



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Γεωφυσική Έρευνα στο Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου για τον
εντοπισμό θέσης εγκατάστασης περιβαλλοντικής διαχείρισης υδάτων
καθώς και μεταλλευτικής στοάς»**

ΜΑΚΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ,
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, 2015

«Η επιστημονική έρευνα γίνεται με τέσσερα πράγματα: μυαλό για να σκέφτεσαι, μάτια για να βλέπεις, μηχανήματα για να μετράς και τέταρτον, χρήματα.»

Albert von Szent-Gyorgyi, 1893-1986, Ούγγρος φυσιολόγος

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στην γενιά των μνημονίων και του οικονομικού εξαναγκασμού, με την ελπίδα για ένα καλύτερο αύριο.

Εδώ θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο Γεώργιο Αποστολόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Μεταλλευτικής και τον κύριο Γεώργιο Αμολοχίτη, γεωφυσικού και μέλους Ε.Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Μεταλλευτικής που με την αφοσίωση τους τόσο στο εκπαιδευτικό όσο και στο ερευνητικό κομμάτι, με μύησαν στην επιστήμη της Γεωφυσικής.

Μακρής Γιώργος

Αθήνα, 2015

Πίνακας περιεχομένων

Ευρετήριο Πινάκων	6
Ευρετήριο Σχημάτων	6
Ευρετήριο Εικόνων	8
Περίληψη.....	9
ABSTRACT	11
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 2 : Θεωρητικό Μέρος	16
2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος	16
2.1.1 Γενικά.....	16
2.1.2. Ηλεκτρικές μέθοδοι.....	16
2.1.3 Ειδική Αντίσταση	17
2.1.3.1 Ο Νόμος του Ohm	17
2.1.3.2 Ο νόμος του Archie.....	19
2.1.3.3 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση	20
2.1.3.4 Ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών της Γης	21
2.1.3.5 Υδροηλεκτρική αγωγιμότητα	21
2.1.3.6 Ειδική αντίσταση και πορώδες.	22
2.1.3.7 <i>Επιδράσεις της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση</i>	24
2.1.3.8 <i>Επιδράσεις της υφής και του πορώδες του πετρώματος στην ειδική αντίσταση για ένα δεδομένο δείγμα.</i>	24
2.1.3.9 Η επίδραση του τύπου του πετρώματος στην ειδική αντίσταση.	25
2.1.3.10 <i>Επιδράσεις των γεωλογικών διεργασιών στην ειδική αντίσταση</i>	26
2.1.3.11 <i>Επιδράσεις των αργιλικών ορυκτών στην ειδική αντίσταση.</i>	27
2.1.3.12 Κορεσμός και ειδική αντίσταση νερού.	30
2.1.4 Ηλεκτρικά δυναμικά.....	31
2.1.5 Ηλεκτρική αγωγιμότητα, ηλεκτρική ειδική αντίσταση.	32
2.1.5.1 Ηλεκτρονική μετάδοση	32
2.1.5.2 Ηλεκτρολυτική μετάδοση.....	33
2.1.6 Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο	33
2.1.7 Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο	35
2.1.8 Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο.	36
2.1.9 Εξοπλισμός Υπαίθρου	37

2.1.10 Διατάξεις Ηλεκτροδίων	38
2.1.10.1 Επιλογή της Κατάλληλης Διάταξης Ηλεκτροδίων	42
2.1.11 Μετρήσεις και Τεχνικές Υπαίθρου	46
2.1.11.1 Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις.....	46
2.1.11.2 Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις Ειδικής Αντίστασης.....	49
2.1.11.3 Γεωηλεκτρική τομογραφία.....	50
2.2 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος μέτρησης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και Μαγνητικής επιδεκτικότητας	53
2.2.1 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	53
2.2.1.1 Μεθοδολογία Μετρήσεων αγωγιμότητας	54
2.2.1.2 Διαμορφώσεις μετρήσεων αγωγιμότητας.....	56
2.2.1.3 Βάθος και Ανάλυση δεδομένων αγωγιμότητας.....	57
2.2.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου στις μετρήσεις αγωγιμότητας	59
2.2.2 Μαγνητική Επιδεκτικότητα	60
2.2.2.1 Μεθοδολογία Μετρήσεων μαγνητικής επιδεκτικότητας	60
2.2.2.2 Διαμορφώσεις μετρήσεων μαγνητικής επιδεκτικότητας	61
2.2.2.3 Βάθος και ανάλυση δεδομένων μαγνητικής επιδεκτικότητας	61
2.2.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου στις μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας	62
Κεφάλαιο 3 : Εφαρμογές γεωφυσικών μεθόδων σε γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά θέματα.	64
3.1 Εφαρμογή Α: Επαρχία Linares, Ισπανία.	64
3.1.1 Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	64
3.1.2 Μετρήσεις	65
3.1.3.Αποτελέσματα.....	66
3.1.3.1..Περιοχή Α:	66
3.1.3.2.Περιοχή Β	66
3.1.3. 3.Περιοχή C.....	69
3.1.3. 4.Περιοχή D.	70
3.2 Εφαρμογή Β: Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα.	70
3.3.Εφαρμογή Γ: Λίμνη Balikli στην περιοχή Sanliufu, Τουρκία.....	77
Κεφάλαιο 4 :Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στην στο Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου για τον εντοπισμό α) χώρου περιβαλλοντικής διαχείρισης και β) μεταλλευτικής στοάς	80
4.1. Γενικά.....	80

4.2. Περιοχή Έρευνας.....	81
4.2.1. Λαυρεωτική.....	81
4.2. 2 Το Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο του Λαυρίου.....	83
4.2.3 Γεωλογική Δομή στο Λαύριο και το Τ.Π.Π.Λ.	84
4.2.3.1 Σειρά Υμηττού-Νότιας Αττικής (αυτόχθονο σύστημα)	85
4.2.3.2 Φυλλιτικό τεκτονικό κάλυμα.....	86
4.2.3.3 Προσχωματικές αποθέσεις	87
4.2.3.4 Τεχνητά μπάζα από υλικά μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας	87
4.2.3.5 Ζώνες εξυγίανσης εδαφών.....	87
4.3.Γεωφυσικές Μετρήσεις και αποτελέσματα στην Περιοχή Α και Β.....	88
4.3.1.Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος.....	88
4.3.1.2. Εξοπλισμός	88
4.3.2.Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες	89
4.3.2.1. Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες του Τ.Π.Π.Λ.....	90
4.3.2.2Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής Α	95
4.3.2.3.Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής Β	99
4.3.3.Ηλεκτρική Μέθοδος	103
4.3.3.1. Εισαγωγή	103
4.3.3.2Εξοπλισμός	103
4.3.3.3.Επεξεργασία Μετρήσεων.....	107
4.3.4.Αποτελέσματα Ηλεκτρικής Μεθόδου στην περιοχή Α και Β	108
4.3.4.1. Γεωηλεκτρική Τομή Α στην Περιοχή Α	109
4.3.4.2.Γεωηλεκτρική Τομή Β στην Περιοχή Β	110
4.3.5.Αποτελέσματα Ηλεκτρικής Μεθόδου στην Περιοχή Γ.....	112
4.3.5.1.Γεωηλεκτρική Τομή Γ.1 στην Περιοχή Γ	113
4.3.5.2. Γεωηλεκτρική Τομή Γ.2 στην Περιοχή Γ	114
Κεφάλαιο 5 :Συμπεράσματα - Σχολιασμός	116
5.1 Σχόλια.....	116
5.2.Συμπεράσματα.....	118
5.2.1 Περιοχή Α	116
5.2.2. Περιοχή Β.....	117
5.2.3. Περιοχή Γ.....	117
Κεφάλαιο 6 :Βιβλιογραφία.....	121

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Γεωφυσικές μέθοδοι και μετρούμενη φυσική ιδιότητα για κάθε μία	15
Πίνακας 2.1: Μορφές του νόμου του Archie, χρήσιμες όταν η λιθολογία είναι γνωστή(Τζάνη 2003).....	20
Πίνακας 2.2: Επίδραση γεωλογικών διεργασιών στην Ειδική Αντίσταση.....	27

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Απεικόνιση του Νόμου του Ohm σε σχήμα (Μαυρομάτης 2007).....	18
Σχήμα 2.2 :Διάφορες υφές πετρωμάτων.....	25
Σχήμα 2.3 :Ειδικές αντιστάσεις ορυκτών και πετρωμάτων (Loke 2000).....	26
Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση των ιόντων που απορροφούνται	28
Σχήμα 2.5: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο (Ιωάννης Φ.Λούης 2004)	34
Σχήμα 2.6: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2004).....	35
Σχήμα 2.7: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο	36
Σχήμα 2.8: Διάταξη εξοπλισμού μέτρησης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης(Αποστολόπουλος 2013).....	38
Σχήμα 2.9: Συνήθεις διατάξεις ηλεκτροδίων (Αποστολόπουλος 2013)	39
Σχήμα 2.10: Διατάξεις ηλεκτροδίων για Wenner(Μαυρομάτης 2007)	40
Σχήμα 2.11: Διατάξεις ηλεκτροδίων για Schlumberger (Μαυρομάτης, 2007)	40
Σχήμα 2.12: Διατάξεις ηλεκτροδίων για Dipole – Dipole (Μαυρομάτης, 2007)	41
Σχήμα 2.13: Διατάξεις ηλεκτροδίων για pole – pole (Μαυρομάτης, 2007)	41
Σχήμα 2.14: Διατάξεις ηλεκτροδίων για pole - dipole (Μαυρομάτης, 2007)	42
Σχήμα 2.15: Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες (Sumner, 1976)	42
Σχήμα 2.16: Η συνάρτηση $f(a)$, για τον υπολογισμό του ποσοστού του ρεύματος που παραμένει σε λεπτό αγώγιμο στρώμα, το οποίο βρίσκεται πάνω από αντιστατικό ημιχώρο. (Edwards & Howell, 1976)	45
Σχήμα 2.17: Επίδραση του τοπογραφικού ανάγλυφου στις ισοδυναμικές επιφάνειες και τις γραμμές ροής ρεύματος (Fox, 1980)	45
Σχήμα 2.18: Διάταξη Wenner (Thomas M. Boyd, 1999)	47
Σχήμα 2.19:Διάταξη Schlumberger (Thomas M. Boyd, 1999)	47
Σχήμα 2.20: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με διάταξη Schlumberger με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Ιωάννης Φ.Λούης 2004).....	48
Σχήμα 2.21: Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης Dipole–Dipole (α), Wenner (β) και Schlumberger (γ) (Μαυρομάτης. 2007).....	49
Σχήμα 2.22: Οριζόντια Ηλεκτρική Χαρτογράφηση με διάταξη Wenner (Αποστολόπουλος, 2008)	50
Σχήμα 2.23: Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση δισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για τη δημιουργία ψευδοτομής (Loke, 1999)	51
Σχήμα 2.24: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγόριθμου (Loke, 1999).....	51
Σχήμα 2.25: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων (Loke 1999)	52

Σχήμα 2.26: Ενδεικτικά μηχανήματα Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου. Στο αριστερό μέρος είναι το EM-31, και στο δεξί μέρος είναι το EM-38	54
Σχήμα 2.27: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής (Παπαζάχος, 1986)	55
Σχήμα 2.28: Γεωμετρική διατύπωση Inphase και Quadrature(Ευστρατία 2013)	56
Σχήμα 2.29: Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικειμένου που θάβεται στα διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παρουσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι (α) ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετριέται με μια χαμηλότερη συχνότητα (β), μια μεγαλύτερη περιοχή μετριέται και μια μικρότερη ανωμαλία μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι ο στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά στο έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d). (Αποστολόπουλος 2013).....	58
Σχήμα 3.1: Γεωγραφικά και γεωλογικά στοιχεία των περιοχών μελέτης.....	65
Σχήμα 3.2: Ηλεκτρική τομογραφία από την περιοχή Α.....	67
Σχήμα 3.3: Ηλεκτρική τομογραφία από το πεδίο Β.....	68
Σχήμα 3.4: Ηλεκτρική τομογραφία από το πεδίο C και D.....	69
Σχήμα 3.5: Η θέση του αγωγού σε σχέση με τις κτηριακές εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π.	71
Σχήμα 3.6: Οι διατάξεις των ηλεκτροδίων και το σχεδιάγραμμα με την θέση του αγωγού σε σχέση με τις γραμμές διασκόπησης.....	72
Σχήμα 3.7: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και το μοντέλο ερμηνείας της Wenner-Schlumberger (WS).....	73
Σχήμα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορετικών τρόπων μετρήσεων : Dipole-Dipole από αριστερά και Dipole- Dipole από δεξιά.	74
Σχήμα 3.9: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Dipole-Dipole από αριστερά και από δεξιά.....	75
Σχήμα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορετικών τρόπων μετρήσεων από αριστερά και από δεξιά.	75
Σχήμα 3.11 :Μετρούμενες υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Pole-Dipole από αριστερά και δεξιά.	76
Σχήμα 3.12: Μετρούμενες και υπολογιζόμενες φαινόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Half-Schlumberger αριστερά και δεξιά.	77
Σχήμα 3.13: Με μπλε χρώμα η περιοχή μελέτης, με λευκό και αριθμημένα ανθρώπινες κατασκευές και η λίμνη και με κόκκινο μέσα στην περιοχή έρευνας οι τομές.....	78
Σχήμα 3.14: α) 3D διάγραμμα των αποτελεσμάτων ERT β) διάγραμμα γεωλογικού μοντέλου	79
Σχήμα 4.1: Στρωματογραφική στήλη Ευρύτερης περιοχής της Λαυρεωτικής (Γεωλογικός χάρτης I.G.M.E., Φύλλο Λαύριο 1997-2000)	85
Σχήμα 4.2: Το πάρκο και με κόκκινο η διαδρομή των μετρήσεων που πάρθηκαν.	90
Σχήμα 4.3: Χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. α) για συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) για συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4. ..	92
Σχήμα 4.4: Χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας α) σε βάθος 3m σε διαμόρφωση CMD-2 και στα δεξιά σε βάθος 6m σε διαμόρφωση CMD-4	93
Σχήμα 4.5: α) Με κόκκινο η περιοχή έρευνας Α, β) Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις στην περιοχή Α με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο «CMD»	95

Σχήμα 4.6: Χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. α) σε συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) σε συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4.	97
Σχήμα 4.7: Χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας α) σε συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) σε συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4	98
Σχήμα 4.8: Με κόκκινο η περιοχή έρευνας B.....	99
Σχήμα 4.9: Χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. α) σε συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) σε συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4.	100
Σχήμα 4.10 :Χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας α) σε συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) σε συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4	102
Σχήμα 4.11: α) Αποτύπωση των γεωηλεκτρικών τομών στην περιοχή έρευνας, β) Το όργανο μέτρησης SYSCAL-Pro, γ) Γεωηλεκτρική τομή στην Περιοχή B.	104
Σχήμα 4.12: Γεωηλεκτρική τομή A με διεύθυνση δύση προς ανατολή. Στην εικόνα (a) είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust- Robust σε διάταξη ηλεκτροδίων Pole-Dipole και η εικόνα (b) η γεωηλεκτρική τομή Robust- RobustHorizontal επίσης σε διάταξη ηλεκτροδίων Pole-Dipole.	109
Σχήμα 4.13: Γεωηλεκτρική τομή B με διεύθυνση δύση προς ανατολή. Στην εικόνα (a) είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust- Robust σε διάταξη ηλεκτροδίων Pole-Dipole και η εικόνα (b) η γεωηλεκτρική τομή Robust- RobustHorizontal επίσης σε διάταξη ηλεκτροδίων Pole-Dipole.	110
Σχήμα 4.14: α) Γεωηλεκτρική τομή Robust-Robust με διάταξη ηλεκτροδίων Dipole-Dipole και β) Γεωηλεκτρική τομή Robust-Robust με διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger	113
Σχήμα 4.15: Γεωηλεκτρική τομή Robust-Robust με διάταξη ηλεκτροδίων Dipole-Dipole. ...	114

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 4.1.: Υπό μελέτη περιοχές στον χώρο του Τ.Π.Π.Α	80
Εικόνα 4.2: Πόλη Λαυρίου	82
Εικόνα 4.3: Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο του Λαυρίου	84
Εικόνα 4.4: Το ειδικό καρότσι με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο «CMD».....	88

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στην επίλυση περιβαλλοντικών ή και γεωτεχνικών προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα διερευνάται το υπέδαφος στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΛ) με εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό μη ρυπασμένων εδαφών σε δύο συγκεκριμένες περιοχές για την δημιουργία υπόγειας φυσικής δεξαμενής νερού και η ανίχνευση παλαιάς μεταλλευτικής στοάς σε μια τρίτη περιοχή.

Αφού γίνεται θεωρητική ανάλυση των γεωφυσικών μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σκοπό της διπλωματικής, εξετάζονται έπειτα αντίστοιχες εφαρμογές γεωφυσικών μεθόδων στην διεθνή βιβλιογραφία.

Στην περιοχή έρευνας στο ΤΠΠΛ, αρχικά μελετήθηκαν τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής και ανάλογα με το στόχο που είχαμε στις περιοχές έρευνας επιλέχθηκαν και οι κατάλληλοι μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης. Αφού σχεδιάστηκε η γεωφυσική έρευνα, έγιναν μετρήσεις με δυο διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους, την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EMI) και την ηλεκτρική μέθοδο (ERT). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις επιτόπου μη καταστρεπτικές μεθόδους έτυχαν επεξεργασίας με δυο διαφορετικά προγράμματα στον υπολογιστή, το Surfer της Golden Software και το RES2DINV της Geotom Software. Μετά από επεξεργασία, εκτενή ανάλυση και τέλος ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων καταλήξαμε στο προσδιορισμό του υπεδάφους για στις δυο περιοχές και στον προσδιορισμό της θέσης της παλαιάς μεταλλευτικής στοάς.

Σε επίπεδο δομής αναλύονται πέντε κεφάλαια, τα οποία περιλαμβάνουν:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται μερικά εισαγωγικά στοιχεία για την γεωφυσική γενικότερα και για την εν λόγω διπλωματική.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στο θεωρητικό υπόβαθρο των δυο γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή η ηλεκτρομαγνητική (EMI) και η ηλεκτρική μέθοδος (ERT). Ακόμη αναφέρονται τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν και στις δυο μεθόδους επίσης, περιγράφονται οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται και ο τρόπος επεξεργασίας των στοιχείων, για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται σε εφαρμογές (casestudies) των συγκεκριμένων μεθόδων σε παραπλήσιες έρευνες ανά τον κόσμο. Με πρώτη αναφορά να γίνεται σε εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή Linaresστην Ισπανία, για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της στον εντοπισμό κοιλοτήτων παλαιών ορυχείων. Η δεύτερη εφαρμογή αναφέρεται στην εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, για τον εντοπισμό υπόγειου αγωγού γνωστών διαστάσεων και η τρίτη και τελευταία εφαρμογή αναφέρεται στην εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή γύρω από την λίμνη Baliliki στη Τουρκία ,όπου έγινε μελέτη για να προσδιοριστεί η υδρογεωλογική θέση της περιοχής και του υπόγειου χαρακτήρα της, ειδικότερα για να μελετηθεί πιθανό υπόγειο σύστημα δεξαμενών νερού, για την καταλληλότητα ανέγερσης συγκροτήματος αναψυχής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ιστορία και γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου. Παρουσιάζονται επίσης οι περιοχές έρευνας, τα όργανα, οι μέθοδοι και οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την κάθε περιοχή ξεχωριστά. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων που πάρθηκαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται σχόλια και παρατηρήσεις επί των γεωφυσικών δεδομένων, και αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η έρευνα.

ABSTRACT

The present dissertation work investigates the implementation of geophysical methods in solving environmental or / and geotechnical problems. Particularly, the subsoil of the Technological and Cultural Lavrio Park (TLCP) is investigated using geophysical methods for the location of non – polluted soils in two certain areas for creation of a subsurface natural water tank and the reveal of an old mine cave in a third area.

In the beginning, a theoretical analysis of the geophysical methods, which can be used for the purpose of this dissertation, is discussed and afterwards, corresponding implementations of geophysical methods of international bibliography are examined.

Initially, in the study area of TLCP, the geological data of the region had been analyzed and according to the target assigned to the study areas, the right geophysical tomography methods were selected. Since the geophysical study was planned, data was acquired with two different geophysical methods, the electromagnetic method (EMI) and the electrical method (ERT). The results derived from the on-site use of non - devastating methods, were processed with two different computer programs, the Surfer of Golden Software and the RES2DINV of Geotomo Software. After processing, detail analysis and at in the end interpretation of the geophysical results, we reached in the determination of the subsoil characteristics for the two study areas and the determination of the location of the old mine cave.

At the level of the dissertation structure, five chapters analyzed and outlined as follows:

- The first chapter refers to some introductory data of the geophysics generally related to the present dissertation.

- The second chapter outlines the theoretical background of the two geophysical methods used, the electromagnetic (EMI) and the electrical method (ERT). In addition, a reference to the instruments used in the two methods is provided, also the arrays used and the way of data processing are discussed for reaching the conclusions.

- The third chapter refers to the implementation (case studies) of the above methods used in similar studies around the world. As first reference is the

implementation of the electrical tomography method in the region of Linares in Spain, for examining its ability / effectiveness in locating cavities of old mines. The second implementation refers to the use of method of electrical tomography in the area within the University Campus of Zografou, for the location of a subsurface pipe with certain dimensions and the third and last implementation refers in the use of method of electrical tomography in the area around the Baliliki Lake in Turkey, where the study was done for the determination of the hydrogeological position and the subsoil character of the study area, particularly for investigating possible subsurface aquifer and the suitability of the area for creating a Recreational Campus.

- The fourth chapter refers to the history and geology of the region of the Technological Cultural Lavrio Park. It also presents the study areas, the instruments, the methods and the arrays used for each site separately. Also it presents the results from the processing and analysis of the data obtained.

- In the last chapter remarks and observations on the above obtained geophysical data are given and the final conclusions reached by this study are presented

Κεφάλαιο 1 :Εισαγωγή

Γεωφυσική, η επιστήμη που εφαρμόζει τους βασικούς νόμους της φυσικής για την μελέτη των ιδιοτήτων της Γης, από άποψη μεθόδων έρευνας η Γεωφυσική ανήκει στους εφαρμοσμένους κλάδους της φυσικής, ενώ από άποψη αντικειμένου αποτελεί κλάδο των Γεωεπιστημών.

Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Έρευνα έχει μεγάλη σημασία γιατί μελετά τη δομή και τις γεωδυναμικές διαδικασίες στο φλοιό και τον ανώτερο μανδύα της γης, οι οποίες καθορίζουν τη θέση πολλών δομών οικονομικής σημασίας. Εντοπίζει, στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης, δομές που σχετίζονται με κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικών αερίων, μεταλλεύματα, πηγές γεωθερμικής ενέργειας, ορυκτούς άνθρακες κ.α. Προσδιορίζει τις μηχανικές ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων της γης, οι οποίες έχουν άμεση σχέση με την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων, όπως θεμελιώσεις γεφυρών, φραγμάτων κ.α. Με τα παραπάνω παρατηρούμε ότι η γεωφυσική επιστήμη έχει εισέλθει σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, κάνοντας την απαραίτητη σχεδόν για κάθε είδους έργο που πραγματοποιείται. Η εφαρμοσμένη Γεωφυσική χρησιμοποιεί τι ακόλουθες μεθόδους:

- ❖ Σεισμικές
- ❖ Βαρυτικές
- ❖ Μαγνητικές
- ❖ Ηλεκτρικές
- ❖ Ηλεκτρομαγνητικές
- ❖ Ραδιομετρική
- ❖ Θερμική

Οι σημαντικότερες μέθοδοι, καθώς και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες εκμεταλλεύεται η κάθε μία, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. (**Πίνακας 1.1**)

Για ποιοτικότερα και καλύτερα αποτελέσματα θα πρέπει να γίνει και κατάλληλη επιλογή γεωφυσικής μεθόδου, αυτή η επιλογή θα εξαρτάται από το μέγεθος της υφιστάμενης αντίθεσης των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων της περιοχής έρευνας. Για κάθε μέθοδο υπάρχει μια «λειτουργική» φυσική ιδιότητα, στην οποία η μέθοδος είναι ευαίσθητη και, ως εκ τούτου, χρησιμεύει για τον προσδιορισμό των υπεδιαφικών «ανωμαλιών». Επίσης για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα αλλά και για διασταύρωση αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει και συνδυασμός δύο ή περισσότερων

μεθόδων. Όπως και έγινε στην εν λόγω διπλωματική με τον συνδυασμό δύο μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας στο χώρο του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου, το οποίο αποτελεί σημείο αναφοράς για την Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών και του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου γενικότερα.

Ο σκοπός αυτής της έρευνας ήταν διττός, δηλαδή είχαμε δυο διαφορετικούς στόχους σε τρεις περιοχές. Στις πρώτες δύο περιοχές ο στόχος μας ήταν η εύρεση κατάλληλης θέσης για τη δημιουργία μιας φυσικής υπόγειας δεξαμενής νερού, οπότε εμείς προσπαθήσαμε να προσδιορίσουμε τα ρυπασμένα εδάφη και ταυτόχρονα κατάλληλη στρωματογραφία για να μπορέσουμε να υποδείξουμε το καταλληλότερο σημείο όπου θα μπορούσε να υποστηρίξει αυτό το έργο. Στην τρίτη και τελευταία περιοχή ο στόχος ήταν η εύρεση μιας παλιάς μεταλλευτικής στοάς...

Για την διεκπεραίωση της διπλωματικής αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός δυο γεωφυσικών μεθόδων όπως προαναφέρθηκε. Μετά από μελέτη των γεωλογικών στοιχείων της περιοχής αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους που είχαμε, χρησιμοποιήθηκαν κατά σειρά η ηλεκτρομαγνητική (EMI) και η ηλεκτρική μέθοδος (ERT).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις επιτόπου μη καταστρεπτικές μεθόδους, μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Εκεί έγινε επεξεργασία με δύο διαφορετικά προγράμματα στον υπολογιστή, ένα για κάθε μία μέθοδο αντίστοιχα, το Surfer της Golden Software και το RES2DINV της Geotomo Software.

Τέλος από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων θα εξαχθούν κάποια συμπεράσματα και ερμηνείες τα οποία θα βοηθήσουν στο να κατανοήσουμε την στρωματογραφία του υπεδάφους αλλά και αν υπάρχουν δομές που να παραπέμπουν στην παρουσία μεταλλευτικής στοάς στη περιοχή.

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΦΥΣΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΣΤΟΧΟΣ
Βαρυτική Μέθοδος	Ένταση πεδίου βαρύτητας	Προσδιορισμός της κατανομής της πυκνότητας των πετρωμάτων
Μαγνητική Μέθοδος	Ένταση γεωμαγνητικού πεδίου	Εντοπισμός μαγνητισμένων πετρωμάτων, μέσω της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της παραμένουσας μαγνήτισης
Σεισμική Μέθοδος	<ul style="list-style-type: none"> - Χρόνοι διαδρομής σεισμικών κυμάτων - Περίοδοι σεισμικών κυμάτων - Πλάτη σεισμικών κυμάτων 	Καθορισμός της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης, μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων
Ηλεκτρική Μέθοδος	<ul style="list-style-type: none"> - Ειδική ηλεκτρική αντίσταση της γης - Ηλεκτρικά δυναμικά 	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και ηλεκτροχωριτικότητα)
Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος	Αντίδραση σε ηλεκτρομαγνητική διέγερση	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαγωγή)
Ραδιομετρική Μέθοδος	Φυσική ραδιενέργεια	Προσδιορισμός της φυσική ραδιενέργειας των πετρωμάτων
Θερμική Μέθοδος	Ροή θερμότητας από το εσωτερικό της γης	Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων

Πίνακας 1.1: Γεωφυσικές μέθοδοι και μετρούμενη φυσική ιδιότητα για κάθε μία

Κεφάλαιο 2 : Θεωρητικό Μέρος

2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος

2.1.1 Γενικά.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι παρουσιάζουν ποικιλία τεχνικών έναντι άλλων γεωφυσικών μεθόδων όπως ηβαρυτική, η μαγνητική, η σεισμική και η ραδιομετρική. Μετριοούνται συνήθως δυναμικά, ρεύματα (εντάσεις και πυκνότητες) και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται είτε από φυσικές ή από τεχνητές πηγές. Η κύρια παράμετρος που μετριέται εδώ είναι η ηλεκτρική ειδική αντίσταση, ρ , ή ηλεκτρική αγωγιμότητας.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι περιλαμβάνουν μετρήσεις φυσικού δυναμικού (SP), τελλουρικών και μαγνητοτελλουρικών ρευμάτων, μαγνητικών πεδίων σε περιοχή ακουστικών-συχνοτήτων (AFMAG), ειδικής αντίστασης, ισοδυναμικών σημείων και γραμμών και *mise-a-la-masse*, ηλεκτρομαγνητικών (FM) και επαγόμενης πόλωσης (IP). Οι ηλεκτρικές μέθοδοι συνήθως ταξινομούνται ανάλογα με την ενέργεια που χρησιμοποιούν, σε παθητικές ή ενεργητικές. (Ιωάννης Φ.Λούης 2004)

2.1.2. Ηλεκτρικές μέθοδοι

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διακρίνονται σε παθητικές και ενεργητικές μεθόδους ανάλογα με την χρησιμοποίηση φυσικών ή τεχνητών πεδίων.

Παθητικές Μέθοδοι:

- **Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (SelfPotentialMethod):** Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία, είτε σχετίζονται με την αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων, είτε είναι ηλεκτροκινητικής ή γεωθερμικής προέλευσης. Εφαρμόζεται σε υδρογεωλογικές ή γεωθερμικές έρευνες.
- **Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (MagnetotelluricMethod):** Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις φυσικών τελλουρικών ρευμάτων, τα οποία παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Χρησιμοποιείται

για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μεγάλα βάθη –μέχρι και τον μανδύα– μέσα στη γη.

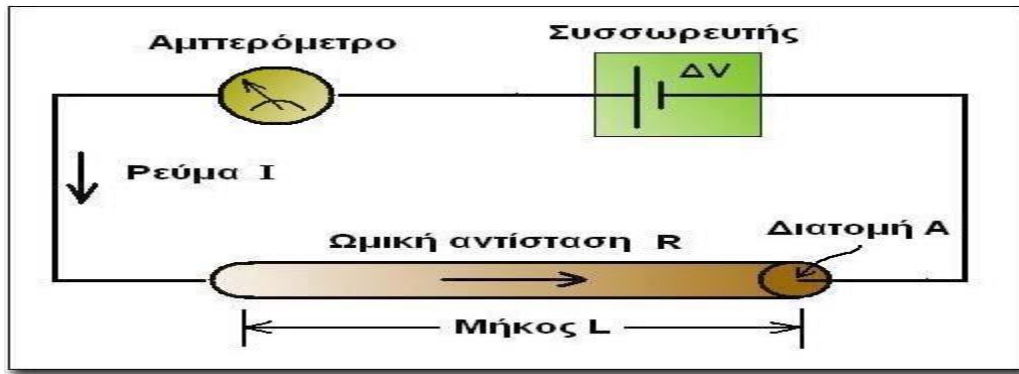
Ενεργητικές Μέθοδοι:

- **Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method).**
:Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, με μέσα βάθη διασκόπησης.
- **Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization Method)**
:Πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) χρονικών μεταβολών του δυναμικού όταν, το ρεύμα που αρχικά διαβιβάζεται, παύει να διαβιβάζεται, στο έδαφος. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων και ηλεκτρικά αγωγίμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών. (Αποστολόπουλος 2013)

2.1.3 Ειδική Αντίσταση

2.1.3.1 Ο Νόμος του Ohm

Γύρω στα 1825 ο Γεώργιος Ωμ (George Simon Ohm) απέδειξε ότι όλα τα υλικά σώματα, ακόμη και τα καλύτερα μέταλλα, εμφανίζουν αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η αντίσταση μεγαλώνει όσο αυξάνει το μήκος ή μειώνεται όταν αυξάνει η διατομή του αγωγού, τον οποίο διαρρέει το ρεύμα. Ο Ωμ διατύπωσε μια σχέση που συνδέει την τάση του ρεύματος, την ένταση και την αντίσταση ενός κυκλώματος, που είναι γνωστή ως "Νόμος του Ωμ". Εκφράζει τη σχέση των τριών θεμελιωδών μεγεθών του ηλεκτρισμού: Αντίσταση, Ηλεκτρική Τάση και Ένταση Ρεύματος.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση του Νόμου του Ohm σε σχήμα (Μαυρομμάτης 2007)

Με βάση τον νόμο του Ohm, η ηλεκτρική αντίσταση R δίνεται από τον τύπο

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

Η ηλεκτρική ωμική αντίσταση R εξαρτάται από τις γεωμετρικές διαστάσεις του αγωγού :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

όπου ρ η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του αγωγού, ανεξάρτητη των διαστάσεών του, που θεωρείται χαρακτηριστική θεμελιώδης παράμετρος του υλικού που είναι κατασκευασμένος ο αγωγός και περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί ο αγωγός να διαβιβάσει ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί και οι ειδικές αντιστάσεις τους θα ήταν πολύ υψηλές αν δεν είχαν πόρους με ρευστά, κυρίως νερό. Η αγωγιμότητα ενός πορώδους πετρώματος μεταβάλλεται με τον όγκο και την κατανομή των πόρων, αλλά πολύ περισσότερο με την αγωγιμότητα και το ποσό του περιεχομένου νερού. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα πετρώματα είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί και η αγωγιμότητα είναι περισσότερο ηλεκτρολυτική παρά ωμική. Το ρεύμα διαδίδεται μέσω ιόντων (μορίων με περίσσεια ή έλλειψη ηλεκτρονίων). Η ειδική αντίσταση διαφέρει με την ευκινησία, την συγκέντρωση και τον βαθμό διαχωρισμού των ιόντων (εξαρτάται από την διηλεκτρική σταθερά του διαλύτη).

2.1.3.2 Ο νόμος του Archie.

Στην γενική περίπτωση δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με την μικροδομή του πορώδους σε ένα φυσικό σχηματισμό και δεν είναι δυνατόν να γίνει κανενός είδους αναλυτικός υπολογισμός. Για τον λόγο αυτό, βασιζόμαστε σε εμπειρικούς νόμους μεταξύ του παράγοντα σχηματισμού και του πορώδους. Προκειμένου περί κεκορεσμένων πορώδων υλικών, ο νόμος του Archie συσχετίζει τις δύο αυτές παραμέτρους σύμφωνα με την σχέση:

$$F = \alpha \cdot \phi^{-m} \quad (2.3)$$

όπου α και m είναι εμπειρικές σταθερές που εξαρτώνται από το εκάστοτε πέτρωμα και κυμαίνονται ως $0.5 \leq \alpha \leq 2.5$ και $1.3 \leq m \leq 2.5$

Η μορφολογία των πόρων ενός πετρώματος, είναι αρκετά πολύπλοκη και δύσκολη να περιγραφεί με απλή γεωμετρία. Σε γενικές γραμμές, αναγνωρίζονται τρεις μορφολογικοί τύποι πόρων:

1. Χώρος μεταξύ των (ακανόνιστων) κόκκων ιζηματογενούς πετρώματος.
2. Γραμμικές μορφές (μικροδιαρρήξεις, διακλάσεις και μικρορωγμές). Αυτές συνήθως απαντούν σε σκληρά ιζηματογενή και κρυσταλλικά πετρώματα.
3. Υγρά εγκλείσματα (ρευστή φάση) κρυσταλλοσχιστωδών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων.
4. Πομφόλυγες και βακουόλες, ή άλλοι μεγάλοι, καθόλου έως ολίγο επικοινωνούντες κενοί χώροι, όπως στα έκχυτα εκρηξιγενή πετρώματα.

Για δεδομένο πορώδες και ποσοστό πορικού ρευστού, ο τύπος ανωτέρω θα δώσει τις πλέον μεγάλες αγωγιμότητες, λόγω της απλούστερης μορφής και της καλύτερης δυνατότητας επικοινωνίας μεταξύ των πόρων. Στο άλλο άκρο, τα πομφολυγώδη ηφαιστειακά πετρώματα (π.χ. κίσηρις), καίτοι διαθέτουν πολύ μεγάλο ποσοστό κενών χώρων συνήθως εμφανίζουν πολύ χαμηλές αγωγιμότητες λόγω της αδυναμίας επικοινωνίας μεταξύ των πόρων.

Περισσότερες μελέτες έχουν γίνει σε ιζηματογενή πετρώματα, κυρίως λόγω της σπουδαιότητάς τους ως ξενιστών (ταμιευτήρων) κοιτασμάτων υδρογονανθράκων και φυσικού αερίου. Αρκετές μελέτες της σχέσης αγωγιμότητας-πορώδους έχουν επίσης γίνει και επί εκρηξιγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Σε κάθε περίπτωση, ο νόμος του Archie φαίνεται να ισχύει ικανοποιητικά.

Κατά την διερεύνηση γεωθερμικών συστημάτων, πολλές φορές ανέκυψε το πρόβλημα της εκτίμησης της αγωγιμότητας σχηματισμού που περιέχει μερικό τήγμα. Και σε αυτή την περίπτωση ο νόμος του Archie χρησίμευσε ως βάση εκκίνησης για την περιγραφή της σχέσης μεταξύ της αγωγιμότητας και του κλασματικού τήγματος.(Τζάνη 2003).

Περιγραφή Πετρώματος	<i>a</i>	<i>m</i>
Χαλαρά συνδεδεμένα πετρώματα και σχηματισμοί (άμμοι, ψαμίτες και τύποι ασβεστολίθων) με πορώδες 25-45%.	0.88	1.37
Μετρίως συγκολλημένα ιζηματογενή πετρώματα περιλαμβανομένων των ψαμιτών και ασβεστολίθων με πορώδες 18-35%.	0.62	1.72
Καλά συγκολλημένα και διαγεννημένα πετρώματα με πορώδες 5-25%.	0.62	1.95
Πομφολυγώδη - εξαιρετικά πορώδη ηφαιστειακά πετρώματα (τόφφοι, λάβες άα, παχόεχοε κλπ.) με πορώδες 20-80%	3.5	1.44
Πυκνά εκρηξιγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα με πορώδες < 4%	1.4	1.58

Πίνακας 2.1: Μορφές του νόμου του Archie, χρήσιμες όταν η λιθολογία είναι γνωστή(Τζάνη 2003)

2.1.3.3 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

Η Γη δεν είναι ομογενής ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η πραγματική ειδική αντίσταση των πετρωμάτων της εύκολα, δηλαδή, με απλή εφαρμογή της σχέσης

$$\rho = \left(\frac{2\pi V}{i}\right) * \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \quad (2.4)$$

Για το λόγο αυτό, απαιτείται η εφαρμογή πιο σύνθετων μεθόδων για τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής αντίστασης μέσα στην πραγματική Γη. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται από τη μια μεριά σε μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων ($\Delta V, i$) στην επιφάνεια της Γης και από την άλλη σε πολύπλοκες θεωρητικές σχέσεις που εκφράζουν το μοντέλο της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και των οποίων σχέσεων πρέπει να καθορίσουμε τις παραμέτρους. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην έννοια της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Στην περίπτωση που η ειδική αντίσταση δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται στα επιφανειακά στρώματα της Γης, όπως στην πραγματικότητα συμβαίνει, η τιμή του δευτέρου μέλους της (2.4) μπορεί επίσης να υπολογιστεί με βάση τις μετρήσεις των ποσοτήτων που περιλαμβάνει το μέλος αυτό, αλλά η τιμή του δεν θα είναι σταθερή, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ομογενούς Γης, αλλά θα εξαρτάται από τις θέσεις των ηλεκτροδίων και θα μεταβάλλεται όταν μεταβάλλονται οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων (Σχήμα 2.7). Η τιμή αυτή δεν θα παριστάνει πια την πραγματική ειδική αντίσταση και για το λόγο αυτό λέγεται φαινόμενη ειδική αντίσταση και παριστάνεται με το σύμβολο ρ_a

$$\rho_a = K \times \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (2.5)$$

2.1.3.4 Ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών της Γης

Το κύριο μέρος των ειδικών αντιστάσεων από την επιφάνεια μέχρι και σε βάθος μεγαλύτερο των 15km, σε ένα κανονικό φλοιό ελέγχεται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα του νερού μέσω των πόρων, των θραυσμάτων, των ρωγματώσεων και των ζωνών διάτμησης.

