



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Εφαρμογή Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας για την διερεύνηση
των υπεδαφικών συνθηκών στη θέση θεμελίωσης του νέου κτιρίου
των Ερευνητικών Εργαστηρίων της Οδοντιατρικής Σχολής του ΕΚΠΑ*



Ασπασία Χαραλαμποπούλου

Επίβλεψη: Ιωάννης Αλεξόπουλος

Αθήνα, 2023

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	i
Πρόλογος.....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract.....	ii
1. Εισαγωγή - Περιοχή μελέτης.....	1
1.1. Γεωλογικό πλαίσιο.....	1
1.2. Γεωλογικές συνθήκες περιοχής μελέτης.....	4
2. Γεωηλεκτρική διασκόπηση.....	12
2.1. Διάδοση ηλεκτρικού ρεύματος.....	12
2.1.1. Ηλεκτρική (Ωμική) αγωγιμότητα.....	12
2.1.2. Ηλεκτρολυτική Αγωγιμότητα.....	12
2.1.3. Διηλεκτρική Αγωγιμότητα.....	13
2.2. Ωμική αντίσταση & ηλεκτρική ειδική αντίσταση.....	13
2.3. Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	14
2.4. Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	15
2.4.1. Διάταξη δίπολου-δίπολου (dipole-dipole).....	15
2.4.2. Διάταξη Wenner.....	16
2.4.3. Διατάξη Schlumberger.....	16
2.5. Κατακόρυφη και πλευρική ερευνά μεταβολής της <i>ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης</i>	17
2.6. Πηγές Θορύβου.....	19
2.6.1. Τελλουρικά Ρεύματα (Telluric Currents).....	19
2.6.2. Παρουσία γειτονικών αγωγών.....	19
2.6.3. Μικρή ειδική αντίσταση κοντά στην επιφάνεια.....	19
2.6.4. Επαγωγή του ρεύματος.....	19
2.7. Επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων (Λογισμικό RES2DINV).....	19
2.7.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	20
2.7.2. Μορφή αρχείου δεδομένων (Data file format).....	21
2.7.3. Δεδομένα τοπογραφίας για index based data format.....	22
2.7.4. Επεξεργασία δεδομένων.....	23
3. Γεωφυσική έρευνα πεδίου.....	32
3.1. Εργασίες πεδίου.....	32
3.1.1. Τεχνική ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ERT.....	32
3.1.2. Τοπογραφική Αποτύπωση του Πεδίου Μετρήσεων.....	35
3.2. Παρουσίαση γεωφυσικών αποτελεσμάτων.....	35
4. Γεωλογική Αξιολόγηση και Συμπεράσματα.....	38
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	41

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και αξιολόγησης των γεωλογικών – γεωφυσικών ερευνών που πραγματοποιήθηκαν στη θέση θεμελίωσης νέου κτιρίου των Ερευνητικών Εργαστηρίων της Οδοντιατρικής Σχολής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, επί των οδών Θηβών & Μικράς Ασίας, στην περιοχή Γουδή.

Στόχος της έρευνας, που ανατέθηκε από την Τεχνική Υπηρεσία του ΕΚΠΑ, ήταν η διερεύνηση των υπεδαφικών συνθηκών, η ανεύρεση του σχιστολιθικού υποβάθρου καθώς και στόχων οι οποίοι θα δημιουργούσαν προβλήματα στην θεμελίωση του έργου.

Η ανάθεση και επίβλεψη αυτής της εργασίας έγινε από τον Αλεξόπουλο Ιωάννη, αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Τον ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε, τις επιστημονικές συζητήσεις μας, τις επισημάνσεις του και τις παροτρύνσεις του σε θέματα οργάνωσης, εκτέλεσης, επεξεργασίας και παρουσίασης θεμάτων εφαρμοσμένης γεωφυσικής. Η καθοδήγηση και η μεταδοτικότητα του αποτέλεσαν σημαντική πηγή γνώσεων και εμπειρίας. Περισσότερο όμως τον ευχαριστώ για την έμπνευση που μου έδωσε ώστε να αγαπήσω τη γεωλογία και τις εφαρμοσμένες γεωεπιστήμες σε μία δύσκολη περίοδο εξ αποστάσεως εκπαίδευσης και αναπροσαρμογής.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τους Σπύρο Δίλαλο, Δρ. γεωλόγο-γεωφυσικό και Γεωργία Μήτσικα, γεωλόγο MSc, επιστημονικούς συνεργάτες του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, για τις υποδείξεις και την επικουρία τους στις μετρήσεις πεδίου, καθώς και τους μεταπτυχιακούς φοιτητές, Ιωάννη Γιαννόπουλο και Βασίλη Γκόσιο, για την πολύτιμη συνεργασία στις εργασίες πεδίου και για τη βοήθειά και καθοδήγηση τους στην επεξεργασία δεδομένων.

Τέλος οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την υποστήριξή τους σε όλα αυτά τα χρόνια φοίτησής μου. Η στήριξη και η θετική τους ενέργεια ήταν και είναι πολύτιμη για εμένα.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μέρος της γεωτεχνικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε για την επικείμενη κατασκευή του νέου τετραώροφου κτιρίου της Οδοντιατρικής Σχολής, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, στον σημερινό υπαίθριο χώρο στάθμευσης της Σχολής στο Γουδί. Η γεωλογική ενότητα που επικρατεί ως υπόβαθρο στο πεδίο έρευνας, είναι η ήπιας μεταμόρφωσης υποενότητα του Αλεποβουνίου και συγκεκριμένα ο σχηματισμός των «Σχιστόλιθων Αθηνών».

Η γεωτεχνική μελέτη χωρίζεται σε δύο φάσεις, με διαφορετικούς επιστημονικούς συντελεστές η κάθε μία. Συνολικά έχουν εκτελεστεί οκτώ (8) δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, οι λιθολογικές στήλες των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικά, μαζί με τις μετρήσεις στάθμης που πραγματοποιούνται σε δύο από αυτές.

Στην Β' φάση της γεωτεχνικής μελέτης (Ιανουάριος 2022), εκτελέσθηκε και η εκτεταμένη επιφανειακή γεωφυσική έρευνα για τη διερεύνηση των υπεδαφικών συνθηκών, τμήμα της οποίας αποτελεί η παρούσα εργασία. Εκτελέσθηκε γεωηλεκτρική διασκόπηση, με εφαρμογή της τεχνικής της *γεωηλεκτρικής τομογραφίας (electrical resistivity tomography - ERT)*. Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη *διπόλου-διπόλου (dipole-dipole)*, με την υλοποίηση τριών (3) γεωηλεκτρικών τομογραμμάτων, συνολικού μήκους 130 μέτρων και βάθους διασκόπησης περίπου 5 μέτρα. Η τοπογραφική αποτύπωση των γεωφυσικών μετρήσεων και λοιπών θέσεων ενδιαφέροντος στο πεδίο έρευνας, πραγματοποιήθηκε με διαφορικό δέκτη *GNSS (Global Navigation Satellite System)*.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των γεωφυσικών μετρήσεων αναδεικνύουν τιμές *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* στην περιοχή ανέγερσης του κτιρίου μεταξύ 60-150 Ωm , με εξαίρεση την παρουσία ενός ιδιαίτερα αντιστατικού στόχου ($>500 \Omega\text{m}$) κοντά στο νότιο άκρο του υπαίθριου χώρου.

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων, με τα ευρήματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, οι χαμηλές τιμές *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* που διερευνώνται αποδίδονται στην ύπαρξη των παλαιών τεχνητών επιχώσεων. Ο αντιστατικός στόχος που διερευνήθηκε στον νότιο τμήμα του πεδίου μελέτης, αξιολογείται ως πιθανός 'κενός χώρος', πχ μία τεχνητή υπόγεια στοά ή παλαιές, πολύ αδρομερείς, ανθρώπινες αποθέσεις με μεγάλα κενά (μπάζα μη συμπυκνωμένα). Τέλος, με την παρούσα τεχνική, δεν κατέστη δυνατός ο εντοπισμός του 'βραχώδους' σχιστολιθικού υπόβαθρου και του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς το πεδίο έρευνας δεν επιτρέπει μεγαλύτερο ανάπτυγμα της τεχνικής.

Abstract

This thesis presents a part of the geotechnical study carried out for the upcoming construction site of the new four-storey building of the School of Dentistry, of the National and Kapodistrian University of Athens, in the current outdoor parking area of the School in Goudi, Athens. The geological unit prevailing as substratum in the field of research is the mild-metamorphic sub-unit Alepovouniou and specifically the formation of the "Athenian Schist".

The geotechnical study is divided into two phases, each with different scientific contributors. In total, eight (8) sampling boreholes have been carried out, the lithological columns of which are presented in detail, along with the aquifer level measurements that are performed on two of them.

In phase B' of the geotechnical study (January 2022), an extended surface geophysical survey was also carried out to investigate the subsurface conditions, part of which is the present work. The Electrical

resistivity tomography (ERT) technique was performed, using the dipole-dipole array, with the implementation of three (3) geoelectric tomograms, of a total length of 130 meters and an investigation depth of about 5 meters. The topographical correction of all the geophysical measurements and other points of interest in the research field was carried out using a GNSS (Global Navigation Satellite System) receiver. The results of processing of the geophysical measurements reveal values of specific electrical resistivity in the area between 60-150 Ωm , where the building is being constructed, with the exception of the presence of a particularly resistant target ($>500 \Omega\text{m}$) near the southern end of the outdoor space. Combining the results of the geophysical measurements with the findings of the sampling boreholes, the low values of specific electrical resistivity investigated are attributed to the existence of old artificial deposits. The resistant target investigated in the southern part of the study area is evaluated as a possible "void space", for example an artificial underground gallery or old, very poorly consolidated, human deposits with large voids (uncompacted deposits). Finally, with the current technique, it was not possible to locate the solid schist bedrock and the aquifer level, as the free space of the research area is limited for the further development of the technique.

1. Εισαγωγή - Περιοχή μελέτης

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται στο πλαίσιο της επικείμενης κατασκευής του νέου τετραώροφου κτιρίου της Οδοντιατρικής σχολής στη θέση του σημερινού χώρου στάθμευσης. Η περιοχή βρίσκεται στο Γουδή και περικλείεται από τις οδούς: Φειδιππίδου-Θηβών, Μικράς Ασίας, Αγίου Θωμά και Τετραπόλεως.



Εικόνα 1.1. Άποψη από Google Earth του χώρου ανέγερσης του κτιρίου.

Ο χώρος στάθμευσης όπου πραγματοποιήθηκε η μελέτη έχει διεύθυνση Β.ΒΑ-Ν.ΝΔ. και περικλείεται από δέντρα κατά μήκος της γωνίας των οδών Θηβών και Μικράς Ασίας.

Είναι ένας περιφραγμένος χώρος και εκτός περιφραξης υπάρχει μεγάλη έκταση πεζοδρόμιο (Εικ. 1.1). Επίσης γύρω από την εκκλησία του Αγίου Αντύπα και του εργαστηρίου ιατροδικαστικής και τοξικολογίας έχει γίνει επίστρωση με σκυρόδεμα.

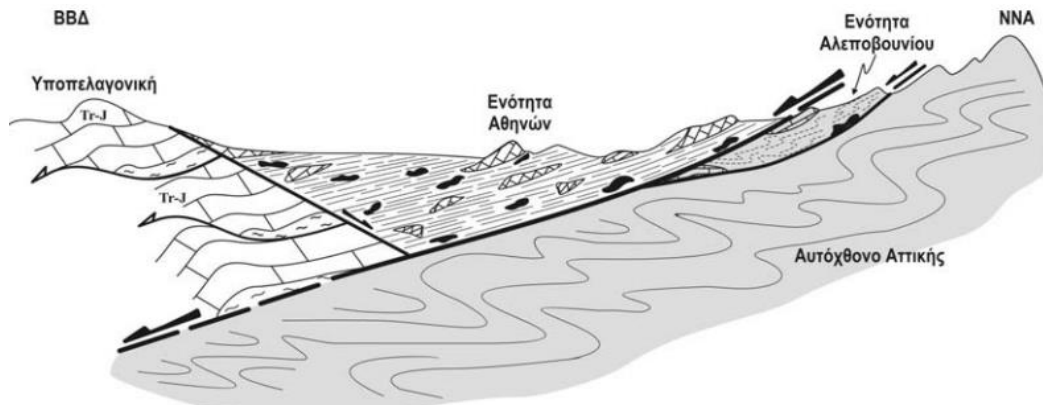
1.1. Γεωλογικό πλαίσιο

Η περιοχή μελέτης είναι αρκετά περιορισμένη σε έκταση, καθώς πρόκειται για έναν χώρο στάθμευσης. Επομένως πληροφορίες για τη γεωλογία του χώρου, μπορεί κανείς να αντλήσει από την γεωλογία της ευρύτερης περιοχής και από ευρήματα γεωτρητικών εργασιών, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Οι «**Σχιστόλιθοι Αθηνών**», είναι μία πολύπλοκη ενότητα και αποτελεί το υπόβαθρο της περιοχής μελέτης. Σύμφωνα με τους Παπανικολάου *et al.* 2004, οι «Σχιστόλιθοι των Αθηνών» δεν είναι μία μόνο ενότητα.

Στην πραγματικότητα μπορεί κανείς να διακρίνει δύο ενότητες, η **υπερκείμενη αμεταμόρφωτη ενότητα των Αθηνών** και η **υποκείμενη ενότητα του Αλεποβουνίου ήπιας μεταμόρφωσης**. Η κάθε ενότητα αποτελείται από δύο επί μέρους σχηματισμούς.

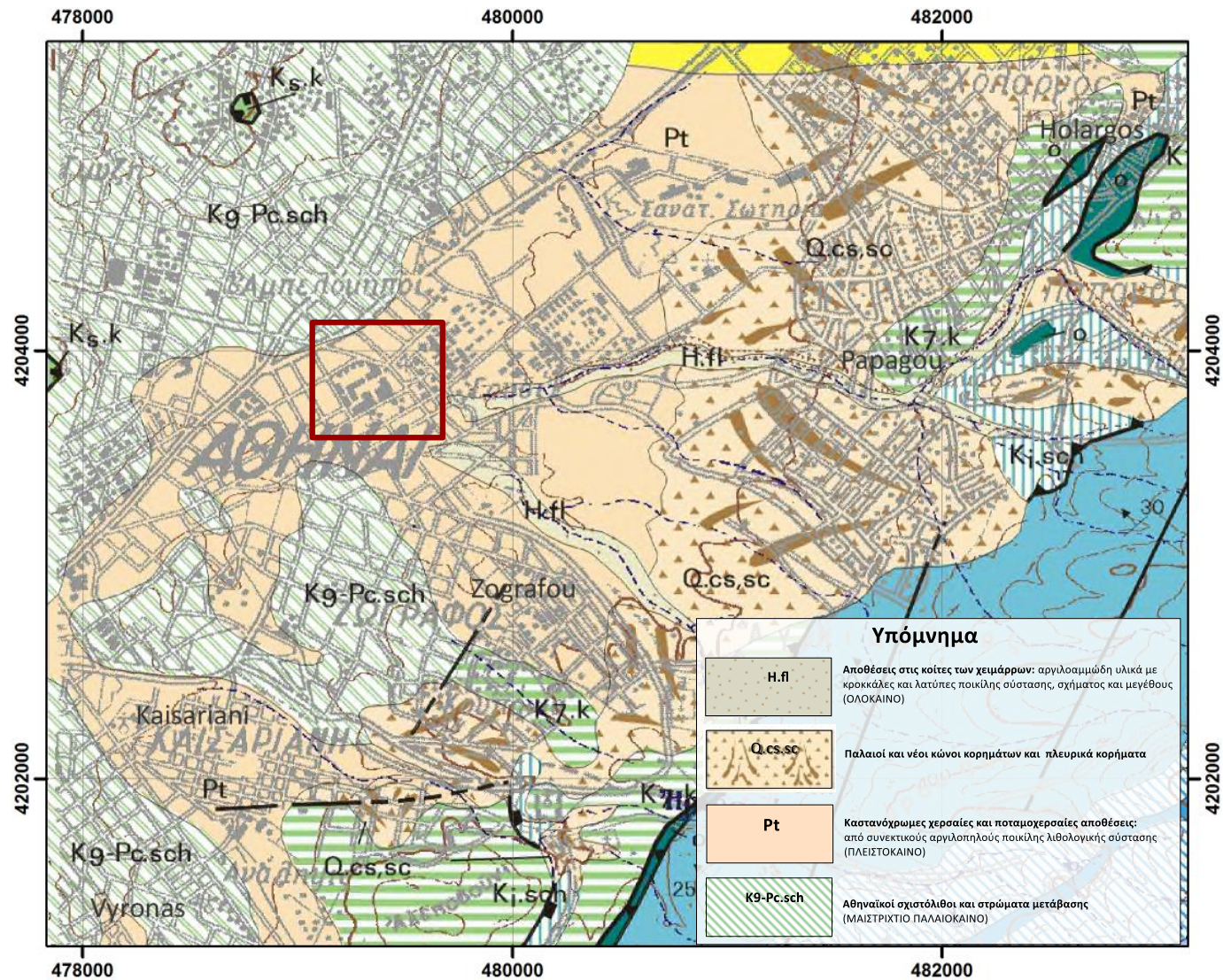
Η περιοχή μελέτης, φαίνεται να έχει ως υπόβαθρο την ενότητα Αλεποβουνίου. Η ενότητα αυτή, συναντάται στα ανατολικά προάστια του λεκανοπεδίου, στους πρόποδες του Υμηττού δυτικά. Τεκτονικά βρίσκονται ως σφήνα μεταξύ του υποκείμενου μεταμορφωμένου υποβάθρου του Υμηττού και της υπερκείμενης ενότητας Αθηνών (Εικ. 1.2). Την ενότητα συνθέτουν κυρίως δύο μεταμορφωμένες λιθολογικές ακολουθίες. Η υπερκείμενη ακολουθία αποτελείται από συμπαγείς άστρωτους έως παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους κρυσταλλικού χαρακτήρα με λευκό έως ερυθρίζον ή φαιοκαστανό χρώμα.



