



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ- ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

*<<Πειραματικός Έλεγχος Ιδιοτήτων Μπεντονιτικών Υλικών
Πλήρωσης Κατακόρυφων Γεωεναλλακτών>>*

Διπλωματική Εργασία

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΠΑΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: ΑΝΔΡΕΑΣ ΚΑΛΛΙΩΡΑΣ
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ- ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**<<Πειραματικός Έλεγχος Ιδιοτήτων Μπεντονιτικών Υλικών
Πλήρωσης Κατακόρυφων Γεωεναλλακτών>>**

Διπλωματική Εργασία

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΠΑΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: ΑΝΔΡΕΑΣ ΚΑΛΛΙΩΡΑΣ

Επίκουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις/..../.....

Σοφία Σταματάκη, Καθηγήτρια,

Γεώργιος Αποστολόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής,

Ανδρέας Καλλιώρας, Επίκουρος Καθηγητής,

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016

Copyright © Παπασταυρόπουλος Κωνσταντίνος, 2016

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η συμβολή κάποιων ατόμων ήταν καταλυτική, προκειμένου να καταφέρω να παρουσιάσω μία αξιόλογη εργασία. Γι' αυτό το βρίσκω αναγκάω να τους ευχαριστήσω, γιατί χωρίς την συμβολή τους δεν θα μπορούσα να τα καταφέρω.

Αρχικά, ένα μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στον επίκουρο καθηγητή κ. Καλλιώρα Αντρέα, ο οποίος σε πρώτο στάδιο με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε μία τέτοια διπλωματική εργασία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στον αναπληρωτή καθηγητή κ. Αποστολόπουλο Γεώργιο, ο οποίος με καλωσόρισε στο εργαστήριο του Τομέα του και μου παρείχε έτσι ένα <<οχυρό>> για να ξεκινήσω την εκστρατεία της έρευνας.

Το πιο θερμό ευχαριστώ, θα ήθελα να το πω στον διδάκτορα Γεώργιο Φραγκογιάννη. Η βοήθειά του ήταν ανεκτίμητη και χωρίς εκείνον η εργασία δεν θα είχε έρθει σε πέρας. Τον ευχαριστώ όχι μόνο επειδή φρόντιζε να μου λύνει κάθε πιθανή και απίθανη απορία, όντας οπλισμένος πάντα με χαμόγελο και υπομονή, αλλά και για τις ατελείωτες ώρες που θυσίασε, για να βρίσκεται δίπλα μου στο εργαστήριο και να επιβλέπει την σωστή διεκπεραίωση των πειραματικών δοκιμών.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους που με στήριξαν και με βοήθησαν, και κατά την διάρκεια των σπουδών, και κυρίως την οικογένεια μου τόσο για την υποστήριξη της αλλά και για την υπομονή που έκανε όλα αυτά τα χρόνια.

Σεπτέμβρης, 2016

Κωνσταντίνος Παπασταυρόπουλος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT	ii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	2
1.2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ.....	4
1.2.1: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ	4
1.2.2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ	11
2.1: ΠΛΗΡΩΣΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ.....	11
2.2: ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.3: ΚΑΤΑΛΛΗΛΑ ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.4: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.4.1: ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΙΚΑ ΕΝΕΜΑΤΑ	16
2.6.2: ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΙΚΑ ΕΝΕΜΑΤΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΑ	19
2.6.3: ΤΣΙΜΕΝΤΙΑΚΑ ΕΝΕΜΑΤΑ.....	21
2.6.4: ΤΣΙΜΕΝΤΙΑΚΑ ΕΝΕΜΑΤΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΑ	22
2.7: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ.....	23
2.8: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	24
2.9: ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....	24
2.10: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	25
2.11: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ.....	26
2.12: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΝΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΗ.....	28
2.12.1: ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ.....	28
2.12.2: ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ.....	28
2.13: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	30
3.1: ΣΚΟΠΟΣ	30
3.2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	31

3.3: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ.....	33
3.4: ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	37
3.4.1: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΔΟΧΕΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	37
3.4.2: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΑΔΕΥΤΗΡΑ	38
3.4.3: ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ.....	39
3.5: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	46
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	46
4.1: ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΔΑΦΗ	46
4.2: ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	47
4.2.1: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	49
4.2.2: ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	53
4.3: ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ WENNER ΣΤΟ ΕΝΕΜΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ.....	56
4.4: ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΚΙΔΑΣ ΜΕΤΡΗΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	59
4.5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	76
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	76
5.1: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	76
5.3: ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	78
5.4: ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	81
5.5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	84
5.6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΑΡΟΜΟΙΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	105
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	107

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η, κατά το δυνατόν, ολοκληρωμένη πειραματική έρευνα σε μπεντονικά υλικά πλήρωσης κατακόρυφων γεωεναλλακτών με προσθετικό συστατικό τον Γραφίτη, καθώς και η αξιολόγηση των θερμοαγωγικών ιδιοτήτων τους. Σκοπός αυτού του μέρους της εργασίας είναι η συμβολή στη δημιουργία μίας πλατφόρμας δεδομένων, η οποία θα μπορεί να αξιοποιηθεί στο σχεδιασμό νέων γεωθερμικών υλικών πλήρωσης, με σαφώς καλύτερες θερμοαγωγιμες ιδιότητες. Στο πρώτο τμήμα της εργασίας, Κεφάλαια 1 και Κεφάλαιο 2, αναλύεται η έννοια της γεωθερμικής ενέργειας, τα υλικά πλήρωσης που χρησιμοποιούνται σε αυτές και οι μηχανικές ιδιότητες αυτών. Στο δεύτερο τμήμα της εργασίας, Κεφάλαια 3, 4 και 5, αναφέρονται σε βάθος οι μέθοδοι μέτρησης ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας και αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής καθώς επίσης παρουσιάζεται και ο τρόπος και η μέθοδος αξιολόγησης των πειραματικών δεδομένων, γενικά, και γίνεται υπολογισμός της ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας σε δείγματα Γραφίτη-Μπεντονίτη με αυξανόμενη περιεκτικότητα Γραφίτη και Μπεντονίτη. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, γίνεται η σύνοψη των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

ABSTRACT

The aim of this thesis is the experimental research on Bentonite-based grouting materials with Graphite additives for geothermal boreholes, as well as the evaluation of their thermoconductive properties. The purpose of this thesis is the contribution to the creation of a data platform, which could be utilized to the design of new geothermal grouts, with better properties of thermal conductivity. The first part of the thesis, through chapters 1 to 2, analyzes the concept of geothermal energy, and presents in a closer look the designing of a geothermal borehole and the grout's properties. The second part, through chapters 3, 4 and 5, presents in depth, the methods of measurement of the grouts, in order to measure their electric and thermal conductivity, the methodology used in the lab in order to complete this thesis, the methods used to evaluate the experimental data, as well as the data of electric and thermal conductivity, taken from Graphite-Bentonite grouts with increased content of each mineral. Finally, chapter 6, is a synopsis of the experiment carried for this thesis, as well as, a conclusion made for the best analogy of Graphite and Bentonite in a grout, in order to have the best possible properties of thermal conductivity, all based to the data taken from the experiment of this thesis.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση του υπεδάφους ως πηγή ή αποθήκη θερμότητας αποτελεί μια καινοτόμα, πολλά υποσχόμενη τεχνική που βρίσκει εφαρμογή στην κάλυψη των αναγκών ψύξης και θέρμανσης δημόσιων κτηρίων, κατοικιών αλλά και στην αντιμετώπιση ενεργειακών αναγκών στον αγροτικό τομέα. Η αξιοποίηση αυτή γίνεται μέσω ολοκληρωμένων τεχνικών εφαρμογών, των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας, στα οποία αντλίες θερμότητας ανταλλάσσουν θερμότητα με το υπέδαφος, μέσω ανοιχτού ή κλειστού κυκλώματος γεωεναλλακτών.

Ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς η επιστημονική κοινότητα ψάχνει νέους τρόπους για την εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και για την προστασία του περιβάλλοντος, οι εφαρμογές γεωθερμικών συστημάτων έχουν γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη στην Ευρώπη και στην Αμερική.

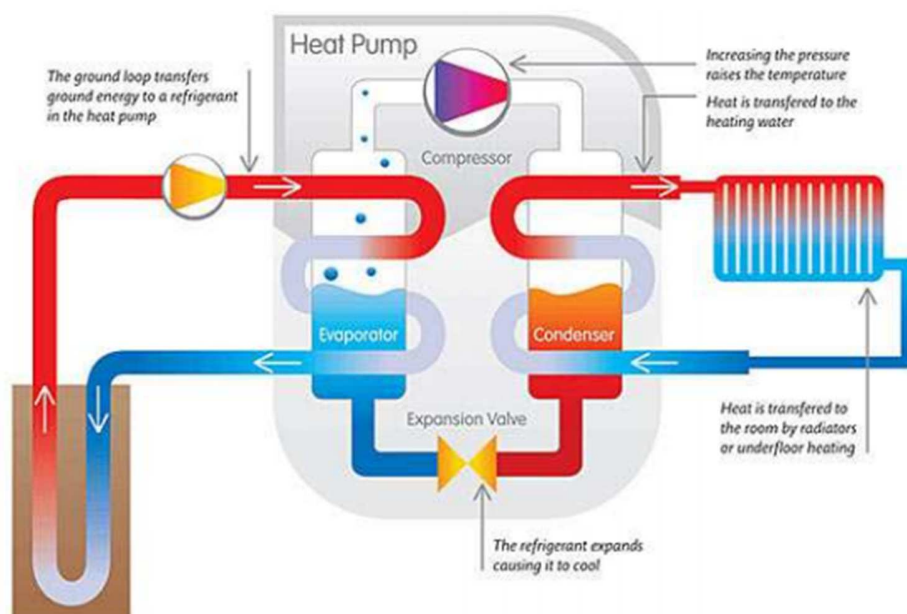
Η βασική αρχή λειτουργίας των γεωθερμικών συστημάτων είναι η αξιοποίηση της φυσικής θερμοκρασίας του υπεδάφους ως πηγή θερμότητας κατά την διάρκεια της θέρμανσης και ως αποθήκη θερμότητας κατά την διάρκεια της ψύξης. Η θερμοκρασία του υπεδάφους καθορίζεται από την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφά και από την θερμότητα που εκλύεται από τον πυρήνα της γης, και έχει κατεύθυνση από τα θερμότερα στρώματα του πυρήνα, στα ψυχρότερα στρώματα του μανδύα και του φλοιού. Τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας αξιοποιούν την διαφορά θερμοκρασίας του υπεδάφους και της ατμόσφαιρας, η οποία κυμαίνεται σε μεγαλύτερο εύρος κατά την διάρκεια του έτους. Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας κυμαίνεται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του υπεδάφους τιμές τον χειμώνα και υψηλότερες το καλοκαίρι, ενώ η μέση τιμή της θερμοκρασίας του υπεδάφους παραμένει σταθερή, παρέχοντας έτσι ψυκτικό και θερμικό όφελος αντίστοιχα.

1.1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ένα σύστημα γεωθερμίας αποτελείται από τρία βασικά μέρη. Το ένα μέρος είναι οι γεωεναλλάκτες, ανοιχτού ή κλειστού κυκλώματος οι οποίοι παρουσιάζονται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 1.2. Το δεύτερο μέρος είναι το ρευστό (συνήθως νερό) ή ο αέρας που κυκλοφορεί στο βασικό σύστημα ψύξης - θέρμανσης του κτιρίου. Το τρίτο μέρος είναι η γεωθερμική αντλία, που μεταφέρει την θερμότητα από το μέσο των γεωεναλλακτών στο μέσο θέρμανσης του κτιρίου και αντίστροφα.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις αντλίες θερμότητας νερού - νερού και τις αντλίες θερμότητας νερού – αέρα. Οι αντλίες θερμότητας, ως συστήματα περιλαμβάνουν τον εξατμιστή, τον συμπιεστή, το ψυκτικό ρευστό, το συμπυκνωτή και τη βαλβίδα εκτόνωσης. Οι σύγχρονες γεωθερμικές αντλίες θερμότητας μπορούν να λειτουργούν και στη φάση της θέρμανσης και στη φάση της ψύξης, μέσω μιας βαλβίδας αντιστροφής (τετράοδη βάνα).

Φάση θέρμανσης (Εικόνα 1): το ρευστό (νερό) που κυκλοφορεί στους γεωεναλλάκτες απορροφά ποσότητα θερμότητας λόγω της κυκλοφορίας του στο υπέδαφος με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου στους γεωεναλλάκτες που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 3 - 5 °C. Το θερμότερο ρευστό στην έξοδο του γεωεναλλάκτη έρχεται σε επαφή με το ψυκτικό ρευστό (φρέον), του οποίου η θερμοκρασία αυξάνει μέσω συμπίεσης, ενώ μειώνεται η θερμοκρασία του ρευστού (νερού) στην είσοδο του γεωεναλλάκτη. Στο δεύτερο μέρος της αντλίας θερμότητας κυκλοφορεί το ρευστό (νερό ή αέρας) του κυκλώματος ψύξης- θέρμανσης του κτιρίου. Ερχόμενο σε επαφή με το υψηλής θερμοκρασίας φρέον αυξάνει η θερμοκρασία του σε επίπεδα που να παρέχει θερμικό όφελος στο κτίριο (για το νερό στα fan-coils 40 - 43 °C), ενώ ταυτόχρονα υποβιβάζεται η θερμοκρασία του ψυκτικού ρευστού και ψύχει το ρευστό (νερό) στην είσοδο των γεωεναλλακτών.



Εικόνα 1: Κύκλος φάσης θέρμανσης Γεωλογικής Αντλίας Θερμότητας

Φάση ψύξης: συντελείται η ακριβώς αντίθετη διαδικασία. Το ρευστό (νερό) που κυκλοφορεί στους γεωεναλλάκτες αποδίδει θερμότητα στο υπέδαφος με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία μεταξύ εισόδου και εξόδου των γεωεναλλακτών. Το χαμηλότερης θερμοκρασίας ρευστό από την έξοδο του γεωεναλλάκτη, έρχεται σε επαφή με το ψυκτικό μέσο (φρέον), υψηλής θερμοκρασίας, που εξέρχεται από τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας, και υποβιβάζει την θερμοκρασία του. Στη συνέχεια, το ψυκτικό μέσο, εκτονώνεται στον εξατμιστή της αντλίας και αεριοποιείται με ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασίας του. Το μειωμένης θερμοκρασίας ρευστό, ανταλλάσσει θερμότητα με το ζεστό ρευστό (νερό), από το κύκλωμα του κτιρίου ψύχοντάς το. Το ψυκτικό σε αέρια μορφή, συμπιέζεται στην αντλία θερμότητας και υγροποιείται με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας του. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται, με συνεχή μεταφορά θερμότητας στο ψυχρότερο υπέδαφος, μέσω των γεωεναλλακτών.

Η χαρακτηριστική ιδιότητα της αντλίας θερμότητας είναι ο συντελεστής απόδοσής της (COP), ο οποίος αποτελεί τον λόγο των θερμικών φορτίων που παράγει η αντλία θερμότητας προς τα ηλεκτρικά φορτία που καταναλώνει για την λειτουργία της. Ο συντελεστής απόδοσης μεταβάλλεται κατά την διάρκεια λειτουργίας της αντλίας, ανάλογα με την θερμοκρασία των

ρευστών που κυκλοφορούν στα δυο μέρη της αντλίας. Σήμερα, αναπτύσσεται συνεχώς η τεχνολογία γύρω από τις αντλίες θερμότητας με αποτέλεσμα να υπάρχουν αντλίες συμβατικού τύπου με COP 2.5 - 3 και νέας τεχνολογίας με COP 4 - 6.

1.2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ

Τα συστήματα των γεωεναλλακτών χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα συστήματα κλειστού βρόχου, όπου η θερμότητα του υπεδάφους μεταφέρεται μέσω ρευστού που κυκλοφορεί εντός οριζόντιων ή κατακόρυφων γεωεναλλακτών και τα κυκλώματα ανοικτού βρόχου στα οποία αξιοποιείται η θερμοκρασία του νερού του υδροφόρου ορίζοντα.

1.2.1: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ

Στα Συστήματα Αβαθούς Γεωθερμίας Κλειστού Βρόχου, οι γεωεναλλάκτες κατασκευάζονται από σωλήνες πολυαιθυλενίου (P.E), υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (H.D.P.E) ή ακτινοδुकτιομένου πολυαιθυλενίου (Pe-Xa) και εμπεριέχουν νερό ή μείγμα νερού και αντιψυκτικού. Οι γεωεναλλάκτες αυτοί τοποθετούνται στο υπέδαφος, είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα και με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη θερμική επαφή τους με το υπέδαφος. (Φραγκογιάννης, 2011)

Οι κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες (Εικόνα 2β) τοποθετούνται εντός γεωτρήσεων διαμέτρου από 76-127 mm και βάθους 30-400 m (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004), αλλά συνηθέστερα σε βάθος 30-100m, λόγω ευκολίας όρυξης της γεώτρησης και τοποθέτησης του γεωεναλλάκτη (Chiasson, 1999) Στους κατακόρυφους γεωεναλλάκτες, μετά τη διάνοιξη της γεώτρησης και την τοποθέτηση τους, ο κενός χώρος πληρούται με κατάλληλα ενέματα- υλικά πλήρωσης (grouting material), τα οποία εξασφαλίζουν, την καλύτερη επαφή των γεωεναλλακτών με το υπέδαφος, ώστε να βελτιώνεται η μεταφορά θερμότητας μεταξύ υπεδάφους και κυκλοφορούντος ρευστού στο γεωεναλλάκτη, η προστασία των υδροφόρων οριζόντων από ανάμειξη με τα επιφανειακά νερά ή από ανάμειξη μεταξύ υδροφόρων διαφορετικών στρωμάτων και την μείωση της

διαφοράς πίεσης μεταξύ του νερού στους αγωγούς και τους περιβάλλοντες γεωλογικούς σχηματισμούς, καθώς αναλαμβάνουν τις ασκούμενες πιέσεις. Τα ενέματα αυτά προστατεύουν περιβαλλοντικά την εγκατάσταση και παράλληλα εξασφαλίζουν και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των αγωγών.

Τα ενέματα συνήθως αποτελούνται από μείγματα μπεντονίτη - άμμου και νερού, ή μείγματα τσιμέντου- άμμου και νερού σε διάφορες αναλογίες. Η ποιότητα της άμμου (ασβεστιτική, χαλαζιακή, κτλ) και οι αναλογίες ανάμειξης καθορίζονται με στόχο την εξασφάλιση της μέγιστης θερμικής αγωγιμότητας του υλικού πλήρωσης, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η μετάδοση θερμότητας μεταξύ αγωγών και υπεδάφους και να επιτυγχάνεται η ελάχιστη υδραυλική αγωγιμότητα, απαραίτητη για την «υδραυλική μόνωση» του γεωεναλλάκτη (Allan and Philipracopoulos, 1999). Τα μείγματα πρέπει να έχουν κατάλληλη πυκνότητα για να μπορούν να εισπνεστούν στη γεώτρηση.

Στα συστήματα οριζοντίων γεωεναλλακτών, θερμοπλαστικοί αγωγοί διαμέτρου 19-38mm τοποθετούνται οριζόντια και σε βάθος έως 5 m από την επιφάνεια. Σ' αυτή τη ζώνη, η θερμοκρασία του υπεδάφους μεταβάλλεται κυρίως λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα να μην έχει τη θερμοκρασιακή σταθερότητα που αξιοποιείται στους κάθετους γεωεναλλάκτες και, ως εκ τούτου, η αντλία θερμότητας τελικά να λειτουργεί με μικρότερο COP (Chiasson, 1999).

Η τοποθέτηση των θερμοπλαστικών αγωγών γίνεται είτε στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου είτε στη θεμελίωσή του. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται μια παραλλαγή, στην οποία οι γεωεναλλάκτες βυθίζονται σε νερό λιμνών ή στη θάλασσα, αξιοποιώντας τη θερμοκρασιακή σταθερότητα του νερού.

Οι τοποθετήσεις οριζοντίων γεωεναλλακτών έχουν τις εξής τεχνικές:

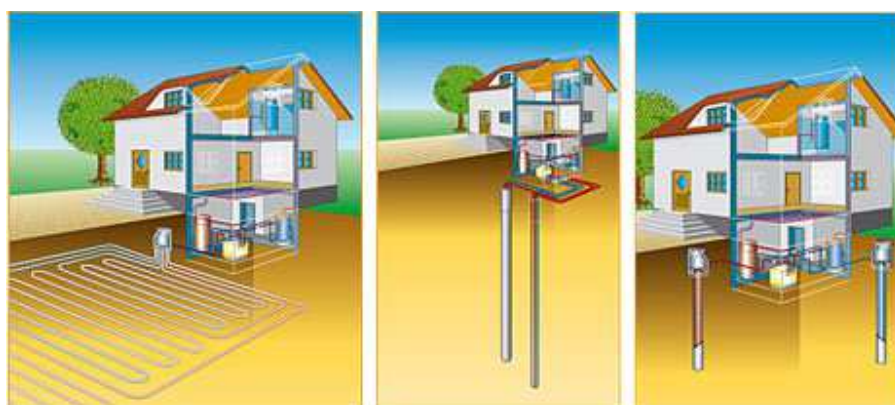
Γεωεναλλάκτες σε παράλληλη διάταξη (Εικόνα 2α): Σε ανοικτή εκσκαφή κατάλληλου βάθους (1-5m), θερμοπλαστικοί αγωγοί τοποθετούνται σε παράλληλη διάταξη και με μεταξύ τους απόσταση τουλάχιστον 60cm.

Γεωεναλλάκτες σε πολλά επίπεδα: Σ' αυτή την τεχνική, τοποθετούνται παράλληλες διατάξεις γεωεναλλακτών, σε πολλά επίπεδα (ανάλογα με το επιθυμητό φορτίο) και σε κατακόρυφη απόσταση 40-50 cm μεταξύ των επιπέδων.

Σπειροειδείς Γεωεναλλάκτες (spiral): Σε αντίθεση με τις δυο προηγούμενες τεχνικές, όπου οι γεωεναλλάκτες είναι παράλληλοι, σ' αυτή την τεχνική σχηματίζουν σπείρες, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται στον ίδιο χώρο μεγαλύτερο συνολικό μήκος αγωγών

Γεωεναλλάκτες βυθισμένοι σε νερό: Αποτελεί ειδική εφαρμογή τοποθέτησης οριζοντίων γεωεναλλακτών, σε λιμναίο ή θαλάσσιο περιβάλλον, στο οποίο οι γεωεναλλάκτες αγκυρώνονται επί του πυθμένα και αξιοποιούν τη θερμοκρασία του νερού.

Η τοποθέτηση των αγωγών στα οριζόντια συστήματα γίνεται εντός ανοικτής εκσκαφής ή ορυγμάτων, τα οποία πρώτα στρώνονται με μια ζώνη άμμου (για την επίτευξη καλύτερης επαφής των εναλλακτών με το υπεδαφικό περιβάλλον). Αφού επιτευχθεί η τοποθέτηση των αγωγών, εν συνεχεία στρώνεται και συμπυκνώνεται το έδαφος της εκσκαφής.



Εικόνα 2α,β,γ: Συστήματα κλειστού (α,β) και ανοιχτού βρόχου (γ)

1.2.2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Στα συστήματα ανοιχτού βρόχου (Εικόνα 2γ, 3), ο γεωεναλλάκτης δεν τροφοδοτείται με νερό ή αντιψυκτικό υγρό για να κάνει τον κύκλο ψύξης ή θέρμανσης, αλλά χρησιμοποιεί το νερό παρόντος υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής ή νερό επιφανειακής πηγής, το οποίο αφού ανταλλάξει θερμότητα με το ψυκτικό, επαναφέρεται στην αρχική του θέση με την καινούργια του θερμοκρασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η υδραυλική αγωγιμότητα παίζει σημαντικό ρόλο στην παροχή νερού που μπορεί να προσφέρει ο υδροφόρος. Το ίδιο ισχύει και για το είδος του υδροφόρου ορίζοντα, τη γεωμετρία του, τη συνολική του έκταση, ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος. Στην περίπτωση που ο υδροφόρος δεν επαρκεί, ρυθμίζεται μικρότερη παροχή, αλλά η αρχική θερμοκρασία του νερού πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να αποφευχθεί πάγωμα ή υπερθέρμανση του νερού.

Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου συναντούν αρκετά πρακτικά προβλήματα που τα καθορίζουν μειονεκτικά σε βάθος χρόνου. Η στάθμη και η παροχή του υδροφόρου μεταβάλλεται ανάλογα με τον κύκλο του και η υπεράντληση του υδροφόρου μπορεί να καταστήσει το κύκλωμα εκτός λειτουργίας. Επίσης, η άντληση του υδροφόρου κοντά σε παραθαλάσσιες περιοχές, μπορεί μετατοπίσει την υφάλμυρη ζώνη, αλλάζοντας έτσι την σύσταση του αντλούμενου νερού.



Εικόνα 3: Σύστημα ανοιχτού βρόχου

Τα παραπάνω συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, υπό προϋποθέσεων και περιορισμών, για τη μεταφορά θερμότητας από το υπέδαφος στο κτήριο. Το καθένα παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ανάλογα με τις υδρογεωλογικές και γεωλογικές συνθήκες στις οποίες εγκαθίστανται, τις απαιτήσεις που έχουν σε χώρο, την αειφόρο ενεργειακή τους απόδοση αλλά και το κόστος κατασκευής τους.

Ως προς την καταλληλότητα των υδρογεωλογικών και γεωλογικών συνθηκών, όπου εξετάζεται εάν οι υδρογεωλογικές (ύπαρξη επιφανειακών ή υπόγειων νερών) και οι γεωλογικές (εδαφικοί

ή βραχώδεις σχηματισμοί) συνθήκες καθιστούν εφικτή την εγκατάσταση ενός εκ των τύπων συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας, η χρήση συστημάτων ανοικτού βρόχου προϋποθέτει την ύπαρξη επιφανειακού ή υπόγειου νερού. Η λειτουργία τους εξαρτάται από τη σταθερότητα παροχής σε νερό, η οποία στην περίπτωση χρήσης υπόγειων νερών είναι αβέβαιη, λόγω των μεταβολών της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Αντίθετα, τα συστήματα κλειστού βρόχου μπορούν να εγκατασταθούν και να λειτουργήσουν ανεξάρτητα από τις επικρατούσες υδρογεωλογικές συνθήκες. Αναφορικά με τις γεωλογικές συνθήκες, τα συστήματα κλειστού βρόχου με κατακόρυφους γεωεναλλάκτες μπορούν να εγκατασταθούν σε κάθε περιοχή, ανεξαρτήτως της φύσης των γεωλογικών σχηματισμών (εδάφη ή πετρώματα). Αντίθετα, οι οριζόντιοι γεωεναλλάκτες προϋποθέτουν εδαφικό επιφανειακό στρώμα, το οποίο μπορεί να απομακρυνθεί και να επανατοποθετηθεί μετά την εγκατάσταση των γεωεναλλακτών. Αυτή η διαδικασία είναι απαγορευτική στην περίπτωση βραχώδους επιφανειακού στρώματος (π.χ. ορεινές περιοχές). Από τα προαναφερόμενα, προκύπτει ότι τα συστήματα κλειστού βρόχου με κατακόρυφους γεωεναλλάκτες αποτελούν την πλέον εφαρμόσιμη λύση σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τύπους.

Σε σύγκριση με την απαίτηση σε χώρο, τα συστήματα ανοικτού βρόχου, αποτελούμενα από δυο γεωτρήσεις (άντλησης και επανεισαγωγής), δεν δεσμεύουν μεγάλη επιφάνεια. Ομοίως, τα συστήματα κλειστού βρόχου με κατακόρυφους γεωεναλλάκτες, ανάλογα βέβαια με το μέγεθος του έργου (αριθμός γεωεναλλακτών), απαιτούν μικρή επιφάνεια, καθώς αξιοποιούν τον υπεδafικό χώρο. Αντίθετα, στα συστήματα οριζόντιων γεωεναλλακτών απαιτείται μεγάλη ελεύθερη επιφάνεια, καθιστώντας την εφαρμογή τους δύσκολη έως και απαγορευτική εντός του πολεοδομικού ιστού, όπου απουσιάζουν μεγάλης έκτασης διαθέσιμοι χώροι.

Συγκρίνοντας την ενεργειακή απόδοση των συστημάτων, η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων ανοικτού βρόχου εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία του υδροφόρου, η οποία είναι μεν σταθερή, αλλά η απόλυτη τιμή της εξαρτάται από πλήθος παραγόντων (γεωτεκτονικές ανωμαλίες, περιβαλλοντικές συνθήκες, θέση τροφοδοσίας υδροφόρου, κ.α.). Στην Ελλάδα, η θερμοκρασία του νερού του υδροφόρου ορίζοντα έχει διακύμανση από 15-20 °C, γεγονός το οποίο οδηγεί σε πολύ υψηλούς συντελεστές απόδοσης των αντλιών. Στα συστήματα κλειστού βρόχου, από πειραματικές και θεωρητικές μελέτες (Eugster & Rybach, 2000), προκύπτει ότι οι κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες έχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τους οριζόντιους. Η καλύτερη ενεργειακή απόδοση των κατακόρυφων γεωεναλλακτών έγκειται στο

γεγονός ότι η θερμοκρασία του υπεδάφους σε βάθος μεγαλύτερο των 10-15 m παραμένει σταθερή για όλη τη διάρκεια του έτους (και μεταβάλλεται μόνο με το βάθος), με αποτέλεσμα η αντλία θερμότητας να λειτουργεί με υψηλούς συντελεστές απόδοσης. Αντίθετα, η θερμοκρασία των επιφανειακών στρωμάτων (1-5 m) επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, οδηγώντας σε μειωμένη απόδοση τόσο κατά τη διάρκεια της θέρμανσης όσο και στη διάρκεια της ψύξης.

Κρίσιμο ζήτημα για τη σύγκριση και την αξιολόγηση των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας αποτελεί η αειφορική ενεργειακή απόδοση και λειτουργία τους. Η συμπεριφορά των συστημάτων ανοικτού βρόχου εξαρτάται άμεσα από την παροχή νερού του υδροφόρου ορίζοντα. Στην πορεία του χρόνου, διαπιστώνονται μεταβολές στην παροχή του υδροφόρου ορίζοντα ή και υποβιβασμός της στάθμης του, με αποτέλεσμα να καθίσταται αβέβαιη η σε βάθος χρόνου λειτουργία αυτών των συστημάτων. Αυτές οι μεταβολές δεν σχετίζονται με τη λειτουργία των συστημάτων αυτών, αλλά με ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (υπεραντλήσεις, τεχνικά έργα που διαταράσσουν τον υδροφόρο ορίζοντα κ.α.). Αντίθετα, η αειφορική λειτουργία των συστημάτων κλειστού βρόχου (οριζόντιοι και κάθετοι γεωεναλλάκτες) σχετίζεται με τις μεταβολές του θερμοκρασιακού πεδίου γύρω από τους γεωεναλλάκτες, οι οποίες μεταβολές πραγματοποιούνται λόγω της μακρόχρονης λειτουργίας τους (Xinguo et. al, 2006). Τα συστήματα κλειστού βρόχου, υπό την προϋπόθεση της ορθής διαστασιολόγησής τους, μπορούν να εξασφαλίζουν υψηλή απόδοση και αειφορική λειτουργία, γεγονός που τα αναδεικνύει ως τη βέλτιστη λύση.

Ο τελικός και αποφασιστικός παράγοντας στην επιλογή του τύπου ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας είναι το κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Στα συστήματα ανοικτού βρόχου, το κόστος κατασκευής και λειτουργίας σχετίζεται με το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς αυτό επιδρά και στο κόστος κατασκευής των υδρογεωτρήσεων άντλησης και επανεισαγωγής, αλλά και στο κόστος άντλησης κατά τη λειτουργία (το οποίο είναι απαγορευτικό για υδροφόρους σε βάθη μεγαλύτερα των 120m). Στα συστήματα κλειστού βρόχου, χαμηλότερο κόστος κατασκευής έχουν τα συστήματα οριζόντιων γεωεναλλακτών, στα οποία το κόστος αυτό καθορίζεται από το μέγεθος της εκσκαφής και το μήκος των γεωεναλλακτών. Τα συστήματα κατακόρυφων γεωεναλλακτών παρουσιάζουν συγκριτικά το υψηλότερο κόστος κατασκευής απ' όλα τα συστήματα, καθώς η διάνοιξη γεωτρήσεων, η τοποθέτηση των γεωεναλλακτών και η πλήρωση με ένεμα, αποτελεί αρκετά σύνθετη, χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία.

Συνοψίζοντας, και με βάση τα προαναφερόμενα κριτήρια, τα συστήματα κλειστού βρόχου με κατακόρυφους γεωεναλλάκτες, παρά το υψηλότερο κόστος κατασκευής, παρουσιάζουν συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι όλων των άλλων συστημάτων, καθώς δύνανται να εγκατασταθούν σε κάθε γεωλογική και υδρογεωλογική συνθήκη, δεν απαιτούν μεγάλο χώρο εγκατάστασης, παρουσιάζουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση έναντι των οριζοντίων, ενώ η αειφορική τους λειτουργία δεν επηρεάζεται από αστάθμητους παράγοντες, όπως η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην περίπτωση των συστημάτων ανοικτού βρόχου. (Φραγκογιάννης, 2011)

Η παρούσα διπλωματική, λοιπόν, στοχεύει στην βελτισποίηση των συστημάτων κλειστού βρόχου με κατακόρυφους γεωεναλλάκτες, καθώς τα πλεονεκτήματα που προαναφέρθηκαν τα καθιστούν ευρέως εφαρμόσιμα. Στα συστήματα αυτά, όμως, και ειδικότερα στην μεταφορά θερμότητας από το υπέδαφος στον γεωεναλλάκτη, ο ανθρώπινος παράγοντας δεν μπορεί να παίζει μεγάλο ρόλο. Το υπέδαφος έχει μια σταθερή θερμική αγωγιμότητα, η οποία δεν μπορεί να μεταβληθεί, και ο γεωεναλλάκτης αποτελείται κι αυτός από υλικό σταθερής θερμικής αγωγιμότητας. Σε αυτό που μπορεί να συμβάλλει, το οποίο αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, είναι στην δημιουργία ενός ενέματος με την βέλτιστη θερμική αγωγιμότητα, για να δημιουργήσει την βέλτιστη θερμική επαφή μεταξύ του εδάφους και του γεωεναλλάκτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

2.1: ΠΛΗΡΩΣΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Η πλήρωση των κατακόρυφων γεωεναλλακτών συστήματος κλειστού βρόχου έχει μεγάλη σημασία τόσο για περιβαλλοντικούς λόγους, όσο και για λόγους μεταφοράς θερμότητας, και επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση υλικού μικρής διαπερατότητας στην δακτύλιο ανάμεσα στα τοιχώματα της γεώτρησης και του γεωεναλλάκτη.

Η πλήρωση του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη, από περιβαλλοντικής άποψης, απαιτείται για να προσφέρει προστασία σε υδροφόρο ορίζοντα εντός του οποίου έχει ορυχθεί η γεώτρηση η οποία θα υποδεχθεί τον γεωεναλλάκτη. Σε αυτό συμπεριλαμβάνεται η αποφυγή εισροής επιφανειακού νερού στον υδροφόρο, η προστασία ανταλλαγής νερών μεταξύ υδροφόρων και ο αποκλεισμός σχηματισμών που μπορεί να είναι μολυσμένοι.

Επίσης, η πλήρωση αποτρέπει υποχωρήσεις και διατηρεί τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των αρτεσιανών σχηματισμών και αποτρέπει τις προς τα πάνω διαρροές κατά μήκος των κατακόρυφων γεωεναλλακτών.