Μια μικρή αύξηση της ειδικής αντίστασης σε βάθος από 0-15km είναι αποτέλεσμα της μείωσης του πορώδους, των ρωγματώσεων, της εναλλαγής των πετρωμάτων και της ζώνης διάτμησης του πορώδους λόγω του αυξημένου λιθοστατικού φορτίου. Είναι καλό να έχουμε υπόψη ότι τα θραύσματα και τα ρήγματα είναι γνωστό ότι παραμένουν ανοιχτά σε βάθη μεγαλύτερα των 15km λόγω των μεταβολών του λιθοστατικού φορτίου όπου οι κύριες φλεβικές τάσεις δεν είναι κατακόρυφες.

Ο εντοπισμός των ανωτέρω μεταβολών είναι χρήσιμος, παράδειγμα, για το βάθος αποθήκευσης χημικών και πυρηνικών αποβλήτων.

2.1.3.5 Υδροηλεκτρική αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα σε επιφανειακά πετρώματα σε μεγάλο βαθμό είναι ηλεκτρολυτική και παρουσιάζεται σε συνδεδεμένους χώρους πόρων, κατά μήκος των ορίων των κόκκων, σε θραύσματα, σε ρωγματώσεις και στις ζώνες διάτμησης άλλα αμελητέα μέσω του πυριτικού πλέγματος.

Τα ιόντα που άγουν το ρεύμα είναι αποτέλεσμα της διάσπασης των αλάτων, τέτοια διάσπαση λαμβάνει χώρα όταν τα άλατα διαλύονται στο νερό. Δεδομένου ότι κάθε ιόν είναι σε θέση να μεταφέρει μόνο μια ορισμένη ποσότητα φορτίου, προκύπτει ότι όσο περισσότερα ιόντα είναι διαθέσιμα μέσα σε ένα διάλυμα τόσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο που μπορεί να μεταφερθεί. Ως εκ τούτου, το διάλυμα με το μεγαλύτερο αριθμό ιόντων θα έχει και μεγαλύτερη αγωγιμότητα.

Γενικά, για ένα δεδομένο πορώδες, ένα πέτρωμα που περιέχει υφάλμυρο νερό μέσα στους πόρους του θα έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα, όταν η αλμυρότητα του νερού είναι υψηλή από ότι όταν είναι χαμηλή. Η αλμυρότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον καθορισμό της ειδικής αντίστασης ενός πετρώματος.

2.1.3.6 Ειδική αντίσταση και πορώδες.

Είναι σύνηθες να σχετίζονται η ειδική αντίσταση και το πορώδες σε ιζηματογενή πετρώματα, μέσω της γενικής μορφής της αρχής Archie η οποία για πετρώματα που δεν έχουν άργιλο γράφεται ως εξής:

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_e} = \alpha \Phi - m \quad (2.6)$$

Όπου $F = \frac{\rho_r}{\rho_e}$, οι παράγοντες σχηματισμού, ρ_r : ειδική αντίσταση του πετρώματος, ρ_e : ειδική αντίσταση του διαλύματος στους πόρους του πετρώματος, Φ : πορώδες, α και m είναι σταθερές που προσδιορίζουν τον τύπο του πετρώματος (μπορώ να χρησιμοποιήσω το ρ_w όπως και το ρ_e για το νερό ή τους ηλεκτρολύτες μέσα στους πόρους). Η σταθερά m συνήθως αναφέρεται ως ο παράγοντας συγκόλλησης, ενώ η σταθερά α αναφέρεται ως ο συντελεστής κορεσμού. Το α γενικά παίρνει τιμές από 0,6-1,0 ενώ το m από 1,4-2,20. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός συγκόλλησης τόσο υψηλότερη τιμή θα έχει το m . Τυπικές μορφές της εξίσωσης (2.6) για αμμώδης πετρώματα:

$$F = 0.62 \Phi^{-2.15} \text{(εξίσωση Humble)} \quad (2.7)$$

Για χαμηλό πορώδες ανθρακικών

$$F = \Phi^{-m} \text{(εξίσωση Shell)} \quad (2.8)$$

Όπου $m = 1,87 + 0,019\Phi^{-1}$

Ενώ οι εξισώσεις Humble και Shell είναι χρήσιμες για τα περιβάλλοντα για τα οποία προορίζονται, άλλες εξισώσεις χρησιμοποιούνται π.χ. για ασβεστολιθικά πετρώματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση $F = \frac{1}{\phi^2}$. Η εμπειρία ορίζει μια εξίσωση θα χρησιμοποιηθεί.

Το πορώδες ορίζεται ως ο όγκος του νερού μέσα στο κορεσμένο πέτρωμα

$$\Phi = \frac{V_e}{V_r} \quad (2.9)$$

Όπου V_e και V_r αντιπροσωπεύουν τους μετρούμενους όγκους νερού και πετρώματος, αντίστοιχα. Για πετρώματα τα οποία περιέχουν λίγο ή καθόλου όγκο πόρων (π.χ. Ψαμμίτης)

$$V_e = L_e A_e \quad (2.10)$$

Όπου L_e και A_e είναι το μήκος και το εμβαδόν της διατομής των διαδρομών του ηλεκτρολύτη μέσα σε ένα δείγμα πετρώματος, αντίστοιχα.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.9) και (2.10), έχουμε:

$$L_e A_e = \Phi V_r \quad (2.11)$$

Τώρα η αντίσταση του δείγματος είναι:

$$R = \frac{\rho_r L_r}{A_r} \quad (2.12)$$

Όπου ρ_r είναι η ειδικά αντίσταση, L_r το μήκος, και A_r η διατομή του δείγματος. Ωστόσο, δεδομένου ότι το σύνολο της αγωγιμότητας, υποτίθεται, ότι λαμβάνει χώρα μέσω της διαδρομής των πόρων και όχι μέσω του πυριτικού πλέγματος, μπορώ επίσης να πω ότι:

$$R = \frac{\rho_e L_e}{A_e} \quad (2.13)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.12) και (2.13) οδηγούμαστε στον ορισμό του L_e σαν

$$L_e = \frac{\sqrt{\Phi R V_r}}{\rho_e} \quad (2.14)$$

Το οποίο είναι το μήκος της διαδρομής των πόρων και δίνεται με βάση μετρίσιμες παραμέτρους. Ο συντελεστής της ελικοειδούς διαδρομής (Pirson 1958) καθορίζεται ως:

$$t = \frac{L_e}{L_r} \quad (2.15)$$

και χρησιμοποιείται για να περιγράψει την περίσσεια μήκους της ισοδύναμης διαδρομής το ηλεκτρολύτη σε σχέση με το μήκος του δείγματος του πετρώματος. Γιατί θέλουμε να γνωρίζουμε για την ελικοειδή διαδρομή; Ο λόγος είναι ότι η ελικοειδής διαδρομή μας παρέχει πληροφορίες για την στερεομετρία και ως εκ τούτου για την υφή ενός πετρώματος.

2.1.3.7 Επιδράσεις της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση.

Μια αύξηση στην θερμοκρασία μειώνει το ιξώδες του νερού, με αποτέλεσμα τα ιόντα μέσα στο νερό να γίνονται πιο κινητικά. Η αύξηση της κινητικότητας των ιόντων οδηγεί σε μια παρατηρούμενη μείωση της ειδικής αντίστασης με αύξηση της θερμοκρασίας σύμφωνα με την εξίσωση (Keller και Frischknecht, 1966):

$$p_r = \frac{p_{18}}{1 + \alpha(t - 18)} \quad (2.16)$$

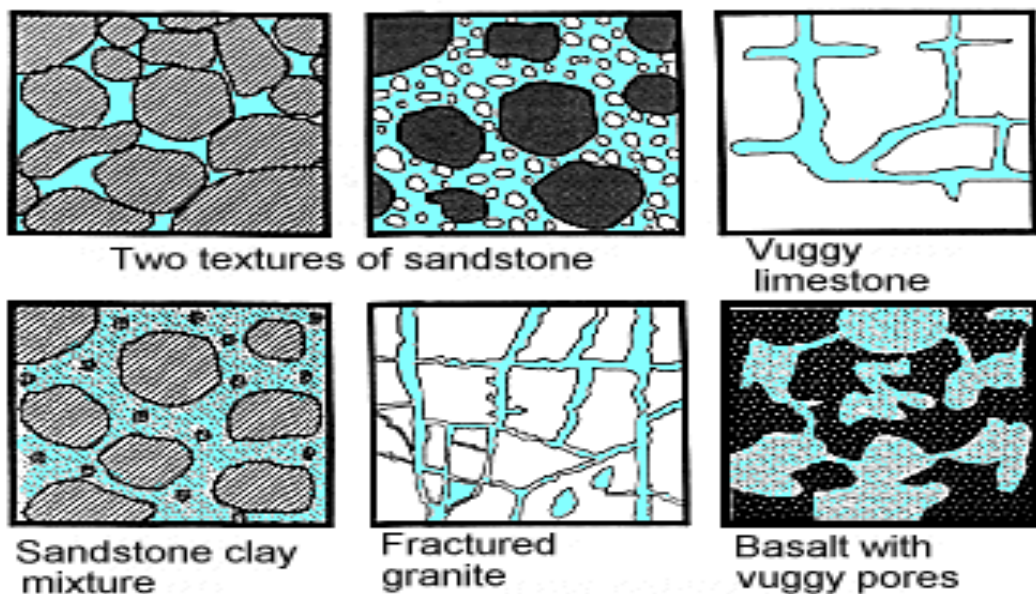
όπου α : ο συντελεστής θερμοκρασίας της ειδικής αντίστασης (περίπου 0,025 ανά βαθμό Κελσίου), t : θερμοκρασία περιβάλλοντος, p_r : ειδική αντίσταση στην συγκεκριμένη θερμοκρασία ενώ p_{18} η ειδική αντίσταση στους 18°C. Αυτή η επίδραση της θερμοκρασίας συμβάλλει ελαφρώς στην εμφάνιση χαμηλών ειδικών αντιστάσεων σε γεωθερμικά συστήματα, αλλά δεν είναι σημαντικός παράγοντας σε περιβαλλοντικές μελέτες.

2.1.3.8 Επιδράσεις της υφής και του πορώδους του πετρώματος στην ειδική αντίσταση για ένα δεδομένο δείγμα.

Η υφή ενός πετρώματος υπαγορεύει την ειδική αντίσταση του δεδομένου δείγματος. Από το σχήμα βρήκαμε τα ακόλουθα:

- I. ένας καλά ταξινομημένος ψαμμίτης έχει μεγάλους κενούς χώρους και ως εκ τούτου παρουσιάζει χαμηλή ειδική αντίσταση.

- II. ένας κακώς ταξινομημένος ψαμμίτης θα έχει πολύ λιγότερο πορώδες και ως εκ τούτου θα παρουσιάζει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση.
- III. Η διάλυση κατά μήκος των ρωγματώσεων στον ασβεστόλιθο ενισχύει το πορώδες με αποτέλεσμα να έχουμε χαμηλότερη ειδική αντίσταση
- IV. Η καθίζηση ορισμένων ορυκτών σε οποιοδήποτε πέτρωμα θα μειώσει το πορώδες με αποτέλεσμα να αυξηθεί η ειδική αντίσταση.
- V. Ένα πέτρωμα με γρανιτική υφή θα ωθήσει την ηλεκτρική ενέργεια στις ρωγμές και κατά μήκος των ορίων των κόκκων, το πορώδες τυπικά θα είναι χαμηλό οπότε η ειδική αντίσταση υψηλή.
- VI. Ο βασάλτης έχει πολλούς ασύνδετους ή αδιέξοδους πόρους με αποτέλεσμα την χαμηλή διαπερατότητα. Έτσι ώστε ακόμη και ένας βασάλτης με μεγάλο πορώδες μπορεί να παρουσιάσει υψηλή ειδική αντίσταση.

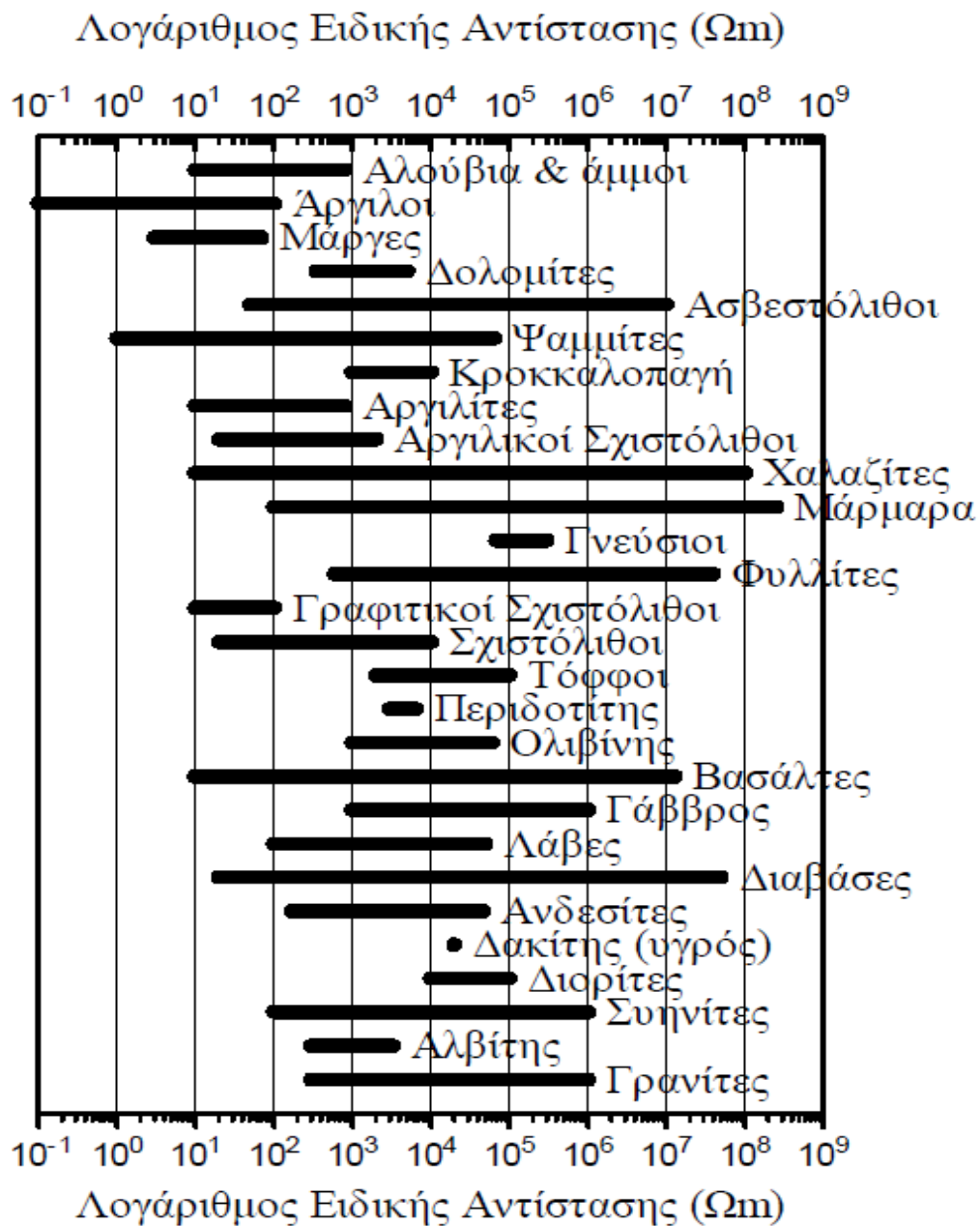


Σχήμα 2.2 :Διάφορες υφές πετρωμάτων

2.1.3.9 Η επίδραση του τύπου του πετρώματος στην ειδική αντίσταση.

Στο **Σχήμα 2.3** εμφανίζει τις τυπικές κλίμακες των ειδικών αντιστάσεων για ένα αριθμό πετρωμάτων και τύπους εδαφών. Αυτές οι κλίμακες εν μέρει αντανακλούν τους τύπους δομής των πετρωμάτων όπως προαναφέρθηκε, αλλά επίσης αντανακλούν τις επιδράσεις των γεωλογικών διεργασιών που θα περιγραφούν. Οι μεγάλες κλίμακες

και οι επικαλύψεις αυτών, για την ειδική αντίσταση σε διάφορους τύπους πετρωμάτων, κάνει την αναγνώριση του τύπου του πετρώματος δύσκολη.



Σχήμα 2.3 :Ειδικές αντιστάσεις ορυκτών και πετρωμάτων (Loke 2000)

2.1.3.10 Επιδράσεις των γεωλογικών διεργασιών στην ειδική αντίσταση.

Ο Πίνακας 2.2 απεικονίζει την επίδραση των διαφόρων γεωλογικών διεργασιών στην ειδική αντίσταση ενός πετρώματος. Γενικά, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση ενός πετρώματος αλλά υπάρχουν και εξαιρέσεις. Η

αποσάθρωση ή η υδροθερμική αλλοίωση του γρανίτη μειώνει σημαντικά την ειδική αντίσταση του όπως υποδεικνύει ο **Πίνακας 2.2**. Επίσης υποδεικνύει ότι οι επιφανειακές ροές, οι κάθετοι σύνδεσμοι και οι ρωγμές ενός βασάλτη μειώνουν επίσης την ειδική αντίσταση αυτού του τύπου πετρωμάτων κατά τάξεις μεγέθους. Η διάλυση, η ρωγματοποίηση, η διάτμηση, και η αποσάθρωση συνήθως αυξάνουν το πορώδες και την διαπερατότητα, και ως εκ τούτου μειώνουν και την ειδική αντίσταση. Η καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου και διοξειδίου του πυριτίου μειώνουν το πορώδες και ως εκ τούτου μειώνουν την διαπερατότητα και αυξάνουν την ειδική αντίσταση. Η σκλήρυνση με συμπίεση και η μεταμόρφωση των ορυκτών έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση του πορώδες και της διαπερατότητα και έτσι την αύξηση της ειδικής αντίστασης. Η εισχώρηση αλμυρού νερού παρέχει περισσότερα ιόντα για μεταβίβαση της αγωγιμότητας επομένως μειώνει την ειδική αντίσταση.

Αργιλική Εξαλλοίωση↓		Αποσάθρωση	↓
Διάλυση	↓	Σκλήρυνση	↑
Ρηγμάτωση ↓		Ιζηματοποίηση ↑	
Εισροή Θαλασσινού Νερού↓		Απολίθωση	↑
Διάτμηση	↓	Μεταμόρφωση	↕

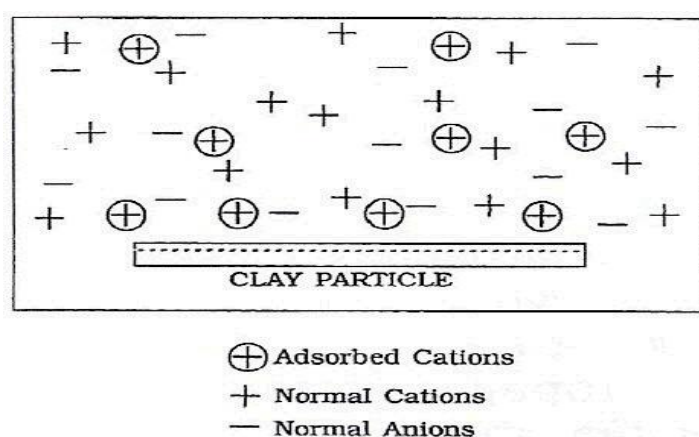
↑ : αύξηση , ↓ : μείωση , ↕ : αύξηση ή μείωση

Πίνακας 2.2: Επίδραση γεωλογικών διεργασιών στην Ειδική Αντίσταση.

2.1.3.11 Επιδράσεις των αργιλικών ορυκτών στην ειδική αντίσταση.

Ένα σωματίδιο αργίλου δρα σαν μια ξεχωριστή διαδρομή αγωγιμότητας επιπρόσθετα από την διαδρομή του ηλεκτρολύτη. Η αντίσταση σε αυτή την επιπρόσθετη διαδρομή είναι χαμηλή. Η προέλευση αυτής της ασυνήθιστα υψηλής αγωγιμότητας των αργιλικών ορυκτών οφείλεται στο διπλό στρώμα ανταλλαγής κατιόντων όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.4**. Τα κατιόντα απαιτούνται για να εξισορροπήσουν τα φορτία λόγω της αντικατάστασης μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα και να σπάσουν τους δεσμούς. Το περιορισμένο μέγεθος των κατιόντων εμποδίζει τον

σχηματισμό ενός μοναδικού στρώματος, μάλλον ένα διπλό στρώμα σχηματίζεται. Το διπλό στρώμα αποτελείται από ένα σταθερό στρώμα άμεσα συνδεδεμένο προς την επιφάνεια του αργίλου και από ένα διάχυτο στρώμα στο οποίο μειώνεται εκθετικά η πυκνότητα του ανάλογα με την απόσταση του από το σταθερό στρώμα. Το διάχυτο στρώμα σε αντίθεση με το σταθερό, είναι ελεύθερο να κινείται υπό την επίδραση ενός εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου. Τα κατιόντα του διάχυτου στρώματος προσθέτονται στην συγκέντρωση των κανονικών ιόντων και έτσι αυξάνει την πυκνότητα του φορτίου που μεταφέρει, το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας. Τα αργιλικά ορυκτά εμφανίζουν αυτή την ιδιότητα σε υψηλό βαθμό λόγω της μεγάλης δυνατότητας ανταλλαγής ιόντων. Οι ζεόλιθοι επίσης εμφανίζουν αυτό το χαρακτηριστικό, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Ωστόσο όλα τα ορυκτά το παρουσιάζουν σε κάποιο βαθμό. Όλα τα πετρώματα που περιέχουν αργιλικά ορυκτά έχουν μια ασυνήθιστα υψηλή αγωγιμότητα σε αυτή την αναφορά.



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση των ιόντων που απορροφούνται από ένα αργιλικό τεμαχίδιο

Το αποτέλεσμα διάδοσης της αργίλου στην αντίσταση ενός πετρώματος γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό καθώς η αγωγιμότητα μέσω των πόρων μικραίνει. Η υδροθερμική αλλοίωση μετατρέπει τους αστρίους σε καολινίτη, μοντμοριλονίτη και άλλα αργιλικά ορυκτά, ειδικά σε πυριτικά πετρώματα. Στα βασικά πετρώματα μπορεί να παραχθεί χλωρίτης και σερπεντίνης. Όλα αυτά τα αλλοιωμένα πετρώματα παρουσιάζουν υψηλή αγωγιμότητα.

Καθώς η συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη αυξάνει την σχετική συμβολή της ηλεκτρολυτικής αγωγιμότητας στην αύξηση της αγωγιμότητας της αργίλου όπως μπορεί να φάνει πιο κάτω.

Η συνολική αγωγιμότητα (σ_r) ενός πετρώματος προέρχεται τόσο από την κανονική αγωγιμότητα του πετρώματος (σ_n) συν την συνεισφορά από την επιφανειακή αγωγιμότητα (σ_s) της αργίλου (Patnode and Wyllie, 1950)

$$\sigma_r = \sigma_n + \sigma_s \quad (2.17)$$

ή

$$\sigma_r = \frac{\sigma_e}{F} + \sigma_s \quad (2.18)$$

όπου $F = \rho_n / \rho_e = \sigma_e / \sigma_n$: είναι ο παράγοντας σχηματισμού που δόθηκε προηγούμενος. Ο Ward και Still (1976-1983) αποδεικνύουν ότι $\sigma_s \sim 3\sigma_e$ για μεταμορφωμένα πετρώματα στο θερμαινόμενες πηγές ,Roosevelt, Utah USA, παρά την παρουσία ενός ηλεκτρολύτη που περιέχει 7000ppm συνολικά διαλυμένων στερεών.

Ο Waxman και Smith (1968) έδωσαν την εξίσωση για την ειδική αντίσταση για την άργιλο που φέρουν τα πετρώματα:

$$\rho_r = \frac{\rho_w F}{1} + \rho_w B Q \quad (2.19)$$

όπου,

ρ_w : η ειδική αντίσταση του νερού των πόρων

B: είναι ο παράγοντας που λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση της κινητικότητας των κατιόντων στην συγκέντρωση νερού στους πόρους.

Q: είναι η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων αργίλου ανά μονάδα όγκου.

Ft: είναι ο παράγοντας σχηματισμού που σε πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις οι επιδράσεις της αργίλου μπορούν να αγνοηθούν.

Από την εξίσωση (2.19) ένας προφανής παράγοντας σχηματισμού μπορεί να γραφεί σαν,

$$F_a = \frac{\rho_r}{\rho_w} = \frac{F_t}{1} + \rho_w BQ \quad (2.20)$$

2.1.3.12 Κορεσμός και ειδική αντίσταση νερού.

Ο επί τις εκατό κορεσμός νερού (S_w) ορίζεται ως:

$$S_w = \frac{\text{ο όγκος του νερού στους πόρους}}{\text{συνολικό όγκο των πόρων}} \quad (2.21)$$

Εμπειρικά έχει βρεθεί ότι,

$$F = \frac{\alpha \Phi^{-m}}{S_w^n} \quad (2.22)$$

ή

$$\rho_r = \frac{\rho_w \alpha \Phi^{-m}}{S_w^n} \quad (2.23)$$

π.χ. η ειδική αντίσταση του πετρώματος μειώνεται όσο αυξάνεται ο επί τις εκατό κορεσμός του νερού, συνήθως η εξίσωση (2.23) γράφεται,

$$S_w^n = \frac{\alpha \rho_w}{\Phi^m \rho_t} \quad (2.24)$$

Και αναφέρεται ως εξίσωση κορεσμού του Archie.

Η σημασία της έγκειται στην παρατήρηση ότι αν ρ_w, ρ_t και Φ μπορούν να μετρηθούν ανεξάρτητα, και τα α και m είναι λογικά εκτιμώμενα, τότε το S_w^n μπορεί να βρεθεί από ηλεκτρικές επισκοπήσεις (έρευνες). Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική στην εξερεύνηση των υπόγειων υδάτων. Ο δείκτης κορεσμού n είναι συνήθως ίσος με 2, αλλά θα διαφέρει στην πράξη.

Όταν υπάρχουν άργιλοι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Simandoux (1963)

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{V_{cl}}{\rho_{cl}} * S_w + \frac{\Phi_m}{\alpha \rho_w} * S_w^2 \quad (2.25)$$

ρ_r =ειδική αντίσταση του πετρώματος

ρ_w = ειδική αντίσταση του νερού των πόρων

α, m = οι συντελεστές όπως και στην εξίσωση Archie

Φ = πορώδες (%)

S_w = κορεσμός νερού (%)

V_{cI} = όγκος της αργίλου

ρ_{cl} = ειδική αντίσταση της αργίλου.

Προφανώς η εξίσωση (2.25) δεν είναι εύκολο να εφαρμοστεί στην πράξη και αναφέρεται εδώ κυρίως ως μια προειδοποιητική σημείωση κατά της χρήσης της (2.24) όταν υπάρχουν άργιλοι.

2.1.4 Ηλεκτρικά δυναμικά

Οι πιο σημαντικές ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών είναι τα φυσικά δυναμικά, η ειδική αντίσταση (E.A) και η διηλεκτρική σταθερά. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι μία έμμεση παράμετρος. Η πλέον σημαντική ιδιότητα είναι αυτή της ειδικής αντίστασης.

Η κύρια πηγή των φυσικών δυναμικών είναι η ηλεκτροχημική και η μηχανική δραστηριότητα που επιτελείται στο υπέδαφος. Ο παράγοντας που ελέγχει αυτή τη δραστηριότητα είναι το νερό. Τα φυσικά δυναμικά συνδέονται με τη διάβρωση των θειούχων σωμάτων, τη μεταβολή του ορυκτολογικού περιεχομένου των πετρωμάτων σε γεωλογικές επαφές, τη βιοηλεκτρική δραστηριότητα του οργανικού υλικού, τη θερμική και υδραυλική κλίση των υπόγειων υγρών και άλλων παρόμοιων φαινομένων.

Υπάρχουν 4 τύποι φυσικών δυναμικών. Ο πρώτος είναι μηχανικής προέλευσης και οι υπόλοιποι χημικής προέλευσης.

- Ηλεκτροκινητικό δυναμικό
- Δυναμικό επαφής
- Δυναμικό Ιλυόλιθου (Nernst)
- Φυσικό δυναμικό μεταλλοφορίας

Υπάρχουν και άλλες πηγές ηλεκτρικών δυναμικών, όπως από διάβρωση μεταλλικών αντικειμένων, επίδραση ιονοσφαιρικών ηλεκτρικών ρευμάτων, πυρηνικών εκρήξεων, πουδημιουργούν επαγόμενα ρεύματα και κατά συνέπεια και

γήινα δυναμικά. Βιοηλεκτρικά δυναμικά αναπτύσσονται επίσης πλησίον φυτικών ριζών. Έχουν αναφερθεί εδώ αρνητικάδυναμικά της τάξης των 100 mV.

2.1.5 Ηλεκτρική αγωγιμότητα, ηλεκτρική ειδική αντίσταση.

Το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαδοθεί στα πετρώματα με τρεις τρόπους:

- i. Τον ηλεκτρονικό (Ωμικά)
- ii. τον ηλεκτρολυτικό και
- iii. τη διηλεκτρική μετάδοση.

Ο πρώτος τρόπος είναι ο κανονικός και γίνεται με τη ροή ρεύματος σε υλικά που έχουνελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως είναι τα μέταλλα. Στον ηλεκτρολυτικό τρόπο το ρεύμαδημιουργείται από τα ιόντα που μετακινούνται με χαμηλό ρυθμό. Ηδιηλεκτρική μετάδοσηλαμβάνει χώρα σε μικρής αγωγιμότητας υλικά και μονωτές, οι οποίοι έχουν πολύ λίγουςελεύθερους μεταφορείς ή κανένα. Κάτω από την επίδραση ενός εξωτερικού μεταβαλλόμενουηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια μετατοπίζονται ελαφρώς σχετικά με τον πυρήνα τους.Αυτός ο ελαφρά σχετικός διαχωρισμός των αρνητικών και θετικών φορτίων είναι γνωστός ωςδιηλεκτρική πόλωση του υλικού. Ιοντική και μοριακή πόλωση μπορεί να εμφανισθεί σε υλικάμε ιοντικούς και μοριακούς δεσμούς. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η διηλεκτρική μετάδοσηείναι το αποτέλεσμα της αλλαγής της ηλεκτρονικής, ιοντικής ή μοριακής πόλωσης πουπροκαλείται από το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

2.1.5.1 Ηλεκτρονική μετάδοση

Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση(ρ) ενός κυλινδρικού στερεού μήκους L και διατομής A , που έχειαντίσταση R μεταξύ των δύο ακραίων διατομών (επιφανειών) δίδεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (2.26)$$

Εάν A είναι σε m^2 , L σε m και R σε Ωm , τότε η μονάδα ειδικής αντίστασης είναι το $\Omega m.m$.

Από το νόμο του Ohm έχουμε:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.27)$$

και αν θέσουμε $\sigma = \frac{1}{\rho}$, τότε

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} = \frac{I}{\frac{A}{V}} = \frac{j}{E} \quad (2.28)$$

όπου $j = \frac{I}{A}$ είναι η πυκνότητα του ρεύματος και μετριέται σε $\frac{A}{m^2}$, $E = \frac{V}{L}$ είναι το ηλεκτρικό πεδίο και μετριέται σε V/m και σ , είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα που μετριέται σε mhos/m ή Siemens/m.

2.1.5.2 Ηλεκτρολυτική μετάδοση

Εφόσον τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, οι ειδικές αντιστάσεις έπρεπε να είναι εξαιρετικά υψηλές, αλλά δεν είναι, διότι συνήθως έχουν πορώδη υφή και στα ενδιάμεσα κενά κυκλοφορούν υγρά και κυρίως νερό. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα πετρώματα είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί των οποίων η ενεργός ειδική αντίσταση μπορεί να οριστεί όπως για τους ηλεκτρονικούς αγωγούς (Ωμική διάδοση). Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι στην ηλεκτρολυτική μετάδοση το ρεύμα διαδίδεται με ιοντικό ή μοριακό τρόπο, με ιόντα ή μόρια που έχουν περίσσεια ή έλλειψη ηλεκτρονίων. Έτσι, η ειδική αντίσταση ποικίλλει ανάλογα με την κινητικότητα, την συγκέντρωση και το βαθμό αποσύνθεσης των ιόντων.

Το τελευταίο, εξαρτάται από τη διηλεκτρική σταθερά του διαλύματος. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ροή του ρεύματος είναι σχετικά χαμηλή σε σχέση με την ωμική μετάδοση και η κίνηση εδώ παριστά μια πραγματική μεταφορά υλικού, συνήθως προκύπτοντας απόχημικό μετασχηματισμό. Η αγωγιμότητα ενός πορώδους πετρώματος ποικίλλει ανάλογα με τον όγκο και την διάταξη των διακένων και ακόμη περισσότερο με την αγωγιμότητα και την ποσότητα του πορικού υγρού (νερού). Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση του Archie έχουμε:

$$\rho_e = \alpha \Phi^{-m} - S^{-n} - \rho_w \quad (2.29)$$

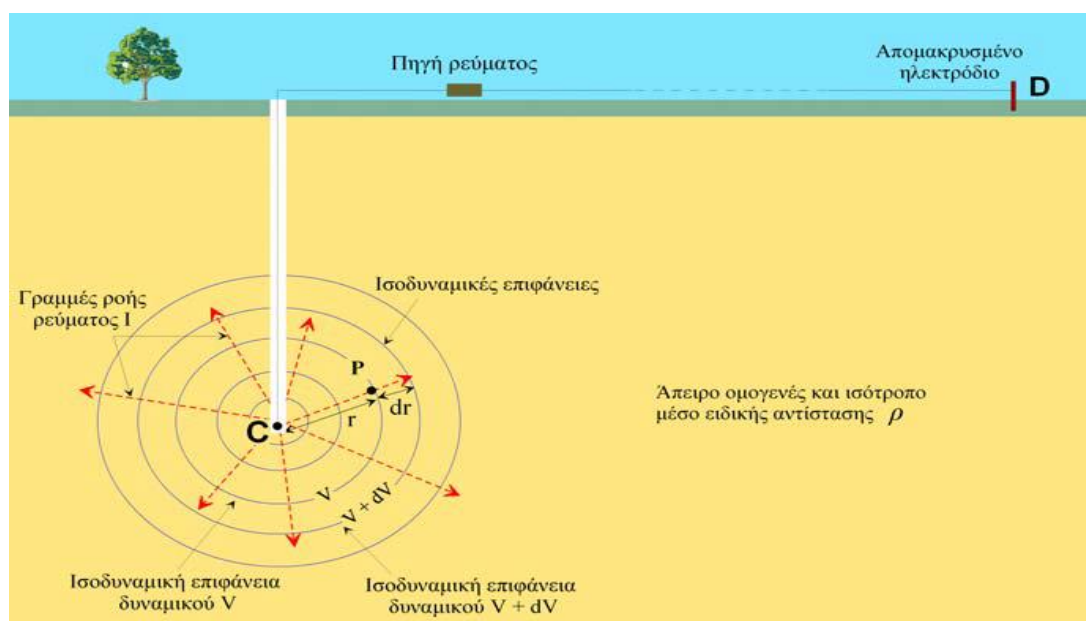
όπου Φ , είναι ο κλασματικός όγκος των διακένων (πορώδες) και S είναι το κλάσμα των πόρων που περιέχουν νερό. Η ρ_w , είναι η ειδική αντίσταση του νερού, το m είναι περίπου 2 και οι σταθερές α & m κυμαίνονται μεταξύ $0.5 < \alpha < 2.5$, και $1.3 < m < 2.5$, αντίστοιχα.

2.1.6 Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο

Στην γεωφυσική έρευνα έχουμε διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη και όχι μόνο σε συρμάτινο καλώδιο. Οπότε είναι γεγονός ότι η ροή ρεύματος μέσα σε

ένα τρισδιάστατο σώμα παρουσιάζει κάποιες διαφορές σε σχέση με τη ροή μέσω ενός γραμμικού αγωγού. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε η θεωρία της ροής ρεύματος στο χώρο. Με βάση αυτή τη θεωρία έχουμε σαν χώρο μελέτης το έδαφος της γης, όμως το θεωρούμε ότι είναι ένα άπειρο, ομοιογενές και ισότροπο μέσο. Με την παραπάνω λογική η ειδική του αντίσταση είναι ίδια και σταθερή σε ολόκληρη τη μάζα του (ηλεκτρικά ομογενής γη).

Συνθήκες άπειρου ομογενούς χώρου δημιουργούμε στη πράξη με την τοποθέτηση ηλεκτροδίου μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά μέσα σε ομογενές και ισότροπο έδαφος (Σχήμα 2.5). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος (συσσωρευτής) και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, D, το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος, I, σημειακής πηγής, C, που βρίσκεται μέσα σε άπειρο ομογενές και ισότροπο μέσο είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τα έξω.



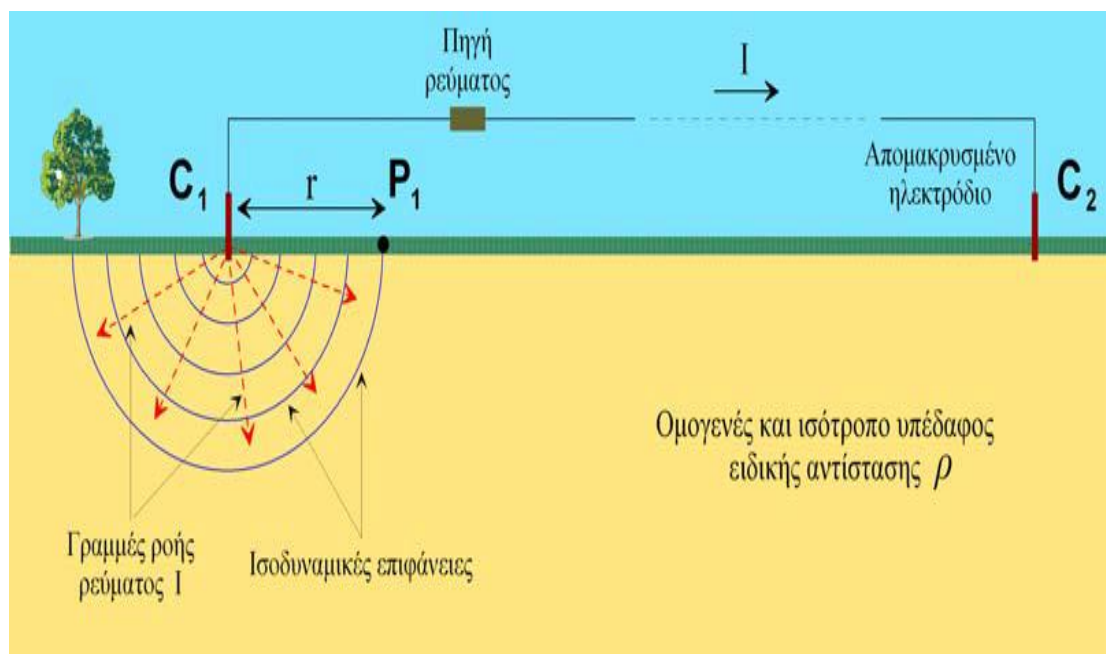
Σχήμα 2.5: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο (Ιωάννης Φ.Λούης 2004)

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το ρεύμα (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) ρέει από το ηλεκτρόδιο C ακτινικά κατά μήκος ευθειών γραμμών. Αν μπορούσαμε με ένα βολτόμετρο να υπολογίσουμε την διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης) που προκαλεί η ειδική αντίσταση του μέσου σε μια απόσταση πολύ μακριά από το ηλεκτρόδιο

ρεύματος σε διάφορες θέσεις του μέσου, θα βρίσκαμε ότι η πτώση τάσης είναι σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών οι οποίες έχουν κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές αυτές καλούνται ισοδυναμικές γραμμές (equipotentials). Στις τρεις διαστάσεις, οι ισοδυναμικές γραμμές σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το ηλεκτρόδιο. Μερικές ισοδυναμικές γραμμές δείχνονται με μπλε κύκλους.

2.1.7 Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο

Συνθήκες ομογενούς ημιχώρου δημιουργούμε στη πράξη με την τοποθέτηση μικρών διαστάσεων ηλεκτροδίου, C_1 , (σημειακή πηγή ρεύματος) στην επιφάνεια ομογενούς γης (Σχήμα 2.6). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C_2 , το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος, I , της σημειακής πηγής, C_1 , είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες ως κάθετες στις γραμμές ροής (ακτίνες) θα είναι ομόκεντρες ημισφαιρικές επιφάνειες.



