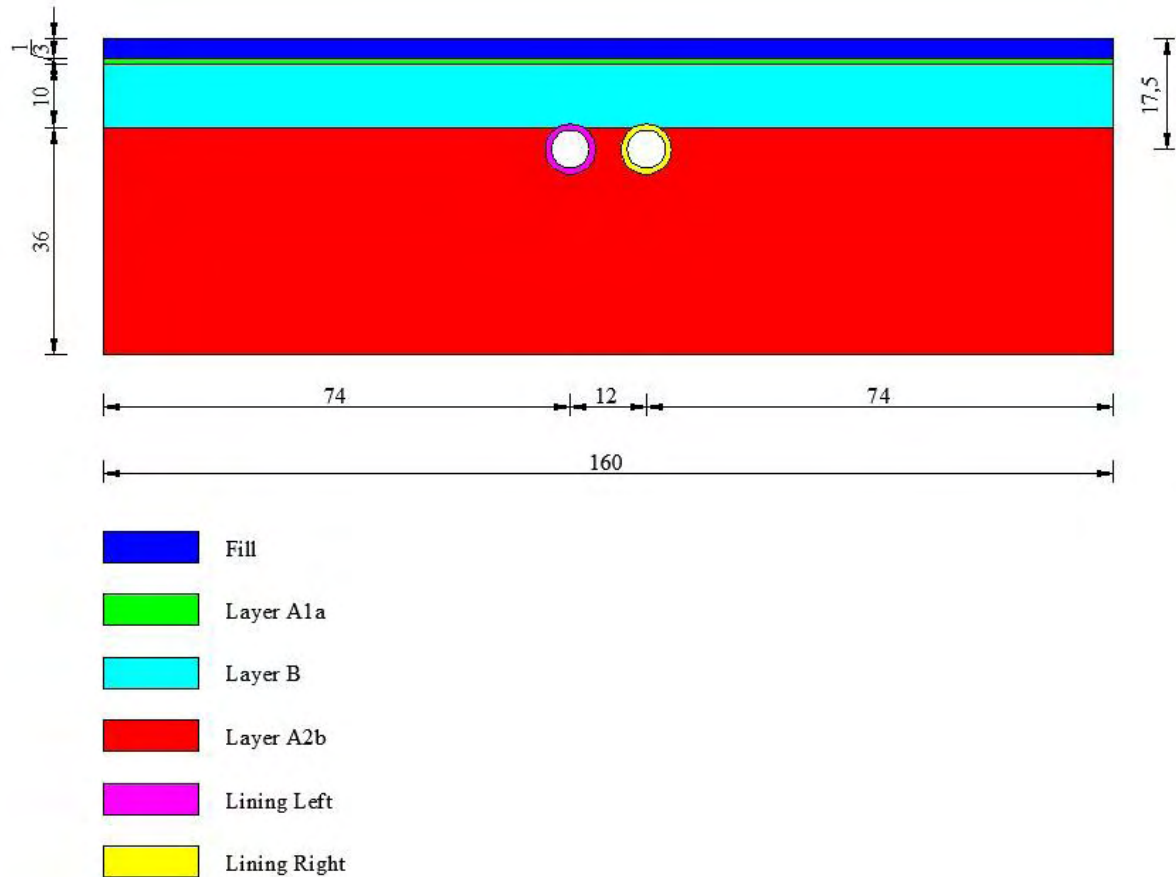
Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος σήραγγας γεωεναλλακτών και εδάφους και κατά πόσο αυτό επηρεάζει θερμικά και μηχανικά το έδαφος. Ως δεδομένα του προβλήματος ήταν η γεωμετρία του συστήματος, που αποτελείται από δύο σήραγγες σε συγκεκριμένο βάθος και σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους, και το βάθος των εδαφικών στρώσεων που περιβάλλουν τις σήραγγες. Η ανάλυση έγινε για χρονική διάρκεια ενός έτους, και οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης FLAC της εταιρείας Itasca Consulting Group.

Για την επίλυση του προβλήματος, και για τον ορισμό των χαρακτηριστικών του εδάφους, χρησιμοποιήθηκε ο καταστατικός νόμος Double-yield. Το μοντέλο Double- yield είναι ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο το οποίο ουσιαστικά αποτελεί προέκταση του μοντέλου Mohr Coulomb με δυνατότητα εισαγωγής κανόνων σκλήρυνσης ή χαλάρωσης στις παραμέτρους αντοχής και δυνατότητα μεταβαλλόμενων παραμέτρων συμπίεσότητας σε φόρτιση και αποφόρτιση ανάλογα με τη μεταβολή των πλαστικών παραμορφώσεων. Με βάση το μοντέλο αυτό τα τρία βασικά στάδια των υπολογισμών είναι: Αρχικό εντατικό πεδίο, επιφάνεια διαρροής και συνθήκη πλαστικότητας.

6.1.1 Προσομοίωση

Κατά τη προσομοίωση του προβλήματος δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα FLAC ένα πλέγμα με πλάτος 160 μέτρα και ύψος 50 μέτρα. Το πλέγμα αυτό αποτελείται από 4 διαφορετικές στρώσεις, δηλαδή 4 εδαφικά προφίλ. Η πρώτη στρώση ξεκινά από τη στάθμη 0 και φτάνει μέχρι το βάθος των 3 μέτρων, η δεύτερη συνεχίζει μέχρι το βάθος των 4 μέτρων, η τρίτη φτάνει μέχρι το βάθος των 14 μέτρων και η τέταρτη κυμαίνεται από το βάθος των 14 μέτρων έως το τελικό βάθος των 50 μέτρων. Τα ονόματα των εδαφικών αυτών στρώσεων όπως αυτά ορίστηκαν στο μοντέλο είναι κατά σειρά που αναφέρθηκαν Fill, Layer A1a, Layer B και Layer A2b. Επίσης, για την προσομοίωση των σηράγγων δημιουργήθηκαν δύο κυκλικοί δακτύλιοι πάχους 1 μέτρου και εξωτερικής διαμέτρου 8 μέτρων οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε αξονική απόσταση μεταξύ τους 12 μέτρων, κεντρικά κατά πλάτους του κάναβου και το κέντρο τους σε βάθος 17,5 μέτρων. Η ονομασία του υλικού των δύο σηράγγων που εισήχθη στο πρόγραμμα είναι Lining Left και Lining

Right για την αριστερή και δεξιά σήραγγα αντίστοιχα. Σε αυτή τη περιοχή, όπως θα δούμε αναλυτικότερα και παρακάτω, έχει εφαρμοστεί και ο μηχανισμός ανταλλαγής θερμότητας με το έδαφος.



Σχήμα 13. Σχηματική απεικόνιση μοντέλου

6.1.2 Ιδιότητες εδάφους - σήραγγας

Για κάθε μία από τις εδαφικές στρώσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο εισήχθησαν στο πρόγραμμα FLAC οι ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελούνται. Για την πρώτη εδαφική στρώση (Fill) δόθηκαν οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες: πυκνότητα 2 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας 50000 kPa , λόγος Poisson $0,35$, συνοχή 3 , θερμική αγωγιμότητα $3,43 \text{ W/(mK)}$, ειδική θερμοχωρητικότητα $1,419 \text{ J/(KgK)}$ και συντελεστής θερμικής διαστολής $1 \cdot 10^{-5}$.

