



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θερμότητας**

Διπλωματική Διατριβή

**“Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς
Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη”**

**“Energy Parametric Simulation of
Vertical Ground Heat Exchanger”**

Δημήτριος Β. Κίτσιος

Επιβλέπων: Χ. Τζιβανίδης – Λέκτορας Ε.Μ.Π.

**Επιμέλεια: Μ. Γρ. Βραχόπουλος – Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός
Επιστημονικός Συνεργάτης Ε.Μ.Π.**

Μάρτιος 2009

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, οι Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (Γ.Α.Θ.) έχουν τύχει ευρύτατης αναγνώρισης καθώς αποτελούν αποδοτικά ανανεώσιμα ενεργειακά συστήματα τόσο για τη θέρμανση όσο και για την ψύξη κτηρίων. Ένα σύστημα Γ.Α.Θ. αποτελείται μια συμβατική αντλία θερμότητας που συνδέεται με έναν γεωθερμικό εναλλάκτη. Το κύριο πλεονέκτημα χρησιμοποιώντας το έδαφος ως πηγή ή καταβόθρα θερμικής ενέργειας είναι ότι στον εδαφικό χώρο επικρατεί μια σχετικά σταθερή μέση θερμοκρασία σε σύγκριση με τον αέρα του περιβάλλοντος. Αυτό οδηγεί σε μια συνολική βελτίωση της θερμικής απόδοσης του συστήματος και επομένως μειώνει τις λειτουργικές δαπάνες.

Οι Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (Γ.Α.Θ.) – (Ground Source Heat Pumps: GSHP) έχουν αποδειχθεί ως μια πολύ αποδοτική μέθοδος για τη θέρμανση και ψύξη κατοικιών και εμπορικών κτηρίων έναντι του παραδοσιακού εξοπλισμού HVAC και είναι ευρέως αποδεκτό ότι αποτελούν μια από τις καλύτερες ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες. Ένα τυπικό σύστημα GSHP αποτελείται μια συμβατική αντλία θερμότητας που συνδέεται με έναν γεωθερμικό εναλλάκτη (Ground Heat Exchanger). Ο γεωθερμικός εναλλάκτης αποτελείται από βρόχους που εγκαθίστανται οριζόντια ή κάθετα. Η τάση για τα περισσότερα κτήρια εμφανίζει να ακολουθεί την κάθετη διαμόρφωση (Vertical Heat Exchanger) συνήθως υπό την μορφή αγωγού U-TUBE.

Αντικείμενο της Διπλωματικής Διατριβής είναι η δημιουργία υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη τύπου U-TUBE (Vertical Ground Heat Exchanger, U-Tube type). Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ εδάφους και κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη είναι θεωρητικά ένα τριδιάστατο (r, θ, z) μη μόνιμο πρόβλημα αγωγής και συναγωγής. Με την θεώρηση πως λόγω της κυλινδρικής συμμετρίας του φαινομένου δεν υπάρχουν θερμοκρασιακές κλίσεις κατά την γωνιακή διεύθυνση (θ), το πρόβλημα μπορεί να αναχθεί σε διδιάστατο. Η θεωρητική ανάλυση για την μεταφορά θερμότητας στο έδαφος βασίζεται στη Διδιάστατη Μεταβατική Αγωγή Θερμότητας (Μη-Μόνιμη Αγωγή σε 2 διαστάσεις). Ο υπολογιστικός κώδικας που αναπτύχθηκε φέρει το όνομα *VG-HEX* από το: *Vertical Ground Heat Exchanger* και περιλαμβάνει πλήρες αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς σε ψύξη και θέρμανση κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη (Κ.Γ.Ε) τύπου U (U-TUBE). Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται είναι η Microsoft Visual Basic 6.0 ενώ το περιβάλλον εργασίας είναι γνωστό και απλουστευμένο καθώς η επικοινωνία με τον χρήστη πραγματοποιείται στο προσκήνιο μέσω του λογισμικού Microsoft Excel (έκδοση Office 2003 ή νεότερη).

Ο χρήστης του λογισμικού VG-HEX εισάγει μία σειρά παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με τα θερμικά χαρακτηριστικά του εδάφους, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ψυκτικού μέσου της διεργασίας, αλλά και των υλικών κατασκευής όσο και με την τακτοποίηση των οριακών συνθηκών.

Κύριοι στόχοι αποτελούν η εύρεση της θερμοκρασίας απολαβής του ψυκτικού μέσου (τυπικά νερό) που ανακυκλοφορεί στον Κάθετο Γεωθερμικό Εναλλάκτη (ΚΓΕ) τόσο κατά τη ψύξη όσο και κατά τη θέρμανση αλλά και η εύρεση των Θερμοκρασιών Εδάφους μετά την απορρόφηση (περίπτωση θέρμανσης) ή απόρριψη (περίπτωση ψύξης) θερμότητας στο έδαφος εντός επιλέξιμου χρονικού διαστήματος. Η ανακυκλοφορία του ψυκτικού μέσου στον ΚΓΕ θεωρείται συνεχής. Επομένως θεωρείται συνεχής άντληση θερμότητας από το έδαφος ή συνεχής απόρριψη θερμότητας στο έδαφος στον χρονικό ορίζοντα εξέτασης που επιλέχθηκε από τον χρήστη. Εν συνεχεία μπορεί να υπολογιστεί η αποδιδόμενη ισχύς θέρμανσης ή η απορριπτόμενη ισχύς ψύξεως βάσει των οποίων μπορούν να αναπτυχθούν σενάρια οικονομικής αξιολόγησης από ενεργειακής άποψης.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον επιβλέποντά μου κ. Τζιβανίδη Χρ. – Λέκτορα Ε.Μ.Π. για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να εκπονήσω τη παρούσα Διπλωματική Διατριβή στο αντικείμενο της Αβαθούς Γεωθερμίας μία σχετικά νέα εναλλακτική πηγή ενέργειας στη χώρα μας αλλά με έντονα αυξανόμενη δυναμική. Η επίβλεψη του ήταν υποδειγματική σε όλα τα στάδια της προσπάθειάς μου.

Ακόμη περισσότερο όμως του εκφράζω τις ευχαριστίες μου για τη προτροπή του να απευθυνθώ για την επιμέλεια της παρούσας διατριβής στον κ. Βραχόπουλο Μ. – Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό Επιστημονικό Συνεργάτη Ε.Μ.Π. ο οποίος με τίμησε προσφέροντάς μου μέρος από τη συσσωρευμένη γνώση και πείρα του στη Γεωθερμική Ενέργεια όντας από τους ελάχιστους πρωτοπόρους στη χώρα μας, εδώ και δεκαετίες, στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο. Από τη θέση τον αυτή τον ευχαριστώ και πάλι. Η καθοδήγησή του και η συνεισφορά του αποτέλεσε τη βάση για όλο το πόνημά.

Καθοριστική ήταν, σε όλη τη πορεία των σπουδών μου, η στήριξη της εταιρείας ΕΞΑΚΜ Α.Β.Ε.Τ.Ε η οποία αποτελεί κατά μία έννοια τη δεύτερη οικογένεια μου...μιας και εργάζομαι σε αυτή για περισσότερο από εννέα έτη πλέον... Η κατανόηση των κόπων μου από όλα τα μέλη της, αλλά και παράλληλα η ανοχή που πολλές φορές χρειάστηκε να επιδείξουν για την ικανοποίηση των αιτημάτων μου, είναι ειλικρινά εξαιρετικά δυσεύρετη...

Ακούραστοι συμπαραστάτες οι γονείς και τα αδέρφια μου τους οποίους πολλές φορές ταλαιπώρησα κατά τη διάρκεια της συμβίωσής μας με τις ιδιαιτερότητες που απαιτούσε η επίτευξη των στόχων μου...

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Κραββαρίτη Ελ. υποψήφιο Διδάκτορα του Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τις συστάσεις του και τον χρόνο που μου αφιέρωσε κατά τις συζητήσεις μας σχετικά με τη παρούσα εργασία.

Στον κ. Υφαντή Ηλία Διπλ. Αρχιτέκτων Μηχανικό Α.Π.Θ. οφείλεται ο άψογος σχεδιασμός των σχημάτων μέσω των οποίων διευκολύνεται εξαιρετικά η επεξήγηση του απαραίτητου θεωρητικού υπόβαθρου. Τον ευχαριστώ για τη βοήθειά του την οποία άλλωστε πάντα μου προσέφερε -όποτε και αν χρειάστηκε- στα πολλά χρόνια της φιλίας που μας συνδέει.

Δεν θα ήταν καθόλου υπερβολή να αναγνωρίσω ότι σε όλη τη πορεία των σπουδών μου, ένας μόνο άνθρωπος παρείχε πολλά περισσότερα από τους υπόλοιπους...από το ξεκίνημα της προσπάθειάς μου...με τις εξετάσεις για την εισαγωγή μου στο Ε.Μ. Πολυτεχνείο ως απόφοιτος του Τ.Ε.Ι Δυτ. Μακεδονίας...μέχρι και τούτη την ώρα που γράφεται αυτή η σελίδα...μοιράστηκε τα άγχη και τις αγωνίες μου...ξενύχτησε μαζί μου...στάθηκε ακλόνητα δίπλα μου σε όλες τις δυσκολίες που ανέκυψαν...Προσέφερε πολλά περισσότερα από όσα μπορούν να περιγράψουν μερικές λέξεις όπως υπομονή, συμπάρασταση, ...

Ως ένα μικρό δείγμα αναγνώρισης και ευγνωμοσύνης αφιερώνω το παρόν σύγγραμμα σε αυτήν...

στη Φωτεινή Ε. Καράμπελα

Περιεχόμενα

Α' ΜΕΡΟΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.	Γεωθερμία – Γενικά.....	8
1.1	Βασικά συστήματα παρουσίας των γεωθερμικών πεδίων.....	12
1.2	Παγκόσμια κατάσταση - Ελληνικό δυναμικό.....	20
1.3	Η γη ως πηγή θερμότητας.....	28
2.	Αβαθής (Κανονική) Γεωθερμία.....	32
2.1	Γενικά.....	32
2.2	Σύντομη Περιγραφή Συστημάτων Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας.....	36

Β' ΜΕΡΟΣ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ (Κ.Γ.Ε) & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ "VG-HEX"

1.	Εισαγωγική περιγραφή διπλωματικής διατριβής.....	50
2.	Αναφορά σε υπάρχοντα αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης θερμικής συμπεριφοράς Κ.Γ.Ε.....	55
2.1.	Θεωρητικές Βάσεις.....	55
2.2.	Σημαντικότερα Αναλυτικά και Αριθμητικά Μοντέλα.....	59
3.	Θεωρητική Τεκμηρίωση.....	65
3.1	Γενική Περιγραφή Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών (Μ.Π.Δ).....	65
3.2	Γενική Περιγραφή Χρήσης της Μ.Π.Δ σε Προβλήματα Μεταφοράς Θερμότητας.....	67
3.3	Επίλυση με την Μ.Π.Δ της μόνιμης μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας.....	79
3.4	Οριακές Συνθήκες.....	82
3.5	Επίλυση με την Μ.Π.Δ της μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας.....	85
3.6	Επίλυση με την Μ.Π.Δ της μόνιμης διδιάστατης αγωγής θερμότητας.....	90
3.7	Επίλυση με την Μ.Π.Δ της μεταβατικής διδιάστατης αγωγής θερμότητας.....	93

4.	Ανάπτυξη Δομής Λογισμικού VG-HEX.....	97
4.1	Πίνακας Παραμέτρων.....	97
4.2	Εισαγωγή Δεδομένων.....	98
4.3	Κατάστρωση Δομής Υπολογιστικού Κώδικα.....	100
5.	Κατάστρωση και Ανάλυση του Λογισμικού VG-HEX.....	116
5.1	Στοιχεία από την Γραμμική Άλγεβρα.....	116
5.2	Μητρώα στη Visual Basic.....	117
5.3	Ανάλυση Λογισμικού.....	121
5.3.1	Στοιχεία Υπολογιστικού Κώδικα.....	121
5.3.2	Λίστα Παραμέτρων Εισόδου.....	122
5.3.3	Φύλλα Αποτελεσμάτων.....	123
5.3.4	Ανάλυση Προγράμματος.....	124
6.	Αποτελέσματα Λογισμικού VG-HEX.....	164
6.1	Συνεχής λειτουργία του Κ.Γ.Ε για θέρμανση σε χρονικό διάστημα δύο (2) ημερών.....	164
6.2	Συνεχής λειτουργία του Κ.Γ.Ε για θέρμανση σε χρονικό διάστημα πέντε (5) ημερών (στις ίδιες συνθήκες με αυτές της παραγράφου 6.1).....	202
6.3	Συνεχής λειτουργία του Κ.Γ.Ε για ψύξη σε χρονικό διάστημα επτά (7) ημερών.....	244
6.4	Συνεχής λειτουργία του Κ.Γ.Ε για ψύξη σε χρονικό διάστημα τριάντα (30) ημερών (στις ίδιες συνθήκες με αυτές της παραγράφου 6.3).....	247
6.5	Χρονική Μεταβολή Θερμοκρασίας Νερού.....	250
6.6	Θερμική ισχύς συναρτήσεως του χρόνου λειτουργίας για μεταβαλλόμενες τιμές παροχής ανακυκλοφορίας στον Κ.Γ.Ε.....	260
6.7	Θερμική ισχύς συναρτήσεως του χρόνου για μεταβαλλόμενες τιμές θερμοκρασίας νερού εισόδου στον Κ.Γ.Ε.....	263
6.8	Θερμική ισχύς συναρτήσεως του χρόνου για διαφορετικά είδη εδάφους.....	268
6.9	Χρονική Μεταβολή Θερμοκρασίας Εδάφους.....	278
7.	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	296

Γ' ΜΕΡΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1.	Γενικά αποτελέσματα χρήσης της Κανονικής Γεωθερμίας από τη διεθνή εμπειρία.....	303
-----------	--	------------

2.	Συνοπτική αναφορά για τις Ελληνικές προοπτικές – Προγράμματα & Δράσεις.....	304
3.	Οικονομικά στοιχεία.....	309
3.1	Γενικές παράμετροι που επιδρούν στο κόστος των γεωθερμικών συστημάτων.....	309
3.2	Κοστολογικά στοιχεία συστημάτων Κανονικής Γεωθερμίας.....	311
4.	Νομοθεσία.....	314
	Βιβλιογραφία.....	315

Α' ΜΕΡΟΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1. Γεωθερμία - Γενικά**
- 2. Κανονική Γεωθερμία**

1. Γεωθερμία - Γενικά

Με τον όρο γεωθερμική ενέργεια νοείται η ενέργεια του εσωτερικού της γης, η οποία διαχέεται προς την επιφάνεια μέσω των πετρωμάτων (με αγωγή και συναγωγή) και η οποία σε αρκετές περιπτώσεις είναι «συγκεντρωμένη» σε κάποιο προσιτό από την επιφάνεια βάθος.

Παλιότερα, η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας είχε ως στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σήμερα γίνονται προσπάθειες για την χρησιμοποίηση αυτής στον κλιματισμό χωρών.

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα με γεωθερμική ενέργεια περιλαμβάνει τις πηγές της ενέργειας, το σύστημα εκμετάλλευσης, και τον τρόπο απολαβής της θερμότητας. Η τοποθεσία και τα χαρακτηριστικά της πηγής είναι σημαντικοί παράγοντες, πρώτον γιατί η γεωθερμική ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη σε όλες τις περιοχές και το κόστος μεταφοράς της δεν είναι οικονομικό όταν η απόσταση είναι μεγαλύτερη από μερικά km, και δεύτερον τα χαρακτηριστικά της πηγής μπορεί να μην πληρούν τις προδιαγραφές για την αποδοτική λειτουργία της εγκατάστασης.

Ακόμα, ο σχεδιασμός ενός συστήματος με γεωθερμική ενέργεια είναι διαφορετικός από αυτόν των συμβατικών συστημάτων. Στα συστήματα αυτά πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαθέσιμη θερμοκρασία και η παροχή του ρευστού από την πηγή, η πτώση πίεσης του ρευστού και η χημική του σύνθεση. Τα συστήματα μεταφοράς και διανομής όπως και τα βοηθητικά συστήματα σχεδιάζονται με συμβατικό τρόπο για την καλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμική ενέργεια μέσα στο φλοιό της γης, που βρίσκεται στα πετρώματα και τα ρευστά που περιέχονται στους πόρους και στα κοιλώματα των πετρωμάτων. Πιστεύεται ότι η πηγή γέννησης της γεωθερμικής ενέργειας είναι η ραδιενεργή αποσύνθεση μέσα στη γη.

Μέσω της κίνησης των πλακών και της δραστηριότητας των ηφαιστειών, ένα μέρος αυτής της ενέργειας συγκεντρώνεται με μεγάλη θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια της γης, η ενέργεια μεταφέρεται από τα βαθύτερα στρώματα της γης κοντά στην επιφάνεια λόγω επαφής και μεταφοράς των ρευστών.

Λόγω της ποικίλης δραστηριότητας των ηφαιστειών, της αποσύνθεσης κτλ διαφορετικές περιοχές έχουν και διαφορετική ροή θερμότητας, και διαφορετικές θερμοκρασίες σε ένα σταθερό βάθος. Η κανονική αύξηση της θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος είναι περίπου $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Η θερμική ενέργεια συνήθως λαμβάνεται με τη μεταφορά ζεστού νερού ή ατμού στην επιφάνεια. Αν η διαπερατότητα των πετρωμάτων είναι μικρή τότε και η εξαγωγή της θερμικής ενέργειας είναι μικρή.

Η θερμοκρασία του ρευστού μέσα στο φλοιό της γης ποικίλει από τους $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ και φτάνει τους $360\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η χαμηλή τιμή αντιπροσωπεύει τα ρευστά που χρησιμοποιούνται ως πηγές ενέργειας αντλιών θερμότητας, ενώ η υψηλή τιμή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ακόλουθος διαχωρισμός των πηγών γεωθερμικής ενέργειας με βάση το θερμοκρασιακό επίπεδο χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία γεωθερμικής ενέργειας :

Υψηλής θερμοκρασίας	$T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Μέσης θερμοκρασίας	$90\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Χαμηλής θερμοκρασίας	$15\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

Σε θερμοκρασίες 90 °C και πάνω, εφαρμογές όπως άμεση θέρμανση μπορούν να λειτουργήσουν με τη χρήση εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σε παρόμοια συμβατικά συστήματα, ενώ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες χρειάζεται διαφορετικός σχεδιασμός ώστε η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας να είναι κατά το δυνατόν μεγαλύτερη.

Η διάφορα θερμοκρασίας ανάμεσα στον πυρήνα (όπου υπερβαίνει τους 3000°C) και την επιφάνεια της γης, έχει ως αποτέλεσμα συνεχή θερμική ροή, με μέση τιμή 60 mW/m² (1,5 cal/cm²s). Σε πολλές περιοχές παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις από την τιμή αυτή.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας μας η θερμική ροή είναι υψηλότερη από τη μέση γήινη. Πιο απλή είναι η κατάσταση στους ωκεανούς, όπου εξαιρετικά υψηλή τιμή της θερμικής ροής (έως 300mW/m²) συνοδεύει την εμφάνιση νέου φλοιού στις μεσοκεάνιες ράχες. Η τιμή αυτή μειώνεται εκθετικά με την απόσταση από τη ράχη και φθάνει τα 40~45 mW/m² σε απόσταση 8000km περίπου από αυτή. Πιο σύνθετη παρουσιάζεται η κατάσταση στις ηπείρους.

Μια χονδρική διάκριση γίνεται με βάση την ηλικία του φλοιού, όσο νεότερη είναι η γεωλογική ηλικία του φλοιού, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμική ροή. Ιδιαίτερα υψηλές τιμές της θερμικής ροής, που ενδιαφέρουν άμεσα για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, εμφανίζονται σε:

- ✓ Περιοχές βύθισης λιθοσφαιρικών πλακών (subduction zones), όπου σχηματίζονται νησιωτικά τόξα ή πτυχωσιγενείς οροσειρές στα ηπειρωτικά περιθώρια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου.
- ✓ Περιοχές ηπειρωτικών βυθισμάτων (rift valleys), όπως είναι το βύθισμα της Παννονικής πεδιάδας στην Ουγγαρία.
- ✓ Ηπειρωτικές περιοχές διογκώσεων (swellings), όπου θερμά ανοδικά ρεύματα του μανδύα συναντούν τον ηπειρωτικό φλοιό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περιοχή της δυτικής Τοσκάνης, όπου βρίσκονται τα γεωθερμικά πεδία του Larderello και του Monte Amiata.

Η συνεχής θερμική ροή από τον πυρήνα προς την επιφάνεια της γης συνεπάγεται συνεχή απώλεια θερμότητας, η οποία φθάνει τα 10,9*10²⁰ kJ το χρόνο. Θερμικές απώλειες, που είναι εξαιρετικά σημαντικές σε ορισμένες περιοχές, προκαλεί και η ηφαιστειακή δράση. Συνολικά, η αντίστοιχη ροή θερμότητας δεν ξεπερνά τα 9,21*10¹⁸ kJ το χρόνο, είναι δηλαδή το 1/100 της γήινης θερμικής ροής. Αυτές οι απώλειες θερμότητας καλύπτονται από τις πηγές θερμότητας που υπάρχουν στο εσωτερικό της γης. Αν γίνει δεκτό ότι η γη σχηματίστηκε από ένα αρχικά ψυχρό σώμα, που θερμάνθηκε με την πάροδο του χρόνου, τότε οι πηγές θερμότητας πρέπει να έχουν, ή τουλάχιστον να είχαν στο παρελθόν, ακόμη μεγαλύτερη θερμική ισχύ.

Η μόνη σημαντική πηγή θερμότητας, της οποίας η συμβολή δεν αμφισβητείται, είναι η ραδιενέργεια. Κατά την μεταστοιχείωση ραδιενεργών πυρήνων εκλύεται ενέργεια με την μορφή σωματιδίων α και β, και ακτινοβολίας γ. Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα. Σημαντική συνεισφορά στην παραγωγή θερμότητας στο εσωτερικό της γης έχουν τα ισότοπα 235U, 232Th, και 40K, τα οποία έχουν χρόνο υποδιπλασιασμού συγκρίσιμο με την ηλικία της γης, βρίσκονται σε αφθονία και έχουν σημαντικό ρυθμό παραγωγής ενέργειας από τη μονάδα μάζας τους.

Όπως γίνεται φανερό από τα προηγούμενα, η γη είναι μια τεράστια μηχανή παραγωγής θερμότητας. Η γεωθερμική ισχύς φθάνει τα 33 TW και αν ήταν εκμεταλλεύσιμη στο σύνολο της, θα υπερκάλυπτε την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας. Δυστυχώς όμως, μόνο ένα μικρό μέρος της γεωθερμικής ενέργειας είναι εκμεταλλεύσιμο, γιατί από την φύση της είναι πολύ διασκορπισμένη στην επιφάνεια της γης.

Η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας συνίσταται στη χρήση του αυξημένου θερμικού περιεχομένου υλικών, που προέρχονται από κάποιο βάθος, δηλαδή της θερμότητας, η οποία είναι αποθηκευμένη στα βαθύτερα στρώματα. Το εκμεταλλεύσιμο βάθος περιορίζεται από τις υπάρχουσες τεχνικές δυνατότητες και οικονομικές συνθήκες. Με τα σημερινά δεδομένα δεν ξεπερνά τα 3km, μολονότι έχουν κατασκευαστεί και βαθύτερες γεωτρήσεις.

Σήμερα η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει σε δυνατότητα ανάπτυξης γεωτρήσεων μεγαλύτερη των 5 και 6km, αυτές θα χρησιμοποιηθούν κατ' αρχάς για ερευνητικούς σκοπούς.

Από το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του εβδομήντα, παρατηρήθηκε στις αναπτυσσόμενες αλλά και σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες τεράστια αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Η αύξηση αυτή ήταν (σε ένα βαθμό) απαραίτητη για τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, σε μεγάλο ποσοστό όμως δεν ήταν αναγκαία. Η αφθονία και η χαμηλή τιμή των ορυκτών καυσίμων και ειδικότερα του πετρελαίου στη διεθνή αγορά επέτρεπαν και επέτειναν την τάση για αλόγιστη κατανάλωση. Η βιομηχανική ανάπτυξη σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε, από ένα σημείο και πέρα, βάση των χαρακτηριστικών μεγεθών των πετρελαιοειδών και οδήγησαν σε σχετική εξάρτηση από αυτά, παρ' όλες τις κατά καιρούς προσπάθειες για χρήση άλλων καυσίμων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα από την καθημερινή ζωή είναι το μεγάλο, ιδιωτικής χρήσης, αμερικάνικο αυτοκίνητο της δεκαετίας του '60, που το βάρος του έφθανε τους 2 τόνους, καθώς και η έλλειψη προδιαγραφών για θερμομόνωση κτιρίων, ακόμη και στις αναπτυσσόμενες χώρες. Χαρακτηριστική επίσης είναι η χρησιμοποίηση ενεργοβόρων μεθόδων στη βιομηχανία. Την εποχή εκείνη η έρευνα για άλλες ενεργειακές πηγές, εκτός από τη πυρηνική, θεωρήθηκε περιττή και η χρηματοδότησή της ήταν περιορισμένη. Η αξιοποίηση των εναλλακτικών αυτών πηγών περιοριζόταν σε πολύ ειδικές περιπτώσεις. Ανάμεσα σ' αυτές είναι η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής και μέσης ενθαλπίας στη Ν. Ζηλανδία και στην Ισλανδία, όπου οι συνθήκες είναι εξαιρετικά ευνοϊκές.

Σημείο καμπής αποτέλεσε η πετρελαϊκή κρίση του 1973. Τα αίτιά της ήταν οικονομικά και πολιτικά γι' αυτό δόθηκαν πολλές και αλληλοσυγκρουόμενες ερμηνείες. Γεγονός είναι ότι η κοινή γνώμη των προηγμένων χωρών συνταράχθηκε και πολλές κυβερνήσεις άλλαξαν ενεργειακή πολιτική. Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας περιορίστηκε για ένα χρονικό διάστημα. Παράλληλα άρχισε εντατική αναζήτηση άλλων ενεργειακών πηγών, που θα μπορούσαν να είναι οικονομικά συμφέρουσες για τις μη πετρελαιοπαραγωγές χώρες.

Η γεωθερμική ενέργεια εξάγεται από τη γη μέσω κάποιου ρευστού. Το μέσο αυτό είναι τα ρευστά που βρίσκονται μέσα στους πόρους και τα κοιλώματα των πετρωμάτων. Τα ρευστά τα οποία παράγονται είναι είτε ατμός, ζεστό νερό, είτε μίγμα αυτών των δυο. Το ρευστό μπορεί να περιέχει ακαθαρσίες, όπως αδιάλυτα στέρεα και αέρια. Τα γεωθερμικά συστήματα τα οποία παράγουν κυρίως ξηρό ατμό, αν και είναι πολύτιμα είναι σπάνια. Τα συστήματα με ζεστό νερό είναι περισσότερο συχνά και μπορούν να λειτουργούν είτε με πηγή ζεστού νερού είτε με μίγμα δύο φάσεων από ατμό και ζεστό νερό, το οποίο εξαρτάται από την πίεση που επικρατεί στο σύστημα παραγωγής. Αν η πίεση διατηρείται πάνω από την πίεση κορεσμού τότε το ρευστό παραμένει σε μια φάση, ειδικά σε χαμηλότερες πιέσεις έχουμε μίγμα δύο φάσεων. Στα συστήματα που χρησιμοποιούν ζεστό νερό η ποσότητα των αδιάλυτων στερεών και αερίων που περιέχει το νερό είναι πολύ σημαντική. Έτσι υπάρχουν ρευστά με mgg αδιάλυτων ουσιών ανά kg και αλλά με gr/kg αδιάλυτων στερεών και αερίων.

Η Ελλάδα, βρισκόμενη ενδεχομένως ακόμη στον απόηχο της ενεργειακής κρίσης του 1973, διατηρεί ακόμα βεβαρημένο το ενεργειακό της ισοζύγιο που εξαρτάται κατά μεγάλο μέρος από εισαγόμενα καύσιμα. Παρ' όλα αυτά, θέλοντας να αποφύγει την "εύκολη" λύση της προσφυγής στα πυρηνικά καύσιμα, ή τουλάχιστον μεταθέτοντας τη σε απώτερο χρονικό ορίζοντα, στρέφεται στο πεδίο των "ανανεώσιμων" μορφών ενέργειας.

Το πεδίο αυτό περιλαμβάνει τόσο παλιές και δοκιμασμένες τεχνολογίες όσο και νέες τεχνολογίες αιχμής με άφθονα περιθώρια έρευνας και ανάπτυξης. Σημαντικό μέρος αυτών των τεχνολογιών αποτελεί και η γεωθερμική ενέργεια.

Τα γεωθερμικά ρευστά εκτός από τις θεραπευτικές τους ιδιότητες, μπορούν να αξιοποιηθούν και για ενεργειακούς σκοπούς. Ως γεωθερμική ενέργεια, όπως ήδη αναφέρθηκε, ορίζεται η θερμότητα που ρέει από τα θερμότερα στρώματα της γης προς την επιφάνειά της. Αυτό έχει σαν συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας από την επιφάνεια της γης προς το εσωτερικό της.

Για τον χαρακτηρισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας με το βάθος υφίσταται η έννοια της γεωθερμικής βαθμίδας. Ως μέση (ή κανονική) γεωθερμική βαθμίδα καλείται το μέσο βάθος που απαιτείται για την αύξηση της γήινης θερμοκρασίας κατά 1K και είναι περίπου ίσο με 33m. Περιοχές όπου η γεωθερμική βαθμίδα είναι πολλαπλάσια, αποτελούν περιοχές γεωθερμικών πεδίων και είναι ιδιαίτερα συμφέρουσες για την εκμετάλλευση της ενέργειας των θερμών ρευστών που αντλούνται από αυτές.

1.1 Βασικά συστήματα παρουσίας των γεωθερμικών πεδίων

Τα υδροθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη φυσικών αποθεμάτων ρευστών, που διευκολύνουν την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας. Κύριο γεωθερμικό ρευστό είναι το νερό, σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται και ο όρος «γεωθερμικό νερό». Το γεωθερμικό ρευστό έχει και άλλα στερεά ή αέρια συστατικά, τα οποία είναι επιβλαβή και δυσχεραίνουν τη θερμική εκμετάλλευση, αν και μερικές φορές δίνουν χρήσιμα παραπροϊόντα.

Σε συστήματα που συνδέονται με μεσωκεάνιες ράχες, το γεωθερμικό νερό προέρχεται κυρίως από θαλάσσιο νερό. Στα υπόλοιπα υδροθερμικά συστήματα, τα οποία ενδιαφέρουν περισσότερο την εκμετάλλευση, το γεωθερμικό νερό έχει κυρίως μετεωρική προέλευση. Το κρύο μετεωρικό νερό κατεισδύει μέσα από ρηγματώσεις, μέχρι τον γεωθερμικό υδροφορέα όπου θερμαίνεται με αγωγή. Πηγή θερμότητας είναι κάποιος μαγματικός όγκος, που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος ή η θερμική ροή γης. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει σε γεωθερμικά συστήματα με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (μέχρι 1500°C) και υδροφορείς μεγάλου σχετικά βάθους.

Το νερό του γεωθερμικού υδροφορέα κατεισδύει σε μεγαλύτερο βάθος μέσα από σχισμές και ρήγματα, και πλησιάζει τον μαγματικό όγκο, ο οποίος αποτελεί την πηγή της θερμότητας. Κατά την κίνηση του αυτή το νερό θερμαίνεται και ανεβαίνει πάλι στο γεωθερμικό υδροφορέα μέσα από άλλα ρήγματα, λόγω άνωσης. Στην περίπτωση αυτή η φυσική συναγωγή παίζει τον κύριο λόγο στη θέρμανση του νερού. Το σχετικά κρύο νερό που κατεισδύει μέσα από κάποιο ρήγμα, αφαιρεί θερμότητα από το πέτρωμα και προκαλεί συστολή, που έχει ως αποτέλεσμα την επέκταση του ρήγματος. Το φαινόμενο αυτό αντισταθμίζει τη μείωση της θερμοκρασίας των ανώτερων στρωμάτων του μαγματικού όγκου. Όπως είναι φυσικό, στα με συναγωγή θερμαινόμενα υδροθερμικά συστήματα αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε μικρότερα βάθη, σε σχέση με τα συστήματα της προηγούμενης κατηγορίας.

Το μετεωρικό νερό κατεισδύει σε μεγάλο βάθος, θερμαίνεται με συναγωγή από το μαγματικό όγκο και βράζει. Ο υδρατμός που δημιουργείται, τροφοδοτεί τον υδροφορέα του γεωθερμικού πεδίου, που βρίσκεται σε μικρότερο βάθος. Οι απώλειες λόγω αγωγής από τα τοιχώματα του υδροφορέα αυτού, ισοσταθμίζονται από τη συμπύκνωση μέρους του ατμού. Το συμπύκνωμα επιστρέφει στο βαθύτερο στρώμα ακολουθώντας τους μικρότερους πόρους, αντίθετα με τον ατμό, που κατά την άνοδο του ακολουθεί τις ευρύτερες διόδους.

Σε όλες τις περιπτώσεις, το γεωθερμικό ρευστό τείνει να κινηθεί προς την επιφάνεια του εδάφους μέσα από φυσικές διόδους του καλύμματος του υδροφορέα, λόγω υδραυλικού φορτίου και άνωσης. Αν φθάσει στην επιφάνεια, σχηματίζει θερμές πηγές ή ατμίδες, που αποτελούν χαρακτηριστικά καθοδηγητικά σημάδια για τον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων.

Κατηγορίες υδροθερμικών συστημάτων

Τα υδροθερμικά συστήματα διακρίνονται σε δυο τύπους, ανάλογα με τη φάση του νερού που επικρατεί και καθορίζει την κατάσταση της πίεσης στο θερμό υδροφορέα.

α) Συστήματα στα οποία κυριαρχεί η υγρή φάση

Στο τύπο αυτό ανήκουν τα περισσότερα από τα γνωστά υδροθερμικά συστήματα. Οι γεωθερμικοί υδροφορείς των συστημάτων αυτών περιέχουν νερό σε υγρή κατάσταση. Είναι δυνατό να περιέχουν και λίγο ατμό, με μορφή φυσαλίδων οι οποίες δεν καταργούν τη συνέχεια της υγρής φάσης. Οι φυσαλίδες αυτές εντοπίζονται στα πιο αβαθή τμήματα, όπου η πίεση είναι χαμηλότερη, δεδομένου ότι η κατανομή της είναι υδροστατική.

Ο εξεταζόμενος τύπος υδροθερμικών συστημάτων περιλαμβάνει συστήματα χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας. Το νερό παραμένει σε υγρή κατάσταση και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100°C, λόγω της μεγάλης πίεσης. Όταν το νερό αυτό ανεβαίνει, μέσα από φυσικές διόδους ή σωλήνες γεωτρήσεων, συναντά μικρότερες πιέσεις και σε κάποιο βάθος αρχίζει να βράζει. Επομένως, το ποσοστό ατμού που παρέχουν γεωτρήσεις ή θερμές πηγές με θερμοκρασία μεγαλύτερη από 100°C, δεν είναι ενδεικτικό της κατάστασης που επικρατεί στο θερμό υδροφορέα.

β) Συστήματα στα οποία κυριαρχεί η αέρια φάση

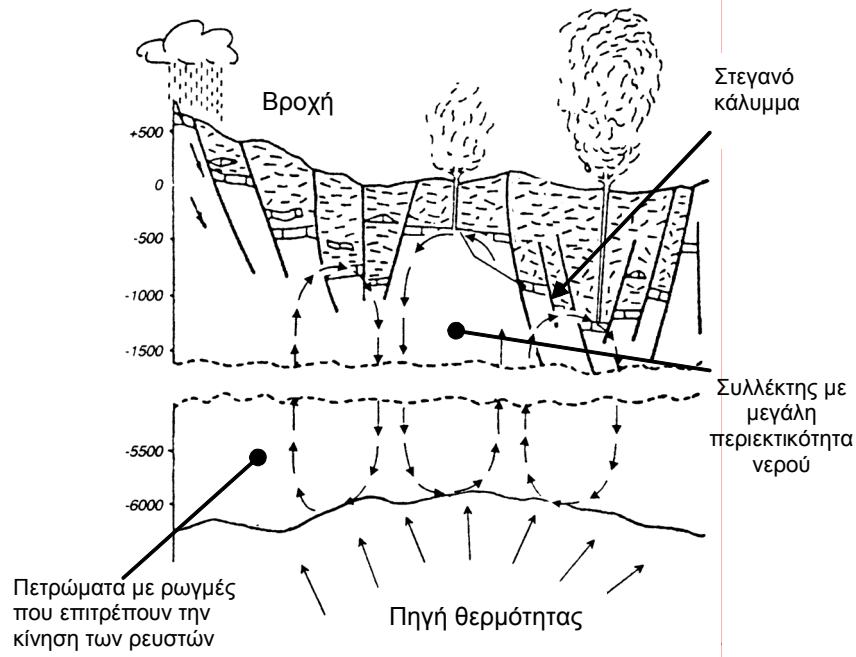
Στο τύπο αυτό ανήκουν υδροθερμικά συστήματα υψηλής ενθαλπίας, τα οποία παράγουν ξηρό ατμό. Για το λόγο αυτό προσφέρονται ιδιαίτερα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στους υδροφορείς των συστημάτων αυτών εκτός από τον ατμό, υπάρχει και νερό σε υγρή κατάσταση, ιδιαίτερα στους μικρούς πόρους και στις επιφάνειες των ρηγμάτων, όπου συγκρατείται λόγω επιφανειακής τάσης. Η παρουσία της υγρής φάσης δεν καταργεί τη συνέχεια της αέριας φάσης, η οποία κυριαρχεί και καθορίζει την πίεση. Είναι χαρακτηριστικό ότι η πίεση στα συστήματα αυτά είναι πολύ μικρότερη από την υδροστατική και σχεδόν ομοιόμορφα κατανομημένη. Επομένως, η κατανομή της πίεσης, που είναι μετρήσιμο μέγεθος, διαφέρει σημαντικά στους δυο τύπους των υδροθερμικών συστημάτων.

Βασικό είναι το πρόβλημα μεταφοράς της θερμότητας στην επιφάνεια του εδάφους. Οι συνθήκες είναι ευνοϊκές στα υδροθερμικά συστήματα, όπου υπάρχουν φυσικά αποθέματα ρευστών (νερού, υδρατμού) των οποίων η άντληση είναι σχετικά εύκολη. Όλες οι γεωθερμικές πηγές που σήμερα βρίσκονται υπό εκμετάλλευση, ανήκουν στην κατηγορία αυτή. Από ενεργειακή άποψη, οι πηγές αυτές περιέχουν μικρό μέρος της θερμικής ενέργειας, που είναι αποθηκευμένη στα προσιτά στον άνθρωπο βάθη. Η θερμότητα των άνω πετρωμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη, η εκμετάλλευση της όμως, προϋποθέτει τεχνητή κατάτμηση και διοχέτευση νερού και βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο.

Γεωθερμικά πεδία είναι περιοχές στις οποίες οι συνθήκες για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας είναι ευνοϊκές. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι τα ακόλουθα:

- i. Αυξημένη (σε μικρό ή μεγάλο βαθμό) θερμική ροή. Αυτή συνδέεται με την ύπαρξη μαγματικού όγκου σε μικρό σχετικά βάθος.
- ii. Ύπαρξη υπόγειου υδροφορέα, σε βάθος μικρότερο των 3km, ο οποίος θερμαίνεται από τον μαγματικό όγκο. Μεταξύ του υδροφορέα και της πηγής θερμότητας πρέπει να υπάρχουν θερμοπερατά στρώματα ή ρήγματα, που διευκολύνουν την κυκλοφορία ρευστών (Σχήμα 1.1-1).
- iii. Ύπαρξη πρακτικά αδιαπέραστου (θερμικά και υδραυλικά) στρώματος πάνω από τον υδροφορέα, για την προστασία του θερμικού περιεχομένου του.

Ειδικότερα, πρέπει να υπάρχει προσιτός και οικονομικά εκμεταλλεύσιμος διαπερατός σχηματισμός πετρωμάτων, ονομαζόμενος γεωθερμικός ταμιευτήρας, όπου συγκεντρώνονται και κυκλοφορούν ρευστά υψηλής θερμοκρασίας. Μέρος της περικλειόμενης θερμικής ενέργειας αντλείται μέσω του αντλούμενου (ή αναβλύζοντος) από ειδικές γεωτρήσεις γεωθερμικού ρευστού. Το ρευστό αυτό μπορεί να είναι ζεστό νερό χαμηλής, μέσης ή υψηλής ενθαλπίας.



Σχήμα 1.1-1 Μορφολογία υδροφορέα.

Οι διάφορες κατηγορίες γεωθερμικών πεδίων σε συνάρτηση με το ενεργειακό περιεχόμενο και τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού (ζεστό νερό, ατμός ή μίγμα νερού-ατμού) καθώς και με τις αντίστοιχες γενικές χρήσεις παρουσιάζονται στο Πίνακα 1.1-1. Στο πίνακα αυτό συμπεριλαμβάνεται και η περίπτωση της κανονικής (ομαλής) γεωθερμίας, όπου δεν υπάρχει η λεγόμενη γεωθερμική ανωμαλία, δηλαδή αύξηση της θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους πέρα από την κανονική γεωθερμική βαθμίδα που είναι 1 K ανά 33 m περίπου.

Η ύπαρξη της ομαλής (κανονικής) γεωθερμίας στον πίνακα οφείλεται, όπως αναφέρεται παρακάτω, στο ότι η σημερινή τεχνολογία κατέστησε οικονομικά εκμεταλλεύσιμα και πεδία με κανονική ή ακόμη και αρνητική γεωθερμική βαθμίδα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση περιοχών του Παρισιού στη Γαλλία, όπου έχουν αποδειχθεί οικονομικά συμφέρουσες και λειτουργούν τα τελευταία 25 χρόνια εγκαταστάσεις θέρμανσης ολόκληρων πολεοδομικών συγκροτημάτων (συνολικού πληθυσμού πάνω από 500.000 άτομα) με ρευστά θερμοκρασίας 70°C, που αντλούνται με μέση παροχή 150 m³/h από κεκλιμένες γεωτρήσεις με βάθη της τάξης των 2000 m. Επίσης, αξιοποίηση της αρνητικής γεωθερμίας επιτυγχάνεται σε περιοχές permafrost, όπου οι παγωμένες υπεδάφικες μάζες χρησιμοποιούνται για συντήρηση τροφίμων.

Στον ίδιο πίνακα αναφέρεται και η περίπτωση γεωτρήσεων πεδίων θερμών ξηρών πετρωμάτων, που μπορεί να θεωρηθεί σαν μια βάσιμη και σημαντική πηγή ενέργειας για το μέλλον. Πρόκειται για την περίπτωση όπου, ενώ διατίθενται τεραστία αποθέματα θερμικής ενέργειας στο πέτρωμα, δεν υπάρχει κυκλοφορία του απαιτούμενου ρευστού (ατμός ή νερό) για τη μεταφορά της στην επιφάνεια. Η σχετική τεχνολογία βρίσκεται σε εξέλιξη, αλλά η τεχνικοοικονομική επιτυχία ενός τέτοιου σχεδίου συστήματος εκμετάλλευσης αναμένεται στα επόμενα χρόνια.

Πίνακας 1.1-1 Κατηγορίες και χρήσεις γεωθερμικών πηγών.

Κατηγορία πεδίου	Θερμοκρασία ρευστού	Βαθμός ενεργειακής απόδοσης	Χρήσεις
Κανονική γεωθερμία	<25°C	<2%	Ψύξη και θέρμανση κτιρίων
Χαμηλής ενθαλπίας	25°C~100°C	2~8%	Θερμό νερό οικιακής χρήσης κ.λ.π.
Μέσης ενθαλπίας	100°C~150°C	2~8%	Ηλεκτροπαραγωγή με πτητικό ρευστό
Υψηλής ενθαλπίας Ξηρού ατμού H>1,5MJ/kg Υγρής φάσης H>2,5MJ/kg	>150°C	8~18%	Ηλεκτροπαραγωγή Απλή εκτόνωση ρευστού Διπλή εκτόνωση ρευστού Διαδικός κύκλος με πτητικό ρευστό – μη ηλεκτρικές χρήσεις τα υπολείμματα θερμότητας
Θερμά ξηρά πετρώματα (hot dry rock)			Ηλεκτροπαραγωγή κ.λ.π.

Τα γεωθερμικά πεδία ανάλογα με τη θερμοκρασία του ρευστού (Πίνακας 1.1-1) χωρίζονται σε:

- *Υψηλής Ενθαλπίας* (θερμοκρασίες ρευστών > 150 °C)

Όταν η θερμοκρασία των παραγόμενων ρευστών ξεπερνά τους 150°C. Τα ρευστά αυτά αποτελούνται στις περισσότερες περιπτώσεις από μίγμα υγρού ατμού και θερμού νερού.

Είναι η πλέον δυναμική έκφραση της γεωθερμικής ενέργειας. Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εφόσον θεωρείται η καλύτερη λύση για την αξιοποίηση γεωθερμικών πηγών υψηλής ενθαλπίας. Το γεωθερμικό ρευστό μπορεί να είναι ξηρός ατμός ή μίγμα ατμού και νερού με μικρή ή μεγάλη περιεκτικότητα αλάτων. Ο παραγόμενος ατμός από τις γεωτρήσεις, ξηρός ατμός ή ο διαχωριζόμενος της δεύτερης περίπτωσης, αποδίδει μέσω στροβίλου το ενεργειακό του περιεχόμενο, που με τη βοήθεια γεννήτριας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ.

Η αρχική εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού υψηλής ενθαλπίας εντοπίζεται στην απευθείας χρήση του ξηρού ατμού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη μονάδα λειτούργησε στο Larderello το 1913 με 250 kW. Σήμερα η κατεξοχήν ενδιαφέρουσα και πλέον διαδεδομένη μορφή εκμετάλλευσης της γεωθερμίας είναι η ηλεκτροπαραγωγή και η καθετοποίηση της εκμετάλλευσης της περιεχόμενης θερμότητας από πεδία υψηλής ενθαλπίας με γεωθερμικά ρευστά σε υγρή μορφή. Με τον τρόπο αυτό η εκμετάλλευση έχει επεκταθεί και σε πεδία τα οποία παράγουν θερμό νερό, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ξεπέρασε τα 6000 MW. Στην περίπτωση αυτή ανήκουν και τα γεωθερμικά πεδία της Μήλου και της Νισύρου.

Οι γεωθερμικές πηγές υψηλής ενθαλπίας ανήκουν στις καθαρές ενεργειακές πηγές, εφόσον η εκμετάλλευση τους δημιουργεί λιγότερα περιβαλλοντικά προβλήματα από όσα οι συμβατικές ενεργειακές πηγές (άνθρακας, πετρέλαιο, πυρηνική ενέργεια κ.λ.π.) και τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται με ικανοποιητικό τρόπο. Σημαντικό χαρακτηριστικό των γεωθερμικών πηγών είναι ότι οι επιπτώσεις στο περιβάλλον περιορίζονται στην περιοχή των παραγωγικών μονάδων.

Το αντίθετο συμβαίνει με τον άνθρακα, το πετρέλαιο και την πυρηνική ενέργεια, όπου υπάρχουν επιπτώσεις στους χώρους εξόρυξης, στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας (διυλιστήρια, εργοστάσια εμπλουτισμού κ.λ.π.), στις περιοχές χρήσης και στους χώρους απόθεσης των καταλοίπων.

Η επίδραση στη χρήση γης και στο τοπίο εξαρτάται από την έκταση του γεωθερμικού πεδίου όπου είναι εγκατεσπαρμένες γεωτρήσεις, σωληνώσεις και παραγωγικές μονάδες. Επειδή όμως οι εγκαταστάσεις αυτές καταλαμβάνουν μικρό μέρος της συνολικής επιφάνειας, δεν εμποδίζουν άλλες χρήσεις της γης. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του Larderello, όπου η πολύχρονη εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας συμβαδίζει με την γεωργική ανάπτυξη. Επομένως οι δυσάρεστες επιπτώσεις στη χρήση γης και στο τοπίο δεν είναι τόσο σοβαρές.

Ένας κίνδυνος, που συνδέεται με την εκμετάλλευση πεδίων στα οποία κυριαρχεί η υγρή φάση, είναι οι εδαφικές καθιζήσεις. Αντιμετωπίζονται όμως με επαναφορά μέρους του γεωθερμικού νερού του υδροφορέα μετά την χρήση ώστε να διατηρείται η πτώση στάθμης του πιεζομετρικού φορτίου σε ανεκτά επίπεδα. Ο κίνδυνος αυτός δεν υφίσταται σε όσα πεδία κυριαρχεί η αέρια φάση. Στα πεδία αυτά η ευστάθεια των πετρωμάτων δεν εξαρτάται από τη πίεση του ατμού που είναι εξαρχής πολύ μικρότερη από την υδροστατική αλλά ομοιόμορφα κατανεμημένη.

Η παραγωγή του γεωθερμικού ρευστού είναι παρόμοια με την παραγωγή πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Βασικό παραγωγικό σύστημα είναι μια γεώτρηση που φτάνει μέχρι τον γεωθερμικό υδροφορέα και αποτελεί έναν σταθερό αγωγό για την διακίνηση του γεωθερμικού ρευστού μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Η γεώτρηση συμπληρώνεται με κατάλληλο εξοπλισμό για τον έλεγχο και την μεταφορά του ρευστού μέχρι τον τόπο χρησιμοποίησής του.

Η αξιοποίηση κάθε γεωθερμικού πεδίου προϋποθέτει κατάλληλο σχεδιασμό, ώστε η απόδοση του να είναι ικανοποιητική. Πρώτα ελέγχεται η δυναμικότητα του πεδίου με εφαρμογή ερευνητικών γεωτρήσεων στις κατάλληλες θέσεις. Με βάση το στοιχείο αυτό καθορίζεται η μέγιστη ισχύς των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τις οποίες μπορεί να τροφοδοτήσει το πεδίο. Οι μονάδες αυτές κατασκευάζονται πάντα στην περιοχή του γεωθερμικού πεδίου γιατί οι θερμικές απώλειες κατά τη μεταφορά του ρευστού είναι μεγάλες.

Μεγάλη σημασία έχει ο υπολογισμός του αριθμού και της διάταξης των γεωτρήσεων, που απαιτούνται για την τροφοδοσία των μονάδων παραγωγής. Επιδιώκεται ο περιορισμός της αλληλεπίδρασης μεταξύ των γεωτρήσεων. Επειδή η παροχή τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, προβλέπεται χώρος για την κατασκευή νέων γεωτρήσεων. Η επέκταση του χώρου αυτού είναι συνάρτηση και του προβλεπόμενου οικονομοτεχνικού χρόνου ζωής των μονάδων παραγωγής ενέργειας.

Βασικά στοιχεία για την οικονομική απόδοση ενός γεωθερμικού πεδίου είναι το βάθος και η διάμετρος των γεωτρήσεων. Το κόστος κατασκευής και το κόστος λειτουργίας αυξάνεται με το βάθος και για το λόγο αυτό υπάρχει ένα οικονομικό όριο βάθους πέρα από το οποίο το γεωθερμικό πεδίο δεν είναι εκμεταλλεύσιμο. Σε εκμεταλλεύσιμα πεδία το εγκιβωτισμένο μήκος της γεώτρησης καθορίζεται από το πάχος του καλύμματος του γεωθερμικού υδροφορέα. Εκείνο που μπορεί να μεταβληθεί είναι το μήκος της τροφοδοσίας (το μήκος της γεώτρησης μέσα στον υδροφορέα) από το οποίο εξαρτάται και η παροχή του γεωθερμικού ρευστού. Η παροχή εξαρτάται και από τη διάμετρο της γεώτρησης, αύξηση της διαμέτρου συνεπάγεται και αύξηση της παροχής και του κόστους. Επιδιώκεται ο καθορισμός του κατάλληλου συνδυασμού βάθους - διαμέτρου της γεώτρησης, ώστε να παρέχεται η επιθυμητή παροχή με το μικρότερο κόστος.

Στα συστήματα όπου κυριαρχεί υγρή φάση στο πρόβλημα υπεισέρχεται και η κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας, που συνήθως αυξάνεται με το βάθος. Μεγαλύτερη θερμοκρασία συνεπάγεται μείωση της απαιτούμενης παροχής με παράλληλη αύξηση του κόστους λόγω της αυξημένης διαβρωτικότητας του θερμότερου νερού. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι κάθε περίπτωση πρέπει να μελετάται με προσοχή λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες που υπεισέρχονται στο πρόβλημα.

Παρόμοιο πρόβλημα βελτιστοποίησης τίθεται και στην επιλογή της διαμέτρου των επιφανειακών σωληνώσεων μεταφοράς του γεωθερμικού ρευστού. Αύξηση της διαμέτρου οδηγεί σε αύξηση της παροχής επιφέρει όμως παράλληλα αύξηση του κόστους και των θερμικών απωλειών, γιατί αυξάνεται η εξωτερική επιφάνεια των.

Το σύστημα παραγωγής του γεωθερμικού ρευστού περιλαμβάνει και διάφορα συστήματα ελέγχου και προστασίας, όπως συσκευές μέτρησης της παροχής και της πίεσης του γεωθερμικού ρευστού, βαλβίδες και δίσκους προστασίας του δικτύου μεταφοράς από υπερπίεσεις και διαχωριστές των στερεών υλικών που συμπαρασύρονται από το γεωθερμικό ρευστό.

- *Μέσης Ενθαλπίας* (θερμοκρασίες ρευστών μεταξύ 150 – 90 °C)

Πρόκειται για τη θερμική ενέργεια γεωθερμικών ρευστών με θερμοκρασία μικρότερη των 150°C (κατ' άλλους 170 °C). Τέτοια ρευστά, όπως ορίζεται και στο Πίνακα 1.1-2, χρησιμοποιούνται κυρίως για ηλεκτροπαραγωγή, για θερμάνσεις με ειδικές ανάγκες σε θερμικά φορτία ή ακόμη και για αμφοτέρους σκοπούς σε μια προχωρημένη εκμετάλλευση.

Το γεωθερμικό ρευστό που χρησιμοποιείται, μπορεί να είναι τελείως επιφανειακό, δηλαδή από θερμές πηγές, ή συνηθέστερα νερό που αντλείται από κατάλληλες γεωτρήσεις βάθους 200 μέχρι και 1800 m (ΗΠΑ). Η άντληση του γίνεται με ειδικές αντλίες, τοποθετημένες σε κάποιο βάθος μέσα στη γεώτρηση, για εξασφάλιση της απαιτούμενης σταθερής ροής και κάτω από τις επιθυμητές βέλτιστες θερμοδυναμικές συνθήκες του συστήματος εκμετάλλευσης του.

Η ενέργεια του γεωθερμικού ρευστού αποδίδεται μέσω εναλλάκτη σε οργανικό ρευστό, το οποίο σε κλειστό κύκλωμα ακολουθεί το θερμοδυναμικό κύκλο Rankine, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Η εφαρμοζόμενη τεχνολογία είναι αξιόπιστη και δοκιμασμένη για τυποποιημένες μονάδες από 1 μέχρι και 20 MW με μοναδική εξαίρεση τη μονάδα 47 MW στο γεωθερμικό πεδίο της Καλιφόρνιας. Υπάρχουν σήμερα σε λειτουργία πάνω από 80 τέτοιοι σταθμοί, δηλαδή με μονάδες οργανικού κύκλου Rankine που αντιπροσωπεύουν συνολικά εγκατεστημένη ισχύ περί τα 260 MW. Οι 60 από τους σταθμούς αυτούς βρίσκονται εγκατεστημένοι στις ΗΠΑ, όπου οι εκτιμήσεις για ηλεκτροπαραγωγή από εκμετάλλευση γεωθερμικών ρευστών μέσης ενθαλπίας αναφέρουν μερικές χιλιάδες MW.

Μονάδες συνήθως της τάξης των 1-3 MW μεταφέρονται έτοιμες από το εργοστάσιο και τοποθετούνται πολύ εύκολα η μία δίπλα στην άλλη κοντά στις γεωτρήσεις. Έχουν μικρό κόστος λειτουργίας και δεν παρουσιάζουν λειτουργικά ή περιβαλλοντικά προβλήματα, αναμένεται δε να έχουν ευρεία διάθεση στα προσεχή χρόνια, αφού τα γεωθερμικά πεδία με υψηλές θερμοκρασίες ρευστού σπανίζουν.

Σχετικές εκτιμήσεις στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αναφέρουν εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη των 60 MW, από τα οποία τα 20 MW (περίπου) στην Ελλάδα (Λέσβο, Σαντορίνη, Σαμοθράκη, κλπ.).

- *Χαμηλής Ενθαλπίας* (θερμοκρασίες ρευστών μεταξύ 90 - 25°C)

Η χρήση του γήινου θερμού νερού για διάφορους σκοπούς είναι γνωστή πολλά χρόνια σε διάφορες χώρες· η εντατική και πλέον ορθολογική ανάπτυξη των πρακτικών εφαρμογών της γεωθερμικής ενέργειας άρχισε ουσιαστικά από το 1973, δηλαδή μετά την ενεργειακή κρίση του πετρελαίου. Οι προοπτικές για περαιτέρω ανάπτυξη κατά τον πλέον βέλτιστο τρόπο, εμφανίζονται συνεχώς πιο θετικές σε διεθνές επίπεδο. Συστηματική προσπάθεια για την καταγραφή και εκτίμηση της ανάπτυξης των γεωθερμικών εφαρμογών χαμηλής ενθαλπίας έγινε από το Geothermal Resources Council. Σύμφωνα με τα στοιχεία, περί τα τέλη του 1984 η παγκόσμια εγκατεστημένη θερμική ισχύς από γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας ανέρχεται σε 7,072 GW με εξοικονόμηση ισοδύναμης ποσότητας πετρελαίου της τάξης των $2,8 \cdot 10^6$ toe τον χρόνο.

- *Κανονική (ή αβαθής) γεωθερμία*

Έτσι χαρακτηρίζεται η θερμότητα που παρουσιάζεται κάτω από κάθε υπέδαφος, η θερμότητα των λιμνών, ποταμών και θαλασσών, όπου το ύψος της θερμοκρασίας είναι μικρότερο των 25°C. Η ομαλή γεωθερμία αφθονεί στην υδρόγειο υπό τη μορφή θερμών ή ψυχρών πηγών σταθερής θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, όπως είναι τα επιφανειακά νερά ή νερά υδροφόρων οριζόντων μέχρι βάθους 300m.

Λαμβάνοντας υπόψη το τεράστιο απόθεμα σε νερό χαμηλής, αλλά σταθερής θερμοκρασίας, παρ' όλο το χαμηλό θερμικό περιεχόμενο ανά μονάδα μάζας, τέτοιες περιοχές αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό διαθέσιμο ενεργειακό απόθεμα το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί σε τοπική κλίμακα, κοντά στην περιοχή όπου αφθονεί το νερό και στη οποία επιπλέον υπάρχει σημαντική ενεργειακή ζήτηση. Σύμφωνα με στοιχεία από τη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές σχετικές εφαρμογές, ειδικά σε χώρες με άφθονη ενέργεια όπως η Ελβετία, Γαλλία, Σουηδία κ.α. Για παράδειγμα αναφέρεται ότι στη Γαλλία σήμερα θερμαίνονται πάνω από 30.000 κατοικίες, ενώ στη Σουηδία θερμαίνονται τεράστια οικοδομικά τετράγωνα με την ενεργειακή αξιοποίηση νερών θερμοκρασίας 15-18°C χάρη στις αντλίες θερμότητας. Αναλυτικότερα οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας ανάλογα με το ύψος της θερμοκρασίας παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 1.1-2.

Πίνακας 1.1-2 Δυνατές χρήσεις γεωθερμικών ρευστών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους (κατάταξη κατά B. Lindal).

T>180 °C	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εφαρμογή θερμικών κύκλων
180 °C	Εξάτμιση συμπυκνωμένων διαλυμάτων, Ψύξη με απορρόφηση (βιομηχανική & βαθιά ψύξη), Κατεργασία χαρτομάζας
170 °C	Παραγωγή βαρέως ύδατος, Ξήρανση διατομών
160 °C	Ξήρανση ψαριών, ξυλείας
150 °C	Παραγωγή αλουμίνας με τη μέθοδο Bayer
140 °C	Ξήρανση αγροτικών προϊόντων, Κονσερβοποίηση
130 °C	Εξάτμιση στην παραγωγή ζάχαρης, Ανάκτηση αλάτων με εξάτμιση και κρυστάλλωση
120 °C	Παραγωγή γλυκού νερού με απόσταξη
110 °C	Ξήρανση οπτόπλινθων
100 °C	Ξήρανση οργανικών ουσιών, φυκιών, οσπρίων κ.λ.π., Πλύσιμο και ξήρανση μαλλιού
90 °C	Ξήρανση ψαριών
80 °C	Θέρμανση οικισμών - θέρμανση θερμοκηπίων
70 °C	Ψύξη (κατώτερο όριο), Κλιματισμός
60 °C	Εκτροφή διαφόρων ζώων
50 °C	Καλλιέργεια μανιταριών, Ιαματικά λουτρά
40 °C	Θέρμανση εδάφους - Θέρμανση οικισμών
30 °C	Πισίνες, Ζύμωση, Θέρμανση θερμοκηπίων με ακτινικό δίκτυο αγωγών
20 °C	Ιχθυοκαλλιέργειες
T < 20 °C	Εγκαταστάσεις αξιοποίησης κανονικού γεωθερμικού πεδίου

1.2 Παγκόσμια κατάσταση - Ελληνικό δυναμικό

Πολλές χώρες έχουν εκμεταλλευτεί εντατικά τη γεωθερμική ενέργεια αναπτύσσοντας ολοκληρωμένες τεχνικές μεθόδους για την καλύτερη αξιοποίηση της στα πλαίσια τόσο οικιακών όσο και βιομηχανικών εφαρμογών. Χαρακτηριστικά αναφέρονται η Ισλανδία, η Ρωσία, η Ιταλία, η Ουγγαρία, η Νέα Ζηλανδία, οι Η.Π.Α. και οι Φιλιππίνες.

Πίνακας 1.2-1. Χώρες με δυναμικό μεγαλύτερο των 100MW.

Χώρα	Παροχή ρευστού (kg/s)	Ισχύς (MW)	Ετήσια ενέργεια (GWh)	Συντελεστής Φορτίου (%)
Γαλλία	2340	300	788	30
Η.Π.Α.	1971	339	390	13
Ιαπωνία	26101	1686	6805	29
Ιταλία	1745	288	1365	54
Ιρλανδία	4579	889	5517	71
Κίνα	3540	393	1945	56
Νέα Ζηλανδία	559	215	1484	79
Ουγγαρία	9533	1001	2615	30
Ρουμανία	1380	251	987	45
Ρωσία (Σοβ.Ενωση)	2735	402	1056	30
Τουρκία	1355	166	423	29
Λοιπές	1965	142	582	47
ΣΥΝΟΛΟ	57803	7072	23957	39

Η Ελλάδα θεωρείται προνομιούχος χώρα όσον αφορά στην γεωθερμική ενέργεια. Υπάρχουν δύο πεδία υψηλής ενθαλπίας (Μήλος και Νίσυρος) και πολλά πεδία μέσης και χαμηλής ενθαλπίας: Μέθανα, Σουσάκι, Θερμοπύλες, Καμένα Βούρλα, Αιδηψός, Λέσβος, Δομοκός, περιοχή βυθίσματος Ανθεμούντος (Νότια της Θεσσαλονίκης) περιοχή Αλμωπίας και Μυγδονίας (Λαγκαδάς), περιοχή βυθίσματος Στρυμόνα, Νέα Κεσσάνη Ξάνθης, Σαμοθράκη, περιοχή Έβρου κ.α. Παρουσιάζονται λοιπόν για την Ελλάδα πολύ μεγάλες δυνατότητες για την αξιοποίηση της ήπιας αυτής μορφής ενέργειας με οικονομικά συμφέροντες όρους.

Οι δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης των γεωθερμικών ρευστών δεν είναι γνωστές στους κατοίκους πολλών περιοχών της Ελλάδας, εκτός από τη θέρμανση θερμοκηπίων που η εφαρμογή της είναι διαδεδομένη και στη χώρα μας. Σε διάφορες περιοχές της βόρειας Ελλάδας και στα νησιά του βορείου Αιγαίου έχουν εγκατασταθεί πάνω από 150 στρέμματα γεωθερμικών θερμοκηπίων, μέσω χρηματοδότησης από ευρωπαϊκά προγράμματα με ισχύ πλέον των 40 MW_{th}. Πέραν των θερμοκηπίων γεωθερμική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί και για τηλεθέρμανση, ιχθυοκαλλιέργειες κ.λ.π. Η γεωθερμική ενέργεια όμως έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες στην Ελλάδα, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Κάπως αργοπορημένα, το 1972, άρχισε η έρευνα των γεωθερμικών πηγών στην Ελλάδα. Το 1976 - 1977 υπογράφηκε συμφωνία μεταξύ ΔΕΗ-ENEL για τεχνική και επιστημονική συνεργασία με στόχο την κατάρτιση αναπτυξιακών γεωθερμικών προγραμμάτων και λεπτομερών ερευνών και μελετών. Παράλληλα το Ι.Γ.Μ.Ε. με τη συμμετοχή (περιστασιακά) ξένων φορέων διεξήγαγε συστηματικές έρευνες σε διάφορες περιοχές της Ελλάδος.

Κατά το 1980 - 1982 έγιναν από το Ι.Γ.Μ.Ε. για λογαριασμό της ΔΕΗ λεπτομερείς μελέτες σε 8 γεωθερμικές περιοχές. Την ίδια περίοδο γεωμετρήθηκαν 3 καινούργια πηγάδια (γεωτρήσεις) και ολοκληρώθηκαν οι εργασίες σε άλλα 2 παλιότερα στη Μήλο με πολύ επιτυχή και ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Στη Νίσυρο διανοίχτηκε γεώτρηση βάθους 1800m, οι δοκιμές παραγωγής έδειξαν την ύπαρξη ικανοποιητικού γεωθερμικού ταμιευτήρα πολύ υψηλής θερμοκρασίας (400°C). Έγιναν διανοίξεις γεωτρήσεων μικρού βάθους στην Νιγρίτα και σε περιοχή της Ξάνθης τα δε παραγόμενα ρευστά θεωρήθηκαν κατάλληλα για θερμοκήπια. Την ίδια περίοδο εκπονήθηκε μελέτη για την θέρμανση των Σερρών με γεωθερμικά ρευστά.

Από τους κρατικούς φορείς ΔΕΗ και Ι.Γ.Μ.Ε. για το 1983 υπήρχε σε γενικές γραμμές το εξής πρόγραμμα:

✓ Ολοκλήρωση των διαδικασιών για τη μελέτη, προμήθεια και εγκατάσταση πειραματικής γεωθερμοηλεκτρικής μονάδας ισχύος 2MW στη Μήλο. Εκτέλεση 2ης βαθιάς γεώτρησης στη Νίσυρο.

✓ Δοκιμές παραγωγής στη Μήλο και Νίσυρο. Έρευνα στο τεκτονικό βύθισμα Στρυμόνα και στη Λέσβο. Συμπλήρωση των εργασιών στη Ν. Κεσσάνη Ξάνθης.

Στα μελλοντικά σχέδια ήταν η εγκατάσταση ηλεκτρικής ισχύος 200 MW μέχρι το 2000. Προβλέφθηκε επίσης η ηλεκτροδότηση νησιών των Κυκλάδων με ηλεκτρικό ρεύμα από το σταθμό της Μήλου μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων, καθώς και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τη Μήλο προς την Στερεά Ελλάδα μέσω Καρύστου. Δυστυχώς όμως το πρόγραμμα αυτό εξ' αιτίας λάθους χειρισμών έχει εγκαταλειφθεί. Παράλληλα έχει δημιουργηθεί μία αρνητική ψυχολογία στους κατοίκους των περιοχών αυτών. Οπωσδήποτε η πολιτεία οφείλει να υποστηρίξει την εκμετάλλευση του πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Νισύρου καθώς και η εκμετάλλευση των περισσότερων πεδίων μέσης και χαμηλής ενθαλπίας.

Στην περίπτωση που σε μια περιοχή παρουσιάζεται η ύπαρξη ευνοϊκού γεωθερμικού δυναμικού, και επιπλέον ευρύτερα πολιτικοκοινωνικά και οικονομικά κριτήρια συγκλίνουν στην ανάπτυξη της εν λόγω περιοχής, τότε για την αξιοποίηση του δυναμικού αυτού, δηλαδή του διαθέσιμου φυσικού ενεργειακού πόρου, είναι απαραίτητη η χάραξη στρατηγικής και η εφαρμογή συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην πορεία ενός γεωθερμικού έργου μέχρι να αρχίσει η εκμετάλλευση του υφισταμένου γεωθερμικού δυναμικού, περιλαμβάνει διάφορα στάδια που το καθένα αντιπροσωπεύει αντίστοιχες δυσκολίες και δαπάνες. Για να γίνει η έρευνα, μελέτη και ανάπτυξη ενός γεωθερμικού πεδίου, ώστε να είναι δυνατή η έναρξη της αξιοποίησής του, σύμφωνα με στοιχεία από τη διεθνή εμπειρία, απαιτούνται 3-5 χρόνια για την περίπτωση πεδίου χαμηλής ενθαλπίας, ανάλογα με το μέγεθος της εκάστοτε εκμετάλλευσης.

Η εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού πεδίου είναι μακροχρόνια, βελτιστοποιείται συνεχώς και αναπτύσσεται παράλληλα με την ολοκλήρωση της έρευνας του πεδίου που σχετίζεται με την ωριμότητα εκμετάλλευσής του.

Με την παραδοχή ότι, οι προοπτικές που παρουσιάζονται στην Ελλάδα είναι αξιοσημείωτες, αφού οι ευνοϊκές περιοχές για ανάπτυξη και αξιοποίηση γεωθερμικών πεδίων υψηλής και ιδιαίτερα χαμηλής ενθαλπίας είναι πάρα πολλές, και με βάση τα παραπάνω σχετικά με την παρούσα κατάσταση στην οποία βρίσκεται η γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας στη χώρα μας, σε γενικές γραμμές θα μπορούσαν να λεχθούν τα εξής:

✓ Η επιφανειακή έρευνα, εστιασμένη κυρίως σε περιοχές όπου υπάρχουν ήδη από τη φύση χαρακτηριστικές επιφανειακές ενδείξεις, έχει προχωρήσει σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό, με αποτέλεσμα να έχουν εντοπισθεί ευνοϊκά πεδία σε διάφορες περιοχές της χώρας. Μπορεί να θεωρηθεί πολύ πιθανό πως περισσότερο συστηματική και εξειδικευμένη έρευνα με γεωφυσικά μέσα και βαθιές γεωτρήσεις είναι δυνατό να δώσει πολύ θετικά αποτελέσματα.

✓ Σε ότι αφορά όμως στη μελέτη και αξιοποίηση του υφιστάμενου γεωθερμικού δυναμικού στα εντοπισθέντα πεδία, μπορεί να αναφερθεί ότι βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ακόμη. Βέβαια είναι γεγονός, ότι γίνονται σημαντικές προσπάθειες από δημόσιους φορείς (ΔΕΗ, ΙΓΜΕ, ΚΑΠΕ, Πανεπιστήμια) καθώς και από ανεξάρτητους φορείς, για την αξιοποίηση θερμών νερών, αλλά είναι μάλλον ανεπαρκείς, ο δε ρυθμός ανάπτυξης δεν είναι ενθαρρυντικός.

Λαμβάνοντας υπόψη τη διάκριση σε δυναμικό υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας που έγινε προηγούμενα, καθώς και τα σχετικά αποτελέσματα υδρογεωλογικής και γεωθερμικής έρευνας που έχει αναπτυχθεί από το ΙΓΜΕ και ΚΑΠΕ καλύπτοντας όλη τη χώρα, εξάγεται το συμπέρασμα πως το διαθέσιμο γεωθερμικό δυναμικό είναι διάσπαρτο και ιδιαίτερα αξιόλογο.

Στο Πίνακα 1.2-2 αναφέρονται οι κυριότερες από τις 100 (περίπου) σημαντικές θερμές πηγές της χώρας με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες ρευστού και παροχές τους.

Πίνακας 1.2-2 Ορισμένες θερμές πηγές της Ελλάδας και οι χαρακτηριστικές τιμές τους.

Περιοχή	Θερμοκρασία (°C)	Παροχή όγκου (m ³ /h)
Αιδηψός	70~78	250
Ελαιοχώρια	34	600
Ελεύθερες	40	100
Θερμοπύλες	42	400
Ικαρία	58	60
Καβάσιλα	32	600
Κύθνος	58	50
Λέσβος	87	>60
Νέα Κεσσάνη	78	30
Νιγρίτα	59	52

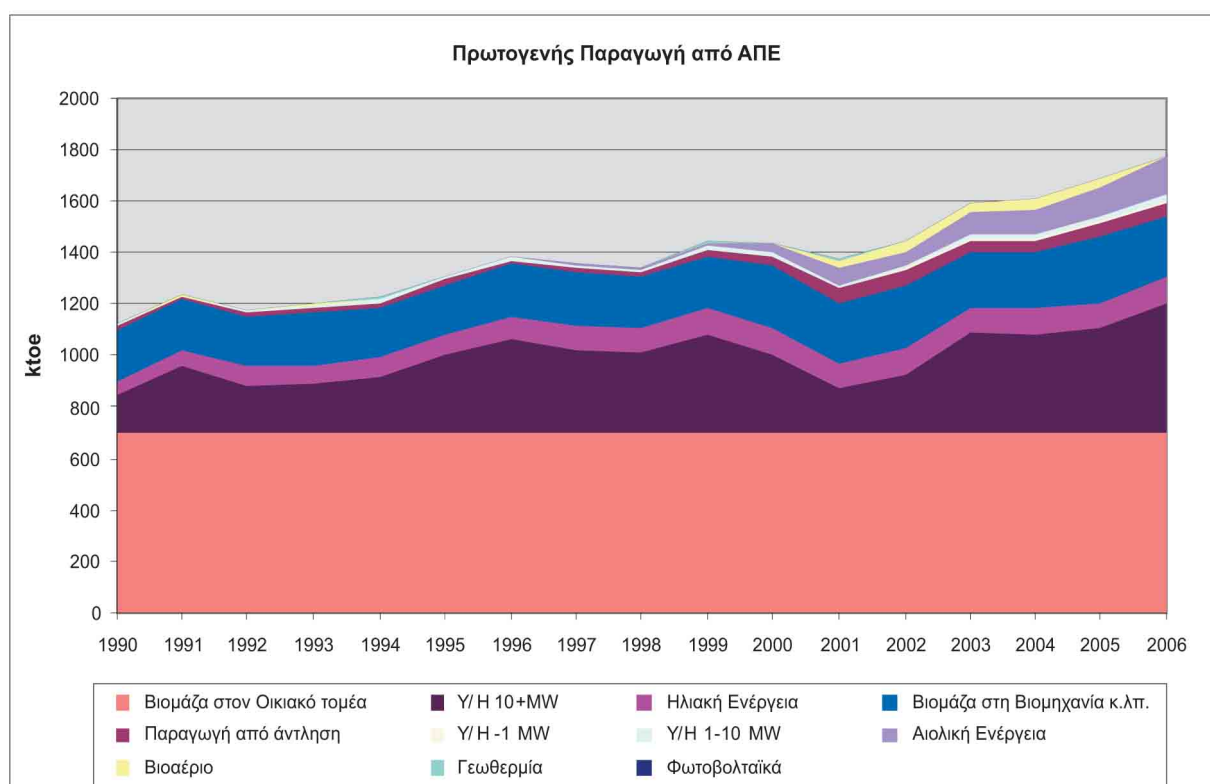
Το θερμό νερό που ρέει επί χιλιάδες και πλέον χρόνια αποδεικνύει την ανανεωσιμότητα της γεωθερμικής ενέργειας. Η χαμηλή γεωθερμία αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ενεργειακό απόθεμα που χάνεται ανεκμετάλλευτο ρέοντας προς τη θάλασσα, ακόμη και σήμερα που η τεχνολογία έχει δώσει πρακτικές και εύκολες λύσεις για ουσιαστική αξιοποίησή του, παράλληλα μάλιστα και με τις χρήσεις του για ιαματικούς σκοπούς.

Σχετικά με εκμετάλλευση στη χώρα μας επιφανειακών ψυχρών νερών πολύ χαμηλής ενθαλπίας, αξίζει να μνημονευθεί η μοναδική ίσως εφαρμογή στη νήσο Άνδρο, όπου πειραματικό θερμοκήπιο θερμαίνεται με την αξιοποίηση του θερμικού περιεχομένου επαρκούς ποσότητας νερού σταθερής θερμοκρασίας ~20°C με τη χρήση αντλίας θερμότητας και οι ερευνητικές εφαρμογές του Ε.Μ.Π. στο Κορωπί και στου Ζωγράφου. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί το έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ιδιωτικών εφαρμογών ψύξης/θέρμανσης κτιρίων σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Για τις εγκαταστάσεις αυτές δεν υπάρχουν προς το παρόν συγκεντρωτικά στοιχεία.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι στις αναφερόμενες εφαρμογές, κατά βάση για θερμοκήπια με πολύ μικρή έκταση χρησιμοποιείται μικρή παροχή γεωθερμικού ρευστού, με μικρή διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) και μικρό συντελεστή φορτίου (load factor), καταλήγει κάποιος στο συμπέρασμα, ότι οι διάφορες εκμεταλλεύσεις, που γίνονται από την ιδιωτική πρωτοβουλία, θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν σαν πειραματικές και μη συστηματικές, αφού δεν βασίζονται σε κάποια μελέτη του αντίστοιχου γεωθερμικού δυναμικού και τη βέλτιστη αξιοποίησή του.

Τέλος να ληφθεί υπόψη, ότι μέχρι στιγμής δεν έχουν γίνει ειδικές γεωθερμικές γεωτρήσεις (μεγάλης διαμέτρου και βάθους τουλάχιστον 500 m) ώστε να ακολουθήσουν, οι απαραίτητες συστηματικές δοκιμές παραγωγής και μετρήσεις. Εξάριση αποτελούν οι δύο βαθιές γεωτρήσεις στις Σέρρες και στο Δέλτα του Νέστου. Οι γεωτρήσεις αυτές, ατυχώς δεν μπόρεσαν να φέρουν κάποιο ουσιαστικό αποτέλεσμα πέρα από το ενθαρρυντικό γεγονός, ότι η δεύτερη γεώτρηση εντόπισε γεωλογικούς σχηματισμούς με σχετικά υψηλή θερμοκρασία (περίπου 120°C).

Μέχρι σήμερα στην Ελλάδα ερευνώνται μόνο τα ανώμαλα γεωθερμικά πεδία και μάλιστα αυτά που έχουν αισθητά αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα. Αντίθετα, σε άλλες χώρες η έρευνα και η αξιοποίηση τόσο της κανονικής (ομαλής) γεωθερμικής ενέργειας, όσο και αυτής που οφείλεται σε ελαφρά αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα, έχουν προχωρήσει σημαντικά. Η αξιοποίηση επιτυγχάνεται είτε με βαθιές γεωτρήσεις, βάθους άνω των 1000 m, στις οποίες αναζητώνται υπόγεια νερά θερμοκρασίας άνω των 50°C , είτε με αβαθείς γεωτρήσεις, βάθους 50-150 m, στις οποίες η θερμική ενέργεια αναβαθμίζεται με τη χρήση αντλιών θερμότητας. Με αυτές είναι δυνατή και η εκμετάλλευση του θερμικού περιεχομένου των αβαθών υπογείων υδάτων σε γεωτρήσεις ή φρέατα.



Γράφημα 1.2-1 Πρωτογενής Παραγωγή από ΑΠΕ.

Με τη χρήση αντλίας θερμότητας νερού - νερού είναι δυνατή η εκμετάλλευση με οικονομικό όφελος ακόμη και ενέργεια από θερμοκρασίες υπεδάφους 8°-10°C. Στις χώρες της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης και στον Καναδά σ' αυτές τις θερμοκρασίες βασίζεται η λειτουργία των γεωθερμικών αντλιών, δηλαδή των αντλιών θερμότητας που εκμεταλλεύονται την υπεδαφική θερμική ενέργεια.

Σε βάθη 0-150 m υπάρχει αποθηκευμένη θερμική ενέργεια που προέρχεται και ανανεώνεται συνεχώς από δύο πηγές τη γεωθερμική, που βρίσκεται στο εσωτερικό της γης και την ηλιακή, που με την ακτινοβολία της διοχετεύει θερμική ενέργεια μέσω της εδαφικής επιφανείας στο υπέδαφος. Λόγω του κλίματος και της γεωγραφικής θέσεως της χώρας μας η ποσότητα ηλιακής θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται στο υπέδαφος αυτής είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ότι στις βορειότερες χώρες. Έτσι οι υπεδαφικές θερμοκρασίες σε βάθη 0-150 m είναι εδώ 15-20 °C, που είναι πολύ πιο ευνοϊκές για την απόδοση των γεωθερμικών αντλιών και δίνουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης πολύ μεγαλύτερων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας.

Γίνεται φανερό λοιπόν, ότι σε βάθη 0-150 m τα υπεδαφικά στρώματα πετρωμάτων και τα υπόγεια νερά μετεωρικής προέλευσης αποθηκεύουν τεράστιες ποσότητες ηλιακής θερμικής ενέργειας, οι οποίες μαζί με την από τα βαθύτερα στρώματα του φλοιού της γης ανερχόμενη γεωθερμική ενέργεια δημιουργούν ένα ενεργειακό απόθεμα, το οποίο ονομάζεται αβαθές (κανονικό) γεωθερμικό και το οποίο αποτελεί μια περιβαλλοντικά εντελώς καθαρή ενεργειακή πηγή και προσφέρεται για εκμετάλλευση με αντλίες θερμότητας. Σε βάθη μεγαλύτερα των 150 m και μέχρι 1.000 - 3.000 m, είναι δυνατή η αναζήτηση θερμών υπογείων νερών και με συνθήκες κανονικής ή ελαφρά αυξημένης γεωθερμικής βαθμίδας. Το θερμικό περιεχόμενο των νερών αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς με άμεση χρήση. Εάν η θερμοκρασία τους είναι κάτω από 500 °C και δεν είναι αρκετή για κάποιο σκοπό, π.χ. θέρμανση χώρων ή για κάποια ανάγκη βιομηχανική ή βιοτεχνική, μπορεί να παρεμβληθεί μια αντλία θερμότητας, ώστε να αποκτήσει το νερό την απαιτούμενη θερμοκρασιακή στάθμη.

Πίνακας 1.2-3: Πρωτογενής Παραγωγή από ΑΠΕ (ktoe).

Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	172	273	206	219	245	325	388	353	333	416	354	235	298	459	448	483	583
εκ των οποίων αντλητικά συστήματα	20	6	16	22	21	22	13	18	13	20	36	54	57	49	46	51	52
Υ/Η -1 MW*	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	3	5	7	8	9	10
Υ/Η 1-10 MW*	5	6	4	7	8	8	10	12	12	14	12	8	8	15	18	19	22
Υ/Η 10+MW*	147	260	185	189	215	295	363	321	307	381	304	169	228	389	376	404	499
Βιομάζα	893	897	899	899	894	897	908	911	907	911	945	938	948	910	917	957	931
στον Οικιακό τομέα	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702	702
στη Βιομηχανία κτλ	191	195	196	197	191	195	206	209	205	209	243	236	246	207	215	255	230
Αιολική Ενέργεια	0	0	1	4	3	3	3	3	6	14	39	65	56	88	96	109	146
Φωτοβολταϊκά	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
Ηλιακή Ενέργεια	56	63	70	75	79	82	86	89	93	97	99	100,5	98,9	98,7	107,5	101	109
Βιοαέριο	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	33	48	36	36	33	33
Γεωθερμία	3	3	3	3	4	3	3	2	3	2	2	2	1	1	1	1	5
Σύνολο	1.125	1.236	1.178	1.201	1.225	1.311	1.388	1.359	1.342	1.440	1.439	1.373	1.451	1.592	1.606	1.684	1.807
Σύνολο χωρίς αντλητικά	1.105	1.230	1.162	1.178	1.204	1.290	1.375	1.340	1.329	1.420	1.403	1.319	1.393	1.544	1.560	1.633	1.755
Σύνολο χωρίς μεγάλα Υ/Η αντλητικά & Βιομάζα στον Οικιακό τομέα	256	268	274	287	287	292	309	317	320	337	397	448	463	452	482	527	554
* δεν συμπεριλαμβάνεται η παραγωγή των αντλητικών																	

Πίνακας 1.2-4 Κύρια χαρακτηριστικά γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας στην Ελλάδα.

Γεωθερμικό πεδίο	Επιφάνεια km ²	Βάθος κρατήρα m	Ροή ρευστού m ³ /h	Θερμοκρασία κρατήρα °C	TDS gr/lt	Είδος νερού	Πηγάζια (γεωτρήσεις) ερευν./παραγ.
Πολίχνιτος, Λέσβος	10	50-150	400	69-96		Cl-Na	25/8
Λισβόρι, Λέσβος			20	68		Cl-Na	2/0
Αργενος, Λέσβος	4	10-180	800	86		Cl-Na	0/3
Στύψη, Νάπη, Λέσβος	10	50-150	30	42-67	1-5	Cl-Na	
Καλλονή, Λέσβος	10	50-200	300	25-30		Cl-HCO ₃	
Θέρμη Γέρας, Λέσβος	2+	20-80	150	40	1-2	Cl-HCO ₃	5/1
Θέρμη, Λέσβος		8-50	200	60	35-38	Cl-Na	0/2
Μυτιλήνη, Λέσβος	10	50-150	500	30-35	1-2	Cl-HCO ₃	0/15
Πέτρα-Μήθυμα, Λέσβος	10	100-200	100	35-60	1+	Cl-HCO ₃	
Αδάμας-Ζεφύρια, Μήλος	50	10-100	200	30-90	5-30	Cl-Na	25/
Νίσυρος		30-120	100	25-95	10-30	Cl-Na	10/3
Σαντορίνη	10	50-350	-	25-70	3-30	Cl-Na	3/0
Νενίτα, Χίος	5+	100-150	100	30	1-2	Cl-HCO ₃	3/0
Ερατίνο, Δέλτα Νέστου	20+	600-800		70-90	6-8		14/0
Ηράκλεια, λεκάνη Στρυμόνα	25	200-400	200	40-62	1-2	HCO ₃	10/1
Ανθεμόντας, Θεσσαλονίκη		50-400		30-40		HCO ₃	8/0
Ελαιοχώρα, Χαλκιδική	30	60-250	1000	33-42		HCO ₃	0/10
Αλμωπία Πέλλας(Αριδαία)	6	300-400		30-38			4/0
Λιλάντιο, Εύβοια	2	-350		25-32		Cl-Na	3/0
Αιδηψός- Γιάλτρα, Εύβοια	5+	0-100	400	50-81+		Cl-Na	4/6
Καμένα Βούρλα, Θερμοπύλες	5+	50-200	1200	35-46		Cl-Na	19/0
Ανδραβίδα, Πελοπόννησος	2	50-200	200	26		Cl-Na	3/0

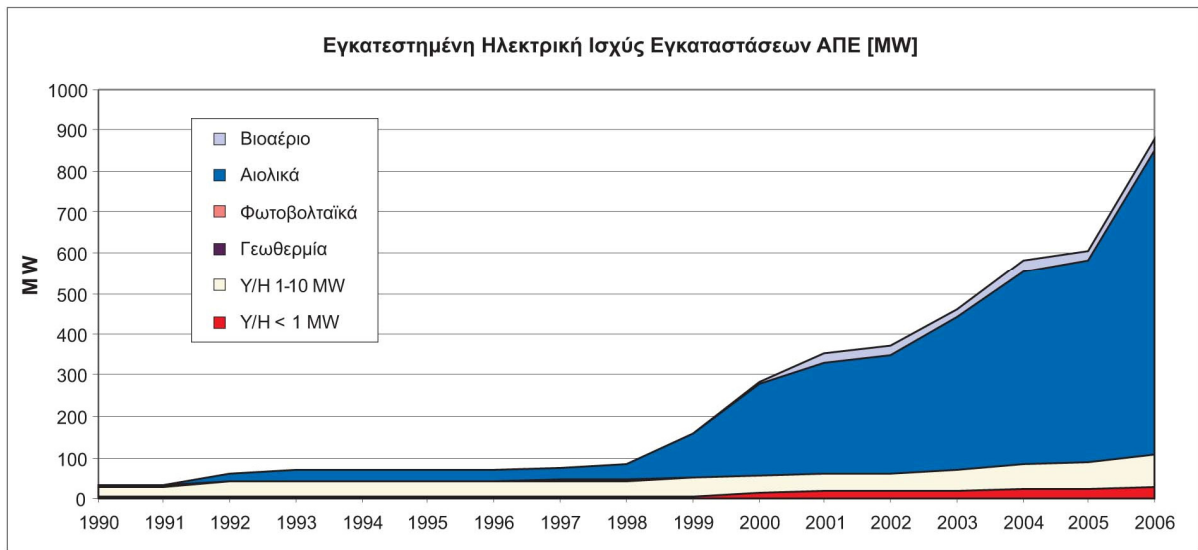
Στην Ελλάδα, οι γεωθερμικές εφαρμογές εστιάζονται σε θερμικές χρήσεις με $69 \text{ MW}_{(\text{th})}$, με κύριες εφαρμογές τα θερμά και ιαματικά λουτρά (~50%), και τη θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών (~50%). Στην Ευρωπαϊκή ένωση οι θερμικές χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας περιλαμβάνουν θέρμανση κτηρίων (~600 $\text{MW}_{(\text{th})}$), θερμοκηπίων (~350 $\text{MW}_{(\text{th})}$), θερμά λουτρά (~350 $\text{MW}_{(\text{th})}$) και άλλες εφαρμογές (~100 $\text{MW}_{(\text{th})}$). Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι αντίστοιχες εφαρμογές αντιστοιχούν σε πολλαπλάσια εγκατεστημένη ισχύ (~9.400 $\text{MW}_{(\text{th})}$).

Ενώ η ηλεκτροπαραγωγή και οι θερμικές χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας αυξάνουν με μικρό ρυθμό ετησίως (~5%), τόσο σε Ευρωπαϊκό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Το έτος 2002, η εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρωπαϊκή Ένωση ανήλθε σε 3.344 $\text{MW}_{(\text{th})}$, από μόλις 1.159 $\text{MW}_{(\text{th})}$ το 1999. Στη χώρα μας, η αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύς περιλαμβάνει λίγες πιλοτικές εφαρμογές και αντιστοιχεί σε 2 $\text{MW}_{(\text{th})}$ περίπου.

Πίνακας 1.2-5 Ισχύς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (σε MW) κατά είδος Α.Π.Ε, Εξέλιξη Συνολικής Επιφάνειας Ηλιακών Συλλεκτών (σε 1.000 m^2) και Βιοκαύσιμα (σε ton) στην Ελλάδα.

Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
Σύνολο	2.411	2.515	2.541	2.552	2.552	2.552	2.551	2.757	2.896	3.068	3.299	3.369	3.388	3.473	3.597	3.621	3.894	
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	2.408	2.512	2.523	2.523	2.523	2.523	2.522	2.728	2.856	2.959	3.072	3.076	3.078	3.079	3.099	3.105	3.124	
εκ των οποίων αντλητικά συστήματα	315	315	315	315	315	315	315	520	615	615	699	699	699	699	699	699	699	
Υ/Η -1 MW*	2	2	2	2	3	3	3	4	5	8	14	15	17	19	23	25	31	
Υ/Η 1-10 MW*	28	28	39	39	39	39	39	39	40	42	42	45	45	50	59	64	77	
Υ/Η 10+MW*	2.063	2.167	2.167	2.167	2.166	2.166	2.165	2.165	2.197	2.294	2.317	2.317	2.317	2.311	2.317	2.317	2.317	
Γεωθερμία	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
Φωτοβολταϊκά	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1,4	1,5	
Αιολική Ενέργεια	1	1	16	27	27	27	27	27	38	109	226	270	287	371	472	491	745	
Βιοαέριο	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22	22	22	24	24	24	
Επιφάνεια Ηλιακών Συλλεκτών (1000 m^2)	1.448	1.610	1.759	1.878	1.991	2.101	2.168	2.228	2.381	2.440	2.941	2.992	3.050	3.140	3.246	3.047	3.296	
Βιοκαύσιμα (τόνους)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	395.000
* δεν συμπεριλαμβάνεται η ισχύς των αντλητικών																		

Οι ερευνητικές δραστηριότητες στην Ελλάδα περιλαμβάνουν κυρίως αναζήτηση γεωθερμικών ρευστών θερμοκρασίας 75-100 °C, καθώς και εφαρμογές γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Ενδεικτικά ερευνητικά έργα αποτελούν η εγκατάσταση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στο δημαρχείο Πυλαίας Θεσσαλονίκης, στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Δημοσίου Δικαίου στα Λεγραινά Αττικής, στα γραφεία του ΚΑΠΕ στο Πικέρι Αττικής και στο κτίριο της Σχολής Μεταλλειολόγων στην Πολυτεχνειούπολη του Ε.Μ.Π. στην Αθήνα, η αξιοποίηση γεωθερμικού νερού >40 °C στο αεροδρόμιο «Μακεδονία», η τηλεθέρμανση δημοτικών κτιρίων στον Λαγκαδά με νερό από τα λουτρά και αντλίες θερμότητας και η αφαλάτωση θαλασσινού νερού με γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας στη Ν. Κίμωλο και στη Ν. Μήλο.



Γράφημα 1.2-2 Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ στην Ελλάδα χωρίς μεγάλα υδροηλεκτρικά.

1.3 Η γη ως πηγή θερμότητας

1.3.α Η θερμοκρασία στο υπέδαφος και η ροή θερμότητας προς τα έξω (πάνω)

Ήταν ήδη γνωστό από τον 17^ο αιώνα ότι η θερμοκρασία σε βαθιά ορυχεία είναι μεγαλύτερη από αυτή της επιφάνειας της γης. Μία τέτοια θερμοκρασιακή βαθμίδα προϋποθέτει ροή θερμότητας από το εσωτερικό προς την επιφάνεια και δημιουργεί πολλά ερωτηματικά που αφορούν στο ποσό της θερμότητας, τη διακύμανσή του από μέρος σε μέρος και την προέλευσή του. Αν η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή, το ποσό που αναδύεται από τη γη ανά μονάδα επιφάνειας είναι ίσο προς το γινόμενο της θερμοκρασιακής βαθμίδας επί τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Στο Πίνακα 1.3-1 δίνεται η τάξη μεγέθους των ανωτέρω ποσοτήτων σε μη ηφαιστειακές περιοχές. Στον Πίνακα 1.3-2 δίνονται τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας για διάφορους τύπους πετρωμάτων. Αξιοσημείωτες αποκλίσεις υπάρχουν φυσικά και εξαρτώνται από τη σύσταση και το περιεχόμενο νερό, ειδικά σε ιζηματογενή πετρώματα.

Σ' ένα σημείο που δεν υπάρχουν ρηχές πηγές θερμότητας η ανερχόμενη θερμοροή πρέπει να είναι η ίδια σε όλα τα βάθη που μπορεί να φτάσει το γεωτρήπανο. Έτσι η θερμοκρασιακή βαθμίδα θα μεταβάλλεται με τη θερμική αγωγιμότητα και θα είναι μικρότερη στις πιο αγωγίμες περιοχές. Δεν είναι εύκολο να βρει κάποιος γεωτρήσεις ή ορυχεία στα οποία να έχουν γίνει αξιόπιστες μετρήσεις. Από τις λίγες περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί αποδείχθηκε ότι οι τιμές προσεγγίζουν την κατανομή Gauss με μέγιστο περίπου στα 35 W/m² ενώ οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται μεταξύ 0-80 W/m².

Πίνακας 1.3-1 Τάξη μεγέθους χαρακτηριστικών μεγεθών ροής θερμότητας εδάφους.

Περιοχή	Βάθος (m)	Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)	Μέση Βαθμίδα (K/km)	Μέση Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Θερμική ροή (W/m ²)
Gerhardminnebrok (South Afrika)	3,022	46,4	9,5	1,566	14,848
Tockelts (Yorkshire, England)	906	35,7	27,7	0,494	13,688
Adams Tunnel (Colorado, U.S.A.)	940	24,8	24,1	0,928	22,388
Lat. 48oN., Long. 17oW (E. basin of N. Atlantic)	4,670 ⁽¹⁾	0,116 ⁽²⁾	25,4	0,265	6,728
Lat. 46oN., Long. 27oW (Central Valley of Mid-Atlantic Ridge)	4,109 ⁽³⁾	0,87 ⁽⁴⁾	315	0,240	75,632

¹ Βάθος νερού.

² Μετρούμενη θερμοκρασιακή διαφορά σε εύρος βάθους 4,6m για τον 1^ο και 2,8m για τον 2^ο σταθμό.

³ Βάθος νερού.

⁴ Μετρούμενη θερμοκρασιακή διαφορά σε εύρος βάθους 4,6m για τον 1^ο και 2,8m για τον 2^ο σταθμό.

Πίνακας 1.3-2 Τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας για διάφορους τύπους πετρωμάτων.

Είδος	Περιοχή Τιμών Θερμορροής (W / m^2) ⁽⁵⁾
Γρανίτης (Granite)	193-290
Δολερίτης (Dolerite)	225-258
Γνευσίτης (Gneiss)	161-290 (φυσική φύλλωση)
Γνευσίτης (Gneiss)	193-354 (παράλληλη φύλλωση)
Χαλαζίας (Quartzite)	225-612
Ασβεστόλιθος (Limestone)	129-193
Δολομίτης (Dolomite)	290-451
Αμμόπετρα με χαλαζία και Άμμο (Sandstone)	129-354
Σχιστόλιθος (Shale)	96-193
Ορυκτό Άλας (Rock Salt)	419-548
Υγρά ορυκτά θαλάσσης (Wet ocean sediments)	54,7-77,3

1.3.β Η πηγή θερμότητας

Θερμική ροή της τάξης των $38,67 W/m^2$ δεν είναι μεγάλη στα πλαίσια ενός εργοστασίου ή ακόμα για οικιακή χρήση. Παρ' όλα αυτά αν η θερμορροή αυτή παρατηρηθεί από γεωλογική σκοπιά είναι εντυπωσιακή λόγω της μεγάλης χρονικής περιόδου για την οποία υφίσταται. Η Γη είναι ηλικίας 4500 εκ χρόνων τα δε τελευταία 3500 εκ. χρόνια αντιπροσωπεύονται από βραχώδη πετρώματα στην επιφάνεια. Μέσα σε 1000 χρόνια θερμική ροή των $38,67 W/m^2$ ισοδυναμεί με θερμότητα $1,675 \times 10^{17} J/m^2$. Αν χρησιμοποιηθεί λιθάνθρακας τυπικής θερμογόνου δύναμης για να παραχθεί η αντίστοιχη ενέργεια θα απαιτούνταν περίπου 4 ton κάτω από κάθε τετραγωνικό εκατοστό της επιφάνειας της γης, δηλαδή συνεχή καύση στρώματος πάχους 20 km. Είναι φανερό ότι η θερμότητα αυτή δεν μπορεί να παράγεται από καύση λιθάνθρακα ή από οποιαδήποτε χημική αντίδραση κοντά στην επιφάνεια.

Μέρος αυτής της θερμότητας μπορεί να προέρχεται από την αρχική θερμότητα που κληρονόμησε η γη από τον ήλιο όταν σχηματίσθηκε. Εφόσον όμως η αρχική της θερμοκρασία παραμένει άγνωστη υπάρχουν αμφιβολίες στο κατά πόσο μεγάλο είναι αυτό το μέρος. Ο λόρδος Kelvin απέδειξε ότι η θερμότητα φέρεται στην επιφάνεια μέσω του μηχανισμού αγωγής δια στερεού εδάφους. Ακόμη κι αν η γη βρισκόταν αρχικά όλη στο σημείο τήξης, μετά από 100 εκατ. χρόνια η εναπομένουσα θερμότητα θα ήταν ένα πολύ μικρό κλάσμα της σήμερα παρατηρούμενης.

Αν βέβαια γίνει αποδεκτό ότι η θερμότητα μεταφέρεται μέσω κινήσεων στο μανδύα, το μοντέλο του Kelvin χρειάζεται αναθεώρηση. Παρά όλα αυτά θεωρείται απίθανο η αρχική ίδια θερμότητα της γης να συνεισφέρει σημαντικά στην παρατηρούμενη ροή θερμότητας.

Η πιθανότερη πηγή σήμερα θεωρείται η ραδιενέργεια των πετρωμάτων. Όλα τα πετρώματα περιέχουν μικρά ποσά ραδιενεργών στοιχείων σπουδαιότερα από τα οποία είναι το Ουράνιο, το Θόριο, το Κάλιο καθώς και τα παράγωγα τους που δίνουν σημαντικά ποσά θερμότητας.

⁵ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε Clark (1966).

Ο χρόνος ημιζωής των ισοτόπων των στοιχείων αυτών και τα εκπεμπόμενα ποσά θερμότητας δίνονται στο Πίνακα 1.3-3. Τα ποσά θερμότητας που παράγονται σε διαφορετικά πετρώματα δίνονται στον Πίνακα 1.3-4.

Πίνακας 1.3-3 Χρόνος ημιζωής των ισοτόπων χαρακτηριστικών στοιχείων.

Ισότοπο	Ημιζωή $\times 10^{10}$ year	Αναλογία ισοτόπου %	Παραγόμενη Θερμότητα ⁽⁶⁾ kJ/kg yr	
U ²³⁴	4,50	99,27	2,931	>3,057
U ²³⁶	0,71	0,72	0,126	
Th ²³²	13,9	100	0,837	
K ⁴⁰	1,31	0,012	1,131 $\times 10^{-2}$	

Πίνακας 1.3-4 Ποσά θερμότητας που παράγονται αναλόγως πετρώματος.

Τύπος Πέτρας	Περιεχόμενα			Παραγόμενη Θερμότητα			
	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	U	Th	K	Ολική
Γρανίτης	4,7	20	3,4	3,4	4,0	0,9	8,3
Βασάλτης	0,6	2,7	0,8	0,44	0,54	0,23	1,21
Ορυκτό με ολιβίνη	0,016	0,0047	0,0012	0,012	0,001	0,0003	0,013

Από τους παραπάνω πίνακες είναι φανερό ότι μπορεί να εξηγηθεί η υπάρχουσα θερμική ροή. Πράγματι εφόσον πάχος 14 km γρανίτη μπορεί να παράγει ροή 32,23 W/m² είναι απαραίτητο να υποθεθεί ότι τα πετρώματα κάτω ακριβώς από το φλοιό είναι λιγότερο ραδιενεργά από τα κρυσταλλικά, αλλιώς η θερμική ροή θα ήταν μεγαλύτερη από την παρατηρούμενη. Μια τέτοια παραδοχή είναι πολύ λογική καθώς τα περισσότερα βασικά πετρώματα του φλοιού είναι πολύ λιγότερο ραδιενεργά από τους γρανίτες.

Η υπόθεση της παραγωγής της θερμικής ροής από ραδιενεργές μεταστοιχειώσεις έχει ελεγχθεί, καθ' όσον η θερμική ροή σε περισσότερο ραδιενεργές περιοχές αποδείχθηκε μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στις λιγότερο ραδιενεργές. Σε περιοχές σχεδόν μηδενικής ραδιενέργειας (π.χ. στους ωκεανούς) μετρήθηκε η ποσότητα που θεωρητικά πρέπει να προέρχεται από το θερμό μανδύα.

Αν και η ραδιενεργή αποσύνθεση που φαίνεται να είναι η βασική πηγή σχηματισμού της γεωθερμικής ενέργειας συνεχίζεται, οι πηγές γεωθερμικής ενέργειας που είναι δυνατόν να βρεθούν είναι περιορισμένες. Ο συντελεστής μείωσης είναι συνήθως το θερμό νερό, το μέσο μεταφοράς της ενέργειας στην επιφάνεια. Αν ο βαθμός εκμετάλλευσης του νερού αυτού υπερβαίνει τον φυσικό ρυθμό επαναφόρτισης, τότε συμβαίνει κορεσμός της πηγής. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου θα πρέπει να σχεδιαστεί ένα σύστημα ανατροφοδότησης της πηγής μέσω διάφορων πηγαδιών ώστε να διατηρηθεί η πίεση της πηγής. Η διάρκεια ζωής μιας γεωθερμικής πηγής είναι δύσκολο να καθοριστεί και χρειάζεται τεχνικές υψηλού κόστους. Η συνήθης διαδικασία είναι επέκταση της περιοχής που θα αναπτυχθεί σε στάδια, η παρακολούθηση της στάθμης του νερού στα πηγάδια, και έπειτα η παροχή κατάλληλων μεθόδων διαχείρισης όταν απαιτείται επιπλέον ικανότητα για την κάλυψη των φορτίων ή όταν ο ρυθμός παραγωγής της γεωθερμικής ενέργειας αρχίζει να μειώνεται.

⁶ Ανά kg του χημικού στοιχείου συμπεριλαμβανομένων όλων των ισοτόπων.

1.3.γ Ηφαίστεια, νησιωτικά τόξα και υποθαλάσσιες κορυφογραμμές. Η κίνηση των πλακών

Το μοντέλο της γης με ελαφρά ραδιενεργό φλοιό και λιγότερο ραδιενεργό μανδύα δίνει θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από το μέσο σημείο τήξης στο φλοιό. Πρόκειται λοιπόν για την γη χωρίς λιωμένα πετρώματα κοντά στην επιφάνεια και επομένως χωρίς ηφαίστεια και εκρηξιγενή δραστηριότητα στο φλοιό. Από πρώτη άποψη αυτή είναι καλή προσέγγιση που συμφωνεί άλλωστε με τις μετρούμενες τιμές θερμορροών προς την επιφάνεια. Αντίθετα όμως από τα ενεργά ηφαίστεια που είναι εξαιρετικές περιπτώσεις και εμφανίζονται σε ειδικές τοποθεσίες, υπάρχουν και πολλές άλλες περιοχές που σχετίζονται με ηφαιστειακή δραστηριότητα⁽⁷⁾ ενώ επιφανειακά δίνουν ελάχιστες ή και καθόλου θερμικές εκδηλώσεις. Οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν ροή θερμότητας σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από τις προαναφερθείσες (λ.χ. 200 φορές πάνω από το φυσιολογικό) και ονομάζονται γεωθερμικές περιοχές.

Η πηγή λοιπόν αυτής της συγκεντρωμένης θερμότητας πρέπει να βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της γης και κατά γενική ομολογία πρόκειται για μαγματικές εισχωρήσεις στο στερεό φλοιό της γης σε βάθος 7-15 km με θερμοκρασίες 600-900°C.

Υφίστανται δύο σειρές ηφαιστειών. Αυτά που βρίσκονται γύρω από τα νησιωτικά τόξα και εκείνα πάνω στις υποθαλάσσιες κορυφογραμμές, σημεία δηλαδή όπου υπάρχει έντονη κινητικότητα μεγάλων τμημάτων του γήινου φλοιού των «πλακών» που σύμφωνα με θεωρίες που έχουν διατυπωθεί κινούνται με ταχύτητα 10~100mm/yr, αλλού απομακρυνόμενες κι αλλού συγκρουόμενες η μία με την άλλη. Η κατανοήση των αιτιών της κίνησης αυτής αποτελεί ένα από τα κυριότερα γεωλογικά προβλήματα.

Είναι εύκολο να αντιληφθεί κάποιος γιατί τα ηφαίστεια δεν υπάρχουν παντού.

*Γιατί όμως να εμφανίζονται ειδικά σ' αυτά τα τόσο διαφορετικά είδη των γραμμών;
Γιατί επίσης η λάβα των δύο ειδών ηφαιστειών να είναι διαφορετική;*

Οι απαντήσεις στα ερωτήματα αυτά ξεφεύγουν από τα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Αναφέρεται απλά ότι υφίστανται χάρτες των υποθαλάσσιων κορυφογραμμών και της κίνησης των «πλακών» συσχετισμένοι με τους παρατηρούμενους σεισμούς τόσο παγκοσμίως όσο και στον Ελλαδικό χώρο. Από τους χάρτες αυτούς είναι φανερό ότι κάτι σημαντικό αλλά και πολύπλοκο συμβαίνει στη Μεσόγειο. Η Αφρική κινείται Βόρεια και συγκρούεται με τη Ν. Ευρώπη και τη Μέση Ανατολή. Στο σημείο της σύγκρουσης οι «πλάκες» δείχνουν κατακερματισμένες με αποτέλεσμα την αλλαγή της διεύθυνσης της κίνησης. Είναι πλέον γνωστό ότι η κύρια Αφρικανική «πλάκα» κινούμενη Βόρεια βυθίζεται κάτω από το νησιωτικό τόξο της Κρήτης.

Μεγάλη τριβή των «πλακών» γίνεται επίσης και στην περιοχή μεταξύ Δωδεκανήσου και Σαντορίνης, στην οποία οφείλεται η γένεση των ηφαιστειών και σεισμών του Αιγαίου. Γενικά οι περιοχές βύθισης των «πλακών» περιέχουν μεγάλο ποσοστό των γεωθερμικών περιοχών του κόσμου. Εξετάζοντας λοιπόν την εμφάνιση γεωθερμικών φαινομένων, σε κάθε περίπτωση είναι χρήσιμο να υποβληθεί η ερώτηση: «Μήπως βρισκόμαστε σε ένα σημείο που ο φλοιός χωρίζεται και νέο υλικό προστίθεται σε μία "πλάκα" με μορφή βασαλτικής λάβας ή αντίθετα μία "πλάκα" καταστρέφεται και λιώνει ενώ ανδρειακή λάβα κινείται προς της επιφάνεια;» Συνήθως κάποιος βρίσκεται αντιμέτωπος με μία από τις δύο αυτές περιπτώσεις.

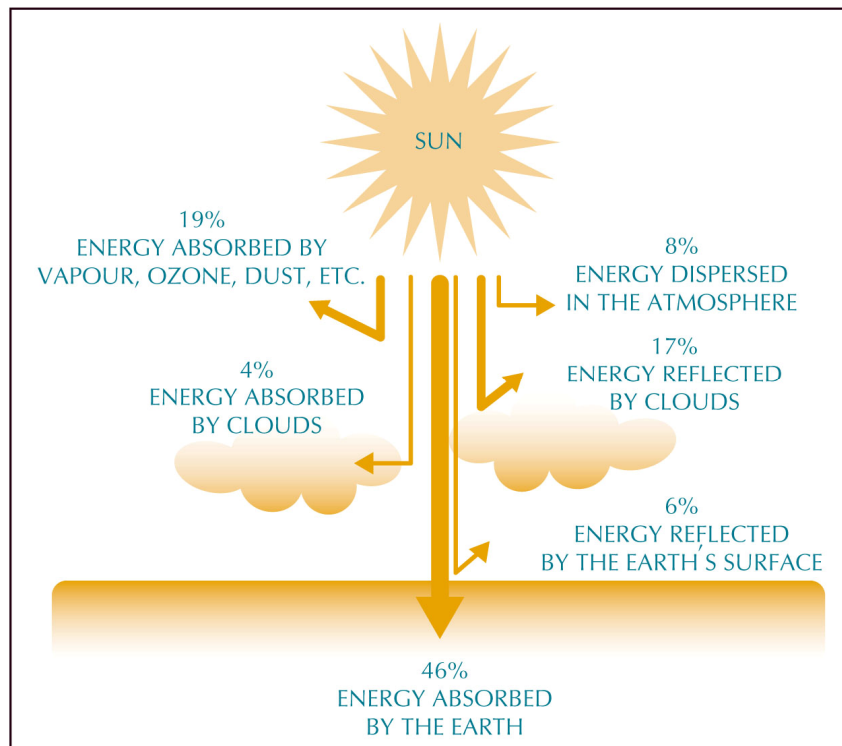
⁷ περισσότερο από 60% των περιπτώσεων.

2. Αβαθής (Κανονική) Γεωθερμία

2.1 Γενικά

Η διατήρηση συνθηκών θερμικής άνεσης σε ένα κτίριο απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας. Συνήθως χρησιμοποιούνται ξεχωριστά συστήματα για θέρμανση και ψύξη ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία χώρου. Η καταναλισκόμενη ενέργεια είναι ηλεκτρική ή προέρχεται από την καύση συμβατικών καυσίμων ή βιομάζας.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η απορροφούμενη από την γη ενέργεια του ήλιου ανέρχεται περίπου στο 46% οι ανάγκες για θέρμανση και ψύξη κτιρίων μπορούν να εφασφαλιστούν χρησιμοποιώντας αυτή την εναλλακτική πηγή ενέργειας.



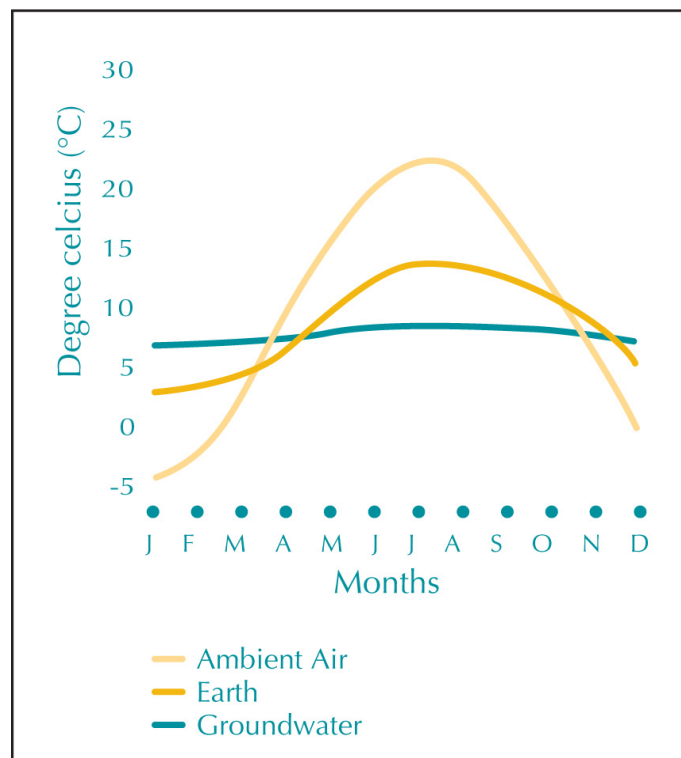
Σχήμα 2.1-1 Απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια από το έδαφος.

Στο υπέδαφος κάθε τόπου, συνεπώς και κάθε κτιρίου, επικρατεί μία μόνιμη και σταθερή θερμική ροή, με κατεύθυνση προς τα άνω, που εκδηλώνεται με τη γεωθερμική βαθμίδα, δηλαδή την αύξηση της θερμοκρασίας ανά μονάδα μήκους με το βάθος στο φλοιό της γης. Η ομαλή (κανονική) γεωθερμική βαθμίδα έχει τιμή περίπου $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$, ενώ στα λεγόμενα ανώμαλα γεωθερμικά πεδία είναι λίγο έως πολύ αυξημένη. Με την βαθμίδα αυτή προκαλείται θερμική ροή με φορά γενικά κατακόρυφη από κάτω προς τα πάνω η οποία αποδίδει στο ανώτερο τμήμα φλοιού της γης ενέργεια περί τα $0,32\text{ kJ}/\text{m}^2$.

Για να είναι δυνατή η αξιοποίηση της γεωθερμικής αυτής ενέργειας με θερμαντλίες θα πρέπει να δημιουργούνται στη πηγή τροφοδοσίας αυτών δηλαδή στα αβαθή υπόγεια νερά και πετρώματα (σε βάθη από 0 έως 150 m) θερμοκρασίες κατάλληλες για την λειτουργία τους. Η κανονική γεωθερμική βαθμίδα δεν είναι ικανή από μόνη της να δημιουργεί το απαραίτητο ενεργειακό υπεδαφικό περιεχόμενο.

Απαιτείται προς τούτο η συμβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα της περιοχής δηλαδή της εξωγενούς ηλιακής θερμοροής για τη διαμόρφωση τέτοιων θερμοκρασιακών συνθηκών στο υπέδαφος ευνοϊκών για την ενεργειακά συμφέρουσα λειτουργία των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.

Λόγω του ότι στο έδαφος η διάχυση της θερμικής ενέργειας είναι μία σχετικά αργή διεργασία αλλά λαμβάνοντας υπόψη ότι διαθέτει μία υψηλή θερμική αποθηκευτική ικανότητα η θερμοκρασία του μεταβάλλεται αργά με την έννοια της παρόδου χρονικού διαστήματος μηνών ή ετών. Ως αποτέλεσμα της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους είναι δυνατή η μετάδοση θερμότητας κατά τη χειμερινή ή θερινή περίοδο όπως εποπτικά φαίνεται στο Σχήμα 2.1-1.



Σχήμα 2.1-2 Τυπική διακύμανση θερμοκρασιών (Καναδάς).

Η θερμότητα που απορροφάται από τη γη κατά τη θερινή περίοδο χρησιμοποιείται τον χειμώνα. Αυτή η συνεχής κυκλική εναλλαγή μεταξύ της θερμοκρασίας αέρα και εδάφους έχει ως αποτέλεσμα σε ένα δυναμικό θερμικής ενέργειας το οποίο μπορεί να υποβοηθήσει στην κάλυψη της απαίτησης θερμικής και ψυκτικής ισχύος ενός κτιρίου.

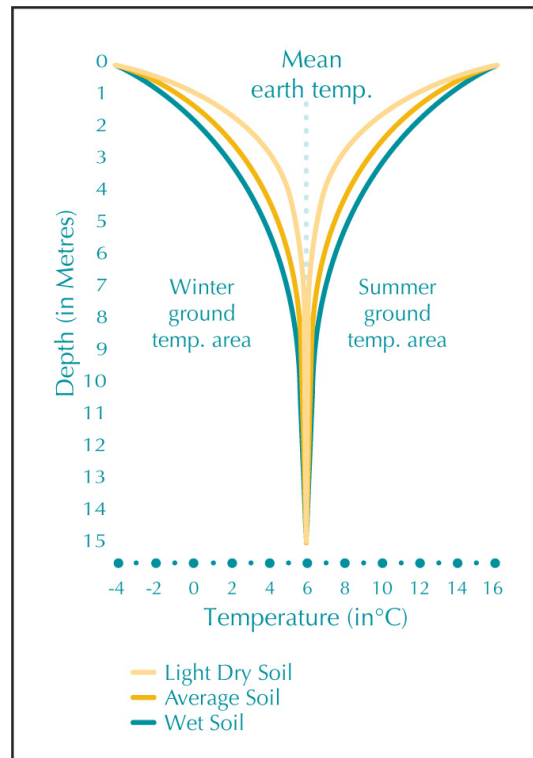
Αυτές οι μεταβολές στη θερμική αντίσταση βρίσκουν εφαρμογή στη μετάδοση του θερμικού ή ψυκτικού φορτίου ανάλογα την εποχή. Η γη είναι θερμότερη από τον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τον χειμώνα και ψυχρότερη από αυτόν το καλοκαίρι.

Για την ακριβέστερη εκτίμηση του θερμικού δυναμικού του υπεδάφους μίας περιοχής είναι σημαντικό να υπάρχει γνώση του θερμοκρασιακού πεδίου όπως αυτό διαμορφώνεται από τις διάφορες θερμοροές που αναπτύσσονται εντός αυτού και που είναι:

α). Η ανοδική γεωθερμική ροή η οποία προκαλείται από την γεωθερμική βαθμίδα. Εφόσον δεν υφίστανται ειδικές γεωλογικές συνθήκες όπως επί παραδείγματι γειτονία με ηφεστιακή δραστηριότητα η τιμή της κανονικής γεωθερμικής βαθμίδας είναι όπως προαναφέρθηκε $3,3K \pm 0,5K/100m$.

