



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



Σκορδάς Παναγιώτης

Προπτυχιακός φοιτητής Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης
Τμήματος Γεωλογίας ΑΕΜ:5044

Μετρήσεις Ηλεκτρικής Τομογραφίας στο Περιβαλλοντικό Πάρκο Θέρμης

Electrical Resistivity Tomography Measurements at the Environmental Park of Thermi

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής,
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Επιβλέποντες Καθηγητές

Επ. Καθηγητής: Τσούρλος Παναγιώτης

Αν. Καθηγητής: Βαργεμέζης Γιώργος



© Σκορδάς Παναγιώτης, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ, Τομέας Γεωφυσικής, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Μετρήσεις Ηλεκτρικής Τομογραφίας στο Περιβαλλοντικό Πάρκο Θέρμης- Διπλωματική εργασία

© Skordas Panagiotis, School of Geology, Department of Geophysics, 2024

All rights reserved.

Electrical Resistivity Tomography Measurements at the Environmental Park of Thermi – 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 την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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



Περίληψη

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν γεωηλεκτρικές μετρήσεις στην περιοχή που γειτονεύει με το περιβαλλοντικό πάρκο Θέρμης το οποίο αποτελεί ένα αναπλασμένο πρώην χώρο ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων (ΧΑΔΑ). Η έρευνα επικεντρώθηκε στο ΒΔ πρანές του πάρκου, δίπλα στην όχθη του ρέματος του Βαθύλακου και λίγα μέτρα από την περιοχή στην οποία συλλέγονται τα διασταλάζονα του πρώην ΧΑΔΑ για να απομακρυνθούν. Στόχος της γεωφυσικής έρευνας ήταν να χαρτογραφήσει τις ιδιότητες του υπεδάφους σε βάθη λίγων μέτρων στην προσπάθεια να εντοπίσει ενδείξεις διαρροής των χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης στραγγιδίων (διασταλαζόντων) στα βαθύτερα στρώματα. Εκτελέστηκαν τέσσερις τομές ηλεκτρικής τομογραφίας και μετά από επεξεργασία παράχθηκαν εικόνες ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους που ερμηνεύτηκαν σε σχέση με την εμφάνιση πιθανής ρύπανσης. Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν πιθανή ρύπανση από διαρροή διασταλαζόντων από τον χώρο ταφής τους στο υπέδαφος κοντά στο ρέμα του Βαθύλακου.



Abstract

In this work, geoelectric measurements were carried out in the area adjacent to the environmental park of Thermi, which is a reclaimed municipal waste area. The research focused on the NW slope of the park, next to the bank of the Vathylakos stream and a few meters from the area where the liquid waste of the former landfill is being collected to be removed. The aim of the geophysical survey was to map the properties of the subsoil up to depths of a few meters in an effort to identify evidence of leakage of low electrical resistance leachate into the deeper layers. Four electrical tomography sections were performed and after processing the electrical resistance images of the subsoil were produced which were interpreted in relation to the occurrence of possible pollution. The results of the work showed possible pollution from leakage of leachate from the waste site into the subsoil near the Vathylakos stream.



Περίληψη.....	ii
Abstract	iii
Πίνακας Περιεχομένων.....	1
Περίληψη.....	2
1. Εισαγωγή	3
Ευχαριστίες.....	4
2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος	5
Βασική Μέτρηση.....	6
2.2 Ηλεκτρική Τομογραφία.....	9
2.3 Αντιστροφή των δεδομένων	11
2.4 Εξοπλισμός Μετρήσεων Ηλεκτρικής Τομογραφίας	12
3.1 Περιοχή μελέτης.....	14
3.2 Γεωλογία της περιοχής.....	15
4.1 Λήψη Μετρήσεων Υπαίθρου.....	19
4.2 Γεωμετρία μετρήσεων.....	21
4.3 Επεξεργασία των δεδομένων	22
5.1 Αποτελέσματα δισδιάστατων τομών	24
5.2 Αποτελέσματα σε τρεις διαστάσεις	28
5.3 Συμπεράσματα	30
Βιβλιογραφία.....	31



Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν γεωηλεκτρικές μετρήσεις στην περιοχή που γειτονεύει με το περιβαλλοντικό πάρκο Θέρμης το οποίο αποτελεί ένα αναπλασμένο πρώην χώρο ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων (ΧΑΔΑ). Η έρευνα επικεντρώθηκε στο ΒΔ πρυνές του πάρκου, δίπλα στην όχθη του ρέματος του Βαθύλακου και λίγα μέτρα από την περιοχή στην οποία συλλέγονται τα διασταλάζοντα του πρώην ΧΑΔΑ για να απομακρυνθούν. Στόχος της γεωφυσικής έρευνας ήταν να χαρτογραφήσει τις ιδιότητες του υπεδάφους σε βάθη λίγων μέτρων στην προσπάθεια να εντοπίσει ενδείξεις διαρροής των χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης στραγγιδίων (διασταλαζόντων) στα βαθύτερα στρώματα. Εκτελέστηκαν τέσσερεις τομές ηλεκτρικής τομογραφίας και μετά από επεξεργασία παράχθηκαν εικόνες ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους που ερμηνεύτηκαν σε σχέση με την εμφάνιση πιθανής ρύπανσης. Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν πιθανή ρύπανση από διαρροή διασταλαζόντων από τον χώρο ταφής τους στο υπέδαφος κοντά στο ρέμα του Βαθύλακου.



Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν γεωηλεκτρικές μετρήσεις στην περιοχή που γειτονεύει με το περιβαλλοντικό πάρκο Θέρμης το οποίο αποτελεί ένα αναπλασμένο πρώην χώρο ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων (ΧΑΔΑ).

Η έρευνα επικεντρώθηκε στο ΒΔ πρυνές του πάρκου, δίπλα στην όχθη του ρέματος του Βαθύλακου και λίγα μέτρα από την περιοχή στην οποία συλλέγονται τα διασταλάζονα του πρώην ΧΑΔΑ για να απομακρυνθούν.

Στόχος της γεωφυσικής έρευνας ήταν να χαρτογραφήσει τις ιδιότητες του υπεδάφους σε βάθη λίγων μέτρων στην προσπάθεια να εντοπίσει ενδείξεις διαρροής των στραγγιδίων (διασταλαζόντων) στα βαθύτερα στρώματα.

Η καταγραφή των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους κρίθηκε σημαντική καθώς τα στραγγίδια έχουν χαρακτηριστική υπογραφή χαμηλών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Η καταγραφή των ηλεκτρικών αντιστάσεων έγινε μέσω της τεχνικής της ηλεκτρικής τομογραφίας. Εκτελέστηκαν τέσσερεις τομές ηλεκτρικής τομογραφίας και μετά από επεξεργασία παράχθηκαν εικόνες ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους που ερμηνεύτηκαν σε σχέση με την εμφάνιση πιθανής ρύπανσης.

Η δομή της εργασίας παρουσιάζει πρώτα τις βασικές αρχές πάνω στις οποίες λειτουργεί η ηλεκτρική γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε

Έπειτα παρουσιάζει κάποια στοιχεία για την περιοχή στο περιβαλλοντολογικό πάρκο Θέρμης καθώς και την Γεωλογία της



Ακολουθεί η περιγραφή της συλλογής δεδομένων στο ύπαιθρο καθώς και της επεξεργασία τους.

Τέλος παρουσιάζεται η ερμηνεία των γεωηλεκτρικών εικόνων του υπεδάφους σε σχέση με το πρόβλημα που μελετάμε.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου στο τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. και συγκεκριμένα τον Κ. Τσούρλο Παναγιώτη που με βοήθησε με την συμβολή του τις γνώσεις και τις συμβουλές του στην περάτωση της εργασίας μου καθώς και στον Κ. Βαργεμέζη Γεώργιο οποίος και αυτός συνέβαλε στην περάτωση των εργασιών στο ύπαιθρο και ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Τμήμα Γεωλογίας του Α.Π.Θ. για την ορθή καθοδήγηση και επίβλεψη της μελέτης μου στην ξεχωριστή επιστήμη της Γεωλογίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος

Στο πλαίσιο της μελέτης διενεργήθηκαν μετρήσεις με τη γεωφυσική μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας στην γειτονική περιοχή του περιβαλλοντικού Πάρκου Θέρμης ώστε να διαμορφωθεί μια γενικότερη εικόνα των γεωφυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη ανασκόπηση των γεωφυσικών τεχνικών που εφαρμόστηκαν καθώς και η μεθοδολογία των μετρήσεων και της επεξεργασίας τους.

