

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΘΕΟΔΩΡΑ Ι.ΚΟΤΑΝΙΔΟΥ

ΑΒΑΘΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ
&
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΑ ΣΤΗ ΣΙΘΩΝΙΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΑΛΛΟΝΙΚΗ

2018

ΘΕΟΔΩΡΑ Ι.ΚΟΤΑΝΙΔΟΥ

Φοιτήτρια του Τμήματος Γεωλογίας, Α.Ε.Μ. 4995

ΑΒΑΘΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ
ΚΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ-ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ
ΚΑΤΟΙΚΙΑ ΣΤΗ ΣΙΘΩΝΙΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και
Υδρογεωλογίας

Επιβλέπουσα

Δρ. Μαρία Παπαχρήστου, Ε.ΔΙ.Π. Τμήματος Γεωλογίας

© Θεοδώρα Ι. Κοτανίδου, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, 2018
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Αβαθής Γεωθερμία και Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας-Παράδειγμα Εφαρμογής σε κατοικία στη Σιθωνία Χαλκιδικής, *Πτυχιακή Εργασία*

© Theodora Kotanidou, School of Geology, Department of Geology, Laboratory of Engineering Geology and Hydrogeology, 2018
All rights reserved
Shallow geothermal systems and Ground Source Heat Pumps – Application in a summer residence in Sithonia (Chalkidiki, Northern Greece), *Bachelor Thesis*

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αβαθή γεωθερμία και τους τρόπους αξιοποίησης της με τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.

Στο *Πρώτο Κεφάλαιο* της εργασίας εισάγονται βασικές γεωθερμικές έννοιες (γεωθερμικοί πόροι, γεωθερμικά συστήματα, χρήσεις της γεωθερμίας).

Το *Δεύτερο Κεφάλαιο* αφορά ειδικότερα τα ρηχά γεωθερμικά συστήματα καθώς και την αξιοποίηση τους στην Ελλάδα και την Ευρώπη.

Στο *Τρίτο Κεφάλαιο* αναλύονται τα συστήματα αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας (γεωεναλλάκτες, αντλίες θερμότητας, ταξινόμηση κυκλωμάτων και γεωεναλλακτών). Παρατίθενται επίσης τα πλεονεκτήματα χρήσης των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (ΓΑΘ) και χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών στον ελληνικό χώρο.

Στο *Τέταρτο Κεφάλαιο* παρουσιάζεται το παράδειγμα εγκατάστασης συστήματος ΓΑΘ, κυρίως για δροσισμό, σε εξοχική κατοικία έκτασης 450m² στη Σιθωνία Χαλκιδικής. Με σκοπό την ορθή επιλογή τύπου αντλίας θερμότητας, την σωστή διαστασολόγηση και την οικονομικότερη λειτουργία της πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Δοκιμή Θερμικής Απόκρισης (TRT). Για την εγκατάσταση του κλειστού κυκλώματος συστήματος ΓΑΘ κατακόρυφου γεωεναλλάκτη πραγματοποιήθηκαν 20 γεωτρήσεις στο βάθος των 100m, με την υδροφορία να εντοπίζεται στα 6-8m και την θερμοκρασία του νερού περίπου στους 18°C. Το σύστημα αναμένεται να λειτουργήσει άρτια από το καλοκαίρι του 2018.

Abstract

This bachelor thesis is about shallow geothermal energy and its exploitation ways specifically ground source heat pumps.

The *First Chapter* introduces some of the basic geothermal meanings and definitions (such as geothermal resources, geothermal systems, uses of geothermal energy).

The *Second Chapter* especially refers to shallow geothermal systems and their exploitation in Greece and Europe.

The *Third Chapter* elaborates on heat extraction systems of shallow geothermal energy (geo-exchangers, heat pumps, geo-exchanger and loop classifications). The advantages of a geothermal heat pump and some typical examples of shallow geothermal uses in Greece are mentioned in this chapter, too.

At the *Fourth Chapter* is represented an example of geothermal heat pump installation, especially for cooling, in a summer residence (total area 450m²) in Sithonia, Chalkidiki. A Thermal Response Test (TRT) took place at the summer residence area, in order to be able to choose the most suitable type of geothermal heat pump, to estimate the right size of heat pump unit and to achieve the lowest cost. For the installation of the close loop geothermal heat pump system that includes a vertical geo-exchanger were constructed 20 boreholes at the depth of 100m, the aquifer was located at the depth of 6-8 m and water temprature was 18°C. The system is expected to operate effectively since the Summer 2018.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	6
1.2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ	6
1.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΒΑΘΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	12
2.1 ΡΗΧΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	12
2.2 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ	16
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	16
3.2 ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ	17
3.3 ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	18
3.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	20
3.3.1 Ανοικτού τύπου κυκλώματα	21
3.3.2 Κλειστού τύπου κυκλώματα	24
3.3.4 Κυκλώματα άμεσης εκτόνωσης	31
3.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	32
3.5 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (Γ.Α.Θ.) ΣΤΗ ΣΙΘΩΝΙΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ	40
4.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΒΟΥΡΒΟΥΡΟΥ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ	40
4.2 ΔΟΚΙΜΗ-ΤΕΣΤ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (TRT- THERMAL RESPONSE TEST)	45
4.2.1 Εισαγωγικές Έννοιες	45
4.2.2 Δοκιμή Θερμικής Απόκρισης (TRT)	47
4.2.3 Εφαρμογή της δοκιμής TRT στη Βουρβουρού (Ν. Χαλκιδικής)	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	51
Βιβλιογραφία	53

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ανατέθηκε από την διδάσκουσα του μαθήματος «Γεωθερμία», Δρ. Μαρία Παπαχρήστου, ΕΔΙΠ του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Το θέμα της αφορά την αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας με τις Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας.

Στα επιμέρους κεφάλαια της εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά τα ρηχά γεωθερμικά συστήματα και περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας των αντλιών θερμότητας σε συνδυασμό με τους διάφορους τύπους γεωεναλλακτών. Επίσης, περιλαμβάνεται παράδειγμα εφαρμογής από την εγκατάσταση συστήματος ΓΑΘ σε εξοχική κατοικία στον οικισμό «Βουρβουρού», στη Σιθωνία Χαλκιδικής. Για την εκπόνηση της εργασίας υπήρξε στενή συνεργασία με την εταιρία «ΓΕΩΣΕΡΕΥΝΑ» και τον υπεύθυνο γεωλόγο κ. Βασίλη Παπαευαγγέλου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ για την ανάθεση της πτυχιακής εργασίας και την επιβλέπουσα της εργασίας, Δρ. Μαρία Παπαχρήστου, για τη συνεργασία, τις επισημάνσεις και την υποστήριξη της κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βασίλη Παπαευαγγέλου για την παροχή δεδομένων και την συνεργασία μας κατά τις εργασίες υπαίθρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που βρίσκεται αποθηκευμένη στο εσωτερικό της γης και περιέχεται σε θερμά ρευστά (νερό ή/και ατμός), σε μίγματα αερίων και ατμών ή σε θερμά πετρώματα. Η γεωθερμική ενέργεια μεταδίδεται από το εσωτερικό της γης προς την επιφάνεια της μέσω του μηχανισμού της αγωγής, με ρυθμό 0,04 - 0,06 W/m² (Τσίλιγκιρίδης, 2007) και της συναγωγής.

Πρόκειται για μία ήπια, περιβαλλοντικά φιλική και σε σημαντικό βαθμό ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία αξιοποιείται με διάφορες μεθόδους από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα.

Η Γεωθερμία αποτελεί τον επιστημονικό κλάδο που ασχολείται με τη ροή της θερμότητας στο εσωτερικό της γης, με τον τρόπο κατανομής των θερμοκρασιών σε σχέση με το βάθος, με τον εντοπισμό των γεωθερμικών συστημάτων και πεδίων και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τους.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η γεωθερμική ενέργεια εκδηλώνεται στην επιφάνεια, δημιουργώντας εντυπωσιακά φαινόμενα όπως: ηφαιστειακές εκρήξεις υδροθερμικούς κρατήρες, θερμές πηγές, θερμοπίδακες, ατμίδες, λεκάνες ιλύος κ.λ.π. (Εικόνα 1.1)



Εικόνα 1.1 Επιφανειακές εκδηλώσεις γεωθερμικής ενέργειας
(Πηγή: <http://blogs.discovermagazine.com>, <https://www.geodifhs.com>, <http://www.geo.auth.gr>)

1.2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

Τα γεωθερμικά συστήματα (Εικόνα 1.2) διαχωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το είδος των γεωθερμικών πόρων (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004):

α) *Υδροθερμικά συστήματα*: πρόκειται για συστήματα συναγωγής ή συστήματα αγωγής, ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσης της θερμότητας και αφορούν ουσιαστικά τους ταμιευτήρες θερμών ρευστών (ατμός και νερό).

β) *Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας*: στα συστήματα αυτά η γεωθερμική ενέργεια βρίσκεται αποθηκευμένη στο έδαφος ή σε ρηχούς ταμιευτήρες και πετρώματα με μέγιστο βάθος συνήθως τα 100m.

γ) *Προηγμένα Γεωθερμικά Συστήματα*: πρόκειται για συστήματα που αξιοποιούν τη θερμότητα που περιέχεται σε πολύ θερμά πετρώματα που βρίσκονται σε βάθη >2km, εντός των οποίων δεν κυκλοφορούν ρευστά με φυσικό τρόπο.

δ) *Γεωπεπιεσμένα συστήματα*: πρόκειται για ταμιευτήρες που βρίσκονται εγκλωβισμένοι ανάμεσα σε αδιαπέρατα στρώματα, σε πολύ μεγάλα βάθη και με την πίεση να ξεπερνά την υδροστατική. Συνήθως μαζί με τα θερμά ρευστά υπάρχουν και υδρογονάνθρακες. Αποτελούν μη ανανεώσιμο γεωθερμικό πόρο.

ε) *Μαγματικά συστήματα*: μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων εντός μαγματικών διεισδύσεων που βρίσκονται σε μικρά σχετικά βάθη και έχουν συνήθως θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 500°C. Η αξιοποίησή τους βρίσκεται πρακτικά σε πειραματικό στάδιο.



Εικόνα 1.2 Σχηματική απεικόνιση ταξινόμησης γεωθερμικών συστημάτων (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004)

Τα υδροθερμικά συστήματα και η αβαθής γεωθερμία είναι οι δύο κατηγορίες γεωθερμικών πόρων που κατά κύριο λόγο αξιοποιούνται σήμερα παγκοσμίως.

Η ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων μπορεί να γίνει και με βάση την ενθαλπία των ρευστών (ΔH) που είναι ανάλογη της θερμοκρασίας τους. Έτσι, λοιπόν, καθιερώθηκαν οι υποκατηγορίες των ρευστών υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας, με τις αντίστοιχες περιοχές που εντοπίζονται να αποκαλούνται πεδία υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας.

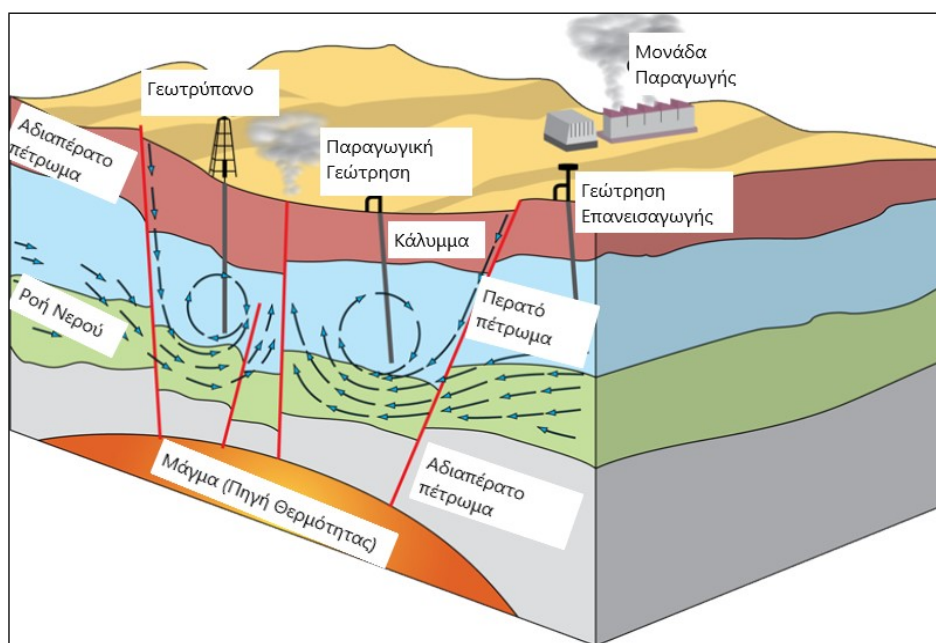
➤ *Συστήματα και πεδία υψηλής ενθαλπίας*

Ως πεδία υψηλής ενθαλπίας ορίζονται οι περιοχές μέσα στις οποίες τα ρευστά έχουν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C. Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζεται ένα πρότυπο γεωθερμικό σύστημα και ο τρόπος λειτουργίας του.

Στην Ελλάδα, τα μόνα βεβαιωμένα πεδία υψηλής ενθαλπίας είναι στη Μήλο και τη Νίσυρο, όπου οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες των 150°C ($T = 300-325\text{ }^{\circ}\text{C}$ στη Μήλο και $T =$ από 250 έως περισσότερο από 350 $^{\circ}\text{C}$ στη Νίσυρο).

➤ *Πεδία μέσης και χαμηλής ενθαλπίας*

Τα πεδία μέσης ενθαλπίας αφορούν περιοχές με θερμοκρασίες ρευστών 90°C-150°C, ενώ η χαμηλή ενθαλπία αφορά ρευστά με θερμοκρασία από 25°C έως 90°C. Τα πεδία μέσης και χαμηλής ενθαλπίας στην ελληνική επικράτεια εντοπίζονται κυρίως σε περιοχές που επικρατεί η εφελκυστική τεκτονική όπως οι οπισθοτόξιες λεκάνες στο Κεντρικό και Βόρειο Αιγαίο και στις γειτονικές ηπειρωτικές περιοχές (Θράκη, Ανατολική και Κεντρική Μακεδονία, λεκάνη του Σπερχειού κλπ).

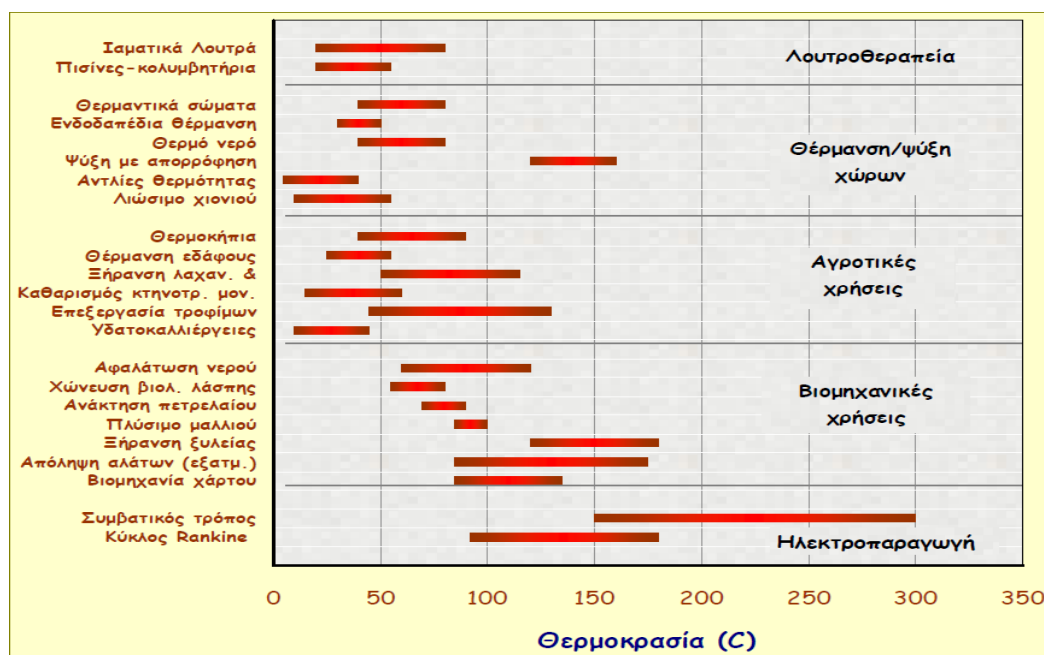


Εικόνα 1.3 Απεικόνιση γεωθερμικού συστήματος (Τροποποιημένη από: <http://www.seylenenergy.com>)

1.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Η γεωθερμία έχει πολυάριθμες εφαρμογές σε πολλούς και διαφορετικούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρήση της θερμότητας σε αγροτικές και βιομηχανικές χρήσεις έως τον τουρισμό και την αναψυχή.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 1.4) εμφανίζονται οι κυριότερες χρήσεις της γεωθερμίας, χωρίς να λαμβάνονται αυστηρά υπόψη τα όρια των θερμοκρασιών, δεδομένης της συνεχούς εξέλιξης της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας.



