



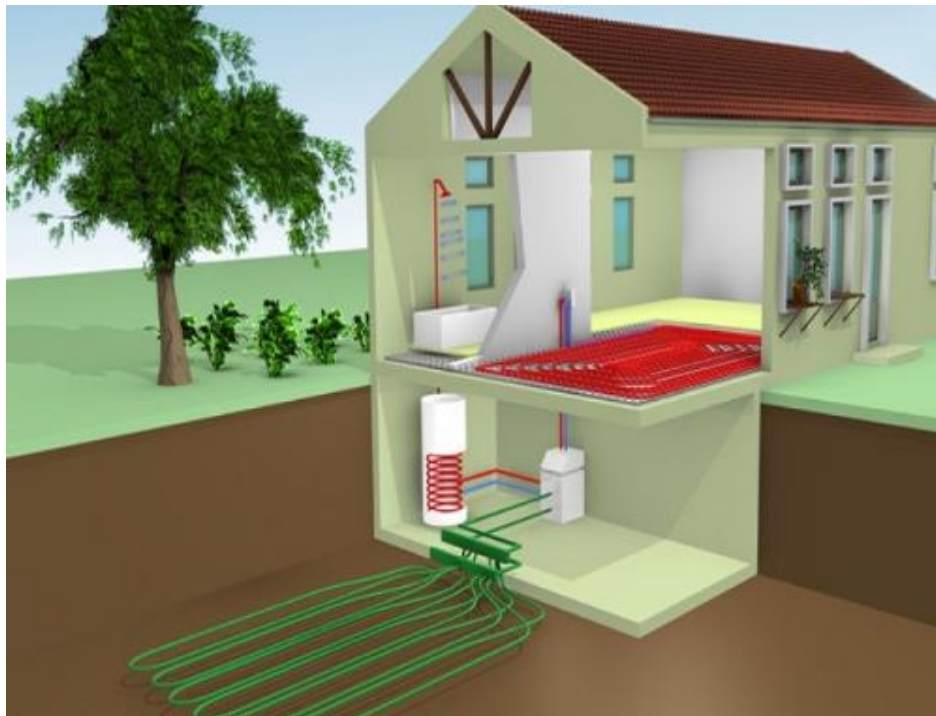
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Επιστημονική ανασκόπηση των συστημάτων αντλιών θερμότητας
αβαθούς γεωθερμίας**



Τσούβαλης Χρήστος
ΑΜ: 46147721

Επιβλέπων: Σακελλαρίου Ευάγγελος

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022



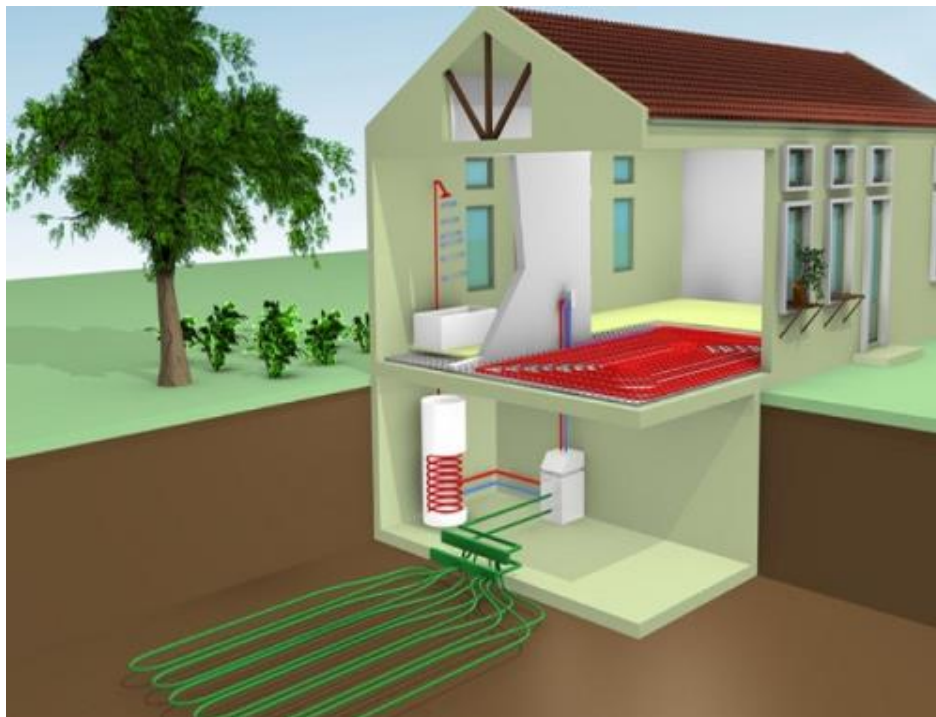
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Literature review on ground source heat pump systems



TSOUVALIS CHRISTOS

AM: 46147721

Supervisor: SAKELLARIOU EVANGELOS

Athens, September 2022

Τριμελής επιτροπή αξιολόγησης της διπλωματικής

Κοσμάς Καββαδίας	
Αντώνιος Νάζος	
Ευάγγελος Σακελλαρίου	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τσούβαλης Χρήστος του Πέτρου, με αριθμό μητρώου 46147721 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Περίληψη

Η αναγκαιότητα για επένδυση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής αυξάνεται διαρκώς. Η εκμετάλλευση της ενέργειας που προσφέρεται από την αβαθή γεωθερμία, μέσω των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, είναι βιώσιμη οικονομικά και ενεργειακά. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί επιστημονική ανασκόπηση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Οπότε αναφέρονται τα υποσυστήματα που αποτελούνται, μαζί με τις διάφορες πιθανές διατάξεις, αφού πρώτα παρουσιαστούν οι διαφορές της αβαθούς με την βαθιά γεωθερμία και οι εφαρμογές τους. Περιγράφονται όλοι οι τύποι γεωεναλλακτών, όπως είναι ο κάθετος, ο οριζόντιος, ο σπιδάλ και ο ενταγμένος στην κατασκευή, καθώς και οι ενεργειακοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και την σύγκρισή τους. Επίσης, αναφέρονται οι βασικές αρχές που αφορούν τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα υπολογισμού θερμοκρασίας του εδάφους και τις μεθόδους διαστασιολόγησης των κάθετων γεωεναλλακτών. Εκτός από το βιβλιογραφικό υπόβαθρο που παρέχεται στην εργασία, με σκοπό την κατανόηση της τεχνολογίας τον τρόπο λειτουργίας και τις εφαρμογές της, ιδιαίτερη αξία προστίθεται με την σύνοψη και πινακοποίηση πειραματικών εφαρμογών εγκατεστημένων και θεωρητικών συστημάτων-προσομοιώσεων. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους πίνακες αναλύονται και κάνουν εφικτή την σύγκριση μεταξύ των τύπων γεωεναλλακτών σε επίπεδο ενεργειακό, τεχνικοοικονομικό, κλίματος και τοπολογίας. Επίσης, δεδομένου ότι ο αριθμός των διαφορετικών περιπτώσεων με εγκατεστημένα συστήματα είναι ικανός για την εξαγωγή έγκυρων συμπερασμάτων, αυτά συγκρίνονται με την βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, προέκυψε ότι ο συντελεστής αποδοτικότητας SPF είναι για τους οριζόντιους γεωεναλλάκτες: $SPF=2,97-3,05$, για τους κάθετους: $SPF=3,72-3,91$ ενώ για τους ενταγμένους στην κατασκευή (geostucture): $SPF=3,24-3,37$. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για κλειστού τύπου συστήματα οι αναμενόμενες αντίστοιχες τιμές είναι $SPF=3-4$, γεγονός που αποδεικνύεται.

Λέξεις κλειδιά: γεωθερμική ενέργεια, αντλίες θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, οριζόντιος-κάθετος γεωεναλλάκτης, γεωεναλλάκτης ενταγμένος στην κατασκευή

ABSTRACT

The need of investment on renewable energy sources, in order to fight the climate change, is constantly increasing. The exploitation of the energy that is offered from the shallow geothermal energy, through the geothermal heat pumps, constitutes a sustainable solution economically and energetically. This thesis is a scientific review on ground source heat pumps (GSHP). Thus, the subsystems are listed, that GSHP are consisted of with the various possible layouts, since first the differences of shallow and deep geothermal energy and their applications are shown. The different types of ground heat exchangers are described, like vertical, horizontal, spiral and geostructure, as well as the energy indexes that can be used for their evaluation and comparison. In addition, fundamentals of the different mathematical models, for the calculations of the ground temperature and the sizing of the vertical ground heat exchangers (boreholes) are mentioned. Apart from the literature background, that is presenting in this thesis, a summary of installed systems and simulations, in tables, adds a special value. The data collected from the summary are analyzed and makes the comparison between the different types of ground heat exchangers possible. Additionally, given the fact that the number of the different cases with installed systems is sufficient to draw valid conclusions, these are compared to the literature. It turned out that, for the horizontal ground heat exchangers: $SPF=2,97-3,05$, for the vertical: $SPF=3,72-3,91$ and for geostructure: $SPF=3,24-3,37$. In literature is mentioned that for closed loop systems $SPF=3-4$, something that matches with summary's data.

Keywords: geothermal energy, heat pumps for shallow geothermal energy, geothermal heat pumps, horizontal-vertical geothermal heat exchanger, geostructure

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας σχημάτων	8
Πίνακας πινάκων	9
Πίνακας εξισώσεων	9
1 Εισαγωγή	10
1.1 Συστήματα αντλιών θερμότητας	12
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής	15
1.3 Σκοπός και στόχοι της εργασίας	15
1.4 Δομή της διπλωματικής	16
2 Μεθοδολογία	18
3 Γεωθερμία και εφαρμογές της	20
3.1 Βαθιά γεωθερμία	20
3.1.1 Γεωθερμικά πεδία και εφαρμογές	21
3.2 Αβαθής γεωθερμία	25
4 Αντλίες θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας	28
4.1 Ανάλυση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας	28
4.1.1 Υποσύστημα αντλίας θερμότητας	28
4.1.2 Υποσύστημα διανομής θερμότητας εντός του κτηρίου	31
4.1.3 Υποσύστημα γεωεναλλάκτη	33
4.2 Ενεργειακοί δείκτες αξιολόγησης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας ..	41
5 Μέθοδοι σχεδίασης κάθετων γεωεναλλακτών	44
5.1 Μαθηματικά μοντέλα υπολογισμού θερμοκρασίας του εδάφους	44
5.2 Μέθοδοι διαστασιολόγησης του γεωεναλλάκτη	47
6 Εγκατεστημένα συστήματα	48
6.1 Ενεργειακή απόδοση	63
6.2 Τοπολογία	64
6.3 Τεχνικοοικονομικά στοιχεία	65
6.4 Κλίμα	67
7 Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις	69
7.1 Ενεργειακή απόδοση	78
7.2 Εργαλεία-λογισμικά προσομοιώσεων	78
8 Συμπεράσματα	80
8.1 Ενεργειακή απόδοση και τοπολογία	80
8.2 Τεχνικοοικονομικά στοιχεία	81
8.3 Κλίμα και λογισμικά προσομοιώσεων	81
8.4 Εντυπώσεις και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	81

Πίνακας σχημάτων

- Εικόνα 1-1 Σύγκριση της εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, εκφραζόμενο σε TJ/year (Lund & Boyd, 2016a)
- Εικόνα 1-2 Γραφική απεικόνιση πωλήσεων αντλιών θερμότητας στην Ευρώπη (ehpa.org, 2021)
- Εικόνα 1-3 Κατηγοριοποίηση των συστημάτων αντλιών θερμότητας με ηλεκτροκινητήρα
- Εικόνα 1-4 Θεωρητικός κύκλος Carnot αντλίας θερμότητας σε λειτουργία θέρμανσης (Sakellariou, E.)
- Εικόνα 3-1 Σχηματική απεικόνιση γεωθερμικού πεδίου με υδροφόρο ορίζοντα σε υψηλή θερμοκρασία (Barbier, 2002)
- Εικόνα 3-2 Σχηματική απεικόνιση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας – μέθοδος εκτόνωσης του ατμού (Τσιώλης, χ.χ.)
- Εικόνα 3-3 Σχηματική απεικόνιση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας – μέθοδος - μέθοδος δυαδικού κύκλου (Τσιώλης, χ.χ.)
- Εικόνα 3-4 Γραφική απεικόνιση διαφόρων εφαρμογών απευθείας χρήσης της γεωθερμίας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία (USAID, 2013)
- Εικόνα 3-5 Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος cascade για παραγωγή ενέργειας και άλλες εφαρμογές (Valdimarsson, Electricity Generation from Low Temperature Geothermal Resources. Conference Short course: Electricity Generation from Low Temperature Geothermal Resources, 2015)
- Εικόνα 3-6 Διακυμάνσεις στην θερμοκρασία του εδάφους συναρτήσει του βάθους στην περιοχή Ottawa, Canada (Self et al., 2013)
- Εικόνα 4-1 Σχηματική απεικόνιση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (Y. Cui et al., 2019)
- Εικόνα 4-2 Βασική διάταξη γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (Camdali et al., 2015)
- Εικόνα 4-3 Σχηματική απεικόνιση αντλίας θερμότητας νερού-αέρα (theengineeringmindset, 2018)
- Εικόνα 4-4 Σχηματική απεικόνιση αντλίας θερμότητας νερού-νερού (theengineeringmindset, 2018)
- Εικόνα 4-5 απεικόνιση ενός σώματος καλοριφέρ τύπου πάνελ (assets.publishing.service.gov.uk, 2021)
- Εικόνα 4-6 Απεικόνιση συστήματος επιδαπέδιας θέρμανσης (reconsblog.gr, n.d.)
- Εικόνα 4-7 απεικόνιση συστήματος θερμού αέρα (electric-heatingcompany.co.uk, χ.χ.)
- Εικόνα 4-8 Σχηματική απεικόνιση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας μονού βρόγχου (W. Yang, 2013)
- Εικόνα 4-9 Σχηματική απεικόνιση συστοιχία γεωεναλλακτών κάθετης διάταξης (Self et al., 2013)
- Εικόνα 4-10 Τύποι σωληνώσεων για τους κάθετους τύπου γεωεναλλάκτες (Florides & Kalogirou, 2007)
- Εικόνα 4-11 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με βασική διαμόρφωση σωληνώσεων (Self et al., 2013)
- Εικόνα 4-12 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με διαμόρφωση σωληνώσεων εν σειρά (Self et al., 2013)
- Εικόνα 4-13 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης διαμόρφωση σωληνώσεων εν παραλλήλω (Self et al., 2013)
- Εικόνα 4-14 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με διαμόρφωση σωληνώσεων με αυλακώσεις (Self et al., 2013)
- Εικόνα 4-15 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με διαμόρφωση σωληνώσεων τύπου slinky (Javadi et al., 2019)
- Εικόνα 4-16 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με διαμόρφωση σπινάλ (SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY, 2001)
- Εικόνα 4-17 Σχηματική απεικόνιση κτηρίου με γεωεναλλάκτη στα θεμέλια του (Olgun, n.d.)
- Εικόνα 4-18 Σχηματική απεικόνιση συστήματος ανοιχτού τύπου γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (Self et al., 2013)
- Εικόνα 4-19 Τα 4 όρια του SPF όπως αυτά ορίζονται από απόφαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Sakellariou, 2021)
- Εικόνα 5-1 Σχηματική απεικόνιση του Infinite line source model (Conti, 2016)
- Εικόνα 5-2 G function-θερμική απόκριση του εδάφους (Bernier, 2015)
- Εικόνα 6-1 Συνεισφορά των επιμέρους εξόδων στο συνολικό κόστος κεφαλαίου για εγκατεστημένο σύστημα με κάθετο γεωεναλλάκτη στην Κίνα (Zhou et al., 2020b)

Πίνακας πινάκων

Πίνακας 4-1	Θερμοκρασία λειτουργίας και θερμική ισχύς των συστημάτων διανομής θέρμανσης
Πίνακας 6-1	Εγκατεστημένα συστήματα οριζόντιων γεωεναλλακτών
Πίνακας 6-2	Εγκατεστημένα συστήματα κάθετων γεωεναλλακτών
Πίνακας 6-3	Εγκατεστημένα συστήματα γεωεναλλακτών ενταγμένων στην κατασκευή
Πίνακας 6-4	Εγκατεστημένα συστήματα-σύγκριση διάφορων τύπων γεωεναλλακτών
Πίνακας 6-5	Μέσος όρος αποδοτικότητας και ροής θερμότητας των συστημάτων σύμφωνα με τον τύπο γεωεναλλάκτη και την λειτουργία τους
Πίνακας 7-1	Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις οριζόντων γεωεναλλακτών
Πίνακας 7-2	Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις κάθετων γεωεναλλακτών
Πίνακας 7-3	Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις γεωεναλλακτών ενταγμένων στην κατασκευή
Πίνακας 7-4	Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις και σύγκριση διάφορων τύπων γεωεναλλακτών

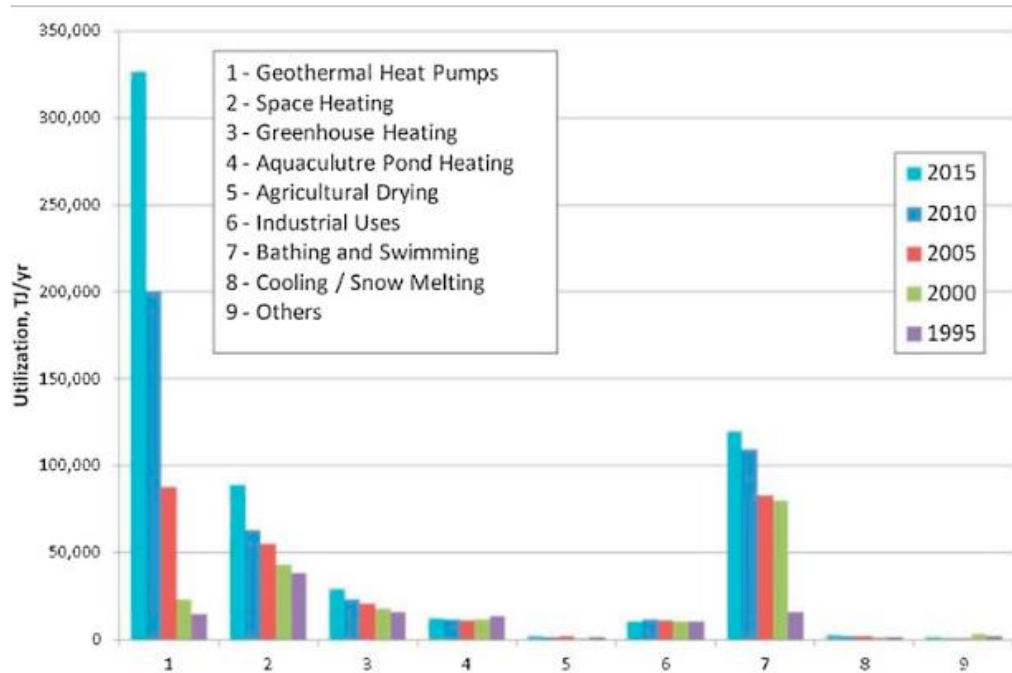
Πίνακας εξισώσεων

Εξίσωση (1)	26
Εξίσωση (2)	26
Εξίσωση (3)	26
Εξίσωση (4)	26
Εξίσωση (5)	42
Εξίσωση (6)	43
Εξίσωση (7)	44
Εξίσωση (8)	45
Εξίσωση (9)	45
Εξίσωση (10)	45
Εξίσωση (11)	45
Εξίσωση (12)	46
Εξίσωση (13)	46

1 Εισαγωγή

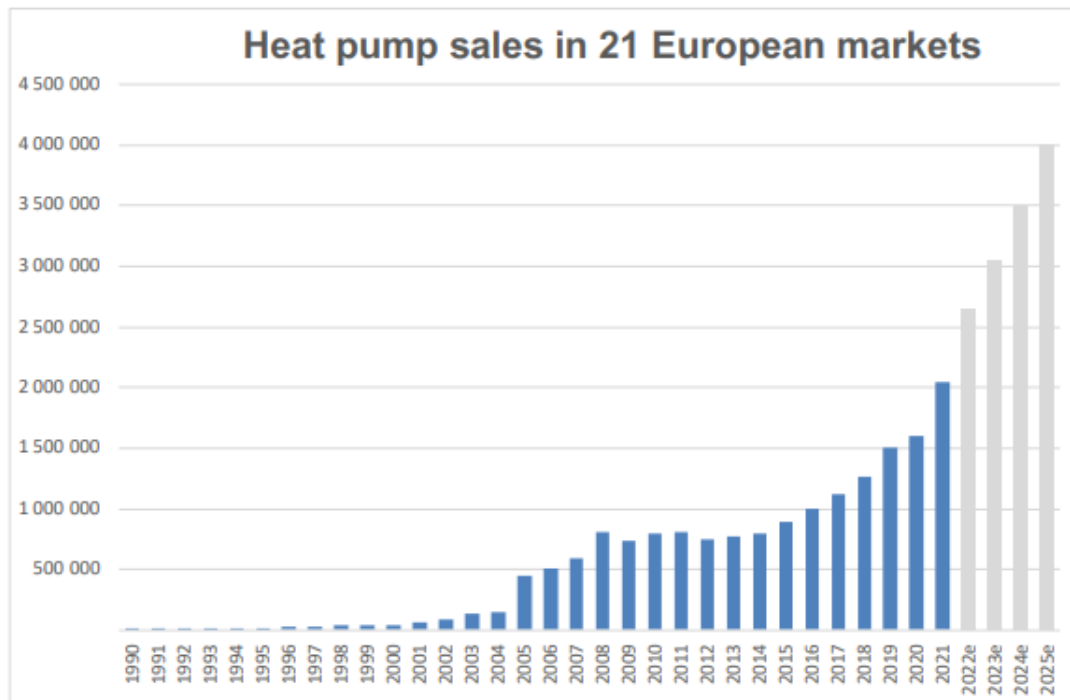
Η κλιματική αλλαγή είναι μια πραγματική απειλή για εμάς και τον πλανήτη μας. Καθώς η υπερθέρμανση του πλανήτη γίνεται όλο και περισσότερο εμφανής, η ανάγκη για την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου είναι μεγάλη. Στις 12 Δεκεμβρίου του 2015, στα πλαίσια της κλιματικής αλλαγής, δημιουργήθηκε η συνθήκη του Παρισιού από το Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών, η οποία θέτει μακροπρόθεσμους στόχους προς αυτή την κατεύθυνση και τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας κατά 2 βαθμούς Κελσίου (un.org, 2015). Στο ίδιο πλαίσιο, τον Μάρτιο του 2020, η επιτροπή της ευρωπαϊκής ένωσης υιοθέτησε νέα στρατηγική και οικονομικό πλάνο με αυστηρά όρια, για τις εκπομπές αερίων, στα κράτη-μέλη της (eu.europa, 2020). Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγάλη ευθύνη για την ανθρωπογενή εκπομπή τέτοιων αερίων όπως το CO₂, έχει η καύση υδρογονανθράκων για τις μετακινήσεις, την θέρμανση κτηρίων, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και άλλα. Επίσης η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με τις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες που γεννιούνται, λόγω της εκμοντερνοποίησης, μεγαλώνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις. Μάλιστα έχει προβλεφθεί ότι η ενεργειακή κατανάλωση το 2050 θα έχει αυξηθεί έως και 275% σε σχέση με το 1990(Fridleifsson, 2001).

Οι εφικτές λύσεις που μπορούν να καταπολεμήσουν το πρόβλημα αυτό, είναι η βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα ή και η κατάργησή και η αντικατάστασή τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως αιολική, ηλιακή, κυματική ενέργεια, γεωθερμία και άλλα. Είναι σημαντικό για την εκάστοτε εφαρμογή, να βρεθεί η κατάλληλη ενεργειακή πηγή, η οποία θα καλύψει τις απαιτούμενες ανάγκες πιο αποδοτικά(Sakellariou E.). Εξάλλου η επιλογή αυτής είναι ένα πολυπαραγοντικό θέμα με οικονομικές, οικολογικές και κοινωνικές προεκτάσεις. Ιδιαίτερα τώρα, που η κατάσταση με τον πόλεμο στην Ουκρανία έχει επιφέρει μεγάλες αυξήσεις στην αγορά του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, αποτελεί μεγάλη πρόκληση η ανεξαρτητοποίηση των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και ιδιαίτερα της Ελλάδας ως προς τα συμβατικά καύσιμα. Η θέρμανση και η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό των ενεργειακών απαιτήσεων που έχει ένα σπίτι ή ένα κτήριο κοινής ωφελείας, καθώς και οι ανάγκες ψύξης μεγαλώνουν κάθε χρόνο(Sarbu & Sebarchievici, 2014). Η ενέργεια που απαιτούν τα κτήρια για φωτισμό, θέρμανση και ψύξη, είναι γύρω στο 40% από το σύνολο της παγκόσμιας κατανάλωσης, με μεγάλο αντίκτυπο στο περιβάλλον λόγω των εκπομπών CO₂, NO₂ και CFCs (Omer, 2013). Ανάμεσα σε αρκετές τεχνολογίες και μεθόδους, τα συστήματα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας θεωρούνται ώριμη τεχνολογία και αρκετά αποδοτική(Singh et al., 2019). Προσφέρουν έναν νέο, ήπιο τρόπο θέρμανσης και ψύξης των κτηρίων, καθώς εκμεταλλεύονται την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια του εδάφους, κάνοντας την λειτουργία τους ενεργειακά πολύ αποδοτική. Mustafa Omer, 2008). Στην Κίνα, για παράδειγμα, οι εφαρμογές γεωθερμικών αντλιών θερμότητας έχουν αυξηθεί δραματικά τα τελευταία 10 χρόνια. Τα εγκατεστημένα συστήματα το 2016 ήταν περίπου 6 φορές περισσότερα σε σχέση με το 2007(Zhou et al., 2020a).



Εικόνα 1-1 Σύγκριση της εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, εκφραζόμενο σε TJ/year(Lund & Boyd, 2016a)

Παρόλο που το διάγραμμα στην Εικόνα 1-1 είναι της περασμένης δεκαετίας, δίνει χρήσιμες πληροφορίες, καθώς φαίνεται ο ρυθμός αύξησης της χρήσης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Συγκεκριμένα, η ετήσια ενεργειακή εκμετάλλευση (TJ/year) των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας το 2015, αυξήθηκε 1,63 φορές με ρυθμό 10,3% σε σχέση με τον 2010 όπως φαίνεται στην. Η μεγάλη αυτή αύξηση οφείλεται, εν μέρει, στο γεγονός πως τα συστήματα αυτά μπορούν να εγκατασταθούν παντού στον κόσμο, χωρίς κάποιους συγκεκριμένους περιορισμούς. Οι 5 χώρες με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ είναι: Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, Κίνα, Σουηδία, Γερμανία και Γαλλία(Lund & Boyd, 2016b).



Εικόνα 1-2 Γραφική απεικόνιση πωλήσεων αντλιών θερμότητας στην Ευρώπη (ehra.org, 2021)

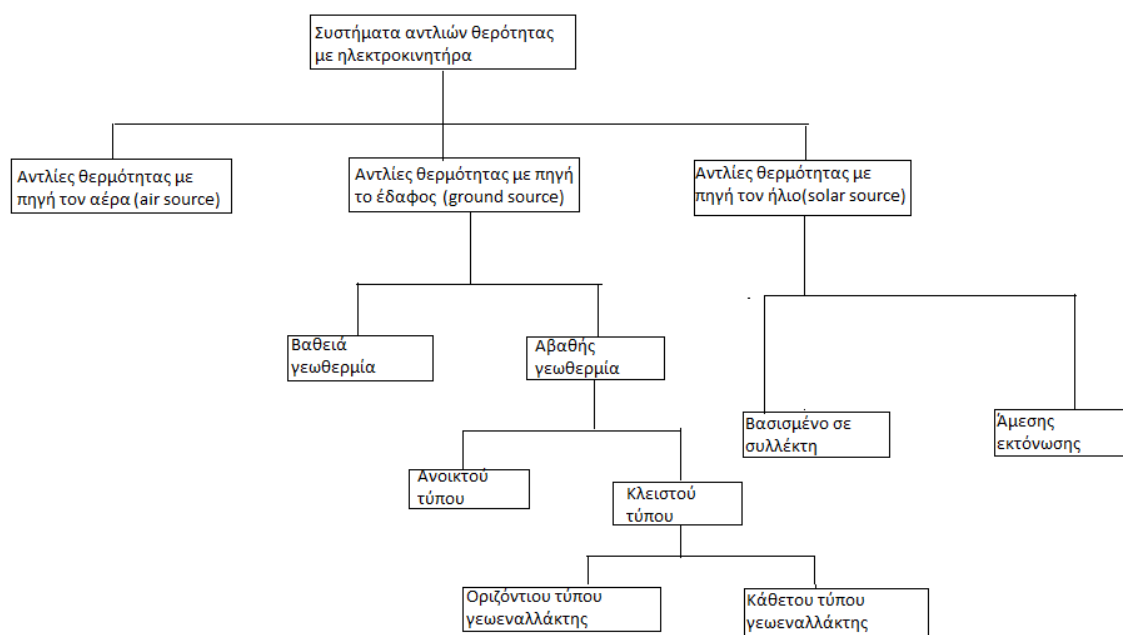
Γενικά, οι αντλίες θερμότητας αποτελούν πλέον κύρια επιλογή για νεόδμητα κτήρια. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-2, το 2020, λόγω της πανδημίας, η αγορά των αντλιών θερμότητας αυξήθηκε μόνο 7% σε σχέση με το 2019. Το 2021 όμως, η αγορά στην Ευρώπη ήταν πολύ αυξημένη, όπως και ο εκτιμώμενος ρυθμός αύξησης τα επόμενα χρόνια προβλέπεται ραγδαίος, για να επιτευχθούν οι ενεργειακοί στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Συγκεκριμένα, στην κομισιόν του 2019, διατυπώθηκε η στρατηγική ότι πάνω από 50 χιλιάδες μονάδες αντλιών θερμότητας θα πρέπει να έχουν εγκατασταθεί ως το 2030, για την υλοποίηση του στόχου εξηλεκτρισμού της θέρμανσης των κτηρίων. (ehra.org, 2021)

1.1 Συστήματα αντλιών θερμότητας

Η αντλία θερμότητας μπορεί να μεταφέρει θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας από μία ανανεώσιμη πηγή, όπως είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, νερό ή το έδαφος και να και να την μετατρέψει σε υψηλότερη, πιο χρήσιμη, θερμοκρασία με έναν θερμοδυναμικό κύκλο. Η σχετικά μικρή ποσότητα ενέργειας που χρειάζεται για να λειτουργήσει η αντλία θερμότητας και να καλύψει τις θερμικές ανάγκες ενός χώρου, δαπανάται από έναν ηλεκτροκινούμενο συμπιεστή. Γενικά για κάθε kWh που χρησιμοποιείται για την λειτουργία του συμπιεστή με ηλεκτροκινητήρα, η χρήσιμη θερμότητα που παράγεται είναι περίπου 3 με 4 kWh. Συγκρινόμενη με τους συμβατικούς καυστήρες πετρελαίου ή αερίου, οι αντλίες θερμότητας μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές CO₂ κατά 30% (gov.UK, 2014). Αυτό βεβαίως έχει να κάνει και με το ενεργειακό μείγμα του ηλεκτρισμού που καταναλώνει το σύστημα μας. Αντιθέτως, τα συμβατικά καύσιμα παράγουν CO₂ ανά kWh. Ενδεικτικά, το φυσικό αέριο παράγει 0,185 kg/kWh, το πετρέλαιο θέρμανσης 0,245 kg/kWh, ενώ το ξύλο παράγει περίπου 0,1 kg CO₂ για κάθε

kg ξύλου που καίγεται, έχοντας μάλιστα αρκετά χαμηλότερη κατώτερη θερμογόνο δύναμη σε σχέση με τα υπόλοιπα καύσιμα (CarbonIndependent, 2022).