β). Πλευρικές θερμοροές μεταφερόμενες με αγωγή και με ρεύματα μεταφοράς με τη βοήθεια υπόγειων νερών (εφόσον είναι παρόντα).

γ). Θερμικές ροές καθοδικές το καλοκαίρι και ανοδικές τον χειμώνα που προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ της εδαφικής επιφάνειας και του υπεδάφους. Ειδικότερα αυτές οι θερμικές ροές έχουν για την χώρα μας ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής αξιοποίησης. Στη διάρκεια της θερινής περιόδου και συγκεκριμένα από τον Μάιο μέχρι και το Σεπτέμβριο παρατηρείται καθοδική θερμική ροή η οποία έχει δημιουργήσει ένα σημαντικό απόθεμα θερμικής ενέργειας στο υπέδαφος ήδη στη διάρκεια των γεωλογικών ετών που ακολούθησαν τη τελευταία παγετώδη περίοδο.



Σχήμα 2.1-3 Τυπική μεταβολή θερμοκρασίας εδάφους αναλόγως υγρασίας και βάθους.

Η εκμετάλλευση του θερμικού ή ψυκτικού φορτίου γίνεται μέσω **Γεωθερμικών Εναλλακτών διασυνδεδεμένων με Αντλίες Θερμότητας**. Η ζεύξη αυτών των δύο αποτελεί την **Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας (ΓΑΘ) - Ground Source Heat Pump (GSHP)**. Με αυτό το σύστημα παρέχεται θέρμανση αντλώντας θερμότητα από το έδαφος και ψύξη απορρίπτοντας θερμότητα στο έδαφος.

Ο κύριος σκοπός της Αντλίας Θερμότητας είναι η συγκέντρωση ή η αναβάθμιση αυτής της δωρεάν ενέργειας από το έδαφος πριν τη διανομή της στο κτίριο μέσω για παράδειγμα αεραγωγών. Ο τρόπος λειτουργίας της είναι γενικά παρόμοιος με αυτόν ενός ψυγείου ή μιας συμβατικής κλιματιστικής συσκευής διαιρούμενου τύπου (split) επομένως είναι απαραίτητη μία εξωτερική πηγή ενέργειας που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι η ηλεκτρική. Τυπικά κάθε καταναλισκόμενο ηλεκτρικό kW για την λειτουργία της Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας (ΓΑΘ) παράγει περισσότερο από 3 kW καθαρής ανανεώσιμης ενέργειας από το έδαφος. Το τυπικό εύρος ψυκτικής ισχύος των ΓΑΘ είναι από 3,5 kW έως 35 kW (περίπου 1 έως 10 ψυκτικούς τόνους). Έτσι μία μονάδα γενικά επαρκεί για μία κατοικία ή ένα μικρό εμπορικό κτίριο. Για μεγαλύτερα κτίρια χρησιμοποιούνται περισσότερες ΓΑΘ κατάλληλα συνδεδεμένες.



Εικόνα 2.1-4 Τυπική Αντλία Θερμότητας.

Οι ΓΑΘ έχουν καλύτερους βαθμούς απόδοσης (COP) σε σχέση με τις αντλίες θερμότητας αέρα οι οποίες συναλλάσσουν θερμότητα με το περιβάλλον εξαιτίας της σταθερής μέσης θερμοκρασίας εδάφους. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ΓΑΘ σε σύγκριση με τις συμβατικές τυπικές διατάξεις κλιματισμού είναι το χαμηλότερο κόστος συντήρησης ενώ επιπρόσθετα καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο.

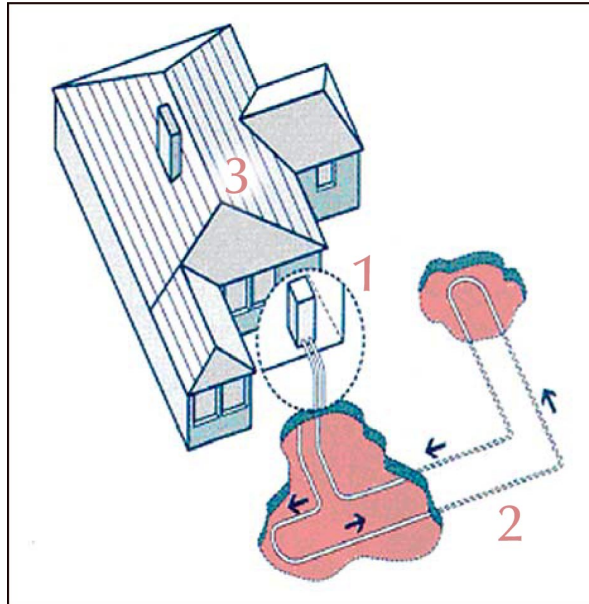
Για τους παραπάνω λόγους πέραν της προκαταρκτικής οικονομοτεχνικής ανάλυσης αποδεικνύεται και στη πράξη ότι οι ΓΑΘ μειώνουν από 30% έως και 70% την κατανάλωση ενέργειας στη θέρμανση και περίπου 20% με 50% στη ψύξη τόσο σε σχέση με τυπικές κλιματιστικές μονάδες όσο και με τις αντλίες θερμότητας αέρα. Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ακόμη μεγαλύτερη σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα καύσης ή άμεσα συστήματα μετατροπής ηλεκτρικής σε θερμική ενέργεια.



Εικόνα 2.1-5 Οριζόντιος Γεωθερμικός Εναλλάκτης.

2.2 Σύντομη Περιγραφή Συστημάτων Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας

Ένα σύστημα Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας απαρτίζεται από τρία βασικά υποσυστήματα: μία αντλία θερμότητας, έναν γεωθερμικό εναλλάκτη και την εσωτερική εγκατάσταση διανομής της ψυκτικής ή θερμικής ισχύος στο κτίριο.

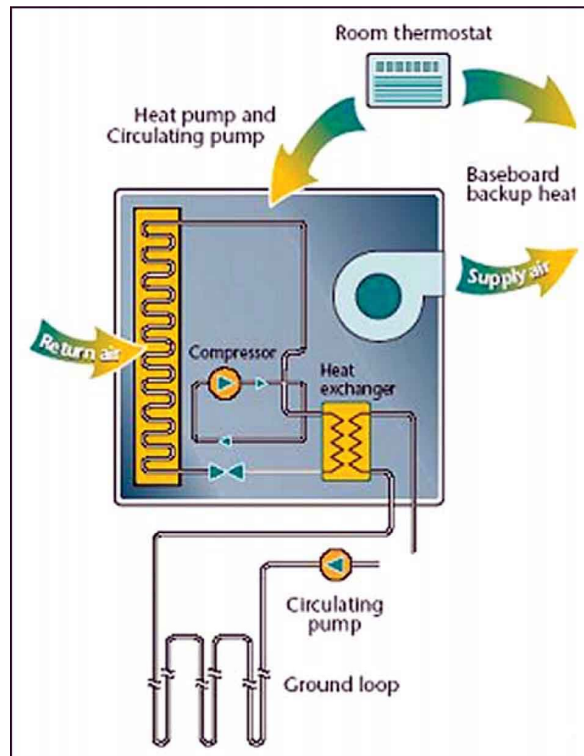


Σχήμα 2.2-1 Σύστημα Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας.
(1: Αντλία Θερμότητας, 2: Γεωθερμικός Εναλλάκτης, 3: Εσωτερική Εγκατάσταση)

Αντλία Θερμότητας με Γεωθερμικό Εναλλάκτη - Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας

Η αντλία θερμότητας συναλλάσσει την θερμική ενέργεια μεταξύ του γεωθερμικού εναλλάκτη και της εσωτερικής εγκατάστασης θέρμανσης/ψύξης του κτιρίου. Είναι το βασικό λειτουργικό στοιχείο ενός συστήματος Γ.Α.Θ. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος αντλίας θερμότητας είναι “νερού-αέρα” με τυπικό εύρος ψυκτικής ισχύος από 3,5 kW έως 35 kW. Ο όρος “νερού-αέρα” έχει την έννοια ότι το ρευστό της διεργασίας μέσα στον γεωθερμικό εναλλάκτη είναι νερό ή μίγμα νερού/αντιπηκτικού και το σύστημα διανομής της θερμικής ενέργειας εντός του κτιρίου χρησιμοποιεί θερμό ή ψυχρό αέρα. Το εύρος λειτουργίας των περισσότερων αντλιών θερμότητας με τη σημερινή τεχνολογία μπορεί να επιτρέψει χαμηλότερες θερμοκρασίες από την ονομαστική σχεδιασμού για την είσοδο του νερού από τον γεωθερμικό εναλλάκτη (περίπτωση θέρμανσης), και υψηλότερες θερμοκρασίες από την ονομαστική σχεδιασμού για την είσοδο του νερού από τον γεωθερμικό εναλλάκτη (περίπτωση ψύξης).

Τα κυριότερα μέρη μίας αντλίας θερμότητας “νερού-αέρα” είναι: συμπιεστής, εναλλάκτης γεωθερμικού νερού-ψυκτικού μέσου, σύστημα αυτοματισμού, σύστημα επεξεργασίας και διανομής αέρα με ανεμιστήρα, εναλλάκτη ψυκτικού μέσου-αέρα, και σύστημα απομάκρυνσης συμπυκνωμάτων του αέρα (Βλ. Σχήμα 2.2-2).



Σχήμα 2.2-2 Τυπική Διάταξη Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας Νερού-Αέρα.

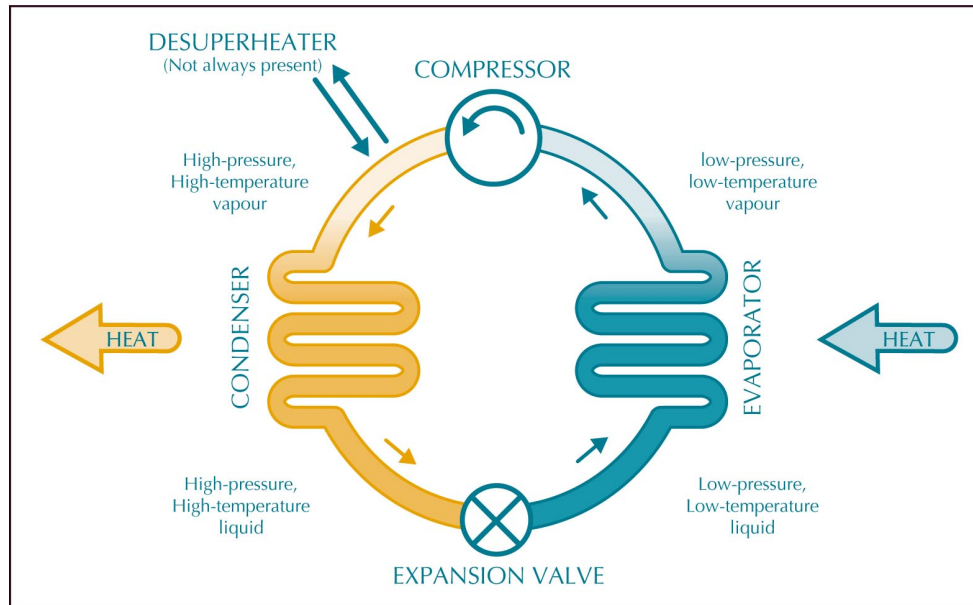
Προκειμένου για τυπικά μεγέθη μονοκατοικιών (μέχρι περίπου 200 m² και αναλόγως θερμομόνωσης) μία αντλία θερμότητας επαρκεί. Για μεγαλύτερα κτίρια (εμπορικά καταστήματα, δημόσια ιδρύματα, ή βιομηχανικές μονάδες) χρησιμοποιούνται πολλές αντλίες θερμότητας διασυνδεδεμένες σε ένα κοινό βρόχο ρευστού διεργασίας.

Η λειτουργία μίας αντλίας θερμότητας είναι αντίστοιχη με αυτή κύκλου ψυκτικού μέσου. Πραγματοποιείται συμπίεση ή εκτόνωση του ψυκτικού μέσου για τη μετάδοση θερμικής ενέργειας μεταξύ του γεωθερμικού εναλλάκτη και της εσωτερικής εγκατάστασης του κτιρίου. Σύμφωνα με τον 2^ο Θερμοδυναμικό Νόμο η θερμότητα ρέει μόνο από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα αλλά η αντλία θερμότητας αντλεί θερμότητα από το έδαφος π.χ στους 5 °C και την χρησιμοποιεί για να θερμάνει το εσωτερικού του κτιρίου στους 21 °C. Ανάλογα την εποχή του χρόνου η θερμοκρασία εδάφους θα είναι τέτοια ώστε η ροή θερμότητας θα είναι προς την επιθυμητή κατεύθυνση έτσι κι αλλιώς. Η αντλία θερμότητας θα λειτουργεί τότε ώστε να εξασφαλιστεί η απαραίτητη ονομαστική θερμοροή. Η απαιτούμενη θερμοροή εξαρτάται από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ αντλίας θερμότητας και γεωθερμικού εναλλάκτη.

Κατά την λειτουργία ψύξης όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του κτιρίου τόσο καλύτερη είναι η θερμοροή προς τον γεωθερμικό εναλλάκτη.

Κατά την λειτουργία θέρμανσης η θερμότητα που αντλείται από τον γεωθερμικό εναλλάκτη οδηγείται στον εναλλάκτη γεωθερμικού νερού-ψυκτικού μέσου της αντλίας θερμότητας. Ο εναλλάκτης αυτός συνήθως ονομάζεται εξατμιστής. Στο δευτερεύον κύκλωμα του εξατμιστή βρίσκεται ψυχρό ψυκτικό μέσο σε υγρή κυρίως φάση. Λόγω του ότι το ψυκτικό μέσο στο δευτερεύον κύκλωμα του εξατμιστή βρίσκεται σε μικρότερη θερμοκρασία από αυτή που έχει το γεωθερμικό νερό, θερμότητα μεταφέρεται προς τη πλευρά του ψυκτικού μέσου με αποτέλεσμα την εξάτμισή του ενώ η θερμοκρασία του δεν αυξάνεται σημαντικά. Το ψυκτικό μέσο τώρα βρίσκεται σε αέρια φάση, χαμηλή πίεση και χαμηλή θερμοκρασία, και εισάγεται σε έναν ηλεκτροκίνητο συμπιεστή στον οποίο αυξάνεται η πίεσή του και ως εκ τούτου και η θερμοκρασία του. (Βλ. Σχήμα 2.2-3).

Το υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης αέριο ψυκτικό μέσο εξέρχεται από τον συμπιεστή και εισάγεται σε έναν δευτερο εναλλάκτη που περιλαμβάνει η αντλία θερμότητας που λειτουργεί ως συμπυκνωτής. Σε αντλίες θερμότητας νερού-αέρα ένας ανεμιστήρας διοχετεύει τον αέρα του περιβάλλοντος διαμέσου του συμπυκνωτή με αποτέλεσμα την θέρμανση του αέρα.

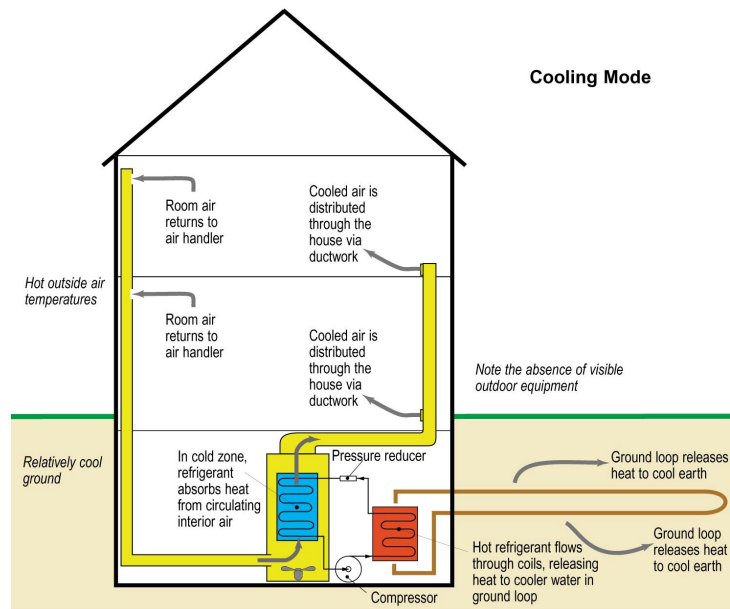


Σχήμα 2.2-3 Απεικόνιση Λειτουργίας Αντλίας Θερμότητας στη περίπτωση θέρμανσης.

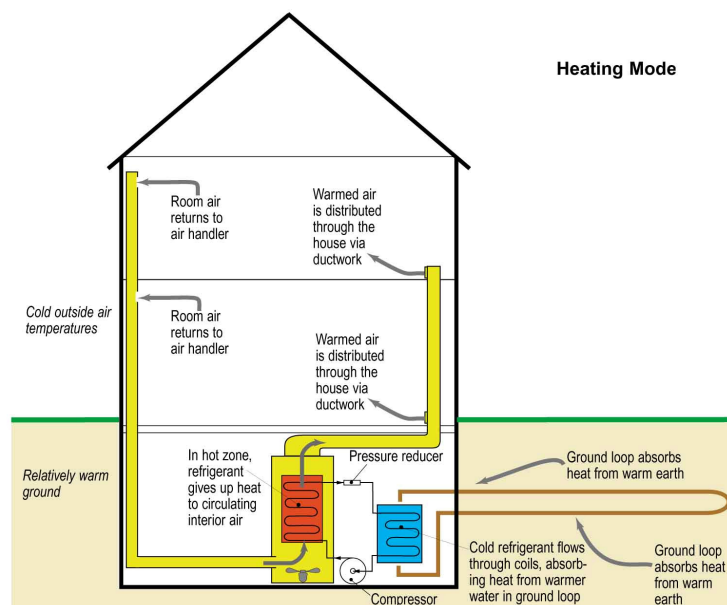
Σε αντλίες θερμότητας τύπου νερού-νερού, που ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται για την εσωτερική εγκατάσταση του κτιρίου fan coils, νερό οδηγείται στο δευτερεύον κύκλωμα του συμπυκνωτή με αποτέλεσμα τη θέρμανσή του. Σε κάθε περίπτωση εφόσον η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου μετά τον συμπιεστή είναι υψηλή θερμότητα μεταφέρεται προς τον αέρα ή το νερό του δευτερεύοντος κυκλώματος του συμπυκνωτή. Καθώς το ψυκτικό μέσο μεταδίδει τη θερμότητά του η θερμοκρασία του υποβιβάζεται και έτσι εν μέρει συμπυκνώνεται. Αυτό το υγρό ψυκτικό μέσο υψηλής θερμοκρασίας διέρχεται από μία βαλβίδα εκτόνωσης στην οποία ως γνωστό πραγματοποιείται υποβιβασμός της πίεσής του (ο στραγγαλισμός θεωρείται άεργος και αδιαβατικός) και έτσι ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του μειώνεται σημαντικά. Στη συνέχεια αυτό το χαμηλής πλέον θερμοκρασίας υγρό ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον εξατμιστή και ο κύκλος αρχίζει ξανά. Με αυτό τον τρόπο η θερμότητα από το νερό (ή το όποιο άλλο ρευστό χρησιμοποιείται στον γεωθερμικό εναλλάκτη) μεταφέρεται στον αέρα ή το νερό ανάλογα το σύστημα εσωτερικής εγκατάστασης του κτιρίου και έτσι αντίστοιχα δίνεται η ονοματολογία αντλία θερμότητας νερού-αέρα ή αντλία θερμότητας νερού-νερού.

Μία ουσιαστική διαφορά ανάμεσα σε μία γεωθερμική αντλία θερμότητας και ένα ψυγείο είναι ότι η γεωθερμική αντλία θερμότητας εκτελεί και την λειτουργία θέρμανσης και την λειτουργία ψύξης με αντιστροφή του κύκλου. Κατά την διάρκεια της ψύξης ο εναλλάκτης γεωθερμικού νερού-ψυκτικού μέσου χρησιμοποιείται ως συμπυκνωτής και ο εναλλάκτης ψυκτικού μέσου-αέρα ως εξατμιστής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μίας βαλβίδας αντιστροφής που περιλαμβάνει η αντλία θερμότητας. Η αντλία θερμότητας μπορεί να περιλαμβάνει και έναν αφυπερθερμαντήρα ο οποίος παρέχει ζεστό νερό χρήσης όταν λειτουργεί ο συμπιεστής. Στη ουσία πρόκειται για έναν μικρό εναλλάκτη θερμότητας που παρεμβάλλεται στην έξοδο του συμπιεστή ο οποίος θερμαίνει νερό προς χρήση μέσω της περίσσειας θερμότητας από το συμπιεσμένο αέριο ψυκτικό μέσο.

Συνήθως χρησιμοποιούνται σπειροειδείς συμπιεστές με λειτουργία ON-OFF και ως ψυκτικά μέσα τα R407C ή R134a με την τάση να αντικατασταθούν από το R410a το οποίο έχει καλύτερες ιδιότητες μετάδοσης θερμότητας και καλύτερη απόδοση σε αναστρέψιμα συστήματα για θέρμανση / ψύξη. Τεχνολογικές καινοτομίες παρουσιάζονται επίσης και σε συμπιεστές μεταβλητής ισχύος με το σημαντικό πλεονέκτημα της περαιτέρω εξοικονόμησης ενέργειας.



Σχήμα 2.2-4 Απεικόνιση τυπικής συνολικής εγκατάστασης Γ.Α.Θ στη περίπτωση ψύξης.



Σχήμα 2.2-5 Απεικόνιση τυπικής συνολικής εγκατάστασης Γ.Α.Θ στη περίπτωση θέρμανσης.

Σε μία γεωθερμική αντλία θερμότητας κλειστού κυκλώματος το νερό ανακυκλοφορεί στον αγωγό ή τους αγωγούς που αποτελούν τον γεωθερμικό εναλλάκτη και στην αντλία θερμότητας.

Σχετικά με τη σύγκριση της απόδοσης των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας χρησιμοποιούνται κυρίως δύο είδη συντελεστών:

1. C.O.P – συντελεστής ενεργειακής απόδοσης που είναι ο λόγος της αποδιδόμενης ενέργειας προς την ηλεκτρική κατανάλωση.
2. S.P.F - εποχιακός συντελεστής απόδοσης που είναι το ολοκλήρωμα του C.O.P κατά τη περίοδο θέρμανσης ή ψύξης.

Ο γεωθερμικός εναλλάκτης συναλλάσσει την θερμική ενέργεια μεταξύ της αντλίας θερμότητας και του εδάφους και είναι ουσιαστικά ένας ή περισσότεροι αγωγοί εντός των οποίων κυκλοφορεί νερό, ή μίγμα νερού/αντιπηκτικού ή κάποιο άλλο ρευστό που ενδείκνυται για την μεταφορά της ενέργειας.

Υπάρχουν διάφορα είδη Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας στα οποία ο γεωθερμικός εναλλάκτης χρησιμοποιεί το έδαφος, τα υπόγεια ή τα επιφανειακά ύδατα. Ένας διαδομένος γεωθερμικός εναλλάκτης που χρησιμοποιεί το έδαφος για την ενεργειακή συναλλαγή αποτελείται από σωληνώσεις θαμμένες σε οριζόντιες τάφρους: **Οριζόντιος Γεωθερμικός Εναλλάκτης** ή σε κατακόρυφες οπές γεώτρησης: **Κάθετος (ή κατακόρυφος) Γεωθερμικός Εναλλάκτης**. Σε περίπτωση αξιοποίησης υπόγειων ή επιφανειακών υδάτων οι σωληνώσεις μπορεί να είναι βυθισμένες σε μία λίμνη ή ακόμη και σε τεχνητές δεξαμενές.



Εικόνα 2.2-6 Οριζόντιος Γεωθερμικός Εναλλάκτης.

Ο γεωθερμικός εναλλάκτης μπορεί να συνδέεται με ένα κλειστό ή ανοικτό κύκλωμα με την αντλία θερμότητας. Στη περίπτωση του κλειστού κυκλώματος το νερό που κυκλοφορεί στις σωληνώσεις – που αποτελούν στην ουσία των γεωθερμικό εναλλάκτη – εισέρχεται στην αντλία θερμότητας και εξερχόμενο από αυτήν επιστρέφει στις σωληνώσεις κ.ο.κ. Στις περιπτώσεις ανοικτών κυκλωμάτων ο γεωθερμικός εναλλάκτης απομαστεύει υπόγειο ή επιφανειακό νερό από μία “πηγή” (υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, λίμνη, ποτάμι, κ.λ.π). Το νερό αυτό οδηγείται στην αντλία θερμότητας η οποία απορροφά τη θερμότητά του ή απορρίπτει θερμότητα σε αυτό και το επιστρέφει πίσω στην υδάτινη “πηγή”. Καθώς η πρόσβαση σε όλους τους γεωθερμικούς εναλλάκτες είναι συνήθως πολύ δύσκολη μετά την εγκατάσταση είναι απαραίτητη ειδική μέριμνα για τη σωστή επιλογή των υλικών αλλά και την ποιότητα κατασκευής.

Για αυτό χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο αγωγοί πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας και συγκολλητές συνδέσεις με σύντηξη (π.χ με θερμοσυγκολλητά περιβλήματα χρησιμοποιώντας θερμότητα από ηλεκτρική ενέργεια, ή με θερμοσυστελλόμενες μούφες κ.α).

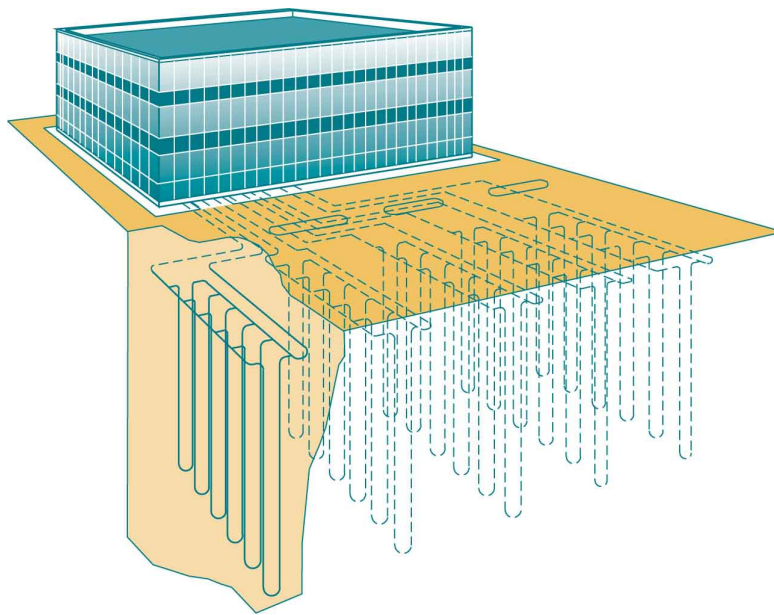
Για τη περίπτωση του Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη χρησιμοποιούνται αυτοκινούμενα (Βλ. Εικ. 2.2-7) ή ρυμουλκούμενα γεωτρήματα καθώς απαιτούνται τυπικά βάθη γεώτρησης περί τα 150 m.



Εικόνα 2.2-7 Τυπικό αυτοκινούμενο γεωτρήματα.

Οι Κάθετοι Γεωθερμικοί Εναλλάκτες χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις κτιρίων με περιορισμένη εξωτερική κοινόχρηστη επιφάνεια και γενικά παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση από τους οριζόντιους λόγω του ότι η θερμοκρασία εδάφους στα βάθη της γεώτρησης δεν υπόκεινται εύκολα σε εποχιακές διακυμάνσεις γεγονός που συχνά συμβαίνει στις εγκαταστάσεις Οριζόντιων Γεωθερμικών Εναλλακτών λόγω του μικρού βάθους τοποθέτησής τους. Μειονέκτημα των Κάθετων Γεωθερμικών Εναλλακτών είναι συνήθως το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης σε σύγκριση με τους Οριζόντιους.

Τυπικά βάθη γεώτρησης για τη τοποθέτηση Κάθετων Γεωθερμικών Εναλλακτών είναι από 45 μέχρι 150 m. Ο Κάθετος Γεωθερμικός Εναλλάκτης – όπως προαναφέρθηκε – είναι ουσιαστικά ένας αγωγός κυκλικής διατομής σε σχήμα U στο πυθμένα της οπής γεώτρησης ή ένας βρόχος από περισσότερους αγωγούς κατάλληλα διατεταγμένους ώστε να αυξάνεται η επιφάνεια συναλλαγής θερμικής ενέργειας. Μετά την τοποθέτηση του κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη στην οπή ή στις οπές γεώτρησης οι αγωγοί εγκιβωτίζονται με πλήρωση της οπής γεώτρησης με κατάλληλο υλικό π.χ δευτερογενές σκυρόδεμα. Το υλικό πλήρωσης αποτρέπει την είσοδο νερού στην οπή γεώτρησης ενώ στις περιπτώσεις εκμετάλλευσης υπόγειων υδάτων το υλικό πλήρωσης στεγανοποιεί πιθανή διαρροή νερού από την μία οπή γεώτρησης προς την άλλη. Η πλήρωση της οπής γεώτρησης γίνεται με τρόπο ώστε τα άκρα του αγωγού να είναι ελεύθερα (αναμονές) σε οριζόντια θέση επάνω στην επιφάνεια προκειμένου να συνδεθούν εύκολα με την αντλία θερμότητας (Βλ. Σχήμα 2.2.-9).



Σχήμα 2.2-8 Κάθετος Γεωθερμικός Εναλλάκτης.

Τυπικά χαρακτηριστικά:

Εγκατάσταση πλαστικών σωληνώσεων σε κατακόρυφη διάταξη εντός οπής γεώτρησης

Υλικό σωλήνωσης: πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (PE-HD)

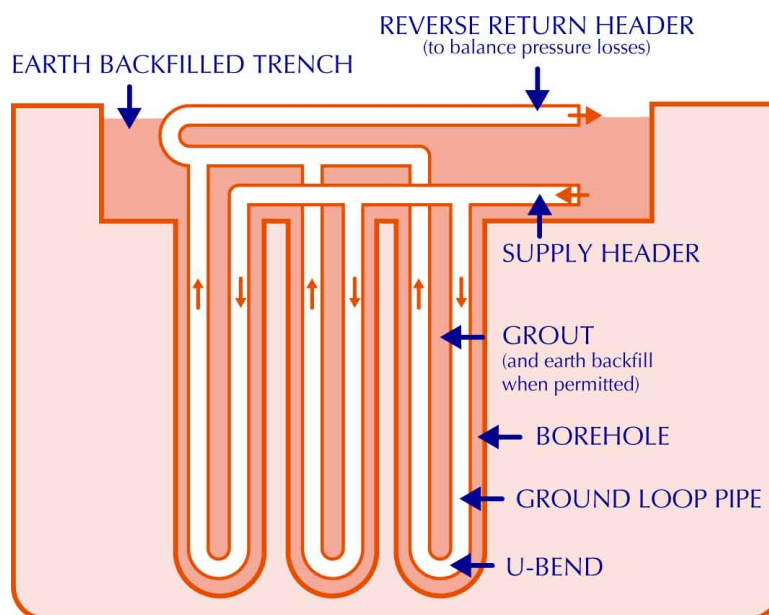
Διάμετρος σωλήνωσης: 25mm, 32mm ή 40mm

Γεώτρηση:

Βάθος γεώτρησης: έως 100-120m

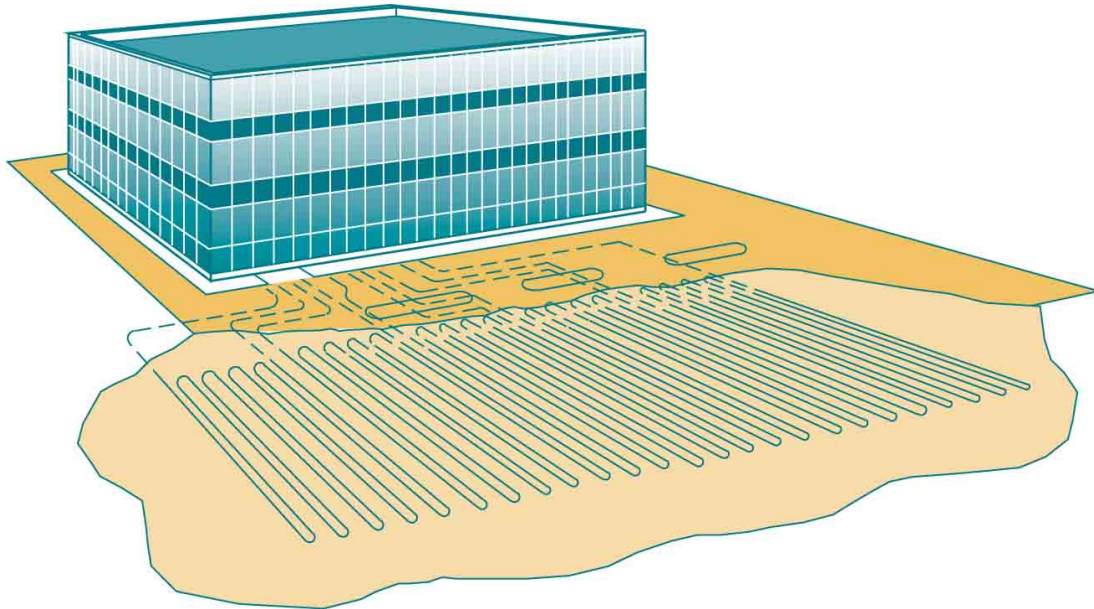
Διάμετρος γεώτρησης: 100-180mm

Υλικό πλήρωσης οπής γεώτρησης: μίγμα μπετονίτη, τσιμέντου και άμμου



Σχήμα 2.2-9 Τρόπος Εγκατάστασης Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη 3^{ωv} Βρόχων.

Ο Οριζόντιος Γεωθερμικός Εναλλάκτης είναι ευκολότερος αλλά και φθηνότερος στην εγκατάσταση από τον Κάθετο Γεωθερμικό Εναλλάκτη λόγω εκσκαφής σε μικρά βάθη αλλά απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη επιφάνεια εγκατάστασης πέριξ του κτιρίου λόγω ανάγκης μεγαλύτερου μήκους αγωγών. Εφόσον επιπρόσθετα το είδος εδάφους επιτρέπει εύκολη εκσκαφή χωρίς ειδικά μηχανήματα, τότε ο Οριζόντιος Γεωθερμικός Εναλλάκτης αποτελεί μία ενδεδειγμένη λύση ιδίως για μικρότερου μεγέθους κτίρια.



Σχήμα 2.2-10 Οριζόντιος Γεωθερμικός Εναλλάκτης.

Ένας Οριζόντιος Γεωθερμικός Εναλλάκτης αποτελείται από μία σειρά σωληνώσεων τοποθετημένες σε τάφρους συνήθως σε βάθος 1 έως 2 m. Στις τυπικές εγκαταστάσεις του είδους απαιτούνται περίπου από 35 έως 55 m αγωγού για κάθε εγκατεστημένο kW.

Τυπικά χαρακτηριστικά:

Εγκατάσταση πλαστικών σωληνώσεων σε οριζόντια διάταξη

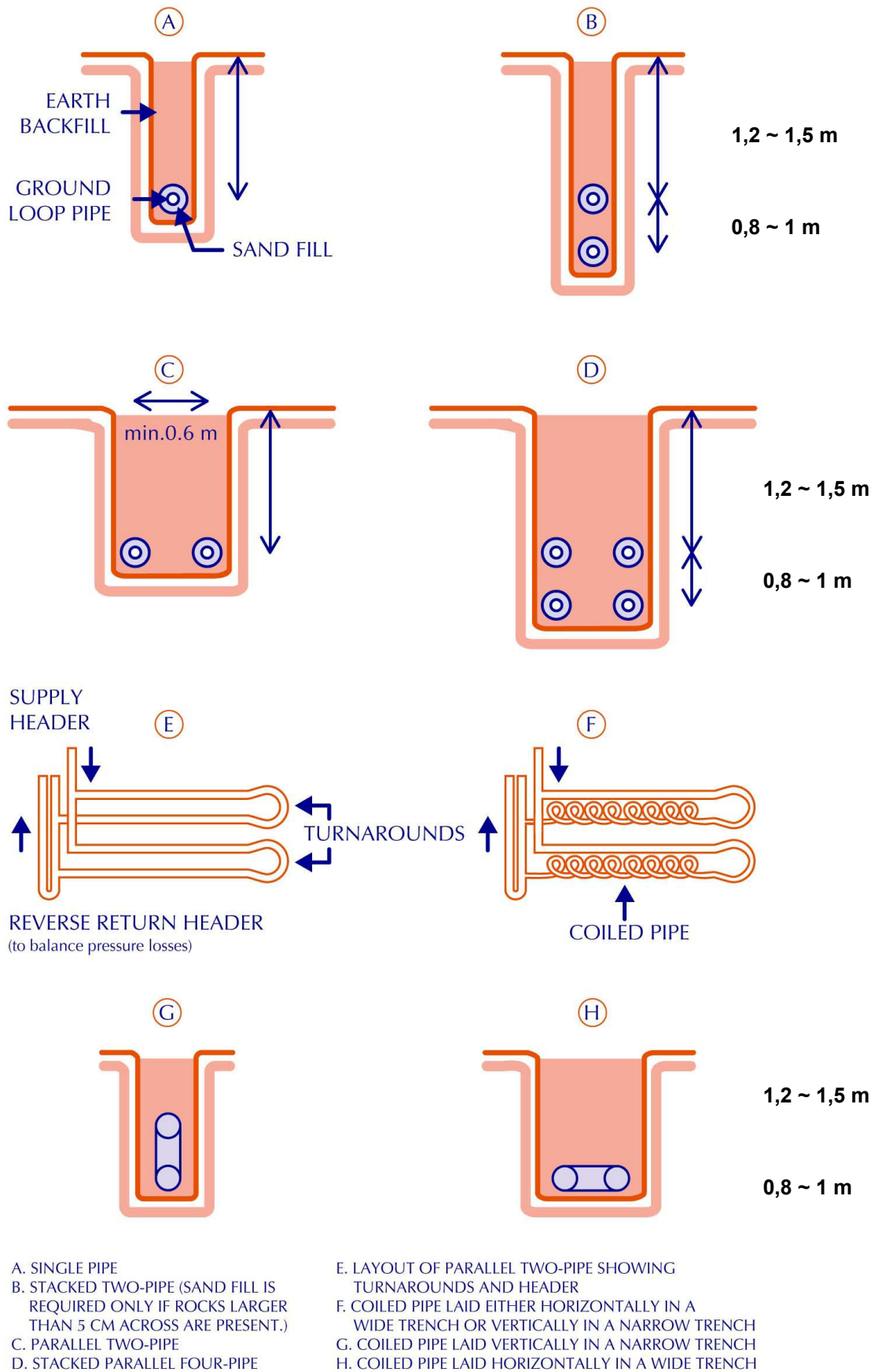
Βάθος: 1,2-2m

Υλικό σωληνώσεων: πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (PE-HD)

Διάμετρος σωλήνωσης: 25mm ή 32mm

Κάλυψη σωληνώσεων με άμμο και φερτά υλικά

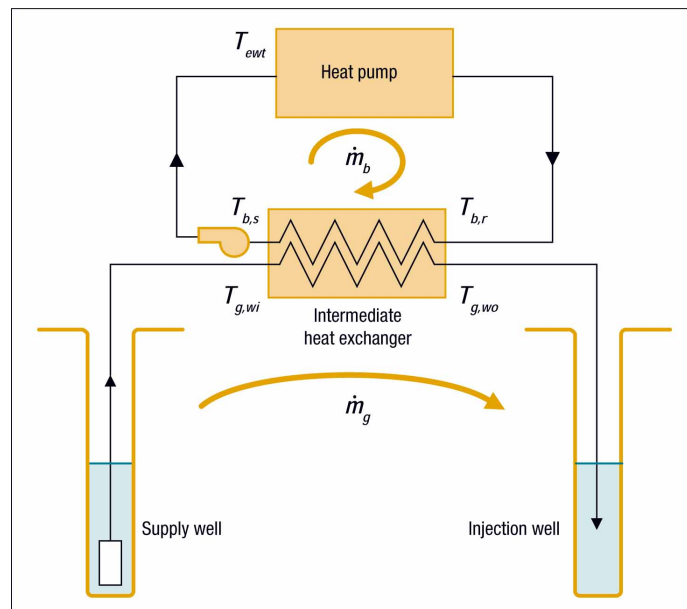
Διάφορες παραλλαγές χρησιμοποιούνται αναφορικά με τη διάταξη των σωληνώσεων με τις κυριότερες να φαίνονται στο Σχήμα 2.2-11. Ιδιαιτερότητα παρουσιάζει η διάταξη περιέλιξης του αγωγού σε μορφή σπειροειδούς - χρήσιμη σε περιπτώσεις περιορισμένου χώρου - αλλά με μειονέκτημα μεγαλύτερης θερμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωληνώσεων και αύξησης του αρχικού κόστους.



Σχήμα 2.2-11 Κυριότεροι τρόποι εγκατάστασης Οριζόντιων Γεωθερμικών Εναλλακτών.

Αντλία Θερμότητας με Υδρογεωτρήσεις

Σε αντίθεση με τις Γ.Α.Θ οι αντλίες θερμότητας που συνδέονται σε υδρογεωτρήσεις είναι συστήματα ανοικτού κυκλώματος καθώς χρησιμοποιούν μία συνεχή τροφοδοσία υπόγειου ύδατος ως το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Το νερό αντλείται από την υπόγεια δεξαμενή (υδροφορέας) προς την αντλία θερμότητας και επιστρέφει από αυτήν μέσω δύο φρεατίων που έχουν διανοιχτεί με την γεώτρηση. Με την άντλησή του το νερό οδηγείται στον εναλλάκτη (αντλούμενου) νερού-ψυκτικού μέσου ή σε έναν ενδιάμεσο εναλλάκτη θερμότητας. Ο ενδιάμεσος εναλλάκτης θερμότητας μεταφέρει τη θερμότητα από το ανοικτό κύκλωμα νερού από την υπόγεια δεξαμενή σε ένα κλειστό κύκλωμα διανομής (εσωτερική εγκατάσταση) του κτιρίου. Με αυτόν τον τρόπο ο κύριος εναλλάκτης νερού-ψυκτικού μέσου που φέρει η αντλία θερμότητας δεν τροφοδοτείται άμεσα με το αντλούμενο νερό από την υδρογεώτρηση και έτσι προστατεύεται από τις επικαθήσεις, την διάβρωση και την απόξυσή του λόγω πιθανής ύπαρξης ακαθαρσιών στο υπόγειο νερό του υδροφορέα. Με την επιστροφή του νερού από το εσωτερικό κλειστό κύκλωμα του κτιρίου οδηγείται και πάλι στον ίδιο υπόγειο ταμιευτήρα μέσω ενός δεύτερου φρεατίου που συνήθως ονομάζεται φρεάτιο έγχυσης.

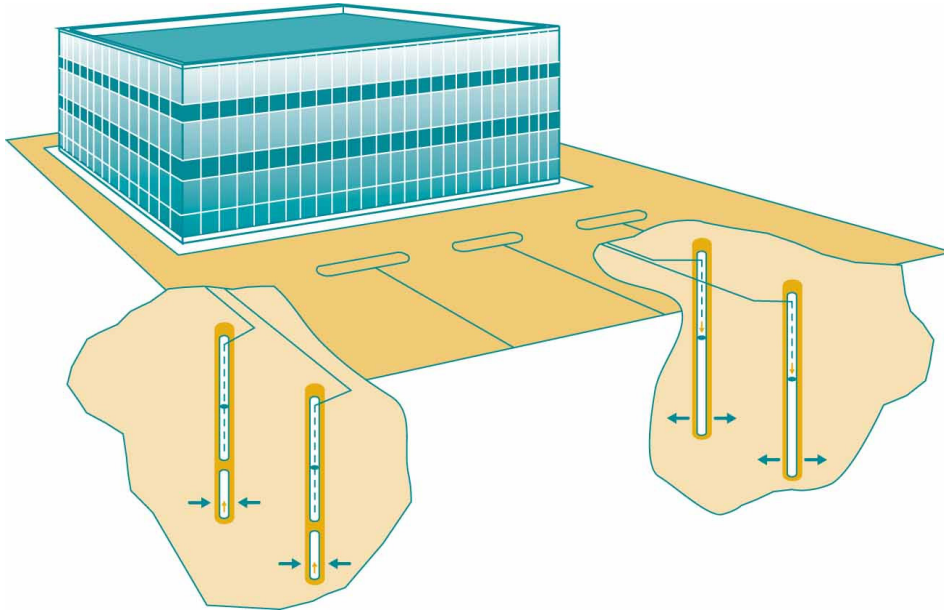


Σχήμα 2.2-12 Αντλία Θερμότητας με Υδρογεωτρήσεις.

Τα συστήματα αντλιών θερμότητας με υδρογεωτρήσεις ήταν και ο πρώτος τύπος γεωθερμικών αντλιών θερμότητας που εμφανίστηκαν στην αγορά με επιτυχία εδώ και δεκαετίες. Το πλεονέκτημά τους είναι ο εύκολος τρόπος εγκατάστασης παρόλο που περιβαλλοντικοί λόγοι περιορίζουν την χρήση τους εξαιτίας της αυτονόητης ζωτικής σημασίας του νερού.

Αντλία Θερμότητας με Στάσιμες Στήλες Νερού

Μία νεότερη παραλλαγή του παραπάνω συστήματος είναι η Αντλία Θερμότητας με Στάσιμες Στήλες Νερού. Οι στάσιμες στήλες νερού είναι τυπικά υδατοφρεάτια διαμέτρου 6" και βάθους μέχρι συνήθως τα 450 m. Το νερό αντλείται από το κάτω μέρος του φρεατίου και οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας. Από εκεί επιστρέφει στην κορυφή του ίδιου φρεατίου. Ένας γενικός κανόνας για τη σωστή λειτουργία του συστήματος αυτού είναι η ύπαρξη άφθονου υπόγειου νερού και μάλιστα όχι σε μεγάλα βάθη καθώς η ενεργειακή δαπάνη για την άντληση μπορεί να περιορίσει δραστικά τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης.



Σχήμα 2.2-13 Αντλία Θερμότητας με Στάσιμες Στήλες Νερού.

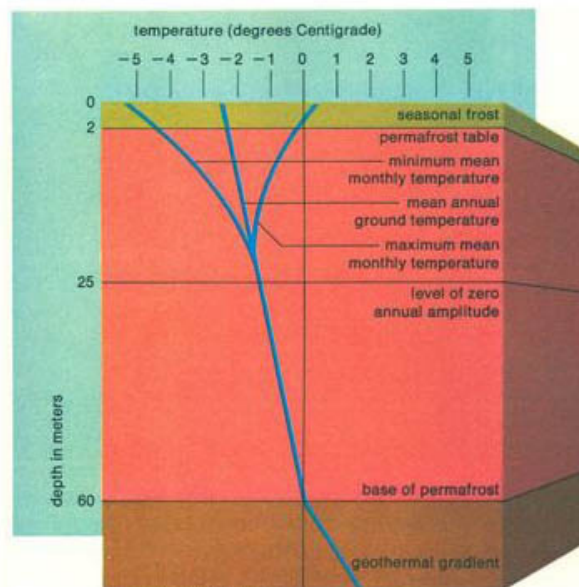
Αντλία Θερμότητας με χρήση Επιφανειακών Υδάτων

Αυτό το σύστημα είναι αρκετά διαδεδομένο και σχετικά χαμηλού κόστους. Αποτελείται από σειρές σωλήνων σπειροειδούς μορφής οι οποίοι βυθίζονται σε μία λίμνη ή και σε μικρότερη επιφανειακή λεκάνη νερού και χρησιμοποιούνται ως εναλλάκτης θερμότητας. Αυτό το σύστημα έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί εκσκαφή αλλά ο επιφανειακός ταμιευτήρας νερού πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλος. Το μέσο της διεργασίας (διάλυμα νερού-αντιπηκτικού, ψυκτικό μέσο κ.α) ανακυκλοφορεί μέσα στις σωληνώσεις (εναλλάκτης) και στην αντλία θερμότητας.

Αντλία Θερμότητας τύπου Ground Frost σε εδάφη με Permafrost

Στην γεωλογία, «permafrost» ή «έδαφος permafrost» είναι το έδαφος που βρίσκεται στο σημείο τήξης του ύδατος ή κάτω από αυτό ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ή $32\text{ }^{\circ}\text{F}$) για δύο ή περισσότερα έτη. Ο πάγος δεν είναι πάντα παρών, όπως ενδεχομένως στη περίπτωση μη πορώδους στρώματος βράχου, αλλά συνήθως εμφανίζεται και μπορεί να είναι και σε ποσότητες που υπερβαίνουν τον δυνητικό υδραυλικό κορεσμό του εδαφικού υλικού. Κυρίως το permafrost συναντάται σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη (δηλ. εδάφη πλησίον του βόρειου ή νότιου πόλου), αλλά «αλπικό permafrost» μπορεί να υπάρξει σε μεγάλα υψόμετρα και σε πολύ χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη.

Η έκταση του permafrost μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις αλλαγές κλίματος. Σήμερα, μια σημαντική περιοχή της Αρκτικής καλύπτεται από permafrost (συμπεριλαμβανομένου του «ασυνεχούς permafrost»). Πάνω από τη ζώνη του permafrost βρίσκεται συνήθως ένα λεπτό ενεργό στρώμα που εποχιακά λιώνει κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η ζωή της χλωρίδας μπορεί να υποστηριχθεί μόνο μέσα στο ενεργό στρώμα δεδομένου ότι η ανάπτυξη των φυτών μπορεί να συμβεί μόνο σε χώμα που δεν είναι πλήρως παγωμένο σε κάποια εποχή του έτους. Το πάχος του ενεργού στρώματος ποικίλλει από έτος σε έτος αλλά και εξαρτάται από τη περιοχή. Τυπικό πάχος είναι από 0,6 έως 4 m. Στις περιοχές συνεχούς permafrost και με "βαρείς" χειμώνες το πάχος του permafrost μπορεί να είναι ακόμη και 1493 m στη περιοχή της βορείου Λένα και στις λεκάνες των ποταμών Yana στη Σιβηρία.



Σχήμα 2.2-14 Τυπικό παράδειγμα επίδρασης του permafrost στη γεωθερμική βαθμίδα.

Το Permafrost μπορεί να διαμορφωθεί σε οποιοδήποτε κλίμα όπου η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του ύδατος. Εξαιρέσεις αποτελούν οι υγρές δασώδεις περιοχές κατά τη διάρκεια του χειμώνα όπως στη βόρεια Σκανδιναβία και τη βορειοανατολική Ρωσία δυτικά από τα Ουράλια, όπου το χιόνι ενεργεί ως μονωτικό κάλυμμα. Στα κατώτερα στρώματα των παγετώνων έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις χωρίς permafrost, αν και αυτό δεν είναι συχνό φαινόμενο. Τυπικά, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του εδάφους θα είναι λιγότερο μεταβλητή από εποχή σε εποχή σε σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα, με θερμοκρασίες που αυξάνονται με το βάθος όπως έχει προαναφερθεί. Κατά συνέπεια, εάν η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα είναι λίγο κάτω από τους 0 °C, το permafrost θα σχηματιστεί μόνο στα σημεία που προστατεύονται συνήθως από ένα βορειότερο μέτωπο. Αυτό είναι γνωστό ως *ασυνεχές permafrost*. Συνήθως, το permafrost θα παραμείνει ασυνεχές σε ένα κλίμα όπου η μέση ετήσια θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους θα κυμαίνεται μεταξύ -5 και 0 °C. Σε υγρές περιοχές κατά τη διάρκεια του χειμώνα όπως προαναφέρθηκε παραπάνω είναι πιθανόν να μην σχηματιστεί ασυνεχές permafrost κάτω από τους -2 °C. Στη Γεωλογία η σποραδική ζώνη ασυνεχούς permafrost ονομάζεται εν συντομία: SPZ και η εκτενής ασυνεχής ζώνη permafrost: DPZ. Η ζώνη συνεχούς permafrost ονομάζεται εν συντομία: CPZ.

Υπάρχουν εξαιρέσεις στα μη παγωμένα τμήματα της Σιβηρίας και Αλάσκας όπου το βάθος του permafrost είναι ότι έχει απομείνει από τις κλιματολογικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των Παγετώνων όπου οι χειμώνες ήταν μέχρι και 11 °C ψυχρότεροι από αυτούς επικρατούν στις μέρες μας.

Σε μέσες ετήσιες θερμοκρασίες επιφάνειας εδάφους μικρότερες από $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ η επίδραση ενός βορειότερου μετώπου δεν είναι ποτέ επαρκής ώστε να λιώσει το permafrost και σχηματίζεται μια ζώνη *συνεχούς permafrost* (CPZ).

Υπάρχουν επίσης «μόνιμες» ψυχρές ανωμαλίες στη γεωθερμική κλίση σε περιοχές όπου το permafrost αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια των Πλειστόκαινων και παραμένει ακόμα μέχρι το βάθος πολλών εκατοντάδων μέτρων. Η επονομαζόμενη Suwalki ψυχρή «ανωμαλία» στη Πολωνία οδήγησε στο συμπέρασμα ότι παρόμοιες τέτοιες θερμικές διαταραχές που καταγράφονται σε οπές γεώτρησης στη Πολωνία έχουν τις ρίζες τους σε κλιματικές μεταβολές κατά τη διάρκεια των Πλειστόκαινων – Ολόκαινων περιόδων.

Όσον αφορά τις Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας η χρησιμότητα του permafrost έγκειται στη περίπτωση ψύξης κτιρίων. Μέσω της θεμελίωσης του κτιρίου μεταφέρεται θερμότητα που επιδρά στο permafrost με σοβαρή πιθανότητα υποβάθμισης της στατικής κατάστασης του κτιρίου.

Με την άντληση της θερμότητας από το έδαφος γύρω από το κτίριο μία Αντλία Θερμότητας τύπου Ground Frost μπορεί να εξασφαλίσει ότι το permafrost θα διατηρείται παγωμένο. Επιπλέον, η αντλούμενη θερμότητα μπορεί να παρέχει από 20 έως 50% των απαιτήσεων θέρμανσης του χώρου και οι δαπάνες των «παραδοσιακών» μέτρων για τη διατήρηση στατικής κατάστασης του κτιρίου σε θεμελιώσεις σε permafrost μπορεί να εξαλειφθούν.

Το τμήμα της αντλίας θερμότητας permafrost που συνδέεται στο έδαφος εγκαθίσταται στο εδαφικό χωμάτινο μίγμα με το οποίο γίνεται η πλήρωση για τη θεμελίωση. Η αντλία θερμότητας διατηρεί τον χωμάτινο αυτό όγκο παγωμένο παρέχοντας παράλληλα συμπληρωματικά ποσά θερμότητας στο κτήριο. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας ανακυκλοφορεί σε κλειστό βρόχο και είναι συνήθως ένα μίγμα νερού –γλυκόλης.

Η χρήση τέτοιας αντλίας θερμότητας απαιτεί τη διερεύνηση πρόσθετων παρατηρήσεων. Το κέρδος θερμότητας στο έδαφος από την θεμελίωση του κτιρίου πρέπει ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό της σύνδεσης της αντλίας θερμότητας κάτω από τα θεμέλια. Η θερμότητα πρέπει να αντλείται στο ίδιο ποσοστό με το κέρδος θερμότητας από τα θεμέλια προκειμένου να διατηρείται σταθερή θερμοκρασία εδάφους. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση ελάχιστη θερμοκρασία εδάφους, είναι πιθανό να αποδειχτεί ότι συμβατικές αντλίες θερμότητας τέτοιου είδους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τέλος, η μακροπρόθεσμη λειτουργία εξαρτάται από την αναθέρμανση του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Τοπικές οικολογικές διαταραχές μπορούν να εμφανιστούν εάν το έδαφος διατηρείται παγωμένο πέρα από το φυσικό κύκλο του. Επειδή οι συνέπειες της αστοχίας του γεωεναλλάκτη μίας τέτοιας αντλίας θερμότητας είναι σοβαρότατες (καθώς έχουν άμεση επίδραση στη θεμελίωση) τα υλικά κατασκευής του πρέπει να είναι αυστηρώς προδιαγραφών αλλά και να ληφθεί κάθε μέριμνα για τη καλύτερη δυνατή εγκατάσταση.

Β' ΜΕΡΟΣ -

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ (Κ.Γ.Ε)

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ "VG- HEX"

- 1. Εισαγωγική περιγραφή διπλωματικής διατριβής**
- 2. Αναφορά σε υπάρχοντα αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης θερμικής συμπεριφοράς Κ.Γ.Ε**
- 3. Θεωρητική Τεκμηρίωση**
- 4. Ανάπτυξη Δομής Λογισμικού VG-HEX**
- 5. Κατάστρωση και Ανάλυση του Λογισμικού VG-HEX**
- 6. Αποτελέσματα Λογισμικού VG-HEX**
- 7. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων**

1. Εισαγωγική περιγραφή διπλωματικής διατριβής

Αντικείμενο της Διπλωματικής Διατριβής είναι η δημιουργία υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη τύπου U-tube (Vertical Ground Heat Exchanger type U-tube).

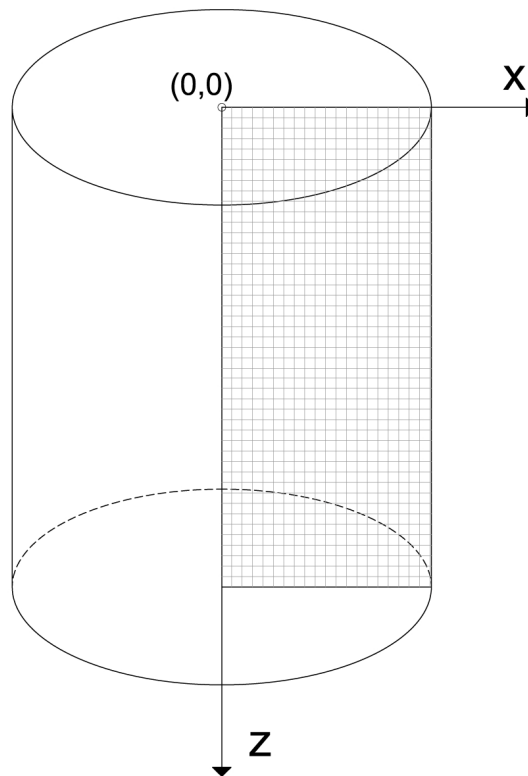
Παραδοχές - Θεωρήσεις

Με την έννοια ενεργειακή συμπεριφορά Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη δεν αναφερόμαστε στην αναπτυσσόμενη θερμοροή πέριξ του σωλήνα ή του πλέγματος σωληνώσεων αλλά στον ευρύτερο γήινο, πέριξ του εναλλάκτη χώρο. Οι παραδοχές που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι:

1). Οι σωλήνες λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύνολο στο οποίο δημιουργείται θερμική συναλλαγή λόγω της ύπαρξης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ ρευστού και στερεού με αποτέλεσμα να δημιουργείται για κάθε στιγμή μια μέση τιμή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ενός στερεού κυλίνδρου, ο οποίος στο υπολογιστικό πλέγμα αποτελεί μια κατανεμημένη πηγή. Έτσι, δεν γίνεται ανάλυση για την εσωτερική μετάδοση θερμότητας μεταξύ των σωληνώσεων ούτε επιλύεται η συσχέτιση και η επί της ουσίας κατανομή των σωληνώσεων εντός αυτού του κατανεμημένου κόμβου. Με τον τρόπο αυτό δεν επιλύεται η όποια διαφορά είναι δυνατό να προκύψει από την χρήση εναλλάκτη μονού ή διπλού U (U-TUBE).

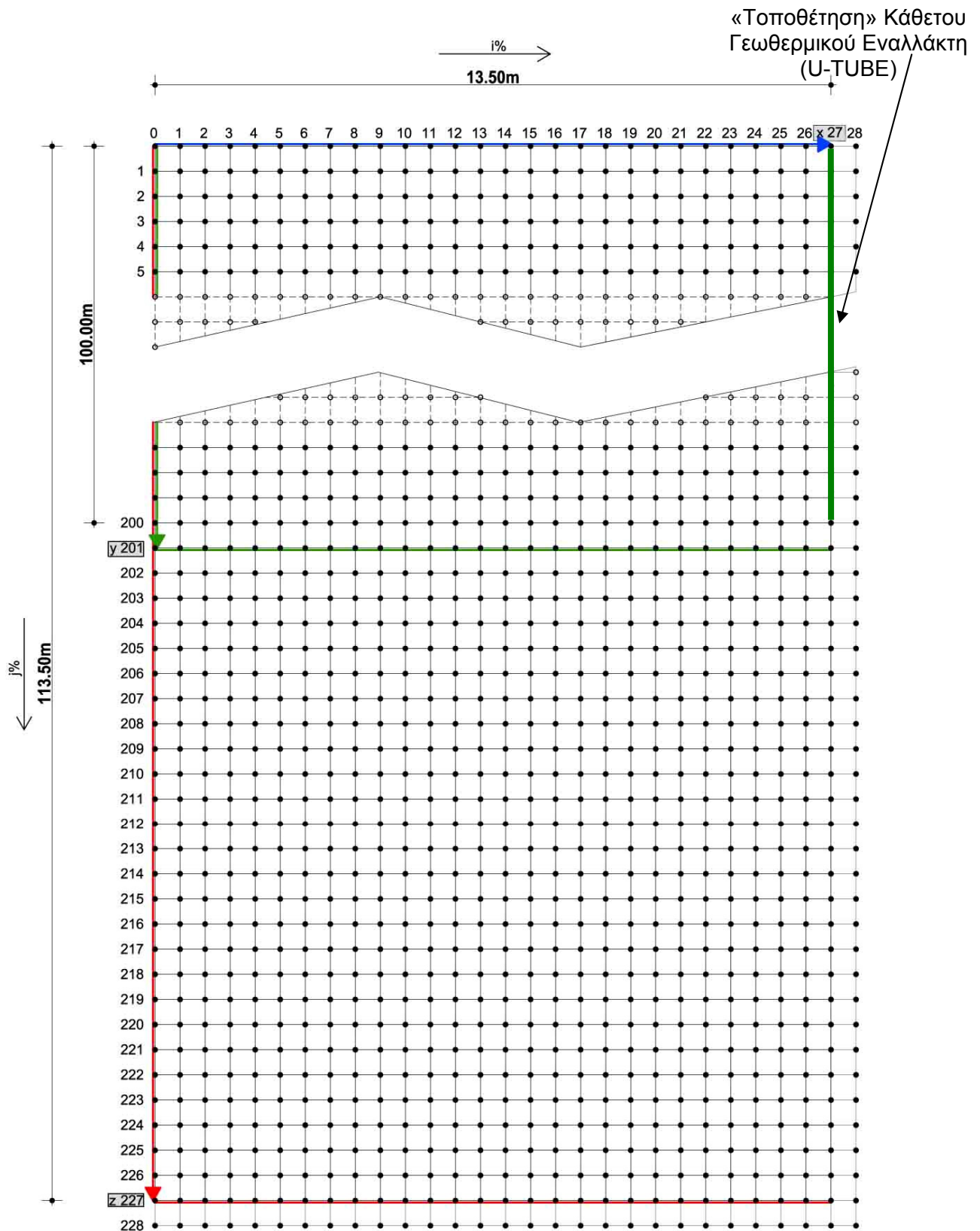
2). Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ εδάφους και κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη είναι θεωρητικά ένα τρισδιάστατο (σε κυλινδρικές συντεταγμένες r , θ , z) μη μόνιμο πρόβλημα αγωγής και συναγωγής. Λόγω της ευρύτητας του πεδίου και του μεγάλου όγκου, (για παράδειγμα διάμετρος ελέγχου τιμών 13,5m και μήκος (βάθος) εναλλάκτη 100m) και για λόγους ευκολίας υπολογισμών, λαμβάνοντας υπόψη την κυλινδρική συμμετρία του φαινομένου, γίνεται η παραδοχή ότι δεν υπάρχουν θερμοκρασιακές κλίσεις κατά την γωνιακή διεύθυνση (θ) και το πρόβλημα μπορεί να αναχθεί σε διδιάστατο. (Βλ. Σχ. 1-1).

Η επίλυση της θερμοροής γίνεται επί κατακόρυφου επιπέδου διδιάστατη με τον καθορισμό οριακών συνθηκών μεταβλητής θερμοκρασίας στην μια κατακόρυφο, όπου μέσω υπορουτίνας υπολογίζεται η τελική κατανομή της θερμοκρασίας από την θερμική διαταραχή λόγω της εισόδου και εξόδου ρευστού, άνω οριακή συνθήκη σταθερής ή μεταβλητής θερμοκρασίας η οποία ορίζεται από την τιμή των θερμοκρασιών περιβάλλοντος, δεύτερο κατακόρυφο όριο από σταθερά κατανεμημένη θερμοκρασία λόγω της ύπαρξης κανονικής γεωθερμικής βαθμίδας, σταθερή θερμοκρασία στον πυθμένα λόγω σταθερής (μηδενικής) επίδρασης από τη διαταραχή. Η προσέγγιση της παρουσίασης του φαινομένου ως διδιάστατο σε επίπεδο, και όχι ως τρισδιάστατο σε κυλινδρικές συντεταγμένες, δεν παρουσιάζει σημαντικά υπολογιστικά σφάλματα, ενώ αντίθετα παρουσιάζει μεγάλη βελτίωση στην ταχύτητα υπολογισμών. Από την σύγκριση με πειραματικές τιμές η απόκλιση είναι εντός του σφάλματος μετρήσεων και πολύ μικρότερη από τα πιθανά σφάλματα που μπορεί να παρουσιαστούν λόγω της ασαφούς γνώσης των ιδιοτήτων των υπεδαφικών υλικών. Έτσι, ενώ η πηγή είναι σημειακής κατανομής, επί της πραγματικότητας θεωρείται επίπεδη πηγή κατανεμημένη στην πλευρά ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου και τίθενται απόλυτα ομοιόμορφες οι προς την αντίθετη πλευρά κατανεμημένες θερμοκρασίες. Με τον τρόπο αυτό θεωρείται ότι το φαινόμενο εξελίσσεται επί ενός κατακόρυφου επιπέδου "μηδενικού" πάχους (στη πραγματικότητα μοναδιαίου πάχους) το οποίο τέμνει παράλληλα με τον άξονά του κατακόρυφο κύλινδρο. Μετά την ανωτέρω ανάλυση η αριθμητική επίλυση για την μη-μόνιμη μεταφορά θερμότητας στο έδαφος μπορεί να γίνει σε καρτεσιανό σύστημα μέσω της Διακριτοποιημένης Εξίσωσης Διδιάστατης Μεταβατικής Αγωγής Θερμότητας.



Σχήμα 1-1: Επίπεδο Εκτέλεσης Υπολογισμών.

Για αυτό το σκοπό καταστρώνεται υπολογιστικό πλέγμα κατά τη κατεύθυνση x και z παράδειγμα των διαστάσεων του οποίου δίδεται κατωτέρω:



Σχήμα 1-2 Παρουσίαση Υπολογιστικού Πλέγματος.

4). Το έδαφος ανεξαρτήτως σύστασης θεωρείται ομοιογενές με σταθερή κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα σε όλο το υπολογιστικό πλέγμα.

$RCE = \text{Κατ' όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους} = \text{Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους σε } J/m^3\text{ }^\circ C$

$$RCE = C(i, j) = \rho(i, j) \cdot Cp(i, j) = \text{const } (J/m^3\text{ }^\circ C) \text{ για όλο το πλέγμα}$$

Όπου:

$\rho(i, j) = \text{πυκνότητα εδάφους (kg/m}^3\text{)}$

$Cp(i, j) = \text{ειδική θερμοχωρητικότητα εδάφους (J/kg }^\circ C\text{)}$

5). Η Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους ($W/m^\circ C$) λαμβάνεται μεταξύ των κόμβων ως συνάρτηση μόνο της κατακόρυφης διεύθυνσης (άξονας z) όπως περιγράφεται στην ανάλυση του προγράμματος και ειδικότερα στην υπορουτίνα: AssignCoefMatrisses.

6). Θεωρείται εξαναγκασμένη συναγωγή στο εσωτερικό του Κ.Γ.Ε και ως εκ τούτου -για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται- χρησιμοποιήθηκαν τυπικές τιμές συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας νερού (W/m^2K).

7). Για τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται λήφθηκαν τυπικές αρχικές τιμές θερμοκρασιών εδάφους σε βάθος ίσο με το επιλεγμένο DY (π.χ 0,5 m, 0,2m κ.ο.κ) για τον μήνα Νοέμβριο (περίπτωση θέρμανσης) και για τον μήνα Ιούλιο (περίπτωση ψύξης).

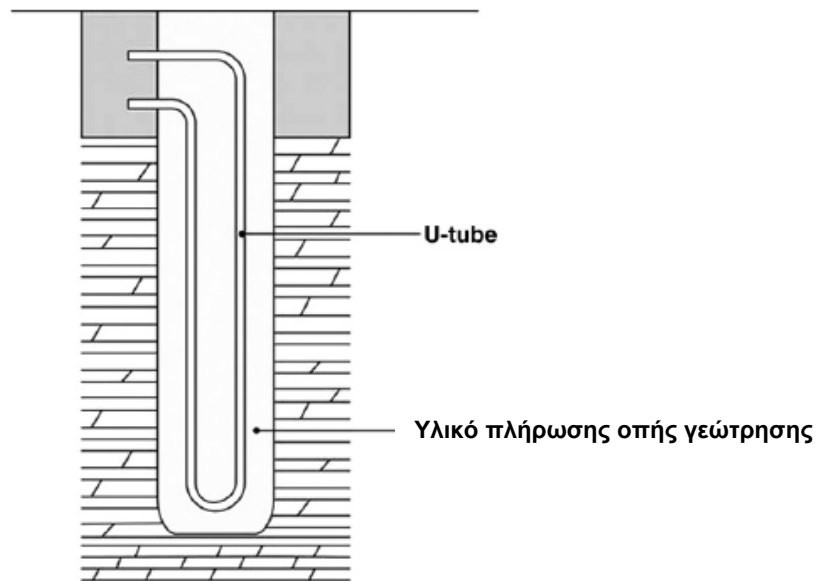
8). Στη περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει να εργαστεί με περισσότερους από έναν Κάθετο Γεωθερμικό Εναλλάκτη στην οπή γεώτρησης (παράμετρος NS) τότε από το λογισμικό γίνεται η παραδοχή ότι οι Κ.Γ.Ε δεν επιδρούν θερμικά μεταξύ τους (βλ. και παραδοχή 1)).

9). Το εδαφικό υλικό πλήρωσης της οπής γεώτρησης μετά τη τοποθέτηση του Κ.Γ.Ε θεωρείται ιδίων χαρακτηριστικών με το υπόλοιπο έδαφος πέριξ της οπής γεώτρησης σε όλη τη περιοχή έκτασης του υπολογιστικού πλέγματος.

10). Η ανακυκλοφορία του ρευστού της διεργασίας (π.χ μίγμα νερού/γλυκόλης) μέσα στον Κ.Γ.Ε θεωρείται συνεχής για όλο το χρονικό διάστημα που εξετάζεται.

11). Οι θερμικές ιδιότητες όλων των υλικών (εδάφους, σωλήνων Κ.Γ.Ε κλπ) παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια εξέτασης του φαινομένου.

Ο υπολογιστικός κώδικας που αναπτύχθηκε φέρει το όνομα VG-HEX από το: Vertical Ground Heat Exchanger και περιλαμβάνει πλήρες αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς σε ψύξη και θέρμανση κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη τύπου U (U-TUBE). Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται είναι η Microsoft Visual Basic 6.0 ενώ το περιβάλλον εργασίας είναι γνωστό και απλουστευμένο καθώς η επικοινωνία με τον χρήστη πραγματοποιείται στο προσκήνιο μέσω του λογισμικού Microsoft Excel (έκδοση Office 2003 ή νεότερη).



Σχήμα 1-3 Τομή Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη (Κ.Γ.Ε) U-TUBE.

Για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών εδάφους λαμβάνεται υπόψη μεταβατική διδιάστατη αγωγή θερμότητας στο έδαφος. Η διακριτοποιημένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για την διδιάστατη μη-μόνιμη αγωγή θερμότητας (χωρίς πηγές θερμότητας) είναι:

$$A_p \cdot T_p = A_E \cdot [f \cdot T_E + (1-f) \cdot T_E^0] + A_W \cdot [f \cdot T_W + (1-f) \cdot T_W^0] + A_N \cdot [f \cdot T_N + (1-f) \cdot T_N^0] + A_S \cdot [f \cdot T_S + (1-f) \cdot T_S^0] + [A_p^0 - (1-f) \cdot (A_E + A_W + A_N + A_S)] \cdot T_p^0$$

Για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών νερού προσαγωγής και επιστροφής στον Κάθετο Γεωθερμικό Εναλλάκτη χρησιμοποιείται μονοδιάστατη ανάλυση θερμικής συναλλαγής σε μόνιμες συνθήκες όπως αναλυτικά εξηγείται στις αντίστοιχες υπορουτίνες.

Ο χρήστης του λογισμικού VG-HEX εισάγει μία σειρά παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ψυκτικού μέσου του διεργασίας, αλλά και των υλικών κατασκευής όσο και με την τακτοποίηση των οριακών συνθηκών. Στη επιφάνεια του εδάφους όπως και στα πλευρικά όρια του υπολογιστικού πλέγματος επικρατούν συνοριακές συνθήκες Dirichlet.

Κύριοι στόχοι αποτελούν η εύρεση της θερμοκρασίας απολαβής του ψυκτικού μέσου (τυπικά νερό) που ανακυκλοφορεί στον Κάθετο Γεωθερμικό Εναλλάκτη (ΚΓΕ) τόσο κατά τη ψύξη όσο και κατά τη θέρμανση αλλά και η εύρεση των θερμοκρασιών εδάφους μετά την απορρόφηση (περίπτωση θέρμανσης) ή απόρριψη (περίπτωση ψύξης) θερμότητας στο έδαφος από τον Κ.Γ.Ε. εντός επιλέξιμου χρονικού διαστήματος. Η ανακυκλοφορία του ψυκτικού μέσου στον Κ.Γ.Ε θεωρείται συνεχής. Επομένως θεωρείται συνεχής άντληση θερμότητας από το έδαφος ή συνεχής απόρριψη θερμότητας στο έδαφος. Εν συνεχεία μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η αποδιδόμενη ισχύς θέρμανσης, η απορριπτόμενη ισχύς ψύξεως βάσει των οποίων μπορούν να αναπτυχθούν σενάρια οικονομικής αξιολόγησης από ενεργειακής άποψης.

2. Αναφορά σε υπάρχοντα αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης θερμικής συμπεριφοράς Κ.Γ.Ε

2.1. Θεωρητικές Βάσεις

Το ζήτημα της θερμικής συναλλαγής σε Κ.Γ.Ε αντιμετωπίζεται κυρίως στη βιβλιογραφία με βάση τις κυλινδρικές συντεταγμένες. Με τη παραδοχή της αμελητέας εξάρτησης της θερμοκρασίας από την γωνιακή συνιστώσα η κατανομή της θερμοκρασίας $T(r,z,t)$ δίνεται:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}$$

$$r > r_b$$

$$t > 0$$

$$0 \leq z < \infty$$

και οριακές συνθήκες:

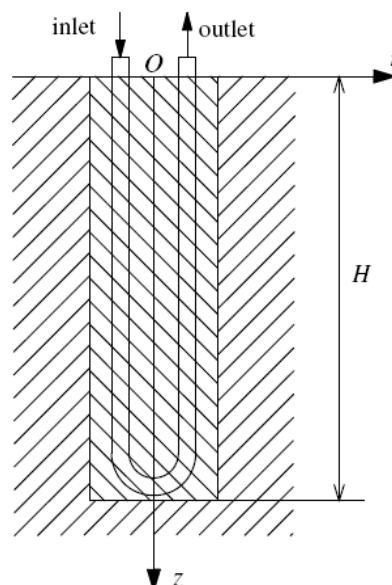
$$T(r, z, 0) = T_o$$

$$T(r, 0, t) = T_o$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_b, 0 \leq z \leq H} = \frac{q'_b(t)}{2\pi r_b}$$

Όπου:

r_b η ακτίνα της οπής γεώτρησης, T_o η αρχική θερμοκρασία εδάφους, $q'_b(t)$ η θερμική ισχύς ανά μέτρο μήκους, που συναλλάσσεται μεταξύ του ορίου της οπής γεώτρησης και του εδάφους, και H το βάθος της γεώτρησης. Η αξονική εξάρτηση της θερμοκρασίας συχνά αμελείται και η λύση αποδίδει το θερμοκρασιακό πεδίο $T(r,t)$ στο οποίο κύριος στόχος υπολογισμού είναι η θερμοκρασία στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης $T_b(t)$ μέσω της οποίας προκύπτουν οι θερμοκρασίες του υγρού που κυκλοφορεί στον Κ.Γ.Ε.



Σχήμα 2.1-1 Τομή Κ.Γ.Ε

Στη βιβλιογραφία τα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης βασίζονται ή εξελίσσουν περαιτέρω την αριθμητική λύση του μοντέλου DST (Duct Storage) που προτάθηκε από τον Hellström και ενσωματώθηκε στο λογισμικό TRNSYS ενώ όσον αφορά τις αναλυτικές λύσεις χρησιμοποιούνται δύο κύριες θεωρίες οι οποίες περιγράφουν τη θερμική συναλλαγή του Κ.Γ.Ε με το έδαφος μέσω της συσχέτισης της θερμοκρασίας στην περιφέρεια της οπής γεώτρησης και του εδάφους έξω από αυτήν: Η θεωρία της Κυλινδρικής Πηγής, και η Θεωρία της Άπειρης Γραμμικής Πηγής.

Θεωρία Κυλινδρικής Πηγής (Carslaw and Jaeger 1947, Kavanaugh 1991)

Η θεωρία βασίζεται στην εξέταση περιοχής εδάφους που θεωρείται ότι περικλείεται από έναν κύλινδρο σταθερής ακτίνας. Για αρχική θερμοκρασία μηδέν επιβάλλεται κατά την ακτινική κατεύθυνση του κυλίνδρου μία σταθερή στην μονάδα χρόνου και στην μονάδα επιφανείας θερμοροή.

Η αναλυτική λύση αυτή δίνει την κατανομή της θερμοκρασίας ακτινικά υπό την μορφή βηματικής συνάρτησης: $q'_b(t) = q'_o \cdot u(t)$ γνωστής ως συνάρτηση-g ως:

$$T(\tilde{r}, \tilde{t}) - T_o = \frac{q'_o}{k} \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-z^2 \tilde{t}} - 1}{z^2 (J_1^2(z) + Y_1^2(z))} [J_o(\tilde{r}z)Y_1(z) - J_1Y_o(\tilde{r}z)] dz$$

Όπου:

$$\tilde{r} = \frac{r}{rb} \text{ η αδιάστατη ακτίνα}$$

$$\tilde{t} = \frac{\alpha t}{r_b^2} = Fo \text{ (αριθμός Fourier)}$$

J = Συνάρτηση Bessel πρώτου είδους

Y = Συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους

z = κατακόρυφη αξονική κατεύθυνση

q'_o = θερμική ισχύς της πηγής ανά μονάδα μήκους (W/m)

k = θερμική αγωγιμότητα (W/mK)

$T(\tilde{r}, \tilde{t})$ = η θερμοκρασία εδάφους σε οποιαδήποτε απόσταση από τη πηγή

T_o = η αρχική θερμοκρασία εδάφους

Στη παραπάνω σχέση ο όρος:

$$G(\tilde{r}, \tilde{t}) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-z^2 \tilde{t}} - 1}{z^2 (J_1^2(z) + Y_1^2(z))} [J_o(\tilde{r}z)Y_1(z) - J_1Y_o(\tilde{r}z)] dz$$

Είναι η επονομαζόμενη "συνάρτηση-g".

Θεωρία Άπειρης Γραμμικής Πηγής (Kelvin 1882, Ingersoll 1954)

Η θεωρία γραμμικής πηγής είναι μία «απλοποιημένη» παραδοχή της Κυλινδρικής θεωρίας αφού ληφθεί: $r = 0$.

Η θεωρία αυτή προσεγγίζει την σπή γεώτρησης με τον Κ.Γ.Ε στο εσωτερικό της ως μία άπειρη γραμμική πηγή με ακτινική ροή θερμότητας.

$$T(r, t) - T_o = \frac{q_o'}{4\pi k} \int_{\tilde{r}^2/4\tilde{t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q_o'}{4\pi k} E_1\left(\frac{\tilde{r}}{4\tilde{t}}\right) = \frac{q_o'}{k} \frac{1}{4\pi} E_1\left(\frac{\tilde{r}}{4\tilde{t}}\right)$$

Όπου:

E_1 = το εκθετικό ολοκλήρωμα

u = η μεταβλητή ολοκλήρωσης: $u = \frac{r}{2\sqrt{a(t-t')}}$

r = ακτινική απόσταση από τη πηγή θερμότητας

t = χρόνος από την αρχή εξέτασης του φαινομένου

Στη παραπάνω σχέση ο όρος:

$$G_2(\tilde{r}, \tilde{t}) = \frac{1}{4\pi} E_1\left(\frac{\tilde{r}}{4\tilde{t}}\right)$$

είναι επίσης η "συνάρτηση-g" που τώρα συμβολίζεται με G_2 .

Για: $\frac{\tilde{r}}{4\tilde{t}} < 0,2$ το εκθετικό ολοκλήρωμα E_1 μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$E_1\left(\frac{\tilde{r}}{4\tilde{t}}\right) = 2,303 \log \frac{1}{\frac{\tilde{r}}{4\tilde{t}}} + \frac{\left(\frac{\tilde{r}}{4\tilde{t}}\right)^2}{2} - \frac{\left(\frac{\tilde{r}}{4\tilde{t}}\right)^4}{8} - 0,2886$$

Ενώ για άλλες τιμές του όρου $\frac{\tilde{r}}{4\tilde{t}}$ το εκθετικό ολοκλήρωμα χρησιμοποιείται είτε ο πίνακας του Ingersoll (1954) ή άλλες προσεγγίσεις επίλυσης όπως για παράδειγμα των Hart and Couvillion.

Η συμπεριφορά του συστήματος σε μικρά χρονικά διαστήματα (short-time steps) δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί απευθείας καθώς η προσέγγιση με την γραμμική πηγή είναι ακριβής για μία πραγματική γραμμική πηγή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυλινδρικές πηγές με αποδεκτό σφάλμα μόνο έπειτα από μερικές ώρες λειτουργίας του συστήματος. Σύμφωνα με την εργασία του Ingersoll (1954) το κριτήριο για τον όρο του σφάλματος είναι η αδιάστατη

παράμετρος: $\frac{at}{r^2}$ όπου a η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα εδάφους (m^2/s). Για: $\frac{at}{r^2} > 20$ με

τυπικά εδάφη ο μικρότερος απαιτούμενος χρόνος που προκύπτει για διατήρηση του σφάλματος περίπου στο 2% είναι 12 ώρες.

2.2. Σημαντικότερα Αναλυτικά και Αριθμητικά Μοντέλα

Τα τελευταία χρόνια, τα συστήματα Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (Γ.Α.Θ) έχουν τύχει ευρύτατης αναγνώρισης καθώς αποτελούν αποδοτικά ανανεώσιμα ενεργειακά συστήματα τόσο για τη θέρμανση όσο και για την ψύξη κτηρίων. Ένα σύστημα Γ.Α.Θ. αποτελείται μια συμβατική αντλία θερμότητας που συνδέεται με έναν γεωθερμικό εναλλάκτη. Το κύριο πλεονέκτημα χρησιμοποιώντας το έδαφος ως πηγή ή καταβόθρα θερμικής ενέργειας είναι ότι αυτό στο εδαφικό περιβάλλον επικρατεί μια σχετικά σταθερή μέση θερμοκρασία σε σύγκριση με τον αέρα του περιβάλλοντος. Αυτό οδηγεί σε μια συνολική βελτίωση της θερμικής απόδοσης του συστήματος και επομένως μειώνει τις λειτουργικές δαπάνες. Η αντλία θερμότητας που εγκαθίσταται στα κτήρια είναι συνήθως μια μονάδα νερού-αέρα όπου το νερό (ή το μίγμα νερού-αντιψυκτικού) συναλλάσσει θερμότητα με το έδαφος. Στα τυπικά είδη εγκατάστασης ο γεωθερμικός εναλλάκτης αποτελείται από βρόχους σωληνώσεων που τοποθετούνται οριζόντια ή κάθετα μέσα στο έδαφος. Οι οριζόντιοι γεωθερμικοί εναλλάκτες είναι συνήθως οικονομικότερες λύσεις αλλά απαιτούν μεγαλύτερη επιφάνεια εδάφους που αρκετές φορές δεν είναι διαθέσιμη. Έτσι, σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται Κάθετος Γεωθερμικός Εναλλάκτης που συνήθως είναι αποδοτικότερος από τον οριζόντιο λόγω της μικρότερης εποχιακής διακύμανσης στις μέσες θερμοκρασίες εδάφους κατά βάθος. Ανάλογα με το μέγεθος των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του εδάφους, μπορούν να γίνουν περισσότερες από μια γεωτρήσεις σε διάφορες γεωμετρικές θέσεις κατόπιν διερεύνησης.

Η διερεύνηση της μεταφοράς θερμότητας γύρω από κάθετους γεωθερμικούς εναλλάκτες είναι ένα κοινό πρόβλημα για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (GCHP). Τα περισσότερα μοντέλα προσομοίωσης βασίζονται στην απόκριση της βηματικής χρονικής επιβολής ποσοτήτων θερμότητας (step response) και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η αρχή της υπέρθεσης για την τελική επίλυση. Η τελική λύση είναι στην μορφή συνέλιξης αυτών των συνεισφορών θερμικής ισχύος. Στη βιβλιογραφία προτείνονται αριθμητικές λύσεις με τη χρήση αλγεβρικών μητρώων καθώς και αρκετές αναλυτικές λύσεις βάσει κυρίως κυλινδρικών συντεταγμένων αλλά και αξονοσυμμετρικά προβλήματα.

Ένας σημαντικός ερευνητικός τομέας είναι η μοντελοποίηση η οποία επιτρέπει προσομοιώσεις αυτών των συστημάτων. Η προσομοίωση και παραμετροποίηση είναι ένα σημαντικό σχεδιαστικό εργαλείο καθώς επίσης και για την έρευνα της απόδοσης του συστήματος σε μακροπρόθεσμη βάση. Οι διάφορες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση του γεωθερμικού εναλλάκτη μπορούν να χωριστούν σε δύο σημαντικές κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μοντέλα που αφορούν σύντομες χρονικά προσομοιώσεις σε διαστήματα μικρότερα μίας ώρας. Το μοντέλο DST (Duct Storage) που προτείνεται από τον Hellström και χρησιμοποιήθηκε στον υπολογιστικό κώδικα TRNSYS είναι ένα από τα πιο γνωστά πρότυπα σε αυτήν την κατηγορία.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό των εναλλακτών θερμότητας και συνήθως περιλαμβάνουν απλοποιήσεις και παραδοχές ώστε να καταστούν υπολογιστικά ορθά για την εκτίμηση της απόδοσης σε μακροχρόνια βάση (συνήθως μέχρι 20 έτη). Μερικά πρότυπα έχουν αναπτυχθεί για να ικανοποιήσουν και τις δύο παραπάνω κατηγορίες.

Τα πρότυπα αυτά συνήθως είναι βασισμένα είτε σε αναλυτικές λύσεις όπως η θεωρία γραμμικής πηγής θερμότητας που προτείνονται από Ingersoll και Plass [1] ή την θεωρία πηγής θερμότητας σε κυλινδρικές συντεταγμένες που παρουσιάστηκε πρώτα από τους Carslaw και Jaeger [2] και επίσης από τον Ingersoll [3] και που μελετήθηκε περαιτέρω αργότερα από τους Deerman και Kavanaugh [4].

Επίσης έχει παρουσιαστεί πληθώρα αριθμητικών λύσεων όπως αυτήν που προτείνεται από τον Eskilson [5] και Hellstrom [6].

Στη περίπτωση μοντέλων προσομοίωσης που εξετάζουν τη συμπεριφορά των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας σε μακρόχρονη βάση δύο φαινόμενα καθίσταται σημαντικά: η αξονική ροή θερμότητας που η επίδραση θεωρείται πολύ μικρή για την ανάλυση σε σύντομα ή μέσα χρονικά διαστήματα, και η θερμική επίδραση μεταξύ των οπών γεώτρησης σε περιπτώσεις όπου περισσότερες από μία οπές γεώτρησης διανοίγονται στο πεδίο. Η εργασία του Eskilson (Thermal analysis of heat extraction boreholes, Doctoral Thesis, University of Lund, Department of Mathematical Physics, Lund, Sweden, 1987) είναι μια από τις σημαντικότερες αναφορές για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων. Ο Eskilson παρουσιάζει μια μέθοδο βασισμένη στις αδιάστατες θερμικές αποκρίσεις που καλούνται συναρτήσεις-g. Αυτές οι συναρτήσεις υπολογίζονται αριθμητικά και δίνονται τιμές για διάφορες χωροταξικές διαμορφώσεις των οπών γεώτρησης. Με αυτό τον τρόπο όμως το μοντέλο δεν είναι αρκετά ευέλικτο στην αντιμετώπιση άλλων διαμορφώσεων. Ο Zeng (A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers, Heat Transfer Asian Research 31 (7) (2002) 558–567) προτείνει μια αναλυτική μέθοδο για την κατάσταση των συναρτήσεων-g. Αυτού του είδους η λύση προτάθηκε αρχικά επίσης από τον Eskilson στη διατριβή του, αλλά δεν φαίνεται να χρησιμοποιήθηκε εκτενώς κατόπιν, ενδεχομένως λόγω των αποκλίσεων στα αποτελέσματα των αριθμητικών τιμών του.

Μία άλλη παραδοχή για την αντιμετώπιση της μεταφοράς θερμότητας γύρω από τον Κ.Γ.Ε. είναι η υποδιαίρεση του πεδίου μεταφοράς θερμότητας στον κάθετο γεωθερμικό εναλλάκτη σε δύο μέρη: ένα στο όριο της οπής γεώτρησης, και ένα έξω από αυτό το όριο. Και οι δύο περιοχές συνδέονται με βάση τη θερμοκρασία στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης. Οι μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται είναι τόσο η μόνιμη όσο και η μεταβατική μεταφορά θερμότητας μέσα και έξω από την οπή γεώτρησης αντίστοιχα. Με βάση το μεταβατικό φαινόμενο υπολογίζεται η θερμοκρασία του τοιχώματος της οπής γεώτρησης για τη περιοχή εδάφους έξω από την οπή γεώτρησης μέσω του κυλινδρικού μοντέλου μεταβατικής θερμοροής. Όσον αφορά στην περιοχή μέσα στην οπή γεώτρησης, λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος της οπής γεώτρησης και τη θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σκελών του γεωθερμικού εναλλάκτη τύπου U, αναπτύσσεται ένα “ημι”-τριδιάστατο μοντέλο μόνιμης μεταφοράς θερμότητας για την οπή γεώτρησης.

Συγκριτικά με το βάθος της η διάμετρος της οπής γεώτρησης είναι πολύ μικρότερη. Κατά συνέπεια η οπή γεώτρησης μέσω της οποίας συναλλάσσεται η θερμότητα με το έδαφος μπορεί να προσεγγιστεί ως άπειρη κυλινδρική πηγή θερμότητας (ή στη περίπτωση ψύξης ως καταβόθρα). Επομένως η μεταβατική θερμοκρασία του τοιχώματος της οπής γεώτρησης, που είναι σημαντική για τη προσομοίωση, μπορεί να καθοριστεί από την θεωρία κυλινδρικής πηγής θερμότητας που είναι κατάλληλη για την ανάλυση της μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας του εδάφους έξω από την οπή γεώτρησης.

Συνεπώς η θερμοκρασία του νερού μέσα στον Κ.Γ.Ε μπορεί να υπολογιστεί μέσω της παραπάνω θερμοκρασίας του τοιχώματος της οπής γεώτρησης βάσει της θερμικής ανάλυσης μέσα στην οπή γεώτρησης, δηλαδή οι περιοχές μέσα (υλικό πλήρωσης με τον αγωγό U-TUBE) και έξω (έδαφος) από τη οπή γεώτρησης «συνδέονται» μέσω της θερμοκρασίας στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης.

Ο κύριος στόχος του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας έξω από την οπή γεώτρησης είναι να υπολογιστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του τοιχώματος της οπής γεώτρησης (μη-μόνιμη κατάσταση) σύμφωνα με την απομακρυσμένη θερμοκρασία εδάφους (θερμοκρασία στην μέγιστη απόσταση: far field soil temperature) και η μεταβατική μεταφορά θερμότητας μεταξύ του Κ.Γ.Ε και της μέγιστης απόστασης στο έδαφος (far field radius).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για αυτόν το υπολογισμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές λύσεις σύμφωνα με την θεωρία κυλινδρικής πηγής που παρουσιάστηκαν από τον Ingersoll [3].

Παρ' όλ' αυτά αν θεωρηθεί μεταβολή των φορτίων ψύξης και θέρμανσης τότε το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος ποικίλλει συνεχώς. Κατά συνέπεια οι λύσεις που βασίζονται στην κυλινδρική πηγή του Ingersoll που είναι κατάλληλες μόνο για τη σταθερή ροή θερμότητας, θα πρέπει να προσαρμοστούν για τη περίπτωση μεταβλητής κατάστασης θερμοροής. Τότε η λύση θα πρέπει να εφαρμοστεί κάθε φορά σε τέτοια χρονικά διαστήματα τα οποία αντιστοιχούν στα διαφορετικά ποσά θερμοροής. Στη συνέχεια με υπέρθεση οι προκύπτουσες διαφορές θερμοκρασίας προστίθενται για κάθε χρονικό διάστημα. Αυτός ο τρόπος είναι και η ουσία εφαρμογής της αρχής της υπέρθεσης.

Αυτόνομα αριθμητικά πρότυπα έχουν αναφερθεί από τους Mei και Emerson [7], Kavanaugh [8], Lei [9], Muraya [10], Rottmayer [11], Thornton [12], Yavuzturk [13,14], Lee και Lam [15] και Lee και Zheng [16]. Ο Eskilson [5] υπολόγισε την θερμοκρασία εδάφους γύρω από έναν κάθετο γεωθερμικό εναλλάκτη χρησιμοποιώντας τη διδιάστατη ρητή μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Πρότεινε έναν αδιάστατο παράγοντα απόκρισης θερμοκρασίας υπό την μορφή συναρτησιακών σχέσεων που είναι γνωστές ως συναρτήσεις-g για να περιγράψει την απόδοση της οπής γεώτρησης. Στη συνέχεια ανέπτυξε γραφήματα βάσει αυτών των συναρτήσεων -g για διάφορες περιπτώσεις συνύπαρξης περισσοτέρων της μίας οπών γεώτρησης στο υπόψη εδαφικό πεδίο. Ο Hellstrom [6] ανέπτυξε ένα μοντέλο για τον Κ.Γ.Ε. και υπολόγισε την απόδοση για την αποθήκευση θερμότητας στο έδαφος βασισμένη στην υπέρθεση μιας τοπικής, σταθερής θερμοροής. Ο Kavanaugh [8] χρησιμοποίησε μια διδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για να μελετήσει την απόδοση μιας οπής γεώτρησης με ομόκεντρο σωλήνα. Ο Lei [9] χρησιμοποίησε μια μέθοδο πεπερασμένων διαφορών σε U-TUBE Κ.Γ.Ε και εισήγαγε ένα διπλό διδιάστατο σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων για να μετατρέψει το τρισδιάστατο σε διδιάστατο πρόβλημα. Ο Muraya [10] χρησιμοποίησε μία μεταβατική διδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να ερευνήσει τη θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ των 2 σκελών του Κ.Γ.Ε τύπου U-TUBE. Ο Rottmayer [11] ανέπτυξε ένα αριθμητικό μοντέλο Κ.Γ.Ε τύπου U-TUBE βασισμένο στη ρητή έκφραση πεπερασμένων διαφορών. Ο Thornton [12] χρησιμοποίησε το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Hellstrom [6] για να εκτελέσει μια πλήρη προσομοίωση τέτοιων συστημάτων χρησιμοποιώντας το ευρέως γνωστό λογισμικό TRNSYS. Ο Yavuzturk [13,14] επέκτεινε το συλλογισμό της βηματικής απόκρισης του Eskilson [5] σε μικρότερα χρονικά βήματα. Ο Lee και Lam [15] ανέπτυξαν ένα αριθμητικό Κ.Γ.Ε τύπου U-TUBE χρησιμοποιώντας τη τρισδιάστατη πεπλεγμένη έκφραση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών σε ορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Οι Lee και Zheng [16] παρουσίασαν ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων όγκων για τον Κ.Γ.Ε τύπου U-TUBE χρησιμοποιώντας τη μέθοδο τριγωνοποίησης του Delaunay για την κατάστρωση του υπολογιστικού πλέγματος.

Εντούτοις, τα αριθμητικά μοντέλα που αναφέρονται παραπάνω είναι σχετικά σύνθετα και δεν επιτρέπουν εύκολη κατανόηση της σχετικής φυσικής διεργασίας. Συγχρόνως, τέτοια αριθμητικά πρότυπα απαιτούν επίσης ένα ικανό χρονικό διάστημα για την εκτέλεση των υπολογισμών (αναλόγως βέβαια και της υπολογιστικής ισχύος του Η/Υ) ιδίως σε περιπτώσεις επίλυσης σε ορίζοντα π.χ εικοσαετούς προσομοίωσης. Αντίθετα, τα αναλυτικά πρότυπα είναι σχετικά εύκολα στην κατανόησή τους, και η προκύπτουσα αναλυτική λύση μπορεί εύκολα να είναι μετατραπεί σε προγραμματιστικό κώδικα. Οι απλούστερες υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις είναι το μοντέλο γραμμικής πηγής που προτείνεται από τους Ingersoll και Plass [1] και το μοντέλο κυλινδρικής πηγής από τους Carslaw και Jaeger [2]. Και τα δύο μοντέλα υποθέτουν άπειρο μήκος της οπής γεώτρησης στη μη-μόνιμη κατάσταση.

Ο Kavanaugh [8] υπολόγισε την κατανομή της θερμοκρασίας ή της θερμοροής γύρω από Κ.Γ.Ε χρησιμοποιώντας την ακριβή λύση της θεωρίας κυλινδρικής πηγής. Οι Hart και Couvillion [17] πρότειναν μια αναλυτική εξίσωση για τη θερμοκρασία εδάφους γύρω από γραμμική πηγή, και καθόρισαν την απόσταση θερμικής επίδρασης κατά την οριζόντια κατεύθυνση. Η IGSHA [18] υιοθέτησε το πρότυπο γραμμικής πηγής αλλά ανέπτυξε εξισώσεις για τη προσέγγιση του εκθετικού ολοκληρώματος της θεωρίας γραμμικής πηγής.

Οι Deerman και Kavanaugh [4] περιέγραψαν την εφαρμογή του κυλινδρικού μοντέλου πηγής θερμότητας με σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά στοιχεία σε περιοχές δοκιμής. Ο Zeng [19] ανέλυσε την μεταβατική αγωγή θερμότητας γύρω από την οπή γεώτρησης ενός Κ.Γ.Ε. μέσω μιας αναλυτικής λύσης για την μεταβατική αγωγή θερμότητας βάσει της θεωρίας της γραμμικής πηγής πεπερασμένου μήκους. Ο Bernier [20] πρότεινε σε έναν πολλαπλό αλγόριθμο συνάθροισης των θερμικών φορτίων για να υπολογίσει την απόδοση μιας οπής γεώτρησης σε μεταβλητό θερμικό φορτίο βασισμένο στο κυλινδρικό μοντέλο θερμικής πηγής. Ο Hikari [21] παρήγαγε απλουστευμένες μορφές με βάση την κυλινδρική πηγή στην επιφάνεια της οπής γεώτρησης εξαρτώμενη από τον αριθμό Fourier. Ο Lamarche [22] παρουσίασε μια νέα αναλυτική προσέγγιση για τη θερμική απόκριση του Κ.Γ.Ε. μέσω της ακριβούς επίλυσης του πεδίου θερμότητας για ομόκεντρους κυλίνδρους και αποτελεί μια καλή προσέγγιση για τον τύπο U-TUBE.

Λόγω της ποικίλης ιδιαιτερότητας στα υλικά πλήρωσης της οπής γεώτρησης οι περισσότερες αναλυτικές λύσεις που αναφέρονται παραπάνω σπάνια εξετάζουν αυστηρά την θερμική επίδραση μεταξύ δύο παρακείμενων σκελών του U-TUBE και η μεταβολή θερμοκρασίας του ρευστού κατά μήκος του βάθους της οπής γεώτρησης συχνά αμελείται. Η οπή γεώτρησης μπορεί να απεικονιστεί ως ένας σχετικά περίπλοκος εναλλάκτης θερμότητας λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες για διαφορετικά υλικά πλήρωσης της οπής γεώτρησης, τα υλικά κατασκευής του Κ.Γ.Ε και του είδους του ανακυκλοφορούντος ρευστού που μεταφέρει τη θερμότητα. Το βασικό σημείο για την ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας έγκειται στη θεώρηση της θερμικής επίδρασης μεταξύ του Κ.Γ.Ε και του υλικού πλήρωσης της οπής γεώτρησης. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι και παραδοχές σχετικά με το γεγονός αυτό αλλά ο πιο κοινός τρόπος είναι να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος του U – TUBE [24]. Εντούτοις, η μέθοδος αυτή δεν εξετάζει αυστηρά την θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ δύο παρακείμενων σκελών του U-TUBE αμελώντας παράλληλα την μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού κατά το βάθος της οπής γεώτρησης.

Μια εναλλακτική λύση με χρήση της ισοδύναμης διαμέτρου είναι ο παράγοντας μορφής που εισήγαγε ο Paul [25], η οποία συνδυάζει τον τρόπο διαμόρφωσης του Κ.Γ.Ε. U-TUBE και το υλικό πλήρωσης της οπής γεώτρησης με δύο κύριους παράγοντες μορφής που λήφθηκαν μετά από επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι τιμές των παραγόντων μορφής λήφθηκαν έπειτα από έναν μικρό αριθμό τυπικών πειραμάτων και δεν έχουν καθολική ισχύ για όλες τα είδη οπών γεώτρησης.

Πίνακας 2.2.1 Κυριότερες εργασίες θερμικής ανάλυσης Κάθετων Γεωθερμικών Εναλλακτών.

A/A	Τίτλος Εργασίας
1	Ingersoll LR, Plass HJ. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. ASHVE Trans 1948;47:339–48.
2	Carslaw HS, Jaeger JC. Conduction of heat in solids. 2nd ed. London: Oxford University Press; 1959.
3	Ingersoll LR, Zobel OJ, Ingersoll AC. Heat conduction with engineering, geological and other applications. New York: McGraw-Hill; 1954.
4	Deerman JD, Kavanaugh SP. Simulation of vertical U-tube ground-coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution. ASHRAE Trans 1991;97:287–94.
5	Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. PhD thesis. Sweden: University of Lund; 1987.
6	Hellstrom G. Ground heat storage. PhD thesis. Sweden: University of Lund; 1991.
7	Mei VC, Emerson CJ. New approach for analysis of ground-coil design for applied heat pump system. ASHRAE Trans 1985;91:1216–24.
8	Kavanaugh SP. Simulation and experimental verification of vertical groundcoupled heat pump systems. PhD thesis. Stillwater, Oklahoma: Oklahoma State University; 1986.
9	Lei TK. Development of a computational model for a ground-coupled heat exchanger. ASHRAE Trans 1993;99(1):149–59.
10	Muraya NK, O’Neal DL, Heffington WM. Thermal interference of adjacent legs in vertical U-tube heat exchanger for a ground-coupled heat pump. ASHRAE Trans 1996;102:12–21.
11	Rottmayer SP, Beckman WA, Mitchell JW. Simulation of a single vertical U-tube ground heat exchanger in an infinite medium. ASHRAE Trans 1997;103:651–9.
12	Thornton JW, McDowell TP, Shonder JA, Hughes PJ, Pahud D, Hellstrom G. Residential vertical geothermal heat pump system models: calibration to data. ASHRAE Trans 1997;103:660–74.
13	Yavuzturk C, Spitler JD, Rees SJ. A transient two-dimensional finite volume model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers. ASHRAE Trans 1999;105:465–74.
14	Yavuzturk C, Spitler JD, Rees SJ. A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers. ASHRAE Trans 1999;105: 475–85.
15	Lee CK, Lam HN. Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems. Renew Energy 2008;33:1289–96.
16	Li Z, Zheng M. Development of a numerical model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers. Appl Therm Eng, in press.
17	Hart DP, Couvillion PJ. Earth coupled heat transfer. Publication of the National Water Well Association; 1986.
18	IGSHPA. Design and installation standards. Stillwater. Oklahoma: International Ground Source Heat Pump Association; 1991.
19	Zeng HY, Diao NR, Fang ZH. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. Heat Transfer – Asian Res 2002;31(7): 558–67.
20	Bernier MA, Pinel P, Labib R, Paillot R. A multiple load aggregation algorithm for annual hourly simulations of GCHP systems. HVAC&R Res 2004;10(4): 471–87.

21	Hikari F, Ryuichi I, Takashi I. Improvements on analytical modeling for vertical U-tube ground heat exchangers. Geotherm Resour Council Trans 2004;28:73–7.
22	Lamarche L, Beauchamp B. New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical boreholes. Int J Heat Mass Transfer 2007;39:188–98.
23	Bandyopadhyay G, Gosnold W, Mann M. Analytical and semi-analytical solutions for short-time transient response of ground heat exchangers. Energy Build 2008;40:1816–24.
24	Gu Y, O’Neal DL. Development of an equivalent diameter expression for vertical U-tubes used in ground-coupled heat pumps. ASHRAE Trans 1998;104(2):347–55.
25	Paul ND. The effect of grout thermal conductivity on vertical geothermal heat exchanger design and performance. Master of Science thesis. South Dakota State University; 1996.
26	Hopkins PL. Performance of a vertical heat pump ground-coupling device. Master thesis. Stillwater, Oklahoma: Oklahoma State University; 1983.
27	Kavanaugh SP, Rafferty K. Ground-source heat pump: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. Atlanta: ASHRAE, Inc.; 1997.
28	Bernier M. Ground-coupled heat pump system simulation. ASHRAE Trans 2001;107:605–16.
29	Diao NR, Cui P, Fang ZH. The thermal resistance in a borehole of geothermal heat exchanger. In: Proceeding of 12th international heat transfer conference, France, 2002. p. 239–43.
30	Incropera FP, DeWitt DP. Fundamentals of heat and mass transfer. 4th ed. New York: John Wiley and Sons Inc.; 1996.
31	Spitler JD, Rees SJ, Yavuzturk C. Recent developments in ground source heat pump system design, modeling and applications. In: Proceeding of CIBSE/ASHRAE joint conference “2020 Vision”, Dubin, September 2000, Session 9a, paper A28. p. 34.

3. Θεωρητική Τεκμηρίωση

3.1 Γενική Περιγραφή Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών (Μ.Π.Δ)

Τα ρευστομηχανικά πεδία εκφράζονται στη γενικότητά τους από τις εξισώσεις Navier – Stokes ή, στην περίπτωση του μη συνεκτικού ρευστού, από τις εξισώσεις Euler. Και στις δυο περιπτώσεις το πεδίο ροής εκφράζεται από ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων που είναι μη γραμμικές.

Η μη γραμμικότητα των εξισώσεων οφείλεται στην χωρική επιτάχυνση του ρευστού και αποτελεί τη βασική αιτία της δυσκολίας επίλυσής τους. Παρά τις συνεχείς προσπάθειες των Μαθηματικών για αναλυτικές λύσεις των εξισώσεων, οι εξισώσεις παραμένουν γενικά άλυτες εκτός από ορισμένες ειδικές περιπτώσεις απλών γεωμετρικών πεδίων ροής. Παραδείγματα αναλυτικών λύσεων ο αναγνώστης θα βρει στα κλασσικά συγγράμματα των Lamb, Schlichting, Shapiro, Thwaites και Batchelor. Με την εμφάνιση όμως στην τελευταία δεκαετία ηλεκτρονικών ψηφιακών υπολογιστών μεγάλης χωρητικότητας, μνήμης και ταχύτητας εκτέλεσης πράξεων έγινε δυνατή σε πολλές περιπτώσεις η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων αυτών. Η βασική ιδέα της μεθοδολογίας αριθμητικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων είναι η αντικατάσταση τους με αλγεβρικές εξισώσεις οι οποίες όταν επιλυθούν με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή δίνουν αριθμητικά τις τιμές των ταχυτήτων ή άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών σε διακριτές θέσεις μέσα στο πεδίο ροής.

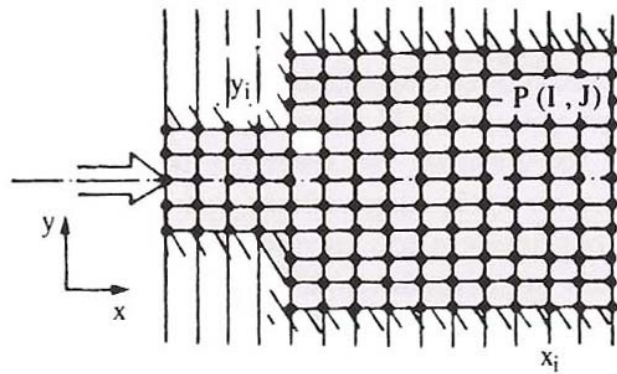
Είναι φανερό ότι οι αλγεβρικές αυτές εξισώσεις πρέπει να εκφράζουν ικανοποιητικά τη μερική διαφορική εξίσωση ώστε η λύση τους να αντιπροσωπεύει με προσέγγιση, όσο είναι επιθυμητό μεγαλύτερη, την λύση της διαφορικής εξίσωσης, δηλαδή η αντιπροσώπευση της διαφορικής εξίσωσης από τις αλγεβρικές εξισώσεις να είναι όπως λέγεται συνεπής. Η διαδικασία αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος που εκφράζει το φυσικό πρόβλημα μπορεί να τυποποιηθεί στα ακόλουθα βήματα.

α). Αδιαστατοποίηση προβλήματος

Το πρώτο βήμα που γίνεται για την αριθμητική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης, σωστά τοποθετημένης με τις οριακές της συνθήκες, είναι η αδιαστατοποίηση του μαθηματικού προβλήματος ώστε να εξαχθούν οι αδιάστατες παράμετροι του προβλήματος και η λύση να αποκτήσει γενικότητα για σειρά πεδίων ροής και οριακών συνθηκών που εκφράζονται από το ίδιο αδιαστατοποιημένο μαθηματικό πρόβλημα. Για παράδειγμα η διαδικασία της αδιαστατοποίησης εμφάνισε σημαντικές αδιάστατες παραμέτρους της ρευστομηχανικής και της μεταφοράς θερμότητας, όπως τους αριθμούς Reynolds, Strouhal, Eckert, Mach, Prandtl κλπ. ή συνδυασμούς των αριθμών αυτών ανάλογα με το πρόβλημα που εξετάζεται.

β). Διακριτοποίηση χώρου

Το δεύτερο βήμα που γίνεται είναι η διακριτοποίηση του χώρου με την τοποθέτηση πάνω στο φυσικό χώρο του πεδίου ροής κατάλληλου αριθμητικού πλέγματος. Για ευκολία παρουσίασης της μεθοδολογίας, το πεδίο ροής και το αριθμητικό πλέγμα λαμβάνονται διδιάστατα χωρίς όμως αυτό να μειώνει τη γενικότητα της μεθόδου. Το πλέγμα δημιουργείται με γραμμές σταθερού x και σταθερού y (βλέπε σχήμα 3.1-1), η τομή των οποίων καλείται αριθμητικός κόμβος. Έστω ότι η θέση του σημείου P που έχει συντεταγμένες x και y συμβολίζεται με $P(I, J)$. Η θέση των γραμμών του πλέγματος είναι αυθαίρετη, δηλαδή οι γραμμές μπορεί να μην ισαπέχουν μεταξύ τους, αν και η ομοιόμορφη κατανομή των γραμμών του πλέγματος απλοποιεί τη μορφή των σχηματιζόμενων αλγεβρικών εξισώσεων.



Σχήμα 3.1-1 Διακριτοποίηση χώρου.

γ). Διακριτοποίηση Διαφορικών Εξισώσεων

Το τρίτο βήμα της διαδικασίας αριθμητικής επίλυσης γίνεται με τη μετατροπή σε κάθε κόμβο του πλέγματος της διαφορικής εξίσωσης σε αλγεβρική, καθώς και τη μετατροπή των αρχικών και οριακών συνθηκών της διαφορικής εξίσωσης σε εκφράσεις πεπερασμένων διαφορών στους κόμβους που βρίσκονται πάνω ή κοντά στο όριο του πεδίου ροής. Η άγνωστη συνάρτηση « φ » παίρνει διακριτή τιμή στη θέση (i, j) και συμβολίζεται με Φ_{ij} ή $\Phi(I, J)$. Είναι επιθυμητό όπως η αντιπροσώπευση αυτή των οριακών και αρχικών συνθηκών να είναι της αυτής ή και μεγαλύτερης τάξης ακριβείας με την αντιπροσώπευση της διαφορικής εξίσωσης από τις αλγεβρικές εξισώσεις σε κάθε εσωτερικό κόμβο του πλέγματος. Οι αλγεβρικές εξισώσεις για κάθε εσωτερικό κόμβο μαζί με τις αντίστοιχες εκφράσεις για τις οριακές συνθήκες πρέπει να αποτελούν ένα σύστημα τόσων εξισώσεων όσων και αγνώστων, όπου άγνωστοι θα είναι π.χ. η θερμοκρασία ή η ταχύτητα του ρευστού σε κάθε κόμβο του πλέγματος.

δ). Αλγόριθμος επίλυσης

Η μεθοδολογία επίλυσης του συστήματος των διακριτών εξισώσεων που συνήθως μορφοποιείται με το λογικό διάγραμμα και υλοποιείται με τον αλγόριθμο γραμμένο σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού, αποτελεί το τέταρτο βήμα της αριθμητικής επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης. Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι ο αλγόριθμος επίλυσης του συστήματος των αλγεβρικών εξισώσεων μπορεί να δίνει αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία όμως να μην αποτελούν και την διακριτή λύση των διαφορικών εξισώσεων. Αυτό μπορεί να συμβεί αν ο αριθμός των κόμβων που χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίηση της μερικής διαφορικής εξίσωσης δεν είναι επαρκής οπότε το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων δεν εκφράζει ακριβώς τις διαφορικές εξισώσεις. Γι' αυτό απαιτείται πάντοτε να γίνεται έλεγχος της λύσης για ανεξαρτησία πλέγματος ώστε να διαπιστωθεί αν η αριθμητική λύση που βρέθηκε είναι πράγματι ανεξάρτητη του πλέγματος για 3 διαφορετικά αριθμητικά πλέγματα αυξανόμενης (κατά τάξη μεγέθους) πυκνότητας, δηλαδή ότι υπάρχει σύμπτωση ή μικρή μεταβολή της λύσης από πλέγμα σε πλέγμα. Προηγουμένως βέβαια πρέπει να έχει εξασφαλισθεί η ευστάθεια του αλγόριθμου επίλυσης του προβλήματος καθώς και η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων αποκοπής.

ε). Κριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Το τελευταίο από την άποψη εφαρμογών στάδιο της διαδικασίας αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων αποτελεί η κριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Βασικός συντελεστής επιτυχίας του σταδίου αυτού αποτελεί η σωστή γραφική παρουσίασή τους η οποία μπορεί να γίνει με την χρήση κατάλληλων λογισμικών γραφικών παραστάσεων είτε εμπορικά διαθέσιμων είτε γραμμένων από τον ίδιο τον χρήστη. Το λογισμικό γραφικής παράστασης εξαρτάται από το λειτουργικό σύστημα του Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.

3.2 Γενική Περιγραφή Χρήσης της Μ.Π.Δ σε Προβλήματα Μεταφοράς Θερμότητας

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών αντιμετωπίζει τα προβλήματα υπερβολικού τύπου ως ελλειπτικά και έτσι δεν είναι απαραίτητη η χρήση άλλων μεθόδων όπως για παράδειγμα της μεθόδου των χαρακτηριστικών για την επίλυση της υπερβολικής εξίσωσης. Χρησιμοποιώντας την Μ.Π.Δ σε διδιάστατο πεδίο διακρίνουμε συντεταγμένες δύο κατευθύνσεων.

Η διαφορική εξίσωση δεν επιλύεται αναλυτικά αλλά αριθμητικά χρησιμοποιώντας “διακριτοποιημένες” αλγεβρικές εξισώσεις. Κάθε μια από αυτές τις αλγεβρικές εξισώσεις συνδέει τις τιμές της ζητούμενης θερμοκρασίας σε ομάδες σημείων σε όλη την περιοχή επίλυσης.

Προκειμένου για την εξέταση της μεταφοράς θερμότητας σε δύο διαστάσεις η αριθμητική επίλυση του συστήματος των διαφοροποιημένων αλγεβρικών εξισώσεων που καταστρώνονται δίνει την λύση της Διαφορικής Εξίσωσης (Δ.Ε) με την μορφή τιμών της θερμοκρασίας στα σημεία της περιοχής επίλυσης.

Έστω:

$T_{p,αν}$ = η τιμή της θερμοκρασίας σε σημείο P η οποία προκύπτει με αναλυτική επίλυση της Δ.Ε.

$T_{p,ακ}$ = η τιμή της θερμοκρασίας σε σημείο P η οποία προκύπτει με ακριβή επίλυση του συστήματος των διακριτοποιημένων αλγεβρικών εξισώσεων που καταστρώθηκαν από την αρχική Δ.Ε.

$T_{p,αρ}$ = η τιμή της θερμοκρασίας σε σημείο P που προκύπτει με αριθμητική επίλυση του συστήματος των διακριτοποιημένων αλγεβρικών εξισώσεων που καταστρώθηκαν από την αρχική Δ.Ε.

Τότε:

Η υπολογιστική διαδικασία είναι ικανοποιητική και το σχήμα διακριτοποίησης που δημιουργήθηκε μπορεί να παράγει σωστά αποτελέσματα όταν αυξανόμενου του πλήθους των σημείων P οι τιμές της $T_{p,ακ}$ τείνουν προς τις $T_{p,αν}$ για κάθε σημείο P . Με την ικανοποίηση αυτής της προϋπόθεσης το σύστημα των διακριτοποιημένων εξισώσεων συγκλίνει.

Κύρια Χαρακτηριστικά της μεθόδου Π.Δ.:

- i. Η περιοχή που ενδιαφέρει η επίλυση της Δ.Ε. είναι η περιοχή επίλυσης. Η διακριτοποίηση των αλγεβρικών εξισώσεων επιτρέπει την αριθμητική επίλυση της δ.ε. στους κόμβους της περιοχής επίλυσης. Δηλαδή 1^ο βήμα αποτελεί ο χωρισμός της περιοχής επίλυσης σε υποπεριοχές τοποθετώντας ένα πλέγμα σ' αυτήν.
- ii. Σε κάθε υποπεριοχή η δ.ε. αντικαθίσταται από αλγεβρική εξίσωση. Η αλγεβρική αυτή εξίσωση συνδέει μεταξύ τους τις τιμές της θερμοκρασίας που επικρατεί στους γειτονικούς κόμβους. Έτσι προκύπτουν τόσες αλγεβρικές εξισώσεις όσοι και οι κόμβοι του πλέγματος.
- iii. Στη συνέχεια λύνεται το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων και έτσι βρίσκονται οι τιμές της θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο.

Η έννοια της διακριτοποίησης:

Αν ήταν εύκολο ή δυνατόν η διαφορική εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας και την μεταβολή της θερμοκρασίας σε όλη την εξεταζόμενη περιοχή θα επιλυόταν αναλυτικά (για παράδειγμα η διαφορική εξίσωση μπορεί να ήταν υπερβολικού τύπου). Τότε θα λαμβανόταν η συνεχή πληροφορία για τη τιμή της θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής επίλυσης. Με την Μ.Π.Δ. η συνεχής πληροφορία δεν υπάρχει. Αντικαθίσταται από διακριμένες τιμές της θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο.