Εικόνα 1.4 Τροποποιημένο διάγραμμα Lindal (Γιάσλα, Καρλάφτη, 2012)

Οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας χωρίζονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:

- i. Ηλεκτρικές: για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, από ρευστά με θερμοκρασίες $>90^{\circ}\text{C}$
- ii. Άμεσες: απευθείας αξιοποίηση της θερμότητας των ρευστών με θερμοκρασίες $>25^{\circ}\text{C}$
- iii. Αξιοποίηση αβαθούς γεωθερμίας με γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (θερμοκρασίες $< 25^{\circ}\text{C}$)

i. Ηλεκτρικές χρήσεις

Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με ρευστά θερμοκρασίας $>90^{\circ}\text{C}$.

Ανάλογα με τον τύπο και τη θερμοκρασία των ρευστών οι βασικοί τύποι γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής είναι :

- μονάδες ξηρού ατμού (dry steam plants)
- μονάδες με κύκλο εκτόνωσης διαφασικού ατμού (flash steam)
- μονάδες δυαδικού κύκλου (binary cycle) (ρευστά $>90^{\circ}\text{C}$)

Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συναντηθεί συνδυασμός των παραπάνω.

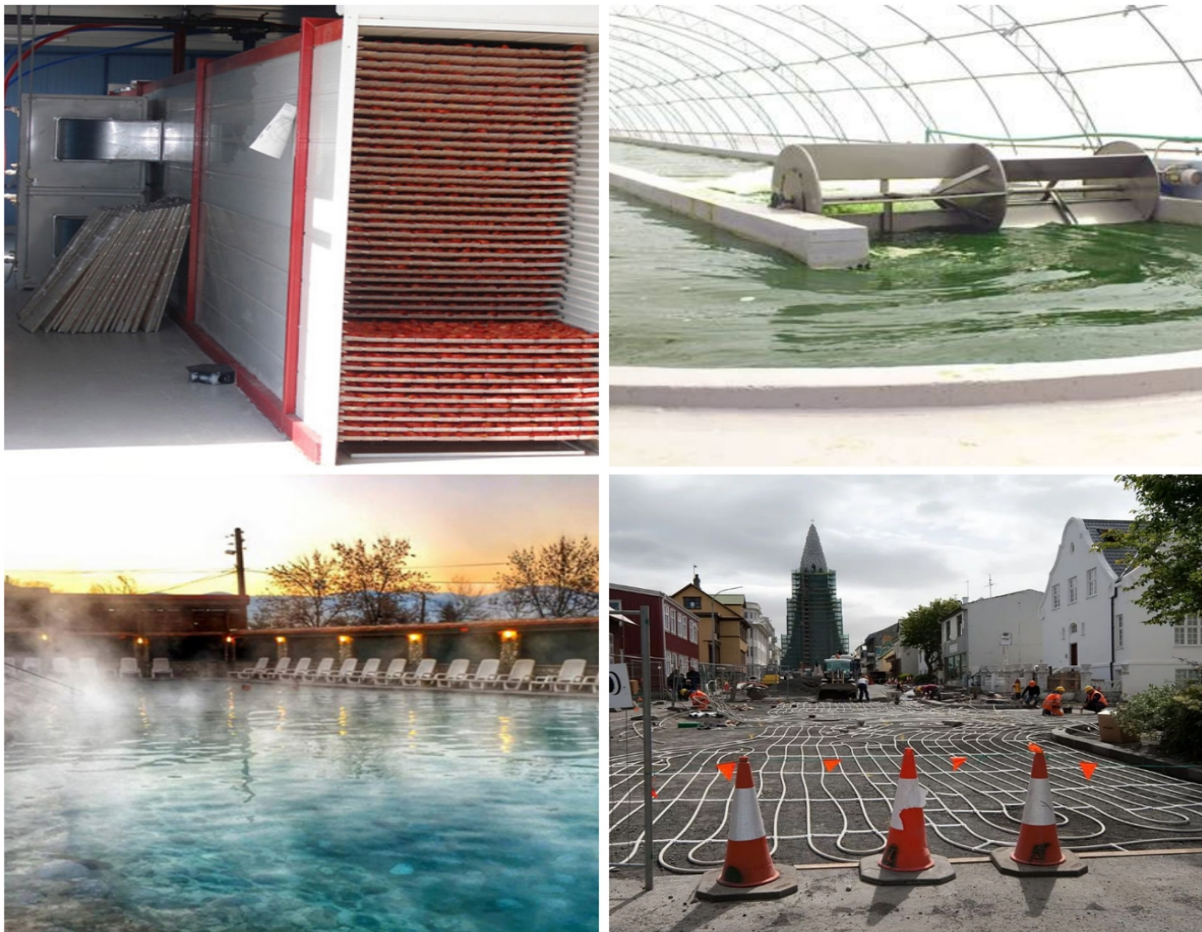
Στον Ελληνικό χώρο παρά τα δύο σημαντικά βεβαιωμένα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας και τις σημαντικές ενδείξεις για την ύπαρξη ταμειυτήρων μέσης ενθαλπίας (για

παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω δυαδικού τύπου), δεν παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από την αξιοποίηση της γεωθερμίας.

ii. Άμεσες χρήσεις

Στις άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας συμπεριλαμβάνονται οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν απευθείας τη θερμότητα των ρευστών όπως για παράδειγμα η θέρμανση χώρων, εδαφών και θερμοκηπίων, η ξήρανση αγροτικών προϊόντων, οι ιχθυοκαλλιέργειες, η λουτροθεραπεία, ο ιαματικός τουρισμός κ.λ.π. (Σχήμα 1.5)

Οι άμεσες χρήσεις αποτελούν τον μοναδικό τομέα αξιοποίησης της γεωθερμίας στην Ελλάδα. Κυριαρχούν τα γεωθερμικά θερμοκήπια και η λουτροθεραπεία ενώ οι υπόλοιπες κατηγορίες αφορούν μικρές και μεμονωμένες εφαρμογές.



Εικόνα 1.5 Είδη άμεσων χρήσεων της γεωθερμίας (www.geothermikihellas.gr, www.enet.gr, www.b2green.gr)

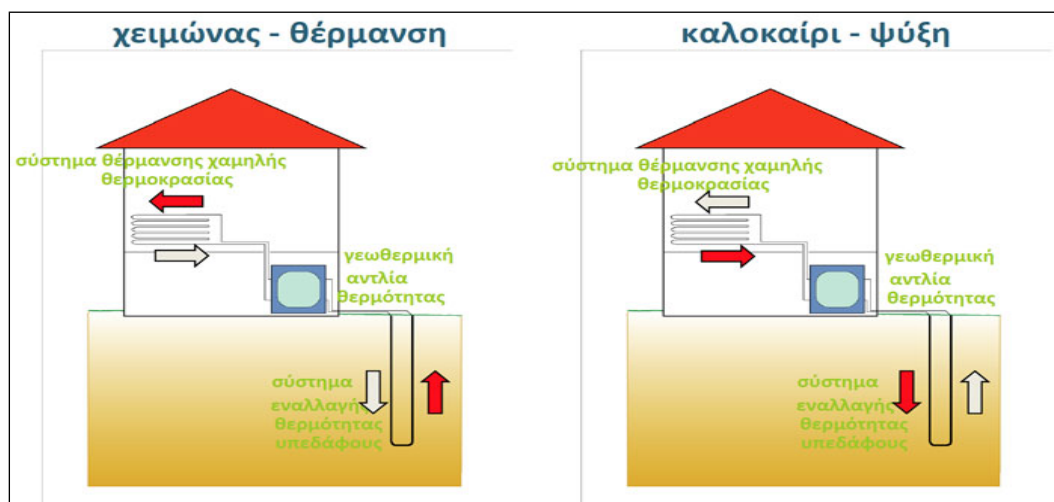
iii. Αβαθής Γεωθερμία

Με βάση το νομοθετικό πλαίσιο της Ελλάδας, ως αβαθής γεωθερμία ορίζεται η αποθηκευμένη ενέργεια των ρηχών γεωλογικών σχηματισμών (εδάφους, πετρωμάτων) και των υδροφορέων με θερμοκρασία μικρότερη των 25°C. (ΦΕΚ 207/2003, Ν. 3175/2003, Άρθρο 11)

Η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας προϋποθέτει την ύπαρξη και χρήση ειδικού εξοπλισμού, όπως είναι οι Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (Geothermal Heat Pumps ή Ground Source Heat Pumps). Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας απορροφούν θερμότητα από το έδαφος ή τη διοχετεύουν σε αυτό, ανάλογα εάν χρησιμοποιούνται για θέρμανση ή για δροσισμό χώρων (Εικόνα 1.6). Ουσιαστικά, το χειμώνα η γη χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας, σε αντίθεση με το καλοκαίρι που χρησιμοποιείται ως δεξαμενή όπου αποβάλλεται η θερμότητα των κλιματιζόμενων χώρων. Το χαρακτηριστικό του εδάφους είναι ότι παρά το γεγονός ότι μεταφέρει την ενέργεια του με πολύ αργούς ρυθμούς έχει την ικανότητα να αποθηκεύει μεγάλα ποσά ενέργειας.

Γενικά, η αντλία θερμότητας είναι ένα σύστημα (μία μηχανή) που επιτρέπει τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας από ένα χώρο χαμηλής θερμοκρασίας σε ένα χώρο υψηλής θερμοκρασίας, δηλαδή με φορά αντίθετη από αυτή της φυσικής ροής, όπως ακριβώς λειτουργεί ένα κοινό κλιματιστικό μηχανήμα. Εναλλακτικά, η γεωθερμική αντλία θερμότητας μπορεί να ενισχύσει τη ροή θερμότητας από μια θερμή περιοχή σε μια πιο ψυχρή.

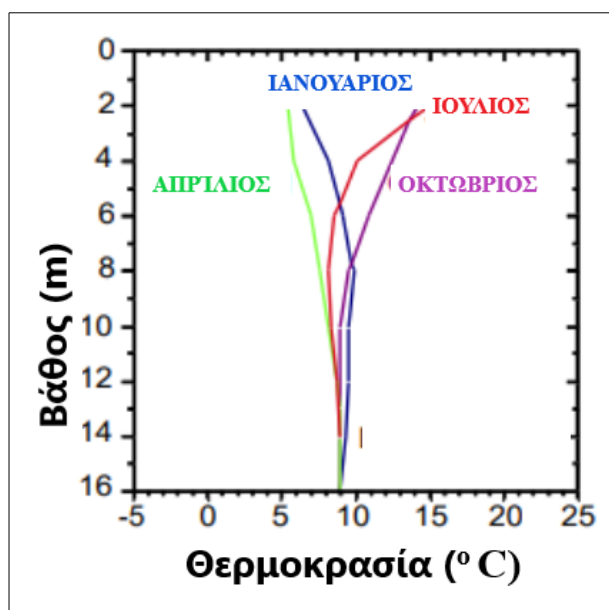
Με την εκμετάλλευση των σχεδόν σταθερών και ήπιων θερμοκρασιών του εδάφους, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας στοχεύουν στην βελτίωση της αποτελεσματικότητας και την ταυτόχρονη μείωση του λειτουργικού κόστους των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Η αβαθής γεωθερμία και η αξιοποίηση της αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, για το λόγο αυτό εξετάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΒΑΘΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

2.1 ΡΗΧΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Σε βάθη 10 έως το πολύ 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους οι μεταβολές της θερμοκρασίας οφείλονται κατά κύριο λόγο στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και σε πολύ μικρότερο ποσοστό στη ροή θερμότητας από το εσωτερικό της γης. Πειραματικές μετρήσεις (Sanner, 2003) έχουν δείξει ότι η θερμοκρασία ως το βάθος των 2m δεν μεταβάλλεται περισσότερο από 3°C κατά τη διάρκεια του έτους και σταθεροποιείται περίπου στα 10 m. Από εκεί και κάτω υπακούει στη γεωθερμική βαθμίδα της κάθε περιοχής (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 Θεωρητική κατανομή των θερμοκρασιών με το βάθος στην διάρκεια του έτους στην περιοχή Wetsla, Γερμανία (Τροποποιημένο από: Sanner, 2003)

Το βάθος των ρηχών γεωθερμικών συστημάτων διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή ανά τον κόσμο, και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φθάνει ως τα 200 ή και τα 400 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Οι πηγές προέλευσης της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας είναι δύο: η *ηλιακή ακτινοβολία* και η *ροή θερμότητας* από το εσωτερικό της γης. Το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από την επιφάνεια της γης και θερμαίνει τα πετρώματα αλλά και τους υδροφόρους μιας περιοχής εξαρτάται τόσο από τις γεωμορφολογικές συνθήκες όσο και από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Τέτοια ρηχά συστήματα πρακτικά υπάρχουν παντού, σε κάθε περιοχή της γης και μπορούν σχετικά πολύ εύκολα να αξιοποιηθούν με την κατάλληλη τεχνολογία.

Τα πλεονεκτήματα χρήσης της αβαθούς γεωθερμίας έναντι άλλων συμβατικών πηγών ενέργειας (λέβητας πετρελαίου, φυσικού αερίου, κλιματιστικά) για ψύξη και θέρμανση χώρων συνοψίζονται ως εξής: (Ζούφιος, 2011)

- Είναι *περιβαλλοντικά φιλική*, δεν παράγει ρύπους και απαιτεί σχετικά μικρή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος.
- Αποτελεί μία *ανεξάντλητη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας*, οπότε δεν θα υπάρξει πρόβλημα εξάντλησης των αποθεμάτων διότι η θερμότητα παρέχεται συνεχώς από το εσωτερικό της γης, ανεξάρτητα από τις τοπικές κλιματικές ή καιρικές συνθήκες.
- Το *κόστος αξιοποίησης δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο*, αφού δεν απαιτούνται μεγάλου βάθους παραγωγικές γεωτρήσεις. Ανάλογα με την επένδυση, ο χρόνος απόσβεσης είναι μικρός (5-7 έτη) ενώ
- *Δεν απαιτούνται σχεδόν καθόλου έξοδα συντήρησης*. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ομαλά για πολλές δεκαετίες, ενώ η γεωθερμική αντλία θερμότητας συνήθως λειτουργεί χωρίς πρόβλημα για τουλάχιστον 20 χρόνια.

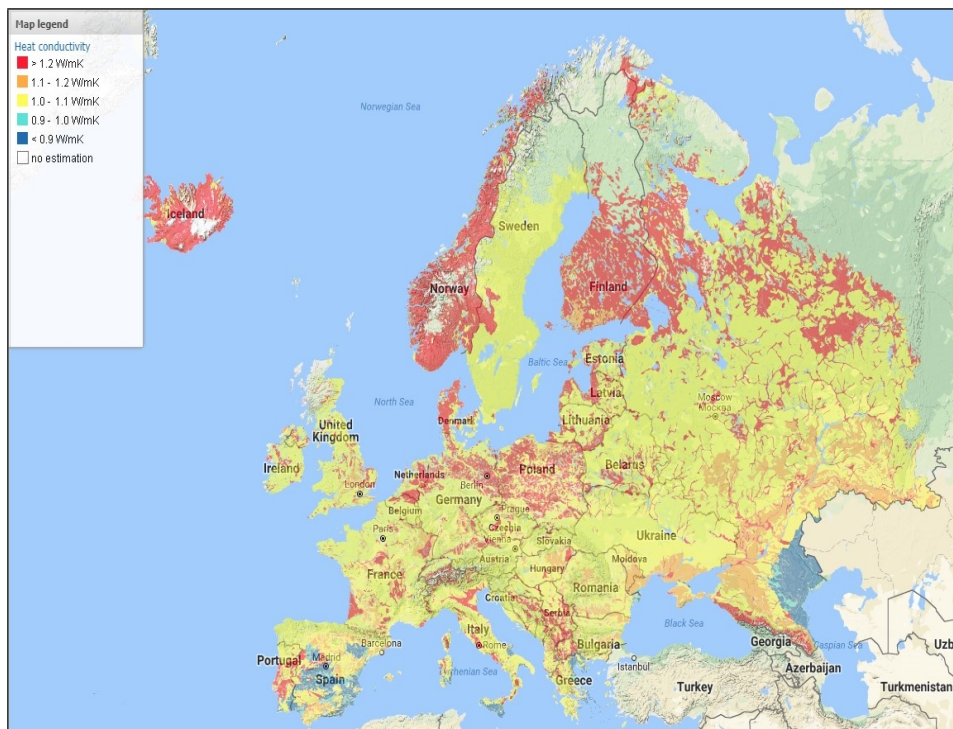
2.2 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Ο τομέας των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας γνώρισε άνθηση παγκοσμίως τις περασμένες δεκαετίες, με περισσότερες από 1,7 εκατομμύρια μονάδες στο τέλος του 2017 εγκατεστημένες σε ευρωπαϊκές χώρες. Από τα συνολικά 35,5 GW εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος στην Ευρώπη, το 65% περίπου αφορά την αβαθή γεωθερμία. (Εικόνα 2.3)