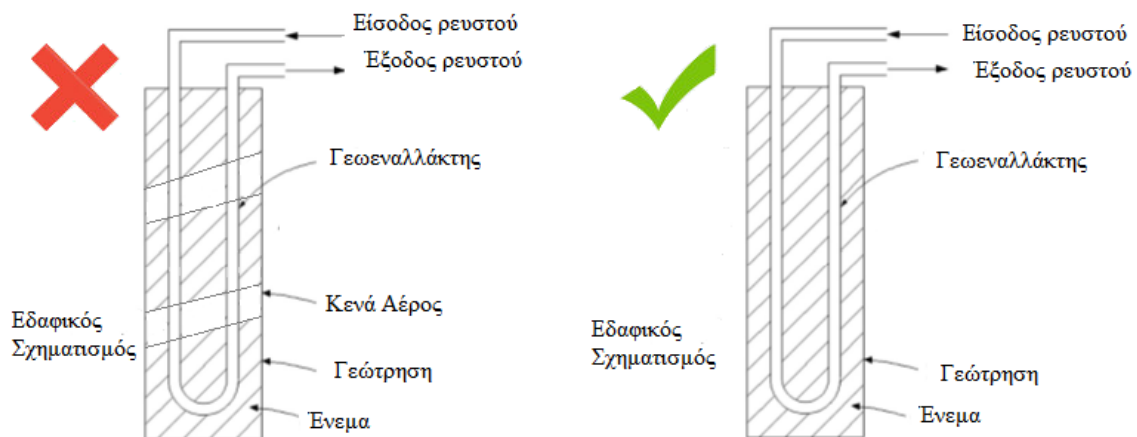


Εικόνα 4: Εισαγωγή ενέματος και πλήρωση κατακόρυφων γεωεναλλακτών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

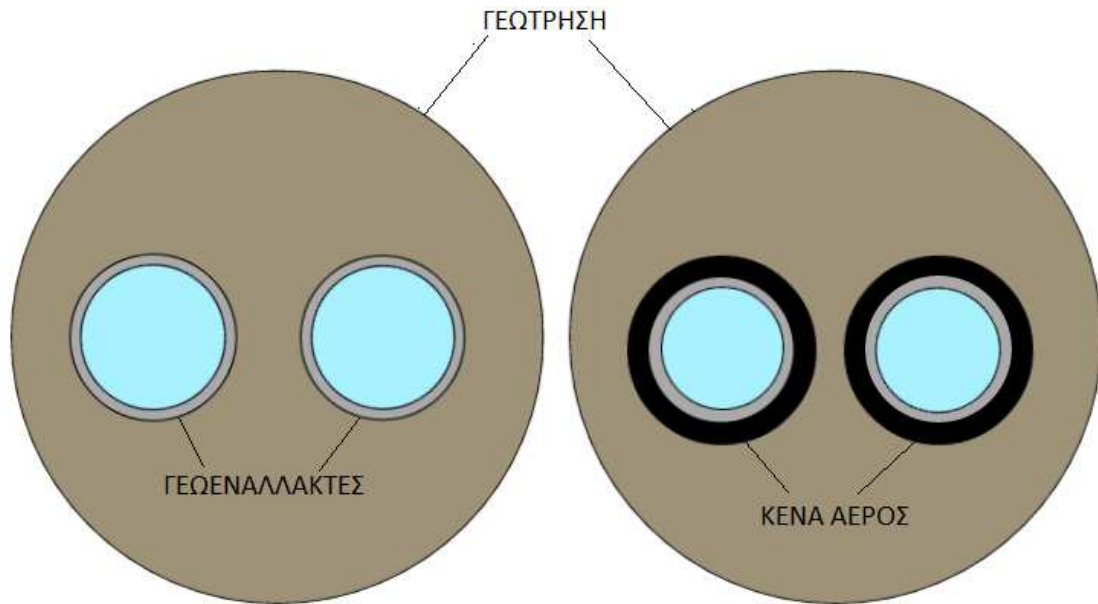
Από τεχνική άποψη, για να έχει ο γεωεναλλάκτης τη βέλτιστη θερμική επαφή, θα πρέπει ο σωλήνας που μεταφέρει το ρευστό μεταφοράς θερμότητας στην αντλία, να έχει την καλύτερη δυνατή θερμική επαφή με το περιβάλλον ένεμα. Η μεταφορά θερμότητας μεγιστοποιείται όταν χρησιμοποιείται υλικό πλήρωσης που έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και που ελαχιστοποιεί την αντίσταση μεταφοράς θερμότητας στον γεωεναλλάκτη.

Παράλληλα, τα υλικά πλήρωσης των γεωεναλλακτών, θα πρέπει να έχουν χαμηλό ιξώδες, έτσι ώστε να είναι εύκολη και εφικτή η πλήρωση της γεώτρησης και να αποφεύγεται η δημιουργία κενών αέρα, αλλά και να δημιουργείται σωστή επαφή μεταξύ του υλικού πλήρωσης και του γεωεναλλάκτη ώστε να διατηρεί θερμικό δεσμό καθώς ο σωλήνας θα συστέλλεται και θα διαστελλεται στις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας. Εάν το υλικό πλήρωσης δεν έχει αρκετά χαμηλό ιξώδες, κατά την τοποθέτηση του στην γεώτρηση υπάρχει η πιθανότητα δημιουργίας ασυνεχειών, οι οποίες γεμίζουν με αέρα και μειώνουν την θερμική αγωγιμότητα του συστήματος.



Εικόνα 5: Δημιουργία κενών αέρος κατά την τοποθέτηση του ενέματος

Σημαντική ιδιότητα του ενέματος είναι και η αντίσταση του στην συρρίκνωση για να αποφεύγεται η δημιουργία κενών ή μικροδακτυλίων που θα μειώσουν την μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στον γεωεναλλάκτη και τα τοιχώματα της γεώτρησης. Τέλος, θα πρέπει να διατηρεί τα θερμικά του χαρακτηριστικά σε μεγάλο χρονικό διάστημα, και να μην υποβιβάζεται ως προς τη θερμική του αγωγιμότητα και την αντίσταση του στην φυσική συρρίκνωση.



Εικόνα 6: Δημιουργία κενών αέρος κατά την συστολοδιαστολή του γεωεναλλάκτη

2.2: ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Για την κατασκευή ενός ενέματος το οποίο θα είναι ικανό να σφραγίσει τον δακτύλιο του κάθετου γεωεναλλάκτη είναι βασική η γνώση της φύσης των γεωλογικών σχηματισμών τους οποίους θα διατρήσει η γεώτρηση που θα υποδεχθεί τον γεωεναλλάκτη, και κατ' επέκταση η σωστή επιλογή υλικών πλήρωσης. Κριτήρια πλήρωσης έχουν δημιουργηθεί, τα οποία υποστηρίζουν την επαναφορά των υδρογεωλογικών συνθηκών, σε παρόμοιων ή ακόμα και καλύτερων της αρχικής κατάστασης του σχηματισμού. Αυτά τα κριτήρια έχουν εξελιχθεί μέσω

πρακτικής εμπειρίας από πολλές βιομηχανίες που σχετίζονται με την διάτρηση και την πλήρωση γεωτρήσεων. (Remund, 1996). Ορισμένα από αυτά είναι:

- Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας του υλικού πλήρωσης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την υδραυλική αγωγιμότητα του υπάρχοντος υπεδάφους, με ελάχιστη τιμή την 10^{-7} cm/sec για να εξασφαλίζει την υδραυλική στεγάνωση του συστήματος.
- Το υλικό πλήρωσης θα πρέπει να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, εξασφαλίζοντας έτσι την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας από τα τοιχώματα της γεώτρησης στον γεωεναλλάκτη.
- Το υλικό θα πρέπει επίσης να είναι συμβατό ως προς τα φυσικά του χαρακτηριστικά με το υπέδαφος και να μην αντιδράει μαζί του χημικά, για να δημιουργείται ένας ικανοποιητικός δεσμός και να αποτρέπονται οι διαρροές ρευστών από και προς τους υπάρχοντες υδροφόρους.
- Το υλικό πλήρωσης θα πρέπει να έχει αρκετή αντοχή για εξασφαλίζει την υδραυλική στεγάνωση σε όλη την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη στον οποίο τοποθετείται.
- Το υλικό πλήρωσης θα πρέπει να τοποθετείται στις κρίσιμες περιοχές της γεώτρησης ή συχνά κατά μήκος όλου του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη, ώστε να αποφεύγεται η μεταφορά ρευστών από τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια ή την ανταλλαγή ρευστών μεταξύ δυο υδροφόρων.

Σχετικά με την επιλογή υλικών πλήρωσης, υπάρχουν δύο μείζονες κατηγορίες υλικών, ως προς την υδραυλική τους σφράγιση. Τα ενέματα που εξαρτώνται από τα υλικά, που αποδίδουν επαρκώς σε ένα μεγάλο εύρος τεχνικών τοποθέτησης, και τα ενέματα που εξαρτώνται από την τοποθέτηση, που απαιτούν ακριβέστερη τεχνική τοποθέτησης και αποδίδουν μόνο όταν η κατασκευή του ενέματος έχει γίνει με ιδιαίτερη φροντίδα και επιμέλεια. Για τις γεωθερμικές γεωτρήσεις προτιμούνται τα ενέματα εξαρτώμενα από τα υλικά, καθώς αυτά τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, χωρίς να αλλοιωθούν τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά στις περισσότερες διαφορετικές περιπτώσεις γεωτρήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.3: ΚΑΤΑΛΛΗΛΑ ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

Για την επιλογή των κατάλληλων υλικών πλήρωσης σε κάθετους γεωεναλλάκτες λαμβάνεται υπόψη η διάμετρος της γεώτρησης, οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην θέση του υδροφόρου ορίζοντα και η υγρασία του εδάφους πάνω από αυτόν. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η εξισορρόπηση των συνθηκών της γεώτρησης μέσω του ενέματος και οι ανάγκες του εξοπλισμού. Επιπροσθέτως, δίνεται προσοχή στο νερό ανάμειξης του υλικού πλήρωσης και στην χημεία του φυσικού νερού του γεωεναλλάκτη πριν την επιλογή του κατάλληλου ενέματος για μακροχρόνιες εφαρμογές.

Διάφορα υλικά πλήρωσης έχουν χρησιμοποιηθεί σε κοινές εφαρμογές πλήρωσης γεωτρήσεων, συμπεριλαμβανομένων θρυμμάτων γεώτρησης, ρευστά διάτρησης, ρευστά γεώτρησης με αυξημένη πυκνότητα, μπεντονικά ενέματα, καθαρό τσιμέντο, τσιμεντιακό ένεμα, άμμος και άμμος αναμειγμένη με άργιλο. Από αυτές τις εναλλακτικές, ερευνητές και ρυθμιστικές επιτροπές έχουν αναπτύξει την μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα μπεντονικά ενέματα (ενέματα μόνο με μπεντονίτη ή με μπεντονίτη και επιπρόσθετα υλικά) και στα τσιμεντιακά ενέματα (ενέματα μόνο με τσιμέντο ή με τσιμέντο και επιπρόσθετα υλικά), για περιβαλλοντικούς και πρακτικούς λόγους. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα τσιμεντιακά ενέματα δεν σχηματίζουν καλό φυσικό και θερμικό δεσμό με το πλαστικό υλικό του γεωεναλλάκτη που να διαρκεί στο χρόνο, γεγονός που οδηγεί στην μείωση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας από το έδαφος, καθώς και στην σημαντική αύξηση της υδραυλικής διαπερατότητας μέσα στην γεώτρηση (Paul κα, 1997). Για αυτούς τους λόγους, τα μπεντονικά ενέματα θεωρούνται η καλύτερη επιλογή, εφόσον οι συνθήκες και οι ρυθμιστικές επιτροπές το επιτρέπουν. Παρόλα αυτά, υπάρχουν γεωλογικές συνθήκες, όπως τα καρστικοποιημένα πετρώματα που τα μπεντονικά ενέματα δεν επαρκούν και τα τσιμεντιακά ενέματα, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας τους και της ακαμψίας τους, προτιμούνται. Όταν αυτά χρησιμοποιούνται, όμως, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αρνητικά αποτελέσματα τους στην επίδοση του κύκλου μεταφοράς θερμότητας, κατά τον σχεδιασμό του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη. Σε μερικές σπάνιες περιπτώσεις, εγκαταστάσεις επωφελούνται με την χρήση και των δύο τύπων ενεμάτων, αλλά το κόστος της χρήσης και των δύο ενεμάτων είναι γενικά απαγορευτικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.4: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Ένα ένεμα, εξ ορισμού, πρέπει να είναι ικανό να σφραγίζει την γεώτρηση εντός της οποίας είναι ο κάθετος γεωεναλλάκτης από μετακινήσεις νερού στον κατακόρυφο άξονα. Επομένως, η διαπερατότητα του υλικού πλήρωσης είναι σημαντική για να αποτρέπει την μετακίνηση ρευστών στο ένεμα. Όμως, η ικανότητα του ενέματος να διατηρεί έναν επαρκή δεσμό με τον γεωεναλλάκτη και τα τοιχώματα της γεώτρησης για να αποτρέπει την μεταφορά ρευστών από πιθανά κενά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τέλος, ίσης σημασίας είναι και η ικανότητα του ενέματος να μεταφέρει θερμότητα ανάμεσα στο γεωεναλλάκτη και το υπέδαφος. Για τη μέγιστη απόδοση του γεωεναλλάκτη, το ένεμα θα πρέπει να έχει τιμή θερμικής αγωγιμότητας κοντινή με αυτή του γεωλογικού σχηματισμού, διαφορετικά προκύπτει σημαντική μείωση στην απόδοση του συστήματος. Επίσης, η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από την σωστή θερμική επαφή ανάμεσα στο ένεμα, τον γεωεναλλάκτη και τον εδαφικό σχηματισμό. Το ένεμα θα πρέπει να είναι ανθεκτικό στην φυσική συρρίκνωση, για να αποφευχθεί ο διαχωρισμός μεταξύ του ενέματος και του γεωλογικού σχηματισμού λόγω συρρίκνωσης από ξηρασία, και ο διαχωρισμός μεταξύ ενέματος και γεωεναλλάκτη λόγω διαφορών στις θερμικές συστολές τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.4.1: ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΙΚΑ ΕΝΕΜΑΤΑ

Ο μπεντονίτης είναι το πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από το αργιλικό ορυκτό μοντμοριλλονίτη, $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$, (σε ποσοστό μεγαλύτερο από 80%), και σχηματίζεται από την εξαλλοίωση όξινων ηφαιστειακών πετρωμάτων. Όταν η περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη είναι μικρότερη (60-80%), το υλικό χαρακτηρίζεται ως “μπεντονιτική άργιλος”. Πήρε το όνομά του από την τοποθεσία Fort Benton της πολιτείας Yoming των Η.Π.Α., όπου πρωτοανακαλύφθηκε και άρχισε να εξορύσσεται. Ο μοντμοριλλονίτης ανήκει στα αργιλικά ορυκτά, δομής 2:1, αποτελείται δηλαδή από δύο φύλλα τετραέδρων πυριτίου που εμπεριέχουν ένα φύλλο οκταέδρων αργιλίου, σιδήρου και μαγνησίου. Στο διαστρωματικό χώρο, μπορούν να προσρροφηθούν κατίοντα και μεγαλομόρια νερού, γι’ αυτό ο μοντμοριλλονίτης έχει την ιδιότητα της διόγκωσης.

Ο εμπορικός μπεντονίτης έχει ταξινομηθεί σε δυο βασικές κατηγορίες, οι οποίες διακρίνονται σύμφωνα με τις φυσικές ιδιότητες του μπεντονίτη. Ο μπεντονίτης που αποτελείται από νατριούχο μοντμοριλλονίτη ορίστηκε ως ο ‘διογκούμενος μπεντονίτης’, καθώς με την επαρκή προσθήκη νερού, αυτό το είδος μπεντονίτη μπορεί να διογκωθεί περισσότερο από 15 φορές του αρχικού του όγκου. Αντίθετα, ο ασβεστούχος μπεντονίτης δεν διογκώνεται αισθητά με την προσθήκη νερού. Υπάρχουν όμως και είδη μπεντονίτη που έχουν ενδιάμεσες ιδιότητες διόγκωσης.

Οι ιδιότητες του μπεντονίτη να διογκώνεται, απορροφώντας και δεσμεύοντας νερό του δίνουν ένα τριπλό πλεονέκτημα σε αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές. Η ικανότητα διόγκωσης είναι θεμιτή στις λάσπες γεώτρησης, στην κατασκευή σφραγίδων και στην κατασκευή πλαστικοποιητών. Μια μείζονα χρήση του μπεντονίτη είναι ως συστατικό στο ρευστό διάτρησης (λάσπη) που χρησιμοποιείται στην περιστροφική διάτρηση με σημαντική επίδραση των ιδιοτήτων του όπως η ζελατοποίηση, το ιξώδες και σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Στις γεωθερμικές γεωτρήσεις, ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται λόγω της ικανότητάς του να διογκώνεται και λόγω της χαμηλής διαπερατότητα του μετά την ενυδάτωση του.

Τα υλικά για μπεντονιτικά ενέματα είναι εμπορικά διαθέσιμα σε πολλές μορφές, όπως σφαιρίδια, ρινίσματα, κόκκο ή πούδρα. Πιο διαδεδομένη μορφή για τις γεωθερμικές γεωτρήσεις, και η μορφή που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, είναι ο μπεντονίτης σε μορφή πούδρας. Ο μπεντονίτης αυτός, εξορρύσσεται και έπειτα κονιοποιείται σε λεπτή πούδρα, η οποία κοσκινίζεται σε μέγεθος 7×10^{-3} cm. Σε αντίθεση με τα σφαιρίδια, τα ρινίσματα ή τους κόκκους μπεντονίτη, ο πουδροποιημένος μπεντονίτης συνήθως αναμειγνύεται κατευθείαν με νερό για να δημιουργήσει μια τσιμεντολάσπη που μπορεί να αντληθεί. Πρόσθετα υλικά χρειάζονται για να μειώσουν τον ρυθμό της ενυδάτωσης των σωματιδίων του μπεντονίτη. Οι περισσότερες εφαρμογές απαιτούν άντληση του μπεντονίτη μέσω μιας αντλίας στο σημείο εφαρμογής, ειδικά όταν άλλα υγρά πρέπει να αντικατασταθούν από το ένεμα.

Ο μοντμοριλλονίτης αποτελεί βασικό ενεργό συστατικό σε όλα τα μπεντονιτικά ενέματα και τα ρευστά διάτρησης. Η λειτουργία του μπεντονίτη στα ρευστά διάτρησης είναι να προσφέρει επαρκές ιξώδες στο ρευστό ώστε τα θρύμματα να μεταφέρονται εκτός της γεώτρησης. Το μέγιστο ποσοστό μπεντονίτη για ρευστά διάτρησης που θα μπορούσε να αναμειχθεί με νερό, ώστε το μείγμα να είναι εργάσιμο για άντληση είναι 8% μπεντονίτη κατά βάρος. Παρότι το

μείγμα αυτό όμως θα εμφανιζόταν αρκετά πυκνό κατά την άντληση του στην γεώτρηση, η διαπερατότητα του δεν θα ήταν αρκετά χαμηλή για να χαρακτηριστεί ένεμα. Επίσης, το μικρό ποσοστό του στερεού μπεντονίτη θα καθιζήσει στο πάτωμα της γεώτρησης, αφήνοντας μόνο νερό στο πάνω μέρος της. Προφανώς, αυτή δεν θεωρείται σωστή τεχνική πλήρωσης. Μπεντονικά ενέματα υψηλής περιεκτικότητας στερεών συνήθως αποτελούνται από σοδιούχο μπεντονίτη που προαναμειγνύεται με επιλεγμένα προσθετικά για την δημιουργία ενός μείγματος που μπορεί να αναμειχθεί με νερό και να τοποθετηθεί στην γεώτρηση με συμβατικούς εξοπλισμούς ανάμειξης και άντλησης. Αμέσως μετά την ανάμειξη αυτή η ιλύς έχει το ελάχιστο ιξώδες. Το ιξώδες της τότε αρχίζει να αυξάνεται όσο ο μπεντονίτης ενυδατώνεται και απορροφά νερό, δίδοντας έτσι περιορισμένο εργάσιμο χρόνο πριν το ένεμα γίνει υπερβολικά παχύρευστο για να αντληθεί. Ο ρυθμός ενυδάτωσης και τα χαρακτηριστικά άντλησης διαφέρουν σε κάθε προϊόν πλήρωσης.

Εάν το μπεντονικό ένεμα τοποθετηθεί σε κορεσμένο ή αρκετά υγρό σχηματισμό, έχει παρατηρηθεί ότι σφραγίζει την γεώτρηση αποδοτικά για απεριόριστο χρονικό διάστημα. Εάν όμως, το μπεντονικό ένεμα τοποθετηθεί γύρω από γεωεναλλάκτη, σε ξηρό περιβάλλον, και υπάρξει σημαντική θερμική απόρριψη στο υπέδαφος, η οποία συνήθως συμβαίνει κατά την ψύξη του κτηρίου τους καλοκαιρινούς μήνες, ο μπεντονίτης μπορεί να χάσει νερό στον σχηματισμό. Χωρίς προστασία έναντι αυτού του φαινομένου, το αποτέλεσμα θα είναι συρρίκνωση του ενέματος στα τοιχώματα της γεώτρησης, η έκταση της οποίας εξαρτάται από το πόσο νερό έφυγε από το ένεμα και τα αρχικά στερεά περιεχόμενα του. Η ενυδάτωση ολόκληρου του σχηματισμού ίσως είναι η μοναδική λύση για την ενυδάτωση του μπεντονίτη και η επαφή που χάθηκε λόγω της ξήρανσης θα οδηγήσει στην μείωση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του γεωεναλλάκτη και του σχηματισμού. Οι Remund κ.α. (1993) μέτρησαν την συρρίκνωση των μπεντονικών ενεμάτων με βάση τα αρχικά στερεά περιεχόμενα και παρατήρησαν ότι υπάρχει δυναμικό για πιθανή συρρίκνωση και το δυναμικό αυτό αυξάνεται όσο τα αρχικά στερεά περιεχόμενα μειώνονται. Βασισμένοι σε αυτή την πληροφορία, είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται όσο περισσότερα στερεά είναι δυνατόν, εάν η συρρίκνωση λόγω ξηρασίας είναι ανησυχητικός παράγοντας.

Η τοποθέτηση του μπεντονικού ενέματος γίνεται γενικώς μέσω μιας αντλίας θετικής εκτόπισης και ενός σωλήνα τρεμιέ. Η ικανότητα να αντλείται το ένεμα μέσω της αντλίας τρεμιέ εξαρτάται από το ιξώδες της ίλυσ του ενέματος, το οποίο είναι συνάρτηση του τύπου του

μπεντονίτη και του χρόνου που χρειάζεται για να γίνει σωστή ανάμειξη και άντληση του ενέματος μέσω του σωλήνα τριμιέ.

2.6.2: ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΙΚΑ ΕΝΕΜΑΤΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΑ

Οι Remund κ.α. (1993) κατέγραψαν την χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των μπεντονιτικών ενεμάτων και έλεγξαν διάφορα προσθετικά στο μπεντονίτη για να ενισχύσουν θερμικά το μείγμα. Την μεγαλύτερη επιτυχία στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας βρέθηκε όταν χρησιμοποιήθηκε άμμος, συμπεριλαμβανομένων κοινή ασβεστολιθική και χαλαζιακή άμμου και άμμου τοιχοποιίας. Πιο πρόσφατες έρευνες (Paul κ.α. 1997) έδειξαν ότι η πυριτική άμμος παράγει τα ίδια αποτελέσματα με την χαλαζιακή άμμο που είχε ελεγχθεί νωρίτερα. Σε σχέση με την ολική μάζα της ανάμειξης, όσο αυξάνει το ποσοστό του προσθετικού, αυξάνει και η θερμική αγωγιμότητα του μείγματος. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι είναι δυνατός ο σχεδιασμός μιας ανάμειξης μπεντονίτη-άμμου με την διπλάσια θερμική αγωγιμότητα ενός αμιγούς μπεντονιτικών ενέματος. Αύξηση πάνω από αυτό το όριο είναι δύσκολο να επιτευχθεί λόγω του ακραίου πάχους του μείγματος που κάνει την τοποθέτηση του μείγματος στην γεώτρηση εικονικά αδύνατη.

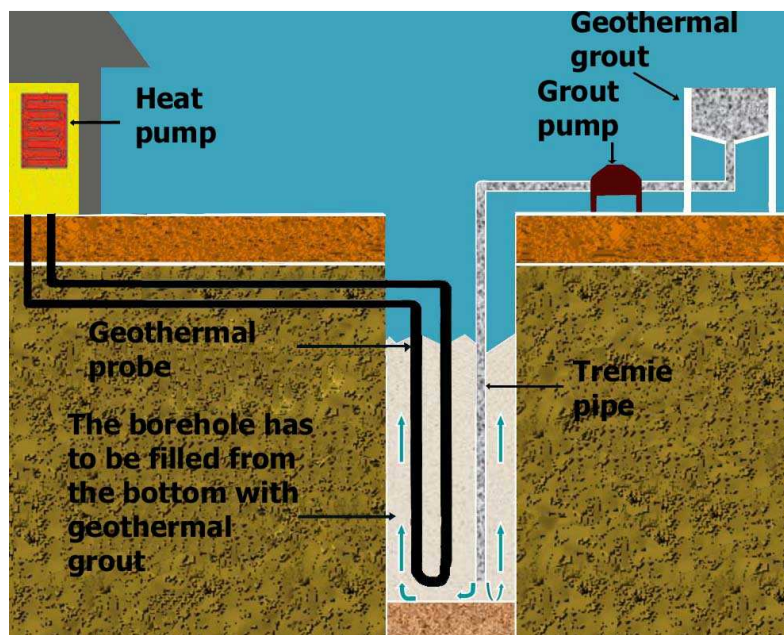
Οι Remund κ.α. (1993) επίσης μελέτησαν τις επιπτώσεις των κοκκοειδών προσθετικών στα μπεντονιτικά ενέματα σε σχέση με την συρρίκνωση λόγω υγρασίας. Βρέθηκε ότι με την προσθήκη κοκκοειδών προσθετικών, όπως η άμμος, μειώνεται το δυναμικό συρρίκνωσης λόγω ξηρασίας λόγω του πλέγματος των κοκκοειδών σωματιδίων που υπάρχουν στο μείγμα. Επίσης, η προσθήκη κοκκοειδούς απαιτεί λιγότερο νερό στο μείγμα για να είναι εργάσιμο, αφήνοντας λιγότερο νερό να καταλαμβάνει όγκο και εν τέλει να αφαιρεθεί κατά την διάρκεια της ξήρασης. Η προσθήκη κοκκοειδών υλικών μειώνει αισθητά την γραμμική ικανότητα συρρίκνωσης του μείγματος, καθιστώντας το μείγμα πιο σταθερό σε περιπτώσεις που μπορεί να προκύψει ξήραση.

Η ικανότητα των μπεντονιτικών ενεμάτων με προσθετικά να σφραγίζουν υδραυλικά την γεώτρηση μετά την εγκατάσταση του γεωεναλλάκτη είναι υποχρεωτική για να τα εστερνιστούν οι ρυθμιστικές κοινότητες. Οι Remund κ.α. (1993) αξιολόγησαν την διαπερατότητα ενός μπεντονιτικού ενέματος με προσθήκη διαφόρων προσθετικών. Ανεξαρτήτως του προσθετικού,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

υπήρξε ένα ρητό όριο στο ποσό του προσθετικού που μπορεί να αναμειχθεί με μπεντονίτη, σαν εργάσιμη ανάμειξη, και να διατηρήσει διαπερατότητα μικρότερη του 1×10^{-7} εκατοστά/δευτερόλεπτο.

Η προσθήκη όμως κοκκοειδών υλικών στην μπεντονιτική ιλύ γενικά οδηγεί σε μια ανάμειξη με μεγαλύτερο ιξώδες που θα είναι δυσκολότερο να αντληθεί από τον σωλήνα τριμιέ. Οι Heimberger και Remund (1997) εξέτασαν τα ιξώδη των μπεντονιτικών με κοκκώδη προσθετικά για να προσδιορίσουν τα σχετικά προαπαιτούμενα άντλησης του καθενός. Μέσω αυτής της έρευνας παρατηρείται ότι το ιξώδες και η ικανότητα άντλησης των μπεντονιτικών αναμειξεων με προσθετικά άμμου εξαρτώνται άμεσα στον τύπο του μπεντονίτη που χρησιμοποιείται και το ποσοστό του μπεντονίτη αυτού στο μείγμα. Αυτά τα αποτελέσματα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό, ώστε να αναμειχθεί ένα θερμικά ενισχυμένο ένεμα που είναι εργάσιμο να αναμειχθεί και να τοποθετηθεί στην γεωθερμική γεώτρηση, και έχει χαμηλή διαπερατότητα.



Εικόνα 7: Τοποθέτηση ενέματος σε κάθετο γεωεναλλάκτη

2.6.3: ΤΣΙΜΕΝΤΙΑΚΑ ΕΝΕΜΑΤΑ

Ένα τσιμεντιακό ένεμα είναι μια ανάμειξη υδραυλικού τσιμέντου και νερού, με ή χωρίς την προσθήκη αδρανών προσθετικών ή αντιδραστηρίων. Η διάκριση ανάμεσα σε ένεμα, κονίασμα και σκυρόδεμα μπορεί να είναι δύσκολη, λόγω των παρόμοιων συστατικών και ιδιοτήτων τους. Το ένεμα έχει συνήθως τις αναλογίες για να είναι εργάσιμο με αντλία. Τα καθαρά τσιμεντιακά ενέματα εμπεριέχουν μόνο υδραυλικό τσιμέντο και νερό. Τα αμμούχα ενέματα εμπεριέχουν τσιμέντο, νερό και ψιλή άμμο. Τα σκυροδεματούχα ενέματα εμπεριέχουν αναμείξεις σκυροδέματος με μεγάλα και μικρά προσθετικά.

Τα τσιμεντιακά ενέματα, στο παρελθόν, ήταν προτιμότερα από τα μπετονούχα σε ορισμένες περιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων των γεωτρήσεων σε πάγιους βραχώδης σχηματισμούς, καρστικοποιημένους σχηματισμούς και γεωτρήσεις που διαπέρασαν μεγάλους ακόρεστους σχηματισμούς. Στους πάγιους σχηματισμούς, το τσιμέντο είχε θεωρηθεί ότι δημιουργεί με το φυσικό περιβάλλον μια πιο σταθερή σφραγίδα. Όταν μεγάλη ποσότητα νερού μετακινούταν μέσω των καρστικοποιημένων σχηματισμών, υπήρχε φόβος ότι ο μπετονίτης θα μπορούσε να αποκολληθεί. Το καθαρό τσιμέντο τοποθετεί μια τραχιά σφραγίδα, μη επιδεκτική στην διάβρωση από τον υδροφόρο. Στους ακόρεστους σχηματισμούς, μπορεί να προκύψει ξήρανση του μπετονίτη αν δεν γίνουν προσπάθειες αποφυγής, που θα οδηγούσαν σε σημαντική συρρίκνωση και θα χανόταν η μονωτική ιδιότητά του, καθώς και η γέφυρα μεταφοράς θερμότητας στον περιβάλλοντα σχηματισμό. Το καθαρό τσιμέντο ευνοείται στους ακόρεστους σχηματισμούς λόγω του μικρότερου δυναμικού συρρίκνωσης.

Τα τσιμεντιακά ενέματα, όμως έχουν και μειονεκτήματα που περιορίζουν την χρήση τους στις γεωθερμικές εφαρμογές. Πρώτον, όταν το καθαρό τσιμέντο ενυδατώνεται σχηματίζει μια άκαμπτη μάζα και συρρικνώνεται ελάχιστα. Στους κάθετους γεωεναλλάκτες, τα τσιμεντιακά ενέματα δεν έχουν την ικανότητα να συστέλλονται και να διαστέλλονται όταν ο γεωεναλλάκτης θερμαίνεται και ψύχεται, και πιθανότατα επηρεάζουν την μεταφορά θερμότητας μειώνοντας την θερμική επαφή ανάμεσα στο ένεμα και τον γεωεναλλάκτη. Εργαστηριακές δοκιμές από Paul κ.α. (1997) υποδεικνύουν ότι το φαινόμενο αυτό θα ήταν πιο εμφανές μακροπρόθεσμα, μετά από ορισμένους κύκλους ανάμεσα σε θέρμανση και ψύξη. Επίσης έχει αναφερθεί ότι η συρρίκνωση του καθαρού τσιμέντου μπορεί να δημιουργήσει μικροδακτύλιους ανάμεσα στο

ένεμα και τα τοιχώματα της γεώτρησης. Ένα ακόμα πρόβλημα των καθαρών τσιμεντιακών ενεμάτων είναι η θερμότητα κατά την ενυδάτωσή τους. Όταν το τσιμέντο ενυδατώνεται απελευθερώνει θερμότητα, και αυτή η θερμότητα έχει παρατηρηθεί να καταστρέφει σωλήνες πολυαιθυλενίου σε εφαρμογές γεωτρήσεων νερού. Οι ίδιοι ερευνητές μελέτησαν την θερμότητα της ενυδάτωσης και τις επιπτώσεις της και ταυτοποίησαν περιπτώσεις όπου υπερβολικά μεγάλες θερμοκρασίες θεωρήθηκαν ανησυχητικές. Τέλος, ίσως το μεγαλύτερο μειονέκτημα, λόγω του οποίου προτιμούνται τα μπεντονικά ενέματα, είναι το κόστος. Τα μπεντονικά ενέματα είναι γενικά φθηνότερα ανά μονάδα όγκου υλικού πλήρωσης από τα τσιμεντιακά.

2.6.4: ΤΣΙΜΕΝΤΙΑΚΑ ΕΝΕΜΑΤΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΑ

Ο μπεντονίτης και η άμμος είναι κοινά προσθετικά στο τσιμέντο για να αυξήσουν τον όγκο και να μειώσουν την πυκνότητα της ιλύος του καθαρού τσιμέντου. Ο μπεντονίτης γενικά προστίθεται στο καθαρό τσιμέντο σε συγκεντρώσεις από 2% έως 8% κατά βάρος τσιμέντου. Ο μπεντονίτης έχει χρησιμοποιηθεί ιστορικά για να εξουδετερώνει την συρρίκνωση του καθαρού τσιμέντου. Παρ'όλα αυτά όμως, η ελάττωση της συρρίκνωσης με τον μπεντονίτη σαν προσθετικό έχει παρατηρηθεί ότι δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο θεωρείτο επειδή η παρουσία των ιόντων CA^{+2} και OH^{-} στο τσιμέντο μειώνουν την ικανότητα του μπεντονίτη να διογκώνεται. Οι Paul και Remund (1997a) συζήτησαν στην έρευνα τους αρκετά επιδράσεις που προκύπτουν με την χρήση του μπεντονίτη σαν προσθετικό σε τσιμεντιακά ενέματα.

Οι Paul και (1997) έκαναν εργαστηριακές αναλύσεις σε τσιμέντο με προσθετικά μπεντονίτη και άμμου. Καθορίστηκαν φυσικές ιδιότητες, όπως ο όγκος, το βάρος της ιλύος και η συρρίκνωση μετά από πλήρη ξήρανση. Η διαπερατότητα του καθαρού τσιμεντιακού ενέματος και του τσιμεντιακού ενέματος με προσθετικά συζητήθηκε και πραγματοποιήθηκαν εξετάσεις σε σωλήνες για να προσδιοριστεί το δυναμικό να αυξηθεί η διαπερατότητα κατά μήκος του σωλήνα, όταν θα υπήρχε συστολή του μακριά από το ένεμα. Μετρήσεις θερμότητας κατά την ενυδάτωση πραγματοποιήθηκαν για να προσδιορίσουν αν υπάρχει κίνδυνος ζημιάς του σωλήνα πολυαιθυλενίου λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι τέτοιος κίνδυνος υπάρχει μόνο σε ζώνες υπερβολικής έκπλυσης κατά μήκος της γεώτρησης και η

θερμότητα θα διασκορπίζόταν αισθητά στις κοινές διαμέτρους γεώτρησης. Τέλος, μετρήθηκε η θερμική αγωγιμότητα των τσιμεντιακών ενεμάτων με προσθήκη μπεντονίτη και άμμου.

2.7: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Σχεδιάζοντας ένα φορτίο θέρμανσης και ψύξης εδάφους, ο σωστός σχεδιασμός ενός κάθετου κυκλώματος γεωεναλλακτών πρέπει να λαμβάνει υπόψη την θερμική αγωγιμότητα του σχηματισμού, την απόσταση των γεωτρήσεων κατα την διεύθυνση του πλέγματος και την θερμική αντίσταση της γεώτρησης. Η θερμική αντίσταση γεώτρησης συμπεριλαμβάνει την αντίσταση του υλικού σωλήνωσης, το μέγεθος και την απόσταση των γεωεναλλακτών και την θερμική αγωγιμότητα του ενέματος που τοποθετείται στην γεώτρηση. Οι Paul και Remund (1997) μελέτησαν την αποδοτική θερμική αγωγιμότητα ενέματος, η οποία εξετάζει την διάμετρο της γεώτρησης, το μέγεθος και την διάταξη του σωλήνα και την θερμική αγωγιμότητα του ενέματος, αλλά δεν συμπεριέλαβαν την θερμική αντίσταση των δύο σωλήνων των γεωεναλλακτών στην γεώτρηση. Η διάμετρος της γεώτρησης εκυμάνθη από 3.5 ίντσες μέχρι 6.5 ίντσες και το μέγεθος των σωλήνων από ονομαστικά $\frac{3}{4}$ της ίντσας έως 1 και $\frac{1}{4}$ της ίντσας. Μελετήθηκε επίσης η εγκατάσταση των σωλήνων, συμπεριλαμβανομένων των τοποθετήσεων στο κέντρο της γεώτρησης, σε ίση απόσταση από το κέντρο και στα τοιχώματα της γεώτρησης σε αντιδιαμετρικά σημεία. Η θερμική αγωγιμότητα του ενέματος εκυμάνθη από 0.066 έως 0.167 W/(m*K). Τα αποτελέσματα αδιαστατοποιήθηκαν ως συντελεστής σχήματος γεώτρησης, από τον οποίο καθορίζεται την ισχύουσα θερμική αντίσταση του ενέματος. Η ισχύουσα θερμική αντίσταση του ενέματος μπορεί να προστεθεί με την θερμική αντίσταση του γεωεναλλάκτη για να σχηματίσει την θερμική αντίσταση της γεώτρησης. Αυτή η τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με υπάρχοντες υπολογισμούς σχεδιασμού για να εξεταστεί η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας του ενέματος στον σχεδιασμό του μήκους του γεωεναλλάκτη.

2.8: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η επίδραση της αναλογίας νερού προς μπεντονικό υλικό επιδεικνύεται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αναμείξεων με διαφορετικές αναλογίες. Η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται όσο μειώνεται το ποσοστό νερού/μπεντονικό υλικού. Όταν το ποσό του νερού στο αρχικό δείγμα ξεπερνά το απαιτούμενο για την ενυδάτωση του μπεντονίτη μπορεί να εξατμιστεί, αφήνοντας πόρους στο ένεμα. Ενέματα με υψηλό ποσοστό νερού/μπεντονίτη έχουν μεγαλύτερο πορώδες και χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από ενέματα με χαμηλότερο ποσοστό.

Μελέτες μεταφοράς θερμότητας από Braud (1991) και Braud και McNamara (1989) έδειξαν ότι ενέματα καθαρού τσιμέντου αποδίδουν παρόμοια στα εμπορικά μπεντονικά ενέματα στις δοκιμές που έγιναν. Αυτό συμβαδίζει με την σχετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των ενεμάτων καθαρού τσιμέντου.