Μέθοδοι διακριτοποίησης Δ.Ε.:

Βασικά υπάρχουν τρεις μεθοδολογίες για τη μετατροπή σε κάθε αριθμητικό κόμβο της μερικής διαφορικής εξίσωσης σε αλγεβρική.

- i. Ανάπτυγμα σε σειρά Taylor και σύντμηση της σειράς,
- ii. Ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης με χρήση κάποιου κριτηρίου ελαχιστοποίησης,
- iii. Ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης πάνω σε υποχώρους του πεδίου (υπολογιστική κυψέλη) με κατάλληλες παραδοχές.

Η μέθοδος (ii) συνδέεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και σε απλές γεωμετρικές πεδίων ροής οι αλγεβρικές εξισώσεις που δημιουργεί είναι σχεδόν ίδιες με αυτές που προκύπτουν από τις δύο άλλες μεθόδους.

Η μεθοδολογία (i) έχει βρει εφαρμογή και χρησιμοποιείται ακόμη ευρύτατα παρά ορισμένα μειονεκτήματα που παρουσιάζει συγκρινόμενη με τη μεθοδολογία (iii).

Οι αλγεβρικές εξισώσεις που λαμβάνονται με τη μεθοδολογία (i) ή (iii) καλούνται εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών διότι η βασική φιλοσοφία της μεθόδου είναι η αντικατάσταση σε κάθε σημείο του αριθμητικού πλέγματος, των διαφορικών τελεστών που εμφανίζονται στη διαφορική εξίσωση με αλγεβρικούς, υπολογιζόμενους από τις διαφορές των τιμών της συνάρτησης στον κόμβο με τις τιμές της στους γειτονικούς κόμβους του πλέγματος.

Η αντικατάσταση των διαφορικών τελεστών όπως για παράδειγμα του γενικού διαφορικού: $\partial f / \partial x$ με πεπερασμένες (αλγεβρικές) διαφορές: $\Delta f / \Delta x$ μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους οδηγώντας κατά συνέπεια και σε διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά το αντίστοιχο σφάλμα.

Για αυτόν τον λόγο οι διακριτοποιημένες εξισώσεις στις οποίες μετατρέπεται η διαφορική εξίσωση που διέπει το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας, ονομάζονται και εξισώσεις διαφορών. Μία πιο ακριβής έκφραση είναι ότι οι διαφορικοί τελεστές δεν «αντικαθίστανται» από τις αλγεβρικές διαφορές αλλά «προσεγγίζονται» από αλγεβρικές διαφορές.

Ένας άλλος τρόπος κατάταξης των παραπάνω μεθόδων διακριτοποίησης είναι:

i. Μεταβολική μέθοδος:

Χρησιμοποιείται κυρίως στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

ii. Μέθοδος σταθμισμένων υπολοίπων:

Από την μέθοδο αυτή προκύπτει η Μέθοδος Ολοκλήρωσης σε όγκο Αναφοράς η οποία ενδείκνυται για τον σχηματισμό των εξισώσεων διαφορών που απαιτούνται για την εφαρμογή της Μ.Π.Δ.

iii. Μέθοδος Ολοκλήρωσης σε όγκο Αναφοράς

iv. Μέθοδος Σειράς Taylor

Μέθοδος Ολοκλήρωσης σε όγκο Αναφοράς:

Λαμβάνεται σαν παράδειγμα η δ.ε. μόνιμης διδιάστατης αγωγής θερμότητας:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{εξίσωση Laplace})$$

Για: $k_x = k_y =$ ειδική θερμική αγωγιμότητα του υλικού ($W / m \cdot K$).

Η παραπάνω εξίσωση είναι μία τυπική διαφορική εξίσωση ελλειπτικού τύπου.

Ενώ για την μη-μόνιμη διδιάστατη αγωγή θερμότητας πάλι με: $k_x = k_y$ ισχύει η δ.ε.:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{ή} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

όπου: $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp}$ η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα του υλικού σε m^2 / s .

Θα μπορούσε ισοδύναμα να γραφεί και ότι:

$$\rho \cdot Cp \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3.2.1)$$

Για την επίλυση τέτοιων δ.ε. απαραίτητο είναι να είναι γνωστή:

i. Η κατανομή της θερμοκρασίας στο όριο της περιοχής επίλυσης (κατά μήκος του κλειστού ορίου της περιοχής επίλυσης), ή:

ii. Η κατανομή της καθέτου στο όριο θερμοροής: $\frac{\partial T}{\partial n}$ κατά μήκος του κλειστού ορίου της περιοχής επίλυσης, ή:

iii. Συνδυασμός των δύο ανωτέρω. Δηλαδή γνωστή κατανομή της θερμοκρασίας σε τμήμα του κλειστού ορίου της περιοχής επίλυσης και δεδομένη κατανομή της καθέτου στο όριο θερμοροής $\frac{\partial T}{\partial n}$ στο υπόλοιπο τμήμα του κλειστού ορίου της περιοχής επίλυσης.

Λαμβάνοντας την δ.ε. μόνιμης διδιάστατης αγωγής θερμότητας:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad \text{με } k_x = k_y, \text{ (εξίσωση Laplace), ενώ:}$$

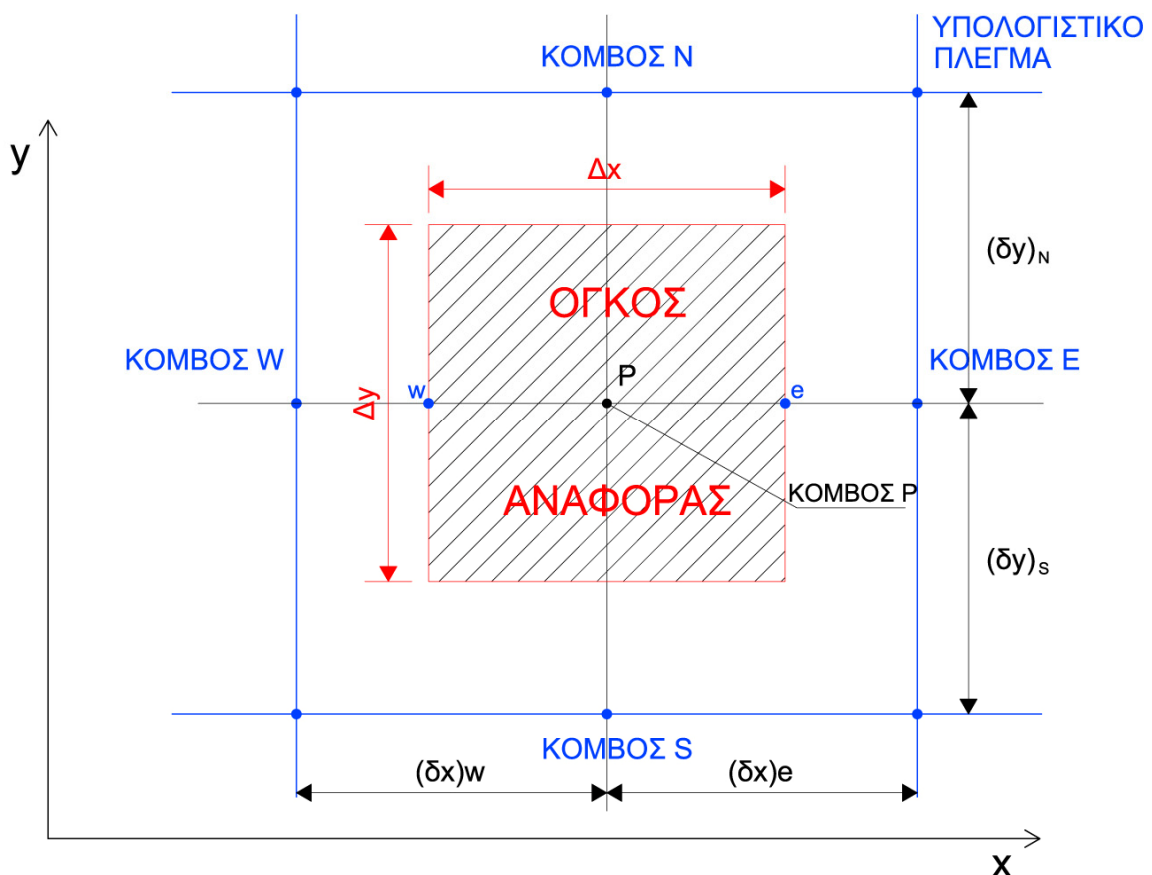
$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad \text{με } k_x \neq k_y \quad \text{ή:}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad \text{ή:}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.2.2)$$

όπου: $\Gamma =$ ο συντελεστής αγωγής θερμότητας ο οποίος συμβολίζεται και ως k (W/mK) ενώ για σταθερή θερμική αγωγιμότητα προκύπτει η πρώτη από τις παραπάνω εξισώσεις (εξίσωση Laplace).

Αυτή η εξίσωση θα ολοκληρωθεί στον όγκο αναφοράς διαστάσεων $\Delta x, \Delta y$ που περιβάλλει τον κόμβο P του υπολογιστικού πλέγματος.



Σχήμα 3.2-1 Λεπτομέρεια Διδιάστατου Υπολογιστικού Πλέγματος.

Οι γειτονικοί κόμβοι του P ονομάστηκαν: W, E, N και S από: West, East, North, South.

Ολοκληρώνοντας την (3.2.2.) στον όγκο αναφοράς θα είναι:

$$\int_s^e \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy + \int_s^e \int_w^e \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy = 0$$

όπου: n : το σημείο που ανήκει στο μέσο (όχι κατ' ανάγκη) μεταξύ P και N
 e : » » » μεταξύ P και E
 w : » » » μεταξύ W και P
 s : » » » μεταξύ S και P

δηλαδή τα n, e, w και s είναι προφανώς σημεία του όγκου αναφοράς και αποτελούν τα άκρα ολοκλήρωσης των διπλών ολοκληρωμάτων.

όπου: Γ ο συντελεστής αγωγής θερμότητας ο οποίος συμβολίζεται στη συνέχεια με k (W / mK) και τότε η ολοκλήρωση της εξίσωσης (3.2.3) στο χωρίο $enws$ θα γίνει ως εξής:

$$\iint_{enws} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy + \iint_{enws} \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy = 0 \quad (3.2.3)$$

αλλά:

$$\iint_{enws} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy = \int_e \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e dy - \int_w \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w dy$$

και σύμφωνα με το θεώρημα της μέσης τιμής:

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e dy_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w dy_w = k_e \frac{T_E - T_P}{\Delta x_{PE}} \delta y_e - k_w \frac{T_P - T_W}{\Delta x_{WP}} \delta y_w \quad (3.2.3\alpha)$$

Όμοια:

$$\iint_{enws} \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy = k_n \frac{T_N - T_P}{\Delta y_{PN}} \delta x_n - k_s \frac{T_P - T_S}{\Delta y_{SP}} \delta x_s \quad (3.2.3\beta)$$

Συνεπώς:

$$\iint_{enws} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy \right] = 0$$

Με αντικατάσταση των ολοκληρωμάτων από τις σχέσεις (3.2.3.α) και (3.2.3β) η δ.ε. (3.2.2) απλουστεύεται στη παρακάτω διακριτοποιημένη μορφή:

$$k_e \frac{T_E - T_P}{\Delta x_{PE}} \delta y_e - k_w \frac{T_P - T_W}{\Delta x_{WP}} \delta y_w + k_n \frac{T_N - T_P}{\Delta y_{PN}} \delta x_n - k_s \frac{T_P - T_S}{\Delta y_{PS}} \delta x_s = 0$$

ή:

$$A_P \cdot T_P = A_E \cdot T_E + A_W \cdot T_W + A_N \cdot T_N + A_S \cdot T_S \quad (3.2.4)$$

με:

$$A_E = \frac{|k_e| \cdot \Delta y}{(\delta x)_e}$$

$$A_W = \frac{|k_w| \cdot \Delta y}{(\delta x)_w}$$

$$A_N = \frac{|k_n| \cdot \Delta x}{(\delta y)_n}$$

$$A_S = \frac{|k_s| \cdot \Delta x}{(\delta y)_s}$$

$$A_p = A_E + A_W + A_N + A_S$$

όπου:

$\Delta x_{PE} = (\delta x)_e =$ απόσταση (κατά την φορά ροής θερμότητας) μεταξύ κόμβου P και E

$\Delta x_{WP} = (\delta x)_w =$ απόσταση (κατά την φορά ροής θερμότητας) μεταξύ κόμβου P και W

$\Delta y_{PN} = (\delta y)_n =$ απόσταση (κατά την φορά ροής θερμότητας) μεταξύ κόμβου P και N

$\Delta y_{PS} = (\delta y)_s =$ απόσταση (κατά την φορά ροής θερμότητας) μεταξύ κόμβου P και S

και:

$\delta y_w = \delta y_e = \Delta y =$ «επιφάνεια» συναλλαγής θερμότητας του όγκου αναφοράς κάθετα προς τη φορά ροής θερμότητας (γράφεται επιφάνεια επειδή κανονικά είναι: $\Delta y * \Delta z$ αλλά αφού: $\Delta z = 1$ λόγω της διδιάστατης ανάλυσης τελικά προκύπτει ότι: $\Delta y = \Delta y * 1$). Στη περίπτωση ομοιόμορφου πλέγματος είναι: $\delta x = \delta y$ και τότε το Δy είναι το στοιχειώδες μήκος πλέγματος κατά τον άξονα y .

$\delta x_n = \delta x_s = \Delta x =$ «επιφάνεια» συναλλαγής θερμότητας του όγκου αναφοράς κάθετα προς τη φορά ροής θερμότητας (γράφεται επιφάνεια επειδή κανονικά είναι: $\Delta x * \Delta z$ αλλά αφού: $\Delta z = 1$ λόγω της διδιάστατης ανάλυσης τελικά προκύπτει ότι: $\Delta x = \Delta x * 1$). Στη περίπτωση ομοιόμορφου πλέγματος είναι: $\delta x = \delta y$ και τότε το Δx είναι το στοιχειώδες μήκος πλέγματος κατά τον άξονα x .

Για την αναφορά στις θέσεις των κόμβων χρησιμοποιείται και ο συμβολισμός (Βλ. και Σχήμα 3.2-2):

$$T_p = T(i, j), T_E = T(i+1, j), T_W = T(i-1, j) \text{ και: } T_N = T(i, j+1) \quad T_S = T(i, j-1)$$

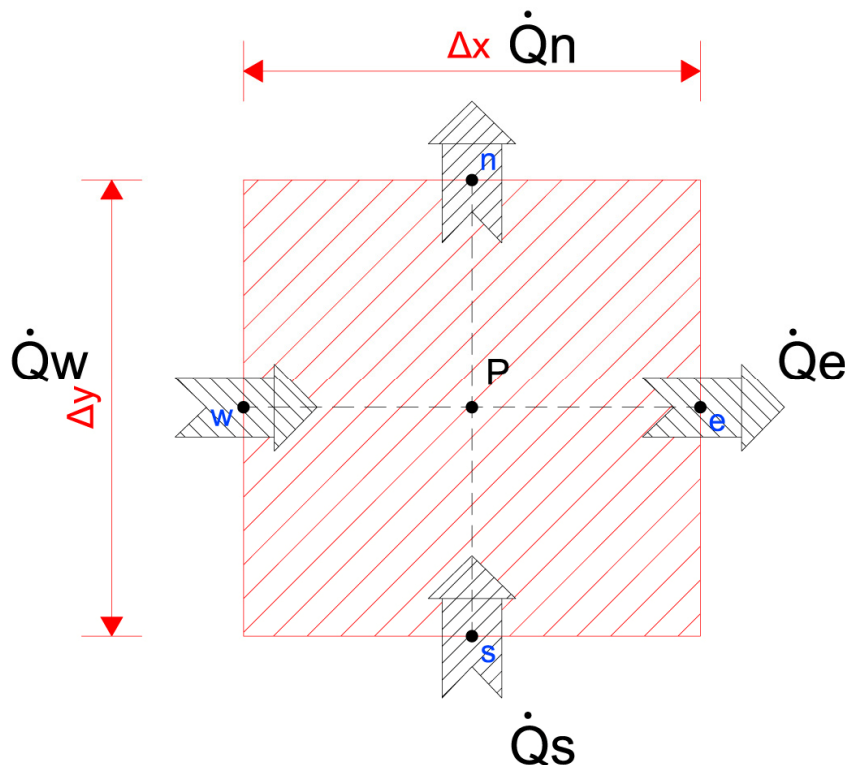
Η εξίσωση ισχύει για κάθε εσωτερικό κόμβο του χωρίου ενώ για το περίγραμμα του χωρίου μπορεί παραδείγματος χάριν να ισχύουν οι οριακές συνθήκες Dirichlet.

Η εξίσωση πρέπει να λυθεί μαζί με τις οριακές συνθήκες στο ορθογωνικό χωρίο ενώ είναι φανερό ότι πρέπει να είναι γνωστή και η διανομή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k στο χωρίο αυτό.

Η αλγεβρική εξίσωση πλέον (3.2.4) μπορεί να γραφεί και ως:

$$\dot{Q}_w - \dot{Q}_e + \dot{Q}_s - \dot{Q}_n = 0 \quad (3.2.5)$$

αφού θεωρήθηκε ότι οι ροές θερμότητας στις 4 πλευρές του όγκου αναφοράς είναι:



Σχήμα 3.2-2 Ισολογισμός θερμότητας στον όγκο αναφοράς.

Επομένως η (3.2.5) γράφεται κατά Fourier ως εξής:

$$-\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right)_w \cdot \Delta y + \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right)_e \cdot \Delta y - \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right)_s \cdot \Delta x + \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right)_n \cdot \Delta x = 0 \quad (3.2.6)$$

Αν υποθεθεί γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ x και y κατεύθυνσης τότε από την παραπάνω: (3.2.6) προκύπτει πάλι η: (3.2.4).

Η εξίσωση όπως μορφώθηκε αποτελεί γενίκευση της μεθοδολογίας κατά Taylor.

Μέθοδος σειράς Taylor:

Με αυτήν την μέθοδο οι παράγωγοι $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ κ.λ.π. προσεγγίζονται αριθμητικά με σειρές Taylor.

Με βάση τον όγκο αναφοράς της προηγούμενης μεθόδου διακριτοποίησης ανάπτυξη σε σειρά Taylor κατά την κατεύθυνση x γύρω από τον κόμβο P δίνει:

$$T_E = T_p + \delta x \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_p + \frac{(\delta x)^2}{2} \cdot \left. \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \right|_p + \frac{(\delta x)^3}{6} \cdot \left. \left(\frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right) \right|_p + \frac{(\delta x)^4}{24} \cdot \left. \left(\frac{\partial^4 T}{\partial x^4} \right) \right|_p + \dots \quad (3.2.7)$$

$$T_W = T_p - \delta x \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_p + \frac{(\delta x)^2}{2} \cdot \left. \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \right|_w - \frac{(\delta x)^3}{6} \cdot \left. \left(\frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right) \right|_w + \frac{(\delta x)^4}{24} \cdot \left. \left(\frac{\partial^4 T}{\partial x^4} \right) \right|_w + \dots \quad (3.2.8)$$

Αν η (3.2.7) επιλυθεί ως προς $\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p$ τότε:

$$\begin{aligned} T_E - T_p &= \delta x \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p + \frac{(\delta x)^2}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_p + \dots \Rightarrow \\ \Rightarrow \delta x \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p &= T_E - T_p - \frac{(\delta x)^2}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_p - \frac{(\delta x)^3}{6} \cdot \left(\frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right)_p - \frac{(\delta x)^4}{24} \cdot \left(\frac{\partial^4 T}{\partial x^4} \right)_p - \dots \Rightarrow \\ \Rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p &= \frac{T_E - T_p}{\delta x} + E(\delta x) \quad (3.2.9) \end{aligned}$$

όπου με: $E(\delta x)$ συμβολίζονται οι όροι τάξεως (δx) και ανωτέρας.

Η (3.2.9) αποτελεί την ΕΚΦΡΑΣΗ 1^{ης} ΠΑΡΑΓΩΓΟΥ ΠΡΟΣ ΤΑ ΕΜΠΡΟΣ με σφάλμα αποκοπής τάξεως (δx) .

Αντίστοιχα από την (3.2.8) προκύπτει:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p = \frac{T_p - T_w}{\delta x} + E(\delta x) \quad (3.2.10) \quad \text{ΕΚΦΡΑΣΗ 1^{ης} ΠΑΡΑΓΩΓΟΥ ΠΡΟΣ ΤΑ ΠΙΣΩ}$$

η οποία έχει σφάλμα αποκοπής τάξης (δx) αν αμεληθεί ο όρος $E(\delta x)$. Όμοια:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p = \frac{T_E - T_w}{2 \cdot \delta x} + E(\delta x^2) \quad (3.2.11) \quad \text{ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΚΦΡΑΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥ 1^{ης} ΤΑΞΗΣ}$$

η οποία έχει σφάλμα αποκοπής τάξης (δx^2) αν αμεληθεί ο όρος $E(\delta x^2)$.

ενώ:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_p = \frac{T_E - 2T_p + T_w}{(\delta x)^2} + E(\delta x^2) \quad (3.2.12) \quad \text{ΕΚΦΡΑΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥ 2^{ης} ΤΑΞΗΣ}$$

η οποία έχει σφάλμα αποκοπής τάξης (δx^2) αν αμεληθεί ο όρος $E(\delta x^2)$.

Με αυτήν τη μέθοδο οι παραγωγοί 1^{ης} και 2^{ης} τάξης των αναπτυγμάτων Taylor που λύνουν την δ.ε. ως προς σημείο αντικαθίσταται με εκφράσεις των παραπάνω πεπερασμένων διαφορών. Όλες οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούνται χωρίς τους όρους $E(\delta x)$, $E(\delta x^2)$ κλπ.

Με βάση τα παραπάνω η δ.ε. μόνιμης διδιάστατης αγωγής θερμότητας γίνεται:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad \xrightarrow[\text{ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ } P]{(3.2.12)} \quad \frac{T_E - 2 \cdot T_p + T_w}{(\delta x)^2} + \frac{T_N - 2 \cdot T_p + T_S}{(\delta y)^2} = 0$$

η οποία έχει σφάλμα αποκοπής της τάξης: $E(\delta x^2, \delta y^2)$.

Λαμβάνοντας πάλι την εξίσωση Laplace (για την οποία είναι $k_y = k_x$) και χρησιμοποιώντας τώρα τους δείκτες (i,j) η επίλυση με ανάπτυγμα κατά Taylor έχει ως εξής:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Η παράγωγος: $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ στη θέση (x_i, y_j) μπορεί να προσεγγιστεί με την έκφραση:

$$\frac{T(i+1, j) - 2T(i, j) + T(i-1, j)}{(\Delta x)^2}$$

που όπως προαναφέρθηκε έχει σφάλμα αποκοπής τάξης Δx^2 .

Η παράγωγος: $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ στη θέση (x_i, y_j) μπορεί να προσεγγιστεί με την έκφραση:

$$\frac{T(i, j+1) - 2T(i, j) + T(i, j-1)}{(\Delta y)^2}$$

που όπως προαναφέρθηκε έχει σφάλμα αποκοπής τάξης Δy^2 .

Η εξίσωση Laplace γράφεται τώρα και ως εξής:

$$\frac{T(i+1, j) - 2T(i, j) + T(i-1, j)}{(\Delta x)^2} + \frac{T(i, j+1) - 2T(i, j) + T(i, j-1)}{(\Delta y)^2} = 0$$

ή:

$$T(i, j) \left[\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right] = \frac{1}{\Delta x^2} [T(i+1, j) + T(i-1, j)] + \frac{1}{\Delta y^2} [T(i, j+1) + T(i, j-1)]$$

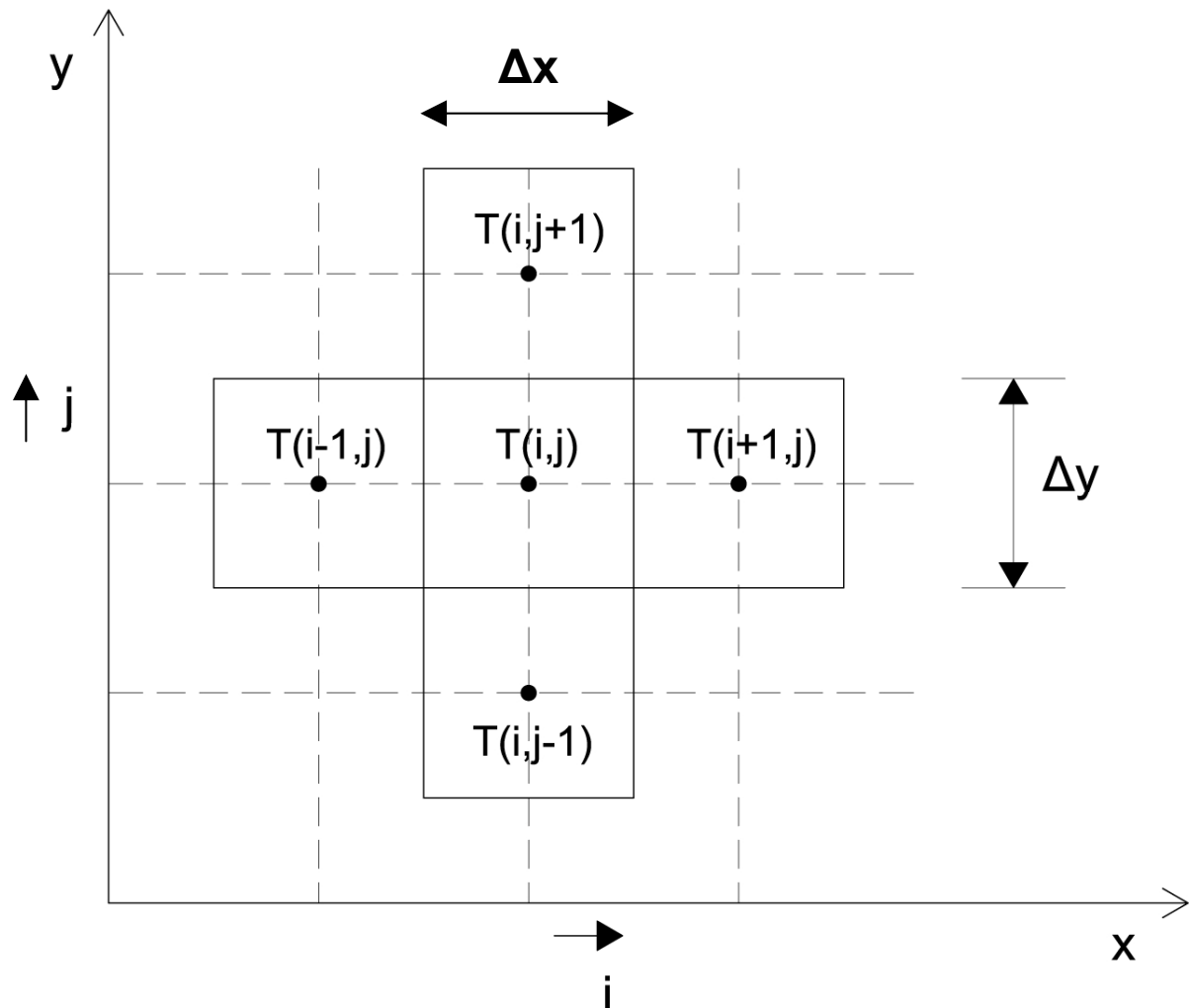
Για την ειδική περίπτωση ισαπεχουσών γραμμών πλέγματος λαμβάνεται η ακόλουθη απλούστερη μορφή:

$$T(i, j) = \frac{1}{4} [T(i+1, j) + T(i-1, j) + T(i, j+1) + T(i, j-1)]$$

που όπως ήδη προαναφέρθηκε ισχύει για τους εσωτερικούς κόμβους του πλέγματος.

Η ακρίβεια της παραπάνω διακριτοποίησης είναι δευτέρας τάξεως αφού:

$$O(\Delta x^2) + O(\Delta y^2)$$



Σχήμα 3.2-2 Απεικόνιση ονομασίας κόμβων για την εφαρμογή της μεθόδου Taylor με ισαπέχουσες γραμμές πλέγματος.

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η τελική λύση της διαφορικής εξίσωσης μη-μόνιμης διδιάστατης αγωγής θερμότητας στο έδαφος με: $kx = ky$ χρησιμοποιώντας την μέθοδο αναπτύγματος Taylor:

$$\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} = \frac{1}{a_{ground}} \cdot \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} \quad \text{ή:} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

όπου: $\alpha_{ground} = \frac{k}{\rho \cdot Cp}$ η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα εδάφους (m^2 / s).

Τότε η διακριτοποιημένη εξίσωση Πεπερασμένων Διαφορών θα είναι:

$$\frac{T_{i+1,j}^p + T_{i-1,j}^p - 2T_{i,j}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^p + T_{i,j-1}^p - 2T_{i,j}^p}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{a_{ground}} \frac{T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p}{\Delta t}$$

Όπου: ρ ο δείκτης χρονικού βήματος.

Για πλέγμα με: $\Delta x = \Delta y$ η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται περαιτέρω στην παρακάτω έκφραση Πεπερασμένων Διαφορών:

$$T_{i,j}^{p+1} = Fo(T_{i-1,j}^p + T_{i+1,j}^p + T_{i,j+1}^p + T_{i,j-1}^p) + (1 - 4Fo)T_{i,j}^p$$

Ο συντελεστής $(1 - 4Fo)$ της θερμοκρασίας της προηγούμενης χρονικής στιγμής: $T_{i,j}^p$ μπορεί να είναι θετικός ή μηδέν και έτσι το κριτήριο για όλους τους εσωτερικούς κόμβους του πλέγματος είναι:

$$Fo = \frac{a_{ground} \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{4}$$

Όπου Fo είναι ο αριθμός Fourier και Δt το χρονικό βήμα (δείκτης ρ).

Επομένως εισάγεται στο πλέγμα περιορισμός για την επιλογή της διάρκειας του χρονικού βήματος ρ των υπολογισμών ή αντίστοιχα επιλογής κατάλληλου πλεγματού χωρικού βήματος Δx .

Μειονεκτήματα μεθόδου διακριτοποίησης κατά Taylor:

Κύριο μειονέκτημα είναι ότι απαιτείται ομοιόμορφο υπολογιστικό πλέγμα. Δηλαδή πλέγμα με ίσες αποστάσεις μεταξύ των πλεγματού γραμμών τόσο κατά x όσο και κατά y . Αυτό όμως κατά περίπτωση ενδεχομένως αποτελεί πρόβλημα διότι σε περιοχές μεγάλων μεταβολών της θερμοκρασίας (T) απαιτείται "πύκνωση" του πλέγματος ώστε να διατηρηθεί το σφάλμα στα αποδεκτά επίπεδα. Διαφορετικά η αποκοπή μπορεί να οδηγήσει σε αποτελέσματα που απέχουν αρκετά από τη πραγματική κατάσταση.

3.3 Επίλυση με την Μ.Π.Δ της μόνιμης μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή γίνεται μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος με διάχυση.

Η δ.ε. για την μόνιμη μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας είναι:

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} + \frac{1}{k} \cdot \Phi(x) = 0$$

όπου:

k = ειδική θερμική αγωγιμότητα σε : $W / m \cdot K$

$\Phi(x)$ = εκλυόμενη θερμότητα από πηγές στον χώρο που είναι συνάρτηση της θέσης x σε: W / m^2 , και αν το Φ είναι ανεξάρτητο της θέσης κατά τον άξονα x :

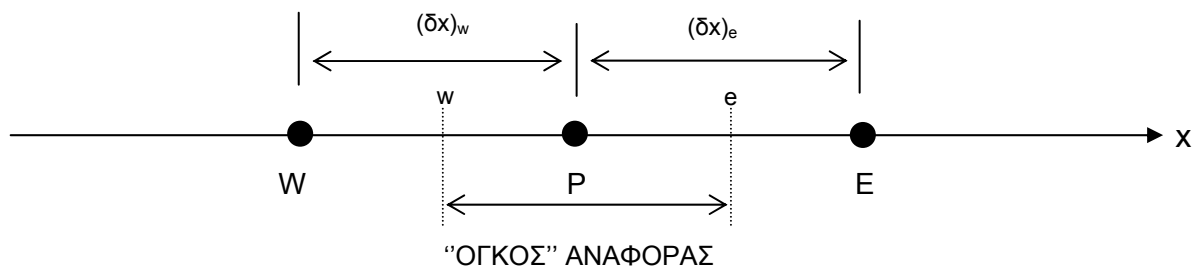
$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} + \frac{1}{k} \cdot \Phi = 0 \Rightarrow \frac{d^2 T(x)}{dx^2} = -\frac{\Phi}{k}$$

Επομένως:

$$\frac{d}{dx} \left(k \cdot \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (3.3.1)$$

όπου:

S = εκλυόμενη θερμότητα από πηγές στον χώρο (ότι και η Φ) = ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου.



Σχήμα 3.3-1 Απεικόνιση όγκου αναφοράς στη μόνιμη μονοδιάστατη αγωγή.

w, e = πλευρές του όγκου αναφοράς στον οποίο ολοκληρώνεται η δ.ε. (3.3.1)

$(\delta x)_w$ = απόσταση μεταξύ κόμβου W και P

$(\delta x)_e$ = απόσταση μεταξύ κόμβου E και P

Οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων δεν είναι απαραίτητα ίσες μεταξύ τους. Ενδείκνυται «πύκνωση» του υπολογιστικού πλέγματος στις περιοχές μεγάλων μεταβολών της θερμοκρασίας.

Υποθέτοντας γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων η ολοκλήρωση της δ.ε. (3.3.1) δίνει:

$$ke \cdot \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - kw \cdot \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} + \bar{S} \cdot \Delta x = 0 \quad (3.3.2)$$

όπου: \bar{S} = μέση τιμή του πηγαιίου όρου στον “όγκο” αναφοράς

$$\bar{S} = S_C + S_p \cdot T_p \quad (3.3.3)$$

Από: (3.3.2) με πράξεις:

$$A_P \cdot T_P = A_E \cdot T_E + A_W \cdot T_W + B \quad (3.3.4)$$

η οποία είναι η διακριτοποιημένη μορφή της δ.ε. (3.3.1) δηλαδή η ζητούμενη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών.

Όπου:

$$A_E = \frac{ke}{(\delta x)_e} \quad , \quad ke = \text{η ειδική θερμ. αγωγιμότητα στην πλευρά } e \text{ του όγκου αναφοράς}$$

$$A_W = \frac{kw}{(\delta x)_w} \quad , \quad kw = \text{η ειδική θερμ. αγωγιμότητα στην πλευρά } w \text{ του όγκου αναφοράς}$$

$$A_P = A_E + A_W - S_p \cdot \Delta x$$

$$B = S_C \cdot \Delta x$$

Υποτίθεται ότι οι τιμές της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους P, W και E είναι γνωστές (k_w, k_p και $k_E = \text{γνωστά}$).

Για υλικά με διαφορετικά k δηλαδή ανομοιογενή υλικά (π.χ. σύνθετη πλάκα αποτελούμενη από στρώματα διαφορετικών υλικών), ή για υλικά ομογενή αλλά με αγωγιμότητα εξαρτώμενη από την θερμοκρασία, οι τιμές των ke και kw πρέπει να εκφραστούν συναρτήσει των γνωστών τιμών στους κόμβους.

Έτσι οι συντελεστές A_E, A_W και A_P της (3.3.4) θα είναι γνωστοί και πάλι.

Αποδεικνύεται ότι:

$$ke = \left(\frac{1 - fe}{k_p} + \frac{fe}{k_E} \right) - 1 \quad (3.3.5)$$

όπου:

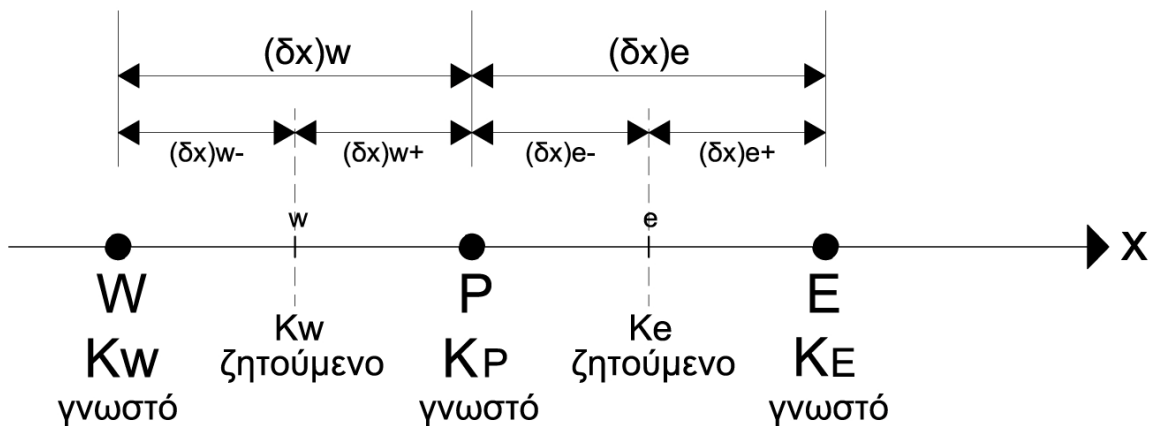
$$fe = \text{συντελεστής παρεμβολής} \frac{(\delta x)_e +}{(\delta x)_e} \quad (3.3.6)$$

Όμοια αποδεικνύεται ότι:

$$k_w = \left(\frac{1 - f_w}{k_w} + \frac{f_w}{k_p} \right)^{-1} \quad (3.3.5)'$$

όπου:

$$f_w = \text{συντελεστής παρεμβολής} = \frac{(\delta x)_{w+}}{(\delta x)_w} \quad (3.3.6)'$$



Σχήμα 3.3-1 Απεικόνιση όγκου αναφοράς στη μόνιμη μονοδιάστατη αγωγή για υλικά με διαφορετικούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας ή τέτοιους που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

Αν η πλευρά e του όγκου αναφοράς βρίσκεται στο μέσον μεταξύ των κόμβων P και E τότε η (3.3.6) δίνει:

$$\Rightarrow f_e = \frac{1 \cdot (\delta x)_{e+}}{2 \cdot (\delta x)_{e+}} \Rightarrow f_e = 0,5$$

οπότε:

$$(3.3.5) \Rightarrow k_e = \frac{2 \cdot k_p \cdot k_E}{k_p + k_E} \quad (3.3.7)$$

και αν η πλευρά w βρίσκεται στο μέσον μεταξύ των κόμβων W και P τότε:

$$(3.3.6)' \Rightarrow f_w = \frac{1 \cdot (\delta x)_{w+}}{2 \cdot (\delta x)_{w+}} \Rightarrow f_w = 0,5$$

$$(3.3.5)' \Rightarrow k_w = \frac{2 \cdot k_W \cdot k_P}{k_W + k_P} \quad (3.3.7)'$$

3.4 Οριακές Συνθήκες

Είναι προφανές ότι από την (3.3.4) πρέπει να είναι γνωστές οι θερμοκρασίες T_E και T_W στους δύο γειτονικούς κόμβους, E και W αντίστοιχα, προκειμένου να υπολογιστεί η ζητούμενη θερμοκρασία στον “εσωτερικό” κόμβο P .



Σχήμα 3.4-1 Απεικόνιση μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας για την εφαρμογή οριακών συνθηκών.

Ένα από τα παρακάτω είδη συνοριακών συνθηκών μπορούν να επιβληθούν στα όρια της περιοχής επίλυσης:

- ① ΓΝΩΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ B και C : T_B, T_C (Συνθήκη Dirichlet)

Τότε η (3.3.4) είναι άμεσα επιλυόμενη και δεν απαιτείται κάποια πρόσθετη εξίσωση.

- ② ΓΝΩΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΡΟΗΣ ΣΤΑ B και C : \dot{q}_B, \dot{q}_C (Συνθήκη Neumann)

Η θερμοροή ή πυκνότητα ροής θερμότητας στη μονοδιάστατη κατά x αγωγή είναι:

$$q(x) = -k \cdot \frac{dT(x)}{dx} \quad \text{σε: } W/m^2$$

Η θερμοροή στην Μ.Π.Δ. αντικαθίσταται από έκφραση πεπερασμένων διαφορών (όσον αφορά το διαφορικό $\frac{dT(x)}{dx}$ της συνάρτησης: $T = T(x)$).

Επομένως:

$$q_e = \frac{ke \cdot (T_p - T_E)}{(\delta x)_e}$$

$$q_w = \frac{k_w \cdot (T_w - T_p)}{(\delta x)_w}$$

Εφόσον είναι γνωστή η θερμοροή στον οριακό κόμβο $B : \dot{q}_B$ και γνωστή η θερμοροή στον οριακό κόμβο $C : \dot{q}_C$ τότε η θερμοκρασία T_B θα βρεθεί από την εξίσωση:

$$\dot{q}_B - \dot{q}_m + (S_2 + S_1 \cdot T_B) \cdot \Delta x = 0 \Rightarrow \quad (3.3.8)$$

$$\Rightarrow \dot{q}_B - \frac{km \cdot (T_B - T_M)}{(\delta x)m} + (S_2 + S_1 \cdot T_B) \cdot \Delta x = 0 \Rightarrow \quad (3.3.9)$$

$$\Rightarrow A_B \cdot T_B = A_M \cdot T_M + B \quad (3.3.10)$$

Η παραπάνω αποτελεί την εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για την οριακή συνθήκη: γνωστή θερμοροή στον κόμβο B ($\dot{q}_B =$ γνωστό).

Όπου:

$$A_B = A_M - S_1 \cdot \Delta x$$

$$A_M = \frac{k_m}{(\delta x)m}$$

$$B = S_2 \cdot \Delta x + \dot{q}_B$$

Ο όρος: $(S_2 + S_1 \cdot T_B)$ είναι ο πηγαίος όρος που εκφράζει η εξίσωση (3.3.3) εφόσον υπάρχει παραγωγή θερμότητας με γνωστό ρυθμό ανά μονάδα όγκου.

Αντίστοιχα η θερμοκρασία T_C βρίσκεται από την εξίσωση:

$$\dot{q}_n - \dot{q}_C + (S_1 + S_2 \cdot T_C) \cdot \Delta x = 0 \Rightarrow \quad (3.3.8)'$$

$$\Rightarrow \frac{kn \cdot (T_N - T_C)}{(\delta x)n} - \dot{q}_C + (S_1 + S_2 \cdot T_C) \cdot \Delta x = 0 \Rightarrow \quad (3.3.9)'$$

$$\Rightarrow \frac{kn \cdot T_N}{(\delta x)n} - \frac{kn \cdot T_C}{(\delta x)n} - \dot{q}_C + (S_1 + S_2 \cdot T_C) \cdot \Delta x = 0 \Rightarrow$$

Ας είναι: $\frac{kn}{(\delta x)n} = A_N$ και τότε:

$$A_N \cdot T_N - A_N \cdot T_C - \dot{q}_C + S_1 \cdot \Delta x + S_2 \cdot T_C \cdot \Delta x = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad (\text{κοινός παράγοντας η ζητούμενη } T_C)$$

$$A_N \cdot T_N + T_C \cdot (S_2 \cdot \Delta x - A_N) - \dot{q}_C + S_1 \cdot \Delta x = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A_N \cdot T_N + T_C \cdot A_C + S_1 \cdot \Delta x - \dot{q}_C = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_C \cdot A_C = A_N \cdot T_N + B \quad (3.3.10)'$$

Όπου τέθηκαν:

$$A_C = A_N - S_2 \cdot \Delta x$$

$$B = S_1 \cdot \Delta x - \dot{q}_C$$

Η παραπάνω αποτελεί την εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για την οριακή συνθήκη: γνωστή θερμοροή στον κόμβο C ($\dot{q}_C =$ γνωστό).

③ ΓΝΩΣΤΕΣ ΣΥΝΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΕΣ ΣΤΑ Β ΚΑΙ C: h_B, h_C ΚΑΙ Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ: T_{fB}, T_{fC} :

Τότε η διακριτοποιημένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για τον κόμβο B είναι:

$$A_B \cdot T_B = A_M \cdot T_M + B \quad (3.3.11)$$

όπου:

$$A_M = \frac{k_m}{(\delta x)m}$$

$$A_B = A_M - S_1 \cdot \Delta x + h_B$$

$$B = S_2 \cdot \Delta x + h_B \cdot T_{fB}$$

Από την οποία υπολογίζεται η ζητούμενη θερμοκρασία: T_B

Όμοια προκύπτει και η διακριτοποιημένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για τον κόμβο C.

3.5 Επίλυση με την Μ.Π.Δ της μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας

Η δ.ε. για την μη-μόνιμη μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Phi = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$$

όπου:

ρ = πυκνότητα του υλικού του σώματος σε kg/m^3

C_p = ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού του σώματος σε J/kgK

Φ = εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα όγκου σε W/m^3

Η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα του υλικού:

$$a = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad \text{σε } m^2/s$$

έχει την φυσική έννοια ότι όσο μεγαλύτερη η τιμή της τόσο ταχύτερα διαχέεται η θερμότητα στο υλικό. Δηλαδή έχει να κάνει με την χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο σώμα κατά την μεταφορά θερμότητας από αυτό.

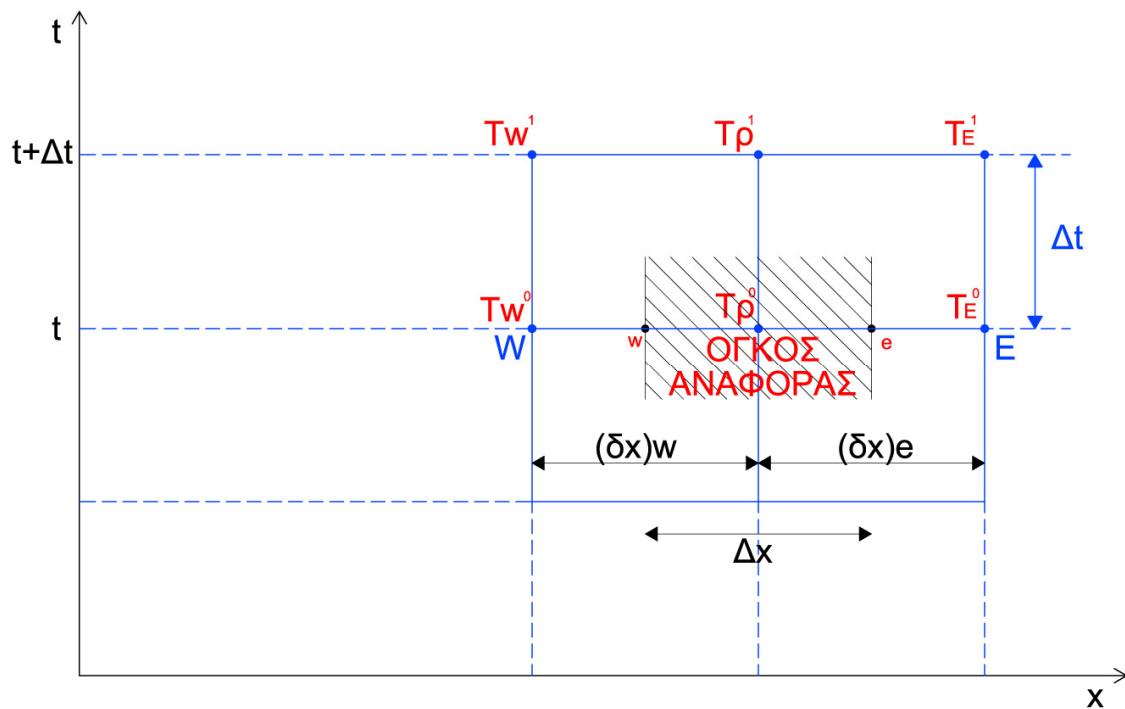
Ο όρος Φ είναι συνάρτηση των x, t ήτοι: $\Phi(x, t)$ σε W/m^3 και παριστάνει την εκλυόμενη θερμότητα από πηγές στο σώμα (μέσα στον στοιχειώδη όγκο).

Ο όρος: $\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$ εκφράζει την μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας στον στοιχειώδη όγκο του υλικού ανά μονάδα χρόνου.

Αν δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας τότε:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) \quad \text{ή} \quad \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.5.1)$$

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος δηλ. την επίλυση της δ.ε. με βάση την Μ.Π.Δ. καταστρώνεται υπολογιστικό πλέγμα δύο συντεταγμένων: $x-t$ όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5-1.



Σχήμα 3.5-1 Απεικόνιση όγκου ελέγχου για την μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή.

Είναι γνωστές οι τιμές της θερμοκρασίας στους κόμβους την χρονική στιγμή: t

$$T_w^0, T_p^0, T_E^0$$

Ζητώνται οι τιμές της θερμοκρασίας σε αυτούς τους κόμβους τη χρονική στιγμή: $t + \Delta t$ (δηλαδή την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή):

$$T_w^1, T_p^1, T_E^1$$

Ολοκληρώνοντας την (3.5.1) στον όγκο αναφοράς από w ως e και στο χρονικό διάστημα από t ως $t + \Delta t$ (θεωρώντας $\rho, C = const$) είναι:

$$(3.5.2): \quad \rho \cdot C \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial x} dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad \Rightarrow \quad T_p = const$$

$$\Rightarrow \rho \cdot C \cdot \Delta x (T_p^1 - T_p^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_E \cdot (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] dt \quad (3.5.3)$$

Όπου η θερμοκρασία T_p θεωρήθηκε σταθερή στον όγκο ελέγχου.

Για την λύση του ολοκληρώματος $\int_t^{t+\Delta t} \dots dt$ πρέπει να συμφωνηθεί ο τρόπος που η θερμοκρασία T_p θα μεταβάλλεται από την στιγμή t ως την $t + \Delta t$ δηλαδή σε κάθε διάστημα Δt .

Μπορούν να γίνουν οι εξής 3 υποθέσεις:

- (1) T_p σταθερά και ίση προς T_p^o την χρονική στιγμή t .
- (2) T_p σταθερά και ίση προς T_p^1 την χρονική στιγμή $t + \Delta t$
- (3) T_p μεταβαλλόμενη γραμμικά με τον χρόνο

και οι τρεις παραπάνω υποθέσεις εκφράζονται από την γενική σχέση:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p \cdot dt = [f \cdot T_p^1 + (1-f) \cdot T_p^o] \cdot \Delta t \quad (3.5.4)$$

όπου:

$$f = \text{παράγοντας στάθμισης με τιμές από 0 ως 1.}$$

Οπότε έτσι η επίλυση της (3.5.3) θα αποτελεί την παρακάτω γενική μορφή της Εξίσωσης Πεπερασμένων Διαφορών:

$$A_p \cdot T_p^1 = A_E \cdot [f \cdot T_E^1 + (1-f) \cdot T_E^o] + A_W \cdot [f \cdot T_W^1 + (1-f) \cdot T_W^o] + [A_p^o - (1-f) \cdot A_E - (1-f) \cdot A_W] \cdot T_p^o$$

: (3.5.5)

Εξίσωση Πεπερασμένων Διαφορών για Μεταβατική Μονοδιάστατη Αγωγή Θερμότητας

όπου:

$$A_E = \frac{ke}{(\delta x)e}$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)w}$$

$$A_p^o = \frac{\rho \cdot C \cdot \Delta x}{\Delta t}$$

$$A_p = f \cdot A_E + f \cdot A_W + A_p^o$$

Και: $f =$ από 0 ως 1 ανάλογα ποια υπόθεση υιοθετείται για την μεταβολή της θερμοκρασίας T_p στο χρονικό διάστημα από t ως $t + \Delta t$.

Σημείωση: Στα επόμενα για την απεικόνιση των θερμοκρασιών της επόμενης χρονικής στιγμής $t + \Delta t$ εφόσον δεν αναφέρονται οι εκθέτες «1» στις θερμοκρασίες θα εννοούνται.

Η (3.5.5) τροποποιείται ανάλογα με την υιοθέτηση κάποιων από τις υποθέσεις (1) ως (3).

Ειδικότερα:

ΥΠΟΘΕΣΗ (1) : ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ: $f = 0$

Τότε: $f = 0$ οπότε η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών (3.5.5) μορφοποιείται στην «ρητή» (explicit) έκφρασή της και απλουστεύεται στην:

$$A_p \cdot T_p^1 = A_E \cdot T_E^o + A_W \cdot T_W^o + (A_p - A_E - A_W) \cdot T_p^o \quad (3.5.6)$$

όπου:

$$A_E = \frac{ke}{(\delta x)_e}, \quad A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}, \quad A_p = \frac{\rho \cdot C \cdot \Delta x}{\Delta t}$$

Πλεονέκτημα άμεσης διατύπωσης:

Άμεσος υπολογισμός της άγνωστης T_p μέσω της σχέσης (3.5.6) διότι οι θερμοκρασίες T_E^o, T_W^o και T_p^o είναι ήδη γνωστές από την προηγούμενη χρονική στιγμή.

Μειονέκτημα άμεσης διατύπωσης:

Αν ο όρος $(A_p - A_E - A_W)$ προκύψει αρνητικός τότε θα δώσει αρνητική T_p (φυσικώς απαράδεκτο).

Οπότε για την αποτροπή αυτού πρέπει:

$$\Delta t < \frac{\rho \cdot C (\Delta x)^2}{2 \cdot k}$$

επομένως απαιτείται πλέγμα τέτοιο ώστε: $k = k_e = k_w$ και: $\Delta x = (\delta x)_w = (\delta x)_e$

και τελικά συμπεραίνεται ότι απαιτείται μικρό χρονικό βήμα Δt ή μεγάλο χωρικό βήμα Δx .

Όμως μείωση του χωρικού βήματος με σκοπό την αύξηση της υπολογιστικής ακρίβειας απαιτεί σημαντική μείωση και του χρονικού βήματος Δt καθιστώντας την μέθοδο αντισοικονομική από πλευράς υπολογιστικού χρόνου.

ΥΠΟΘΕΣΗ (2) : ΕΜΜΕΣΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ: $f = 1$

Τότε: $f = 1$ οπότε η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών (3.5.5) μορφοποιείται στην «πεπλεγμένη» (implicit) έκφρασή της και απλουστεύεται στην:

$$A_p \cdot T_p^1 = A_E \cdot T_E^1 + A_W \cdot T_W^1 + A_p^o \cdot T_p^o \quad (3.5.7)$$

όπου:

$$A_E = \frac{ke}{(\delta x)_e}, \quad A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}, \quad A_p^o = \frac{\rho \cdot C \cdot \Delta x}{\Delta t}, \quad A_p = A_E + A_W + A_p^o$$

Πλεονέκτημα έμμεσης διατύπωσης:

Το χρονικό βήμα μπορεί να ληφθεί οσοδήποτε μεγάλο εξοικονομώντας υπολογιστικό χρόνο.

Μειονέκτημα έμμεσης διατύπωσης:

Η εύρεση της ζητούμενης T_p απαιτεί τις επίσης άγνωστες T_E και T_W τη χρονική στιγμή $t + \Delta t$. Επομένως απαιτείται η επίλυση συστήματος τριδιαγώνιου μορφής με χρήση του ειδικών αλγορίθμων όπως για παράδειγμα ο TDMA.

ΥΠΟΘΕΣΗ (3) : ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ CRANK NICOLSON: $f = 0,5$

Τότε: $f = 0,5$ και η (3.5.5) απλουστεύεται στην:

$$A_p \cdot T_p^1 = \frac{A_E}{2} \cdot (T_E^1 + T_E^o) + \frac{A_W}{2} \cdot (T_W^1 + T_W^o) + \left(A_p^o - \frac{A_E}{2} - \frac{A_W}{2} \right) \cdot T_p^o \quad (3.5.8)$$

όπου:

$$A_E = \frac{ke}{(\delta x)_e}, \quad A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}, \quad A_p^o = \frac{\rho \cdot C \cdot \Delta x}{\Delta t}$$

$$A_p = \frac{A_E}{2} + \frac{A_W}{2} + A_p^o$$

Πλεονέκτημα διατύπωσης Crank Nicolson:

Μεγαλύτερη ακρίβεια έναντι των δυο άλλων διατυπώσεων.

Μειονέκτημα διατύπωσης Crank Nicolson:

Παρόλο που για οσοδήποτε μεγάλο Δt η υπόθεση αυτή δίνει αποδεκτή μαθηματικά λύση είναι πιθανό πολλές φορές η λύση αυτή να μην ευσταθεί κατά τη φυσική έννοια.

Επιπρόσθετα, απαιτείται και πάλι λύση τριδιαγώνιου συστήματος εξισώσεων για τον προσδιορισμό της T_p^1 συναρτήσει των επίσης άγνωστων θερμοκρασιών κατά τη χρονική στιγμή $t + \Delta t$: T_E^1 και T_W^1 .

Συμπέρασμα:

Από τις (3) παραπάνω διατυπώσεις προτιμάται η "ΕΜΜΕΣΗ".

Άλλες διατυπώσεις είναι αποδεκτές και έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί.

3.6 Επίλυση με την Μ.Π.Δ της μόνιμης διδιάστατης αγωγής θερμότητας

Έχει προηγηθεί η αναλυτική παρουσίαση της Μ.Π.Δ για την μόνιμη διδιάστατη αγωγή θερμότητας κατά τη περιγραφή της Μεθόδου Ολοκλήρωσης σε όγκο Αναφοράς.

Έστω ορθογώνιος χώρος. Η δ.ε. της μόνιμης διδιάστατης αγωγής θερμότητας είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S = 0 \quad (3.6.1)$$

ή:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

που ισχύει για: $kx = ky = k$ και χωρίς πηγές θερμότητας που συμβολίζονται Φ ή S (θερμότητα που εκλύεται από πηγές εντός του όγκου αναφοράς).

Πάνω στον ορθογώνιο χώρο πρέπει τοποθετείται κατάλληλο το αριθμητικό πλέγμα και τότε η διαφορική εξίσωση μετατρέπεται σε εξίσωση πεπερασμένων διαφορών είτε με αντικατάσταση των διαφορικών τελεστών της εξίσωσης σε μορφή πεπερασμένων διαφορών είτε με ολοκλήρωση της εξίσωσης πάνω σε όγκους αναφοράς που περιβάλλουν τον κεντρικό κόμβο P της υπολογιστικής κυψέλης.

Με βάση την ανάλυση της παραγράφου 3.2 η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών που προκύπτει είναι:

$$A_p \cdot T_p = A_E \cdot T_E + A_W \cdot T_W + A_N \cdot T_S + B = 0 \quad (3.6.2)$$

όπου:

$$A_E = \frac{ke \cdot \Delta y}{(\delta x)_e}$$

$$A_W = \frac{k_w \cdot \Delta y}{(\delta x)_w}$$

$$A_N = \frac{kn \cdot \Delta x}{(\delta y)_n}$$

$$A_S = \frac{ks \cdot \Delta x}{(\delta y)_s}$$

$$A_p = A_E + A_W + A_N + A_S - S_p \Delta x \Delta y$$

και: $B = S_C \cdot \Delta x \cdot \Delta y$ η ένταση της πηγής θερμότητας

Όπου: S_C η ένταση των εσωτερικών πηγών.

Υποτέθηκε γραμμική μεταβολή του ρυθμού παραγωγής θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, δηλαδή:

$$S = S_C + S_p \cdot T_p$$

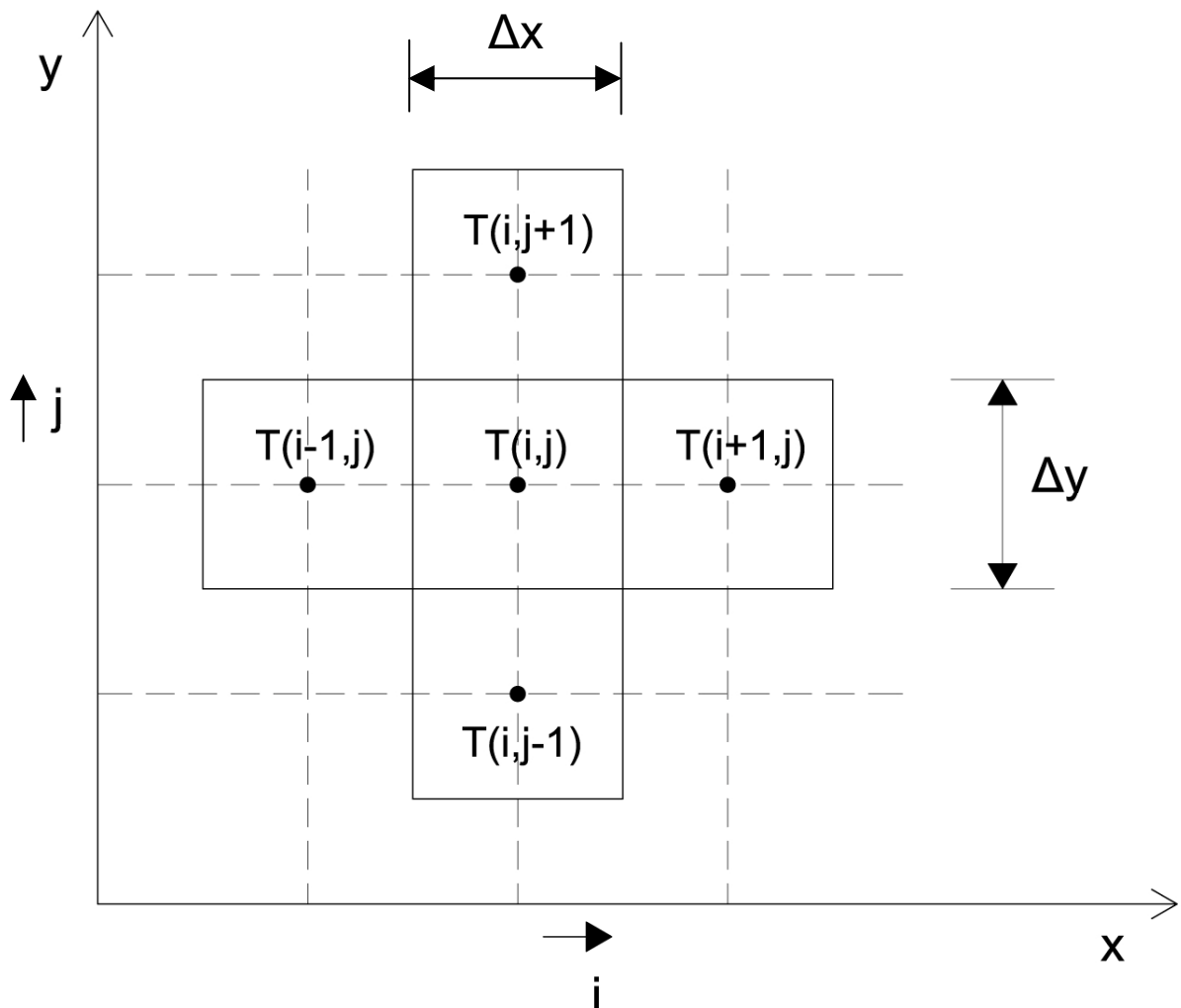
Η εξίσωση πρέπει να λυθεί με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες τύπου Neumann, Dirichlet ή μικτού τύπου. Οι οριακές συνθήκες διακριτοποιούνται στα οριακά σημεία του χωρίου ολοκλήρωσης.

Συνεπώς διατίθεται για επίλυση ένα σύστημα τόσων αλγεβρικών εξισώσεων όσων και αγνώστων. Άγνωστοι είναι οι θερμοκρασίες στους κόμβους του αριθμητικού πλέγματος.

Στην περίπτωση όπου ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k είναι σταθερός, ανεξάρτητος της θερμοκρασίας, δεν υπάρχουν εσωτερικές πηγές θερμότητας στο χώρο και οι αποστάσεις Δx και Δy είναι ίσες, η σχέση απλοποιείται στην:

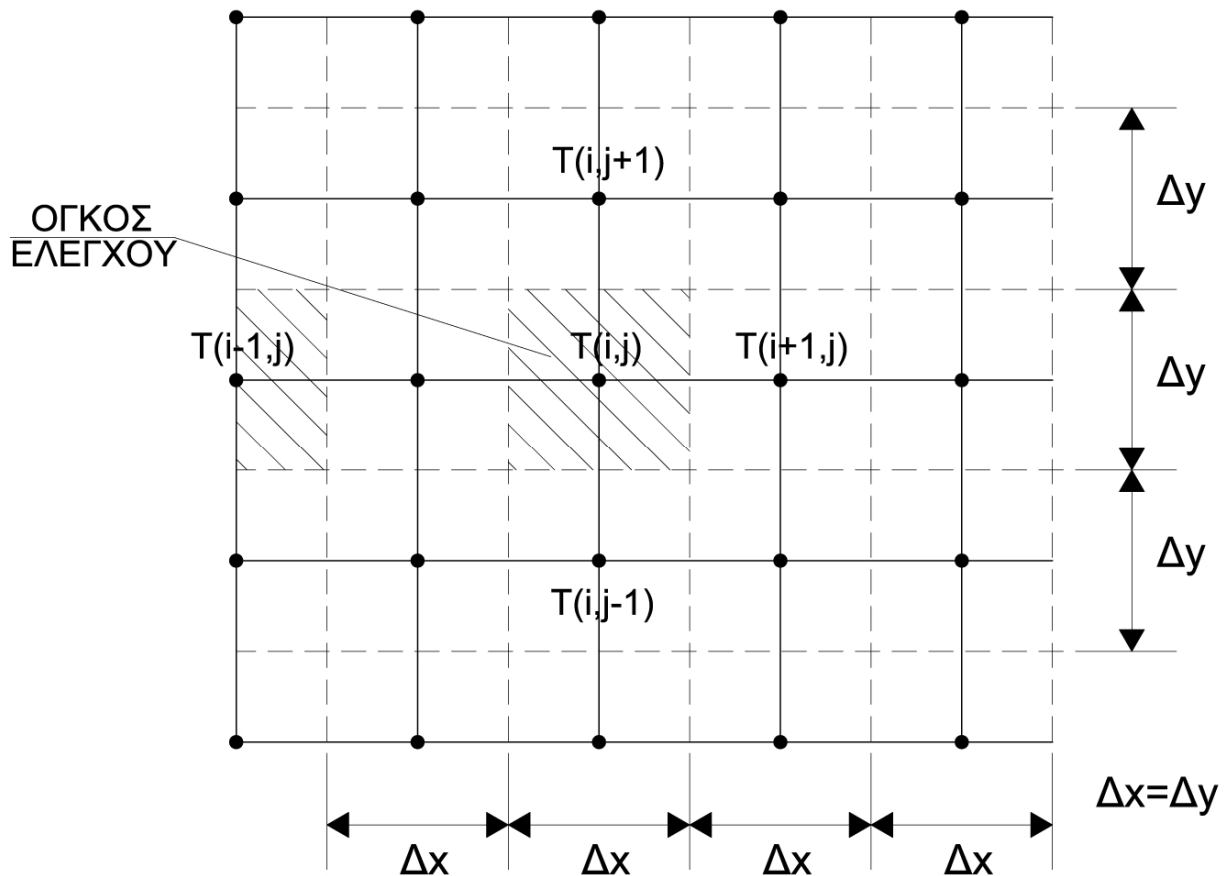
$$T_P = \frac{1}{4}(T_E + T_W + T_N + T_S)$$

γνωστή και ως σχέση των πέντε σημείων. Η σχέση απλά δείχνει ότι κάθε κεντρικό σημείο P επηρεάζεται από τα τέσσερα γειτονικά του σημεία όπως καθαρά φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 3.6-1 Υπολογιστικό πλέγμα με $Dx = Dy$.

Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από ορθογώνια τμήματα. Δυο είδη πλεγμάτων χρησιμοποιούνται με αυτήν την τεχνική: α) πλέγμα στο οποίο τα όρια της περιοχής επίλυσης να είναι πλεγματικές γραμμές και: β) πλέγμα στο οποίο τα όρια επίλυσης να είναι πλευρές όγκων αναφοράς.



Σχήμα 3.6-2 Δημιουργία του πλέγματος και εν συνεχεία τοποθέτηση των όγκων αναφοράς.

Συνεπώς χρησιμοποιώντας τη τεχνική α) οι αποστάσεις $\Delta x, \Delta y$ είναι οι διαστάσεις του “όγκου” αναφοράς στο μέσον του οποίου βρίσκεται ο κόμβος P που εξετάζεται κάθε φορά εφ’ όσον πρώτα έχουν χαραχτεί οι πλεγματικές γραμμές στις επιθυμητές θέσεις και στη συνέχεια χαράζονται οι όγκοι αναφοράς, έτσι ώστε να διχοτομούν τις αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών κόμβων.

Οι όγκοι ελέγχου «τοποθετούνται» με τέτοιο τρόπο ώστε να διχοτομούν τις αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών κόμβων.

Σύμφωνα με τη τεχνική β) πρώτα τοποθετούνται οι όγκοι αναφοράς και εν συνεχεία οι πλεγματικές γραμμές.

3.7 Επίλυση με την Μ.Π.Δ της μεταβατικής διδιάστατης αγωγής θερμότητας

Αυτή διέπεται από την δ.ε.:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (3.7.1)$$

Η διακριτοποίηση της παραπάνω δ.ε. επιτρέπει την αριθμητική επίλυση αφού πλέον η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται στην ακόλουθη ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (3.7.2):

$$A_p \cdot T_p = A_E \cdot [f \cdot T_E + (1-f) \cdot T_E^o] + A_W \cdot [f \cdot T_W + (1-f) \cdot T_W^o] + A_N \cdot [f \cdot T_N + (1-f) \cdot T_N^o] + \\ + A_S \cdot [f \cdot T_S + (1-f) \cdot T_S^o] + [A_p^o - (1-f) \cdot (A_E + A_W + A_N + A_S - S_p \cdot \Delta x \cdot \Delta y)] \cdot T_p^o + S_C \Delta x \Delta y$$

όπου:

$$A_E = \frac{ke \cdot \Delta y}{(\delta x)_e}$$

$$A_W = \frac{k_w \cdot \Delta y}{(\delta x)_w}$$

$$A_N = \frac{kn \cdot \Delta x}{(\delta y)_n}$$

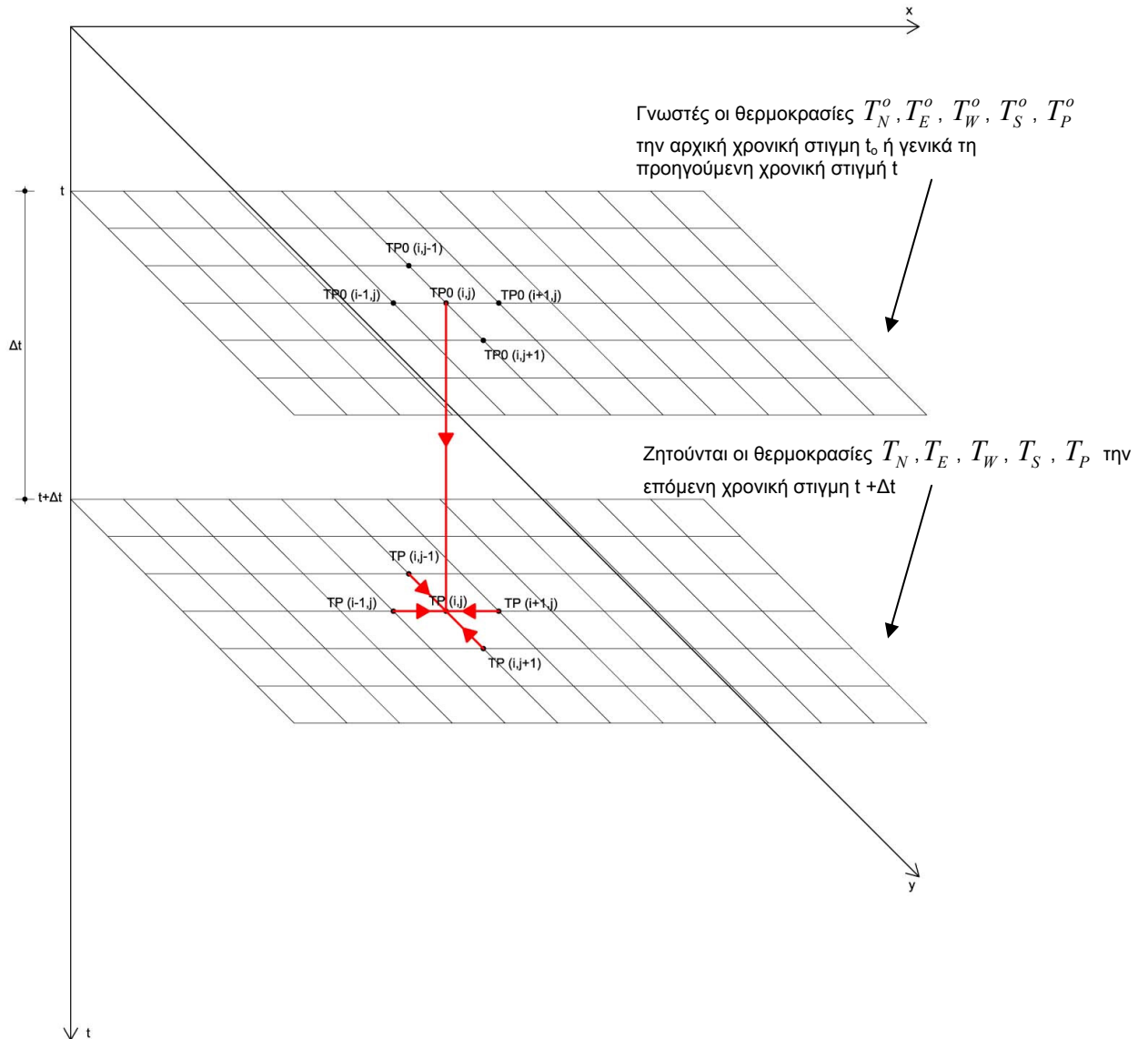
$$A_S = \frac{ks \cdot \Delta x}{(\delta y)_s}$$

$$A_p^o = \rho \cdot C \cdot \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\Delta t}$$

$$A_p = A_p^o + f \cdot (A_E + A_W + A_N + A_S - S_p \cdot \Delta x \cdot \Delta y)$$

$$f = \begin{cases} 0 & \text{για άμεση διατύπωση υπόθεσης μεταβολής } T_p \\ 0,5 & \text{για διατύπωση μεταβολής } T_p \text{ κατά Crank-Nicolson} \\ 1 & \text{για έμμεση διατύπωση υπόθεσης μεταβολής } T_p \end{cases}$$

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (3.7.2) γίνεται με κάποια επαναληπτική μέθοδο όπως Gauss-Siedel, Jacobi, υπερχαλάρωσης (SOR) ή εναλλασσόμενης διεύθυνσης σάρωσης (ADI) κλπ.



Σχήμα 3.7-1 Παράσταση Πλέγματος Διδιάστατης Μεταβατικής Αγωγής Θερμότητας.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει για τη χρήση της ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗΣ: $f = 0$

Στη προκειμένη περίπτωση εφόσον χρησιμοποιηθεί η άμεση διατύπωση για τον παράγοντα στάθμισης μεταβολής θερμοκρασίας «f» δηλαδή για τον τρόπο που η θερμοκρασία T_p θα μεταβάλλεται μέσα σε κάθε διάστημα Δt από την στιγμή t ως την $t + \Delta t$ σε αντιστοιχία με την μεταβατική μονοδιάστατη ανάλυση της παρ/φου: 3.5 παρατηρείται ότι:

Η διακριτοποιημένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών λαμβάνει την ρητή έκφρασή της και εισάγονται περιορισμοί σχετικά με την επιλογή του χρονικού βήματος Δt ή των χωρικών βημάτων (αλγεβρικών διαφορών) Δx και Δy κατά την οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση αντίστοιχα. Ο περιορισμός για την εκλογή του χρονικού βήματος είναι πλέον:

$$\Delta t < \frac{\rho \cdot C \cdot \Delta x_i \Delta y_j}{kn + kw + ks + ke}$$

Χρήση της ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗΣ στον υπολογιστικό κώδικα VG-HEX

Στον υπολογιστικό κώδικα VG-HEX -όπως εξηγείται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια- θεωρούνται μεταξύ άλλων τα εξής:

1). Το έδαφος ανεξαρτήτως σύστασης σε όλα τα παραδείγματα που αναλύονται θεωρείται ομοιογενές με σταθερή κατ'όγκον θερμοχωρητικότητα σε όλο το υπολογιστικό πλέγμα.

RCE = Κατ' όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους = Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους σε $J/m^3\text{ }^\circ\text{C}$

$$RCE = C(i, j) = \rho(i, j) \cdot Cp(i, j) = \text{const } (J/m^3\text{ }^\circ\text{C}) \text{ για όλο το πλέγμα}$$

Όπου: $\rho(i, j)$ = πυκνότητα εδάφους (kg/m^3)

$Cp(i, j)$ = ειδική θερμοχωρητικότητα εδάφους ($J/kg \text{ }^\circ\text{C}$)

2). Η Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους ($W/m^\circ\text{C}$) λαμβάνεται μεταξύ των κόμβων ως συνάρτηση μόνο της κατακόρυφης διεύθυνσης (άξονας z) με τρόπο που αναλυτικά περιγράφεται στην υπορουτίνα: AssignCoefMatrisses.

Επομένως πρέπει να γίνει έλεγχος για την απαίτηση του ελάχιστου επιτρεπόμενου χρονικού βήματος υπολογισμών. Ως παράδειγμα λαμβάνεται έδαφος από δολομιτικό ασβεστόλιθο.

Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους «RCE» = $13.400.000 J/m^3\text{ }^\circ\text{C}$

Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: $2,4 (W/m^\circ\text{C})$

Η μεγαλύτερη τιμή που λαμβάνει η ειδική θερμική αγωγιμότητα αποτελεί και τη δυσμενέστερη περίπτωση που πρέπει να ληφθεί για τον υπολογισμό του μικρότερου επιτρεπόμενου χρονικού βήματος. Αυτή η μεγαλύτερη τιμή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας, για το παράδειγμα εδάφους από δολομιτικό ασβεστόλιθο που εξετάζεται, είναι $7,2 W/m^\circ\text{C}$ όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς της υπορουτίνας AssignCoefMatrisses που αναλύονται στη συνέχεια.

α) Για "λεπτότητα" πλέγματος $DX = DY = 0,5 \text{ m}$

$$\Delta t \leq \frac{C(i, j)\Delta x\Delta y}{ke + kn + kw + ks} = \frac{RCE \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{4 \cdot LE1} = \frac{13.400.000 \cdot (0,5)^2}{4 \cdot 7,2} \Rightarrow \Delta t \leq 116.319s$$

β) Για "λεπτότητα" πλέγματος $DX = DY = 0,2 \text{ m}$

$$\Delta t \leq \frac{C(i, j)\Delta x\Delta y}{ke + kn + kw + ks} = \frac{RCE \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{4 \cdot LE1} = \frac{13.400.000 \cdot (0,2)^2}{4 \cdot 7,2} \Rightarrow \Delta t \leq 18.611s$$

Επομένως για τη περίπτωση β) ο χρήστης δεν μπορεί να εργαστεί με ημερήσιο χρονικό βήμα ανάλυσης και θα πρέπει να εξετάσει την εκλογή μεγαλύτερου χωρικού βήματος DX ή DY ή συνδυασμού αυτών ανάλογα.

Ένας παρόμοιος τρόπος διερεύνησης του απαιτούμενου χρονικού βήματος είναι μέσω του αριθμού Fourier (Fo) ο οποίος είναι ανεξάρτητος του αριθμού κόμβων του πλέγματος.

Για ομοιόμορφο πλέγμα $\Delta x = \Delta y$ έχει αποδειχθεί (βλ. παράγραφο 3.2) ότι πρέπει να ικανοποιείται ο περιορισμός:

$$Fo \leq \frac{1}{4}$$

Από τον ορισμό:
$$Fo = \frac{\alpha_g \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2}$$

Όπου:

$$\alpha_g = \frac{k_g}{\rho \cdot Cp_g} \quad \text{η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα εδάφους σε } m^2/s$$

Για το παράδειγμα εδάφους από δολομιτικό ασβεστόλιθο:

Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους «RCE» = 13.400.000 J/m³°C
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: 2,4 (W/m°C)

Σε βάθος υπεδαφικού πεδίου τέτοιο όπως προσδιορίζεται από την υπορουτίνα AssignCoefMatrisses η ειδική θερμική αγωγιμότητα αυξάνει την αρχική τιμή της (2,4 W/m°C) μέχρι το μέγιστο των 7,2 W/m°C. Τότε:

$$\alpha_g = \frac{7,2}{13.400.000} \Rightarrow \alpha_g = 5,373 \cdot 10^{-7} m^2 / s$$

Επομένως:

α) Για "λεπτότητα" πλέγματος $\Delta X = \Delta Y = 0,5 \text{ m}$

$$Fo = \frac{\alpha_g \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{4} \Rightarrow \Delta t \leq 116.322s$$

β) Για "λεπτότητα" πλέγματος $\Delta X = \Delta Y = 0,2 \text{ m}$

$$Fo = \frac{\alpha_g \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{4} \Rightarrow \Delta t \leq 18.611s$$

4. Ανάπτυξη Δομής Λογισμικού «VG-HEX»

4.1 Πίνακας Παραμέτρων

Οι παράμετροι εισόδου που μπορούν να δοθούν από τον χρήστη είναι:

Αριθμός Χρονικών Μονάδων «m»
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX»
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY»
Βάθος Γεώτρησης «YY» σε m
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» σε m
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω»
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» σε °C
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Targ» σε °C
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» σε W/mK
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» σε m
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» σε m
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» σε m
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» σε J/kg°C
Παροχή Νερού στον ΚΓΕ «MN» σε kg/s
Πλήθος ΚΓΕ εντός της οπής γεώτρησης «NS»
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» σε W/m ² K
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» σε W/mK
Παράγων Στάθμισης Μεταβολής Θερμοκρασίας Εξίσωσης Π.Δ. «F»
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» σε s
Κατ'όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» σε J/ m ³ °C

4.2 Εισαγωγή Δεδομένων

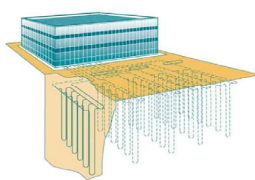
Η εισαγωγή δεδομένων στον υπολογιστικό κώδικα γίνεται στο φύλλο INPUT και ένα τυπικό παράδειγμα παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα:

VG-HEX

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

Αριθμός Χρονικών Μονάδων «m» :	5
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,5
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,5
Βάθος Γεώτρησης «YY» (m) :	100
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	13
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	8
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Targ» (°C) :	8
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» :	1
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,5
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4185
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,12
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» :	500
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» :	0,41
Παράγων Στάθμισης Μεταβολής Θερμοκρασίας Εξίσωσης Π.Δ. «F» :	<input type="radio"/> F= 0 (Άμεση Διατύπωση) <input checked="" type="radio"/> F= 1 (Έμμεση Διατύπωση) <input type="radio"/> F= 0,5 (Διατύπωση Crank Nicolson)

Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	24	x	3600	=	86400	s
Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» :	2100000					



Σχήμα 4.2-1 Μορφή Φύλλου Εισαγωγής Δεδομένων.

Με βάση το παραπάνω σχήμα για τις επιλεγμένες παραμέτρους εισόδου:

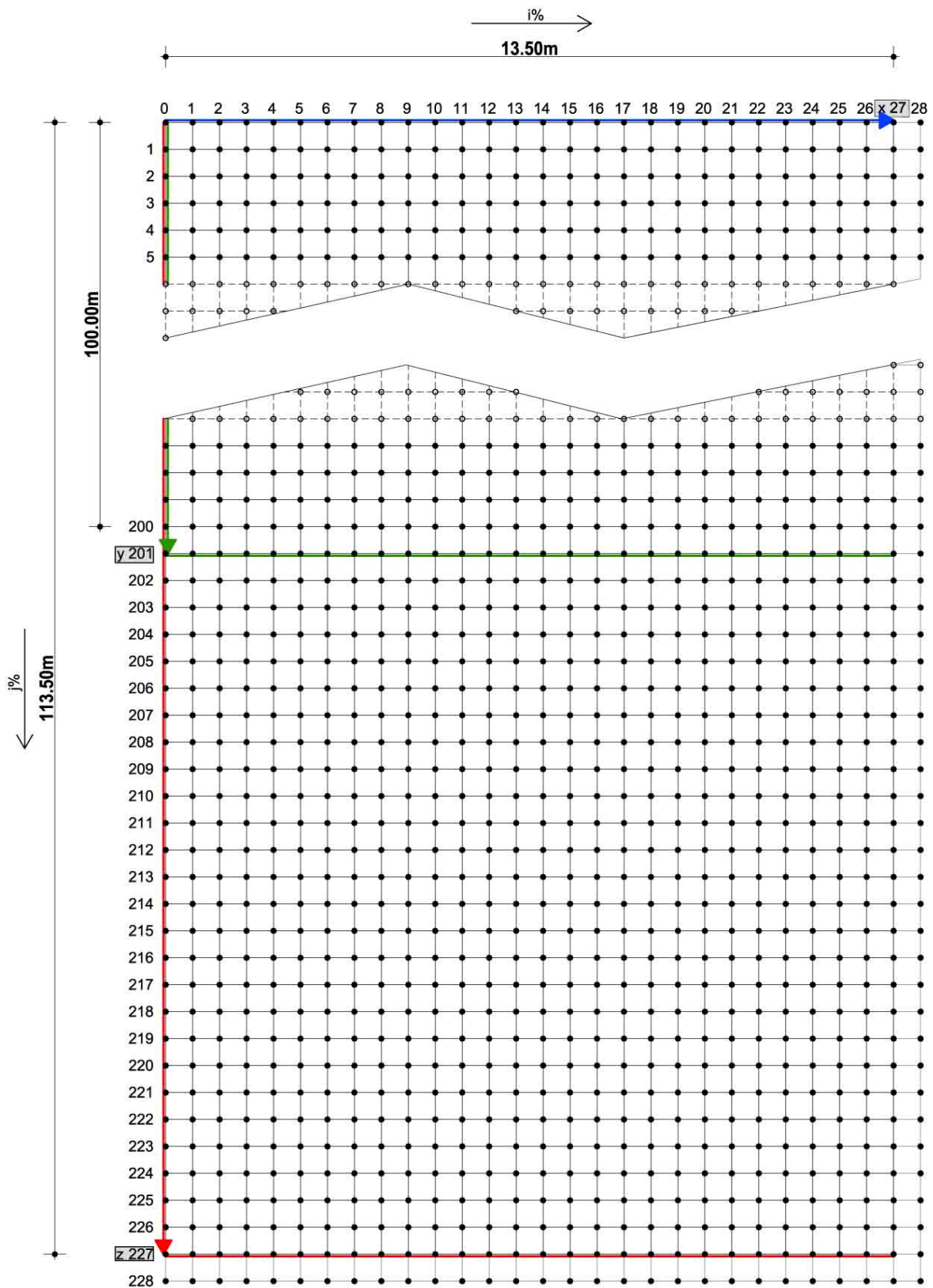
$$XX=13 \text{ m}$$

$$YY = 100 \text{ m}$$

Τότε ο κώδικας θέτει:

$$\begin{aligned}
 x\% = x = 27 & \quad (\text{μέγιστος αριθμοδείκτης οριζόντιας κατεύθυνσης}) \\
 y\% = y = 201 & \quad (\text{μέγιστος αριθμοδείκτης κατακόρυφης κατεύθυνσης μέχρι το βάθος της γεώτρησης}) \\
 z\% = z = 227 & \quad (\text{μέγιστος αριθμοδείκτης κατακόρυφης κατεύθυνσης μέχρι το πέρας του υπολογιστικού πλέγματος})
 \end{aligned}$$

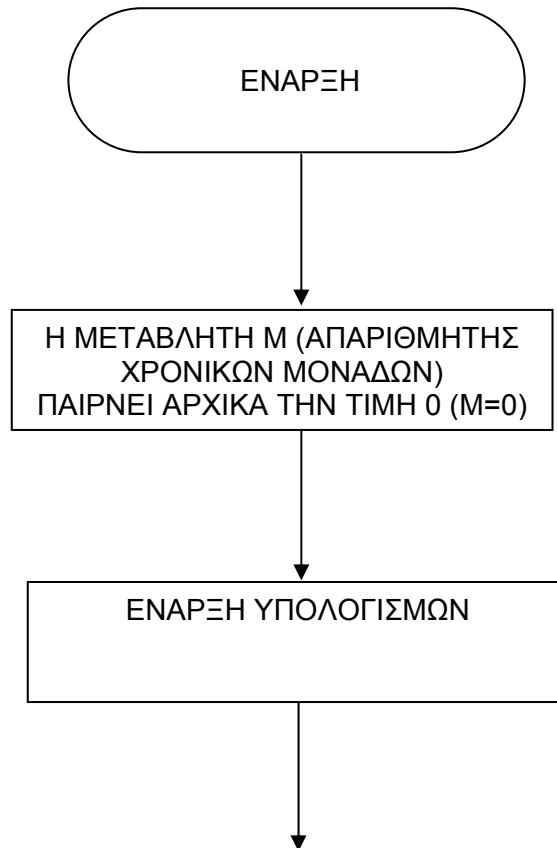
και καταστρώνεται το ακόλουθο υπολογιστικό πλέγμα:



Σχήμα 4.2-2: Υπολογιστικό Πλέγμα για το παράδειγμα δεδομένων εισόδου του Σχήματος 4.2-1.

4.3 Κατάστρωση Δομής Υπολογιστικού Κώδικα

Παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία υπολογισμού που ακολουθεί ο κώδικας βήμα – βήμα με βάση το παράδειγμα δεδομένων εισόδου της παραγράφου 4.2:

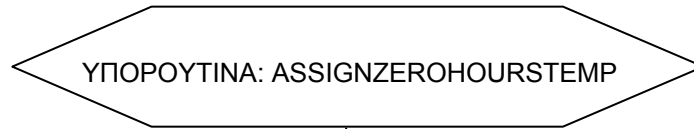


Στο φύλλο αποτελεσμάτων «TR-Calculations» του προγράμματος δημιουργούνται οι εγγραφές:

ΧΡΟΝ. ΜΟΝΑΔΑ m% (συμβ. Μ)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ TR(1) TR(1)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ TR(y) TR(201)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΧΡΟΝ. ΜΟΝΑΔΩΝ RunningTime(m%) - RunningTime(m%-1)	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ Timer-StartTime
------------------------------	--	--	--	---

Δηλαδή εμφανίζονται:

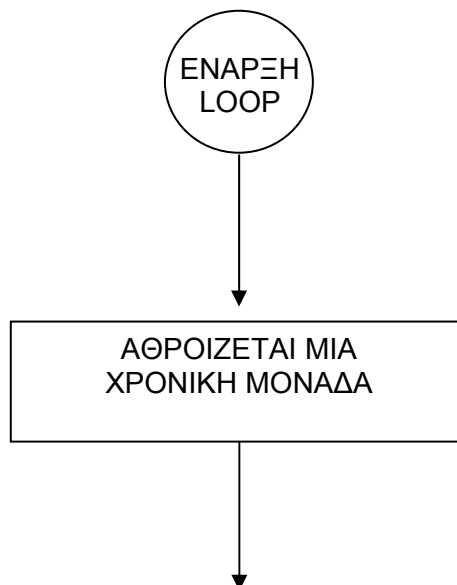
- Ο αριθμός της χρονικής μονάδας (π.χ ώρα). Κάθε τιμή m εμφανίζεται αμέσως μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών της.
- Η θερμοκρασία νερού επιστροφής στην έξοδο του Κ.Γ.Ε προς την αντλία θερμότητας (στον κόμβο με δείκτη κατακόρυφης κατεύθυνσης j=1).
- Η θερμοκρασία νερού επιστροφής στο κατώτερο σημείο του Κ.Γ.Ε (δηλαδή στον κόμβο με δείκτη κατακόρυφης κατεύθυνσης j= y% = 201 στο βάθος που είναι το πέρας της γεώτρησης).
- Ο χρόνος ολοκλήρωσης που δαπανά ο Η/Υ για τον υπολογισμό μίας χρονικής μονάδας μεταξύ t και t + Δt.
- Ο χρόνος που έχει δαπανήσει ο Η/Υ από την αρχή των υπολογισμών μέχρι την τρέχουσα χρονική μονάδα που εξετάζεται.



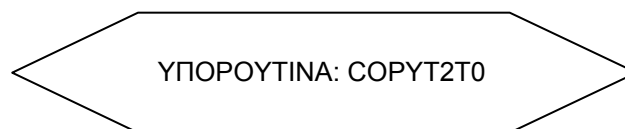
Τοποθετούνται σε όλο το πλέγμα αρχικές τιμές θερμοκρασίας εδάφους στις θέσεις των κόμβων $T(i,j)$.

Αρχικά λαμβάνεται η τιμή που έδωσε ο χρήστης: $TP0(1,1) = T_{arx} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ η οποία τοποθετείται κατακόρυφα από τον κόμβο (1,1) μέχρι τον (1,227) κατά βάθος. Στη συνέχεια από τον (1,1) μέχρι τον (1,27) η υπορουτίνα αντιγράφει τις θερμοκρασίες κατά την οριζόντια κατεύθυνση.

Με αυτή τη διαδικασία γίνεται η αρχική προσέγγιση των θερμοκρασιών την χρονική στιγμή $m = m_0 = 0$ ώστε να μπορεί να ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία και να υπολογιστούν οι θερμοκρασίες την επόμενη χρονική στιγμή $m = m + 1$.



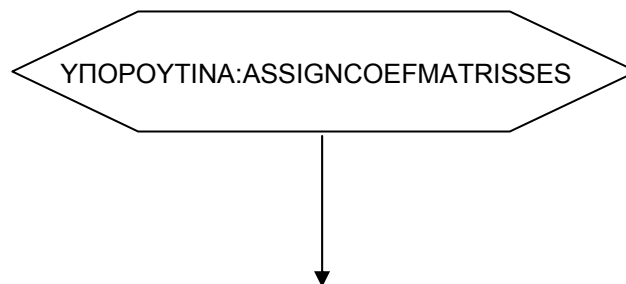
Αρχικά ήταν και εννοείται $m=0$ οπότε την πρώτη φορά που θα «περάσει» ο κώδικας σε αυτό το σημείο θα ξεκινήσει η υπολογιστική διαδικασία για: $m=0 + 1 \Rightarrow m=1$. Την επόμενη φορά που θα έρθει ο κώδικας στην αρχή του βρόχου θα προστεθεί μία χρονική μονάδα και τώρα θα είναι: $m = m + 1 \Rightarrow 2 = 1 + 1$ και θα ξεκινήσουν οι υπολογισμοί για $m=2$ κ.ο.κ



Αυτή θέτει ως προηγούμενες θερμοκρασίες εδάφους αυτές τις $T(i,j)$ που τέθηκαν (στην εκκίνηση όταν ήταν $m=0$) ή υπολογίστηκαν (κατά την ολοκλήρωση των υπολογισμών της προηγούμενης χρονικής στιγμής).

Κάθε φορά στην αρχή των υπολογισμών της χρονικής μονάδας στην οποία έχει φτάσει το πρόγραμμα, οι υπάρχουσες τιμές θερμοκρασίας εδάφους που έχουν γραφτεί στη μνήμη του Η/Υ (RAM) αμέσως μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών της προηγούμενης χρονικής στιγμής, ονομάζονται τώρα «προηγούμενες»: $T_0(i,j) = T(i,j)$. Αυτό γίνεται σε όλους τους κόμβους του πλέγματος από 1 έως 28 και 1 έως 227.

Για παράδειγμα έστω ότι το πρόγραμμα βρίσκεται στη χρονική μονάδα $m = 2$. Η υπορουτίνα CORYT2T0 θα πάρει τις θερμοκρασίες που βρέθηκαν για όλους τους κόμβους του πλέγματος στο τέλος της προηγούμενης επανάληψης (δηλαδή της χρονικής στιγμής $m = 1$) και θα τις θέσει ως προηγούμενες για να υπολογιστούν οι θερμοκρασίες της τρέχουσας χρονικής στιγμής $m = 2$.



Υπολογίζει τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας εδάφους k σε όλα τα j από 1 έως 227 (δηλαδή κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση)

Με γνωστό το k υπολογίζει τον όρο $A(1, j)$ της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών (δηλαδή για όλα τα j κατά βάθος με $i=1$).

Με γνωστό τον όρο $A(1, j)$ υπολογίζει τον όρο και $AP(1,j)$ της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών (δηλαδή για όλα τα j κατά βάθος με $i=1$).

Τοποθετεί σε όλους τους κόμβους του πλέγματος μέχρι την θέση $x\%+1 = 28$ τους όρους $AP(1,j)$ που υπολόγισε παραπάνω. (έτσι σε όλο το πλέγμα από 1 ως 227 κατακόρυφα και 1 ως 28 οριζόντια είναι γνωστοί οι όροι $A = A_E, A_W, A_N, A_S$ και: $AP = A_P$).

Παραδείγματος χάριν:
$$A_E = A_{i+1,j} = \frac{k_{i+1,j} \cdot \Delta y}{(\delta x)_{i+1,j}}$$

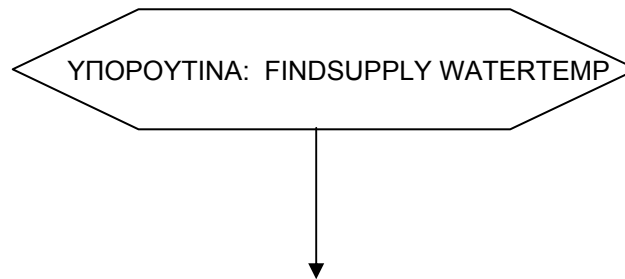
που στον κώδικα γράφεται: $A(1, J) = K(J) * DX / DY$

Ενώ: $AP(1, J) = F * (2 * A(1, J) + A(1, J + 1) + A(1, J - 1)) + AP0$

Υπολογίζει από $j=2$ μέχρι το όριο της γεώτρησης $j=201$ κατά βάθος τις τιμές συνολικής θερμικής αγωγιμότητας από συναγωγή και αγωγή (μητρώα ALFA & BHTA στον υπολογιστικό κώδικα) που απαιτούνται για την εύρεση των θερμοκρασιών νερού στον γεωθερμικό εναλλάκτη.

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του k άρα και του A άρα και του AP είναι συνάρτηση μόνο του βάθους (κατακόρυφης κατεύθυνσης). Επομένως σύμφωνα με την μονοδιάστατη θεώρηση:

$$A(1, J) = K(J) / DY$$



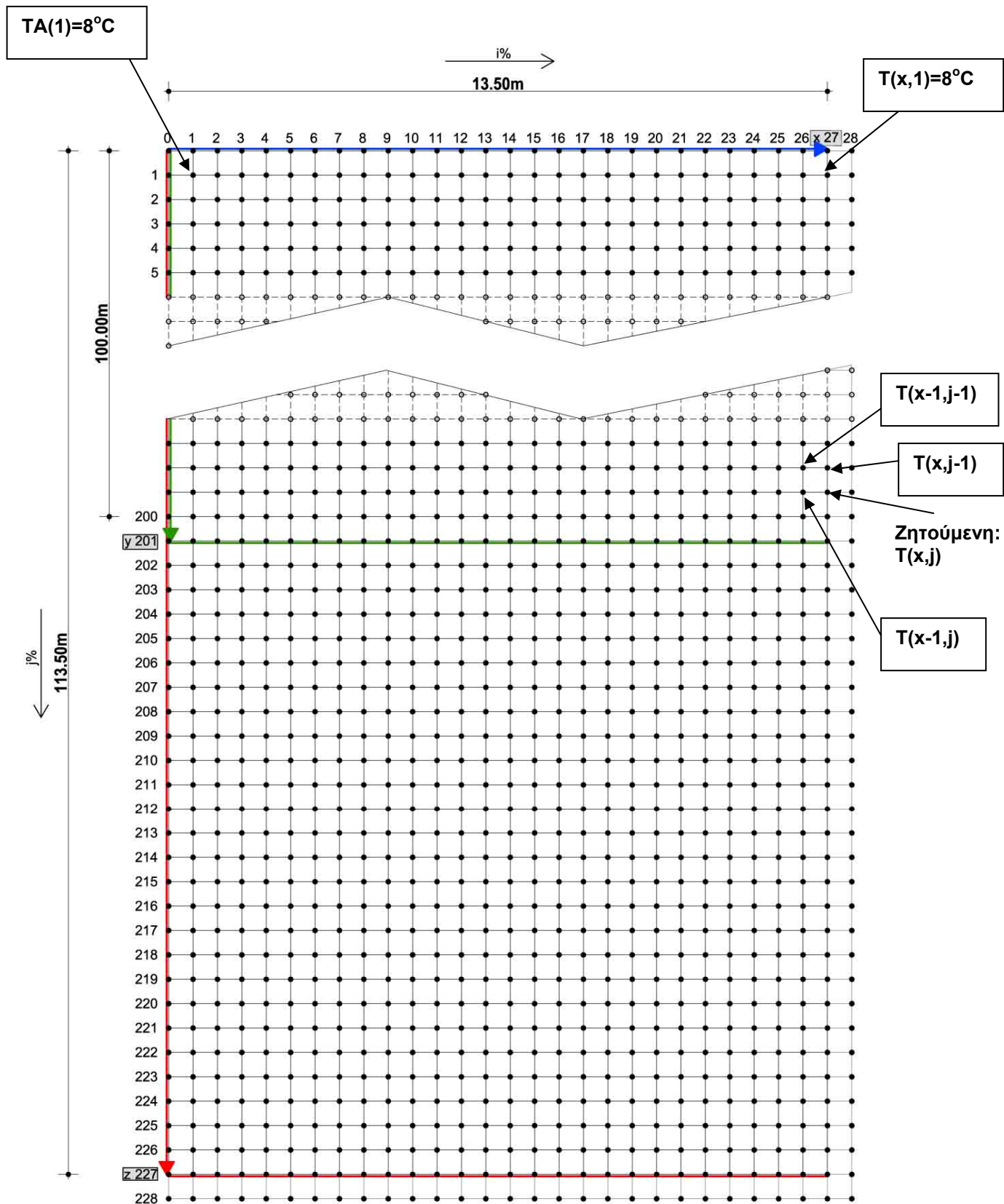
Θέτει την αρχική θερμοκρασία νερού προσαγωγής στον γεωθερμικό εναλλάκτη που εισήγαγε ο χρήστης (π.χ $T_{in} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$) στη θέση με $j=1$. Δηλαδή: $TA(1) = T_{in} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$

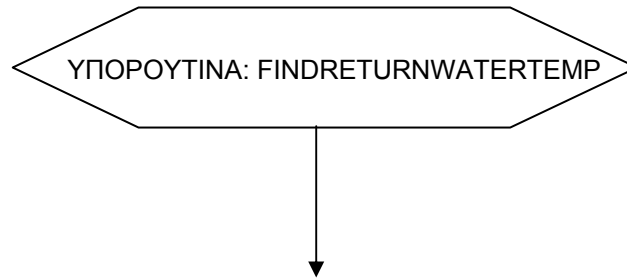
Θέτει αυτήν την θερμοκρασία ως θερμοκρασία εδάφους στο σύνορο της οπής γεώτρησης που βρίσκεται ο Κ.Γ.Ε. Η θερμοκρασία εδάφους σε αυτόν τον αρχικό κόμβο (27,1) είναι: $T(27,1) = 8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Βρίσκει με τη βοήθεια των μητρώων ALFA και BHTA την θερμοκρασία εδάφους σε όλα τα j από 2 έως 201 που είναι και το πέρας της γεώτρησης.

Θέτει αυτές τις τιμές θερμοκρασίας ως τη ζητούμενη θερμοκρασία νερού προσαγωγής στον γεωθερμικό εναλλάκτη από $j=2$ μέχρι και $j=201$.

Με βάση την οριζόντια απόσταση «XX» που ορίζει ο χρήστης ($XX = 13 \text{ m}$ για το παράδειγμα που εξετάζεται) η απεικόνιση υπολογισμού της θερμοκρασίας νερού προσαγωγής είναι:

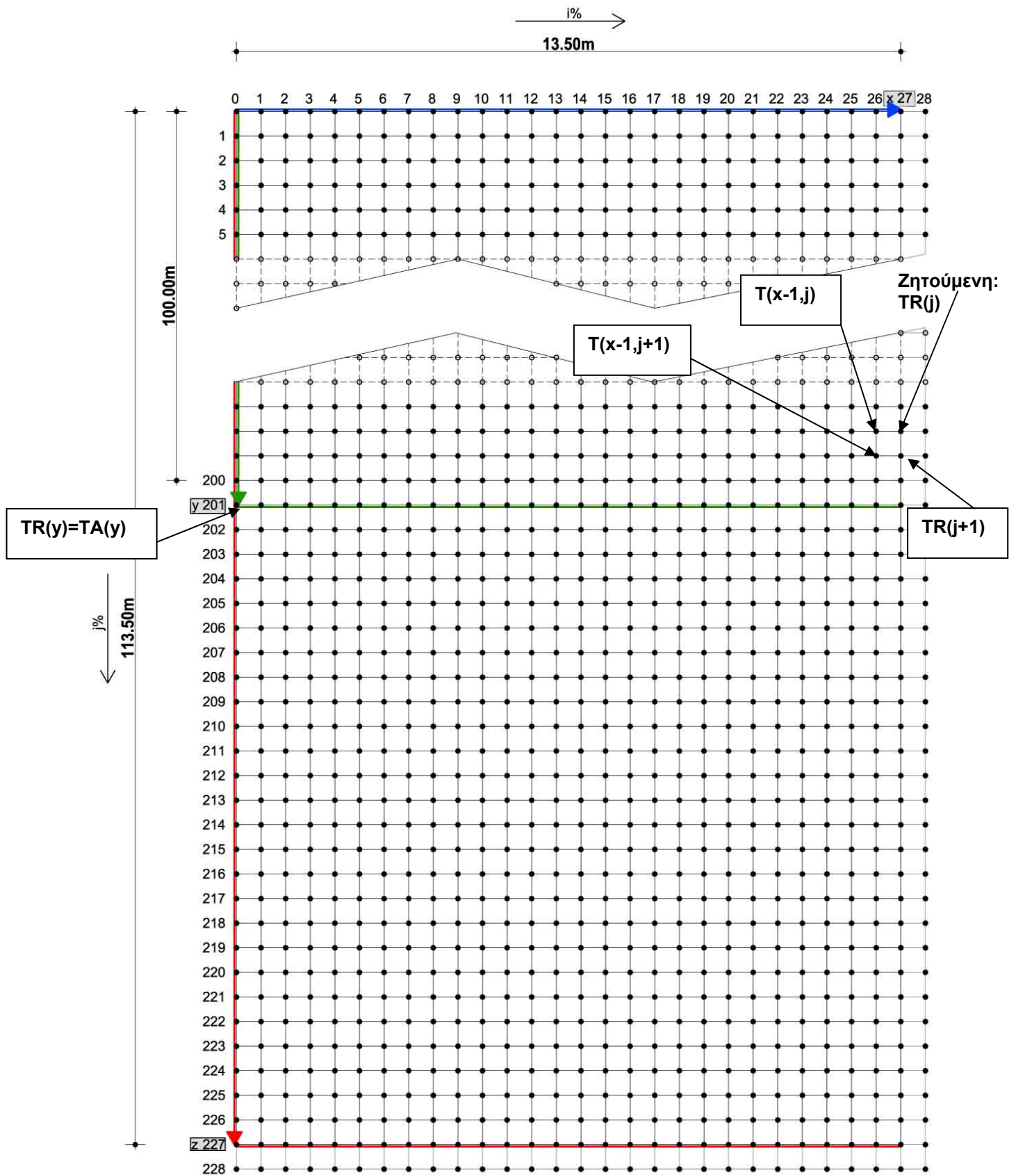




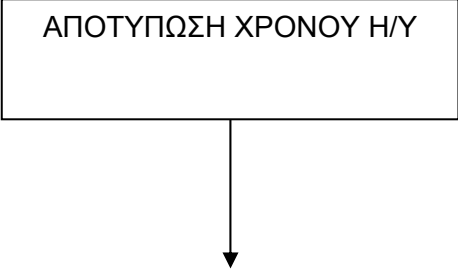
Τοποθετεί την θερμοκρασία νερού στο όριο της γεώτρησης κοινή. $TR(y) = TRy$ δηλαδή: $TR(201) = TRy$. Είναι η κοινή θερμοκρασία προσαγωγής και επιστροφής στο κατώτερο σημείο του ΚΓΕ.

Βρίσκει με τη βοήθεια των μητρώων ALFA και BHTA την θερμοκρασία νερού σε όλα τα j από $j = 200$ έως $j = 0$ με ανάποδο loop (ξεκινώντας από το πέρας της οπής γεώτρησης αντίθετα προς τη φορά του άξονα Y και ανεβαίνοντας προς την επιφάνεια).

Με βάση την οριζόντια απόσταση «XX» που ορίζει ο χρήστης ($XX = 13$ m για το παράδειγμα που εξετάζεται) η απεικόνιση υπολογισμού της θερμοκρασίας νερού προσαγωγής είναι:



ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΧΡΟΝΟΥ Η/Υ



Αποτυπώνεται ο χρόνος από το RTC του Η/Υ ώστε να υπολογιστεί ο χρόνος που δαπανήθηκε από τον κώδικα μέχρι τώρα για να υπολογιστούν οι θερμοκρασίες νερού. Αυτό γίνεται για να υπολογιστούν οι ζητούμενοι χρόνοι στο φύλλο αποτελεσμάτων «TR-calculations».

ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ
ΣΤΟ ΦΥΛΛΟ
"TR-CALCULATIONS"



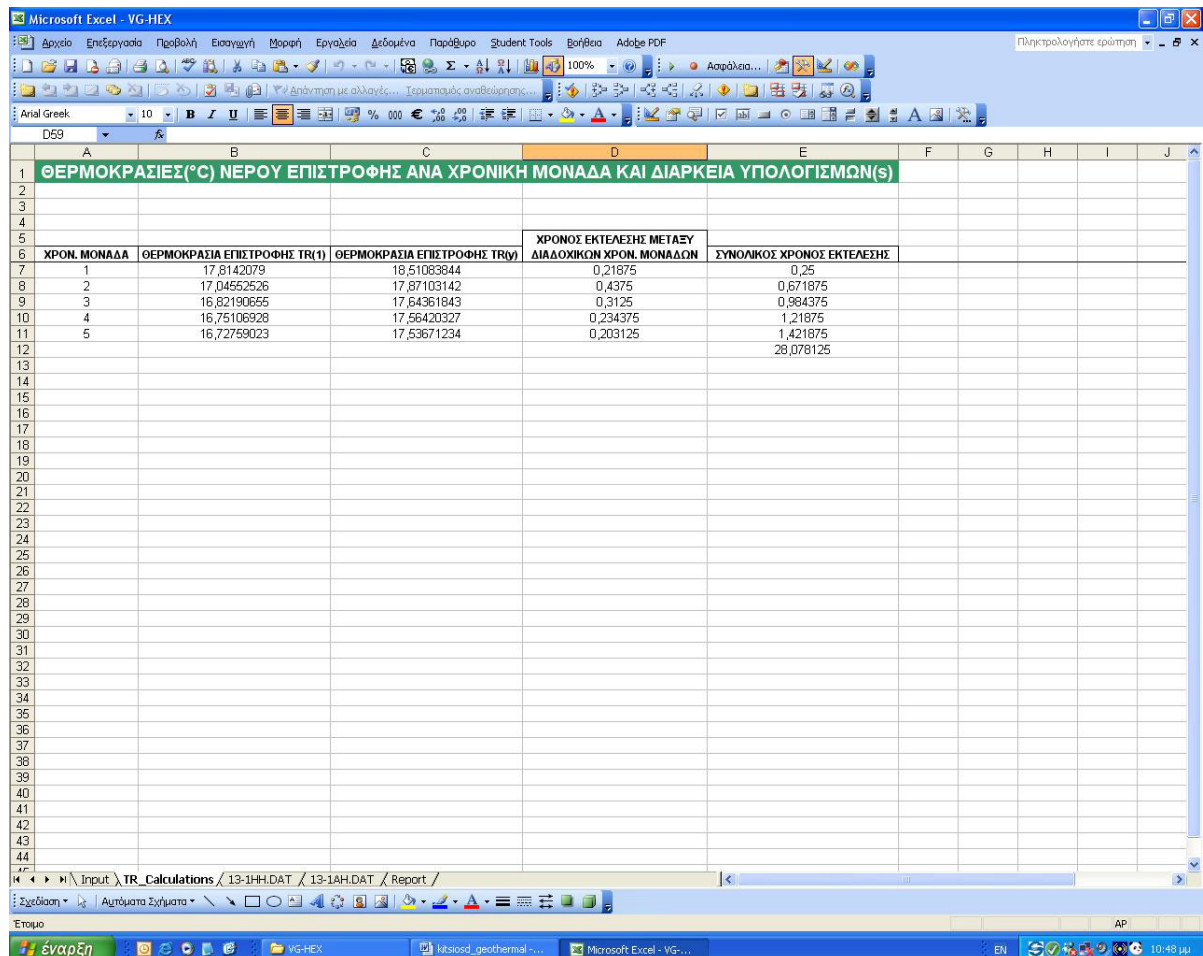
Εμφανίζονται οι υπολογισμοί του φύλλου TR-calculations για την τρέχουσα χρονική μονάδα.

Δηλαδή μόλις το πρόγραμμα:

- > έχει αναθέσει τις αμέσως υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας εδάφους ως προηγούμενες
- > υπολογίσει τους συντελεστές της εξίσωσης Π.Δ
- > υπολογίσει την θερμοκρασία νερού προσαγωγής και επιστροφής
- > αποτυπώσει τον χρόνο του Η/Υ (τρέχουσα ώρα για αυτό το m):

Εμφανίζει στην οθόνη στο φύλλο TR-calculations τα αποτελέσματα κάτω από την αντίστοιχη στήλη:

ΧΡΟΝ. ΜΟΝΑΔΑ m% (συμβ. M)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ TR(1) TR(1)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ TR(y) TR(201)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΧΡΟΝ. ΜΟΝΑΔΩΝ RunningTime(m%) - RunningTime(m%-1)	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ Timer-StartTime
------------------------------	--	--	--	---



Σχήμα 4.3-1 Το φύλλο υπολογισμών TR_Calculations του VG-HEX.

ΑΝΑΘΕΣΗ ΜΕΣΗΣ
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ



Ανατίθεται η μέση θερμοκρασία νερού στο οριζόντιο άκρο του πλέγματος δηλαδή στην επιφάνεια του Κ.Γ.Ε που έχει αριθμοδείκτη οριζόντιας κατεύθυνσης το $i = x = 27$ και κατακόρυφα σε όλα τα j από 1 έως $y-1 = 201-1=200$ όπου αντιστοιχεί στο μέγιστο βάθος γεώτρησης.

$$T(x, j) = (TR(j) + TA(j)) / 2$$

Σε αυτό το σημείο τίθεται η μέση τιμή για όλες τις θερμοκρασίες εδάφους στη θέση του Κ.Γ.Ε: $T(x\%,j\%)$ μέχρι το βάθος της γεώτρησης ώστε να υπολογιστούν οι νέες θερμοκρασίες νερού προσαγωγής και επιστροφής μέσα στην επόμενη χρονική μονάδα.

ΤΙΘΕΝΤΑΙ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ
ΟΙ ΩΣ ΑΝΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

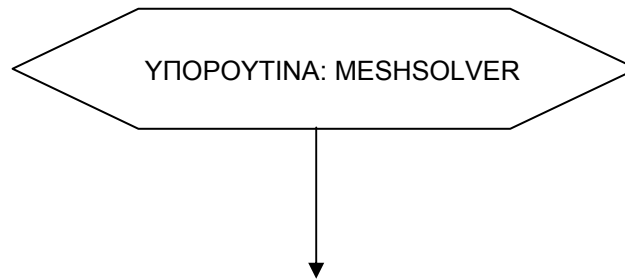


Ονομάζονται «προηγούμενες» οι αμέσως παραπάνω υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας εδάφους στη θέση $i = x = 27$ για όλα τα j από 1 έως 227

$$T0(x, j) = T(x, j)$$

Σε αυτό το σημείο ουσιαστικά τοποθετούνται οι νέες τιμές θερμοκρασίας εδάφους στη παρειά του Κ.Γ.Ε που είναι ίσες με τις αντίστοιχες μέσες θερμοκρασίες νερού από το $j=1$: $T(27,1)$ έως το $j = 200$: $T(27,200)$.

Θέτοντας ως «προηγούμενες»: $T0(27,j)$ τις τιμές: $T(27,j)$ σε όλα τα j από $j = 1$ έως $j = z\% = 227$ οι τιμές θερμοκρασίας εδάφους από $(27,201)$ μέχρι και $(27,227)$ δεν αλλάζουν. Είναι αυτές που έχει τοποθετήσει ως προηγούμενες η υπορουτίνα CopyT2T0.



Η «προηγούμενη» τιμή θερμοκρασίας εδάφους $T_0(i,j)$ που υπάρχει σε κάθε κόμβο του πλέγματος ονομάζεται: $T^n(i,j)$ και υπολογίζεται η νέα τιμή σε κάθε κόμβο με χρήση της διακριτοποιημένης εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών για την μεταβατική διδιάστατη αγωγή:

$$A_p \cdot T_p = A_E \cdot [f \cdot T_E + (1-f) \cdot T_E^0] + A_W \cdot [f \cdot T_W + (1-f) \cdot T_W^0] + A_N \cdot [f \cdot T_N + (1-f) \cdot T_N^0] + A_S \cdot [f \cdot T_S + (1-f) \cdot T_S^0] + [A_p^0 - (1-f) \cdot (A_E + A_W + A_N + A_S)] \cdot T_p^0$$

Στον υπολογιστικό κώδικα η παραπάνω εξίσωση ορίζεται ως συνάρτηση «ΤΤΤ» η οποία έχει την μορφή:

$$TTT = ((v_n + v_s + v_e + v_w) + (A_{p0} - f_1 \cdot (A(1, J) + A(1, J) + A(1, J + 1) + A(1, J - 1))) \cdot T_{p0}(1, J)) / A_p(I, J)$$

$$\begin{aligned} v_n &= A(1, J) \cdot (F \cdot T(I + 1, J) + f_1 \cdot T_{p0}(1, J)) \\ v_s &= A(1, J) \cdot (F \cdot T(I - 1, J) + f_1 \cdot T_{p0}(1, J)) \\ v_e &= A(1, J + 1) \cdot (F \cdot T(I, J + 1) + f_1 \cdot T_{p0}(1, J + 1)) \\ v_w &= A(1, J - 1) \cdot (F \cdot T(I, J - 1) + f_1 \cdot T_{p0}(1, J - 1)) \end{aligned}$$

Η συνάρτηση ΤΤΤ εφαρμόζεται μόνο για τους εσωτερικούς κόμβους του πλέγματος. Χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος αριθμητικής επίλυσης κατά JACOBI και εφαρμόζεται υποχαλάρωση για τη σύγκλιση.

Η επίλυση του πλέγματος εκτελείται ως εξής:

Πλέγμα ως το βάθος γεώτρησης:

Επιλύεται με τη συνάρτηση πεπερασμένων διαφορών και υποχαλάρωση η περιοχή από $j = 2$ ως $j = 200$ και από $i = 2$ έως $i = 26$

Σημεία όμορα και κάτω από τη γεώτρηση:

Για τη περιοχή από $j = 201$ ως $j = 226$ οι θερμοκρασίες εδάφους κατά βάθος αλλά στην οριζόντια θέση σταθερή θέση με $i = 28$: $T(28, j)$ εξισώνονται με τις γνωστές θερμοκρασίες της θέσης: $T(26, j)$

Πλέγμα κάτω από τη γεώτρηση:

Επιλύεται με τη συνάρτηση πεπερασμένων διαφορών και υποχαλάρωση η περιοχή από $j = 200$ ως $j = 226$ και από $i = 2$ έως $i = 26$.

Νέα επίλυση όλου του πλέγματος συνολικά:

Επιλύεται με τη συνάρτηση πεπερασμένων διαφορών και υποχαλάρωση συνολικά όλο το πλέγμα από $j = 2$ ως $j = 226$ και από $i = 2$ έως $i = 26$.