Υπάρχουν αρκετές υποκατηγορίες στον τρόπο που λειτουργεί μια αντλία θερμότητας:



Εικόνα 1-3 Κατηγοριοποίηση των συστημάτων αντλιών θερμότητας με ηλεκτροκινητήρα

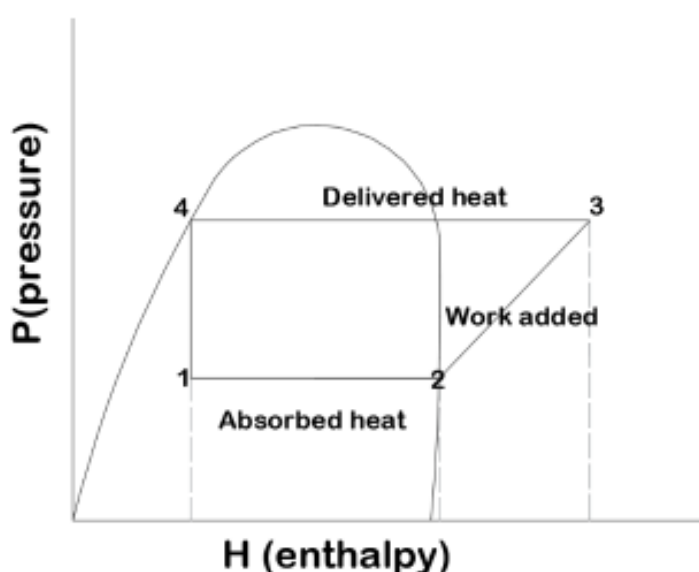
Η αγορά των αντλιών θερμότητας συνεχώς ανεβαίνει, με τις περισσότερες εγκαταστάσεις συστημάτων να γίνονται σε νεόδμητα κτήρια. Παρόλα αυτά, καταλαμβάνει μόνο ένα μικρό ποσοστό στην για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης σε οικιακό επίπεδο. Το 2020 σχεδόν το 50% των νοικοκυριών παγκοσμίως, χρησιμοποιούν συστήματα με συμβατικά καύσιμα (Abergel, 2021).

Ενθαρρυντικό είναι το γεγονός πως όλοι οι διαφορετικοί τύποι αντλιών θερμότητας γίνονται συνεχώς πιο δημοφιλείς. Οι αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα, τα τελευταία χρόνια, γίνονται όλο και πιο διαδεδομένη ως τεχνολογία και κυριαρχεί στις πωλήσεις μεταξύ των αντλιών θερμότητας στα νέα κτήρια. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής για παράδειγμα, οι ετήσιες πωλήσεις της αυξήθηκαν από 2,3 το 2015 σε 3,4 εκατομμύρια μονάδες το 2020 (iea, 2021). Αντίστοιχα, οι πωλήσεις της αντλίας θερμότητας αέρα-νερού, έχουν τουλάχιστον τριπλασιαστεί από 2010 με μεγαλύτερη αγορά στην Κίνα (iea, 2021). Οι πωλήσεις της στην Ευρώπη είναι μεν χαμηλότερες, αλλά ανεβαίνουν σταθερά με 180.000 μονάδες να εγκαταστάθηκαν το 2020, σε σχέση με τις 30.000 το 2010 (iea, 2021). Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας είναι η λιγότερο κοινή τεχνολογία παγκοσμίως με ετήσιες πωλήσεις γύρω στις 400.000 μονάδες (iea, 2021). Οι περισσότερες από τις μισές εγκαταστάσεις βρίσκονται στις Η.Π.Α., έχοντας παρουσιάσει βέβαια διπλασιασμό σε σχέση με το 2010. Για αυτού του τύπου τις αντλίες θερμότητας, στη Ευρώπη οι δύο κύριες αγορές βρίσκονται στην Γερμανία και στην Σουηδία, έχοντας συνολικά εγκατεστημένες 410.000 και 650.000 μονάδες αντίστοιχα το 2020 (iea, 2021). Οι αντλίες θερμότητας οι οποίες μπορούν να αντιστρέψουν την

λειτουργία θέρμανσης σε ψύξη είναι αρκετά δημοφιλείς σε κάποιες χώρες. Για παράδειγμα, οι τύπου αέρα-αέρα που μπορούν να αντιστρέψουν την λειτουργία τους είναι πού διαδεδομένες στις αστικές περιοχές της Κίνας για ψύξη το καλοκαίρι, όμως τον χειμώνα βασίζονται σε άλλους τρόπους για θέρμανση, όπως τηλεθέρμανση. Στην Ιαπωνία, την Κορέα, την Ευρώπη, την Αμερική και την Αυστραλία αυτού του τύπου οι αντλίες είναι αρκετά κοινές για θέρμανση και για ψύξη κτηρίων (iea, 2021).

Θερμοδυναμικός κύκλος αντλίας θερμότητας

Όλες οι αντλίες θερμότητας έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας, η οποία βασίζεται σε έναν θερμοδυναμικό κύκλο, τον κύκλο Carnot (Εικόνα 1-4). Ο θερμοδυναμικός κύκλος των αντλιών θερμότητας έχει να κάνει με την μεταβολή του ρευστού λειτουργίας (ψυκτικού ρευστού). Παρακάτω περιγράφονται οι βασικές μεταβολές.



Εικόνα 1-4 Θεωρητικός κύκλος Carnot αντλίας θερμότητας σε λειτουργία θέρμανσης (Sakellariou, E.)

Διεργασία 1-2: Ισοβαρής προσθήκη θερμότητας, σε χαμηλή θερμοκρασία, από τον ατμοσφαιρικό αέρα στο ψυκτικό μέσο, μέσω του ατμοποιητή. Ένας ανεμιστήρας χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η ροή αέρα που περνά από αυτόν.

Διεργασία 2-3: Αδιαβατική συμπίεση από τον ηλεκτροκινούμενο συμπιεστή. Προσφέρεται έργο, ενώ ταυτόχρονα η θερμοκρασία του ψυκτικού αυξάνεται.

Διεργασία 3-4: Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας από το ψυκτικό μέσο στο νερό, μέσω του συμπυκνωτή. Η θερμική ενέργεια που περιέχεται στο ψυκτικό απορροφάται από το νερό το οποίο χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών του κτηρίου.

Διεργασία 4-1: Ισενθαλπική εκτόνωση από την εκτονωτική βαλβίδα. (Sakellariou, 2021)

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής

Η γεωθερμική ενέργεια ξεχωρίζει σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς είναι διαθέσιμη καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου, όλες τις ώρες της ημέρας, οπότε δύναται να αξιοποιηθεί και για παραγωγή ενέργειας και για θέρμανση κτηρίων άμεσα, ή έμμεσα μέσω γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (Agemar et al., 2003). Για αυτές τις χρήσεις απαιτούνται γεωθερμικές πηγές υψηλής, μέτριας και χαμηλής θερμοκρασίας αντίστοιχα. Οι υψηλές και μέτριες θερμοκρασιακά πηγές συνήθως προέρχονται από θερμικές ροές από τον πυρήνα της γης. Οι χαμηλής θερμοκρασίας πηγές έχουν θερμοκρασιακές τιμές κοντά σε αυτές του περιβάλλοντος και επηρεάζονται κυρίως από τις κλιματολογικές συνθήκες και την ηλιακή ακτινοβολία (Self et al., 2013). Στην βαθιά γεωθερμία η ενέργεια που εκλύεται από το έδαφος, μπορεί να εκμεταλλευτεί άμεσα χωρίς να υπάρχει ανάγκη χρήσης αντλίας θερμότητας να αυξήσει την θερμοκρασία (Agemar et al., 2003). Η κύρια διαφορά της με την αβαθή γεωθερμία είναι το βάθος του εδάφους το οποίο εκμεταλλεόμαστε στην κάθε εφαρμογή. Εφαρμογή στην οποία το βάθος της γεώτρησης ξεπερνά τα 400m θεωρείται βαθιά γεωθερμία (Haehnlein et al., 2010). Επίσης, τα συστήματα που εντάσσονται στο γενικότερο πλαίσιο της βαθιάς γεωθερμίας είναι υψηλότερης θερμοκρασίας σε σχέση αυτά της αβαθούς. Τα πρώτα είναι συγκεκριμένα και μεγάλης κλίμακας έργα, ενώ τα δεύτερα είναι βασισμένα σε απλές τεχνολογικές αρχές (Haehnlein et al., 2010). Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα εργασία αφορά την αβαθή γεωθερμία και τις εφαρμογές της για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών κτηρίων, όπως οικιακά, βιομηχανικά και άλλα. Η θερμοκρασία του εδάφους από ένα συγκεκριμένο βάθος και κάτω (περίπου 10m), παραμένει σχεδόν σταθερή στην διάρκεια του χρόνου. Επίσης υπάρχει και μια χρονική καθυστέρηση στις διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και αυτής του εδάφους. Έτσι, διαφόρων τύποι γεωεναλλάκτες θερμότητας τοποθετούνται στο έδαφος, ώστε να εκμεταλλευτεί η μεγάλη θερμοχωρητικότητά του (Florides & Kalogirou, 2007). Επιπλέον, τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως λόγω της αυξημένης αποδοτικότητάς τους και του χαμηλού λειτουργικού κόστους σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης (Esen et al., 2006). Είναι αρκετά σημαντικό να αναφερθεί, ότι οι κλιματολογικές συνθήκες και το είδος του χώματος επηρεάζουν το θερμοκρασιακό προφίλ του εδάφους, το οποίο έχει τον ρόλο δεξαμενής απόθεσης θερμότητας το καλοκαίρι και πηγής θερμότητας τον χειμώνα. Όσο η ανάγκη για πιο αποδοτικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης μεγαλώνει και παράλληλα η θερμική άνεση στα κτήρια κρίνεται απαραίτητη, τόσο οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας θα αποτελούν βιώσιμη λύση έναντι άλλων εναλλακτικών λύσεων (Chua et al., 2010; Hepbasli & Kalinci, 2009).

1.3 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει σαν αντικείμενο την ανασκόπηση των συστημάτων αντλιών θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας. Αρχικά κρίνεται σκόπιμο να αναδειχθεί η διαφορά της βαθιάς και της αβαθούς γεωθερμίας και με ποιες εφαρμογές μπορεί να γίνει η εκμετάλλευσή αυτών των πηγών ενέργειας. Επικεντρώνοντας στην αβαθή γεωθερμία,

κύριο στόχο της εργασίας αποτελεί η ενδεδειγμένη ανάλυση της τεχνολογίας των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, όπως οι διάφορες πιθανές τοπολογίες και διατάξεις, τα είδη των γεωεναλλακτών και τα πιθανά συστήματα διανομής θέρμανσης. Επίσης απαραίτητη κρίνεται η περιγραφή του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας από το έδαφος στον γεωεναλλάκτη, με την ανάλυση των βασικών μαθηματικών μοντέλων υπολογισμού θερμοκρασίας του εδάφους και των μεθόδων διαστασιολόγησης των γεωεναλλακτών. Αφού έχουν περιγραφεί αναλυτικά οι έννοιες γύρω από την τεχνολογία, κύριο στόχο της εργασίας αποτελεί η σύνοψη και η κατηγοριοποίηση πραγματικών εφαρμογών εγκατεστημένων συστημάτων και προσομοιώσεων σε μορφή πινάκων, παραθέτοντας χαρακτηριστικά και ενεργειακούς δείκτες της κάθε περίπτωσης. Σε συνέχεια των πινάκων και των δεδομένων που παρέχονται από την σύνοψη των διαφορετικών περιπτώσεων σε αυτούς, εξαιρετικά χρήσιμη κρίνεται η παρατήρηση και σύγκριση των συστημάτων. Οι παράμετροι με τους οποίους πραγματοποιείται η σύγκριση αφορούν την ενεργειακή απόδοση, τα τεχνικοοικονομικά στοιχεία, το κλίμα, τις διάφορες τοπολογίες και τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις.

1.4 Δομή της διπλωματικής

Η εργασία αναλύεται σε οχτώ κεφάλαια:

Ακολουθώντας το κεφάλαιο 1, που είναι η εισαγωγή, διατυπώνεται το γενικό πρόβλημα, το οποίο αποτελεί κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Περιγράφονται επίσης συνοπτικά οι βασικές αρχές της τεχνολογίας των αντλιών θερμότητας και παρουσιάζονται ο σκοπός και οι στόχοι της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται η μεθοδολογία για την εκπόνηση της εργασίας. Αναλύονται όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για να απαντηθούν τα ερωτήματα και οι στόχοι που έχουν τεθεί. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται και όλα τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο κεφάλαιο 3, παρατίθενται οι θεμελιώδεις αρχές της γεωθερμικής ενέργειας- ξεχωριστά για βαθιά και αβαθή γεωθερμία- όπως και οι εφαρμογές με τις οποίες γίνεται εκμετάλλευσή της.

Το κεφάλαιο 4 προστίθεται, για να αναλύσει με τεχνικά στοιχεία τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, τις διάφορες πιθανές τοπολογίες και διατάξεις αυτών, τα είδη των γεωεναλλακτών, τα πιθανά συστήματα διανομής θέρμανσης και τους ενεργειακούς δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση αυτών των συστημάτων.

Στο κεφάλαιο 5, περιγράφονται τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα υπολογισμού θερμοκρασίας του εδάφους και οι μέθοδοι διαστασιολόγησης των κάθετων γεωεναλλακτών.

Το κεφάλαιο 6 αφορά την σύνοψη και κατηγοριοποίηση πειραματικών εφαρμογών εγκατεστημένων συστημάτων σε μορφή πινάκων, οι οποίοι παραθέτουν χαρακτηριστικά και ενεργειακούς δείκτες της κάθε περίπτωσης. Γίνεται επίσης

ανάλυση και σύγκριση των δεδομένων που προσφέρουν οι πίνακες έχοντας ως βάση κριτήρια ενεργειακά, τεχνικοοικονομικά, κλιματικά και τοπολογικά.

Στο κεφάλαιο 7 επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με το κεφάλαιο 6, μόνο που αυτή την φορά αφορά θεωρητικά-προσομοιώσεις συστημάτων. Η σύγκριση των δεδομένων γίνεται με κριτήρια αποδοτικότητας και χρήσης λογισμικών που απαιτούνται για τις προσομοιώσεις.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8 ανακεφαλαιώνονται τα βασικά σημεία μαζί με τους στόχους της εργασίας και προτείνονται περαιτέρω θέματα, τα οποία έμειναν ανοικτά προς διερεύνηση, για την επέκταση της παρούσας εργασίας.

2 Μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία αποτελεί βιβλιογραφική ανασκόπηση με αντικείμενο τις αντλίες θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας. Υπάρχει πλεόνασμα πληροφοριών σε αυτό το πεδίο, αφού θεωρείται τεχνολογία ευρέως διαδιδόμενη για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης κτηρίων όλων των τάξεων μεγέθους. Το internet χρησιμοποιήθηκε σαν εργαλείο, εξαιτίας της τεράστιας δεξαμενής πληροφοριών που διαθέτει, όπως επίσης και κάποια συγγράμματα, τα οποία έχουν σχετικό με το αντικείμενο περιεχόμενο. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν βέβαια, εμπεριείχαν κείμενα γραμμένα από εξειδικευμένους, για το πεδίο συγγραφείς, σε έγκυρες ιστοσελίδες ή επίσημους οργανισμούς. Όλα τα στατιστικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι επίκαιρα όπως και τα περισσότερα άρθρα, εκτός από κάποια που συντάχθηκαν σε προηγούμενες δεκαετίες και περιέχουν τις βασικές αρχές για την λειτουργία και την σχεδίαση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Η αξιοπιστία και η συνάφεια των άρθρων λήφθηκε υπόψιν για την ένταξή τους ως πηγές σε αυτήν την εργασία. Οπότε στα πλαίσια της αξιολόγησης των πηγών τέθηκαν κάποια κριτήρια: α) Πόσο σύγχρονη είναι αυτή η πηγή; β) Αυτά που πραγματεύεται το κείμενο ανταποκρίνονται στην τρέχουσα τεχνολογία ή είναι ξεπερασμένα; γ) η πηγή ταυτίζεται με τις ερευνητικές ερωτήσεις της εργασίας; Για την μετάφραση κάποιων αγγλικών ορολογιών χρησιμοποιήθηκε η ιστοσελίδα IATE (Interactive Terminology for Europe).

Τα κύρια μεθοδολογικά βήματα που ακολουθήθηκαν για την συγγραφή της παρούσα εργασίας περιγράφονται παρακάτω:

- Αρχικά αναζητήθηκαν επιστημονικά άρθρα, στην μηχανή αναζήτησης google scholar, που είχαν σαν θέμα την ανασκόπηση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας και την τωρινή εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας. Ο σκοπός ήταν να κατανοηθεί πλήρως το αντικείμενο, η εξοικείωση με την ορολογία, ώστε η επεξεργασία της πληροφορίας που δίνεται στα κείμενα να γίνεται εύκολα. Οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν στην μηχανή αναζήτησης ήταν: geothermal heat pump, a review, current status.
- Έπειτα στην μηχανή αναζήτησης του google έγινε αναζήτηση για διεθνείς και ευρωπαϊκούς στατιστικούς οργανισμούς όπως το European heat pump association (Ehpa) και το Eurostat. Όπως επίσης το κείμενο στηρίχθηκε σε διεθνείς και ευρωπαϊκές αποφάσεις και συνθήκες, οι οποίες αντλήθηκαν από επίσημες ιστοσελίδες όπως un.org και eu.europa.
- Μετά, για την αναλυτική περιγραφή της τεχνολογίας των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, χρησιμοποιήθηκαν άρθρα, από τα οποία κάποια δεν ήταν σύγχρονα, που περιείχαν τις βασικές και θεμελιώδεις αρχές. Κάποια από αυτά ήταν δευτερεύουσα βιβλιογραφία στα άρθρα που είχαν βρεθεί αρχικά, ενώ άλλα αναζητήθηκαν με την βοήθεια της μηχανής αναζήτησης google scholar με λέξεις κλειδιά όπως: heat pump system with vertical heat exchanger, heat pump system with horizontal heat exchanger.
- Έπειτα, για την καταγραφή και σύννοψη εγκατεστημένων και θεωρητικών εφαρμογών έγινε αναζήτηση επιστημονικών άρθρων και δοκιμίων στις μηχανές

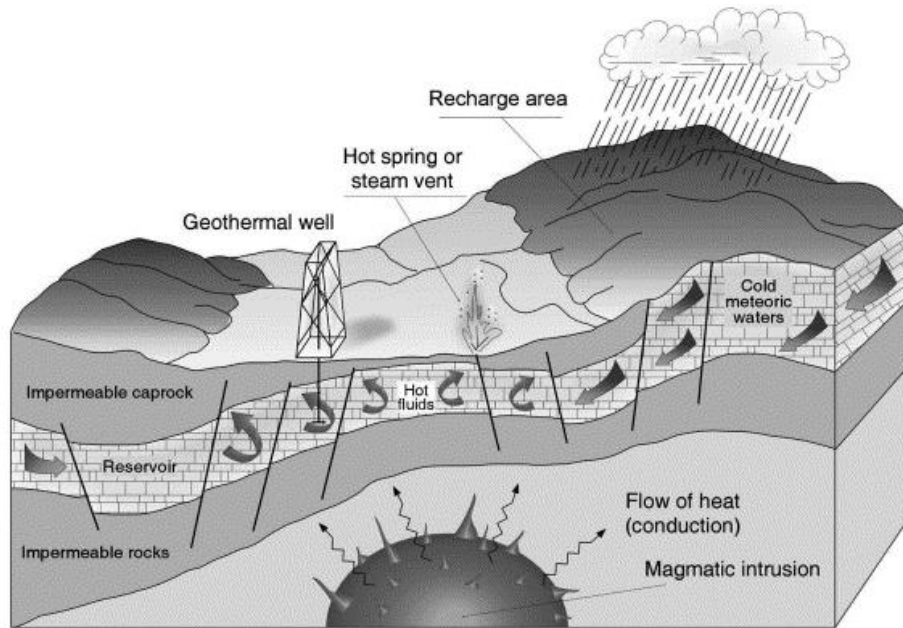
αναζήτησης: google scholar και science direct. Η αναζήτηση έγινε ομαδοποιημένα για έναν τύπο γεωεναλλάκτη κάθε φορά. Οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν είναι: a case study, experimental study, experimental analysis, experimental investigation, theoretical approach, numerical simulation, simulation analysis.

- Αφού συγκεντρώθηκαν οι επαρκείς περιπτώσεις εγκατεστημένων και θεωρητικών συστημάτων συμπληρώθηκαν πίνακες, ξεχωριστά για κάθε τύπο γεωεναλλάκτη, με ενεργειακούς δείκτες, περιοχή, λειτουργία, βάθος εγκατάστασης και άλλα.
- Τέλος, παράχθηκαν κάποια αποτελέσματα από τις παρατηρήσεις και τις συγκρίσεις. Οι συγκρίσεις έγιναν ξεχωριστά σε επίπεδο εγκατεστημένων και ξεχωριστά σε επίπεδο θεωρητικών συστημάτων. Τα κριτήρια σύγκρισης ήταν η αποδοτικότητα των συστημάτων οι τεχνικοοικονομικοί παράμετροι αυτών, το κλίμα, οι διάφορες τοπολογίες και διατάξεις και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις.

3 Γεωθερμία και εφαρμογές της

3.1 Βαθιά γεωθερμία

Η γεωθερμική ενέργεια είναι ενέργεια η οποία περιέχεται στο εσωτερικό της γης, η οποία σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να εξαχθεί εύκολα και οικονομικά, σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας (υδροηλεκτρικά ή καύσιμα), για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή σε επίπεδο βιομηχανίας, γεωργίας ή οικιακό. Η προέλευση της θερμότητας συνδέεται με την εσωτερική δομή του πλανήτη μας, τις φυσικές διεργασίες οι οποίες λαμβάνουν χώρα εκεί όπως και την ψύξης του πυρήνα της γης (Barbier, 2002). Η ραδιενεργός διάσπαση μακρόβιων ισότοπων στοιχείων όπως η σπάνια μορφή του καλίου, το ουράνιο και το θόριο (^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U and ^{238}U), συνεχώς παράγουν ενέργεια στο εσωτερικό της γης. Το συνολικό ποσό θερμότητας που περιέχει το εσωτερικό της γης εκτιμάται στα $1,3 \times 10^{31}$ J, ενώ ο μέσος ρυθμός θερμότητας που χάνεται είναι περίπου 80MWm^{-2} (Gupta, 2006). Η μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό της γης γίνεται με δύο τρόπους: με αγωγή και με μεταφορά. Η αγωγή περιλαμβάνει την ροή θερμότητας ανάμεσα σε δύο στερεά σώματα, (τα μέταλλα είναι πολύ καλοί αγωγοί θερμότητας, ενώ τα πετρώματα όχι τόσο) η οποία λαμβάνει χώρα στα ανώτερα τμήματα (λιθόσφαιρα) μέσω των πετρωμάτων. Αντίθετα, η μεταφορά λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε ρευστά ή σε ρευστό και στερεό σώμα και απαιτεί την ροή του ρευστού. Εξαιτίας της μετακίνησης αυτής, η μεταφορά θερμότητας είναι πιο αποδοτική διαδικασία μετάδοσης θερμότητας από την αγωγή (Barbier, 2002). Όταν γίνεται λόγος για γεωθερμικό πεδίο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1, το ρευστό είναι συνήθως νερό βροχής, το οποίο εισέρχεται στο εσωτερικό της γης μέσω ανοιγμάτων, θερμαίνεται όταν έρχεται σε επαφή με τα καυτά πετρώματα, με μεταφορά και σχηματίζει υδροφόρους ορίζοντες συνήθως σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες ($\sim 300^\circ\text{C}$). Αυτοί οι υδροφόροι ορίζοντες αποτελούν σημαντικό κομμάτι από το συνολικό των γεωθερμικών πεδίων. Στις περισσότερες των περιπτώσεων στην επάνω επιφάνειά τους καλύπτονται από έδαφος που αποτρέπει το καυτό ρευστό να έρθει σε επαφή με την ατμόσφαιρα, ενώ τα κρατά σε υψηλή πίεση (Barbier, 2002).



Εικόνα 3-1 Σχηματική απεικόνιση γεωθερμικού πεδίου με υδροφόρο ορίζοντα σε υψηλή θερμοκρασία (Barbier, 2002)

Η διεργασία μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή από το εσωτερικό της γης προς τα εξωτερικά στρώματα γίνεται μέσω του μάγματος (λιωμένα πετρώματα), το οποίο συμπεριφέρεται σαν ιξώδες ρευστό. Λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας, προκαλείται τήξη στα πετρώματα (Gupta, 2006). Μελέτες στην θερμική συμπεριφορά της γης καταστούν δυνατή την κατανόηση της θερμοκρασιακής διακύμανσης ανάλογα με το βάθος και πως μπορεί να αλλάξει κατά την διάρκεια του χρόνου. Ο μέσος ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας σε βάθη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους είναι περίπου $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Όμως σε κάποια μέρη μπορούν να βρεθούν χαμηλές τιμές όπως $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$, ενώ υψηλές τιμές της τάξης $>100^{\circ}\text{C}/\text{km}$, μπορούν να βρεθούν σε ηφαιστιογενείς περιοχές (Barbier, 2002). Η διαδικασία μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία, μέσω του ήλιου, επηρεάζει μόνο την επιφάνεια της γης. Στο εσωτερικό της συναντάται επίσης μόνο στα πολύ καυτά κομμάτια των κατώτερων τμημάτων της, δηλαδή στον πυρήνα (Gupta, 2006).

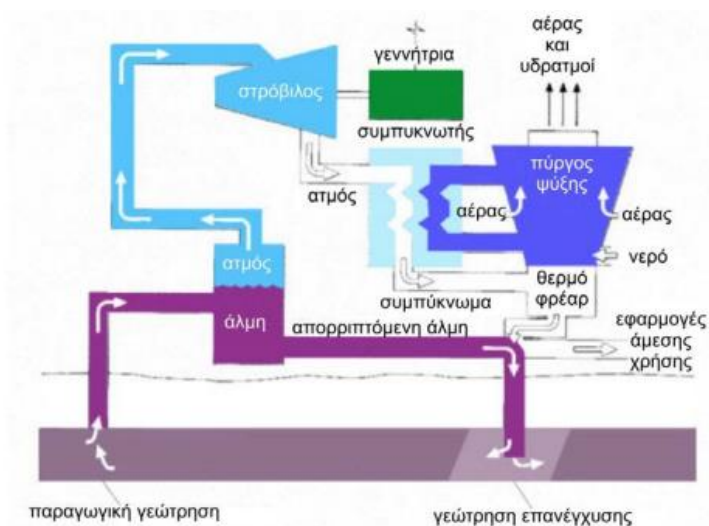
3.1.1 Γεωθερμικά πεδία και εφαρμογές

Όταν η θερμοκρασία των πετρωμάτων κάτω της επιφάνειας της γης είναι αυξημένη σε σχέση με το κανονικό, είναι ένδειξη ύπαρξης γεωθερμικού πεδίου στην συγκεκριμένη περιοχή. Η προέλευση της θερμότητας τοπικά, μπορεί να είναι από σώμα μάγματος θερμοκρασίας $600\text{--}1000^{\circ}\text{C}$, σε βάθος λίγων χιλιομέτρων από την επιφάνεια. Επίσης η πηγή θερμότητας είναι δυνατό να οφείλεται και σε ορισμένες ανωμαλίες όσο αφορά την τεκτονική διαμόρφωση του υπεδάφους (Barbier, 2002). Όμως για να υπάρχει μια παραγωγική γεωθερμική πηγή, χρειάζεται κάτι παραπάνω από αυτά. Χρειάζεται μία φυσική δεξαμενή, αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας που προσφέρεται, από θερμοπερατά πετρώματα, σε βάθος που τα καθιστά προσβάσιμα μέσω της γεώτρησης. Στην δεξαμενή αυτή περιέχεται καυτό νερό ή ατμός, προερχόμενα από νερό βροχής κυρίως, που εισέρχονται από ανοίγματα στην επιφάνεια της γης και αυξάνουν την θερμοκρασία τους αλληλοεπιδρώντας με τα καυτά πετρώματα (Gupta, 2006). Η

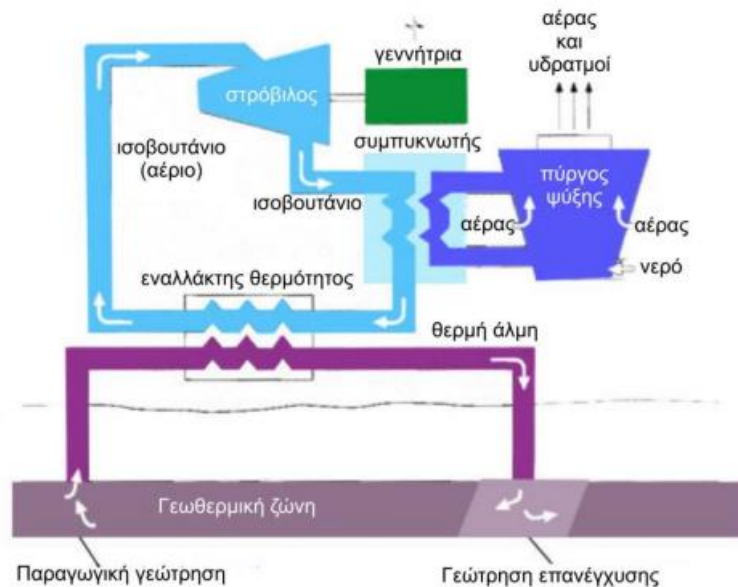
μετάδοση θερμότητας μεταξύ των πετρωμάτων και του ρευστού, μέσω της μεταφοράς, έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία στα υψηλότερα σημεία της δεξαμενής να μην διαφέρει σημαντικά από τα χαμηλότερα σημεία. Σε κάποιες περιπτώσεις, καυτό ρευστό ξεφεύγει από την θερμική δεξαμενή και φτάνει στην επιφάνεια, σχηματίζοντας ορατά γεωθερμικά φαινόμενα όπως θερμές πηγές, πίδακες κ.α. Τα γεωθερμικά πεδία είναι δυνατόν να περιέχουν στην δεξαμενή τους είτε ατμό, είτε καυτό νερό. Αυτά τα ρευστά μεταφέρουν την γεωθερμική ενέργεια, που είναι αποθηκευμένη στο υπέδαφος, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή απευθείας χρήσεις. Ανάλογα τα χαρακτηριστικά της θερμικής δεξαμενής, η γεώτρηση μπορεί να είναι 300-3000m, στα σημεία όπου το ρευστό υπάρχει σε φυσική μορφή (Eslami-Nejad et al., 2014).