Με την εφαρμογή ηλεκτρικών μεθόδων επιδιώκεται ο καθορισμός της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους και έτσι έμμεσα μπορούν να ληφθούν πληροφορίες για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται ανήκουν στην κατηγορία του τεχνητά παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διαβιβάζεται στο έδαφος δια μέσου ενός ζεύγους ηλεκτροδίων. Σε ένα δεύτερο ζεύγος ηλεκτροδίων μετράται η πτώση τάσης που προκαλείται (Σχήμα 2.1). Η ωμική αντίσταση που υπολογίζεται ως το πηλίκο των δύο αυτών μεγεθών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία με τη σειρά της μας επιτρέπει τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις οπότε η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και τον εντοπισμό ειδικών στόχων.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι συνδυασμός παραγόντων που επηρεάζουν τη συγκέντρωση, σύσταση του νερού που βρίσκεται στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς. Ειδικότερα εξαρτάται από: τις υδρολογικές - υδρογεωλογικές συνθήκες, τη χημική σύσταση του νερού, το μέγεθος των πόρων (πορώδες) των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις – διακλάσεις - ρήγματα των σχηματισμών, τη θερμοκρασία και την πίεση.

Επομένως η ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης πρέπει να γίνεται με προσοχή.

Βασική Μέτρηση

Η βασική διαδικασία μέτρησης είναι η εξής: χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια (συνήθως μεταλλικοί πάσσαλοι) τα οποία εισάγονται στο έδαφος σε ένα βάθος μερικών εκατοστών (~10cm) και σε αποστάσεις μεταξύ τους που ποικίλουν από μερικά μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα.

Χρησιμοποιείται όργανο μέτρησης το οποίο συνδέεται με τα ηλεκτρόδια μέσω καλωδίων. Διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I_{AB} (ποικίλλει από μερικά milli-Ampere έως μερικά Ampere) μέσα στη γη με δυο ηλεκτρόδια ρεύματος που στη βιβλιογραφία ονομάζονται A, B και μετράται σε διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού V_{MN} μεταξύ δυο ηλεκτροδίων δυναμικού που στη βιβλιογραφία ονομάζονται M, N (βλ. Σχήμα 2. 1). Βρίσκεται έτσι για κάθε μέτρηση η ηλεκτρική αντίσταση R.

$$R = \frac{V_{MN}}{I_{AB}}$$

Το βάθος διείσδυσης του ρεύματος (άρα και το βάθος της διασκόπησης) είναι ανάλογο με την απόσταση των ηλεκτροδίων. Επειδή η γη

είναι γεωηλεκτρικά ανομοιογενής, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση:

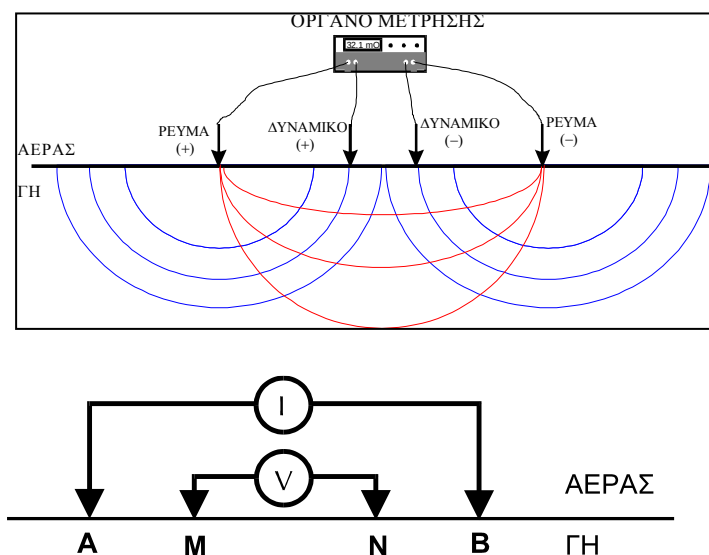
- της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους
- της γεωμετρίας της μέτρησής μας (Θέσεις A, B, M, N)

Για να λάβουμε υπόψη την επίδραση της γεωμετρίας εισάγεται ο όρος της Φαινόμενης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης ρ_a .

$$\rho_a = \frac{V_{MN}}{I_{AB}} K$$

όπου K είναι ο λεγόμενος γεωμετρικός παράγοντας – παράγοντας που εξαρτάται από τις αποστάσεις AB, AM, BM, BN.

Στην πράξη, η φαινόμενη αντίσταση ρ_a αποτελεί (σε μια πρώτη προσέγγιση) ένα είδος «μέσου όρου» των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους. Άρα δεν δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια «παραμορφωμένη» εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Η πραγματική αντίσταση μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία.

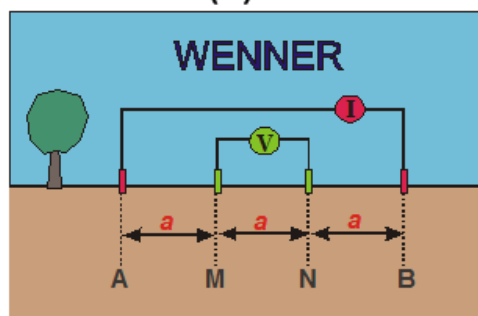


Σχήμα 2.1. Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι διάταξης των τεσσάρων ηλεκτροδίων A, B, M, N στην επιφάνεια του εδάφους. Έχουν προταθεί πάρα πολλές διατάξεις με σχετικά θεωρητικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην πράξη χρησιμοποιούνται διατάξεις που έχουν εσωτερική συμμετρία και ελαχιστοποιούν τις μετρήσεις καλωδίων στο ύπαιθρο. Τυπικές διατάξεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.

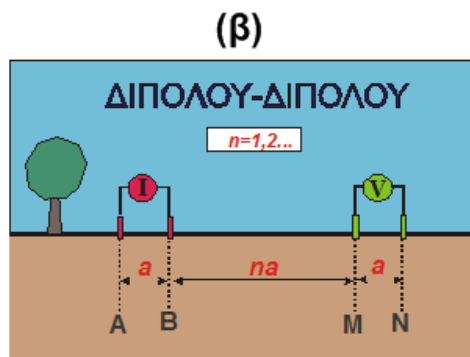
Στις μετρήσεις κατά κύριο λόγο χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις διπόλου διπόλου και Πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient) που είναι μια παραλλαγή της Wenner. Στη διάταξη διπόλου-διπόλου (2.2β), το δίπολο ρεύματος AB ξεχωρίζει από το δίπολο δυναμικού MN. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διάταξη να έχει σχετικά αδύναμο σήμα και γενικά μεγάλο γεωμετρικό παράγοντα σε σχέση με άλλες ισοδύναμες διατάξεις. Παρουσιάζει όμως πολύ καλή διακριτική ικανότητα στις πλευρικές μεταβολές της αντίστασης και για αυτό είναι δημοφιλής για τον εντοπισμό δισδιάστατων στόχων.

Η διάταξη Wenner (2.2α) είναι χαρακτηριστική καθώς τα ηλεκτρόδια δυναμικού MN εμπερικλείονται στα ηλεκτρόδια ρεύματος AB. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διάταξη να έχει ισχυρό σήμα και γενικά μικρό γεωμετρικό παράγοντα σε σχέση με άλλες ισοδύναμες διατάξεις. Επίσης δεν παρουσιάζει τόσο καλή διακριτική ικανότητα στις πλευρικές μεταβολές της αντίστασης όμως εμφανίζει πολύ καλή κατακόρυφη ανάλυση.



WENNER: >>>R <<< K

Καλό σήμα – μικρή ευαισθησία



ΔΙΠΟΛΟΥ: <<<R >>> K

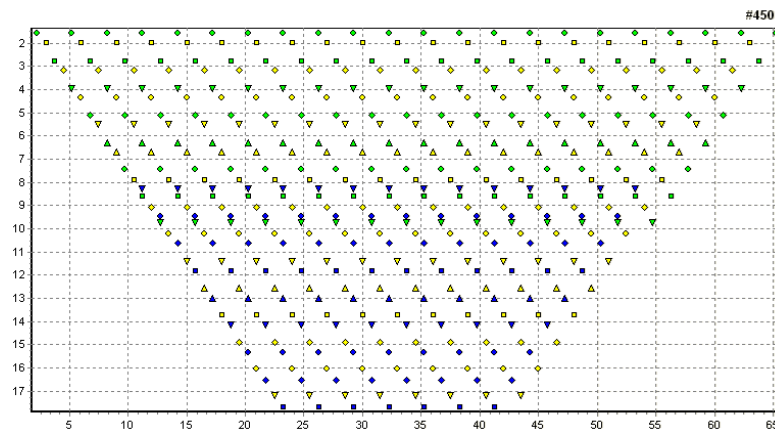
Κακό σήμα – μεγάλη ευαισθησία

Σχήμα 2.2. Τυπικές διατάξεις ηλεκτροδίων

2.2 Ηλεκτρική Τομογραφία

Ο όρος ηλεκτρική τομογραφία (HT) περιγράφει γενικά έναν τύπο μετρήσεων της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο “παραδοσιακών” τεχνικών μέτρησης: της όδευσης και της βυθοσκοπησης. Ειδικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να περιγραφεί ως μία σειρά από συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος της γραμμής έρευνας ή ως μία σειρά από οδεύσεις πάνω από την ίδια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η λήψη πληροφορίας τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης και έτσι λαμβάνεται μία πληρέστερη “εικόνα” του υπεδάφους.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της HT είναι ότι σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές λαμβάνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων άρα και χρήσιμης πληροφορίας (βλ. Σχ.2.3). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Παράλληλα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις είναι δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων, και επομένως χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών με πολυκάναλα καλώδια (Σχ. 2.4).



