ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ,ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ THERMAL RESPONSE TEST(TRT) ΚΑΙ ΕΥΡΕΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΑΝΩ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.

ΖΟΥΦΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ Α.Μ 2005030026

Εξεταστική Επιτροπή : Καλαϊτζάκης Κ. (**Επιβλέπων**)

Σταυρακάκης Γ.

Κουτρούλης Ε.

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Ευχαριστίες

Κατ‘ αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κο. Κώστα Καλαϊτζάκη, για την καθοδήγηση του και τη βοήθειά του σε κάθε φάση δημιουργίας της εργασίας αυτής, καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη στιγμή που τον συνάντησα.

Επίσης τον κο. Ιωάννη Ζερβαντωνάκη, διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π και Υποψήφιο Διδάκτορα στο MIT για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε όλο αυτόν τον καιρό. Η προθυμία του να μου λύσει οποιαδήποτε απορία και τα πειραματικά δεδομένα που μου έστειλε συνετέλεσαν σε μεγάλο βαθμό στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής.

Ακόμη τα άλλα δύο μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κο. Γεώργιο Σταυρακάκη και τον κο. Ευτύχιο Κουτρούλη, για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν μέσα από τα μαθήματα τους, καθ’ όλη τη διάρκεια της φοιτητικής σταδιοδρομίας μου.

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή 5

Γεωθερμία και Γεωθερμικά Συστήματα 6

Γεωθερμία και Γεωθερμική Ενέργεια 6

Λειτουργία Γεωθερμικού Συστήματος 7

Από τι αποτελείται ένα πλήρως λειτουργικό Γεωθερμικό Σύστημα. 9

Εναλλάκτες θερμότητας 14

Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας 16

Εσωτερικό σύστημα διανομής θερμότητας 24

Πλεονεκτήματα χρήσης και εγκατάστασης Γεωθερμικών Συστημάτων 26

Thermal Response Test 30

Εισαγωγή 30

Γεώτρηση 31

Διάτρηση εδάφους 34

Συλλέκτης (Εναλλάκτης) 35

Ολοκλήρωση Γεώτρησης 35

Θερμική Αγωγιμότητα(λ) 37

Θερμική Αντίσταση(R_b) 38

Σταθερή θερμοκρασία(θερμοκρασία ισορροπίας) υπεδάφους 40

Thermal Response 42

Εξέλιξη θερμοκρασίας 42

Τρόποι υπολογισμού παραμέτρων 43

Συσκευές Thermal Response Test 45

Πειραματική διάταξη 45

Υδραυλικό κύκλωμα πειραματικής συσκευής 51

Η διαδικασία του Thermal Response Test 55

Μαθηματικά μοντέλα - Προσομοίωση TRT με χρήση πραγματικών δεδομένων 58

Ονοματολογία 58

Συντομεύσεις 58

Μοντέλα Ανάλυσης Απόκρισης 59

Θεωρία Γραμμικής Πηγής Θερμότητας 60

Μοντέλο Κυλινδρικής Πηγής 62
Αριθμητικά μοντέλα 63
Σύγκριση μοντέλων 63
Χρήση της μεθόδου TRT πάνω σε πραγματικά πειραματικά δεδομένα για την εύρεση των δύο βασικών παραμέτρων σχεδιασμού γεωθερμικών εγκαταστάσεων 65
Αρχική λειτουργία της αντλίας 69
Μέτρηση της θερμοκρασίας ισορροπίας του υπεδάφους T_o 72
Έναρξη Thermal Response Test και εύρεση παραμέτρων διαστασιολόγησης 78
Σύνοψη 93
Ερμηνεία αποτελεσμάτων Thermal Response Test 93
Σημασία εύρεσης σωστών παραμέτρων με τη μέθοδο TRT 96
Επιμέρους συμπεράσματα και διευκρινίσεις 100
Παράρτημα 103
Βιβλιογραφία 112

Εισαγωγή

Η χρήση κάθετων υπόγειων γεωθερμικών εναλλακτών ως πηγή θερμότητας, σε συνδυασμό με αντλίες θερμότητας για εφαρμογές ψύξης και θέρμανσης, αυξάνεται διαρκώς. Η επιτυχής διαστασιολόγηση αυτών των εγκαταστάσεων απαιτεί γνώση των θερμικών ιδιοτήτων του υπεδάφους και της θερμικής απόδοσης των εναλλακτών. Οι δύο βασικές παράμετροι σχεδιασμού γεωθερμικών εγκαταστάσεων είναι η θερμική αγωγιμότητα του πετρώματος και η θερμική αντίσταση του γεωθερμικού εναλλάκτη. Οι παραπάνω παράμετροι σχεδιασμού μπορούν να προσδιοριστούν με εργαστηριακές δοκιμές και κατασκευή πρωτοτύπων. Παρότι οι συγκεκριμένες μετρήσεις παρέχουν υψηλή ακρίβεια, αδυνατούν να συμπεριλάβουν την επίδραση γεωλογικών και κατασκευαστικών συνθηκών, οι οποίες προσδιορίζουν την πραγματική λειτουργία και απόδοση των γεωθερμικών συστημάτων. Γι αυτό το λόγο έχει αναπτυχθεί η μέθοδος Thermal Response Test. Από την αξιολόγηση των μετρήσεων της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς των γεωθερμικών εναλλακτών σε πραγματικές συνθήκες, με τη μέθοδο του Thermal Response Test (TRT), προκύπτουν ρεαλιστικές τιμές για τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού, κάτι που συνεισφέρει στην αξιόπιστη διαστασιολόγηση των γεωθερμικών εγκαταστάσεων (συστημάτων).

Στην εργασία αυτή αρχικά γίνεται μια περιγραφή της γεωθερμίας και στη συνέχεια αναλύονται τα βασικά μέρη ενός γεωθερμικού συστήματος, πως αυτό λειτουργεί, καθώς και τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση τους. Στη συνέχεια αναλύθηκε διεξοδικά τι είναι η μέθοδος Thermal Response Test, από ποιους παράγοντες και πως επηρεάζεται (π.χ παρουσία υπόγειων υδροφόρων ρευμάτων), τι είναι η αρχική θερμοκρασία του εδάφους καθώς και ποια μοντέλα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της μεθόδου αυτής. Στο τρίτο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε ένα συγκεκριμένο μοντέλο που ονομάζεται Line Source Theory πάνω σε πραγματικά πειραματικά δεδομένα, από μετρήσεις που έγιναν στη Γερμανία χρησιμοποιώντας την μέθοδο TRT, και προσδιορίστηκαν οι δυο βασικές παράμετροι του γεωθερμικού συστήματος οι οποίες και ενδιαφέρουν.

Γεωθερμία και Γεωθερμικά Συστήματα

Γεωθερμία και Γεωθερμική Ενέργεια

Η συνεχής ανεξέλεγκτη αύξηση της τιμής του πετρελαίου καθιστά τη γεωθερμία μια επένδυση συνεχώς πιο δελεαστική.

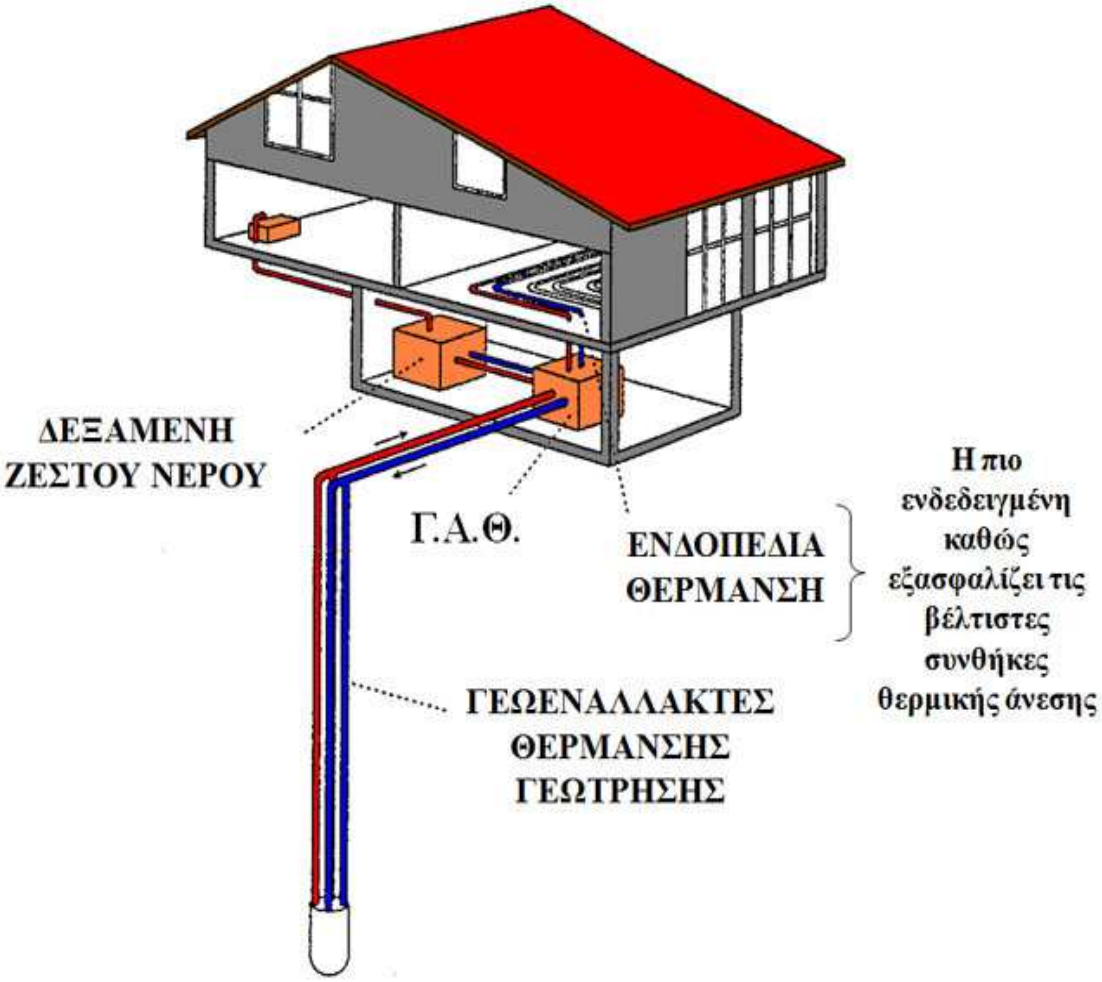
Ο όρος Γεωθερμία αναφέρεται στην ενέργεια που προέρχεται από τα επιφανειακά ή βαθύτερα στρώματα των Γεωλογικών σχηματισμών και του υπογείου ή επιφανειακού υδροφόρου ορίζοντα της γης. Απλούστερα ο όρος αυτό αναφέρεται στη θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης. Η ενέργεια αυτή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: α) την ενέργεια που προέρχεται από τα επιφανειακά στρώματα της γης και ονομάζεται «αβαθής γεωθερμία» β) την ενέργεια που προέρχεται από τα έγκατά της και ονομάζεται «γεωθερμικό δυναμικό». Στη συγκεκριμένη εργασία η έννοια Γεωθερμία αναφέρεται στην εκμετάλλευση της ενέργειας από το εσωτερικό της γης, από όπου με τη χρήση μιας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (heat pump) επιτρέπεται η μεταφορά θερμότητας από και προς το έδαφος για παραγωγή ψύξης, θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης για οικιακές αλλά και ευρύτερης κλίμακας εφαρμογές.

Η Γεωθερμική ενέργεια είναι μια πολύ σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η οποία προέρχεται από τη συσσώρευση θερμότητας στο φλοιό της γης. Η θερμότητα που διαπερνά τα πετρώματα μεταφέρεται στην επιφάνεια μέσω ρευστών όπως το νερό και οι ατμοί. Η Γεωθερμία και ειδικότερα η γεωθερμία χαμηλής θερμοκρασίας (από 25° C έως 90° C) εκμεταλλεύεται τη θερμοκρασία του υπεδάφους χαμηλού θερμοενεργειακού περιεχομένου και αξιοποιεί τη ιδιότητα των εδαφών να διατηρούν την θερμοκρασία τους σταθερή. Στα πρώτα 100 μέτρα βάθους η θερμοκρασία του υπεδάφους κυμαίνεται από 14° C έως 18° C για τη χώρα μας, εξαιρουμένων των περιπτώσεων όπου συναντούμε γεωθερμικό δυναμικό δηλαδή σε πολύ μεγάλο βάθος (έγκατα της γης) . Το παραπάνω εξηγείται ως εξής: ο φλοιός της γης απορροφά μεγάλη ποσότητα ενέργειας από τον Ήλιο σε μορφή θερμότητας. Το αποτέλεσμα της συνεχούς Ηλιακής Ακτινοβολίας, είναι η διατήρηση των επιφανειακών στρωμάτων της Γης σε σταθερή θερμοκρασία ανεξαρτήτως των κλιματικών αλλαγών που επικρατούν στην επιφάνεια.

Λειτουργία Γεωθερμικού Συστήματος

Όπως είδαμε και παραπάνω η γεωθερμία χρησιμοποιείται για τον κλιματισμό (θέρμανση ή ψύξη) επαγγελματικών χώρων, υποκαθιστώντας το πετρέλαιο και μειώνοντας την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Παρέχει επίσης τη δυνατότητα παραγωγής ζεστού νερού χρήσης καθώς και για τη θέρμανση ειδικών χώρων όπως πισίνες και θερμοκήπια. Η γεωθερμία εφαρμόζεται κυρίως σε οικιστικά σύνολα καθώς και στη γεωργία.

Ένα γεωθερμικό σύστημα απάγει θερμότητα από το υπέδαφος κατά την χειμερινή περίοδο αποδίδοντάς την στο κτίριο και με ανάλογο τρόπο την επιστρέφει κατά την καλοκαιρινή, δροσίζοντας το κτίριο. Η απαγωγή και η επιστροφή θερμότητας επιτυγχάνεται δια μέσω ενός ή περισσοτέρων γεωεναλλακτών (heat exchanger) συνοδευόμενων από μία αντλία θερμότητας.



Εικόνα 1.1 Σχεδίαση ενός πραγματικού Γεωθερμικού Συστήματος

Οι γεωεναλλάκτες μπορεί να είναι κάθετοι ή οριζόντιοι. Οι κάθετοι γεωεναλλάκτες θερμότητας είναι σωλήνες πολυαιθυλενίου (κυρίως) οι οποίες τοποθετούνται εντός γεωτρήσεων διαμέτρου 100-115 mm και βάθους 30-250m κατά περίπτωση. Ενώ οι οριζόντιοι γεωεναλλάκτες θερμότητας τοποθετούνται σε σκάμμα βάθους 2m-3m διαστρώνονται σε όλη την επιφάνειά του και κατόπιν καλύπτονται με το χώμα εκσκαφής. Ένα πλήρως λειτουργικό γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από μια γεώτρηση, έναν ή περισσότερους γεωεναλλάκτες (κυρίως κάθετους και σε σχήμα U) , μια γεωθερμική αντλία θερμότητας (geothermal heat pump) και μια μονάδα εντός του κτιρίου ή οποιαδήποτε άλλης εγκατάστασης.

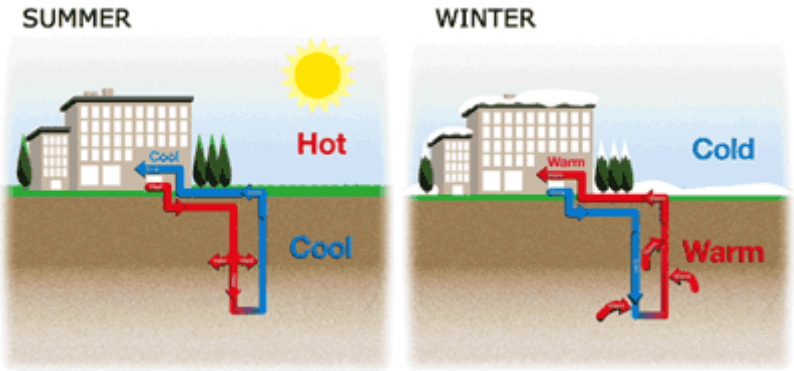
Στην ουσία με τον όρο γεωθερμικό σύστημα γίνεται αναφορά σε ένα ολοκληρωμένο αποδοτικό σύστημα κλιματισμού μη ρυπογόνου, με μηδενικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο και το σπουδαιότερο **λειτουργεί χωρίς την χρήση ορυκτών καυσίμων** μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο τις δαπάνες από 25-75%.

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση Γεωθερμικών Συστημάτων σε κτίρια ή σε άλλα οικιστικά σύνολα είναι πάρα πολλά.

- Κατάργηση των δαπανών κατανάλωσης καυσίμων.
- Ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίου και της αξίας του.
- Εξοικονόμηση χώρου εντός κτιρίου με κατάργηση θερμαντικών σωμάτων και **επιτοίχιων συμβατικών συστημάτων κλιματισμού**
- Μείωση εκπομπών CO_2
- Σεβασμός στο περιβάλλον
- Μηδενικό αισθητικό αντίκτυπο

Από τι αποτελείται ένα πλήρως λειτουργικό Γεωθερμικό Σύστημα.

Τα γεωθερμικά συστήματα ή συστήματα παροχής ενέργειας από τη γη παρέχουν έναν ενεργειακά αποδοτικό τρόπο για τη θέρμανση ή την ψύξη μιας εγκατάστασης και γίνονται ολοένα και πιο διαδεδομένα σε ολόκληρο τον κόσμο. Σκοπός του συστήματος είναι η αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων, η πράσινη συμπεριφορά καθώς και η ενεργειακή και χρηματική εξοικονόμηση. Παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα, χαμηλό κόστος συντήρησης και επίσης χαμηλό κόστος κύκλου ζωής. Παρόλα αυτά το αρχικό υψηλό κόστος εγκατάστασής του μπορεί να αποτρέψει έναν ιδιοκτήτη κτιρίου να το εγκαταστήσει. Όπως αναφέραμε προηγουμένως οι εξωτερικές θερμοκρασίες του αέρα μεταβάλλονται με την αλλαγή των εποχών όχι όμως και οι θερμοκρασίες του υπεδάφους. Σε ένα συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους οι θερμοκρασίες παραμένουν σχετικά σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Ένα γεωθερμικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από μια μονάδα εντός του κτιρίου και ένα θαμμένο γεωεναλλάκτη (exchanger), αξιοποιεί αυτές τις σταθερές θερμοκρασίες για να δεσμεύσει την "ελεύθερη" ενέργεια. Το χειμώνα, το ρευστό που κυκλοφορεί μέσα στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη απορροφά την αποθηκευμένη θερμότητα του εδάφους και την φέρνει στη μονάδα εσωτερικά του κτιρίου. Η μονάδα αντλεί τη θερμότητα σε μια υψηλότερη θερμοκρασία και την διανέμει στο κτίριο. Το καλοκαίρι, γίνεται ακριβώς η αντίθετη διαδικασία, δηλαδή το σύστημα απάγει τη θερμότητα από το κτίριο, τη μεταφέρει στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη και την αποθέτει στην πιο δροσερή γη.



Εικόνα 1.2 Λειτουργία γεωθερμικού συστήματος το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα

Η εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ υπεδάφους και επιφάνειας (δηλ. του ενεργειακού δυναμικού που ονομάζεται Αβαθής Γεωθερμική Ενέργεια) μπορεί να γίνει με τη χρήση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (geothermal heat pump) και δικτύου σωληνώσεων εντός του υπεδάφους, έτσι ώστε οι διάφοροι χώροι να θερμαίνονται τον χειμώνα και να ψύχονται το καλοκαίρι. Η Αβαθής Γεωθερμική Ενέργεια είναι διαθέσιμη όλο το χρόνο και δεν εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες της ατμόσφαιρας. Η ενέργεια αυτή είναι ανεξάντλητη, φυσικά καθαρή και δωρεάν καθώς παρέχεται από τη φύση.

Ένα πλήρως λειτουργικό Γεωθερμικό Σύστημα αποτελείται από τρία (3) κύρια μέρη:

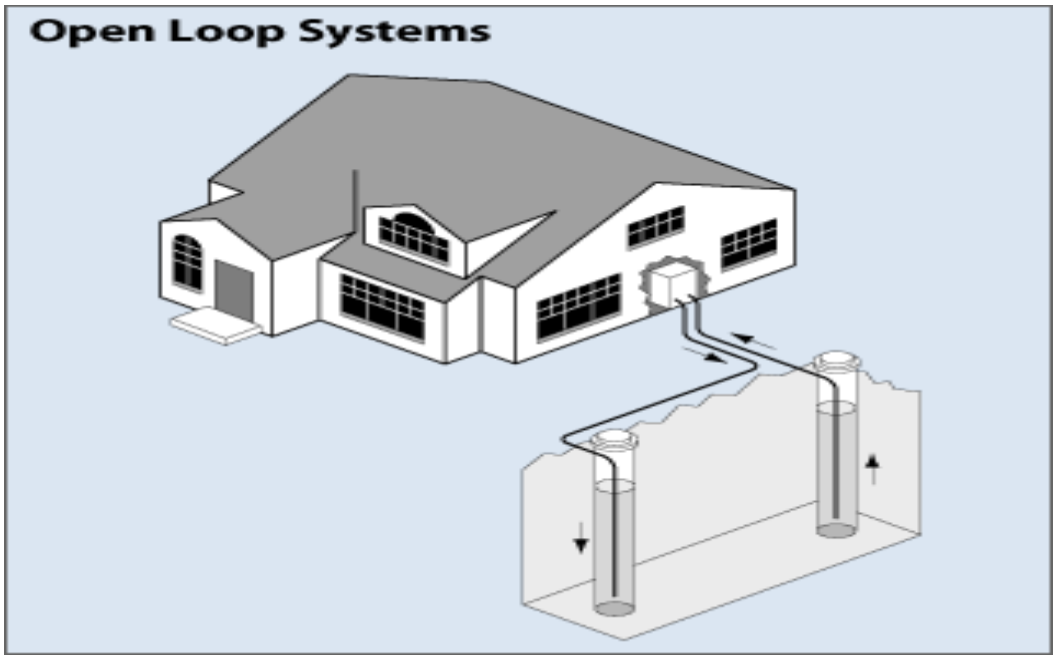
- Τον εναλλάκτη θερμότητας νερού ή γεωεναλλάκτη (heat exchanger)
- Την αντλία θερμότητας (heat pump)
- Το εσωτερικό σύστημα διανομής της θερμότητας στο κτίριο (αεραγωγοί ή ενδοδαπέδια) .

Τα τρία αυτά μέρη φαίνονται αναλυτικά παραπάνω, στην Εικόνα 1.1 .

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος είναι η διάτρηση του εδάφους με ειδικά τρυπάνια (drilling) έτσι ώστε να τοποθετηθεί στη συνέχεια μέσα ο γεωθερμικός εναλλάκτης ή σε ορισμένες περιπτώσεις ένα ολόκληρο δίκτυο γεωθερμικών εναλλακτών. Η γεώτρηση αυτή μπορεί να γίνει είτε σε πολύ μικρό βάθος (2 m) είτε σε πολύ μεγαλύτερο (έως και 200 m), έχει διάμετρο από εκατό (100) έως εκατό δεκαπέντε (115) mm, είναι πάντα κάθετη στην επιφάνεια της γης και εξαρτάται από το χώρο που είναι διαθέσιμος για την εγκατάσταση του συστήματος, από την ύπαρξη ή όχι υδροφόρου ορίζοντα κάτω από την επιφάνεια της γης και από οικονομικούς παράγοντες.

Ο βασικός διαχωρισμός των γεωθερμικών συστημάτων γίνεται σε συστήματα ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος. Τα γεωθερμικά συστήματα ανοικτού κυκλώματος κάνουν χρήση του επιφανειακού ή υπόγειου (συνήθως) υδροφόρου ορίζοντα μέσω ενός συστήματος υδρογεωτρήσεων άντλησης και επανεισαγωγής. Δηλαδή το σύστημα αντλεί νερό από υπόγειο ταμιευτήρα με χρήση γεώτρησης και με τη χρήση ενός ενδιάμεσου εναλλάκτη νερού/νερού

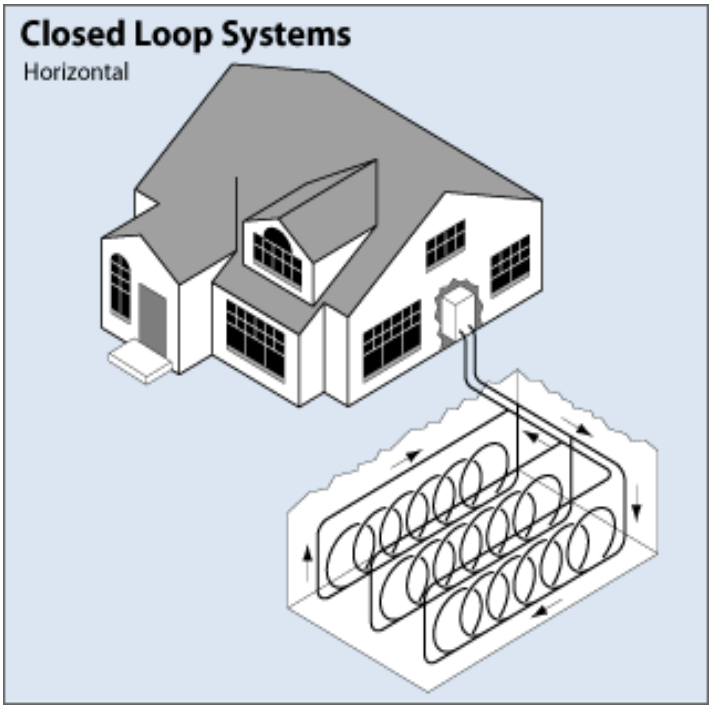
που παρεμβάλλεται μεταξύ της αντλίας θερμότητας και του ανοικτού κυκλώματος προσδίδει ή απορροφά ενέργεια στο ή από το σύστημα πριν το νερό επιστρέψει στον ταμιευτήρα. Ενδείκνυται σε περιοχές με ρηχό βάθος υδροφόρου ορίζοντα και βασίζεται στην ιδιότητα της σταθερής θερμοκρασίας που έχουν τα νερά του υπόγειου ταμιευτήρα καθ' όλο το χρόνο ανεξάρτητα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν.



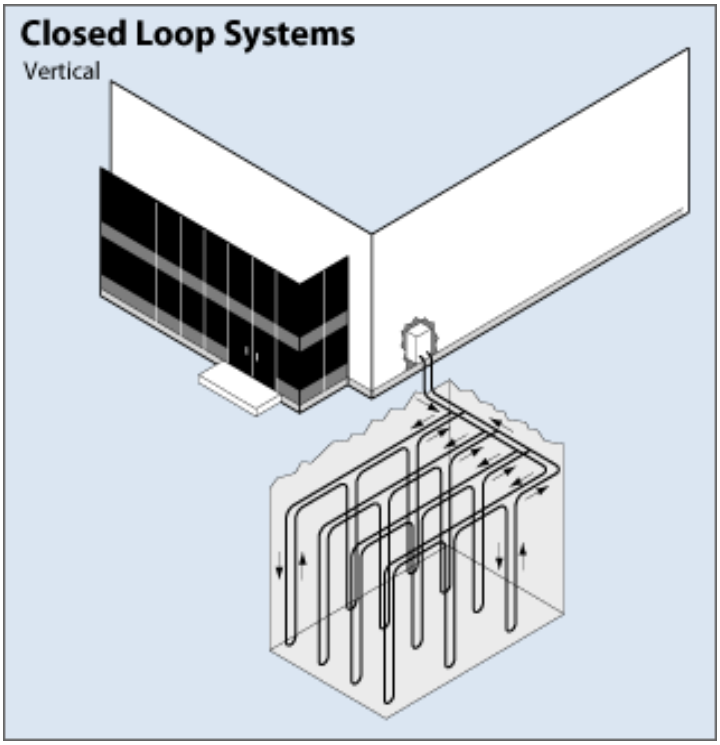
Εικόνα 1.3 Εικόνα ενός ανοικτού κυκλώματος δείχνει έναν σωλήνα να μεταφέρει νερό από το σπίτι προς τα έξω, μέσα στο έδαφος και από εκεί σε ένα πηγάδι όπου αδειάζεται στο νερό του εδάφους. Ένας ξεχωριστός σωλήνας, μέσα σε πηγάδι, λίγο πιο πέρα αντλεί νερό από το πηγάδι και το επιστρέφει στο σπίτι.

Από την άλλη μεριά τα συστήματα κλειστού κυκλώματος εκμεταλλεύονται τη σταθερή θερμοκρασία των πετρωμάτων και των γεωλογικών σχηματισμών με την εγκατάσταση σωληνώσεων. Πιο αναλυτικά, η συγκεκριμένη κατηγορία βασιζεται στην κατασκευή ενός εναλλάκτη στο υπέδαφος, ο οποίος ονομάζεται γεωεναλλάκτης. Ο γεωεναλλάκτης κατασκευάζεται από έναν αριθμό σωληνώσεων μέσα στις οποίες κυκλοφορεί νερό. Το χειμώνα η γεωθερμική αντλία θερμότητας τροφοδοτείται με νερό θερμοκρασίας περίπου 16 ^{o}C από τον εναλλάκτη, η οποία απορροφά περίπου 4 ^{o}C με 5°C, πριν το επιστρέψει στη

γη. Έτσι με μικρή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, παράγεται με αυτό τον τρόπο ζεστό νερό χρήσης από 35 ^{o}C έως 40 ^{o}C το οποίο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα για θέρμανση χώρων με ενδοδαπέδιο (συνήθως) σύστημα θέρμανσης. Για την παραπάνω λειτουργία της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας καταναλώνεται μόνο ηλεκτρικό ρεύμα, που χρησιμοποιείται από τον συμπιεστή αυτής και την αντλία νερού, που σε σχέση με την αποδιδόμενη θερμική ενέργεια της αντλίας είναι της τάξης του 20% με 25%. Για κάθε 100 μονάδες θερμικής ενέργειας δηλαδή, που αποδίδει η αντλία θερμότητας σε ένα κτίριο για τη θέρμανσή του, πληρώνουμε μόνο το κόστος των 25 μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει για τη λειτουργία της. Οι υπόλοιπες 75 μονάδες αντλούνται δωρεάν από τη φύση. Το καλοκαίρι αντιστρέφεται η λειτουργία της αντλίας θερμότητας έτσι ώστε να απορρίπτει τη θερμότητα από τους κλιματιζόμενους χώρους στο υπέδαφος με τη χρήση και πάλι του γεωεναλλάκτη ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί σε οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη ανάλογα με το χώρο του οικοπέδου που έχουμε στη διάθεσή μας. Επομένως ένα γεωθερμικό σύστημα κλειστού κυκλώματος αποτελείται από ένα δίκτυο θαμμένων σωλήνων πολυαιθυλενίου που ονομάζονται εναλλάκτες θερμότητας. Οι σωλήνες συνδέονται με την αντλία θερμότητας όπου και ολοκληρώνεται το κλειστό κύκλωμα. Μέσα στο κύκλωμα αυτό κυκλοφορεί διάλυμα νερού με φιλικό προς το περιβάλλον αντιψυκτικό. Το κλειστό κύκλωμα ανακυκλοφορεί συνεχώς υπό πίεση το διάλυμα που μεταφέρει τη θερμότητα, σε αντίθεση με το ανοικτό κύκλωμα στο οποίο αντλείται συνεχώς νερό από τη γεώτρηση. Το κύκλωμα γενικά μπορεί να είναι οριζόντιο ή κατακόρυφο ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των σωλήνων (εναλλακτών). Σε κάθε περίπτωση ένα σωστά μελετημένο σύστημα θα λειτουργήσει αποτελεσματικά.



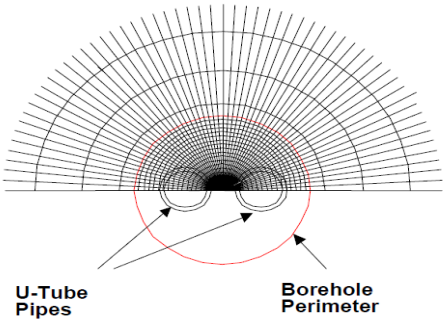
Εικόνα 1.4 Εικόνα ενός οριζόντιου κλειστού συστήματος δείχνει τους σωλήνες να ξεκινούν από το σπίτι και να εισέρχονται στο έδαφος, έπειτα να διακλαδώνονται σε τρεις σειρές μέσα στο έδαφος, με κάθε σειρά να αποτελείται από έξι αλληλεπικαλυπτόμενα κάθετα συστήματα-βρόγχοι σωληνώσεων. Στο τέλος των σειρών, οι σωλήνες κατευθύνονται πάλι προς την αρχή των σειρών και συνδυάζονται ώστε να αποτελέσουν ένα σωλήνα ο οποίος οδηγείται πίσω στο σπίτι.



Εικόνα 1.5 Εικόνα ενός κάθετου κλειστού συστήματος δείχνει τους σωλήνες να ξεκινούν από ένα κτίριο και να εισέρχονται στο έδαφος, έπειτα να διακλαδώνονται σε τέσσερις σειρές μέσα στο έδαφος. Σε κάθε σειρά το σύστημα των σωλήνων παραμένει οριζόντιο με εξαίρεση ότι εκτρέπεται σε τρεις βαθείς κάθετους σχηματισμούς. Στο τέλος της σειράς, η σωλήνωση κάνει καμπύλη και επιστρέφει στην αρχή της σειράς όπου μετατρέπεται σε ένα σωλήνα που οδηγεί πίσω στο κτίριο.

Εναλλάκτες θερμότητας

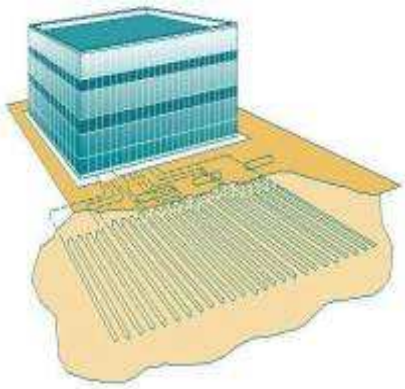
Η ιδέα του θαψίματος σωλήνα στο έδαφος για να συλλέξει τη θερμική ενέργεια ξεκίνησε τη δεκαετία του ’40. Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι γενικά συσκευές με τις οποίες επιτυγχάνεται η μεταφορά ενέργειας (θερμότητας) από ένα ρευστό υψηλής θερμοκρασίας σε ένα άλλο ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι σωλήνες πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (το πιο συνηθισμένο υλικό κατασκευής) οι οποίοι τοποθετούνται εντός των γεωτρήσεων, δηλαδή μέσα στη γη, και γι αυτό το λόγο ονομάζονται γεωεναλλάκτες. Με σωστή εγκατάσταση οι σωλήνες αυτοί αντέχουν για πολλές δεκαετίες. Παραμένουν άθικτοι από τα συστατικά του εδάφους και έχουν πολύ καλές ιδιότητες θερμικής αγωγιμότητας. Σωλήνες PVC δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιούνται.



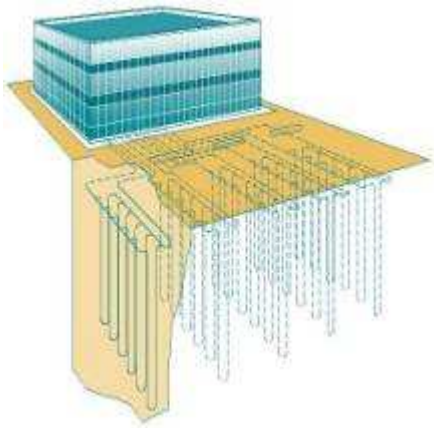
Εικόνα 1.6 Κάτοψη γεώτρησης καθώς και του εναλλάκτη σχήματος U που τοποθετείται μέσα

Όπως αναφέραμε ακριβώς παραπάνω, οι εναλλάκτες μπορεί να είναι κάθετοι ή οριζόντιοι ανάλογα με τον τρόπο που τοποθετούνται μέσα στις γεωτρήσεις. Οι οριζόντιοι εναλλάκτες χρησιμοποιούνται όταν οι γεωτρήσεις είναι μικρού βάθους αλλά καλύπτουν πολύ μεγάλη επιφάνεια (Εικόνα 1.7). Οι εναλλάκτες αυτοί τοποθετούνται σε σκάμμα βάθους 2m έως 3m, διαστρώνονται σε όλη την επιφάνειά του και κατόπιν καλύπτονται με το χώμα εκσκαφής. Από την άλλη μεριά οι κάθετοι ή κατακόρυφοι εναλλάκτες απαιτούν λιγότερη επιφάνεια

αλλά μεγαλύτερο βάθος (Εικόνα 1.8). Είναι δυνατό να υπάρχουν ακόμη και πολλοί εναλλάκτες που ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας σειρές όπως φαίνεται στις Εικόνες 1.4, 1.5, 1.7, 1.8. Τα τμήματα των σωλήνων ενώνονται με θερμική κόλληση, μια τεχνική που παράγει σίγουρες ενώσεις και αποτρέπει τις διαρροές.

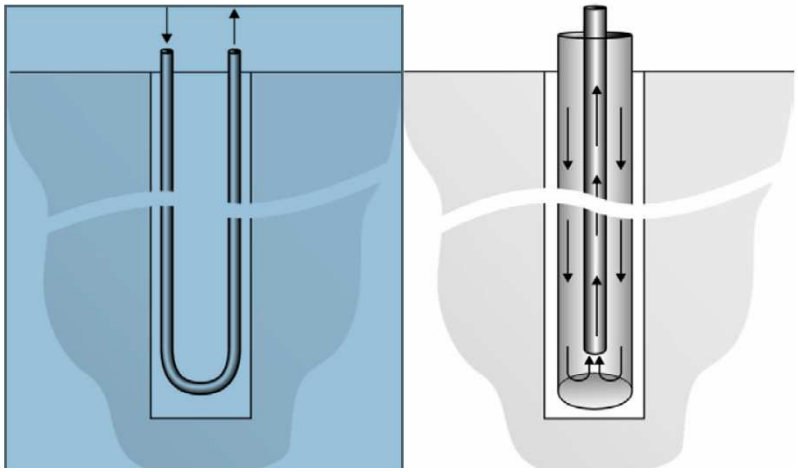


Εικόνα 1.7 Οριζόντιοι εναλλάκτες θερμότητας σε σκάμμα



Εικόνα 1.8 Κάθετοι εναλλάκτες θερμότητας τοποθετημένοι μέσα σε γεώτρηση.

Η γεωμετρία των εναλλακτών που χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές ποικίλει. Οι εναλλάκτες μπορεί να είναι σχήματος U (U-pipes) ή ομοαξονικοί (coaxial pipes) όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν. Οι πρώτοι διακρίνονται σε εναλλάκτες σχήματος μονού U (single U-pipe) και διπλού U (double U-pipe). Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται εναλλάκτες σχήματος U.

