



## Διπλωματική Εργασία

# «Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης προσομοίωσης γεωθερμικής εγκατάστασης»

Βλαστός Σπύρος



Επιβλέπων Καθηγητής: Μουσταϊζής Σταύρος

Χανιά 2016

## **Επιτροπή**

### **Μουσταϊζής Σταύρος**

Αναπληρωτής Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης,  
Πολυτεχνείο Κρήτης

### **Νικολός Ιωάννης**

Αναπληρωτής Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης,  
Πολυτεχνείο Κρήτης

### **Σταυρουλάκης Γεώργιος**

Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης,  
Πολυτεχνείο Κρήτης

# Περιεχόμενα

## Εισαγωγή

### Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

#### 1.1 Εισαγωγή στη Γεωθερμία

1.1.1 Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης και γεωθερμική ενέργεια

1.1.2 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων

1.1.3 Ιστορική αναδρομή της γεωθερμικής ενέργειας

#### 1.2 Γεωθερμικά Συστήματα Γεωεναλλακτών Θερμότητας

1.2.1 Είδη Γεωεναλλακτών

1.2.2 Γεωεναλλάκτες ανοικτού κυκλώματος

1.2.2.1 Συστήματα ανοικτού βρόγχου πολλαπλών γεωτρήσεων

1.2.2.2 Συστήματα υδάτινης στήλης

1.2.2.3 Συστήματα επιφανειακών υδάτων

1.2.3 Γεωεναλλάκτες κλειστού κυκλώματος

1.2.3.1 Οριζόντια κλειστά γεωθερμικά συστήματα

1.2.3.2 Κατακόρυφα κλειστά γεωθερμικά συστήματα

1.2.4 Υβριδικά συστήματα γεωεναλλακτών

Βιβλιογραφία 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

### Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

#### 2.1 Κατασκευή διάταξης προσομοίωσης γεωεναλλάκτη θερμότητας

2.1.1 Κατασκευή μικρογραφίας της γεώτρησης σε θερμό υπέδαφος

2.1.2 Κατασκευή του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη

2.1.3 Συναρμολόγηση των μελών της διάταξης με τη μονωμένη

δεξαμενή

#### 2.2 Προετοιμασία της διάταξης του γεωεναλλάκτη για τη διεξαγωγή

πειραμάτων

2.3 Κατασκευή διάταξης ελέγχου της θερμικής συμπεριφοράς των υλικών πλήρωσης της γεώτρησης και εγκιβωτισμού των αγωγών του γεωεναλλάκτη

#### 2.4 Προετοιμασία της δεύτερης διάταξης για τη διεξαγωγή πειραμάτων

Βιβλιογραφία 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

#### 3.1 Πειραματική διάταξης προσομοίωσης γεωεναλλάκτη θερμότητας

3.1.1 Χρήση μίγματος σκυροδέματος ως υλικό πλήρωσης

3.1.2 Χρήση άμμου ως υλικό πλήρωσης

3.1.3 Χρήση μίγματος άμμου – μετάλλου (50% κατά βάρος)

3.1.4 Χρήση μίγματος άμμου – μετάλλου (67% κατά βάρος)

#### 3.2 Αποτελέσματα εκτέλεσης πειραμάτων με τη 2<sup>η</sup> διάταξη

3.2.1 Χρήση μίγματος σκυροδέματος ως υλικό πλήρωσης

3.2.2 Χρήση άμμου ως υλικό πλήρωσης

3.2.3 Χρήση μίγματος άμμου – μετάλλου (50% κατά βάρος)

3.2.4 Χρήση μίγματος άμμου – μετάλλου (67% κατά βάρος)

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

4.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων πρώτης διάταξης

4.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων δεύτερης διάταξης

**Παράρτημα Α** – Εναλλακτικοί τρόποι πειραματισμού

**Παράρτημα Β** – Εναλλακτικοί τρόποι θέρμανσης της διάταξης

**Παράρτημα Γ** – Δυνατότητα τροποποίησης του μεγέθους της διάταξης

**Παράρτημα Δ** – Διαστασιολογημένα σχέδια



## Εισαγωγή

Η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται από τον άνθρωπο χιλιάδες χρόνια κυρίως για λουτροθεραπευτικούς σκοπούς ή για το μαγείρεμα του φαγητού. Η αξιοποίηση της γεωθερμίας στην εποχή μας ξεκίνησε ουσιαστικά στις αρχές του περασμένου αιώνα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η συστηματική θέρμανση χώρων με τη γεωθερμία άρχισε να υλοποιείται μερικές δεκαετίες αργότερα σε χώρες με τις κατάλληλες ιδιότητες στο υπέδαφος τους όπως η Ισλανδία. Η πρώτη ενεργειακή κρίση στις αρχές του 1970 αναζωογόνησε το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μεταξύ των οποίων και της γεωθερμικής ενέργειας. Στις μέρες μας, η τεχνολογία αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας είναι αρκούντως ώριμη, τόσο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για άμεση χρήση της θερμότητας που απελευθερώνεται. Η γεωθερμική ενέργεια σήμερα καλύπτει περίπου το 0,5% των αναγκών της ανθρωπότητας σε ενέργεια.

Στο πλαίσιο εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, προτείνεται ένας πρωτότυπος και καινοτόμος τρόπος προσομοίωσης και αξιολόγησης γεωθερμικών συστημάτων που κάνουν χρήση υπόγειου γεωεναλλάκτη θερμότητας. Η διάνοιξη της γεώτρησης σε θερμό υπέδαφος που απαιτείται σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις προσομοιάζεται συναρμολογώντας δακτυλίους σκυροδέματος. Το σχήμα των δακτυλίων που χυτεύτηκαν επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει δομική σταθερότητα στη διάταξη. Επομένως είναι δυνατή η αυξομείωση του μεγέθους της διάταξης για την εκτέλεση πειραμάτων μεγαλύτερης κλίμακας. Ιδιαίτερη προσπάθεια καταβλήθηκε για την ανεύρεση ενός εύκολου και αποτελεσματικού τρόπου θέρμανσης της συναρμολογημένης διάταξης των δακτυλίων, ώστε να προσομοιάζει το θερμό υπέδαφος που πραγματοποιείται η γεώτρηση. Ένα μικρό σπειροειδές κύκλωμα χάλκινων σωληνώσεων τοποθετήθηκε στο κέντρο της διάταξης ως μικρογραφία των αντίστοιχων πραγματικών εγκαταστάσεων. Εναλλάσσοντας το υλικό πλήρωσης της γεώτρησης στη διάταξη έγινε προσπάθεια αξιολόγησης των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες γεωθερμικές εγκαταστάσεις.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας που ακολουθεί γίνεται μία συνοπτική εισαγωγή στη γεωθερμία και τη γεωθερμική ενέργεια καθώς και τους τρόπους που αυτή εκδηλώνεται στη γη. Αναφέρονται οι κυριότεροι σύγχρονοι τρόποι αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας ενώ ταυτόχρονα γίνεται μια γρήγορη ιστορική αναδρομή στη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας. Στη δεύτερο μέρος του κεφαλαίου περιγράφονται τα γεωθερμικά συστήματα γεωεναλλακτών θερμότητας, αναλύοντας τα συστήματα ανοιχτού και κλειστού κυκλώματος, καθώς και τα σύγχρονα υβριδικά συστήματα. Στη συνέχεια περιγράφεται η κατασκευή της πειραματικής διάταξης προσομοίωσης ενός κατακόρυφου κλειστού συστήματος γεωεναλλάκτη θερμότητας, όπως πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Δομής της Ύλης και Φυσικής Λείψερ, του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αναλύεται διεξοδικά η κατασκευή κάθε μέλους της διάταξης και η προετοιμασία που έγινε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και την καταγραφή των αποτελεσμάτων. Με αντίστοιχο τρόπο περιγράφεται και η κατασκευή μιας δεύτερης πειραματικής διάταξης, που πραγματοποιήθηκε επίσης στο εργαστήριο, για τον έλεγχο της θερμικής συμπεριφοράς των υλικών πλήρωσης και εγκιβωτισμού των γεωεναλλακτών.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων περιλαμβάνονται στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας. Καταγράφονται τα αποτελέσματα καθώς οι διάφορες παράμετροι του πειράματος τροποποιούνται και παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν. Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο αναλύονται τα δεδομένα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία και εξάγονται συμπεράσματα.

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## 1.1 Εισαγωγή στη Γεωθερμία

Ο όρος Γεωθερμία (Geothermics) αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία στον εφαρμοσμένο επιστημονικό κλάδο που περιλαμβάνει όλο το φάσμα της έρευνας, από τη μελέτη της γήινης ροής θερμότητας, τις συνθήκες κατανομής των θερμοκρασιών στο υπέδαφος, το μηχανισμό της κυκλοφορίας των υπογείων θερμών ρευστών σε συνδυασμό με τις γεωλογικές συνθήκες, καθώς και τα φυσικο – χημικά χαρακτηριστικά τους, μέχρι τον εντοπισμό και της αξιολόγηση των γεωθερμικών πεδίων με κατάλληλες παραγωγικές γεωτρήσεις.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια φυσική, ήπια και σε σημαντικό βαθμό ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς επιφανειακούς ή υπόγειους ατμούς, με ή χωρίς αέρια σε θερμά νερά ή σε μίγματα των παραπάνω, καθώς και σε θερμά – ξηρά πετρώματα. Η εκμετάλλευση της ενέργειας αυτής είναι εφικτή μόνο υπό την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες, σε συνδυασμό με το θερμικό φορτίο, εξασφαλίζουν ένα συγκριτικό οικονομικό αποτέλεσμα. Γεωθερμική ενέργεια περιέχεται και σε ξηρά – θερμά πετρώματα σε μεγάλα βάθη, σε γεωπεπιεσμένους σχηματισμούς και σε λιωμένα πετρώματα (μάγματα), αλλά είναι δύσκολη η αξιοποίηση αυτής της ενέργειας με τα σημερινά τεχνικά και οικονομικά δεδομένα. Αντίθετα, αναπτύσσεται συνεχώς η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας, από ρηχά ρευστά ή πετρώματα, έστω και αν έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία.

Κυριότερος στόχος της Γεωθερμίας είναι ο εντοπισμός και η μελέτη των γεωθερμικών περιοχών, δηλαδή των περιοχών εκείνων που παρουσιάζουν θετικές θερμικές ανωμαλίες και ευνοϊκές γενικά συνθήκες για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας.

Σε μερικές περιοχές της γης παρατηρούνται ασυνήθιστα υψηλές τιμές της θερμικής ροής, δηλαδή της μετάδοσης θερμότητας από το εσωτερικό προς την επιφάνεια. Αυτές οι περιοχές, με θετική θερμική ανωμαλία, έχουν βεβαίως προτεραιότητα στη γεωθερμική έρευνα και αξιοποίηση. Όμως, με τις σημερινές τεχνολογικές εξελίξεις και σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη τιμή της ενέργειας, τον ορατή προοπτική εξάντλησης των συμβατικών πόρων και καυσίμων και την ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος, γίνονται ενδιαφέρουσες και περιοχές με μικρότερες θερμικές ανωμαλίες ή και χωρίς καμία εμφανή θερμική ανωμαλία. Αρκεί οι περιοχές αυτές να διαθέτουν αξιόλογες ποσότητες ρευστών σε μικρά σχετικά βάθη, μέχρι 3000m. Το βάθος αυτό θεωρείται γενικά ως το μέγιστο βάθος των γεωτρήσεων γεωθερμικών εγκαταστάσεων με τα σημερινά οικονομικά δεδομένα.

Περιοχές που παρουσιάζουν αυξημένη θερμική ροή είναι συνήθως οι περιοχές ενεργού μαγματισμού, δηλαδή όπου υπάρχουν λιωμένα πετρώματα σε μικρά σχετικά βάθη. Εκμεταλλεύσιμες όμως γεωθερμικές συνθήκες μπορεί να υπάρχουν και σε άλλες περιοχές, αρκεί να είναι ευνοϊκές οι γεωλογικές συνθήκες, σε συνδυασμό με ενδιαφέροντες κλιματολογικούς και χωροταξικούς παράγοντες (π.χ. περιοχές πυκνοκατοικημένες ή βιομηχανικά ανεπτυγμένες, με αυξημένες ανάγκες σε θερμική ενέργεια κτλ.). Οι ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες μπορεί να επιτρέψουν τη δημιουργία υπόγειων ταμιευτήρων θερμών ρευστών σε ικανοποιητικές ποσότητες και θερμοκρασίες.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων υψηλής θερμοκρασίας ( $>150^{\circ}\text{C}$ ) αυξήθηκε από 3887 MW το 1980 στα 7974 MW το 2000 και το 2005 ξεπέρασε τα 11000 MW. Βεβαίως το γεγονός ότι τα γεωθερμικά ρευστά δε μεταφέρονται μακριά από τον τόπο παραγωγής τους αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα και συντελεί στην αποθάρρυνση των ανεπτυγμένων

Οι γνώσεις μας για τον πλανήτη γη είναι ουσιαστικά επιφανειακές και ότι γνωρίζουμε για το εσωτερικό του προέρχεται από έμμεσες πληροφορίες. Υποθέτουμε βάσιμα ότι η γη είναι θερμή στο εσωτερικό της. Αυτό αποδεικνύεται περίτρανα από τα λιωμένα πετρώματα (μάγματα), θερμοκρασίας μέχρι και 1200°C, τα οποία φτάνουν στην επιφάνεια με τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Λιγότερο εντυπωσιακές, αλλά επίσης ενδεικτικές της θερμότητας του εσωτερικού της γης, είναι οι υδροθερμικές εκρήξεις, οι θερμοπίδακες υπέρθερμου νερού (geysers), οι ατμίδες, τα θερμά εδάφη οι θερμές πηγές και οι λεκάνες ιλύος. [1]

The image is a composite of three distinct visual elements. The largest element is a map of Europe and its surrounding regions, including parts of North Africa and the Middle East. This map is overlaid with a complex pattern of concentric contour lines and color gradients. The colors range from deep red and orange, indicating higher elevations or specific geological features, to yellow, green, and blue, representing lower elevations or different geological compositions. The British Isles are shown as a separate inset in the upper left corner, also featuring the same color-coded overlay. In the upper right corner, there is a circular diagram of the Earth. This diagram shows a cross-section of the planet with its internal layers labeled: the outermost layer is the 'Crust', followed by the 'Mantle' (which is further divided into the 'Asthenosphere' and the 'Core'), and the innermost layer is the 'Core' (divided into the 'Outer Core' and the 'Inner Core'). The diagram is color-coded to represent the different materials and temperatures of these layers, with the core being a bright yellow/orange, the mantle in shades of red and orange, and the crust in shades of blue and green.

[illegible]

2

### 1.1.1 Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης και γεωθερμική ενέργεια

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι ένα από το πιο εντυπωσιακά φυσικά φαινόμενα της γήινης θερμότητας ενώ οι σεισμοί ένα από τα καταστρεπτικότερα. Τα φαινόμενα αυτά αποδεικνύουν ότι ο πλανήτης μας είναι ακόμα ζωντανός, με τις λιθοσφαιρικές πλάκες να κινούνται η μία σε σχέση με την άλλη. Οι σεισμοί και τα ρήγματα που δημιουργούνται διευκολύνουν την κυκλοφορία του μάγματος προς τα πάνω και κυρίως των γεωθερμικών ρευστών και την άνοδό τους προς την επιφάνεια της γης, μεταφέροντας έτσι μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας καθιστώντας την ενέργεια αυτή περισσότερο διαθέσιμη στον άνθρωπο.

Τα γεωθερμικά ρευστά, με τη βοήθεια των τεκτονικών κινήσεων στις σεισμικά ενεργές περιοχές, φθάνουν πολλές φορές μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, δημιουργώντας και άλλα εντυπωσιακά φυσικά φαινόμενα ή εκδηλώσεις τα κυριότερα των οποίων είναι:

- ❖ Οι **υδροθερμικοί ή φρεατικοί κρατήρες**, οι οποίοι σχηματίζονται ύστερα από «έκρηξη» υπέρθερμων γεωθερμικών ρευστών που βρίσκονται εγκλωβισμένα σε μικρό βάθος υπό πίεση, και τα οποία ανατινάζουν τα υπερκείμενα πετρώματα. Στην επόμενη φωτογραφία (Εικόνα 1.3) απεικονίζεται ένας τέτοιος γεωλογικός σχηματισμός στη Νίσυρο. Είναι από τους εντυπωσιακότερους υδροθερμικούς κρατήρες, που σχηματίστηκε σε ιστορικούς χρόνους έχει το μυθολογικό όνομα του Πολυβώτη, και εκλύει ακόμη και σήμερα υπέρθερμους ατμούς και θερμά αέρια. [1]



Εικόνα 1.3 Φωτογραφία φρεατικών κρατήρων στη Νίσυρο (Πολυβώτης). [8,10]

- ❖ Οι **θερμές πηγές** (hot springs) είναι φυσικές εξοδοί ζεστού νερού, υπό ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες, με θερμοκρασία που προσεγγίζει το σημείο ζέσεως του νερού. Σε λίγες περιπτώσεις έχουν σημαντική παροχή, συνήθως όμως διαρρέονται από λίγο νερό, επειδή το περισσότερο εγκλωβίζεται στο υπέδαφος. Στην Ελλάδα οι πηγές των Θερμοπυλών (Εικόνα 1.4), οι οποίες είναι γνωστές από την εποχή του Λεωνίδα,



συνεχίζουν να ρέουν ακόμη και σήμερα με σημαντική παροχή (περίπου  $1000\text{m}^3/\text{h}$ ), γεγονός που καταδεικνύει την ανανεωσιμότητα του ενεργειακού πόρου. [1]



*Εικόνα 1.4 Φωτογραφία των θερμών πηγών στις Θερμοπύλες. [17]*

Οι αποθέσεις αλάτων και ο σχηματισμός ορισμένων πετρωμάτων στις περιοχές εκροής των θερμών πηγών ή άλλων γεωθερμικών εκδηλώσεων αποτελούν συχνό φαινόμενο. Για παράδειγμα, πυριτικές αποθέσεις σχηματίζονται από θερμά νερά με σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένο διοξείδιο του πυριτίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι θερμές πηγές (Εικόνα 1.5) του Πολυχνίτου στη Λέσβο (των θερμότερων στην Ελλάδα), όπου δημιουργούνται αποθέσεις διαφόρων τύπων αλάτων στην περιοχή. Πολλές φορές οι αποθέσεις αυτές σχηματίζουν σωρούς, στρώματα και μικρές αναβαθμίδες από τα καταβυθιζόμενα άλατα. Μερικοί από αυτούς τους σχηματισμούς είναι ιδιαίτερα εντυπωσιακοί, όπως αυτοί που δημιουργούνται από τις πηγές Mammoth στο Yellowstone National Park στις Η.Π.Α. και στο Pamukkale (αρχαία Ιεράπολη) της Τουρκίας (Εικόνες 1.6 και 1.7). [1]



*Εικόνα 1.5 Θερμές πηγές και αποθέσεις διαφόρων τύπων αλάτων στην περιοχή του Πολυχνίτου Λέσβου. [11]*



Εικόνα 1.6 Mammoth Springs, Yellowstone National Park. [18]



Εικόνα 1.7 Pamukkale, Τουρκία. [12]

- ❖ Οι **θερμοπίδακες** (geysers) αποτελούν ειδική περίπτωση θερμών εκδηλώσεων και δημιουργούνται από την κυκλοφορία υπέρθερμων υπόγειων νερών σε μικρό βάθος. Αυτά τα ύδατα κάθε τόσο αποκτούν ικανή πίεση, ώστε να δημιουργηθεί μια σχεδόν περιοδική και εντυπωσιακή μερικές φορές έκρηξη νερού και υδρατμών, τα οποία εκτινάσσονται σε αρκετές δεκάδες μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι θερμοπίδακες είναι ιδιαίτερα σπάνιο φαινόμενο και παρατηρούνται σε ενεργές ηφαιστειακά περιοχές. Δεν έχουν καταγραφεί περισσότεροι από χίλιους θερμοπίδακες σε όλο τον κόσμο. [1]



Εικόνα 1.8 Ο θερμοπίδακας Old Faithful στο Yellowstone National Park, Η.Π.Α. [13]

- ❖ Οι **ατμίδες** (fumaroles, Εικόνα 1.9) είναι αναδύσεις υπέρθερμων ατμών και αερίων, που βγαίνουν από ρωγμές του εδάφους χωρίς πίεση, αλλά με εντυπωσιακή σταθερότητα. Σχηματίζονται όταν η παροχή του νερού είναι περιορισμένη και το νερό εξατμίζεται προτού φτάσει στην επιφάνεια της γης. Γύρω από τις ατμίδες αποτίθενται διάφορα άλατα και ορυκτά, που περιέχονται στα φυσικά θερμά ρευστά. Σε εξαιρετικές



περιπτώσεις η θερμοκρασία των αερίων φτάνει τους  $600^{\circ}\text{C}$ , αν και συνήθως τα αέρια έχουν θερμοκρασία γύρω από τους  $100^{\circ}\text{C}$ . Τα αέρια που εξέρχονται μαζί με τον ατμό είναι κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα και δευτερευόντως το διοξείδιο του θείου, το υδρόθειο και μικρές ποσότητες άλλων ηφαιστειακών και μη αερίων. Οι ατμίδες που εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες υδρόθειου ονομάζονται θειωνίες (solfataras, Εικόνα 1.10), ενώ οι ατμίδες που περιέχουν μόνο διοξείδιο του άνθρακα καλούνται μοφέτες (mofettes). [1]



*Εικόνα 1.9* Πεδίο ατμίδων στο ηφαίστειο Akutan στην Αλάσκα. [14]



*Εικόνα 1.10* Χαρακτηριστική θειωνία στο White Island Νέα Ζηλανδία. [15]

- ❖ Οι **λεκάνες ίλως** (mud pools, Εικόνα 1.11) σχηματίζονται όταν δεν υπάρχει μεγάλη ροή και πίεση του νερού μιας θερμής πηγής, ώστε να μεταφέρει μακριά τα αργίλοπυριτικά σωματίδια που συμπαρασύρονται από το νερό. Αυτά συσσωρεύονται στην έξοδο ή τη «λεκάνη» της θερμικής εκδήλωσης, ενώ οι υδρατμοί μαζί με τα μη συμπυκνώσιμα αέρια, συσσωρεύονται στην επιφάνεια της πηκτής ίλως και εκτονώνονται με χαρακτηριστικό ήχο. Οι θερμικοί αυτοί σχηματισμοί αποτελούν ενδιάμεση θερμική εκδήλωση μεταξύ των θερμοπιδάκων και των ατμίδων. [1]



*Εικόνα 1.11 Λεκάνη ίλως στο Yellowstone National Park, Η.Π.Α. [16]*

- ❖ Τα **θερμά εδάφη** (hot grounds) σχηματίζονται συνήθως από τη θερμική αγωγή των πετρωμάτων και μη περατών γεωλογικών σχηματισμών, που παρεμβάλλονται μεταξύ μερικών σημείων της επιφάνεια της γης και των υποκείμενων αβαθών και πολύ θερμών ρευστών. Έχουν θερμοκρασίες που φτάνουν μέχρι και τους 100°C στην επιφάνεια του εδάφους. Στη Μήλο και στη Νίσυρο υπάρχουν διάφορες τέτοιες περιοχές. Μία χαρακτηριστική περίπτωση είναι μια περιοχή 15000m<sup>2</sup> στη θέση «Χάρου Θειάφες» κοντά στον Αδάμαντα της Μήλου, στο σημείο συνάντησης δύο σημαντικών ρηγμάτων.[1]

### *1.1.2 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων*

Ένα συνηθισμένο γεωθερμικό πεδίο αποτελείται από τρία κύρια μέρη: μία πηγή θερμότητας, έναν ταμιευτήρα και τα ρευστά, τα οποία είναι οι φορείς της θερμότητας. Η πηγή θερμότητας μπορεί να είναι είτε μια μαγματική διείσδυση η οποία έφτασε σε σχετικά μικρά βάθη (3 – 10km), είτε η κανονική θερμική ροή της γης, που δημιουργεί όλο και θερμότερους σχηματισμούς όσο προχωρούμε σε μεγαλύτερο βάθος. Ο ταμιευτήρας (reservoir) αποτελείται ουσιαστικά από ένα σύστημα θερμών διαπερατών πετρωμάτων, που επιτρέπουν την εύκολη κυκλοφορία ή τον εγκλωβισμό των κυκλοφορούντων ρευστών τα οποία απάγουν θερμότητα. Τα γεωθερμικά ρευστά είναι ύδατα μετεωρικής ή επιφανειακής προέλευσης (και σπάνια μαγματικής), σε υγρή ή αέρια φάση και συχνά περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαλυμένων στερεών ουσιών και αερίων. Η κατάσταση των γεωθερμικών ρευστών εξαρτάται προφανώς από την πίεση και τη θερμοκρασία τους. [1, 4]



Σήμερα αξιοποιείται μόνο ένα μικρό μέρος της γεωθερμικής ενέργειας, λεγόμενη «ενέργεια της γης» ή υδροθερμική ενέργεια, με τη μορφή θερμών ρευστών. Μια κατηγορία γεωθερμικής ενέργειας, που βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο, είναι η λεγόμενη ενέργεια των θερμών ξηρών πετρωμάτων. Νερό οδηγείται τεχνητά από την επιφάνεια της γης μέσω γεώτρησης εισαγωγής μέχρι τα θερμά, ξηρά και χωρίς ύδατα πετρώματα, σε βάθος που μπορεί να υπερβαίνει τα 5000m. Μετά τη θέρμανση του εκεί, το νερό επιστρέφει στην επιφάνεια μέσω άλλης ή άλλων παραγωγικών γεωτρήσεων. Η τεχνική βιωσιμότητα τέτοιων συστημάτων έχει αποδειχθεί πειραματικά, το κόστος τους όμως είναι αρκετά υψηλό με τα σημερινά τεχνικά και οικονομικά δεδομένα. Υπάρχουν βέβαια και άλλες μορφές γεωθερμικής ενέργειας, οι οποίες αυτή τη στιγμή, με τα τεχνικά και οικονομικά μέσα που διαθέτει η ανθρωπότητα, δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν. Οι μορφές αυτές είναι η γεωπεπιεσμένη ενέργεια και η ενέργεια του μάγματος. Τα γεωπεπιεσμένα συστήματα (geopressed systems), τα οποία αποτελούνται από ρευστά εγκλεισμένα σε μεγάλο βάθος, βρίσκονται περιορισμένα από μη περατά πετρώματα και η πίεση τους υπερβαίνει την υδροστατική. Η γεωπεπιεσμένη ενέργεια ουσιαστικά προκύπτει από την ενέργεια υδάτων υψηλής αλατότητας που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Ταυτόχρονα περιέχονται σημαντικές ποσότητες διαλυμένου μεθανίου στην περίπτωση παρουσίας υδρογονανθράκων. Τα μαγματικά συστήματα (magma systems) αναφέρονται στην απόληψη θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις, οι οποίες βρίσκονται σε μικρό σχετικά βάθος. [1]

Τελευταία, έχει διαδοθεί σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες η τεχνική της εκμετάλλευσης της θερμότητας των πετρωμάτων σε σχετικά μικρότερα βάθη, με τη βοήθεια είτε αβαθών γεωτρήσεων ή μικρών εκσκαφών στην «αυλή» του καταναλωτή με τη χρήση **γεωεναλλακτών θερμότητας** και **γεωθερμικών αντλιών θερμότητας**. Η μέθοδος αυτή της αξιοποίησης αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη κατηγορία γεωθερμικής ενέργειας και μπορεί να εφαρμοστεί οπουδήποτε υπάρχει ανάγκη τόσο για θέρμανση το χειμώνα, όσο και για κλιματισμό το καλοκαίρι, διότι ακόμα και στα μικρότερα βάθη η θερμοκρασία του εδάφους είναι σταθερή σχεδόν σε όλη τη διάρκεια του έτους. Ο τρόπος της αξιοποίησης της ενέργειας των πετρωμάτων σε αυτή την περίπτωση γίνεται ως επί το πλείστον με ανακυκλοφορία νερού σε κλειστά υδραυλικά συστήματα. Η περιγραφή αυτών των συστημάτων θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια.

### *1.1.3 Ιστορική αναδρομή της γεωθερμικής ενέργειας*

Οι θερμές πηγές θεωρούνταν από την αρχαιότητα ότι είχαν θεραπευτικές και υπερφυσικές ιδιότητες, και γι' αυτό το λόγο τα Ασκληπιεία αλλά και άλλοι ιεροί χώροι, βρίσκονταν κοντά σε θερμές πηγές. Τρανό παράδειγμα αποτελεί ο ναός της Αρτέμιδος στη Λέσβο ο οποίος είναι κτισμένος επάνω σε τόπο όπου ακόμα και σήμερα αναβλύζουν θερμά ύδατα. Ταυτόχρονα υπάρχουν πολλές παραστάσεις, κυρίως σε αγγεία, που συνδέουν τις θερμές πηγές με τη χρήση του νερού για ιαματικούς αλλά και θρησκευτικούς λόγους. [1]

Η χρήση των φυσικών θερμών ρευστών ήταν γνωστή και στους αρχαίους ανατολικούς λαούς, στην Κίνα και την Ιαπωνία, με πληθώρα μαρτυριών στη μυθολογία και την ιστορία τους. Οι Ετρούσκοι και οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν τα θερμά νερά, όχι μόνο για ιαματικούς σκοπούς αλλά και για τη θέρμανση οικιών. Ο Γαληνός προσέφερε φρούτα εκτός εποχής στους καλεσμένους του, τα οποία παρήγαγε σε κάποια «γεωθερμικά» θερμοκήπια. Ο στρατηγός Σίλας χρησιμοποίησε τις θερμές πηγές της Αιδηψού για να γιατρευτεί και το όνομα του φέρει μέχρι σήμερα μια πηγή στην περιοχή. Ακόμα και σήμερα στη περιοχή της Αιδηψού λειτουργούν σύγχρονα λουτροθεραπευτικά συγκροτήματα. [1]

Τα φυσικά λοιπόν θερμά ρευστά χρησιμοποιήθηκαν από πολύ παλιά, κυρίως για τις θεραπευτικές τους ιδιότητες, πολύ σπάνια όμως για τις ενεργειακές τους δυνατότητες. Οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις επέτρεψαν, κατά τον προηγούμενο κυρίως αιώνα, την

αξιοποίηση της γήινης θερμότητας. Προηγουμένως έλειπαν προφανώς οι μεγάλες ποσότητες ρευστών που μπορούν να παραχθούν με τις γεωτρήσεις, αφού η τεχνολογία των γεωτρήσεων αναπτύχθηκε ουσιαστικά μόλις τον προηγούμενο αιώνα. Πράγματι, οι ποσότητες των ρευστών που καταφέρνουν να φτάσουν από μόνα τους στην επιφάνεια είναι πολύ μικρές, σε σύγκριση με τα ρευστά που είναι εγκλωβισμένα στο υπέδαφος «αναμένοντας» τις γεωτρήσεις ώστε να ανέβουν στην επιφάνεια της γης, είτε με τη δική τους πίεση είτε ύστερα από άντληση.

Στη σύγχρονη εποχή, η πρώτη βιομηχανική αξιοποίηση της γεωθερμίας πραγματοποιήθηκε στο Larderello της Ιταλίας. Στο πεδίο αυτό, από τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα χρησιμοποιούνταν υπέρθερμος ατμός για την παραγωγή βορικού οξέος (με την εξάτμιση των υπέρθερων ρευστών που περιείχαν σημαντικές ποσότητες του οξέος) και για τη θέρμανση κτηρίων. Εκεί, το 1904, έγινε η πρώτη πετυχημένη προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρήση των φυσικών ατμών που έβγαιναν με πίεση. Η πρώτη συστηματική αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών για θέρμανση χώρων, θερμοκηπίων και κτηρίων ξεκίνησε στη δεκαετία του 1920 στην Ισλανδία. Σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού της Ισλανδίας (και ολόκληρη η πόλη του Reykjavik) θερμαίνονται με γεωθερμικά ρευστά. Συγχρόνως, υπάρχουν ποικίλες άλλες εφαρμογές, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, θέρμανση θερμοκηπίων και πισινών (ονομαστή είναι η μεγάλη σε έκταση πισίνα Blue Lagoon στο Grindavik η οποία θεωρείται ότι έχει και ιαματικές ιδιότητες), στις ιχθυοκαλλιέργειες, στην ξήρανση της γης κ.α., με συνολική εγκατεστημένη ισχύ θερμικών μονάδων 1469 MW (ποσοστό 17% των παγκόσμιων θερμικών χρήσεων) και ηλεκτρικών μονάδων 170 MW. Το παράδειγμα της Ισλανδίας μιμήθηκαν και πολλές άλλες χώρες της Ευρώπης, αλλά και της Ασίας και της Αμερικής. Σήμερα ο αριθμός των χωρών που έχει ενταχθεί ουσιαστικά στη γεωθερμική έρευνα και εκμετάλλευση για θερμικών σκοπούς ξεπερνά τις 60, με συνολική ισχύ που υπερβαίνει τα 15000 MW. Στην ηλεκτροπαραγωγή, εκτός από την Ιταλία, από το 1950 και μετά έχουν εμπλακεί κατά σειρά η Νέα Ζηλανδία, οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, η Ιαπωνία, το Μεξικό, οι Φιλιππίνες και αρκετές χώρες της Κεντρικής Αμερικής. [1, 5]

Όσον αφορά την Ευρώπη, υπάρχουν 28 «γεωθερμικά» ενεργές χώρες με εφαρμογές άμεσων χρήσεων και πέντε χώρες με γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή (Ιταλία, Ισλανδία, Γαλλία, Αυστρία, Πορτογαλία), με εγκατεστημένη ισχύ 971 MW και παραγωγή 5635 GWh το χρόνο ηλεκτρικής ενέργειας. [1]

Ενώ το δυναμικό της γεωθερμικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο, αλλά και στην Ελλάδα είναι σημαντικό, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στην αποτελεσματική αξιοποίηση αυτού του δυναμικού. Αυτοί οι περιορισμοί μπορεί να είναι τεχνικής (διάβρωσης, δημιουργία επικαθίσεων), περιβαλλοντικής (κυρίως εκπομπής υδρόθειου), νομοθετικής και οικονομικής φύσεως. Οι οικονομικοί περιορισμοί διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο σε κάθε προσπάθεια αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας. Γενικά, είναι πιθανότερη η αξιοποίηση γεωθερμικών ρευστών όταν αυτά βρίσκονται κοντά σε βιομηχανικές, αστικές ή αγροτικές περιοχές, ή όταν υπάρχουν ανάγκες θέρμανσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

## *1.2 Γεωθερμικά Συστήματα Γεωεναλλακτών Θερμότητας*

Η πρώτη εγκατάσταση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (ground – source heat pump), ή πιο σωστά διατυπωμένα η πρώτη αντλία θερμότητας με πηγή θερμότητας το έδαφος, έλαβε χώρα στην Ινδιανάπολη το 1945 στο σπίτι του Robert C. Webber υπάλληλου στην εταιρία Indianapolis Power and Light Co. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιώντας συμπιεστή 2,2 kW συνδεδεμένο με απευθείας επέκταση ενός συστήματος σπειρών σε υπόγειους τάφρους, παρείχε θερμότητα σε σύστημα θέρμανσης με θερμό αέρα. [3]

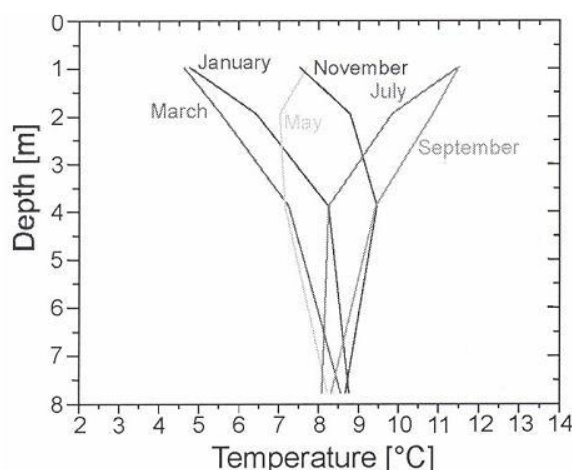
Στα επόμενα χρόνια, ακολούθησαν πολυάριθμες προτάσεις για το πώς θα μπορούσε η γη να χρησιμοποιηθεί ως πηγή θερμότητας και σαν δεξαμενή θερμότητας για τις αντλίες θερμότητας. Έρευνες που έχουν διεξαχθεί από το 1947 δείχνουν ουσιαστικά ότι όλες οι μέθοδοι εφαρμογής μέχρι σήμερα, συμπεριλαμβάνοντας γεωτρήσεις υπόγειου νερού, οριζόντιες σπείρες με απευθείας επέκταση, κυκλώματα άλμης, κάθετες γεωτρήσεις εναλλακτών θερμότητας ομοαξονικές, σχήματος U και σπειροειδής μορφής δοκιμάστηκαν από τις πρώτες μέρες αυτής της τεχνολογίας. [3]

Η εγκατάσταση τέτοιου είδους συστημάτων (ground source – coupled heat pumps), παρουσιάζει αρκετά μεγάλη δυναμική τα τελευταία χρόνια. Είναι χαρακτηριστικά τα αποτελέσματα του Παγκοσμίου Συνεδρίου Γεωθερμίας το 2005 (WSG 2005) σύμφωνα με τα οποία μεταξύ 2000 και 2005 υπήρξε συνολική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος κατά 198% (24% ετησίως) και αντίστοιχη αύξηση 272% στο πλήθος των εγκαταστάσεων (30% ετησίως). Από τα ίδια στοιχεία υπολογίζεται πως ο συνολικός αριθμός εγκατεστημένων μονάδων ξεπερνά το 1700000 με ελλιπή όμως στοιχεία. [2]

Αυτού του είδους τα συστήματα αξιοποίησης της θερμότητας της γης χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- ❖ Συστήματα ανοικτού βρόγχου (open loop).
- ❖ Συστήματα κλειστού βρόγχου (closed loop).

Οι εγκαταστάσεις αυτές χρησιμοποιούν ως πηγή κυρίως υπόγεια ή επιφανειακά ύδατα και το υπέδαφος. Χαρακτηριστικό είναι πως σε πρόσφατη έρευνα, Lund et al., (2004), υπολογίζεται πως το 85% των εγκαταστάσεων τέτοιου τύπου που είναι εγκατεστημένες στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας το έδαφος. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης του εδάφους είναι ότι από κάποιο βάθος και κάτω, ανάλογα με την περιοχή, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στη διάρκεια του χρόνου και μεταβάλλεται με τον κανόνα της γεωθερμικής βαθμίδας όπως έχει προαναφερθεί. Αυτό συμβαίνει σε μικρό βάθος από τα πρώτα κίολας μέτρα (Εικόνα 1.12). [2]



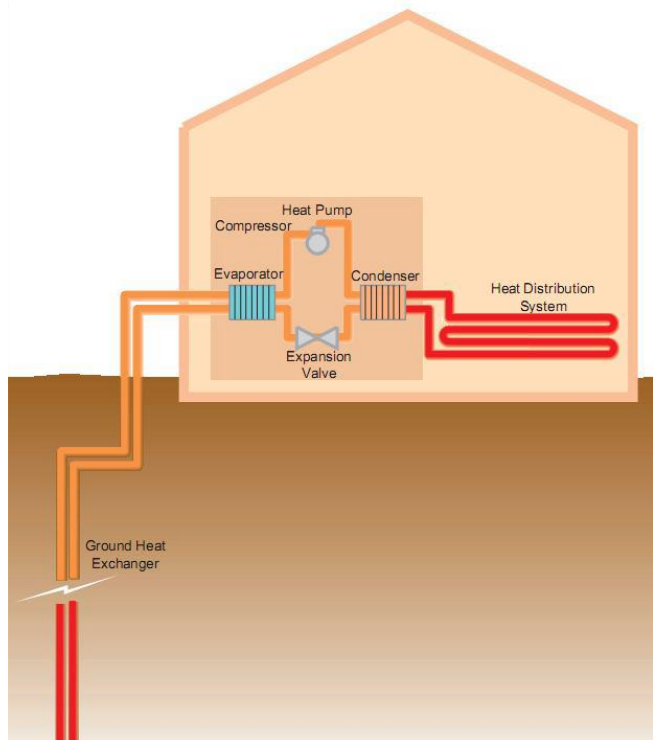
Εικόνα 1.12 Θερμοκρασιακή μεταβολή συναρτήσει του βάθους. [3]

Η απολαβή της θερμότητας από το υπέδαφος γίνεται μέσω σωλήνων θαμμένων στο έδαφος στους οποίους κυκλοφορεί συνήθως νερό ή μίγμα νερού – αντιπηκτικού ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Οι θαμμένοι αυτοί σωλήνες αποτελούν τους γεωεναλλάκτες, που διακρίνονται σε οριζόντιους και κατακόρυφους, ανάλογα με τη διάταξη των σωλήνων από τους οποίους αποτελούνται. Σε ορισμένες περιπτώσεις γεωεναλλακτών που είναι τοποθετημένοι οριζόντια ή πολύ κοντά στην επιφάνεια, η εγκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ψύξη απορρίπτοντας θερμότητα στο έδαφος ή στην εκάστοτε περιοχή που είναι θαμμένος ο

γεωεναλλάκτης. Τα κυριότερα μέρη ενός τέτοιου γεωθερμικού συστήματος (Εικόνα 1.13) είναι τα εξής:

- ❖ Η αντλία θερμότητας.
- ❖ Ο γεωεναλλάκτης με την αντλία κυκλοφορίας του (πρωτεύον κύκλωμα).
- ❖ Το σύστημα διανομής της θερμότητας στο χώρο εγκατάστασης (δευτερεύον κύκλωμα).

Η αντλία θερμότητας τοποθετείται στο μηχανοστάσιο στο εσωτερικό του κτιρίου και τροφοδοτεί το σύστημα θέρμανσης (δευτερεύον κύκλωμα της αντλίας θερμότητας).