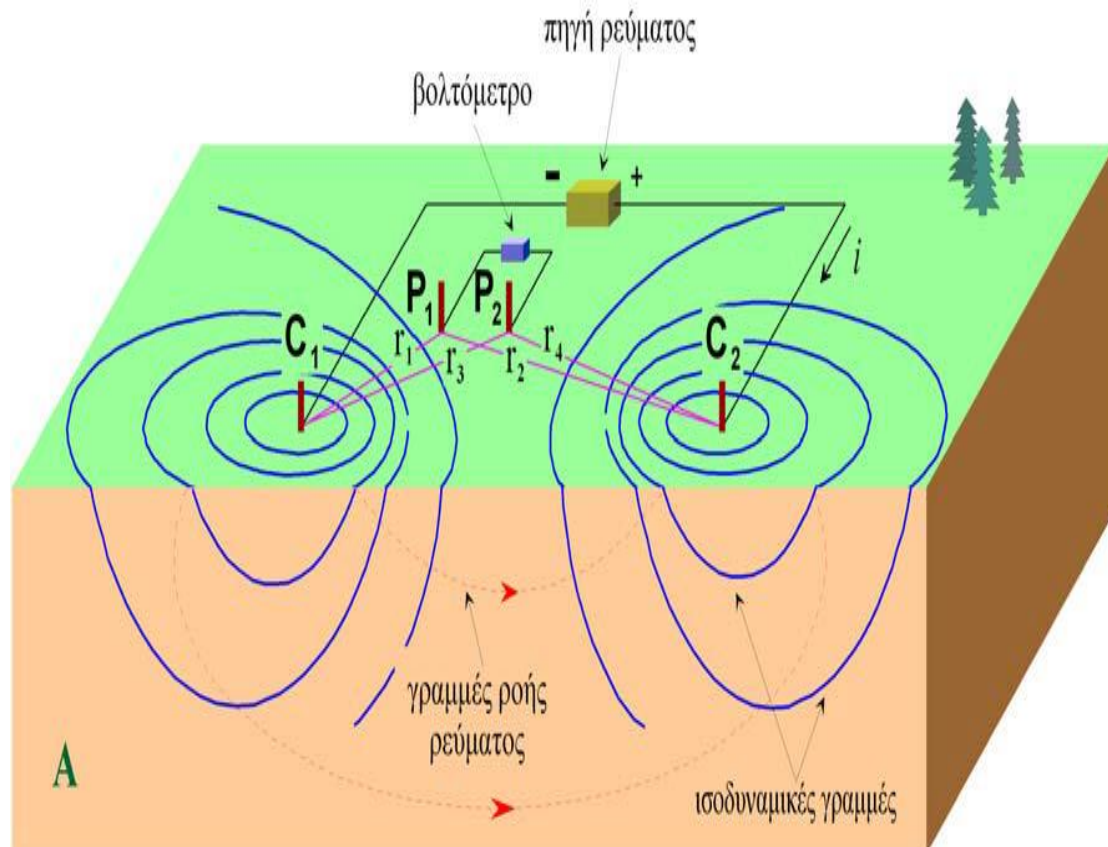
Σχήμα 2.6: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2004)

2.1.8 Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο.

Τοποθετώντας τις δυο σημειακές πηγές κοντά μεταξύ τους η κατανομή του ρεύματος και οι ισοδυναμικές γραμμές που παράγονται μέσα στην ομογενή γη θα είναι πιο γίνονται πιο πολύπλοκες όπως φαίνεται στα πιο κάτω σχήματα

Στη περίπτωση αυτή όπου το δεύτερο ηλεκτρόδιο ρεύματος C2 βρίσκεται κοντά στη σημειακή πηγή C1 (Σχήμα 2.7) τότε το δυναμικό στο σημείο P1 (ηλεκτρόδιο P1) θα είναι διαφορετικό διότι τώρα επηρεάζεται και από την πηγή ρεύματος C2. Το διαμορφούμενο δυναμικό στο σημείο P1 θα είναι το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού V1 λόγω της πηγής C1 και του δυναμικού V2 λόγω της πηγής C2 (αρχή της υπέρθεσης).

Ακόμα, οι γραμμές ροής του ρεύματος δεν είναι πλέον ακτινικές, αλλά καμπύλες γραμμές που ενώνουν τα δυο ηλεκτρόδια ρεύματος. (Βερβερέλης Ε. 2011)



Σχήμα 2.7: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο με δυο σημειακές πηγές (Ιωάννης Φ.Λούης 2004)

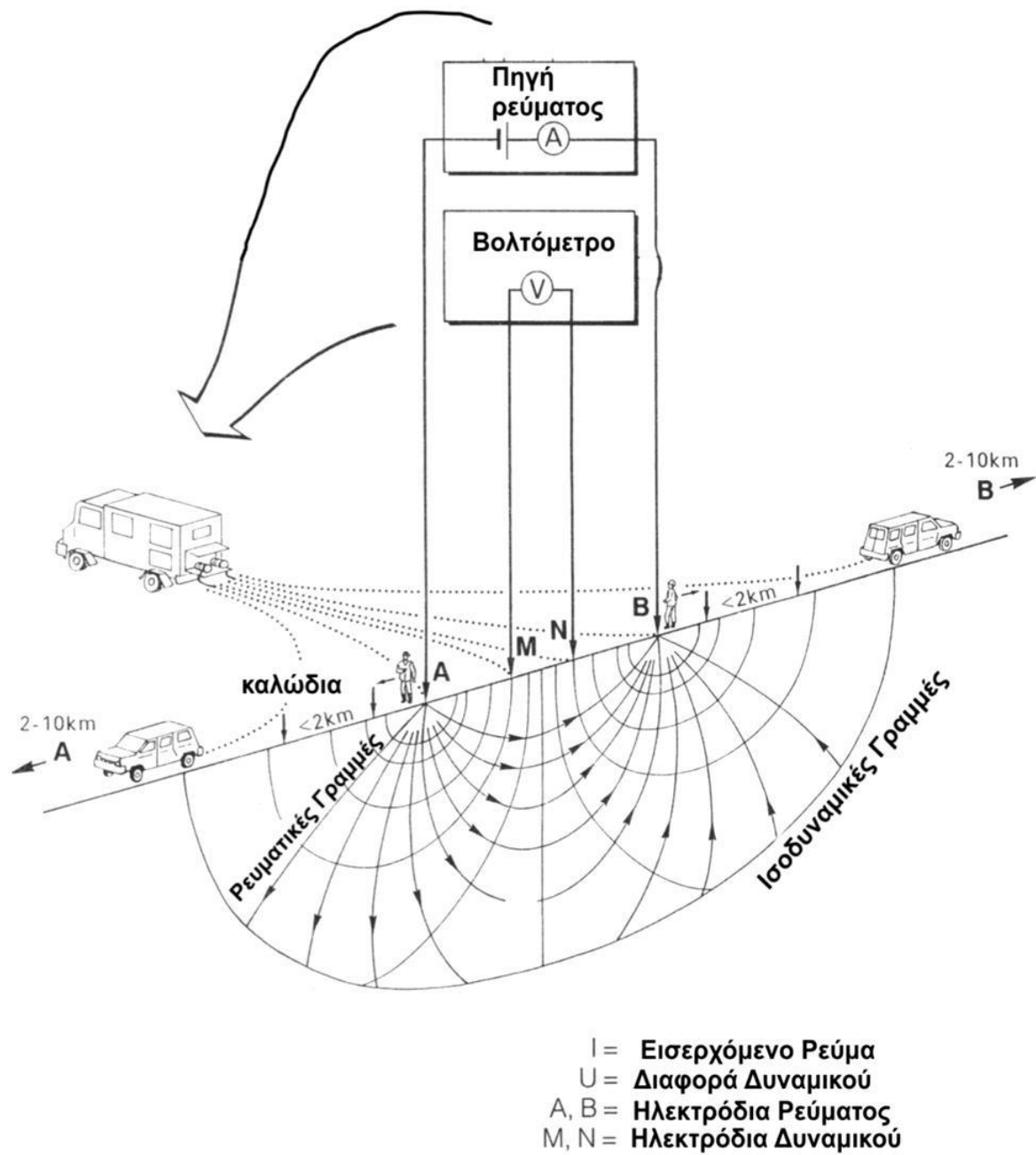
2.1.9 Εξοπλισμός Υπαίθρου

Για να μετρήσουμε την φαινόμεναιδική αντίσταση δηλαδή τα ΔV και I , απαιτεί για την ηλεκτρική διασκόπηση και τον κατάλληλο εξοπλισμό. Ο εξοπλισμός αυτός είναι σχετικά απλός, συγκρινόμενος με τον αντίστοιχο εξοπλισμό άλλων γεωφυσικών μεθόδων, όπως η βαρυτική ή η μαγνητική.

Ο εξοπλισμός αποτελείται από τα παρακάτω μηχανήματα και αντικείμενα:

1. **Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος:** Μέχρι 1 ampere χρησιμοποιούμε συσσωρευτές ενώ για ρεύμα μεγαλύτερης έντασης γεννήτριες
2. **Αμπερόμετρο:** Για τη μέτρηση του ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα απλό αμπερόμετρο. Ο μοναδικός περιορισμός είναι να μπορεί το όργανο να μετρήσει ποσότητα ρεύματος από λίγα milliamps έως περίπου 0.5amp με ακρίβεια καλύτερη του 2% στη πλήρη κλίμακα.
3. **Βολτόμετρο:** Τα σύγχρονα, υψηλής ακρίβειας, βολτόμετρα έχουν αντιστάσεις εισόδου της τάξης των 10M Ω ή και μεγαλύτερες, με αποτέλεσμα να είναι ικανά να μετρούν δυναμικά από 10 μ V έως μερικά V. Αυτά τα υψηλής εμπέδησης βολτόμετρα είναι συζευγμένα με ένα καταγραφικό σύστημα, για την περίπτωση που το μετρούμενο δυναμικό είναι πολύ μικρό.
4. **Σύστημα Αντιστάθμισης:** Συνδέεται σε σειρά με το βολτόμετρο και χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση ανεπιθύμητων φυσικών δυναμικών, προερχόμενων από άλλες φυσικές ή τεχνικές πηγές, τα οποία υπεισέρχονται ως θόρυβος στις μετρήσεις
5. **Καλώδια σε καρούλια:** Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των ηλεκτροδίων με τα διάφορα ηλεκτρικά εξαρτήματα. Η αντίσταση τους θεωρείται κατά κανόνα αμελητέα. Θα πρέπει να ικανοποιούν τις εξής, συχνά αντικρουόμενες, απαιτήσεις:
 - ❖ Χαμηλή ωμική αντίσταση
 - ❖ Μεγάλη μηχανική αντοχή στις έλξεις
 - ❖ Ισχυρή μόνωση
 - ❖ Μικρό βάρος
6. **Ηλεκτρόδια:** Πρόκειται για ράβδους από αλουμίνιο, χαλκό ή χάλυβα, μήκους 60 cm. Οι ράβδοι πακτώνονται γερά στο έδαφος και συνδέονται

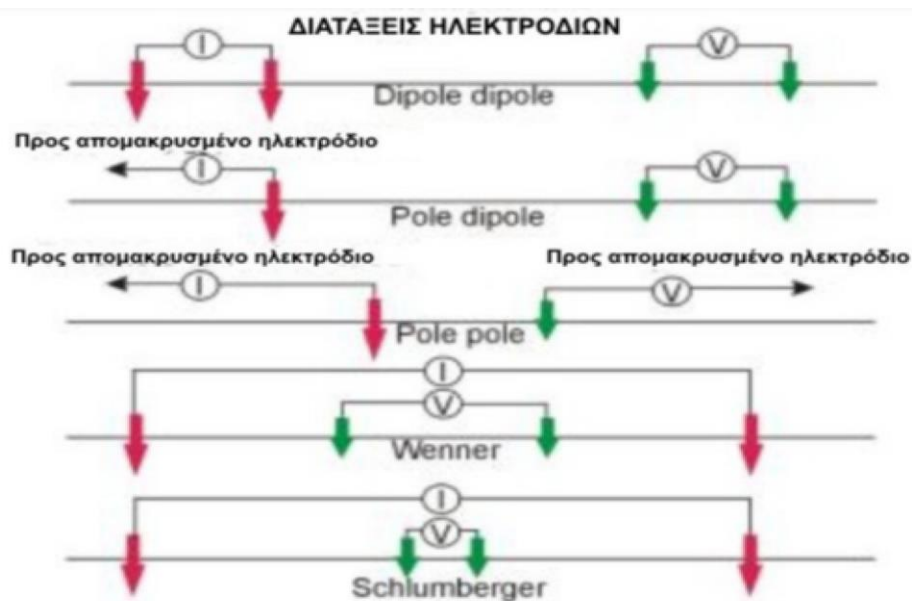
με τα υπόλοιπα ηλεκτρικά εξαρτήματα των κυκλωμάτων ρεύματος και δυναμικού, μέσω των καλωδίων



Σχήμα 2.8: Διάταξη εξοπλισμού μέτρησης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Αποστολόπουλος 2013)

2.1.10 Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Στο Σχήμα 2.9, παρουσιάζονται οι σημαντικότερες διατάξεις ηλεκτροδίων και αναλύονται οι αντίστοιχες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις (ο συντελεστής k αποτελεί τον γεωμετρικό συντελεστή κάθε διάταξης):



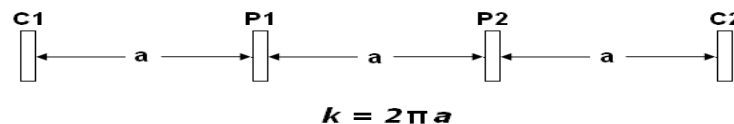
Σχήμα 2.9: Συνήθεις διατάξεις ηλεκτροδίων (Αποστολόπουλος 2013)

Διάταξη Wenner:

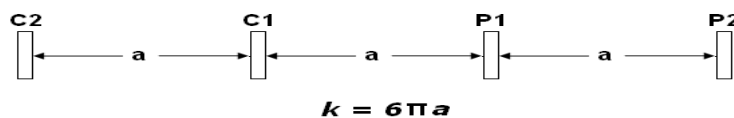
Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a . Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

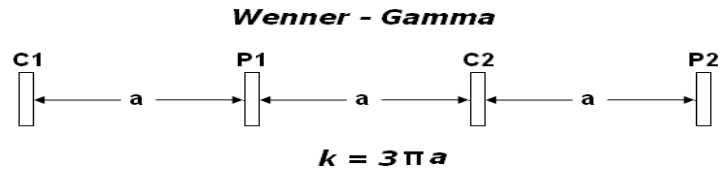
$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * 2\pi * \alpha \tag{2.30}$$

Wenner - Alpha



Wenner - Beta





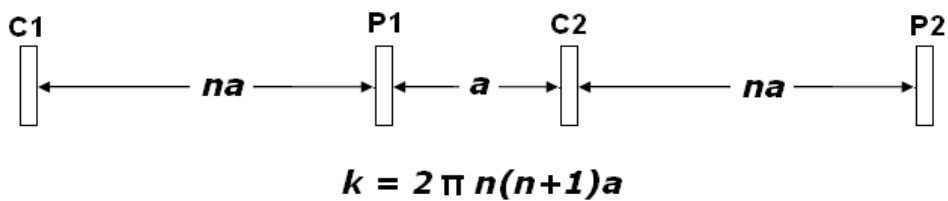
Σχήμα 2.10: Διατάξεις ηλεκτροδίων για Wenner (Μαυρομάτης 2007)

Διάταξη Schlumberger:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης σε απόσταση L και l αντίστοιχα. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * \pi \frac{L^2 - l^2}{2l} \quad (2.31)$$

Wenner - Schlumberger

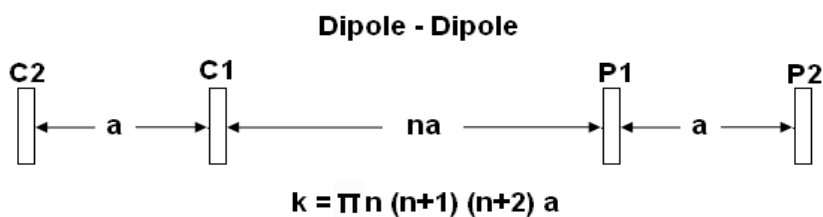


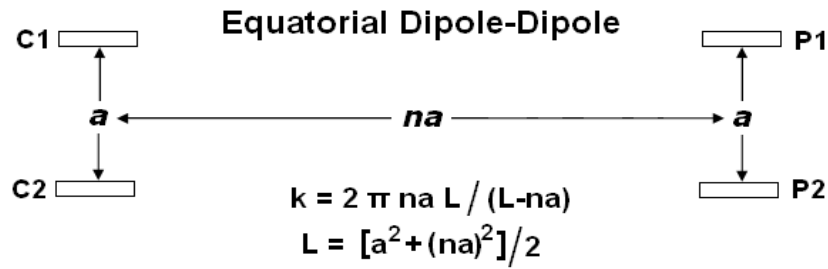
Σχήμα 2.11: Διατάξεις ηλεκτροδίων για Schlumberger (Μαυρομάτης, 2007)

Διάταξη Dipole - Dipole:

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

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * \pi * n * (n + 1)(n + 2)a \quad (2.32)$$



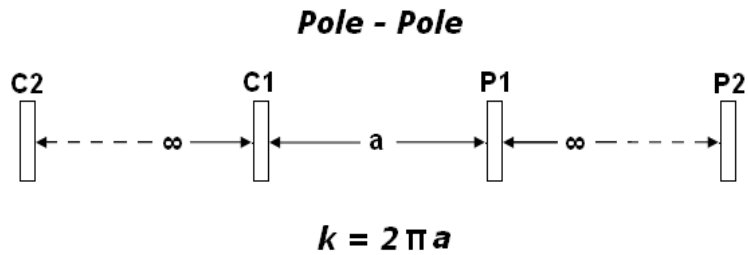


Σχήμα 2.12: Διατάξεις ηλεκτροδίων για Dipole – Dipole (Μαυρομάτης, 2007)

Διάταξη Pole – Pole:

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

$$\rho_\alpha = \frac{\Delta V}{I} * 2\pi * a \tag{2.33}$$



Σχήμα 2.13: Διατάξεις ηλεκτροδίων για pole – pole (Μαυρομάτης, 2007)

Διάταξη Pole – Dipole:

Το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος (C2) τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι a , ενώ η απόσταση του ηλεκτροδίου ρεύματος από το ηλεκτρόδιο δυναμικού P1 είναι na . Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_\alpha = \frac{\Delta V}{I} * 2\pi n(n + 1)a \tag{2.34}$$

Pole - Dipole



$$k = 2 \pi n(n+1)a$$

Σχήμα 2.14: Διατάξεις ηλεκτροδίων για pole - dipole (Μαυρομάτης, 2007)

2.1.10.1 Επιλογή της Κατάλληλης Διάταξης Ηλεκτροδίων

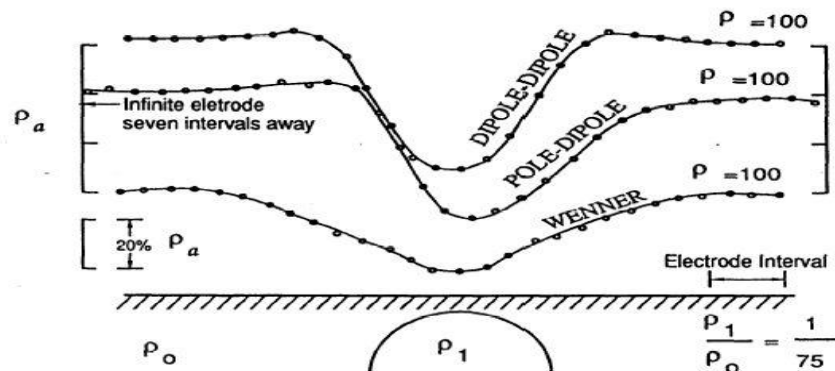
Σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την διάταξη των ηλεκτροδίων καθώς και την σειρά απόδοσης των διαφόρων διατάξεων:

❖ Λόγος σήματος προς θόρυβο:

1. Wenner
2. Schlumberger
3. Pole – Dipole
4. Dipole – Dipole

❖ Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες :

1. Dipole – Dipole
2. Pole – Dipole
3. Schlumberger
4. Wenner



Σχήμα 2.15: Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες (Sumner, 1976)

❖ Διαχωρισμός δομών με απότομη κλίση:

1. Schlumberger
2. Wenner
3. Dipole – Dipole
4. Pole – Dipole

❖ Διαχωρισμός οριζόντιων στρωμάτων:

1. Schlumberger και Wenner
2. Dipole – Dipole και Pole Dipole

❖ Ευαισθησία στην μορφολογία του υποβάθρου:

1. Dipole – Dipole
2. Pole – Dipole
3. Schlumberger και Wenner

❖ Βάθος διασκόπησης:

1. Dipole – Dipole $0.195L$
2. Schlumberger $0.125L$

Όπου L η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

❖ Ευαισθησία σε πλευρικά φαινόμενα:

Μια γεωλογική ή τοπογραφική δομή, η οποία βρίσκεται εκτός της περιοχής έρευνας, μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Ο παράγοντας αυτός είναι άμεσα συνδεδεμένος με το βάθος της διασκόπησης και, ως εκ τούτου, μεγάλη αβεβαιότητα υπεισέρχεται σε μια πιθανή εκτίμηση της κατάταξης των διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων, με βάση την ευαισθησία τους στα διάφορα πλευρικά φαινόμενα. (Αποστολόπουλος 2013)

❖ Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος:

1. Schlumberger και Wenner

2. Dipole – Dipole
3. Pole – Dipole

❖ Ευαισθησία στην κλίση:

1. Schlumberger και Wenner
2. Dipole – Dipole
3. Pole – Dipole

❖ Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση βυθοσκοπήσεων:

1. Schlumberger

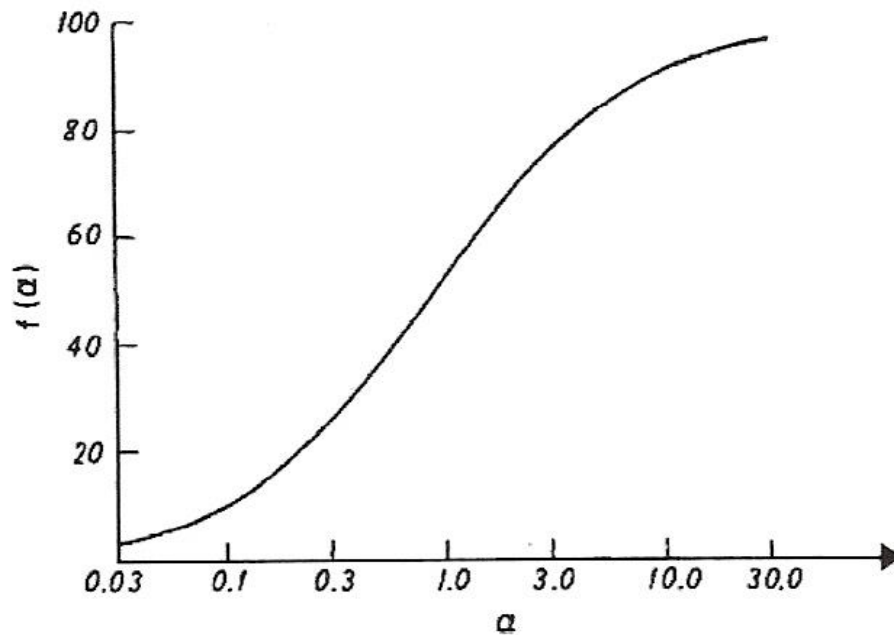
❖ Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση ηλεκτρικών χαρτογραφήσεων:

1. Pole – Dipole
2. Dipole – Dipole
3. Schlumberger – Wenner

❖ Διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος:

Η μεταβλητή α ($\alpha=4(\rho_2 / \rho_1)(t_1 / AB)$), όπου ρ_1 , ρ_2 οι ειδικές αντιστάσεις καλύμματος και υποβάθρου, t_1 το πάχος του καλύμματος και AB η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος), δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 0.1 για να μπορούμε να εντοπίσουμε τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου.

1. Schlumberger

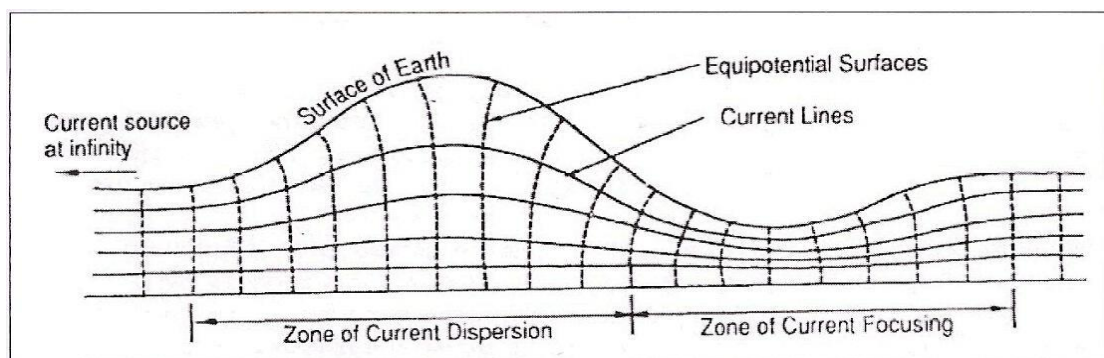


Σχήμα 2.16: Η συνάρτηση $f(a)$, για τον υπολογισμό του ποσοστού του ρεύματος που παραμένει σε λεπτό αγώγιμο στρώμα, το οποίο βρίσκεται πάνω από αντιστατικό ημιχώρο. (Edwards & Howell, 1976)

❖ Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.

Οι διατάξεις των ηλεκτροδίων πρέπει να έχουν διεύθυνση παράλληλη με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής.

1. Dipole – Dipole



Σχήμα 2.17: Επίδραση του τοπογραφικού ανάγλυφου στις ισοδυναμικές επιφάνειες και τις γραμμές ροής ρεύματος (Fox, 1980)

Σαν συμπέρασμα με τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία κάθε διάταξης στους διάφορους παράγοντες, προκύπτει ότι τα περισσότερα πλεονεκτήματα ως διάταξη ηλεκτροδίων για βυθοσκόπηση έχει η διάταξη Schlumberger. Οι

αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνουν συνεχώς με σταθερή απόσταση ηλεκτροδίων δυναμικού, η οποία αλλάζει μόνο όταν το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού γίνεται τόσο μικρό ώστε να μην είναι δυνατόν να μετρηθεί με την απαιτούμενη ακρίβεια. Όταν πρόκειται να μεταβληθεί η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού, λαμβάνονται διπλομετρήσεις και με τις δυο αποστάσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού. Γίνονται έξι μετρήσεις ανά λογαριθμικό κύκλο του ημίσεως της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος.

Η διάταξη Dipole–Dipole, παράλο που έχει μεγαλύτερο βάθος ανίχνευσης λόγω της μετακίνησης των ηλεκτροδίων δυναμικού υφίσταται το θόρυβο που δημιουργούν οι παράπλευρες επιφανειακές ανομοιογένειες. (Αποστολόπουλος 2013)

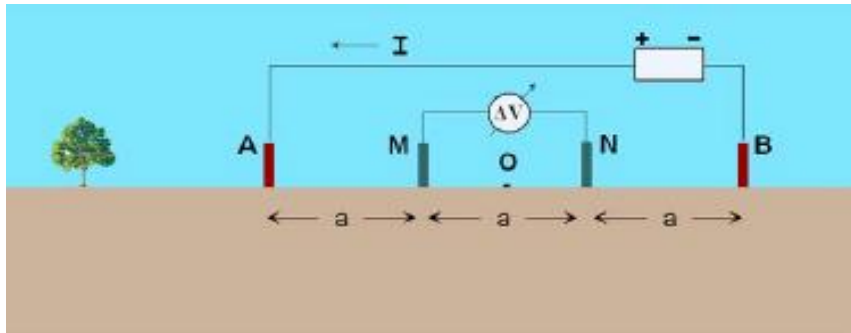
2.1.11 Μετρήσεις και Τεχνικές Υπαίθρου

Ανάλογα με τον σκοπό και το βάθος έρευνας υπάρχουν τρεις τεχνικές με τις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην ύπαιθρο. Αυτές είναι η Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση, η Οριζόντια Ηλεκτρική Χαρτογράφηση και η Γεωηλεκτρική Τομογραφία.

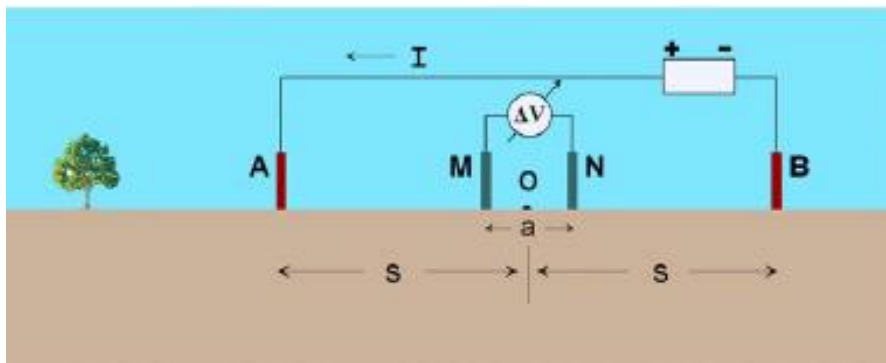
2.1.11.1 Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις.

Χρησιμοποιούνται όπου μπορούμε να βρούμε την εναλλαγή των στρωμάτων με το βάθος, κάτω από ένα σημείο που είναι το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων, ανοίγοντας τα ηλεκτρόδια συμμετρικά ως προς αυτό σε μεγαλύτερες διαδοχικά αποστάσεις.

Όταν πραγματοποιούμε βυθοσκοπήσεις ειδικής αντίστασης, δύο τύποι διασκόπησης χρησιμοποιούνται περισσότερο. Και για τους δύο τύπους, τα ηλεκτρόδια καταναέμονται κατά μήκος μια γραμμής, το κέντρο της οποίας αποτελεί τη θέση της βυθοσκόπησης. Η πιο απλή τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, από άποψη γεωμετρίας, καλείται μέθοδος Wenner. Η πιο οικονομική σε χρόνο εργασιών υπαίθρου καλείται μέθοδος Schlumberger.

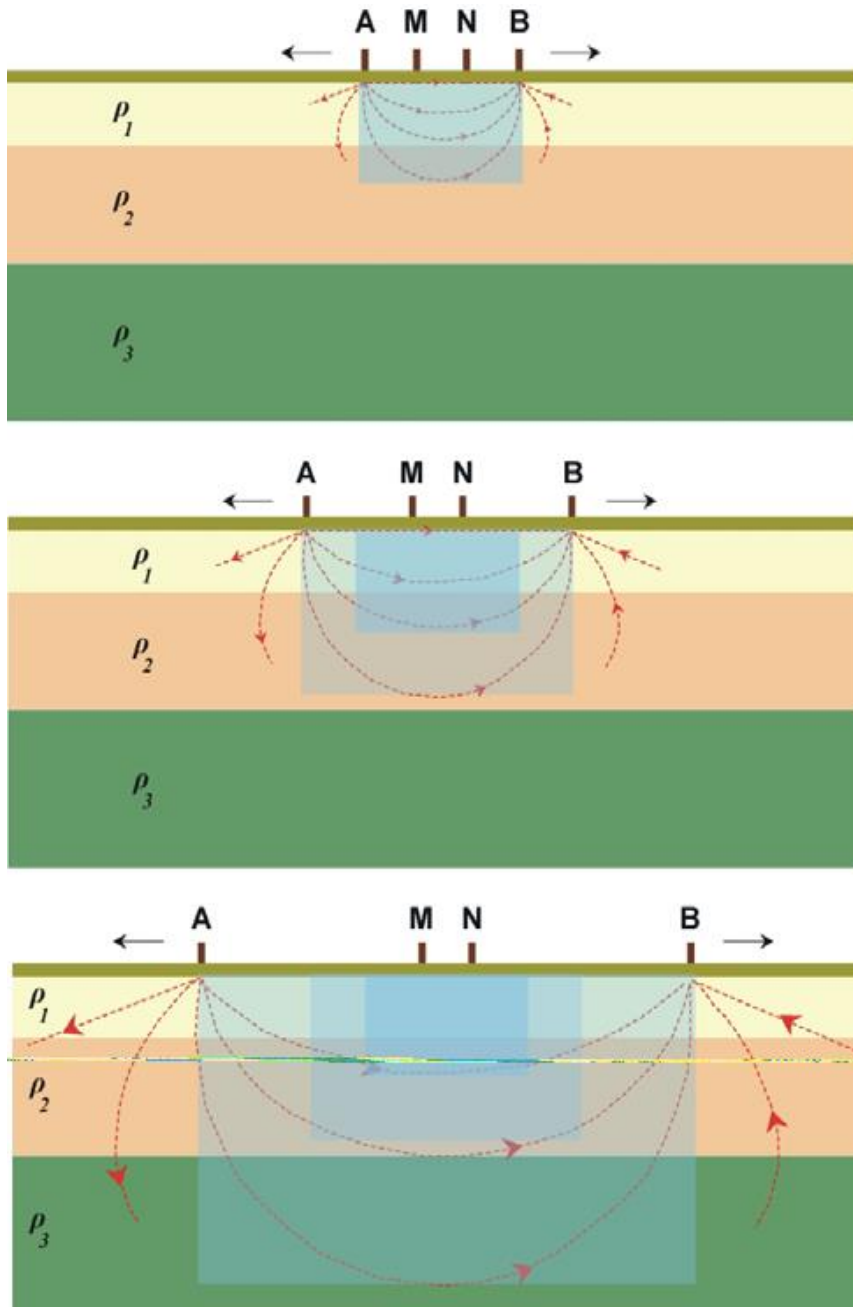


Σχήμα 2.18: Διάταξη Wenner (Thomas M. Boyd, 1999)



Σχήμα 2.19: Διάταξη Schlumberger (Thomas M. Boyd, 1999)

Η συνηθέστερη διάταξη είναι η Schlumberger λόγω βάθους διασκόπησης αλλά και οικονομίας χρόνου εργασιών όπως προαναφέρθηκε. Μετακινούμε συμμετρικά τα ηλεκτρόδια ρεύματος (AB) κρατώντας σταθερά τα ηλεκτρόδια δυναμικού (MN) (Σχήμα 2.20), μέχρι οι τιμές διαφοράς δυναμικού γίνουν πολύ μικρές, οπότε μεταφέρουμε και τα ηλεκτρόδια δυναμικού συμμετρικά ως προς το κέντρο σε μεγαλύτερη απόσταση και συνεχίζουμε να αυξάνουμε τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος.

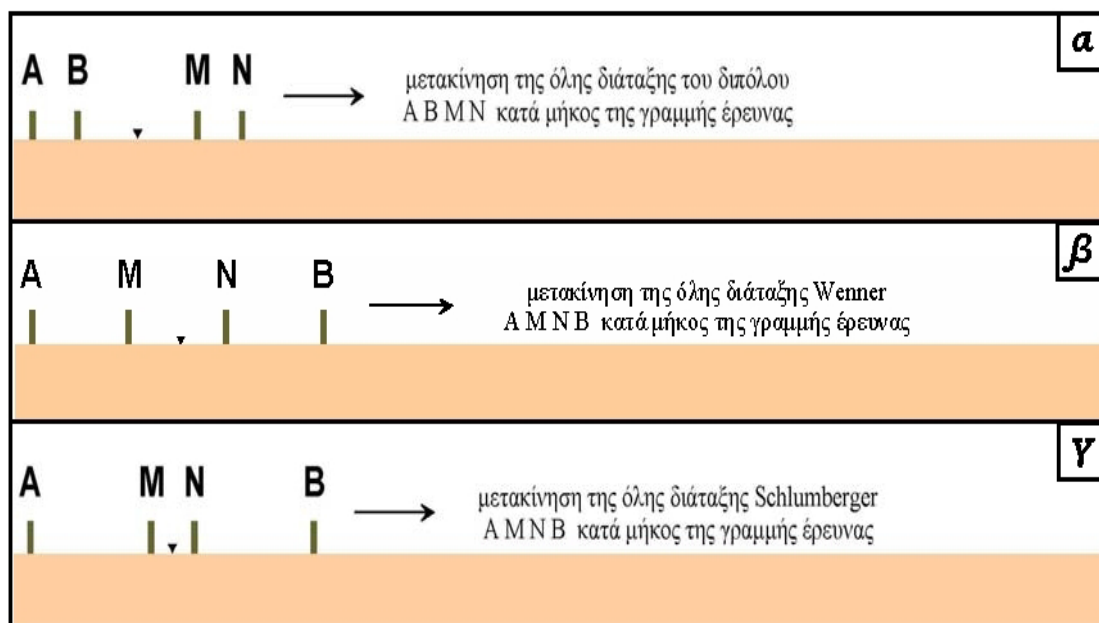


Σχήμα 2.20: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με διάταξη Schlumberger με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Ιωάννης Φ.Λούης 2004)

Καθώς η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνει ο συνολικός όγκος που ελέγχεται από την μέτρηση αυξάνει επίσης, τόσο σε βάθος όσο και πλευρικά. Δεδομένου ότι το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και εκείνο που αλλάζει είναι οι διαδοχικά διευρυνόμενες αποστάσεις AB είναι φανερό ότι οι διαδοχικά διευρυνόμενοι όγκοι που ελέγχονται από τις μετρήσεις αλληλεπικαλύπτονται.

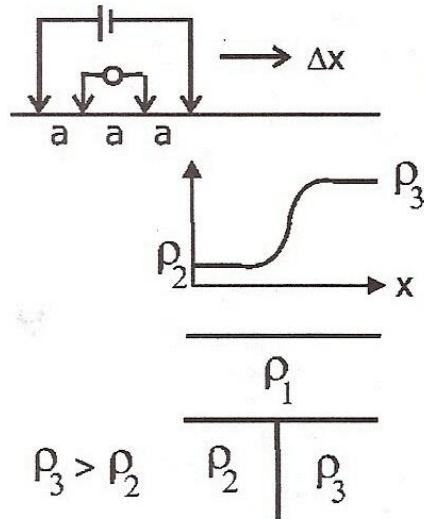
2.1.11.2 Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις Ειδικής Αντίστασης

Στις οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις (Resistivity Profiling), μπορούμε να σαρώσουμε πλευρικά μια ζώνη συγκεκριμένου πάχους και να μελετήσουμε τη οριζόντια διαφοροποίηση του υλικού της ζώνης από τη μελέτη της οριζόντιας (πλευρικής) μεταβολής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Στη περίπτωση αυτή τα ηλεκτρόδια της διάταξης ρεύματος και δυναμικού παραμένουν σταθερά και μετακινείται όλη η διάταξη κατά μήκος μιας γραμμής ή χωρικά σε μια ευρύτερη περιοχή.



Σχήμα 2.21: Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης *Dipole–Dipole* (α), *Wenner* (β) και *Schlumberger* (γ) (Μαυρομμάτης, 2007)

Συνήθως για οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις χρησιμοποιούμε την διάταξη Wenner μετακινώντας αυτήν ολόκληρη, με σταθερές τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων μεταξύ τους, κρατώντας έτσι το βάθος διασκόπησης σταθερό και διασκοπώντας παράπλευρα.

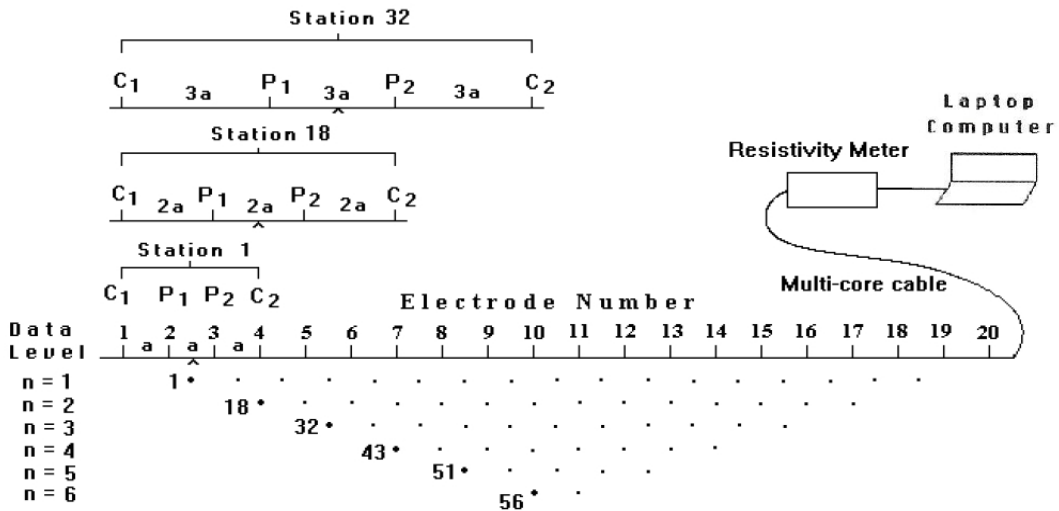


Σχήμα 2.22: Οριζόντια Ηλεκτρική Χαρτογράφηση με διάταξη Wenner (Αποστολόπουλος, 2008)

2.1.11.3 Γεωηλεκτρική τομογραφία

Χρησιμοποιείται όταν σε συγκεκριμένες θέσεις θέλουμε μεγάλης ακρίβειας διασκοπήσεις τόσο παράπλευρα όσο και σε βάθος. Η ηλεκτρική τομογραφία συνιστάται σε πολλές βυθοσκοπήσεις πολύ κοντά μεταξύ τους. Ο τρόπος μέτρησης, οι αποστάσεις και οι θέσεις των ηλεκτροδίων καθορίζονται με την επιλογή των διατάξεων που θέλουμε (Schlumberger, Wenner κλπ). Όλες οι τιμές χρησιμοποιούνται σε μία διαδικασία ερμηνείας, που τελικά δίνει μια διδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας.