Σχήμα 2.3. Κατανομή μετρήσεων στην τομογραφία βάσει του σχεδιασμού λήψης μετρήσεων από τον αυτόματο πολυπλέκτη (διάταξη Διπόλου-Διπόλου).



Σχήμα 2.4. Πολυκάναλο σύστημα λήψης μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας

2.3 Αντιστροφή των δεδομένων

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελούν μια «παραμορφωμένη» εικόνα των πραγματικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους είναι απαραίτητο να υποστούν μια ειδική, πολύπλοκη μαθηματικά και υπολογιστικά διαδικασία, η οποία ονομάζεται αντιστροφή. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση είναι η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις δοθείσης της κατανομής της αντίστασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, στην παρούσα μελέτη, είναι ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος λύνει τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Η αντιστροφή μπορεί να γίνει σε δυο (δισδιάστατη) ή τρεις (τρισδιάστατη) διαστάσεις.

Στην γεωηλεκτρική μέθοδο, λόγω της μη γραμμικής φύσης του αντιστρόφου προβλήματος, οι αλγόριθμοι αντιστροφής είναι μια αυτοματοποιημένη επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά, η περιοχή ενδιαφέροντος διακριτοποιείται σε ένα δίκτυο από παραμέτρους στις οποίες και αποδίδεται μια αρχική τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Βάσει αυτού του μοντέλου υπολογίζονται τα αντίστοιχα συνθετικά δεδομένα, τα οποία και συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα. Λαμβάνεται έτσι μια εκτίμηση του λάθους $dy = (\text{πραγματικά δεδομένα} - \text{συνθετικά δεδομένα})$. Στη συνέχεια με μια διαδικασία αντιστροφής πινάκων γίνεται διόρθωση του αρχικού μοντέλου αντίστασης και η όλη διαδικασία

επαναλαμβάνεται έως ότου το λάθος dy μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών δεδομένων ελαχιστοποιηθεί. Το τελικό μοντέλο αντίστασης θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή των γεωηλεκτρικών αντιστάσεων και με βάση τις υπάρχουσες γεωλογικές συνθήκες ερμηνεύεται ώστε οι αντιστάσεις να μετατραπούν σε λιθολογικές και τεκτονικές τομές του υπεδάφους.

Τα δεδομένα, υποβλήθηκαν σε δισδιάστατη αντιστροφή, με το λογισμικό DC-2DPro (Kim, 2010). Πρόκειται για αλγόριθμο που εκτελεί μη γραμμική δισδιάστατη αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων

Η τρισδιάστατη επεξεργασία των γεωηλεκτρικών τομογραφιών έγινε με το λογισμικό DC-3DPro (Yi and Kim, 2010) και επιτρέπει την πλήρως τρισδιάστατη μοντελοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων εξασφαλίζοντας μεγαλύτερο βαθμό ρεαλιστικότητας στα παραγόμενα μοντέλα.

2.4 Εξοπλισμός Μετρήσεων Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Για την εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCAL Pro της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS. Πρόκειται για πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχεδιασμένο για έρευνα με μεθόδους συνεχούς ρεύματος. Το συγκεκριμένο όργανο έχει μέγιστη τάση εξόδου 800 V και επιτυγχάνει τη δημιουργία ρεύματος με ένταση που τυπικά ξεπερνάει τα 1000 mA, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπει και σημαντικά μεγαλύτερες εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος (έως 1500mA).

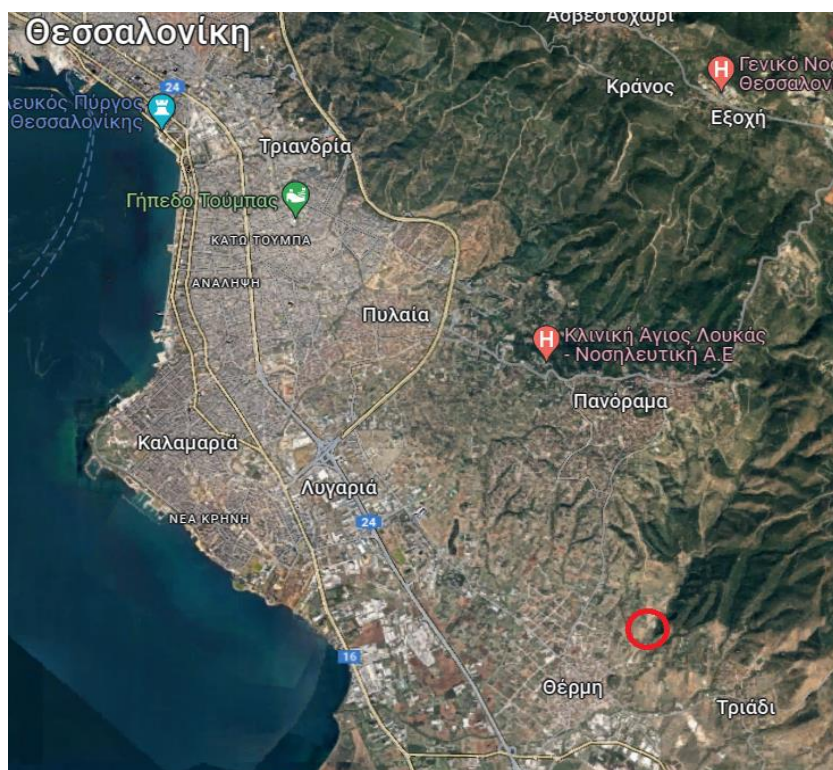


Σχήμα 2.5. Το γεωηλεκτρικό όργανο SYSCAL-Pro της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων. (αριστερά). Ο εξοπλισμός με τη συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της μέτρησης (δεξιά).

3.1 Περιοχή μελέτης

Η παρούσα ερευνητική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Περιβαλλοντικό Πάρκο Θέρμης (ΧΥΤΑ) στα Ανατολικά προάστεια της Θεσσαλονίκης (Σχ. 3.1) στις 11/09/23 με σκοπό των εντοπισμό υπογείων αποβλήτων επικίνδυνων για την μόλυνση των υδάτων της περιοχής. Το περιβαλλοντολογικό πάρκο Θέρμης δημιουργήθηκε από την ανάπλαση και αποκατάσταση του παλαιού χώρου διάθεσης απορριμμάτων Θέρμης .

Η παλαιά χωματερή λειτούργησε ως χώρος ταφής απορριμμάτων από τον Αύγουστο του 1974 έως τον Αύγουστο του 1981. Η συνολική έκταση της περιοχής είναι 80 στρέμματα



Σχήμα 3.1. Γενικός χάρτης της Θεσσαλονίκης με την περιοχή μελέτης (κόκκινος κύκλος)