Για τη δεύτερη εδαφική στρώση (Layer A1a) οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες που δόθηκαν είναι: πυκνότητα 2 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας 50000 kPa , λόγος Poisson $0,35$, συνοχή 75 , θερμική αγωγιμότητα $2,42 \text{ W/(mK)}$, ειδική θερμοχωρητικότητα $0,730 \text{ J/(KgK)}$ και συντελεστής θερμικής διαστολής $1 \cdot 10^{-5}$.

Για τη τρίτη εδαφική στρώση (Layer B) οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες που δόθηκαν είναι: πυκνότητα 2 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας 50000 kPa , λόγος Poisson $0,35$, συνοχή 220 , θερμική αγωγιμότητα $3,50 \text{ W/(mK)}$, ειδική θερμοχωρητικότητα $0,500 \text{ J/(KgK)}$ και συντελεστής θερμικής διαστολής $1 \cdot 10^{-5}$.

Για τη τέταρτη εδαφική στρώση (Layer A2b) οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες που δόθηκαν είναι: πυκνότητα 2 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας 50000 kPa , λόγος Poisson $0,35$, συνοχή 75 , θερμική αγωγιμότητα 2.42 W/(mK) , ειδική θερμοχωρητικότητα $0,730 \text{ J/(KgK)}$ και συντελεστής θερμικής διαστολής $1 \cdot 10^{-5}$.

Τέλος, το υλικό από το οποίο αποτελούνται οι δύο σήραγγες έχει τις εξής μηχανικές και θερμικές ιδιότητες: πυκνότητα 2 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας 23500000 kPa , λόγος Poisson $0,20$, θερμική αγωγιμότητα $1,70 \text{ W/(mK)}$, ειδική θερμοχωρητικότητα $0,880 \text{ J/(KgK)}$ και συντελεστής θερμικής διαστολής $1 \cdot 10^{-5}$.

Πίνακας 3. Ιδιότητες του εδάφους

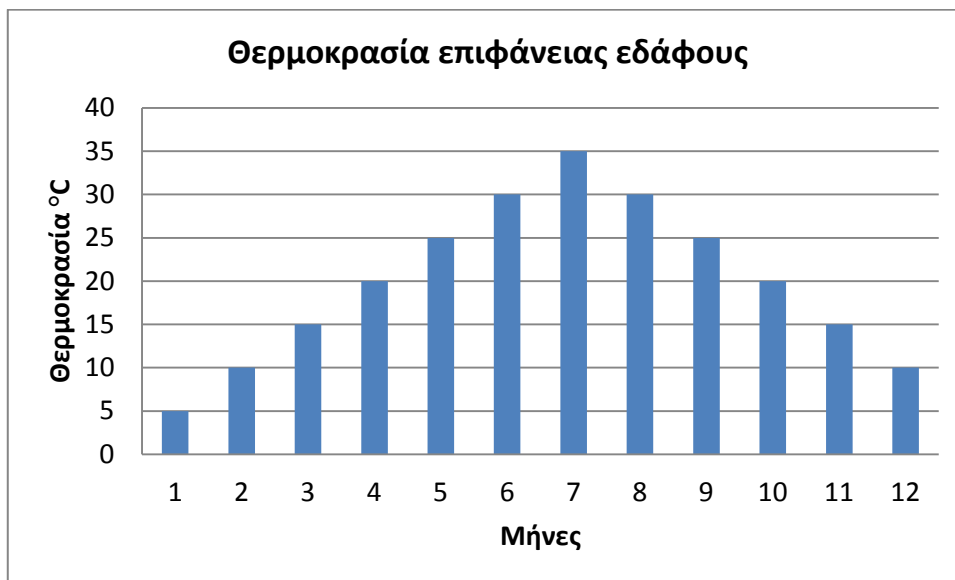
Ιδιότητες	Fill	Layer A1a	Layer B	Layer A2b	Lining Left & Right
Λόγος Poisson	0,35	0,35	0,35	0,35	0,20
Συνοχή c (kPa)	3	75	220	75	-
Πυκνότητα ρ (kg/m^3)	2	2	2	2	2
Θερμική αγωγιμότητα k W/(mK)	3,43	2,42	3,50	2,42	1,70
Ειδική θερμοχωρητικότητα C_v J/(KgK)	1,419	0,730	0,500	0,730	0,880
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής α	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$

6.1.3 Συνοριακές και αρχικές συνθήκες του αριθμητικού μοντέλου

Για την επίλυση του αριθμητικού μοντέλου ορίστηκαν συνοριακές μηχανικές και θερμικές συνθήκες. Όσον αφορά τις μηχανικές συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, στις δυο κάθετες πλευρές του κανάβου δεσμεύτηκαν οι οριζόντιες μετακινήσεις κατά x ενώ η κατακόρυφη κίνηση

κατά y αφέθηκε ελεύθερη. Στη κάτω πλευρά του κανάβου δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις και προς τις 2 κατευθύνσεις x,y και στη πάνω πλευρά δεν έγινε καμία δέσμευση των μετακινήσεων ώστε το έδαφος να μπορεί να κινηθεί ελεύθερα προς όλες τις κατευθύνσεις.

Όσον αφορά τις θερμικές συννοριακές συνθήκες, στις δυο κάθετες πλευρές και στη κάτω πλευρά του κανάβου, δεσμεύτηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας και διατηρείται σταθερή και ίση με 17°C . Η θερμοκρασία των σημείων της πάνω πλευράς του κανάβου, ακολουθεί το διάγραμμα θερμοκρασιών που βλέπουμε παρακάτω, προσομοιώνοντας όσο το δυνατόν καλύτερα τη θερμοκρασιακή μεταβολή της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Στο διάγραμμα θερμοκρασιών της επιφάνειας του εδάφους, οι αριθμοί στον οριζόντιο άξονα αντιπροσωπεύουν το εκάστοτε μήνα. Παράδειγμα η στήλη με τον αριθμό "1" απεικονίζει τη θερμοκρασία του εδάφους τον πρώτου μήνα του χρόνου, τον Ιανουάριο.



Σχήμα 14. Διακύμανση θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους στη διάρκεια ενός έτους

Όσον αφορά την υπόλοιπη περιοχή του κανάβου, ορίστηκε ως αρχική θερμοκρασία η τιμή των 17°C και δεν έγινε καμία δέσμευση ως προς την μεταβολή της. Αυτή η παραδοχή είναι και ο τρόπος να παρομοιάσουμε την θερμοκρασία του εδάφους που είναι σταθερή από ένα βάθος και κάτω, και δεν βάλουμε καμία δέσμευση προκειμένου να είναι ελεύθερη η αυξομείωσή της για να εξάγουμε τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν.

6.2 Στάδια εφαρμογής θερμικής φόρτισης

Σε ένα αριθμητικό μοντέλο υπάρχουν τρεις τρόποι να εισαχθεί μια θερμική φόρτιση. Αυτοί είναι είτε εισάγοντας μια σταθερή μεταβολή της θερμοκρασίας ΔT κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου είτε εισάγοντας μια σταθερή ροή θερμότητας σε όλα τα στοιχεία (W/m^3) ή εισάγοντας μια σταθερή ροή θερμότητας ανά κόμβο (W). Στη συγκεκριμένη ανάλυση επιλέχτηκε να εισάγεται μια σταθερή τιμή θερμότητας ανά κόμβο.