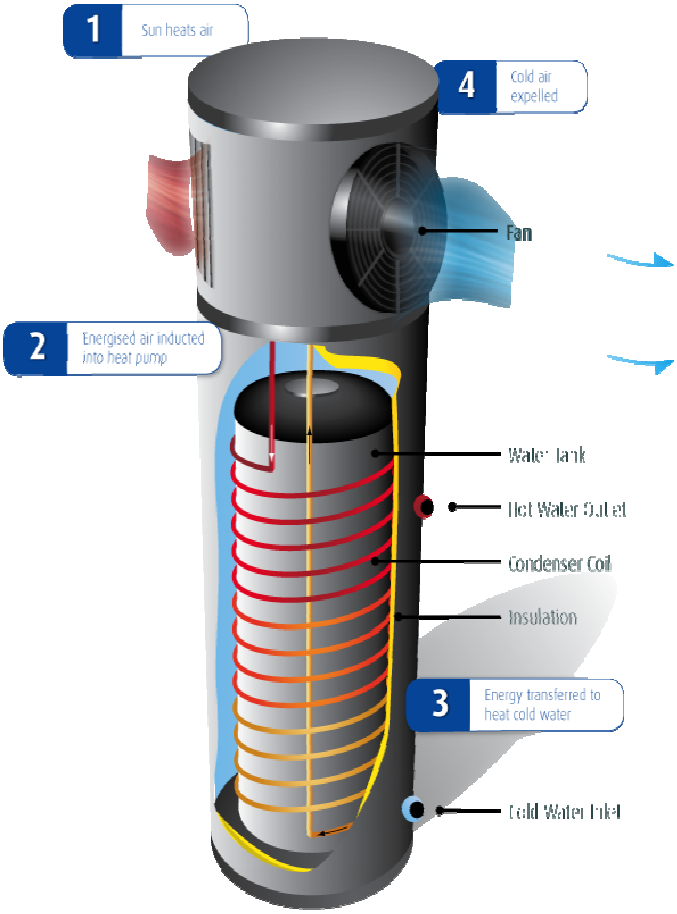


Εικόνα 1.9 Εναλλάκτες θερμότητας διαφορετικής γεωμετρίας : U-pipe και coaxial pipe

Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας

Ό όρος γεωθερμική αντλία θερμότητας (geothermal heat pump) ή αντλία θερμότητας πηγής εδάφους (ground source heat pump) αναφέρεται σε ένα κεντρικό σύστημα θέρμανσης ή/και ψύξης το οποίο αντλεί θερμότητα από ή προς το έδαφος. Χρησιμοποιεί τη γη σαν πηγή θερμότητας το χειμώνα ή σαν δεξαμενή θερμότητας το καλοκαίρι. Πρακτικά δεν είναι τίποτα άλλο από μια μηχανή που μπορεί να μεταφέρει τη θερμότητα από το ψυχρό χώρο στο θερμό ή στη γλώσσα των μηχανικών, από τη «θερμή δεξαμενή» στη «ψυχρή δεξαμενή». Ακριβώς την ίδια διαδικασία εκτελεί το οικιακό ψυγείο και το κλιματιστικό μηχάνημα, που υπάρχουν σε σπίτια και σε γραφεία. Οι αντλίες αυτές μπορούν να μεταφέρουν θερμότητα από ένα ψυχρό χώρο σε ένα θερμότερο, αντίθετα με τη φυσική ροή της θερμότητας (από τα θερμά στα ψυχρά) ή μπορούν να ενισχύσουν τη φυσική ροή θερμότητας από μια θερμή περιοχή σε κάποια πιο ψυχρή. Η σχεδίαση μιας τέτοιας αντλίας

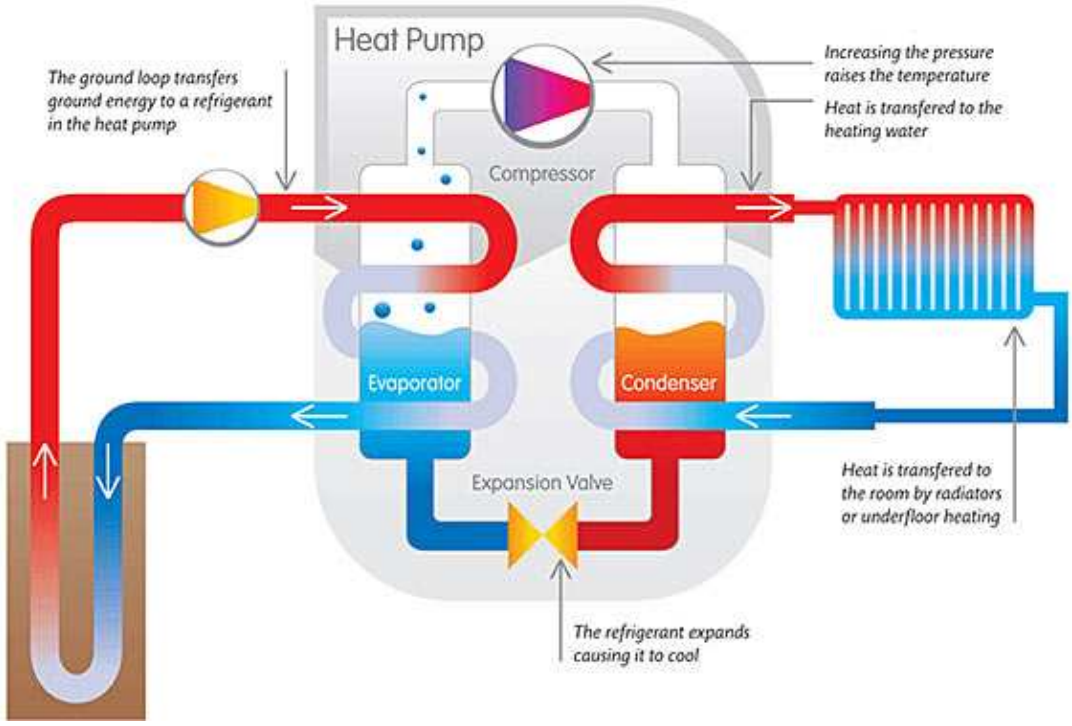
εκμεταλλεύεται τις μέτριες (μεσαίες) θερμοκρασίες του εδάφους για να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα και να μειώσει το λειτουργικό κόστος των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Είναι επίσης δυνατό να συνδυαστεί με ηλιακή θέρμανση και να δημιουργήσει ένα «γεωηλιακό» (geosolar) σύστημα με ακόμα μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας είναι επίσης γνωστές και με διάφορα άλλα ονόματα όμως από την επιστημονική κοινότητα προτιμούνται οι όροι «γεωεναλλαγή» (Geoexchange) ή «αντλίες θερμότητας με πηγή το έδαφος» (Ground Source Heat Pumps) για να αποφευχθεί η σύγχυση με την παραδοσιακή γεωθερμική ενέργεια, όπου χρησιμοποιείται θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας για παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι αντλίες θερμότητας με πηγή το έδαφος χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό της γεωθερμικής ενέργειας από τον πυρήνα της γης και της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από την επιφάνεια της γης όταν χρησιμοποιούνται για θέρμανση, αλλά κάτι τέτοιο δε συμβαίνει όταν χρησιμοποιούνται για κλιματισμό.



χώρου).Όπως
καλοκαιριού.
να ζεσταθεί το
η θερμότητα
ν αέρας για να
παρξη ζεστού

Ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, η θερμοκρασία κάτω από την επιφάνεια της γης διατηρείται σχεδόν σταθερή μεταξύ 10 ^{o}C και 16 ^{o}C. Όπως σε μια σπηλιά, αυτή η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα (περιβάλλοντος) κατά τη διάρκεια του χειμώνα και μικρότερη από τη θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Γι αυτό το λόγο όπως ένα ψυγείο ή ένα κλιματιστικό έτσι και τα γεωθερμικά συστήματα χρησιμοποιούν μια αντλία για να επιτύχουν τη μεταφορά θερμότητας από εκεί. Το βασικότερο τμήμα (πυρήνας) της αντλίας θερμότητας είναι η συνεχής ανακύκλωση (loop) μιας ψυκτικής ουσίας, η οποία αντλείται μέσω ενός συνεχούς κύκλου συμπίεσης ατμών της ουσίας αυτής. Με αυτό τον τρόπο μεταφέρεται θερμότητα.

Για να γίνει το παραπάνω περισσότερο κατανοητό, θα πρέπει να υπογραμμιστεί ξανά ότι μια αντλία θερμότητας έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει θερμική ενέργεια από ένα περιβάλλον σε ένα άλλο και προς τις δύο κατευθύνσεις (ανεξάρτητα από το ποιο είναι πιο θερμό). Αυτό επιτρέπει στην αντλία θερμότητας τόσο να φέρνει θερμότητα μέσα σε ένα δεδομένο κλειστό χώρο όσο και να την εξάγει από αυτό. Στη λειτουργία ψύξης η αντλία λειτουργεί όπως ένα συνηθισμένο air-condition. Χρησιμοποιεί ένα ενδιάμεσο υγρό που ονομάζεται refrigerant (ελλ. ψυκτική ουσία), η οποία απορροφά θερμότητα όταν εξατμίζεται ενώ αντίθετα απελευθερώνει θερμότητα όταν συμπυκνώνεται. Στη συνέχεια χρησιμοποιεί έναν εξατμιστήρα για να απορροφήσει τη θερμότητα μέσα από έναν κατειλημμένο χώρο (δωμάτιο) και αποβάλλει τη θερμότητα προς τα έξω μέσω ενός συμπυκνωτή. Το ενδιάμεσο υγρό (refrigerant) ρέει έξω από το χώρο που ρυθμίζεται θερμοκρασιακά, όπου υπάρχουν ένας συμπυκνωτής (ψυκτήρας) και ένας συμπιεστής, ενώ ο εξατμιστήρας βρίσκεται μέσα στο χώρο αυτό. Το βασικό στοιχείο που κάνει μια τέτοια αντλία να διαφέρει από ένα air-condition είναι η βαλβίδα αντιστροφής (reversing valve ή expansion valve). Η βαλβίδα αυτή επιτρέπει την αλλαγή κατεύθυνσης της ροής του υγρού (refrigerant), κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα η θερμότητα να αντληθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, δηλαδή επιτρέπει στην αντλία να λειτουργεί είτε για θέρμανση είτε για κλιματισμό χώρων.



Εικόνα 1.11 Η εσωτερική όψη μιας αντλίας θερμότητας και οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα της.

Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας κατά τη διαδικασία θέρμανσης και κατά τη διαδικασία ψύξης ενός χώρου.

- Στη λειτουργία θέρμανσης η εξωτερική έλικα (σπείρα) της αντλίας λειτουργεί ως εξατμιστήρας, ενώ η εσωτερική λειτουργεί ως συμπυκνωτής ο οποίος απορροφά τη θερμότητα από το ανακυκλούμενο υγρό (refrigerant) και τη διαχέει στον αέρα που ρέει μέσα του. Ο εξωτερικός αέρας ακόμα και στη θερμοκρασία των 0 ^{o}C έχει θερμική ενέργεια μέσα του. Με το υγρό (refrigerant) να ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση ο εξατμιστήρας, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η υπαίθρια σπείρα, απορροφά τη θερμότητα από τον αέρα και τη μεταφέρει στο εσωτερικό της αντλίας. Μόλις απορροφήσει τη θερμότητα, ο αέρας συμπιέζεται και στέλνεται στον συμπυκνωτή (εσωτερική σπείρα). Τότε η εσωτερική σπείρα αποβάλει τη θερμότητα

στο ειδικό σύστημα διανομής το οποίο μεταφέρει το θερμαινόμενο αέρα σε ολόκληρο το σπίτι.

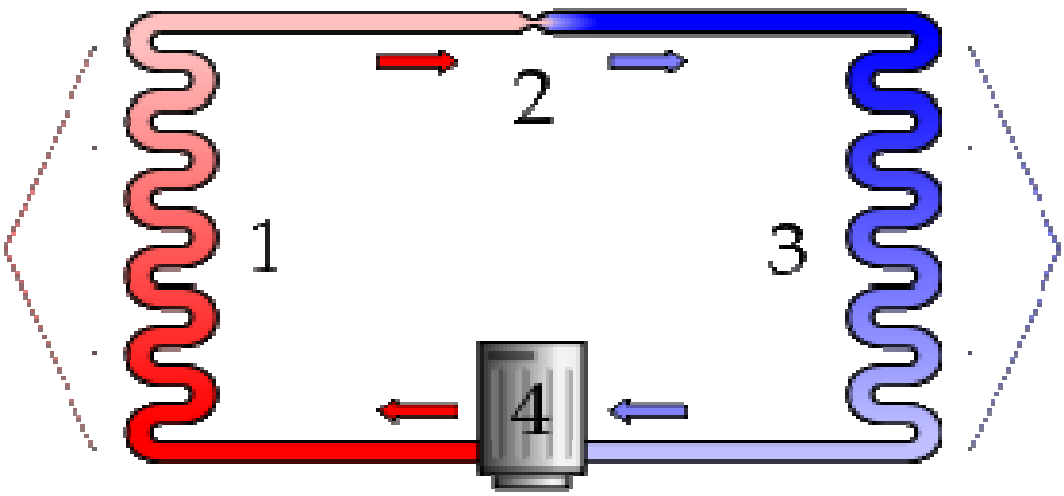
- Στη λειτουργία κλιματισμού η υπαίθρια σπείρα (έλικα) παίζει το ρόλο του συμπυκνωτή, επομένως η εσωτερική λειτουργεί ως εξατμιστήρας, καθώς χρησιμοποιείται για να απορροφήσει τη θερμότητα μέσα από τον κλειστό χώρο. Ο εξατμιστήρας λοιπόν αφού απορροφήσει τη θερμότητα από το εσωτερικό του σπιτιού, τη μεταφέρει στον συμπυκνωτή από όπου αποβάλλεται στον εξωτερικό αέρα.

Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι ο όρος ενδιάμεσο υγρό (refrigerant) αναφέρεται σε διάλυμα νερού που περιέχει ψυκτική ουσία. Πιο συγκεκριμένα, η ουσία αυτή βρίσκεται αρχικά σε υγρή μορφή και χρησιμοποιείται σε έναν κύκλο μεταφοράς (ανακύκλωση) θερμότητας, ο οποίος περιλαμβάνει και μια αναστρέψιμη φάση μετατροπής από αέριο σε υγρό. Συνήθως χρησιμοποιούνται χλωροφθοράνθρακες, αλλά τα τελευταία χρόνια έχουν σταματήσει λόγω της επίδρασής τους στο φαινόμενο του όζοντος. Συνηθέστερες ουσίες που χρησιμοποιούνται είναι η αμμωνία, το διοξείδιο του θείου και το μεθάνιο. Ένα ιδανικό ενδιάμεσο υγρό (refrigerant) έχει καλές θερμοδυναμικές ιδιότητες (υψηλό βαθμό εξαέρωσης, λογική τιμή πυκνότητας σε υγρή μορφή αλλά σχετικά μεγάλη στην αέρια μορφή και «καλό» σημείο βρασμού), δε μπορεί να δημιουργηθεί με χημικό τρόπο και είναι ασφαλές. Εξατμιστήρας (evaporator) είναι μια συσκευή που μετατρέπει το υγρό σε αέριο (ατμός) ενώ συμπυκνωτής (condenser) είναι μια συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για την μετατροπή από αέρια μορφή σε υγρή.

Αρχές λειτουργίας της αντλίας θερμότητας

Δεδομένου ότι η αντλία θερμότητας χρησιμοποιεί ένα συγκεκριμένο ποσό έργου (ενέργειας) για να κινήσει τη ψυκτική ουσία (refrigerant), το ποσό της ενέργειας που εναποτίθεται στη θερμή πλευρά της αντλίας είναι μεγαλύτερο από το ποσό που λαμβάνεται από την κρύα πλευρά. Μια κοινή αντλία θερμότητας λειτουργεί εκμεταλλευόμενη τις φυσικές ιδιότητες του υγρού που υπόκειται σε εξάτμιση και συμπύκνωση το οποίο είναι γνωστό όπως αναφέρθηκε προηγουμένως με την ονομασία refrigerant.

Το εργαζόμενο ρευστό (refrigerant), στην αέρια κατάσταση του, συμπιέζεται και ανακυκλώνεται (διανέμεται) μέσα στο σύστημα από ένα συμπιεστή (compressor). Στη πλευρά εκκένωσης του συμπιεστή, ο τώρα ζεστός και συμπιεσμένος σε υψηλό βαθμό ατμός, ψύχεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας που ονομάζεται συμπυκνωτής (condenser), έως ότου συμπυκνωθεί σε υγρό μέτριας θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης. Το συμπυκνωμένο εργαζόμενο μέσο, στη συνέχεια, περνά μέσα από μια συσκευή μείωσης της πίεσης που ονομάζεται επίσης και συσκευή μέτρησης όπως μια βαλβίδα επέκτασης(expansion valve) ή πιθανότατα από μια συσκευή που παράγει έργο όπως είναι ο στρόβιλος (τουρμπίνα). Το υγρό εργαζόμενο μέσο (refrigerant) το οποίο τη δεδομένη χρονική στιγμή είναι χαμηλής πίεσης, φεύγει από τη συσκευή επέκτασης και μπαίνει σε έναν άλλο εναλλάκτη θερμότητας, που ονομάζεται εξατμιστήρας. Μέσα στον εξατμιστήρα το υγρό απορροφά θερμότητα και βράζει. Στη συνέχεια η ψυκτική ουσία γυρνάει στον συμπιεστή και ο κύκλος επαναλαμβάνεται από την αρχή.



υμπίεσης της
:1) συμπυκνωτής
μπιεστής

Σε ένα τέτοιο σύστημα όπως αυτό της Εικόνας 1.11 είναι σημαντικό η ψυκτική ουσία (refrigerant) να φθάσει σε μια αρκετά μεγάλη θερμοκρασία όταν συμπιέζεται, καθώς από τον δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής ξέρουμε ότι δεν γίνεται να έχουμε ροή θερμότητας από ένα ψυχρό υγρό σε μια θερμή δεξαμενή θερμότητας. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το ενδιάμεσο ρευστό πρέπει να φτάσει σε μια θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος (ατμόσφαιρα) γύρω από τον εναλλάκτη υψηλής θερμοκρασίας. Ομοίως το υγρό πρέπει να φτάσει σε μια αρκετά χαμηλή θερμοκρασία όταν επιτρέπεται να επεκταθεί (expansion valve) ή όταν η θερμότητα δεν μπορεί να ρέει από τη ψυχρή περιοχή στο υγρό, δηλαδή το υγρό πρέπει να είναι πιο κρύο (χαμηλότερη θερμοκρασία) απ' ότι το περιβάλλον γύρω από τον εναλλάκτη χαμηλής θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα η διαφορά πίεσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε το υγρό να συμπυκνωθεί στη θερμή πλευρά και επίσης να μπορεί να εξατμιστεί στη ψυχρή πλευρά όπου ή πίεση είναι μικρότερη. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας, τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η διαφορά πίεσης και συνεπώς χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για τη συμπίεση του υγρού. Κατά συνέπεια, όπως συμβαίνει με όλες τις αντλίες, ο συντελεστής απόδοσης (Coefficient of Performance, CoP) δηλαδή το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται ανά μονάδα εργασίας εισαγωγής που απαιτείται, μειώνεται με την αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας.

Εικόνα 1.13 Παρουσιάζονται οι εσωτερικές διεργασίες που γίνονται μέσα σε μια αντλία θερμότητας κατά τη διάρκεια του κύκλου ατμού-συμπίεσης του refrigerant με περισσότερες λεπτομέρειες απ΄ ότι προηγουμένως.

Στην Εικόνα 1.10 φαίνεται ότι η δεξαμενή νερού μέσα στην αντλία έχει μόνωση. Η μόνωση αυτή χρησιμοποιείται για να μειωθεί η εργασία και η ενέργεια που απαιτείται για να επιτευχθεί και να διατηρηθεί χαμηλότερη θερμοκρασία στο δροσερό χώρο.

Πολλές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούν μια βοηθητική πηγή θερμότητας κατά τη λειτουργία θέρμανσης (heating mode). Αυτό σημαίνει ότι εκτός από την ίδια την αντλία θερμότητας που είναι η κύρια πηγή θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάποια άλλη πηγή όπως παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, πετρελαίου ή αερίου ως εφεδρική.

Στην ειδική περίπτωση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, χρησιμοποιείται το έδαφος ως πηγή θερμότητας και δεξαμενή και νερό σαν το μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο όπως και οι air to air αντλίες θερμότητας, με τη μόνη διαφορά ότι αντί για εσωτερικές και εξωτερικές σπείρες (οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω), χρησιμοποιούν το νερό που αντλείται από τη γη σαν μέσο μεταφοράς θερμότητας. Είναι ιδιαίτερα φιλικές προς το περιβάλλον και μια φθηνή εναλλακτική λύση σε βάθος χρόνου εξαιτίας του χαμηλού κόστους λειτουργίας. Το λειτουργικό κόστος μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο με την αποθήκευση της καλοκαιρινής θερμότητας στο έδαφος και τη χρησιμοποίηση της κατά τη διάρκεια του χειμώνα και αντίστροφα. Με τον τρόπο αυτό αποθηκεύεται το χειμερινό ψύχος υπογείως για να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί το καλοκαίρι. Η τεχνική αυτή αναπτύσσεται ολοένα και περισσότερο και εφαρμόζεται σε μεγάλα οικιστικά σύνολα. Τα γεωθερμικά συστήματα αντλιών μπορούν να φτάσουν σε αρκετά υψηλό συντελεστή απόδοσης (CoP) περίπου 3-6 τις πιο κρύες νύχτες του χειμώνα σε σύγκριση με τις αντλίες θερμότητας με πηγή τον αέρα (air to air heat pumps) που έχουν συντελεστή απόδοσης 1.75-2.5 κάτω από παρόμοιες συνθήκες.

Συνοψίζοντας όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για την αντλία θερμότητας και ειδικότερα για την γεωθερμική αντλία θερμότητας (geothermal heat pump) η λειτουργία της είναι η ακόλουθη:

- Ψυκτικό υγρό κυκλοφορεί σε ένα σωλήνα (εναλλάκτη) και παίρνει τη θερμότητα (ενέργεια) από το έδαφος.

- Στην αντλία θερμότητας υπάρχει ένας εναλλάκτης που λέγεται αεροποιητής (εξατμιστήρας). Εκεί μεταφέρεται η θερμότητα από το αντιψυκτικό υγρό στο ψυκτικό υγρό (refrigerant) που υπάρχει μέσα στην αντλία. Το τελευταίο έχει χαμηλό σημείο ζέσεως, μπορεί να εξαερωθεί και κυκλοφορεί σε ένα κλειστό κύκλωμα.
- Στο συμπιεστή αυξάνεται η πίεση του ψυκτικού υγρού, η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία στο χρησιμοποιούμενο επίπεδο.
- Από τον υγροποιητή (συμπυκνωτή) μεταφέρεται η θερμότητα στο σύστημα θέρμανσης του σπιτιού.
- Μέσα στην αντλία υπάρχει ένα μικρό ψυγείο το οποίο λειτουργεί σαν ξεχωριστός εναλλάκτης (παίρνει ως είσοδο την έξοδο του συστήματος θέρμανσης του σπιτιού), απορροφά και τα τελευταία ψήγματα θερμότητας και το ψυκτικό υγρό επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση(υγρό).
- Στη βαλβίδα εκτόνωσης (expansion valve) γίνεται αποσυμπίεση και έτσι πέφτει η πίεση του ψυκτικού (refrigerant).
- Το ψυκτικό υγρό μεταφέρεται πάλι στον αεροποιητή (εξατμιστήρας) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Εσωτερικό σύστημα διανομής θερμότητας

Όπως μαρτυρά και το όνομα του, το σύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για τη διανομή της θερμότητας ή της ψύξης που έχουμε πάρει, χρησιμοποιώντας τη γεωθερμική αντλία, σε όλους τους χώρους ενός κτιρίου που θέλουμε να θερμάνουμε ή αντίστοιχα να ψύξουμε. Είναι το τελευταίο μέρος ενός Γεωθερμικού Συστήματος αλλά εξίσου σημαντικό με τα δύο προηγούμενα. Τα συστήματα εσωτερικής διανομής της θερμότητας-ψύξης εντός των κτιρίων αποτελούνται από τα δίκτυα, τα εξαρτήματα και τους αυτοματισμούς που φροντίζουν για τη διανομή της παραγόμενης θέρμανσης ή ψύξης στο εσωτερικό των κτιρίων. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν τη δυνατότητα απόδοσης της θερμότητας (ψύξης) απευθείας σε συστήματα αέρα ή νερού. Η διαμόρφωση των εσωτερικών δικτύων αποτελεί αρχιτεκτονική επιλογή και αποτέλεσμα μηχανολογικής μελέτης.

Η διανομή της θερμότητας γίνεται κυρίως με δύο τρόπους, είτε με ειδικούς αεραγωγούς είτε ενδοδαπέδια. Στην ενδοδαπέδια θέρμανση ένας ελαστικός σωλήνας τοποθετείται κάτω από την επένδυση του πατώματος και τροφοδοτείται με νερό χαμηλής θερμοκρασίας. Καθώς η θέρμανση προέρχεται ομοιόμορφα από το πάτωμα, νερό μόλις 30 ^{o}C - 40 ^{o}C, έχει το ίδιο αποτέλεσμα με νερό 70 ^{o}C -80 ^{o}C σε παραδοσιακά σώματα καλοριφέρ. Αυτό σημαίνει ότι για το ίδιο επίπεδο θέρμανσης απαιτείται λιγότερη ενέργεια και μικρότερος λέβητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι δε χρειάζεται συντήρηση και συνοδεύεται από εγγύηση σωστής λειτουργίας 20 έως 40 χρόνων.

Η μεταφορά θερμότητας ή ψύξης με αεραγωγούς χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε μονοκατοικίες, ιδιαίτερα στη Μεγάλη Βρετανία και στις ΗΠΑ. Συγκεκριμένα στη μεταφορά θερμότητας, ο θερμός αέρας κινείται με φυσικό ελκυσμό μέσα από τους αεραγωγούς προς τους χώρους, υπό την επίδραση της φυσικής στρωμάτωσης. Η θέρμανση του αέρα γίνεται σε κλίβανο που λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας άμεσης δράσης. Η μονάδα θέρμανσης εγκαθίσταται συνήθως σε κεντρική θέση του κτιρίου ώστε να περιορίζεται όσο το δυνατόν το μήκος των αεραγωγών. Όταν φθάσουμε σε σημείο που δε θα απαιτείται πλέον θέρμανση ο ανεμιστήρας κυκλοφορίας του αέρα διατηρεί τον αερισμό ώστε να παρέχεται φρέσκος αέρας.

Τέλος για τη συγκεκριμένη λειτουργία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και θερμαντικά σώματα νέου τύπου (πάνελ) τα οποία είναι πολύ καλύτερα σε σχέση με τα παραδοσιακά θερμαντικά σώματα (άβακες) γιατί δημιουργούν ίδιες συνθήκες θερμικής άνεσης με καλύτερες συνθήκες υγρασίας του χώρου, καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια.

Εικόνα 1.14 Ενδοδαπέδιο εσωτερικό σύστημα διανομής θερμότητας. Διακρίνονται οι σωλήνες που τοποθετούνται κάτω από την επένδυση του πατώματος.

Πλεονεκτήματα χρήσης και εγκατάστασης Γεωθερμικών Συστημάτων

Όπως έχει επισημανθεί έως τώρα, τα Γεωθερμικά Συστήματα εκμεταλλεύονται την θερμότητα που περιέχεται στο εσωτερικό της γης. Αναφέρθηκε επίσης ότι μια πλήρης εγκατάσταση γεωθερμίας αποτελείται από τη γεωθερμική αντλία θερμότητας η οποία αποτελεί τη καρδιά του συστήματος, από τον γεωθερμικό εναλλάκτη που είναι ένα κλειστό σύστημα σωληνώσεων από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, που διαρρέεται από ειδικό υγρό και τοποθετείται μέσα στο έδαφος και από την εσωτερική εγκατάσταση θέρμανσης/κλιματισμού της κατοικίας. Ανακεφαλαιώνοντας, το γεωθερμικό σύστημα εκμεταλλεύεται τη

θερμοκρασία του εδάφους (10 ^{o}C -21 ^{o}C), χρησιμοποιώντας διατρητικό εξοπλισμό για ανόρυξη γεωτρήσεων μικρής διαμέτρου βάθους έως 150m και ειδικών γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη θερμοκρασία έως και 55 ^{o}C.

Η γεωθερμία αποτελεί μια καινοτομία εξέλιξης στον τομέα της θέρμανσης και του κλιματισμού. Η χρήση της ενδείκνυται για όλους τους χώρους: οικιακούς χώρους, ξενοδοχειακές επιχειρήσεις, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, κτηνοτροφικές μονάδες, θερμοκήπια, ιχθυοκαλλιέργειες και σε ορισμένες περιπτώσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση γεωθερμίας και ειδικότερα των γεωθερμικών συστημάτων είναι πολλά:

- Ενέργεια σε ελάχιστο κόστος. Λόγω της χαμηλής κατανάλωσης και της σχεδόν ανύπαρκτης συντήρησης του εξοπλισμού, τα γεωθερμικά συστήματα κλιματισμού μπορούν να εξοικονομήσουν από 55% μέχρι και 70% από την ετήσια δαπάνη σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα θέρμανσης και κλιματισμού. Το μόνο λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης είναι η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από τον συμπιεστή και τις αντλίες, το οποίο είναι οικονομικότερο σε σχέση με τη χρήση λέβητα πετρελαίου κατά 20-25%.
- Απόδοση. Ένα γεωθερμικό σύστημα είναι 3 έως 5 φορές αποδοτικότερο από ένα συμβατικό σύστημα. Επειδή δεν καίει ορυκτά καύσιμα για να παράγει θερμότητα, παρέχει 3 έως 5 μονάδες ενέργειας για κάθε μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτεί το σύστημα.
- Ανεξαρτησία από το πετρέλαιο θέρμανσης.
- Ασφάλεια. Με ένα σύστημα γεωθερμίας δεν υπάρχει καύση και φλόγα, δεν υπάρχουν καπνοί και οσμές. Δεν υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης, φωτιάς ή ασφυξίας από το μονοξείδιο.
- Φιλικό προς το περιβάλλον. Επειδή δεν χρησιμοποιούνται καύσιμα, δεν συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, που είναι υπεύθυνο για την αύξηση της θερμοκρασίας στον πλανήτη.
- Αθόρυβη λειτουργία. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν για να είναι σχεδόν αθόρυβες. Λειτουργούν πιο αθόρυβα και από ένα ψυγείο.
- Γρήγορη απόσβεση.
- Ζεστό νερό χειμώνα και καλοκαίρι.
- Δροσιά χωρίς κόστος το καλοκαίρι.
- Δυνατότητα επιδότησης.

- Απόλυτη αξιοπιστία κατασκευών σε ακραίες συνθήκες θέρμανσης και κλιματισμού. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται παραπάνω από 20 χρόνια σε κράτη όπως Η.Π.Α, η Ιαπωνία, η Γερμανία, η Ελβετία, η Αυστρία και η Σουηδία.

Από την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας τόσο για ηλεκτροπαραγωγή όσο και για θερμικές εφαρμογές, προκύπτουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που εντοπίζονται στην αποφυγή έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων αέριων ρύπων που εκλύονται από την καύση συμβατικών καυσίμων. Όσον αφορά τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, αυτές καταναλώνουν 30%-60% λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια από τα αποδοτικότερα αερόψυκτα συστήματα (καθώς και συστήματα θέρμανσης) με αντίστοιχη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) κατά 40% περίπου. Εξάλλου όπως είδαμε παραπάνω ισχύει ότι για κάθε 100 μονάδες θερμικής ενέργειας που αποδίδει η αντλία θερμότητας στο κτίριο μας για θέρμανση αυτού, πληρώνουμε μόνο το κόστος των 25 μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει για τη λειτουργία της ενώ οι υπόλοιπες 75 αντλούνται δωρεάν από τη φύση. Τέλος από τη χρήση των συστημάτων αυτών προκύπτουν και κοινωνικά οφέλη, κυρίως από το γεγονός ότι η γεωθερμία αποτελεί ανανεώσιμη και εγχώρια μορφή ενέργειας μέσω κυρίως της δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας και ανάπτυξης σε τοπικό επίπεδο για την εγκατάσταση των γεωθερμικών μονάδων.

Από την άλλη μεριά, τα γεωθερμικά συστήματα, παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα που είναι σαφώς λιγότερα από τα πλεονεκτήματα:

- Το αρχικό κόστος κατασκευής είναι υψηλότερο από αυτό ενός συμβατικού συστήματος. Θα πρέπει να τονίσουμε εδώ ότι το χρονικό διάστημα μετά το οποίο θα αρχίσουμε να έχουμε κέρδος από τη χρήση του γεωθερμικού συστήματος είναι 5 χρόνια στις πιο ακραίες περιπτώσεις.
- Υπάρχει δυσκολία στην επιδιόρθωση μιας διαρροής στα κλειστά κυκλώματα.
- Για τα συστήματα ανοικτού κυκλώματος απαιτείται μεγάλη παροχή καθαρού νερού.

Στη χώρα μας έχουμε εκμεταλλευτεί μέχρι σήμερα λιγότερο από το 1% του συνολικού γεωθερμικού δυναμικού (0% για ηλεκτροπαραγωγή και 5%-8% για θερμικές χρήσεις), όμως στο άμεσο μέλλον μπορεί το αξιοποιημένο γεωθερμικό δυναμικό μέσω άμεσων επενδύσεων, να αυξηθεί σημαντικά και να υπάρχουν για ηλεκτροπαραγωγή, εγκατεστημένα τουλάχιστον 10 MW(e) από τα μηδενικά υφιστάμενα.

Γραφεία Garrett Κατανάλωση ενέργειας
Ανάλυση για το έτος 2000 των δύο κτιρίων

	Συμβ.Κλιματ. 1390m^2		Γεωθερμικό 1860m^2	
ΜΗΝΑΣ	Gas Mcf	Elec kWh	Gas Mcf	Elec kWh
Ιαν-00	36,2	12.400	0,0	9.920
Φεβ-00	21,0	14.720	0,0	10.880
Μαρ-00	6,9	13.600	0,0	9.960
Απρ-00	4,3	15.760	0,0	10.120
Μαϊ-00	3,5	17.920	0,0	11.600
Ιουν-00	4,2	18.560	0,0	12.400
Ιουλ-00	3,2	21.280	0,0	13.120
Αυγ-00	3,2	23.520	0,0	14.480
Σεπ-00	3,2	18.720	0,0	11.120
Οκτ-00	11,2	16.080	0,0	9.840
Νοε-00	21,9	12.720	0,0	10.360
Δεκ-00	69,4	13.600	0,0	13.600
ΣΥΝΟΛΟ	188,2	198.880	0,0	137.400
ΚΟΣΤΟΣ σε $	$ 1.882	$ 17.899	$	$ 10.992
$/m^2	14,20 $/m^2		5,92 $/m^2	

Εικόνα 1.15 Πίνακας όπου γίνεται σύγκριση μεταξύ ενός συμβατικού συστήματος κλιματισμού και ενός γεωθερμικού συστήματος σε δύο δίδυμα κτίρια γραφείων της εταιρίας Garrett Edmond στην Οκλαχόμα. Παρατηρούμε ότι ενώ το κτίριο με εγκατεστημένο το γεωθερμικό σύστημα είναι κατά περίπου 500m^2 μεγαλύτερο από το δίδυμό του με το συμβατικό σύστημα, κοστίζει πολύ λιγότερο τόσο συνολικά όσο και ανά m^2 και έχει σαφώς λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.

Thermal Response Test

Εισαγωγή

Το Thermal Response Test (TRT) ή Θερμικό Τεστ Απόκρισης είναι μια αναγνωρισμένη μέθοδος για τη διαπίστωση της πραγματικής (λειτουργικής) θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους και της θερμικής αντίστασης του εναλλάκτη, μεγέθη τα οποία χρειάζονται για τη σωστή διαστασιολόγηση ενός γεωθερμικού συστήματος. Η εντός της γης μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας απαλλάσσει τον εκτελεστή του έργου από επιπλέον μέτρα ασφάλειας στη μέτρηση. Ιδιαίτερα για μεσαίες και μεγάλες γεωθερμικές εγκαταστάσεις μπορούν, με αυτόν τον τρόπο να εξοικονομηθούν πολυδάπανες επενδύσεις. Το Thermal Response Test υπερέχει ποιοτικά των εργαστηριακών μετρήσεων διότι μέσω αυτής της μεθόδου δεν αλλοιώνονται λιθολογικοί και γεωφυσιολογικοί παράγοντες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα διεθνούς αναγνώρισης της μεθόδου αυτής είναι η απόφαση της διεύθυνσης της Γερουσίας του Βερολίνου η οποία απαιτεί την εκτέλεση του συγκεκριμένου τεστ στην περίπτωση εγκατεστημένου γεωθερμικού συστήματος με απόδοση μεγαλύτερη από 30 kW. Πέρα από τον ακριβή υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας, μπορεί επίσης να μετρηθεί η λεγόμενη θερμική αντίσταση κατά τη γεώτρηση. Αυτή η παράμετρος δείχνει πόσο καλή είναι η εγκατάσταση του γεωθερμικού σωλήνα και επίσης αν αναπτύσσεται λόγω της πίεσης μεγάλη θερμική αντίσταση ή όχι.

Το Thermal Response Test εκτελείται γενικά σε μια δοκιμαστική γεώτρηση εξοπλισμένη με γεωθερμικό σωλήνα. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή μια πειραματική διάταξη συνδέεται με τον γεωθερμικό εναλλάκτη –αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο- και μετριέται για ένα διάστημα μερικών ημερών, η θερμοκρασιακή απόκριση του ανακυκλοφορούντος στον εναλλάκτη εργαζόμενου μέσου (ρευστού), υπό την παροχή ή την άντληση ενός σταθερού ποσού θερμότητας. Από την αξιολόγηση των μετρήσεων αυτών, όπως έχει αναφερθεί προκύπτουν δύο πολύ σημαντικά μεγέθη που είναι η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και η θερμική αντίσταση του εναλλάκτη. Με την τεχνική αυτή μειώνονται στο ελάχιστο οι λανθασμένες προσπάθειες ενώ το ίδιο το πείραμα εκτελείται γρήγορα, αξιόπιστα και οικονομικά. Η κλασική

αξιολόγηση ενός TRT πραγματοποιείται σύμφωνα με τη θεωρία γραμμικής πηγής και άλλων μοντέλων που θα δούμε στη συνέχεια. Η βάση της αξιολόγησης είναι η πορεία του υγρού (εργαζόμενου μέσου) και της θερμοκρασίας του πεδίου της γεώτρησης κατά τη διάρκεια του Thermal Response Test.

Η πρώτη πειραματική διάταξη προς διεξαγωγή μετρήσεων (με φορητή συσκευή) TRT αναπτύχθηκε στη Σουηδία το 1995, ενώ ταυτόχρονα εμφανίστηκε μια παρόμοια συσκευή στις ΗΠΑ. Την κατασκευή των δύο παραπάνω πρωτότυπων ακολούθησαν διάφορες παραλλαγές στη Γερμανία και στην Ολλανδία, ενώ σήμερα υπάρχει πλήθος πειραματικών διατάξεων σε διάφορες χώρες της Ευρώπης(Ελβετία, Αγγλία, Νορβηγία, Βέλγιο) και στον Καναδά. Η διαστασιολόγηση μικρών γεωθερμικών μονάδων, που αποτελούνται από μικρό αριθμό γεωθερμικών εναλλακτών, μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση εμπειρικών τιμών για τις θερμικές ιδιότητες του υπεδάφους, βάσει κατάλληλων πινάκων που περιλαμβάνουν συγκεκριμένες κατηγορίες υπεδάφους. Παρόλα αυτά η μέθοδος αυτή δεν παρέχει σε καμία περίπτωση την ακρίβεια της μεθόδου TRT. Μεγαλύτερες γεωθερμικές εγκαταστάσεις όμως, απαιτούν τη διεξαγωγή μετρήσεων Thermal Response Test, για τον προσδιορισμό της πραγματικής θερμικής συμπεριφοράς του υπεδάφους (πετρώματος) και των εναλλακτών. Επίσης εκτός από τη διαστασιολόγηση και το σχεδιασμό νέων γεωθερμικών συστημάτων, η μέθοδος του TRT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς εγκαταστάσεων που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία, με σκοπό τη διάγνωση κατασκευαστικών ή και σχεδιαστικών σφαλμάτων.