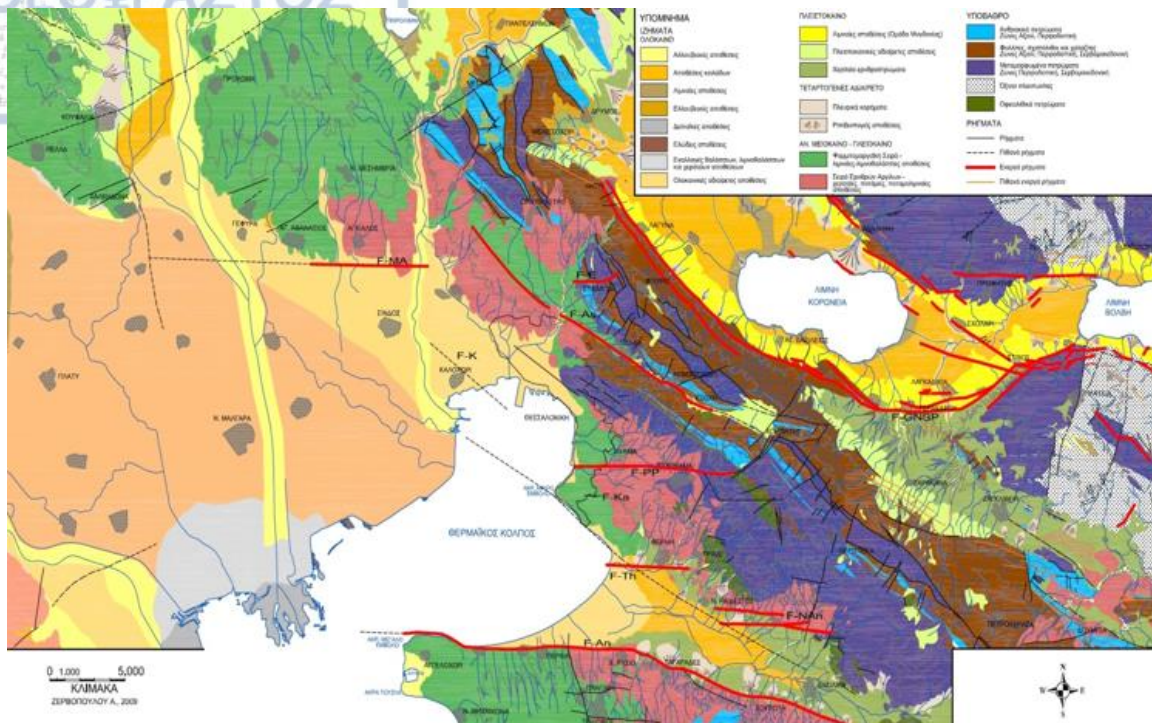


Σχήμα 3.2 Η περιοχή έρευνας

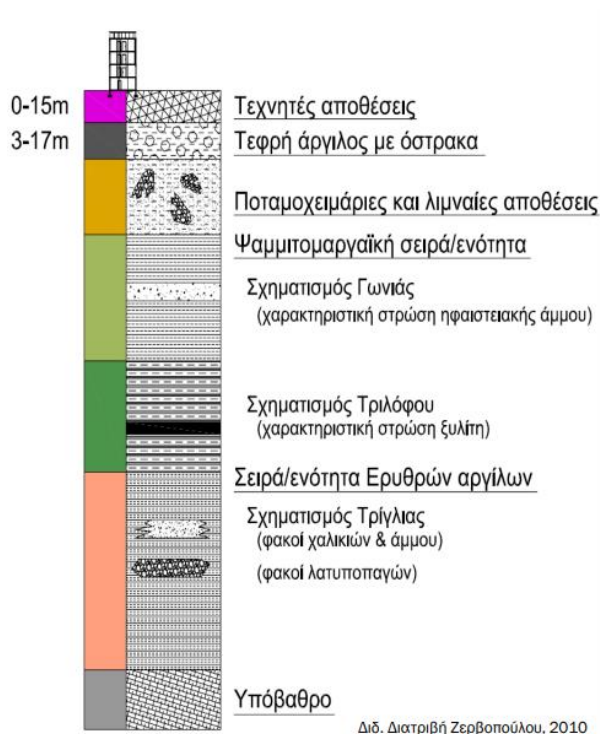
Στο Σχ. 3.2 παρουσιάζεται η δορυφορική εικόνα της περιοχής μελέτης όπου απεικονίζεται και η ηλεκτρικές τομογραφίες που πραγματοποιήθηκαν

3.2 Γεωλογία της περιοχής

Η Θέρμη ανήκει στην ανατολική περιοχή της λεκάνης της Θεσσαλονίκης (Ανθεμούντα) . Η Θεσσαλονίκη και κατ'επέκταση η περιοχή της Θέρμης ανήκει στην Περιοδοπική Ζώνη και ένα τμήμα του στην Σερβομακεδονική Ζώνη . Ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής παρουσιάζεται στο Σχ. 3.3.



Σχήμα 3.3 Γεωλογικός χάρτης Θεσσαλονίκης (από Ζερβοπούλου, 2018)



Σχήμα 3.4 Στρωματογραφική στήλη περιοχής Θέρμης

Στο Σχ. 3.4 βλέπουμε την Στρωματογραφική στήλη της περιοχής από τα νεότερα στα παλαιότερα έχουμε :

- Τεχνητές ανθρωπογενείς αποθέσεις

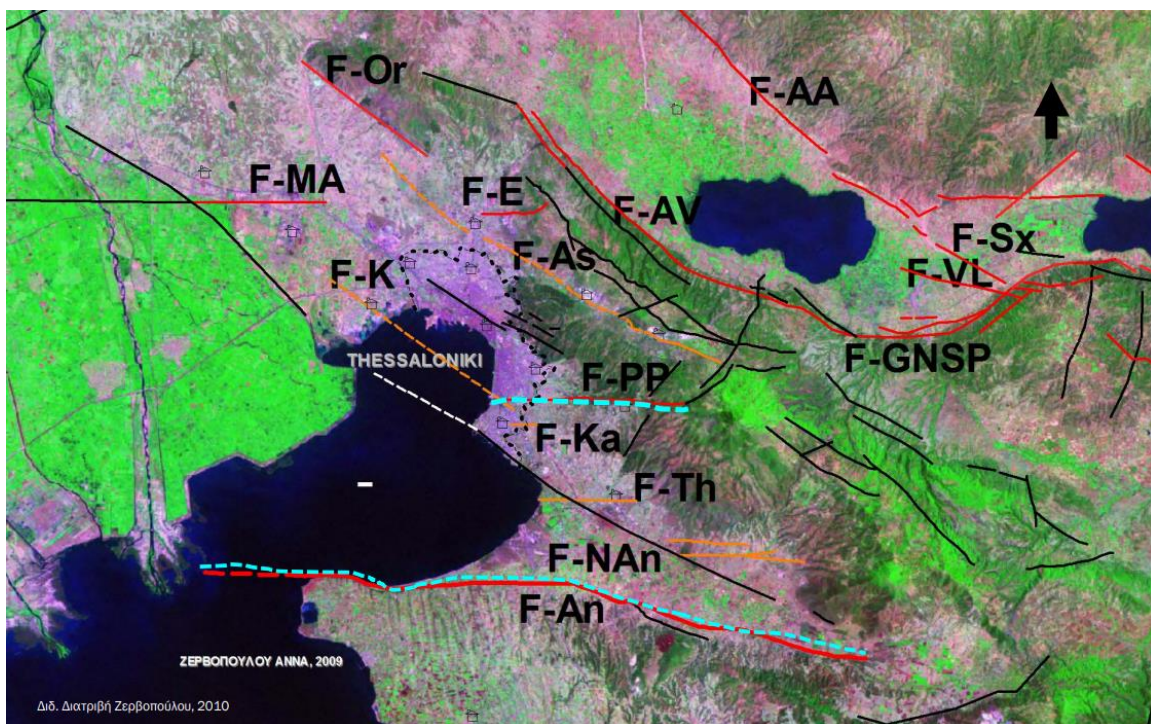
Έπειτα ακολουθούν οι Τεταρτογενείς αποθέσεις

- Άργιλος
- Παράκτιες άμμοι
- Ποταμοχειμάρειες αποθέσεις
- Λιμναία ιζήματα

Νεογενή ιζήματα

- Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά
- Σειρά Ερυθρών αργίλων

Τέλος ακολουθεί το αλπικό υπόβαθρο το οποίο είναι μεταμορφωμένο και δεν εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης της εργασίας



Σχήμα 3.4 Ρήγματα στην λεκάνη του Ανθεμούντα (Ζερβοπούλου 2018)

Η Τεκτονική στην περιοχή είναι έντονη λόγω και της παλαιοτεκτονικής αλλά και λόγω της νεοτεκτονικής δράσης.

Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής είναι :

- Ο κοινός προσανατολισμός των ρηγμάτων(παράταξη Α-Δ)
- Όλα είναι κανονικά ρήγματα και τα περισσότερα με Βόρεια κλίση
- Τα περισσότερα από αυτά είναι ενεργά λόγω του εκτατικού πεδίου τάσεων που υπάρχει στην περιοχή

Από όλα τα ρήγματα συγκεκριμένα θα αναφερθεί το ρήγμα Πυλαίας - Πανοράματος .

Χαρακτηριστικά του ρήγματος είναι

- βρίσκεται μέσα στο αλπικό πρασινοσχιστολιθικό υπόβαθρο
- Α-Δ διεύθυνση του
- Είναι κανονικό μεταπτωτικό ρήγμα
- Αποτελεί τεκτονική επαφή μεταξύ νεογενών με πιο πρόσφατες αποθέσεις
- διασχίζει τα Μειοκαινικά ιζήματα των Ερυθρών Αργίλων νότια της Πυλαίας
- Έχει παρατηρηθεί μετατόπιση μεγαλύτερη των 40 μέτρων

Το ρήγμα έχει χαρακτηριστεί ενεργό από το 1997 (Μουντράκης ,Τρανός) και αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα ρήγματα που έχουν ανακαλυφθεί στην περιοχή.