Η τιμή της θερμότητας που επιβαλλόταν, άλλαζε από μήνα σε μήνα ανάλογα με τις ανάγκες που μπορεί να έχει ένα κτίριο για θέρμανση ή ψύξη. Τους καλοκαιρινούς μήνες, το νερό που ρέει στους σωλήνες του συστήματος που περιβάλλουν τις δύο σήραγγες έχει υψηλότερη θερμοκρασία από το έδαφος. Οπότε και έχουμε μεταφορά θερμότητας από το νερό στο έδαφος. Στο μοντέλο εισήχθη η θερμότητα αυτή που εναποτίθεται στη γη με τελικό αποτέλεσμα τη ψύξη ενός υποτιθέμενου κτιρίου. Η τιμή της θερμότητας κατά τη διάρκεια της ψύξης είναι θετική, πρόσημο που αντιπροσωπεύει ροή θερμότητας από το σύστημα στο περιβάλλον. Αυτή είναι παραδοχή που τέθηκε κατά τη διάρκεια μοντελοποίησης των δύο σηράγγων.

Αντίθετα, κατά τη χειμερινή περίοδο, η θερμοκρασία του νερού είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του εδάφους και έχουμε μεταφορά θερμότητας από το έδαφος στο νερό. Στο μοντέλο εισάγονται αυτές οι τιμές της θερμότητας που ως τελικό αποτέλεσμα έχουν την θέρμανση ενός υποτιθέμενου κτιρίου. Σε αυτή τη περίπτωση η θερμότητα έχει αρνητική τιμή, γεγονός που αντιπροσωπεύει ροή θερμότητας από το περιβάλλον στο σύστημα.

Οι τιμές της θερμότητας που εισήχθησαν στο πρόγραμμα επιλέχθηκαν σύμφωνα με δυο κριτήρια που τέθηκαν από την αρχή της μοντελοποίησης. Το αρχικό κριτήριο ήταν εάν θέλουμε εισαγωγή ή εξαγωγή θερμότητας από το σύστημά μας. Αυτό είναι άμεσα εξαρτώμενο από την εποχή και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και κατ' επέκταση την ανάγκη για θέρμανση ή ψύξη όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Δεύτερο κριτήριο ήταν το ότι η ποσότητα της θερμότητας που θα εισήγαμε ή θα εξήγαμε από το σύστημά δεν θα έπρεπε να επηρεάζει τη θερμοκρασία του εδάφους τόσο ώστε να ξεπερνάει κάποιες ακραίες τιμές που ορίστηκαν. Έτσι από την αρχή, τέθηκε ως κατώτερο όριο της θερμοκρασίας του εδάφους η τιμή των περίπου $5^{\circ}C$ και ανώτερο η τιμή των περίπου $35^{\circ}C$. Μετά από δοκιμές επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές της θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν εν τέλη για την επίλυση του μοντέλου και για την εξαγωγή και ανάλυση των τελικών αποτελεσμάτων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι τιμές της θερμότητας που εισάγονται μετριοούνται σε Watt (W), και στην ουσία αντιπροσωπεύει θερμότητα που ρέει ανά κόμβο.

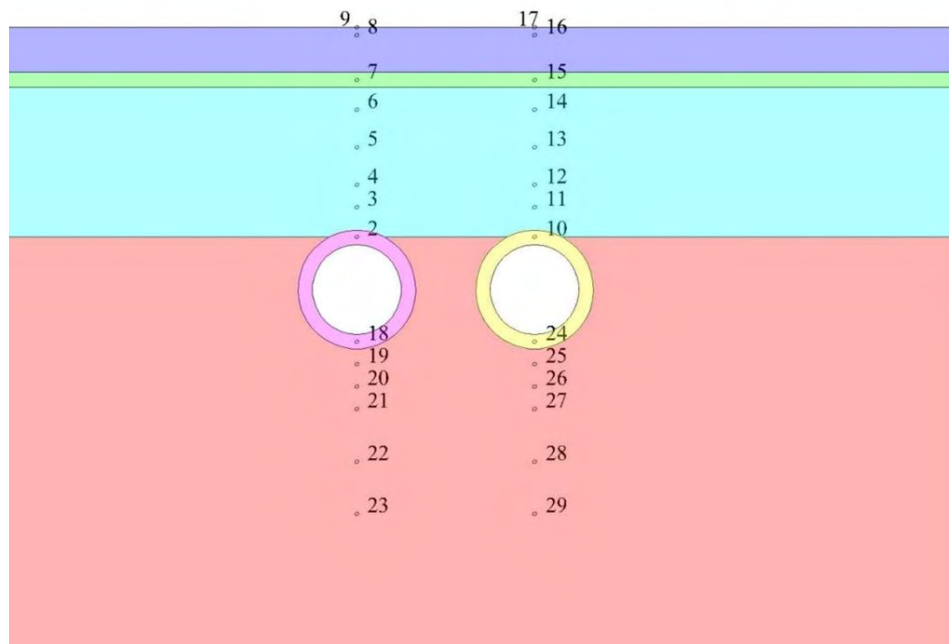
Πίνακας 4. Τιμές θερμότητες που εισήχθησαν στο μοντέλο ανά μήνα

Μήνας	Q (W)
Ιανουάριος	-70
Φεβρουάριος	-70
Μάρτιος	-70
Απρίλιος	-70
Μάιος	-20
Ιούνιος	25
Ιούλιος	70
Αύγουστος	70
Σεπτέμβριος	70
Οκτώβριος	-30
Νοέμβριος	-70
Δεκέμβριος	-70

6.3 Αποτελέσματα πολυσταδιακής αριθμητικής επίλυσης

Κατά την επίλυση του αριθμητικού προβλήματος, προκειμένου να γίνει όσο το δυνατόν ευκολότερη η κατανόηση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, δημιουργήθηκαν 28 σημεία μέτρησης θερμοκρασιών με το χρόνο σε διάφορα σημεία του κανάβου. Η θέση τους επιλέχθηκε σύμφωνα με τη θέση των δύο σηράγγων και τοποθετήθηκαν ανάλογα. Η θερμοκρασία που καταγράφεται, μετριέται σε κλίμακα κελσίου και κατά τη διάρκεια της επίλυσης, αποθηκεύονται τα δεδομένα από κάθε χρονική στιγμή έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια χρονοϊστορία θερμοκρασιών σε κάθε μία επιλεγμένη θέση.

Η θέση των σημείων αυτών φαίνεται και σχηματικά στη παρακάτω σχηματική απεικόνιση του μοντέλου. Από τα 28 σημεία, ουσιαστικά τα 14 αποτελούν σημεία για παρακολούθηση των θερμοκρασιών της αριστερή σήραγγας (lining left) και τα υπόλοιπα 14 για την παρακολούθηση των θερμοκρασιών της δεξιάς σήραγγας (lining right). Η απόσταση μεταξύ των σημείων καθ' ύψος είναι από 1,5 έως 3 μέτρα. Η απόσταση των σημείων της αριστερής σήραγγας με αυτά της δεξιάς σήραγγας οριζοντίως είναι όση είναι και η απόσταση των κέντρων των σηράγγων μεταξύ τους, δηλαδή 12 μέτρα.