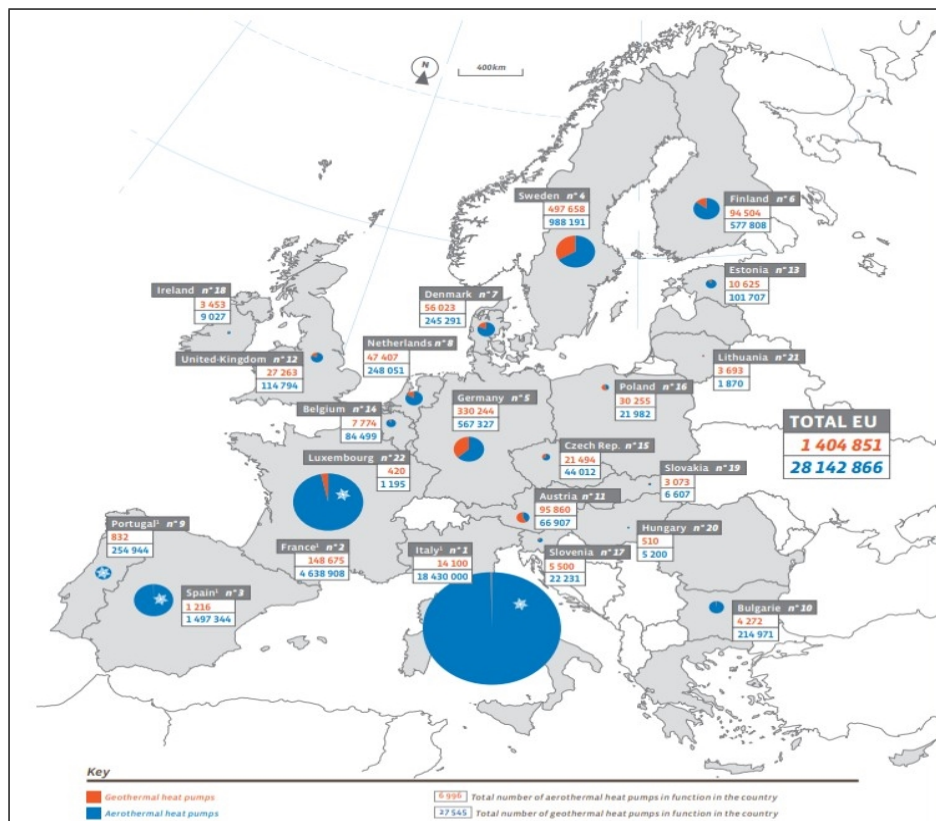
Στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας με ΓΑΘ είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Αξίζει να αναφερθεί ότι στη Σουηδία δαπανήθηκαν, με βάση τα διαθέσιμα οικονομικά στοιχεία για το 2015, πέντε (5) δισεκατομμύρια ευρώ στον τομέα αυτό, ενώ στη Φιλανδία μία στις δύο καινούριες κατοικίες χρησιμοποιούν για τον κλιματισμό των εσωτερικών χώρων γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (Papachristou et al., 2018).

Στην Κεντρική Ευρώπη, χώρες όπως η Γαλλία, η Γερμανία, η Ελβετία και η Αυστρία έχουν τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ από συστήματα αβαθούς γεωθερμίας. Στην Ελβετία αντιστοιχεί μια γεωθερμική αντλία θερμότητας για κάθε 2 km² της χώρας (Rybach et al., 2000).

Στη Νότια Ευρώπη η αβαθής γεωθερμία δεν έχει αναπτυχθεί στα επίπεδα που θα αναμενόταν, ίσως λόγω των ευνοϊκότερων και ηπιότερων κλιματικών συνθηκών και την μεγαλύτερη αξιοποίηση άλλων ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια.



Εικόνα 2.2 Χάρτης θερμικής αγωγιμότητας της Ευρώπης (Πηγή: <http://geoweb2.sbg.ac.at>)



Εικόνα 2.3 Χάρτης με εγκατεστημένες αντλίες θερμότητας στην Ευρώπη για το έτος 2015 (Πηγή: www.eurobserv-er.org)

Οι θερμοκρασίες του εδάφους στην Ελλάδα είναι σχετικά υψηλές σε σχέση με άλλες περιοχές της Ευρώπης, λόγω της εντονότερης διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας (Μυλωνάς, 2013). Οι θερμοκρασίες σε βάθη από 0-150 m κυμαίνονται κατά μέσο όρο σε θερμοκρασίες από 16°C έως 22°C. Αυτό εξαρτάται και από την γεωγραφική θέση της περιοχής, όπως ενδεικτικά αναφέρεται στον Πίνακα 2.1 :

Πίνακας 2.1 Μέσες θερμοκρασίες του εδάφους στον ελλαδικό χώρο (Κ.Α.Π.Ε., 2012)

Βόρεια Ελλάδα	12 - 14 °C
Κεντρική Ελλάδα	13 – 15 °C
Νότια Ελλάδα	14 – 16 °C
Νησιώτικες περιοχές	15 – 17 °C
Ορεινές περιοχές	<2 °C

Στην Ελλάδα η αβαθής γεωθερμία αποτελεί τον μοναδικό κλάδο αξιοποίησης της γεωθερμίας που παρουσιάζει σημαντική έως θεαματική ανάπτυξη. Μετά το 1997, οπότε και εγκαταστάθηκαν οι πρώτες γεωθερμικές αντλίες θερμότητας στη Ρόδο και την Αττική, ο ρυθμός αύξησης του αριθμού των εγκατεστημένων μονάδων ήταν περίπου 10-15% ετησίως, με μια τάση σταθεροποίησης κατά την περίοδο της οικονομικής κρίσης. Τα αίτια της ανάπτυξης αυτής εντοπίζονται στην ευνοϊκή νομοθεσία, στις απλές διαδικασίες αδειοδότησης και στα οικονομικά κίνητρα που δίνονται στους χρήστες.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κυρίως για τον κλιματισμό χώρων σε συνδυασμό με παροχή ζεστού νερού χρήσης, αλλά υπάρχουν και λίγες εφαρμογές που αφορούν στην αντιπαγετική προστασία, τη θέρμανση εδάφους και την οινοποιία. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των περίπου 3000 εγκατεστημένων μονάδων στο τέλος του 2017 εκτιμάται προσεγγιστικά στα 160 MWth (Παπαχρήστου κ.ά., 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Ένα σύστημα αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας (ΓΑΘ) αποτελείται από τρία βασικά τμήματα :

- i. γεωεναλλάκτης (που τοποθετείται στην πηγή ενέργειας: έδαφος ή νερό)
- ii. αντλία θερμότητας
- iii. σύστημα θέρμανσης/δροσισμού εσωτερικού χώρου

Όπως προαναφέρθηκε, η αντλία θερμότητας (heat pump) είναι μια συσκευή που έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει θερμότητα αντίθετα από τη φυσική ροή της, από μια πηγή με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία σε μια άλλη με υψηλότερη. Αυτό επιτυγχάνεται με μηχανικό τρόπο (κατανάλωση έργου), αξιοποιώντας τις φυσικές (θερμοδυναμικές) ιδιότητες ενός ψυκτικού μέσου (refrigerant) ή αλλιώς ενός εργαζόμενου ρευστού. Για τη λειτουργία της απαιτείται η κατανάλωση μικρής ποσότητας εξωτερικής ενέργειας (ηλεκτρικό ρεύμα).

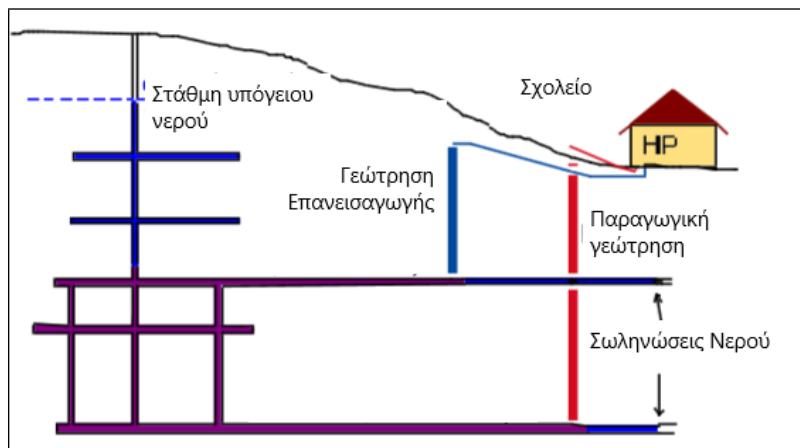
Οι τυπικές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον ατμοσφαιρικό αέρα (όπως για παράδειγμα τα κοινά κλιματιστικά), με το μειονέκτημα όμως ότι η απόδοσή τους μειώνεται σημαντικά για πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες.

Με τη χρήση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας αυτό το «πρόβλημα» επιλύεται, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας το έδαφος ή το υπόγειο και επιφανειακό νερό, των οποίων η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν αμετάβλητη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Μετά από αρκετές δεκαετίες χρήσης τους, δεν έχουν καταγραφεί σημαντικά προβλήματα στην απόδοσή τους ακόμα και σε αρκετά ακραίες καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 3.1 Διαφορετικοί τύποι ΓΑΘ (Πηγή: www.worldenergynews.gr)

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας μπορούν να λειτουργήσουν και με το νερό που υπάρχει σε εγκαταλειμμένα ορυχεία (Εικόνα 3.2), το οποίο έχει υψηλή θερμοκρασία σε όλη την διάρκεια του έτους και είναι εύκολα προσβάσιμο. Τέτοιες εφαρμογές έχουν γίνει σε χώρες όπως η Γερμανία και ο Καναδάς.



Εικόνα 3.2 Σχηματική απεικόνιση εκμετάλλευσης νερού από παλιό ορυχείο (Τροποποιημένο από Sanner, 2003)

3.2 ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ

Οι γεωεναλλάκτες αποτελούν το τμήμα της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας μέσω του οποίου γίνεται απορρόφηση ή εναπόθεση ενέργειας στο έδαφος ή το νερό. Αποτελούνται από σωληνώσεις που συνδέουν την πηγή θερμότητας με την αντλία θερμότητας και τελικά με το χώρο που πρόκειται να κλιματιστεί. Μέσα στο γεωεναλλάκτη συνήθως κυκλοφορεί ένα διάλυμα νερού και αντιψυκτικού υγρού. Συχνά ως αντιψυκτικά χρησιμοποιούνται οι γλυκόλες (αιθυλενο-γλυκόλη και προπυλενο-γλυκόλη), το χλωριούχο ασβέστιο, το οξικό κάλιο κ.α.

Η σύνδεση του γεωεναλλάκτη με το έδαφος ή τον υδάτινο πόρο ονομάζεται βρόγχος ή κύκλωμα. Ανάλογα με το είδος του γεωεναλλάκτη, τα κυκλώματα μπορεί να είναι:

- α) ανοιχτού τύπου (σύνδεση με τα υπόγεια νερά)
- β) κλειστού τύπου (σύνδεση με το υπέδαφος)
- γ) άμεσης εκτόνωσης ή απευθείας μετάδοσης της θερμότητας

Για την επιλογή του σωστού τύπου γεωεναλλάκτη θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, οι ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και ο διαθέσιμος χώρος για την τοποθέτησή του. Για τον κλιματισμό μεγάλων κτιρίων, είναι δυνατός ο συνδυασμός διαφορετικών τύπων γεωεναλλακτών,

3.3 ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Τα βασικά εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται μια αντλία θερμότητας (heat pump) είναι: ο εξατμιστής, ο συμπιεστής, ο συμπυκνωτής, η βαλβίδα εκτόνωσης και το ψυκτικό υγρό.

Το ψυκτικό υγρό είναι ένα οργανικό ρευστό που περιέχει άνθρακα, υδρογόνο και φθόριο (π.χ. διφθορομεθάνιο) με πολύ χαμηλό σημείο ζέσεως ($<<50^{\circ}\text{C}$). Λόγω των κατάλληλων θερμοδυναμικών του ιδιοτήτων, δεσμεύει την υπεδάφια θερμική ενέργεια απορροφώντας τη θερμότητα του αντιψυκτικού υγρού που φτάνει στην αντλία μέσω του γεωεναλλάκτη. Ακολουθεί ένα συνεχή κύκλο συμπύκνωσης και εκτόνωσης, δηλαδή μετατροπής του από την υγρή στην αέρια φάση και αντίστροφα, μεταφέροντας και αποβάλλοντας ή απορροφώντας θερμότητα. Το ψυκτικό υγρό δεν πρέπει να είναι τοξικό, να διαβρώνει τα εξαρτήματα της αντλίας ή να είναι εύφλεκτο και φυσικά πρέπει να είναι οικονομικό. Αρχικά, ως ψυκτικά υγρά χρησιμοποιήθηκαν οι χλωροφθοράνθρακες. Ωστόσο, επειδή η επίδρασή τους στο περιβάλλον είναι αρνητική, συμβάλλοντας στην καταστροφή του ατμοσφαιρικού όζοντος και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, με την υπογραφή της συνθήκης του Μόντρεαλ το 1999 απαγορεύτηκε η χρήση τους. Σήμερα, τα ψυκτικά υγρά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι το R17a, R134a, R407c, R410 κ.α.

Ο εξατμιστής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας, μέσα στον οποίο πραγματοποιείται η μετάδοση της θερμότητας από το αντιψυκτικό υγρό που κυκλοφορεί στο γεωεναλλάκτη (χειμώνας) ή από τον εσωτερικό χώρο που κλιματίζεται (καλοκαίρι) στο ψυκτικό υγρό της αντλίας. Λόγω απορρόφησης θερμότητας προκαλείται εξάτμιση του ψυκτικού υγρού.

Ο συμπιεστής είναι το τμήμα της αντλίας όπου αυξάνεται η πίεση του ψυκτικού και προκαλείται άνοδος της θερμοκρασίας του στο επιθυμητό επίπεδο.

Ο συμπυκνωτής είναι ο δεύτερος εναλλάκτης θερμότητας της αντλίας, μέσα στον οποίο το ψυκτικό μέσο συμπυκνώνεται και υγροποιείται εκ νέου, μεταφέροντας τη θερμότητά του στο σύστημα του εσωτερικού χώρου (το χειμώνα) ή το υπεδάφιο σύστημα (καλοκαίρι).

Η βαλβίδα εκτόνωσης χρησιμεύει για την αποσυμπίεση του ψυκτικού υγρού πριν αυτό οδηγηθεί πάλι στον εξατμιστή.

Μια αντλία θερμότητας μπορεί να λειτουργήσει με δύο διαφορετικούς τρόπους: είτε μεταφέροντας θερμότητα από έναν εσωτερικό χώρο στο περιβάλλον (ψύξη) είτε μεταφέροντας τη θερμική ενέργεια από το περιβάλλον στον εσωτερικό χώρο (θέρμανση).

Συνοπτικά, η λειτουργία ενός συστήματος αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας (ΓΑΘ) κατά τον κύκλο θέρμανσης μπορεί να περιγραφεί ως εξής (Εικόνα 3.3):

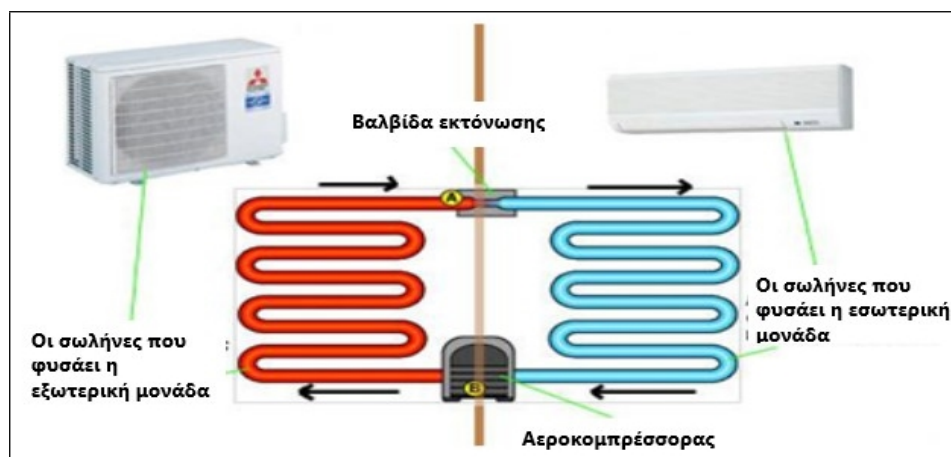
Το μηχανικό έργο κυρίως καταναλώνεται στον συμπίεστή, ώστε να επιτευχθούν οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται.

3.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι αντλίες θερμότητας μπορούν να διαχωριστούν σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με (Μπινιάρης, 2012):

- α. τον τρόπο λειτουργίας του συμπίεστή (συμπίεστες που λειτουργούν με μηχανές εσωτερικής καύσης ή συμπίεστες που λειτουργούν με τη θερμική ενέργεια χαμηλής και μέσης ενθαλπίας)
- β. τον τρόπο κατανομής στο χώρο των διαφόρων μηχανισμών της αντλίας θερμότητας (ενιαίες ή διαιρούμενες)
- γ. τον τρόπο εναλλαγής και λειτουργίας των αντλιών (σταθερού ή μεταβλητού κυκλώματος)
- δ. την ισχύ (μικρού, μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους)

Το κυριότερο και συνηθέστερο κριτήριο διάκρισής τους είναι η *προέλευση της πηγής και του αποδέκτη της θερμότητας* (αέρας, νερό, έδαφος, ήλιος). Η επιλογή της πηγής και του αποδέκτη θερμότητας σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από τις γεωλογικές και κλιματικές συνθήκες της περιοχής, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και τον τύπο του συστήματος. Έτσι, λοιπόν, υπάρχουν αντλίες αέρα-αέρα, όπως τα κοινά κλιματιστικά, (Εικόνα 3.4), αέρα-νερού, νερού-νερού, εδάφους-νερού και εδάφους-αέρα.