Η ενεργότητα του ρήγματος προδίδεται λόγω του ότι

- Έχει έντονο μορφοανάγλυφο η περιοχή
- Μικροσεισμικότητα
- Αποτελεί επαφή ιζημάτων διαφορετικής ηλικίας
- Προκαλεί ασυμμετρία του υδρογραφικού δικτύου των δυο λεκανών

4.1 Λήψη Μετρήσεων Υπαίθρου

Κατά την εργασία εκτελέστηκαν 4 γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας (line 1,2,3,4) όπου φαίνονται στο Σχ. 4.1 με κόκκινο χρώμα.. Η διεύθυνση όλων των γραμμών ήταν ΝΝΔ-BBA

Στο ίδιο σχήμα φαίνονται: η θέση της δεξαμενής συλλογής των διασταλοζόντων προς απομάκρυνση (λευκός κύκλος) καθώς και η θέση υπόγειου μεταλλικού αγωγού καυσίμων με BBA διεύθυνση (μαύρη γραμμή) το οποίο το λάβαμε υπόψιν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων



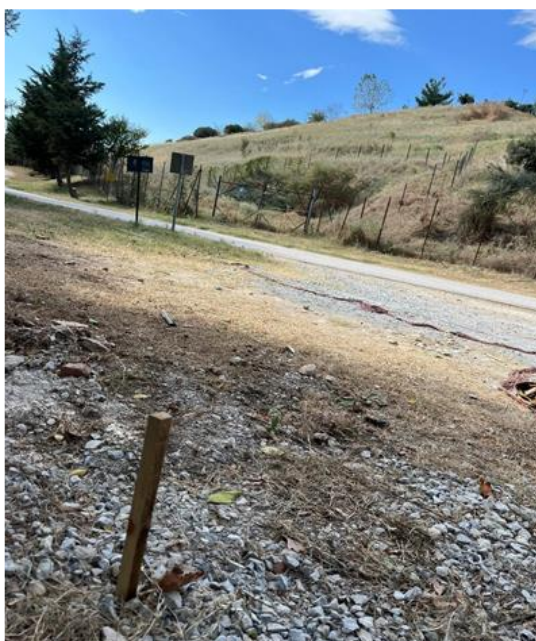
Σχήμα 4.1 Χάρτης με τις τομές ηλεκτρικής τομογραφίας που μετρήθηκαν στην περιοχή έρευνας

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήσαμε είναι τα εξής :

- 1 x Μπαταρία

- Καλώδια
- 23 x Ηλεκτρόδια
- 1 x Όργανο μέτρησης αντίστασης Syscal Pro
- GPS ακρίβειας για τη χωροθέτηση των γραμμών.

Στο Σχ. 4.2 παρουσιάζονται φωτογραφίες από τη λήψη των μετρήσεων.



- Σχήμα 4.2 Φωτογραφίες από τη λήψη των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας

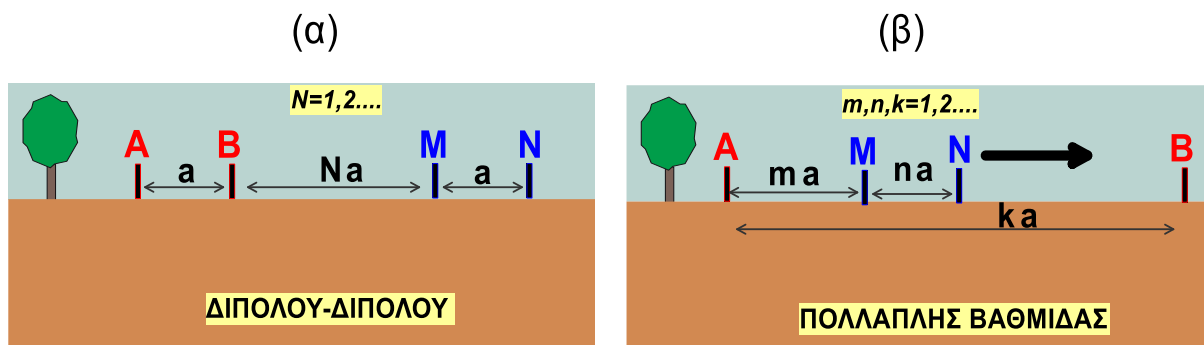
4.2 Γεωμετρία μετρήσεων

Η γραμμή Line 1 είχε απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων 1 μέτρο και 24 ηλεκτρόδια συνολικά άρα είχε μήκος 23 μέτρα. Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται από το μήκος της γραμμής και στη διάταξη της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι τυπικά 0.2 έως 0.25 της συνολικής απόστασης. Επομένως για την γραμμή 1 είχαμε βάθος διασκόπησης περίπου 6m.

Οι γραμμές Line 2-3-4 είχαν απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων 2 μέτρα και 24 ηλεκτρόδια συνολικά άρα είχαν μήκος 46 μέτρα. Το βάθος διασκόπησης εκτιμάται σε περίπου 12m. Οι 3 γραμμές σχεδιάστηκαν ώστε να είναι παράλληλες μεταξύ τους με την απόσταση μεταξύ των γραμμών να είναι επίσης 2m.

Η διάταξη διπόλου-διπόλου (Σχ. 4.3α) που μετρήθηκε είχε 420 μετρήσεις με μέγιστες αποστάσεις μεταξύ των διπόλων $1 \cdot a, 2 \cdot a$ και $3 \cdot a$ με $N=8$

Για τη μέτρηση με τη διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (980 μετρήσεις) συμπεριλήφθηκαν όλες οι δυνατές μετρήσεις για αποστάσεις ρεύματος $k=4,5,10,15,20$ (Σχ. 4.3β).



Σχήμα 4.3 διατάξεις ηλεκτροδίων (α) διπόλου-διπόλου, (β) πολλαπλής βαθμίδας

Σε σχέση με τις παραμέτρους των ηλεκτρικών μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικός παλμός 0.5 sec με κατ' ελάχιστο 4 κύκλους επανάληψης οι οποίοι

έφτασαν του 6 σε περίπτωση που η τυπική απόκλιση των τριών αρχικών μετρήσεων ήταν μεγαλύτερη του 1%.

Γενικά η ποιότητα των μετρήσεων κρίνεται ιδιαίτερα καλή καθώς ελάχιστες μετρήσεις (<5%) παρουσίασαν σφάλμα επανάληψης μεγαλύτερο του 10%.

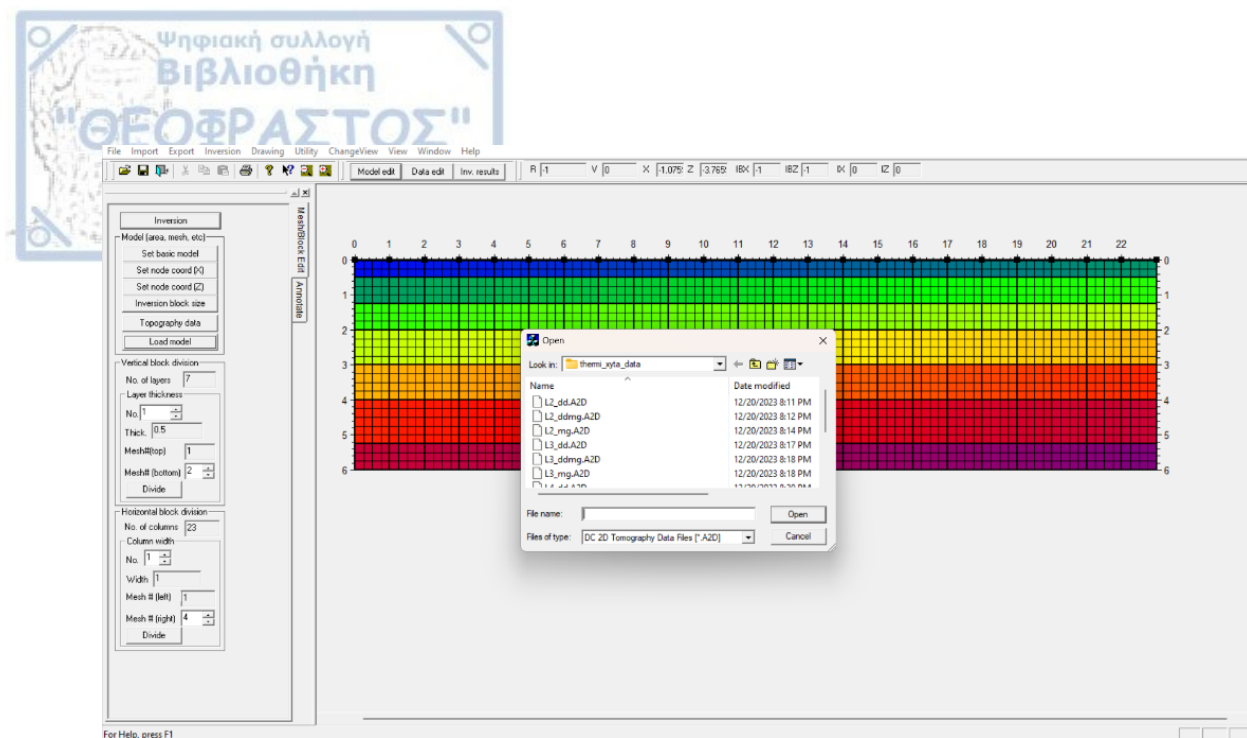
4.3 Επεξεργασία των δεδομένων

Τα δεδομένα κάθε τομής φιλτράριστηκαν για τυχόν ακραίες τιμές: δηλαδή μετρήσεις που φαίνεται να αποκλίνουν σημαντικά από τις μέσες τιμές των δεδομένων

Τα δεδομένα, στη συνέχεια, υποβλήθηκαν σε δισδιάστατη αντιστροφή (Tsourlos et al., 1998; Tsourlos and Ogilvy, 1999) με το λογισμικό DC-2DPro (Kim, 2011) και DC3DPro (Kim & Yi, 2011). Πρόκειται για αλγόριθμο που εκτελεί μη γραμμική αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων με την μέθοδο αντιστροφής του Occam (Constable, 1987). Ο αλγόριθμος είναι επαναληπτικός και σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να επιλύσει το ευθύ πρόβλημα.