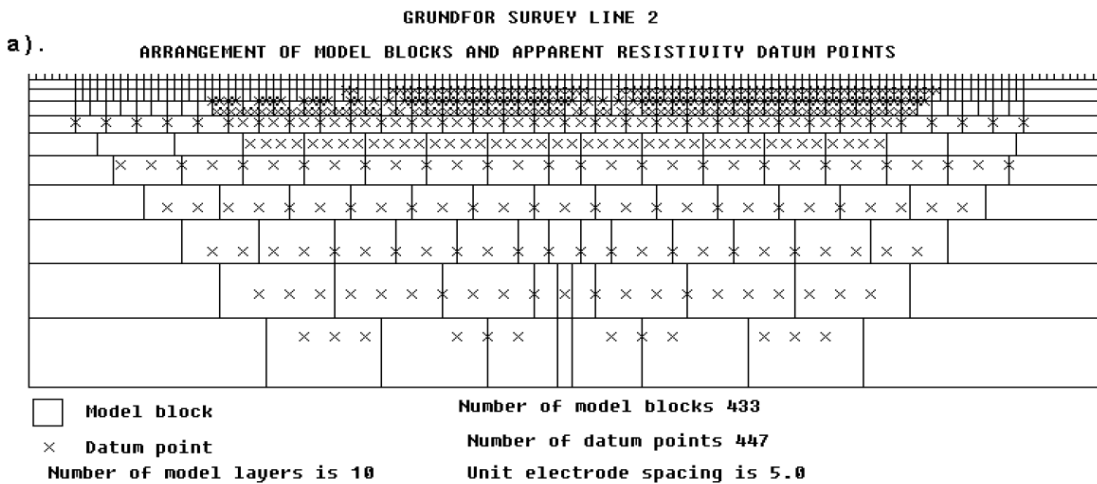
Η γεωηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής (**Σχήμα 2.23**). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους.



Sequence of measurements to build up a pseudosection

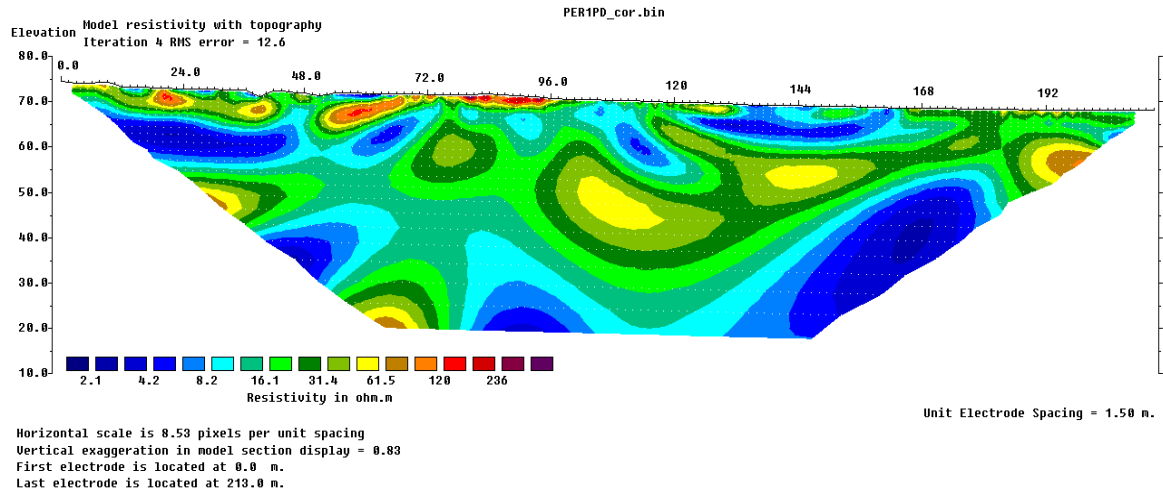
Σχήμα 2.23: Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση δισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για τη δημιουργία ψευδοτομής (Loke, 1999)

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων, οι οποίες παράγονται από τα συστήματα αυτά, με τη σειρά τους, αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία των δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντιστροφής δημιουργίας μοντέλων έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν αυτή την ανάγκη. Με τις τεχνικές αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως, αυξάνει με το βάθος.



Σχήμα 2.24: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγόριθμου (Loke, 1999)

Οι ειδικές ηλεκτρικές τους αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, μέχρι να επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και την απόκριση του μοντέλου



Σχήμα 2.25: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων (Loke 1999)

Όσον αφορά στην τοπογραφία, αυτή αντιμετωπίζεται είτε με διορθώσεις, δηλαδή μετατροπή των δεδομένων πριν και μετά την αντιστροφή, είτε με απευθείας εισαγωγή της στο πλέγμα.

2.2 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος μέτρησης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και Μαγνητικής επιδεκτικότητας

2.2.1 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο για το πόσο εύκολα ένα ηλεκτρικό ρεύμα θα διατρέξει ένα υλικό, και μετριέται σε Siemens ή milliSiemens (mS). Ένα Siemens είναι το αντίστροφο ενός Ohm, ή ίσο με 1 Ohm. Οι παλαιότερες αναφορές χρησιμοποιούν την ισοδύναμη μονάδα «Mho», η οποία είναι απλά «το Ohm» που συλλαβίζουν προς τα πίσω. Είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης, και τα στοιχεία αγωγιμότητας δεν είναι συχνά συγκρίσιμα με τις μετρήσεις αντίστασης που λαμβάνονται με τα συστήματα των ηλεκτροδίων. Συνήθως, όταν μιλούν οι αρχαιολόγοι για την ειδική αντίσταση ή την αντίσταση, αναφέρονται συνήθως σε μετρήσεις που συλλέγονται με ένα όργανο που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια στο έδαφος. Όταν μιλάμε για την αγωγιμότητα, σχεδόν πάντα αναφερόμαστε στις μετρήσεις που λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EMI) επαγωγής. Οι χάρτες αγωγιμότητας τείνουν να μοιάζουν με τους χάρτες των δεδομένων αντίστασης και μπορούν να ερμηνευθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές, αν και η ανάλυση της αγωγιμότητας είναι μερικές φορές φτωχότερη λόγω διαφορών στις βαθιές ευαισθησίες. Παρά το γεγονός ότι τα στοιχεία της EMI συλλέγονται συχνά σε μια υψηλότερη πυκνότητα από τα δεδομένα αντίστασης, οι μετρήσεις της EMI επηρεάζονται συνήθως από έναν μεγαλύτερο όγκο του εδάφους, θολώνοντας ενδεχομένως τα όρια ανωμαλίας. Όπως στην αντίσταση, η αγωγιμότητα είναι μια άριστη μέθοδος για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βασισμένες στις αντιθέσεις της επίγειας υγρασίας ή του τύπου υλικού. Τα μικρά κοιλάματα δεν ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλάματα, τάφροι, και τα υπολείμματα των χωματουργικών έργων μπορούν να ανιχνευθούν πολύ αποτελεσματικά.

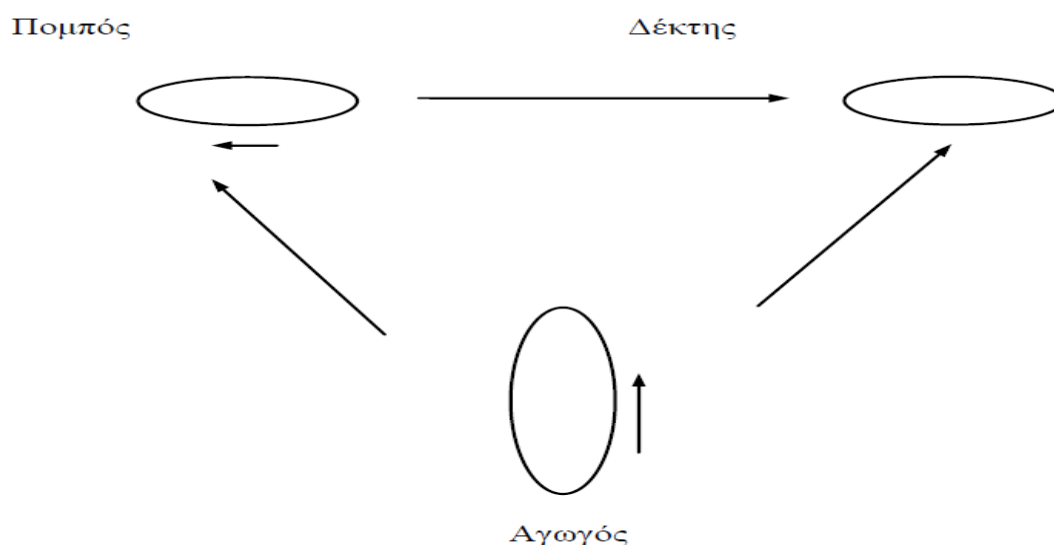


Σχήμα 2.26: Ενδεικτικά μηχανήματα Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου. Στο αριστερό μέρος είναι το EM-31, και στο δεξί μέρος είναι το EM-38

2.2.1.1 Μεθοδολογία Μετρήσεων αγωγιμότητας

Η μέθοδος της «EMI» που μετράει την αγωγιμότητα είναι αρκετά πιο σύνθετη από την αντίσταση, έτσι μόνο οι θεμελιώδεις αρχές εξηγούνται εδώ. Όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσω μιας σπείρας ή ενός βρόχου, ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δημιουργείται. Εάν αυτό το πεδίο είναι αρκετά κοντά σε αντικείμενα που είναι κάπως αγωγίμα, τότε το πεδίο θα αναγκάσει τα ρεύματα να ρέουν σε αυτά. Ακριβώς όπως το ηλεκτρικό ρεύμα στη σπείρα δημιούργησε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έτσι και τα ρεύματα στα αντικείμενα θα δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτή η διαδικασία καλείται επαγωγή. Στις αρχαιολογικές έρευνες, τα δεδομένα αγωγιμότητας της «EMI» συλλέγονται συνήθως με δύο πηνία, μια συσκευή εκπομπής σημάτων, ο πομπός και έναν δέκτη σημάτων, με πολλές εναλλακτικές διαμορφώσεις, συμπεριλαμβανομένης της «Slingram», τον οριζόντιο βρόχο, την κινούμενη συσκευή πομπού-δέκτη, το διπλό πηνίο κινούμενης πηγής, και το μετρητή εδάφους-αγωγιμότητας. Ο πομπός δημιουργεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αποκαλούμενο αρχικό πεδίο που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις, και κυρίως προς το έδαφος. Εάν το έδαφος είναι αγωγίμο, ή περιέχει δομές που είναι αγωγίμες, τα ρεύματα θα ρέουν σε αυτό. Αυτά τα δημιουργημένα ρεύματα, αποκαλούμενα «eddycurrents» (επειδή διαμορφώνονται όπως οι στρόβιλοι στην κοίτη ενός ποταμού), θα

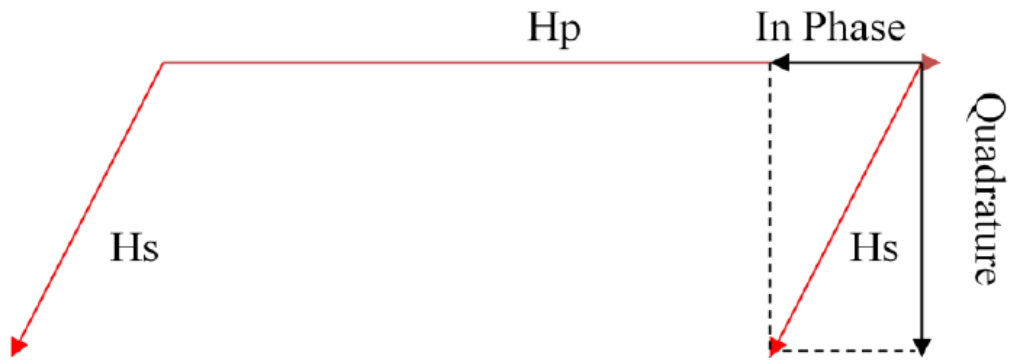
δημιουργήσουν στη συνέχεια έναν δευτερεύον πεδίο. Τα δευτερεύοντα και αρχικά πεδία μετριοούνται από το πηνίο του δέκτη



Σχήμα 2.27: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής (Παπαζάχος, 1986)

Η αγωγιμότητα προσεγγίζεται με τη σύγκριση του δευτερεύοντος με το αρχικό πεδίο, και τη μέτρηση της καθυστέρησης φάσης. Η φάση είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις σχετικές χρονικές θέσεις δύο σημάτων. Εάν δύο κύματα είναι σε φάση, είναι σύγχρονα. Εάν είναι εκτός φάσης, υπάρχει κάποια καθυστέρηση μεταξύ τους. Υπάρχει ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα που παίρνει για τη διαδικασία επαγωγής να εμφανιστεί και το δευτερεύον πεδίο να παραληφθεί. Όσο υψηλότερη η επίγεια αγωγιμότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση του δευτερεύοντος πεδίου.

Αυτή η καθυστέρηση μετριέται με μαθηματική σχέση που αναλύει το λαμβανόμενο σήμα σε δύο μέρη: in-phase και out-of-phase. Το «in-phase» πρέπει να είναι σε φάση με τον πομπό (αρχικό πεδίο), ενώ το «out-of-phase»(Quadrature) καθυστερεί με γωνία 90 μοιρών.(**Σχήμα 2.28**)



Σχήμα 2.28: Γεωμετρική διατύπωση *Inphase* και *Quadrature* (Ευστρατία 2013)

Ο λόγος των πλατών του πρωτεύοντος H_p και του δευτερεύοντος H_s H/M πεδίων μετριέται απ' ευθείας από την H/M συσκευή. Αν η απόσταση των πομπού και δέκτη ισούται με s , ω είναι η κυκλική συχνότητα, I_m είναι το φανταστικό μέρος της έντασης του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό η φαινόμενη ειδική αγωγιμότητα του υπεδάφους ισούται με:

$$\sigma_\alpha = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} * \frac{I_m(H_s)}{H_p} \quad (2.35)$$

2.2.1.2 Διαμορφώσεις μετρήσεων αγωγιμότητας

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι χρησιμοποίησης των οργάνων της «EMI», με τη χρησιμοποίηση παραλλαγών στη συχνότητα, τον αριθμό σπειρών των πηνίων, το διάστημα σπειρών, και τον προσανατολισμό σπειρών. Θα αναφερθούν εδώ μόνο αυτές που σχετίζονται με την αρχαιολογία. Η πιο κοινή και πρακτική διαμόρφωση είναι να τοποθετηθεί μια σπείρα του πομπού και μια σπείρα δέκτη στα αντίθετα άκρα ενός βραχίονα. Δεδομένου ότι ο πομπός και ο δέκτης πρέπει να έχουν μια συγκεκριμένη απόσταση για κάθε μέτρηση, η χρησιμοποίηση του βραχίονα το καθιστά ευκολότερο και γρηγορότερο να συλλεχθούν τα στοιχεία ενώ κινούμαστε κατά μήκος ενός περάσματος. Σύμφωνα με τον McNeill (1996), για κάθε δεδομένο διάστημα σπειρών υπάρχει μια βέλτιστη συχνότητα. Οι συχνότητες επάνω από ή κάτω από το βέλτιστο προκαλούν δευτερεύοντα πεδία, αλλά εάν το διάστημα σπειρών είναι πάρα πολύ μικρό ή πάρα πολύ μεγάλο ο δέκτης δεν θα το καταγράψει επαρκώς. Αντιθέτως, ο Won (1996) υποστηρίζει ότι το διάστημα και η συχνότητα

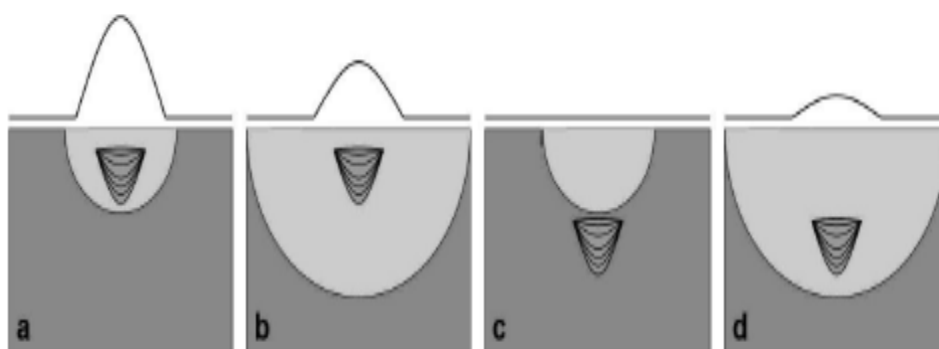
σπειρών μπορούν να τεθούν ανεξάρτητα. Τα όργανα έχουν σχεδιαστεί σε αυτήν την αρχή και συνήθως έχουν καθοριστεί τα διαστήματα σπειρών, αλλά οι πολλαπλές συχνότητες χρήσης τίθενται από το χειριστή. Η ιδέα είναι ότι κάθε συχνότητα θα διαπεράσει ένα διαφορετικό βάθος έτσι οι πολλαπλές συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για να καταγράψουμε δεδομένα σε πολλά βάθη. Είναι ασαφές εάν η καθοριζόμενη σπείρα, και τα όργανα πολλών συχνοτήτων είναι επαρκή για την αρχαιολογία, αλλά δοκιμές έχουν δείξει ότι όταν αντιστοιχούνται η συχνότητα και το διάστημα σπειρών όπως προτείνεται από τον McNeill (1996), τα αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα από όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλές συχνότητες. Σε ένα υπαίθριο πείραμα από τον Tiwanaku (Βολιβία), το GEM-2 (Georhex) ήταν ανεπιτυχές, ενώ το EM38 (Geonics) είχε πολύ καλά αποτελέσματα. Εντούτοις πρόσθετες δοκιμές αυτών των οργάνων απαιτούνται.

Μια άλλη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται μερικές φορές στην αρχαιολογία περιλαμβάνει τη χρήση ενός πομπού δίπολων και ενός δεύτερου δέκτη δίπολων που συνδέονται με ένα καλώδιο και σέρνονται κατά μήκος του εδάφους. Αυτή η διαμόρφωση είναι η βάση του «OhmMapper», που κατασκευάζεται από την Geometrics. Αν και φαίνεται πολύ διαφορετικό από τα περισσότερα όργανα της «EMI», το «OhmMapper» λειτουργεί με τον ίδιο σχεδόν τρόπο. Μετρά την πραγματική αγωγιμότητα με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EMI) επαγωγής και την μετατρέπει στην ειδική αντίσταση, και πωλείται ως όργανο ειδικής αντίστασης.

2.2.1.3 Βάθος και Ανάλυση δεδομένων αγωγιμότητας

Το βάθος και η ανάλυση των δεδομένων αγωγιμότητας που μετριοούνται με την «EMI» εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, η ειδική συχνότητα, το ύψος των αισθητήρων επάνω από το έδαφος, και ο προσανατολισμός των σπειρών. Αρχικά εξετάζεται η συχνότητα. Τα πεδία χαμηλότερης συχνότητας της «EMI» έχουν πιο μεγάλα μήκη κύματος, και είναι επομένως ικανά να διαπεράσουν βαθύτερο στο έδαφος. Γενικά η διείσδυση σε βάθος είναι μεγαλύτερη για τις χαμηλότερες συχνότητες. Βέβαια, το μειονέκτημα των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι ότι ένας μεγαλύτερος όγκος γης μετρείται, επομένως τα μικρά αντικείμενα όπως τα αρχαιολογικά στοιχεία δεν μπορούν να ανιχνευθούν.

Είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί μια υψηλότερη συχνότητα, η οποία θα έχει μικρότερο βάθος, έτσι ώστε τα αρχαιολογικά στοιχεία να αποτελούν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού όγκου. Με άλλα λόγια, οι υψηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερη ανάλυση ώστε να ανιχνευθούν τα μικρότερα στοιχεία, αλλά οι χαμηλότερες συχνότητες μπορούν να επιτρέψουν την ανίχνευση των σχετικά μεγάλων ή υψηλών στόχων αντίθεσης που είναι πάρα πολύ βαθιοί και ειδικά δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Αν και τα ρηχά αντικείμενα, ίσως να μπορούν να ανιχνευθούν επαρκώς με χαμηλές συχνότητες, οι υψηλότερες συχνότητες είναι συνήθως καλύτερες για την ανίχνευση των αρχαιολογικών στοιχείων.



Σχήμα 2.29: Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικείμενου που θάβεται στα διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παροσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι (a) ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετρείται με μια χαμηλότερη συχνότητα (b), μια μεγαλύτερη περιοχή μετρείται και μια μικρότερη ανωμαλία μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι ο στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά στο έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d). (Αποστολόπουλος 2013)

Το ύψος του οργάνου επάνω από το έδαφος είναι επίσης ένας κύριος παράγοντας που έχει επιπτώσεις στην ευαισθησία του βάθους. Δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ του πηνίου δέκτη και των αντικειμένων αυξάνεται, η απόκριση από το αντικείμενο μικραίνει. Πέρα από το μέγιστο επιφανειακό βάθος, το σήμα επιστροφής από ένα αντικείμενο είναι πάρα πολύ μικρό για να ανιχνευθεί. Η ευαισθησία βάθους μπορεί επομένως να αυξηθεί με το να φέρουμε το όργανο όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Ένας άλλος σοβαρός παράγοντας που έχει επιπτώσεις στο

βάθος διείσδυσης είναι ο προσανατολισμός των πηνίων (σπειρών). Οι δύο πιο κοινοί προσανατολισμοί είναι να κρατηθούν οι σπείρες είτε οριζόντιες είτε κάθετες όσον αφορά την επιφάνεια του εδάφους. Εάν οι δύο σπείρες τοποθετούνται οριζόντια στην επιφάνεια του εδάφους (φανταστείτε δύο ρόδες που βρίσκονται στο έδαφος) ο προσανατολισμός τους καλείται οριζόντιο συνεπίπεδο. Σε αυτήν την θέση ο οριζόντιος πομπός παράγει ένα μαγνητικό πεδίο του οποίου οι γραμμές ροής προέρχονται κάθετα, τον οποίο προσανατολισμό ονομάζουμε κάθετο μαγνητικό δίπολο (ή απλά «κάθετος τρόπος»). Σε αυτήν την θέση υπάρχει μέγιστη ενεργειακή διείσδυση στο έδαφος. Αυτός είναι ο πιο κοινός προσανατολισμός για τις περισσότερες αρχαιολογικές έρευνες. Όταν οι σπείρες κρατιούνται κάθετα όσον αφορά την επιφάνεια του εδάφους, ο προσανατολισμός ονομάζεται κάθετο συνεπίπεδο και η μαγνητική ροή που προέρχεται από το πομπό είναι οριζόντια, αποκαλούμενος οριζόντιος μαγνητικός προσανατολισμός δίπολων («οριζόντιος τρόπος»). Σε αυτήν την θέση ένα πολύ μικρότερο μέρος του προκληθέντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαπερνά το έδαφος και έτσι η διείσδυση βάθους μειώνεται. (Witten 2006)

2.2.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου στις μετρήσεις αγωγιμότητας

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα καθώς επίσης και μειονεκτήματα στην έρευνα αγωγιμότητας. Έναντι της ειδικής αντίστασης, τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν γρηγορότερα επειδή δεν υπάρχει καμία ανάγκη να παρεμβληθούν ηλεκτρόδια στο έδαφος ή να ξαναγίνουν περιστασιακά οι μακρινοί έλεγχοι. Επίσης, τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν στις περιοχές με πολύ ξηρό ή σκληρό έδαφος, όπου τα ηλεκτρόδια είτε δεν μπορούν να τοποθετηθούν, ή το ρεύμα δεν θα ρεύσει λόγω της έλλειψης υγρασίας. Οι πολύ ξερές συνθήκες επιφάνειας δεν είναι απαραίτητως μια ένδειξη ότι το έδαφος κάτω από την επιφάνεια είναι πάρα πολύ ξηρό για να παρέχει μια αρκετή αντίθεση, συχνά επαρκής υγρασία βρίσκεται μόνο μερικά εκατοστόμετρα κάτω από τα ηλεκτρόδια. Τα όργανα της «EMI» μπορούν επίσης να «πακεταριστούν» και να μεταφερθούν ευκολότερα εξ αιτίας του μικρότερου μεγέθους τους. Τα μειονεκτήματα των ερευνών αγωγιμότητας περιλαμβάνουν την ευαισθησία του EM38 στην ηλεκτρική παρέμβαση (π.χ., φωτισμός, ηλεκτροφόρα καλώδια) και τα συντρίμια μετάλλων. Σε ορισμένες

περιπτώσεις η ευαισθησία του EM38 είναι ένα πλεονέκτημα ειδικά στην ανεύρεση χειροποίητων μεταλλικών αντικειμένων.

2.2.2 Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (MS) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας ενός υλικού για να μαγνητιστεί παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου. Μπορεί να μετρηθεί ανά όγκου (κ) ή ως ομαλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας (χ), αλλά όταν μετρείται με το EM38 ή παρόμοια όργανα δίνεται ως αναλογία του αρχικού προς το δευτερεύον πεδίο.

Όλα τα άτομα περιέχουν μαγνητικά πεδία προερχόμενα από την εξωτερική στοιβάδα των ηλεκτρονίων, έτσι όλες οι ουσίες αντιδρούν (είναι ευαίσθητες) στα κοντινά μαγνητικά πεδία μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Ο φυσικός σχηματισμός των εδαφών περιλαμβάνει τη μετατροπή των αδύναμων μαγνητικών οξειδίων και των υδροξειδίων στις εντονότερα μαγνητικές μορφές, έτσι το χώμα είναι πολύ περισσότερο μαγνητικό από τα στρώματα του υπεδάφους. Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν περαιτέρω το χώμα, έτσι ώστε τα χώματα επί των αρχαιολογικών τόπων να είναι συνήθως πιο μαγνητικά από εκείνα στις περιβάλλουσες μη-πολιτιστικές περιοχές. Οι άνθρωποι ενισχύουν τις νεογενείς διαδικασίες και επομένως τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας, με την αύξηση της οργανικής ουσίας και την αλλαγή του πορώδους των χωμάτων, και επίσης με την αύξηση της εδαφολογικής θερμοκρασίας μέσω της πυρκαγιάς. Μπορούν επίσης να ενσωματώσουν καμένα ή υψηλής επιδεκτικότητας υλικά στο έδαφος. Οι πυρκαγιές, είτε φυσικές είτε προκαλούμενες από τον άνθρωπο, επίσης ενισχύουν την μαγνητική επιδεκτικότητα. Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση του χώματος αυξάνει συχνά την αντίθεση επιδεκτικότητας επί των αρχαιολογικών τόπων, με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα να ανιχνευθούν τα τεχνητά αντικείμενα. (Dalan 2006)

2.2.2.1 Μεθοδολογία Μετρήσεων μαγνητικής επιδεκτικότητας

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να μετρηθεί η μαγνητική επιδεκτικότητα, αλλά όλα στηρίζονται στη θεμελιώδη αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ένα δευτεροβάθμιο ηλεκτρομαγνητικό (EM) πεδίο μπορεί να προκληθεί στο έδαφος με την δημιουργία έναν αρχικού πεδίου. Το δευτεροβάθμιο πεδίο, όχι μόνο περιέχει τις πληροφορίες για τις ηλεκτρικές ιδιότητες

του εδάφους, αλλά αποκρίνεται και στις μαγνητικές ιδιότητες. Επίσης υπενθυμίζεται ότι όταν το δευτεροβάθμιο πεδίο μετασχηματίζεται από μαθηματική άποψη στα «in-phase» και «out-of-phase», το μέγεθος του «out-of-phase» τμήματος είναι ανάλογο προς την αγωγιμότητα. Εφ' όσον δεν υπάρχει κανένας εξαιρετικά αγώγιμος στόχος στο έδαφος (όπως τα μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα), το «in-phase» θεωρείται μέτρο της μαγνητικής επιδεκτικότητας (McNeill, 1986). Μερικά όργανα της «EMI» μπορούν να μετρήσουν και την πραγματική αγωγιμότητα και την μαγνητική επιδεκτικότητα ταυτόχρονα. Άλλα όργανα σχεδιάζονται για να μετρήσουν μόνο την μαγνητική επιδεκτικότητα, αλλά εξακολουθούν να χρησιμοποιούν την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.

2.2.2.2 Διαμορφώσεις μετρήσεων μαγνητικής επιδεκτικότητας

Τα μαγνητικά δεδομένα επιδεκτικότητας συλλέγονται με ποικίλους τρόπους, συμπεριλαμβανομένης της σχετικά υψηλής οριζόντιας κάλυψης πυκνότητας δεδομένων των ενδεχομένως μεγάλων περιοχών επιφάνειας, αναλύσεις των εδαφολογικών δειγμάτων που λαμβάνονται σε ποικίλα σημεία της επιφάνειας, και μετρήσεις που λαμβάνονται μέσα από μια γεώτρηση (downhole). Για τις έρευνες επιφάνειας, υπάρχουν δύο κοινές διαμορφώσεις αισθητήρων: μονής και διπλής-σπείρας. Τα όργανα μονής σπείρας (επίσης αποκαλούμενα μονού βρόχου ή συμπίπτοντα βρόχου) προκαλούν ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο έδαφος, και μετρούν τη συχνότητα του δευτεροβάθμιου πεδίου. Η αλλαγή συχνότητας είναι ανάλογη προς την επιδεκτικότητα του χώματος κοντά στη σπείρα (Clark, 1996). Αυτή η μέθοδος απαιτεί ο αισθητήρας να είναι σε απευθείας επαφή με την επιφάνεια του εδάφους. Όταν δύο σπείρες χρησιμοποιούνται (διαμόρφωση Slingram, ένας πομπός και ένας δέκτης), οι μετρήσεις λαμβάνονται από την απόκριση του «in-phase», όπως περιγράφηκε νωρίτερα.

2.2.2.3 Βάθος και ανάλυση δεδομένων μαγνητικής επιδεκτικότητας

Από όλες τις γεωφυσικές μεθόδους που περιγράφονται εδώ, η μαγνητική επιδεκτικότητα που συλλέγεται από την επιφάνεια του εδάφους είναι περιορισμένη από την άποψη της διαπερατότητας σε βάθος εξ 'αιτίας της αδυναμίας των μαγνητικών πεδίων που μετριοούνται. Η εκθετική απώλεια εμφανίζεται καθώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εισάγεται στο έδαφος, και έπειτα πάλι καθώς ταξιδεύει από

το έδαφος στον αισθητήρα μέτρησης. Η απώλεια είναι εκθετική στην έκτη δύναμη, με συνέπεια την πολύ μικρή διείσδυση σε βάθος.

Υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στην διαπερατότητα σε βάθος ανάμεσα στα μονά και διπλής σπείρας οργάνων. Τα μονά όργανα σπειρών πρέπει να έχουν απευθείας επαφή με το έδαφος, και το βάθος της διείσδυσης περιορίζεται από τη διάμετρο του βρόχου αναζήτησης.

Οι πυκνότητες δεδομένων για τις έρευνες περιοχής μαγνητικής επιδεκτικότητας εξαρτώνται από το όργανο. Οι αισθητήρες διπλής-σπείρας είναι γρήγοροι και οι χαρακτηριστικές πυκνότητες δεδομένων είναι σχεδόν οι ίδιες όπως για την αγωγιμότητα, ίσως 0.25m X 0.5m (δηλ., 4 αναγνώσεις ανά γραμμικό μέτρο, με περάσματα που χωρίζονται ανά 0.5m). Οι μονοί αισθητήρες σπειρών, εντούτοις, είναι αρκετά πιο αργοί επειδή κάθε ανάγνωση απαιτεί την απευθείας επαφή με το έδαφος και συχνά ο αισθητήρας πρέπει να μηδενιστεί πριν από κάθε μέτρηση. Άρα η πυκνότητα των μετρήσεων είναι επομένως της τάξης μίας μέτρησης ανά τετραγωνικό μέτρο (ή λιγότερο). Αυτό βάζει ένα προφανές όριο στη χωρική ανάλυση. Με τα όργανα διπλών-σπειρών η χωρική ανάλυση είναι παρόμοια με την αγωγιμότητα.

2.2.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου στις μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας

Οι μαγνητικές έρευνες, μαγνητικής επιδεκτικότητας δεν χρησιμοποιούνται πολύ στην αρχαιολογία, τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ένας λόγος είναι η πολυπλοκότητα της οργάνωσης των μηχανισμών, και τα όρια της διείσδυσης σε βάθος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η τρέχουσα έλλειψη σταθερών και βελτιωμένων οργάνων. Το EM38 είναι ευρέως διαθέσιμο, αλλά είναι επιρρεπές στην κλίση και τα στοιχεία μερικές φορές είναι δύσκολο και χρονοβόρο να επεξεργαστούν. Βέβαια, υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στην μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Το γεγονός ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα που μετριέται με την «EMI» είναι μια ενεργή μέθοδος σημαίνει ότι δεν περιορίζεται στην κατεύθυνση και τη δύναμη του γήινου μαγνητικού πεδίου (σε αντιδιαστολή με τη μαγνητομετρία), έτσι μπορεί να εντοπίσει τα στοιχεία ανεξάρτητα από τη γεωμετρία. Μερικές έρευνες έχουν δείξει ότι με τη μαγνητική επιδεκτικότητα μπορούν να ανιχνευτούν κάτω από την επιφάνεια πολιτιστικά στοιχεία που δεν ανιχνεύονται με τη μαγνητομετρία. Το Geonics EM38 είναι πιθανώς το καλύτερο για τη γρήγορη κάλυψη περιοχής και την καλή διείσδυση βάθους για τις αρχαιολογικές εφαρμογές. (Ernenwein E. G. 2009)

Κεφάλαιο 3 : Εφαρμογές γεωφυσικών μεθόδων σε γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά θέματα.

3.1 Εφαρμογή A: Επαρχία Linares, Ισπανία.

Η πρώτη εφαρμογή αναφέρεται σε μια έρευνα που έγινε στην περιοχή Linares στην Ισπανία όπου κατά τον 19^ο αιώνα ήταν επαρχία ορυχείων με κύριο μέταλλο τον μόλυβδο.

Σκοπός της παρούσας μελέτης, εφόσον σε όλα τα παρακάτω παραδείγματα η θέση το σχήμα και τα χαρακτηριστικά των δομών ήταν γνωστά, ήταν να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας στον εντοπισμό κοιλοτήτων στην εν λόγω περίπτωση παλαιών ορυχείων.

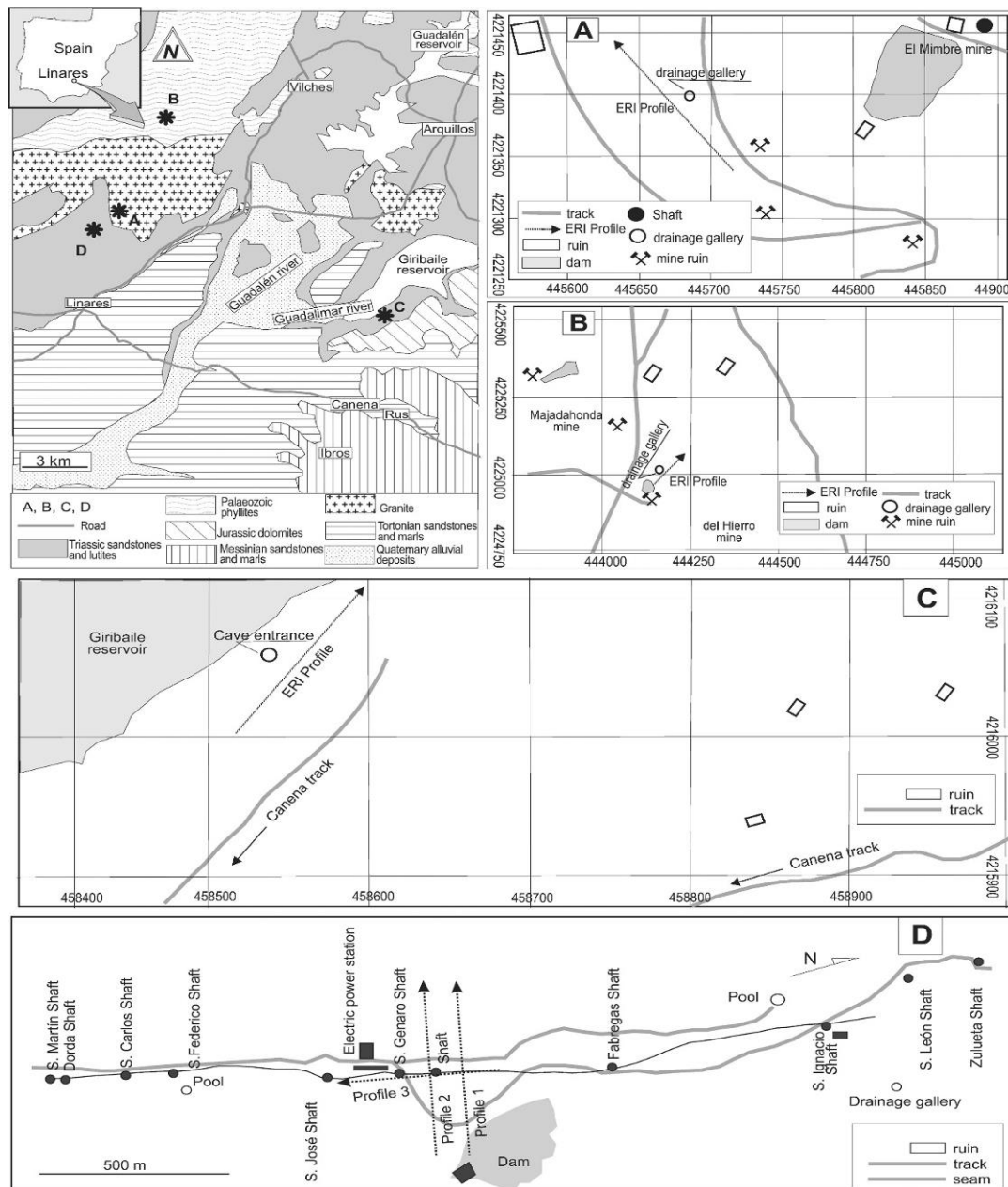
3.1.1 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Στην μέθοδο της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις Wenner-Schlumberger, dipole-dipole και Wenner.

Η διάταξη Wenner είναι η πλέον ευαίσθητη στις κάθετες αλλαγές στην ειδική αντίσταση του υπεδάφους, ο μέσος όρος πραγματικού βάθους για έρευνα είναι γύρω στο μισό της απόστασης ηλεκτροδίων ρεύματος. Η διάταξη έχει μικρό γεωμετρικό παράγοντα και οδηγεί σε ένα δυνατό σήμα ακόμη και σε περιοχές με ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Η dipole-dipole είναι αρκετά ευαίσθητη στις παράπλευρες αλλαγές και σχετικά ανεπαίσθητη σε κάθετες αλλαγές. Έτσι είναι χρήσιμη στην ανίχνευση των κάθετων δομών όπως οι θαμμένοι τοίχοι, κοιλότητες και μολυσμένους αγωγούς. Από τις τρεις διατάξεις, η dipole-dipole επιτυγχάνει το μεγαλύτερο μέσο όρο βάθους έρευνας, αν και η απόδοση της επηρεάζεται αρνητικά σε περιοχές με ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Η Wenner-Schlumberger είναι ένα υβρίδιο μεταξύ της Wenner και της Schlumberger. Σύμφωνα με τους Pazdirek και Blaha (1996), αυτή η διάταξη είναι μέτρια ευαίσθητη τόσο στην οριζόντια όσο και στις κάθετες δομές. Ο μέσος όρος βάθους έρευνας είναι μεγαλύτερος από εκείνο της διάταξης Wenner και η ένταση του σήματος είναι χαμηλότερη από εκείνη της dipole-dipole.