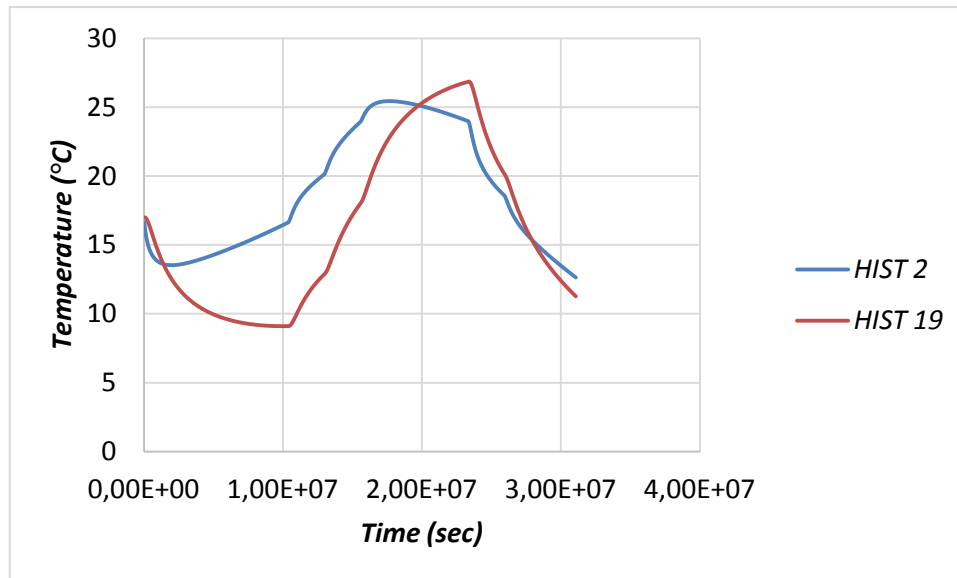
Σχήμα 15. Σημεία μέτρησης θερμοκρασίας

Όπως φάνηκε κατά την παρατήρηση των αποτελεσμάτων, η θερμοκρασία του εδάφους τους χειμερινούς μήνες όπου το σύστημα παίρνει θερμότητα από το έδαφος, μειώνεται. Αντίστοιχα, τους μήνες όπου το σύστημα δίνει θερμότητα στο έδαφος, η θερμοκρασία σημειώνει αύξηση. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας του εδάφους εξαρτάται από τη τιμή της θερμότητας που εισάγει ή εξάγει το σύστημα που είναι εγκατεστημένο στις σήραγγες, αλλά και φυσικά από την απόσταση. Όπως φαίνεται και σχηματικά, όσο μεγαλώνει η απόσταση από την περίμετρο των σηράγγων τόσο μικρότερη είναι και η μεταβολή της θερμοκρασίας.

Κατά τη χρονική διάρκεια για την οποία έγινε η ανάλυση του μοντέλου, δηλαδή 12 μηνών, η θερμοκρασία του εδάφους στα σημεία τα οποία βρίσκονται κοντά στη περίμετρο των σηράγγων, παρουσιάζει μια πτώση από τους 17°C στους 5°C, έπειτα μετά την εξαγωγή θερμότητας από το σύστημα, αυξάνεται στους 32°C και μειώνεται πάλι κοντά στους 17°C εξαιτίας της απορρόφησης θερμότητας. Πραγματοποιεί δηλαδή έναν πλήρη κύκλο με την τελική τιμή της θερμοκρασίας να είναι σχεδόν όσο και η αρχική, κάτι που ήταν επιθυμητό.

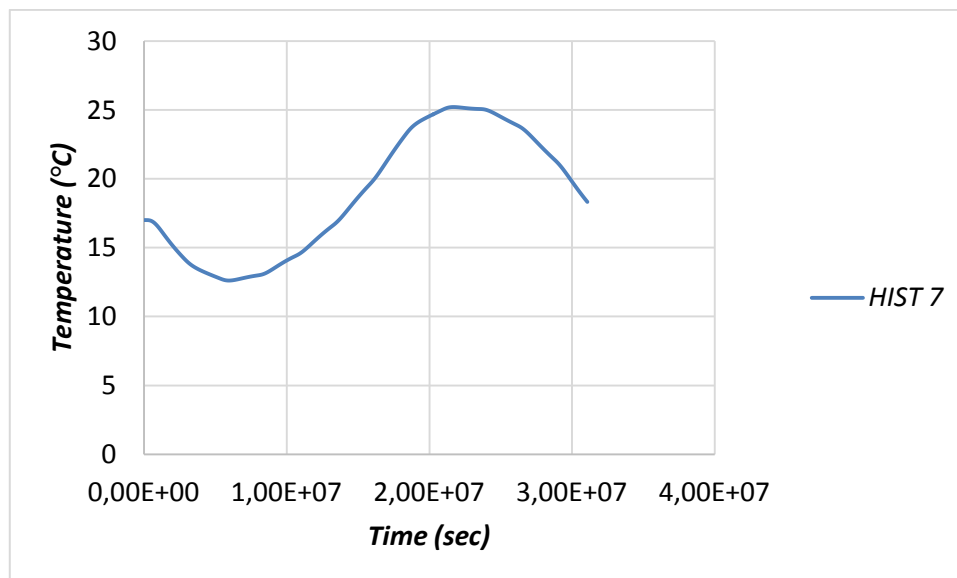
Όσο μεγαλώνει η απόσταση από τα σημεία μεταφοράς θερμότητας, η αυξομείωση αυτή μικραίνει τόσο ώστε στα σημεία που βρίσκονται κοντά στα όρια του κανάβου, να είναι σχεδόν αμελητέα. Αυτό δεν ισχύει για τα σημεία που βρίσκονται πάνω από τη σήραγγα τα οποία δείχνουν αν επηρεάζονται τόσο από τη μεταφορά θερμότητας που επιβάλλεται όσο και από την

μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας. Παρακάτω φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν, η διακύμανση της θερμοκρασίας με τον χρόνο για επιλεγμένα σημεία.



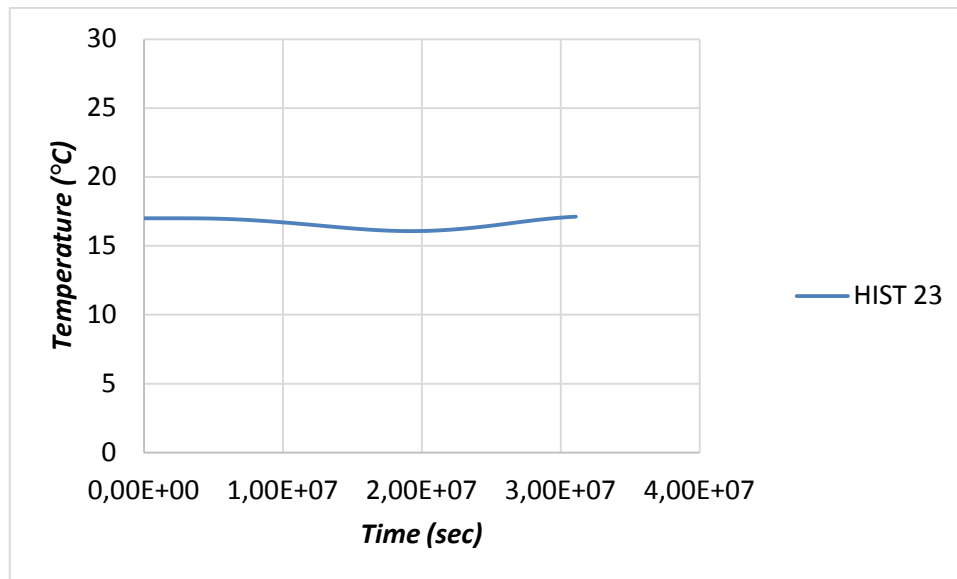
Σχήμα 16. Θερμοκρασιακή μεταβολή στα σημεία 2 & 19 κατά τη διάρκεια ενός έτους

Οι μεγάλες διακυμάνσεις στις θερμοκρασίες που παρατηρούνται στις χρονοϊστορίες των σημείων 2 και 19 είναι λογικές καθώς τα σημεία αυτά, είναι τα πιο κοντινά στη σήραγγα, δηλαδή στη πηγή εισαγωγής και εξαγωγής θερμότητας.