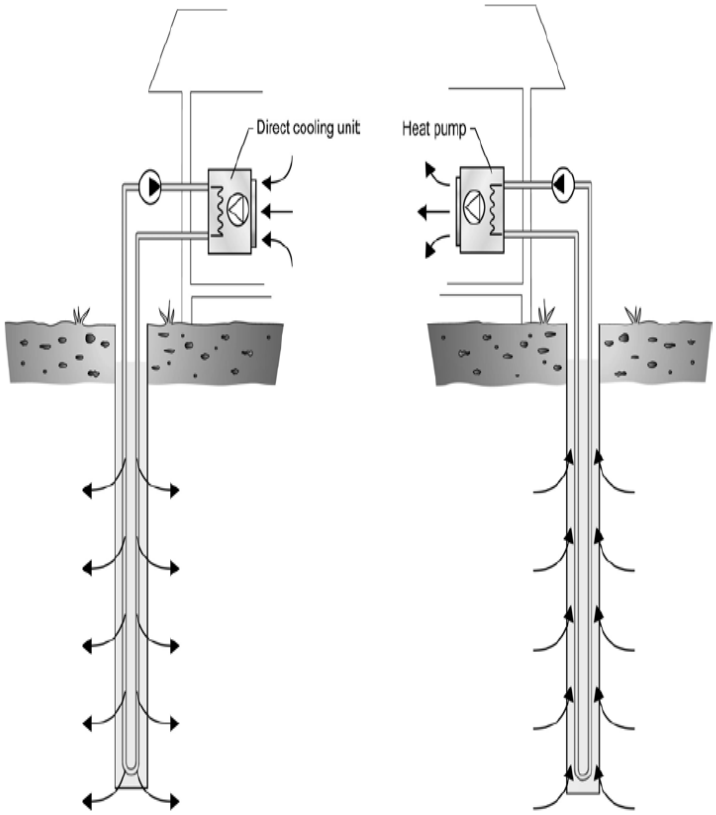
Γεώτρηση

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μέσω γεώτρησης (Borehole Thermal Energy Storage systems-BTES), για αποθήκευση ή/και εξαγωγή θερμότητας ή ψύχους είναι πλέον πολύ διαδεδομένα. Περισσότερες από 20.000 γεωτρήσεις γίνονται με τη χρήση ειδικών τρυπανιών κάθε χρόνο στη Σουηδία. Οι γεωτρήσεις αυτές είναι κυρίως μεμονωμένες και εξυπηρετούν τις ανάγκες μιας οικογένειας, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις κατασκευάζονται μεγαλύτερα συστήματα με περισσότερες από μια γεωτρήσεις. Περίπου μισό εκατομμύριο γεωτρήσεις για την κατασκευή συστημάτων αποθήκευσης

θερμικής ενέργειας (BTES), γίνονται με ειδικό τρόπο κάθε χρόνο στη βόρεια Αμερική, η οποία σήμερα αποτελεί τη μεγαλύτερη αγορά για τα συγκεκριμένα συστήματα σε ολόκληρο τον κόσμο. Το μέγεθος των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη χρήση γεώτρησης ποικίλει. Σε ορισμένες περιπτώσεις αρκεί η διάτρηση μιας και μόνο γεώτρησης αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις όπου χρειάζονται έως και 400. Όσο μεγαλύτερο είναι το σύστημα μας, τόσο καλύτερη εκτίμηση θα έχουμε για τη θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και για την απώλεια θερμοκρασίας μεταξύ του ανακυκλοφορούντος υγρού και του εδάφους.

Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω το πρώτο βήμα για την πραγματοποίηση ενός Thermal Response Test είναι η διάτρηση του εδάφους, δηλαδή η κατασκευή της γεώτρησης, όπως συμβαίνει εξάλλου και με τα γεωθερμικά συστήματα που μελετήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι γεωτρήσεις αυτές μέσω των οποίων γίνεται ανταλλαγή θερμότητα προς ή από το έδαφος ονομάζονται πηγές ενέργειας (energy wells). Ο όρος αυτός αναφέρεται συνήθως σε συστήματα όπου η υπόγεια πηγή θερμότητας ή δεξαμενή είναι είτε το εσωτερικό της γης (υπέδαφος) είτε υπόγεια υδροφόρα ρεύματα που προέρχονται από ένα υδροφόρο στρώμα. Το εσωτερικό της γης (ground) μπορεί να έχει πολλούς διαφορετικούς σχηματισμούς, από σκληρό πέτρωμα (hard rock) έως περισσότερο ή λιγότερο ενισχυμένα ιζηματώδη στρώματα (consolidated sedimentary layers). Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με χρήση γεωτρήσεων(Borehole Thermal Energy Storage) αποτελούνται από αρκετούς εναλλάκτες θερμότητας γεωτρήσεων οι οποίοι ονομάζονται Borehole Heat Exchangers (BHE). Οι εφαρμογές όπου θερμική ενέργεια εγχέεται ή εξάγεται μέσω της γεώτρησης με χρήση αντλιών θερμότητας, αναφέρονται συνήθως ως συστήματα αντλιών θερμότητας με πηγή το έδαφος (Ground Source Heat Pump systems- GSHP). Οι εναλλάκτες θερμότητας γεωτρήσεων (BHE) είναι ουσιαστικά γεωτρήσεις διαμέτρου συνήθως από 0.09m έως 0.15m(δηλ. από 9cm έως 15cm), οι οποίες έχουν βάθος από 30m έως 150m. Ένα υγρό το οποίο λειτουργεί ως μεταφορέας θερμότητας (heat carrier fluid) ανακυκλώνεται μέσα στη γεώτρηση, συνήθως σε ένα κλειστό κύκλωμα, εξάγοντας θερμότητα ή ψύχος από το έδαφος στη μονάδα του χρήστη.

Θα πρέπει να διευκρινιστεί στο σημείο αυτό, ότι στη μέθοδο Thermal Response Test, ο όρος Borehole Heat Exchanger(BHE) αναφερεται σε ολόκληρη τη γεώτρηση μαζί με τον εναλλάκτη θερμότητας που υπάρχει μέσα, ο οποίος αναφέρεται πολύ συχνά και ως συλλέκτης. Είναι δύο παραδοχές όσον αφορά τις ονομασίες, που γίνονται στη συγκεκριμένη μέθοδο, χωρίς να επηρεάζουν περαιτέρω την όλη διαδικασία. Όπως εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε ένα γεωθερμικό σύστημα, γίνεται αναφορά στους όρους αυτούς με τις ονομασίες γεώτρηση και εναλλάκτης θερμότητας αντίστοιχα. Για την αποφυγή σύγχυσης θα χρησιμοποιείται η αγγλική ορολογία. Επίσης οι όροι εργαζόμενο μέσο και ρευστό (υγρό) μεταφοράς θερμότητας αντιπροσωπεύουν το ίδιο ακριβώς, δηλαδή το υγρό που κυκλοφορεί στο σωλήνα του εναλλάκτη.

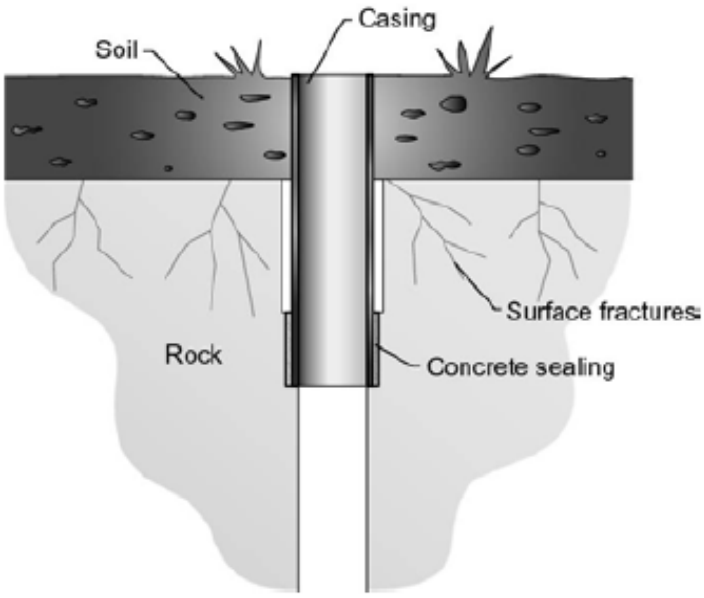


Εικόνα 2.1 Στην αριστερή εικόνα βλέπουμε έναν Borehole Heat Exchanger (BHE) σε μια εφαρμογή για απευθείας ψύξη ενώ στη δεξιά εικόνα ο εναλλάκτης θερμότητας γεώτρησης (BHE) χρησιμοποιείται μαζί με μια αντλία θερμότητας για τη θέρμανση ενός χώρου.

Διάτρηση εδάφους

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι διάτρησης του εδάφους (συγκεκριμένα σκληρού πετρώματος-hard rock) είναι η περιστροφική διάτρηση, η διάτρηση top hammer (μεταφράζεται ως μεγάλου σφυροκοπήματος) και η διάτρηση down-hole. Η μέθοδος top hammer χρησιμοποιεί κρουστική δράση, με την κρουστική ενέργεια να παρέχεται από ένα ειδικό σφυρί συναρμολόγησης που ονομάζεται Drifter. Είναι γρήγορη αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σχετικά μικρές γεωτρήσεις έως 80m, καθώς σε μεγαλύτερα βάθη έχουμε απώλεια ενέργειας λόγω της μεταφοράς των κρουστικών παλμών. Η περιστροφική διάτρηση είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται παγκοσμίως, για γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, αλλά έχει χαμηλό ρυθμό διείσδυσης στο έδαφος και για αυτό το λόγο είναι ακριβή διαδικασία. Η μέθοδος down-hole χρησιμοποιείται περισσότερο από τις άλλες δύο και βασίζεται στον συμπιεσμένο αέρα. Είναι η πιο γρήγορη μέθοδος γεώτρησης σε βράχο και όταν συνδυάζεται με ειδικά συστήματα περιβλήματος αποτελεί μια πολύ ευέλικτη μέθοδο γεώτρησης. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι εισάγει περιορισμό στο βάθος της γεώτρησης. Παρόλα αυτά ο περιορισμός αυτός μπορεί να εξαλειφθεί αν χρησιμοποιηθεί ως ρευστό διάτρησης, νερό και όχι ο αέρας.

Όταν πραγματοποιούνται γεωτρήσεις σε χωματώδη εδάφη ή σε ασταθή πετρώματα χρειάζεται να γίνει σταθεροποίηση της γεώτρησης με ειδικά περιβλήματα. Γι αυτό χρησιμοποιούνται ειδικούς σωλήνες από χάλυβα ή πλαστικό για να αποφευχθεί κατάρρευση της γεώτρησης. Οι σουηδικοί κανονισμοί σε τέτοιου είδους περιπτώσεις προτείνουν περίβλημα τουλάχιστον 6m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το ειδικό περίβλημα που χρησιμοποιείται πρέπει να σφραγιστεί με σκυρόδεμα (τσιμέντο).



Εικόνα 2.2 Στην εικόνα αυτή διακρίνεται το πάνω μέρος μιας γεώτρησης που έχει ειδικό περίβλημα (sealing) για τη σταθεροποίησή της και το οποίο έχει σφραγιστεί.

Συλλέκτης (Εναλλάκτης)

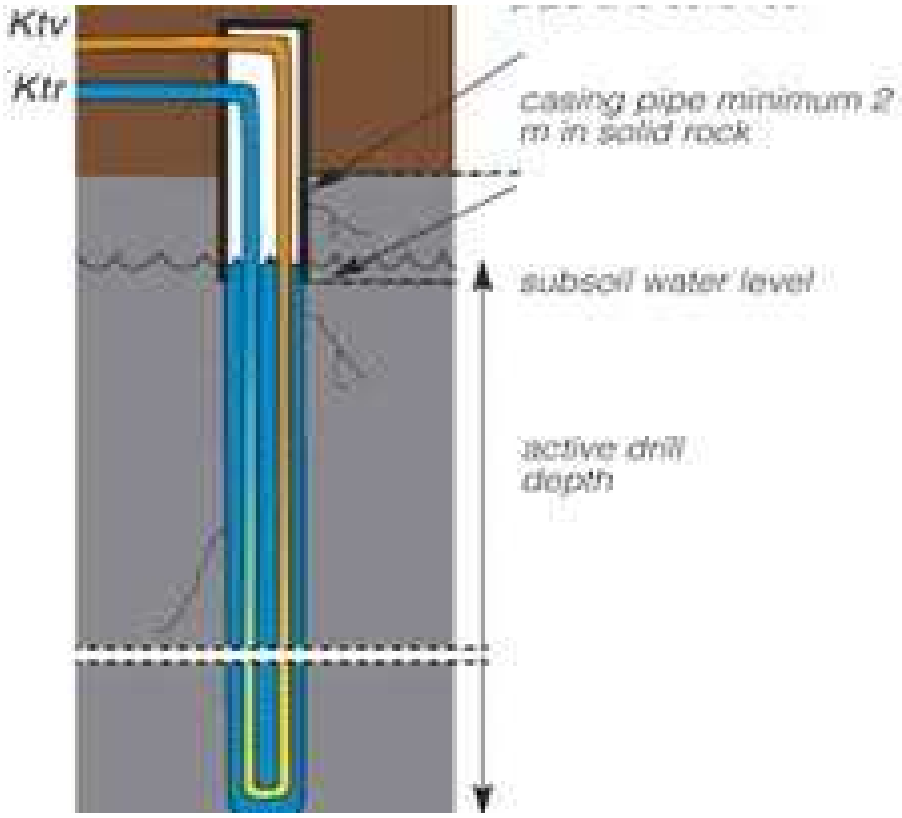
Έχει γίνει γνωστό έως τώρα ότι οι κάθετοι γεωεναλλάκτες θερμότητας ταξινομούνται με βάση τη γεωμετρία τους και τον τρόπο που γίνεται η ανταλλαγή θερμότητας από τα κανάλια ροής. Σύμφωνα με την παραδοχή που έγινε λίγο παραπάνω, ο εναλλάκτης μπορεί να αναφέρεται με τον όρο συλλέκτης. Υπάρχουν 2 βασικοί τύποι εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται σε γεωτρήσεις, οι εναλλάκτες τύπου U (U-pipe) και οι ομοαξονικοί (coaxial). Στους εναλλάκτες τύπου U τόσο το ανοδικό όσο και τα καθοδικό κανάλι ροής συμμετέχουν στην ανταλλαγή θερμότητας με το έδαφος. Οι εναλλάκτες αυτού του τύπου μπορούν να έχουν 2 ή περισσότερα κανάλια ροής. Πιο συνηθισμένοι είναι οι εναλλάκτες με ένα κανάλι σχήματος U (single U-pipe), αλλά στις μέρες μας χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά εναλλάκτες με δύο κανάλια σχήματος U (double U-pipe) εξαιτίας της μικρότερης θερμικής αντίστασης και των λιγότερων θερμικών απωλειών που παρουσιάζουν. Από την άλλη μεριά το κύριο χαρακτηριστικό των ομοαξονικών εναλλακτών θερμότητας είναι ότι η ανταλλαγή θερμότητας γίνεται είτε από το ανοδικό είτε από το καθοδικό κανάλι ροής. Η κατεύθυνση της ροής αυτής μπορεί να είναι διαφορετική κατά τη διάρκεια έγχυσης ή εξαγωγής θερμότητας. Ο εσωτερικός σωλήνας είναι συχνά θερμικά μονωμένος για να αποφύγουμε το θερμικό βραχυκύκλωμα μεταξύ των δύο καναλιών ροής. Οι δύο τύποι εναλλακτών θερμότητας φαίνονται στην Εικόνα 1.8

Ολοκλήρωση Γεώτρησης

Όπως έχει αναφερθεί στη μέθοδο TRT, μέσα σε μια γεώτρηση τοποθετείται ένα σύστημα γεωθερμικού εναλλάκτη. Σε μια κάθετη γεώτρηση όπως αυτές που αναλύονται στο κεφάλαιο αυτό, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε κάποιο είδος υλικού επιχωμάτωσης (backfilling material) για να γεμίσει το κενό μεταξύ των καναλιών ροής και των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Ένας από τους λόγους που κάνουμε το παραπάνω είναι για να υπάρχει καλύτερη θερμική επαφή με το έδαφος, εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του φυσικού υλικού με το οποίο «γεμίζεται» τη γεώτρηση. Ένας επιπλέον λόγος είναι ότι με την τεχνική αυτή, περιορίζεται η κάθετη κίνηση του νερού κατά μήκος της γεώτρησης έτσι ώστε να αποφευχθεί η μεταφορά μολυσμένου νερού

και η αποξήρανση των στρωμάτων χώματος (soil layers) κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Τα ειδικά συνδετικά υλικά (grouts-ρευστοκονιάματα) χρησιμοποιούνται για να παρέχουν χαμηλή διαπερατότητα. Είναι σημαντικό τα υλικά αυτά να έχουν την δυνατότητα να «συνδέσουν» τα τοιχώματα της γεώτρησης με τους σωλήνες του συλλέκτη. Τα πιο συνηθισμένα συνδετικά υλικά όπως ο μπεντονίτης έχουν συνήθως χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

Σε ορισμένες χώρες όπως στη Σουηδία και στη Νορβηγία δε χρησιμοποιούν κανένα συνδετικό υλικό, αλλά οι γεωτρήσεις «γεμίζονται» με υπόγεια νερά. Οι γεωτρήσεις ανοίγονται σε σκληρά πετρώματα με τη στάθμη των υπόγειων νερών να βρίσκεται λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 2.3 Στην εικόνα αυτή φαίνεται γεώτρηση με ειδικό περίβλημα για τη σταθεροποίησή της, τουλάχιστον δύο μέτρα μέσα σε σκληρό πέτρωμα, καθώς και η στάθμη των υπόγειων νερών κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Θερμική Αγωγιμότητα(λ)

Στη φυσική με τον όρο «θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού», γίνεται αναφορά στη δυνατότητα του υλικού αυτού να άγει θερμότητα. Η μεταφορά θερμότητας ανάμεσα σε υλικά που παρουσιάζουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα γίνεται με γρηγορότερο ρυθμό, από ότι ανάμεσα σε υλικό με μικρότερη θερμική αγωγιμότητα.

Επομένως υλικά που παρουσιάζουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα χρησιμοποιούνται ευρέως ως δεξαμενές θερμότητας, ενώ αντίστοιχα υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα χρησιμοποιούνται ως θερμική μόνωση. Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Σε γενικές γραμμές τα υλικά τείνουν να γίνουν περισσότερο αγώγιμα στη θερμότητα, όσο η μέση θερμοκρασία αυξάνεται. Το αντίστροφο της θερμικής αγωγιμότητας είναι η θερμική αντίσταση. Στο S.I η θερμική αγωγιμότητα μετριέται σε W/(m·K).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, κατά τη διάρκεια του πειράματος Thermal Response Test από τα δεδομένα που συλλέγονται, με την εφαρμογή διάφορων μοντέλων προκύπτει τελικά η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους, δηλαδή πόσο εύκολα ή μη γίνεται η μεταφορά της θερμότητας από το σύστημα της γεώτρησης με τον εναλλάκτη, προς το έδαφος γύρω από αυτή. Εκτιμάται επομένως πόσο μεγάλη είναι η μεταφορά θερμότητας μέσω του εδάφους.

Μαζί με τη θερμική αντίσταση του γεωθερμικού εναλλάκτη είναι οι δύο βασικές παράμετροι σχεδιασμού γεωθερμικών εγκαταστάσεων.

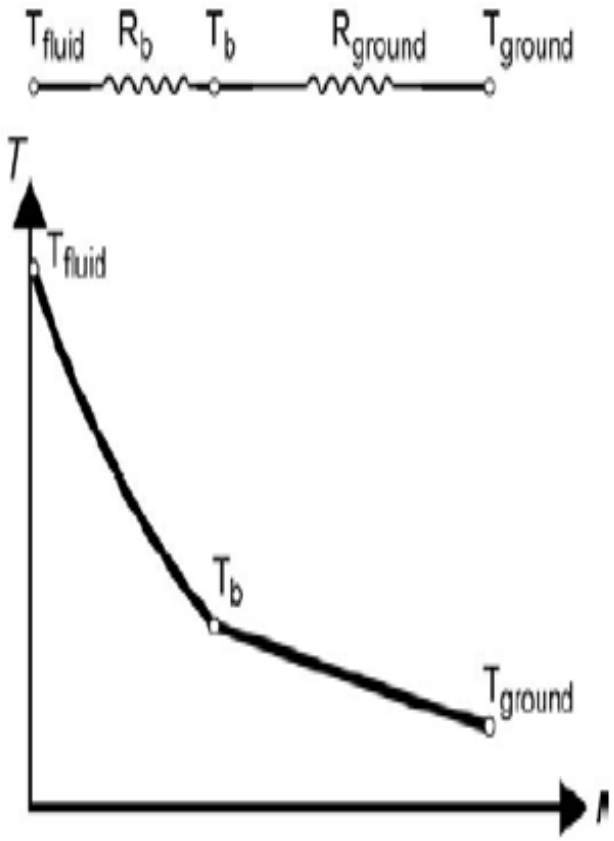
Θερμική Αντίσταση(R_b)

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για τη σχεδίαση και στη συνέχεια την κατασκευή συστημάτων γεωτρήσεων είναι η θερμική αντίσταση μεταξύ του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στα κανάλια ροής του εναλλάκτη της γεώτρησης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Η αντίσταση αυτή (R_b) μεταξύ του ρευστού και του τοιχώματος της γεώτρησης δίνει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας του ρευστού στο συλλέκτη ή εναλλάκτη (T_f) και της θερμοκρασίας στο τοίχωμα της γεώτρησης (T_b) για ένα συγκεκριμένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας q (W/m):

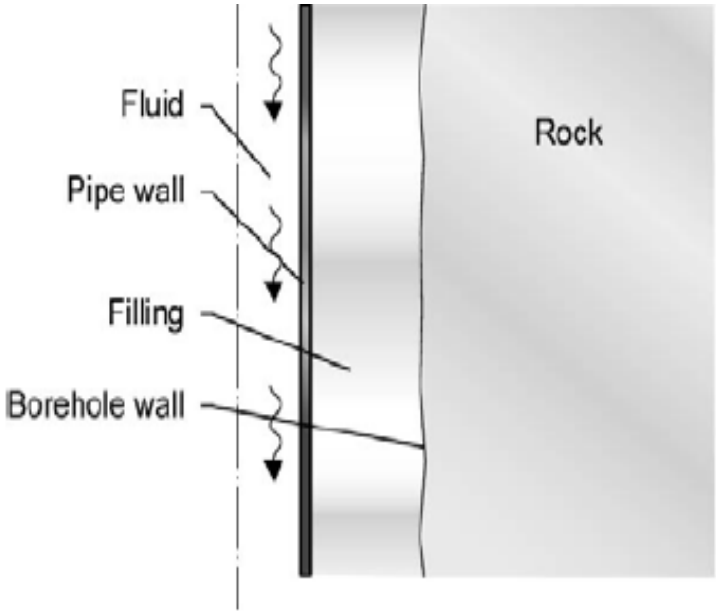
$$T_f - T_b = R_b \cdot q \qquad \text{(Εξ. 2.1)}$$

Η παράμετρος αυτή που ονομάζεται επίσης θερμική αντίσταση γεώτρησης (borehole thermal resistance) εξαρτάται από τη διευθέτηση των καναλιών ροής και τις θερμικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται. Οι τιμές που παρατηρούνται για το μέγεθος αυτό σε πραγματικά συστήματα κυμαίνονται από 0.01 $KW^{-1}m$ για ένα ανοικτό σύστημα, έως 0.20 $KW^{-1}m$ για απλούς σωλήνες τύπου U, όπου έχει χρησιμοποιηθεί μπεντονίτης ως συνδετικό υλικό. Η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας και στη γεώτρηση (τοιχώματα) είναι ανάλογη του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Για ρυθμό μεταφοράς θερμότητας 50 Wm^{-1} η αντίστοιχη διαφορά θερμοκρασίας κυμαίνεται από 0.5 έως 10 βαθμούς Κελσίου. Η θερμική αντίσταση της γεώτρησης (συστήματος γεωτρήσεων) επιδρά σημαντικά στην απόδοση του όλου συστήματος και γι αυτό το λόγο πρέπει να κρατηθεί όσο πιο μικρή γίνεται. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για να «γεμίσουν» μια γεώτρηση (π.χ μπεντονίτης ή τσιμέντο) συνήθως παρέχουν καλύτερη μεταφορά θερμότητας απ’ ότι το καθαρό νερό. Εντούτοις στις γεωτρήσεις που «γεμίζονται» με νερό (water-filled boreholes) , η μεταφορά θερμότητας προκαλεί τη φυσική μεταφορά του νερού που βρίσκεται μέσα στις γεωτρήσεις και στο περιβάλλοντα διαπερατό έδαφος. Αυτό το φαινόμενο που συμβαίνει όταν ο ρυθμός μεταφορά θερμότητας είναι μεγάλος, οδηγεί σε μια μείωση της συνολικής θερμικής αντίστασης της γεώτρησης.

Η συνολική θερμική απόδοση του πεδίου της γεώτρησης εξαρτάται όχι μόνο από τη θερμική αντίσταση της γεώτρησης (R_b) αλλά και από την παροδική θερμική αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους και τη θερμική επιρροή των άλλων γεωτρήσεων σε ένα μεγάλο σύστημα. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μαθηματικοί τύποι για την εύρεση της λειτουργικής θερμικής αντίστασης (effective thermal resistance) μιας γεώτρησης, η οποία αντίσταση περιλαμβάνει τις επιδράσεις από τις εναλλαγές της θερμοκρασίας του εργαζόμενου ρευστού.



Εικόνα 2.4 Στην εικόνα αυτή φαίνεται η βασική αρχή συμπεριφοράς της θερμικής αντίστασης στη γεώτρηση. T_{fluid} είναι η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου(υγρό που μεταφέρει θερμότητα), T_b είναι η θερμοκρασία των τοιχωμάτων της γεώτρησης και T_{ground} η θερμοκρασία του εδάφους που περιβάλλει τη γεώτρηση. Πρέπει να επισημανθεί ότι υπάρχουν 2 αντιστάσεις, η θερμική αντίσταση της γεώτρησης και το έδαφος που συμπεριφέρεται ως αντίσταση.

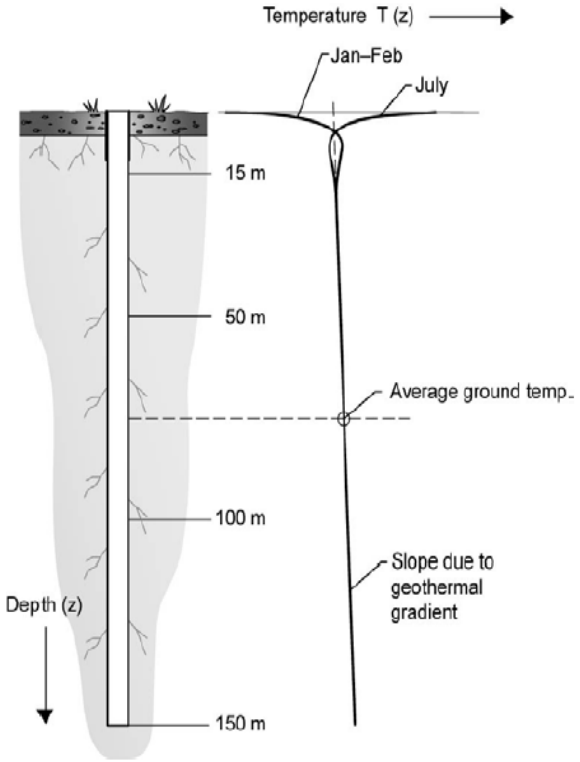


Εικόνα 2.5 Στην εικόνα αυτή φαίνονται όσα έχουν αναλυθεί σε αυτό το κεφάλαιο, το υγρό μεταφοράς θερμότητας, οι σωλήνες του εναλλάκτη, το τοίχωμα της γεώτρησης καθώς και η σύνδεση του σωλήνα με το τοίχωμα χρησιμοποιώντας κατάλληλο υλικό που ονομάζεται grout.

Σταθερή θερμοκρασία(θερμοκρασία ισορροπίας) υπεδάφους

Μια καλή εκτίμηση της θερμοκρασίας ισορροπίας του υπεδάφους είναι απαραίτητη για τη σχεδίαση του γεωεναλλάκτη θερμότητας (ground heat exchanger). Η εποχιακή αλλαγή της θερμοκρασίας εδάφους εξαιτίας της εποχιακής αλλαγής της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, φτάνει μόνο 10m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτός είναι και ο λόγος που στα πρώτα 100m περίπου, η θερμοκρασία του υπεδάφους παραμένει σταθερή όπως επισημάνθηκε στο πρώτο Κεφάλαιο. Για τις εφαρμογές που μελετούνται δηλαδή για συστήματα αποθήκευσης θερμότητας με χρήση γεωτρήσεων (Borehole Thermal Energy Storage) , δεν είναι απαραίτητο να ληφθεί υπ' όψιν η αλλαγή της θερμοκρασίας κατά μήκος της γεώτρησης. Η μέση θερμοκρασία κατά μήκος της γεώτρησης είναι μια καλή εκτίμηση της σταθερής θερμοκρασίας του εδάφους γύρω από αυτήν. Όταν καταγράφεται η θερμοκρασία αυτή πρέπει η γεώτρηση να βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον έδαφος. Η θερμοκρασία που προκύπτει από την μέτρηση της θερμοκρασίας του υγρού που κυκλοφορεί στο σωλήνα σχήματος U (εναλλάκτη), δίνει τη σωστή θερμοκρασία του υπεδάφους η οποία παραμένει σταθερή (αμετάβλητη) για βάθος έως 120m περίπου. Η συγκεκριμένη

θερμοκρασία καταγράφεται κάθε λίγα μέτρα κατά μήκος του σωλήνα του εναλλάκτη και τα αποτελέσματα που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του αριθμητικού μέσου της θερμοκρασίας της γεώτρησης. Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα λαμβάνεται από ένα σχεδιάγραμμα θερμοκρασίας, το οποίο καθορίζεται από την καταγραφή της θερμοκρασίας, σε τακτά χρονικά διαστήματα, του ανακυκλοφορούντος εργαζόμενου μέσου στο σωλήνα. Μια συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας ισορροπίας, είναι η ανακύκλωση του υγρού μεταφοράς θερμότητας μέσα στη γεώτρηση, για περίπου μισή ώρα πριν τεθεί σε λειτουργία το σύστημα θέρμανσης για να ξεκινήσει το Thermal Response Test. Εντούτοις, παρόλο που στο συγκεκριμένο διάστημα η θερμάστρα είναι σβηστή και δεν μεταφέρεται θερμότητα, θα υπάρχει μια μικρή θέρμανση του εργαζόμενου μέσου (διάλυμα νερού στη συγκεκριμένη περίπτωση) από τη λειτουργία των αντλιών.



Εικόνα 2.6 Σχεδιάγραμμα θερμοκρασίας υπεδάφους. Φαίνεται ότι τόσο τους χειμερινούς όσο και τους καλοκαιρινούς μήνες η θερμοκρασία έως και 150 μέτρα περίπου κάτω από την επιφάνεια του εδάφους παραμένει σταθερή και δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Η σημασία καθορισμού της σταθερής θερμοκρασίας του υπεδάφους είναι μεγάλη και γι αυτό το λόγο έχουν γραφτεί πολλές μελέτες για το συγκεκριμένο θέμα.

Θα πρέπει να τονίστεί στο σημείο αυτό ότι το έδαφος επηρεάζεται από τη διαδικασία διάτρησης για την κατασκευή της γεώτρησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ορισμένες φορές, τη θέρμανση του εδάφους, εξαιτίας της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής. Γι αυτό το λόγο απαιτείται ορισμένος χρόνος για να επανέλθει το έδαφος στην αρχική του κατάσταση. Μετά την πάροδο του διαστήματος αυτού είναι δυνατό να υπολογιστεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια η σταθερή θερμοκρασία του υπεδάφους γύρω από τη γεώτρηση. Δυστυχώς το συγκεκριμένο κομμάτι βρίσκεται ακόμη υπό μελέτη και δεν είναι ακόμη γνωστό ακριβώς πόσος χρόνος απαιτείται.

Thermal Response

Εξέλιξη θερμοκρασίας

Ο όρος «απόκριση θερμοκρασίας της γεώτρησης» αναφέρεται στη διακύμανση (εξέλιξη) της θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου, όταν επιβάλλεται ένα γνωστό ποσό θερμότητας ή ψύξης με την ανακυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου (υγρό μεταφοράς θερμότητας), μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας της γεώτρησης. Από την αξιολόγηση της θερμοκρασία του υγρού συναρτήσει του χρόνου, λαμβάνονται χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις θερμικές ιδιότητες μέσα και γύρω από τη γεώτρηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η θερμική αγωγιμότητα. Αν η απόκριση της θερμοκρασίας είναι γρήγορη αυτό σημαίνει ότι η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρή. Έτσι γίνεται μια πρώτη προσέγγιση για το μέγεθος αυτό, προτού βρεθεί αναλυτικά στη συνέχεια. Η απόκριση της θερμοκρασίας δίνει επίσης πληροφορίες σχετικά με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υγρού μεταφοράς θερμότητας και του εδάφους που περικλείει τη γεώτρηση, δηλαδή για τη θερμική αντίσταση του εναλλάκτη θερμότητας της γεώτρησης.

Η ανάπτυξη της θερμοκρασίας του υγρού αυτού μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά από την παρακάτω σχέση που ονομάζεται Heat Equation (εξίσωση θερμότητας):

$\Delta T = T_f - T_b$ (Εξ. 2.2)

Η μέση θερμοκρασία του υγρού (T_f) ορίζεται ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών εισόδου (T_{in}) και εξόδου (T_{out}) του εναλλάκτη θερμότητας της γεώτρησης. Η εγχεόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η μέση θερμοκρασία της γεώτρησης (T_b). Κατά την έγχυση (εισαγωγή) ενός σταθερού ποσού θερμότητας, οι θερμοκρασίες T_f και T_b διαφοροποιούνται με την πάροδο του χρόνου, αλλά ύστερα από ένα μικρό χρονικό διάστημα, η διαφορά θερμοκρασίας $\Delta T = T_f - T_b$ φθάνει σε μια σταθερή τιμή. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται «κατάσταση σταθερής ροής» (steady-flux state) και το ΔT είναι ανάλογο του ρυθμού θερμότητας που εισάγεται q (Wm^{-1}) ανά μέτρο του εναλλάκτη θερμότητας όπως φαίνεται και στην Εξίσωση 2.1.

Στην πραγματικότητα η εισαγωγή ή εξαγωγή θερμότητας σε/από έναν εναλλάκτη θερμότητας είναι σπάνια σταθερή, αλλά μπορεί να αναπαρασταθεί με αρκετή ακρίβεια από τμηματικές σταθερές τιμές.

Στην εργασία αυτή όπως θα φανεί και από τα δεδομένα στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται η παραδοχή ότι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι σχεδόν σταθερός.

Τρόποι υπολογισμού παραμέτρων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να υπολογιστούν οι θερμικές ιδιότητες του εδάφους για ένα σύστημα γεωτρήσεων με εναλλάκτες θερμότητας (Borehole Heat Exchanger system). Ο πιο απλός τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν γνωστές (τυποποιημένες) τιμές για τον τύπο του πετρώματος, που βρίσκεται το σύστημα το οποίο εξετάζεται. Έχουν αναπτυχθεί πολύ χρήσιμοι πίνακες, οι οποίοι δίνουν τις θερμικές και υδραυλικές ιδιότητες (υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες) ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.

Medium	Hydraulic Properties		Thermal Properties	
	Hydraulic conductivity (K) [ms^{-1}]	Porosity (n) [-]	Thermal conductivity (λ) [$Wm^{-1}K^{-1}$]	Volumetric heat capacity (c_p) [$Jm^{-3}K^{-1}$]
Gravel (dry)	$3\cdot10^{-4}$-$3\cdot10^{-2}$	0.24 – 0.38	0.70 – 0.90	$1.4\cdot10^{6}$
Coarse sand (dry)	$9\cdot10^{-7}$-$6\cdot10^{-3}$	0.31 – 0.46	0.70 – 0.90	$1.4\cdot10^{6}$
Fine sand (dry)	$2\cdot10^{-7}$-$2\cdot10^{-4}$	0.26 – 0.53	0.70 – 0.90	$1.4\cdot10^{6}$
Silt	10^{-9}-$2\cdot10^{-5}$	0.34 – 0.61	1.20 - 2.40	$2.4\cdot10^{6}$-$3.3\cdot10^{6}$
Clay	10^{-11}-$4.7\cdot10^{-9}$	0.34 – 0.60	0.85 - 1.10	$3\cdot10^{6}$-$3.6\cdot10^{6}$
Limestone	10^{-9}-$6\cdot10^{-6}$	0 – 0.20	1.50 - 3.30	$2.13\cdot10^{6}$-$5.5\cdot10^{6}$
Karst limestone	10^{-6}-10^{-2}	0.05 – 0.50	2.50 – 4.30	$2.13\cdot10^{6}$-$5.5\cdot10^{6}$
Sandstone	$3\cdot10^{-10}$-$6\cdot10^{-6}$	0.05 – 0.30	2.30 – 6.50	$2.13\cdot10^{6}$-$5\cdot10^{6}$
Shale	10^{-13}-$2\cdot10^{-9}$	0 – 0.10	1.50 - 3.500	$2.38\cdot10^{6}$-$5.5\cdot10^{6}$
Fractured igneous and metamorphic rock	$8\cdot10^{-9}$-$3\cdot10^{-4}$	0 – 0.10	2.50 – 6.60	$2.2\cdot10^{6}$
Unfractured igneous and metamorphic rock	$3\cdot10^{-13}$-$2\cdot10^{-10}$	0 – 0.05	2.50 – 6.60	$2.2\cdot10^{6}$

Εικόνα 2.7 Τυπικές τιμές υδραυλικών και θερμικών ιδιοτήτων για διάφορα είδη χώματος και πετρώματος(CHIASSON 2000).

Υπάρχουν επίσης εργαστηριακές μέθοδοι για τον καθορισμό της θερμικής αγωγιμότητας των στερεών υλικών, εντούτοις απαιτούν δείγματα τα οποία είναι ακριβά και δεν δίνουν ολόκληρη την εικόνα της στρωματογραφίας του εδάφους .

Το Thermal Response Test παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1983 από τον Morgensen σαν μια μέθοδος καθορισμού της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους και της θερμικής αντίστασης σε συστήματα γεωτρήσεων με εναλλάκτες θερμότητας. Πρότεινε λοιπόν ένα σύστημα, όπου ένα υγρό μεταφοράς θερμότητας αρχικά ψυγμένο, θα ανακυκλώνεται διαρκώς μέσω ενός συστήματος ΒΗΕ με σταθερό ρυθμό εξαγωγής θερμότητας, ενώ η θερμοκρασία εξόδου του υγρού από το σύστημα θα καταγράφεται διαρκώς. Τα δεδομένα θερμοκρασίας που λαμβάνονται με την πάροδο του χρόνου (η λεγόμενη Θερμική Απόκριση ή Thermal Response) συγκρίνεται με ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας, που συμβαίνουν στη γεώτρηση και στο έδαφος γύρω από αυτή. Το μοντέλο αυτό εξαρτάται πρωτίστως από τη θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και από τη θερμική αντίσταση της γεώτρησης, οι οποίες αποτελούν και τις δύο βασικές

παραμέτρους σχεδιασμού γεωθερμικών εγκαταστάσεων. Η μέθοδος του Morgensen χρησιμοποιήθηκε επίσης για την αξιολόγηση των συστημάτων γεωτρήσεων με εναλλάκτες θερμότητας (Borehole Heat Exchanger) σε διάφορες περιπτώσεις.

Ανακεφαλαιώνοντας η διαστασιολόγηση μικρών γεωθερμικών μονάδων, που αποτελούνται από μικρό αριθμό γεωθερμικών εναλλακτών, μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση εμπειρικών τιμών για τις θερμικές ιδιότητες του υπεδάφους, βάσει κατάλληλων πινάκων που περιλαμβάνουν συγκεκριμένες κατηγορίες υπεδάφους. Μεγαλύτερες γεωθερμικές εγκαταστάσεις απαιτούν τη διεξαγωγή μετρήσεων TRT, για τον προσδιορισμό της πραγματικής θερμικής συμπεριφοράς του πετρώματος (του εδάφους γενικότερα) και των εναλλακτών. Είναι επίσης δυνατή, στην περίπτωση αυτή η χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης για το σχεδιασμό μιας αποδοτικής και βιώσιμης εγκατάστασης.