Εικόνα 1.13 Κυριότερα μέρη συστήματος γεωεναλλάκτη – αντλίας θερμότητας. [3]

Ένα σύστημα γεωεναλλάκτη είναι τρεις έως πέντε φορές αποδοτικότερο από ένα συμβατικό σύστημα. Επειδή τα συστήματα γεωεναλλάκτη δεν καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή θερμότητας, παρέχουν τρεις έως πέντε μονάδες ενέργειας για κάθε μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτεί το σύστημα. Τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης βαθμονομούνται για την απόδοση τους σύμφωνα με τις διεθνείς και ευρωπαϊκές προδιαγραφές (ISO και EN). Οι καυστήρες ορυκτών καυσίμων βαθμονομούνται με την επί τοις εκατό απόδοσή τους σε σχέση με τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου που καταναλώνουν. Οι καυστήρες φυσικού αερίου, προπανίου και πετρελαίου βαθμονομούνται για την απόδοσή τους σε ειδικά εργαστήρια. Για να εκτιμηθεί η ακριβής απόδοση μιας εγκατάστασης πρέπει να συμπεριληφθούν παράγοντες όπως οι απώλειες θερμότητας καυσαερίων, οι πολλαπλές εναύσεις

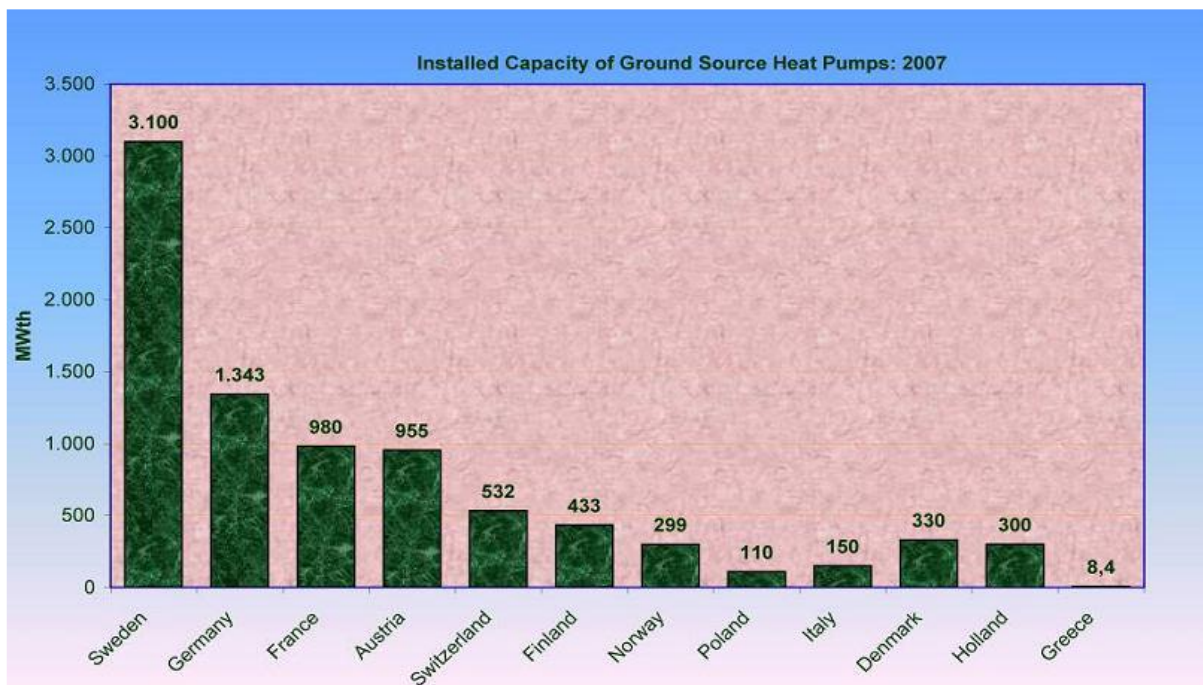
λόγω υπερδιαστασιολόγησης, η ηλεκτρική κατανάλωση των κυκλοφορητών, κλπ. [1]

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, όπως όλοι οι άλλοι τύποι αντλιών θερμότητας βαθμονομούνται σύμφωνα με το συντελεστή απόδοσης (COP – coefficient of performance). Είναι ο επιστημονικός τρόπος προσδιορισμού της ενέργειας που το σύστημα παράγει σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιεί. Τα περισσότερα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας έχουν COPs 3~5. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε μία μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει το σύστημα, 3~5 μονάδες παρέχονται ως θερμότητα. Δηλαδή ένας καυστήρας ορυκτών καυσίμων μπορεί να είναι 78 – 95% αποδοτικός, ενώ μια γεωθερμική αντλία θερμότητας είναι 300 – 500%. [3]

Επίσης θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι πέρα από την αποδοτικότητά τους, τα γεωθερμικά συστήματα λειτουργούν σε συνεργασία με τη φύση και όχι ενάντια σε αυτήν. Δεν εκπέμπουν αέρια θερμοκηπίου, τα οποία έχουν συνδεθεί με την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, την όξινη βροχή και άλλους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Ταυτόχρονα πολλά τέτοια συστήματα χρησιμοποιούν ένα ψυκτικό υγρό υψηλής απόδοσης το R410A το οποίο δε βλάπτει το στρώμα του όζοντος στην ατμόσφαιρα. [3]

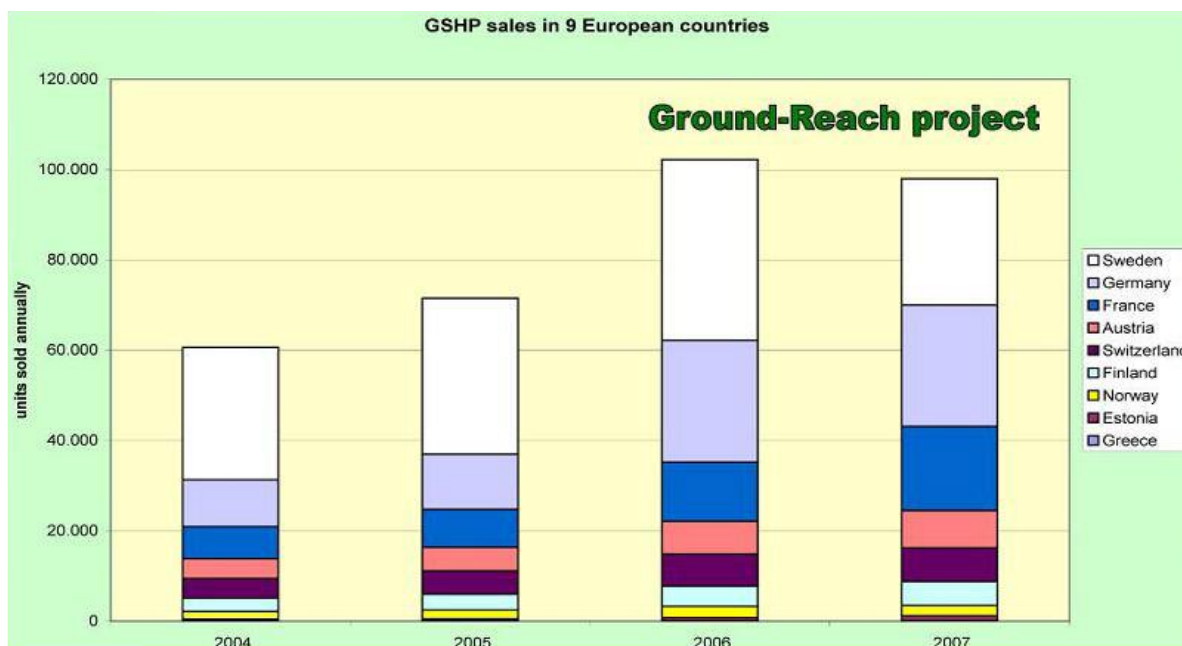
Ένα συνηθισμένο παράδειγμα κατανόησης της λειτουργίας των αντλιών θερμότητας αποτελούν τα ψυγεία και τα κλιματιστικά μηχανήματα, τα οποία είναι αντλίες θερμότητας που κινούν τη θερμότητα από τους πιο κρύους εσωτερικούς χώρους στους θερμότερους εξωτερικούς χώρους με σκοπό την ψύξη των πρώτων. Οι αντλίες θερμότητας κινούν επίσης την θερμότητα από χαμηλής θερμοκρασίας πηγές σε υψηλής θερμοκρασίας χώρους με σκοπό τη θέρμανση. Παραδείγματος χάριν, μια αντλία θερμότητας με πηγή θερμότητας τον εξωτερικό αέρα, λαμβάνει τη θερμότητα από τον υπαίθριο χώρο και την αντλεί στο εσωτερικό του κτιρίου. Μια γεωθερμική αντλία θερμότητας λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, με τη διαφορά ότι η πηγή θερμότητάς της είναι η πιο ζεστή γη αντί του κρύου αέρα. Η διαδικασία της ανύψωσης της θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας σε άνω των 30°C και μεταφορά στον εσωτερικό χώρο περιλαμβάνει έναν κύκλο εξάτμισης, συμπίεσης, συμπύκνωσης και εκτόνωσης. Το ψυκτικό υγρό χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας που κυκλοφορεί μέσα στην αντλία θερμότητας. [3]

Τα πλεονεκτήματα αυτά έχουν καταστήσει αυτά τα συστήματα ιδιαίτερα ελκυστικά, ως επί το πλείστον στις ανεπτυγμένες χώρες. Στον ευρωπαϊκό χώρο έχουν βρει ευρεία εφαρμογή σε χώρες όπως η Σουηδία και η Γερμανία. (Εικόνα 1.14)



Εικόνα 1.14 Διείσδυση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στην ευρωπαϊκή αγορά.

Πηγή: ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) [3]



Εικόνα 1.15 Ετήσιες πωλήσεις γεωθερμικών αντλιών θερμότητας για 9 ευρωπαϊκές χώρες.  
Πηγή: ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) [3]

### 1.2.1 Είδη Γεωεναλλακτών

Χρησιμοποιώντας το έδαφος ως πηγή θερμότητας είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί σύνδεση μεταξύ του σημείου που θα αξιοποιηθεί η θερμότητα (κτίριο, κατοικία κτλ.) και του εδάφους. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν οι γεωεναλλάκτες θερμότητας. Όπως προαναφέρθηκε οι γεωθερμικές αυτές συνδέσεις με το έδαφος ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- ❖ Τους γεωεναλλάκτες κλειστού βρόγχου οι οποίοι εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που βρίσκεται αποθηκευμένη στους γεωλογικούς σχηματισμούς.
- ❖ Τους γεωεναλλάκτες ανοικτού βρόγχου οι οποίοι εκμεταλλεύονται την παρουσία υπογείων υδάτων ή επιφανειακού υδρολογικού ορίζοντα.

Οι παράγοντες σχεδιασμού που επηρεάζουν το είδος του κυκλώματος που θα εφαρμοστεί είναι:

- ❖ Οι γεωλογικές συνθήκες δηλαδή τα θερμικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους.
- ❖ Οι τεχνικές παράμετροι όπως είναι το μήκος, η διάμετρος και το υλικό του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και το είδος και η ποιότητα εμποτισμού των αγωγών.
- ❖ Το απαιτούμενο θερμικό φορτίο.
- ❖ Το εμβαδόν του κτιρίου που πρόκειται να θερμανθεί καθώς και ο διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση.
- ❖ Η θερμοκρασία του υπεδάφους.



### 1.2.2 Γεωεναλλάκτες ανοικτού κυκλώματος

Τα ανοιχτά γεωθερμικά συστήματα είναι αυτά που εκμεταλλεύονται τον υπόγειο ή επιφανειακό υδροφόρο ορίζοντα με υδρογεωτρήσεις. Κατασκευαστικά είναι ευκολότερη λύση αλλά και η πιο δαπανηρή στη λειτουργία από όλα τα γεωθερμικά συστήματα, λόγω της κατανάλωσης του υποβρύχιου συγκροτήματος στην γεώτρηση της άντλησης. Τα ανοιχτά γεωθερμικά συστήματα αποτελούνται από το κύκλωμα των υδρογεωτρήσεων, τη γεωθερμική αντλία θερμότητας και το δίκτυο διανομής της θέρμανσης ή της ψύξης ανάλογα και εφαρμόζονται σε περιοχές που παρουσιάζουν συνεχή υψηλή υπόγεια ή επιφανειακή υδροφορία. [3]

Συγκεκριμένα, νερό αντλείται από γειτονικό υδροφορέα, διέρχεται μέσω του γεωεναλλάκτη στην αντλία θερμότητας και τελικά αποφορτίζεται. Μετά την απομάκρυνση του από το κτίριο, το νερό διατίθεται με μία από τις τρεις μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω ανάλογα κάθε φορά τους ισχύοντες τοπικούς κανονισμούς και περιορισμούς.

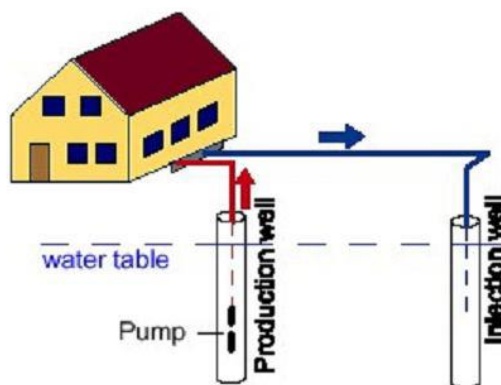
1. Αποστράγγιση επιφάνειας, συμβαίνει σε περιοχές όπως λίμνες, ποτάμια, ρυάκια.
2. Υπόγεια, σε μία συγκεκριμένη περιοχή αποστράγγισης μεγέθους ανάλογης με τον όγκο του απαιτούμενου νερού της αντλίας θερμότητας.
3. Επαναφόρτιση στον ίδιο υδροφορέα.



Εικόνα 1.16 Η περίπτωση της υπόγειας διάθεσης των υπό απομάκρυνση υδάτων. [3]

#### 1.2.2.1 Συστήματα ανοικτού βρόγχου πολλαπλών γεωτρήσεων

Τα συγκεκριμένα γεωθερμικά συστήματα, συνήθως, συμπεριλαμβάνουν ένα ή περισσότερα φρεάτια άντλησης και ένα ή περισσότερα φρεάτια επαναφόρτισης.



Εικόνα 1.17 Σύστημα ανοικτού βρόγχου με τα φρεάτια άντλησης και επαναφόρτισης. [3]

Στα συστήματα ανοιχτού βρόγχου, το υπόγειο νερό αντλείται από τον υδροφορέα μέσω του φρεατίου άντλησης χρησιμοποιώντας ως επί το πλείστον μια υποβρύχια αντλία και εισάγεται στην αντλία θερμότητας, η οποία δρα ως πηγή ή δεξαμενή θερμότητας στην διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης. Αφού το νερό διέλθει την αντλία θερμότητας επιστρέφει στον υδροφορέα μέσω του φρεατίου φόρτισης. Η μόνη διαφορά ανάμεσα στο αντλούμενο και στο επιστρεφόμενο νερό είναι η θερμοκρασία. [3]

Έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε συνδυασμό με την μακρόχρονη εμπειρία εφαρμογής του συγκεκριμένου συστήματος, δείχνουν ότι η απαραίτητη ικανότητα του συστήματος για αποτελεσματική εναλλαγή θερμότητας είναι γύρω στα 8 με 11 lt/min. Από τη στιγμή που η θερμοκρασία του εδάφους παραμένει σταθερή, τα γεωθερμικά συστήματα ανοιχτού βρόγχου, αποτελούν δημοφιλή επιλογή σε περιοχές που επιτρέπεται η εγκατάσταση τους. Παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται λιγότερο από τα συστήματα κλειστού κυκλώματος, μπορεί να αποδειχθούν αρκετά πιο αποδοτικά στον τομέα του κόστους υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι το νερό υπάρχει σε αφθονία. Περιοριστικό βέβαια ρόλο στην εφαρμογή και εγκατάσταση τους έχουν και οι τοπικές περιβαλλοντικές αρχές με τους θεσπισμένους νόμους και κώδικες ή διατάγματα καθώς και τις απαιτήσεις αδειοδότησης. [3]

Πρέπει να τονιστεί ότι το φτωχό σε ποιότητα νερό μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα στις συγκεκριμένες εφαρμογές. Για το λόγο αυτό συνίσταται να προηγούνται έλεγχοι του διαθέσιμου νερού σε σκληρότητα, οξύτητα, περιεκτικότητα σε σίδηρο και διάφορες άλλες μετρήσεις ανάλογα με την περιοχή πριν την εγκατάσταση της αντλίας θερμότητας. [3]

Ταυτόχρονα θα πρέπει να επισημανθεί ότι από την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος δεν προκύπτει καμία περιβαλλοντική ζημιά δεδομένου ότι το νερό που αντλείται επιστρέφεται στον υδροφορέα. Η μόνη διαφορά που προκύπτει είναι μία μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του χρησιμοποιούμενου νερού από το φρεάτιο άντλησης στο φρεάτιο φόρτισης. Σημαντικό επίσης παράγοντα για την λειτουργία ενός γεωθερμικού συστήματος ανοιχτού βρόγχου αποτελεί η απόσταση μεταξύ των φρεατίων άντλησης και επαναφόρτισης. Η αποφυγή της ροής από το φρεάτιο φόρτισης στο φρεάτιο άντλησης δεν είναι απαραίτητη, θα πρέπει όμως να επιβεβαιωθεί ότι η κυκλοφορία του νερού μεταξύ των φρεατίων είναι επαρκώς χαμηλή έτσι ώστε η θερμοκρασία του νερού από το φρεάτιο φόρτισης στο φρεάτιο άντλησης να είναι σχεδόν ίδια με την θερμοκρασία του υδροφορέα. [3]

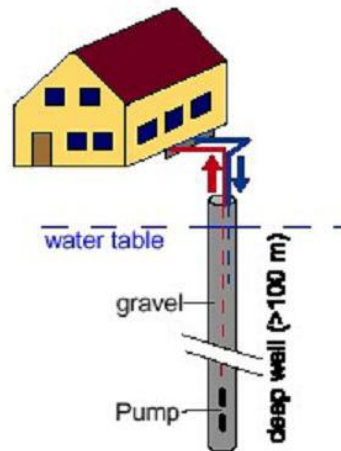
Όσον αφορά τις διαστάσεις του φρεατίου, αυτό θα πρέπει να είναι μήκους 85 με 200 περίπου μέτρα ανάλογα βέβαια το μέγιστο ψυκτικό ή θερμικό φορτίο του συστήματος, την τυπική διάρκεια του μέγιστου φορτίου καθώς και από το πάχος και τη φυσική ροή του υδροφορέα. Εάν δεν ληφθεί η απαραίτητη προσοχή στο συγκεκριμένο παράγοντα σχεδιασμού, τότε μπορεί να προκληθεί αύξηση της θερμοκρασίας του υδροφορέα με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ανεπιθύμητων οργανισμών. [3]

#### *1.2.2.2 Συστήματα υδάτινης στήλης*

Ένα άλλο είδος γεωθερμικού συστήματος ανοιχτού βρόγχου αποτελεί και αυτό της υδάτινης στήλης. Στην ουσία πρόκειται για μία μόνο βαθιά γεώτρηση/φρεάτιο σε βραχώδες υπόβαθρο. Η μέθοδος αυτή λειτουργεί καλύτερα με αντιδιαβρωτικό νερό, καθώς το νερό χρησιμοποιείται απ' ευθείας στην αντλία θερμότητας. Στην περίπτωση αυτή το γεωθερμικό νερό κυκλοφορεί μέσα στο ίδιο φρεάτιο. Το νερό αντλείται από τη βάση της γεώτρησης, διέρχεται από την αντλία θερμότητας η οποία προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του και

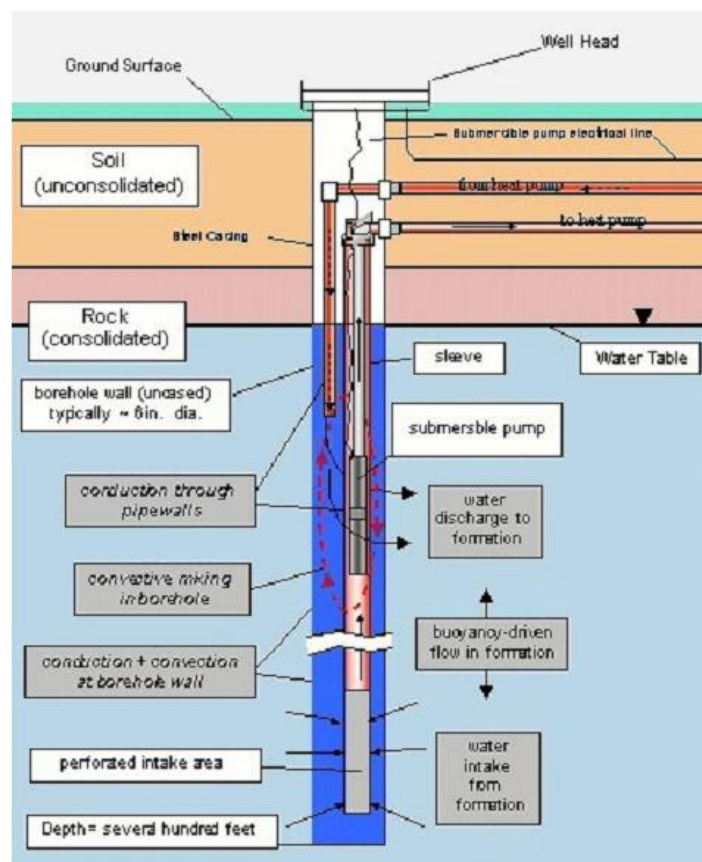


επιστρέφει στην κορυφή της γεώτρησης. Στη συνέχεια ρέει έως ότου επιστρέψει στον υπόγειο ορίζοντα, ενώ στην πορεία, ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον πέτρωμα. [3]



Εικόνα 1.18 Σύστημα υδάτινης στήλης σε βραχώδες υπόβαθρο. [3]

Η κάθετη αυτή κίνηση του νερού και η εναλλαγή θερμότητας καλείται υδάτινη στήλη παρέχοντας μία κατάλληλη και αποδοτική μέθοδο μετάδοσης θερμότητας. Βασιζόμενοι στην εμπειρία της Ένωσης ενεργειακών συστημάτων και ύδατος (Water and Energy Systems Corporation) για κάθε τόνο κτιριακού φορτίου, απαιτούνται 16,5 με 20 μέτρα υδάτινης στήλης. Ο τόνος κτιριακού φορτίου είναι ενεργειακό μέγεθος ισοδύναμο με 12000 Btu ανά ώρα. Οι ανάγκες μιας τυπικής σύγχρονης οικίας σε θέρμανση είναι 4 – 5 τόνοι ενώ για ψύξη 2 τόνοι.[3]



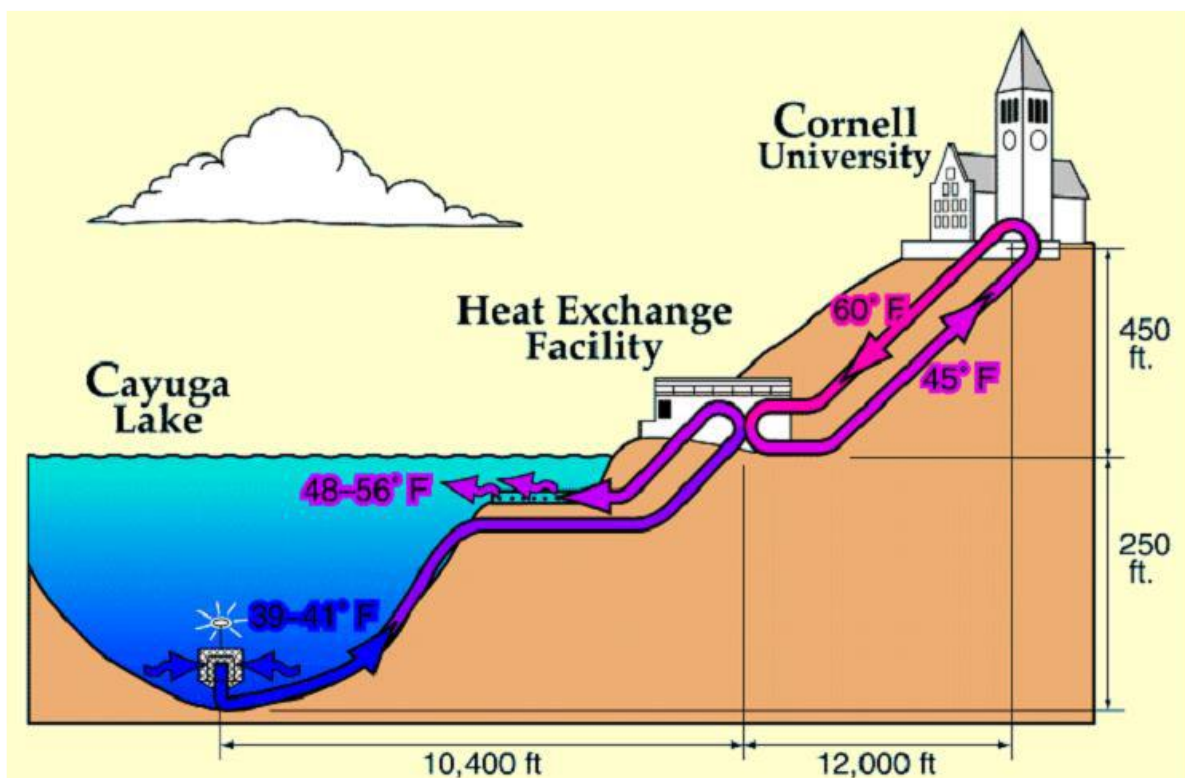
Εικόνα 1.19 Αναλυτικότερη περιγραφή του συστήματος υδάτινης στήλης. [3]

Τα ανοιχτά αυτά γεωθερμικά συστήματα αποτελούν καθιερωμένη τεχνολογία για πολλές περιοχές ειδικότερα στο βορειοανατολικό τμήμα των Ηνωμένων Πολιτειών. Η διάμετρος τέτοιων φρεατίων κυμαίνεται γύρω στα 15 με 20cm και μπορεί να φτάσουν σε βάθος έως τα 500m. Ωστόσο για την αποδοτική λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση η ύπαρξη άφθονου νερού. Εάν η εγκατάσταση γίνει σε περιοχή όπου ο υδροφόρος ορίζοντας είναι πολύ βαθιά τότε η μέθοδος αποδεικνύεται ασύμφορη. Υπό κανονικές συνθήκες, το νερό το οποίο αποσπάται για οικιακή χρήση (πόσιμο) αντικαθίσταται από σταθερής θερμοκρασίας υπόγειο νερό, διαδικασία που κάνει το σύστημα να λειτουργεί ως γεωθερμικό σύστημα ανοιχτού κυκλώματος. Επιπλέον εάν παρατηρηθεί αξιοσημείωτη αύξηση της θερμοκρασίας του νερού της γεώτρησης ή αντίθετα σημαντική μείωση της, τότε προτείνεται η ανάμειξη του υπόγειου νερού με νερό του συστήματος για την αποκατάσταση της θερμοκρασίας του νερού στα συνηθισμένα επίπεδα λειτουργίας. [3]

### 1.2.2.3 Συστήματα επιφανειακών υδάτων.

Τα συστήματα επιφανειακών υδάτων χρησιμοποιούν όγκο νερού προερχόμενο από παράλια ωκεανού ή ανοιχτής θάλασσας ή ακόμα και λιμνών στην ενδοχώρα τόσο για παροχή ύδατος όσο και για απόρριψη αυτού. Εννοιολογικά τα συστήματα επιφανειακών υδάτων είναι παρόμοια με τα συστήματα υδάτινων στηλών που περιγράφησαν στην προηγούμενη υποενότητα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής του γεωθερμικού συστήματος επιφανειακών υδάτων, που συγκαταταλλέγεται στην κατηγορία γεωεναλλακτών ανοιχτού κυκλώματος, είναι η λίμνη Cayuga. Συγκεκριμένα το νερό που προέρχεται από τη λίμνη, χρησιμοποιείται ως η πηγή του γεωθερμικού εναλλάκτη που χρησιμοποιείται για την παροχή ψύξης στο Πανεπιστήμιο του Cornell στις Ηνωμένες Πολιτείες (Εικόνα 1.20). Η μέθοδος αυτή, που βρίσκει εφαρμογή μόνο για τη μία λειτουργία, αυτή δηλαδή του δροσισμού συνήθως δεν κάνει καμία χρήση γεωθερμικών αντλιών. [3]



Εικόνα 1.20 Σύστημα αξιοποίησης επιφανειακών υδάτων του πανεπιστημίου Cornell. [3]

### 1.2.3 Γεωεναλλάκτες κλειστού κυκλώματος

Σε αυτά τα συστήματα, το κύκλωμα των υδρογεωτρήσεων αντικαθίστανται με γεωεναλλάκτες που τοποθετούνται σε κάθετη ή οριζόντια διάταξη. Η επιλογή μεταξύ κάθετης και οριζόντιας διάταξης, εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους της περιοχής και τη διαθεσιμότητα του περιβάλλοντα χώρου αλλά και τις θερμικές απαιτήσεις σε κάθε περίπτωση. Οι γεωεναλλάκτες κλειστού βρόχου αποτελούνται από πολυάριθμους τύπους συστημάτων εφαρμογής, όλοι τους όμως χρησιμοποιούν ένα συνεχές κύκλωμα μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η κυκλοφορία της θερμικής ροής. Η πειραματική διάταξη προσομοίωσης του γεωεναλλάκτη θερμότητας που κατασκευάστηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αφορούν συστήματα τέτοιου είδους. Το γεωθερμικό κύκλωμα, η τοποθέτηση του οποίου γίνεται υπόγεια είναι τυπικά κατασκευασμένο από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE). Πρόκειται για ένα πολύ σκληρό πλαστικό το οποίο χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ανθεκτικότητα καθώς και μεγάλη διάρκεια ζωής. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιπτώσεις όπου γίνεται εφαρμογή μεταλλικού κυκλώματος σωληνώσεων.

#### 1.2.3.1 Οριζόντια κλειστά γεωθερμικά συστήματα.

Τα οριζόντια κλειστά γεωθερμικά συστήματα είναι τα πιο επωφελή από άποψη κόστους, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει αρκετή διαθέσιμη έκταση τοποθέτησης και το έδαφος είναι κατάλληλο εκσκαφής υπόγειων τάφρων. Η διάνομιξη των σκαμμάτων γίνεται με ειδικά σκαπτικά μηχανήματα όπως εκσκαφείς και γεωτρήπανα σε βάθος λίγων μέτρων κάτω από την επιφάνεια. Μετά την τοποθέτηση των αγωγών σε διάταξη που εξαρτάται από την μελέτη, γίνεται επιχωμάτωση των υπόγειων τάφρων λαμβάνοντας όμως ιδιαίτερη προσοχή στο υλικό συμπλήρωσης καθώς υπολείμματα βράχου ή άλλων κοφτερών τεμαχίων μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στους αγωγούς. Για το λόγο αυτό το υλικό επιχωμάτωσης που προτιμάται συνήθως είναι αμμοχάλικο. Σε πολλές περιπτώσεις βέβαια ως υλικό επιχωμάτωσης χρησιμοποιείται το υλικό που έγινε η εκσκαφή. [3]

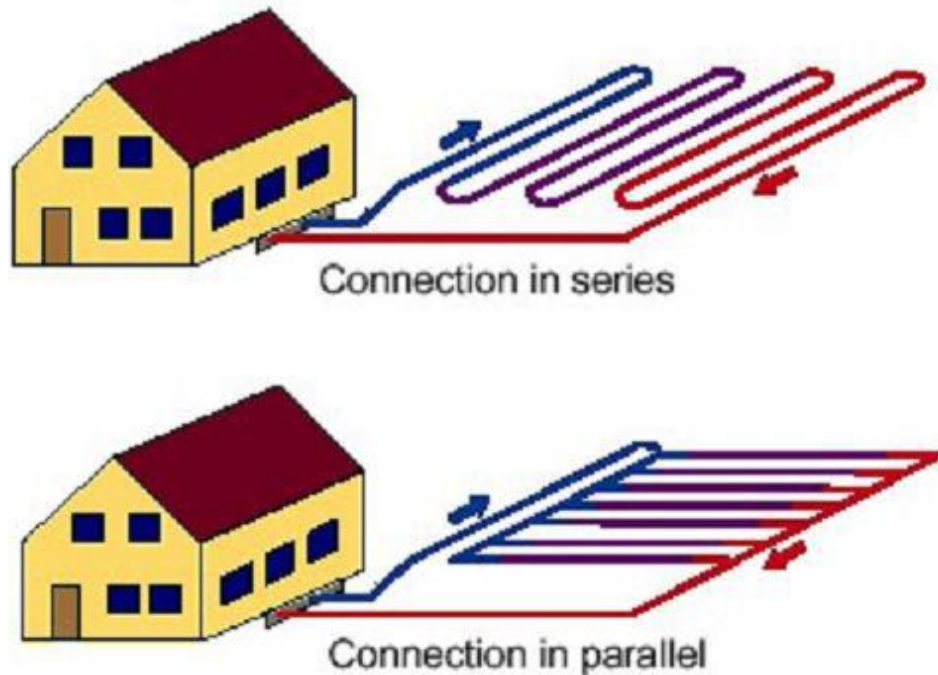
Ένα τυπικό σύστημα (Εικόνα 1.21) οριζόντιου γεωθερμικού συστήματος αποτελείται από αγωγούς συνολικού μήκους 150 με 200 μέτρα ανά τόνο θερμικής ή ψυκτικής ικανότητας ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης. Η απαιτούμενη έκταση γης για την τοποθέτηση οριζόντιων γεωεναλλακτών κυμαίνεται από 150m<sup>2</sup> έως 300m<sup>2</sup> ανά τόνο θερμικής ή ψυκτικής ικανότητας ενώ ταυτόχρονα καθοριστικό ρόλο έχουν οι ιδιότητες και η θερμοκρασία του εδάφους. [3]



Εικόνα 1.21 Τυπική διάταξη οριζόντιου γεωθερμικού συστήματος κλειστού κυκλώματος. [3]



Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν περιορισμοί στην διαθέσιμη έκταση γης για την εγκατάσταση της διάταξης, οι αγωγοί τοποθετούνται με σχετικά, πιο πυκνή διάταξη και συνδέονται, ανάλογα με την περίπτωση, είτε σε σειρά είτε παράλληλα (Εικόνα 1.22).



Εικόνα 1.22 Εναλλακτικοί τρόποι διάταξης οριζόντιου γεωθερμικού συστήματος κλειστού κυκλώματος, σε σειρά ή παράλληλα. [3]

Μία άλλη διάταξη τοποθέτησης του κυκλώματος είναι η σπειροειδής. Ο τρόπος αυτός εφαρμόζεται με σκοπό τη μείωση του μήκους του γεωεναλλάκτη ανά μήκος ορύγματος απαιτεί όμως περισσότερο μήκος αγωγού ανά τόνο θερμικής ή ψυκτικής ικανότητας. Ο αγωγός περιστρέφεται σε σπειροειδή μορφή, επικαλυπτόμενος και εν συνεχεία τοποθετείται μέσα στο ορύγμα. Συστήματα αποτελούμενα από δύο αγωγούς απαιτούν 85 με 100 μέτρα αγωγού περισσότερα ανά τόνο ονομαστικής ικανότητας του γεωεναλλάκτη. Επιπλέον, το μήκος του ορύγματος μειώνεται καθώς ο αριθμός των τοποθετούμενων αγωγών αυξάνεται ή καθώς πυκνώνουν οι σπείρες της διάταξης. [3]



Εικόνα 1.23α Σπειροειδής διάταξη οριζόντιου γεωθερμικού συστήματος. [3]



Εικόνα 1.23β Εγκατάσταση σπειροειδούς οριζόντιου γεωθερμικού συστήματος. [3]

### 1.2.3.2 Κατακόρυφα κλειστά γεωθερμικά συστήματα

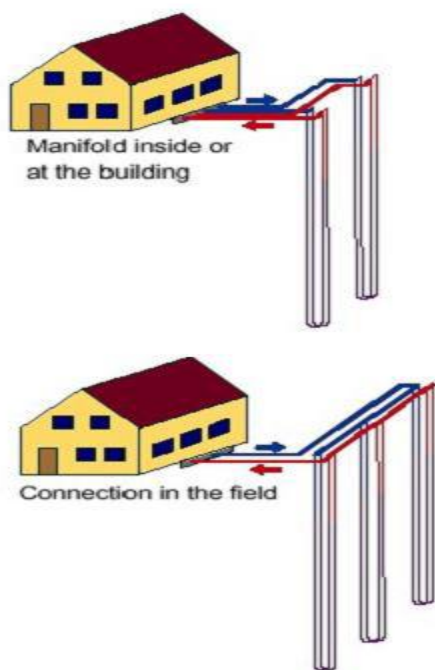
Τα κατακόρυφα κλειστά γεωθερμικά συστήματα βρίσκουν ευρεία εφαρμογή εκεί όπου υπάρχει μικρός διαθέσιμος χώρος εγκατάστασης του κυκλώματος, ή στην περίπτωση όπου η παρουσία βράχων καθιστά την εκσκαφή μη πρακτική λύση καθώς και όταν επιθυμείται η όσο το δυνατό λιγότερη διατάραξη του τοπίου. [3]

Ο συνολικός αριθμός των εγκατεστημένων κατακόρυφων μονάδων ανά τον κόσμο υπολογίζεται στις 500000, σύμφωνα με το Διεθνές Γραφείο Ενέργειας (IEA), με τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, τη Γερμανία, τη Σουηδία και την Ελβετία να κυριαρχούν στις εγκαταστάσεις. Τα κατακόρυφα συστήματα παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα οριζόντια επειδή οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι όλο και μικρότερες όσο κατεβαίνουμε σε μεγαλύτερο βάθος. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των γεωθερμικών συστημάτων με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη είναι πως απαιτούν μικρότερα επιφάνεια εδάφους, καθώς εκτείνονται σε βάθος, και δεν προϋποθέτουν την ύπαρξη υδρολογικού σχηματισμού, γεγονός που τα καθιστά πιο ευέλικτα στην εφαρμογή τους. [3]

Αναλυτικότερα, πραγματοποιείται η διάνοιξη των κάθετων γεωτρήσεων, με τη χρήση γεωτρήπανου, ακολουθεί τοποθέτηση μονών ή πολλαπλών αγωγών συνήθως σχήματος U στον πυθμένα της γεώτρησης και τέλος ακολουθεί εγκιβωτισμός των αγωγών. Εκτός από αυτό το σχήμα έχουν εφαρμοστεί και άλλες γεωμετρίες με σκοπό την αύξηση της επιφάνειας του υπόγειου γεωεναλλάκτη, όπως τα διπλά ζεύγη σωληνώσεων και η σπειροειδής τοποθέτηση του αγωγού. [3]



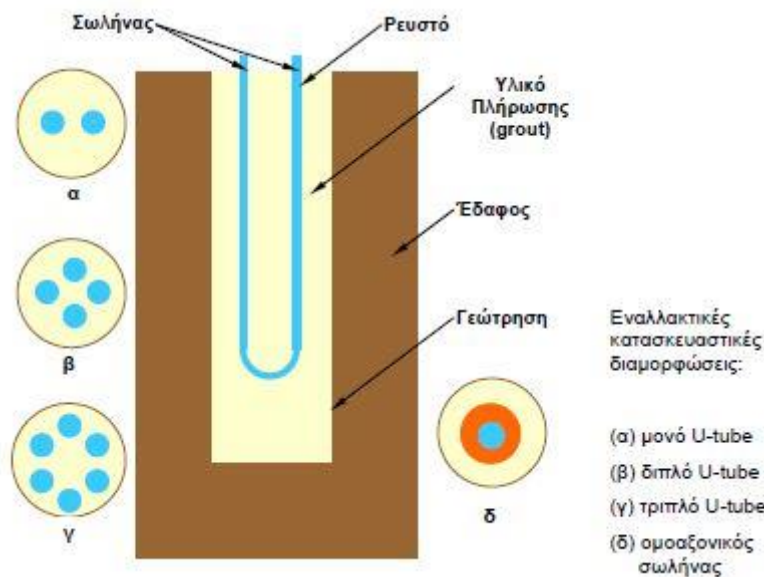
Εικόνα 1.24 Η διάνοιξη της γεώτρησης με το γεωτρήπανο. [3]



Εικόνα 1.25 Κατακόρυφα κλειστά γεωθερμικά συστήματα. [3]

Είναι γεγονός ότι η τοποθέτηση κατακόρυφου συστήματος γεωεναλλακτών είναι πιο ακριβή, απαιτεί όμως μικρότερο μήκος αγωγών από αυτό των οριζόντιων συστημάτων καθώς η θερμοκρασία είναι υψηλότερη και πιο σταθερή καθώς απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια. Οι τυπικές απαιτήσεις αγωγών ποικίλλουν με μήκος που διαφοροποιείται ανάλογα με τις θερμικές απαιτήσεις της εγκατάστασης και εξαρτάται πάντα από τις ιδιότητες του υπεδάφους καθώς και τις θερμοκρασιακές του συνθήκες. Οι παράμετροι αυτοί ρυθμίζουν τον αριθμό των γεωτρήσεων και τη γεωμετρία των αγωγών της εγκατάστασης. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων είναι μικρή (2 – 3m), επειδή η επίδραση της μιας γεώτρησης στην άλλη είναι ελάχιστη. Με αυτό τον τρόπο πυκνώνει η τοποθέτηση των γεωτρήσεων εξασφαλίζοντας σημαντικά ποσά θερμότητας ακόμα και σε μικρό χώρο. Όταν πραγματοποιούνται πολλαπλές γεωτρήσεις η σύνδεση των σωληνώσεων γίνεται σε οριζόντιο υπόγειο αγωγό. [3]

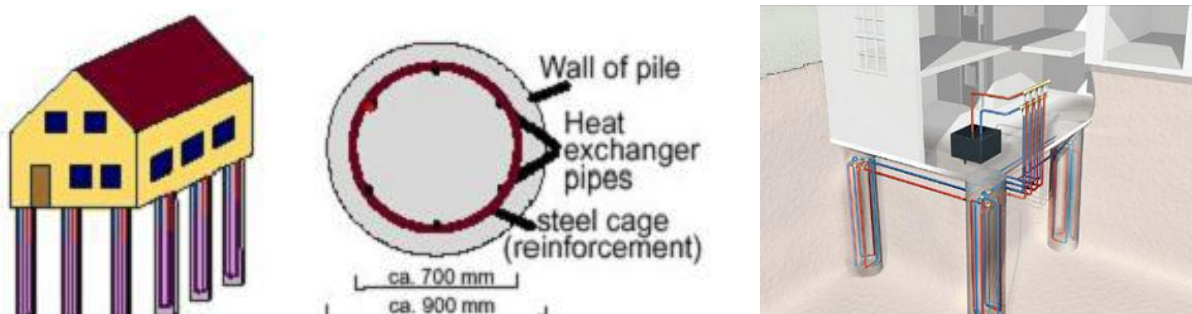
Μετά τη διάνοιξη της γεώτρησης και την τοποθέτηση σε αυτήν της σωλήνωσης του γεωεναλλάκτη ο κενός χώρος της γεώτρησης πληρούνει συνήθως με ρευστοκονίαμα (grout). Σκοπός του υλικού πλήρωσης είναι να εξασφαλίσει καλύτερη επαφή μεταξύ του εδάφους και της σωλήνωσης του γεωεναλλάκτη και μέσω αυτής να βελτιώσει τη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στα δύο μέρη της εγκατάστασης. Επίσης σε συστήματα γεωεναλλακτών με αντιπηκτική προστασία του ρευστού, το υλικό πλήρωσης πρέπει να λειτουργεί και ως μονωτής σε πιθανή διαρροή, ώστε να προστατεύεται η ρύπανση τόσο του εδάφους όσο και των υπογείων υδροφόρων στρωμάτων. Παρακάτω (Εικόνα 1.26), παρουσιάζεται ενδεικτικά η τομή της γεώτρησης ενός κατακόρυφου γεωεναλλάκτη. [2]



Εικόνα 1.26 Σχηματική απεικόνιση κατακόρυφου γεωεναλλάκτη σε τομή. [2]

Διάφοροι τύποι κατακόρυφων γεωεναλλακτών έχουν χρησιμοποιηθεί και ελεγχθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εγκατάστασης. Η γεωθερμική βιομηχανία έχει αναπτύξει ταυτόχρονα σε διάφορες χώρες ποικίλες μεθόδους εφαρμογής. Στην Ευρώπη, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι με αντικειμενικό σκοπό την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης έκτασης γης που θα χρησιμοποιηθεί. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τοποθέτηση 2 ή 3 ζευγών αγωγών εντός της γεώτρησης. Στις Η.Π.Α αντιθέτως συνηθίζεται περισσότερο η χρήση μονού ζεύγους αγωγών. [3]

Μία αξιοσημείωτη μέθοδος κατακόρυφων γεωθερμικών συστημάτων είναι αυτή των ενεργειακών πασσάλων. Πρόκειται για εξοπλισμό των πασσάλων θεμελίωσης με συστήματα αγωγών γεωεναλλακτών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σε προκατασκευασμένους ή σε επί τόπου χυτευτούς πασσάλους.