Η διατήρηση των ιδιοτήτων θερμικής αγωγιμότητας κάτω από συνθήκες ξηρασίας είναι σημαντικός παράγοντας. Τα ενέματα με υψηλό ποσοστό νερού/τσιμέντο παρατηρούνται να έχουν σημαντική μείωση στην θερμική αγωγιμότητα κατά την ξήρανση, σε σύγκριση με τα ενέματα με χαμηλό ποσοστό στα οποία η μείωση αυτή είναι μικρότερη. Επομένως, τα ενέματα με χαμηλό ποσοστό νερού/στερεού έχουν μικρότερη μείωση θερμικής αγωγιμότητας κατά την ξήρανση (Alan, 2007).

2.9: ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η Alan (2007) μελέτησε την αλλαγή της διαπερατότητας ανάλογα με την αλλαγή του ποσοστού νερού/τσιμέντου στην ανάμειξη. Η έρευνα της έδειξε ότι η αύξηση του ποσοστού από 0.4 σε 0.8 αυξάνει την τιμή της διαπερατότητας εκθετικά. Τα προσθετικά στο μείγμα δεν προκαλούν μεγάλες διαφορές στην διαπερατότητα του μείγματος. Για τσιμεντιακά μείγματα, ποσοστό μεγαλύτερο του 0.75 αποτελεί μείγμα με υδροπερατότητα πάνω από το όριο για να θεωρηθεί ένεμα, και όσο το ποσοστό νερού στερεού ελαττωνόταν, υπήρχε και ελάττωση στην διαπερατότητα. Η διαπερατότητα των υλικών πλήρωσης στα δοκίμια της είχε την τάση να έχει μεγαλύτερη διαφοροποίηση σε δοκίμια που τοποθετούνταν σε σωλήνες από δοκίμια σε

χονδρικούς όγκος. Αυτό αποδίδεται σε μεγαλύτερα μονοπάτια υδροπερατότητας που σχηματίζονταν στους σωλήνες λόγω μη ικανοποιητικής επαφής σε αυτούς. Η ίδια έρευνα έδειξε ότι η προσθήκη κοκκωδών στερεών μειώνει το εύρος της αύξησης της διαπερατότητας.

2.10: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Ένας τρόπος να περιγραφούν τα χαρακτηριστικά μεταβίβασης θερμότητας σε περίπλοκη γεωθερμία είναι μέσω της χρήσης ενός συντελεστή σχήματος. Για την γεωμετρία δυο σωλήνων σε μια γεώτρηση, ο συντελεστής σχήματος γεώτρησης μπορεί να οριστεί, ανά μονάδα μήκους γεώτρησης, ως (grouting for vertical geothermal heat pump systems):

$$q' = S_b k_g (T_p - T_b) \quad (2.1)$$

όπου: q' = Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα μήκους της γεώτρησης (W/m)

S_b = Συντελεστής σχήματος γεώτρησης

k_g = Θερμική αγωγιμότητα ενέματος (W/m-°C)

T_p = Θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια των γεωεναλλάκτη (°C)

T_b = Θερμοκρασία τοίχου γεώτρησης (°C)

Οι Paul και Remund (1997) ανέπτυξαν μια μέθοδο για να υπολογίζουν την ισχύουσα θερμική αντίσταση. Ο συντελεστής σχήματος γεώτρησης συσχετιζόταν με την θερμική αντίσταση του ενέματος της γεώτρησης ως εξής:

$$R_g = 1/S_b k_g \quad (2.2)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Η εξίσωση 2.2 χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί ο συντελεστής σχήματος γεώτρησης από πειραματικά ισχύοντα δεδομένα θερμικής αντίστασης και θερμικής αγωγιμότητας ενέματος. Το αποτέλεσμα ήταν η κατασκευή της εξίσωσης συντελεστή σχήματος γεώτρησης η οποία είναι:

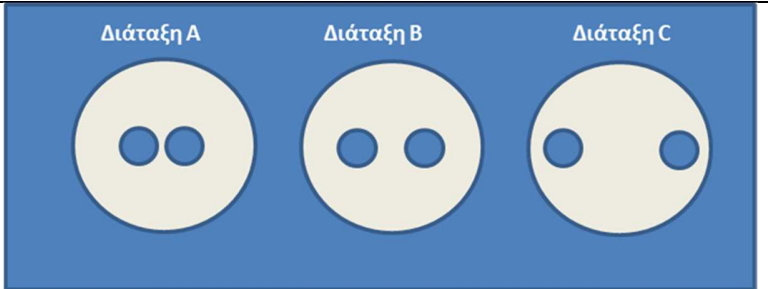
$$S_b = \beta_0 \left(\frac{D_b}{D_{p,o}} \right)^{\beta_1} \quad (2.3)$$

όπου β_0 και β_1 , συντελεστές που σχετίζονται με τη διάταξη των αγωγών εντός γεώτρησης (πίνακας 1) και

D_b : διάμετρος γεώτρησης (m)

$D_{p,o}$: εξωτερική διάμετρος αγωγού (m)

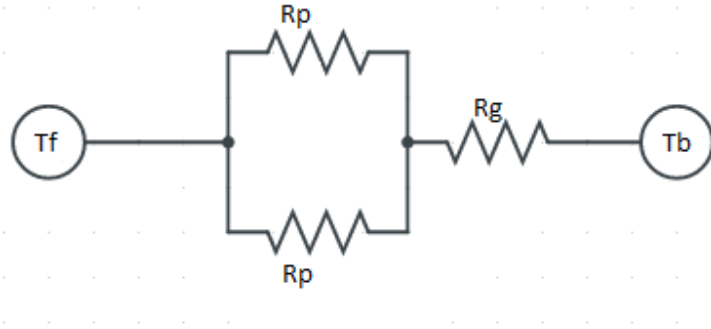
Πίνακας 2.1: Συντελεστής προσαρμογής για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης του υλικού πλήρωσης

	β_0	β_1	
Διάταξη A	20.1	-0.9447	
Διάταξη B	17.44	-0.6052	
Διάταξη C	21.91	-0.3796	

Στην εξίσωση 2.3 συμπεριλαμβάνεται και η περίπτωση που ο γεωεναλλάκτης θεωρείται ως μια ενιαία σωλήνα ίσης διαμέτρου., οι τιμές της οποίας θα είναι παρόμοιες με γεωεναλλάκτη διάταξης A με ίδια διάμετρο.

2.11: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Η θερμική αντίσταση γεώτρησης μπορεί να υπολογιστεί, γνωρίζοντας ότι η θερμική αντίσταση του ενέματος και της σωλήνα λειτουργούν σε σειρά, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.



Εικόνα 8: Μοντέλο σύνδεσης θερμικής αντίστασης σωλήνων γεωεναλλάκτη και ενέματος

Η συνολική αντίσταση των σωλήνων είναι ίση με την θερμική αντίσταση του καθενός σε παράλληλη σύνδεση. Η εξίσωση υπολογισμού της θερμικής αντίστασης των δυο σωλήνων σε παράλληλη είναι:

$$R_{pp} = \frac{R_{p1}R_{p2}}{R_{p1} + R_{p2}} \quad (2.4)$$

Οι δύο σωλήνες, όμως έχουν την ίδια θερμική αντίσταση ($R_{p1} = R_{p2} = R_{pipe}$), οπότε η εξίσωση 2.4 γίνεται:

$$R_{pp} = \frac{R_{pipe}}{2} \quad (2.5)$$

Επομένως, η τελική θερμική αντίσταση της γεώτρησης (R_b) υπολογίζεται από το σύνολο της θερμικής αντίστασης του ενέματος και της μισής θερμικής αντίστασης μιας σωλήνας του γεωεναλλάκτη που χρησιμοποιείται.

$$R_b = R_{pp} + R_g \quad (2.6)$$

2.12: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΝΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

2.12.1: ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ

Η θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού έχει σημαντική επίδραση στον σχεδιασμό του μήκος ενός κατακόρυφου γεωεναλλάκτη. Μέθοδοι και λογισμικά σχεδιασμού που μπορούν να λάβουν υπόψη τις θερμικές ιδιότητες του ενέματος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για να σιγουρέψουν ότι οι θερμοκρασίες των ρευστών του βρόχου εξέρχονται εντός των ορίων που επιβάλλει ο σχεδιαστής του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη.

Τα δεδομένα τις θερμικής αντίστασης του ενέματος μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να συγκριθούν τα μήκη σχεδιαζόμενων γεωθερμικών γεωτρήσεων που χρησιμοποιούν ενέματα με διαφορετικές θερμικές ιδιότητες. Ο σχεδιαστής, με την σύγκριση αυτή, μπορεί να προσδιορίσει εάν οι οικονομίες σε κόστη διάτρησης, σωλήνων και εργατοωρών λόγω της μείωσης του μήκους της γεώτρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντικατάσταση ενός συμβατικού υλικού πλήρωσης με ενός υλικού με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα.

2.12.2: ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ

Κατά την εγκατάσταση του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη, το ένεμα πρέπει να τοποθετηθεί στον δακτύλιο της γεώτρησης, ανάμεσα στον εδαφικό σχηματισμό και τον γεωεναλλάκτη. Αυτή η διαδικασία γίνεται μέσω μιας αντλίας και ενός σωλήνα τριμιέ, ο οποίος ξεκινά από το πυθμένα της γεώτρησης και ανεβαίνει σταδιακά καθώς τοποθετεί το ένεμα στο δακτύλιο της γεώτρησης. Η εκτίμηση και επιλογή ενός ενέματος που θα τοποθετηθεί με συμβατικές μεθόδους άντλησης και με την μέθοδο του σωλήνα τριμιέ πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα και το ιξώδες του ενέματος, όταν βρίσκεται σε κατάσταση ιλύος. Σε πολλές περιπτώσεις, οι γεωθερμικές γεωτρήσεις έχουν μεγάλο βάθος και απαιτούν την χρήση σωλήνα τριμιέ μήκους μεγαλύτερο από 100 μέτρα. Η επιλογή ενέματος με μεγάλο ιξώδες θα οδηγήσει σε υψηλές πιέσεις άντλησης που δυσκολεύουν την εφαρμογή στο πεδίο. Εάν χρησιμοποιηθεί θερμικά

ενισχυμένο ένεμα, το υλικό πρέπει να μπορεί να είναι αντλήσιμο για αρκετό χρόνο μετά την ανάμειξη του για να επιτρέψει την σωστή ανάμειξη πριν αντληθεί κατά μήκος όλου του σωλήνα τριμιέ.

2.13: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Από όσα αναλύθηκαν στο κεφάλαιο αυτό, συμπεραίνουμε ότι ένα ένεμα θα πρέπει:

1. Να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα για να αυξάνει την θερμική απόδοση του συστήματος
2. Να έχει χαμηλή διαπερατότητα, ώστε να στεγανώνει υδραυλικά την γεώτρηση και να αποφεύγονται οι διαρροές.
3. Να έχει χαμηλό ιξώδες ώστε να είναι εύκολη, γρήγορη και αποτελεσματική η τοποθέτηση του.

Σύμφωνα με αυτά τα κριτήρια, έχουν αναπτυχθεί και ερευνώνται δύο μεγάλες ομάδες ενεμάτων, τα μπεντονιτικά και τα τσιμεντιακά ενέματα. Τα μπεντονιτικά προτιμούνται για τις πλαστικές ιδιότητες που προσφέρει ο μπεντονίτης στο ένεμα, ενώ τα τσιμεντιακά προτιμούνται καθώς θεωρείται ότι εξασφαλίζουν καλύτερη στεγάνωση του συστήματος κάθετων γεωεναλλακτών. Και στις δύο ομάδες αυτές, γίνεται χρήση προσθετικών στα ενέματα, για την βελτιστοποίηση των θερμικών ιδιοτήτων τους.

Υπάρχει όμως, εμπορική πρακτική να εμφανίζονται υλικά πλήρωσης με εξαιρετικά μεγάλες τιμές θερμικής αγωγιμότητας, χωρίς όμως να διευκρινίζεται σε τι συνθήκες πυκνότητας αναφέρονται.

Η παρούσα διπλωματική, λοιπόν, έχει στόχο να εξετάσει την ποιοτική και ποσοτική επίδραση της μεταβολής που ποσοστού γραφίτη ως προσθετικό, στην θερμική αγωγιμότητα και ηλεκτρική αντίσταση μπεντονιτικών ενεμάτων διαφόρων πυκνοτήτων και να δημιουργήσει μια ρεαλιστική βάση πειραματικών δεδομένων των θερμικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων υλικών πλήρωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1: ΣΚΟΠΟΣ

Η παρουσίαση και ανάλυση των εξισώσεων των παραπάνω κεφαλαίων, αποδεικνύουν ότι η θερμική αγωγιμότητα του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη είναι μια συνάρτηση του συντελεστή σχήματος της γεώτρησης και της θερμικής αγωγιμότητας του ενέματος. Προηγούμενες μελέτες απέδειξαν ότι η θερμική αγωγιμότητα του ενέματος είναι άρτια συνδεδεμένη με το ποσοστό νερού/μπεντονιτικού υλικού στο ένεμα. Στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, με σκοπό τον προσδιορισμό της θερμικής, αλλά και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε μπεντονικά ενέματα με προσθετικό υλικό τον γραφίτη. Ο γραφίτης επιλέχθηκε σαν προσθετικό υλικό του μπεντονίτη στην παρούσα διπλωματική, καθώς είναι υλικό ικανό να ενισχύσει τις θερμικές ιδιότητες του ενέματος. Τα οφέλη που έχει όμως, στην κατασκευή μπεντονιτικών ενεμάτων, δεν έχουν καταγραφεί ποσοτικά ή ποιοτικά. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθεί, κάνει ένα ποσοτικό και ποιοτικό έλεγχο των επιδράσεων του γραφίτη ως προσθετικό σε μπεντονικά ενέματα.

Σκοπός των πειραμάτων αυτών είναι

1. Η εξέταση της ποιοτικής και ποσοτικής επίδρασης της μεταβολής του ποσοστού γραφίτη στην θερμική αγωγιμότητα και την ηλεκτρική αντίσταση μπεντονιτικών μειγμάτων διαφόρων πυκνοτήτων.
2. Η δημιουργία μιας αξιόπιστης βάσης πειραματικών δεδομένων θερμικών και φυσικών ιδιοτήτων υλικών πλήρωσης που μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν στην πράξη (εργασιμότητα, πυκνότητα, χαμηλό ιξώδες). Η βάση αυτή θα μπορεί να αξιοποιηθεί:
 - Στον σχεδιασμό υλικών πλήρωσης γεωεναλλακτών με βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες.
 - Στην ποσοτική συσχέτιση της επίδρασης του ποσοστού γραφίτη και της πυκνότητας του υλικού πλήρωσης με την θερμική αγωγιμότητα του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

- Στον καθορισμό ρεαλιστικών τιμών θερμικών ιδιοτήτων υλικών πλήρωσης, οι οποίες μπορούν να αξιοποιούνται στον σχεδιασμό γεωθερμικών συστημάτων, χωρίς να οδηγούν σε υπερδιαστασιολόγηση ή υποδιαστασιολόγηση των συστημάτων (ως τιμές βάσης-αναφοράς).
3. Η προσπάθεια συσχέτισης της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ενέματος, ώστε να πετύχει τον ευκολότερο και ταχύτερο υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη στο πεδίο.
 4. Η τεχνική μελέτη η οποία θα μας οδηγήσει στην ορθή επιλογή μιας αναλογίας γραφίτη/μπεντονίτη κατά την ανάμειξη για την κατασκευή ενός μπεντονιτικών ενέματος γνωστής θερμικής αγωγιμότητας με την βέλτιστη εργασιμότητα και το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Για να μπορέσει να προσδιοριστεί η διαφοροποίηση της θερμικής και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σε ένα μπεντονιτικό ένεμα, ανάλογα με το ποσοστό γραφίτη που χρησιμοποιείται ως προσθετικό υλικό, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων στα οποία, για ενέματα καθορισμένης αναλογίας μπεντονίτη/γραφίτη, μετρήθηκε η θερμική αγωγιμότητα (k) και η ηλεκτρική αντίσταση (R), για μεταβαλλόμενο ποσοστό νερού/μπεντονιτικού μείγματος, αλλά και ποσοστού γραφίτη στο υλικό αυτό.

3.2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Για την εκπόνηση αυτής της πειραματικής εργασίας, σε τρεις σταθερές αναλογίες νερού – μπεντονίτη, προστέθηκε προοδευτικά γραφίτης, για την δημιουργία 15 συνολικά δειγμάτων διαφορετικής πυκνότητας και αναλογιών.

Τα αρχικά υλικά ανάμειξης ήταν σε κονιοποιημένη μορφή, όπως αυτά προμηθεύτηκαν από το εμπόριο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



Εικόνα 9: Μπεντονίτης και Γραφίτης, σε κονιοποιημένη μορφή, που χρησιμοποιήθηκε

Εξετάστηκε η αλλαγή στις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες του μείγματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στην εικόνα 10 παρουσιάζονται οι αναμειξίες με τα ποσοστά τους σε γραφίτη και μπεντονιτη. Δείγματα 1 και 17 ονομάστηκαν τα δείγματα καθαρού Μπεντονίτη και Γραφίτη αντίστοιχα, τα οποία μετρήθηκαν για να προκύψουν αντίστοιχες συγκριτικές τιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Εικόνα 10:Τιτλοφόρηση δειγμάτων βάση αναλογίας γραφίτη/μπεντονίτη και πυκνότητας

Αναλογία Νερού- Μπεντονίτη	Αναλογία Γραφίτη – Μπεντονίτη				
	I (1:5)	II (2:5)	III (3:5)	IV (4:5)	V (5:5)
A (5:1)	Δείγμα 2 3 λίτρα νερό 600 gr μπεντονίτη 120 gr γραφίτη	Δείγμα 5 3 λίτρα νερό 600 gr μπεντονίτη 240 gr γραφίτη	Δείγμα 8 3 λίτρα νερό 600 gr μπεντονίτη 360 gr γραφίτη	Δείγμα 11 3 λίτρα νερό 600 gr μπεντονίτη 480 gr γραφίτη	Δείγμα 14 3 λίτρα νερό 600 gr μπεντονίτη 600 gr γραφίτη
B (7.5:1)	Δείγμα 3 3 λίτρα νερό 450 gr μπεντονίτη 90 gr γραφίτη	Δείγμα 6 3 λίτρα νερό 450 gr μπεντονίτη 180 gr γραφίτη	Δείγμα 9 3 λίτρα νερό 450 gr μπεντονίτη 270 gr γραφίτη	Δείγμα 12 3 λίτρα νερό 450 gr μπεντονίτη 360 gr γραφίτη	Δείγμα 15 3 λίτρα νερό 450 gr μπεντονίτη 450 gr γραφίτη
Γ (10:1)	Δείγμα 4 3 λίτρα νερό 300 gr μπεντονίτη 60 gr γραφίτη	Δείγμα 7 3 λίτρα νερό 300 gr μπεντονίτη 120 gr γραφίτη	Δείγμα 10 3 λίτρα νερό 300 gr μπεντονίτη 180 gr γραφίτη	Δείγμα 13 3 λίτρα νερό 300 gr μπεντονίτη 240 gr γραφίτη	Δείγμα 16 3 λίτρα νερό 300 gr μπεντονίτη 300 gr γραφίτη

Οι αναμείξεις αυτές τοποθετήθηκαν σε ειδικούς υποδοχείς, στους οποίους πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας. Κάθε ανάμειξη είχε τελικό όγκο, περίπου τρία λίτρα, και χωρίστηκε σε δύο υποδοχείς, ο καθένας από τους οποίους χρησιμοποιήθηκε για διαφορετική μέτρηση. Οι μετρήσεις διήρκησαν για μια βδομάδα από την στιγμή που το δείγμα αναμείχθηκε, όμως μια τελική μέτρηση πραγματοποιήθηκε μετά από 30 μέρες για να προσδιοριστούν οι τελικές ιδιότητες του μείγματος.

Ο μπεντονίτης που χρησιμοποιήθηκε, προμηθεύτηκε από την εταιρεία S&B BIOMΗΧΑΝΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ Α.Ε. και εξετάστηκε με περιθλασιμετρία ακτίνων X για να προσδιοριστεί η ορυκτολογική του σύσταση. Για προσθετικό χρησιμοποιήθηκε κοινός γραφίτης εμπορίου και εξετάστηκε με τον ίδιο τρόπο. Τα αποτελέσματα τους αναλύονται στο Κεφάλαιο 4.4.

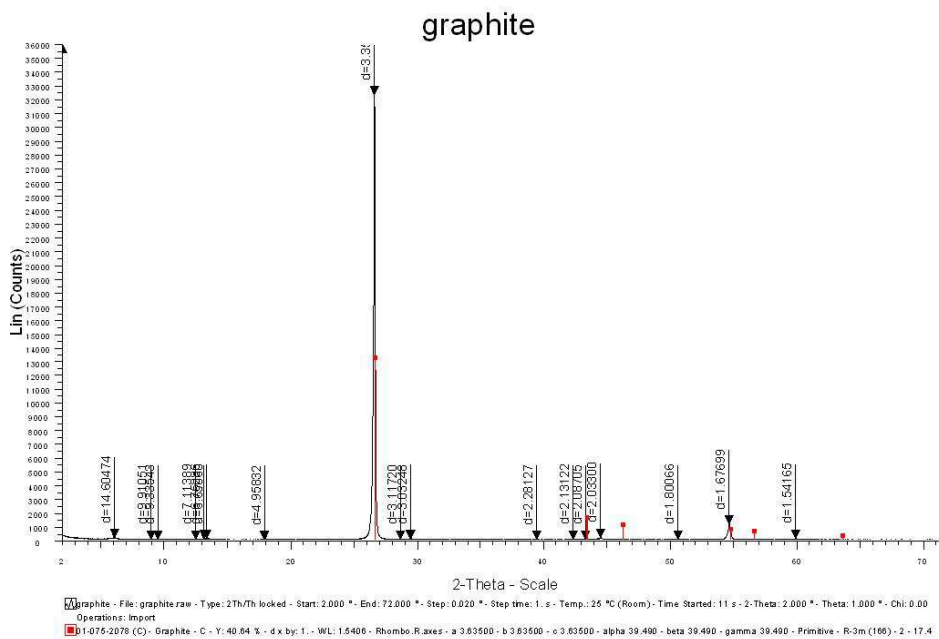
3.3: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Προκειμένου να εξεταστεί η ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και να προσδιοριστεί η ορυκτολογική σύσταση τους, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από την περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

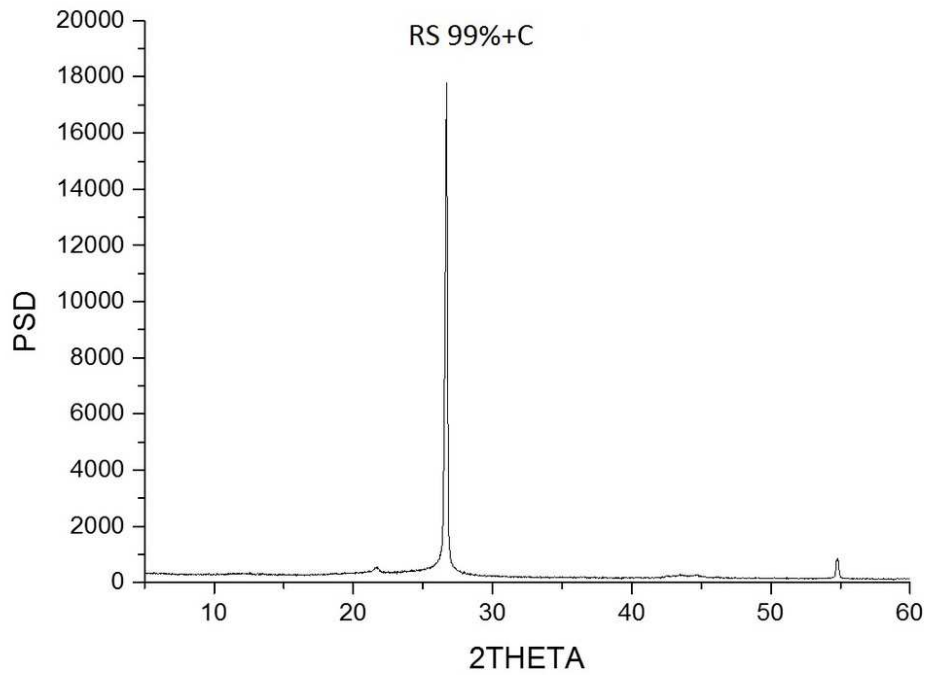
Τα δείγματα εξετάστηκαν με περιθλασιμετρία ακτίνων - X (X-Ray Diffraction, XRD). Για τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο τύπου Bruker D8 Focus με τις ακόλουθες συνθήκες λειτουργίας: ακτινοβολία CuK α , ($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$), φίλτρο Ni, ένταση 30 mA, τάση 40 kV και ταχύτητα γωνιόμετρου 10/min. Η ταυτοποίηση των διαφόρων ορυκτολογικών φάσεων, έγινε με βάση τις χαρακτηριστικές ανακλάσεις τους. Η εξέταση με περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD) έγινε σε κονιοποιημένα δείγματα και η ταυτοποίηση των ορυκτών έγινε με βάση τις χαρακτηριστικές ανακλάσεις τους.

Οι ανακλάσεις της περιθλασιμετρίας ακτίνων X στο κονιοποιημένο δείγμα του Γραφίτη, δείχνουν ότι το δείγμα αποτελείται από καθαρό Γραφίτη, με καθαρότητα μεγαλύτερη από 99%. Η αξιολόγηση αυτή έγινε με σύγκριση της ανάκλασης του δείγματος με την ανάκλαση καθαρού Γραφίτη.



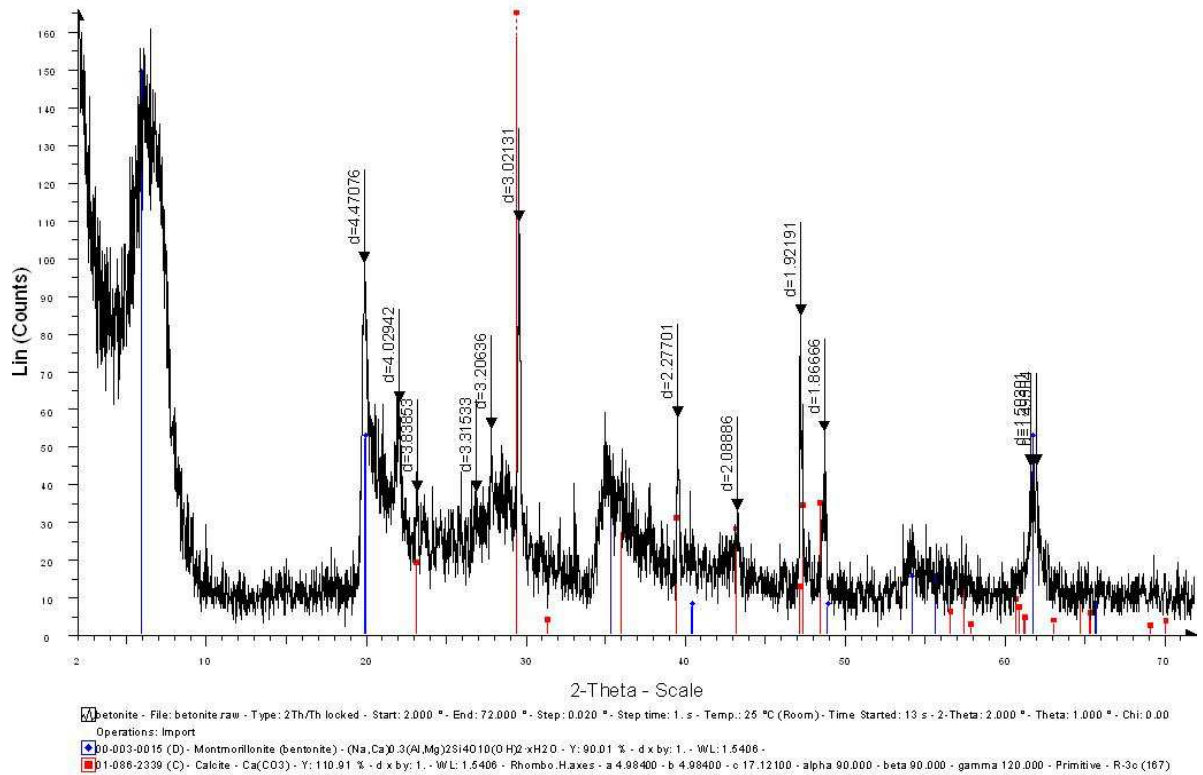
Εικόνα 11: Αποτελέσματα περιθλασιμετρίας ακτίνων X του γραφίτη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



Εικόνα 102: Μοντέλο χαρακτηριστικής ανάκλασης γραφίτη με >99% καθαρότητα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



Εικόνα 113: Αποτελέσματα περιθλασιμετρίας ακτίνων X του μπεντονίτη

Αντίστοιχη σύγκριση έγινε και με το κονιοποιημένο δείγμα Μπεντονίτη, του οποίου η ταυτοποίηση ενέδειξε ότι το δείγμα αποτελείται από μοντμορριλονίτη και ασβεσίτη, συστατικά του ασβεστούχου μπεντονίτη. Το δείγμα επίσης περιέχει, σε μικρό ποσοστό, φυλλοπυριτικά ορυκτά και αστρίους.

3.4: ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.4.1: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΔΟΧΕΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Για να αποθηκευτούν τα δοκίμια, κατασκευάστηκαν πρότυποι υποδοχείς από σωλήνα PVC. Ο σωλήνας αυτός κόπηκε σε ίσους κυλίνδρους των 15 εκατοστών. Ο κάθε κύλινδρος συγκολλήθηκε με ένα πλακάκι plexiglass, με θερμόκολλα σιλικόνης. Η κατασκευή αυτή δεν απέδωσε μονωτικά για τις πιο υδαρές αναμείξεις και γι'αυτό τελικά ενισχύθηκαν από τριπλό στρώμα πλαστικής θήκης, το οποίο συγκρατούσε το μείγμα στο δοχείο και μείωσε τις απώλειες από εξάτμιση. Οι διαστάσεις των υποδοχέων τηρούν τις προϋποθέσεις, σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM, για τον σωστό προσδιορισμό ηλεκτρικής και θερμικής αντίστασης εδαφών.



Εικόνα 124: Αποθήκευση μειγμάτων στους υποδοχείς PVC

3.4.2: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΑΔΕΥΤΗΡΑ

Λαμβάνοντας υπόψη άλλες πειραματικές εργασίες, στην ανάμειξη των ενεμάτων προτιμάται η αργή ανάδευση για την αποφυγή παγίδευσης αέρα στο μείγμα και την δημιουργία κροκιδώσεων. Η προτεινόμενη ταχύτητα ανάδευσης είναι οι 60 στροφές το λεπτό. Ακολουθώντας τα μέτρα αυτά, κατασκευάστηκε ένας ειδικός αναδευτήρας για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής. Ο αναδευτήρας αυτός αποτελείται από 3 μέρη, την περωτή κεφαλή, που αναδύει το μείγμα, έναν κινητήρα 16V, που δίνει κίνηση στην κεφαλή και έναν μειωτήρα (ρυθμιστή), ο οποίος δουλεύει και ως μετασχηματιστής, μετατρέποντας τα 220V σε 16V για τις ανάγκες του κινητήρα, αλλά μπορούσε να αυξομειώσει και τις στροφές της κεφαλής για να επιτευχθεί η κατάλληλη ταχύτητα αναμείξεως.

Η περωτή κεφαλή προμηθεύτηκε από τον Τομέα Εμπλουτισμού, ενώ ο μειωτήρας αγοράστηκε σε κομμάτια και συναρμολογήθηκε. Για κινητήρα, χρησιμοποιήθηκε ένας κινητήρας υαλοκαθαριστήρα 16V, του οποίου οι στροφές κυμαίνονταν από 0 έως 90 με την βοήθεια του μειωτήρα.



Εικόνα 15: Αναδευτήρας μείγματος

3.4.3: ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ

Για τον καθορισμό της ορθής διαδικασίας ανάμειξης και παραγωγής των μειγμάτων εξετάστηκαν διάφορες μεθοδολογίες προκειμένου:

1. Να επιτευχθεί η βέλτιστη ομοιογένεια των μειγμάτων.
2. Να μπορούν εύκολα και ταχύτατα να παράγονται τα προς εξέταση δοκίμια.

Διαδικασία Α: Ανάμειξη γραφίτη σε προκαθορισμένο όγκο νερού και μετά προσθήκη της ποσότητας μπεντονίτη.

Διαδικασία Β: Προπαρασκευή καθορισμένης αναλογίας ξηρού μείγματος γραφίτη/μπεντονίτη σε στερεή κονιοποιημένη μορφή και εν συνεχεία προοδευτική προσθήκη του στερεού μείγματος σε προκαθορισμένο όγκο νερού.

Στις αναμειξεις της διαδικασίας Α υπήρξαν αρκετά προβλήματα που οδηγούσαν σε μη εργάσιμο ένεμα. Η αργή ανάδευση δεν βοηθούσε στην ομοιομορφία του μείγματος και ο μπεντονίτης σχημάτιζε κροκιδώματα, παγιδεύοντας αέρα. Το ξηρό μείγμα γραφίτη – μπεντονίτη της διαδικασίας Β αναμειγνυόταν ευκολότερα με το νερό, δημιουργώντας έτσι λιγότερα κροκιδώματα στο συνολικό μείγμα. Επίσης, η ανάμειξη του μπεντονίτη και του γραφίτη πριν την προσθήκη του σταθερού όγκου νερού καθυστερούσε σημαντικά την ενεργοποίηση του μπεντονίτη, επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερο χρόνο ανάδευσης και σε μεγαλύτερες ταχύτητες, επιτυγχάνοντας έτσι ένα πιο ομοιογενές τελικό μείγμα.

Επιλέχθηκε η διαδικασία Β, σύμφωνα με την οποία, προετοιμάστηκαν πέντε διαφορετικές αναλογίες μπεντονίτη-γραφίτη που αναφέρονται στον πίνακα του μέρους 4.3 (I, II, III, IV και V). Καθεμιά από αυτές αναμειχθηκε με νερό, δημιουργώντας τρία μείγματα με διαφορετικά ποσοστά νερού-μπεντονίτη (Α, Β και Γ). Από τις αναμειξεις αυτές δημιουργήθηκαν 15 διαφορετικά δοκίμια, γνωστής πυκνότητας και περιεκτικότητας γραφίτη και μπεντονίτη των οποίων οι θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες μετρήθηκαν σε βάθος 30 ημερών. Η ανάμειξη έγινε με νερό του οποίου η ηλεκτρική αγωγιμότητα είχε μετρηθεί ήδη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



Εικόνα 16: Τρεις διαφορετικές φάσης ανάμειξης μείγματος

Για την κατασκευή των αναλογιών γραφίτη – μπεντονίτη (I, II, III, IV και V), ζυγίστηκαν ακριβείς ποσότητες των δύο υλικών, οι οποίες μετά αναδεύτηκαν ξηρά μέχρι να δημιουργηθεί ένα ομοιογενές δείγμα. Επομένως, η αναλογία I αποτελούταν από γραφίτη και μπεντονίτη με ποσοστό 5:1 κατά βάρος, η αναλογία II με ποσοστό 5:2, η αναλογία III με ποσοστό 5:3, η αναλογία IV με ποσοστό 5:4 και η αναλογία V με ποσοστό 5:5.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 16 η ανάδευση ξεκινούσε σε δοχείο με καθαρό νερό, στο οποίο γινόταν προσθήκη των αναμειξεων γραφίτη - μπεντονίτη με αργή ροή και ο αναδευτήρας λειτουργούσε σε χαμηλές στροφές. Όταν όλο το μείγμα στερεών είχε τοποθετηθεί στο δοχείο, η διαδικασία συνεχιζόταν μέχρι να επιτευχθεί ομοιογένεια του μείγματος. Σε αυτό παρατηρήθηκε να βοηθάει η αύξηση των στροφών περιστροφής της κεφαλής κατά το τέλος της ανάμειξης, η οποία επιτύγχανε την διάσπαση των τυχών κροκιδώσεων που μπορεί να είχαν δημιουργηθεί στην ανάμειξη. Η συνολική διαδικασία ολοκληρωνόταν σε χρονικό διάστημα 20-25 λεπτών, εκ των οποίων η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής ήταν περίπου τα τελευταία 1-2 λεπτά. Έπειτα το μείγμα αποθηκευόταν σε δοχεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



Εικόνα 17: Μετρητής ηλεκτρικής αγωγιμότητας νερού



Εικόνα 18: Ζύγιση στερεού μείγματος γραφίτη-μπεντονίτη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



Εικόνα 19: Αποθήκευση ανάμειξης στα δοχεία της

Για να μην υπάρχουν προβλήματα απώλειας μάζας ή καταστροφής δείγματος κατά την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων, τα δείγματα χωρίστηκαν σε δύο ομάδες (τις Α και Β). Ομάδα Α ονομάστηκε η ομάδα στην οποία γινόταν η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και Ομάδα Β η ομάδα στην οποία γινόταν η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας. Μέτρηση της πυκνότητας έγινε σε όλα τα δείγματα, καθώς μέσω αυτής μπορούμε να εξετάσουμε εάν το δοκίμιο που κατασκευάστηκε είναι κατάλληλο για τοποθέτηση με συμβατικά μέσα.