Σχήμα 3.1: Γεωγραφικά και γεωλογικά στοιχεία των περιοχών μελέτης

3.1.2 Μετρήσεις

Στις περιοχές A, B και C, έγιναν έντεκα γεωηλεκτρικές τομές και χρησιμοποιήθηκαν ογδόντα (80) ηλεκτρόδια σε ένα μήκος 120m με το διάστημα ανάμεσα τους να είναι στο 1,5m. Στη περιοχή B η απόσταση των ηλεκτροδίων ήταν ανά 3m. Χρησιμοποιήθηκαν διαστήματα τα οποία ήταν ίσα ή μεγαλύτερα από τη διάμετρο της κοιλότητας για να μπορέσουν να προβάλλουν κοιλότητες σε βάθος μεταξύ 2 και 4 μέτρων με ικανοποιητική ευκρίνεια. Στη περιοχή D, έγιναν τρεις τομές

(**Σχήμα 3.1D**) ,χρησιμοποιώντας διάταξη Wenner-Schlumberger με διάστημα 5m, μια τιμή όμοια προς το μέγεθος του θαλάμου. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήθηκαν ογδόντα (80) ηλεκτρόδια σε μια απόσταση 400m.

3.1.3.Αποτελέσματα

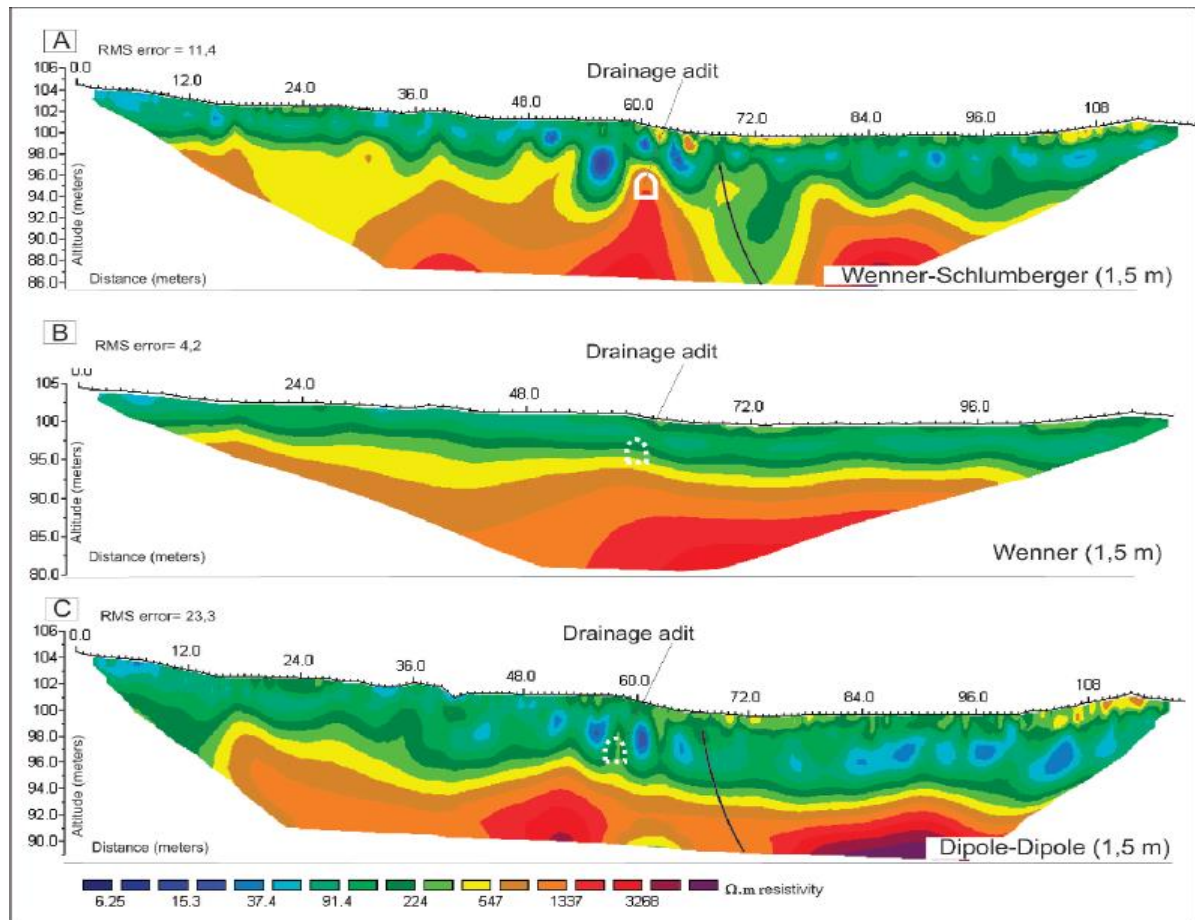
3.1.3.1..Περιοχή A:

Από πλευράς γεωφυσικής, η γεωλογική δομή της περιοχής A συμπεριφέρεται όπως ένα μοντέλο δύο στρωμάτων. Έχει ένα παχύ επιφανειακό στρώμα με 2 μέχρι 4m, το οποίο παρουσιάζει χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης (<300 ohm-m), το οποίο έχει μεταλλαγμένο γρανίτη με ποικίλους βαθμούς υδατικού κορεσμού. Κάτω από αυτό υπάρχει μια μάζα με μεγαλύτερη αντίσταση, η οποία εμπεριέχει μη μεταλλαγμένο γρανίτη.

Χρησιμοποιώντας ένα διάστημα ηλεκτροδίων 1,5m παρόμοιο με τη διάμετρο της κοιλότητας, η Wenner-Schlumberger διάταξη, εντοπίζει μια περιοχή με αντίσταση η οποία συνδέεται με τη θέση της κοιλότητας (**Σχήμα 3.2A**). Η θέση της δομής δεν μπορεί να οριστεί με τη μέθοδο Wenner γιατί, υπάρχουν ήδη τιμές χαμηλής αντίστασης από τις προηγούμενες μετρήσεις (**Σχήμα3.2B**). Με τη dipole-dipole διάταξη η κοιλότητα τοποθετήθηκε αλλά τα σφάλματαRMS ήταν ψηλότερα.(**Σχήμα 3.2C**).

3.1.3.2.Περιοχή B

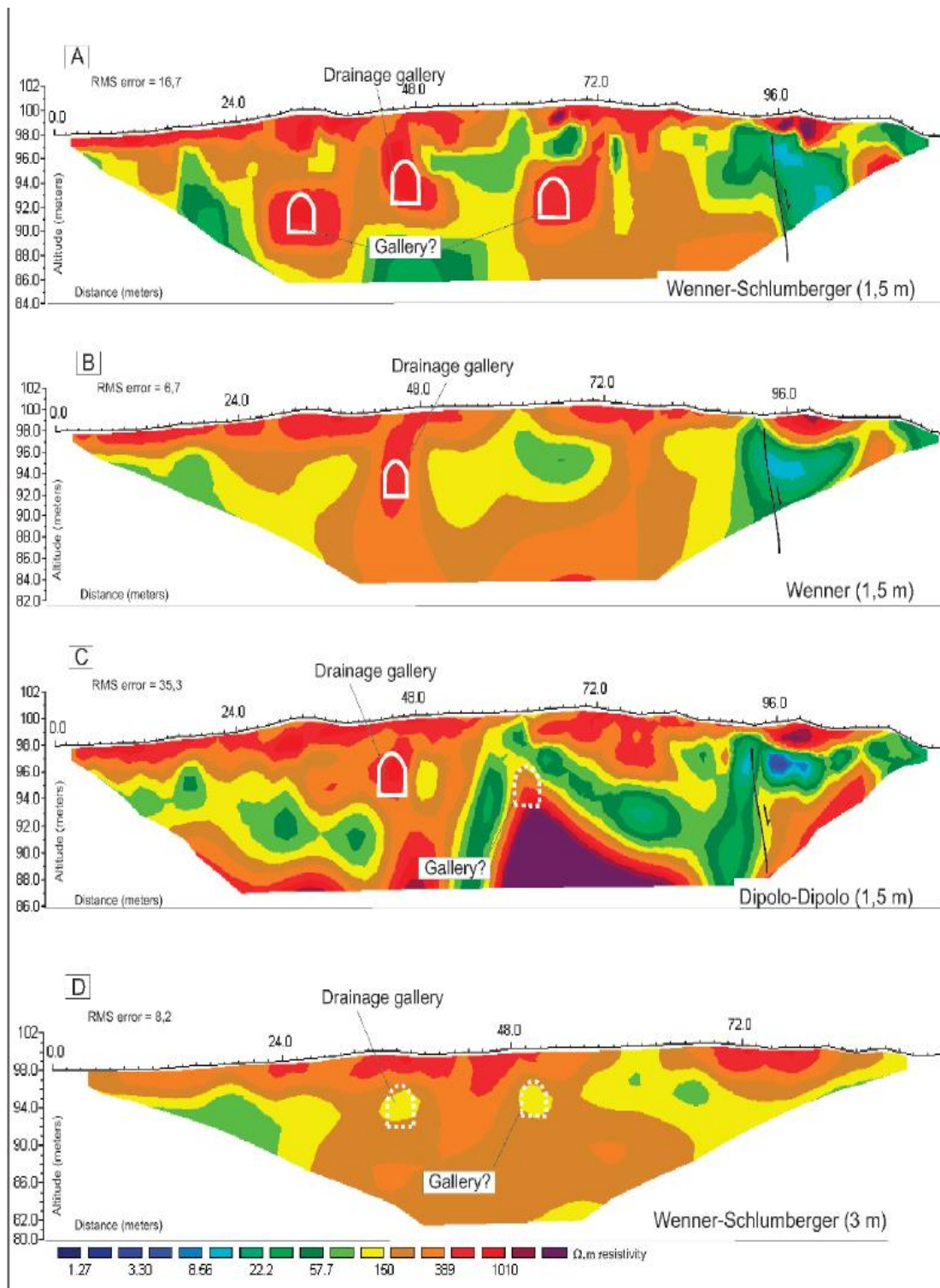
Στην περιοχή B, η γεωλογική δομή συμπεριφέρεται όπως ένα μοντέλο τριών στρωμάτων. Υπάρχει ένα επιφανειακό στρώμα πάχους 1m μέχρι 2m με υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (>300 ohm-m) που πιθανώς αποτελείται από λατυτοπαγή και απομεινάρια ενός παλαιού ερειπίου. Κάτω από αυτό υπάρχει ένα στρώμα μεταλλαγμένων φυλλίτων. Η ανομοιόμορφη κατανομή της περιοχής με ποικίλους βαθμούς μεταβολής, ρωγμών και υδατικού κορεσμού, μπορεί να εξηγήσει τις μεγάλες αλλαγές στις τιμές ειδικής αντίστασης μεταξύ 20 και 200. Κάτω από αυτό, είναι ακόμα ένα στρώμα το οποίο έχει ψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης. Αυτές οι τιμές μέχρι 1200ohm-m συμπίπτουν με τους λιγότερο μεταλλαγμένους φυλλίτες.



Σχήμα 3.2: Ηλεκτρική τομογραφία από την περιοχή Α

Χρησιμοποιώντας τη διάταξη Wenner-Schlumberger με ένα διάστημα ηλεκτροδίων 1,5m, όμοιο με τη διάμετρο της κοιλότητας, εντοπίστηκε μια αύξηση στην ειδική αντίσταση σε μια περιοχή η οποία συμπίπτει με τη θέση της κοιλότητας. Δύο επιπρόσθετες ψηλές τιμές στην αντίσταση έχουν παρατηρηθεί σε βάθος περίπου 6m(Σχήμα 3.3A). Αυτές μπορούν να αντιστοιχούν σε δύο χώρους υπηρεσίας κοντά στην γραμμή συναρμογής. Η διάταξη dipole-dipole φαίνεται να ανιχνεύει την ίδια δομή με ψηλές τιμές αντίστασης, αν και η μορφολογία του ήταν λιγότερο ακριβής (Σχήμα 3.3C). Η διάταξη Wenner ανίχνευσε τις δομές, αλλά η ευκρίνεια ήταν χαμηλότερη (Σχήμα 3.3B).

Μείωση της ευκρίνειας σημειώθηκε όταν το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων αυξήθηκε. Σαν αποτέλεσμα, με διάστημα 3m (διπλάσιο της διαμέτρου της κοιλότητας) ο χώρος δεν μπορεί να προσδιοριστεί (Σχήμα 3.3D).

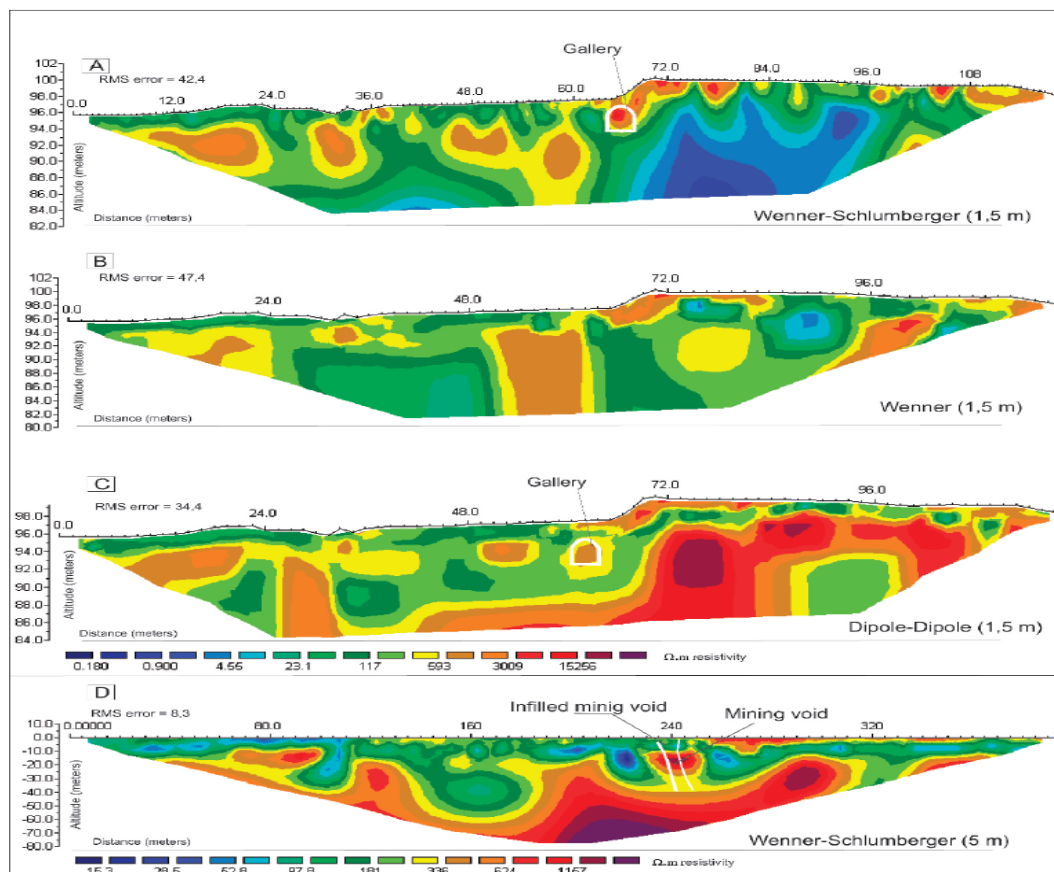


Σχήμα 3.3: Ηλεκτρική τομογραφία από το πεδίο Β

3.1.3. 3.Περιοχή C.

Στο περιοχή C, έγιναν τομές και με τις τρεις διατάξεις και η γεωλογική δομή συμπεριφέρεται όπως ένα μοντέλο δύο στρώματων. Στην επιφάνεια υπάρχουν κατά τόπους λατυτοπαγή πετρώματα, με υψηλές ειδικές αντιστάσεις μέχρι τις 2000 $\Omega\text{m}\cdot\text{m}$. Υπάρχει ένα επιφανειακό στρώμα πάχους 1-10m δείχνει χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης (<350) και πιθανό να αποτελείται από ασβεστολιθικούς ψαμμίτες ενώ από κάτω βρίσκεται το στρώμα, μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης με τιμές που κυμαίνονται από 1000 μέχρι 2500 $\Omega\text{m}\cdot\text{m}$ το οποίο φαίνεται να είναι πυριτικά ετερογενών δραστηριοτήτων. Η επαφή μεταξύ των δύο μονάδων επηρεάζεται από ρωγματώσεις.

Με τη Wenner-Schlumberger, η ανωμαλία αποτυπώνεται με υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (Σχήμα 3.4A). Με τη dipole-dipole στήλη, η εισδοχή εντοπίστηκε σαν μια περιοχή με μέτρια ειδική αντίσταση (Σχήμα 3.4C). Η εισδοχή δεν μπόρεσε να ανιχνευτεί με την διάταξη Wenner. (Σχήμα 3.4B).



Σχήμα 3.4: Ηλεκτρική τομογραφία από το πεδίο C και D

3.1.3.4.Περιοχή D.

Ένα γεωφυσικό μοντέλο δύο στρωμάτων μπορεί επίσης να θεωρηθεί στην περιοχή D. Υπάρχει ένα επιφανειακό στρώμα με χαμηλή αντίσταση (<250) που φαίνεται να σχηματίστηκε είτε από Τριαδικό λουτίτη ή έντονα μεταλλαγμένο γρανίτη.

Χρησιμοποιώντας τη διάταξη Wenner-Schlumberger με διάστημα ηλεκτροδίων 5m, όμοιο της διαμέτρου της κοιλότητας, ανιχνεύθηκε πολύ καλά περιοχή τη μέγιστη ειδική αντίσταση η οποία αντιστοιχεί σε ένα θάλαμο εξόρυξης, προσανατολισμένο κατά μήκος των προηγούμενων διαδρόμων της γραμμής συναρμογής (**Σχήμα 3.4D**). Η κοιλότητα δείχνει δύο διαφορετικούς τύπους συμπεριφοράς. Στο πάνω μέρος, η κατάρρευση του προστατευτικού επιφανειακού στρώματος είχε σαν αποτέλεσμα την μερική διείσδυση του λουτίτη, έτσι ώστε στον πλησιέστερο τομέα προς την επιφάνεια η σπηλαιώδης γραμμή συναρμογής συμπεριφέρθηκε όπως ένα σύνδεσμος, ο κενός θάλαμος δείχνει υψηλότερη ειδική αντίσταση, με τιμές όπου κυμαίνονται από 60 μέχρι 160 ohm-m. Σε μεγαλύτερο βάθος, ο κενός θάλαμος δείχνει υψηλότερη ειδική αντίσταση, με τιμές που κυμαίνονται από 600 μέχρι 1500 ohm-m.(Martínez-López et al. 2013).

3.2 Εφαρμογή B:Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα.

Στην εφαρμογή B, θα δούμε την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, για τον εντοπισμό υπόγειου αγωγού γνωστών διαστάσεων (2*3 m και βάθος περίπου 2,5m).

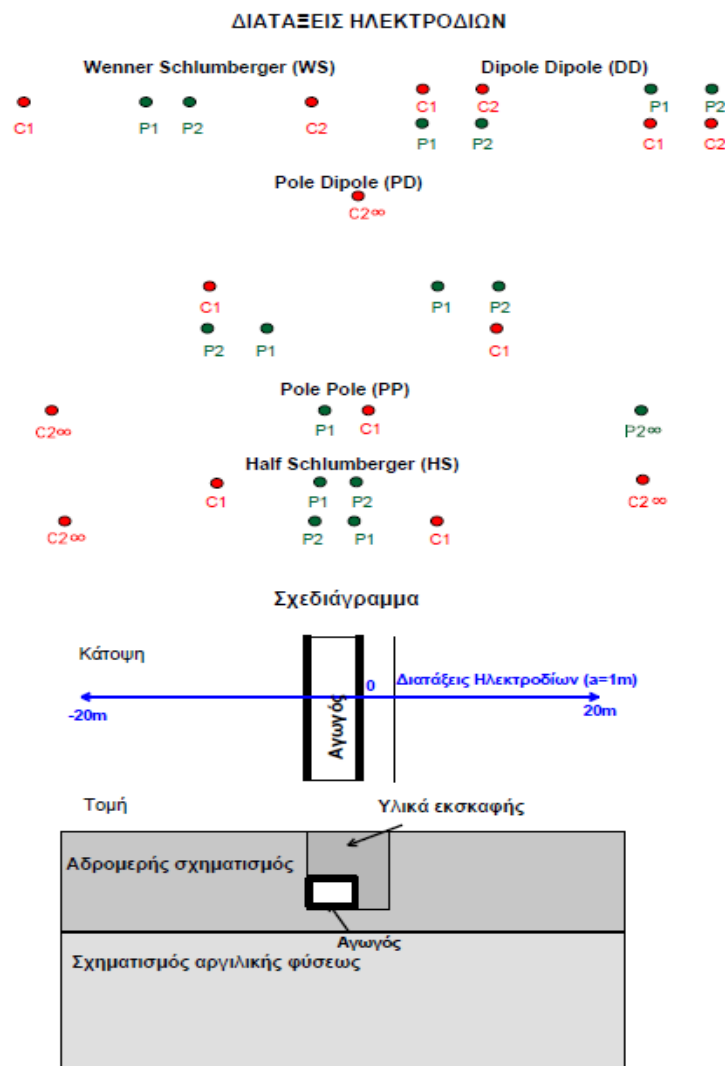
Σκοπός της εν λόγω έρευνας ήταν η αξιολόγηση και η σύγκριση των κυριότερων διατάξεων ηλεκτροδίων ως προς την ικανότητα τους στον εντοπισμό υπόγειων πεπερασμένων στόχων και η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους όσον αφορά την οριοθέτηση του στόχου.



Σχήμα 3.5: Η θέση του αγωγού σε σχέση με τις κτηριακές εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π.

Στο **Σχήμα 3.6** παρουσιάζονται οι διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και η θέση και ο προσανατολισμός της γραμμής διασκόπησης σε σχέση με τον υφιστάμενο αγωγό σε κάτοψη και σε τομή. Οι διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων εφαρμόστηκαν κατά μήκος γραμμής με διεύθυνση κάθετη στον αγωγό. Για την επεξεργασία και την ερμηνεία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Res2dinv.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψε το αρχικό συμπέρασμα ότι τα μοντέλα ερμηνείας όλων των διατάξεων επηρεάζονται περισσότερο από την παρουσία της εκσκαφής παρά από την ύπαρξη του στόχου. Αιτία του φαινομένου αυτού αποτελεί η συνύπαρξη στον αγωγό του κενού (μεγάλη ειδική αντίσταση) και του μεταλλικού οπλισμού του (μικρή ειδική αντίσταση), που συντελεί σε μια ενδιάμεση ειδική αντίσταση με αυτή των υλικών εκσκαφής.

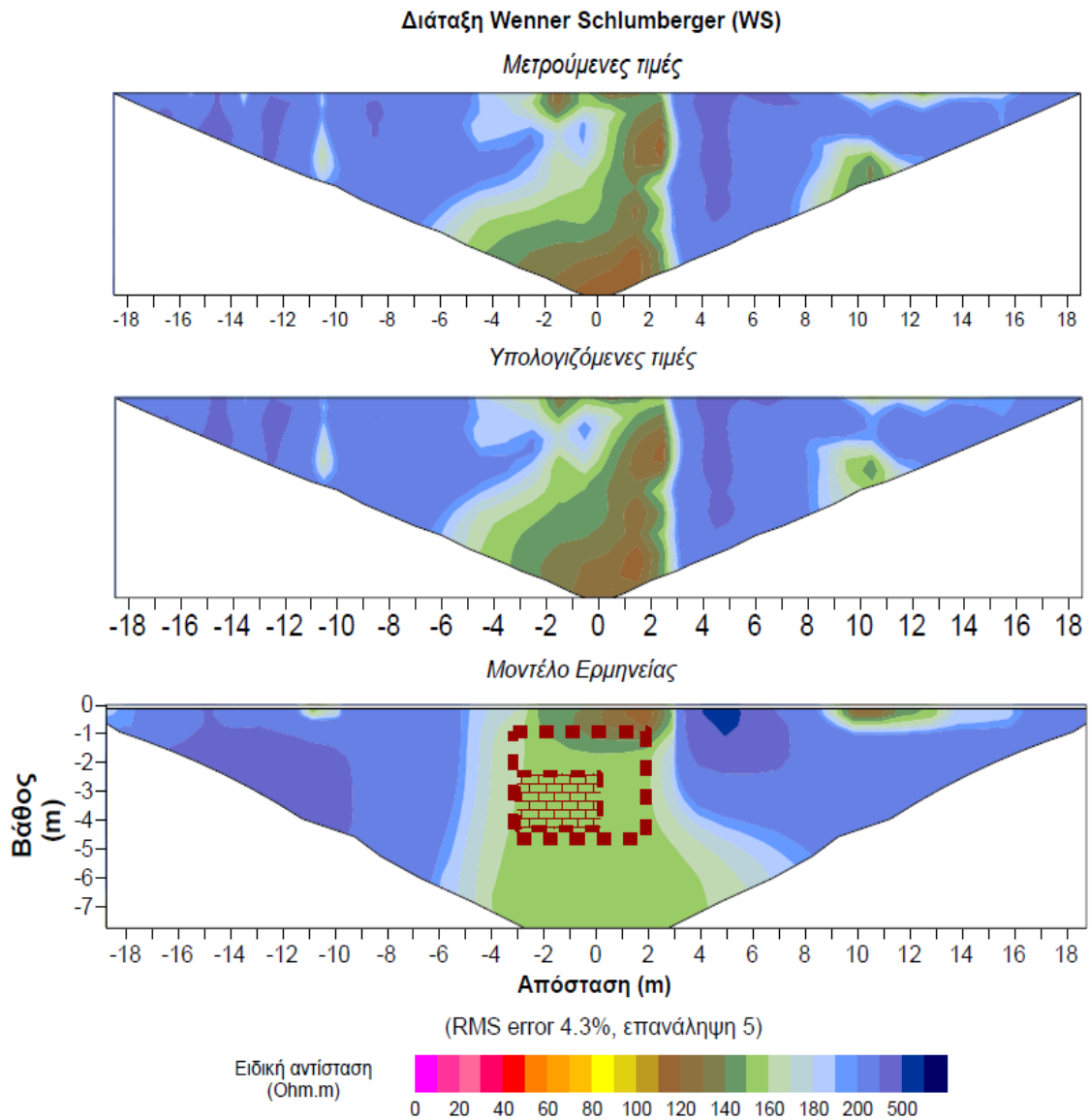


Σχήμα 3.6: Οι διατάξεις των ηλεκτροδίων και το σχεδιάγραμμα με την θέση του αγωγού σε σχέση με τις γραμμές διασκόπησης

Διάταξη Wenner-Schlumberger (WS)

Συμπερασματικά από την τομή των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων της διάταξης βλέπουμε μια αρχική ποιοτική απεικόνιση του χώρου ενώ αποτελεί και κριτήριο αξιοπιστίας του τελικού μοντέλου ερμηνείας. Στο μοντέλο ερμηνείας διακρίνεται η περιοχή εκσκαφής (χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις) χωρίς όμως να είναι διακριτά τα όρια της (κυρίως το κάτω όριο). Επίσης δεν απεικονίζεται ευκρινώς το υποκείμενο στρώμα χαμηλότερων ειδικών αντιστάσεων.

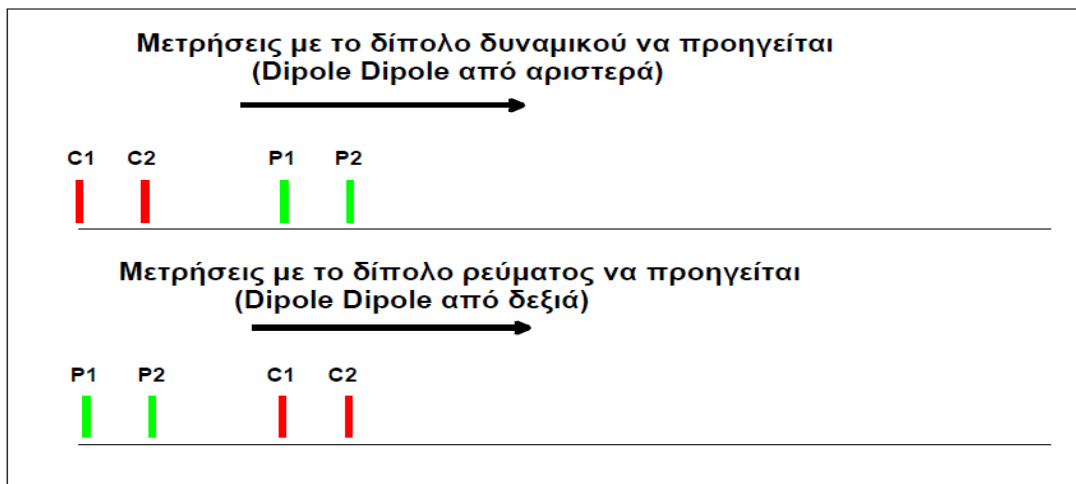
Μια εξήγηση που μπορεί να δοθεί για τα παραπάνω είναι ότι στο συγκεκριμένο βάθος δεν υπάρχει επαρκής αριθμός μετρήσεων με αποτέλεσμα να παρουσιάζει χαμηλή ευαισθησία.



Σχήμα 3.7: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και το μοντέλο ερμηνείας της Wenner-Schlumberger (WS)

Διάταξη Dipole – Dipole (DD)

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με δύο τρόπους: αρχικά με το δίπολο δυναμικού να προηγείται του δίπολου του ρεύματος και αντίστροφα όπως παρουσιάζεται στην εικόνα. Το πρωτόκολλο μετρήσεων, όμοιο και για τους δύο τρόπους περιλαμβάνει συνδυασμούς όπου οι τιμές του $n \leq 6$, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα με το λόγο σήματος προς θόρυβο.



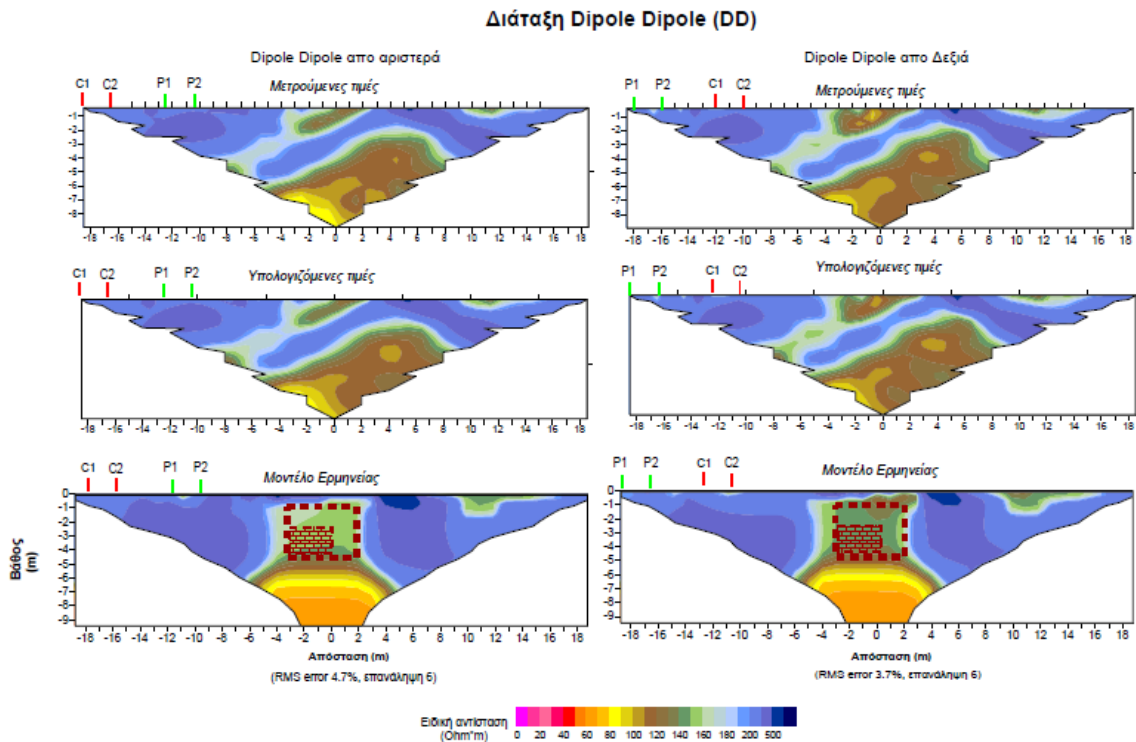
Σχήμα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορετικών τρόπων μετρήσεων : Dipole-Dipole από αριστερά και Dipole-Dipole από δεξιά.

Από το **Σχήμα 3.9** συμπεραίνεται ότι υπάρχουν ενδείξεις για την ύπαρξη ανομοιογενειών που δηλώνουν πιθανή ύπαρξη υπόγειου στόχου χωρίς όμως να είναι εύκολη η απευθείας ερμηνεία τους.

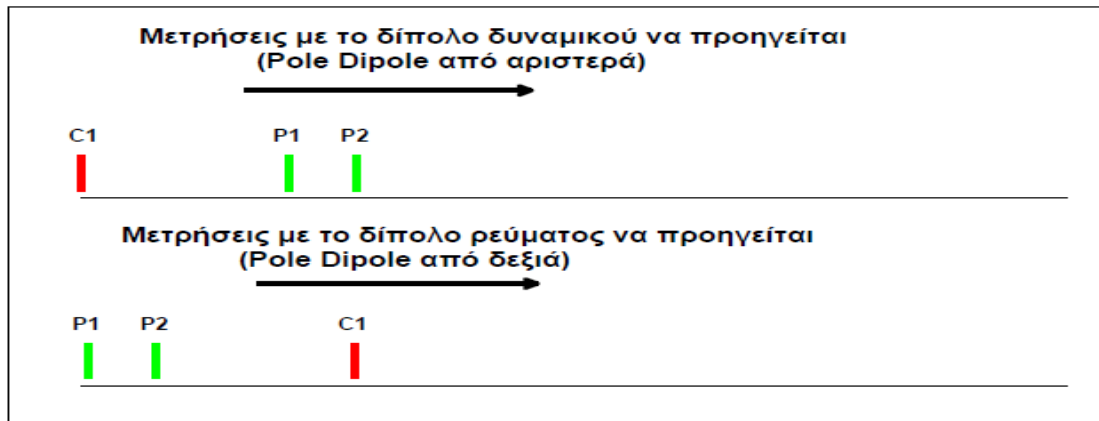
Σε γενικές γραμμές στα μοντέλα ερμηνείας (Dipole-Dipole από αριστερά και δεξιά) διακρίνεται τόσο η πλευρικά όσο και η οριζόντια ανομοιογένεια λόγω της εκσκαφής όσο και του υποκείμενου στρώματος. Με την συγκεκριμένη διάταξη και αφενός με το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι εφικτός ο εντοπισμός με μεγάλη ευκρίνεια πλευρικών αλλαγών στο υπέδαφος. Συνεπώς, κατατάσσεται υψηλά στη κλίμακα της ικανότητας εντοπισμού πεπερασμένων δομών ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν προβλήματα θορύβου.

Διάταξη Pole-Dipole (PD)

Εφαρμόστηκαν δύο αντιδιαμετρικές διατάξεις Pole-Dipole με το ηλεκτρόδιο ρεύματος αριστερά ή δεξιά σε σχέση με το δίπολο δυναμικού (**Σχήμα 3.8**) και με το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο ρεύματος πολύ μακριά (<200m) και σε διεύθυνση κάθετη προς την γραμμή διασκόπησης.

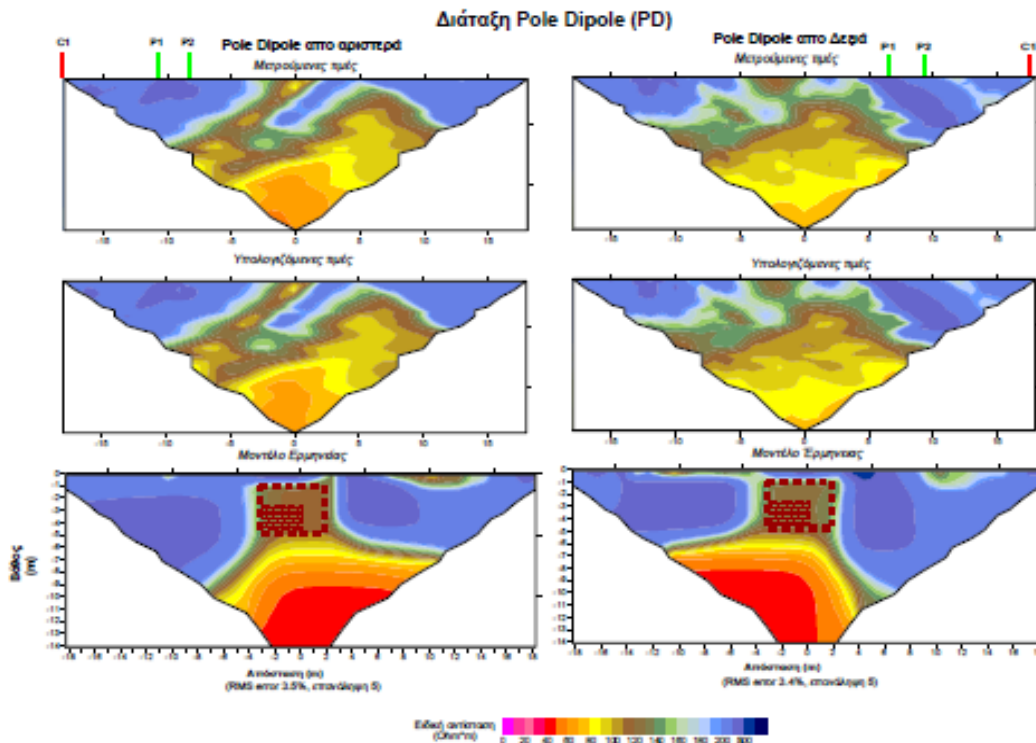


Σχήμα 3.9: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Dipole-Dipole από αριστερά και από δεξιά



Σχήμα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορετικών τρόπων μετρήσεων από αριστερά και από δεξιά.

Στο **Σχήμα 3.11** διακρίνεται και στα δύο μοντέλα ερμηνείας τόσο η πλευρική και οριζόντια ανομοιογένεια λόγω της εκσκαφής με ακρίβεια και μεγάλη αντίθεση τιμών ειδικής αντίστασης σε σχέση με τον περιβάλλοντα σχηματισμό (resistivity contrast) όσο και του υποκείμενου στρώματος.

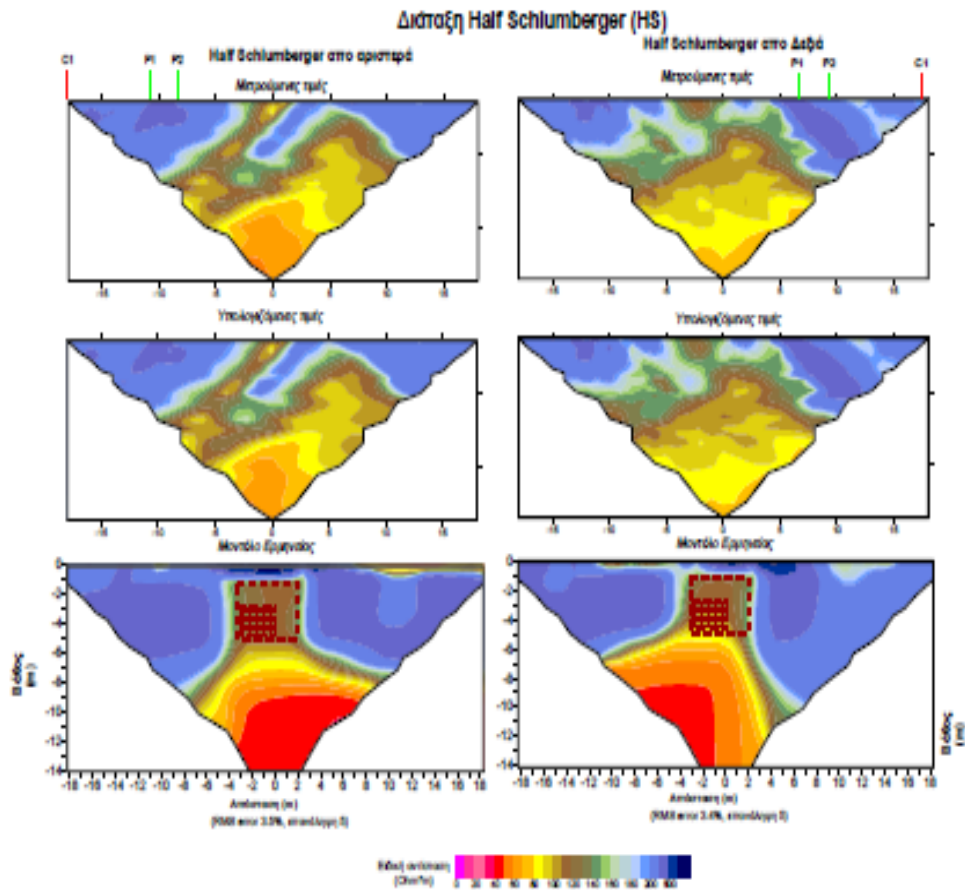


Σχήμα 3.11 :Μετρούμενες υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Pole-Dipole από αριστερά και δεξιά.