Η «προηγούμενη» τιμή θερμοκρασίας εδάφους $T_0(i,j)$ που υπάρχει σε κάθε κόμβο του πλέγματος ονομάζεται: $T^n(i,j)$ για να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση TTT. Με τον εκθέτη «n» συμβολίζεται ο αριθμός επανάληψης.

Η συνάρτηση TTT υπολογίζει την νέα θερμοκρασία $T^{n+1}(i,j)$

Η νέα $T^{n+1}(i,j)$ συγκρίνεται με την αμέσως προηγούμενη τιμή που ήταν η: $T^n(i,j) \equiv T_0(i,j)$

Αν ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης: $|T_0(i,j) - T(i,j)| < G$ τότε το loop παίρνει το επόμενο i

$$\underbrace{T_0(i,j)}_{T^n(i,j)} - \underbrace{T(i,j)}_{T^{n+1}(i,j)}$$

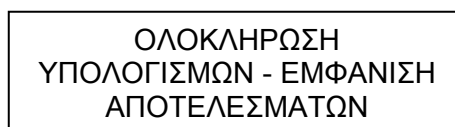
Αν δεν ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης τότε η $T^{n+1}(i,j)$ «διορθώνεται» με υποχαλάρωση.

Η υποχαλάρωση δίνει ένα νέο: $T^{n+1}(i,j) = \omega * (T^{n+1}(i,j) - T_0(i,j)) + T_0(i,j)$

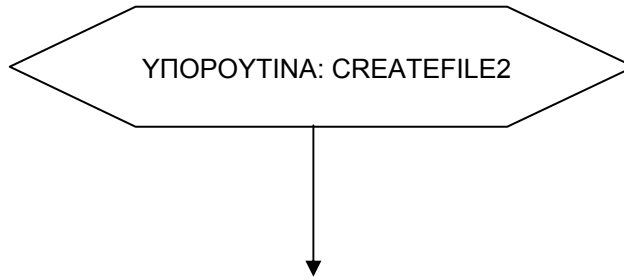
$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{NEO}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{«ΠΑΛΑΙΟ»}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{T^n(i,j) = \text{η τιμή της}}$

προηγούμενης επανάληψης

Στη συνέχεια το NEO $T^{n+1}(i\%, j\%)$ ονομάζεται προηγούμενο: $T_0(i, j)$ που είναι το: $T^n(i\%, j\%)$ και ξαναμπαίνει στη συνάρτηση TTT για να προκύψει το $T^{n+1}(i\%, j\%)$ το οποίο συγκρίνεται με το προηγούμενο. Αν δεν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης «διορθώνεται» με υποχαλάρωση και προκύπτει το NEO $T^{n+1}(i\%, j\%)$ το οποίο ονομάζεται $T_0(i, j) \equiv T^n(i\%, j\%)$ μπαίνει στην συνάρτηση TTT κ.ο.κ.



Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών για όλες τις επιλεγμένες χρονικές μονάδες προετοιμάζονται τα φύλλα αποτελεσμάτων με τις ακόλουθες υπορουτίνες:

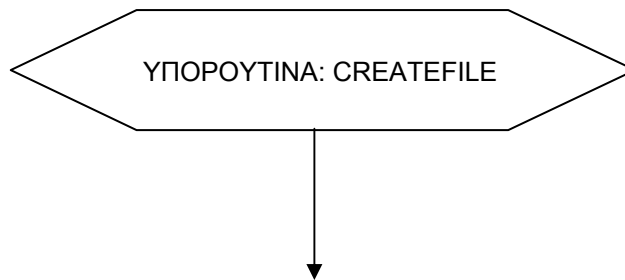


Σε αυτό το σημείο οι τιμές θερμοκρασίας εδάφους $T(i,j)$, οι θερμοκρασίες νερού $TA(j)$ και $TR(j)$ καθώς και εδάφους στο όριο του Κ.Γ.Ε: $T(x,j) = T(27,j)$ που υπολόγισε η παραπάνω υπορουτίνα MeshSolver εγγράφονται στο φύλλο αποτελεσμάτων: 13-1HH.DAT

Στο φύλλο αυτό του Excel είναι καταχωρημένες οι τελικές τιμές θερμοκρασίας μετά τη συμπλήρωση όλων των χρονικών μονάδων (παραδείγματος χάριν 7 ημερών). Η διάρκεια κάθε χρονικής μονάδας σε δευτερόλεπτα είναι επίσης επιλέξιμη από τον χρήστη.

ΑΡΧΕΙΟ 13-1HH.DAT									
	Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Εδάφους (Θέσις Κόμβων) T(i,j)	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (°C) TA(j)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (°C) TR(j)	Μείση Θερμοκρασία (°C) κατά Βάθος στο Όριο x T(x,j)
9	1	0,5	1	1	8	1	8	16,72759023	12,36379511
10	2	1	1	2	8,333333333	2	8,002975431	16,7749979	12,38998667
11	3	1,5	1	3	8,666666667	3	8,010019263	16,81857025	12,41429477
12	4	2	1	4	9	4	8,018993314	16,86044641	12,43970286
13	5	2,5	1	5	9,333333333	5	8,029457025	16,9009461	12,46520156
14	6	3	1	6	9,666666667	6	8,041452409	16,94011273	12,49078257
15	7	3,5	1	7	10	7	8,054928788	16,97794671	12,51643775
16	8	4	1	8	10,333333333	8	8,069676406	17,01444162	12,54215901
17	9	4,5	1	9	10,666666667	9	8,086286668	17,04958986	12,56793627
18	10	5	1	10	11	10	8,104151203	17,08338367	12,59376743
19	11	5,5	1	11	11,333333333	11	8,123461708	17,11581512	12,61963642
20	12	6	1	12	11,666666667	12	8,144209925	17,14687634	12,64554313
21	13	6,5	1	13	12	13	8,166387635	17,17655936	12,6714735
22	14	7	1	14	12,333333333	14	8,189966656	17,20465621	12,69742143
23	15	7,5	1	15	12,666666667	15	8,214998645	17,23175895	12,72337895
24	16	8	1	16	13	16	8,241416059	17,25725524	12,74933767
25	17	8,5	1	17	13,333333333	17	8,26923037	17,28134924	12,77529691
26	18	9	1	18	13,666666667	18	8,298433733	17,30402063	12,80122718
27	19	9,5	1	19	14	19	8,329018662	17,32526474	12,82711417
28	20	10	1	20	14,333333333	20	8,360979184	17,34507198	12,85302528
29	21	10,5	1	21	14,666666667	21	8,394314925	17,36342468	12,87896698
30	22	11	1	22	15	22	8,434385498	17,38042863	12,90740706
31	23	11,5	1	23	15,333333333	23	8,48092534	17,39877791	12,9385163
32	24	12	1	24	15,666666667	24	8,533714173	17,41806576	12,97588997
33	25	12,5	1	25	16	25	8,592588655	17,43790808	13,01823337
34	26	13	1	26	16,333333333	26	8,66726342	17,45798076	13,06761209
35	27	13,5	1	27	16,666666667	27	8,727627249	17,47791771	13,10277248
36			1	28	17	28	8,803440721	17,49750897	13,15047485
37			1	29	17,333333333	29	8,88447365	17,51650958	13,20049161
38			1	30	17,666666667	30	8,970441844	17,53476975	13,2526058
39			1	31	18	31	9,060909061	17,55231	13,30680953
40			1	32	18,01515152	32	9,151468821	17,5695854	13,36052761
41			1	33	18,03030303	33	9,241531491	17,58642559	13,41397854
42			1	34	18,04545455	34	9,330920766	17,60300691	13,46696384
43			1	35	18,06060606	35	9,419583451	17,61938955	13,5194865
44			1	36	18,07575758	36	9,507505556	17,63559446	13,57155001

Σχήμα 4.3-2 Το φύλλο αποτελεσμάτων 13-1HH.DAT του VG-HEX.



Η υπορουτίνα αυτή εγγράφει αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα στο φύλλο 13-1AH.DAT ίδια με αυτά του φύλλου: 13-1HH.DAT πλην της μέσης θερμοκρασίας κατά βάθος στη θέση του Κ.Γ.Ε δίνοντας παράλληλα και αναφορά για τη θέση των θερμοκρασιών εδάφους στο καρτεσιανό σύστημα.

Ένα μέρος των αποτελεσμάτων για το παραπάνω παράδειγμα που εξετάζεται είναι:

ΑΡΧΕΙΟ 13-1AH.DAT								
Δίκτυος Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Δίκτυος Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Βάθος (m)	Θερμοκρασία Εδάφους (°C) (Θέσεις Κόμβων)	Δίκτυος Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (°C)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (°C)	
i	j	r'DX	r'DY	T _(i,j)	j	TA(j)	TR(j)	
1	1	0,5	0,5	8	1	8,002975431	16,72759023	
10	1	2	0,5	1	2	8,002975431	16,7749979	
11	1	3	0,5	1,5	3	8,010019283	16,81857025	
12	1	4	0,5	2	4	8,018959314	16,86044641	
13	1	5	0,5	2,5	5	8,029457025	16,9009461	
14	1	6	0,5	3	6	8,041452409	16,94011273	
15	1	7	0,5	3,5	7	8,054928788	16,97794671	
16	1	8	0,5	4	8	8,069676406	17,01444162	
17	1	9	0,5	4,5	9	8,086286668	17,04958988	
18	1	10	0,5	5	10	8,104151203	17,08338367	
19	1	11	0,5	5,5	11	8,123461708	17,11581512	
20	1	12	0,5	6	12	8,144209925	17,14687634	
21	1	13	0,5	6,5	13	8,166387835	17,17659396	
22	1	14	0,5	7	14	8,189896856	17,20495621	
23	1	15	0,5	7,5	15	8,214998345	17,23175885	
24	1	16	0,5	8	16	8,241418099	17,25725924	
25	1	17	0,5	8,5	17	8,26923037	17,28134924	
26	1	18	0,5	9	18	8,298433733	17,30402063	
27	1	19	0,5	9,5	19	8,329018662	17,32526474	
28	1	20	0,5	10	20	8,360979184	17,34507138	
29	1	21	0,5	10,5	21	8,394314925	17,36342488	
30	1	22	0,5	11	22	8,434385498	17,38042863	
31	1	23	0,5	11,5	23	8,48092534	17,39877791	
32	1	24	0,5	12	24	8,533714173	17,41806576	
33	1	25	0,5	12,5	25	8,592558855	17,43790808	
34	1	26	0,5	13	26	8,65726342	17,45798076	
35	1	27	0,5	13,5	27	8,727627249	17,47791771	
36	1	28	0,5	14	28	8,803440721	17,49750897	
37	1	29	0,5	14,5	29	8,88447365	17,51659058	
38	1	30	0,5	15	30	8,970441844	17,53476975	
39	1	31	0,5	15,5	31	9,060909061	17,55231	
40	1	32	0,5	16	32	9,154489821	17,5695854	
41	1	33	0,5	16,5	33	9,241531491	17,58642569	
42	1	34	0,5	17	34	9,330920766	17,60300691	
43	1	35	0,5	17,5	35	9,419583451	17,61938955	
44	1	36	0,5	18	36	9,507505556	17,63559446	

Σχήμα 4.3-3 Το φύλλο αποτελεσμάτων 13-1AH.DAT του VG-HEX.

ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ
 ΧΡΟΝΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

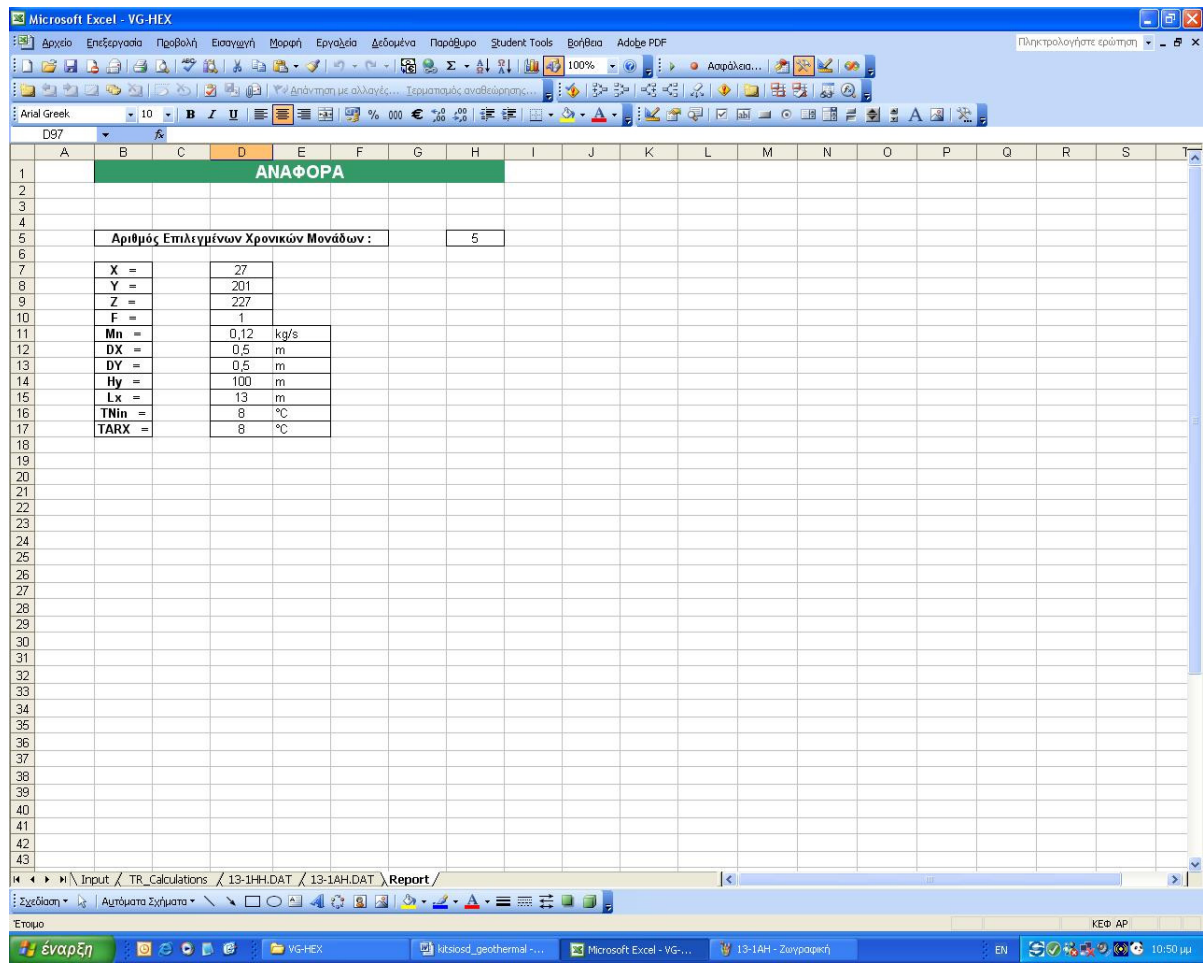


Εγγράφεται στο φύλλο «TR_Calculations» ο Συνολικός Χρόνος Εκτέλεσης του Προγράμματος στην αντίστοιχη στήλη ως το αποτέλεσμα: (Timer – StartTime)

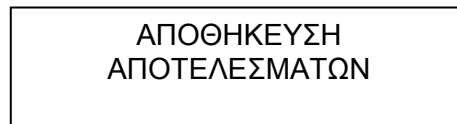
ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑ: REPORT



Η υπορουτίνα αυτή δίνει μία συνοπτική αναφορά για τις τιμές των μεταβλητών εισόδου που έχει εισάγει ο χρήστης.



Σχήμα 4.3-4 Το φύλλο αποτελεσμάτων Report του VG-HEX.



Τα αποτελέσματα όλων των φύλλων υπολογισμού αποθηκεύονται στο Σκληρό Δίσκο.



Εμφάνιση Παραθύρου Διαλόγου: «ΤΕΛΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ !!!»

5. Κατάστρωση και Ανάλυση του Λογισμικού VG-HEX

5.1 Στοιχεία από την Γραμμική Άλγεβρα

Πίνακας A είναι διάταξη n γραμμών και m στηλών που περιέχει: $n \cdot m$ πλήθος στοιχείων.

Για δείκτη γραμμής έστω i και δείκτη στήλης έστω j κάθε στοιχείο του πίνακα αντιστοιχεί σε μια τιμή που συμβολίζεται: a_{ij}

Συμβολισμός Μητρώου:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nm} \end{bmatrix} \quad \text{για: } i \in [1, n] \text{ και } j \in [1, m] \text{ ή: } \begin{pmatrix} 1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m \end{pmatrix}$$

Εάν $i \in [0, n]$ και $j \in [0, m]$ τότε:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{01} & \dots & \alpha_{0m} \\ \alpha_{10} & \alpha_{11} & \dots & \alpha_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n0} & \alpha_{n1} & \dots & \alpha_{nm} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} 0 \leq i \leq n \\ 0 \leq j \leq m \end{matrix}$$

Διάσταση Μητρώου είναι πρακτικά η έκταση του μητρώου ως προς τα μοναδιαία διανύσματα $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ του χώρου \mathcal{R}^3 .

Έτσι Μητρώο με 1 γραμμή και m στήλες είναι μονοδιάστατο:

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_m] \quad \text{ή} \quad \begin{matrix} n = 1 \\ 1 \leq j \leq m \end{matrix}$$

$$A = [a_0, a_1, \dots, a_m] \quad \text{ή} \quad \begin{matrix} n = 1 \\ 0 \leq j \leq m \end{matrix}$$

όμοια ο πίνακας στήλη:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} m = 1 \\ 1 \leq i \leq n \end{matrix} \quad \text{ή} \quad A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} m = 1 \\ 0 \leq i \leq n \end{matrix}$$

Που περιέχει πλήθος στοιχείων: $n \cdot m = n \cdot 1 = n$

που περιέχει πλήθος στοιχείων: $(n+1) \cdot m = (n+1) \cdot 1 = n+1$

Μητρώα $[A]_{n \cdot m}$ με $n \neq 1$, $m \neq 1$ είναι διδιάστατα (2D).

5.2 Μητρώα στη Visual Basic

Δίνονται απευθείας τα παρακάτω παραδείγματα:

α). Εισαγωγή Μητρώου με 10 γραμμές

DIM T() Δήλωση Πίνακα
REDIM T(9) Δήλωση Διαστάσεων Πίνακα

DIM T%(9) ή DIM T(9) AS INTEGER

T% = το όνομα του πίνακα ο οποίος περιέχει ακέραιους (%)

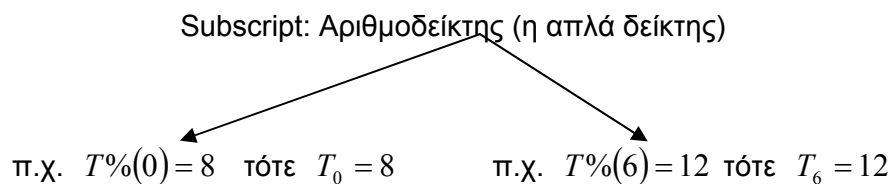
9 = ο αριθμοδείκτης των γραμμών δηλαδή περιέχονται 10 στοιχεία (10 γραμμές: από 0 ως και 9 και μια στήλη).

Εφόσον έχει οριστεί OPTION BASE 0:

$$T\%(9) = \begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \\ T_9 \end{bmatrix} \quad 0 \leq i \leq 9$$

Το i δεικνύει τον αριθμό της γραμμής γενικά. Είναι δείκτης που χρησιμοποιείται για την αναφορά σε συγκεκριμένη γραμμή και δεν δείχνει το πλήθος των γραμμών ως σύνολο.

β). Απόδοση τιμής σε συγκεκριμένο στοιχείο του πίνακα:



Αποδίδει για $i = 6$ την τιμή 12. Για παράδειγμα η θερμοκρασία όταν ο δείκτης γραμμής γίνει: $i = 6$ (δηλ. στην έβδομη γραμμή του πίνακα) θα πάρει την τιμή 12.

Για μονοδιάστατο μητρώο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου τόσο ο δείκτης i όσο και ο δείκτης j ακριβώς με την ίδια σύνταξη.

$$T\%(9) = \begin{matrix} i = 0 & 8 \\ i = 1 & T_1 \\ i = 2 & T_2 \\ i = 3 & T_3 \\ i = 4 & T_4 \\ i = 5 & T_5 \\ i = 6 & 12 \\ i = 7 & T_7 \\ i = 8 & T_8 \\ i = 9 & T_9 \end{matrix}$$

γ). Η εντολή OPTION BASE

Χρησιμοποιείται για να ορίσει τον ελάχιστο (μικρότερο) αριθμοδείκτη ενός πίνακα.

OPTION BASE 0 θέτει τον ελάχιστο αριθμοδείκτη ενός πίνακα ως δείκτη 0
 OPTION BASE 1 θέτει τον ελάχιστο αριθμοδείκτη ενός πίνακα ως δείκτη 1.

OPTION BASE 0:

$$\text{DIM } T\%(3) = \begin{matrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{matrix} \quad 0 \leq i \leq 3$$

Επειδή ο μικρότερος δείκτης είναι το 0 και ο μεγαλύτερος το 3 δημιουργείται πίνακας τεσσάρων γραμμών.

OPTION BASE 1:

$$\text{DIM } T\%(3) = \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{matrix} \quad 1 \leq i \leq 3$$

Επομένως μόνο με: OPTION BASE 1 ο μέγιστος αριθμοδείκτης ενός μονοδιάστατου μητρώου δείχνει και το πλήθος των γραμμών.

δ). Διδιάστατοι και τριδιάστατοι πίνακες

Ένας διδιάστατος πίνακας δηλώνεται απευθείας επί παραδείγματι ως: DIM A(1,2) ή με DIM A() και λαμβάνει διαστάσεις με την επόμενη εντολή:

$$\text{REDIM } A(1,2)$$

όπου το 1 είναι το όριο τιμής που μπορεί να πάρει ο δείκτης γραμμής και 2 το όριο τιμής που μπορεί να πάρει ο δείκτης στήλης.

Ένας τριδιάστατος πίνακας δηλώνεται επί παραδείγματι ως:

$$\text{DIM } B(4,3,6)$$

Με OPTION BASE 0 θα είναι:

$$\text{DIM } A(1,2) = \begin{bmatrix} A_{0,0} & A_{0,1} & A_{0,2} \\ A_{1,0} & A_{1,1} & A_{1,2} \end{bmatrix}$$

Δηλαδή πίνακας με 2 γραμμές και 3 στήλες.

Με OPTION BASE 1 θα είναι:

$$\text{DIM } A(1,2) = [A_{1,1} \quad A_{1,2}]$$

Δηλαδή πίνακας με 1 γραμμή και 2 στήλες.

Αν ο πίνακας αυτός θα έχει τιμές ακέραιους αριθμούς τότε:

$$\text{DIM } A\% = (1,2)$$

Για πίνακα με 2 γραμμές και 3 στήλες τότε π.χ με OPTION BASE 1 πρέπει:

$$\text{DIM } x\% = (2,3)$$

Και τότε θα δημιουργηθεί ο πίνακας:

$$x = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} \end{bmatrix}$$

Τα στοιχεία του πίνακα μπορούν να λάβουν τιμές ως εξής:

$$x\%(1,1) = 2$$

$$x\%(1,2) = 0$$

$$x\%(1,3) = 6$$

$$x\%(2,1) = 5$$

$$x\%(2,2) = 8$$

$$x\%(2,3) = 4$$

οπότε θα έχει καταγραφεί το μητρώο:

$$x = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 6 \\ 5 & 8 & 4 \end{bmatrix}$$

Για τον ίδιο πίνακα με OPTION BASE 0 πρέπει:

DIM $x\%(1,2)$ ή ισοδύναμα DIM $x(1,2)$ AS INTEGER

Και τότε δημιουργείται το μητρώο:

$$x = \begin{bmatrix} x_{0,0} & x_{0,1} & x_{0,2} \\ x_{1,0} & x_{1,1} & x_{1,2} \end{bmatrix}$$

οπότε τώρα τα στοιχεία του πίνακα μπορούν να λάβουν τιμές ως εξής:

$$x\%(0,0) = 2$$

$$x\%(0,1) = 0$$

$$x\%(0,2) = 6$$

$$x\%(1,0) = 5$$

$$x\%(1,1) = 8$$

$$x\%(1,2) = 4$$

Οπότε και πάλι έχει καταγραφεί το μητρώο:

$$x = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 6 \\ 5 & 8 & 4 \end{bmatrix}$$

Παρατήρηση:

Εάν ένας πίνακας έχει οριστεί να έχει όριο αριθμοδείκτη γραμμής το $i\% = 27$ τότε είναι δυνατόν να εκτελείται εντολή βρόχου (LOOP): FOR ... TO ... NEXT σε μέρος των στοιχείων του π.χ. με OPTION BASE 0:

```

FOR i% = 0 TO 27
ή   FOR i% = 1 TO 27
ή   FOR i% = 0 TO 4
ή   FOR i% = 5 TO 25 κ.ο.κ.

```

Συνοψίζοντας:

Αν $x\% = \text{ΑΡΙΘΜΟΔΕΙΚΤΗΣ} = 27$

Τότε $i \in [0,27]$, $0 \leq i \leq 27 \Rightarrow$ περιέχονται 28 στοιχεία.

και με: FOR $i\% = 1$ TO $x\%$ πρέπει να ληφθούν αποτελέσματα για 27 τιμές.

5.3 Ανάλυση Λογισμικού

Ο τρόπος συλλογισμού για την δομή του υπολογιστικού κώδικα παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο: 4. Ανάπτυξη Δομής Λογισμικού «VG-HEX».

5.3.1 Στοιχεία Υπολογιστικού Κώδικα

Το λογισμικό VG-HEX αποτελείται από 2 MODULES με συνολικά 16 ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΕΣ (SUBS) και 1 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ (FUNCTION). Ειδικότερα:

Πίνακας 5.3.1.-1 Στοιχεία Υπολογιστικού Κώδικα

1	Sub F_0_Click
2	Sub F_1_Click
3	Sub F_0point5_Click
4	Sub Get_AppletParameters
5	Sub Clear_OldData
6	Sub Show_InvalidInputMessage
7	Sub AssignZeroHoursTemp
8	Sub CopyT2T0
9	Sub AssignCoefMatrisses
10	Sub FindReturnWaterTemp
11	Sub FindSupplyWaterTemp
12	Sub MeshSolver
1	<i>Function TTT</i>
13	Sub CreateFile
14	Sub CreateFile2
15	Sub Report
16	Sub Show_FinishMessage

Στη Παράγραφο 5.3.4. «Ανάλυση Προγράμματος» παρουσιάζεται η λειτουργία ορισμένων από τις παραπάνω.

5.3.2 Λίστα Παραμέτρων Εισόδου

Οι παράμετροι εισόδου που μπορούν να δοθούν από τον χρήστη είναι (Βλ. και παράγραφο: 4.1):

Αριθμός Χρονικών Μονάδων «m»
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX»
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY»
Βάθος Γεώτρησης «YY» σε m
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» σε m
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω»
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» σε °C
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Targ» σε °C
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» σε W/mK
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» σε m
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» σε m
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» σε m
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» σε J/kg°C
Παροχή Νερού στον ΚΓΕ «MN» σε kg/s
Πλήθος ΚΓΕ εντός της οπής γεώτρησης «NS»
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» σε W/m ² °C
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» σε W/mK
Παράγων Στάθμισης Μεταβολής Θερμοκρασίας Εξίσωσης Π.Δ. «F»
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» σε s
Κατ'όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» σε J/m ³ °C

5.3.3 Φύλλα Αποτελεσμάτων

Δημιουργούνται τα ακόλουθα φύλλα αποτελεσμάτων:

5.3.3.1 13-1HH.DAT

Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Εδάφους (°C) (Θέσεις Κόμβων)	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (°C)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (°C)	Μέση Θερμοκρασία (°C) κατά Βάθος στο Όριο x
i	i*DX	j	T(i,j)	TA(j)	TR(j)	T(x,j)

5.3.3.2 13-1AH.DAT

Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Βάθος (m)	Θερμοκρασία Εδάφους (°C) (Θέσεις Κόμβων)	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (°C)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (°C)
i	j	i*DX	j*DY	T(i,j)	TA(j)	TR(j)

5.3.3.3 REPORT

Αριθμός Επιλεγμένων Χρονικών Μονάδων :

X =		Μέγιστος αριθμοδείκτης οριζόντιας κατεύθυνσης
Y =		Αριθμοδείκτης κατακόρυφης κατεύθυνσης στο όριο της οπής γεώτρησης
Z =		Μέγιστος αριθμοδείκτης κατακόρυφης κατεύθυνσης
F =		Παράγων Στάθμισης Μεταβολής Θερμοκρασίας Εξίσωσης Π.Δ.
Mn =	kg/s	Παροχή Νερού
DX =	m	Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης
DY =	m	Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης
Hy =	m	Βάθος Γεώτρησης
Lx =	m	Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση
TNin =	°C	Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ
TARX =	°C	Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους

5.3.4. Ανάλυση Προγράμματος

Μητρώα και χρησιμοποιούμενες παράμετροι:

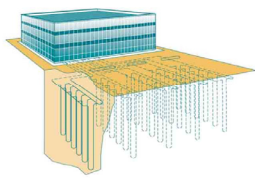
$TP0(1 TO 1, z\% + 1) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΑΡΧΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ
$T_p = T(x\% + 1, z\% + 1) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΖΗΤΟΥΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ
$T_p^o = T0(x\% + 1, z\% + 1) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΣΤΙΓΜΗΣ
$TR(y\%) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΝΕΡΟΥ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ ΣΤΟΝ Κ.Γ.Ε.
$TA(y\%) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟΝ Κ.Γ.Ε.
$A(1 TO 1, z\% + 1) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ (ΟΡΩΝ) A_E, A_W, A_N, A_S ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ (ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ TTT)
$AP(x\% + 1, z\%) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ (ΟΡΟΥ) A_p ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ (ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ TTT)
$k(z\%) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΕΙΔΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ k_E, k_W, k_N, k_S ΕΞΙΣΩΣΗΣ Π.Δ.
$ALFA(y\%) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΝΕΡΟΥ
$BHTA(y\%) =$	ΜΗΤΡΩΟ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ (ΣΥΝΑΓΩΓΗ & ΑΓΩΓΗ)
$\omega = w =$	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ
$G =$	ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ
$TNin =$	ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟΝ Κ.Γ.Ε.
$Tarx =$	ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ
$LE1 =$	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΚΟΜΒΟΥ ($j\%$)
$LE2 =$	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΚΟΜΒΟΥ ($j\% = 3 \cdot LE1$)

$DLE =$	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣΑΥΞΗΣΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΚΟΜΒΟΥ ($j\% = \frac{LE2 - LE1}{10}$)
$R1 =$	ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΚΤΙΝΑ ΣΩΛΗΝΑ Κ.Γ.Ε.
$R2 =$	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΑΚΤΙΝΑ ΣΩΛΗΝΑ Κ.Γ.Ε. (= $R1 + e$)
$e =$	ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ Κ.Γ.Ε U-TUBE
$R3 =$	ΑΚΤΙΝΑ ΟΠΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ
$CP =$	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΙΕΣΗ
$MN =$	ΠΑΡΟΧΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ Κ.Γ.Ε.
$NS =$	ΠΛΗΘΟΣ Κ.Γ.Ε. ΕΝΤΟΣ ΟΠΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ
$GAMA =$	$CP \cdot \dot{m}_N = MN \cdot CP / NS$
$HF =$	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΝ Κ.Γ.Ε
$DT =$	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΙΑΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ
$RCE =$	ΚΑΤ'ΟΓΚΟΝ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ = ΓΙΝΟΜΕΝΟ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙ ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ
$m =$	ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

Οι τιμές όλων μεταβλητών για την ανάλυση που ακολουθεί αφορούν τα παρακάτω δεδομένα εισόδου:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ
VG-HEX

Αριθμός Χρονικών Μονάδων «m» :	5
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,5
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,5
Βάθος Γεώτρησης «ΥΥ» (m) :	100
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	13
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	8
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Tgrx» (°C) :	8
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/mK) :	1
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,5
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4185
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,12
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	500
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK) :	0,41
Παράγων Στάθμισης Μεταβολής Θερμοκρασίας Εξίσωσης Π.Δ. «F» :	<input type="radio"/> F= 0 (Άμεση Διασύπωση) <input checked="" type="radio"/> F= 1 (Έμμεση Διασύπωση) <input type="radio"/> F= 0,5 (Διασύπωση Crank Nicolson)



Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	1	x	86400	=	86400	s
Κατ'όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» (J/m ³ °C):	2100000					

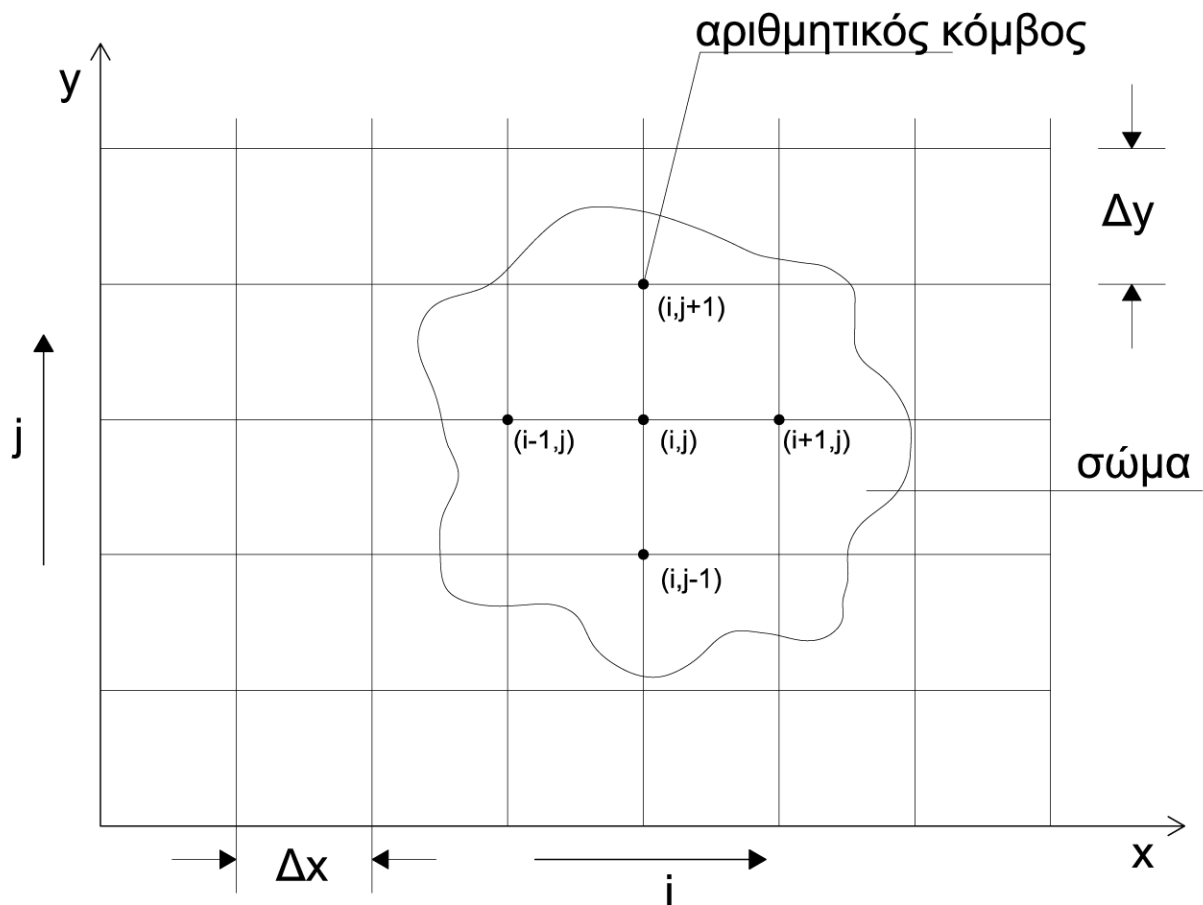
Σχήμα 5.3.4-1 Φύλλο δεδομένων εισόδου βάσει του οποίου γίνεται η ανάλυση του προγράμματος.

START TIME = TIMER

Δηλώνει την έναρξη του προγράμματος υιοθετώντας την ώρα του Η/Υ.

 $\Delta x = 0,5$

Αλγεβρική διαφορά οριζόντιας κατεύθυνσης. Διαμέριση οριζόντιας διάστασης που αντικαθιστά το διαφορικό (διαφορικό τελεστή) $\frac{\partial}{\partial x}$ της διαφορικής εξίσωσης με την αλγεβρική διαφορά $\Delta x = 0,5$.



Σχήμα 5.3.4-2 Κατάρτιση υπολογιστικού πλέγματος.

Η επιλογή των διαμερίσεων $\Delta x, \Delta y$ καθορίζει και την ακρίβεια της μεθόδου. Με $T(i, j)$ συμβολίζεται η θερμοκρασία στον κόμβο (i, j) .

DY = 0,5

Αλγεβρική διαφορά κατακόρυφης κατεύθυνσης. Διαμέριση κατακόρυφης κατεύθυνσης (διάστασης) που αντικαθιστά το διαφορικό (διαφορικό τελεστή) $\frac{\partial}{\partial x}$ της διαφορικής εξίσωσης με την αλγεβρική διαφορά $\Delta y = 0,5$.

YY = 100

Βάθος γεώτρησης σε μέτρα (m).

XX = 13

Οριζόντια απόσταση εξέτασης επίλυσης σε μέτρα (m).

x

Ακέραια μεταβλητή η οποία καθορίζει τον μέγιστο αριθμοδείκτη (δηλαδή το άνω όριο καταμέτρησης) οριζόντιας κατεύθυνσης.

$$x\% = INT\left(\frac{XX}{DY} + DY\right) + 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x\% = INT\left(\frac{13}{0,5} + 0,5\right) + 1 \Rightarrow x\% = 27$$

y

Ακέραια μεταβλητή η οποία καθορίζει τον μέγιστο αριθμοδείκτη (δηλαδή το άνω όριο καταμέτρησης) του δείκτη κατακόρυφης κατεύθυνσης μέχρι το όριο της γεώτρησης.

$$y\% = INT\left(\frac{YY}{DY} + DY\right) + 1 \Rightarrow$$

$$y\% = INT\left(\frac{100}{0,5} + 0,5\right) + 1 \Rightarrow y\% = 201$$

Με βάση τον παραπάνω υπολογισμό το πέρας του βάθους γεώτρησης λαμβάνει τον δείκτη 201 (202 κόμβοι: από τον 0 έως τον 201).

z

Ακέραια μεταβλητή η οποία καθορίζει τον μέγιστο αριθμοδείκτη (δηλαδή το άνω όριο καταμέτρησης) του δείκτη κατακόρυφης κατεύθυνσης μέχρι το όριο του εδάφους που εξετάζεται.

$$z\% = INT(y\% + 2 \cdot XX + DY) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow z\% = INT(201 + 2 \cdot 13 + 0,5) \Rightarrow z\% = 227$$

REDIM TP0(1 TO 1, z%+1)

Μητρώο αρχικών θερμοκρασιών εδάφους για $t = 0$. Εισάγονται οι τιμές θερμοκρασίας κατά βάθος στη θέση με $i = 1$ και στη συνέχεια αντιγράφονται σε όλο το πλέγμα μέχρι το όριο της οριζόντιας απόστασης: x .

Αυτές είναι οι αρχικές τιμές θερμοκρασίας τη χρονική στιγμή $t = t_0$ για να μπορέσουν να υπολογιστούν οι θερμοκρασίες την επόμενη χρονική στιγμή.

$$TP0 = \begin{bmatrix} TP0_{1,0} \\ TP0_{1,1} \\ TP0_{1,2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ TP0_{1,227} \\ TP0_{1,228} \end{bmatrix}$$

REDIM T(x%+1, z%+1)

Μητρώο ζητούμενων θερμοκρασιών εδάφους:

$$Tp = T = \begin{bmatrix} Tp_{0,0} & Tp_{0,1} & Tp_{0,2} & \dots & Tp_{0,228} \\ Tp_{1,0} & Tp_{1,1} & Tp_{1,2} & \dots & Tp_{1,228} \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ Tp_{28,0} & Tp_{28,1} & Tp_{28,2} & \dots & Tp_{28,228} \end{bmatrix}$$

Μετά την πρώτη φορά εκτέλεσης του υπολογισμού, δηλαδή μετά από χρονικό διάστημα $t + \Delta t$ στο μητρώο αυτό θα καταχωρηθούν οι νέες τιμές θερμοκρασίας. Αυτές οι νέες τιμές θα χρησιμοποιηθούν ως προηγούμενες για την εύρεση των νέων θερμοκρασιών μετά την παρέλευση του επόμενου χρονικού διαστήματος Δt .

REDIM T0(x%+1, z%+1)

Ορίζεται εδώ το μητρώο που θα παίρνει (θα αναλαμβάνει) τις αμέσως υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίες στους κόμβους μέσω του μητρώου $T(x\% + 1, z\% + 1)$, για να γίνονται αυτές “προηγούμενες” ώστε να υπολογιστούν οι “επόμενες” (δηλαδή οι τιμές θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στην επόμενη χρονική στιγμή).

$$Tp^0 = T0 = \begin{bmatrix} Tp^0_{0,0} & Tp^0_{0,1} & Tp^0_{0,2} & \dots & Tp^0_{0,228} \\ Tp^0_{1,0} & Tp^0_{1,1} & Tp^0_{1,2} & \dots & Tp^0_{1,228} \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ Tp^0_{28,0} & Tp^0_{28,1} & Tp^0_{28,2} & \dots & Tp^0_{28,228} \end{bmatrix}$$

Προφανώς το μητρώο αυτό έχει την ίδια διάσταση με το μητρώο $Tp = T(x\% + 1, z\% + 1)$ που υπολογίζει τις νέες (“επόμενες”) τιμές θερμοκρασίας στους κόμβους.

REDIM TR(y%)

Μητρώο θερμοκρασιών νερού στο σωλήνα επιστροφής του Κ.Γ.Ε.

$$TR = \begin{bmatrix} TR_0 \\ TR_1 \\ TR_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ TR_{199} \\ TR_{200} \\ TR_{201} \end{bmatrix}$$

REDIM TA(y%)

Μητρώο θερμοκρασιών νερού στο σωλήνα προσαγωγής του Κ.Γ.Ε.

$$TA = \begin{bmatrix} TA_0 \\ TA_1 \\ TA_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ TA_{199} \\ TA_{200} \\ TA_{201} \end{bmatrix}$$

Παρατήρηση: Προκειμένου για μονοδιάστατο μητρώο η αναφορά στα στοιχεία του μπορεί να γίνεται εξίσου με τον ακέραιο δείκτη i ή με τον ακέραιο δείκτη j .

REDIM A(1 TO 1, z%+1)

Μητρώο έκφρασης των συντελεστών A της μορφής:

$$A_{i+1,j} = \frac{k_{i+1,j} \cdot \Delta y}{(\delta x)_{i+1,j}}, \quad A_{i-1,j} = \frac{k_{i-1,j} \cdot \Delta y}{(\delta x)_{i-1,j}}, \quad A_{i,j+1} = \frac{k_{i,j+1} \cdot \Delta x}{(\delta y)_{i+1,j}}, \quad A_{i,j-1} = \frac{k_{i,j-1} \cdot \Delta x}{(\delta y)_{i,j-1}}$$

της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών.

$$A = [A_{1,0}, A_{1,1}, A_{1,2}, \dots, A_{1,227}, A_{1,228}]$$

REDIM AP(x%+1, z%)

Μητρώο έκφρασης συντελεστή: $AP = AP0 + f \cdot (A_{i+1,j} + A_{i-1,j} + A_{i,j+1} + A_{i,j-1})$ της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών.

$$AP = \begin{bmatrix} Ap_{0,0} & Ap_{0,1} & Ap_{0,2} & \dots & Ap_{0,227} \\ Ap_{1,0} & Ap_{1,1} & Ap_{1,2} & \dots & Ap_{1,227} \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ Ap_{27,0} & Ap_{27,1} & Ap_{27,2} & \dots & Ap_{27,227} \\ Ap_{28,0} & Ap_{28,1} & Ap_{28,2} & \dots & Ap_{28,227} \end{bmatrix}$$

REDIM K(z%)

Μητρώο ειδικής θερμικής αγωγιμότητας εδάφους $K_{i,j}, K_{i+1,j}, K_{i-1,j}, K_{i,j+1}, K_{i,j-1}$ (k σε $W / m \cdot K$). Αυτό έχει τις διαστάσεις του πίνακα συντελεστών A διότι γενικά:

$$A_{i,j} = \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x}{(\delta y)_{i,j}} \quad \text{ή} \quad A_{i,j} = \frac{K_{i,j} \cdot \Delta y}{(\delta x)_{i,j}}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_0 \\ K_1 \\ K_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ K_{226} \\ K_{227} \end{bmatrix}$$

$(\delta x)_{i+1,j} = (\delta x)_e =$ απόσταση (κατά την φορά ροής θερμότητας) μεταξύ κόμβου P και E

$(\delta x)_{i-1,j} = (\delta x)_w =$ απόσταση (κατά την φορά ροής θερμότητας) μεταξύ κόμβου P και W

$(\delta y)_{i,j+1} = (\delta y)_n =$ απόσταση (κατά την φορά ροής θερμότητας) μεταξύ κόμβου P και N

$(\delta y)_{i,j-1} = (\delta y)_s =$ απόσταση (κατά την φορά ροής θερμότητας) μεταξύ κόμβου P και S

$\Delta y =$ «επιφάνεια» συναλλαγής θερμότητας του όγκου αναφοράς κάθετα προς τη φορά ροής θερμότητας (γράφεται επιφάνεια επειδή κανονικά είναι: $\Delta y * \Delta z$ αλλά αφού: $\Delta z = 1$ λόγω της διδιάστατης ανάλυσης τελικά είναι: $\Delta y = \Delta y * 1$). Στη περίπτωση ομοιόμορφου πλέγματος είναι: $\delta x = \delta y$ και τότε το Δy είναι το στοιχειώδες μήκος πλέγματος κατά τον άξονα y .

$\Delta x =$ «επιφάνεια» συναλλαγής θερμότητας του όγκου αναφοράς κάθετα προς τη φορά ροής θερμότητας (γράφεται επιφάνεια επειδή κανονικά είναι: $\Delta x * \Delta z$ αλλά αφού: $\Delta z = 1$ λόγω της διδιάστατης ανάλυσης τελικά είναι: $\Delta x = \Delta x * 1$). Στη περίπτωση ομοιόμορφου πλέγματος είναι: $\delta x = \delta y$ και τότε το Δx είναι το στοιχειώδες μήκος πλέγματος κατά τον άξονα x .

REDIM ALFA(y%), BHTA(y%)

Το μητρώο BHTA υπολογίζει τη συνολική θερμική αγωγιμότητα από συναγωγή μεταξύ του ρευστού που ανακυκλοφορεί στον Κ.Γ.Ε και αγωγή στο υλικό του Κ.Γ.Ε και στην οπή γεώτρησης. Το μητρώο ALFA χρησιμοποιεί το μητρώο BHTA και τον συντελεστή:

$GAMMA = \frac{m \cdot Cp}{NS}$ για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών του ρευστού στον Κ.Γ.Ε όπως αναλυτικότερα εξηγείται στα επόμενα.

$$ALFA(y\%) = \begin{bmatrix} ALFA_0 \\ ALFA_1 \\ ALFA_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ ALFA_{200} \\ ALFA_{201} \end{bmatrix}$$

$$BHTA(y\%) = \begin{bmatrix} BHTA_0 \\ BHTA_1 \\ BHTA_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ BHTA_{200} \\ BHTA_{201} \end{bmatrix}$$

Για παράδειγμα λαμβάνεται η πλεγματική γραμμή με δείκτη 2:

$$ALFA(i\%) = \frac{1}{GAMA + BHTA(i\%)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow ALFA(2) = \frac{1}{\gamma + BHTA(2)} \quad \text{όπου:}$$

$$BHTA(2) = \frac{2 \cdot \pi}{i \cdot \text{var}1 + \frac{i \cdot \text{var}2}{k(2)}}$$

με: $K(2) = LE1 = 1$ για το παράδειγμα που εξετάζεται.

Περισσότερα στην υπορουτίνα: AssignCoefMatrisses.

$\omega = 0,5$

Συντελεστής μεθόδου χαλάρωσης που χρησιμοποιείται κατά την επίλυση του πλέγματος στην υπορουτίνα: "MeshSolver"

$$T_{(i,j)} = T_{(i,j)} + \omega \cdot (T_{(i,j)} - T0_{(i,j)}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_{(i,j)} = T_{(i,j)} + \frac{T_{(i,j)} - T0_{(i,j)}}{2} \Rightarrow T_{(i,j)}^{(n+1)} = T_{(i,j)}^n + \omega \cdot [T_{(i,j)}^{(n+1)*} - T_{(i,j)}^n]$$

Χρησιμοποιείται επαναληπτική μέθοδος επίλυσης του συστήματος εξισώσεων για τις θερμοκρασίες εδάφους στους κόμβους δηλαδή αριθμητική μέθοδος εύρεσης λύσης στο μητρώο αγνώστων θερμοκρασιών εδάφους:

$$Tp = T$$

Εφαρμόζοντας την "Μέθοδο διαδοχικών αντικαταστάσεων Jacobi" βρίσκεται μια δεύτερη προσέγγιση στην λύση του συστήματος έχοντας γνωστή ή υιοθετώντας μια πρώτη προσέγγιση.

Στη διακριτοποιημένη συνάρτηση επίλυσης TTT (FUNCTION TTT) χρησιμοποιούνται οι πλέον πρόσφατες τιμές των αγνώστων.

Γενικά ο αναγωγικός τύπος επίλυσης κατά Jacobi γράφεται:

$$x^{(n+1)} = X(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})$$

$$y^{(n+1)} = Y(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})$$

$$z^{(n+1)} = Z(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})$$

δηλαδή στο δεύτερο μέρος των εξισώσεων χρησιμοποιείται πάντα η ίδια τριάδα αριθμών $(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})$. Η μέθοδος Jacobi έχει μικρότερο ρυθμό σύγκλισης από τη μέθοδο Gauss-Seidel, και απαιτεί περισσότερη υπολογιστική μνήμη.

Η μέθοδος των διαδοχικών αντικαταστάσεων ενδείκνυται για εφαρμογή στην επίλυση μεγάλου πλήθους γραμμικών εξισώσεων, λόγω της αλγεβρικής απλότητάς της, αλλά και της υπολογιστικής της υπεροχής.

Χρησιμοποιείται η μέθοδος της χαλάρωσης με σκοπό την βελτίωση του ρυθμού σύγκλισης.

Έτσι:

$$T_{(i,j)} = T_{(i,j)} + A \cdot [T_{(i,j)} - T_{0(i,j)}] \quad \text{ή}$$

$$T_{(i,j)}^{(n+1)} = T_{(i,j)}^{(n)} + \omega \cdot [T_{(i,j)}^{(n+1)*} - T_{(i,j)}^{(n)}]$$

όπου ω ο συντελεστής μεθόδου χαλάρωσης και για $\omega=0,5 \Rightarrow$ ΥΠΟΧΑΛΑΡΩΣΗ.

$T_{(i,j)}^{(n+1)*}$ = η τιμή $T_{(i,j)}^{(n+1)}$ που δίνει η επανάληψη $(n+1)$ κατά την λύση του συστήματος:

$$T_{(i,j)} = TTT(i\%, j\%, A(), Ap(), F, f1, Ap0)$$

για την οποία τώρα θα ληφθεί ως:

$$T_{(i,j)}^{(n+1)} = T_{(i,j)}^{(n)} + 0,5 \cdot [T_{(i,j)}^{(n+1)*} - T_{(i,j)}^{(n)}]$$

δηλαδή η “τελική” τιμή της θερμοκρασίας στον κάθε για την επανάληψη $(n+1)$ δεν θα αφεθεί να είναι η $T^{(n+1)}$ αλλά θα «διορθωθεί» ονομάζοντάς την ως $T^{(n+1)*}$ και λύνοντας την:

$$T_{(i,j)}^{(n+1)} = T_{(i,j)}^{(n)} + \omega \cdot [T_{(i,j)}^{(n+1)*} - T_{(i,j)}^{(n)}]$$

G = 0,001

Η επιθυμητή ακρίβεια υπολογισμών. Είναι το κριτήριο σύγκλισης για τον τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας εύρεσης της θερμοκρασίας εδάφους σε κάθε συγκεκριμένο κόμβο.

$$|T_{(i,j)}^{(n+1)} - T_{(i,j)}^{(n)}| < 0,001$$

Η τιμή για τον κόμβο που εξετάζεται είναι η: $T_{(i,j)}^{(n+1)}$ δηλαδή αυτή της τρέχουσας επανάληψης.

Χρησιμοποιείται το απόλυτο κριτήριο σύγκλισης (m = δείκτης επανάληψης):

$$|x_m - x_{m-1}| < E_r$$

ενώ επίσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το Εκτιμώμενο Σχετικό Σφάλμα της αριθμητικής διαδικασίας επίλυσης:

$$\varepsilon_\alpha = \left| \frac{x_m - x_{m-1}}{x_m} \right| \leq \varepsilon_r$$

T_{Nin} = 8 °C

Δίνεται από τον χρήστη μια τιμή για την θερμοκρασία εισόδου του νερού στον Κ.Γ.Ε.

T_{arx} = 8 °C

Δίνεται από τον χρήστη μια τιμή για την αρχική θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους.

Η αρχική τιμή για τη θερμοκρασία εδάφους ορίζεται στον δείκτη κατακόρυφης κατεύθυνσης $j=1$ λόγω του ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του εδάφους και μεταβάλλει την θερμοκρασία της. Σε τυπικές κλιματικές συνθήκες θεωρείται ότι σε βάθος εδάφους από τα 0,5 m και μεγαλύτερο παρατηρείται απόσβεση των μεταβολών της θερμοκρασίας λόγω της επίδρασης του αέρα.

LE1 = 1

Δίνεται από τον χρήστη μια τιμή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας εδάφους από $j\% = 1$ ως $z\% = 227$ αναλόγως κόμβου.

LE2 = 3 · LE1

Τιμή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας εδάφους από $j\% = 1$ ως $z\% = 227$ αναλόγως κόμβου.

$$DLE = \frac{(LE2 - LE1)}{10}$$

Ποσότητα προσαύξησης ειδικής θερμικής αγωγιμότητας εδάφους αναλόγως κόμβου από $j\% = 1$ ως $z\% = 227$.

$$DLE = \frac{3 \cdot LE1 - LE1}{10} = \frac{2 \cdot LE1}{10} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow DLE = \frac{2 \cdot 1}{10} \Rightarrow DLE = 0,2$$

CP

Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του νερού στον Κ.Γ.Ε

$$C_p = 4.185 J / kg \cdot ^\circ C \quad \text{Για νερό στους } \approx 20^\circ C$$

MN

Παροχή μάζας που ανακυκλοφορεί στον Κ.Γ.Ε.

$$\dot{m}_N = 0,12 kg / s$$

NS

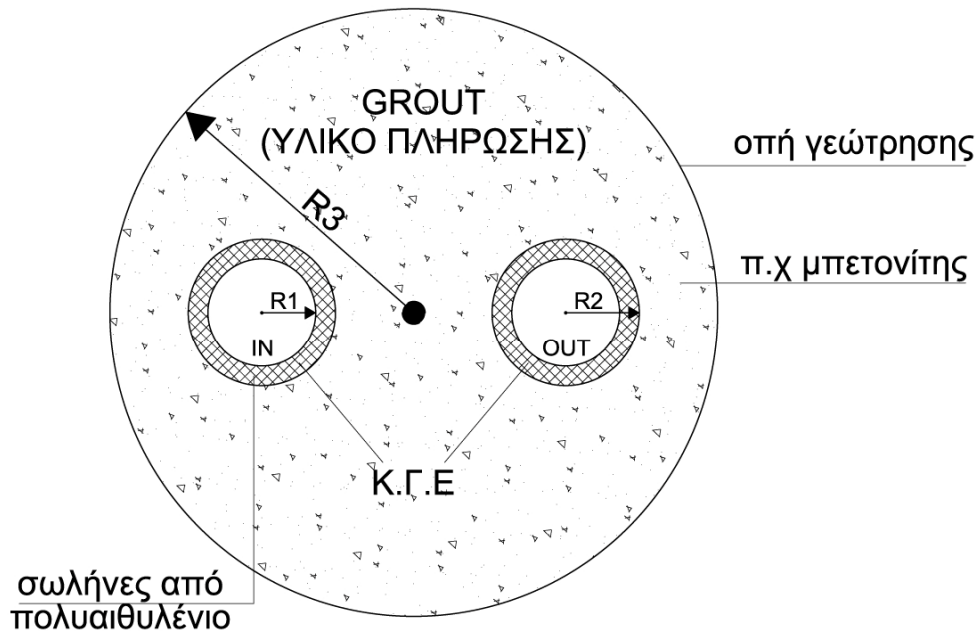
NS = 1 Πλήθος κάθετων γεωθερμικών εναλλακτών στην οπή γεώτρησης.

R1 R2 R3

$R1$ = Εσωτερική Ακτίνα του Κ.Γ.Ε = $0,011m$

$R2$ = Εξωτερική Ακτίνα του Κ.Γ.Ε = $R1 + e = R1 + 0,003 = 0,014m$ όπου e η τιμή του πάχους του σωλήνα που εισάγει ο χρήστης.

$R3 = 0,5m$ Ακτίνα οπής γεώτρησης



Σχήμα 5.3.4-3 Κάτοψη μονού (NS=1) Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη U-TUBE.

GAMA

Συντελεστής που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις υπολογισμού θερμοκρασιών νερού.

$$GAMA = \frac{MN \cdot CP}{NS}$$

$$\gamma = \frac{m_N \cdot Cp}{NS} = \frac{0,12 \cdot 4.185}{1} = 502,2 \frac{kg \cdot J}{s \cdot kg \cdot ^\circ C}$$

HF

Συντελεστής συναγωγιμότητας ρευστού που ανακυκλοφορεί στον Κ.Γ.Ε.

Θεωρείται εξαναγκασμένη συναγωγή στο εσωτερικό του αγωγού του Κ.Γ.Ε και ως εκ τούτου -για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται- χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχες τυπικές τιμές συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας νερού (W/m^2K).

$$HF = 500W / m^2K$$

$$HF = h_f = W / m^2K$$

LS

Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK). Λαμβάνεται: $LS = 0,41$

Για ένα σωλήνα που περιέχει ρευστό το ρεύμα θερμότητας Q ανά μονάδα μήκους (εδώ: βάθους) L δίνεται γενικά:

$$\frac{Q}{L} = \frac{T_S - T_\infty}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

όπου: R_i η θερμική αντίσταση σε $m \cdot K / W$

Από το ρευστό που κυκλοφορεί στον ΚΓΕ με ειδική συναγωγιμότητα $HF = h_f = 500W / m^2K$ μεταφέρεται θερμότητα στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα με συναγωγή.

Η θερμική αντίσταση ανά μέτρο μήκους σωλήνα στη συναγωγή είναι:

$$R_H = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot h_f} (m \cdot K / W)$$

Η θερμική αντίσταση ανά μέτρο μήκους σωλήνα στην αγωγή είναι:

$$R_C = \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot K_{VGHE}} (m \cdot K / W)$$

Όπου: $K_{VGHE} = LS$ = η ειδική θερμική αγωγιμότητα του υλικού του Κ.Γ.Ε (Vertical Ground Heat Exchanger).

Η τιμή του LS εισάγεται από τον χρήστη (γνωστή τιμή αναλόγως υλικού του ΚΓΕ).

$$LS = K_{VGHE} = 0,41W / mK$$

F = 1

Παράγων (Συντελεστής) Στάθμισης σύμφωνα με την έμμεση υπόθεση μεταβολής της θερμοκρασίας T_p από t ως $t + \Delta t$.

Για διδιάστατη μεταβατική αγωγή θερμότητας είναι:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p \cdot dt = [f \cdot T_p' + (1-f) \cdot T_p^0] \cdot \Delta t$$

ενώ για την έμμεση διατύπωση είναι: $f = 1$ οπότε:

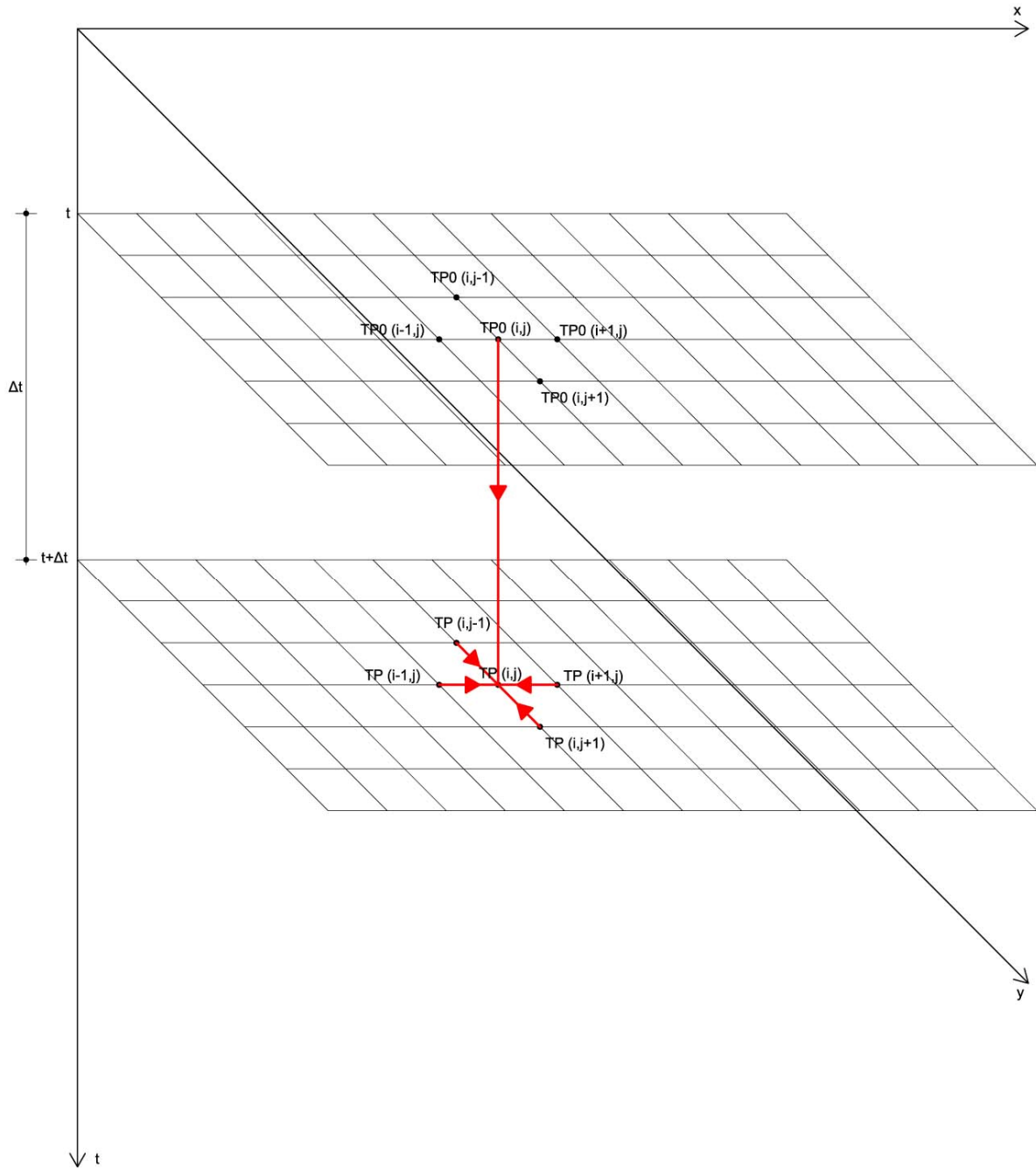
$$\int_t^{t+\Delta t} T_p \cdot dt = f \cdot T_p^1 \cdot \Delta t \Rightarrow \int_t^{t+\Delta t} T_p \cdot dt = T_p^1 \cdot \Delta t$$

δηλαδή η T_p είναι σταθερή και ίση με: T_p^1 την χρονική στιγμή $t + \Delta t$.

Οπότε αν εισαχθεί από τον χρήστη: $F = 1$ Συντελεστής (παράγων) Στάθμισης τότε χρησιμοποιείται η έμμεση διατύπωση.

Με την έμμεση διατύπωση η άγνωστη θερμοκρασία $T_{p(i,j)}$ κατά την χρονική στιγμή $t + \Delta t$ εκφράζεται συναρτήσει των επίσης άγνωστων θερμοκρασιών $T_{p(i,j-1)}$, $T_{p(i,j+1)}$, $T_{p(i-1,j)}$ και $T_{p(i+1,j)}$. Συνεπώς ο υπολογισμός της $T_{p(i,j)}$ γίνεται μόνο εμμέσως δηλαδή με την επίλυση του συστήματος εξισώσεων.

Στο επόμενο σχήμα παριστάνεται η εφαρμογή της έμμεσης διατύπωσης κατά την οποία γίνεται η υπόθεση ότι κατά την χρονική στιγμή t η θερμοκρασία στον κόμβο P μεταπίπτει απότομα από την τιμή T_{p_0} στην τιμή T_p την οποία και διατηρεί καθ' όλο το χρονικό βήμα Δt .



Σχήμα 5.3.4-4 Υπολογισμός της $Tp_{(i,j)}$ για $F = 1$.

f1 = 1 - F

Ο πολλαπλασιαστής (1-F) στην εξίσωση πεπερασμένων διαφορών στη συνάρτηση TTT του υπολογιστικού κώδικα.

DT

Χρονικό βήμα υπολογισμού των θερμοκρασιών (διάρκεια μιας χρονικής μονάδας σε s).

$$DT = \Delta t = 86400s$$

ή:

$$DT = \Delta t = 3600s$$

RCE

Το έδαφος ανεξαρτήτως σύστασης θεωρείται ομοιογενές με σταθερή κατ'όγκον θερμοχωρητικότητα σε όλο το υπολογιστικό πλέγμα.

RCE = Κατ' όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους = Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους σε J/m³°C

$$RCE = C(i, j) = \rho(i, j) \cdot Cp(i, j) = const \text{ (J/m}^3\text{°C)} \text{ για όλο το πλέγμα}$$

Όπου:

$\rho(i, j)$ = πυκνότητα εδάφους (kg/m³)

$Cp(i, j)$ = ειδική θερμοχωρητικότητα εδάφους (J/kg °C)

$$RCE = \rho \cdot C = 2.100.000$$

AP0

Όρος της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών που δεν εξαρτάται από τους κόμβους.

$$A_p^0 = \frac{RCE \cdot DY \cdot DX}{DT} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A_p^0 = \frac{\rho \cdot c \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\Delta t}$$

ivar1

Όροι της θερμικής αντίστασης συναγωγής & αγωγής (χωρίς το $2 \cdot \pi$) σε κυλινδρικό σωλήνα από το κέντρο μέχρι την εξωτερική επιφάνειά του.

$$i \text{ var1} = \frac{1}{HF \cdot R1} + \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{LS} \Rightarrow R1 = \frac{1}{R1 \cdot hf} + \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{K_{VGHE}}$$

Γενικά:

$$R1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot hf} + \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot K_{VGHE}}$$

Συναγωγή από το ρευστό στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα	Αγωγή μέσα από το εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα μέχρι και την εξωτερική του επιφάνεια
---	---

ivar2

Όρος της θερμικής αντίστασης αγωγής από την εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα του ΚΓΕ μέχρι την επιφάνεια του υλικού πλήρωσης της οπής γεώτρησης.

$$i \text{ var2} = \ln\left(\frac{R3}{R2}\right) \Rightarrow R2 = \ln\left(\frac{R3}{R2}\right)$$

Στη σχέση δεν υπάρχει ο όρος $2 \cdot \pi$ καθώς και η ειδική θερμική αγωγιμότητα του εδάφους. Η θερμική αντίσταση όμως υπολογίζεται για κάθε κόμβο μέσω του μητρώου ΒΗΤΑ ($j\%$) όπου λαμβάνεται υπ' όψη τόσο ο όρος $2 \cdot \pi$ όσο και το η ειδική θερμική αγωγιμότητα εδάφους μέσω του μητρώου: $K(z\%)$. (Βλ. υπορουτίνα: "Assign CoefMatrisses").

DIM m

Μεταβλητή αρίθμησης χρονικών μονάδων: Αριθμός Χρονικών Μονάδων «m» που εισάγει ο χρήστης. Για παράδειγμα εάν $m=5$ τα αποτελέσματα αφορούν τη παρέλευση 5 χρονικών μονάδων.

DIM StartTime

Μεταβλητή αποτύπωσης του χρόνου του Η/Υ στην έναρξη των υπολογισμών.

SUB AssignZeroHoursTemp

Από το Μητρώο Αρχικών Θερμοκρασιών εδάφους:

$$TP0 = T_p^0 = [Tp0_{1,0}, Tp0_{1,1}, TP0_{1,2} \dots TP0_{1,227}, TP0_{1,228}]$$

Ορίζεται ότι το ακόλουθο στοιχείο του πίνακα λαμβάνει την αρχική θερμοκρασία εδάφους.

$$TP0(1,1) = TP0_{1,1} = \text{ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΟΝ ΚΟΜΒΟ (1,1)} = Tarx$$

αφού ο χρήστης έχει εισάγει: $Tarx = 8^{\circ}C = TP0(1,1)$

Θεωρείται ότι από το στοιχείο με αριθμοδείκτη $j\% = 2$ δηλαδή από το στοιχείο $TP0_{1,2}$ δηλαδή από τον κόμβο (1,2) μέχρι το $j\%$ με: $P1 = \frac{15}{DY} + 1 \Rightarrow P1 = \frac{15}{0,5} + 1 = 31$ ήτοι το $j\% = 31$, δηλαδή το στοιχείο που βρίσκεται στη γραμμή με δείκτη 1 και στήλη με δείκτη 31 (δηλ. το στοιχείο: $TP0_{1,31}$) η θερμοκρασία εδάφους μεταβάλλεται με την σχέση:

$$TP0(1, j\%) = TP0(1, j\% - 1) + DT1$$

Είναι προφανές ότι αυτό συμβαίνει για τα πρώτα: 15,5m βάθους. Σε αυτά 15,5m η θερμοκρασία του επόμενου κόμβου είναι αυτή του προηγούμενου προσαυξημένη κατά την ποσότητα $DT1$ που ορίζεται:

$$DT1 = \frac{DY}{1,5} \quad \text{ήτοι}$$

$$DT1 = \frac{0,5}{1,5} = 0,3333333$$

Στη συνέχεια από το στοιχείο του πίνακα:

ΑΠΟ: $j\% = (P1 + 1)$ δηλαδή από το στοιχείο με αριθμοδείκτη $j\% = 31 + 1$ ήτοι από $j\% = 32$ άρα από την $TP0_{1,32}$ ΕΩΣ: $z\%$ ήτοι μέχρι το στοιχείο με αριθμοδείκτη στήλης 227 του Μητρώου $TP0$: που είναι το $TP0_{1,227}$ επομένως μέχρι τον κόμβο (1,227) η θερμοκρασία του επόμενου κόμβου υπολογίζεται από αυτήν του προηγούμενου προσαυξημένη κατά την ποσότητα $DT2$ που ορίζεται:

$$DT2 = \frac{DY}{33} = 0,0151515$$

Όπου: $1/33 = 0,03$ K/m η γεωθερμική βαθμίδα.

ΑΠΟ: $i = 1$ ΕΩΣ $x\%$ (δηλαδή στην επιφάνεια του εδάφους από το στοιχείο του μητρώου $TP0$ με αριθμοδείκτη οριζόντιας κατεύθυνσης $i\% = 1$) ΕΩΣ $i\% = 27$ (σαρώθηκε η οριζόντια κατεύθυνση και για την κατακόρυφη είναι):

ΑΠΟ $j\% = 1$ ΕΩΣ $z\%$

Δηλαδή από το στοιχείο με $j\% = 1$ μέχρι και το στοιχείο με $j\% = 227$ (και έτσι σαρώθηκε όλο το πλέγμα με συντεταγμένες από κόμβο (1,1) ως (27,1) και από κόμβο (1,1) ως (1,227)).

Η θερμοκρασία τίθεται:

$$T(i\%, j\%) = TP0(1, j\%)$$

Με αυτή τη διαδικασία τοποθετούνται σε όλους τους κόμβους του πλέγματος οι τιμές της αρχικής θερμοκρασίας από το μητρώο $TP0$ που υπολογίστηκε όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Μπορεί να ξεκινήσει τώρα η διαδικασία επίλυσης για την επόμενη χρονική στιγμή $t + \Delta t$ σε όλους τους κόμβους.

SUB CopyT2T0

Η υπορουτίνα αυτή λαμβάνει τις θερμοκρασίες σε όλους τους κόμβους $T(i, j)$ που υπολογίστηκαν από την υπορουτίνα: “SUB AssignZeroHoursTemp” και τις αναθέτει στο Μητρώο $T0$ που είναι το Μητρώο “Προηγούμενων” θερμοκρασιών εδάφους. Δηλαδή ξεκινώντας η εκτέλεση του προγράμματος υπολογίζονται και τίθενται οι αρχικές θερμοκρασίες σε όλους τους κόμβους και στη συνέχεια με την SUB CopyT2T0 οι πρώτες αυτές τιμές θερμοκρασίας μπαίνουν στο μητρώο $T0$ “Προηγούμενων” θερμοκρασιών εδάφους για να υπολογιστούν οι επόμενες τιμές.

ΑΠΟ $i\% = 1$

Από τα στοιχεία με αριθμοδείκτη σειράς: $i\% = 1$ (αριθμοδείκτης οριζόντιας σάρωσης)

ΕΩΣ $x\% + 1$

Μέχρι και το: στοιχείο με αριθμοδείκτη σειράς: $i\% = 27 + 1 = 28$ (οριζόντιας κατεύθυνσης) δηλαδή τον κόμβο που βρίσκεται στα: $14m$ οριζόντια

ΑΠΟ $j\% = 1$

Από το στοιχείο με αριθμοδείκτη στήλης $j\% = 1$ (κατακόρυφης κατεύθυνσης)

ΕΩΣ $z\%$

Μέχρι και το στοιχείο με αριθμοδείκτη στήλης $j\% = 227$ (δηλαδή τον κόμβο) που βρίσκεται στα $113,5m$ κατακόρυφα

Με τα παραπάνω 2 loop (βρόχους) έχει σαρωθεί όλη η περιοχή από τον κόμβο (1,1) μέχρι και τον (28,1) και από τον (1,1) μέχρι τον (1,227) και εκτελείται η εξίσωση:

$$T0(i\%, j\%) = T(i\%, j\%)$$

Επομένως οι αρχικές τιμές των θερμοκρασιών στους κόμβους του πλέγματος γίνονται “προηγούμενες” για να υπολογιστούν οι επόμενες.

SUB AssignCoefMatrisses

Στην υπορουτίνα αυτή τίθενται όλοι οι συντελεστές και όροι που είναι απαραίτητοι για την επίλυση της Εξίσωσης Πεπερασμένων Διαφορών για την μη-μόνιμη διδιάστατη αγωγή θερμότητας καθώς και τα μητρώα ALFA και BHTA που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των θερμοκρασιών νερού.

ΑΠΟ $j\% = 1$

Από το στοιχείο με δείκτη στήλης $j\% = 1$

ΕΩΣ $z\%$

Μέχρι το στοιχείο με δείκτη στήλης $j\% = 227$ του μητρώου κατακόρυφου υπολογισμού

$$k(j\%) = LE1$$

Η ειδική θερμική αγωγιμότητα του εδάφους όπως ορίστηκε στο Μητρώο Συντελεστών Ειδικής Αγωγιμότητας Εδάφους $k(z\%)$ λαμβάνει την τιμή: $LE1$ δηλαδή: $LE1 = 1$ όπως εισήχθη στην αρχή του προγράμματος. Επομένως σε όλους τους κόμβους του πλέγματος με $j\%$ από 1 ως 227 τίθεται η ειδική θερμική αγωγιμότητα εδάφους ίση με 1 για οποιοδήποτε $i\%$. Στη συνέχεια προσαρμόζεται κατά βάθος ως εξής:

$$EAN ((j\% - 1) \cdot DY) > 10$$

Από $j\% = 1$ ως και $j\% = 227$ αν η διαφορά $(j\% - 1) \cdot DY > 10$ δηλαδή:

$$j\% = 1 \Rightarrow (j\% - 1) \cdot DY = 0 < 10$$

$$j\% = 2 \Rightarrow (j\% - 1) \cdot DY = 1 \cdot 0,5 = 0,5 < 10$$

$$j\% = 3 \Rightarrow (3 - 1) \cdot 0,5 = 1$$

$$j\% = 4 \Rightarrow (4 - 1) \cdot 0,5 = 1,5$$

$$j\% = 5 \Rightarrow (5 - 1) \cdot 0,5 = 2$$

$$j\% = 6 \Rightarrow (6 - 1) \cdot 0,5 = 2,5$$

$$j\% = 7 \Rightarrow (7 - 1) \cdot 0,5 = 3$$

$$j\% = 8 \Rightarrow (8 - 1) \cdot 0,5 = 3,5$$

$$j\% = 9 \Rightarrow \dots = 4$$

$$j\% = 10 \Rightarrow \dots = 4,5$$

.

.

.

$$j\% = 20 \Rightarrow (20 - 1) \cdot 0,5 = 9,5$$

$$j\% = 21 \Rightarrow (21 - 1) \cdot 0,5 = 10$$

$$j\% = 22 \Rightarrow (22 - 1) \cdot 0,5 = 10,5 > 10$$

Άρα από $j\% = 1$ μέχρι και $j\% = 21$ είναι $k(j\%) = LE1 = 1$

TOTE: $k(j\%) = k(j\% - 1) + DLE$

Επομένως η ειδική θερμική αγωγιμότητα εδάφους για αυτόν τον αριθμοδείκτη κατακόρυφης κατεύθυνσης του Μητρώου $k(z\%)$ είναι ίση με την θερμική αγωγιμότητα του προηγούμενου στοιχείου συν την διαφορά (ποσότητα) DLE :

$$DLE = \frac{(LE2 - LE1)}{10} \Rightarrow DLE = \frac{3-1}{10} = 0,2$$

Από $j\% = 1$ έως και το στοιχείο με αριθμοδείκτη $j\% = 21$ του μητρώου $k(z\%)$ είναι:

$$k(z\%) = [1, 1, 1, \dots, 1, k_{22}, k_{23}, \dots, k_{27}]$$

Από $j\% = 22$ ως $j\% = 227$

$$k(j\%) = k(j\% - 1) + DLE$$

π.χ.

$$k(22) = k(21) + DLE \quad \text{ή:}$$

$$k_{22} = k_{21} + 0,2 \Rightarrow k_{22} = 1 + 0,2 = 1,2$$

$$k_{23} = k_{22} + 0,2 \Rightarrow k_{23} = 1,2 + 0,2 = 1,4$$

κ.ο.κ

Η διαδικασία συνεχίζεται ομοίως ώσπου το $j\%$ θα γίνει: $k(j\%) > LE2$ δηλαδή: $k(j\%) > 3$. Αυτό θα συμβεί όταν $j\% = 32$ αφού:

$$k(32) = k(31) + 0,2 = 3 + 0,2 = 3,2 \quad \text{διότι:}$$

$$k_{23} = k_{21} + 0,2 \Rightarrow k_{23} = 1,4$$

$$k_{24} = k_{23} + 0,2 \Rightarrow k_{24} = 1,6$$

$$k_{25} = k_{24} + 0,2 \Rightarrow k_{25} = 1,8$$

$$k_{26} = k_{25} + 0,2 \Rightarrow k_{26} = 2,0$$

$$k_{27} = k_{26} + 0,2 \Rightarrow k_{27} = 2,2$$

$$k_{28} = k_{27} + 0,2 \Rightarrow k_{28} = 2,4$$

$$k_{29} = k_{28} + 0,2 \Rightarrow k_{29} = 2,6$$

$$k_{30} = k_{29} + 0,2 \Rightarrow k_{30} = 2,8$$

$$k_{31} = k_{30} + 0,2 \Rightarrow k_{31} = 3,0$$

$$k_{32} = k_{31} + 0,2 \Rightarrow k_{32} = 3,2$$

ΕΑΝ $k(j\%) > LE2$

Αν ο συντελεστής αγωγής θερμότητας προκύψει μεγαλύτερος από την τιμή $LE2 = 3,0$

ΤΟΤΕ $k(j\%) = LE2$

Τότε το k από αυτό το στοιχείο και μετά παίρνει τη σταθερή τιμή $LE2 = 3,0$.

Το μητρώο συντελεστών αγωγής θερμότητας διαμορφώνεται τελικά:

$$k(z\%) = \begin{bmatrix} k0 \\ k1 \\ k2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ k20 \\ k21 \\ k22 \\ k23 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ k31 \\ k32 \\ k33 \\ \cdot \\ \cdot \\ k226 \\ k227 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \\ 1 \\ 1,2 \\ 1,4 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 3,0 \\ 3,0 \\ 3,0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 3,0 \\ 3,0 \end{bmatrix}$$

$$A(1, j\%) = k(j\%)DX / DY$$

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του k άρα και του A άρα και του AP είναι συνάρτηση μόνο του βάθους (κατακόρυφης κατεύθυνσης). Επομένως σύμφωνα με την μονοδιάστατη θεώρηση:

$$A(1, J) = K(J) / DY$$

Υπολογίζεται τώρα κάθε όρος του Μητρώου Συντελεστών A της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών.

Από τον ορισμό του Μητρώου A είναι:

$$A = [A_{1,0}, A_{1,1}, A_{1,2}, \dots, A_{1,227}, A_{1,228}]$$

Ενώ γενικά:

$$A_{i+1,j} = \frac{k_{i+1,j} \cdot \Delta y}{(\delta x)_{i+1,j}}$$

όπου: $(\delta x)_{i+1,j}$ = απόσταση μεταξύ κόμβου (i, j) και $(i + 1, j)$

$$A_{i-1,j} = \frac{k_{i-1,j} \cdot \Delta y}{(\delta x)_{i-1,j}}$$

όπου: Δy = μήκος πλευράς του όγκου αναφοράς κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση y

$$A_{i,j+1} = \frac{k_{i,j+1} \cdot \Delta x}{(\delta y)_{i,j+1}}$$

όπου Δx = μήκος πλευράς του όγκου αναφοράς κατά την οριζόντια κατεύθυνση x

$$A_{i,j-1} = \frac{k_{i,j-1} \cdot \Delta x}{(\delta y)_{i,j-1}}$$

Υπολογίζεται τώρα το Μητρώο Συντελεστών AP της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών.

Προκειμένου για την εξίσωση πεπερασμένων διαφορών (3.7.2):

$$Ap = A_p^0 + f \cdot (A_E + A_W + A_N + A_S) \quad \text{ή}$$

$AP_{(i,j)} = A_p^0 + F \cdot [A(i+1, j) + A(i-1, j) + A(i, j+1) + A(i, j-1)]$ ή για την κατακόρυφη κατά βάθος διεύθυνση πάνω στην πλεγματική γραμμή με δείκτη $i\% = 1$

$$\begin{aligned} AP(1, j) &= AP_0 + F \cdot [A(1, j) + A(1, j) + A(1, j+1) + A(1, j-1)] \Rightarrow \\ &\Rightarrow AP(1, j) = AP_0 + F \cdot [2 \cdot A(1, j) + A(1, j+1) + A(1, j-1)] \end{aligned}$$

όπου όπως εξηγήθηκε στα ανωτέρω:

$$AP_0 = \frac{RCE \cdot DX \cdot DY}{DT}$$

ΑΠΟ $j\% = 1$ ΕΩΣ $z\%$

Από το στοιχείο με αριθμοδείκτη κατακόρυφου κατεύθυνσης $j\% = 1$ του μητρώου συντελεστών AP δηλ. κατά μήκος της πλεγματικής γραμμής με $i = 1$ όπου εκεί είναι: $AP_{1,1}$ μέχρι το $z\% = 227$ δηλαδή το στοιχείο με αριθμοδείκτη στήλης $j\% = 227$ (στοιχείο $AP_{1,227}$):

$$AP(1, j\%) = F \cdot (2 * A(1, j\%) + A(1, j\% + 1) + A(1, j\% - 1) + AP_0)$$

ΑΠΟ $i\% = 2$ ΕΩΣ $x\% + 1$

Από το στοιχείο με αριθμοδείκτη σειράς $i\% = 2$ του μητρώου συντελεστών AP όπου εκεί είναι $AP_{2,j\%}$ μέχρι το $x\% + 1 = 28$ δηλαδή το στοιχείο με αριθμοδείκτη σειράς $i\% = 28$ (στοιχείο $AP_{28,j\%}$) το μητρώο συντελεστών AP λαμβάνει τις τιμές:

$$AP(i\%, j\%) = AP(1, j\%)$$

Με αυτό τον τρόπο τοποθετούνται σε όλο το πλέγμα σειρά κατά σειρά διαδοχικά οι τιμές του μητρώου AP που υπολογίστηκαν από $j\% = 1$ ως $z\%$.

Υπολογίζονται τώρα τα Μητρώα $ALFA(y\%)$ & $BHTA(y\%)$.

Το μητρώο $BHTA(y\%)$ υπολογίζει την θερμική αγωγιμότητα από συναγωγή και αγωγή από το ρευστό μέχρι και το εξωτερικό τοίχωμα του ΚΓΕ και την αγωγή από το εξωτερικό τοίχωμα του Κ.Γ.Ε στο έδαφος καθώς διατρέχεται το πλέγμα με κατεύθυνση σάρωσης κατά στήλες. Κάθε φορά αναλαμβάνεται από τον εκάστοτε κόμβο κατάλληλη τιμή του συντελεστή αγωγής θερμότητας $k(j\%)$.

ΑΠΟ $j\% = 2$ ΕΩΣ $y\%$

Από το στοιχείο με αριθμοδείκτη κατακόρυφης κατεύθυνσης $j\% = 2$ του μητρώου κατακόρυφου υπολογισμού $y\%$ ήτοι το $(i\%, 2)$ έως το $y\% = 201$ ήτοι το στοιχείο $(i\%, 201)$ υπολογίζεται το μητρώο:

$$BHTA(y\%) = \begin{bmatrix} BHTA_0 \\ BHTA_1 \\ BHTA_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ BHTA_{200} \\ BHTA_{201} \end{bmatrix}$$

Τότε για κάθε $j\%$ υπολογίζεται το αντίστοιχο στοιχείο του μητρώου $BHTA(y\%)$ και έτσι "τοποθετείται" νέα τιμή συνολικής θερμικής αγωγιμότητας σε κάθε κόμβο στη αριστερή παρειά του πλέγματος διαδοχικά κόμβο-κόμβο κατά βάθος.

$$\frac{1}{R(j\%)} = BHTA(j\%) = \frac{2 \cdot \pi}{(i \text{ var } 1 + i \text{ var } 2 / k(j\%))}$$

$$\text{ή: } BHTA(j\%) = \frac{6,283185307...}{\frac{1}{R1 \cdot hf} + \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{k_{VGHE}} + \frac{\ln\left(\frac{R3}{R2}\right)}{k(j\%)}}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το μητρώο ALFA.

Μέσα στο ίδιο loop από $j\% = 2$ ως $y\%$ προσδιορίζονται όλοι ο όροι του μητρώου ως εξής:

$$ALFA(j\%) = \frac{1}{GAMA + BHTA(j\%)}$$

Παραδείγματος χάριν για $j\% = 3$ δηλαδή το στοιχείο με $j\% = 3$ του μητρώου κατακόρυφης κατεύθυνσης θα είναι $k(j\%) = k(3)$ όπου έχει υπολογιστεί στα προηγούμενα ότι: $k(3) = 1 \text{ W/mK}$. Τότε:

$$BHTA(3) = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{0,011(m) \cdot 500(W/m^2K)} + \frac{\ln\left(\frac{0,014}{0,011}\right)}{0,41(W/mK)}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow BHTA(3) = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{5,5 \frac{W \cdot m}{m^2 \cdot K}} + \frac{0,2412}{0,41 \frac{W}{m \cdot K} + \frac{2,882}{1 \frac{W}{m \cdot K}}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow BHTA(3) = \frac{2 \cdot \pi}{0,18182 \frac{m \cdot K}{W} + 0,5883 \frac{m \cdot K}{W} + 2,282 \frac{m \cdot K}{W}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow BHTA(3) = \frac{2 \cdot \pi}{3,65212 \frac{m \cdot K}{W}} \Rightarrow BHTA(3) = 1,72 \frac{W}{m \cdot K}$$

Ενώ:

$$ALFA(3) = \frac{1}{\frac{\dot{m} \cdot Cp}{NS} + BHTA(3)}$$

SUB FindSupplyWaterTemp

Οι θερμοκρασίες νερού σχετίζονται με την απλοποίηση κοινού εναλλάκτη θερμότητας εντός του οποίου επιτελείται ροή θερμότητας από το εξωτερικό τοίχωμα σταθερής θερμοκρασιακής κατανομής (όπως αυτό διαμορφώνεται από την ανάλυση της παραγράφου: («1. Εισαγωγική περιγραφή διπλωματικής διατριβής» του Β' μέρους) και ρευστό το οποίο κινείται προς και από τα πάνω, δεν λαμβάνεται μόνο υπόψη, σε σημαντικό βαθμό, η επίδραση των δυο ροών από και προς αν και έχει μικρή επίδραση λόγω διαδοχικότητας των πράξεων.

Θεωρείται ότι η συνολική θερμική αγωγιμότητα $1/R$ αφορά έναν σωλήνα στην οπή γεώτρησης. Η συναγωγή κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση αμελείται.

Λαμβάνεται ο συνολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας από συναγωγή και αγωγή που υπολογίζεται:

$$\frac{1}{R(j)} = \frac{2\pi}{\frac{1}{R1 \cdot HF} + \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{LS} + \frac{\ln\left(\frac{R3}{R2}\right)}{k(j)}}$$

$k(j)$ η ειδική θερμική αγωγιμότητα εδάφους αναλόγως βάθους που έχει υπολογιστεί στο αρχικό βήμα εκτέλεσης του προγράμματος μέσω της υπορουτίνας AssignCoefMatrisses σύμφωνα με συγκεκριμένη γεωθερμική βαθμίδα.

HF = συντελεστής συναγωγιμότητας νερού

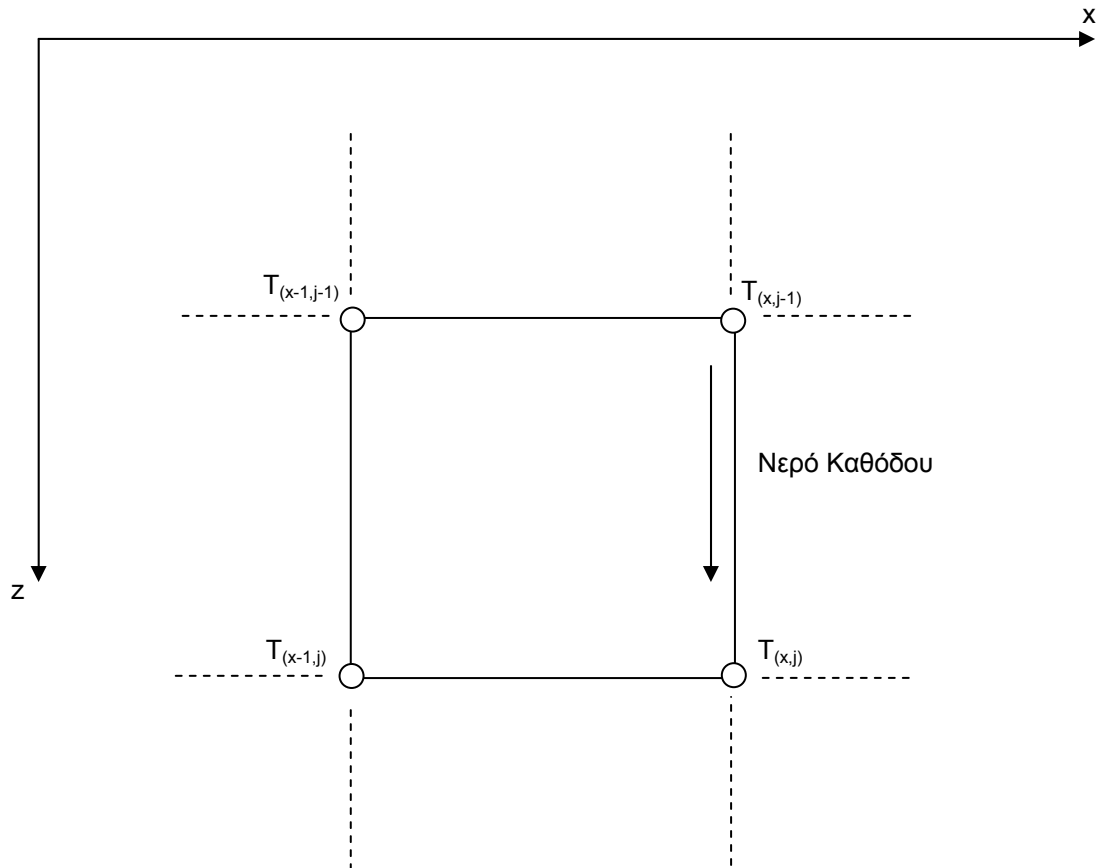
LS = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υλικού Κ.Γ.Ε

R2 = εξωτερική ακτίνα σωλήνα ΚΓΕ

R1 = εσωτερική ακτίνα σωλήνα ΚΓΕ

R3 = ακτίνα οπής γεώτρησης

Τότε με ισολογισμό ενέργειας υπολογίζεται η θερμοκρασία νερού προσαγωγής (καθόδου) στον Κ.Γ.Ε ως εξής:



$$\begin{aligned} \dot{m}C_p[T(x, j) - T(x, j-1)] &= \frac{1}{R(j)}[T(x-1, j-1) - T(x, j-1)] + \frac{1}{R(j)}[T(x-1, j) - T(x, j)] \Rightarrow \\ \dot{m}C_pT(x, j) - \dot{m}C_pT(x, j-1) &= \frac{1}{R(j)}T(x-1, j-1) - \frac{1}{R(j)}T(x, j-1) + \frac{1}{R(j)}T(x-1, j) - \frac{1}{R(j)}T(x, j) \Rightarrow \\ \dot{m}C_pT(x, j) + \frac{1}{R(j)}T(x, j) &= \frac{1}{R(j)}T(x-1, j-1) + \dot{m}C_pT(x, j-1) - \frac{1}{R(j)}T(x, j-1) + \frac{1}{R(j)}T(x-1, j) \Rightarrow \\ \left(\dot{m}C_p + \frac{1}{R(j)}\right)T(x, j) &= \frac{1}{R(j)}T(x-1, j-1) + \left[\dot{m}C_p - \frac{1}{R(j)}\right]T(x, j-1) + \frac{1}{R(j)}T(x-1, j) \Rightarrow \\ \left(\dot{m}C_p + \frac{1}{R(j)}\right)T(x, j) &= \frac{1}{R(j)}[T(x-1, j-1) + T(x-1, j)] + \left(\dot{m}C_p - \frac{1}{R(j)}\right)T(x, j-1) \Rightarrow \\ TA(j) = T(x, j) &= \frac{1}{\dot{m}C_p + \frac{1}{R(j)}} \left\{ \frac{1}{R(j)}[T(x-1, j-1) + T(x-1, j)] + \left(\dot{m}C_p - \frac{1}{R(j)}\right)T(x, j-1) \right\} \end{aligned}$$

Όπου:

\dot{m} = παροχή μάζας ψυκτικού υγρού και C_p η θερμοχωρητικότητα του.

Για περισσότερους του ενός (1) Κ.Γ.Ε εντός της οπής γεώτρησης τότε:

$$TA(j) = T(x, j) = \frac{1}{\frac{mCp}{NS} + \frac{1}{R(j)}} \left\{ \frac{1}{R(j)} [T(x-1, j-1) + T(x-1, j)] + \left(\frac{mCp}{NS} - \frac{1}{R(j)} \right) T(x, j-1) \right\}$$

Όπου:

NS το πλήθος των γεωθερμικών εναλλακτών τύπου U στην οπή γεώτρησης (στο παρόν παράδειγμα είναι: NS = 1).

Η παραπάνω εξίσωση εισάγεται στον κώδικα με τη βοήθεια των μητρώων ALFA και ΒΗΤΑ ως εξής:

$$T(x\%, j\%) = ALFA(j\%) * (ΒΗΤΑ(j\%) * (T(x\%-1, j\%-1) + T(x\%-1, j\%))) + (GAMA - ΒΗΤΑ(j\%)) * T(x\%, j\%-1)$$

Αρχικά ανατίθεται στο στοιχείο με δείκτη 1 του Μητρώου Θερμοκρασιών $TA(y\%)$ νερού προσαγωγής στον ΚΓΕ η τιμή της θερμοκρασίας $TNin$ εισόδου του νερού που ορίστηκε από τον χρήστη: $TNin = 8^{\circ}C$

$$TA = \begin{bmatrix} TA_0 \\ TA_1 \\ TA_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ TA_{199} \\ TA_{200} \\ TA_{201} \end{bmatrix}$$

$$TA(1) = TNin$$

Επομένως η θερμοκρασία του νερού προσαγωγής στο στοιχείο με $j\% = 1$ θα είναι:

$$TA(1) = TA_1 = TNin = 8^{\circ}C$$

$$T(x\%, 1) = TNin$$

Το στοιχείο $(x\%, 1)$ του Μητρώου $T = TP(x\% + 1, z\% + 1)$ είναι το στοιχείο που έχει $i\% = x\% = 27$ και $j\% = 1$ δηλαδή το: $TP_{27,1}$ οπότε τίθεται εδώ η θερμοκρασία $TP_{27,1} = TNin = 8^{\circ}C$ που αυτή είναι η θερμοκρασία του κόμβου: $(27, 1)$.

$$T(27, 1) = TNin = TA(1) = TA_1 = 8^{\circ}C$$

Εφαρμόζοντας τώρα ένα Ισορ “κατά βάθος” θα υπολογιστούν οι υπόλοιπες θερμοκρασίες του πλέγματος στη παρειά του υπολογιστικού πλέγματος που βρίσκεται ο Κ.Γ.Ε και έχει αριθμοδείκτη σειράς $i\% = 27$.

ΑΠΟ $j\% = 2$ ΕΩΣ $y\%$

Από το στοιχείο με αριθμοδείκτη στήλης $j\% = 2$ μέχρι το όριο της γεώτρησης δηλ. το $y\% = 201$ αλλά για $i\% = x\% = 27$ υπολογίζεται η θερμοκρασία νερού προσαγωγής ως εξής:

$$T(x\%,j\%) = ALFA(j\%)*(BHTA(j\%)*(T(x\%-1,j\%-1)+T(x\%-1,j\%)))+(GAMA-BHTA(j\%))*T(x\%,j\%-1))$$

Παράδειγμα:

Υπολογισμός της θερμοκρασίας $T(27,5)$

Αυτή η θερμοκρασία αντιστοιχεί στο στοιχείο του μητρώου θερμοκρασιών εδάφους που βρίσκεται στην σειρά με δείκτη: $x\% = 27 \Rightarrow i\% = 27$ δείκτη στήλης $j\% = 5$ δηλαδή την θερμοκρασία $Tp_{27,5}$ (θερμοκρασία στον κόμβο: $(27,5)$). Επομένως:

	0	1	2	3	4	5	...	228
0	$Tp_{0,0}$	$Tp_{0,1}$	$Tp_{0,2}$	$Tp_{0,3}$	$Tp_{0,4}$	$Tp_{0,5}$	...	$Tp_{0,228}$
1	$Tp_{1,0}$	$Tp_{1,1}$	$Tp_{1,2}$	$Tp_{1,3}$	$Tp_{1,4}$	$Tp_{1,5}$	...	$Tp_{1,228}$
2	$Tp_{2,0}$	$Tp_{2,1}$	$Tp_{2,2}$	$Tp_{2,3}$	$Tp_{2,4}$	$Tp_{2,5}$	...	$Tp_{2,228}$
.
.
.
26	$Tp_{26,0}$	$Tp_{26,1}$	$Tp_{26,2}$	$Tp_{26,3}$	$Tp_{26,4}$	$Tp_{26,5}$	...	$Tp_{26,228}$
27	$Tp_{27,0}$	$Tp_{27,1}$	$Tp_{27,2}$	$Tp_{27,3}$	$Tp_{27,4}$	$Tp_{27,5}$	...	$Tp_{27,228}$
28	$Tp_{28,0}$	$Tp_{28,1}$	$Tp_{28,2}$	$Tp_{28,3}$	$Tp_{28,4}$	$Tp_{28,5}$	...	$Tp_{28,228}$

Αφού: $i\% = 27$ και $j\% = 5$

$$T(27,5) = T_{\text{ΚΟΜΒΟΥ}}(27,5) = ALFA(5) \cdot (BHTA(5) \cdot (T(26,4) + T(26,5))) + (GAMA - BHTA(5)) \cdot T(27,4)$$

Στη συνέχεια τίθεται η θερμοκρασία του Νερού Προσαγωγής στον Κ.Γ.Ε αντιστοιχίζοντας στο μητρώο $TA(y\%)$ από το 3^ο στοιχείο του (δηλ. για $j\% = 2$) μέχρι το στοιχείο TA_{201} τις θερμοκρασίες που βρέθηκαν παραπάνω.

Έτσι:

$$TA(j\%) = T(x\%, j\%)$$

SUB FindReturnWaterTemp

Οι θερμοκρασίες νερού σχετίζονται με την απλοποίηση κοινού εναλλάκτη θερμότητας εντός του οποίου επιτελείται ροή θερμότητας από το εξωτερικό τοίχωμα σταθερής θερμοκρασιακής κατανομής (όπως αυτό διαμορφώνεται από την ανάλυση της παραγράφου: («1. Εισαγωγική περιγραφή διπλωματικής διατριβής» του Β' μέρους) και ρευστό το οποίο κινείται προς και από τα πάνω, δεν λαμβάνεται μόνο υπόψη, σε σημαντικό βαθμό, η επίδραση των δυο ροών από και προς αν και έχει μικρή επίδραση λόγω διαδοχικότητας των πράξεων.

Θεωρείται ότι η συνολική θερμική αγωγιμότητα $1/R$ αφορά έναν σωλήνα στην οπή γεώτρησης. Η συναγωγή κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση αμελείται.

Λαμβάνεται ο συνολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας από συναγωγή και αγωγή που υπολογίζεται:

$$\frac{1}{R(j)} = \frac{2\pi}{\frac{1}{R1 \cdot HF} + \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{LS} + \frac{\ln\left(\frac{R3}{R2}\right)}{k(j)}}$$

Όπου:

$k(j)$ η ειδική θερμική αγωγιμότητα εδάφους αναλόγως βάθους που έχει υπολογιστεί στο αρχικό βήμα εκτέλεσης του προγράμματος μέσω της υπορουτίνας AssignCoefMatrisses σύμφωνα με συγκεκριμένη γεωθερμική βαθμίδα.

HF = συντελεστής συναγωγιμότητας νερού

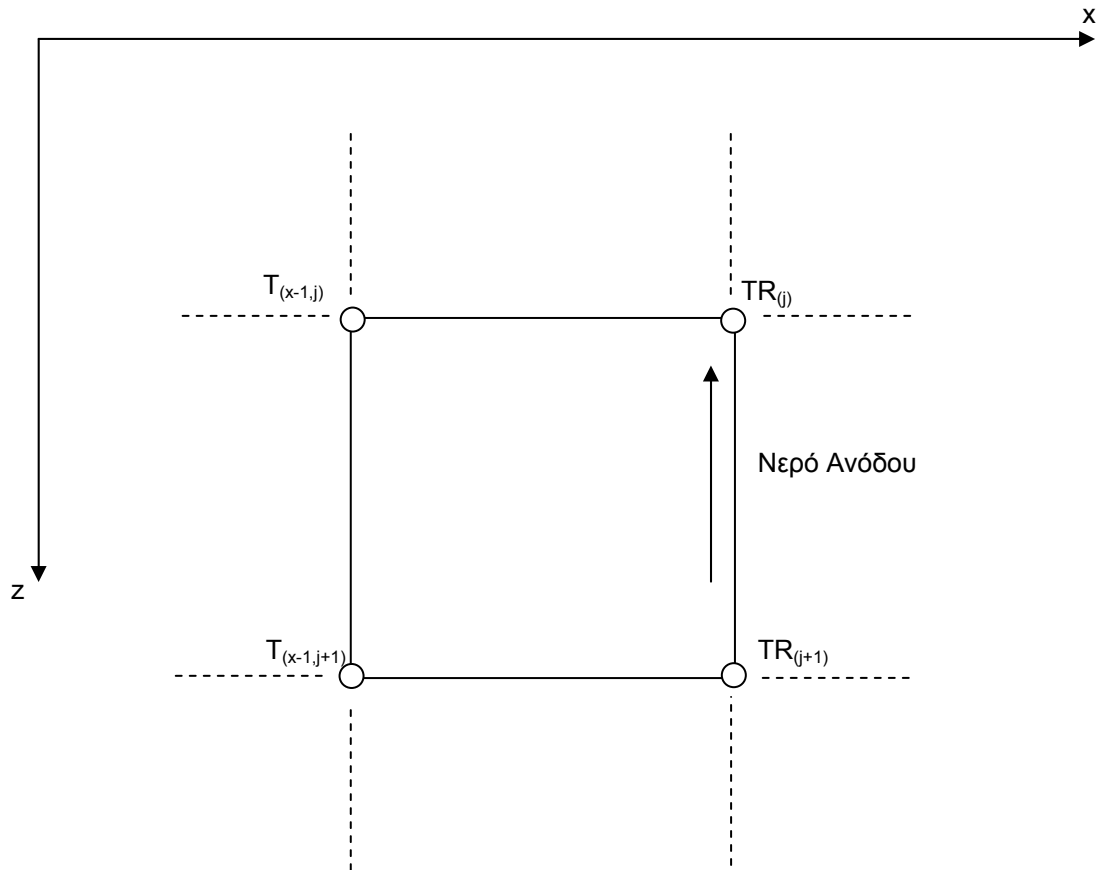
LS = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υλικού Κ.Γ.Ε

R2 = εξωτερική ακτίνα σωλήνα ΚΓΕ

R1 = εσωτερική ακτίνα σωλήνα ΚΓΕ

R3 = ακτίνα οπής γεώτρησης

Τότε με ισολογισμό ενέργειας υπολογίζεται η θερμοκρασία νερού προσαγωγής (καθόδου) στον Κ.Γ.Ε ως εξής:



$$\begin{aligned}
 -\dot{m} C_p [TR(j+1) - TR(j)] &= \frac{1}{R(j)} [T(x-1, j+1) - TR(j+1)] + \frac{1}{R(j)} [T(x-1, j) - TR(j)] \Rightarrow \\
 \dot{m} C_p TR(j) - \dot{m} C_p TR(j+1) &= \frac{1}{R(j)} T(x-1, j+1) - \frac{1}{R(j)} TR(j+1) + \frac{1}{R(j)} T(x-1, j) - \frac{1}{R(j)} TR(j) \Rightarrow \\
 \dot{m} C_p TR(j) + \frac{1}{R(j)} TR(j) &= \frac{1}{R(j)} T(x-1, j+1) + \dot{m} C_p TR(j+1) - \frac{1}{R(j)} TR(j+1) + \frac{1}{R(j)} T(x-1, j) \Rightarrow \\
 \left(\dot{m} C_p + \frac{1}{R(j)} \right) TR(j) &= \frac{1}{R(j)} T(x-1, j+1) + \left[\dot{m} C_p - \frac{1}{R(j)} \right] TR(j+1) + \frac{1}{R(j)} T(x-1, j) \Rightarrow \\
 TR(j) &= \frac{1}{\dot{m} C_p + \frac{1}{R(j)}} \left\{ \frac{1}{R(j)} [T(x-1, j+1) + T(x-1, j)] + \left(\dot{m} C_p - \frac{1}{R(j)} \right) TR(j+1) \right\}
 \end{aligned}$$

Όπου:

\dot{m} = παροχή μάζας ψυκτικού υγρού και C_p η θερμοχωρητικότητα του.

Για περισσότερους του ενός (1) Κ.Γ.Ε εντός της οπής γεώτρησης τότε:

$$TR(j) = \frac{1}{\frac{mCp}{NS} + \frac{1}{R(j)}} \left\{ \frac{1}{R(j)} [T(x-1, j+1) + T(x-1, j)] + \left(\frac{mCp}{NS} - \frac{1}{R(j)} \right) TR(j+1) \right\}$$

Όπου:

NS το πλήθος των γεωθερμικών εναλλακτών τύπου U στην οπή γεώτρησης (στο παρόν παράδειγμα είναι: NS = 1).

Η παραπάνω εξίσωση εισάγεται στον κώδικα με τη βοήθεια των μητρώων ALFA και ΒΗΤΑ ως εξής:

$$TR(j\%) = ALFA(j\%) * (ΒΗΤΑ(j\%) * (T(x\%-1, j\%+1) + T(x\%-1, j\%))) + (GAMA - ΒΗΤΑ(j\%)) * TR(j\%+1)$$

Από το Μητρώο θερμοκρασιών νερού στο σωλήνα επιστροφής του Κ.Γ.Ε:

$$TR(y\%) = \begin{bmatrix} TR_0 \\ TR_1 \\ TR_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ TR_{199} \\ TR_{200} \\ TR_{201} \end{bmatrix}$$

Ο Κ.Γ.Ε έρχεται στο κατώτερο σημείο του σε επαφή με το έδαφος. Στο κατώτερο αυτό σημείο του Κ.Γ.Ε η θερμοκρασία νερού προσαγωγής και επιστροφής είναι κοινή.

Οπότε τίθεται:

$$TR(y\%) = TR_y \text{ και εν προκειμένω:}$$

$$TR(201) = TR_y$$

δηλαδή η θερμοκρασία του 201^{ου} στοιχείου του μητρώου θερμοκρασιών νερού επιστροφής στον Κ.Γ.Ε είναι ίση με TR_y (κόμβος (i%,201)).

Εφαρμόζοντας τώρα ένα loop με βήμα -1 ξεκινώντας από το στοιχείο $y\% - 1 = 201 - 1 = 200$ υπολογίζεται η θερμοκρασία νερού επιστροφής στον Κ.Γ.Ε ως εξής:

$$\text{ΑΠΟ } j\% = y\% - 1 \text{ ΕΩΣ } 0 \text{ Step } -1$$

Από το στοιχείο TR_{200} μέχρι το στοιχείο με αριθμοδείκτη $j\% = 0 \Rightarrow TR_0$ του μητρώου $TR(y\%)$ με βήμα -1 η θερμοκρασία του νερού επιστροφής υπολογίζεται από κόμβο σε κόμβο:

$$TR(j\%) = ALFA(j\%) \cdot (BH\tau A(j\%) \cdot (T(x\% - 1, j\% + 1) + T(x\% - 1, j\%))) + (GAMA - BH\tau A(j\%)) \cdot TR(j\% + 1))$$

Παράδειγμα:

$$\text{Επειδή: } x\% = 27 \Rightarrow i\% = 27$$

Για $j\% = 199$:

$$TR(199) = ALFA(199) \cdot (BH\tau A(199) \cdot (T(26, 200) + T(26, 199))) + (GAMA - BH\tau A(199)) \cdot TR(200))$$

όπου:

$$TR(199) = \text{θερμοκρασία νερού επιστροφής στον κόμβο με δείκτη } j\% = 199$$

$T(26, 200)$ = θερμοκρασία εδάφους στο στοιχείο που βρίσκεται στην 27^η σειρά και 201^η στήλη του μητρώου θερμοκρασιών εδάφους ήτοι στον κόμβο: (26, 200)

$$T(26, 199) = \text{θερμοκρασία εδάφους στον κόμβο (26, 199)}$$

$$TR(200) = \text{θερμοκρασία νερού επιστροφής στον κόμβο με δείκτη } j\% = 200$$

Όταν κατά την εκτέλεση του βρόχου έρθει η αρίθμηση του στοιχείου: $j\% = 0$ θα βρεθεί η:

$$TR(0) = TR_0 = ALFA(0) \cdot (BH\tau A(0) \cdot (T(26, 1) + T(26, 0))) + (GAMA - BH\tau A(0)) \cdot TR(1))$$

με την βοήθεια της $TR_1 = TR(1)$ η οποία υπολογίζεται:

$$TR(1) = ALFA(2) \cdot (BH\tau A(2) \cdot (T(x\% - 1, 2) + T(x\% - 1, 1))) + (GAMA - BH\tau A(2)) \cdot TR(2))$$

SUB MeshSolver

Η υπορουτίνα αυτή περιέχει την αριθμητική επαναληπτική μέθοδο επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών για τον υπολογισμό των ζητούμενων θερμοκρασιών εδάφους στους κόμβους του πλέγματος.

Η διακριτοποιημένη εξίσωση (3.7.2) χωρίς πηγές μετασχηματίζεται στην υπολογιστική συνάρτηση που ονομάζεται TTT (finite difference equation for Transient Time Two dimensional heat conduction).

FUNCTION TTT=

$$\begin{aligned} &= ((A(i\%, j\%)) \cdot (F \cdot T(i\% + 1, j\%) + f1 \cdot TP0(1, j\%)) + \\ &+ A(i\% - 1, j\%) \cdot (F \cdot T(i\% - 1, j\%) + f1 \cdot TP0(1, j\%)) + \\ &+ A(i\%, j\% + 1) \cdot (F \cdot T(i\%, j\% + 1) + f1 \cdot TP0(1, j\% + 1)) + \\ &+ A(i\%, j\% - 1) \cdot (F \cdot T(i\%, j\% - 1) + f1 \cdot TP0(1, j\% - 1)) + \\ &+ (AP0 - f1 \cdot (A(i\% + 1, j\%) + A(i\% - 1, j\%) + A(i\%, j\% + 1) + A(i\%, j\% - 1)))) \cdot TP0(1, j\%) / AP(i\%, j\%) \end{aligned}$$

Μια πιο συνοπτική γραφή είναι η ακόλουθη:

$$TTT = ((vn + vs + ve + vw) + (AP0 - f1 * (A(1, j\%) + A(1, j\%) + A(1, j\% + 1) + A(1, j\% - 1)))) \cdot TP0(1, j\%) / AP(i\%, j\%)$$

όπου:

$$\begin{aligned} vn &= A(1, j\%) \cdot (F \cdot T(i\% + 1, j\%) + f1 \cdot TP0(1, j\%)) \\ vs &= A(1, j\%) \cdot (F \cdot T(i\% - 1, j\%) + f1 \cdot TP0(1, j\%)) \\ ve &= A(1, j\% + 1) \cdot (F \cdot T(i\%, j\% + 1) + f1 \cdot TP0(1, j\% + 1)) \\ vw &= A(1, j\% - 1) \cdot (F \cdot T(i\%, j\% - 1) + f1 \cdot TP0(1, j\% - 1)) \end{aligned}$$

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί για να ξεκινήσει η διαδικασία αριθμητικής επίλυσης για την εύρεση των θερμοκρασιών στους κόμβους κάθε χρονική στιγμή μέσω της συνάρτησης TTT, απαιτείται μια αρχική πρώτη προσέγγιση στη λύση του συστήματος των εξισώσεων. Στη συνέχεια η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης υλοποιείται μέσω της μεθόδου Jacobi.

Η αρχική εκτίμηση στις θερμοκρασίες των κόμβων του πλέγματος γίνεται μέσω της υπορουτίνας: AssignZeroHoursTemp. Η υπορουτίνα αυτή προσεγγίζει αρχικές τιμές θερμοκρασίας στους κόμβους του πλέγματος μέσω του μητρώου TP0 αρχικών θερμοκρασιών εδάφους. Στη συνέχεια καλείται η υπορουτίνα CopyT2T0 η οποία λαμβάνει τις τιμές θερμοκρασίας όλων των κόμβων που αντιστοιχήθηκαν από την προηγούμενη υπορουτίνα και τις τοποθετεί στους κόμβους του πλέγματος ως προηγούμενες (Μητρώο "Προηγούμενων θερμοκρασιών εδάφους T0") για να υπολογιστούν οι επόμενες μέσω της συνάρτησης TTT.

Η αριθμητική επαναληπτική διαδικασία σταματά για κάθε κόμβο όταν εκπληρωθεί το κριτήριο σύγκλισης που ορίστηκε. Όσο δεν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης εφαρμόζεται η μέθοδος της Χαλάρωσης (Relaxation). Η Μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στις επαναληπτικές μεθόδους επίλυσης συστημάτων Gauss – Seidel και Jacobi για να επιτευχθεί ταχύτερη σύγκλιση (επιτάχυνση αριθμητικών υπολογισμών και εξοικονόμηση χρόνου στον Η/Υ).

Επίσης χρησιμοποιείται σε μητρώα που βρίσκονται σε “κακή κατάσταση” (ill condition) και δεν φαίνεται ότι συγκλίνουν σχετικά εύκολα. Μητρώα σε “κακή κατάσταση” είναι αυτά στα οποία μια μικρή αλλαγή στη “διαταραχή” των δεδομένων επιφέρει σημαντική μεταβολή στις τιμές των ζητούμενων αγνώστων. Για παράδειγμα για το σύστημα: $[A] \cdot [x] = [B]$ μικρή μεταβολή στο μητρώο $[A]$ επιφέρει μεγάλη αλλαγή στη λύση (μητρώο $[x]$).

Για την εκτίμηση της κατάστασης ενός μητρώου υπάρχουν χαρακτηριστικοί “αριθμοί κατάστασης” όπως ο: “Αριθμός Κατάστασης HADAMARD”, ο “Φασματικός Αριθμός Κατάστασης” κ.α. η ανάπτυξη των οποίων ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας Διπλωματικής Διατριβής. Απλώς αναφέρεται πως Μητρώα σε “καλή κατάσταση” θεωρούνται αυτά που έχουν ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα κοντά το ένα στο άλλο και < 1 .

Ο υπολογιστικός κώδικας που αναπτύσσεται εδώ επιτρέπει την επιλογή του συντελεστή “ ω ” που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της χαλάρωσης από τον χρήστη. Στη βιβλιογραφία ο συντελεστής αυτός συνήθως αναφέρεται ως Συντελεστής Βαρύτητας και συμβολίζεται με: “ ω ”. Γενικά για σύστημα N εξισώσεων με την i -οστή εξίσωση:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot x_j = b_i$$

σύμφωνα με την αριθμητική μέθοδο Jacobi για την επανάληψη $n + 1$ θα είναι:

$$x_i^{n+1} = \frac{1}{a_{ij}} \left[b_j - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \cdot x_j^n - \sum_{j=i+1}^N a_{ij} \cdot x_j^n \right]$$

η τιμή που θα προκύψει από την παραπάνω γενική σχέση για το x_i^{n+1} ονοματίζεται: x^* και η “πραγματική” λύση για τον x_i^{n+1} η οποία και υιοθετείται (λαμβάνεται) για να εκτελεστεί εκ νέου η αριθμητική μέθοδος για την νέα (επόμενη) επανάληψη είναι η:

$$x_i^{n+1} = \omega \cdot x^* + (1 - \omega) \cdot x^n$$

Με $\omega > 1$ η διαδικασία αυτή ονομάζεται υπερχαλάρωση (over-relaxation) ή παρεκβολή και χρησιμοποιείται για επιτάχυνση της σύγκλισης εφόσον τα μητρώα είναι σε καλή κατάσταση.

Με $\omega < 1$ η διαδικασία ονομάζεται υποχαλάρωση (under-relaxation) δηλαδή λαμβάνεται μια τιμή κάπου ενδιάμεσα στην παλαιά και την καινούργια ως νέα εσωτερική παρεμβολή. Η x^* θεωρείται πλέον ως μια ενδιάμεση λύση.

Εφαρμόζοντας υποχαλάρωση η διαδικασία σύγκλισης καθυστερεί μεν, αλλά γίνεται προσπάθεια για μια “συντηρητική” (αμυντική) σύγκλιση που είναι επιτακτική ιδίως σε μητρώα που βρίσκονται σε κακή κατάσταση ή σε τέτοια που αναμένεται δύσκολη σύγκλιση.

