Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΒΟΣΚΟΥ ΕΥΑΝΘΙΑ

ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΠΙΚΡΟΛΙΜΝΗΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΚΙΛΚΙΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων: Ηλίας Φίκος, μέλος Ε.ΔΙ.Π.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΕΥΑΝΘΙΑ ΒΟΣΚΟΥ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5394

ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΠΙΚΡΟΛΙΜΝΗΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΚΙΛΚΙΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής,
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

© Ευανθία Βοσκού, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΠΙΚΡΟΛΙΜΝΗΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΚΙΛΚΙΣ– *Διπλωματική Εργασία*

© Evanthia Voskou, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2021

All rights reserved.

EXPLORATION OF CLAY DEPOSITS WITH THE APPLICATION OF THE ELECTRIC TOMOGRAPHY METHOD TO VERY LONG SECTIONS IN THE PIKROLIMNI AREA OF THE KILKIS REGION – *Bachelor Thesis*

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

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

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους στην περιοχή της Πικρολίμνης, στο νότιο τμήμα της περιφερειακής ενότητας Κιλκίς, για την εύρεση πιθανών αργιλικών κοιτασμάτων.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με την διεξαγωγή μετρήσεων στο ύπαιθρο εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας που ανήκει στην κατηγορία των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος κρίνεται κατάλληλη για τον εντοπισμό αργιλικών συγκεντρώσεων, λόγω των χαμηλών αντιστάσεων που παρουσιάζουν της τάξης των 5 έως 10 Ohm·m. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 3 ηλεκτρικές τομογραφίες διατάξεων διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας, εκ των οποίων η κάθε μια αποτελούνταν από 48 ηλεκτρόδια με μεταξύ τους απόσταση ίση με 5 μέτρα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η λήψη μετρήσεων μέχρι το επιθυμητό βάθος διασκόπησης των 50 μέτρων και να καλυφθεί απόσταση μήκους περίπου 0.5 χιλιομέτρων.

Στη συνέχεια, ακολούθησε επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων με τη βοήθεια του προγράμματος *DC_2DPro*, μέσω του οποίου πραγματοποιείται αντιστροφή των δεδομένων φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε τιμές πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Abstract

The aim of this dissertation is the study of the underground geoelectrical structure of the Pikrolimni Area, at the South part of the Kilkis region, focusing on identifying and mapping clay deposits.

The research was conducted by collecting data using the electrical resistivity tomography technique which belongs to electrical geophysical prospecting methods. This method is particularly useful for the discovery of clay deposits due to the fact that those are characterized by very low resistivity values ranging from 5 to 10 Ohm·m. In total, three electrical tomographies where conducted, using dipole-dipole and multiple gradient array configurations, each one constituted by 48 steel electrodes of equal 5 m spacing, so that data collection up to the required depth of 50 m and length of 0.5 km could be achieved.

Furthermore, the acquired data was edited and interpreted with the assistance of the *DC_2DPro* software, with which the true resistivity data could be calculated.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη……..…….……....4

Abstract……..……5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

1.1 Γεωγραφική τοποθέτηση…….……..7

1.2 Γεωλογικά στοιχεία……...7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

Εφαρμοσμένη γεωφυσική και γεωφυσική διασκόπηση.....11

2.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης…….……...11

2.2 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης…….……..12

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση……..…15

2.4 Φαινόμενη ειδική αντίσταση και διεργασία αντιστροφής……..……...17

2.5 Ευθύ και αντίστροφο πρόβλημα στην ηλεκτρική διασκόπηση…….…….20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Γεωφυσική έρευνα στην περιοχή ενδιαφέροντος…….……...……..25

3.1 Λογιμικό Electre Pro – Iris Instruments…….25

3.2 Μετρήσεις πεδίου……...28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

Επεξεργασία μετρήσεων και Αποτελέσματα

4.1 Λογισμικό Prosys II – Iris Instruments……...30

4.2 Πρόγραμμα αντιστροφής και δημιουργίας συνθετικών δεδομένων DC_2DPro…….32

4.3 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων…….33

Βιβλιογραφία……..….36

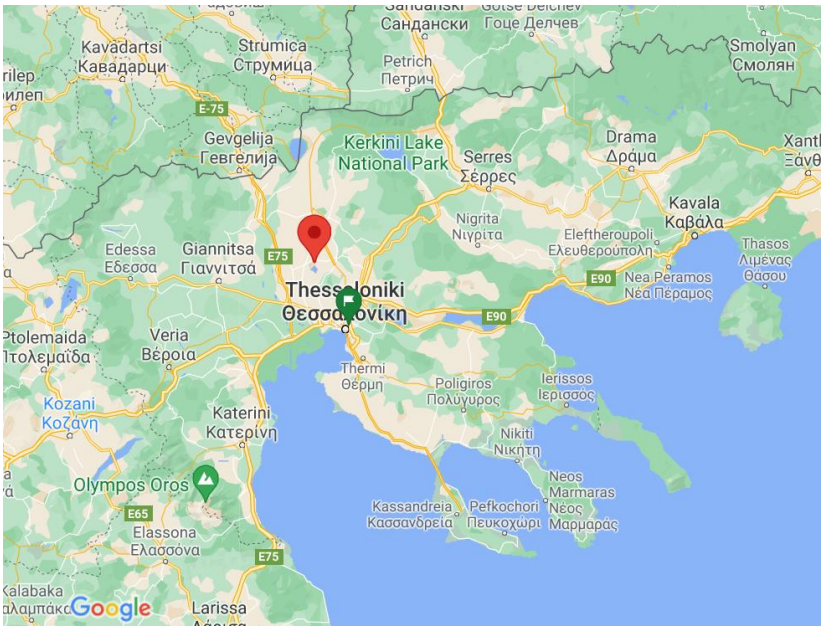
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

1.1 Γεωγραφική τοποθέτηση

Γεωγραφικά η περιοχή έρευνας τοποθετείται στο νομό του Κιλκίς, περίπου 2.5 χιλιόμετρα ανατολικά της λίμνης Πικρολίμνης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος τομής 600 μέτρων, διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ μεταξύ των οικισμών Ξυλοκερατιά και Μπακαίικα.



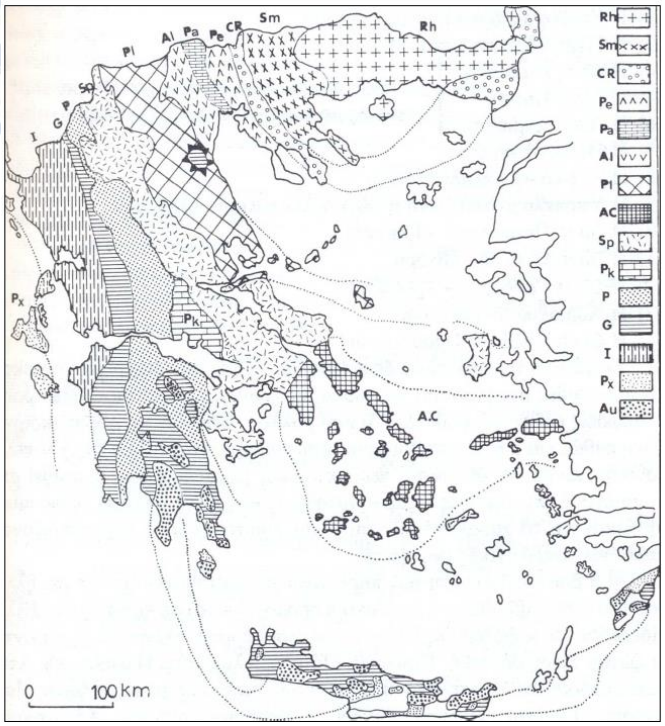
Σχήμα 1: Η περιοχή της Πικρολίμνης στο νότιο τμήμα της περιφερειακής ενότητας Κιλκίς.