Εικόνα 3.4 Βασική αρχή λειτουργίας αντλίας αέρα-αέρα (Τροποποιημένο σχήμα από : <https://oaedhlectrologoi.blogspot.gr>)

Οι Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας, ονομάζονται, με βάση τον γεωεναλλάκτη, «κλειστού» ή «ανοικτού τύπου», ανάλογα με το αν συνδέονται με το υπέδαφος ή τα υπόγεια νερά, αντίστοιχα.

Οι ΓΑΘ που συνδέονται με επιφανειακά νερά είναι είτε “ανοικτού τύπου” είτε “κλειστού τύπου”, ανάλογα με τη θέση του γεωεναλλάκτη.

Οι ΓΑΘ που είναι συνδεδεμένες με το υπέδαφος (κλειστά κυκλώματα) χωρίζονται περαιτέρω σε κατακόρυφα και οριζόντια συστήματα, ανάλογα με τη γεωμετρία του υπόγειου εναλλάκτη (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

Οι ΓΑΘ που λειτουργούν με υπόγεια νερά συνήθως απαιτούν την ύπαρξη γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής. Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι σε περιοχές όπου υπάρχουν γεωθερμικοί ταμιευτήρες αρκετά χαμηλής θερμοκρασίας (25-35°C). Σε αυτήν την περίπτωση το θερμό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας (χωρίς να υπάρχει γεωεναλλάκτης), δηλαδή να οδηγηθεί στον εξαμιστή όπου θα αποδώσει τη θερμότητα του στο ψυκτικό υγρό της αντλίας θερμότητας.

3.3.1 Ανοικτού τύπου κυκλώματα

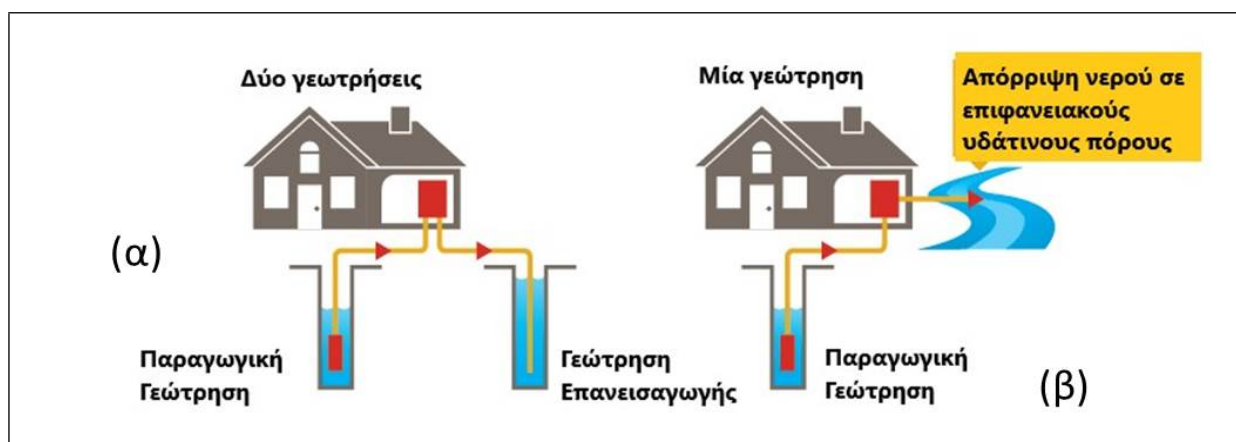
Στα συστήματα ανοικτού κυκλώματος χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας το υπόγειο νερό από γεωτρήσεις, πηγάδια ή εγκαταλειμμένα ορυχεία. Μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί και νερό από ποτάμια, θάλασσες ή λίμνες (επιφανειακά νερά). Για την εξασφάλιση της μέγιστης απόδοσης και της βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος, αλλά και την τήρηση των αυστηρών νομοθετικών πλαισίων για τους υδάτινους και τους ρηχούς γεωθερμικούς πόρους, θα πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις, όπως: η ποσότητα του νερού να είναι επαρκής, η ποιότητα του να είναι ικανοποιητική και να υπάρχει η δυνατότητα επανεισαγωγής του στον ταμιευτήρα.

➤ Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας που λειτουργούν με υπόγεια νερά

Σε αυτό τον τύπο ΓΑΘ συνήθως απαιτείται η ύπαρξη δύο γεωτρήσεων που θα συνδεθούν με την αντλία θερμότητας (άντλησης και επανεισαγωγής). Οι απαραίτητες προϋποθέσεις για τη χρήση τους είναι η υψηλή περατότητα των πετρωμάτων της περιοχής, η καλή ποιότητα του υπόγειου νερού (χαμηλές περιεκτικότητες σε σίδηρο(Fe) και υδρόθειο(H₂S)) και η σταθερή παροχή σε σημαντική ποσότητα καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου.

Η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων εισαγωγής και επανεισαγωγής εξαρτάται από τα πετρώματα της περιοχής, την ποσότητα του αντλούμενου νερού και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα. Κατά μέσο όρο, η απόσταση κυμαίνεται από 10m έως 15m (Μυλωνάς, 2013). Επίσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η κατεύθυνση της ροής του νερού για αποφυγή φαινομένων ανάμειξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις αντί για την διάνοιξη νέων γεωτρήσεων μπορεί να αξιοποιηθεί κάποια ήδη υπάρχουσα γεώτρηση ή το νερό από κάποιο πηγάδι, που έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική ελάττωση του κόστους της αρχικής εγκατάστασης.

Η χρήση αυτού του τύπου ΓΑΘ προτιμάται συνήθως σε περιοχές με πλούσια, ρηχή και συνεχή υδροφορία χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές στη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (Εικόνα 3.5α).



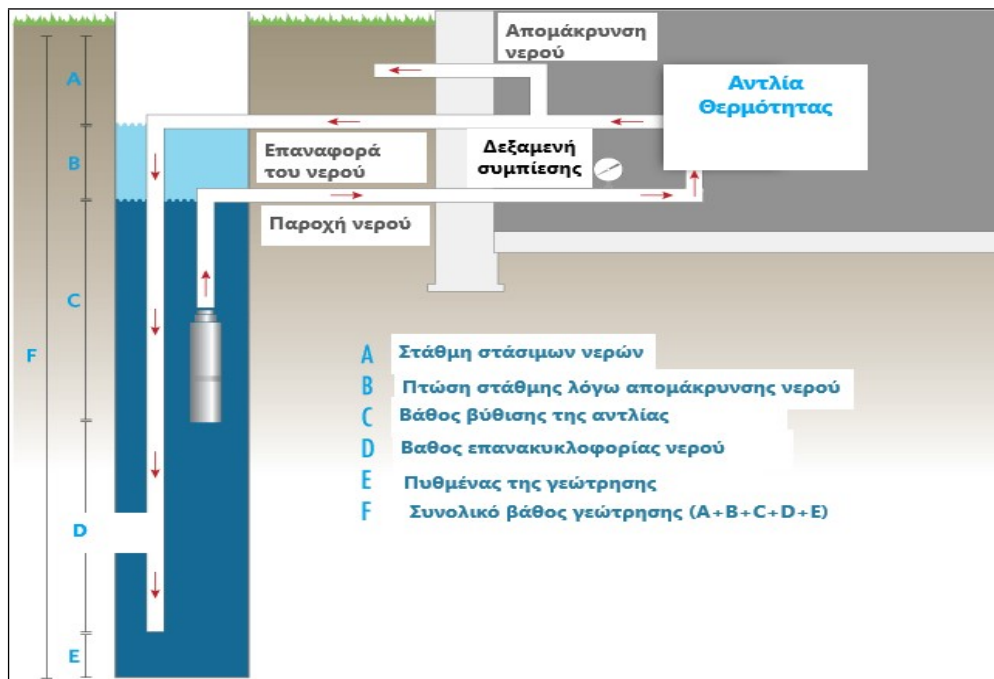
Εικόνα 3.5 Ανοιχτού τύπου κύκλωμα ΓΑΘ (Τροποποιημένο από www.groundbeneath.com)

➤ Συστήματα μόνιμης υδάτινης στήλης

Πρόκειται για ανοικτά συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν μόνο μία γεώτρηση, και αφορά συνήθως περιοχές με ρηχό βραχώδες υπόστρωμα με πλούσια υδροφορία. Τόσο η άντληση όσο και η επανεισαγωγή του νερού γίνεται μέσω της ίδιας γεώτρησης (Εικόνα 3.5β).

Τα πρώτα μέτρα εδαφικού υλικού αποτελούνται από χαλαρά ιζήματα, ενώ σε μικρό σχετικά βάθος, η γεώτρηση συναντά κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα (υπόβαθρο), συνήθως πυριγενή ή ισχυρά μεταμορφωμένα. Το νερό που αντλείται από τον πυθμένα της γεώτρησης οδηγείται στην αντλία θερμότητας και στη συνέχεια επιστρέφει προς το κατώτερο μέρος της γεώτρησης για να ξεκινήσει ένας νέος κύκλος (Εικόνα 3.6). Κατά την διάρκεια της διαδρομής που διανύει μέχρι να φθάσει τον πυθμένα της γεώτρησης, ανταλλάσσει θερμότητα με τα πετρώματα που περιβάλλουν τη γεώτρηση.

Για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος απαιτείται πολύ καλή και χωρίς διακυμάνσεις παροχή νερού, σχετικά μικρό βάθος στάθμης (ειδάλλως το κόστος άντλησης είναι απαγορευτικό) και πολύ καλή σύσταση του νερού ώστε να μην προκαλείται διάβρωση και επικαθήσεις στα μέρη της γεώτρησης και της αντλίας.



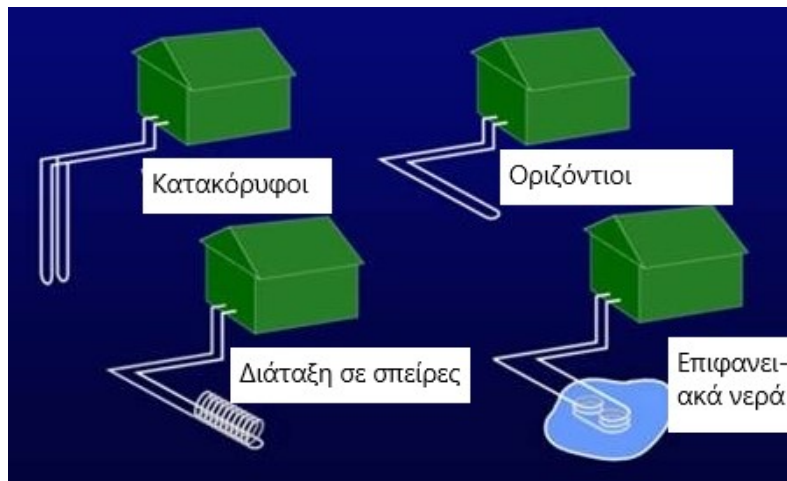
Εικόνα 3.6 Σχηματική απεικόνιση τρόπου λειτουργίας συστημάτων μόνιμης υδάτινης στήλης
(Τροποποιημένο από: <https://goodwinwellandwater.com>)

3.3.2 Κλειστού τύπου κυκλώματα

Τα συστήματα κλειστού τύπου ή βρόγχου λειτουργούν αξιοποιώντας τη θερμότητα του υπεδάφους και των πετρωμάτων που βρίσκονται σε μικρό βάθος. Στα συστήματα αυτά η γεωθερμική αντλία θερμότητας συνδέεται με ένα κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων (γεωεναλλάκτης) που βρίσκεται θαμμένο σε μικρά σχετικά βάθη. Μέσα στις σωληνώσεις κυκλοφορεί νερό ή ένα διάλυμα που περιέχει νερό και αντιψυκτικό υγρό, μέσω του οποίου γίνεται η μεταφορά της θερμότητας από το έδαφος.

Αυτά τα κυκλώματα είναι ιδανικά για περιοχές όπου ο υδροφόρος δεν έχει σταθερή παροχή κατά τη διάρκεια του έτους. Ανάλογα με τη διάταξη των γεωεναλλακτών, τα συστήματα κλειστού τύπου χωρίζονται σε οριζόντια, κατακόρυφα ή κωνικά. Η κυριότερη διαφορά μεταξύ τους είναι ότι για την τοποθέτηση των κατακόρυφων σωληνώσεων είναι απαραίτητη η διάνοιξη μίας ή περισσότερων γεωτρήσεων. Αντίθετα, στις οριζόντιες διατάξεις οι εκσκαφές είναι επιφανειακές ή μικρού βάθους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν η θεμελίωση του κτιρίου το επιτρέπει, ο γεωεναλλάκτης μπορεί να τοποθετηθεί στα θεμέλια του κτιρίου.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την συνολική απόδοση ενός τέτοιου συστήματος είναι οι κλιματικές συνθήκες, οι θερμικές ιδιότητες του εδάφους της περιοχής και το κόστος. Οι τύποι των γεωθερμικών συστημάτων κλειστού τύπου απεικονίζονται στην εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7 Τύποι κυκλωμάτων ΓΑΘ κλειστού τύπου
(Τροποποιημένο από: www.health.state.mn.us)

➤ Οριζόντιοι Εναλλάκτες

Στα οριζόντια συστήματα κλειστού κυκλώματος το δίκτυο των σωληνώσεων τοποθετείται σε βάθος 1m έως 2m και με διαφορετικές διατάξεις.

Στο αρχικό στάδιο είναι απαραίτητη η κατασκευή μιας τάφρου είτε με τη μορφή ορυγμάτων, συνήθως με πλάτος 20 έως 60 cm, είτε με ολική αφαίρεση του εδάφους από την περιοχή (Μπινιάρης, 2012). Στη συνέχεια τοποθετούνται οι σωληνώσεις, οι οποίες πριν καταλήξουν στην αντλία θερμότητας συγκεντρώνονται σε κεντρικότερους συλλέκτες. Μετά την τοποθέτηση των σωληνώσεων η περιοχή τις περισσότερες φορές καλύπτεται πρώτα από ένα στρώμα άμμου και έπειτα επανατοποθετείται το υλικό που αφαιρέθηκε κατά την εκσκαφή ώστε στο τέλος να μην υπάρχει καμία οπτική όχληση.