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Το έτος 2018, η συνολική εγκαταστημένη ισχύς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της γεωθερμίας ήταν 12.7 GW. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν 5 κύριες διαμορφώσεις συστημάτων: ξηρού ατμού, μονής εκτόνωσης, διπλής εκτόνωσης, δυαδικός κύκλος (οργανικός κύκλος Rankine) και υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν τα παραπάνω ή έχουν σαν δευτερεύουσα πηγή θερμότητας την καύση συμβατικών καυσίμων ή ανανεώσιμες πηγές θερμικής ενέργειας (Valdimarsson, Geothermal Power Generation: Developments and Innovation, 2008). Γενικά οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της γεωθερμίας κατηγοριοποιούνται σε δύο γκρουπ: θερμοδυναμική κύκλοι με εργαζόμενο μέσο τον ατμό για υψηλής ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-2 και δυαδικοί κύκλοι για χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία (85-180°C), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-3.



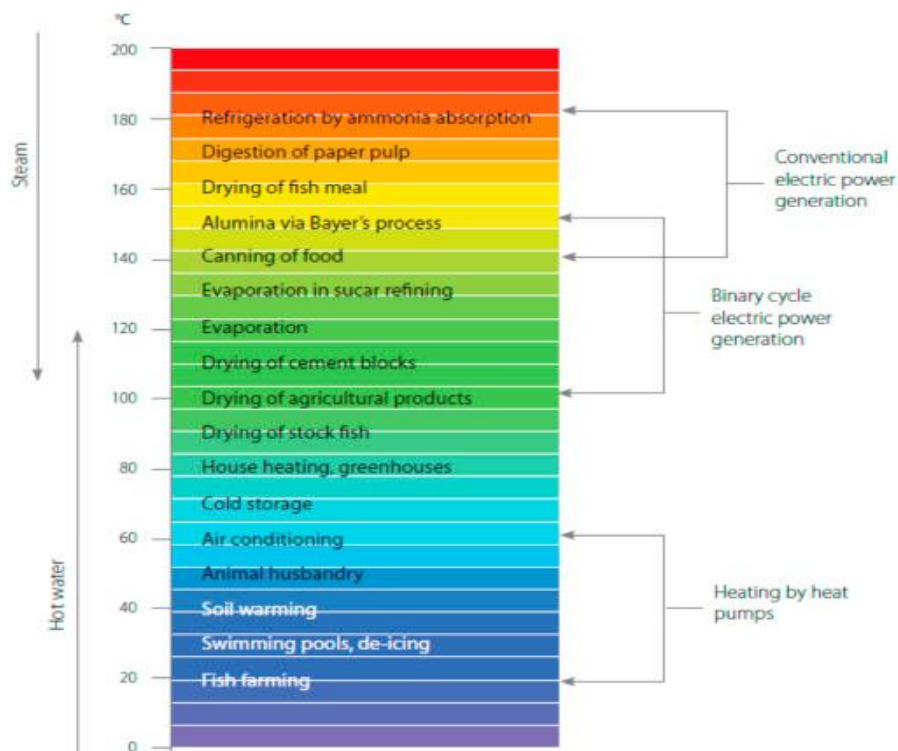
Εικόνα 3-2 Σχηματική απεικόνιση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας – μέθοδος εκτόνωσης του ατμού (Τσιώλης, χ.χ.)



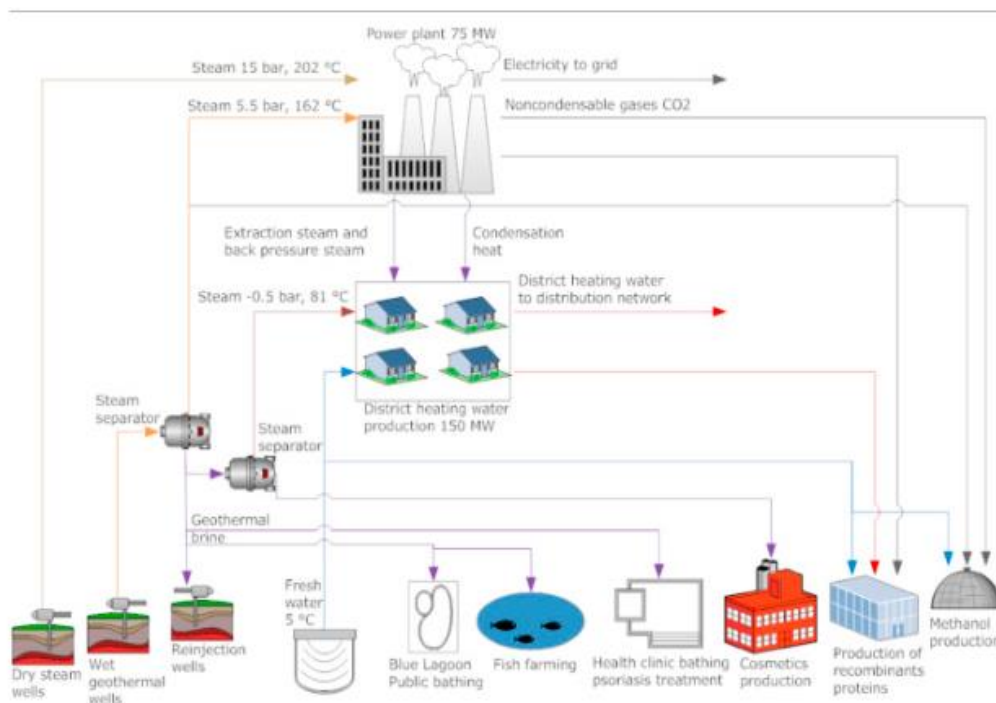
Εικόνα 3-3 Σχηματική απεικόνιση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας – μέθοδος - μέθοδος δυαδικού κύκλου (Τσιούλης, χ.χ.)

Απευθείας χρήσεις

Η θερμική ενέργεια μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί απευθείας από το ρευστό σε πολλές εφαρμογές με θερμοκρασιακό εύρος 10-150 °C. Τα οικονομικά όρια που τίθενται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δεν υφίστανται σε αυτές τις εφαρμογές, ενώ παράλληλα αντικαθίστανται τα συμβατικά καύσιμα με την χαμηλή τους θερμοδυναμική απόδοση (Gudmundsson, 1988). Σαν αποτέλεσμα της ανάπτυξης των εφαρμογών με απευθείας χρήση του γεωθερμικού ρευστού, το 2018, 82 χώρες έχουν αναπτύξει τέτοιου είδους εφαρμογές με εκτιμώμενη ισχύ ίση με 70.33 GW (Climo et al., 2016). Παραδείγματα εφαρμογών και πεδίων στα οποία γίνεται χρήση της γεωθερμίας είναι τα εξής: θέρμανση χώρων, θέρμανση θερμοκηπίων, θέρμανση υδατοκαλλιεργειών, βιομηχανικές χρήσεις, θερμά λουτρά και θέρμανση πισίνας, ψύξη, αποπαγοποίηση και άλλα όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-4 (USAID, 2013). Πρόσφατες έρευνες αναδεικνύουν τα θετικά που απορρέουν από την εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας, που προσφέρεται από την γεωθερμία, με διαδικασία διαδοχικών σταδίων (cascade applications) (Climo et al., 2016). Με αυτού του είδους την σχεδίαση επιτρέπεται η εκμετάλλευση της θερμότητας που προσφέρεται από το γεωθερμικό πεδίο σε πολλές εφαρμογές. Μπαίνουν σε τέτοια σειρά, ώστε να απαιτείται όλο και χαμηλότερη θερμοκρασία για κάθε εφαρμογή, καθώς προχωράει η σειρά (Glassley, 2015). Για παράδειγμα το γεωθερμικό ρευστό, αφού εξέλθει από την μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τροφοδοτείται για την θέρμανση ενός θερμοκηπίου ντομάτας και μετά σε αντίστοιχα θερμοκήπια λαχανικών που απαιτούν χαμηλότερη θερμοκρασία. Η εγκατάσταση στην Εικόνα 3-5 πρεσβεύει ένα παράδειγμα θέρμανσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα cascade σύστημα. Το γεωθερμικό ρευστό εισέρχεται στους 202°C και 162°C στην εγκατάσταση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξέρχεται στους 81°C όπου χρησιμοποιείται για θέρμανση οικιών και τελικά σε ακόμα χαμηλότερη θερμοκρασία χρησιμεύει σε άλλες εφαρμογές.



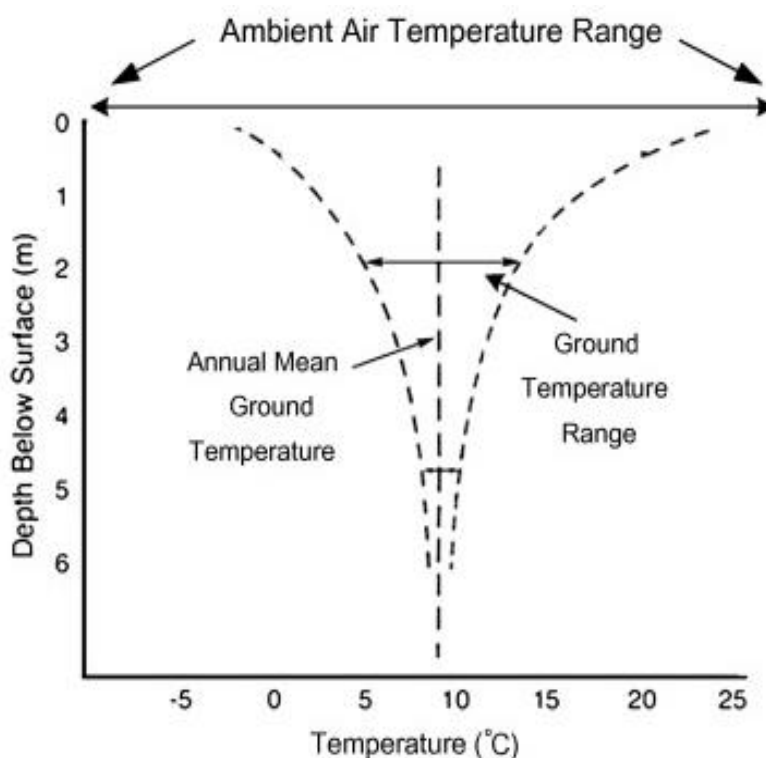
Εικόνα 3-4 Γραφική απεικόνιση διαφόρων εφαρμογών απευθείας χρήσης της γεωθερμίας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία (USAID, 2013)



Εικόνα 3-5 Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος cascade για παραγωγή ενέργειας και άλλες εφαρμογές (Valdimarsson, Electricity Generation from Low Temperature Geothermal Resources. Conference Short course: Electricity Generation from Low Temperature Geothermal Resources, 2015)

3.2 Αβαθής γεωθερμία

Οι θερμοκρασίες της ατμόσφαιρας, κατά την διάρκεια του χρόνου, παρουσιάζουν αρκετές αυξομειώσεις σε καθημερινή βάση. Το ίδιο γίνεται και στις θερμοκρασίες του εδάφους από την επιφάνεια του έως και περίπου 0,8 μέτρα βάθος, καθώς σε μεγαλύτερα από βάθη οι διακυμάνσεις αρχίζουν να μειώνονται (Strategic GHG Reduction through the Use of Ground Source Heat Pump Technology, 2007). Η μεταβολή των θερμοκρασιών του εδάφους σε μεγαλύτερα βάθη γίνεται ανάλογα με την εποχή και όχι σε ημερήσια βάση. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-6, η οποία περιγράφει την διακύμανση στις θερμοκρασίες του εδάφους στην τοποθεσία Ottawa, Canada, όσο αυξάνεται το βάθος, οι χαμηλές και οι υψηλές θερμοκρασίες συγκλίνουν. Το βάθος στο οποίο η θερμοκρασία του εδάφους γίνεται σταθερή διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και αυτή εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία, την ποσότητα του χιονιού που καλύπτει την επιφάνεια, τις θερμικές ιδιότητες του χώματος και γενικότερα το κλίμα της περιοχής (Strategic GHG Reduction through the Use of Ground Source Heat Pump Technology, 2007).



Εικόνα 3-6 Διακυμάνσεις στην θερμοκρασία του εδάφους συναρτήσει του βάθους στην περιοχή Ottawa, Canada (Self et al., 2013)

Φυσική κατανομή θερμοκρασίας εδάφους (Natural soil temperature distribution)

Πολλοί θεωρούν πως η θερμοκρασία του εδάφους έχει αρμονική συμπεριφορά σε συνάρτηση με τον χρόνο, συγκεκριμένα ημιτονοειδής μορφή (Achenbach, 1965). Αυτό ισχύει σε σημεία, όπου οι μικροαλλαγές της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας ωριαία

και καθημερινά μπορούν να λογιστούν ως αμελητέες, συνήθως σε βάθη μεγαλύτερα του 1 μέτρου (Naranjo-Mendoza, 2018).

Μη επηρεασμένη θερμοκρασία του εδάφους (Undisturbed ground temperature)

Η αδιατάρακτη θερμοκρασία του εδάφους είναι η θερμοκρασία σε βάθη όπου οι εποχιακές μεταβολές δεν έχουν καμία επίδραση. Συχνά ταυτίζεται με την τιμή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Όμως σε περιπτώσεις περιοχές με ασταθή κλίματα η ταύτιση αυτή δεν είναι σωστή (Ouzzane, 2015). Η μέθοδος του (Badache, 2015) είναι πιο ακριβής, η οποία συσχετίζει την μέση ετήσια θερμοκρασία με την αδιατάρακτη. Για μονοδιάστατο πρόβλημα και θερμοκρασίες σε Kelvin ισχύει (εξίσωση **Error! Reference source not found.**):

$$T_{gr} = 17.898 + 0.951T_d \quad (1)$$

Εύκολα γίνεται αντιληπτό πως, ενώ στα γεωθερμικά πεδία η εξέργεια μεταβάλλεται σύμφωνα με τις τιμές των μεγεθών της θερμοκρασίας και της πίεσης, στην αβαθή γεωθερμία όπου η θερμοκρασία και η πίεση είναι περίπου ατμοσφαιρικές, η εξέργεια είναι σχεδόν μηδενική (Chen, 2008).

Η εξέργεια σε ένα γεωθερμικό πεδίο υπολογίζεται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$Ex = Ex_{th} + Ex_{mech} \quad (2)$$

$$Ex_{th} = \dot{m}C_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) \quad (3)$$

$$Ex_{mech} = \frac{\dot{m}}{\rho} (P - P_0) \quad (4)$$

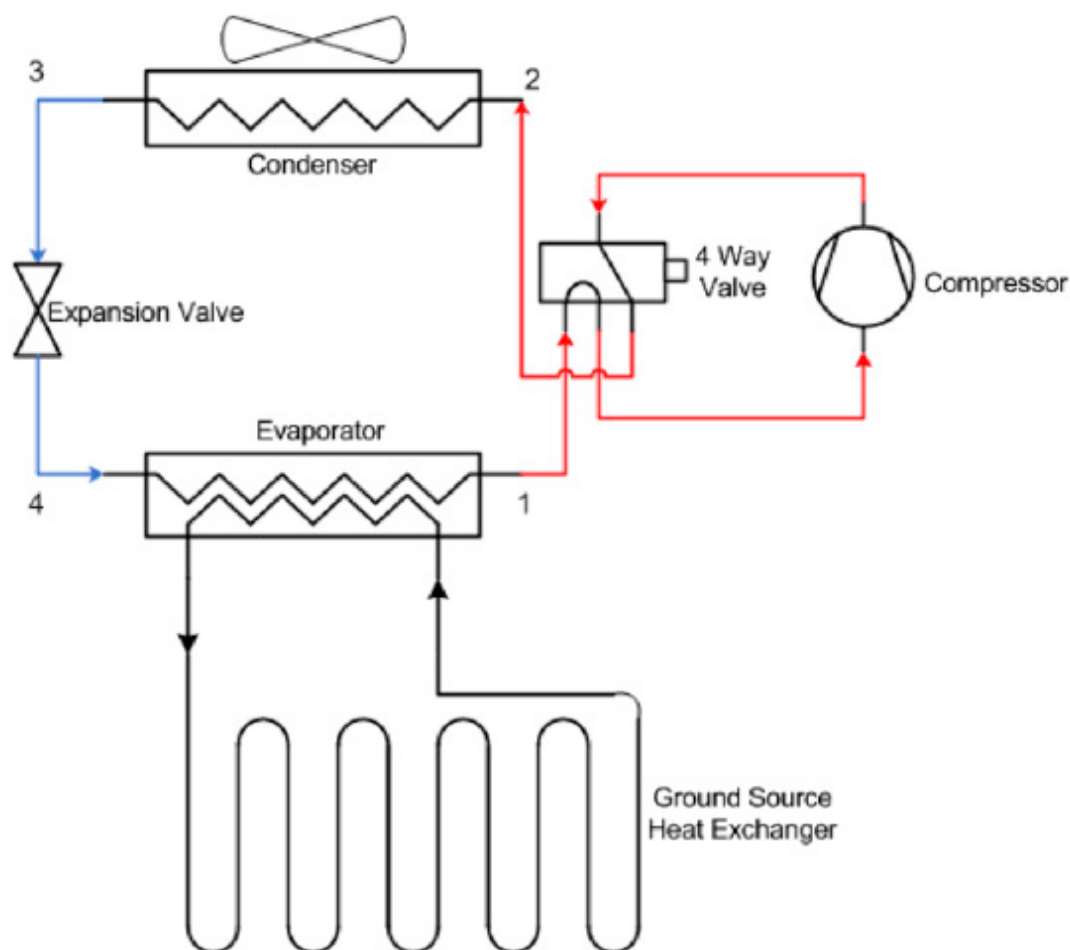
Το Ex_{th} είναι η εξέργεια που σχετίζεται με την θερμότητα, το Ex_{mech} είναι η εξέργεια που σχετίζεται με την πίεση, το \dot{m} είναι η ροή μάζας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και T, P είναι η θερμοκρασία και η πίεση του αντίστοιχα.

Στην αβαθή γεωθερμία το έδαφος δεν έχει τον ρόλο των γεωθερμικών πόρων, αλλά την δεξαμενή απόρριψης θερμότητας το καλοκαίρι και πηγή θερμότητας τον χειμώνα. Όσον αφορά το κατά πόσο οι πηγές θεωρούνται ανανεώσιμες, στην βαθιά γεωθερμία είναι λίγο πεπλεγμένο. Για να θεωρείται ανανεώσιμη πηγή, πρέπει ο ρυθμός με τον οποίο εξάγουμε θερμότητα από μία θερμική δεξαμενή, να είναι ίσος ή μικρότερος από αυτόν που το έδαφος απορρίπτει σε αυτήν. Με λίγα λόγια η θερμότητα που εξάγεται θα πρέπει να αναπληρώνεται σε χρονικές τάξεις που έχουν μέγεθος ίσο με αυτές του

ανθρώπου. Αντίθετα η αβαθής γεωθερμία θεωρείται ανανεώσιμη πηγή, αφού η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζεται αμελητέα με την απόρριψη και πρόσδοση θερμότητας (Chen, 2008).

Τα κύρια συστήματα για την εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμίας είναι οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια, και οι υπόγειες αποθήκες θερμικής ενέργειας (Underground Thermal Energy Storage). Οι εφαρμογές των συστημάτων αυτών έχουν να κάνουν κυρίως με θέρμανση και ψύξη χώρων και αποπαγοποίηση δρόμων (Sanner, 2016) .

εργαζόμενο ρευστό μέσα στην αντλία θερμότητάς είναι ψυκτικό μέσο, όπου η επιλογή του διαφέρει ανάλογα την εφαρμογή, δηλαδή τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της εγκατάστασης (Chua et al., 2010). Τα κύρια επιμέρους εξαρτήματα της αντλίας θερμότητας είναι πέντε, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-2: συμπιεστής, εκτονωτική βαλβίδα, βαλβίδα αναστροφής, ατμοποιητής και συμπυκνωτής. Στην λειτουργία της βοηθούν και άλλα εξαρτήματα όπως είναι ο ανεμιστήρας, οι σωληνώσεις και ο πίνακας ελέγχου και αυτοματισμού (Herbasli & Kalinci, 2009).



Εικόνα 4-2 Βασική διάταξη γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (Camdali et al., 2015)

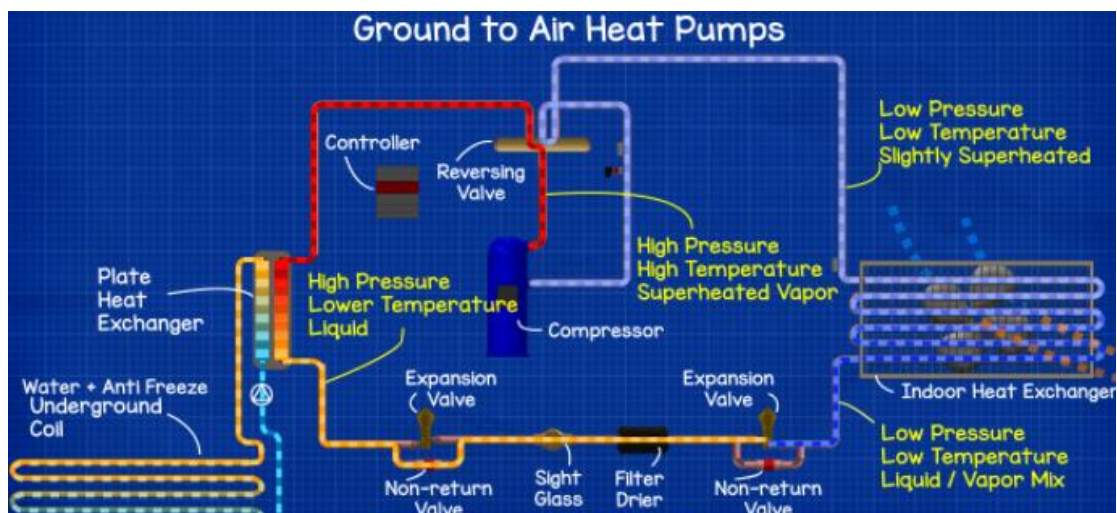
Η λειτουργία της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σε κατάσταση θέρμανσης είναι η εξής (Self et al., 2013):

- 1) Θερμική ενέργεια απορροφάται από το έδαφος και μεταφέρεται στον ατμοποιητή.
- 2) Το ψυχρό ψυκτικό υγρό σε φάση μίγματος υγρού-αερίου μπαίνει στον ατμοποιητή. Θερμότητα μεταφέρεται σε αυτό η οποία προκαλεί τον βρασμό του και το μετατρέπει σε ατμό χαμηλής πίεσης, καθώς η θερμοκρασία του αυξάνεται ελάχιστα.
- 3) Ο ατμός εισέρχεται σε ένα ηλεκτροκίνητο συμπιεστή, όπου η πίεση αυξάνεται μετατρέποντάς τον σε ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

- 4) Ο υψηλής θερμοκρασίας ατμός ρέει μέσα στον συμπυκνωτή. Το ψυκτικό μέσο βρίσκεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από τον χώρο, οπότε μεταφέρει θερμότητα στο κτήριο. Εξέρχεται από αυτόν με χαμηλότερη θερμοκρασία σχηματίζοντας ένα υγρό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.
- 5) Το υγρό περνά από την εκτονωτική βαλβίδα που του ρίχνει την πίεση και κατ' επέκταση και την θερμοκρασία, με κατεύθυνση τον ατμοποιητή για να επαναληφθεί ο κύκλος.

Αρκετά συστήματα έχουν την δυνατότητα να αντιστρέφουν την λειτουργία της θέρμανσης σε ψύξη, αφαιρώντας θερμότητα από τον χώρο και απορρίπτοντάς την στο έδαφος. Η βαλβίδα αναστροφής είναι αυτή που χρησιμοποιείται για να μετακινηθεί το ρευστό στην κατεύθυνση αυτή ώστε ο θερμοδυναμικός κύκλος να πραγματοποιηθεί αντίστροφα. Οι εναλλάκτες θερμότητας αντιστρέφονται, με αυτόν που αλληλοεπιδρά με το έδαφος να γίνεται ο συμπυκνωτής και αυτόν του κτηρίου να γίνεται ο ατμοποιητής (Self et al., 2013). Κάποια συστήματα περιλαμβάνουν και έναν υπερθερμαντήρα, ο οποίος είναι ένας βοηθητικός εναλλάκτης θερμότητας, που παρέχει θερμότητα σε μία δεξαμενή ζεστού νερού και βρίσκεται στη έξοδο του συμπιεστή (Self et al., 2013).

Τα είδη των αντλιών θερμότητας διακρίνονται με βάση το ρευστό, με το οποίο γίνεται η μετάδοση θερμότητας στο ατμοποιητή και τον συμπυκνωτή. Για τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας δυο είδη τέτοιων συστημάτων που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι: νερού-αέρα και νερού-νερού. Το σύστημα νερού-αέρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-3, μεταφέρει θερμική ενέργεια από το έδαφος, αφού ένας γεωεναλλάκτης είναι τοποθετημένος στην γη, στον κτήριο μέσω της αντλίας θερμότητας η οποία θερμαίνει τον αέρα που περνά από τον συμπυκνωτή. Ο αέρας αυτός κινείται μέσα στο στους διάφορους χώρους του κτηρίου μέσω αεραγωγών (Bloomquist, 2003).



Εικόνα 4-3 Σχηματική απεικόνιση αντλίας θερμότητας νερού-αέρα (theengineeringmindset, 2018)

Αντίστοιχα το σύστημα νερού-νερού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-4, απορροφά θερμική ενέργεια από το έδαφος και μέσω της αντλίας θερμότητας μεταφέρεται στο

κτήριο έχοντας σαν μέσο μετάδοσης το νερό. Το νερό αυτό κυκλοφορεί μεταξύ ενός κλειστού κυκλώματος σωληνώσεων και μίας δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού. Το αρχικά κρύο νερό της δεξαμενής εισέρχεται στον συμπυκνωτή, όπου απορροφά θερμότητα και εξέρχεται σε αρκετά μεγαλύτερη θερμοκρασία, τέτοια ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει το κτήριο με ζεστό νερό για χρήση, για την λειτουργία των θερμαντικών σωμάτων, επιδαπέδιας θέρμανσης και άλλα (Herbasli & Kalinci, 2009). Υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν τους δύο παραπάνω τύπους διανομής θερμότητας υπάρχουν επίσης και προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία για τον έλεγχο της επιθυμητής θερμοκρασίας του χώρου.



Εικόνα 4-4 Σχηματική απεικόνιση αντλίας θερμότητας νερού-νερού (theengineeringmindset, 2018)

4.1.2 Υποσύστημα διανομής θερμότητας εντός του κτηρίου

Το υποσύστημα διανομής θερμότητας απαιτείται για να παρέχει θερμική άνεση στους χώρους εντός του κτηρίου. Τα τελευταία χρόνια, με την εξέλιξη των θερμομονωτικών υλικών η απαιτούμενη θερμική ισχύς έχει μειωθεί σε σχέση με τα παλαιότερα κτήρια. Υπάρχει πληθώρα επιλογής συστήματος διανομής θέρμανσης ανάλογα τις ανάγκες.

Σώμα καλοριφέρ (radiator)

Το σώμα καλοριφέρ είναι ένας εκπομπός θερμότητας που παρέχει θέρμανση με αγωγή, όταν καυτό νερό ρέει σε αυτό. Ζεσταίνεται το μέταλλο από το οποίο είναι κατασκευασμένο το σώμα, θερμαίνοντας το αέρα γύρω του και κατ'επέκταση τον χώρο γύρω του. Συνήθως είναι φτιαγμένα από χάλυβα, παρόλο που υπάρχουν και αλουμινένια υψηλής απόδοσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι με τον πιο συνηθισμένο να είναι το πάνελ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-5, το οποίο μπορεί να αποδώσει θερμική ισχύ $3000-4000 \text{ W/m}^2$ (Εικόνα 4-5) (assets.publishing.service.gov.uk, 2021).



Εικόνα 4-5 απεικόνιση ενός σώματος καλοριφέρ τύπου πάνελ (*assets.publishing.service.gov.uk, 2021*)

Σύστημα επιδαπέδιας θέρμανσης (Underfloor heating systems)

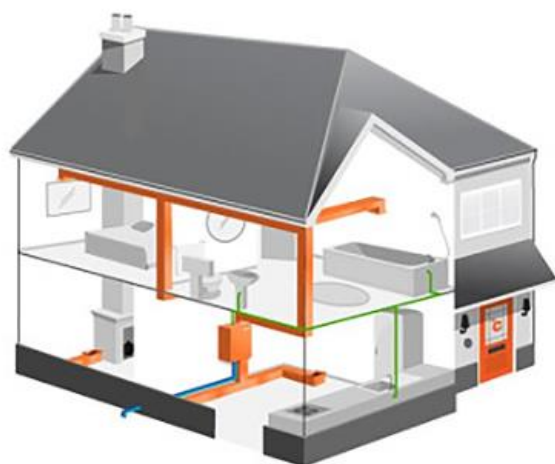
Μια εναλλακτική λύση αποτελεί το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης (Εικόνα 4-6). Αποτελείται από μια σειρά σωληνώσεων, που συνήθως είναι πλαστικές και ρέει σε αυτές ζεστό νερό, ενώ είναι τοποθετημένες κάτω από την επιφάνεια του πατώματος. Γενικά, σε καλά μονωμένα σπίτια προτείνεται σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας για συνεχή λειτουργία κατά την διάρκεια της μέρας. Επίσης είναι αρκετά αποδοτικό όταν η πηγή θερμικής ενέργειας είναι χαμηλών θερμοκρασιών όπως η αντλία θερμότητας. Όμως, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως υπάρχουν αρκετές τεχνικές δυσκολίες στην εγκατάσταση των σωληνώσεων κάτω από την επιφάνεια του πατώματος (*assets.publishing.service.gov.uk, 2021*).



Εικόνα 4-6 Απεικόνιση συστήματος επιδαπέδιας θέρμανσης (*reconsblog.gr, n.d.*)

Σύστημα θερμού αέρα (Warm air systems)

Θερμός αέρας ρέει σε αεραγωγούς που είναι τοποθετημένοι σε όλο το κτήριο για την παροχή θέρμανσης. Σε συγκεκριμένα σημεία, όπως στο πάτωμα και τους τοίχους υπάρχουν ανοίγματα για την εισαγωγή του θερμού αέρα στον χώρο. Αυτά τα συστήματα όμως δεν προτιμώνται πλέον καθόλου λόγω του μεγάλου κόστους των εξαρτημάτων τους (*assets.publishing.service.gov.uk, 2021*).



Εικόνα 4-7 απεικόνιση συστήματος θερμού αέρα (electric-heatingcompany.co.uk, χ.χ.)