1.2 Γεωλογικά στοιχεία

Γεωτεκτονικά η ευρύτερη περιοχή ανήκει κατά το μεγαλύτερο μέρος της στις Εσωτερικές Ελληνικές ζώνες κυρίως στην υποζώνη Παιονίας της ζώνης του Αξιού καθώς και στην Περιροδοπική ζώνη, ενώ το ανατολικότερο τμήμα αυτής τοποθετείται στην Ελληνική Ενδοχώρα και πιο συγκεκριμένα στην Σερβομακεδονική μάζα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 2: Γεωτεκτονικός χάρτης των ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική Μάζα, CR: Περιροδοπική Ζών, (Pe: Ζώνη Παιονίας, Pa: Ζώνη Πάικου, Al: Ζώνη Αλμωπιάς) = Ζώνη Αξιού, Pl: Πελαγονική Ζώνη, Ac: Αττικοκυκλαδική Ζώνη, Sp: Υποπελαγονική Ζώνη,Pk: Ζώνη Παρνασσού – Γκίωνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαββρόβου – Τριίπολης,I: Ιόνιος Ζώνη, Ζώνη Παξών ή Προαπουλία, Au: Ενότητα " Ταλέα όρη – πλακώδεις ασβεστόλιθοι " (Mountrakis et al, 1983).

Κοντά στο πεδίο της έρευνας συναντώνται δύο αλπικοί σχηματισμοί :

Ο πρώτος και παλαιότερος σχηματισμός ηλικίας ανώτερου Τριαδικού ανήκει στην ενότητα Άσπρης Βρύσης – Χορτιάτη της Περιροδοπικής ζώνης. Πρόκειται για ένα λευκότεφρο έως τεφρό λεπτοστρωματώδη ασβεστόλιθο στο λόφο Καρδίτσα ΒΑ της Πικρολίμνης, με ανάπτυξη ΒΔ-ΝΑ και μικρή κλίση προς τα ΒΑ. Πιθανόν η ασβεστολιθική αυτή μάζα να αποτελεί το υπόβαθρο της λίμνης όπως και ο καρστικός υδροφορέας που αναπτύσσεται σε αυτόν τον σχηματισμό να συνδέεται υδραυλικά με τον ταμιευτήρα της λίμνης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Ο δεύτερος, νεότερος σχηματισμός τοποθετείται χρονικά στο ανώτερο Ιουρασικό και ανήκει στην ενότητα Παιονίας της ζώνης του Αξιού. Αυτός αποτελείται από χονδρόκοκκα έως λεπτόκοκκα κροκαλοπαγή που εναλλάσσονται ρυθμικά με μεσόκοκκους έως λεπτόκοκκους ψαμμίτες και ερυθρούς σχιστολίθους.

Η ευρύτερη περιοχή της έρευνας βρίσκεται εντός της λεκάνης απορροής του Γαλλικού ποταμού και συνεπώς καλύπτεται κυρίως από ιζήματα λιμναίας, ποτάμιας και ποταμοχειμμάρειας φάσης, τα οποία διακρίνουμε σε παλαιότερα Πλειστοκαινικά και νεότερα Ολοκαινικά :

- Πλειστοκαινικές αποθέσεις

Αποτελούνται από ερυθρές αργίλους οι οποίες εναλλάσσονται με πάγκους πολύ συνεκτικών ασβεστολιθικών συγκριμάτων καθώς και με ορίζοντες χαλικιών, πολλές φορές διάσπαρτων. Στις περιοχές γύρω από την Πικρολίμνη, Μπακάικα, Πέρινθο, Ξυλοκερατέα, Μικρόκαμπο αντιπροσωπεύουν παλαιότερες λιμναίες αποθέσεις. Πλευρικά μεταβαίνουν σε συνεκτικά αδιαβάθμητα λατυποπαγή που εναλλάσσονται με τους πάγκους των ασβεστιτικών συγκριμάτων και με αμμούχες αργίλους. Επιπλέον παρατηρούνται διασταυρούμενες στρώσεις.

Πάνω από τις ερυθρές αργίλους εντοπίζεται κατά θέσεις ένα σύστημα αναβαθμίδων αποτελούμενο κυρίως από χαλαρά κροκαλοπαγή, χαλίκια και άμμους.

- Ολοκαινικές αποθέσεις

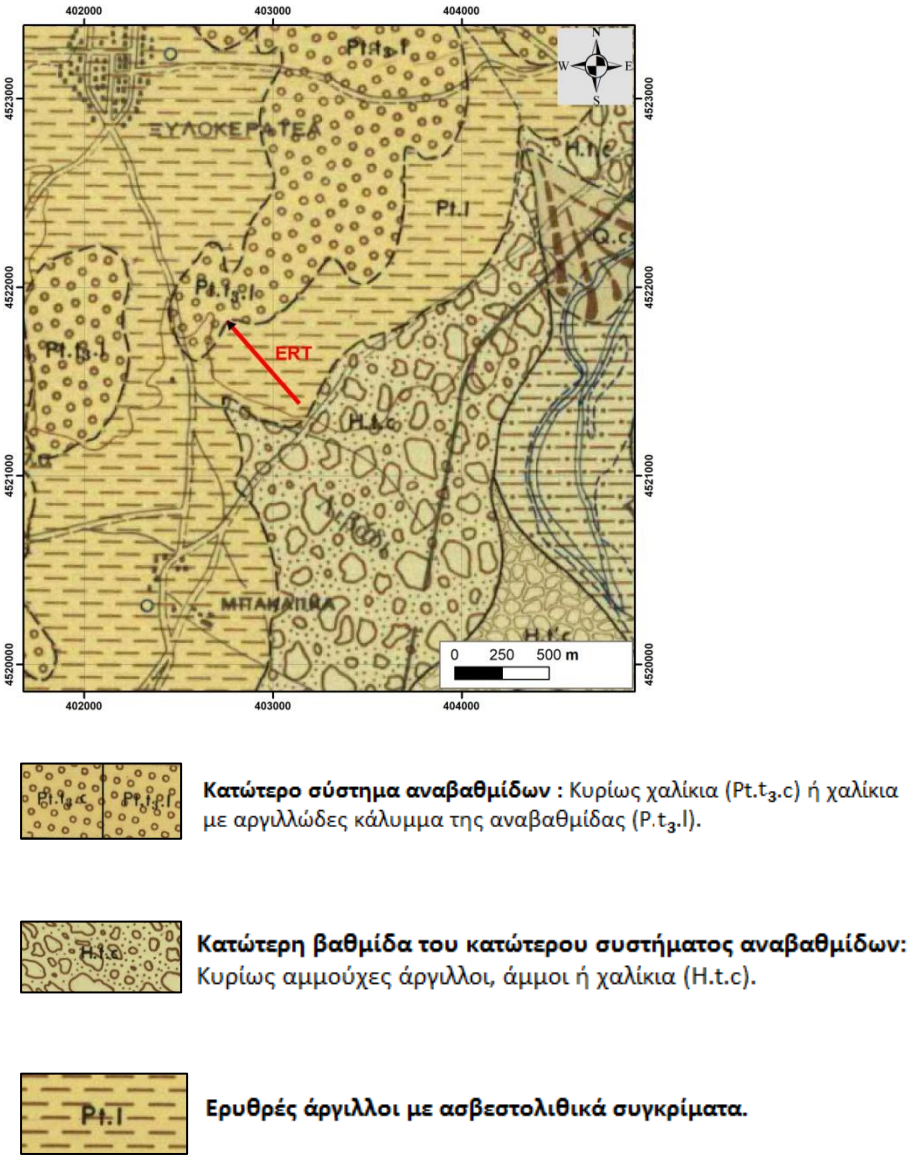
Κυρίως αμμούχες άργιλοι, άμμοι και χαλίκια της κατώτερης βαθμίδας του κατώτερου συστήματος αναβαθμίδων, καθώς και σύγχρονα

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

λιμναία ιζήματα στην περιοχή της Πικρολίμνης όπως ιλύς, άργιλος και άμμοι.

Κατά τόπους συναντώνται ελουβιακοί σχηματισμοί οι οποίοι καλύπτουν τα Αλπικά και Πλειστοκαινικά πετρώματα, σχηματίζοντας έναν αποσαθρωμένο μανδύα από αποσαθρώματα και λατύπες σχιστολιθικών πετρωμάτων.



Κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων : Κυρίως χαλίκια ($Pt.t_3.c$) ή χαλίκια με αργιλλώδες κάλυμμα της αναβαθμίδας ($P.t_3.l$).

Κατώτερη βαθμίδα του κατώτερου συστήματος αναβαθμίδων: Κυρίως αμμούχες άργιλλοι, άμμοι ή χαλίκια (H.t.c).

Ερυθρές άργιλλοι με ασβεστολιθικά συγκρίματα.