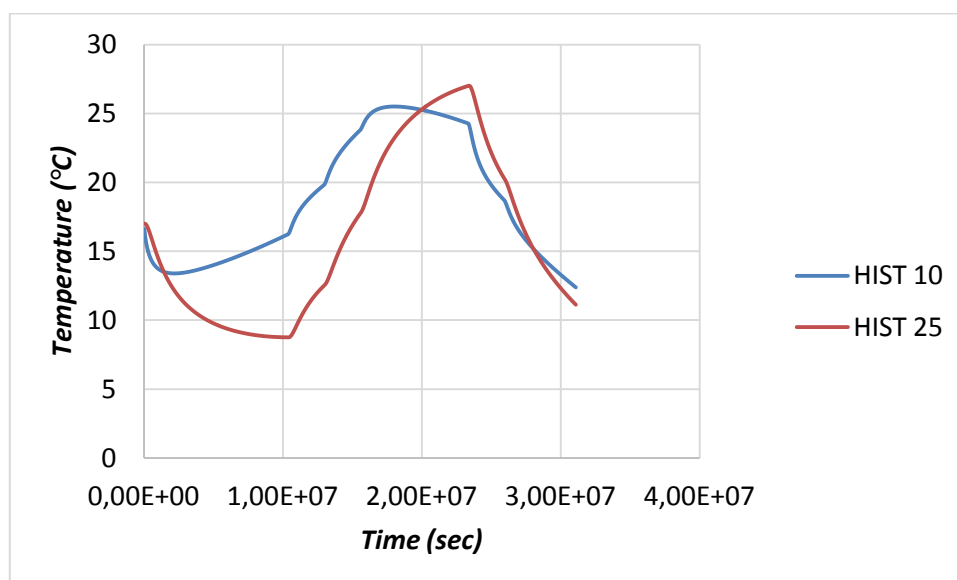


Σχήμα 17. Θερμοκρασιακή μεταβολή στο σημείο 7 κατά τη διάρκεια ενός έτους

Όπως διαπιστώνουμε από τη θερμοκρασιακή μεταβολή στο σημείο 7, η διακύμανση της θερμοκρασίας μικραίνει, γεγονός λογικό όσο απομακρυνόμαστε από τη σήραγγα.

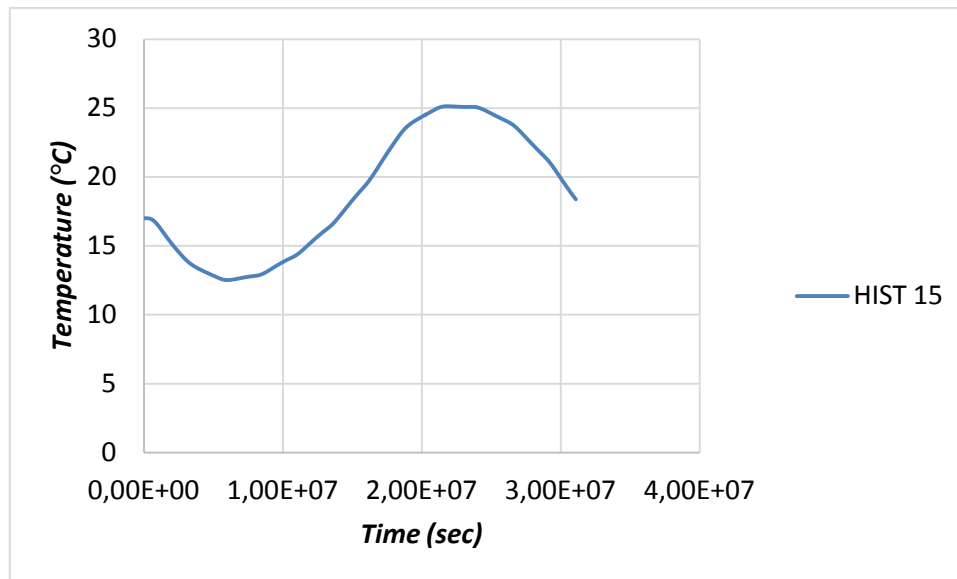


Σχήμα 18. Θερμοκρασιακή μεταβολή στο σημείο 23 κατά τη διάρκεια ενός έτους

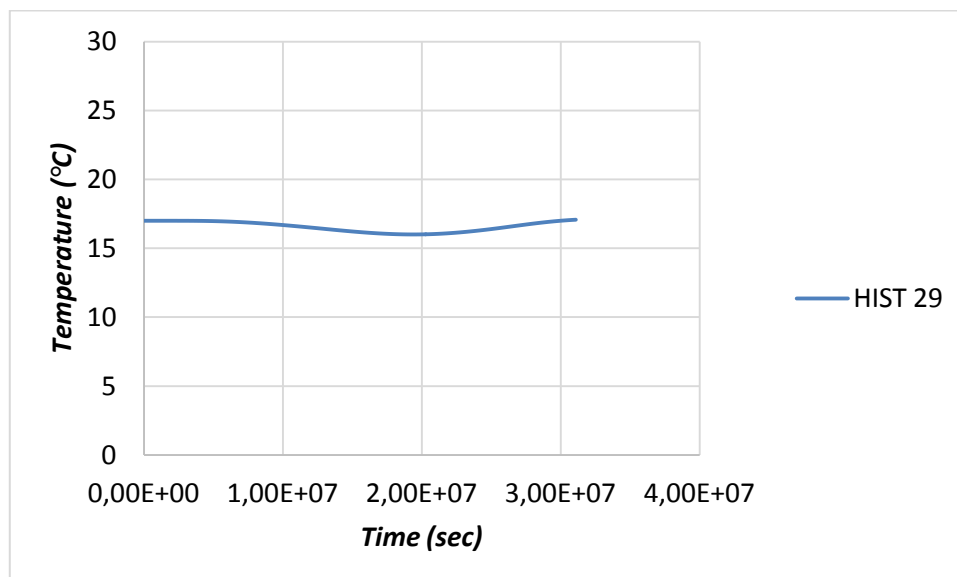


Σχήμα 19. Θερμοκρασιακή μεταβολή στα σημεία 10 & 25 κατά τη διάρκεια ενός έτους

Η διακύμανση της θερμοκρασίας στα σημεία 2, 19, 10 & 25 είναι κατά ζεύγη παρόμοια κάτι που ήταν και αναμενόμενο καθώς έχουν ίδια σχετική θέση με την κάθε σήραγγα. Τα σημεία 2 και 10 βρίσκονται ακριβώς πάνω από τις δύο σήραγγες ενώ τα σημεία 19 και 25 βρίσκονται κάτω από τις σήραγγες και σε απόσταση από το κέντρο τους 5 μέτρα. Το ίδιο ισχύει και για τις θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στα σημεία 7, 15, 23 και 29 για την ίδια χρονική διάρκεια. Τα σημεία 7 και 15 βρίσκονται σε απόσταση 3,5 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους ενώ τα σημεία 23 και 29, βρίσκονται 15 μέτρα πιο βαθιά από το κέντρο των σηράγγων.