Υποσύστημα διανομής θερμότητας στο κτήριο	Θερμοκρασία λειτουργίας (Degrees Celsius)	Αποδιδόμενη θερμική ισχύς (W/m ²)
Σώματα καλοριφέρ	90	3000-4000
Επιδαπέδια θέρμανση	30	100
Σύστημα θερμού αέρα	40	-

Πίνακας 4-1 Θερμοκρασία λειτουργίας και θερμική ισχύς των συστημάτων διανομής θέρμανσης

4.1.3 Υποσύστημα γεωεναλλάκτη

Οι γεωεναλλάκτες είναι οι συνδέσεις μεταξύ του εδάφους και της αντλίας θερμότητας. Αποτελούνται από ένα σύνολο σωληνώσεων σε διάφορες διατάξεις, στις οποίες κυκλοφορεί ρευστό που απορροφά ή αποβάλλει θερμότητα στο χώμα. Δύο βασικοί σχεδιασμοί γεωεναλλακτών θερμότητας υπάρχουν: διπλού βρόγχου και μονού βρόγχου (Self et al., 2013).

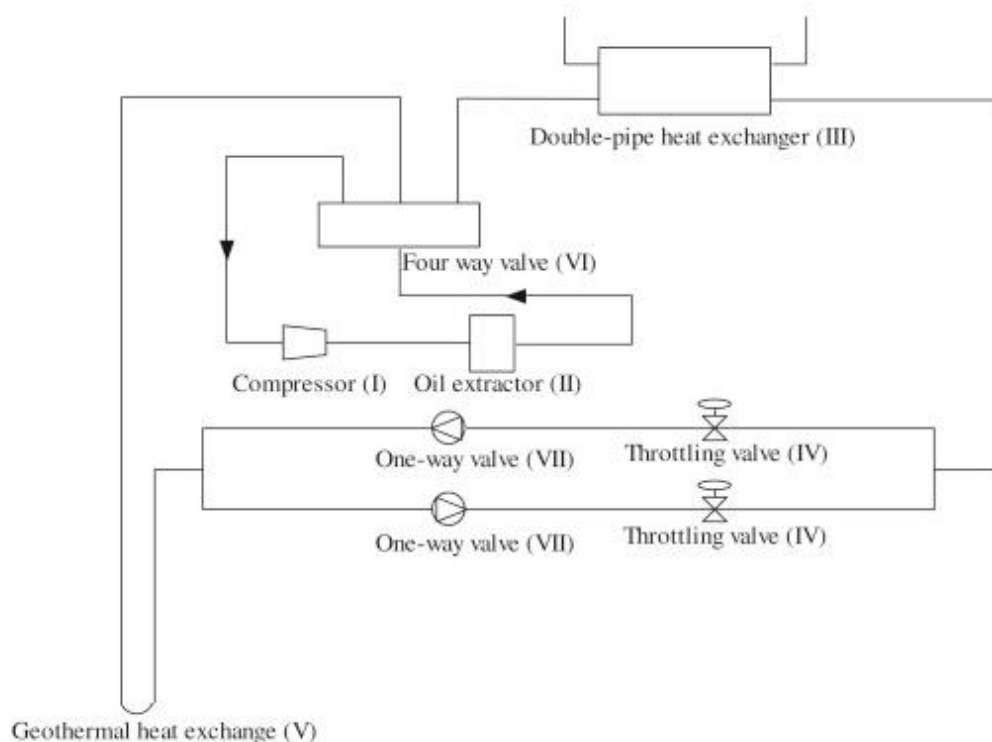
Διατάξεις διπλού βρόγχου

Αυτές οι διατάξεις είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες και περιέχουν ξεχωριστό κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων, που έρχεται σε επαφή με το έδαφος, εκτός από αυτό της αντλίας θερμότητας. Η θερμότητα μεταφέρεται στο ψυκτικό υγρό μέσω του ατμοποιητή ενώ στις σωληνώσεις του γεωεναλλάκτη ρέει μίγμα νερού με αντιπαγωτικές προσμίξεις (Ozyurt & Ekinici, 2011). Δύο τύποι διατάξεων διπλού βρόγχου υπάρχουν: ανοικτού και κλειστού.

Διατάξεις μονού βρόγχου

Στις διατάξεις μονού βρόγχου ή συστήματα άμεσης εναλλαγής θερμότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-8, το εργαζόμενο μέσο της αντλίας θερμότητας είναι αυτό που ρέει στον γεωεναλλάκτη. Αποφεύγεται έτσι η ανάγκη για τοποθέτηση δεύτερου κλειστού βρόγχου στο έδαφος. Ουσιαστικά, ο γεωεναλλάκτης γίνεται πλέον ο ατμοποιητής της αντλίας θερμότητας (Mustafa Omer, 2008). Επίσης αυτές οι διατάξεις δεν διαθέτουν σε λειτουργία αντλία κυκλοφορίας, γιατί βασίζονται σε έναν μεγαλύτερο

συμπιεστή στην αντλία θερμότητας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αποδοτικότητα του συστήματος (H. Li et al., 2007). Οι σωληνώσεις είναι συνήθως χάλκινες σε αυτές τις εφαρμογές, λόγω των καλών χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας του υλικού. Αν φθαρούν, όλο το σύστημα πρέπει να ξεθαφτεί για να επιδιορθωθεί. Ακόμα, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι χρειάζονται μεγάλες ποσότητες από το ψυκτικό μέσο, οπότε και μεγαλύτερο κόστος (Mustafa Omer, 2008). Παρόλα αυτά, τα συστήματα μονού βρόγχου γίνονται όλο και πιο δημοφιλή παγκοσμίως, λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς τους (COP), ενώ σε κάποιες περιπτώσεις εκτός από άμεση εναλλαγή θερμότητας με το έδαφος, ανταλλάσσουν άμεσα θερμότητα με τον εσωτερικό χώρο με την χρήση επιδαπέδιας θέρμανσης (Mustafa Omer, 2008).



Εικόνα 4-8 Σχηματική απεικόνιση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας μονού βρόγχου (W. Yang, 2013)

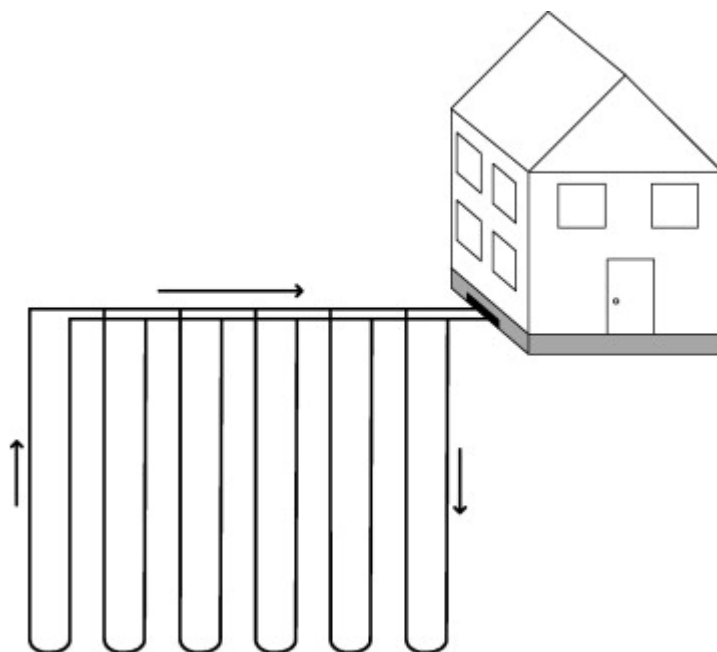
Επίσης, οι διατάξεις διπλού βρόγχου με την σειρά τους χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: στα κλειστού τύπου και στα ανοιχτού τύπου συστήματα, με τα πρώτα να έχουν διάφορες πιθανές τοπολογίες και διατάξεις, όπως κάθετη, οριζόντια, σπирάλ ή ενταγμένη στην κατασκευή.

Κλειστού τύπου συστήματα

Στα κλειστού τύπου συστήματα, που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα, το ρευστό ρέει στον γεωεναλλάκτη χωρίς να έρχεται σε άμεση επαφή με το έδαφος. Η μετάδοση της θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω του υλικού των σωληνώσεων, το οποίο είναι απαραίτητο να έχει ιδιότητες θερμικά αγωγίμου υλικού (Cui et al., 2011; Noorollahi et al., 2018). Υπάρχουν 4 είδη κλειστού τύπου συστημάτων γεωεναλλάκτες: κάθετης διάταξης, οριζόντιας διάταξης, σπирάλ και ενταγμένοι στην κατασκευή (geostucture).

Γεωεναλλάκτες κάθετης διάταξης

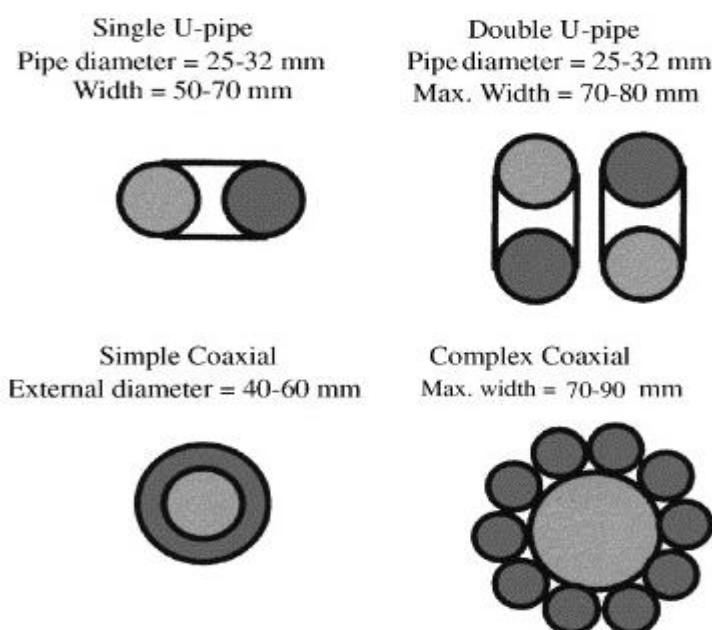
Ένας σύστημα γεωεναλλάκτη κάθετης διάταξης αποτελείται από σωληνώσεις συνδεδεμένες μεταξύ τους σχηματίζοντας έναν εναλλάκτη θερμότητας τοποθετημένο κάθετα προς το έδαφος όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-9. Απαραίτητο είναι λοιπόν, για αυτού του είδους τα συστήματα, μία γεώτρηση που συνήθως είναι περίπου 45-75 μέτρα βάθος για νοικοκυριά και πάνω από 150 μέτρα για βιομηχανικές εγκαταστάσεις (Self et al., 2013). Για να ενισχυθεί η μετάδοση θερμότητας, το κενό μεταξύ των σωληνώσεων και των τοιχωμάτων της γεώτρησης γεμίζεται με ειδικό κονίαμα (P. Cui et al., 2011; W. Yang et al., 2009). Σε τυπικές διατάξεις η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων, αν είναι παραπάνω από μία, είναι τουλάχιστον 5-6 μέτρα ώστε να μην επηρεάζονται θερμικά (H. Yang et al., 2010). Στην περίπτωση αυτή εισάγεται και σύστημα ίσης διανομής της παροχής του ρευστού στις σωληνώσεις των γεωτρήσεων, το οποίο τοποθετείται είτε μέσα στο κτήριο είτε στο έδαφος (H. Yang et al., 2010). Ένα πλεονέκτημα της κάθετης διάταξης των γεωεναλλακτών είναι ότι απαιτείται μικρή επιφάνεια για την εγκατάστασή τους, πράγμα που τους καθιστά ελκυστική λύση σε περιπτώσεις που ο χώρος είναι περιορισμένος ή το έδαφος έχει πετρώματα και βράχους σε διάφορα σημεία του (Self et al., 2013). Επίσης, τοποθετώντας τις σωληνώσεις βαθιά στο έδαφος, όπου η θερμοκρασία είναι σχεδόν σταθερή κατά την διάρκεια όλου του χρόνου, η αποδοτικότητα της αντλίας θερμότητας αυξάνεται και το συνολικό μήκος τους μειώνεται (P. Cui et al., 2011; H. Yang et al., 2010). Το κύριο μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης, το οποίο προκύπτει από την ανάγκη για γεώτρηση και επομένως τα σκαπτικά έξοδα. Συνεπώς, θεωρείται συνήθως βιώσιμη λύση, όταν πρόκειται για μεγάλης κλίμακας εγκατάσταση με την θερμική του απόδοση να είναι 50-100 W/m (Mustafa Omer, 2008).



Εικόνα 4-9 Σχηματική απεικόνιση συστοιχία γεωεναλλακτών κάθετης διάταξης (Self et al., 2013)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι σωληνώσεων για τους κάθετου τύπου γεωεναλλάκτες, οι οποίοι χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τύπου U και ομόκεντροι ή ομοαξονικοί.

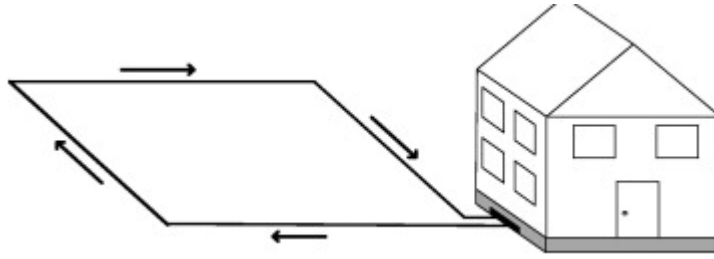
- Οι σωληνώσεις τύπου U όπως φαίνονται στην Εικόνα 4-10 αποτελούνται από δύο ευθείες σωλήνες που ενώνονται με μία καμπύλη τύπου U στον πάτο της γεώτρησης. Επειδή το κόστος αυτού του τύπου είναι σχετικά χαμηλό, δύο ή και τρία τέτοια ζευγάρια σωληνώσεων εγκαθίστανται σε μία γεώτρηση.
- Οι ομόκεντροι ή ομοαξονικοί σωλήνες, όπως φαίνονται στην Εικόνα 4-10, αποτελούν απλή διάταξη με μία ευθεία σωλήνα τοποθετημένη μέσα σε μία μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνα (Florides & Kalogirou, 2007).



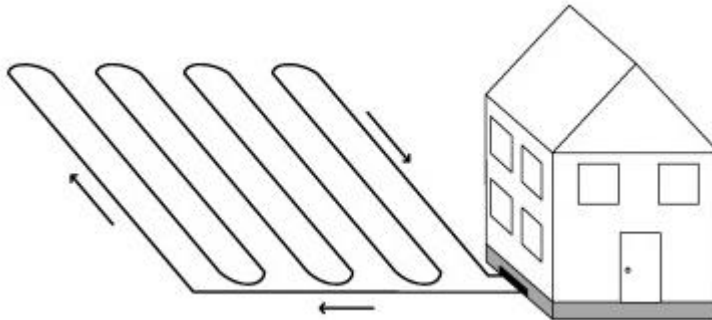
Εικόνα 4-10 Τύποι σωληνώσεων για τους κάθετου τύπου γεωεναλλάκτες (Florides & Kalogirou, 2007)

Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης

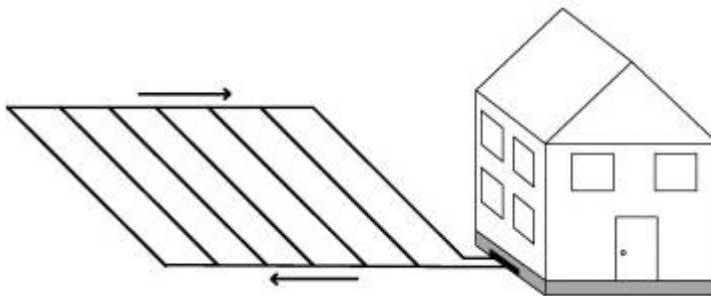
Οι γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης αποτελούν την πιο σύνηθες επιλογή όταν η διαθέσιμη επιφάνεια του εδάφους είναι επαρκής. Τοποθετούνται σε πολύ μικρό βάθος κάτω από την επιφάνεια της γης, 1-2 μέτρα, σε αυλακώσεις οι οποίες καλύπτονται με χώμα (Self et al., 2013). Ο τρόπος που οι σωληνώσεις συνδέονται μεταξύ τους διαφέρει ανάλογα την εφαρμογή, τις ανάγκες και την διαθεσιμότητα της επιφάνειας. Υπάρχουν 4 επιλογές διατάξεων που χρησιμοποιούνται συνήθως: η βασική διαμόρφωση, διαμόρφωση εν σειρά, διαμόρφωση εν παραλλήλω και διάταξη με αυλακώσεις. Η βασική διαμόρφωση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-11, χρειάζεται μεγαλύτερο επιφάνεια σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η διαμόρφωση εν σειρά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-12, χαρακτηρίζεται από την μειωμένη επιφάνεια που χρειάζεται και την απλότητα στις συνδέσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στην διαμόρφωση εν παραλλήλω όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-13. Η διάταξη με αυλακώσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-14 έχει λίγο πιο πολύπλοκη μορφή (Mustafa Omer, 2008).



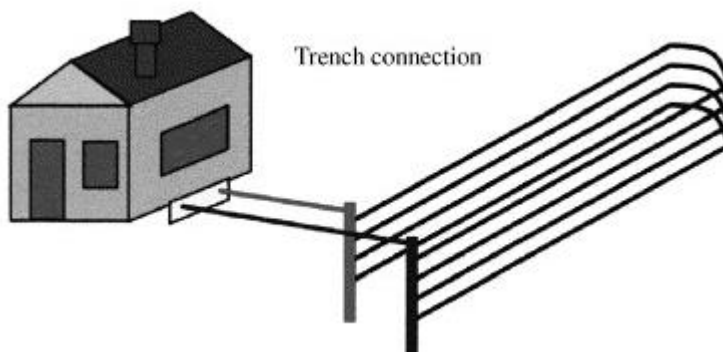
Εικόνα 4-11 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με βασική διαμόρφωση σωληνώσεων (Self et al., 2013)



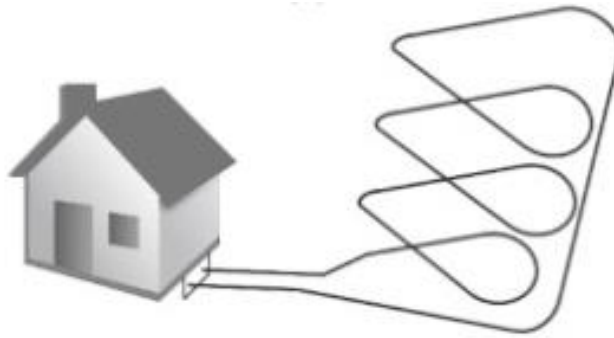
Εικόνα 4-12 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με διαμόρφωση σωληνώσεων εν σειρά (Self et al., 2013)



Εικόνα 4-13 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης διαμόρφωση σωληνώσεων εν παραλλήλω (Self et al., 2013)



Εικόνα 4-14 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με διαμόρφωση σωληνώσεων με αυλακώσεις (Self et al., 2013)



Εικόνα 4-15 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με διαμόρφωση σωληνώσεων τύπου slinky (Javadi et al., 2019)

Τα συστήματα γεωεναλλακτών οριζόντιας διάταξης είναι συνήθως τα πιο αποδοτικά συναρτήσει του κόστους τους, αφού βέβαια υπάρχει διαθέσιμος ο απαραίτητος χώρος για την τοποθέτησή τους (Florides & Kalogirou, 2007). Οι αυλακώσεις που σκάβονται για να φιλοξενήσουν τις σωληνώσεις δεν ξεπερνούν τα 2 μέτρα βάθος συνήθως (Florides & Kalogirou, 2007). Όμως σε αυτά τα μικρά βάθη η αλληλεπίδραση του χώματος με την ατμόσφαιρα είναι αυξημένη, που οδηγεί σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εδάφους σε καθημερινή βάση και κατ' επέκταση στην μείωση της αποδοτικότητας της αντλίας θερμότητας (Self et al., 2013). Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ροή θερμότητας είναι η βροχή, το χιόνι, η βλάστηση και η ηλιοφάνεια (Mustafa Omer, 2008). Οι παραπάνω είναι οι λόγοι που οι οριζόντιες διατάξεις γεωεναλλακτών χρειάζονται μεγαλύτερο συνολικό μήκος σωληνώσεων από τις κάθετες, αποδίδοντας θερμική ισχύ 17-30 W/m. Επιπρόσθετα, απαιτείται μίγμα νερού και αντιψυκτικού υγρού σαν ρευστό που ρέει στον γεωεναλλάκτη για την προστασία από πάγο κατά την διάρκεια του χειμώνα στα ψυχρά κλίματα (Florides & Kalogirou, 2007).

Γεωεναλλάκτες διάταξης σπирάλ

Οι γεωεναλλάκτες διάταξης σπирάλ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-16, είναι παρεμφερείς με τις συμβατικές οριζόντιες διάταξης, αφού είναι τοποθετημένοι και αυτοί οριζόντια σε αβαθείς αυλακώσεις, μόνο που οι σωληνώσεις τους ακολουθούν σπειροειδές μοτίβο. Στο τέλος κάθε σπирάλ υπάρχει μια ευθεία διάταξη σωληνώσεων που οδηγεί το ρευστό στην αντλία θερμότητας (Mustafa Omer, 2008) (Ma & Chai, 2004). Οι εν λόγω γεωεναλλάκτες χρειάζονται λιγότερη επιφάνεια σε σχέση με τις υπόλοιπες οριζόντιες διαμορφώσεις, όμως απαιτούν μεγαλύτερο μήκος σωληνώσεων (P. Cui et al., 2011). Μία άλλη παραλλαγή αυτών των συστημάτων είναι η τοποθέτηση των σωληνώσεων τύπου σπирάλ κατακόρυφα σε στενές αυλακώσεις. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτών είναι ότι μειώνουν δραματικά την απαιτούμενη επιφάνεια αποδίδοντας στο κόστος του συστήματος (C. K. Lee, 2011). Σαν μειονέκτημα αναγνωρίζεται το γεγονός πως απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ άντλησης για την κυκλοφορία του ρευστού λόγω του αυξημένου μήκους και της γεωμετρίας τους, χαμηλώνοντας την αποδοτικότητα της εγκατάστασης.

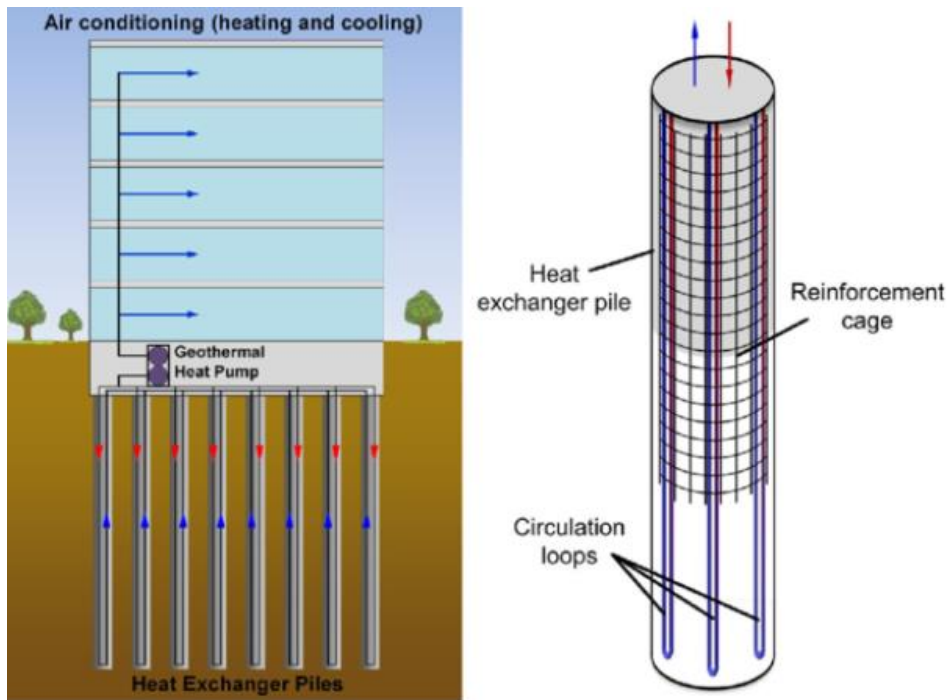


Εικόνα 4-16 Γεωεναλλάκτες οριζόντιας διάταξης με διαμόρφωση σπирάλ (SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY, 2001)

Στα κλειστού τύπου συστήματα κατατάσσονται και αυτά στα οποία ο γεωεναλλάκτης δεν βρίσκεται στο έδαφος, αλλά βυθισμένος σε υδάτινη μάζα. Αποτελεί μια διάταξη με διαμόρφωση σπирάλ, που τοποθετείται λίγο πάνω από τον βυθό, ώστε να επιτρέπεται συνεχείς ροή νερού γύρω από τις σωληνώσεις (Self et al., 2013). Τα ποτάμια δεν αποτελούν καλή λύση για υδάτινη μάζα λόγω της απροσδιόριστής τους συμπεριφοράς όπως πιθανές πλημμύρες, φερτά υλικά και άλλα, που μπορούν να αποτελέσουν κίνδυνο για το σύστημα (Mustafa Omer, 2008). Παρόλα αυτά, τα εν λόγω συστήματα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα υπόλοιπα όπως το γεγονός ότι απαιτούν μικρότερο μήκος σωληνώσεων, εξαιτίας των ανώτερων χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας και ότι δεν χρειάζεται καθόλου σκάψιμο (Florides & Kalogirou, 2007).

Ενταγμένος γεωεναλλάκτης στην κατασκευή

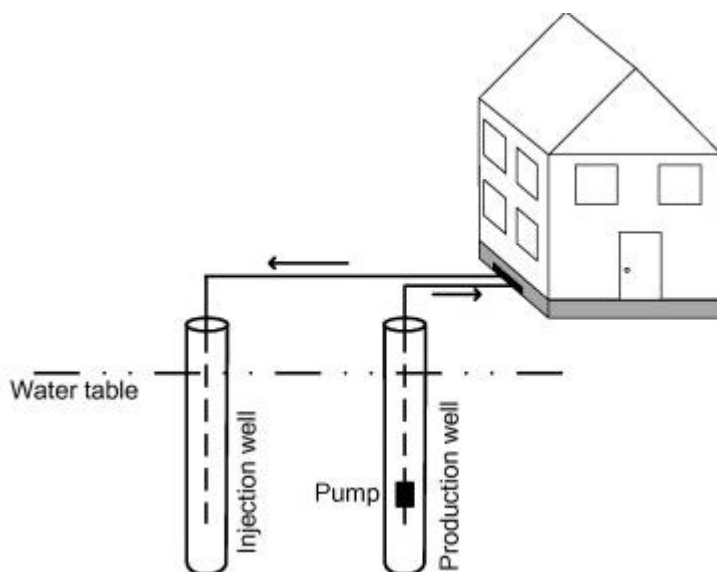
Τα θεμέλια ενός κτηρίου μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν με σκοπό την θερμική αλληλεπίδραση του γεωεναλλάκτη με το έδαφος. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-17, οι δοκοί στήριξης ενός κτηρίου, εκτός από την χρησιμότητα τους για την ανάληψη των στατικών φορτίων, μπορούν να αποτελέσουν το περίβλημα σωληνώσεων ενός γεωεναλλάκτη, φτάνοντας από 10 έως και 30 μέτρα βάθος ανάλογα το ύψος του κτηρίου (Morrone et al., 2014). Είναι προφανές όμως ότι μια τέτοια εγκατάσταση μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο κατά την διάρκεια κατασκευής του κτηρίου. Στα θετικά προσμετράται το γεγονός πως δεν απαιτείται παραπάνω επιφάνεια εδάφους, κατ'επέκταση και σκαπτικά έξοδα, για τη τοποθέτησή του. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι θερμικές καταπονήσεις που προκαλούνται από το ρευστό που ρέει στις σωληνώσεις επηρεάζουν τις δοκούς και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην σχεδίαση του συστήματος (Morrone et al., 2014). Αντίστοιχες εφαρμογές αβαθούς γεωθερμίας είναι και η τοποθέτηση γεωεναλλακτών σε τοίχους κτισμάτων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης όπως σταθμοί και διαδρομές του μετρό, τούνελ και άλλα (Bouazza, 2011).



Εικόνα 4-17 Σχηματική απεικόνιση κτηρίου με γεωεναλλάκτη στα θεμέλια του (Olgun, n.d.)

Ανοιχτού τύπου συστήματα

Τα ανοιχτού τύπου συστήματα (Εικόνα 4-18) αλληλεπιδρούν άμεσα με το έδαφος. Χρησιμοποιούν τοπικά υπόγεια ύδατα ή νερό από τη επιφάνεια της γης, όπως λίμνες, σαν μέσο μεταφοράς θερμότητας. Το νερό το οποίο αντλείται, αφού περάσει από τον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας, τότε επιστρέφεται πίσω στην πηγή από την οποία αντλήθηκε ή χρησιμοποιείται για άρδευση (Mustafa Omer, 2008). Γενικά τα ανοιχτού τύπου συστήματα προτιμώνται σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις. Για παράδειγμα νερό από εγκαταλελειμμένα ορυχεία, είναι ικανό να παρέχει θέρμανση, με χαμηλό κόστος, σε ολόκληρη πόλη με την χρήση αντλιών θερμότητας (Mustafa Omer, 2008). Υπάρχουν 3 πιθανές διατάξεις για τα ανοιχτού τύπου συστήματα: άντληση υπόγειων υδάτων, άντληση και επανεισαγωγή υπόγειων υδάτων και συστήματα με εκμετάλλευση υδάτων στην επιφάνεια της γης. Το πιο σύνηθες σύστημα είναι αυτό με την επανεισαγωγή των υπόγειων υδάτων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-18. Νερό αντλείται από μία γεώτρηση και αφού περάσει από τον ατμοποιητή της αντλίας θερμότητας, επανεισάγεται στον υδροφόρο ορίζοντα. Η απόσταση όμως από το σημείο την άντλησης είναι επαρκής, ώστε να μην αλληλεπιδρούν θερμικά το νερό εισαγωγής και το νερό απόθεσης (Mustafa Omer, 2008).



Εικόνα 4-18 Σχηματική απεικόνιση συστήματος ανοικτού τύπου γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (Self et al., 2013)

Πλεονέκτημα, στις διατάξεις ανοικτού τύπου, αποτελεί το γεγονός πως η θερμοκρασία του νερού παραμένει σχετικά σταθερή, δηλαδή υψηλότερη τον χειμώνα και χαμηλότερη το καλοκαίρι. Επίσης εκμηδενίζονται όλες οι θερμικές απώλειες που υπάρχουν στα κλειστού τύπου συστήματα, λόγω του γεωεναλλάκτη, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα του συστήματος (H. Li et al., 2007). Η άντληση των υδάτων όμως, μπορεί να χρειάζεται μεγάλη ισχύ στις αντλίες. Παρόλα αυτά η αποδοτικότητα τους είναι συνήθως μεγάλη, οπότε αυτό δεν συνιστά πρόβλημα στα λειτουργικά έξοδα της εγκατάστασης (Mustafa Omer, 2008). Επιπρόσθετα, τα ανοικτού τύπου συστήματα χρειάζονται μικρότερες γεωτρήσεις και πιο απλές συνδέσεις, οπότε έχουν και χαμηλότερο συνολικό κόστος. Από την άλλη πλευρά, η ποσότητα του νερού που μπορεί να αντληθεί σε μια τέτοια εγκατάσταση συνήθως είναι περιορισμένη από σχετικές νομοθεσίες των τοπικών κοινοτήτων (Mustafa Omer, 2008). Επίσης το θέμα που τίθεται σε αυτές τις εγκαταστάσεις είναι η προστασία της ποιότητας του νερού, οπότε ο καθαρισμός του είναι απαραίτητος από την νομοθεσία κάποιες φορές, ενώ άλλες φορές τίθεται θέμα απαγόρευσης συστημάτων ανοικτού τύπου (H. Li et al., 2007). Οι σωληνώσεις στις οποίες ρέει το νερό που αντλείται υπόκεινται σε διάβρωση. Έτσι, το νερό θα πρέπει να έχει pH μέσα στα επιτρεπτά όρια, όπως και ποσότητες μεταλλικών στοιχείων σαν τον σίδηρο (Ma & Chai, 2004). Εάν η χημική σύσταση του νερού στον υδροφόρο ορίζοντα δεν είναι ουδέτερη, θα πρέπει να περάσει από επεξεργασία πρώτα, πράγμα που σημαίνει μεγάλα λειτουργικά έξοδα (Mustafa Omer, 2008).