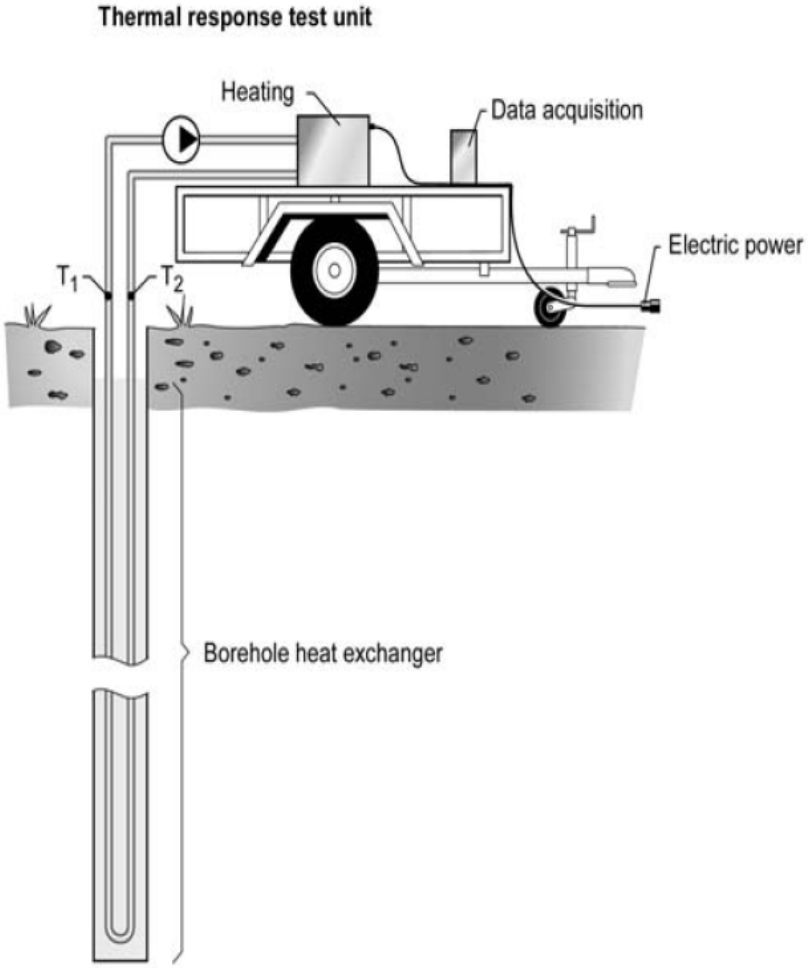
Συσκευές Thermal Response Test

Οι πρώτες κινητές (φορητές) συσκευές μέτρησης για δοκιμές θερμικής απόκρισης (Thermal Response Testing) κατασκευάστηκαν ανεξάρτητα στη Σουηδία και τις Η.Π.Α το 1995. Η σουηδική συσκευή γνωστή ως “TED” κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας στο Lulea . Την ίδια εποχή μια παρόμοια συσκευή αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα. Και οι δύο συσκευές βασίστηκαν στη θεωρία του Morgensen αλλά χρησιμοποιούσαν θερμάστρα και όχι ψυγείο. *Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι σύμφωνα με την πρόταση του Morgensen, το υγρό μεταφοράς θερμότητας αρχικά ψύχεται, ενώ στις συσκευές που αναπτύχθηκαν, το υγρό θερμαίνεται*. Την κατασκευή των δύο παραπάνω πρωτότυπων ακολούθησαν διάφορες παραλλαγές στη Γερμανία και στην Ολλανδία ενώ σήμερα υπάρχει πλήθος πειραματικών διατάξεων σε διάφορες χώρες της Ευρώπης(Ελβετία, Αγγλία, Νορβηγία, Βέλγιο) και στον Καναδά.

Πειραματική διάταξη

Η σουηδική συσκευή θερμικής απόκρισης (response test device) κατασκευάστηκε το 1995 και είχε το όνομα “TED”. Συναρμολογήθηκε πάνω σε ένα μικρό τρέιλερ το οποίο έφερε ειδικό κάλυμμα, και αποτελούνταν από

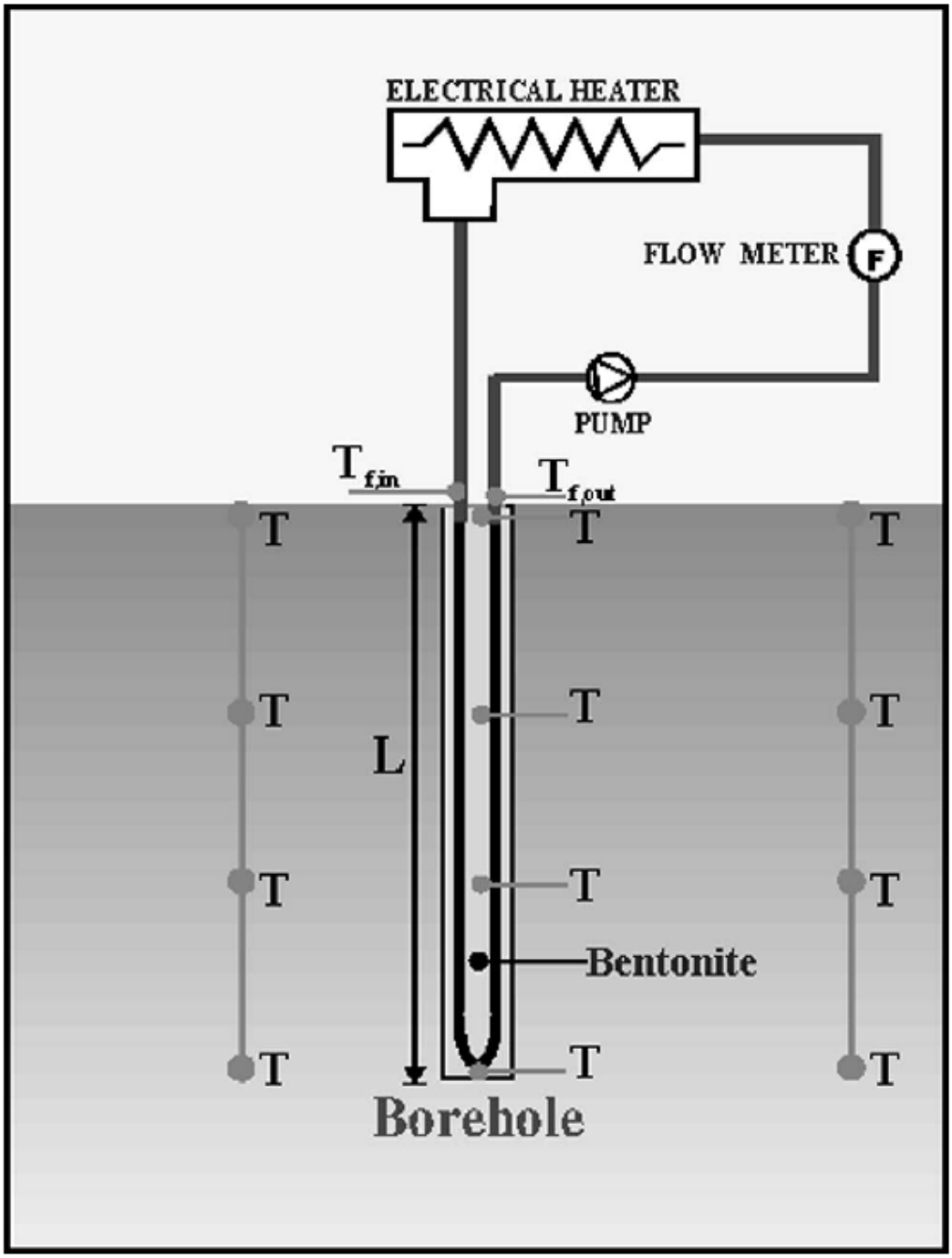
μια θερμάστρα με ηλεκτρική αντίσταση, ειδικά ηλεκτρονικά όργανα και μια δεξαμενή 85L (λίτρων), η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον καθαρισμό (purging) του υγρού και ως δεξαμενή επέκτασης. Η δεξαμενή αυτή περιείχε υγρό για το αρχικό γέμισμα του συστήματος σωληνώσεων. Μια αντλία 1.75 kW ανακύκλωνε το υγρό μεταφοράς θερμότητας μέσα στη γεώτρηση. Η θερμάστρα είχε κλιμακούμενη ρυθμιζόμενη ισχύ με εύρος από 3kW έως 12 kW. Οι θερμοκρασίες του υγρού μετριούνται από θερμοζεύγη που βρίσκονται τοποθετημένα στην είσοδο και έξοδο της γεώτρησης. Οι θερμοκρασίες του υγρού, η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο τρέιλερ και ο ρυθμός ισχύος καταγράφονται σε τακτά χρονικά διαστήματα.



Εικόνα 2.8 Φαίνεται η πειραματική διάταξη εν λειτουργία κατά τη διάρκεια ενός Thermal Response Test. Τα T_1 και T_2 δίνουν η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του υγρού μεταφοράς θερμότητας.

Κατά τη διενέργεια του συγκεκριμένου τεστ η πειραματική διάταξη που περιγράφηκε, η οποία βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη γεώτρηση, είναι συνδεδεμένη με τους (γεμάτους υγρό) σωλήνες του εναλλάκτη. Οι σωλήνες σύνδεσης γεμίζονται νερό από τη δεξαμενή που αναφέρθηκε παραπάνω. Τα εκτεθειμένα στο περιβάλλον μέρη που βρίσκονται ανάμεσα στη γεώτρηση και τη συσκευή δοκιμής απόκρισης, είναι καλά μονωμένα έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η δεξαμενή καθαρισμού είναι συνδεδεμένη με το σύστημα σωλήνων για να συλλέξει τυχόν φουσκάλες αέρα, αν και το υγρό δεν ρέει μέσα στη δεξαμενή. Όταν το σύστημα σωλήνων γεμίσει έως ένα συγκεκριμένο σημείο, δεν προστίθεται επιπλέον υγρό στους σωλήνες από τη δεξαμενή. Στην πραγματικότητα όμως παρατηρείται μια μικρή εσωτερική ροή μέσα στη δεξαμενή, η οποία προκαλείται από την αύξηση όγκου του θερμαινόμενου υγρού. Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη διάρκεια του τεστ (Thermal Response Test) είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, από την στιγμή που θα ξεκινήσει.

Η συσκευή “TED” έχει χρησιμοποιηθεί σε περισσότερα από 30 τεστ θερμικής απόκρισης. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση στη Σουηδία, όσον αφορά τη συγκεκριμένη διαδικασία, είναι οι γεωτρήσεις γεμάτες υπόγεια νερά σε πέτρωμα γρανίτη. Εξαιτίας της ύπαρξης γεωτρήσεων «γεμάτες» υπόγεια νερά, έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της μετάδοσης θερμότητας με μεταγωγή μέσα στη γεώτρηση, καθώς και τοπική ροή της υπόγειας στάθμης νερού. Η συγκεκριμένη συσκευή Thermal Response Test, η πρώτη που κατασκευάστηκε πριν 16 περίπου χρόνια, έχει υποστεί βελτιώσεις με το πέρασμα των χρόνων έως και σήμερα, αλλά η βασική αρχή λειτουργίας παραμένει η ίδια!



Εικόνα 2.9 Στην εικόνα αυτή φαίνεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, για να πραγματοποιηθεί το πρώτο Thermal Response Test, στη Λατινική Αμερική. Πιο συγκεκριμένα το τεστ αυτό έγινε το 2002 στη Χιλή. Παρατηρούμε ότι η γεώτρηση έχει μονωθεί με μίγμα μπεντονίτη 12%. Στο κέντρο της γεώτρησης έχουν τοποθετηθεί 4 θερμοζεύγη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουν γίνει δύο ακόμα γεωτρήσεις, η πρώτη 0.4m αριστερά και η δεύτερη 0.8m δεξιά του BHE. Ο εναλλάκτης είναι σχήματος U-pipe φτιαγμένος από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, η ηλεκτρική θερμάστρα είναι 2kW και η αντλία ανακυκλοφορίας έχει ηλεκτρική ισχύ 370W, στα 2900 rpm. Η εγκατάσταση αυτή αποτελεί ενδεικτικό παράδειγμα εγκατάστασης που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση του Thermal Response Test.

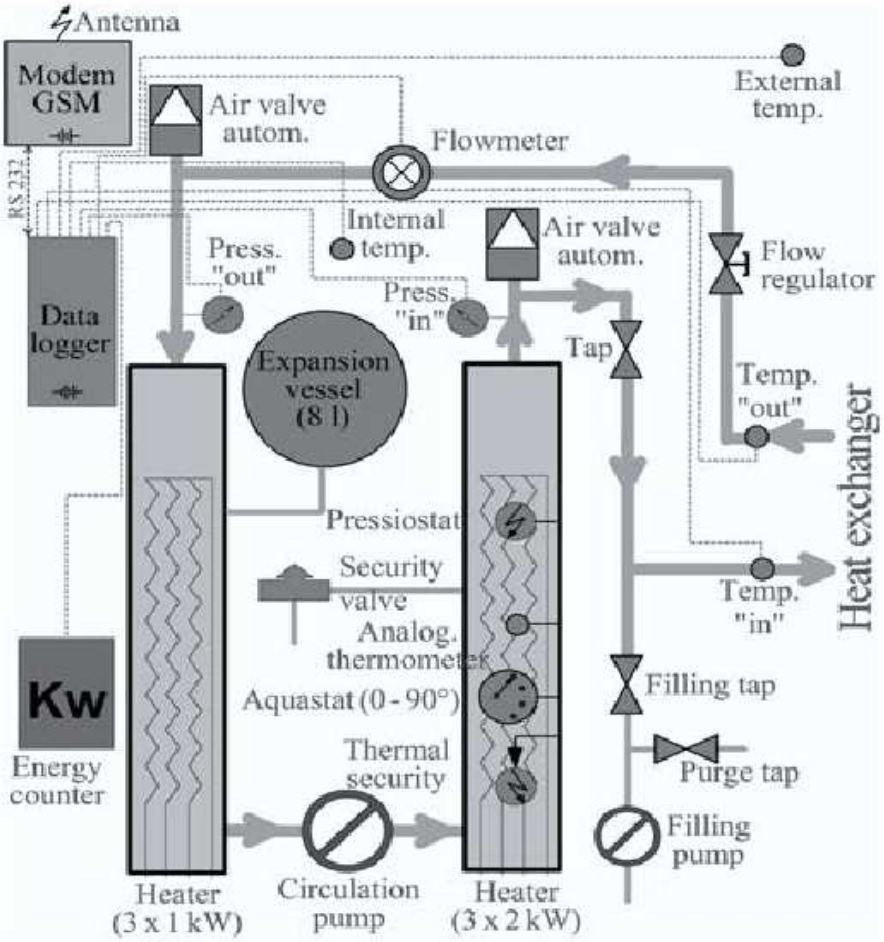
Η τελευταία συσκευή για τη διεξαγωγή του συγκεκριμένου τεστ κατασκευάστηκε το 2005 στο Ελβετικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας στη Λωζάννη. Βασίστηκε στη συσκευή “TED” και ήταν κατασκευασμένη πάνω σε τρέιλερ επίσης. Παρέμειναν όλες οι βασικές γενικές λειτουργίες της προηγούμενης συσκευής, αλλά η συνολική κατασκευή έγινε περισσότερο συμπαγής, για διευκόλυνση κατά τις μετακινήσεις. Η νέα συσκευή περιλαμβάνει μια θερμάστρα, ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, ένα υδραυλικό κύκλωμα όπως επίσης συστήματα ασφαλείας και ρύθμισης για τη θερμοκρασία, τη ροή και την πίεση. Επιπλέον η συσκευή περιέχει συσκευές μέτρησης οι οποίες καταγράφουν τις ακόλουθες 8 παραμέτρους:

- Τη θερμοκρασία του υγρού που εισέρχεται/εξέρχεται
- Την εσωτερική/εξωτερική θερμοκρασία της μονάδας δοκιμής(test unit)
- Την πίεση του εισερχόμενου/εξερχόμενου υγρού μεταφοράς θερμότητας
- Τη ροή του υγρού
- Την κατανάλωση ενέργειας.

Η θερμική ενέργεια μεταδίδεται από το έδαφος στο ανακυκλοφορούν υγρό, με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας στη γεώτρηση. Το κενό μεταξύ των σωλήνων του εναλλάκτη και του τοιχώματος της γεώτρησης γεμίζεται με μπεντονίτη (μπετόν) ή άλλο υλικό, για να εξασφαλιστεί καλή θερμική επαφή και να αποτραπεί η κάθετη κυκλοφορία των υπόγειων υδάτων. Η συσκευή φέρει επίσης ένα φορητό σύστημα μετάδοσης δεδομένων, διά του οποίου ένα modem που είναι εγκατεστημένο μέσα στη μονάδα δοκιμής, εκπέμπει τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί, σε έναν κεντρικό υπολογιστή (server) που είναι συνδεδεμένος με το διαδίκτυο. Με αυτό τον τρόπο η εξέλιξη του Thermal Response Test μπορεί να παρακολουθηθεί από οποιαδήποτε τοποθεσία σε πραγματικό χρόνο. Με τις τελευταίες προσαρμογές που έχουν γίνει, είναι δυνατόν να μεταβληθεί η παροχή ισχύς και να τεθεί σε λειτουργία η συσκευή, στέλνοντας ένα γραπτό μήνυμα(SMS) από κινητό τηλέφωνο.

Το αρχικό κομμάτι του τεστ επικεντρώνεται στον καθορισμό της σταθερής (αμετάβλητης) θερμοκρασίας του υπεδάφους. Κατά την περίοδο αυτή το υγρό (εργαζόμενο μέσο) κυκλοφορεί στον εναλλάκτη χωρίς να θερμαίνεται. Οι μετρήσεις που γίνονται καταγράφονται κάθε λεπτό και το τεστ διαρκεί συνολικά περίπου 7 συνεχόμενες ημέρες, για να εξασφαλιστεί ότι έχουν καταγραφεί αρκετά δεδομένα.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι στα περισσότερα συγγράμματα, αναφέρεται πως 50 ώρες εκτέλεσης του Thermal Response Test, από τη στιγμή που θα τεθεί σε λειτουργία η θερμάστρα (δηλαδή περίπου 70 ώρες),είναι αρκετές για να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Η εκτέλεση του τεστ για παραπάνω ώρες δίνει ασφαλώς περισσότερα δεδομένα, αλλά έχει και μεγαλύτερο κόστος.



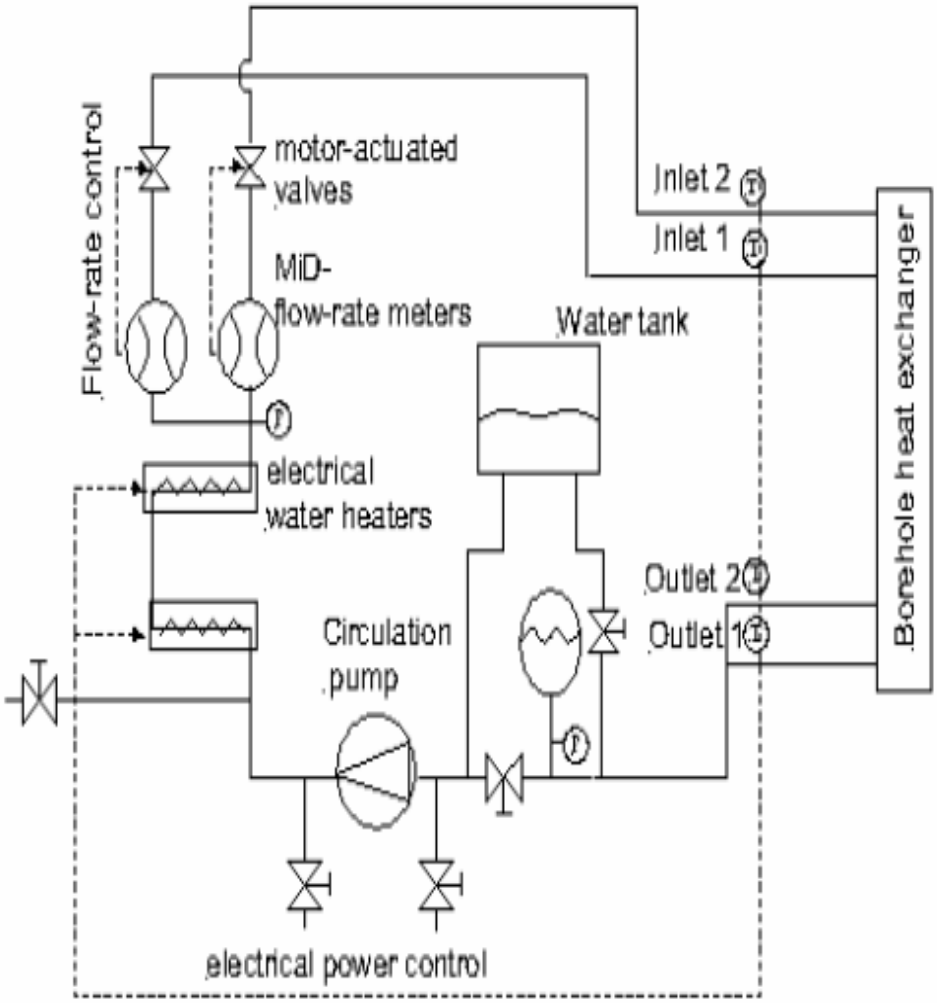
Εικόνα 2.10 Σχηματικό διάγραμμα της συσκευής Thermal Response Test που κατασκευάστηκε το 2005 και αναλύθηκε παραπάνω. Εγκρίθηκε από τον Ελβετικό Οργανισμό Πιστοποίησης.

Υδραυλικό κύκλωμα πειραματικής συσκευής

Οι βασικές προδιαγραφές ποιότητας που πρέπει να ισχύουν σε οποιαδήποτε πειραματική συσκευή για την πραγματοποίηση του Thermal Response Test, είναι από τη μια μεριά η αδιάκοπη παροχή σταθερού ποσού θερμότητας στη γεώτρηση καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, και από την άλλη οι μετρήσεις της θερμοκρασίας και του ρυθμού ροής να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η πειραματική συσκευή που αναπτύχθηκε στη Γερμανία (Zae-Bayern) και η θα αναλυθεί στη συνέχεια αποτελεί τη βάση, μαζί με τη συσκευή TED, πάνω στην οποία στηρίχθηκαν όλες οι μετέπειτα εκδόσεις για τη διενέργεια του τεστ. Η συγκεκριμένη διάταξη αναπτύχθηκε κυρίως για τη διεξαγωγή δοκιμών (tests) σε εναλλάκτες θερμότητας γεωτρήσεων σχήματος μονού U (Single-U) ή διπλού U (Double-U). Οι τελευταίοι είναι ευρέως διαδεδομένοι στη Γερμανία, στην Αυστρία και στην Ελβετία.

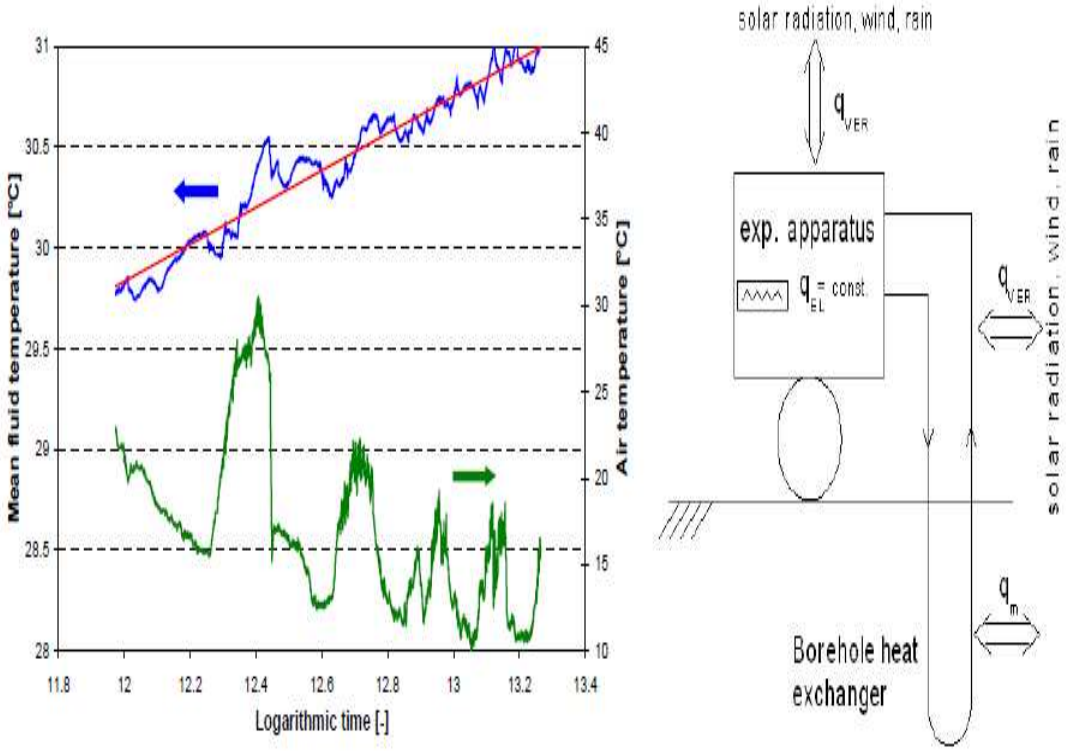
Μια δεξαμενή νερού, μια αντλία (ανά)κυκλοφορίας, δύο ηλεκτρικές θερμάστρες νερού (θερμοσίφωνες), δύο ροόμετρα και περισσότεροι από τέσσερις αισθητήρες θερμοκρασίας είναι τα βασικά όργανα της συσκευής. Η συλλογή δεδομένων ελέγχεται μέσω υπολογιστή με ένα υψηλής ακρίβειας ψηφιακό πολύμετρο, το οποίο προσφέρει μεγάλη ευελιξία στη διαχείριση των μετρήσεων. Τα πειραματικά δεδομένα αποθηκεύονται σε έναν υπολογιστή και μπορούν να αναπαρασταθούν γραφικά σε πραγματικό χρόνο. Οι πολλαπλοί αισθητήρες θερμοκρασίας οι οποίοι, πραγματοποιούν (υπέρ)αρκετές μετρήσεις για τη θερμοκρασία του υγρού και αυξάνουν την αξιοπιστία της συσκευής, έχει αποδειχτεί ότι είναι χρήσιμοι, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που εντοπιστεί σφάλμα σε έναν από τους αισθητήρες. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο κατάστασης λειτουργίας της συσκευής. Η ηλιακή ακτινοβολία και ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία του τεστ, γι αυτό το λόγο, είναι απαραίτητη η πολύ καλή θερμική μόνωση του υδραυλικού κυκλώματος και των σωλήνων σύνδεσης της πειραματικής διάταξης με το γεωθερμικό εναλλάκτη. Η ηλεκτρική ισχύς και η θερμοκρασία του αέρα μέσα και έξω από τη συσκευή καταγράφονται κατά τη διάρκεια του τεστ, έτσι ώστε να είναι εφικτή στη συνέχεια η αναγνώριση, τυχόν επίδρασεων του περιβάλλοντος στην απόκριση της θερμοκρασίας ή διακυμάνσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας που καταγράφουν τη μέση θερμοκρασία του ρευστού, πρέπει να τοποθετηθούν όσο γίνεται πιο

κοντά στους σωλήνες εισόδου και εξόδου, ενώ το μήκος των σωληνώσεων πρέπει να είναι όσο πιο μικρό γίνεται.

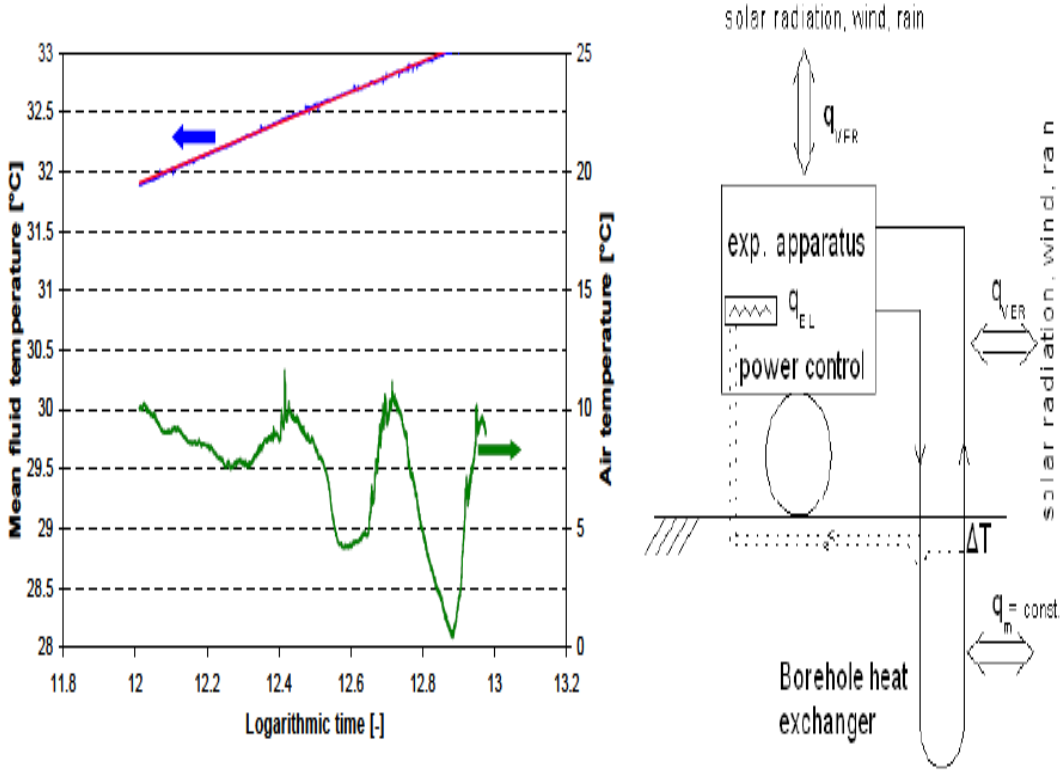


Εικόνα 2.11 Σχηματικό διάγραμμα υδραυλικού κυκλώματος της πειραματικής διάταξης. Αναπτύχθηκε στο ZAE-Bayern.

Παρά τις ρυθμίσεις αυτές, οι εξωτερικές επιδράσεις στα πειραματικά δεδομένα δεν μπορούν να εξαλειφτούν ολοκληρωτικά. Για την εξάλειψη των διαταραχών αυτών, αναπτύχθηκε ένα σύστημα ελέγχου βασισμένο σε PID ελεγκτή, το οποίο εγγυάται την παροχή ενός σταθερού ποσού θερμότητας. Το ποσό θερμότητας ανά μονάδα μήκους γεωθερμικού εναλλάκτη υπολογίζεται βάσει της παροχής όγκου και της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ εισόδου και εξόδου. Επομένως με κατάλληλη ρύθμιση της ογκομετρικής παροχής και της παροχής ηλεκτρικής ισχύος στη θερμαντική αντίσταση(θερμάστρα), μπορεί να επιτευχθεί πρόσδοση σταθερού ποσού θερμότητας στον εναλλάκτη q_m= const, το οποίο συνάδει με τις παραδοχές της θεωρίας γραμμικής πηγής, που θα μελετήθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Η βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του γεωθερμικού εναλλάκτη με την ενσωμάτωση του παραπάνω συστήματος ελέγχου στην πειραματική διάταξη, είναι εμφανής στην Εικόνα 2.13 που ακολουθεί.



Εικόνα 2.12 Επίδραση θερμικού περιβάλλοντος στη θερμοκρασιακή απόκριση του γεωθερμικού εναλλάκτη.



Εικόνα 2.13 Εξάλειψη επίδρασης του εξωτερικού θερμικού περιβάλλοντος στην θερμοκρασιακή απόκριση του εναλλάκτη, χρησιμοποιώντας σύστημα ελέγχου θερμότητας.

Η ύπαρξη ή όχι του συστήματος αυτού, που εγγυάται την παροχή ενός σταθερού ποσού θερμότητας, δεν επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα, σε τόσο μεγάλο βαθμό όσο επισημαίνεται θεωρητικά. Με την χρήση όμως του συστήματος έχουμε 100% ακρίβεια. Ενδεικτικό αυτών είναι ο πίνακας που ακολουθεί.

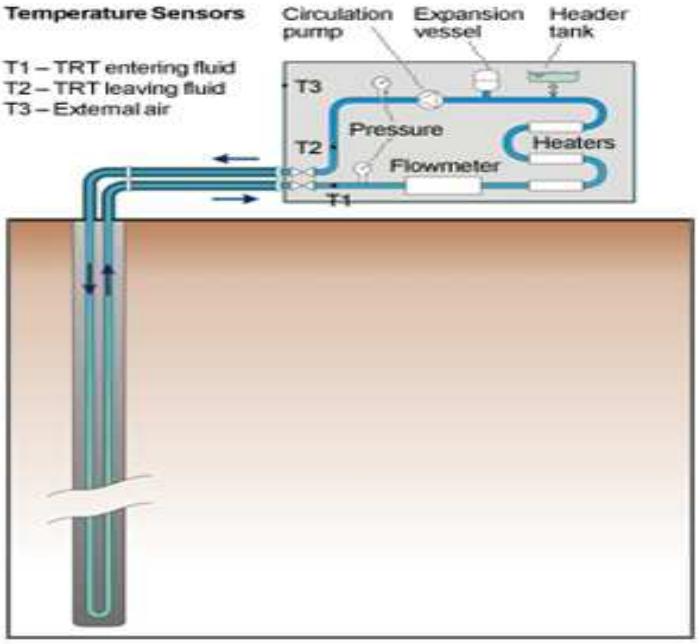
Error component	**Value**	
	Apparatus with power-control	*Apparatus without power-control*
Temperature	± 0.06 K	± 0.17 K
Volumetric flow-rate	± 1 %	± 1 %
Heating power	± 2.3 %	± 5 %
Systematic error of the line-source theory for a test-duration of 4 days	± 2.5 %	± 2.5 %
Undisturbed ground temperature	± 0.2 - 1 K	± 0.2 - 1 K
Ground thermal conductivity	ca. ± 6 %	ca. ± 9 %
Borehole resistance	ca. ± 10 %	ca. ± 14 %

Εικόνα 2.14 Παρατηρείται ότι η απόκλιση στον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας είναι 3% και η αντίστοιχη για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης 4%.

Η διαδικασία του Thermal Response Test

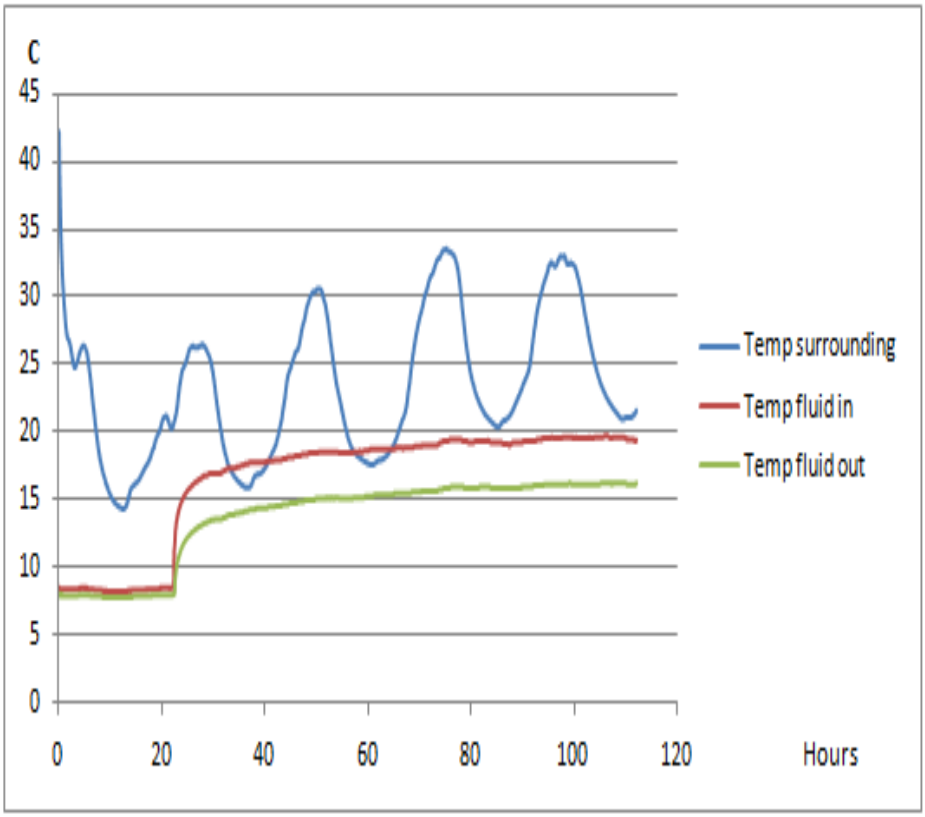
Η πορεία μιας μέτρησης κατά τη διάρκεια του Thermal Response Test περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Η πειραματική διάταξη συνδέεται με τους σωλήνες του εναλλάκτη, ο οποίος βρίσκεται μέσα στη γεώτρηση, και γεμίζεται με ένα υγρό, που είναι συνήθως μίγμα νερού και αλκοόλης. Το υγρό αυτό όπως έχει επισημανθεί συναντάται στη βιβλιογραφία με πολλές ονομασίες όπως: υγρό μεταφοράς θερμότητας, εργαζόμενο μέσο, ανακυκλοφορούν υγρό. Το υγρό στη συνέχεια ανακυκλοφορεί μέσα στο συλλέκτη, με τη βοήθεια της αντλίας.
- Μέτρηση της θερμοκρασίας ισορροπίας (σταθερή θερμοκρασία) του υπεδάφους $\mathbf{T_{o.m}}$ που αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου αυτού. Αποτελεί σημαντικότατη παράμετρο για την εύρεση των άλλων δύο και χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα μαθηματικά μοντέλα που υπάρχουν. Μετριέται πριν ξεκινήσει το τεστ, όταν δηλαδή η ηλεκτρική αντίσταση είναι ακόμα εκτός λειτουργίας, και η γεώτρηση (συνολικά μαζί με τον εναλλάκτη) βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον γύρω της. Κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας αυτής το υγρό κυκλοφορεί μέσα στο συλλέκτη από 10 έως 24 ώρες. Γι αυτό το λόγο, το συγκεκριμένο τεστ δεν μπορεί να ξεκινήσει αμέσως μετά την κατασκευή του συστήματος γεώτρησης (Borehole Heat Exchanger), αλλά μετά από μερικές ημέρες, για να έχουν εξαλειφτούν εντελώς οι θερμικές επιδράσεις που προκαλούνται από τη διαδικασία διάτρησης και μόνωσης.
- Θέση σε λειτουργία της ηλεκτρικής αντίστασης. Η θερμάστρα τίθεται σε μια συγκεκριμένη ισχύ, και το υγρό θερμαίνεται διαρκώς κάθε φορά που ανακυκλώνεται. Το βήμα αυτό διαρκεί από 48 έως ακόμη και 100 ώρες (ενδεικτικές τιμές). Για την επίτευξη αξιόπιστων μετρήσεων, προτείνεται η διάρκεια των μετρήσεων που πραγματοποιούνται να ισούται τουλάχιστον με 50 ώρες.
- Καταγραφή της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του ρευστού.



Εικόνα 2.15 Φαίνεται σχηματικά τι συμβαίνει κατά τη διάρκεια του τεστ.

Η θερμοκρασία ισορροπίας του εδάφους $\mathbf{T_{o,m}}$ υπολογίζεται ως η μέση τιμή (για το συνολικό μήκος του εναλλάκτη) της θερμοκρασίας του ρευστού που βρισκόταν σε θερμική ισορροπία με το πέτρωμα, η οποία καταγράφεται στην έξοδο του εναλλάκτη, προτού τεθεί σε λειτουργία η ηλεκτρική αντίσταση. Εν συνεχεία το κύκλωμα του γεωθερμικού εναλλάκτη τροφοδοτείται με το θερμαινόμενο εργαζόμενο μέσο, προσδίδοντας σταθερό ποσό θερμότητας στο έδαφος. Όταν τίθεται σε λειτουργία η θερμάστρα (αντίσταση), αρχικά η θερμοκρασία του ρευστού αυξάνει απότομα και στη συνέχεια ακολουθεί μια περίοδος όπου η αύξηση της θερμοκρασίας είναι όλο και πιο αργή, έως ότου η θερμοκρασία μείνει σταθερή. Η διαφορά θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου στον εναλλάκτη, είναι η θερμότητα που απορροφάται από το περιβάλλον έδαφος γύρω από τη γεώτρηση. Η κλίση της καμπύλης που αναπαριστά τη θερμοκρασία, είναι αποτέλεσμα των θερμικών ιδιοτήτων της γεώτρησης και του περιβάλλοντος εδάφους. Καταγράφονται επίσης η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η παροχή ηλεκτρικής ισχύος στη θερμαντική αντίσταση, για την αναγνώριση πιθανών διαταραχών.



Εικόνα 2.16 Χαρακτηριστική απεικόνιση των θερμοκρασιών εισόδου/εξόδου του εργαζόμενου μέσου και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διενέργεια του Thermal Response Test, ενώ η θερμάστρα έχει τεθεί σε λειτουργία.