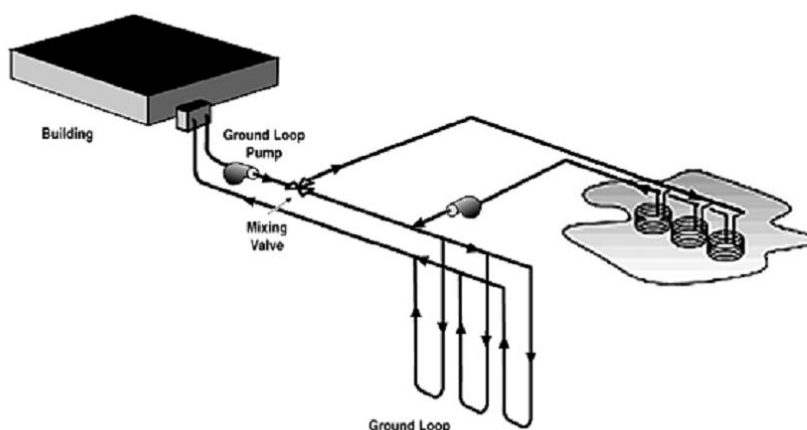
Εικόνα 1.27 Απεικόνιση κατακόρυφων γεωθερμικών συστημάτων με τη μέθοδο των ενεργειακών πασσάλων θεμελίωσης. [3]



#### 1.2.4 Υβριδικά συστήματα γεωεναλλακτών

Υβριδικά γεωθερμικά συστήματα καλούνται τα συστήματα τα οποία παράλληλα με την χρήση συστημάτων γεωθερμικών αντλιών κάνουν χρήση και άλλων μορφών ενέργειας ή ακόμα και αυτά που χρησιμοποιούν ταυτόχρονα και τους δύο τύπους των κλασικών γεωθερμικών συστημάτων (ανοιχτού – κλειστού κυκλώματος) με σκοπό την παραγωγή ενέργειας για θέρμανση και ψύξη καθώς και την παροχή ζεστού νερού. Είναι προφανές ότι η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων οδηγεί σε διατάξεις με ακόμα μεγαλύτερη απόδοση ενώ παράλληλα μπορεί να επιφέρει σχεδόν μηδενική εξάρτηση από την κατανάλωση συμβατικών καυσίμων. [3]

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ταυτόχρονης χρήσης κλειστού και ανοιχτού κυκλώματος αποτελούν περιπτώσεις στις οποίες η αυξημένη απόρριψη θερμότητας στο έδαφος, του ήδη υπάρχοντος συστήματος οδήγησαν σε αναζήτηση λύσεων όπως η παράλληλη λειτουργία ανοιχτών γεωθερμικών κυκλωμάτων για την αποφυγή του προβλήματος. Συγκεκριμένα, σε ένα σχολικό κτίριο στη νότιο Αμερική παρατηρήθηκε ότι η απορριπτόμενη στο έδαφος θερμότητα ήταν περισσότερη από αυτή που αντλούνταν μέσω κατακόρυφου κλειστού γεωθερμικού συστήματος. Για την αποφυγή λοιπόν της υπερθέρμανσης του εδάφους, γεγονός που συνεπαγόταν αναπόφευκτα μείωση της αποδοτικότητας του συστήματος ψύξης, κατασκευάστηκε τεχνητή λίμνη ως συμπληρωματικό μέσο για την απόρριψη θερμότητας. [3]

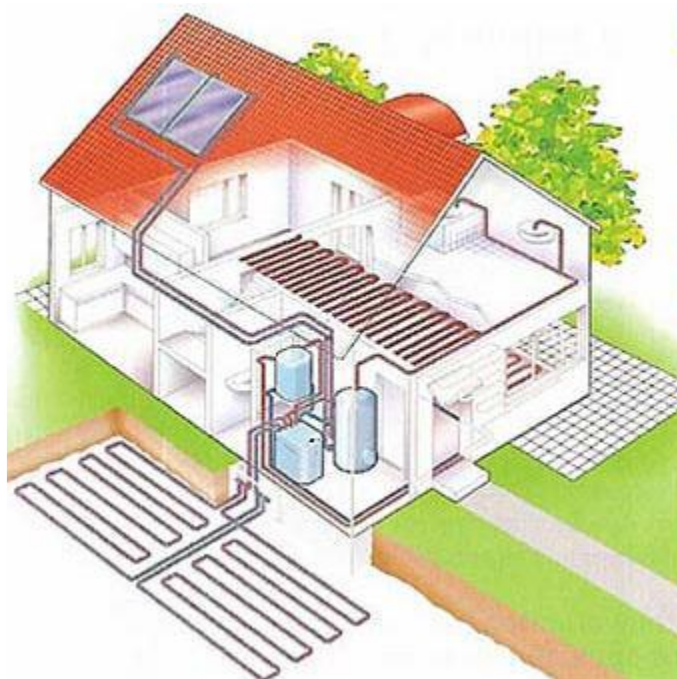


Εικόνα 1.28 Απεικόνιση ενός υβριδικού συστήματος με ταυτόχρονη λειτουργία κλειστού και ανοιχτού γεωεναλλάκτη. [3]

Σε περιπτώσεις όπου η κατασκευή τεχνητής λίμνης κρίνεται αδύνατη, εναλλακτική λύση αποτελεί η λειτουργία πύργου ψύξης, ο οποίος μπορεί να συνδεθεί είτε απ' ευθείας με το γεωθερμικό κύκλωμα είτε σε συνδυασμό με εναλλάκτη απομόνωσης θερμότητας. Έρευνες στο Πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα απέδειξαν ότι σαφώς πιο συμφέρουσα λύση από άποψη κόστους, είναι η κατασκευή τεχνητής λίμνης από την εγκατάσταση πύργου ψύξης υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι υπάρχει η διαθέσιμη έκταση. [3]

Μία λύση άκρως φιλική προς το περιβάλλον αποτελεί το γεωθερμικό – ηλιακό σπίτι. Για να επιτευχθεί ο στόχος της ψύξης - θέρμανσης μέσω ηλιακών συστημάτων και γεωθερμικών αντλιών πρέπει να ληφθεί μέριμνα για τον σωστό σχεδιασμό, τα υλικά κατασκευής, και τα άλλα χαρακτηριστικά του κτίσματος ώστε να συλλέγεται, αποθηκεύεται και να διανέμεται η ηλιακή θερμότητα κατά τη διάρκεια του χειμώνα αλλά να εμποδίζεται η είσοδο της κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. [3]

Γενικά τα συστήματα αυτά αποτελούνται από το κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών (παραγωγή θερμικής ενέργειας), το θερμοδοχείο (αποθήκευση ενέργειας), ένα σύστημα κύριας θερμικής ενέργειας (γεωθερμική αντλία θερμότητας), ένα σύστημα θέρμανσης, ενδοδαπέδια, fan coils, και ένα σύστημα ελέγχου. Η ενέργεια των ηλιακών συλλεκτών μεταφέρεται σε ένα καλά μονωμένο θερμοδοχείο και θερμαίνει αρχικά το νερό της κεντρικής θέρμανσης και στη συνέχεια το ζεστό νερό χρήσης. Εάν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί, τότε τίθεται σε λειτουργία η αντλία θερμότητας και συμπληρώνει την απαιτούμενη ενέργεια. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση καυσίμων και η θέρμανση των χώρων και του νερού χρήσης επιτυγχάνεται με ένα τρόπο πολύ φιλικό προς το περιβάλλον. [3]



Εικόνα 1.29 Απεικόνιση ενός υβριδικού συστήματος γεωθερμίας – ηλιακής ενέργειας. [3]

Ένα από τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωθερμικής -ηλιακής θέρμανσης είναι το θερμοδοχείο, το οποίο αποτελεί την «καρδιά» του συστήματος και πρέπει να είναι ειδικά μελετημένο και κατασκευασμένο για τον σκοπό αυτό. Το θερμοδοχείο θα πρέπει να είναι καλά μονωμένο και κυρίως να βοηθά στην διαστρωμάτωση της θερμοκρασίας του νερού στο εσωτερικό του. Η διαστρωμάτωση του δοχείου έχει ως αποτέλεσμα την μέγιστη απόδοση του συστήματος, τον περιορισμό των θερμικών απωλειών και την μέγιστη συλλογή ενέργειας από τους ηλιακούς συλλέκτες. Η λειτουργία του είναι πλήρως αυτοματοποιημένη έτσι ώστε ο χρήστης το μόνο που έχει να κάνει είναι να απολαμβάνει τις ιδανικές συνθήκες διαβίωσης που αυτό εξασφαλίζει. [3]

Όταν ο ήλιος δεν επαρκεί, δηλαδή την νύχτα ή όταν έχει πολλή συννεφιά, τότε η αντλία θερμότητας τίθεται σε λειτουργία και θερμαίνει το νερό της κεντρικής θέρμανσης ενώ εάν παράλληλα υπάρχει και ζήτηση σε ζεστό νερό χρήσης τότε ανοίγει μια τρίοδη βαλβίδα και διοχετεύεται ζεστό νερό από την αντλία προς τον μεταλλικό εναλλάκτη.

Επειδή η χώρα μας χαρακτηρίζεται από έντονη ηλιοφάνεια ακόμα και κατά τη διάρκεια του χειμώνα και κυρίως στις νότιες περιοχές, είναι αυτονόητο ότι ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να επιτύχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και συνεπώς χρημάτων ιδίως όταν συνδυάζεται με συστήματα θέρμανσης χαμηλών θερμοκρασιών όπως είναι η ενδοδαπέδια θέρμανση.



## Βιβλιογραφία

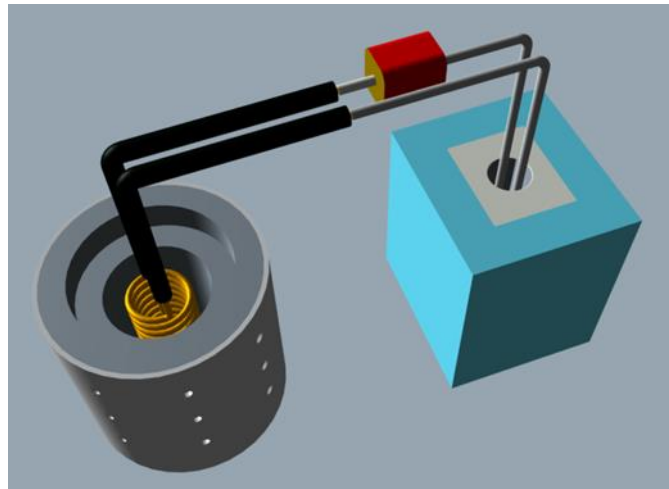
1. Μ. Φυτίκας Ν. Ανδρίτσος, Γεωθερμία, Εκδόσεις Τζιόλα.
2. Απόστολος Κ. Μιχόπουλος, Διδακτορική Διατριβή Μελέτης Γεωεναλλάκτη Θερμότητας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 2008.
3. Αποστολίδου Γεωργία, Μεταπτυχιακή Διατριβή Συστήματα Αξιοποίησης του Εδάφους για Θέρμανση – Ψύξη Κτιρίων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 2010.
4. Γρηγόριος Ι. Καρυδάκης, Γεωθερμική Ενέργεια, Εκδόσεις Αθλότυπο
5. Batini F., Bertini G., Gianelli G., Pandelli E., Deep structure, age and evolution of the Larderello – Travale geothermal field, Geotherm. Res. Coun. Trans 9, 253 – 259 (1985)
6. Hutter G. W., The status of world geothermal generation 1995 – 2000, Geothermics (2001)
7. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), <http://cres.gr/kape/index.htm>
8. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), <http://www.igme.gr/index.php>
9. <https://askjaenergy.com/category/engineering-and-technology/page/3/>
10. [http://nisyros.igme.gr/nisyros/index.php?option=com\\_content&task=view&id=26&Itemid=41](http://nisyros.igme.gr/nisyros/index.php?option=com_content&task=view&id=26&Itemid=41)
11. <http://www.lesvosgreece.gr/el/iamatika-polihnitoy>
12. <http://www.toonts.com/pamukkale-turkey/>
13. <http://strangesounds.org/2014/06/yellowstone-geyser-eruption-a-really-cool-and-hot-old-faithfuls-eruption.html>
14. <https://www.usgs.gov/news/potential-geothermal-resources-akutan-alaska>
15. <https://www.britannica.com/science/solfatara-geology>
16. <https://www.nps.gov/features/yell/slidefile/thermalfeatures/hotspringterraces/mudvolcano/Page.htm>
17. <http://blogs.sch.gr/dimmvrysis/2012/03/28/>
18. <http://www.yellowstonepark.com/yellowstone-geyser-basins-map/>

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### Κατασκευή Πειραματικών Διατάξεων Προσομοίωσης

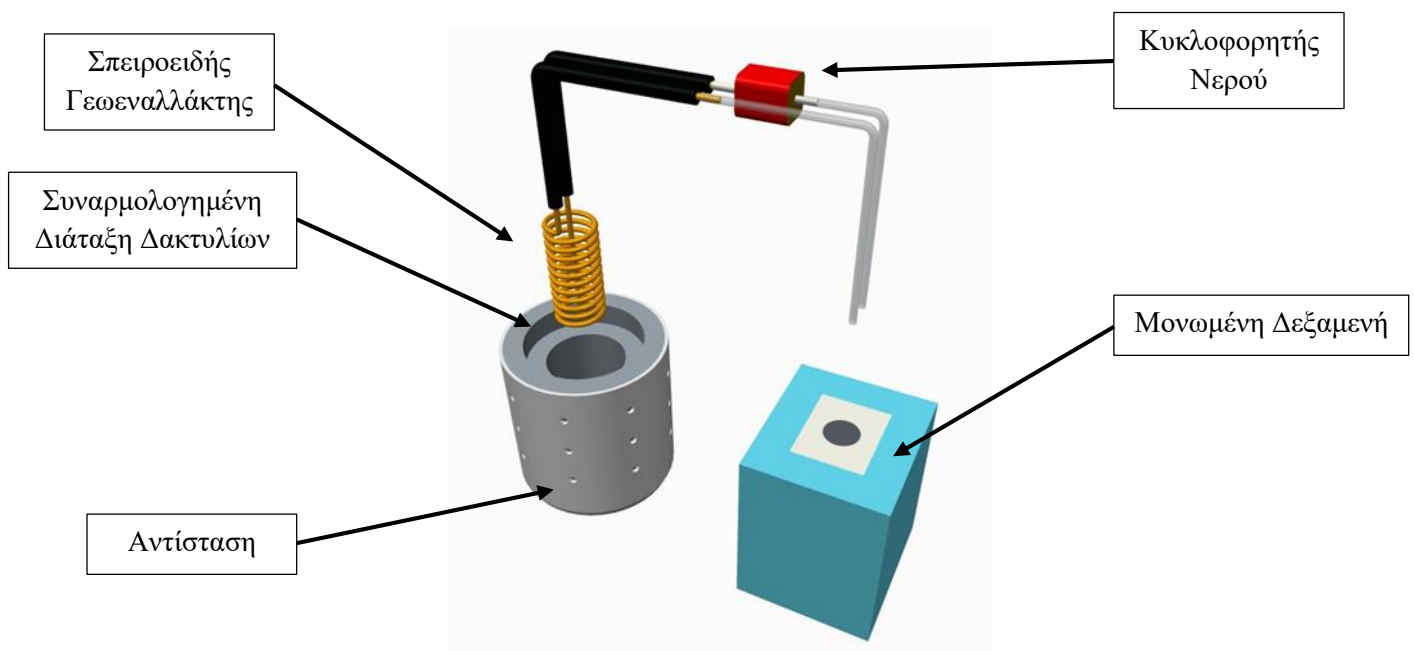
#### 2.1 Κατασκευή διάταξης προσομοίωσης γεωεναλλάκτη θερμότητας

Η προσπάθεια που πραγματοποιήθηκε αφορούσε την κατασκευή πειραματικής διάταξης αποτελούμενη από αριθμό υποσυστημάτων που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός κατακόρυφου κλειστού συστήματος γεωθερμικής εγκατάστασης. Ταυτόχρονα επιδιώχθηκε η διάταξη να επιτρέπει την αυξομείωση του μεγέθους της διάταξης αλλά και την εναλλαγή του υλικού κατασκευής των δομικών στοιχείων που αποτελούν την πειραματική διάταξη της γεώτρησης, αλλά και του υλικού εγκιβωτισμού του γεωεναλλάκτη που γίνεται σε μια τέτοιου τύπου εγκατάσταση. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.1) παρουσιάζεται η κατασκευή όπως σχεδιάστηκε σε τριδιάστατο πρόγραμμα σχεδίασης.



Εικόνα 2.1 Τριδιάστατη απεικόνιση της διάταξης που κατασκευάστηκε.

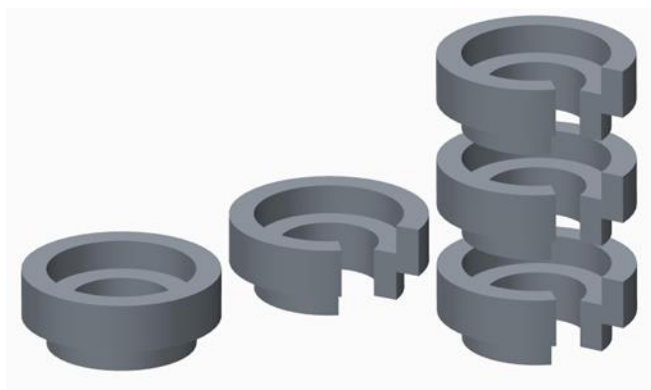
Όπως φαίνεται αναλυτικά στο παρακάτω σχέδιο (Εικόνα 2.2) η πειραματική διάταξη αποτελείται από τρία βασικά μέλη. Αυτά είναι, η περιοχή που προσομοιάζει τη γεώτρηση σε θερμό υπέδαφος, το κλειστό κύκλωμα των σωληνώσεων του γεωεναλλάκτη θερμότητας μαζί με τον κυκλοφορητή νερού και μία μονωμένη δεξαμενή νερού.



Εικόνα 2.2 Τριδιάστατη απεικόνιση των μελών που απαρτίζουν την διάταξη.

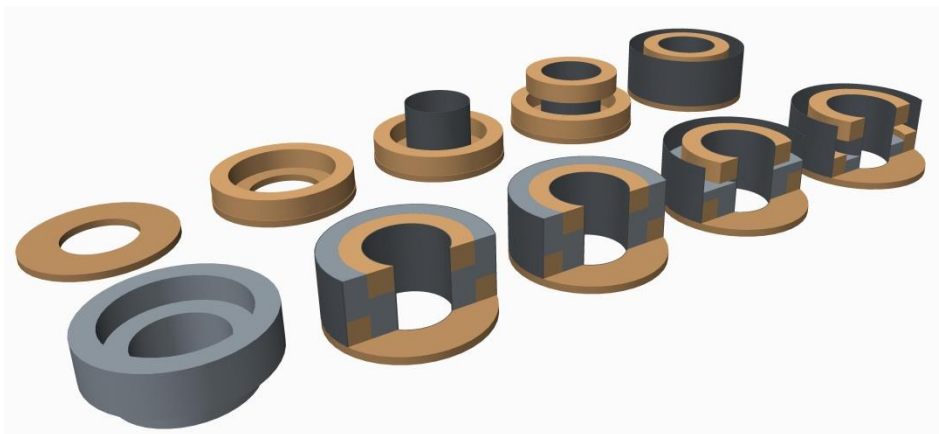
### 2.1.1 Κατασκευή μικρογραφίας της γεώτρησης σε θερμό υπέδαφος

Η κατασκευή της πειραματικής διάταξης προσομοίωσης της γεώτρησης επιτεύχθηκε συναρμολογώντας δακτυλίους από σκυροδέμα πάνω σε μια βάση σκυροδέματος με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η δομική σταθερότητα της κατασκευής αλλά και η δυνατότητα αυξομείωσης του μεγέθους της διάταξης. Οι δακτύλιοι επιτρέπουν επιπλέον την προσομοίωση διαφόρων τύπων πετρωμάτων στο υπέδαφος ανάλογα με τις αναλογίες που χρησιμοποιούνται κατά τη χύτευση του σκυροδέματος. Προκειμένου να εξυπηρετούνται οι προδιαγραφές που αναφέρονται επιλέχθηκε η γεωμετρία που παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 2.3).



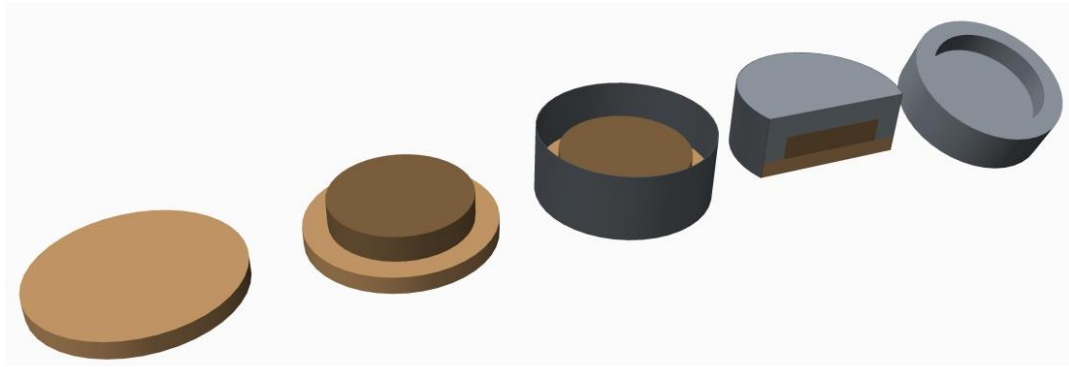
Εικόνα 2.3 Απεικόνιση της γεωμετρίας των δακτυλίων που απαρτίζουν τη μικρογραφία.

Η χύτευση του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε σε καλούπι δική μας ειδικής κατασκευής αντίστοιχο με το σχήμα που σχεδιάστηκε. Για κάθε ένα δομικό στοιχείο (δακτύλιο) της κατασκευής κατασκευάστηκε ξεχωριστό καλούπι το οποίο στη συνέχεια, μετά την πήξη του σκυροδέματος, καταστρεφόταν για να αφαιρεθεί ο δακτύλιος. Το καλούπι, ο τρόπος συναρμολόγησής του καθώς και όλα τα βήματα για τη διαδικασία της χύτευσης παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (Εικόνα 2.4).



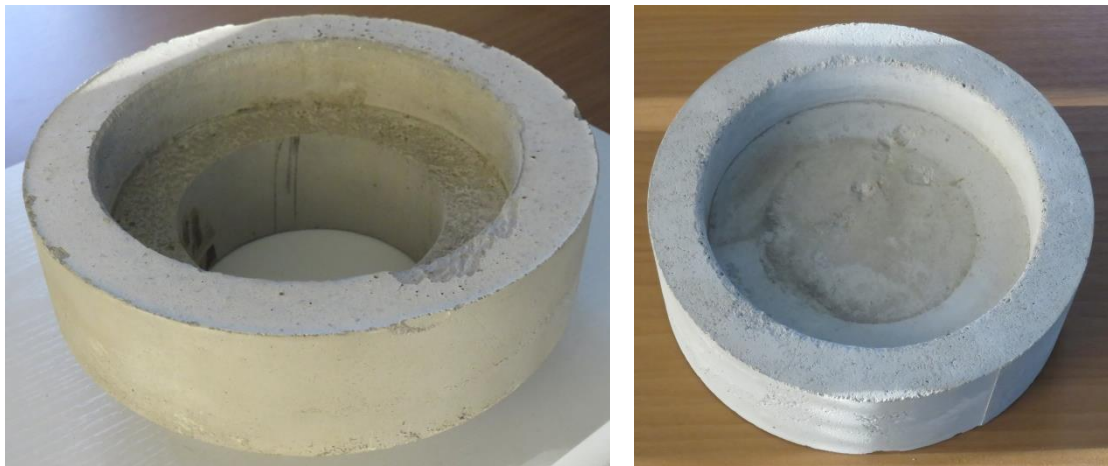
Εικόνα 2.4 Η διαδικασία της χύτευσης των δακτυλίων.

Για την κατασκευή των δακτυλίων χρησιμοποιήθηκε έτοιμο κονίαμα επισκευαστικού σκυροδέματος το οποίο απαιτούσε μόνο την προσθήκη νερού στο μίγμα. Αυτό έγινε τόσο για λόγους ευκολίας όσο και για να επιτευχθεί η βέλτιστη ομοιότητα μεταξύ των δακτυλίων. Κατασκευάστηκαν τρεις δακτύλιοι οι οποίοι συναρμολογήθηκαν και τοποθετήθηκαν πάνω σε ειδική βάση που κατασκευάστηκε με τρόπο παρόμοιο με αυτόν των δακτυλίων. Τα διάφορα βήματα της κατασκευής παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.5.



*Εικόνα 2.5 Η διαδικασία της χύτευσης της βάσης της διάταξης.*

Στη συνέχεια παρουσιάζονται φωτογραφίες των δομικών στοιχείων της μικρογραφίας της γεώτρησης που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Επίσης, παρουσιάζεται η συναρμολογημένη διάταξη των δακτυλίων με τη βάση της διάταξης.



*Εικόνα 2.6 Τα δομικά στοιχεία της μικρογραφίας της γεώτρησης (αριστερά ο δακτύλιος και δεξιά η βάση της διάταξης).*



*Εικόνα 2.7 Η συναρμολογημένη διάταξη των δακτυλίων (αριστερά η μικρογραφία της γεώτρησης και δεξιά τριδιάστατο σχέδιο της σε τομή).*



Η προσομοίωση των θερμών πετρωμάτων του υπεδάφους επιτεύχθηκε εφαρμόζοντας (περιτυλίγοντας) τη διάταξη των συναρμολογημένων δακτυλιδιών σκυροδέματος ένα κυλινδρικό χιτώνιο – μανδύα ειδικής κατασκευής με αντιστάσεις ισόμορφα κατανεμημένες στην επιφάνειά του για ομοιόμορφη θέρμανση. Η ηλεκτρική αντίσταση σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τις διαστάσεις της πειραματικής διάταξης και κατασκευάστηκε από εταιρεία η οποία ειδικεύεται στην κατασκευή θερμαντικών χιτώνων – μανδύων με χρήση ηλεκτρικών αντιστάσεων. Σύμφωνα με τις πληροφορίες που δόθηκαν από τον κατασκευαστή η αντίσταση είναι ισχύος 2300 watt όταν λειτουργεί στα 220 volt και είναι κατασκευασμένη από σύρματα αντίστασης χρωμίου – νικελίου τα οποία διαμορφώνονται σε έναν εξωτερικό μανδύα από μαλακό χάλυβα. Έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η εγκατάστασή της αλλά και η αφαίρεση της από τη διάταξη να είναι εύκολη χωρίς να διαταράσσονται τα εξαρτήματα που την απαρτίζουν. Στις φωτογραφίες της Εικόνας 2.8 παρουσιάζεται η ηλεκτρική αντίσταση που κατασκευάστηκε καθώς και η προσαρμογή της γύρω από την συναρμολογημένη διάταξη των δακτυλίων από σκυρόδεμα.



Εικόνα 2.8 Η ηλεκτρική αντίσταση που κατασκευάστηκε στα αριστερά και η συναρμολογημένη διάταξη των δακτυλίων περιβαλλόμενη από την αντίσταση στα δεξιά.

Οι οπές που διανοίχθηκαν περιμετρικά του χιτωνίου – μανδύα έγιναν προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης αισθητήρων περιμετρικά στους δακτυλίους της διάταξης χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα λόγω παρουσίας της αντίστασης. Η αντίσταση μπορεί να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρικό ρεύμα απευθείας από το δίκτυο αλλά αυτό δε θα επέτρεπε τη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας της αντίστασης. Για αυτό το λόγο η αντίσταση συνδέθηκε με συσκευή διαφοροποίησης της ηλεκτρικής τάσης (variac), ώστε να γίνεται ρύθμιση της τάσης στα άκρα της αντίστασης. Η συσκευή του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε φωτογραφήθηκε και παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9 Συσκευή διαφοροποίησης της τάσης του εργαστηρίου.

### 2.1.2 Κατασκευή του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη

Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφεται η κατασκευή του κυκλώματος των σωληνώσεων του γεωεναλλάκτη θερμότητας και η σύνδεση του με τον κυκλοφορητή.

Το κύκλωμα των σωληνώσεων αποτελείται από τρία επιμέρους μέλη, όπως παρουσιάζονται στη φωτογραφία της Εικόνας 2.10. Αυτά είναι ο χάλκινος σπειροειδής αγωγός που τοποθετείται στη μικρογραφία της γεώτρησης ενδεδυμένος με μόνωση στα εξωτερικά τμήματα, ο κυκλοφορητής και δύο βοηθητικούς αγωγούς από σιλικόνη οι οποίοι τοποθετούνται στη δεξιά μεντή όπου γίνονται οι μετρήσεις και η ανακυκλοφορία.



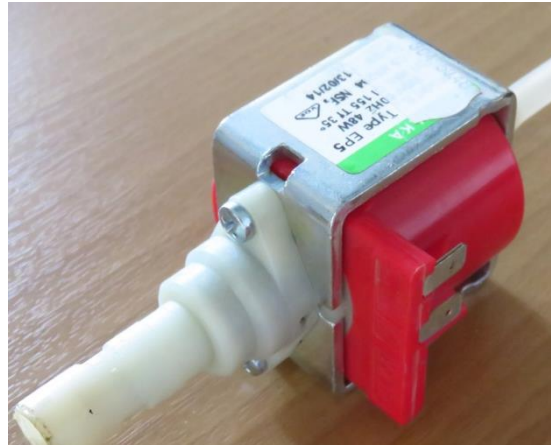
Εικόνα 2.10 Το κύκλωμα του γεωεναλλάκτη θερμότητας μαζί με τον κυκλοφορητή.

Η κατασκευή του χάλκινου αγωγού έγινε από ενισχυμένη σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου 6,35mm (1/4 της ίντσας) και εσωτερικής διαμέτρου 3mm ( $\approx 1/8$  της ίντσας). Τα τμήματα που προεξέχουν της συναρμολογημένης διάταξης των δακτυλίων έχουν μονωθεί με μόνωση πάχους 10mm η οποία είναι κατασκευασμένη για το συγκεκριμένο αγωγό. Στο άκρο της σωληνώσεως, όπου γίνεται η σύνδεση με τον αγωγό εξόδου του κυκλοφορητή, έχει ηλεκτροσυγκολληθεί κοχλιωτός σύνδεσμος αρσενικού τύπου παρόμοιος με αυτόν του κυκλοφορητή ώστε να συνδέονται. Στο άλλο άκρο αυτό δεν έγινε καθώς η σύνδεση του χάλκινου αγωγού με το βοηθητικό αγωγό από σιλικόνη είναι πολύ πιο απλή.



Εικόνα 2.11 Το κύκλωμα του γεωεναλλάκτη θερμότητας με την εξωτερική μόνωση (διακρίνεται το σπείρωμα της σύνδεσης με τον κυκλοφορητή του νερού).

Η ανακυκλοφορία του νερού στη διάταξη απαιτεί τη χρήση ενός κυκλοφορητή. Έπρεπε να είναι μία σχετικά χαμηλού κόστους αντλία η οποία ταυτόχρονα θα επέτρεπε να τίθεται σε κυκλοφορία το νερό με θερμοκρασίες κοντά στο σημείο βρασμού χωρίς πρόβλημα. Για τους παραπάνω λόγους ως κυκλοφορητής χρησιμοποιήθηκε μία εμβολοφόρα αντλία που φαίνεται στην Εικόνα 2.12.



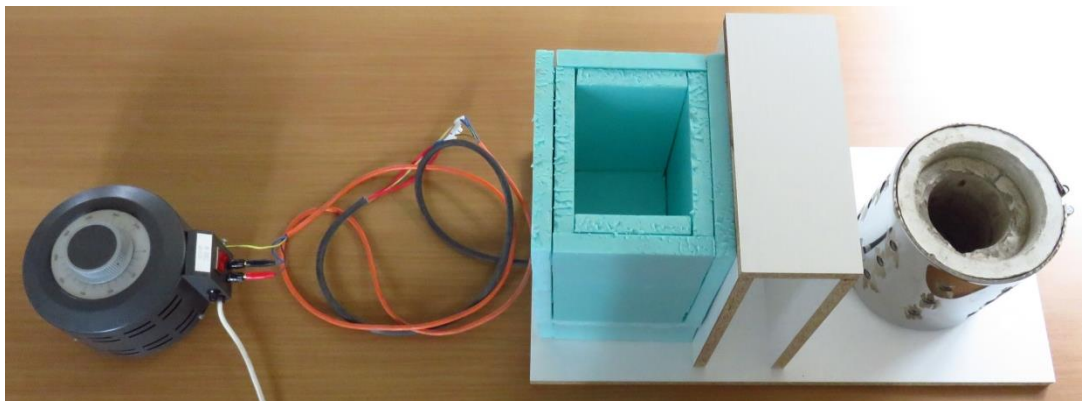
*Εικόνα 2.12 Η αντλία που χρησιμοποιήθηκε για την ανακυκλοφορία του νερού στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη θερμότητας.*

Η συγκεκριμένη αντλία συνδέεται μέσω των δύο ακροδεκτών που απεικονίζονται στο ηλεκτρικό δίκτυο (220volt) και έχει ισχύ 48watt. Στο υδραυλικό δίκτυο της διάταξης προσομοίωσης που κατασκευάστηκε έχει τη δυνατότητα διακίνησης 750ml νερού ανά λεπτό, όπως μετρήθηκε πειραματικά στο εργαστήριο.

Τέλος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιήθηκαν δύο εύκαμπτοι βοηθητικοί αγωγοί από σιλίκονη, ανθεκτικοί στην υψηλή θερμοκρασία, για την αναρρόφηση του νερού από τη δεξαμενή και την επιστροφή του σε αυτή.

### *2.1.3 Συναρμολόγηση των μελών της διάταξης με τη μονωμένη δεξαμενή*

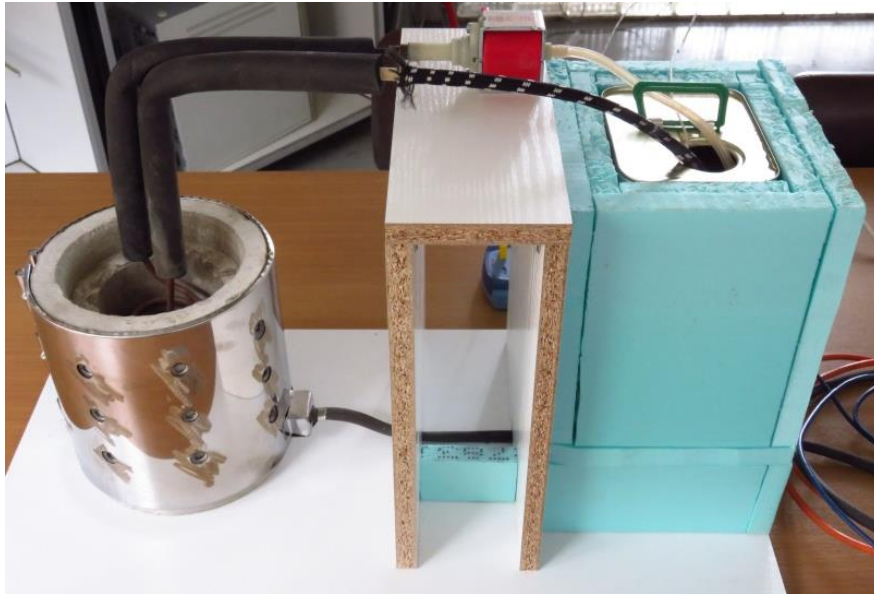
Η διαδικασία κατασκευής της μονωμένης δεξαμενής του νερού που ανακυκλοφορεί στον γεωεναλλάκτη θερμότητας είναι ιδιαίτερα απλή. Ως δεξαμενή χρησιμοποιήθηκε ένα μικρό δοχείο λευκοσιδήρου το οποίο συνήθως χρησιμοποιείται για την αποθήκευση διαφόρων υγρών. Το δοχείο αυτό μονώθηκε με φύλλα εξηλασμένης πολυστερίνης τα οποία διαμορφώθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να τυλίγουν τα πλευρά και τη βάση του δοχείου. Στην επόμενη φωτογραφία παρουσιάζεται το μονωτικό πλαίσιο (το δοχείο έχει αφαιρεθεί για να φαίνεται καλύτερα η κατασκευή) και τη συναρμολογημένη διάταξη των δακτυλίων με την ηλεκτρική αντίσταση.



*Εικόνα 2.13 Απεικονίζονται η συναρμολογημένη διάταξη των δακτυλίων με την αντίσταση, το μονωτικό πλαίσιο, ο ρυθμιστής της τάσης και η βοηθητική ξύλινη βάση. 30*



Η διάταξη τοποθετήθηκε σε ένα κομμάτι ξύλου (μελαμίνη) και επιπλέον από το ίδιο υλικό κατασκευάστηκε μια υπερυψωμένη ξύλινη βάση για την τοποθέτηση του κυκλοφορητή η οποία βοηθά επίσης στην καλύτερη απομόνωση της θερμαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης από τη δεξαμενή. Στις επόμενες εικόνες απεικονίζεται συναρμολογημένη όλη η διάταξη.



Εικόνα 2.14 Απεικονίζεται συναρμολογημένη όλη η διάταξη.



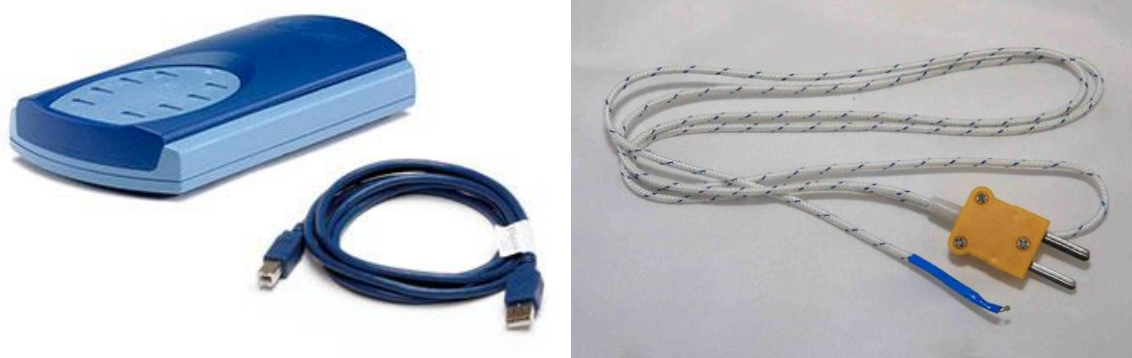
Εικόνα 2.15 Ο γεωεναλλάκτης τοποθετημένος στη μικρογραφία της γεώτρησης. (Δεν έχει γίνει πρόσθεση του υλικού εγκιβωτισμού των αγωγών.)

Σημείωση: Στο παράρτημα Δ στο τέλος της εργασίας περιλαμβάνονται τα αναλυτικά διαστασιολογημένα σχέδια όλων των επιμέρους στοιχείων που απαρτίζουν τη διάταξη.