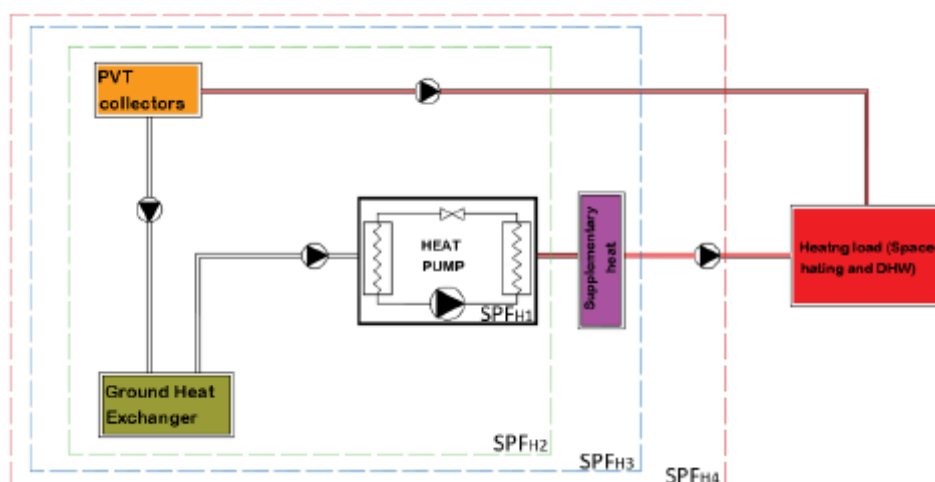
4.2 Ενεργειακοί δείκτες αξιολόγησης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας

Η αποδοτικότητα των συστημάτων συνήθως μεταφράζεται σε ενεργειακούς όρους. Συσχετίζεται η θερμική ενέργεια που παρέχεται από την αντλία θερμότητας με την ηλεκτρική ενέργεια που δαπανείται για να λειτουργήσει. Οι αντλίες θερμότητας αποδίδουν μεγαλύτερο ποσό θερμικής ενέργειας από την ηλεκτρική ενέργεια που

καταναλώνουν για να κινηθεί ο άξονας του συμπιεστή, οπότε θα έβγαινε απόδοση άνω του 100%. Για να αποφευχθεί αυτή η σύγχυση εισάγεται ο όρος του COP (Coefficient Of Performance) που είναι ο λόγος της θερμότητας που παράγεται στον συμπυκνωτή προς την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας. Με βάση τον ορισμό του COP, είναι ένας δείκτης που δηλώνει αυστηρά την αποδοτικότητα της αντλίας θερμότητας, ως συσκευή. Το COP για τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 3 και 6, και είναι συνάρτηση των θερμοκρασιών εισόδου στον ατμοποιητή και στον συμπυκνωτή καθώς και των παροχών των ρευστών μεταφοράς θερμότητας (Efficiency, 2009).

$$COP = \frac{Q_{condenser}}{E_{hp}} \quad (5)$$

Ο δείκτης που μας δίνει την συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα ενός συστήματος με αντλία θερμότητας είναι ο SPF (Seasonal Performance Factor). Ο SPF μπορεί να υπολογιστεί σε ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία ή ετήσια περίοδο. Είναι ο λόγος της θερμότητάς που παρέχεται στο σύστημα θέρμανσης ή ζεστού νερού, προς την ενέργεια που δαπανήθηκε (ηλεκτρισμός στην περίπτωση ηλεκτροκινούμενης αντλίας θερμότητας), συν την ετήσια πρόσθετη ενέργεια που απορροφά το σύστημα για την λειτουργία του και της παρασιτικής ενέργειας.



Εικόνα 4-19 Τα 4 όρια του SPF όπως αυτά ορίζονται από απόφαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Sakellariou, 2021)

Με την απόφαση του European Parliament ορίζονται 4 διαφορετικά όρια για τον ενεργειακό δείκτη SPF όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-19. Το SPF_{H1} είναι η πιο κοντινή τιμή με αυτή που δίνεται από τον κατασκευαστή για την αντλία θερμότητας λαμβάνοντας υπόψιν μόνο την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της συσκευής (συμπιεστής, αντλία κ.α.). Στο SPF_{H2} προστίθενται και οι αντλίες για την κυκλοφορία του ρευστού στον γεωεναλλάκτη. Στο SPF_{H3} εμπεριέχεται επιπλέον και η επιπρόσθετη θερμότητα που παράγεται με ηλεκτρική ενέργεια (αντιστάσεις), ενώ στο SPF_{H4} όλη η

ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει το σύστημα υπολογίζεται όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση (αντλίες, κυκλοφορητές, ανεμιστήρες) (Parliament, 2016).

$$SPF_{H4} = \frac{Q_{condenser}}{E_{hp} + E_{pumps} + E_{aux}} \quad (6)$$

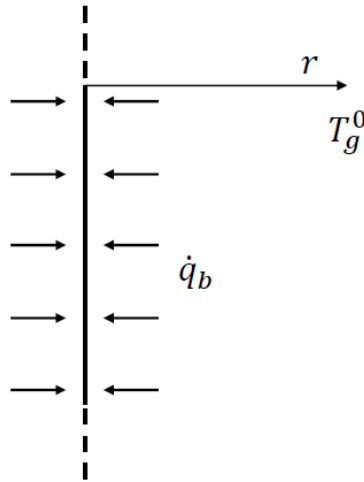
Για να θεωρείται το σύστημα με την αντλία θερμότητας ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, πρέπει ο δείκτης SPF_{H2} να είναι μεγαλύτερος από την τιμή 2,5 (Parliament, 2016). Η τιμή αυτή του 2,5 έχει τεθεί για την αντιστάθμιση των ρύπων. Αποτελεί το κατώτατο όριο αποδοτικότητας, ώστε οι ρύποι που παράγονται από την λειτουργία της αντλίας θερμότητας, να είναι λιγότεροι από ένα αποδοτικό σύστημα θέρμανσης συμβατικού καυσίμου.

5 Μέθοδοι σχεδίασης κάθετων γεωεναλλακτών

5.1 Μαθηματικά μοντέλα υπολογισμού θερμοκρασίας του εδάφους

Η μετάδοση της θερμότητας μεταξύ του εδάφους και των σωληνώσεων του γεωεναλλάκτη γίνεται με αγωγή. Συνήθως ο γεωεναλλάκτης αποτελείται από τις σωληνώσεις (U-tube, double U-tube, coaxial) και το ειδικό κονίαμα που είναι υλικό με μεγάλη θερμοχωρητικότητα όπως βεντονίτης, σκυρόδεμα άμμος κλπ. Με την παραδοχή ότι τα όρια του γεωεναλλάκτη είναι εκεί που τελειώνει το κονίαμα, η ροή θερμότητας μελετάται σε δύο όγκους ελέγχου: τον χώρο εκτός του γεωεναλλάκτη (έδαφος/χώμα) και τον χώρο εντός του γεωεναλλάκτη (κονίαμα, σωληνώσεις). (Rees, 2016)

Infinite line source (ILS) model:



Εικόνα 5-1 Σχηματική απεικόνιση του Infinite line source model (Conti, 2016)

Η πρώτη μαθηματική αναλυτική λύση της εξίσωσης αγωγής του Fourier για κάθετους γεωεναλλάκτες δόθηκε από τον (Ingersoll, 1955) βασισμένη στην θεωρία του Kelvin. Σε αυτό το μοντέλο η ύπαρξη του χώρου εντός του γεωεναλλάκτη (κονίαμα, σωληνώσεις, ρευστό) δεν λαμβάνεται υπόψιν, κάνοντας την παραδοχή ότι η Infinite line περιβάλλεται κατευθείαν από το έδαφος, το οποίο έχει σταθερές και ομογενείς ιδιότητες. Με αυτή την μέθοδο η θερμοκρασία του εδάφους μπορεί να προσδιοριστεί σε κάθε ακτίνα οποιαδήποτε χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση που προτάθηκε από τους Carslaw και Jaeger:

$$T - T_0 = \frac{q_b}{4\pi k_{gr}} \int_{\frac{r^2}{4\alpha_{gr}t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q_b}{4\pi k_{gr}} \times E_1 \left(\frac{r^2}{4\alpha_{gr}t} \right) \quad (7)$$

Όπου: q_b είναι η ροή θερμότητας (W/m), E_1 ένα εκθετικό ολοκλήρωμα και το T_0 η αρχική θερμοκρασία του εδάφους (undisturbed ground temperature). Το εκθετικό ολοκλήρωμα E_1 μπορεί να θεωρηθεί το παρακάτω άθροισμα:

$$E_1(x) = -\gamma - \ln(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{n \times n!} \quad (8)$$

Όμως για μεγάλο χρόνο λειτουργίας, περίπου μεταξύ 3 και 10 ωρών, η εξίσωση μπορεί να απλουστευτεί:

$$T - T_o \cong \frac{q_b}{4\pi k_{gr}} \left[\ln \left(\frac{4\alpha_{gr} t}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (9)$$

Παρόλο που υπάρχουν περιορισμοί, αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται αρκετά για τον υπολογισμό κι την ανάλυση της θερμοκρασίας του εδάφους. (Yavuzturk, 1999)

Infinite cylindrical source (ICS) model:

Οι Carlaw και Jaeger πρότειναν ένα μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας του εδάφους στην ακτινική διεύθυνση. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται η παραδοχή ότι ο κύλινδρος έχει σταθερή ροή θερμότητας σε όλη του την ακτινική του διεύθυνση. Οπότε η βασική διαφορά του από το ILS μοντέλο είναι ότι η λύση της εξίσωσης λαμβάνει χώρα στην εξωτερική ακτίνα του γεωαναλλάκτη, εκεί που τελειώνει το κονίαμα. Η λύση εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$T - T_o = \frac{q_b}{\pi^2 k_{gr}} \int_0^{\infty} (e^{-u^2 Fo} - 1) \frac{J_0(u) Y_1(u) - Y_0(u) J_1(u)}{u^2 (J_1^2(u) + Y_1^2(u))} du \quad (10)$$

Όμως για μεγάλο χρόνο λειτουργίας, περίπου μεταξύ 3 και 10 ωρών, η εξίσωση μπορεί να απλουστευτεί:

$$T - T_o \cong \frac{q_b}{4\pi k_{gr}} \left[\ln \left(\frac{4\alpha_{gr} t}{r^2} \right) - \gamma + \frac{r^2}{2\alpha_{gr} t} \left(\ln \left(\frac{4\alpha_{gr} t}{r^2} \right) - \gamma + 1 \right) \right] \quad (11)$$

Το ICS είναι παρόμοιο με το ILS ενώ θεωρούνται επίσης απλά μοντέλα. Όμως, όπως αναφέρεται από τον Li και Lai (Li, 2015), αυτά τα μοντέλα δεν είναι ικανά να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα για μικρούς χρόνους λειτουργίας, αφού το κονίαμα δεν λαμβάνεται υπόψιν. Αντίστοιχα δεν είναι αξιόπιστα για πολύ μεγάλους χρόνους λειτουργίας (20 χρόνια και άνω) καθώς η επιρροή της επιφάνειας του εδάφους και του heat diffusion στην αξονική διεύθυνση στον τέλος της γεώτρησης (bottom of the borehole) δεν λαμβάνεται υπόψιν.

Finite line source (FLS) model:

Το μοντέλο FLS επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμοκρασίας σε όλα τα σημεία σε όλους τους άξονες κάθε χρονική στιγμή. Το μοντέλο βασίζεται σε σταθερή ροή θερμότητας σε μία γραμμή ύψους (H) κατά το μήκος του γεωεναλλάκτη, σε σημείο με βάθος (D) από την επιφάνεια του εδάφους. Το μοντέλο αρχικά προτάθηκε από τον (Eskilson, 1987) και έπειτα υιοθετήθηκε τον (Zeng, 2002). Η λύση μπορεί να εφαρμοστεί για σταθερή θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους (ίση με την undisturbed soil temperature) για μία αδιαβατική επιφάνεια εδάφους. Το μοντέλο FLS περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$T(r, t) = T_o + \frac{q_b}{4\pi k_{gr}} \int_0^H \left(\frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha_{gr}t}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha_{gr}t}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right) dh \quad (12)$$

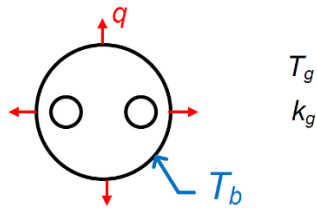
Όπου το erfc είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος. Όμως με αυτή την εξίσωση χρειάζεται να λυθεί διπλό ολοκλήρωμα, πράγμα το οποίο αυξάνει την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται, άρα και το κόστος. Οι (Lamarche, L., Beaucamp, B., 2007) πρότειναν μία μέθοδο που δεν απαιτεί λύση διπλού ολοκληρώματος, χωρίς να μειώνεται η ακρίβεια.

G-Functions method:

Η μέθοδος G-Functions αρχικά διατυπώθηκε από τον (Eskilson, 1987), για να αναλυθεί η θερμική απόκριση ενός κάθετου γεωεναλλάκτη. Η ιδέα της μεθόδου αυτής ήταν να απλοποιηθούν τα σύνθετα αναλυτικά μοντέλα και να παρασταθεί γραφικά η θερμική απόκριση του κάθετου γεωεναλλάκτη, σύμφωνα με την γεωμετρία του σε συγκεκριμένο χρόνο. Η θερμοκρασία στα εξωτερικά όρια του γεωεναλλάκτη (borehole wall) υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$T_b = T_o + \frac{q_b}{2\pi k_{gr}} \times g \left(\frac{t}{t_s}, \frac{B}{H'}, \frac{r_b}{H'}, \frac{D}{H} \right) \quad (13)$$

Είναι σημαντικό να αναφερθεί με την μέθοδο G-Functions υπολογίζεται μόνο η θερμοκρασία στα εξωτερικά όρια του γεωεναλλάκτη (borehole wall). Αν χρειάζεται ο υπολογισμός ακτινικά της γεώτρησης, πρέπει να επιλεγθεί εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού (Rees, 2016).



$$T_b = T_g - \frac{q}{2\pi k_g} \cdot g$$

Εικόνα 5-2 G function-θερμική απόκριση του εδάφους (Bernier, 2015)

5.2 Μέθοδοι διαστασιολόγησης του γεωεναλλάκτη

Η διαστασιολόγηση ενός γεωεναλλάκτη έχει στόχο να βρεθεί το ελάχιστο μέγεθός του, που έχει απόδοση τέτοια, ώστε να ικανοποιεί τις θερμικές ανάγκες του συστήματος. Απαραίτητος κρίνεται ο προσδιορισμός των θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους στο οποίο θα τοποθετηθεί ο γεωεναλλάκτης, ο αριθμός και η απόσταση των γεωτρήσεων, το φορτίο που θα καλείται να καλύψει η αντλία θερμότητας και οι εσωτερικές διαστάσεις του γεωεναλλάκτη (διάμετρος, single ή double U, κονίαμα). Η μέθοδος διαστασιολόγησης θα προσδιορίσει εν συνεχεία το βάθος των γεωτρήσεων. Αν το βάθος για κάποιο λόγο είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο, ο σχεδιαστής θα κληθεί να προσαρμόσει τον αριθμό και την διάταξη ή τις εσωτερικές διαστάσεις του γεωεναλλάκτη (Rees, 2016).

Μέθοδος βασισμένη στις g-functions

Η διαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη με αυτήν την μέθοδο, απαιτεί επαναληπτικές δοκιμές μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια που έχουν τεθεί από τον σχεδιαστή όσο αφορά τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ρευστού. Αφού ληφθούν υπόψιν όλα τα δεδομένα για το έδαφος, την διαδικασία της γεώτρησης, την αντλία θερμότητας και τα θερμικά φορτία, από αντίστοιχες εξισώσεις, οι διαστάσεις του γεωεναλλάκτη προσαρμόζονται ανάλογα. Όσο το βάθος της γεώτρησης μεγαλώνει, τόσο η ακρίβεια των υπολογισμών αυτών θα μειώνεται (Rees, 2016).

Μέθοδος ASHRAE handbook

Η διαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη με αυτήν την μέθοδο, απαιτεί τα μέγιστα φορτία του αντίστοιχου καλοκαιρινού ή χειμερινού μήνα με τις μεγαλύτερες θερμικές απαιτήσεις. Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, η διαστασιολόγηση μπορεί να γίνει υπολογίζοντας όχι μόνο την μέγιστη ισχύ, αλλά και για μερικό φορτίο λειτουργίας. Οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου της αντλίας θερμότητας λαμβάνονται υπόψιν επίσης στην μέθοδο ASHRAE (Christodoulides et al., n.d.).

6 Εγκατεστημένα συστήματα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται κατηγοριοποίηση κάποιων πειραματικών εφαρμογών εγκατεστημένων συστημάτων σε μορφή πινάκων, ενώ παρέχονται στοιχεία και χαρακτηριστικά για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Με τα δεδομένα που προσφέρονται από τους πίνακες, συγκρινόμενα και με την βιβλιογραφία, πραγματοποιείται ανάλυση, σύγκριση και εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με ενεργειακά, τεχνικοοικονομικά, κλιματικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά των συστημάτων. Για την δημιουργία των πινάκων, οι διάφορες περιπτώσεις επιλέχθηκαν με κριτήρια: να παρέχονται ικανά στοιχεία για την αξιολόγησή τους, να καλύπτεται ευρύ φάσμα των διαφορετικών τύπων γεωεναλλακτών, να υπάρχει ικανός αριθμός περιπτώσεων σε λειτουργία θέρμανσης, όπως επίσης σε λειτουργία ψύξης, ή και στις δύο μαζί.

Πίνακας 6-1 Εγκατεστημένα συστήματα οριζόντιων γεωεναλλακτών

Τύπος οριζόντιου γεωεναλλάκτη	Είδος μελέτης	Λειτουργία	COP/ SPF	Περιγραφή	Αναφορά/ Τοποθεσία
Εν σειρά	πειραματικό	Θέρμανση	4,03-4,18/ 2,46-2,58	Μετά από οικονομική ανάλυση αποδείχθηκε, ότι σε αυτήν την περιοχή της Τουρκίας, είναι ο πιο οικονομικά αποδοτικός τρόπος θέρμανσης	(Pulat et al., 2009) /Bursa, Turkey
Εν σειρά	πειραματικό	Ψύξη	3,86/ 2,5	Αποδείχθηκε ότι αποτελεί εφικτή λύση για ψύξη	(Cos; Kun et al., 2008) / Bursa, Turkey
Εν σειρά	πειραματικό	Ψύξη	3,8-4,5/ 2,3-2,7	Αποδείχθηκε ότι τέτοια συστήματα είναι κατάλληλα για ψύξη στην Τυνησία	(Naili et al., 2013) /Borj Cédria, Tunisia

Εν σειρά	πειραματικό	Θέρμανση/ Ψύξη	-	Για ένα δωμάτιο 12 m ² το σύστημα κάλυψε 65% από τις συνολικές ανάγκες ψύξης Η ροή θερμότητας, σε σταθερή κατάσταση, είναι 26 W/m.Οι ενεργειακές και εξεργειακές αποδόσεις είναι 12-52% και 12-36% αντίστοιχα	(Naili et al., 2015) /Tunisia
slinky	Πειραματικό και προσομοίωση (CFD)	Θέρμανση/ Ψύξη	Θέρμανση : -/ 2,5	Για να αυξηθεί ο SPF χρειάζεται μεγαλύτερος σε μήκος γεωεναλλάκτης και μεγαλύτερη επιφάνεια εδάφους. Στην προσομοίωση ο slinky συγκρίθηκε με έναν εν σειρά και βρέθηκε ότι μετά από 140 ώρες λειτουργίας, η ροή θερμότητας θα πέσει από 46 W/m σε 30 και 33 W/m αντίστοιχα	(Wu et al., 2010) /Oxfordshire, UK
slinky	Πειραματικό και προσομοίωση (FEFLOW)	Θέρμανση/ Ψύξη	Θέρμανση : 2,7-4,8/ -	Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ιδανικό βάθος του γεωεναλλάκτη είναι 1,5m και 2m.	(Fujii et al., 2013) / Fukuoka, Japan
Εν σειρά	Πειραματικό και προσομοίωση	Θέρμανση	-/ 3,2	Τα πειραματικά δεδομένα συμφωνούν με αυτά της προσομοίωσης.	(Esen et al., 2007) / Firat,, Turkey

Εν σειρά βάθος 1m βάθος 2m	Πειραματικό	Θέρμανση	Για βάθος 1m: -/ 2,66 Για βάθος 2m: -/ 2,81	Για ένα δωμάτιο 16,24 m ² με 2,5kW θερμικό φορτίο γίνεται σύγκριση δύο εν σειρά γεωεναλλακτών, των οποίων η αποδοτικότητα είναι αρκετά χαμηλή λόγω κακής σχεδίασης.	(Inalli & Esen, 2004) / Firat, Elazig, Turkey
----------------------------------	-------------	----------	------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------

Πίνακας 6-2 Εγκατεστημένα συστήματα κάθετων γεωεναλλακτών

Τύπος κάθετου γεωεναλλάκτη	Είδος μελέτης	Λειτουργία	Βάθος	COP/ SPF	Περιγραφή	Αναφο ρά/ Τοποθε σία
Single u-type double-u type	Πειραματικό	Θέρμανση/ ψύξη	16m	-	Η ροή θερμότητας από και προς το έδαφος ήταν 50% μικρότερη στο Single u-type για την λειτουργία θέρμανσης και 45% μικρότερη για την λειτουργία ψύξης σε σχέση με το double-u type.	(X. Li et al., 2006) / Tianjin ,China
Single u-type double-u type multi tube type	Πειραματικό	Ψύξη	20m	-	Η ροή θερμότητας για τις ίδιες συνθήκες και συνεχή λειτουργία ήταν 49,6 W/m για το double- tube, 34,8 W/m για το multi-tube και 30,4 W/m για το U-tube. Επίσης αυξήθηκε σημαντικά όταν η ροή του ρευστού από 2 L/min πήγε 4 L/min.	(Jalalu ddin et al., 2011) / Saga, Japan

U-shaped type W-shaped type W-shaped-all round type	Πειραματικό	Ψύξη	25m	-	Το W-shaped-all round type αποδείχθηκε ότι έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους με $Q=68W/m$, $Q=54W/m$ για το W-shaped type και $Q=44W/m$ για το U-shaped type.	(Mehrizi et al., 2016) / Karaj, Iran
W-shaped Single U-shaped Double U-shaped Triple U-shaped	Πειραματικό και προσομοίωση (SIMPLE)	Θέρμανση/ψύξη	5m	-	Ο W-shaped τύπος γεωαναλλάκτη, μετά τα πειραματικά δεδομένα και αυτά της προσομοίωσης, είναι ο πιο αποδοτικός σε σχέση με τους υπόλοιπους.	(Gao et al., 2008) / Shanghai, China
Single U-tube double U-tube	Πειραματικό και προσομοίωση (TRNSYS)	Θέρμανση	100m	-	Όταν το βάθος παραμένει σταθερό, η θερμική αντίσταση για το double U-tube αυξάνεται κατά 70% σε σύγκριση με αυτήν του Single U-tube. Ενώ η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται 8-10%.	(Cai et al., 2016) / Deqing, China
24x Single U-tube	Πειραματικό	Ψύξη	175m	-/ 8,3 Load 65%: -/ 5,9	Σε ένα σχολικό κτήριο $1193 m^2$ τέθηκαν σε λειτουργία 10 αντλίες θερμότητας με 24 κάθετους γεωαναλλάκτες. Συγκρίθηκε με αντλία θερμότητας με πηγή τον αέρα η οποία βρέθηκε να έχει $COP=3,4$. Η διαφορά στην αποδοτικότητα των συστημάτων είναι της τάξης του 74%.	(Hwang et al., 2009) / Korea

21x Single U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση/ ψύξη	80m	Θέρμανση: -/ 4,4-5,2 Ψύξη: -/ 4,4-4,5	Σε κτήριο 1350 m ² έχουν τεθεί σε λειτουργία 7 αντλίες θερμότητας με 21 κάθετους γεωεναλλάκτες. Σε σύγκριση με την αντλία θερμότητας με πηγή τον αέρα η απαιτούμενη ενέργεια για την λειτουργία του συστήματος είναι 45% λιγότερη για θέρμανση και 28% λιγότερη για ψύξη.	(Michopoulos et al., 2007) / Thessaloniki, Greece
Single U-tube	Πειραματικό	Ψύξη	110m	3,1-4,8/ 2,1-3,1	Παρατηρήθηκε ότι οι δείκτες COP αυξάνονταν όταν μειωνόταν η ηλιακή ακτινοβολία και όταν αυξανόταν η ταχύτητα του ανέμου.	(Karabacak et al., 2011) / Denizli, Turkey
Single U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση	53m	-/ 2,7-3,3	Το σύστημα αποτελείται από δύο κάθετους γεωεναλλάκτες. Αν αναλογιστούμε ότι τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα τέτοιου είδους έχουν COP=3-4 η αποδοτικότητα της εγκατάστασης δεν είναι επαρκής λόγω του σχεδιασμού της.	(Bakirci, 2010) / Erzurum, Turkey

18x Single U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση/ ψύξη	80m	Θέρμανση: -/ 3,9-4,2 Ψύξη: -/ 3,4-4,1	Το εν λόγω σύστημα 18 κάθετων γεωεναλλακτών έχει τοποθετηθεί σε εταιρικό κτήριο γραφείων 1530 m ² . Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το θερμικό φορτίο του κτηρίου επηρεάζονται πλήρως από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Επίσης βρέθηκε ότι το θερμικό φορτίο επηρεάζεται ελάχιστα από την διάμετρο των γεωτρήσεων καθώς εξετάστηκαν 3 περιπτώσεις.	(Luo et al., 2015) / Nuremberg, Germany
Single U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση/ ψύξη	8,5m	Θέρμανση: 3,14-3,45/ 2,87-3,03 Ψύξη: 2,75-2,9/ 2,56-2,66	Η ροή θερμότητας μεταξύ του ρευστού του γεωεναλλάκτη και του εδάφους, στην αρχή της λειτουργίας τους, λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς, είναι μεγάλη. Στην συνέχεια με την πάροδο του χρόνου μειώνεται.	(Sivaskhivel et al., 2016) / Himalayan city, India
9x Single U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση/ ψύξη	3X80m 3X60 m 3X50m	Θέρμανση: -/ 3 Ψύξη: -/ 3,2	Για τις ανάγκες χώρου 180m ² 9 κάθετοι γεωεναλλάκτες έχουν τοποθετηθεί μαζί με αντλία θερμότητας. Η θερμική ενέργεια για την θέρμανση του χώρου είναι 20,9kW ενώ για την ψύξη 17kW. Αποδεικνύεται ότι αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως σε περιοχές με παρόμοιο κλίμα.	(Zhai et al., 2017) / Shanghai, China

2x Single U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση	53 m	2,65-3,00/ 2,12-2,5	Η εγκατάσταση έγινε στο Atatürk University σε 1869m υψόμετρο. Αποτελείται από 2 κάθετους γεωεναλλάκτες και 1 αντλία θερμότητας. Η αποδοτικότητα του συστήματος είναι αρκετά χαμηλή σε σύγκριση με άλλα συστήματα παρόμοιας σχεδίασης.	(Ozyurt & Ekinci, 2011) / Erzurum, Turkey
2x Single U-tube	Πειραματικό και Προσομοίωση	Θέρμανση	30m	-/ 3,45-3,55	Στην αρχή της λειτουργίας του συστήματος με τους 2 κάθετους γεωεναλλάκτες, ο δείκτης COP εμφανίζει μεγάλη πτώση. Μετά το αρχικό αυτό στάδιο εκκίνησης, δηλαδή τις πρώτες 200 ώρες της λειτουργίας, παραμένει σχετικά σταθερός και επηρεάζεται αποκλειστικά από τις απαιτήσεις του κτηρίου. Η απόκλιση μεταξύ πειραματικού και θεωρητικού μοντέλου ήταν 6% κάτι το οποίο είναι απολύτως αποδεκτό.	(W. Yang et al., 2009) / Shoutheast, China

Single U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση	50m	1,656/ 1,339	Το σύστημα έχει εγκατασταθεί για τις ανάγκες ενός δωματίου 65 m ² με ανάγκες για θέρμανση και ψύξη 3,8 και 4,2 kW αντίστοιχα. Η αποδοτικότητα του συστήματος είναι πολύ χαμηλή σε σχέση με άλλα παρόμοια συστήματα, κυρίως λόγω της υπερδιαστασιολόγησης κάποιων εξαρτημάτων. Από οικονομική σκοπιά, ο γεωεναλλάκτης και η τοποθέτησή του αποτελούν το 24-26% του συνολικού κόστους.	(Hepas li et al., 2003) / Izmir, Turkey
11x Single U-tube 10x double U tube	Πειραματικό και προσομοίωση (TRNSYS)	Θέρμανση /ψύξη	11x 150m 10x 120m	Θέρμανση: -/3,05 Ψύξη: -/3,4	Σε κτήριο 934m ² με θερμικές ανάγκες 69,6 kW για θέρμανση και 98,4 kW για ψύξη εγκαθίσταται το σύστημα με 21 κάθετους γεωεναλλάκτες.	(Lv et al., 2016) / Tianjin, China
6x Single U-tube	Πειραματικό και προσομοίωση (TRNSYS)	Θέρμανση/ψύξη	100m	Θέρμανση: -/3,9 Ψύξη: -/3,6	Σε κτήριο, που στεγάζει γραφεία, 2300m ² με ενεργειακές απαιτήσεις 10,82kWh/m ³ εγκαθίστανται 6 κάθετοι γεωεναλλάκτες. Η προσομοίωση για την θέρμανση είχε ένα σφάλμα 10% με COP=4,3 ενώ για την ψύξη 45% με COP=5,2. Αποδείχθηκε επίσης ότι το σύστημα αυτό είναι πιο αποδοτικό της τάξης του 47% στην ενέργεια που απαιτεί για την λειτουργία του και 39% στο κόστος λειτουργίας σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.	(Arteconi et al., 2013) / Italy