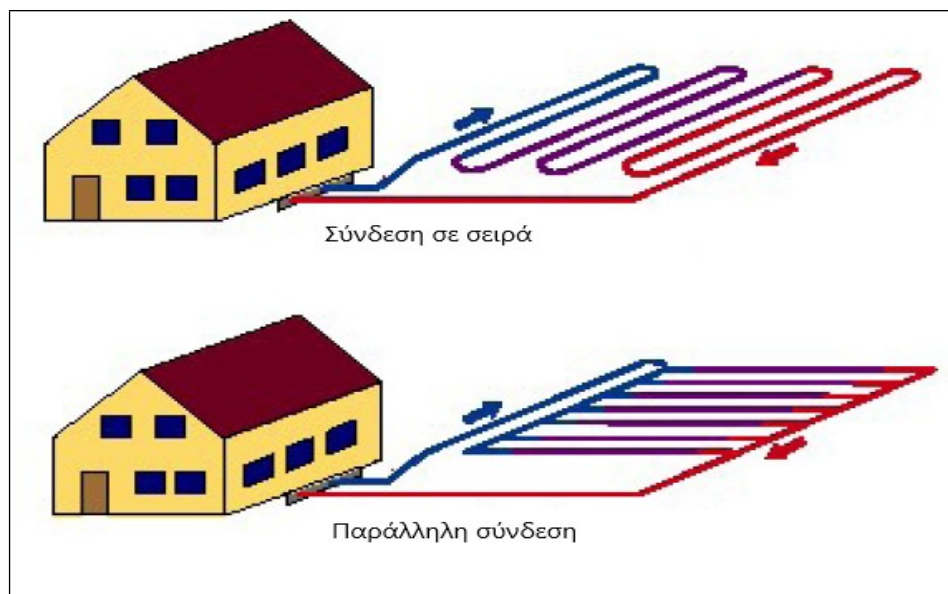


Εικόνα 3.8 Τοποθέτηση σωληνώσεων σε ορύγματα (Μυλωνάς, 2013)



Εικόνα 3.9 Τοποθέτηση σωληνώσεων σε τάφρο με ολική αφαίρεση του εδάφους (Μυλωνάς, 2013)

Ανάλογα με τον τρόπο διάταξης των σωληνώσεων, τα οριζόντια γεωθερμικά συστήματα κλειστού κυκλώματος χωρίζονται σε επιμέρους υποκατηγορίες : ενός ή δύο επιπέδων, σπειροειδή, αστεροειδή και στα υβριδικά συστήματα, στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν μεγάλες απαιτήσεις για ψύξη και θέρμανση. (Εικόνες 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14)



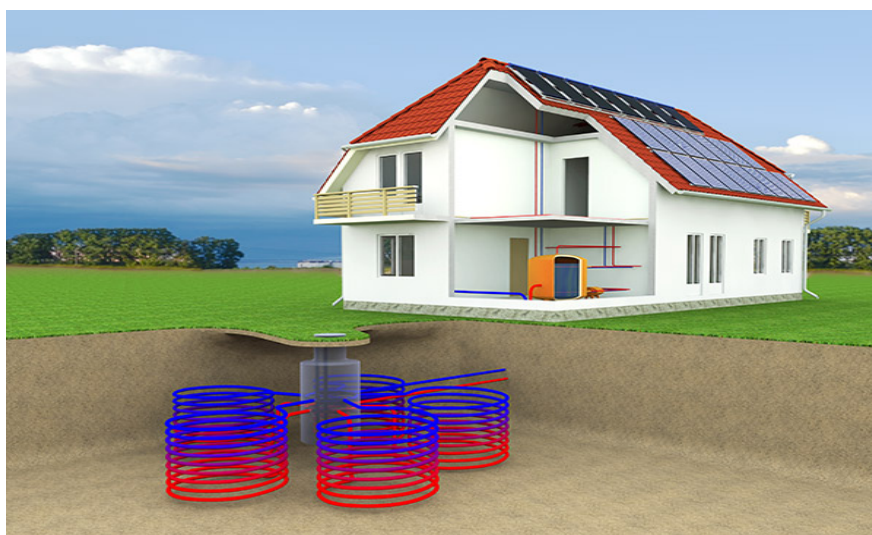
Εικόνα 3.10 Διατάξεις ενός επιπέδου (Πηγή: www.geothermie.de)



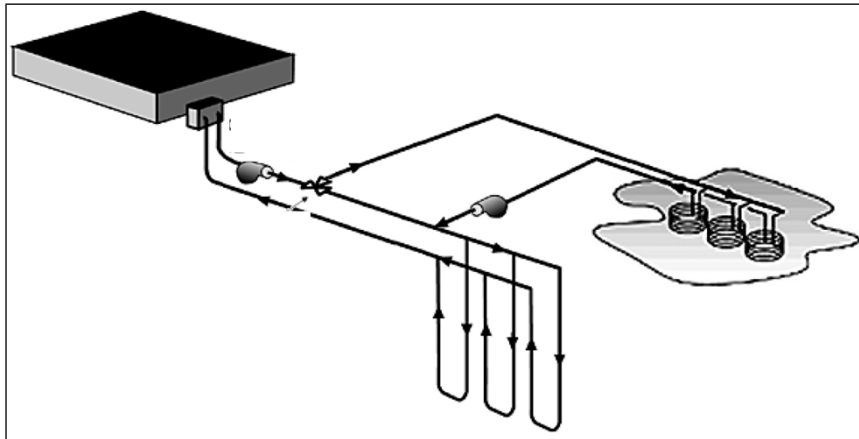
Εικόνα 3.11 Διάταξη δύο επιπέδων (Πηγή: www.pmmag.com)



Εικόνα 3.12 Σπειροειδής διάταξη, κάθετη και οριζόντια (Πηγή: www.geothermie.de)



Εικόνα 3.13 Αστεροειδής διάταξη (Πηγή: www.rpdarmstadt.hessen.de)



Εικόνα 3.14 Υβριδικό σύστημα (Πηγή: www.earthrivergeo.net)

Τα πλεονεκτήματα της οριζόντιας διάταξης είναι (Μυλωνάς, 2013):

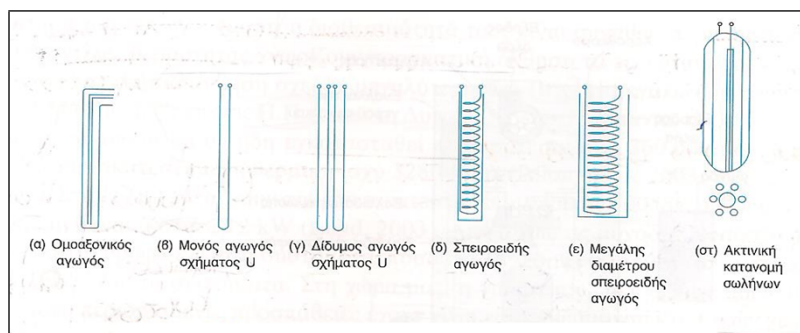
- i. σχετικά χαμηλό κόστος εκσκαφής των ορυγμάτων
- ii. ευκολότερη εγκατάσταση
- iii. συντελεστής απόδοσης COP= 4-4,5
- iv. πιο εύκολη παροχή άδειας
- v.

Τα μειονεκτήματα της οριζόντιας διάταξης είναι (Μυλωνάς, 2013):

- i. απαίτηση για μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια
- ii. μεγαλύτερες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας του υπεδάφους, λόγω του μικρού βάθους
- iii. σχετικά μικρή απόδοση κατά την ψύξη (δροσισμό)
- iv. περιορισμοί στη χρήση της άνωθεν επιφάνειας διότι μπορεί να επηρεαστεί το υπόγειο σύστημα

➤ Κατακόρυφοι Εναλλάκτες

Τα κατακόρυφα συστήματα αποτελούνται από ένα ζεύγος σωληνώσεων μικρής διαμέτρου (20-40 mm) που ενώνονται μεταξύ τους στο κάτω άκρο σε μορφή U και τοποθετούνται σε μια ή περισσότερες γεωτρήσεις. Οι διατάξεις των εγκαταστάσεων μπορεί να έχουν πολλές διαφορετικές δομές, όπως φαίνονται στην εικόνα 3.15, να είναι είτε παράλληλες είτε σε σειρά με τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όπως στα οριζόντια συστήματα.



Εικόνα 3.15 Κατακόρυφα συστήματα σωληνώσεων (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004)

Οι γεωτρήσεις πραγματοποιούνται συνήθως σε βάθη από 15 έως 200m. Το τελικό βάθος τους εξαρτάται από τη γεωλογία της περιοχής, τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου και το κόστος ανόρυξης της γεώτρησης. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών γεωτρήσεων είναι περίπου 2-3m, οπότε σε μία μικρή έκταση μπορούν να διανοιχθούν αρκετές και πυκνές γεωτρήσεις. Οι κατακόρυφοι εναλλάκτες ενδείκνυνται όταν πρέπει να καλυφθούν μεγάλες θερμικές ανάγκες αλλά δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χώρος, όπως συμβαίνει με τα μεγάλα κτίρια των αστικών κέντρων.

Μια πολύ μεγάλη εγκατάσταση τέτοιου τύπου ΓΑΘ βρίσκεται στη Γερμανία, με 154 γεωτρήσεις για τη θέρμανση των κεντρικών γραφείων της γερμανικής αεροπορικής εταιρίας «Deutsche Flugsicherung». Επίσης, στο New Jersey των Ηνωμένων Πολιτειών, κατασκευάστηκαν 400 γεωτρήσεις βάθους 130m για την τοποθέτηση των κατακόρυφων γεωεναλλακτών με σκοπό τον κλιματισμό του Κολλεγίου Richard Stockton με ΓΑΘ, (Sanner, 2003).

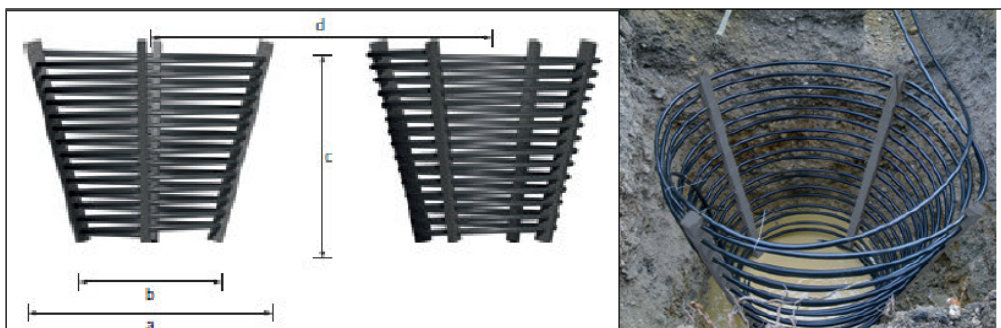
Τα πλεονεκτήματα της κατακόρυφης διάταξης είναι (Μυλωνάς, 2013):

- i. μικρό συνολικό μήκος σωληνώσεων
- ii. απαίτηση για μικρή έκταση γης
- iii. μικρή επίδραση της θερμοκρασίας του υπεδάφους από την εξωτερική
- iv. υψηλή και σταθερή αποδοτικότητα σε όλη την διάρκεια του έτους
- v. βαθμός απόδοσης (COP) είναι 4,5-5

Τα μειονεκτήματα της κατακόρυφης διάταξης είναι (Μυλωνάς, 2013) :

- i. αυξημένο αρχικό κόστος εξαιτίας της διάνοιξης γεωτρήσεων
- ii. ανάγκη για εξειδικευμένη εγκατάσταση
- iii. δυσκολότερη αδειοδότηση

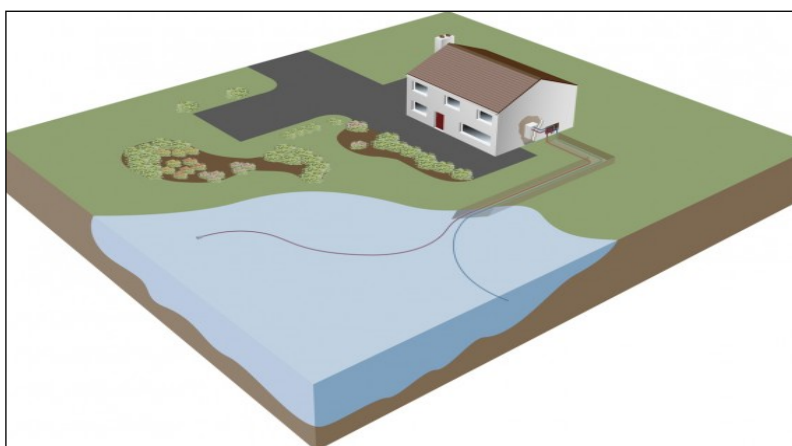
Υποπερίπτωση των κατακόρυφων αποτελούν οι κωνικοί εναλλάκτες (Εικόνα 3.16). Αποτελούν μια σχετικά καινούργια διάταξη κατακόρυφου κυκλώματος που χρησιμοποιείται αντί του οριζόντιου όταν δεν υπάρχει αρκετά μεγάλη διαθέσιμη έκταση. Επίσης, θεωρείται ως μία πιο οικονομική επιλογή σε σχέση με την κλασσική κατακόρυφη διάταξη.



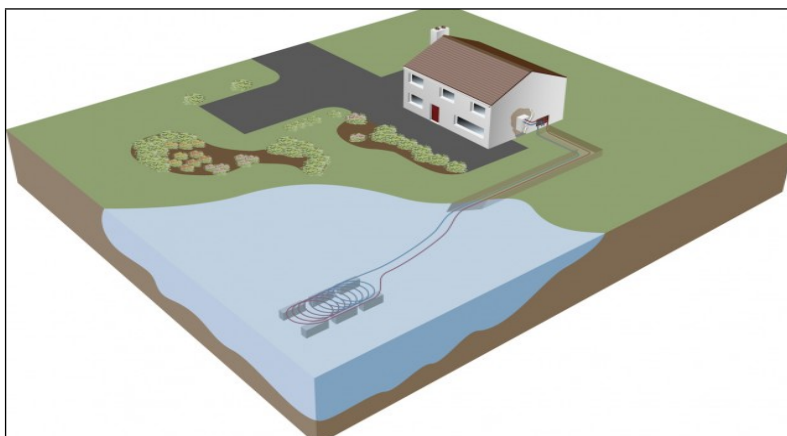
Εικόνα 3.16 Σχηματική απεικόνιση κωνικού γεωεναλλάκτη και τοποθέτηση κωνικού γεωεναλλάκτη (Μυλωνάς, 2013)

3.3.3 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας που λειτουργούν με επιφανειακά νερά

Αυτού του είδους τα συστήματα χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας συγκεντρώσεις επιφανειακών νερών (λίμνες, ποτάμια, θάλασσα κλπ). Μπορεί να είναι είτε ανοικτού τύπου είτε κλειστού (Εικόνες 3.17, 3.18), όταν το σύνολο του δικτύου των σωληνώσεων βρίσκεται εμβαπτισμένο μέσα στον επιφανειακό ταμιευτήρα. Οι σωληνώσεις για την πρόσληψη και απόληψη του νερού πρέπει να είναι απομακρυσμένες μεταξύ τους, ώστε να μην επηρεάζεται η θερμοκρασία του νερού. Στα γεωθερμικά συστήματα επιφανειακών νερών κλειστού τύπου, συχνά προτιμάται η σπειροειδής διάταξη (Εικόνα 3.18).



Εικόνα 3.17 Γεωθερμική αντλία θερμότητας ανοικτού κυκλώματος που λειτουργεί με επιφανειακά νερά (www.kensaheatpumps.com)



*Εικόνα 3.18 Γεωθερμική αντλία θερμότητας κλειστού κυκλώματος που λειτουργεί με επιφανειακά νερά
(www.kensaheatpumps.com)*

Η θάλασσα παρουσιάζει σχετικά μικρό εύρος μεταβολής της θερμοκρασίας της, είτε κατά τη διάρκεια ενός 24ωρου είτε ετησίως, ανάλογα βέβαια με τη γεωγραφική της θέση. Όσον αφορά στις λίμνες, θα πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις για την αξιοποίησή τους στη γεωθερμία, που κυρίως αφορούν στο βάθος (τουλάχιστον 1,5m), τον όγκο και την ποιότητα του νερού. Τα ποτάμια προτιμώνται σπανιότερα λόγω της ασταθούς ροής τους. Όταν οι σωληνώσεις βυθίζονται κάτω από το νερό ενός ρηχού επιφανειακού πόρου, θα πρέπει να τοποθετούνται σε συγκεκριμένο βάθος κάτω από τον πυθμένα, ώστε να μην παγώνουν κατά τους χειμερινούς μήνες (Μυλωνάς, 2013).

Το κυριότερο πλεονέκτημα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας που λειτουργούν με επιφανειακά νερά είναι το μειωμένο κόστος εγκατάστασης διότι δεν απαιτείται η ανόρυξη γεωτρήσεων.



*Εικόνα 3.19 Γεωεναλλάκτες που βυθίζονται κάτω από φυσικούς ή τεχνητούς επιφανειακούς υδάτινους πόρους
(Μυλωνάς, 2013)*

3.3.4 Κυκλώματα άμεσης εκτόνωσης

Τα κυκλώματα άμεσης εκτόνωσης ή απευθείας μετάδοσης της θερμότητας αποτελούν κλειστού τύπου διατάξεις, όπου οι ανταλλαγές θερμότητας γίνονται απευθείας μεταξύ του ψυκτικού υγρού της αντλίας και του υπεδάφους. Το ψυκτικό υγρό κυκλοφορεί μέσα σε χάλκινες σωληνώσεις και σπείρες που βρίσκονται εγκατεστημένες στο υπέδαφος (Εικόνα 3.20). Ο χαλκός επιλέγεται επειδή αποτελεί ένα υλικό με εξαιρετικά μεγάλη θερμική αγωγιμότητα.

Κατά τον κύκλο θέρμανσης (τον χειμώνα) το έδαφος παίζει το ρόλο του εξατμιστή. Δηλαδή, το ψυκτικό μέσο με τη μορφή υγρού εισέρχεται στις υπεδάφειες σωληνώσεις και απορροφά θερμότητα απευθείας από το έδαφος, εξατμίζεται και στη συνέχεια οδηγείται στον συμπυκνωτή, ακολουθώντας από εκεί και πέρα την κλασσική διαδικασία μέσα στην αντλία θερμότητας. Ενώ κατά τον κύκλο ψύξης (το καλοκαίρι), το έδαφος παίζει ρόλο του συμπυκνωτή. Το ψυκτικό μέσο, που εξέρχεται από τον συμπιεστή της αντλίας με τη μορφή υπέρθερμου ατμού, οδηγείται στο κύκλωμα σωληνώσεων του εδάφους. Εκεί προσφέρει θερμότητα στο ψυχρότερο υπέδαφος, οπότε συμπυκνώνεται και μετατρέπεται πάλι σε υγρό, το οποίο μεταφέρεται στην εσωτερική μονάδα και εκτονώνεται, οπότε αποκτά μικρότερη πίεση και θερμοκρασία, απορροφώντας θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο. Με τον τρόπο αυτό, δια μέσω του εξατμιστή, εξατμίζεται και οδηγείται στο συμπιεστή με τη μορφή κορεσμένου ατμού.