## 2.2 Προετοιμασία της διάταξης του γεωεναλλάκτη για τη διεξαγωγή πειραμάτων

Αφού είχε πλέον ολοκληρωθεί η πειραματική διάταξη του προσομοιωτή της εγκατάστασης ενός κατακόρυφου γεωθερμικού συστήματος εναλλαγής θερμότητας, προχωρήσαμε στην απαραίτητη εγκατάσταση των ανιχνευτών – μετρητών και καταγραφικών ώστε να αποθηκεύονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δεδομένων κατά τη λειτουργία της διάταξης. Χρησιμοποιήθηκε ειδική συσκευή καταγραφής της θερμοκρασίας του εργαστηρίου (data logger) η οποία παρέχει τη δυνατότητα αποστολής των αποτελεσμάτων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω θύρας USB για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής της θερμοκρασίας μέσω ειδικών αισθητηρίων μέτρησης της θερμοκρασίας, των θερμοζευγών (thermocouples). Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε και ο αντίστοιχος αισθητήρας θερμοκρασίας παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 2.16 Η συσκευή καταγραφής θερμοκρασιών (αριστερά) και ο αισθητήρας θερμοζεύγους που συνδέεται στη συσκευή καταγραφής (δεξιά). [2]

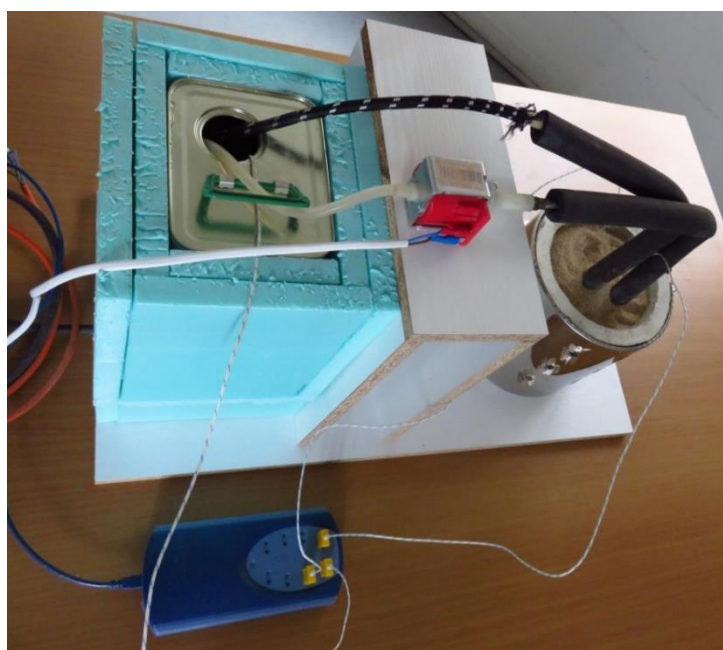
Τα θερμοζεύγη συνδέονται στις ειδικά διαμορφωμένες υποδοχές της συσκευής καταγραφής και το άκρο του αισθητήρα τοποθετείται στο σημείο εκείνο που γίνεται η καταγραφή της θερμοκρασίας. Το θερμοζεύγος αποτελείται από κλειστό κύκλωμα δύο διαφορετικών μετάλλων, το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα όταν μία από τις δύο μεταλλικές επαφές είναι διαφορετικής θερμοκρασίας. Η ένταση και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των μετάλλων που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα αλλά και των θερμικών τους ιδιοτήτων. Το φαινόμενο αυτό είναι ευρύτερα γνωστό ως φαινόμενο Seebeck. Τα θερμοζεύγη μπορούν να κατασκευαστούν από οποιαδήποτε δύο διαφορετικά μέταλλα, όταν ένα από τα δύο θερμαίνεται μπορεί να παρατηρηθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Εάν αντιστραφούν οι θέσεις τοποθέτησης του ψυχρού και του θερμού μετάλλου, αντιστρέφεται και η φορά της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος. Το κύκλωμα ενός θερμοζεύγους δίνει τη δυνατότητα μέτρησης μίας πολύ μικρής ηλεκτρικής τάσης που δημιουργείται, η οποία είναι σχεδόν άμεσα ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμής και της ψυχρής επαφής. Με αυτόν τον τρόπο ένα τέτοιο κύκλωμα μας δίνει τη δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας. [1]

Έχουν κατασκευαστεί και τυποποιηθεί διάφοροι τύποι θερμοζευγών ανάλογα με τα δύο ξεχωριστά μέταλλα που χρησιμοποιούνται. Ανάλογα με τις μετρούμενες θερμοκρασίες και την ευαισθησία που απαιτείται στην κάθε μέτρηση υπάρχουν οι ανάλογοι τύποι θερμοζευγών. Για τη μέτρηση και καταγραφή των θερμοκρασιών της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκαν τα συνήθη θερμοζεύγη που βρίσκονται εύκολα στην αγορά ηλεκτρονικών και είναι κατασκευασμένα από χρώμιο και αλουμίνιο. Είναι αυτό που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 2.16 και διακρίνεται από το χαρακτηριστικό κίτρινο βύσμα του.

Στη διάταξη προσομοίωσης που κατασκευάστηκε έγινε χρήση τριών θερμοζευγών για την καταγραφή των θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης των πειραμάτων. Ένας αισθητήρας τοποθετήθηκε στη δεξαμενή του νερού, ώστε να καταγράφεται το αποτέλεσμα της κυκλοφορίας του νερού από τη μικρογραφία του γεωεναλλάκτη θερμότητας. Ένας δεύτερος αισθητήρας θερμοκρασίας επικολλήθηκε με ταινία στην εσωτερική πλευρά του κεντρικού δακτυλίου της πειραματικής διάταξης προσομοίωσης της γεώτρησης, ώστε να καταγράφεται η θερμοκρασία στο συγκεκριμένο σημείο. Τέλος, ένας τρίτος αισθητήρας, τοποθετήθηκε στο κέντρο της γεώτρησης, με σκοπό να γίνεται καταγραφή της θερμοκρασίας του υλικού πλήρωσης της γεώτρησης και εγκιβωτισμού του κυκλώματος του γεωεναλλάκτη κατά τη λειτουργία της διάταξης και όσο ανακυκλοφορεί το νερό. Η ακριβής θέση τοποθέτησης των θερμοζευγών στη διάταξη παρουσιάζονται στη συνέχεια (Εικόνα 2.17). Δόθηκε έμφαση στην παρουσίαση των θερμοζευγών στη γεώτρηση, φαίνονται με κόκκινο χρώμα, ώστε να γίνει απόλυτα κατανοητή η θέση τοποθέτησης τους.



Εικόνα 2.17 Τριδιάστατη απεικόνιση της ακριβούς θέσης τοποθέτησης των θερμοζευγών στο εσωτερικό της γεώτρησης (αριστερά), λεπτομέρεια της διάταξης (δεξιά).



Εικόνα 2.18 Φωτογραφία της διάταξης, όπου απεικονίζεται η θέση των θερμοζευγών στη διάταξη.

### 2.3 Κατασκευή διάταξης ελέγχου της θερμικής συμπεριφοράς των υλικών πλήρωσης της γεώτρησης και εγκιβωτισμού των αγωγών του γεωεναλλάκτη.

Η δεύτερη διάταξη που κατασκευάστηκε είναι πολύ πιο απλή από την προηγούμενη καθώς αποτελείται μόνο από την πειραματική διάταξη προσομοίωσης της γεώτρησης μαζί με την ηλεκτρική αντίσταση χωρίς να περιλαμβάνεται το κύκλωμα των σωληνώσεων του γεωεναλλάκτη θερμότητας.

Χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της θερμικής συμπεριφοράς των υλικών πλήρωσης της γεώτρησης όταν δεν επηρεάζονται από την παρουσία του αγωγού στη γεώτρηση. Όπως προαναφέρθηκε η συγκεκριμένη διάταξη δεν περιλαμβάνει κάποια νέα κατασκευή, εκτός από ένα κυκλικό ξύλινο καπάκι στον άνω δακτύλιο το οποίο χρησιμεύει για τη σωστή χωροθέτηση των αισθητήρων αλλά και ως στοιχειώδης μόνωση. Στην Εικόνα 2.19 παρουσιάζονται φωτογραφίες της διάταξης που κατασκευάστηκε.



Εικόνα 2.19 Η δεύτερη διάταξη που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο.

Η ηλεκτρική αντίσταση της συγκεκριμένης διάταξης είναι παρόμοια με την προηγούμενη σε διαστάσεις και ισχύ. Η τροφοδοσία της αντίστασης με ηλεκτρικό ρεύμα γίνεται μέσω κατάλληλης συσκευής τροποποίησης της τάσης όπως και στην πειραματική διάταξη προσομοίωσης του γεωεναλλάκτη θερμότητας, ώστε να ελέγχεται η θερμοκρασία λειτουργίας της αντίστασης.

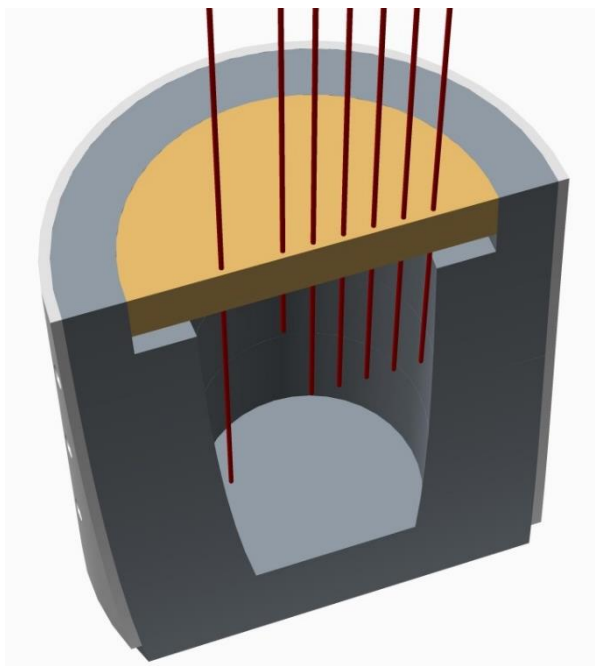


Εικόνα 2.20 Η δεύτερη διάταξη που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο μαζί με τη συσκευή ελέγχου της τάσης στα άκρα της αντίστασης.



## 2.4 Προετοιμασία της δεύτερης διάταξης για τη διεξαγωγή πειραμάτων

Σε αυτή τη διάταξη χρησιμοποιήθηκε, όπως και στη πειραματική διάταξη του γεωεναλλάκτη θερμότητας, η ίδια συσκευή καταγραφής της θερμοκρασίας με τους ίδιους αισθητήρες θερμοκρασίας. Χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα θερμοζεύγη, ώστε να γίνεται καταγραφή σε πολλαπλά σημεία της γεώτρησης ταυτόχρονα, ενώ ένα από αυτά εφάπτεται στην εσωτερική πλευρά του κεντρικού δακτυλίου. Στο σχήμα της Εικόνας 2.21 παρουσιάζεται με μία τομή η θέση τοποθέτησης των αισθητήρων στη συναρμολογημένη διάταξη των δακτυλίων.



Εικόνα 2.21 Τριδιάστατη τομή του σχεδίου της δεύτερης διάταξης όπου απεικονίζεται η ακριβής θέση τοποθέτησης των θερμοζευγών.



Εικόνα 2.22 Φωτογραφία της δεύτερης διάταξης πειραμάτων όπου διακρίνονται τα μέλη της και ο τρόπος σύνδεσης τους.



## *Βιβλιογραφία*

1. D.M. Rowe, Thermoelectrics Handbook, CRC Press
2. <https://www.picotech.com/data-logger/tc-08/thermocouple-data-logger>

Σημείωση: Η σχεδίαση των τριδιάστατων σχεδίων έγινε με το πακέτο CREO Parametric 2.0 της PTC. Η φωτογράφιση της διάταξης και των μελών που την απαρτίζουν έγινε στο εργαστήριο με τη βοήθεια του φίλου μου Χαρίδημου Μάρακα.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Αποτελέσματα Εκτέλεσης Πειραμάτων

Μία παράμετρος με σημαντικό ρόλο στην επιτυχή και αποδοτική λειτουργία των κατακόρυφων γεωθερμικών συστημάτων είναι ο τρόπος εγκιβωτισμού των κυκλωμάτων τους. Είναι δεδομένο ότι η γεώτρηση θα πρέπει να δρα αποδοτικά ως πηγή ή δεξαμενή θερμότητας, ικανότητα γνωστή ως απόδοση θερμικής αγωγιμότητας, για την οποία καθοριστικό ρόλο έχει ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει ο εγκιβωτισμός των αγωγών του γεωεναλλάκτη.

Όπου ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας είναι κοντά στην επιφάνεια, η επίχωση της γεώτρησης μπορεί να γίνει με χαλίκι με κόκκο μικρής διαμέτρου ή αμμοχάλικο, το οποίο επιτρέπει την κυκλοφορία του υπόγειου νερού γύρω από τα στοιχεία του αγωγού. Σε περιπτώσεις όπου το έδαφος είναι ξηρό ή σε περιπτώσεις όπου παρατηρούνται μεγάλες εποχιακές διακυμάνσεις του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ή ακόμη και όταν οι τοπικοί κανονισμοί απαιτούν μόνιμο σφράγισμα των γεωτρήσεων, ο εγκιβωτισμός των αγωγών του γεωεναλλάκτη θα πρέπει να γίνεται με σκυρόδεμα ή μίγμα θερμικά ενισχυμένου σκυροδέματος. Η θερμική απόδοση μπορεί ταυτόχρονα να ενισχυθεί με τη χρήση συνδετήρων ανά διαστήματα 1,5 μέτρου κατά μήκος του αγωγού, μέσω των οποίων ασκείται δύναμη των επί μέρους αγωγών, της διάταξης ενάντια στα τοιχώματα της γεώτρησης. [4]

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους αποτελούν σημαντικότερη παράμετρο στον σχεδιασμό των γεωεναλλακτών. Η λειτουργία ενός γεωεναλλάκτη προκαλεί ταυτόχρονη ροή θερμότητας και υγρασίας στο περιβάλλον έδαφος. Η μετάδοση της θερμότητας μεταξύ του γεωεναλλάκτη και του εδάφους προέρχεται πρωτίστως από θερμική αγωγιμότητα και κατά ένα σημαντικό βαθμό από την μετανάστευση της υγρασίας. Για το λόγο αυτό το φαινόμενο της μετάδοσης εξαρτάται απόλυτα από το είδος του εδάφους, την θερμοκρασία, καθώς και τον βαθμό της υγρασίας. [4]

Είναι γνωστό από τη μετάδοση θερμότητας ότι η θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity)  $\alpha$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ενός υλικού προσδιορίζεται διαιρώντας το λόγο της θερμικής αγωγιμότητας  $k$  ( $\text{W}/\text{M}\cdot\text{K}$ ) του υλικού με το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) και της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση  $c_p$  ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ). [1] Δηλαδή:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$$

Η θερμική διαχυτότητα μετρά την ικανότητα ενός υλικού να άγει θερμότητα σε σχέση με την ικανότητά του να την αποθηκεύει. Συνεπώς τα χαρακτηριστικά του εδάφους που αφορούν τη θερμική του αγωγιμότητα, την πυκνότητα και τη θερμοχωρητικότητά του θα πρέπει ή να είναι εκ των προτέρων γνωστές ή τουλάχιστον να μπορούν να εκτιμηθούν έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα πρόβλεψης της θερμικής συμπεριφοράς των γεωεναλλακτών. Η απόκτηση όμως ακριβών τιμών των θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους απαιτεί ενδελεχή έρευνα. Προκειμένου να εκτιμηθούν οι θερμικές ιδιότητες κοκκωδών εδαφών (αμμώδη, αργιλικά, ίλυος) είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η περιεκτικότητα σε άμμο ή άργιλο, η ξηρή πυκνότητα, και η περιεκτικότητα του εξεταζόμενου εδάφους σε υγρασία. [4]

Η ολοκλήρωση ενός κατακόρυφου κλειστού συστήματος γεωεναλλάκτη θερμότητας γίνεται με την πλήρωση, «γέμισμα», του κενού χώρου μεταξύ των αγωγών και της γεώτρησης και ταυτόχρονα των εγκιβωτισμό των αγωγών. Όπως προαναφέρθηκε, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στον τόπο της γεώτρησης, γίνεται είτε απλή επιχωμάτωση (grouting) είτε μόνιμο σφράγισμα (filling) των αγωγών του γεωεναλλάκτη. Οι λόγοι της συγκεκριμένης εργασίας είναι οι εξής: Προστασία του υδροφόρου ορίζοντα σε περίπτωση διαρροών, καλύτερη επαφή άρα και καλύτερη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ των τοιχωμάτων της

γεώτρησης και των αγωγών του γεωεναλλάκτη και τέλος ο καλύτερος οικονομοτεχνικός συνδυασμός των παραπάνω.

Το αμερικανικό τμήμα φυσικών πόρων και περιβάλλοντος (DNRE – Department of Natural Resources & Environment) [2] και η εθνική υπηρεσία που αφορά τον υδροφόρο ορίζοντα των Η.Π.Α. (NGWA – National Ground Water Association), έχουν εκδώσει κάποιες οδηγίες βέλτιστων πρακτικών που θα πρέπει να ακολουθούνται για τον εγκιβωτισμό των αγωγών ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες του υπεδάφους που επικρατούν. Σύμφωνα με αυτές τις μελέτες σε υπέδαφος όπου επικρατεί κορεσμένη (πλήρως υγρή), μη συμπαγής άμμος, χαλίκι, άργιλος ή συνδυασμός των παραπάνω, προτείνεται η πλήρωση της γεώτρησης με τσιμεντοειδές μίγμα ή μίγμα κοινού σκυρόδεμα, με μίγμα μπετονίτη ή ειδικού θερμοαγωγίμου μίγματος μπετονίτη. Στην περίπτωση αντίστοιχων γεωλογικών συνθηκών αλλά ακόρεστου (μερικώς υγρού) υπεδάφους προτείνονται τα ίδια υλικά πλήρωσης και εγκιβωτισμού των αγωγών του γεωεναλλάκτη εξαιρώντας το μείγμα του απλού μπετονίτη. Γεωτρήσεις σε διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες υπεδάφους με συμπαγής σχηματισμούς, όπως ο ασβεστόλιθος (limestone), ο δολομίτης (dolomite), η σχιστή άργιλος (shale), ο γρανίτης (granite) και ο σχιστόλιθος (schist), καλό είναι να πληρώνονται με τσιμεντοειδή μίγματα ή μίγμα κοινού σκυροδέματος. [3] Η ίδια διαδικασία θα πρέπει να ακολουθείται στην περίπτωση που το υπέδαφος στην περιοχή της γεώτρησης συγκροτείται από θρυμματισμένο, ρηγματώδη ή σπηλαιώδη ασβεστόλιθο. Οι έννοιες που αναφέρθηκαν αναλύονται συνοπτικά παρακάτω.

Μπετονίτης: Είναι πέτρωμα με κύριο συστατικό (>50%) το αργιλικό ορυκτό μοντοριλλονίτη το οποίο έχει την ιδιαίτερη ικανότητα να συγκρατεί το νερό.

Μίγμα Μπετονίτη: Προκύπτει από την ανάμιξη μπετονίτη και νερού, με συγκέντρωση των στερεών στο μίγμα να είναι μεγαλύτερη του 20%.

Θερμοαγωγίμο Μίγμα Μπετονίτη: Είναι μίγμα μπετονίτη στο οποίο έχει προστεθεί άμμος ή άλλα αγωγίμα υλικά, ώστε να αυξηθεί η συνολική θερμική αγωγιμότητα του παρασκευάσματος. Η συγκέντρωση των στερεών στο μίγμα είναι το λιγότερο 60%.

Κοινό Σκυρόδεμα: Προκύπτει από την ανάμιξη τσιμεντοκονιάματος, άμμου και νερού σε συγκεκριμένη αναλογία.

Τσιμεντοειδές Μίγμα: Προκύπτει από την ανάμιξη νερού, άμμου, τσιμεντοκονιάματος και μπετονίτη σε συγκεκριμένη αναλογία.

### 3.1 Πειραματική διάταξη προσομοίωσης γεωεναλλάκτη θερμότητας

Η πειραματική διάταξη της προσομοίωσης του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη θερμότητας που κατασκευάστηκε επιτρέπει την πλήρωση της γεώτρησης με διαφορετικά υλικά ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά τους κατά τη λειτουργία του γεωεναλλάκτη. Πραγματοποιήθηκε μόνον επίχωση της γεώτρησης και των αγωγών του γεωεναλλάκτη και όχι πλήρες σφράγισμα και εγκιβωτισμός των αγωγών, προκειμένου η ίδια διάταξη να χρησιμοποιηθεί με περισσότερα του ενός υλικού πλήρωσης.

Όπως προαναφέρθηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, όπου περιγράφεται η διαδικασία της κατασκευής των διατάξεων, μετά την πλήρωση του κενού μεταξύ των δακτυλίων της γεώτρησης και του σπειροειδούς αγωγού, τοποθετήθηκε ένα θερμοζεύγος στο κέντρο της γεώτρησης, εντός του υλικού πλήρωσης. Ένα όμοιο θερμοζεύγος είχε τοποθετηθεί προηγουμένως, πριν την επίχωση της συναρμολογημένης διάταξης των δακτυλίων, στην εσωτερική πλευρά των δακτυλίων στο κέντρο (σε παρόμοιο βάθος με τον αισθητήρα στο κέντρο στις γεώτρησης, Εικόνα 2.17). Τέλος, τοποθετήθηκε ένα θερμοζεύγος στο δοχείο νερού, ώστε να γίνεται μέτρηση του αποτελέσματος της κυκλοφορίας του νερού στο γεωεναλλάκτη, στο οποίο περιέχονται δύο λίτρα νερού σε κάθε πείραμα.

Εκτελέστηκαν πειράματα με τέσσερα διαφορετικά υλικά πλήρωσης και καταγράφηκαν τα αποτελέσματα καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Ως υλικά πλήρωσης χρησιμοποιήθηκαν το κονίαμα κατασκευής των δακτυλίων, άμμος και δύο μίγματα άμμου – μετάλλου με διαφορετική συγκέντρωση μετάλλου στην άμμο κάθε φορά. Στα τέσσερα υποκεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και οι παράμετροί τους.

### 3.1.1 Χρήση μίγματος σκυροδέματος ως υλικό πλήρωσης

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του πειράματος όταν η γεώτρηση πληρώνεται με το μίγμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δακτυλίων που απαρτίζουν τη γεώτρηση. Όπως αναλύθηκε προηγουμένως το μίγμα δεν αναμίχθηκε με νερό διότι αυτό θα οδηγούσε στην παρασκευή σκυροδέματος το οποίο όταν στερεοποιούταν θα αχρήστευε τη διάταξη. Εκτελέστηκαν πέντε πειράματα με αυτό το υλικό ρυθμίζοντας κάθε φορά τη θερμοκρασία της αντίστασης του χιτωνίου – μανδύα μέσω της αντίστοιχης συσκευής που περιλαμβάνεται στην πειραματική διάταξη.



Εικόνα 3.1 Φωτογραφία του κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δακτυλίων της διάταξης, αλλά και ως υλικό πλήρωσης της γεώτρησης.

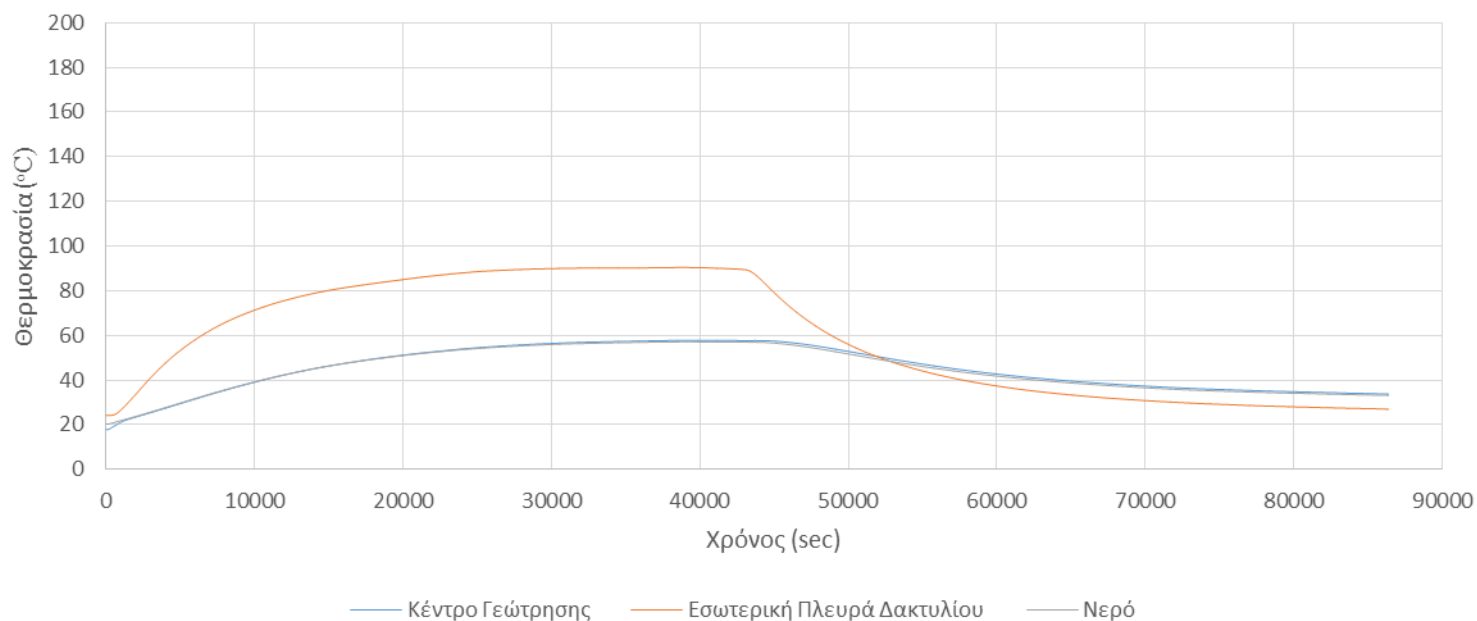
Σε κάθε πείραμα που εκτελέστηκε η διάταξη ξεκινά από τη θερμοκρασία του δωματίου εκείνη τη στιγμή, εκκινώντας ταυτόχρονα τη λειτουργία της αντίστασης και του κυκλοφορητή νερού. Στη μονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης του νερού έχουν προηγουμένως τοποθετηθεί δύο λίτρα νερού σε θερμοκρασία δωματίου. Μετά από αρκετές ώρες λειτουργίας, όταν το σύστημα ισορροπήσει θερμικά, σταματά η λειτουργία της αντίστασης και το σύστημα αρχίζει να ψύχεται ενώ η αντλία συνεχίζει τη λειτουργία της. Για κάθε πείραμα καταγράφεται η θερμοκρασία σε κάθε σημείο μέτρησης καθώς και οι υπόλοιπες παράμετροι του πειράματος.



Γραφική Παράσταση 3.1.1α Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης το κονίαμα κατασκευής των δακτυλίων.

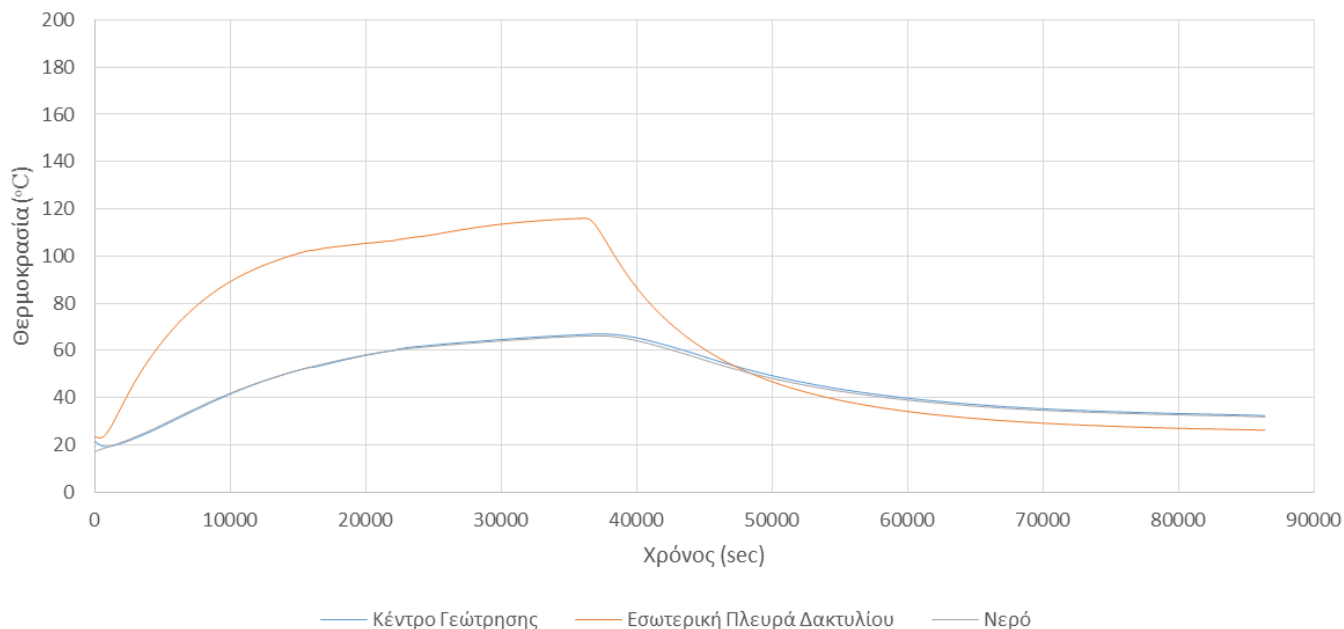


Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2070gr - 55 volt - 2,5 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 30gr



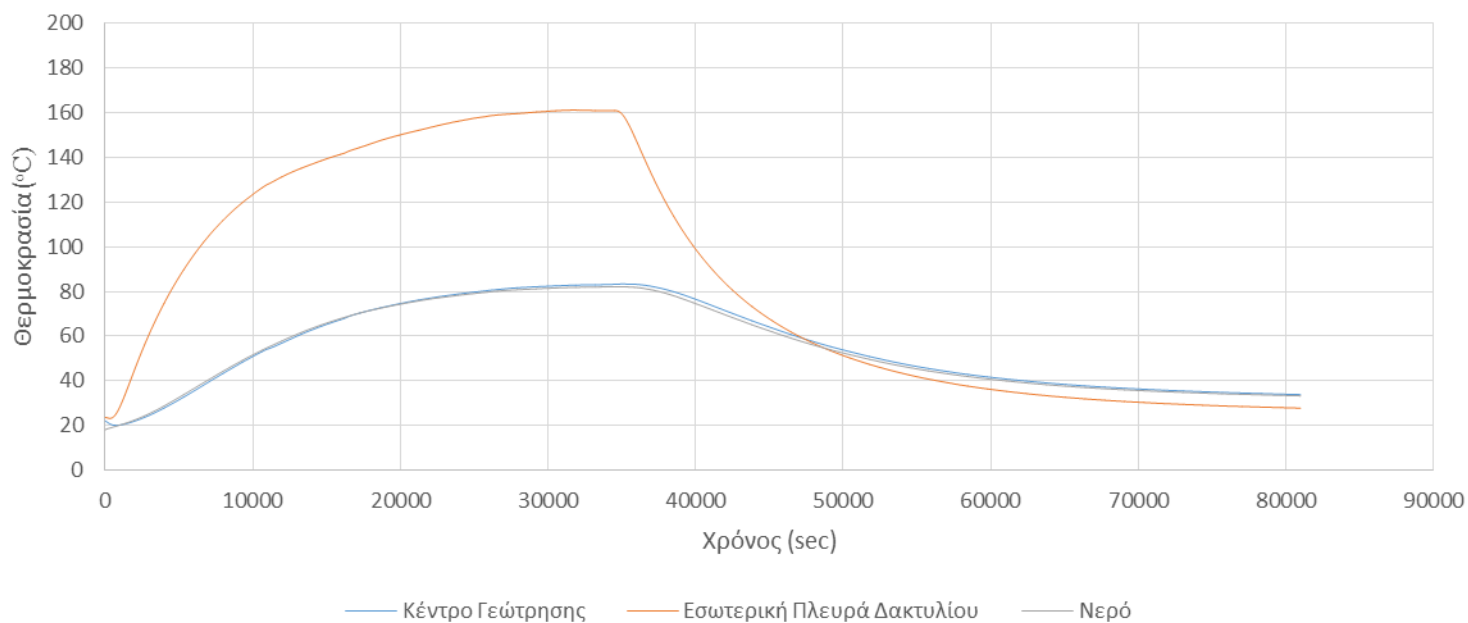
Γραφική Παράσταση 3.1.1β Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης το κονίαμα κατασκευής των δακτυλίων.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2070gr - 70 volt - 3,2 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 30gr



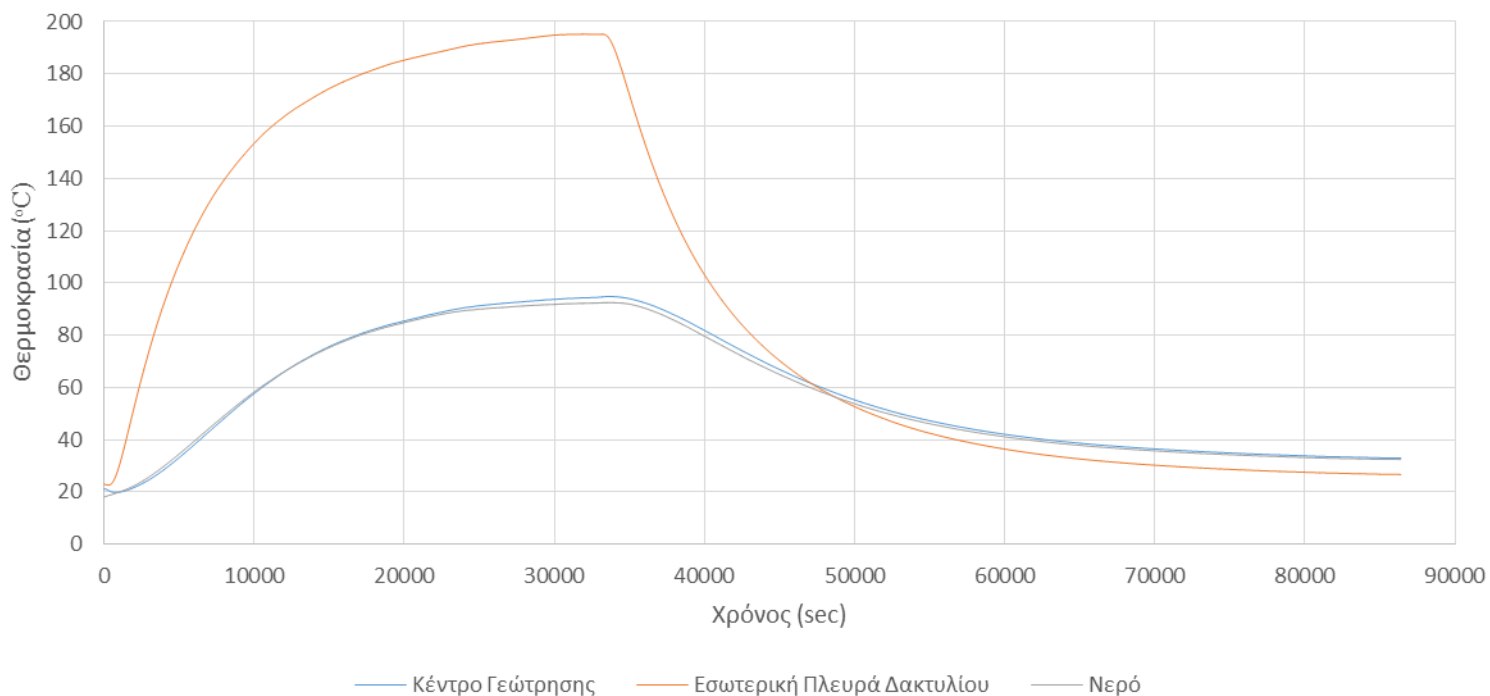
Γραφική Παράσταση 3.1.1γ Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης το κονίαμα κατασκευής των δακτυλίων.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2070gr - 90 volt - 4 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 35gr



Γραφική Παράσταση 3.1.1δ Αποτελέσματα 4<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης το κονίαμα κατασκευής των δακτυλίων.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2070gr - 105 volt - 4,7 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 35gr



Γραφική Παράσταση 3.1.1ε Αποτελέσματα 5<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης το κονίαμα κατασκευής των δακτυλίων.

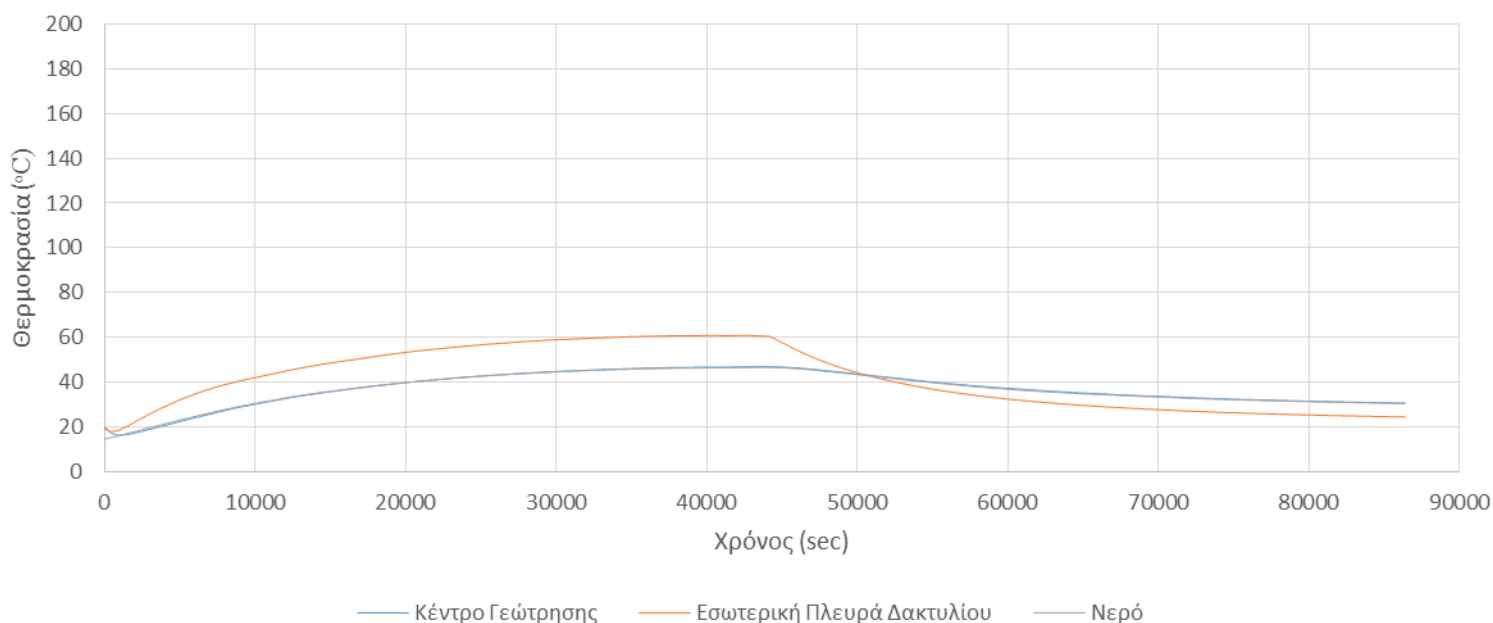
### 3.1.2 Χρήση άμμου ως υλικό πλήρωσης

Η ίδια σειρά πειραμάτων έγινε χρησιμοποιώντας την άμμο ως υλικό πλήρωσης. Η γεώτρηση της διάταξης πληρώθηκε με καθαρή (μετά από πλύση) άμμο θαλάσσης, αφού πρώτα κοσκινίστηκε, προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν πρόσθετα και να επιτευχθεί παρόμοια κοκκομετρία. Η συσκευή καταγραφής (data logger) των θερμοκρασιών των αισθητήρων ρυθμίστηκε ώστε να καταγράφει τη θερμοκρασία ανά δύο δευτερόλεπτα, όπως και στην προηγούμενη σειρά πειραμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την καταγραφή των θερμοκρασιών καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων.