Σχήμα 3: Τμήμα γεωλογικού χάρτη όπου απεικονίζεται η ακριβής θέση διεξαγωγής των τριών ηλεκτρικών τομογραφιών.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

Εφαρμοσμένη γεωφυσική και γεωφυσική διασκόπηση

Αντικείμενο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής και των γεωφυσικών διασκοπήσεων αποτελεί η μελέτη της κατανομής διαφόρων φυσικών ποσοτήτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης, καθώς και η επεξεργασία και ερμηνεία αυτής, με τελικό στόχο τον εντοπισμό υπεδάφιων δομών οικονομικού ή άλλου ενδιαφέροντος.

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται απευθείας στην φύση με τη βοήθεια γεωφυσικών οργάνων μέτρησης όπως σεισμόμετρα, βαρυτόμετρα, μαγνητόμετρα, βολτόμετρα κ.ά. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά υφίστανται επεξεργασία προκειμένου να υπολογιστούν μεγέθη που περιγράφουν τις φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων, ώστε αυτά να χαρτογραφηθούν και να δημιουργηθεί μια αντιπροσωπευτική εικόνα του εσωτερικού της Γης. Είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι δεν ενδιαφερόμαστε αποκλειστικά για την γνώση της πραγματικής τιμής της ιδιότητας της δομής αλλά και για την μεταβολή αυτής στον χώρο.

Ειδικότερα, κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας, τα δεδομένα που συλλέγουμε αφορούν μετρήσεις διαφοράς δυναμικού στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης, με στόχο τον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

2.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

Με την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων, επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, με απώτερο σκοπό τον εντοπισμό γεωλογικών αλλά και ανθρωπογενών δομών όπως μεταλλευμάτων, γεωθερμικών πεδίων, υδροφόρων οριζόντων,

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

αρχαιοτήτων καθώς και τη διεκπεραίωση περιβαλλοντικών και τεχνικών μελετών για την θεμελίωση πιθανών τεχνικών έργων, εφόσον γίνεται εφικτός ο καθορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους.

Μερικές από τις σπουδαιότερες μεθόδους των ηλεκτρικών διασκοπήσεων είναι οι εξής:

- *Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης*
- *Μέθοδος επαγόμενης πόλωσης*
- *Μέθοδος ισοδυναμικών γραμμών*
- *Μέθοδος φυσικού δυναμικού*
- *Μέθοδος τελλουρικών ρευμάτων*

Οι πρώτες τρεις βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών που παράγονται από φυσικά ρεύματα ή πεδία, ενώ οι τελευταίες δύο από τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία.

2.2 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους εφαρμογής, της ευκολίας στην χρήση καθώς και της επάρκειας των δεδομένων που παράγει, αναδεικνύεται ως μια από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους γεωηλεκτρικής διασκόπησης.

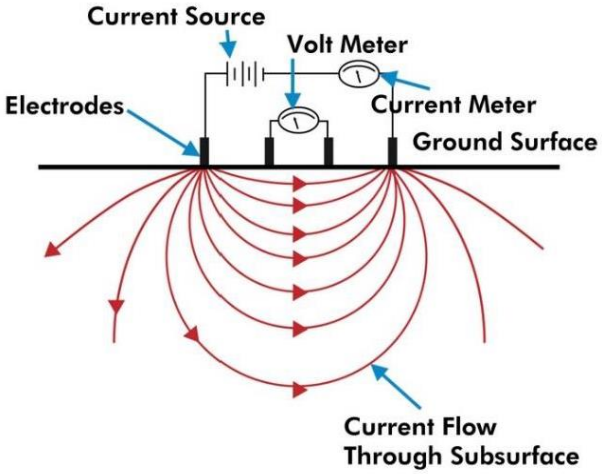
Η παρούσα διπλωματική ασχολείται με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT). Αυτή προκύπτει από τον συνδυασμό της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης και της οριζοντιογραφίας και παρέχει πληροφορίες τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στόχος είναι η δημιουργία μιας δισδιάστατης απεικόνισης της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Η τεχνική αυτή μπορεί να περιγραφεί ως μια σειρά βυθοσκοπήσεων κατά μήκος της γραμμής έρευνας (Tsourlos, 1995).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου διοχετεύεται στο έδαφος ρεύμα σταθερής έντασης (DC) μέσω ενός διπόλου ηλεκτροδίων ρεύματος A, B, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου. Παράλληλα, πραγματοποιείται η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη Γη, μέσω δύο ηλεκτροδίων δυναμικού M, N .



Σχήμα 4: Βασική διάταξη μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης. (https://edtech.engineering.utoronto.ca/files/electrical-resistivity).

Ο Γερμανός φυσικός George Ohm το 1827 εξήγαγε μια εμπειρική σχέση που συνδέει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει ένα αγώγιμο σώμα και της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα του (σχέση 2.1).

$$I = \frac{V}{R} \qquad (2.1)$$

I: Ένταση ρεύματος $(Ampere)$

R: Ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)

V: Τάση $(Volt)$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο η ένταση του ρεύματος είναι ποσότητα ανάλογη της ηλεκτρικής τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του αγώγιμου σώματος.

Ο όρος R αντιστοιχεί στην ηλεκτρική αντίσταση και εκφράζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα εισέρχεται σε ένα σώμα, δηλαδή στην περίπτωση των γεωφυσικών διασκοπήσεων, στο εσωτερικό της Γης. Είναι μια ποσότητα, ανεξάρτητη από την ένταση του ρεύματος και τη διαφορά δυναμικού, η οποία περιγράφει την φυσική ιδιότητα του υλικού χωρίς να λαμβάνει υπ' όψιν τις διαστάσεις του. Για το λόγο αυτό, εισάγεται ο όρος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ρ.

Εάν R είναι η ηλεκτρική αντίσταση ενός κυλινδρικού αγωγού μήκους L και διατομής S, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ ορίζεται από την σχέση:

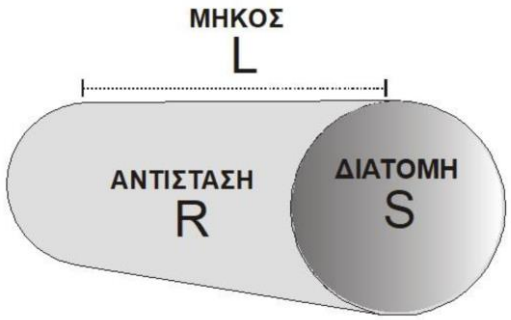
$$\rho = \frac{RS}{L} \qquad (2.2)$$

R: Ωμική αντίσταση (Ohm)

ρ: Ειδική ηλεκτρική αντίσταση $(ohm \cdot m)$

L: Μήκος αγώγιμου σώματος (m)

S: Εμβαδόν διατομής(m^2)



Σχήμα 5: Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυλινδρικού αγωγού μήκους L, διατομής S και αντίστασης R. (Παρουσιάσεις Η/Μ μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης Α.Π.Θ)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων SI είναι το $1\Omega m$.

Το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα $\sigma = \frac{1}{\rho}$ και εκφράζει την ευκολία διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό αγώγιμου σώματος. Μονάδα μέτρησης: Siemens ανά μονάδα μήκους (S/m).

Γνωρίζοντας τις ηλεκτρικές παραμέτρους της διαφοράς δυναμικού ΔV και της έντασης του ρεύματος, I, καθώς και την χωροθετική διάταξη των ηλεκτροδίων, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ρ, στο υπέδαφος.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Τα περισσότερα από τα πιο διαδεδομένα ορυκτά των πετρωμάτων είναι μονωτές. Συνεπώς, η ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων, ιδιαίτερα αυτών που βρίσκονται στα πιο επιφανειακά στρώματα της Γης, οφείλεται στα ιόντα που σχηματίζονται στο νερό που εμπεριέχεται στους πόρους τους. Η σχέση που συνδέει την ειδική αντίσταση ρ, ενός πετρώματος με το πορώδες φ αυτού είναι γνωστή ως νόμος του Archie:

$$\rho = \alpha \rho_v \varphi^{-m} \qquad (2.3)$$

όπου,

ρ_v: ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος

φ: ο λόγος του όγκου των πόρων προς το ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες)

α, m: σταθερές (τυπικές τιμές $\alpha = 1, m = 2$)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

και μας δείχνει ότι η ειδική αντίσταση αυξάνει με την ελάττωση του πορώδους του πετρώματος.