Διάταξη Half-Shlumberger

Οι μετρήσεις με αυτή τη διάταξη πραγματοποιήθηκαν κυρίως για να διερευνηθεί η επίδραση της θέσης του απομακρυσμένου ηλεκτροδίου ρεύματος σε σχέση με τη θέση της γραμμής διασκόπησης, στο τελικό μοντέλο ερμηνείας.

Στο **Σχήμα 3.12**, τα δύο μοντέλα ερμηνείας έχουν μεγάλη ομοιότητα με τα αντίστοιχα της Pole-dipole (PD) με ανάλογα συμπεράσματα. Επιπρόσθετα η θέση του απομακρυσμένου ηλεκτροδίου ρεύματος δεν είναι σημαντική σε σχέση με την γραμμή διασκόπησης αρκεί να βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, δηλαδή πάνω από 10 φορές της μέγιστης απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων. (Ορφανός Χρήστος 2011)



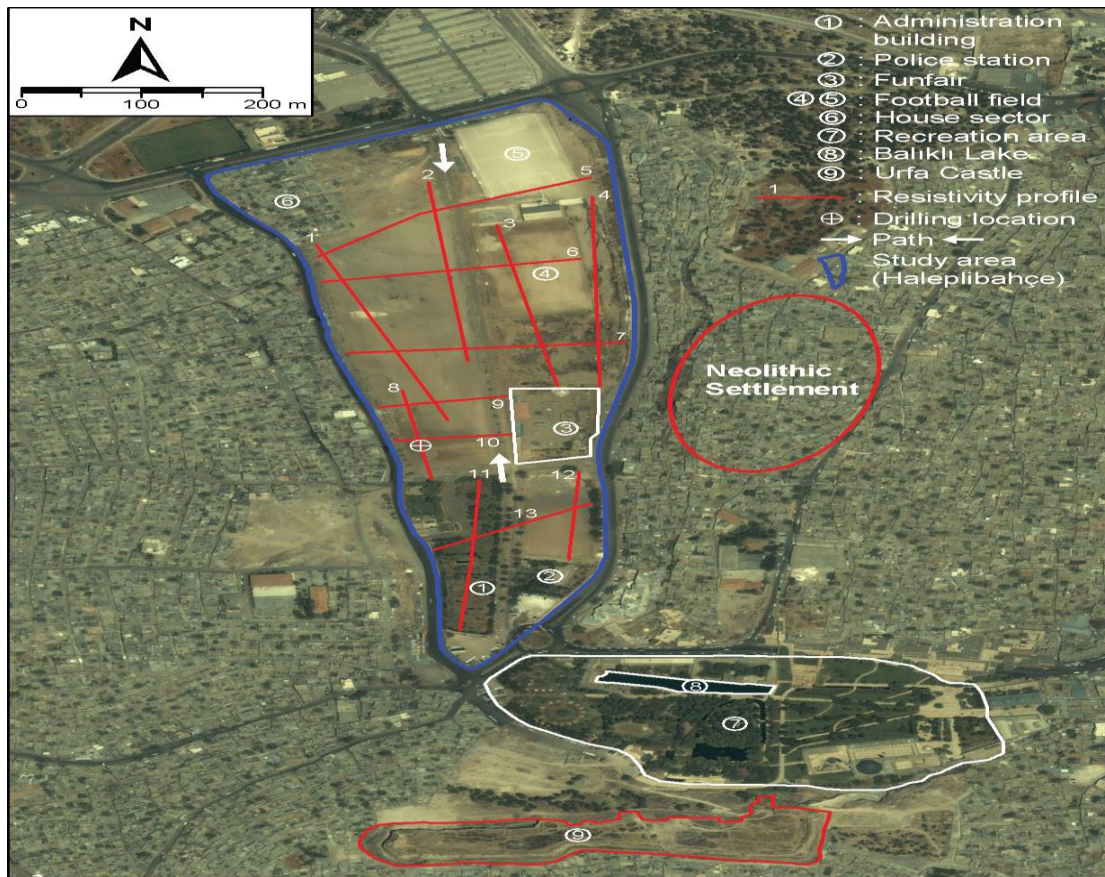
Σχήμα 3.12: Μετρούμενες και υπολογιζόμενες φαινόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Half-Schlumberger αριστερά και δεξιά.

3.3.Εφαρμογή Γ: Λίμνη Balikli στην περιοχή Sanliuufa, Τουρκία.

Η τρίτη εφαρμογή αναφέρεται στην περιοχή γύρω από την λίμνη όπου έγινε μελέτη για να προσδιοριστεί η υδρογεωλογική θέση της περιοχής και του υπόγειου χαρακτήρα της, ειδικότερα να μελετηθεί πιθανό υπόγειο σύστημα δεξαμενών νερού, για την καταλληλότητα ανέγερσης συγκροτήματος ανανυχής.

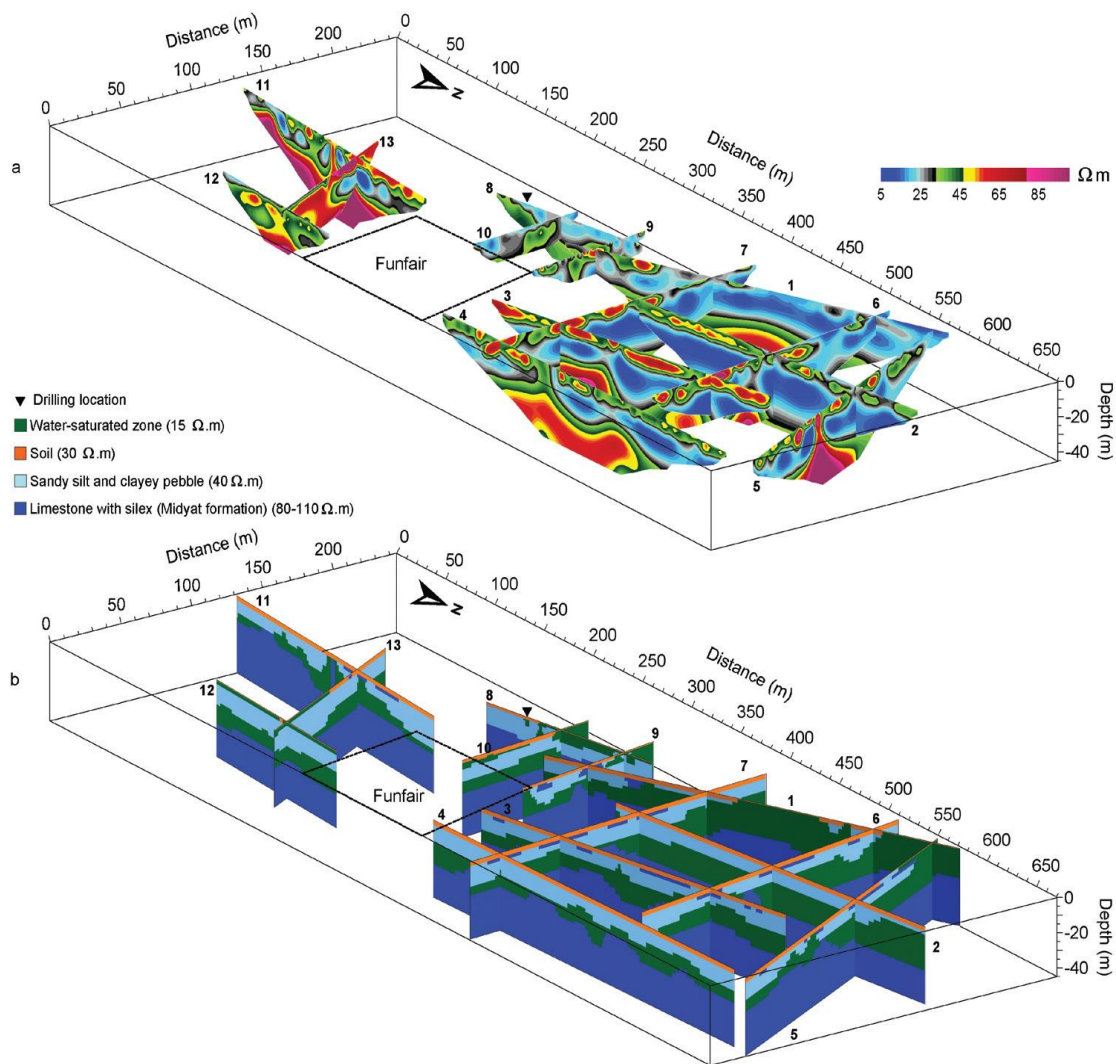
Για τις μετρήσεις στην περιοχή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με διάταξη Schlumberger και έγιναν 13 τομές όπως φαίνονται στην **Σχήμα 3.13**. το μήκος των τομών μεταβαλλόταν ανάλογα, ενώ τα ηλεκτρόδια είχαν απόσταση μεταξύ τους 5m.

Για την επεξεργασία και την ερμηνεία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Res2dinv.



Σχήμα 3.13: Με μπλε χρώμα η περιοχή μελέτης, με λευκό και αριθμημένα ανθρώπινες κατασκευές και η λίμνη και με κόκκινο μέσα στην περιοχή έρευνας οι τομές

Στην **Σχήμα 3.14.α** βλέπουμε όλα τα αποτελέσματα ERT σε μορφή δικτυωτού διαγράμματος 3D. Όπως βλέπουμε υπάρχει ένα συνταίριασμα μεταξύ των ζωνών ειδικής αντίστασης, ενώ δεν έχουν παρθεί αποτελέσματα από την περιοχή όπου υπάρχει ένα τοπικό λούνα παρκ. Τα αποτελέσματα δείχνουν χαμηλές ειδικές αντιστάσεις (5-25 Ωm) οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με ζώνες κορεσμένες σε νερό και προς τα δυτικά υπάρχει μια αύξηση του πάχους αυτών των ζωνών που φτάνει από 8m έως 10m. Ενώ οι υψηλές ειδικές αντιστάσεις (40-100Ωm) που προκαλούνται από τα πετρώματα της βάσης παρατηρούνται κυρίως σε ασβεστολιθικές κρούστες. Η ανώτερη επιφάνεια τους παρατηρείται σε βάθη 15-35m.



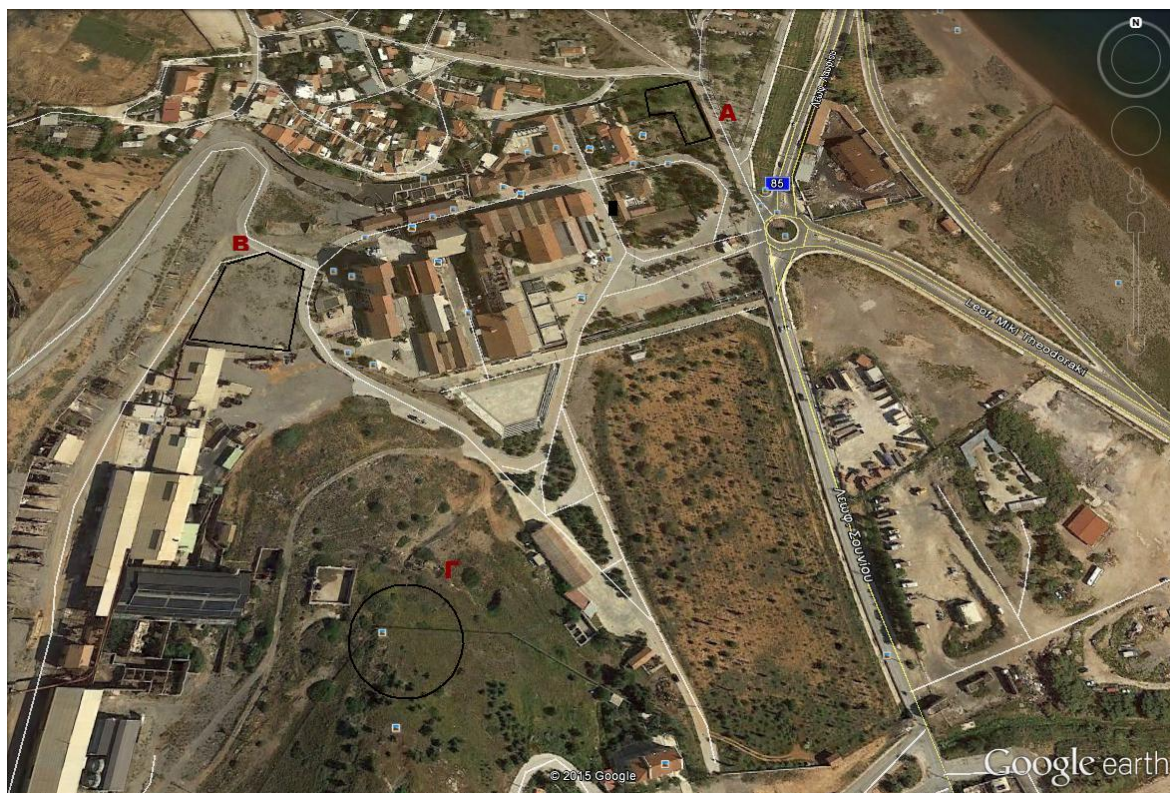
Σχήμα 3.14: α) 3D διάγραμμα των αποτελεσμάτων ERT β) διάγραμμα γεωλογικού μοντέλου

Ενώ στο **Σχήμα 3.14.b** βλέπουμε ένα ιδεατό διάγραμμα της γεωλογικής σύστασης της περιοχής. Έτσι έχουμε με μπλε χρώμα τον ασβεστολιθικό σχηματισμό Midyat (80-100Ωm), με γαλάζιο (40Ω) παρουσιάζονται ιζήματα με άργιλο πιθανόσχαλίκια ή άμμο. Η ζώνη κορεσμού η οποία έχει χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης (15Ω) παρουσιάζεται με πράσινο και το έδαφος που έχει ένα μέτριο επίπεδο τιμών (30Ω) για την περιοχή έρευνας παρουσιάζεται με πορτοκαλί. (Drahor 2011)

Κεφάλαιο 4 :Εφαρμογήγεωφυσικώνμεθόδων στην στο Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου για τον εντοπισμό α) χώρου περιβαλλοντικής διαχείρισης και β) μεταλλευτικής στοάς

4.1.Γενικά

Στην υπό μελέτη περιοχή του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου υπήρχαν δύο διαφορετικά αντικείμενα έρευνας σε τρεις διαφορετικές περιοχές όπως φαίνεται στην **εικόνα 4.1**. Στην περιοχή **A** και **B**,στόχος της έρευνας ήταν η υπόδειξη χώρου όπου θα μπορούσε γεωλογικά να υποστηρίξει φυσικό ταμιευτήρα νερού και στην συνέχεια με γεωτρήσεις να αντλείται για ύδρευση. Στην περιοχή **Γ**, ο στόχος ήταν ο εντοπισμόςήδη γνωστής μεταλλευτικής στοάς και η υπόδειξη καταλληλότερης θέσης για τοποθέτηση νέας εισόδου .



Εικόνα 4.1.: Υπό μελέτη περιοχές στον χώρο του Τ.Π.Π.Α

Στις A και B πάρθηκαν μετρήσεις με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας και με την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (γεωηλεκτρική τομογραφία) ενώ στην Γ χρησιμοποιήθηκε μόνο η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

(γεωηλεκτρικήτομογραφία). Ενώ έγινε και μια προσπάθεια να παρθούν μετρήσεις με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο στο σύνολο του πάρκου.

4.2. Περιοχή Έρευνας.

4.2.1. Λαυρεωτική

Στην αρχαιότητα η νοτιοανατολική Αττική ονομαζόταν Λαύριο ή Λαυρεωτική. Ο ρόλος του ήταν πολύ σημαντικός στην αρχαιότητα εξαιτίας των πλούσιων ορυχείων του σε ασήμι, παράγοντας που οδήγησε την Αθήνα στον χρυσό της αιώνα. Τα μεταλλευτικά φρέατα της Λαυρεωτικής απλώνονται σ' όλη την έκταση από το ακρωτήριο του Σουνίου στο νότο ως τις παρυφές της κωμόπολης της Κερατέας στο βορρά. Ο αριθμός τους ανέρχεται σε πολλές εκατοντάδες (Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου, 2007).

Το τεράστιο δίκτυο των μεταλλευτικών φρεάτων, δημιουργημένο στην αρχαιότητα, απετέλεσε τη βάση επάνω στην οποία στηρίχθηκε το νεότερο δίκτυο, που άρχισε να κατασκευάζεται από το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1870 και διατηρήθηκε ενεργό έως τις πρώτες μεταπολεμικές δεκαετίες.

Το Λαύριο υπήρξε μια από τις πιο σημαντικές νέες πόλεις στην Ελλάδα του προπερασμένου αιώνα, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον διεθνή χώρο. Υπήρξε ο πρώτος εργατικός οικισμός που οικοδομήθηκε απ' αρχής στο νεοσύστατο ελληνικό κράτος. Η ίδρυση του Λαυρίου και η εκμετάλλευση του πλούσιου υπεδάφους του συνδέεται άμεσα με την προσπάθεια του νέου ελληνικού κράτους του 19ου αιώνα να αναπτύξει τις πλουτοπαραγωγικές του πηγές και την βιομηχανία του.

Η Ελληνική και η Γαλλική Εταιρεία είναι οι βιομηχανίες που έβαλαν την σφραγίδα τους τόσο στην ανάπτυξη της μεταλλευτικής βιομηχανίας στην Ελλάδα, όσο και στην δημιουργία και το χαρακτήρα της πόλης του Λαυρίου. Το 1875, ιδρύθηκε από τον Serpieri η «Compagnie Francaisedes Mines du Laurium», που διαδέχθηκε τα «Μεταλλεία Καμάριζας». Το 19ο αιώνα, η βιομηχανική ανάπτυξη του Λαυρίου και η εισροή εργατών και άλλου προσωπικού από όλη την Ελλάδα και το εξωτερικό έκαναν το Λαύριο πρωτοπόρο σε πολλούς τομείς της κοινωνικής, οικονομικής και τεχνολογικής ζωής. Το Λαύριο μεταβλήθηκε σε πόλη 10.000 κατοίκων στην αρχή του αιώνα, ενώ η Γαλλική Εταιρεία δημιούργησε εγκαταστάσεις 45.000 m² στον Κυπριανό. Οι δύο εταιρίες του Λαυρίου ήταν υπεύθυνες για την

λειτουργία της πόλης. Οι κατοικίες και τα καταστήματα ανήκαν στην ιδιοκτησία τους, αυτές φρόντιζαν για την υγειονομική περίθαλψη με νοσοκομεία και φαρμακεία. Οι ίδιες κατασκεύαζαν τα σχολεία, τις εκκλησίες, τις λιμενικές εγκαταστάσεις.

Η ζωή της πόλης του Λαυρίου είναι στενά συνδεδεμένη με τις βιομηχανίες της περιοχής.. Το Λαύριο ήταν η πρώτη πόλη που χρησιμοποίησε τηλέφωνο και ηλεκτρικούς λαμπτήρες (1880), απέκτησε σιδηροδρομική σύνδεση με την Αθήνα (1885) και ηλεκτροφωτίστηκε με λάμπες βολταϊκού τόξου (1882). Το 1906 θα φτιαχτεί το πρώτο σωματείο. Στα χρόνια που ακολουθούν, θα γίνουν εκατοντάδες απεργίες.

Σήμερα, μετά την οριστική διακοπή των μεταλλευτικών εργασιών, η περιοχή του Λαυρίου διατηρεί την ιστορική σημασία της, αλλά και την ιδιαίτερη ομορφιά της. Οι εγκαταστάσεις του 19ου αιώνα και ο περιβάλλον χώρος τους έχουν κριθεί ιστορικά, διατηρητέα μνημεία από το Υπουργείο Πολιτισμού και αποτελούν σημαντικό δείγμα της βιομηχανικής και μεταλλευτικής τεχνολογίας του παρελθόντος, μνημείο του ανθρώπινου μόχθου και σημαντικό κεφάλαιο της ελληνικής βιομηχανικής αρχαιολογίας.



Εικόνα 4.2: Πόλη Λαυρίου

Τα Μεταλλεία Λαυρίου λειτούργησαν από το 1875 έως το 1989. Στο διάστημα 1875-1904 η εταιρεία κατασκευάζει το βασικό πυρήνα των εγκαταστάσεων της που περιλαμβάνει κτίρια διοίκησης, εγκαταστάσεις μηχανικής επεξεργασίας και υδρομηχανικού εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων και αναγωγής του μολύβδου. Το 1905 ξεκινά μια μεγάλη επιχείρηση τεχνολογικού εκσυγχρονισμού της

μεταλλουργίας του μολύβδου. Επίσης, από το 1905 αλλάζει και η κινητήρια δύναμη του συγκροτήματος με την εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων. Στο τέλος της δεκαετίας του 1920 η εταιρεία βρίσκεται αντιμέτωπη με τη συνεχιζόμενη πτώση των τιμών του μολύβδου και με τη σταδιακή εξάντληση των κοιτασμάτων. Επιχειρεί να αντιμετωπίσει την κρίση με τον εκσυγχρονισμό της μεθόδου εμπλουτισμού και με την παραγωγή καθαρού μολύβδου για την εσωτερική αγορά. Οι τελευταίες σημαντικές παρεμβάσεις στο συγκρότημα είναι οι εγκαταστάσεις των φίλτρων καπνού που δημιουργήθηκαν μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Ορισμένα από τα κτίρια που σώζονται μέχρι και σήμερα κατασκευάστηκαν το 1875-76 και εξακολούθησαν μέχρι το 1988 να στεγάζουν τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Το συγκρότημα διέκοψε οριστικά τη λειτουργία του το 1989.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η σχετικά πρόσφατη αναβάθμιση του λιμανιού του Λαυρίου, η λειτουργία της μαρίνας, η μεγαλύτερη μαρίνα ελλιμενισμού και υποστήριξης σκαφών αναψυχής στην Ελλάδα, και η μελλοντική επέκταση του Προαστιακού σιδηρόδρομου προσδίδει μια νέα δυναμική στην ευρύτερη περιοχή. (Ζαβερδίνος Α.Μ. 2011)

4.2. 2 Το Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο του Λαυρίου

Το Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (Τ.Π.Π.Λ.) ιδρύθηκε στην θέση της παλιάς Γαλλικής Εταιρίας Λαυρίου (Compagnie Francaise des Mines du Laurium) το 1992, με πρωτοβουλία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Είναι ένας οργανισμός επιστημονικής έρευνας, εκπαίδευσης, επιχειρηματικής δραστηριότητας και πολιτισμού. Το μέγεθός του είναι περί τα 250 στρέμματα μέσα στα οποία βρίσκονται 41 κτηριακές μονάδες, κτισμένες από το 1875 έως το 1940, ενώ μέχρι σήμερα έχουν αποκατασταθεί 80 στρέμματα

Σκοπός του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου του Λαυρίου είναι η σύνδεση της επιστημονικής και τεχνολογικής έρευνας που πραγματοποιείται στο ΕΜΠ με τις ανάγκες του επιχειρηματικού κόσμου. Αυτό επιτυγχάνεται με την πραγματοποίηση πολιτιστικών εκδηλώσεων. Ο συγκεκριμένος χώρος αποτελεί μοναδικό μνημείο βιομηχανικής αρχαιολογίας και αρχιτεκτονικής και σε αυτόν τον χώρο υπάρχουν μια σειρά από εγκαταστάσεις για την στέγαση τυχόν επιχειρηματικών δραστηριοτήτων καθώς και εγκαταστάσεις που τις εκμεταλλεύεται το ΕΜΠ προς όφελος των

σπουδαστών του. Καθώς, είναι το μοναδικό Τεχνολογικό Πάρκο στην περιοχή της Αττικής που εξειδικεύεται σε τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας, όπως είναι η πληροφορική, η ηλεκτρονική τεχνολογία, οι τηλεπικοινωνίες, η ρομποτική η τεχνολογία laser, η περιβαλλοντική τεχνολογία, η εξοικονόμηση ενέργειας, κ.α.

Το κτηριακό σύνολο των εγκαταστάσεων του Τ.Π.Π.Α. αποτελεί εξαιρετικό δείγμα της βιομηχανικής αρχιτεκτονικής, το οποίο έχει κηρυχθεί «νεότερο μνημείο» από το Υπουργείο Πολιτισμού καθώς η βιομηχανική του παράδοση έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ανάδειξη και την ενίσχυση της περιοχής. Για 120 χρόνια η Γαλλική Εταιρία υπηρέτησε την ανάπτυξη της τεχνολογίας, την έρευνα και την εκπαίδευση. Σήμερα, οι ανακαινισμένες εγκαταστάσεις της και οι υπηρεσίες που παρέχονται από το Τ.Π.Π.Α. συνεχίζουν στα χνάρια της

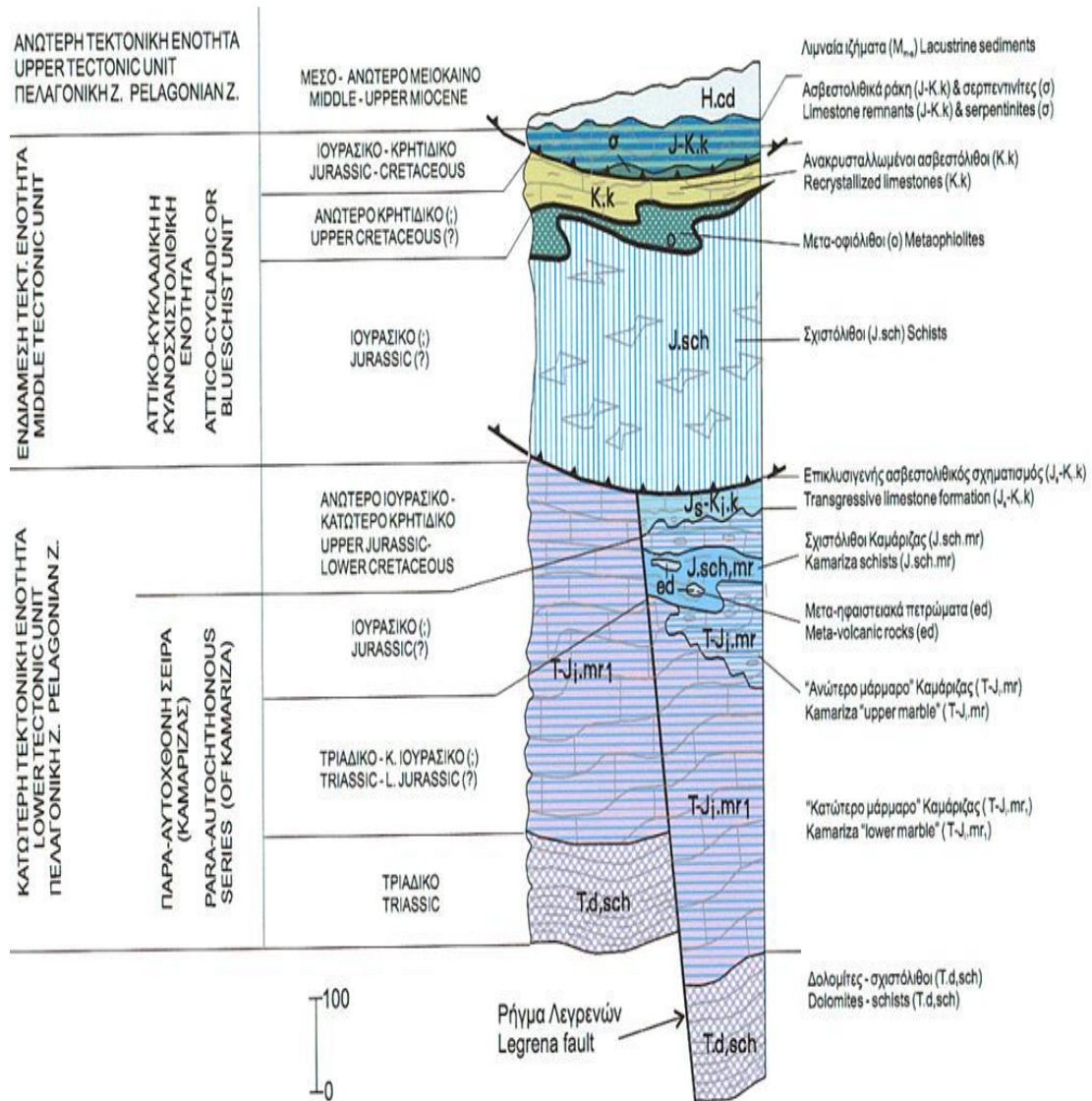


Εικόνα 4.3: Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο του Λαυρίου

4.2.3 Γεωλογική Δομή στο Λαύριο και το Τ.Π.Π.Α.

Η ευρύτερη περιοχή του Λαυρίου, όπως και όλη η ΝΑ Αττική αποτελεί τμήμα της μεταμορφωμένης Αττικοκυκλαδικής Μάζας. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής είναι μεταμορφωμένοι ή ημι-μεταμορφωμένοι, αποτελούμενοι από μάρμαρα, δολομιτικά μάρμαρα ή δολομίτες, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και φυλλίτες. Περιορισμένης έκτασης τριτογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμοί εμφανίζονται σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο. Στην περιοχή της Λαυρεωτικής υπάρχουν δύο συστήματα στρωμάτων. Το αυτόχθον μεταμορφωμένο σύστημα, που αποτελεί τη σειρά Υμηττού – Νότιας Αττικής, και οι σχηματισμοί που παλαιότερα είχαν θεωρηθεί επικλυσιογενείς και αποτελούν το Φυλλιτικό τεκτονικό κάλυμμα. Στην περιοχή του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου φαίνεται ότι εμφανίζονται

γεωλογικοί σχηματισμοί και των δύο λιθοστρωματογραφικών τεκτονικών ενοτήτων της ΝΑ Αττικής:



Σχήμα 4.1: Στρωματογραφική στήλη Ευρύτερης περιοχής της Λαυρεωτικής (Γεωλογικός χάρτης I.G.M.E., Φύλλο Λαύριο 1997-2000)

4.2.3.1 Σειρά Υμηττού-Νότιας Αττικής (αυτόχθονο σύστημα)

Η σειρά Υμηττού-Νότιας Αττικής αποτελείται από μάρμαρα, δολομίτες και κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους με γνωστό πάχος άνω των 10000 m. Χωρίζεται σε τρεις διαπλάσεις:

- **Το κατώτερο μάρμαρο:** Έχει πάχος άνω των 800 m και εξαπλώνεται σε όλη την ΝΑ Αττική. Μέσα στα γνωστά τμήματα του κατώτερου μαρμάρου

(Νότιος Υμηττός, Κερατοβούνι, Όλυμπος, Καμάριζα) υπάρχουν δολομίτες και κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι. Είναι λευκό ως κυανότεφο κοκκώδες μάρμαρο, ενώ κατά θέσεις εμφανίζεται ροδόχρουν. Το ανώτερο τμήμα του κατώτερου μαρμάρου εμφανίζει διαφορετική όψη στα δύο μισά της Λαυρεωτικής χερσονήσου. Στο ανατολικό τμήμα είναι λευκό και σε στρώματα μεγάλου πάχους, ενώ στο δυτικό τμήμα είναι σχεδόν χωρίς στρώση, λατυποπαγές και συνήθως ροδόχρουν έως καστανό

- **Τον σχιστόλιθο Καισαριανής ή Καμάριζας:** Είναι κυρίως μοσχοβιτικοί και ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι και φυλλίτες κυρίως μαύροι (με γραφίτοειδή), με ενστρώσεις μαρμάρων συνήθως λεπτοστρωματωδών. Το πάχος των σχιστόλιθων μεταξύ δύο μαρμάρων συνήθως κυμαίνεται από 0-300 m. Στην περιοχή της Πλάκας, οι σχιστόλιθοι έχουν μεταμορφωθεί εξ' επαφής σε κερατίτες, γύρω από τον γνωστό γρανοδιοριτικό όγκο της Πλάκας.
- **Το ανώτερο μάρμαρο:** Είναι λευκό έως τεφρό, σε λεπτότερα συνήθως στρώματα απ' ότι εμφανίζεται το κατώτερο μάρμαρο. Σε εκσκαφή λατομείου κοντά στο Λαύριο εμφανίζεται σε δύο ορίζοντες, πλήρως διαχωρισμένους χρωματικά. Ο κατώτερος ορίζοντας είναι λευκού χρώματος ενώ ο ανώτερος είναι τεφρού χρώματος. Το συνολικό πάχος του ανώτερου μαρμάρου κυμαίνεται από λίγα έως 100 m. Έχει σημαντική εξάπλωση κυρίως στην νοτιοανατολική πλευρά της Λαυρεωτικής και στο βόρειο Υμηττό(Ζαβερδίνος Α.Μ. 2011)

4.2.3.2 Φυλλιτικό τεκτονικό κάλυμμα

Οι σχηματισμοί Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος που εμφανίζονται διάφορες περιοχές της Νότιας Αττικής, βρίσκονται επωθημένοι πάνω στους σχηματισμούς του αυτόχθονου συστήματος της σειράς Υμηττού-Νότιας Αττικής. Το συνολικό πάχος των σχηματισμών του Φυλλιτικού καλύμματος υπερβαίνει πολλές φορές τα 800 m. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται, κυρίως, από φυλλίτες, σερικιτικούς και χαλαζιακούς σχιστόλιθους και χαλαζίτες, με παρεμβολές μεταμορφωμένων βασικών εκρηξιγενών (πρασινιτών). Επίσης απαντώνται σ' αυτούς ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων, ποικίλου πάχους, κυρίως στα ανώτερα μέλη των σχηματισμών του τεκτονικού καλύμματος. Πρόκειται για μυλονιτωμένα μάρμαρα, συνήθως χρώματος καστανού λόγω αγκεριτώσεως από τη δράση μεταγενέστερων σιδηρούχων διαλυμάτων. Μυλονιτώση, δολομιτώση και

αγκεριτίωση υπέστη επίσης και το ανώτερο τμήμα του ανώτερου ή του κατώτερου μαρμάρου, το οποίο βρέθηκε κάτω από την επιφάνεια της επώθησης. Τα αγκεριτιωμένα αυτά μάρμαρα, στη βάση του επωθημένου καλύμματος θεώρησε ο LEPSIUS σαν ιδιαίτερο στρωματογραφικό ορίζοντα, τον οποίο ονόμασε κατώτερο ασβεστόλιθο ή σιδηρούχο ασβεστόλιθο.

Οι σχηματισμοί του νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος επικρατούν στους λόφους που περιβάλλουν τις εγκαταστάσεις του Τ.Π.Π.Α. Αποτελούνται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, εντός των οποίων κατά θέσεις εμφανίζονται σχιστολιθικές και χαλαζιτικές ενστρώσεις. Στον βορειοδυτικό λόφο του Πάρκου είναι άστρωτοι, τοφφώδεις, αγκεριτιωμένοι.

4.2.3.3 Προσχωματικές αποθέσεις

Ανάλογα με την θέση ανάπτυξή τους επικρατούν τα αδρομερή ή τα λεπτομερή υλικά. Στα περιθώρια της χαμηλής ζώνης εμφανίζονται τα αδρομερή υλικά ενώ στις υψομετρικά χαμηλότερες ζώνες επικρατούν τα λεπτομερέστερα υλικά. Τα αδρομεδή υλικά είναι συνήθως μικρών διαστάσεων κώνοι κορημάτων ενώ τα λεπτομερέστερα υλικά δεν είναι συνήθως ορατά στην επιφάνεια του εδάφους καθώς έχουν επικαλυφθεί από δευτερογενή υλικά τα οποία προέρχονται από την μεταλλευτική και την μεταλλουργική δραστηριότητα.

4.2.3.4 Τεχνητά μπάζα από υλικά μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας

Το μεγαλύτερο τμήμα του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου του Λαυρίου είναι καλυμμένο από υλικά μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας, το πάχος των οποίων διαφέρει από περιοχή σε περιοχή.

4.2.3.5 Ζώνες εξυγίανσης εδαφών

Έχουν παρθεί μέτρα για την μείωση της τοξικότητας των υλικών από την μεταλλευτική και την μεταλλουργική δραστηριότητα εντός του Τ.Π.Π.Α. Ένας τρόπος είναι η κάλυψη των υλικών αυτών με ασβεστολιθικό υλικό και στην συνέχεια με ένα στρώμα ερυθράς αργίλου. (Ζαβερδίνος Α.Μ. 2011)

4.3.Γεωφυσικές Μετρήσεις και αποτελέσματα στην Περιοχή Α και Β

4.3.1.Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος



Εικόνα 4.4: Το ειδικό καρότσι με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο «CMD»

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ηλεκτρομαγνητική στο σύνολο του πάρκου με την βοήθεια ειδικού καροτσιού, κατασκευής του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, στο οποίο εφαρμόζει το όργανο και μπορεί να μεταφέρετε είτε σπρώχνοντας το, είτε δένοντας το στο αμάξι, όπως και κάναμε,(**Εικόνα4.4**) για να έχουμε μια γενική εικόνα του υπεδάφους του πάρκου. Ενώ στην συνέχεια προχωρήσαμε στην περιοχή Α και Β.

4.3.1.2. Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με τις δύο διαμορφώσεις του CMD-2, με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m, και CMD-4 με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m, αντίστοιχο του Geonics EM-31. Το όργανο με κατάλληλη σύνδεση με όργανο GPS μπορεί να παρέχει και τα στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης.

Το όργανο αποτελείται από την μονάδα ελέγχου και το σύστημα πομπού δέκτη. Μονάδα Ελέγχου: Η Μονάδα ελέγχου Attachable CMD λειτουργεί με όλους τους τύπους των συστημάτων πομπού δέκτη

Πέντε τρόποι μέτρησης:

- ❖ Χειροκίνητη μέτρηση - ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πιέζοντας το πλήκτρο. Η θέση του σημείου ενημερώνεται αυτόματα στο προκαθορισμένο δίκτυο ή μπορεί να εισαχθεί απευθείας. Κάθε σημείο μπορεί να μετρηθεί και πάλι ή να παραλειφθεί και να ολοκληρωθεί με ένα σχόλιο.
- ❖ Συνεχής μέτρηση - Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Οι θέσεις για το προφίλ καθορίζεται από τα σήματα μήκους με συνεχή συνυπολογισμό των θέσεων των μεμονωμένων μετρήσεων.
- ❖ GPS χειροκίνητη μέτρηση - ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πατώντας το πλήκτρο. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
- ❖ Συνεχής μέτρηση GPS - Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
- ❖ Λειτουργία αναζήτησης - τα δεδομένα μετρώνται συνεχώς, αλλά δεν σώζονται. (Φωκίων Λοϊζος 2014)

Εμείς χρησιμοποιήσαμε τον τρόπο μέτρησης GPS με χειροκίνητη μέτρηση για τις περιοχές Α και Β ενώ για το σύνολο του πάρκου χρησιμοποιήθηκε η συνεχής μέτρηση GPS.

4.3.2. Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες

Με τη βοήθεια των οργάνων που αναφέρθηκαν παραπάνω πάρθηκαν μετρήσεις με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3m (διαμόρφωση CMD-2) και 6m(διαμόρφωση CMD-4). Τα αποτελέσματα που έδωσαν οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα Surfer της Golden software για την κατασκευή χαρτών ακολουθούν.

4.3.2.1. Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες του Τ.Π.Π.Λ



Σχήμα 4.2: Το πάρκο και με κόκκινο η διαδρομή των μετρήσεων που πάρθηκαν.