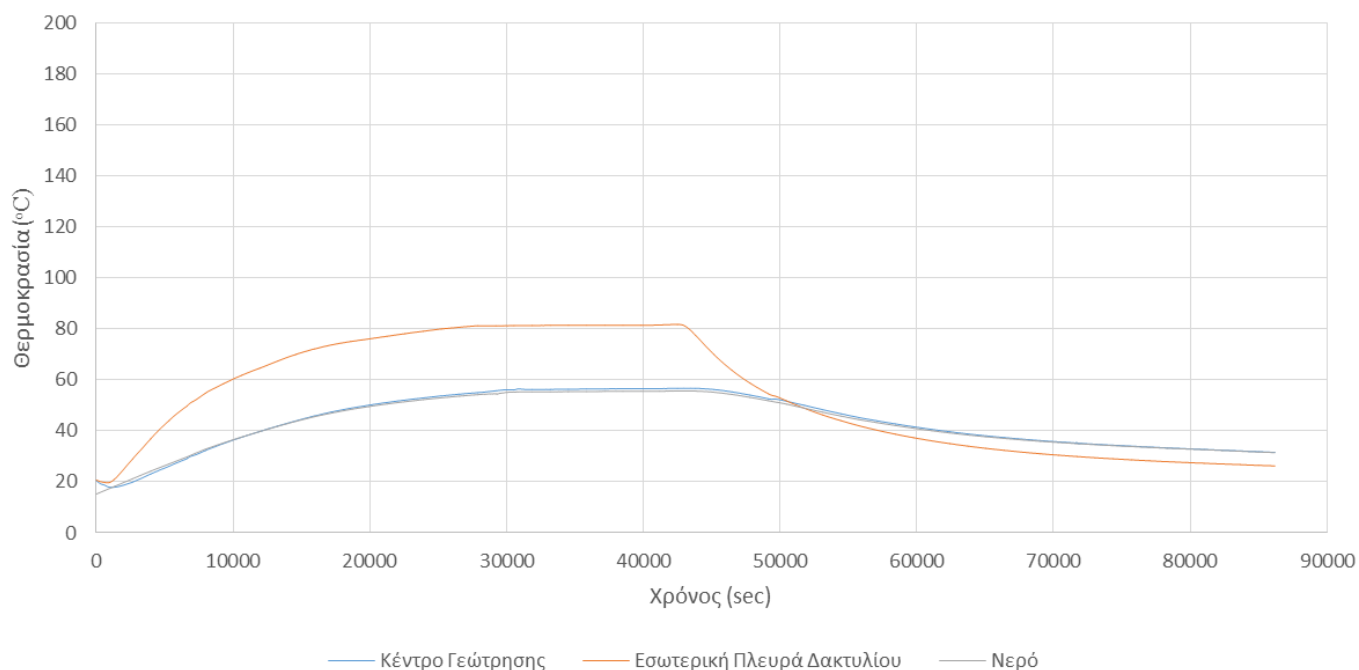
Εικόνα 3.2 Φωτογραφία της άμμου που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης της γεώτρησης.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2350gr - 40 volt - 1,8 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 10gr



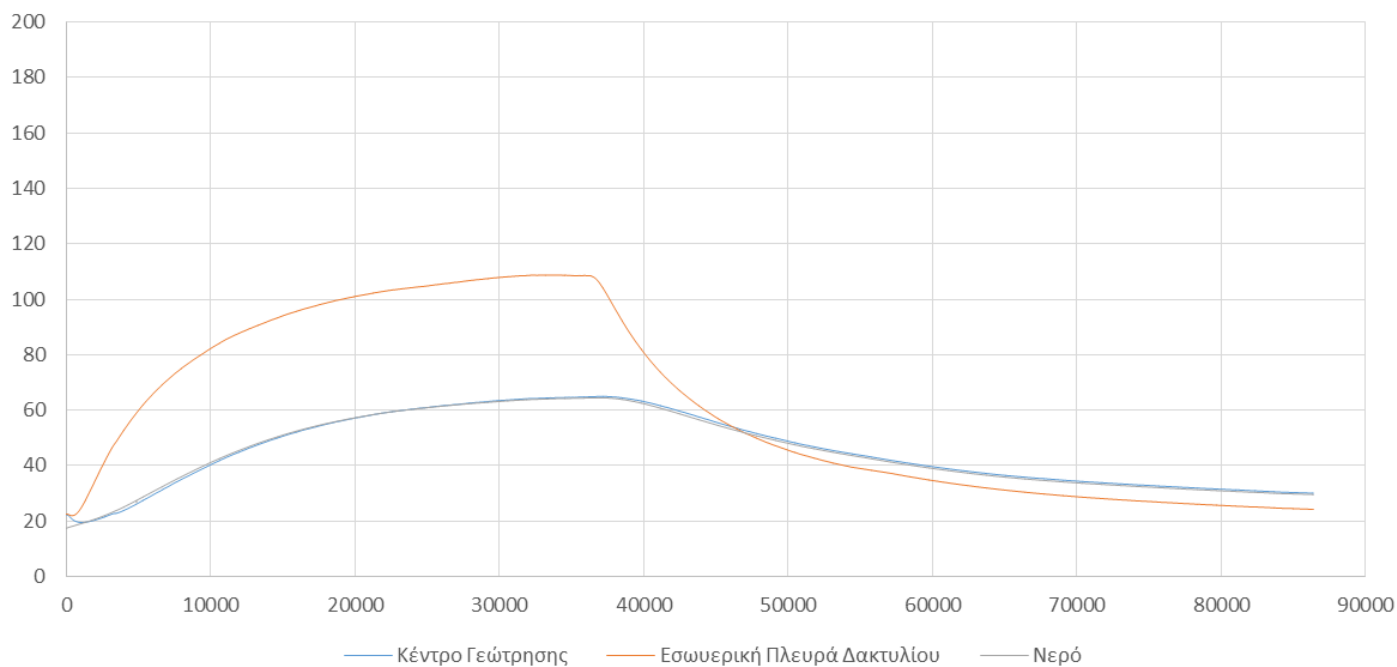
Γραφική Παράσταση 3.1.2α Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης την άμμο.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2350gr - 55 volt - 2,5 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 25gr



Γραφική Παράσταση 3.1.2β Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης την άμμο.

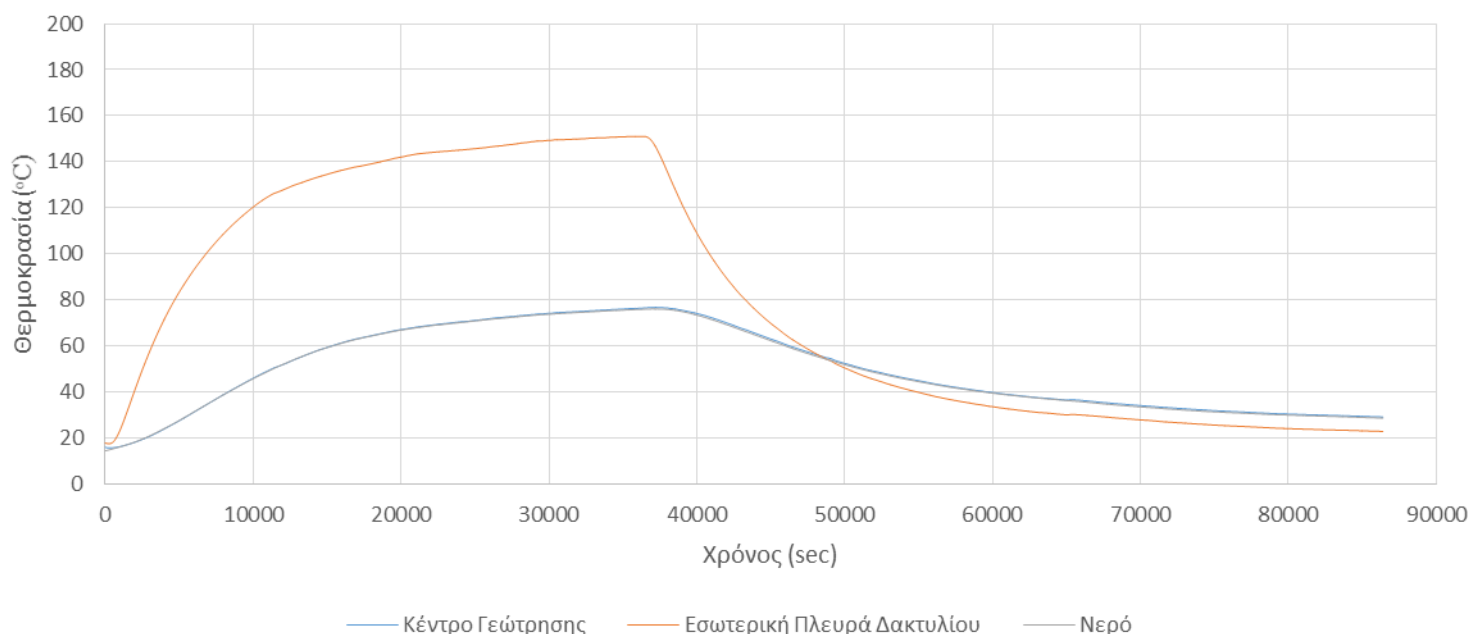
Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2350gr - 70 volt - 3,2 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 35gr



Γραφική Παράσταση 3.1.2γ Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης την άμμο.



Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2350gr - 90 volt - 4 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 30gr



Γραφική Παράσταση 3.1.2δ Αποτελέσματα 4<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης την άμμο.

### 3.1.3 Χρήση μίγματος άμμου – μετάλλου (50% κατά βάρος)

Η τελευταία σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε γεμίζοντας τη γεώτρηση με ένα μίγμα άμμου – μετάλλου, με δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις του μετάλλου στην άμμο. Αυτή η προσπάθεια έγινε με σκοπό να ελεγχθεί η συμπεριφορά της διάταξης του γεωεναλλάκτη θερμότητας με το πρωτότυπο υλικό που προκύπτει αναμιγνύοντας την άμμο με ένα μεταλλικό υλικό, το οποίο είναι εξ' ορισμού καλός αγωγός της θερμότητας. Η άμμος αναμίχθηκε με ειδικό υλικό πολύ μικρής κοκκομετρίας που χρησιμοποιείται σε εργασίες σιδηροβολής για την απομάκρυνση της σκουριάς κυρίως σε ναυπηγοεπισκευαστικές εργασίες. Αποτελείται από πολύ μικρά χαλύβδινα σφαιρίδια. Η επιλογή αυτού του μεταλλικού υλικού έγινε διότι είναι σχετικά χαμηλού κόστους και εύκολο να βρεθεί στην αγορά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων όταν η γεώτρηση γεμίζεται με μίγμα στο οποίο η συγκέντρωση του μετάλλου στην άμμο είναι 50% κατά βάρος.

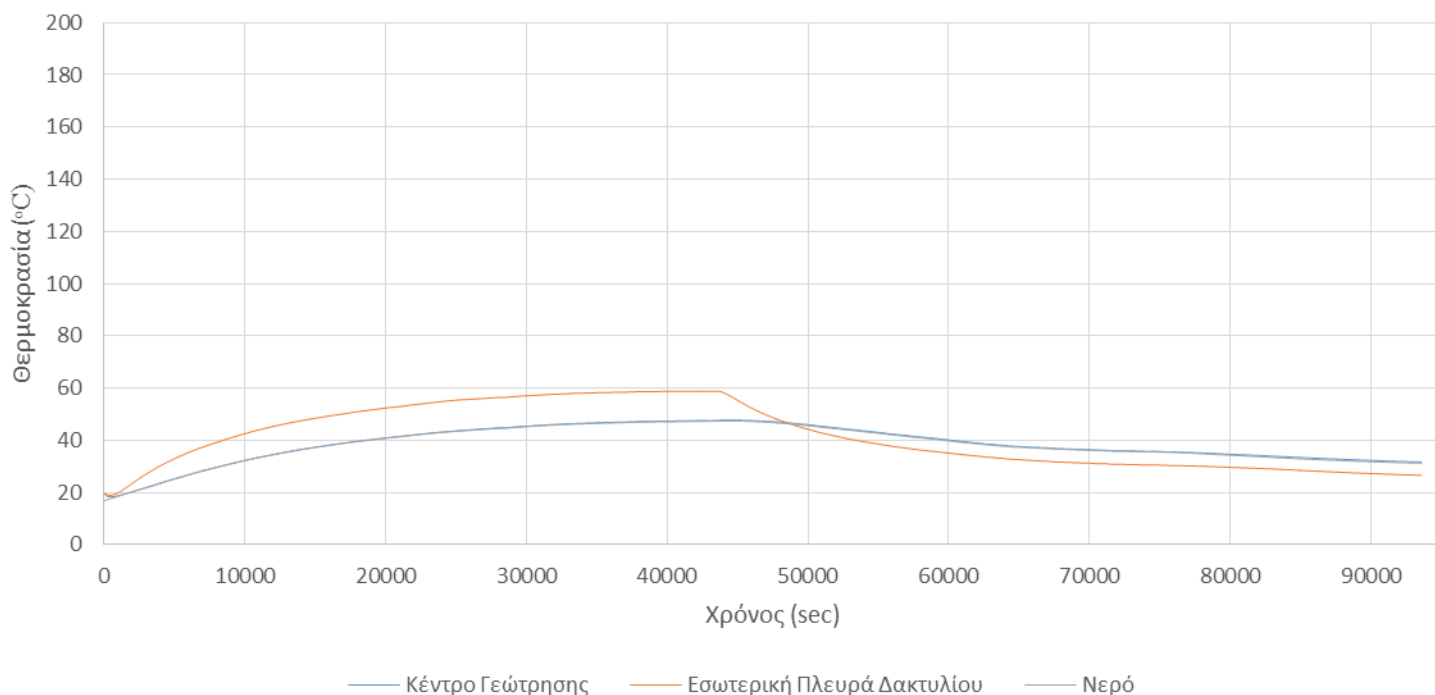


Εικόνα 3.3 Φωτογραφία του μίγματος άμμου – μετάλλου (50% κ.β.) που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης της γεώτρησης.



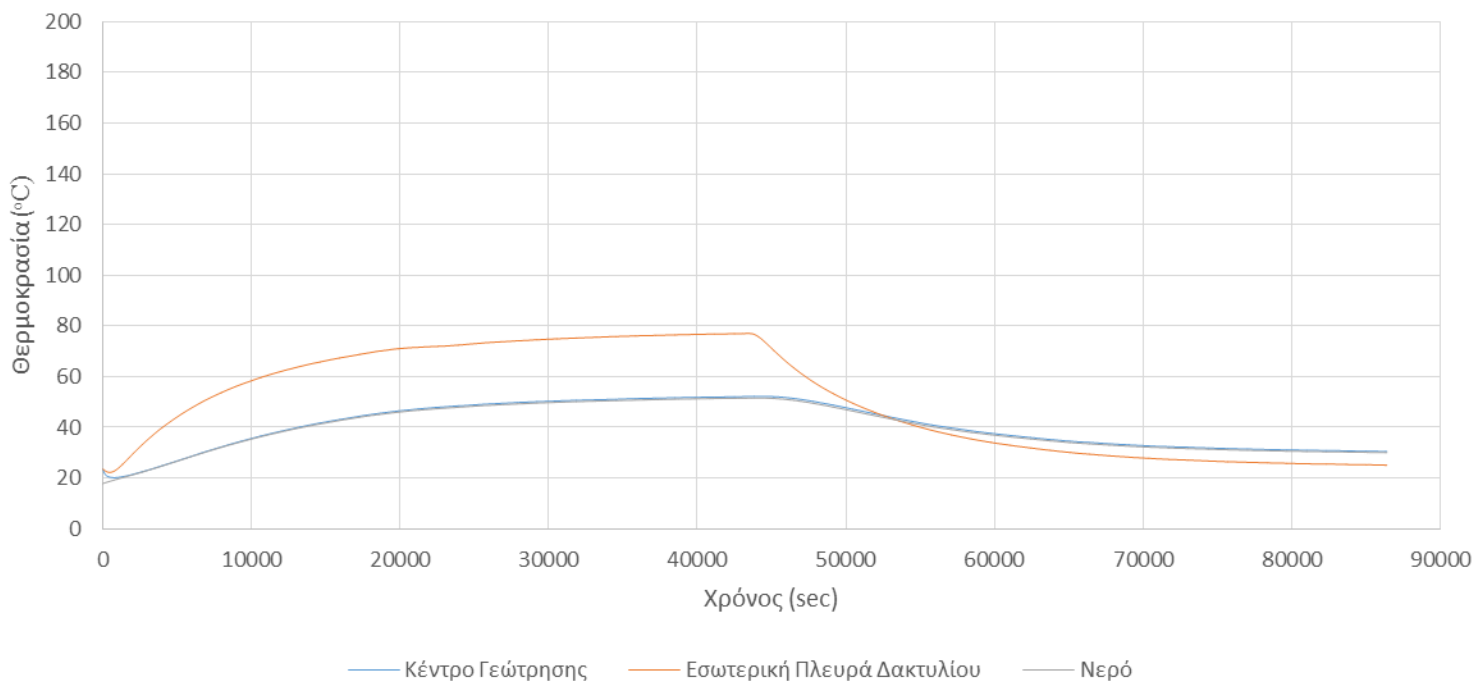
Εικόνα 3.4 Φωτογραφία του μετάλλου που χρησιμοποιήθηκε στην ανάμιξη.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3610gr - 40 volt - 1,8 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 15gr



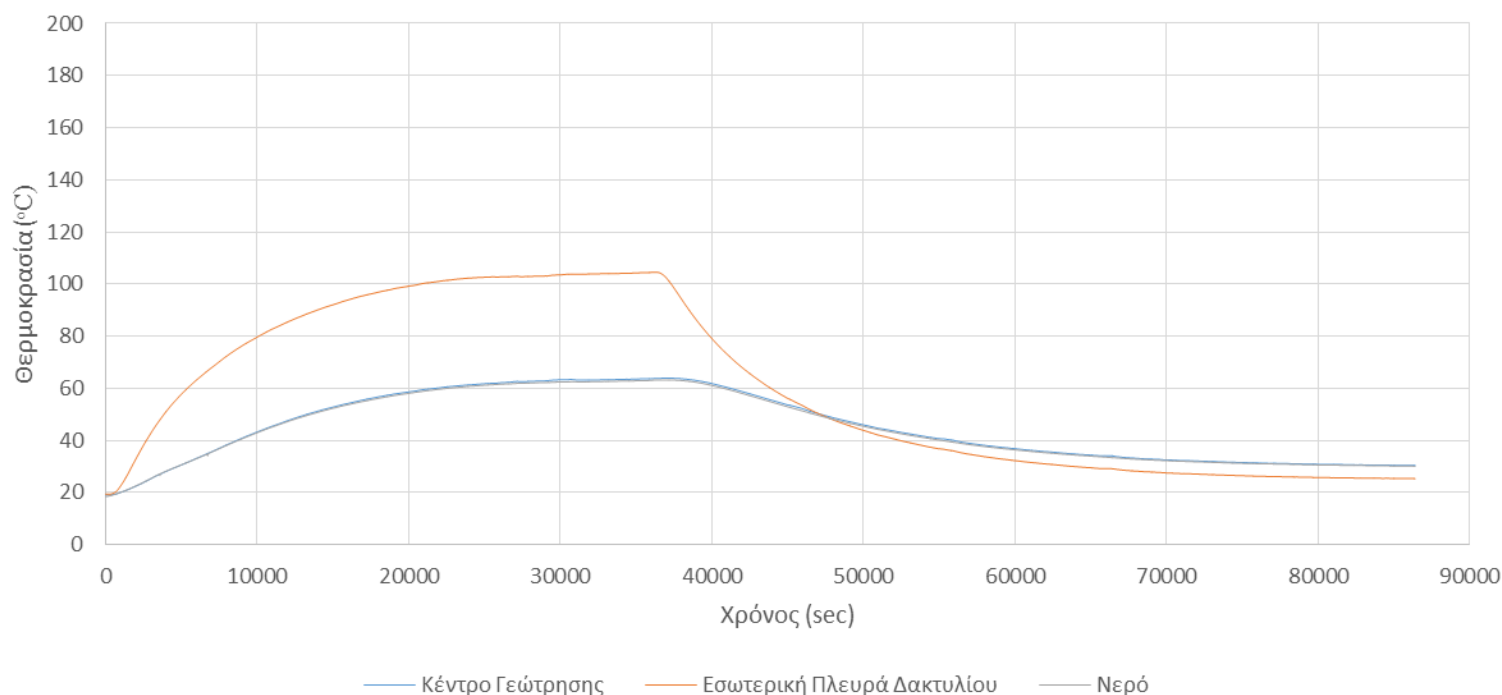
Γραφική Παράσταση 3.1.3α Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 50% κ.β.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3610gr - 55 volt - 2,5 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 30gr



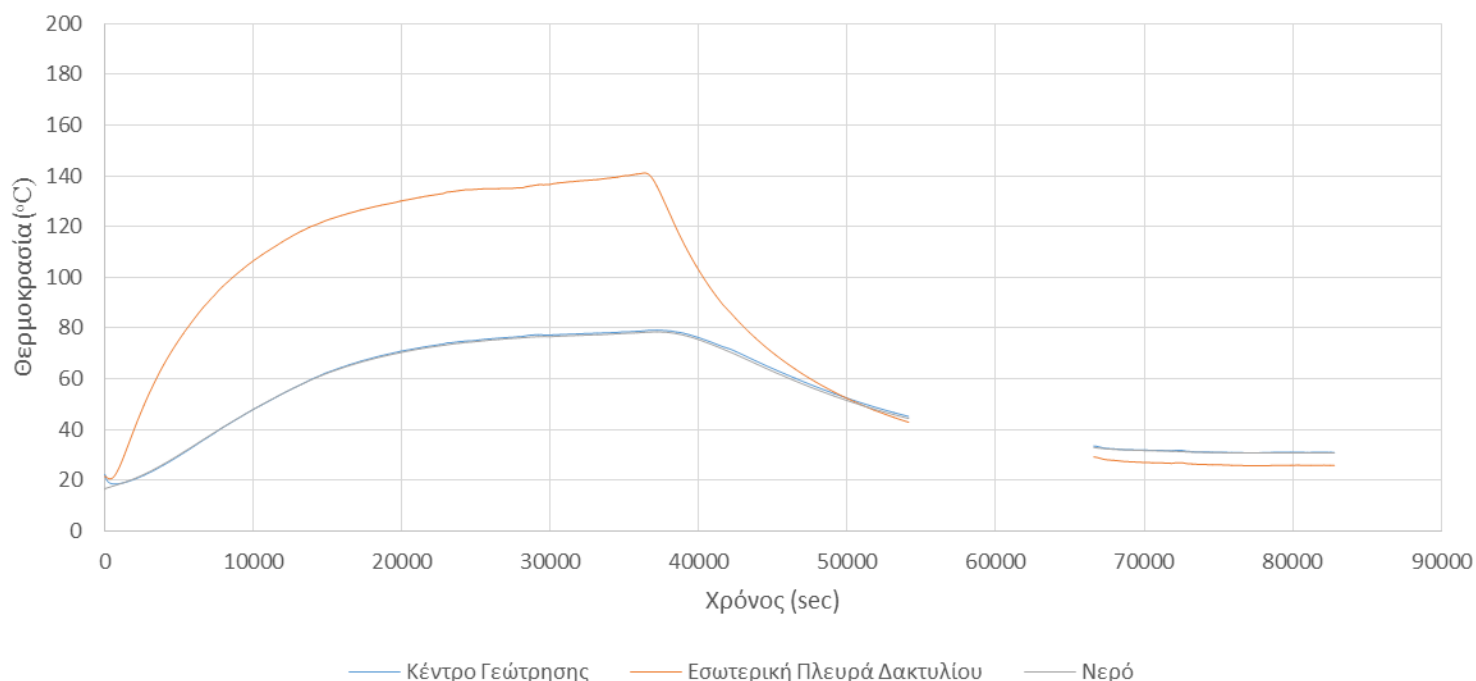
Γραφική Παράσταση 3.1.3β Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 50% κ.β.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3610gr - 70 volt - 3,2 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 30gr



Γραφική Παράσταση 3.1.3γ Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 50% κ.β.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3610gr - 90 volt - 4 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 15gr



Γραφική Παράσταση 3.1.3δ Αποτελέσματα 4<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 50% κ.β.  
(Το κενό στο γράφημα προέκυψε λόγω απώλειας των δεδομένων.)

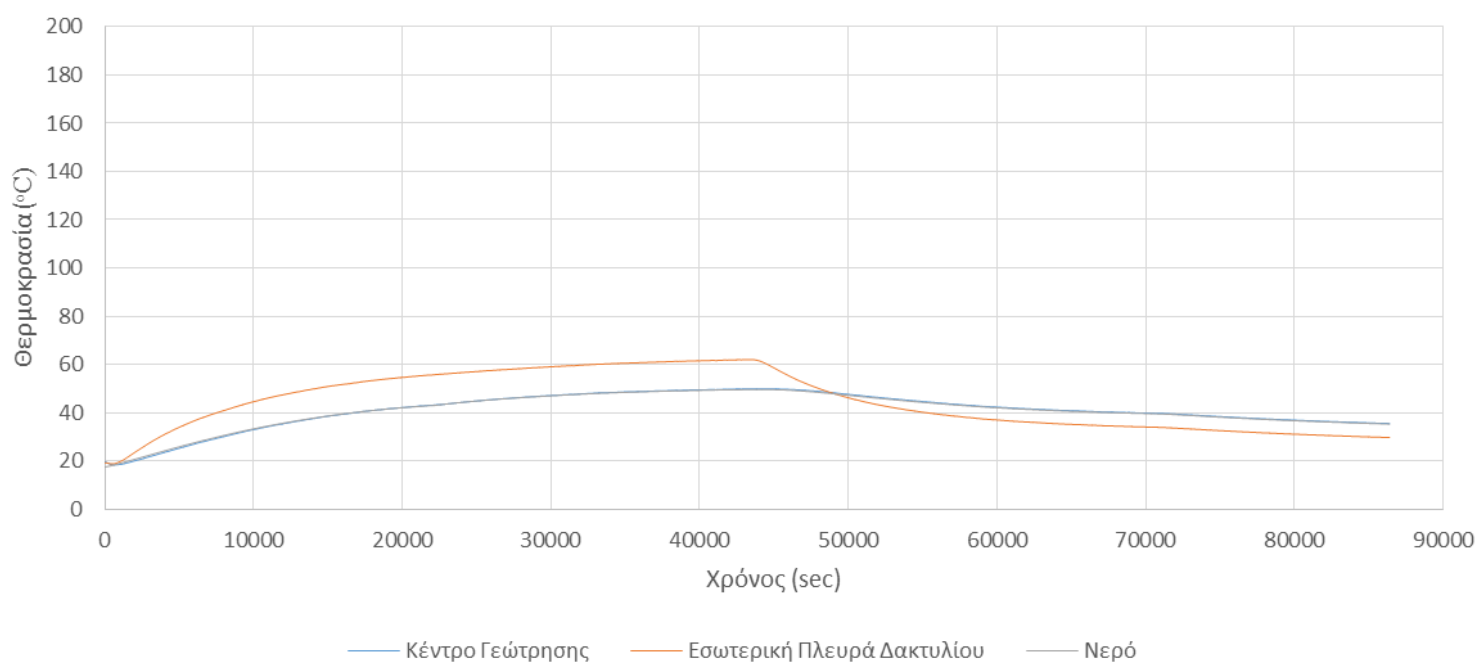
### 3.1.4 Χρήση μίγματος άμμου – μετάλλου (67% κατά βάρος)

Η τελευταία σειρά των πειραμάτων με τη διάταξη προσομοίωσης της λειτουργίας ενός γεωεναλλάκτη θερμότητας έγινε γεμίζοντας τη γεώτρηση με ένα μίγμα στο οποίο η κατά βάρος συγκέντρωση του μετάλλου στην άμμο είναι 2/3. Βέβαια ο αντίστοιχος όγκος του μετάλλου συγκρινόμενος με τον όγκο της άμμου, είναι πολύ μικρότερος λόγω της πολύς μεγαλύτερης πυκνότητας του χάλυβα σε σχέση με την άμμο. Αυτό φυσικά συνέβη και στην προηγούμενη σειρά πειραμάτων όταν η συγκέντρωση του μετάλλου στο μίγμα ήταν 50% κατά βάρος. Με αυτή τη σειρά πειραμάτων ολοκληρώθηκαν όλα τα πειράματα που αφορούσαν την διάταξη του γεωεναλλάκτη θερμότητας.



Εικόνα 3.5 Φωτογραφία του μίγματος άμμου – μετάλλου (67% κ.β.) που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης της γεώτρησης.

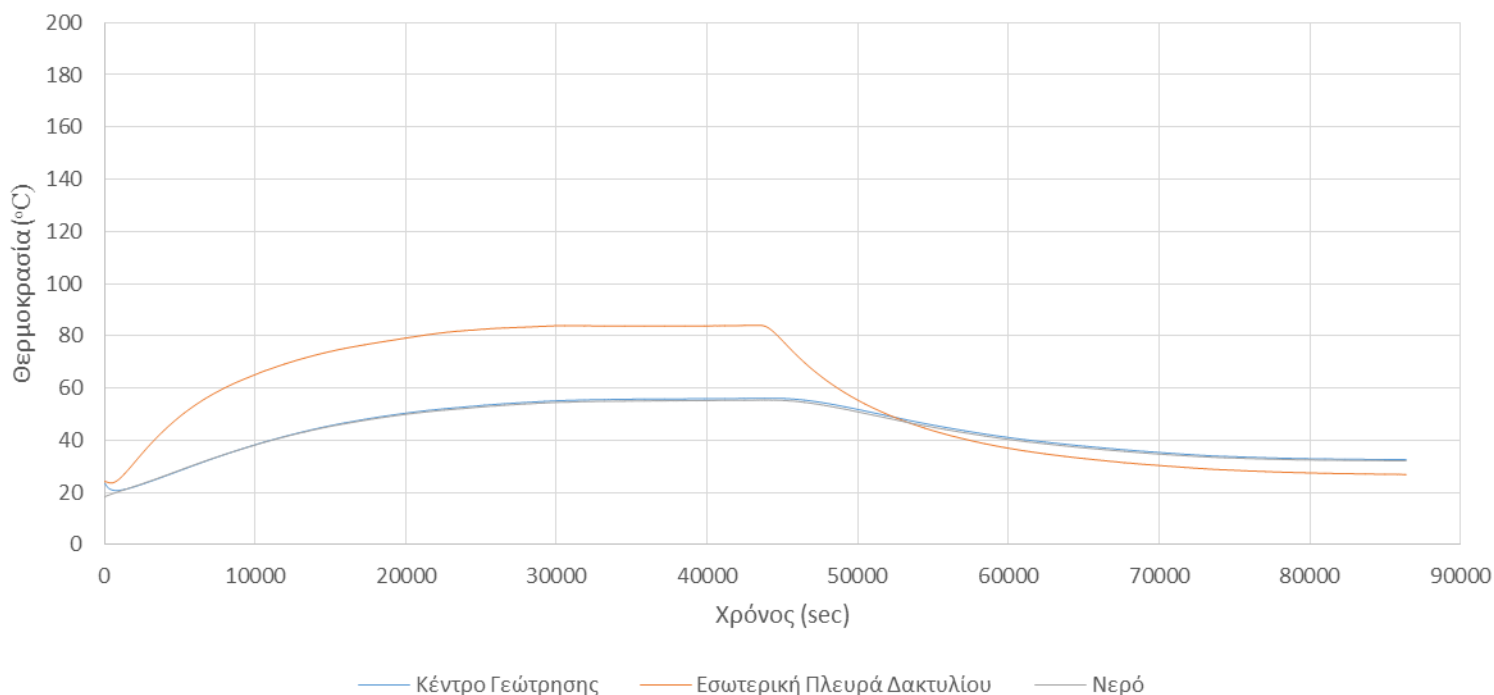
Μάζα Υλικού Πλήρωσης 4120gr - 40 volt - 1,8 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 25gr



Γραφική Παράσταση 3.1.4α Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 67% κ.β.

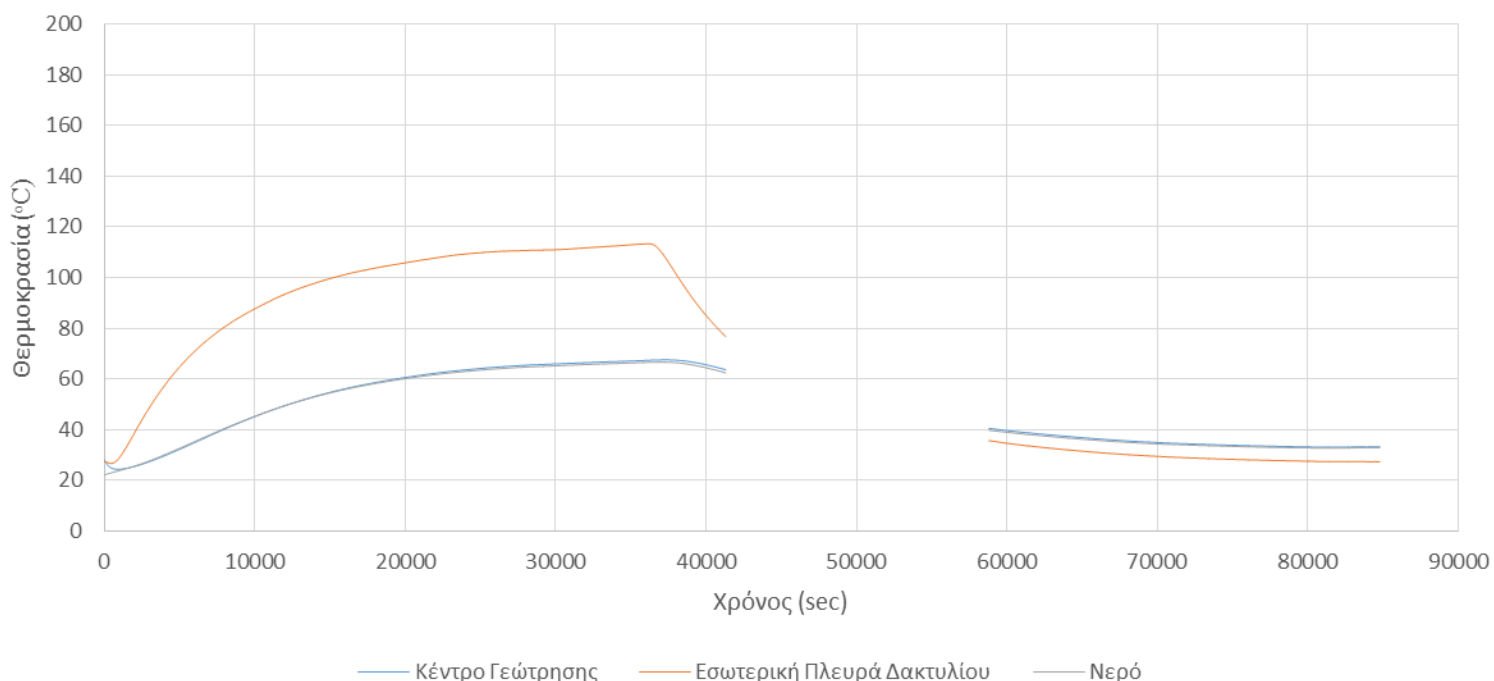


Μάζα Υλικού Πλήρωσης 4120gr - 55 volt - 2,5 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 30gr



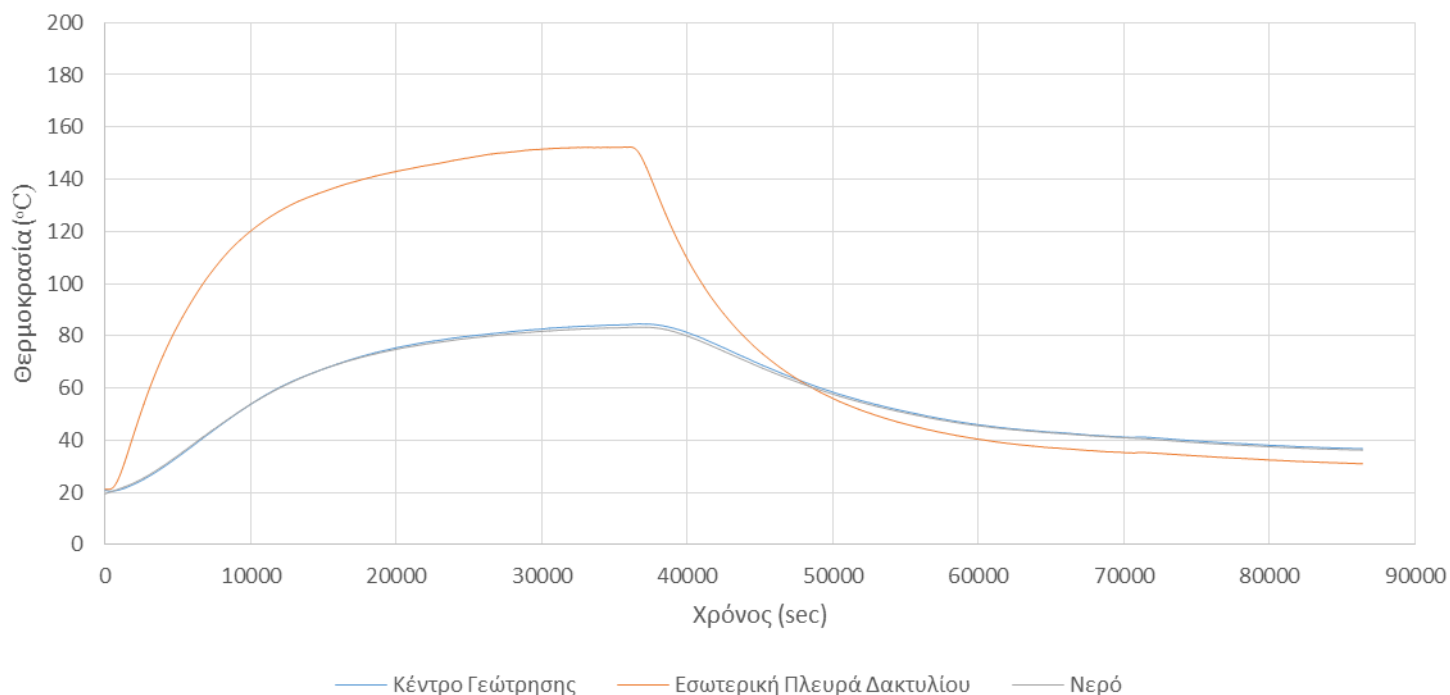
Γραφική Παράσταση 3.1.4β Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 67% κ.β.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 4120gr - 70 volt - 3,2 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 30gr



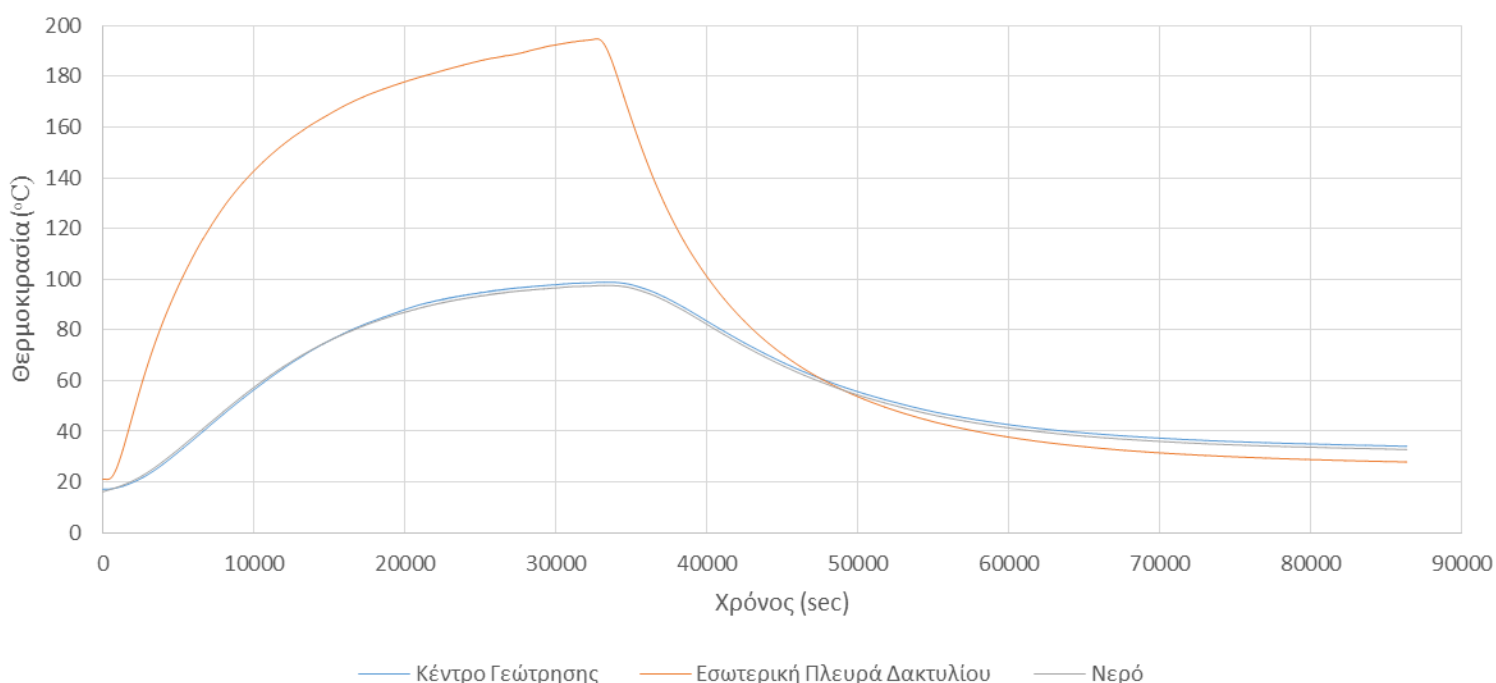
Γραφική Παράσταση 3.1.4γ Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 67% κ.β.  
(Το κενό στο γράφημα προέκυψε λόγω απώλειας των δεδομένων.)

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 4120gr - 90 volt - 4 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 40gr



Γραφική Παράσταση 3.1.4δ Αποτελέσματα 4<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 67% κ.β.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 4120gr - 105 volt - 4,7 ampere - Απώλεια νερού λόγω εξάτμισης 45gr



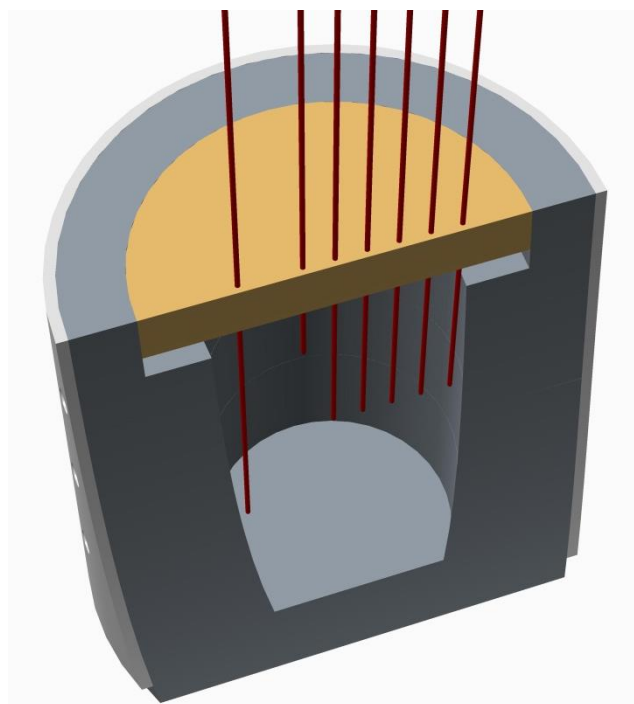
Γραφική Παράσταση 3.1.4ε Αποτελέσματα 5<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 67% κ.β.

### 3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εκτέλεσης πειραμάτων με τη 2<sup>η</sup> διάταξη

Η δεύτερη πειραματική διάταξη προσομοίωσης που κατασκευάστηκε είναι εν γένει ευκολότερη της πρώτης, αλλά για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα θερμοζεύγη ώστε να λαμβάνονται μετρήσεις από πολλαπλά σημεία της διάταξης ταυτόχρονα. Προκειμένου να εκτελούνται πειράματα και με τις δύο διατάξεις ταυτόχρονα, χωρίς να χάνεται χρόνος επειδή ήταν πολύωρα, χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη κυλινδρική αντίσταση, όμοια της πρώτης, καθώς και ένα δεύτερο σετ δακτυλίων σκυροδέματος με τη βάση τους. Φυσικά χρησιμοποιήθηκε και δεύτερη συσκευή καταγραφής των θερμοκρασιών συνδεδεμένη με υπολογιστή.

Ως υλικά πλήρωσης της συναρμολογημένης διάταξης των δακτυλίων χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς τα ίδια υλικά με αυτά της πρώτης διάταξης. Φυσικά υπήρξε διαφορά στη μάζα των χρησιμοποιηθέντων υλικών αφού η δεύτερη διάταξη δεν έχει σωληνώσεις στο εσωτερικό της. Επίσης, η διάταξη δε δοκιμάστηκε σε τάση 90 volt καθώς η θερμοκρασία ήταν πολύ υψηλή λόγω της απουσίας των σωληνώσεων και του ρέοντος ύδατος από τη διάταξη.