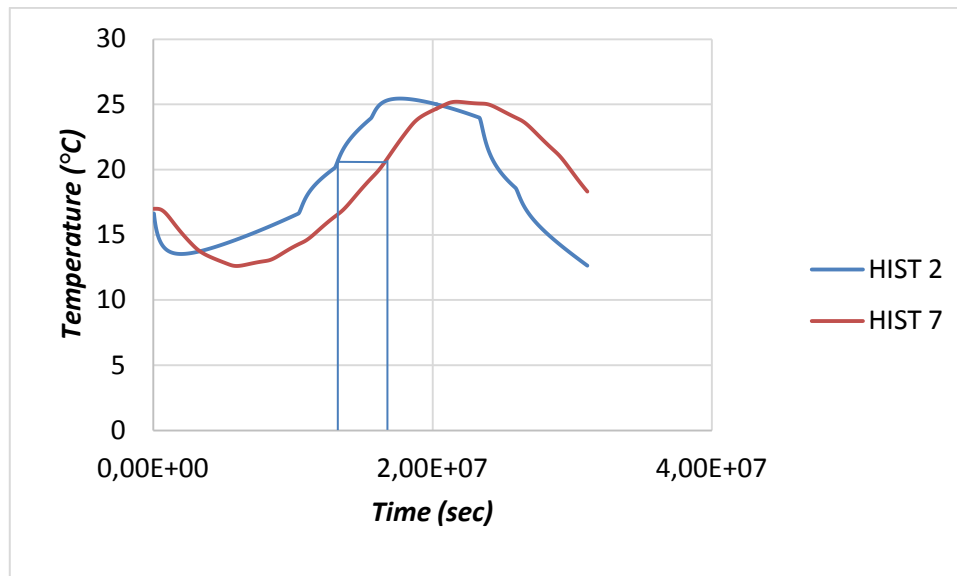


Σχήμα 20. Θερμοκρασιακή μεταβολή στο σημείο 15 κατά τη διάρκεια ενός έτους



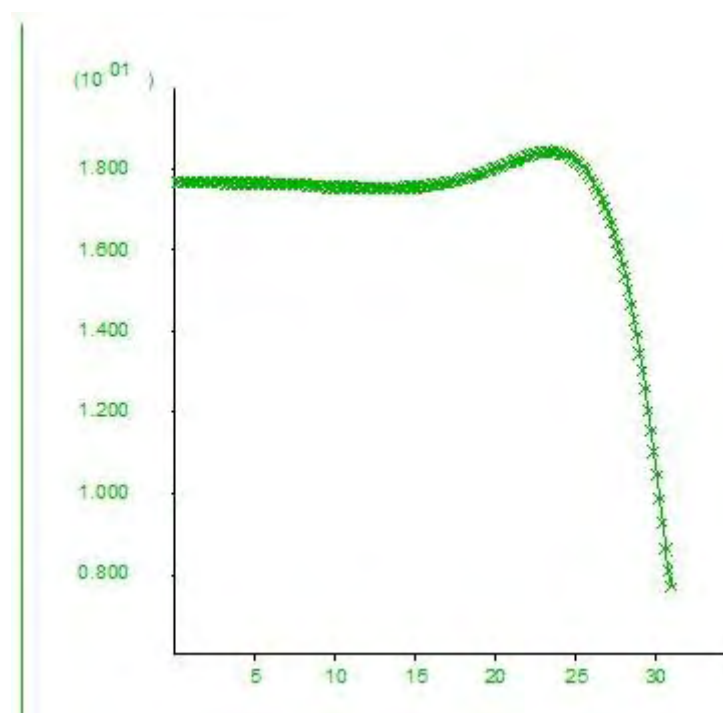
Σχήμα 21. Θερμοκρασιακή μεταβολή στο σημείο 29 κατά τη διάρκεια ενός έτους

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του σημείου 2 που βρίσκεται κοντά στην αριστερή σήραγγα και του σημείου 7 που βρίσκεται κοντά στο έδαφος. Όπως παρατηρούμε η μεταβολή της θερμοκρασίας έχει μια διαφορά φάσης περίπου 40 ημερών. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η απόσταση μεταξύ των δύο αυτών σημείων είναι 10,5 μέτρα, ενώ το σημείο 2 βρίσκεται σε βάθος 14 μέτρων και το σημείο 7 σε βάθος 3,5 μέτρων



Σχήμα 22. Διαφορά φάσης των θερμοκρασιακών μεταβολών στα σημεία 2 & 7

Μεγάλη σημασία έχει και η παρατήρηση της μεταβολής της θερμοκρασίας καθώς απομακρυνόμαστε από τις δύο σήραγγες οριζοντίως. Όπως φαίνεται από το παρακάτω γράφημα, η θερμοκρασία του εδάφους όσο απομακρυνόμαστε από το περίβλημα της σήραγγας, μεταβάλλεται απότομα.



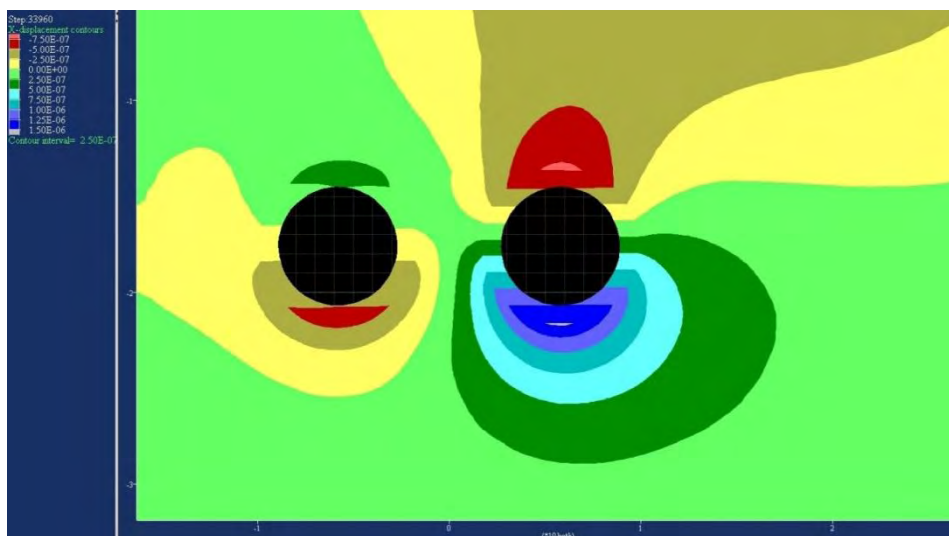
Σχήμα 23. Μεταβολή της θερμοκρασίας με την απόσταση

Το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι από τη χρονική περίοδο των 12 μηνών, όπου η θερμοκρασία κοντά στις σήραγγες είναι κοντά στους 5°C. Όπως είναι εμφανές από το γράφημα, σε απόσταση περίπου 5 μέτρα οριζοντίως από τη σήραγγα, η θερμοκρασία έχει σχεδόν φτάσει τη θερμοκρασία των 17°C ακολουθώντας μια γραμμή σχεδόν εκθετικής μορφής.