Η υλοποίηση της μεθόδου της χαλάρωσης εκφρασμένης για τις θερμοκρασίες του υπολογιστικού πλέγματος είναι:

$$T_{(i,j)}^{n+1} = \omega \cdot T_{(i,j)}^* + (1 - \omega) \cdot T_{(i,j)}^n \quad \text{ή ισοδύναμα:}$$

$$T_{(i,j)}^{n+1} = T_{(i,j)}^n + \omega \cdot (T_{(i,j)}^* - T_{(i,j)}^n)$$

Η «προηγούμενη» τιμή θερμοκρασίας εδάφους $T0(i,j)$ που υπάρχει σε κάθε κόμβο του πλέγματος ονομάζεται: $T^n(i,j)$ για να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση TTT. Με τον εκθέτη «n» συμβολίζεται ο αριθμός επανάληψης.

Η συνάρτηση TTT υπολογίζει την νέα θερμοκρασία $T^{n+1}(i,j)$

Η νέα $T^{n+1}(i,j)$ συγκρίνεται με την αμέσως προηγούμενη τιμή που ήταν η: $T^n(i,j)$ δηλ. η: $T0(i,j)$

Αν ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης: $|T0(i,j) - T(i,j)| < G$ τότε το loop παίρνει το επόμενο i

$$\underbrace{T0(i,j)}_{T^n(i,j)} - \underbrace{T(i,j)}_{T^{n+1}(i,j)}$$

Αν δεν ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης τότε η $T^{n+1}(i,j)$ «διορθώνεται» με υποχαλάρωση.

Η υποχαλάρωση δίνει ένα νέο: $T^{n+1}(i,j) = \omega * (T^{n+1}(i,j) - T0(i,j)) + T0(i,j)$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{NEO}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{«ΠΑΛΑΙΟ»}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{T^n(i,j) = \text{η τιμή της}}$

προηγούμενης επανάληψης

Στη συνέχεια το NEO $T^{n+1}(i\%, j\%)$ ονομάζεται προηγούμενο: $T0(i, j)$ δηλ. η: $T^n(i\%, j\%)$ και ξαναμπάνει στη συνάρτηση TTT για να προκύψει το $T^{n+1}(i\%, j\%)$ το οποίο συγκρίνεται με το προηγούμενο. Αν δεν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης «διορθώνεται» με υποχαλάρωση και προκύπτει το NEO $T^{n+1}(i\%, j\%)$ το οποίο ονομάζεται $T0(i, j)$ δηλαδή είναι η: $T^n(i\%, j\%)$ μπαίνει στην συνάρτηση TTT κ.ο.κ.

Κατόπιν της παραπάνω ανάλυσης η υπορουτίνα Mesh Solver κατασκευάζεται ως εξής:

Για το πλέγμα μέχρι το βάθος της γεώτρησης: (Δηλαδή από $j\% = 2$ ως $j\% = y\% - 1 = 200$)

ΑΠΟ $j\% = 2$ ΕΩΣ $y\% - 1$

200:

ΑΠΟ $i\% = 2$ ΕΩΣ $x\% - 1$

Από το με $i\% = 2$ στοιχείο σαρώνεται μέχρι και το $x\% - 1 = 27 - 1 = 26$ το υπολογιστικό πλέγμα από τον κόμβο $(i\%, j\%) = (2, 2)$ και $(2, 200)$ ως τον κόμβο $(26, 2)$ και $(26, 200)$ και εκτελούνται οι υπολογισμοί:

$$T0(i\%, j\%) = T(i\%, j\%)$$

$$T(i\%, j\%) = TTT(i\%, j\%, A(), AP(), F, f1, AP0)$$

ΕΠΟΜΕΝΟ $i\%$

Εφαρμογή κριτηρίου σύγκλισης και της μεθόδου χαλάρωσης:

ΑΠΟ $i\% = 2$ ΕΩΣ $x\% - 1$

ΕΑΝ $ABS(T0(i\%, j\%) - T(i\%, j\%)) < G$ ΠΗΓΑΙΝΕ ΣΤΗΝ 290

$$T(i\%, j\%) = T0(i\%, j\%) + w \cdot (T(i\%, j\%) - T0(i\%, j\%))$$

ΠΗΓΑΙΝΕ ΣΤΗΝ 200

Πραγματοποιείται έτσι νέα επανάληψη για τον ίδιο κόμβο εφόσον δεν έχει επιτευχθεί το κριτήριο σύγκλισης.

290:

ΕΠΟΜΕΝΟ $i\%$ Δηλαδή η φορά επίλυσης του πλέγματος είναι:
 πρώτα όλοι οι κόμβοι \longrightarrow ως $x - 1$

ΕΠΟΜΕΝΟ $j\%$ μετά αλλαγή σειράς (επόμενο $j\%$) \downarrow
 στη συνέχεια πάλι \longrightarrow ως $x - 1$

Για τα σημεία τα όμορα με την γεώτρηση και κάτω από αυτήν:

300:

ΑΠΟ $j\% = y\%$ ΕΩΣ $z\% - 1$

Από το με $j\% = 201$ στοιχείο δηλαδή από τον “κόμβο” ($i\%, 201$) μέχρι και το με $j\% = z\% - 1 = 227 - 1 = 226$ στοιχείο του κατακόρυφου υπολογισμού δηλαδή μέχρι τον κόμβο ($i\%, 226$) θα είναι:

$$T(x\% + 1, j\%) = T(x\% - 1, j\%)$$

Δηλαδή εδώ με αυτούς τους βρόχους σαρώνεται η περιοχή από τον κόμβο (2,201) και (2,226) μέχρι και τον (26,201) και (26,226).

π.χ. για $j\% = 201$:

$$x\% + 1 = 27 + 1 = 28, \quad x\% - 1 = 27 - 1 = 26$$

Άρα η θερμοκρασία εδάφους για το στοιχείο (28,201) του Μητρώου Θερμοκρασιών Εδάφους $T(x\% + 1, z\% + 1)$ δηλαδή η θερμοκρασία εδάφους για τον κόμβο (28,201) τίθεται ίση με την θερμοκρασία $T(26,201)$.

ΕΠΟΜΕΝΟ $j\%$

Για το πλέγμα κάτω από τη γεώτρηση:

ΑΠΟ $j\% = y\%$ ΕΩΣ $z\% - 1$

Από τον αριθμοδείκτη στήλης $j\% = 200$ μέχρι και αυτόν με $j\% = 227 - 1 = 226$

ΑΠΟ $i\% = 2$ ΕΩΣ $x\%$

Από τον αριθμοδείκτη στήλης $i\% = 2$ μέχρι και αυτόν με $i\% = x\% = 27$

(σαρώνεται εδώ η περιοχή από τον κόμβο (2,201) και (26,201) μέχρι τον (2,226) και (26,226)) θα είναι:

$$T_0(i, j) = T(i\%, j\%)$$

$$T(i\%, j\%) = TTT(i\%, j\%, A(), AP(), F, f1, AP0)$$

ΕΠΟΜΕΝΟ $i\%$

ΓΙΑ $i = 2$ ΕΩΣ $x\% - 1$

ΕΑΝ $ABS(T0(i\%, j\%) - T(i\%, j\%)) < G$ ΠΗΓΑΙΝΕ ΣΤΗΝ 400

$$T(i\%, j\%) = T0(i\%, j\%) + w \cdot (T(i\%, j\%) - T0(i\%, j\%))$$

ΠΗΓΑΙΝΕ ΣΤΗΝ 300

400:

ΕΠΟΜΕΝΟ $i\%$

ΕΠΟΜΕΝΟ $j\%$

Επίλυση πλήρους πλέγματος:

550:

ΓΙΑ $i\% = 2$ ΕΩΣ $x\% - 1$

Από το στοιχείο με αριθμοδείκτη $i\% = 2$ μέχρι το στοιχείο με αριθμοδείκτη $i\% = 26$ στην οριζόντια κατεύθυνση (έτσι προσδιορίστηκε το εύρος της οριζόντιας σάρωσης). Τώρα ορίζεται και το εύρος της κατακόρυφης σάρωσης:

ΓΙΑ $j\% = 2$ ΕΩΣ $z\% - 1$

Από το στοιχείο με αριθμοδείκτη 2 της κατακόρυφης κατεύθυνσης μέχρι το στοιχείο με αριθμοδείκτη $227 - 1 = 226$ κατακόρυφης κατεύθυνσης.

Δηλαδή εδώ σαρώθηκε το πλέγμα από τον κόμβο (2,2) ως τον (2,226) και από τον (26,2) ως (26,226): και τότε υπολογίζεται:

$$T0(i\%, j\%) = T(i\%, j\%)$$

$$T(i\%, j\%) = TTT(i\%, j\%, A(), AP(), F, f1, AP0)$$

ΕΠΟΜΕΝΟ $j\%$

ΓΙΑ $j\% = 2$ ΕΩΣ $z\%$

ΕΑΝ $ABS(T0(i\%, j\%) - T(i\%, j\%)) < G$ ΠΗΓΑΙΝΕ ΣΤΗΝ 570

$$T(i\%, j\%) = T0(i\%, j\%) + w \cdot (T(i\%, j\%) - T0(i\%, j\%))$$

GO TO 550

570:

ΕΠΟΜΕΝΟ $j\%$

ΕΠΟΜΕΝΟ $i\%$

SUB CreateFile2

Εδώ οι τιμές θερμοκρασίας εδάφους $T(i,j)$, οι θερμοκρασίες νερού $TA(j)$ και $TR(j)$ καθώς και η μέση θερμοκρασία: $T(x,j) = T(27,j)$ που υπολόγισε η παραπάνω υπορουτίνα MeshSolver εγγράφονται στο φύλλο αποτελεσμάτων: 13-1HH.DAT

Στο φύλλο αυτό υπάρχουν οι τελικές θερμοκρασίες μετά το τέλος του προγράμματος δηλαδή μετά τη συμπλήρωση όλων των επιλεγμένων χρονικών μονάδων. Η διάρκεια κάθε χρονικής μονάδας σε δευτερόλεπτα είναι επίσης επιλέξιμη από τον χρήστη.

SUB CreateFile

Η υπορουτίνα αυτή παρουσιάζει αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα ίδια με αυτά του φύλλου: 13-1HH.DAT (πλην της κατανομής της μέσης θερμοκρασίας $T(x,j)$ αλλά δίνοντας και αναφορά για τη θέση των θερμοκρασιών εδάφους στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

SUB Report

Η υπορουτίνα αυτή δίνει μία συνοπτική αναφορά για τις σημαντικότερες τιμές των μεταβλητών εισόδου που έχει εισάγει ο χρήστης.

6. Αποτελέσματα Λογισμικού VG-HEX

6.1 Συνεχής λειτουργία του Κ.Γ.Ε για θέρμανση σε χρονικό διάστημα δύο (2) ημερών με τα ακόλουθα δεδομένα

ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Αριθμός Χρονικών Μονάδων «m» :	2
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,5
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,5
Βάθος Γεώτρησης «YY» (m) :	100
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	13
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	8
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Tairx» (°C) :	8
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/mK) :	1
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,5
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4185
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,12
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C):	500
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK) :	0,41
Παράγων Στάθμισης Μεταβολής Θερμοκρασίας Εξίσωσης Π.Δ. «F» :	1
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	86400
Κατ'όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» (J/m ³ °C):	2100000

Δοθέντος ότι για τα παραπάνω δεδομένα τα αποτελέσματα αφορούν ένα σύνολο τιμών 6.129 θερμοκρασιών εδάφους και επιπρόσθετα 402 τιμές θερμοκρασιών νερού (θα απαιτούνταν αντίστοιχα πίνακας αποτελεσμάτων 6.129 γραμμών) παρουσιάζεται ακολουθώντας ένα μόνο μέρος τους:

APXEIO 13-1HH.DAT

Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Εδάφους (°C) (Θέσεις Κόμβων)	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (oC)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (oC)	Μέση Θερμοκρασία (°C) κατά Βάθος στο Όριο x
i	i*DX	i	j	T(i,j)	j	TA(j)	TR(j)	T(x,j)
1	0,5	1	1	8	1	8	17,04552526	12,52276263
2	1	1	2	8,3333333	2	8,003232659	17,09451024	12,54887145
3	1,5	1	3	8,6666667	3	8,010828125	17,13937143	12,57509978
4	2	1	4	9	4	8,020363223	17,18249699	12,60143011
5	2,5	1	5	9,3333333	5	8,031464419	17,22424139	12,6278529
6	3	1	6	9,6666667	6	8,04406702	17,26465267	12,65435984
7	3,5	1	7	10	7	8,058153778	17,30373181	12,68094279
8	4	1	8	10,3333333	8	8,0737149	17,3414724	12,70759365
9	4,5	1	9	10,666667	9	8,090741808	17,37786683	12,73430432
10	5	1	10	11	10	8,10922615	17,41290724	12,7610667
11	5,5	1	11	11,3333333	11	8,129159644	17,44658575	12,7878727
12	6	1	12	11,666667	12	8,150534045	17,4788944	12,81471422

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

13	6,5	1	13	12	13	8,173341149	17,50982522	12,84158318
14	7	1	14	12,3333333	14	8,197572784	17,53937019	12,86847149
15	7,5	1	15	12,6666667	15	8,223220814	17,56752128	12,89537105
16	8	1	16	13	16	8,250277143	17,59427038	12,92227376
17	8,5	1	17	13,3333333	17	8,278733729	17,61960937	12,94917155
18	9	1	18	13,6666667	18	8,308582674	17,64352996	12,97605632
19	9,5	1	19	14	19	8,339816679	17,66602325	13,00291996
20	10	1	20	14,3333333	20	8,372431315	17,68707746	13,02975439
21	10,5	1	21	14,6666667	21	8,406435556	17,70666729	13,05655142
22	11	1	22	15	22	8,447346648	17,72485363	13,08610014
23	11,5	1	23	15,3333333	23	8,494956648	17,74446686	13,11971175
24	12	1	24	15,6666667	24	8,549066964	17,76505676	13,15706186
25	12,5	1	25	16	25	8,609501216	17,78620128	13,19785125
26	13	1	26	16,3333333	26	8,676080546	17,80751969	13,24180012
27	13,5	1	27	16,6666667	27	8,748620716	17,82866939	13,28864505
		1	28	17	28	8,826929154	17,84934427	13,33813671
		1	29	17,3333333	29	8,91079165	17,86928405	13,39003785
		1	30	17,6666667	30	8,999926907	17,8883161	13,4441215
		1	31	18	31	9,093855893	17,90648256	13,50016923
		1	32	18,015152	32	9,187941632	17,92431111	13,55612637
		1	33	18,030303	33	9,281526269	17,94166833	13,6115973
		1	34	18,045455	34	9,374420474	17,95874635	13,66658341
		1	35	18,060606	35	9,466566633	17,97560883	13,72108773
		1	36	18,075758	36	9,557950371	17,99227714	13,77511376
		1	37	18,090909	37	9,64857156	18,00875872	13,82866514
		1	38	18,106061	38	9,738434744	18,02505635	13,88174555
		1	39	18,121212	39	9,827545974	18,04117127	13,93435862
		1	40	18,136364	40	9,915911761	18,0571042	13,98650798
		1	41	18,151515	41	10,00353873	18,07285565	14,03819719
		1	42	18,166667	42	10,09043352	18,08842607	14,08942979
		1	43	18,181818	43	10,1766027	18,10381586	14,14020928
		1	44	18,19697	44	10,26205284	18,11902537	14,19053911
		1	45	18,212121	45	10,34679042	18,13405496	14,24042269
		1	46	18,227273	46	10,43082188	18,14890493	14,28986341
		1	47	18,242424	47	10,51415362	18,16357558	14,3388646
		1	48	18,257576	48	10,59679195	18,17806716	14,38742956
		1	49	18,272727	49	10,67874317	18,19237993	14,43556155
		1	50	18,287879	50	10,7600135	18,20651409	14,4832638
		1	51	18,30303	51	10,84060912	18,22046984	14,53053948
		1	52	18,318182	52	10,92053617	18,23424734	14,57739175
		1	53	18,3333333	53	10,9998007	18,24784673	14,62382371
		1	54	18,348485	54	11,07840875	18,26126813	14,66983844
		1	55	18,363636	55	11,15636629	18,27451163	14,71543896
		1	56	18,378788	56	11,23367924	18,28757731	14,76062827
		1	57	18,393939	57	11,31035346	18,3004652	14,80540933
		1	58	18,409091	58	11,38639479	18,31317533	14,84978506
		1	59	18,424242	59	11,461809	18,3257077	14,89375835
		1	60	18,439394	60	11,5366018	18,33806227	14,93733203
		1	61	18,454545	61	11,61077886	18,350239	14,98050893
		1	62	18,469697	62	11,68434582	18,36223781	15,02329182
		1	63	18,484848	63	11,75730824	18,37405861	15,06568343
		1	64	18,5	64	11,82967166	18,38570127	15,10768647
		1	65	18,515152	65	11,90144154	18,39716565	15,14930359

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	66	18,530303	66	11,97262332	18,40845158	15,19053745
1	67	18,545455	67	12,04322238	18,41955886	15,23139062
1	68	18,560606	68	12,11324405	18,43048728	15,27186567
1	69	18,575758	69	12,18269362	18,44123661	15,31196511
1	70	18,590909	70	12,25157634	18,45180657	15,35169145
1	71	18,606061	71	12,31989739	18,46219688	15,39104713
1	72	18,621212	72	12,38766192	18,47240724	15,43003458
1	73	18,636364	73	12,45487503	18,4824373	15,46865617
1	74	18,651515	74	12,52154178	18,49228672	15,50691425
1	75	18,666667	75	12,58766718	18,50195512	15,54481115
1	76	18,681818	76	12,65325619	18,51144209	15,58234914
1	77	18,69697	77	12,71831372	18,5207472	15,61953046
1	78	18,712121	78	12,78284467	18,52987001	15,65635734
1	79	18,727273	79	12,84685384	18,53881005	15,69283194
1	80	18,742424	80	12,91034604	18,54756681	15,72895643
1	81	18,757576	81	12,97332599	18,55613979	15,76473289
1	82	18,772727	82	13,03579841	18,56452844	15,80016342
1	83	18,787879	83	13,09776793	18,57273219	15,83525006
1	84	18,80303	84	13,15923918	18,58075046	15,86999482
1	85	18,818182	85	13,22021672	18,58858264	15,90439968
1	86	18,833333	86	13,28070507	18,59622808	15,93846658
1	87	18,848485	87	13,34070873	18,60368614	15,97219743
1	88	18,863636	88	13,40023212	18,61095613	16,00559412
1	89	18,878788	89	13,45927965	18,61803735	16,0386585
1	90	18,893939	90	13,51785567	18,62492907	16,07139237
1	91	18,909091	91	13,57596451	18,63163053	16,10379752
1	92	18,924242	92	13,63361043	18,63814097	16,1358757
1	93	18,939394	93	13,69079767	18,64445959	16,16762863
1	94	18,954545	94	13,74753041	18,65058556	16,19905799
1	95	18,969697	95	13,80381283	18,65651804	16,23016544
1	96	18,984848	96	13,85964901	18,66225617	16,26095259
1	97	19	97	13,91504305	18,66779905	16,29142105
1	98	19,015152	98	13,96999897	18,67314576	16,32157236
1	99	19,030303	99	14,02452076	18,67829536	16,35140806
1	100	19,045455	100	14,07861238	18,6832469	16,38092964
1	101	19,060606	101	14,13227775	18,68799939	16,41013857
1	102	19,075758	102	14,18552074	18,69255182	16,43903628
1	103	19,090909	103	14,23834518	18,69690316	16,46762417
1	104	19,106061	104	14,29075488	18,70105234	16,49590361
1	105	19,121212	105	14,3427536	18,70499829	16,52387594
1	106	19,136364	106	14,39434506	18,7087399	16,55154248
1	107	19,151515	107	14,44553295	18,71227605	16,5789045
1	108	19,166667	108	14,49632093	18,71560557	16,60596325
1	109	19,181818	109	14,54671259	18,7187273	16,63271994
1	110	19,19697	110	14,59671152	18,72164003	16,65917577
1	111	19,212121	111	14,64632125	18,72434253	16,68533189
1	112	19,227273	112	14,6955453	18,72683356	16,71118943
1	113	19,242424	113	14,74438712	18,72911183	16,73674948
1	114	19,257576	114	14,79285015	18,73117606	16,7620131
1	115	19,272727	115	14,84093778	18,73302491	16,78698134
1	116	19,287879	116	14,88865337	18,73465703	16,8116552
1	117	19,30303	117	14,93600024	18,73607106	16,83603565
1	118	19,318182	118	14,98298169	18,7372656	16,86012365

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	119	19,333333	119	15,02960098	18,73823922	16,8839201
1	120	19,348485	120	15,07586131	18,73899047	16,90742589
1	121	19,363636	121	15,12176588	18,73951787	16,93064188
1	122	19,378788	122	15,16731784	18,73981994	16,95356889
1	123	19,393939	123	15,2125203	18,73989515	16,97620773
1	124	19,409091	124	15,25737636	18,73974194	16,99855915
1	125	19,424242	125	15,30188905	18,73935874	17,0206239
1	126	19,439394	126	15,34606141	18,73874396	17,04240268
1	127	19,454545	127	15,38989641	18,73789595	17,06389618
1	128	19,469697	128	15,433397	18,73681308	17,08510504
1	129	19,484848	129	15,47656611	18,73549366	17,10602989
1	130	19,5	130	15,51940662	18,73393599	17,1266713
1	131	19,515152	131	15,56192138	18,73213833	17,14702986
1	132	19,530303	132	15,60411322	18,73009893	17,16710608
1	133	19,545455	133	15,64598492	18,72781601	17,18690047
1	134	19,560606	134	15,68753925	18,72528775	17,2064135
1	135	19,575758	135	15,72877894	18,72251232	17,22564563
1	136	19,590909	136	15,76970667	18,71948785	17,24459726
1	137	19,606061	137	15,81032511	18,71621246	17,26326878
1	138	19,621212	138	15,85063689	18,71268421	17,28166055
1	139	19,636364	139	15,89064463	18,70890118	17,2997729
1	140	19,651515	140	15,93035089	18,70486138	17,31760613
1	141	19,666667	141	15,9697582	18,70056282	17,33516051
1	142	19,681818	142	16,0088691	18,69600346	17,35243628
1	143	19,69697	143	16,04768605	18,69118125	17,36943365
1	144	19,712121	144	16,0862115	18,68609411	17,38615281
1	145	19,727273	145	16,12444789	18,68073993	17,40259391
1	146	19,742424	146	16,1623976	18,67511655	17,41875708
1	147	19,757576	147	16,20006299	18,66922182	17,43464241
1	148	19,772727	148	16,23744641	18,66305354	17,45024998
1	149	19,787879	149	16,27455015	18,65660948	17,46557981
1	150	19,80303	150	16,31137648	18,64988739	17,48063194
1	151	19,818182	151	16,34792767	18,64288498	17,49540632
1	152	19,833333	152	16,38420592	18,63559993	17,50990293
1	153	19,848485	153	16,42021343	18,62802991	17,52421267
1	154	19,863636	154	16,45595236	18,62017254	17,53806245
1	155	19,878788	155	16,49142484	18,61202542	17,55172513
1	156	19,893939	156	16,52663297	18,60358612	17,56510955
1	157	19,909091	157	16,56157885	18,59485218	17,57821551
1	158	19,924242	158	16,59626451	18,58582109	17,5910428
1	159	19,939394	159	16,63069199	18,57649035	17,60359117
1	160	19,954545	160	16,66486327	18,56685739	17,61586033
1	161	19,969697	161	16,69878032	18,55691964	17,62784998
1	162	19,984848	162	16,7324451	18,54667447	17,63955978
1	163	20	163	16,7658595	18,53611923	17,65098937
1	164	20,015152	164	16,79902542	18,52525127	17,66213834
1	165	20,030303	165	16,83194473	18,51406785	17,67300629
1	166	20,045455	166	16,86461924	18,50256624	17,68359274
1	167	20,060606	167	16,89705078	18,49074367	17,69389722
1	168	20,075758	168	16,92924112	18,47859733	17,70391922
1	169	20,090909	169	16,96119202	18,46612438	17,7136582
1	170	20,106061	170	16,99290521	18,45332195	17,72311358
1	171	20,121212	171	17,02438239	18,44018715	17,73228477

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	172	20,136364	172	17,05562524	18,42671702	17,74117113
1	173	20,151515	173	17,08663542	18,41290861	17,74977202
1	174	20,166667	174	17,11741454	18,39875892	17,75808673
1	175	20,181818	175	17,1479642	18,38426489	17,76611455
1	176	20,19697	176	17,178286	18,36942348	17,77385474
1	177	20,212121	177	17,20838146	18,35423156	17,78130651
1	178	20,227273	178	17,23825213	18,338686	17,78846906
1	179	20,242424	179	17,26789949	18,32278363	17,79534156
1	180	20,257576	180	17,29732502	18,30652125	17,80192314
1	181	20,272727	181	17,32653018	18,2898956	17,80821289
1	182	20,287879	182	17,35551639	18,27290342	17,8142099
1	183	20,30303	183	17,38428505	18,25554138	17,81991321
1	184	20,318182	184	17,41283753	18,23780615	17,82532184
1	185	20,333333	185	17,44117518	18,21969433	17,83043476
1	186	20,348485	186	17,46929934	18,20120251	17,83525092
1	187	20,363636	187	17,49721131	18,18232722	17,83976927
1	188	20,378788	188	17,52491236	18,16306498	17,84398867
1	189	20,393939	189	17,55240374	18,14341226	17,847908
1	190	20,409091	190	17,57968669	18,12336549	17,85152609
1	191	20,424242	191	17,60676242	18,10292107	17,85484174
1	192	20,439394	192	17,6336321	18,08207535	17,85785372
1	193	20,454545	193	17,6602969	18,06082464	17,86056077
1	194	20,469697	194	17,68675802	18,03916518	17,8629616
1	195	20,484848	195	17,71301677	18,01709298	17,86505488
1	196	20,5	196	17,73907535	17,99460314	17,86683924
1	197	20,515152	197	17,76493982	17,9716867	17,86831326
1	198	20,530303	198	17,79063428	17,9483163	17,86947529
1	199	20,545455	199	17,81626558	17,92438005	17,87032281
1	200	20,560606	200	17,8423207	17,89937828	17,87084949
1	201	20,575758	201	17,87103142	17,87103142	19,85029425
1	202	20,590909				
1	203	20,606061				
1	204	20,621212				
1	205	20,636364				
1	206	20,651515				
1	207	20,666667				
1	208	20,681818				
1	209	20,69697				
1	210	20,712121				
1	211	20,727273				
1	212	20,742424				
1	213	20,757576				
1	214	20,772727				
1	215	20,787879				
1	216	20,80303				
1	217	20,818182				
1	218	20,833333				
1	219	20,848485				
1	220	20,863636				
1	221	20,878788				
1	222	20,893939				
1	223	20,909091				
1	224	20,924242				

1	225	20,939394
1	226	20,954545
1	227	20,969697
2	1	8
2	2	8,3333333
2	3	8,6666667
2	4	9
2	5	9,3333333
2	6	9,6666667
2	7	10
2	8	10,3333333
2	9	10,6666667
2	10	11
2	11	11,3333333
2	12	11,6666667
2	13	12
2	14	12,3333333
2	15	12,6666667
2	16	13,000001
2	17	13,333345
2	18	13,66675
2	19	14,000531
2	20	14,336431
2	21	14,684209
2	22	15,030469
2	23	15,365
2	24	15,697748
2	25	16,030217
2	26	16,362604
2	27	16,694679
2	28	17,025388
2	29	17,350535
2	30	17,657999
2	31	17,910806
2	32	17,988152
2	33	18,021825
2	34	18,042724
2	35	18,059712
2	36	18,075461
2	37	18,09081
2	38	18,106028
2	39	18,121201
2	40	18,13636
2	41	18,151514
2	42	18,166666
2	43	18,181818
2	44	18,19697
2	45	18,212121
2	46	18,227273
2	47	18,242424
2	48	18,257576
2	49	18,272727
2	50	18,287879

2	51	18,30303
2	52	18,318182
2	53	18,333333
2	54	18,348485
2	55	18,363636
2	56	18,378788
2	57	18,393939
2	58	18,409091
2	59	18,424242
2	60	18,439394
2	61	18,454545
2	62	18,469697
2	63	18,484848
2	64	18,5
2	65	18,515152
2	66	18,530303
2	67	18,545455
2	68	18,560606
2	69	18,575758
2	70	18,590909
2	71	18,606061
2	72	18,621212
2	73	18,636364
2	74	18,651515
2	75	18,666667
2	76	18,681818
2	77	18,69697
2	78	18,712121
2	79	18,727273
2	80	18,742424
2	81	18,757576
2	82	18,772727
2	83	18,787879
2	84	18,80303
2	85	18,818182
2	86	18,833333
2	87	18,848485
2	88	18,863636
2	89	18,878788
2	90	18,893939
2	91	18,909091
2	92	18,924242
2	93	18,939394
2	94	18,954545
2	95	18,969697
2	96	18,984848
2	97	19
2	98	19,015152
2	99	19,030303
2	100	19,045455
2	101	19,060606
2	102	19,075758
2	103	19,090909

2	104	19,106061
2	105	19,121212
2	106	19,136364
2	107	19,151515
2	108	19,166667
2	109	19,181818
2	110	19,19697
2	111	19,212121
2	112	19,227273
2	113	19,242424
2	114	19,257576
2	115	19,272727
2	116	19,287879
2	117	19,30303
2	118	19,318182
2	119	19,333333
2	120	19,348485
2	121	19,363636
2	122	19,378788
2	123	19,393939
2	124	19,409091
2	125	19,424242
2	126	19,439394
2	127	19,454545
2	128	19,469697
2	129	19,484848
2	130	19,5
2	131	19,515152
2	132	19,530303
2	133	19,545455
2	134	19,560606
2	135	19,575758
2	136	19,590909
2	137	19,606061
2	138	19,621212
2	139	19,636364
2	140	19,651515
2	141	19,666667
2	142	19,681818
2	143	19,69697
2	144	19,712121
2	145	19,727273
2	146	19,742424
2	147	19,757576
2	148	19,772727
2	149	19,787879
2	150	19,80303
2	151	19,818182
2	152	19,833333
2	153	19,848485
2	154	19,863636
2	155	19,878788
2	156	19,893939

2	157	19,909091
2	158	19,924242
2	159	19,939394
2	160	19,954545
2	161	19,969697
2	162	19,984848
2	163	20
2	164	20,015152
2	165	20,030303
2	166	20,045455
2	167	20,060606
2	168	20,075758
2	169	20,090909
2	170	20,106061
2	171	20,121212
2	172	20,136364
2	173	20,151515
2	174	20,166667
2	175	20,181818
2	176	20,19697
2	177	20,212121
2	178	20,227273
2	179	20,242424
2	180	20,257576
2	181	20,272727
2	182	20,287879
2	183	20,30303
2	184	20,318182
2	185	20,333333
2	186	20,348485
2	187	20,363636
2	188	20,378788
2	189	20,393939
2	190	20,409091
2	191	20,424242
2	192	20,439394
2	193	20,454545
2	194	20,469697
2	195	20,484848
2	196	20,5
2	197	20,515152
2	198	20,530303
2	199	20,545455
2	200	20,560606
2	201	20,575758
2	202	20,590909
2	203	20,606061
2	204	20,621212
2	205	20,636364
2	206	20,651515
2	207	20,666667
2	208	20,681818
2	209	20,69697

2	210	20,712121
2	211	20,727273
2	212	20,742424
2	213	20,757576
2	214	20,772727
2	215	20,787879
2	216	20,80303
2	217	20,818182
2	218	20,833333
2	219	20,848485
2	220	20,863636
2	221	20,878788
2	222	20,893939
2	223	20,909091
2	224	20,924242
2	225	20,939394
2	226	20,954545
2	227	20,969697
3	1	8
3	2	8,3333333
3	3	8,6666667
3	4	9
3	5	9,3333333
3	6	9,6666667
3	7	10
3	8	10,3333333
3	9	10,6666667
3	10	11
3	11	11,3333333
3	12	11,6666667
3	13	12
3	14	12,3333333
3	15	12,6666667
3	16	13,000002
3	17	13,333353
3	18	13,666797
3	19	14,000768
3	20	14,337475
3	21	14,688001
3	22	15,037246
3	23	15,372932
3	24	15,706214
3	25	16,038891
3	26	16,371501
3	27	16,7034
3	28	17,032785
3	29	17,354111
3	30	17,651773
3	31	17,888065
3	32	17,976484
3	33	18,01705
3	34	18,040925
3	35	18,05906

3	36	18,07523
3	37	18,090729
3	38	18,105999
3	39	18,121191
3	40	18,136357
3	41	18,151513
3	42	18,166666
3	43	18,181818
3	44	18,19697
3	45	18,212121
3	46	18,227273
3	47	18,242424
3	48	18,257576
3	49	18,272727
3	50	18,287879
3	51	18,30303
3	52	18,318182
3	53	18,333333
3	54	18,348485
3	55	18,363636
3	56	18,378788
3	57	18,393939
3	58	18,409091
3	59	18,424242
3	60	18,439394
3	61	18,454545
3	62	18,469697
3	63	18,484848
3	64	18,5
3	65	18,515152
3	66	18,530303
3	67	18,545455
3	68	18,560606
3	69	18,575758
3	70	18,590909
3	71	18,606061
3	72	18,621212
3	73	18,636364
3	74	18,651515
3	75	18,666667
3	76	18,681818
3	77	18,69697
3	78	18,712121
3	79	18,727273
3	80	18,742424
3	81	18,757576
3	82	18,772727
3	83	18,787879
3	84	18,80303
3	85	18,818182
3	86	18,833333
3	87	18,848485
3	88	18,863636

3	89	18,878788
3	90	18,893939
3	91	18,909091
3	92	18,924242
3	93	18,939394
3	94	18,954545
3	95	18,969697
3	96	18,984848
3	97	19
3	98	19,015152
3	99	19,030303
3	100	19,045455
3	101	19,060606
3	102	19,075758
3	103	19,090909
3	104	19,106061
3	105	19,121212
3	106	19,136364
3	107	19,151515
3	108	19,166667
3	109	19,181818
3	110	19,19697
3	111	19,212121
3	112	19,227273
3	113	19,242424
3	114	19,257576
3	115	19,272727
3	116	19,287879
3	117	19,30303
3	118	19,318182
3	119	19,333333
3	120	19,348485
3	121	19,363636
3	122	19,378788
3	123	19,393939
3	124	19,409091
3	125	19,424242
3	126	19,439394
3	127	19,454545
3	128	19,469697
3	129	19,484848
3	130	19,5
3	131	19,515152
3	132	19,530303
3	133	19,545455
3	134	19,560606
3	135	19,575758
3	136	19,590909
3	137	19,606061
3	138	19,621212
3	139	19,636364
3	140	19,651515
3	141	19,666667

3	142	19,681818
3	143	19,69697
3	144	19,712121
3	145	19,727273
3	146	19,742424
3	147	19,757576
3	148	19,772727
3	149	19,787879
3	150	19,80303
3	151	19,818182
3	152	19,833333
3	153	19,848485
3	154	19,863636
3	155	19,878788
3	156	19,893939
3	157	19,909091
3	158	19,924242
3	159	19,939394
3	160	19,954545
3	161	19,969697
3	162	19,984848
3	163	20
3	164	20,015152
3	165	20,030303
3	166	20,045455
3	167	20,060606
3	168	20,075758
3	169	20,090909
3	170	20,106061
3	171	20,121212
3	172	20,136364
3	173	20,151515
3	174	20,166667
3	175	20,181818
3	176	20,19697
3	177	20,212121
3	178	20,227273
3	179	20,242424
3	180	20,257576
3	181	20,272727
3	182	20,287879
3	183	20,30303
3	184	20,318182
3	185	20,333333
3	186	20,348485
3	187	20,363636
3	188	20,378788
3	189	20,393939
3	190	20,409091
3	191	20,424242
3	192	20,439394
3	193	20,454545
3	194	20,469697

3	195	20,484848
3	196	20,5
3	197	20,515152
3	198	20,530303
3	199	20,545455
3	200	20,560606
3	201	20,575758
3	202	20,590909
3	203	20,606061
3	204	20,621212
3	205	20,636364
3	206	20,651515
3	207	20,666667
3	208	20,681818
3	209	20,69697
3	210	20,712121
3	211	20,727273
3	212	20,742424
3	213	20,757576
3	214	20,772727
3	215	20,787879
3	216	20,80303
3	217	20,818182
3	218	20,833333
3	219	20,848485
3	220	20,863636
3	221	20,878788
3	222	20,893939
3	223	20,909091
3	224	20,924242
3	225	20,939394
3	226	20,954545
3	227	20,969697
4	1	8
4	2	8,3333333
4	3	8,6666667
4	4	9
4	5	9,3333333
4	6	9,6666667
4	7	10
4	8	10,333333
4	9	10,666667
4	10	11
4	11	11,333333
4	12	11,666667
4	13	12
4	14	12,333333
4	15	12,666667
4	16	13,000003
4	17	13,333357
4	18	13,666816
4	19	14,000846
4	20	14,337761

4	21	14,688841
4	22	15,038794
4	23	15,374928
4	24	15,70841
4	25	16,041489
4	26	16,374192
4	27	16,706051
4	28	17,034906
4	29	17,354701
4	30	17,649209
4	31	17,881796
4	32	17,972214
4	33	18,014905
4	34	18,039986
4	35	18,058679
4	36	18,075083
4	37	18,090674
4	38	18,105979
4	39	18,121184
4	40	18,136354
4	41	18,151512
4	42	18,166666
4	43	18,181818
4	44	18,19697
4	45	18,212121
4	46	18,227273
4	47	18,242424
4	48	18,257576
4	49	18,272727
4	50	18,287879
4	51	18,30303
4	52	18,318182
4	53	18,333333
4	54	18,348485
4	55	18,363636
4	56	18,378788
4	57	18,393939
4	58	18,409091
4	59	18,424242
4	60	18,439394
4	61	18,454545
4	62	18,469697
4	63	18,484848
4	64	18,5
4	65	18,515152
4	66	18,530303
4	67	18,545455
4	68	18,560606
4	69	18,575758
4	70	18,590909
4	71	18,606061
4	72	18,621212
4	73	18,636364

4	74	18,651515
4	75	18,666667
4	76	18,681818
4	77	18,69697
4	78	18,712121
4	79	18,727273
4	80	18,742424
4	81	18,757576
4	82	18,772727
4	83	18,787879
4	84	18,80303
4	85	18,818182
4	86	18,833333
4	87	18,848485
4	88	18,863636
4	89	18,878788
4	90	18,893939
4	91	18,909091
4	92	18,924242
4	93	18,939394
4	94	18,954545
4	95	18,969697
4	96	18,984848
4	97	19
4	98	19,015152
4	99	19,030303
.	.	.
.	.	.
.	.	.

ΑΡΧΕΙΟ 13-1ΑΗ.DAT

Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Βάθος (m)	Θερμοκρασία Εδάφους (°C) (Θέσεις Κόμβων)	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (°C)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (°C)
i	j	i*DX	j*DY	T(i,j)	j	TA(j)	TR(j)
1	1	0,5	0,5	8	1	8	17,04552526
1	2	0,5	1	8,333333333	2	8,003232659	17,09451024
1	3	0,5	1,5	8,666666667	3	8,010828125	17,13937143
1	4	0,5	2	9	4	8,020363223	17,18249699
1	5	0,5	2,5	9,333333333	5	8,031464419	17,22424139
1	6	0,5	3	9,666666667	6	8,04406702	17,26465267
1	7	0,5	3,5	10	7	8,058153778	17,30373181
1	8	0,5	4	10,33333333	8	8,0737149	17,3414724
1	9	0,5	4,5	10,66666667	9	8,090741808	17,37786683
1	10	0,5	5	11	10	8,10922615	17,41290724
1	11	0,5	5,5	11,33333333	11	8,129159644	17,44658575
1	12	0,5	6	11,66666667	12	8,150534045	17,4788944
1	13	0,5	6,5	12	13	8,173341149	17,50982522
1	14	0,5	7	12,33333333	14	8,197572784	17,53937019
1	15	0,5	7,5	12,66666667	15	8,223220814	17,56752128
1	16	0,5	8	13	16	8,250277143	17,59427038

1	17	0,5	8,5	13,33333333	17	8,278733729	17,61960937
1	18	0,5	9	13,66666667	18	8,308582674	17,64352996
1	19	0,5	9,5	14	19	8,339816679	17,66602325
1	20	0,5	10	14,33333333	20	8,372431315	17,68707746
1	21	0,5	10,5	14,66666667	21	8,406435556	17,70666729
1	22	0,5	11	15	22	8,447346648	17,72485363
1	23	0,5	11,5	15,33333333	23	8,494956648	17,74446686
1	24	0,5	12	15,66666667	24	8,549066964	17,76505676
1	25	0,5	12,5	16	25	8,609501216	17,78620128
1	26	0,5	13	16,33333333	26	8,676080546	17,80751969
1	27	0,5	13,5	16,66666667	27	8,748620716	17,82866939
1	28	0,5	14	17	28	8,826929154	17,84934427
1	29	0,5	14,5	17,33333333	29	8,91079165	17,86928405
1	30	0,5	15	17,66666667	30	8,999926907	17,8883161
1	31	0,5	15,5	18	31	9,093855893	17,90648256
1	32	0,5	16	18,01515152	32	9,187941632	17,92431111
1	33	0,5	16,5	18,03030303	33	9,281526269	17,94166833
1	34	0,5	17	18,04545455	34	9,374420474	17,95874635
1	35	0,5	17,5	18,06060606	35	9,466566633	17,97560883
1	36	0,5	18	18,07575758	36	9,557950371	17,99227714
1	37	0,5	18,5	18,09090909	37	9,64857156	18,00875872
1	38	0,5	19	18,10606061	38	9,738434744	18,02505635
1	39	0,5	19,5	18,12121212	39	9,827545974	18,04117127
1	40	0,5	20	18,13636364	40	9,915911761	18,0571042
1	41	0,5	20,5	18,15151515	41	10,00353873	18,07285565
1	42	0,5	21	18,16666667	42	10,09043352	18,08842607
1	43	0,5	21,5	18,18181818	43	10,1766027	18,10381586
1	44	0,5	22	18,1969697	44	10,26205284	18,11902537
1	45	0,5	22,5	18,21212121	45	10,34679042	18,13405496
1	46	0,5	23	18,22727273	46	10,43082188	18,14890493
1	47	0,5	23,5	18,24242424	47	10,51415362	18,16357558
1	48	0,5	24	18,25757576	48	10,59679195	18,17806716
1	49	0,5	24,5	18,27272727	49	10,67874317	18,19237993
1	50	0,5	25	18,28787879	50	10,7600135	18,20651409
1	51	0,5	25,5	18,3030303	51	10,84060912	18,22046984
1	52	0,5	26	18,31818182	52	10,92053617	18,23424734
1	53	0,5	26,5	18,33333333	53	10,9998007	18,24784673
1	54	0,5	27	18,34848485	54	11,07840875	18,26126813
1	55	0,5	27,5	18,36363636	55	11,15636629	18,27451163
1	56	0,5	28	18,37878788	56	11,23367924	18,28757731
1	57	0,5	28,5	18,39393939	57	11,31035346	18,3004652
1	58	0,5	29	18,40909091	58	11,38639479	18,31317533
1	59	0,5	29,5	18,42424242	59	11,461809	18,3257077
1	60	0,5	30	18,43939394	60	11,5366018	18,33806227
1	61	0,5	30,5	18,45454545	61	11,61077886	18,350239
1	62	0,5	31	18,46969697	62	11,68434582	18,36223781
1	63	0,5	31,5	18,48484848	63	11,75730824	18,37405861
1	64	0,5	32	18,5	64	11,82967166	18,38570127
1	65	0,5	32,5	18,51515152	65	11,90144154	18,39716565
1	66	0,5	33	18,53030303	66	11,97262332	18,40845158
1	67	0,5	33,5	18,54545455	67	12,04322238	18,41955886
1	68	0,5	34	18,56060606	68	12,11324405	18,43048728
1	69	0,5	34,5	18,57575758	69	12,18269362	18,44123661

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	70	0,5	35	18,59090909	70	12,25157634	18,45180657
1	71	0,5	35,5	18,60606061	71	12,31989739	18,46219688
1	72	0,5	36	18,62121212	72	12,38766192	18,47240724
1	73	0,5	36,5	18,63636364	73	12,45487503	18,4824373
1	74	0,5	37	18,65151515	74	12,52154178	18,49228672
1	75	0,5	37,5	18,66666667	75	12,58766718	18,50195512
1	76	0,5	38	18,68181818	76	12,65325619	18,51144209
1	77	0,5	38,5	18,6969697	77	12,71831372	18,5207472
1	78	0,5	39	18,71212121	78	12,78284467	18,52987001
1	79	0,5	39,5	18,72727273	79	12,84685384	18,53881005
1	80	0,5	40	18,74242424	80	12,91034604	18,54756681
1	81	0,5	40,5	18,75757576	81	12,97332599	18,55613979
1	82	0,5	41	18,77272727	82	13,03579841	18,56452844
1	83	0,5	41,5	18,78787879	83	13,09776793	18,57273219
1	84	0,5	42	18,8030303	84	13,15923918	18,58075046
1	85	0,5	42,5	18,81818182	85	13,22021672	18,58858264
1	86	0,5	43	18,83333333	86	13,28070507	18,59622808
1	87	0,5	43,5	18,84848485	87	13,34070873	18,60368614
1	88	0,5	44	18,86363636	88	13,40023212	18,61095613
1	89	0,5	44,5	18,87878788	89	13,45927965	18,61803735
1	90	0,5	45	18,89393939	90	13,51785567	18,62492907
1	91	0,5	45,5	18,90909091	91	13,57596451	18,63163053
1	92	0,5	46	18,92424242	92	13,63361043	18,63814097
1	93	0,5	46,5	18,93939394	93	13,69079767	18,64445959
1	94	0,5	47	18,95454545	94	13,74753041	18,65058556
1	95	0,5	47,5	18,96969697	95	13,80381283	18,65651804
1	96	0,5	48	18,98484848	96	13,85964901	18,66225617
1	97	0,5	48,5	19	97	13,91504305	18,66779905
1	98	0,5	49	19,01515152	98	13,96999897	18,67314576
1	99	0,5	49,5	19,03030303	99	14,02452076	18,67829536
1	100	0,5	50	19,04545455	100	14,07861238	18,6832469
1	101	0,5	50,5	19,06060606	101	14,13227775	18,68799939
1	102	0,5	51	19,07575758	102	14,18552074	18,69255182
1	103	0,5	51,5	19,09090909	103	14,23834518	18,69690316
1	104	0,5	52	19,10606061	104	14,29075488	18,70105234
1	105	0,5	52,5	19,12121212	105	14,3427536	18,70499829
1	106	0,5	53	19,13636364	106	14,39434506	18,7087399
1	107	0,5	53,5	19,15151515	107	14,44553295	18,71227605
1	108	0,5	54	19,16666667	108	14,49632093	18,71560557
1	109	0,5	54,5	19,18181818	109	14,54671259	18,7187273
1	110	0,5	55	19,1969697	110	14,59671152	18,72164003
1	111	0,5	55,5	19,21212121	111	14,64632125	18,72434253
1	112	0,5	56	19,22727273	112	14,6955453	18,72683356
1	113	0,5	56,5	19,24242424	113	14,74438712	18,72911183
1	114	0,5	57	19,25757576	114	14,79285015	18,73117606
1	115	0,5	57,5	19,27272727	115	14,84093778	18,73302491
1	116	0,5	58	19,28787879	116	14,88865337	18,73465703
1	117	0,5	58,5	19,3030303	117	14,93600024	18,73607106
1	118	0,5	59	19,31818182	118	14,98298169	18,7372656
1	119	0,5	59,5	19,33333333	119	15,02960098	18,73823922
1	120	0,5	60	19,34848485	120	15,07586131	18,73899047
1	121	0,5	60,5	19,36363636	121	15,12176588	18,73951787
1	122	0,5	61	19,37878788	122	15,16731784	18,73981994

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	123	0,5	61,5	19,39393939	123	15,2125203	18,73989515
1	124	0,5	62	19,40909091	124	15,25737636	18,73974194
1	125	0,5	62,5	19,42424242	125	15,30188905	18,73935874
1	126	0,5	63	19,43939394	126	15,34606141	18,73874396
1	127	0,5	63,5	19,45454545	127	15,38989641	18,73789595
1	128	0,5	64	19,46969697	128	15,433397	18,73681308
1	129	0,5	64,5	19,48484848	129	15,47656611	18,73549366
1	130	0,5	65	19,5	130	15,51940662	18,73393599
1	131	0,5	65,5	19,51515152	131	15,56192138	18,73213833
1	132	0,5	66	19,53030303	132	15,60411322	18,73009893
1	133	0,5	66,5	19,54545455	133	15,64598492	18,72781601
1	134	0,5	67	19,56060606	134	15,68753925	18,72528775
1	135	0,5	67,5	19,57575758	135	15,72877894	18,72251232
1	136	0,5	68	19,59090909	136	15,76970667	18,71948785
1	137	0,5	68,5	19,60606061	137	15,81032511	18,71621246
1	138	0,5	69	19,62121212	138	15,85063689	18,71268421
1	139	0,5	69,5	19,63636364	139	15,89064463	18,70890118
1	140	0,5	70	19,65151515	140	15,93035089	18,70486138
1	141	0,5	70,5	19,66666667	141	15,9697582	18,70056282
1	142	0,5	71	19,68181818	142	16,0088691	18,69600346
1	143	0,5	71,5	19,6969697	143	16,04768605	18,69118125
1	144	0,5	72	19,71212121	144	16,0862115	18,68609411
1	145	0,5	72,5	19,72727273	145	16,12444789	18,68073993
1	146	0,5	73	19,74242424	146	16,1623976	18,67511655
1	147	0,5	73,5	19,75757576	147	16,20006299	18,66922182
1	148	0,5	74	19,77272727	148	16,23744641	18,66305354
1	149	0,5	74,5	19,78787879	149	16,27455015	18,65660948
1	150	0,5	75	19,8030303	150	16,31137648	18,64988739
1	151	0,5	75,5	19,81818182	151	16,34792767	18,64288498
1	152	0,5	76	19,83333333	152	16,38420592	18,63559993
1	153	0,5	76,5	19,84848485	153	16,42021343	18,62802991
1	154	0,5	77	19,86363636	154	16,45595236	18,62017254
1	155	0,5	77,5	19,87878788	155	16,49142484	18,61202542
1	156	0,5	78	19,89393939	156	16,52663297	18,60358612
1	157	0,5	78,5	19,90909091	157	16,56157885	18,59485218
1	158	0,5	79	19,92424242	158	16,59626451	18,58582109
1	159	0,5	79,5	19,93939394	159	16,63069199	18,57649035
1	160	0,5	80	19,95454545	160	16,66486327	18,56685739
1	161	0,5	80,5	19,96969697	161	16,69878032	18,55691964
1	162	0,5	81	19,98484848	162	16,7324451	18,54667447
1	163	0,5	81,5	20	163	16,7658595	18,53611923
1	164	0,5	82	20,01515152	164	16,79902542	18,52525127
1	165	0,5	82,5	20,03030303	165	16,83194473	18,51406785
1	166	0,5	83	20,04545455	166	16,86461924	18,50256624
1	167	0,5	83,5	20,06060606	167	16,89705078	18,49074367
1	168	0,5	84	20,07575758	168	16,92924112	18,47859733
1	169	0,5	84,5	20,09090909	169	16,96119202	18,46612438
1	170	0,5	85	20,10606061	170	16,99290521	18,45332195
1	171	0,5	85,5	20,12121212	171	17,02438239	18,44018715
1	172	0,5	86	20,13636364	172	17,05562524	18,42671702
1	173	0,5	86,5	20,15151515	173	17,08663542	18,41290861
1	174	0,5	87	20,16666667	174	17,11741454	18,39875892
1	175	0,5	87,5	20,18181818	175	17,1479642	18,38426489

1	176	0,5	88	20,1969697	176	17,178286	18,36942348
1	177	0,5	88,5	20,21212121	177	17,20838146	18,35423156
1	178	0,5	89	20,22727273	178	17,23825213	18,338686
1	179	0,5	89,5	20,24242424	179	17,26789949	18,32278363
1	180	0,5	90	20,25757576	180	17,29732502	18,30652125
1	181	0,5	90,5	20,27272727	181	17,32653018	18,2898956
1	182	0,5	91	20,28787879	182	17,35551639	18,27290342
1	183	0,5	91,5	20,3030303	183	17,38428505	18,25554138
1	184	0,5	92	20,31818182	184	17,41283753	18,23780615
1	185	0,5	92,5	20,33333333	185	17,44117518	18,21969433
1	186	0,5	93	20,34848485	186	17,46929934	18,20120251
1	187	0,5	93,5	20,36363636	187	17,49721131	18,18232722
1	188	0,5	94	20,37878788	188	17,52491236	18,16306498
1	189	0,5	94,5	20,39393939	189	17,55240374	18,14341226
1	190	0,5	95	20,40909091	190	17,57968669	18,12336549
1	191	0,5	95,5	20,42424242	191	17,60676242	18,10292107
1	192	0,5	96	20,43939394	192	17,6336321	18,08207535
1	193	0,5	96,5	20,45454545	193	17,6602969	18,06082464
1	194	0,5	97	20,46969697	194	17,68675802	18,03916518
1	195	0,5	97,5	20,48484848	195	17,71301677	18,01709298
1	196	0,5	98	20,5	196	17,73907535	17,99460314
1	197	0,5	98,5	20,51515152	197	17,76493982	17,9716867
1	198	0,5	99	20,53030303	198	17,79063428	17,9483163
1	199	0,5	99,5	20,54545455	199	17,81626558	17,92438005
1	200	0,5	100	20,56060606	200	17,8423207	17,89937828
1	201	0,5	100,5	20,57575758	201	17,87103142	17,87103142
1	202	0,5	101	20,59090909			
1	203	0,5	101,5	20,60606061			
1	204	0,5	102	20,62121212			
1	205	0,5	102,5	20,63636364			
1	206	0,5	103	20,65151515			
1	207	0,5	103,5	20,66666667			
1	208	0,5	104	20,68181818			
1	209	0,5	104,5	20,6969697			
1	210	0,5	105	20,71212121			
1	211	0,5	105,5	20,72727273			
1	212	0,5	106	20,74242424			
1	213	0,5	106,5	20,75757576			
1	214	0,5	107	20,77272727			
1	215	0,5	107,5	20,78787879			
1	216	0,5	108	20,8030303			
1	217	0,5	108,5	20,81818182			
1	218	0,5	109	20,83333333			
1	219	0,5	109,5	20,84848485			
1	220	0,5	110	20,86363636			
1	221	0,5	110,5	20,87878788			
1	222	0,5	111	20,89393939			
1	223	0,5	111,5	20,90909091			
1	224	0,5	112	20,92424242			
1	225	0,5	112,5	20,93939394			
1	226	0,5	113	20,95454545			
1	227	0,5	113,5	20,96969697			
2	1	1	0,5	8			

2	2	1	1	8,333333333
2	3	1	1,5	8,666666667
2	4	1	2	9
2	5	1	2,5	9,333333333
2	6	1	3	9,666666667
2	7	1	3,5	10
2	8	1	4	10,333333333
2	9	1	4,5	10,666666667
2	10	1	5	11
2	11	1	5,5	11,333333333
2	12	1	6	11,666666667
2	13	1	6,5	12
2	14	1	7	12,333333334
2	15	1	7,5	12,666666676
2	16	1	8	13,00000114
2	17	1	8,5	13,33334478
2	18	1	9	13,66675034
2	19	1	9,5	14,00053102
2	20	1	10	14,33643104
2	21	1	10,5	14,68420908
2	22	1	11	15,03046922
2	23	1	11,5	15,36500008
2	24	1	12	15,69774766
2	25	1	12,5	16,03021691
2	26	1	13	16,36260414
2	27	1	13,5	16,69467869
2	28	1	14	17,02538828
2	29	1	14,5	17,35053548
2	30	1	15	17,65799927
2	31	1	15,5	17,91080585
2	32	1	16	17,9881521
2	33	1	16,5	18,02182459
2	34	1	17	18,04272398
2	35	1	17,5	18,05971175
2	36	1	18	18,07546142
2	37	1	18,5	18,09081031
2	38	1	19	18,1060275
2	39	1	19,5	18,12120099
2	40	1	20	18,13635989
2	41	1	20,5	18,15151389
2	42	1	21	18,16666624
2	43	1	21,5	18,18181804
2	44	1	22	18,19696965
2	45	1	22,5	18,2121212
2	46	1	23	18,22727272
2	47	1	23,5	18,24242424
2	48	1	24	18,25757576
2	49	1	24,5	18,27272727
2	50	1	25	18,28787879
2	51	1	25,5	18,3030303
2	52	1	26	18,31818182
2	53	1	26,5	18,33333333
2	54	1	27	18,34848485

2	55	1	27,5	18,36363636
2	56	1	28	18,37878788
2	57	1	28,5	18,39393939
2	58	1	29	18,40909091
2	59	1	29,5	18,42424242
2	60	1	30	18,43939394
2	61	1	30,5	18,45454545
2	62	1	31	18,46969697
2	63	1	31,5	18,48484848
2	64	1	32	18,5
2	65	1	32,5	18,51515152
2	66	1	33	18,53030303
2	67	1	33,5	18,54545455
2	68	1	34	18,56060606
2	69	1	34,5	18,57575758
2	70	1	35	18,59090909
2	71	1	35,5	18,60606061
2	72	1	36	18,62121212
2	73	1	36,5	18,63636364
2	74	1	37	18,65151515
2	75	1	37,5	18,66666667
2	76	1	38	18,68181818
2	77	1	38,5	18,6969697
2	78	1	39	18,71212121
2	79	1	39,5	18,72727273
2	80	1	40	18,74242424
2	81	1	40,5	18,75757576
2	82	1	41	18,77272727
2	83	1	41,5	18,78787879
2	84	1	42	18,8030303
2	85	1	42,5	18,81818182
2	86	1	43	18,83333333
2	87	1	43,5	18,84848485
2	88	1	44	18,86363636
2	89	1	44,5	18,87878788
2	90	1	45	18,89393939
2	91	1	45,5	18,90909091
2	92	1	46	18,92424242
2	93	1	46,5	18,93939394
2	94	1	47	18,95454545
2	95	1	47,5	18,96969697
2	96	1	48	18,98484848
2	97	1	48,5	19
2	98	1	49	19,01515152
2	99	1	49,5	19,03030303
2	100	1	50	19,04545455
2	101	1	50,5	19,06060606
2	102	1	51	19,07575758
2	103	1	51,5	19,09090909
2	104	1	52	19,10606061
2	105	1	52,5	19,12121212
2	106	1	53	19,13636364
2	107	1	53,5	19,15151515

2	108	1	54	19,16666667
2	109	1	54,5	19,18181818
2	110	1	55	19,1969697
2	111	1	55,5	19,21212121
2	112	1	56	19,22727273
2	113	1	56,5	19,24242424
2	114	1	57	19,25757576
2	115	1	57,5	19,27272727
2	116	1	58	19,28787879
2	117	1	58,5	19,3030303
2	118	1	59	19,31818182
2	119	1	59,5	19,33333333
2	120	1	60	19,34848485
2	121	1	60,5	19,36363636
2	122	1	61	19,37878788
2	123	1	61,5	19,39393939
2	124	1	62	19,40909091
2	125	1	62,5	19,42424242
2	126	1	63	19,43939394
2	127	1	63,5	19,45454545
2	128	1	64	19,46969697
2	129	1	64,5	19,48484848
2	130	1	65	19,5
2	131	1	65,5	19,51515152
2	132	1	66	19,53030303
2	133	1	66,5	19,54545455
2	134	1	67	19,56060606
2	135	1	67,5	19,57575758
2	136	1	68	19,59090909
2	137	1	68,5	19,60606061
2	138	1	69	19,62121212
2	139	1	69,5	19,63636364
2	140	1	70	19,65151515
2	141	1	70,5	19,66666667
2	142	1	71	19,68181818
2	143	1	71,5	19,6969697
2	144	1	72	19,71212121
2	145	1	72,5	19,72727273
2	146	1	73	19,74242424
2	147	1	73,5	19,75757576
2	148	1	74	19,77272727
2	149	1	74,5	19,78787879
2	150	1	75	19,8030303
2	151	1	75,5	19,81818182
2	152	1	76	19,83333333
2	153	1	76,5	19,84848485
2	154	1	77	19,86363636
2	155	1	77,5	19,87878788
2	156	1	78	19,89393939
2	157	1	78,5	19,90909091
2	158	1	79	19,92424242
2	159	1	79,5	19,93939394
2	160	1	80	19,95454545

2	161	1	80,5	19,96969697
2	162	1	81	19,98484848
2	163	1	81,5	20
2	164	1	82	20,01515152
2	165	1	82,5	20,03030303
2	166	1	83	20,04545455
2	167	1	83,5	20,06060606
2	168	1	84	20,07575758
2	169	1	84,5	20,09090909
2	170	1	85	20,10606061
2	171	1	85,5	20,12121212
2	172	1	86	20,13636364
2	173	1	86,5	20,15151515
2	174	1	87	20,16666667
2	175	1	87,5	20,18181818
2	176	1	88	20,1969697
2	177	1	88,5	20,21212121
2	178	1	89	20,22727273
2	179	1	89,5	20,24242424
2	180	1	90	20,25757576
2	181	1	90,5	20,27272727
2	182	1	91	20,28787879
2	183	1	91,5	20,3030303
2	184	1	92	20,31818182
2	185	1	92,5	20,33333333
2	186	1	93	20,34848485
2	187	1	93,5	20,36363636
2	188	1	94	20,37878788
2	189	1	94,5	20,39393939
2	190	1	95	20,40909091
2	191	1	95,5	20,42424242
2	192	1	96	20,43939394
2	193	1	96,5	20,45454545
2	194	1	97	20,46969697
2	195	1	97,5	20,48484848
2	196	1	98	20,5
2	197	1	98,5	20,51515152
2	198	1	99	20,53030303
2	199	1	99,5	20,54545455
2	200	1	100	20,56060606
2	201	1	100,5	20,57575758
2	202	1	101	20,59090909
2	203	1	101,5	20,60606061
2	204	1	102	20,62121212
2	205	1	102,5	20,63636364
2	206	1	103	20,65151515
2	207	1	103,5	20,66666667
2	208	1	104	20,68181818
2	209	1	104,5	20,6969697
2	210	1	105	20,71212121
2	211	1	105,5	20,72727273
2	212	1	106	20,74242424
2	213	1	106,5	20,75757576

2	214	1	107	20,77272727
2	215	1	107,5	20,78787879
2	216	1	108	20,8030303
2	217	1	108,5	20,81818182
2	218	1	109	20,83333333
2	219	1	109,5	20,84848485
2	220	1	110	20,86363636
2	221	1	110,5	20,87878788
2	222	1	111	20,89393939
2	223	1	111,5	20,90909091
2	224	1	112	20,92424242
2	225	1	112,5	20,93939394
2	226	1	113	20,95454545
2	227	1	113,5	20,96969697
3	1	1,5	0,5	8
3	2	1,5	1	8,333333333
3	3	1,5	1,5	8,666666667
3	4	1,5	2	9
3	5	1,5	2,5	9,333333333
3	6	1,5	3	9,666666667
3	7	1,5	3,5	10
3	8	1,5	4	10,33333333
3	9	1,5	4,5	10,66666667
3	10	1,5	5	11
3	11	1,5	5,5	11,33333333
3	12	1,5	6	11,66666667
3	13	1,5	6,5	12
3	14	1,5	7	12,33333335
3	15	1,5	7,5	12,66666692
3	16	1,5	8	13,00000239
3	17	1,5	8,5	13,33335295
3	18	1,5	9	13,66679737
3	19	1,5	9,5	14,00076775
3	20	1,5	10	14,33747496
3	21	1,5	10,5	14,68800062
3	22	1,5	11	15,03724634
3	23	1,5	11,5	15,37293168
3	24	1,5	12	15,70621359
3	25	1,5	12,5	16,03889098
3	26	1,5	13	16,37150056
3	27	1,5	13,5	16,70340046
3	28	1,5	14	17,03278484
3	29	1,5	14,5	17,3541107
3	30	1,5	15	17,65177305
3	31	1,5	15,5	17,88806535
3	32	1,5	16	17,97648368
3	33	1,5	16,5	18,01705042
3	34	1,5	17	18,04092517
3	35	1,5	17,5	18,05905957
3	36	1,5	18	18,07522978
3	37	1,5	18,5	18,09072904
3	38	1,5	19	18,1059992
3	39	1,5	19,5	18,12119119

3	40	1,5	20	18,13635651
3	41	1,5	20,5	18,15151273
3	42	1,5	21	18,16666584
3	43	1,5	21,5	18,1818179
3	44	1,5	22	18,1969696
3	45	1,5	22,5	18,21212118
3	46	1,5	23	18,22727272
3	47	1,5	23,5	18,24242424
3	48	1,5	24	18,25757576
3	49	1,5	24,5	18,27272727
3	50	1,5	25	18,28787879
3	51	1,5	25,5	18,3030303
3	52	1,5	26	18,31818182
3	53	1,5	26,5	18,33333333
3	54	1,5	27	18,34848485
3	55	1,5	27,5	18,36363636
3	56	1,5	28	18,37878788
3	57	1,5	28,5	18,39393939
3	58	1,5	29	18,40909091
3	59	1,5	29,5	18,42424242
3	60	1,5	30	18,43939394
3	61	1,5	30,5	18,45454545
3	62	1,5	31	18,46969697
3	63	1,5	31,5	18,48484848
3	64	1,5	32	18,5
3	65	1,5	32,5	18,51515152
3	66	1,5	33	18,53030303
3	67	1,5	33,5	18,54545455
3	68	1,5	34	18,56060606
3	69	1,5	34,5	18,57575758
3	70	1,5	35	18,59090909
3	71	1,5	35,5	18,60606061
3	72	1,5	36	18,62121212
3	73	1,5	36,5	18,63636364
3	74	1,5	37	18,65151515
3	75	1,5	37,5	18,66666667
3	76	1,5	38	18,68181818
3	77	1,5	38,5	18,6969697
3	78	1,5	39	18,71212121
3	79	1,5	39,5	18,72727273
3	80	1,5	40	18,74242424
3	81	1,5	40,5	18,75757576
3	82	1,5	41	18,77272727
3	83	1,5	41,5	18,78787879
3	84	1,5	42	18,8030303
3	85	1,5	42,5	18,81818182
3	86	1,5	43	18,83333333
3	87	1,5	43,5	18,84848485
3	88	1,5	44	18,86363636
3	89	1,5	44,5	18,87878788
3	90	1,5	45	18,89393939
3	91	1,5	45,5	18,90909091
3	92	1,5	46	18,92424242

3	93	1,5	46,5	18,93939394
3	94	1,5	47	18,95454545
3	95	1,5	47,5	18,96969697
3	96	1,5	48	18,98484848
3	97	1,5	48,5	19
3	98	1,5	49	19,01515152
3	99	1,5	49,5	19,03030303
3	100	1,5	50	19,04545455
3	101	1,5	50,5	19,06060606
3	102	1,5	51	19,07575758
3	103	1,5	51,5	19,09090909
3	104	1,5	52	19,10606061
3	105	1,5	52,5	19,12121212
3	106	1,5	53	19,13636364
3	107	1,5	53,5	19,15151515
3	108	1,5	54	19,16666667
3	109	1,5	54,5	19,18181818
3	110	1,5	55	19,1969697
3	111	1,5	55,5	19,21212121
3	112	1,5	56	19,22727273
3	113	1,5	56,5	19,24242424
3	114	1,5	57	19,25757576
3	115	1,5	57,5	19,27272727
3	116	1,5	58	19,28787879
3	117	1,5	58,5	19,3030303
3	118	1,5	59	19,31818182
3	119	1,5	59,5	19,33333333
3	120	1,5	60	19,34848485
3	121	1,5	60,5	19,36363636
3	122	1,5	61	19,37878788
3	123	1,5	61,5	19,39393939
3	124	1,5	62	19,40909091
3	125	1,5	62,5	19,42424242
3	126	1,5	63	19,43939394
3	127	1,5	63,5	19,45454545
3	128	1,5	64	19,46969697
3	129	1,5	64,5	19,48484848
3	130	1,5	65	19,5
3	131	1,5	65,5	19,51515152
3	132	1,5	66	19,53030303
3	133	1,5	66,5	19,54545455
3	134	1,5	67	19,56060606
3	135	1,5	67,5	19,57575758
3	136	1,5	68	19,59090909
3	137	1,5	68,5	19,60606061
3	138	1,5	69	19,62121212
3	139	1,5	69,5	19,63636364
3	140	1,5	70	19,65151515
3	141	1,5	70,5	19,66666667
3	142	1,5	71	19,68181818
3	143	1,5	71,5	19,6969697
3	144	1,5	72	19,71212121
3	145	1,5	72,5	19,72727273

3	146	1,5	73	19,74242424
3	147	1,5	73,5	19,75757576
3	148	1,5	74	19,77272727
3	149	1,5	74,5	19,78787879
3	150	1,5	75	19,8030303
3	151	1,5	75,5	19,81818182
3	152	1,5	76	19,83333333
3	153	1,5	76,5	19,84848485
3	154	1,5	77	19,86363636
3	155	1,5	77,5	19,87878788
3	156	1,5	78	19,89393939
3	157	1,5	78,5	19,90909091
3	158	1,5	79	19,92424242
3	159	1,5	79,5	19,93939394
3	160	1,5	80	19,95454545
3	161	1,5	80,5	19,96969697
3	162	1,5	81	19,98484848
3	163	1,5	81,5	20
3	164	1,5	82	20,01515152
3	165	1,5	82,5	20,03030303
3	166	1,5	83	20,04545455
3	167	1,5	83,5	20,06060606
3	168	1,5	84	20,07575758
3	169	1,5	84,5	20,09090909
3	170	1,5	85	20,10606061
3	171	1,5	85,5	20,12121212
3	172	1,5	86	20,13636364
3	173	1,5	86,5	20,15151515
3	174	1,5	87	20,16666667
3	175	1,5	87,5	20,18181818
3	176	1,5	88	20,1969697
3	177	1,5	88,5	20,21212121
3	178	1,5	89	20,22727273
3	179	1,5	89,5	20,24242424
3	180	1,5	90	20,25757576
3	181	1,5	90,5	20,27272727
3	182	1,5	91	20,28787879
3	183	1,5	91,5	20,3030303
3	184	1,5	92	20,31818182
3	185	1,5	92,5	20,33333333
3	186	1,5	93	20,34848485
3	187	1,5	93,5	20,36363636
3	188	1,5	94	20,37878788
3	189	1,5	94,5	20,39393939
3	190	1,5	95	20,40909091
3	191	1,5	95,5	20,42424242
3	192	1,5	96	20,43939394
3	193	1,5	96,5	20,45454545
3	194	1,5	97	20,46969697
3	195	1,5	97,5	20,48484848
3	196	1,5	98	20,5
3	197	1,5	98,5	20,51515152
3	198	1,5	99	20,53030303

3	199	1,5	99,5	20,54545455
3	200	1,5	100	20,56060606
3	201	1,5	100,5	20,57575758
3	202	1,5	101	20,59090909
3	203	1,5	101,5	20,60606061
3	204	1,5	102	20,62121212
3	205	1,5	102,5	20,63636364
3	206	1,5	103	20,65151515
3	207	1,5	103,5	20,66666667
3	208	1,5	104	20,68181818
3	209	1,5	104,5	20,6969697
3	210	1,5	105	20,71212121
3	211	1,5	105,5	20,72727273
3	212	1,5	106	20,74242424
3	213	1,5	106,5	20,75757576
3	214	1,5	107	20,77272727
3	215	1,5	107,5	20,78787879
3	216	1,5	108	20,8030303
3	217	1,5	108,5	20,81818182
3	218	1,5	109	20,83333333
3	219	1,5	109,5	20,84848485
3	220	1,5	110	20,86363636
3	221	1,5	110,5	20,87878788
3	222	1,5	111	20,89393939
3	223	1,5	111,5	20,90909091
3	224	1,5	112	20,92424242
3	225	1,5	112,5	20,93939394
3	226	1,5	113	20,95454545
3	227	1,5	113,5	20,96969697
4	1	2	0,5	8
4	2	2	1	8,333333333
4	3	2	1,5	8,666666667
4	4	2	2	9
4	5	2	2,5	9,333333333
4	6	2	3	9,666666667
4	7	2	3,5	10
4	8	2	4	10,33333333
4	9	2	4,5	10,66666667
4	10	2	5	11
4	11	2	5,5	11,33333333
4	12	2	6	11,66666667
4	13	2	6,5	12
4	14	2	7	12,33333337
4	15	2	7,5	12,66666704
4	16	2	8	13,00000308
4	17	2	8,5	13,33335676
4	18	2	9	13,66681588
4	19	2	9,5	14,00084635
4	20	2	10	14,33776116
4	21	2	10,5	14,68884125
4	22	2	11	15,03879385
4	23	2	11,5	15,37492783
4	24	2	12	15,70840988

4	25	2	12,5	16,04148889
4	26	2	13	16,37419174
4	27	2	13,5	16,7060515
4	28	2	14	17,03490551
4	29	2	14,5	17,3547012
4	30	2	15	17,64920895
4	31	2	15,5	17,88179624
4	32	2	16	17,97221391
4	33	2	16,5	18,0149046
4	34	2	17	18,03998622
4	35	2	17,5	18,05867893
4	36	2	18	18,07508254
4	37	2	18,5	18,09067381
4	38	2	19	18,10597893
4	39	2	19,5	18,12118387
4	40	2	20	18,13635389
4	41	2	20,5	18,1515118
4	42	2	21	18,16666552
4	43	2	21,5	18,18181779
4	44	2	22	18,19696956
4	45	2	22,5	18,21212117
4	46	2	23	18,22727271
4	47	2	23,5	18,24242424
4	48	2	24	18,25757576
4	49	2	24,5	18,27272727
4	50	2	25	18,28787879
4	51	2	25,5	18,3030303
4	52	2	26	18,31818182
4	53	2	26,5	18,33333333
4	54	2	27	18,34848485
4	55	2	27,5	18,36363636
4	56	2	28	18,37878788
4	57	2	28,5	18,39393939
4	58	2	29	18,40909091
4	59	2	29,5	18,42424242
4	60	2	30	18,43939394
4	61	2	30,5	18,45454545
4	62	2	31	18,46969697
4	63	2	31,5	18,48484848
4	64	2	32	18,5
4	65	2	32,5	18,51515152
4	66	2	33	18,53030303
4	67	2	33,5	18,54545455
4	68	2	34	18,56060606
4	69	2	34,5	18,57575758
4	70	2	35	18,59090909
4	71	2	35,5	18,60606061
4	72	2	36	18,62121212
4	73	2	36,5	18,63636364
4	74	2	37	18,65151515
4	75	2	37,5	18,66666667
4	76	2	38	18,68181818
4	77	2	38,5	18,6969697

4	78	2	39	18,71212121
4	79	2	39,5	18,72727273
4	80	2	40	18,74242424
4	81	2	40,5	18,75757576
4	82	2	41	18,77272727
4	83	2	41,5	18,78787879
4	84	2	42	18,8030303
4	85	2	42,5	18,81818182
4	86	2	43	18,83333333
4	87	2	43,5	18,84848485
4	88	2	44	18,86363636
4	89	2	44,5	18,87878788
4	90	2	45	18,89393939
4	91	2	45,5	18,90909091
4	92	2	46	18,92424242
4	93	2	46,5	18,93939394
4	94	2	47	18,95454545
4	95	2	47,5	18,96969697
4	96	2	48	18,98484848
4	97	2	48,5	19
4	98	2	49	19,01515152
4	99	2	49,5	19,03030303
4	100	2	50	19,04545455
4	101	2	50,5	19,06060606
4	102	2	51	19,07575758
4	103	2	51,5	19,09090909
4	104	2	52	19,10606061
4	105	2	52,5	19,12121212
4	106	2	53	19,13636364
4	107	2	53,5	19,15151515
4	108	2	54	19,16666667
4	109	2	54,5	19,18181818
4	110	2	55	19,1969697
4	111	2	55,5	19,21212121
4	112	2	56	19,22727273
4	113	2	56,5	19,24242424
4	114	2	57	19,25757576
4	115	2	57,5	19,27272727
4	116	2	58	19,28787879
4	117	2	58,5	19,3030303
4	118	2	59	19,31818182
4	119	2	59,5	19,33333333
4	120	2	60	19,34848485
4	121	2	60,5	19,36363636
4	122	2	61	19,37878788
4	123	2	61,5	19,39393939
4	124	2	62	19,40909091
4	125	2	62,5	19,42424242
4	126	2	63	19,43939394
4	127	2	63,5	19,45454545
4	128	2	64	19,46969697
4	129	2	64,5	19,48484848
4	130	2	65	19,5

4	131	2	65,5	19,51515152
4	132	2	66	19,53030303
4	133	2	66,5	19,54545455
4	134	2	67	19,56060606
4	135	2	67,5	19,57575758
4	136	2	68	19,59090909
4	137	2	68,5	19,60606061
4	138	2	69	19,62121212
4	139	2	69,5	19,63636364
4	140	2	70	19,65151515
4	141	2	70,5	19,66666667
4	142	2	71	19,68181818
4	143	2	71,5	19,6969697
4	144	2	72	19,71212121
4	145	2	72,5	19,72727273
4	146	2	73	19,74242424
4	147	2	73,5	19,75757576
4	148	2	74	19,77272727
4	149	2	74,5	19,78787879
4	150	2	75	19,8030303
4	151	2	75,5	19,81818182
4	152	2	76	19,83333333
4	153	2	76,5	19,84848485
4	154	2	77	19,86363636
4	155	2	77,5	19,87878788
4	156	2	78	19,89393939
4	157	2	78,5	19,90909091
4	158	2	79	19,92424242
4	159	2	79,5	19,93939394
4	160	2	80	19,95454545
4	161	2	80,5	19,96969697
4	162	2	81	19,98484848
4	163	2	81,5	20
4	164	2	82	20,01515152
4	165	2	82,5	20,03030303
4	166	2	83	20,04545455
4	167	2	83,5	20,06060606
4	168	2	84	20,07575758
4	169	2	84,5	20,09090909
4	170	2	85	20,10606061
4	171	2	85,5	20,12121212
4	172	2	86	20,13636364
4	173	2	86,5	20,15151515
4	174	2	87	20,16666667
4	175	2	87,5	20,18181818
4	176	2	88	20,1969697
4	177	2	88,5	20,21212121
4	178	2	89	20,22727273
4	179	2	89,5	20,24242424
4	180	2	90	20,25757576
4	181	2	90,5	20,27272727
4	182	2	91	20,28787879
4	183	2	91,5	20,3030303

4	184	2	92	20,31818182
4	185	2	92,5	20,33333333
4	186	2	93	20,34848485
4	187	2	93,5	20,36363636
4	188	2	94	20,37878788
4	189	2	94,5	20,39393939
4	190	2	95	20,40909091
4	191	2	95,5	20,42424242
4	192	2	96	20,43939394
4	193	2	96,5	20,45454545
4	194	2	97	20,46969697
4	195	2	97,5	20,48484848
4	196	2	98	20,5
4	197	2	98,5	20,51515152
4	198	2	99	20,53030303
4	199	2	99,5	20,54545455
4	200	2	100	20,56060606
4	201	2	100,5	20,57575758
4	202	2	101	20,59090909
4	203	2	101,5	20,60606061
4	204	2	102	20,62121212
4	205	2	102,5	20,63636364
4	206	2	103	20,65151515
4	207	2	103,5	20,66666667
4	208	2	104	20,68181818
4	209	2	104,5	20,6969697
4	210	2	105	20,71212121
4	211	2	105,5	20,72727273
4	212	2	106	20,74242424
4	213	2	106,5	20,75757576
4	214	2	107	20,77272727
4	215	2	107,5	20,78787879
4	216	2	108	20,8030303
4	217	2	108,5	20,81818182
4	218	2	109	20,83333333
4	219	2	109,5	20,84848485
4	220	2	110	20,86363636
4	221	2	110,5	20,87878788
4	222	2	111	20,89393939
4	223	2	111,5	20,90909091
4	224	2	112	20,92424242
4	225	2	112,5	20,93939394
4	226	2	113	20,95454545
4	227	2	113,5	20,96969697
5	1	2,5	0,5	8
5	2	2,5	1	8,33333333
5	3	2,5	1,5	8,66666667
5	4	2,5	2	9
5	5	2,5	2,5	9,33333333
5	6	2,5	3	9,66666667
5	7	2,5	3,5	10
5	8	2,5	4	10,33333333
5	9	2,5	4,5	10,66666667

5	10	2,5	5	11
5	11	2,5	5,5	11,33333333
5	12	2,5	6	11,66666667
5	13	2,5	6,5	12
5	14	2,5	7	12,33333338
5	15	2,5	7,5	12,66666709
5	16	2,5	8	13,00000337
5	17	2,5	8,5	13,33335818
5	18	2,5	9	13,66682197
5	19	2,5	9,5	14,0008691
5	20	2,5	10	14,33783368
5	21	2,5	10,5	14,68903161
5	22	2,5	11	15,03915554
5	23	2,5	11,5	15,37533609
5	24	2,5	12	15,7091101
5	25	2,5	12,5	16,04224084
5	26	2,5	13	16,37499573
5	27	2,5	13,5	16,70684181
5	28	2,5	14	17,035493
5	29	2,5	14,5	17,3547419
5	30	2,5	15	17,64828715
5	31	2,5	15,5	17,8799647
5	32	2,5	16	17,97073991
5	33	2,5	16,5	18,0140408
5	34	2,5	17	18,03955726
5	35	2,5	17,5	18,05848615
5	36	2,5	18	18,0750014
5	37	2,5	18,5	18,09064118
5	38	2,5	19	18,10596624
5	39	2,5	19,5	18,12117905
5	40	2,5	20	18,1363521
5	41	2,5	20,5	18,15151114
5	42	2,5	21	18,16666528
5	43	2,5	21,5	18,1818177
5	44	2,5	22	18,19696953
5	45	2,5	22,5	18,21212116
5	46	2,5	23	18,22727271
5	47	2,5	23,5	18,24242424
5	48	2,5	24	18,25757576
5	49	2,5	24,5	18,27272727
5	50	2,5	25	18,28787879
5	51	2,5	25,5	18,3030303
5	52	2,5	26	18,31818182
5	53	2,5	26,5	18,33333333
5	54	2,5	27	18,34848485
5	55	2,5	27,5	18,36363636
5	56	2,5	28	18,37878788
5	57	2,5	28,5	18,39393939
5	58	2,5	29	18,40909091
5	59	2,5	29,5	18,42424242
5	60	2,5	30	18,43939394
5	61	2,5	30,5	18,45454545
5	62	2,5	31	18,46969697

5	63	2,5	31,5	18,48484848
5	64	2,5	32	18,5
5	65	2,5	32,5	18,51515152
5	66	2,5	33	18,53030303
5	67	2,5	33,5	18,54545455
5	68	2,5	34	18,56060606
5	69	2,5	34,5	18,57575758
5	70	2,5	35	18,59090909
5	71	2,5	35,5	18,60606061
5	72	2,5	36	18,62121212
5	73	2,5	36,5	18,63636364
5	74	2,5	37	18,65151515
5	75	2,5	37,5	18,66666667
5	76	2,5	38	18,68181818
5	77	2,5	38,5	18,6969697
5	78	2,5	39	18,71212121
5	79	2,5	39,5	18,72727273
5	80	2,5	40	18,74242424
5	81	2,5	40,5	18,75757576
5	82	2,5	41	18,77272727
5	83	2,5	41,5	18,78787879
5	84	2,5	42	18,8030303
5	85	2,5	42,5	18,81818182
5	86	2,5	43	18,83333333
5	87	2,5	43,5	18,84848485
5	88	2,5	44	18,86363636
5	89	2,5	44,5	18,87878788
5	90	2,5	45	18,89393939
5	91	2,5	45,5	18,90909091
5	92	2,5	46	18,92424242
5	93	2,5	46,5	18,93939394
5	94	2,5	47	18,95454545
5	95	2,5	47,5	18,96969697
5	96	2,5	48	18,98484848
5	97	2,5	48,5	19
5	98	2,5	49	19,01515152
5	99	2,5	49,5	19,03030303
5	100	2,5	50	19,04545455
5	101	2,5	50,5	19,06060606
5	102	2,5	51	19,07575758
5	103	2,5	51,5	19,09090909
5	104	2,5	52	19,10606061
5	105	2,5	52,5	19,12121212
5	106	2,5	53	19,13636364
5	107	2,5	53,5	19,15151515
5	108	2,5	54	19,16666667
5	109	2,5	54,5	19,18181818
5	110	2,5	55	19,1969697
5	111	2,5	55,5	19,21212121
5	112	2,5	56	19,22727273
5	113	2,5	56,5	19,24242424
5	114	2,5	57	19,25757576
5	115	2,5	57,5	19,27272727

5	116	2,5	58	19,28787879
5	117	2,5	58,5	19,3030303
5	118	2,5	59	19,31818182
5	119	2,5	59,5	19,33333333
5	120	2,5	60	19,34848485
5	121	2,5	60,5	19,36363636
5	122	2,5	61	19,37878788
5	123	2,5	61,5	19,39393939
5	124	2,5	62	19,40909091
5	125	2,5	62,5	19,42424242
5	126	2,5	63	19,43939394
5	127	2,5	63,5	19,45454545
5	128	2,5	64	19,46969697
5	129	2,5	64,5	19,48484848
5	130	2,5	65	19,5
5	131	2,5	65,5	19,51515152
5	132	2,5	66	19,53030303
5	133	2,5	66,5	19,54545455
5	134	2,5	67	19,56060606
5	135	2,5	67,5	19,57575758
5	136	2,5	68	19,59090909
5	137	2,5	68,5	19,60606061
5	138	2,5	69	19,62121212
5	139	2,5	69,5	19,63636364
5	140	2,5	70	19,65151515
5	141	2,5	70,5	19,66666667
5	142	2,5	71	19,68181818
5	143	2,5	71,5	19,6969697
5	144	2,5	72	19,71212121
5	145	2,5	72,5	19,72727273
5	146	2,5	73	19,74242424
5	147	2,5	73,5	19,75757576
5	148	2,5	74	19,77272727
5	149	2,5	74,5	19,78787879
5	150	2,5	75	19,8030303
5	151	2,5	75,5	19,81818182
5	152	2,5	76	19,83333333
5	153	2,5	76,5	19,84848485
5	154	2,5	77	19,86363636
5	155	2,5	77,5	19,87878788
5	156	2,5	78	19,89393939
5	157	2,5	78,5	19,90909091
5	158	2,5	79	19,92424242
5	159	2,5	79,5	19,93939394
5	160	2,5	80	19,95454545
5	161	2,5	80,5	19,96969697
5	162	2,5	81	19,98484848
5	163	2,5	81,5	20
5	164	2,5	82	20,01515152
5	165	2,5	82,5	20,03030303
5	166	2,5	83	20,04545455
5	167	2,5	83,5	20,06060606
5	168	2,5	84	20,07575758

5	169	2,5	84,5	20,09090909
5	170	2,5	85	20,10606061
5	171	2,5	85,5	20,12121212
5	172	2,5	86	20,13636364
5	173	2,5	86,5	20,15151515
5	174	2,5	87	20,16666667
5	175	2,5	87,5	20,18181818
5	176	2,5	88	20,1969697
5	177	2,5	88,5	20,21212121
5	178	2,5	89	20,22727273
5	179	2,5	89,5	20,24242424
5	180	2,5	90	20,25757576
5	181	2,5	90,5	20,27272727
5	182	2,5	91	20,28787879
5	183	2,5	91,5	20,3030303
5	184	2,5	92	20,31818182
5	185	2,5	92,5	20,33333333
5	186	2,5	93	20,34848485
5	187	2,5	93,5	20,36363636
5	188	2,5	94	20,37878788
5	189	2,5	94,5	20,39393939
5	190	2,5	95	20,40909091
5	191	2,5	95,5	20,42424242
5	192	2,5	96	20,43939394
5	193	2,5	96,5	20,45454545
5	194	2,5	97	20,46969697
5	195	2,5	97,5	20,48484848
5	196	2,5	98	20,5
5	197	2,5	98,5	20,51515152
5	198	2,5	99	20,53030303
5	199	2,5	99,5	20,54545455
5	200	2,5	100	20,56060606
5	201	2,5	100,5	20,57575758
5	202	2,5	101	20,59090909
5	203	2,5	101,5	20,60606061
5	204	2,5	102	20,62121212
5	205	2,5	102,5	20,63636364
5	206	2,5	103	20,65151515
5	207	2,5	103,5	20,66666667
5	208	2,5	104	20,68181818
5	209	2,5	104,5	20,6969697
5	210	2,5	105	20,71212121
5	211	2,5	105,5	20,72727273
5	212	2,5	106	20,74242424
5	213	2,5	106,5	20,75757576
5	214	2,5	107	20,77272727
5	215	2,5	107,5	20,78787879
5	216	2,5	108	20,8030303
5	217	2,5	108,5	20,81818182
5	218	2,5	109	20,83333333
5	219	2,5	109,5	20,84848485
5	220	2,5	110	20,86363636
5	221	2,5	110,5	20,87878788

5	222	2,5	111	20,89393939
5	223	2,5	111,5	20,90909091
5	224	2,5	112	20,92424242
5	225	2,5	112,5	20,93939394
5	226	2,5	113	20,95454545
5	227	2,5	113,5	20,96969697
6	1	3	0,5	8
6	2	3	1	8,333333333
6	3	3	1,5	8,666666667
6	4	3	2	9
6	5	3	2,5	9,333333333
6	6	3	3	9,666666667
6	7	3	3,5	10
6	8	3	4	10,33333333
6	9	3	4,5	10,66666667
6	10	3	5	11
6	11	3	5,5	11,33333333
6	12	3	6	11,66666667
6	13	3	6,5	12
6	14	3	7	12,33333338
6	15	3	7,5	12,66666711
6	16	3	8	13,00000347
.
.
.

6.2 Συνεχής λειτουργία του Κ.Γ.Ε για θέρμανση σε χρονικό διάστημα πέντε (5) ημερών (στις ίδιες συνθήκες με αυτές της παραγράφου 6.1)**ΘΕΡΜΑΝΣΗ**

Αριθμός Χρονικών Μονάδων «m» :	5
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,5
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,5
Βάθος Γεώτρησης «YY» (m) :	100
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	13
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	8
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Tarc» (°C) :	8
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/mK) :	1
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,5
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4185
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,12
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C):	500
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK) :	0,41
Παράγων Στάθμισης Μεταβολής Θερμοκρασίας Εξίσωσης Π.Δ. «F» :	1
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	86400
Κατ'όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» (J/m ³ °C):	2100000

Δοθέντος ότι για τα παραπάνω δεδομένα τα αποτελέσματα αφορούν ένα σύνολο τιμών 6.129 θερμοκρασιών εδάφους και επιπρόσθετα 402 τιμές θερμοκρασιών νερού (θα απαιτούνταν αντίστοιχα πίνακες αποτελεσμάτων 6.129 γραμμών) παρουσιάζεται ακολουθώντας ένα μόνο μέρος τους:

APXΕΙΟ 13-1HH.DAT

Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Εδάφους (°C) (Θέσεις Κόμβων)	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (°C)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (°C)	Μέση Θερμοκρασία (°C) κατά Βάθος στο Όριο x
i	i*DX	i	j	T(i,j)	j	TA(j)	TR(j)	T(x,j)
1	0,5	1	1	8	1	8	16,72759023	12,36379511
2	1	1	2	8,333333333	2	8,002975431	16,7749979	12,38898667
3	1,5	1	3	8,666666667	3	8,010019283	16,81857025	12,41429477
4	2	1	4	9	4	8,018959314	16,86044641	12,43970286
5	2,5	1	5	9,333333333	5	8,029457025	16,9009461	12,46520156
6	3	1	6	9,666666667	6	8,041452409	16,94011273	12,49078257
7	3,5	1	7	10	7	8,054928788	16,97794671	12,51643775
8	4	1	8	10,333333333	8	8,069876406	17,01444162	12,54215901
9	4,5	1	9	10,666666667	9	8,086286668	17,04958988	12,56793827
10	5	1	10	11	10	8,104151203	17,08338367	12,59376743
11	5,5	1	11	11,333333333	11	8,123461708	17,11581512	12,61963842
12	6	1	12	11,666666667	12	8,144209925	17,14687634	12,64554313
13	6,5	1	13	12	13	8,166387635	17,17655936	12,6714735
14	7	1	14	12,333333333	14	8,189986656	17,20485621	12,69742143
15	7,5	1	15	12,666666667	15	8,214998845	17,23175885	12,72337885
16	8	1	16	13	16	8,241416099	17,25725924	12,74933767
17	8,5	1	17	13,333333333	17	8,26923037	17,28134924	12,77528981
18	9	1	18	13,666666667	18	8,298433733	17,30402063	12,80122718

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

19	9,5	1	19	14	19	8,329018662	17,32526474	12,8271417
20	10	1	20	14,33333333	20	8,360979184	17,34507138	12,85302528
21	10,5	1	21	14,66666667	21	8,394314925	17,36342468	12,8788698
22	11	1	22	15	22	8,434385498	17,38042863	12,90740706
23	11,5	1	23	15,33333333	23	8,48092534	17,39877791	12,93985163
24	12	1	24	15,66666667	24	8,533714173	17,41806576	12,97588997
25	12,5	1	25	16	25	8,592558655	17,43790808	13,01523337
26	13	1	26	16,33333333	26	8,65726342	17,45796076	13,05761209
27	13,5	1	27	16,66666667	27	8,727627249	17,47791771	13,10277248
		1	28	17	28	8,803440721	17,49750897	13,15047485
		1	29	17,33333333	29	8,88447365	17,51650958	13,20049161
		1	30	17,66666667	30	8,970441844	17,53476975	13,2526058
		1	31	18	31	9,060909061	17,55231	13,30660953
		1	32	18,01515152	32	9,151469821	17,5695854	13,36052761
		1	33	18,03030303	33	9,241531491	17,58642559	13,41397854
		1	34	18,04545455	34	9,330920766	17,60300691	13,46696384
		1	35	18,06060606	35	9,419583451	17,61938955	13,5194865
		1	36	18,07575758	36	9,507505556	17,63559446	13,57155001
		1	37	18,09090909	37	9,594686893	17,65162907	13,62315798
		1	38	18,10606061	38	9,68113205	17,66749604	13,67431405
		1	39	18,12121212	39	9,766847256	17,68319637	13,72502181
		1	40	18,13636364	40	9,851839271	17,69873043	13,77528485
		1	41	18,15151515	41	9,936115004	17,71409839	13,8251067
		1	42	18,16666667	42	10,01968137	17,72930029	13,87449083
		1	43	18,18181818	43	10,10254523	17,74433616	13,9234407
		1	44	18,1969697	44	10,18471341	17,75920598	13,9719597
		1	45	18,21212121	45	10,26619265	17,77390973	14,02005119
		1	46	18,22727273	46	10,34698961	17,78844735	14,06771848
		1	47	18,24242424	47	10,42711091	17,80281877	14,11496484
		1	48	18,25757576	48	10,50656308	17,81702393	14,16179351
		1	49	18,27272727	49	10,58535261	17,8310627	14,20820765
		1	50	18,28787879	50	10,66348589	17,84493498	14,25421043
		1	51	18,3030303	51	10,74096926	17,85864064	14,29980495
		1	52	18,31818182	52	10,81780899	17,87217952	14,34499425
		1	53	18,33333333	53	10,8940113	17,88555145	14,38978138
		1	54	18,34848485	54	10,96958234	17,89875625	14,43416929
		1	55	18,36363636	55	11,04452817	17,91179372	14,47816095
		1	56	18,37878788	56	11,11885482	17,92466365	14,52175923
		1	57	18,39393939	57	11,19256824	17,93736579	14,56496702
		1	58	18,40909091	58	11,26567433	17,9498999	14,60778712
		1	59	18,42424242	59	11,33817892	17,9622657	14,65022231
		1	60	18,43939394	60	11,41008779	17,97446292	14,69227536
		1	61	18,45454545	61	11,48140663	17,98649125	14,73394894
		1	62	18,46969697	62	11,55214111	17,99835038	14,77524574
		1	63	18,48484848	63	11,62229682	18,01003996	14,81616839
		1	64	18,5	64	11,69187929	18,02155964	14,85671946
		1	65	18,51515152	65	11,760894	18,03290905	14,89690153
		1	66	18,53030303	66	11,82934637	18,04408781	14,93671709
		1	67	18,54545455	67	11,89724177	18,05509551	14,97616864
		1	68	18,56060606	68	11,96458549	18,06593174	15,01525862
		1	69	18,57575758	69	12,0313828	18,07659604	15,05398942
		1	70	18,59090909	70	12,09763889	18,08708797	15,09236343
		1	71	18,60606061	71	12,1633589	18,09740705	15,13038297
		1	72	18,62121212	72	12,22854792	18,10755279	15,16805035
		1	73	18,63636364	73	12,29321098	18,11752468	15,20536783
		1	74	18,65151515	74	12,3573531	18,12732217	15,24233763
		1	75	18,66666667	75	12,42097931	18,1369446	15,27896196
		1	76	18,68181818	76	12,48409438	18,14639152	15,31524295
		1	77	18,6969697	77	12,54670297	18,15566252	15,35118275
		1	78	18,71212121	78	12,60880995	18,16475691	15,38678343
		1	79	18,72727273	79	12,67042006	18,17367406	15,42204706
		1	80	18,74242424	80	12,73153799	18,18241332	15,45697565
		1	81	18,75757576	81	12,79216838	18,19097403	15,4915712
		1	82	18,77272727	82	12,85231579	18,19935552	15,52583566
		1	83	18,78787879	83	12,91198476	18,20755712	15,55977094
		1	84	18,8030303	84	12,97117976	18,21557812	15,59337894
		1	85	18,81818182	85	13,02990523	18,22341779	15,62666151
		1	86	18,83333333	86	13,08816554	18,2310754	15,65962047
		1	87	18,84848485	87	13,14596504	18,23855019	15,69225761

Διπλωματική Διατριβή

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	88	18,86363636	88	13,203308	18,24584137	15,72457469
1	89	18,87878788	89	13,26019869	18,25294816	15,75657343
1	90	18,89393939	90	13,31664131	18,25986974	15,78825552
1	91	18,90909091	91	13,37264	18,26660526	15,81962263
1	92	18,92424242	92	13,4281989	18,27315386	15,85067638
1	93	18,93939394	93	13,48332206	18,27951468	15,88141837
1	94	18,95454545	94	13,5380135	18,28568683	15,91185017
1	95	18,96969697	95	13,59227719	18,29166941	15,9419733
1	96	18,98484848	96	13,64611706	18,2974615	15,97178928
1	97	19	97	13,699537	18,30306216	16,00129958
1	98	19,01515152	98	13,75254084	18,30847042	16,03050563
1	99	19,03030303	99	13,80513241	18,3136853	16,05940885
1	100	19,04545455	100	13,85731545	18,3187058	16,08801063
1	101	19,06060606	101	13,90909371	18,32353089	16,1163123
1	102	19,07575758	102	13,96047086	18,32815952	16,14431519
1	103	19,09090909	103	14,01145055	18,33259065	16,1720206
1	104	19,10606061	104	14,06203637	18,33682318	16,19942977
1	105	19,12121212	105	14,11223189	18,34085601	16,22654395
1	106	19,13636364	106	14,16204064	18,34468801	16,25336433
1	107	19,15151515	107	14,2114661	18,34831806	16,27989208
1	108	19,16666667	108	14,26051172	18,35174497	16,30612835
1	109	19,18181818	109	14,3091809	18,35496758	16,33207424
1	110	19,1969697	110	14,35747702	18,35798467	16,35773084
1	111	19,21212121	111	14,40540341	18,36079502	16,38309921
1	112	19,22727273	112	14,45296336	18,36339738	16,40818037
1	113	19,24242424	113	14,50016013	18,36579049	16,43297531
1	114	19,25757576	114	14,54699695	18,36797306	16,457485
1	115	19,27272727	115	14,593477	18,36994378	16,48171039
1	116	19,28787879	116	14,63960344	18,37170132	16,50565238
1	117	19,3030303	117	14,68537936	18,37324433	16,52931185
1	118	19,31818182	118	14,73080786	18,37457143	16,55268965
1	119	19,33333333	119	14,77589198	18,37568124	16,57578661
1	120	19,34848485	120	14,82063473	18,37657233	16,59860353
1	121	19,36363636	121	14,86503907	18,37724328	16,62114118
1	122	19,37878788	122	14,90910794	18,37769263	16,64340028
1	123	19,39393939	123	14,95284424	18,37791889	16,66538157
1	124	19,40909091	124	14,99625085	18,37792058	16,68708571
1	125	19,42424242	125	15,0393306	18,37769615	16,70851338
1	126	19,43939394	126	15,08208632	18,37724405	16,72966519
1	127	19,45454545	127	15,12452078	18,3765627	16,75054174
1	128	19,46969697	128	15,16663674	18,37565049	16,77114361
1	129	19,48484848	129	15,20843689	18,37450582	16,79147135
1	130	19,5	130	15,24992393	18,37312702	16,81152547
1	131	19,51515152	131	15,29110049	18,37151245	16,83130647
1	132	19,53030303	132	15,3319692	18,36966039	16,8508148
1	133	19,54545455	133	15,37253264	18,36756915	16,87005089
1	134	19,56060606	134	15,41279336	18,36523698	16,88901517
1	135	19,57575758	135	15,45275388	18,36266212	16,907708
1	136	19,59090909	136	15,49241671	18,35984278	16,92612975
1	137	19,60606061	137	15,53178431	18,35677715	16,94428073
1	138	19,62121212	138	15,5708591	18,35346339	16,96216124
1	139	19,63636364	139	15,6096435	18,34989964	16,97977157
1	140	19,65151515	140	15,64813987	18,34608401	16,99711194
1	141	19,66666667	141	15,68635057	18,34201459	17,01418258
1	142	19,68181818	142	15,72427791	18,33768945	17,03098368
1	143	19,6969697	143	15,76192418	18,33310661	17,0475154
1	144	19,71212121	144	15,79929165	18,3282641	17,06377787
1	145	19,72727273	145	15,83638254	18,32315989	17,07977121
1	146	19,74242424	146	15,87319905	18,31779194	17,0954955
1	147	19,75757576	147	15,90974338	18,31215818	17,11095078
1	148	19,77272727	148	15,94601766	18,30625652	17,12613709
1	149	19,78787879	149	15,98202402	18,30008483	17,14105442
1	150	19,8030303	150	16,01776455	18,29364097	17,15570276
1	151	19,81818182	151	16,05324132	18,28692276	17,17008204
1	152	19,83333333	152	16,08845638	18,279928	17,18419219
1	153	19,84848485	153	16,12341175	18,27265444	17,19803309
1	154	19,86363636	154	16,1581094	18,26509984	17,21160462
1	155	19,87878788	155	16,19255131	18,2572619	17,2249066
1	156	19,89393939	156	16,22673941	18,24913831	17,23793886

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	157	19,90909091	157	16,26067562	18,24072671	17,25070116
1	158	19,92424242	158	16,29436182	18,23202474	17,26319328
1	159	19,93939394	159	16,32779988	18,22302999	17,27541493
1	160	19,95454545	160	16,36099163	18,21374003	17,28736583
1	161	19,96969697	161	16,39393888	18,20415239	17,29904563
1	162	19,98484848	162	16,42664343	18,19426457	17,310454
1	163	20	163	16,45910703	18,18407407	17,32159055
1	164	20,01515152	164	16,49133143	18,17357832	17,33245487
1	165	20,03030303	165	16,52331834	18,16277473	17,34304653
1	166	20,04545455	166	16,55506945	18,15166607	17,35336507
1	167	20,06060606	167	16,58658642	18,14023357	17,36341
1	168	20,07575758	168	16,61787092	18,12849066	17,37318079
1	169	20,09090909	169	16,64892454	18,11642927	17,38267691
1	170	20,10606061	170	16,6797489	18,10404666	17,39189778
1	171	20,12121212	171	16,71034555	18,09134004	17,4008428
1	172	20,13636364	172	16,74071607	18,07830661	17,40951134
1	173	20,15151515	173	16,77086197	18,06494354	17,41790275
1	174	20,16666667	174	16,80078476	18,05124794	17,42601635
1	175	20,18181818	175	16,83048592	18,03721691	17,43385142
1	176	20,1969697	176	16,85996692	18,02284751	17,44140722
1	177	20,21212121	177	16,88922919	18,00813677	17,44868298
1	178	20,22727273	178	16,91827416	17,99308166	17,45567791
1	179	20,24242424	179	16,94710321	17,97767917	17,46239119
1	180	20,25757576	180	16,97571772	17,96192619	17,46882195
1	181	20,27272727	181	17,00411904	17,94581962	17,47496933
1	182	20,28787879	182	17,0323085	17,92935631	17,48083241
1	183	20,3030303	183	17,06028741	17,91253308	17,48641024
1	184	20,31818182	184	17,08805706	17,89534669	17,49170188
1	185	20,33333333	185	17,11561872	17,8777939	17,49670631
1	186	20,34848485	186	17,14297363	17,8598714	17,50142252
1	187	20,36363636	187	17,17012302	17,84157587	17,50584944
1	188	20,37878788	188	17,19706808	17,82290393	17,50998601
1	189	20,39393939	189	17,22381002	17,80385218	17,5138311
1	190	20,40909091	190	17,25034998	17,78441717	17,51738358
1	191	20,42424242	191	17,27668912	17,76459541	17,52064226
1	192	20,43939394	192	17,30282857	17,74438336	17,52360597
1	193	20,45454545	193	17,32876953	17,72377737	17,52627345
1	194	20,46969697	194	17,35451336	17,70277355	17,52864345
1	195	20,48484848	195	17,3800621	17,68136724	17,53071467
1	196	20,5	196	17,40542036	17,65955113	17,53248575
1	197	20,51515152	197	17,43060194	17,63730843	17,53395518
1	198	20,53030303	198	17,45565581	17,61458631	17,53512106
1	199	20,54545455	199	17,48076954	17,5911903	17,53597992
1	200	20,56060606	200	17,50670276	17,56634159	17,53652218
1	201	20,57575758	201	17,53671234	17,53671234	19,75446525
1	202	20,59090909				
1	203	20,60606061				
1	204	20,62121212				
1	205	20,63636364				
1	206	20,65151515				
1	207	20,66666667				
1	208	20,68181818				
1	209	20,6969697				
1	210	20,71212121				
1	211	20,72727273				
1	212	20,74242424				
1	213	20,75757576				
1	214	20,77272727				
1	215	20,78787879				
1	216	20,8030303				
1	217	20,81818182				
1	218	20,83333333				
1	219	20,84848485				
1	220	20,86363636				
1	221	20,87878788				
1	222	20,89393939				
1	223	20,90909091				
1	224	20,92424242				
1	225	20,93939394				

1	226	20,95454545
1	227	20,96969697
2	1	8
2	2	8,333333333
2	3	8,666666667
2	4	9
2	5	9,333333333
2	6	9,666666667
2	7	10
2	8	10,33333333
2	9	10,66666667
2	10	11
2	11	11,33333333
2	12	11,66666667
2	13	12,00000002
2	14	12,33333347
2	15	12,66666742
2	16	13,00000399
2	17	13,33335437
2	18	13,66677785
2	19	14,00059357
2	20	14,3365487
2	21	14,68440558
2	22	15,03076553
2	23	15,36539895
2	24	15,69824099
2	25	16,03076554
2	26	16,36309469
2	27	16,69486046
2	28	17,02482755
2	29	17,34924835
2	30	17,6565609
2	31	17,90966951
2	32	17,98741367
2	33	18,02140407
2	34	18,04250505
2	35	18,05960488
2	36	18,07541175
2	37	18,09078808
2	38	18,10601784
2	39	18,1211969
2	40	18,13635819
2	41	18,15151319
2	42	18,16666596
2	43	18,18181793
2	44	18,1969696
2	45	18,21212118
2	46	18,22727272
2	47	18,24242424
2	48	18,25757576
2	49	18,27272727
2	50	18,28787879
2	51	18,3030303
2	52	18,31818182
2	53	18,33333333
2	54	18,34848485
2	55	18,36363636
2	56	18,37878788
2	57	18,39393939
2	58	18,40909091
2	59	18,42424242
2	60	18,43939394
2	61	18,45454545
2	62	18,46969697
2	63	18,48484848
2	64	18,5
2	65	18,51515152
2	66	18,53030303
2	67	18,54545455

2	68	18,56060606
2	69	18,57575758
2	70	18,59090909
2	71	18,60606061
2	72	18,62121212
2	73	18,63636364
2	74	18,65151515
2	75	18,66666667
2	76	18,68181818
2	77	18,6969697
2	78	18,71212121
2	79	18,72727273
2	80	18,74242424
2	81	18,75757576
2	82	18,77272727
2	83	18,78787879
2	84	18,8030303
2	85	18,81818182
2	86	18,83333333
2	87	18,84848485
2	88	18,86363636
2	89	18,87878788
2	90	18,89393939
2	91	18,90909091
2	92	18,92424242
2	93	18,93939394
2	94	18,95454545
2	95	18,96969697
2	96	18,98484848
2	97	19
2	98	19,01515152
2	99	19,03030303
2	100	19,04545455
2	101	19,06060606
2	102	19,07575758
2	103	19,09090909
2	104	19,10606061
2	105	19,12121212
2	106	19,13636364
2	107	19,15151515
2	108	19,16666667
2	109	19,18181818
2	110	19,1969697
2	111	19,21212121
2	112	19,22727273
2	113	19,24242424
2	114	19,25757576
2	115	19,27272727
2	116	19,28787879
2	117	19,3030303
2	118	19,31818182
2	119	19,33333333
2	120	19,34848485
2	121	19,36363636
2	122	19,37878788
2	123	19,39393939
2	124	19,40909091
2	125	19,42424242
2	126	19,43939394
2	127	19,45454545
2	128	19,46969697
2	129	19,48484848
2	130	19,5
2	131	19,51515152
2	132	19,53030303
2	133	19,54545455
2	134	19,56060606
2	135	19,57575758
2	136	19,59090909

2	137	19,60606061
2	138	19,62121212
2	139	19,63636364
2	140	19,65151515
2	141	19,66666667
2	142	19,68181818
2	143	19,6969697
2	144	19,71212121
2	145	19,72727273
2	146	19,74242424
2	147	19,75757576
2	148	19,77272727
2	149	19,78787879
2	150	19,8030303
2	151	19,81818182
2	152	19,83333333
2	153	19,84848485
2	154	19,86363636
2	155	19,87878788
2	156	19,89393939
2	157	19,90909091
2	158	19,92424242
2	159	19,93939394
2	160	19,95454545
2	161	19,96969697
2	162	19,98484848
2	163	20
2	164	20,01515152
2	165	20,03030303
2	166	20,04545455
2	167	20,06060606
2	168	20,07575758
2	169	20,09090909
2	170	20,10606061
2	171	20,12121212
2	172	20,13636364
2	173	20,15151515
2	174	20,16666667
2	175	20,18181818
2	176	20,1969697
2	177	20,21212121
2	178	20,22727273
2	179	20,24242424
2	180	20,25757576
2	181	20,27272727
2	182	20,28787879
2	183	20,3030303
2	184	20,31818182
2	185	20,33333333
2	186	20,34848485
2	187	20,36363636
2	188	20,37878788
2	189	20,39393939
2	190	20,40909091
2	191	20,42424242
2	192	20,43939394
2	193	20,45454545
2	194	20,46969697
2	195	20,48484848
2	196	20,5
2	197	20,51515152
2	198	20,53030303
2	199	20,54545455
2	200	20,56060606
2	201	20,57575758
2	202	20,59090909
2	203	20,60606061
2	204	20,62121212
2	205	20,63636364

2	206	20,65151515
2	207	20,66666667
2	208	20,68181818
2	209	20,6969697
2	210	20,71212121
2	211	20,72727273
2	212	20,74242424
2	213	20,75757576
2	214	20,77272727
2	215	20,78787879
2	216	20,8030303
2	217	20,81818182
2	218	20,83333333
2	219	20,84848485
2	220	20,86363636
2	221	20,87878788
2	222	20,89393939
2	223	20,90909091
2	224	20,92424242
2	225	20,93939394
2	226	20,95454545
2	227	20,96969697
3	1	8
3	2	8,333333333
3	3	8,666666667
3	4	9
3	5	9,333333333
3	6	9,666666667
3	7	10
3	8	10,33333333
3	9	10,66666667
3	10	11
3	11	11,33333333
3	12	11,66666667
3	13	12,00000004
3	14	12,33333357
3	15	12,66666793
3	16	13,00000653
3	17	13,33336661
3	18	13,66683526
3	19	14,00085237
3	20	14,33763365
3	21	14,68826827
3	22	15,0376577
3	23	15,37349439
3	24	15,70691775
3	25	16,03977262
3	26	16,37219883
3	27	16,70359856
3	28	17,03206198
3	29	17,35224071
3	30	17,64963405
3	31	17,88632754
3	32	17,97532413
3	33	18,0163733
3	34	18,04056449
3	35	18,05887986
3	36	18,07514472
3	37	18,09069035
3	38	18,10598216
3	39	18,12118388
3	40	18,13635343
3	41	18,15151146
3	42	18,16666533
3	43	18,1818177
3	44	18,19696952
3	45	18,21212115
3	46	18,2272727
3	47	18,24242423

3	48	18,25757575
3	49	18,27272727
3	50	18,28787879
3	51	18,3030303
3	52	18,31818182
3	53	18,33333333
3	54	18,34848485
3	55	18,36363636
3	56	18,37878788
3	57	18,39393939
3	58	18,40909091
3	59	18,42424242
3	60	18,43939394
3	61	18,45454545
3	62	18,46969697
3	63	18,48484848
3	64	18,5
3	65	18,51515152
3	66	18,53030303
3	67	18,54545455
3	68	18,56060606
3	69	18,57575758
3	70	18,59090909
3	71	18,60606061
3	72	18,62121212
3	73	18,63636364
3	74	18,65151515
3	75	18,66666667
3	76	18,68181818
3	77	18,6969697
3	78	18,71212121
3	79	18,72727273
3	80	18,74242424
3	81	18,75757576
3	82	18,77272727
3	83	18,78787879
3	84	18,8030303
3	85	18,81818182
3	86	18,83333333
3	87	18,84848485
3	88	18,86363636
3	89	18,87878788
3	90	18,89393939
3	91	18,90909091
3	92	18,92424242
3	93	18,93939394
3	94	18,95454545
3	95	18,96969697
3	96	18,98484848
3	97	19
3	98	19,01515152
3	99	19,03030303
3	100	19,04545455
3	101	19,06060606
3	102	19,07575758
3	103	19,09090909
3	104	19,10606061
3	105	19,12121212
3	106	19,13636364
3	107	19,15151515
3	108	19,16666667
3	109	19,18181818
3	110	19,1969697
3	111	19,21212121
3	112	19,22727273
3	113	19,24242424
3	114	19,25757576
3	115	19,27272727
3	116	19,28787879

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

3	117	19,3030303
3	118	19,31818182
3	119	19,33333333
3	120	19,34848485
3	121	19,36363636
3	122	19,37878788
3	123	19,39393939
3	124	19,40909091
3	125	19,42424242
3	126	19,43939394
3	127	19,45454545
3	128	19,46969697
3	129	19,48484848
3	130	19,5
3	131	19,51515152
3	132	19,53030303
3	133	19,54545455
3	134	19,56060606
3	135	19,57575758
3	136	19,59090909
3	137	19,60606061
3	138	19,62121212
3	139	19,63636364
3	140	19,65151515
3	141	19,66666667
3	142	19,68181818
3	143	19,6969697
3	144	19,71212121
3	145	19,72727273
3	146	19,74242424
3	147	19,75757576
3	148	19,77272727
3	149	19,78787879
3	150	19,8030303
3	151	19,81818182
3	152	19,83333333
3	153	19,84848485
3	154	19,86363636
3	155	19,87878788
3	156	19,89393939
3	157	19,90909091
3	158	19,92424242
3	159	19,93939394
3	160	19,95454545
3	161	19,96969697
3	162	19,98484848
3	163	20
3	164	20,01515152
3	165	20,03030303
3	166	20,04545455
3	167	20,06060606
3	168	20,07575758
3	169	20,09090909
3	170	20,10606061
3	171	20,12121212
3	172	20,13636364
3	173	20,15151515
3	174	20,16666667
3	175	20,18181818
3	176	20,1969697
3	177	20,21212121
3	178	20,22727273
3	179	20,24242424
3	180	20,25757576
3	181	20,27272727
3	182	20,28787879
3	183	20,3030303
3	184	20,31818182
3	185	20,33333333

3	186	20,34848485
3	187	20,36363636
3	188	20,37878788
3	189	20,39393939
3	190	20,40909091
3	191	20,42424242
3	192	20,43939394
3	193	20,45454545
3	194	20,46969697
3	195	20,48484848
3	196	20,5
3	197	20,51515152
3	198	20,53030303
3	199	20,54545455
3	200	20,56060606
3	201	20,57575758
3	202	20,59090909
3	203	20,60606061
3	204	20,62121212
3	205	20,63636364
3	206	20,65151515
3	207	20,66666667
3	208	20,68181818
3	209	20,6969697
3	210	20,71212121
3	211	20,72727273
3	212	20,74242424
3	213	20,75757576
3	214	20,77272727
3	215	20,78787879
3	216	20,8030303
3	217	20,81818182
3	218	20,83333333
3	219	20,84848485
3	220	20,86363636
3	221	20,87878788
3	222	20,89393939
3	223	20,90909091
3	224	20,92424242
3	225	20,93939394
3	226	20,95454545
3	227	20,96969697
4	1	8
4	2	8,33333333
4	3	8,66666667
4	4	9
4	5	9,33333333
4	6	9,66666667
4	7	10
4	8	10,33333333
4	9	10,66666667
4	10	11
4	11	11,33333333
4	12	11,66666668
4	13	12,00000005
4	14	12,33333362
4	15	12,66666682
4	16	13,00000775
4	17	13,33337194
4	18	13,66685743
4	19	14,0009385
4	20	14,33793406
4	21	14,68913474
4	22	15,03924943
4	23	15,37555647
4	24	15,70930865
4	25	16,04240359
4	26	16,37495453
4	27	16,70624005

4	28	17,03406228
4	29	17,35255828
4	30	17,64673422
4	31	17,87975268
4	32	17,97082697
4	33	18,01408064
4	34	18,03953997
4	35	18,0584531
4	36	18,07497409
4	37	18,09062382
4	38	18,10595664
4	39	18,12117419
4	40	18,13634978
4	41	18,15151009
4	42	18,16666482
4	43	18,1818175
4	44	18,19696945
4	45	18,21212112
4	46	18,22727269
4	47	18,24242423
4	48	18,25757575
4	49	18,27272727
4	50	18,28787879
4	51	18,3030303
4	52	18,31818182
4	53	18,33333333
4	54	18,34848485
4	55	18,36363636
4	56	18,37878788
4	57	18,39393939
4	58	18,40909091
4	59	18,42424242
4	60	18,43939394
4	61	18,45454545
4	62	18,46969697
4	63	18,48484848
4	64	18,5
4	65	18,51515152
4	66	18,53030303
4	67	18,54545455
4	68	18,56060606
4	69	18,57575758
4	70	18,59090909
4	71	18,60606061
4	72	18,62121212
4	73	18,63636364
4	74	18,65151515
4	75	18,66666667
4	76	18,68181818
4	77	18,6969697
4	78	18,71212121
4	79	18,72727273
4	80	18,74242424
4	81	18,75757576
4	82	18,77272727
4	83	18,78787879
4	84	18,8030303
4	85	18,81818182
4	86	18,83333333
4	87	18,84848485
4	88	18,86363636
4	89	18,87878788
4	90	18,89393939
4	91	18,90909091
4	92	18,92424242
4	93	18,93939394
4	94	18,95454545
4	95	18,96969697
4	96	18,98484848

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

4	97	19
4	98	19,01515152
4	99	19,03030303
4	100	19,04545455
.	.	.
.	.	.
.	.	.