Μαθηματικά μοντέλα - Προσομοίωση TRT με χρήση πραγματικών δεδομένων

Ονοματολογία

a = Thermal diffusivity = λ/c (m^2/s)

C_p = Volumetric specific heat capacity (J/m^3K)

E_1 = The exponential integral

H = Borehole depth (m)

h = $2\pi \cdot \lambda_{ground} \cdot R_b$

Q = Heat injection rate (W)

R = Thermal resistance (K m/W)

r = Radius (m)

T = Temperature (^oC)

T_o = Undisturbed ground temperature (^oC)

t = Time (s)

v = Flow velocity (m^3/sm^2)

α = Heat transfer coefficient (W/m K)

γ = Euler's constant = 0.5772

λ = Thermal conductivity (W/m K)

Συντομεύσεις

amb = ambient air

av = average

b = borehole

BHE = borehole heat exchanger

f = fluid

in = inlet

out = outlet

LSM = Line source Model

ug = undisturbed ground

th = thermal

Μοντέλα Ανάλυσης Απόκρισης

Υπάρχουν διάφορα μαθηματικά μοντέλα- αναλυτικά και αριθμητικά- τα οποία χρησιμοποιούνται, για την αξιολόγηση των δεδομένων που προκύπτουν από την απόκριση θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του τεστ. Τα αναλυτικά μοντέλα, όπως το μοντέλο γραμμικής πηγής και το μοντέλο κυλινδρικής πηγής υιοθετούν την αναλυτική λύση του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας, ανάμεσα στη γεώτρηση και την γύρω περιοχή, η οποία θεωρούμε ότι έχει άπειρες διατάσεις. Τα δύο αυτά μοντέλα απαιτούν αρκετές απλουστευτικές υποθέσεις, όσον αφορά τη γεωμετρία της γεώτρησης και τους σωλήνες του εναλλάκτη θερμότητας. Κατά την αποτίμηση του Thermal Response Test, η ροή θερμότητας προς/από τη γεώτρηση μπορεί να αναπαρασταθεί σαν μια άπειρου μήκους πηγή θερμότητας ή δεξαμενή, η οποία βρίσκεται μέσα στο έδαφος. Η μιας ή δύο διαστάσεων διαδικασία ροής θερμότητας, από το ανακυκλούμενο υγρό έως τα τοιχώματα της γεώτρησης, υποτίθεται ότι αντιπροσωπεύεται από μια θερμική αντίσταση, η οποία αναπαριστά την μείωση θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και του τοιχώματος της γεώτρησης.

Θεωρία Γραμμικής Πηγής Θερμότητας

Κατά τη διάρκεια του πειράματος Thermal Response Test, μετριέται η θερμοκρασιακή απόκριση του εργαζόμενου μέσου υπό την παροχή ή την άντληση θερμότητας (στην περίπτωση που εξετάζεται υπάρχει παροχή ποσού θερμότητας). Για την αξιολόγηση των μετρήσεων, χρησιμοποιείται ευρέως η θεωρία της γραμμικής πηγής θερμότητας (Line Source Theory), η οποία αναπαριστά το γεωθερμικό εναλλάκτη ως μια γραμμική πηγή θερμότητας, εντός ενός ομοιογενούς μέσου άπειρων διαστάσεων. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας T_{Fm} (αριθμητικός μέσος θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου) του ρευστού συναρτήσει του χρόνου και της ακτίνας, γύρω από μια γραμμική πηγή με σταθερό ρυθμό έγχυσης θερμότητας , δίνεται από τον τύπο:

$$T_{Fm}(r,t) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi\lambda} E_1(r^2/4at) \qquad (\text{Εξ. } 3.1)$$

όπου το E_1 ονομάζεται εκθετικό ολοκλήρωμα (exponential integral).

Για μεγάλες τιμές της παραμέτρου at/r^2, το εκθετικό ολοκλήρωμα E_1 μπορεί να προσεγγιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$E_1(r^2/4at) = \ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \ , \ \frac{at}{r^2} \geq 5 \qquad (\text{Εξ. } 3.2)$$

Όπου ο όρος γ=0.5772… είναι η σταθερά του Euler. Το μέγιστο σφάλμα είναι 2.5% για $\frac{at}{r^2} \geq 20$ και 10% για $\frac{at}{r^2} \geq 5$. Για τις περισσότερες γεωτρήσεις το t κυμαίνεται από 10 έως 20 ώρες. Η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους όπως φαίνεται και παραπάνω συμβολίζεται με λ και ισχύει ότι $a=\lambda/c_p$, όπου το c_p αναπαριστά την ειδική θερμική χωρητικότητα του εδάφους. Η συνθήκη αυτή σημαίνει ότι η ακρίβεια αυξάνεται όσο το θερμικό μέτωπο φτάνει πολύ πιο πέρα από το τοίχωμα της γεώτρησης και η ταχύτητα του θερμικού μετώπου εξαρτάται από την αναλογία μεταξύ θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας του εδάφους δηλαδή τη θερμική διάχυση του εδάφους a (ground thermal diffusivity).

Η θερμοκρασία του ρευστού υπολογίζεται παίρνοντας τη θερμοκρασία γραμμικής πηγής στην ακτίνα της γεώτρησης ($r = r_b$) και προσθέτοντας την

επίδραση της θερμικής αντίστασης της γεώτρησης (R_b), που εμφανίζεται, ανάμεσα στο ρευστό και τα τοιχώματα της γεώτρησης. Λόγω του παραπάνω η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, συναρτήσει του χρόνου, μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \cdot \left(\ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma\right) + \frac{Q}{H} \cdot R_b + T_o \qquad \text{(Εξ. 3.3)}$$

όπου Το είναι η θερμοκρασία ισορροπίας(μέση θερμοκρασία) του υπεδάφους.

Η Εξίσωση 3.3 μπορεί να μετασχηματιστεί στη παρακάτω ΓΡΑΜΜΙΚΗ μορφή.

$$T_f(t) = k \cdot \ln t + m \text{ , όπου } k = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \qquad \text{(Εξ. 3.4)}$$

Η αξιολόγηση των μετρήσεων με τη θεωρία της γραμμικής πηγής θερμότητας βασίζεται στην Εξίσωση 3.4, η οποία παρεμβάλλεται στα πειραματικά δεδομένα και ως αποτέλεσμα προκύπτουν οι σταθερές k και m. Εν συνεχεία μπορούν να υπολογιστούν η θερμική αγωγιμότητα λ και η θερμική αντίσταση του εναλλάκτη R_b. Στα περισσότερα και πιο σημαντικά συγγράμματα, προτείνεται το μοντέλο της γραμμικής πηγής για την εύρεση της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους για υπόγεια συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Η εύρεση της παραμέτρου αυτής γίνεται χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.4, βρίσκοντας την κλίση της καμπύλης η οποία αναπαριστά τη μέση θερμοκρασία του υγρού συναρτήσει του χρόνου (του ln(t) συγκεκριμένα). Από αυτό προκύπτει και η ονομασία της μεθόδου αυτής. Στην παραπάνω εξίσωση το k αναπαριστά την κλίση της καμπύλης. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.5, και αφού έχουμε βρει το λ με την παραπάνω διαδικασία(οι άλλες παράμετροι είναι γνωστές καθώς αποτελούν προδιαγραφές του πειράματος), βρίσκουμε τη (μέση) θερμική αντίσταση της γεώτρησης R_b ως εξής:

$$R_b = \frac{H}{Q}\left(T_f - T_o\right) - \frac{1}{4\pi\lambda}\left(\ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma\right) \qquad \text{(Εξ. 3.5)}$$

Η συγκεκριμένη μέθοδος συναντάται συνήθως στην πράξη, λόγω της απλότητας και της ταχύτητας που προσφέρει, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους που θα εξεταστούν παρακάτω.

Μοντέλο Κυλινδρικής Πηγής

Το μοντέλο κυλινδρικής πηγής (Cylinder Source Model), του οποίου το μοντέλο γραμμικής πηγής αποτελεί μια πιο απλουστευμένη έκδοση, προσεγγίζει το σύστημα ΒΗΕ σαν ένα τεράστιο κύλινδρο (άπειρων διαστάσεων), με μια σταθερή ροή θερμότητας. Οι σωλήνες του εναλλάκτη θερμότητας απεικονίζονται από ένα κύλινδρο «ίσης διαμέτρου» (equal diameter cylinder). Η λύση με βάση το μοντέλο αυτό για μια σταθερή ροή θερμότητας είναι η εξής:

$$T(r,t) = \frac{Q}{\lambda} \cdot G(z,p) \qquad \begin{cases} z = \frac{at}{r^2} \\ p = \frac{r}{r_o} \end{cases} \qquad \text{(Εξ. 3.6)}$$

όπου η G(z,p) είναι η κυλινδρική συνάρτηση πηγής(cylindrical source function) η οποία περιγράφεται από τους παρακάτω τύπους:

$$G(z,p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty f(\beta) d\beta \qquad \text{και} \qquad \text{(Εξ. 3.7)}$$

$f(\beta) = (e^{-\beta^2 z} - 1) \cdot \frac{[J_o(p\beta)Y_1(\beta) - Y_o(p\beta)J_1(p\beta)]}{\beta^2[J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]}$, όπου J_o, J_1, Y_o, Y_1 είναι συναρτήσεις Bessel(δίνουν κανονικές λύσεις για διαφορική εξίσωση) πρώτης και δεύτερης τάξης αντίστοιχα.

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται επίσης και στο σχεδιασμό υπόγειων εναλλακτών θερμότητας με βρόχο. Επιπλέον σε ορισμένα συγγράμματα χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή για να καθοριστεί αντίστροφα η θερμική αγωγιμότητα λ. Η λειτουργική θερμική αγωγιμότητα (και διάχυση) του εδάφους υπολογίζεται, αντιστρέφοντας τη διαδικασία που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το μήκος του εναλλάκτη θερμότητας. Στη συνέχεια βασιζόμενοι σε ένα σύντομο πείραμα, η λειτουργική θερμική αντίσταση του εδάφους συγκρίνεται με μια τιμή, που προκύπτει από τον αριθμό Fourier (z) και τη κυλινδρική συνάρτηση πηγής G(z,p) όπου έχουν τεθεί υποτιθέμενες τιμές για τη θερμική αγωγιμότητα του εδάφους, έως ότου τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την αντίσταση του εδάφους τείνουν να είναι ίδια.

Αριθμητικά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά σχεδιάζονται με σκοπό να χειριστούν λεπτομερείς αναπαραστάσεις της γεωμετρίας της γεώτρησης καθώς και τις θερμικές ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου, του σωλήνα, του εδάφους και του υλικού που χρησιμοποιείται για να «γεμίσει» η γεώτρηση. Επιπλέον μπορούν να χειριστούν περιπτώσεις όπου η πρόσδοση θερμότητας στον εναλλάκτη δεν είναι σταθερή. Ο μεγάλος αριθμός δεδομένων εισόδου που απαιτούνται για τα μοντέλα αυτά, τα καθιστά πιο δύσκολα στη χρήση και περισσότερα χρονοβόρα σε σύγκριση με τα αναλυτικά μοντέλα, δύο εκ των οποίων αναλύθηκαν προηγουμένως.

Τα αριθμητικά μοντέλα μπορούν να συνδυαστούν με αλγόριθμους εύρεσης παραμέτρων, για τον υπολογισμό των λ και R_b. Τα συγκεκριμένα μοντέλα δε βασίζονται σε απλοϊκές παραδοχές και περιλαμβάνουν ρεαλιστικές συνοριακές συνθήκες του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας, προσφέροντας ωστόσο ευελιξία και ακρίβεια. Από την άλλη μεριά η χρήση τους απαιτεί ικανοποιητική γνώση της γεωμετρίας του εναλλάκτη και των παραμέτρων διεξαγωγής του πειράματος. Αβεβαιότητα στη χρήση παραμέτρων αυτών επηρεάζει σημαντικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Σύγκριση μοντέλων

Υπάρχουν πολλοί τρόποι που χρησιμοποιούνται για να αναλύσουμε τα δεδομένα θερμοκρασίας τα οποία προκύπτουν από ένα TRT test. Οι ευρωπαϊκές χώρες χρησιμοποιούν τη θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και τη θερμική αντίσταση μεταξύ του υγρού μεταφοράς θερμότητας και του τοιχώματος της γεώτρησης, ενώ τα αμερικάνικα μοντέλα αναλύουν τη θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και τη θερμική αγωγιμότητα του συνδετικού υλικού (grout) που γεμίζει το κενό μεταξύ του εργαζόμενου μέσου και του πετρώματος.

Από τις δοκιμές που έχουν γίνει έως σήμερα και για τα τρία αυτά μοντέλα (πάνω στα ίδια δεδομένα), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το αριθμητικό μοντέλο τείνει να δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές για το λ και το R_b απ' ότι το μοντέλο γραμμικής πηγής, ενώ το μοντέλο κυλινδρικής πηγής δίνει ακόμα μεγαλύτερες τιμές για τα μεγέθη αυτά. Το μοντέλο γραμμικής πηγής (προσομοίωση) συμφωνεί περισσότερο με τις πειραματικές θερμοκρασίες για

τρία διαφορετικά σετ δεδομένων. Όταν ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται, το αριθμητικό μοντέλο είναι πιο ακριβές από το μοντέλο γραμμικής πηγής. Εντούτοις όταν το ποσό θερμότητας που δίνεται στον εναλλάκτη είναι σταθερό, τα δύο αυτά μοντέλα έχουν σχεδόν παρόμοια αποτελέσματα. Το σφάλμα στην εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους, είτε με τη χρήση αναλυτικών είτε αριθμητικών μοντέλων είναι περίπου ±10%. Η απόκλιση στα αποτελέσματα ανάμεσα στα τρία μοντέλα, είναι μεγαλύτερη για μικρό αριθμό μετρήσεων ενώ μειώνεται για μεγαλύτερο αριθμό.

Model	Data set A			Data set B			Data set C		
	λ [$Wm^{-1}K^{-1}$]	R_b [$KW^{-1}m$]	ΔT [K]	λ [$Wm^{-1}K^{-1}$]	R_b [$Wm^{-1}K^{-1}$]	ΔT [K]	λ [$Wm^{-1}K^{-1}$]	R_b [$Wm^{-1}K^{-1}$]	ΔT [K]
Line Source	2.12	0.141	0.049	4.59	0.061	0.015	3.31	0.070	0.050
Cylinder Source	2.45	0.164	0.054	5.23	0.070	0.016	3.57	0.079	0.053
Numerical	2.20	0.146	0.050	4.57	0.060	0.015	3.34	0.070	0.051

Εικόνα 3.1 Εκτιμήσεις παραμέτρων λ και R_b για τρία διαφορετικά σετ δεδομένων, χρησιμοποιώντας τα τρία μοντέλα που περιγράψαμε παραπάνω. Φαίνεται ότι τη μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζει το μοντέλο κυλινδρικής πηγής, ενώ στα άλλα δύο οι διαφορές είναι πολύ μικρές (σχεδόν αμελητέες).

Χρήση της μεθόδου TRT πάνω σε πραγματικά πειραματικά δεδομένα για την εύρεση των δύο βασικών παραμέτρων σχεδιασμού γεωθερμικών εγκαταστάσεων

Για την προσομοίωση που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά πειραματικά δεδομένα, τα οποία καταγράφηκαν, κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος TRT στη Γερμανία τον Ιούνιο του 2004. Το συγκεκριμένο πείραμα ξεκίνησε στις 28 Ιουνίου 2004 και ώρα 13:41 και διήρκησε έως τις 5 Ιουλίου 2004 και ώρα 13:34, δηλαδή σχεδόν 7 ημέρες ή 168 ώρες περίπου. Επομένως υπάρχουν αρκετά δεδομένα (παραπάνω από όσα χρειάζονται) για την εύρεση των παραμέτρων σχεδιασμού . Στο excel που περιέχει τις μετρήσεις αυτές, υπάρχουν δεδομένα για τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του υγρού μεταφοράς θερμότητας (T_{in} και T_{out} αντίστοιχα), για τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (ατμοσφαιρικού αέρα), για το ποσό θερμότητας που δίνεται στον εναλλάκτη, για τη θερμοκρασία στο εσωτερικό της πειραματικής διάταξης καθώς και οι απαραίτητες προδιαγραφές διεξαγωγής του πειράματος.

Για την προσομοίωση καθώς και τον υπολογισμό των παραμέτρων που χρειάζεται να υπολογιστούν, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB (2009b).

Οι προδιαγραφές διεξαγωγής του πειράματος είναι οι εξής:

Τύπος εναλλάκτη	Double U
Διάμετρος σωλήνα (εναλλάκτη)	25 mm
Πάχος σωλήνα	2.3 mm
Ακτίνα σωλήνα	10.2 mm
Διάμετρος γεώτρησης	150 mm
Βάθος γεώτρησης	30 m
Μήκος του σωλήνα εναλλάκτη(2 φορές το βάθος της γεώτρησης)	60 m
Εκτιμώμενη θερμική χωρητικότητα εδάφους(C_p)	200000 J/m^3K
Επιφάνεια A του σωλήνα($\pi \cdot r^2$)	0.0003269 m^2
Προσδιδόμενη ισχύς	3892 W
Ρευστό στον εναλλάκτη	Μίγμα νερού-αιθανόλης
Συνολική διάρκεια διαδικασίας	28/6/2004-5/7/2004(168 ώρες)
Διάρκεια Thermal Response Test	165 ώρες

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί η γεωμετρία (διάταξη) του συστήματος BHE. Όπως είδαμε η γεωμετρία των εναλλακτών που χρησιμοποιούνται είναι διπλού U. Το σύστημα εναλλακτών θερμότητας στη γεώτρηση αποτελείται από 3 εναλλάκτες (διπλού U) σε σειρά, σε απόσταση 7 m μεταξύ τους, οπότε το συνολικό μήκος της διάταξης του εναλλάκτη είναι 3·(2·30) + 2·7 = 194m, κάτι που θα μας χρειαστεί για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας ισορροπίας του υπεδάφους αργότερα. Η γεωμετρία αυτή είναι σχετικά πολύπλοκη, ώστε να καλυφθεί μεγαλύτερη επιφάνεια με λιγότερες κεντρικές συνδέσεις.

Είναι αναγκαίο επίσης να τονιστεί ότι, σε διάφορες εργαστηριακές δοκιμές που έχουν γίνει, προκύπτει ότι οι συλλέκτες διπλού U παρουσιάζουν μικρότερη θερμική αντίσταση από ότι οι συλλέκτες μονού U. Οι εργαστηριακές μετρήσεις έγιναν για το ίδιο ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας στους εναλλάκτες (περίπου 100W/m) και για θερμοκρασίες ρευστού από 22 ^{o}C έως 45°C. Γι αυτό το λόγο σε συστήματα γεωθερμικών εναλλακτών μέσα σε γεώτρηση (BHE systems) είναι καλύτερο οι εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται να είναι σχήματος διπλού U (double U pipe).

Installation Type	Laboratory R_b [K/(W/m)]	In Situ R_b [K/(W/m)]
Single U-pipe	0.052-0.065	0.056 *[0.05-0.06]*
Double U-pipe	0.026-0.038	0.025 *[0.02-0.03]*
Concentric pipe		0.015 *[0.01-0.02]*

Εικόνα 3.2 Θερμική αντίσταση συλλεκτών διαφορετικής γεωμετρίας.

Ενδεικτικά παρατίθεται ένα μέρος του excel αρχείου, όπου φαίνεται πως μεταβάλλονται με το χρόνο τα δεδομένα που χρειάζονται για την εύρεση των δύο βασικών παραμέτρων σχεδιασμού.

Ημερομηνία	Ώρα (sec)	Παροχή ροής,	Θερμοκρασία εισόδου	Θερμοκρασία εξόδου	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Θερμοκρασία πειραματικής διάταξης TRT
		ml/s	C	C	C	C
28/6/04 13:41	0,00	0	25,49	25,52	24,01	26,84
28/6/04 13:42	59,00	0,25	25,48	25,53	24,36	26,89
28/6/04 13:43	120,00	0	25,48	25,54	24,75	26,93
28/6/04 13:44	180,00	0	25,47	25,49	24,74	27,01
28/6/04 13:45	240,00	0	25,46	25,46	24,56	27,05
28/6/04 13:46	300,00	0	25,45	25,46	24,62	26,98
28/6/04 13:47	359,00	0	25,44	25,48	24,66	27,01
28/6/04 13:48	420,00	0	25,42	25,46	24,85	27,06
28/6/04 13:49	480,00	0	25,41	25,44	24,54	27,1
28/6/04 13:50	540,00	0	25,39	25,43	24,63	27,13
28/6/04 13:51	600,00	0	25,39	25,42	24,87	27,15
28/6/04 13:52	659,00	0	25,38	25,41	25,04	27,14
28/6/04 13:53	720,00	0	25,37	25,4	24,67	27,09
28/6/04 13:54	780,00	0	25,36	25,39	24,59	27,13
28/6/04 13:55	840,00	0,25	25,35	25,39	24,64	27,12
28/6/04 13:56	900,00	0	25,34	25,37	24,3	27,08
28/6/04 13:57	959,00	0	25,06	25,36	24,57	27,12
28/6/04 13:58	1020,00	0	24,55	26,08	24,65	27,17
28/6/04 13:59	1080,00	0	24,48	26,45	24,67	27,25
28/6/04 14:03	1274,00	0	24,37	27,5	24,81	27,4
28/6/04 14:04	1335,00	0	24,36	27,9	24,86	27,47
28/6/04 14:05	1395,00	0	24,35	28,13	24,52	27,5
28/6/04 14:06	1455,00	0	24,36	28,53	24,93	27,49
28/6/04 14:07	1515,00	0	24,37	29,34	24,64	27,42
28/6/04 14:08	1574,00	0	24,37	31,4	24,52	27,38
28/6/04 14:09	1635,00	0	24,4	30,81	24,39	27,43
28/6/04 14:10	1695,00	0	24,41	30,75	24,4	27,41
28/6/04 14:11	1754,00	0	24,44	30,72	24,4	27,44
28/6/04 14:12	1815,00	0	24,45	30,68	24,96	27,48
28/6/04 14:13	1875,00	0	24,47	29,65	24,57	27,45
28/6/04 14:14	1935,00	0	24,48	28,56	24,21	27,42
28/6/04 14:15	1995,00	0	24,5	28,46	24,28	27,41
28/6/04 14:16	2054,00	0,25	24,72	28,44	24,52	27,49
28/6/04 14:17	2115,00	0	25,18	28,43	24,28	27,54
28/6/04 14:18	2175,00	0	25,28	28,42	24,28	27,54
28/6/04 14:19	2235,00	0	25,34	28,41	24,72	27,56

28/6/04 14:20	2295,00	0	25,37	28,39	24,5	27,55
28/6/04 14:21	2354,00	0	25,39	28,37	24,47	27,56
28/6/04 14:22	2415,00	0	25,4	28,35	24,36	27,57
28/6/04 14:23	2475,00	0	25,4	28,34	24,37	27,57
28/6/04 14:24	2535,00	116	25,03	28,32	24,23	27,58
28/6/04 14:25	2595,00	46,75	25,76	28,28	24,32	27,68
28/6/04 14:26	2654,00	0	25,82	28,25	24,39	27,65
28/6/04 14:27	2715,00	0	25,81	28,17	24,48	27,56
28/6/04 14:28	2775,00	0	25,81	28,01	24,51	27,62
28/6/04 14:29	2834,00	26,5	26	27,89	24,71	27,66
28/6/04 14:30	2895,00	21,5	26,16	29,01	24,33	27,7
28/6/04 14:31	2955,00	0	26,03	15,02	24,54	27,76
28/6/04 14:32	3015,00	0	26,01	14,42	24,88	27,73
28/6/04 14:33	3075,00	0	26,01	14,8	24,44	27,62
28/6/04 14:34	3134,00	0	26	14,38	24,15	27,6
28/6/04 14:35	3195,00	0	26	12,35	24,54	27,74
28/6/04 14:36	3255,00	0	26	12,62	24,53	27,75
28/6/04 14:37	3315,00	0	26	12,85	24,35	27,72
28/6/04 14:38	3375,00	0	26	15,12	24,61	27,71
28/6/04 14:39	3434,00	0	25,98	15,9	24,49	27,75
28/6/04 14:40	3495,00	0	26,05	15,85	24,64	27,69
28/6/04 14:41	3555,00	0	26	15,98	24,88	27,72
28/6/04 14:42	3615,00	32,75	26,12	16,06	25,13	27,75

Οι μετρήσεις που υπάρχουν στο αρχείο excel μπορούν να χωριστούν σε τρία μέρη τα οποία είναι τα εξής:

- Τα δεδομένα από τις 28/6/2004 (13:41) έως τις 28/6/2004 (14:43) αναφέρονται σε μια περίοδο δοκιμής της πειραματικής διάταξης, κατά την οποία η αντλία βρίσκεται σε manual λειτουργία. Κατά την περίοδο αυτή (σχεδόν μία ώρα) απλά γίνεται έλεγχος της λειτουργία της αντλίας και κατ' επέκταση όλης της διάταξης. Η περίοδος αυτή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα και την εξέλιξη του Thermal Response Test.
- Τα δεδομένα από τις 28/6/2004 (14:44) έως τις 28/6/2004 (15:40) αναφέρονται στην περίοδο καταγραφής της θερμοκρασίας ισορροπίας του υπεδάφους, η οποία αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο για την εύρεση των λ και R_b στη συνέχεια. Η μέτρηση της T_o δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του TRT από τα οποία θα αξιολογηθούν τα μεγέθη που χρειάζονται, γιατί κατά την περίοδο αυτή δε λαμβάνουμε υπ' όψιν μας τη θερμοκρασιακή απόκριση του υπεδάφους σε ένα γνωστό ποσό θερμότητας.

- Τα υπόλοιπα δεδομένα, από 28/6/2004 (15:41) έως 5/7/2004 (13:34) αναφέρονται στο πείραμα Thermal Response Test, και είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την εύρεση των παραμέτρων λ και R_b. Όπως έχει αναφερθεί για να ξεκινήσει το TRT, πρέπει να τεθεί σε λειτουργία η θερμάστρα και να αρχίσει η θέρμανση του ρευστού κάτι το οποίο γίνεται στις 15:41 και φαίνεται στο αρχείο excel.

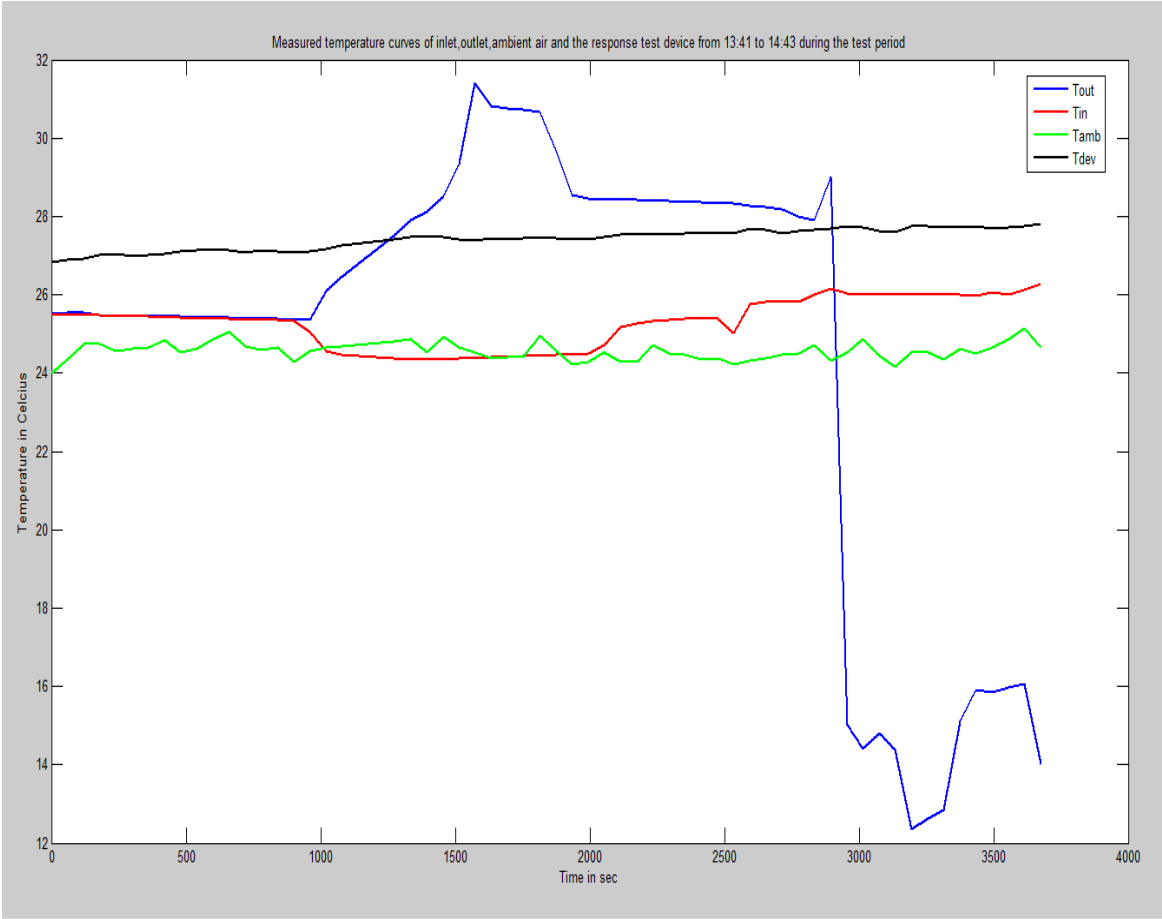
Επειδή η μέθοδος TRT είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εύρεση των παραμέτρων διαστασιολόγησης, τα δεδομένα που αναφέρονται στην περίοδο αυτή αποτελούν σχεδόν το 98% των συνολικών μετρήσεων.

Αρχική λειτουργία της αντλίας

Κατά την αρχική λειτουργία του συστήματος, γίνονται δοκιμές της πειραματικής διάταξης και γι αυτό το λόγο η αντλία βρίσκεται σε manual λειτουργία. Στο γεγονός αυτό οφείλονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την παροχή ροής στο ρευστό σε συνάρτηση με το χρόνο, όπως θα φανεί και στην γραφική που ακολουθεί.

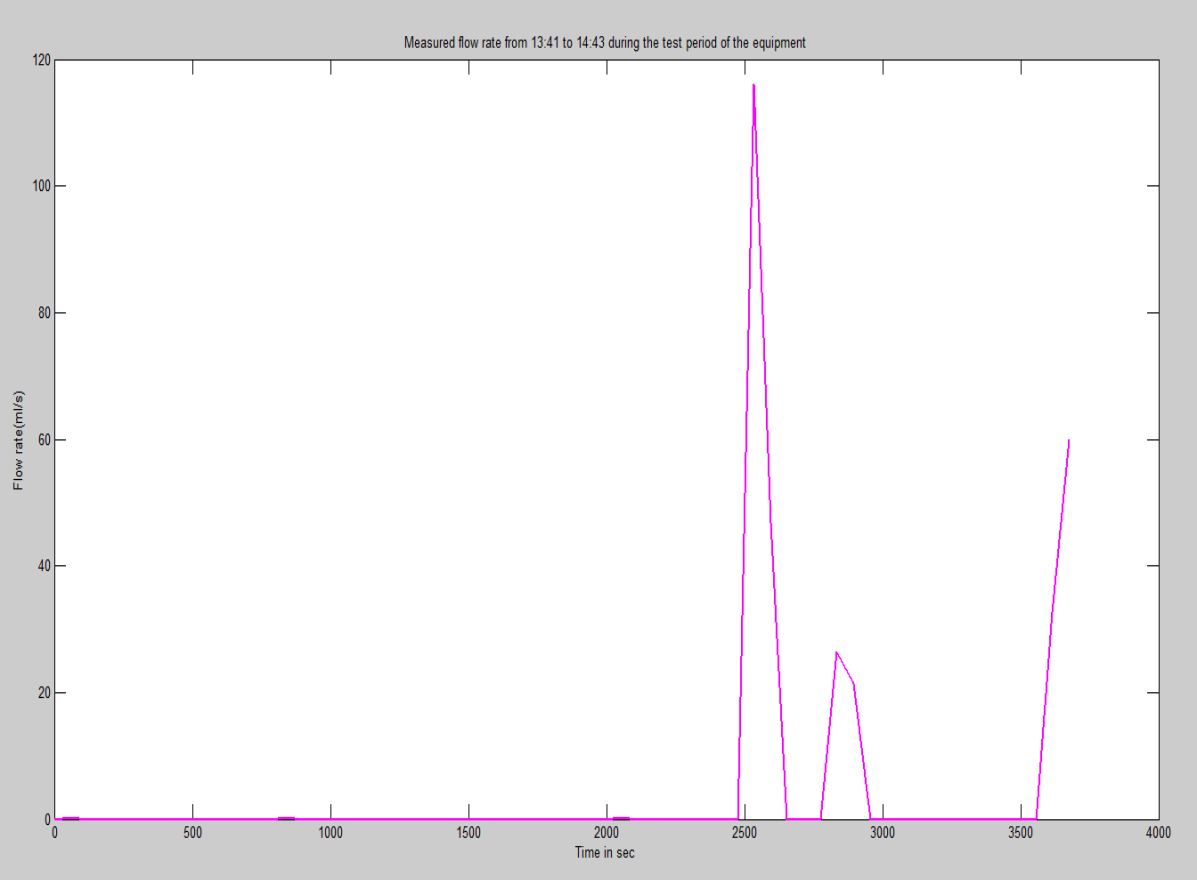
Ο κώδικας MATLAB που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των δεδομένων της περιόδου αυτής βρίσκεται στο Παράρτημα (Μέρος Α). Ακολουθούν οι γραφικές που προκύπτουν από την εκτέλεσή του. Στις γραφικές φαίνεται η εξέλιξη πέντε μεγεθών σε σχέση με το χρόνο. Τα μεγέθη αυτά είναι:

- Θερμοκρασία εισόδου του ρευστού
- Θερμοκρασία εξόδου του ρευστού
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος έξω από τη συσκευή
- Θερμοκρασία εσωτερικού πειραματικής διάταξης
- Παροχή ροής στο ρευστό

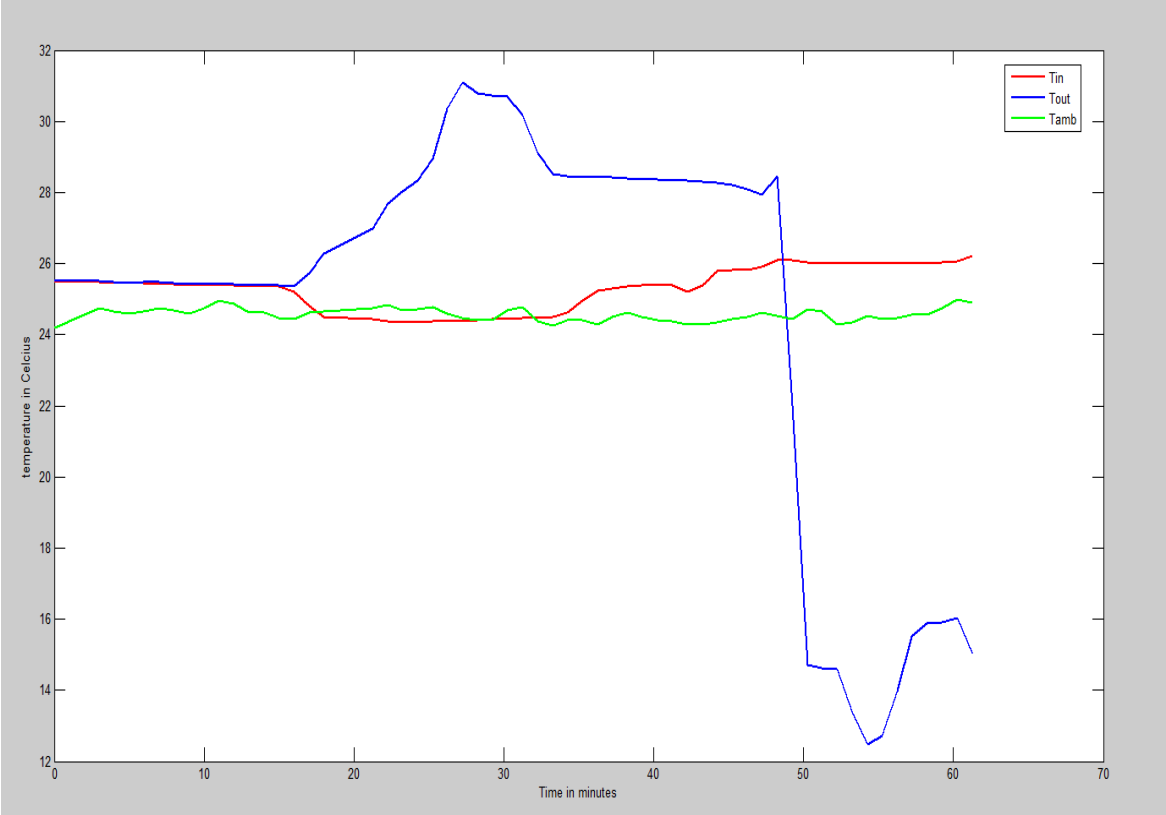


Εικόνα 3.3 Φαίνονται οι καμπύλες που αναπαριστούν τις θερμοκρασίας εισόδου και θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού καθώς και οι καμπύλες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και θερμοκρασίας στο εσωτερικό της πειραματικής διάταξης σε βαθμούς Κελσίου(^{o}C) συναρτήσει του χρόνου(seconds).

Πρέπει να τονιστεί ότι αρχικά, η θερμοκρασία εισόδου είναι ίδια με τη θερμοκρασία εξόδου εξαιτίας της θερμικής ισορροπίας του υπεδάφους αλλά στη συνέχεια οι δύο θερμοκρασίες αρχίζουν να απομακρύνονται. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος καθώς και η θερμοκρασία στο εσωτερικό της συσκευής είναι σχεδόν σταθερές, δεν υπάρχουν επομένως ακόμη έντονες καιρικές συνθήκες που προκαλούν μεταβολές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Εικόνα 3.4 Καμπύλη που αναπαριστά την παροχή ροής στο ρευστό (ml/s) συναρτήσει του χρόνου (seconds). Οι τιμές για το μέγεθος αυτό είναι ακανόνιστες (μεταβάλλονται απότομα) καθώς η αντλία είναι σε manual mode και κάνουμε δοκιμές για τη λειτουργία της διάταξης.

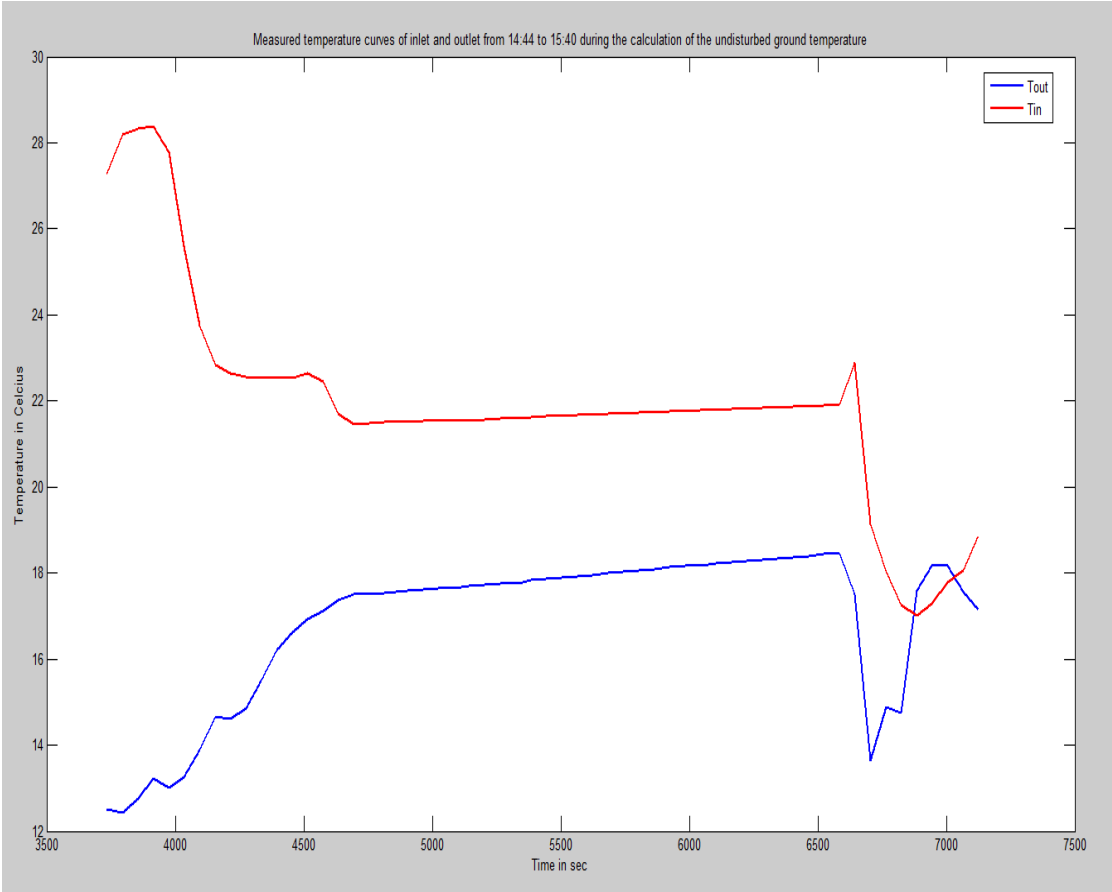


Εικόνα 3.5 Οι γραφικές παραστάσεις της Εικόνας 3.3, στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως ο άξονας του χρόνου είναι σε λεπτά και όχι σε δευτερόλεπτα.