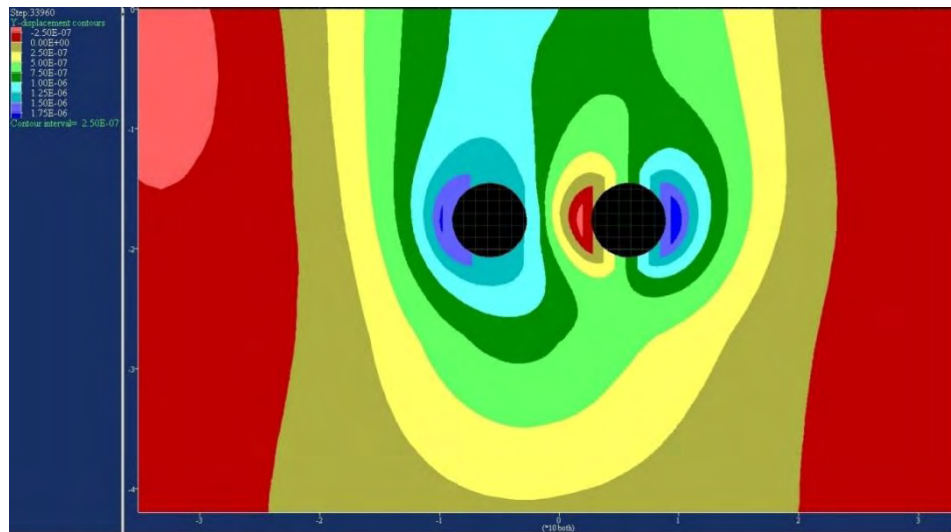
6.4 Αποτίμηση επιπτώσεων στη μηχανικής συμπεριφορά της σήραγγας

Εκτός των θερμοκρασιακών μεταβολών, ελέγχθηκαν και τυχόν μεταβολές των τάσεων και των μετακινήσεων. Τέτοιες μεταβολές μπορούν να προκληθούν εξαιτίας της διαστολής και συστολής των εδαφικών σχηματισμών από αυξομείωση αυτή των θερμοκρασιών τους. Οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι απειροελάχιστες όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς στο σύστημά μας δεν εισάγαμε και εξάγαμε μεγάλες τιμές θερμότητας.

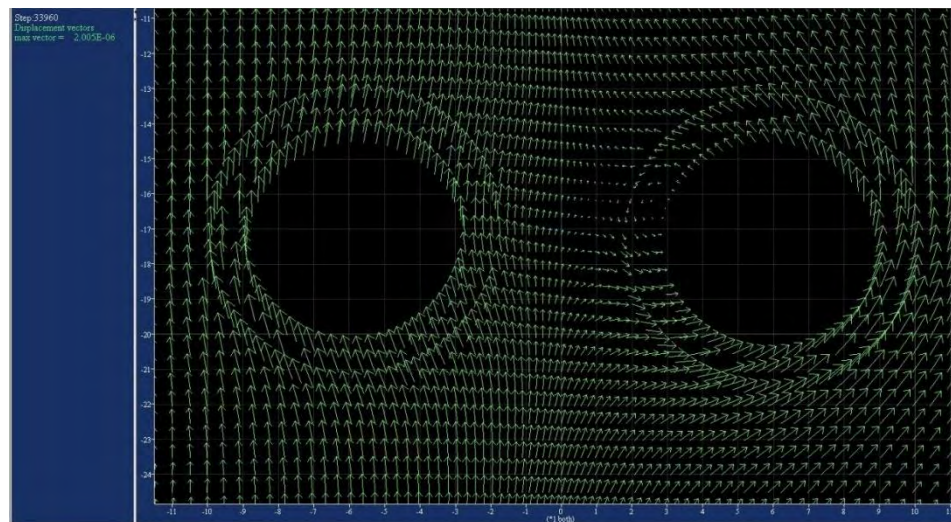
Κατά τη διάρκεια της επίλυσης, οι σχετικές μετακινήσεις που καταγράφηκαν είναι μηδαμινές. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, οι μετακινήσεις είναι της τάξεως των 1,5 μm, γεγονός που δεν μπορεί να μας απασχολήσει όσον αφορά την επιρροή των σήραγγων. Από τα διανύσματα των μετακινήσεων βλέπουμε ότι το έδαφος τείνει να διογκωθεί, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας την εξαγωγής θερμότητας από το σύστημα στο έδαφος. Στις επόμενες εικόνες βλέπουμε σχηματικά τις ισοϋψείς των μετακινήσεων κατά x και y αντίστοιχα αλλά και το συνολικό διάνυσμα των μετακινήσεων.



Σχήμα 24. Μετακινήσεις του εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση

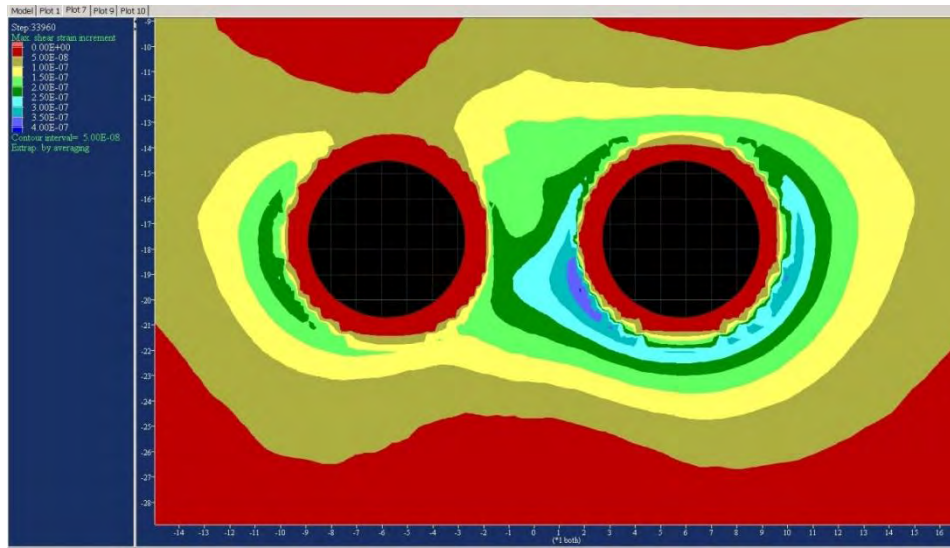


Σχήμα 25. Μετακινήσεις του εδάφους κατά την κατακόρυφη διεύθυνση



Σχήμα 26. Διανύσματα μετακίνησης του εδάφους

Όπως είναι επόμενο, παρατηρώντας μηδαμινές μετακινήσεις, μπορούμε αμέσως να υποθέσουμε ότι συμβαίνουν και μηδενικές μεταβολές τάσεων. Αυτό είναι και το αποτέλεσμα που μας έδωσε το πρόγραμμα FLAC, μετά από τη δοκιμή μετάδοσης θερμότητας για 12 μήνες. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται οι ισοϋψείς από τις μέγιστες μεταβολές διατμητικών τάσεων, το μέγεθος των οποίων είναι αντίστοιχο των μετακινήσεων. Οι μηδενικές σχεδόν μεταβολές των τάσεων μας υποδεικνύει ότι η εγκατάσταση ενός γεωθερμικού συστήματος σε δ'υο γειτονικές σήραγγες όπως αυτές του μοντέλου, δεν μπορεί να έχει καμιά επίπτωση στη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους και τω σηράγγων.