Για την καταγραφή των θερμοκρασιών χρησιμοποιήθηκαν επτά θερμοζεύγη. Πέντε τοποθετήθηκαν ισαπέχοντας κατά μήκος της ακτίνας της οπής που σχηματίζουν οι δακτύλιοι στο μέσον του βάθους της οπής. Το πρώτο θερμοζεύγος εφάπτεται στο δακτύλιο και το πέμπτο βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης. Τα υπόλοιπα δύο θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε ένα να βρίσκεται βαθύτερα και το άλλο ψηλότερα από τα υπόλοιπα πέντε σε διαφορετική θέση κατά μήκος της ακτίνας της οπής.

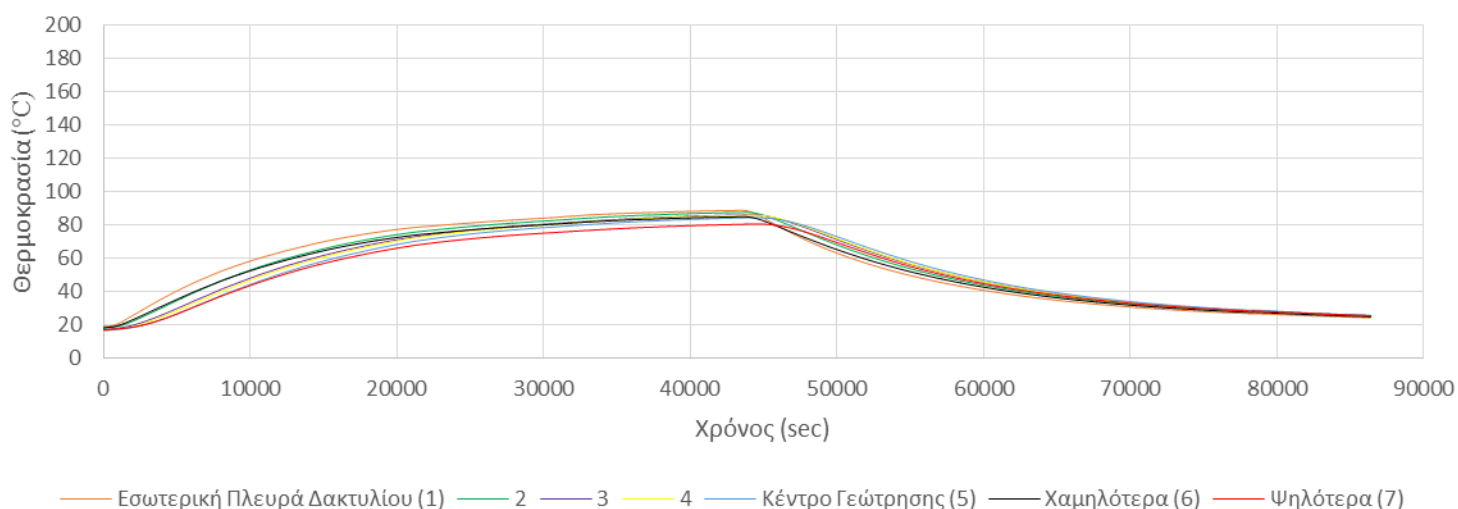


Εικόνα 3.6 Τριδιάστατη τομή του σχεδίου της δεύτερης διάταξης όπου απεικονίζεται η ακριβής θέση τοποθέτησης των θερμοζευγών.

### 3.2.1 Χρήση μίγματος σκυροδέματος ως υλικό πλήρωσης

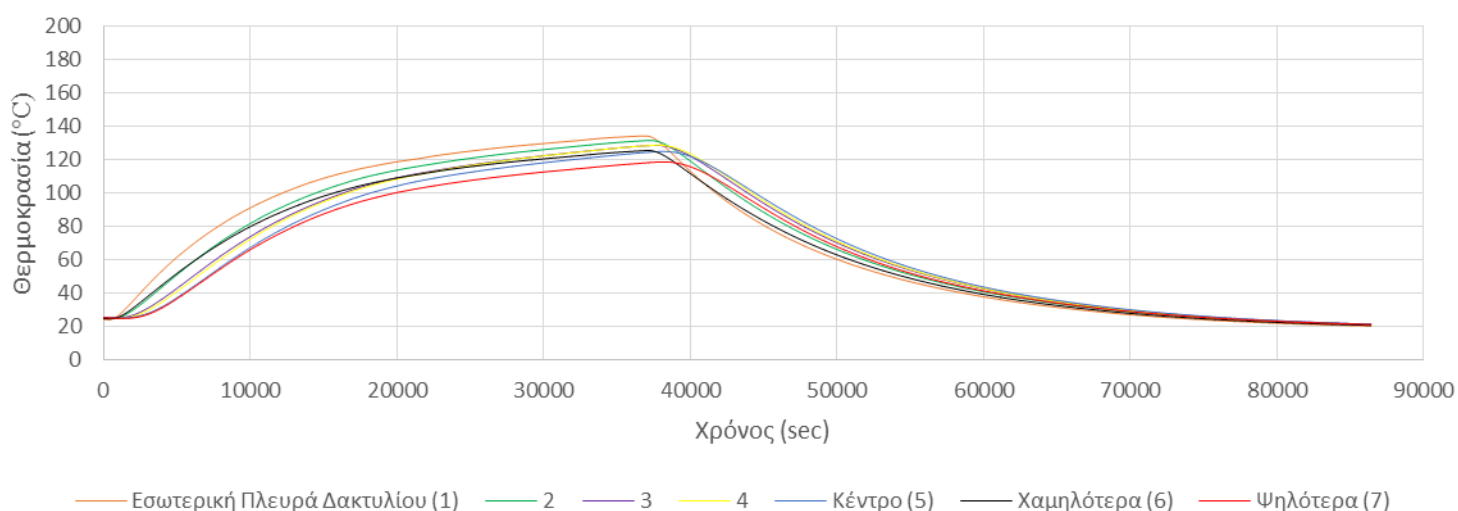
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του πειράματος με τη δεύτερη διάταξη όταν η κεντρική οπή που σχηματίζεται από τη συναρμολόγηση των δακτυλίων πληρώνεται με το μίγμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους. Φυσικά το κονίαμα δεν αναμίχθηκε με νερό διότι αυτό θα οδηγούσε στην παρασκευή σκυροδέματος το οποίο όταν στερεοποιούταν θα αχρήστευε τη διάταξη. Εκτελέστηκαν τρία πειράματα με αυτό το υλικό ρυθμίζοντας κάθε φορά τη θερμοκρασία της αντίστασης μέσω της αντίστοιχης συσκευής που περιλαμβάνεται στη πειραματική διάταξη. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 1790gr - 40 volt - 2,15 ampere



Γραφική Παράσταση 3.2.1α Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης το κονίαμα παρασκευής των δακτυλίων.

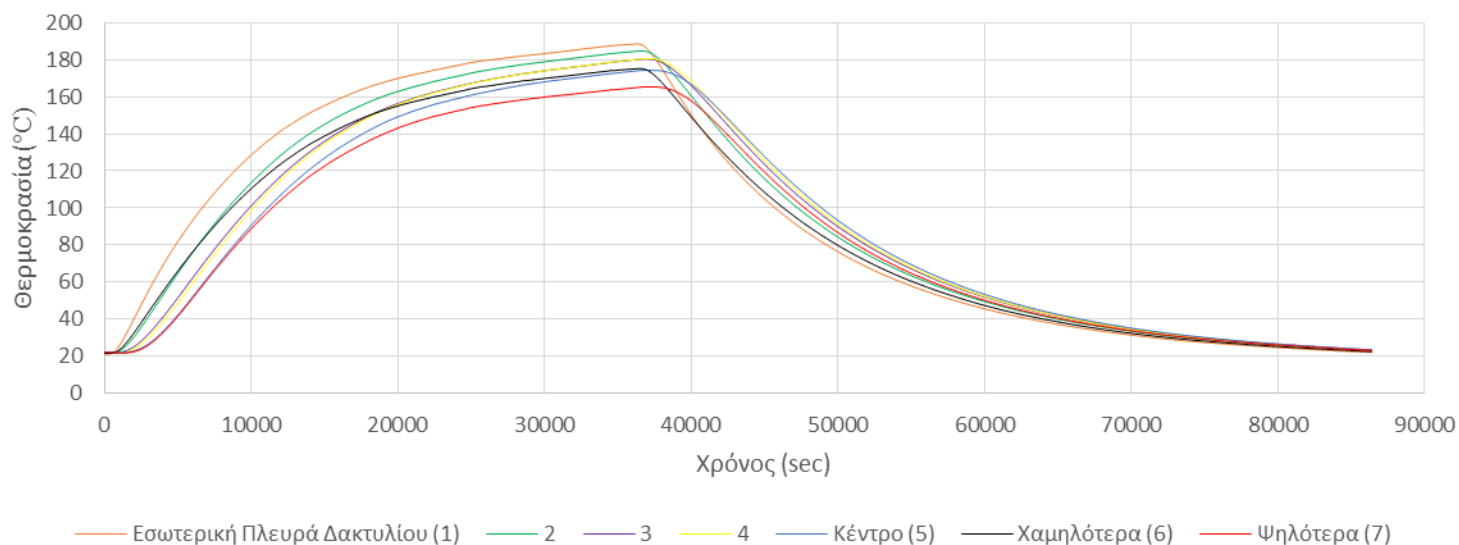
Μάζα Υλικού Πλήρωσης 1790gr - Τάση 55volt - Ένταση 2,9 ampere



Γραφική Παράσταση 3.2.1β Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης το κονίαμα παρασκευής των δακτυλίων.



Μάζα Υλικού Πλήρωσης 1790gr - Τάση 70volt - Ένταση 3,6 ampere

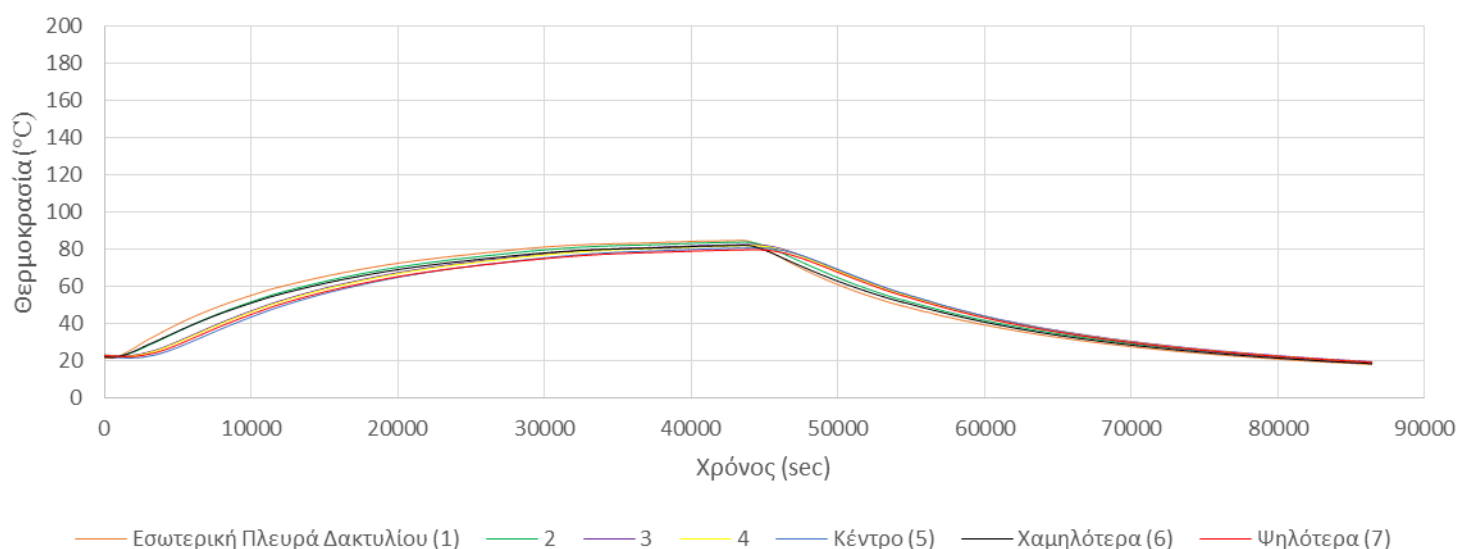


Γραφική Παράσταση 3.2.1γ Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης το κονίαμα παρασκευής των δακτυλίων.

### 3.2.2 Χρήση άμμου ως υλικό πλήρωσης

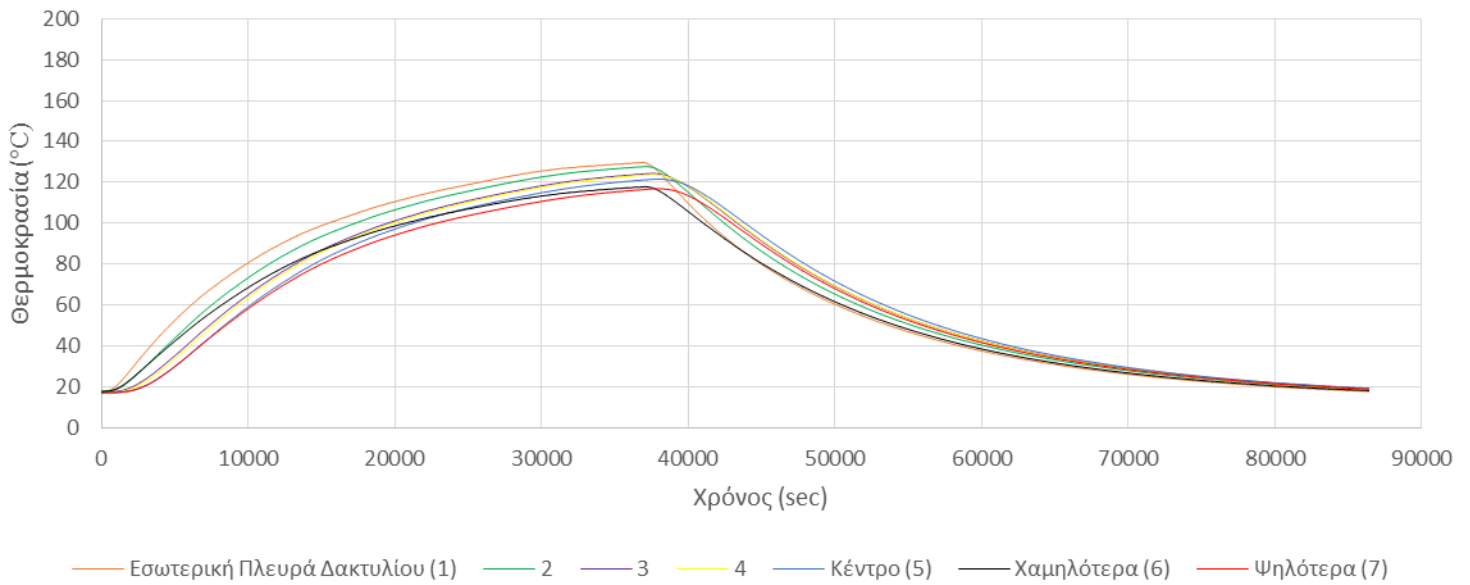
Παρόμοια πειράματα εκτελέστηκαν στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας την άμμο ως υλικό πλήρωσης. Η γεώτρηση της διάταξης πληρώθηκε με την καθαρή (μετά από πλύση) άμμο θαλάσσης όπως και στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με την πρώτη πειραματική διάταξη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την καταγραφή των θερμοκρασιών σε κάθε σημείο καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2150gr - Τάση 40 volt - Ένταση 2,15ampere



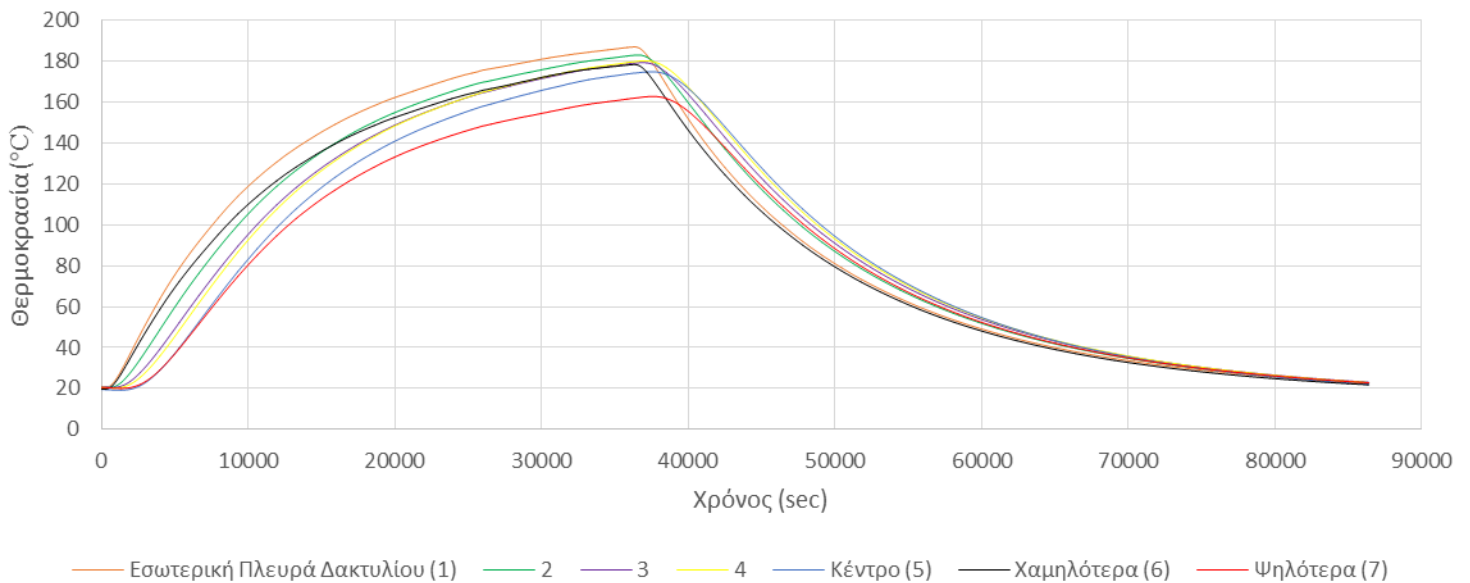
Γραφική Παράσταση 3.2.2α Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης άμμο.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2150 gr - Τάση 55 volt - Ένταση 2,9 ampere



Γραφική Παράσταση 3.2.2β Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης άμμο.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 2150gr - Τάση 70volt - Ένταση 3,6 ampere

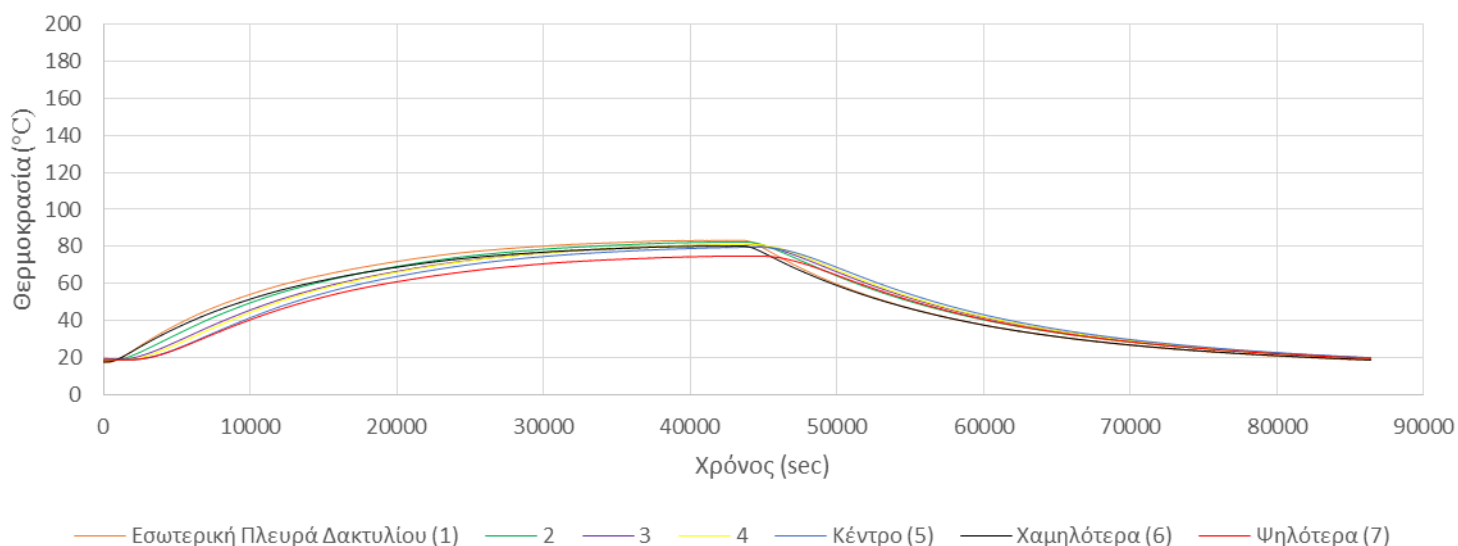


Γραφική Παράσταση 3.2.2γ Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης άμμο.

### 3.2.3 Χρήση μίγματος άμμου – μετάλλου (50% κατά βάρος)

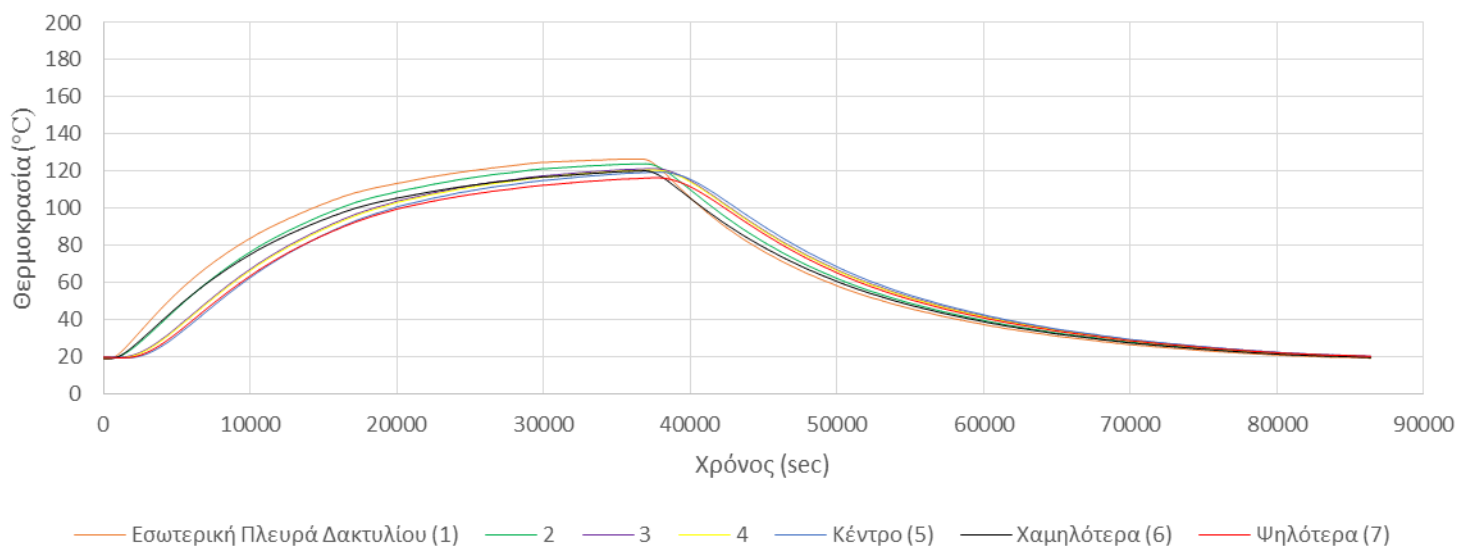
Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα πειραμάτων όταν ως υλικά πλήρωσης της δεύτερης πειραματικής διάταξης χρησιμοποιούνται τα μίγματα άμμου με τα χαλύβδινα σφαιρίδια, σε διαφορετικές συγκεντρώσεις κατά βάρος. Είναι μίγματα αντίστοιχα με αυτά που σκευάστηκαν για τα πειράματα με την πρώτη πειραματική διάταξη. Στη συνέχεια, οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν χρησιμοποιώντας μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση 50% κατά βάρος.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3420gr - Τάση 40volt - Ένταση 2,15 ampere



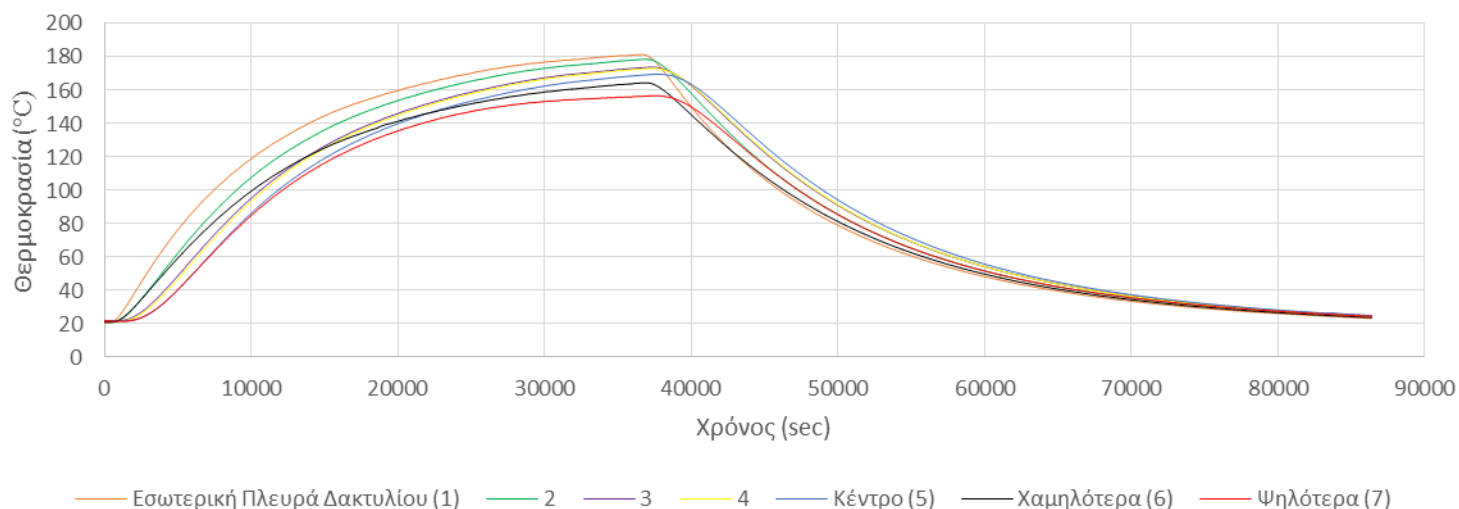
Γραφική Παράσταση 3.2.3α Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 50% κ.β.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3420gr - Τάση 55 volt - Ένταση 2,9 ampere



Γραφική Παράσταση 3.2.3β Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 50% κ.β.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3420gr - Τάση 70 volt - Ένταση 2,9 ampere

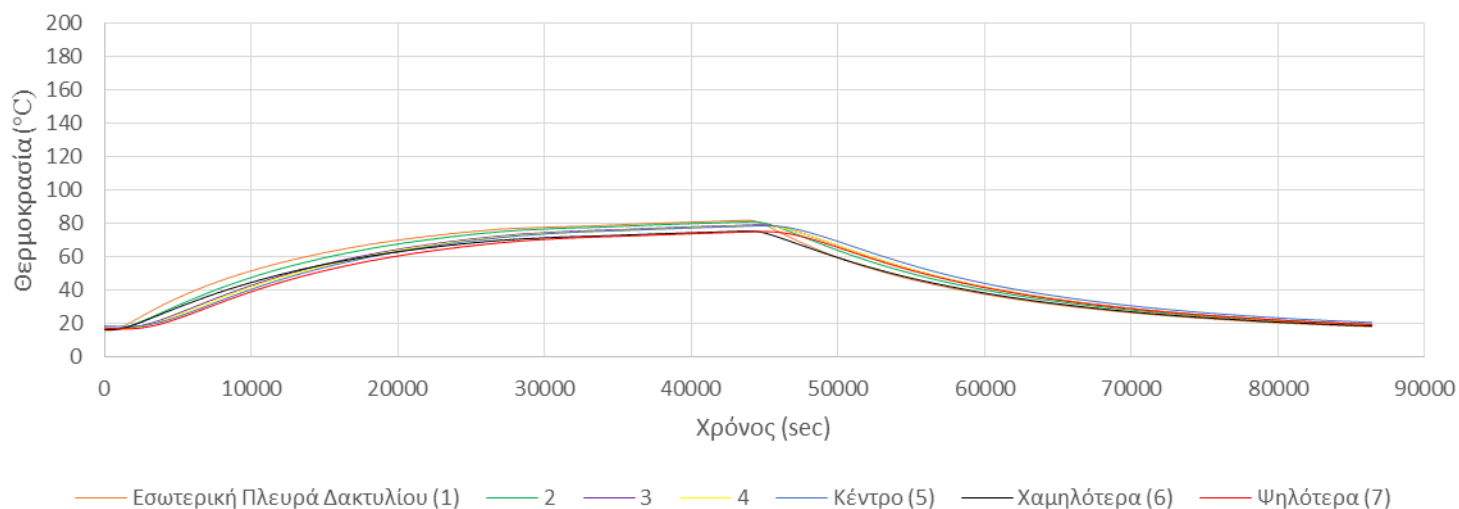


Γραφική Παράσταση 3.2.3γ Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 50% κ.β.

### 3.2.4 Χρήση μίγματος άμμου – μετάλλου (67% κατά βάρος)

Τέλος, εμφανίζονται τα αποτελέσματα του τελευταίου πειράματος με τη δεύτερη πειραματική διάταξη, όταν ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 67% κατά βάρος. Με την παρουσίαση αυτής της σειράς πειραμάτων ολοκληρώνεται το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας που αφορά τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των πειραμάτων με τις δύο διατάξεις που κατασκευάστηκαν.

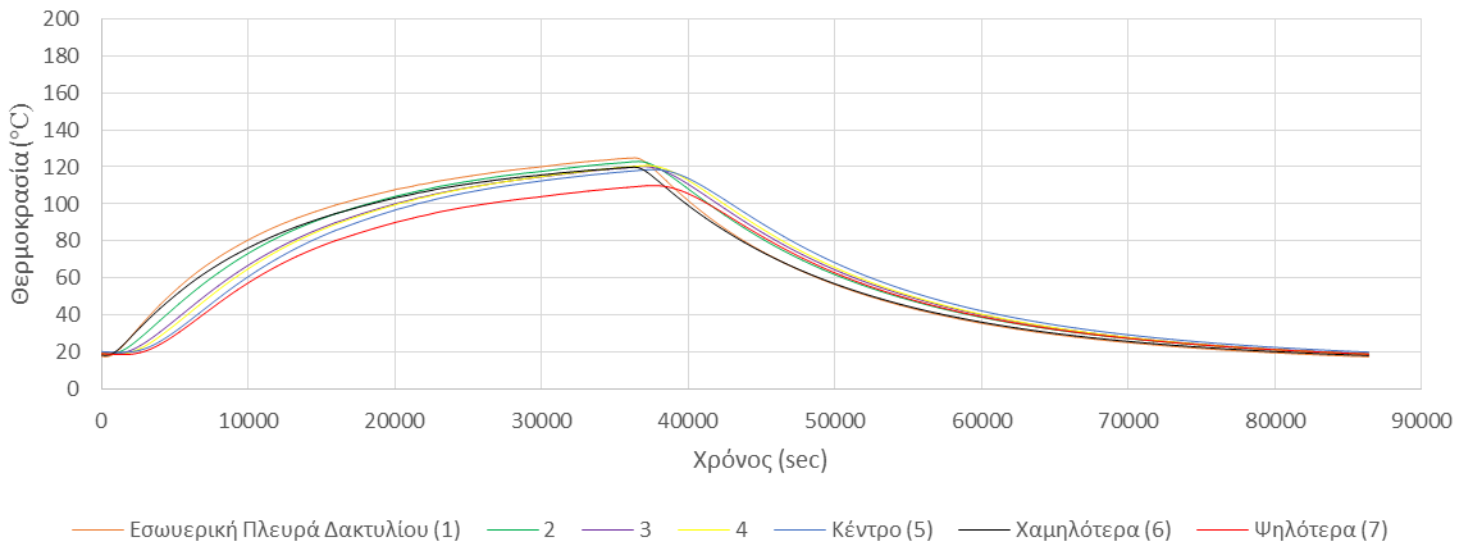
Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3810 gr - Τάση 40 volt - Ένταση 2,15 ampere



Γραφική Παράσταση 3.2.4α Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 67% κ.β.

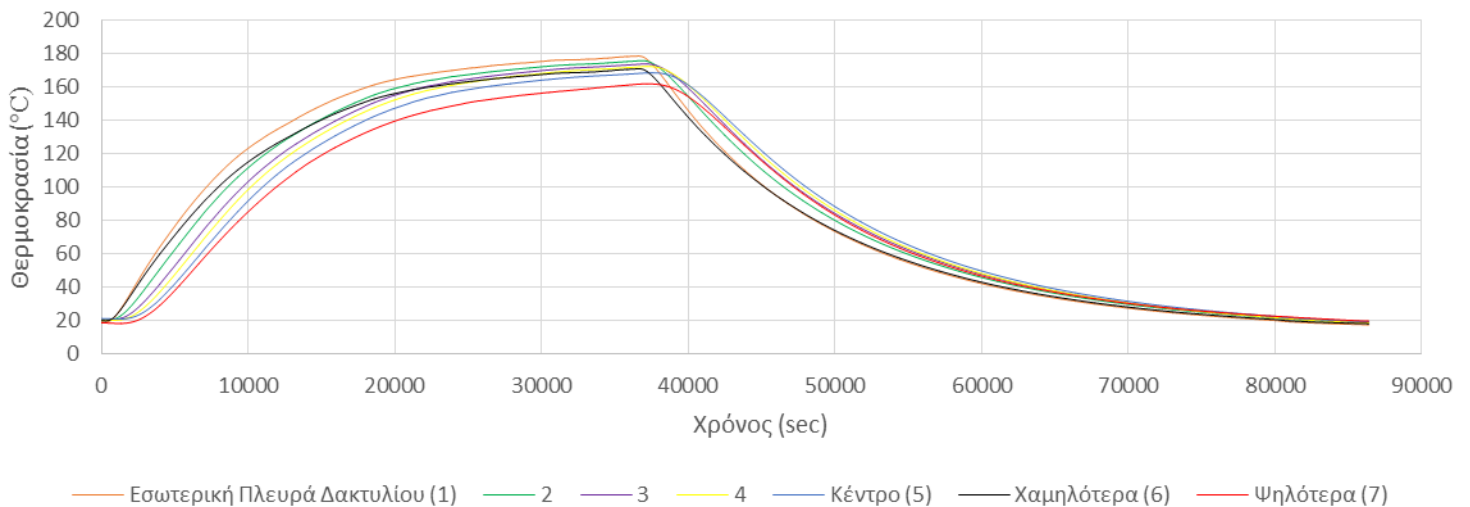


Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3810 gr - Τάση 55 volt - Ένταση 2,9 ampere



Γραφική Παράσταση 3.2.4β Αποτελέσματα 2<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 67% κ.β.

Μάζα Υλικού Πλήρωσης 3810gr - Τάση 70 volt - Ένταση 3,6 ampere



Γραφική Παράσταση 3.2.4γ Αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> πειράματος χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης μίγμα άμμου – μετάλλου με συγκέντρωση μετάλλου στο μίγμα 67% κ.β.

Είναι προφανές ότι η συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι καμπύλες της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων είναι διαφορετική συγκρινόμενη με τα αποτελέσματα των πειραμάτων με την πρώτη πειραματική διάταξη προσομοίωσης. Το κύκλωμα κυκλοφορίας του νερού της πρώτης πειραματικής διάταξης μαζί με τον κυκλοφορητή παίζει καθοριστικό ρόλο στη θερμική συμπεριφορά της καθώς είναι ο κυριότερος παράγοντας των απωλειών θερμότητας. Στη δεύτερη πειραματική διάταξη προσομοίωσης ο κυριότερος παράγοντας είναι το περιβάλλον, αφού η θερμοκρασία του είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην συναρμολογημένη κατασκευή. Αυτές οι απώλειες εμφανίζονται κυρίως στο άνω τμήμα της διάταξης διότι λόγω της απουσίας επαρκούς μόνωσης μεγάλο μέρος της παρεχόμενης θερμικής ενέργειας διοχετεύεται από εκεί στο περιβάλλον. Εξαιτίας των απωλειών αυτών η καμπύλη που περιγράφει τη θερμοκρασία στο ανώτερο τμήμα

της διάταξης (κόκκινη καμπύλη) εμφανίζεται σε όλες τις γραφικές παραστάσεις χαμηλότερα από τις υπόλοιπες. Σε μικρότερο βαθμό αντίστοιχο φαινόμενο απώλειας θερμότητας συμβαίνει και από το κατώτερο τμήμα της διάταξης.

### *Βιβλιογραφία*

1. Frank P. Incropera, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Εκδόσεις Wiley.
2. Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems, Engineering Design and Field Manual, 2000, IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association).
3. Best Practices for Geothermal Vertical Closed-Loop Installations, April 2010, DNRE (Department of Natural Resources & Environment).
4. Αποστολίδου Γεωργία, Μεταπτυχιακή Διατριβή Συστήματα Αξιοποίησης του Εδάφους για Θέρμανση – Ψύξη Κτιρίων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 2010.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Ανάλυση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από την εκτέλεση των πειραμάτων με τις δύο διατάξεις, όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναλύονται για κάθε διάταξη ξεχωριστά στα υποκεφάλαια που ακολουθούν με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων, τόσο για την ορθή λειτουργία της πειραματικής διάταξης προσομοίωσης και των υποσυστημάτων της όσο και για τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικών υλικών εγκιβωτισμού στην περιοχή του γεωεναλλάκτη. Επίσης δοκιμάζεται και η επαναληψιμότητα των δεδομένων. Γίνεται προσπάθεια ώστε τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από την κάθε διάταξη να βοηθήσουν στην σύγκριση της συμπεριφοράς των υλικών εγκιβωτισμού που χρησιμοποιήθηκαν.

#### 4.1 Διάταξη προσομοίωσης γεωεναλλάκτη θερμότητας (1<sup>η</sup> διάταξη)

Προκειμένου να γίνει σύγκριση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τον εγκιβωτισμό του προσομοιωτή του γεωεναλλάκτη θερμότητας, συγκεντρώθηκαν οι μέγιστες θερμοκρασίες της εσωτερικής περιφέρειας των δακτυλίων σε σχέση με τις μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στο νερό στη δεξαμενή. Αυτές οι θερμοκρασίες παρουσιάζονται για κάθε υλικό και για κάθε διαφορετική τάση λειτουργίας στους ακόλουθους πίνακες.