9x Single U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση	7x50m 1x75m 1x25m	3,4- 4,1/ -	Στο Dalian University of Technology εγκαθίσταται σύστημα με 9 κάθετους γεωεναλλάκτες. Παρατηρείται ότι μετά την εκκίνηση του συστήματος ο COP πέφτει όπως και η ροή θερμότητας, ενώ ο συμπιεστής της αντλίας θερμότητας αυξάνει την ισχύ του.	(Shang et al., 2014) / Leicester,
Σύστημα μονού βρόγχου: U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση/ ψύξη	42m	Θέρμανση: -4,73 Ψύξη: -5,03	Ο κάθετος γεωεναλλάκτης τοποθετήθηκε σε πηγάδι, στο οποίο η στάθμη του νερού φτάνει στα 6m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Φαίνεται ότι συστήματα με τέτοιους γεωεναλλάκτες είναι πιο αποδοτικά από τους συμβατικούς γεωεναλλάκτες, όπως φαίνεται και από τους δείκτες COP.	Xiangtan, China (hot summer, Cold winter)
56x U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση/ ψύξη	100m	Θέρμανση και ψύξη: -/ 2,49- 2,97	Σε κτήριο 16467m ² τοποθετούνται 56 κάθετοι γεωεναλλάκτες και 4 μεγάλες αντλίες θερμότητας. Παρόλο που η αποδοτικότητα του συστήματος θεωρείται καλή, στα αναμενόμενα αποτελέσματα υπήρχαν μεγαλύτερες απαιτήσεις. Αυτό οφείλεται σε λάθος εκτιμήσεις του θερμικού φορτίου στην αρχική μελέτη της εγκατάστασης.	(Naicker & Rees, 2018) / Croydon, UK

9x spiral type (0,1m Pitch)	Πειραματικό και προσομοίωση(COSMOL)	Θέρμανση /ψύξη	4m	-	Εξετάστηκε η απόσταση μεταξύ των 9 κάθετων σπирάλ γεωεναλλακτών και αποδείχθηκε ότι η πτώση στην απόδοση ήταν 64%, 37%, 20%, 12% και 7% για αποστάσεις 4,5,6,7,8 μέτρα αντίστοιχα σε σχέση με την απόσταση των 9 μέτρων. Η μεγάλη απόσταση μεταξύ τους μειώνει την θερμική τους αλληλεπίδραση.	(Dehghan B., 2017a) / Tabriz, Iran
--------------------------------	-------------------------------------	----------------	----	---	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------

Πίνακας 6-3 Εγκατεστημένα συστήματα γεωεναλλακτών ενταγμένων στην κατασκευή

Τύπος γεωεναλλάκτη ενταγμένου στην κατασκευή	Είδος μελέτης	Λειτουργία	Βάθος (m)	COP/ SPF	Περιγραφή	Αναφορά/ Περιοχή
W-shaped Spiral (5m pitch)	Πειραματικό και προσομοίωση(COSMOL)	Θέρμανση /ψύξη	13,27m 12,8m	Θέρμανση: 4,7/- Ψύξη: 4,7/-	Όταν χρησιμοποιήθηκε ο σπирάλ γεωεναλλάκτης η ροή θερμότητας ανά μέτρο βάθους αυξήθηκε κατά 10-15% σε σχέση με το W-shaped. Όμως ανά μέτρο μήκους του γεωεναλλάκτη για το W-shaped είναι 350-400% μεγαλύτερος σε σχέση με το σπирάλ. Επίσης το κόστος του W-shaped είναι 3 φορές μικρότερο από αυτό του σπирάλ για τις ίδιες θερμικές ανάγκες κτηρίου 540m ² .	(Yoon, Lee, Xue, et al., 2015) / Korea
Spiral (5m pitch) 3-U-tubes	Πειραματικό και προσομοίωση(CaRM)	Θέρμανση	12m	-	Ο Spiral type γεωεναλλάκτη αποδείχθηκε πιο αποδοτικός σε σχέση με τον triple-u. Η θερμική απόδοσή του ήταν 23% μεγαλύτερη, αλλά συνολικά η απόδοση στο σύστημα είναι 9%	(Zarrella et al., 2013) / Mestre-

					μεγαλύτερη, σε σχέση με το triple-u type.	Venice, Italy
energy-pile energy-slab	Πειραματικό	Θέρμανση	13,8m 4,5m	energy-pile: 4,2-4,7/ 3,6-3,9 energy-slab: 4,5-5,3/ 3,7-4,4	Αυτού του είδους οι γεωεναλλάκτες μπορούν να μειώσουν αρκετά το κόστος καθώς δεν χρειάζονται επιπλέον επιφάνεια εδάφους και γεώτρηση για να τοποθετηθούν. Επίσης η αποδοτικότητά τους είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη αποδεκτή (COP=3,45) γεωεναλλακτών κλειστού βρόγχου.	(Moon & Choi, 2015) / Korea
26 units of Single U-tube	Πειραματικό	Θέρμανση	9m	3,9/ 3,2	Σε κτήριο 247.53 m ² εγκαθίστανται γεωεναλλάκτης ενταγμένος στην κατασκευή. Σε σύγκριση με άλλους δύο τύπους επιλέχθηκε ο Single U-tube για τεchnικοοικονομικούς λόγους. Συγκρίθηκε με συμβατική μέθοδο θέρμανσης (boiler) και βρέθηκε 23,2% μείωση στην ενέργεια που καταναλώνεται.	(Hamada et al., 2007) / Hokkaido, Japan
3-U-tubes W-shaped	Πειραματικό και προσομοίωση (ABAQUS)	Θέρμανση /ψύξη	13,2m	-	Τα αποτελέσματα από το πείραμα συμφωνούν με μια μικρή απόκλιση τα δεδομένα της προσομοίωσης. Για διακοπτόμενη λειτουργία του συστήματος το 3-U-tube εμφανίζει ανώτερη απόδοση σε σχέση με το W-shaped, περίπου 15% μεγαλύτερη ροή θερμότητας με το έδαφος. Ενώ για συνεχόμενη λειτουργία η διαφορά τους είναι σχεδόν μηδενική.	(Park et al., 2013) / Korea

double-U triple U double W spiral (0,3m pitch)	Πειραματικό	Θέρμανση /ψύξη	18,5m 18,5m 12m 12m	-	Όσο αφορά την ψύξη οι τύποι γεωεναλλακτών, ενταγμένοι στην κατασκευή, σπирάλ και double W έχουν παρόμοια αποδοτικότητα, εμφανώς μεγαλύτερη από του υπόλοιπους δύο τύπους. Για την θέρμανση ο τύπος double-U έχει την χειρότερη αποδοτικότητα ενώ ο τύπος triple U έχει την μεγαλύτερη. Επίσης αποδείχθηκε ότι για τον τύπο σπирάλ όταν οι σωληνώσεις είναι 32mm η θερμική απόδοση αυξάνεται κατά 32% σε σχέση με διάμετρο σωληνώσεων 25mm. Ο τύπος triple U είναι αυτός που πληροί καλύτερα τα κριτήρια απόδοσης και οικονομίας ακολουθούμενος από τον double-U, τον spiral και τον double-W type.	(Luo et al., 2016) / Henan, China
spiral-shaped (0,25m pitch) U-shaped W-shaped	Πειραματικό και προσομοίωση(COSMOL)	Θέρμανση /ψύξη	25m	-	Τα πειραματικά αποτελέσματα δεν διαφέρουν αρκετά με αυτά της προσομοίωσης. Ο γεωεναλλάκτης τύπου σπирάλ έχει την καλύτερη θερμική απόδοση σε σχέση με του άλλους δύο.	(Zhao et al., 2016) / Jinan, China

Πίνακας 6-4 Εγκατεστημένα συστήματα-σύγκριση διάφορων τύπων γεωεναλλακτών

Τύπος γεωεναλλάκτη	Είδος μελέτης	Λειτουργία	Βάθος (m)	COP/ SPF	Περιγραφή	Αναφορά/ Περιοχή
--------------------	---------------	------------	-----------	----------	-----------	------------------

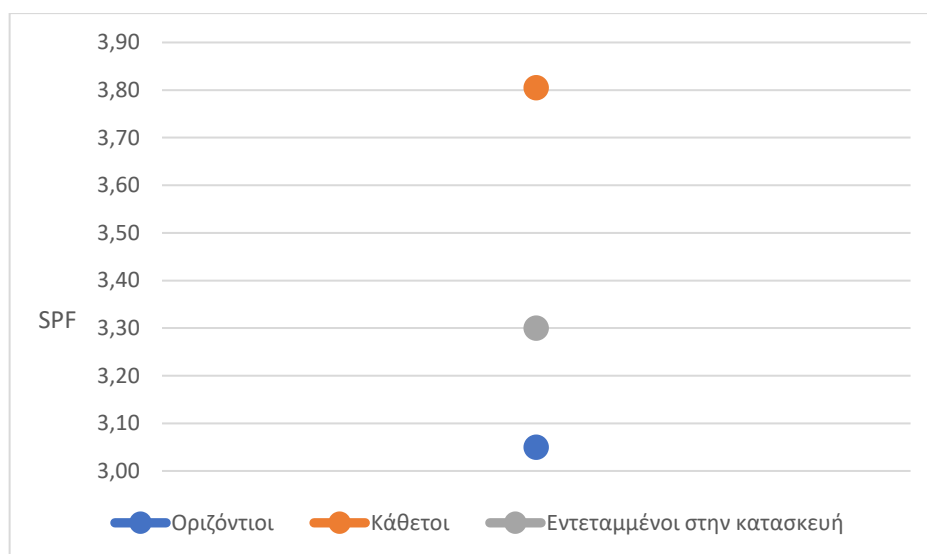
2x vertical (1 coaxial και 1 U-tube) 2x horizontal (slinkies)	Πειραματικό	Θέρμανση /ψύξη	18m 2m	Θέρμανση: Vertical 1 2,8/2,5- 3,5 Horizontal 2,8/ 2,8-3 Ψύξη: Vertical 1 2,8/ 1-2 Horizontal 2,8/2,8- 3	Γενικά όσο αυξάνεται η ροή θερμότητας του γεωεναλλάκτη με το έδαφος τόσο αυξάνεται και ο COP του συστήματος. Οι ελάττωση εκπομπών CO2 υπολογίζεται σε 3,8 τόνους κάθε χρόνο σε σχέση με θέρμανση με χρήση πετρελαίου. Επίσης η περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται στα 5,71 χρόνια για το σύστημα συγκρίνοντάς το με την χρήση πετρελαίου.	(Doherty et al., 2004) / Nottingham, England
Horizontal Spiral (0,3m pitch) Slinky (0,3 m pitch)	Πειραματικό	Θέρμανση	0,5 m	-	Οι ροές θερμότητας για τον spiral και τον slinky ήταν 14,45 W/m και 10,64 W/m αντίστοιχα. Αυτό δείχνει ότι ο spiral είναι πιο αποδοτικός από τον slinky. Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους τόσο μεγαλύτερος είναι ο ροή θερμότητας.	(Kim et al., 2016) / Korea
Horizontal: slinky (pitch 0,06m και 0,3m) spiral (pitch 0,06m και 0,3m) U-type	Πειραματικό	Θέρμανση	0,5m	-	Η μέση ροή θερμότητας των slinky και Spiral οριζόντιων γεωεναλλακτών είναι 14,45 W/m και 10,64 W/m αντίστοιχα. Για μεγάλο βήμα υπήρξε 10-40% μείωση στην ροή θερμότητας σε	(Yoon, Lee, & Go, 2015) / Korea

					σχέση με το μικρό βήμα. Το U-type είχε την πιο μικρή απόδοση σε σχέση με τα υπόλοιπα 2. Από οικονομική σκοπιά οι spiral φαίνεται να υπερέχουν σε αποδοτικότητα ανά μονάδα κόστους από τους slinky. Βέβαια ο U-type είναι ο φθηνότερος όλων αλλά χρειάζεται 20% περισσότερη επιφάνεια εδάφους για να μπορεί να ανταποκριθεί στο ίδιο θερμικό φορτίο με τους υπόλοιπους.	
horizontal U-type (0,54m pitch) horizontal spiral (0,25m pitch)	Πειραματικό	Θέρμανση	2,5m 2,5m	U-type: 4,15- 4,97/ 4,4 Spiral: 3,75- 4,77/ 4,2	Για δωμάτιο 21m ² εγκαθίστανται σύστημα με αντλία θερμότητας και οριζόντιους γεωεναλλάκτες. Σύμφωνα με την ανάλυση των αποτελεσμάτων ο U-type έχει πιο ικανοποιητική αποδοτικότητα από τον spiral. Όμως αν η επιφάνεια τοποθέτησης του γεωεναλλάκτη είναι περιορισμένη ο τύπος spiral είναι καλύτερη λύση.	(Karicioğlu & Esen, 2020) / Turkey (cold climate)
Vertical spiral-type Horizontal spiral-type	Πειραματικό και προσομοίωση (TRNSYS)	Ψύξη	15m 1,5m	Vertical: 3,9- 4,3/ Horizontal: 3,3-3,7 /-	Ο δείκτης COP στο vertical spiral-type είναι μεγαλύτερος της τάξης του 15% από το horizontal spiral-type λόγω τη μεγαλύτερης ροής θερμότητας. Στην προσομοίωση που έγινε για χρονικό ορίζοντα 1 έτους αποδείχθηκε ότι το σύστημα με τον οριζόντιο γεωεναλλάκτη καταναλώνει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια λόγω του μικρού βάθους εγκατάστασής του	(J. U. Lee et al., 2015) / Incheon, South Korea

					που επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Από οικονομική σκοπιά, μακροπρόθεσμα ο κάθετος γεωεναλλάκτης είναι κατά 28% πιο οικονομικός από το οριζόντιο.	
--	--	--	--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

6.1 Ενεργειακή απόδοση

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στους Πίνακες 6-1, Πίνακας 6-2, Πίνακας 6-3 και Πίνακας 6-4, αφορούν εγκατεστημένα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας με διάφορες διατάξεις, σε αρκετές περιοχές ανά τον κόσμο. Αφού στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων, είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως σε κάποιες περιπτώσεις συστημάτων η σχεδίαση και διαστασιολόγησή τους δεν ανταποκρίνεται στα βέλτιστα αποδεκτά επίπεδα, οπότε και η αποδοτικότητά τους δεν είναι η μέγιστη δυνατή. Παρόλα αυτά ο αριθμός των συστημάτων είναι επαρκής για την εξαγωγή έγκυρων, γενικευμένων συμπερασμάτων.



Σχήμα 1 Αποδοτικότητα των συστημάτων σύμφωνα με τον τύπο γεωεναλλάκτη που χρησιμοποιούν

Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται γραφικά το μέσο όρο των τιμών του Seasonal Performance Factor (SPF) για κάθε τύπο γεωεναλλάκτη στο σύνολο των εγκατεστημένων συστημάτων, που περιέχουν οι παραπάνω πίνακες (Πίνακας 6-1, Πίνακας 6-2, Πίνακας 6-3 και Πίνακας 6-4). Συγκεκριμένα, για τους οριζόντιους γεωεναλλάκτες: $SPF=2,97-3,05$, για τους κάθετους: $SPF=3,72-3,91$ ενώ για τους ενταγμένους στην κατασκευή (geostucture) $SPF=3,24-3,37$. Αν αναλογιστούμε ότι τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα κλειστού τύπου γεωθερμικών αντλιών θερμότητας έχουν $SPF=3-4$, προκύπτει ότι οι αντίστοιχες τιμές των συστημάτων που περιέχουν οι πίνακες βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων (Bakirci, 2010).

Πίνακας 6-5 Μέσος όρος αποδοτικότητας και ροής θερμότητας των συστημάτων σύμφωνα με τον τύπο γεωεναλλάκτη και την λειτουργία τους

	Οριζόντιοι γεωεναλλάκτες	Κάθετοι γεωεναλλάκτες	Ενταγμένοι στην κατασκευή
heat flux (w/m)	22,82	46,8	-

Στον Πίνακα 6-5 παρατίθενται ο μέσος όρος της ροής θερμότητας, με βάση των τύπο γεωεναλλάκτη. Με όλα τα παραπάνω στοιχεία είναι ευδιάκριτη η υπεροχή των κάθετων γεωεναλλακτών, έναντι των οριζόντιων, όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση. Εκτός από τον δείκτη SPF, ο οποίος είναι σαφώς μεγαλύτερος, παρατηρείται ότι, στην περίπτωση των κάθετων γεωεναλλακτών η θερμότητα που απορροφάται ή απορρίπτεται από ή προς το έδαφος σε 1 μέτρο σωληνώσεων, είναι σχεδόν η διπλάσια σε σχέση με τους οριζόντιους. Είναι λογικό να συμβαίνει αυτό, καθώς τοποθετώντας τις σωληνώσεις βαθιά στο έδαφος, όπου η θερμοκρασία είναι σχεδόν σταθερή κατά την διάρκεια όλου του χρόνου, η αποδοτικότητα του συστήματος αυξάνεται και το συνολικό μήκος μειώνεται (Cui et al., 2011; H. Yang et al., 2010).

Για μεγάλου μεγέθους εφαρμογές (>1000m²), όπως γραφεία, σχολεία, πανεπιστήμια, βιομηχανίες και άλλα, παρατηρείται ότι χρησιμοποιούνται αποκλειστικά κάθετοι γεωεναλλάκτες. Μάλιστα, για τέτοιας δυναμικότητας εγκαταστάσεις, που βρέθηκαν και καταγράφηκαν στους πίνακες, ο μέσος όρος είναι: SPF=4,18-4,35. Φαίνεται πως τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, όχι απλά αρκούν για την κάλυψη μεγάλων θερμικών φορτίων, αλλά αποδεικνύονται και αρκετά αποδοτικά. Η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων στους κάθετους γεωεναλλάκτες υπολογίζεται κατά την διάρκεια της σχεδίασης του συστήματος, καθώς έχει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης. Συγκεκριμένα αποδεικνύεται ότι η απόδοση πέφτει δραματικά όταν μεταξύ των γεωτρήσεων υπάρχει θερμική αλληλεπίδραση (Dehghan B., 2017a).

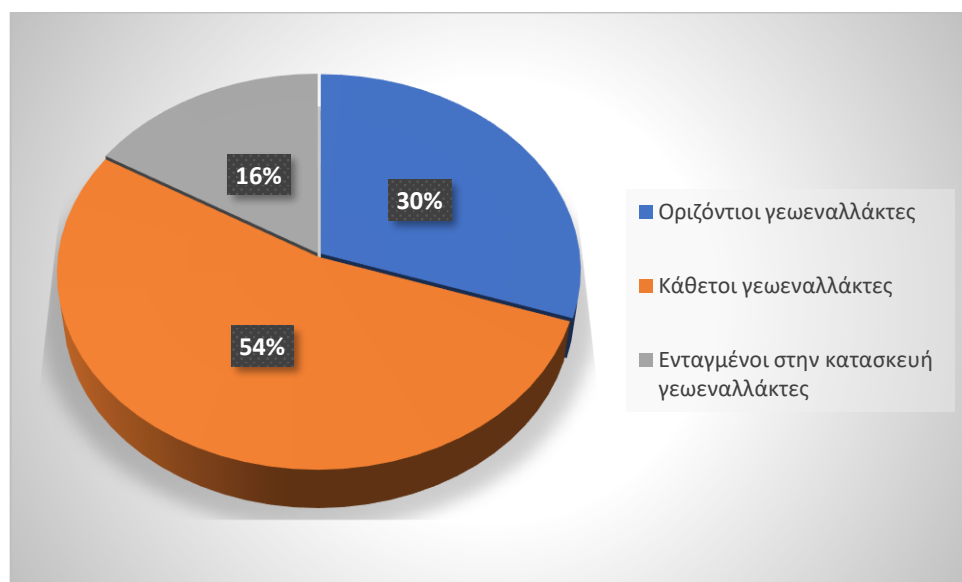
6.2 Τοπολογία

Όσον αφορά τους οριζόντιους γεωεναλλάκτες, το βάθος στο οποίο τοποθετούνται δεν ξεπερνά συνήθως τα 2 μέτρα (Florides & Kalogirou, 2007). Οπότε δεν έχει και ιδιαίτερο νόημα να εξετάζεται το ακριβές βάθος τους, διότι η θερμική αλληλεπίδραση του γεωεναλλάκτη με την ατμόσφαιρα είναι δεδομένη (Self et al., 2013). Αυτό που έχει νόημα να εξεταστεί, είναι οι διαφορετικές συνδέσεις και τοπολογίες που χρησιμοποιούνται και πως επηρεάζουν αυτές τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Στις περιπτώσεις που εξετάζονται στον Πίνακα 6-1 και Πίνακα 6-4, το 40% των οριζόντιων γεωεναλλακτών έχουν σύνδεση «εν σειρά», το 33% «slinky» και το 27% «spiral». Φαίνεται ότι οι δύο πρώτες τοπολογίες επιλέγονται εξίσου, καθώς δεν έχουν κάποια σημαντική διαφορά, ενώ οι σωληνώσεις τύπου spiral δεν είναι τόσο συχνά χρησιμοποιούμενες, κυρίως λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας τους.

Κατά την σχεδίαση ενός συστήματος με κάθετο γεωεναλλάκτη, υπολογίζεται ο αριθμός των γεωτρήσεων και το βάθος αυτών, ώστε να είναι σε θέση να ανταποκρίνεται με τον βέλτιστο τρόπο στις θερμικές απαιτήσεις. Σε μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις, συνήθως δεν χρειάζεται παραπάνω από μία γεώτρηση. Προτιμάται να υπάρχει μία γεώτρηση η οποία φτάνει σε μεγάλο βάθος, παρά παραπάνω από μία με μικρό βάθος. Το μέσο βάθος των μικρής κλίμακας συστημάτων με κάθετο γεωεναλλάκτη στις περιπτώσεις του Πίνακα 6-2 και του Πίνακα 6-4 είναι ίσο με 40m. Στην περίπτωση των συστημάτων

μεγάλης κλίμακας (>1000 m²) μία γεώτρηση, όσο βαθιά και να είναι, δεν αρκεί να καλύψει τις θερμικές ανάγκες, οι οποίες είναι αυξημένες. Το μέσο βάθος αυτών των συστημάτων στις περιπτώσεις του Πίνακα 6-2 και του Πίνακα 6-4 είναι 105m με μέσο όρο πλήθους γεωτρήσεων ίσο με 25. Η συντριπτική πλειοψηφία, ανεξάρτητα της δυναμικής τους, αποτελείται από «single U-tube» τύπο σωληνώσεων. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της απλότητας στην γεωμετρία και κατ' επέκταση σε τεχνικοοικονομικά ζητήματα.

Αναφορικά με τα συστήματα γεωεναλλακτών ενταγμένων στην κατασκευή, ενώ έχουν διάταξη κάθετη με το έδαφος, αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία. Έχουν την ιδιαιτερότητα, ότι δεν χρειάζονται κάποια γεώτρηση, γιατί τοποθετούνται κατά την κατασκευή του κτηρίου στα θεμέλιά του. Το μέσο βάθος των συστημάτων αυτών του Πίνακα 6-3 και του Πίνακα 6-4 είναι 12,2 m και εξαρτάται από το πόσο βαθιά θα σκαφτούν τα θεμέλια του κτηρίου, όπως και το αν θα υπάρχει ένας ή παραπάνω υπόγειοι χώροι. Βέβαια ο αριθμός των γεωεναλλακτών που θα ενταχθούν στα θεμέλια του κτηρίου προσαρμόζεται σύμφωνα με τις θερμικές ανάγκες του κτηρίου.



Σχήμα 2 Ποσοστό εμφάνισης του κάθε τύπου γεωεναλλάκτη στα εγκατεστημένα συστήματα που αναλύονται

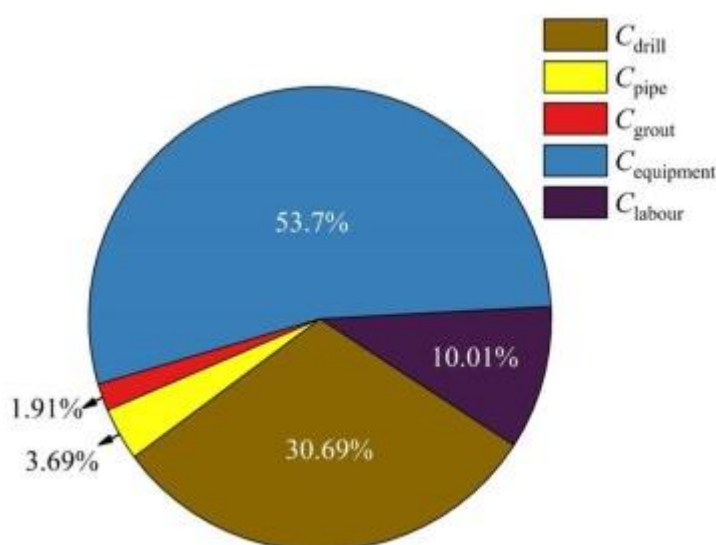
Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται γραφικά το ποσοστό χρησιμοποίησης του κάθε τύπου γεωεναλλάκτη, ανάμεσα σε 43 περιπτώσεις εγκατεστημένων συστημάτων που εμφανίζονται στους Πίνακες 6-1, Πίνακας 6-2, Πίνακας 6-3 και Πίνακας 6-4. Ο αριθμός των συστημάτων είναι ικανός να περιγράψει έγκυρα την γενική εικόνα. Άρα, γίνεται σαφές ότι οι κάθετοι γεωεναλλάκτες προτιμώνται περισσότερο από τους οριζόντιους, ενώ οι ενταγμένοι στην κατασκευή είναι οι λιγότερο χρησιμοποιούμενοι.

6.3 Τεχνικοοικονομικά στοιχεία

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας αναγνωρίζονται ευρέως ως μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες, για θέρμανση, ψύξη και παροχή ζεστού νερού χρήσης σε

οικίες και διάφορα κτήρια, εξαιτίας της υψηλής απόδοσής τους αλλά και του χαμηλού λειτουργικού κόστους τους. Βέβαια, τα υψηλά κόστη επένδυσης και εγκατάστασης, αποθαρρύνουν τους ιδιοκτήτες των κτηρίων να διαλέξουν αυτά τα συστήματα (Y. Cui et al., 2019). Στην περίπτωση των συστημάτων με οριζόντιους γεωεναλλάκτες το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης μειώνεται σημαντικά, οπότε αποτελεί μια βιώσιμη επιλογή που μπορεί να εφαρμοστεί ευρέως. Πιο συγκεκριμένα, οι «εν παραλλήλω» και οι «εν σειρά» διατάξεις βασίζονται στην διαθεσιμότητα της επιφάνειας του εδάφους. Οι διατάξεις «slinky» και «spiral» χρειάζονται μικρότερη επιφάνεια εδάφους για να τοποθετηθούν. Κατ' επέκταση, το αρχικό κόστος της επένδυσης επηρεάζεται άμεσα από το αν υπάρχει διαθέσιμη η απαραίτητη επιφάνεια γης. Επίσης, η γεωμετρία και οι τρόποι σύνδεσης των σωληνώσεων είναι αρκετά απλοί -εκτός από την διάταξη «spiral»-, οπότε το κόστος τους είναι σχετικά χαμηλό (Florides & Kalogirou, 2007).

Αντίθετα, για τα συστήματα αντλιών θερμότητας με κάθετο γεωεναλλάκτη δεν χρειάζεται μεγάλη επιφάνεια εδάφους για την τοποθέτησή τους. Απαιτείται όμως μία ή και παραπάνω γεωτρήσεις, γεγονός το οποίο συνεισφέρει αρκετά στο κόστος της επένδυσης. Τα σκαπτικά έξοδα, διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή, ενώ αυξάνονται εκθετικά με την αύξηση του βάθους (Self et al., 2013). Επίσης, στους κάθετους γεωεναλλάκτες, για να ενισχυθεί η μετάδοση θερμότητας, το κενό μεταξύ των σωληνώσεων και των τοιχωμάτων της γεώτρησης γεμίζεται με ειδικό κονίαμα (P. Cui et al., 2011; W. Yang et al., 2009).



Εικόνα 6-1 Συνεισφορά των επιμέρους εξόδων στο συνολικό κόστος κεφαλαίου για εγκατεστημένο σύστημα με κάθετο γεωεναλλάκτη στην Κίνα (Zhou et al., 2020b)

Στην Εικόνα 6-1 συνοψίζεται η συνεισφορά των επιμέρους εξόδων στο συνολικό κεφάλαιο που πρέπει να επενδυθεί για την εγκατάσταση συστήματος αντλίας θερμότητας με κάθετο γεωεναλλάκτη, που βρίσκεται στην περιοχή της Κίνας. Το κόστος του εξοπλισμού και της γεώτρησης (100m βάθος) αποτελούν το 85% του συνολικού κόστους ενώ το υπόλοιπο 15% αφορά το κονίαμα (25m βάθος), τις

σωληνώσεις και τα εργατικά έξοδα. Επομένως, η μείωση του αρχικού κεφαλαίου είναι εφικτή, μειώνοντας το βάθος της γεώτρησης και το μήκος των σωληνώσεων, ενώ παράλληλα να καλύπτονται οι θερμικές απαιτήσεις του κτηρίου (Zhou et al., 2020b). Το παράδειγμα της Εικόνα 6-1 δεν διαφέρει αρκετά με την γενική εικόνα που ισχύει στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη. Βέβαια, τα κόστη δεν είναι για όλες τις χώρες ίδια. Για παράδειγμα σε χώρες όπως η Ιαπωνία που τα εργατικά και τα έξοδα μεταφοράς είναι σε πολύ ψηλά επίπεδα, η συνεισφορά τους στο συνολικό κόστος ίσως αυξηθεί (Farabi-Asl et al., 2018). Επίσης, το βάθος της γεώτρησης, για το οποίο απαιτείται μεγάλο κόστος, εξαρτάται από τον τύπο του κτηρίου που γίνεται η εγκατάσταση. Σε μεγάλης κλίμακας κτήρια (πανεπιστήμια, σχολεία κ.α.), χρειάζεται γεώτρηση μεγάλου βάθους, ώστε να καλυφθούν οι θερμικές απαιτήσεις. Κρίνεται λοιπόν ικανή και αναγκαία συνθήκη η βέλτιστη σχεδίαση του συστήματος, γιατί σε περίπτωση υπερδιαστασιολόγησης το απαιτούμενο αρχικό κεφάλαιο επένδυσης αυξάνεται ραγδαία.

Τα συστήματα με γεωεναλλάκτες ενταγμένους στην κατασκευή, συγκεκριμένα στα θεμέλια ενός κτηρίου, μπορούν να τοποθετηθούν μόνο κατά την διάρκεια ανέγερσής του. Θεωρούνται πιο οικονομικά από τα αντίστοιχα συστήματα με κάθετους γεωεναλλάκτες, καθώς δεν απαιτείται γεώτρηση. Κατ' επέκταση τα σκαπτικά έξοδα ελαχιστοποιούνται, όπως επίσης και η απαιτούμενη επιφάνεια εδάφους.