Στο **Σχήμα 4.2** βλέπουμε την διαδρομή (με κόκκινο) που ακολούθησε το αμάξι με το όργανο μέσα στο τεχνολογικό πολιτιστικό πάρκο Λαυρίου, και στο **Σχήμα 4.3** βλέπουμε τους χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα 3m (αριστερά) και 6m (δεξιά). Ένα πρώτο σχόλιο που μπορεί να γίνει είναι η έντονη ανθρωπογενής δραστηριότητα στη επιφάνεια του πάρκου (κτίρια, αμάξια ,γενικά μεταλλικές κατασκευές) είναι δυνατόν να επηρέασαν σε ένα βαθμό τα αποτελέσματα.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στο **Σχήμα 4.3**άπου φαίνεται η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

- Στο κύκλο με ροζ χρώμα παρουσιάζονται οι πιο υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, οπότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι οφείλεται σε ανθρωπογενή παράγοντα, όπως κτίρια, σωληνώσεις και καλώδια υψηλής

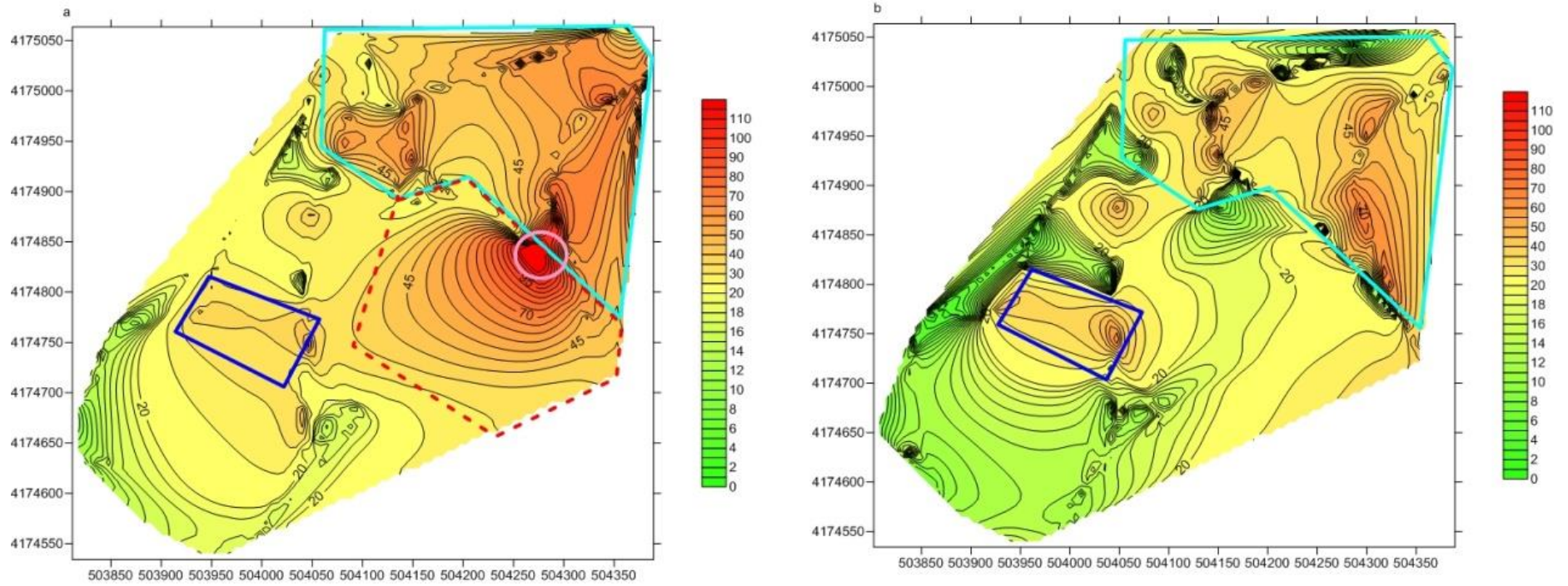
τάσης, κρίνοντας και από την απότομη μεταβολή των τιμών τις ηλεκτρικής αγωγιμότητας γεγονός που δεν μπορεί να συμβεί στην φύση.

- Στο πολύγωνο με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται μια σχετικά γραμμική μεταβολή στις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι αυτές οι τιμές οφείλονται στις υψηλές τιμές που παρουσιάζονται στο ροζ κύκλο.
- Στο πολύγωνο με γαλάζιο χρώμα παρουσιάζονται τοπικές απότομες μεταβολές στις τιμές και αυτό μπορεί να οφείλεται σε ανθρωπογενή παράγοντα όπως είναι οι αποθέσεις σκουριών ή σωληνώσεων.
- Ενώ βλέπουμε και μια περιοχή που παρουσιάζει ενδιάμεσες τιμές και ίσως να οφείλεται σε αργιλικά εδάφη.

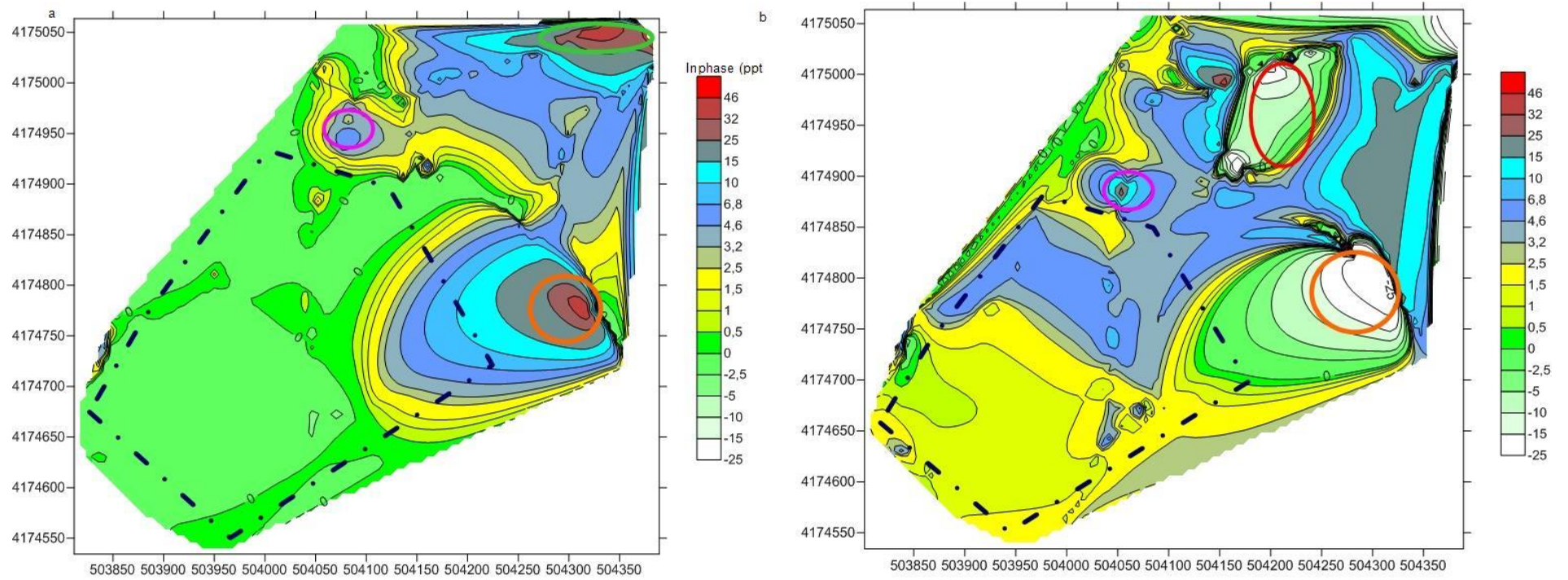
Στο **Σχήμα 4.3β** όπου φαίνεται η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6m έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

- Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν πολύ υψηλές τιμές όπως στα 3m αλλά οι μετρήσεις μας δεν επηρεάζονται τόσο από την επιφανειακή ανθρωπογενή δραστηριότητα.
- Παραμένει όμως η περιοχή που παρουσιάζεται στο γαλάζιο πολύγωνο η οποία παρουσιάζει ακόμη υψηλές τιμές με απότομες μεταβολές, γεγονός που στην φύση δεν μπορεί να συμβεί, οπότε είναι ανθρωπογενής δραστηριότητα και λόγω βάθους πιθανόν να είναι αποθέσεις σκουριών που είχαν γίνει κατά το παρελθόν.

Με μπλε χρώμα και στους δύο χάρτες έχει σημειωθεί η περιοχή Β.



Σχήμα 4.3: Χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. α) για συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) για συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4.



Σχήμα 4.4: Χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας α) σε βάθος 3m σε διαμόρφωση CMD-2 και στα δεξιά σε βάθος 6m σε διαμόρφωση CMD-4

Στο **Σχήμα 4.4a** όπου φαίνεται ο χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνολικό βάθος 3m έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

- Στις ελλείψεις με πορτοκαλί, ροζ και πράσινο παρουσιάζονται υψηλές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας και κρίνοντας και από την απότομη μεταβολή των τιμών αυτών, γεγονός που δεν παρουσιάζεται στην φύση, οφείλονται σε ανθρωπογενή παράγοντα.
- Παρατηρούμε και μια γραμμική μεταβολή των τιμών γύρω από τις ελλείψεις που αναφέραμε πιο πάνω και μια αρχική εκτίμηση είναι ότι οφείλονται ή επηρεάζονται από τις πολύ υψηλές τιμές που σημειώσαμε μέσα στις ελλείψεις.
- Γενικότερα η παρατήρησή μας είναι ότι υψηλές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας έχουμε στην περιοχή που στον χάρτη φαινόμενης αγωγιμότητας του **Σχήματος 4.3a** είχαμε υψηλές τιμές αποδίδοντάς τις σωστά σε ανθρωπογενή δραστηριότητα.

Στο **Σχήμα 4.4β** όπου φαίνεται ο χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε βάθος 6m έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

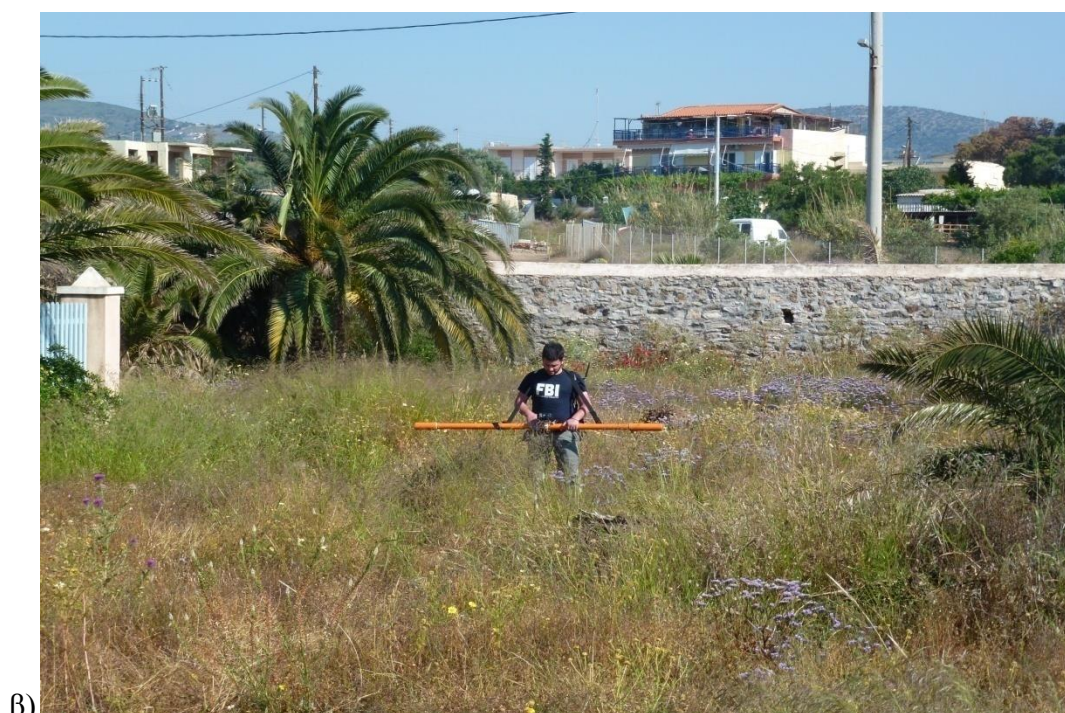
- Παρατηρούμαι ότι η περιοχή με υψηλές τιμές (θετικές ή αρνητικές) επεκτείνεται ανατολικά και με πολύγωνο χρώματος καφέ, έχει σημειωθεί μια περιοχή όπου παρατηρήθηκε μια αύξηση στις τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας και πιθανό να οφείλεται σε αποθέσεις σκουριών.

Συμπέρασμα

Τέλος συγκρίνοντας και τους δυο χάρτες στο **Σχήμα 4.3** και λαμβάνοντας υπόψη τους χάρτες στο **Σχήμα 4.4** οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι στους χάρτες των 3m παρατηρούμε κυρίως την ανθρωπογενή δραστηριότητα όπως είναι τα κτίρια, τα αμάξια τις μεταλλικές κατασκευές και τα καλώδια υψηλής έντασης. Ενώ στους χάρτες των 6m έχουμε μια πιο ξεκάθαρη εικόνα του υπεδάφους με τις θέσεις απόθεσης σκουριών και των περιοχών όπου πιθανό να αποτελούνται από αργιλικά εδάφη.

4.3.2 Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής Α

Η περιοχή Α (Σχήμα 4.5α) αποτελεί προέκταση του κήπου της βίλας Σερπιέρη, αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει τοίχος κατά μήκος της, ενώ δεν υπάρχουν άλλα εμφανή σημεία τα οποία θα επηρέαζαν τις μετρήσεις.



Σχήμα 4.5: α) Με κόκκινο η περιοχή έρευνας Α, β) Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις στην περιοχή Α με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο «CMD»

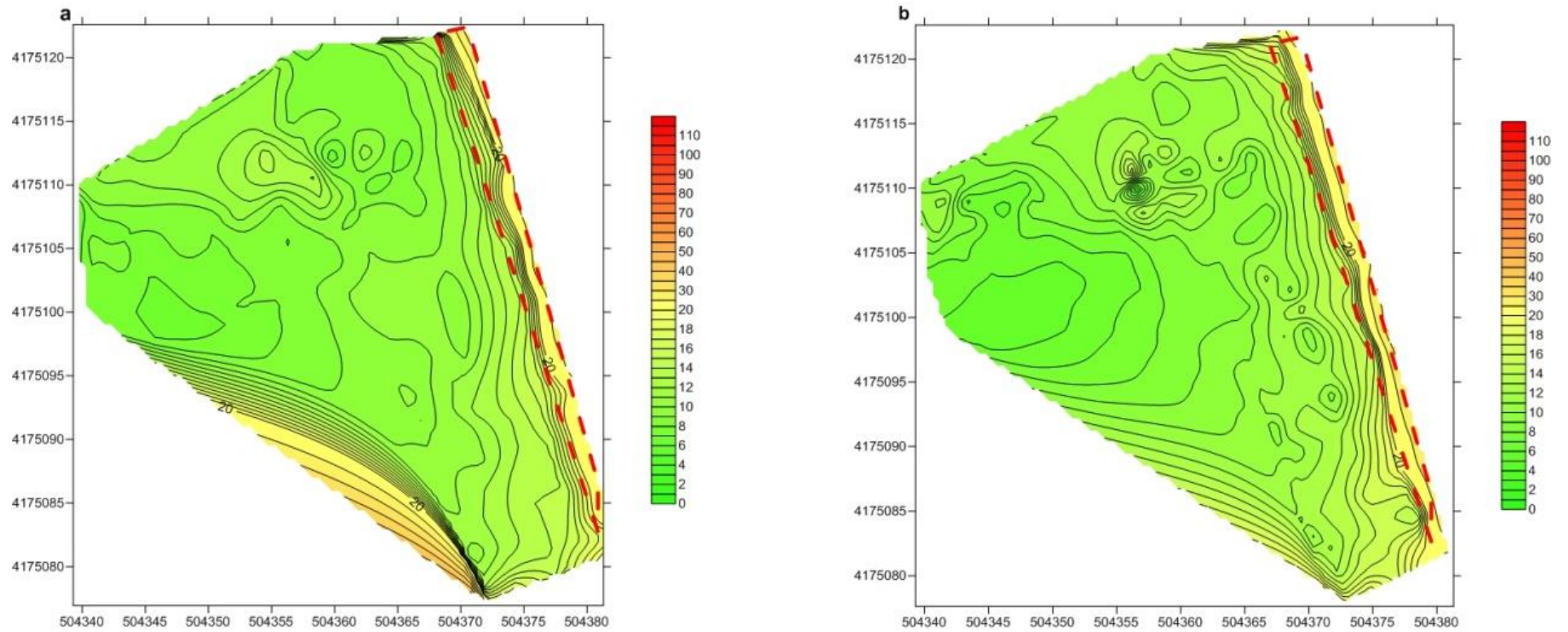
Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στο **Σχήμα 4.6** όπου φαίνονται οι χάρτες κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας σε βάθος 3m (α) και 6m(b) έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

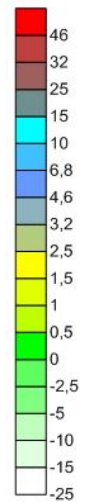
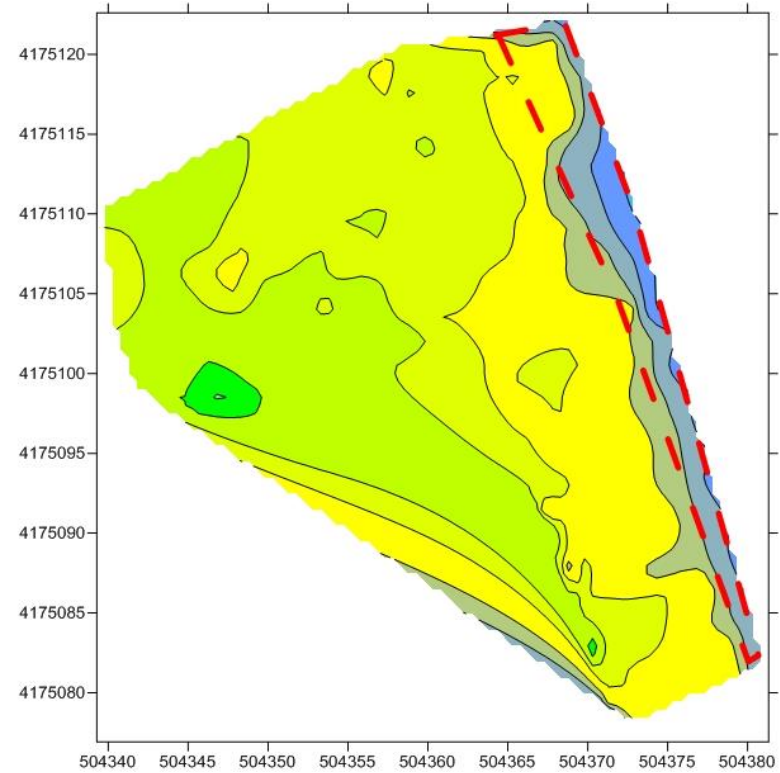
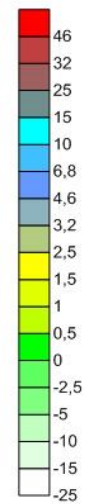
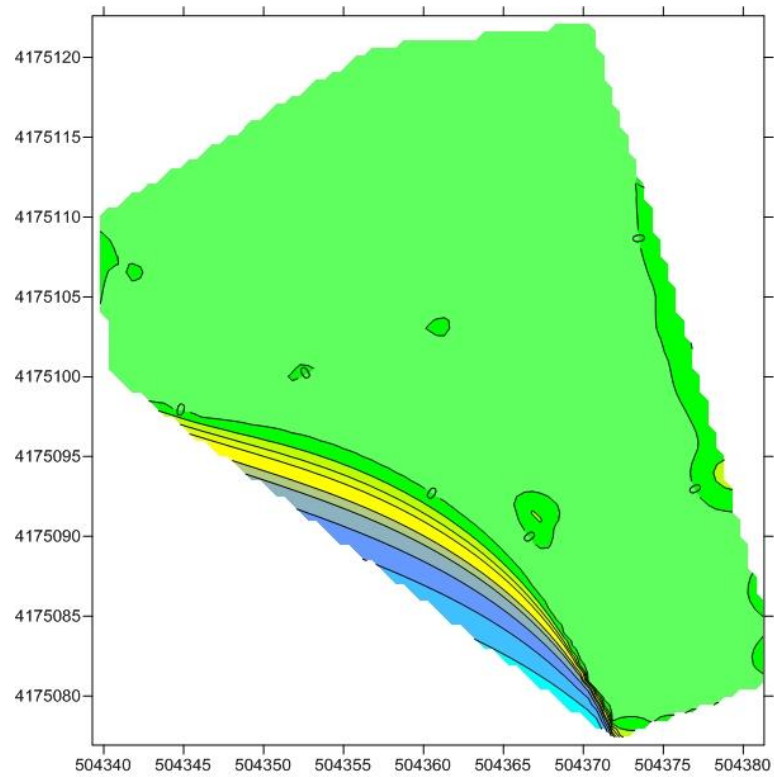
- Με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή περικλείονται οι πιο υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας οι οποίες παρουσιάζονται και στους δύο χάρτες και πιθανό να οφείλονται στον τοίχο που προαναφέρθηκε.
- Ενώ και στους δυο χάρτες παρατηρούμε ότι υπάρχει μια ομοιομορφία σε πολύ χαμηλές τιμές σε όλη την περιοχή, που πιθανό να οφείλονται σε συνεκτικούς τόφους ή αδρανή υλικά.

Στο **Σχήμα 4.7** όπου φαίνονται οι χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε βάθος 3 και 6m αντίστοιχα, έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

- Στον χάρτη των 3m (**Σχήμα 4.7.a**) δεν παρατηρούνται μεταβολές στην κατανομή της μαγνητικής επιδεκτικότητας ενώ η τιμές είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα.
- Στον χάρτη των 6m (**Σχήμα 4.7.b**) και συγκεκριμένα στο κόκκινο πολύγωνο παρατηρείται μια απότομη αύξηση στις τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας που πιθανόν να οφείλεται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα.
- Επίσης στο χάρτη των 6m παρατηρείται μια γενική αύξηση των τιμών σε όλη την περιοχή που πιθανός να οφείλεται σε αποθέσεις σκουριών που έγιναν στο παρελθόν.



Σχήμα 4.6: Χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. α) σε συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) σε συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4.



Σχήμα 4.7: Χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας α) σε συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) σε συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4

4.3.2.3. Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής Β

Στη περιοχή Β (Σχήμα 4.8) αξίζει να σημειωθεί ότι την διαπερνά διαγώνια ένας αγωγός, ο οποίος πολύ πιθανόν να επηρεάσει τις μετρήσεις μας, ενώ δεν υπάρχει κάποιο άλλο εμφανές σημείο που θα επηρέαζε τις εν λόγω μετρήσεις.

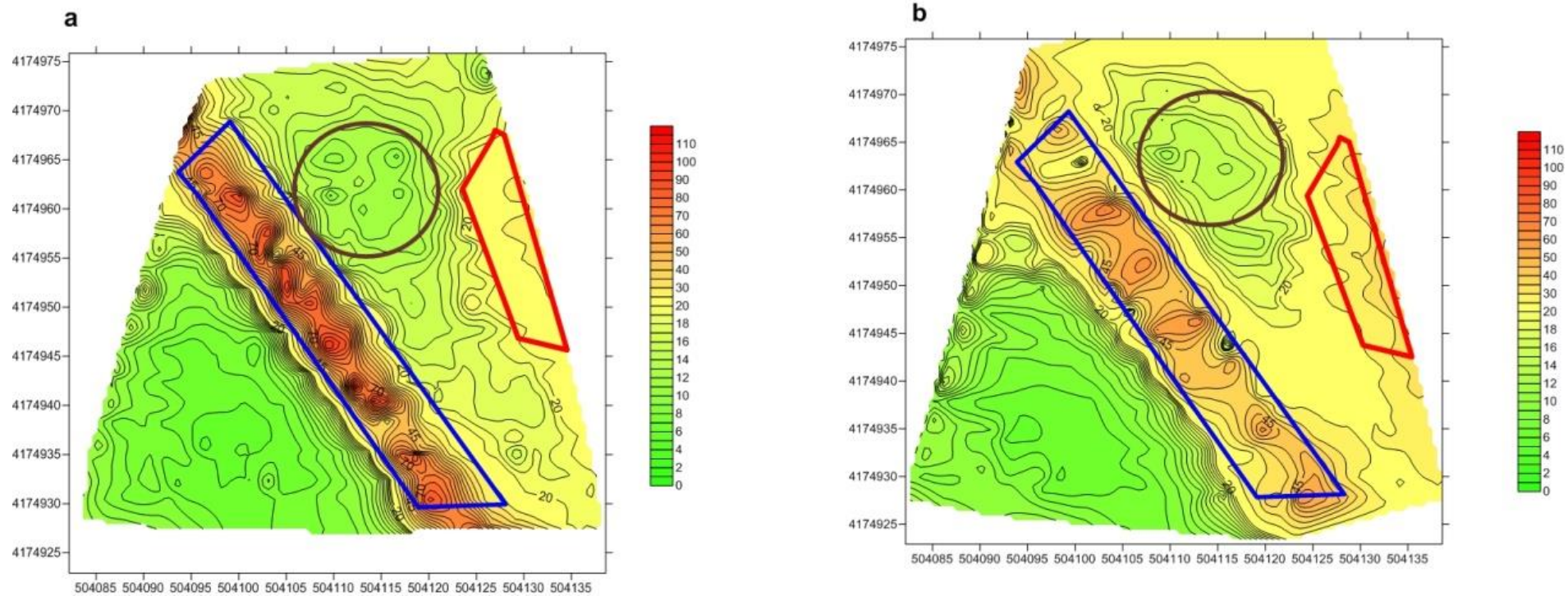


Σχήμα 4.7: Με κόκκινο η περιοχή έρευνας Β

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων:

Στο Σχήμα 4.9α όπου φαίνεται η κατανομή της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

- Στο μπλε πολύγωνο παρουσιάζονται οι πιο υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που οφείλονται στον αγωγό που περνά από εκείνη ακριβώς την περιοχή.
- Στο κόκκινο πολύγωνο παρατηρούμαι μετρήσεις που παραπέμπουν σε άργιλο.
- Στον καφέ κύκλο παρατηρούμαι χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας με μια τάση προς αύξηση που πιθανό να οφείλονται σε αδρομερή υλικά μέσα σε αργιλικά.
- Ενώ στην υπόλοιπη περιοχή επικρατούν πολύ χαμηλές τιμές που πιθανόν οφείλονται σε συνεκτικούς τόφους ή αδρανή υλικά.



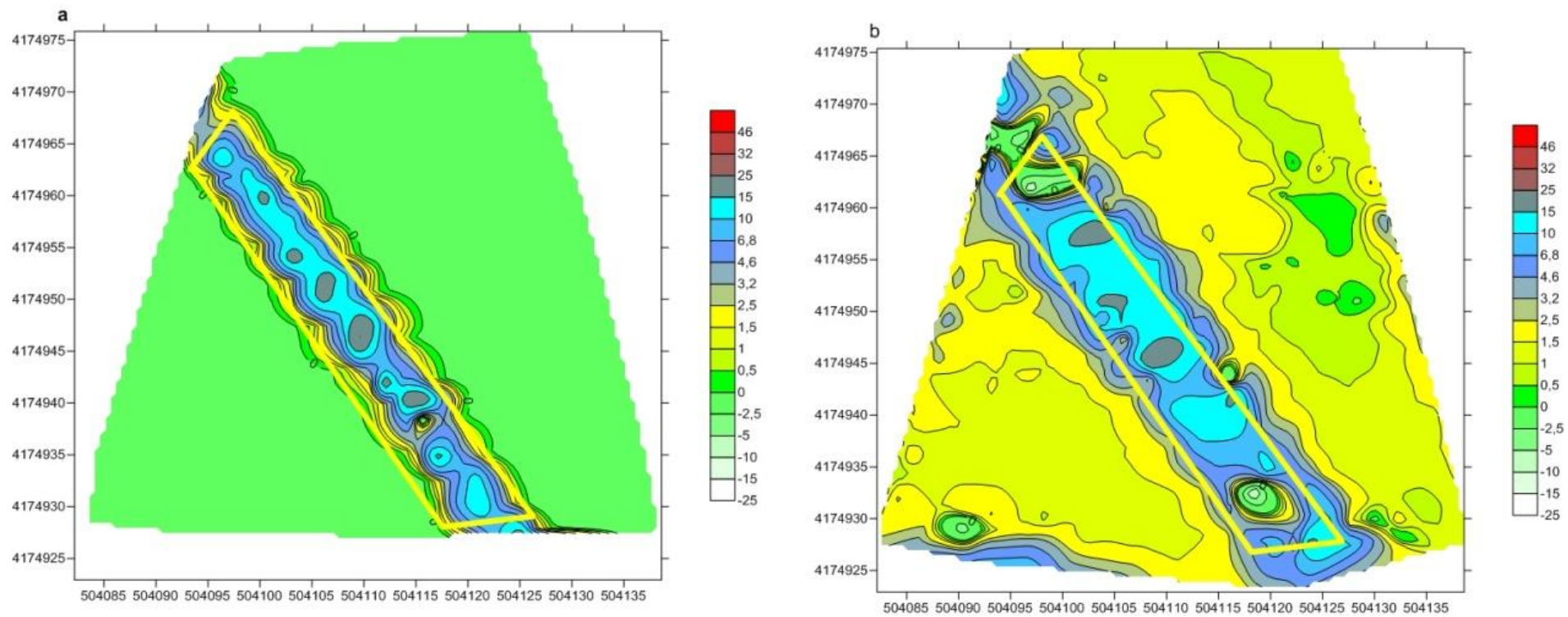
Σχήμα 4.7: Χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. α) σε συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) σε συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4.

Στο **Σχήμα 4.9b** όπου φαίνεται η κατανομή της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

- Στο μπλε πολύγωνο παρατηρείται μια εξασθένηση των υψηλών τιμών που είχαν παρατηρηθεί στο χάρτη των 3m, όμως παραμένουν σε υψηλά επίπεδα.
- Στο κόκκινο πολύγωνο παρατηρούμαι τις ίδιες τιμές όπως και στα 3m οπότε είναι ενιαίο
- Στον καφέ κύκλο παρατηρείται μια μικρή αύξηση των τιμών όμως παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα.

Στο **Σχήμα 4.10** όπου φαίνονται οι χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε βάθος 3 και 6m αντίστοιχα, έχουμε εξάγει τα εξής σχόλια:

- Στο χάρτη των 3m (α) στο κίτρινο πολύγωνο παρατηρούνται σχετικά υψηλές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας γεγονός που δείχνει τον αγωγό που έχει προαναφερθεί λόγο του οπλισμού του.
- Στον χάρτη των 6m (β) όπως και στα 3m παρατηρούνται στην περιοχή όπου βρίσκεται ο αγωγός σχετικά υψηλές τιμές.
- Επίσης στο χάρτη των 6m με καφέ έλλειψη σημειώνεται μια απότομη αύξηση των τιμών , σε σύγκριση με τα 3m, γεγονός που παραπέμπει σε ανθρωπογενή δραστηριότητα



Σχήμα 4.8 :Χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας α) σε συνολικό βάθος 3m με διαμόρφωση CMD-2 και β) σε συνολικό βάθος 6m με διαμόρφωση CMD-4

4.3.3. Ηλεκτρική Μέθοδος

4.3.3.1. Εισαγωγή

Η δεύτερη μέθοδος που έγινε ήταν η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, η οποία δίνει καλύτερα και ποιοτικότερα αποτελέσματα.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 4 γεωηλεκτρικές τομές από μια στις περιοχές Α και Β και 2 σχετικά παράλληλες στην περιοχή Γ (**Σχήμα 4.11α**)

Για τις μετρήσεις μας χρησιμοποιήθηκαν οι εξής διατάξεις ηλεκτροδίων:

- Για τις περιοχές Α και Β οι διατάξεις:
Pole- Dipole
Dipole- Dipole
- Για την περιοχή Γ οι διατάξεις:
Dipole- Dipole
Schlumberger

Η επεξεργασία των μετρήσεων των γεωηλεκτρικών τομών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2Dinv.

4.3.3.2 Εξοπλισμός

Για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε το όργανο μέτρησης SYSCAL-Pro (**Σχήμα 4.11β**).

Πρόκειται για έναν διαβιβαστή ρεύματος, ο οποίος στέλνει ρεύμα στο υπέδαφος μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος και μετράει στη συνέχεια την τάση που αναπτύσσεται στα ηλεκτρόδια δυναμικού. Ο μετρητής SYSCAL-Pro αποτελείται από 10 ταυτόχρονα κανάλια λήψης δεδομένων, είναι 1000 V – 250 W – 2.5 A. Έχει τη δυνατότητα αυτόματου injection ranging και έχει την επιλογή αλλαγής των ηλεκτροδίων. Είναι ένα νέο σύστημα σχεδιασμένο για υψηλή ανάλυση στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης και IP. Περιλαμβάνει αρκετές επιλογές δίνοντας τη δυνατότητα εργασίας σε κάθε είδους συνθήκες και πεδία. Δηλαδή έχει την προοπτική για εξερεύνηση υπογείων νερών, για γεωτεχνικές μελέτες των πολιτικών μηχανικών ή για διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές.



Σχήμα 4.9: α) Αποτύπωση των γεωηλεκτρικών τομών στην περιοχή ερευνάς, β) Το όργανο μέτρησης SYSCAL-Pro, γ) Γεωηλεκτρική τομή στην Περιοχή B.

Ο μετρητής SYSCAL Pro έχει τις εξής δυνατότητες:

- Αυτόματο σύστημα injection ranging: το ρεύμα εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί αυτόματα για τη βελτιστοποίηση των τιμών της τάσης εισόδου και με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζει την καλύτερη ποιότητα μετρήσεων. Το σύστημα προσφέρει την δυνατότητα στον χειριστή να εισχωρεί το ρεύμα με καθορισμένη τάση.
- IP μετρήσεις: τα IP διαγράμματα από τα 10 κανάλια μπορεί ο χειριστής να τα βλέπει επιτόπου χάρη στην LCD οθόνη.
- Marine application: μια συγκεκριμένη λειτουργία επιτρέπει στο σύστημα να χρησιμοποιείται για συνεχόμενη καταγραφή. Αυτό εξυπηρετεί ιδιαίτερα το marine application, όπου σε αυτή την λειτουργία ένα GPS μπορεί απευθείας να συνδέεται με τη μονάδα μέσω μιας σειριακής σύνδεσης για την συνεχόμενη καταγραφή της τοποθεσίας των 10 καναλιών σε όλη την έκταση του προφίλ. Το σύνολο των 10 αντιστάσεων μετριέται και αποθηκεύεται περίπου κάθε 2 δευτερόλεπτα. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχουν ειδικά καλώδια που να ταιριάζουν σε αυτό το περιβάλλον. Ένα ειδικό τηλεχειριστήριο για το λογισμικό του υπολογιστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση των δεδομένων και για την γραφική απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο της ψευδοτομής της ειδικής αντίστασης.
- Remotes of tware: ένα ειδικό λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την λειτουργία της μονάδας από τον υπολογιστή. Αυτή η λειτουργία έχει το πλεονέκτημα ότι αποθηκεύονται τα δεδομένα απευθείας στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή χωρίς να υπάρχει περιορισμός μνήμης (πολύ χρήσιμο για Marine application). Ακόμα προσφέρει την δυνατότητα να προγραμματίζει κάποιες από τις ακολουθίες των μετρήσεων σε χρονικά διαστήματα που είναι εντός των χρονοδιαγραμμάτων (πολύ χρήσιμο για ERT acquisition).
- Switch in capability: εσωτερικά συστήματα εναλλαγής μπορούν να προστεθούν στη βασική μονάδα SYSCAL Pro έτσι ώστε να γίνεται πολύ γρήγορα η απεικόνιση της ειδικής αντίστασης σε διάγραμμα. Σε τέτοια

έκδοση, η μονάδα αποκαλείται SYSCAL Pro Switch-48 – 71 ή 96 (για διαδικασία εναλλαγής της σύνθεσης ηλεκτροδίων από 48 –72 ή 96) και δίνει τη δυνατότητα της ταυτόχρονης συλλογής 10 μετρήσεων και διαμόρφωση της εναλλαγής των ηλεκτροδίων αυτόματα. Ορισμένοι μετρητές ονομάζονται και Switch Pro επειδή έχει επιπλέον δυνατότητα για 3D έρευνες. Σε τέτοια έκδοση τα μέγιστα και τα χαρακτηριστικά εισχώρησης του μετρητή είναι 800 V – 250 W– 2.5 A.

Ο υπόλοιπος εξοπλισμός αποτελείται από:

- **Πολύκλιωνα Καλώδια:** Πρόκειται για πολλαπλά multicore Switch καλώδια που συνδέουν τα ηλεκτρόδια με τον διανομέα ρεύματος (μετρητή SYSCAL Pro). Κάθε πολύκλινο καλώδιο αποτελείται από πολλά μικρότερα. Το καλώδιο έχει ανά συγκεκριμένα διαστήματα επαφές, στις οποίες συνδέονται τα ηλεκτρόδια. Κάθε επαφή είναι αγωγή συνδεδεμένη με έναν από τους εσωτερικούς κλώνους του καλωδίου. Στα άκρα του πολύκλινου καλωδίου υπάρχει ένα βύσμα στο οποίο καταλήγουν όλα τα επιμέρους καλώδια. Το βύσμα αυτό συνδέεται στην ειδική υποδοχή του οργάνου SYSCAL Pro όπως επίσης υπάρχει η επιλογή σύνδεσης πολλών καλωδίων μεταξύ τους με τον κατάλληλο βύσμα
- **Ηλεκτρόδια:** Τα ηλεκτρόδια είναι στην ουσία κυλινδρικές μεταλλικές ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα, μήκους περίπου 60 cm. Οι ράβδοι αυτές πακτώνονται (καρφώνονται) στο έδαφος και συνδέονται στα πολύκλιωνα καλώδια με ειδικούς συνδετήρες. Στο κάτω άκρο τους έχουν μυτερό σχήμα για να εισχωρούν με ευκολία στο έδαφος, ενώ στην κορυφή τους υπάρχει μικρή οπή κάθετα στον μεγάλο τους άξονα, η οποία βοηθάει στον εύκολο απεγκλωβισμό τους. Σκοπός των ηλεκτροδίων είναι να εξασφαλίσουν την αγωγή σύνδεση του γεωφυσικού εξοπλισμού με το έδαφος. Για τον λόγο αυτό έχει μεγάλη σημασία ο τρόπος στερεοποίησης των ηλεκτροδίων.
- **Συσσωρευτής:** Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα διέθεταν το καθένα δική του πηγή ρεύματος (μπαταρία). Όσον αφορά τον μετρητή SYSCAL Pro παρόλο που έχει δική του εσωτερική μπαταρία χρησιμοποιήθηκε και εξωτερική για λόγους ασφαλείας. Το

συγκεκριμένο όργανο είναι αυτό που διοχετεύει ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος και επιπλέον αναλαμβάνει τη διαδικασία μέτρησης της διαφοράς δυναμικού, αλλά και την επεξεργασία των μετρήσεων. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη χρησιμοποιήθηκε ως πηγή τροφοδοσίας του SYSCAL Pro ένας απλός εξωτερικός συσσωρευτής 12V.

4.3.3.3. Επεξεργασία Μετρήσεων

Για την επεξεργασία των μετρήσεων των γεωηλεκτρικών τομών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2Dinv. Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας. Τα βήματα επεξεργασίας είναι τα παρακάτω:

- Επιλέξαμε την ρύθμιση «use model refinement» διότι το πρόγραμμα μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μετρήσεις περισσότερες από αυτές που του εισάγονται. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να δημιουργηθούν μετρήσεις με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων.
- Επιλέξαμε τη ρύθμιση «Inversion methods», και ελέχθησαν 3 εναλλακτικές διαδικασίες ερμηνείας:

Standard–Standard :

Με αυτή την επιλογή έχουμε ερμηνεία μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται ελεύθερα.