Αρχικά ορίζεται η δομή των παραμέτρων (βλέπε παράδειγμα στο Σχ. 4.4) και η διαδικασία της αντιστροφής επαναλαμβάνεται αρκετές φορές με το να απομακρύνεται ένα μικρό πλήθος μετρήσεων κάθε φορά με βάση το % σφάλμα μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών δεδομένων.

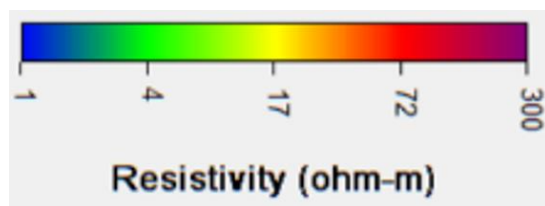
Η αντιστροφή για τις τομές επαναλήφθηκε αρκετές φορές με διαφορετικές παραμέτρους ώστε να επιτευχθεί μια σχετική ομοιομορφία στο σφάλμα κάθε τομής. Τα τελικά αποτελέσματα της αντιστροφής χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα αξιόπιστα καθώς το % λάθος (RMS) για κάθε αντιστροφή κυμάνθηκε μεταξύ 1-3%, ενδεικτικό επίσης και της καλής ποιότητας των πρωτογενών δεδομένων.



Σχήμα 4.4. Δομή παραμέτρων αντιστροφής

5.1 Αποτελέσματα δισδιάστατων τομών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι ερμηνείες των τομογραφιών. Στις ηλεκτρικές τομές που παρουσιάζονται αποτυπώνονται τα πραγματικά βάθη από την επιφάνεια (π.χ 0-12μ) και οι πραγματικές ηλεκτρικές αντιστάσεις του υπεδάφους οι οποίες και παρουσιάζονται με ενιαία χρωματική κλίμακα «ουράνιου τόξου» με τα ψυχρά χρώματα (μπλε) να αντιστοιχούν σε χαμηλές αντιστάσεις (π.χ. ρύπανση από διασταλάζοντα), τα ενδιάμεσα (πράσινα) σε αργιλικούς αμμόδης σχηματισμούς και τα θερμά χρώματα (κόκκινα) να αντιστοιχούν σε υψηλές αντιστάσεις (π.χ. αδρόκοκκες αποθέσεις και επιχώσεις). Η ενιαία κλίμακα παρουσιάζεται στο Σχ. 5.1.



Σχήμα 5.1 Η κλίμακα αντιστάσεων που χρησιμοποιείται

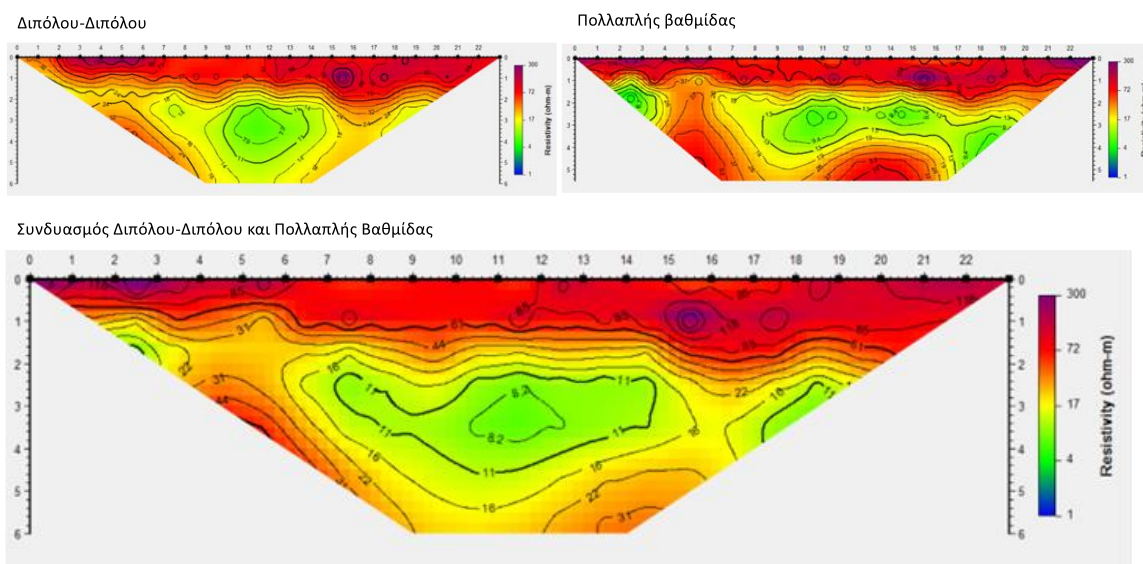
Για όλες τις τομές έγινε επεξεργασία ξεχωριστά για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας. Καθώς κάθε διάταξη μπορεί να τονίζει διαφορετικά χαρακτηριστικά τα δεδομένα από τις δυο διατάξεις συνδυάστηκαν και υποβλήθηκαν σε επεξεργασία μαζί. Το αποτέλεσμα της συνδυασμένης επεξεργασία θεωρείται πιο αξιόπιστο για αυτό και η ερμηνεία βασίζεται σε αυτό.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχ. 5.2-5.6 παρατηρούμε τα εξής για κάθε γραμμή που παρουσιάζονται με τη σειρά θέσης από Δυτικά προς Ανατολικά:

- Γραμμή 1 (Σχ. 5.2): παρατηρείται επιφανειακό αντιστατικό στρώμα με επιχώσεις και μια ανωμαλία χαμηλής αντίστασης περίπου 5-6 ohm (Σχ. 5.2) σε βάθος 3m με και σε μήκος 11m
- Γραμμή 4 (Σχ. 5.3): παρατηρείται επιφανειακό αντιστατικό στρώμα με επιχώσεις και μια μεγάλη περιοχή χαμηλής αντίστασης 1ohm σε βάθος μεγαλύτερο των > 6 m και σε μήκος από τα 10-22 m . Επίσης παρατηρούμε μια περιοχή μικρής αντίστασης περίπου 5-6ohm σε μήκος 35-40m και σε βάθος >3m
- Γραμμή 2 (Σχ. 5.4): παρατηρείται επίσης επιφανειακό αντιστατικό στρώμα με επιχώσεις πάχους 2-3m και μια μια περιοχή πολύ χαμηλής αντίστασης 1ohm σε βάθος σε μήκος 14-22m και βάθος 10-12 m
- Γραμμή 3 (Σχ. 5.5) παρουσιάζονται λιγότερο χαμηλές αντιστάσεις σε μήκος 28-32 m και σε βάθος >11m

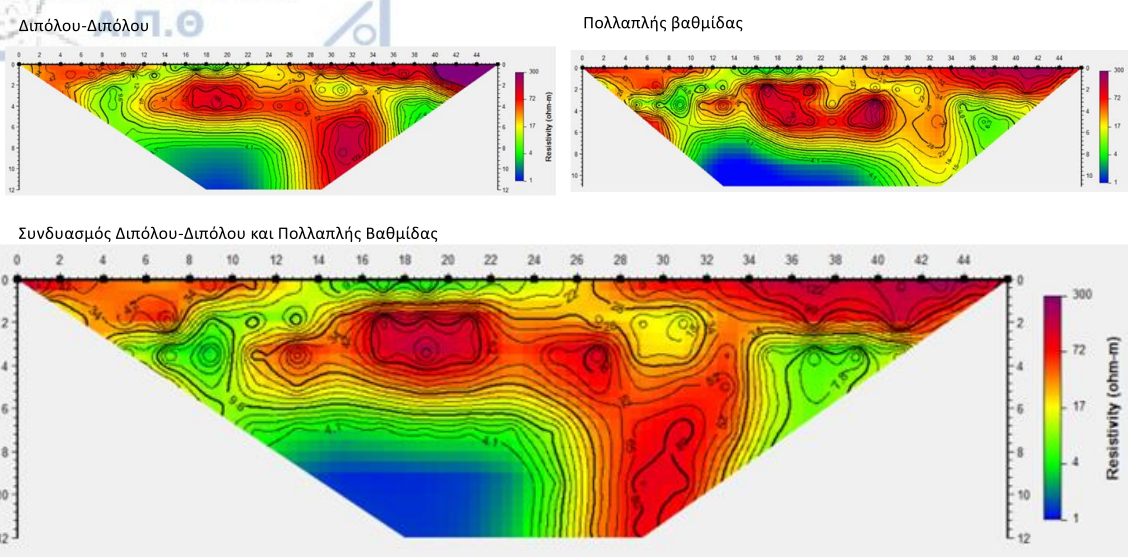
Στο Σχ. 5.6 παρουσιάζεται η συνδυασμένη απεικόνιση όλων των δισδιάστατων αποτελεσμάτων για την περιοχή,