Μέτρηση της θερμοκρασίας ισορροπίας του υπεδάφους T_o

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαιο οι εποχικές αλλαγές της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα και κατ' επέκταση του εδάφους, φτάνουν πολύ λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια της γης και δεν επηρεάζουν τη θερμοκρασία του υπεδάφους που παραμένει σταθερή.

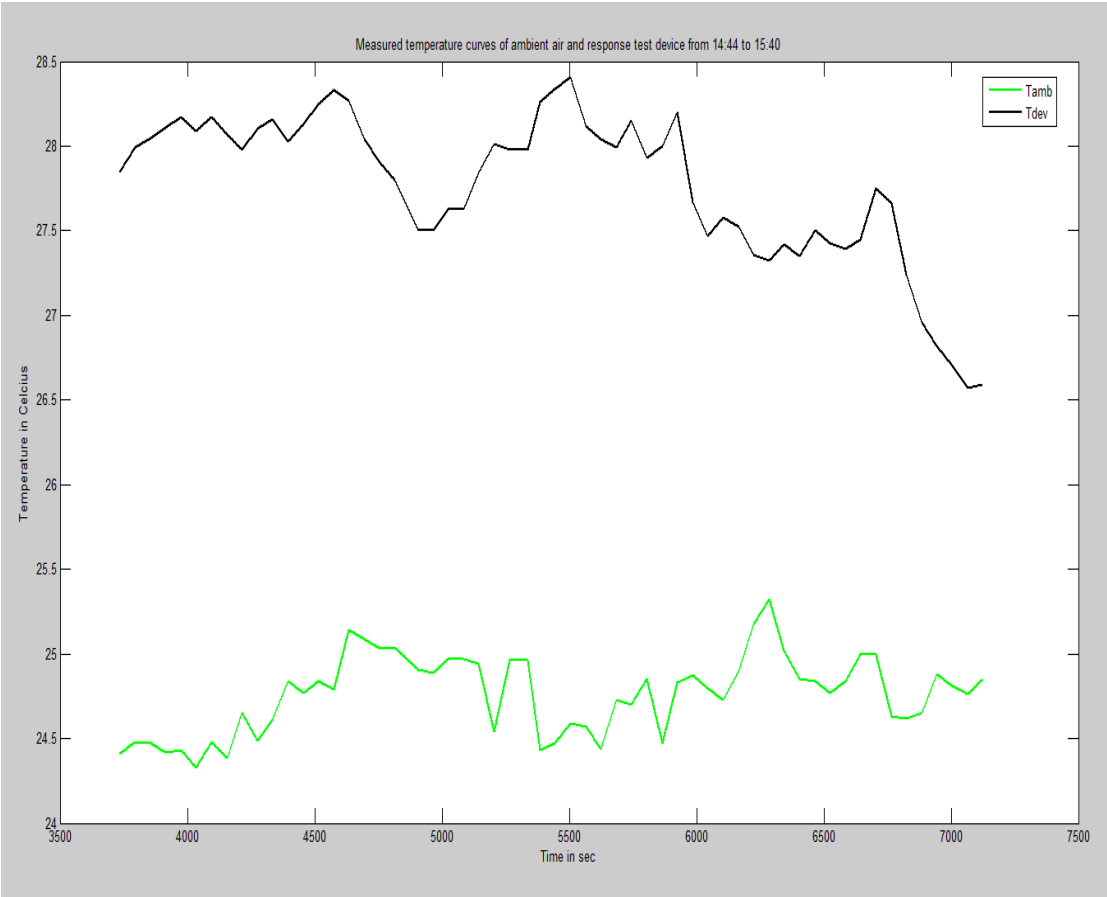
Ο κώδικας για την προσομοίωση των δεδομένων, που αντιστοιχούν στην περίοδο υπολογισμού της μέσης θερμοκρασίας του υπεδάφους, από 14:44 έως 15:40 (28/6/2004) υπάρχει στο Παράρτημα (Μέρος Β). Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 3.6 Φαίνονται οι καμπύλες που αναπαριστούν τις θερμοκρασίες εισόδου και θερμοκρασίες εξόδου του ρευστού, σε συνάρτηση με το χρόνο, κατά τη διαδικασία υπολογισμού της μέσης θερμοκρασίας του υπεδάφους.

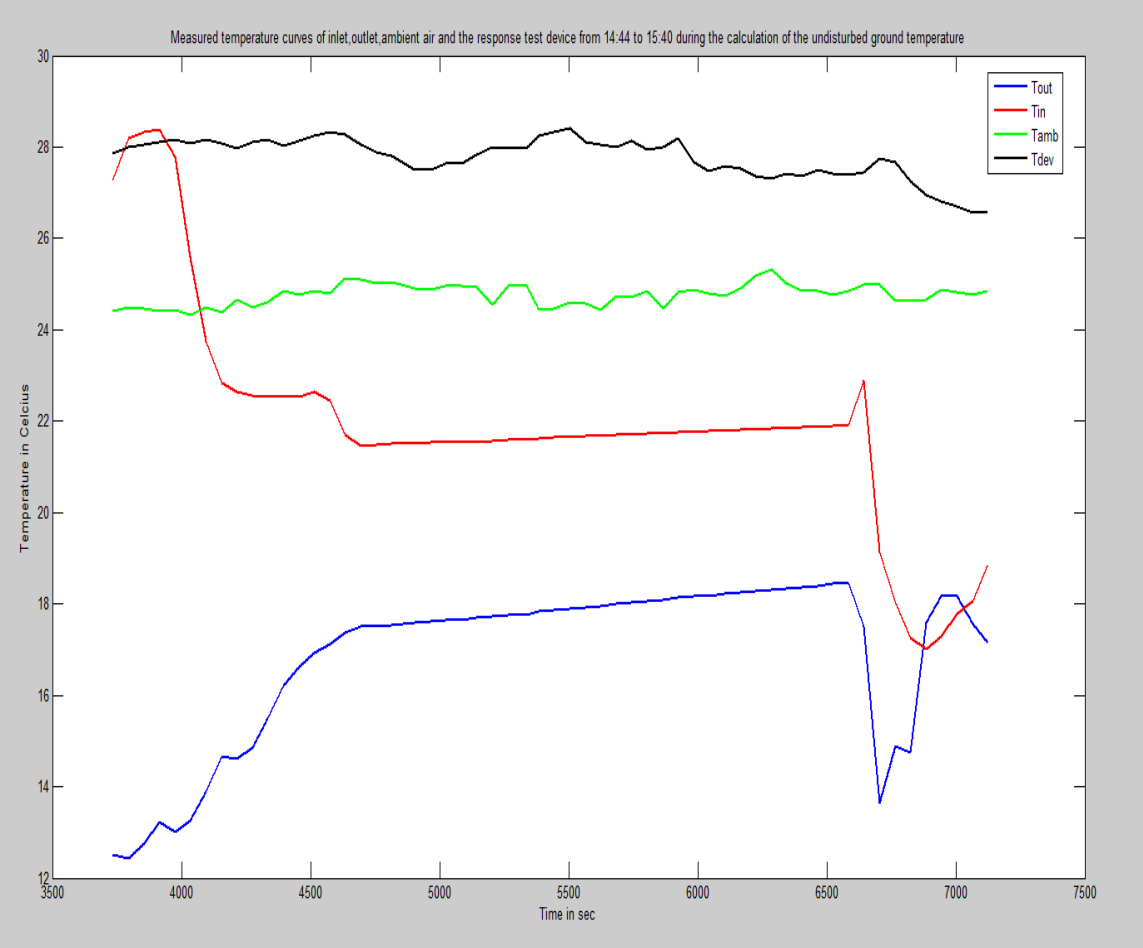
Από την Εικόνα 3.6 φαίνεται ότι η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία εξόδου, κάτι απόλυτα λογικό καθώς αρχικά το ρευστό έχει τη θερμοκρασία που υπάρχει στο εσωτερικό της πειραματικής διάταξης και κυμαίνεται από 27.5 έως 28.5 ^{o}C. Μετά από ένα χρονικό διάστημα, λίγο πριν τεθεί σε λειτουργία η θερμάστρα για να ξεκινήσει το Thermal Response Test οι δύο θερμοκρασίες τείνουν να γίνουν ίσες. Πρέπει να τονιστεί επίσης ότι η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο θερμοκρασιών καταγράφεται περίπου στα 6705 sec, όπου και γίνεται απότομη αλλαγή στην παροχή ροής.

Να σημειωθεί ότι και για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας ισορροπίας του υπεδάφους η αντλία βρίσκεται και πάλι σε manual λειτουργία.

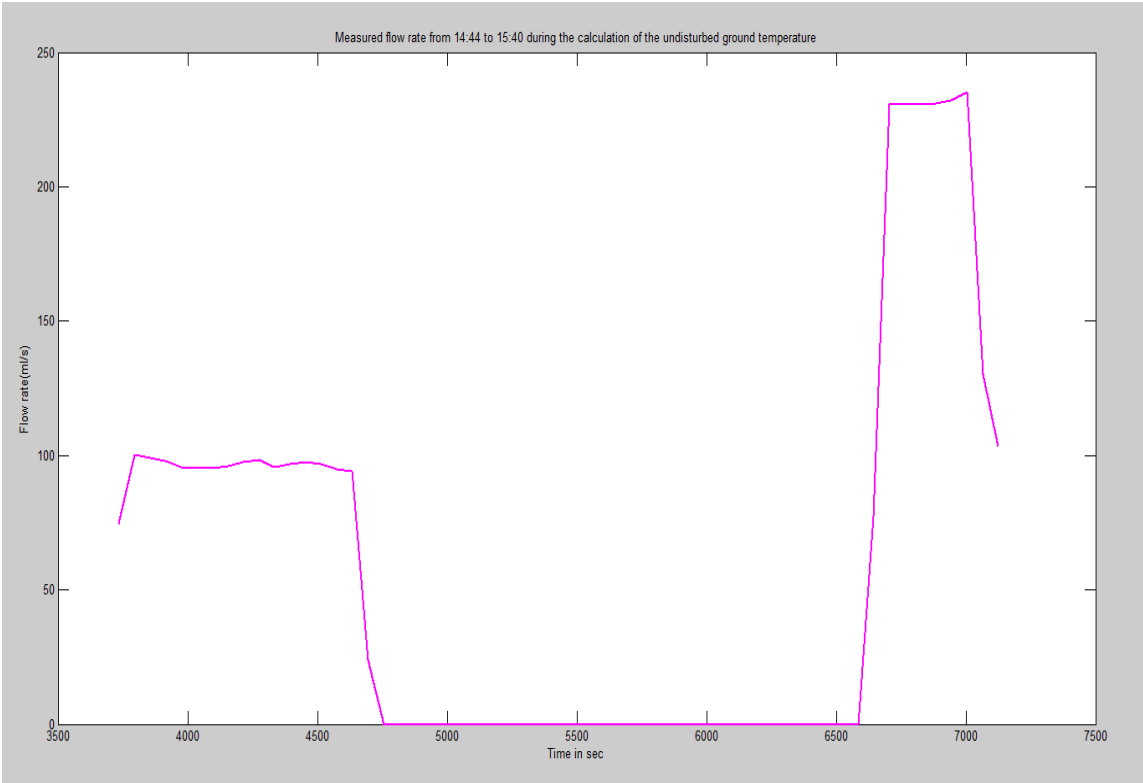


Εικόνα 3.7 Φαίνονται οι καμπύλες που αναπαριστούν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία στο εσωτερικό της πειραματικής διάταξης, σε συνάρτηση με το χρόνο, κατά τη διαδικασία υπολογισμού της μέσης θερμοκρασίας του υπεδάφους.

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι οι δύο αυτές θερμοκρασίες μεταβάλλονται σχεδόν με τον ίδιο τρόπο κάτι το οποίο φαίνεται καλύτερα στην Εικόνα 3.8 που ακολουθεί. Η θερμοκρασία μέσα στην πειραματική διάταξη είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κάτι το φυσιολογικό, καθώς η διάταξη βρίσκεται μέσα σε ένα κλειστό τρέιλερ και είναι πλήρως μονωμένη. Με την καταγραφή της θερμοκρασίας αυτής βλέπουμε πόσο θερμαίνεται η διάταξη σε σχέση με τη θερμοκρασία αέρα.



Εικόνα 3.8 Φαίνονται οι καμπύλες που αναπαριστούν τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ρευστού καθώς και οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία στο εσωτερικό της πειραματικής διάταξης σε βαθμούς Κελσίου (^{o}C) συναρτήσει του χρόνου (seconds). Φαίνεται καλύτερα αυτό που αναφέραμε παραπάνω, δηλαδή ότι οι T_{amb} και T_{dev} μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο.



Εικόνα 3.9 Καμπύλη που αναπαριστά την ροή του ρευστού (ml/s) συναρτήσει του χρόνου (seconds). Οι τιμές για το μέγεθος αυτό είναι ακανόνιστες(μεταβάλλονται απότομα) καθώς η αντλία είναι σε manual mode.

Έχει γίνει γνωστό από τη θεωρία ότι ο πιο συνηθισμένος τρόπος για τον υπολογισμό της σταθερής θερμοκρασίας του υπεδάφους, είναι η κυκλοφορία του ρευστού μέσα στη γεώτρηση για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, πριν η θερμάστρα τεθεί σε λειτουργία για να ξεκινήσει το πείραμα. Θα πρέπει δηλαδή να υπάρχει παροχή ροής (συνήθως σταθερή) στο ρευστό για ένα συγκεκριμένο διάστημα, έτσι ώστε να διανύσει όλο το μήκος του εναλλάκτη και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι θερμοκρασίες εξόδου που καταγράφηκαν κατά το διάστημα αυτό για να υπολογιστεί θερμοκρασία ισορροπίας του υπεδάφους T_o.

Από την Εικόνα 3.9 και από το αρχείο excel παρατηρείται ότι έχουμε σταθερή ροή από τις 14:43 (3675 sec) έως τις 14:59 (4635 sec), οπότε και η παροχή ροής αρχίζει να μειώνεται έως ότου φτάσει στο μηδέν. Το ρευστό πρέπει να κάνει ένα κύκλο στους εναλλάκτες οπότε το μήκος που θα διανύσει είναι 194 μέτρα συνολικά, καθώς όπως έχει σημειωθεί υπάρχουν τρεις εναλλάκτες εν σειρά συνολικού μήκους 2·30=60m και απέχουν μεταξύ τους 7μέτρα.

Άρα το μήκος που διανύει το ρευστό είναι 3·(2·30)+2·7= 194m.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση παροχή ρευστού (flow_rate) και η μέση ταχύτητα ρευστού (fluid_vel) χρησιμοποιώντας τον τύπο:

fluid_vel = $\frac{flow_{rate} \cdot 0.000001}{area}$, όπου area = $\pi \cdot (radius \cdot 0.001)^2$

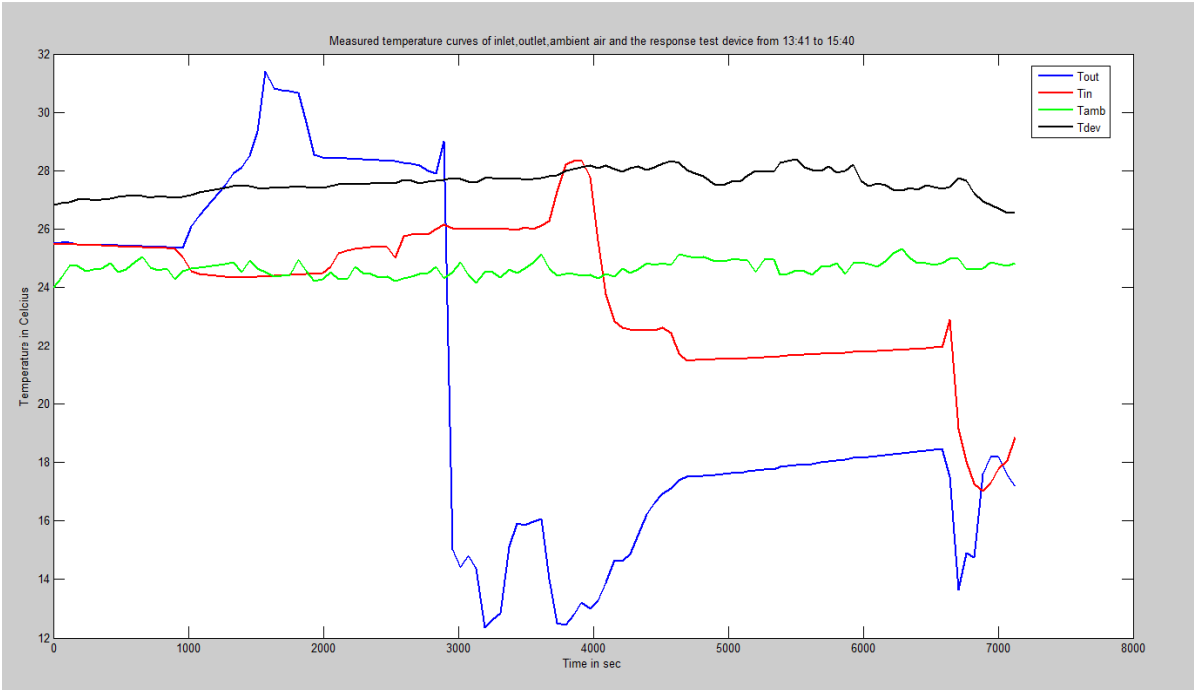
Έπειτα βρίσκεται ο χρόνος που χρειάζεται το ρευστό για να διατρέξει αυτή την απόσταση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το ρευστό διανύει τα 194 μέτρα από τις 14:43 (3675 sec) έως τις 14:54 (4335 sec). Λαμβάνονται οι θερμοκρασίες εξόδου του ρευστού για τους χρόνους αυτούς (συνολικά 12 τιμές), υπολογίζεται ο μέσος όρο τους και βρίσκεται το ζητούμενο, δηλαδή η θερμοκρασία ισορροπίας του υπεδάφους.

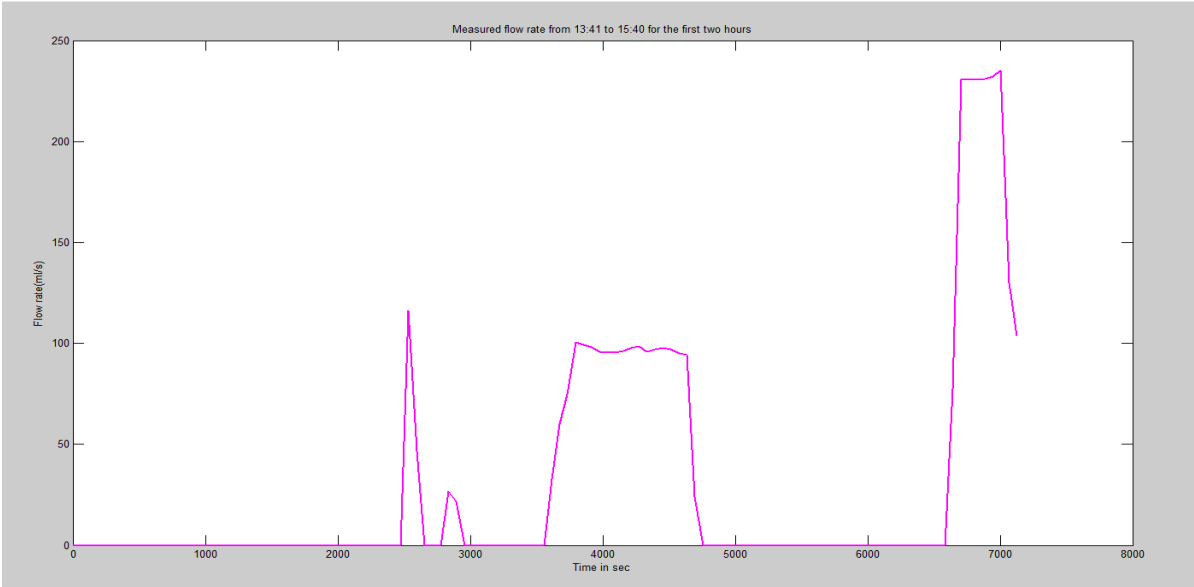
Ο κώδικας MATLAB που υλοποιεί τα παραπάνω υπάρχει στο Παράρτημα (Μέρος Δ).

Μέσω του συγκεκριμένου κώδικα υπολογίστηκε η θερμοκρασία ισορροπίας του υπεδάφους ίση με 13.73 ^{o}C. Το μέγεθος αυτό είναι πολύ σημαντικό και απαραίτητο για την εύρεση των λ και R_b.

Ο κώδικας που υπάρχει στο Μέρος Γ του Παραρτήματος, απλά προσομοιώνει τις καμπύλες των θερμοκρασιών (και τις τέσσερις) καθώς και την παροχή ροής σε συνάρτηση με το χρόνο, για τις δύο πρώτες περιόδους , δηλαδή για την περίοδο δοκιμαστικής λειτουργίας της αντλίας και την περίοδο καταγραφής της θερμοκρασίας του υπεδάφους.

Προκύπτουν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις.





Εικόνες 3.10 & 3.11 Φαίνονται οι καμπύλες που αναπαριστούν όλες τις θερμοκρασίες καθώς και την παροχή ροής συναρτήσει του χρόνου, από 13:41 έως 15:40.

Έναρξη Thermal Response Test και εύρεση παραμέτρων διαστασιολόγησης

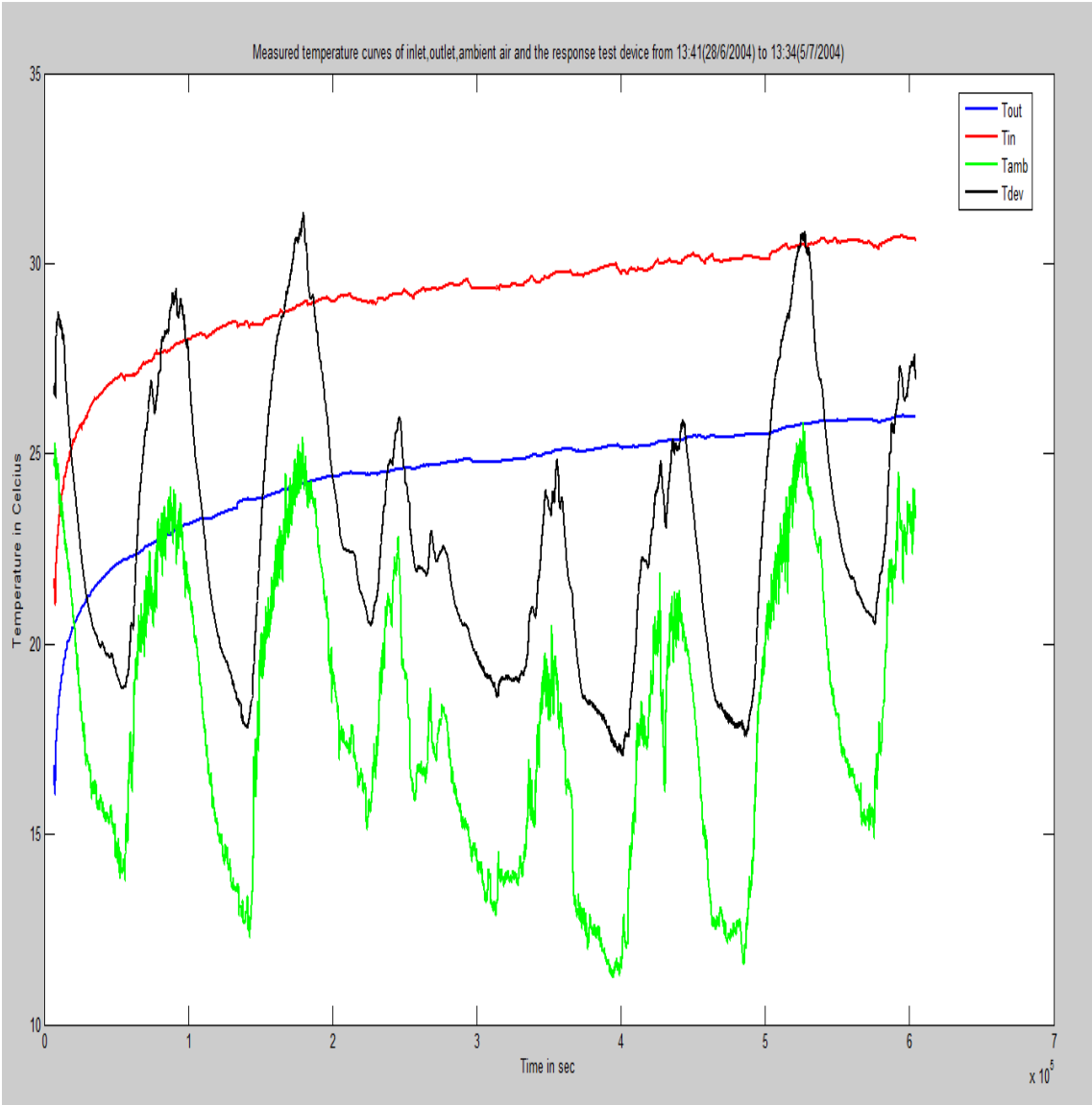
Το Thermal Response Test βασίζεται στην πρόσδοση (έγχυση) θερμότητας μέσα στο έδαφος, η οποία πρέπει να παραμένει σταθερή, μέσω της παροχής

ενός σταθερού ποσού ισχύος σε μια θερμάστρα ηλεκτρικής αντίστασης (θερμική αντίσταση). Στη συνέχεια υπολογίζεται η θερμοκρασιακή απόκριση του ρευστού που χρησιμοποιείται, δηλαδή στην περίπτωσή αυτή(αφού αρχικά γίνεται θέρμανση του ρευστού) πόσο ψύχεται από την είσοδο του στην έξοδο του. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία και το οποίο έδωσε τα αποτελέσματα που χρησιμοποιούνται (αρχείο excel), χρησιμοποιήθηκε PID ελεγκτής, ο οποίος εγγυάται την παροχή ενός σταθερού ποσού θερμότητας Q .Επίσης η χρήση του, εγγυάται ότι τηρούνται όσο πιο πιστά γίνονται οι παραδοχές της θεωρίας Line Source Theory, έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν οι κατάλληλοι τύποι μετέπειτα.

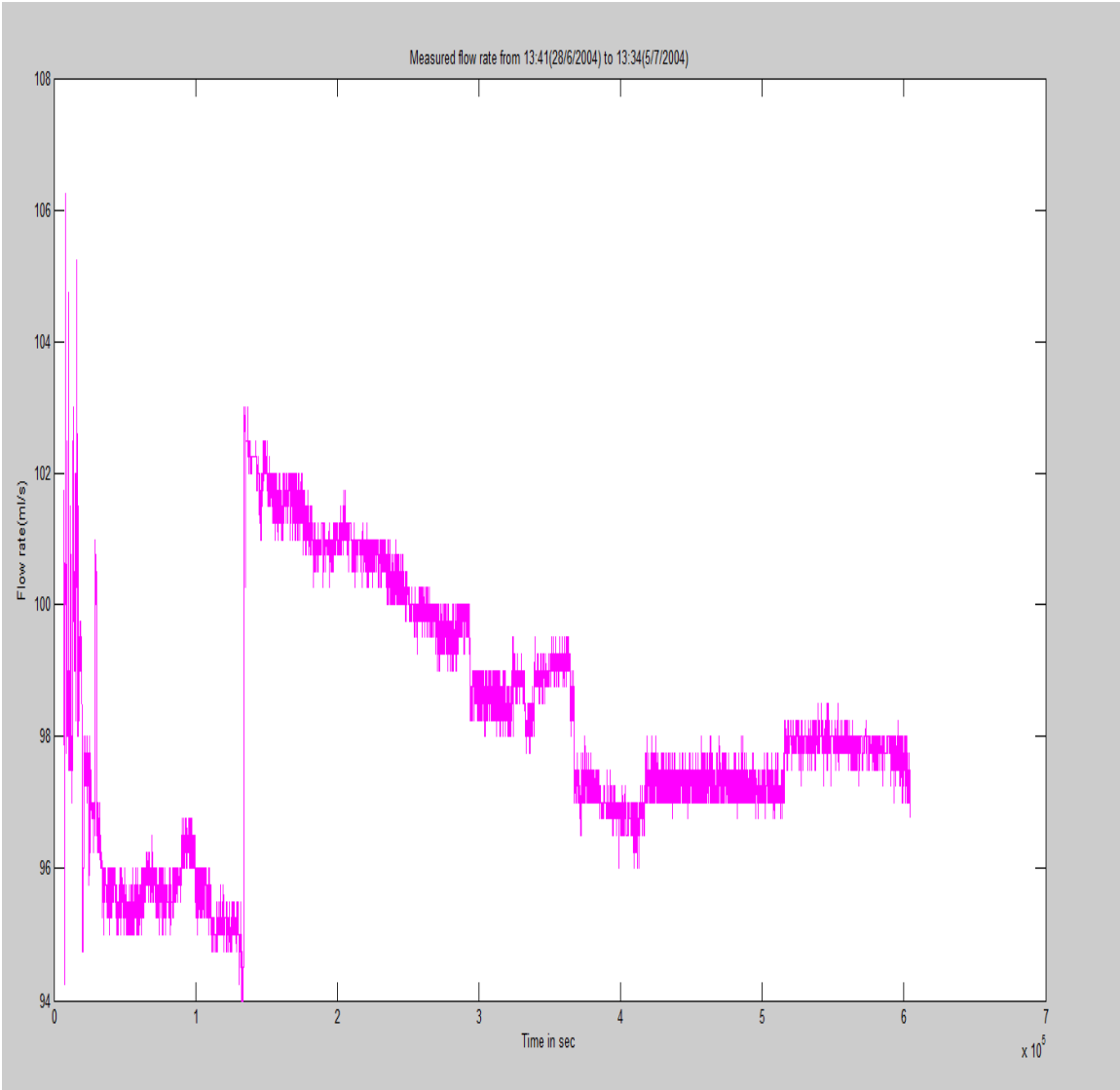
Για να ξεκινήσει το τεστ αυτό είναι απαραίτητο να αρχίσει να θερμαίνεται το ρευστό σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η θέρμανση του ρευστού σύμφωνα με τα δεδομένα του excel αρχείου ξεκίνησε στις 15:41 (28/6/2004). Το σημείο αυτό σηματοδοτεί και την έναρξη του πειράματος, μέσω του οποίου θα βρεθούν τελικά οι παράμετροι λ και R_b. Τα δεδομένα από τις 15:41 (28/6/2004) έως τις 13:34 (5/7/2004) αναπαριστούν τη θερμοκρασιακή απόκριση του ρευστού και κατ’ επέκταση του υπεδάφους, σε ένα γνωστό ποσό θερμότητας.

Στο Μέρος Ε του Παραρτήματος φαίνεται ο κώδικας MATLAB για την προσομοίωση του διαστήματος αυτού, από τη στιγμή που αρχίζει η θέρμανση του ρευστού.

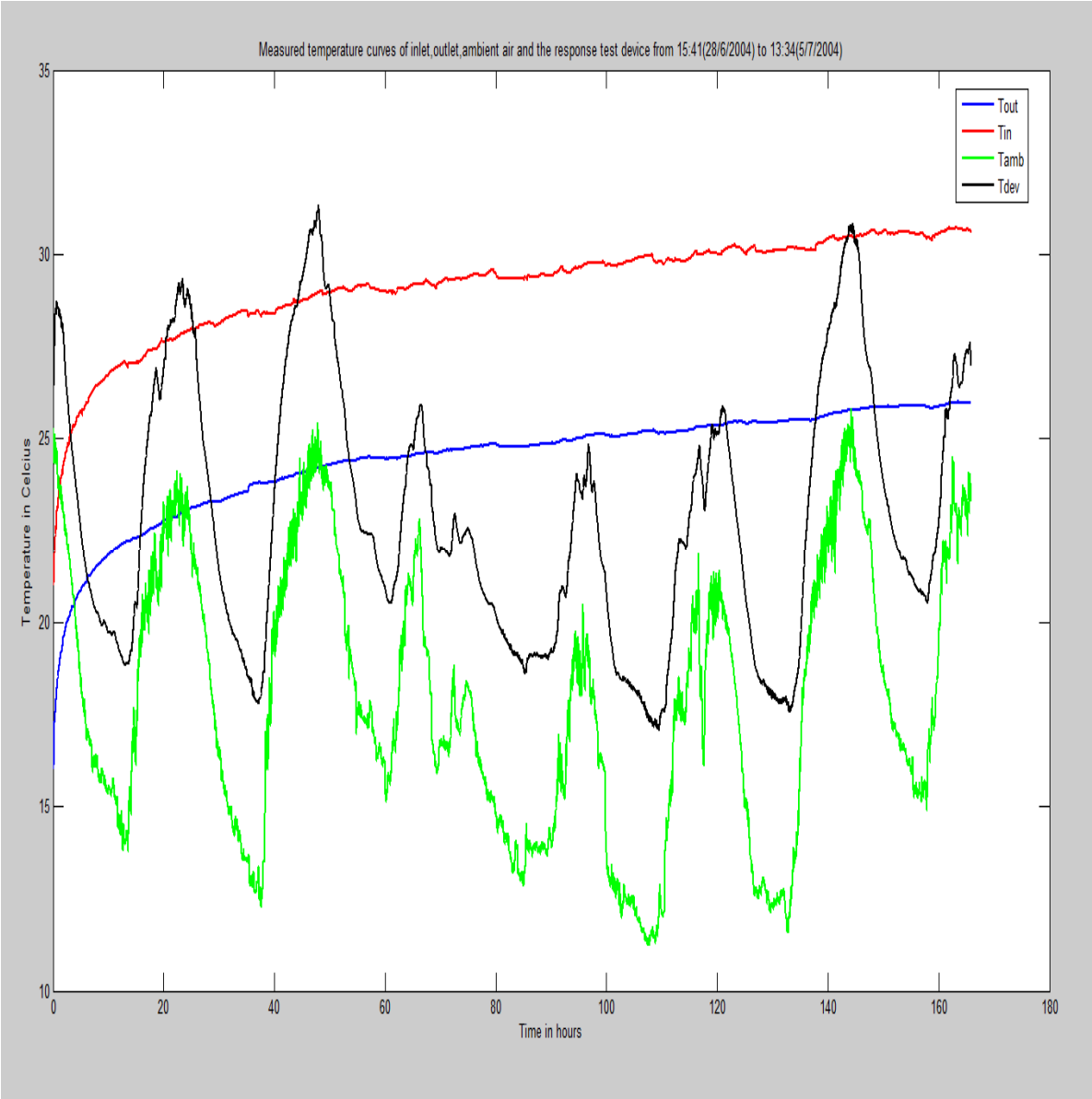
Από την εκτέλεση του κώδικα αυτού προκύπτουν οι γραφικές που ακολουθούν.



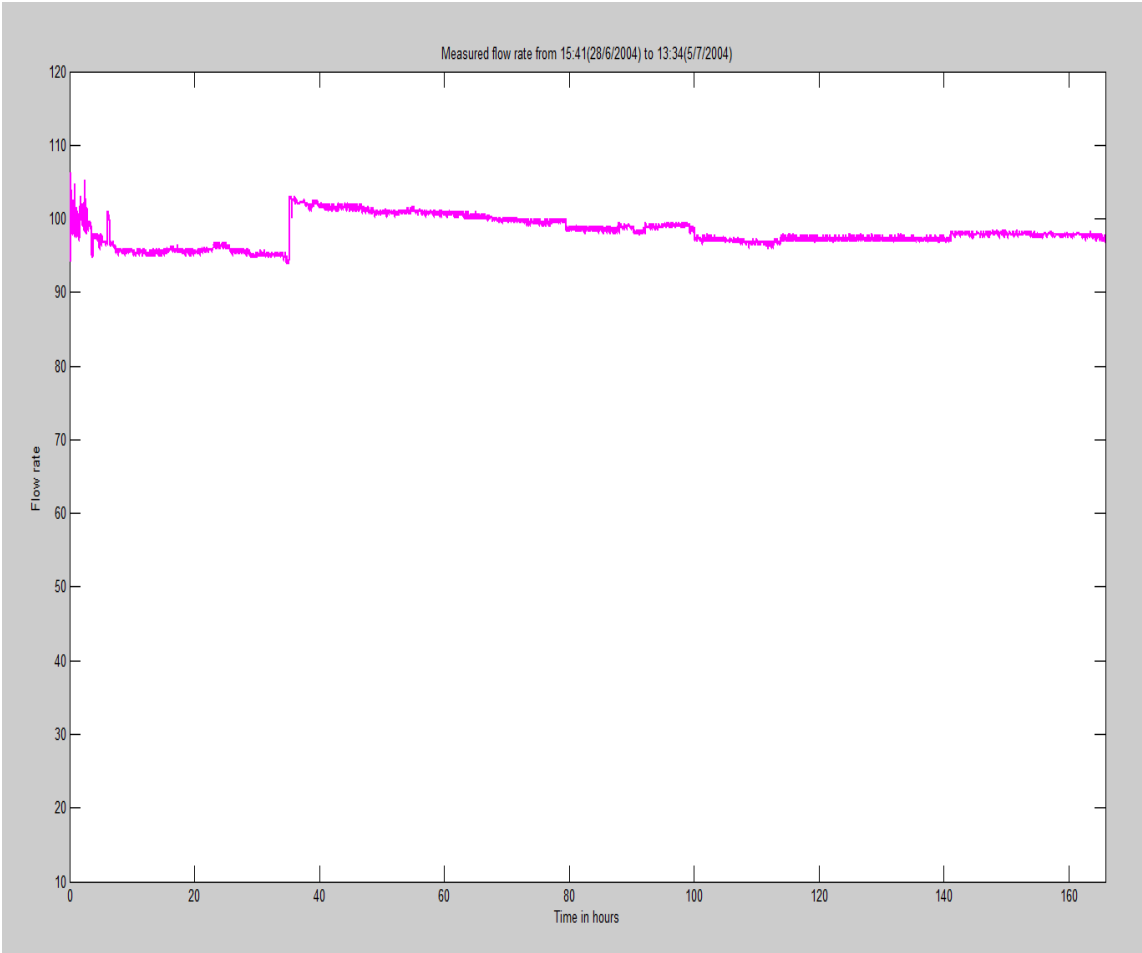
Εικόνα 3.12 Φαίνεται η εξέλιξη των θερμοκρασιών T_{in}, T_{out}, T_{amb}, T_{dev} (^{o}C) σε συνάρτηση με το χρόνο (sec) καθ΄ όλη τη διάρκεια του Thermal Response Test. Τα δεδομένα που αναφέρονται αποκλειστικά και μόνο στο TRT αποτελούν σχεδόν το 98% των δεδομένων που υπάρχουν στο excel.



Εικόνα 3.13 Φαίνεται η εξέλιξη της παροχής ροής (ml/s) στο ρευστό συναρτήσει του χρόνου (sec) κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του TRT.