Η τοποθέτηση των χάλκινων σπειρών γίνεται σε κάθετες ή οριζόντιες τάφρους. Όταν η εκσκαφή είναι κάθετη, πραγματοποιείται σε βάθη 3-4m και απαιτούνται 2,5-4 m² για ένα (1) kW θερμικής ενέργειας. Αντιθέτως, όταν η εκσκαφή είναι οριζόντια, γίνεται σε βάθη 1,5-3m και απαιτείται επιφάνεια 12-15 m²/kW. (Μπινιάρης, 2012)

Το βασικό μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι ο αυξημένος κίνδυνος διάβρωσης των μεταλλικών σωληνώσεων. Επίσης, λόγω των μεγάλων θερμοκρασιακών μεταβολών του εδάφους στο μικρό βάθος που είναι τοποθετημένοι οι σωλήνες, είναι πιθανή η μετατροπή της εδαφικής υγρασίας σε πάγο. Τα κυκλώματα άμεσης εκτόνωσης βρίσκουν καλύτερη εφαρμογή και απόδοση σε αμμώδη εδάφη.



Εικόνα 3.20 Σύστημα άμεσης εκτόνωσης (Πηγή: http://geothermalvalley.com/about_geothermal.php)

3.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Τα πλεονεκτήματα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε σχέση με τα πιο παραδοσιακά συστήματα θέρμανσης και δροσισμού είναι τα εξής: (Μυλωνάς, 2013; Μπινιάρης 2012; Ζούφιος, 2011)

- i. συνδυασμός θέρμανσης και δροσισμού, δηλαδή λειτουργίας που δεν μπορεί να επιτευχθεί με τα καλοριφέρ (λέβητας πετρελαίου ή φυσικού αερίου)
- ii. χαμηλό κόστος κλιματισμού (εξοικονόμηση 55-70% σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα)
- iii. 3 έως 5 φορές υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης (πετρέλαιο, κλιματιστικά)
- iv. υψηλός βαθμός ασφάλειας, διότι δεν υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης εφόσον δεν χρησιμοποιείται κάποιο καύσιμο
- v. φιλικό προς το περιβάλλον σύστημα, αφού δεν εκλύεται CO₂ και άλλοι ρύποι
- vi. αθόρυβη λειτουργία
- vii. συνεχή παροχή ενέργειας σε όλη τη διάρκεια του έτους, με ταυτόχρονη παροχή ζεστού νερού

- viii. εγκατάσταση που δεν απαιτεί μεγάλες επιφανειακές εκτάσεις όπως τα φωτοβολταϊκά, τα αιολικά κλπ.
- ix. μικρή κυκλοφοριακή επιβάρυνση, αφού δεν απαιτείται η μεταφορά καυσίμων
- x. δωρεάν παροχή ενέργειας από το περιβάλλον (έδαφος ή νερό)
- xi. δεν απαιτείται συντήρηση του γεωεναλλάκτη, παρά μόνο περιοδικός έλεγχος της αντλίας θερμότητας

Τα μειονεκτήματα των ΓΑΘ είναι :

- i. υψηλό κόστος εγκατάστασης, η απόσβεση του οποίου όμως γίνεται συνήθως μέσα στα πρώτα 5-7 έτη λειτουργίας
- ii. δυσκολία στην επιδιόρθωση κάποιας διαρροής μέσα στα κλειστά κυκλώματα
- iii. ανάγκη για αρκετά μεγάλη παροχή νερού στα συστήματα ανοιχτού κυκλώματος

Στους Πίνακες 3.1 και 3.2, παρουσιάζονται αντίστοιχα τα ενεργειακά πλεονεκτήματα και τα οφέλη της ψύξης-θέρμανσης με ΓΑΘ έναντι ενός συμβατικού συστήματος. Τα δεδομένα αφορούν παλαιότερο έτος, είναι όμως ενδεικτικά για σύγκριση.

Πίνακας 3.1: Το ενεργειακό πλεονέκτημα των συστημάτων Γ.Α.Θ. σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης χώρων (καλοριφέρ, κλιματιστικό) (Καρύτσας, 2012)

Σύστημα ΓΑΘ	Ισχύς	Ώρες λειτουργίας	Ενέργεια	Συντελεστής απόδοσης	Απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια	Ισοδύναμη πρωτογενής ενέργεια
	kW	h	kWh	SPF	kWh _e	kWh
Θέρμανση	20	1.600	32.000	4,5	7.111	26.337
Ψύξη	16	1.200	19.200	3,5	5.846	20.317
Σύνολο	-	-	-		12.597	46.655

Συμβατικό σύστημα	Ισχύς	Ώρες λειτουργίας	Ενέργεια	Συντελεστής απόδοσης	Απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια	Ισοδύναμη πρωτογενής ενέργεια
	kW	h	kWh	SPF	kWh _e	kWh
Θέρμανση	20	1.600	32.000	0,85	37.647	37.647
Ψύξη	16	1.200	19.200	3	6.400	23.704
Σύνολο	-	-	-		44.047	61.351

Πίνακας 3.2: Το ενεργειακό και οικονομικό όφελος από συστήματα ΓΑΘ σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης χώρων. (Καρύτσας, 2012)

Ετήσια εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας από ΓΑΘ	14.696 kW _{th}
Ποσοστό ετήσιας εξοικονόμησης ενέργειας της ΓΑΘ σε σχέση με συμβατικό σύστημα	23,95 %
Ετήσια εξοικονόμηση	1,40 TΠΠ
Ετήσια μείωση εκπομπών CO ₂	4,49 Tn CO ₂
Ετήσιο κόστος συστήματος ΓΑΘ (λειτουργίας και συντήρησης)	1.912 €
Ετήσιο κόστος συμβατικού συστήματος (λειτουργίας και συντήρησης)	5.585 €
Ετήσιο οικονομικό όφελος από τη λειτουργία της ΓΑΘ	3.673 €
Ποσοστό ετήσιας μείωσης κόστους από τη λειτουργία του συστήματος ΓΑΘ	65,77 %

Κάποιες γενικές προϋποθέσεις και περιορισμοί που αφορούν την επιλογή και εγκατάσταση της αντλίας θερμότητας, ώστε το σύστημα αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας να είναι συμφέρον είναι οι εξής (Μαρούδης, 2014):

- i. Θα πρέπει να εξετάζεται εάν η μέγιστη ισχύς της αντλίας είναι ίση ή μεγαλύτερη από το θερμικό φορτίο του κτιρίου. Αυτό εξετάζεται σε συνδυασμό με την απόδοση και το κόστος, διότι μπορεί να είναι πιο συμφέρον οικονομικά να συνδυαστεί μια αντλία θερμότητας μικρότερης ισχύος με μία άλλη μέθοδο θέρμανσης.
- ii. Εάν η αντλία θερμότητας συνδυαστεί με άλλο σύστημα θέρμανσης/δροσισμού, τότε θα πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον το 40-50% των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μέχρι μια συγκεκριμένη θερμοκρασία λειτουργεί η αντλία θερμότητας (συνήθως νερού-αέρα) και από εκείνη την θερμοκρασία και κάτω είτε λειτουργούν και τα δύο συστήματα ή σταματά να λειτουργεί η αντλία θερμότητας. Ο συνδυασμός δύο διαφορετικών μεθόδων γίνεται συνήθως για λόγους ασφαλείας.
- iii. Η μέγιστη θερμική ενέργεια που μπορεί να παράγει η αντλία θερμότητας εξαρτάται από τη διαφορά στη θερμοκρασία μεταξύ της πηγής και του νερού που προσφέρεται για θέρμανση.

3.5 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

➤ Θέρμανση κολυμβητηρίου στην Ήλιδα του νομού Ηλείας.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιήθηκαν στην περιοχή της Ηλίδας για την θέρμανση πισίνας ολυμπιακών διαστάσεων με έκταση 1050 m² και χωρητικότητας 2205 m³. Οι θερμικές ανάγκες και η παροχή ζεστού νερού για την πισίνα και για τα αποδυτήρια καλύπτονται από δύο γεωθερμικές αντλίες θερμότητας που αποδίδουν 400kW η κάθε μία. Και οι δύο γεωθερμικές αντλίες θερμότητας είναι ανοιχτού κυκλώματος, με την τροφοδοσία να γίνεται από δύο γεωτρήσεις βάθους 100m με παροχή 70m³/h και θερμοκρασία νερού στους 18°C. Μετά την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας, το νερό με θερμοκρασία 10°C επανεισάγεται στον υδροφόρο. Το κόστος της εγκατάστασης ανήλθε σε 500.000 €, ενώ ο χρόνος απόσβεσης εκτιμήθηκε σε ένα περίπου έτος (Papachristou et al., 2016).

➤ Θέρμανση και ψύξη του ξενοδοχείου “Αμαλία” στο Ναύπλιο

Το ξενοδοχείο “Αμαλία” στο Ναύπλιο καλύπτει συνολική έκταση 9000 m². Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας εγκαταστάθηκαν για τη θέρμανση και τον κλιματισμό των χώρων του ξενοδοχείου και για την παροχή ζεστού νερού σε όλο το κτίριο.

Τοποθετήθηκαν τέσσερα συστήματα ανοιχτού τύπου, με μία γεώτρηση παραγωγής και μια γεώτρηση επανεισαγωγής στο βάθος των 60m, το καθένα. Το υπόγειο νερό έχει αρχική θερμοκρασία 18°C και μέσω των αντλιών θερμότητας παράγονται 740 kW για θέρμανση και 566 kW για δροσισμό με τη χρήση αερόθερμων (fan coils). (Papachristou et al., 2016)



Εικόνα 3.21 Ξενοδοχείο Αμαλία στο Ναύπλιο (www.trivago.gr)



Εικόνα 3.22 και 3.23 Το μηχανοστάσιο και οι αντλίες θερμότητας του ξενοδοχείου (Μαρούδης, 2014)

➤ Θέρμανση κεντρικών πεζοδρομίων στο Καρπενήσι (Ν. Ευρυτανίας)

Το 2015 στο Καρπενήσι Ευρυτανίας εφαρμόστηκε ένα πρωτοποριακό για την Ελλάδα πρόγραμμα αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιήθηκαν για τη θέρμανση των κεντρικών πεζοδρομίων του Καρπενησίου ώστε να μην παγώνουν και να παραμένουν ασφαλή για τους πεζούς. Το σύστημα ενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία του αέρα πέφτει κάτω από τους 7°C ή όταν η θερμοκρασία του εδάφους πέσει κάτω από τους 4°C.

Για τη λειτουργία του συστήματος (κλειστό κύκλωμα) πραγματοποιήθηκαν 18 γεωτρήσεις σε βάθος 100m, όπου το υπόγειο νερό έχει σταθερή θερμοκρασία 12-14°C. Μέσω της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας το νερό που τελικά κυκλοφορεί στις σωληνώσεις κάτω από τα πεζοδρόμια φτάνει στους 28°C. Το πρώτο έτος λειτουργίας του συστήματος αυτού ήταν το 2015-2016. (Papachristou et al.,2016)

➤ Σύστημα θέρμανσης και ψύξης σε οиноποιείο (Ν. Ηλείας)

Το πρώτο οиноποιείο στην Ελλάδα το οποίο έχει μηδενικές εκπομπές αερίων και μηδαμινά ποσοστά μόλυνσης του περιβάλλοντος βρίσκεται στο χωριό Λαντζόι του νομού Ηλείας στην ΒΔ Πελοπόννησο. Για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών συνδυάζονται οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας με φωτοβολταϊκά πάνελ.

Η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του κρασιού, την αλκοολική ζύμωση, για τη θέρμανση, τον δροσισμό και την ψύξη στις εγκαταστάσεις προσφέρεται από ένα σύστημα δύο γεωθερμικών αντλιών θερμότητας με παροχή 57kW για θέρμανση και 53kW για ψύξη, η κάθε

μία. Οι υπόγειοι γεωεναλλάκτες σε βάθος 100m διακινούν νερό με θερμοκρασία 16°C το χειμώνα και 20°C το καλοκαίρι. Το κόστος της εγκατάστασης ανήρθε σε 60.000 €, με χρόνο απόσβεσης 4-5 χρόνια. (Papachristou et al.,2016)

➤ Σύστημα θέρμανσης και ψύξης σε κατάστημα της αλυσίδας SM AB Βασιλόπουλος

Η ελληνική εταιρία AB Βασιλόπουλος προκειμένου να ενισχύσει το ενεργειακό της προφίλ και να ελαττώσει τις εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα κατασκεύασε ένα οικολογικό κατάστημα στην Σταμάτα Αττικής. Ο εσωτερικός χώρος του καταστήματος καλύπτει έκταση 1334 m².

Το σύστημα ΓΑΘ παρέχει 101kW για θέρμανση το χειμώνα και 87kW για δροσισμό το καλοκαίρι, με συντελεστή απόδοσης COP=4,35 το χειμώνα και COP=4,04 το καλοκαίρι, με μηδενικό θόρυβο.

Η γεωθερμική αντλία θερμότητας συνδέεται με ένα οριζόντιο κύκλωμα γεωεναλλάκτη έκτασης 1900m² που βρίσκεται κάτω από το χώρο του parking. Η θερμοκρασία του υπόγειου νερού κυμαίνεται από 5-18°C το χειμώνα και 15-28°C κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. (Papachristou et al.,2016)

➤ Θέρμανση εδάφους για ανοικτή καλλιέργεια στην Χρυσούπολη Καβάλας

Στην περιοχή της Χρυσούπολης Καβάλας είναι πολύ διαδεδομένη η καλλιέργεια σπαραγγιών. Σε κάποιες από τις εκτάσεις αυτές (~200 στρέμματα) χρησιμοποιήθηκαν γεωθερμικές αντλίες θερμότητας νερού-νερού με σκοπό την θέρμανση των εδαφών για πρωϊμηση σπαραγγιών. Οι θερμικές ανάγκες για την έκταση αυτή ανέρχονται σε 2,2 MW.

Κατασκευάστηκαν γεωτρήσεις σε μικρά σχετικά βάθη (30-100m), οι οποίες παρέχουν νερό με θερμοκρασία 16°C έως 19,5°C. Όταν η θερμοκρασία του νερού ξεπεράσει τους 18°C, γίνεται απόληψη θερμότητας με εξάτμιση σε δύο στάδια, βελτιστοποιώντας την ορθολογική διαχείριση των χρησιμοποιούμενων υδάτων.

Η μέγιστη θερμοκρασία του νερού που εξέρχεται από την αντλία θερμότητας και οδηγείται στις υπόγειες σωληνώσεις κάτω από το ριζικό σύστημα των φυτών, δεν ξεπερνά τους 35°C. Ο συντελεστής απόδοσης (COP) κυμαίνεται μεταξύ 4.0 και 5.0.

Στην περίπτωση της Χρυσούπολης, η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας αποδεδειγμένα παρέχει την απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την πρώιμη παραγωγή σπαραγγιών σε πολύ χαμηλότερο κόστος έναντι άλλων συμβατικών μεθόδων θέρμανσης (Papachristou et al.,2016).