ΑΡΧΕΙΟ 13-1ΑΗ.DAT

Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Βάθος (m)	Θερμοκρασία Εδάφους (°C) (Θέσεις Κόμβων)	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (°C)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (°C)
i	j	i*DX	j*DY	T(i,j)	j	TA(j)	TR(j)
1	1	0,5	0,5	8	1	8	16,72759023
1	2	0,5	1	8,333333333	2	8,002975431	16,7749979
1	3	0,5	1,5	8,666666667	3	8,010019283	16,81857025
1	4	0,5	2	9	4	8,018959314	16,86044641
1	5	0,5	2,5	9,333333333	5	8,029457025	16,9009461
1	6	0,5	3	9,666666667	6	8,041452409	16,94011273
1	7	0,5	3,5	10	7	8,054928788	16,97794671
1	8	0,5	4	10,33333333	8	8,069876406	17,01444162
1	9	0,5	4,5	10,66666667	9	8,086286668	17,04958988
1	10	0,5	5	11	10	8,104151203	17,08338367
1	11	0,5	5,5	11,33333333	11	8,123461708	17,11581512
1	12	0,5	6	11,66666667	12	8,144209925	17,14687634
1	13	0,5	6,5	12	13	8,166387635	17,17655936
1	14	0,5	7	12,33333333	14	8,189986656	17,20485621
1	15	0,5	7,5	12,66666667	15	8,214998845	17,23175885
1	16	0,5	8	13	16	8,241416099	17,25725924
1	17	0,5	8,5	13,33333333	17	8,26923037	17,28134924
1	18	0,5	9	13,66666667	18	8,298433733	17,30402063
1	19	0,5	9,5	14	19	8,329018662	17,32526474
1	20	0,5	10	14,33333333	20	8,360979184	17,34507138
1	21	0,5	10,5	14,66666667	21	8,394314925	17,36342468
1	22	0,5	11	15	22	8,434385498	17,38042863
1	23	0,5	11,5	15,33333333	23	8,48092534	17,39877791
1	24	0,5	12	15,66666667	24	8,533714173	17,41806576
1	25	0,5	12,5	16	25	8,592558655	17,43790808
1	26	0,5	13	16,33333333	26	8,65726342	17,45796076
1	27	0,5	13,5	16,66666667	27	8,727627249	17,47791771
1	28	0,5	14	17	28	8,803440721	17,49750897
1	29	0,5	14,5	17,33333333	29	8,88447365	17,51650958
1	30	0,5	15	17,66666667	30	8,970441844	17,53476975
1	31	0,5	15,5	18	31	9,060909061	17,55231
1	32	0,5	16	18,01515152	32	9,151469821	17,5695854
1	33	0,5	16,5	18,03030303	33	9,241531491	17,58642559
1	34	0,5	17	18,04545455	34	9,330920766	17,60300691
1	35	0,5	17,5	18,06060606	35	9,419583451	17,61938955
1	36	0,5	18	18,07575758	36	9,507505556	17,63559446
1	37	0,5	18,5	18,09090909	37	9,594686893	17,65162907
1	38	0,5	19	18,10606061	38	9,68113205	17,66749604
1	39	0,5	19,5	18,12121212	39	9,766847256	17,68319637
1	40	0,5	20	18,13636364	40	9,851839271	17,69873043
1	41	0,5	20,5	18,15151515	41	9,936115004	17,71409839
1	42	0,5	21	18,16666667	42	10,01968137	17,72930029
1	43	0,5	21,5	18,18181818	43	10,10254523	17,74433616
1	44	0,5	22	18,1969697	44	10,18471341	17,75920598
1	45	0,5	22,5	18,21212121	45	10,26619265	17,77390973
1	46	0,5	23	18,22727273	46	10,34698961	17,78844735
1	47	0,5	23,5	18,24242424	47	10,42711091	17,80281877

1	48	0,5	24	18,25757576	48	10,50656308	17,81702393
1	49	0,5	24,5	18,27272727	49	10,58535261	17,8310627
1	50	0,5	25	18,28787879	50	10,66348589	17,84493498
1	51	0,5	25,5	18,3030303	51	10,74096926	17,85864064
1	52	0,5	26	18,31818182	52	10,81780899	17,87217952
1	53	0,5	26,5	18,33333333	53	10,8940113	17,88555145
1	54	0,5	27	18,34848485	54	10,96958234	17,89875625
1	55	0,5	27,5	18,36363636	55	11,04452817	17,91179372
1	56	0,5	28	18,37878788	56	11,11885482	17,92466365
1	57	0,5	28,5	18,39393939	57	11,19256824	17,93736579
1	58	0,5	29	18,40909091	58	11,26567433	17,9498999
1	59	0,5	29,5	18,42424242	59	11,33817892	17,9622657
1	60	0,5	30	18,43939394	60	11,41008779	17,97446292
1	61	0,5	30,5	18,45454545	61	11,48140663	17,98649125
1	62	0,5	31	18,46969697	62	11,55214111	17,99835038
1	63	0,5	31,5	18,48484848	63	11,62229682	18,01003996
1	64	0,5	32	18,5	64	11,69187929	18,02155964
1	65	0,5	32,5	18,51515152	65	11,760894	18,03290905
1	66	0,5	33	18,53030303	66	11,82934637	18,04408781
1	67	0,5	33,5	18,54545455	67	11,89724177	18,05509551
1	68	0,5	34	18,56060606	68	11,96458549	18,06593174
1	69	0,5	34,5	18,57575758	69	12,0313828	18,07659604
1	70	0,5	35	18,59090909	70	12,09763889	18,08708797
1	71	0,5	35,5	18,60606061	71	12,1633589	18,09740705
1	72	0,5	36	18,62121212	72	12,22854792	18,10755279
1	73	0,5	36,5	18,63636364	73	12,29321098	18,11752468
1	74	0,5	37	18,65151515	74	12,3573531	18,12732217
1	75	0,5	37,5	18,66666667	75	12,42097931	18,1369446
1	76	0,5	38	18,68181818	76	12,48409438	18,14639152
1	77	0,5	38,5	18,6969697	77	12,54670297	18,15566252
1	78	0,5	39	18,71212121	78	12,60880995	18,16475691
1	79	0,5	39,5	18,72727273	79	12,67042006	18,17367406
1	80	0,5	40	18,74242424	80	12,73153799	18,18241332
1	81	0,5	40,5	18,75757576	81	12,79216838	18,19097403
1	82	0,5	41	18,77272727	82	12,85231579	18,19935552
1	83	0,5	41,5	18,78787879	83	12,91198476	18,20755712
1	84	0,5	42	18,8030303	84	12,97117976	18,21557812
1	85	0,5	42,5	18,81818182	85	13,02990523	18,22341779
1	86	0,5	43	18,83333333	86	13,08816554	18,2310754
1	87	0,5	43,5	18,84848485	87	13,14596504	18,23855019
1	88	0,5	44	18,86363636	88	13,203308	18,24584137
1	89	0,5	44,5	18,87878788	89	13,26019869	18,25294816
1	90	0,5	45	18,89393939	90	13,31664131	18,25986974
1	91	0,5	45,5	18,90909091	91	13,37264	18,26660526
1	92	0,5	46	18,92424242	92	13,4281989	18,27315386
1	93	0,5	46,5	18,93939394	93	13,48332206	18,27951468
1	94	0,5	47	18,95454545	94	13,5380135	18,28568683
1	95	0,5	47,5	18,96969697	95	13,59227719	18,29166941
1	96	0,5	48	18,98484848	96	13,64611706	18,2974615
1	97	0,5	48,5	19	97	13,699537	18,30306216
1	98	0,5	49	19,01515152	98	13,75254084	18,30847042
1	99	0,5	49,5	19,03030303	99	13,80513241	18,3136853
1	100	0,5	50	19,04545455	100	13,85731545	18,3187058
1	101	0,5	50,5	19,06060606	101	13,90909371	18,32353089
1	102	0,5	51	19,07575758	102	13,96047086	18,32815952
1	103	0,5	51,5	19,09090909	103	14,01145055	18,33259065
1	104	0,5	52	19,10606061	104	14,06203637	18,33682318
1	105	0,5	52,5	19,12121212	105	14,11223189	18,34085601
1	106	0,5	53	19,13636364	106	14,16204064	18,34468801
1	107	0,5	53,5	19,15151515	107	14,2114661	18,34831806
1	108	0,5	54	19,16666667	108	14,26051172	18,35174497

1	109	0,5	54,5	19,18181818	109	14,3091809	18,35496758
1	110	0,5	55	19,1969697	110	14,35747702	18,35798467
1	111	0,5	55,5	19,21212121	111	14,40540341	18,36079502
1	112	0,5	56	19,22727273	112	14,45296336	18,36339738
1	113	0,5	56,5	19,24242424	113	14,50016013	18,36579049
1	114	0,5	57	19,25757576	114	14,54699695	18,36797306
1	115	0,5	57,5	19,27272727	115	14,593477	18,36994378
1	116	0,5	58	19,28787879	116	14,63960344	18,37170132
1	117	0,5	58,5	19,3030303	117	14,68537936	18,37324433
1	118	0,5	59	19,31818182	118	14,73080786	18,37457143
1	119	0,5	59,5	19,33333333	119	14,77589198	18,37568124
1	120	0,5	60	19,34848485	120	14,82063473	18,37657233
1	121	0,5	60,5	19,36363636	121	14,86503907	18,37724328
1	122	0,5	61	19,37878788	122	14,90910794	18,37769263
1	123	0,5	61,5	19,39393939	123	14,95284424	18,37791889
1	124	0,5	62	19,40909091	124	14,99625085	18,37792058
1	125	0,5	62,5	19,42424242	125	15,0393306	18,37769615
1	126	0,5	63	19,43939394	126	15,08208632	18,37724405
1	127	0,5	63,5	19,45454545	127	15,12452078	18,3765627
1	128	0,5	64	19,46969697	128	15,16663674	18,37565049
1	129	0,5	64,5	19,48484848	129	15,20843689	18,37450582
1	130	0,5	65	19,5	130	15,24992393	18,37312702
1	131	0,5	65,5	19,51515152	131	15,29110049	18,37151245
1	132	0,5	66	19,53030303	132	15,3319692	18,36966039
1	133	0,5	66,5	19,54545455	133	15,37253264	18,36756915
1	134	0,5	67	19,56060606	134	15,41279336	18,36523698
1	135	0,5	67,5	19,57575758	135	15,45275388	18,36266212
1	136	0,5	68	19,59090909	136	15,49241671	18,35984278
1	137	0,5	68,5	19,60606061	137	15,53178431	18,35677715
1	138	0,5	69	19,62121212	138	15,5708591	18,35346339
1	139	0,5	69,5	19,63636364	139	15,6096435	18,34989964
1	140	0,5	70	19,65151515	140	15,64813987	18,34608401
1	141	0,5	70,5	19,66666667	141	15,68635057	18,34201459
1	142	0,5	71	19,68181818	142	15,72427791	18,33768945
1	143	0,5	71,5	19,6969697	143	15,76192418	18,33310661
1	144	0,5	72	19,71212121	144	15,79929165	18,3282641
1	145	0,5	72,5	19,72727273	145	15,83638254	18,32315989
1	146	0,5	73	19,74242424	146	15,87319905	18,31779194
1	147	0,5	73,5	19,75757576	147	15,90974338	18,31215818
1	148	0,5	74	19,77272727	148	15,94601766	18,30625652
1	149	0,5	74,5	19,78787879	149	15,98202402	18,30008483
1	150	0,5	75	19,8030303	150	16,01776455	18,29364097
1	151	0,5	75,5	19,81818182	151	16,05324132	18,28692276
1	152	0,5	76	19,83333333	152	16,08845638	18,279928
1	153	0,5	76,5	19,84848485	153	16,12341175	18,27265444
1	154	0,5	77	19,86363636	154	16,1581094	18,26509984
1	155	0,5	77,5	19,87878788	155	16,19255131	18,2572619
1	156	0,5	78	19,89393939	156	16,22673941	18,24913831
1	157	0,5	78,5	19,90909091	157	16,26067562	18,24072671
1	158	0,5	79	19,92424242	158	16,29436182	18,23202474
1	159	0,5	79,5	19,93939394	159	16,32779988	18,22302999
1	160	0,5	80	19,95454545	160	16,36099163	18,21374003
1	161	0,5	80,5	19,96969697	161	16,39393888	18,20415239
1	162	0,5	81	19,98484848	162	16,42664343	18,19426457
1	163	0,5	81,5	20	163	16,45910703	18,18407407
1	164	0,5	82	20,01515152	164	16,49133143	18,17357832
1	165	0,5	82,5	20,03030303	165	16,52331834	18,16277473
1	166	0,5	83	20,04545455	166	16,55506945	18,1516607
1	167	0,5	83,5	20,06060606	167	16,58658642	18,14023357
1	168	0,5	84	20,07575758	168	16,61787092	18,12849066
1	169	0,5	84,5	20,09090909	169	16,64892454	18,11642927

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	170	0,5	85	20,10606061	170	16,6797489	18,10404666
1	171	0,5	85,5	20,12121212	171	16,71034555	18,09134004
1	172	0,5	86	20,13636364	172	16,74071607	18,07830661
1	173	0,5	86,5	20,15151515	173	16,77086197	18,06494354
1	174	0,5	87	20,16666667	174	16,80078476	18,05124794
1	175	0,5	87,5	20,18181818	175	16,83048592	18,03721691
1	176	0,5	88	20,1969697	176	16,85996692	18,02284751
1	177	0,5	88,5	20,21212121	177	16,88922919	18,00813677
1	178	0,5	89	20,22727273	178	16,91827416	17,99308166
1	179	0,5	89,5	20,24242424	179	16,94710321	17,97767917
1	180	0,5	90	20,25757576	180	16,97571772	17,96192619
1	181	0,5	90,5	20,27272727	181	17,00411904	17,94581962
1	182	0,5	91	20,28787879	182	17,0323085	17,92935631
1	183	0,5	91,5	20,3030303	183	17,06028741	17,91253308
1	184	0,5	92	20,31818182	184	17,08805706	17,89534669
1	185	0,5	92,5	20,33333333	185	17,11561872	17,8777939
1	186	0,5	93	20,34848485	186	17,14297363	17,8598714
1	187	0,5	93,5	20,36363636	187	17,17012302	17,84157587
1	188	0,5	94	20,37878788	188	17,19706808	17,82290393
1	189	0,5	94,5	20,39393939	189	17,22381002	17,80385218
1	190	0,5	95	20,40909091	190	17,25034998	17,78441717
1	191	0,5	95,5	20,42424242	191	17,27668912	17,76459541
1	192	0,5	96	20,43939394	192	17,30282857	17,74438336
1	193	0,5	96,5	20,45454545	193	17,32876953	17,72377737
1	194	0,5	97	20,46969697	194	17,35451336	17,70277355
1	195	0,5	97,5	20,48484848	195	17,3800621	17,68136724
1	196	0,5	98	20,5	196	17,40542036	17,65955113
1	197	0,5	98,5	20,51515152	197	17,43060194	17,63730843
1	198	0,5	99	20,53030303	198	17,45565581	17,61458631
1	199	0,5	99,5	20,54545455	199	17,48076954	17,5911903
1	200	0,5	100	20,56060606	200	17,50670276	17,56634159
1	201	0,5	100,5	20,57575758	201	17,53671234	17,53671234
1	202	0,5	101	20,59090909			
1	203	0,5	101,5	20,60606061			
1	204	0,5	102	20,62121212			
1	205	0,5	102,5	20,63636364			
1	206	0,5	103	20,65151515			
1	207	0,5	103,5	20,66666667			
1	208	0,5	104	20,68181818			
1	209	0,5	104,5	20,6969697			
1	210	0,5	105	20,71212121			
1	211	0,5	105,5	20,72727273			
1	212	0,5	106	20,74242424			
1	213	0,5	106,5	20,75757576			
1	214	0,5	107	20,77272727			
1	215	0,5	107,5	20,78787879			
1	216	0,5	108	20,8030303			
1	217	0,5	108,5	20,81818182			
1	218	0,5	109	20,83333333			
1	219	0,5	109,5	20,84848485			
1	220	0,5	110	20,86363636			
1	221	0,5	110,5	20,87878788			
1	222	0,5	111	20,89393939			
1	223	0,5	111,5	20,90909091			
1	224	0,5	112	20,92424242			
1	225	0,5	112,5	20,93939394			
1	226	0,5	113	20,95454545			
1	227	0,5	113,5	20,96969697			
2	1	1	0,5	8			
2	2	1	1	8,33333333			
2	3	1	1,5	8,66666667			

2	4	1	2	9
2	5	1	2,5	9,333333333
2	6	1	3	9,666666667
2	7	1	3,5	10
2	8	1	4	10,333333333
2	9	1	4,5	10,666666667
2	10	1	5	11
2	11	1	5,5	11,333333333
2	12	1	6	11,666666667
2	13	1	6,5	12,000000002
2	14	1	7	12,333333347
2	15	1	7,5	12,666666742
2	16	1	8	13,00000399
2	17	1	8,5	13,33335437
2	18	1	9	13,66677785
2	19	1	9,5	14,00059357
2	20	1	10	14,3365487
2	21	1	10,5	14,68440558
2	22	1	11	15,03076553
2	23	1	11,5	15,36539895
2	24	1	12	15,69824099
2	25	1	12,5	16,03076554
2	26	1	13	16,36309469
2	27	1	13,5	16,69486046
2	28	1	14	17,02482755
2	29	1	14,5	17,34924835
2	30	1	15	17,6565609
2	31	1	15,5	17,90966951
2	32	1	16	17,98741367
2	33	1	16,5	18,02140407
2	34	1	17	18,04250505
2	35	1	17,5	18,05960488
2	36	1	18	18,07541175
2	37	1	18,5	18,09078808
2	38	1	19	18,10601784
2	39	1	19,5	18,1211969
2	40	1	20	18,13635819
2	41	1	20,5	18,15151319
2	42	1	21	18,16666596
2	43	1	21,5	18,18181793
2	44	1	22	18,1969696
2	45	1	22,5	18,21212118
2	46	1	23	18,22727272
2	47	1	23,5	18,24242424
2	48	1	24	18,25757576
2	49	1	24,5	18,27272727
2	50	1	25	18,28787879
2	51	1	25,5	18,3030303
2	52	1	26	18,31818182
2	53	1	26,5	18,33333333
2	54	1	27	18,34848485
2	55	1	27,5	18,36363636
2	56	1	28	18,37878788
2	57	1	28,5	18,39393939
2	58	1	29	18,40909091
2	59	1	29,5	18,42424242
2	60	1	30	18,43939394
2	61	1	30,5	18,45454545
2	62	1	31	18,46969697
2	63	1	31,5	18,48484848
2	64	1	32	18,5

2	65	1	32,5	18,51515152
2	66	1	33	18,53030303
2	67	1	33,5	18,54545455
2	68	1	34	18,56060606
2	69	1	34,5	18,57575758
2	70	1	35	18,59090909
2	71	1	35,5	18,60606061
2	72	1	36	18,62121212
2	73	1	36,5	18,63636364
2	74	1	37	18,65151515
2	75	1	37,5	18,66666667
2	76	1	38	18,68181818
2	77	1	38,5	18,6969697
2	78	1	39	18,71212121
2	79	1	39,5	18,72727273
2	80	1	40	18,74242424
2	81	1	40,5	18,75757576
2	82	1	41	18,77272727
2	83	1	41,5	18,78787879
2	84	1	42	18,8030303
2	85	1	42,5	18,81818182
2	86	1	43	18,83333333
2	87	1	43,5	18,84848485
2	88	1	44	18,86363636
2	89	1	44,5	18,87878788
2	90	1	45	18,89393939
2	91	1	45,5	18,90909091
2	92	1	46	18,92424242
2	93	1	46,5	18,93939394
2	94	1	47	18,95454545
2	95	1	47,5	18,96969697
2	96	1	48	18,98484848
2	97	1	48,5	19
2	98	1	49	19,01515152
2	99	1	49,5	19,03030303
2	100	1	50	19,04545455
2	101	1	50,5	19,06060606
2	102	1	51	19,07575758
2	103	1	51,5	19,09090909
2	104	1	52	19,10606061
2	105	1	52,5	19,12121212
2	106	1	53	19,13636364
2	107	1	53,5	19,15151515
2	108	1	54	19,16666667
2	109	1	54,5	19,18181818
2	110	1	55	19,1969697
2	111	1	55,5	19,21212121
2	112	1	56	19,22727273
2	113	1	56,5	19,24242424
2	114	1	57	19,25757576
2	115	1	57,5	19,27272727
2	116	1	58	19,28787879
2	117	1	58,5	19,3030303
2	118	1	59	19,31818182
2	119	1	59,5	19,33333333
2	120	1	60	19,34848485
2	121	1	60,5	19,36363636
2	122	1	61	19,37878788
2	123	1	61,5	19,39393939
2	124	1	62	19,40909091
2	125	1	62,5	19,42424242

2	126	1	63	19,43939394
2	127	1	63,5	19,45454545
2	128	1	64	19,46969697
2	129	1	64,5	19,48484848
2	130	1	65	19,5
2	131	1	65,5	19,51515152
2	132	1	66	19,53030303
2	133	1	66,5	19,54545455
2	134	1	67	19,56060606
2	135	1	67,5	19,57575758
2	136	1	68	19,59090909
2	137	1	68,5	19,60606061
2	138	1	69	19,62121212
2	139	1	69,5	19,63636364
2	140	1	70	19,65151515
2	141	1	70,5	19,66666667
2	142	1	71	19,68181818
2	143	1	71,5	19,6969697
2	144	1	72	19,71212121
2	145	1	72,5	19,72727273
2	146	1	73	19,74242424
2	147	1	73,5	19,75757576
2	148	1	74	19,77272727
2	149	1	74,5	19,78787879
2	150	1	75	19,8030303
2	151	1	75,5	19,81818182
2	152	1	76	19,83333333
2	153	1	76,5	19,84848485
2	154	1	77	19,86363636
2	155	1	77,5	19,87878788
2	156	1	78	19,89393939
2	157	1	78,5	19,90909091
2	158	1	79	19,92424242
2	159	1	79,5	19,93939394
2	160	1	80	19,95454545
2	161	1	80,5	19,96969697
2	162	1	81	19,98484848
2	163	1	81,5	20
2	164	1	82	20,01515152
2	165	1	82,5	20,03030303
2	166	1	83	20,04545455
2	167	1	83,5	20,06060606
2	168	1	84	20,07575758
2	169	1	84,5	20,09090909
2	170	1	85	20,10606061
2	171	1	85,5	20,12121212
2	172	1	86	20,13636364
2	173	1	86,5	20,15151515
2	174	1	87	20,16666667
2	175	1	87,5	20,18181818
2	176	1	88	20,1969697
2	177	1	88,5	20,21212121
2	178	1	89	20,22727273
2	179	1	89,5	20,24242424
2	180	1	90	20,25757576
2	181	1	90,5	20,27272727
2	182	1	91	20,28787879
2	183	1	91,5	20,3030303
2	184	1	92	20,31818182
2	185	1	92,5	20,33333333
2	186	1	93	20,34848485

2	187	1	93,5	20,36363636
2	188	1	94	20,37878788
2	189	1	94,5	20,39393939
2	190	1	95	20,40909091
2	191	1	95,5	20,42424242
2	192	1	96	20,43939394
2	193	1	96,5	20,45454545
2	194	1	97	20,46969697
2	195	1	97,5	20,48484848
2	196	1	98	20,5
2	197	1	98,5	20,51515152
2	198	1	99	20,53030303
2	199	1	99,5	20,54545455
2	200	1	100	20,56060606
2	201	1	100,5	20,57575758
2	202	1	101	20,59090909
2	203	1	101,5	20,60606061
2	204	1	102	20,62121212
2	205	1	102,5	20,63636364
2	206	1	103	20,65151515
2	207	1	103,5	20,66666667
2	208	1	104	20,68181818
2	209	1	104,5	20,6969697
2	210	1	105	20,71212121
2	211	1	105,5	20,72727273
2	212	1	106	20,74242424
2	213	1	106,5	20,75757576
2	214	1	107	20,77272727
2	215	1	107,5	20,78787879
2	216	1	108	20,8030303
2	217	1	108,5	20,81818182
2	218	1	109	20,83333333
2	219	1	109,5	20,84848485
2	220	1	110	20,86363636
2	221	1	110,5	20,87878788
2	222	1	111	20,89393939
2	223	1	111,5	20,90909091
2	224	1	112	20,92424242
2	225	1	112,5	20,93939394
2	226	1	113	20,95454545
2	227	1	113,5	20,96969697
3	1	1,5	0,5	8
3	2	1,5	1	8,33333333
3	3	1,5	1,5	8,66666667
3	4	1,5	2	9
3	5	1,5	2,5	9,33333333
3	6	1,5	3	9,66666667
3	7	1,5	3,5	10
3	8	1,5	4	10,33333333
3	9	1,5	4,5	10,66666667
3	10	1,5	5	11
3	11	1,5	5,5	11,33333333
3	12	1,5	6	11,66666667
3	13	1,5	6,5	12,00000004
3	14	1,5	7	12,33333357
3	15	1,5	7,5	12,66666793
3	16	1,5	8	13,00000653
3	17	1,5	8,5	13,33336661
3	18	1,5	9	13,66683526
3	19	1,5	9,5	14,00085237
3	20	1,5	10	14,33763365

3	21	1,5	10,5	14,68826827
3	22	1,5	11	15,0376577
3	23	1,5	11,5	15,37349439
3	24	1,5	12	15,70691775
3	25	1,5	12,5	16,03977262
3	26	1,5	13	16,37219883
3	27	1,5	13,5	16,70359856
3	28	1,5	14	17,03206198
3	29	1,5	14,5	17,35224071
3	30	1,5	15	17,64963405
3	31	1,5	15,5	17,88632754
3	32	1,5	16	17,97532413
3	33	1,5	16,5	18,0163733
3	34	1,5	17	18,04056449
3	35	1,5	17,5	18,05887986
3	36	1,5	18	18,07514472
3	37	1,5	18,5	18,09069035
3	38	1,5	19	18,10598216
3	39	1,5	19,5	18,12118388
3	40	1,5	20	18,13635343
3	41	1,5	20,5	18,15151146
3	42	1,5	21	18,16666533
3	43	1,5	21,5	18,1818177
3	44	1,5	22	18,19696952
3	45	1,5	22,5	18,21212115
3	46	1,5	23	18,2272727
3	47	1,5	23,5	18,24242423
3	48	1,5	24	18,25757575
3	49	1,5	24,5	18,27272727
3	50	1,5	25	18,28787879
3	51	1,5	25,5	18,3030303
3	52	1,5	26	18,31818182
3	53	1,5	26,5	18,33333333
3	54	1,5	27	18,34848485
3	55	1,5	27,5	18,36363636
3	56	1,5	28	18,37878788
3	57	1,5	28,5	18,39393939
3	58	1,5	29	18,40909091
3	59	1,5	29,5	18,42424242
3	60	1,5	30	18,43939394
3	61	1,5	30,5	18,45454545
3	62	1,5	31	18,46969697
3	63	1,5	31,5	18,48484848
3	64	1,5	32	18,5
3	65	1,5	32,5	18,51515152
3	66	1,5	33	18,53030303
3	67	1,5	33,5	18,54545455
3	68	1,5	34	18,56060606
3	69	1,5	34,5	18,57575758
3	70	1,5	35	18,59090909
3	71	1,5	35,5	18,60606061
3	72	1,5	36	18,62121212
3	73	1,5	36,5	18,63636364
3	74	1,5	37	18,65151515
3	75	1,5	37,5	18,66666667
3	76	1,5	38	18,68181818
3	77	1,5	38,5	18,6969697
3	78	1,5	39	18,71212121
3	79	1,5	39,5	18,72727273
3	80	1,5	40	18,74242424
3	81	1,5	40,5	18,75757576

3	82	1,5	41	18,77272727
3	83	1,5	41,5	18,78787879
3	84	1,5	42	18,8030303
3	85	1,5	42,5	18,81818182
3	86	1,5	43	18,83333333
3	87	1,5	43,5	18,84848485
3	88	1,5	44	18,86363636
3	89	1,5	44,5	18,87878788
3	90	1,5	45	18,89393939
3	91	1,5	45,5	18,90909091
3	92	1,5	46	18,92424242
3	93	1,5	46,5	18,93939394
3	94	1,5	47	18,95454545
3	95	1,5	47,5	18,96969697
3	96	1,5	48	18,98484848
3	97	1,5	48,5	19
3	98	1,5	49	19,01515152
3	99	1,5	49,5	19,03030303
3	100	1,5	50	19,04545455
3	101	1,5	50,5	19,06060606
3	102	1,5	51	19,07575758
3	103	1,5	51,5	19,09090909
3	104	1,5	52	19,10606061
3	105	1,5	52,5	19,12121212
3	106	1,5	53	19,13636364
3	107	1,5	53,5	19,15151515
3	108	1,5	54	19,16666667
3	109	1,5	54,5	19,18181818
3	110	1,5	55	19,1969697
3	111	1,5	55,5	19,21212121
3	112	1,5	56	19,22727273
3	113	1,5	56,5	19,24242424
3	114	1,5	57	19,25757576
3	115	1,5	57,5	19,27272727
3	116	1,5	58	19,28787879
3	117	1,5	58,5	19,3030303
3	118	1,5	59	19,31818182
3	119	1,5	59,5	19,33333333
3	120	1,5	60	19,34848485
3	121	1,5	60,5	19,36363636
3	122	1,5	61	19,37878788
3	123	1,5	61,5	19,39393939
3	124	1,5	62	19,40909091
3	125	1,5	62,5	19,42424242
3	126	1,5	63	19,43939394
3	127	1,5	63,5	19,45454545
3	128	1,5	64	19,46969697
3	129	1,5	64,5	19,48484848
3	130	1,5	65	19,5
3	131	1,5	65,5	19,51515152
3	132	1,5	66	19,53030303
3	133	1,5	66,5	19,54545455
3	134	1,5	67	19,56060606
3	135	1,5	67,5	19,57575758
3	136	1,5	68	19,59090909
3	137	1,5	68,5	19,60606061
3	138	1,5	69	19,62121212
3	139	1,5	69,5	19,63636364
3	140	1,5	70	19,65151515
3	141	1,5	70,5	19,66666667
3	142	1,5	71	19,68181818

3	143	1,5	71,5	19,6969697
3	144	1,5	72	19,71212121
3	145	1,5	72,5	19,72727273
3	146	1,5	73	19,74242424
3	147	1,5	73,5	19,75757576
3	148	1,5	74	19,77272727
3	149	1,5	74,5	19,78787879
3	150	1,5	75	19,8030303
3	151	1,5	75,5	19,81818182
3	152	1,5	76	19,83333333
3	153	1,5	76,5	19,84848485
3	154	1,5	77	19,86363636
3	155	1,5	77,5	19,87878788
3	156	1,5	78	19,89393939
3	157	1,5	78,5	19,90909091
3	158	1,5	79	19,92424242
3	159	1,5	79,5	19,93939394
3	160	1,5	80	19,95454545
3	161	1,5	80,5	19,96969697
3	162	1,5	81	19,98484848
3	163	1,5	81,5	20
3	164	1,5	82	20,01515152
3	165	1,5	82,5	20,03030303
3	166	1,5	83	20,04545455
3	167	1,5	83,5	20,06060606
3	168	1,5	84	20,07575758
3	169	1,5	84,5	20,09090909
3	170	1,5	85	20,10606061
3	171	1,5	85,5	20,12121212
3	172	1,5	86	20,13636364
3	173	1,5	86,5	20,15151515
3	174	1,5	87	20,16666667
3	175	1,5	87,5	20,18181818
3	176	1,5	88	20,1969697
3	177	1,5	88,5	20,21212121
3	178	1,5	89	20,22727273
3	179	1,5	89,5	20,24242424
3	180	1,5	90	20,25757576
3	181	1,5	90,5	20,27272727
3	182	1,5	91	20,28787879
3	183	1,5	91,5	20,3030303
3	184	1,5	92	20,31818182
3	185	1,5	92,5	20,33333333
3	186	1,5	93	20,34848485
3	187	1,5	93,5	20,36363636
3	188	1,5	94	20,37878788
3	189	1,5	94,5	20,39393939
3	190	1,5	95	20,40909091
3	191	1,5	95,5	20,42424242
3	192	1,5	96	20,43939394
3	193	1,5	96,5	20,45454545
3	194	1,5	97	20,46969697
3	195	1,5	97,5	20,48484848
3	196	1,5	98	20,5
3	197	1,5	98,5	20,51515152
3	198	1,5	99	20,53030303
3	199	1,5	99,5	20,54545455
3	200	1,5	100	20,56060606
3	201	1,5	100,5	20,57575758
3	202	1,5	101	20,59090909
3	203	1,5	101,5	20,60606061

3	204	1,5	102	20,62121212
3	205	1,5	102,5	20,63636364
3	206	1,5	103	20,65151515
3	207	1,5	103,5	20,66666667
3	208	1,5	104	20,68181818
3	209	1,5	104,5	20,6969697
3	210	1,5	105	20,71212121
3	211	1,5	105,5	20,72727273
3	212	1,5	106	20,74242424
3	213	1,5	106,5	20,75757576
3	214	1,5	107	20,77272727
3	215	1,5	107,5	20,78787879
3	216	1,5	108	20,8030303
3	217	1,5	108,5	20,81818182
3	218	1,5	109	20,83333333
3	219	1,5	109,5	20,84848485
3	220	1,5	110	20,86363636
3	221	1,5	110,5	20,87878788
3	222	1,5	111	20,89393939
3	223	1,5	111,5	20,90909091
3	224	1,5	112	20,92424242
3	225	1,5	112,5	20,93939394
3	226	1,5	113	20,95454545
3	227	1,5	113,5	20,96969697
4	1	2	0,5	8
4	2	2	1	8,333333333
4	3	2	1,5	8,666666667
4	4	2	2	9
4	5	2	2,5	9,333333333
4	6	2	3	9,666666667
4	7	2	3,5	10
4	8	2	4	10,33333333
4	9	2	4,5	10,66666667
4	10	2	5	11
4	11	2	5,5	11,33333333
4	12	2	6	11,66666668
4	13	2	6,5	12,00000005
4	14	2	7	12,33333362
4	15	2	7,5	12,6666682
4	16	2	8	13,00000775
4	17	2	8,5	13,33337194
4	18	2	9	13,66685743
4	19	2	9,5	14,0009385
4	20	2	10	14,33793406
4	21	2	10,5	14,68913474
4	22	2	11	15,03924943
4	23	2	11,5	15,37555647
4	24	2	12	15,70930865
4	25	2	12,5	16,04240359
4	26	2	13	16,37495453
4	27	2	13,5	16,70624005
4	28	2	14	17,03406228
4	29	2	14,5	17,35255828
4	30	2	15	17,64673422
4	31	2	15,5	17,87975268
4	32	2	16	17,97082697
4	33	2	16,5	18,01408064
4	34	2	17	18,03953997
4	35	2	17,5	18,0584531
4	36	2	18	18,07497409
4	37	2	18,5	18,09062382

4	38	2	19	18,10595664
4	39	2	19,5	18,12117419
4	40	2	20	18,13634978
4	41	2	20,5	18,15151009
4	42	2	21	18,16666482
4	43	2	21,5	18,1818175
4	44	2	22	18,19696945
4	45	2	22,5	18,21212112
4	46	2	23	18,22727269
4	47	2	23,5	18,24242423
4	48	2	24	18,25757575
4	49	2	24,5	18,27272727
4	50	2	25	18,28787879
4	51	2	25,5	18,3030303
4	52	2	26	18,31818182
4	53	2	26,5	18,33333333
4	54	2	27	18,34848485
4	55	2	27,5	18,36363636
4	56	2	28	18,37878788
4	57	2	28,5	18,39393939
4	58	2	29	18,40909091
4	59	2	29,5	18,42424242
4	60	2	30	18,43939394
4	61	2	30,5	18,45454545
4	62	2	31	18,46969697
4	63	2	31,5	18,48484848
4	64	2	32	18,5
4	65	2	32,5	18,51515152
4	66	2	33	18,53030303
4	67	2	33,5	18,54545455
4	68	2	34	18,56060606
4	69	2	34,5	18,57575758
4	70	2	35	18,59090909
4	71	2	35,5	18,60606061
4	72	2	36	18,62121212
4	73	2	36,5	18,63636364
4	74	2	37	18,65151515
4	75	2	37,5	18,66666667
4	76	2	38	18,68181818
4	77	2	38,5	18,6969697
4	78	2	39	18,71212121
4	79	2	39,5	18,72727273
4	80	2	40	18,74242424
4	81	2	40,5	18,75757576
4	82	2	41	18,77272727
4	83	2	41,5	18,78787879
4	84	2	42	18,8030303
4	85	2	42,5	18,81818182
4	86	2	43	18,83333333
4	87	2	43,5	18,84848485
4	88	2	44	18,86363636
4	89	2	44,5	18,87878788
4	90	2	45	18,89393939
4	91	2	45,5	18,90909091
4	92	2	46	18,92424242
4	93	2	46,5	18,93939394
4	94	2	47	18,95454545
4	95	2	47,5	18,96969697
4	96	2	48	18,98484848
4	97	2	48,5	19
4	98	2	49	19,01515152

4	99	2	49,5	19,03030303
4	100	2	50	19,04545455
4	101	2	50,5	19,06060606
4	102	2	51	19,07575758
4	103	2	51,5	19,09090909
4	104	2	52	19,10606061
4	105	2	52,5	19,12121212
4	106	2	53	19,13636364
4	107	2	53,5	19,15151515
4	108	2	54	19,16666667
4	109	2	54,5	19,18181818
4	110	2	55	19,1969697
4	111	2	55,5	19,21212121
4	112	2	56	19,22727273
4	113	2	56,5	19,24242424
4	114	2	57	19,25757576
4	115	2	57,5	19,27272727
4	116	2	58	19,28787879
4	117	2	58,5	19,3030303
4	118	2	59	19,31818182
4	119	2	59,5	19,33333333
4	120	2	60	19,34848485
4	121	2	60,5	19,36363636
4	122	2	61	19,37878788
4	123	2	61,5	19,39393939
4	124	2	62	19,40909091
4	125	2	62,5	19,42424242
4	126	2	63	19,43939394
4	127	2	63,5	19,45454545
4	128	2	64	19,46969697
4	129	2	64,5	19,48484848
4	130	2	65	19,5
4	131	2	65,5	19,51515152
4	132	2	66	19,53030303
4	133	2	66,5	19,54545455
4	134	2	67	19,56060606
4	135	2	67,5	19,57575758
4	136	2	68	19,59090909
4	137	2	68,5	19,60606061
4	138	2	69	19,62121212
4	139	2	69,5	19,63636364
4	140	2	70	19,65151515
4	141	2	70,5	19,66666667
4	142	2	71	19,68181818
4	143	2	71,5	19,6969697
4	144	2	72	19,71212121
4	145	2	72,5	19,72727273
4	146	2	73	19,74242424
4	147	2	73,5	19,75757576
4	148	2	74	19,77272727
4	149	2	74,5	19,78787879
4	150	2	75	19,8030303
4	151	2	75,5	19,81818182
4	152	2	76	19,83333333
4	153	2	76,5	19,84848485
4	154	2	77	19,86363636
4	155	2	77,5	19,87878788
4	156	2	78	19,89393939
4	157	2	78,5	19,90909091
4	158	2	79	19,92424242
4	159	2	79,5	19,93939394

4	160	2	80	19,95454545
4	161	2	80,5	19,96969697
4	162	2	81	19,98484848
4	163	2	81,5	20
4	164	2	82	20,01515152
4	165	2	82,5	20,03030303
4	166	2	83	20,04545455
4	167	2	83,5	20,06060606
4	168	2	84	20,07575758
4	169	2	84,5	20,09090909
4	170	2	85	20,10606061
4	171	2	85,5	20,12121212
4	172	2	86	20,13636364
4	173	2	86,5	20,15151515
4	174	2	87	20,16666667
4	175	2	87,5	20,18181818
4	176	2	88	20,1969697
4	177	2	88,5	20,21212121
4	178	2	89	20,22727273
4	179	2	89,5	20,24242424
4	180	2	90	20,25757576
4	181	2	90,5	20,27272727
4	182	2	91	20,28787879
4	183	2	91,5	20,3030303
4	184	2	92	20,31818182
4	185	2	92,5	20,33333333
4	186	2	93	20,34848485
4	187	2	93,5	20,36363636
4	188	2	94	20,37878788
4	189	2	94,5	20,39393939
4	190	2	95	20,40909091
4	191	2	95,5	20,42424242
4	192	2	96	20,43939394
4	193	2	96,5	20,45454545
4	194	2	97	20,46969697
4	195	2	97,5	20,48484848
4	196	2	98	20,5
4	197	2	98,5	20,51515152
4	198	2	99	20,53030303
4	199	2	99,5	20,54545455
4	200	2	100	20,56060606
4	201	2	100,5	20,57575758
4	202	2	101	20,59090909
4	203	2	101,5	20,60606061
4	204	2	102	20,62121212
4	205	2	102,5	20,63636364
4	206	2	103	20,65151515
4	207	2	103,5	20,66666667
4	208	2	104	20,68181818
4	209	2	104,5	20,6969697
4	210	2	105	20,71212121
4	211	2	105,5	20,72727273
4	212	2	106	20,74242424
4	213	2	106,5	20,75757576
4	214	2	107	20,77272727
4	215	2	107,5	20,78787879
4	216	2	108	20,8030303
4	217	2	108,5	20,81818182
4	218	2	109	20,83333333
4	219	2	109,5	20,84848485
4	220	2	110	20,86363636

4	221	2	110,5	20,87878788
4	222	2	111	20,89393939
4	223	2	111,5	20,90909091
4	224	2	112	20,92424242
4	225	2	112,5	20,93939394
4	226	2	113	20,95454545
4	227	2	113,5	20,96969697
5	1	2,5	0,5	8
5	2	2,5	1	8,333333333
5	3	2,5	1,5	8,666666667
5	4	2,5	2	9
5	5	2,5	2,5	9,333333333
5	6	2,5	3	9,666666667
5	7	2,5	3,5	10
5	8	2,5	4	10,33333333
5	9	2,5	4,5	10,66666667
5	10	2,5	5	11
5	11	2,5	5,5	11,33333333
5	12	2,5	6	11,66666668
5	13	2,5	6,5	12,00000006
5	14	2,5	7	12,33333365
5	15	2,5	7,5	12,66666831
5	16	2,5	8	13,00000824
5	17	2,5	8,5	13,33337389
5	18	2,5	9	13,66686473
5	19	2,5	9,5	14,00096372
5	20	2,5	10	14,33801138
5	21	2,5	10,5	14,68933427
5	22	2,5	11	15,03962759
5	23	2,5	11,5	15,37608825
5	24	2,5	12	15,70997034
5	25	2,5	12,5	16,0431701
5	26	2,5	13	16,37577888
5	27	2,5	13,5	16,70701893
5	28	2,5	14	17,03458572
5	29	2,5	14,5	17,35247406
5	30	2,5	15	17,64565672
5	31	2,5	15,5	17,87777281
5	32	2,5	16	17,96923696
5	33	2,5	16,5	18,01313803
5	34	2,5	17	18,03906281
5	35	2,5	17,5	18,05823314
5	36	2,5	18	18,07487858
5	37	2,5	18,5	18,09058399
5	38	2,5	19	18,10594048
5	39	2,5	19,5	18,12116776
5	40	2,5	20	18,13634727
5	41	2,5	20,5	18,15150911
5	42	2,5	21	18,16666444
5	43	2,5	21,5	18,18181736
5	44	2,5	22	18,1969694
5	45	2,5	22,5	18,2121211
5	46	2,5	23	18,22727269
5	47	2,5	23,5	18,24242423
5	48	2,5	24	18,25757575
5	49	2,5	24,5	18,27272727
5	50	2,5	25	18,28787879
5	51	2,5	25,5	18,3030303
5	52	2,5	26	18,31818182
5	53	2,5	26,5	18,33333333
5	54	2,5	27	18,34848485

5	55	2,5	27,5	18,36363636
5	56	2,5	28	18,37878788
5	57	2,5	28,5	18,39393939
5	58	2,5	29	18,40909091
5	59	2,5	29,5	18,42424242
5	60	2,5	30	18,43939394
5	61	2,5	30,5	18,45454545
5	62	2,5	31	18,46969697
5	63	2,5	31,5	18,48484848
5	64	2,5	32	18,5
5	65	2,5	32,5	18,51515152
5	66	2,5	33	18,53030303
5	67	2,5	33,5	18,54545455
5	68	2,5	34	18,56060606
5	69	2,5	34,5	18,57575758
5	70	2,5	35	18,59090909
5	71	2,5	35,5	18,60606061
5	72	2,5	36	18,62121212
5	73	2,5	36,5	18,63636364
5	74	2,5	37	18,65151515
5	75	2,5	37,5	18,66666667
5	76	2,5	38	18,68181818
5	77	2,5	38,5	18,6969697
5	78	2,5	39	18,71212121
5	79	2,5	39,5	18,72727273
5	80	2,5	40	18,74242424
5	81	2,5	40,5	18,75757576
5	82	2,5	41	18,77272727
5	83	2,5	41,5	18,78787879
5	84	2,5	42	18,80303030
5	85	2,5	42,5	18,81818182
5	86	2,5	43	18,83333333
5	87	2,5	43,5	18,84848485
5	88	2,5	44	18,86363636
5	89	2,5	44,5	18,87878788
5	90	2,5	45	18,89393939
5	91	2,5	45,5	18,90909091
5	92	2,5	46	18,92424242
5	93	2,5	46,5	18,93939394
5	94	2,5	47	18,95454545
5	95	2,5	47,5	18,96969697
5	96	2,5	48	18,98484848
5	97	2,5	48,5	19
5	98	2,5	49	19,01515152
5	99	2,5	49,5	19,03030303
5	100	2,5	50	19,04545455
5	101	2,5	50,5	19,06060606
5	102	2,5	51	19,07575758
5	103	2,5	51,5	19,09090909
5	104	2,5	52	19,10606061
5	105	2,5	52,5	19,12121212
5	106	2,5	53	19,13636364
5	107	2,5	53,5	19,15151515
5	108	2,5	54	19,16666667
5	109	2,5	54,5	19,18181818
5	110	2,5	55	19,1969697
5	111	2,5	55,5	19,21212121
5	112	2,5	56	19,22727273
5	113	2,5	56,5	19,24242424
5	114	2,5	57	19,25757576
5	115	2,5	57,5	19,27272727

5	116	2,5	58	19,28787879
5	117	2,5	58,5	19,3030303
5	118	2,5	59	19,31818182
5	119	2,5	59,5	19,33333333
5	120	2,5	60	19,34848485
5	121	2,5	60,5	19,36363636
5	122	2,5	61	19,37878788
5	123	2,5	61,5	19,39393939
5	124	2,5	62	19,40909091
5	125	2,5	62,5	19,42424242
5	126	2,5	63	19,43939394
5	127	2,5	63,5	19,45454545
5	128	2,5	64	19,46969697
5	129	2,5	64,5	19,48484848
5	130	2,5	65	19,5
5	131	2,5	65,5	19,51515152
5	132	2,5	66	19,53030303
5	133	2,5	66,5	19,54545455
5	134	2,5	67	19,56060606
5	135	2,5	67,5	19,57575758
5	136	2,5	68	19,59090909
5	137	2,5	68,5	19,60606061
5	138	2,5	69	19,62121212
5	139	2,5	69,5	19,63636364
5	140	2,5	70	19,65151515
5	141	2,5	70,5	19,66666667
5	142	2,5	71	19,68181818
5	143	2,5	71,5	19,6969697
5	144	2,5	72	19,71212121
5	145	2,5	72,5	19,72727273
5	146	2,5	73	19,74242424
5	147	2,5	73,5	19,75757576
5	148	2,5	74	19,77272727
5	149	2,5	74,5	19,78787879
5	150	2,5	75	19,8030303
5	151	2,5	75,5	19,81818182
5	152	2,5	76	19,83333333
5	153	2,5	76,5	19,84848485
5	154	2,5	77	19,86363636
5	155	2,5	77,5	19,87878788
5	156	2,5	78	19,89393939
5	157	2,5	78,5	19,90909091
5	158	2,5	79	19,92424242
5	159	2,5	79,5	19,93939394
5	160	2,5	80	19,95454545
5	161	2,5	80,5	19,96969697
5	162	2,5	81	19,98484848
5	163	2,5	81,5	20
5	164	2,5	82	20,01515152
5	165	2,5	82,5	20,03030303
5	166	2,5	83	20,04545455
5	167	2,5	83,5	20,06060606
5	168	2,5	84	20,07575758
5	169	2,5	84,5	20,09090909
5	170	2,5	85	20,10606061
5	171	2,5	85,5	20,12121212
5	172	2,5	86	20,13636364
5	173	2,5	86,5	20,15151515
5	174	2,5	87	20,16666667
5	175	2,5	87,5	20,18181818
5	176	2,5	88	20,1969697

5	177	2,5	88,5	20,21212121
5	178	2,5	89	20,22727273
5	179	2,5	89,5	20,24242424
5	180	2,5	90	20,25757576
5	181	2,5	90,5	20,27272727
5	182	2,5	91	20,28787879
5	183	2,5	91,5	20,30303030
5	184	2,5	92	20,31818182
5	185	2,5	92,5	20,33333333
5	186	2,5	93	20,34848485
5	187	2,5	93,5	20,36363636
5	188	2,5	94	20,37878788
5	189	2,5	94,5	20,39393939
5	190	2,5	95	20,40909091
5	191	2,5	95,5	20,42424242
5	192	2,5	96	20,43939394
5	193	2,5	96,5	20,45454545
5	194	2,5	97	20,46969697
5	195	2,5	97,5	20,48484848
5	196	2,5	98	20,5
5	197	2,5	98,5	20,51515152
5	198	2,5	99	20,53030303
5	199	2,5	99,5	20,54545455
5	200	2,5	100	20,56060606
5	201	2,5	100,5	20,57575758
5	202	2,5	101	20,59090909
5	203	2,5	101,5	20,60606061
5	204	2,5	102	20,62121212
5	205	2,5	102,5	20,63636364
5	206	2,5	103	20,65151515
5	207	2,5	103,5	20,66666667
5	208	2,5	104	20,68181818
5	209	2,5	104,5	20,6969697
5	210	2,5	105	20,71212121
5	211	2,5	105,5	20,72727273
5	212	2,5	106	20,74242424
5	213	2,5	106,5	20,75757576
5	214	2,5	107	20,77272727
5	215	2,5	107,5	20,78787879
5	216	2,5	108	20,80303030
5	217	2,5	108,5	20,81818182
5	218	2,5	109	20,83333333
5	219	2,5	109,5	20,84848485
5	220	2,5	110	20,86363636
5	221	2,5	110,5	20,87878788
5	222	2,5	111	20,89393939
5	223	2,5	111,5	20,90909091
5	224	2,5	112	20,92424242
5	225	2,5	112,5	20,93939394
5	226	2,5	113	20,95454545
5	227	2,5	113,5	20,96969697
6	1	3	0,5	8
6	2	3	1	8,333333333
6	3	3	1,5	8,666666667
6	4	3	2	9
6	5	3	2,5	9,333333333
6	6	3	3	9,666666667
6	7	3	3,5	10
6	8	3	4	10,33333333
6	9	3	4,5	10,66666667
6	10	3	5	11

6	11	3	5,5	11,33333333
6	12	3	6	11,66666668
6	13	3	6,5	12,00000006
6	14	3	7	12,33333366
6	15	3	7,5	12,66666836
6	16	3	8	13,00000841
6	17	3	8,5	13,33337453
6	18	3	9	13,66686692
6	19	3	9,5	14,00097061
6	20	3	10	14,3380307
6	21	3	10,5	14,68938133
6	22	3	11	15,03971982
6	23	3	11,5	15,37622729
6	24	3	12	15,71015436
6	25	3	12,5	16,04339271
6	26	3	13	16,37602238
6	27	3	13,5	16,70724281
6	28	3	14	17,0347132
6	29	3	14,5	17,35239279
6	30	3	15	17,64527204
6	31	3	15,5	17,87714716
6	32	3	16	17,96868377
6	33	3	16,5	18,01277115
6	34	3	17	18,03885701
6	35	3	17,5	18,0581294
6	36	3	18	18,07482994
6	37	3	18,5	18,09056232
6	38	3	19	18,10593118
6	39	3	19,5	18,12116388
6	40	3	20	18,13634568
6	41	3	20,5	18,15150848
6	42	3	21	18,16666419
6	43	3	21,5	18,18181726
6	44	3	22	18,19696936
6	45	3	22,5	18,21212109
6	46	3	23	18,22727268
6	47	3	23,5	18,24242422
6	48	3	24	18,25757575
6	49	3	24,5	18,27272727
6	50	3	25	18,28787879
6	51	3	25,5	18,3030303
6	52	3	26	18,31818182
6	53	3	26,5	18,33333333
6	54	3	27	18,34848485
6	55	3	27,5	18,36363636
6	56	3	28	18,37878788
6	57	3	28,5	18,39393939
6	58	3	29	18,40909091
6	59	3	29,5	18,42424242
6	60	3	30	18,43939394
6	61	3	30,5	18,45454545
6	62	3	31	18,46969697
6	63	3	31,5	18,48484848
6	64	3	32	18,5
6	65	3	32,5	18,51515151
6	66	3	33	18,53030303
6	67	3	33,5	18,54545455
6	68	3	34	18,56060606
6	69	3	34,5	18,57575758
6	70	3	35	18,59090909
6	71	3	35,5	18,60606061

6	72	3	36	18,62121212
6	73	3	36,5	18,63636364
6	74	3	37	18,65151515
6	75	3	37,5	18,66666667
6	76	3	38	18,68181818
6	77	3	38,5	18,6969697
6	78	3	39	18,71212121
6	79	3	39,5	18,72727273
6	80	3	40	18,74242424
6	81	3	40,5	18,75757576
6	82	3	41	18,77272727
6	83	3	41,5	18,78787879
6	84	3	42	18,8030303
6	85	3	42,5	18,81818182
6	86	3	43	18,83333333
6	87	3	43,5	18,84848485
6	88	3	44	18,86363636
6	89	3	44,5	18,87878788
6	90	3	45	18,89393939
6	91	3	45,5	18,90909091
6	92	3	46	18,92424242
6	93	3	46,5	18,93939394
6	94	3	47	18,95454545
6	95	3	47,5	18,96969697
6	96	3	48	18,98484848
6	97	3	48,5	19
6	98	3	49	19,01515151
6	99	3	49,5	19,03030303
6	100	3	50	19,04545455
6	101	3	50,5	19,06060606
6	102	3	51	19,07575758
6	103	3	51,5	19,09090909
6	104	3	52	19,10606061
6	105	3	52,5	19,12121212
6	106	3	53	19,13636364
6	107	3	53,5	19,15151515
6	108	3	54	19,16666667
6	109	3	54,5	19,18181818
6	110	3	55	19,1969697
6	111	3	55,5	19,21212121
6	112	3	56	19,22727273
6	113	3	56,5	19,24242424
6	114	3	57	19,25757576
6	115	3	57,5	19,27272727
6	116	3	58	19,28787879
6	117	3	58,5	19,3030303
6	118	3	59	19,31818182
6	119	3	59,5	19,33333333
6	120	3	60	19,34848485
6	121	3	60,5	19,36363636
6	122	3	61	19,37878788
6	123	3	61,5	19,39393939
6	124	3	62	19,40909091
6	125	3	62,5	19,42424242
6	126	3	63	19,43939394
6	127	3	63,5	19,45454545
6	128	3	64	19,46969697
6	129	3	64,5	19,48484848
6	130	3	65	19,5
6	131	3	65,5	19,51515151
6	132	3	66	19,53030303

6	133	3	66,5	19,54545455
6	134	3	67	19,56060606
6	135	3	67,5	19,57575758
6	136	3	68	19,59090909
6	137	3	68,5	19,60606061
6	138	3	69	19,62121212
6	139	3	69,5	19,63636364
6	140	3	70	19,65151515
6	141	3	70,5	19,66666667
6	142	3	71	19,68181818
6	143	3	71,5	19,6969697
6	144	3	72	19,71212121
6	145	3	72,5	19,72727273
6	146	3	73	19,74242424
6	147	3	73,5	19,75757576
6	148	3	74	19,77272727
6	149	3	74,5	19,78787879
6	150	3	75	19,8030303
6	151	3	75,5	19,81818182
6	152	3	76	19,83333333
6	153	3	76,5	19,84848485
6	154	3	77	19,86363636
6	155	3	77,5	19,87878788
6	156	3	78	19,89393939
6	157	3	78,5	19,90909091
6	158	3	79	19,92424242
6	159	3	79,5	19,93939394
6	160	3	80	19,95454545
6	161	3	80,5	19,96969697
6	162	3	81	19,98484848
6	163	3	81,5	20
6	164	3	82	20,01515151
6	165	3	82,5	20,03030303
6	166	3	83	20,04545455
6	167	3	83,5	20,06060606
6	168	3	84	20,07575758
6	169	3	84,5	20,09090909
6	170	3	85	20,10606061
6	171	3	85,5	20,12121212
6	172	3	86	20,13636364
6	173	3	86,5	20,15151515
6	174	3	87	20,16666667
6	175	3	87,5	20,18181818
6	176	3	88	20,1969697
6	177	3	88,5	20,21212121
6	178	3	89	20,22727273
6	179	3	89,5	20,24242424
6	180	3	90	20,25757576
6	181	3	90,5	20,27272727
6	182	3	91	20,28787879
6	183	3	91,5	20,3030303
6	184	3	92	20,31818182
6	185	3	92,5	20,33333333
6	186	3	93	20,34848485
6	187	3	93,5	20,36363636
6	188	3	94	20,37878788
6	189	3	94,5	20,39393939
6	190	3	95	20,40909091
6	191	3	95,5	20,42424242
6	192	3	96	20,43939394
6	193	3	96,5	20,45454545

6	194	3	97	20,46969697
6	195	3	97,5	20,48484848
6	196	3	98	20,5
6	197	3	98,5	20,51515151
6	198	3	99	20,53030303
6	199	3	99,5	20,54545455
6	200	3	100	20,56060606
6	201	3	100,5	20,57575758
6	202	3	101	20,59090909
6	203	3	101,5	20,60606061
6	204	3	102	20,62121212
6	205	3	102,5	20,63636364
6	206	3	103	20,65151515
6	207	3	103,5	20,66666667
6	208	3	104	20,68181818
6	209	3	104,5	20,6969697
6	210	3	105	20,71212121
6	211	3	105,5	20,72727273
6	212	3	106	20,74242424
6	213	3	106,5	20,75757576
6	214	3	107	20,77272727
6	215	3	107,5	20,78787879
6	216	3	108	20,8030303
6	217	3	108,5	20,81818182
6	218	3	109	20,83333333
6	219	3	109,5	20,84848485
6	220	3	110	20,86363636
6	221	3	110,5	20,87878788
6	222	3	111	20,89393939
6	223	3	111,5	20,90909091
6	224	3	112	20,92424242
6	225	3	112,5	20,93939394
6	226	3	113	20,95454545
6	227	3	113,5	20,96969697
7	1	3,5	0,5	8
7	2	3,5	1	8,333333333
7	3	3,5	1,5	8,666666667
7	4	3,5	2	9
7	5	3,5	2,5	9,333333333
7	6	3,5	3	9,666666667
7	7	3,5	3,5	10
7	8	3,5	4	10,33333333
7	9	3,5	4,5	10,666666667
7	10	3,5	5	11
7	11	3,5	5,5	11,33333333
7	12	3,5	6	11,666666668
7	13	3,5	6,5	12,00000006
7	14	3,5	7	12,333333367
7	15	3,5	7,5	12,666666837
7	16	3,5	8	13,00000847
7	17	3,5	8,5	13,33337472
7	18	3,5	9	13,66686754
7	19	3,5	9,5	14,00097241
7	20	3,5	10	14,33803547
7	21	3,5	10,5	14,68939269
7	22	3,5	11	15,03974286
7	23	3,5	11,5	15,37626415
7	24	3,5	12	15,71020578
7	25	3,5	12,5	16,0434571
7	26	3,5	13	16,37609334
7	27	3,5	13,5	16,70730539

7	28	3,5	14	17,03474075
7	29	3,5	14,5	17,35235047
7	30	3,5	15	17,64513651
7	31	3,5	15,5	17,87694269
7	32	3,5	16	17,96849186
7	33	3,5	16,5	18,0126327
7	34	3,5	17	18,03877253
7	35	3,5	17,5	18,05808338
7	36	3,5	18	18,07480681
7	37	3,5	18,5	18,09055136
7	38	3,5	19	18,10592621
7	39	3,5	19,5	18,12116171
7	40	3,5	20	18,13634475
7	41	3,5	20,5	18,15150809
7	42	3,5	21	18,16666403
7	43	3,5	21,5	18,1818172
7	44	3,5	22	18,19696933
7	45	3,5	22,5	18,21212107
7	46	3,5	23	18,22727268
7	47	3,5	23,5	18,24242422
7	48	3,5	24	18,25757575
7	49	3,5	24,5	18,27272727
7	50	3,5	25	18,28787879
7	51	3,5	25,5	18,3030303
7	52	3,5	26	18,31818182
7	53	3,5	26,5	18,33333333
7	54	3,5	27	18,34848485
7	55	3,5	27,5	18,36363636
7	56	3,5	28	18,37878788
7	57	3,5	28,5	18,39393939
7	58	3,5	29	18,40909091
7	59	3,5	29,5	18,42424242
7	60	3,5	30	18,43939394
7	61	3,5	30,5	18,45454545
7	62	3,5	31	18,46969697
7	63	3,5	31,5	18,48484848
7	64	3,5	32	18,5
7	65	3,5	32,5	18,51515151
7	66	3,5	33	18,53030303
7	67	3,5	33,5	18,54545454
7	68	3,5	34	18,56060606
7	69	3,5	34,5	18,57575757
7	70	3,5	35	18,59090909
7	71	3,5	35,5	18,6060606
7	72	3,5	36	18,62121212
7	73	3,5	36,5	18,63636364
7	74	3,5	37	18,65151515
7	75	3,5	37,5	18,66666667
7	76	3,5	38	18,68181818
7	77	3,5	38,5	18,6969697
7	78	3,5	39	18,71212121
7	79	3,5	39,5	18,72727273
7	80	3,5	40	18,74242424
7	81	3,5	40,5	18,75757576
7	82	3,5	41	18,77272727
7	83	3,5	41,5	18,78787879
7	84	3,5	42	18,8030303
7	85	3,5	42,5	18,81818182
7	86	3,5	43	18,83333333
7	87	3,5	43,5	18,84848485
7	88	3,5	44	18,86363636

7	89	3,5	44,5	18,87878788
7	90	3,5	45	18,89393939
7	91	3,5	45,5	18,90909091
7	92	3,5	46	18,92424242
7	93	3,5	46,5	18,93939394
7	94	3,5	47	18,95454545
7	95	3,5	47,5	18,96969697
7	96	3,5	48	18,98484848
7	97	3,5	48,5	19
7	98	3,5	49	19,01515151
7	99	3,5	49,5	19,03030303
7	100	3,5	50	19,04545454
7	101	3,5	50,5	19,06060606
7	102	3,5	51	19,07575758
7	103	3,5	51,5	19,09090909
7	104	3,5	52	19,10606061
7	105	3,5	52,5	19,12121212
7	106	3,5	53	19,13636364
7	107	3,5	53,5	19,15151515
7	108	3,5	54	19,16666667
7	109	3,5	54,5	19,18181818
7	110	3,5	55	19,1969697
7	111	3,5	55,5	19,21212121
7	112	3,5	56	19,22727273
7	113	3,5	56,5	19,24242424
7	114	3,5	57	19,25757576
7	115	3,5	57,5	19,27272727
7	116	3,5	58	19,28787879
7	117	3,5	58,5	19,3030303
7	118	3,5	59	19,31818182
7	119	3,5	59,5	19,33333333
7	120	3,5	60	19,34848485
7	121	3,5	60,5	19,36363636
7	122	3,5	61	19,37878788
7	123	3,5	61,5	19,39393939
7	124	3,5	62	19,40909091
7	125	3,5	62,5	19,42424242
7	126	3,5	63	19,43939394
7	127	3,5	63,5	19,45454545
7	128	3,5	64	19,46969697
7	129	3,5	64,5	19,48484848
7	130	3,5	65	19,5
7	131	3,5	65,5	19,51515151
7	132	3,5	66	19,53030303
7	133	3,5	66,5	19,54545454
7	134	3,5	67	19,56060606
7	135	3,5	67,5	19,57575758
7	136	3,5	68	19,59090909
7	137	3,5	68,5	19,60606061
7	138	3,5	69	19,62121212
7	139	3,5	69,5	19,63636364
7	140	3,5	70	19,65151515
7	141	3,5	70,5	19,66666667
7	142	3,5	71	19,68181818
7	143	3,5	71,5	19,6969697
7	144	3,5	72	19,71212121
7	145	3,5	72,5	19,72727273
7	146	3,5	73	19,74242424
7	147	3,5	73,5	19,75757576
7	148	3,5	74	19,77272727
7	149	3,5	74,5	19,78787879

7	150	3,5	75	19,8030303
7	151	3,5	75,5	19,81818182
7	152	3,5	76	19,83333333
7	153	3,5	76,5	19,84848485
7	154	3,5	77	19,86363636
7	155	3,5	77,5	19,87878788
7	156	3,5	78	19,89393939
7	157	3,5	78,5	19,90909091
7	158	3,5	79	19,92424242
7	159	3,5	79,5	19,93939394
7	160	3,5	80	19,95454545
7	161	3,5	80,5	19,96969697
7	162	3,5	81	19,98484848
7	163	3,5	81,5	20
7	164	3,5	82	20,01515151
7	165	3,5	82,5	20,03030303
7	166	3,5	83	20,04545454
7	167	3,5	83,5	20,06060606
7	168	3,5	84	20,07575758
7	169	3,5	84,5	20,09090909
7	170	3,5	85	20,10606061
7	171	3,5	85,5	20,12121212
7	172	3,5	86	20,13636364
7	173	3,5	86,5	20,15151515
7	174	3,5	87	20,16666667
7	175	3,5	87,5	20,18181818
7	176	3,5	88	20,1969697
7	177	3,5	88,5	20,21212121
7	178	3,5	89	20,22727273
7	179	3,5	89,5	20,24242424
7	180	3,5	90	20,25757576
7	181	3,5	90,5	20,27272727
7	182	3,5	91	20,28787879
7	183	3,5	91,5	20,3030303
7	184	3,5	92	20,31818182
7	185	3,5	92,5	20,33333333
7	186	3,5	93	20,34848485
7	187	3,5	93,5	20,36363636
7	188	3,5	94	20,37878788
7	189	3,5	94,5	20,39393939
7	190	3,5	95	20,40909091
7	191	3,5	95,5	20,42424242
7	192	3,5	96	20,43939394
7	193	3,5	96,5	20,45454545
7	194	3,5	97	20,46969697
7	195	3,5	97,5	20,48484848
7	196	3,5	98	20,5
7	197	3,5	98,5	20,51515151
7	198	3,5	99	20,53030303
7	199	3,5	99,5	20,54545454
7	200	3,5	100	20,56060606
7	201	3,5	100,5	20,57575757
7	202	3,5	101	20,59090909
7	203	3,5	101,5	20,60606061
7	204	3,5	102	20,62121212
7	205	3,5	102,5	20,63636364
7	206	3,5	103	20,65151515
7	207	3,5	103,5	20,66666667
7	208	3,5	104	20,68181818
7	209	3,5	104,5	20,6969697
7	210	3,5	105	20,71212121

7	211	3,5	105,5	20,72727273
7	212	3,5	106	20,74242424
7	213	3,5	106,5	20,75757576
7	214	3,5	107	20,77272727
7	215	3,5	107,5	20,78787879
7	216	3,5	108	20,8030303
7	217	3,5	108,5	20,81818182
7	218	3,5	109	20,83333333
7	219	3,5	109,5	20,84848485
7	220	3,5	110	20,86363636
7	221	3,5	110,5	20,87878788
7	222	3,5	111	20,89393939
7	223	3,5	111,5	20,90909091
7	224	3,5	112	20,92424242
7	225	3,5	112,5	20,93939394
7	226	3,5	113	20,95454545
7	227	3,5	113,5	20,96969697
8	1	4	0,5	8
8	2	4	1	8,33333333
8	3	4	1,5	8,66666667
8	4	4	2	9
8	5	4	2,5	9,33333333
8	6	4	3	9,66666667
8	7	4	3,5	10
8	8	4	4	10,33333333
8	9	4	4,5	10,66666667
8	10	4	5	11
8	11	4	5,5	11,33333333
8	12	4	6	11,66666668
8	13	4	6,5	12,00000006
8	14	4	7	12,33333367
8	15	4	7,5	12,66666838
8	16	4	8	13,00000849
8	17	4	8,5	13,33337478
8	18	4	9	13,66686771
8	19	4	9,5	14,00097288
8	20	4	10	14,33803666
8	21	4	10,5	14,68939549
8	22	4	11	15,03974874
8	23	4	11,5	15,37627404
8	24	4	12	15,7102202
8	25	4	12,5	16,04347563
8	26	4	13	16,37611372
8	27	4	13,5	16,70732232
8	28	4	14	17,03474526
8	29	4	14,5	17,35233186
8	30	4	15	17,6450889
8	31	4	15,5	17,87687429
8	32	4	16	17,96842514
8	33	4	16,5	18,01258139
8	34	4	17	18,03873899
8	35	4	17,5	18,05806385
8	36	4	18	18,07479636
8	37	4	18,5	18,09054612
8	38	4	19	18,10592371
8	39	4	19,5	18,12116056
8	40	4	20	18,13634424
8	41	4	20,5	18,15150787
8	42	4	21	18,16666393
8	43	4	21,5	18,18181716
8	44	4	22	18,19696931

8	45	4	22,5	18,21212107
8	46	4	23	18,22727267
8	47	4	23,5	18,24242422
8	48	4	24	18,25757575
8	49	4	24,5	18,27272727
8	50	4	25	18,28787878
8	51	4	25,5	18,3030303
8	52	4	26	18,31818181
8	53	4	26,5	18,33333333
8	54	4	27	18,34848484
8	55	4	27,5	18,36363636
8	56	4	28	18,37878787
8	57	4	28,5	18,39393939
8	58	4	29	18,4090909
8	59	4	29,5	18,42424242
8	60	4	30	18,43939393
8	61	4	30,5	18,45454545
8	62	4	31	18,46969697
8	63	4	31,5	18,48484848
8	64	4	32	18,5
8	65	4	32,5	18,51515151
8	66	4	33	18,53030303
8	67	4	33,5	18,54545454
8	68	4	34	18,56060606
8	69	4	34,5	18,57575757
8	70	4	35	18,59090909
8	71	4	35,5	18,6060606
8	72	4	36	18,62121212
8	73	4	36,5	18,63636363
8	74	4	37	18,65151515
8	75	4	37,5	18,66666666
8	76	4	38	18,68181818
8	77	4	38,5	18,69696969
8	78	4	39	18,71212121
8	79	4	39,5	18,72727272
8	80	4	40	18,74242424
8	81	4	40,5	18,75757575
8	82	4	41	18,77272727
8	83	4	41,5	18,78787878
8	84	4	42	18,8030303
8	85	4	42,5	18,81818181
8	86	4	43	18,83333333
8	87	4	43,5	18,84848485
8	88	4	44	18,86363636
8	89	4	44,5	18,87878788
8	90	4	45	18,89393939
8	91	4	45,5	18,90909091
8	92	4	46	18,92424242
8	93	4	46,5	18,93939394
8	94	4	47	18,95454545
8	95	4	47,5	18,96969697
8	96	4	48	18,98484848
8	97	4	48,5	19
8	98	4	49	19,01515151
8	99	4	49,5	19,03030303
8	100	4	50	19,04545454
8	101	4	50,5	19,06060606
8	102	4	51	19,07575757
8	103	4	51,5	19,09090909
8	104	4	52	19,1060606
8	105	4	52,5	19,12121212

8	106	4	53	19,13636363
8	107	4	53,5	19,15151515
8	108	4	54	19,16666666
8	109	4	54,5	19,18181818
8	110	4	55	19,19696969
8	111	4	55,5	19,21212121
8	112	4	56	19,22727272
8	113	4	56,5	19,24242424
8	114	4	57	19,25757576
8	115	4	57,5	19,27272727
8	116	4	58	19,28787879
8	117	4	58,5	19,30303030
8	118	4	59	19,31818182
8	119	4	59,5	19,33333333
8	120	4	60	19,34848485
8	121	4	60,5	19,36363636
8	122	4	61	19,37878788
8	123	4	61,5	19,39393939
8	124	4	62	19,40909091
8	125	4	62,5	19,42424242
8	126	4	63	19,43939394
8	127	4	63,5	19,45454545
8	128	4	64	19,46969697
8	129	4	64,5	19,48484848
8	130	4	65	19,5
8	131	4	65,5	19,51515151
8	132	4	66	19,53030303
8	133	4	66,5	19,54545454
8	134	4	67	19,56060606
8	135	4	67,5	19,57575757
8	136	4	68	19,59090909
8	137	4	68,5	19,60606060
8	138	4	69	19,62121212
8	139	4	69,5	19,63636363
8	140	4	70	19,65151515
8	141	4	70,5	19,66666666
8	142	4	71	19,68181818
8	143	4	71,5	19,69696969
8	144	4	72	19,71212121
8	145	4	72,5	19,72727272
8	146	4	73	19,74242424
8	147	4	73,5	19,75757576
8	148	4	74	19,77272727
8	149	4	74,5	19,78787879
8	150	4	75	19,80303030
8	151	4	75,5	19,81818182
8	152	4	76	19,83333333
8	153	4	76,5	19,84848485
8	154	4	77	19,86363636
8	155	4	77,5	19,87878788
8	156	4	78	19,89393939
8	157	4	78,5	19,90909091
8	158	4	79	19,92424242
8	159	4	79,5	19,93939394
8	160	4	80	19,95454545
8	161	4	80,5	19,96969697
8	162	4	81	19,98484848
8	163	4	81,5	20
8	164	4	82	20,01515151
8	165	4	82,5	20,03030303
8	166	4	83	20,04545454

8	167	4	83,5	20,06060606
8	168	4	84	20,07575757
8	169	4	84,5	20,09090909
8	170	4	85	20,10606060
8	171	4	85,5	20,12121212
8	172	4	86	20,13636363
8	173	4	86,5	20,15151515
8	174	4	87	20,16666666
8	175	4	87,5	20,18181818
8	176	4	88	20,19696969
8	177	4	88,5	20,21212121
8	178	4	89	20,22727272
8	179	4	89,5	20,24242424
8	180	4	90	20,25757575
8	181	4	90,5	20,27272727
8	182	4	91	20,28787879
8	183	4	91,5	20,30303030
8	184	4	92	20,31818182
8	185	4	92,5	20,33333333
8	186	4	93	20,34848485
8	187	4	93,5	20,36363636
8	188	4	94	20,37878788
8	189	4	94,5	20,39393939
8	190	4	95	20,40909091
8	191	4	95,5	20,42424242
8	192	4	96	20,43939394
8	193	4	96,5	20,45454545
8	194	4	97	20,46969697
8	195	4	97,5	20,48484848
8	196	4	98	20,5
8	197	4	98,5	20,51515151
8	198	4	99	20,53030303
8	199	4	99,5	20,54545454
8	200	4	100	20,56060606
.
.
.
.
.
.

6.3 Συνεχής λειτουργία του Κ.Γ.Ε για ψύξη σε χρονικό διάστημα επτά (7) ημερών με τα ακόλουθα δεδομένα**ΨΥΞΗ**

Αριθμός Χρονικών Μονάδων «m» :	7
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «YY» (m) :	70
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	8
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNip» (°C) :	40
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Targ» (°C) :	25
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/mK) :	0,8
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,2
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό ρ=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4179
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,25
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C):	500
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK) :	0,41
Παράγων Στάθμισης Μεταβολής Θερμοκρασίας Εξίσωσης Π.Δ. «F» :	1
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	86400
Κατόγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» (J/m ³ °C):	1400000

Για τα παραπάνω δεδομένα τα αποτελέσματα αφορούν ένα σύνολο τιμών 15.047 θερμοκρασιών εδάφους και 702 τιμών θερμοκρασιών νερού. Συνεπώς θα απαιτούνταν αντίστοιχα πίνακας αποτελεσμάτων 15.047 γραμμών δηλ. περίπου 237 σελίδες A4 με γραμματοσειρά Arial 8. Για αυτόν τον λόγο παρουσιάζεται ακολούθως ένα μόνο μέρος τους:

APXEIO 13-1AH.DAT

Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Βάθος (m)	Θερμοκρασία Εδάφους (°C) (Θέσεις Κόμβων)	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (°C)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (°C)
i	j	i*DX	j*DY	T(i,j)	j	TA(j)	TR(j)
1	1	0,2	0,2	25	1	40	36,78793807
1	2	0,2	0,4	25,13333333	2	39,9643988	36,81419336
1	3	0,2	0,6	25,26666667	3	39,94016488	36,82922992
1	4	0,2	0,8	25,4	4	39,91997493	36,84032616
1	5	0,2	1	25,53333333	5	39,9014547	36,84983981
1	6	0,2	1,2	25,66666667	6	39,88374317	36,85862486
1	7	0,2	1,4	25,8	7	39,86649459	36,86702357
1	8	0,2	1,6	25,93333333	8	39,84955786	36,87518497
1	9	0,2	1,8	26,06666667	9	39,83286247	36,88317816
1	10	0,2	2	26,2	10	39,8163738	36,89103666
1	11	0,2	2,2	26,33333333	11	39,80007419	36,89877718
1	12	0,2	2,4	26,46666667	12	39,78395432	36,90640817
1	13	0,2	2,6	26,6	13	39,76800908	36,91393389

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	14	0,2	2,8	26,73333333	14	39,75223556	36,92135644
1	15	0,2	3	26,86666667	15	39,73663202	36,92867676
1	16	0,2	3,2	27	16	39,72119731	36,93589521
1	17	0,2	3,4	27,13333333	17	39,70593063	36,94301178
1	18	0,2	3,6	27,26666667	18	39,69083135	36,95002632
1	19	0,2	3,8	27,4	19	39,67589892	36,95693857
1	20	0,2	4	27,53333333	20	39,66113287	36,96374822
1	21	0,2	4,2	27,66666667	21	39,64653275	36,97045495
1	22	0,2	4,4	27,8	22	39,63209811	36,9770584
1	23	0,2	4,6	27,93333333	23	39,61782851	36,98355822
1	24	0,2	4,8	28,06666667	24	39,60372354	36,98995403
1	25	0,2	5	28,2	25	39,58978275	36,99624549
1	26	0,2	5,2	28,33333333	26	39,57600574	37,00243223
1	27	0,2	5,4	28,46666667	27	39,56239206	37,00851389
1	28	0,2	5,6	28,6	28	39,5489413	37,01449011
1	29	0,2	5,8	28,73333333	29	39,53565303	37,02036051
1	30	0,2	6	28,86666667	30	39,52252682	37,02612474
1	31	0,2	6,2	29	31	39,50956227	37,03178243
1	32	0,2	6,4	29,13333333	32	39,49675894	37,0373332
1	33	0,2	6,6	29,26666667	33	39,48411644	37,04277668
1	34	0,2	6,8	29,4	34	39,47163433	37,0481125
1	35	0,2	7	29,53333333	35	39,4593122	37,0533403
1	36	0,2	7,2	29,66666667	36	39,44714965	37,05845969
1	37	0,2	7,4	29,8	37	39,43514626	37,0634703
1	38	0,2	7,6	29,93333333	38	39,42330161	37,06837176
1	39	0,2	7,8	30,06666667	39	39,41161531	37,07316367
1	40	0,2	8	30,2	40	39,40008697	37,07784564
1	41	0,2	8,2	30,33333333	41	39,38871624	37,08241724
1	42	0,2	8,4	30,46666667	42	39,37750281	37,08687797
1	43	0,2	8,6	30,6	43	39,36644653	37,09122721
1	44	0,2	8,8	30,73333333	44	39,35554745	37,09546412
1	45	0,2	9	30,86666667	45	39,34480608	37,09958738
1	46	0,2	9,2	31	46	39,33422383	37,10359479
1	47	0,2	9,4	31,13333333	47	39,3238038	37,10748244
1	48	0,2	9,6	31,26666667	48	39,31355244	37,11124301
1	49	0,2	9,8	31,4	49	39,30348318	37,11486217
1	50	0,2	10	31,53333333	50	39,29362319	37,11831172
1	51	0,2	10,2	31,66666667	51	39,28403092	37,12153192
1	52	0,2	10,4	31,8	52	39,27336047	37,12442513
1	53	0,2	10,6	31,93333333	53	39,2618746	37,12735012
1	54	0,2	10,8	32,06666667	54	39,24971538	37,1302252
1	55	0,2	11	32,2	55	39,23698734	37,13300146
1	56	0,2	11,2	32,33333333	56	39,22377403	37,13564748
1	57	0,2	11,4	32,46666667	57	39,21014475	37,13814275
1	58	0,2	11,6	32,6	58	39,19615766	37,14047454
1	59	0,2	11,8	32,73333333	59	39,18186086	37,14263696
1	60	0,2	12	32,86666667	60	39,16729188	37,1446315
1	61	0,2	12,2	33	61	39,15247467	37,14647023
1	62	0,2	12,4	33,13333333	62	39,13797057	37,1481786
1	63	0,2	12,6	33,26666667	63	39,12374225	37,14971358
1	64	0,2	12,8	33,4	64	39,10977677	37,15108531
1	65	0,2	13	33,53333333	65	39,09606769	37,15229754
1	66	0,2	13,2	33,66666667	66	39,08261122	37,15335141

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη Διπλωματική Διατριβή

1	67	0,2	13,4	33,8	67	39,0694046	37,15424706
1	68	0,2	13,6	33,93333333	68	39,05644515	37,15498456
1	69	0,2	13,8	34,06666667	69	39,04372981	37,15556438
1	70	0,2	14	34,2	70	39,03125472	37,15598784
1	71	0,2	14,2	34,33333333	71	39,01901484	37,15625744
1	72	0,2	14,4	34,46666667	72	39,00700359	37,15637732
1	73	0,2	14,6	34,6	73	38,99521242	37,15635367
1	74	0,2	14,8	34,73333333	74	38,98363013	37,15619539
1	75	0,2	15	34,86666667	75	38,97224191	37,1559152
1	76	0,2	15,2	35	76	38,96102727	37,15553167
1	77	0,2	15,4	35,00606061	77	38,94995567	37,15507379
1	78	0,2	15,6	35,01212121	78	38,93899691	37,15457054
1	79	0,2	15,8	35,01818182	79	38,92813156	37,15404045
1	80	0,2	16	35,02424242	80	38,9173463	37,15349616
1	81	0,2	16,2	35,03030303	81	38,90663166	37,15294661
1	82	0,2	16,4	35,03636364	82	38,89598084	37,15239813
1	83	0,2	16,6	35,04242424	83	38,88538894	37,15185526
1	84	0,2	16,8	35,04848485	84	38,87485243	37,15132122
1	85	0,2	17	35,05454545	85	38,86436875	37,15079826
1	86	0,2	17,2	35,06060606	86	38,8539361	37,15028796
1	87	0,2	17,4	35,06666667	87	38,84355316	37,14979138
1	88	0,2	17,6	35,07272727	88	38,83321902	37,14930921
1	89	0,2	17,8	35,07878788	89	38,82293299	37,14884191
1	90	0,2	18	35,08484848	90	38,8126946	37,14838976
1	91	0,2	18,2	35,09090909	91	38,80250347	37,14795292
1	92	0,2	18,4	35,0969697	92	38,79235931	37,14753148
1	93	0,2	18,6	35,1030303	93	38,7822619	37,14712547
1	94	0,2	18,8	35,10909091	94	38,77221104	37,14673487
1	95	0,2	19	35,11515152	95	38,76220655	37,14635968
1	96	0,2	19,2	35,12121212	96	38,75224828	37,14599983
1	97	0,2	19,4	35,12727273	97	38,74233608	37,1456553
1	98	0,2	19,6	35,13333333	98	38,73246981	37,14532601
1	99	0,2	19,8	35,13939394	99	38,72264932	37,14501192
1	100	0,2	20	35,14545455	100	38,71287449	37,14471297
1	101	0,2	20,2	35,15151515	101	38,70314517	37,14442909
1	102	0,2	20,4	35,15757576	102	38,69346123	37,14416023
1	103	0,2	20,6	35,16363636	103	38,68382254	37,14390632
1	104	0,2	20,8	35,16969697	104	38,67422897	37,1436673
1	105	0,2	21	35,17575758	105	38,66468039	37,14344311
1	106	0,2	21,2	35,18181818	106	38,65517666	37,14323369
1	107	0,2	21,4	35,18787879	107	38,64571767	37,14303896
.
.

6.4 Συνεχής λειτουργία του Κ.Γ.Ε για ψύξη σε χρονικό διάστημα τριάντα (30) ημερών (στις ίδιες συνθήκες με αυτές της παραγράφου 6.3)**ΨΥΞΗ**

Αριθμός Χρονικών Μονάδων «m» :	30
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «YY» (m) :	70
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	8
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «w» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	40
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Targ» (°C) :	25
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/mK) :	0,8
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,2
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4179
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,25
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C):	500
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK) :	0,41
Παράγων Στάθμισης Μεταβολής Θερμοκρασίας Εξίσωσης Π.Δ. «F» :	1
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	86400
Κατ'όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» (J/m ³ °C):	1400000

Για τα παραπάνω δεδομένα τα αποτελέσματα αφορούν ένα σύνολο τιμών 15.047 θερμοκρασιών εδάφους και 702 τιμών θερμοκρασιών νερού. Συνεπώς θα απαιτούνταν αντίστοιχα πίνακας αποτελεσμάτων 15.047 γραμμών δηλ. περίπου 237 σελίδες Α4 με γραμματοσειρά Arial 8. Για αυτόν τον λόγο παρουσιάζεται ακολούθως ένα μόνο μέρος τους:

ΑΡΧΕΙΟ 13-1ΑΗ.DAT

Δείκτης Οριζόντιας Κατεύθυνσης	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Οριζόντια Απόσταση (m)	Βάθος (m)	Θερμοκρασία Εδάφους (°C) (Θέσεις Κόμβων)	Δείκτης Κατακόρυφης Κατεύθυνσης	Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής (°C)	Θερμοκρασία Νερού Επιστροφής (°C)
i	j	i*DX	j*DY	T(i,j)	j	TA(j)	TR(j)
1	1	0,2	0,2	25	1	40	37,12080265
1	2	0,2	0,4	25,13333333	2	39,96455354	37,14788211
1	3	0,2	0,6	25,26666667	3	39,94069323	37,1635253
1	4	0,2	0,8	25,4	4	39,92097379	37,17513167
1	5	0,2	1	25,53333333	5	39,90297616	37,18510332
1	6	0,2	1,2	25,66666667	6	39,88581893	37,19431439
1	7	0,2	1,4	25,8	7	39,86914513	37,2031182
1	8	0,2	1,6	25,93333333	8	39,85279666	37,21167067
1	9	0,2	1,8	26,06666667	9	39,83669828	37,22004559
1	10	0,2	2	26,2	10	39,82081208	37,22827972
1	11	0,2	2,2	26,33333333	11	39,80511805	37,23639206
1	12	0,2	2,4	26,46666667	12	39,78960522	37,24439273
1	13	0,2	2,6	26,6	13	39,77426733	37,25228712
1	14	0,2	2,8	26,73333333	14	39,75910064	37,26007816
1	15	0,2	3	26,86666667	15	39,74410285	37,26776735
1	16	0,2	3,2	27	16	39,72927243	37,27535544

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	17	0,2	3,4	27,13333333	17	39,71460831	37,28284269
1	18	0,2	3,6	27,26666667	18	39,70010968	37,29022913
1	19	0,2	3,8	27,4	19	39,68577589	37,29751464
1	20	0,2	4	27,53333333	20	39,67160639	37,304699
1	21	0,2	4,2	27,66666667	21	39,65760066	37,31178192
1	22	0,2	4,4	27,8	22	39,64375824	37,31876311
1	23	0,2	4,6	27,93333333	23	39,63007868	37,32564223
1	24	0,2	4,8	28,06666667	24	39,61656153	37,33241894
1	25	0,2	5	28,2	25	39,60320637	37,3390929
1	26	0,2	5,2	28,33333333	26	39,59001277	37,34566375
1	27	0,2	5,4	28,46666667	27	39,57698032	37,35213113
1	28	0,2	5,6	28,6	28	39,56410858	37,35849469
1	29	0,2	5,8	28,73333333	29	39,55139716	37,36475407
1	30	0,2	6	28,86666667	30	39,53884562	37,37090891
1	31	0,2	6,2	29	31	39,52645357	37,37695883
1	32	0,2	6,4	29,13333333	32	39,51422058	37,38290348
1	33	0,2	6,6	29,26666667	33	39,50214625	37,38874249
1	34	0,2	6,8	29,4	34	39,49023018	37,39447547
1	35	0,2	7	29,53333333	35	39,47847198	37,40010206
1	36	0,2	7,2	29,66666667	36	39,46687125	37,40562186
1	37	0,2	7,4	29,8	37	39,45542763	37,41103446
1	38	0,2	7,6	29,93333333	38	39,44414078	37,41633942
1	39	0,2	7,8	30,06666667	39	39,4330104	37,42153627
1	40	0,2	8	30,2	40	39,42203626	37,42662446
1	41	0,2	8,2	30,33333333	41	39,41121825	37,43160332
1	42	0,2	8,4	30,46666667	42	39,40055642	37,43647201
1	43	0,2	8,6	30,6	43	39,39005114	37,44122939
1	44	0,2	8,8	30,73333333	44	39,37970328	37,4458738
1	45	0,2	9	30,86666667	45	39,3695145	37,45040276
1	46	0,2	9,2	31	46	39,35948795	37,45481232
1	47	0,2	9,4	31,13333333	47	39,34962921	37,45909605
1	48	0,2	9,6	31,26666667	48	39,33994837	37,46324298
1	49	0,2	9,8	31,4	49	39,33046384	37,46723369
1	50	0,2	10	31,53333333	50	39,32121045	37,47103223
1	51	0,2	10,2	31,66666667	51	39,31225785	37,4745675
1	52	0,2	10,4	31,8	52	39,30237809	37,47773051
1	53	0,2	10,6	31,93333333	53	39,29184264	37,48091198
1	54	0,2	10,8	32,06666667	54	39,28079235	37,48401897
1	55	0,2	11	32,2	55	39,26932768	37,48699518
1	56	0,2	11,2	32,33333333	56	39,25752596	37,48980489
1	57	0,2	11,4	32,46666667	57	39,24544835	37,49242597
1	58	0,2	11,6	32,6	58	39,23314294	37,49484678
1	59	0,2	11,8	32,73333333	59	39,22064601	37,4970649
1	60	0,2	12	32,86666667	60	39,20798158	37,49908762
1	61	0,2	12,2	33	61	39,19515855	37,500935
1	62	0,2	12,4	33,13333333	62	39,18264601	37,50264225
1	63	0,2	12,6	33,26666667	63	39,17039739	37,50417526
1	64	0,2	12,8	33,4	64	39,1583938	37,50555021
1	65	0,2	13	33,53333333	65	39,14662461	37,50677521
1	66	0,2	13,2	33,66666667	66	39,13508306	37,50785459
1	67	0,2	13,4	33,8	67	39,12376433	37,50879083
1	68	0,2	13,6	33,93333333	68	39,11266442	37,50958557
1	69	0,2	13,8	34,06666667	69	39,10177962	37,51024025
1	70	0,2	14	34,2	70	39,09110605	37,51075648
1	71	0,2	14,2	34,33333333	71	39,0806393	37,51113646
1	72	0,2	14,4	34,46666667	72	39,07037407	37,51138332
1	73	0,2	14,6	34,6	73	39,06030365	37,51150166
1	74	0,2	14,8	34,73333333	74	39,05041919	37,51149831
1	75	0,2	15	34,86666667	75	39,04070853	37,51138352
1	76	0,2	15,2	35	76	39,03115404	37,51117323

Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη

1	77	0,2	15,4	35,00606061	77	39,02172791	37,51089378
1	78	0,2	15,6	35,01212121	78	39,01240255	37,51057169
1	79	0,2	15,8	35,01818182	79	39,00316077	37,51022333
1	80	0,2	16	35,02424242	80	38,99399106	37,50985957
1	81	0,2	16,2	35,03030303	81	38,98488538	37,50948795
1	82	0,2	16,4	35,03636364	82	38,97583795	37,50911383
1	83	0,2	16,6	35,04242424	83	38,96684452	37,50874109
1	84	0,2	16,8	35,04848485	84	38,95790191	37,50837259
1	85	0,2	17	35,05454545	85	38,94900775	37,50801042
1	86	0,2	17,2	35,06060606	86	38,94016021	37,50765615
1	87	0,2	17,4	35,06666667	87	38,93135788	37,50731094
1	88	0,2	17,6	35,07272727	88	38,92259968	37,50697567
1	89	0,2	17,8	35,07878788	89	38,91388473	37,50665098
1	90	0,2	18	35,08484848	90	38,90521236	37,50633736
1	91	0,2	18,2	35,09090909	91	38,89658201	37,50603514
1	92	0,2	18,4	35,0969697	92	38,88799323	37,5057446
1	93	0,2	18,6	35,1030303	93	38,87944565	37,50546592
1	94	0,2	18,8	35,10909091	94	38,87093894	37,50519922
1	95	0,2	19	35,11515152	95	38,86247285	37,5049446
1	96	0,2	19,2	35,12121212	96	38,85404713	37,50470211
1	97	0,2	19,4	35,12727273	97	38,84566157	37,50447176
1	98	0,2	19,6	35,13333333	98	38,83731599	37,50425359
1	99	0,2	19,8	35,13939394	99	38,82901022	37,50404756
1	100	0,2	20	35,14545455	100	38,8207441	37,50385368
1	101	0,2	20,2	35,15151515	101	38,81251748	37,50367191
1	102	0,2	20,4	35,15757576	102	38,80433021	37,50350223
1	103	0,2	20,6	35,16363636	103	38,79618217	37,50334458
1	104	0,2	20,8	35,16969697	104	38,78807321	37,50319893
1	105	0,2	21	35,17575758	105	38,78000321	37,50306524
1	106	0,2	21,2	35,18181818	106	38,77197204	37,50294346
1	107	0,2	21,4	35,18787879	107	38,76397959	37,50283354
.
.

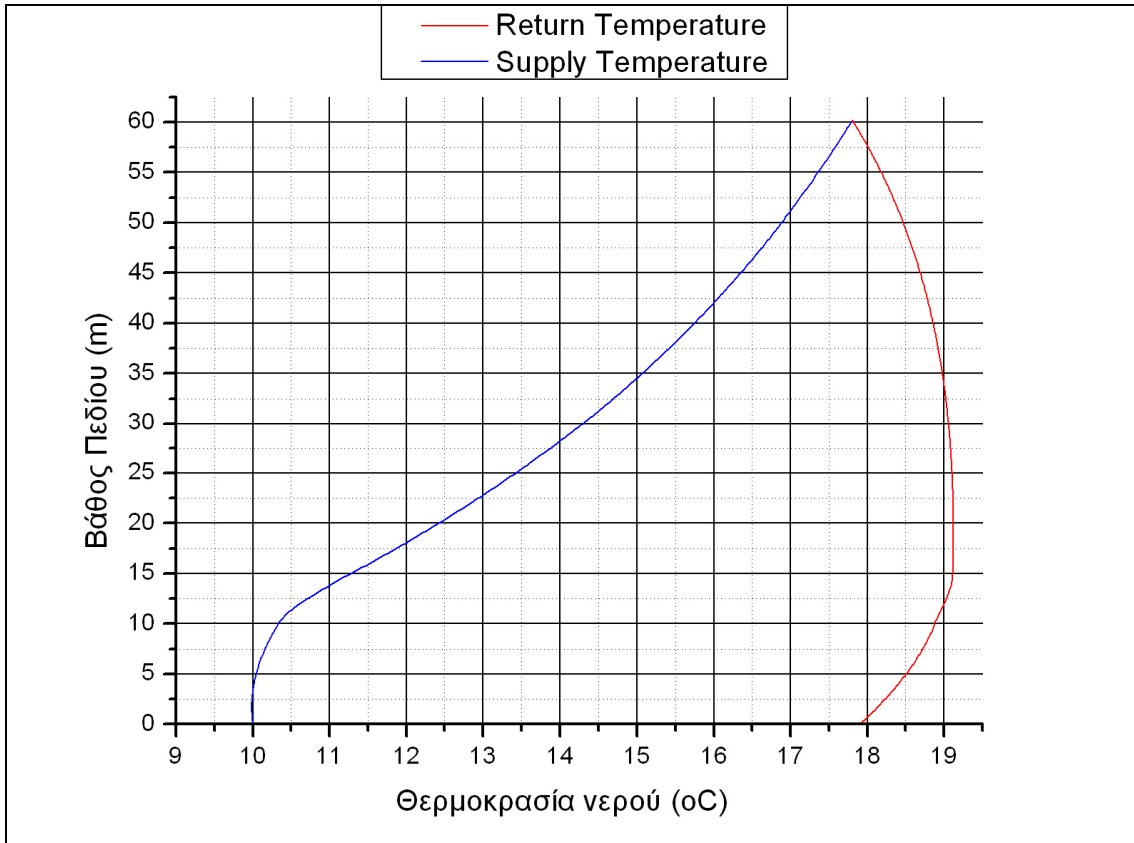
6.5 Χρονική Μεταβολή Θερμοκρασίας Νερού

Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

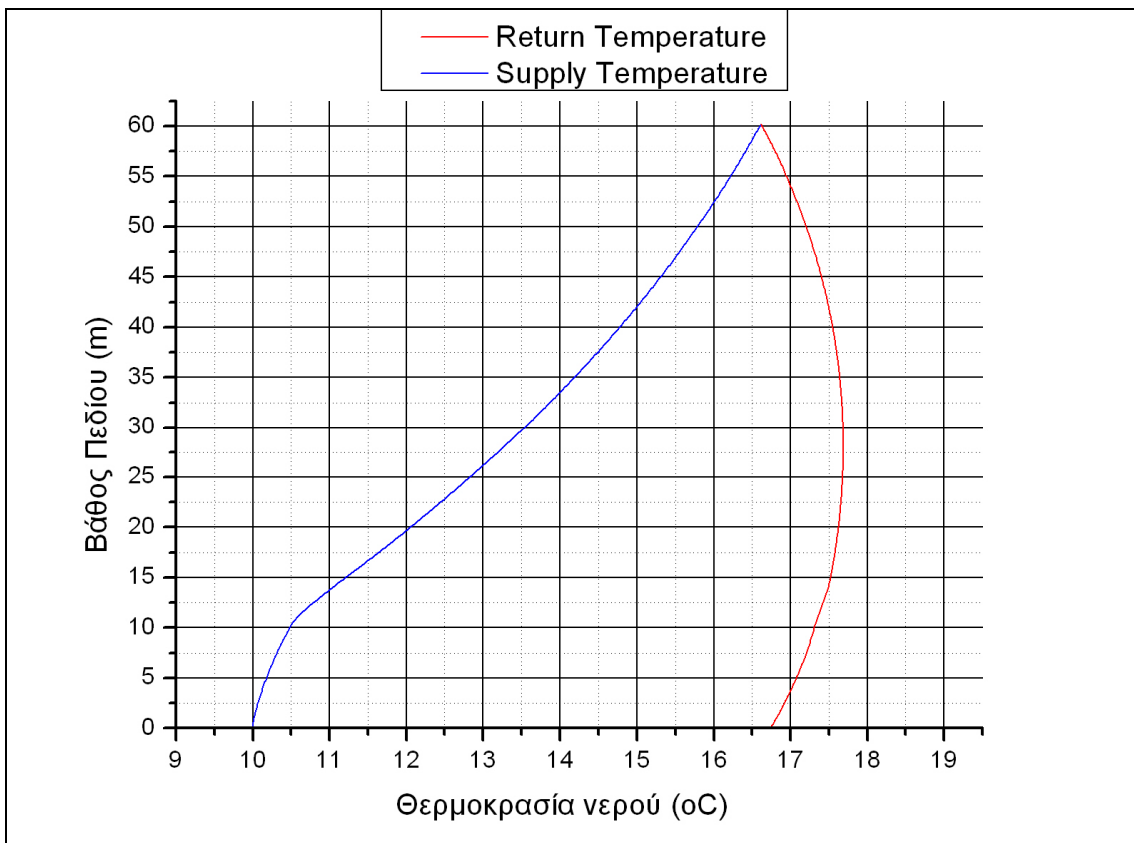
ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς)

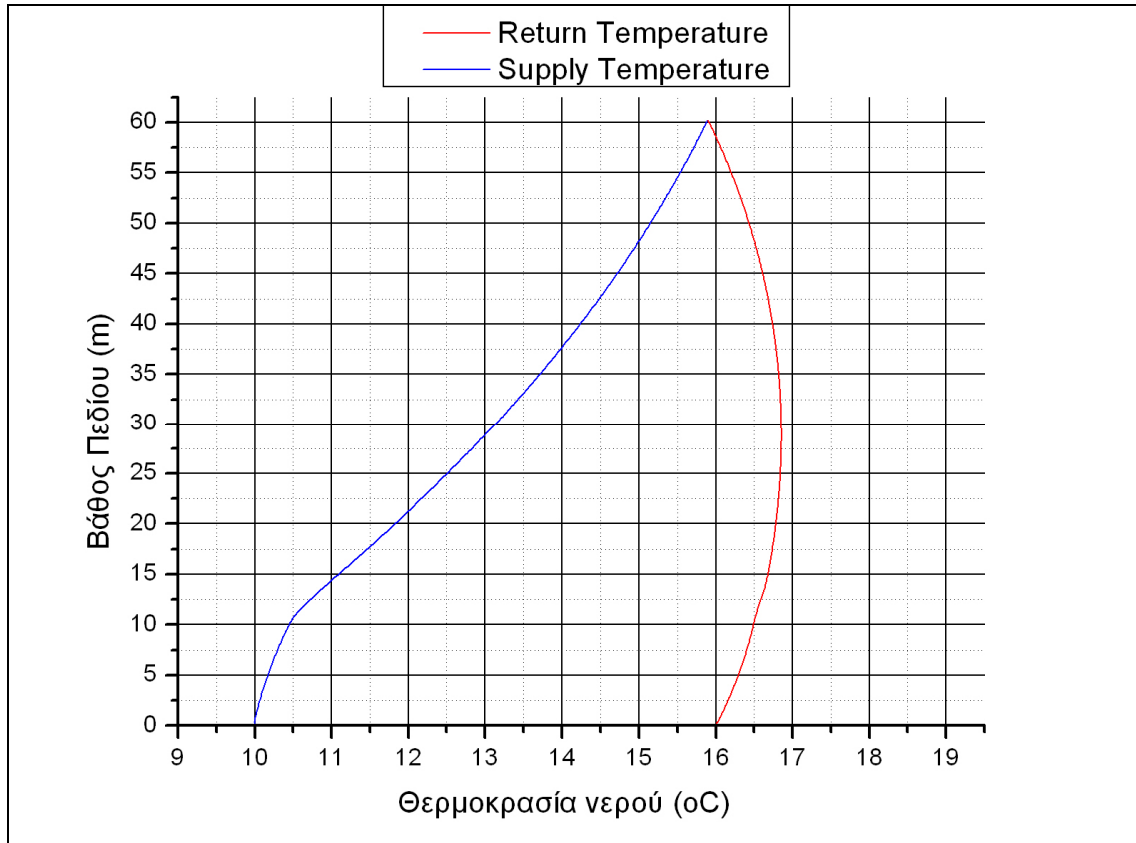
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «YY» (m) :	60
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	8
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	10
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Tαrx» (°C) :	9
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/m°C) :	0,8
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,1
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό ρ=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4193
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,3
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	560
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK):	0,41
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	1 x 86400 = 86400 s = 1 day
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους «RCE» : (J/m ³ °C)	1400000



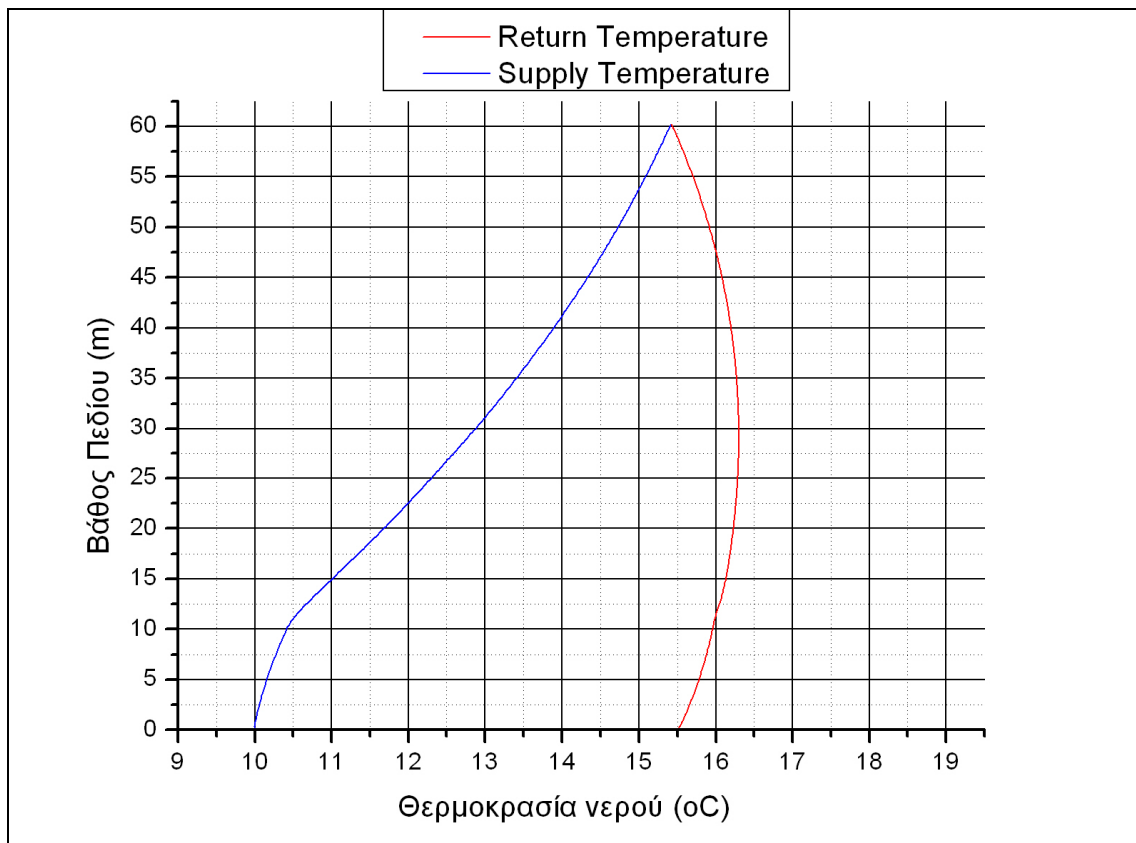
Σχήμα 6.5-1 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 1 ημέρας.



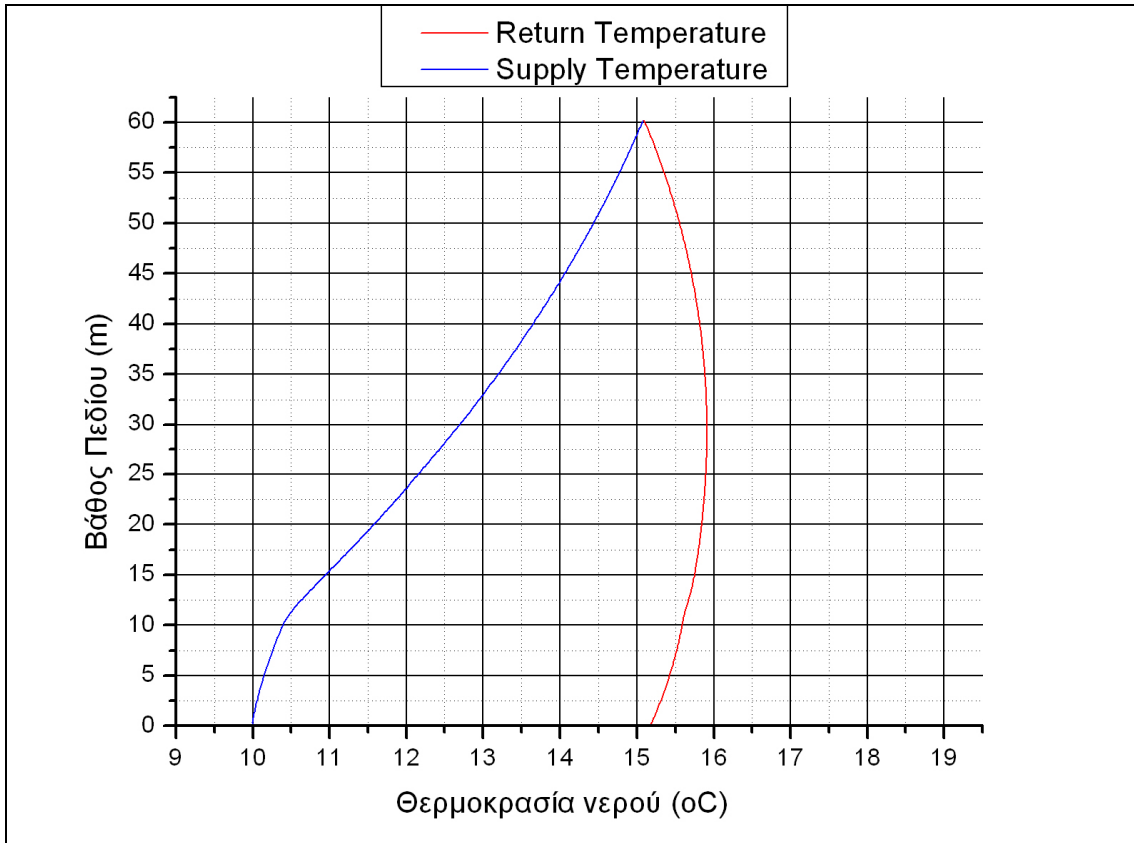
Σχήμα 6.5-2 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 2 ημερών.



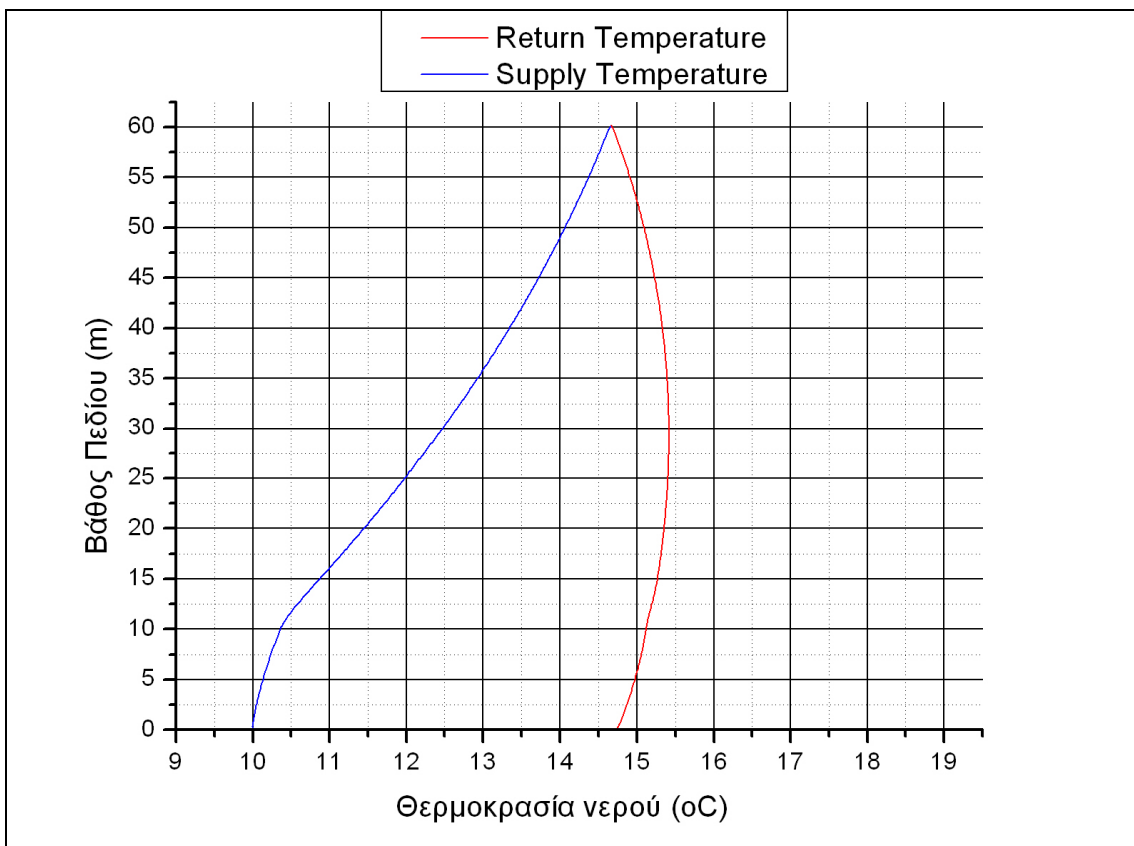
Σχήμα 6.5-3 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 3 ημερών.



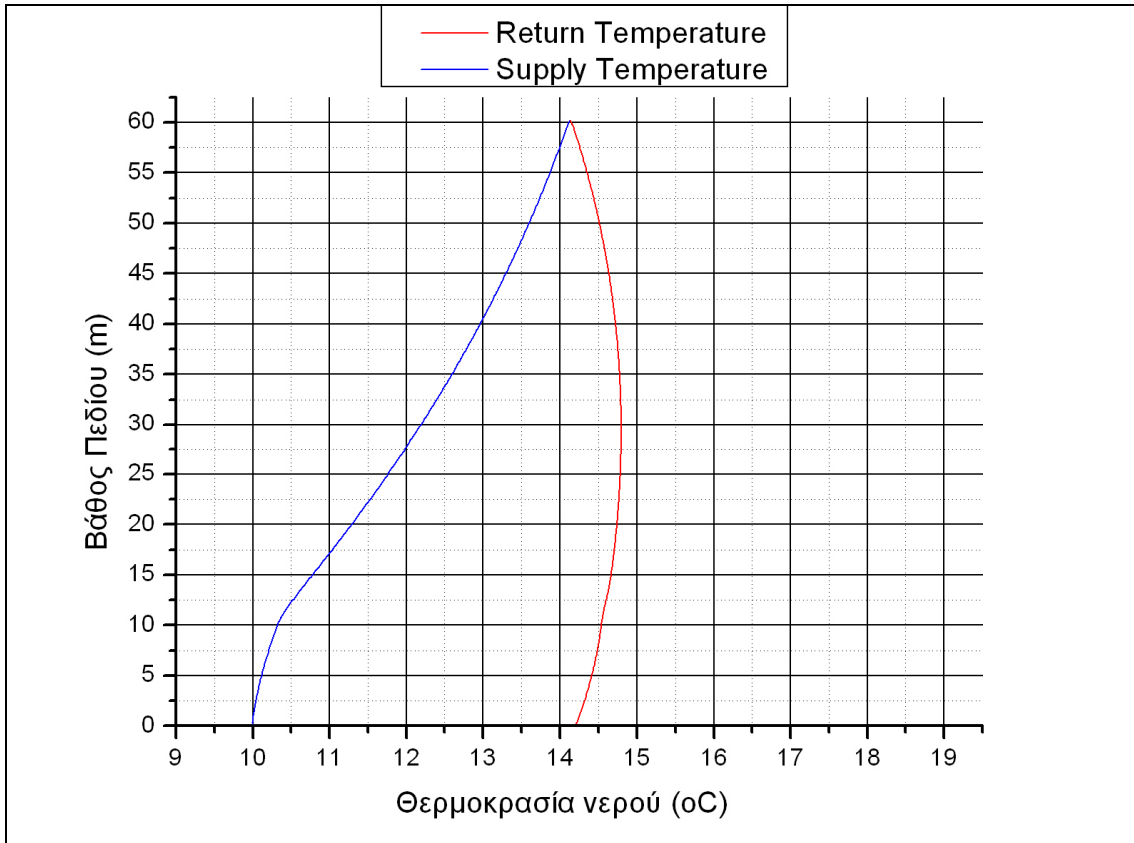
Σχήμα 6.5-4 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 4 ημερών.



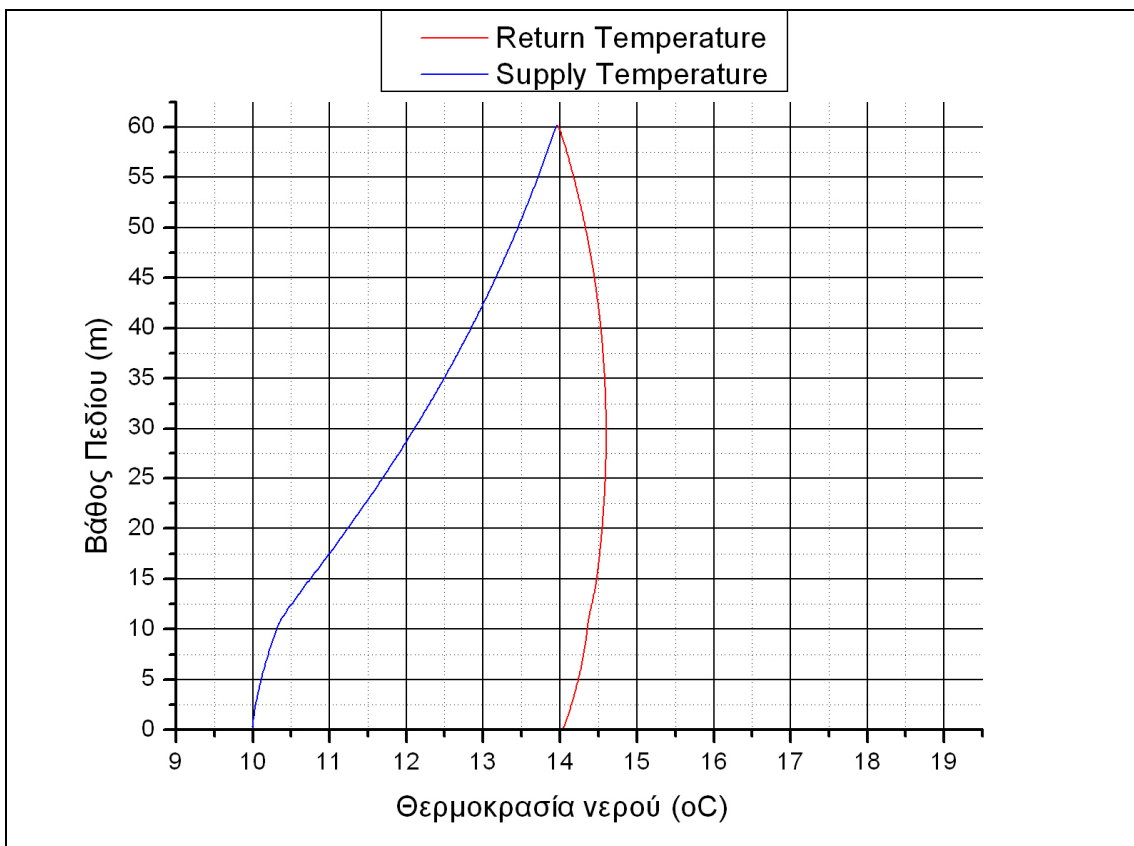
Σχήμα 6.5-5 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 5 ημερών.



Σχήμα 6.5-6 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 7 ημερών.



Σχήμα 6.5-7 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 14 ημερών.