Χρήση κονιάματος σκυροδέματος ως υλικό εγκιβωτισμού της διάταξης (2,07 kg)				
Τάση Λειτουργίας	40 volt	55 volt	70 volt	90 volt
Θερμοκρασία Δακτυλίου	62,9 °C	90,4 °C	116 °C	161,2 °C
Θερμοκρασία Νερού	47,3 °C	57,8 °C	67 °C	83,4 °C

Χρήση άμμου ως υλικό εγκιβωτισμού της διάταξης (2,35 kg)				
Τάση Λειτουργίας	40 volt	55 volt	70 volt	90 volt
Θερμοκρασία Δακτυλίου	60,9 °C	81,7 °C	108,8 °C	151 °C
Θερμοκρασία Νερού	46,9 °C	56,7 °C	65 °C	76,8 °C

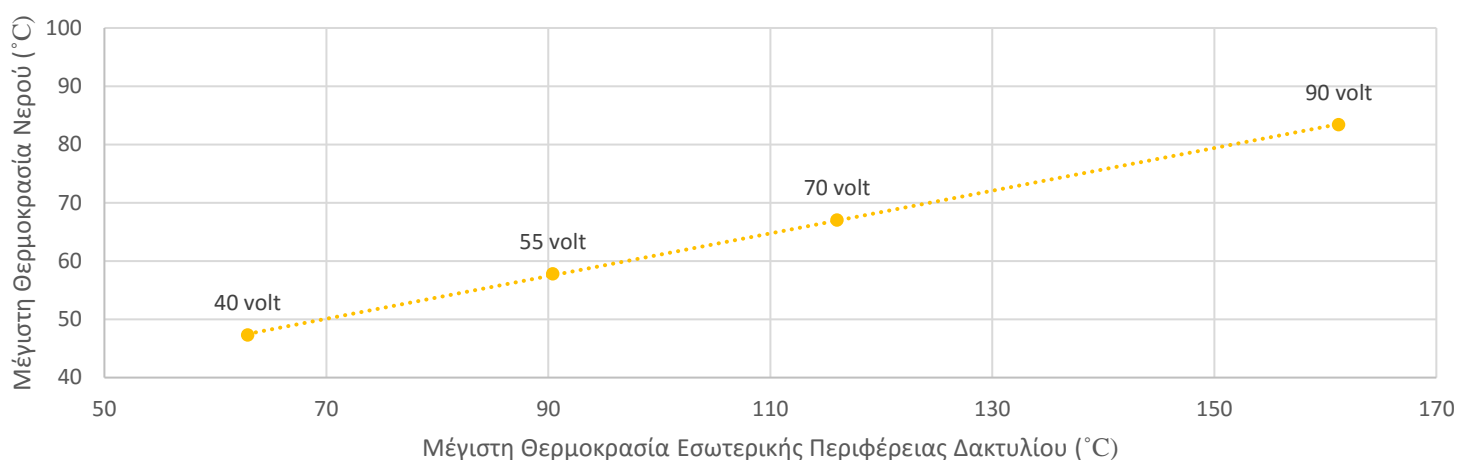
Χρήση μείγματος άμμου – μετάλλου (50% κ.β.) ως υλικό εγκιβωτισμού της διάταξης (3,61 kg)				
Τάση Λειτουργίας	40 volt	55 volt	70 volt	90 volt
Θερμοκρασία Δακτυλίου	58,8 °C	77 °C	104,5 °C	141,1 °C
Θερμοκρασία Νερού	47,7 °C	52,2 °C	63,9 °C	79,2 °C

Χρήση μείγματος άμμου – μετάλλου (67% κ.β.) ως υλικό εγκιβωτισμού της διάταξης (4,12 kg)				
Τάση Λειτουργίας	40 volt	55 volt	70 volt	90 volt
Θερμοκρασία Δακτυλίου	62 °C	84 °C	113,4 °C	152,3 °C
Θερμοκρασία Νερού	49,9 °C	56,1 °C	67,6 °C	84,6 °C

Σημείωση: Στους παραπάνω πίνακες για λόγους ομοιογένειας δε συμπεριελήφθησαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων όταν η τάση λειτουργίας της αντίστασης είναι 105 volt, διότι πραγματοποιήθηκαν μόνο με το κονίαμα σκυροδέματος και το μείγμα με την επαυξημένη περιεκτικότητα σε μέταλλο. Παρουσιάζονται όμως στις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

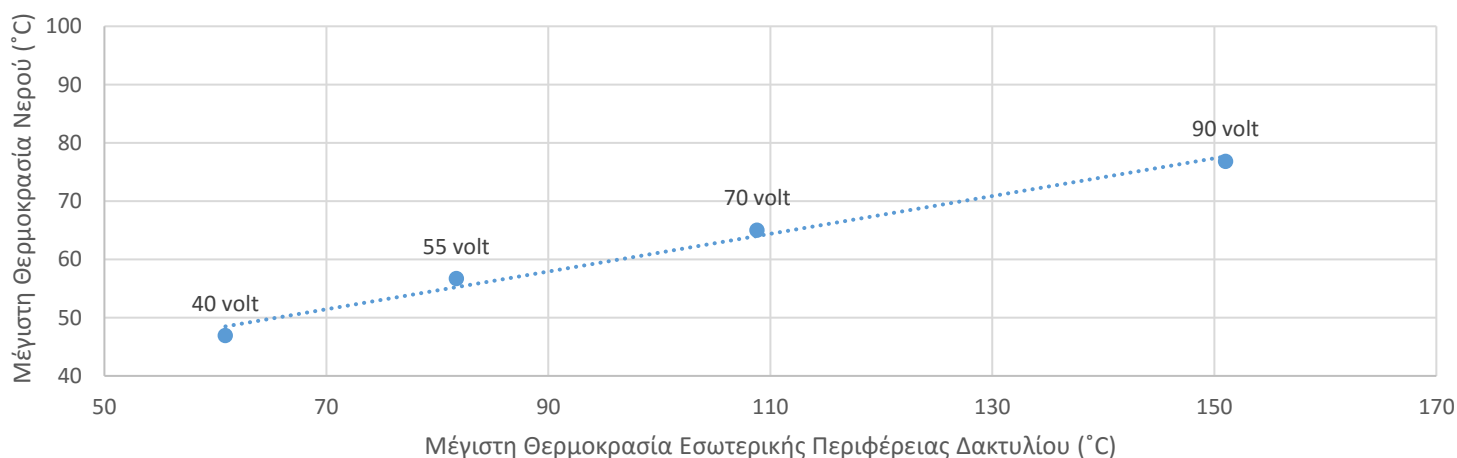
Εάν οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας της εσωτερικής περιφέρειας των δακτυλίων και του νερού αποτελέσουν σημεία γραφικών παραστάσεων της θερμοκρασίας του νερού (εντός του μονωμένου θερμικά αποθηκευτικού χώρου) συναρτήσει της θερμοκρασίας των δακτυλίων, προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα. Όπως ήταν αναμενόμενο η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων που σχηματίζεται από τα σημεία έχει αύξουσα συμπεριφορά καθώς όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας των δακτυλίων, αντίστοιχα αυξάνεται και η θερμοκρασία του νερού.

Κονίαμα Σκυροδέματος (2,07 kg)



Γραφική Παράσταση 4.1.1 Μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας του νερού και της εσωτερικής επιφάνειας του δακτυλίου, όταν ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται κονίαμα σκυροδέματος.

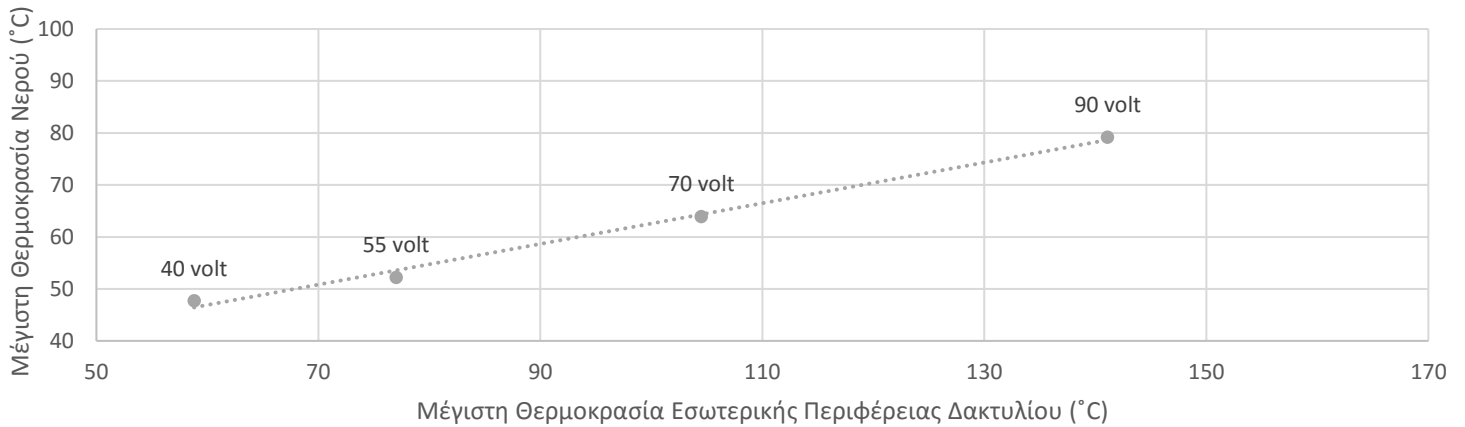
Άμμος (2,35 kg)



Γραφική Παράσταση 4.1.2 Μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας του νερού και της εσωτερικής επιφάνειας του δακτυλίου, όταν ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται άμμος.

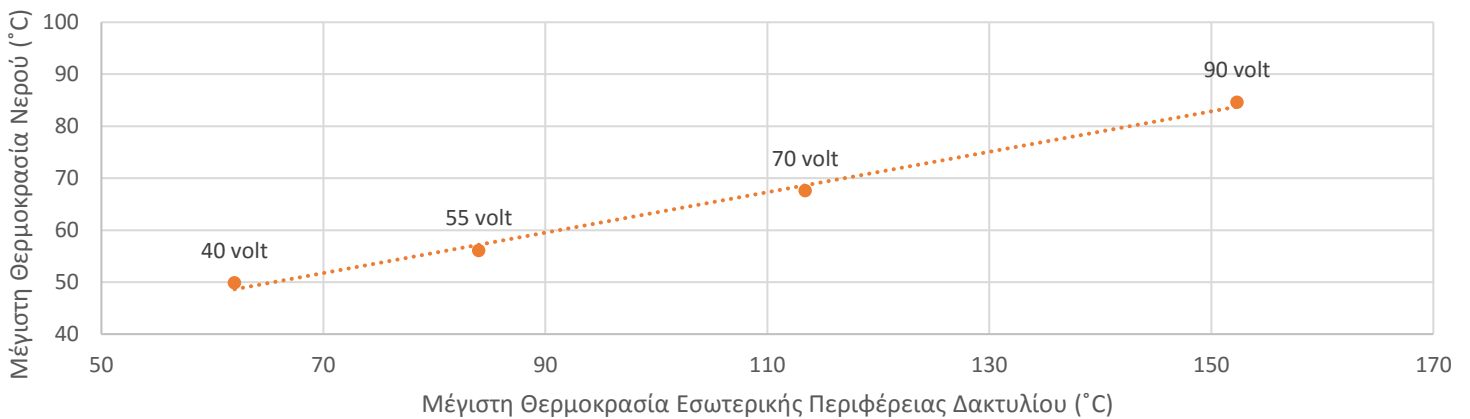


### Μείγμα Άμμου - Μετάλλου 50% κ.β. (3,61 kg)



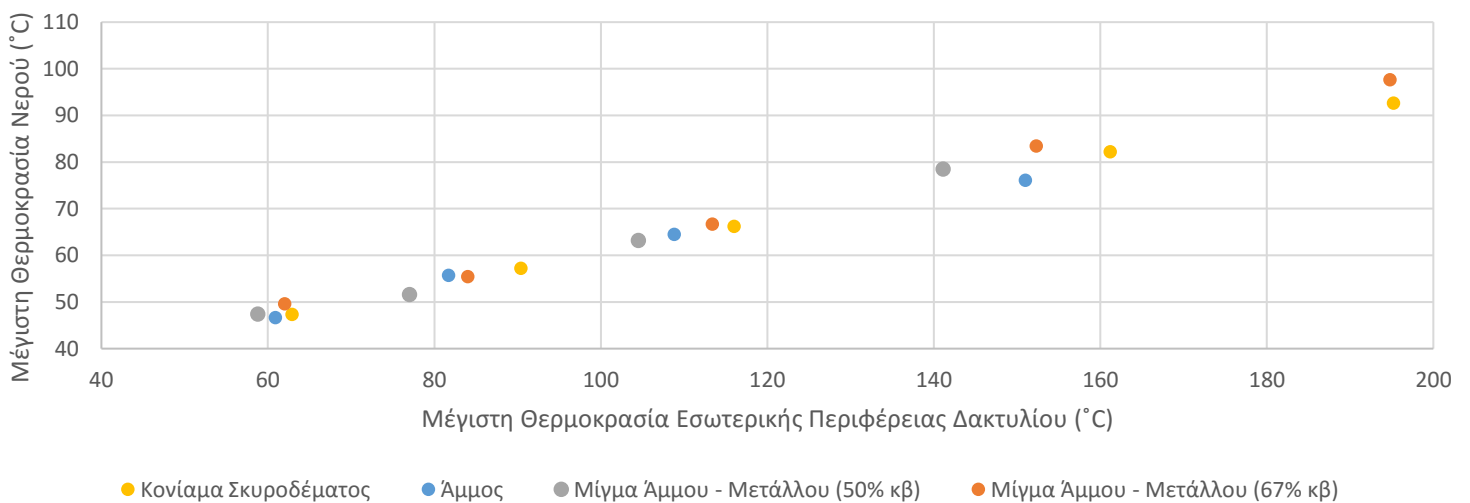
Γραφική Παράσταση 4.1.3 Μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας του νερού και της εσωτερικής επιφάνειας του δακτυλίου, όταν ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται μείγμα άμμου – μετάλλου 50% κ.β.

### Μείγμα Άμμου - Μετάλλου 67% κ.β. (4,12 kg)



Γραφική Παράσταση 4.1.4 Μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας του νερού και της εσωτερικής επιφάνειας του δακτυλίου, όταν ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται μείγμα άμμου – μετάλλου 67% κ.β.

### Θερμοκρασία Νερού συναρτήσει Θερμοκρασίας Δακτυλίου



Γραφική Παράσταση 4.1.5 Συγκεντρωτικό διάγραμμα με τα σημεία των μέγιστων θερμοκρασιών για κάθε υλικό. Περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων όταν εφαρμόζονται 105 volt στα άκρα της αντίστασης.

Παρατηρούμε ότι στη γραφική παράσταση 4.1.5 υπάρχει απόκλιση από μια νοητή ευθεία 45 μοιρών που θα μπορούσε να ενώσει τα πειραματικά σημεία και τούτο διότι υπάρχουν απώλειες κατά την κυκλοφορία του νερού από το χώρο του συστήματος του γεωεναλλάκτη στο χώρο αποθήκευσης του νερού. Η μέγιστη απώλεια είναι στην περιοχή του ηλεκτρικού κυκλοφορητή. Επίσης παρατηρούμε ότι για υψηλές θερμοκρασίες τοιχωμάτων η διαφορά θερμοκρασίας του νερού είναι ένας παράγοντας της τάξεως του δύο (2) ή λίγο μεγαλύτερος και για χαμηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 40 βαθμών είναι σχετικά κοντά στη μονάδα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ηλεκτρικός κυκλοφορητής έχει αυξημένες απώλειες, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού. Αυτό που μπορούμε να πούμε είναι ότι το «θερμικό φορτίο» της πειραματικής διάταξης του προσομοιωτή αποτελείται από τα διάφορα υποσυστήματα του κυκλώματος του νερού και της αποθήκευσής του παρουσιάζοντας απώλειες που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του νερού (κυρίως λόγω του κυκλοφορητή).

Όπως διακρίνεται και στην προηγούμενη γραφική παράσταση (4.1.5), όσο αυξάνεται η εφαρμοζόμενη τάση στην αντίσταση τόσο οι αντίστοιχες θερμοκρασίες έχουν την τάση να διακριτοποιούνται. Σε χαμηλή τάση λειτουργίας (40 volt), που συνεπάγεται και χαμηλότερες θερμοκρασίες παρατηρείται η ομαδοποίηση σε μια περιοχή των θερμοκρασιών, για τα επιμέρους υλικά εγκιβωτισμού της διάταξης. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην περίπτωση που η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα της αντίστασης είναι πολύ μεγαλύτερη (105 volt), γεγονός που καταδεικνύει τα άνω όρια πειραματισμού με τη διάταξη του γεωεναλλάκτη. Όταν η θερμοκρασία στα εσωτερικά τοιχώματα των δακτυλίων αυξηθεί πάρα πολύ, το νερό που κυκλοφορεί στο δίκτυο των σωληνώσεων αγγίζει θερμοκρασίες βρασμού. Παρόλη την υψηλή θερμοκρασία των τοιχωμάτων το νερό δεν μπορεί να αλλάξει φάση αφού περιορίζεται λόγω της κατασκευής, που δεν μπορεί να υποστηρίξει αέρια. Το νερό που κοχλάζει στη δεξαμενή και αγγίζει στιγμιαία τους 100°C, υγροποιείται αμέσως μόλις έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα της δεξαμενής και επιστρέφει στη δεξαμενή. Όσον αφορά τα πειράματα με τάση 105 volt, έγιναν μόνο δύο από τα τέσσερα πειράματα για λόγους προστασίας της κατασκευής.

Στις ενδιάμεσες τάσεις λειτουργίας της αντίστασης (55, 70 και 90 volt) οι θερμοκρασίες είναι περισσότερο διακριτές και δεν συγκεντρώνονται σε μια περιοχή. Ο λόγος που είναι περισσότερο διακριτές δεν είναι αποτέλεσμα των μέγιστων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο νερό, οι οποίες αν και διαφορετικές είναι σχετικά κοντινές. Η διαφοροποίηση τους οφείλεται κυρίως στις μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην εσωτερική επιφάνεια του δακτυλίου. Δηλαδή ενώ οι θερμοκρασίες του νερού δε διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό, οι αντίστοιχες θερμοκρασίες της περιφέρειας του δακτυλίου διαφέρουν αρκετά, για την ίδια πάντα τάση λειτουργία της αντίστασης.

Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στα διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τον εγκιβωτισμό των σωληνώσεων της διάταξης, καθώς είναι η μόνη παράμετρος που διαφοροποιεί τα πειράματα μεταξύ τους. Κάποια υλικά αξιοποιούν την ενέργεια που παρέχεται από την αντίσταση με τη μορφή θερμότητας με αποδοτικότερο τρόπο, ενώ κάποια άλλα δεν το καταφέρνουν στον ίδιο βαθμό.

Τα υλικά εγκιβωτισμού διαφέρουν μεταξύ τους στην ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για να προκληθεί μια δοσμένη ανύψωση της θερμοκρασίας σε μια δοσμένη μάζα. Ο λόγος της θερμότητας  $\Delta Q$  που προσφέρεται σε ένα σώμα προς την αντίστοιχη ανύψωση της θερμοκρασίας  $\Delta T$  (για διαφορά ενός βαθμού) λέγεται θερμοχωρητικότητα  $C$  του σώματος δηλαδή:

$$C = \text{θερμοχωρητικότητα} = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

Η λέξη «χωρητικότητα» μπορεί να είναι παραπλανητική γιατί φανερώνει την, ουσιαστικά, χωρίς νόημα φράση «το ποσό της θερμότητας που μπορεί να συγκρατήσει ένα σώμα», ενώ απλώς εννοούμε τη θερμότητα που απαιτείται για κάθε μονάδα ανόδου της θερμοκρασίας. [1]

Η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας ενός σώματος, ονομάζεται ειδική θερμότητα και υπολογίζεται ως εξής:

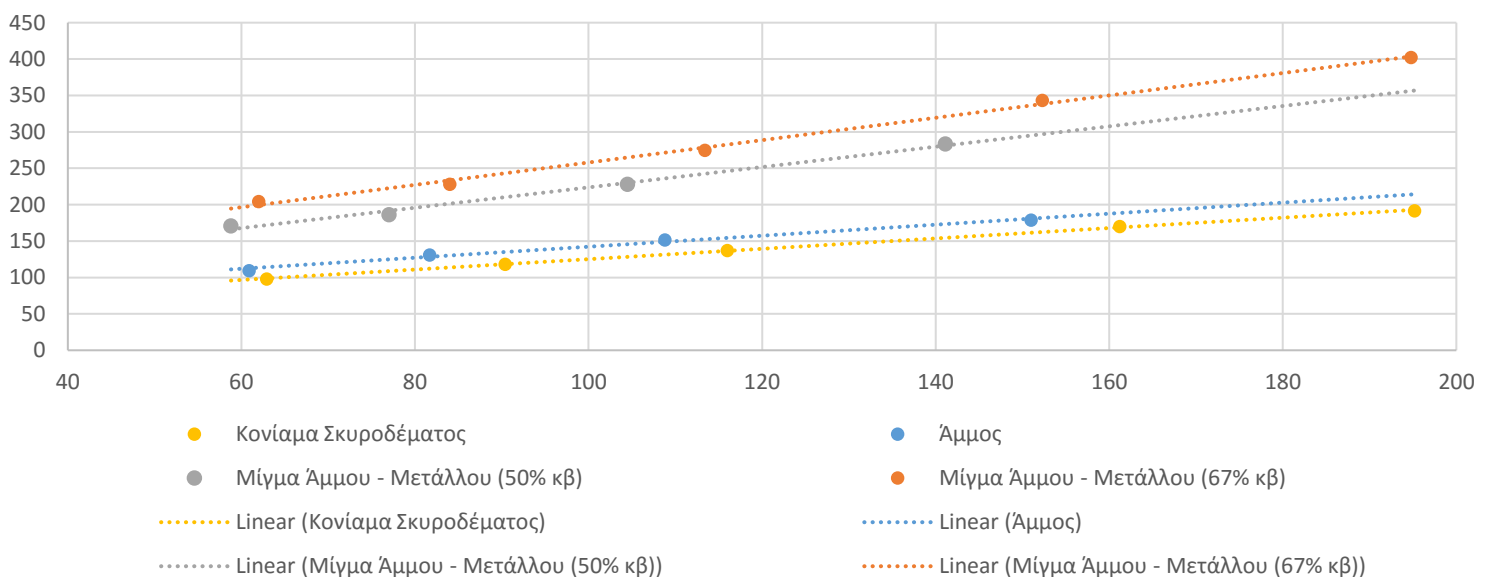
$$c = \frac{\text{θερμοχωρητικότητα}}{\text{μάζα}} = \frac{\Delta Q}{m\Delta T}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις δεν ορίζουν την ειδική θερμότητα μονοσήμαντα. Πρέπει επίσης να καθορίζονται και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες η θερμότητα  $\Delta Q$  προστίθεται στο δείγμα. Μία συνηθισμένη συνθήκη είναι να παραμένει το δείγμα σε σταθερή ατμοσφαιρική πίεση καθώς παρέχεται η θερμική ενέργεια. Κάθε φορά που ορίζεται μια τιμή για την ειδική θερμότητα πρέπει να αναφέρονται και οι συνθήκες που αφορούν το όγκο, την πίεση κτλ. Του δείγματος. [1, 2]

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων με την πειραματική διάταξη προσομοίωσης του γεωεναλλάκτη θερμότητας η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα της αντίστασης καθώς και η ένταση του διαρρέοντος ηλεκτρικού ρεύματος ήταν σταθερές ενώ το υλικό πλήρωσης της διάταξης εναλλασσόταν. Είναι ασφαλές να υποθεθεί ότι η παρεχόμενη θερμότητα  $\Delta Q$  στη διάταξη ήταν η ίδια για τις αντίστοιχες τιμές της τάσης ενώ το υλικό πλήρωσης άλλαζε. Αυτό συμβαίνει και με τις απώλειες της θερμότητας αφού τα πειράματα εκτελέστηκαν σε παρόμοιο περιβάλλον.

Η παρεχόμενη θερμότητα διατηρείται σταθερή, άρα ο κρίσιμος παράγοντας στην εξίσωση της ειδικής θερμότητας είναι ο παρονομαστής. Συγκεκριμένα ο όρος της μάζας, που στην περίπτωση της διάταξης αναφέρεται στη μάζα του υλικού πλήρωσης, είναι το κύριο στοιχείο της διαφοροποίησης της συμπεριφοράς των υλικών. Πολλαπλασιάζοντας τη θερμοκρασία με τη μάζα στη γραφική παράσταση 4.1.6 προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.

Διάγραμμα T·m



Γραφική Παράσταση 4.1.6 Το γραφικό αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της παράστασης 4.1.5 με την αντίστοιχη μάζα για κάθε υλικό πλήρωσης της διάταξης.

Ο όρος της μάζας στο παραπάνω διάγραμμα έχει πολλαπλασιαστεί με τη θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή, ενώ η αναφορά γίνεται για τη θερμοκρασία των υλικών πλήρωσης της διάταξης. Αυτή η παράβλεψη όμως δεν αλλοιώνει το ποιοτικό αποτέλεσμα της γραφικής παράστασης καθώς η θερμοκρασία στο κέντρο της γεώτρησης είναι κάθε φορά ελαφρώς υψηλότερη από αυτή του νερού στη δεξαμενή, παρατήρηση που είναι καθολική για όλα τα πειράματα που εκτελέστηκαν με την πρώτη διάταξη που κατασκευάστηκε.

Ο ρόλος της μάζας του υλικού πλήρωσης είναι κρίσιμος. Όσο βαρύτερο είναι το υλικό (ή το μείγμα) πλήρωσης της γεώτρησης, τόσο υψηλότερο είναι το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού του με τη θερμοκρασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ειδική θερμότητα να μειώνεται καθώς αυξάνεται η μάζα ενώ η παρεχόμενη θερμότητα παραμένει σταθερή. Συνοψίζοντας, όσο βαρύτερο είναι το υλικό εγκιβωτισμού των σωληνώσεων τόσο χαμηλότερη είναι η θερμοχωρητικότητά του ανά μονάδα μάζας. Δηλαδή απαιτείται λιγότερη θερμότητα ανά μονάδα μάζας ώστε να προκληθεί η άνοδος της θερμοκρασίας.

Οι φυσικές ιδιότητες των υλικών πλήρωσης είναι εξίσου σημαντικές. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του μείγματος σε μέταλλο, που είναι εν γένει καλός αγωγός, η θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή αυξάνεται περισσότερο. Ταυτόχρονα όμως, η θερμοκρασία των εσωτερικών τοιχωμάτων είναι μικρότερη σε σχέση με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται όταν τα υλικά πλήρωσης δεν περιέχουν μέταλλο. Προφανώς όσο πιο αγωγίμο είναι το υλικό που χρησιμοποιείται στη γεώτρηση τόσο πιο εύκολα απορροφά την προσφερόμενη θερμότητα. Ο κατάλληλος συνδυασμός της πυκνότητας του υλικού στη γεώτρηση με τις φυσικές του ιδιότητες μπορεί να οδηγήσει σε ένα αποδοτικότερο αποτέλεσμα. Αυτός είναι ο λόγος που το μείγμα με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε μέταλλο συμπεριφέρεται καλύτερα σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά.

## *4.2 Διάταξη ελέγχου της θερμικής συμπεριφοράς των υλικών πλήρωσης*

Στη δεύτερη διάταξη γίνεται σύγκριση της θερμικής συμπεριφοράς των υλικών χωρίς της παρουσία του κυκλώματος των σωληνώσεων και του νερού. Ως εκ τούτου, οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στη διάταξη είναι υψηλότερες καθώς η προσφερόμενη θερμότητα από την ηλεκτρική αντίσταση μεταδίδεται χωρίς να υφίστανται απώλειες λόγω της κυκλοφορίας του νερού. Επειδή οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι υψηλότερες για τις αντίστοιχες εφαρμοζόμενες τάσεις λειτουργίας, δεν πραγματοποιήθηκαν πειράματα με τάση 90 volt για λόγους προστασίας της κατασκευής. Στη μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας βοηθά και το γεγονός ότι στην παρούσα πειραματική διάταξη δεν υπάρχουν σημαντικές απώλειες θερμότητας όπως στην προηγούμενη πειραματική διάταξη λόγω απουσίας του κυκλώματος νερού.

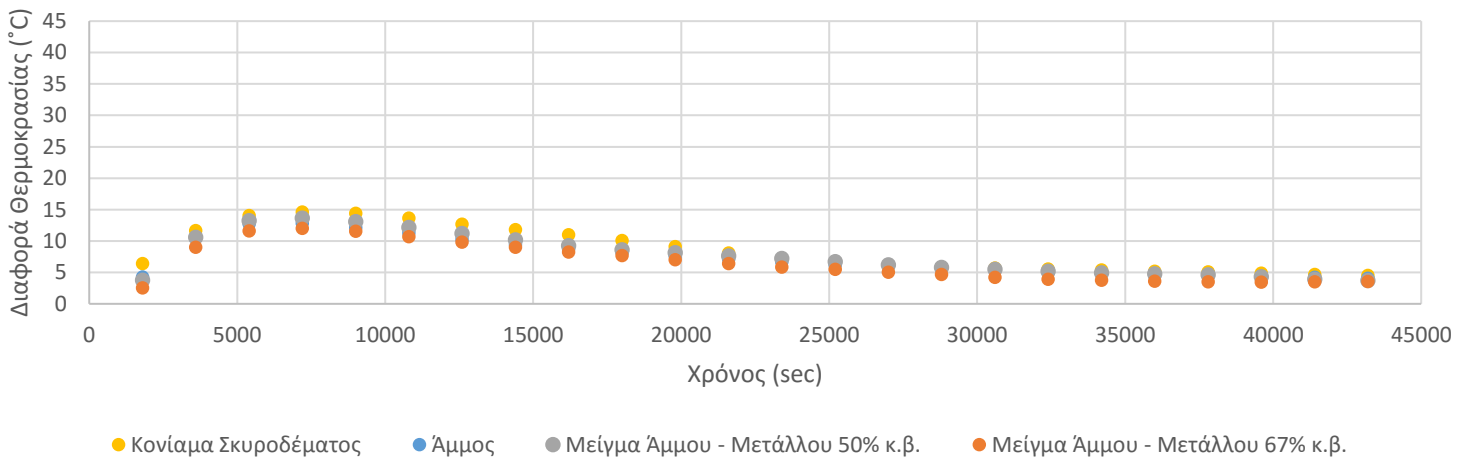
Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, στη συγκεκριμένη διάταξη γίνεται μέτρηση της θερμοκρασίας κατά μήκος της ακτίνας της γεώτρησης. Επίσης η θερμοκρασία μετριέται σε δύο επιπλέον σημεία ένα υψηλότερα και ένα χαμηλότερα από εκείνα που είναι κατά μήκος της ακτίνας. Το πρώτο θερμοζεύγος των διατεταγμένων σε σειρά εφάπτεται στην εσωτερική πλευρά του δακτυλίου. Η θερμοκρασία του σημείου αυξάνεται πολύ γρήγορα σε σχέση με τη θερμοκρασία στα υπόλοιπα σημεία αφού βρίσκεται κοντύτερα στην πηγή της θερμότητας. Όσο απομακρυνόμαστε από την περιφέρεια του δακτυλίου και συγκλίνουμε στο κέντρο της γεώτρησης ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας ελαττώνεται. Από κάποιο χρονικό σημείο και έπειτα ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας των σημείων τείνει να μηδενιστεί και οι διαφορές των θερμοκρασιών μεταξύ των σημείων παραμένουν πλέον σταθερές. Ο χρόνος που απαιτείται για τη σταθεροποίηση των διαφορών εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα της αντίστασης, δηλαδή από το μέγεθος της θερμικής ενέργειας που προσφέρεται στο σύστημα.



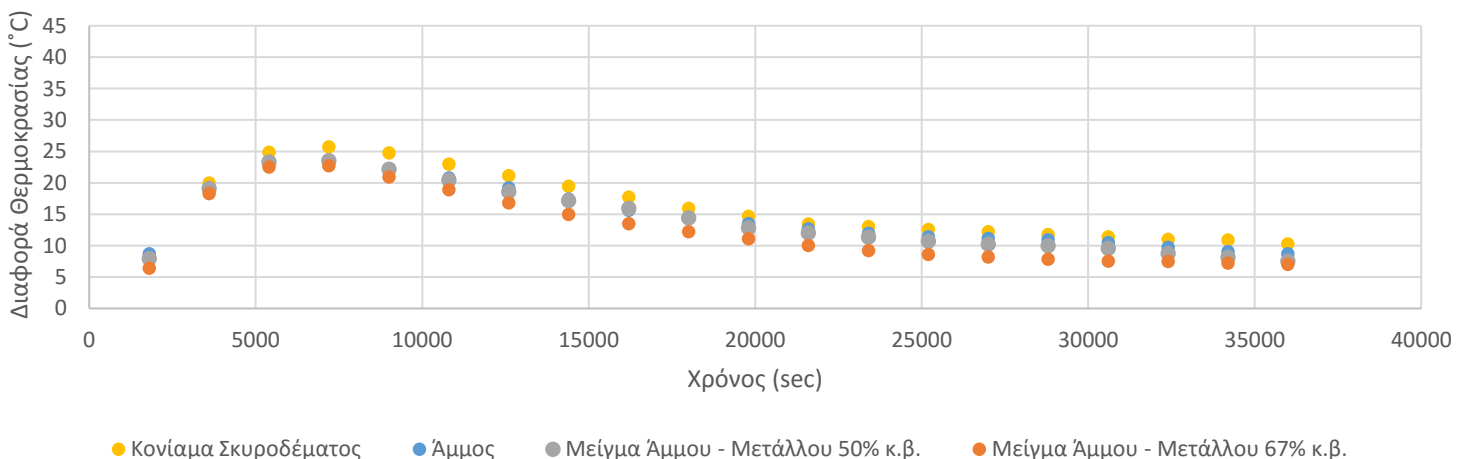
Η θερμοκρασία του θερμοζεύγους που είναι βυθισμένο λιγότερο στη γεώτρηση είναι αισθητά χαμηλότερη από εκείνου που βρίσκεται στην αντίστοιχη θέση, διατεταγμένο κατά μήκος της ακτίνας. Αυτή η διαφορά της θερμοκρασίας καθ' ύψος υποδηλώνει ότι αρκετή θερμότητα μεταδίδεται στο περιβάλλον από το άνω μέρος της διάταξης. Η παρατήρηση αυτή είναι καθολική για όλα τα πειράματα με τη δεύτερη διάταξη, καθώς η αντίστοιχη καμπύλη της θερμοκρασίας σε εκείνο το σημείο είναι χαμηλότερα από τις υπόλοιπες. Επίσης το σημείο αυτό απέχει από την εσωτερική περιφέρεια του δακτυλίου και βρίσκεται κοντύτερα στο κέντρο της γεώτρησης, έχοντας δεδομένη μια χαμηλότερη θερμοκρασία.

Παρόμοια είναι και η συμπεριφορά στο σημείο πιο κάτω από τα διατεταγμένα θερμοζεύγη. Εκείνο το σημείο είναι αντίστοιχο με το δεύτερο σε σειρά θερμοζεύγος, είναι κοντύτερα στην εσωτερική περιφέρεια του δακτυλίου. Η θερμοκρασία του είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του αντίστοιχου διατεταγμένου. Άρα υφίστανται απώλειες θερμότητας από τη βάση της διάταξης, οι οποίες όμως είναι μικρότερες σε σχέση με τις απώλειες από το άνω μέρος της διάταξης. Η ύπαρξη της βάσης από σκυρόδεμα όπου στηρίζεται η συναρμολογημένη διάταξη των δακτυλίων εμποδίζει σε κάποιο βαθμό τη μετάδοση της θερμότητας.

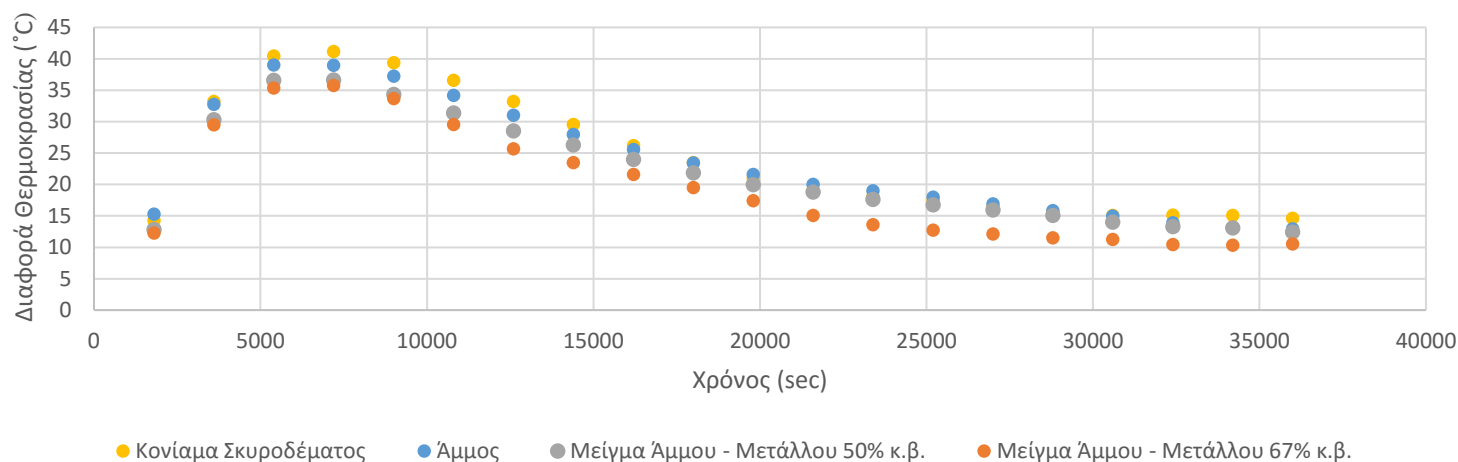
Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις με τη διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής περιφέρειας και του κέντρου της γεώτρησης καθώς εξελίσσεται το πείραμα, μέχρι τη στιγμή που απενεργοποιείται η ηλεκτρική αντίσταση. Η τάση λειτουργίας της αντίστασης αλλάζει, ως εκ τούτου και η παρεχόμενη θερμότητα, αλλά η συμπεριφορά των υλικών είναι παρόμοια.



Γραφική Παράσταση 4.2.1 Η θερμοκρασιακή διαφορά όταν η τάση στα άκρα της αντίστασης είναι 40 volt.



Γραφική Παράσταση 4.2.2 Η θερμοκρασιακή διαφορά όταν η τάση στα άκρα της αντίστασης είναι 55 volt.



Γραφική Παράσταση 4.2.3 Η θερμοκρασιακή διαφορά όταν η τάση στα άκρα της αντίστασης είναι 70 volt.

Τάση 40 volt – Λειτουργία αντίστασης για 43200 sec (12 ώρες)				
Υλικό Εγκιβωτισμού	Θερμοκρασία Εσωτερικής Περιφέρειας (°C)	Θερμοκρασία Κέντρου (°C)	Διαφορά ΔΤ (°C)	Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)
Κονίαμα Σκυροδέματος	88,67	84,10	4,57	84,3 (43868 sec)
Άμμος	84,56	80,46	4,10	80,58 (44340 sec)
Μείγμα με συγκέντρωση μετάλλου 50% κ.β.	83,34	79,60	3,74	79,71 (44088 sec)
Μείγμα με συγκέντρωση μετάλλου 67% κ.β.	81,94	78,37	3,57	78,82 (44962 sec)
Τάση 55 volt – Λειτουργία αντίστασης για 36000 sec (10 ώρες)				
Υλικό Εγκιβωτισμού	Θερμοκρασία Εσωτερικής Περιφέρειας (°C)	Θερμοκρασία Κέντρου (°C)	Διαφορά ΔΤ (°C)	Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)
Κονίαμα Σκυροδέματος	133,91	123,61	10,3	124,88 (37958 sec)
Άμμος	129,24	120,52	8,72	121,54 (37780 sec)
Μείγμα με συγκέντρωση μετάλλου 50% κ.β.	126,49	118,96	7,53	119,52 (37890 sec)
Μείγμα με συγκέντρωση μετάλλου 67% κ.β.	124,72	117,70	7,02	118,58 (37540 sec)
Τάση 70 volt – Λειτουργία αντίστασης για 36000 sec (10 ώρες)				
Υλικό Εγκιβωτισμού	Θερμοκρασία Εσωτερικής Περιφέρειας (°C)	Θερμοκρασία Κέντρου (°C)	Διαφορά ΔΤ (°C)	Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)
Κονίαμα Σκυροδέματος	188,33	173,73	14,60	174,29 (36954 sec)
Άμμος	186,86	173,94	12,92	174,88 (37424 sec)
Μείγμα με συγκέντρωση μετάλλου 50% κ.β.	181,10	168,69	12,41	169,69 (37646 sec)
Μείγμα με συγκέντρωση μετάλλου 67% κ.β.	178,32	167,80	10,52	168,54 (37486 sec)

Στον προηγούμενο πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας τη στιγμή απενεργοποίησης της ηλεκτρικής αντίστασης. Συνδυάζοντας τα δεδομένα του πίνακα με αυτά των γραφικών παραστάσεων παραπάνω προκύπτει ότι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην περιφέρεια και το κέντρο της γεώτρησης διαφοροποιείται ανάλογα με το υλικό πλήρωσης της γεώτρησης. Επίσης καθώς η τάση αυξάνεται η θερμοκρασιακή διαφορά αυξάνει και αυτή διότι οι δακτύλιοι σκυροδέματος είναι πλέον πολλοί θερμοί και στην εσωτερική τους περιφέρεια αναπτύσσεται μεγάλη θερμοκρασία.

Όταν ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται το κονίαμα παρασκευής των δακτυλίων η θερμοκρασιακή διαφορά είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα άλλα υλικά. Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα στο συγκεκριμένο υλικό δε μεταδίδεται με την ίδια ευκολία που μεταδίδεται στα υπόλοιπα υλικά. Η χρήση της άμμου έχει καλύτερα αποτελέσματα καθώς η θερμοκρασιακή διαφορά είναι μικρότερη γεγονός που υποδεικνύει ότι είναι αποδοτικότερη σε σχέση με το κονίαμα. Η προσθήκη μετάλλου στην άμμου δημιουργεί ένα μείγμα με ακόμη καλύτερα χαρακτηριστικά. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του μετάλλου στο μείγμα η θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος της ακτίνας ελαττώνεται. Η χρήση ουσιών με χαρακτηριστικά καλού αγωγού θερμότητας στο μείγμα πλήρωσης της γεώτρησης, έχει αποτέλεσμα την αποδοτικότερη λειτουργία της πειραματικής διάταξης.

Παρόλα αυτά, η θερμοκρασία στο κέντρο της διάταξης είναι υψηλότερη με το κονίαμα σκυροδέματος, ενώ καθώς η συγκέντρωση του μετάλλου στο μείγμα αυξάνεται η θερμοκρασία στο κέντρο πέφτει. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς το μείγμα γίνεται πιο αγωγίμο αποβάλλει θερμότητα ευκολότερα στο περιβάλλον. Η θερμότητα αυτή κυρίως χάνεται από το άνω και κάτω μέρος της διάταξης αφού η διάταξη περιφερειακά καλύπτεται από την αντίσταση. Η παρατήρηση αυτή σε σχέση με την ανάλυση που προηγήθηκε επιβεβαιώνει την αποδοτικότερη λειτουργία του μείγματος του μετάλλου με την άμμο.