➤ Κτίριο Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (Θεσσαλονίκη)

Η μεγαλύτερη εφαρμογή αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας βρίσκεται στο κτίριο της Περιφέρειας της Κεντρικής Μακεδονίας στη Θεσσαλονίκη. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας παρέχουν 850kW, καλύπτοντας τις ανάγκες συνολικής επιφάνειας 22.000 m². Η εξοικονόμηση αγγίζει το ποσοστό του 70% σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα (φυσικό αέριο, πετρέλαιο). Πρόκειται για ένα υβριδικό σύστημα με δύο αντλίες θερμότητας, οι οποίες συνδέονται με τρία διαφορετικού τύπου συστήματα γεωεναλλακτών:

- i. οριζόντιο κλειστό κύκλωμα τύπου slinky (42.000 μέτρα σωλήνα κάτω από την θεμελίωση του κτιρίου)
- ii. κλειστό κατακόρυφο σύστημα ομοαξονικών γεωεναλλακτών
- iii. ανοιχτό κατακόρυφο με γεωτρήσεις άντλησης και επανεισαγωγής

➤ Άλλες εφαρμογές ΓΑΘ

Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν χρησιμοποιηθεί για θέρμανση πισίνων (Βέροια, Χαλάνδρι Αττικής), σχολείων (Σέρρες, Θεσσαλονίκη, Αθήνα, Χαλκιδική, Μεσολόγγι, Ναύπακτο), ξενοδοχείων (Σύβοτα, Πήλιο), επαγγελματικών χώρων (Θήβα, Θεσσαλονίκη) και σε καζίνο (Αττική).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΣΙΘΩΝΙΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

4.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΒΟΥΡΒΟΥΡΟΥ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

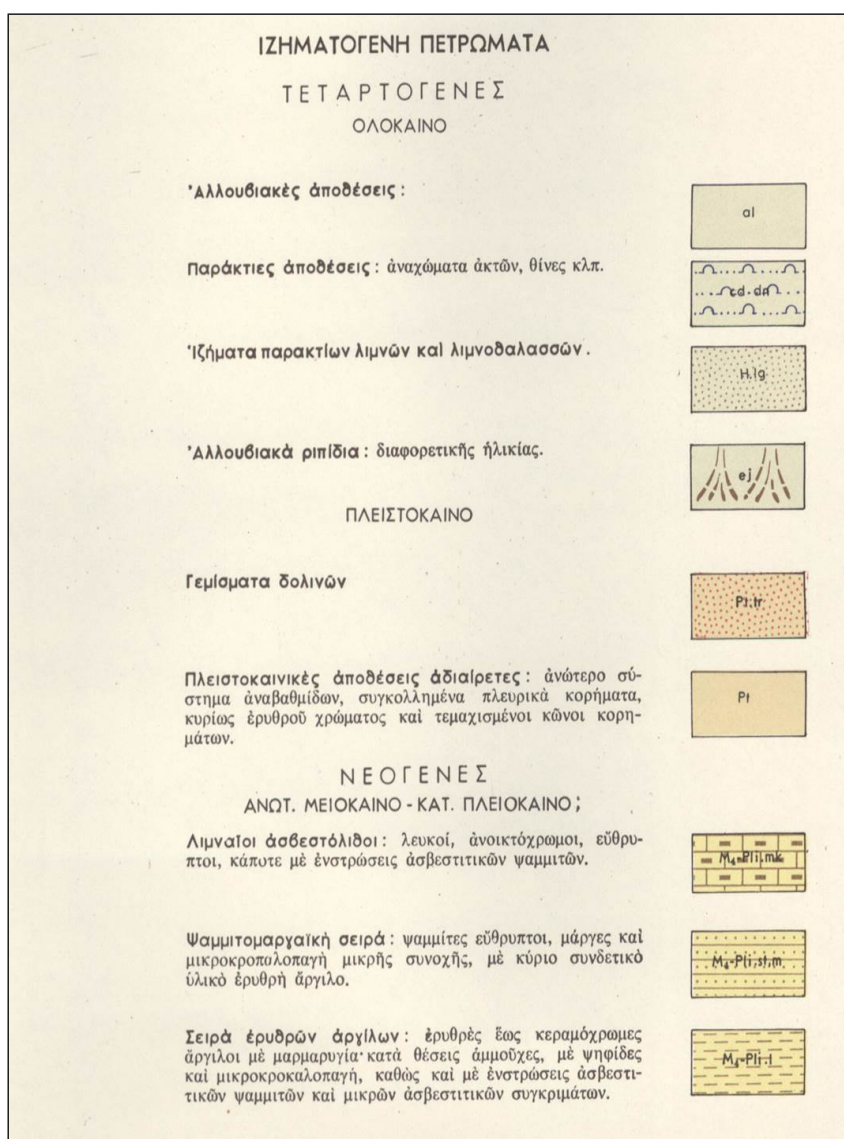
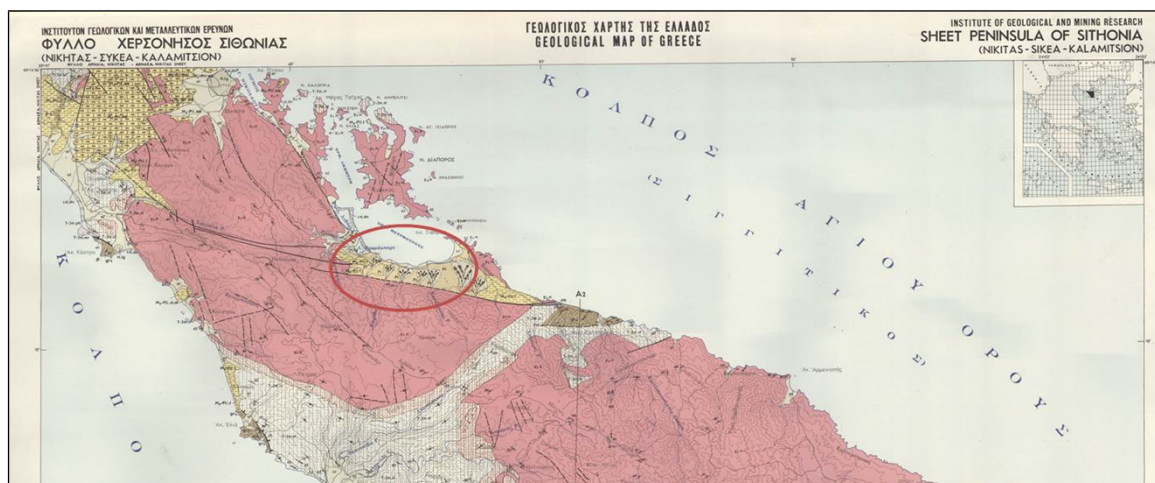
Το έτος 2018 η εταιρία «ΓΕΩΕΡΕΥΝΑ» ανέλαβε την εγκατάσταση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας για τη θέρμανση και το δροσισμό εξοχικής κατοικίας με συνολική έκταση 450m², στον οικισμό «Βουρβουρού» της Σιθωνίας (Ν. Χαλκιδικής).

Η νεοαναγειρόμενη εξοχική κατοικία βρίσκεται σε οικόπεδο στην παραλιακή ζώνη του οικισμού, με συντεταγμένες 40° 11' 18" N και 23° 46' 57" E. (Εικόνα 4.1)



Εικόνα 4.1 Απεικόνιση θέσης οικοπέδου όπου τοποθετήθηκε η ΓΑΘ (Google Earth)

Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της περιοχής 1:50.000, (ΦΥΛΛΟ: ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΣ ΣΙΘΩΝΙΑΣ), στη συγκεκριμένη περιοχή επικρατούν τεταρτογενή χαλαρά ιζήματα που αποτελούνται από αργιλοίλυες, άμμους, ψηφίδες, χάλικες και κροκάλες. Τα υλικά αυτά προέρχονται από τη διάβρωση και απόπλυση παλαιότερων σχηματισμών που στη συνέχεια μεταφέρθηκαν εκεί μέσω χειμάρρων (Εικόνα 4.2). Χαρακτηρίζονται ως σχηματισμοί μέτριας έως υψηλής διαπερατότητας και φιλοξενούν υδροφορείς μεγάλης δυναμικότητας.



Εικόνα 4.2 Απόσπασμα από Γεωλογικό Χάρτη 1.50000 ΙΓΜΕ, ΦΥΛΛΟ «Χερσόνησος Σιθωνίας»

Το σύστημα αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας περιλαμβάνει κατακόρυφο γεωεναλλάκτη κλειστού τύπου και δύο αντλίες θερμότητας NIBE F1345, με ισχύ 60 kW η κάθε μία

και συντελεστή απόδοσης (COP) 4.22. Κάθε αντλία μπορεί να καλύψει ενεργειακές ανάγκες έως 540kW. Πριν την επιλογή της αντλίας θερμότητας και τη λειτουργία του συστήματος διενεργήθηκε δοκιμή θερμικής απόκρισης (Thermal Response Test ή Geothermal Response Test-GeRT) για την εκτίμηση θερμικών παραμέτρων του εδάφους και του γεωεναλλάκτη.

Η ερευνητική-δειγματοληπτική γεώτρηση που είχε διανοιχθεί στα πλαίσια της γεωτεχνικής μελέτης για την κατασκευή της οικίας, έφτασε σε βάθος 18m και συνάντησε εναλλαγές ιλυώδους άμμου με συστηματική παρουσία χαλικιών. Η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα μετρήθηκε σε βάθος 1,10m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Για την τοποθέτηση των σωληνώσεων του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη πραγματοποιήθηκαν 20 γεωτρήσεις βάθους 100m και διαμέτρου διάτρησης Φ 9". Στα πρώτα μέτρα συνάντησε χαλαρά υλικά (Εικόνα 4.3) και στη συνέχεια τον γρανοδιορίτη της Σιθωνίας. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρέθηκε στο βάθος των 6-8m, με την θερμοκρασία του νερού περίπου στους 18°C.

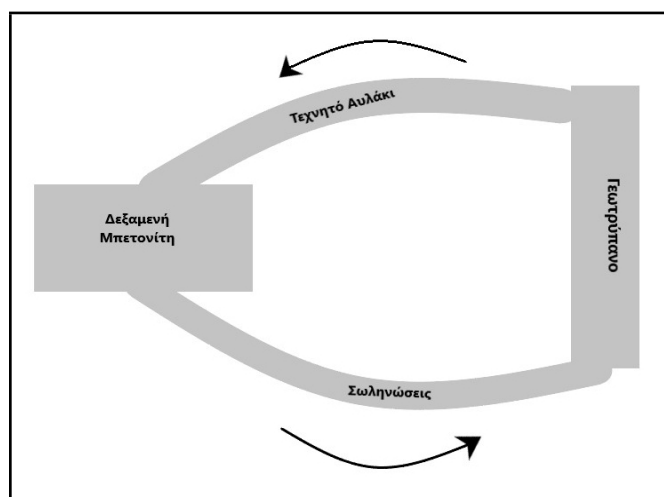


Εικόνα 4.3 Υλικά (άμμοι και αμμο-άργιλοι) που εντοπίστηκαν σε βάθη από 0-32m

Το γεωτρύπανο που χρησιμοποιήθηκε καθώς και η διάταξη των απαιτούμενων εγκαταστάσεων στο χώρο γύρω από τις γεωτρήσεις, φαίνονται στις Εικόνες 4.4 και 4.5, αντίστοιχα. Η Εικόνα 4.6 δείχνει τη δεξαμενή του μπεντονίτη, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως υλικό ενεμάτωσης, αλλά και για να συμβάλει στην ομαλή διεξαγωγή της διαδικασίας ανόρυξης των γεωτρήσεων.



Εικόνα 4.4 Εγκατάσταση γεωτρύπανου πριν την κατασκευή των γεωτρήσεων για την τοποθέτηση του γεωεναλλάκτη



Εικόνα 4.5 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης των εγκαταστάσεων γύρω από τις γεωτρήσεις



Εικόνα 4.6 Δεξαμενή μπετονίτη

Οι σωληνώσεις που τοποθετήθηκαν μέσα στις γεωτρήσεις είναι διπλού τύπου-U (δίδυμος αγωγός). Ο μπεντονίτης που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό ενεμάτωσης (για την πλήρωση των κενών και για ευκολότερη μεταφορά θερμότητας) ήταν τύπου RAGEO fill blue και τοποθετήθηκε στους μαύρους σωλήνες. Οι πράσινοι σωλήνες, από όπου διέρχεται το ρευστό κυκλοφορίας του συστήματος, είναι διαμέτρου Φ3” και κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο (PE-Xa REHAU) (Εικόνα 4.7). Για την καταλληλότερη και σωστότερη τοποθέτηση των σωληνώσεων χρησιμοποιήθηκαν ειδικά βαρίδια (βάρους 75kg) (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.7 Τα είδη των σωληνώσεων (αγωγών) που χρησιμοποιήθηκαν



Εικόνα 4.8 Τοποθέτηση βαριδίων στις σωληνώσεις του εναλλάκτη

4.2 ΔΟΚΙΜΗ-ΤΕΣΤ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (TRT- THERMAL RESPONSE TEST)

4.2.1 Εισαγωγικές Έννοιες

➤ Θερμική αγωγιμότητα (λ)

Ο όρος θερμική αγωγιμότητα αναφέρεται στην ιδιότητα ενός υλικού που προσδιορίζει πόσο εύκολα ή δύσκολα επιτρέπει τη διάδοση της θερμικής ενέργειας στο εσωτερικό του. Υλικά με μεγάλη θερμική αγωγιμότητα άγουν με γρήγορους ρυθμούς τη θερμότητα, ενώ, στα υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα η θερμότητα διαδίδεται με αργούς ρυθμούς.

Τα υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα χρησιμοποιούνται ως δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας, σε αντίθεση με τα υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιούνται ως μονωτές. Γενικά, η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από την θερμοκρασία, το πορώδες, την υγρασία, το είδος και το μέγεθος των πόρων αλλά όχι από το βάθος. Η μονάδα μέτρησης της στο σύστημα S.I. είναι $W/(mK)$. Θεωρητική εκτίμηση της τιμής του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1 (Ζούφιος, 2011)

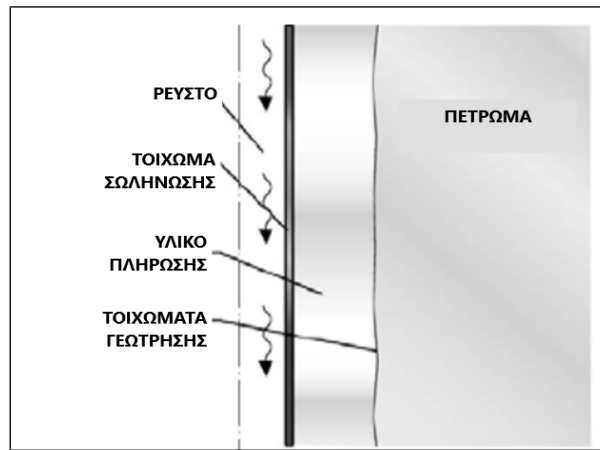
Πίνακας 4.1: Θεωρητική εκτίμηση του δείκτη θερμικής αγωγιμότητας (λ) ανάλογα με την λιθολογία (Ζούφιος, 2011)

Ξηρά, μη συνεκτικά εδάφη,	$\lambda < 1,5$
Υδροφόρα Ιζήματα, συνήθη πετρώματα,	$\lambda = 1,5-3,0$
Συνεκτικά πετρώματα, μεγάλη υδροφορία,	$\lambda > 3,0$

➤ Θερμική αντίσταση (R_b)

Η θερμική αντίσταση εκφράζει τη δυσκολία μεταφοράς της θερμικής ενέργειας από τα τοιχώματα της γεώτρησης στο ρευστό μεταφοράς που υπάρχει στο εσωτερικό των σωληνώσεων του γεωεναλλάκτη. Ως υλικό πλήρωσης της γεώτρησης προτιμάται ένα θερμοαγώγιμο ένεμα (συνήθως μίγμα νερού, άμμου, μπετονίτη), με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα σε σχέση με το καθαρό νερό, ώστε να είναι πιο αποτελεσματική η εναλλαγή θερμότητας.

Η θερμική αντίσταση εξαρτάται από τον τρόπο διευθέτησης των καναλιών ροής και τις θερμικές ιδιότητες του υλικού, όμως είναι ανεξάρτητο από τις ποσότητες θερμότητας που μεταφέρονται. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της θερμικής αντίστασης τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση του συστήματος. Η μονάδα μέτρησής της στο σύστημα S.I. είναι m^2K/W .



Εικόνα 4.9 Απεικόνιση βασικής διάταξης στο εσωτερικό της γεώτρησης (Πηγή: Ζούφιος, 2011)

➤ **Θερμοκρασία υπεδάφους**

Η σωστή εκτίμηση της διακύμανσης της θερμοκρασίας του υπεδάφους θεωρείται απαραίτητη για την ορθή σχεδίαση και λειτουργία ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας. Πραγματοποιούνται κάθε λίγα μέτρα θερμομετρήσεις στο εσωτερικό της γεώτρησης (Εικόνα 4.10) και στο τέλος προκύπτει η μέση θερμοκρασία του εδάφους μέχρι το επιθυμητό βάθος. Για τη σωστή καταγραφή της θερμοκρασίας θα πρέπει να έχει παρέλθει ικανό διάστημα από το πέρας των εργασιών ανόρυξης της γεώτρησης, έτσι ώστε να έχει επέλθει θερμική ισορροπία.



Εικόνα 4.10 Θερμοκρασία του εδάφους πριν την δοκιμή TRT (Τροποποιημένο από Marc Sauer et al., 2012)

4.2.2 Δοκιμή Θερμικής Απόκρισης (TRT)

Η δοκιμή θερμικής απόκρισης βοηθά στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με:

- i. τον αριθμό και το βάθος των απαιτούμενων γεωτρήσεων
- ii. τις διαστάσεις του γεωεναλλάκτη
- iii. τα πραγματικά ποσά θερμότητας που θα χρειαστεί να παραχθούν από το σύστημα
- iv. την ισχύ της αντλίας θερμότητας

Η δοκιμή αυτή θεωρείται συνήθως απαραίτητη για μεγάλες εγκαταστάσεις ώστε να αποφεύγονται οι υπο- ή υπερ- διαστασολογήσεις, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και, πιθανότατα, την απόδοση του γεωθερμικού συστήματος.

Τα αποτελέσματα της TRT, μετά την επεξεργασία τους από εξειδικευμένο επιστημονικό προσωπικό, εισάγονται σε ειδικά λογισμικά, τα οποία υπολογίζουν τις απαραίτητες διαστάσεις του γεωεναλλάκτη. Σε ήδη εγκατεστημένο εξοπλισμό υπάρχει η δυνατότητα υπόδειξης κακοτεχνιών ή επιβεβαίωσης της σωστής λειτουργίας και καλής απόδοσης.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, διοχετεύονται στον γεωεναλλάκτη, μέσω μιας κινητής μονάδας, σταθερές ποσότητες θερμότητας για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (αρκετές ώρες), ανάλογα με τη διάμετρο της γεώτρησης, τη θερμική αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα του εδάφους ή του νερού. Η εναλλαγή θερμότητας γίνεται μέσω του θερμοαγωγίμου ενέματος που γεμίζει τη γεώτρηση. Στη συνέχεια καταγράφονται οι θερμοκρασίες εισόδου-εξόδου του υγρού, οι παροχές και η καταναλισκόμενη ισχύς και εξάγονται συμπεράσματα για τη θερμική αγωγιμότητα (λ) και τη θερμική αντίσταση του γεωεναλλάκτη.