Robust – Robust :

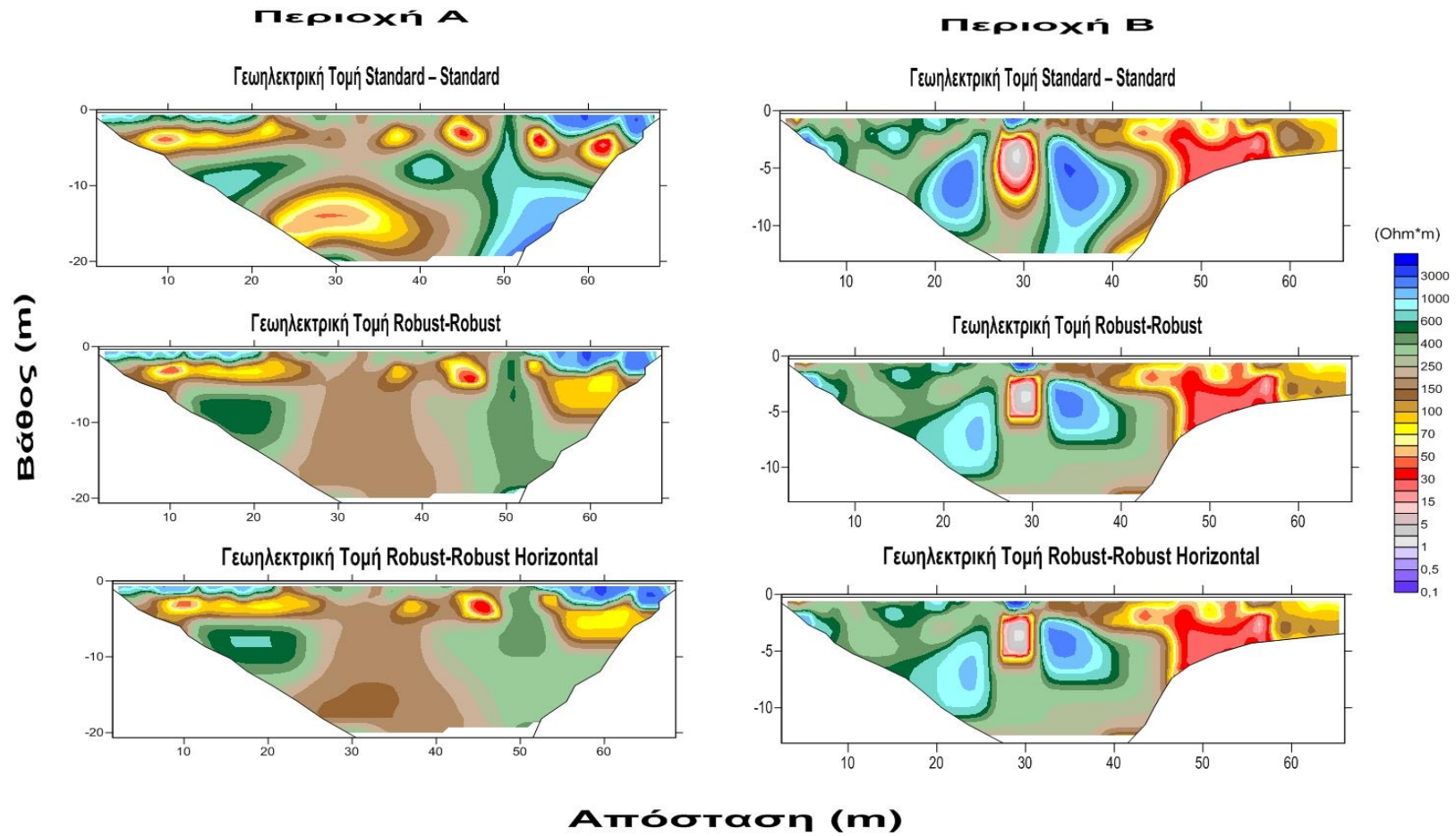
Με αυτή την επιλογή έχουμε ερμηνεία μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και στην παρουσία «θορύβου» στις μετρήσεις.

Robust – RobustHorizontal:

Με αυτή την επιλογή, ακολουθώντας τις εντολές Change settings → Inversion damping → Vertical/ Horizontal αλλάξαμε προκαθορισμένη τιμή 1 σε 0,5 έτσι ώστε να «ωθήσουμε» το πρόγραμμα να θεωρεί ότι τα στρώματα είναι σχετικά οριζόντια και να δίνεται έμφαση στην κάθετη μεταβολή της ειδικής αντίστασης (όταν ενδιαφερόμαστε για στρωματογραφία παρά για τον εντοπισμό πεπερασμένων δομών).

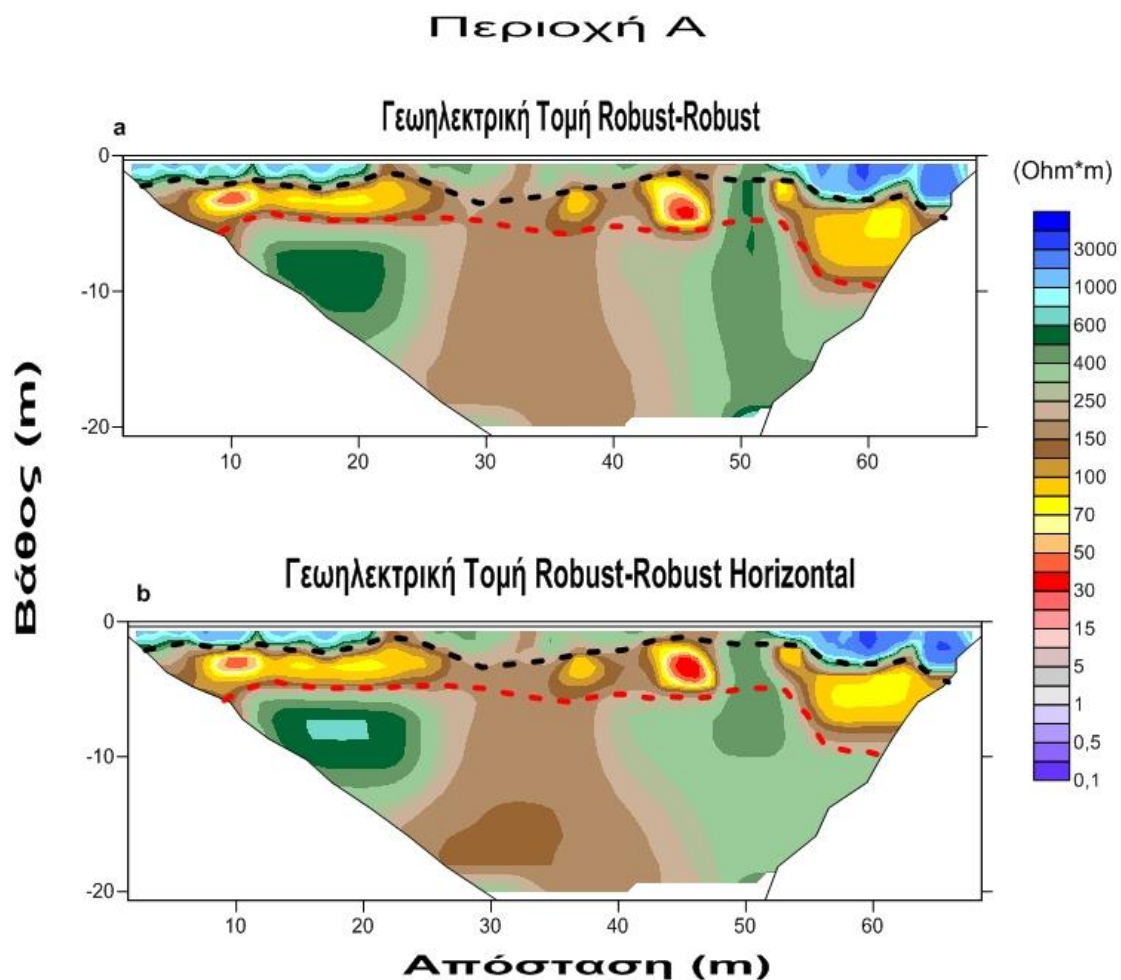
4.3.4.Αποτελέσματα Ηλεκτρικής Μεθόδου στην περιοχή A και B

Γεωηλεκτρικές τομές στις περιοχές A και B



Συγκρίνοντας τα πιο πάνω αποτελέσματα παρατηρήσαμε ότι πιο κοντά στο γεωλογικό μοντέλο της περιοχής είναι οι γεωηλεκτρικές τομές Robust- Robust και Robust- RobustHorizontal, οπότε θα αναλυθούν εκτενέστερα στην συνέχεια.

4.3.4.1.Γεωηλεκτρική Τομή Α στην Περιοχή Α



Σχήμα 4.10: Γεωηλεκτρική τομή Α με διεύθυνση δύση προς ανατολή. Στην εικόνα a είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust- Robust σε διάταξη ηλεκτροδίων Pole-Dipole και η εικόνα (b) η γεωηλεκτρική τομή Robust- RobustHorizontal επίσης σε διάταξη ηλεκτροδίων Pole-Dipole.

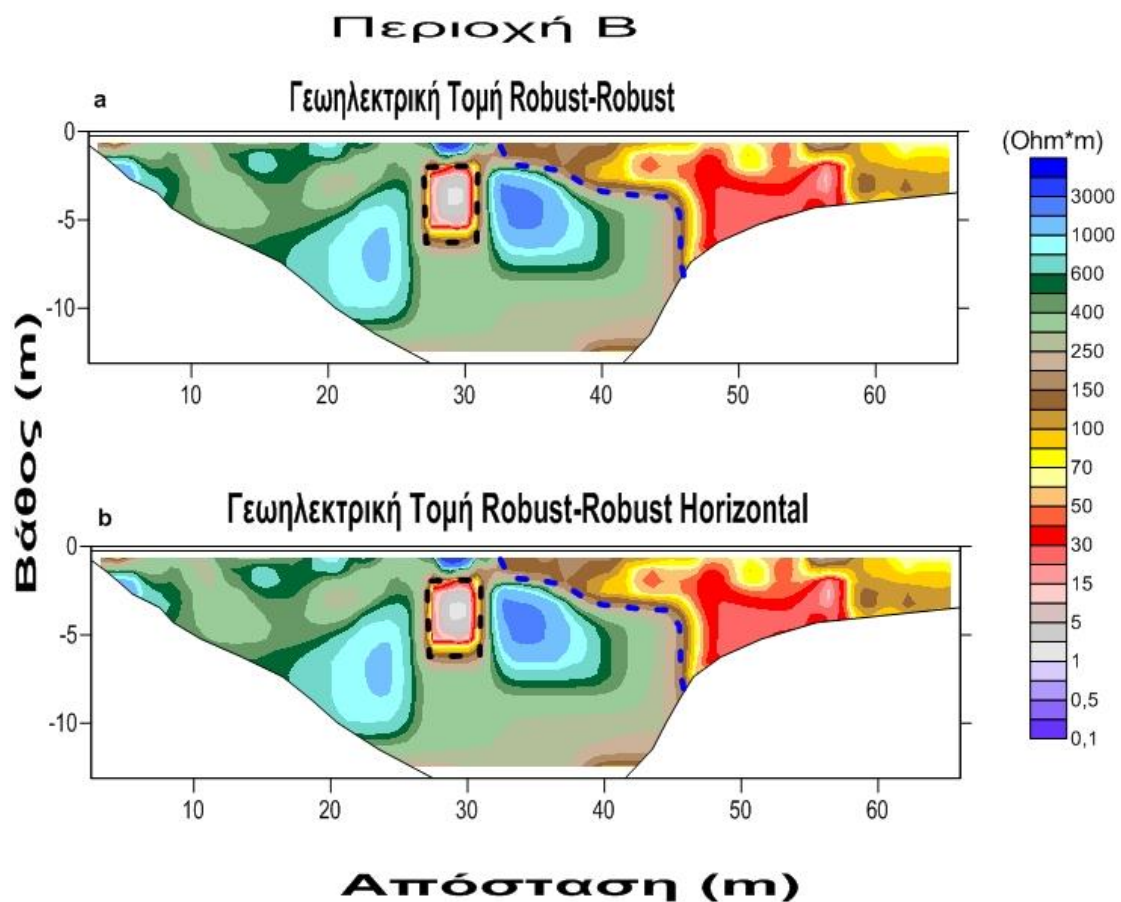
Στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζετε η γεωηλεκτρική τομή Robust- Robust και η γεωηλεκτρική τομή Robust- RobustHorizontal σε διάταξη Pole-Dipole

Σχόλια:

- I. Με μαύρη διακεκομμένη γραμμή ορίσαμε το πρώτο στρώμα σε βάθος περίπου 2-3m, όπου παρατηρούμε υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης και πιθανόν αποτελείται από αδρομερή υλικά.

- II. Με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή σε βάθος περίπου 5-8m και οροφή την μαύρη διακεκομμένη γραμμή είναι το δεύτερο στρώμα που παρατηρούμε. Αποτελείται κυρίως από μεσαίες τιμές ειδικής αντίστασης και πιθανόν να αποτελείται από φυλιτικά πετρώματα και κατά τόπους αποθέσεις σκουριών στα σημεία όπου χρωματίζονται με κόκκινο.
- III. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αποτελεί την οροφή του τελευταίου στρώματος που παρατηρούμε τιμές ειδικής αντίστασης που παραπέμπουν σε ασβεστολιθικά πετρώματα και πιθανόν να είναι ανώτερο μάρμαρο.

4.3.4.2. Γεωηλεκτρική Τομή Β στην Περιοχή Β



Σχήμα 4.11: Γεωηλεκτρική τομή Β με διεύθυνση δύση προς ανατολή. Στην εικόνα (α) είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust- Robust σε διάταξη ηλεκτροδίων Pole-Dipole και η εικόνα (β) η γεωηλεκτρική τομή Robust- Robust Horizontal επίσης σε διάταξη ηλεκτροδίων Pole-Dipole.

Στο **Σχήμα 4.13** παρουσιάζετε η γεωηλεκτρική τομή Robust- Robust και η γεωηλεκτρική τομή Robust- RobustHorizontal σε διάταξη Pole-Dipole.

Σχόλια:

- I.** Με μαύρη διακεκομμένη γραμμή ορίσαμε τον γνωστό αγωγό που περνά από την περιοχή, όμως αυτό μπορούμε να το διακρίνουμε και από τις απότομες εναλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης πράγμα που στην φύση δεν το συναντάμε και οφείλονται κυρίως σε ανθρωπογενή αίτια.
- II.** Από την μπλε γραμμή και δεξιά παρατηρούμε μια περιοχή που παρουσιάζει κυρίως μεσαίες τιμές ειδικής αντίστασης και πιθανόν να αποτελείται από φυλικά πετρώματα και κατά τόπους αποθέσεις σκουριών ή μπαζών στα σημεία όπου χρωματίζονται με κόκκινο.
- III.** Στον περιοχές γύρω από την μαύρη διακεκομμένη γραμμή όπου παρατηρούνται έντονες αυξήσεις στις τιμές της ειδικής αντίστασης οφείλονται ακριβώς στην παρουσία του αγωγού που προαναφέρθηκε. Αξίζει να σημειωθεί πως αν δεν υπήρχε ο αγωγός μάλλον θα είχαμε μέσες τιμές και η περιοχή αυτή θα ήταν στις αποχρώσεις του πράσινου.
- IV.** Ενώ στην υπολειπόμενη γεωηλεκτρική τομή παρατηρούμε τιμές ειδικής αντίστασης που παραπέμπουν σε ασβεστολιθικά πετρώματα και πιθανόν να είναι ανώτερο μάρμαρο.

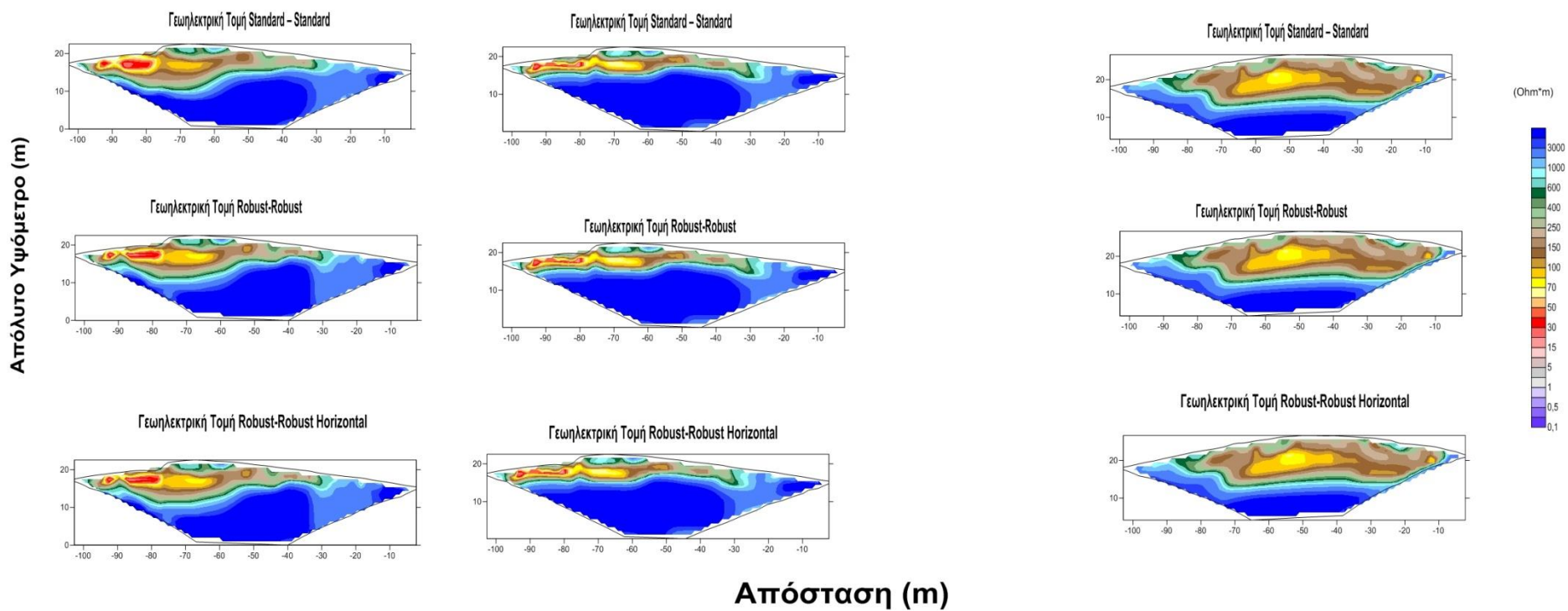
4.3.5.Αποτελέσματα Ηλεκτρικής Μεθόδου στην Περιοχή Γ

Γεωηλεκτρικές τομές Γ.1 και Γ.2

Περιοχή Γ

Γ.1

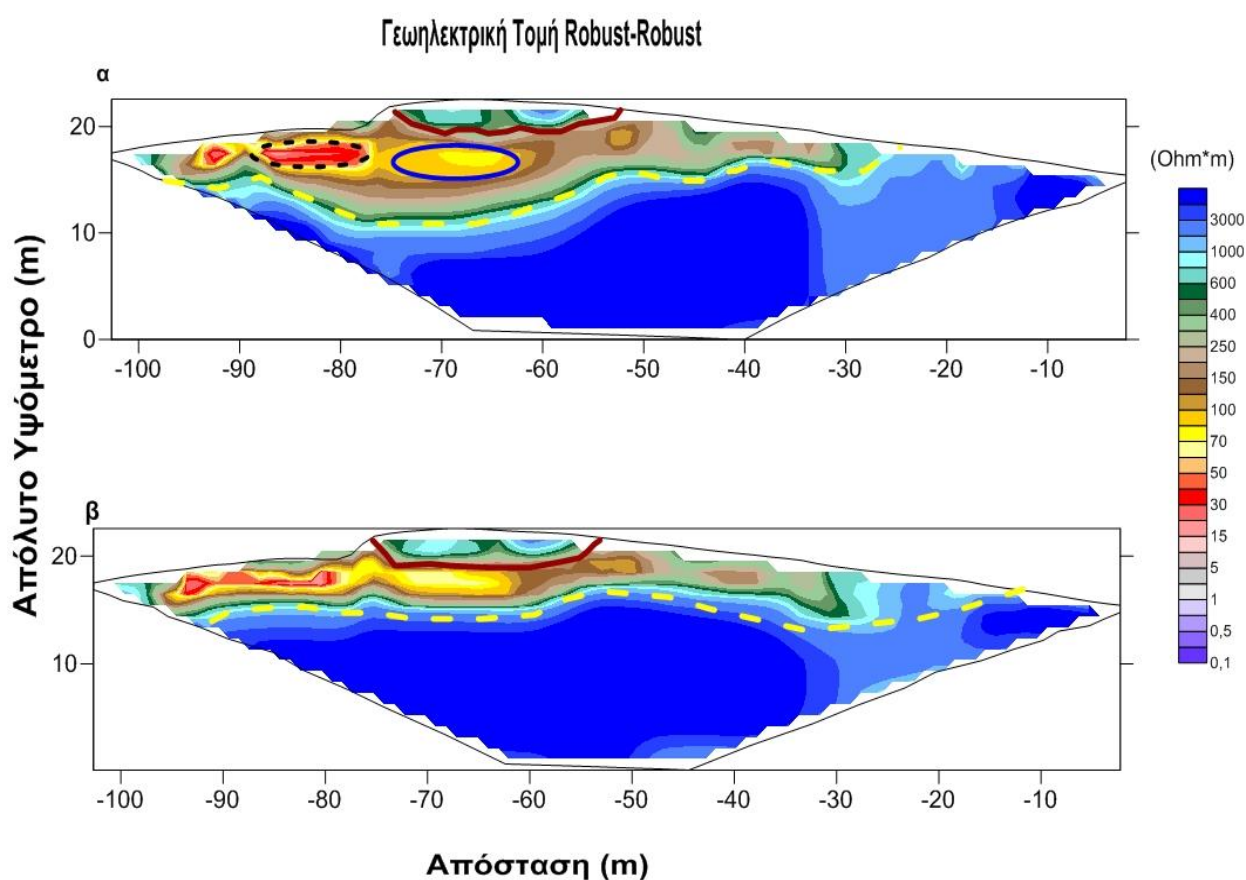
Γ.2



Συγκρίνοντας τα πιο πάνω αποτελέσματα παρατηρήσαμε ότι καλύτερα και πιο ποιοτικά αποτελέσματα μας δίνουν οι γεωηλεκτρικές τομές Robust- Robust και θα αναλυθούν εκτενέστερα στην συνέχεια.

4.3.5.1.Γεωηλεκτρική Τομή Γ.1 στην Περιοχή Γ

Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται οι γεωηλεκτρικές τομές Robust-Robust της γεωηλεκτρικής τομής Γ.1.



Σχήμα 4.12:α)Γεωηλεκτρική τομή Robust-Robust με διάταξη ηλεκτροδίων Dipole-Dipole και β) Γεωηλεκτρική τομή Robust-Robust με διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger

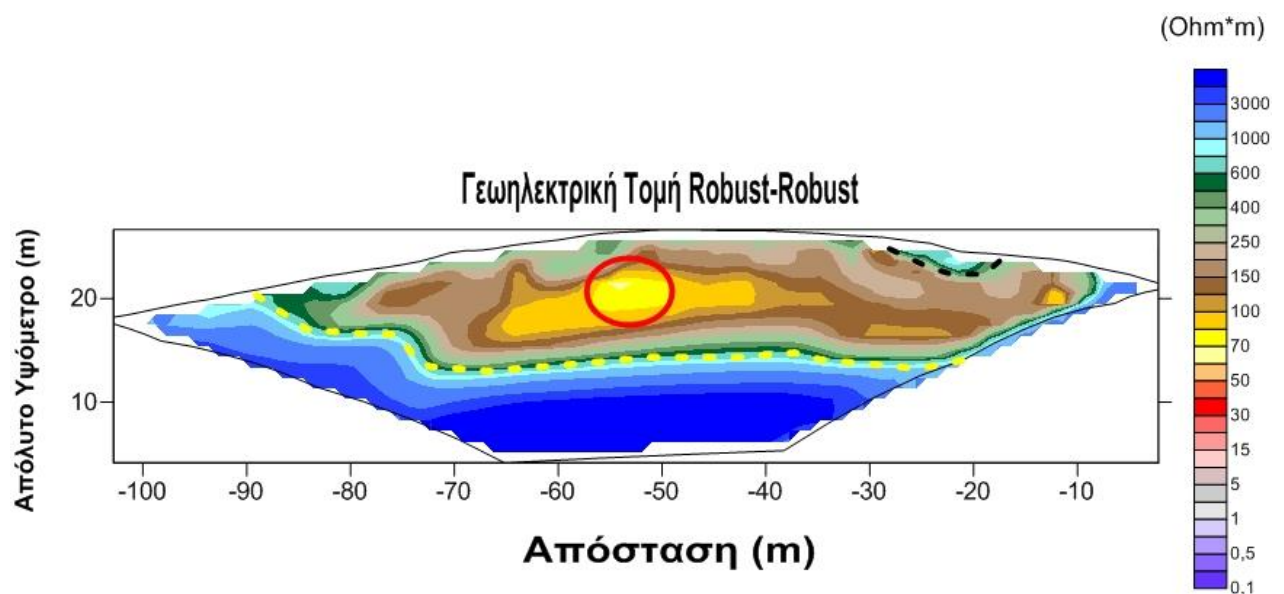
Σχόλια:

- I. Παρατηρούμε με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή σε ύψος περίπου 15m το ανάγλυφο της οροφής του βραχώδους υπόβαθρου της περιοχής.Είναι ένα στρώμα με υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης που μας παραπέμπει σε ασβεστολιθικά πετρώματα

- II. Με μαύρο διακεκομμένο κύκλο παρατηρούμε μια απότομη μεταβολή στις τιμές της ειδικής αντίστασης το οποίο δεν συμβαίνει στην φύση και οφείλεται κυρίως σε ανθρωπογενή δραστηριότητα. Συγκρίνοντας όμως το σημείο που σημειώθηκε η απότομη μεταβολή στις τιμές με την γενική εικόνα της περιοχής (**Σχήμα 4.10**) παρατηρούμε ότι στο σημείο υπάρχει ένα κτίσμα οπότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι από εκεί προέρχονται και οι απότομες μεταβολές στο σημείο αυτό.
- III. Με μπλε κύκλο παρατηρούμε μια απότομη μεταβολή στις τιμές της ειδικής αντίστασης το οποίο δεν συμβαίνει στην φύση, οπότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι σε εκείνο το σημείο βρίσκεται η στοά. Γύρω από το συγκεκριμένο σημείο παρατηρούνται μέσες τιμές ειδικής αντίστασης και πιθανόν να αποτελείται από φυλικά πετρώματα.
- IV. Τέλος με κόκκινο σκούρο σημειώνεται το ανώτερο στρώμα σε ύψος περίπου 20m, όπου παρατηρούνται υψηλές τιμές και πιθανόν να αποτελείται από αδρομερή υλικά ή ασβεστόλιθους του φυλικού καλύμματος.

4.3.5.2.Γεωηλεκτρική Τομή Γ.2 στην Περιοχή Γ

Στο **Σχήμα 4.15** παρουσιάζονται οι γεωηλεκτρική τομή Robust-Robust της γεωηλεκτρικής τομής Γ.2 με διάταξη ηλεκτροδίων Dipole-Dipole.



Σχήμα 4.13: Γεωηλεκτρική τομή Robust-Robust με διάταξη ηλεκτροδίων Dipole-Dipole.

Σχόλια:

- I. Παρατηρούμε με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή σε ύψος περίπου 20-15m το ανάγλυφο της οροφής του υπόβαθρου της περιοχής. Είναι ένα στρώμα με υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης που μας παραπέμπει σε ασβεστολιθικά πετρώματα
- II. Με κόκκινο κύκλο παρατηρούμε μιαν απότομη μεταβολή στις τιμές της ειδικής αντίστασης το οποίο δεν συμβαίνει στην φύση, οπότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι σε εκείνο το σημείο βρίσκεται η στοά.
- III. Με μαύρη διακεκομμένη γραμμή παρατηρούμε ένα στρώμα με υψηλές τιμές και υποθέτουμε ότι αποτελείται από αδρομερή υλικά ή ασβεστόλιθους του φυλιτικού καλύμματος.

Κεφάλαιο 5 :Συμπεράσματα - Σχολιασμός

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας όπως αναφέρθηκε ήταν διττός, δηλαδή είχαμε δυο διαφορετικούς στόχους σε τρεις περιοχές. Στις πρώτες δύο περιοχές ο στόχος μας ήταν η εύρεση κατάλληλης θέσης για τη δημιουργία φυσικού υπόγειου ταμιευτήρα νερού , οπότε εμείς προσπαθήσαμε να προσδιορίσουμε τα ρυπασμένα εδάφη και ταυτόχρονα στρωματογραφία για να μπορέσουμε να υποδείξουμε το καταλληλότερο σημείο όπου θα μπορούσε να υποστηρίξει αυτό το έργο. Στην τρίτη και τελευταία περιοχή ο στόχος ήταν η εύρεση μιας παλαιάς μεταλλευτικής στοάς.

5.1 Συμπεράσματα.

Από την εφαρμογή των δυο γεωφυσικών μεθόδων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, προκύπτουν μια σειρά από συμπεράσματα κατά περιοχή.

5.2.1 Περιοχή Α

Στην περιοχή Α χρησιμοποιήθηκαν και οι δυο μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης. Από τα αποτελέσματα το οποίων εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Από τους χάρτες κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας (**Σχήμα 4.6**) σε βάθος 3-6m σχεδόν όλη η περιοχή καλύπτεται από συνεκτικούς τόφους ή αδρανή υλικά. Ακόμη από τους χάρτες κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας (**Σχήμα 4.7**) σε βάθος 6m υπάρχουν αποθέσεις σκουριών που έγιναν κατά το παρελθόν.
- Από την γεωηλεκτρική τομογραφία Α (**Σχήμα 4.11**) παρατηρήθηκε ότι σε βάθος 2-3m οι τιμές ειδικής αντίστασης παραπέμπουν σε αδρομερή υλικά, σε βάθος 4-8m παρατηρήθηκαν τιμές που παραπέμπουν σε αποθέσεις σκουριών και κάτω των 8m οι τιμές παραπέμπουν σε ασβεστολιθικά πετρώματα.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων είναι εμφανής η ταύτιση τους και βάση αυτών οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το υπέδαφος της Α περιοχής μέχρι το βάθος των 8m δεν παρουσιάζει κάποιο σημείο που να μπορεί να υποστηρίξει τον σκοπό για τον οποίο έγινε η ερεύνα.

5.2.2. Περιοχή Β

Στην περιοχή Β χρησιμοποιήθηκαν και οι δυο μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης. Από τα αποτελέσματα το οποίων εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Από τους χάρτες κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας (**Σχήμα 4.8**) παρατηρούνται τιμές που δείχνουν τον αγωγό που περνά μέσα από την περιοχή έρευνας. Παρατηρήθηκε μια περιοχή όπου φαίνεται να υπάρχει ενιαίο στρώμα αργίλου μέχρι και τα 6m, ενώ παραπλήσια αυτής της περιοχής παρατηρήθηκαν τιμές που παραπέμπουν σε αδρομερή υλικά στα 3m οι οποίες αυξάνονται σταδιακά μέχρι τα 6m. Επίσης παρατηρήθηκε μια μεγάλη περιοχή της οποίας οι τιμές παραπέμπουν σε συνεκτικούς τόφους ή αδρανή υλικά.
- Από τον χάρτη κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας (**Σχήμα 4.9**) παρατηρήθηκαν τιμές που δείχνουν την παρουσία του αγωγού λόγω του σπλισμού που φέρει. Ενώ παρατηρήθηκε και μια περιοχή όπου παρουσιάζει απότομη αύξηση στις τιμές οπότε συμπεραίνουμε ότι οφείλεται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα.
- Από την γεωηλεκτρική τομογραφία Β (**Σχήμα 4.12**) παρατηρήθηκε επίσης οι τιμές εκείνες που δείχνουν την παρουσία του αγωγού. Επίσης παρατηρήθηκαν τιμές που παραπέμπουν σε φυλικά πετρώματα με κατά τόπους αποθέσεις σκουριών. Ενώ παρατηρήθηκαν και τιμές που παραπέμπουν σε ασβεστολιθικά πετρώματα με πολύ πιθανό να είναι το ανώτερο μάρμαρο που αναφέρεται και στην γεωλογία της περιοχής.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων είναι εμφανής η σημαντική ταύτιση τους και βάση αυτών οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι στο σημείο όπου εντοπίζεται το ενιαίο στρώμα αργίλου μέχρι και τα 6m ίσως να μπορούσε γεωλογικά να υποστηρίξει φυσικό ταμειυτήρα νερού το υπέδαφος της περιοχής έρευνας Β.

5.2.3. Περιοχή Γ

Στην περιοχή Γ χρησιμοποιήθηκε μόνο η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας, από τα αποτελέσματα της οποίας εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Σε απόλυτο ύψος 15m παρατηρήθηκε το ανάγλυφο του βραχώδους υπόβαθρου της περιοχής.

- Παρατηρήθηκε μια απότομη μεταβολή η οποία ταυτίστηκε με ένα επιφανειακό κτίσμα.
- Επίσης παρατηρήθηκε ένα στρώμα τιμών που παραπέμπουν σε φυλίτη και μέσα σε αυτό το στρώμα μια απότομη μεταβολή στις τιμές ειδικής αντίστασης, αυτό δεν συμβαίνει στην φύση.
- Σε απόλυτο ύψος περίπου 20m δηλαδή στο ανώτερο στρώμα παρατηρήθηκαν τιμές που παραπέμπουν σε αδρομερή υλικά ή ασβεστόλιθους του φυλιτικού καλύμματος.
- Και στις δυο γεωηλεκτρικές τομές που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή έρευνας τα αποτελέσματα ταυτίζονται, με την μονή διαφορά στη απότομη μεταβολή των τιμών η οποία αποδόθηκε στο επιφανειακό κτίσμα που υπάρχει στο συγκεκριμένο σημείο.

Από τα πιο πάνω και συγκρίνοντας την υψομετρική διαφορά που παρουσιάζουν οι τιμές ειδικής αντίστασης στις δυο γεωηλεκτρικές τομές η οροφή της στοάς βρίσκεται περίπου στα 19m σε απόλυτο ύψος και έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, αφού στην γεωηλεκτρική τομή Γ.1 (**Σχήμα 4.13**) εντοπίζεται σε απόσταση 60-70m ενώ στη γεωηλεκτρική τομή Γ.2 (**Σχήμα 4.14**) εντοπίζεται σε απόσταση 50-60m.

5.2.Σχόλια.

Από την εφαρμογή των δύο γεωφυσικών μεθόδων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους προκύπτουν μια σειρά από σχόλια, τα οποία παρατίθενται παρακάτω:

- ❖ Οι εφαρμογές (cases studies), οι οποίες αναζητήθηκαν στην παγκόσμια βιβλιογραφία βοήθησαν σημαντικά στην έρευνά μας. Οι εφαρμογές που μελετήθηκαν είχαν παρόμοια προβλήματα με την γεωφυσική έρευνα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.
- ❖ Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης γεωφυσικής έρευνας πιστεύεται ότι είναι ορθός και προτείνεται σε περιπτώσεις, οι οποίες έχουν κοινά σημεία και προβλήματα με τη συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα. Επιπροσθέτως, τονίζεται η σημαντικότητα εφαρμογής και των δυο γεωφυσικών μεθόδων. Γιατί, η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος δίνει εύκολα και οικονομικά μία γενική αλλά ουσιαστική εικόνα για τη μεταβολή της αγωγιμότητας στη περιοχή έρευνας σε

διάφορα βάθη. Ενώ η ηλεκτρική μέθοδος όπως προαναφέρθηκε, είναι μία δύσκολη και επίπονη μέθοδος κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων. Αυτό έχει και ως αποτέλεσμα η συγκεκριμένη μέθοδος να είναι από πλευράς κόστους πιο ακριβή, αλλά τα αποτελέσματα των μετρήσεων να έχουν μικρό σφάλμα, να είναι μεγάλης ακριβείας και με μεγάλο βάθος συνολικής διασκόπησης.

- ❖ Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος με την δυνατότητα μετακίνησης του οργάνου με το ειδικό αμαξίδιο και το αυτοκίνητο μας δίνει την δυνατότητα γρήγορης κάλυψης μεγάλης έκτασης (όλου του χώρου του ΤΠΠΑ) με σκοπό την αποτύπωση μέσω της φαινόμενης αγωγιμότητας σε δύο συνολικά βάθη (3μ και 6μ) να εντοπίσουμε περιοχές που χαλαρά ιζήματα, βραχώδες υπόβαθρο ή ανθρωπογενής αποθέσεις ή κατασκευές υπάρχουν.
- ❖ Στις εντοπισμένες περιοχές Α και Β χρησιμοποιήθηκαν και οι δυο γεωφυσικές μέθοδοι γιατί χρειαζόμασταν μια γενική χωρική εικόνα του υπεδάφους και αυτό έχει επιτευχθεί με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και διασταυρώσαμε τα αποτελέσματα με μια πιο ποιοτική μέθοδο την ηλεκτρική για να δούμε δισδιάστατα σε τομή και σε βάθος τη στρωματογραφία των περιοχών. Στη περιοχή Γ το βάθος του στόχου μας ήταν άγνωστο και πολύ πιθανόν μεγαλύτερο από τα 6m, οπότε χρησιμοποιήθηκε μόνο η ηλεκτρική μέθοδος η όποια και με βάση τις εφαρμογές (cases studies) που μελετήθηκαν ήταν η καταλληλότερη μέθοδος για την εύρεση μεταλλευτικής στοάς.
- ❖ Κάθε μια από τις γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την έρευνα, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην προσπάθεια εντοπισμού ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο υπέδαφος (όπως είναι η στοά) και διαφοροποιήσεις μεταξύ των εδαφών.
- ❖ Οι διατάξεις των οργάνων των μεθόδων ήταν η βέλτιστη. Για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο οι διαμορφώσεις του CMD-2, με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m, και CMD-4 με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m. Τέλος για την ηλεκτρική μέθοδο η διάταξη των ηλεκτροδίων ήταν οι ενδεδειγμένες για τις αντίστοιχες έρευνες.
- ❖ Στην μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας παρατηρήσαμε ότι στις περιοχές έρευνας Α και Β καλύτερα αποτελέσματα πάρθηκαν με τη διάταξη ηλεκτροδίων Pole-Dipole, ενώ στην περιοχή έρευνας Γ πάρθηκαν με τη διάταξη ηλεκτροδίων Dipole-Dipole.

- ❖ Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων κάθε μεθόδου πιστεύεται ότι ήταν η καλύτερη δυνατή. Η επεξεργασία έγινε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με δυο διαφορετικά προγράμματα στον υπολογιστή, το Surfer της Golden Software και το RES2DINV της Geotomo Software για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και την ηλεκτρική μέθοδο αντίστοιχα.
- ❖ Τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στις περιοχές έρευνας Α και Β είναι σε σημαντική συμφωνία μεταξύ τους όσο αφορά την στρωματογραφία των περιοχών.

Κεφάλαιο 6 :Βιβλιογραφία

- Dalan, R.A., 2006. Magnetic Susceptibility. In *Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective*, edited by J. K. Johnson, pp. 161-203. University of Alabama Press, Tuscaloosa.
- Drahor, 2011. Mapping aquifer geometry using electrical resistivity tomography: a case study from Şanlıurfa, south-eastern Turkey. *Near Surface Geophysics*, pp.55–66.
- Ermenwein E. G., . Hargrave M. L., 2009. *Archaeological Geophysics for DoD Field Use: a Guide for New and Novice Users*. Project 200611: Streamlined Archaeo-geophysical Data Processing and Integration for DoD Field Use.
- Loke, D.M., 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *Cangkat Minden Lorong*, 6574525, p.63.
- Loke, M.H., 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. , p.59. Available at: <http://www.georentals.co.uk/Lokenote.pdf>.
- Martínez-López, J. et al., 2013. Electrical tomography applied to the detection of subsurface cavities. *Journal of Cave and Karst Studies*, 75(1), pp.28–37.
- Witten, A.J., 2006. *Handbook of Geophysics and Archaeology*. Equinox Publishing, London.
- Αποστολόπουλος, 2013. Σημειώσεις εφαρμοσμένης γεωφυσικής.
- Βερβερέλης Ε., 2011. Εφαρμογή της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας στον Αστικό Ιστό, για τον Εντοπισμό Στρωματογραφίας και Πεπερασμένων Δομών.
- Ευστρατια, Π., 2013. Γεωφυσική Διασκόπηση για τον Χαρακτηρισμό των Γεωλογικών Σχηματισμών σε Οικόπεδο στην Περιοχή των Μεγάρων Αττικής.
- Ζαβερδίνος Α.Μ., 2011. Εξέταση των Δυνατοτήτων επέκτασης του υπόγειου χώρου διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων στο χώρο του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου.
- Ιωάννης Φ.Λούης, 2004. *Εισαγωγικά Μαθήματα στη Διερευνητική Γεωφυσική*.
- Μαυρομάτης, Δ., 2007. Συνδυασμός Στρωματογραφικών Δεδομένων και Γεωηλεκτρικών Τομογραφιών για τον εντοπισμό του Προολοκαινικού Υποβάθρου στην περιοχή Πειραιά – Νέου Φαλήρου, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ορφανός Χρήστος, 2011. Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση Υπεδάφους για τον Εντοπισμό Υπόγειων Ανοιγμάτων.

Τζάνη, Α., 2003. Εισαγωγή στις Ηλεκτρομαγνητικές Μεθόδους Γεωφυσικής Διασκόπησης.

Φωκίων Λοΐζος, 2014. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΝΑΟ ΤΟΥ ΠΟΣΕΙΔΩΝΑ ΣΤΟ ΣΟΥΝΙΟ.