Σχήμα 27. Ισοϋψείς μεταβολών διατμητικών τάσεων του εδάφους

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση ενός γεωθερμικού συστήματος τοποθετημένου σε δύο γειτονικές σήραγγες χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FLAC. Τα αποτελέσματα την ανάλυσης αυτής, μας βοήθησε να καταλάβουμε την επίδραση που μπορεί να έχει η εγκατάσταση ενός γεωθερμικού συστήματος στην μεταβολή της θερμοκρασίας αλλά και στην μεταβολή των τάσεων του υπεδάφους.

Συγκεντρώνοντας και επεξεργάζοντας τα αποτελέσματα θερμοκρασιών και τάσεων από το πρόγραμμα FLAC, μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την συμπεριφορά και τις επιπτώσεις της εγκατάστασης ενός γεωθερμικού συστήματος σε υπόγειες σήραγγες. Όσον αφορά τις θερμοκρασιακές μεταβολές, είναι φυσικό να παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του υπεδάφους κατά την μεταφορά θερμότητας από το σύστημα στο έδαφος και μείωση της θερμοκρασίας στην αντίθετη περίπτωση. Επίσης όσο απομακρυνόμαστε από το κέλυφος των σηράγγων, η θερμοκρασία του υπεδάφους επηρεάζεται λιγότερο, και αυτή η επιρροή μειώνεται απότομα και πολύ σύντομα η θερμοκρασία του εδάφους φτάνει στη θερμοκρασία των 17°C, που είναι και η αρχική θερμοκρασία του εδάφους της περιοχής. Όπως είναι φανερό από τα αποτελέσματα αυτή η θερμοκρασιακή επιρροή γίνεται σε απόσταση περίπου 5 μέτρων από το κέλυφος της σήραγγας.

Εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του υπεδάφους, παρατηρείται διαστολή και συστολή των σχηματισμών ανάλογα με την αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας. Αυτή η συστολή και διαστολή των σχηματισμών προκαλεί την μεταβολή των τάσεων τους. Όσον αφορά τις μηχανικές μεταβολές του εδάφους λοιπόν, μελετήθηκε η μεταβολή των τάσεων αλλά και των μετακινήσεων του εδάφους γύρω από τις σήραγγες. Από τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι η επίδραση που μπορεί να έχει ένα γεωθερμικό σύστημα σαν το συγκεκριμένο που προσομοιώθηκε στην αριθμητική ανάλυση, είναι μικρή έως αμελητέα.. Οι μεταβολές των τάσεων που παρουσιάζει το υπέδαφος εξαιτίας την διαστολής και στην συστολής δεν υποδηλώνουν κανένα κίνδυνο. Αυτό συμβαίνει καθώς θέσαμε εξ αρχής όρια των θερμοκρασιών που να μπορεί να έχει το υπεδάφος και επιλέξαμε τις τιμές θερμότητας που εισάγαμε στο σύστημα έτσι ώστε να μην ξεπεραστούν.

Το συγκεκριμένο θέμα υπάρχουν πολλά πεδία που μπορεί κανείς να μελετήσει τα οποία εκτός από επιστημονικό ενδιαφέρον έχουν και οικονομικό και μακροπρόθεσμα περιβαλλοντικό. Θα άξιζε λοιπόν να γίνουν αρκετές έρευνες ακόμα γύρω από αυτό το κομμάτι με εστίαση στην μηχανική συμπεριφορά του εδάφους και των σηράγγων και σε άλλες συνθήκες θερμοκρασίας και υλικών από τα οποία απαρτίζεται το υπέδαφος. Θα άξιζε να μελετηθεί κατά πόσο αποδοτικό

θα ήταν ένα παρόμοιο σύστημα σε περίπτωση όπου έχουμε ανάγκη μόνο για θέρμανση ή για ψύξη αντίστοιχα, σε περιοχές δηλαδή με ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γούλας, Τ., Goulas, Τ., Γιαννέλης, Κ., & Giannelis, Κ. (2012). Εφαρμογές στη γεωθερμία.
- Καββαδάς, Μ. (2005). Στοιχεία εδαφομηχανικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Καρατάσος, Α. Σ., & Τζιώλος, Δ. Σ. (2015). Αβαθής γεωθερμία και τρόποι εκμετάλλευσής της.
- Κουτελίδα, Α. Σ. (2010). Ανάλυση και εκτίμηση θερμοκρασιών εδάφους.
- Κωνσταντινίδης, Ε. (2017). Γεωθερμία στην Ελλάδα.
- Λιούτας, Γ., & Παπαδάκης, Ζ. (2009). Αξιοποίηση γεωθερμίας με χρήση αντλιών θερμότητας.
- Φραγκογιάννης Γ., 2011. Αναλυτικός Σχεδιασμός και Παραμετρική ανάλυση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφους γεωεναλλάκτες. Πειραματική διερεύνηση του θερμικού δυναμικού του υπεδάφους. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 284 σελ.
- Φραγκογιάννης Γ.Ι., Παπαθεοδώρου Ν.Γ., Σταματάκη Σ.Κ. & Ρόζος Δ.Ε., 2010. Πειραματικός Προσδιορισμός της Θερμικής Αγωγιμότητας Εδαφών - Συσχέτιση με Χαρακτηριστικές Ιδιότητες των Εδαφικών Υλικών. 60 Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09- 1/10/2010, Βόλος, 8 σελ.
- Antics, M., & Sanner, B. (2007, May). Status of geothermal energy use and resources in Europe. In Proceedings of the European geothermal congress (p. 8).
- Barla, M., & Perino, A. (2015). Energy from geo-structures: a topic of growing interest. Environmental geotechnics, 2(1), 3-7.
- Franzius, J. N., & Pralle, N. (2011). Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 164(1), 35.
- Hsiung, S. M., Chowdhury, A. H., & Nataraja, M. S. (2005). Numerical simulation of thermal–mechanical processes observed at the Drift-Scale Heater Test at Yucca Mountain, Nevada, USA. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(5-6), 652-666.
- Hurtig, E., Cermak, V., Haenel, R., & Zui, V. (1992). Geothermal atlas of Europe.
- Kagel, A., Bates, D., & Gawell, K. (2007). A guide to geothermal energy and the environment, geothermal energy association. Pennsylvania Avenue SE, Washington, DC.
- Loveridge, F., & Powrie, W. (2013, September). Performance of piled foundations used as heat exchangers. In 18th International Conference for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France.
- Nicholson, D. P., Chen, Q., de Silva, M., Winter, A., & Winterling, R. (2014, June). The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability (Vol. 167, No. 3, pp. 118-134). Thomas Telford Ltd.

Pahud, D., & Hubbuch, M. (2007). Measured thermal performances of the energy pile system of the dock midfield at Zürich Airport.

Vrachopoulos, M., Koukou, M., Karytsas, K., Βραχόπουλος, Μ., Κούκου, Μ., & Καρύτσας, Κ. (2015). NORMAL GEOTHERMY-DESIGN PRINCIPLES OF GEOTHERMAL SYSTEMS AND APPLICATIONS.

Wilhelm, J., & Rybach, L. (2003). The geothermal potential of Swiss Alpine tunnels. *Geothermics*, 32(4-6), 557-568.

Wilhelm, J., & Rybach, L. (2003). The geothermal potential of Swiss alpine tunnels Forecast and valorization. In *European Geothermal Conference, Szeged, Hungary*.

Wu, D., Zhang, Y., Zhao, R., Deng, T., & Zheng, Z. (2017). A coupled thermal-hydraulic-mechanical application for subway tunnel. *Computers and Geotechnics*, 84, 174-182.