Εικόνα 1.2. Σχηματική απεικόνιση της τεκτονικής σφήνας της ενότητας «Αλεποβούνι» (Παπανικολάου *et al.* 2004)

Η υποκείμενη ακολουθία αποτελείται από στρώματα σχιστομαργών και φυλλιτών, καθώς επίσης και από μεταψαμμίτες. Στην τεκτονική επαφή μεταξύ των δύο ακολουθιών, παρατηρούνται έντονες πτυχώσεις και σχιστότητα στους φυλλίτες. Επίσης στην επαφή των ακολουθιών παρεμβάλλονται πλακώδεις ασβεστόλιθοι τεφρού ή καστανού χρώματος, όπως και χαλαζίτες ερυθρού ή κιτρινωπού χρώματος.

Ακολουθεί ο χάρτης της γεωλογίας της ευρύτερης περιοχής (Εικ. 1.3)

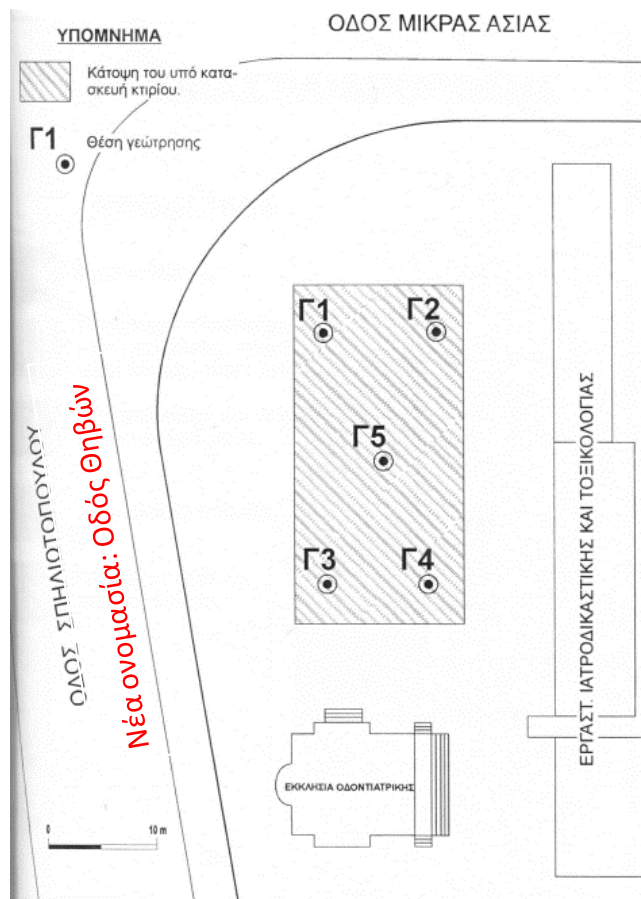


Εικόνα 1.3. Γεωλογικός χάρτης Μεσογείων Αττικής Ελλάδος (Φύλλα Κορωπί-Πλάκα). Με κόκκινο πλαίσιο επισημαίνεται η περιοχή ενδιαφέροντος.

1.2. Γεωλογικές συνθήκες περιοχής μελέτης

Για την υλοποίηση του έργου που βρίσκεται σε εξέλιξη στον χώρο στάθμευσης, έχουν πραγματοποιηθεί **δύο (2) φάσεις γεωτεχνικών μελετών** με διαφορετικούς επιστημονικούς συντελεστές.

Η **Α' φάση γεωτεχνικών μελετών πραγματοποιήθηκε το 2004** στο πλαίσιο της οποίας εκτελέστηκαν πέντε (5) δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, τα βάθη των οποίων ολοκληρώνονται αντίστοιχα: Γ1=20,0 m, Γ2=19,1 m, Γ3=19,2 m, Γ4=18,0 m και Γ5=20,0 m. Οι θέσεις των γεωτρήσεων παρουσιάζονται στο σκαρίφημα της εικόνας 1.4 από Καροτσιέρης *et al.* 2004.



Εικόνα 1.4. Θέσεις γεωτρήσεων Α' φάσης (2004), σε σχέση με την κάτοψη του υπό κατασκευή κτιρίου (Καροτσιέρης *et al.* 2004)

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα ευρήματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων της Α' φάσης γεωτεχνικής μελέτης.

Την περιοχή δομούν επιφανειακοί εδαφικοί σχηματισμοί, οι οποίοι υπέρκεινται του βραχώδους υποβάθρου. Οι σχηματισμοί αυτοί (πάχος περίπου ένα μέτρο) χαρακτηρίζονται ως τεχνητές επιχώσεις που υπέρκεινται των πλειστοκαινικών αποθέσεων. Το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης (Αθηναϊκός σχιστόλιθος) εμφανίζεται περίπου στα 12 μέτρα βάθος από την επιφάνεια.

Πίνακας 1.1. Αποτελέσματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων Γ1-Γ5 (Καροτσιέρης <i>et al.</i> 2004)				
α/α γεώτρησης	Αριθμός στρωμάτων	Βάθος		Περιγραφή
		Από (m)	Έως (m)	
Γ1	1	0,0	3,4	Επιχωματώσεις (υλικά όπως τούβλα, κεραμίδια)
	2	3,4	10,0	Πλειστοκαινικές αποθέσεις
	3	10,0	20,0	Αθηναϊκός σχιστόλιθος
Γ2	1	0,0	0,95	Επιχωματώσεις
	2	0,95	12,5	Πλειστοκαινικές αποθέσεις
	3	12,5	19,1	Αθηναϊκός σχιστόλιθος
Γ3	1	0,0	0,8	Επιχωματώσεις
	2	0,8	8,4	Πλειστοκαινικές αποθέσεις
	3	8,4	11,2	Άργιλος μεγέθους άμμου-χαλικιού
	4	11,2	19,2	Αθηναϊκός σχιστόλιθος
Γ4	1	0,0	0,25	Επιχωματώσεις
	2	0,25	9,0	Πλειστοκαινικές αποθέσεις
	3	9,0	11,0	Άργιλος
	4	11,0	13,5	Πλειστοκαινικές αποθέσεις
	5	13,5	18,0	Αθηναϊκός σχιστόλιθος
Γ5	1	0,0	0,5	Επιχωματώσεις
	2	0,5	11,0	Πλειστοκαινικές αποθέσεις
	3	11,0	20,0	Αθηναϊκός σχιστόλιθος

Στην δορυφορική εικόνα του 2007 που παρουσιάζεται παρακάτω (Εικ. 1.5) αποτυπώνεται ο χώρος στάθμευσης που καλύπτεται ακόμα από σκυρόδεμα γεγονός που αποδεικνύει πως στα τρία χρόνια που μεσολάβησαν από την γεωτεχνική μελέτη, δεν είχε πραγματοποιηθεί κάποια εργασία στον χώρο στάθμευσης.

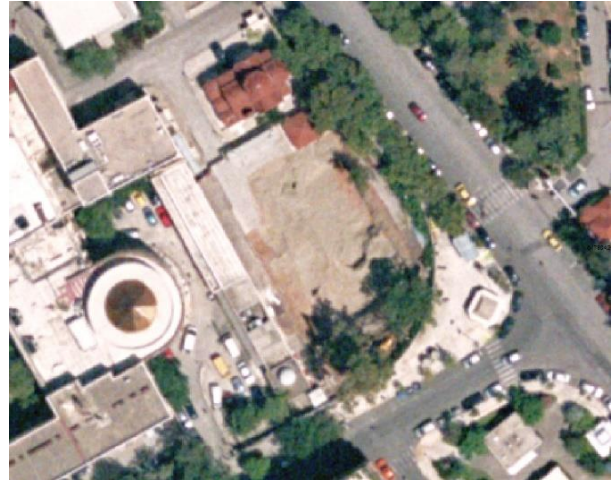
Το 2010, ξεκίνησε η διαδικασία της εκσκαφής, με σκοπό τη θεμελίωση του κτιρίου. Στην εικόνα 1.6 είναι σαφές ότι η περιοχή έχει υποστεί εκσκαφή. Ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνεται το έδαφος στην εικόνα, δείχνει τη διαδρομή που ακολούθησαν τα οχήματα εκσκαφής. Φαίνεται λοιπόν ότι η είσοδος των οχημάτων έγινε από την οδό μικράς Ασίας, πλησίον του εργαστηρίου ιατροδικαστικής και τοξικολογίας του ΕΚΠΑ. Τα όρια της εκσκαφής αυτής αποτυπώνονται στον χάρτη της εικόνας 1.13.

Το έργο όμως ματαιώθηκε και αποφασίστηκε από το ΕΚΠΑ η επίχωση της εκσκαφής και η δημιουργία εκ νέου του χώρου στάθμευσης, όπου λαμβάνει τη σημερινή του εικόνα (Εικ. 1.1).

Δώδεκα (12) χρόνια αργότερα το έργο επανενεργοποιείται και **το 2022 η Β' φάση της γεωτεχνικής μελέτης**, με διαφορετικούς επιστημονικούς συντελεστές.



Εικόνα 1.5. Ο χώρος εκσκαφής το 2007 όπως αποτυπώνεται σε απόσπασμα δορυφορικής εικόνας από το Κτηματολόγιο.



Εικόνα 1.6. Ο χώρος εκσκαφής το 2010 όπως αποτυπώνεται σε απόσπασμα δορυφορικής εικόνας από το Κτηματολόγιο.

Σε αυτή τη φάση εκτελέστηκαν τρεις (3) νέες δειγματοληπτικές γεωτρήσεις με περιστροφικό γεωτρήσιμο τύπου Boyles σε αυτόνομο τροχοφόρο όχημα. Αναλυτικότερα:

- Η γεώτρηση **Γ6** (Εικ. 1.7 & 1.8), τοποθετείται πλησίον του ιερού ναού «Άγιος Αντύπας». Η διαδικασία απόληψης δείγματος ήταν συνεχής και το βάθος ολοκλήρωσής της είναι τα 15 m.



Εικόνα 1.7. Θέση δειγματοληπτικής γεώτρησης Γ6 .



Εικόνα 1.8. Δείγματα από το βάθος των 10 – 15 m για την γεώτρηση Γ6.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.2 το βάθος στο οποίο συναντάται το συμπαγές υπόβαθρο (Αθηναϊκός σχιστόλιθος), είναι τα 11,2 m. Οι επιφανειακοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως ανθρωπογενείς επιχώσεις, λόγω της παλαιάς εκσκαφής και ολοκληρώνονται στα 8,3 m.

Πίνακας 1.2. Αποτελέσματα δειγματοληπτικής γεώτρησης Γ6 (Κρητσωτάκης et.al. 2022).

	Αριθμός στρωμάτων	Βάθος		Περιγραφή
		Από (m)	Έως (m)	
Γεώτρηση Γ6	1	0,0	8,3	Τεχνητές επιχώσεις
	2	8,3	11,2	Ιλυώδης άργιλος με άμμο
	3	11,2	15,0	Αθηναϊκός σχιστόλιθος κατακερματισμένος

Για την γεώτρηση Γ6 πραγματοποιείται, έως και το διάστημα που συγγράφεται η παρούσα εργασία, συστηματική μέτρηση κάθε 15 ημέρες της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα με σταθμήμετρο (βλ. αναλυτικά Πίνακα 1.5).

- Η γεώτρηση Γ7 (Εικ. 1.9 & 1.10) τοποθετείται νοτιοανατολικά της γεώτρησης Γ6 κοντά στην περίφραξη του χώρου. Το υπόβαθρο συναντάται στο βάθος των 14,5 m (Πίνακας 1.3), ενώ ο σχηματισμός των τεχνητών επιχώσεων ολοκληρώνεται στα 8,2m. Στη συγκεκριμένη γεώτρηση δε πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα και το συνολικό της βάθος της είναι 19,6 m.



Εικόνα 1.9. Θέση δειγματοληπτικής γεώτρησης Γ7.

Εικόνα 1.10. Δείγμα από τον αθηναϊκό σχιστόλιθο.

Πίνακας 1.3. Αποτελέσματα δειγματοληπτικής γεώτρησης Γ7 (Κρητσωτάκης *et al.* 2022).

	Αριθμός στρωμάτων	Βάθος		Περιγραφή
		Από (m)	Έως (m)	
Γεώτρηση Γ7	1	0,0	8,2	Τεχνητές επιχώσεις.
	2	8,2	14,5	Ιλυοαργιλώδης άμμος.
	3	14,5	19,6	Αθηναϊκός σχιστόλιθος.

- Η γεώτρηση Γ8 (Εικ. 1.11 & 1.12, τοποθετείται στο νότιο τμήμα του χώρου στάθμευσης και πλησίον του εργαστηρίου ιατροδικαστικής και τοξικολογίας. Η θέση της γεώτρησης Γ8 είναι σημαντική, καθώς από αυτήν την θέση διέρχονται τομές που αφορούν στη γεωφυσική έρευνα (αναλυτικά στο Υποκεφ. 3.1). Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να συνδυάσουμε την γεωλογική πληροφορία με τα γεωφυσικά δεδομένα.



Εικόνα 1.11. Θέση δειγματοληπτικής γεώτρησης Γ8.

Εικόνα 1.12. Δείγμα Αθηναϊκού σχιστόλιθου από τη γεώτρηση Γ8 10-15,4m

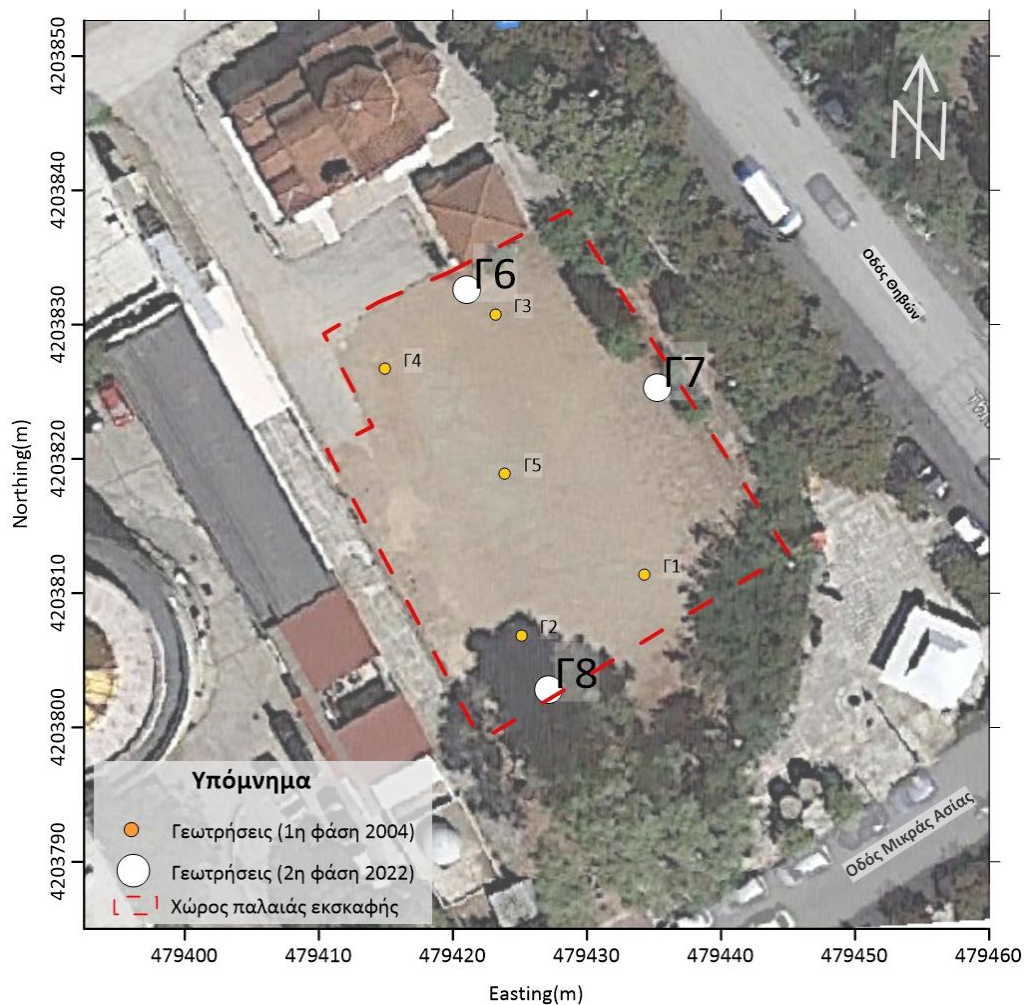
Ο επιφανειακός σχηματισμός είναι επίσης τεχνητές επιχώσεις και ολοκληρώνεται στα 8,7 m, ενώ ο σχηματισμός του υποβάθρου εμφανίζεται στα 13 m (βλ. Πίνακα 1.4). Το συνολικό βάθος της γεώτρησης Γ8 είναι 15,4 m.

Πίνακας 1.4. Αποτελέσματα δειγματοληπτικής γεώτρησης Γ8 (Κρητσωτάκης *et al.* 2022)

	Αριθμός στρωμάτων	Βάθος		Περιγραφή
		Από (m)	Έως (m)	
Γεώτρηση Γ8	1	0,0	8,7	Τεχνητές επιχώσεις
	2	8,7	13,0	Αργιλώδεις χάλικες με άμμο έως αργιλώδης άμμος (Μανδύας αποσάθρωσης Αθηναϊκού Σχιστόλιθου)
	3	13,0	15,4	Αθηναϊκός σχιστόλιθος κατά τόπους εδαφοποιημένος

Στη συγκεκριμένη γεώτρηση, γίνεται επίσης συστηματική μέτρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (Πίνακας 1.5).

Λαμβάνοντας, με υψηλής ακρίβειας δέκτη **παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος πλοήγησης (GNSS)** τις συντεταγμένες των γωνιών της εκκλησίας του «Άγιου Αντύπα» (βλ. παράγραφο 3.1), κατέστη δυνατή η τοπογραφική χωροθέτηση των θέσεων των πέντε (5) γεωτρήσεων (Γ1 έως Γ5) της Α΄ φάσης γεωτεχνικής μελέτης. Με την ίδια μεθοδολογία ελήφθησαν επίσης **επι τόπου**, οι συντεταγμένες των θέσεων των τριών (3) γεωτρήσεων της Β΄ φάσης γεωτεχνικής μελέτης. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιήθηκαν στην κατασκευή χάρτη γεωτρήσεων και παρουσιάζονται στον χάρτη της εικόνας 1.13.



Εικόνα 1.13. Χάρτης του χώρου στάθμευσης με τις θέσεις των παλαιών (πορτοκαλί) και νέων (λευκό) γεωτρήσεων και το περίγραμμα της παλαιάς εκσκαφής (κόκκινη εστιγμένη γραμμή).

Όπως φαίνεται από τον χάρτη, οι γεωτρήσεις της Β΄ φάσης της γεωτεχνικής μελέτης, τοποθετούνται εξωτερικά των γεωτρήσεων της Α΄ φάσης. Εντούτοις, όλες οι γεωτρήσεις ευρίσκονται εσωτερικά του πλαισίου που οριοθετεί τον παλαιό χώρο εκσκαφής.

Τα ευρήματα και των οκτώ δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, έρχονται να επιβεβαιώσουν τη γεωλογία της περιοχής στο υπόβαθρο, αλλά και να δώσουν στοιχεία για τους υπερκείμενους σχηματισμούς.

Οι σχηματισμοί από τους οποίους αποτελείται η περιοχή του έργου, αξιολογήθηκαν ως προς τον βαθμό της υδροπερατότητάς τους. Έτσι, σύμφωνα με τη γεωτεχνική μελέτη της Β΄ φάσης, οι τεχνητές επιχώσεις, όπως και ο μανδύας αποσάθρωσης (με τη μορφή αμμωδών χαλικιών), χαρακτηρίζονται ως διαπερατοί σχηματισμοί. Ως ημι-διαπερατοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται τα αλλουβιακά ριτίδια (πιο λεπτόκοκκου

χαρακτήρα ή κατακερματισμένα λατυποπαγή). Τα συμπαγή αλλουβιακά ριπίδια (συμπαγή λατυποπαγή και αργιλόλιθοι, ιλυόλιθοι), όπως επίσης και ο αθηναϊκός σχιστόλιθος, χαρακτηρίζονται ως σχηματισμοί με μικρή περατότητα (Κρητσωτάκης *et al.* 2022).

Λαμβάνοντας υπόψιν τους παραπάνω χαρακτηρισμούς, αλλά και τη σειρά ακολουθίας αυτών των σχηματισμών, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα φαίνεται να αναπτύσσεται εντός των μεταλλικών ιζημάτων και του βραχώδους αθηναϊκού σχιστόλιθου. Τα αποτελέσματα από τις επί τόπου συστηματικές μετρήσεις της στάθμης (Εικ. 1.14) για τις γεωτρήσεις Γ6 και Γ8 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.5.

Πίνακας 1.5 Στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στις γεωτρήσεις Γ6 και Γ8 (από επιφάνεια, σε μέτρα)

Γεώτρηση	08/02/22	14/02/22	20/03/22	03/03/22	15/03/22	02/04/22	29/04/22	31/05/22
Γ6	11,05	11,06	11,07	11,10	11,18	11,23	11,35	11,45
Γ8	10,00	10,09	10,13	10,19	10,22	10,25	10,38	10,42
Γεώτρηση	30/06/22	22/07/22	06/09/22	07/10/22	07/11/22	1/12/22	28/12/22	1/2/23
Γ6	11,53	11,58	11,58	11,56	11,58	11,60	11,63	11,62
Γ8	10,49	10,60	10,48	10,48	10,48	10,53	10,52	10,38



Εικόνα 1.14. Μέτρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στη γεώτρηση Γ8.

Συνοψίζοντας, από τις γεωτρήσεις της Α' φάσης (2004) παρατηρείται ότι υπάρχει ένα πολύ λεπτό στρώμα από επιχωματώσεις, με εξαίρεση την γεώτρηση Γ1 όπου το στρώμα έχει ένα πάχος της τάξης των τριών (3) μέτρων (Πίνακας 1.1). Επομένως, φαίνεται ότι στο παρελθόν, πραγματοποιήθηκε ανθρώπινη παρέμβαση στη περιοχή, με τη θέση της γεώτρησης Γ1 να αποτελεί έναν κενό χώρο ρίψης. Ακολουθεί ο σχηματισμός των πλειστοκαινικών αποθέσεων, πάχους περίπου 9-10 μέτρων με την παρεμβολή ενός αργιλικού σχηματισμού. Οι γεωτρήσεις ολοκληρώνονται με την εμφάνιση του αθηναϊκού σχιστόλιθου ως υπόβαθρο της περιοχής.

Οι γεωτρήσεις τις Β' φάσης (2022), παρουσιάζουν την ίδια υπεδαφική κατάσταση με εκείνες της Α' Φάσης.

Ανακεφαλαιώνοντας για την περιοχή μελέτης μας η λιθολογία έχει όπως παρακάτω:

- Ένας επιφανειακός σχηματισμός με τεχνητές επιχώσεις πάχους περίπου 8 μέτρα, όσο και η εκσκαφή του 2010. Επομένως οι άργιλοι και οι πλειστοκαινικές αποθέσεις των γεωτρήσεων της Α' Φάσης, δεν υφίστανται.
- Ακολουθεί ένας ενδιάμεσος σχηματισμός από αργιλώδεις χάλικες με άμμο έως αργιλώδης άμμος που αποτελούν τον μανδύα αποσάθρωσης του αθηναϊκού σχιστόλιθου. Αποτελείται από χαλίκια αργιλώδους ή αμμώδους σύστασης και καστανέρυθρου χρώματος. Στη μη εδαφική τους φάση εμφανίζονται ως λατυποπαγή με συνδετικό υλικό ασβεστιτικής και αργιλοαμμώδους σύστασης. Τα υλικά αυτά έχουν προέλευση από τον ορεινό όγκο του Υμηττού και εναλλάσσονται μεταξύ τους.
- Τέλος, ως αλπικό υπόβαθρο της περιοχής, στα 12-13 μέτρα βάθος, εμφανίζεται ο συμπαγής σχηματισμός του αθηναϊκού σχιστόλιθου.

2. Γεωηλεκτρική διασκόπηση

Η γεωηλεκτρική μέθοδος εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1912 από τον Conrad Schlumberger, αξιοποιώντας τους νόμους της φυσικής που διέπουν τον ηλεκτρισμό και κυρίως την διάδοσή του μέσα στους υπεδάφικούς σχηματισμούς.

Η τεχνική της «ενεργούς πηγής» βασίζεται στη διάδοση και διέλευση ελεγχόμενου συνεχούς ή χαμηλής συχνότητας *εναλλασσόμενου ρεύματος* στο υπέδαφος, μέσω δυο μεταλλικών πασσάλων, των **ηλεκτροδίων ρεύματος** και της μέτρησης της δημιουργηθείσας διαφοράς δυναμικού μέσω δύο άλλων, των **ηλεκτροδίων δυναμικού**.

Η διαδικασία αυτή οδηγεί στον υπολογισμό της **ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, ρ** , (*resistivity*), μέσω της ωμικής αντίστασης (*R*).

2.1. Διάδοση ηλεκτρικού ρεύματος

Το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαδοθεί στα πετρώματα με τρεις τρόπους: **τον ηλεκτρονικό (ωμικά), τον ηλεκτρολυτικό, την διηλεκτρική μετάδοση.**

2.1.1. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (ΩΜΙΚΗ) ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Ηλεκτρονική ή ωμική αγωγιμότητα είναι ο συνήθης τρόπος ροής ηλεκτρικού ρεύματος σε υλικά που φέρουν ελεύθερα φορτία, όπως για παράδειγμα ηλεκτρόνια εντός του κρυσταλλικού πλέγματος των μετάλλων. Στα μέταλλα, σε περίπτωση εφαρμογής εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια μπορούν να 'εγκαταλείψουν' το άτομο και να 'ολισθήσουν' μέσα στο πλέγμα. Αυτό τα καθιστά ηλεκτρονικούς **αγωγούς**. Σε πάρα πολλά μη μεταλλικά υλικά όμως, με έμφαση στα κρυσταλλικά, η ενέργεια που απαιτείται για την ενεργοποίηση των μηχανισμών ωμικής αγωγιμότητας είναι τόσο μεγάλη, ώστε να μην λαμβάνει χώρα μετακίνηση φορτίων. Τα υλικά αυτά ονομάζονται **μονωτές**. Τα περισσότερα πυριτικά, ανθρακικά και άλλα κοινά πετρογενετικά ορυκτά και πετρώματα εμπίπτουν σ' αυτήν την κατηγορία.

2.1.2. ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η αγωγιμότητα των *ηλεκτρολυτών* έχει ιδιαίτερη σημασία για τις γεωεπιστήμες. Στους στερεούς ηλεκτρολύτες (ιοντικά κρυσταλλικά πετρώματα), η αγωγιμότητα οφείλεται στην θερμική διέγερση του κρυσταλλικού πλέγματος, η οποία μπορεί να αποδεσμεύσει ιόντα από τις κανονικές τους θέσεις έτσι, ώστε να είναι διαθέσιμα για αγωγή ρεύματος μόλις εφαρμοσθεί εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.

Τα περισσότερα ξηρά ορυκτά και πετρώματα είναι πτωχοί έως κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και σε κανονικές θερμοκρασίες οι ειδικές τους αντιστάσεις θα ήταν εξαιρετικά υψηλές, εάν αυτά δεν ήταν πορώδη και οι πόροι τους πλήρεις ηλεκτρολυτών. Εντός των υγρών ηλεκτρολυτών, το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται με σχετικά βραδύρυθμη κίνηση των ιόντων των διαλυμένων ιοντικών υλικών.

Η σπουδαιότερη για τις γεωεπιστήμες περίπτωση είναι η ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα των υγρών διαλυμάτων, δεδομένου ότι το νερό είναι ο κοινότερος και αφθονότερος φυσικός διαλύτης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ηλεκτρικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών εξαρτώνται άμεσα από την δυνατότητά τους να συγκρατούν νερό στο πορώδες, και από την θερμοκρασία. Σε κανονικές

θερμοκρασίες, οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πορωδών γεωλογικών σχηματισμών καθορίζονται αποκλειστικά από το περιεχόμενο νερό, ακόμη και αυτό είναι ελάχιστο.

2.1.3. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

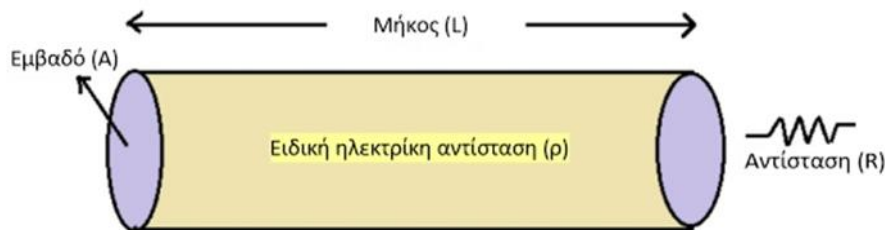
Εάν σε δεδομένο μέσο εφαρμοσθεί εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, τότε εκτός από την ροή ελεύθερων φορτίων (ρεύμα αγωγιμότητας), επέρχεται *πόλωση (polarization)*, δηλαδή εξαναγκασμένη τοπική ανακατανομή δεσμευμένων φορτίων σε νέες θέσεις ισορροπίας, στις οποίες οι μεταξύ τους δυνάμεις Coulomb εξισορροπούν το εξωτερικό πεδίο. Η μετατόπιση αντιθέτων φορτίων $\pm q$ από τις θέσεις ουδέτερης ισορροπίας κατά απόσταση x διεγείρει ηλεκτρική διπολική ροπή με μέτρο $q \cdot |x|$, και φορά από τα θετικά προς τα αρνητικά φορτία, παράγοντας επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο με φορά αντίθετη προς το εφαρμοζόμενο εξωτερικό.

2.2. Ωμική αντίσταση & ηλεκτρική ειδική αντίσταση

Η αντίσταση R δίνεται, συναρτήσει της εφαρμοζόμενης στα άκρα του κυλίνδρου εξωτερικής τάσης V (σε Volt) και του διαρρέοντος ηλεκτρικού ρεύματος I (σε Ampère) στον κύλινδρο μέσω του γνωστού «**νόμου του Ohm**», από την σχέση:

$$R = \frac{V}{I}$$

Η χρήση της μετρούμενης ωμικής αντίστασης ενός σώματος για τον γεωφυσικό χαρακτηρισμό του παρουσιάζει προβλήματα, καθώς αυτή δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το σώμα αλλά και από τη γεωμετρία του. Θεωρώντας ηλεκτρικό αγωγό συγκεκριμένου μήκους και διατομής, αν αυξήσουμε το μήκος του ή ελαττώσουμε τη διατομή του, η μετρούμενη αντίσταση μεταβάλλεται.



Εικόνα 2.1. Σχηματική απεικόνιση της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.

Η **ηλεκτρική ειδική αντίσταση (resistivity)**, ρ , ενός κυλινδρικού στερεού, μήκους L , διατομής A και ολικής ηλεκτρικής αντίστασης R (Εικόνα 2.1) δίδεται από την σχέση:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L}$$

(A μετριέται σε m^2 , L σε m και R σε Ω , η ηλεκτρική ειδική αντίσταση μετριέται σε $\Omega \cdot m$)

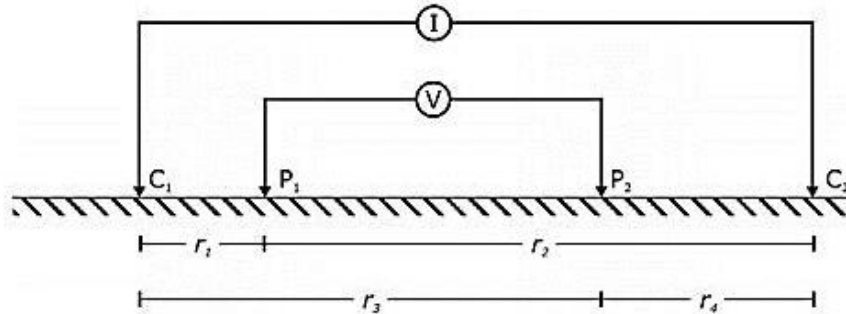
Το αντίστροφο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, ορίζεται η **ειδική αγωγιμότητα (conductivity)**, σ και μετριέται σε Siemens ανά μέτρο (S/m).

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση / ειδική αγωγιμότητα είναι χαρακτηριστικές ιδιότητες του υλικού και ανεξάρτητες του σχήματος ή του μεγέθους του.

2.3. Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Στην παρακάτω εικόνα 2.2, παρουσιάζεται διάταξη τεσσάρων (4) συνευθειακών ηλεκτροδίων ρεύματος-C και δυναμικού-P (Dobrin & Savit, 1988).



Εικόνα 2.2. Διάταξη τεσσάρων συνευθειακών ηλεκτροδίων ρεύματος (C) και δυναμικού (P) (Dobrin & Savit, 1988).

Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται, μεταξύ των ηλεκτροδίων P1 και P2, δίνεται από τη σχέση:

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

Λύνοντας ως προς ρ , προκύπτει:

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

όπου ο παράγοντας K ,

$$K = \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)$$

εξαρτάται από τη γεωμετρία (θέση) της διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και ονομάζεται **γεωμετρικός παράγοντας** ή **γεωμετρικός συντελεστής**.

Όταν το μέσο είναι ομογενές, ομοιόμορφο, ισότροπο και απείρου βάθους, η τιμή της μετρούμενης **ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης** θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη της τιμής του γεωμετρικού παράγοντα K . Αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την ένταση του παρεχόμενου ρεύματος, αν μεταβληθεί η γεωμετρία της διάταξης θα πρέπει να μεταβληθεί ο λόγος

$$K \frac{\Delta V}{I}$$

ώστε να παραμένει πάντα σταθερός και η τιμή ρ πάντα ίδια.

Στην πραγματικότητα όμως, τα γεωλογικά μέσα (πετρώματα / λιθολογίες) είναι κατά το πλείστον ανομοιογενή, ανομοιόμορφα και ανισότροπα, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις της **ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης** να παρουσιάζουν διακυμάνσεις προς διαφορετικές διευθύνσεις λόγω της παραμόρφωσης των **γραμμών ροής ρεύματος** και των **ισοδυναμικών γραμμών** του πεδίου.

Για τον λόγο αυτό, οι τιμές που λαμβάνονται στο πεδίο αναφέρονται ως τιμές φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, ρ_a (apparent resistivity), οι οποίες κατόπιν της επεξεργασίας υπολογίζονται σε τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.

2.4. Διατάξεις ηλεκτροδίων

Στην εφαρμογή της γεωηλεκτρικής μεθόδου στο πεδίο και σε συνάρτηση με τις ανάγκες της έρευνας, εφαρμόζεται συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων. Καθεμία έχει συγκεκριμένο τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων και ανάλογα με τη γεωμετρία τους *μεταβάλλεται η τιμή του γεωμετρικού παράγοντα (K)*.

Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων, εξαρτάται από την υπό διερεύνηση δομή το επίπεδο 'θορύβου' (*noise*) της περιοχής μελέτης και την 'ευαισθησία' (*τεχνικά χαρακτηριστικά-sensitivity*) της γεωηλεκτρικής συσκευής.

Οι πλέον συνήθεις χρησιμοποιούμενες γεωηλεκτρικές τεχνικές μετρήσεων πεδίου, είναι εκείνες της **δίπολου-δίπολου** (*dipole - dipole*), της διάταξης που προτείνει ο **Wenner** και εκείνης που προτείνει ο **Schlumberger**.

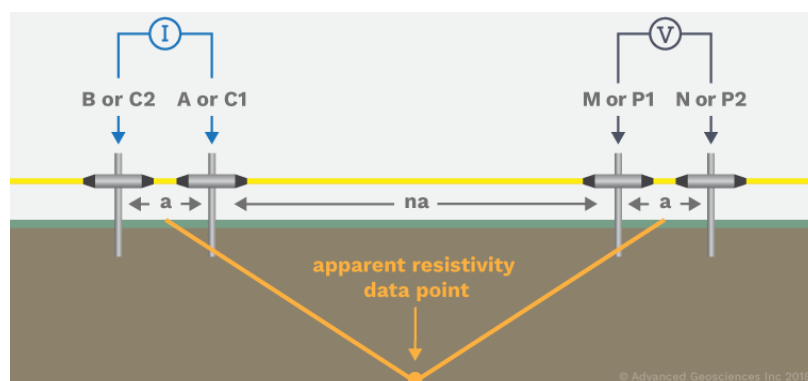
2.4.1. ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ (DIPOLE-DIPOLE)

Η διάταξη *δίπολου-δίπολου* (*dipole-dipole*) χρησιμοποιεί δύο (2) ζεύγη ηλεκτροδίων, ένα (1) ζεύγος ρεύματος και ένα (1) ζεύγος δυναμικού (Εικ. 2.3). Στη γενική περίπτωση της διάταξης *δίπολο-δίπολο* το ζεύγος των ηλεκτροδίων δυναμικού μπορεί να έχει οποιαδήποτε θέση και διεύθυνση σε σχέση με τα ηλεκτρόδια ρεύματος.

Η μετρούμενη εκάστοτε τιμή της *φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης*, παρέχεται από τη σχέση

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I}$$

Το πλεονέκτημα της διάταξης *dipole-dipole* είναι η ευκολία των μετρήσεων υπαίθρου, αφού τα μήκη των απαιτούμενων καλωδίων είναι μικρά. Επίσης, η αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού (σύζευξη) είναι αμελητέα. Στη συγκεκριμένη όμως διάταξη απαιτείται μεγαλύτερη ένταση ρεύματος, απ' αυτή που απαιτείται στις διατάξεις *Schlumberger* και *Wenner*.



Εικόνα 2.3. Τοποθέτηση 4 συνευθειακών ηλεκτροδίων ρεύματος-C και δυναμικού-P για τη διάταξη Dipole-Dipole (<https://www.agiusa.com/>).

Το βάθος διερεύνησης είναι συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των δίπολων, ενώ το σημείο μέτρησης εντοπίζεται στην ενδιάμεση απόσταση των δύο δίπολων. Η διάταξη αυτή είναι χρήσιμη για το εντοπισμό

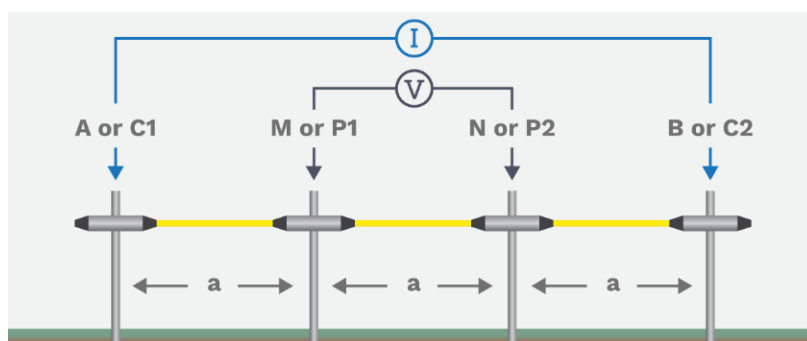
πλευρικών μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε γεωτεχνικές εφαρμογές.

Συνοψίζοντας, η διάταξη *δίπολου-δίπολου* (*dipole-dipole*) παρέχει μία καλή υπεδαφική κάλυψη καθώς και πολύ καλή ευαισθησία στην οριζόντια κατανομή της *ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης*, αλλά επηρεάζεται αρνητικά από τον 'θόρυβο' (*background noise*) της περιοχής μελέτης και έχει έναν χαμηλότερο λόγο *S/N* (*S/N ratio*) από τη διάταξη που προτείνει ο *Wenner* (Hoogervorst, 2006). Είναι συνεπώς μία κατάλληλη τεχνική για τη διερεύνηση (χαρτογράφηση) κατακόρυφων δομών (Ibraheem, 2021).

2.4.2. ΔΙΑΤΑΞΗ WENNER

Στη διάταξη που προτείνει ο *Wenner* χρησιμοποιούνται τέσσερα (4) ηλεκτρόδια που διατάσσονται επί μιας ευθείας, τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση α (Εικ. 2.4) Η μετρούμενη εκάστοτε τιμή της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, παρέχεται από τη σχέση

$$\rho_{\alpha} = 2\pi\alpha \frac{\Delta V}{I}$$



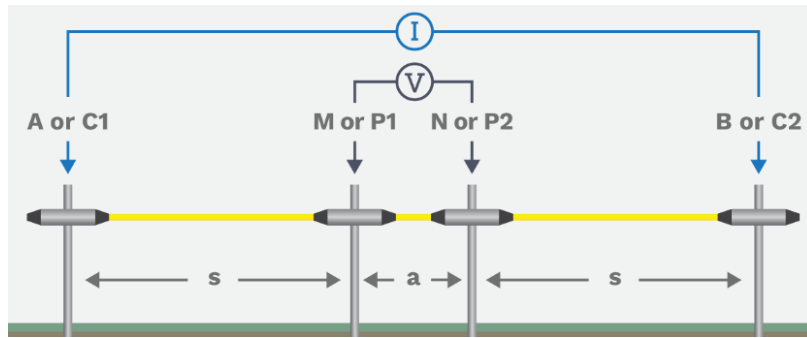
Εικόνα 2.4. Τοποθέτηση 4 ηλεκτροδίων ρεύματος-C και δυναμικού-P για τη διάταξη που προτείνει ο *Wenner* (<https://www.agiusa.com/>)

Η διάταξη *Wenner* θεωρείται η πλέον κατάλληλη επιλογή τεχνικής σε περιοχές με υψηλό 'θόρυβο' (*background noise*), καθώς διαθέτει υψηλό λόγο *S/N* και έτσι παρέχει πολύ αξιόπιστες μετρήσεις (*strong signal strength*).

Είναι συνεπώς μία κατάλληλη τεχνική για τη εξέταση κατακόρυφων μεταβολών της *ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης* και κατά συνέπεια διερεύνηση (χαρτογράφηση) οριζόντιων δομών (Ibraheem, 2021).

2.4.3. ΔΙΑΤΑΞΗ SCHLUMBERGER

Η διάταξη που προτείνει ο *Schlumberger* χρησιμοποιεί τέσσερα (4) ηλεκτρόδια που διατάσσονται επί μιας ευθείας (Εικ. 2.5). Τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος μετακινούνται σε προκαθορισμένες αποστάσεις, και τα δύο δυναμικού παραμένουν σε σταθερή θέση.



Εικόνα 2.5. Τοποθέτηση 4 ηλεκτροδίων ρεύματος-C και δυναμικού-P, για τη διάταξη που προτείνει ο Schlumberger (<https://www.agiusa.com/>)

Το σημείο μέτρησης αντιστοιχίζεται στο μέσον της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η μετρούμενη εκάστοτε τιμή της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, παρέχεται από τη σχέση

$$\rho_a = \pi \frac{(s^2 - a^2) \Delta V}{a I}$$

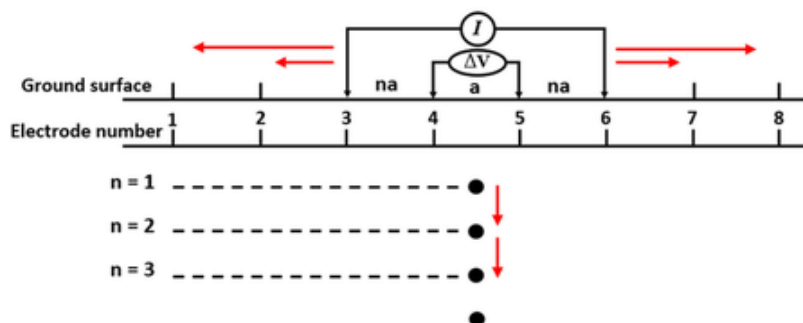
Η διάταξη Schlumberger έχει μέτρια ευαισθησία σε οριζόντιες και κάθετες δομές. Έχει ισχυρότερη ισχύ σήματος (*signal strength*) από τη διάταξη δίπολου-δίπολου, αλλά περισσότερο αδύναμη από τη διάταξη Wenner (Loke, 2020).

Περισσότερες πληροφορίες για τις ιδιότητες των τριών (3) κυρίως τεχνικών, παραθέτουν στις δημοσιεύσεις τους οι Dahlin and Zhou (2003 & 2004).

2.5. Κατακόρυφη και πλευρική ερευνά μεταβολής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης

Διοχετεύοντας ηλεκτρικό ρεύμα (I), από τα δυο ηλεκτρόδια ρεύματος και ταυτόχρονα μετρώντας τη διαφορά δυναμικού (ΔV) από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, υπολογίζεται η ηλεκτρική ειδική αντίστασης (ρ) του υπεδάφικου σχηματισμού.

Αυξάνοντας γενικά τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος, ως προς το μέσο των διατάξεων των Schlumberger και Wenner κυρίως (κέντρο συμμετρίας διάταξης), εκτελείται η **κατακόρυφη διερεύνηση της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης** (*vertical electrical sounding – VES*), δίνοντας την δυνατότητα, μετά την επεξεργασία, να δημιουργηθεί ένα μονοδιάστατο (**1D**) μοντέλο της κατανομής της σε σχέση με το βάθος (Εικ. 2.6).



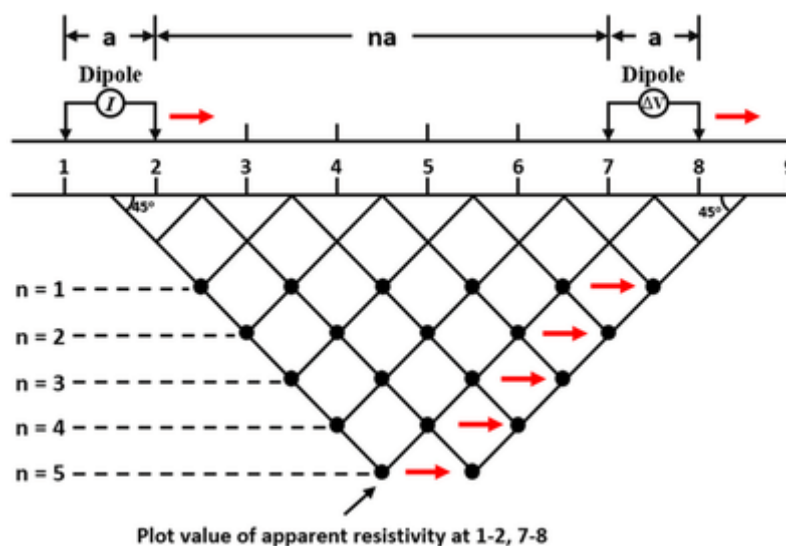
Εικόνα 2.6. Σχηματική απεικόνιση εκτέλεσης της τεχνικής της κατακόρυφης διερεύνησης της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (Widodo et al., 2022)

Η τεχνολογική εξέλιξη των υπολογιστών καθώς και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την γεωηλεκτρική έρευνα, παρείχε τη δυνατότητα γρήγορης λήψης δεδομένων μέσω πολυκαναλικών συστημάτων και συσκευών και επέτρεψαν τον προσδιορισμό της **δισδιάστατης (2D)** ή/και της **τριδιάστατης (3D)** υπεδαφικής διερεύνησης της κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης σε μία περιοχή.

Η **πλευρική διερεύνηση της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης** επιτυγχάνεται εκτελώντας τη **γεωηλεκτρική τομογραφική τεχνική** (*electrical resistivity tomography - ERT*).

Πραγματοποιείται με την εγκατάσταση μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων συννευθεικά, σε ίση οριζόντια απόσταση, κατά μήκος μίας τομής επί του εδάφους (Εικ. 2.7).

Όλα τα ηλεκτρόδια συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας **πολυκαναλικά καλώδια**, που καταλήγουν στη **μονάδα διακοπών**, η οποία επικοινωνεί με την **μονάδα μετρήσεων (resistivity meter)** για τη διαχείριση και καταγραφή της γεωφυσικής πληροφορίας.



Εικόνα 2.7. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας λήψης δεδομένων με την μέθοδο ERT με την τεχνική διπόλου-διπόλου, κατά μήκος μιας γραμμής (Widodo *et al.*, 2022).

Το λογισμικό της μονάδας μετρήσεων επιλέγει αυτόματα τα εκάστοτε τέσσερα (4) ενεργά ηλεκτρόδια που εμπλέκονται σε κάθε μέτρηση, λαμβάνοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των ηλεκτροδίων και της διάταξης που έχει επιλεγεί.

Μετά το πέρας της λήψης όλων των μετρήσεων, δίνεται η δυνατότητα από το λογισμικό διαχείρισης της μεταφοράς και τοποθέτησης τμήματος ή/και του συνόλου των ηλεκτροδίων στο τέλος της αρχικής γραμμής της τομογραφικής διασκόπησης (γραμμικά μεταβαλλόμενη διάταξη - roll along).

Η ταχύτητα λήψης, η πυκνότητα των μετρήσεων και το βάθος διασκόπησης, εξαρτώνται από την απόσταση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων, τον αριθμό που μπορεί να διαχειριστεί ο εξοπλισμός, τη διάταξη και τη μέγιστη απόσταση που μπορούν να απέχουν μεταξύ τους.

Το προκαταρκτικό αποτέλεσμα της μεθόδου, είναι η κατασκευή της ψευδοτομής **φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης** (*measured apparent resistivity pseudo-section*). Η ψευδοτομή αυτή αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της υπεδαφικής δομής. Ο υπολογισμός των (πραγματικών) τιμών των **ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων** πραγματοποιείται αργότερα, μέσω της μαθηματικής διαδικασίας της **αντιστροφής**.

2.6. Πηγές Θορύβου

Πριν προχωρήσουμε στο στάδιο της επεξεργασίας των γεωηλεκτρικών δεδομένων, θα ήταν χρήσιμο να ειπωθούν και λίγα λόγια για τις πηγές θορύβου που μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος, από τις οποίες υπολογίζεται η τιμή της *φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης*.

2.6.1. ΤΕΛΛΟΥΡΙΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ (TELLURIC CURRENTS)

Στη γη ρέουν φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία ονομάζονται *τελλουρικά ρεύματα*. Η παρουσία αυτών των ρευμάτων μπορεί να παράγει μια μετρήσιμη *τάση* στα ηλεκτρόδια δυναμικού, ακόμα και όταν αυτά δεν διαρρέονται από ρεύμα.

2.6.2. ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

Οι γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν κοντά σε ρευματοφόρους κυρίως αγωγούς που κάνουν επαφή με το έδαφος, όπως η παρουσία θαμμένων σωλήνων ή φρακτών που λειτουργούν ως *απορροφητές* ρεύματος (καταβόθρες). Λόγω της μικρής τους *ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης*, το ρεύμα διέρχεται κατά προτίμηση κατά μήκος αυτών των υλικών, παρά διαχέεται ανάλογα με τις ιδιότητες των γεωυλικών. Η παρουσία λοιπόν αυτών των καταστάσεων, στην ουσία λειτουργεί ως ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα στο σύστημα.

2.6.3. ΜΙΚΡΗ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Ένα στρώμα υψηλής αγωγιμότητας κοντά στην επιφάνεια, όπως για παράδειγμα ένας επιφανειακός υδροφόρος σχηματισμός, είναι δυνατόν να δημιουργήσει προβλήματα στην βαθύτερη διερεύνηση, καθώς προκαλεί *συγκέντρωση* των γραμμών ροής του ηλεκτρικού ρεύματος

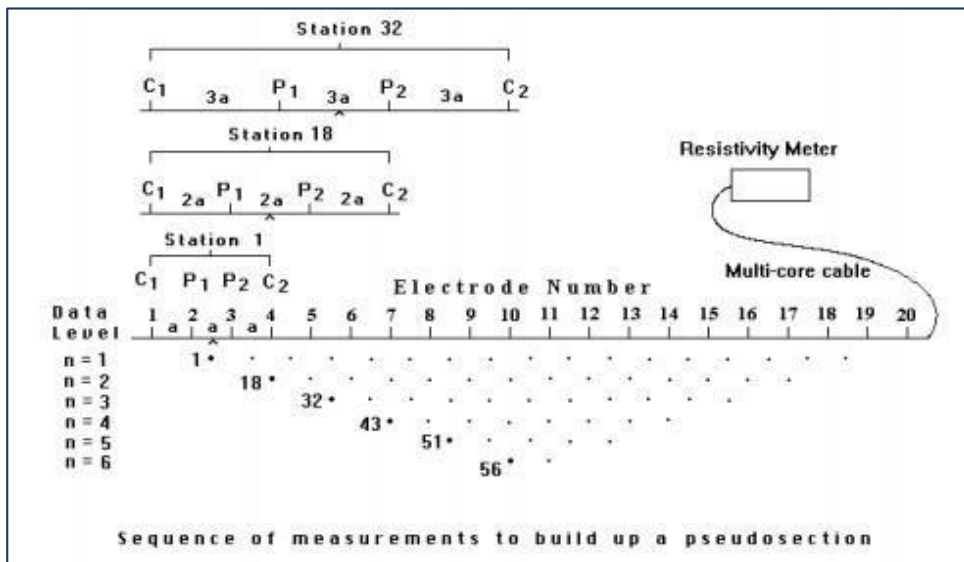
2.6.4. ΕΠΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Το ρεύμα, το οποίο διαρρέει τα καλώδια που συνδέουν την πηγή του ρεύματος με τα *ηλεκτρόδια ρεύματος*, μπορεί να παράγει ένα επαγόμενο ρεύμα στα καλώδια που συνδέουν το βολτόμετρο με τα *ηλεκτρόδια δυναμικού*, δημιουργώντας έτσι μια ψευδή καταγραφή. Αυτή η πηγή θορύβου μπορεί να ελαχιστοποιηθεί αν διατηρήσουμε μια απόσταση μερικών μέτρων μεταξύ των καλωδίων ρεύματος και δυναμικού.

2.7. Επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων (Λογισμικό RES2DINV)

Οι διδιάστατες (2D) απεικονίσεις μιας γεωηλεκτρικής έρευνας χρησιμοποιούνται ευρέως, πλέον, για τη χαρτογράφηση περιοχών μέτριας έως σύνθετης υπεδάφικης δομής. Το λογισμικό RES2DINV του οίκου Geotomo, παρέχει την δυνατότητα κατάλληλης επεξεργασίας των δεδομένων υπαίθρου, προκειμένου να παραχθεί η επιθυμητή διδιάστατη απεικόνιση. Χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος *αντιστροφής ελάχιστων τετραγώνων Gauss-Newton (Sasaki, 1992)* για την παραγωγή ενός 2D μοντέλου του ημιχώρου από τα δεδομένα της *φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης*.

Στην εικόνα 2.8 παρουσιάζεται παράδειγμα διάταξης των ηλεκτροδίων και ακολουθίας μετρήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια έρευνα 2D γεωηλεκτρικής απεικόνισης.



Εικόνα 2.8. Ακολουθία μετρήσεων με σκοπό τη δημιουργία μιας “ψευδοτομής”, χρησιμοποιώντας πολλαπλά ηλεκτρόδια (Geotomo Software, 2019).

Έχουν αναπτυχθεί πολλά διαφορετικά συστήματα πολλαπλών ηλεκτροδίων, χρησιμοποιώντας διαφορετικές διευθετήσεις των καλωδίων και τρόπους μέτρησης (Loke, 2018). Η έρευνα πραγματοποιείται σε ένα σύστημα στο οποίο τα ηλεκτρόδια είναι διατεταγμένα κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής, με ίσες, σταθερές αποστάσεις μεταξύ των. Παρ’ όλα αυτά, το λογισμικό μπορεί να διαχειριστεί και δεδομένα με άνιση/ανομοιόμορφη απόσταση ηλεκτροδίων.

Εάν η περιοχή μελέτης παρουσιάσει τοπογραφική παραμόρφωση, το λογισμικό δύναται να χρησιμοποιεί ένα παραμορφωμένο πλέγμα (*grid*) πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε η επιφάνεια του πλέγματος να ταιριάζει με την τοπογραφία (Loke, 2000).

Το λογισμικό λειτουργεί σε έρευνες με διατάξεις ηλεκτροδίων τύπου *Wenner*, *Schlumberger*, *πόλου-πόλου*, *διπόλου-διπόλου*, *πόλου-διπόλου* και *τετραγώνου*. Εκτός από αυτές τις γνωστές συστοιχίες ηλεκτροδίων, το RES2DINV υποστηρίζει ακόμα και συμβατικές συστοιχίες με σχεδόν απεριόριστο αριθμό ηλεκτροδίων.

2.7.1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η διαδικασία *αντιστροφής* που χρησιμοποιείται από το λογισμικό βασίζεται στη μέθοδο των *ελαχίστων τετραγώνων* (deGroot-Hedlin and Constable, 1990, Sasaki, 1992, Loke *et al.*, 2003).

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_{k-1}$$

Όπου:

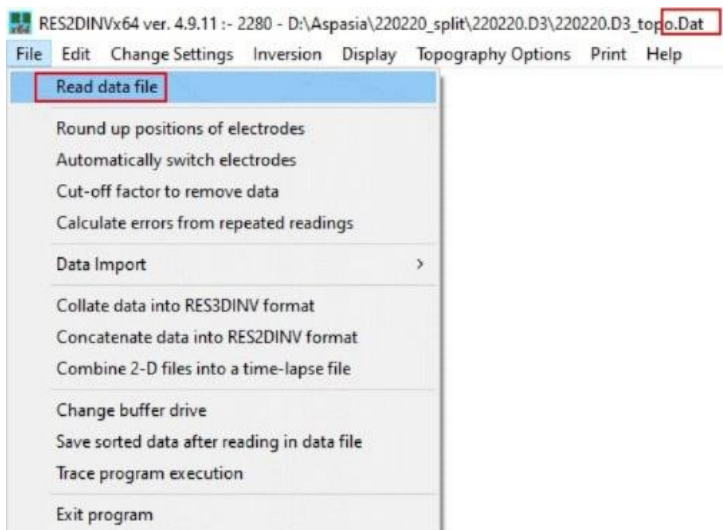
- $F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_z C_z^T C_z$
- $C_x =$ οριζόντια φίλτρα τραχύτητας
- $C_z =$ κατακόρυφα φίλτρα τραχύτητας
- $J =$ Jacobian matrix of partial derivatives
- $J^T =$ transpose of J
- $\lambda =$ συντελεστής απόσβεσης
- $q =$ διάνυσμα
- $g =$ δεδομένα ακατάλληλου διανύσματος
- $\alpha_x =$ βάρος για οριζόντιο φίλτρο
- $\alpha_z =$ βάρος για κατακόρυφο φίλτρο
- $k =$ αριθμός επανάληψης

Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα λ , C_x και C_z μπορούν να προσαρμοστούν με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ταιριάζουν σε διαφορετικούς τύπους δεδομένων. Ξεκινώντας από ένα αρχικό μοντέλο, συνήθως από ένα ομοιογενές γήινο μοντέλο, το λογισμικό υπολογίζει την αλλαγή στις παραμέτρους του μοντέλου (Δq_k), οι οποίες θα μειώσουν την διαφορά μεταξύ υπολογισθέντων και μετρούμενων τιμών φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (g). Μια μέτρηση αυτής της διαφοράς δίνεται από το σφάλμα *root-mean-squared (RMS) error*. Ωστόσο, ορισμένες φορές, το μοντέλο με το χαμηλότερο δυνατό σφάλμα *RMS* εμφανίζει μεγάλες και μη ρεαλιστικές μεταβολές στο μοντέλο των τιμών *ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης* και μπορεί να μην είναι το καλύτερο μοντέλο, με βάση την αναμενόμενη υπεδαφική δομή. Γενικότερα, η πιο συνετή προσέγγιση είναι να επιλεγεί το μοντέλο κατά την επανάληψη μετά την οποία το σφάλμα *RMS* δεν αλλάζει σημαντικά. Αυτό, συνήθως, συμβαίνει μεταξύ της 3ης και της 6ης επανάληψης υπολογισμού.

2.7.2. ΜΟΡΦΗ ΑΡΧΕΙΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (DATA FILE FORMAT)

Στο λογισμικό δίνεται η επιλογή "**Read data file**" στο *File menu options*. Εκεί εμφανίζεται μια λίστα από αρχεία στον τρέχοντα φάκελο με επέκταση *.DAT (Εικ. 2.9). Οι τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δίδονται σε ένα αρχείο τύπου *κειμένου (text file)*.

Σε αυτή την περίπτωση, είναι δυνατή η χρήση οποιουδήποτε προγράμματος επεξεργασίας κειμένου, όπως το *Windows Notepad*, εάν το αρχείο δεδομένων δημιουργείται με μη αυτόματο τρόπο.



Εικόνα 2.9 Μορφή αρχείου δεδομένων.

Τα δεδομένα είναι διατεταγμένα με ένα ASCII οριοθετημένο τρόπο (Εικ. 2.10), στο οποίο χρησιμοποιείται κόμμα, κενό διάστημα ή LF/CR για τον διαχωρισμό διαφορετικών δεδομένων αριθμητικών στοιχείων. Εάν υπάρξει πρόβλημα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του λογισμικού, η αιτία μπορεί να είναι ότι τα δεδομένα εισόδου έχουν λάθος μορφή.

<i>LANDFILL.DAT file</i>	<i>Comments</i>
LANDFILL SURVEY	<i>Name of survey line</i>
3.0	<i>Unit electrode spacing</i>
1	<i>Array type, 1 for Wenner</i>
334	<i>Number of data points</i>
1	<i>Type of x-location for data points, 1 for mid-point</i>
0	<i>Flag for I.P. data, 0 for none (1 if present)</i>
4.50 3.0 84.9	<i>First data point. For each data point, list the x-location,</i>
7.50 3.0 62.8	<i>'a' electrode spacing, apparent resistivity value</i>
10.50 3.0 49.2	<i>Third data point</i>
13.50 3.0 41.3	<i>Fourth data point</i>
...	<i>Same format for other data points</i>
...	
75.00 48.0 52.5	<i>Last data point</i>
0,0,0,0,0	<i>Ends with a few zeros. Flags for other options.</i>

Εικόνα 2.10. Παράδειγμα φακέλου δεδομένων διάταξης Wenner.

2.7.3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ INDEX BASED DATA FORMAT

Τα δεδομένα τοπογραφίας εισάγονται αμέσως μετά την κύρια τομή (ενότητα) με τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στην εικόνα 2.11 το αρχείο GLADOE2.DAT.file αποτελεί παράδειγμα με τοπογραφικά δεδομένα. Αυτά τα δεδομένα τοποθετούνται αμέσως μετά από τα σημεία δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το πρώτο στοιχείο αποτελεί ένα *flag*, το οποίο υποδεικνύει ότι ο φάκελος περιλαμβάνει τοπογραφικά δεδομένα. Εάν δεν υπάρχουν, τότε η τιμή του *flag* θα είναι 0. Στην αντίθετη περίπτωση, η τιμή θα είναι 1 ή 2. Στην περίπτωση όπου δίδονται οι πραγματικές οριζόντιες και κατακόρυφες συντεταγμένες των δεδομένων τοπογραφίας κατά μήκος της γραμμής, τότε η τιμή θα είναι 1. Ακόμα κι αν οι πραγματικές οριζόντιες αποστάσεις δίνονται στην ενότητα δεδομένων τοπογραφίας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο άξονας x (απόσταση) κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους στην τομή της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Το *index based* πάντα υποθέτει ότι οι αποστάσεις x στην κύρια τομή δεδομένων είναι επιφανειακές αποστάσεις ανεξάρτητα από τις αποστάσεις x που χρησιμοποιούνται στην τοπογραφική τομή.

<i>GLADOE2.DAT file</i>	<i>Comments</i>
237 2 39.207	<i>Last four data points</i>
203 2 14.546	<i>with x-location of the data point, electrode spacing</i>
227 2 31.793	<i>and measured apparent resistivity values</i>
233 2 30.285	
2	<i>Topography data flag. If no topography data, place 0 here.</i>
26	<i>Number of topography data points</i>
-100 33	<i>Horizontal and vertical coordinates of 1st,</i>
-40 34.5	<i>2nd topography data point</i>
-20 35.0	<i>This is followed by similar data for</i>
0 35.209	<i>the remaining topography data points</i>
..	
..	
..	
300 33	<i>Last topography data point</i>
2	<i>The topography data point number with the first electrode</i>
0,0,0,0,0	<i>A few zeros to end the file</i>

Εικόνα 2.11. Παράδειγμα ενός τοπογραφικού index based data file.

Δεν είναι απαραίτητο να υπολογισθεί το υψόμετρο για κάθε ηλεκτρόδιο. Ο μέγιστος αριθμός σημείων τοπογραφικών δεδομένων είναι 4000. Για κάθε σημείο, η οριζόντια θέση και το υψόμετρο εισάγονται στο αρχείο δεδομένων. Μετά το τελευταίο σημείο των δεδομένων τοπογραφίας, δίδεται ο αριθμός του τοπογραφικού σημείου με το πρώτο ηλεκτρόδιο. Είναι πολύ σημαντικό να συμπεριλαμβάνεται και το υψόμετρο του πρώτου ηλεκτροδίου. Εάν δεν μετρήθηκε στο πεδίο, είναι δυνατό να εκτιμηθεί από τα υψόμετρα των γειτονικών σημείων. Συνήθως, το πρώτο σημείο της τοπογραφίας αντιστοιχεί στο πρώτο ηλεκτρόδιο και αντίστοιχα το τελευταίο σημείο στο τελευταίο ηλεκτρόδιο. Συμπεριλαμβάνοντας αυτά τα δύο σημεία, αποφεύγονται σφάλματα στη μορφή των δεδομένων.

2.7.4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν στην ύπαιθρο, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής λειτουργίες του RES2DINV:

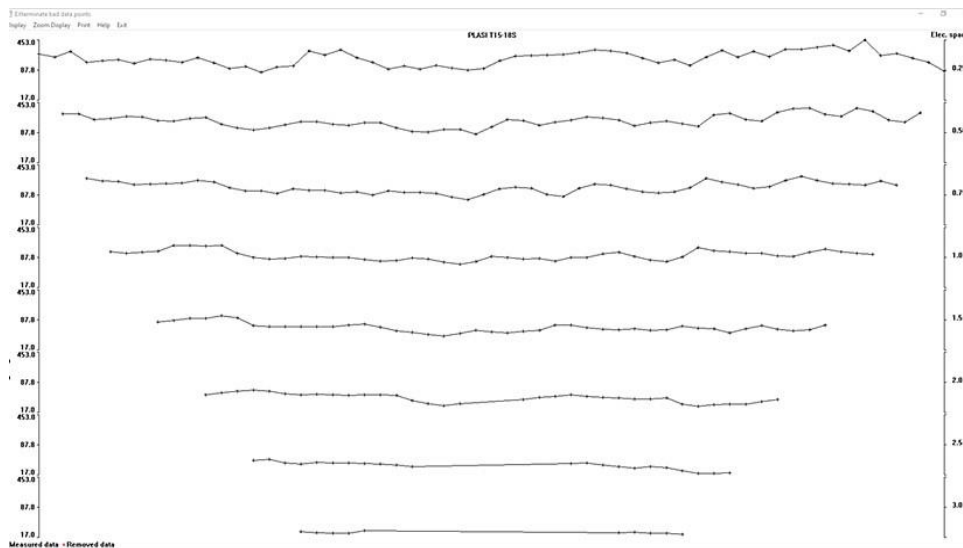
- **Edit** → *Exterminate bad datum points*
- **Model Discretization** → *Use model refinement*
- **Inversion Methods and settings** → *Select robust inversion*
- **Inversion Damping Parameters** → *Vertical/Horizontal flatness filter ratio*
- **Mesh parameters** → *Mesh refinement*
- **Least-squares inversion**
- **Display sections** → *Display data and model sections*

Edit

Αυτή η ενότητα καλύπτει μερικές επιλογές επεξεργασίας δεδομένων για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων *data points*, περικοπή πολύ μεγάλων προφίλ, αντιστροφή της κατεύθυνσης ενός συνόλου δεδομένων και για την αλλαγή θέσης έναρξης της γραμμής.

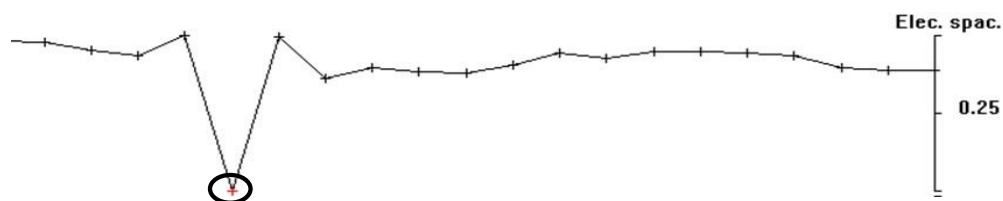
- *Exterminate bad data points*

Με αυτή την επιλογή, οι τιμές *φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* εμφανίζονται με την μορφή προφίλ για το καθένα επίπεδο δεδομένων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για δεδομένα τα οποία συλλέγονται με συμβατικές συστοιχίες.



Εικόνα 2.12. Αποτέλεσμα εντολής “Exterminate bad datum points”.

Ο κύριος σκοπός αυτής της επιλογής στο λογισμικό είναι να αφαιρέσει σημεία με τιμές αντιστάσεων σαφώς λανθασμένες (Εικ. 2.12). Τέτοια “*bad points*” μπορεί να οφείλονται στην αποτυχία λειτουργίας ενός ηλεκτροδίου, στην επαφή του ηλεκτροδίου με το έδαφος λόγω ξηρότητας, ή σε βραχυκύκλωμα των καλωδίων λόγω πολύ υγρών συνθηκών στο έδαφος. Συνήθως, οι τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε αυτά τα σημεία είναι διακριτά πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές (Εικ. 2.13) συγκριτικά με γειτονικά *data points*. Ο καλύτερος τρόπος διαχείρισης τέτοιων σημείων είναι να αφαιρεθούν, έτσι ώστε να μην επηρεάσουν το μοντέλο.



Εικόνα 2.13. Παράδειγμα παράβλεψης των μη αποδεκτών σημείων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

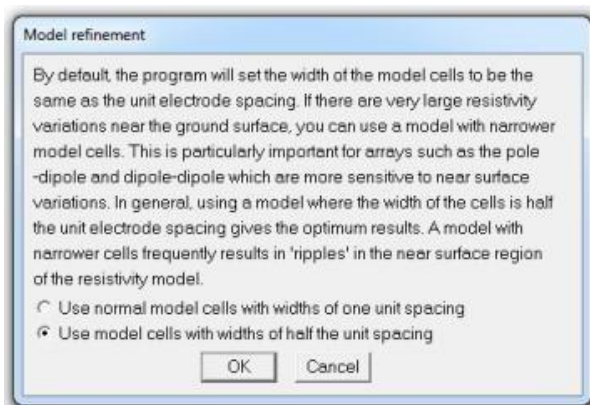
Model Discretization

Αυτή η επιλογή επιτρέπει την αλλαγή του τρόπου με τον οποίο το λογισμικό υποδιαιρεί τον ημιχώρο σε κελιά, το οποίο χρησιμοποιείται ως μοντέλο αντιστροφής.

➤ Use model refinement

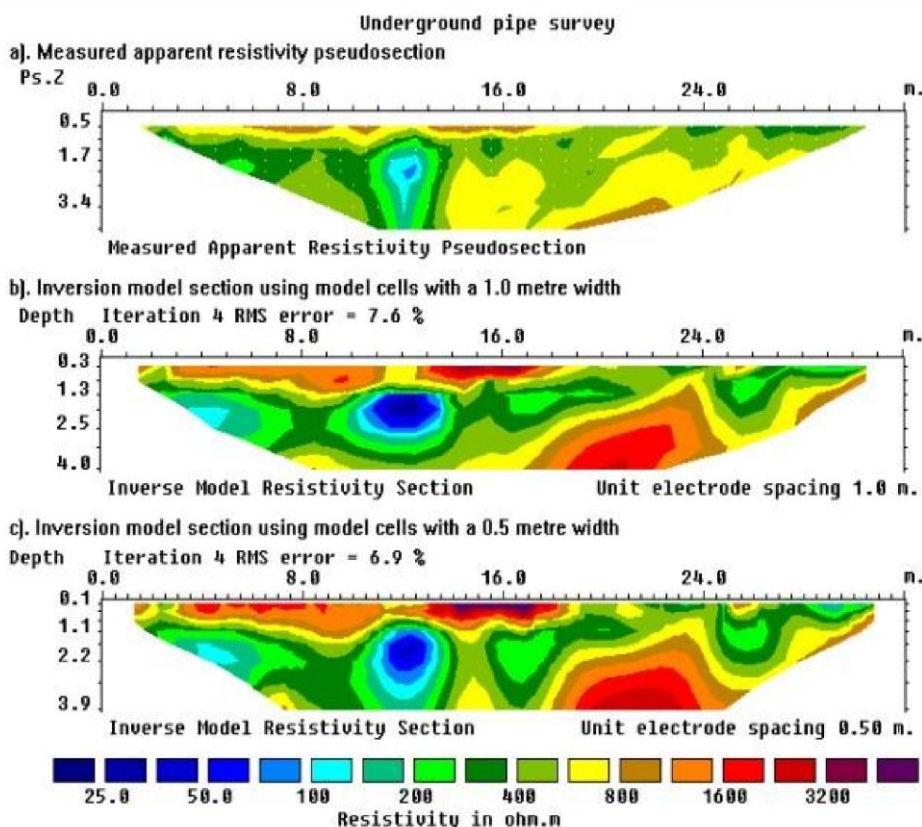
Το λογισμικό RES2DINV προεπιλέγει ένα μοντέλο στο οποίο το πλάτος του εσωτερικού (*interior model blocks*) είναι το ίδιο με το διάστημα των ηλεκτροδίων. Σε περιπτώσεις με μεγάλες παραλλαγές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην επιφάνεια του εδάφους μπορούν να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας στενότερα μοντέλα κελιών ή κόμβων. Υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι μείωσης του

πάχους του μοντέλου κελιών. Ο πρώτος είναι χρησιμοποιώντας την επιλογή “Use model refinement” από το μενού “Inversion”.



Εικόνα 2.14. Πρώτος πιθανός τρόπος μείωσης του πάχους του μοντέλου κελιών.

Επιτρέπεται, επίσης, η επιλογή κελιών μοντέλου με πλάτος τη μισή απόσταση των ηλεκτροδίων (Εικ. 2.14). Αφού οριστεί αυτή η επιλογή, πρέπει να διαβαστεί το αρχείο δεδομένων. Στη συνέχεια, το λογισμικό θα μειώσει την απόσταση των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιεί κατά το ήμισυ από αυτό που γίνεται στο αρχείο δεδομένων. Στην εικόνα 2.15 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα μίας τέτοιας εντολής.



Εικόνα 2.15. Παράδειγμα μοντέλων αντιστροφής χρησιμοποιώντας τα μισού μεγέθους model blocks.

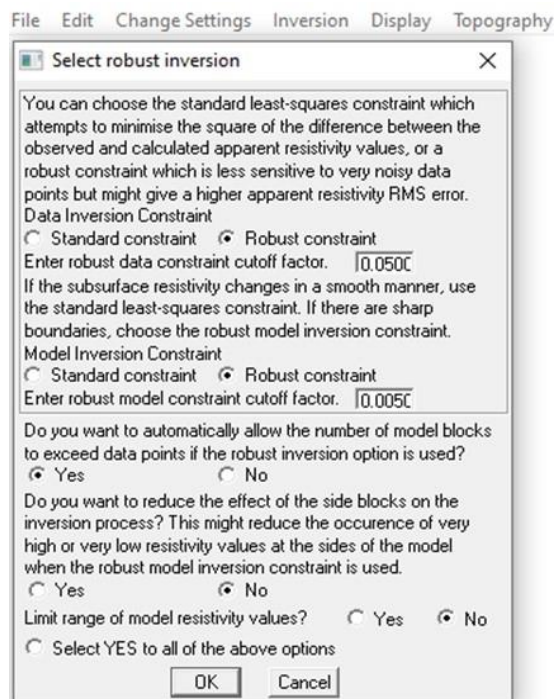
Η δεύτερη μέθοδος αποτελεί την απευθείας τροποποίηση του αρχείου δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου.

Inversion Methods and settings

Αυτή η σειρά επιλογών επιτρέπει την επιλογή του τύπου κανονικής μεθόδου αντιστροφής που θα χρησιμοποιηθεί.

➤ Select robust inversion

Η συμβατική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων έχει τη δυνατότητα να ελαχιστοποιήσει το τετράγωνο της διαφοράς μεταξύ των μετρημένων και υπολογισθέντων τιμών φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Αυτή η μέθοδος δίνει λογικά αποτελέσματα εάν τα δεδομένα περιέχουν τυχαίο ή «*Gaussian*» θόρυβο. Ωστόσο, εάν το σύνολο των δεδομένων περιέχει “*outlier*” data points (ο θόρυβος προέρχεται από μη τυχαίες πηγές, όπως αβλεψίες ή προβλήματα στον εξοπλισμό), η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ικανοποιητική. Τέτοια σημεία *data points* θα μπορούσαν να έχουν μεγάλη επιρροή στο προκύπτον μοντέλο αντιστροφής.



Εικόνα 2.16. Select robust inversion.

Υπάρχει ένας παράγοντας *cut-off* (αποκοπής), ο οποίος ελέγχει το βαθμό στον οποίο χρησιμοποιείται αυτός ο ισχυρός περιορισμός δεδομένων. Εάν χρησιμοποιείται η τιμή 0,05 (Εικ. 2.16), σημαίνει ότι η επίδραση των *data points*, των οποίων οι διαφορές των μετρημένων και υπολογισθέντων τιμών φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι πολύ μεγαλύτερες από 5%, θα μειωθεί σημαντικά.

Η συμβατική μέθοδος *ελαχίστων τετραγώνων περιορισμένης ομαλότητας* (deGrootHedlin and Constable, 1990) επιχειρεί, επίσης, να ελαχιστοποιήσει το “τετράγωνο” (τετραγωνισμό) των αλλαγών στις τιμές φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης του μοντέλου. Αυτό θα παράγει ένα μοντέλο με

ομαλή διακύμανση στις τιμές της αντίστασης. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι κατάλληλο εκεί όπου η επιφανειακή αντίσταση αλλάζει επίσης ομαλά (Loke *et al.*, 2003).

Ωστόσο, εάν τα υποεπιφανειακά στρώματα (σώματα) έχουν απότομα όρια, όπως η διεπαφή εδάφους-υποστρώματος ή μεγάλα ομοιογενή σώματα, η συμβατική μέθοδος *ομαλότητας-περιορισμού ελάχιστων τετραγώνων* τείνει να τα ομαλύνει. Εάν χρησιμοποιείται ισχυρή μέθοδος *περιορισμένης αντιστροφής μοντέλου*, το πρόγραμμα θα προσπαθήσει να ελαχιστοποιήσει τις αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης. Αυτός ο περιορισμός τείνει να παράγει μοντέλα με απότομες διεπαφές μεταξύ διαφορετικών περιοχών με διαφορετικές τιμές *ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης*, αλλά σε κάθε περιοχή η τιμή *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* είναι σχεδόν συνεχής. Αυτό μπορεί να είναι κατάλληλο για περιοχές όπου υπάρχει μια τέτοια γεωλογική κατάσταση, όπως η διεπαφή εδάφους μητρικού πετρώματος.

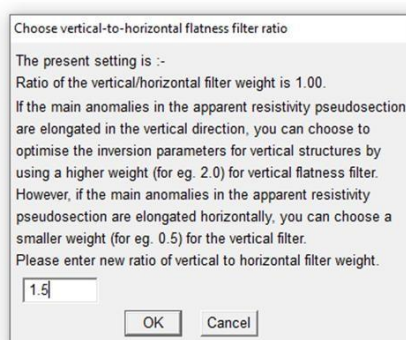
Inversion Damping Parameters

Καλύπτει μια λίστα από επιλογές, οι οποίες ελέγχουν τον *συντελεστή απόσβεσης*, λ. Μία από τις επιλογές είναι η *Vertical/Horizontal flatness filter ratio* (Εικ. 2.17).

➤ *Vertical/Horizontal flatness filter ratio*

Είναι δυνατή η επιλογή της αναλογίας του συντελεστή απόσβεσης για το *vertical flatness filter* (f_z) στον *horizontal flatness filter* (f_x). Εξ ορισμού ο ίδιος συντελεστής απόσβεσης χρησιμοποιείται και για τα δύο. Ωστόσο, εάν οι ανωμαλίες στην “ψευδοτομή” επιμηκύνονται κάθετα, είναι δυνατό το πρόγραμμα να παράγει μοντέλα, τα οποία είναι επιμηκυσμένα κάθετα, επιλέγοντας μια υψηλότερη τιμή για την αναλογία *vertical* προς *horizontal flatness filter*. Για ανωμαλίες οι οποίες είναι επιμηκυσμένες οριζόντια, η καλύτερη επιλογή είναι μια μικρότερη τιμή (π.χ. 0,5).

File Edit Change Settings Inversion Display Topography Options Print Help Quit



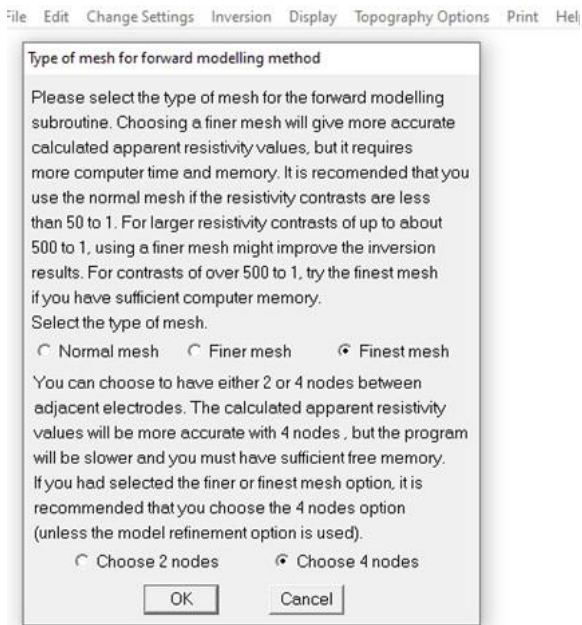
Εικόνα 2.17. Παράδειγμα εφαρμογής Vertical/Horizontal flatness filter ratio.

Mesh parameters

Αυτή η επιλογή καθορίζει τις παραμέτρους, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμεύουν στον υπολογισμό των τιμών *φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης*.

➤ *Mesh refinement*

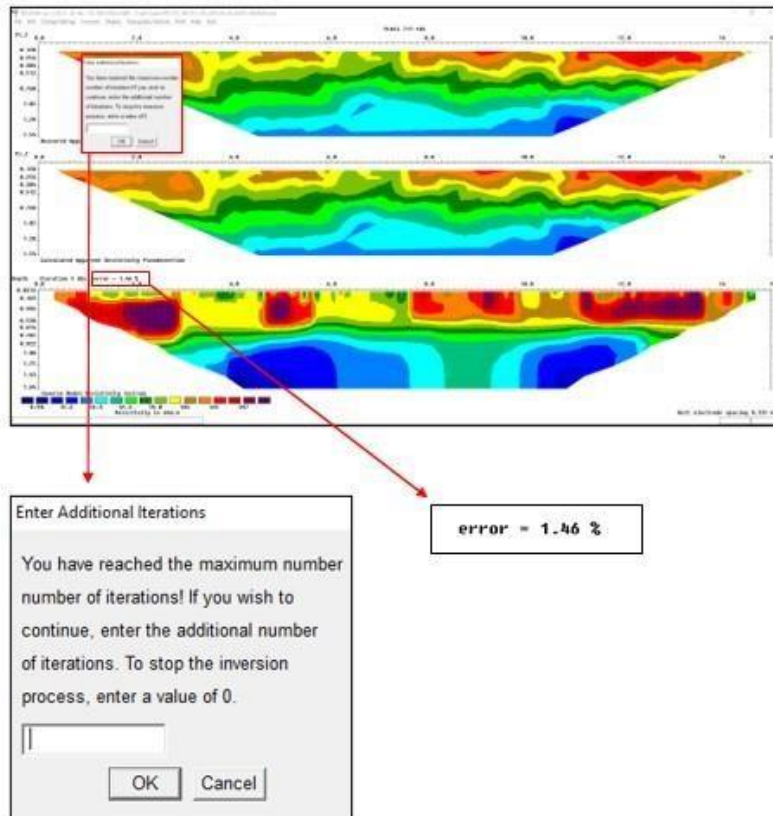
Για να επιτευχθεί ο επιθυμητός υπολογισμός, εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο (Εικ. 2.18), στο οποίο γίνονται οι απαραίτητες επιλογές.



Εικόνα 2.18. Mesh refinement

Least-squares inversion

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας *αντιστροφής*, μετά από κάθε μία επανάληψη, το λογισμικό θα εμφανίσει το αντίστροφο *model section* στην οθόνη. Εάν χρησιμοποιείται ένα συμβατικό array δεδομένων, θα εμφανιστούν οι μετρημένες και υπολογισθείσες “ψευδοτομές” της *φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης* (1^η και 2^η τομή της Εικόνας 2.19).



Εικόνα 2.19. Model section και RMS.

Το σφάλμα που αναγράφεται κατά τη διάρκεια την επεξεργασίας (π.χ. $error = 1.46\%$) αφορά τις δύο πρώτες τομές, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 2.19. Δηλαδή, εμφανίζεται με τη μορφή ποσοστού η διαφορά μεταξύ της *Measured* (1^η τομή) και της *Calculated* (2^η τομή) *Apparent Resistivity Pseudosections*. Η τιμή του σφάλματος υπολογισμού (*error*) θα πρέπει να είναι < 2 . Αν χρειαστεί αλλαγή, στον πίνακα που εμφανίζεται (*Enter Additional Iterations*), πληκτρολογείται η τιμή 2 ή 1. Αν το σφάλμα < 2 , τότε αναγράφεται η τιμή 0. Σε περίπτωση που η τιμή του δεν μειώνεται, τότε το σφάλμα επιτρέπεται να είναι < 5 .

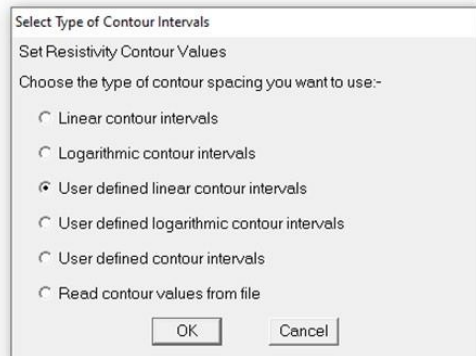
Display sections

Καλύπτει πολλές επιλογές για την απεικόνιση του model section.

➤ *Display data and model sections*

Με αυτή την επιλογή γίνεται δυνατός ο σχεδιασμός του μοντέλου και της *φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* στην οθόνη. Ζητείται ο αριθμός επανάληψης και ο τύπος των *contour intervals* (ισοδιάσταση ισότιμων καμπυλών). Θα εμφανιστεί το παράθυρο της εικόνας 2.20 για τα δεδομένα *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* των οποίων οι τιμές είναι θετικές.

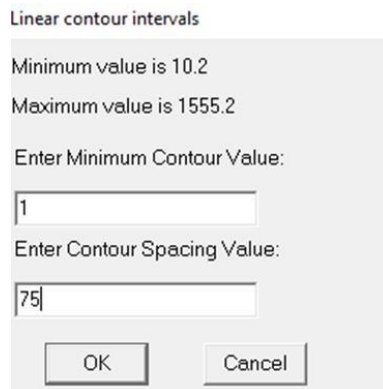
Maximum value 782.40
Minimum value 7.78



Εικόνα 2.20. Επεξεργασία των contours.

Η επιλογή “*User defined linear contour intervals*” θα εμφανίσει το παράθυρο της εικόνας 2.20.

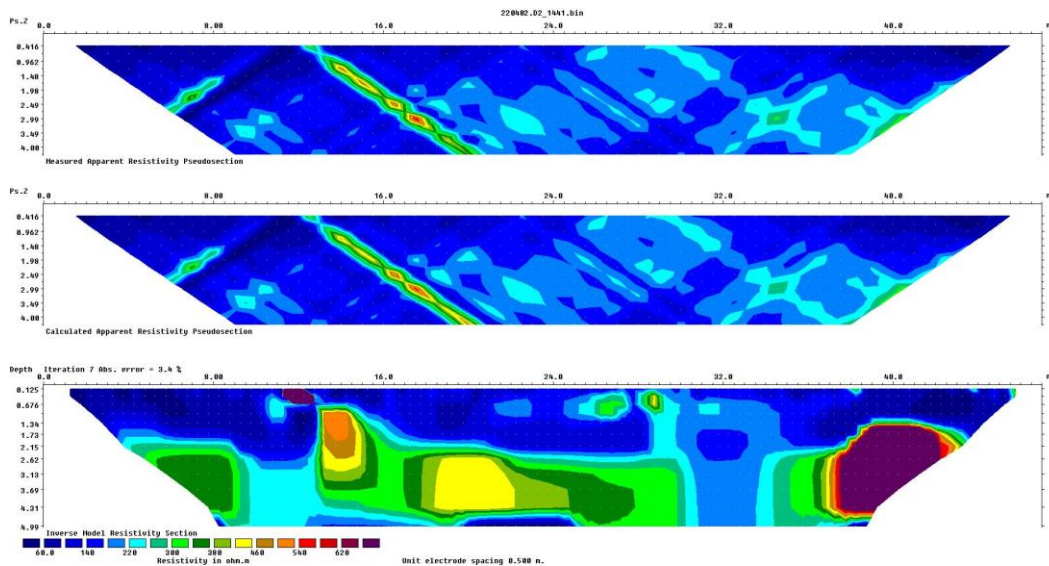
Θα πρέπει να οριστεί από τον χειριστή η τιμή της μικρότερης ισότιμης καμπύλης (*Enter Minimum Contour Value*) και του ισοδιαστήματος αυτών, έτσι ώστε να καλύπτει το εύρος των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχουν υπολογισθεί. Στο παράδειγμα της εικόνας 2.21 οι τιμές κυμαίνονται από 10,2 έως 1.555,2 Ωm.



Εικόνα 2.21. Καθορισμός του τρόπου αναπαράστασης των ισότιμων καμπύλων ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.

Στόχος της μεθόδου βελτιστοποίησης είναι να μειώσει τη διαφορά μεταξύ των «**υπολογιζόμενων**» και «**μετρούμενων**» τιμών της *φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης*, προσαρμόζοντας την *ηλεκτρική ειδική αντίσταση* των ορθογώνιων τμημάτων του μοντέλου. Ένα μέτρο της διαφοράς αυτής εκφράζει η *ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος*.

Θα πρέπει το μοντέλο να έχει όσο το δυνατό μικρότερο σφάλμα. Ωστόσο, ανάλογα με τα αναμενόμενα αποτελέσματα, οι μικρότερες τιμές του σφάλματος σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες και μη ρεαλιστικές διακυμάνσεις στις τιμές της ειδικής αντίστασης.



Εικόνα 2.22. Παράδειγμα επεξεργασίας δεδομένων γεωηλεκτρικής τομογραφίας με το λογισμικό RES2DINV.

Στην εικόνα 2.22 παρουσιάζονται:

- [1] στην πρώτη τομή, η τομή κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης όπως αυτή μετρήθηκε στο ύπαιθρο, συναρτήσει του βάθους,
- [2] στο μέσο, η τομή κατανομής της υπολογισθείσας φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης σε σχέση με το βάθος, και
- [3] στην τελευταία τομή, η τομή κατανομής της πραγματικής ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους.

3. Γεωφυσική έρευνα πεδίου

Ένα μεγάλο μέρος των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν κατά τη Β' φάση της γεωτεχνικής μελέτης, περιλαμβάνει και το ερευνητικό κομμάτι των γεωφυσικών εργασιών. Όπως αναφέρεται εκτενώς στο πρώτο κεφάλαιο, οι δύο φάσεις των γεωτεχνικών μελετών περιλαμβάνουν συνολικά οκτώ δειγματοληπτικές γεωτρήσεις (Γ1-Γ8). Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, μολονότι προσφέρουν αδιάψευστα δεδομένα για το υπόβαθρο μιας περιοχής, έχουν σημειακό χαρακτήρα και δεν παρέχουν πληροφορίες για την πλευρική ανομοιογένεια του εδάφους. Για τον λόγο αυτό είναι θεμιτό σε μία τέτοια μελέτη, να συνδυάζεται η γεωφυσική έρευνα, ώστε να συλλέγονται επιπλέον στοιχεία ως προς την ανισοτροπία, ανομοιομορφία και ανομοιογένεια του υποβάθρου μιας περιοχής. Επίσης ο συνδυασμός της γεωφυσικής έρευνας με τις γεωτρήσεις είναι ικανός να αναδείξει καλύτερα το υπόβαθρο και τις φυσικές του ιδιότητες.

3.1. Εργασίες πεδίου

Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στον χώρο και διήρκεσε **δύο (2) μήνες**, καθώς επίσης και κάποιες εργασίες που δεν αφορούν στις γεωφυσικές μετρήσεις, αλλά είναι απαραίτητες για την ομαλή συνέχεια των ερευνών.

Προτού διεξαχθεί η τεχνική της *ERT*, και πριν γίνει οποιαδήποτε διαδικασία γεωφυσικών ερευνών, πραγματοποιήθηκε ένας μακροσκοπικός έλεγχος στην ευρύτερη περιοχή (γύρω και έξω από τον χώρο στάθμευσης), προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχει σε κοντινή ακτίνα κάποια πηγή θορύβου (πχ καλώδια). Η αδυναμία αντίληψης μιας πηγής θορύβου, θα μπορούσε να αλλοιώσει εντελώς τα δεδομένα και να αξιολογηθούν εσφαλμένα τα αποτελέσματα. Εν τέλει κάποια τέτοια πηγή δεν βρέθηκε, επομένως ακολούθησε η ερευνητική διαδικασία.

3.1.1. ΤΕΧΝΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ *ERT*.

Για την έρευνα που αφορά την παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε η γεωηλεκτρική μέθοδος και πιο συγκεκριμένα η τεχνική της *ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης ERT*.

Για την τεχνική *ERT* έγινε χρήση της συσκευής μέτρησης κατανομής της *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης «Syscal Pro»* της εταιρίας *«IRIS instruments»*. Η συσκευή είναι πολυκαναλική και για την συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν 48 κανάλια.

Ο εξοπλισμός της τεχνικής *ERT* περιλάμβανε :

- Γεωηλεκτρική συσκευή της *IRIS Syscal Pro switch 48*
- Δύο (2) πολυκαναλικά καλώδια, με είκοσι τέσσερις (24) εξόδους το καθένα
- Σαράντα οκτώ (48) ηλεκτρόδια
- Ένας (1) εφεδρικός συσσωρευτής δώδεκα (12) V.

Στην εικόνα 3.1. παρουσιάζεται μία από τις τομές της *ERT* με τη γεωηλεκτρική διάταξη και τη συσκευή *Syscal Pro*.



Εικόνα 3.1. Παρουσίαση του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της μεθόδου ERT.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι η εξής :

1. Σε μία ευθύγραμμη διάταξη (με χρήση μετροταινίας) εντοπίζονται οι κατάλληλες θέσεις πάκτωσης των ηλεκτροδίων, σύμφωνα με την απόσταση (spacing) που έχει επιλεχθεί.
2. Τα ηλεκτρόδια (μεταλλικοί πάσσαλοι) πακτώνονται στο έδαφος. Σε κάποιες περιπτώσεις απαιτήθηκε η χρήση δραπάνου για την διάνοιξη οπών τοποθέτησης των ηλεκτροδίων.
3. Τα πολυκαναλικά καλώδια συνδέονται με τα ηλεκτρόδια και καταλήγουν στην γεωηλεκτρική μονάδα, για την μέτρηση (Εικόνα 3.1, πορτοκαλί καλώδια).
4. Η περιοχή της πάκτωσης διαβρέχεται με νερό, για τη μείωση της αντίστασης επαφής.
5. Αφού ελεγχθούν όλες οι συνδεσμολογίες και δε διαπιστωθούν παραλείψεις, επιλέγονται στη γεωηλεκτρική μονάδα οι επιθυμητές παράμετροι.
6. Στη συνέχεια επιλέγεται η διάταξη των ηλεκτροδίων με τις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι λήψεις δεδομένων. Για την παρούσα εργασία έγινε η χρήση της διάταξης ηλεκτροδίων δίπολο-δίπολο (dipole-dipole).
7. Αφού ελεγχθεί η συνδεσμολογία από τη γεωηλεκτρική συσκευή, ξεκινάει η λήψη των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του ημιεπιπέδου (τομή).

Στον χώρο στάθμευσης πραγματοποιήθηκαν 3 γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις ERT, οι θέσεις των οποίων επιλέχθηκαν βάσει των θέσεων των γεωτρήσεων, του διαθέσιμου χώρου (συναρτήσεως των αποστάσεων των ηλεκτροδίων) και των αποτελεσμάτων που προέκυπταν κάθε φορά. Για παράδειγμα, η τρίτη τομή αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί μετά την επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν από τη δεύτερη τομή. Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται στιγμιότυπο από τις μετρήσεις πεδίου και στον χάρτη της εικόνας 3.3, που κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού *Surfer* της εταιρίας *Golden Software*, απεικονίζονται οι θέσεις των τομών της γεωηλεκτρικής διασκόπησης (**ERT1**, **ERT2**, **ERT4**), καθώς και το περίγραμμα της παλαιάς εκσκαφής του 2010.

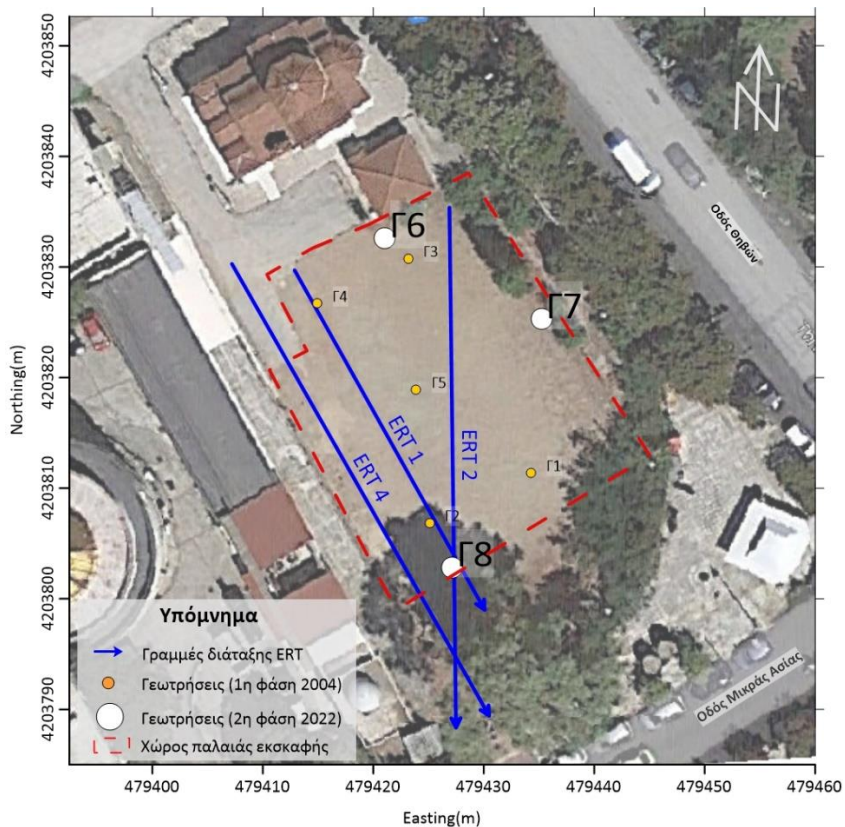


Εικόνα 3.2. Στιγμιότυπο από τις εργασίες πεδίου.

Για τις τομές αυτές χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι για τη διοχέτευση ρεύματος, η ίδια διάταξη ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου) αλλά διαφορετική ισοαπόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων.

α/α τομής	Μήκος (m)	Ισοαπόσταση ηλεκτροδίων (m)
ERT 1	35,25	0,75
ERT 2	47,00	1,00
ERT 4	47,00	1,00



Εικόνα 3.3. Χάρτης τομών ERT τεχνικής με το περίγραμμα της παλαιάς εκσκαφής

3.1.2. ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

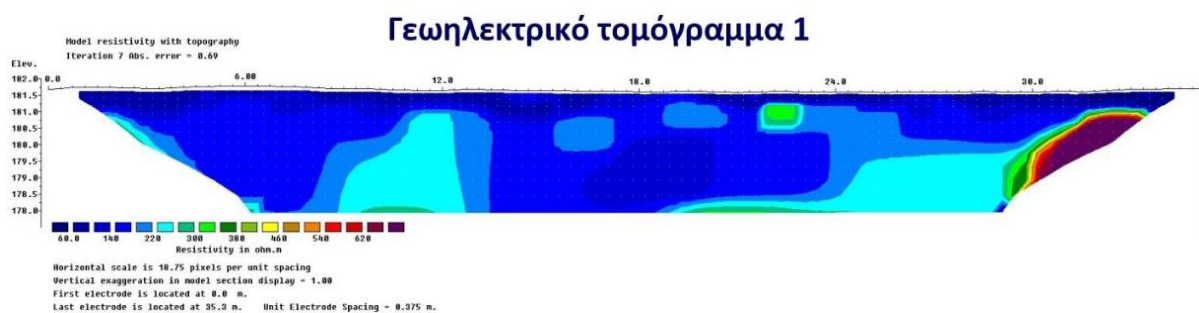
Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διεξαγωγή των εργασιών για την παρούσα διπλωματική εργασία, έχουν γεωαναφερθεί με μεγάλη ακρίβεια. Για τον ακριβή προσδιορισμό των θέσεων των γεωτρήσεων και των ηλεκτροδίων (Εικ. 3.4) για την κατασκευή των χαρτών που παρουσιάζονται στις εικόνες 1.13 και 3.3, χρησιμοποιήθηκε ο δέκτης *GNSS Kolida K5 UFO (GNSS-Global Navigation Satellite Systems)*. Για τις μετρήσεις εφαρμόστηκε η τεχνική *RTK-NTRIP (Real Time Kinematics-Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)*, κατά την οποία, ο δέκτης λαμβάνει δεδομένα από δορυφόρους σε πραγματικό χρόνο, μέσω ενός δικτύου μόνιμων σταθμών αναφοράς. Η οριζοντιογραφική και κατακόρυφη ακρίβεια της μέτρησης με τον συγκεκριμένο εξοπλισμό να είναι 8mm και 15mm αντίστοιχα.



Εικόνα 3.4. Στιγμιότυπα από την τοπογραφική αποτύπωση των θέσεων των γεωτρήσεων (αριστερά) και ηλεκτροδίων (δεξιά).

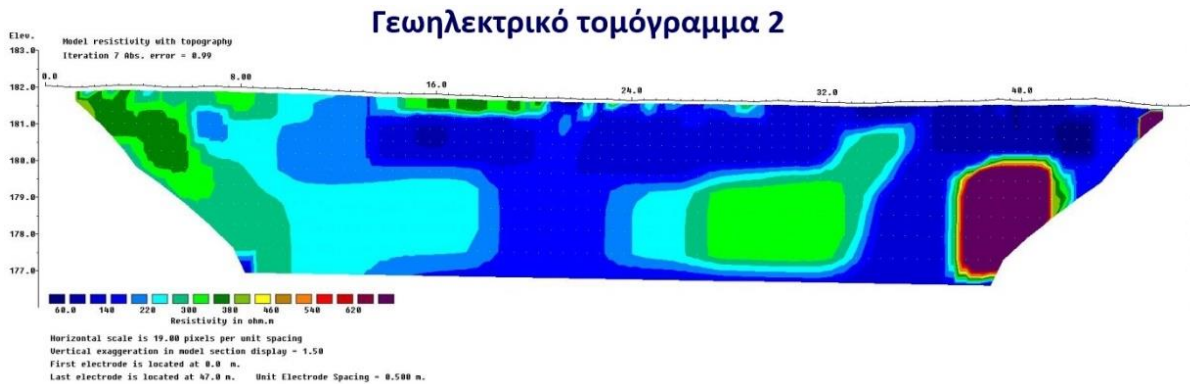
3.2. Παρουσίαση γεωφυσικών αποτελεσμάτων

Από την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών δεδομένων λαμβάνονται τρία (3) γεωηλεκτρικά τομογράμματα, ένα για κάθε γεωηλεκτρική τομογραφία (ERT) που διεξήχθη. Τα γεωηλεκτρικά τομογράμματα απεικονίζουν την πλευρική και κατά βάθος κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Λαμβάνοντας υπόψη και την τοπογραφία της περιοχής, ακολουθούν τα δισδιάστατα μοντέλα κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τις τομές ERT 1, ERT 2 και ERT 4.



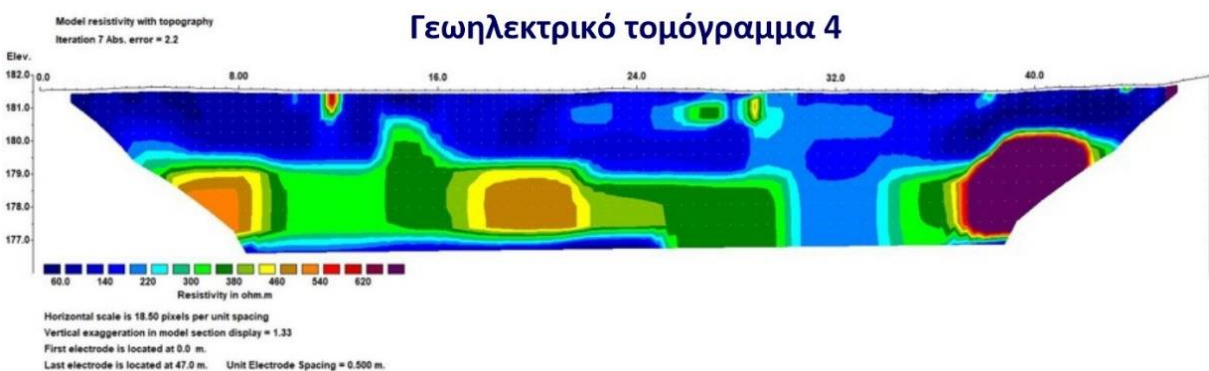
Εικόνα 3.5. Δισδιάστατο (2D) μοντέλο κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την **ERT 1**. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων λήφθηκε υπόψη και η τοπογραφία του πεδίου.

Στην ERT 1 (Εικ. 3.5) παρατηρείται ένα σχετικά ομογενές ημιεπίπεδο χαμηλών αντιστάσεων, με τις τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης να κυμαίνονται από 60 έως 150 Ωm. Οι περιοχές που εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι σε απόσταση 12 μέτρων περίπου, όπου παρατηρείται μια ζώνη να μεταβαίνει σε λίγο υψηλότερες τιμές που κυμαίνονται από 200 έως 300 Ωm. Το ίδιο παρατηρείται και σε απόσταση από 18 έως 29 μετρά. Η σημαντικότερη παρατήρηση που μπορεί να γίνει σε αυτήν την τομή, είναι η ζώνη πολύ υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που βρίσκεται στο τέλος της τομής (απόσταση 29 έως 34 μέτρα) με τις τιμές της να κυμαίνονται >500 Ωm.



Εικόνα 3.6. Δισδιάστατο (2D) μοντέλο κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την ERT 2. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων λήφθηκε υπόψιν και η τοπογραφία του πεδίου.

Στην ERT 2 (Εικ. 3.6) παρατηρείται ένα πιο ανομοιογενές ημιεπίπεδο σε σχέση με την τομή 1. Αναλυτικότερα, διακρίνονται 3 ζώνες με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 250 έως 400 Ωm με την πρώτη να βρίσκεται στην αρχή της τομής μέχρι την απόσταση των 9 μέτρων, η δεύτερη βρίσκεται επιφανειακά σε απόσταση από 14 έως 20 μέτρα και η τρίτη σε βάθος 2 έως 5 μέτρα και απόσταση 25 έως 34 μέτρα. Στις ενδιάμεσες περιοχές επικρατούν χαμηλότερες τιμές που κυμαίνονται από 60 έως 200 Ωm. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στα 37 έως 42 μέτρα με μια ζώνη πολύ υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (>500 Ωm) σε βάθος από 2 έως 5 μέτρα. Πολύ υψηλές τιμές φαίνεται να ξεκινούν να διερευνώνται πάλι και στην απόσταση των 46 μέτρων.



Εικόνα 3.7. Δισδιάστατο (2D) μοντέλο κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τοπογραφία για την ERT 4.

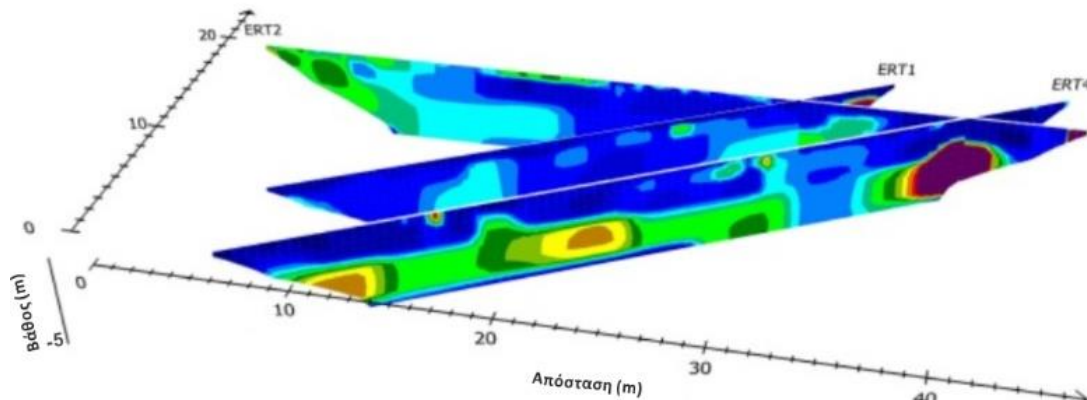
Στην ERT 4 (Εικ. 3.7), σε βάθος μέχρι και τα 2 μέτρα περίπου, επικρατούν σχετικά χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 60 έως 150 Ωm. Σε βάθος από 2 έως 5 μέτρα παρατηρείται

μια πιο αντιστατική ζώνη, σχεδόν σε όλο το μήκος της τομής, που κυμαίνεται από 300 έως 400 Ωm. Τέλος παρουσιάζονται τρεις πολύ αντιστατικές ζώνες σε σχέση με το περιβάλλον.

1. Σε απόσταση από 4 έως 9 μέτρα και βάθος 2 έως 4,5 μέτρα, οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κυμαίνονται από 450 έως 550 Ωm.
2. Σε απόσταση από 18 έως 22 μέτρα και βάθος 2 έως 4,5 μέτρα, οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κυμαίνονται από 450 έως 550 Ωm.
3. Σε απόσταση από 37 έως 42 μέτρα και βάθος από 1,5 έως 5 μέτρα, οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζουν τιμές > 500 Ωm.

Για την καλύτερη κατανόηση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην υπό μελέτη περιοχή, επιλέχθηκε να γίνει απεικόνιση όλων των γεωηλεκτρικών τομογραμμάτων σε μορφή fence diagram, το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 3.8. Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για αυτή την ψευδο-τριδιάστατη απεικόνιση ήταν το Eriviz.

Διαπιστώνουμε ότι στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, επιφανειακά (έως τα 2 m βάθος) επικρατούν γενικά μικρές τιμές (<100 Ωm - ψυχρά χρώματα) ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

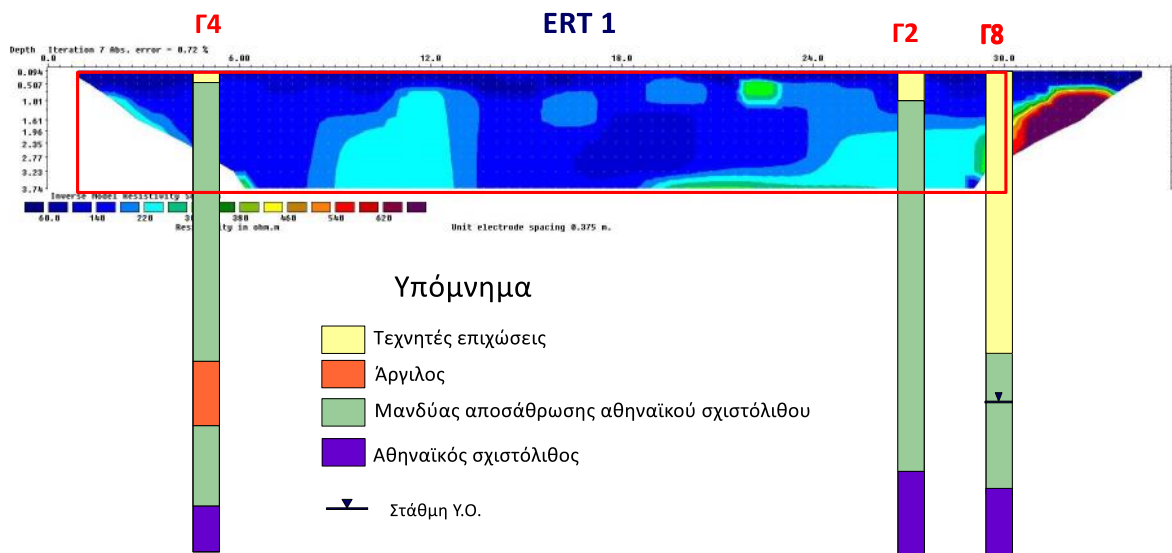


Εικόνα 3.8. Τρισδιάστατη απεικόνιση των τριών τομών ERT 1, ERT 2, ERT 4 σε μορφή fence diagram με την χρήση του λογισμικού Eriviz.

4. Γεωλογική Αξιολόγηση και Συμπεράσματα

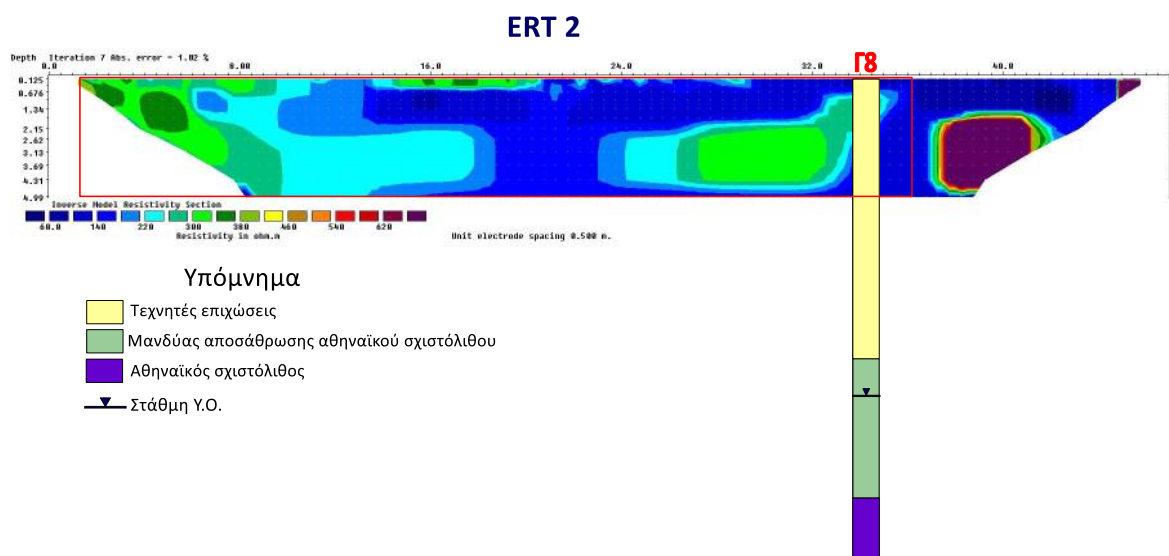
Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των γεωφυσικών μετρήσεων, συνδυάζονται με τα ευρήματα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και προκύπτουν τα ακόλουθα γεωλογικά αποτελέσματα.

Στην εικόνα 4.1, για το τομόγραμμα 1, παρουσιάζεται συνδυαστικά το μοντέλο της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (μέχρι το βάθος των 5 μέτρων) με τις λιθολογικές στήλες των γεωτρήσεων Γ2, Γ4 και Γ8 (βάθη μέχρι 10 μέτρα).



Εικόνα 4.1. Γεωηλεκτρικό τομόγραμμα 1 με τα στοιχεία των γεωτρήσεων Γ4, Γ2, Γ8 και τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στα 10 m. Με κόκκινο πλαίσιο οριοθετείται ο παλιός χώρος εκσκαφής.

Αντίστοιχα στην Εικ. 4.2 παρουσιάζεται το δισδιάστατο μοντέλο κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για το τομόγραμμα 2 και η λιθολογική στήλη της γεώτρησης Γ8.



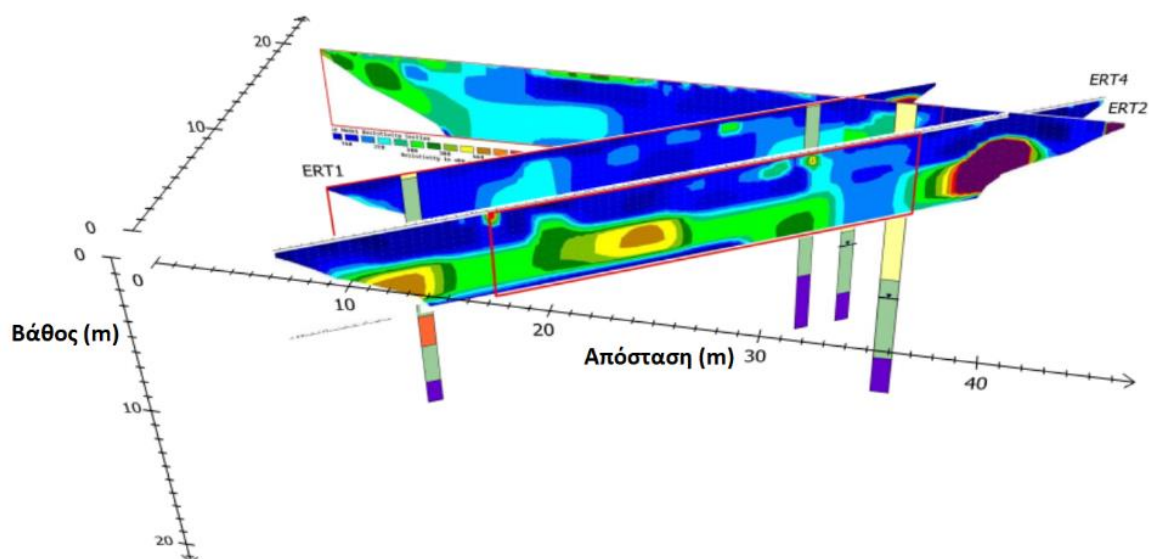
Εικόνα 4.2. Τομόγραμμα 2 με τα στοιχεία της γεώτρησης Γ8 (0-15 m) και τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στα 10 m. Με κόκκινο πλαίσιο οριοθετείται ο παλιός χώρος εκσκαφής.

Το βάθος διασκόπησης και στα δύο τομογράμματα, δεν ξεπερνάει τα 5 μέτρα, συνεπώς δεν διερευνάται το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής, δηλαδή ο αθηναϊκός σχιστόλιθος. Αυτό απορρέει και από τις τιμές

της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που δεν είναι υψηλές, οδηγώντας μας στο συμπέρασμα ότι οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στον σχηματισμό των τεχνητών επιχώσεων. Επιπρόσθετα, δεν έχουμε ενδείξεις για τον υδροφόρο ορίζοντα, καθώς η στάθμη του εντοπίζεται περί τα 10 m βάθος σύμφωνα πάντα με τις μετρήσεις της στάθμης στην γεώτρηση Γ8.

Η ERT 4 δεν διέρχεται από την θέση κάποιας ερευνητικής γεώτρησης ώστε να απεικονιστεί συγκριτικά με κάποια λιθολογική στήλη. Με βάση την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και τις γνώσεις για τον περιβάλλοντα χώρο, η ύπαρξη μίας ελαφρώς πιο αντιστατικής ζώνης σε απόσταση 4 έως 30 μέτρων θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει ένα στρώμα πλειστοκαινικών αποθέσεων.

Στην εικόνα 4.3 παρουσιάζεται ένα ψεύδο-τρισιδιάστατο μοντέλο των γεωφυσικών τομών, των γεωτρήσεων και του χώρου που καταλάμβανε η παλαιά εκσκαφή.



Εικόνα 4.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση των τριών τομών ERT 1, ERT 2, ERT 4 των γεωτρήσεων Γ2, Γ4, Γ8 σε μορφή fence diagram με την χρήση του λογισμικού Erviz.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, πρέπει να αναφέρουμε πως ο αρχικός στόχος της γεωφυσικής έρευνας, ο οποίος ήταν η εύρεση και ανάδειξη του υποβάθρου της περιοχής μελέτης και του υδροφόρου, δεν επετεύχθη. Αυτό οφείλεται στους περιορισμούς της τοποθεσίας για το μέγεθος του αναπτύγματος των γεωφυσικών διασκοπήσεων και ως επακόλουθο το μέγιστο βάθος διερεύνησης.

Εντούτοις, καθώς η γεωηλεκτρική τομογραφία πρόκειται για μία τεχνική υψηλής διακριτικής ικανότητας, έχουμε πληροφορίες και μία καλή εικόνα των υπεδαφικών συνθηκών. Επιπλέον, στο νότιο τμήμα του πεδίου έρευνας εντοπίστηκε ένας ιδιαίτερα αντιστατικός στόχος, όπως διακρίνεται στα τομογράμματα των ERT 2 και ERT 4 και διαφέρει κατά πολύ από την γενική εικόνα που δίνουν τα μοντέλα κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για το πεδίο μας. Οι τιμές της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης είναι αρκετά αυξημένες συγκριτικά με τον ημιχώρο χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυριαρχεί, και για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.

Από τα υπάρχοντα στοιχεία, και με μεγάλη επιφύλαξη, αξιολογείται ότι ο αντιστατικός στόχος στο νότιο τμήμα πιθανόν να αντιπροσωπεύει κάποιον 'κενό χώρο', πχ μία τεχνητή υπόγεια στοά ή παλαιές, πολύ αδρομερείς, ανθρώπινες αποθέσεις με μεγάλα κενά (μπάζα μη συμπυκνωμένα). Η θέση που εντοπίζεται δεν ήταν ευνοϊκή για την καλύτερη ανάδειξή του με την γεωηλεκτρική μέθοδο διασκόπησης, καθώς

εντοπίζεται κοντά στην περίφραξη του χώρου στάθμευσης ή πιθανόν και εκτός των ορίων της περιοχής έρευνας

Συμπερασματικά, η γεωηλεκτρική τομογραφία (ERT), όντως παρείχε μια καλή εικόνα της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δίνοντας μας πληροφορίες για τις υπεδαφικές συνθήκες και φανερώνοντας έναν στόχο υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Καροτσιέρης, Ζ., Μεταξάς, Ι., Στερπόπουλος, Κ. (2004) Γεωτεχνική έρευνα-μελέτη στη θέση ανέγερσης των ερευνητικών εργαστήριων του οδοντιατρικού τμήματος παν/μίου Αθηνών.
- Κρητωτάκης, Γ. (2022). Νέο κτήριο ερευνητικών εργαστήριων οδοντιατρικού τμήματος του ΕΚΠΑ. Παρουσίαση και αξιολόγηση γεωτεχνικών ερευνών υπαίθρου & εργαστήριου - γεωτεχνική μελέτη θεμελίωσης.
- Παπανικολάου Δ., Λόζιος Σ., Σούκης Κ., Σκούρτσος Μ. (2004). Η ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΛΛΟΧΘΟΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ «ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΩΝ ΑΘΗΝΩΝ».
- Dahlin, T. & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379–398.
- deGroot-Hedlin, C. and Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, p.1613-1624.
- Dobrin, M.B. and Savit, C.H. (1988) Introduction to Geophysical Prospecting. 4th Edition, McGraw-Hill, New York.
- Everett, M. E. (2013). Near-Surface Applied Geophysics, Cambridge University Press.
- HOOGERVORST, G. (2006). Fundamental noise affecting signal-to-noise ratio of resistivity surveys. *Geophysical Prospecting*. 23. 380 - 390. 10.1111/j.1365-2478.1975.tb01535.x.
- Ibraheem, I.M., Tezkan, B. & Bergers, R. (2021). Integrated Interpretation of Magnetic and ERT Data to Characterize a Landfill in the North-West of Cologne, Germany. *Pure Appl. Geophys.* 178, 2127–2148 (2021).
- Loke, M.H., (2000). Topographic modelling in resistivity imaging inversion. 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.
- Loke, M.H., Acworth, I. and Dahlin, T., (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.
- Loke, M.H., (2018). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomosoft Solutions, Malaysia.
- Loke, M. H. (2020). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomosoft Solutions, Malaysia. www.geotomosoft.com. Accessed 18 Mar 2020.
- Loke, M.H. (2021). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomosoft Solutions.
- Sasaki, Y., (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464
- Widodo, Phanjaya, H., Prassetyo, S.H., Simangunsong, M.G., Made Astawa Rai, Wattimena, K.R. Dynamic Slope Stability Subject to Blasting Vibrations: a Case Study of the Jakarta-Bandung High-Speed Railway Tunnel. *Transp. Infrastruct. Geotech.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s40515-022-00242-6>
- Zhou, B., & Dahlin, T. (2003). Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying. *Near Surface Geophysics*, 1, 105–117