Άλλοι παράγοντες που είναι δυνατό να επηρεάσουν την ειδική αντίσταση των γεωλογικών σχηματισμών είναι οι παρακάτω:

- Γεωλογική ηλικία: Όσο αυξάνεται η ηλικία των σχηματισμών τόσο αυξάνεται συνήθως και η ηλεκτρική αντίστασή τους. Λόγω της συσσώρευσης όλο και περισσότερων στρωμάτων με την πάροδο του χρόνου, η πίεση που ασκείται στα υποκείμενα στρώματα έχει ως συνέπεια την αύξηση της συνοχής τους. Εξαίρεση αποτελούν τα τριτογενή ιζήματα, τα οποία σχηματίστηκαν κυρίως σε περιβάλλον γλυκού νερού και έχουν υψηλότερες αντιστάσεις από τα προγενέστερα μεσοζωικά που δημιουργήθηκαν σε αλμυρό νερό.

- Δευτερογενές πορώδες: Τα κρυσταλλικά κυρίως πετρώματα είναι πιθανό να παρουσιάζουν διαρρήξεις, διακλάσεις ή και ρήγματα, δομές στις οποίες οφείλεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυτών των σχηματισμών.

- Θερμοκρασία: Μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με νερό ανάλογα με το βαθμό στον οποίο επηρεάζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη. Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με ηλεκτρολύτη σε συνάρτηση με την θερμοκρασία δίνεται από την σχέση:

$$\rho_\theta = \frac{\rho_{18}}{1+\alpha_\theta(\theta-18^0)} \qquad (2.4)$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

όπου,

ρ_θ: ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία $\theta^o C$

ρ_{18}: ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία $18^o C$

α_θ: θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης (συνήθης τιμή $0{,}025/\ ^o C$ για τους περισσότερους ηλεκτρολύτες).

Η θερμοκρασία ασκεί μεγάλη επίδραση στην ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με νερό μόνο σε περίπτωση μεγάλων μεταβολών αυτής. Για παράδειγμα, η ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών ελαττώνεται όταν η θερμοκρασία είναι τόσο υψηλή ώστε να προκαλείται εξάτμιση του νερού, γεγονός που αναδεικνύει την χρήση της μεθόδου ειδικής αντίστασης στον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων

2.4 Φαινόμενη ειδική αντίσταση και διεργασία αντιστροφής.

Για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, όπως αναφέρθηκε, είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός κλειστού ηλεκτρικού κυκλώματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός θετικού και ενός αρνητικού ηλεκτροδίου ρεύματος Α, Β μιας ηλεκτρικής πηγής στην επιφάνεια της Γης. Το δυναμικό που μετράται σε ένα οποιοδήποτε σημείο Μ του εδάφους υπολογίζεται από το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών που προκύπτουν από την ύπαρξη των δύο σημειακών πηγών ως εξής:

$$V_M = V_{AM} + V_{BM} = \frac{\rho I}{2\pi AM} + \frac{-\rho I}{2\pi BM} = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) \qquad (2.5)$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Αντίστοιχα το δυναμικό σε ένα δεύτερο σημείο Ν θα είναι :

$$V_N = V_{AN} + V_{BN} = \frac{\rho I}{2\pi AN} + \frac{-\rho I}{2\pi BN} = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right) \qquad (2.6)$$

Επομένως, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο σημείων Μ, Ν που προκαλείται από την εισαγωγή ρεύματος μέσω των δύο ηλεκτροδίων Α, Β δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)$$

$$\Delta V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right) \qquad (2.7)$$

Ο παράγοντας $G = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)}$ ονομάζεται γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται από την γεωμετρική διάταξη των ηλεκτροδίων.

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι ίση με:

$$\rho = \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}} G \quad \text{ή} \quad \rho = RG \qquad (2.8)$$

Όπως γνωρίζουμε, ο φλοιός της Γης είναι εξαιρετικά ανομοιογενής και συνεπώς η θεωρία που αναπτύχθηκε παραπάνω ισχύει μόνο για μικρά τμήματα αυτού που μπορούν να θεωρηθούν ομοιογενή. Για το λόγο αυτό, εισάγεται ο όρος της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ_α.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Η ποσότητα αυτή δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους αλλά αποτελεί ένα μέσο όρο των αντιστάσεων και η τιμή της εξαρτάται άμεσα από την χωροθετική διάταξη των ηλεκτροδίων.

$$\rho_\alpha = \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}} G = RG \qquad (2.9)$$

Οι μετρούμενες τιμές φαινόμενης αντίστασης μας παρέχουν μια παραμορφωμένη εικόνα της πραγματικής κατανομής των αντιστάσεων στην περιοχή έρευνας. Είναι απαραίτητο λοιπόν να υποστούν μια πολύπλοκη μαθηματική διεργασία, την διεργασία της αντιστροφής, έτσι ώστε να μετατραπούν σε πραγματικές τιμές αντιστάσεων και να γίνει η ερμηνεία τους.

Διεργασία αντιστροφής

Η διαδικασία ξεκινά με την δημιουργία ενός τυχαίου αρχικού μοντέλου πραγματικών αντιστάσεων και στη συνέχεια, υπολογίζονται οι φαινόμενες αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό. Το παραπάνω στάδιο αποτελεί την επίλυση του ευθέος προβλήματος.

Οι θεωρητικές αυτές τιμές συγκρίνονται με τις μετρούμενες (πραγματικές μετρήσεις) και πραγματοποιείται η απαραίτητη διόρθωση στο αρχικό μοντέλο με στόχο την μικρότερη δυνατή απόκλιση μεταξύ της υπολογιζόμενης και της μετρούμενης τιμής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η διεργασία αυτή αποτελεί την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός βέλτιστου ηλεκτρικού μοντέλου που θα παρουσιάζει όμοια απόκριση με τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και θα

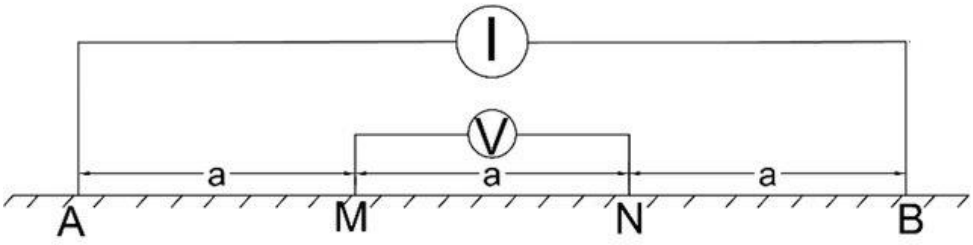
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

προσεγγίζει την κατανομή των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων του υπεδάφους.

2.5 Διατάξεις ηλεκτρόδιων

Διάταξη Wenner



Σχήμα 6: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης Wenner. (Puttiwongrak & Tesfaldet, 2019)

Η διάταξη Wenner αποτελείται από τέσσερα ισαπέχοντα ηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετούνται κατά μήκος ορισμένης γραμμής στο έδαφος. Η ανάπτυξη των ηλεκτροδίων πραγματοποιείται ως προς συγκεκριμένο κέντρο με αύξηση της απόστασης a κάθε φορά κατά ορισμένη τιμή.

Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.9) τις αποστάσεις, προκύπτει ότι η φαινόμενη αντίσταση για τη διάταξη Wenner δίνεται από τον τύπο:

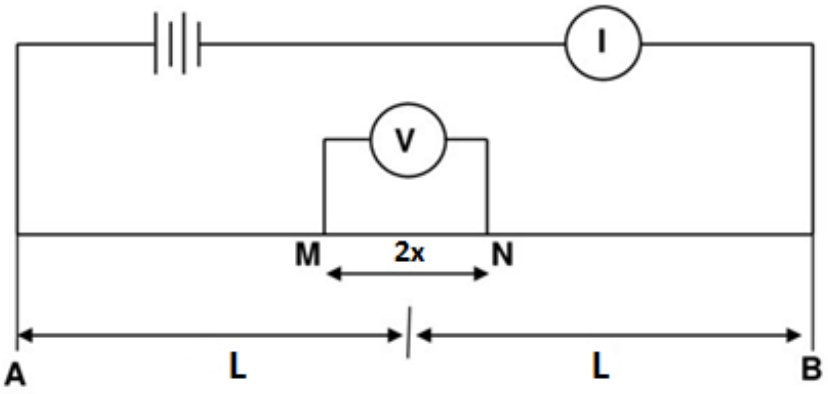
$$\rho_\alpha = \frac{\Delta V}{I}\left(\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{a}-\frac{1}{a}+\frac{1}{a}\right)}\right) = \frac{2\pi}{\frac{1}{a}}$$

$$\rho_\alpha = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a \qquad (2.10)$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Διάταξη Schlumberger



Σχήμα 7: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης Schlumberger. (Τροποποιημένο από Anomohanran, 2011)

Η διάταξη Schlumberger είναι όμοια της Wenner, με τη διαφορά ότι τα ηλεκτρόδια δυναμικού, βρίσκονται στο κέντρο της διάταξης σε μικρή μεταξύ τους απόσταση MN=2x , τυπικά μικρότερη από το 1/5 της απόστασης AB=2L μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης.

Η φαινόμενη αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση :

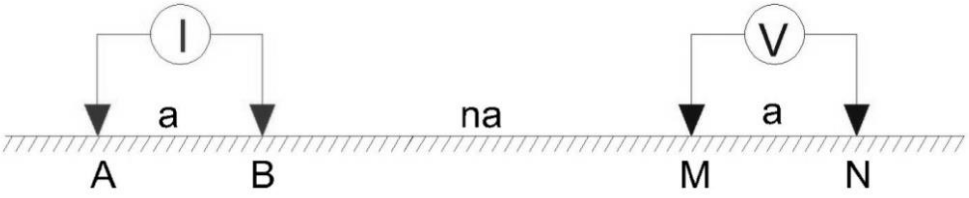
$$\rho_\alpha = \frac{\pi(L^2 - x^2)}{2x}\frac{\Delta V}{I} \qquad (2.11)$$

Συγκριτικά με τη διάταξη Wenner, παρουσιάζει υψηλότερη ευαισθησία στις πλευρικές και κατακόρυφες μεταβολές της αντίστασης με το βάθος, ενώ υστερεί στο λόγο σήματος/θορύβου.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Διάταξη διπόλου–διπόλου



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης διπόλου-διπόλου.

Σε αυτή τη διάταξη τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων των δύο διπόλων είναι σταθερή και ίση με α (AB=MN=α), ενώ η απόσταση μεταξύ των δύο διπόλων είναι σημαντική και πολλαπλάσια της απόστασης α (BM=nα, n=2,3,...). Στην περίπτωση αυτή, η φαινόμενη αντίσταση υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho_\alpha = \pi n(n+1)(n+2)a\frac{\Delta V}{I} \qquad (2.12)$$

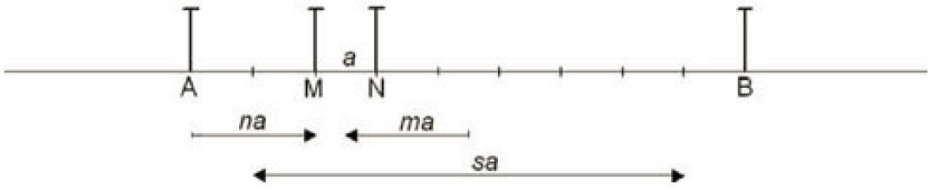
Οι μετρήσεις κατά την εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιούνται αυξάνοντας την απόσταση n κατά βήματα, γεγονός που προσδίδει πλεονέκτημα στην διάταξη αυτή καθώς δεν υπάρχει απαίτηση για μεγάλα μήκη καλωδίων σε αντίθεση με τις διατάξεις Wenner και Schlumberger.

Επιπλέον, παρουσιάζει καλή ευαισθησία στην ανίχνευση πλευρικών και κατακόρυφων μεταβολών, ενώ μειονέκτημα της αποτελεί ο κακός λόγος σήματος προς θόρυβο.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διάταξη multi–electrode gradient



Σχήμα 9: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης multi-electrode gradient. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι (s+2)α όπου s=7, n=2 και m=-2. Ο παράγοντας n ορίζεται ως η μικρότερη απόσταση μεταξύ ενός ηλεκτροδίου ρεύματος και ενός ηλεκτροδίου δυναμικού. (Dahlin & Zhou, 2006)

Η διάταξη αυτή πραγματοποιείται διοχετεύοντας ρεύμα στο υπέδαφος μέσω των ηλεκτροδίων A, B τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση *(s+2)a*, ενώ ταυτόχρονα γίνονται μετρήσεις διαφοράς δυναμικού μετακινώντας τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια σε όλες τις δυνατές θέσεις μεταξύ των A, B.

Ο παράγοντας *s* είναι ένας ακέραιος αριθμός και εκφράζει τον μέγιστο αριθμό μετρήσεων διαφοράς δυναμικού για μια τροφοδότηση ρεύματος στο έδαφος. Ο παράγοντας *n* αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απόσταση μεταξύ του διπόλου δυναμικού και του πλησιέστερου ηλεκτροδίου ρεύματος.

Τέλος, είναι πρακτικό να ορίσουμε έναν παράγοντα m, ο οποίος αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ του κέντρου της διάταξης και του μέσου MN:

$$m = \frac{(\chi_M+\chi_N)/2-(\chi_A-\chi_B)/2}{\chi_N-\chi_M} = \frac{\chi_{MN}-\chi_{AB}}{\alpha} \qquad (2.13)$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

όπου, $\chi_{A,}\chi_{B},\chi_{M,}\chi_{N}$ οι θέσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού ($\chi_B > \chi_A$, $\chi_N > \chi_M$) και $\chi_{MN,}\chi_{AB}$ τα μέσα των αποστάσεων μεταξύ του διπόλου δυναμικού και ρεύματος αντίστοιχα. Ο αρνητικός *m* παράγοντας υποδηλώνει ότι το δίπολο δυναμικού βρίσκεται στα αριστερά του μέσου του διπόλου ρεύματος, ενώ θετικός m παράγοντας υποδηλώνει ότι το δίπολο δυναμικού βρίσκεται στα δεξιά.

Όσο μεγαλύτερη η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και των ηλεκτροδίων δυναμικού, τόσο μεγαλύτερο το βάθος διασκόπησης. Όταν το δίπολο δυναμικού βρίσκεται κοντά σε ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος, η διάταξη multi-gradient αποτελεί ουσιαστικά μια διάταξη pole-dipole, τουλάχιστον για μεγάλο *s* παράγοντα, ενώ όταν το δίπολο δυναμικού είναι τοποθετημένο στο κέντρο της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, τότε η διάταξη multi-gradient είναι όμοια με την Schlumberger. Συνεπώς, η διάταξη multi-gradient συνδυάζει χαρακτηριστικά των διατάξεων pole-dipole, Wenner και Schlumberger.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Γεωφυσική έρευνα στην περιοχή ενδιαφέροντος

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν τρεις ηλεκτρικές τομογραφίες διάταξης διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας με τη βοήθεια του οργάνου *Syscal Pro* της εταιρείας *IRIS Instruments,* το οποίο παρέχει την δυνατότητα καταγραφής μετρήσεων ειδικής αντίστασης, φυσικού δυναμικού και επαγόμενης πόλωσης.

Για κάθε μια τομογραφία χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια τα οποία απείχαν μεταξύ τους απόσταση ίση με 5 μέτρα. Μεταξύ των διαδοχικών τομογραφιών εφαρμόστηκε επικάλυψη (roll along) των τελευταίων 13 ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα τα τελευταία 60 μέτρα της μίας να συνιστούν τα πρώτα 60 μέτρα της επόμενης. Η επιλογή των παραπάνω παραμέτρων έγινε ώστε να καλυφθεί το επιθυμητό μήκος έρευνας των 600 μέτρων, να γίνει λήψη μετρήσεων σε βάθος έως και 60 μέτρων και να επιτευχθεί παράλληλα η απαιτούμενη διακριτική ικανότητα.