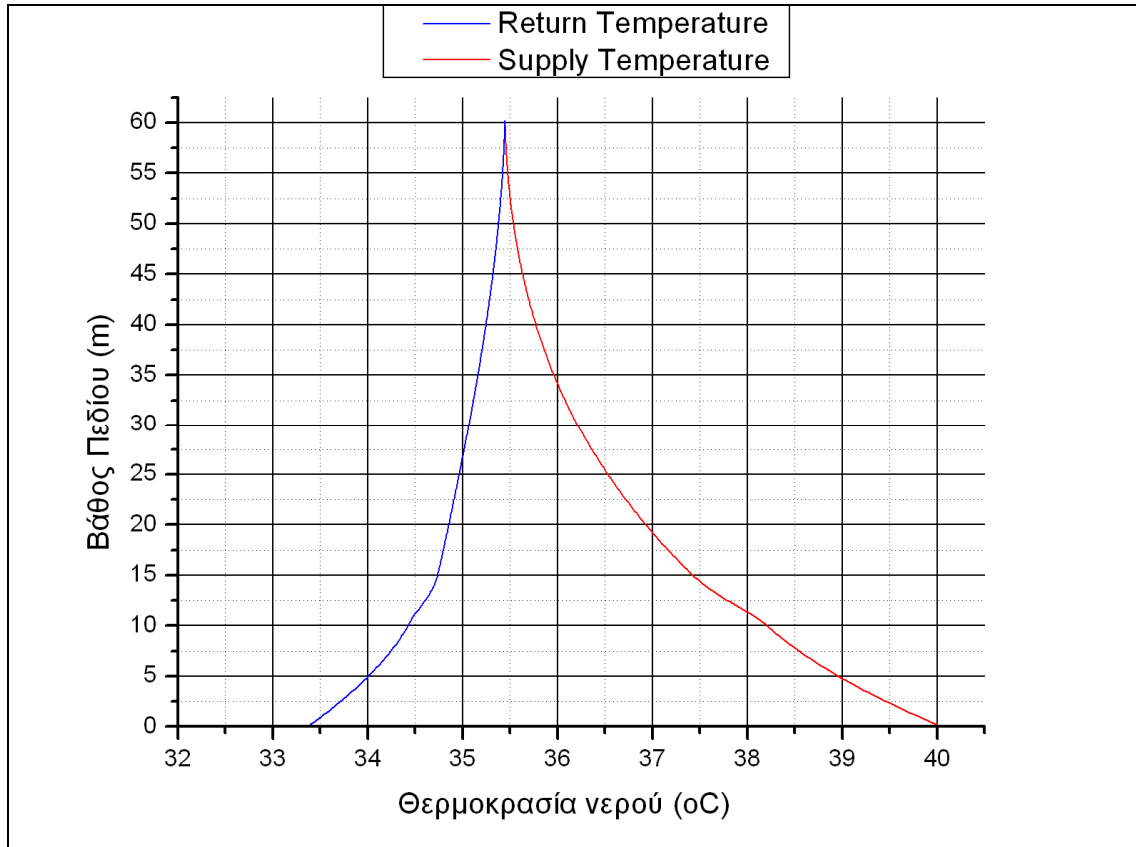
Σχήμα 6.5-8 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 30 ημερών.

Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

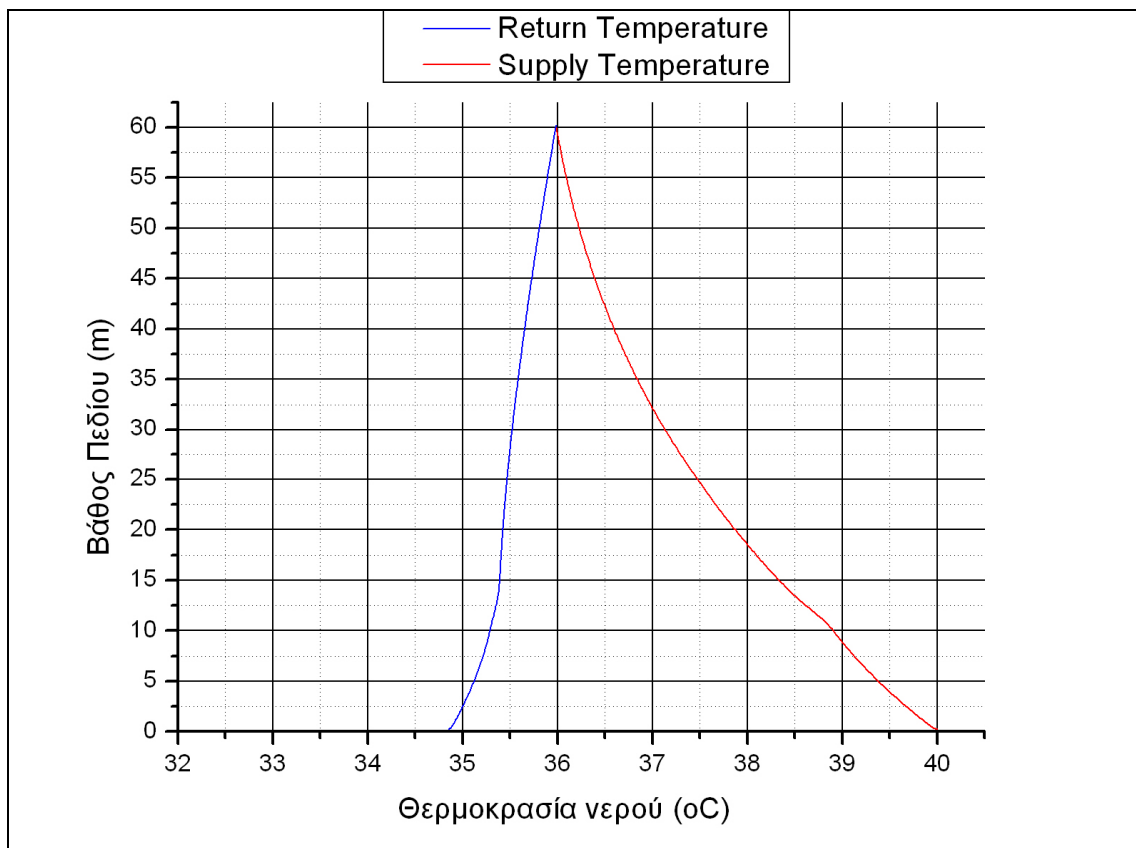
ΨΥΞΗ

Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς)

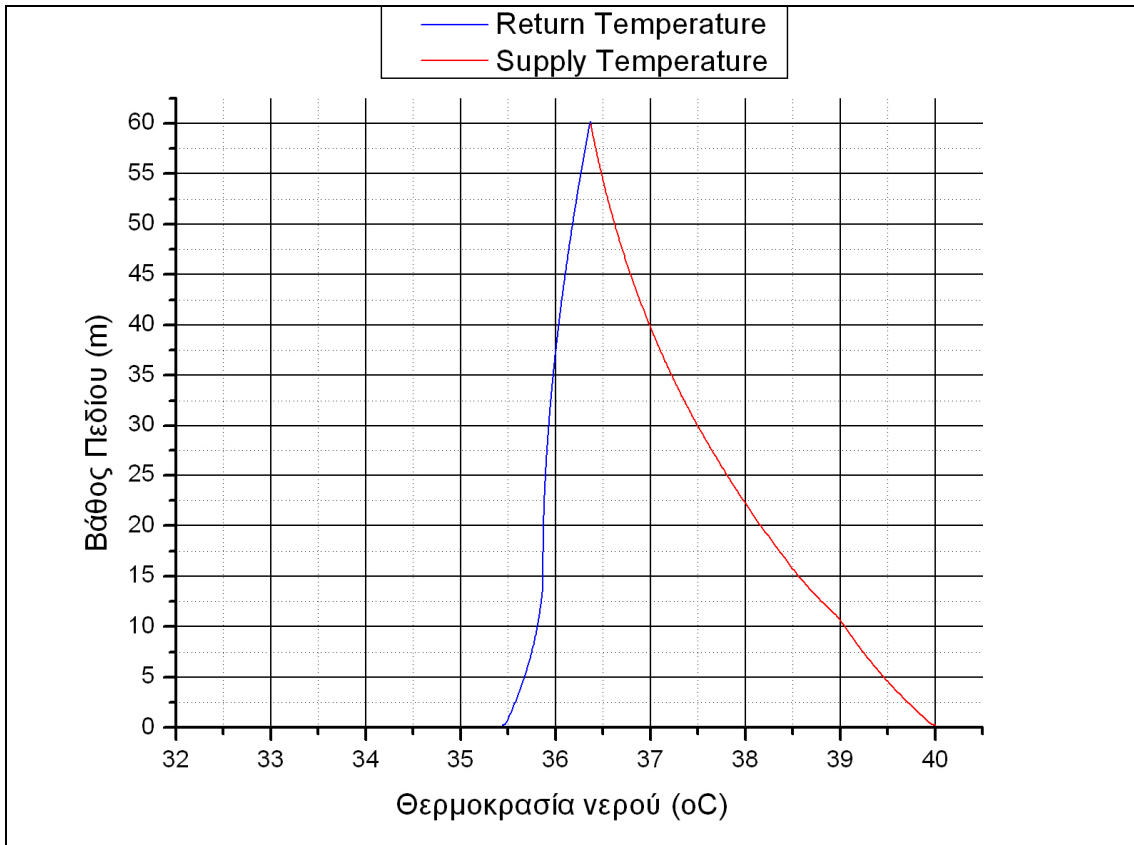
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «ΥΥ» (m) :	60
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	8
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	40
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Targ» (°C) :	24
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/m°C) :	0,8
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,1
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4179
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,3
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	560
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK):	0,41
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	1 x 86400 = 86400 s = 1 day
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους «RCE» : (J/m ³ °C)	1400000



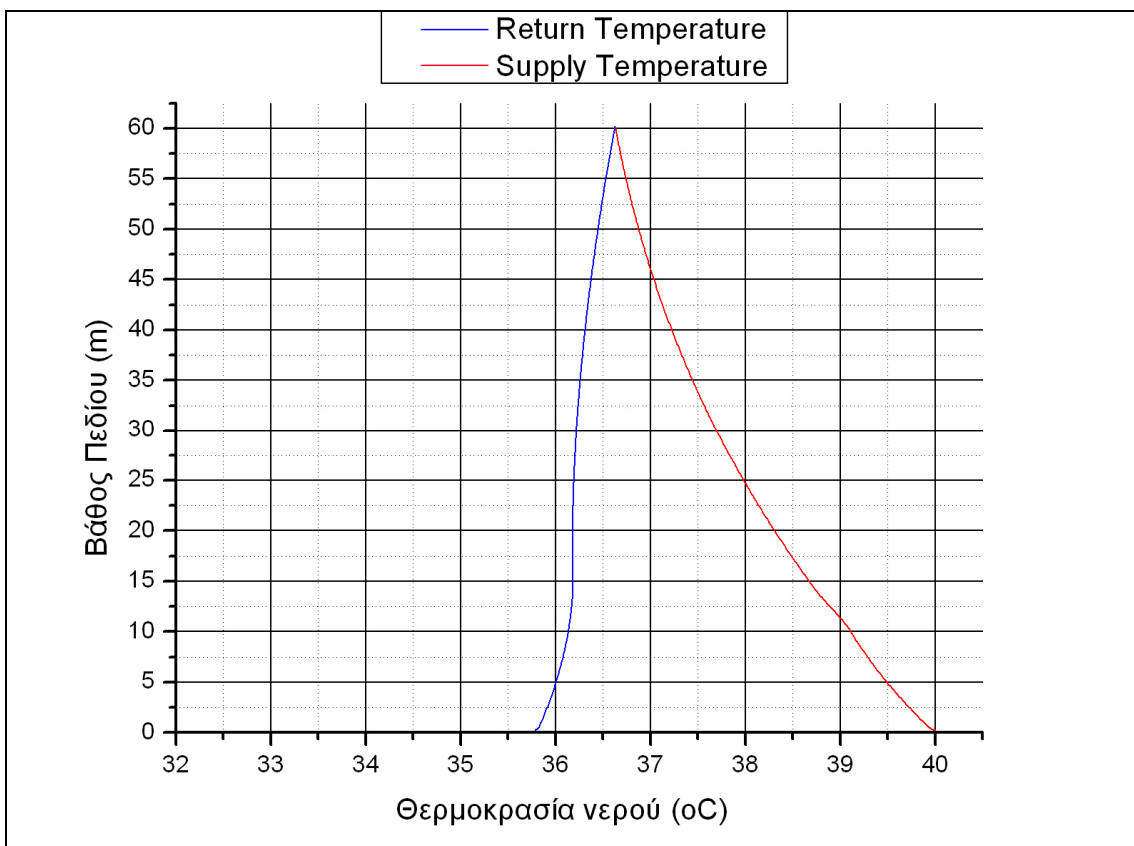
Σχήμα 6.5-9 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 1 ημέρας.



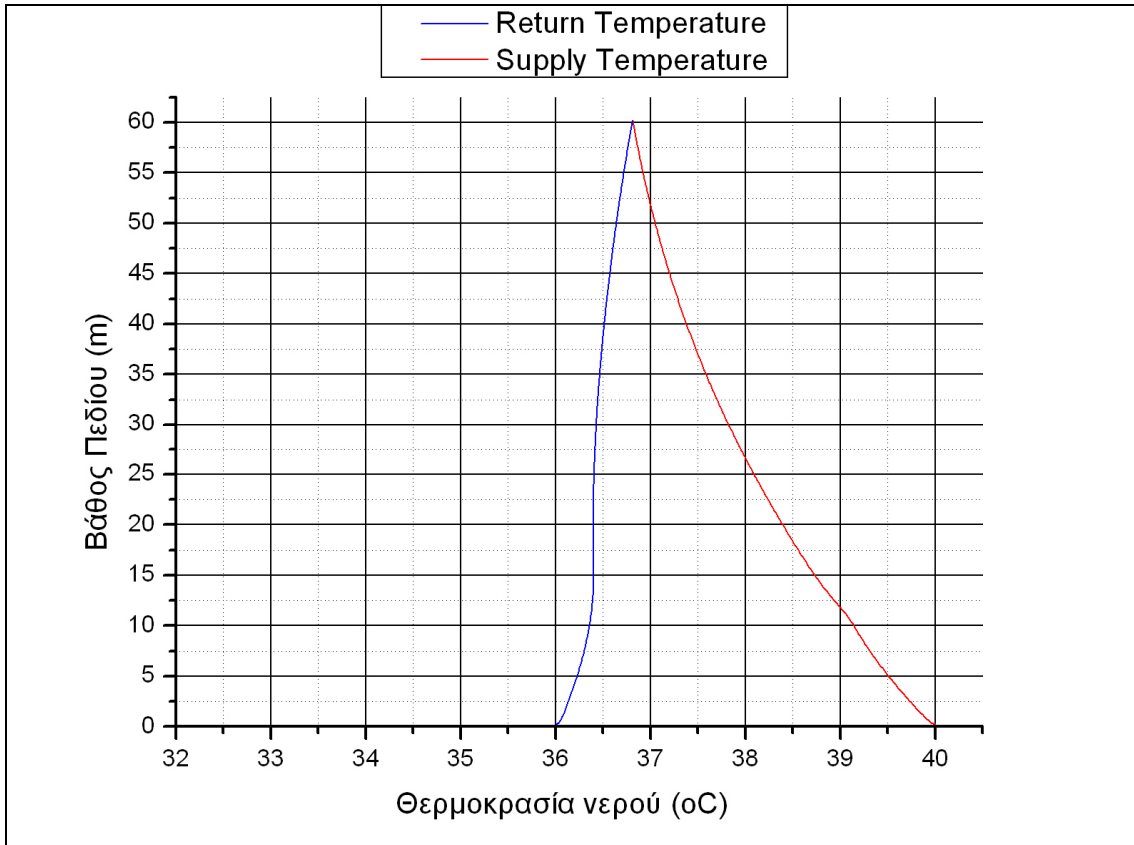
Σχήμα 6.5-10 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 2 ημερών.



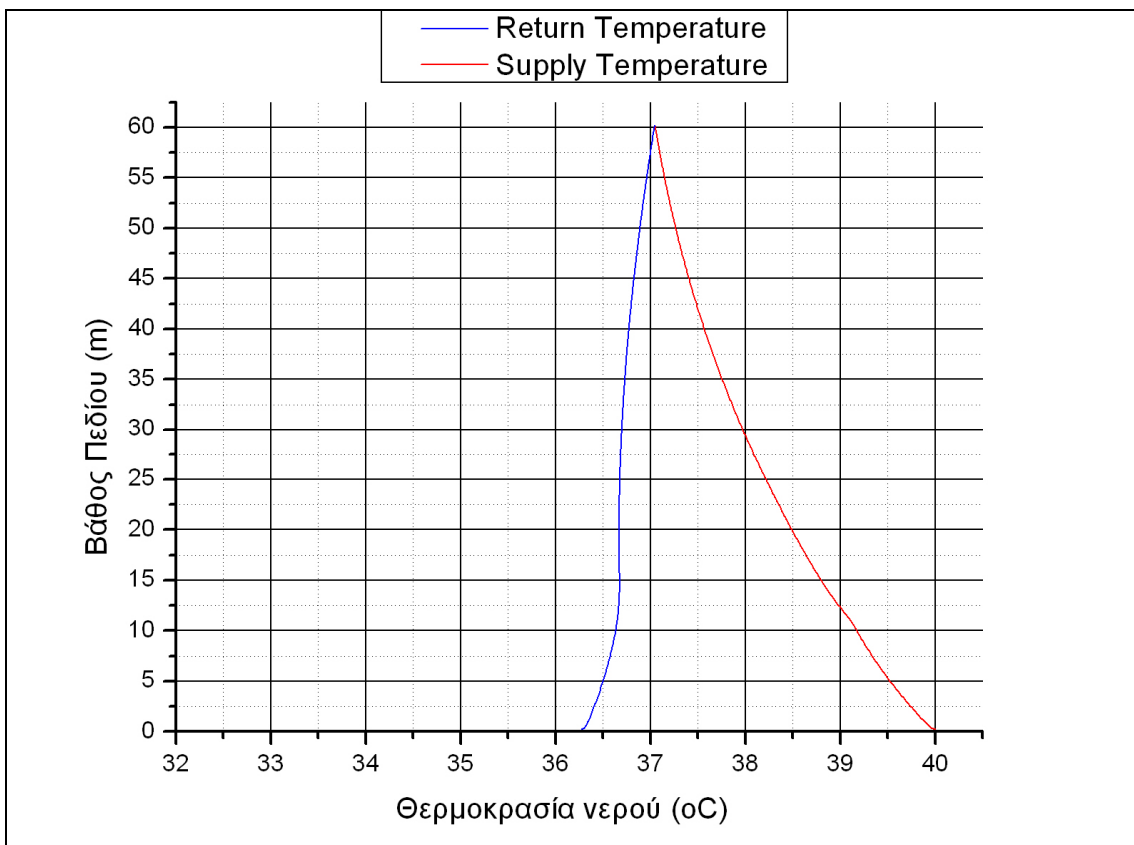
Σχήμα 6.5-11 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 3 ημερών.



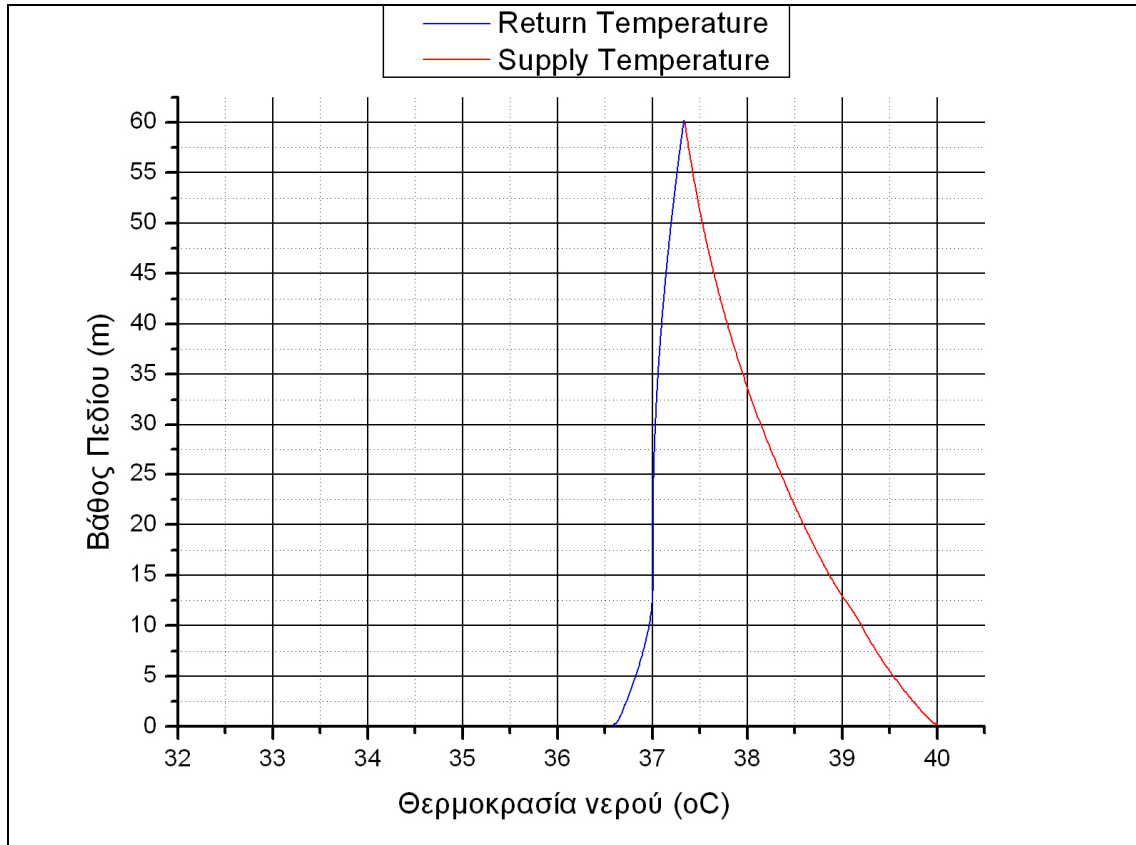
Σχήμα 6.5-12 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 4 ημερών.



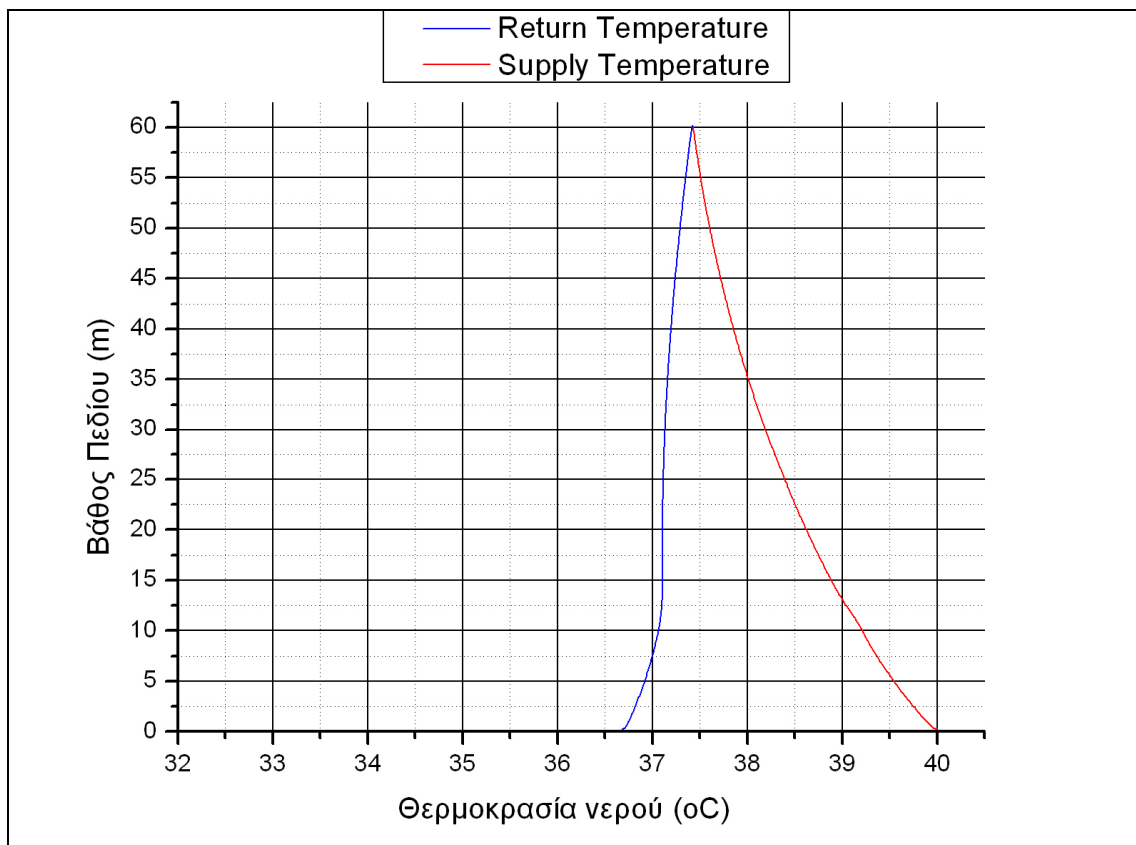
Σχήμα 6.5-13 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 5 ημερών.



Σχήμα 6.5-14 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 7 ημερών.



Σχήμα 6.5-15 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 14 ημερών.

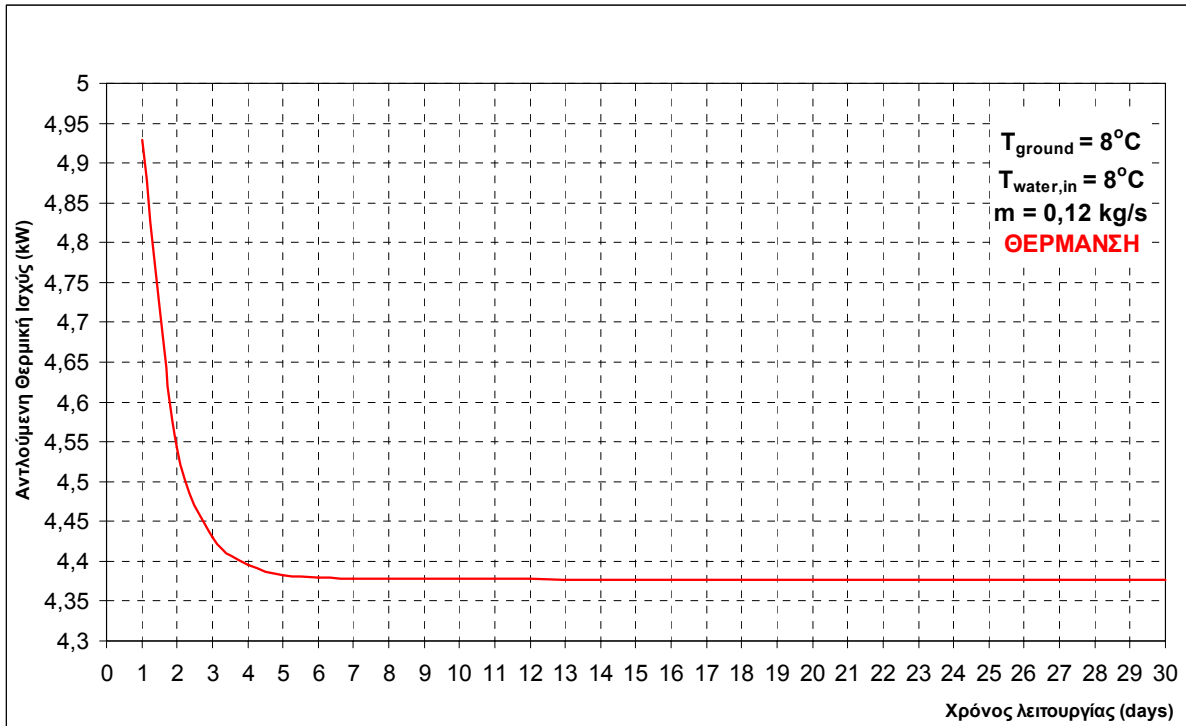


Σχήμα 6.5-16 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Μεταβολή θερμοκρασίας νερού μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 30 ημερών.

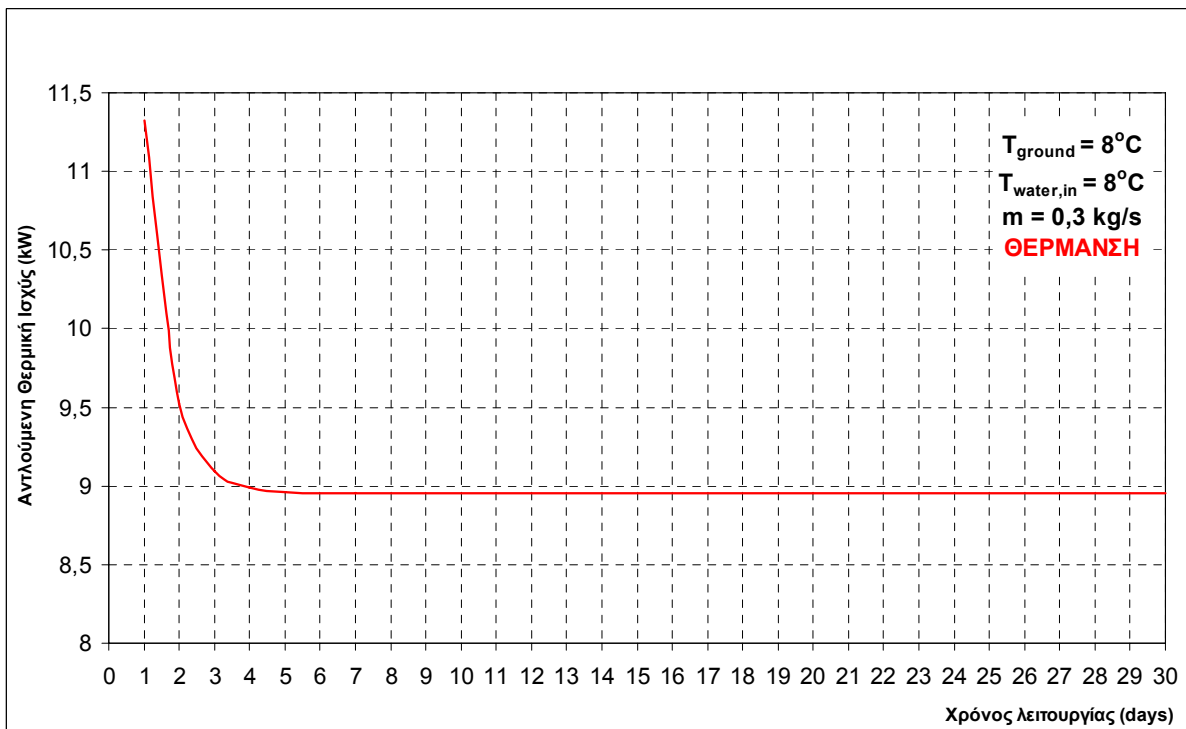
6.6 Θερμική ισχύς συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας για μεταβαλλόμενες τιμές παροχής ανακυκλοφορίας στον Κ.Γ.Ε

Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

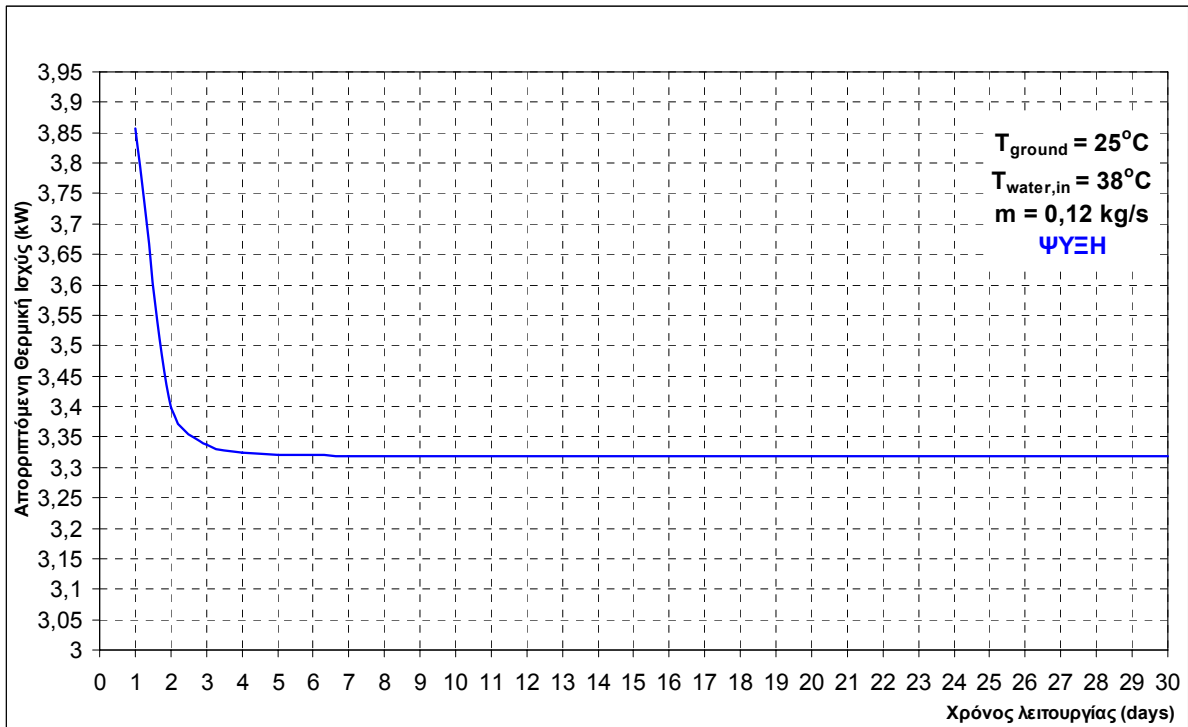
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,5
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,5
Βάθος Γεώτρησης «ΥΥ» (m) :	100
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	13
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/m°C) :	1
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,5
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό ρ=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4185
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	500
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK):	0,41
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	86400
Κατ'όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» : (J/m ³ °C)	2100000



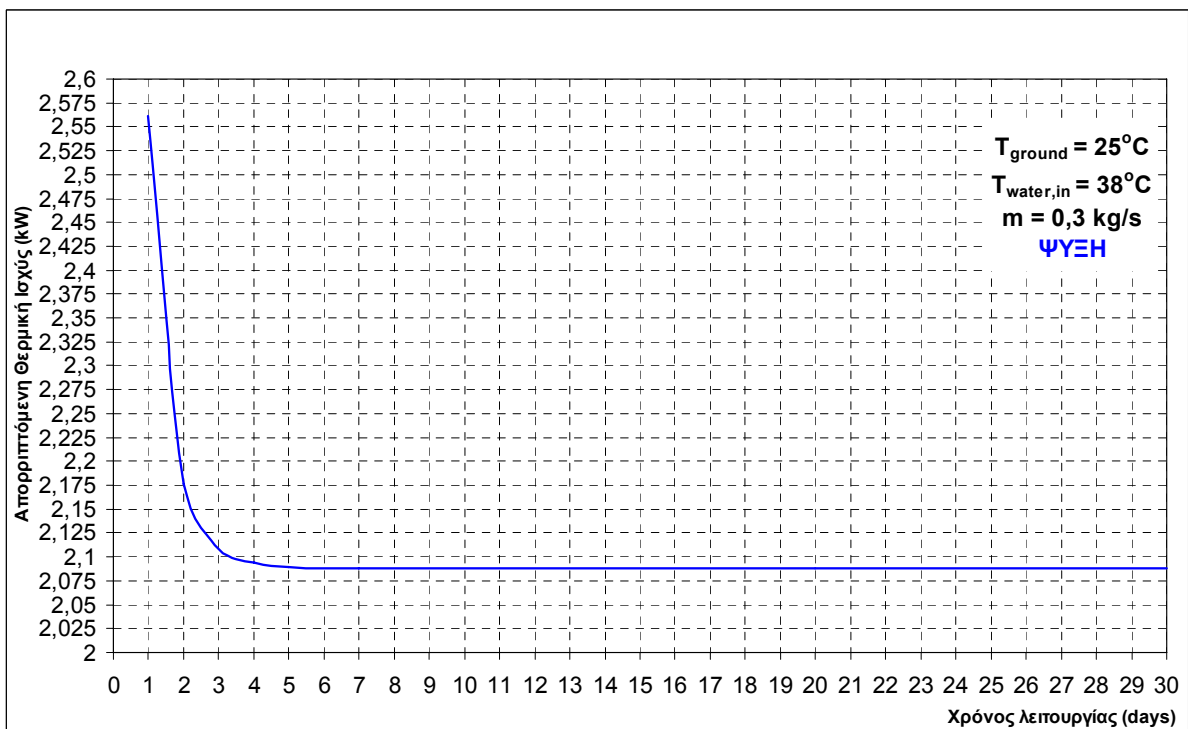
Σχήμα 6.6-1 Αντλούμενη Θερμική Ισχύς για $T_{water,in} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $m = 0,12\text{ kg/s}$



Σχήμα 6.6-2 Αντλούμενη Θερμική Ισχύς για $T_{water,in} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $m = 0,3\text{ kg/s}$



Σχήμα 6.6-3 Απορριπτόμενη Θερμική Ισχύς για $T_{water,in} = 38^{\circ}C$ και $m = 0,12 \text{ kg/s}$

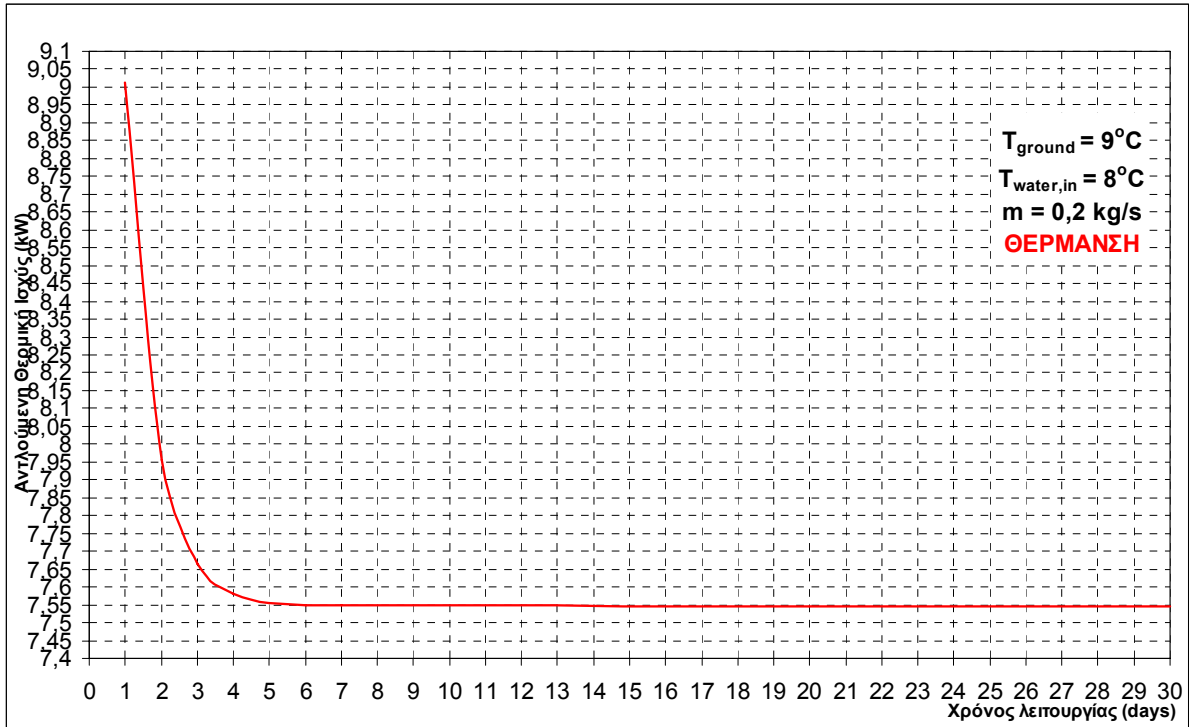


Σχήμα 6.6-3 Απορριπτόμενη Θερμική Ισχύς για $T_{water,in} = 38^{\circ}C$ και $m = 0,3 \text{ kg/s}$

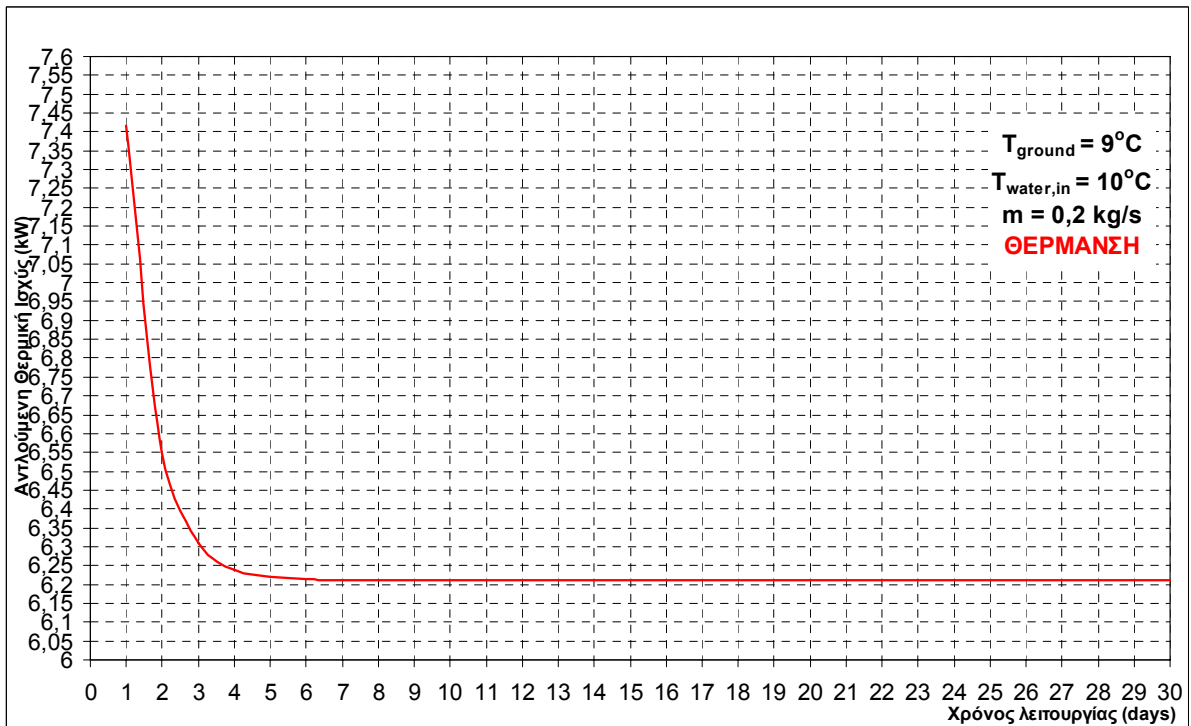
6.7 Θερμική ισχύς συναρτήσει του χρόνου για μεταβαλλόμενες τιμές θερμοκρασίας νερού εισόδου στον Κ.Γ.Ε

Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

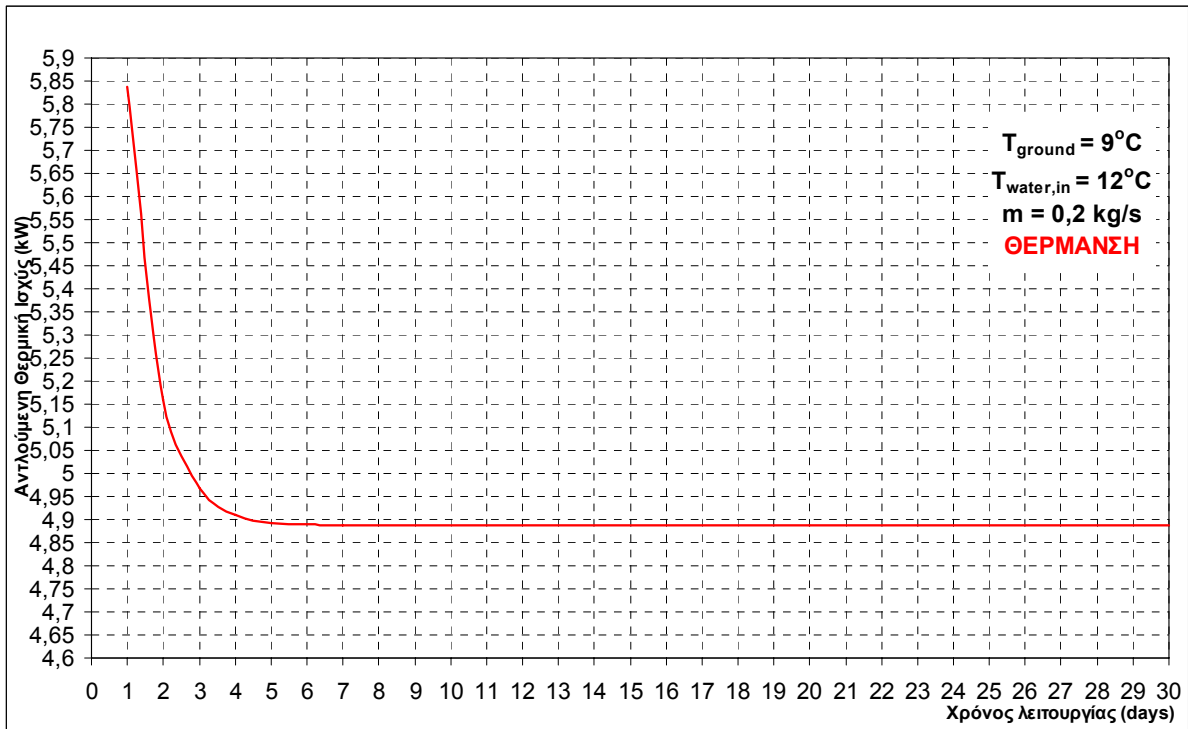
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,5
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,5
Βάθος Γεώτρησης «ΥΥ» (m) :	100
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	13
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/m°C) :	1
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,5
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4185
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	500
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK):	0,41
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	86400
Κατ' όγκον Θερμοχωρητικότητα Εδάφους «RCE» : (J/m ³ °C)	2100000



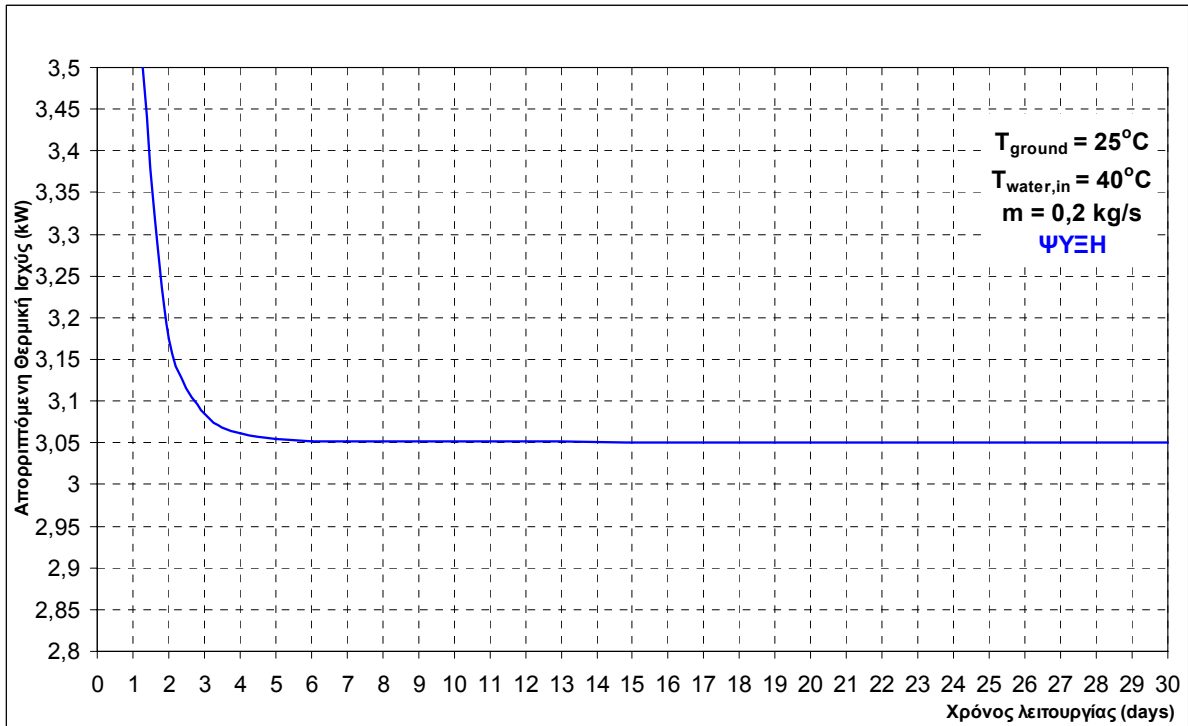
Σχήμα 6.7-1 Αντλούμενη Θερμική Ισχύς για $m = 0,2 \text{ kg/s}$ και $T_{water,in} = 8^{\circ}\text{C}$



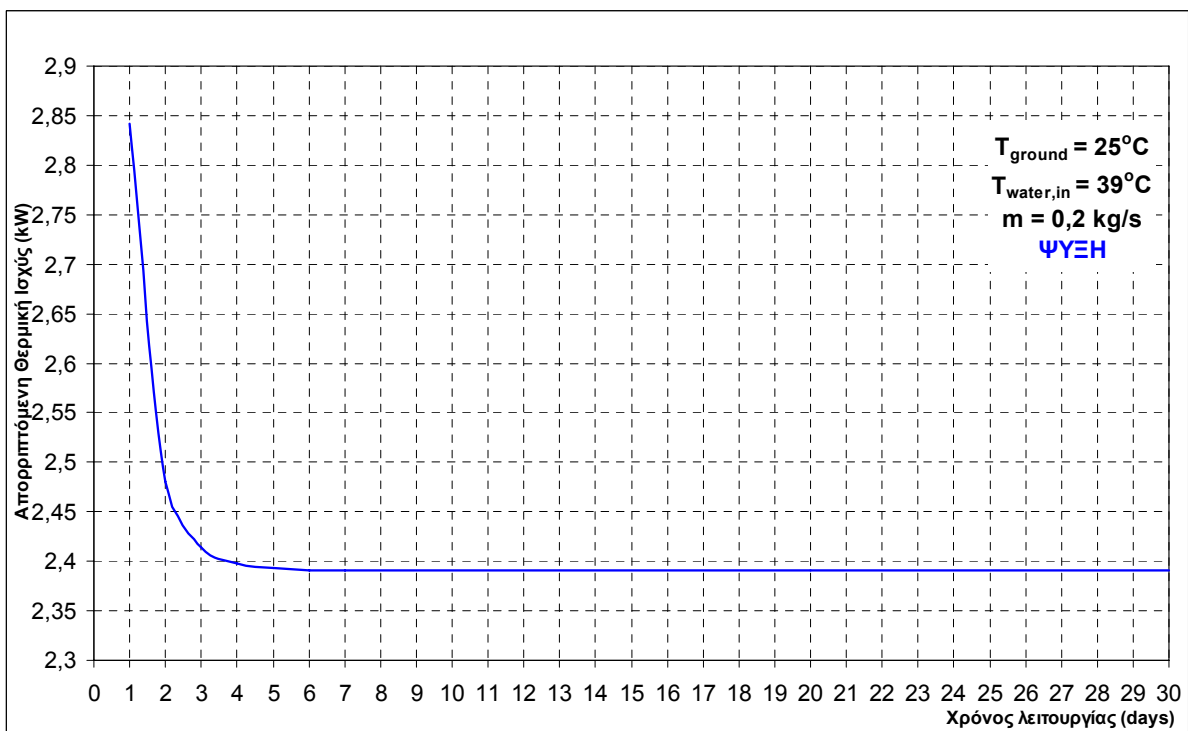
Σχήμα 6.7-2 Αντλούμενη Θερμική Ισχύς για $m = 0,2 \text{ kg/s}$ και $T_{water,in} = 10^{\circ}\text{C}$



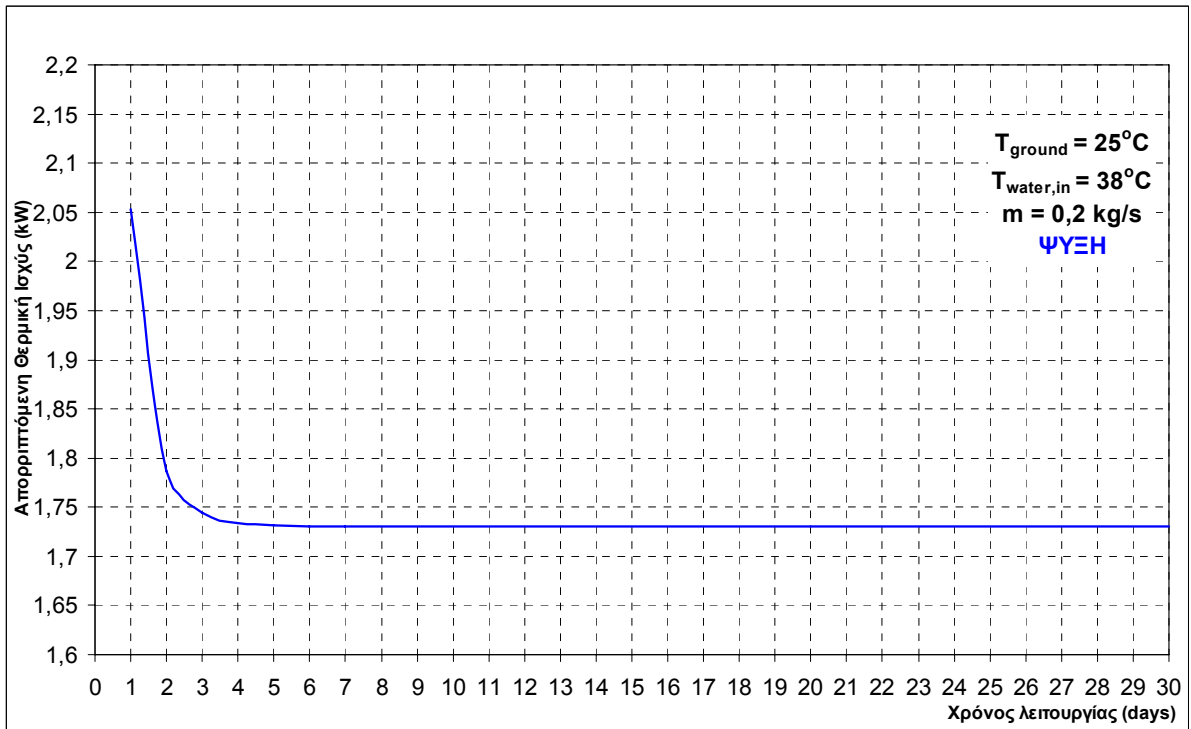
Σχήμα 6.7-3 Αντλούμενη Θερμική Ισχύς για $m = 0,2 \text{ kg/s}$ και $T_{water,in} = 12^{\circ}C$



Σχήμα 6.7-4 Απορριπτόμενη Θερμική Ισχύς για $m = 0,2 \text{ kg/s}$ και $T_{water,in} = 40^{\circ}C$



Σχήμα 6.7-5 Απορριπτόμενη Θερμική Ισχύς για $m = 0,2 \text{ kg/s}$ και $T_{water,in} = 39^{\circ}C$



Σχήμα 6.7-6 Απορριπτόμενη Θερμική Ισχύς για $m = 0,2 \text{ kg/s}$ και $T_{\text{water,in}} = 38^{\circ}\text{C}$

6.8 Θερμική ισχύς συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικά είδη εδάφους

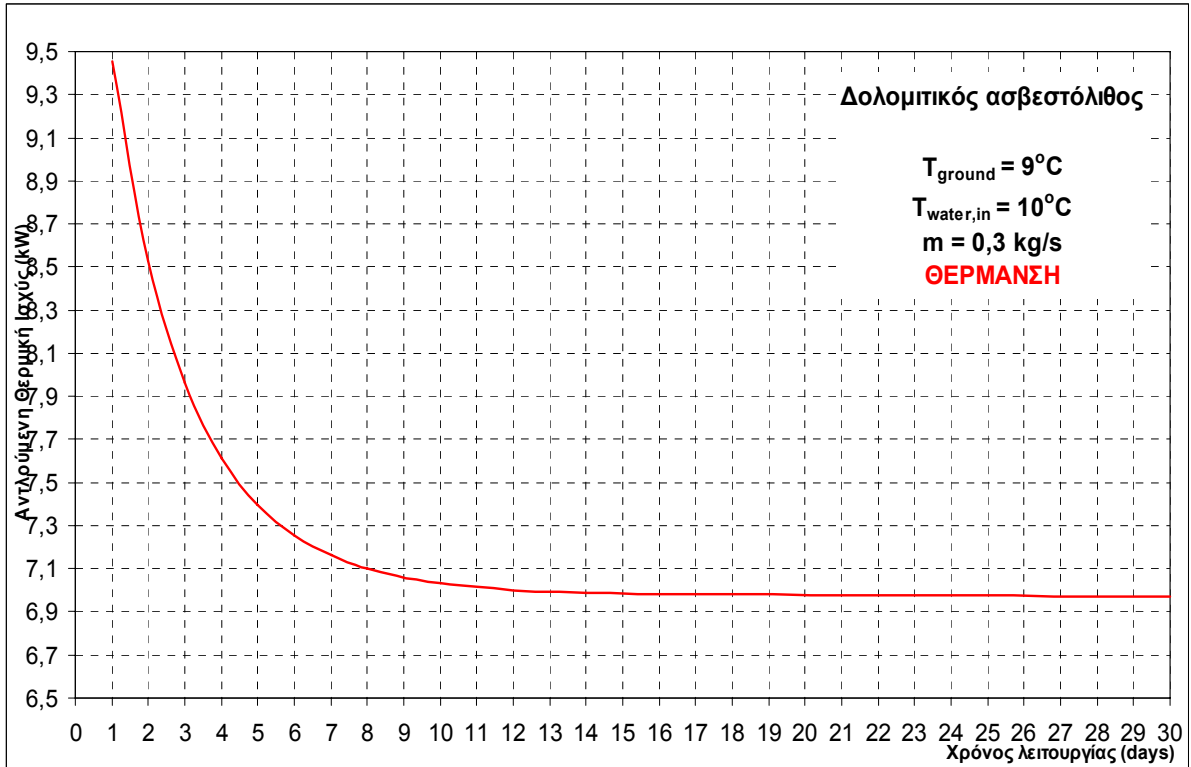
Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «YY» (m) :	60
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	7
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	10
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Targ» (°C) :	9
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,3
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4190
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,3
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	560
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK):	0,41

6.8.1-Η Δολομιτικός ασβεστόλιθος

Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους (Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους) «RCE» = 13.400.000 (J/m³°C)
 Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: 2,4 (W/m°C)



Σχήμα 6.8-1 Αντλούμενη Θερμική Ισχύς σε έδαφος από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο

6.8.2-Η Σχιστόλιθος

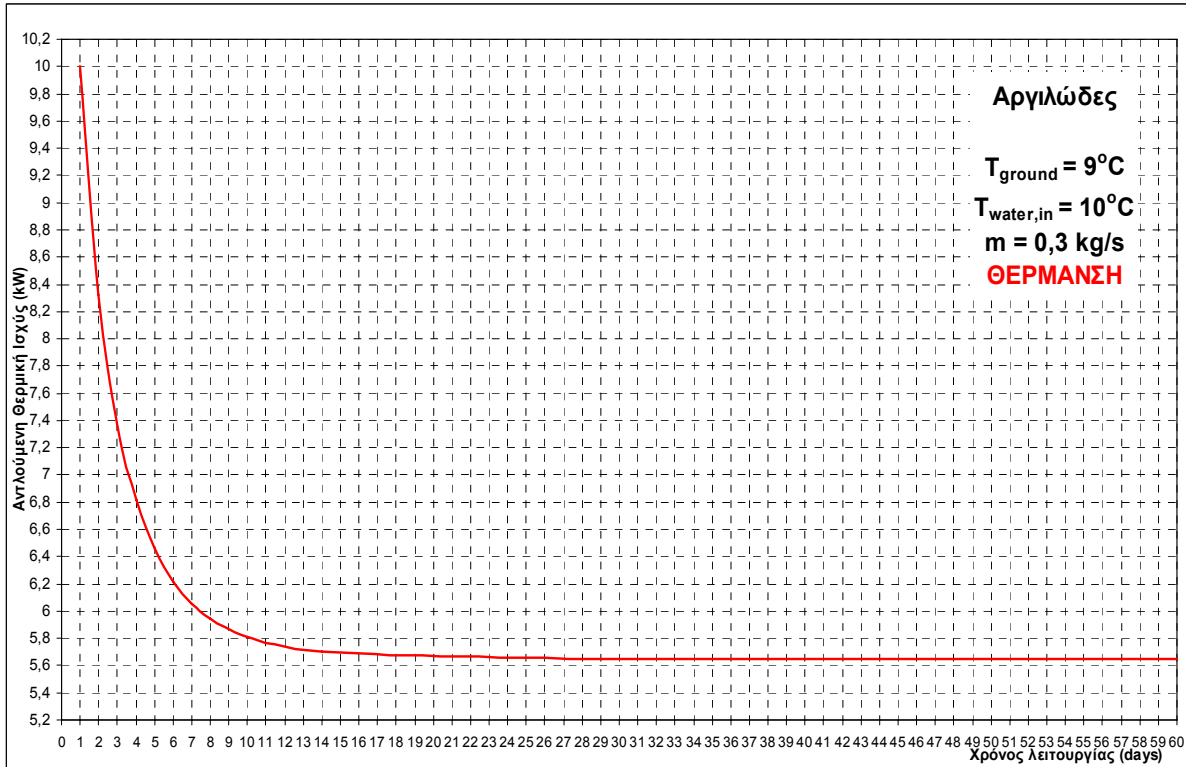
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους (Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους) «RCE» = 3.940.000 (J/m³°C)
 Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: 2,5 (W/m°C)



Σχήμα 6.8-2 Αντλούμενη Θερμική Ισχύς σε έδαφος από Σχιστόλιθο

6.8.3-Η Αργιλώδες

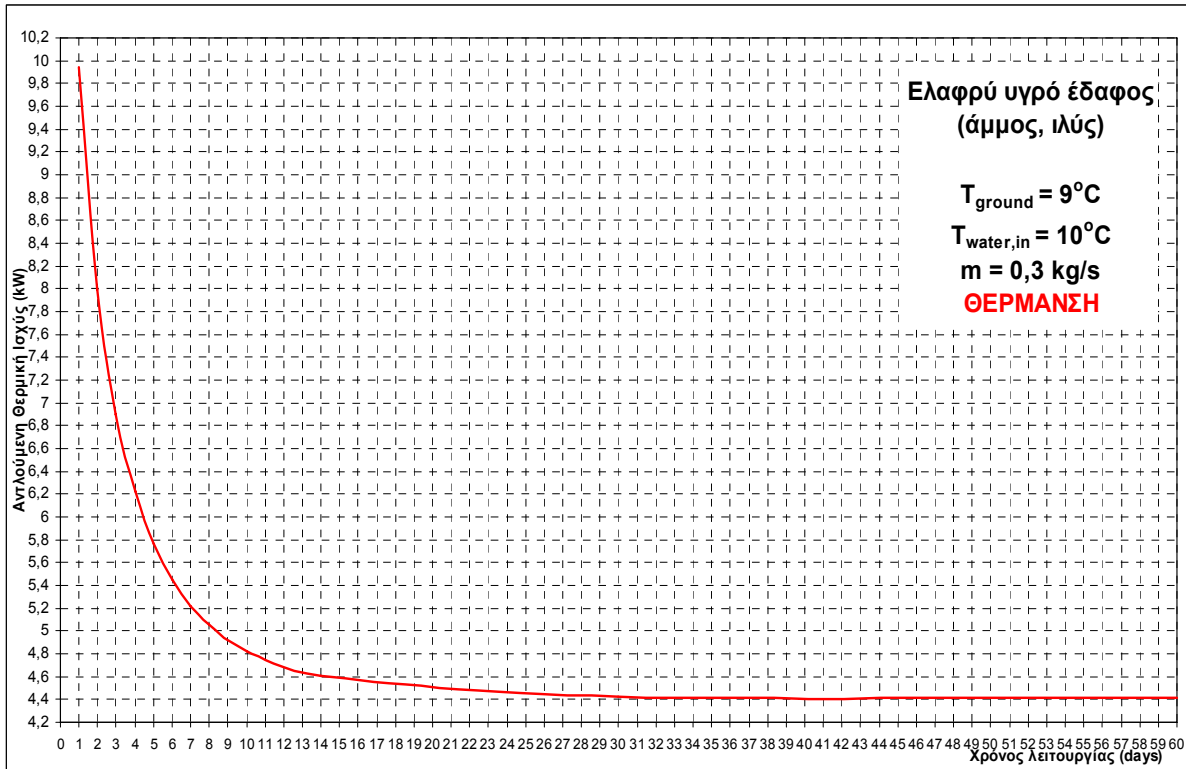
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους (Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους) «RCE» = 3.300.000 (J/m³°C)
 Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: 0,98 (W/m°C)



Σχήμα 6.8-3 Αντλούμενη Θερμική Ισχύς σε Αργιλώδες έδαφος

6.8.4-Η Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς)

Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους (Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους) «RCE» = 1.400.000 (J/m³°C)
 Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: 0,80 (W/m°C)



Σχήμα 6.8-4 Αντλούμενη Θερμική Ισχύς σε ελαφρύ υγρό έδαφος

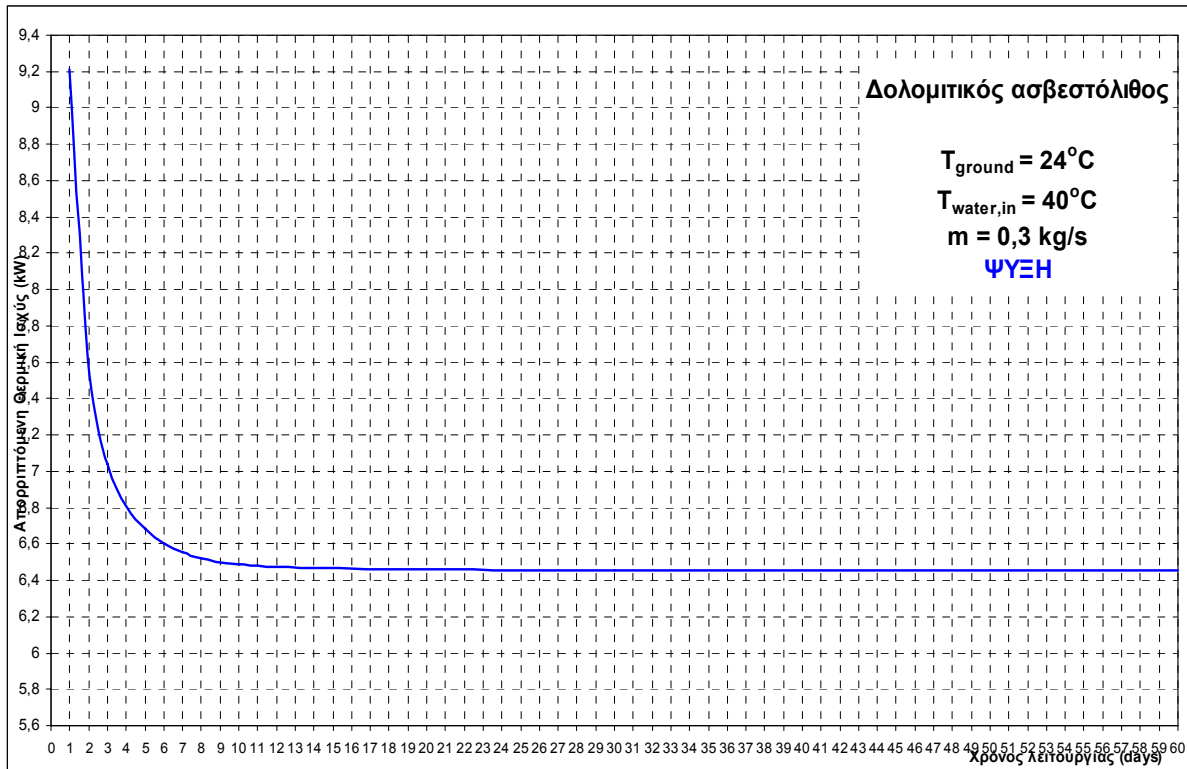
Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

ΨΥΞΗ

Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «ΥΥ» (m) :	60
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	7
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	40
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «T _{αρχ} » (°C) :	24
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,3
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4179
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,3
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	560
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK):	0,41

6.8.1-C Δολομιτικός ασβεστόλιθος

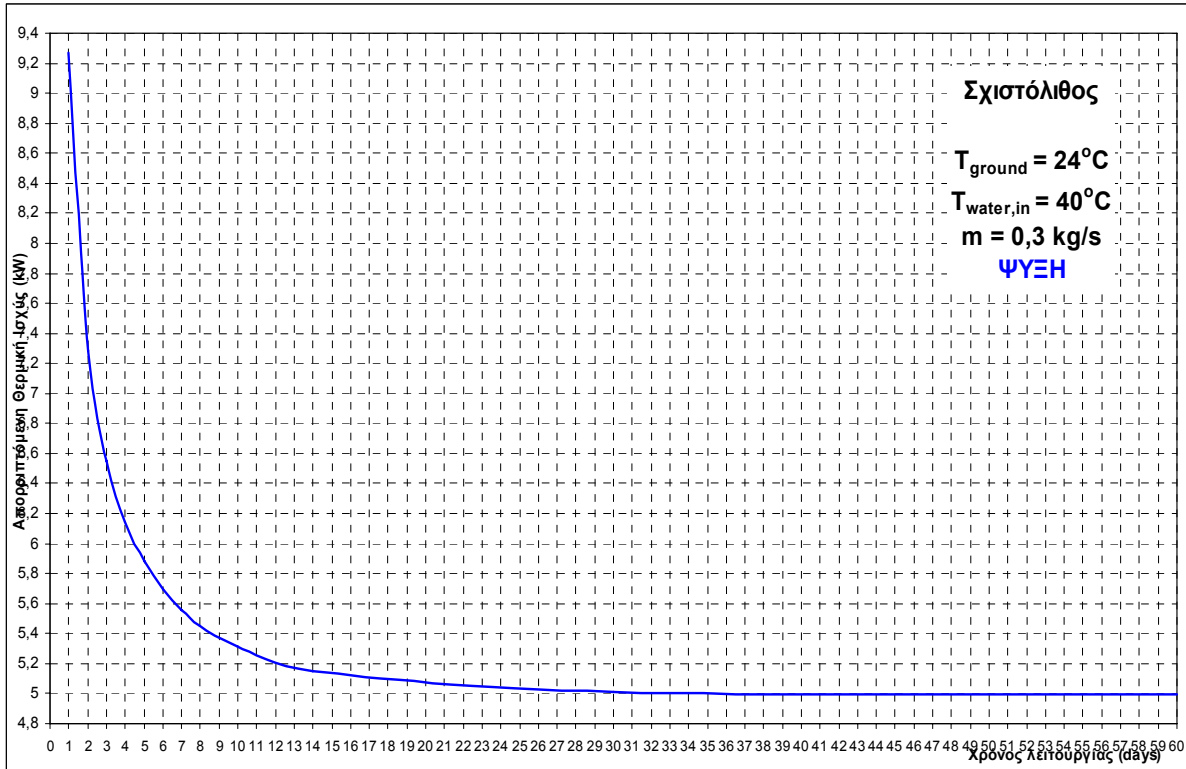
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους (Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους) «RCE» = 13.400.000 (J/m³°C)
 Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: 2,4 (W/m°C)



Σχήμα 6.8-5 Απορριπτόμενη Θερμική Ισχύς σε έδαφος από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο

6.8.2-C Σχιστόλιθος

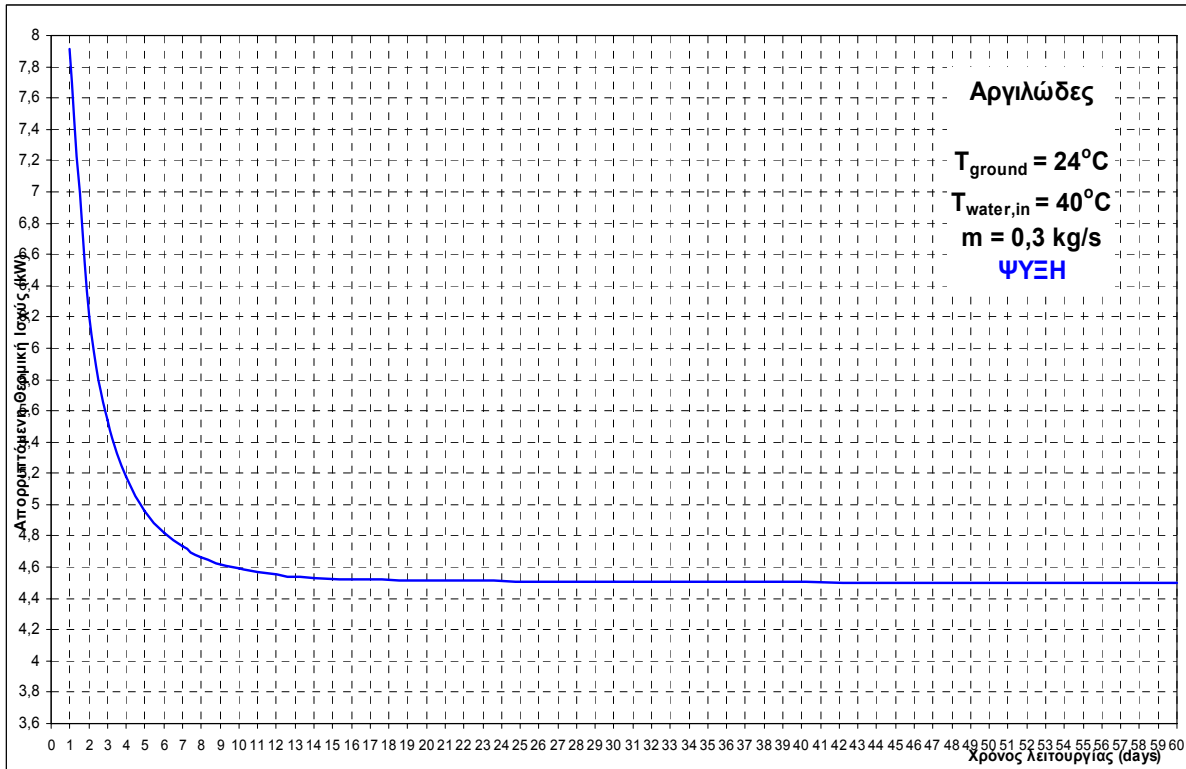
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους (Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους) «RCE» = 3.940.000 (J/m³°C)
 Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: 2,5 (W/m°C)



Σχήμα 6.8-6 Απορριπτόμενη Θερμική Ισχύς σε έδαφος από Σχιστόλιθο

6.8.3-C Αργιλώδες

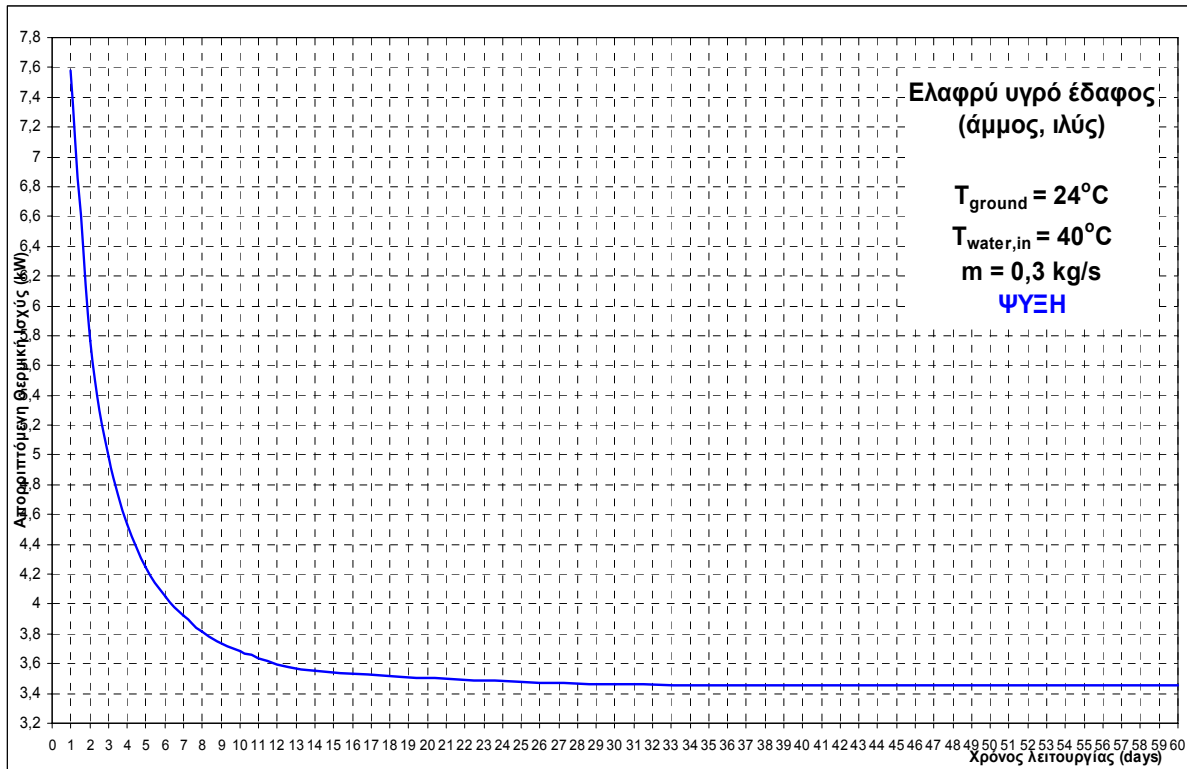
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους (Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους) «RCE» = 3.300.000 (J/m³°C)
 Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: 0,98 (W/m°C)



Σχήμα 6.8-7 Απορριπτόμενη Θερμική Ισχύς σε Αργιλώδες έδαφος

6.8.4-C Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς)

Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους (Γινόμενο Πυκνότητας επί Ειδική Θερμοχωρητικότητα Εδάφους) «RCE» = 1.400.000 (J/m³°C)
 Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1»: 0,80 (W/m°C)



Σχήμα 6.8-8 Απορριπτόμενη Θερμική Ισχύς σε ελαφρύ υγρό έδαφος

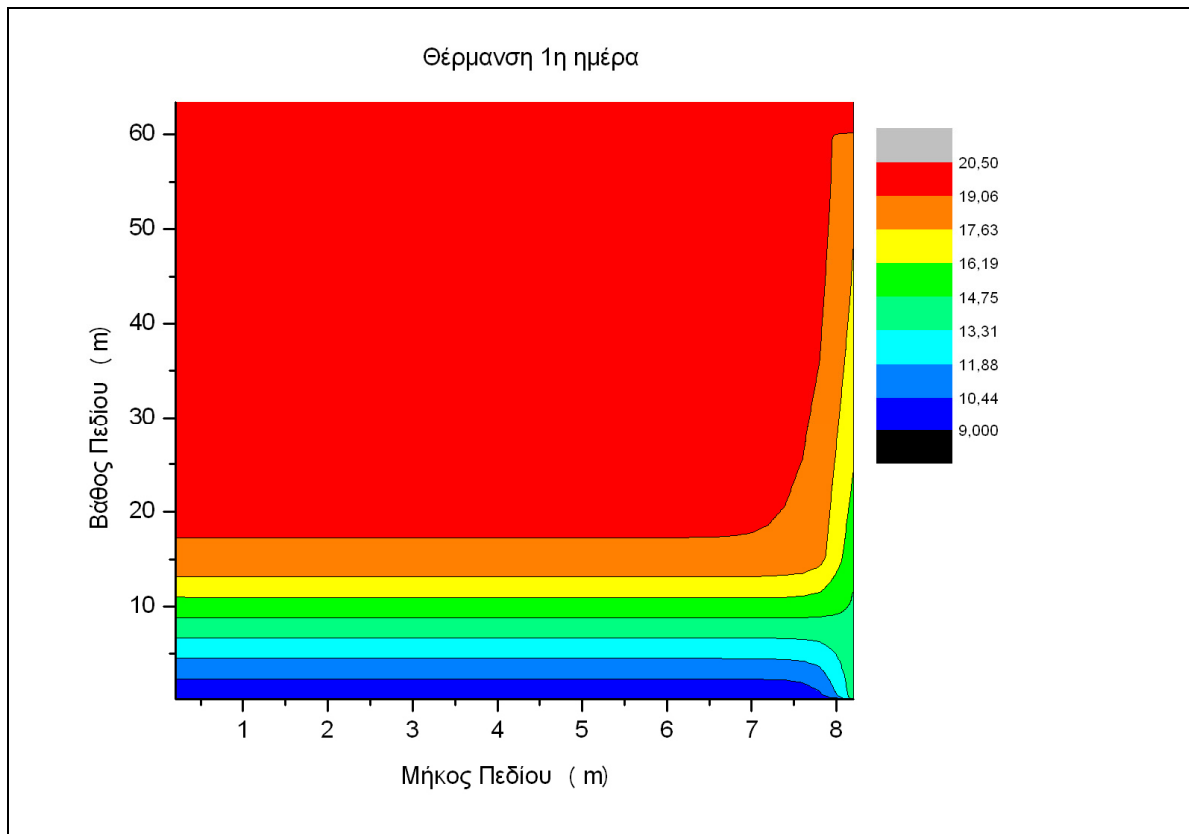
6.9 Χρονική Μεταβολή Θερμοκρασίας Εδάφους

Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

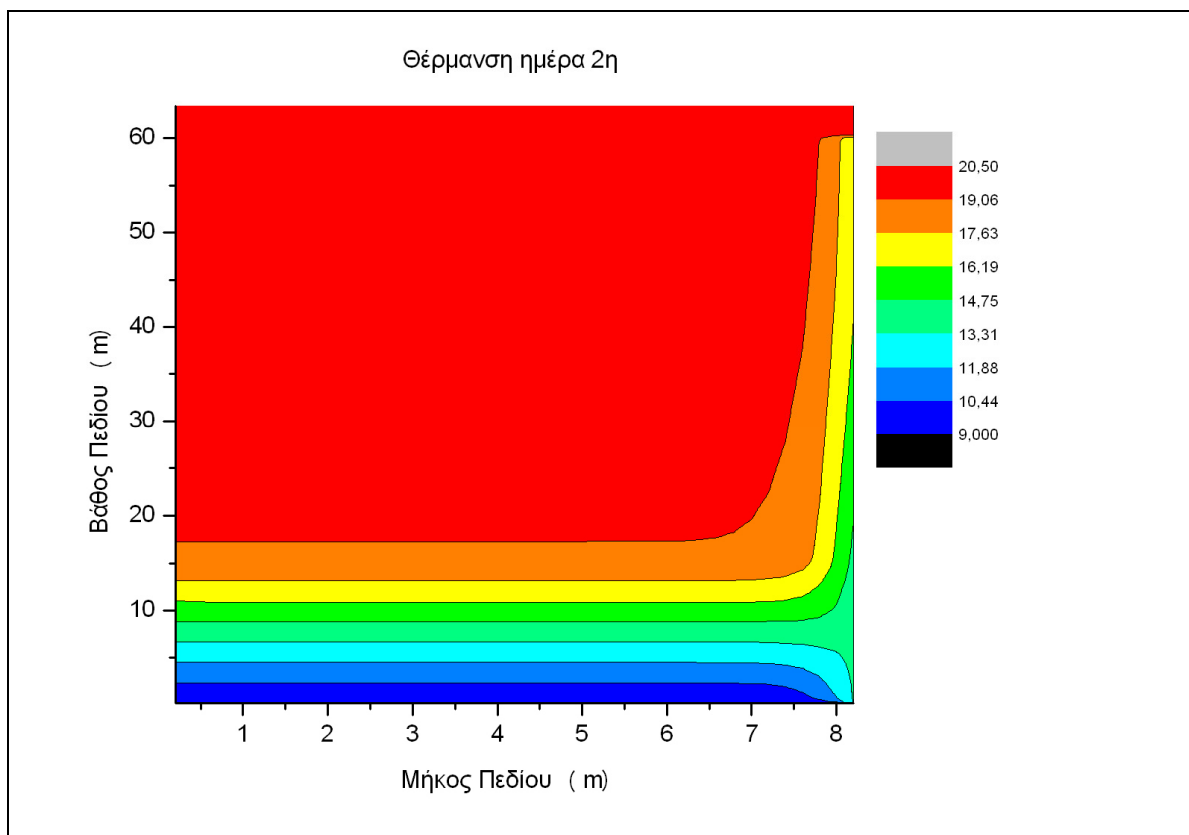
ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς)

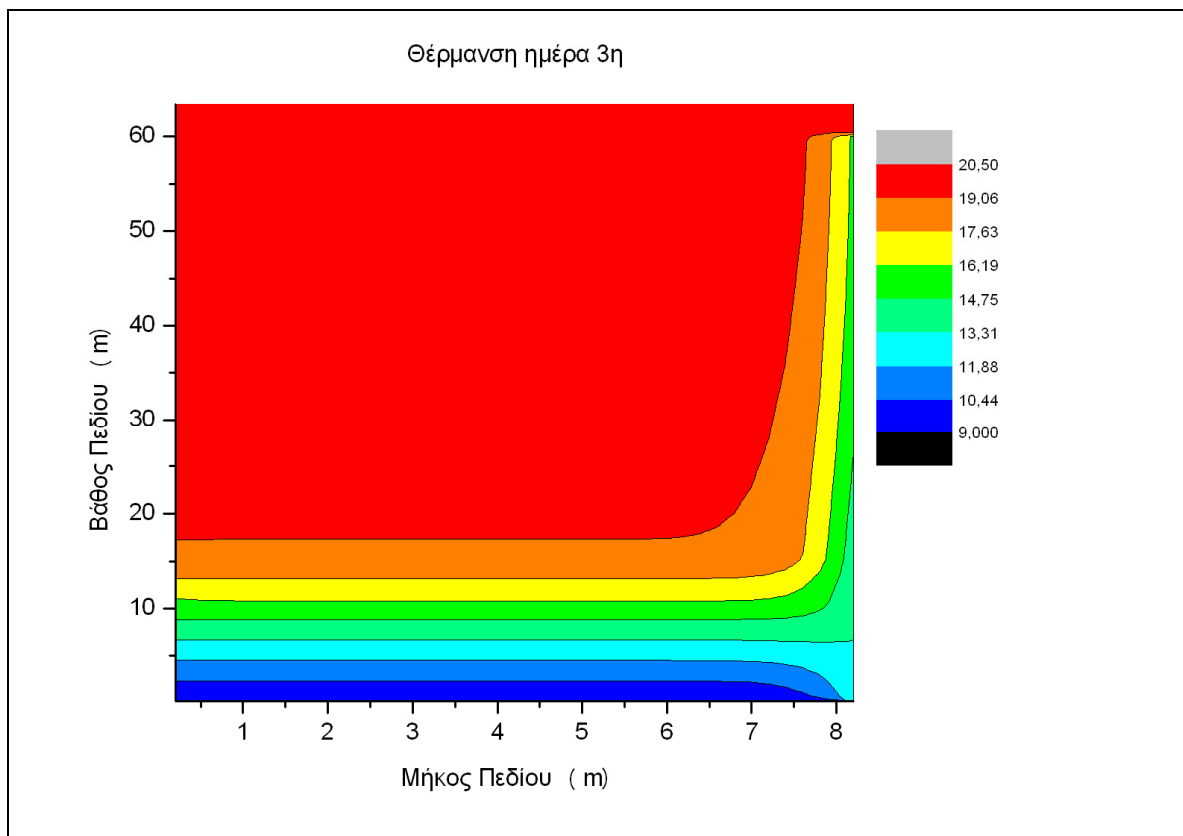
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «YY» (m) :	60
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	8
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	10
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Tαrx» (°C) :	9
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/m°C) :	0,8
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,1
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό ρ=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4193
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,3
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	560
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK):	0,41
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	1 x 86400 = 86400 s = 1 day
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους «RCE» : (J/m ³ °C)	1400000



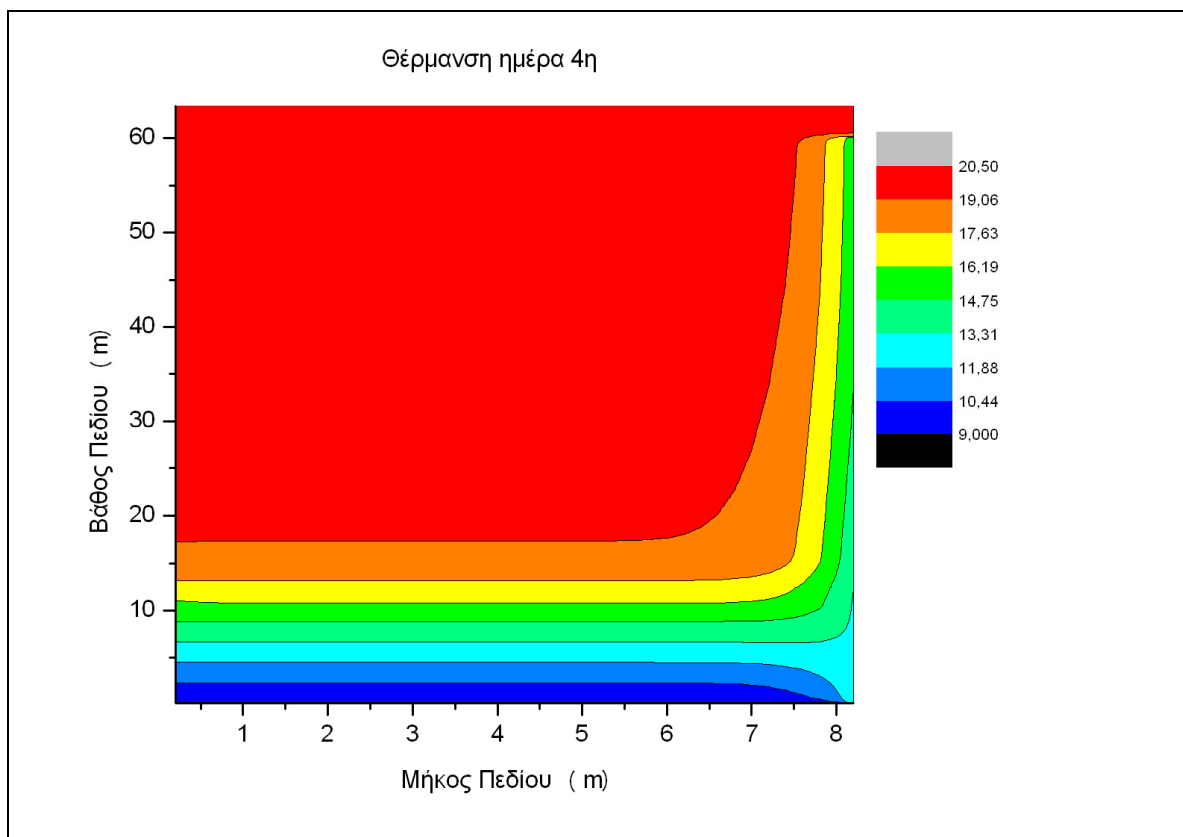
Σχήμα 6.9-1 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 1 ημέρας.



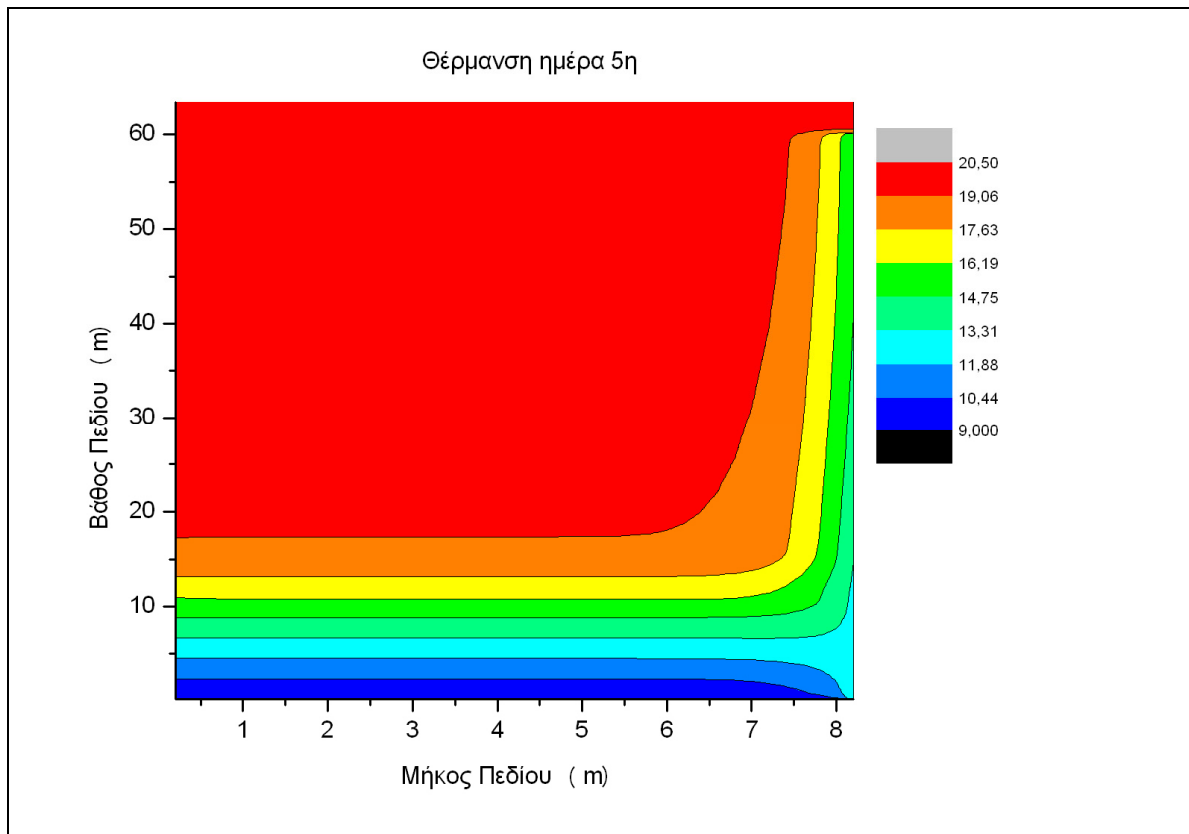
Σχήμα 6.9-2 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 2 ημερών.



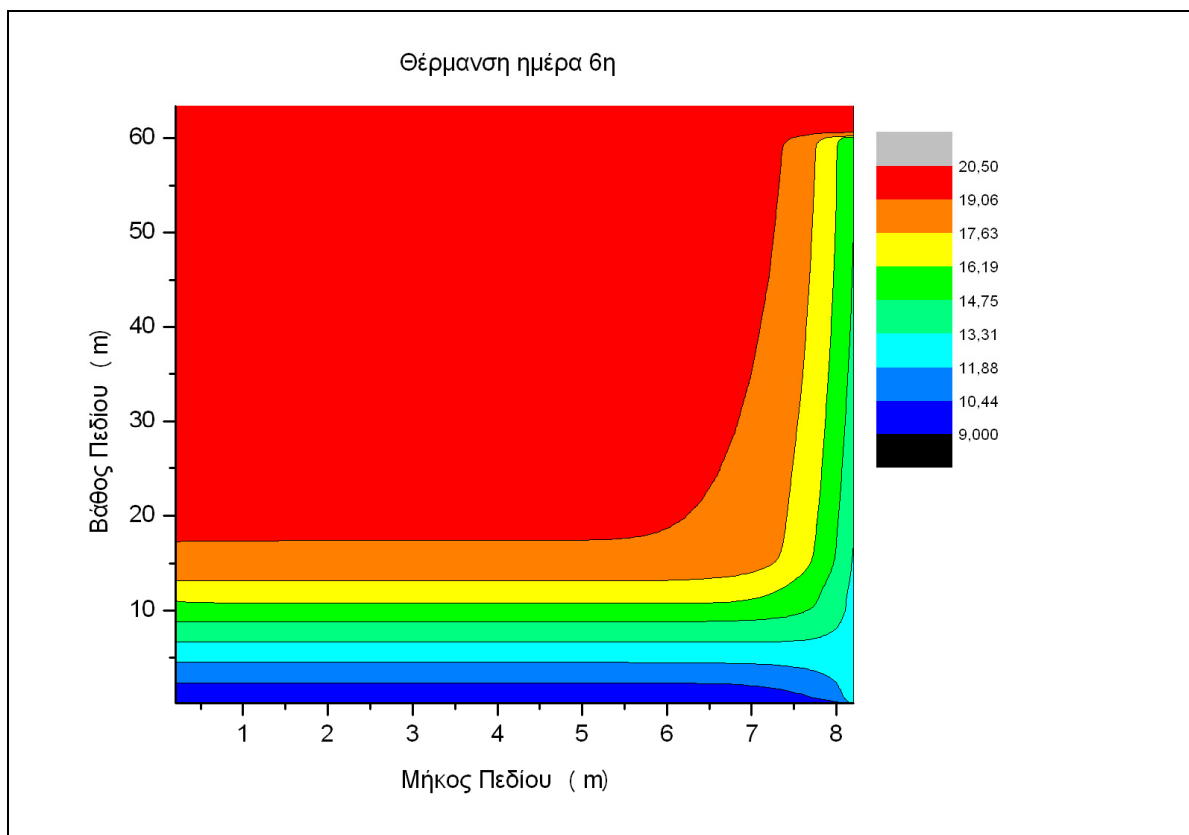
Σχήμα 6.9-3 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 3 ημερών.



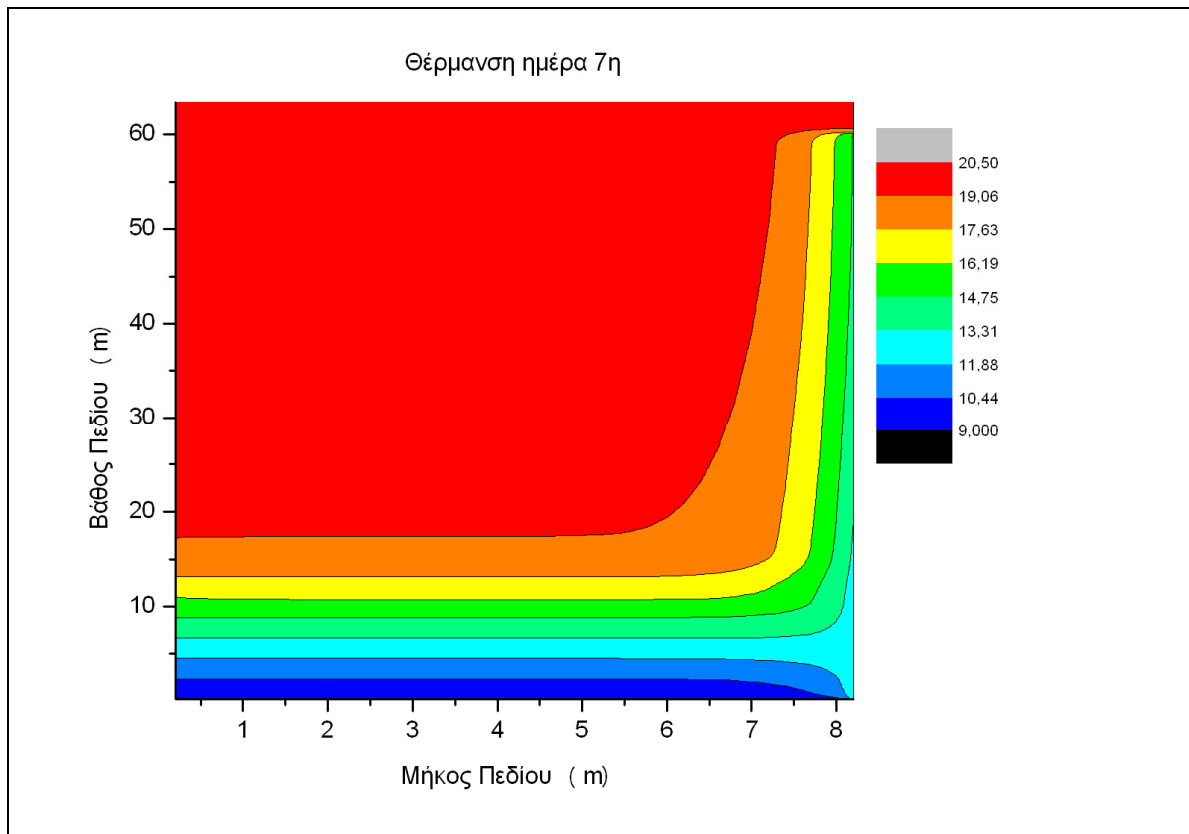
Σχήμα 6.9-4 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 4 ημερών.



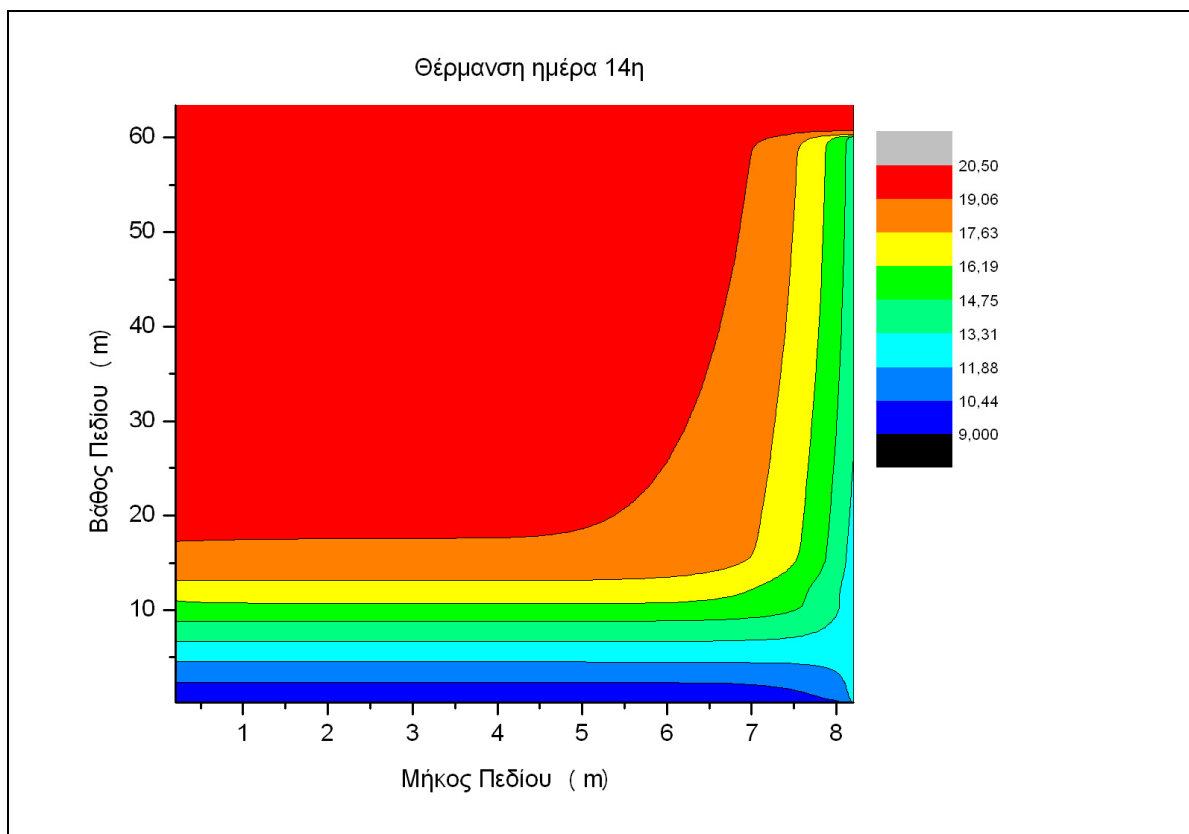
Σχήμα 6.9-5 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 5 ημερών.



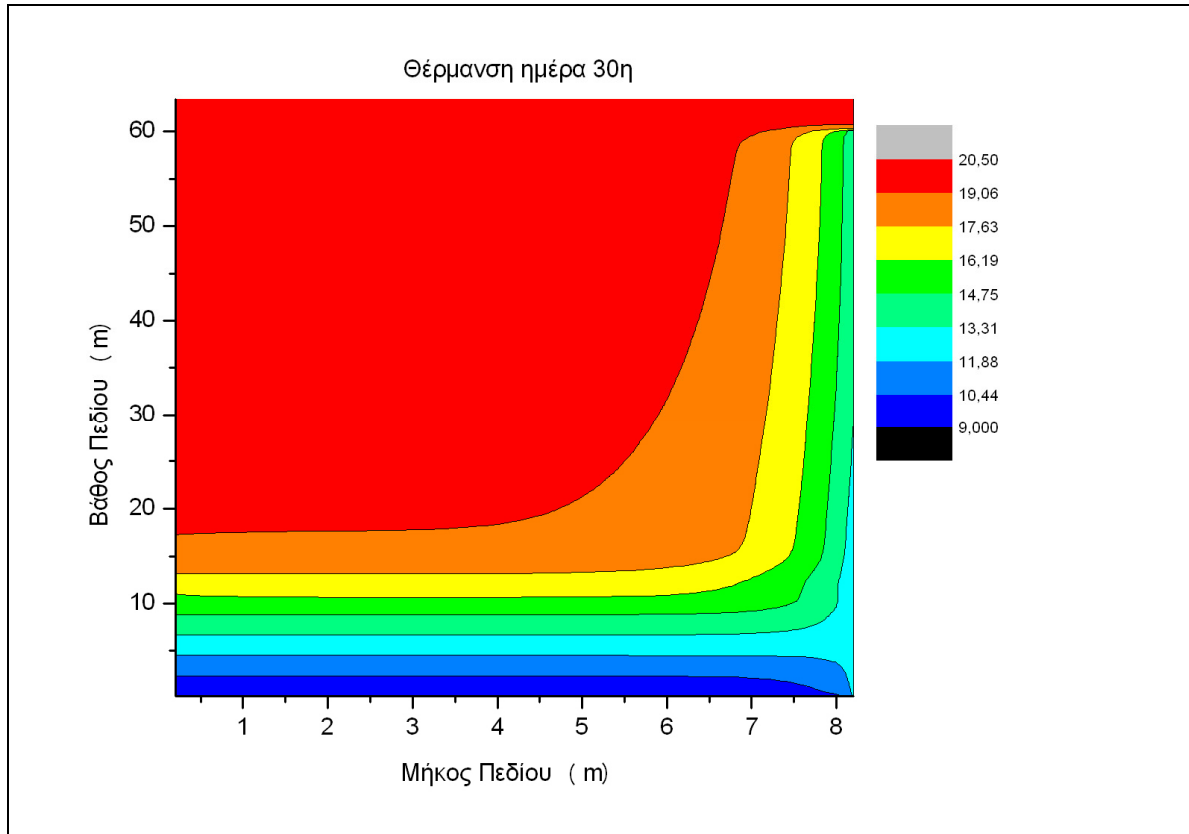
Σχήμα 6.9-6 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 6 ημερών.



Σχήμα 6.9-7 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 7 ημερών.



Σχήμα 6.9-8 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 14 ημερών.



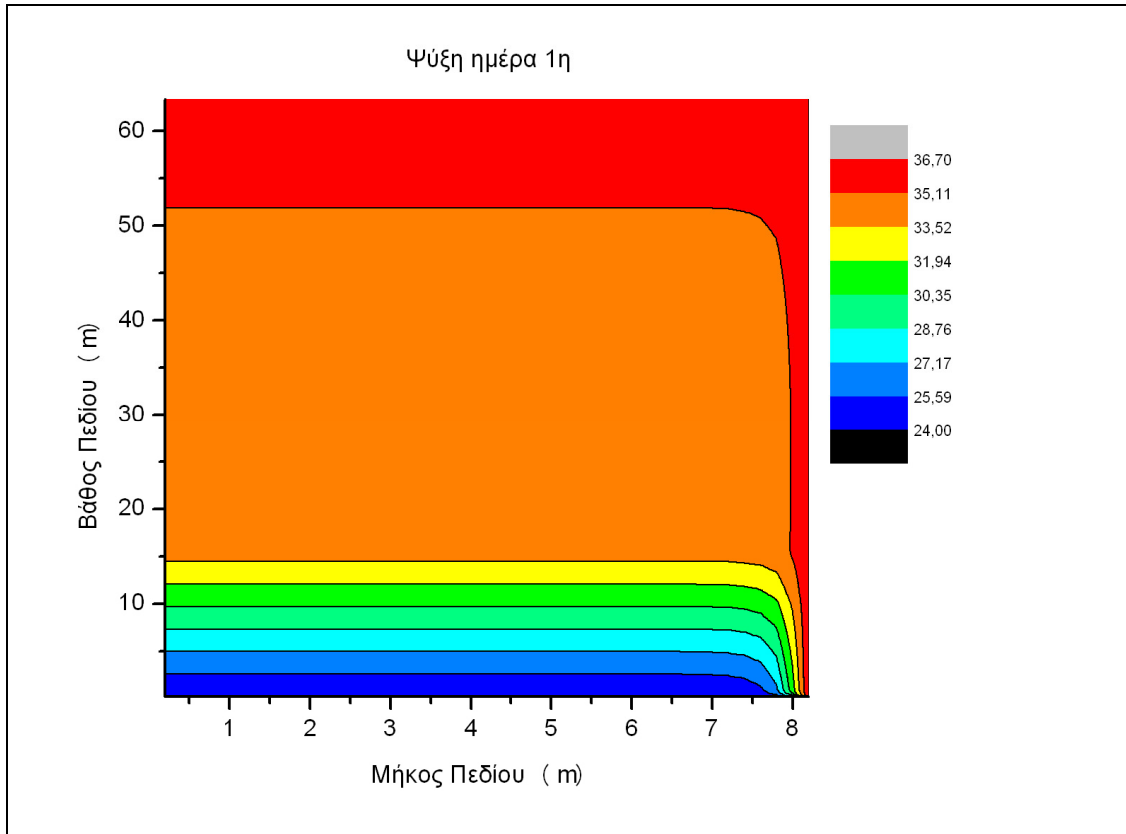
Σχήμα 6.9-9 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 30 ημερών.

Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

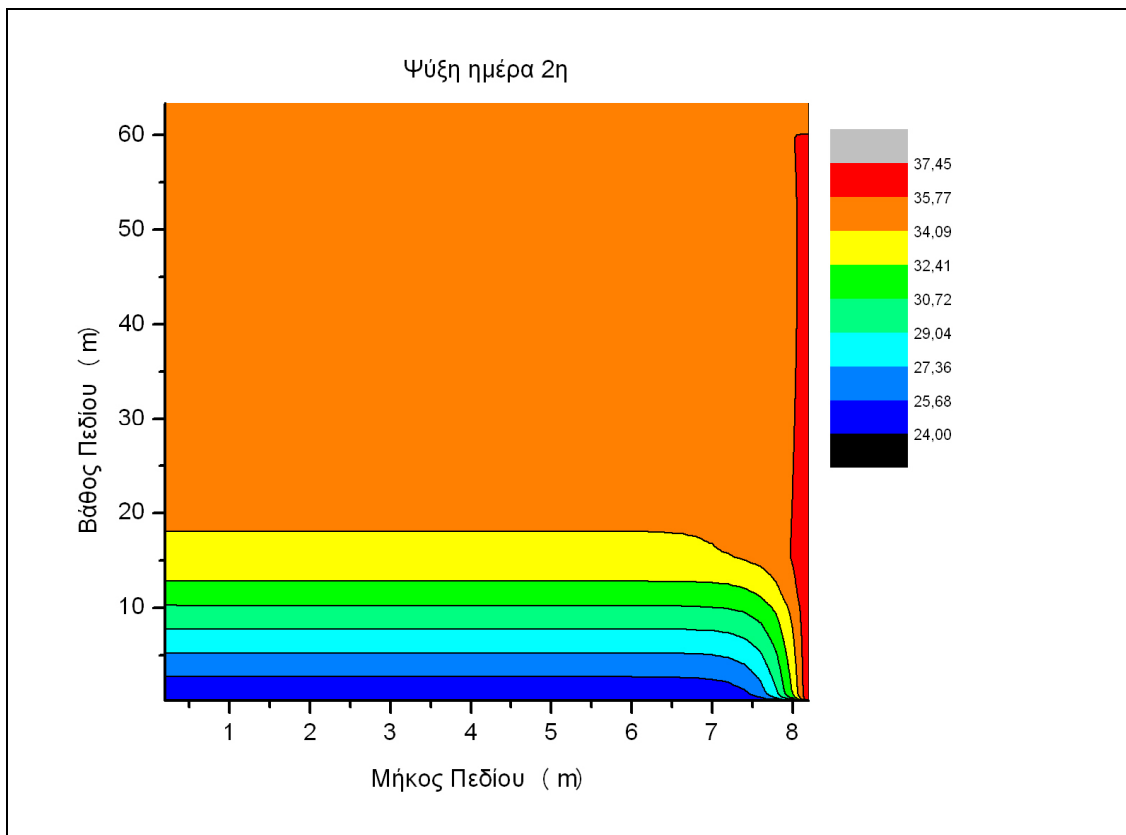
ΨΥΞΗ

Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς)

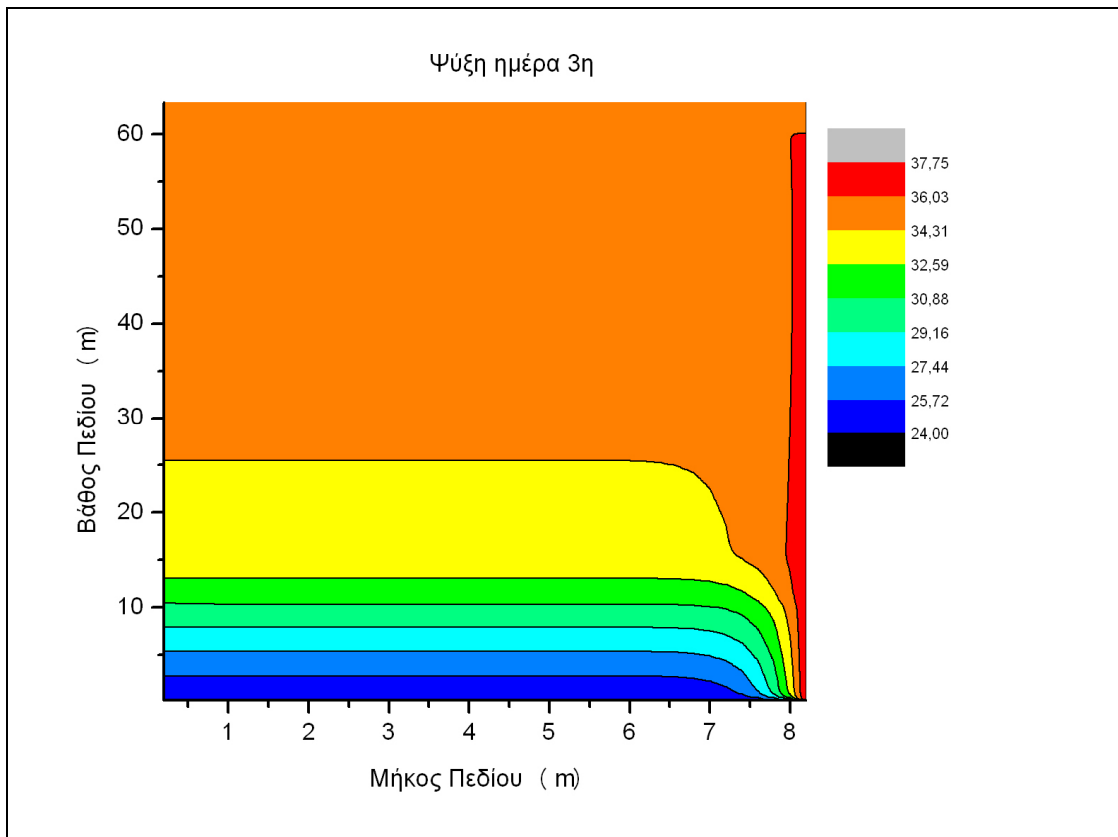
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «ΥΥ» (m) :	60
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	8
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	40
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Targ» (°C) :	24
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/m°C) :	0,8
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,1
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4179
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,3
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	560
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK):	0,41
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	1 x 86400 = 86400 s = 1 day
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους «RCE» : (J/m ³ °C)	1400000



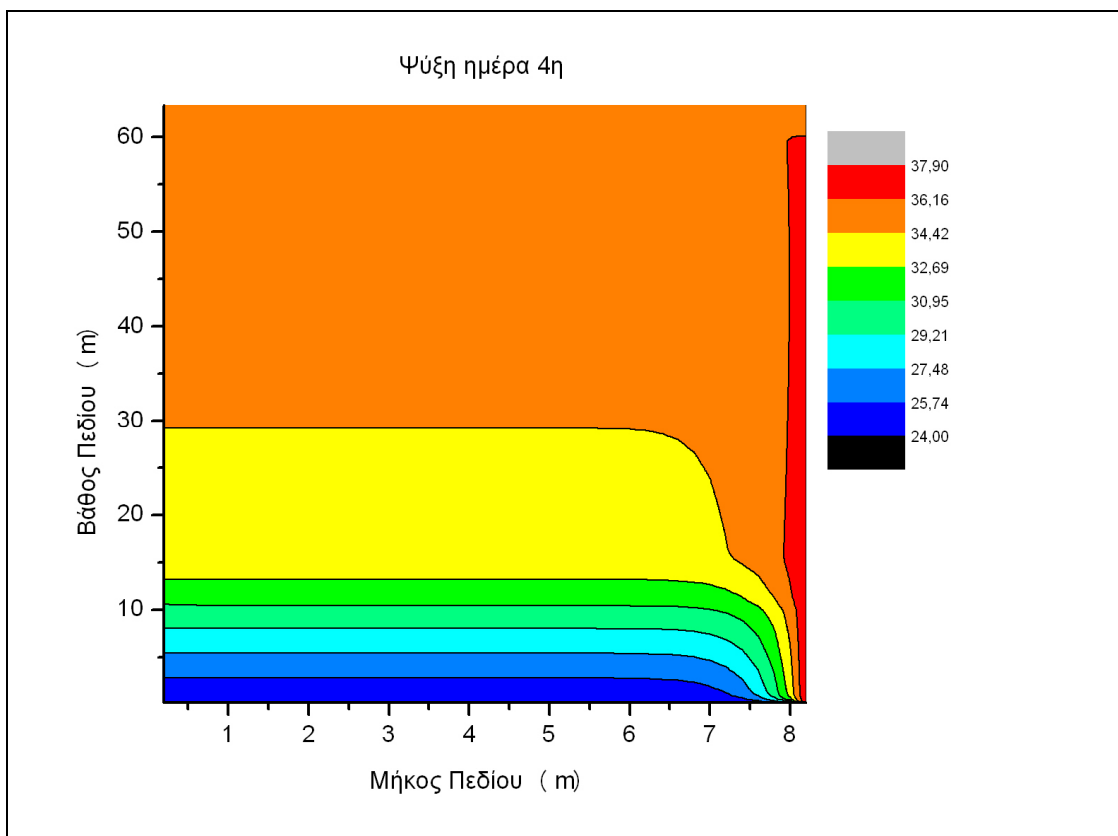
Σχήμα 6.9-10 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 1 ημέρας.



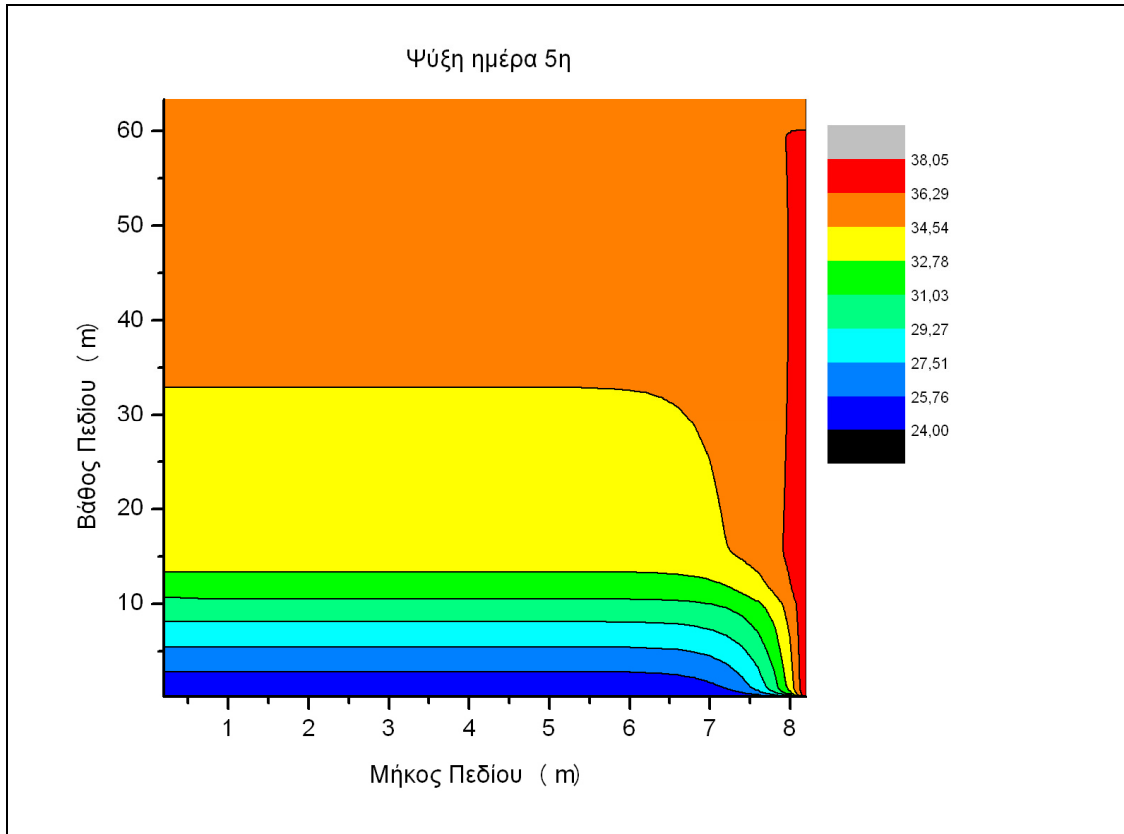
Σχήμα 6.9-11 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 2 ημερών.