Αναλυτικότερα, η διαδικασία που ακολουθείται σε μία δοκιμή θερμικής απόκρισης είναι η εξής:

- i. Πραγματοποιείται σύνδεση του γεωεναλλάκτη με την πειραματική κινητή διάταξη. Στο εσωτερικό του γεωεναλλάκτη κυκλοφορεί το μίγμα αντιψυκτικού, με την βοήθεια μιας αντλίας.
- ii. Πριν ξεκινήσει η δοκιμή θερμικής απόκρισης μετράται η θερμοκρασία του εδάφους, όταν το έδαφος βρίσκεται σε θερμική ισορροπία.
- iii. Θερμαίνεται το υγρό που πρόκειται να κυκλοφορήσει μέσα στις σωληνώσεις.
- iv. Ξεκινά η καταγραφή των θερμοκρασιών εισόδου-εξόδου για χρονικό διάστημα από 48 έως 100 ώρες.
- v. Γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων με λογισμικά (αριθμητικές προσομοιώσεις)

4.2.3 Εφαρμογή της δοκιμής TRT στη Βουρβουρού (Ν. Χαλκιδικής)

Οι δοκιμές θερμικής απόκρισης στην εγκατάσταση ΓΑΘ στη Βουρβουρού Χαλκιδικής πραγματοποιήθηκαν από επιστημονικό προσωπικό του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). Η χρονική διάρκεια των μετρήσεων διήρκησε συνολικά τέσσερις (4) ημέρες, από 27/6/2017 έως 30/6/2017.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις απεικονίζεται στην Εικόνα 4.11, μέσω της οποίας έγινε προσομοίωση της λειτουργίας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σε συνθήκες ψύξης, δεδομένου ότι η απαίτηση του ιδιοκτήτη της κατοικίας ήταν κατά βάση για δροσισμό των εσωτερικών χώρων κατά τη θερινή περίοδο.

Ο καθαρός χρόνος μετρήσεων ήταν 246.900 sec (2,86 ημέρες). Η διάταξη GeRT είχε μέση παροχή $2,21\text{m}^3/\text{h}$, πίεση 1,90 bar, αρχική μέση θερμοκρασία $20,90^\circ\text{C}$ και ογκομετρική θερμοχωρητικότητα $3,03\text{ MJ/m}^3/\text{K}$.



Εικόνα 4.11: Η διάταξη για το Geothermal Response Test (GeRT)

Κατά τη λειτουργία της διάταξης GeRT, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των θερμοκρασιών εισόδου-εξόδου στον γεωεναλλάκτη υπό σταθερή παροχή. Η καταγραφή και η αποθήκευση των τιμών της θερμοκρασίας έγινε με ένα καταγραφέα δεδομένων (data logger) Minimer με βήμα 10min. (Εικόνα 4.12)

Η επεξεργασία, ο υπολογισμός των δεδομένων και η αποθήκευση των νέων στοιχείων, της θερμοκρασίας, της παροχής και της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε έγινε μέσω καταγραφέα Zenner με βήμα 5min. (Εικόνα 4.12)



Εικόνα 4.12 Καταγραφείς δεδομένων: αριστερά: Minimer και δεξιά: Zenner

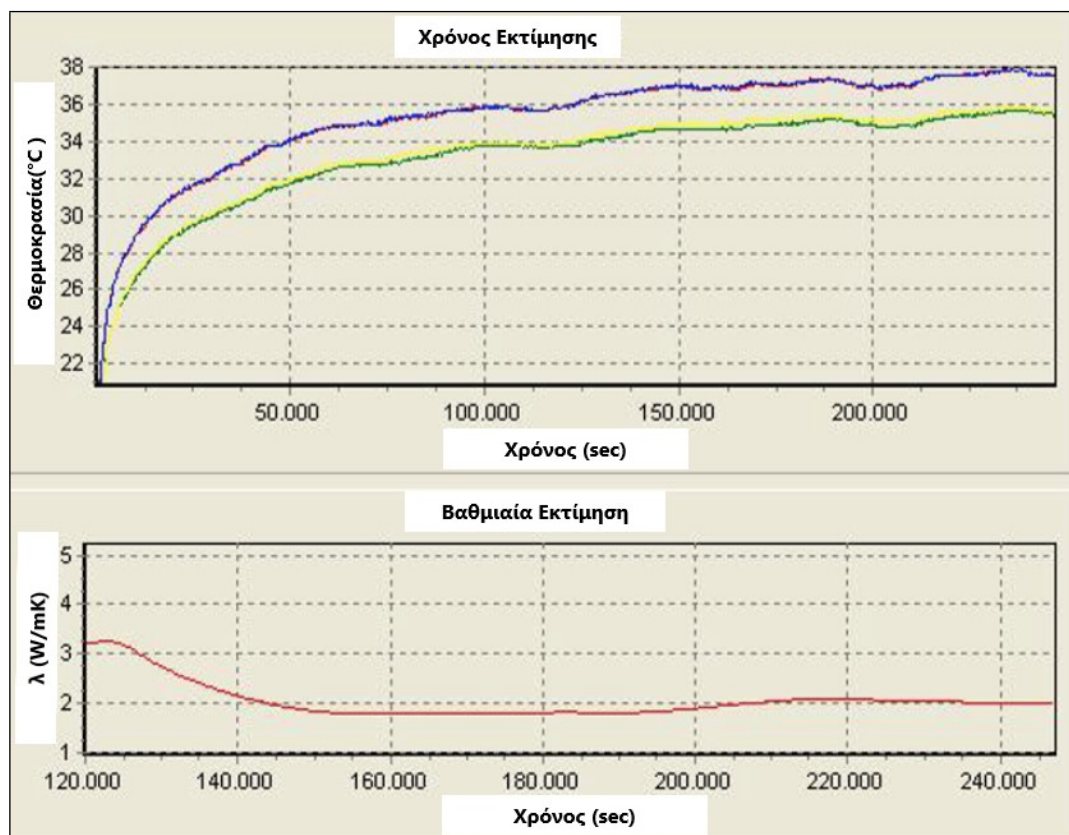
➤ Αποτελέσματα

Η Εικόνα 4.13 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της δοκιμής θερμικής απόκρισης του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας στη Βουρβουρού.

Basic Data:	
Length of Tube [m]:	100
Radius of Borehole [m]:	0,1143
Heating Output [W]:	5576
t_0 [°C]:	20,90
ρC_p [MJ/m ³ /K]:	3,03
Evaluation Period:	
Start of Test:	27.06.2017 13:30:00
End of Test:	30.06.2017 10:05:00
from:	27.06.2017 13:30:00
to:	30.06.2017 10:05:00
Duration [Seconds]:	246900
Heating Work [kWh]	7587,637
7970,541	
Progress:	
0%	
Result:	
☒ T1	2.007
☒ T2	2.026
☒ T3	2.000
☒ T4	2.018
Mean Lambda:	2.013
Mean Thermal Borehole resistance:	0.152

Εικόνα 4.13: Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου TRT

Η μέση τιμή θερμικής αγωγιμότητας (λ) υπολογίστηκε σε 2,013 W/mK και η μέση θερμική αντίσταση εντός της γεώτρησης (R_b) ίση με 0,152 mK/W



Εικόνα 4.14 : Διαγράμματα αξιολόγησης των μετρήσεων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, και μετά την αξιολόγηση τους με χρήση ειδικού λογισμικού (Εικόνα 4.14) , προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Με βάση το διάγραμμα της βαθμιαίας εκτίμησης, η θερμική αγωγιμότητα στο γεωεναλλάκτη τείνει να σταθεροποιηθεί στην τιμή $\lambda = 2,013$ W/mK μετά τα 150.000 sec μετρήσεων. Η τιμή αυτή προσεγγίζει την αναμενόμενη θεωρητική τιμή για άμμους, αμμοάργιλους και γρανιοδιορίτη.
- Σύμφωνα με τις ανωτέρω τιμές της θερμικής αγωγιμότητας, τη διαφορά θερμοκρασίας εισόδου εξόδου στο γεωεναλλάκτη, την παροχή, το βάθος του γεωεναλλάκτη και το είδος των γεωλογικών σχηματισμών, εκτιμάται ότι η απόδοση του συγκεκριμένου γεωεναλλάκτη είναι της τάξεως των 55,80-57,50 W/m (λειτουργία ψύξης), για 1800 h λειτουργίας του συστήματος ετησίως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέχρι πριν μερικές δεκαετίες, η θερμότητα της γης μπορούσε να αξιοποιηθεί μόνο σε περιοχές αποδεδειγμένης και αξιόλογης γεωθερμικής ανωμαλίας, δηλαδή εκεί όπου υπάρχουν προσβάσιμοι υδροθερμικοί πόροι. Η ανάπτυξη και εφαρμογή των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας άλλαξε τη γεωθερμική αγορά παγκοσμίως, επιτρέποντας, πρακτικά, την αξιοποίηση της γήινης θερμότητας σε κάθε σημείο του πλανήτη. Με τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, αξιοποιούνται ακόμη και οι χαμηλές ή μέτριες θερμοκρασίες του υπεδάφους και η γη (έδαφος, πετρώματα ή υπόγεια/επιφανειακά νερά) χρησιμοποιείται ως πηγή ή χώρος αποθήκευσης θερμότητας, ανάλογα με τις απαιτήσεις για θέρμανση ή δροσισμό, αντίστοιχα.

Μια γεωθερμική αντλία θερμότητας δεν παράγει ηλεκτρική ενέργεια, αλλά σίγουρα συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσής της, ανάλογα με τον συντελεστή απόδοσής της. Πέραν αυτού, η σημερινή τεχνολογία των ΓΑΘ προσδίδει σε ένα σύστημα αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων συστημάτων θέρμανσης/δροσισμού, όπως χαμηλό κόστος λειτουργίας και ακόμη πιο χαμηλό κόστος συντήρησης του εξοπλισμού, μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ασφάλεια (δεν υπάρχουν καύσιμες ύλες), μεγάλη διάρκεια ζωής (τουλάχιστον 20 χρόνια για την αντλία και πολλές δεκαετίες για τον γεωεναλλάκτη) και σχετικά μικρή περίοδος απόσβεσης του αρχικού κόστους εγκατάστασης.

Βασική παράμετρος για τη σωστή λειτουργία ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας είναι βέβαια ο ορθός σχεδιασμός του, η κατάλληλη επιλογή της αντλίας θερμότητας και η σωστή διαστασολόγηση του γεωεναλλάκτη. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η χρήση όλων των διαθέσιμων εργαλείων που συμβάλουν στην βέλτιστη εκτίμηση των τοπικών συνθηκών της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθεί ένα σύστημα ΓΑΘ.

Πλέον, μετά από αρκετές δεκαετίες χρήσεις τους, τα συστήματα βεβαιωμένα θεωρούνται από τα πλέον αποδοτικά για τον κλιματισμό μικρών ή και πολύ μεγάλων χώρων και οι εφαρμογές τους σταδιακά επεκτείνονται και σε τομείς όπως ο αγροτικός.

Απόδειξη όλων των παραπάνω αποτελεί το γεγονός ότι τα 2/3 της παγκόσμιας γεωθερμικής αγοράς, όσον αφορά στην εγκατεστημένη ισχύ, αφορούν τα ρηχά γεωθερμικά συστήματα. Ανάλογη κατάσταση επικρατεί και στην Ελλάδα, όπου στο τέλος του 2017 υπήρχαν κατ' εκτίμηση περισσότερες από 3000 εγκατεστημένες μονάδες ΓΑΘ, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 160 MWth, αποτελώντας τον τομέα αξιοποίησης της γεωθερμίας με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη.

Τα συστήματα ΓΑΘ στην Ελλάδα επιλέγονται κυρίως για καινούρια μεγάλα κτίρια, μονοκατοικίες (αστικές ή εξοχικές), κολυμβητήρια κλπ, αλλά και για πρωτοποριακές για τη χώρα χρήσεις, όπως η από-παγοποίηση πεζοδρομίων ή η θέρμανση εδάφους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε η εγκατάσταση ενός συστήματος ΓΑΘ, σε εξοχική κατοικία στον οικισμό «Βουρβουρού» της Σιθωνίας (Ν. Χαλκιδικής). Η συνολική έκταση του κτιρίου είναι 450m^2 και επιλέχθηκε σύστημα κατακόρυφου γεωεναλλάκτη τύπου U, ο οποίος τοποθετήθηκε σε γεώτρηση βάθους 100m. Η γεώτρηση διέτρησε στα πρώτα μέτρα τα χαλαρά ιζήματα που επικρατούν στην παραλιακή ζώνη της περιοχής (ΒΑ Σιθωνία) και στη συνέχεια τον γρανοδιορίτη της Σιθωνίας.

Για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της κατοικίας (έως 1080 kW) τοποθετήθηκαν δύο αντλίες θερμότητας με συντελεστή απόδοσης $\text{COP} = 4.22$. Πριν την επιλογή των αντλιών και την έναρξη λειτουργίας του συστήματος, πραγματοποιήθηκε Δοκιμή Θερμικής Απόκρισης (Thermal Response Test –TRT) με σκοπό την εκτίμηση των θερμικών παραμέτρων του εδάφους και του γεωεναλλάκτη.

Σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις, αλλά και τα τοπικά γεωλογικά δεδομένα της περιοχής, αναμένεται η άρτια λειτουργία και απόδοση του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

- Kępińska, B. (2008) *Geothermal Energy Use in Europe*. 30th Anniversary Workshop, Geothermal Training Programme, Reykjavík, Iceland, 26-27 August 2008, 14 p.
- Papachristou, M., Mendrinou, D., Dalampakis, P., Arvanitis, A., Karytsas, C. and Andritsos, N. (2016) *Geothermal Energy Use, Country Update for Greece*. European Geothermal Congress 2016, Strassburg, France, 19-24 Sept. 2016, 14 p.
- Rybach, L., Brunner, M., Gorhan, H. (2000): *Swiss Geothermal Update 1995-2000*. In: Proc. World Geothermal Congress, Japan 2000, 413-426 p.
- Sanner, B. (2003) *Shallow Geothermal Energy*, International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy. GHC Bulletin, Germany, 2003, 21p.
- Sauer, M., Sanner, B., Mands, E., Grundmann, E. and Fernández, A. (2012) *Thermal Response Test: Practical Experience and Extended Range of Application*. The 12th International Conference on Energy Storage, Innostock. Spain, 9 p.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Γιάσλα, Α. και Καρλάφτη, Μ.-Ε. *Γεωθερμία και Δυνατότητες Εφαρμογής της Χρήσης της Κατοικίας με Ενδοδαπέδια Θέρμανση*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας Τεχνολογικό Ίδρυμα Καβάλας, Καβάλα, Ιούνιος 2012, 64p.
- Ζούφιος, Ι. *Μελέτη Γεωθερμικού Συστήματος, Ανάλυση της Μεθόδου Thermal Response Test (TRT) και Εύρεση των Δύο Βασικών Παραμέτρων Σχεδιασμού Γεωθερμικών Συστημάτων με Χρήση Κατάλληλου Μοντέλου Πάνω σε Πραγματικά Δεδομένα*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Κρήτη (2011), 114 p.
- ΙΓΜΕ, ΦΥΛΛΟ ΧΑΡΤΗ 1:50000 «ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΣ ΣΙΘΩΝΙΑΣ», Έκδοση 1978

- Καρύτσας, Κ. *Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας και η συμβολή της στην Αειφόρο Ανάπτυξη*. Παρουσίαση από την ημερίδα “Πρότυπες Περιφέρειες για μια Βιώσιμη Ευρώπη” Άργος, Ελλάδα, 12 Μάρτιου 2012 (διαθέσιμη στην ιστοσελίδα www.cres.gr)
- Μαρούδης, Β. *Πρακτικές Εφαρμογές Γεωθερμίας σε Κτηριακές Εγκαταστάσεις στην Ελλάδα*. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Κρήτη (2014), 123 p.
- Μπινιάρης, Γ. *Εξοικονόμηση Ενέργειας Θέρμανσης-Κλιματισμού με Γεωθερμία σε Κατοικία*. Διπλωματική Εργασία, Ηράκλειο (2012), 204 p.
- Μυλωνάς, Ν. *Συστήματα Αξιοποίησης Εδάφους για Θέρμανση/Ψύξη Κατοικιών. Βασικές Αρχές Σχεδιασμού Οριζόντιου Γεωεναλλάκτη Θερμότητας*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ηράκλειο (2013), 167 p.
- Παπαχρήστου Μ., Ανδρίτσος, Ν., Αρβανίτης Α., Δαλαμπάκης Π. *Εξέλιξη της αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα και την Ευρώπη*, Πρακτικά 11^{ου} Συνεδρίου ΙΗΤ, Θεσσαλονίκη (2018)
- Τσιλιγκιρίδης, Γ. *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη (2007)
- Φυτίκας, Μ. και Ανδρίτσος, Ν. *Γεωθερμία*. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη (2004), 416 p.

Διαδουκτιακές Πηγές

<http://www.teetkm.gr>

<http://www.ee.teihal.gr>

<http://www.iene.gr>

<http://users.uoa.gr>

<http://www.geo.auth.gr>

<http://me1065.wikidot.com>

<http://cres.gr>