Εικόνα 3.14 Φαίνεται η εξέλιξη των θερμοκρασιών T_{in}, T_{out}, T_{amb} , T_{dev} (^{o}C) σε συνάρτηση με το χρόνο (hours) καθ΄ όλη τη διάρκεια του Thermal Response Test. Η διαφορά με την Εικόνα 3.12 είναι η αλλαγή στον άξονα του χρόνου έτσι ώστε να φαίνεται πιο ρεαλιστικά η εξέλιξη των μεγεθών αυτών κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 3.15 Φαίνεται πολύ καλύτερα σε σχέση με την Εικόνα 3.13, η εξέλιξη της παροχής ροής στο ρευστό συναρτήσει του χρόνου (hours) κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του TRT. Παρατηρούμε ότι διατηρείται σχεδόν σταθερή σε αντίθεση με την Εικόνα 3.12 όπου κάτι τέτοιο δεν μπορεί να φανεί.

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να γίνουν ορισμένες σημαντικές επισημάνσεις όσον αφορά τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις:

- Θεωρείται ότι το TRT ξεκινά την στιγμή που τίθεται σε λειτουργία η θερμαντική αντίσταση και θερμαίνεται για πρώτη φορά το ρευστό. Για αυτό το λόγο σε όλες οι γραφικές ο άξονας των x(του χρόνου) ξεκινά πάντα από το μηδέν.
- Οι γραφικές παραστάσεις 3.12 και 3.14 είναι παρόμοιες με την Εικόνα 2.16 κάτι που δείχνει ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν συμβαδίζουν με τη θεωρία.

- Από τις ίδιες γραφικές παρατηρείται ότι υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας εισόδου και της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού. Η διαφορά αυτή των θερμοκρασιών αποθηκεύεται με τη μορφή θερμότητας στο υπέδαφος.
- Από την Εικόνα 3.12 φαίνεται καλύτερα αυτό που αναφέρθηκε λίγο παραπάνω. Η θερμοκρασία του αέρα και η θερμοκρασία στο εσωτερικό της πειραματικής διάταξης μεταβάλλονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Παρόλα αυτά η θερμοκρασία του περιβάλλοντος παρουσιάζει πολύ περισσότερες διακυμάνσεις (peaks) από ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό της διάταξης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η συσκευή είναι μερικώς μονωμένη.
- Η παροχή ροής στο ρευστό κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι σχεδόν σταθερή καθώς κατά τη διεξαγωγή του TRT η θερμάστρα είναι αναμμένη και γίνεται συνεχής ανακυκλοφορία του ρευστού στους σωλήνες των εναλλακτών κάτι που δε συνέβαινε στις Εικόνες 3.4 και 3.9, δηλαδή κατά τη δοκιμαστική λειτουργία της αντλίας και την καταγραφή της θερμοκρασίας ισορροπίας του υπεδάφους αντίστοιχα. Με τη βοήθεια της MATLAB υπολογίστηκε ότι η μέση παροχή ροής κατά τη διάρκεια του τεστ είναι 98.20 ml/s ή 353.52 L/h

Όπως είχε τονιστεί παραπάνω, κατά την ανάλυση της θεωρίας της γραμμικής πηγής θερμότητας, πρέπει να τηρούνται ορισμένες προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθεί. Για να βρεθούν επομένως οι δύο παράμετροι που χρειάζονται, σύμφωνα με τη θεωρία, δε θα χρησιμοποιηθούν όλα τα δεδομένα που αναφέρονται στο Thermal Response Test, δηλαδή από το 15:41 και κάτω (οπότε και αρχίζει η θέρμανση του ρευστού), αλλά μόνο τα δεδομένα που ικανοποιούν τη σχέση:

$$\frac{\mathrm{a}t}{r^2} \geq 5 \qquad \text{(Εξ. 3.8)}$$

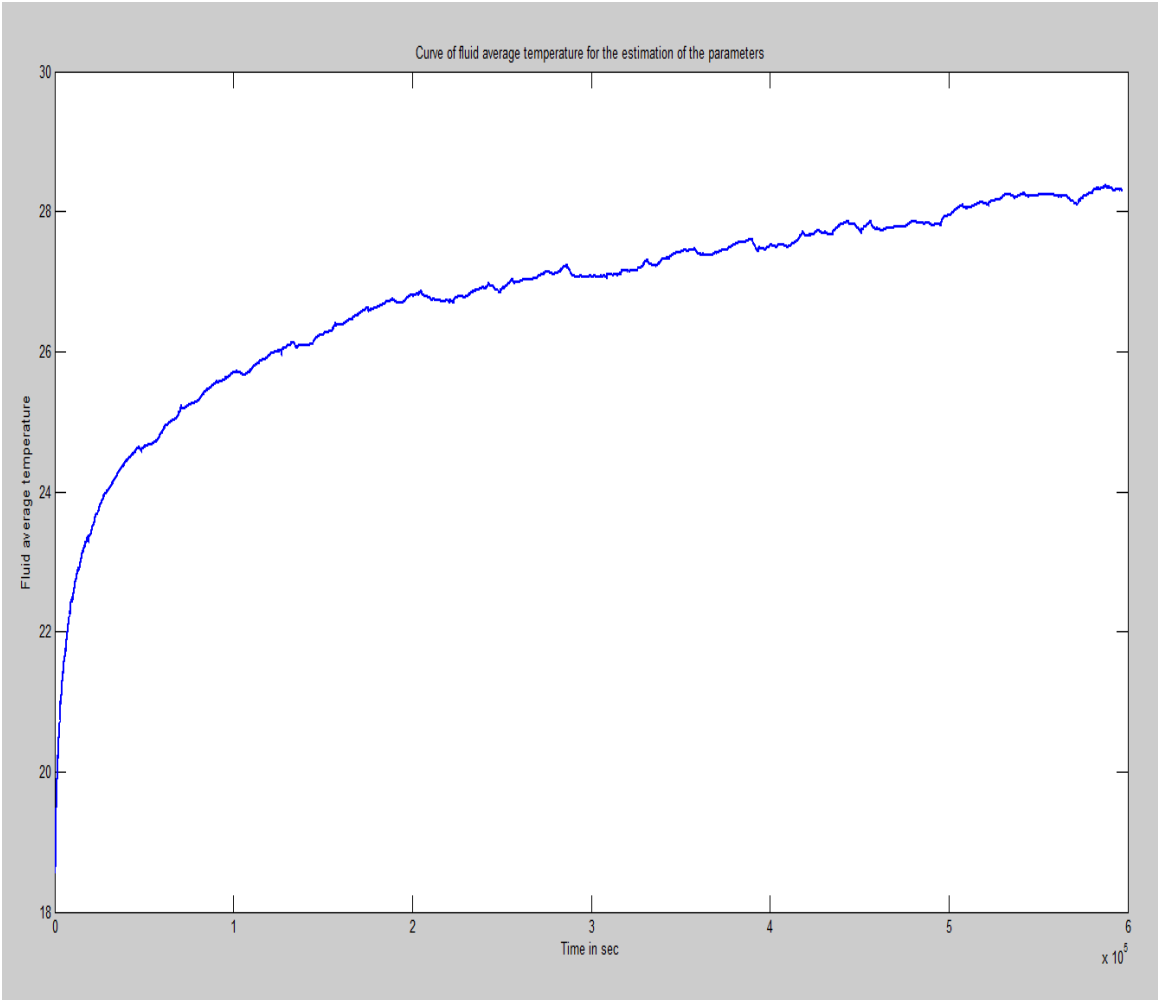
Δηλαδή πρέπει να βρεθεί από ποιο χρονικό σημείο και μετά ισχύει η συνθήκη αυτή. Ο λόγος που απορρίπτονται τα δεδομένα του TRT που δεν ικανοποιούν την παραπάνω σχέση, από τον υπολογισμό των λ και R_b, είναι ακριβώς επειδή

μπορεί να υπάρξει λάθος εκτίμηση αυτών των δύο, αν τα αρχικά δεδομένα επηρεαστούν, από τη θερμοκρασία του αέρα στο περιβάλλον . Με αυτό τον τρόπο μειώνεται κατά πολύ το σφάλμα στα τελικά αποτελέσματα. Με τη βοήθεια της MATLAB βρέθηκε ότι, το κριτήριο για να ισχύει η θεωρία γραμμικής πηγής αρχίζει να ισχύει από τις 21:58 (28/6/2004), δηλαδή απορρίπτονται τελείως οι πρώτες 377 μετρήσεις από τη στιγμή που ξεκινά να θερμαίνεται το ρευστό. Αυτό σημαίνει ότι το t_{min} , δηλαδή ο χρόνος κάτω από τον οποίο όλα τα δεδομένα ικανοποιούν την Εξίσωση 3.8 , είναι 22500 seconds ή 6.25 hours. Να σημειωθεί ότι ως μηδέν θεωρείται η στιγμή που αρχίζει να θερμαίνεται το ρευστό για πρώτη φορά δηλαδή στις 15:41. Επομένως οι πρώτες 6.25 ώρες του TRT δεν παίζουν κανένα ρόλο στην εκτίμηση των παραμέτρων διαστασιολόγησης.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία του ρευστού από τον μέσο όρο των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου, δηλαδή:

$$T_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \qquad \text{(Εξ. 3.9)}$$

Ο κώδικας MATLAB που υλοποιεί όλα τα παραπάνω βρίσκεται στο Παράρτημα (Μέρος ΣΤ). Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την εκτέλεση του κώδικα.

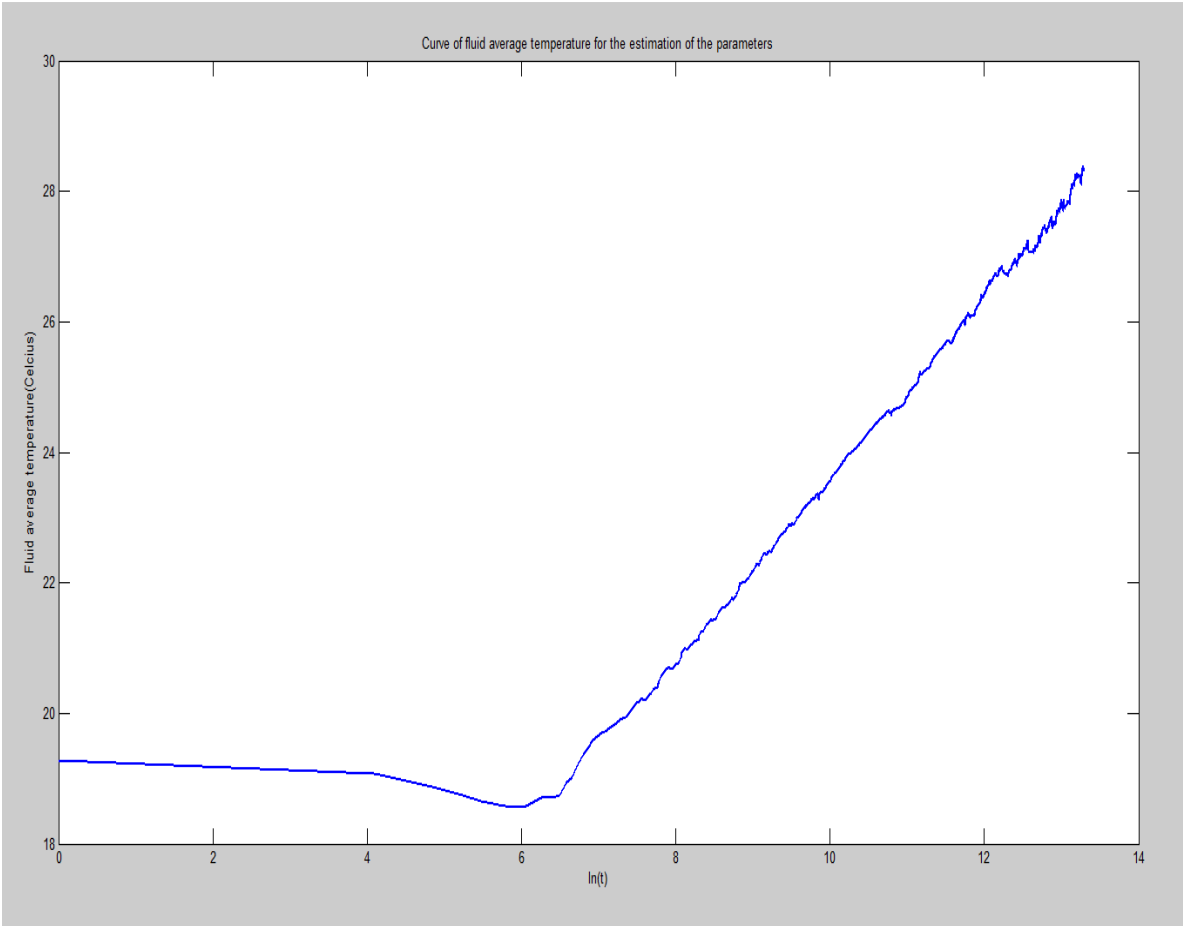


Εικόνα 3.16 Η καμπύλη αυτή αναπαριστά τη μέση θερμοκρασία του ρευστού σε συνάρτηση με το χρόνο (seconds).

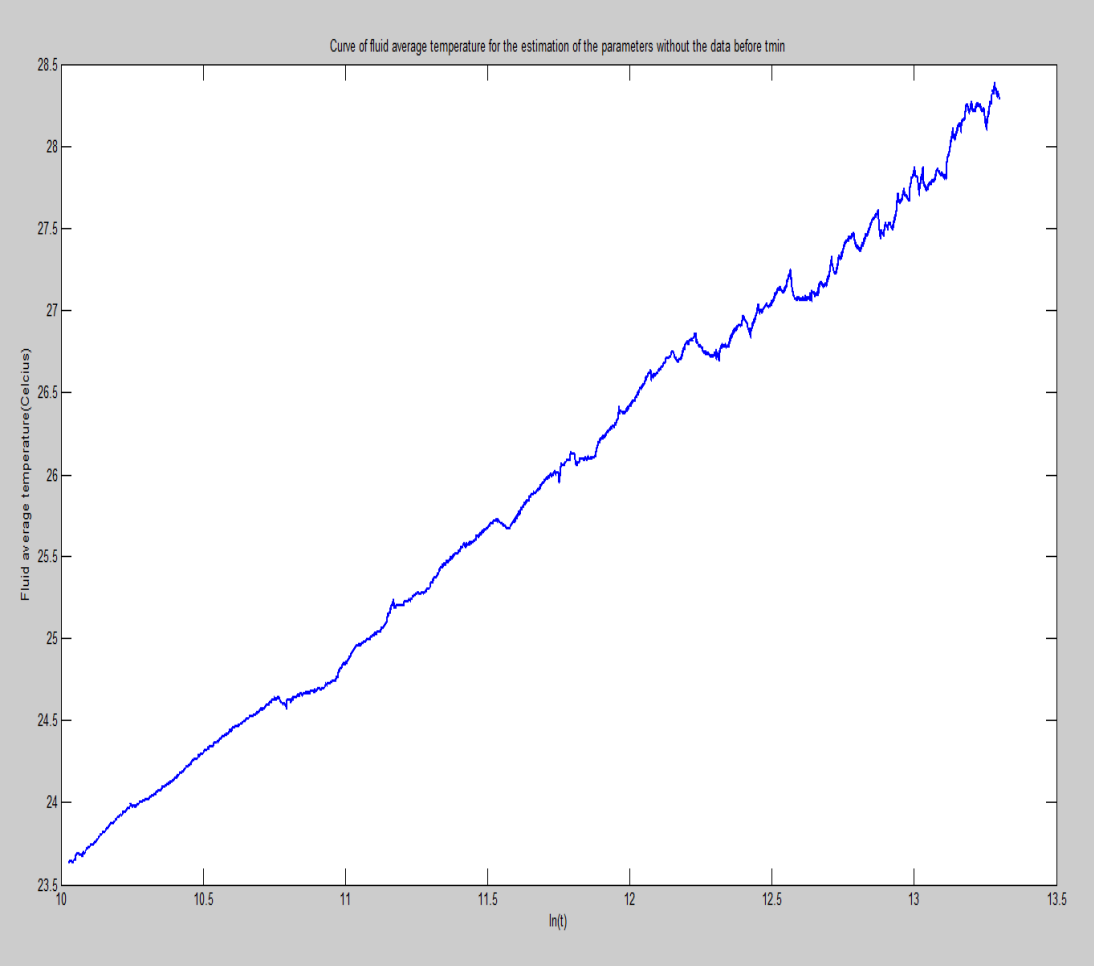
Παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία T_f παρουσιάζει ταλαντώσεις λόγω μεταβολών στις καταγραφόμενες τιμές (θερμοκρασία εισόδου, θερμοκρασία εξόδου), επειδή η μετρητική διάταξη θερμαίνεται και ψύχεται από το περιβάλλον ανάλογα να είναι μέρα ή νύχτα (σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα).

Όπως αποδείχθηκε από την Εξίσωση 3.4, η μέση θερμοκρασία του ρευστού μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση:

$$T_f(t) = k \cdot \ln t + m \text{ , όπου } \quad k = \frac{Q}{4\pi\lambda H}$$



Εικόνα 3.17 Εξαιτίας της παραπάνω σχέσης, παρατίθεται η εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το ln(t). Σε όλα τα συγγράμματα οι παράμετροι λ και R_b βρίσκονται αξιοποιώντας κατάλληλα την γραφική αυτή, χωρίς όμως να υπάρχουν δεδομένα που δεν χρειάζονται.



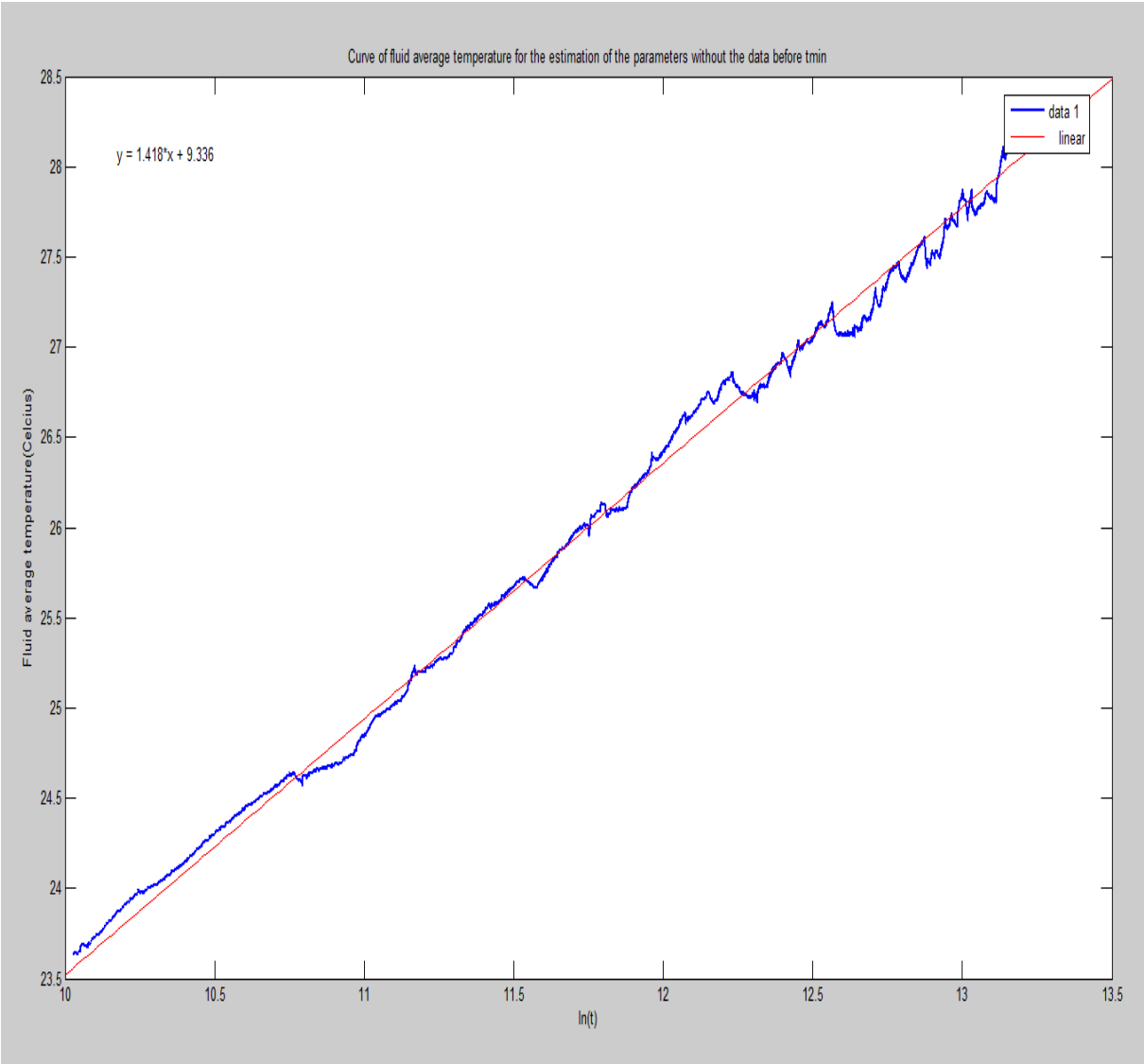
Εικόνα 3.18 Φαίνεται η καμπύλη που αναπαριστά τη μέση θερμοκρασία του ρευστού σε συνάρτηση με το ln(t). Για τη σχεδίαση της καμπύλης αυτής παραλείφθηκαν εντελώς τα δεδομένα που δεν ικανοποιούν το κριτήριο at/r^2 >5.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το μενού της MATLAB (Tools → Basic Fitting → linear) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής (linear regression) στην παραπάνω καμπύλη έτσι ώστε να εκτιμηθούν οι δύο σταθερές k και m όπως φαίνεται από την Εξίσωση 3.4, και με τη βοήθεια αυτών υπολογίστηκαν οι παράμετροι λ και R_b.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα μέσω της γραμμικής παρεμβολής προέκυψε ότι:

$$T_f(t) = 1.418 \cdot \ln(t) + 9.336 \quad , \qquad (\text{Εξ. } 3.10)$$

δηλαδή οι δύο σταθερές που προκύπτουν είναι k = 1.418 και m=9.336

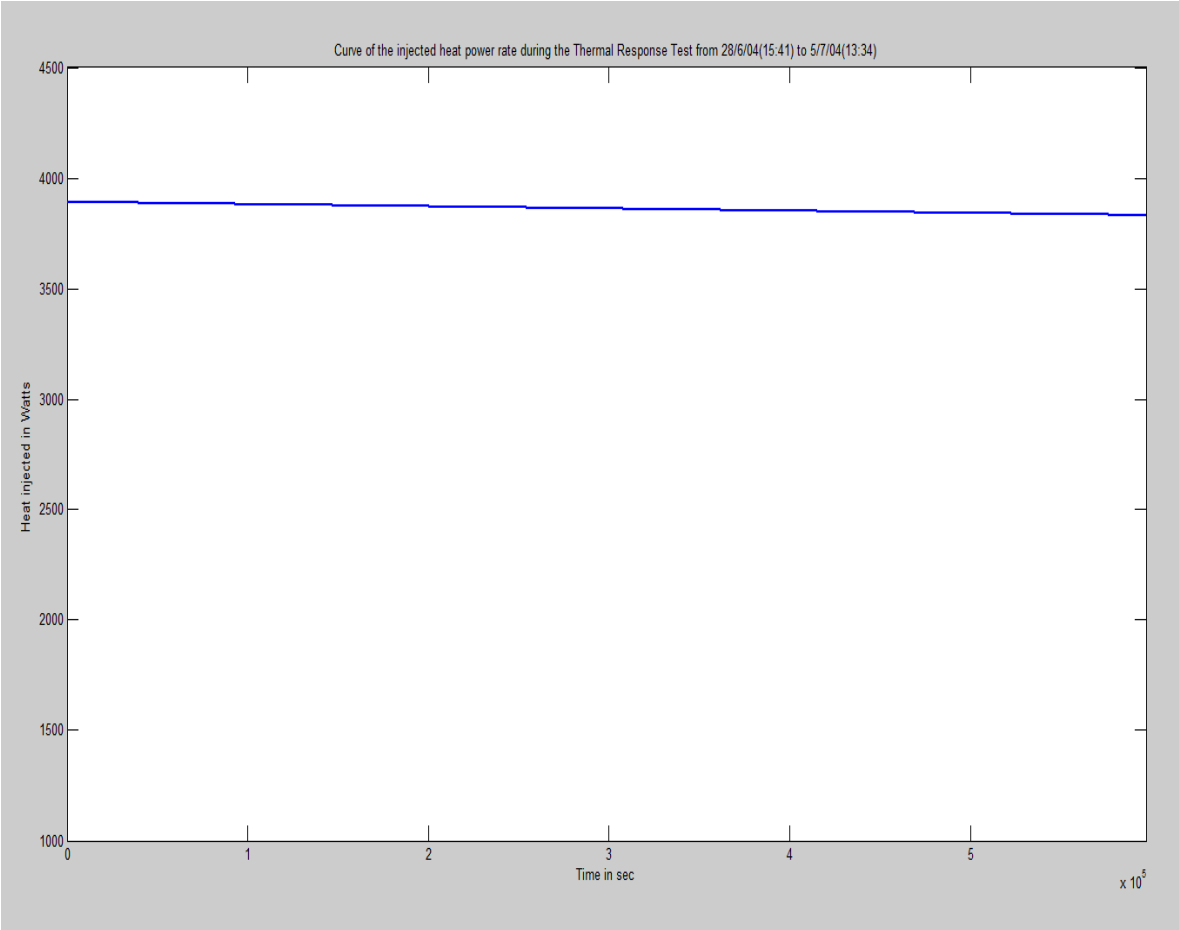


Εικόνα 3.19 Γραμμική παρεμβολή στην καμπύλη που αναπαριστά τη μέση θερμοκρασία T_f ως προς ln(t) και εύρεση των δύο σταθερών k,m με βάση την Εξίσωση 3.4

Είναι γνωστό ότι $k = \frac{Q}{4\pi\lambda H}$, επομένως $\lambda = \frac{Q}{4\pi\kappa H}$ και άρα θα πρέπει να βρεθεί το Q για να υπολογιστεί το λ. Η συνολική ισχύς που δίνεται αρχικά στο σύστημα BHE είναι γνωστή και ισούται με Q_{tot} = 3892 W. Υπολογίζεται στη συνέχεια η μέση ισχύς κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αφού το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από τρεις εναλλάκτες σε σειρά, το ποσό θερμότητας που χρησιμοποιείται για την εύρεση του λ είναι $Q = \frac{Q_{av}}{3}$. Με βάση την τιμή αυτή και ξέροντας τις τιμές k, Q, H βρίσκουμε το λ, με χρήση του κώδικα που βρίσκεται στο Μέρος Z του Παραρτήματος.

Από την εκτέλεση του κώδικα αυτού βρέθηκε ότι Q_{av} = 3862.1 και Q = 1287.4 Watts.

Επιπλέον από τη γραφική παράσταση που προκύπτει, επιβεβαιώνεται και γραφικά η χρήση PID ελεγκτή, ο οποίος εγγυάται την παροχή ενός σταθερού ποσού θερμότητας.



Εικόνα 3.20 Γραφική παράσταση του ποσού θερμότητας που προσδίδεται στο σύστημα(Watts) σε συνάρτηση με το χρόνο(seconds). Το ποσό αυτό είναι σχεδόν σταθερό(μεταβάλλεται ελάχιστα) καθ' όλη τη διάρκεια του τεστ, κάτι που μας δείχνει τη χρησιμότητα του ελεγκτή PID.

Επομένως λ = $\frac{Q}{4\pi\kappa H}$ = $\frac{1287.4\ W}{4\pi\cdot 1.418\cdot 30\ m}$ = 2.4082 W/m·K με τη βοήθεια της MATLAB.

Προέκυψε επίσης ότι η μέση θερμοκρασία του ρευστού είναι T_f = 26.965 ^oC.

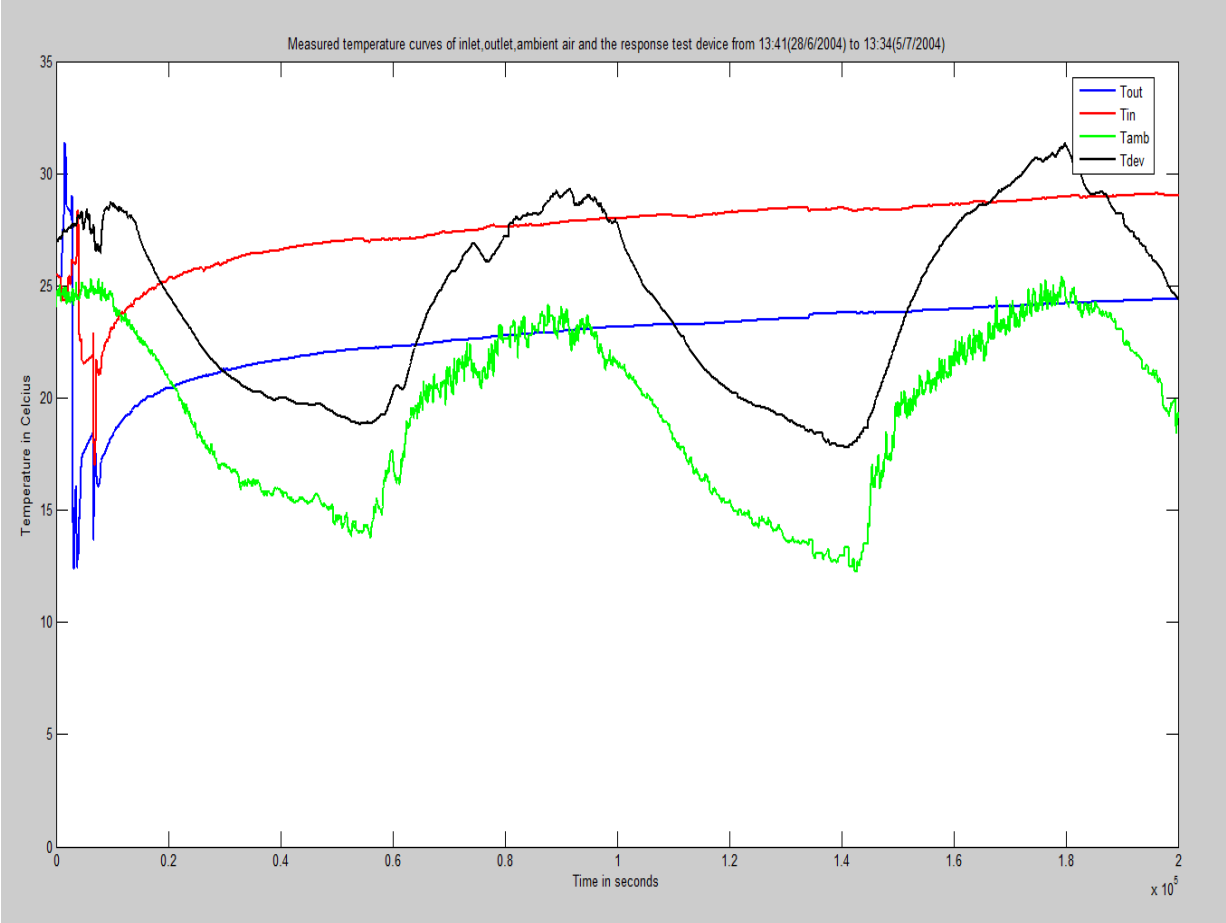
Αφού υπολογίστηκε η πρώτη παράμετρος διαστασιολόγησης (λ), είναι εύκολο να υπολογιστεί και το R_b χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.5.

Με τη βοήθεια του κώδικα που παρατίθεται στο Παράρτημα (Μέρος Η) λαμβάνεται η θερμική αντίσταση του γεωθερμικού εναλλάκτη. Προκύπτει ως ο μέσος όρος ενός αριθμού θερμικών αντιστάσεων. Κάθε τιμή θερμικής αντίστασης που εξάγεται, αντιστοιχεί σε ένα ζευγάρι μέσης θερμοκρασίας ρευστού και σε ένα συγκεκριμένο χρόνο.

Μέσω της MATLAB προέκυψε ότι η θερμική αντίσταση του εναλλάκτη είναι R_b = 0.4584 K·m/W. Επομένως οι δύο κύριες παράμετροι σχεδιασμού ενός πραγματικού γεωθερμικού συστήματος στην περιοχή αυτή (Αττερκίρχεν) είναι λ = 2.4082 W/m·K και R_b = 0.4584 K·m/W. Το πιο σημαντικό στην όλη διαδικασία εύρεσης των παραμέτρων είναι να γίνουν σωστά fit τα πειραματικά δεδομένα και να υπολογιστούν οι δύο σταθερές της ευθείας k και m με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής.

Τέλος ο κώδικας που παρατίθεται στο Παράρτημα (Μέρος Θ), προσομοιώνει την όλη διαδικασία από τις 13:41(28/6/2004) έως τις 13:34(5/7/2004).

Από την εκτέλεση του παραπάνω προκύπτει η γραφική παράσταση που ακολουθεί.



Εικόνα 3.21 Φαίνονται οι καμπύλες των θερμοκρασιών T_{in}, T_{out}, T_{amb}, T_{dev}, σε συνάρτηση με το χρόνο (seconds) από τις 13:41 (28/6/2004) έως τις 13:34 (5/7/2004). Ουσιαστικά δηλαδή φαίνεται η προσομοίωση και τω τριών περιόδων που αναφέραμε στην αρχή, σε μια γραφική παράσταση.

Είναι ορατό από την εικόνα 3.21 ότι σχεδόν το 98% της προσομοίωσης αναφέρεται στην περίοδο που λαμβάνει χώρα το Thermal Response Test. Η αρχική περίοδος λειτουργίας της αντλίας καθώς και η περίοδος καταγραφής της θερμοκρασίας ισορροπίας του υπεδάφους, διαρκούν ελάχιστα σε σχέση με το πείραμα TRT.

Σύνοψη

Ερμηνεία αποτελεσμάτων Thermal Response Test

Θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα στο σημείο αυτό ότι το αποτέλεσμα που προκύπτει για την παράμετρο λ είναι απολύτως λογικό καθώς ύστερα από διάφορες εργαστηριακές μετρήσεις που έγιναν, πάνω στη συγκεκριμένη γεώτρηση, η εκτίμηση για την παράμετρο αυτή ήταν λ_{est} = 2.50 W/m·K. Επομένως η τιμή που υπολογίστηκε για το λ είναι σχεδόν η ίδια με την αρχική εκτίμηση δεδομένου ότι η θεωρία της γραμμικής πηγής θερμότητας εισάγει και ένα μικρό σφάλμα. Το ίδιο ισχύει και για την τιμή του R_b. Το R_b είναι μια θερμική αντίσταση, η οποία μπορεί να αναπαρασταθεί πιο απλά σαν μία ηλεκτρική αντίσταση. Καταδεικνύει πόση θερμοκρασιακή διαφορά θα χρειαστεί, για να μεταφερθεί ένα συγκεκριμένο ποσό θερμότητας από τον εναλλάκτη στο πέτρωμα. Όσο πιο μεγάλη είναι η παράμετρος αυτή, τόσο περισσότερο πρέπει να θερμανθεί το ρευστό και κατά συνέπεια θα καταναλωθεί περισσότερη ενέργεια.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν ωστόσο με τη χρήση του Thermal Response Test, θεωρούνται περισσότερο ακριβή από τις μετρήσεις που γίνονται στο εργαστήριο, καθώς οι τιμές που μετρώνται με το TRT είναι οι effective (λειτουργικές) που βλέπει το θερμικό σύστημα.

Έχει αναφερθεί πολλές φορές ότι με τη μέθοδο αυτή, προκύπτουν οι δύο βασικές παράμετροι σχεδιασμού γεωθερμικών εγκαταστάσεων, που είναι η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και η θερμική αντίσταση του γεωθερμικού εναλλάκτη. Με τον όρο διαστασιολόγηση γεωθερμικού συστήματος εννοείται πόσο «μεγάλο» ή «μικρό» πρέπει να είναι ένα τέτοιο σύστημα για να καλύψει τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί κατά τη σχεδίαση του. Για παράδειγμα, ένα σπίτι 100 τ.μ με συνολικά πέντε(5) δωμάτια και ένα ξενοδοχείο 3500 τ.μ με 125 δωμάτια και μέση ζήτηση ζεστού νερού 40 λίτρα/άτομο δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από το ίδιο γεωθερμικό σύστημα. Πιο συγκεκριμένα για να γίνει διαστασιολόγηση μιας γεωθερμικής εγκατάστασης, είναι ιδιαίτερα σημαντική η εύρεση των παρακάτω:

- Πλήθος και βάθος γεωτρήσεων που πρέπει να ανοιχτούν στο έδαφος για αποθήκευση ή άντληση θερμότητας
- Πραγματικές διαστάσεις συστήματος
- Ποσά θερμότητας που πρέπει να παράγει το σύστημα
- Μέγεθος αντλίας θερμότητας
- Μέγεθος δεξαμενής νερού
- Μήκος εναλλάκτη

Τα μεγέθη αυτά αποφασίζονται αφότου έχει πραγματοποιηθεί το Thermal Response Test από τον εκάστοτε σχεδιαστή και δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης στην παρούσα εργασία. Αυτό που είναι πολύ σημαντικό είναι η εύρεση των παραμέτρων διαστασιολόγησης που είναι η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους και η θερμική αντίσταση του εναλλάκτη. Το TRT είναι μια μέθοδος που δίνει τις παραμέτρους και ανάλογα στη συνέχεια ο σχεδιαστής αξιολογεί πως πρέπει να προχωρήσει στην κατασκευή του γεωθερμικού συστήματος, το οποίο θα καλύπτει τις προδιαγραφές που του έχουν ζητηθεί αρκετά.

Ένα μικρό αλλά χαρακτηριστικό παράδειγμα αξιολόγησης των παραμέτρων που προκύπτουν είναι το παρακάτω. Θέλουμε να κατασκευάσουμε δύο γεωθερμικά συστήματα με τις ίδιες ακριβώς προδιαγραφές σε δύο διαφορετικές περιοχές Α και Β. Χρησιμοποιείται η μέθοδος TRT στην περιοχή Α και προκύπτει ότι λ=2.35 και R_b=0.54. Χρησιμοποιώντας και πάλι TRT με τις ίδιες αρχικές παραμέτρους, για την περιοχή Β εξάγεται ότι λ=2.39 και R_b=0.12 .
Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή Β συμπεριφέρεται θερμικά καλύτερα από την Α και επομένως το κόστος κατασκευής του συστήματος στην περιοχή Β θα είναι μικρότερο από ότι στην περιοχή Α. Για να επιτευχθεί δηλαδή η μεταφορά του ίδιου ποσού θερμότητας στην περιοχή Α θα χρειαστεί αντλία θερμότητας με μεγαλύτερη ισχύ, από ότι αυτή που θα χρησιμοποιήθεί στην περιοχή Β.

Στη συνέχεια παρατίθεται ένα ακόμη παράδειγμα που δείχνει γιατί η διαδικασία εύρεσης των παραμέτρων διαστασιολόγησης είναι τόσο σημαντική.

Θέλουμε να σχεδιάσουμε μία αποθήκη θερμότητας η οποία θα αποθηκεύει θερμότητα από ηλιακούς θερμοσίφωνες το καλοκαίρι στο υπέδαφος και θα την αντλεί τον χειμώνα, για να τροφοδοτήσει αντλίες θερμότητας που θα παρέχουν ζεστό νερό σε σπίτια.
Το σύστημα έχει ορισμένες προδιαγραφές: Αριθμός σπιτιών, θερμοκρασία νερού που θα παρέχουμε, κλπ, οπότε πρέπει να δούμε πόση θερμότητα θα αποθηκεύσουμε το καλοκαίρι και πόση θα αντλήσουμε το χειμώνα. Εφόσον θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε το υπέδαφος, πρέπει να ξέρουμε τις θερμικές παραμέτρους, ώστε να κάνουμε τη διαστασιολόγηση του συστήματος (για δεδομένα λ και R_b τα οποία βρίσκουμε μέσω TRT, βάσει των δεδομένων θερμοκρασιών T_f, T_{und} και ποσών θερμοτήτων q) θα υπολογιστούν πόσες γεωτρήσεις πρέπει να γίνουν, πόσο βαθιές, τι υλικά θα χρησιμοποιήσουμε, την μέγιστη ισχύ των αντλιών, μέγεθος δεξαμενών νερού και άλλες σχετικές παραμέτρους.

Εφόσον δεν είναι γνωστές οι παράμετροι του υπεδάφους, είτε θα γίνει εκτίμησή τους, είτε θα διεξαχθεί το TRT πείραμα. Οι τιμές που θα προκύψουν από το TRT θα είναι οι πραγματικές τιμές λειτουργίας του συστήματος, οπότε η διαστασιολόγηση θα είναι ακριβής.