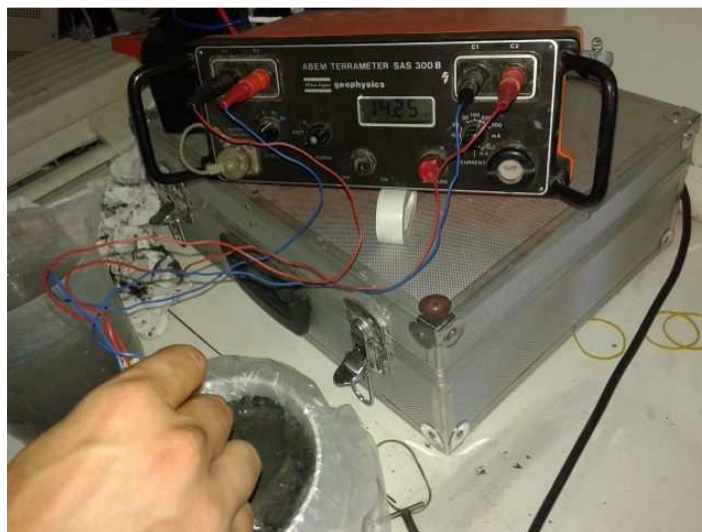
Εικόνα 20: Δοκίμια 1-Α,2-Α και 3-Α τοποθετημένα στους ειδικούς υποδοχείς

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της θερμικής αγωγιμότητας του κάθε δείγματος, ανάλογα με την ομάδα του, πραγματοποιούνται πάντα μετά από μετρήσεις των φυσικών μεγεθών του (ύψος, βάρος, πυκνότητα) . Όλα τα δείγματα ζυγίζονταν πριν από κάθε μέτρηση, για να εξεταστεί η απώλεια βάρους του από την εξάτμιση και μετά, για να καταγραφούν οι απώλειες μάζας λόγω της μέτρησης. Επίσης γινόταν έλεγχος του ύψους του δοκιμίου με παχύμετρο ώστε να καταγραφεί η συρρίκνωση που έχουν τα δείγματα ανάλογα με την απώλεια τους και να καταγραφεί η πυκνότητα τους σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 21: Ένεμα ομάδας A μετά από μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης και ένεμα ομάδας B κατά την διάρκεια μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας



Εικόνα 22: Μέτρηση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

3.5: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Η πυκνότητα των δειγμάτων έχει πολύ μεγάλο ρόλο, καθώς οι ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες του κάθε δείγματος εξαρτώνται άμεσα από την πυκνότητα του. Προηγούμενες έρευνες έχουν αποδείξει ότι η αύξηση της πυκνότητας των ενεμάτων οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας τους.

Για να προσδιοριστεί η πυκνότητα των δειγμάτων που αναμείχθηκαν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις όγκου και βάρους.

Για να υπολογιστεί το βάρος του δείγματος πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω βήματα. Ο κάθε υποδοχέας είχε ζυγιστεί με ακρίβεια πριν τοποθετηθεί το ένεμα σε αυτόν. Η ζύγιση επαναλαμβανόταν και μετά την τοποθέτηση του ενέματος, για τον υπολογισμό του αρχικού βάρους του δείγματος. Επίσης, μετά από κάθε μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης ή θερμικής αγωγιμότητας, το δείγμα ζυγιζόταν για να μετρηθεί επίσης η μάζα που τυχόν χανόταν από την επαφή του ενέματος με την ακίδα μέτρησης. Ζύγιση πραγματοποιείτο και πριν από κάθε μέτρηση, για τον προσδιορισμό του νερού του δείγματος που χανόταν μέσω της εξάτμισης.

Για τον υπολογισμό του όγκου του δείγματος, έχοντας κατασκευάσει υποδοχείς σταθερής διαμέτρου, απαιτείτο η μεθοδική μέτρηση του ύψους του δείγματος πριν από κάθε μέτρηση με ειδικό παχύμετρο. Μέσω του ύψους υπολογιζόταν ο όγκος κιλίνδρου του οποίου η διάμετρος ήταν γνωστή.

Με αυτές τις δύο μετρήσεις ήταν δυνατός ο υπολογισμός της πυκνότητας των δειγμάτων και παρατηρήθηκε η μεταβολή τους σε βάθος χρόνου.

Οι διάφορες πυκνότητες των δειγμάτων σε βάθος χρόνου παρατήθονται στο παράρτημα 1 της παρούσας διπλωματικής.

Στους πίνακες 4.1 και 4.2 παρατίθενται οι τελικές ξηρές και υγρές πυκνότητες των δειγμάτων κατά την ανάμειξη και τοποθέτηση τους στους ειδικούς υποδοχείς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Πίνακας 4.1: Αρχική Ξηρή Πυκνότητα Δειγμάτων (gr/cm³)

Τύπος	Αναλογία Γραφίτη – Μπεντονίτη				
	I (1:5)	II (2:5)	III (3:5)	IV (4:5)	V (5:5)
A (600 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 2 0,218	Δείγμα 5 0,250	Δείγμα 8 0,281	Δείγμα 11 0,311	Δείγμα 14 0,340
B (450 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 3 0,167	Δείγμα 6 0,193	Δείγμα 9 0,217	Δείγμα 12 0,242	Δείγμα 15 0,265
Γ (300 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 4 0,114	Δείγμα 7 0,132	Δείγμα 10 0,150	Δείγμα 13 0,167	Δείγμα 16 0,184

Πίνακας 4.2: Αρχική Υγρή Πυκνότητα Δειγμάτων (gr/cm³)

Τύπος	Αναλογία Γραφίτη – Μπεντονίτη				
	I (1:5)	II (2:5)	III (3:5)	IV (4:5)	V (5:5)
A (600 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 2 1,124	Δείγμα 5 1,142	Δείγμα 8 1,159	Δείγμα 11 1,176	Δείγμα 14 1,192
B (450 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 3 1,095	Δείγμα 6 1,109	Δείγμα 9 1,132	Δείγμα 12 1,136	Δείγμα 15 1,149
Γ (300 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 4 1,065	Δείγμα 7 1,074	Δείγμα 10 1,085	Δείγμα 13 1,094	Δείγμα 16 1,104

Όπως παρατηρείται, οι πυκνότητες των δειγμάτων αυξάνονται καθώς μετακινούμαστε από την αναλογία I προς την αναλογία V και από τον τύπο Γ στον τύπο A. Το δείγμα 14 παρουσιάζεται το δοκίμιο με την μεγαλύτερη ξηρή και υγρή πυκνότητα, ενώ το δείγμα 4 αυτό με την μικρότερη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο καταγράφεται η εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη σειρά των μπεντονιτικών ενεμάτων που παρασκευάστηκαν με τις διαδικασίες που προαναφέρθηκαν. Επίσης, παρουσιάζεται η μέθοδος, ο εξοπλισμός και η διάταξη των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Στόχος των πειραμάτων αυτών, ήταν η συσχέτιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την θερμική αγωγιμότητα, ώστε να δημιουργηθεί μια απλοποιημένη διαδικασία προσδιορισμού της θερμικής αγωγιμότητας των μπεντονιτικών ενεμάτων με προσθετικό γραφίτη σε συνθήκες υπαίθρου.

4.1: ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΛΑΦΗ

Η διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος γίνεται με τρεις τρόπους: ηλεκτρονικά (ωμικά), ηλεκτρολυτικά και διηλεκτρικά. Στην Ωμική περίπτωση η ροή ρεύματος γίνεται μέσω ελεύθερων ηλεκτρονίων στο υλικό. Στην ηλεκτρολυτική περίπτωση, η μεταφορά γίνεται με χαμηλό ρυθμό μέσω ιόντων και στην διηλεκτρική περίπτωση, η μετάδοση γίνεται μέσω ηλεκτρονίων, τα οποία με επίδραση εξωτερικού πεδίου μετακινούνται σχετικά με τον πυρήνα.

4.2: ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ενεμάτων, στην παρούσα διπλωματική εργασία, μετρήθηκε το αντίστροφο της, δηλαδή η ηλεκτρική τους αντίσταση για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών και παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα Σ :

$$\Sigma = 1/\rho \quad (4.1)$$

με μονάδες Siemens/m=1/Ohm*m

Η ηλεκτρική αντίσταση R ενός κυλινδρικού αγωγού μήκους L και διατομής A που διαρρέεται από ρεύμα I και στα άκρα του έχει διαφορά δυναμικού ΔV , δίνεται από τον τύπο:

$$R = \Delta V/I \quad (4.2)$$

Η ηλεκτρική αντίσταση λοιπόν εξαρτάται από τις γεωμετρικές διαστάσεις του αγωγού, σύμφωνα με τον τύπο:

$$R = \rho L/A \quad (4.3)$$

Όπου ρ η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του αγωγού, η οποία είναι μια θεμελιώδης παράμετρος του υλικού από το οποίο έχει κατασκευαστεί ο αγωγός, ανεξάρτητη από διαστάσεις, που περιγράφει την ευκολία διαβίβασης του ρεύματος μέσω αυτού.

Τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί ηλεκτρικού ρεύματος και οι ειδικές τους αντιστάσεις είναι υψηλές. Λόγω αυτού, η μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος στα πετρώματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

γίνεται ηλεκτρολυτικά και όχι ωμικά, λόγω των ρευστών που εμπεριέχονται στους πόρους τους. Η αγωγιμότητα ενός πορώδους πετρώματος μεταβάλλεται με την όγκο και την κατανομή των πόρων, καθώς και με την αγωγιμότητα και την ποσότητα του περιεχόμενου νερού. Ο εμπειρικός τύπος του Archie (1942) υπολογίζει την ειδική αντίσταση ενός εδαφικού μέσου ως εξής:

$$\rho_e = a n^{-m} S_p^{-v} \rho_w \quad (4.4)$$

όπου n : το πορώδες του υλικού, S_r : ο κορεσμός, ρ_w : η ειδική αντίσταση του νερού, $v \approx 2$, a , m : σταθερές με τιμές $0.5 \leq a \leq 2.5$, $1.3 \leq m \leq 2.5$).

Πρέπει να αναφερθεί ότι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αντίσταση ενός πετρώματος είναι:

- Το είδος του πετρώματος
- Η δομή του και το πορώδες
- Η περιεκτικότητα του σε άλατα
- Οι γεωλογικές διεργασίες που έχει υποστεί
- Η ηλικία του
- Τα αργιλικά ορυκτά
- Ο βαθμός κορεσμού
- Η θερμοκρασία

4.2.1: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

4.2.1.1: ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΕ ΑΠΕΙΡΟ ΟΜΟΓΕΝΗ ΧΩΡΟ

Σε οποιοδήποτε τρισδιάστατο σώμα, το ηλεκτρικό ρεύμα δεν περιορίζεται σε μια ροή κατά μήκος μιας μοναδικής διαδρομής, όπως συμβαίνει με το καλώδιο. Συνθήκες άπειρου ομογενούς χώρου δημιουργούμε στη πράξη με την τοποθέτηση ηλεκτροδίου μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά μέσα σε ομογενές και ισότροπο έδαφος. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος (συσσωρευτής) και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, Β, το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος, I, σημειακής πηγής, C, που βρίσκεται μέσα σε άπειρο ομογενές και ισότροπο μέσο είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τα έξω.

Εάν η διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο ισοδυναμικών επιφανειών είναι dV και απέχουν απόσταση dr , προκύπτει:

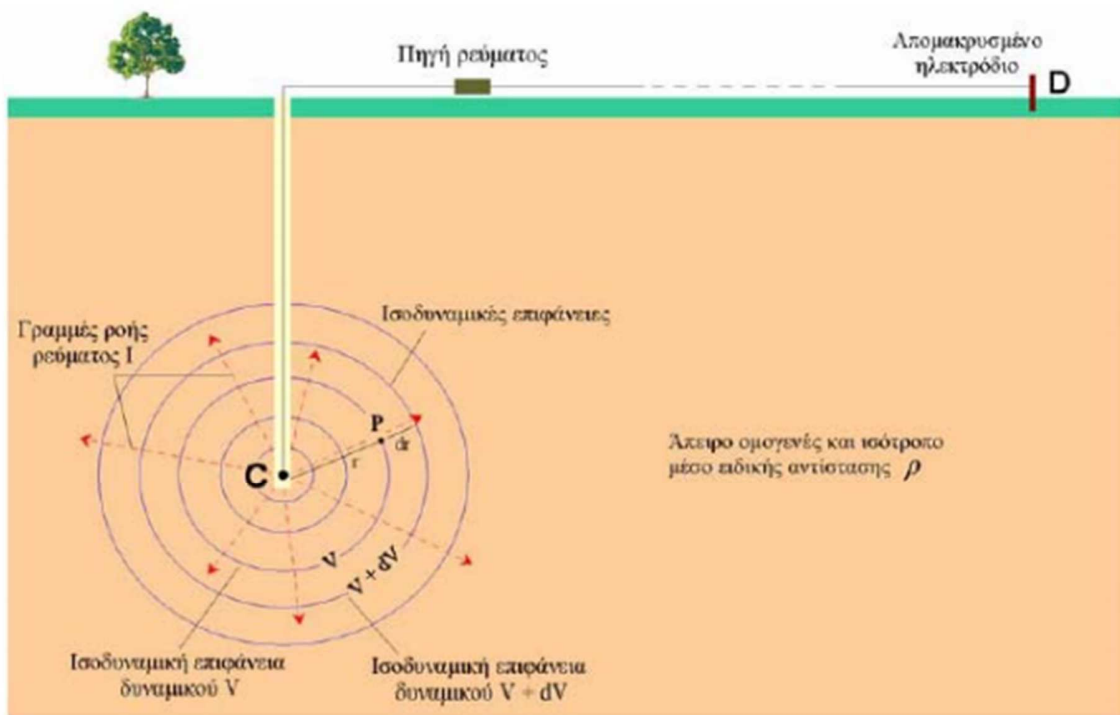
$$dV = \frac{\rho dr I}{4 \pi r^2} \quad (4.5)$$

όπου ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του μέσου.

Με ολοκλήρωση της σχέσης προκύπτει ότι:

$$V = \frac{\rho I}{4 \pi r} \quad (4.6)$$

Όπου V το δυναμικό που δημιουργείται σε σημείο του χώρου λόγω της σημειακής πηγής ρεύματος και r η απόσταση του σημείου από την σημειακή πηγή.



Εικόνα 23: Δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο

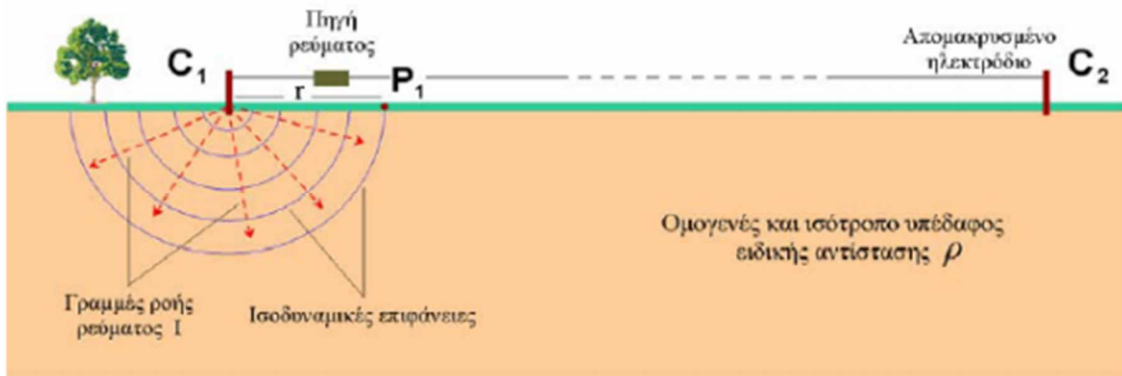
4.2.1.2: ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΕ ΗΜΙΑΠΕΙΡΟ ΟΜΟΓΕΝΗ ΧΩΡΟ

Συνθήκες ομογενούς ημιχώρου δημιουργούμε στη πράξη με την τοποθέτηση μικρών διαστάσεων ηλεκτροδίου, C1, (σημειακή πηγή ρεύματος) στην επιφάνεια ομογενούς χώρου. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C2, το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια του χώρου, αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος, I, της σημειακής πηγής, C1, είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο.

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες ως κάθετες στις γραμμές ροής (ακτίνες) θα είναι ομόκεντρες ημισφαιρικές επιφάνειες. Για τον προσδιορισμό του δυναμικού V σε σημείο P1 του ημιχώρου (συνήθως στην επιφάνεια του ημιχώρου) εργαζόμαστε με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγούμενα με τη διαφορά ότι εδώ η επιφάνεια A είναι επιφάνεια ημισφαιρίου δηλαδή $A =$

$2\pi r^2$. Εάν στις σχέσεις της προηγούμενης περίπτωσης του άπειρου και ομογενούς χώρου αντικαταστήσουμε το A προκύπτει ότι το δυναμικό στο σημείο P_1 είναι:

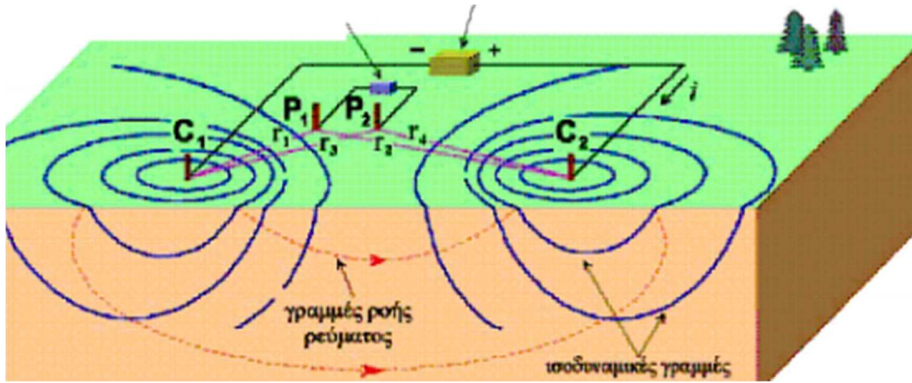
$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4.7)$$



Εικόνα 13: Δυναμικό σημειακής πηγής σε ημιάπειρο ομογενή χώρο

4.2.1.3: ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΑΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΗΜΙΧΩΡΟ

Στην πράξη, θα χρειαστεί να τοποθετήσουμε τα δύο σημειακές πηγές ρεύματος (ηλεκτρόδια ρεύματος) κοντά μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο όμως, η κατανομή του ρεύματος και οι ισοδυναμικές γραμμές που παράγονται μέσα στον ομογενή χώρο γίνονται πιο πολύπλοκες από αυτές που εξετάσαμε νωρίτερα. Αντί το ρεύμα να ρέει ακτινικά από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος, τώρα ρέει κατά μήκος καμπύλων διαδρομών που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος. Στη περίπτωση αυτή όπου το δεύτερο ηλεκτρόδιο ρεύματος C_2 βρίσκεται κοντά στη σημειακή πηγή C_1 τότε το δυναμικό στο σημείο P_1 (ηλεκτρόδιο P_1) θα είναι διαφορετικό διότι τώρα επηρεάζεται και από την πηγή ρεύματος C_2 . Το διαμορφούμενο δυναμικό στο σημείο P_1 θα είναι το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού V_1 λόγω της πηγής C_1 και του δυναμικού V_2 λόγω της πηγής C_2 (αρχή της υπέρθεσης).



Εικόνα 25: Δυναμικό δυο σημείων σε ημόπειρο χώρο

Σύμφωνα με την σχέση το δυναμικό στο σημείο P₁ λόγω του ηλεκτροδίου ρεύματος C₁ είναι:

$$V_1 = \frac{\rho I}{2 \pi r_1} \quad (4.8)$$

Ομοίως το δυναμικό στο σημείο P₂ λόγω του ηλεκτροδίου ρεύματος C₂ είναι:

$$V_2 = -\frac{\rho I}{2 \pi r_2} \quad (4.9)$$

Αφού τα ρεύματα στα δυο ηλεκτρόδια είναι ίσα και αντίθετης πολικότητας, από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$V_1 + V_2 = \frac{I \rho}{2 \pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.10)$$

Τελικά εάν υπάρχει δεύτερο ηλεκτρόδιο δυναμικού στο σημείο P₂ μπορεί να μετρηθεί η διαφορά δυναμικού μεταξύ P₁ και P₂:

$$\Delta V = \frac{I \rho}{2 \pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \quad (4.11)$$

και

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2 \pi}{\left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}} = \frac{\Delta V}{I} \cdot k \quad (4.12)$$

Όπου k ορίζεται ως γεωμετρικός παράγοντας που εξαρτάται από τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων.

4.2.2: ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και τις μεταξύ τους αποστάσεις, έχουμε τις κάτωθι διατάξεις ηλεκτροδίων και τις αντίστοιχες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις:

- Διάταξη Schlumberger:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις L και I αντίστοιχα. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{\pi \cdot (L^2 - I^2)}{2I} \quad (4.13)$$

- Διάταξη Wenner:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a και η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \cdot 2\pi \cdot a \quad (4.14)$$

- Διάταξη Dipole-Dipole:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν απόσταση a , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού, ενώ τα δίπολα μεταξύ τους απέχουν απόσταση πολλαπλάσια της απόστασης a ($n \cdot a$). Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

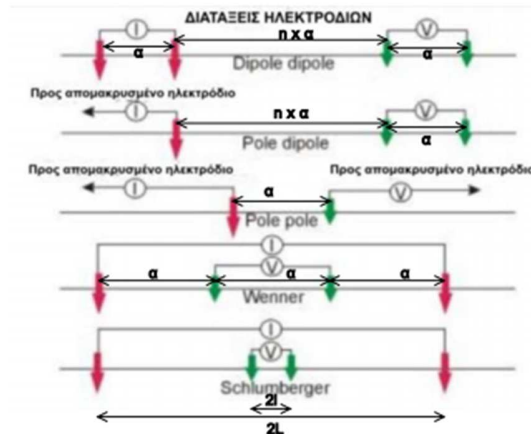
$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \cdot \pi \cdot n \cdot (n + 1)(n + 2)a \quad (4.15)$$

- Διάταξη Pole-Pole:

Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση a , ενώ τα άλλα δυο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δυο κοντινά ηλεκτρόδια. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

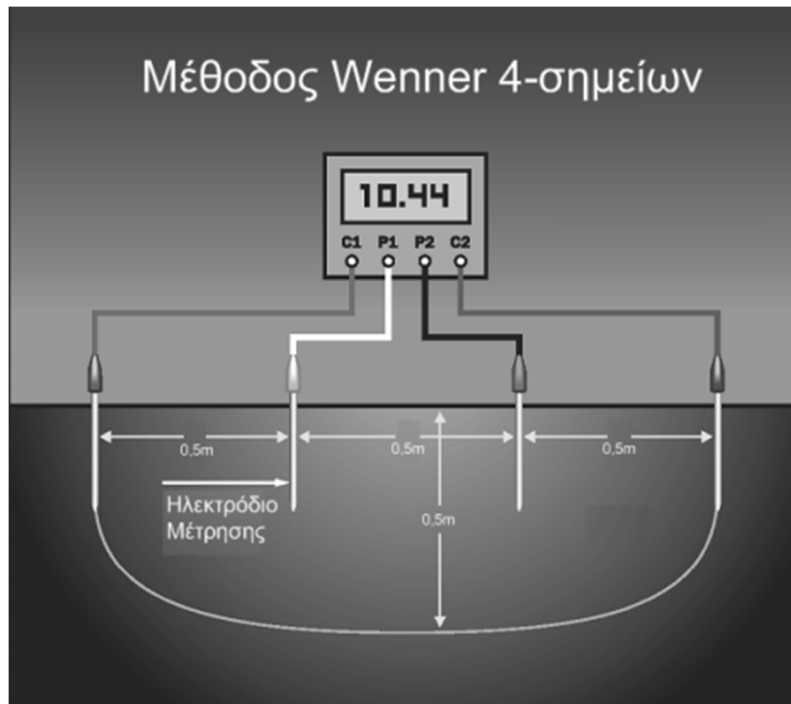
$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \cdot 2\pi \cdot a \quad (4.16)$$

Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζονται οι διάφορες διατάξεις των ηλεκτροδίων για την μέτρηση της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης



Εικόνα 26: Διατάξεις ηλεκτροδίων

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους είναι σημαντική για τον σχεδιασμό έργων που σχετίζονται με την μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος από αυτό. Η πιο συχνή μέθοδος μέτρησης της ηλεκτρικής αναλύθηκε από τον Frank Wenner, εν έτη 1915, στο Bureau of Standards στην Washington. Άλλες μέθοδοι υπάρχουν, όπως η μέθοδος Schlumberger, εντούτοις, αυτές σπάνια χρησιμοποιούνται και ποικίλουν μόνο ελαφρώς στο πώς τα διαστήματα μετρήσεων χωρίζονται σε σχέση με τη μέθοδο Wenner. Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση είναι η μέτρηση της αντίστασης ανά μονάδα ενός δεδομένου υλικού. Αντιπροσωπεύει την αντίσταση μεταξύ δύο απέναντι πλευρών ενός κύβου πλευράς 1m. Η μέτρηση απαιτεί την τοποθέτηση τεσσάρων ηλεκτροδίων σε ίσες αποστάσεις για να προσεγγιστεί το βάθος του χώματος που εξετάζεται. Τυπικές αποστάσεις είναι 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.2, 1.5, 2.1, 3 m, κ.λπ., με κάθε διάστημα να αυξάνεται από το προηγούμενο κατά έναν παράγοντα περίπου 1,5, μέχρι το μέγιστο διάστημα να είναι ίσο με 1 έως 3 φορές με τη μέγιστη διαγώνια διάσταση του συστήματος γείωσης, με συνέπεια μια μέγιστη απόσταση μεταξύ των εξωτερικών ηλεκτροδίων 3 έως 9 φορές της μέγιστης διαγωνίου του συστήματος. Αυτή είναι μια σειρά μετρήσεων και επαναλαμβάνεται αρκετές φορές σε διαφορετικές διευθύνσεις ώστε να εξασφαλίσει ακριβείς μετρήσεις. Η βασική προϋπόθεση είναι ότι τα ηλεκτρόδια που απέχουν μια απόσταση 1.5 m μεταξύ τους, θα μπορούν να μετρήσουν και 1.5 m σε βάθος. Αυτά τα ακατέργαστα στοιχεία υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσω υπολογιστών για να καθορίσουν την ειδική αντίσταση του εδάφους.

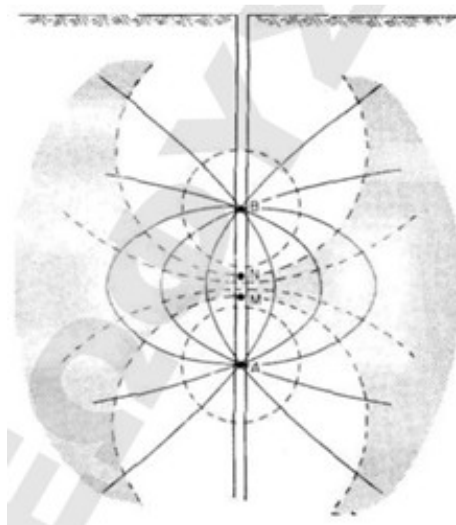


Εικόνα 27: Διάταξη Μεθόδου Wenner τεσσάρων σημείων

4.3: ΚΑΘΕΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ WENNER ΣΤΟ ΕΝΕΜΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

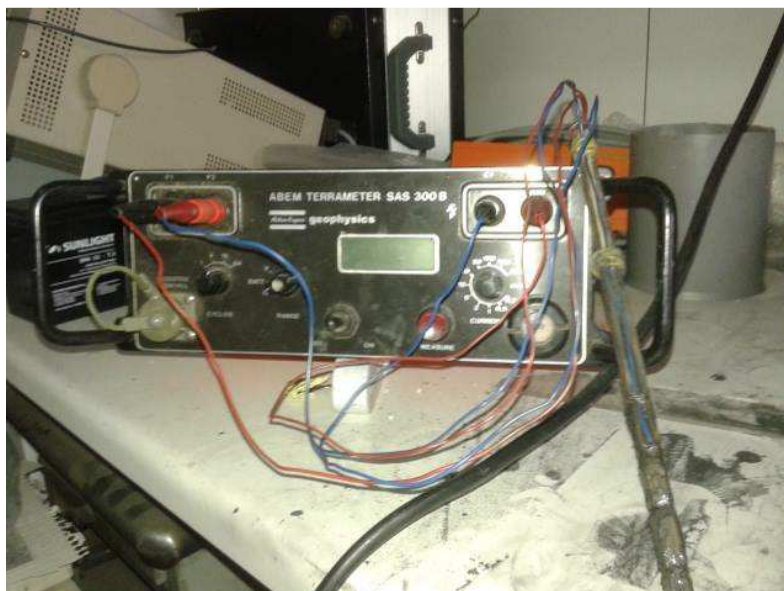
Για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ενεμάτων που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, έπρεπε να μηχανευτεί μια μέθοδος κάθετης μέτρησης εντός των δοχείων όπου ασφαλίστηκαν και αποθηκεύθηκαν οι αναμειξίξεις. Η μέθοδος Wenner χρησιμοποιείται ήδη και κάθετα σε αρκετές εφαρμογές γεωτρήσεων για να παρουσιάσει μια τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους. Η διαφορά της μεθόδου αυτής, όμως, με την παρούσα περίπτωση είναι ότι στις μέχρι τώρα εφαρμογές τα ηλεκτρόδια ήταν ενσωματωμένα στις γεωτρήσεις και μετριόταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του περιβαλλόμενου γεωλογικού σχηματισμού, ενώ τώρα μας ενδιαφέρει η μέτρηση του ενέματος εντός της γεώτρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ



Εικόνα 28: Κάθετη μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης

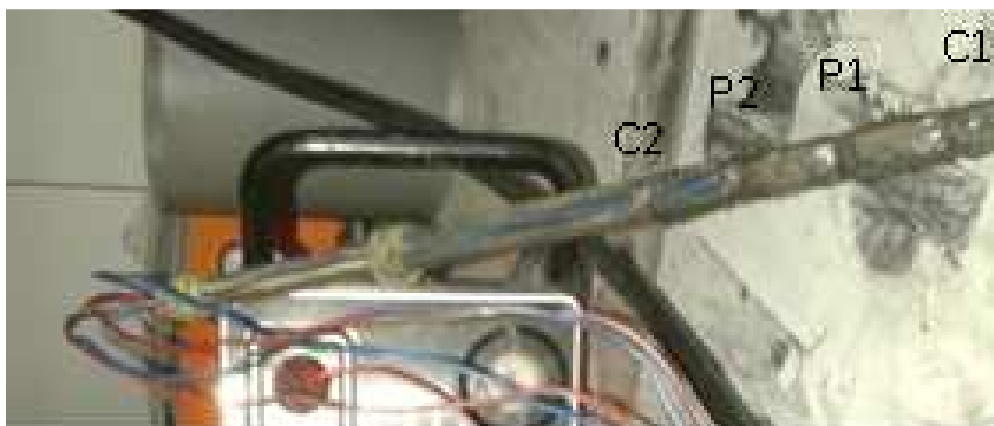
Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε με την κατασκευή ενός οργάνου, στο οποίο τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια για την μέτρηση. Ακολουθήθηκε λοιπόν, η παραπάνω μέθοδος, αλλά πραγματοποιήθηκε σε μικρογραφία μέσα στο σύστημα του κάθετου γεωνεαλλάκτη. Το όργανο έπαιξε το ρόλο της γεώτρησης και συνδέθηκε με τα ηλεκτρόδια και το ένεμα πήρε το ρόλο του υπεδάφους.



Εικόνα 29: Όργανο μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Με την μεθοδολογία αυτή έπρεπε απλά ρυθμιστεί η απόσταση των ηλεκτροδίων έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση από τα τοιχώματα των δοχείων. Αυτό επιτεύχθηκε μετά από συνεχόμενες μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης σε νερό, του οποίου η ηλεκτρική αγωγιμότητα ήταν ήδη γνωστή. Με την βοήθεια τοιχωμάτων διαφορετικής ακτίνας, αλλά και ρυθμίζοντας την απόσταση των ηλεκτροδίων σε σταθερά αυξανόμενες αποστάσεις, συμπεράναμε ότι για να μην επηρεάζουν τα τοιχώματα την μέτρηση, έπρεπε η ακίδα να έχει τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια της ανά είκοσι ένα χιλιοστά, και τα ηλεκτρόδια C1 και C2 να απέχουν τουλάχιστον αυτή την απόσταση από το πάτωμα του δοχείου και το ύψος της ανάμειξης στο δοχείο αντίστοιχα.



Εικόνα 3014: Ακίδα μετρήσεως ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

4.4: ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΚΙΔΑΣ ΜΕΤΡΗΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της απόστασης των ηλεκτροδίων στην ακίδα του μετρητή της ηλεκτρικής αντίστασης. Οι μετρήσεις έγιναν σε τέσσερα διαφορετικά σετ αποστάσεων (1.3 εκ., 2 εκ., 2.6 εκ. και 3.2 εκ.) σε τρία δοχεία διαφορετικής διαμέτρου (11.8 εκ., 23 εκ., 38 εκ.). Στο τέλος υπολογίζεται η καμπύλη σφάλματος των μετρήσεων στην οποία είναι εμφανής η θεμιτή απόσταση, όπου ο συντελεστής σφάλματος ισούται με την μονάδα.