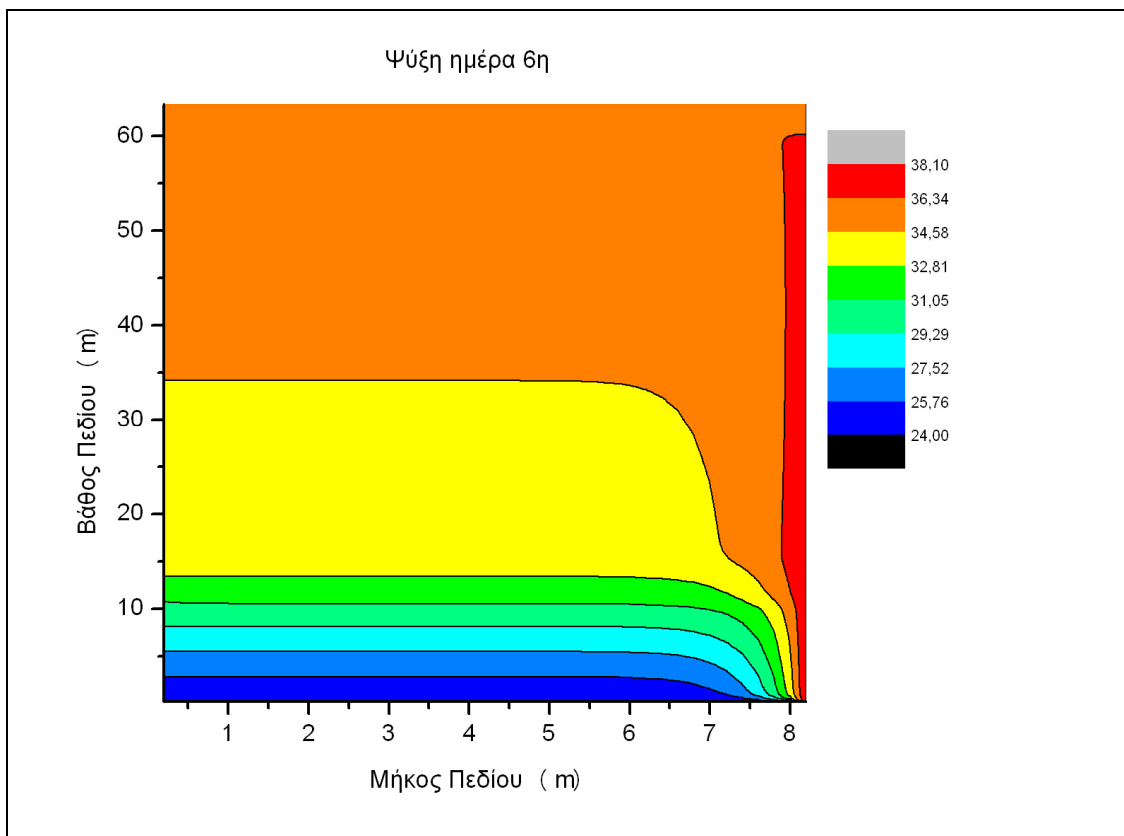
Σχήμα 6.9-12 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 3 ημερών.



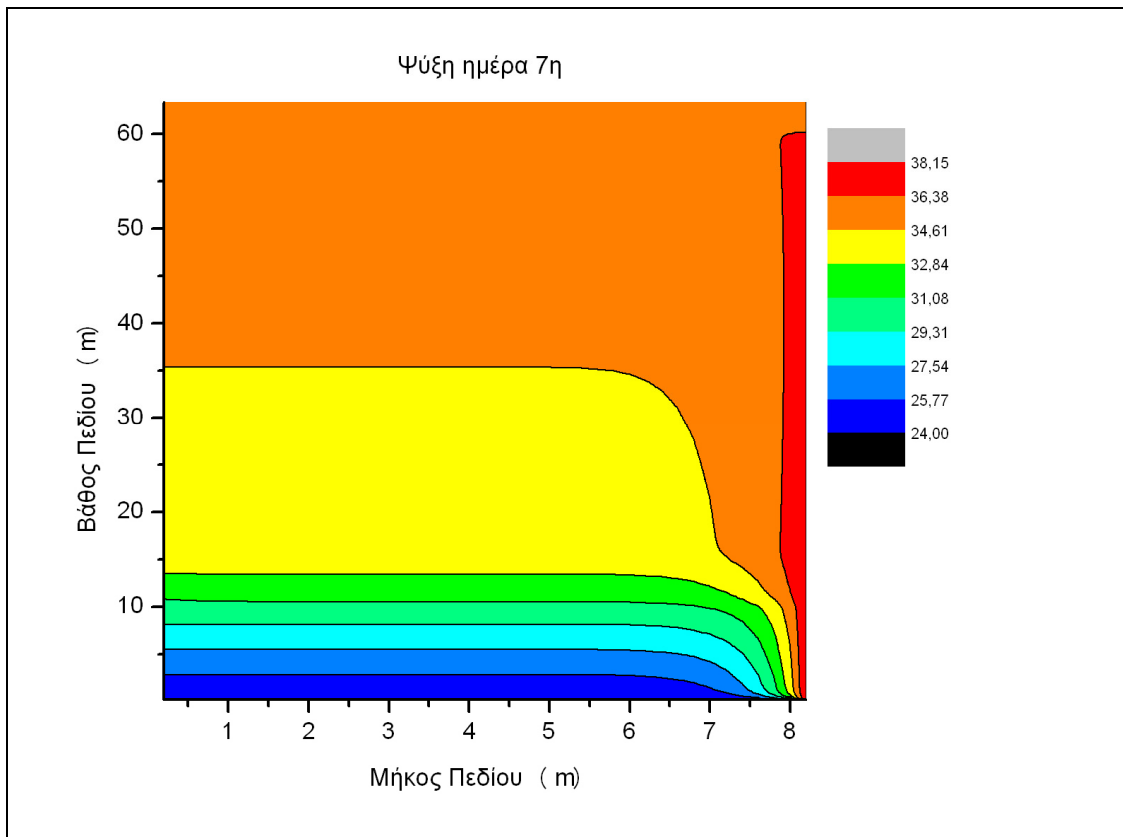
Σχήμα 6.9-13 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 4 ημερών.



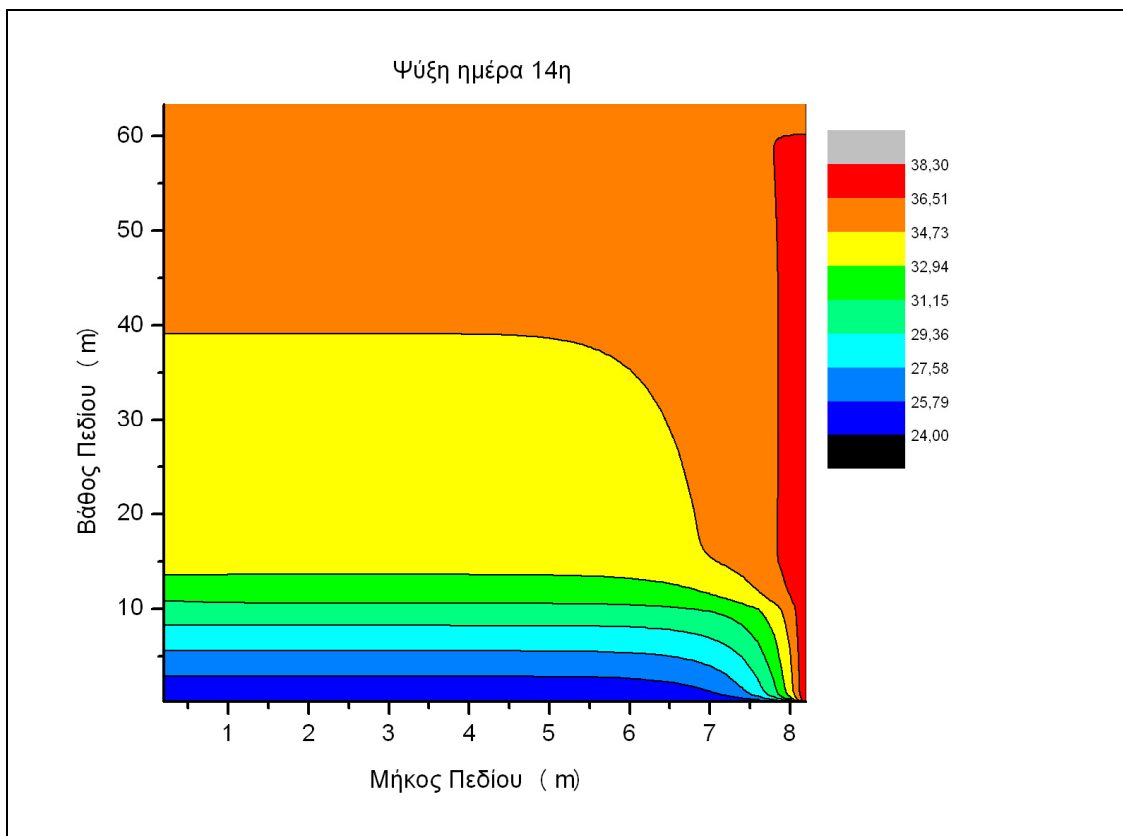
Σχήμα 6.9-14 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 5 ημερών.



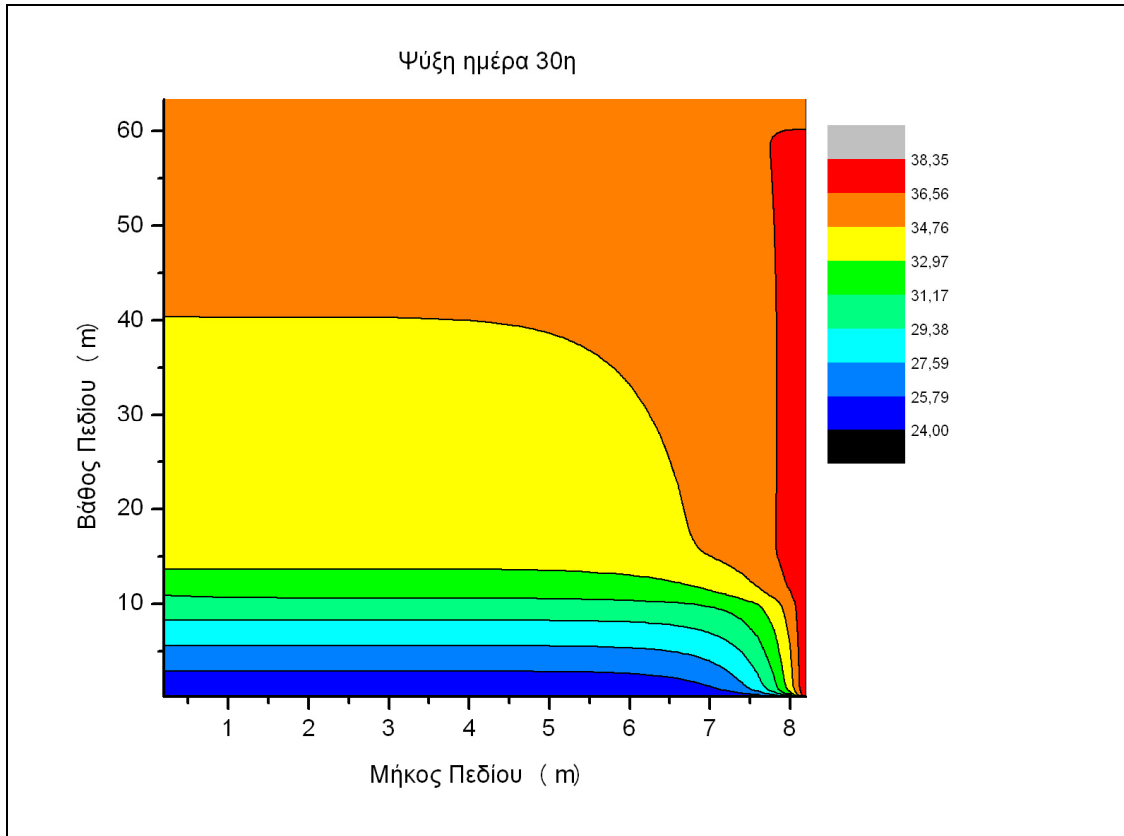
Σχήμα 6.9-15 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 6 ημερών.



Σχήμα 6.9-16 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 7 ημερών.



Σχήμα 6.9-17 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 14 ημερών.



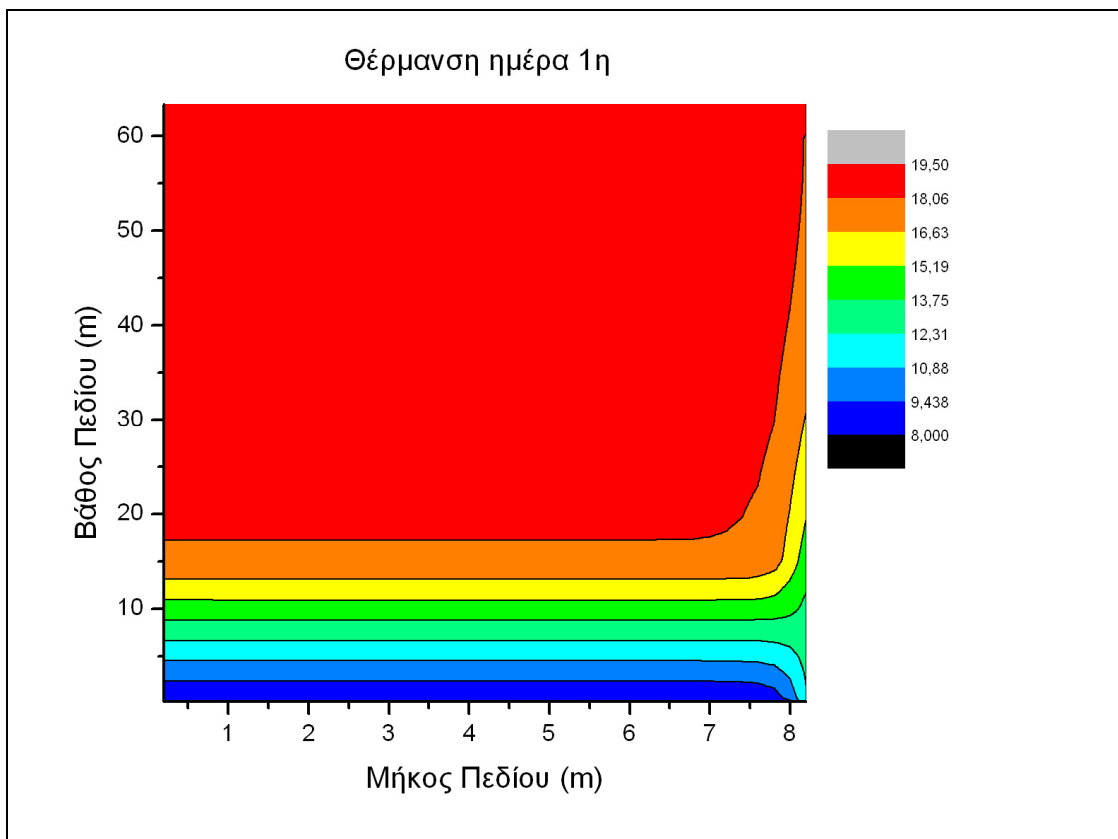
Σχήμα 6.9-18 Ελαφρύ υγρό έδαφος (άμμος, ιλύς). Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 30 ημερών.

Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

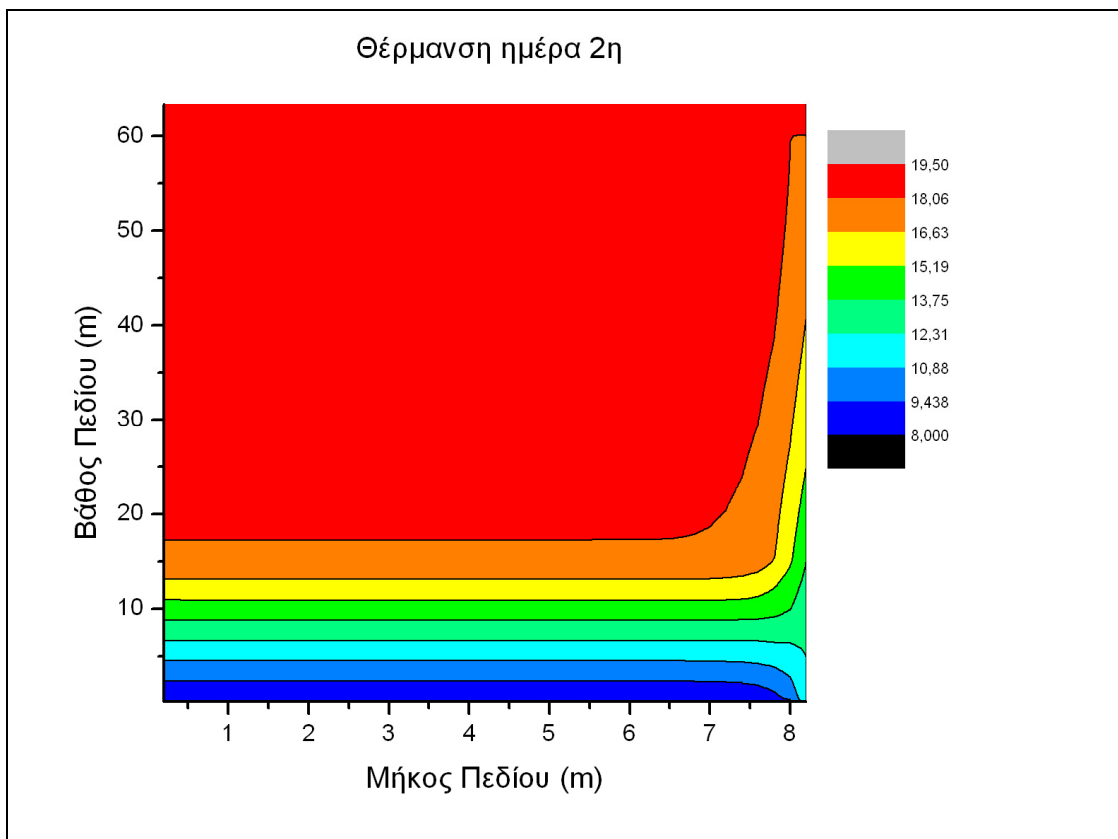
ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο

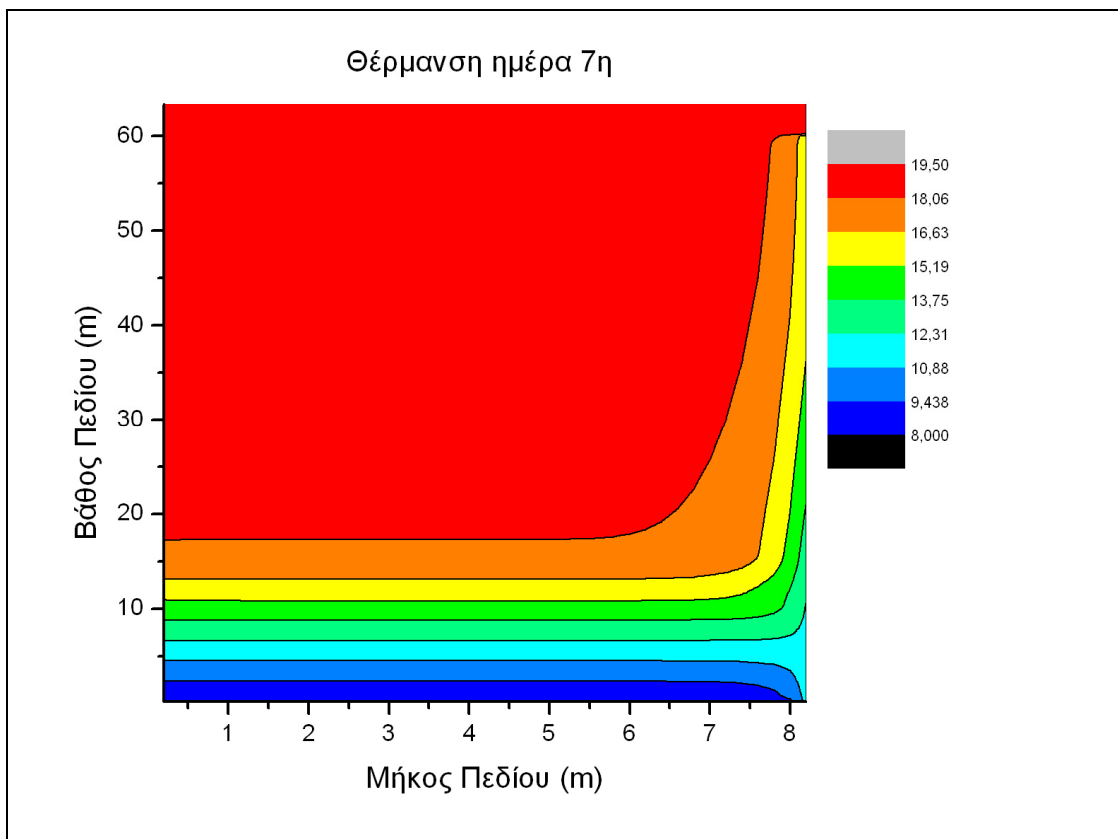
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «ΥΥ» (m) :	60
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	8
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	8
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Targ» (°C) :	8
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/m°C) :	2,4
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,1
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4185
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,3
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	560
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK) :	0,41
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	1 x 86400 = 86400 s = 1 day
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους «RCE» : (J/m ³ °C)	13400000



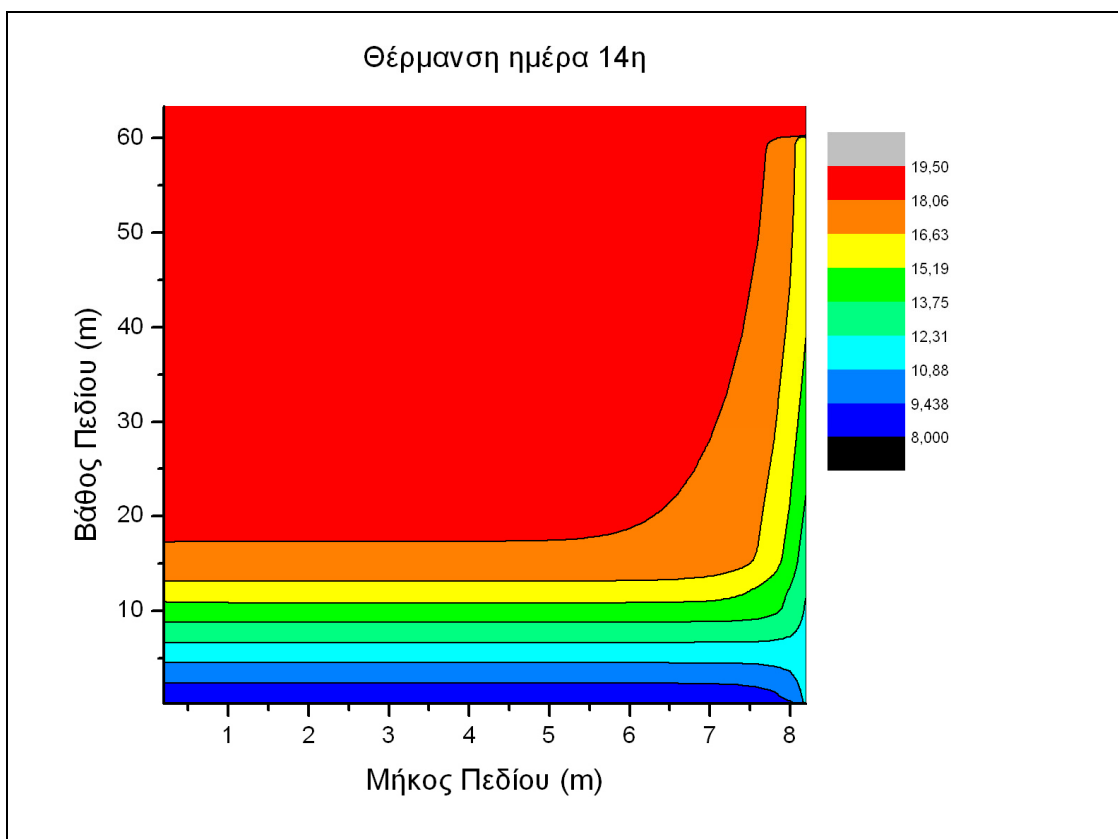
Σχήμα 6.9-19 Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο. Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 1 ημέρας.



Σχήμα 6.9-20 Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο. Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 2 ημερών.



Σχήμα 6.9-21 Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο. Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 7 ημερών.



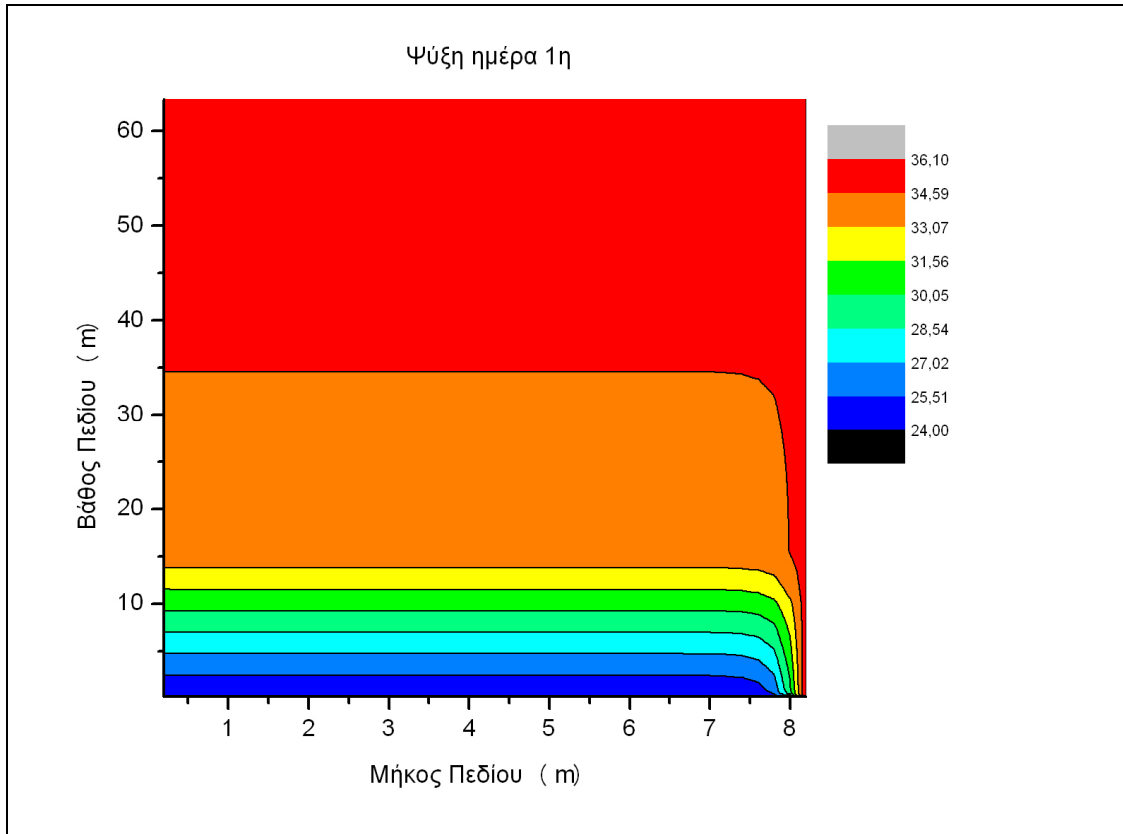
Σχήμα 6.9-22 Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο. Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης 14 ημερών.

Για τα εξής δεδομένα εισόδου:

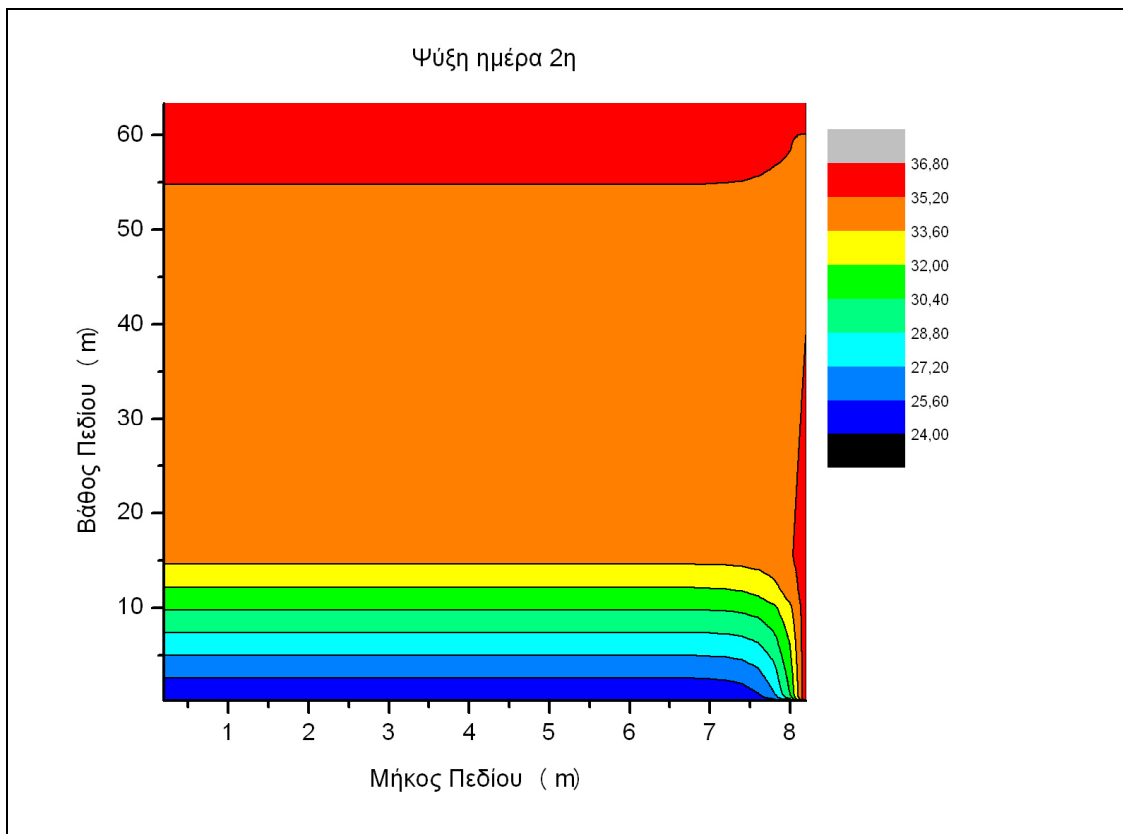
ΨΥΞΗ

Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο

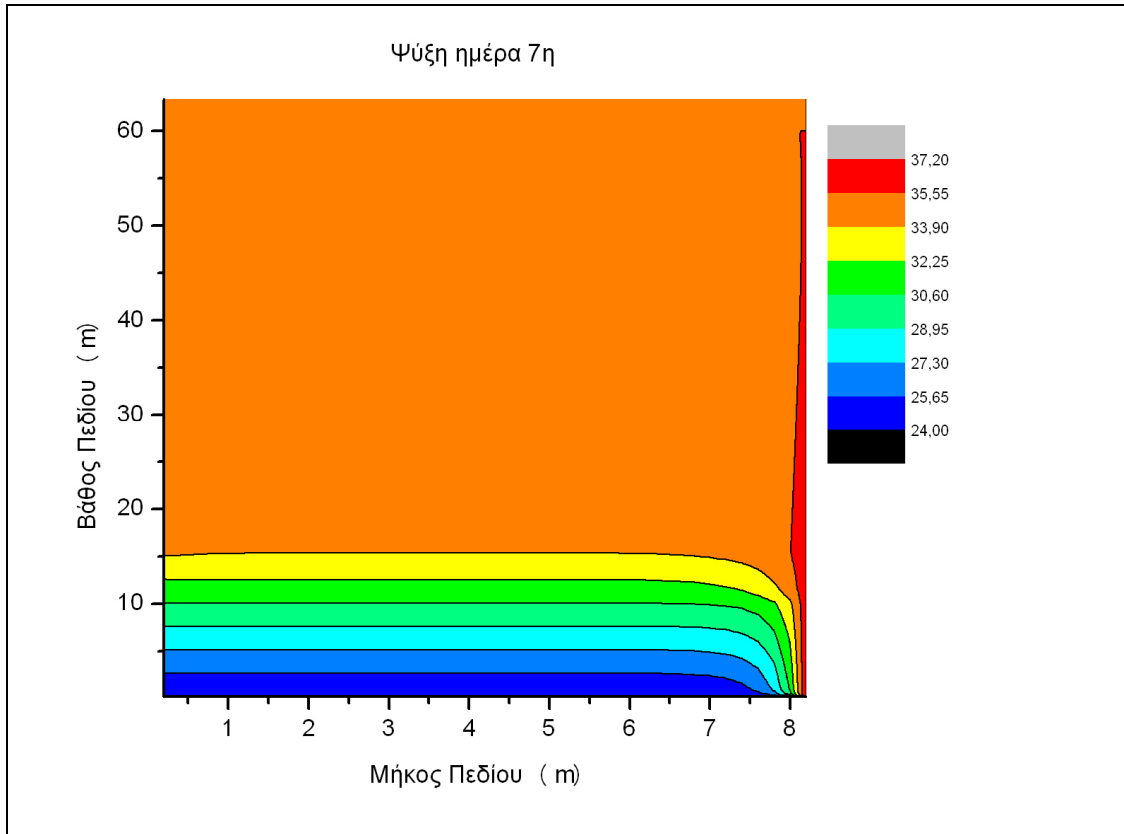
Αλγεβρική Διαφορά Οριζόντιας Κατεύθυνσης «DX» :	0,2
Αλγεβρική Διαφορά Κατακόρυφης Κατεύθυνσης «DY» :	0,2
Βάθος Γεώτρησης «YY» (m) :	60
Μήκος Εξέτασης Επίλυσης κατά την Οριζόντια Κατεύθυνση «XX» (m) :	8
Συντελεστής Βαρύτητας Μεθόδου Χαλάρωσης «ω» :	0,5
Επιθυμητή Ακρίβεια Υπολογισμών (απόλυτο κριτήριο σύγκλισης) «G» :	0,001
Αρχική Θερμοκρασία Νερού Προσαγωγής στον ΚΓΕ «TNin» (°C) :	40
Αρχική Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους «Tαrx» (°C) :	24
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Εδάφους «LE1» (W/m°C) :	2,4
Εσωτερική Ακτίνα Αγωγού ΚΓΕ «R1» (m) :	0,011
Πάχος Τοιχώματος Αγωγού ΚΓΕ «e» (m) :	0,003
Ακτίνα Οπής Γεώτρησης «R3» (m) :	0,1
Ειδική Θερμοχωρητικότητα Νερού υπό p=σταθ. «CP» (J/kg°C) :	4179
Παροχή Νερού «MN» (kg/s) :	0,3
Πλήθος ΚΓΕ «NS» :	1
Συντελεστής Συναγωγιμότητας Νερού στον ΚΓΕ «HF» (W/m ² °C) :	560
Ειδική Θερμική Αγωγιμότητα Υλικού ΚΓΕ «LS» (W/mK):	0,41
Διάρκεια μιας Χρονικής Μονάδας «DT» (s) :	1 x 86400 = 86400 s = 1 day
Κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους «RCE» : (J/m ³ °C)	13400000



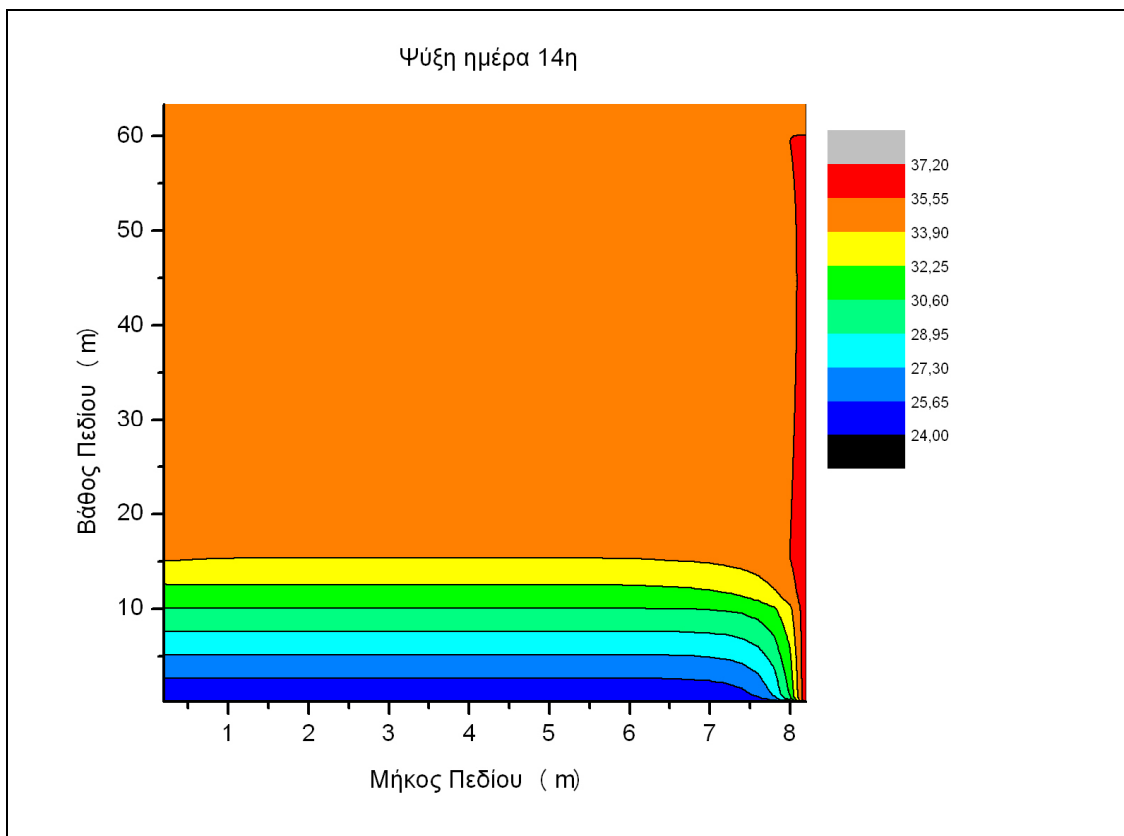
Σχήμα 6.9-23 Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο. Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 1 ημέρας.



Σχήμα 6.9-24 Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο. Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 2 ημέρων.



Σχήμα 6.9-25 Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο. Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 7 ημέρων.



Σχήμα 6.9-26 Έδαφος αποτελούμενο κυρίως από Δολομιτικό Ασβεστόλιθο. Κατανομή θερμοκρασιών εδαφικού πεδίου μετά από συνεχή λειτουργία ψύξης 14 ημέρων.

7. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Σχετικά με τα αποτελέσματα λειτουργίας του Κ.Γ.Ε με τις ίδιες παραμέτρους και συνθήκες λειτουργίας αλλά για διαφορετική χρονική διάρκεια παρατηρείται ότι αυξανόμενου του χρόνου συνεχούς λειτουργίας φθίνει ο βαθμός απόδοσής του. Στη περίπτωση θέρμανσης για χρονικό διάστημα δύο ημερών με θερμοκρασία νερού προσαγωγής στον Κ.Γ.Ε τους 8 °C, η θερμοκρασία νερού στην είσοδο της Γ.Α.Θ. θα είναι 17,04 °C δηλαδή προκαλείται μία διαφορά περί τους 9°C. Μετά από συνεχή λειτουργία πέντε ημερών η θερμοκρασία εξόδου από τον Κ.Γ.Ε παρουσιάζεται ελαττωμένη στους 16,73 °C.

Αναφορικά με τη θερμοκρασία εδάφους στο γήινο περιβάλλον του Κ.Γ.Ε σημειώνεται επί παραδείγματι η τιμή θερμοκρασίας εδάφους με συντεταγμένες $(x,y)=(12,5, 15)$ κατά τη λειτουργία θέρμανσης έπειτα από χρονικό διάστημα δύο ημερών βρίσκεται να είναι: $T_{(12,5,15)} = 17,12$ °C. Κατόπιν λειτουργίας πέντε ημερών βρίσκεται να είναι: $T_{(12,5,15)} = 17,05$ °C. Αυτή η παρατήρηση θα σχολιαστεί περισσότερο στις επόμενες παραγράφους.

Αντίστοιχα συμβαίνουν και στη περίπτωση ψύξης. Για χρονικό διάστημα εξέτασης της συμπεριφοράς του Κ.Γ.Ε επτά ημερών με θερμοκρασία νερού προσαγωγής στον Κ.Γ.Ε τους 40 °C, η θερμοκρασία νερού στην είσοδο της Γ.Α.Θ. θα είναι 36,79 °C δηλαδή προκαλείται μία διαφορά περί τους 3°C. Μετά από συνεχή λειτουργία τριάντα ημερών η θερμοκρασία εξόδου από τον Κ.Γ.Ε παρουσιάζεται αυξημένη στους 37,12 °C.

Σχετικά με τα αποτελέσματα χρονικής μεταβολής της θερμοκρασίας νερού εξετάζοντας επί παραδείγματι το διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας νερού κατά τη λειτουργία θέρμανσης μετά από χρονικό διάστημα μίας (1) ημέρας διαπιστώνονται τα εξής:

Η θερμοκρασία νερού προσαγωγής κατά τη θέρμανση στον Κ.Γ.Ε βαίνει αυξανόμενη συναρτήσει του μήκους του (αντίστοιχα συναρτήσει του βάθους γεώτρησης).

Για τον λόγο ότι το νερό προσαγωγής από τη είσοδό του και κατά την όδευση προς το κάτω τμήμα του Κ.Γ.Ε έχει σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά σε σχέση με το εδάφος παρουσιάζεται έντονη θερμороή με αποτέλεσμα η αρχική τιμή θερμοκρασίας εισόδου του νερού στους 10 °C σε βάθος 0 m, να ανέλθει περίπου στους 17,8 °C στα 60m που είναι και το όριο της γεώτρησης. Επομένως θεωρώντας μία απλουστευμένη προσέγγιση της πραγματικής μεταβολής -όπως εκφράζεται από την παριστάμενη καμπύλη: $T=f(\text{Depth})$ - σαν γραμμική, διαπιστώνεται μία θερμοκρασιακή αύξηση περίπου 0,13 °C/m γεώτρησης.

Στο κατώτερο σημείο του Κ.Γ.Ε η μορφή του είναι U (εκεί είναι και το πέρας γεώτρησης) και επομένως έχει ληφθεί σε αυτό το τμήμα κοινή θερμοκρασία μεταξύ νερού προσαγωγής και νερού επιστροφής. Το νερό εξερχόμενο από αυτό το τμήμα U έχει αλλάξει κατεύθυνση και πλέον κατευθύνεται προς τα άνω. Για λόγους διάκρισης όπως έχει πλέον ξεκάθαρα διαφανεί και στα προηγούμενα ονομάζεται "νερό επιστροφής". Κατά την ανοδική του πορεία το νερό επιστροφής συνεχίζει να θερμαίνεται προσλαμβάνοντας όμως μικρότερο ποσό θερμότητας διότι οι διαφορές θερμοκρασίας τόσο σε σχέση με το γήινο περιβάλλον όσο και σε σχέση με τον κλάδο νερού καθόδου είναι πλέον μικρές. Η θέρμανση του νερού συνεχίζεται μέχρι μία περιοχή βάθους στην οποία εμφανίζει την μέγιστη τιμή της περίπου στους 19,15 °C. Η περιοχή αυτή είναι μεταξύ 14 και 23 m βάθους εντός της οποίας η καμπύλη θερμοκρασίας νερού επιστροφής εμφανίζει σημείο καμπής και στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω. Αυτό συμβαίνει διότι από αυτό το βάθος και προς τα άνω το νερό επιστροφής δέχεται μεγαλύτερη θερμική επίδραση από τον κλάδο καθόδου. Στα τελευταία 13m βάθους η κλίση της καμπύλης είναι εντονότερη διότι σε αυτό συνεισφέρει το υπεδαφικό στρώμα που βρίσκεται κοντύτερα στην επιφάνεια και στο οποίο οι τιμές θερμοκρασίας εδάφους είναι μικρότερες. Τελικά το νερό επιστρέφει από τον Κ.Γ.Ε. περίπου στους 17,9 °C.

Μετά από συνεχή λειτουργία θέρμανσης πέντε (5) ημερών η καμπύλη θερμοκρασίας νερού επιστροφής έχει μετατοπιστεί σε μικρότερο θερμοκρασιακό εύρος εμφανίζοντας πλέον μέγιστη τιμή περίπου στους 15,9 °C ενώ στην έξοδό του το νερό επιστρέφει τελικά με τιμή περίπου στους 15,2 °C. Αυτό συμβαίνει διότι οι θερμοκρασίες εδάφους πέριξ του Κ.Γ.Ε έχουν μειωθεί. Η θερμοκρασιακή κατανομή στο υπέδαφος έχει διαταραχθεί στην «γειτονιά» του Κ.Γ.Ε. Αυτό γίνεται φανερό από τα αποτελέσματα της παραγράφου: 6.9 "Χρονική Μεταβολή Θερμοκρασίας Εδάφους" τα οποία θα σχολιαστούν εν συνεχεία εκτενέστερα.

Αντίστοιχα σχόλια μπορούν να γίνουν και για τις περιπτώσεις ψύξης με την κύρια διαφορά ότι με τη πάροδο του χρόνου η θερμοκρασία νερού επιστροφής αυξάνεται όπως είναι αναμενόμενο.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα για τη λειτουργία της Γ.Α.Θ σε μεταβαλλόμενες παροχές ανακυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου (εξετάζεται η περίπτωση καθαρού νερού) για το ίδιο έδαφος και την ίδια θερμοκρασία εισόδου νερού στον Κ.Γ.Ε φαίνονται τα εξής: Στη περίπτωση θέρμανσης με παροχή μάζας ανακυκλοφορίας στον Κ.Γ.Ε $m = 0,12 \text{ kg/s}$ η αντλούμενη θερμική ισχύς βαίνει μειούμενη συναρτήσει του χρόνου. Για παράδειγμα προκύπτει εύκολα ότι σε χρονικό διάστημα συνεχούς λειτουργίας 2 ημερών ανέρχεται στα 4,53 kW ενώ σε χρονικό διάστημα 7 ημερών και πλέον σταθεροποιείται στη τιμή των 4,33 kW.

Για τις ίδιες συνθήκες εδάφους και θερμοκρασίας εισόδου νερού στον Κ.Γ.Ε με αύξηση της παροχής μάζας ανακυκλοφορίας στον Κ.Γ.Ε από: $m = 0,12 \text{ kg/s}$ σε: $m = 0,3 \text{ kg/s}$ η αντλούμενη θερμική ισχύς βαίνει επίσης μειούμενη συναρτήσει του χρόνου αλλά σε χρονικό διάστημα συνεχούς λειτουργίας 2 ημερών ανέρχεται στα 9,5 kW ενώ σε χρονικό διάστημα 5 ημερών και πλέον έχει σταθεροποιηθεί στη τιμή των 8,9 kW.

Είναι σύνηθες η αντλούμενη θερμική ισχύς να ανάγεται σε μέτρα βάθους γεώτρησης. Για τη περίπτωση που εξετάζεται η γεώτρηση έχει βάθος 100m επομένως με παροχή ανακυκλοφορίας $m = 0,12 \text{ kg/s}$ η αντλούμενη θερμική ισχύς έπειτα από χρονικό διάστημα 7 ημερών ανέρχεται στα 43,3 W/m γεώτρησης ενώ σε λειτουργία με παροχή $m = 0,3 \text{ kg/s}$ η αντλούμενη θερμική ισχύς έπειτα από χρονικό διάστημα 5 ημερών ανέρχεται στα 89 W/m. Μπορεί φαινομενικά να παρατηρείται οικονομοτεχνικά συμφερότερη η λειτουργία σε υψηλότερες παροχές μάζας αλλά πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη το αναπόφευκτο γεγονός της σταδιακής μείωσης της περικλειόμενης θερμότητας στο έδαφος πέριξ του γεωθερμικού εναλλάκτη. Απαιτείται παραμετρική μελέτη σε διάφορες συνθήκες με την βοήθεια του λογισμικού VG-HEX για την εκλογή της κατάλληλης παροχής ανακυκλοφορίας η οποία θα έχει τέτοια τιμή ώστε να μην οδηγήσει γρήγορα σε ανικανότητα του εδάφους να αναπληρώσει το έλλειμμα θερμικής ενέργειας στον γήινο όγκο του. Η δυνατότητα αυτή είναι και ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα χρήσης του λογισμικού VG-HEX.

Στη περίπτωση ψύξης με παροχή μάζας ανακυκλοφορίας στον Κ.Γ.Ε $m = 0,12 \text{ kg/s}$ η απορριπτόμενη θερμική ισχύς βαίνει μειούμενη συναρτήσει του χρόνου. Για παράδειγμα προκύπτει εύκολα ότι σε χρονικό διάστημα συνεχούς λειτουργίας 2 ημερών η ικανότητα απόρριψης θερμότητας ανέρχεται στα 3,40 kW ενώ σε χρονικό διάστημα 7 ημερών και πλέον σταθεροποιείται στη τιμή των 3,32 kW.

Για τις ίδιες συνθήκες εδάφους και θερμοκρασίας εισόδου νερού στον Κ.Γ.Ε με αύξηση της παροχής μάζας ανακυκλοφορίας στον Κ.Γ.Ε από: $m = 0,12 \text{ kg/s}$ σε: $m = 0,3 \text{ kg/s}$ η απορριπτόμενη θερμική ισχύς βαίνει επίσης μειούμενη συναρτήσει του χρόνου.

Σε χρονικό διάστημα συνεχούς λειτουργίας 2 ημερών ανέρχεται στα 2,175 kW ενώ σε χρονικό διάστημα περίπου 5 ημερών και πλέον έχει σταθεροποιηθεί στη τιμή των 2,083 kW.

Ανάγοντας την απορριπτόμενη θερμική ισχύ σε μέτρα βάθους γεώτρησης παρατηρείται ότι με παροχή ανακυκλοφορίας $m = 0,12 \text{ kg/s}$ η απορριπτόμενη θερμική ισχύς έπειτα από χρονικό διάστημα 7 ημερών ανέρχεται στα 33,2 W/m γεώτρησης ενώ σε λειτουργία με παροχή $m = 0,3 \text{ kg/s}$ η απορριπτόμενη θερμική ισχύς σταθεροποιείται γρηγορότερα στα 20,83 W/m γεώτρησης έπειτα από χρονικό διάστημα 5 ημερών.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι στη περίπτωση θέρμανσης για το ίδιο έδαφος και την ίδια θερμοκρασία εισόδου νερού στον Κ.Γ.Ε η αύξηση της παροχής μάζας ανακυκλοφορίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού μείωσης του εδαφικού ενεργειακού περιεχομένου πέριξ του γεωθερμικού εναλλάκτη δοθέντος ότι μεγαλύτερες τιμές παροχής μάζας ανακυκλοφορίας απορροφούν μεγαλύτερο ποσό θερμότητας από το έδαφος. Αντίστοιχα για τη περίπτωση ψύξης η αύξηση της παροχής ανακυκλοφορίας οδηγεί σε μείωση του ρυθμού απώριψης θερμότητας στο έδαφος δοθέντος ότι το εδαφικό ενεργειακό περιεχόμενο πέριξ του γεωθερμικού εναλλάκτη βαίνει χρονικά αυξανόμενο με αποτέλεσμα τον σταδιακό «κορεσμό» του. Στη περίπτωση θέρμανσης η υψηλότερη παροχή ανακυκλοφορίας οδηγεί σε μικρότερες θερμοκρασίες νερού εισόδου στην Γ.Α.Θ. Γενικά μία υπερδιαστασολογημένη τιμή παροχής στον Κ.Γ.Ε -αναλόγως και των λοιπών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την εγκατάσταση- θα έχει ως αποτέλεσμα ακόμη και τη μείωση της ενεργειακής απολαβής από το έδαφος.

Τονίζεται όμως ότι σε κάθε περίπτωση ο σχεδιασμός του Κ.Γ.Ε σχετικά με τη παροχή ανακυκλοφορίας πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζεται τυρβώδης ροή του εργαζόμενου μέσου καθώς είναι προϋπόθεση -σε συνδυασμό βέβαια με τις υπόλοιπες παραμέτρους- για την επίτευξη του βέλτιστου βαθμού απόδοσής του.

Η θερμοκρασία εισόδου στο νερό στον Κ.Γ.Ε σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία εξόδου του νερού η οποία έχει καθοριστική επίδραση στο COP της Γ.Α.Θ. Παρατηρείται ότι για την ίδια παροχή ανακυκλοφορίας και το ίδιο έδαφος αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου νερού στον Κ.Γ.Ε οδηγεί σε μείωση της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος τόσο στη λειτουργία θέρμανσης όσο και ψύξης. Μάλιστα η μείωση της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος είναι μεγαλύτερη στο εύρος θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ $\Delta T_{water,in} = (10 - 8)^\circ C$ από ότι στην ίδια θερμοκρασιακή διαφορά αλλά στο εύρος $\Delta T_{water,in} = (12 - 10)^\circ C$. Γενικά μικρότερη θερμοκρασία εισόδου του νερού στον Κ.Γ.Ε οδηγεί σε μεγαλύτερη απομαστευόμενη θερμότητα στη περίπτωση θέρμανσης. Στη περίπτωση της ψύξης μικρότερη θερμοκρασία εισόδου του νερού στον Κ.Γ.Ε οδηγεί σε μείωση της απορριπτόμενης θερμότητας στο εδαφικό περιβάλλον.

Η εξέταση διαφορετικών ειδών εδάφους επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων που σχετίζονται με τις βασικές παραμέτρους θερμικών ιδιοτήτων εδάφους. Συγκεκριμένα από τα αποτελέσματα της απόδοσης διαφορετικών ειδών εδάφους εξάγονται τα εξής συμπεράσματα: Η μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας εδάφους $k(j)$ σχετίζεται με την ολική εδαφική αγωγιμότητα $1/R(j)$. Με χρήση του λογισμικού VG-HEX όπως αναλυτικά παρουσιάστηκε η συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών λαμβάνει χώρα στο μητρώο BHTA(j) ως εξής:

Λαμβάνεται ο συνολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας από συναγωγή και αγωγή που υπολογίζεται:

$$BHTA(j) = \frac{1}{R(j)} = \frac{2\pi}{\frac{1}{R1 \cdot HF} + \frac{\ln(\frac{R2}{R1})}{LS} + \frac{\ln(\frac{R3}{R2})}{k(j)}}$$

Όπου:

$k(j)$ η ειδική θερμική αγωγιμότητα εδάφους αναλόγως βάθους που έχει υπολογιστεί στο αρχικό βήμα εκτέλεσης του προγράμματος μέσω της υπορουτίνας AssignZeroHoursTemp σύμφωνα με συγκεκριμένη γεωθερμική βαθμίδα.

HF = συντελεστής συναγωγιμότητας νερού

LS = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υλικού Κ.Γ.Ε

R2 = εξωτερική ακτίνα σωλήνα ΚΓΕ

R1 = εσωτερική ακτίνα σωλήνα ΚΓΕ

R3 = ακτίνα οπής γεώτρησης

Για υπολογιστικό πλέγμα με διακριτοποίηση $DX=DY=0,5$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εδάφους είναι ο ίδιος για όλους τους δείκτες κατακόρυφης κατεύθυνσης από $j=1$ έως και $j=21$ και μάλιστα για όλο το μήκος οριζόντιας εξέτασης (από $i=1$ έως και $i=x=27$). Σε αυτή τη περιοχή προκειμένου για έδαφος αποτελούμενο κυρίως από δολομιτικό ασβεστόλιθο λαμβάνει τη τιμή $k(j) = 2,4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Επομένως το $k(j)$ είναι το ίδιο είτε υπολογιστεί η συνολική θερμική αγωγιμότητα εδάφους $1/R(j)$ στο τοίχωμα της οπής γεώτρησης: R3, είτε στη θέση $i=2$ κλπ.

Εξετάζοντας ως παράδειγμα τη παραπάνω περιοχή εδάφους στην οποία επικρατεί σταθερή τιμή του $k(j)$ φαίνεται ότι για διαφορετικά είδη εδάφους η αύξηση της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας εδάφους οδηγεί όπως ήταν αναμενόμενο σε αύξηση της συνολικής θερμικής αγωγιμότητας. Επομένως για εδάφη με μεγαλύτερη ειδική θερμική αγωγιμότητα k (W/mK) η συναλλαγή θερμότητας μεταξύ εδάφους και Κ.Γ.Ε αυξάνει. Κατά συνέπεια αυξάνεται και η ανά μέτρο μήκους γεώτρησης αποδιδόμενη (ή απορριπτόμενη) θερμική ισχύς. Αυτό διαπιστώνεται άμεσα από τα παραδείγματα εδαφικών υλικών που εξετάστηκαν τόσο σε θέρμανση όσο και σε λειτουργία ψύξης.

Διαφορετικά είδη εδάφους παρουσιάζουν διαφορετική τιμή της κατ' όγκον θερμοχωρητικότητας εδάφους ($\text{J/m}^{30}\text{C}$). Η επίδραση αυτής της παραμέτρου αφορά στο αποτέλεσμα που έχει επί του αριθμού Fourier.

Από τον ορισμό:
$$Fo = \frac{\alpha_g \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2}$$

Όπου:

$$\alpha_g = \frac{k_g}{\rho \cdot Cp_g} \text{ η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα εδάφους σε } \text{m}^2/\text{s}$$

$$\rho \cdot Cp_g = \text{«RCE»} = \text{η κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους σε } \text{J/m}^{30}\text{C}$$

Η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα εδάφους έχει την φυσική έννοια ότι όσο μεγαλύτερη τόσο ταχύτερα διαχέεται η θερμότητα στο υλικό. Δηλαδή έχει να κάνει με την χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο σώμα κατά την μεταφορά θερμότητας από αυτό. Επομένως εδάφη με μικρότερη κατ' όγκον θερμοχωρητικότητα εδάφους εμφανίζουν μεγαλύτερη θερμοκρασιακή αγωγιμότητα εδάφους και άρα μεγαλύτερο αριθμό Fourier για την ίδια ειδική θερμική αγωγιμότητα εδάφους.

Σχετικά με τη χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας εδάφους στη περιοχή γύρω από τον Κ.Γ.Ε παρατηρούνται τα εξής: Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας εδάφους αυξάνεται με την απόρριψη θερμότητας στο έδαφος κατά τη λειτουργία ψύξης, ενώ μειώνεται βαθμιαία με την άντληση θερμότητας κατά τη διάρκεια λειτουργίας θέρμανσης. Αυτό ισχύει γενικά για όλες τις τιμές παραμέτρων εισόδου που επιδρούν άμεσα στην αποδοτικότητα του Κ.Γ.Ε (παροχή ανακυκλοφορίας, θερμοκρασία εισόδου νερού, τύπος εδάφους κλπ). Γενικώς η συναλλασσόμενη θερμική ενέργεια μεταξύ εδάφους και Κ.Γ.Ε εξαρτάται από την θερμοκρασιακή κατανομή του υπεδάφους. Ο βαθμός απόδοσης του Κ.Γ.Ε προκειμένου για συνεχή (μη-διακοπτόμενη) λειτουργία φθίνει με τη πάροδο του χρόνου για τον κύριο λόγο ότι οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ σωληνώσεων και εδάφους μειώνονται.

Στη περίπτωση θέρμανσης η θερμοκρασία εδάφους περίξ του Κ.Γ.Ε μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου διότι η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που περικλείεται σε όλον τον υπεδαφικό όγκο που εξετάζεται φθίνει σταδιακά. Ο βαθμός μείωσης της θερμοκρασίας στο υπέδαφος εξαρτάται από την απόσταση του εκάστοτε στοιχειωδούς υπεδαφικού όγκου ελέγχου τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη απόσταση από τον Κ.Γ.Ε.

Στη περίπτωση ψύξης τα συμπεράσματα όπως αναμένεται είναι ανάλογα. Η θερμοκρασία εδάφους περίξ του Κ.Γ.Ε αυξάνεται με τη πάροδο του χρόνου διότι η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που περικλείεται σε όλον τον υπεδαφικό όγκο που εξετάζεται αυξάνεται σταδιακά. Το υπέδαφος συσσωρεύει θερμική ενέργεια με τη πάροδο του χρόνου. Ο βαθμός αύξησης της θερμοκρασίας στο υπέδαφος εξαρτάται (όπως και στη περίπτωση θέρμανσης) από την απόσταση του εκάστοτε στοιχειωδούς υπεδαφικού όγκου ελέγχου τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη απόσταση από τον Κ.Γ.Ε. Γενικά εδαφικοί όγκοι που βρίσκονται πλησιέστερα στον Κ.Γ.Ε επηρεάζονται περισσότερο από αντίστοιχους που βρίσκονται σε περισσότερο απομακρυσμένες θέσεις. Η επίδραση αυτή και ο ρυθμός μεταβολής της υπεδαφικής θερμοκρασίας εξαρτάται ταυτόχρονα –όπως αναλυτικά εξηγήθηκε και στα παραπάνω- και από μία σειρά παραμέτρων όπως η παροχή ανακυκλοφορίας, η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον Κ.Γ.Ε, τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους κλπ.

Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση τόσο του εποχιακού όσο και του ολικού συντελεστή συμπεριφοράς μίας Γ.Α.Θ. εντός των ορίων εύρυθμης λειτουργίας αποτελεί η διεξοδική διερεύνηση κατά το σχεδιασμό του συστήματος ώστε η εκλογή των συσχετιζόμενων παραμέτρων να αποσκοπούν στην αποκατάσταση της υπεδαφικής θερμικής ισορροπίας.

Η εκλογή των παραμέτρων πρέπει να είναι τέτοια ώστε στη περίπτωση λειτουργίας θέρμανσης το έδαφος να ανανεώνει επαρκώς το έλλειμμα θερμικής ενέργειας που προκύπτει από την άντληση θερμότητας από τα περιβάλλοντα τη γεώτρηση πετρώματα ενώ αντίστοιχα στη περίπτωση ψύξης να διαχέει αποτελεσματικά στις παρακείμενες εδαφικές μάζες τη περίσσεια θερμότητας που προκύπτει από την απόρριψη θερμότητας.

Από το λογισμικό VG-HEX που αναπτύχθηκε εξάγονται αποτελέσματα για συνεχή λειτουργία του Κ.Γ.Ε εντός του χρονικού διαστήματος εξέτασης που ορίστηκε από τον χρήστη. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αφορούν συνολικό χρονικό διάστημα λειτουργίας χωρίς διακοπτόμενη ζήτηση θερμικής ή ψυκτικής ενέργειας. Στη πραγματικότητα οι Γ.Α.Θ. δεν λειτουργούν σε 24ωρη βάση αλλά κατά διαστήματα σύμφωνα με τις περιόδους λειτουργίας που εξυπηρετούν τις ανάγκες του εκάστοτε κτιρίου. Επομένως, με σωστή εκλογή όλων των εμπλεκόμενων παραμέτρων η απόδοση του Κ.Γ.Ε θα διατηρείται στα επίπεδα σχεδιασμού λόγω της ενεργειακής εξομάλυνσης και θερμοκρασιακής υπεδαφικής αποκατάστασης κατά τις περιόδους μη λειτουργίας της Γ.Α.Θ. Από σειρά προσομοιώσεων συνοδευόμενες από επικύρωση των υπολογιστικών μοντέλων μέσω πειραματικών διατάξεων, έχει διαπιστωθεί ότι οι περίοδοι εδαφικής αποκατάστασης πρέπει γενικά να έχουν σχεδόν ίση χρονική διάρκεια με τις περιόδους χρήσης.

Υπάρχουν βέβαια περιπτώσεις όπου απαιτείται ειδικός χειρισμός της θερμικής αποκατάστασης του υπεδαφικού υλικού διότι η διαδικασία αυτή δεν είναι δυνατόν να ολοκληρωθεί αφ' ευατής. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να έχει ληφθεί εκ των προτέρων μέριμνα για την υποστήριξη της διεργασίας από ξεχωριστά υποσυστήματα όπως με χρήση ηλιακών συλλεκτών ή την ανακόμιση θερμότητας από τη χρήση συμβατικών κλιματιστικών μονάδων κατά τη διάρκεια του θέρους.

Η πολυπλοκότητα που εμφανίζει ο σωστός σχεδιασμός ενός Κ.Γ.Ε έχει ήδη διαφανεί. Συμπληρωματικά αναφέρεται ότι σημαντικό ρόλο για την αποδοτικότητα του συστήματος αποτελεί και το ποσό υγρασίας που περικλείεται στο υπέδαφος το οποίο μάλιστα κατά περίπτωση εμφανίζει εποχιακή διακύμανση. Επιπρόσθετα, η ύπαρξη υπογείων υδάτων πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός Κ.Γ.Ε καθώς επηρεάζει όλη τη διεργασία θερμικής συναλλαγής. Για αυτόν τον λόγο πρέπει να εξεταστούν κατάλληλα υλικά πλήρωσης της οπής γεώτρησης όπως για παράδειγμα μίγμα μπετονίτη-χαλαζίτη. Τέλος, αναφέρονται οι ακόλουθες γενικές παρατηρήσεις που αφορούν τη προσομοίωση τέτοιων συστημάτων:

1). Το υπολογιστικό πλέγμα θα μπορούσε να αναπτυχθεί σε περισσότερες από μία φάσεις ώστε η υπορουτίνα κατάστρωσής του να επέτρεπε την εκλέπτυνση του πλέγματος στο σύνορο του Κ.Γ.Ε. λόγω των μεγαλύτερων θερμοκρασιακών κλίσεων. Είναι συνήθη πλέγματα που καταστρώνονται με συγκεκριμένα χωρικά βήματα αυξανόμενης της πλεγματικής απόστασης από τη θερμική πηγή (ή καταβόθρα). Τέτοιος σχεδιασμός θα επέτρεπε αποτελέσματα με αυξημένη ακρίβεια. Για τον χρήστη του VG-HEX κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει αμέσως κατανοητό εισάγοντας διαφορετικές αλγεβρικές διαφορές στα δεδομένα εισόδου του προγράμματος και ελέγχοντας τα αποτελέσματα για τις ίδιες φυσικά λοιπές συνθήκες προσομοίωσης.

2). Εφόσον στο σύνορο του πλέγματος με δείκτη οριζόντιας κατεύθυνσης $i = 1$ εισαγόταν συνθήκες Dirichlet με πολύ μικρότερες τιμές θερμοκρασίας τότε οι προκύπτουσες θερμοκρασιακές κλίσεις θα ήταν σημαντικά μεγαλύτερες. Κατά συνέπεια οι μεταβολές στις παραμέτρους εισόδου του υπολογιστικού μοντέλου θα ήταν περισσότερο ευδιάκριτες. Κάλι τέτοιο όμως θα απείχε από την κατά το δυνατόν καλύτερη προσπάθεια απεικόνισης της πραγματικής κατάστασης.

3). Μικρή βελτίωση στα αποτελέσματα των υπολογισμών είναι δυνατόν να παρατηρηθεί αν αντί της θεώρησης του Κ.Γ.Ε ως ένας σωλήνας ανόδου ή καθόδου (ανάλογα αν επιλύεται η θερμοκρασία νερού επιστροφής ή προσαγωγής αντίστοιχα) με την εισαγωγή στο μοντέλο προσομοίωσης ενός παράγοντα μορφής ο οποίος θα συσχέτιζε την κυλινδρική περιφέρεια των 2 σωλήνων του Κ.Γ.Ε με το ορθογωνικό υπολογιστικό πλέγμα. Από τη διερεύνηση διαφόρων υπολογιστικών μεθόδων που υιοθέτησαν αυτόν τον συντελεστή γεωμετρίας (βλ. Β' Μέρος παρ/φος 2: «Αναφορά σε υπάρχοντα αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης θερμικής συμπεριφοράς Κ.Γ.Ε») διαφαίνεται πως η μεταβολή στα αποτελέσματα των τιμών θερμοκρασίας ανέρχεται στο εύρος από 3 έως 8%. Αντίθετα η αναποτελεσματική γνώση των υπεδαφικών ιδιοτήτων οδηγεί σε κατά πολύ περισσότερο λανθασμένα συμπεράσματα καθώς η γνώση της υπεδαφικής συμπεριφοράς στη συναλλαγή θερμότητας αποτελεί μία από τις κύριες παραμέτρους για τον βέλτιστο σχεδιασμό.

4). Κάθε υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης οφείλει να συνοδεύεται από διαδικασία επικύρωσης των αποτελεσμάτων του. Ένας τρόπος είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων του λογισμικού με τα ληφθέντα αποτελέσματα από μια πειραματική διάταξη. Η επικύρωση του λογισμικού VG-HEX που αναπτύχθηκε ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας διατριβής. Τονίζεται όμως ότι το λογισμικό VG-HEX που αναπτύχθηκε αποτελεί την εξέλιξη ενός παλαιότερου υπολογιστικού προγράμματος -που δημιούργησε ο υπογράφων την επιμέλεια του παρόντος συγγράμματος- τα αποτελέσματα του οποίου έχει επικυρώσει πειραματικά.

Γ' ΜΕΡΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- 1. Γενικά αποτελέσματα χρήσης της Κανονικής Γεωθερμίας από τη διεθνή εμπειρία**
- 2. Συνοπτική αναφορά για τις Ελληνικές προοπτικές – Προγράμματα & Δράσεις**
- 3. Οικονομικά στοιχεία**
- 4. Νομοθεσία**

1. Γενικά αποτελέσματα χρήσης της Κανονικής Γεωθερμίας από τη διεθνή εμπειρία

Η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας ομαλής ενθαλπίας με γεωθερμικές αντλίες άρχισε στις τεχνολογικά προηγμένες χώρες, όπως είναι οι Η.Π.Α., ο Καναδάς, η Σουηδία, η Γαλλία, η Ελβετία και η Γερμανία γύρω στο 1980 μετά την άνοδο των τιμών πετρελαίου στη δεκαετία του 1970. Μέχρι το 1990 υπήρχε σε λειτουργία σημαντικός αριθμός εγκαταστάσεων με γεωθερμικές αντλίες στις χώρες αυτές, που συνεχίζεται με ταχύ ρυθμό. Η σημαντική αύξηση του αριθμού των γεωθερμικών εγκαταστάσεων στις χώρες αυτές οφείλεται κατά μεγάλο μέρος στα κίνητρα που δίνουν κρατικοί φορείς και οι ηλεκτρικές εταιρίες κοινής ωφέλειας στους πελάτες τους για να αντικαταστήσουν τη θέρμανση με καύσιμα ή με ηλεκτρικό ρεύμα με γεωθερμική αντλία. Έτσι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση των αιχμών ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος και περιορισμός στη χρήση των ρυπογόνων καυσίμων.

Σήμερα οι ΓΑΘ είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας παγκοσμίως. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη συμβαίνει στις Η.Π.Α και Ευρώπη ενώ σημαντική είναι και η εφαρμογή σε Ιαπωνία και Τουρκία. Μέχρι το τέλος του 2004 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανερχόταν σε περίπου 12 GW_{th} από τη συνολική παγκόσμια απαίτηση ενέργειας 20 TWh.

Με βάση τα στοιχεία για το έτος 2006 τα συστήματα ΓΑΘ ανέρχονται σε περίπου σε 1.000.000 παγκοσμίως ενώ ο αριθμός τους τα τελευταία 10 χρόνια έχει σημειώσει αύξηση κατά περίπου 10% σε πάνω από 30 χώρες. Μόνο στις Η.Π.Α πωλούνται περίπου 50.000 συστήματα ΓΑΘ ετησίως με τη πλειοψηφία αυτών σε κατοικίες. Όσον αφορά τη ταξινόμηση των συστημάτων ανάλογα με το είδος του Γεωθερμικού Εναλλάκτη που χρησιμοποιείται, για περισσότερα από 500.000 από τα περίπου 1.000.000 υπάρχοντα παγκοσμίως το 85% είναι κλειστά συστήματα (46% Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη Θερμότητας, 38% Οριζόντιου Γεωθερμικού Εναλλάκτη Θερμότητας) και 15% είναι ανοικτά συστήματα δηλαδή αντλίες θερμότητας με κυκλοφορία υπόγειου νερού σε ανοικτό κύκλωμα (Πηγή: Lund University, Sweden).

Μέχρι σήμερα η χρήση του παραπάνω αριθμού Γ.Α.Θ σε παγκόσμια κλίμακα έχει επιφέρει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Ελάττωση περισσότερων από 5,8 x 10 τόνων ρύπων CO₂ ετησίως.
- Εξοικονόμηση περισσότερων από 1,6 x 10⁹ ισοδύναμων τόνων άνθρακα ετησίως.
- Εξοικονόμηση ενέργειας σχεδόν 40 x 10¹² BTU συμβατικών καυσίμων.
- Μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά 2,6 x 10⁶ kW.

Οι ΓΑΘ γνωρίζουν σήμερα πραγματική άνθηση, σημειώνοντας ετήσια αύξηση σχεδόν μεγαλύτερη του 25%. Η εγκατεστημένη ισχύς των ΓΑΘ σε όλο τον κόσμο ανήλθε στα 15.384 MWt (στοιχεία 2005), μέγεθος που αντιπροσωπεύει περισσότερο από το μισό της εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος σε άμεσες χρήσεις. Η γεωθερμική ενέργεια που αξιοποιείται από τις ΓΑΘ ανέρχεται σε 1,5 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου ανά έτος. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη των ΓΑΘ σημειώθηκε στις Η.Π.Α και τη Δυτική και Βόρεια Ευρώπη (Γερμανία, Ελβετία, Σουηδία, Νορβηγία, Δανία). Στην Ευρώπη υπάρχουν εγκατεστημένες περισσότερες από 380.000 μονάδες με συνολική εγκατεστημένη θερμική ισχύ 4531 MW_{th}. Η Σουηδία έχει σήμερα το μεγαλύτερο αριθμό συστημάτων ΓΑΘ στην Ευρώπη, 185.530 μονάδες, ενώ η χώρα αυτή βασίζεται και στη Γεωθερμία για να επιτύχει τον πρόσφατα ανακοινωθέντα στόχο της πλήρους απεξάρτησης από το πετρέλαιο μέχρι το 2020. Στην Γαλλία, περισσότερο από το 90% των συστημάτων ΓΑΘ που εγκαθίστανται τα τελευταία χρόνια είναι οριζόντιου τύπου.

2. Συνοπτική αναφορά για τις Ελληνικές προοπτικές – Προγράμματα & Δράσεις

Σε αντίθεση με τις παραπάνω χώρες, στην Ελλάδα, όπου δαπανούνται μεγάλες ποσότητες πετρελαίου και ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση/ψύξη και παραγωγή ζεστού νερού, συζητάται χρονιά τώρα η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας και προστασίας του περιβάλλοντος από τη ρύπανση, δυστυχώς όμως τα αποτελέσματα απέχουν κατά πολύ από τους αρχικούς στόχους.

Επιβάλλεται λοιπόν η έναρξη προγραμμάτων για την άμεση ανάπτυξη της εκμετάλλευσης της κανονικής γεωθερμίας, που σε σχέση με την εκμετάλλευση της γεωθερμίας μέσης και υψηλής ενθαλπίας, είναι τεχνολογικά απλούστερη. Μπορούν να εφαρμοστούν προγράμματα που θα προβλέπουν κυρίως τη χρήση αντλιών θερμότητας νερού-νερού σε αυτόνομες μονάδες θέρμανσης - ψύξης αρχικά σε κατοικίες και στη συνέχεια σε μεγαλύτερα κτίρια. Επίσης θα πρέπει να ερευνηθούν οι δυνατότητες εκμετάλλευσης του γεωθερμικού δυναμικού με βαθύτερες γεωτρήσεις που θα δώσουν υπόγειο νερό υψηλότερων θερμοκρασιών. Με τα προγράμματα αυτά οι ενδιαφερόμενοι θα αποκτήσουν πολύτιμη γνώση και εμπειρία παράλληλα θα ενημερωθεί το αγοραστικό κοινό ενώ θα δημιουργηθούν και οι προϋποθέσεις για την ίδρυση εξειδικευμένων μελετητικών και κατασκευαστικών εταιρειών για τη διάδοση των συστημάτων εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας.

Με την εμπειρία του πρώτου σταδίου εφαρμογής, η χρήση της τοπικής γεωθερμικής ενέργειας θα επεκταθεί και σε κτιριακά συγκροτήματα, ή οικισμούς με κεντρικά δίκτυα διανομής του ζεστού και ψυχρού νερού μέσω της τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης. Επίσης θα αναπτυχθεί η εγχώρια σχετική βιομηχανία και βιοτεχνία και γενικά η εγχώρια γεωθερμική τεχνολογία, που θα συμβάλλει σημαντικά στην ταχύτερη αξιοποίηση και της γεωθερμικής ενέργειας υψηλών θερμοκρασιών της χώρας μας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός των δύο ή και των τριών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συστήματα εκμετάλλευσης, στα οποία οι πηγές θα συνεργάζονται, ώστε να αλληλοεξουδετερώνουν τα μειονεκτήματά τους. Για παράδειγμα στη διάρκεια μακρού χρόνου ηλιοφάνειας (το καλοκαίρι) η πλεονάζουσα ηλιακή θερμική ενέργεια μπορεί να διοχετεύεται στα πετρώματα του υπεδάφους, όπου θα αποθηκεύεται ή θα εξομαλύνει κάποια έντονη θερμοκρασιακή πτώση, που ενδεχομένως θα έχει προκληθεί από μια προηγούμενη χειμερινή εντατική λειτουργία γεωθερμικών αντλιών. Οι τελευταίες, σε περιόδους νεφώσεων και συνεπώς αδράνειας των ηλιακών συλλεκτών, θα μπορούν να προσφέρουν θερμική ενέργεια από το υπέδαφος, χρησιμοποιώντας και την τεχνητά αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια.

Με βάση τα παραπάνω είναι φανερό ότι σε κάθε νέα κατοικία και κτίριο, σε κάθε νέο κτιριακό συγκρότημα ή και σε κάθε παλαιό ανακαινιζόμενο κτίριο και κτιριακό συγκρότημα, ιδιαίτερα στις περιβαλλοντικά βεβαρημένες πόλεις, όπως είναι η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη, επιβάλλεται να εφαρμοστούν τα νέα συστήματα που εκμεταλλεύονται την εν λόγω ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή και να περιοριστεί κατά το δυνατόν η χρήση των ρυπογόνων καυσίμων. Εξ' άλλου και η Ε.Ε είναι πρόθυμη να συνδράμει οικονομικά σε τέτοιες εφαρμογές με άμεση απόδοση, όπως συμβαίνει σε άλλες κοινοτικές χώρες.

Αυτό που καθιστά ένα σύστημα Γ.Α.Θ ιδιαίτερο από την πλευρά της αποδοτικότητάς του αλλά παράλληλα και κοστολογικά ακριβότερο είναι ο Κ.Γ.Ε.

Ένα συμβατικά σχεδιασμένο σύστημα αντλιών θερμότητας νερού-νερού περιλαμβάνει έναν λέβητα ως πηγή θερμότητας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας θέρμανσης και ενός πύργου ψύξης για να απορρίψει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ψύξης. Το νερό κυκλοφορεί στο κύκλωμα των αντλιών θερμότητας νερού που έχουν συνδεθεί στο σύστημα.

Ο λέβητας (για τη χειμερινή λειτουργία) και ο πύργος ψύξης (για τη θερινή λειτουργία) παρέχουν μια αρκετά σταθερή θερμοκρασία στο κύκλωμα νερού η οποία επιτρέπει στις αντλίες θερμότητας νερού να λειτουργήσουν με υψηλή απόδοση.

Μια συμβατική αντλία θερμότητας αέρα χρησιμοποιεί τον αέρα του περιβάλλοντος ως πηγή θερμότητας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας θέρμανσης και ως δεξαμενή απόρριψης θερμότητας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ψύξης. Οι αντλίες θερμότητας αέρα υπόκεινται έτσι στις έντονες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα και ως εκ τούτου καθίστανται λιγότερο αποδοτικές στις υψηλές θερμοκρασίες αέρα ενώ ο συντελεστής συμπεριφοράς τους παρουσιάζει βελτίωση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Επιπλέον, η συναλλαγή θερμότητας μέσω του αέρα δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο τα συστήματα θερμαντικών νερού λόγω του πολύ μικρότερου συντελεστή θερμοχωρητικότητας του αέρα σε σύγκριση με αυτόν του νερού.

Μία Γ.Α.Θ χρησιμοποιεί το έδαφος ως πηγή θερμότητας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας θέρμανσης και ως καταβόθρα θερμότητας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ψύξης. Οι Γ.Α.Θ. κατά περίπτωση μπορούν να υπόκεινται σε μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις από τις συμβατικές αντλίες θερμότητας νερού αλλά όχι σε τέτοιες θερμοκρασιακές μεταβολές όπως σε αυτές που υπόκεινται αντλίες θερμότητας αέρα. Κατά συνέπεια ολοένα και περισσότεροι κατασκευαστές Γ.Α.Θ εντείνουν τις προσπάθειές τους για παραγωγή τύπων μεταβλητού θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας.

Η κανονική γεωθερμία παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα και ορισμένα μειονεκτήματα σε σχέση με την ηλιακή και την αιολική ενέργεια από πλευράς εκμετάλλευσης.

Πλεονεκτήματα:

1. Είναι διαθέσιμη με σταθερές παροχές σ' όλη τη διάρκεια του χρόνου υπό οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες και σχεδόν παντού.
2. Οι απαιτήσεις σε χώρο μιας εγκατάστασης εκμετάλλευσης είναι ασήμαντες και δεν δημιουργούν αρχιτεκτονικά ή αισθητικά περιβαλλοντικά προβλήματα.
3. Οι πολύ χαμηλές υπεδαφικές θερμοκρασίες (κάτω των 25 °C) σε συνδυασμό με γεωθερμικές αντλίες προσφέρονται για την παραγωγή τόσο ζεστού, όσο και ψυχρού νερού, δηλαδή για θέρμανση και ψύξη χώρων.

Μειονεκτήματα:

1. Το σχετικά υψηλό αρχικό κόστος της εγκατάστασης που μπορεί να απαιτήσει σημαντικές δαπάνες για γεωτρήσεις και εναλλάκτες θερμότητας.
2. Η χαμηλή ισχύς της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας.

Έναντι του συστήματος θέρμανσης - ψύξης (κλιματισμού) με αντλία θερμότητας με «πηγή» τον αέρα, που εφαρμόζεται ευρύτατα στην Ελλάδα, το γεωθερμικό σύστημα παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Ο βαθμός απόδοσης (C.O.P), δηλαδή η ποσότητα θερμικής ενέργειας που παράγει η γεωθερμική αντλία σε σχέση με την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, που καταναλώνει, είναι στην πράξη 3,5 έως 4,0, ενώ στην αντλία θερμότητας με «πηγή» τον αέρα είναι κατώτερη από 2,8 (βλέπε σχήμα 2), εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

2. Λειτουργία σε οποιεσδήποτε καιρικές και θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος, υπό το μηδέν το χειμώνα, και πάνω από 40°C το καλοκαίρι, διότι η αντλία θερμότητας με «πηγή» το νερό τροφοδοτείται από το γεωθερμικό εναλλάκτη με νερό αμετάβλητης θερμοκρασίας, ίσης περίπου με αυτή που επικρατεί στο υπέδαφος κάτω από το κτίριο.

3. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος γεωκλιματισμού είναι πολύ χαμηλότερο, απ' ό,τι στο σύστημα με αντλία θερμότητας με «πηγή» τον αέρα όπως φαίνεται από τα προηγούμενα παραδείγματα.

4. Συμβάλλει θετικά σε δύο υψηλούς αναπτυξιακούς - κοινωνικούς στόχους:

α) Στην εξοικονόμηση ενέργειας με την πολύ χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και την παραγωγή πολλαπλάσιας θερμικής και ψυκτικής ενέργειας από την επιτόπια γεωθερμική.

β) Στην προστασία του περιβάλλοντος, διότι, χρησιμοποιώντας την καθαρή γεωθερμική ενέργεια, εκτοπίζει το ρυπογόνο πετρέλαιο και μειώνει την κατανάλωση ηλ. ενέργειας, που, όπως είναι γνωστό, παράγεται στη χώρα μας κυρίως στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς από λιγνίτη.

Πίνακας 2-1 Μεταβολή απόδοσης των θερμαντλιών.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Χειμώνας			Θέρος	
	+7°	0°	-5°	+35°	+45°
Θερμαντλία με πηγή αέρα	100%	80%	60%	100%	90%
Γεωθερμική Αντλία	100%	100%	100%	100%	100%

Σημαντικές δράσεις για τις Α.Π.Ε διαχειρίζονται από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Ειδικότερα:

Έργα σχετικά με την Έρευνα και Τεχνολογική Ανάπτυξη της Γεωθερμίας στα οποία συμμετείχε το ΚΑΠΕ κατά το 2007:

1). 29/04/2004 - 31/01/2007

ΓΓΕΤ, ΕΠΑΝ/Πράξη 4.3.6.1.β Συνεργασία με Ε&Τ οργανισμούς χωρών εκτός Ευρώπης «*Geothermal Heat Pump Technology Transfer From Usa To Greece –GHPTRANS*»

Μέσω του έργου αυτού έγινε μεταφορά τεχνογνωσίας από τις ΗΠΑ στην Ελλάδα σε θέματα ανάπτυξης και διάδοσης τεχνολογίας συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Ακόμα αναπτύχθηκε πιλοτική μονάδα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας με οριζόντιο γήινο εναλλάκτη στο Νέο Ρύσιο Θεσσαλονίκης.

2). 01/11/2005 - 31/10/2008

ΓΓΕΤ, ΠΕΝΕΔ/2003 -03ΕΔ93 «*Υπεδαφική Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας μέσω της χρήσης Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας Υφιστάμενης και Νέας Τεχνολογίας*»

Το έργο αφορούσε στην έρευνα των υπεδαφικών αποθηκών θερμότητας που συνδυάζονται με γήινους εναλλάκτες θερμότητας.

3). 18/07/2006 - 31/05/2008

ΓΓΕΤ-ΠΕΠ Βορείου Αιγαίου 2000-2006 «*Ανάπτυξη Ολοκληρωμένης Μεθοδολογίας για την Έρευνα και Οργάνωση Δοκιμών για την Εκμετάλλευση της Γεωθερμίας Χαμηλής Ενθαλπίας στη Νησιωτική Ελλάδα -ΘΕΡΜΟΠΟΛΙΣ*»

Στόχος του έργου ήταν η δημιουργία μιας κοινοπραξίας έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης στον τομέα της παροχής ολοκληρωμένων υπηρεσιών για την αξιολόγηση γεωθερμικών πεδίων, την παροχή άρτιων λύσεων για την αιεφόρο εκμετάλλευσή τους και την ποιοτική πραγματοποίηση τεχνικών έργων στα πεδία εφαρμογής σε συστήματα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης και σε συστήματα εκμετάλλευσης αβαθούς γεωθερμίας και αντλιών θερμότητας για εφαρμογές στη θέρμανση και ψύξη χώρων καθώς και για αγροτικές χρήσεις.

Έργα στα οποία συμμετέχει το ΚΑΠΕ στο πλαίσιο ευρωπαϊκών ανταγωνιστικών προγραμμάτων:

1). 01/03/2006 - 31/05/2009

6 FP/TREN/EN/S07.53962/518277

«*Efficient low temperature geothermal binary power -LOW-BIN*»

Το έργο στοχεύει στη βελτίωση της αποδοτικότητας κόστους, της ανταγωνιστικότητας και της διείσδυσης στην αγορά των σχημάτων ηλεκτροπαραγωγής από γεωθερμική ενέργεια.

2). 01/06/2004 - 31/05/2008

6 FP-TREN/04/EN/S07.31402/503063

«*Ground Coupled Heat Pumps of High Technology –GROUNDHIT*»

Το έργο αφορούσε στην ανάπτυξη γεωθερμικών αντλιών θερμότητας υψηλής τεχνολογίας και κατακόρυφων γήινων εναλλακτών βελτιωμένης απόδοσης.

3). 01/01/2007 - 31/12/2009

6 FP-DGRESEARCH-2004-SES 019913

«*High Temperature Instruments for supercritical geothermal reservoir characterization and exploration – HITI*»

Το έργο αποσκοπεί στην ανάπτυξη γεωφυσικών και γεωχημικών αισθητήρων και μεθόδων για την αποτίμηση βαθιών γεωτρήσεων, μέχρι υπερκρίσιμες συνθήκες ($T > 380$ C). Έτσι, το έργο HITI πρόκειται να αναπτύξει, κατασκευάσει και δοκιμάσει στο πεδίο, νέα επιφανειακά και υπεδαφικά εργαλεία και προσεγγίσεις για βαθιές γεωτρήσεις υψηλών θερμοκρασιών.

4). 01/12/2007 - 31/11/2010

6 FP/DG-TREN/TERRA THERMA/S07.75919/038548

«*Terrestrial Energy Recovery using Advanced Stirling Heat Pumps for Residential temperature Management - TERRA THERMA*»

Σκοπός του έργου, είναι η παροχή ψύξης και θέρμανσης (όπου είναι εφικτό), με τον πιο ενεργειακά και οικονομικά αποδοτικό τρόπο, αναφορικά με τους χρήστες.

5). 01/11/2005 - 31/10/2008
6 FP-DG RESEARCH-2004-518378
«*Integrated Geophysical Exploration Technologies for Deep Fractured Geothermal Systems - I-GET*»

Το έργο στοχεύει στην ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων γεωφυσικών διασκοπίσεων, με εφαρμογή στον εντοπισμό γεωθερμικών ταμιευτήρων.

6). 01/11/2005 - 30/04/2008
6 FP-DGRESEARCH- 2004- 019760
«*Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe (CA) – ENGINE*»

Το έργο αφορούσε στην προώθηση των εμπλουτισμένων (βελτιωμένων) γεωθερμικών συστημάτων.

7). 01/01/2006 - 31/12/2008
EIE/05/105/S12. 420205 Intelligent Energy for Europe -ALTENER
«*Reaching the Kyoto targets by means of a wide introduction of ground coupled heat pumps (GCHP) in the built environment -GROUND-REACH*»

Το έργο GROUND-REACH είχε στόχο τη προώθηση χρήσης Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (ΓΑΘ) για θέρμανση και ψύξη κατοικιών στην Ευρώπη, μέσω:

- Του προσδιορισμού της παρούσας κατάστασης και του μελλοντικού δυναμικού των ΓΑΘ
- Της ανάλυσης της συνεισφοράς τους σχετικά με την Ευρωπαϊκή Οδηγία της Ενεργειακής Αποδοτικότητας των Κτιρίων
- Της επεξεργασίας και αποτίμησης των σχετικών δεδομένων για όλη την Ευρωπαϊκή Ένωση
- Της εκπόνησης μέτρων για την υπέρβαση των σημερινών εμποδίων και την εξασφάλιση της μακροπρόθεσμης διείσδυσης στην αγορά και:
- Της οργάνωσης σχετικής εκστρατείας μεγάλης κλίμακας.

8). 01/01/2005 - 31/12/2007
6 FP-TREN -INCO 509205
«*Virtual Balkan Power Centre for Advance of Renewable Energy Sources in Western Balkans -VBPC-RES*»

Οι κύριοι στόχοι του έργου VBPC-RES ήταν:

- Η μεταφορά τεχνογνωσίας των τεχνολογιών ΑΠΕ και η εφαρμογή τους σε απομονωμένες περιοχές
- Ο προσδιορισμός των κύριων οικονομικών και νομοθετικών παραγόντων που επηρεάζουν τις επενδυτικές αποφάσεις για ΑΠΕ και τη διείσδυσή τους στην αγορά
- Η προώθηση της συνειδητοποίησης των κατοίκων σχετικά με τις ΑΠΕ.

Εγκεκριμένα Έργα στα οποία συμμετέχει το ΚΑΠΕ και άρχισαν το έτος 2008:

01/10/2008 - 30/09/2009
7 FP-DGTREN
«*Advanced ground source heat pump systems for heating and cooling in Mediterranean climate -GROUND-MED*»

Το έργο αφορά στην ανάπτυξη Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας για βελτιστοποιημένη λειτουργία στα Μεσογειακά κλίματα.

3. Οικονομικά στοιχεία

3.1 Γενικές παράμετροι που επιδρούν στο κόστος των γεωθερμικών συστημάτων

Το επενδυόμενο κόστος, όπως και το κόστος λειτουργίας ενός γεωθερμικού συστήματος βασικά επηρεάζεται από τα παρακάτω στοιχεία-παραμέτρους:

Το βάθος της γεωθερμικής πηγής
Η απόσταση μεταξύ της γεωθερμικής πηγής και του συστήματος κλιματισμού
Η ροή της γεωθερμικής ενέργειας
Η θερμοκρασία της γεωθερμικής ενέργειας
Η πτώση της θερμοκρασίας κατά τη μεταφορά της ενέργειας
Το μέγεθος και το είδος του φορτίου
Το κατά πόσο εύκολη είναι η απόρριψη
Η χημική σύνθεση του γεωθερμικού ρευστού
Το κόστος της ενέργειας τροφοδοσίας του συστήματος κλιματισμού

Συνοπτικά τα παραπάνω επιδρούν ως εξής:

ΤΟ ΒΑΘΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ

Το κόστος της γεώτρησης του γεωθερμικού πηγαδιού κατέχει συνήθως το μεγαλύτερο ποσοστό επί του συνολικού κόστους. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος γεώτρησης τόσο μεγαλύτερο και το κόστος.

Η ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας πρέπει να πραγματοποιείται κοντά στην πηγή της. Ο λόγος είναι βασικά οικονομικός, αν και το γεωθερμικό ρευστό μπορεί να μεταφερθεί σε αρκετά μακρινές αποστάσεις, χωρίς να υφίσταται σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του, το κόστος μιας τέτοιας μεταφοράς θα ήταν τεράστιο. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις που υπάρχουν δεν υπερβαίνουν μια απόσταση της τάξης των 1600 m.

Η ΡΟΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ενέργεια που εξάγεται από ένα γεωθερμικό πηγάδι εξαρτάται άμεσα από την παροχή του γεωθερμικού ρευστού. Οι τυπικά καλές γεωθερμικές πηγές μπορούν να παρέχουν περίπου 25 με 50 l/s γεωθερμικό ρευστό ανά πηγάδι, αν και υπάρχουν γεωθερμικά πηγάδια που μπορούν να προσφέρουν μέχρι και 130 l/s παροχή ρευστού.

Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Στα γεωθερμικά συστήματα, η διαθέσιμη θερμοκρασία είναι σταθερή για μια συγκεκριμένη πηγή. Αν και η θερμοκρασία αυξάνει με το βάθος της γεώτρησης, η φυσική μεταγωγή θερμότητας, διατηρεί την θερμοκρασία περίπου ίδια κατά μήκος της γεώτρησης. Αν η γεώτρηση συνεχιστεί μέχρι βάθος όπου δεν υπάρχει αρκετή διαπερατότητα για μεταγωγή θερμότητας, η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί, αλλά συνήθως η ανεπάρκεια σε παροχή οφείλεται σε μια οικονομική γεώτρηση. Ο περιορισμός της θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει σημαντικά εμπόδια για εφαρμογές που πρέπει να καλύψουν ένα αρκετά σημαντικό φορτίο. Συχνά απαιτείται ένας επαναπροσδιορισμός των αποδεκτών θερμοκρασιών λειτουργίας, ώστε να μπορούμε να προσδιορίσουμε το κόστος και το μέγεθος της εγκατάστασης. Όταν γίνεται χρήση της γεωθερμικής ενέργειας, η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να είναι μικρότερη από την θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, ενώ αν χρησιμοποιούνται αντλίες θερμότητας, η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή του γεωθερμικού ρευστού.

Η ΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η ενέργεια εξόδου από ένα γεωθερμικό πηγάδι είναι ανάλογη της πτώσης της θερμοκρασίας που επηρεάζεται από το σύστημα εκμετάλλευσης, εφόσον η παροχή του γεωθερμικού ρευστού είναι σταθερή. Συχνά, μια μεγάλη πτώση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την δυσλειτουργία της εγκατάστασης.

Αν και είναι σημαντικό να υφίσταται αρκετά μεγάλη θερμοκρασιακή διάφορα στον εναλλάκτη, η μέγιστη διάφορα θερμοκρασίας δεν είναι πάντοτε αποδεκτή λόγω του κόστους του εναλλάκτη. Συνήθως τα γεωθερμικά συστήματα λειτουργούν με μια διάφορα θερμοκρασίας μεταξύ 17 και 28 °C.

ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το μέγεθος του φορτίου παίζει σημαντικό ρόλο, αφού επηρεάζει το μέγεθος της εγκατάστασης, επίσης είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το ρόλο του συστήματος που θα κατασκευαστεί, δηλαδή αν θα καλύπτει όλο το φορτίο ή ένα μέρος αυτού.

Η ΕΥΚΟΛΙΑ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ

Τα περισσότερα συστήματα απορρίπτουν το γεωθερμικό ρευστό στην επιφάνεια, δηλαδή σε ποτάμια, λίμνες κ.τ.λ. Αυτές οι μέθοδοι είναι φυσικά πιο οικονομικές από το να ανοιχτούν πηγάδια απόρριψης. Όμως, η απόρριψη στην επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει πτώση της στάθμης του γεωθερμικού ρευστού, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, για το λόγο αυτό σήμερα, έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται η μέθοδος των πηγαδιών απόρριψης. Ακόμα, τα γεωθερμικά ρευστά μερικές φορές περιέχουν χημικά στοιχεία τα οποία βλάπτουν την επιφάνεια.

Η ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

Η ποιότητα του γεωθερμικού ρευστού όπως έχει ειπωθεί, ποικίλει και επηρεάζει τον σχεδιασμό της εγκατάστασης, διότι πρέπει να γίνει χρήση κατάλληλων υλικών ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση, και επίσης επηρεάζει την μέθοδο απόρριψης. Πολλές γεωθερμικές εφαρμογές λειτουργούν με ρευστά που περιέχουν μικρή ποσότητα αδιάλυτων ουσιών, πράγμα το οποίο δεν προκαλεί άμεση διάβρωση αλλά σταδιακή. Είναι λοιπόν πιο συνετό να απομονώσουμε το γεωθερμικό ρευστό από το υπόλοιπο κύκλωμα.

ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ Ή ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για την λειτουργία των αντλιών θερμότητας και την κίνηση του συμπιεστή, πρέπει να χρησιμοποιηθεί είτε ηλεκτρική ενέργεια είτε μηχανή εσωτερικής καύσεως, το κόστος αυτής της ενέργειας, όπως και της ενέργειας που καταναλώνεται από τα υπόλοιπα εξαρτήματα της εγκατάστασης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αν είναι δυνατόν, μπορεί να σχεδιαστεί ένα διαφορετικό σύστημα κάλυψης αυτών των αναγκών με την εκμετάλλευση άλλων ήπιων μορφών ενέργειας.

3.2 Κοστολογικά στοιχεία συστημάτων Κανονικής Γεωθερμίας

Η σύγκριση της οικονομικότητας ενός συστήματος ΓΑΘ σε σχέση με άλλες περισσότερο συμβατικές λύσεις (π.χ. θέρμανση με πετρέλαιο ή φυσικό αέριο, ψύξη με κοινά κλιματιστικά) γίνεται συνήθως αναφορικά με το κόστος εγκατάστασης, το κόστος λειτουργίας και το κόστος συντήρησης κάθε τεχνολογίας. Η παραπάνω σύγκριση οδηγεί σε ακριβή συμπεράσματα για τον χρονικό ορίζοντα της απόσβεσης του υψηλότερου (από άλλες τεχνολογίες) κόστους εγκατάστασης ενός συστήματος ΓΑΘ. Για τη σύγκριση λαμβάνονται συνήθως υπόψη οι τρέχουσες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, αν και μπορεί να υποτεθούν και συγκεκριμένα σενάρια για τη μελλοντική διακύμανση των τιμών τους. Στη κατανάλωση ηλεκτρισμού θα πρέπει να προστεθεί και ο «παρασιτικός» ηλεκτρισμός για την ανακυκλοφορία του υγρού στον γεωεναλλάκτη.

Παρά το σχετικά μεγαλύτερο αρχικό κόστος τα συστήματα ΓΑΘ έχουν τρία χαρακτηριστικά που τα κάνουν να ξεχωρίζουν όταν συγκριθούν για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού: χαμηλό κόστος λειτουργίας, μικρότερο κόστος συντήρησης από τα αντίστοιχα συμβατικά συστήματα, μεγάλη διάρκεια ζωής.

Το κόστος εγκατάστασης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας ανέρχεται σε 500-1000 Ευρώ ανά $kW_{(th)}$ για μονάδες που χρησιμοποιούν νερό από υδρογέωτρωση και σε 1000-1500 Ευρώ ανά $kW_{(th)}$ για μονάδες που χρησιμοποιούν γήινους εναλλάκτες. Το αντίστοιχο κόστος ανά μονάδα παρερχομένης θερμικής ενέργειας ανέρχεται σε 0,015-0,028 € ανά kWh χωρίς αποσβέσεις, και σε 0,038-0,048 € ανά kWh λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου. Όσον αφορά την απευθείας χρήση του γεωθερμικού ρευστού για θερμικές εφαρμογές τα κόστη ανέρχονται σε 200-1400 € / $kW_{(th)}$ και 0,005-0,035 € / $kWh_{(th)}$.

Ενδεικτικό κοστολόγιο:

- Κόστος υλικών και εργασίας για τους κατακόρυφους γεωεναλλάκτες: 45ευρώ/m
 - Κόστος υλικών: σωλήνες PE, υλικό πλήρωσης, υγρό με αντιψυκτικό και διανομείς/συλλέκτες
 - Κόστος εργασιών: διάνοιξη γεωτρήσεων & τροφοδότηση πληρωτικού υλικού
 - Κόστος υλικών και εργασίας για το οριζόντιο τμήμα των γεωεναλλακτών: 2,5ευρώ/m + 400ευρώ
 - Κόστος εργασιών & λοιπά εξαρτήματα μηχανοστασίου: 4.000ευρώ (εξαιρούνται ΓΑΘ, δοχείο αδρανείας, boiler)
 - Κόστος ΓΑΘ Ενδεικτικά 10-40kW: 7.000 – 12.000ευρώ
 - Κόστος συντήρησης συστήματος ΓΑΘ: 400ευρώ ετησίως (οικίες)
- Ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας:
Θερμική απαίτηση: 20kWh
- 3 κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες – 90m βάθους (συνολικά 270m)
 - Κόστος εγκατάστασης συστήματος ΓΑΘ 26.150 €
 - Κόστος συντήρησης συστήματος ΓΑΘ 400 € ετησίως
- Συγκρίνοντας το σύστημα ΓΑΘ με συμβατικό σύστημα (πετρέλαιο + ηλ.ενέργεια) – ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας ~ 65%.

Παράδειγμα 1:

Στο Πίνακα 3.2-1 παρουσιάζεται η ανάλυση του κόστους θέρμανσης-ψύξης μιας κατοικίας 200 m² στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Τα κόστη εγκατάστασης των διαφόρων τεχνολογιών αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές της αγοράς. Από την ανάλυση των οικονομικών μεγεθών εκτιμάται ότι ο χρόνος απόσβεσης για το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης οριζόντιου γεωεναλλάκτη είναι περίπου 8 χρόνια. Ο χρόνος αυτός εκτιμάται χωρίς να ληφθεί υπόψη η εξοικονόμηση ενέργειας για τη ψύξη το καλοκαίρι (για τα δεδομένα της χώρας μας η εξοικονόμηση τον κύκλο της ψύξης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από ότι στον κύκλο της θέρμανσης), η δωρεάν παροχή ζεστού νερού το καλοκαίρι και η τυχόν επιδότηση ή μειώσεις από το φορολογητέο εισόδημα.

Πίνακας 3.2-1 Εκτίμηση κόστους για ψύξη / θέρμανση 200 m² στη περιοχή της Θεσσαλονίκης

Θερμαντικές ανάγκες οικίας 200 m ² στην περιοχή της Θεσσαλονίκης	
- Θερμαντικές ανάγκες: $\sim 40 \text{ (W/m}^2) \times 200 \text{ (m}^2)$: 8 kWth	
- Θερμό νερό: 5 (άτομα) $\times 0,2 \text{ (kWt/άτομο)}$: 1 kWth	
- Σύνολο: 9 kWth	
ΓΑΘ οριζόντιου κλειστού βρόχου	Συμβατική θέρμανση (καυστήρας πετρελαίου) – κοινά κλιματιστικά
- Κάλυψη για εκσκαφή $\sim 120 \text{ m}^2$ - COP=4,2 - Ηλεκτρική ισχύς αντλίας: 2,2 kW - Ετήσιος χρόνος θέρμανσης: 2000 h	- Θερμική ισχύς: 25 kWt - Ετήσιος χρόνος θέρμανσης: 1080 h
- Κόστος εκσκαφής & εγκ. = 1000 € - Κόστος αντλίας θερμ.* = 14500 € - Κόστος συστ. ενδοδ. θέρμ. = 2000 €	- Κόστος λέβητα** = 4500 € - Κόστος συστ. θέρμανσης = 1500 € - Κόστος συστήματος ψύξης=2000 €
- Ετήσιο κόστος ηλεκτρισμού: 380 € (2,2 kW $\times 2000 \text{ h/y} \times 0,086 \text{ €/kWh}$) - Ετήσιο κόστος συντ.: 100 €	- Ετήσιο κόστος πετρελαίου : 1430 € (2,4 l/h $\times 6 \text{ h/d} \times 180 \text{ d/y} \times 0,55 \text{ €/l}$) - Ετήσιο κόστος συντ.: 150 €

* Σωληνώσεις (+αντιψυκτικό), βάνες και εξαρτήματα μηχανοστασίου, ενσωματωμένος υπερθερμαντήρας 250 l.

** Δεξαμενή πετρελαίου 1000 l, μπόιλερ θερμού νερού: 100 l, Σωληνώσεις, βάνες, εξαρτήματα μηχανοστασίου, καμινάδα κ.α.

Παράδειγμα 2:

Πίνακας 3.2-2 Κοστολόγιο Εγκατάστασης – Μελετών

ΕΙΔΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΙΣΧΥΣ - ΠΟΣΟΤΗΤΑ		ΜΕΡΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ		ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	
Κ.Γ.Ε	500	m	50	€/m	25.000	€
Οριζόντιος Γεωθ. Εναλλ.	33,3	m/kW	2	€/m	1.998	€
Υπεδαφική δεξαμενή	45	m ²	44	€/m ²	2.000	€

Πίνακας 3.2-3 Αποπληρωμή Εγκατάστασης

ΕΙΔΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	Εξοικονόμηση Χρημάτων	Χρόνος Απόσβεσης	Χρόνος Συνεχούς Αντλησης
Κ.Γ.Ε	25.000€	1.261 €/έτος	19,83 έτη	96 ώρες
Οριζόντιος Γεωθ. Εναλλ.	1.998€	1.170 €/έτος	1,71 έτη	48 ώρες
Υπεδαφική δεξαμενή	2.000€	1.314 €/έτος	1,52 έτη	36 ώρες

4. Νομοθεσία

Η διείσδυση των συστημάτων ΓΑΘ στη χώρα μας είναι σχετικά πολύ μικρή, και οι όποιες προσπάθειες έχουν γίνει μέχρι σήμερα οφείλονται κυρίως στη προσωπική οικολογική συνείδηση ορισμένων ιδιοκτητών που προχώρησαν σε εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων. Η τεχνολογία της αβαθούς γεωθερμίας έχει μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης, κυρίως στην ορεινή και τη Βόρεια Ελλάδα για θέρμανση, αλλά και στη Νότια Ελλάδα για ψύξη/θέρμανση. Προϋπόθεση για τη διείσδυση της νέας (για τη χώρα μας) αυτής τεχνολογίας αποτελεί η ύπαρξη κινήτρων, ιδίως σε ανεγειρόμενα κτίρια, η ενημέρωση των εμπλεκόμενων στον οικοδομικό κλάδο και η εγκατάσταση και λειτουργία επιδεικτικών έργων σε όλη τη χώρα.

Ιδιαίτερα, η προώθηση της αβαθούς γεωθερμίας με τα συστήματα κλειστού βρόχου στον οικιακό τομέα θα μπορούσε να γίνει με το συνδυασμό των παρακάτω μέτρων, ορισμένα από τα οποία εφαρμόζονται με επιτυχία σε πολλές χώρες:

α) Έκπτωση του κόστους εγκατάστασης από το φορολογητέο εισόδημα εφ' άπαξ ή κατανομή του σε χρονικό ορίζοντα 2-3 ετών.

β) Μείωση του Φ.Π.Α. από 19% σε 9% για όλες τις μηχανολογικές εγκαταστάσεις (κυρίως αντλίες θερμότητας με πηγή το νερό).

γ) Εναλλακτικά του πρώτου μέτρου, θα μπορούσε να γίνει επιδότηση των εγκαταστάσεων με 1500-3000 € για κάθε αυτόνομη εγκατάσταση σε νέα οικία, όπως γίνεται σε άλλες χώρες της Ε.Ε.

δ) Εφαρμογή ευνοϊκών τιμολογίων ηλεκτρισμού από τη ΔΕΗ, η οποία ευνοείται άμεσα από την ανάπτυξη της αβαθούς γεωθερμίας με τη βελτίωση των συνθηκών ζήτησης ηλεκτρισμού κατά ώρες αιχμής (στις ημέρες καύσωνα και παγετού).

ε) Προσφορά δανείων με μηδενικό ή μικρό επιτόκιο για την εγκατάσταση του συστήματος.

Με την Απόφαση Δ9Β,Δ/Φ166/ΟΙΚ 18508/5552/207ΦΕΚ Β' 1595/25.10.2004

«Άδειες εγκατάστασης για ίδια χρήση ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης χώρων μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό» καθορίζονται τα παρακάτω:

- Όροι, προϋποθέσεις, απαιτούμενα δικαιολογητικά και οι διαδικασίες έκδοσης της απαιτούμενης άδειας
- Έκδοση άδειας από τη Διεύθυνση ή Τμήμα Βιομηχανίας και Ορυκτού Πλούτου της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης που υπάγεται το ακίνητο
- Γεωλογική & Μηχανολογική μελέτη
- Στοιχεία & δικαιολογητικά για το οικόπεδο και την οικοδομή

Βιβλιογραφία

- 1) «Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς- Μέρος Πρώτο» Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, Καθηγητού Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005.
- 2) «Υπολογιστική Ρευστομηχανική» Γ. Μπεργελές, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Εκδόσεις Συμμεών, ISBN 960-7346-19-x, 2000.
- 3) «Μετάδοση Θερμότητας» Ξενοφών Κ. Κακάτσιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Εκδόσεις Κλειδάριθμος, ISBN 960-209-555-5, 2002.
- 4) «Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς» Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π., Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 3η Έκδοση, Αθήνα, 2003.
- 5) «Temperature Field Prediction around a Vertical Earth Heat Exchanger for Heating and Cooling Loads of Agro-tourist Buildings» Professor Michael Gr. Vrachopoulos, International Conference Geothermal Energy Applications in Agriculture, 3 - 4 May 2004, Athens, Greece.
- 6) «Εκμεταλλεύσιμη Ηλιογενής και Γηγενής Θερμότητα στο Αβαθές Υπέδαφος της Αττικής» Μ. Γρ. Βραχόπουλος Καθηγητής Τ.Ε.Ι Χαλκίδας, Επιστημονικός Συνεργάτης Ε.Μ.Π., Ι. Παπαγεωργάκης, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π. , Τεχνικά Χρονικά Επιστημονικές Εκδόσεις Τ.Ε.Ε IV, τευχ.1, 1998.
- 7) «Conductive Heat Extraction to a Deep Borehole: Thermal Analyses and Dimensioning Rules» Johan Claesson and Per Eskilson, Department of Building Technology, Lund Institute of Technology Sweden. Energo Vol. 13, No. 6, 0360-5442/88 Pergamon Press plc, 1988.
- 8) «Αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα και στην Ευρωπαϊκή ένωση», Καρύτσας Κ. και Μενδρινός Δ. Τμήμα Γεωθερμίας, Δνση ΑΠΕ, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας - Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2004 Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος 2004.
- 9) «RetScreen® Engineering & Case Textbook» ISBN: 0-662-39191-8 Catalogue no.: M39-112/2005E © Minister of Natural Resources Canada 2001-2005.
- 10) «Project Ground-Reach» E.C Contract: EIE/05/105/S12.420205, Αναστασία Μπένου / Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
- 11) «Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας», Αναστασία Μπένου Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός, MSc Τμήμα Γεωθερμικής Ενέργειας Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
- 12) «Πεπραγμένα 2007 - Προγραμματισμός Δράσεων 2008 - Στατιστικά Στοιχεία ΑΠΕ & ΕΞΕ» Ετήσια Έκθεση 2007 Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
- 13) «GeoExchange Heating and Cooling Systems: Fascinating Facts» Geothermal Heat Pump Consortium, Inc. U.S.A., GHPC #GB-003 1/06 www.geoexchange.org.
- 14) «Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system», Hikmet Esen et Al. Department of Mechanical Education University of Firat, Turkey, Science Direct, Building and Environment 42 (2007) 1126-1134.

- 15) «Heat Conduction in 2 and 3 Dimensions», Thomas Blomberg, May 1996, Report TVBH-1008, ISRN LUTVDG/TVBH- -96/1008- -SE/(1-188), ISBN 91-88722-05-8, Department of Building Physics Lund University, Sweden.
- 16) «New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical boreholes», Louis Lamarche, Benoit Beauchamp, Ecole de Technologie Supereure, 1100 Notre-Dame Ouest, Montreal, Canada H3C 1K3, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 1408–1419.
- 17) «A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes» Louis Lamarche, Benoit Beauchamp Ecole de Technologie Superieure, 1100 Notre-Dame Ouest, Montreal, Canada H3C 1K3, Energy and Buildings 39 (2007) 188–198.
- 18) «Modelling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers for Ground Source Heat Pump Systems», Cenk Yavuzturk, Dipl. Ingenieur, Technical University of Berlin, Germany, 1988. Submitted to the Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy December, 1999.
- 19) «A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers» Yavuzturk, C., J.D. Spitler. 1999. ASHRAE Transactions. 105(2): 475-485.
- 20) «Permafrost» from Wikipedia, the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Permafrost>.
- 21) «Τεχνικο-οικονομική μελέτη οριζόντιου συστήματος γεωθερμικής αντλίας θερμότητας», Ζ. Ζησκάτας, Ν. Ανδρίτσος, Κ. Διαμαντίδης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μ. Φυτίκας Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.
- 22) «Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers» Heyi Zeng, Nairen Diao, Zhaohong Fang, The Ground Source Heat Pump Research Center, Shandong Institute of Architecture and Engineering, China. Copyright: PERGAMON, International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 4467–4481, April 2003.
- 23) «Simulation of Ground Coupled Vertical U-Tube Heat Exchangers», By Steven P. Rottmayer. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of MSc at the University of Wisconsin Madison, U.S.A. 1997.
- 24) «Thermal energy storage in the ground: Comparative analysis of heat transfer modeling using U-tubes and boerholes» Dwayne S. Breger, James E. Hubbell, Hamid El Hasnaoui, J. Edward Sunderland. Lafayette College, Dpt of Civil and Enviromental Engineering - Easton, University of Massachusetts, Department of Mechanical Engineering, U.S.A. Solar Energy Vol. 56, No. 6, pp. 493-503, 1996. Elsevier Science Ltd, PLI: S003&092X(96)00013-8. Copyright 1996.
- 25) «Modeling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers with Variable Convective Resistance and Thermal Mass of the Fluid» Xiaowei Xu Jeffrey D. Spitler, Ph.D., PE Oklahoma State University Stillwater, OK, 74075 U.S.A.
- 26) «Potential of geothermal heat exchangers for office building climatisation» Ursula Eicker, Christoph Vorschulze. Centre of Applied Research Sustainable Energy Technologies zafh.net, University of Applied Sciences Stuttgart, Germany. Elsevier Ltd. All rights reserved. 2008.

- 27) «Comparison of several BHT correction methods: a case study on an Australian data set» Bruno Goutorbe, Francis Lucazeau and Alain Bonneville. Institut de Physique du Globe de Paris, France. Geophys. J. Int. 170, 913–922 doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03403.x. 2007.
- 28) «Thermal Response Test, Method Development and Evaluation» Signhild Gehlin. Dpt of Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Lulea Sweden, ISSN 1402-1544 Doctoral Thesis:2002/ 039, LTU-DT-0239-SE, 2002.
- 29) «Thermal Response Test Numerical simulations and analyses», Anna-Maria Gustafsson. Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Architecture and Infrastructure. ISSN 1402-1757 2006:14, LTU-LIC-0614-SE, 2006.
- 30) «Thermal Performance of Borehole Heat Exchangers» Göran Hellström. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden 2000.
- 31) «Vertical Borehole Heat Exchanger EWS Model, version 2.4. Model description and implementing into TRNSYS» Michael Wetter, Arthur Huber. ZTL Luzern, Huber Energietechnik Zurich, 1997.
- 32) «Γεωθερμικά Συστήματα» Βιβλιοθήκη εταιρείας: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - Μιχάλης Γρ. Βραχόπουλος & ΣΙΑ Ο.Ε. Μπούσγου 20, Αθήνα, ΤΚ 114 73 Τηλ. +30 210 2234875, Fax +30 210 2117757. www.renewable.gr.
- 33) «Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems» C.K. Lee, H.N. Lam, Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong, Renewable Energy 33 (2008) 1286–1296, ELSEVIER 2007.
- 34) «A two-region simulation model of vertical U-tube ground heat exchanger and its experimental verification» Weibo Yang, Mingheng Shi, Guangyuan Liu, Zhenqian Chen. School of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou City, PR China, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing City, PR China. Elsevier, 2008.
- 35) «Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors» Valentin Trillat-Berdal, Bernard Souyri, Gilbert Achard– Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingenierie de l'Environnement –ESIGEC,Universite´ de Savoie, Savoie Technolac, Le Bourget du Lac, France, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1750–1755. Elsevier 2006.
- 36) «Implementing ground source heat pump and ground loop heat exchanger models in the Energyplus simulation environment» Arunachalam Murugappan. BSc of Eng. Annamalai University Chidambaram, India 1998. Submitted to the Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of MSc Oklahoma State University. December, 2002.
- 37) «Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application» Jun Gao, Xu Zhang, Jun Liu, Kuishan Li, Jie Yang Institute of HVAC and Gas Engineering, Tongji University, Shanghai, China Applied Energy 85 (2008) 901–910, Elsevier 2008.
- 38) «Ground-source heat pumps systems and applications» Abdeen Mustafa Omer, Nottingham NG7 4EU, UK. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 344–371 Elsevier 2006.

39) «Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system» Yujin Nam, Ryoza Ooka, Suckho Hwang Cw403 Institute of Industry Science, The University of Tokyo, Japan. Energy and Buildings 40 (2008) 2133–2140. Elsevier 2008.