Τα παραπάνω αποτελούν πολύ απλά παραδείγματα, αξιολόγησης των παραμέτρων που προκύπτουν από το TRT για την κατασκευή ενός πραγματικού γεωθερμικού συστήματος. Όπως αναφέρθηκε λίγο παραπάνω η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζεται στη σωστή εύρεση των παραμέτρων λ και R_b και όχι στη διαδικασία που ακολουθείται μετά την εύρεση των παραμέτρων αυτών.

Επιπλέον εκτός της εύρεση των παραμέτρων αυτών το TRT έχει και μία ακόμη χρησιμότητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς εγκαταστάσεων που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία, με σκοπό τη διάγνωση κατασκευαστικών ή και σχεδιαστικών σφαλμάτων. Για παράδειγμα εάν ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από 10 εναλλάκτες και χρειάζεται να επιβεβαιωθεί ότι όλοι τους δουλεύουν σωστά θα πρέπει να γίνει TRT στον καθένα ξεχωριστά, να καταγραφεί η συμπεριφορά του και στη συνέχεια να εξεταστεί αν συμπεριφέρεται ανάλογα στην πραγματικότητα. Τα σφάλματα που προκύπτουν είναι κυρίως κατασκευαστικά, μπορούν όμως να είναι και σχεδιαστικά. Ένα σχεδιαστικό σφάλμα είναι η μη χρησιμοποίηση κατάλληλου filling material στη γεώτρηση.

Επομένως το Thermal Response Test μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο πριν τη σχεδίαση ενός γεωθερμικού συστήματος για την εύρεση των παραμέτρων διαστασιολόγησης, είτε μετά την κατασκευή του συστήματος για την εύρεση τυχόν σφαλμάτων.

Όσον αφορά τις παραμέτρους λ και R_b, προκύπτει ότι δεν υπάρχουν ζεύγη τιμών τα οποία θεωρούνται σωστά ή λάθος, καθώς η διαδικασία δεν γίνεται κάτω από τις ίδιες συνθήκες(είδος εδάφους, στρωματογραφία, ύπαρξη υπόγειων νερών, μέθοδος υπολογισμού). Είναι σαφές όμως με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί έως τώρα ότι αν το έδαφος παρουσιάζει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα τότε η θερμική αντίσταση θα είναι σχετικά «μικρή» και το αντίστροφο.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα με ζεύγη τιμών λ και R_b αποτελεί ο παρακάτω πίνακας ο οποίος περιέχει αποτελέσματα από διάφορα TRT, που έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές περιοχές.

Τοποθεσία	λ(W/mK)	R_b (mK/W)
Langen 1(Germany 1999)	2.8	0.11
Langen 2	2.3	0.08
Langen 3	2.2	0.07
Mainz 1(Germany 2003)	1.43	0.16
Mainz 2	1.41	0.20
Latin America(2003)	2.35	0.32
Oklahoma(1998)	2.12	0.141
Norway(1998)	4.59	0.061
Sweden(1998)	3.31	0.070

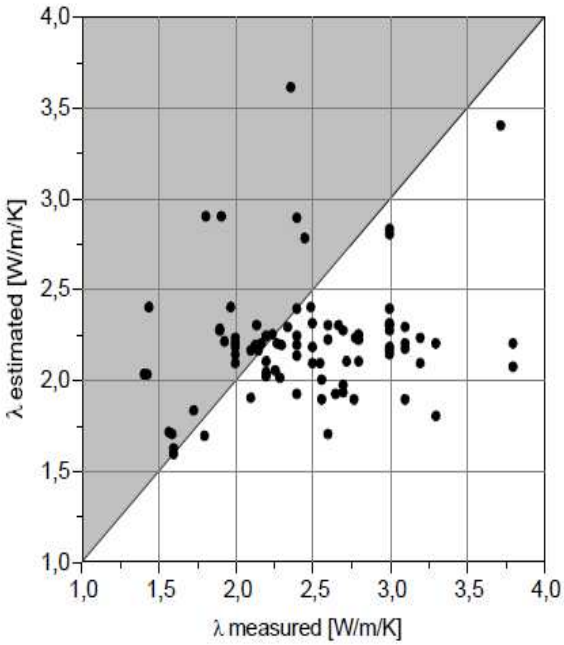
Σημασία εύρεσης σωστών παραμέτρων με τη μέθοδο TRT

Θα αποδειχθεί παρακάτω ο λόγος για τον οποίο η μέθοδος Thermal Response Test είναι τόσο σημαντική για την εύρεση των παραμέτρων διαστασιολόγησης και γιατί πρέπει να χρησιμοποιείται πάντα για το σωστό σχεδιασμό και κατασκευή ενός πραγματικού γεωθερμικού συστήματος.

Στην Εικόνα 3.22 φαίνεται η σύγκριση 86 τιμών για το λ. Οι τιμές αυτές αρχικά βρέθηκαν ύστερα από εκτίμηση με βάση τη λιθογραφία του εδάφους και στη συνέχεια υπολογίστηκαν με χρήση της μεθόδου που μελετούμε. Προκύπτει ότι 25% των εκτιμώμενων τιμών για τη θερμική αγωγιμότητα ήταν μεγαλύτερες από τις πραγματικές τιμές που προέκυψαν από το TRT, ενώ μόνο το 8% των εκτιμώμενων και των πραγματικών τιμών συνέπιπταν μεταξύ τους. Το 45% των δεδομένων παρουσιάζει απόκλιση από τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές, μεγαλύτερη από 0.5 W/m·K. Η απόκλιση αυτή στην τιμή του λ ,μια από τις δύο κύριες παραμέτρους για την κατασκευή ενός γεωθερμικού συστήματος μπορεί να οδηγήσει στην υπο-διαστασιολόγηση ή υπερ-διαστασιολόγηση του συστήματος αυτού.

Με τον όρο υπο-διαστασιολόγηση , εννοούμε ότι το γεωθερμικό σύστημα δεν παράγει την απαιτούμενη ενέργεια, για να καλύψει τις ανάγκες ενός κτιρίου σε θέρμανση και ψύξη. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι $\lambda_{est} > \lambda_{measured}$. Οι συνέπειες από την λάθος εύρεση του λ που οδηγεί σε υποδιαστασιολόγηση του συστήματος είναι οι ακόλουθες:

- Η θερμοκρασία του μέσου μεταφοράς θερμότητας μειώνεται πιο γρήγορα και φθάνει σε χαμηλότερα επίπεδα.
- Ο συντελεστής απόδοσης(COP) της αντλίας θερμότητας μειώνεται.
- Το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης αυξάνεται.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις έχουμε ανεπάρκεια του συστήματος και πιθανή βλάβη κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.



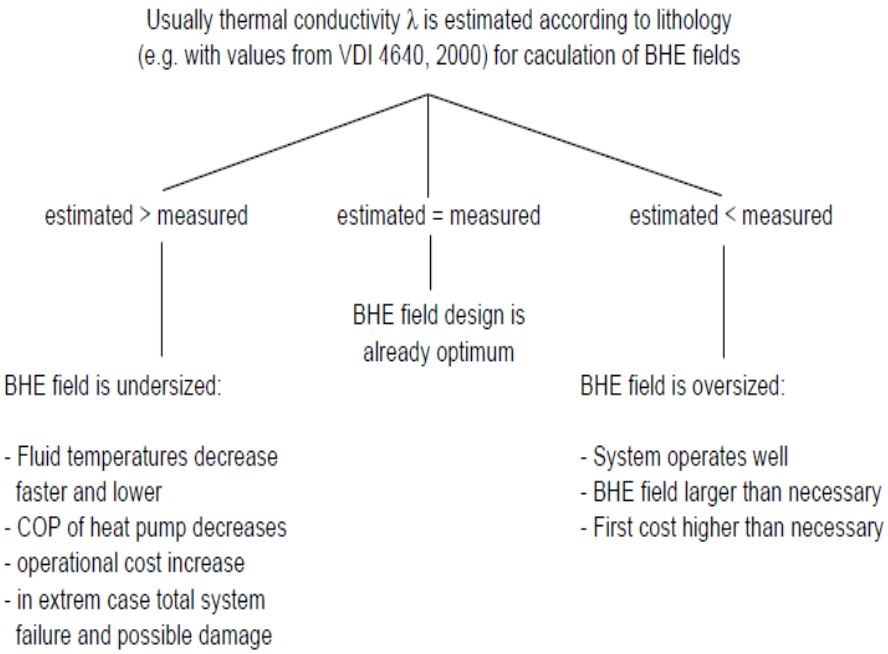
Εικόνα 3.22 Σύγκριση πραγματικών τιμών και εκτιμήσεων για τη θερμική αγωγιμότητα του εδάφους

Αντίθετα με τον όρο υπερ-διαστασιολόγηση, εννοούμε ότι το σύστημα κοστίζει περισσότερο από ότι πρέπει και μειώνεται η συνολική βιωσιμότητα του. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι $\lambda_{est} < \lambda_{measured}$. Αντίστοιχα και η υπερδιαστασιολόγηση έχει τις παρακάτω συνέπειες:

- Το συνολικό μέγεθος του BHE συστήματος είναι μεγαλύτερο από ότι χρειάζεται.
- Το αρχικό κόστος για την εγκατάσταση του συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι υπό κανονικές συνθήκες.

Στις ελάχιστες περιπτώσεις(όπως φαίνεται παραπάνω) όπου $\lambda_{est} = \lambda_{measured}$ η σχεδίαση του συστήματος BHE είναι βέλτιστη.

Όλα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως για υποδιαστασιολόγηση και υπερδιαστασιολόγηση φαίνονται σχηματικά στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.23 Πιθανές συνέπειες από την εύρεση εσφαλμένων τιμών της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους.

Εκτός από τις συνέπειες αυτές έχουν γίνει ειδικές μελέτες που δείχνουν την επίδραση της υποδιαστασιολόγησης και της υπερδιαστασιολόγησης στο λειτουργικό και στο αρχικό κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος γεωθερμίας.

Table 3: Incremental annual electricity cost due to undersizing for GSHP with 50 kW heating capacity, design 12 BHE each 102 m deep for estimated thermal conductivity λ = 2.2 W/m/K

thermal conductivity [W/m/K]	SPF [-]	annual power cons. [MWh/a]	annual electricity cost [€/a]	incremental cost [€/a]
2.2	4.0	26.3	3'945	-
2.0	3.5	30.0	4'500	555
1.8	3.1	33.9	5'085	1'140
1.6	2.8	37.5	5'625	1'680

Table 4: Incremental investment cost due to oversizing for GSHP with 50 kW heating capacity, basic design 12 BHE each 102 m deep for estimated thermal conductivity λ = 2.2 W/m/K

thermal conductivity [W/m/K]	necessary length for 12 BHE [m]	total BHE length [m]	first cost of BHE [€]	incremental cost [€]
2.2	102.2	1'226.4	91'980	-
2.4	96.7	1'160.4	87'030	4'950
2.6	91.5	1'098.0	82'350	9'630
2.8	86.7	1'040.4	78'030	13'950

Από την ανάλυση του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι με μόνο 0.4 W/m·K υπερεκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους, ο συντελεστής εποχιακής απόδοσης του συστήματος (SPF) μειώνεται αισθητά και το ετήσιο λειτουργικό κόστος μπορεί να αυξηθεί κατά περισσότερο από 1.000 ευρώ. Σε περίπτωση υποεκτίμησης της θερμικής αγωγιμότητας λ, και πάλι κατά 0.4 W/m·K ,το αρχικό κόστος για την εγκατάσταση του BHE συστήματος είναι 10.000 παραπάνω από την κανονική τιμή.

Ανακεφαλαιώνοντας όσα έχουν επισημανθεί έως τώρα στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται κατανοητό γιατί η μέθοδος του Thermal Response Test είναι τόσο σημαντική και χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις χώρες για το σχεδιασμό γεωθερμικών εγκαταστάσεων.

Επιμέρους συμπεράσματα και διευκρινίσεις

Είναι αναγκαίο να γίνουν ορισμένες σημαντικές διευκρινίσεις όσον αφορά τη διαδικασία του Thermal Response Test.

- Το ρευστό που κυκλοφορεί στους σωλήνες του εναλλάκτη είναι μίγμα νερού-αιθανόλης ,έτσι ώστε το ρευστό να μην επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από ακραίες καιρικές συνθήκες, κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα.
- Το λ είναι χαρακτηριστικό του εδάφους και δεν εξαρτάται από το βάθος της γεώτρησης.
- Το R_b είναι ανεξάρτητο από το ποσό θερμότητας Q. Αυξάνοντας το Q θα αλλάξουν και τα χαρακτηριστικά της ευθείας γραμμικής παρεμβολής που χρησιμοποιούμε για την εύρεση των δύο παραμέτρων.
- Η γεώτρηση στην οποία πραγματοποιήθηκε το συγκεκριμένο TRT το οποίο και μελετούμε, ήταν γεμισμένη με κάποιο filling material, που στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν μπεντονίτης, για καλύτερη μεταφορά θερμότητας.
- Η γεώτρηση προϋπάρχει πριν γίνει το TRT. Η γεώτρηση είναι τόσο βαθιά όσο μας αφορά η στρωματογραφία του εδάφους και η ζώνη θερμικής επιρροής. Η στρωματογραφία δείχνει τι υλικά υπάρχουν ανά βάθος στο υπέδαφος. Η ζώνη επιρροής δείχνει πόσο πιο μακριά από τη γεώτρηση(κατά ακτίνα και βάθος), αλλάζει η θερμοκρασία, δηλαδή λύνουμε το πρόβλημα αγωγής θερμότητας γύρω από τον εναλλάκτη. Οι όροι αυτοί δε θα απασχολήσουν περαιτέρω στη συγκεκριμένη εργασία.
- Είναι ιδιαιτέρως σημαντικό ο εξοπλισμός TRT που χρησιμοποιείται να έχει ελεγχθεί αρχικά, για να διορθωθούν τυχόν δυσλειτουργίες κυρίως της αντλίας θερμότητας. Στο πείραμα από το οποίο αντλούνται και τα δεδομένα, ο έλεγχος της διάταξης γίνεται για μία ώρα.
- Από τη στιγμή που γίνεται η διάτρηση του εδάφους θα πρέπει να περάσουν τουλάχιστον 24 ώρες για να ξεκινήσουν οι μετρήσεις, έτσι ώστε το έδαφος να επανέλθει σε θερμική ισορροπία.
- Μπορεί να γίνει εκτίμηση για το λ ανάλογα με τα υλικά που υπάρχουν στο υπέδαφος και την περιεκτικότητα νερού. Η εκτίμηση αυτή όμως δε θα είναι τόσο ακριβής όσο η μέθοδος TRT.
- Το συγκεκριμένο πείραμα γίνεται τον μήνα Ιούνιο (καλοκαίρι) και άρα εκλύεται θερμότητα στο υπέδαφος. Αν γινόταν κατά τη διάρκεια του χειμώνα, το ρευστό θα ήταν πιο κρύο από το υπέδαφος και ουσιαστικά θα είχαμε τελικώς άντληση θερμότητας.

- Η μέτρηση της ροής του ρευστού γίνεται με τη χρήση πολύ μικρών αισθητήρων, που τοποθετούνται μέσα στους σωλήνες των εναλλακτών για την απευθείας μέτρηση.
- Τα δεδομένα που προκύπτουν, για να αξιολογηθούν σωστά με τη θεωρία γραμμικής πηγής θερμότητας, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερα, δεδομένα τουλάχιστον 50 ωρών.
- Προτείνεται η διάρκεια του TRT να είναι 4 ημέρες, για να υπάρξει μία αξιόπιστη πρόβλεψη της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους.
- Για να επιτευχθεί σωστό fitting στα πειραματικά δεδομένα και να προκύψουν αποτελέσματα όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα, πρέπει να υπάρχει ένα αξιόπιστο σύστημα ελέγχου της ισχύος θερμότητας. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται PID ελεγκτής, ο οποίος εγγυάται την παροχή ενός σταθερού ποσού θερμότητας.

Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται μια πρώτη εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους με βάση τη λιθογραφία του εδάφους.

Κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες
Ξηρά, μη συνεκτικά εδάφη, λ<1,5
Υδροφόρα ιζήματα, συνήθη πετρώματα, λ = 1,5 – 3,0
Συνεκτικά πετρώματα, μεγάλη υδροφορία λ > 3,0

Ανακεφαλαιώνοντας όλα όσα έχουν αναφερθεί έως αυτό το σημείο, το TRT με το πέρασμα των χρόνων έχει εξελιχθεί σε ένα διεθνώς αναγνωρισμένο εργαλείο για τον προσδιορισμό των θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους και συνεπώς για τη σχεδίαση γεωθερμικών συστημάτων. Η βασική ιδέα της μεθόδου αυτής είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη και τα αποτελέσματα που προκύπτουν πολύ ακριβή. Απαιτούμενες προϋποθέσεις για τη σωστή εκτέλεση του συγκεκριμένου τεστ είναι η μεγάλη ακρίβεια των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των θερμοκρασιών, η σταθερή(ως προς την θερμότητα) λειτουργία της πειραματικής διάταξης και η μεγάλη χρονική διάρκεια του πειράματος για την απόκτηση επαρκών δεδομένων. Η μέθοδος

της γραμμικής πηγής θερμότητας χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις για την αξιολόγηση των δεδομένων, εξαιτίας της απλότητάς και της ακρίβειάς της. Η εκτίμηση των παραμέτρων μπορεί επίσης να γίνει με χρήση αριθμητικών μοντέλων, σε περιπτώσεις επιδράσεων από το εξωτερικό περιβάλλον και μπορεί να προσδώσει περισσότερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά είναι περισσότερη πολύπλοκη και χρειάζεται πολύ περισσότερα δεδομένα για τη σωστή εύρεση των τιμών που χρειαζόμαστε.

Έχουν γραφτεί ορισμένες αναφορές σχετικά με την περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου αυτής :

- Γρηγορότερα τεστ με χαμηλότερο κόστος, όπου η ακρίβεια σε ελέγχους ποιότητας θα είναι μικρότερη από ότι στο κανονικό τεστ.
- Ένα ιδιαιτέρως ενδιαφέρον θέμα το οποίο και εξετάζεται ενδελεχώς, είναι η πραγματοποίηση του Thermal Response Test κατά τη διάρκεια διάτρησης του εδάφους , κάτι που σήμερα δεν είναι δυνατό να γίνει.
- Γίνονται διάφορες μελέτες για τη δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων που θα κάνουν εκτίμηση και θα διερευνούν την επίδραση των υπόγειων υδροφόρων ρευμάτων σε όλο το σύστημα.
- Πραγματοποίηση περιπλοκότερων δοκιμών με χρήση επιπρόσθετων δεδομένων όπως η κάθετη διανομή της θερμικής αγωγιμότητας κατά μήκος της γεώτρησης και η ακρίβεια των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται.

Έως σήμερα έχουν γραφτεί πολλές εργασίες οι οποίες δίνουν χρήσιμες πληροφορίες, τόσο για τη διάρκεια του τεστ έτσι ώστε να προκύπτουν τελικώς επαρκή σε αριθμό δεδομένα όσο και για την εύρεση των παραμέτρων σχεδιασμού με ακρίβεια.

Το TRT χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές χώρες του κόσμου για τη σχεδίαση εμπορικών συστημάτων ΒΗΕ. Η ακριβής γνώση των θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους επιτρέπει τη μείωση των περιθωρίων ασφαλείας τα οποία είναι απαραίτητα κατά τον υπολογισμό των παραμέτρων εισαγωγής και γι αυτό το λόγο η μέθοδος αυτή θεωρείται πολύ καλή οικονομικά για συστήματα που αποτελούνται από 10 ή περισσότερες γεωτρήσεις με εναλλάκτες θερμότητας .

Στην Ελλάδα η μέθοδος αυτή και γενικότερα η γεωθερμία δεν είναι τόσο αναπτυγμένη όσο στις υπόλοιπες χώρες της Ευρώπης. Παρόλα αυτά από το 2004 και έπειτα σε περιοχές όπως η Ρόδος και η Λαμία έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται γεωθερμικές εφαρμογές.

Παράρτημα

Ακολουθεί ο κώδικας MATLAB που υλοποιεί όλα τα παραπάνω βήματα.

Όπως φαίνεται είναι χωρισμένος σε 9 μέρη ανάλογα με τη διαδικασία που προσομοιώνεται και τις παραμέτρους που υπολογίζονται.

Μέρος Α

```
%%%%%%%%%%%%%% Simulation of Thermal Response Test(TRT) %%%%%
%%%%%%%%%%%%%% using the mathematical model %%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%% of line source theory %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%The specific Thermal Response Test has taken place in
Attenkirchen,
%%%%Germany from 28/6/2004 13:41 to 5/7/2004 13:34

clc;
clear all;
close all;

diameter_bhe=150*10^(-3);
radius_bhe=diameter_bhe/2;
thickness=2.3*10^(-3);
diameter=25*10^(-3);
radius=(diameter/2)-thickness;
area=0.0003269;   % in m^2

diameter2=125*10^(-3);
length=60;
depth=30;
gamma=0.5772;       %Euler's constant
```

```
exch_dist=7;
und_temp_length=3*length+2*exch_dist;

lamda_est=2.50;     % in (W/mK)
Cp=2000000;         % in J/m^3K
a=lamda_est/Cp;     %in m^2/sec

%%%The time from 28/6/2004 13:41 to 28/6/2004 14:43 is a test
%%%period for the whole equipment and its function.The heat pump is
in
%%%manual mode.


subData=xlsread('peiramatika_clean.xls',1,'A4:G63');

figure();
plot(subData(:,1),subData(:,4),'LineWidth',2);
hold on;
plot(subData(:,1),subData(:,3),'r','LineWidth', 2);
hold on;
plot(subData(:,1),subData(:,5),'g','LineWidth',2);
hold on;
plot(subData(:,1),subData(:,6),'k','LineWidth',2);
hold off;
legend('Tout','Tin','Tamb','Tdev');
xlabel('Time in sec');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of inlet,outlet,ambient air and
the response test device from 13:41 to 14:43 during the test
period');
pause;

% figure();
% plot(subData(:,1),subData(:,6),'k','LineWidth',2);
% xlabel('Time(seconds)');
% ylabel('Temperature in Celcius');
% title('Measured temperature in the response test device from 13:41
to 14:43');
% pause;

figure();
plot(subData(:,1),subData(:,2),'m','LineWidth',2);
xlabel('Time in sec');
ylabel('Flow rate(ml/s)');
title('Measured flow rate from 13:41 to 14:43 during the test period
of the equipment');
pause;

Tin_1h=mean(subData(:,3))
Tout_1h=mean(subData(:,4))
Tamb_1h=mean(subData(:,5))


%%%Plot of the parameters above,this time in different time axis
scale(minutes)

for i=1:59
    data1(1)=0;
```

```
    data1(i)=(subData(i+1,1)-subData(1,1))/60;
    temp_in(i)=(subData(i,3)+subData(i+1,3))/2;
    temp_out(i)=(subData(i,4)+subData(i+1,4))/2;
    temp_amb(i)=(subData(i,5)+subData(i+1,5))/2;
end


figure();
plot(data1,temp_in,'r','LineWidth',2);
hold on;
plot(data1,temp_out,'LineWidth',2);
hold on;
plot(data1,temp_amb,'g','LineWidth',2);
hold off;
legend('Tin','Tout','Tamb');
xlabel('Time in minutes');
ylabel('temperature in Celcius');
pause;
```

Μέρος Β

```
%%%From 28/6/2004 14:44 to 28/6/2004 15:40 begins the procedure for
%%%calculation of the undisturbed ground temperature.During the
procedure
%%%the electric heater is off. The heat pump is again in manual mode
function.

subData2=xlsread('peiramatika_clean.xls',1,'B64:G120');

figure();
plot(subData2(:,1),subData2(:,4),'LineWidth',2);
hold on;
plot(subData2(:,1),subData2(:,3),'r','LineWidth', 2);
hold off;
legend('Tout','Tin');
xlabel('Time in sec');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of inlet and outlet from 14:44 to
15:40 during the calculation of the undisturbed ground temperature');
pause;

figure();
plot(subData2(:,1),subData2(:,5),'g','LineWidth',2);
hold on;
plot(subData2(:,1),subData2(:,6),'k','LineWidth',2);
hold off;
legend('Tamb','Tdev');
xlabel('Time in sec');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of ambient air and response test
device from 14:44 to 15:40');
pause;

figure();
plot(subData2(:,1),subData2(:,4),'LineWidth',2);
hold on;
plot(subData2(:,1),subData2(:,3),'r','LineWidth', 2);
hold on;
```

```
plot(subData2(:,1),subData2(:,5),'g','LineWidth',2);
hold on;
plot(subData2(:,1),subData2(:,6),'k','LineWidth',2);
hold off;
legend('Tout','Tin','Tamb','Tdev');
xlabel('Time in sec');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of inlet,outlet,ambient air and
the response test device from 14:44 to 15:40 during the calculation
of the undisturbed ground temperature');
pause;

figure()
plot(subData2(:,1),subData2(:,2),'m','LineWidth',2);
xlabel('Time in sec');
ylabel('Flow rate(ml/s)');
title('Measured flow rate from 14:44 to 15:40 during the calculation
of the undisturbed ground temperature');
pause;

Tin2_2h=mean(subData2(:,3))
Tout2_2h=mean(subData2(:,4))
Tamb2_2h=mean(subData2(:,5))
```

Μέρος Γ

```
%%%Plot of temperature curves and flow rate from the beginning of the
test
%%%period of the equipment until the calculation of the undisturbed
ground
%%%temperature, 13:41 to 15:40

subData3=xlsread('peiramatika_clean.xls',1,'A4:G120');

figure();
plot(subData3(:,1),subData3(:,4),'LineWidth',2);
hold on;
plot(subData3(:,1),subData3(:,3),'r','LineWidth', 2);
hold on;
plot(subData3(:,1),subData3(:,5),'g','LineWidth',2);
hold on;
plot(subData3(:,1),subData3(:,6),'k','LineWidth',2);
hold off;
legend('Tout','Tin','Tamb','Tdev');
xlabel('Time in sec');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of inlet,outlet,ambient air and
the response test device from 13:41 to 15:40');
pause;

figure()
plot(subData3(:,1),subData3(:,2),'m','LineWidth',2);
xlabel('Time in sec');
ylabel('Flow rate(ml/s)');
title('Measured flow rate from 13:41 to 15:40 for the first two
hours');
pause;
```

```
for i=1:116
    data3(1)=0;
    data3(i)=(subData3(i+1,1)-subData3(1,1))/60;
    temp_in(i)=(subData3(i,3)+subData3(i+1,3))/2;
    temp_out(i)=(subData3(i,4)+subData3(i+1,4))/2;
    temp_amb(i)=(subData3(i,5)+subData3(i+1,5))/2;
end


figure();
plot(data3,temp_in,'r','LineWidth',2);
hold on;
plot(data3,temp_out,'LineWidth',2);
hold on;
plot(data3,temp_amb,'g','LineWidth',2);
hold off;
legend('Tin','Tout','Tamb');
xlabel('Time in minutes');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of inlet,outlet,ambient air and
the response test device from 13:41 to 15:40');
pause;
```

Μέρος Δ

```
%%Estimation of undisturbed ground temperature%%

length_ugt= 3*(2*depth) + 2* exch_dist;   %Length for the estimation
of undisturbed ground temperature.
                                          %In the case we study,
                                          %length
                                          %depends on the geometry of
                                          %exchanger.

%%The circulation of the fluid begins at 14:43 and
%%ends at 14:59.So we can find the average flow rate and the
%%velocity of the fluid.Finally we find the time(in sec) that the
fluid
%%needs to cover the whole length.

flow_data=xlsread('peiramatika_clean.xls',1,'B63:G79');
t_ugt_start = flow_data(1,1);
flow_rate=mean(flow_data(:,2))
fluid_vel = (flow_rate*10^(-6))/area
t_ugt = length_ugt/fluid_vel;

t_ugt_new = t_ugt_start + t_ugt;

differ=zeros(1,17);
for i=1:17
    differ(i)=abs(t_ugt_new - flow_data(i,1));
    i=i+1;
end

c=1;
nearest=min(differ);
while nearest~=differ(c)
    c=c+1;
```

```
end
t_ugt_start
t_ugt_final=flow_data(12,1)

%%After this procedure we are able to find
%%the undisturbed ground temperature.

Und_ground_temp = mean(flow_data(1:12,4));
```

Μέρος Ε

```
%%From 15:41(28/6/2004) the heater is turned on
%%and the fluid is heating.
%%This is the main period of the Thermal Response Test, in which we
are
%%going to estimate the ground thermal conductivity(λ) and the
thermal
%%resistsnce(Rb).

subData4=xlsread('peiramatika_clean.xls' ,1, 'B121:L10054');

figure();
plot(subData4(:,1),subData4(:,4),'LineWidth',2);
hold on;
plot(subData4(:,1),subData4(:,3),'r','LineWidth', 2);
hold on;
plot(subData4(:,1),subData4(:,5),'g','LineWidth',2);
hold on;
plot(subData4(:,1),subData4(:,6),'k','LineWidth',2);
hold off;
legend('Tout','Tin','Tamb','Tdev');
xlabel('Time in sec');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of inlet,outlet,ambient air and
the response test device from 15:41(28/6/2004) to 13:34(5/7/2004)');
pause;

figure()
plot(subData4(:,1),subData4(:,2),'m');
xlabel('Time in sec');
ylabel('Flow rate(ml/s)');
title('Measured flow rate from 15:41(28/6/2004) to 13:34(5/7/2004)');
pause;

for i=1:993
    data4(i)=(subData4(i,1))/60;

end


figure();
plot(data4,subData4(:,3),'r','LineWidth',2);
hold on;
plot(data4,subData4(:,4),'LineWidth',2);
hold on;
plot(data4,subData4(:,5),'g','LineWidth',2);
hold off;
legend('Tin','Tout','Tamb');
```

```
xlabel('Time in minutes');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of inlet,outlet,ambient air and
the response test device from 15:41 to 13:34');
pause;

figure();
plot(data4,subData4(:,2), 'm', 'LineWidth', 2);
xlabel('Time in minutes');
ylabel('Flow rate');
title('Measured flow rate from 15:41(28/6/2004) to 13:34(5/7/2004)');
pause;

hourData4=xlsread('peiramatika_clean.xls' ,1, 'P121:P10054');

figure();
plot(hourData4,subData4(:,4),'LineWidth',2);
hold on;
plot(hourData4(:,1),subData4(:,3),'r','LineWidth', 2);
hold on;
plot(hourData4(:,1),subData4(:,5),'g','LineWidth',2);
hold on;
plot(hourData4(:,1),subData4(:,6),'k','LineWidth',2);
hold off;
legend('Tout','Tin','Tamb','Tdev');
xlabel('Time in hours');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of inlet,outlet,ambient air and
the response test device from 15:41(28/6/2004) to 13:34(5/7/2004)');
pause;

figure();
plot(hourData4,subData4(:,2), 'm', 'LineWidth', 2);
axis([hourData4(1,1) hourData4(9934,1) 10 120])
xlabel('Time in hours');
ylabel('Flow rate');
title('Measured flow rate from 15:41(28/6/2004) to 13:34(5/7/2004)');
pause;

mean_flow_rate=mean(subData4(:,2))
```

Μέρος ΣΤ

```
%%We will use the line source criterion to see
%%which and how many data will be excluded from the
%%evaluation of the two parameters.
%%The criterion is (at/(r^2)) > 5 <=>
%%tmin>(5*(r^2))/a.
%%We suppose that t=0 is when the
%%heater is turned on for the first time to begin
%%the Thermal Response Test.

tmin_sec = (5 *(radius_bhe^2))/a
tmin_hour = tmin_sec/3600

Tfm=(subData4(:,3)+subData4(:,4))/2;
```

```
figure();
plot(subData4(:,11),Tfm,'LineWidth',2);
xlabel('Time in sec');
ylabel('Fluid average temperature');
title('Curve of fluid average temperature for the estimation of the
parameters');
pause;

ln_secData4=xlsread('peiramatika_clean2.xls' ,1, 'O121:O10054');

figure();
plot(ln_secData4, Tfm, 'LineWidth', 2);
xlabel('ln(t)');
ylabel('Fluid average temperature(Celcius)');
title('Curve of fluid average temperature for the estimation of the
parameters');
pause;

%%We plot the Tfm(t) starting from tmin.
%%The initial data before tmin are discarded.

figure();
plot(ln_secData4(378:9934,1), Tfm(378:9934,1) ,'LineWidth', 2);
xlabel('ln(t)');
ylabel('Fluid average temperature(Celcius)');
title('Curve of fluid average temperature for the estimation of the
parameters without the data before tmin');
pause;
```

Μέρος Z

```
%%We found that Tfm can be written in linear form as
%%Tfm=c1*ln(t)+c2
%%Tfm=1.418ln(t)+ 9.338

c1=1.418;
c2=9.336;

for m=1:9934
    Qtherm(m)=-0.0001 * subData4(m,11)+ 3892;
end

figure();
plot(subData4(:,11),Qtherm,'LineWidth',2);
axis([subData4(1,11) subData4(9934,11) 1000 4500])
xlabel('Time in sec');
ylabel('Heat injected in Watts');
title('Curve of the injected heat power rate during the Thermal
Response Test from 28/6/04(15:41) to 5/7/04(13:34)');
pause;

Qtherm_av=mean(Qtherm);

Q=Qtherm_av/3     %in Watt


lamda=Q/(4*pi*c1*depth)
```

```
Tf_av=mean(Tfm(378:9934,1))
```

Μέρος Η

```
for i=378:9934
   % Rb_all(i)=(H/Q)*(Tfm2(i)-To)-((1/(4*pi*lamda))*E1(i));
    R1(i)=(depth/Q)*(Tfm(i)-Und_ground_temp);

R2(i)=(1/(4*pi*lamda))*(log(4*a*ln_secData4(i,1)/((radius_bhe)^2))-
gamma);
    Rb(i)=R1(i)-R2(i);

end

Rb_av=mean(Rb)
```

Μέρος Θ

```
%%We plot the equation that gives us the mean fluid temperature
%%versus time.


allData=xlsread('peiramatika_clean.xls' ,1, 'A4:G10054');

figure();

plot(allData(:,1),allData(:,4),'LineWidth',2);
hold on;
plot(allData(:,1),allData(:,3),'r','LineWidth', 2);
hold on;
plot(allData(:,1),allData(:,5),'g','LineWidth',2);
hold on;
plot(allData(:,1),allData(:,6),'k','LineWidth',2);
hold off;
axis([0 200000 0 35]);
legend('Tout','Tin','Tamb','Tdev');
xlabel('Time in seconds');
ylabel('Temperature in Celcius');
title('Measured temperature curves of inlet,outlet,ambient air and
the response test device from 13:41(28/6/2004) to 13:34(5/7/2004)');
pause;
```

Βιβλιογραφία

1)Ιωάννης Κ. Ζερβαντωνάκης,"Η μέθοδος του Thermal Response Test για τη διαστασιολόγηση Γεωθερμικών Συστημάτων", ΔΕΛΤΙΟ ΠΣΔΜ-Η,2009

2)Gehlin S. "Thermal Response Test – Method Evaluation", Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 2002.

3)Austin W.A.,"Development of an in situ system for measuring ground thermal properties", Master Thesis, Oklahoma University, USA, 1988.

4)I.Zervantonakis, M. Reuss, "Quality requirements of a Thermal Response Test", ZAE-Bayern, Germany, 2004.

5) B. Sanner, E. Mands, M. K. Sauer, E. Grundmann, "Thermal Response Test, a routine method to determine ground properties for GSHP design", 9th International IEA Heat Pump Conference, 20 – 22 May 2008, Zürich, Switzerland.

6)P.Roth[a], A. Georgiev[a], A.Busso[b], E. Barraza[a], "First is situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America", [a]Department of Mechanical Engineering, UTFSM, Valparaiso, Chile- [b] Department of Physics, FaCENa, UNNE, 3400 Corrientes, Argentina, 18 February 2004.

7)Nina Mattsson, Gilbert Steinman, Lyesse Laloui, "In-Situ Thermal Response Testing-New Developments", Proceedings European Geothermal Congress 2007

8)S. Gehlin ,"Recent Status of In-Situ Thermal Response Tests for BTES Applications in Sweden", Proceedings, Terrastock 2000, Stuttgart, Germany.

9)S. Gehlin, J.Spitler, "Thermal Response Test for BTES Applications", State of the Art 2001, IEA ECES Annex 13.

10)S. Gehlin, B. Nordell, "Determining Undisturbed Ground Temperature for Thermal Response Test", ASHRAE Transactions 2003, Vol. 109, Pt 1.

11)S. Gehlin, G. Hellstrom, "Comparison of Four Models for Thermal Response Test Evaluation", ASHRAE Transactions 2003, Vol. 109, Pt 1.

12)Signhild Gehlin, Goran Hellstrom, "Influence on Thermal Response Test by Groundwater flow in vertical fractures in hard rock", Submitted to Renewable Energy, 2002.

13)Burkhard Sanner, Goran Hellstrom, Jeff Spitler, Signhild Gehlin, “Thermal Response Test – Current status and World-Wide Application”, Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey 24-29 April 2005.

14) Mikael Philippe, Dominique Marchio, Hervé Lesueur and Alexandre Vrain, “An evaluation of ground thermal properties measure accuracy by thermal response test of horizontal ground heat exchangers”, Proceedings World Geothermal Congress 2010,Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

15) A. Georgiev , S. Tabakova and R. Popov, “The Bulgarian Experience in the Thermal Response Tests”, Proceedings World Geothermal Congress 2010,Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

16)S. Gehlin, G. Hellstrom, “Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock”, Renewable Energy 28, 2003.

17)S. Gehlin, “Thermal Response Test – In Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock”, Lulea University, Licentiate Thesis, 1998.

18) Sarah Signorelli , Simone Bassetti , Daniel Pahud , Thomas Kohl, ”Numerical evaluation of thermal response tests”, Geothermics 36, 2007.

19) E. Zanchini and T. Terlizzese, “Finite-Element Evaluation of Thermal Response Tests Performed on U-Tube Borehole Heat Exchangers”, Proceedings of the COMSOL Conference, Hannover, 2008.

20) A. Georgiev, R. Popov, S. Tabakova , “First thermal response test in Bulgaria”, Technical University of Sofia, Branch Plovdiv, 4023 Plovdiv, Bulgaria.

21) Burkhard Sanner, Erich Mands, Marc Sauer & Edgar Grundmann , “Technology, development status, and routine application of Thermal Response Test”, Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007.

22) Andrzej Gonet and Tomasz Śliwa , “Modification of Method of Interpreting Thermal Response Test of Borehole Heat Exchanger “,Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

23) Mostafa H. Sharqawy, S.A. Said , E.M. Mokheimer , M.A. Habib , H.M. Badr , N.A. Al-Shayea , “First in situ determination of the ground thermal conductivity for borehole heat exchanger applications in Saudi Arabia” , Renewable Energy 34, 2009.

24) L. Schiavi , “3D Simulation of the Thermal Response Test in a U-tube Borehole Heat Exchanger” , Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università di Parma, Parma, Italy.

25) Luis Coelho, Rita Cerdeira, João Garcia, “Thermal Response Tests”, Polytechnic Institute of Setúbal, ESTSetúbal, Portugal, 24 June 2010.

26) C. Corradi, L. Schiavi, S. Rainieri and G. Pagliarini , “Numerical Simulation of the Thermal Response Test Within Comsol Multiphysics® Environment “,Proceedings of the COMSOL Conference 2008, Hannover.

27) *T*. Katsura, K. Nagano, H. Umezawa , S. Hori, “ Performance Prediction and Feasibility Study of Heat Pump Systems for an Actual Low Energy House”, Fujiwara Environmental Science Institute Ltd.

28)Δ. Μενδρινός, Κ. Καρύτσας, “ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΟΙΚΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ”, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, Νοέμβριος 2009.

29)T. Blomberg, J. Claesson, P. Eskilson, G. Hellstrom, B. Sanner, “Earth Energy Designer(EED)”,version 2.0 http://www.buildingphysics.com/earth1.htm.

30) http://ekofektiv.com/tjanster-och-produkter/thermal-response-test/

31) http://www.econ3.gr/index.php

32) http://www.wjgl.com/service-thermaltest

33) http://www.geoexchange.gr/faq.php

34) http://www.amkat.gr/geothermia_methods.php

35) http://www.geowarmth.co.uk/thermal-response-test.htm

36) http://www.boudouri.gr/sistim.php