Η απενεργοποίηση της αντίστασης δε συνεπάγεται την άμεση πτώση της θερμοκρασίας στο κέντρο της διάταξης. Το υλικό εγκιβωτισμού συνεχίζει για κάποιο μικρό διάστημα να προσλαμβάνει θερμότητα από τα θερμά τοιχώματα καθώς αυτά σταδιακά ψύχονται. Σε όλα τα πειράματα που διενεργήθηκαν η θερμοκρασία στο κέντρο αποκτά τη μέγιστη τιμή της λίγο αργότερα και ενώ η ψύξη των τοιχωμάτων είναι σε εξέλιξη. Στην ουσία μετά την απενεργοποίηση της αντίστασης τα τοιχώματα αποβάλλουν θερμότητα κυρίως προς το περιβάλλον ενώ ένα μικρό μέρος αυτής της θερμότητας οδηγείται προς το κέντρο της διάταξης. Αυτό συμβαίνει όσο η θερμοκρασία της περιφέρειας είναι υψηλότερη από αυτήν του κέντρου. Μόλις όμως η περιφέρεια ψυχθεί αρκετά και η θερμοκρασία του κέντρου γίνει η υψηλότερη της διάταξης, ακολουθεί μια ομοιόμορφη ψύξη από το εσωτερικό προς το εξωτερικό της διάταξης. Αυτό συμβαίνει σε όλα τα πειράματα και για όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

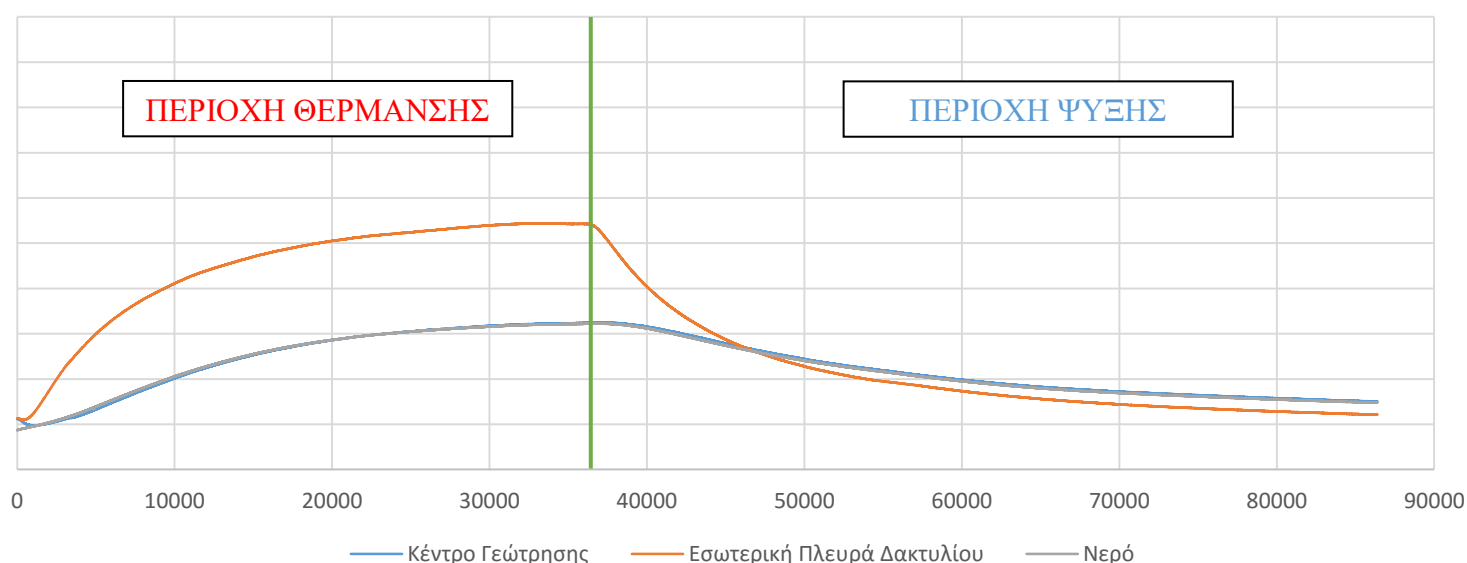
### *Βιβλιογραφία*

1. Halliday – Resnick, Φυσική, Εκδόσεις Πνευματικός
2. Young, Πανεπιστημιακή Φυσική, Εκδόσεις Παπαζήση

## Παράρτημα Α

### Εναλλακτικοί τρόποι πειραματισμού

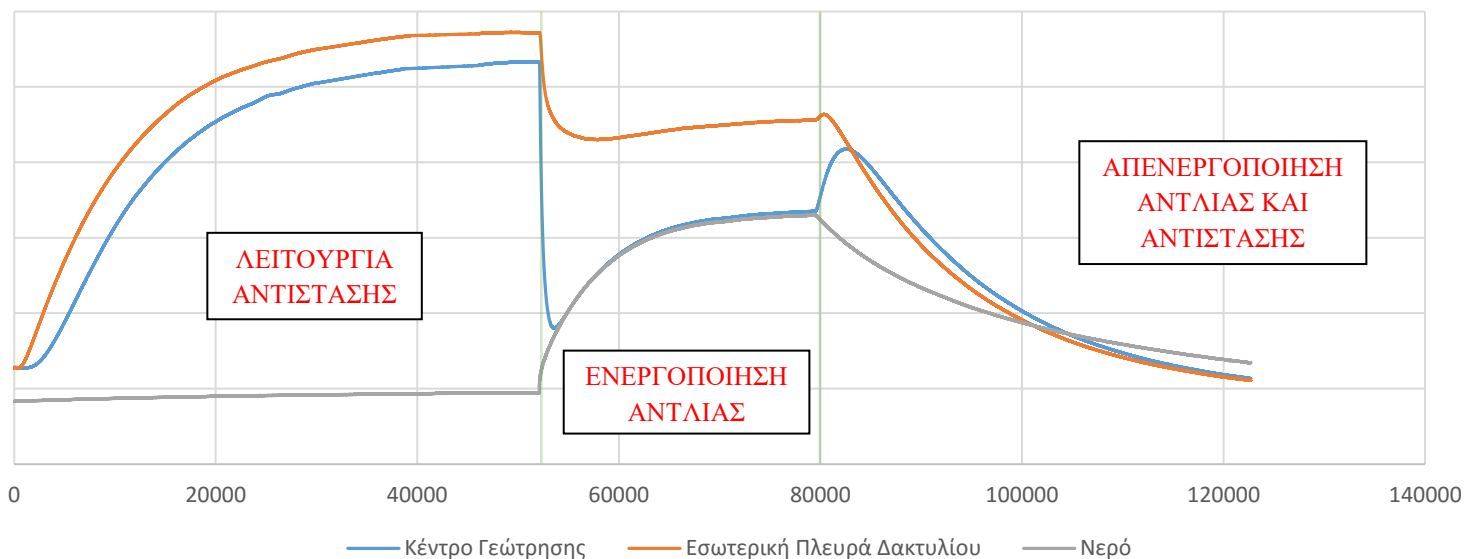
Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με την πειραματική διάταξη προσομοίωσης του γεωεναλλάκτη θερμότητας όπως παρουσιάζονται στην εργασία, εκτελούνται με την αντλία συνεχώς σε λειτουργία. Όταν η παροχή θερμότητας από την ηλεκτρική αντίσταση σταματήσει η θερμοκρασία σταδιακά μειώνεται. Οι γραφικές παραστάσεις των θερμοκρασιών σε συνάρτηση με το χρόνο συν συνιστούν δύο διακριτές περιοχές. Στην πρώτη περιοχή η ηλεκτρική αντίσταση θερμαίνει σταδιακά την κατασκευή έως ένα σημείο ισορροπίας, ενώ στη δεύτερη περιοχή η μορφή των καμπύλων αλλάζει καθώς η διάταξη σταδιακά ψύχεται. Ενδεικτικά παρουσιάζεται παρακάτω η γραφική παράσταση των καμπύλων της θερμοκρασίας για ένα από τα πειράματα με υλικό πλήρωσης της άμμο.



*Γραφική Παράσταση Α.1* Οι καμπύλες της θερμοκρασίας όταν η αντλία και αντίσταση λειτουργούν εξ αρχής. Όταν επέλθει θερμική ισορροπία η λειτουργία της αντίστασης διακόπτεται σχηματίζοντας τις δύο περιοχές.

Αυτή η διαδικασία εκτέλεσης των πειραμάτων ακολουθήθηκε για όλα τα υλικά και τις διαφορετικές τάσεις λειτουργίας. Υπάρχουν και εναλλακτικοί τρόποι εκτέλεσης των πειραμάτων, οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω. Ο παραπάνω τρόπος όμως ήταν ικανοποιητικότερος επειδή είναι γρηγορότερος, απλούστερος και η μορφή των καμπύλων που σχηματίζονται είναι περισσότερο λείες.

Ένας διαφορετικός τρόπος λειτουργίας της διάταξης επιτυγχάνεται θερμαίνοντας αρχικά τη διάταξη έως ένα σημείο ισορροπίας χωρίς την ταυτόχρονη λειτουργία της αντλίας. Όταν το σύστημα ισορροπήσει θερμικά ενεργοποιείται η αντλία και το πείραμα συνεχίζεται. Όταν επανέλθει η θερμική ισορροπία διακόπτεται η λειτουργία της αντίστασης και της αντλίας και το σύστημα σταδιακά ψύχεται. Το γραφικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας πειραματισμού παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Γραφική Παράσταση Α.2 Διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος με πιο πολύπλοκο τρόπο και δύο σημεία ισορροπίας.

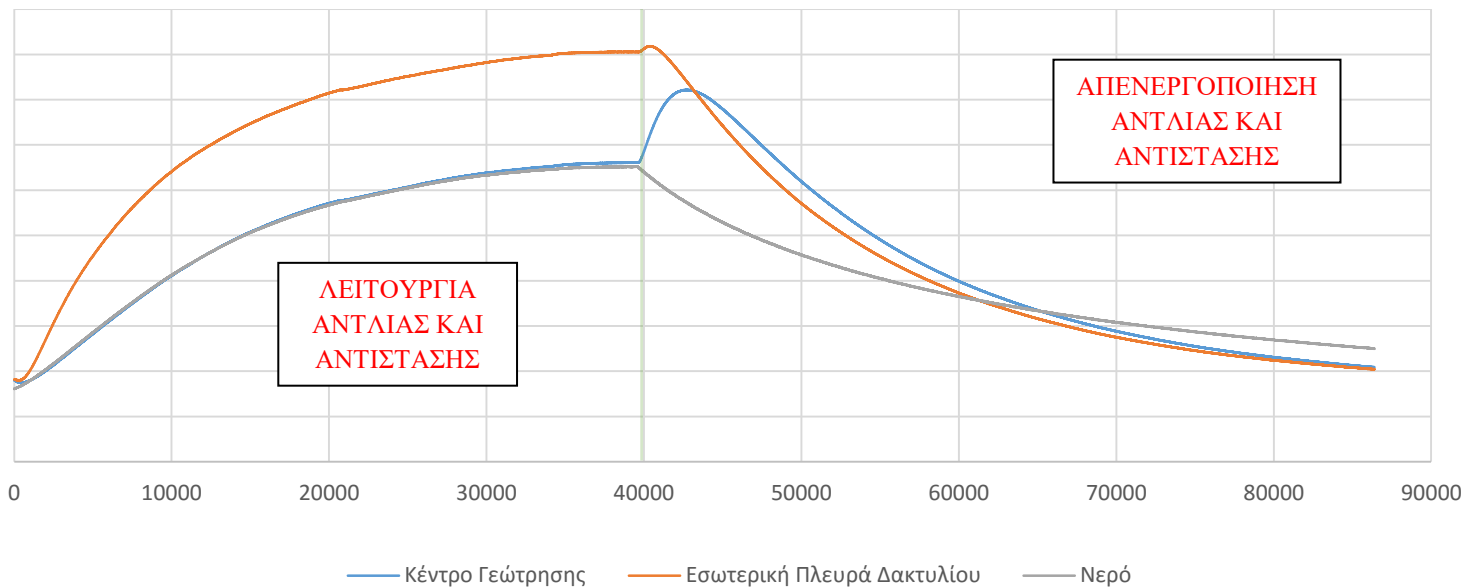
Αρχικά το νερό τοποθετείται στη δεξαμενή και παραμένει εκεί κατά τη θέρμανση της πειραματικής διάταξης του γεωεναλλάκτη. Η θερμοκρασία στην εσωτερική πλευρά του δακτυλίου αυξάνει σταδιακά. Ταυτόχρονα αυξάνεται και η θερμοκρασία στο κέντρο της γεώτρησης σε χαμηλότερο βεβαίως βαθμό. Με την πάροδο του χρόνου η καμπύλη της θερμοκρασίας σταθεροποιείται και το σύστημα τείνει να ισορροπήσει. Το νερό παραμένει στη δεξαμενή σε σταθερή θερμοκρασία.

Μόλις η αντλία ενεργοποιηθεί, το ψυχρό νερό ρέει από τη δεξαμενή στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη. Η ροή του νερού προκαλεί την απότομη πτώση της θερμοκρασίας στο κέντρο της γεώτρησης και την ταυτόχρονη άνοδο της θερμοκρασίας του νερού. Η θερμοκρασία στην εσωτερική περιφέρεια του δακτυλίου πέφτει επίσης καθώς η θερμότητα μεταδίδεται προς το νερό. Λίγο μετά την ενεργοποίηση της αντλίας η θερμοκρασία του νερού και του κέντρου της γεώτρησης απέχουν ελάχιστα. Φυσικά ελαφρώς υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του κέντρου της γεώτρησης. Η λειτουργία της αντλίας και της αντίστασης συνεχίζεται έως ότου το σύστημα ισορροπήσει σε νέο σημείο χαμηλότερης θερμοκρασίας από το πρώτο.

Στο δεύτερο σημείο ισορροπίας η λειτουργία της αντίστασης και της αντλίας διακόπτεται. Η θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή ακολουθεί πλέον πτωτική πορεία. Η καμπύλη της θερμοκρασίας στο κέντρο της γεώτρησης αρχικά αυξάνεται καθώς δέχεται θερμότητα από τα θερμά τοιχώματα των δακτυλίων και του υπολοίπου υλικού του γεωεναλλάκτη χωρίς να υφίσταται πλέον ο περιοριστικός παράγοντας της ροής του νερού. Σε πολύ μικρότερο βαθμό το ίδιο συμβαίνει και στην θερμοκρασία της εσωτερικής πλευράς του δακτυλίου. Μόλις η ροή του νερού σταματήσει η θερμοκρασία των εσωτερικών τοιχωμάτων αυξάνεται ελαφρώς λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας στην εξωτερική περιφέρεια των δακτυλίων. Αυτή η αύξηση φυσικά διαρκεί ελάχιστα καθώς η αντίσταση έχει απενεργοποιηθεί. Οι καμπύλες στη συνέχεια ακολουθούν φθίνουσα πορεία καθώς η θερμότητα του συστήματος αποδίδεται στο περιβάλλον. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι πολύ σημαντική διότι μας επέτρεψε να βεβαιωθούμε για την ορθή θερμοδυναμική λειτουργία της πειραματικής διάταξης προσομοίωσης δεδομένου ότι διαπιστώθηκε η μεταφορά θερμότητας από τον εξωτερικό μανδύα – χιτώνιο μέχρι τη δεξαμενή αποθήκευσης του νερού όπως θα περίμενε κανείς βάσει των κανόνων της θερμοδυναμικής.



Ένας ακόμη τρόπος εκτέλεσης του πειράματος είναι ο παρακάτω. Η αντλία και η αντίσταση λειτουργούν ταυτόχρονα από την αρχή έως ότου το σύστημα ισορροπήσει θερμικά. Σε εκείνο το σημείο η λειτουργία της αντλίας και της αντίστασης διακόπτεται και η διάταξη σταδιακά ψύχεται. Το αποτέλεσμα των καμπύλων παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα.



*Γραφική Παράσταση Α.3 Εναλλακτικός τρόπος εκτέλεσης του πειράματος.*

Ενεργοποιώντας την αντίσταση θερμαίνονται οι δακτύλιοι και η θερμοκρασία της εσωτερικής του πλευράς σταδιακά αυξάνεται. Με παρόμοιο τρόπο αυξάνεται και η θερμοκρασία του υλικού εγκιβωτισμού του κυκλώματος των σωληνώσεων. Η ταυτόχρονη λειτουργία της αντλίας οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του νερού με τον ίδιο ρυθμό που αυξάνεται η θερμοκρασία στο κέντρο της γεώτρησης. Το πείραμα συνεχίζεται μέχρι την επίτευξη θερμικής ισορροπίας.

Η ταυτόχρονη απενεργοποίηση της αντίστασης και της αντλίας οδηγούν στην άμεση πτώση της θερμοκρασίας του νερού στη δεξαμενή. Η θερμοκρασία του κέντρου και της εσωτερικής περιφέρειας προσωρινά αυξάνεται για τους ίδιους λόγους που εξηγήθηκαν προηγουμένως, έπειτα το σύστημα σταδιακά ψύχεται. Αυτός ο τρόπος πειραματισμού μοιάζει με τον προηγούμενο εάν εξαιρεθεί το πρώτο σημείο ισορροπίας. Αντίστοιχα, και με αυτή τη σειρά των πειραμάτων επιβεβαιώθηκε η ορθή θερμοδυναμική λειτουργία της πειραματικής διάταξης που αναπτύξαμε.

## Παράρτημα Β

### *Εναλλακτικοί τρόποι θέρμανσης της διάταξης*

Η διάταξη των δακτυλίων θερμαίνεται με την ηλεκτρική αντίσταση που περιβάλλει σαν μανδύας όλη την κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατή η παροχή της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας για την αύξηση της θερμότητας στον προσομοιωτή και πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα που παρουσιάστηκαν. Παρόλα αυτά στην αρχή έγινε προσπάθεια θέρμανσης της διάταξης διαφορετικά με χρήση επαγωγικών ρευμάτων για την αύξηση της θερμοκρασία χρησιμοποιώντας την αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή..

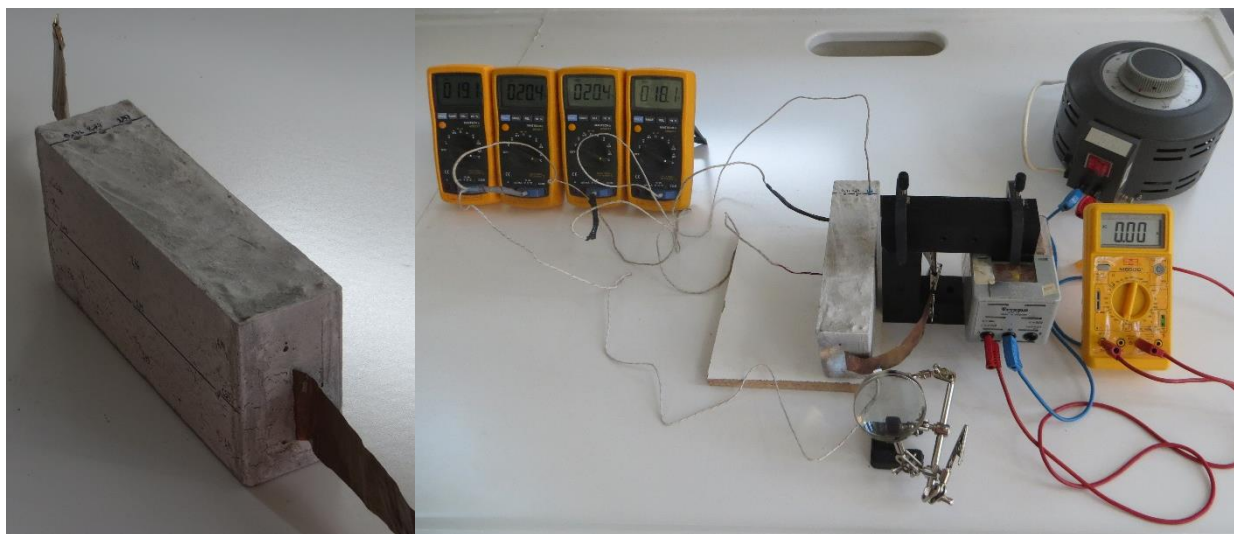
Συνοπτικά ο μετασχηματιστής είναι μια συσκευή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δύο κυκλωμάτων, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών ή πηνίων. Ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο πρώτο κύκλωμα (το «πρωτεύον») δημιουργεί ανάλογα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει μεταβαλλόμενη τάση στο δεύτερο κύκλωμα (το «δευτερεύον»). Αν ένα ηλεκτρικό φορτίο είναι συνδεδεμένο στο δευτερεύον κύκλωμα τότε θα υπάρξει ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο τύλιγμα (αγωγό ή πηνίο) του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Με τον τρόπο αυτό γίνεται μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από το πρωτεύον στο δευτερεύον κύκλωμα. Η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον κύκλωμα είναι ανάλογη της τάσης στο πρωτεύον κατά ένα συντελεστή ίσο με τον λόγο του αριθμού των περιελίξεων στα αντίστοιχα τυλίγματα (πηνία).

Χρησιμοποιώντας ως δευτερεύον ένα πολύ λεπτό σε πάχος φύλλο χαλκού, επαγωγικά συζευγμένου με κατάλληλο πρωτεύον τύλιγμα, είναι δυνατή η αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος σε βαθμό ικανό να προκαλέσει την άνοδο της θερμοκρασίας στο φύλλο του χαλκού. Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στο γεγονός ότι η αντίσταση στο φύλλο του χαλκού εξαρτάται αντιστρόφως αναλογικά από το πάχος, οπότε για πάχος κάποιων δεκάδων μικρών η αντίσταση γίνεται πολύ μεγάλη ( $R = \rho L/S$ ). Στην ουσία στο δευτερεύον το πηνίο (η αγωγός) αποτελείται από μία μόνον περιέλιξη. Όταν γίνεται σύζευξη του δεύτερου κυκλώματος με ένα πρωτεύον περισσοτέρων περιελίξεων μειώνεται η τάση στο δεύτερο κύκλωμα. Η ένταση όμως ταυτόχρονα αυξάνεται προκειμένου να ικανοποιείται η ιδανική εξίσωση της ισχύος:  $P = V \cdot I$ . Αυτή η αύξηση της έντασης οδηγεί στην άνοδο της θερμοκρασίας του φύλλου χαλκού.

Πραγματοποιήθηκαν κάποια πειράματα στο εργαστήριο προκειμένου να εξακριβωθεί η δυνατότητα του χαλκού να αναπτύξει υψηλές θερμοκρασίες επαγωγικά τα οποία ήταν επιτυχημένα. Έγινε κατασκευή δοκιμών σκυροδέματος με φύλλο χαλκού στο εσωτερικό τους και εκτελέστηκαν πειράματα. Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από αυτά.



*Εικόνα Β.1 Εγκλωβισμός ενός επαγωγικά θερμαινόμενου φύλλου χαλκού ανάμεσα σε δύο δοκίμια σκυροδέματος*



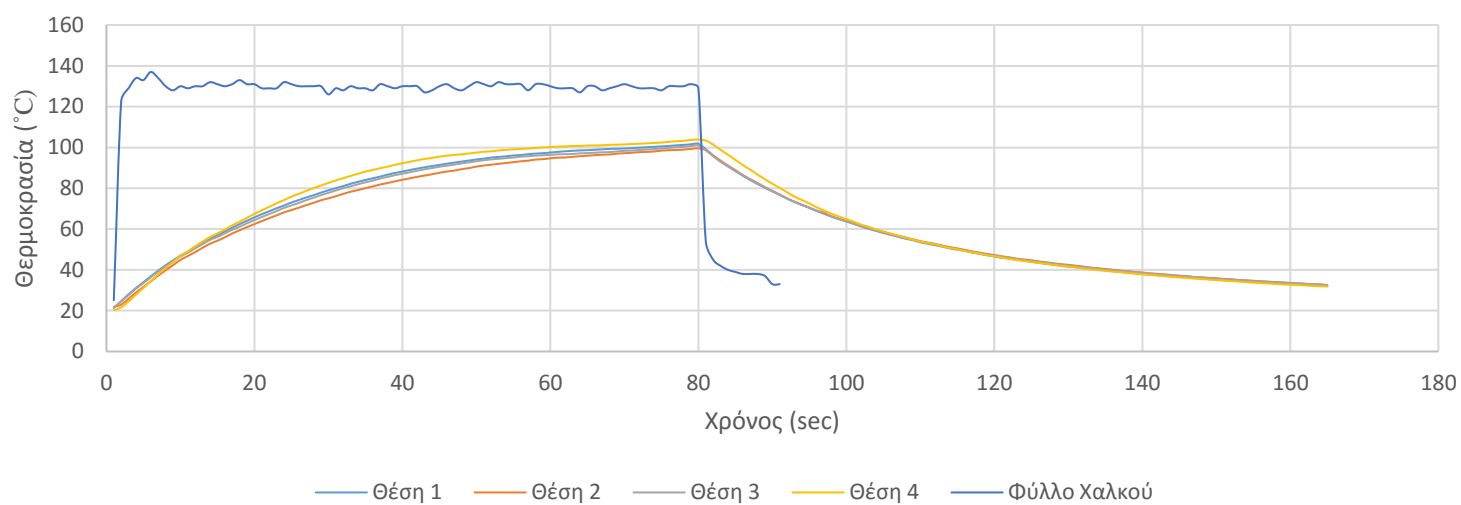
*Εικόνα B.2 Θέρμανση δοκιμίου σκυροδέματος μέσω επαγωγής.  
Το φύλλο χαλκού είναι ενσωματωμένο στο δοκίμιο*



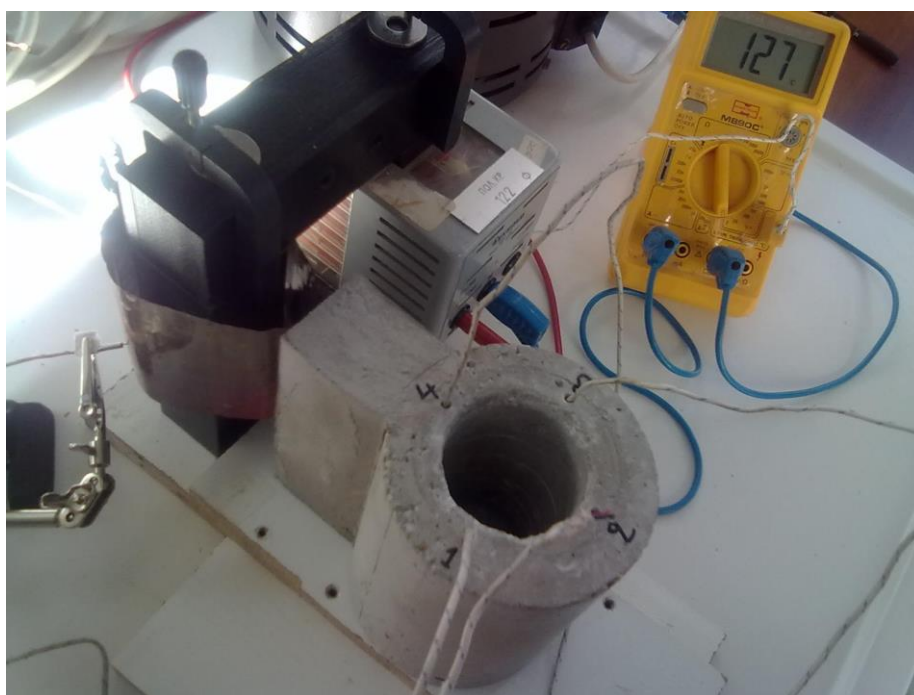
*Εικόνα B.3 Θέρμανση δοχείου σκυροδέματος το οποίο ενσωματώνει φύλλο χαλκού.*

Η κατασκευής μίας μεγαλύτερης πειραματικής διάταξης, όπως αυτή που κατασκευάστηκε, και η θέρμανση της με αυτό τον τρόπο είχε πολλές δυσκολίες. Η χύτευση του σκυροδέματος με φύλλο χαλκού στο εσωτερικό του ήταν ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα, ενώ ταυτόχρονα υπήρχε πάντα ο κίνδυνος να αποτύχει το καλούπι. Η διαδικασία συναρμολόγησης μιας διάταξης τέτοιας μορφής είχε πολλές ιδιαιτερότητες καθώς πρέπει να προβλεφθεί η θέση τοποθέτησης των μετασχηματιστών. Για αυτούς τους λόγους τελικά η ιδέα απορρίφθηκε και έγινε η χρήση εξωτερικής αντίστασης για τη θέρμανση της διάταξης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το γραφικό αποτέλεσμα της επαγωγικής θέρμανσης του δοχείου σκυροδέματος για ογδόντα λεπτά. Πρέπει να σημειωθεί ότι η λήψη των δεδομένων έγινε χειροκίνητα ανά λεπτό καθώς δεν είχαμε προμηθευτεί στο εργαστήριο εξοπλισμό καταγραφής δεδομένων.

### Επαγωγική Θέρμανση Κατασκευής



Γραφική Παράσταση B.1 Θέρμανση δοχείου σκυροδέματος το οποίο ενσωματώνει φύλλο χαλκού.



Εικόνα B.4 Εκτέλεση πειραμάτων για την αξιολόγηση της επαγωγικής θέρμανσης της διάταξης.



## Παράρτημα Γ

### *Δυνατότητα τροποποίησης του μεγέθους της διάταξης*

Ο τρόπος κατασκευής της πειραματικής διάταξης που αναπτύχθηκε επιτρέπει τη δημιουργία διατάξεων μεγαλύτερου μεγέθους. Προσθέτοντας επιπλέον δακτυλίους στη διάταξη είναι δυνατή η συναρμολόγηση πειραματικής διάταξης μεγαλύτερης κλίμακας. Αντίστοιχα μπορούν να προσαρμοσθούν επιπλέον αντιστάσεις για τη θέρμανση της διάταξης. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί και η καθ' ύψος ρύθμιση της θερμοκρασίας στους δακτυλίους ελέγχοντας την τάση λειτουργίας των ανεξάρτητων αντιστάσεων. Φυσικά πρέπει να κατασκευαστεί και το αντίστοιχο μεγαλύτερο κύκλωμα σωληνώσεων για την κυκλοφορία του ρευστού στη διάταξη. Στις επόμενες φωτογραφίες παρουσιάζεται μία διάταξη μεγαλύτερης κλίμακας, η οποία προέκυψε από το συνδυασμό των διατάξεων που κατασκευάστηκαν.

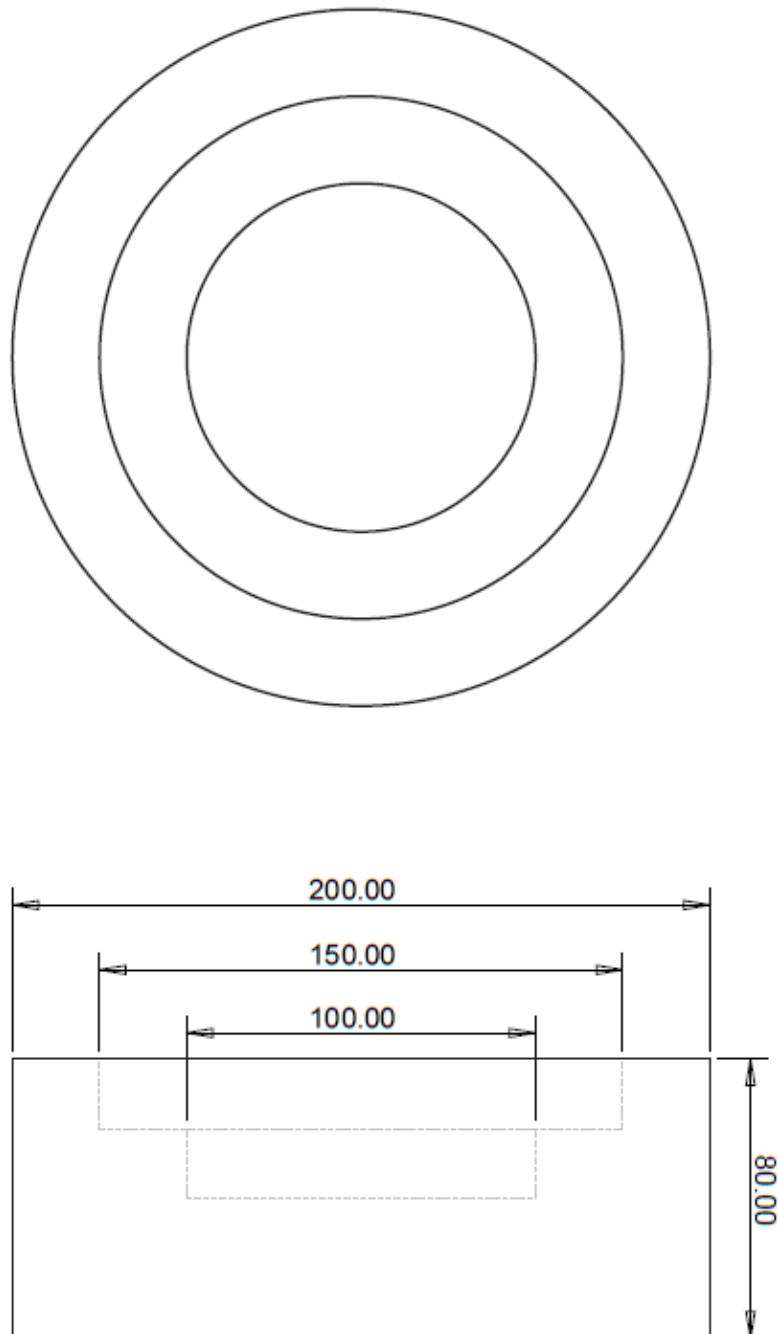


*Εικόνα Γ.1 Συναρμολόγηση διάταξης μεγαλύτερης κλίμακας.*

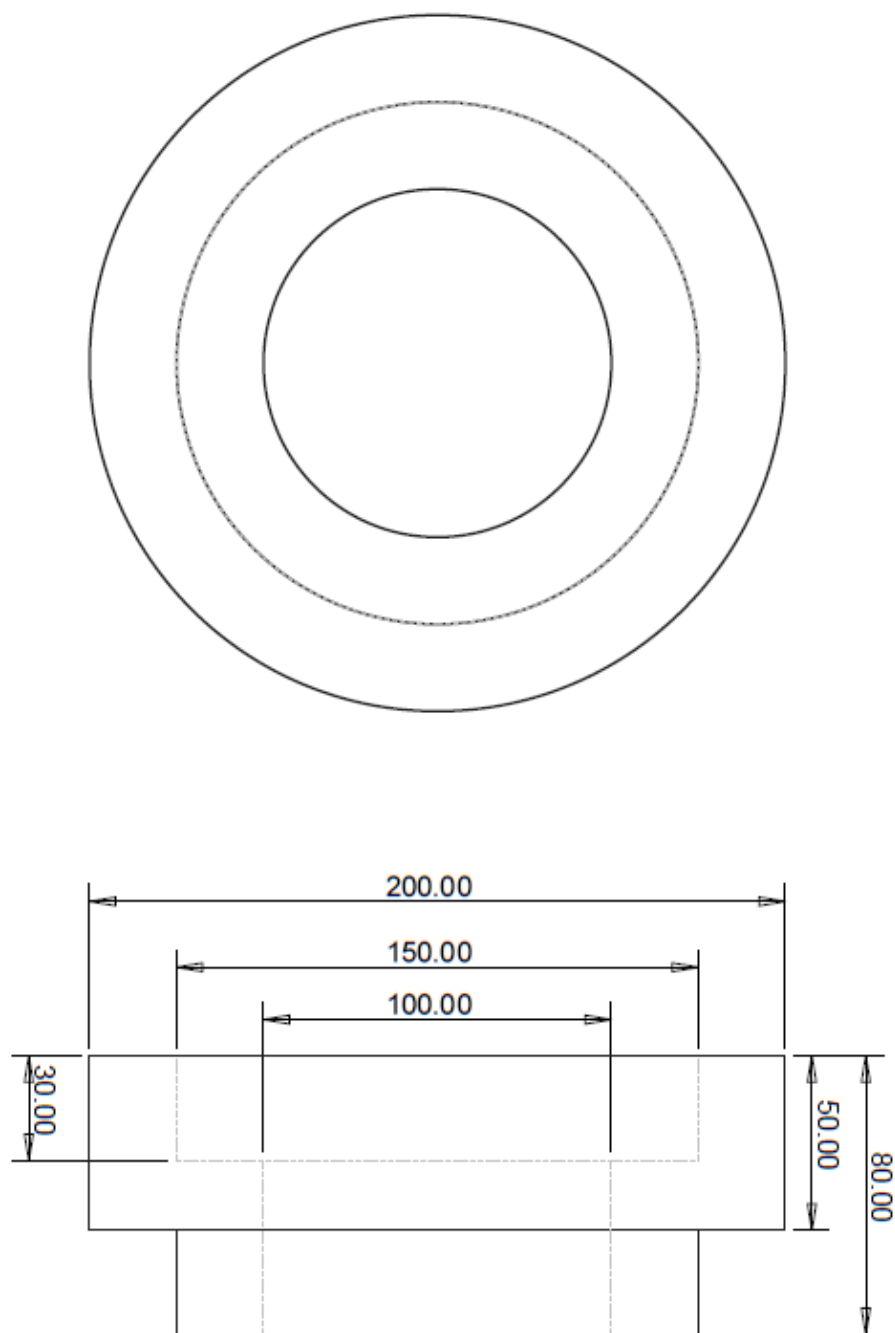


## Παράρτημα Δ

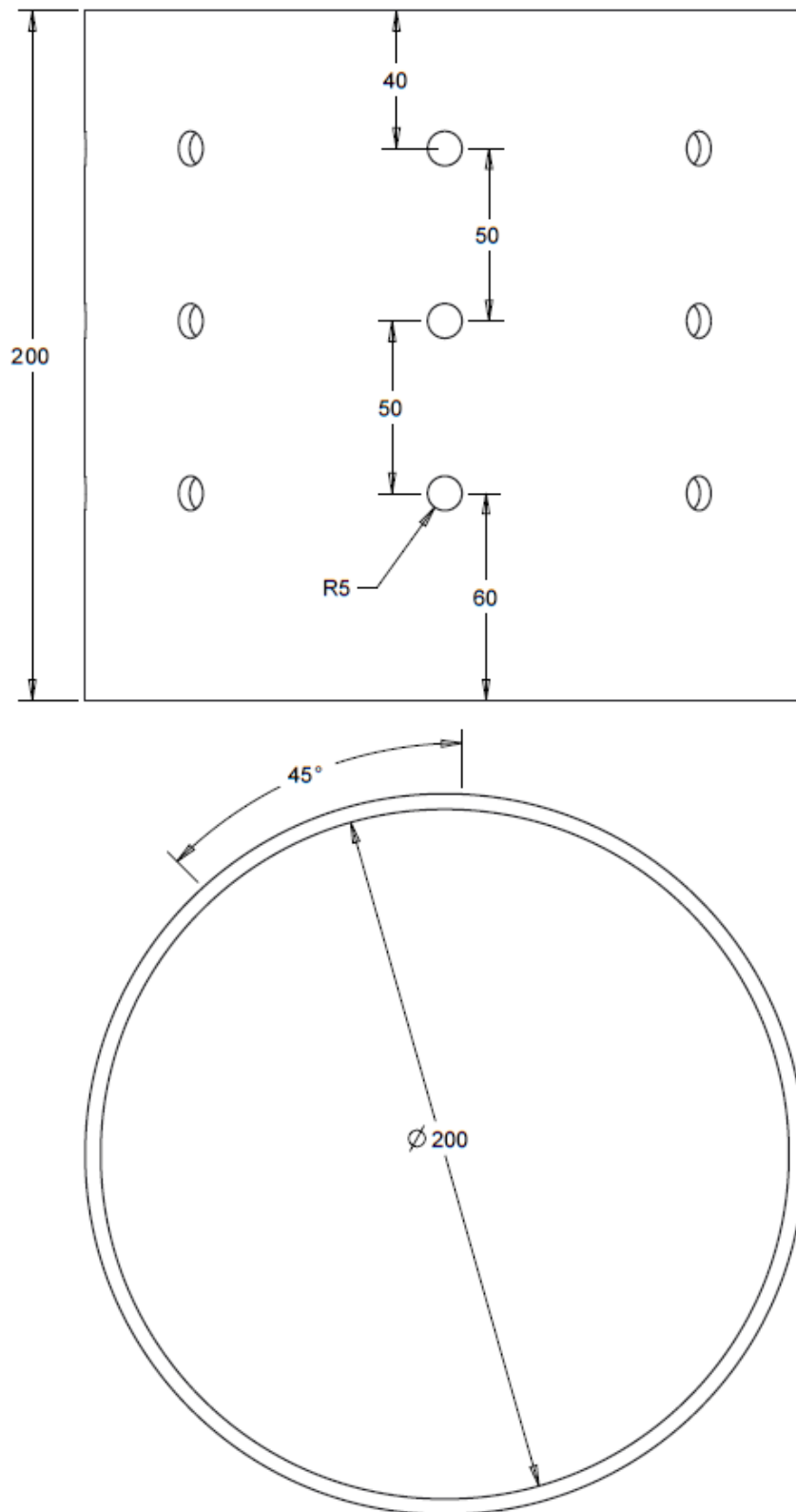
*Διαστασιολογημένα σχέδια*



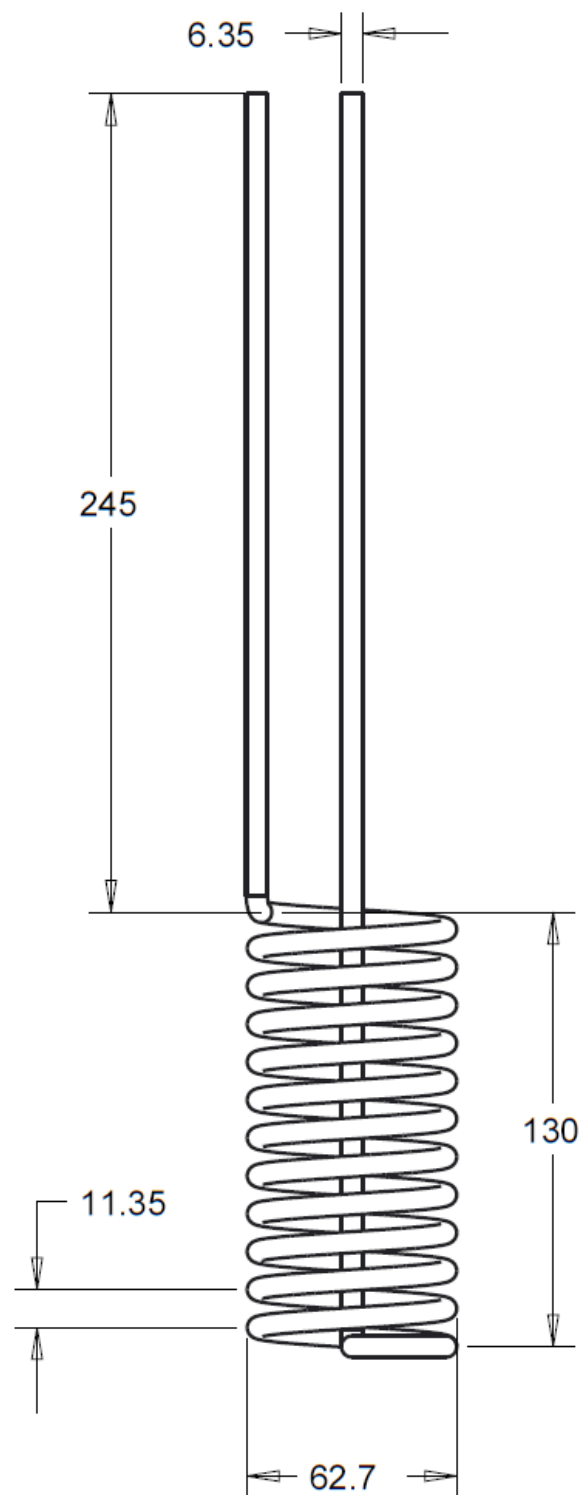
*Εικόνα Δ.1 Διαστάσεις δακτυλίου – βάσης της πειραματικής διάταξης.*



Εικόνα 4.2 Διαστάσεις δακτυλίου (βασικού δομικού στοιχείου της πειραματικής διάταξης).



Εικόνα 4.3 Διαστάσεις της ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιήθηκε για τη θέρμανση της διάταξης.



Εικόνα 4.4 Διαστάσεις του γεωεναλλάκτη που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων.