



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΠΡΟΒΑΤΑ ΕΛΕΝΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥ-
ΝΗΣΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΣΤΟΩΝ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2024





ΠΡΟΒΑΤΑ ΕΛΕΝΗ

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 6110

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥ- ΝΗΣΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΣΤΟΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής,
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Επιβλέπων:

Βαργεμέζης Γεώργιος

Συνεπιβλέπων:

Τσούρλος Παναγιώτης



© Προβατά Ελένη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΑΡΞΗΣ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΣΤΟΩΝ– *Διπλωματική Εργασία*

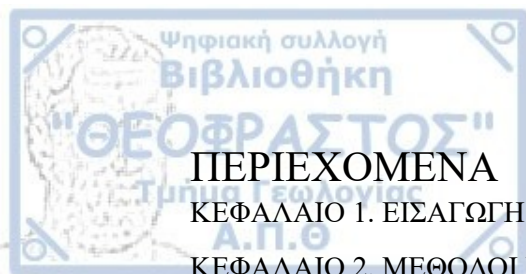
© Provata Eleni, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2023

All rights reserved.

Application of geoelectrical method to the detection of possible void.

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

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



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	6
2.1. ΓΕΝΙΚΑ	6
2.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	7
2.2.1. ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	8
2.2.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	12
2.3. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΤΟΕΣ ΚΑΙ ΕΓΚΟΙΛΑ.....	17
3.1. ΚΑΡΣΤΙΚΗ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ.....	17
3.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΟΩΝ ΚΑΙ ΕΓΚΟΙΛΩΝ	18
3.2.1.ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ (GPR)	18
3.2.2.ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (VLF).....	19
3.2.3.ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ (MASW). 20	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	22
4.1. ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	22
4.2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	25
5.1. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	26
5.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	26
5.3. ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ-ΑΝΑΛΥΣΗ.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	33
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	35
ABSTRACT	35
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	36
ΕΙΚΟΝΟΓΡΑΦΙΑ.....	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γεωφυσική ονομάζεται η επιστήμη που εφαρμόζει τους νόμους της Φυσικής για να μελετήσει τη Γη. Πρόκειται για έναν κλάδο της Γεωλογίας ο οποίος μελετάει τις φυσικές ιδιότητες της Γης από το κέντρο της μέχρι την εξωτερική ατμόσφαιρα. Η Γεωφυσική ανήκει στους εφαρμοσμένους κλάδους της Φυσικής και ασχολείται με τη μελέτη επιφανειακών στρωμάτων της Γης, για στόχους οικονομικού, γεωτεχνικού, πολιτισμικού και περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. (Παπαζάχος Βασίλειος, Παπαζάχος Κωνσταντίνος, 2008)

Η γεωφυσική έρευνα βασίζεται στη συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία παρατηρήσεων που γίνονται απευθείας στη φύση με γεωφυσικά όργανα. Μέσω ηλεκτρικών, μαγνητικών, βαρυτικών, σεισμικών και άλλων μεθόδων, επιτυγχάνονται πολλές ανακαλύψεις γεωλογικής και οικονομικής σημασίας κάτω από την επιφάνεια της γης. Ανάλογα με το είδος των μετρήσεων παρέχονται πληροφορίες για μια συγκεκριμένη ιδιότητα του υπεδάφους και με κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων αυτών εξαγόνται συμπεράσματα για τη δομή του (Chambers, 1974).

Στη συγκεκριμένη εργασία, ερευνάται η πιθανότητα ύπαρξης υπόγειας στοάς ή έγκοιλου στην περιοχή μελέτης. Λόγω της διαφοράς ηλεκτρικής αντίστασης του περιβάλλοντος πετρώματος και της υπόγειας στοάς, η μέθοδος της ηλεκτρικής διασκόπησης είναι κατάλληλη για την προσέγγιση της περιοχής έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Οι γεωφυσικές έρευνες χρησιμοποιούνται τόσο για λόγους εξοικονόμησης χρόνου, όσο και χρημάτων, σε σχέση με τις έρευνες που περιέχουν γεωτρήσεις. Οι μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης, ως αρχικό στάδιο μιας μελέτης, σε συνδυασμό με τη γνώση της γεωλογίας της περιοχής, μπορεί να ωφελήσει στον εντοπισμό περιοχών οι οποίες χρειάζονται επιπλέον διερεύνηση και πιθανά γεωτρήσεις. Οι θέσεις αυτές γίνονται εύκολα διακριτές ύστερα από την υλοποίηση γεωφυσικών μεθόδων, καθώς παρουσιάζονται σαν ανωμαλίες στα αποτελέσματα που λαμβάνονται. Ακόμη, οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πιθανές θέσεις μόλυνσης, ώστε να γίνει μια αξιολόγηση κινδύνου πριν την οποιαδήποτε δειγματοληψία. Επιπλέον, γεωφυσικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ακόμη και μέσα σε γεωτρήσεις με σκοπό την ερμηνεία γεωλογικών δομών και προσδιορισμό υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών ιδιοτήτων του εδάφους.

Οι μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης μπορούν να επιφέρουν απογοητευτικά αποτελέσματα αν δεν έχει γίνει σωστή έρευνα της περιοχής μελέτης ή σωστή επιλογή μεθόδου διασκόπησης. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια μέθοδος που δεν παρέχει την ακρίβεια που απαιτείται για μια συγκεκριμένη έρευνα, ή μια μέθοδος μπορεί να κριθεί ακατάλληλη για την περιοχή και το στόχο της μελέτης. Κάποιες φορές έχει αποδειχτεί πως οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής είναι πιο περίπλοκες

απ' ότι αναμενόταν από τον σχεδιασμό που είχε προηγηθεί. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται σωστή έρευνα και αξιολόγηση της περιοχής και πιθανή επίσκεψη του πεδίου για την ανάλυση των συνθηκών που επικρατούν. Η σωστή επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί ανάλογα με τον στόχο που πρόκειται να μελετηθεί είναι κρίσιμης σημασίας.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν περιληπτικά μερικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης καθώς και οι χρήσεις τους.

Η βαρυτική μέθοδος, περιλαμβάνει τη μέτρηση των διακυμάνσεων του πεδίου βαρύτητας της Γης οι οποίες προέρχονται από τοπικές διαφορές στην πυκνότητα των πετρωμάτων του υπεδάφους. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα τιμών πυκνότητας που αντιστοιχούν στα διάφορα πετρώματα και ιζήματα. Η συγκεκριμένη τεχνική συνήθως χρησιμοποιείται σε γεωφυσικές έρευνες μεγάλης κλίμακας που διερευνούν κατά κύριο λόγο την γεωλογική δομή. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να ληφθούν ακόμα και από τον αέρα ή τη θάλασσα.

Η μαγνητική μέθοδος, αναφέρεται σε μετρήσεις των διακυμάνσεων του συνολικού μαγνητικού πεδίου της Γης, οι οποίες προκαλούνται από τοπικές διαφοροποιήσεις στη μαγνήτιση των πετρωμάτων κάτω από την επιφάνεια, καθώς και των εδαφών. Κάθε σχηματισμός αντιστοιχίζεται σε μια τυπική περιοχή τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας. Η μέθοδος αυτή είναι εύκολη και γρήγορη εφόσον η έρευνα μιας περιοχής μπορεί να γίνει με κοντινή απόσταση πλέγματος και χαμηλό κόστος. Όταν παρατηρούνται απότομες αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο, είναι γνωστό ότι αυτές προέρχονται από την παρουσία κάποιου μαγνητικού σώματος (μεταλλικά βαρέλια, σιδηρούχες δομές, κ.α.).

Η σεισμική μέθοδος, βασίζεται στη δημιουργία σεισμικών κυμάτων στην επιφάνεια του εδάφους και στη μέτρηση της χρονικής διάρκειας που χρειάζονται τα κύματα αυτά να ταξιδέψουν από την πηγή, μέσω των πετρωμάτων και των σχηματισμών του υπεδάφους σε μια σειρά από γεώφωνα (ακουστικές συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εξακρίβωση θορύβων που προέρχονται από το έδαφος), τα οποία τοποθετούνται συνήθως σε ευθεία από την πηγή. Ανάλογα με τις ταχύτητες των ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων, μπορεί να βγει ένα συμπέρασμα για το πάχος και τη δομή κάθε στρώματος του υπεδάφους.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, βασίζεται στην αγωγιμότητα του εδάφους όταν αυτό διαρρέεται από ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγεται από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές. Στη μέθοδο αυτή γίνεται χρήση ενός πηνίου εναλλασσόμενου ρεύματος το οποίο τοποθετείται πάνω στο έδαφος. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στον πομπό μεταβάλλεται με το χρόνο και προκαλεί μικρά ρεύματα στη γη. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο, το οποίο ανιχνεύεται μαζί με το πρωτεύον (που προέρχεται από τη γη), από το πηνίο του δέκτη.

2.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ειδικότερα και σε αυτή την εργασία έγινε χρήση της ηλεκτρικής μεθόδου γεωφυσικής διασκόπησης και πιο συγκεκριμένα ηλεκτρική τομογραφία, διότι είναι η καταλληλότερη για τη μελέτη στοών και εγκαύλων λόγω της διαφοράς της ηλεκτρικής

αντίστασης των κενών (πολύ μεγάλη αντίσταση) σε σχέση με το περιβάλλον πέτρωμα ή σχηματισμό.

Για να πραγματοποιηθεί η ηλεκτρική μέθοδος, χρειάζονται δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (I) και δύο ηλεκτρόδια δυναμικού (V) για τη μέτρηση της μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των υλικών τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Με αυτό τον τρόπο εντοπίζονται ασυνέχειες (π.χ. ρήγματα), έγκοιλα με αέρα είτε πληρωμένα (με νερό, υλικό αποσάθρωσης κ.α.), μεταλλοφορία και ρυπαντές. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χωρίζονται στις μεθόδους της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, της επαγόμενης πόλωσης και του φυσικού δυναμικού. Αντίστοιχα στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπάγεται η ηλεκτρική τομογραφία, όπου παρέχει λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας (Loke & Barker, 1996 από Βαφειδής Α., 2004).

2.2.1. ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ) είναι η φυσική ιδιότητα που περιγράφει την ικανότητα του υλικού να αντιστέκεται στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Πρόκειται για έναν σταθμισμένο μέσο όρο των τοπικών αντιστάσεων με μια συνάρτηση στάθμισης, εφαρμοσμένη σε τετράγωνα δείγματα van der Pauw και σε γραμμικούς και τετράγωνους πίνακες ανίχνευσης τεσσάρων σημείων (Koon & Knickerbocker, 1992).

Η ηλεκτρική αντίσταση (R) είναι η μετρούμενη διαφορά δυναμικού (ΔV) σε Volt διαιρούμενη με το ρεύμα (I) σε Ampere που εφαρμόζεται κατά μήκος ενός αγωγού (νόμος του Ohm).

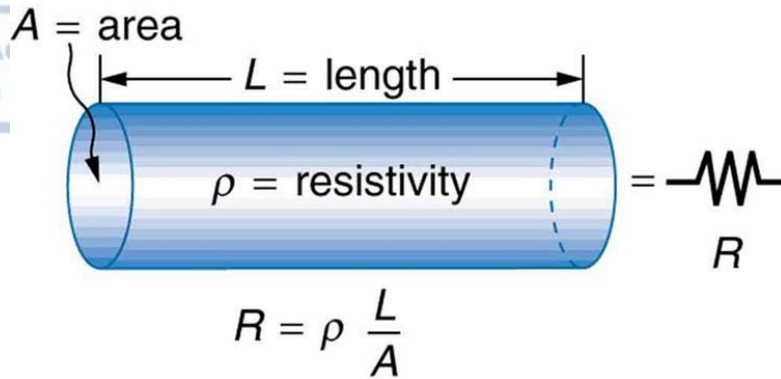
$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Έτσι, η αντίσταση θα αλλάξει αν αλλάξει η γεωμετρία της μέτρησης ή ο όγκος του υλικού επομένως δεν πρόκειται για φυσική ιδιότητα.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ) είναι η ηλεκτρική αντίσταση (R) ανά μονάδα μήκους του αγωγού.

$$\rho = \frac{V A}{I L} = R \frac{A}{L} \quad (2)$$

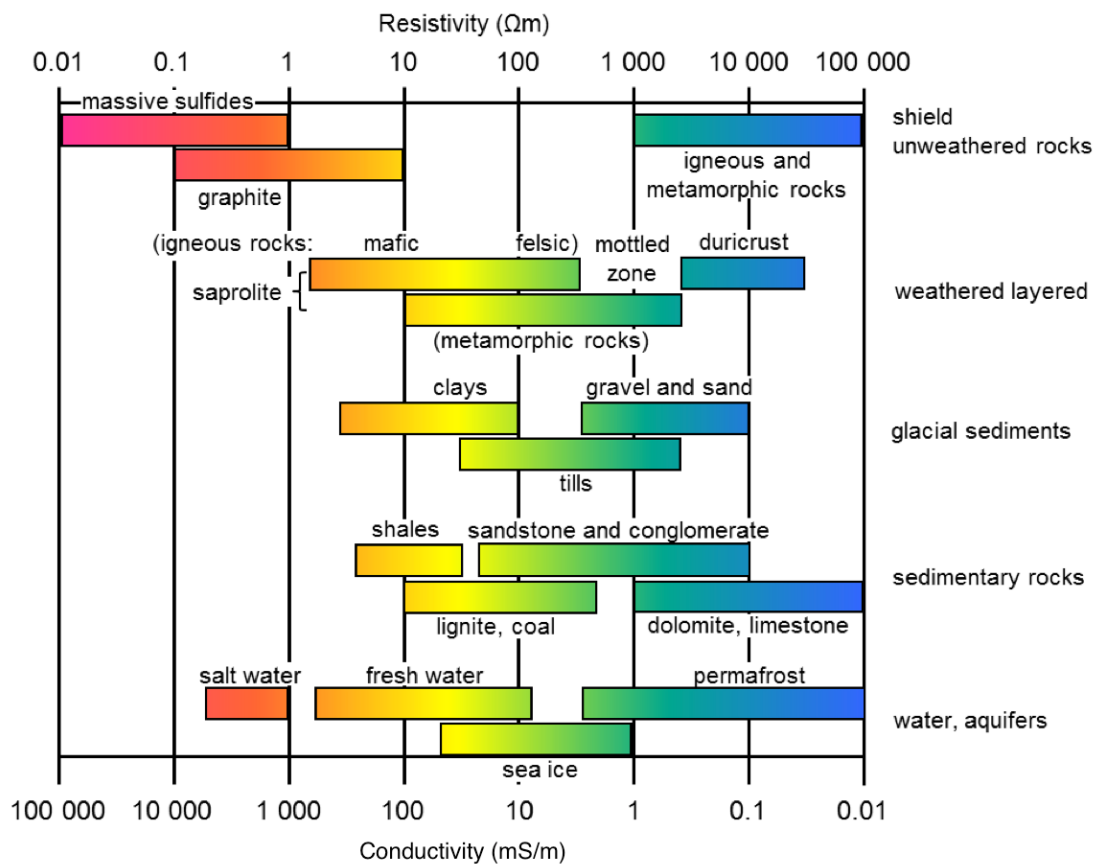
όπου, R η ηλεκτρική αντίσταση, A η διατομή του ομογενούς υλικού και L το μήκος του.



Εικόνα 1: Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυλινδρικού σώματος.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) είναι ένα μέτρο της ικανότητας των υλικών να διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Η τιμή του κυμαίνεται από 10-18 έως 107 (Siemens/m) ανάλογα με το υλικό (McCarthy, 2002). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι η αντίστροφη ιδιότητα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$



Εικόνα 2: Στον πάνω άξονα φαίνεται η αντίσταση ενώ στον κάτω άξονα φαίνεται η αγωγιμότητα για διάφορα υλικά και διάφορες τάξεις μεγέθους.

Ένας από τους παράγοντες που επηρεάζει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων είναι η αντίσταση του υγρού των πόρων και το πορώδες. Ο νόμος του Archie συνδέει αυτές τις δύο παραμέτρους (P. W. J. Glover, 2016).

$$\rho = \rho_w a \varphi^m \quad (4)$$

όπου, ρ είναι η συνολική ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος, ρ_w είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ρευστού που πληρώνει τους πόρους, φ είναι το πορώδες, a είναι ο παράγοντας λιθολογίας (μεταξύ 0,6 και 2) και m είναι ο παράγοντας συμπαγοποίησης (από 1,3 για χαλαρά έως 2,2 για τελείως συμπαγή πετρώματα).

Δηλαδή σύμφωνα με τον νόμο του Archie η αντίσταση των πετρωμάτων εξαρτάται από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υγρού που πληρώνει το σχηματισμό συνεπώς και από την ποσότητα των αλάτων που είναι διαλυμένα σε αυτό, την ποσότητα του υγρού που περιέχεται στο πορώδες (ο βαθμός κορεσμού) και από τον τρόπο που το ρευστό είναι κατανομημένο στο πέτρωμα. Αντίστοιχα, η αντίσταση είναι ανεξάρτητη από το υλικό του πετρώματος διότι το ηλεκτρικό ρεύμα δεν διέρχεται από τον ιστό του πετρώματος. Ο νόμος του Archie δεν ισχύει όταν υπάρχουν αργιλικά υλικά και αυτό γιατί η άργιλος έχει υψηλή ικανότητα ανταλλαγής ιόντων, οπότε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ρευστού των πόρων μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό (Τσούρλος, 2023).

Context	Hole	Location	Age (Ma)	Rock type	a	m	Source
Oceanic	396B	Mid-Atlantic Ridge	13	Basalt	12.50	1.33	Core/log
	417D	Bermuda Rise	109	Basalt	11.40	1.20	Core
				Basalt	26.40	0.88	Log
	418A	Bermuda Rise	109	Basalt (fresh)	29.50	1.16	Log
				Basalt (altered)	11.50	1.85	Log
	504B	Costa Rica Rift	5.9	Basalt	9.10	1.05	Core
				Basalt (massive flows only)	22.00	1.06	Log
Continental	Falkenberg	Oberpfalz, FRG	—	Granite	4.10	1.08	Core

Εικόνα 3: Παραδείγματα κάποιων παραμέτρων του νόμου του Archie σε κρυσταλλικά πετρώματα, από διάφορες περιοχές και διαφορετικές ηλικίες.

Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υγρού των πόρων επειδή η κινητικότητα των ιόντων στο διάλυμα αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Αυτή η ιδιότητα που έχουν τα διαλύματα λειτουργεί αντίθετα από της συμπεριφοράς των μεταλλικών αγωγών όπου σε αυτή την περίπτωση η αντίσταση αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Έτσι ένας κατά προσέγγιση τύπος για την αντίσταση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία είναι ο εξής:

$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1 + 0,025(t - 18)} \quad (5)$$

όπου, ρ_t είναι η αντίσταση σε $t^\circ\text{C}$, ρ_{18} είναι η αντίσταση σε 18°C , και 0,025 είναι ο θερμικός παράγοντας ειδικής αντίστασης (Παπαζάχος, 1996).

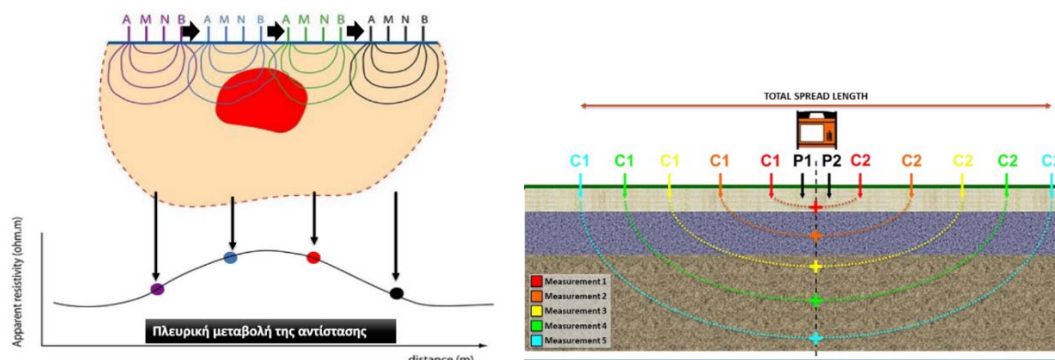
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται από την παρουσία υγρού, τη χημική σύσταση του υγρού, τον όγκο των πόρων που το φιλοξενούν, το δευτερογενές πορώδες (ζώνες διάρρηξης, ρήγματα) και τη θερμοκρασία. Από τη μία επειδή η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, αποτελεί δείκτη αλλαγών και άρα δίνει έμμεση πληροφορία για σημαντικές παραμέτρους, από την άλλη όμως, ακριβώς επειδή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες είναι δύσκολο να γίνει γνωστό σε τι οφείλεται η αλλαγή της αντίστασης και αν πρόκειται για έναν ή πολλούς παράγοντες.

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ωm)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Αργίλοι	2-20
Μάργες	20-60
Αμμοί και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
Συμπαγής δολομίτης	>104
Πορώδης δολομίτης	100-1000
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500
ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	102 –106

Εικόνα 4: Ενδεικτικές τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων.

2.2.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η Ηλεκτρική Τομογραφία (Electrical Resistivity Tomography, ERT) χρησιμοποιείται στο πλαίσιο των επιτόπου (in situ) γεωφυσικών μεθόδων, για τη μελέτη σχετικά επιφανειακών περιοχών. Η ηλεκτρική τομογραφία είναι ένας συνδυασμός των μεθόδων της Όδευσης (Profiling) και της Βυθοσκοπήσης (Vertical Electrical Sounding, VES). Πιο συγκεκριμένα, η όδευση μελετά τις πλευρικές αλλαγές της αντίστασης και οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές (το βάθος διασκόπησης παραμένει σταθερό), ενώ η βυθοσκοπήση μελετά την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης, χρησιμοποιώντας ένα σταθερό κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων και αυξάνοντας συνεχώς την μεταξύ τους απόσταση, για να μετρηθεί ολόένα και μεγαλύτερο βάθος. Συνεπώς, η ηλεκτρική τομογραφία μελετά τόσο την πλευρική όσο και την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης.



Εικόνες 5 και 6: Στην εικόνα 5 (αριστερά) παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η όδευση-οριζοντιογραφία, χρησιμοποιούνται 4 ηλεκτρόδια (τα A, B είναι τα ηλεκτρόδια ρεύματος και τα M, N είναι τα ηλεκτρόδια δυναμικού). Στο διάγραμμα φαίνεται πως παρουσιάζεται ένας στόχος μεγαλύτερης αντίστασης σε σχέση με την απόσταση που διανύεται. Στην εικόνα 6 (δεξιά) φαίνεται πως γίνεται η βυθοσκοπήση ξανά με χρήση 4 ηλεκτροδίων (τα P1, P2 είναι τα ηλεκτρόδια δυναμικού και τα C1, C2 είναι τα ηλεκτρόδια ρεύματος), τα ηλεκτρόδια ρεύματος μετακινούνται σε ίσες αποστάσεις από το κέντρο της μέτρησης για τη μελέτη μεγαλύτερου βάθους.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην ηλεκτρική τομογραφία αποτελείται από ένα σύστημα πολλαπλών ηλεκτροδίων το οποίο λαμβάνει μεγάλο αριθμό δεδομένων αυτόματα και στη συνέχεια εφαρμόζει ένα λογισμικό σε υπολογιστή για την ανακατασκευή της δομής του εδάφους σύμφωνα με τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που συλλέχθηκαν. Πρόκειται για μια μέθοδο με αποτελέσματα αρκετά κοντά στην πραγματικότητα και το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού την κάνει αρκετά εύκολη στη χρήση. Γι' αυτό το λόγο η ηλεκτρική τομογραφία πλέον χρησιμοποιείται σε έρευνα ορυκτών πόρων, σε προμελέτη τεχνικών έργων, σε υδρολογικές έρευνες, καθώς και περιβαλλοντικές έρευνες και αρχαιολογική χαρτογράφηση (Bing Zhou, 2018).

Η ηλεκτρική τομογραφία δίνει ένα συμβατικό σχήμα με σύνθετες αντιστάσεις, το οποίο προκύπτει έπειτα από σάρωση με ηλεκτρικά κύματα τα οποία μεταβάλλουν το ηλεκτρικό δυναμικό στα όρια του σχηματισμού. Με βάση αυτές τις διαταραχές του

δυναμικού γίνεται ανακατασκευή της αγωγιμότητας με μία διαδικασία αντιστροφής. Τα δεδομένα που λαμβάνονται δεν είναι τα πραγματικά, διότι η ηλεκτρική αντίσταση κάθε σχηματισμού επηρεάζεται από τις αντιστάσεις των περιβαλλόντων σχηματισμών, με αποτέλεσμα η αντίσταση που καταγράφεται να είναι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Ο στόχος της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης στο υπέδαφος το οποίο θα παράγει δεδομένα φαινόμενης αντίστασης που θα είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα που μετρήθηκαν. Επομένως, δημιουργείται ένας αλγόριθμος αριθμητικής προσομοίωσης που επαναλαμβάνει μια διαδικασία η οποία σταματάει όταν το μοντέλο είναι πιο κοντά στο πραγματικό. Ύστερα από τη διαδικασία της αντιστροφής, αριθμητικά πειράματα με προσομοιωμένα δεδομένα παράγουν εικόνες υψηλής ποιότητας, τόσο σε 2D όσο και σε 3D (Kuchment & Kunyansky, 2018).

2.3. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

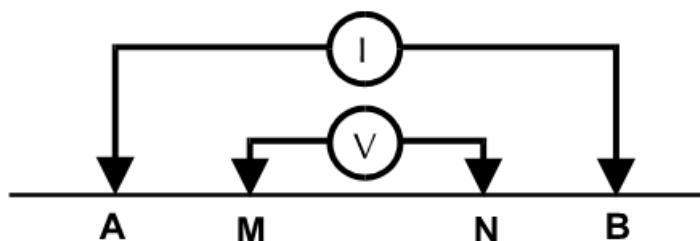
Η Γη δεν είναι ομογενής, όμως προκειμένου να μελετηθούν οι ιδιότητες της αντιμετωπίζεται ως τέτοια. Έχουν προταθεί διάφορες διατάξεις ανάλογα με την περιοχή μελέτης, που κάθε μία έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι αρχικές διατάξεις αποτελούνται από 4 ηλεκτρόδια. Η βασική εξίσωση για τη μέτρηση του δυναμικού είναι η παρακάτω:

$$V_{(MN)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (6)$$

Όπου $V_{(MN)}$ το δυναμικό, ρ η αντίσταση του μετρούμενου σχηματισμού, I το ρεύμα που εφαρμόζεται και τα κλάσματα στην παρένθεση αποτελούν τον γεωμετρικό παράγοντα.

Αντίστοιχα για την αντίσταση ισχύει:

$$\rho_a = \frac{V(MN)}{I} \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (7)$$

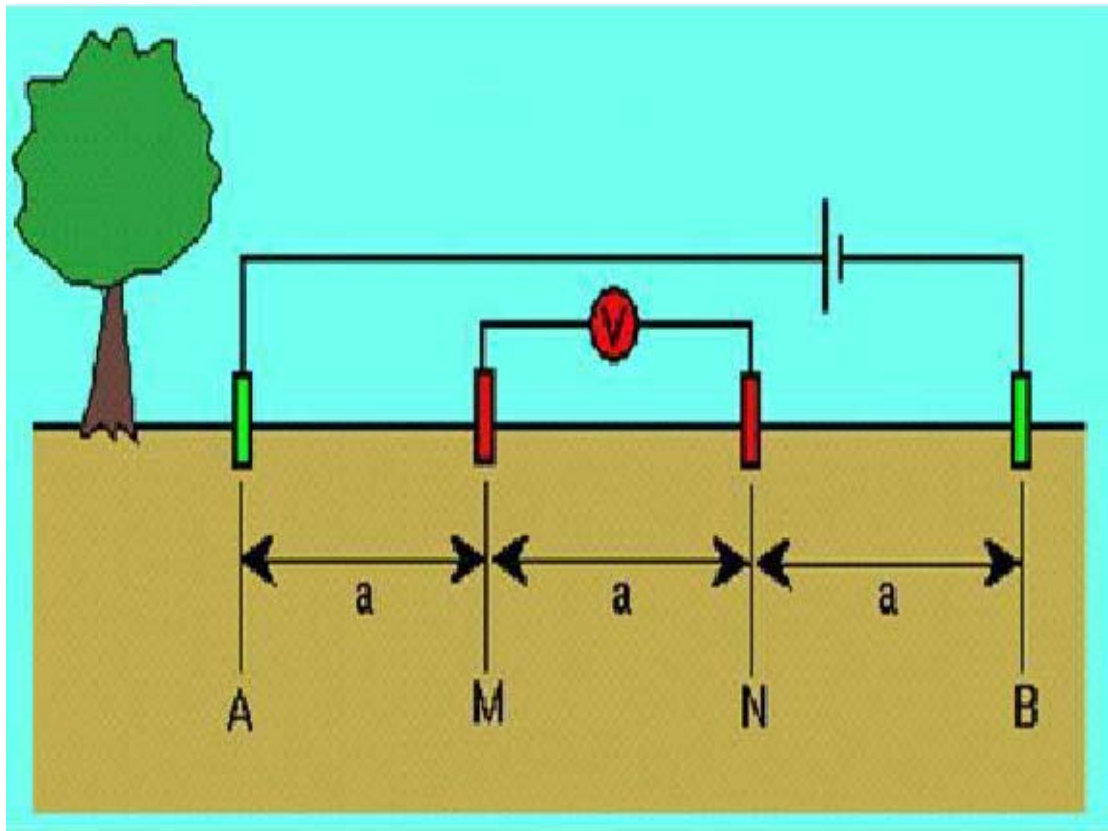


Εικόνα 7: Διάταξη ηλεκτροδίων όπου A,B είναι τα ηλεκτρόδια ρεύματος και M,N τα ηλεκτρόδια δυναμικού.

Στη συνέχεια θα αναγραφούν μερικές από τις δημοφιλέστερες διατάξεις μέτρησης με δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (A,B) και δύο ηλεκτρόδια δυναμικού (M,N).

1. Διάταξη Wenner

Στη διάταξη Wenner όπως φαίνεται και πάρα κάτω οι αποστάσεις ανάμεσα στα ηλεκτρόδια AM, MN και BN είναι ίσες και θεωρείται πως αυτή η απόσταση είναι ίση με a .



Εικόνα 8: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης Wenner (Mines, 2003).

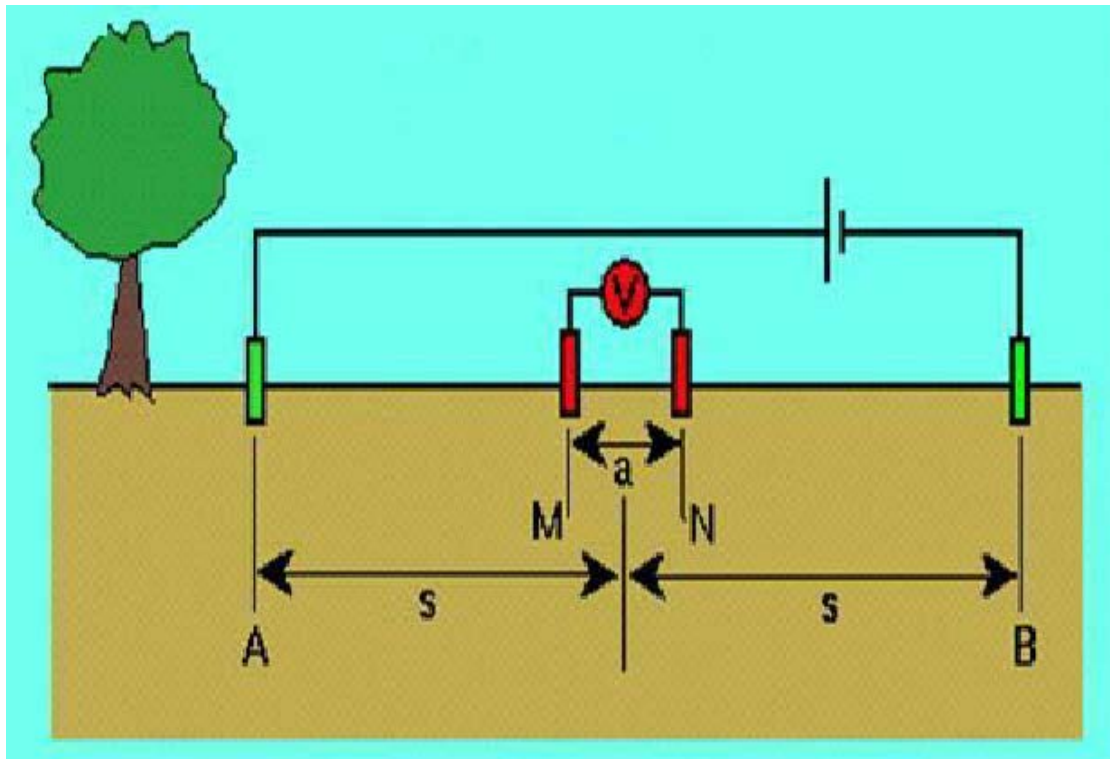
Λόγω της συμμετρίας ο γεωμετρικός παράγοντας στη διάταξη Wenner μπορεί να απλοποιηθεί και η σχέση (7) να εμφανίζεται με απλούστερη μορφή:

$$\rho(a) = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (8)$$

Το $\rho(a)$ αναφέρεται στη φαινόμενη αντίσταση του εδάφους, εφόσον στην πραγματικότητα η $\Gamma\eta$ δεν είναι ομογενής. Η φαινόμενη αντίσταση θα ισούται με τη πραγματική μόνο στην περίπτωση που το πάχος του στρώματος είναι αρκετά μεγάλο και η συστοιχία έχει μικρό μήκος, επομένως δεν "βλέπει" το υποκείμενο στρώμα και κατ' επέκταση δεν επηρεάζεται από κάποια άλλη αντίσταση. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η αντίσταση είναι μία ενδιάμεση τιμή των αντιστάσεων όλων των στρωμάτων που μετρήθηκαν από την διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

2. Διάταξη Schlumberger

Η διάταξη Schlumberger μοιάζει αρκετά με τη διάταξη Wenner, διαφέρουν κυρίως στη γεωμετρία ανάπτυξης τους. Πιο συγκεκριμένα η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού (MN) δεν παραμένει στο μισό της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος (AB) όπως γίνεται στη διάταξη Wenner.



Εικόνα 9: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης Schlumberger (Mines, 2003).

Λόγω της διαφοράς στη συμμετρία οι υπολογισμοί της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι πιο περίπλοκοι απ' ό,τι στη διάταξη Wenner, σύμφωνα με τη σχέση (7):

$$\rho(\alpha) = \pi \frac{V}{I} \frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{MN} \quad (9)$$

Στη συνέχεια τα δεδομένα της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης ($\rho(\alpha)$) απεικονίζονται ως συνάρτηση του $AB/2$. Αυτή η μέτρηση που παρουσιάζει συμμετρία ως προς το κέντρο της μέτρησης πολλές φορές χρησιμοποιείται για βυθοσκοπήσεις καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα των AB τόσο μεγαλύτερο θα είναι το βάθος της διασκόπησης. Για να πραγματοποιηθεί η διάταξη Schlumberger υπάρχει ένας περιορισμός, ο οποίος είναι ο εξής:

$$AB \geq 5MN$$

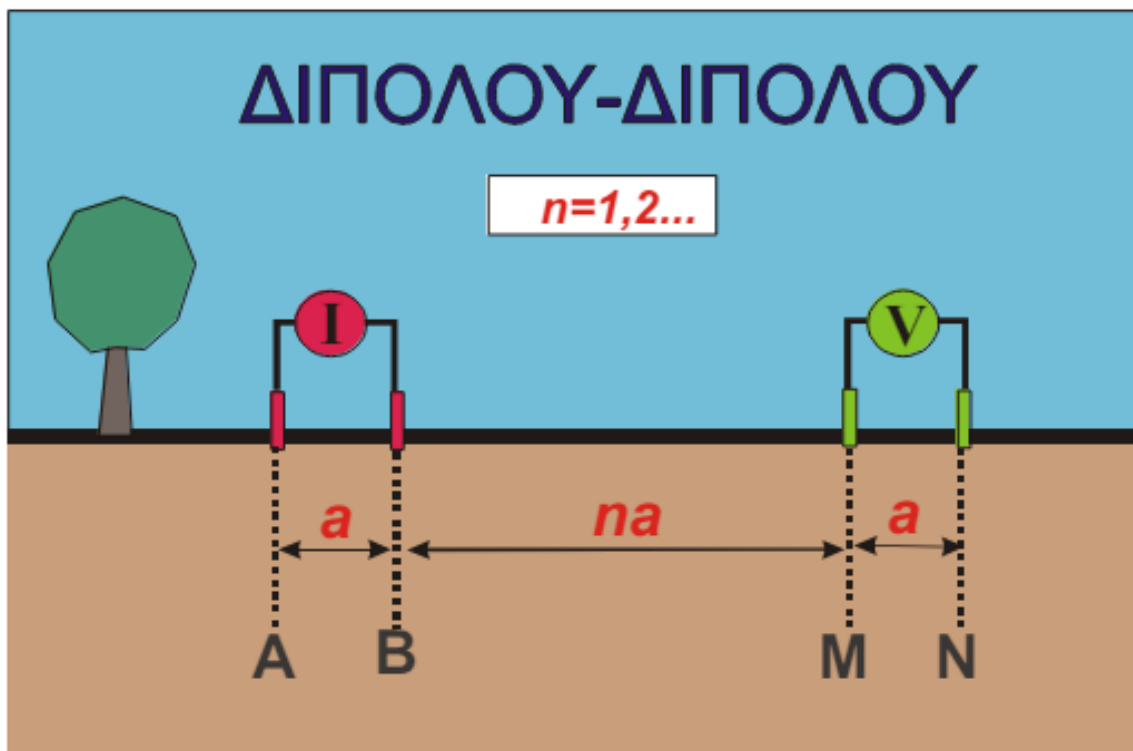
Δηλαδή, η απόσταση AB πρέπει να είναι τουλάχιστον 5 φορές η απόσταση MN.

Η διάταξη Schlumberger έχει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τη διάταξη Wenner και αυτά είναι, πρώτον ότι στη διάταξη Schlumberger ερευνάται ελαφρώς μεγαλύτερο βάθος, δεύτερον η ειδική αντίσταση γίνεται δειγματοληπτικά μεταξύ των

σημείων MN, οπότε η πλευρική ανάλυση είναι καλύτερη σε αυτή τη διάταξη. Τέλος, οι αλλαγές AB και MN γίνονται ανεξάρτητα με αποτέλεσμα οι πλευρικές διακυμάνσεις των ηλεκτροδίων MN ανιχνεύονται ευκολότερα με τη χρήση της διάταξης Schlumberger.

3. Διάταξη Διπόλου- Διπόλου

Η διάταξη Διπόλου- Διπόλου είναι αρκετά χρήσιμη για την ταυτόχρονη μελέτη στις αλλαγές τόσο πλευρικά όσο και σε βάθος.



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης Διπόλου- Διπόλου.

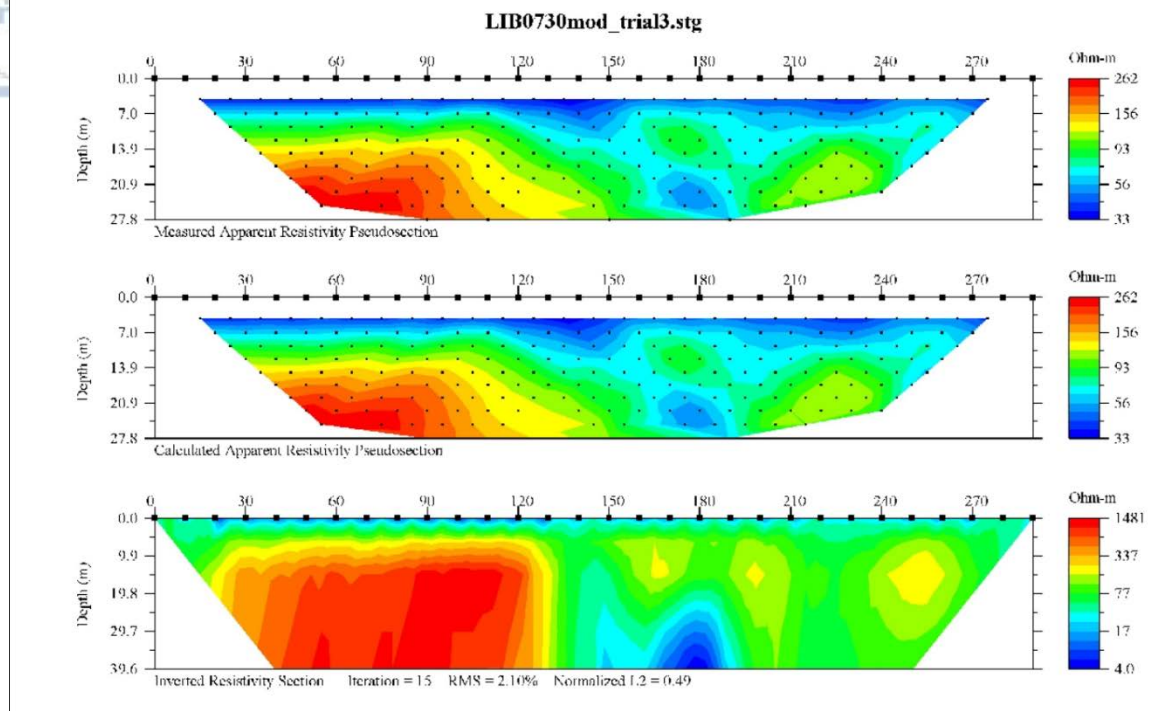
Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση για τη διάταξη Διπόλου- Διπόλου, σύμφωνα με τη σχέση (7) είναι:

$$\rho(\alpha) = \frac{V(MN)}{I} [-\pi n(n+1)(n+2)a] \quad (10)$$

Το πραγματικό βάθος για τη διάταξη αυτή είναι μεγαλύτερο από $3a$ αλλά μικρότερο από $4a$, δηλαδή, το μέγιστο βάθος διερεύνησης είναι της τάξης του 0,2 φορές το συνολικό μήκος των καλωδίων (L. S. Edwards, 1977).

Η μέθοδος Διπόλου- Διπόλου έχει ως μειονεκτήματα ότι απαιτεί υψηλά ηλεκτρικά ρεύματα για τη διερεύνηση σε βάθος και δεύτερον είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί η πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση από τη φαινόμενη που δίνει το μοντέλο (Dr. Don Stierman, 2005).

Τα αποτελέσματα που δίνει η διάταξη Διπόλου- Διπόλου είναι τα παρακάτω:



Εικόνα 11: Αποτελέσματα ενός προφίλ Διπόλου-Διπόλου σε αναζήτηση της άκρης του ανθρακικού πετρώματος (υψηλή ειδική αντίσταση - κόκκινο) στον κρατήρα Liberty. Η επάνω ψευδοτομή είναι η παρατηρούμενη, η κάτω το γεωηλεκτρικό μοντέλο και το κέντρο είναι η ψευδοτομή που υπολογίζεται για το γεωλογικό μοντέλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΤΟΕΣ ΚΑΙ ΕΓΚΟΙΛΑ

3.1. ΚΑΡΣΤΙΚΗ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η λέξη καρστ (karst) προέρχεται από την Ινδοευρωπαϊκή λέξη karra/gara η οποία σημαίνει «το πετρώδες έδαφος». Το όνομα αυτό προκύπτει από μια περιοχή στα σύνορα Σλοβενίας και Ιταλίας όπου υπάρχει μια περιοχή με ασβεστόλιθους που ονομάζεται ΚΡΑΣ. Στην περιοχή αυτή, ιστορικά, υπήρχε πετρώδες και άγονο έδαφος, λόγω της αποψίλωσης των δασών από την υλοτόμηση και την ανεξέλεγκτη υπερβόσκηση, που είχε συμβάλει στην απώλεια μεγάλου μέρους του εδαφικού μανδύα στις δολίνες και στα σπήλαια.

Γενικά, το καρστικό ανάγλυφο δημιουργείται σε ανθρακικούς σχηματισμούς όπως είναι οι ασβεστόλιθοι, οι δολομίτες, τα ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή κ.α. καθώς και στους εβαπορίτες όπως είναι ο γύψος, οι ανυδρίτες και τα άλατα. Το χαρακτηριστικό αυτών των σχηματισμών είναι η μεγάλη ικανότητα διάλυσης και αποσάθρωσης, καθώς αντιπροσωπεύεται από ένα σύμπλεγμα καρστικών μορφών τόσο επιφανειακά όσο και υπόγεια τα οποία έχουν ιδιαίτερα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Πέρα από τη διάλυση (χημική και μηχανική), τα καρστ έχουν και

μεγάλη δευτερογενή περατότητα της μάζας τους σε σχέση με τα άλλα πετρώματα. Ως αποτέλεσμα όλων αυτών δημιουργείται το φαινόμενο της καρστικοποίησης.

Το νερό που συμβάλει στην καρστικοποίηση μπορεί να είναι μετεωρικό, θαλάσσιο, κάποιο υπόγειο γεωθερμικό ρευστό ή ακόμη και ανάμειξη δύο ή περισσότερων από τα παραπάνω. Η εξέλιξη ενός καρστ είναι μια διαδικασία αργή και συνεχόμενη που μπορεί να διαρκέσει εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια και συμβαίνει σε μεγάλες επιφανειακές αλλά και υπόγειες εκτάσεις πολλών τετραγωνικών χιλιομέτρων (Μ. Γ. Δεληγιάννη, 2019).

Ο Huntoon (1995) καθόρισε το καρστ ως εξής:

«Το σύστημα του καρστ είναι ένα ενσωματωμένο σύστημα της μάζας των διαλυτών πετρωμάτων, τα οποία με την επίδραση του νερού που κυκλοφορεί σε αυτά, και με την διαλυτότητα, και την διαπερατότητα τους, διαμορφώνονται στις καρστικές μορφές των κατακλάσεων, ρηγματώσεων, αγωγών οι οποίες διευκολύνουν την κυκλοφορία του νερού».

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, στοά ή έγκοιλο είναι οποιαδήποτε φυσική κοιλότητα στο εσωτερικό της Γης, από μερικά εκατοστά μέχρι κάποια μέτρα. Σε μεγαλύτερη κλίμακα γίνεται λόγος για σπήλαιο.

3.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΟΩΝ ΚΑΙ ΕΓΚΟΙΛΩΝ

Οι κύριες μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης που χρησιμοποιούνται για την εύρεση στοών και εγκοίλων είναι αυτές του γεωραντάρ (GPR) και της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Σπανιότερα χρησιμοποιούνται σεισμικές μέθοδοι (διάθλασης και πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων, MASW) καθώς και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι όπως η πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF), για τις οποίες συνοπτική περιγραφή παρουσιάζεται στη συνέχεια.

3.2.1.ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ (GPR)

Η μέθοδος του γεωραντάρ είναι μια σχετικά πρόσφατη γεωφυσική μέθοδος κατά την οποία χρησιμοποιούνται παλμοί ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για να δώσει την απεικόνιση του υπεδάφους. Πρόκειται για μια μη καταστρεπτική μέθοδο, καθώς η συλλογή των δεδομένων γίνεται επιφανειακά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και σε γεωτρήσεις. Η μέθοδος αυτή παρέχει αποτελέσματα για τα πρώτα στρώματα του υπεδάφους (~<20m). Το γεωραντάρ βρίσκει εφαρμογή στην οδοποιία, σε εύρεση θαμμένων δικτύων, σε περιβαλλοντικές και αρχαιολογικές μελέτες, σε μελέτες σε παγετώνες ακόμα και σε ανίχνευση ναρκών. Το GPR χρησιμεύει όταν χρησιμοποιείται για τη διάκριση του σχήματος και της θέσης στόχων σε διαφορετικά βάθη, για μέτρηση στόχων όπου οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες έχουν κάποια αντίθεση, για εντοπισμό πολύ μικρών στόχων (από μερικά χιλιοστά ή εκατοστά) με χρήση υψηλής συχνότητας, αλλά με πολύ μικρό βάθος. Ακόμη, είναι αρκετά χρήσιμο γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλοντα τόσο ξηρά όσο και υγρά (όχι σε θαλασσινό νερό).

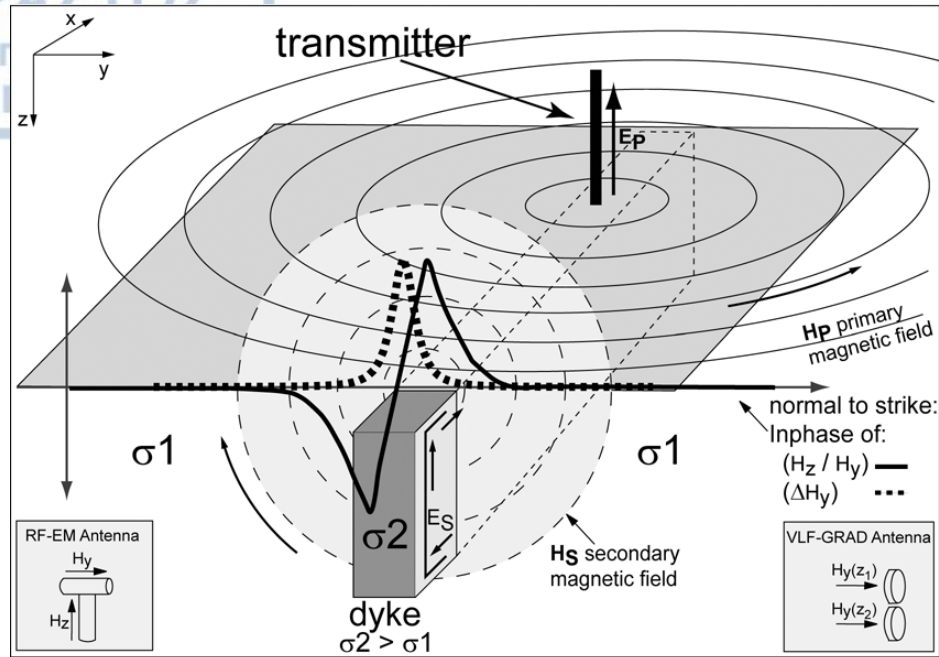
Το GPR όπως φαίνεται και παρακάτω αποτελείται από τη μονάδα ελέγχου και έναν φορητό υπολογιστή για τη ρύθμιση και τη συλλογή των δεδομένων, το οδόμετρο που βρίσκεται ενσωματωμένα στη μία ρόδα του μηχανήματος για να μην χρειάζεται να γίνει χρήση μεζούρας- μέτρου και τέλος από τον πομπό και τον δέκτη που στέλνουν και λαμβάνουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.



Εικόνα 12: Μηχάνημα γεωραντάρ και τα μέλη από τα οποία αποτελείται.

3.2.2.ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (VLF)

Η μέθοδος πολύ χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό μεγάλου μήκους ηλεκτρικών αγωγών όπως ρηξιγενείς επιφάνειες. Το VLF λειτουργεί σε συχνότητες 15-30 KHz και είναι πολύ εύκολη στη χρήση, καθώς έχει και πολύ φθηνό εξοπλισμό. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί αυτή η μέθοδος είναι ο εξής. Ένας πομπός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα και όταν συναντήσει ένα σώμα που διαφοροποιείται από το περιβάλλον δημιουργείται δευτερογενές πεδίο αρχικά ηλεκτρικής και στη συνέχεια ηλεκτρομαγνητικής φύσης, το οποίο με τη σειρά του καταγράφεται από έναν δέκτη. Συνήθως, το πρωτογενές πεδίο προέρχεται από κάποιους σταθμούς που είναι εγκατεστημένοι σε διάφορα μέρη σε όλο τον κόσμο και ανάλογα με τη μέτρηση που πρέπει να πραγματοποιηθεί γίνεται επιλογή του καταλληλότερου (μέγιστο όταν το πηνίο είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο). Για τον εντοπισμό ενός σχηματισμού πρέπει η κίνηση που θα πραγματοποιηθεί να είναι κάθετη σε αυτόν και ο σταθμός να είναι στην ίδια διεύθυνση με το ρήγμα.

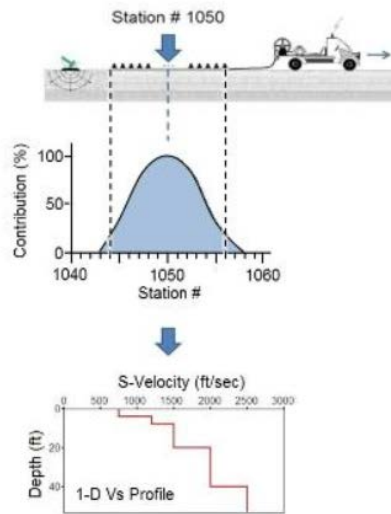


Εικόνα 13: Κατανομή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για τη μέθοδο VLF στην πόλωση E με θεωρητικά σήματα πάνω από ένα κατακόρυφο αγώγιμο ανάχωμα (μετά τους Bosch και Müller, 2001).

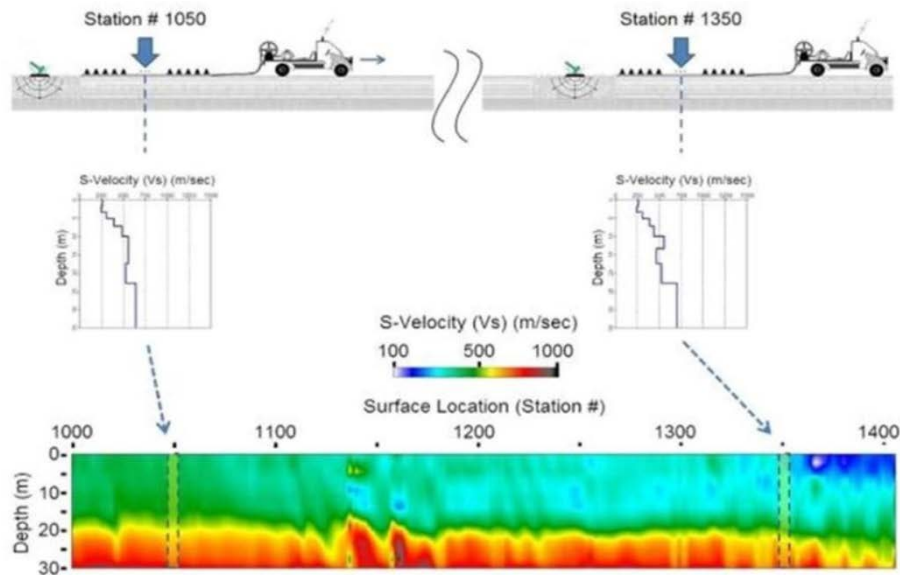
3.2.3.ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ (MASW)

Η MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) είναι μια τεχνική σεισμικής έρευνας, που αρχικά εισήχθη από τους Park et al. (1999), όπου με τη χρήση της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) αξιολογείται η δομή του υπεδάφους σε μορφές 1-D, 2-D και 3-D κυρίως για βάθη 0-30 μέτρα. Για την παραγωγή μιας τυπικής δισδιάστατης διατομής της ταχύτητας V_s , πραγματοποιείται η συλλογή πολυκαναλικών σεισμικών αρχείων σε πολλές θέσεις όπως φαίνεται και στη συνέχεια. Μετά από κάθε καταγραφή δημιουργείται ένα μονοδιάστατο προφίλ βάθους- ταχύτητας, πολλαπλάσιο του οποίου θα πραγματοποιήσει στη συνέχεια την τελική δισδιάστατη διατομή.

1-D S-Velocity (V_s) Profiling (Lateral Contribution)



Εικόνα 14: Ένα σχηματικό που δείχνει μια διάταξη πεδίου για 1-D MASW έρευνα (επάνω) και το τελικό γινόμενο του προφίλ S-velocity (V_s) (κάτω). Εμφανίζεται μια καμπύλη που αντιπροσωπεύει τη σχετική συμβολή του υποεπιφανειακού μοντέλου ταχύτητας σε διαφορετικό πλευρικό τμήμα εντός της διάταξης δέκτη που χρησιμοποιείται για την απόκτηση δεδομένων (μέση).



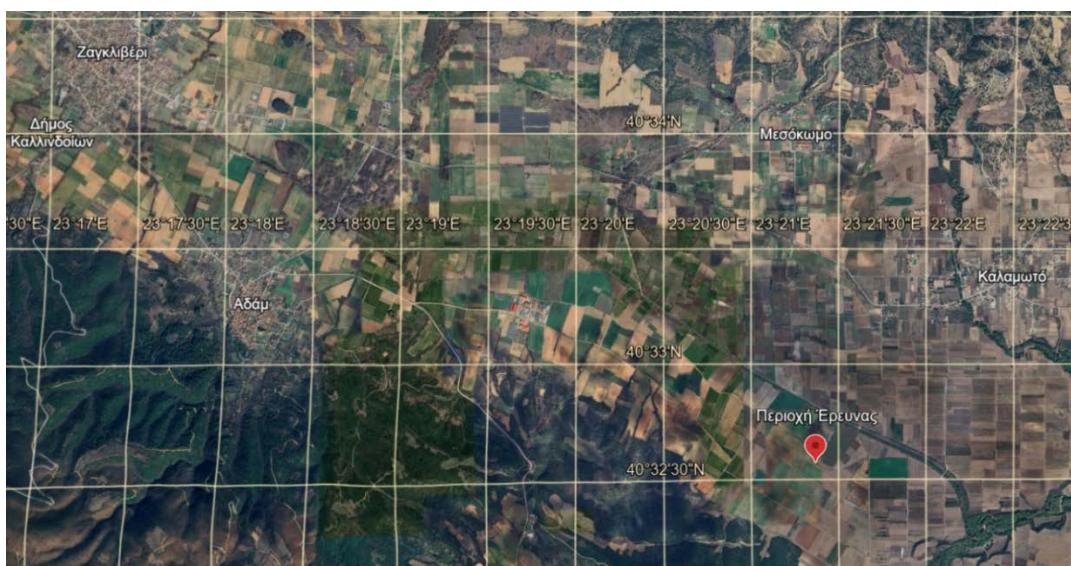
Εικόνα 15: Μια σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας απόκτησης πεδίου για 2-D έρευνα MASW. Μια εγγραφή πεδίου πολλαπλών καναλιών που λαμβάνεται σε μια θέση επιφάνειας (πάνω) δημιουργεί ένα προφίλ 1-D ταχύτητας S (V_s) (μεσαία), πολλαπλάσιο του οποίου κατασκευάζει την τελική διατομή 2-D ταχύτητας (V_s) (κάτω).

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της MASW είναι η χαρτογράφηση του ορίου του εδάφους με το υποκείμενο πέτρωμα (bedrock), καθώς στο σημείο αυτό παρατηρείται μια σημαντική αύξηση της ταχύτητας Vs από τα 300 m/sec στα 1000 m/sec. Ακόμη χρησιμοποιείται για την κατακόρυφη καθώς και την οριζόντια διακύμανση του εδάφους με αλλαγές στην ταχύτητα Vs. Εφαρμογή ακόμη βρίσκει σε εντοπισμό ανωμαλιών που μπορεί να οφείλονται σε ανάπτυξη κενών, σήραγγες, φθορά του υποβάθρου, απώλεια συνοχής σε υλικά κ.α. (MASW.com).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1. ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

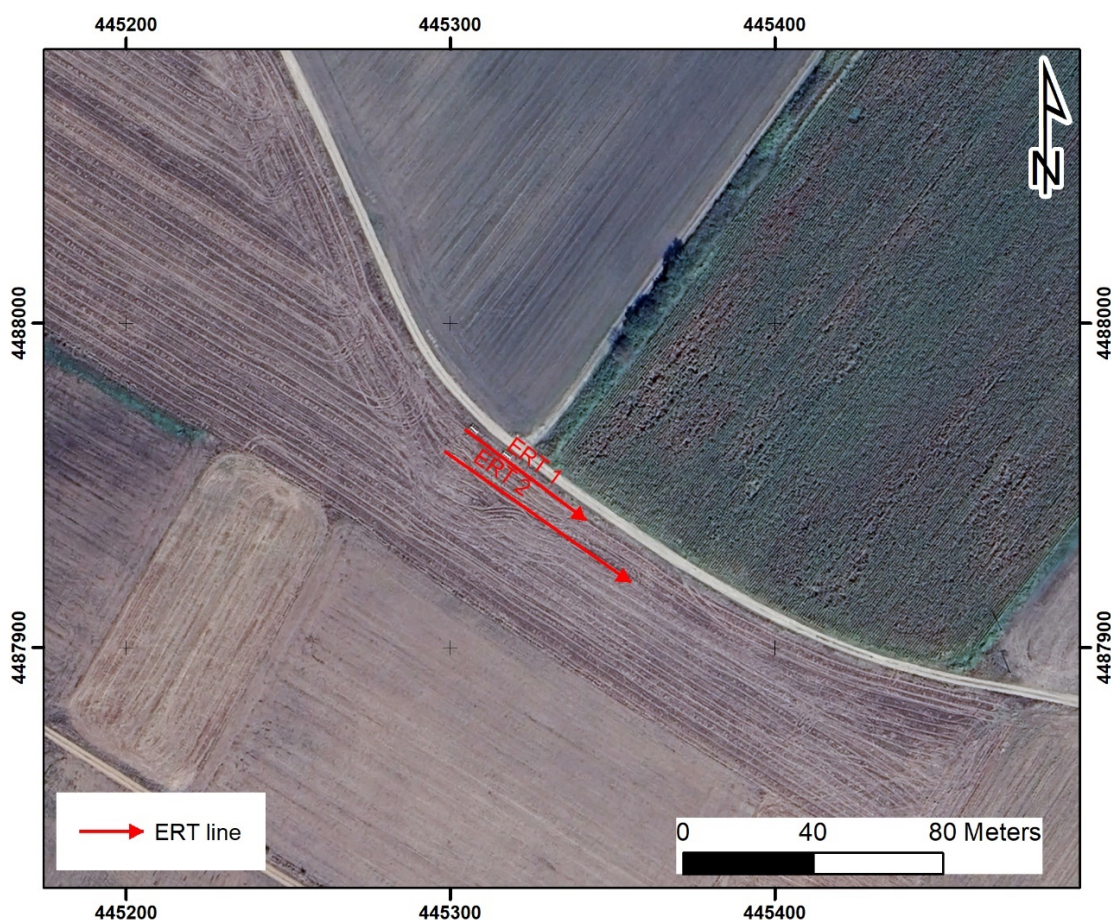
Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στις 5 Οκτωβρίου 2023, στα Νοτιοανατολικά του χωριού Ζαγκλιβέρι και Νότια του χωριού Μεσόκωμο. Απέχει περίπου 4,7 χιλιόμετρα από το χωριό Αδάμ. Η ακριβής θέση φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη, καθώς και οι αποστάσεις από τις γύρω περιοχές. Πρόκειται για ένα μέρος στα αμπέλια της οινοποιίας Αδάμ Οίνος, όπου ο ιδιοκτήτης ενημέρωσε για την πιθανή ύπαρξη στοάς.



Χάρτης 1: Η περιοχή έρευνας και η θέση της από εικόνα του Google Earth.

Η επιλογή της θέσης έγινε σύμφωνα με την καθοδήγηση του υπεύθυνου για την περιοχή που πιθανολογείται η ύπαρξη της στοάς και πραγματοποιήθηκαν δύο ηλεκτρικές τομογραφίες, παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στη δομή αναζήτησης. Η πρώτη μέτρηση (ERT 1) είχε διάταξη 47 μέτρων, δηλαδή 48 ηλεκτρόδια με απόσταση ενός μέτρου μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα και σύμφωνα με τον εμπειρικό κανόνα το βάθος διασκόπησης που αναμένεται είναι το 30% του ανοίγματος των ηλεκτροδίων,

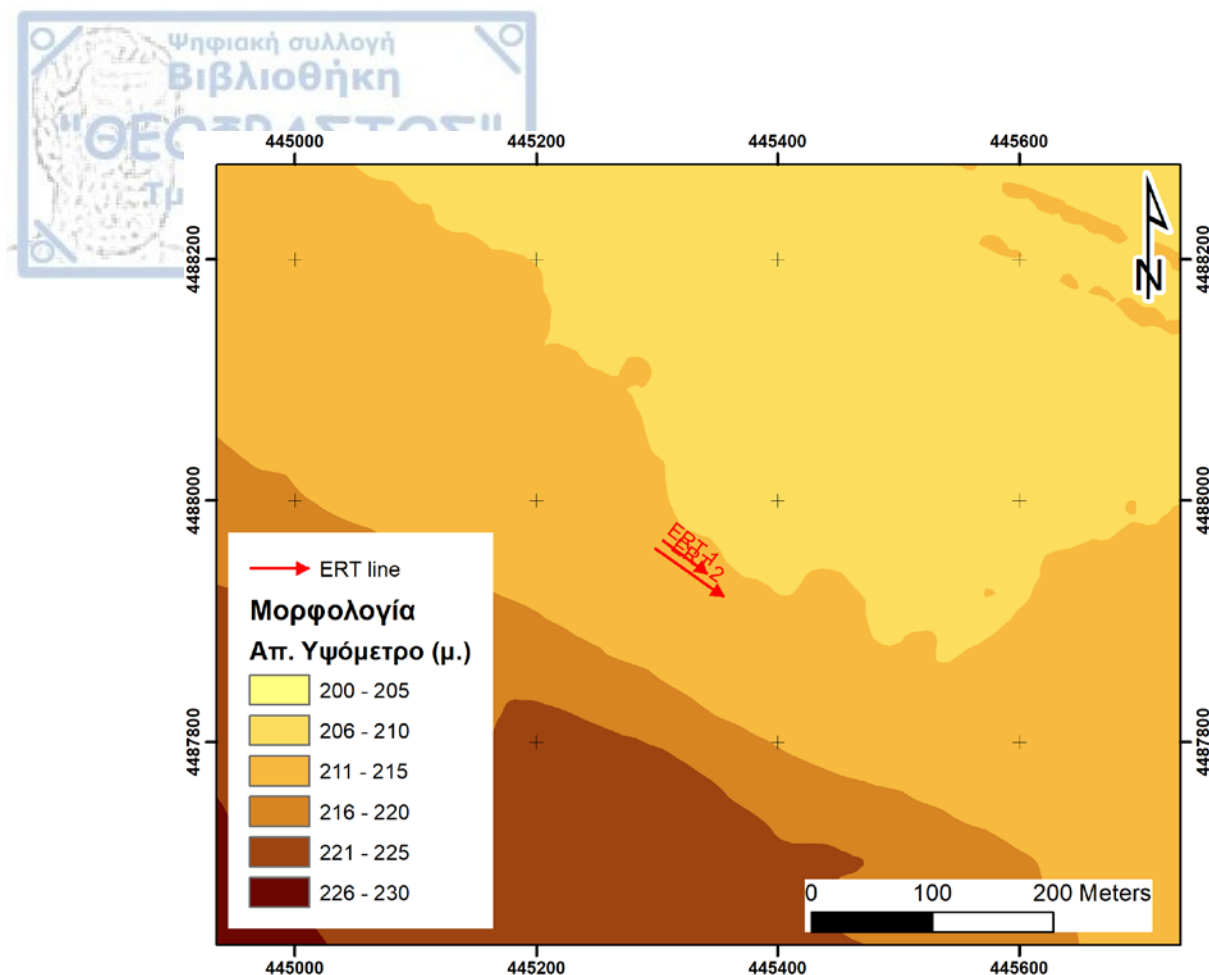
δηλαδή περίπου τα πρώτα 15 μέτρα. Στη δεύτερη μέτρηση (ERT 2) χρησιμοποιήθηκαν και πάλι 48 ηλεκτρόδια αλλά η απόσταση μεταξύ τους αυξήθηκε στα 1,5 μέτρα, ώστε το βάθος διασκόπησης να είναι μεγαλύτερο, δηλαδή η μέτρηση αυτή είχε άνοιγμα ηλεκτροδίων 70,5 μέτρα.



Χάρτης 2: Η περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι δύο ηλεκτρικές τομογραφίες.

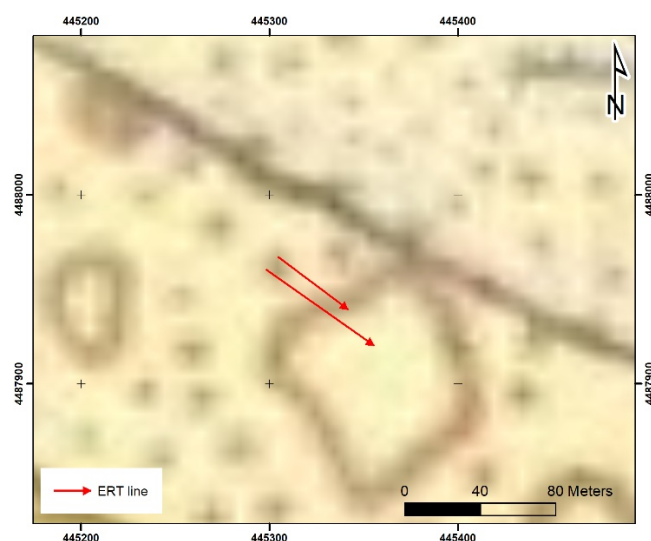
4.2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η έρευνα διεξάχθηκε σε μία επίπεδη περιοχή 211- 215 μέτρα υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας και γενικά το ανάγλυφο δείχνει μια ομαλή άνοδο προς τα Νότιο- Νοτιοδυτικά.



Χάρτης 3: Τοπογραφικός χάρτης περιοχής μελέτης.

Όπως φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη στην περιοχή υπάρχουν λιμναία ιζήματα (αμμούχες άργιλοι, ιλύς και λεπτόκοκκες άμμοι, πλούσιες σε μαρμαρυγία. Ακόμη υπάρχει η σειρά ερυθρών αργίλων και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσα στο κόκκινο πλαίσιο βρίσκονται πάνω στο μεσαίο σύστημα αναβαθμίδων (άμμοι, χαλίκια, πιθανόν παλαιότερα λιμναία ιζήματα.





Λιμναία ιζήματα : άμμοι, άργιλοι, ίλυσ και λεπτόκοκκες άμμοι, πλούσιες σε μαρμαρυγία.



Μεσαίο σύστημα άναβαθμιδών : άμμοι (Pt.t₁s) ή χαλίκια (Pt.t₁c). Η κορυφή του συστήματος βρίσκεται 10-15 μ. πάνω από τη στάθμη των ποταμών. Στη περιοχή αυτή πιθανόν ν' αντιπροσωπεύει παλαιότερα ιζήματα λιμνών.



Σειρά έρυθρων άργιλων : έρυθρές έως κεραμόχρωμες, ιλυώδεις και μαρμαρυγιούχες, που περιέχουν μικρά άσβεστιτικά συγκρίματα.



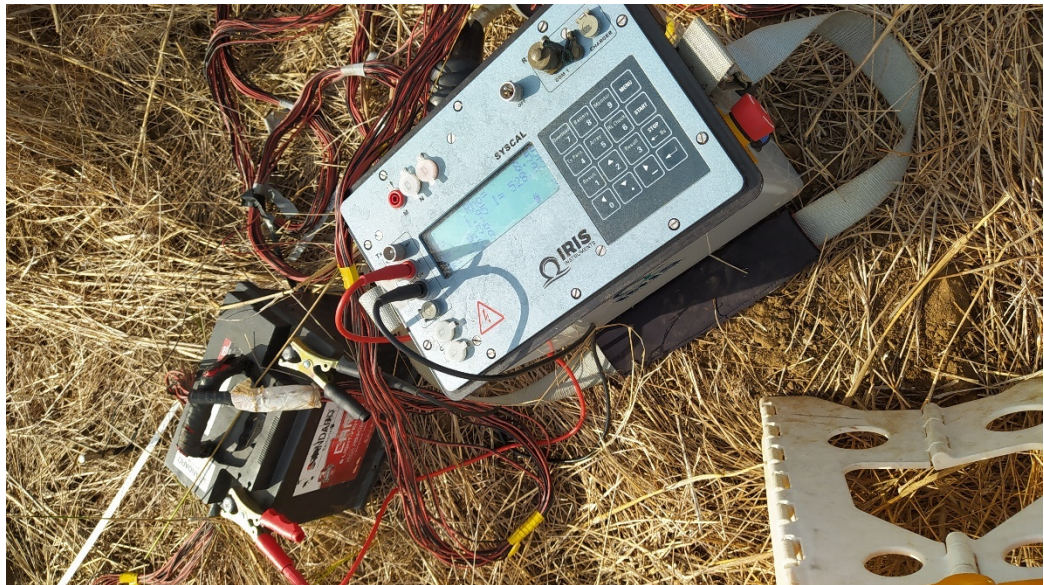
Χάρτες 4 και 5: Ο χάρτης 4 είναι μεγέθυνση του κόκκινου πλέγματος του χάρτη 5. Ο χάρτης 5 απεικονίζει τη λιθολογία της περιοχής μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

Ανάλογα με το αντικείμενο της έρευνας και το στόχο που αναζητείται επιλέγεται η καταλληλότερη μέθοδος με βάση τα στοιχεία του εδάφους, το βάθος που απαιτείται και τον εδαφικό θόρυβο της περιοχής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για την εύρεση στοάς κρίθηκε πως η καλύτερη μέθοδος είναι η ηλεκτρική τομογραφία, καθώς το βάθος της στοάς δεν αναμένεται πολύ μεγάλο και δεν υπάρχει ιδιαίτερος εδαφικός θόρυβος στην περιοχή από ηλεκτρικά δίκτυα.

5.1. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από το όργανο μέτρησης Syscal Pro, την μπαταρία τροφοδοσίας του, δύο πολυκάναλα καλώδια που το καθένα έχει 24 εξόδους, η μετροταινία, τα ηλεκτρόδια και το διαφορικό GPS της Trimble για τη γεωαναφορά των σημείων των μετρήσεων.



Εικόνα 16: Δεξιά το όργανο καταγραφής Syscal Pro και αριστερά η μπαταρία τροφοδοσίας του, από προσωπικό αρχείο.

5.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Ξεκινώντας τη διαδικασία των μετρήσεων, συνδέθηκε το όργανο καταγραφής με τη μπαταρία τροφοδοσίας και στη συνέχεια με τα δυο πολυκάναλα καλώδια. Σε κάθε απόληξη των καλωδίων συνδέθηκε με μονωτική ταινία από ένα ηλεκτρόδιο, τα οποία καρφώθηκαν στο έδαφος σε ευθεία γραμμή ανά 1 μέτρο και με διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ. Έτσι, η συνολική μέτρηση αποτελούνταν από 47 μέτρα, με κέντρο της μέτρησης μεταξύ 24^{ου} και 25^{ου} ηλεκτροδίου και με βάση του εμπειρικού κανόνα (το βάθος διασκόπησης είναι περίπου το 30% του συνολικού ανοίγματος των ηλεκτροδίων) το βάθος διασκόπησης αναμενόταν στα 15 περίπου μέτρα.

Πριν αρχίσει η μέτρηση, έγινε μια δοκιμαστική μέτρηση με διάρκεια μερικών λεπτών, ώστε το όργανο να εμφανίσει τις αντιστάσεις που καταγράφονται ανάμεσα σε δυο ηλεκτρόδια κατά ζεύγη. Αυτό γίνεται αυτόματα από το όργανο, δίνοντας ρεύμα σε ένα ζεύγος ηλεκτροδίων και μετρώντας το δυναμικό σε δύο άλλα. Αν σε κάποιο ζεύγος ηλεκτροδίων η τιμή της αντίστασης είναι πολύ μεγάλη, αυτό σημαίνει ότι έχουμε μεγάλη αντίσταση επαφής. Πιο συγκεκριμένα η μεγάλη τιμή αντίστασης μπορεί να οφείλεται στο ότι το ηλεκτρόδιο δεν έχει καρφωθεί καλά στο έδαφος και δεν

έχει καλή επαφή με το περιβάλλον του, είτε στο γεγονός ότι το έδαφος είναι αρκετά άνυδρο και δημιουργεί κενά ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και αυτό. Το πρόβλημα αυτό λύνεται εύκολα καρφώνοντας καλύτερα το ηλεκτρόδιο ή ρίχνοντας λίγο νερό στο ηλεκτρόδιο έτσι ώστε -λειτουργώντας σαν ηλεκτρολύτης- να μειώσει την αντίσταση επαφής μεταξύ ηλεκτροδίου και εδάφους.

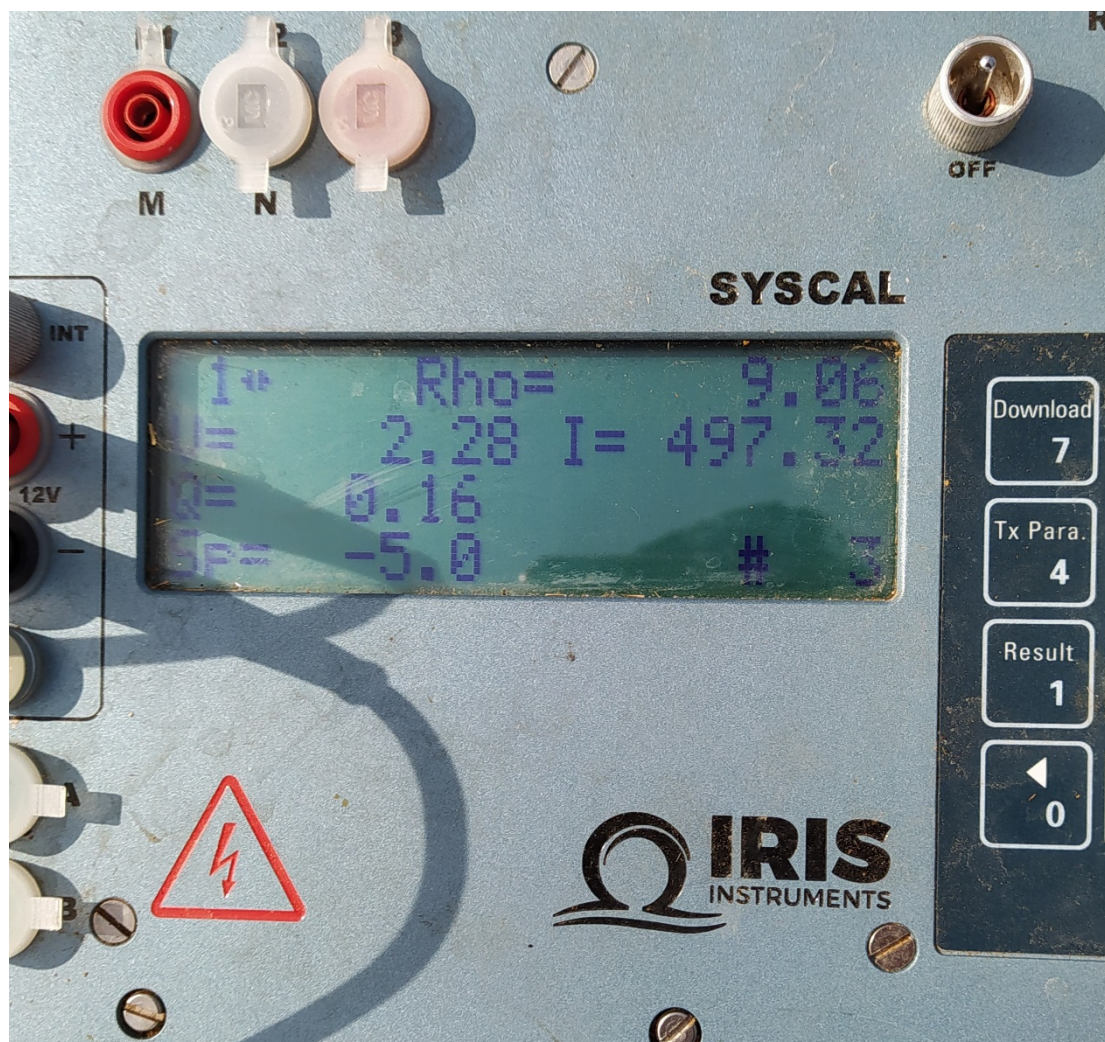


Εικόνα 17: Ηλεκτρόδιο καρφωμένο στο έδαφος με την καθοδήγηση της μετροταινίας, ώστε να έχουν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, από προσωπικό αρχείο.

Ξεκινώντας τη μέτρηση, επιλέχθηκε ως καταλληλότερο το πρωτόκολλο Διπόλου-Διπόλου με διάρκεια παλμού 250 μιλισεκόντ, διότι αυτό το πρωτόκολλο αποδίδει καλύτερα τις πλευρικές μεταβολές της αντίστασης. Ακόμη, εφαρμόστηκε το πρωτόκολλο πολλαπλής βαθμίδας (Multi Gradient).

Αρχικά επιλέγει το πρώτο ζεύγος ηλεκτροδίων και εφαρμόζει ρεύμα και ελάχιστος αριθμός μετρήσεων ανά ζεύγος είναι 3. Η τυπική απόκλιση (Q) έχει οριστεί ως 1, επομένως αν φτάσει στην ορισμένη τιμή τότε σταματάει και προχωράει στο επόμενο ζεύγος. Στην περίπτωση που δεν φτάσει στην ορισμένη τιμή τυπικής απόκλισης συνεχίζει τις μετρήσεις στο ίδιο ζεύγος ηλεκτροδίων μέχρι τον μέγιστο αριθμό των 6 μετρήσεων. Επιπλέον, έχει οριστεί η ενδιάμεση απόσταση της μέτρησης (N) η οποία δεν υπερβαίνει τα 8 μέτρα.

Το όργανο μετρά την ένταση του ρεύματος που διοχετεύεται στα ηλεκτρόδια ρεύματος, την διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού και -με γνωστές τις θέσεις των ηλεκτροδίων- υπολογίζει την φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (σε Ωμόμετρα, Ωm).



Εικόνα 18: Οι ενδείξεις του οργάνου καθώς παίρνει τις μετρήσεις. Φαίνονται οι μετρήσεις του δυναμικού (V), του ρεύματος (I), της τυπικής απόκλισης (Q), της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Rho), του φυσικού δυναμικού (Sr) καθώς και κάτω δεξιά ο αριθμός επανάληψης για το συγκεκριμένο ζεύγος ηλεκτροδίων. Από προσωπικό αρχείο.

Κατά τη διάρκεια που το όργανο λάμβανε τις μετρήσεις, έγινε μέτρηση των συντεταγμένων με το διαφορικό GPS ανά 8 μέτρα, και ονομάστηκαν ανάλογα με τον αριθμό του ηλεκτροδίου (π.χ. 101 για το πρώτο ηλεκτρόδιο, 108 για την επόμενη μέτρηση μετά από 8 μέτρα κλπ.).



Εικόνα 19: Αριστερά φαίνεται το διαφορικό GPS και δεξιά φαίνεται το όργανο καταγραφής των δεδομένων που συλλέγει το GPS. Από προσωπικό αρχείο.

Ύστερα από την πρώτη μέτρηση, τα δεδομένα περάστηκαν σε υπολογιστή και με την διαδικασία της αντιστροφής πάρθηκε το γεωηλεκτρικό μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της τομής. Τα αποτελέσματα αυτά θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Μετά το τέλος της πρώτης μέτρησης και λόγω των αποτελεσμάτων που θα αναλυθούν στη συνέχεια, αποφασίστηκε η πραγματοποίηση μιας δεύτερης ηλεκτρικής τομογραφίας, παράλληλη στην πρώτη και στα 10 μέτρα απόσταση προς το Νότο. Στη δεύτερη τομογραφία η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά ηλεκτρόδια ήταν 1.5 μέτρο, με αποτέλεσμα το συνολικό άνοιγμα των ηλεκτροδίων να είναι 70,5 μέτρα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια και τα αποτελέσματα αυτής της ηλεκτρικής τομογραφίας αναλύονται επίσης παρακάτω.

5.3. ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ-ΑΝΑΛΥΣΗ

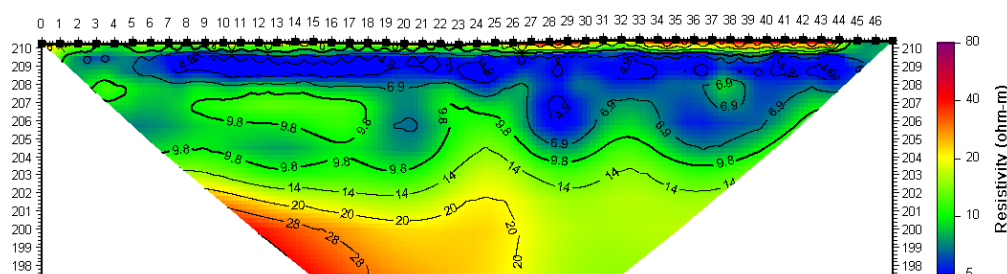
Με όλη την προαναφερθείσα διαδικασία, η συνέχεια της μελέτης αφορά το υπολογιστικό κομμάτι καθώς και το κομμάτι της απεικόνισης της μορφής του υπεδάφους. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν δύο πρωτόκολλα, το dd αναφέρεται στη μέθοδο Διπόλου- Διπόλου και το mg αναφέρεται στη μέθοδο Multi Gradient.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς και την ανάλυση είναι το DC_2DPRO το οποίο παρέχει ένα περιβάλλον εύκολο στη χρήση και γρήγορο στην επεξεργασία και την ανάλυση των δεδομένων. Το πρόγραμμα δουλεύει με αρχεία .a2d, ενώ τα αρχεία που εισάγονται βρίσκονται σε .dat μορφή. Αρχικά, γίνεται η

εισαγωγή των δεδομένων (import) και στη συνέχεια επιλέγουμε τις παραμέτρους της αντιστροφής των δεδομένων (Numerical Modeling, Invert Model). Έτσι, δημιουργείται μια πρώτη εικόνα του υπεδάφους. Έπειτα, αλλάζουμε το Error Minimalization σε L1 και πατάμε το run inversion. Όσον αφορά την κλίμακα που επιλέγεται, προτιμάται η λογαριθμική διότι απεικονίζεται καλύτερα το μεγάλο εύρος αντιστάσεων μέσω της χρωματικής κλίμακας.

Το Root Mean Square (RMS), αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για τη μέτρηση, καθώς δείχνει την απόκλιση του αποτελέσματος που εμφανίζει από τα πραγματικά δεδομένα. Ένα καλό ποσοστό RMS είναι 5% ή μικρότερο.

Αρχικά, η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε για τα δεδομένα της πρώτης ERT και για το πρωτόκολλο Διπόλου- Διπόλου και το αποτέλεσμα είναι το εξής:

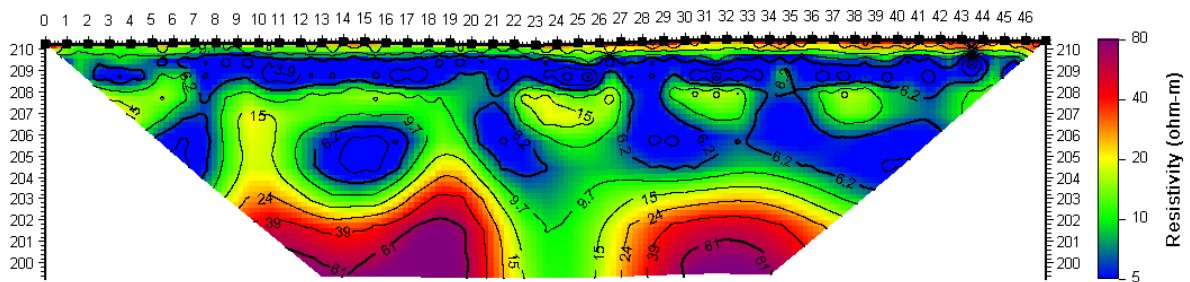


Εικόνα 20: Απεικόνιση του υπεδάφους για το πρωτόκολλο Διπόλου- Διπόλου, κάτω από την πρώτη ERT. Η χρωματική κλίμακα στα δεξιά δείχνει τις αντιστάσεις από τις χαμηλές που φαίνονται με μπλε χρώμα μέχρι υψηλές που φαίνονται με μωβ χρώμα. Στον οριζόντιο άξονα φαίνονται τα μέτρα της διάταξης, ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας.

Σε περισσότερη ανάλυση για την εικόνα 20, φαίνεται στα πρώτα λίγα εκατοστά να υπάρχει ένα στρώμα με μέτριες έως υψηλές αντιστάσεις (10- 40 Ohm), οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε παρουσία υγρασίας. Στα επόμενα περίπου 2- 3 μέτρα φαίνεται ένα στρώμα χαμηλότερης αντίστασης με μπλε χρώμα και πρόκειται για αργιλικό υλικό δεδομένης της πολύ μικρής τιμής της αντίστασης του. Προχωρώντας σε βάθος παρατηρείται ένα ακόμη στρώμα με αντίσταση μεγαλύτερη του υπερκείμενου, το οποίο φαίνεται να συνεχίζει στα τελευταία 20 μέτρα της ERT σαν ημιχώρος και απεικονίζεται με πράσινο χρώμα. Τέλος σε βάθος 8- 9 μέτρων και στα πρώτα 17- 18 μέτρα της ERT παρατηρείται αύξηση της αντίστασης σε σχέση με το περιβάλλον και όπως φαίνεται με κόκκινο χρώμα η αντίσταση βρίσκεται περίπου στα 40 Ohm.

Ο σχηματισμός αυτός διακόπτεται στο κέντρο της τομογραφίας, δείχνοντας πιθανή ρηξιγενή ζώνη ή πλευρική στρωματογραφική μετάβαση.

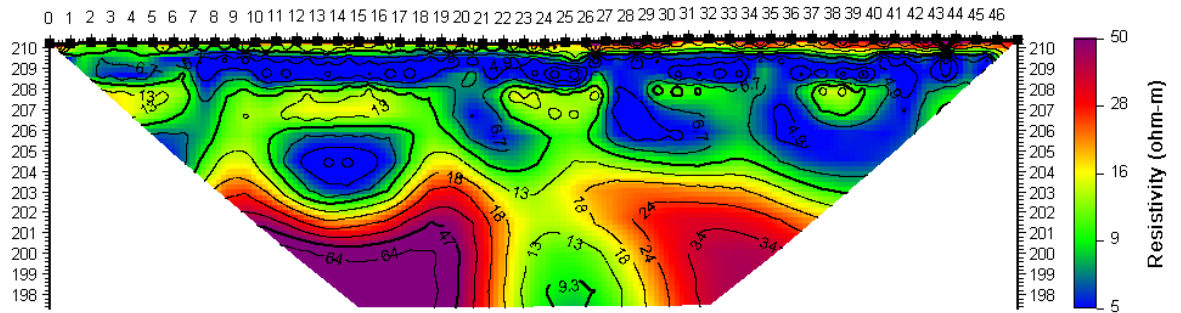
Στη συνέχεια έγινε απεικόνιση του υπεδάφους πάλι για την πρώτη ERT, αλλά αυτή τη φορά για το πρωτόκολλο Multi Gradient και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 21: Απεικόνιση του υπεδάφους για το πρωτόκολλο Multi Gradient, κάτω από την πρώτη ERT. Η χρωματική κλίμακα στα δεξιά δείχνει τις αντιστάσεις από τις χαμηλές που φαίνονται με μπλε χρώμα μέχρι υψηλές που φαίνονται με μωβ χρώμα. Στον οριζόντιο άξονα φαίνονται τα μέτρα της διάταξης, ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας.

Όπως παρατηρείται στην εικόνα 21, η μορφή της συγκεκριμένης τομογραφίας πρόκειται για μια λίγο διαφορετική από αυτής στην εικόνα 20. Σε αυτή την ηλεκτρική τομογραφία ενώ τα πρώτα 8- 9 μέτρα φαίνεται να μοιάζουν με την εικόνα από το πρωτόκολλο Διπόλου- Διπόλου, αφού στα πρώτα εκατοστά φαίνονται αντιστάσεις με χρώματα κίτρινα και κόκκινα (20-40 Ohm) και στα επόμενα 2- 3 μέτρα υπάρχει στρώμα χαμηλής αντίστασης, τα υπόλοιπα στοιχεία φαίνεται να είναι διαφορετικά. Εδώ, ο σχηματισμός με την αντίσταση που απεικονίζεται με πράσινο χρώμα φαίνεται να συνεχίζει σε βάθος μόνο στη μέση της μέτρησης και τόσο στην αριστερή, όσο και στη δεξιά μεριά παρατηρείται αύξηση των αντιστάσεων με τιμές μεγαλύτερες των 60 Ohm.

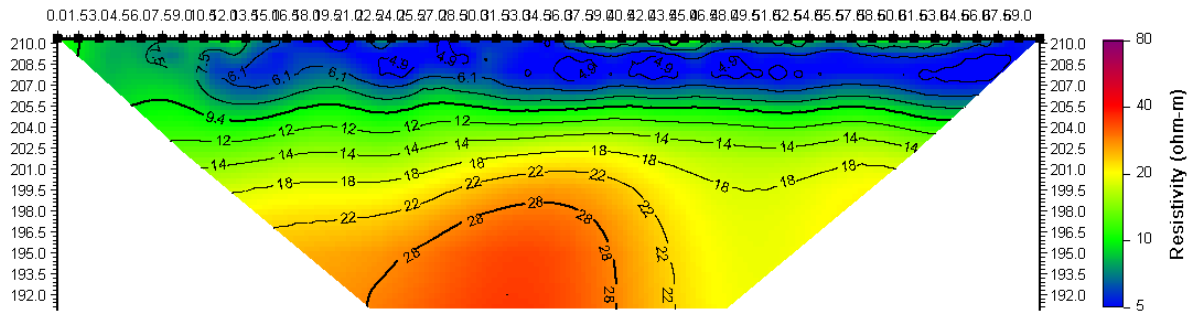
Ύστερα από την παρατήρηση των δύο παρά πάνω ηλεκτρικών τομογραφιών ξεχωριστά και με τη βοήθεια του προγράμματος DC_2DPRO, χρησιμοποιήθηκε όλη η πληροφορία για την κατασκευή μιας τομογραφίας στην οποία το υπέδαφος θα είναι όσο πιο κοντά στην πραγματική δομή είναι δυνατό. Μετά από την συγχώνευση των δεδομένων των δύο διατάξεων, πραγματοποιήθηκε εκ νέου αντιστροφή του συνόλου των δεδομένων και το αποτέλεσμα φαίνεται στη συνέχεια:



Εικόνα 22: Απεικόνιση του υπεδάφους για τα πρωτόκολλα Διπόλου-Διπόλου και Multi Gradient, κάτω από την πρώτη ERT. Η χρωματική κλίμακα στα δεξιά δείχνει τις αντιστάσεις από τις χαμηλές που φαίνονται με μπλε χρώμα μέχρι υψηλές που φαίνονται με μωβ χρώμα. Στον οριζόντιο άξονα φαίνονται τα μέτρα της διάταξης, ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας.

Σε αυτή την εικόνα (Εικόνα 22), φαίνεται στα πρώτα εκατοστά βάθος να υπάρχει ένα λεπτό αγωγίμο στρώμα που πιθανά οφείλεται σε ύπαρξη νερού, στα επόμενα 2 περίπου μέτρα υπάρχει ένα στρώμα πολύ χαμηλής αντίστασης (αργλικό) και στα επόμενα 5- 6 μέτρα βάθος παρατηρούνται εναλλαγές του στρώματος χαμηλής αντίστασης (μπλε) με ένα άλλο λίγο μεγαλύτερης αντίστασης (πράσινο). Η εξήγηση για τη μορφή αυτή μπορεί να είναι πως ο πράσινος σχηματισμός εκτός από άργιλο περιέχει ακόμη άμμο ή χαλίκια. Οι μεγάλες αντιστάσεις που υπάρχουν περίπου στα πρώτα 21 μέτρα και στα τελευταία 20 είναι διότι ο σχηματισμός αυτός αποτελεί το υπόβαθρο. Τέλος, στα μέτρα 21- 27 της ERT και σε βάθος 8- 12 μέτρα, υπάρχει ένας χώρος με αντίσταση ίδια με του πάνω στρώματος. Η πιθανή εξήγηση για αυτή τη μορφή είναι πως ο χώρος αυτός, με κυκλικό σχήμα, είναι η στοά η οποία αναζητείται στην έρευνα, όμως το κομμάτι που φαίνεται είναι η κορυφή της. Η αντίσταση είναι ίδια με αυτή του υπερκείμενου σχηματισμού γιατί το κενό έχει πληρωθεί με το υλικό αυτό.

Για την δεύτερη ERT που πραγματοποιήθηκε 10 μέτρα μακριά και παράλληλα στην πρώτη, με άνοιγμα ηλεκτροδίων μεγαλύτερο της πρώτης για τη μέτρηση μεγαλύτερου βάθους, χρησιμοποιήθηκε μόνο το πρωτόκολλο Διπόλου- Διπόλου. Θεωρήθηκε πως με το μεγαλύτερο άνοιγμα των ηλεκτροδίων θα φανεί όλο το μήκος και η βάση της στοάς και με όλη την προαναφερθείσα διαδικασία το αποτέλεσμα που εμφάνισε είναι αυτό:



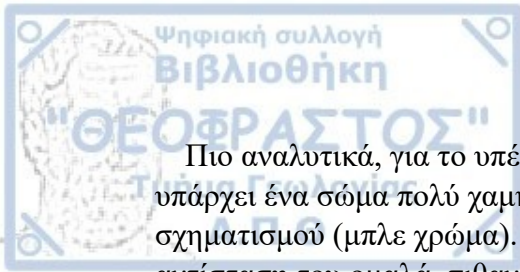
Εικόνα 23: Απεικόνιση του υπεδάφους για το πρωτόκολλο Διπόλου-Διπόλου, κάτω από τη δεύτερη ERT. Η χρωματική κλίμακα στα δεξιά δείχνει τις αντιστάσεις από τις χαμηλές που φαίνονται με μπλε χρώμα μέχρι υψηλές που φαίνονται με μωβ χρώμα. Στον οριζόντιο άξονα φαίνονται τα μέτρα της διάταξης, ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας.

Το αποτέλεσμα αυτής της ηλεκτρικής τομογραφίας (Εικόνα 23), είναι πολύ συναφές με την διάταξη διπόλου της πρώτης τομογραφίας ενώ είναι αρκετά διαφορετικό από την διάταξη πολλαπλής βαθμίδας. Σε αυτή τη μέτρηση, υπάρχει ένα επιφανειακό στρώμα στα πρώτα 3 μέτρα με πολύ χαμηλές αντιστάσεις (4,9- 6,1 Ohm), οπότε πρόκειται για άργιλο. Στα επόμενα 5- 6 μέτρα βάθος ακολουθεί ένα στρώμα πράσινου χρώματος με λίγο υψηλότερες αντιστάσεις (9-18 Ohm) και ακόμα πιο βαθιά φαίνεται να υπάρχει μια ομαλή άνοδος των αντιστάσεων που δείχνει την παρουσία στρωμάτων με περισσότερο αδρόκοκκα υλικά. Και στην την τομογραφία αυτή, παρατηρείται η πλευρική ασυνέχεια που εντοπίζεται και στην πρώτη τομογραφία..

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, βασική παρατήρηση είναι πως ενώ στις δύο διαφορετικές θέσεις που πραγματοποιήθηκαν οι ηλεκτρικές τομογραφίες, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πρωτόκολλα Διπόλου- Διπόλου μοιάζουν αρκετά μεταξύ τους, η εικόνα που παρουσιάστηκε από το πρωτόκολλο Multi Gradient φαίνεται να διαφέρει αρκετά από την αντίστοιχη διπόλου-διπόλου και να περιπλέκει τα πράγματα ως προς την κατανομή των αντιστάσεων στο υπέδαφος. Έχει παρατηρηθεί σε διάφορες έρευνες πως μερικές φορές τα αποτελέσματα που δίνει η μέθοδος Multi Gradient διαφέρουν πολύ από τα υπόλοιπα, χωρίς όμως να είναι γνωστός ο λόγος που αυτό συμβαίνει και από τι προκαλείται.

Από την αξιολόγηση των γεωηλεκτρικών μοντέλων και με βάση την αναμενόμενη γεωλογία της περιοχής, αποφασίστηκε η ερμηνεία των δεδομένων να βασιστεί στα γεωηλεκτρικά μοντέλα των μετρήσεων που προέκυψαν με το πρωτόκολλο Διπόλου- Διπόλου.



Πιο αναλυτικά, για το υπέδαφος στην περιοχή μελέτης, στα πρώτα περίπου 5 μέτρα υπάρχει ένα σώμα πολύ χαμηλής αντίστασης που υποδηλώνει την ύπαρξη αργιλικού σχηματισμού (μπλε χρώμα). Ο σχηματισμός αυτός σε μεγαλύτερο βάθος, αυξάνει την αντίσταση του ομαλά, πιθανόν διότι αναμιγνύεται με αμμώδες υλικό, κάτι που προκαλεί αύξηση της αντίστασης κατά μερικά Ohmm. Σχεδόν στα 10 μέτρα βάθος φαίνεται να αυξάνεται ακόμη περισσότερο η αντίσταση, παρ' όλα αυτά η τιμή της δεν είναι πολύ μεγάλη, επομένως πρόκειται είτε για περεταίρω προσθήκη αμμούχου υλικού, είτε υπάρχει ελάχιστο μαργαϊκό υλικό (πορτοκαλί χρώμα). Η πλευρική αλλαγή στην αντίσταση που παρατηρείται στα 26 μέτρα από την αρχή της πρώτης ηλεκτρικής τομογραφίας ή στα 40 μέτρα από την αρχή της δεύτερης μπορεί να οφείλεται σε κάποιο ρήγμα ή ακόμη μπορεί να είναι η παλαιά κοίτη κάποιου ποταμού, εφόσον το βάθος είναι αρκετά μικρό. Έτσι, η ύπαρξη στοάς απορρίπτεται, καθώς τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν την μορφή κάποιου κενού πληρωμένο με αέρα ή κάποιο άλλο υλικό.

Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στην εύρεση πιθανής στοάς, στην περιοχή Αδάμ με τη χρήση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας. Αρχικά αναφέρονται διάφορες μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης και πιο συγκεκριμένα της ηλεκτρικής αντίστασης, της ηλεκτρικής τομογραφίας καθώς και διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων. Έπειτα, αναλύονται περισσότερες πληροφορίες για τις στοές και τα έγκοιλα, μαζί με τις μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εύρεση τους. Έστερα, ακολουθεί η έρευνα για την περιοχή μελέτης και τη λιθολογία της. Εκεί με τη βοήθεια εξοπλισμού έγιναν δύο παράλληλες διατάξεις με απόσταση 10 μέτρα μεταξύ τους και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν και για τις δύο Διπόλου- Διπόλου, ενώ μόνο για την πρώτη έγινε χρήση και του πρωτοκόλλου Multi Gradient. Ακόμη, πάρθηκαν μετρήσεις με GPS για την γεωαναφορά των δεδομένων. Στη συνέχεια, με τη χρήση του λογισμικού DC_2DPRO έγινε αντιστροφή των δεδομένων και δημιουργήθηκαν εικόνες που παρουσιάζουν τη δομή του υπεδάφους. Τέλος, έγινε η ανάλυση και η σύγκριση των εικόνων αυτών και η ερμηνεία- αντιστοιχία των αντιστάσεων σε σχηματισμούς. Αποφασίστηκε πως το πρωτόκολλο Multi Gradient δεν βοηθάει την σωστή ερμηνεία και έτσι χρησιμοποιήθηκαν και για τις δύο τομογραφίες μόνο τα δεδομένα των διατάξεων Διπόλου- Διπόλου. Ως αποτέλεσμα, δεν εντοπίστηκε η ύπαρξη στοάς ή κάποιου εγκοίλου, αλλά σε βάθος περίπου 10 μέτρων εντοπίστηκε μόνο μια πλευρική αλλαγή στις αντιστάσεις που μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη ρήγματος.

ABSTRACT

This thesis focuses on finding a possible cavity in the Adam area using the electrical tomography method. Initially, various methods of geophysical analysis are mentioned, more specifically electrical resistivity, electrical tomography as well as various electrode arrangements. Then, more information about the cavities and hollows, along with the methods used to find them, is discussed. Then, the research on the study area and its lithology follows. There, with the help of equipment, two parallel arrangements were measured with a inner distance of 10 meters between electrodes and the protocols used were for both Dipole-Dipole, while only for the first one the Multi Gradient protocol was used. Furthermore, GPS measurements were taken for the georeferencing of the data. Then using the DC_2DPRO software the data was inverted and images were created showing the subsoil structure. Finally, the analysis and comparison of these images and the interpretation-correspondence of the resistances in formations were made. It was decided that the Multi Gradient protocol does not help the correct interpretation and so only the data from the Dipole-Dipole arrangements were used for both scans. As a result, no cavity was detected, but at a depth of about 10 meters only a lateral change in resistivities was detected which may be due to the existence of a fault.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Academic Dictionaries and Encyclopedias, 2000-2024

Bing Zhou (2018), Electrical Resistivity Tomography: A Subsurface-Imaging Technique

Chambers Dictionary of Science and Technology, (ed) T C Collocott and A B Dobson, Revised Edition (W & R Chambers, Edinburgh, 1974)].

D. W. Koon, C. J. Knickerbocker (1992), Review of Scientific Instruments, Volume 63, Issue 1

Dr. Don Stierman (2005), Field Techniques <http://www.eeescience.utoledo.edu/faculty/stierman/EEG/notes/FT.htm>

Kuchment P. and Kunyansky L. (2018), 2D and 3D reconstructions in acousto-electric tomography

L. S. Edwards (1977), A modified pseudosection for resistivity and IP. Geophysics, 42, 1020-1036.

O.J. McCarthy (2002), Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)

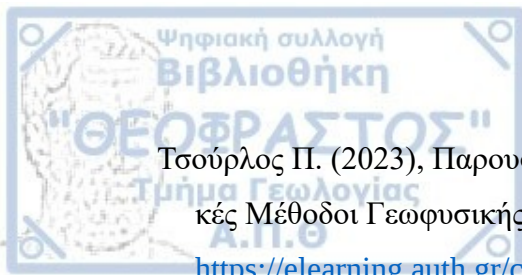
P. W. J. Glover (2016), Archie's law – a reappraisal

A. Βαφείδης et al. (2004), Συμβολή Της Ηλεκτρικής Τομογραφίας Και Της Σεισμικής Διάθλασης Στην Επιλογή Θέσης Για Την Δημιουργία Λιμνοδεξαμενής Στην Κου-ντουρα, Δ.Πελεκανου, Ν.Χανιων

Μ. Γ. Δεληγιάννη (2019), 'Περιβαλλοντική Καρστική Γεωμορφολογία'. Εκδοτικός Όμιλος Ιων.

Παπαζάχος, Β.Κ., (1996). 'Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη Γεωφυσική '. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Παπαζάχος, Βασίλειος, Παπαζάχος Κωνσταντίνος, (2008). 'Εισαγωγή στη Γεωφυσική'. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.



Τσούρλος Π. (2023), Παρουσιάσεις του μαθήματος Ηλεκτρικές και Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

<https://elearning.auth.gr/course/view.php?id=10588>

Βαργιεμέζης Γ. (2024), Παρουσιάσεις του μαθήματος Ηλεκτρικές και Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ

https://elearning.auth.gr/pluginfile.php/2419713/mod_resource/content/2/%CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B7%208-%CE%93%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AC%CF%81.pdf

MASW.com, Park Seismic LLC, Shelton, Connecticut

ΕΙΚΟΝΟΓΡΑΦΙΑ

Εικόνα 1:

https://docplayer.gr/44281195-Exartisi-tis-ilektrikis-antistasis-apo-to-mikos-kyлиндrikoy-agogoy-metrisi-eidikis-ilektrikis-antistasis-agogon-theoritiko-meros.html#google_vignette

Εικόνα 2:

https://em.geosci.xyz/content/physical_properties/electrical_conductivity/electrical_conductivity_values.html

Εικόνα 3:

https://www.researchgate.net/figure/Summary-of-the-parameters-of-Archies-law-in-crystalline-rocks-a-10_tbl3_237393425

Εικόνα 4:

https://docplayer.gr/52019648-Polytehneio-kritis-sholi-mihanikon-orykton-poron.html#google_vignette

Εικόνα 5 και 6:



https://elearning.auth.gr/pluginfile.php/2419711/mod_resource/content/2/LEC3_2022.pdf

Εικόνα 7:

https://elearning.auth.gr/pluginfile.php/2419710/mod_resource/content/1/LEC2_2022.pdf

Εικόνα 8:

https://www.researchgate.net/figure/Electrode-configurations-in-Wenner-array-Mines-2003_fig3_269635723

Εικόνα 9:

https://www.researchgate.net/figure/Electrode-configurations-in-Schlumberger-array-Mines-2003_fig2_269635723

Εικόνα 10:

https://elearning.auth.gr/pluginfile.php/2419710/mod_resource/content/1/LEC2_2022.pdf

Εικόνα 11:

<http://www.eeescience.utoledo.edu/faculty/stierman/EEG/notes/psec.jpg>

Εικόνα 12:

<https://www.geophysical.com/whatisgpr>

Εικόνα 13:

https://www.researchgate.net/figure/EM-field-distribution-for-VLF-method-inE-polarization-with-theoretical-signals-over-a_fig5_260024471

Εικόνα 14 και 15:

<http://masw.com/WhatisMASW.html>