Γραμμή Line 1



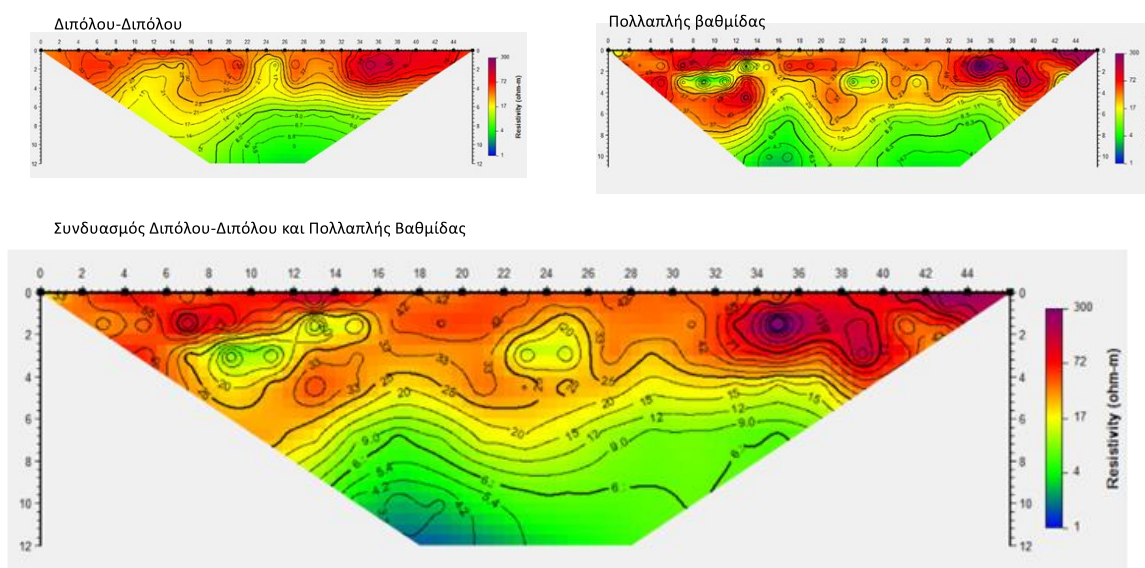
Σχήμα 5.2 Αποτελέσματα 2Δ αντιστροφής για τη γραμμή Line1: διάταξη διπόλου-διπόλου (επάνω αριστερά εικόνα), πολλαπλής βαθμίδας (επάνω δεξιά εικόνα) και συνδυασμένη αντιστροφή (κάτω εικόνα)

Γραμμή Line 4



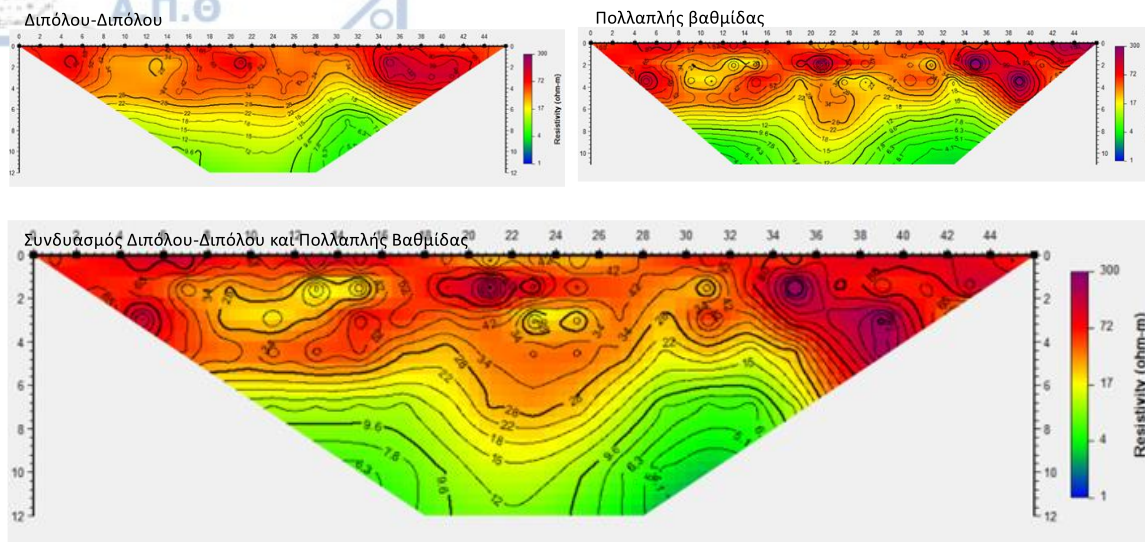
Σχήμα 5.3 Αποτελέσματα 2Δ αντιστροφής για τη γραμμή Line4: διάταξη διπόλου-διπόλου (επάνω αριστερά εικόνα), πολλαπλής βαθμίδας (επάνω δεξιά εικόνα) και συνδυασμένη αντιστροφή (κάτω εικόνα)

Γραμμή Line 2

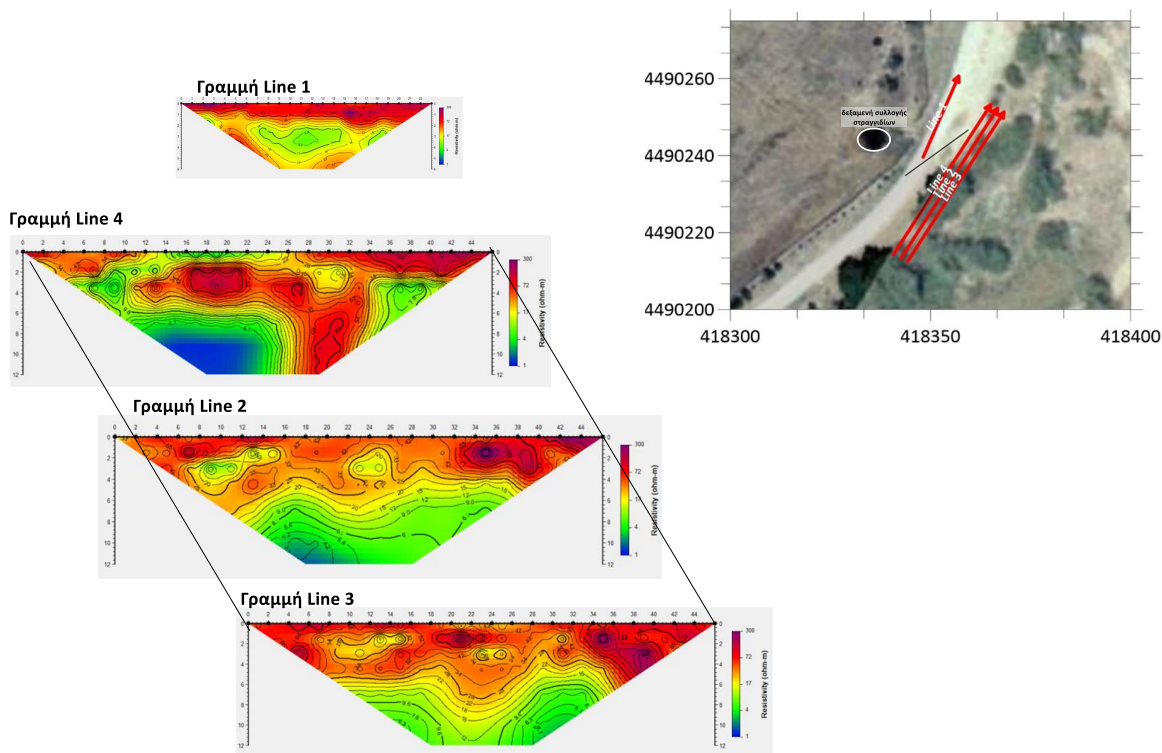


Σχήμα 5.4 Αποτελέσματα 2Δ αντιστροφής για τη γραμμή Line2: διάταξη διπόλου-διπόλου (επάνω αριστερά εικόνα), πολλαπλής βαθμίδας (επάνω δεξιά εικόνα) και συνδυασμένη αντιστροφή (κάτω εικόνα)

Γραμμή Line 3



Σχήμα 5.5 Αποτελέσματα 2D αντιστροφής για τη γραμμή Line3: διάταξη διπόλου-διπόλου (επάνω αριστερά εικόνα), πολλαπλής βαθμίδας (επάνω δεξιά εικόνα) και συνδυασμένη αντιστροφή (κάτω εικόνα)