3.1 Λογισμικό *Electre Pro* της *Iris Instruments*

Ως πρώτη ενέργεια κατά τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων ορίζεται η εισαγωγή στο όργανο των κατάλληλων πρωτοκόλλων μέτρησης. Αυτά αποτελούν αρχεία μέσω των οποίων γίνεται η επιλογή των τεχνικών χαρακτηριστικών που επιθυμούμε να εφαρμοστούν όπως η επιλογή της διάταξης των ηλεκτροδίων, οι αρχικές θέσεις και το σύνολο των ηλεκτροδίων, το σύνολο των μετρήσεων καθώς και η χωροθετική διάταξη κάθε ηλεκτροδίου A, B, M, N κάθε μέτρησης.

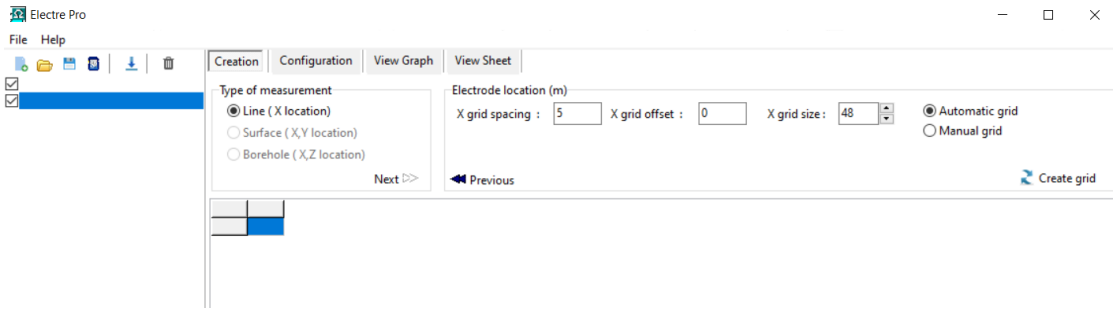
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Η δημιουργία των πρωτοκόλλων επιτυγχάνεται με το λογισμικό *Electre Pro* που παρέχεται από την εταιρεία *Iris Instruments* και επιτρέπει την δημιουργία αλληλουχιών 2D/3D μετρήσεων για την εισαγωγή τους στο όργανο *Syscal Pro*. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά βήματα για την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

Creation tab

Σε αυτό το παράθυρο επιλέγεται ο τύπος της μέτρησης *Line*, *Surface* ή *Borehole*, ορίζεται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων καθώς και ο αριθμός των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθούν.



Σχήμα 10: Δημιουργία πρωτοκόλλων μέτρησης με το λογισμικό Electre Pro.

Configuration tab

Σε αυτή την ενότητα καθορίζεται το όνομα κάθε πρωτοκόλλου μέτρησης, επιλέγεται ο τύπος της διάταξης (*dipole-dipole*, *Wenner*, *Multi gradient* κ.ά.), ο τύπος της μέτρησης και η διάρκεια παλμού του ρεύματος.

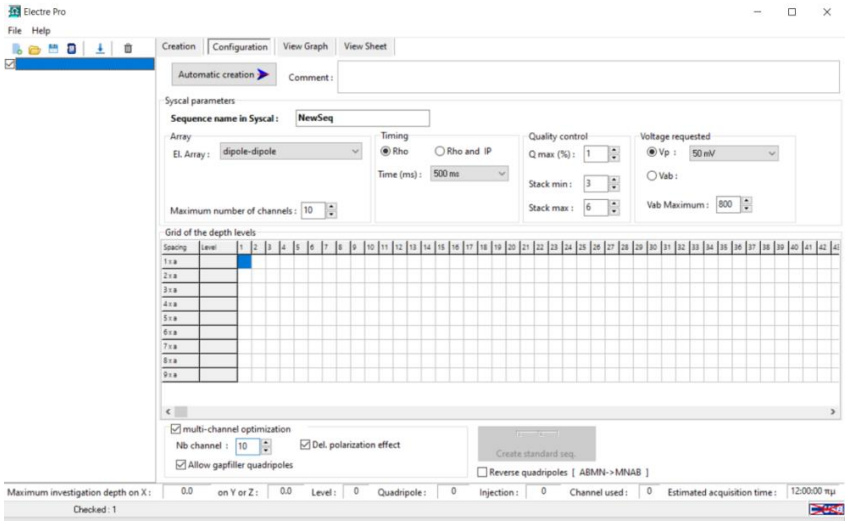
Μπορούμε ακόμη να ορίσουμε τον παράγοντα ποιότητας της μέτρησης Q. Εάν ο παράγοντας είναι μικρότερος της καθορισμένη τιμής, η μέτρηση θα επαναληφθεί έως ότου συμπληρωθεί ο ελάχιστος αριθμός επαναλήψεων *stack min*. Διαφορετικά η μέτρηση θα συνεχιστεί μέχρι η

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

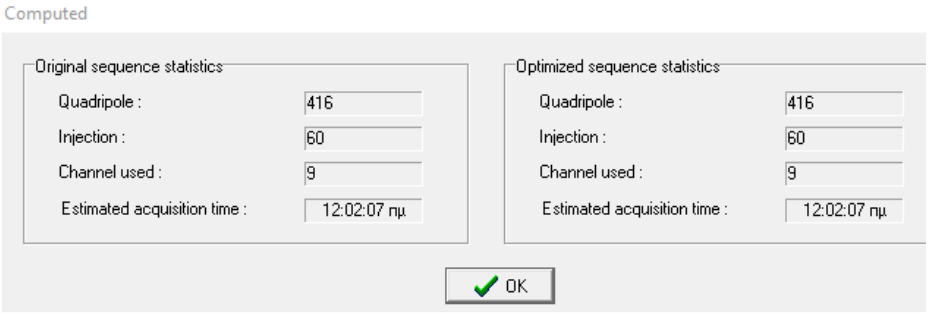
τιμή του παράγοντα να ελαττωθεί, χωρίς να ξεπεράσει τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων *stack max*.

Επιπλέον, το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα βελτιστοποίησης των μετρήσεων αυξάνοντας των αριθμό των καναλιών ή και προσθέτοντας τετράδες ηλεκτροδίων *gapfiller quadripoles* με στόχο την μείωση του συνολικού αριθμού διοχέτευσης ρεύματος και κατ' επέκταση του χρόνου των μετρήσεων.



Σχήμα 11: Δημιουργία πρωτοκόλλων μέτρησης με το λογισμικό Electre Pro.

Μετά τον καθορισμό των παραμέτρων του πρωτόκολλου, η διαδικασία ολοκληρώνεται επιλέγοντας *Standard compute* όπου εμφανίζονται τα παρακάτω στοιχεία (Σχήμα 12).



Σχήμα 12: Αριθμός τετράδων ηλεκτροδίων, διοχετεύσεων ρεύματος και καναλιών.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

3.2 Μετρήσεις πεδίου

Αφού τοποθετήσουμε τα 48 ηλεκτρόδια στο έδαφος κατά μήκος ορισμένης γραμμής, τα συνδέουμε με τη βοήθεια ενός πολύκλωνου καλωδίου στο όργανο *Syscal Pro* το οποίο τοποθετείται στο κέντρο της διάταξης.

Σχήμα 13: Όργανο μέτρησης SYSCAL Pro της εταιρείας IRIS Instruments.

Πριν την έναρξη λήψης των μετρήσεων, πραγματοποιούμε έλεγχο για την αντίσταση επαφής πατώντας το κουμπί με την ένδειξη *Rs Check*, ώστε να επιβεβαιώσουμε την σωστή τοποθέτηση των ηλεκτροδίων στο έδαφος και να αποφύγουμε τυχόν λανθασμένες μετρήσεις.