Αποτελέσματα πρώτου σετ δοκιμών

ΣΕΤ 1 απόσταση 1.3cm d=11.8

Μέτρηση					
l	1	Συχνότητα	16		
T	26.4	C			
$\rho=4\pi ar$	$\Omega\mu$		νερό	900	$\mu S/cm$
P	7.98439	$\Omega\mu$		0.00090	S/cm
A	0.01300	M		0.09000	S/m
R	48.90000	Ω		11.11111	$\Omega\mu$ 1.391604

ΣΕΤ 1 απόσταση 1.3cm d=23

Μέτρηση					
l	1	Συχνότητα	16		
T	26.4	C			
$\rho=4\pi ar$	$\Omega\mu$		νερό	900	$\mu S/cm$
P	7.52721	$\Omega\mu$		0.00090	S/cm
A	0.01300	M		0.09000	S/m
R	46.10000	Ω		11.11111	$\Omega\mu$ 1.476126

ΣΕΤ 1 απόσταση 1.3cm d=38

Μέτρηση					
l	1	Συχνότητα	16		
T	26.4	C			
$\rho=4\pi ar$	$\Omega\mu$		νερό	892	$\mu S/cm$
P	7.70682	$\Omega\mu$		0.00089	S/cm
A	0.01300	M		0.08920	S/m
R	47.20000	Ω		11.21076	$\Omega\mu$ 1.454656

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Αποτελέσματα δεύτερου σετ δοκιμών

ΣΕΤ 2 απόσταση 2cm d=11.8

Μέτρηση						
l	1	Συχνότητα	16			
T	26.4	C				
$\rho=4\pi a r$	$\Omega\mu$		νερό	885	$\mu\text{S/cm}$	
P	10.95232	$\Omega\mu$		0.00089	S/cm	
A	0.02000	M		0.08850	S/m	
R	43.60000	Ω		11.29944	$\Omega\mu$	1.031693

ΣΕΤ 2 απόσταση 2cm d=23

Μέτρηση						
l	1	Συχνότητα	16			
T	26.4	C				
$\rho=4\pi a r$	$\Omega\mu$		νερό	900	$\mu\text{S/cm}$	
P	9.36976	$\Omega\mu$		0.00090	S/cm	
A	0.02000	M		0.09000	S/m	
R	37.30000	Ω		11.11111	$\Omega\mu$	1.185848

ΣΕΤ 2 απόσταση 2cm d=38

Μέτρηση						
l	1	Συχνότητα	16			
T	26.4	C				
$\rho=4\pi a r$	$\Omega\mu$		νερό	900	$\mu\text{S/cm}$	
P	9.29440	$\Omega\mu$		0.00090	S/cm	
A	0.02000	M		0.09000	S/m	
R	37.00000	Ω		11.11111	$\Omega\mu$	1.195463

Αποτελέσματα τρίτου σετ δοκιμών

ΣΕΤ 3 απόσταση 2.6cm d=11.8

Μέτρηση						
l	1	Συχνότητα	16			
T	26.1	C				
$\rho=4\pi a r$	$\Omega\mu$		νερό	900	$\mu\text{S/cm}$	
P	12.73584	$\Omega\mu$		0.00090	S/cm	
A	0.02600	M		0.09000	S/m	
R	39.00000	Ω		11.11111	$\Omega\mu$	0.872429

ΣΕΤ 3 απόσταση 2.6cm d=23

Μέτρηση						
l	1	Συχνότητα	16			
T	26.1	C				
$\rho=4\pi a r$	$\Omega\mu$		νερό	900	$\mu\text{S/cm}$	
P	9.30696	$\Omega\mu$		0.00090	S/cm	
A	0.02600	M		0.09000	S/m	
R	28.50000	Ω		11.11111	$\Omega\mu$	1.19385

ΣΕΤ 3 απόσταση 2.6cm d=38

Μέτρηση						
l	1	Συχνότητα	16			
T	26.1	C				
$\rho=4\pi a r$	$\Omega\mu$		νερό	900	$\mu\text{S/cm}$	
P	9.37227	$\Omega\mu$		0.00090	S/cm	
A	0.02600	M		0.09000	S/m	
R	28.70000	Ω		11.11111	$\Omega\mu$	1.18553

Αποτελέσματα τέταρτου σετ δοκιμών

ΣΕΤ 4 απόσταση 3.2cm d=11.8

Μέτρηση					
l	1	Συχνότητα	16		
T	26.4	C			
$\rho=4\pi ar$	$\Omega\mu$		νερό	892	$\mu S/cm$
P	15.75526	$\Omega\mu$		0.00089	S/cm
A	0.03200	M		0.08920	S/m
R	39.20000	Ω		11.21076	$\Omega\mu$ 0.711557

ΣΕΤ 4 απόσταση 3.2cm d=23

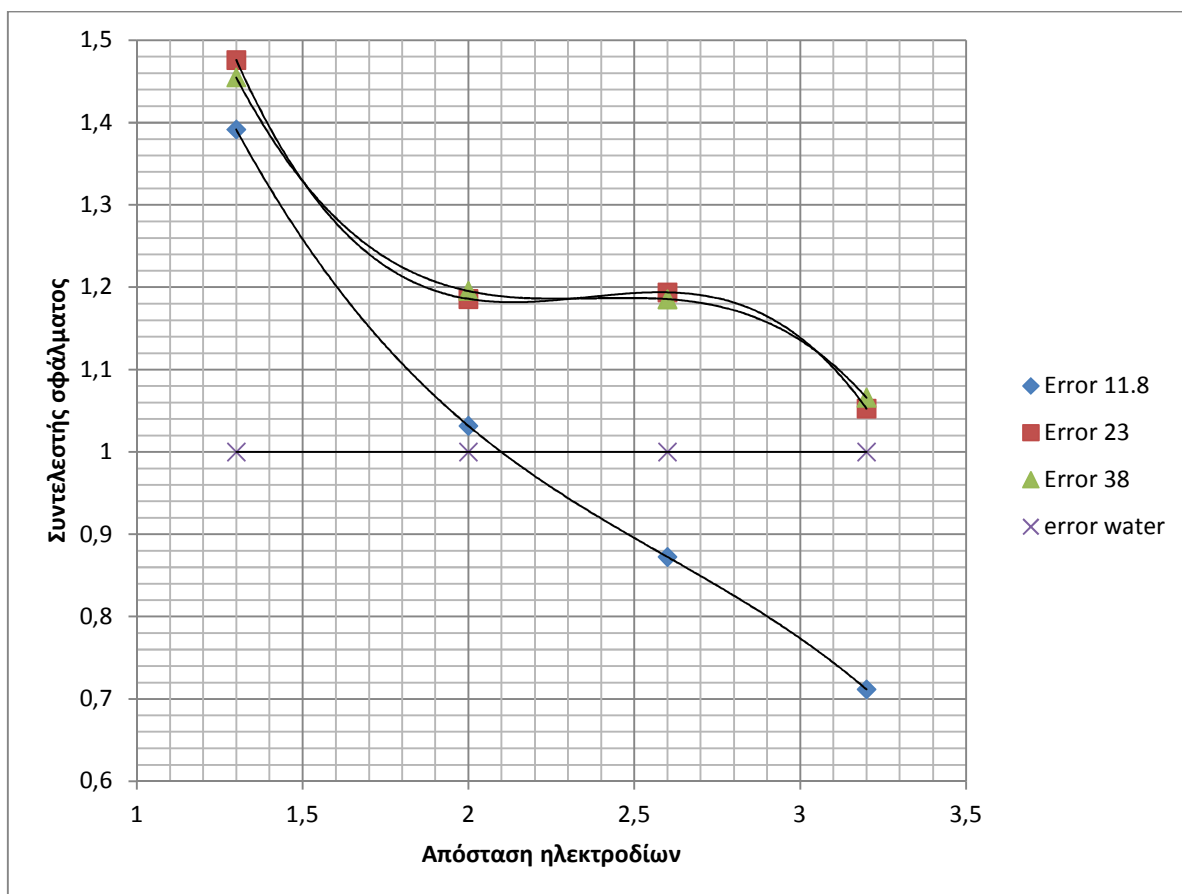
Μέτρηση					
l	1	Συχνότητα	16		
T	26.4	C			
$\rho=4\pi ar$	$\Omega\mu$		νερό	892	$\mu S/cm$
P	10.65088	$\Omega\mu$		0.00089	S/cm
A	0.03200	M		0.08920	S/m
R	26.50000	Ω		11.21076	$\Omega\mu$ 1.052567

ΣΕΤ 4 απόσταση 3.2cm d=38

Μέτρηση					
l	1	Συχνότητα	16		
T	26.4	C			
$\rho=4\pi ar$	$\Omega\mu$		νερό	891	$\mu S/cm$
P	10.53030	$\Omega\mu$		0.00089	S/cm
A	0.03200	M		0.08910	S/m
R	26.20000	Ω		11.22334	$\Omega\mu$ 1.065814

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Εικόνα 3115: Διάγραμμα διόρθωσης σφάλματος ακίδας μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης



Με την βοήθεια του διαγράμματος της εικόνας 31, το οποίο σχεδιάστηκε από τα δεδομένα των μετρήσεων διόρθωσης, έγιναν οι εξής εκτιμήσεις. Πρώτον, για τις διαμέτρους 23 εκ. και 38 εκ. οι αποστάσεις που επιλέχθηκαν δεν μπορούν να απαλείψουν το σφάλμα της μέτρησης. Για ακριβέστερα αποτελέσματα θα πρέπει να γίνουν και άλλες μετρήσεις με αποστάσεις ηλεκτροδίων μεγαλύτερες των 3,2 εκατοστών. Δεύτερον, βλέπουμε ότι οι τρεις καμπύλες των διαφορετικών διαμέτρων εμφανίζουν μια σταθερότητα στις τιμές τους όταν η απόσταση ηλεκτροδίων κυμαίνεται από 2 έως 2,6 εκατοστά. Οι καμπύλες των μεγάλων διαμέτρων παρουσιάζουν σταθερές τιμές ενώ η καμπύλη της διαμέτρου που μας ενδιαφέρει από εκθετική γίνεται γραμμική. Κρίθηκε λοιπόν βέλτιστο, η απόσταση των ηλεκτροδίων να βρίσκεται μέσα σε αυτό το εύρος. Τρίτον και σημαντικότερο, με τις δοκιμές που έγιναν, παρατηρείται ότι στην διάμετρο που θα γίνει το πείραμα της παρούσας διπλωματικής, δηλαδή στο εσωτερικό του σωλήνα, ο οποίος έχει διάμετρο 11.8 εκατοστά, ο συντελεστής σφάλματος απαλείφεται σε

απόσταση ηλεκτροδίων ίση με 2.1 εκατοστά, απόσταση που βρίσκεται μέσα στο εύρος που προαναφέρεται. Με αυτά τα δεδομένα, κατασκευάστηκε η ακίδα μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των αναμειξών του πειράματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι και η αλλαγή τύπου καλωδίων αλλοιοποιούσε τις μετρήσεις, και γιαυτό χρησιμοποιήθηκαν ίδιοι τύποι καλωδίων σε όλη την φάση των πειραματικών δοκιμών. Η ακίδα που κατασκευάστηκε, δοκιμάστηκε κι αυτή σε νερό με ελεγχόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μέτρηση της είχε διαφορά μικρότερη από την τάξη των 10^6 , η οποία θεωρήθηκε αμελητέα.

4.5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Στα δεκαπέντε μπεντονικά ενέματα της ομάδας Α, μετά την τοποθέτηση τους στους ειδικούς υποδοχείς που περιγράφονται στην παράγραφο 3.5.2, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης.

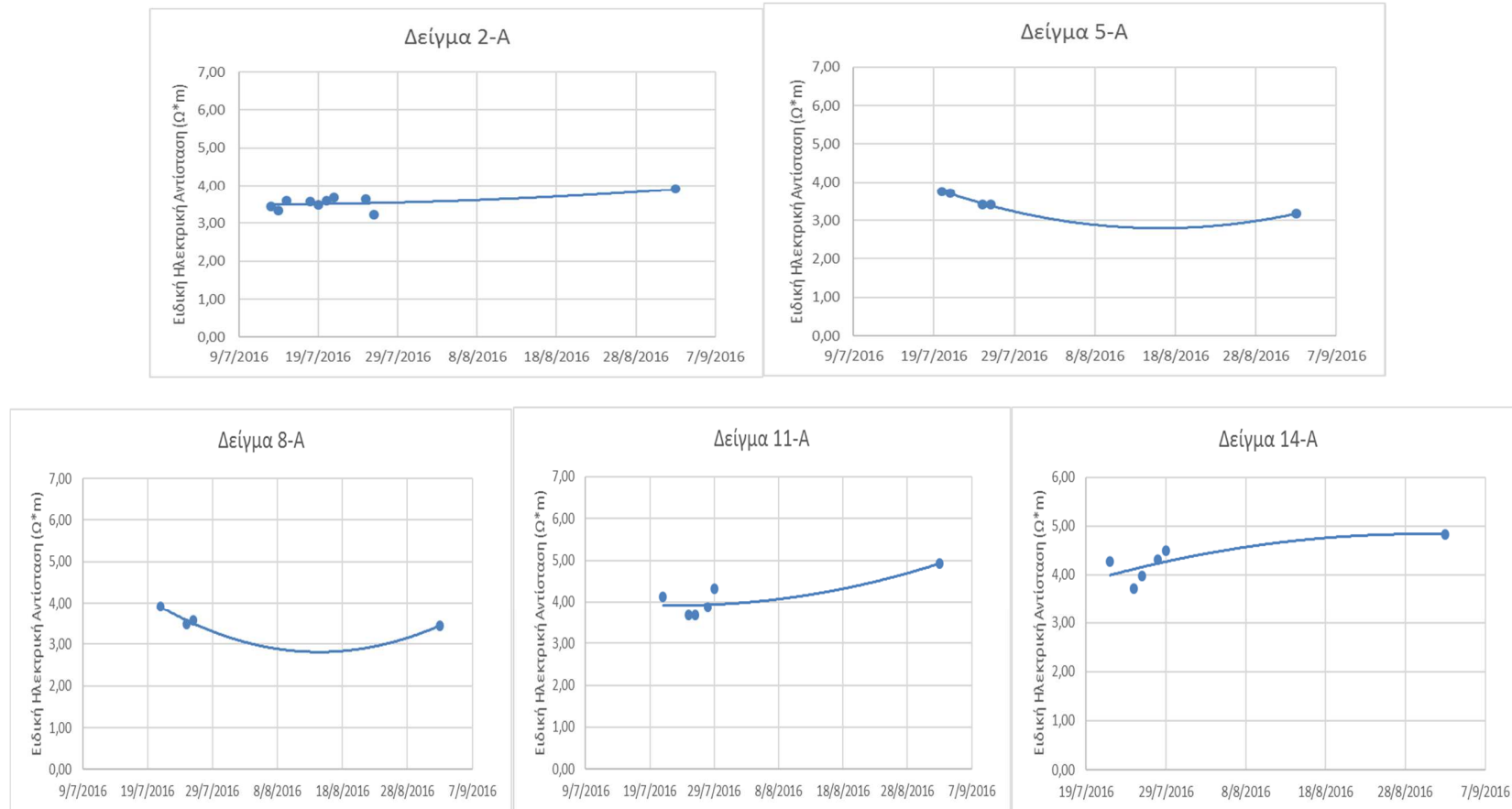
Ακολουθούν ο πίνακας της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των δειγμάτων, τα χρονικά διαγράμματα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του κάθε δείγματος, καθώς και τα διαγράμματα τελικών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προς ξηρή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Με την εξέταση των διαγραμμάτων αυτών, μπορεί να δοθεί μια σαφή ερμηνεία της επίδρασης του γραφίτη στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός μπεντονικού ενέματος σταθερού ποσοστού νερού μπεντονίτη.

Πίνακας 4.1: Τελικά αποτελέσματα μετρώσεων ηλεκτρικής αντίστασης

Τύπος	Αναλογία Γραφίτη / Μπεντονίτη				
	I (1:5)	II (2:5)	III (3:5)	IV (4:5)	V (5:5)
A (600 γρ μπεντονίτη)	Δείγμα 2 3,2231472	Δείγμα 5 3,3814032	Δείγμα 8 3,56076	Δείγμα 11 4,3230264	Δείγμα 14 4,5023832
B (450 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 3 3,9669504	Δείγμα 6 4,0434408	Δείγμα 9 4,2781872	Δείγμα 12 4,5155712	Δείγμα 15 4,7793312
Γ (300 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 4 4,5551352	Δείγμα 7 4,760868	Δείγμα 10 5,037816	Δείγμα 13 5,301576	Δείγμα 16 6,040104

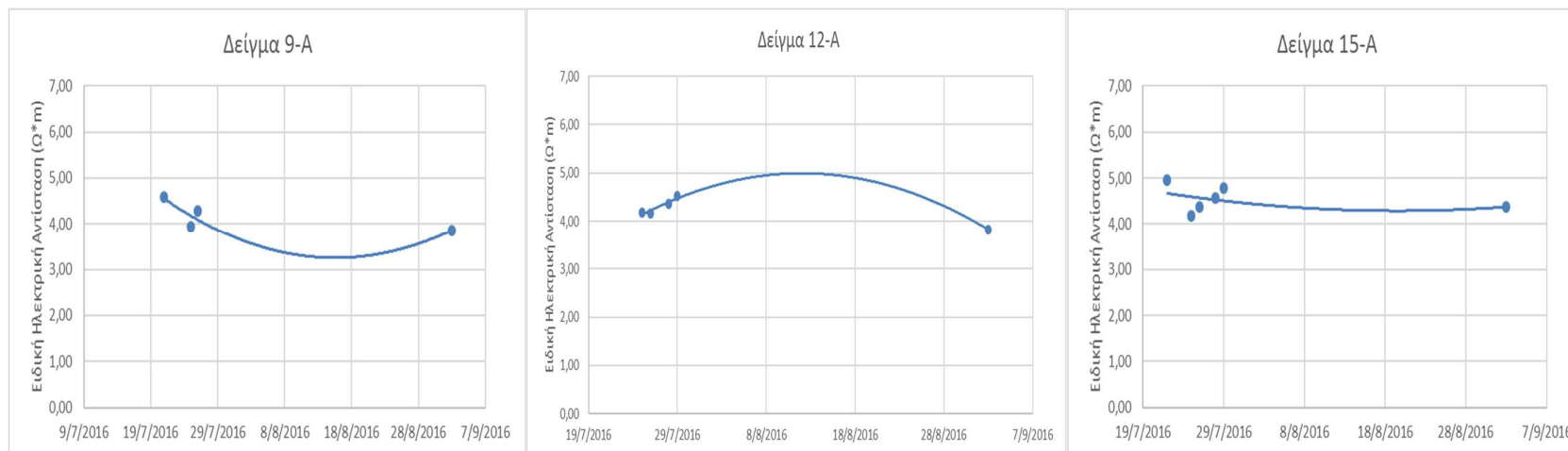
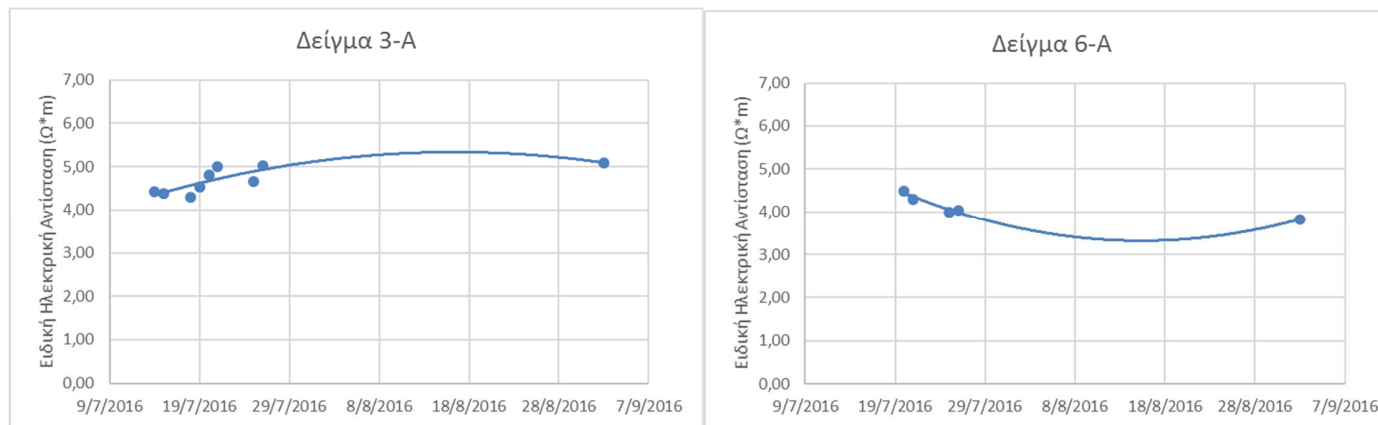
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Διάγραμμα 4.1: Διαγράμματα Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης - Χρόνου Τύπου A



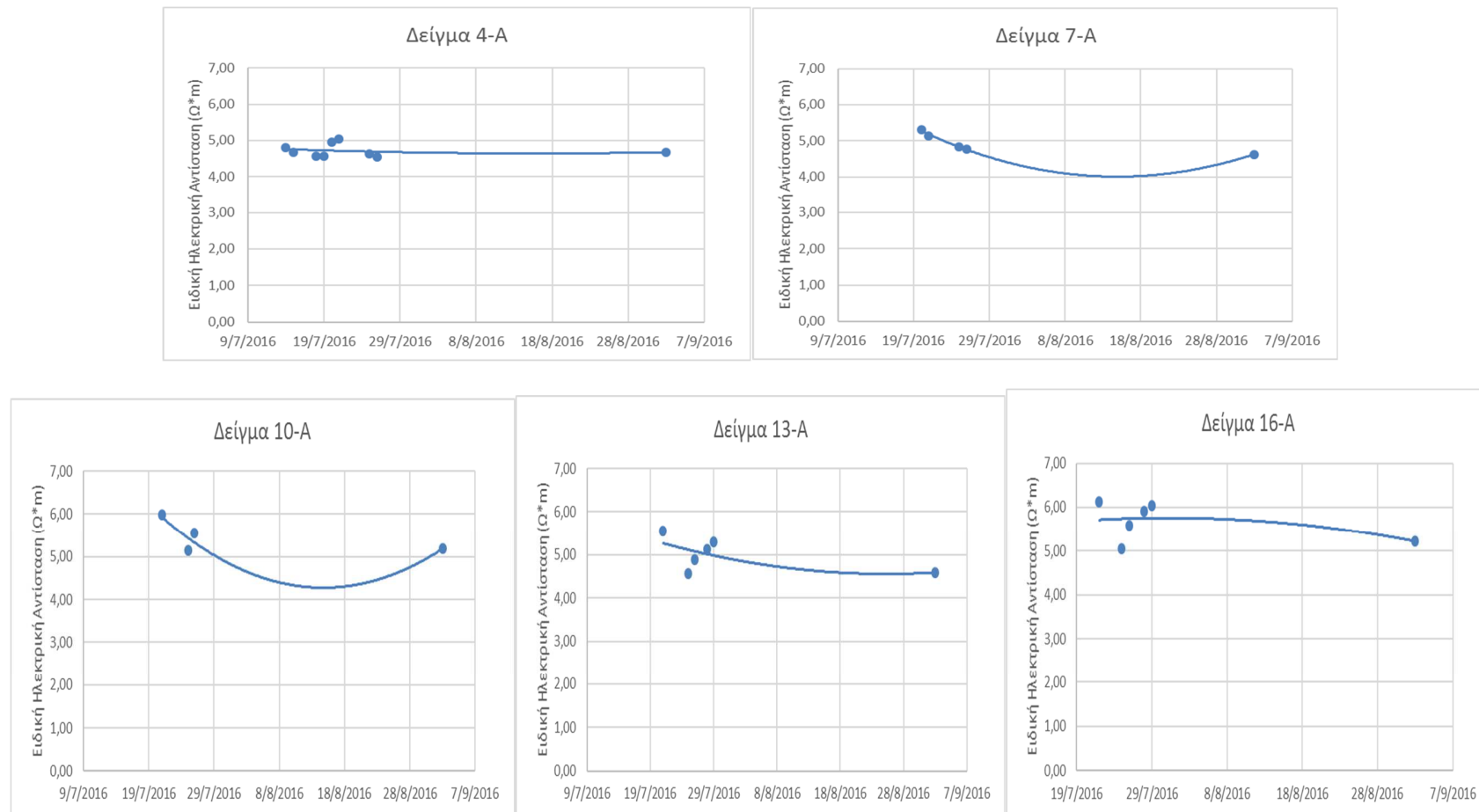
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Διάγραμμα 4.2: Διαγράμματα Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης - Χρόνου Τύπου Β

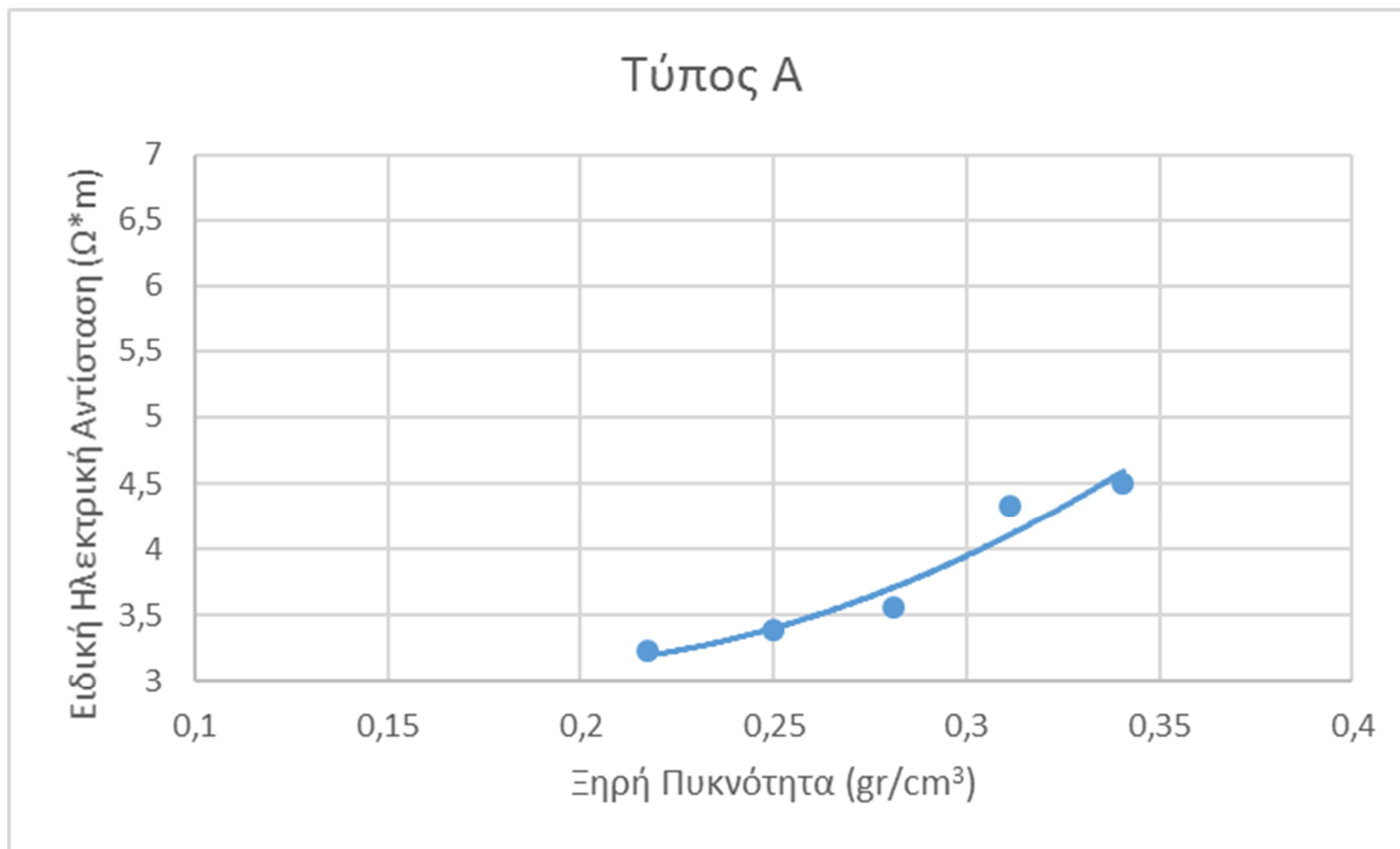


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

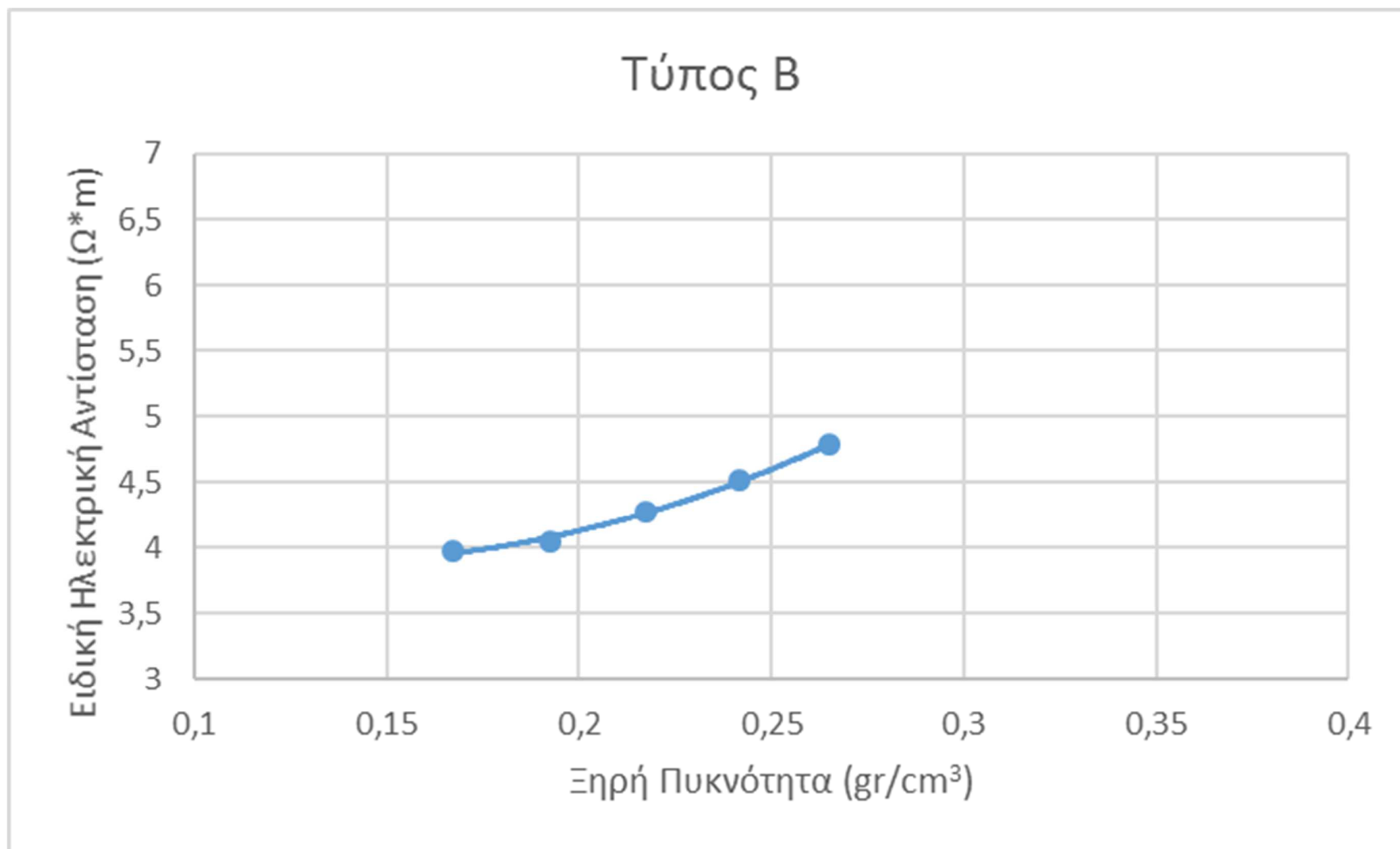
Διάγραμμα 4.3: Διαγράμματα Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης - Χρόνου Τύπου Γ



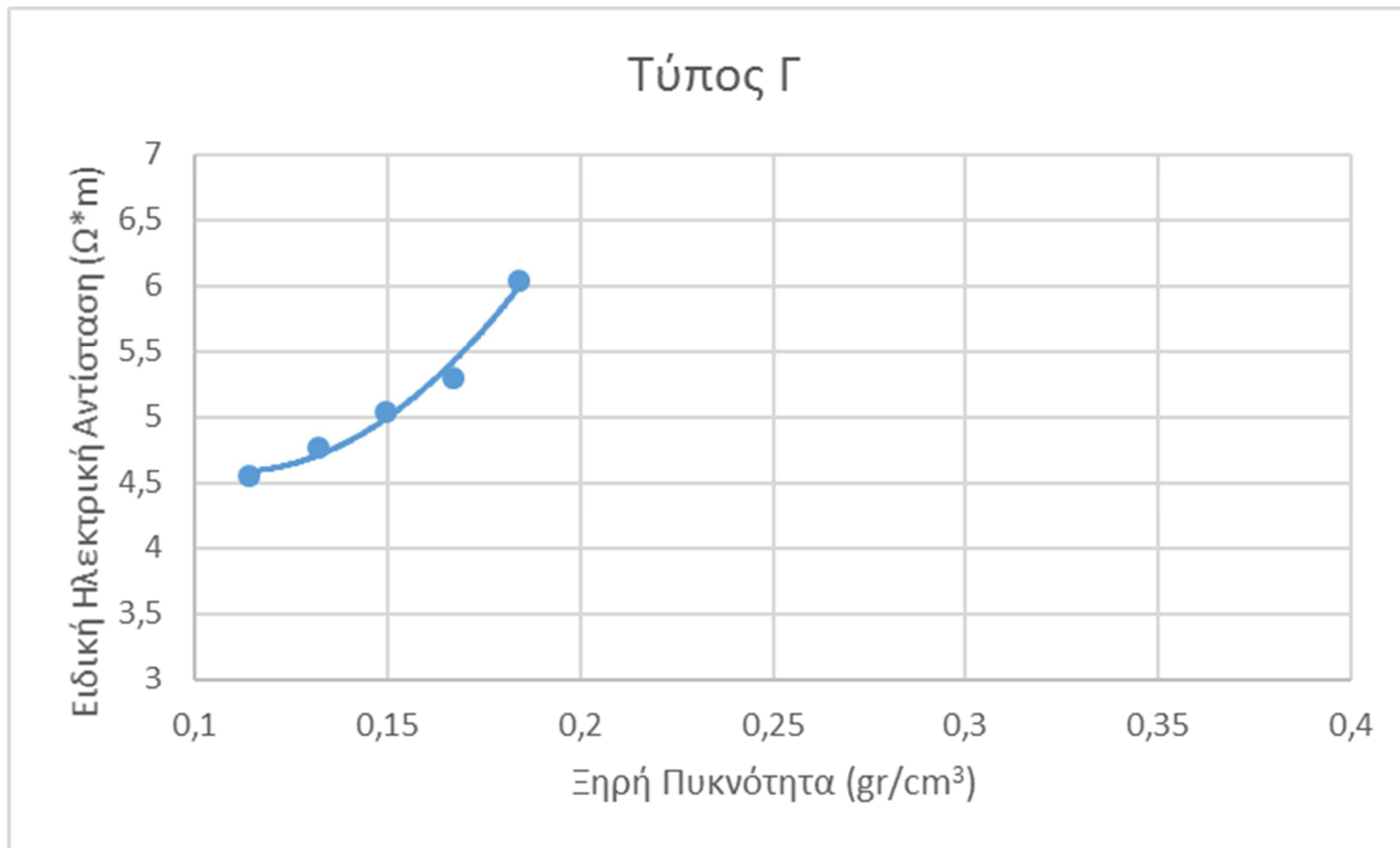
Διάγραμμα 4.4: Διάγραμμα τελικών μετρήσεων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προς ξηρή πυκνότητα τύπου Α



Διάγραμμα 4.5: Διάγραμμα τελικών μετρήσεων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προς ξηρή πυκνότητα τύπου Β



Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα τελικών μετρήσεων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προς ξηρή πυκνότητα τύπου Γ

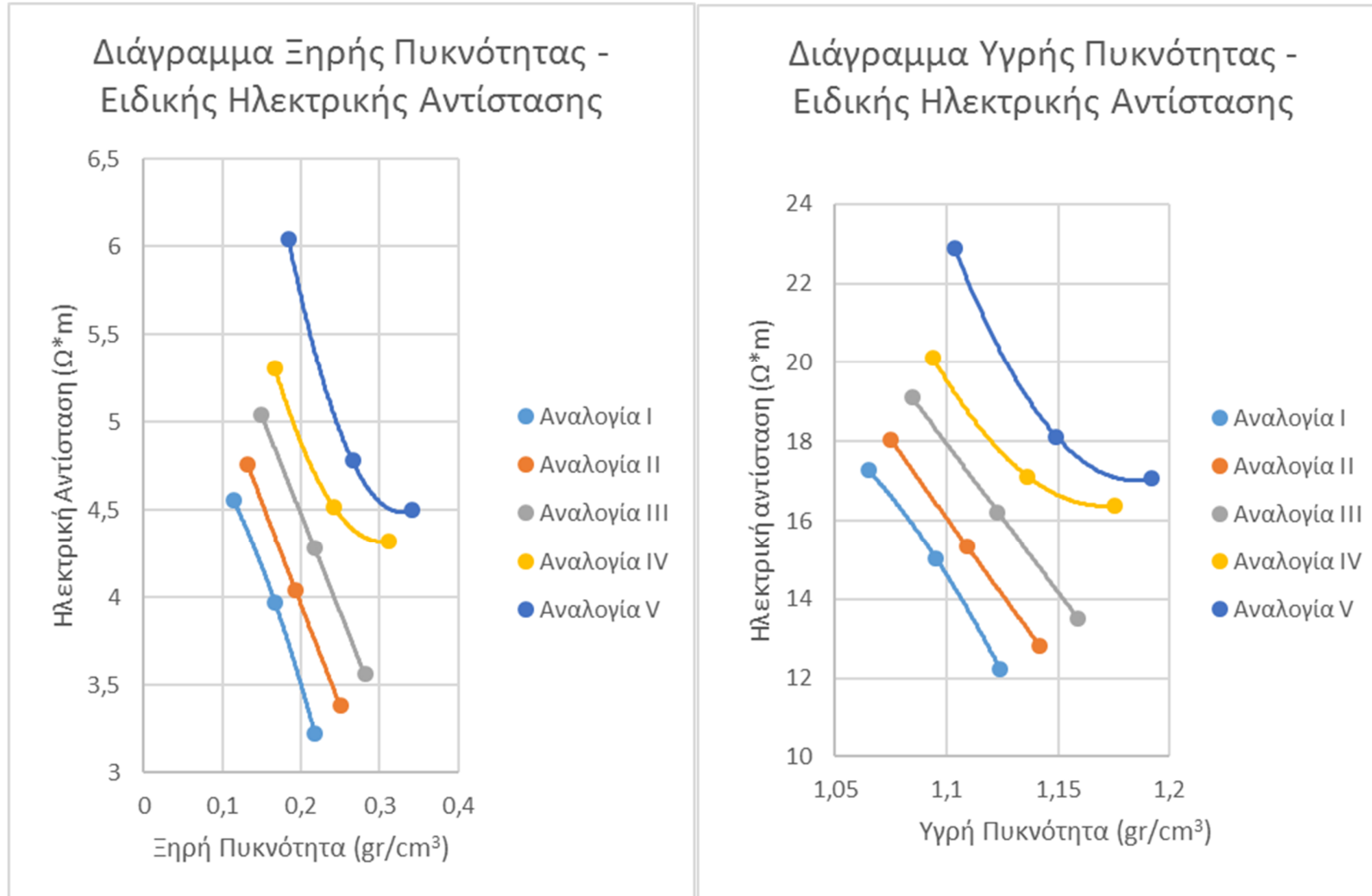


Παρατηρώντας τον πίνακα 4.1 της ηλεκτρικής αντίστασης, είναι εμφανής η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε κάθε τύπο ενέματος με την προσθήκη γραφίτη. Επίσης παρατηρείται ότι για σταθερή αναλογία υπάρχει αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την αύξηση του ποσοστού νερού/μπεντονίτη.

Από τα διαγράμματα 4.1, 4.2 και 4.3, δηλαδή τα διαγράμματα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης – χρόνου, παρατηρείται ότι σε χρονικό διάστημα ενός μήνα, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εκάστοτε δοκιμίου έχει αμελητέες διαφοροποιήσεις και είναι σχετικά σταθερή. Θεωρητικά, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μπεντονιτικών ενεμάτων με σύσταση παρόμοια των δοκιμίων της παρούσας διπλωματικής θα παραμείνει σταθερή για όλη την διάρκεια ζωής του ενέματος κατά την τοποθέτηση του στην γεώτρηση του γεωεναλλάκτη.

Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης υπολογίζεται στα διαγράμματα 4.4, 4.5 και 4.6 που απεικονίζουν τις καμπύλες ειδικής αντίστασης προς ξηρή πυκνότητα για κάθε τύπο ξεχωριστά. Παρατηρείται ότι η μέγιστη ειδική ηλεκτρική αντίσταση επιτυγχάνεται στην μέγιστη ξηρή πυκνότητα για κάθε τύπο. Αφού όμως ο κάθε τύπος δείγματος έχει σταθερή ποσότητα μπεντονίτη, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυξάνει με την προσθήκη γραφίτη στο δείγμα. Αντίθετα, παρατηρείται μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την προσθήκη μπεντονίτη στα δείγματα. Η επίδραση της πυκνότητας στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζεται με μεγαλύτερη ευκρίνεια στο διάγραμμα 4.7.

Διάγραμμα 4.7: Διαγράμμα Ξηρής Πυκνότητας-Ηλεκτρικής Αντίστασης, Διάγραμμα Υγρής Πυκνότητας-Ηλεκτρικής Αντίστασης



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Στο διάγραμμα 4.9 παρουσιάζονται τα διαγράμματα περιεκτικότητας γραφίτη προς ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ως προς την αναλογία γραφίτη/μπεντονίτη αλλά και ως προς την προσθήκη γραφίτη σε σταθερή ποσότητα μπεντονίτη. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα με τα διαγράμματα πυκνότητας που παρατέθηκαν νωρίτερα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο φαινόμενο, κατά το οποίο η προσθήκη υλικού μειώνει την ηλεκτρική αντίσταση του δοκιμίου, αλλά η προσθήκη γραφίτη σε αυτό την αυξάνει.

Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται μέσω του διαγράμματος ποσοστού γραφίτη/μπεντονίτη προς ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαγράμματος 4.10. Στο διάγραμμα αυτό παρατίθενται οι καμπύλες των μετρήσεων σε σχέση με το βάρος του μπεντονίτη στο δείγμα, καθώς και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε και οι ηλεκτρικές αγωγιμότητες του καθαρού μπεντονίτη του μείγματος 1-A και του καθαρού Γραφίτη του δείγματος 17-A.

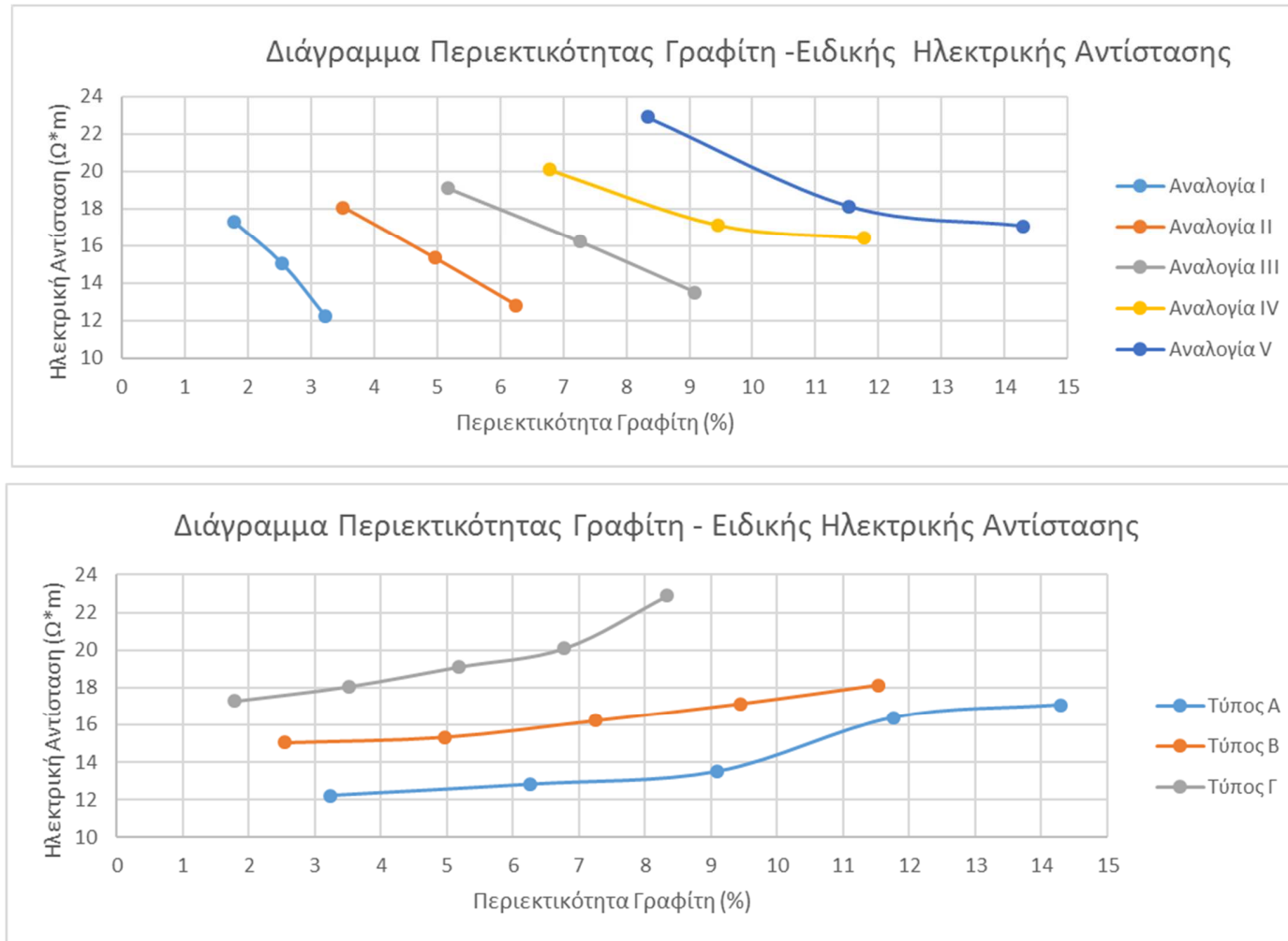
Στα καθαρά δείγματα δεν έχουν γίνει μετρήσεις σε διαφορετικά βάρη προς σταθερό νερό (450 γραμμάρια σε τρία λίτρα νερό κ.τ.λ), όπως έγινε στις αναμειξεις τους, αλλά μόνο στο βάρος των 600 γραμμαρίων στερεού. Αν και οι παραπάνω μετρήσεις πρέπει να γίνουν για να υπάρξει καλύτερη ερμηνεία της επίδρασης των στερεών ανάμειξης στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, με τα συγκεκριμένα δεδομένα μπορεί να γίνει η εξής ερμηνεία:

Το καθαρό μείγμα Μπεντονίτη είναι ηλεκτρικά πιο αγώγιμο από τον καθαρό μείγμα Γραφίτη, και τα δύο υλικά είναι πιο καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού από το νερό. Ένα μπεντονιτικό ένεμα με προσθετικό υλικό τον Γραφίτη λοιπόν, σε σταθερή πυκνότητα έχει τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενδιάμεση των δύο αντίστοιχων καθαρών αναμειξεων ίδιας πυκνότητας. Επομένως, η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε ένα μπεντονιτικό ένεμα είναι ανάλογη της πυκνότητάς του, αλλά και της αναλογίας των στερεών που το αποτελούν.

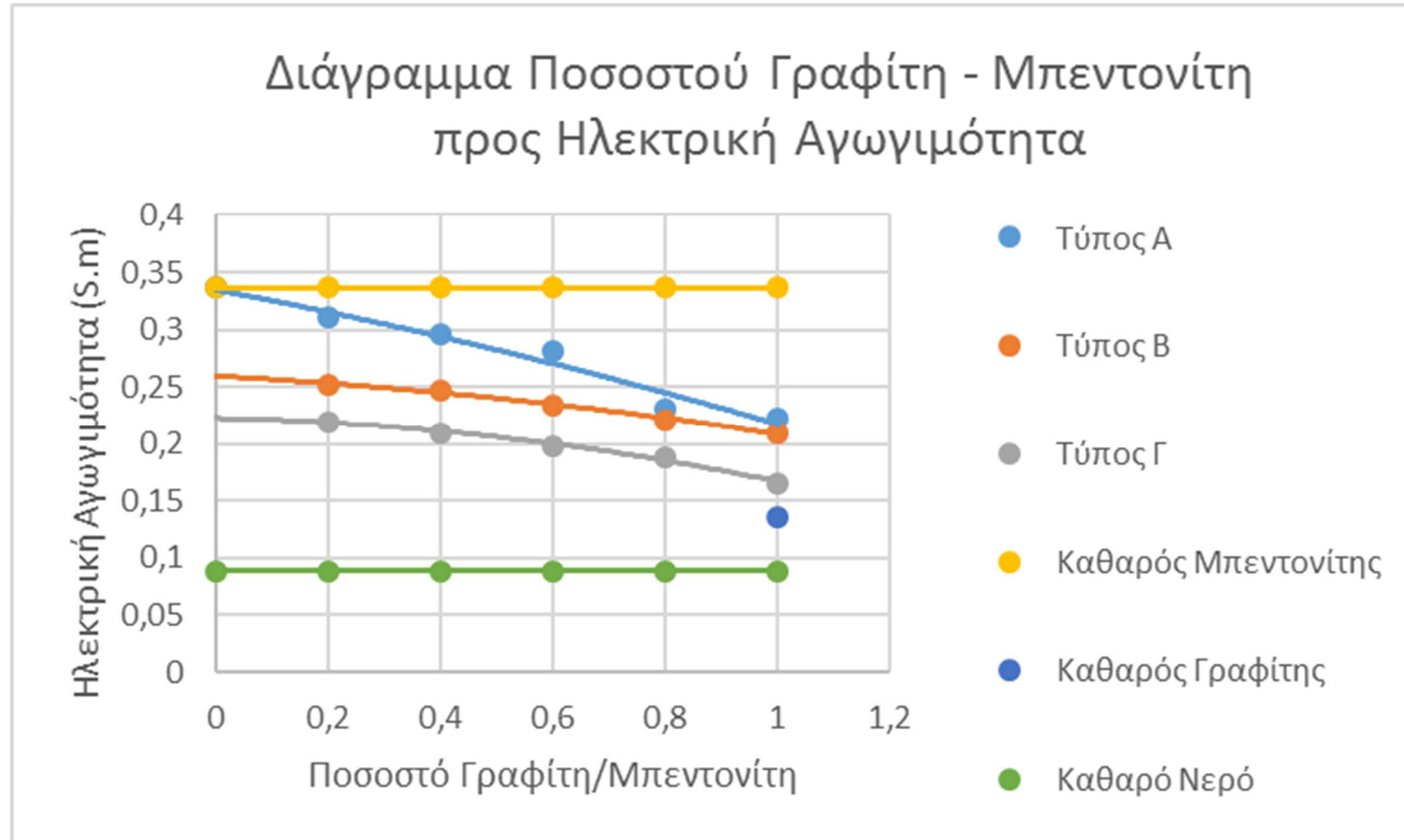
Για το διάγραμμα αυτό πρέπει παρ'όλα αυτά να σημειωθεί ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του καθαρού Μπεντονίτη δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται εκθετικά ανάλογα με την ξηρή πυκνότητα του δοκιμίου όπως και τα υπόλοιπα δείγματα. Για ακριβέστερη συσχέτιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ποσοστού στερεών, πρέπει να γίνει πειραματικός έλεγχος και των καθαρών δειγμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Διάγραμμα 4.9: Διάγραμμα Περιεκτικότητας Γραφίτη-Ηλεκτρικής Αντίστασης ως προς την αναλογία στερεών και την πυκνότητα



Διάγραμμα 4.10: Διάγραμμα Ποσοστού Γραφίτη – Μπεντονίτη προς Ηλεκτρική Αγωγιμότητα



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κεφάλαιο καταγράφονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων της θερμικής αγωγιμότητας στην σειρά των μπεντονιτικών ενεμάτων που παρασκευάστηκαν σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν. Αποτελεί ένα από τα κύρια μέρη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δεδομένου ότι η βασική ιδιότητα των ενεμάτων με την οποία απασχολείται η παρούσα διπλωματική είναι η θερμική αγωγιμότητα του ενέματος και η μεταβολή αυτής συναρτήσει του ποσοστού γραφίτη στο ένεμα, καθώς και συναρτήσει της σχέσης νερού/μπεντονιτικού υλικού.

5.1: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Θερμική αγωγιμότητα ορίζεται η χαρακτηριστική ιδιότητα της ύλης που προσδιορίζει την ευκολία ή δυσκολία μετάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού. Η θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού χαρακτηρίζεται με τον "συντελεστή αγωγιμότητας" ο οποίος διαφέρει από σώμα σε σώμα. Ανάλογα με την ευκολία της διάδοσης της θερμότητας τα σώματα (υλικά) διακρίνονται σε ευθερμαγωγά, ή *καλοί αγωγοί θερμότητας*, (όπως π.χ. τα μέταλλα) και σε δυσθερμαγωγά, ή *κακοί αγωγοί θερμότητας*, ή κατ' επέκταση θερμομονωτικά, (όπως π.χ. το ξύλο, ο αμιάντος, τα υγρά και τα αέρια). Η μονάδα μέτρησης της είναι Watt ανά μέτρο * Kelvin (W/mK).

Η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι βασική παράμετρος στο σχεδιασμό έργων, όπου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας, όπως είναι τα συστήματα γεωεναλλακτών και επιδρά σημαντικά στην απόδοση και τη λειτουργία ενός συστήματος Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας. Η Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας καθορίζει το ποσό της θερμικής ενέργειας που

απορροφάται από το υπέδαφος ή αποθηκεύεται στο υπέδαφος, ενώ η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους εκφράζει την ικανότητα αναπλήρωσης αυτού του ποσού από το υπέδαφος «αποθήκη» και τον περιβάλλοντα χώρο.

Η θερμοκρασία του υπεδάφους, όπου βρίσκεται ο γεωεναλλάκτης, μεταβάλλεται περιοδικά κατά την ετήσια λειτουργία του συστήματος ανάλογα πρώτον, με τη θερμότητα που απορροφάται από το κτίριο ή αποδίδεται στο κτίριο και η οποία καθορίζεται από τις ενεργειακές του ανάγκες και την ισχύ της ΓΑΘ και δεύτερον την ικανότητα του τμήματος του υπεδάφους, όπου βρίσκεται ο γεωεναλλάκτης να ανακτά θερμότητα από τον περιβάλλοντα χώρο ή να απορρίπτει θερμότητα στον περιβάλλοντα χώρο και αυτή η ικανότητα εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους και τον όγκο που καταλαμβάνει το σύστημα γεωεναλλακτών στο υπέδαφος.

Όταν η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι υψηλή, τότε διευκολύνεται η μετάδοση θερμότητας από το υπέδαφος στους γεωεναλλάκτες ή η αποθήκευση θερμότητας από τους γεωεναλλάκτες προς το υπέδαφος και η αναπλήρωση ή απόρριψη αυτής της θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο του υπεδάφους αποθήκευσης, με αποτέλεσμα τη μικρότερη θερμοκρασιακή διαταραχή και τη σταθερότερη λειτουργία όλου του συστήματος. Επίσης η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τους γεωεναλλάκτες είναι μεγαλύτερη κατά την περίοδο της θέρμανσης και χαμηλότερη κατά την περίοδο της ψύξης, με αποτέλεσμα τη βελτίωση του συντελεστή απόδοσης της Γ.Α.Θ. και τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος.

Όταν η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι χαμηλή, τότε συσσωρεύεται θερμική ενέργεια στο υπέδαφος και αυξάνεται η θερμοκρασία του υπεδάφους με αρνητικές συνέπειες κατά τη λειτουργία ψύξης του συστήματος.

Η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους επιδρά σημαντικά στη διαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη και συνεπώς αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική αγωγιμότητα του υπεδάφους, τόσο διευκολύνεται η μετάδοση θερμότητας σε αυτό και συνεπώς απαιτείται μικρότερο μήκος γεωεναλλάκτη για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος (σε κατακόρυφα κλειστά συστήματα αυτό σημαίνει μικρότερος αριθμός γεωτρήσεων). Ο ακριβής προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας του υπεδάφους είναι το

ζητούμενο. Πιθανές παραδοχές της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να οδηγήσουν σε υπερδιαστασιολόγηση ή υποδιαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη με αρνητικές συνέπειες (αύξηση κόστους - μειωμένη ενεργειακή απόδοση και λειτουργία αντίστοιχα).

Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική αγωγιμότητα των υπεδαφικών σχηματισμών είναι η θερμική αγωγιμότητα των διαφόρων φάσεων του εδαφικού υλικού (τους κόκκους, το νερό και των αέρα των πόρων), η κοκκομετρία του εδάφους (μέγεθος και σχήμα κόκκων), η ορυκτολογική σύσταση των κόκκων (επηρεάζει τη θερμική αγωγιμότητα των κόκκων), η θερμοκρασία του εδάφους, η υγρή πυκνότητα του εδάφους (ρ_b , kg/m³), η ξηρή πυκνότητα του εδάφους (ρ_d , kg/m³), το μοναδιαίο ειδικό βάρος των κόκκων (ρ_s , kg/m³), η υγρασία (w , %), ο κορεσμός σε νερό (S_r , %), η κατ' όγκον περιεκτικότητα αέρα (V_a , %) και το πορώδες

5.3: ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας υπεδαφικών σχηματισμών έχουν επικρατήσει οι εξής μέθοδοι.

- Εργαστηριακή μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας δειγμάτων εδαφικών σχηματισμών και πετρωμάτων
- Δοκιμή Θερμικής Απόκρισης (Thermal Response Test - TRT)
- Εφαρμογή θεωρητικών μοντέλων με τη χρήση μαθηματικών τύπων που συνδέουν διάφορες μετρήσιμες φυσικές υπεδαφικές παραμέτρους με τη θερμική αγωγιμότητα, όπως μοντέλα κατά De Vries (1963), Tarnawski et al. (2000), Johansen (1975), Cote & Kornad (2005), Gori (1983)
- Εφαρμογή ημιεμπειρικών εξισώσεων για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας μέσω άλλων γνωστών μετρήσιμων φυσικών παραμέτρων (κοκκομετρία, υγρασία, πυκνότητα, κορεσμός κλπ), όπως τύποι κατά Kersten (1949), Campbell (1985), Singh & David (2000)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Οι εργαστηριακές μετρήσεις αποτελούν τον πιο αξιόπιστο τρόπο προσδιορισμού της θερμικής αγωγιμότητας σημειακά για τις στρώσεις του υπεδάφους. Γίνονται σε αδιατάρακτα δείγματα κατόπιν ειδικής δειγματοληψίας και με κατάλληλο εξοπλισμό και εξειδίκευση. Δημιουργούνται πρότυπα εδαφικά δοκίμια με κατάλληλη διαδικασία και μεθοδολογία και με γνωστές ιδιότητες (κοκκομετρία, υγρασία, πυκνότητα, ειδικό βάρος, ορυκτολογική σύσταση) που προέκυψαν κατά το στάδιο της επεξεργασίας και προετοιμασίας τους και ακολουθεί μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας σε κάθε δοκίμιο με κατάλληλο όργανο. Η εργαστηριακή μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας παρέχει μεγάλη ακρίβεια αλλά είναι χρονοβόρα και αυξάνει το κόστος εγκατάστασης του γεωεναλλάκτη.



Εικόνα 32: Όργανο μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας

Η Δοκιμή Θερμικής Απόκρισης (Thermal Response Test, TRT) αποτελεί τεχνική προσδιορισμού της μέσης θερμικής αγωγιμότητας του υπεδάφους σε εγκατεστημένο κατακόρυφο γεωεναλλάκτη. Μια κινητή μονάδα συνδέεται με εγκατεστημένο γεωεναλλάκτη και περιλαμβάνει αντλία θερμότητας - ηλεκτρική αντίσταση, όργανα μετρήσεων και καταγραφέα δεδομένων. Στην τιμή μέτρησης, εκτός από το υπέδαφος, περιλαμβάνονται το

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

υλικό πλήρωσης και το υλικό των σωλήνων. Μειονέκτηματά της είναι ότι η δοκιμή παρουσιάζει σφάλματα σε περιοχές με υδροφορία. Η προσδιοριζόμενη μέση τιμή θερμικής αγωγιμότητας δεν είναι αντιπροσωπευτική περιοχής με μεταβολές σε πυκνότητα, υγρασία κ.ά. ιδιότητες των ιδίων σχηματισμών και η δοκιμή γίνεται σε έργα μεγάλης κλίμακας και όχι σε μικρά καθώς είναι οικονομικά ασύμφορη.



Εικόνα 33: Όργανο Δοκιμής Θερμικής Απόκρισης

Έμμεσος τρόπος προσδιορισμού της θερμικής αγωγιμότητας υπεδαφικών σχηματισμών γίνεται με την εφαρμογή θεωρητικών μοντέλων με τη χρήση μαθηματικών τύπων που συνδέουν διάφορες φυσικές υπεδαφικές παραμέτρους με τη θερμική αγωγιμότητα και την εφαρμογή ημιεμπειρικών εξισώσεων για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας μέσω άλλων γνωστών φυσικών παραμέτρων, όπως κοκκομετρία, υγρασία, πυκνότητα, κορεσμός κλπ. Ο μεγάλος αριθμός των φυσικών παραμέτρων που εμπλέκονται στη θερμική αγωγιμότητα δυσκολεύει τη μαθηματική της έκφραση. Γενικά, έχουν διαπιστωθεί αποκλίσεις των αποτελεσμάτων από τα θεωρητικά μοντέλα και τις ημιεμπειρικές εξισώσεις σε σχέση με υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα.

5.4: ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στηρίζεται στη μέθοδο της γραμμικής πηγής θερμότητας σε άπειρο μέσο. Σύμφωνα με αυτήν, η παραγωγή σταθερής ποσότητας θερμότητας, από μια γραμμική πηγή σε ένα άπειρο μέσο, οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του μέσου αυτού, σε ακτίνα γύρω από την πηγή. Επομένως, η αύξηση εμφανίζει σχήμα κυλινδρικό με άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου την γραμμική αυτή πηγή. Η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα σημείο του μέσου $T(t)$, που απέχει απόσταση (r) από την πηγή, την χρονική στιγμή (t) από την έναρξη της θέρμανσης, δίδεται από τη σχέση (5-1):

$$T(t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot k} Ei \cdot \left(-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t} \right) \quad (5.1)$$

όπου: $T(t)$ η αύξηση της θερμοκρασίας (K), q η ροή θερμότητας ανά μονάδα μήκους της πηγής (W/m), k η θερμική αγωγιμότητα ($W/m.K$), a η θερμική διαχυτότητα (m^2/s), Ei η έκφραση του εκθετικού ολοκληρώματος που δίδεται από τη σχέση (5-2):

$$-Ei(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt \quad (5.2)$$

Αρχικά, για $t = 0$, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι $T(0) = 0$. Για μικρές τιμές της απόστασης $r \approx 0$, δηλαδή στα όρια της γραμμικής πηγής, το εκθετικό ολοκλήρωμα μπορεί να απλοποιηθεί σύμφωνα με τη σχέση (5-3) :

$$E_i(-x) = -0.577216 - \ln(x) \quad (5.3)$$

Επομένως η αύξηση θερμοκρασίας δίδεται από τη σχέση (5-4) :

$$T(t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot k} \cdot \left[-0.577216 - \ln\left(\frac{r^2}{4 \cdot a}\right) \right] + \ln(t) \quad (5.4)$$

Με βάση τη σχέση (6-4), αν σε ένα μέσο καταγράφεται η μεταβολή της θερμοκρασίας που προκαλείται από μια γραμμική πηγή στη μονάδα του χρόνου, τότε είναι δυνατό να προσδιοριστεί η θερμική αγωγιμότητα του, σύμφωνα με τη σχέση (5-5):

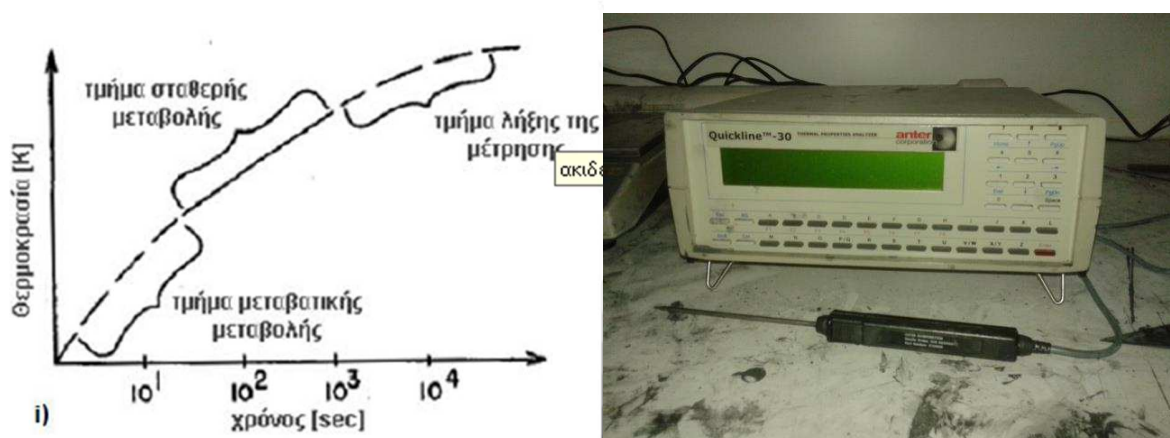
$$k = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot (T_2 - T_1)} \cdot \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (5.5)$$

Η διαδικασία της πειραματικής μέτρησης, σύμφωνα με τα ASTM standards (D-5334) είναι η εξής:

Σε ένα εδαφικό δείγμα κατάλληλων διαστάσεων (διάμετρος και ύψος μεγαλύτερο από 10 cm), εισάγεται μια ακίδα, η οποία στο ένα άκρο της έχει αντίσταση (η οποία λειτουργεί ως γραμμική πηγή θερμότητας), ενώ σε θέση εντός της ακίδας είναι τοποθετημένο θερμοστοιχείο συνεχούς καταγραφής της θερμοκρασίας. Από μια πηγή ρεύματος, τροφοδοτείται η αντίσταση με ρεύμα σταθερής έντασης, με αποτέλεσμα να παράγεται θερμότητα από την αντίσταση. Ο προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας πραγματοποιείται με την περιοδική καταγραφή της θερμοκρασίας του δείγματος, συναρτήσει του χρόνου στον οποίο παράγεται θερμότητα (Εικόνα 5-1, i). Η καταγραφή πραγματοποιείται σε σημείο της γραμμικής πηγής, το οποίο απέχει r mm από την αντίσταση. Κατά τη διάρκεια της καταγραφής, προκύπτουν καμπύλες όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-1, i. Η διαδικασία μέτρησης διακρίνεται σε 3 στάδια: Στο αρχικό, όπου η μεταβολή της θερμοκρασίας του δείγματος αυξάνει με μεγάλο ρυθμό, στο ενδιάμεσο,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

όπου η κλίση παραμένει σταθερή, και στο τελικό, όπου σταματάει η λειτουργία της πηγής θερμότητας και συνεπώς η θερμοκρασία του δείγματος αρχίζει να σταθεροποιείται. Από αυτά τα 3 στάδια, εκείνο που αξιοποιείται για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας είναι το ενδιάμεσο στάδιο σταθερής μεταβολής. Η παραπάνω διαδικασία, ονομάζεται μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας με την χρήση απλής θερμικής ακίδας (Εικόνα 34-i, ii) (Single thermal needle probe).



Εικόνα 34: i) Περιοδική καταγραφή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό δοκιμίου, στη μονάδα το χρόνου.

ii) Απλή ακίδα και μηχανήμα μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας εδαφών.

Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας, της θερμικής διαχυτότητας και της θερμοχωρητικότητας στα δείγματα που προετοιμαστηκαν. Όπως και στις μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, η θερμική αγωγιμότητα των δειγμάτων μετριόταν καθημερινά και μετά τα δείγματα αποθηκεύονταν ξανά. Τα δείγματα ζυγίζονταν πάντα πριν και μετά από κάθε μέτρηση για να προσδιοριστεί η μάζα που χανόταν από την επαφή του δείγματος με τις ακίδες των οργάνων μέτρησης και η υγρασία που χανόταν λόγω εξάτμισης.

5.5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Όπως και στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης, τα δείγματα της ομάδας Β τοποθετήθηκαν σε ειδικούς υποδοχείς και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας σε βάθος ενός μήνα.

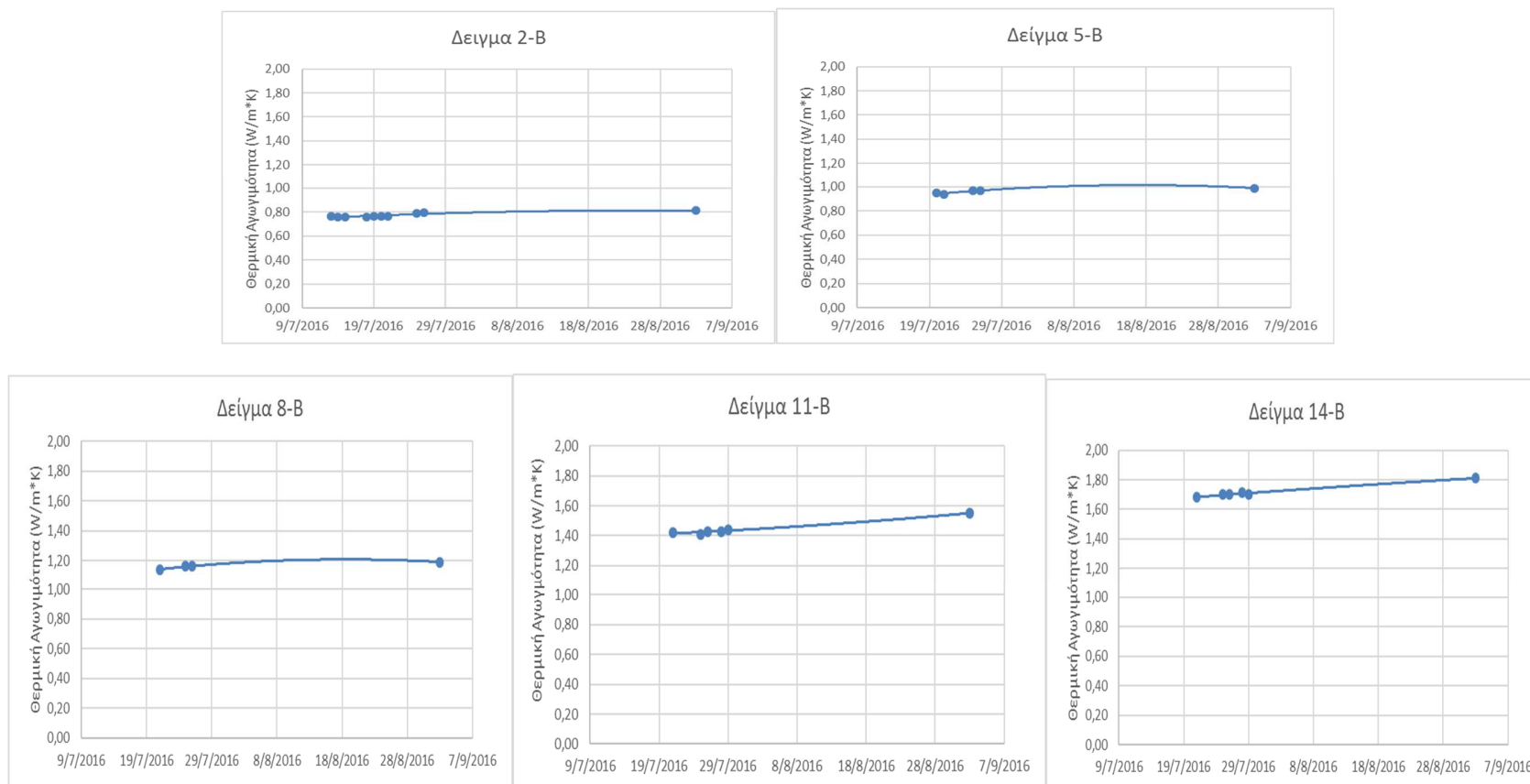
Για να παρατηρηθεί η επίδραση του γραφίτη στη θερμική αγωγιμότητα, όταν χρησιμοποιείται ως προσθετικό σε μπεντονικά ενέματα και η επίδραση του χρόνου στις θερμικές ιδιότητες των ενεμάτων αυτών, παρατίθενται ο πίνακας των τελικών μετρήσεων της θερμικής αντίστασης των δειγμάτων αλλά και τα διαγράμματα θερμικής αγωγιμότητας – χρόνου των δειγμάτων. Από τον πίνακα προκύπτει ότι η μέγιστη μετρούμενη θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζεται στον τύπο Α με την αναλογία γραφίτη V και έχει τιμή 1,81 W/m*K. Την μικρότερη μετρούμενη τιμή παρατηρείται στον Τύπο Γ με αναλογία I, 0,671 W/m*K.

Πίνακας 2: Τελικά αποτελέσματα μετρήσεων θερμικής αγωγιμότητας

Τύπος	Αναλογία Γραφίτη - Μπεντονίτη				
	I (1:5)	II (2:5)	III (3:5)	IV (4:5)	V (5:5)
A (600 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 2 0,811	Δείγμα 5 0,989	Δείγμα 8 1,19	Δείγμα 11 1,55	Δείγμα 14 1,81
B (450 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 3 0,72	Δείγμα 6 0,859	Δείγμα 9 1,04	Δείγμα 12 1,12	Δείγμα 15 1,32
Γ (300 γρ. μπεντονίτη)	Δείγμα 4 0,671	Δείγμα 7 0,754	Δείγμα 10 0,774	Δείγμα 13 0,911	Δείγμα 16 0,992

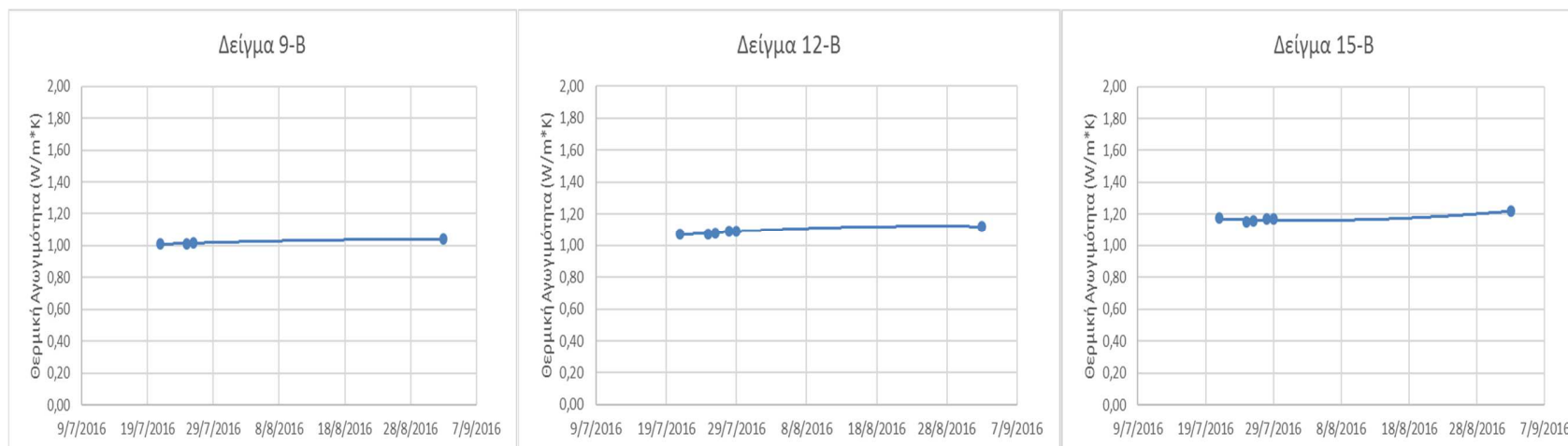
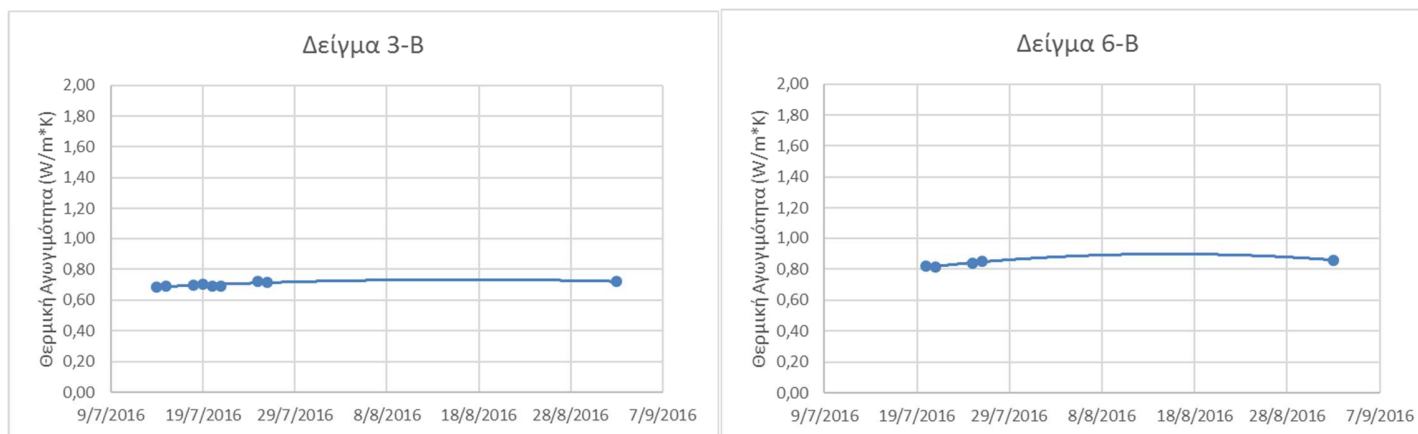
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Διάγραμμα 5.1: Διαγράμματα Θερμικής αγωγιμότητας – Χρόνου Τύπου A



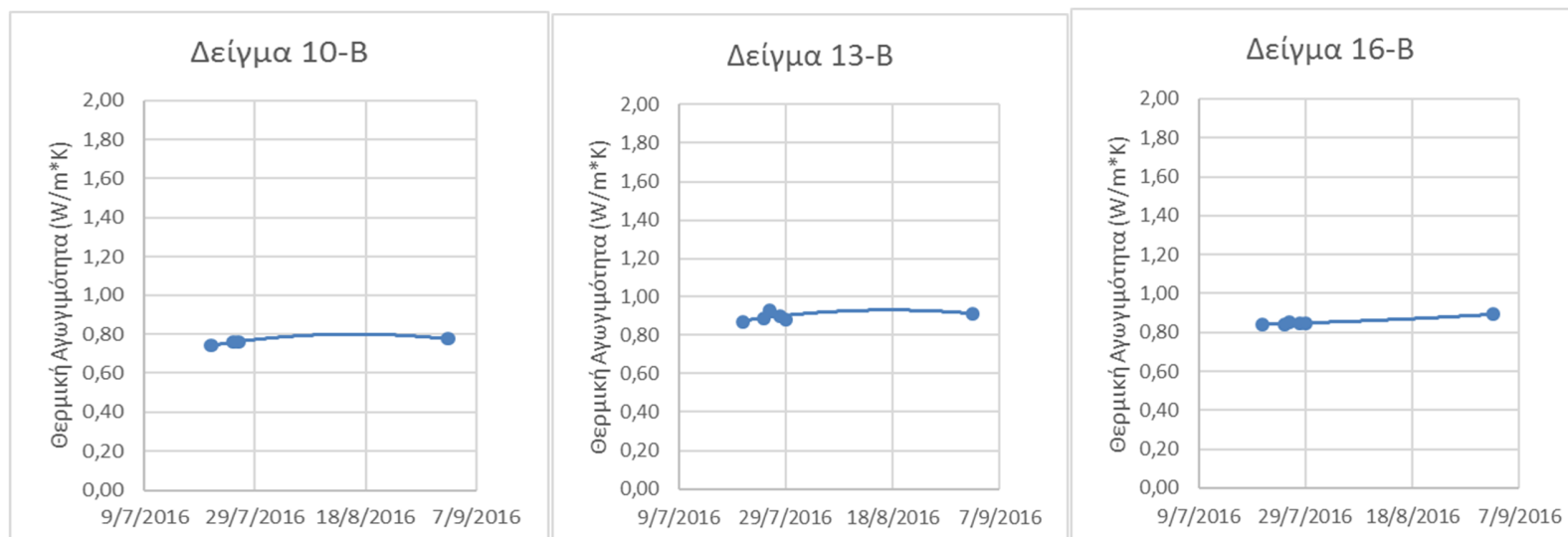
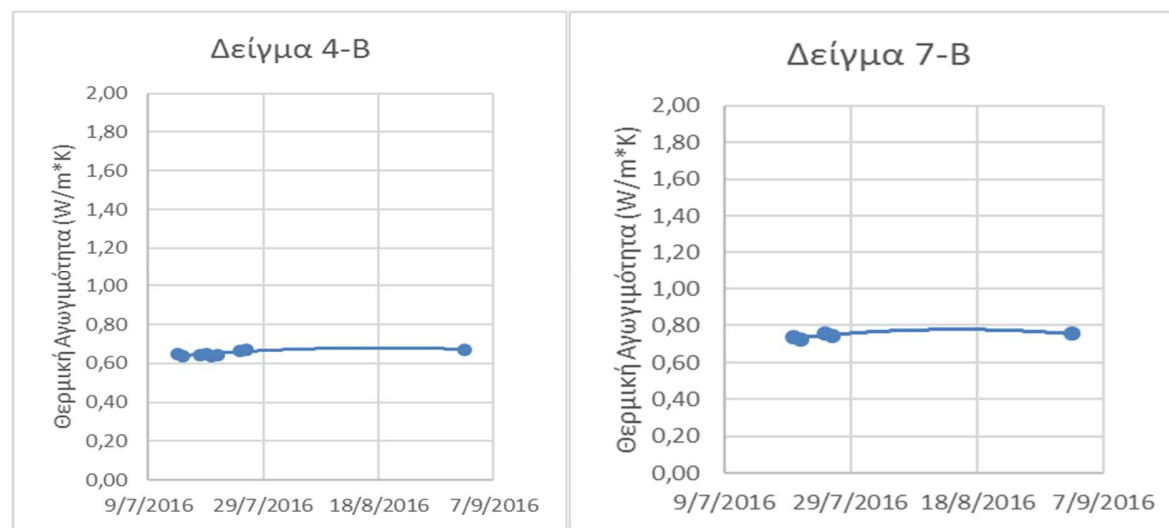
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Διάγραμμα 5.2 Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας – Χρόνου Τύπου Β

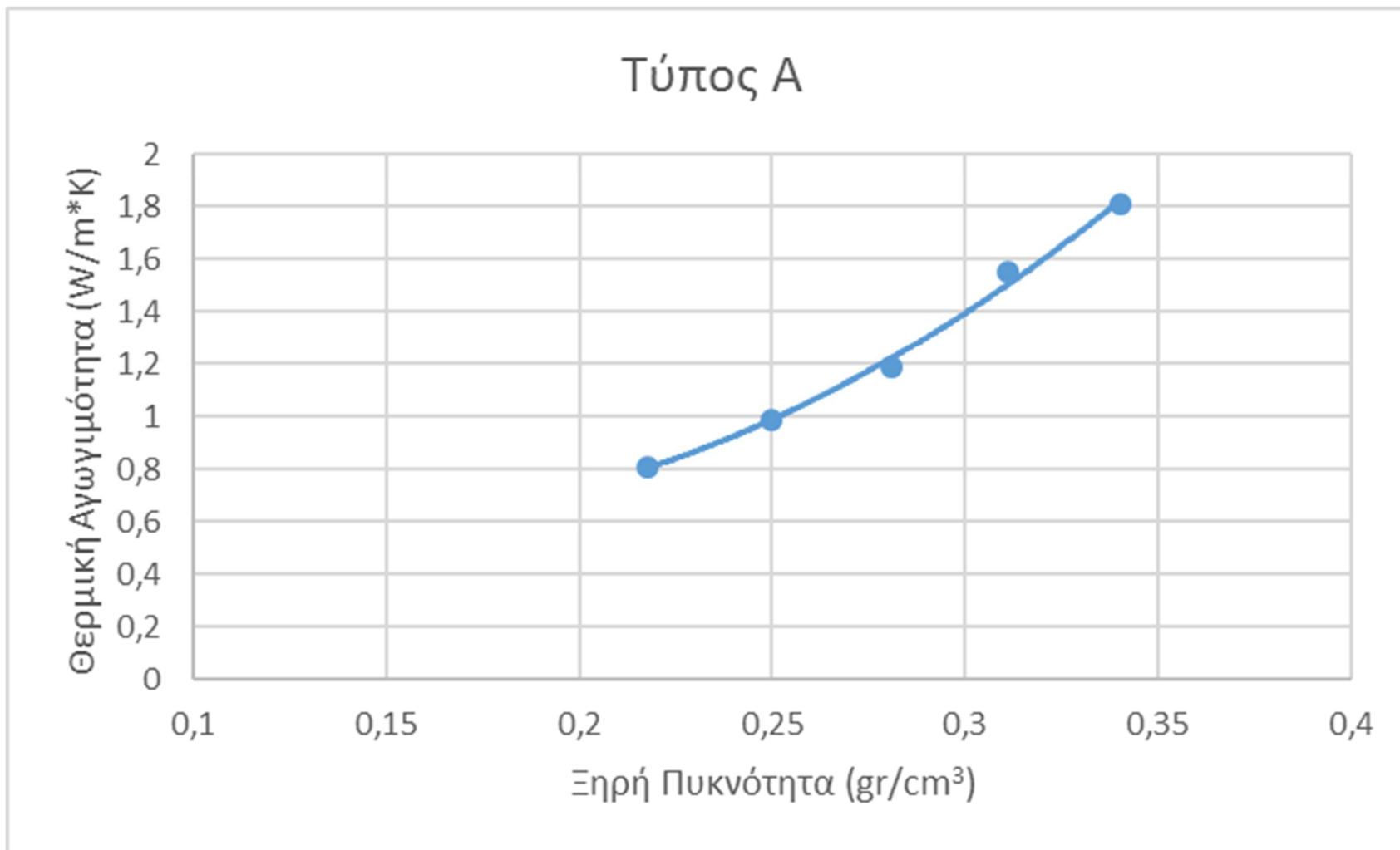


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

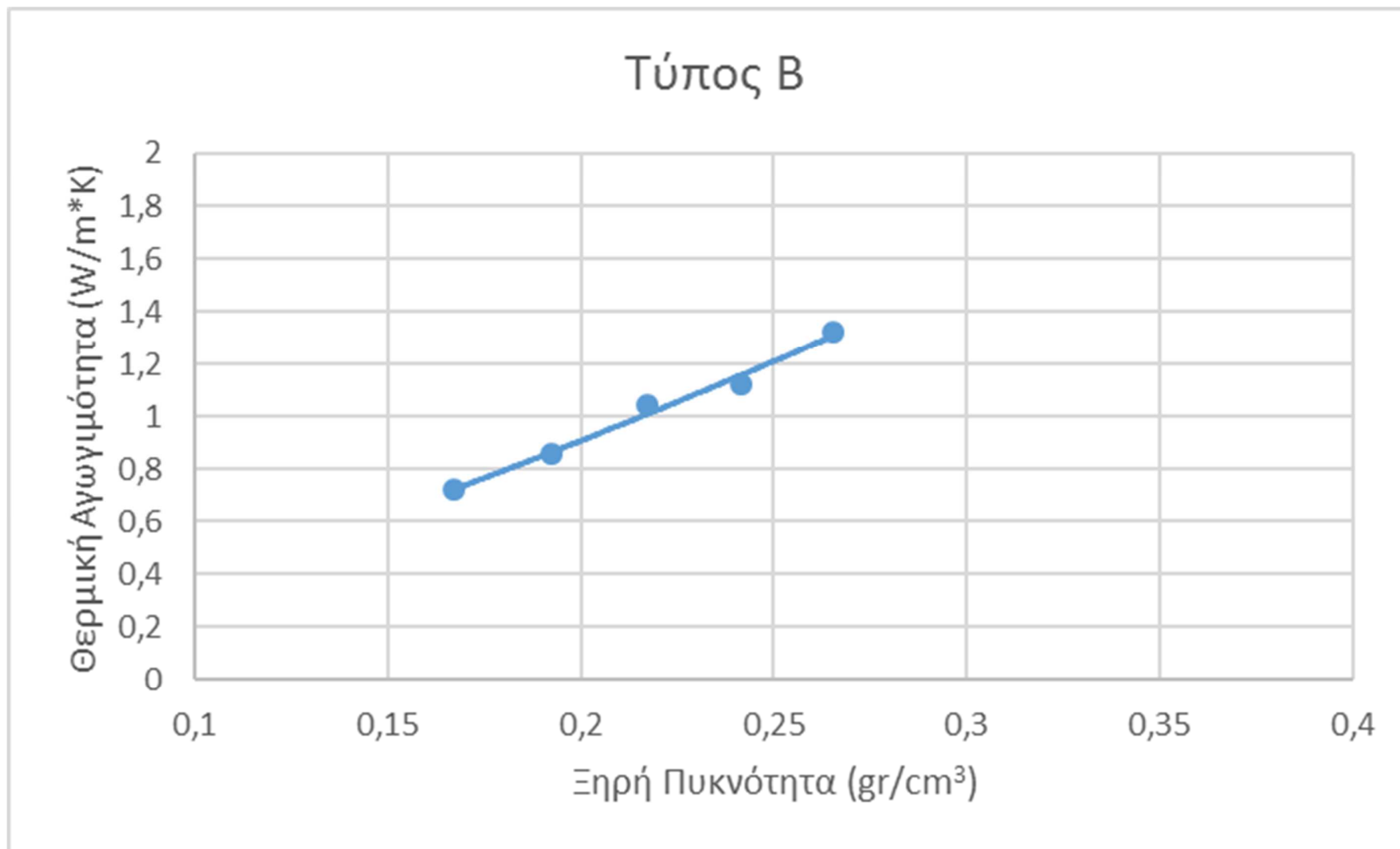
Διάγραμμα 5.3: Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας – Χρόνου Τύπου Γ



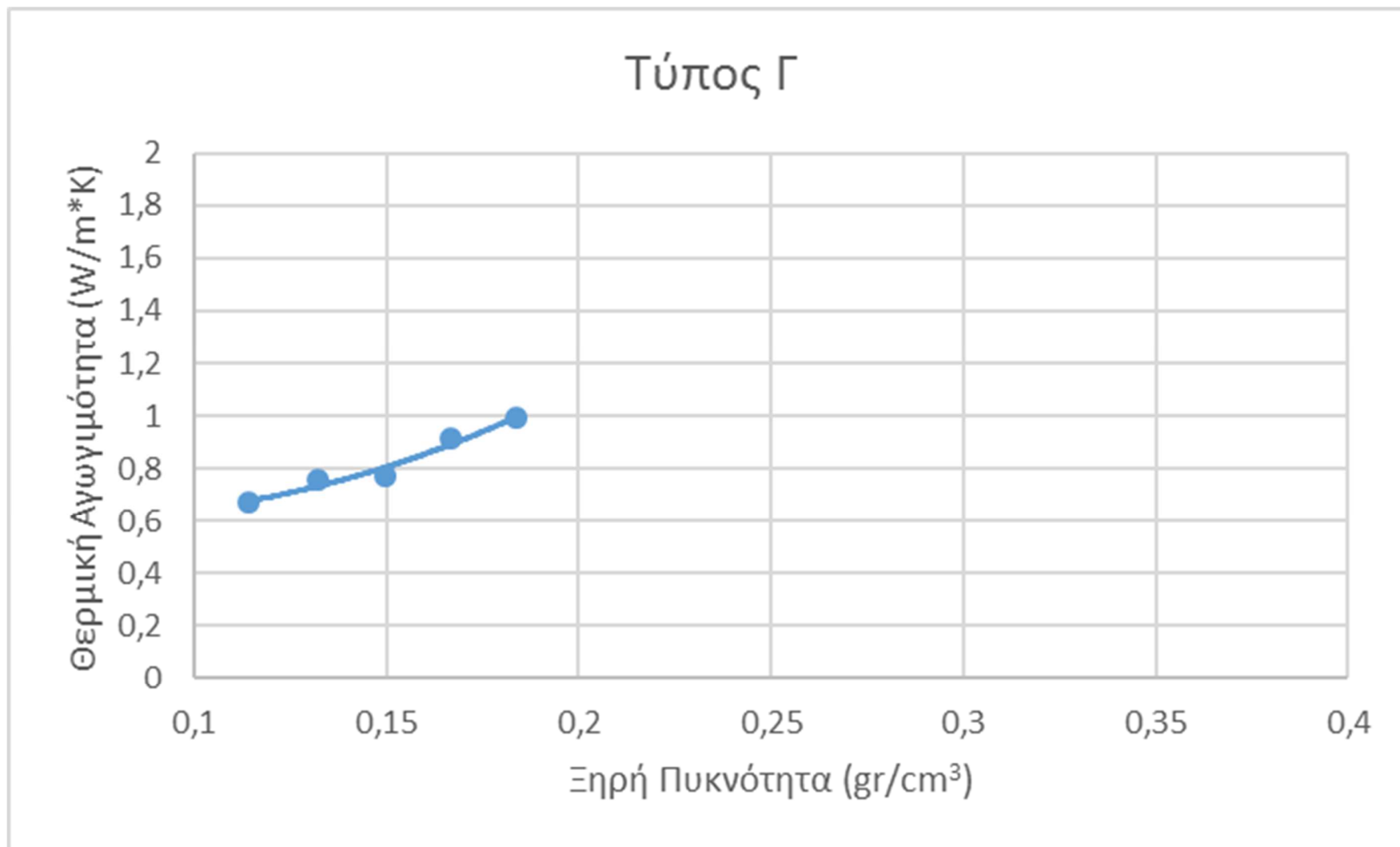
Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας – ξηρής πυκνότητας δοκιμίων τύπου Α



Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας – ξηρής πυκνότητας δοκιμίων τύπου Β



Διάγραμμα 5.6: Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας – ξηρής πυκνότητας δοκιμίων τύπου Γ



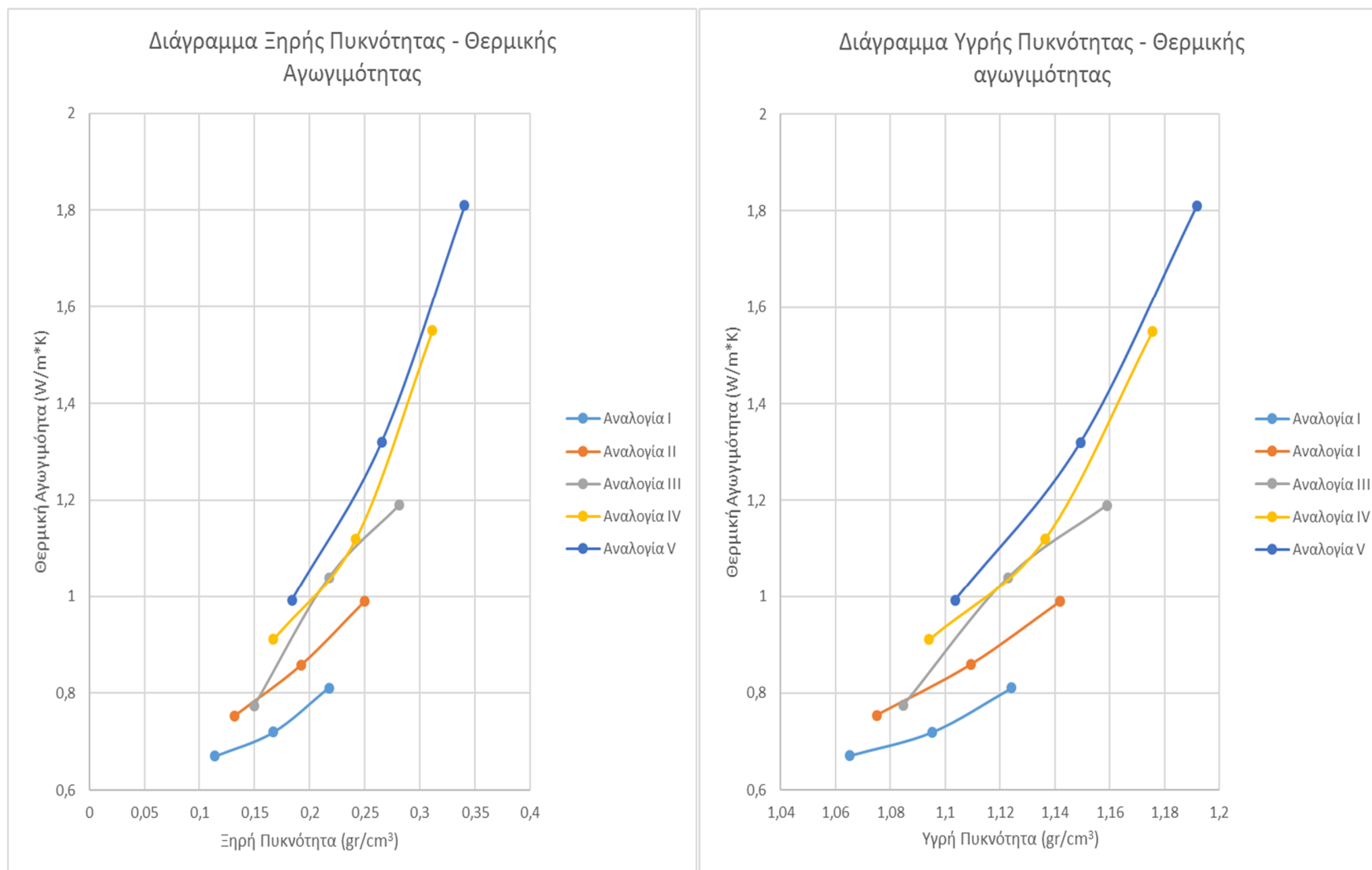
Χρονικά, τα δείγματα παρουσιάζουν μια αύξηση στην θερμική αγωγιμότητα, σε όλους τους τύπους και τις αναλογίες. Η αύξηση αυτή παρατηρείται να είναι μεγαλύτερη, στον τύπο Α, όπου τα δείγματα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τους άλλους τύπους, και όσο το ποσοστό γραφίτη/μπεντονίτη μεγαλώνει. Στα αντίστοιχα δείγματα της ομάδας Α υπήρχε και αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και το φαινόμενο πιθανά να έχει σχέση με την αναλογία του γραφίτη στο συνολικό δείγμα.

Στο διάγραμμα 5.7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμικής αγωγιμότητας προς ξηρή και υγρή πυκνότητα. Στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται εκθετική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας με την αύξηση των πυκνοτήτων.

Μέσω των μετρήσεων αυτών, σχεδιάστηκε επίσης διάγραμμα περιεκτικότητας Γραφίτη προς θερμική αγωγιμότητα που παρατίθεται στο διάγραμμα 5.8. Παρατηρείται από αυτό η ραγδαία αύξηση την θερμικής αγωγιμότητας με την προσθήκη γραφίτη ως προσθετικό σε μπεντονικά ένεμα.

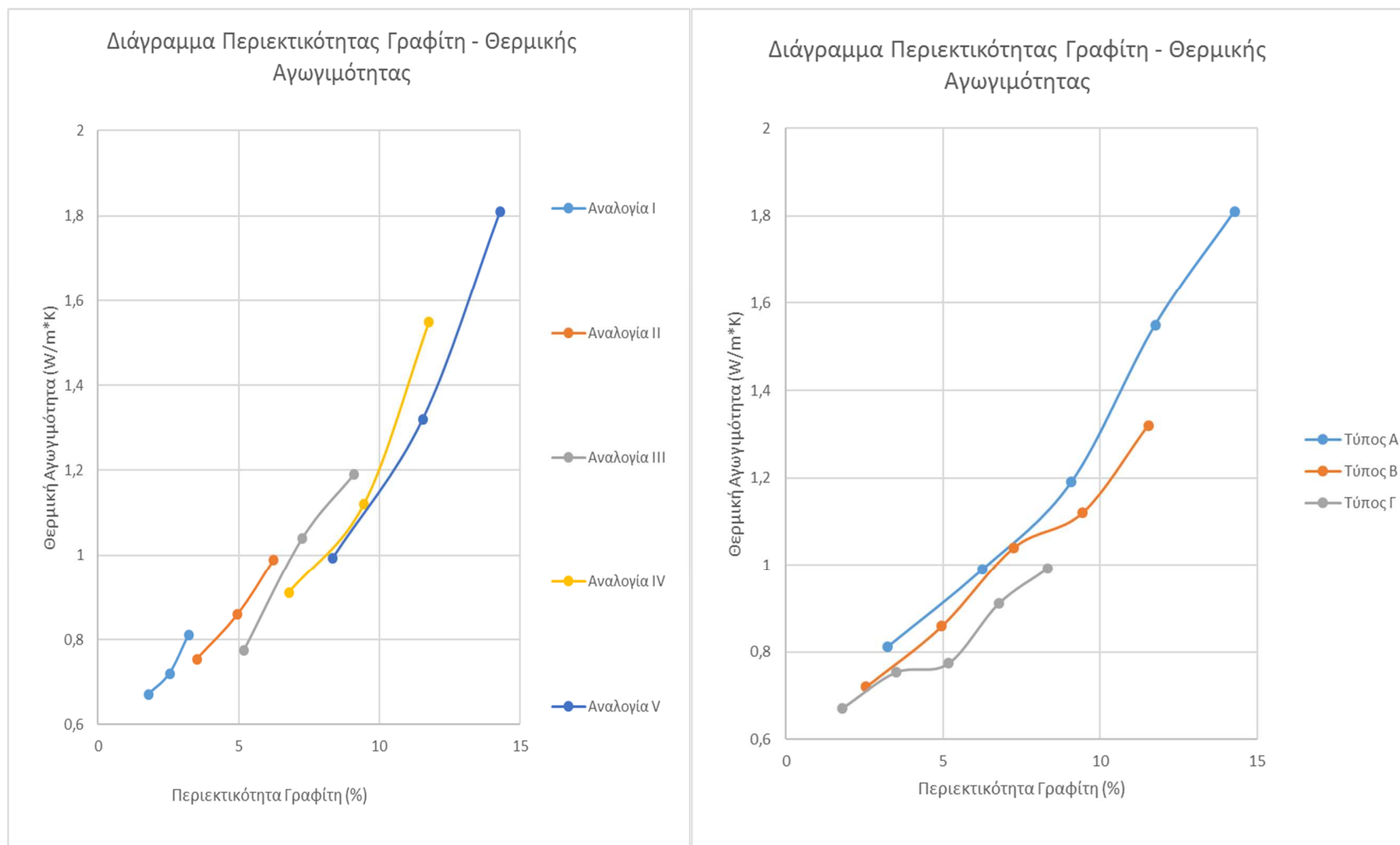
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα Ξηρής Πυκνότητας προς Θερμική Αγωγιμότητα, Διάγραμμα Υγρής Πυκνότητας προς Θερμική αγωγιμότητα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Διάγραμμα 5.8: Διαγράμματα Περιεκτικότητας Γραφίτη - Θερμικής Αγωγιμότητας ως προς την Αναλογία Στερεών και την Πυκνότητα



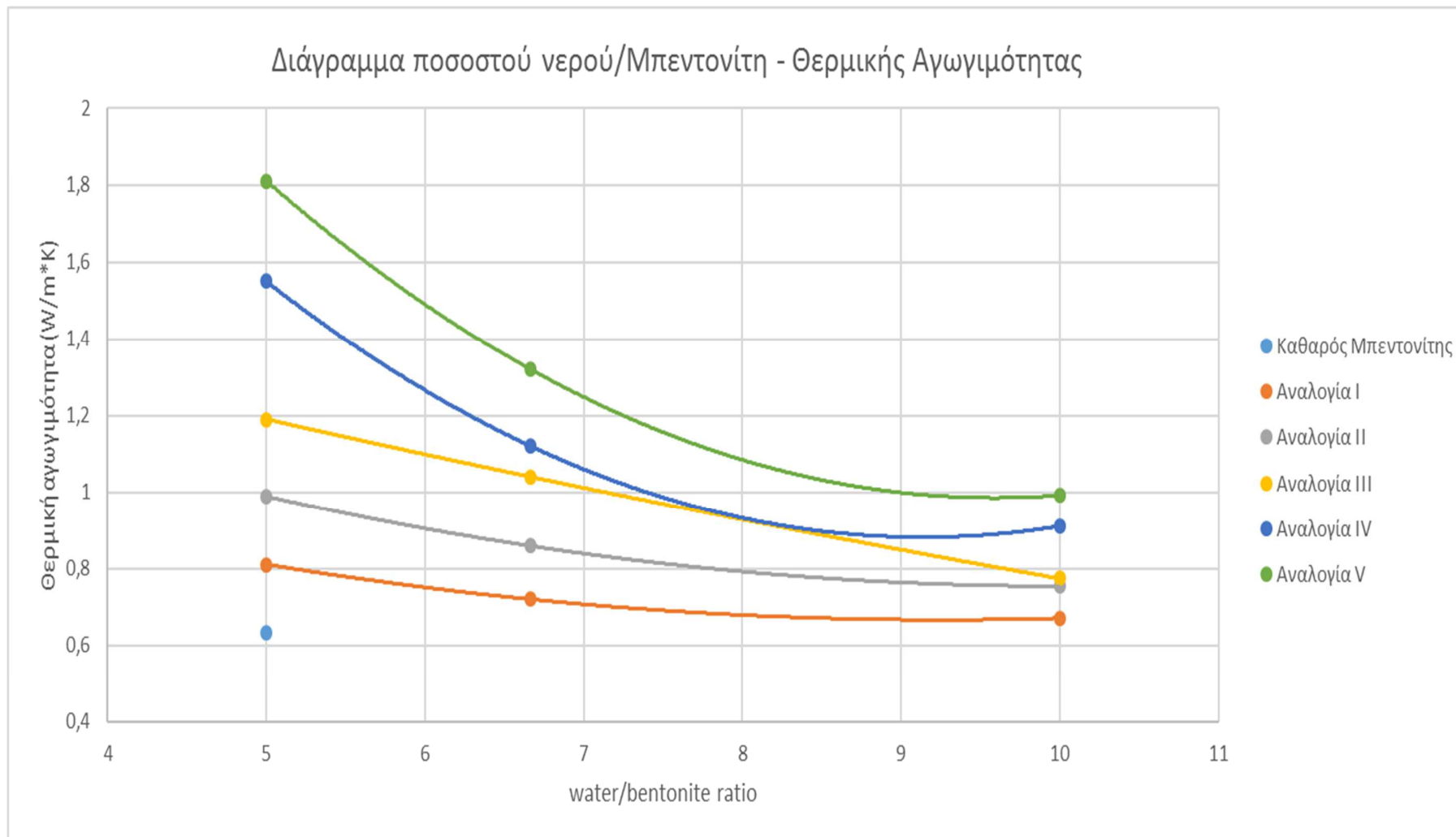
Παρόμοια παρατήρηση γίνεται επίσης με το διάγραμμα 5.9 που απεικονίζει την μεταβολή που προκαλεί η αλλαγή του ποσοστού νερού/Μπεντονίτη στην θερμική αγωγιμότητα. Η αύξηση της ποσότητας των στερεών υλικών στο δείγμα προκαλεί εκθετική αύξηση των θερμικών ιδιοτήτων του ενέματος.

Ένα πιο ευκρινές αποτέλεσμα μας δίνει το διάγραμμα 5.10, το διάγραμμα ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη προς θερμική αγωγιμότητα, όπου παρατηρείται ταυτόχρονα, η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και από τις δύο μεταβολές, δηλαδή και με την προσθήκη Γραφίτη σε σταθερή ποσότητα Μπεντονίτη, αλλά και με την αύξηση την πυκνότητας του δείγματος.

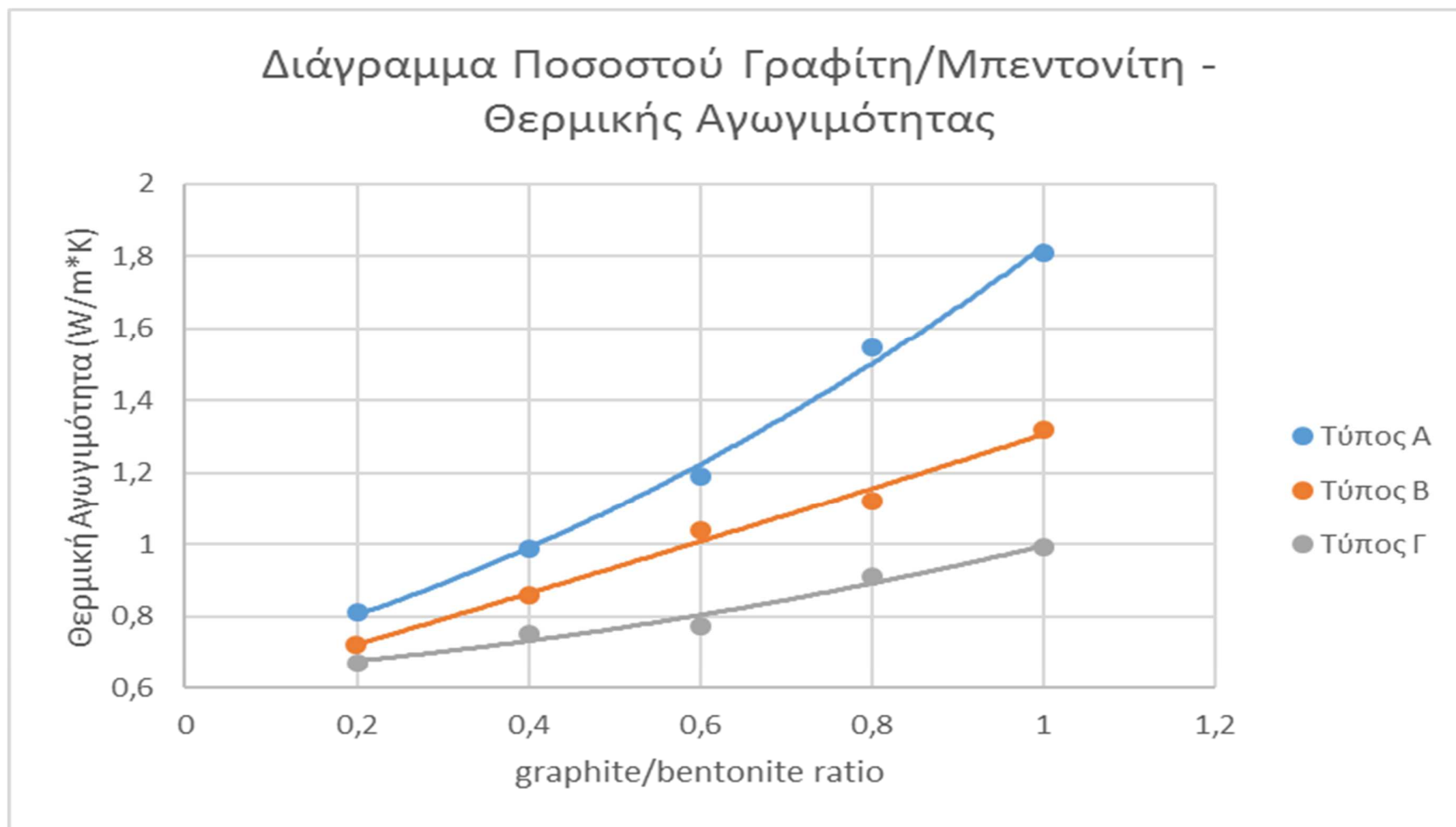
Παρ' όλα αυτά, η πυκνότητα των δειγμάτων που αναμείχθηκαν με 600 γραμμάρια Μπεντονίτη (Δείγματα 2, 5, 8, 11, 14) ξεπερνούσε το επιτρεπτό όριο για να μπορέσει να αντληθεί το ένεμα μέσω της σωλήνας τριμιέ στο δακτύλιο του κάθετου γεωεναλλάκτη, καθιστώντας το μη εργάσιμο. Η καλύτερη αναλογία σε άποψη πυκνότητας ήταν αυτή των 450 γραμμαρίων, και η εργασιμότητα του ενέματος είναι μια μεταβλητή με μεγάλη βαρύτητα κατα την δημιουργία ενός ενέματος. Επομένως, το εργάσιμο δοκίμιο με την βέλτιστη θερμική αγωγιμότητα στην παρούσα διπλωματική, είναι το δοκίμιο 15 με τιμή θερμικής αγωγιμότητας $1,22 \text{ Watt/m}^{\circ}\text{K}^{\circ}$.

Ένας νέος πειραματικός έλεγχος, με τιμές ανάμειξης Μπεντονίτη ανάμεσα στα 450 και 600 γραμμάρια, θα μπορούσε να οριοθετήσει το σημείο που η ανάμειξη θεωρείται μη εργάσιμη και να δημιουργήσει ένα νέο εργάσιμο ένεμα με ακόμα μεγαλύτερη τιμή θερμικής αγωγιμότητας, η οποία θεωρητικά κυμαίνεται ανάμεσα στο $1,22 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}^{\circ}$ και $1,81 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}^{\circ}$.

Διάγραμμα 5.9: Διάγραμμα ποσοστού νερού/Μπεντονίτη προς Θερμική Αγωγιμότητα



Διάγραμμα 5.10: Διάγραμμα Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη προς Θερμική Αγωγιμότητα



5.6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΑΡΟΜΟΙΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το σύνολο των δειγμάτων που κατασκευάστηκαν συγκρίθηκαν ως προς τα φυσικά τους και θερμικά τους χαρακτηριστικά. Οι συγκρίσεις αυτές οδήγησαν στα συμπεράσματα των παραπάνω κεφαλαίων σχετικά με την επίδραση της πυκνότητας των μπεντονιτικών ενεμάτων και της περιεκτικότητας τους σε γραφίτη, στην μεταβολή της θερμικής τους αγωγιμότητας, τα οποία αποτελούν τον ποιοτικό και ποσοτικό έλεγχο που είχε ως στόχο η παρούσα πτυχιακή.

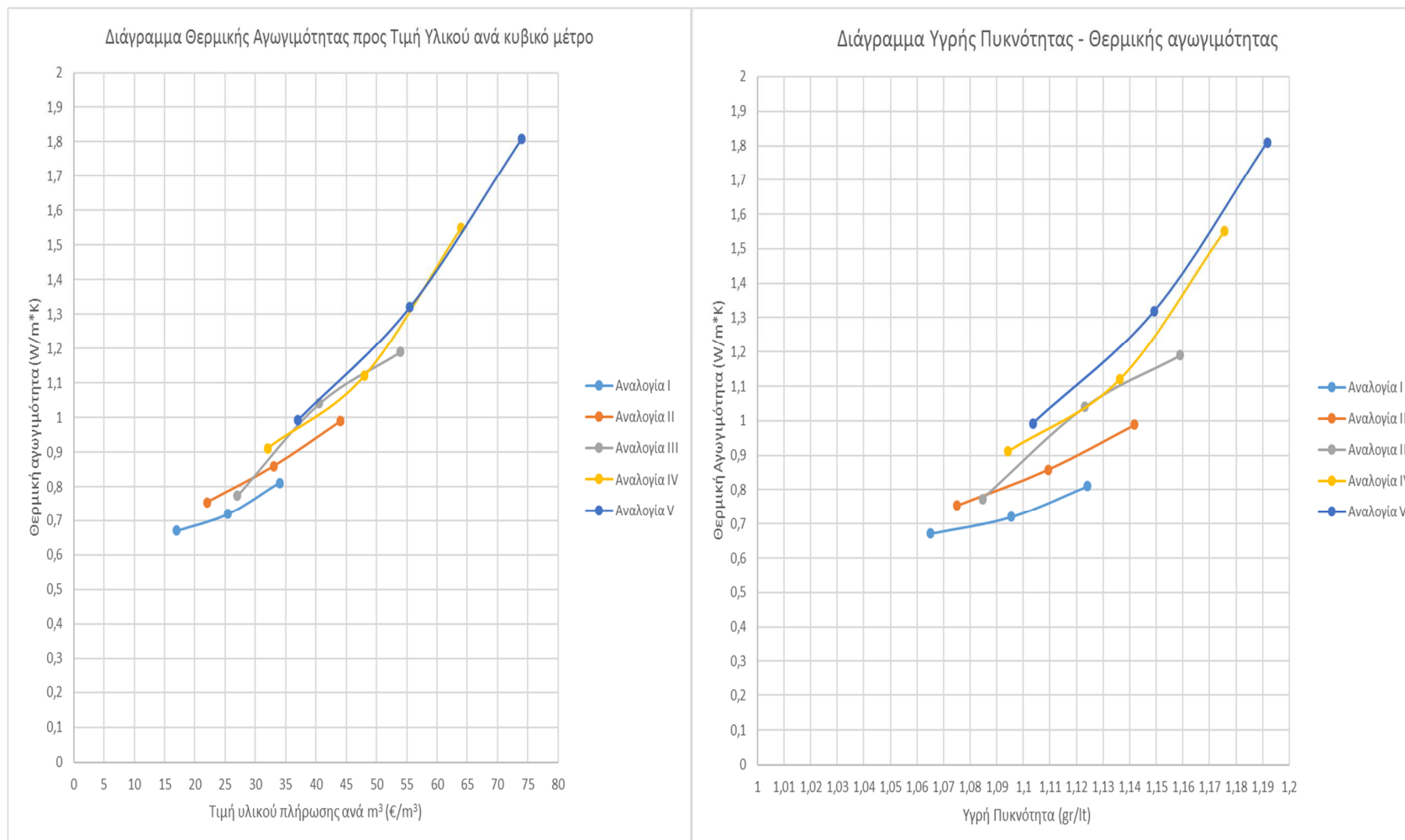
Ως τελικός στόχος όμως, τέθηκε ο τεχνικός έλεγχος των δειγμάτων που κατασκευάστηκαν. Ο έλεγχος αυτός έγινε με την σύγκριση της εργασιμότητας αλλά και του κόστους κατασκευής ανά μονάδα όγκου δειγμάτων ίσης θερμικής αγωγιμότητας, και αποσκοπεί στην προσπάθεια κατασκευής ενός μπεντονιτικού ενέματος σε ένα εύρος θεμιτής θερμικής αγωγιμότητας, το οποίο να είναι όσο το δυνατό, εύκολο στην εγκατάσταση και οικονομικό.

Στο διάγραμμα 5.11 γίνεται σύγκριση θερμικής αγωγιμότητας της εκάστοτε αναλογίας υλικών με την τιμή του ενέματος κατασκευάζεται από την αναλογία αυτή και την πυκνότητα του. Από το διάγραμμα αυτό, μπορούμε τεχνικά να μελετήσουμε για συγκεκριμένη θερμική αγωγιμότητα, ποιά αναλογία υλικών έχει το χαμηλότερο κόστος και είναι πιο εύκολο στην εγκατάσταση μέσω του σωλήνα τριμιέ.

Ως παράδειγμα, στο διάγραμμα 5.12, για την κατασκευή ενός υλικού πλήρωσης με θερμική αγωγιμότητα $1,1 \text{ W/m} \cdot \text{K}^\circ$ παρατηρούμε ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τρεις διαφορετικές αναμείξεις. Παρόλα αυτά η ανάμειξη V στην οποία το ποσοστό γραφίτη/μπεντονίτη είναι 1:1 στην συγκεκριμένη θερμική αγωγιμότητα έχει και χαμηλότερη τιμή κατασκευής ανά μονάδα όγκου αλλά και χαμηλότερη πυκνότητα που το καθιστά πιο εύκολα εργάσιμο κατά την εγκατάσταση του στην γεώτρηση.

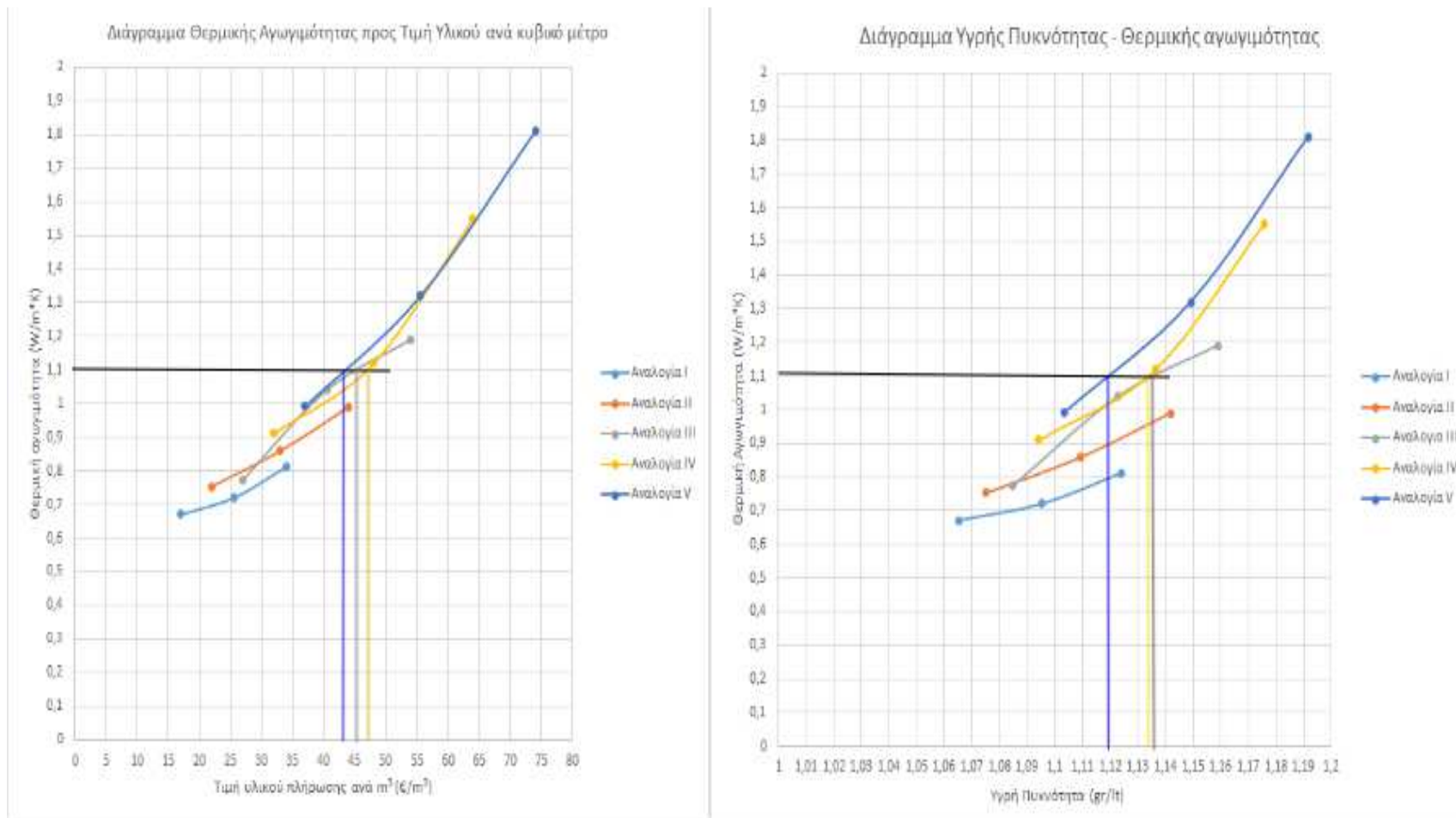
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Διάγραμμα 5.11: Διαγράμμα Θερμικής Αγωγιμότητας προς Τιμή υλικού πλήρωσης ανά κυβικό μέτρο και Διάγραμμα Θερμικής Αγωγιμότητας προς Υγρή Πυκνότητα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Διάγραμμα 5.12: Παράδειγμα στα Διάγραμμα Θερμικής Αγωγιμότητας προς Τιμή υλικού πλήρωσης ανά κυβικό μέτρο και Διάγραμμα Θερμικής Αγωγιμότητας προς Υγρή Πυκνότητα



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στον πειραματικό προσδιορισμό της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε πρότυπα μπεντονιτικά ενέματα με προσθετικό Γραφίτη υπό ελεγχόμενα μεταβαλλόμενες συνθήκες πυκνότητας και αναλογίας Γραφίτη/Μπεντονίτη.

Στόχος της εργασίας ήταν η δημιουργία αξιόπιστης βάσης πειραματικών δεδομένων θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε μπεντονιτικά ενέματα, αλλά και η διερεύνηση και συσχέτιση των φυσικών ιδιοτήτων των ενεμάτων με τη θερμική και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η διπλωματική εργασία πραγματεύεται επίσης τη σχέση μεταξύ θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Για να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι θερμικές ιδιότητες του ενέματος, καθίσταται απαραίτητη η βαθύτερη γνώση της δομής και των φυσικών ιδιοτήτων του. Στη βάση αυτή αναλύθηκαν και διατυπώθηκαν, στην παρούσα διπλωματική εργασία, με σαφήνεια οι κύριες φυσικές ιδιότητες που υπεισέρχονται στον υπολογισμό των θερμικών ιδιοτήτων, με έμφαση στη θερμική αγωγιμότητα.

Σημαντικές φυσικές ιδιότητες, οι οποίες καθιστούν ένα ένεμα ικανό να πληρώσει έναν κάθετο γεωεναλλάκτη, και αναφέρονται εκτενώς στην παρούσα διπλωματική είναι:

- Η πυκνότητα του ενέματος
- Η περιεκτικότητα των στερεών του ενέματος
- Η υδραυλική αγωγιμότητα του ενέματος
- Η αντοχή του ενέματος στη συρρίκνωση
- Η αντοχή του ενέματος στο χρόνο

Για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων σχεδιάστηκε ολοκληρωμένη πειραματική διαδικασία ώστε να μπορεί να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για την πυκνότητα και την περιεκτικότητα των ενεμάτων. Η πειραματική αυτή διαδικασία, στηρίζεται στη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας πρότυπων μπεντονιτικών ενεμάτων, γνωστής ορυκτολογικής σύστασης και κοκκομετρίας, με συγκεκριμένες κάθε φορά τιμές ξηρής πυκνότητας και προσθετικών.

Τα κλάσματα που αξιοποιήθηκαν για τη δημιουργία των πρότυπων δοκιμίων, προέκυψαν από ανάμειξη προγεγραμμένων υλικών πλήρωσης σε συνθήκες εργαστηρίου.

Οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας που ακολούθησαν διεξήχθησαν με απόλυτα συστηματικό τρόπο και σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM, χρησιμοποιώντας το όργανο Q1 – 30 της εταιρίας Anter με τη χρήση needle probe.

Ως γενική διαπίστωση, η ξηρή πυκνότητα και η περιεκτικότητα επιδρούν σημαντικά στην τιμή της θερμικής αγωγιμότητας.

Σχετικά με τις κρίσιμες φυσικές παραμέτρους των ενεμάτων που επιδρούν στη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας, ισχύουν:

- Η μέγιστη θερμική αγωγιμότητα επιτυγχάνεται στην μέγιστη ξηρή και υγρή πυκνότητα.
- Η μέγιστη θερμική αγωγιμότητα επίσης επιτυγχάνεται με την αύξηση του ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη.
- Τα δοκίμια που εξετάστηκαν, διατηρήθηκαν σταθερά ως προς την θερμική τους αγωγιμότητα σε βάθος χρόνου 30 ημερών.

Αντίστοιχα οι ίδιες παράμετροι επιδρούν στην μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ως εξής:

- Η μέγιστη ηλεκτρική αγωγιμότητα επιτυγχάνεται στην μέγιστη πυκνότητα με το ελάχιστο ποσοστό Γραφίτη/Μπεντονίτη.
- Η αύξηση της πυκνότητας Μπεντονίτη οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ενέματος.
- Η αύξηση της πυκνότητας του Γραφίτη οδηγεί σε μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ενέματος.
- Τα δοκίμια που εξετάστηκαν, διατήρησαν σχετικά σταθερές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης σε βάθος χρόνου 30 ημερών.

Επίσης, η πυκνότητα ενός ενέματος παίζει μεγάλο ρόλο στην εργασιμότητα του μέσω του σωλήνα τριμέ και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός ενέματος πλήρωσης κατακόρυφου γεωεναλλάκτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

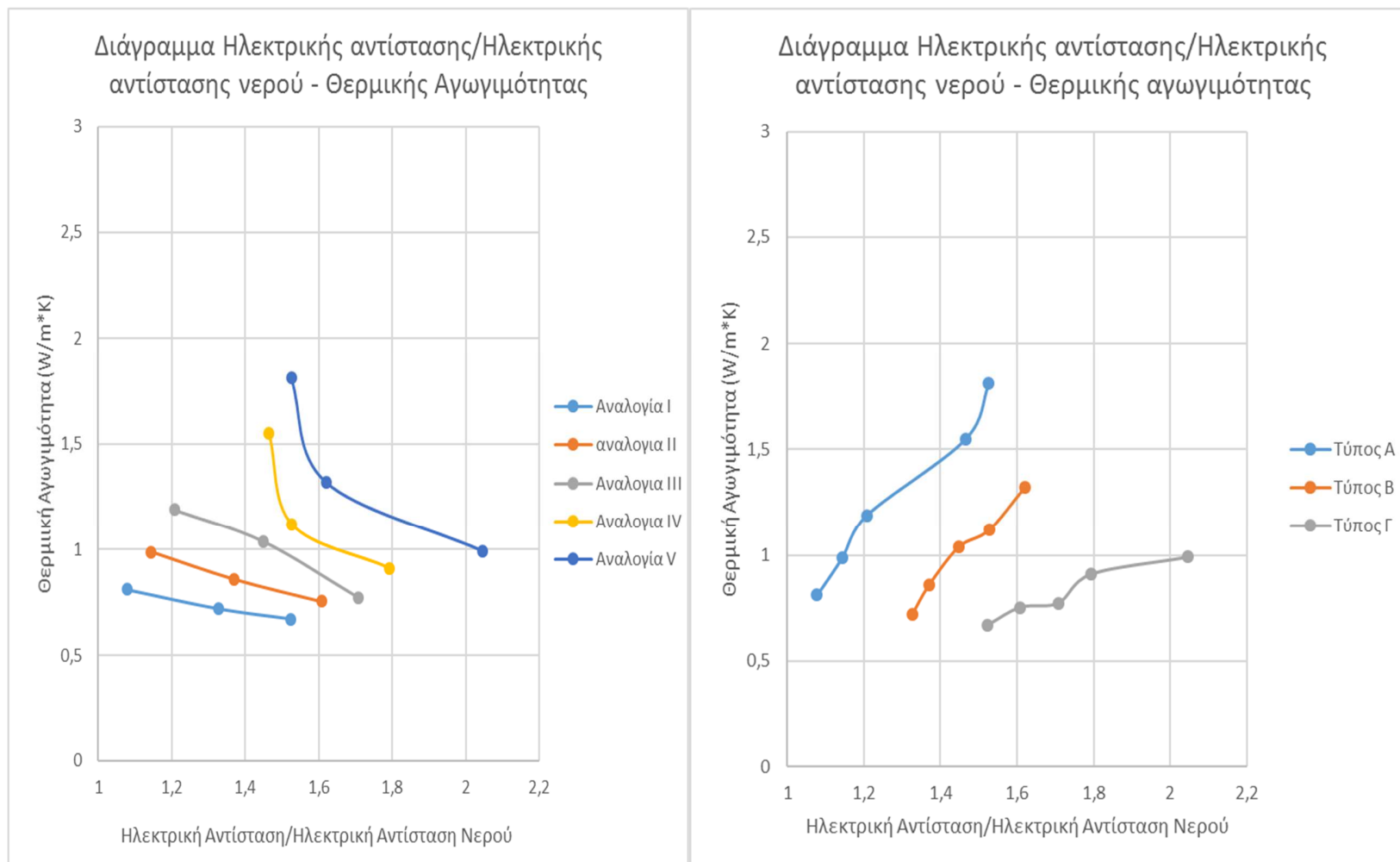
Από τεχνική άποψη, κατασκευάστηκαν διαγράμματα τα οποία επιτρέπουν την ορθή επιλογή της κατάλληλης ανάμειξης, από αυτές που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο, για την δημιουργία ενός ενέματος με γνωστή και ρεαλιστική θερμική αγωγιμότητα, ώστε το ένεμα αυτό να είναι το κατά δύναμιν πιο οικονομικά συμφέρον και εύκολα εργάσιμο. Τα διαγράμματα αυτά αναλύονται στο υποκεφάλαιο 5.6. Ως γενικό φαινόμενο, παρατηρήθηκε ότι παρότι ο γραφίτης αποτελεί ακριβότερο υλικό από τον μπεντονίτη, η επίδραση του στην μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας είναι αρκετή για να είναι προτιμότερες οι μεγαλύτερες αναλογίες γραφίτη/μπεντονίτη καθώς επιτυγχάνουν επιθυμητές τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε αρκετά μικρότερες πυκνότητες, δημιουργώντας έτσι ένα ένεμα το οποίο είναι ταυτόχρονα φθηνότερο και πιο εύκολα εργάσιμο.

Στα πλαίσια του πειραματικού προσδιορισμού της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας, σχεδιάστηκε τα ακόλουθα διαγράμματα συσχέτισης.

Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται ότι η θερμική αγωγιμότητα είναι ανάλογη της ηλεκτρικής σε σχέση με την ξηρή πυκνότητα του ενέματος, αλλά είναι αντιστρόφως ανάλογη σε σχέση με το ποσοστό Γραφίτη/Μπεντονίτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διάγραμμα 5.11: Διαγράμματα Ηλεκτρικής Αντίστασης – Θερμικής Αγωγιμότητας ως προς την αναλογία στερεών και την πυκνότητα



Προτάσεις – Εξέλιξη της έρευνας

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατάφεραν να οριοθετήσουν την μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας ενεμάτων, τα οποία κατασκευάστηκαν με την χρήση γραφίτη και μπεντονίτη, δυο ορυκτών του Ελλαδικού χώρου που εύκολα προμηθεύονται μέσω της Ελληνικής αγοράς.

Την έρευνα αυτή για την βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων των ενεμάτων που χρησιμοποιούνται στα γεωθερμικά συστήματα κατακόρυφων γεωεναλλακτών θα μπορέσει να εξελίξει περαιτέρω:

- Η μελέτη της μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας των ενεμάτων αυτών, με την χρήση άλλων υλικών ως προσθετικά, όπως ο καολίνης.
- Η διαστασιολόγηση συστημάτων κατακόρυφων γεωεναλλακτών με την χρήση των τιμών που μετρήθηκαν στην παρούσα διπλωματική.
- Η κατασκευή ενός εργάσιμου ενέματος με την μέγιστη δυνατή θερμική αγωγιμότητα και η διαστασιολόγηση του μήκους της γεώτρησης που χρειάζεται για την εγκατάσταση του ενέματος αυτού.
- Ο υπολογισμός του κόστους της κατασκευής ενός τέτοιου ενέματος και της διάτρησης της γεώτρησης του και η σύγκριση του κόστους αυτού με το συνολικό κόστος εγκατάστασης των συμβατικών ενεμάτων της αγοράς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alan, Marita L. (1997) « THERMAL CONDUCTIVITY OF CEMENTITIOUS GROUTS FOR GEOTHERMAL HEAT PUMPS » Brookhaven National Laboratory Upton, NY 11973-5000

Alan, Marita L. (2015) « Quality Control and Troubleshooting for Grouts Used with Geothermal Heat Pumps » Swinburne University of Technology, Burwood Rd, Hawthorn, Vic 3122, Australia

ASTM standards.

Fabien Delaleux, Xavier Py, Régis Olives, Antoine Dominguez (2012) Enhancement of geothermal borehole heat exchanger performances by improvement of bentonite grouts conductivity, Applied Thermal Engineering

Selcuk Erol, Bernard Francois (2014) Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers, Applied Thermal Engineering

Chulho Lee, Moonseo Park, Sunhong Min, Shin-Hyung, Byonghu Sohn, Hongseok Choi (2011), Comparison of effective thermal conductivity in closed-loop vertical ground heat exchangers, Applied Thermal Engineering

Michigan Department of Natural Resources & Environment Groundwater Division (2010) «Best Practices for Geothermal Vertical Closed-Loop Installations »

Paul, N.D and C.P. Remund (1997) The Effect of Grout Thermal Conductivity on Vertical Geothermal Heat Exchanger Design and Performance. Final Report No. TR- 108529 EPRI Project RP3881-1. Electric Power Research Institute.

Paul, N.D. and C.P. Remund (1997a) “Ground Source Heat Pump Cement-based Grout Literature Review”. Final Report No. TR-109166. EPRI Project RP3024-33. Electric Power Research Institute. Final Report.

Paul, N.D. and C.P. Remund (1997b) Physical, Thermal and Hydraulic Properties of Bentonite-Based Grouts. Final Report No. TR-109160. EPRI Project RPP3881-1. Electric Power Research Institute. Final Report.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Paul, N.D., G.A. Streich, J.A. Heibergfer and C.P. Remund. (1997) Termal, Physical, Hydraulic and Heat of Hydration Properties of Cement-Based Grouts. Final Report No. TR-109165. ERPI Project RP3024-33. Electric Power Research Institute. Final Report.

Charles P. Remund (1999), «Borehole thermal resistance: Laboratory and field studies»

The International Ground Source Heat Pump Association and the Board of Regents (2000) « Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems » Oklahoma State University

Lele Yu, Wanlu Huang (2015) «Research on Thermal Conductivity of Grouting Material for Underground Heat Exchanger of GSHP System» Asia-Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference

Αποστολόπουλος Γεώργιος (2013) « Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής »

Βραχόπουλος Μιχάλης, Κούκου Μαρία, Καρύτσας Κωνσταντίνος (2015) « Κανονική γεωθερμία - αρχές σχεδιασμού γεωθερμικών συστημάτων και εφαρμογές » Εκδόσεις Κάλλιπος

Σώμος Γεώργιος (2009) « Πειραματικός Προσδιορισμός Θερμικής και Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας Εδάφους »

Φραγκογιάννης Γεώργιος Ι. (2011) « Αναλυτικός Σχεδιασμός και Παραμετρική ανάλυση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφους γεωεναλλάκτες. Πειραματική διερεύνηση του θερμικού δυναμικού του υπεδάφους »

www.orykta.gr (30/9/2016)

www.energypress.gr (30/9/2016)

<http://www.panceratubi.it> (30/9/2016)

<http://geoergo.gr> (30/9/2016)

<http://hdl.handle.net/11419/4773> (30/9/2016)

<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/graphite/graphmyb03.pdf>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Πίνακας 1: Πίνακας Τελικών μετρήσεων καθαρού Γραφίτη (Δοκίμιο 17) και Μπεντονίτη (1-A, 1-B)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		Γραφίτης	1-A	1-B
νερό	gr	1500,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	0,00	600,00	600,00
γραφίτης	gr	300,00	0,00	0,00
σύνολο	gr	1800,00	3600,00	3600,00
Κατά βάρους αναλογία				
νερό	%	83,33	83,33	83,33
μπεντονίτης	%	0,00	16,67	16,67
γραφίτης	%	16,67	0,00	0,00
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	0,00	100,00	100,00
Γραφίτης	%	100,00	0,00	0,00
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	378,70	385,40	352,80
υψος	m	0,113	0,117	0,13
διάμετρος	m	0,118	0,118	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1751,80	1769,40	1861,70
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1750,40	1764,30	1861,20
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	1,40	5,10	0,50
Απώλεια εξάτμισης	gr	175,10	20,70	19,30
βάρος (δείγματος)	gr	1373,10	1384,00	1508,90
Ογκος δείγματος	lt	1,24	1,28	1,41
m-bentonite		0,00	230,67	251,48
m-graphite		228,85	0,00	0,00
m-solid		228,85	230,67	251,48
m-water		1144,25	1153,33	1257,42
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1111,71	1082,22	1070,13
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,19	0,180	0,18
υγρασία	%	500,00	500,00	500,00
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,11	1,08	1,07
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K	8,31		0,63
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K	2,92		1,85
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s	2,85		0,34
ηλεκτρική αντίσταση	Ω	28,00	12,57	
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm	7,39	3,32	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 2: Πίνακας ηλεκτρικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 1/5 (Δοκίμια 2-A,3-A,4-A)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		2-A	3-A	4-A
νερό	gr	3000,00	2000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	300,00	300,00
γραφίτης	gr	120,00	60,00	60,00
σύνολο	gr	3720,00	2360,00	3360,00
Κατά βάρους αναλογία				
νερό	%	80,65	84,75	89,29
μπεντονίτης	%	16,13	12,71	8,93
γραφίτης	%	3,23	2,54	1,79
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	83,33	83,33	83,33
Γραφίτης	%	16,67	16,67	16,67
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	350,40	343,50	360,80
υψος	m	0,12	0,09	0,11
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1779,40	1450,00	1626,70
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1776,50	1447,00	1624,20
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	2,90	3,00	2,50
Απώλεια εξάτμισης	gr	21,90	20,80	19,80
βάρος (δείγματος)	gr	1429,00	1106,50	1265,90
Ογκος δείγματος	lt	1,31	1,02	1,18
m-bentonite		230,48	140,66	113,03
m-graphite		46,10	28,13	22,61
m-solid		276,58	168,79	135,63
m-water		1152,42	937,71	1130,27
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1089,48	1088,52	1072,36
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,21	0,17	0,11
υγρασία	%	416,67	555,56	833,33
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,09	1,09	1,07
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K			
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K			
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s			
ηλεκτρική αντίσταση	Ω	14,80	19,31	17,74
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm	3,90	5,09	4,68

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 3: Πίνακας ηλεκτρικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 2/5 (Δοκίμια 5-Α,6-Α,7-Α)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		5-Α	6-Α	7-Α
νερό	gr	3000,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	450,00	300,00
γραφίτης	gr	240,00	180,00	120,00
σύνολο	gr	3840,00	3630,00	3420,00
Κατά βάρους αναλογία				
νερό	%	78,13	82,64	87,72
μπεντονίτης	%	15,63	12,40	8,77
γραφίτης	%	6,25	4,96	3,51
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	71,43	71,43	71,43
Γραφίτης	%	28,57	28,57	28,57
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	354,10	349,70	352,60
υψος	m	0,14	0,13	0,14
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1990,40	1797,30	1908,10
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1989,00	1735,90	1899,80
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	1,40	61,40	8,30
Απώλεια εξάτμισης	gr	19,30	19,00	12,20
βάρος (δείγματος)	gr	1636,30	1447,60	1555,50
Ογκος δείγματος	lt	1,51	1,40	1,50
m-bentonite		255,67	179,45	136,45
m-graphite		102,27	71,78	54,58
m-solid		357,94	251,24	191,03
m-water		1278,36	1196,36	1364,47
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1084,80	1034,68	1038,76
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,24	0,18	0,13
υγρασία	%	357,14	476,19	714,29
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,08	1,03	1,04
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K			
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K			
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s			
ηλεκτρική αντίσταση	Ω	12,02	14,48	17,54
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm	3,17	3,82	4,63

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 4: Πίνακας ηλεκτρικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 3/5 (Δοκίμια 8-A, 9-A, 10-A)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		8-A	9-A	10-A
νερό	gr	3000,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	450,00	300,00
γραφίτης	gr	360,00	270,00	180,00
σύνολο	gr	3960,00	3720,00	3480,00
Κατά βάρους αναλογία				
νερό	%	75,76	80,65	86,21
μπεντονίτης	%	15,15	12,10	8,62
γραφίτης	%	9,09	7,26	5,17
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	62,50	62,50	62,50
Γραφίτης	%	37,50	37,50	37,50
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	359,90	344,70	356,80
υψος	m	0,13	0,14	0,13
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1955,40	1983,10	1811,30
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1952,80	1981,60	1809,60
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	2,60	1,50	1,70
Απώλεια εξάτμισης	gr	27,50	31,10	30,90
βάρος (δείγματος)	gr	1595,50	1638,40	1454,50
Ογκος δείγματος	lt	1,42	1,48	1,37
m-bentonite		241,74	198,19	125,39
m-graphite		145,05	118,92	75,23
m-solid		386,79	317,11	200,62
m-water		1208,71	1321,29	1253,88
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1122,84	1110,33	1064,56
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,27	0,21	0,15
υγρασία	%	312,50	416,67	625,00
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,12	1,11	1,06
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K			
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K			
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s			
ηλεκτρική αντίσταση	Ω	13,05	14,62	19,64
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm	3,44	3,86	5,18

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 5: Πίνακας ηλεκτρικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 4/5 (Δοκίμια 11-A, 12-A, 13-A)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		11-A	12-A	13-A
νερό	gr	3000,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	450,00	300,00
γραφίτης	gr	480,00	360,00	240,00
σύνολο	gr	4080,00	3810,00	3540,00
Κατά βάρους αναλογία				
νερό	%	73,53	78,74	84,75
μπεντονίτης	%	14,71	11,81	8,47
γραφίτης	%	11,76	9,45	6,78
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	55,56	55,56	55,56
Γραφίτης	%	44,44	44,44	44,44
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	348,80	373,90	358,10
υψος	m	0,12	0,14	0,13
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1910,40	2020,40	1871,20
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1908,80	2015,50	1869,20
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	1,60	4,90	2,00
Απώλεια εξάτμισης	gr	29,00	30,00	20,90
βάρος (δείγματος)	gr	1561,60	1646,50	1513,10
Ογκος δείγματος	lt	1,36	1,52	1,40
m-bentonite		229,65	194,47	128,23
m-graphite		183,72	155,57	102,58
m-solid		413,36	350,04	230,81
m-water		1148,24	1296,46	1282,29
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1152,16	1083,71	1081,49
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,30	0,23	0,16
υγρασία	%	277,78	370,37	555,56
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,15	1,08	1,08
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K			
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K			
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s			
ηλεκτρική αντίσταση	Ω	18,64	14,50	17,37
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm	4,92	3,82	4,58

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 6: Πίνακας ηλεκτρικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 5/5 (Δοκίμια 14-A, 15-A, 16-A)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		14-A	15-A	16-A
νερό	gr	3000,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	450,00	300,00
γραφίτης	gr	600,00	450,00	300,00
σύνολο	gr	4200,00	3900,00	3600,00
Κατά βαρος αναλογία				
νερό	%	71,43	76,92	83,33
μπεντονίτης	%	14,29	11,54	8,33
γραφίτης	%	14,29	11,54	8,33
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	50,00	50,00	50,00
Γραφίτης	%	50,00	50,00	50,00
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	387,10	381,20	380,70
υψος	m	0,12	0,13	0,13
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1911,90	1888,00	1913,60
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1909,60	1886,50	1910,80
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	2,30	1,50	2,80
Απώλεια εξάτμισης	gr	27,20	24,80	40,40
βάρος (δείγματος)	gr	1524,80	1506,80	1532,90
Ογκος δείγματος	lt	1,36	1,39	1,41
m-bentonite		217,83	173,86	127,74
m-graphite		217,83	173,86	127,74
m-solid		435,66	347,72	255,48
m-water		1089,14	1159,08	1277,42
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1125,01	1085,47	1087,15
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,32	0,25	0,18
υγρασία	%	250,00	333,33	500,00
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,13	1,09	1,09
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K			
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K			
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s			
ηλεκτρική αντίσταση	Ω	18,29	16,56	19,77
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm	4,82	4,37	5,21

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 7: Πίνακας θερμικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 1/5 (Δοκίμια 2-B, 3-B, 4-B)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		2-B	3-B	4-B
νερό	gr	3000,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	450,00	300,00
γραφίτης	gr	120,00	90,00	60,00
σύνολο	gr	3720,00	3540,00	3360,00
Κατά βαρος αναλογία				
νερό	%	80,65	84,75	89,29
μπεντονίτης	%	16,13	12,71	8,93
γραφίτης	%	3,23	2,54	1,79
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	83,33	83,33	83,33
Γραφίτης	%	16,67	16,67	16,67
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	366,20	345,00	347,80
υψος	m	0,13	0,09	0,13
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1860,00	1395,40	1816,30
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1859,40	1395,00	1815,70
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	0,60	0,40	0,60
Απώλεια εξάτμισης	gr	20,30	20,70	15,30
βάρος (δείγματος)	gr	1493,80	1050,40	1468,50
Ογκος δείγματος	lt	1,42	0,99	1,38
m-bentonite		240,94	133,53	131,12
m-graphite		48,19	26,71	26,22
m-solid		289,12	160,23	157,34
m-water		1204,68	890,17	1311,16
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1051,27	1056,04	1066,28
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,20	0,16	0,11
υγρασία	%	416,67	555,56	833,33
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,05	1,06	1,07
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K	0,81	0,72	0,67
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K	1,94	1,87	1,87
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s	0,42	0,39	0,36
ηλεκτρική αντίσταση	Ω			
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm			

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 8: Πίνακας θερμικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 2/5 (Δοκίμια 5-B, 6-B, 7-B)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		5-B	6-B	7-B
νερό	gr	3000,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	450,00	300,00
γραφίτης	gr	240,00	180,00	120,00
σύνολο	gr	3840,00	3630,00	3420,00
Κατά βαρος αναλογία				
νερό	%	78,13	82,64	87,72
μπεντονίτης	%	15,63	12,40	8,77
γραφίτης	%	6,25	4,96	3,51
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	71,43	71,43	71,43
Γραφίτης	%	28,57	28,57	28,57
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	343,90	352,80	354,70
υψος	m	0,14	0,14	0,13
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1953,70	1946,20	1868,90
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1953,00	1945,60	1868,20
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	0,70	0,60	0,70
Απώλεια εξάτμισης	gr	19,50	17,40	18,10
βάρος (δείγματος)	gr	1609,80	1593,40	1514,20
Ογκος δείγματος	lt	1,50	1,50	1,43
m-bentonite		251,53	197,53	132,82
m-graphite		100,61	79,01	53,13
m-solid		352,14	276,54	185,95
m-water		1257,66	1316,86	1328,25
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1075,02	1064,07	1057,49
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,24	0,18	0,13
υγρασία	%	357,14	476,19	714,29
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,08	1,06	1,06
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K	0,99	0,86	0,75
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K	2,04	1,98	1,92
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s	0,49	1,43	0,39
ηλεκτρική αντίσταση	Ω			
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm			

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 9: Πίνακας θερμικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 3/5 (Δοκίμια 8-B, 9-B, 10-B)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		8-B	9-B	10-B
νερό	gr	3000,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	450,00	300,00
γραφίτης	gr	360,00	270,00	180,00
σύνολο	gr	3960,00	3720,00	3480,00
Κατά βαρος αναλογία				
νερό	%	75,76	80,65	86,21
μπεντονίτης	%	15,15	12,10	8,62
γραφίτης	%	9,09	7,26	5,17
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	62,50	62,50	62,50
Γραφίτης	%	37,50	37,50	37,50
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	346,10	361,50	352,10
υψος	m	0,12	0,13	0,13
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1818,00	1956,90	1817,30
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1817,30	1955,40	1815,60
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	0,70	1,50	1,70
Απώλεια εξάτμισης	gr	25,20	1,30	30,90
βάρος (δείγματος)	gr	1471,90	1595,40	1465,20
Ογκος δείγματος	lt	1,32	1,42	1,38
m-bentonite		223,02	192,99	126,31
m-graphite		133,81	115,80	75,79
m-solid		356,82	308,79	202,10
m-water		1115,08	1286,61	1263,10
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1112,91	1122,77	1063,88
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,27	0,22	0,15
υγρασία	%	312,50	416,67	625,00
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,11	1,12	1,06
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K	1,19	1,04	0,77
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K	2,16	2,88	1,92
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s	0,35	0,50	0,40
ηλεκτρική αντίσταση	Ω			
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm			

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 10: Πίνακας θερμικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 4/5 (Δοκίμια 11-B, 12-B, 13-B)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		11-B	12-B	13-B
νερό	gr	3000,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	450,00	300,00
γραφίτης	gr	480,00	360,00	240,00
σύνολο	gr	4080,00	3810,00	3540,00
Κατά βαρος αναλογία				
νερό	%	73,53	78,74	84,75
μπεντονίτης	%	14,71	11,81	8,47
γραφίτης	%	11,76	9,45	6,78
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	55,56	55,56	55,56
Γραφίτης	%	44,44	44,44	44,44
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	360,30	340,30	342,60
υψος	m	0,13	0,12	0,12
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1956,90	1817,00	1708,80
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1956,10	1817,80	1708,10
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	0,80	-0,80	0,70
Απώλεια εξάτμισης	gr	28,80	2,40	31,60
βάρος (δείγματος)	gr	1596,60	1476,70	1366,20
Ογκος δείγματος	lt	1,41	1,33	1,27
m-bentonite		234,79	174,41	115,78
m-graphite		187,84	139,53	92,62
m-solid		422,63	313,94	208,40
m-water		1173,97	1162,76	1157,80
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1132,33	1107,39	1077,51
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,30	0,24	0,16
υγρασία	%	277,78	370,37	555,56
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,13	1,11	1,08
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K	1,55	1,12	0,91
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K	2,29	2,09	2,00
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s	0,66	0,54	0,46
ηλεκτρική αντίσταση	Ω			
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm			

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας 11: Πίνακας θερμικών μετρήσεων Ποσοστού Γραφίτη/Μπεντονίτη 5/5 (Δοκίμια 14-B, 15-B, 16-B)

Αρχική αναλογία/ δοκίμιο		14-B	15-B	16-B
νερό	gr	3000,00	3000,00	3000,00
μπεντονίτης	gr	600,00	450,00	300,00
γραφίτης	gr	600,00	450,00	300,00
σύνολο	gr	4200,00	3900,00	3600,00
Κατά βαρος αναλογία				
νερό	%	71,43	76,92	83,33
μπεντονίτης	%	14,29	11,54	8,33
γραφίτης	%	14,29	11,54	8,33
Αναλογία Στερεών		100,00	100,00	100,00
Μπεντονίτης	%	50,00	50,00	50,00
Γραφίτης	%	50,00	50,00	50,00
Βάρος Δειγματολήπτη	gr	380,20	381,10	381,90
υψος	m	0,12	0,13	0,13
διάμετρος	m	0,12	0,12	0,12
βάρος (συνολικό)	gr	1933,80	1928,40	1904,40
βάρος μετά τη μέτρηση	gr	1933,40	1927,70	1900,60
Απώλεια Μάζας Δειγματοληψίας	gr	0,40	0,70	3,80
Απώλεια εξάτμισης	gr	28,20	26,40	30,40
βάρος (δείγματος)	gr	1553,60	1547,30	1522,50
Ογκος δείγματος	lt	1,31	1,37	1,41
m-bentonite		221,94	178,53	126,88
m-graphite		221,94	178,53	126,88
m-solid		443,89	357,07	253,75
m-water		1109,71	1190,23	1268,75
υγρή πυκνότητα	gr/lt	1184,47	1132,48	1079,78
ξηρή πυκνότητα	gr/cm ³	0,34	0,26	0,18
υγρασία	%	250,00	333,33	500,00
υγρή πυκνότητα	gr/cm ³	1,18	1,13	1,08
Μετρούμενα μεγέθη				
θερμική αγωγιμότητα	W/m K	1,81	1,22	0,89
θερμοχωρητικότητα	10 ⁶ j/K	2,96	2,15	2,00
θερμική διαχυτότητα	10 ⁶ m ² /s	0,77	0,57	0,45
ηλεκτρική αντίσταση	Ω			
Ηλεκτρική Αντίσταση Νερού	Ω	11,34	11,34	11,34
ειδική ηλεκτρική αντίσταση	Ωm			