Γενικά, το αν θα είναι βιώσιμη η επιλογή συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας για θέρμανση, ψύξη, ζεστό νερό χρήσης, είναι ένα πολυπαραγοντικό ζήτημα, που απαιτεί τεχνικοοικονομική μελέτη. Το αρχικό κόστος επένδυσης και το λειτουργικό κόστος, διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Η χρονική περίοδος αποπληρωμής αυτών των συστημάτων εκτιμάται στα 6-20 χρόνια, αναλόγως το αρχικό κεφάλαιο, την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και την εκτιμώμενη αύξηση αυτής στα επόμενα χρόνια. Σημαντικό ρόλο στην επιλογή συστήματος θέρμανσης παίζουν οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και του φυσικού αερίου ή του πετρελαίου. Για παράδειγμα, σε χώρες όπου οι τιμή του πετρελαίου και του φυσικού αερίου είναι χαμηλές, είναι πιθανόν συμφέρουν περισσότερο τα συμβατικά συστήματα καυστήρων (H. Li et al., 2007). Βέβαια, στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες αυτό πλέον δεν ισχύει. Λόγω του πολέμου στην Ουκρανία οι τιμές των συμβατικών καυσίμων έχουν φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα, γεγονός που αποτελεί επιπλέον κίνητρο για αύξηση της αγοράς γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Ενδεικτικά, για μία μέση κατοικία η εγκατάσταση ενός ανοιχτού τύπου συστήματος μπορεί να κοστίζει γύρω στα 10000\$, ενώ για κλειστού τύπου συστήματα περίπου 20000\$. Όμως το ετήσιο λειτουργικό κόστος θα είναι περίπου 850\$, ενώ για τα συμβατικά συστήματα καυστήρων αερίου είναι περίπου 2000\$ ή και περισσότερα (Mustafa Omer, 2008).

6.4 Κλίμα

Το κλίμα της κάθε περιοχής σαφώς και επηρεάζει την σχεδίαση, την λειτουργία και την απόδοση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Στους Πίνακας 6-1, Πίνακας 6-2, Πίνακας 6-3 και Πίνακας 6-4, δεν έχουν βρεθεί αρκετές περιπτώσεις συστημάτων με ακραίες θερμοκρασίες τον χειμώνα ή αντίστοιχα το καλοκαίρι, ώστε να μπορούν να

εξαχθούν γενικευμένα συμπεράσματα για την αποδοτικότητά τους. Σε εγκατεστημένο σύστημα με κρύο κλίμα στην Τουρκία, με μέση θερμοκρασία την περίοδο θέρμανσης -20°C , η θερμοκρασία εξόδου στον συμπυκνωτή της αντλίας θερμότητας ήταν $42\text{--}48^{\circ}\text{C}$ κατά την διάρκεια της μέρας (Ozyurt & Ekinici, 2011). Σε όλες τις εγκαταστάσεις τέτοιων συστημάτων σε περιοχές με παρόμοιο κλίμα, προτείνεται το σύστημα διανομής θερμότητας στο κτήριο να είναι ενδοδαπέδια θέρμανση. Θεωρείται αποδοτικότερο σε αυτές τις περιπτώσεις, διότι λειτουργεί στους $40\text{--}45^{\circ}\text{C}$ σε αντίθεση με άλλα συστήματα (fan coils, θερμαντικά σώματα κ.α.), τα οποία απαιτούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες για να λειτουργήσουν. Για να επιτευχθούν υψηλότερες θερμοκρασίες, ειδικότερα σε περιοχές με κρύο κλίμα, θα πρέπει να αυξηθεί σημαντικά το έργο που προσφέρει ο συμπιεστής της αντλίας θερμότητας, γεγονός που θα μείωνε την απόδοση του συστήματος. Επίσης, σε περιοχές με κρύο κλίμα, κρίνονται απαραίτητες οι προσμίξεις αντιπαγωτικών ουσιών στο νερό, που ρέει στις σωληνώσεις του γεωεναλλάκτη, για την αποφυγή παγιοποίησής του στις χαμηλές θερμοκρασίες.

7 Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται κατηγοριοποίηση κάποιων θεωρητικών εφαρμογών συστημάτων προσομοίωσης σε μορφή πινάκων, ενώ παρέχονται στοιχεία και χαρακτηριστικά για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Με τα δεδομένα που απορρέουν από τους πίνακες, συγκρινόμενα και με την βιβλιογραφία, πραγματοποιείται ανάλυση, σύγκριση και εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την ενεργειακή απόδοση των συστημάτων και τα διαφορετικά λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση τους. Για την δημιουργία των πινάκων, οι διάφορες περιπτώσεις επιλέχθηκαν με κριτήρια: να παρέχονται ικανά στοιχεία για την αξιολόγησή τους, να καλύπτεται ευρύ φάσμα των διαφορετικών τύπων γεωεναλλακτών, να υπάρχει ικανός αριθμός περιπτώσεων σε λειτουργία θέρμανσης, όπως επίσης σε λειτουργία ψύξης ή και στις δύο μαζί και να υπάρχουν περιπτώσεις χρήσης διαφορετικών λογισμικών.

Πίνακας 7-1 Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις οριζόντων γεωεναλλακτών

Τύπος οριζόντιου γεωεναλλάκτη	Είδος μελέτης	Λειτουργία	COP/ SPF	Περιγραφή	Αναφορά/ Τοποθεσία
slinky	Πειραματικό και προσομοίωση (CFD)	Θέρμανση/ Ψύξη	Θέρμανση : -/ 2,5	Για να αυξηθεί ο SPF χρειάζεται μεγαλύτερος σε μήκος γεωεναλλάκτης και μεγαλύτερη επιφάνεια εδάφους. Στην προσομοίωση ο slinky συγκρίθηκε με έναν εν σειρά και βρέθηκε ότι μετά από 140 ώρες λειτουργίας, η ροή θερμότητας θα πέσει από 46 W/m σε 30 33 W/m.	(Wu et al., 2010)/ Oxfordshire, UK
slinky	Πειραματικό και προσομοίωση (FEFLOW)	Θέρμανση/ ψύξη	Θέρμανση η : 2,7-4,8/ -	Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ιδανικό βάθος του γεωεναλλάκτη είναι 1,5m και 2m.	(Fujii et al., 2013) / Fukuoka, Japan
Εν σειρά	Πειραματικό και προσομοίωση	Θέρμανση	-/ 3,2	Τα πειραματικά δεδομένα συμφωνούν με αυτά της προσομοίωσης.	Esen et al., 2007)

					/Firat, Elazig, Turkey
Εν σειρά	Προσομοίωση(MATLAB, Solkan Refrigerant Software)	Θέρμανση	MATLAB: -/ 3,33 SRS: -/ 3,28	Το σφάλμα στον υπολογισμό του COP για τα δύο λογισμικά ήταν 1,52%.	(Camdali et al., 2015) /Bolu, Turkey
Εν σειρά	Προσομοίωση(MATLAB)	Θέρμανση/ Ψύξη	-	Για ένα σπίτι 1000m ² ελέγχθηκαν 4 σενάρια. Τα 3 πρώτα είχαν διαφορετικό αριθμό αντλιών θερμότητας και μήκος γεωεναλλάκτη και το τελευταίο είχε συμβατικούς τρόπους θέρμανσης και ψύξης. Αυξάνοντας το μήκος του γεωεναλλάκτη μειώνεται ο αριθμός αντλιών θερμότητας που απαιτείται για να καλύψει τις ανάγκες, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Αποδείχθηκε ότι τα συμβατικά συστήματα είναι πιο οικονομικά στο Iran.	(Noorollahi et al., 2016) /Karaj, Iran
Εν σειρά	Προσομοίωση(GHEADS)	Θέρμανση/ Ψύξη	Μέσο όρο: -/ 3,26	Για ένα σπίτι 200m ² και απαιτήσεις 59,6 και 3,8 GJ/έτος για θέρμανση και ψύξη αντίστοιχα, χρειάζεται γεωεναλλάκτη εν σειρά 300m στα 0,5m βάθος	(Tarnawski et al., 2009) / Sapporo, Japan
Εν σειρά	Προσομοίωση(GHEADS)	Θέρμανση/ Ψύξη	Θέρμανση: -/ 2,4-2,9 Ψύξη: -/ 3-3,9	Η αποδοτικότητα αυτού το συστήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η επιφάνεια στην οποία τοποθετείται ο γεωεναλλάκτης, η διάμετρος των σωληνώσεων και άλλα. Αυτή η μελέτη δείχνει πως αυτά τα συστήματα είναι οικονομικότερα από τα συμβατικά σε οικιακό επίπεδο στην	(Healy & Ugursal, 1997) /Nova, Scotia

				Σκωτία. Παρεμφερή θα είναι τα αποτελέσματα σε τοποθεσίες με παρόμοιο κλίμα.	
--	--	--	--	-----------------------------------------------------------------------------	--

Πίνακας 7-2 Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις κάθετων γεωεναλλακτών

Τύπος κάθετου γεωεναλλάκτη	Είδος μελέτης	Λειτουργία	Βάθος	COP/SPF	Περιγραφή	Αναφορά/Τοποθεσία
Single U-tube Double U-tube coaxial pipes	Προσομοίωση(EnergyPlus)	Θέρμανση /ψύξη	100m	Θέρμανση: 4,13/- Ψύξη: 4,86/-	Σε χώρο 4550m ² διαπιστώθηκε ότι η περίπτωση των coaxial pipes έχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με τις άλλες δύο σε ίδιες συνθήκες λειτουργίας.	(Zarrella et al., 2017) /Venice, Italy
Single u-type double-u type spiral type	Προσομοίωση(TOUGH2/EOS 1.)	Θέρμανση /ψύξη	70m 70m 20m	-	Το κόστος του spiral type αποδείχθηκε ότι είναι 30% λιγότερο για τις ίδιες ενεργειακές ανάγκες με τους άλλους δύο τύπους με την παραδοχή ότι δεν υπάρχει ροή θερμότητας μεταξύ των σωληνώσεων.	(Suzuki et al., 2016) /Tokyo, Japan
W-shaped Single U-shaped Double U-shaped Triple U-shaped	Πειραματικό και προσομοίωση(SIMPLE)	Θέρμανση /ψύξη	5m	-	Ο W-shaped τύπος γεωεναλλάκτη, μετά τα πειραματικά δεδομένα και αυτά της προσομοίωσης, είναι ο πιο αποδοτικός.	(Gao et al., 2008)/ Shanghai, China
Single U-tube double U-tube	Πειραματικό και προσομοίωση(TRNSYS)	Θέρμανση	100m	-	Όταν το βάθος παραμένει σταθερό, η θερμική αντίσταση για το double U-tube αυξάνεται κατά 70% σε σύγκριση με αυτήν του Single U-tube. Ενώ η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται 8-10%.	(Cai et al., 2016) / Deqing, China
Single U-tube	Πειραματικό και	Θέρμανση	30m	-/ 3,45-3,55	Στην αρχή της λειτουργίας του συστήματος με τους 2 κάθετους	(W. Yang et al., 2009)

	προσομοίωση (TRN SYS)				γεωεναλλάκτες, ο δείκτης COP εμφανίζει μεγάλη πτώση. Μετά το αρχικό αυτό στάδιο εκκίνησης, δηλαδή τις πρώτες 200 ώρες της λειτουργίας, παραμένει σχετικά σταθερός και επηρεάζεται αποκλειστικά από τις απαιτήσεις του κτηρίου. Η απόκλιση μεταξύ πειραματικού και θεωρητικού μοντέλου ήταν 6% κάτι το οποίο είναι απολύτως αποδεκτό.	/ Shoutheast, China
Single U-tube double U tube	Πειραματικό και προσομοίωση (TRN SYS)	Θέρμανση /ψύξη	11x 60x150 m 10x 120m	Θέρμανση: -/3,05 Ψύξη: -/3,4	Σε κτήριο 934m ² με θερμικές ανάγκες 69,6 kW για θέρμανση και 98,4 kW για ψύξη εγκαθίσταται το σύστημα με 21 κάθετους γεωεναλλάκτες.	(Lv et al., 2016) / Tianjin, China
Single U-tube	Πειραματικό και προσομοίωση (TRN SYS)	Θέρμανση /ψύξη	100m	Θέρμανση: -/3,9 Ψύξη: -/3,6	Σε κτήριο, που στεγάζει γραφεία, 2300m ² με ενεργειακές απαιτήσεις 10,82kWh/m ³ εγκαθίστανται 6 κάθετοι γεωεναλλάκτες. Η προσομοίωση για την θέρμανση είχε ένα σφάλμα 10% με COP=4,3 ενώ για την ψύξη 45% με COP=5,2. Αποδείχθηκε επίσης ότι το σύστημα αυτό είναι πιο αποδοτικό της τάξης του 47% στην ενέργεια που απαιτεί για την λειτουργία του και 39% στο κόστος λειτουργίας σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.	(Arteconi et al., 2013) / Italy
Single U-tube	Προσομοίωση (TRN SYS)	Θέρμανση /ψύξη	80m	Θέρμανση: -/4,9 Ψύξη: -/2,3	Σε κατοικία με συνολική επιφάνεια 422m ² και θερμικό φορτίο 26,5 kW για θέρμανση και 26,1 kW για ψύξη εγκαθίστανται 9 κάθετοι γεωεναλλάκτες. Η αντλία	(Desideri et al., 2011) / Perugia Italy

					θερμότητας που έχει επιλεγθεί έχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην θέρμανση παρά την ψύξη. Αυτό μπορεί να διαφέρει από εφαρμογή σε εφαρμογή.	
circular U-tube elliptical U-tubes	Προσομοίωση(COM SOL)	Θέρμανση /ψύξη	60m 60m	-	Χρησιμοποιώντας κάθετους γεωεναλλάκτες elliptical U-tubes μπορούν να μειώσουν την θερμική αντίσταση έως και 17% σχέση με τους circular U-tube. Όπως επίσης υπερέχουν και στην σύγκριση για την θερμοκρασιακή διακύμανση.	(Jahanbin, 2020a) / Bologna, Italy
spiral type pitch 0,1m 0,25m 0,5m 0,7m	Προσομοίωση(COM SOL)	Θέρμανση	25m	-	Παρόλο που η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον κάθετο σπιδάλ γεωεναλλάκτη αυξάνεται με την αύξηση του βήματος, η ροή θερμότητας μειώνεται. Χρησιμοποιώντας βήμα 0,25m παρατηρείται 68% αύξηση στην ροή θερμότητας έναντι του βήματος 0,7m.	(Carotenuto et al., 2017) / Shunyi, Beijing
spiral type pitch 0,25m 0,5m 1,0 m 2,0 m	Προσομοίωση(COM SOL)	Θέρμανση /ψύξη	20m	Θέρμανση: -/ 3,5-4,5 Ψύξη: -/5-6	Όσο αυξάνεται το βήμα, τόσο μειώνεται ο COP 0,77-16,49%. Η μείωση του βήματος μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος για κάθετους σπιδάλ γεωεναλλάκτες.	(Zhao et al., 2017) /Jinan, China
9x spiral type Pitch 0,1m	Προσομοίωση(COM SOL)	Θέρμανση	4m	4,8/-	Αποδείχθηκε ότι σε 156,23m ² του κτηρίου μπορούν να παρέχουν θέρμανση οι 9 κάθετοι σπιδάλ γεωεναλλάκτες. Το βέλτιστο βήμα και η βέλτιστη διάμετρος βρέθηκε να είναι 0,1 και 0,45m αντίστοιχα.	(Dehghan B., 2017b) / Tabriz, Iran
9x spiral type Pitch 0,1m	Πειραματικό και	Θέρμανση /ψύξη	4m	-	Εξετάστηκε η απόσταση μεταξύ των 9 κάθετων σπιδάλ	(Dehghan B., 2017a)

	προσομοίωση (COM SOL)				γεωεναλλακτών και αποδείχθηκε ότι η πτώση στην απόδοση ήταν 64%, 37%, 20%, 12% και 7% για αποστάσεις 4,5,6,7,8 μέτρα αντίστοιχα σε σχέση με την απόσταση των 9 μέτρων. Η μεγάλη απόσταση μεταξύ τους μειώνει την θερμική τους αλληλεπίδραση.	/ Tabriz, Iran
spiral type pitch 0,1m 0,2m 0,33m 0,5m	Προσομοίωση (COM SOL)	Θέρμανση /ψύξη	10m	-	Η ταχύτητα του ρευστού στον κάθετο σπирάλ γεωεναλλάκτη αλλάζει την ροή θερμότητας. Οπότε η βέλτιστη ταχύτητα για βήμα 0.1,0.2,0.33 είναι 0.15-0.2,0.2-0.4 και 0.6-0.8 αντίστοιχα.	(Saeidi et al., 2018) / Iran

Πίνακας 7-3 Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις γεωεναλλακτών ενταγμένων στην κατασκευή

Τύπος γεωεναλλάκτη ενταγμένου στην κατασκευή	Είδος μελέτης	Λειτουργία	Βάθος (m)	COP/ SPF	Περιγραφή	Αναφορά/ Περιοχή
W-shaped Spiral (5m pitch)	Πειραματικό και προσομοίωση (COM SOL)	Θέρμανση /ψύξη	13,27m 12,8m	Θέρμανση: 4,7/ Ψύξη: 4,7/	Όταν χρησιμοποιήθηκε ο σπирάλ γεωεναλλάκτης ο ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας ανά μέτρο βάθους αυξήθηκε κατά 10-15% σε σχέση με το W-shaped. Όμως ανά μέτρο μήκους του γεωεναλλάκτη για το W-shaped είναι 350-400% μεγαλύτερος σε σχέση με το σπирάλ. Επίσης το κόστος του W-shaped είναι 3 φορές μικρότερο από αυτό του σπирάλ για τις ίδιες θερμικές ανάγκες κτηρίου 540m ² .	(Yoon, Lee, Xue, et al., 2015) / Korea

Spiral (5m pitch) 3-U-tubes	Πειραματικό και προσομοίωση (CaRM)	Θέρμανση	12m	-	Ο spiral type γεωαναλλάκτη αποδείχθηκε πιο αποδοτικός σε σχέση με τον triple-u. Η θερμική απόδοσή του ήταν 23% μεγαλύτερη, αλλά συνολικά η απόδοση σύστημα είναι 9% μεγαλύτερη, σε σχέση με το triple-u type.	(Zarrella et al., 2013) /Mestre-Venice, Italy
3-U-tubes W-shaped	Πειραματικό και προσομοίωση (ABAQUS)	Θέρμανση /ψύξη	13,25m	-	Τα αποτελέσματα από το πείραμα συμφωνούν με μια μικρή απόκλιση τα δεδομένα της προσομοίωσης. Για διακοπτόμενη λειτουργία του συστήματος το 3-U-tube εμφανίζει ανώτερη απόδοση σε σχέση με το W-shaped, περίπου 15% μεγαλύτερη ροή θερμότητας. Ενώ για συνεχόμενη λειτουργία η διαφορά τους είναι σχεδόν μηδενική.	(Park et al., 2013) / Korea
spiral-shaped (0,25m pitch) U-shaped W-shaped	Πειραματικό και προσομοίωση (COMSOL)	Θέρμανση /ψύξη	25m	-	Τα πειραματικά αποτελέσματα δεν διαφέρουν αρκετά με αυτά της προσομοίωσης. Ο γεωαναλλάκτης τύπου σπирάλ έχει την καλύτερη θερμική απόδοση σε σχέση με του άλλους δύο.	(Zhao et al., 2016) /Jinan, China

Πίνακας 7-4 Θεωρητικά συστήματα-προσομοιώσεις και σύγκριση διάφορων τύπων γεωαναλλακτών

Τύπος γεωαναλλάκτη	Είδος μελέτης	Λειτουργία	Βάθος (m)	COP/SPF	Περιγραφή	Αναφορά/ Περιοχή
Horizontal Spiral Slinky linear	Προσομοίωση (CFD code Fluent)	Θέρμανση /ψύξη	1,5m, 2,0m, 2,5m	-	Και οι 3 τύποι οριζόντιων γεωαναλλακτών προσομοιώθηκαν και στα 3 βάθη. Αποδείχθηκε ότι δεν έχει κάποια σημαντική διαφορά μέχρι τα 2,5m οπότε επιλέγεται βάθος 1,5m για καλή	(Congedo et al., 2012) / Napoli, Italy

					ισορροπία μεταξύ κόστους και απόδοσης. Η σύγκριση των συγκεκριμένων γεωεναλλακτών σε ακριβώς ίδιες συνθήκες έδειξε ότι ο spiral είναι ο πιο αποδοτικός και στην θέρμανση και στην ψύξη. Συγκεκριμένα είναι 10 φορές πιο αποδοτικός από τον linear και 5 φορές από τον slinky. Όμως το μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης είναι κάτι που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν.	
4x horizontal lines-tube Vertical U-tube	Προσομοίωση(FlexPDE)	Θέρμανση /ψύξη	1,5m 100m	-	Ο οριζόντιος γεωεναλλάκτης παράγει μεγαλύτερη θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον κάθετο για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Όμως αυτό ισχύει για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Γενικά για την επιλογή τύπου γεωεναλλάκτη θα πρέπει να αναλύονται πολλοί παράγοντες οικονομίας και αποδοτικότητας.	(Florides et al., 2013) / Cyprus
Vertical spiral-type Horizontal spiral-type	Πειραματικό και προσομοίωση(TRNSYS)	Ψύξη	15m 1,5m	Vertical: 3,9-4,3/- Horizontal: 3,3-3,7 /-	Ο δείκτης COP στο vertical spiral-type είναι μεγαλύτερος της τάξης του 15% από το horizontal spiral-type λόγω του αυξημένης ροής θερμότητας. Στην προσομοίωση που έγινε για χρονικό ορίζοντα 1 έτους αποδείχθηκε ότι το σύστημα με τον οριζόντιο γεωεναλλάκτη καταναλώνει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια λόγω του μικρού βάθους εγκατάστασής του που επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Από	(J. U. Lee et al., 2015) /Incheon, South Korea

					οικονομική σκοπιά, μακροπρόθεσμα ο κάθετος γεωεναλλάκτης είναι κατά 28% περισσότερο οικονομικός από το οριζόντιο.	
--	--	--	--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

7.1 Ενεργειακή απόδοση

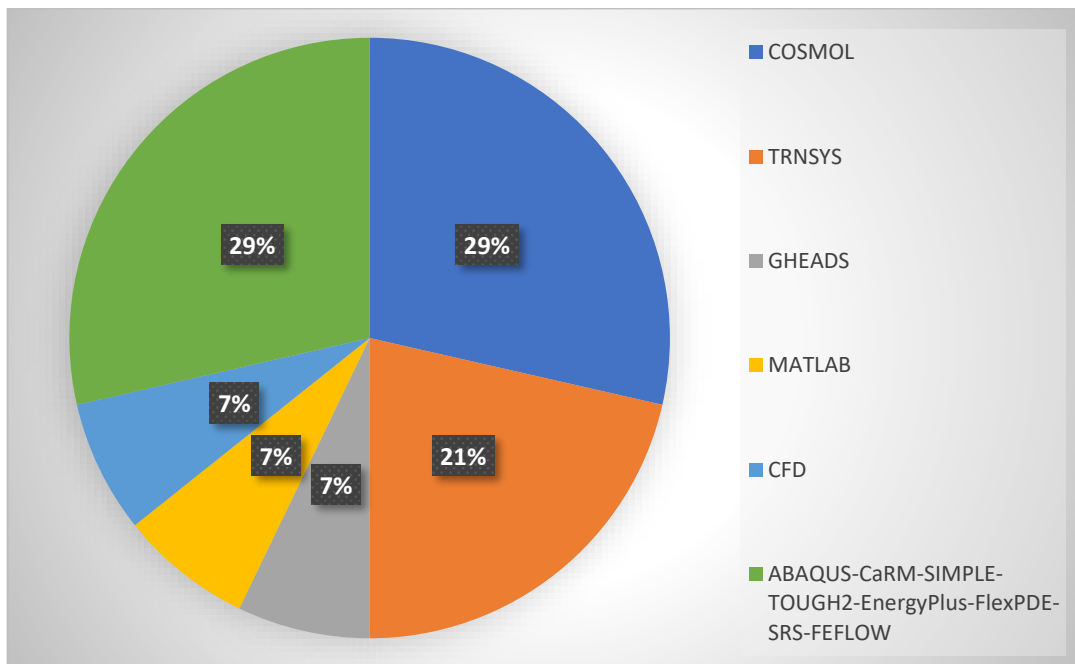
Τα δεδομένα των παραπάνω Πινάκων (Πίνακας 7-1, Πίνακας 7-2, Πίνακας 7-3 Πίνακας 7-4) αφορούν προσομοιώσεις συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Μετά από την ανάλυσή τους βρέθηκε ο μέσος όρος του ενεργειακού δείκτη SPF στους οριζόντιους γεωεναλλάκτες να είναι $SPF=3,1-3,2$, για τους κάθετους βρέθηκε $SPF=3,7-3,85$, ενώ για τους γεωεναλλάκτες ενταγμένους στην κατασκευή δεν βρέθηκαν ικανά στοιχεία για ανάλυση. Όσα έχουν ειπωθεί στο υποκεφάλαιο 6.1 για την αποδοτικότητα των διαφόρων εγκατεστημένων συστημάτων, ισχύουν εξίσου και για τις προσομοιώσεις. Η διαφορά είναι ότι, όταν χρησιμοποιούνται λογισμικά για προσομοίωση υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις σε σχέση με τις πραγματικές εφαρμογές των ίδιων συστημάτων. Τις περισσότερες φορές η απόδοση του συστήματος υπερεκτιμάται με την χρήση των λογισμικών. Το έδαφος, σε πραγματικές συνθήκες, δεν είναι σε όλα του τα σημεία ομοιογενές, δηλαδή παρεμβάλλονται διάφορα πετρώματα, τα οποία αλλάζουν την συνολική θερμική συμπεριφορά του. Επίσης τα μέρη της εγκατάστασης (αντλίες, συμπιεστής αντλίας θερμότητας, σωληνώσεις και τριβές αυτών με το ρευστό) συνήθως δεν είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να ανταποκρίνονται με τον βέλτιστο τρόπο. Στις προσομοιώσεις αυτά τα προβλήματα δεν συναντώνται και αποτέλεσμα είναι να υπερεκτιμάται η απόδοση ενός συστήματος.

Στα δεδομένα των Πινάκων Πίνακας 7-1 Πίνακας 7-2, Πίνακας 7-3 Πίνακας 7-4, βρίσκονται κάποιες προσομοιώσεις που αφορούν την σύγκριση μεταξύ διατάξεων spiral. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η αποδοτικότητά ανάλογα το βήμα (pitch) τους. Στις περιπτώσεις των (Zhao et al., 2017) και (Carotenuto et al., 2017) αποδεικνύεται, ότι όσο μικρότερο είναι το βήμα ενός spiral γεωεναλλάκτη τόσο μεγάλη είναι και η αποδοτικότητά του. Το μικρό βήμα σημαίνει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής των σωληνώσεων με το έδαφος, άρα και μεγαλύτερη ροή θερμότητας. Βέβαια, ένα αρκετά χαμηλό βήμα πρέπει να αποφεύγεται γιατί προκαλεί εξαιρετικά μεγάλες πτώσεις πίεσης, λόγω της γεωμετρίας του και του ύψους απωλειών που δημιουργούνται.

7.2 Εργαλεία-λογισμικά προσομοιώσεων

Η αξιοπιστία της σχεδίασης ενός γεωεναλλάκτη για σταθερή λειτουργία, εξαρτάται κυρίως στην ικανότητά του να απορρίπτει ή να προσλαμβάνει θερμότητα από ή προς το έδαφος για μεγάλη χρονική διάρκεια, χωρίς να δημιουργείται μεγάλη συσσώρευση ή απώλεια θερμότητας από το έδαφος. Ένα καλό λογισμικό σχεδίασης πρέπει να έχει μεγάλη υπολογιστική απόδοση, η οποία να επιτρέπει τους υπολογισμούς για τις μεταβατικές καταστάσεις (transient effects). Η μαθηματική μεθοδολογία, ή το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του γεωεναλλάκτη και του εδάφους, είναι το πιο σημαντικό κομμάτι για ένα λογισμικό (H. Yang et al., 2010). Ερευνητές και τεχνικοί μπορούν να διαλέξουν από μία πληθώρα προγραμμάτων για την μοντελοποίηση ενεργειακών συστημάτων. Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται γραφικά η συχνότητα με την οποία χρησιμοποιούνται τα διάφορα εργαλεία προσομοίωσης, στις περιπτώσεις συστημάτων στους Πίνακας 7-1, Πίνακας 7-2, Πίνακας 7-3 Πίνακας 7-4. Παρατηρείται, ότι σε ένα σύνολο 28 περιπτώσεων προσομοίωσης τα λογισμικά τα οποία

χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι το COMSOL και το TRNSYS. Το TRNSYS (trnsys, 2022) είναι ένα ευέλικτο πακέτο που καθιστά εφικτή την προσομοίωση και ανάλυση συστημάτων μεταβατικής κατάστασης (transient systems). Επίσης, η τμηματική δομή του επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν αριθμητικά μοντέλα με διάφορα εξαρτήματα και συστήματα με εξειδικευμένες απαιτήσεις (Bordignon et al., 2021). Αντίστοιχα το COMSOL (comsol, 2022) χρησιμοποιεί την Finite Element Method (FEM) ως αριθμητική προσέγγιση. Μέθοδος η οποία είναι ευέλικτη και ακριβής για την επίλυση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας σε γεωθερμικές εφαρμογές (Jahanbin, 2020b).



Σχήμα 3 Συχνότητα χρησιμοποίησης λογισμικών προσομοίωσης των περιπτώσεων που αναλύονται στην εργασία

8 Συμπεράσματα

Τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας χρησιμοποιούν το έδαφος, τα υπόγεια ύδατα ή νερό στην επιφάνεια της γης (λίμνες) ως πηγή/δεξαμενή απόθεσης θερμότητας. Επιπροσθέτως, στα πλαίσια του εξηλεκτρισμού της θέρμανσης και της μείωσης των ρύπων CO₂, κρίνεται άκρως κατάλληλη η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων. Το μεγάλο πλεονέκτημα των αντλιών θερμότητας με πηγή το έδαφος σε σχέση με αυτές που έχουν πηγή τον αέρα είναι ότι η θερμοκρασία του εδάφους κάτω από την γη δεν έχει μεγάλες μεταβολές, αφού η αλληλεπίδρασή του με την ατμόσφαιρα είναι περιορισμένη. Μάλιστα, όσο μεγαλώνει το βάθος, τόσο μικρότερη, έως και μηδενική, είναι η αλληλεπίδραση. Αυτή η εργασία σαν αντικείμενο έχει την ανασκόπηση των αντλιών θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας. Πιο συγκεκριμένα, αφού αναδείχθηκαν οι διαφορές της βαθιάς και της αβαθούς γεωθερμίας, όπως και οι εφαρμογές τους, περιεγράφηκαν αναλυτικά τα μέρη της εγκατάστασης τέτοιων συστημάτων, επικεντρώνοντας στους τύπους γεωεναλλακτών που χρησιμοποιούνται. Έπειτα, συγκροτήθηκαν πίνακες, τόσο με πραγματικά εγκατεστημένα συστήματα που υπάρχουν ανά τον κόσμο, όσο και με προσομοιώσεις, για κάθε τύπο γεωεναλλάκτη ξεχωριστά. Οι εν λόγω πίνακες περιέχουν δεδομένα για κάθε διαφορετική περίπτωση συστήματος, όπως ενεργειακούς δείκτες, λειτουργία, τοποθεσία, βάθος εγκατάστασης για τους κάθετους γεωεναλλάκτες, λογισμικό προσομοίωσης για τα θεωρητικά συστήματα και μία σύντομη περιγραφή για τις ιδιαιτερότητες και τα αποτελέσματα του κάθε συστήματος. Συνοψίζοντας έναν ικανό αριθμό διαφορετικών εγκατεστημένων και θεωρητικών συστημάτων, έχει αξία η παρατήρηση και η σύγκριση των δεδομένων για την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων.