Έπειτα, πατώντας το *Start* αρχίζει η διεξαγωγή των μετρήσεων ειδικής αντίστασης σύμφωνα με τα καθορισμένα πρωτόκολλα που κατασκευάστηκαν για κάθε διάταξη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Εφόσον ολοκληρωθούν οι μετρήσεις για την πρώτη τομογραφία και των δύο διατάξεων, επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για τις δύο επόμενες, αφήνοντας στο έδαφος κάθε φορά τα τελευταία 13 ηλεκτρόδια της μιας, τα οποία θα αποτελέσουν τα 13 πρώτα ηλεκτρόδια της επόμενης ώστε να επιτευχθεί επικάλυψη 60 μέτρων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

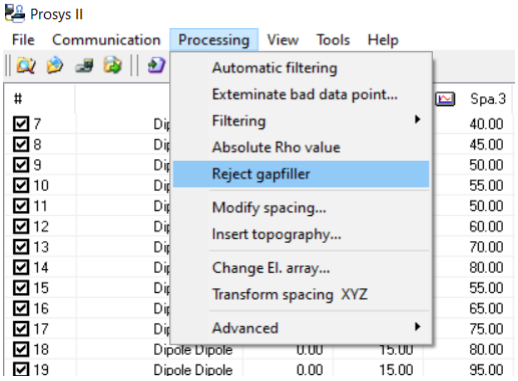
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

4.1 Λογισμικό *Prosys II*

Μετά το πέρας της ανωτέρας διαδικασίας θα αποκτήσουμε τα δεδομένα φαινόμενης αντίστασης που συλλέχθηκαν, με τη βοήθεια του λογισμικού *Prosys II*, το οποίο παρέχεται από την *IRIS Instruments* και προσφέρει δυνατότητες οπτικοποίησης και επεξεργασίας των δεδομένων.

Αρχικά, μέσω του *Processing* αφαιρούνται οι τετράδες ηλεκτροδίων gapfillers που επιλέχθηκαν κατά τη δημιουργία των πρωτοκόλλων μέτρησης.

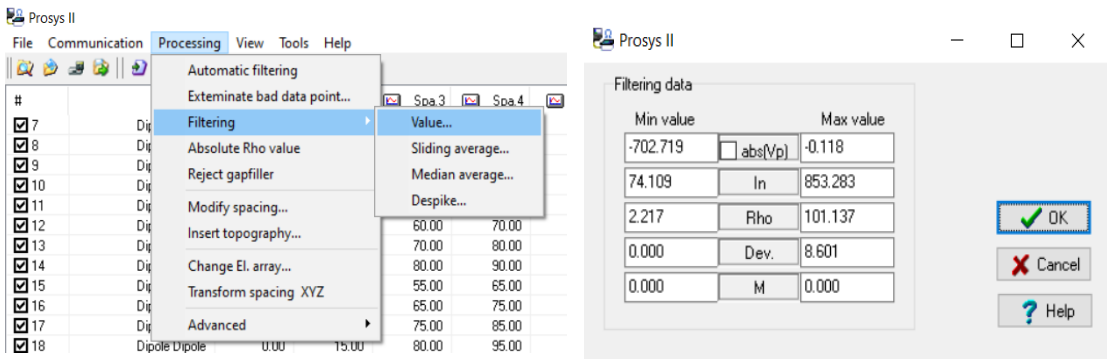


Σχήμα 14: Φιλτράρισμα των δεδομένων με αφαίρεση των gapfiller quadripoles.

Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε επιπλέον φιλτράρισμα καθορίζοντας τα όρια των τιμών κάποιων παραμέτρων όπως του ρεύματος, της φαινόμενης αντίστασης ή και του Deviation (*Dev.*). Στα συγκεκριμένα δεδομένα εφαρμόστηκε ως ανώτατο όριο του Dev η τιμή 5, ενώ το εύρος των τιμών της φαινόμενης αντίστασης δεν μεταβλήθηκε καθώς κρίθηκε ικανοποιητικό (max value ≅ 100).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 15: Φιλτράρισμα δεδομένων μέσω του Prosys II.

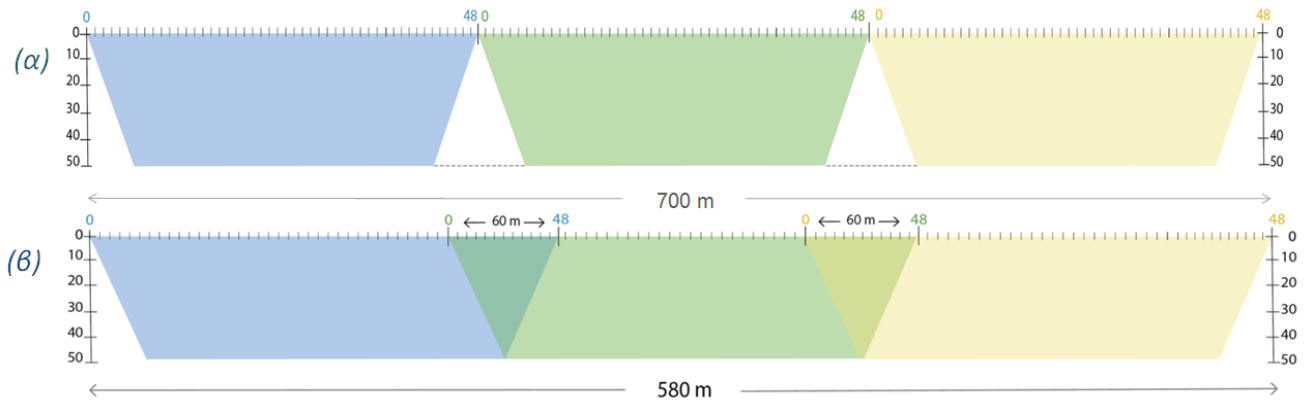
Ως τελευταία ενέργεια ορίζεται η εξαγωγή και αποθήκευση των δεδομένων στην μορφή *Res2dinv*, η οποία δημιουργεί αρχεία *.dat και είναι συμβατή με το πρόγραμμα αντιστροφής *DC_2DPro*, που θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα για τη δημιουργία του τελικού προφίλ αντιστάσεων του εδάφους.

Ενοποίηση των δεδομένων

Ο σχεδιασμός κάθε ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε, με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει επικάλυψη 60 μέτρων μεταξύ των διαδοχικών τομογραφιών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 16 κάθε ηλεκτρική τομογραφία λαμβάνει μετρήσεις σε ένα επίπεδο σχήματος τραπεζίου, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενές περιοχές μεταξύ των διαδοχικών τομογραφιών. Με τη μέθοδο της επικάλυψης γίνεται δυνατή η λήψη μετρήσεων σε αυτές τις περιοχές και η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου προφίλ εδάφους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 16: Σχεδιάγραμμα των τριών διαδοχικών ηλεκτρικών τομογραφιών (α) χωρίς επικάλυψη, (β) με επικάλυψη 13 ηλεκτροδίων. Παρατηρούμε ότι για την επίτευξη της επικάλυψης, μειώνεται το συνολικό μήκος έρευνας όπου στην (α) περίπτωση προσεγγίζει τα 700 m ενώ στην (β) τα 500 m.

Συνεπώς μετά την λήψη και επεξεργασία των μετρήσεων μας με το λογισμικό *Prosys II*, είναι απαραίτητη η ενοποίηση των τριών αρχείων *.dat, σε ένα ενιαίο αρχείο δεδομένων, το οποίο θα εισάγουμε στο πρόγραμμα *DC_2DPro*.

4.2 Πρόγραμμα αντιστροφής και δημιουργίας συνθετικών δεδομένων *DC_2DPro*

Η διαδικασία της αντιστροφής όπως αναφέρθηκε αποτελεί στάδιο κατά το οποίο τα δεδομένα φαινόμενης ειδικής αντίστασης μετατρέπονται, προκειμένου να παραχθούν συνθετικά μοντέλα κατανομής της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους. Για τον σκοπό αυτό στην συγκεκριμένη διατριβή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *DC_2DPro*.

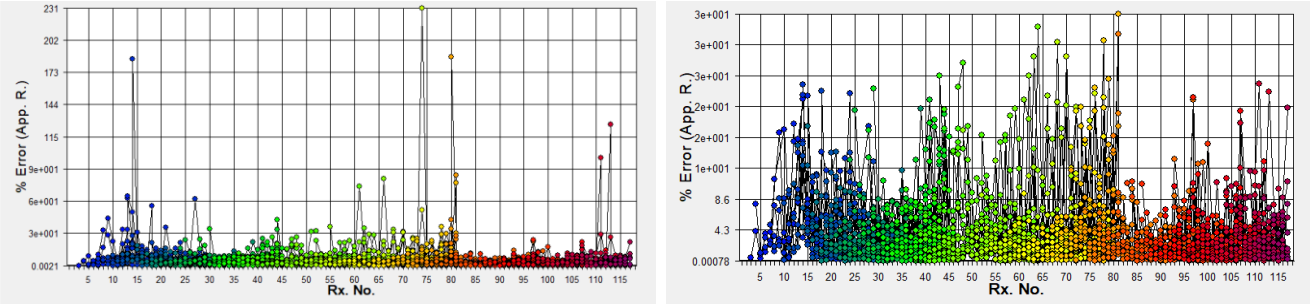
Εφόσον γίνει η εισαγωγή στο λογισμικό του τελικού ενοποιημένου αρχείου που δημιουργήσαμε, καθώς και των δεδομένων τοπογραφίας της περιοχής μελέτης, έχουμε τη δυνατότητα να εξετάσουμε τις μετρήσεις με

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

βάση στατιστικούς δείκτες, ποιοτικούς και ποσοτικούς και να απορρίψουμε εκείνες που δεν ικανοποιούν τα κριτήρια που εμείς θέτουμε. Στη συνέχεια, ξεκινάει η διεργασία της αντιστροφής επιλέγοντας *Inversion*.