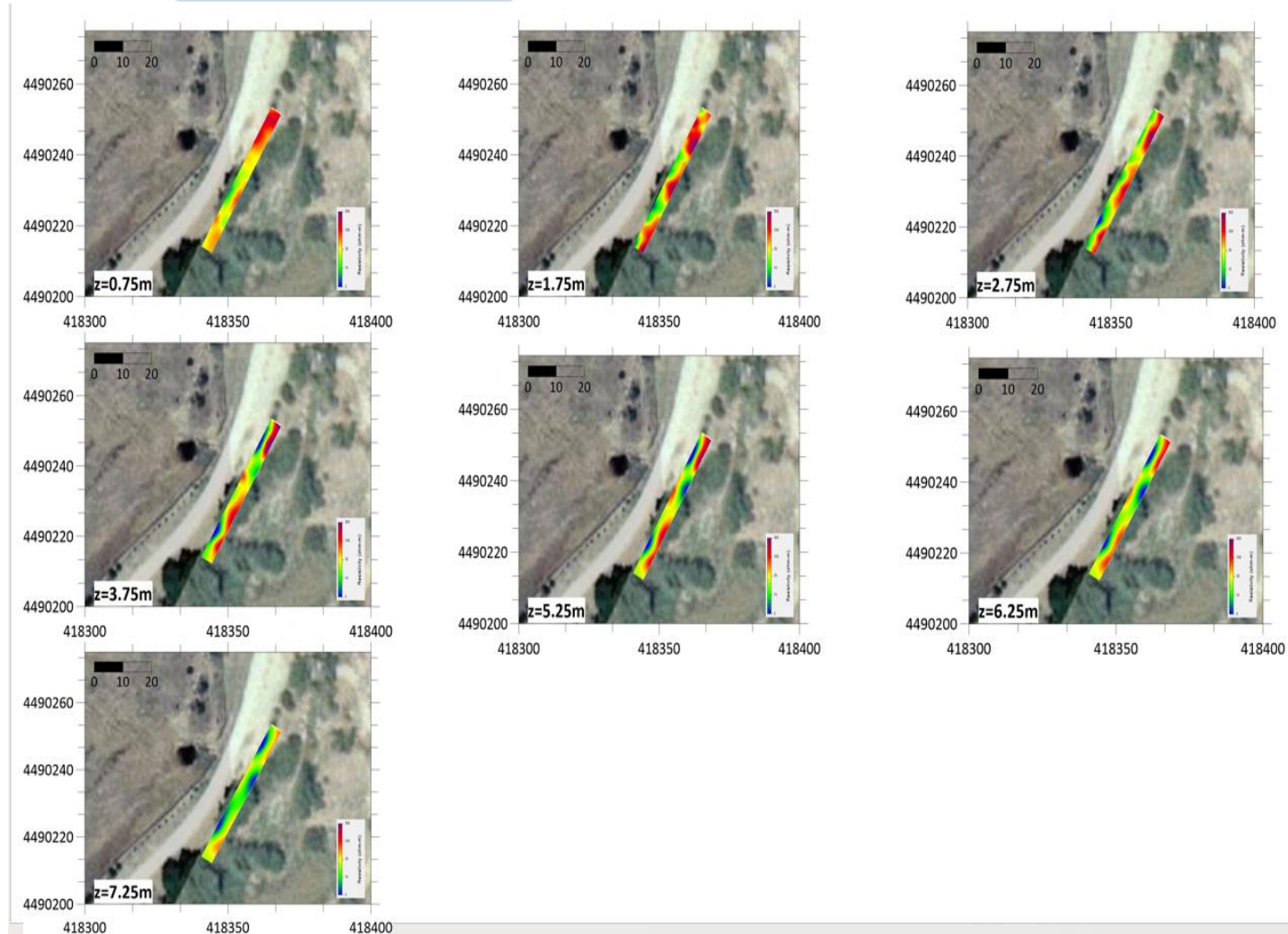
Σχήμα 5.6 Συνδυασμένα αποτελέσματα 2D αντιστροφής για όλες τις γραμμές

5.2 Αποτελέσματα σε τρεις διαστάσεις

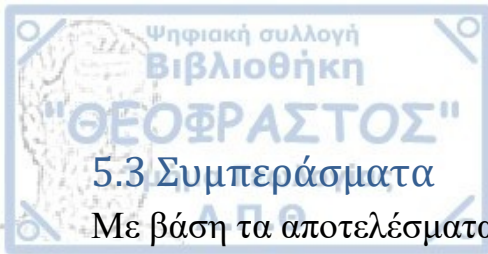
Όσο αναφορά την τρισδιάστατη απεικόνιση έγινε συνδυασμός των δεδομένων των γραμμών 4,2,3 που ήταν παράλληλες και ισαπέχουσες μεταξύ τους. Το τελικό ενιαίο σύνολο δεδομένων υποβλήθηκε σε τρισδιάστατη αντιστροφή με το DC3Dpro.

Χρησιμοποιώντας συντεταγμένες από την αρχή και το τέλος των ακραίων γραμμών απεικονίσαμε πάνω σε δορυφορικό χάρτη σε κατόψεις για διάφορα βάθη από την επιφάνεια την μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης. Τα αποτελέσματα των τελικών απεικονίσεων φαίνονται στο Σχ. 5.7.

Όσο αναφορά την τρισδιάστατη απεικόνιση (σχ. 5.7) παρατηρούμε ότι σε ρηχότερα βάθη πρώτα εμφανίζονται χαμηλές αντιστάσεις κοντά στην περιοχή του περιβαλλοντολογικού πάρκου (ΔΝΔ) και μετά σε μεγαλύτερα βάθη αρχίζουν και εμφανίζονται προς τα ΑΒΑ κοντά δηλαδή στην παρακείμενη όχθη του ρέματος του Βαθύλακου.



Σχήμα 5.7 Κατόψεις της τρισδιάστατης ηλεκτρικής αντίστασης για διαφορετικά βάθη με υπόβαθρο σε δορυφορικό χάρτη μετά από επεξεργασία δεδομένων με το DC_3dPro



Με βάση τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε τα παρακάτω:

- Σε όλες τις τομές εμφανίζεται ένα στρώμα υψηλών αντιστάσεων πάχους 2μ περίπου
- στα ΝΔ κοντά στο περιβαλλοντολογικό πάρκο και σε σχετικά μικρά βάθη 1-2μ εμφανίζεται ένα στρώμα χαμηλών αντιστάσεων.
- προχωρώντας προς το ρέμα ΒΑ παρατηρούμε την ανωμαλία χαμηλών αντιστάσεων να μεταναστεύει σε μεγαλύτερα βάθη και προς τα ΒΑ (γραμμές 2,3,4)
- η ανωμαλία με πολύ χαμηλές αντιστάσεις του 1ohm που εμφανίζεται σε συγκεκριμένο βάθος και εύρος αποτελεί ένδειξη πιθανής ρύπανσης των στρωμάτων

Λαμβάνοντας αυτά σε υπόψιν θα πρέπει να πραγματοποιηθούν περαιτέρω έρευνες με γεωτρήσεις και δειγματοληψία και γεωχημικές αναλύσεις για την εξακρίβωση των παραπάνω ενδείξεων.



Παπαζάχος Β., 1996. Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Εκδόσεις Ζήτη

Τσούρλος Παναγιώτης , Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι γεωφυσικής διαπισκόπησης.https://elearning.auth.gr/pluginfile.php/2419709/mod_resource/content/4/LEC1_2022.pdf

Ζερβοπούλου Α. 2018 ‘ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΡΗΓΜΑΤΑ ΤΟΥ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΟΥ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ’, Ημερίδα “Γεωλογία - Ενεργά ρήγματα και Επιπτώσεις στα σημαντικά τεχνικά έργα της Θεσσαλονίκης”

Ζερβοπούλου , Παυλίδης 2005 ‘Μορφοτεκτονική μελέτη της ευρύτερης περιοχής Θεσ/νίκης για τη χαρτογράφηση νεοτεκτονικών ρηγμάτων’. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVIII, 2005 30 Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVIII

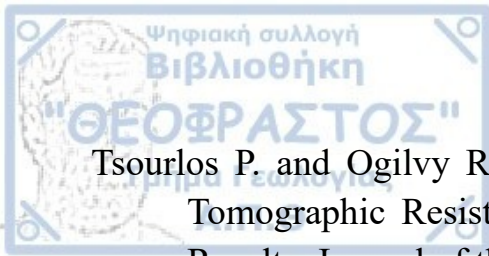
Φωτιάδης Γ.,2021 ,Μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας και ηλεκτρικής τομογραφίας σε θέση εμφάνισης διασταλαζόντων από χώρο απόθεσης ιζημάτων , Διπλωματική εργασία Τμήματος Γεωλογίας Τομέας Γεωφυσικής

Constable,S C.Parker, and C.G Constable (1987). Occam’s inversion – A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, Geophysics, 52 (03), 289–300.

Kim J-H, 2010. Dc2Dpro - 2D Inversion of ERT data. User's Manual, KIGAM, KOREA

Kim J-H, Yi M.J 2010. Dc3Dpro - 3D Inversion of ERT data. User's Manual, KIGAM, KOREA

Tsourlos P. (1995). Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Data. D.Phil Thesis, University of York (315 p.).



Tsourlos P. and Ogilvy R. (1998). An algorithm for the 3-D Inversion of Tomographic Resistivity and Induced Polarisation data: Preliminary Results. Journal of the Balkan Geophysical Society, 2, 30-45.

Tsourlos P., Szymanski J. and Tsokas G. (1999). The Effect of Terrain Topography on Commonly Used Resistivity Arrays. Geophysics, 64, 1357-1363.

.Young H. και R.A.Freedman ,Πανεπιστημιακή φυσική ,Εκδόσεις Παπαζήση