8.1 Ενεργειακή απόδοση και τοπολογία

Ειδικότερα, αναφορικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα των εγκατεστημένων συστημάτων βρέθηκε η μέση τιμή για τους οριζόντιους γεωεναλλάκτες: SPF=2,97-3,05, για τους κάθετους: SPF=3,72-3,91 ενώ για τους ενταγμένους στην κατασκευή (geostucture) SPF=3,24-3,37. Τα εμπειρικά αυτά αποτελέσματα βρίσκονται εντός των αναμενόμενων ορίων, COP=3-4, ενώ καταδεικνύουν την υπεροχή των κάθετων γεωεναλλακτών έναντι των υπολοίπων. Μάλιστα το μέσο όρο της ροής θερμότητας (heat flux) για τους κάθετους γεωεναλλάκτες υπολογίστηκε 46,8 W/m, ενώ στην βιβλιογραφία τα δίνονται τα όρια 40-80 W/m και για τους οριζόντιους υπολογίστηκε 22,82 W/m, ενώ στην βιβλιογραφία τα δίνονται τα όρια 17-30 W/m. Αντίστοιχα στοιχεία βρέθηκαν και στα θεωρητικά συστήματα. Συγκεκριμένα στους οριζόντιους γεωεναλλάκτες: SPF=3,1-3,2, ενώ για τους κάθετους βρέθηκε: SPF=3,7-3,8. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε ότι ενώ στις μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλοι οι τύποι γεωεναλλακτών, ενώ στις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις (σχολεία βιομηχανίες κ.α.) χρησιμοποιείται αποκλειστικά κάθετος γεωεναλλάκτης, για να μπορούν να καλυφθούν επαρκώς οι θερμικές ανάγκες του κτηρίου. Μάλιστα, σε τέτοιες μεγάλες εγκαταστάσεις (>1000m²), υπολογίστηκε μέση τιμή SPF=4,18-4,35. Άρα φαίνεται να είναι αρκετά αποδοτικά τα συστήματα κάθετων γεωεναλλακτών σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις. Όσον αφορά την τοπολογία των

συστημάτων, αναλύοντας τα δεδομένα των πινάκων βρέθηκε ότι στους οριζόντιους γεωεναλλάκτες οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις είναι η «εν σειρά» και οι «slinky», λόγω της απλότητάς τους. Με τον ίδιο τρόπο, βρέθηκε η μέση τιμή του βάθους που τοποθετούνται οι κάθετοι γεωεναλλάκτες, σε μικρής κλίμακας κτήρια, να είναι 40m, ενώ σε μεγάλης κλίμακας 105m. Αντίστοιχα, οι ενταγμένοι στην κατασκευή τοποθετούνται κατά μέσο όρο στα 12,2m.

8.2 Τεχνικοοικονομικά στοιχεία

Γενικά, η εγκατάσταση συστήματος αντλιών θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας χρειάζεται υψηλό αρχικό κεφάλαιο για να πραγματοποιηθεί. Όμως το κόστος λειτουργίας τους είναι αρκετά χαμηλότερο σε σχέση με συμβατικά συστήματα, όπως λέβητες αερίου ή πετρελαίου. Ιδιαίτερα στις ευρωπαϊκές χώρες όπου οι τιμές των καυσίμων έχουν αυξηθεί πολύ τελευταία, με τον πόλεμο στην Ουκρανία, η διαφορά στο λειτουργικό κόστος είναι μεγάλη. Ειδικότερα το κόστος εγκατάστασης των οριζόντιων γεωεναλλακτών είναι αρκετά μειωμένο, εξαιτίας της απουσίας ανάγκης για γεώτρηση. Βέβαια απαιτείται μεγάλη επιφάνεια εδάφους για την τοποθέτησή τους, γεγονός που δεν είναι βολικό σε όλες τις περιπτώσεις. Αντίθετα, για τους κάθετους γεωεναλλάκτες απαιτείται γεώτρηση, η οποία αυξάνει κατά πολύ το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης. Μάλιστα με τη αύξηση του βάθους γεώτρησης αυξάνεται εκθετικά το κόστος. Για τους ενταγμένους στην κατασκευή γεωεναλλάκτες δεν απαιτείται γεώτρηση, αφού τοποθετούνται στα θεμέλια του κτηρίου, οπότε τα σκαπτικά έξοδα ελαχιστοποιούνται.

8.3 Κλίμα και λογισμικά προσομοιώσεων

Το κλίμα της περιοχής στη οποία έχει γίνει εγκατάσταση συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, παίζει ρόλο στην σχεδίαση και την αποδοτικότητά του. Συγκεκριμένα, σε περιοχές με ιδιαίτερα ψυχρό κλίμα, το σύστημα διανομής θέρμανσης ενδείκνυται να είναι ενδοδαπέδια θέρμανση, στο οποίο η θερμοκρασία του νερού είναι 40–45°C. Γενικότερα σε όλες τις εγκαταστάσεις, και σε πιο θερμά κλίματα, ο συμπιεστής αδυνατεί να ανεβάσει την θερμοκρασία του ψυκτικού στους 90°C, που απαιτείται για την λειτουργία των καλοριφέρ, χωρίς να δαπανηθούν μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Οπότε, κατά την σχεδίαση του συστήματος, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και αυτή η παράμετρος. Όσον αφορά τα λογισμικά προσομοίωσης διαφέρουν ανάλογα με την μαθηματική μεθοδολογία, ή το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του γεωεναλλάκτη και του εδάφους που χρησιμοποιούν. Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στους πίνακες Πίνακας 7-1, Πίνακας 7-2, Πίνακας 7-3 Πίνακας 7-4 τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο είναι το COSMOL και το TRNSYS.

8.4 Εντυπώσεις και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Οι αντλίες θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας αποδεικνύονται κατάλληλες για θέρμανση και ψύξη κτηρίων, ενώ μπορούν να έχουν σημαντικό ρόλο στην μείωση εκπομπών CO₂. Κατά την συνολική πορεία της εργασίας παρατηρήθηκε, ότι τα περισσότερα εγκατεστημένα συστήματα και οι περισσότερες έρευνες αφορούν κάθετους

γεωεναλλάκτες, παρόλη την ύπαρξη υψηλού κόστους τοποθέτησης, γεγονός που αποθαρρύνει τους ιδιοκτήτες των κτηρίων. Η ίδια βαρύτητα αξίζει να δοθεί και στους οριζόντιους γεωεναλλάκτες, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν αρκετά αποδοτικά σε συνδυασμό με την αντλία θερμότητας, ενώ το αρχικό κόστος επένδυσης είναι σημαντικά χαμηλότερο. Επίσης, αρκετά μεγάλη αξία για μελλοντική επέκταση της εργασίας θα έχει η οικονομική σύγκριση μεταξύ των συμβατικών μεθόδων θέρμανσης και των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, τόσο σε επίπεδο αρχικού κόστους επένδυσης, όσο και σε λειτουργικό κόστος. Παρόλο που έχει γίνει στο παρελθόν, το τοπίο πλέον έχει αλλάξει κατά πολύ, λόγω του πολέμου στην Ουκρανία και τις ανατιμήσεις που έχει επιφέρει αυτός όπως και άλλες αιτίες. Έχουν αυξηθεί κατά πολύ οι τιμές των συμβατικών καυσίμων από την μία, και οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν πολλαπλασιαστεί από την άλλη. Θα ήταν σημαντικό να μπορούσε να εκτιμηθεί η υπεροχή του ενός συστήματος θέρμανσης έναντι του άλλου στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, λαμβάνοντας υπόψιν και τις επιδοτήσεις που δίνονται για αντικατάσταση των συμβατικών μεθόδων.

Βιβλιογραφία-Αναφορές

- (n.d.).
(2018). Retrieved from theengineeringmindset:
<https://theengineeringmindset.com/heat-pumps-explained/>
- Abergel, T. (2021, November). *iea*. Retrieved from *iea*: <https://www.iea.org/>
- Achenbach, T. K. (1965). Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States.
- assets.publishing.service.gov.uk. (2021). *assets.publishing.service.gov.uk*. Retrieved from <https://assets.publishing.service.gov.uk/government>
- Badache, M. E.-N. (2015). A new modeling approach for improved ground temperature profile determination.
- Bernier, M. (2015). *Bore field sizing : Theory and applications*.
- Bouazza, A. D. (2011). Direct Geothermal Energy from Geostrutures.
- CarbonIndependent. (2022, Feb). Retrieved from carbonindependent:
<https://www.carbonindependent.org/15.html>
- Chen, C. D. (2008). Classification of Shallow and Deep Geothermal Energy.
- comsol. (2022). Retrieved from comsol: <https://www.comsol.com/>
- Conti. (2016). *Dimensionless Maps for the Validity of Analytical Ground Heat Transfer Models for GSHP Applications*.
- Efficiency, O. o. (2009). Heating and cooling with a heat pump – ground-source heat pumps (earth-energy systems).
- ehpa.org. (2021). Retrieved from ehpa.org:
https://www.ehpa.org/fileadmin/red/03._Media/Publications
- electric-heatingcompany.co.uk. (n.d.). *electric-heatingcompany.co.uk*. Retrieved from <https://www.electric-heatingcompany.co.uk/article/warm-air-heating-in-homes-today/>
- Eskilson. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*.
- eu.europa. (2020). Retrieved from europa:
https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability_en
- exoikonomo.gov. (2021). Retrieved from gov:
<https://exoikonomo2021.gov.gr/documents/>
- Glassley. (2015). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment, Second Edition*.
- gov.UK. (2014). Retrieved from assets.publishing:
<https://assets.publishing.service.gov.uk/government>
- Gupta, S. R. (2006). Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century.
- heatingforce.co.uk. (2021). Retrieved from heatingforce.co.uk:
<https://heatingforce.co.uk/>
- iea. (2021). Retrieved from *iea*: <https://www.iea.org/>
- Ingresoll. (1955). *Heat conduction with engineering, geological and other applications*. London.
- Lamarche, L., Beaucamp, B. (2007). *New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical boreholes*.
- Li, M. L. (2015). *Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales*. .
- Naranjo-Mendoza, C. W. (2018). A comparison of analytical and numerical model predictions of shallow soil temperature variation with experimental measurements. Geothermics.

- Olgun, G. (n.d.). *researchgate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-showing-a-building-supported-by-heat-exchanger-piles-b-typical-configuration_fig1_264192970
- Omer, A. M. (2013). DIRECT EXPANSION GROUND SOURCE HEAT PUMPS FOR HEATING AND. *International journal of science inventions today*.
- Ouzzane, M. E.-N. (2015). New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature. *Geothermics*.
- Parliament, E. (2016). Establishing the Guidelines for Member States on Calculating Renewable Energy from Heat Pumps from Different Heat Pump Technologies pursuant to Article 5 of Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council. *Official Journal of the European Union*, 27–35.
- reconsblog.gr. (n.d.). *reconsblog.gr*. Retrieved from <https://reconsblog.gr/ta-panta-gia-tin-endodapedia-thermansii/>
- Rees, S. (2016). *Advances in ground source heat pump systems*. *renewableenergyhub.co.uk*. (2021). Retrieved from <https://www.renewableenergyhub.co.uk>
- Sakellariou, E. (2021). Solar Assisted Heat Pump (SAHP), types and operation. In *Module: Solar Energy Applications*.
- Sanner, B. (2016). Shallow geothermal energy –history, development, current status, and future prospects. *SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY*. (2001). Retrieved from Burkhard Sanner: *trnsys*. (2022). Retrieved from [trnsys: http://www.trnsys.com/](http://www.trnsys.com/)
- un.org. (2015). Retrieved from UN: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
- USAID. (2013). Geothermal Direct-Use Guidebook - A case study for Kenya. Washington, The USA: US Agency for International Development (USAID), The Volunteers for Economic Growth Alliance (VEGA), Powering African Agriculture Project (PAA) and Land O’Lakes Inc.
- Valdimarsson. (2008). Geothermal Power Generation: Developments and Innovation.
- Valdimarsson. (2015). *Electricity Generation from Low Temperature Geothermal Resources. Conference Short course: Electricity Generation from Low Temperature Geothermal Resources*.
- Yavuzturk, C. S. (1999). *A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers*.
- Zeng, H. D. (2002). *A Finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat*.
- Μπιτζιώνης, Β. (2021). *Θέρμανση Ψύξη Κλιματισμός*.
- Τσιώλης, Σ. (n.d.). <http://eclass.teipir.gr/>. Retrieved from <http://eclass.teipir.gr/>
- Agemar, T., Weber, J., & Schulz, R. (2003). *Deep Geothermal Energy Production in Germany*. 7, 4397–4416. <https://doi.org/10.3390/en7074397>
- Arteconi, A., Brandoni, C., Rossi, G., & Polonara, F. (2013). *Experimental evaluation and dynamic simulation of a ground coupled heat pump for a commercial building*. <https://doi.org/10.1002/er.3059>
- Bakirci, K. (2010). Evaluation of the performance of a ground-source heat-pump system with series GHE (ground heat exchanger) in the cold climate region. *Energy*, 35(7), 3088–3096. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2010.03.054>
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2), 3–65. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3)

- Bi, Y., Wang, X., Liu, Y., Zhang, H., & Chen, L. (2009). Comprehensive exergy analysis of a ground-source heat pump system for both building heating and cooling modes. *Applied Energy*, 86(12), 2560–2565. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2009.04.005>
- Bloomquist, R. G. (2003). Geothermal space heating. *Geothermics*, 32(4–6), 513–526. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2003.06.001>
- Bordignon, S., Emmi, G., Zarrella, A., & de Carli, M. (2021). Energy analysis of different configurations for a reversible ground source heat pump using a new flexible TRNSYS Type. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117413. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117413>
- Cai, Y., Xu, H., & Chen, S. (2016). Testing and analysis of the influence factors for the ground thermal parameters. *Applied Thermal Engineering*, 107, 662–671. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.06.186>
- Camdali, U., Bulut, M., & Sozbir, N. (2015). Numerical modeling of a ground source heat pump: The Bolu case. *Renewable Energy*, 83, 352–361. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.04.030>
- Carotenuto, A., Marotta, P., Massarotti, N., Mauro, A., & Normino, G. (2017). Energy piles for ground source heat pump applications: Comparison of heat transfer performance for different design and operating parameters. *Applied Thermal Engineering*, 124, 1492–1504. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.06.038>
- Christodoulides, P., Vieira, A., Lenart, S., Maranha, J., Vidmar, G., Popov, R., Georgiev, A., Aresti, L., & Florides, G. (n.d.). *Reviewing the Modeling Aspects and Practices of Shallow Geothermal Energy Systems*. <https://doi.org/10.3390/en13164273>
- Chua, K. J., Chou, S. K., & Yang, W. M. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, 87(12), 3611–3624. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.06.014>
- Climo, M., Milicich, S. D., & White, B. (2016). A history of geothermal direct use development in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geothermics*, 59, 215–224. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2015.07.004>
- Congedo, P. M., Colangelo, G., & Starace, G. (2012). CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 33–34(1), 24–32. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.09.005>
- Coskun, S., Pulat, E., & Yamankaradeniz, R. (2008). Experimental performance investigation of a horizontal ground source compression refrigeration machine. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH Int. J. Energy Res*, 32, 44–56. <https://doi.org/10.1002/er.1350>
- Cui, P., Li, X., Man, Y., & Fang, Z. (2011). Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils. *Applied Energy*, 88(11), 4113–4119. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.03.045>
- Cui, Y., Zhu, J., Twaha, S., Chu, J., Bai, H., Huang, K., Chen, X., Zoras, S., & Soleimani, Z. (2019). Techno-economic assessment of the horizontal geothermal heat pump systems: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, 191, 208–236. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.04.018>
- Dehghan B., B. (2017a). Experimental and computational investigation of the spiral ground heat exchangers for ground source heat pump applications. *Applied*

- Thermal Engineering*, 121, 908–921.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.05.002>
- Dehghan B., B. (2017b). Performance assessment of ground source heat pump system integrated with micro gas turbine: Waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 152, 328–341.
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.09.058>
- Desideri, U., Sorbi, N., Arcioni, L., & Leonardi, D. (2011). Feasibility study and numerical simulation of a ground source heat pump plant, applied to a residential building. *Applied Thermal Engineering*, 31(16), 3500–3511.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.07.003>
- Doherty, P. S., Al-Huthaili, S., Riffat, S. B., & Abodahab, N. (2004). Ground source heat pump—description and preliminary results of the Eco House system. *Applied Thermal Engineering*, 24(17–18), 2627–2641.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2004.04.007>
- Esen, H., Inalli, M., & Esen, M. (2006). Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey. *Energy Conversion and Management*, 47(9–10), 1281–1297.
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2005.06.024>
- Esen, H., Inalli, M., & Esen, M. (2007). Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system. *Building and Environment*, 42(3), 1126–1134. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.11.027>
- Eslami-Nejad, P., Ouzzane, M., & Aidoun, Z. (2014). Modeling of a two-phase CO₂-filled vertical borehole for geothermal heat pump applications. *Applied Energy*, 114, 611–620. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.10.028>
- Farabi-Asl, H., Fujii, H., & Kosukegawa, H. (2018). Cooling tests, numerical modeling and economic analysis of semi-open loop ground source heat pump system. *Geothermics*, 71, 34–45. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2017.08.005>
- Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications. In *Renewable Energy* (Vol. 32, Issue 15, pp. 2461–2478). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>
- Florides, G., Theofanous, E., Iosif-Stylianou, I., Tassou, S., Christodoulides, P., Zomeni, Z., Tsiolakis, E., Kalogirou, S., Messaritits, V., Pouloupatis, P., & Panayiotou, G. (2013). Modeling and assessment of the efficiency of horizontal and vertical ground heat exchangers. *Energy*, 58, 655–663.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.05.053>
- Fridleifsson, I. B. (2001). Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(3), 299–312. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00002-8)
- Fujii, H., Yamasaki, S., Maehara, T., Ishikami, T., & Chou, N. (2013). Numerical simulation and sensitivity study of double-layer Slinky-coil horizontal ground heat exchangers. *Geothermics*, 47, 61–68.
<https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2013.02.006>
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. S., & Yang, J. (2008). Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 28(17–18), 2295–2304.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2008.01.013>
- Gudmundsson, J. S. (1988). The elements of direct uses. *Geothermics*, 17(1), 119–136.
[https://doi.org/10.1016/0375-6505\(88\)90009-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(88)90009-0)

- Haehnlein, S., Bayer, P., & Blum, P. (2010). International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(9), 2611–2625. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.07.069>
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., & Ochifuji, K. (2007). Field performance of an energy pile system for space heating. *Energy and Buildings*, *39*(5), 517–524. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2006.09.006>
- Healy, P. F., & Ugursal, V. I. (1997a). PERFORMANCE AND ECONOMIC FEASIBILITY OF GROUND SOURCE HEAT PUMPS IN COLD CLIMATE. In *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH* (Vol. 21). chrome-extension://dagcmkpagjlhakfdhnbomgmjdpkdklff/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fonlinelibrary.wiley.com%2Fdoi%2Fpdfdirect%2F10.1002%2F%2528SICI%25291099-114X%2528199708%252921%253A10%253C857%253A%253AAID-ER279%253E3.0.CO%253B2-1
- Healy, P. F., & Ugursal, V. I. (1997b). PERFORMANCE AND ECONOMIC FEASIBILITY OF GROUND SOURCE HEAT PUMPS IN COLD CLIMATE. In *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH* (Vol. 21).
- Hepbasli, A., Akdemir, O., & Hancioglu, E. (2003). Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system. *Energy Conversion and Management*, *44*(4), 527–548. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00073-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00073-0)
- Hepbasli, A., & Kalinci, Y. (2009). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(6–7), 1211–1229. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2008.08.002>
- Hwang, Y., Lee, J. K., Jeong, Y. M., Koo, K. M., Lee, D. H., Kim, I. K., Jin, S. W., & Kim, S. H. (2009). Cooling performance of a vertical ground-coupled heat pump system installed in a school building. *Renewable Energy*, *34*(3), 578–582. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2008.05.042>
- Inalli, M., & Esen, H. (2004). Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, *24*(14–15), 2219–2232. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2004.01.005>
- Jahanbin, A. (2020a). Thermal performance of the vertical ground heat exchanger with a novel elliptical single U-tube. *Geothermics*, *86*, 101804. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2020.101804>
- Jahanbin, A. (2020b). Thermal performance of the vertical ground heat exchanger with a novel elliptical single U-tube. *Geothermics*, *86*, 101804. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2020.101804>
- Jalaluddin, Miyara, A., Tsubaki, K., Inoue, S., & Yoshida, K. (2011). Experimental study of several types of ground heat exchanger using a steel pile foundation. *Renewable Energy*, *36*(2), 764–771. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2010.08.011>
- Javadi, H., Mousavi Ajarostaghi, S. S., Rosen, M. A., & Pourfallah, M. (2019). Performance of ground heat exchangers: A comprehensive review of recent advances. *Energy*, *178*, 207–233. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.04.094>
- Kapicioğlu, A., & Esen, H. (2020). Experimental investigation on using Al₂O₃/ethylene glycol-water nano-fluid in different types of horizontal ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, *165*, 114559. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.114559>

- Karabacak, R., Güven Acar, E., Kumsar, H., Gökgöz, A., Kaya, M., & Tülek, Y. (2011). Experimental investigation of the cooling performance of a ground source heat pump system in Denizli, Turkey. *International Journal of Refrigeration*, *34*(2), 454–465. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2010.10.009>
- Kim, M. J., Lee, S. R., Yoon, S., & Go, G. H. (2016). Thermal performance evaluation and parametric study of a horizontal ground heat exchanger. *Geothermics*, *60*, 134–143. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2015.12.009>
- Lee, C. K. (2011). Effects of multiple ground layers on thermal response test analysis and ground-source heat pump simulation. *Applied Energy*, *88*(12), 4405–4410. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.05.023>
- Lee, J. U., Kim, T., & Leigh, S. B. (2015). Applications of building-integrated coil-type ground-coupled heat exchangers—Comparison of performances of vertical and horizontal installations. *Energy and Buildings*, *93*, 99–109. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.02.020>
- Li, H., Zou, Z., China, S., Lei, Y., Tan, H. W., Wang, L. Z., Qian, M., Yan, D., An, J., Hanova, J., & Dowlatabadi, H. (2007). Strategic GHG reduction through the use of ground source heat pump technology You may also like Low-carbon Technology Application in Wuhan Based on Ground Source Heat Pump System Post-evaluation of a ground source heat pump system for residential space heating Field test and modeling analysis on unbalance of heat extraction and rejection of GSHP systems with different AC terminal units Strategic GHG reduction through the use of ground source heat pump technology. *Environ. Res. Lett.*, *2*, 8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/044001>
- Li, X., Chen, Y., Chen, Z., & Zhao, J. (2006). Thermal performances of different types of underground heat exchangers. *Energy and Buildings*, *38*(5), 543–547. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2005.09.002>
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016a). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, *60*, 66–93. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2015.11.004>
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016b). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, *60*, 66–93. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2015.11.004>
- Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., Wilkmann, L., & Xiang, W. (2015). Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany. *Geothermics*, *53*, 57–66. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2014.04.004>
- Luo, J., Zhao, H., Gui, S., Xiang, W., Rohn, J., & Blum, P. (2016). Thermo-economic analysis of four different types of ground heat exchangers in energy piles. *Applied Thermal Engineering*, *108*, 11–19. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.07.085>
- Lv, J., Wei, Z., & Zhang, J. (2016). Running and economy performance analysis of ground source heat pump with thermal energy storage devices. *Energy and Buildings*, *127*, 1108–1116. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.06.072>
- Ma, G. Y., & Chai, Q. H. (2004). Characteristics of an improved heat-pump cycle for cold regions. *Applied Energy*, *77*(3), 235–247. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00123-5](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00123-5)
- Mehrizi, A. A., Porkhial, S., Bezyan, B., & Lotfizadeh, H. (2016). Energy pile foundation simulation for different configurations of ground source heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *70*, 105–114. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2015.12.001>

- Michopoulos, A., Bozis, D., Kikidis, P., Papakostas, K., & Kyriakis, N. A. (2007). Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece. *Energy and Buildings*, 39(3), 328–334. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2006.08.002>
- Moon, C. E., & Choi, J. M. (2015). Heating performance characteristics of the ground source heat pump system with energy-piles and energy-slabs. *Energy*, 81, 27–32. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.10.063>
- Morrone, B., Coppola, G., & Raucci, V. (2014). Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different climates. *Energy Conversion and Management*, 88, 189–198. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.08.007>
- Mustafa Omer, A. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344–371. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2006.10.003>
- Naicker, S. S., & Rees, S. J. (2018). Performance analysis of a large geothermal heating and cooling system. *Renewable Energy*, 122, 429–442. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.01.099>
- Naili, N., Hazami, M., Attar, I., & Farhat, A. (2013). In-field performance analysis of ground source cooling system with horizontal ground heat exchanger in Tunisia. *Energy*, 61, 319–331. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.08.054>
- Naili, N., Hazami, M., Kooli, S., & Farhat, A. (2015). Energy and exergy analysis of horizontal ground heat exchanger for hot climatic condition of northern Tunisia. *Geothermics*, 53, 270–280. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2014.07.004>
- Noorollahi, Y., Bigdelou, P., Pourfayaz, F., & Yousefi, H. (2016). Numerical modeling and economic analysis of a ground source heat pump for supplying energy for a greenhouse in Alborz province, Iran. *Journal of Cleaner Production*, 131, 145–154. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.05.059>
- Noorollahi, Y., Saeidi, R., Mohammadi, M., Amiri, A., & Hosseinzadeh, M. (2018). The effects of ground heat exchanger parameters changes on geothermal heat pump performance – A review. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 129, pp. 1645–1658). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.111>
- Ozyurt, O., & Ekinici, D. A. (2011). Experimental study of vertical ground-source heat pump performance evaluation for cold climate in Turkey. *Applied Energy*, 88(4), 1257–1265. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.10.046>
- Park, H., Lee, S. R., Yoon, S., & Choi, J. C. (2013). Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation. *Applied Energy*, 103, 12–24. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.10.012>
- Pulat, E., Coskun, S., Unlu, K., & Yamankaradeniz, N. (2009). Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey. *Energy*, 34(9), 1284–1295. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2009.05.001>
- Saeidi, R., Noorollahi, Y., & Esfahanian, V. (2018). Numerical simulation of a novel spiral type ground heat exchanger for enhancing heat transfer performance of geothermal heat pump. *Energy Conversion and Management*, 168, 296–307. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.05.015>
- Sakellariou JANUARY, E. (n.d.). *ENERGETIC STUDY OF A SOLAR ASSISTED GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM FOR DOMESTIC HEATING WITH PARAMETRIC ANALYSES VIA SIMULATION*.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 70, 441–454. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.11.068>

- Self, S. J., Reddy, B. v., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, *101*, 341–348. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.01.048>
- Shang, Y., Dong, M., & Li, S. (2014). Intermittent experimental study of a vertical ground source heat pump system. *Applied Energy*, *136*, 628–635. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.09.072>
- Singh, R. M., Sani, A. K., & Amis, T. (2019). An overview of ground-source heat pump technology. *Managing Global Warming: An Interface of Technology and Human Issues*, 455–485. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00015-6>
- Sivasakthivel, T., Murugesan, K., Kumar, S., Hu, P., & Kobiga, P. (2016). Experimental study of thermal performance of a ground source heat pump system installed in a Himalayan city of India for composite climatic conditions. *Energy and Buildings*, *131*, 193–206. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.09.034>
- Strategic GHG reduction through the use of ground source heat pump technology.* (2007). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/044001>
- Suzuki, M., Yoneyama, K., Amemiya, S., & Oe, M. (2016). Development of a Spiral Type Heat Exchanger for Ground Source Heat Pump System. *Energy Procedia*, *96*, 503–510. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2016.09.091>
- Tarnawski, V. R., Leong, W. H., Momose, T., & Hamada, Y. (2009). Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan. *Renewable Energy*, *34*(1), 127–134. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2008.03.026>
- Wu, Y., Gan, G., Verhoef, A., Vidale, P. L., & Gonzalez, R. G. (2010). Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, *30*(16), 2574–2583. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.07.008>
- Yang, H., Cui, P., & Fang, Z. (2010). Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Applied Energy*, *87*(1), 16–27. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2009.04.038>
- Yang, W. (2013). Experimental performance analysis of a direct-expansion ground source heat pump in Xiangtan, China. *Energy*, *59*, 334–339. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.07.036>
- Yang, W., Shi, M., Liu, G., & Chen, Z. (2009). A two-region simulation model of vertical U-tube ground heat exchanger and its experimental verification. *Applied Energy*, *86*(10), 2005–2012. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2008.11.008>
- Yoon, S., Lee, S. R., & Go, G. H. (2015). Evaluation of thermal efficiency in different types of horizontal ground heat exchangers. *Energy and Buildings*, *105*, 100–105. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.07.054>
- Yoon, S., Lee, S. R., Xue, J., Zosseder, K., Go, G. H., & Park, H. (2015). Evaluation of the thermal efficiency and a cost analysis of different types of ground heat exchangers in energy piles. *Energy Conversion and Management*, *105*, 393–402. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2015.08.002>
- Zarrella, A., de Carli, M., & Galgaro, A. (2013). Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube. *Applied Thermal Engineering*, *61*(2), 301–310. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2013.08.011>
- Zarrella, A., Emmi, G., & de Carli, M. (2017). A simulation-based analysis of variable flow pumping in ground source heat pump systems with different types of borehole heat exchangers: A case study. *Energy Conversion and Management*, *131*, 135–150. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.10.061>

- Zhai, X. Q., Cheng, X. W., & Wang, R. Z. (2017). Heating and cooling performance of a minitype ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, *111*, 1366–1370. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.03.117>
- Zhao, Q., Chen, B., & Liu, F. (2016). Study on the thermal performance of several types of energy pile ground heat exchangers: U-shaped, W-shaped and spiral-shaped. *Energy and Buildings*, *133*, 335–344. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.09.055>
- Zhao, Q., Liu, F., Liu, C., Tian, M., & Chen, B. (2017). Influence of spiral pitch on the thermal behaviors of energy piles with spiral-tube heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, *125*, 1280–1290. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.07.099>
- Zhou, K., Mao, J., Li, Y., & Zhang, H. (2020a). Performance assessment and techno-economic optimization of ground source heat pump for residential heating and cooling: A case study of Nanjing, China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *40*, 100782. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2020.100782>
- Zhou, K., Mao, J., Li, Y., & Zhang, H. (2020b). Performance assessment and techno-economic optimization of ground source heat pump for residential heating and cooling: A case study of Nanjing, China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *40*, 100782. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2020.100782>