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης αντιστροφής, φιλτράρουμε τα δεδομένα μέσω του *Error Analysis*, απομακρύνοντας τιμές με μεγάλη απόκλιση από το υπόλοιπο σύνολο δεδομένων και έπειτα πραγματοποιούμε εκ νέου αντιστροφή. Έτσι, επιτυγχάνουμε τη μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMS και τη δημιουργία ενός πιο αντιπροσωπευτικού μοντέλου Γης.



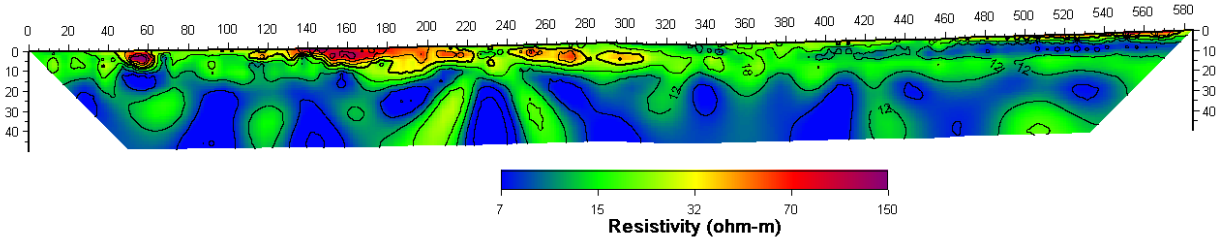
Σχήμα 17: Σχεδιάγραμμα απεικόνισης σφάλματος ανά μέτρηση πριν και μετά το φιλτράρισμα μέσω του Error analysis.

4.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρουσιάζεται το ηλεκτρικό προφίλ του εδάφους που διαμορφώνεται έπειτα από την αντιστροφή των δεδομένων. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το βάθος διασκόπησης το οποίο προσεγγίζει τα 50 μέτρα, ενώ ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην οριζόντια απόσταση πάνω στην επιφάνεια του εδάφους με σημείο αναφοράς το πρώτο ηλεκτρόδιο της πρώτης τομογραφίας, συνολικού μήκους 590 μέτρων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 18: Γεωηλεκτρικό προφίλ εδάφους όπως προκύπτει μετά την αντιστροφή των δεδομένων.

Τα ψυχρά μπλε χρώματα της χρωματικής κλίμακας αντιστοιχούν σε χαμηλές τιμές αντιστάσεων της τάξεως των 7-10 Ohm·m, τα πρασινοκίτρινα χρώματα αντιπροσωπεύουν ενδιάμεσες αντιστάσεις 11-40 Ohm·m, ενώ τα θερμότερα κόκκινα έως μωβ χρώματα υψηλές αντιστάσεις έως 150 Ohm·m.

Καθώς παρατηρούμε την εικόνα διακρίνουμε 3 ομάδες σχηματισμών:

Στα επιφανειακά στρώματα εντοπίζονται γεωλογικοί σχηματισμοί υψηλών ειδικών αντιστάσεων 50-70 Ohm·m οι οποίοι παρουσιάζονται με θερμά χρώματα, κυρίως μεταξύ των 120-220 μέτρων του οριζόντιου άξονα και σε βάθος μικρότερο των 10 μέτρων.

Στη συνέχεια, διακρίνουμε σχηματισμούς μεσαίων αντιστάσεων 15-30 Ohm·m οι οποίοι απεικονίζονται με πρασινωπά χρώματα και βρίσκονται διάσπαρτοι κατά μήκος της περιοχής έρευνας, συνήθως σε βάθη έως 20 μέτρα αλλά και ως φακοειδή σώματα σε μεγαλύτερα βάθη.

Τέλος, σε βάθη μεγαλύτερα των 15 μέτρων και κατά μήκος ολόκληρης της τομής, παρατηρούμε σχηματισμούς χαμηλών αντιστάσεων έως 10 Ohm·m, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από ψυχρά μπλε χρώματα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Μελετώντας το γεωηλεκτρικό προφίλ του εδάφους καθώς και τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

Κοντά στην επιφάνεια της Γης, σε μια έκταση 100 μέτρων κατά μήκος της περιοχής μελέτης συναντώνται ανδρόκοκκα και στεγνά υλικά, κυρίως άμμοι και χαλίκια του κατώτερου συστήματος αναβαθμίδων.

Σε επαφή με το παραπάνω στρώμα αλλά και ως σφηνοειδή σώματα σε μεγαλύτερα βάθη, εντοπίζονται συνεκτικοί σχηματισμοί ασβεστιτικών συγκριμάτων οι οποίοι συχνά εναλλάσσονται με ορίζοντες χαλικιών.

Κάτω από τα ασβεστιτικά συγκρίματα αλλά και σε εναλλαγές με αυτά, σε βάθη μεγαλύτερα των 15 μέτρων κυριαρχούν σχηματισμοί χαμηλών αντιστάσεων όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι οποίοι αντιστοιχούν σε αργιλικά υλικά. Παρατηρώντας το μοντέλο του εδάφους, διακρίνουμε περιοχές έντονου μπλε χρώματος όπου απαντάται καθαρή άργιλος, ενώ γύρω από αυτές το χρώμα διαφοροποιείται, γεγονός που υποδεικνύει την πρόσμιξη της αργίλου με υλικά περισσότερο αντιστατικά όπως η άμμος.

Αυτές οι περιοχές αποτελούν θέσεις πιθανών αργιλικών κοιτασμάτων στις οποίες θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο στάδιο εκτενέστερη έρευνα προκειμένου να ληφθούν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την σύσταση και την ποιότητα της αργίλου.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Arjwech, R., Sriwangpon, P., Somchat, K., Pondthai, P. and Everett, M., 2020. Electrical resistivity tomography (ERT) data for clay mineral mapping. *Data in Brief*, 30.

Dahlin, T. and Zhou, B., 2006. Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, [online] 4(2). Available at: <https://www.researchgate.net/publication/279902755> [Accessed 7 May 2021].

Mattas, C. and Kazakis, N., 2014. GROUNDWATER VULNERABILITY AND RISK ASSESSMENT USING DRASTIC MODEL IN A GIS ENVIRONMENT. A CASE STUDY FROM THE GALLIKOS RIVER BASIN, NORTHERN GREECE. In: *10th International Hydrogeological Congress of Greece*. [online] Thessaloniki. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/266739887> [Accessed 10 April 2021].

Openei.org. n.d. *DC Resistivity Survey (Wenner Array) | Open Energy Information*. [online] Available at: <https://openei.org/wiki/DC_Resistivity_Survey_(Wenner_Array)> [Accessed 8 May 2021].

ΜΑΤΤΑΣ, Χ., 2009. *ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΓΑΛΛΙΚΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ*. Ph.D. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ.

ΜΑΥΡΟΣ, Σ., 2020. *ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΤΟΜΕΣ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ*. MSc. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ.

Παπαζάχος, Β., 1986. *Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική*. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: Εκδόσεις Ζήτη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΑΚΗ, Η., 2016. *Διερεύνηση βέλτιστων διατάξεων μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων*. MSc. ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ.

Seasonal Groundwater Recharge Characterization using Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography in Thepkasattri Watershed on Phuket Island, Thailand - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-the-Wenner-array-electrode-configuration-A-and-B-current_fig2_332874558 [accessed 6 April, 2021]

Geo-electrical investigation of groundwater condition in Oleh, Nigeria - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Geometric-arrangement-of-the-Schlumberger-array-configuration_fig1_281611306 [accessed 6 April, 2021]

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης