



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων
για τον εντοπισμό στρωματογραφίας
και πεπερασμένων δομών
σε περιοχή της Νήσου Μήλου**

Κατσαρογιάννης Σταύρος

Επιβλέπων: Επικ. Καθηγητής Γ.Αποστολόπουλος



Αθήνα 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του δέκατου εξαμήνου στη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν, με οποιονδήποτε τρόπο, στην αποτύπωση αυτής μου της προσπάθειας και την συνεπαγόμενη ολοκλήρωση αυτού του κύκλου σπουδών.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον υπεύθυνο της διπλωματικής μου εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών κ.Αποστολόπουλο Γεώργιο, για την εμπιστοσύνη του να μου αναθέσει το συγκεκριμένο θέμα, όπως και τον Γεωφυσικό κ.Αμολοχίτη Γεώργιο, μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Μεταλλευτικής. Τους ευχαριστώ για την ουσιαστική βοήθεια τους και την άρτια επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης των ερευνών στο ύπαιθρο αλλά και κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Τον πτυχιούχο Μηχανικό Μεταλλείων-Μεταλλουργών Καραλή Πέτρο για τις πολύτιμες συμβουλές του όσον αφορά τη δομή της εργασίας μου.

Την Καθηγήτρια Σοφία Σταματάκη και την Λέκτορα Μαρία Μενεγάκη του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Επίσης τον Καθηγητή Δημήτρη Καλιαμπάκο, επιστημονικό υπεύθυνο του ερευνητικού έργου «Προστασία και ανάδειξη αρχαιολογικών ευρημάτων με παράλληλη συνέχιση της μεταλλευτικής δραστηριότητας στη Νήσο Μήλο», μέρος του οποίου αποτελούν οι γεωφυσικές έρευνες, και βεβαίως την εταιρεία S&B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε. για την χρηματοδότηση της ερευνητικής αυτής δραστηριότητας.

Τους γονείς μου και τον αδερφό μου, για την ανεκτίμητη στήριξη τους στις προσπάθειες μου να επιτύχω τους στόχους μου όλα αυτά τα χρόνια..

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική αναφέρεται στον εντοπισμό στρωματογραφίας και πεπερασμένων δομών στην Περιοχή Κουφή της Νήσου Μήλου μέσω γεωφυσικών μεθόδων. Οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη ήταν, η μέθοδος της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (γεωηλεκτρική τομογραφία) και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Στα δύο πρώτα κεφάλαια της εργασίας αναφέρεται μία σύντομη ιστορία της αρχαιολογικής γεωφυσικής και οι θεμελιώδεις έννοιες της αρχαιολογικής γεωφυσικής. Αναπτύσσονται οι βασικές έννοιες κάθε μεθόδου, γίνεται αναφορά στα όργανα και τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων αλλά και τις μεθόδους ερμηνείας αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παραθέτονται έρευνες που έχουν γίνει με χρήση του οργάνου EM-31 για την λήψη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων προς ανεύρεση αρχαιοτήτων. Στο Μπαχρέιν στον Αραβικό κόλπο εντοπίστηκαν πέτρινοι τάφοι της Χάλκινης Περιόδου, που ήταν κάτω από τεράστια αναχώματα στην πόλη της Χαμάντ. Στο νησί Failaka του Κουβέιτ αξιοποιήθηκε το EM-31 σε μια προσπάθεια να εντοπισθούν ανθρώπινα νεκροταφεία, που σχετίζονται με την πρώιμη εποχή του Χαλκού, του Κασσίτερου και των Ελληνιστικών οικισμών στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού.

Στο τέταρτο και εκτενέστερο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται παρουσίαση της γεωφυσικής έρευνας. Αρχικά παραθέτονται στοιχεία για την περιοχή Κουφή της Μήλου και την δραστηριότητα της Εταιρείας S&B στο βορειοανατολικό κομμάτι του νησιού. Στις παρυφές του ορυχείου της εταιρείας μέσω της αρχαιολογικής ανασκαφής εντοπίστηκε κατ' αρχήν υπόγειος χώρος με πετρόκτιστη είσοδο με σκαλιά και πλησίον κοντά στην επιφάνεια αρχαία τοιχεία με θραύσματα αγγείων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται η γεωλογία του νησιού και της περιοχής έρευνας. Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου περιγράφονται οι διαδικασίες υπαίθρου εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων και αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η επεξεργασία- ερμηνεία των μετρήσεων. Από τα δεδομένα των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων δημιουργούνται χάρτες φαινόμενης αγωγιμότητας, από τους οποίους, εξάγονται τα πρώτα συμπεράσματα για την ύπαρξη και θέση αρχαιολογικών δομών (τοιχίων) σε περιοχές «γραμμικών» μορφών ισοκαμπυλών χαμηλής αγωγιμότητας. Ακολουθούν στην επόμενη αμέσως ενότητα τα αποτελέσματα της γεωηλεκτρικής τομογραφίας όπου εντοπίζονται επίσης οι θέσεις και το βάθος των πεπερασμένων (πιθανά αρχαιολογικών) δομών υψηλότερης ειδικής αντίστασης σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντος χώρου .

Στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα για τον προσδιορισμό των θέσεων των αρχαιολογικών δομών. Τέλος εκτιμάται η αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό ενταφιασμένων αρχαιοτήτων.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to identify stratigraphy and finite structures of Koufi's area on Milos island, by means of geophysical methods. The two methods used for this study, were geophysical electrical resistivity (Resistivity Tomography) and electromagnetic induction.

The first two chapters refer to a brief history and the fundamental concepts of archaeological geophysics. Basic concepts for each method are analyzed, including the instruments that were used and the process-analyzing of geophysical measurements.

In the third chapter surveys carried out with the EM-31 instrument are listed, used for measurements of archaeological investigations. Bronze-age stone tombs were found in the city of Hamad in Bahrein under enormous mounds of ground. EM-31 were utilized in an attempt to identify human graveyards related to the Early Bronze Age, Kassite Age and Hellenistic settlements on the southwestern part of the island Failaka in Kuwait.

The fourth and most extensive chapter contains a presentation of the geophysical survey. Initially, data about Koufi area of Milos and the mining activity of S&B company at the northeastern part of the Island are presented. At the outskirts of the company's mine, an underground space with a stone built entrance with a staircase, was found during the archaeological excavation and ,nearby ,ancient walls with pieces of antiquities. The geology of the island and the investigation area are also presented. Later on this chapter, the outdoor process of geophysical survey is described, as well as the instruments used, and the processing-analyzing of geophysical measurements. By the electromagnetic measurements data, apparent conductivity maps are created, from which primary indications for the existence and position of archaeological sites defined by 'linear' forms of low conductivity. The following part of this chapter includes the results of resistivity tomography in which the position and depth of finite structures (possibly archaeological), with higher geophysical electrical-resistivity than that of the surroundings are estimated.

The last chapter includes the final results for the determination of the archaeological structures location. Finally, the effectiveness of geophysical methods in locating buried archaeological sites is estimated.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	8
ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ - ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ.....	8
1.1. Εισαγωγή.....	8
1.2. Σύντομη ιστορία της αρχαιολογικής γεωφυσικής.....	8
1.3. Θεμελιώδεις έννοιες στην Αρχαιολογική Γεωφυσική.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	13
ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	13
2.1. Ο Νόμος του Ohm – Ειδική Αντίσταση.....	13
2.1.1. Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση – Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.....	14
2.1.2. Ροή ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο.....	20
2.1.3. Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο.....	21
2.1.4. Δυο Σημειακές Πηγές σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο.....	22
2.1.5. Φαινόμενη ειδική Αντίσταση.....	25
2.1.6. Κατανομή ρεύματος και δυναμικού σε ομογενή υπέδαφος.....	26
2.2. Μέτρηση της Φαινόμενης Ειδικής Αντίστασης.....	28
2.2.1. Εξοπλισμός Υπαίθρου.....	28
2.2.2. Σφάλματα Μετρήσεων στη Γεωφυσική Διασκόπηση.....	30
2.2.3. Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	32
2.2.4. Επιλογή της Κατάλληλης Διάταξης.....	34
2.3. Μετρήσεις και Τεχνικές Διασκόπησης Υπαίθρου.....	40
2.3.1. Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση.....	40
2.3.2. Οριζόντια Ηλεκτρική Χαρτογράφηση.....	42
2.3.3. Γεωηλεκτρική Τομογραφία.....	44
2.4. Μέθοδος της Αντιστροφής.....	48

2.5. Γραφική απεικόνιση με τη Μέθοδο της Ψευδοτομής.....	49
2.6. Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος μέτρησης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και Μαγνητικής Επιδεκτικότητας.....	53
2.6.1. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.....	53
2.6.1.1. Μεθοδολογία Μετρήσεων.....	54
2.6.1.2. Διαμορφώσεις.....	55
2.6.1.3. Βάθος και Ανάλυση.....	56
2.6.1.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	57
2.6.2. Μαγνητική Επιδεκτικότητα.....	58
2.6.2.1. Μεθοδολογία Μετρήσεων.....	59
2.6.2.2. Διαμορφώσεις.....	59
2.6.2.3. Βάθος και ανάλυση.....	59
2.6.2.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	62
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ.....	62
3.1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ Α: Εντοπισμός πέτρινων τάφων στο Bahrain.....	62
3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ Β: Εντοπισμός αρχαίων νεκροταφείων στο Kuwait.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	66
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	66
4.1. Εισαγωγή.....	66
4.2. Η Περιοχή της έρευνας.....	68
4.3. Η Γεωλογία της Νήσου Μήλου και της Περιοχής Έρευνας.....	70
4.3.1. Εισαγωγή.....	70
4.3.2. Η γεωλογία της Νήσου Μήλου.....	71
4.3.3. Γεωλογικά στοιχεία του Βορειοανατολικού τμήματος της Νήσου Μήλου (περιοχή έρευνας).....	73
4.4. Γεωφυσική Έρευνα.....	75
4.4.1. Ηλεκτρομαγνητικές Μετρήσεις.....	77
4.4.1.1. Μετρήσεις υπαίθρου. Όργανο μετρήσεων.....	77
4.4.1.2. Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας.....	79

4.4.2. Γεωηλεκτρική τομογραφία.....	83
4.4.2.1. Εισαγωγή.	83
4.4.2.2. Το όργανο μέτρησης SYSCALPro.	84
4.4.2.3. Στοιχεία ερμηνείας της γεωηλεκτρικής τομογραφίας.	84
4.4.2.4. Γεωηλεκτρικές Τομές.	87
4.4.2.5. Τριδιάστατη Αποτύπωση Γεωηλεκτρικών Τομών.....	95
4.4.3. Ανάλυση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων.	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	98
Η ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.	98
5.1. Γενικά Σχόλια.	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ - ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ

1.1. Εισαγωγή.

Η γεωφυσική είναι η μελέτη της γης μέσω φυσικών μεθόδων (π.χ. μαγνητική μέθοδος, μέθοδος ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι, γεωραντάρ), που χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύσουν, να χαρτογραφήσουν, και να χαρακτηρίσουν γεωλογικούς σχηματισμούς ή θαμμένες αρχαιότητες. Η αποτελεσματική χρήση της γεωφυσικής μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία, να μειώσει τις απώλειες και σε πολλές περιπτώσεις να μειώσει τις δαπάνες των αρχαιολογικών ερευνών.

1.2. Σύντομη ιστορία της αρχαιολογικής γεωφυσικής.

Ο **Augustus Pitt Rivers** έγραψε για την εκσκαφή στο **Handley Down** της Αγγλίας κατά το 1893-1895. Περιγράφει την πρώτη φορά που μία «γεωφυσική μέθοδος» εφαρμόστηκε για αρχαιολογικό εντοπισμό.

Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε είναι γνωστή ως «**bosing**». Στην περίπτωση αυτή το επίπεδο άκρο μίας αξίνας καρφώνεται στο έδαφος για να προσδιοριστεί που βρίσκεται ένας αρχαιολογικός χώρος από τον ήχο που παράγεται. Ο **Rivers** έγραψε ότι, «ο ήχος που παράγεται από την σφυρηλάτηση σε χώρο ανασκαφής είναι πολύ βαθύτερος απ' ό τι σε ανέπαφη επιφάνεια». Η τεχνική επέτρεψε στον **Rivers** και την ομάδα του να ανακαλύψει ένα χαντάκι ορατό από την επιφάνεια μίας καλυμμένης με γρασίδι πλαγιάς.

Πενήντα χρόνια αργότερα ο **Richard Atkinson** έγινε ο πρωτοπόρος σε αυτό που θεωρείται σύγχρονη αρχαιολογική έρευνα. Ο **Atkinson** έμαθε για την μέθοδο της «ηλεκτρικής αντίστασης» από ένα περιοδικό για πολιτικούς μηχανικούς. Το άρθρο που προσέλκυσε το ενδιαφέρον του περιέγραφε την έρευνα περί «ηλεκτρικής αντίστασης» από τους **Evershed** και **Vignoles** για την διερεύνηση τοποθεσιών για κατασκευή φραγμάτων. Έτσι λοιπόν, θεώρησε ότι η ίδια μέθοδος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για αρχαιολογικά ζητήματα.

Το 1946 ο **Atkinson** προσέλαβε τους **Evershed** και **Vignoles** για να διεξάγουν μια βασική έρευνα για την τοποθεσία **Dorchester Thames** χρησιμοποιώντας μετρήσεις αντίστασης από το **Megger Earth Tester**. Η μέθοδος αποδείχθηκε χρονοβόρος και έτσι νοίκιασε ένα **Megger** από αυτούς και διεξήγαγε την δική του ερευνητική μέθοδο που ήταν πιο εφαρμόσιμη σε αρχαιολογικές τοποθεσίες.

Το **Megger** τροφοδοτούνταν από χειροκίνητη γεννήτρια. Αυτή ήταν η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για μελέτες ηλεκτρικής αντίστασης μέχρι την ανακάλυψη της «κρυσταλλολυχνίας», του γνωστού transistor, στην δεκαετία του 1950. Το transistor επέτρεψε την δημιουργία σύνθετων και συμπαγών κυκλωμάτων με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Οι **John Martin** και **Anthony Clark** συνεργάστηκαν το 1956 για να παράγουν έναν μετρητή ηλεκτρικής αντίστασης, που ονομάστηκε «Martin-Clark», ειδικό για αρχαιολογικούς σκοπούς. Η πυρακτωμένη άργιλος εξασθενεί μαγνητικά με μια διαδικασία που ονομάζεται **thermoremanent magnetization** (θερμική μαγνήτιση). Αυτό συμβαίνει καθώς τα οξειδία του σιδήρου σε υψηλές θερμοκρασίες μαγνητίζονται από το μαγνητικό πεδίο της γης καθώς ψύχονται. Αυτός ο παλαιομαγνητισμός επιτρέπει την χρονολόγηση γεωλογικών εναποθέσεων. Ταυτόχρονα ο μαγνητικός βορράς περιστρέφεται γύρω από τον γεωγραφικό βορρά. Όταν μια υψικάμιнос θερμαίνεται πάνω από το σημείο **Curie**, τότε τα σωματίδια του σιδήρου επαναδιατάσσονται προς τον μαγνητικό βορρά όσο η υψικάμιнос θερμαίνεται. Η αρχαιομαγνητική χρονολόγηση επιτρέπει αυτά τα χαρακτηριστικά να χρονολογηθούν σύμφωνα με αυτήν την πολική μετατόπιση.

Έπειτα από μία διάλεξη από τον **John Belshe** για τον «αρχαιομαγνητισμό» το 1957, ο **Graham Webster** αναρωτήθηκε αν ένα μαγνητόμετρο θα μπορούσε να εντοπίσει θαμμένη πυρακτωμένη άργιλο σε αρχαιολογικές τοποθεσίες. Αυτό θεωρήθηκε ως κατάλληλη εφαρμογή για το μαγνητόμετρο και έτσι ένα πρωτότυπο αναπτύχθηκε. Το όργανο αποδείχθηκε ευαίσθητο, τόσο σε κάμινους όσο και σε εδαφικά στοιχεία, όπως χαντάκια και σπήλαια.

Η επιτυχής χρήση της «ηλεκτρικής αντίστασης» και των «μαγνητικών ερευνών» έστρεψαν την αρχαιολογική έρευνα και σε άλλες γεωφυσικές μεθόδους. Αυτές περιλαμβάνουν την χρήση της ηλεκτρομαγνητικής επιδεκτικότητας, των κλισιόμετρων και του γεωραντάρ (**GPR**). Οι γεωφυσικές τεχνολογίες συνεχώς αναπτύσσονται και γίνονται πιο επαρκής με την παράλληλη χρήση ανάλογων λογισμικών ηλεκτρονικών υπολογιστών.

1.3. Θεμελιώδεις έννοιες στην Αρχαιολογική Γεωφυσική.

Η αρχαιολογική γεωφυσική περιλαμβάνει τη μέτρηση ορισμένων φυσικών ιδιοτήτων στην επιφάνεια της γης προκειμένου να ανιχνευθούν και να χαρακτηριστούν τα θαμμένα αρχαιολογικά στοιχεία. Το βάθος ποικίλει ανάλογα τη μέθοδο από 1 έως 4 μέτρα περίπου. Εφαρμόζονται και ενεργητικές και παθητικές γεωφυσικές μέθοδοι.

Οι ενεργητικές μέθοδοι παράγουν τα σήματα τους, όπως ηλεκτρομαγνητικά πεδία ή ηλεκτρικά ρεύματα, και μετρούν τη γήινη απόκριση. Οι παθητικές μέθοδοι, αφ' ετέρου, χρησιμοποιούν φυσικά φαινόμενα (πεδία). Μία παθητική γεωφυσική μέθοδος είναι η μαγνητική,

που χρησιμοποιεί το γήινο μαγνητικό πεδίο. Το επίγειο ραντάρ, η ειδική αντίσταση, και ο ηλεκτρομαγνητισμός είναι όλες ενεργητικές μέθοδοι. Τα γεωφυσικά δεδομένα (μετρήσεις των επιλεγμένων γεωφυσικών ιδιοτήτων στην επιφάνεια του εδάφους ή πάνω από αυτή) συλλέγονται με την κίνηση ενός οργάνου στην περιοχή που θέλουμε να εξετάσουμε, και συχνά σε ομοιόμορφα χωρισμένους κατά διαστήματα παράλληλους τομείς. Αυτές οι μετρήσεις περιλαμβάνουν τις X, Y συντεταγμένες θέσης και το Z να είναι η γεωφυσική μέτρηση. Συντάσσονται έπειτα σε μια βάση δεδομένων και επεξεργάζονται για να δημιουργήσουν χάρτες ή διαγράμματα απεικονίζοντας τη χωρική μεταβολή στις μετρημένες ιδιότητες.

Όλες οι γεωφυσικές μέθοδοι στηρίζονται στις διαφορές, ή την αντίθεση μιας φυσικής ιδιότητας, μεταξύ των αρχαιολογικών στοιχείων και του περιβάλλοντα χώρου (υπόβαθρο). Η αντίθεση είναι ο βαθμός στον οποίο οι γεωφυσικές ιδιότητες ενός αρχαιολογικού στοιχείου διαφέρουν από αυτές των περιβαλλόντων σχηματισμών (εδάφους ή ιζημάτων). Το πραγματικό μέγεθος μιας γεωφυσικής μέτρησης δεν είναι τόσο σημαντικό όσο η διαφοροποίηση του από θέση σε θέση. Με άλλα λόγια, ένα εξαιρετικά ηλεκτρικά μη αγώγιμο αρχαιολογικό στοιχείο δεν θα ανιχνευθεί εάν ο περιβάλλον χώρος είναι εξίσου μη αγώγιμος. Όταν η αντίθεση είναι ικανοποιητική μια ανωμαλία παράγεται. Οι «ανωμαλίες» είναι περιοχές σε ένα γεωφυσικό σύνολο δεδομένων που ξεχωρίζουν από τις περιβάλλουσες μετρήσεις. Τα γεωφυσικά δεδομένα καλύπτουν ευρεία σειρά τιμών θετικών ή αρνητικών. Οι ανωμαλίες επίσης μπορούν να είναι είτε θετικές, είτε αρνητικές, είτε διπολικές (έχοντας και θετικές και αρνητικές τιμές). Όλοι αυτοί οι τύποι ανωμαλίας μπορούν να ανιχνεύσουν αρχαιολογικά στοιχεία. Μια γεωφυσική έρευνα για μια αρχαιολογική περιοχή είναι επιτυχής εάν μπορεί να προσδιορίσει και να χαρακτηρίσει τα θαμμένα αρχαιολογικά στοιχεία, αλλά πολλοί παράγοντες εκτός από την αρχαιολογία συμβάλλουν στην μορφή των δεδομένων. Οι γεωφυσικές μετρήσεις έχουν δυστυχώς κάποιο βαθμό «θορύβου» που συνδέεται μαζί τους. Ο θόρυβος στα γεωφυσικά δεδομένα περιλαμβάνει οτιδήποτε που δεν είναι αντιπροσωπευτικό με αυτό που βρίσκεται στην επιφάνεια ή κάτω από αυτήν. Τα παραδείγματα του θορύβου είναι είτε υψίσυχα δεδομένα (εξαιρετικά υψηλές ή χαμηλές, συχνά τοπικές μετρήσεις, που περιβάλλονται συνήθως από τις έγκυρες μετρήσεις) είτε τυχαίες ή περιοδικές μετρήσεις σχετιζόμενες με τις γεωφυσικές μεθόδους.

Ευτυχώς υπάρχουν πολλοί τρόποι ώστε να «φιλτραρισθεί» ο θόρυβος από το καταγραμμένο σήμα, είτε με την αποφυγή ορισμένων περιοχών ή περιόδων της ημέρας για τη συλλογή δεδομένων, είτε με κάποια ορισμένη επεξεργασία.

Εμπόδιο ανάλυσης των καταγραμμένων δεδομένων αποτελεί η επικράτηση των ανεπιθύμητων σημάτων (ηλεκτρομαγνητικοί πεδία, ηλεκτρικά ρεύματα, ή άλλα φυσικά σήματα που καταγράφονται από τα γεωφυσικά όργανα). Είναι χρήσιμο να σκεφτόμαστε το καταγραμμένο σήμα ως διάφορα σήματα προστιθέμενα από κοινού. Το σήμα ενδιαφέροντος είναι από τα αρχαιολογικά στοιχεία, αλλά υπάρχουν επίσης σήματα από άλλα υπόγεια φαινόμενα όπως οι ρίζες δέντρων, τα

λαγούμια τρωκτικών, τα στρώματα των ιζημάτων και πεπερασμένες βραχώδεις δομές. Αυτά τα ανεπιθύμητα σήματα που είναι ανεξάρτητα από τα αρχαιολογικά καλούνται «**clutters**» (αταξίες). Οι ανωμαλίες που προκύπτουν από τις «αταξίες» γίνονται πρόβλημα όταν δεν μπορούν να διαφοροποιηθούν από τις ανωμαλίες σχετικές με τα αρχαιολογικά στοιχεία. Μερικές «αρχαιολογικές ανωμαλίες» μπορούν να προσδιοριστούν σαφώς λόγω των αντιπροσωπευτικών ιδιοτήτων του που εμφανίζουν (π.χ. κυκλικά ή ορθογώνια πατώματα σπιτιών). Τα μικρότερα και λιγότερο διαμορφωμένα αρχαιολογικά στοιχεία παράγουν ανωμαλίες που είναι πολύ δύσκολο να διακριθούν από τις ανωμαλίες των αταξιών.

Η δυνατότητα να ανιχνευθούν τα υπόγεια στοιχεία περιορίζεται επίσης από την πυκνότητα και την ανάλυση. Η πυκνότητα δεδομένων (επίσης αποκαλούμενη πυκνότητα δειγματοληψίας) είναι ο αριθμός γεωφυσικών μετρήσεων που καταγράφονται ανά μονάδα μήκους ή επιφάνειας στην περίπτωση των τρισδιάστατων μεθόδων όπως στο **GPR**. Η ανάλυση εξαρτάται από το διάστημα δειγματοληψίας (απόσταση μεταξύ των μετρήσεων σύμφωνα με τις γραμμές συλλογής δεδομένων, τομών ή περασμάτων) καθώς επίσης και την απόσταση μεταξύ των τομών. Πολλές σύγχρονες γεωφυσικές έρευνες γίνονται με ένα διάστημα δειγματοληψίας 0.5m έως 0.125m ανά μέτρηση με τις γραμμές χωρισμένες κατά διαστήματα 1m έως 0.5m . Η ανάλυση των μικρότερων και βαθύτερων στοιχείων αντίθεσης βελτιώνεται με την αύξηση της πυκνότητας . Ο **Clark** (1996) δείχνει ότι καθώς το διάστημα δειγματοληψίας μειώνεται από 1.5m έως 0.125m, η δυνατότητα να διαφοροποιηθεί ένας κλίβανος από ένα κομμάτι του σιδήρου στην επιφάνεια αυξάνεται (χρησιμοποιώντας ένα μαγνητόμετρο). Το πείραμα δείχνει ότι 0.5m είναι το μεγαλύτερο κατάλληλο διάστημα, και υπάρχει μια ιδιαίτερη βελτίωση σε 0.25m και μόνο οριακές βελτιώσεις σε 0.125m. Η χρησιμοποίηση ενός 0.25m ή ενός μικρότερου διαστήματος δειγματοληψίας κατά μήκος των τομών ολοκληρώνεται εύκολα με τα σημερινά γεωφυσικά όργανα, με κύριο περιορισμό στην πυκνότητα στοιχείων, να είναι το διάστημα μεταξύ των τομών. Και ο **Clark** (1996) και **Gaffney** και **Gater** (2003) προτείνουν ότι 1m μεταξύ των τομών είναι επαρκές για τις περισσότερες γεωφυσικές έρευνες στο Ηνωμένο Βασίλειο (υποθέτοντας διαστήματα δειγματοληψίας το πολύ 0.5m κατά μήκος των τομών, αλλά συνήθως 0.25m ή λιγότερο), αν και τελευταία προτείνεται 0.5m για τις έρευνες ερευνητικών επιπέδων. Στη Βόρεια Αμερική είναι πιο κοινό να χρησιμοποιηθεί το 0.5m ως διάστημα τομών, με το 1m διάστημα να διατηρείται για τις περιοχές με τις πολύ μεγάλες τιμές αντίθεσης. Σε μερικές περιπτώσεις το 0.25m διάστημα τομών χρησιμοποιείται, ιδιαίτερα σε έρευνες μικρής περιοχής όπου οι κύριοι στόχοι είναι μικροί και έχουν χαμηλή αντίθεση.

Ένας καταλυτικός παράγοντας που καθορίζει τις αποστάσεις είναι το μέγεθος των στόχων. Αν και η αντίθεση είναι ο εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας, το μέγεθος διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση και την αναγνώριση των στόχων. Εάν δύο στοιχεία αποτελούνται από τα ίδια υλικά και θάβονται στα ίδια βάθη στο ίδιο υπόβαθρο, το μεγαλύτερο των δύο θα ανιχνευθεί ευκολότερα και θα προσδιοριστεί ως πιθανό στόχος για διάφορους λόγους. Κατ' αρχάς, το μικρότερο στοιχείο είναι λιγότερο πιθανό να είναι ακριβώς κάτω ή κοντά στις γραμμές τομών,

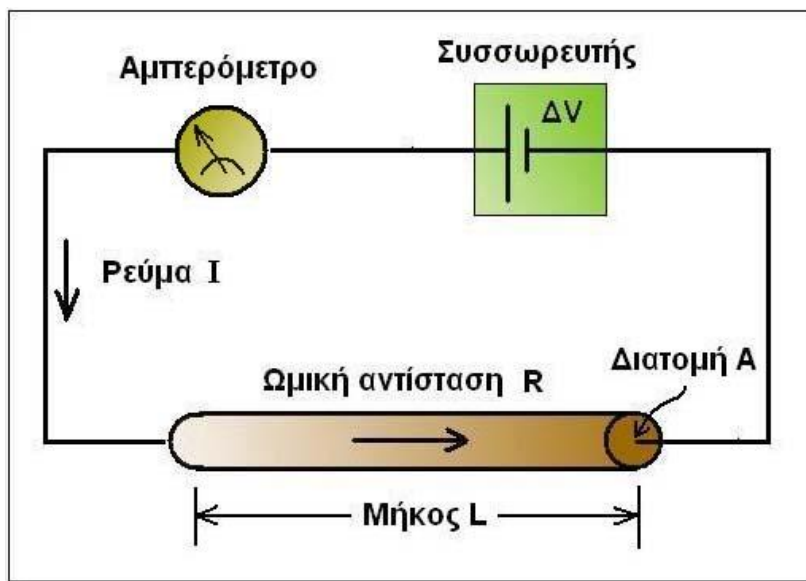
έτσι το καταγραμμένο σήμα θα ήταν σχετικά αδύνατο. Δεύτερον, το μικρότερο στοιχείο θα παράγει μια μικρότερη ανωμαλία, που ίσως αντιπροσωπεύεται από μόνο μια μέτρηση. Οι ανώμαλες αναγνώσεις που καταγράφονται μόνο σε μια μέτρηση είναι εύκολο να μπερδευτούν με ανωμαλίες και συνήθως αφαιρούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Τέλος, η ανωμαλία από ένα μικρότερο στοιχείο είναι λιγότερο πιθανό να πάρει μια ευπροσδιόριστη μορφή (τετραγωνική, γραμμική, ή κυκλική), κάνοντας το δυσκολότερο να διακριθεί από το θόρυβο και τις αταξίες. Ένα στοιχείο για να βρεθεί με αξιοπιστία πρέπει να καταγραφεί από τουλάχιστον δύο σαρώσεις του οργάνου. Εν περιλήψει, όταν όλοι οι άλλοι παράγοντες είναι ίσοι, η πιθανότητα της ανίχνευσης και της αναγνώρισης των μικρών αρχαιολογικών στοιχείων βελτιώνεται καθώς η πυκνότητα δειγματοληψίας αυξάνεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Ο Νόμος του Ohm – Ειδική Αντίσταση.

Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσα στα πετρώματα και ορυκτά με τρεις τρόπους: ηλεκτρονικά (ωμικά), ηλεκτρολυτικά και διηλεκτρικά. Στην πρώτη περίπτωση η ροή ρεύματος στα υλικά περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια (μέταλλα). Στον ηλεκτρολύτη το ρεύμα μεταφέρεται μέσω ιόντων με σχετικά χαμηλό ρυθμό. Η διηλεκτρική αγωγιμότητα λαμβάνει χώρα σε φτωχούς αγωγούς ή μονωτές όπου τα ατομικά ηλεκτρόνια κάτω από την επίδραση εξωτερικού πεδίου μετακινούνται σχετικά με τον πυρήνα.



Σχήμα 2.1. Σχηματική απεικόνιση του Νόμου του Ohm (Μαυρομμάτης. 2007)

Από τις βασικές γνώσεις της Φυσικής είναι γνωστό όταν σε έναν συμμάτινο αγωγό, μήκους L και διατομής A , όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.1**, διαρρέει ρεύμα, η σχέση που συνδέει το ρεύμα που διαρρέει με τη διαφορά δυναμικού (τάση) που απαιτείται για να δημιουργηθεί το ρεύμα είναι:

$$\Delta V = IR \quad (\text{Ohm}) \quad (2.1)$$

Αντίστοιχα, η ηλεκτρική αντίσταση R δίνεται από τον τύπο:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.2)$$

όπου ΔV είναι η τάση (σε Volt), I είναι η ένταση του ρεύματος (σε Ampere) και R είναι η ωμική αντίσταση του υλικού (resistance), η οποία έχει ως μονάδα μέτρησης το Ohm

$$(\text{Ohm} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}}).$$

Η παραπάνω σχέση είναι γνωστή και ως Νόμος του Ohm.

Γνωστός είναι ακόμα και ο όρος ειδική αντίσταση (resistivity), που συμβολίζεται με ρ και περιγράφει την ικανότητα του υλικού να διαβιβάζει ρεύμα. Η σχέση που συνδέει την ωμική αντίσταση R με την ειδική αντίσταση ρ , για την περίπτωση του συρμάτινου καλωδίου, είναι:

$$\tilde{n} = \frac{RA}{L} \text{ (Ohm} \cdot \text{m)} \quad (2.3)$$

όπου A η επιφάνεια της διατομής και L το μήκος του αγωγού. Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης είναι το $\text{Ohm} \cdot \text{m}$. Συνδυάζοντας την παραπάνω σχέση με το Νόμο του Ohm, η ειδική αντίσταση ρ θα είναι:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{L} \Rightarrow \frac{\Delta V}{L} = \tilde{n} \frac{I}{A} \quad (2.4)$$

Η διαφορά δυναμικού ΔV ανά μονάδα μήκους L ορίζει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E . επίσης, το πηλίκο $\frac{I}{A}$ ονομάζεται αλλιώς πυκνότητα ρεύματος (J). Έτσι η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$E = \rho J \quad (2.5)$$

όπου E και J είναι ανύσματα. Η παραπάνω σχέση είναι η ανυσματική έκφραση του νόμου του Ohm.

Η ειδική αντίσταση είναι μια θεμελιώδης παράμετρος που χαρακτηρίζει το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το συρμάτινο καλώδιο, και περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί το καλώδιο να διαβιβάσει ηλεκτρικό ρεύμα. Υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης υποδηλώνουν ότι το υλικό είναι πολύ ανθεκτικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος (αντιστατικό υλικό). Χαμηλές τιμές υποδηλώνουν ότι το υλικό μεταδίδει το ηλεκτρικό ρεύμα πολύ εύκολα (αγώγιμο υλικό).

2.1.1. Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση – Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.

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

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (2.6)$$

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

Τα υλικά της γης έχουν κάποιες ηλεκτρικές ιδιότητες. Σε μικρά βάθη το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται στα υλικά της γης μέσω δυο τρόπων: της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της ηλεκτρολυτικής αγωγιμότητας (ή ηλεκτρονικά και ηλεκτρολυτικά). Κατά την ηλεκτρική αγωγιμότητα το ρεύμα διαδίδεται μέσω ελευθέρων ηλεκτρονίων, όπως γίνεται και στα μέταλλα. Κατά την

ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα το ρεύμα διαδίδεται μέσω της κινήσεως των φορτισμένων ιόντων στα νερά των πόρων. Σε διασκοπήσεις που εξυπηρετούν περιβαλλοντικούς και γεωτεχνικούς σκοπούς, η ηλεκτρολυτική διάδοση είναι πιο συνηθισμένος μηχανισμός. Η διάδοση μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρουσιάζεται όταν υπάρχουν αγωγιμα ορυκτά, όπως μεταλλικά σουλφίδια ή ο γραφίτης σε διασκοπήσεις με σκοπό την ανεύρεση μεταλλοφορίας.

Τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί (μονωτές) και οι ειδικές αντιστάσεις τους θα ήταν πολύ υψηλές αν δεν είχαν πόρους με ρευστά, κυρίως νερό. 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 ευκίνησία, την συγκέντρωση και τον βαθμό διαχωρισμού των ιόντων (εξαρτάται από την διηλεκτρική σταθερά του διαλύτη). 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.

Παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης πετρωμάτων και ορυκτών:

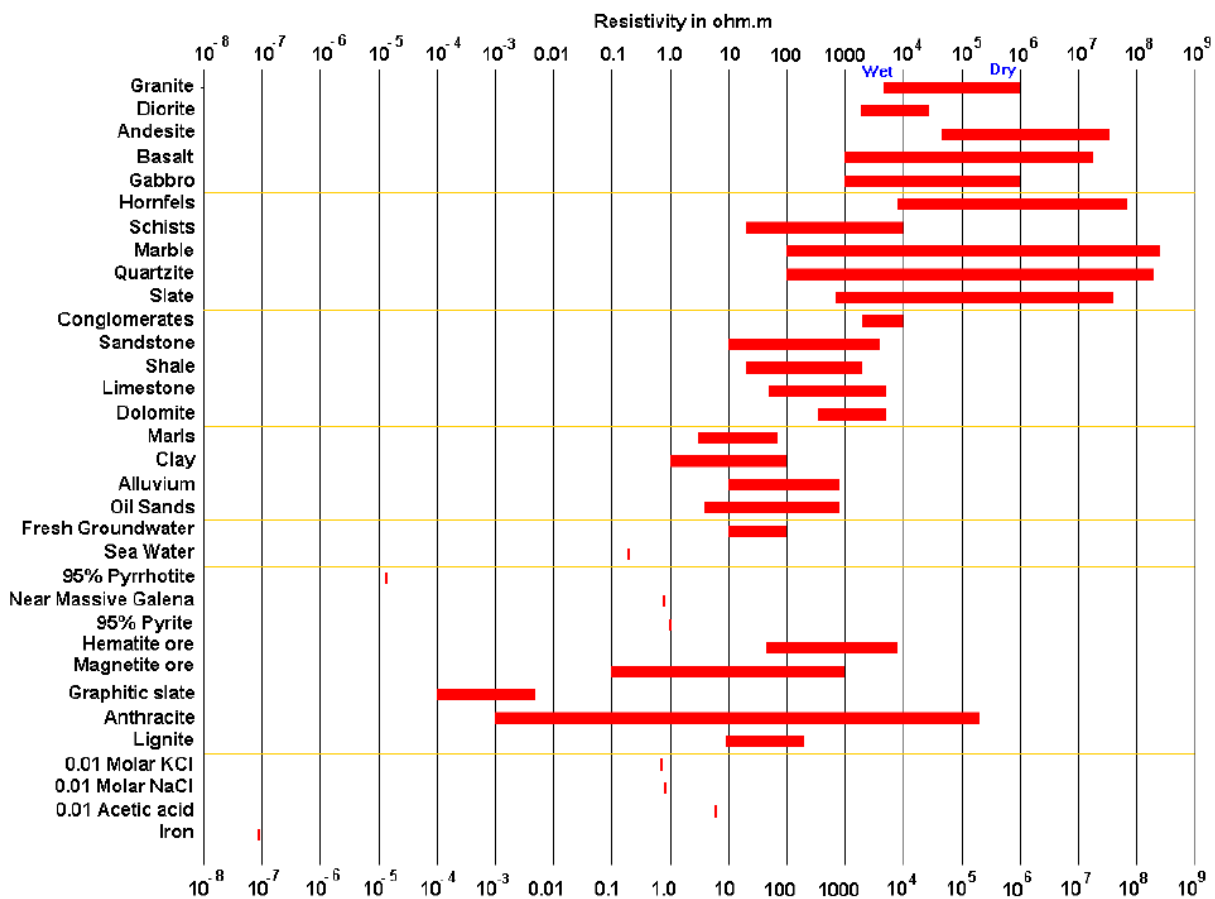
A) Είδος πετρώματος: Κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης, αναλυτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα που δίνονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης διαφόρων υλικών και πετρωμάτων (Λούης, 2003).

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm·m)
Αέρας	∞
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό Άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-3}
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Συμπαγής Γρανίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^6$
Αποσαθρωμένος Γρανίτης	$1 - 1 \times 10^2$
Ασβεστόλιθος	$50 - 1 \times 10^7$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτης	$1 - 1 \times 10^8$

Σχιστόλιθος	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^4$
Άμμος	$1 - 1 \times 10^3$
Άργιλος	$1 - 1 \times 10^2$
Εδαφικό Νερό	0,5 – 300
Θαλασσινό Νερό	0,2

Πίνακας 2.1. Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση διαφόρων υλικών και πετρωμάτων (Λούης, 2003)

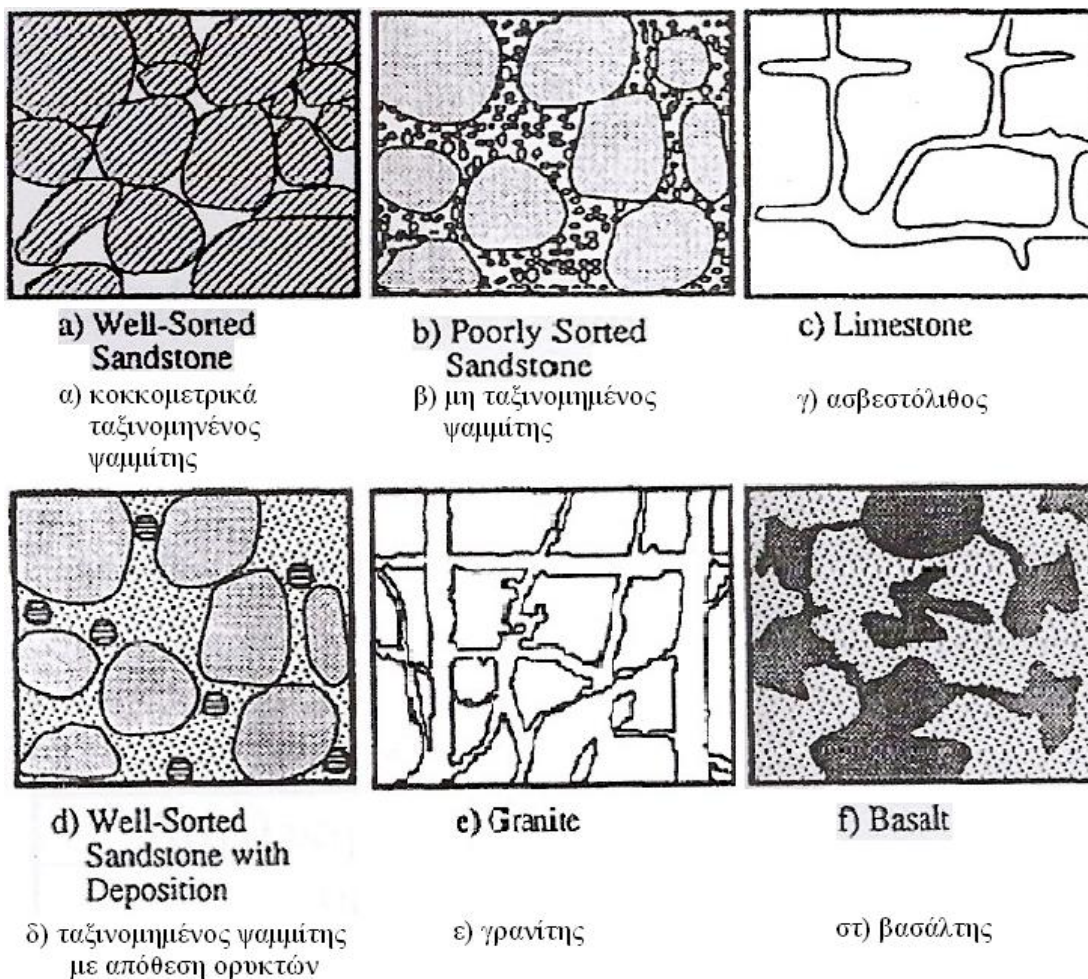
Τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Από την άλλη τα ιζηματογενή τις χαμηλότερες, λόγω του – συνήθως – υψηλού περιεχομένου τους σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες τάσεις αλληλοεπικάλυψης.



Σχήμα 2.2. Ειδικές αντιστάσεις ορυκτών και πετρωμάτων (Loke, 2002)

Β) Δομή και Πορώδες: Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες ενός πετρώματος, τόσο μικρότερη είναι και η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση.

- Ο κοκκομετρικά ταξινομημένος ψαμμίτης (χονδρό κλάσμα) έχει μεγάλα κενά και, κατά συνέπεια, παρουσιάζει χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.3α**)
- Ο μη ταξινομημένος ψαμμίτης (χονδρό και ψιλό κλάσμα) έχει πολύ μικρότερο πορώδες και, ως εκ τούτου, χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.3β**)
- Η διάλυση του ασβεστόλιθου, κατά μήκος των ρωγμών του, αυξάνει το πορώδες και, κατά συνέπεια, μειώνει τις τιμές της ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.3γ**).
- Η απόθεση ορυκτών σε οποιοδήποτε πέτρωμα μειώνει το πορώδες του, αυξάνοντας την ειδική του αντίσταση (**Σχήμα 2.3δ**)
- Ένα πέτρωμα με την γρανιτική υφή θα άγει τον ηλεκτρισμό μέσω διακλάσεων και κατά μήκος των ορίων γωνιωδών κόκκων, έχοντας μικρό πορώδες και κατά συνέπεια υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.3ε**).
- Ο βασάλτης έχει κενούς χώρους που σπάνια συνδέονται μεταξύ τους, καθιστώντας το σχηματισμό ελάχιστα περατό. Επομένως, ακόμα και στην περίπτωση που αυτός χαρακτηρίζεται από μεγάλο πορώδες, παρουσιάζει υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.3στ**).



Σχήμα 2.3. Σχηματική απεικόνιση Δομής και Πορώδες (Αποστολόπουλος, 2008)

Γ) Περιεκτικότητα σε άλατα: Για δεδομένο πορώδες, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης των πόρων σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος.

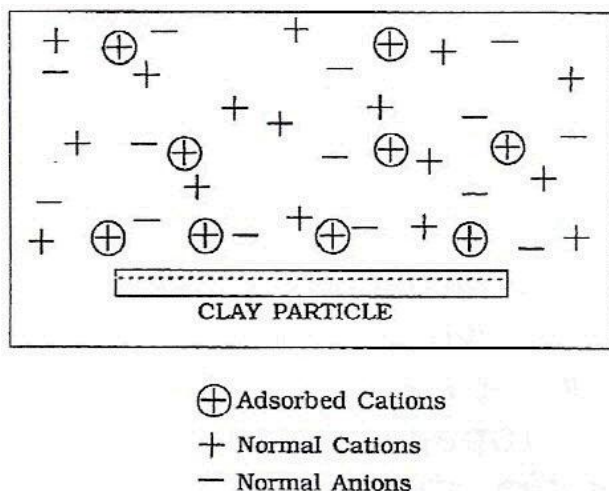
Δ) Επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών: Ανάλογα με τις διάφορες γεωλογικές διεργασίες παρουσιάζονται και διαφοροποιήσεις στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων. Γενικά, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση, αλλά υπάρχουν εξαιρέσεις.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
Αργιλική Εξαλλοίωση	Ελάττωση
Διάλυση	Ελάττωση
Ρηγμάτωση	Ελάττωση
Εισροή Θαλασσινού Νερού	Ελάττωση
Διάτμηση	Ελάττωση
Αποσάθρωση	Ελάττωση
Σκλήρυνση	Αύξηση
Ιζηματοποίηση	Αύξηση
Απολίθωση	Αύξηση
Μεταμόρφωση	Αύξηση ή Ελάττωση

Πίνακας 2.2. Επίδραση στην Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση λόγω Γεωλογικών Διεργασιών

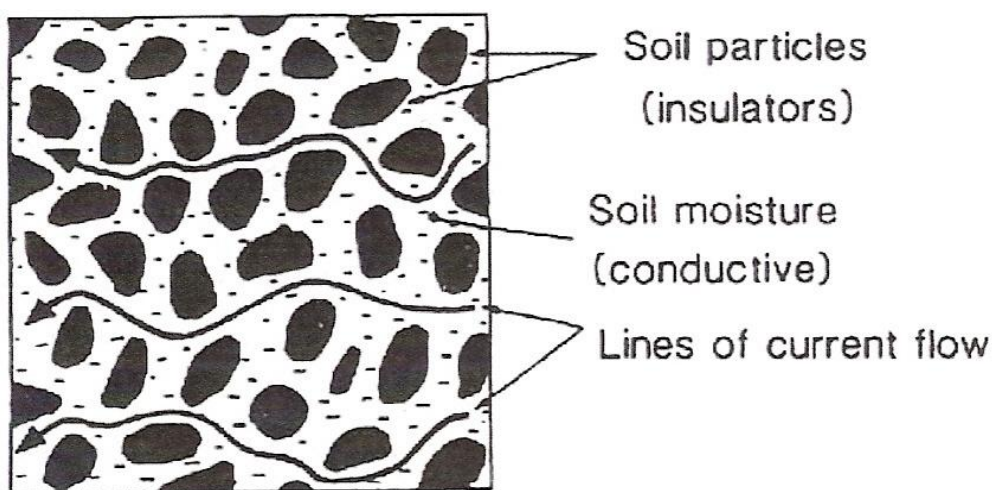
Ε) Ηλικία πετρώματος: Τα παλαιότερα πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

ΣΤ) Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών: Λόγω της αυξημένης αγωγιμότητας των αργιλικών ορυκτών, η ύπαρξή τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαμηλών τιμών επιφανειακής ειδικής αντίστασης.



Σχήμα 2.4. Σχηματική αναπαράσταση των ιόντων που απορροφούνται από ένα αργιλικό τεμαχίδιο (Πολυχρονοπούλου, 2005)

Ζ) Βαθμός κορεσμού: Όσο ο βαθμός κορεσμού ενός πετρώματος αυξάνεται, η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση μειώνεται.



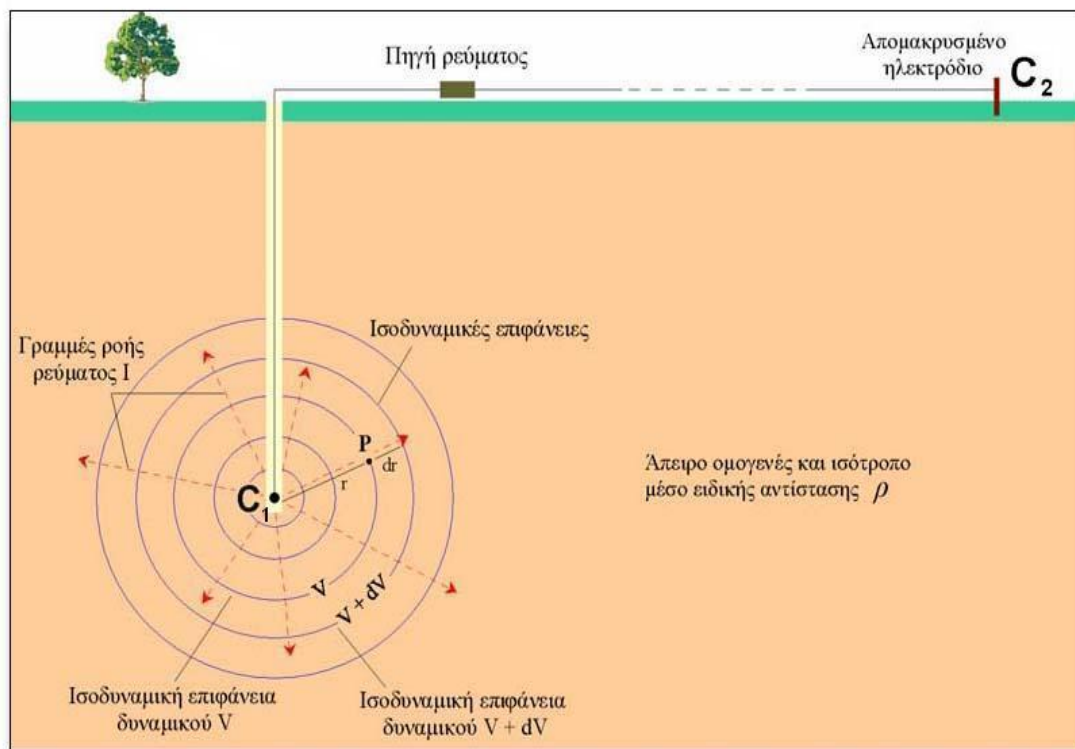
Σχήμα 2.5. Ροή του Ρεύματος σε Εδαφικό Δείγμα (Πολυχρονοπούλου, 2005)

Η) Θερμοκρασία: Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος. Αυτός ο παράγοντας, ωστόσο, έχει τόσο μικρή επίδραση, ώστε διαδραματίζει αξιoσημείωτο ρόλο μόνο σε γεωθερμικά συστήματα και όχι σε γεωτεχνικές ή περιβαλλοντικές μελέτες.

2.1.2. Ροή ρεύματος 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).



Σχήμα 2.6. Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ομογενή χώρο (Λούης, 2003)

Για την εφαρμογή στην πράξη αυτού του μοντέλου τοποθετούμε ένα ηλεκτρόδιο C₁ μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά σε ομογενές και ισότροπο μέσο. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C₂, που τοποθετείται στην επιφάνεια της γης και σε αρκετά μακρινή απόσταση ούτως ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα (**Σχήμα 2.6**).

Οι γραμμές ροής του ρεύματος I είναι ακτινικές και ξεκινούν από τη σημειακή πηγή C₁, κατευθυνόμενες προς τα έξω. Η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού) που προκαλείται από την ηλεκτρική αντίσταση του μέσου, παραμένει σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών, οι οποίες έχουν ως κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται ισοδυναμικές γραμμές (equipotentials) και στις τρεις διαστάσεις σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες, με κέντρο το ηλεκτρόδιο.

Σύμφωνα με τη σχέση (2.2), (2.3) και (2.4), η διαφορά δυναμικού dV μεταξύ δυο ισοδυναμικών επιφανειών με εμβαδόν $A=4\pi r^2$ (επιφάνεια σφαίρας) που απέχουν απόσταση dr , είναι:

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

$$\frac{dV}{I} = \tilde{n} \frac{dr}{A} \Rightarrow \frac{dV}{dr} = \tilde{n} \frac{I}{A} = \tilde{n} \frac{I}{4\pi r^2} \Rightarrow dV = \frac{\rho I}{4\pi r^2} dr \quad (2.7)$$

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

Με ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης προκύπτει:

$$\int dV = \int \left(\rho \frac{I}{4\pi r^2} \right) dr \Rightarrow V = \frac{\rho}{4\pi} I \cdot \int \frac{1}{r^2} dr \quad (2.8)$$

$$V = \frac{\rho}{4\pi} I \quad (\text{Volt}) \quad (2.9)$$

όπου: V το δυναμικό που δημιουργείται σε σημείο του χώρου λόγω της σημειακής πηγής ρεύματος και r η απόσταση του σημείου από τη σημειακή πηγή.

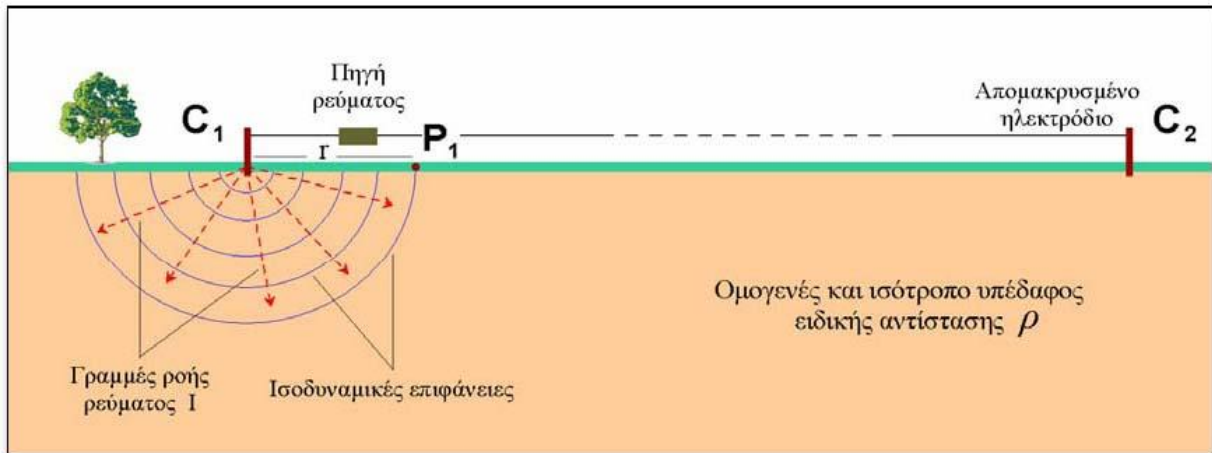
Οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δυο οποιονδήποτε σημείων του μέσου μπορούν να υπολογιστούν αφαιρώντας τα δυναμικά των δυο ισοδυναμικών γραμμών που διέρχονται από τα σημεία αυτά.

2.1.3. Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο.

Το παραπάνω μοντέλο εφαρμόζεται σε περίπτωση του ημιάπειρου ομογενή χώρου. Τοποθετούμε ένα ηλεκτρόδιο C_1 στην επιφάνεια ηλεκτρικά ομογενούς μέσου (**Σχήμα 2.7**). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C_2 , το οποίο τοποθετείται επίσης στην επιφάνεια, αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση, ούτως ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα.

Οι γραμμές ροής του ρεύματος I είναι, όπως και στην περίπτωση του άπειρου ομογενούς μέσου, ακτινικές και ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο. Ενώ οι ισοδυναμικές

επιφάνειες είναι κάθετες στις γραμμές ροής και σχηματίζουν ομόκεντρα ημισφαίρια, με κέντρο το ηλεκτρόδιο C_1 .



Σχήμα 2.7. Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2003)

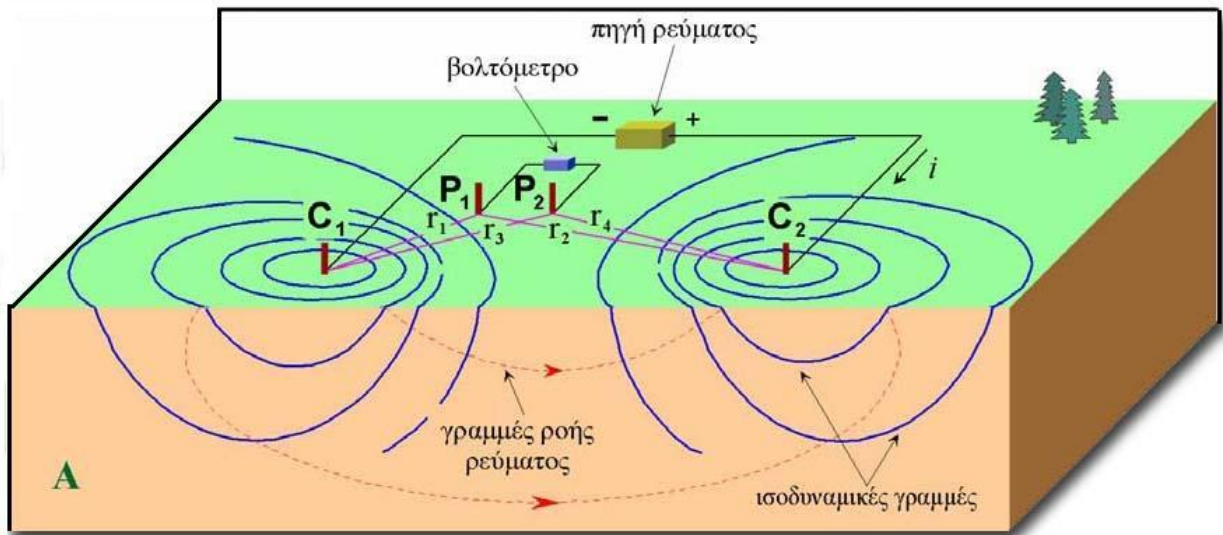
Για τον προσδιορισμό του δυναμικού V σε τυχαίο σημείο P_1 του ημιχώρου (συνήθως στην επιφάνεια του), ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με την περίπτωση του άπειρου ομογενούς χώρου. Η διαφορά είναι ότι εδώ αντί για επιφάνεια σφαίρας, έχουμε επιφάνεια A που είναι η επιφάνεια ημισφαιρίου, δηλαδή $A=2\pi r^2$. Σύμφωνα με τη σχέση (2.7) και (2.8), η διαφορά δυναμικού dV στο σημείο P_1 είναι:

$$V = \frac{\rho}{2\pi r} I \quad (\text{Volt}) \quad (2.10)$$

Δηλαδή, γίνεται η διατύπωση του νόμου του Ohm για ημιάπειρο ομογενή χώρο με $R=\rho/2\pi r^2$.

2.1.4. Δυο Σημειακές Πηγές σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο.

Στις περιπτώσεις του άπειρου ομογενή χώρου και του ημιάπειρου ομογενή χώρου, τα δυο ηλεκτρόδια C_1 και C_2 , απέχουν μεταξύ τους μεγάλη απόσταση ώστε η επίδραση του ενός στη διαμόρφωση του δυναμικού του άλλου να είναι αμελητέα. Όταν η απόσταση μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων ρεύματος είναι πεπερασμένη, το δυναμικό σε κοντινό σημείο της επιφάνειας επηρεάζεται και από τα δυο ηλεκτρόδια ρεύματος (**Σχήμα 2.8**).



Σχήμα 2.8. Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο με δυο σημειακές πηγές (Λούης, 2003)

Άρα το δυναμικό σε τυχαίο σημείο P_1 θα ισούται με το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού V_1 , λόγω της σημειακή πηγής C_1 , και του δυναμικού V_2 , λόγω της πηγής C_2 . Ακόμα, οι γραμμές ροής του ρεύματος δεν είναι πλέον ακτινικές, αλλά καμπύλες γραμμές που ενώνουν τα δυο ηλεκτρόδια ρεύματος (οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές του **Σχήματος 2.8**).

Οπότε το δυναμικό στο σημείο P_1 λόγω του ηλεκτροδίου ρεύματος C_1 είναι:

$$V_1 = \frac{I\rho}{2\pi r_1} \quad (2.11)$$

Ομοίως το δυναμικό στο σημείο P_1 λόγω του ηλεκτροδίου ρεύματος C_2 είναι:

$$V_2 = \frac{(-I)\rho}{2\pi r_2} \quad (2.12)$$

Αφού τα ρεύματα στα δυο ηλεκτρόδια είναι ίσα και αντίθετης πολικότητας:

$$V_{P1} = V_1 + V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.13)$$

όπου: V_{P1} : το δυναμικό που δημιουργείται στο σημείο P_1 του χώρου λόγω των σημειακών πηγών ρεύματος C_1 και C_2

r_1 : η απόσταση του σημείου P_1 από τη σημειακή πηγή C_1

r_2 : η απόσταση του σημείου P_1 από τη σημειακή πηγή C_2

Το δυναμικό σε δεύτερο τυχαίο σημείο P_2 της επιφάνειας είναι αντίστοιχα:

$$V_{P_2} = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (2.14)$$

όπου: V_{P_2} : το δυναμικό που δημιουργείται στο σημείο P_2 του χώρου λόγω των σημειακών πηγών ρεύματος C_1 και C_2

r_3 : η απόσταση του σημείου P_2 από τη σημειακή πηγή C_1

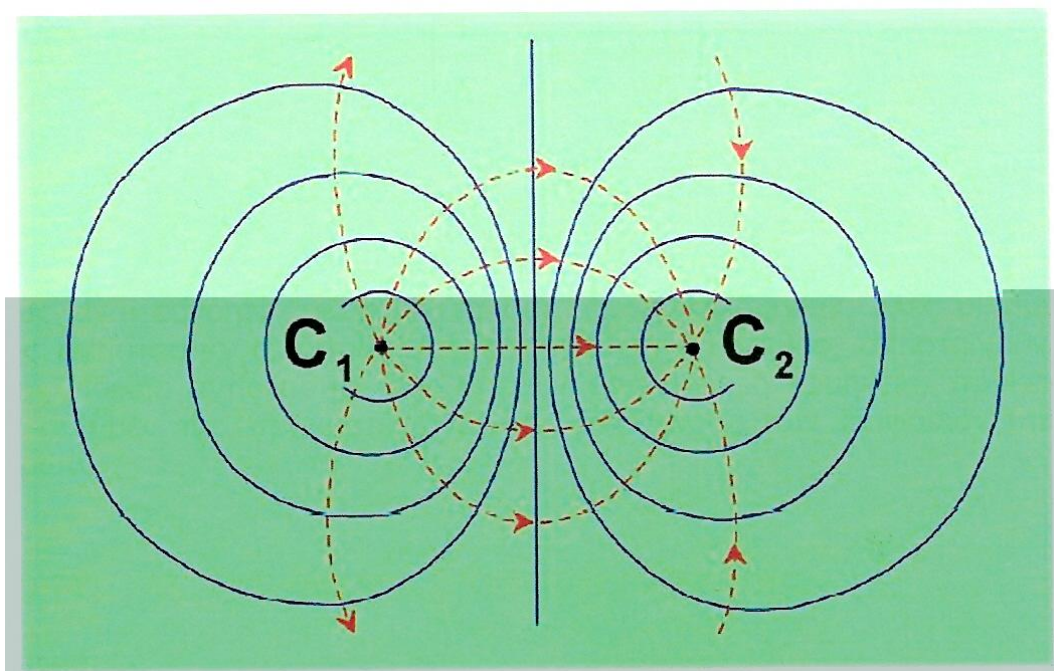
r_4 : η απόσταση του σημείου P_2 από τη σημειακή πηγή C_2

Η διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης) που αναπτύσσεται μεταξύ των σημείων P_1 και P_2 μπορούμε να τη μετρήσουμε και σύμφωνα με τις σχέσεις (2.13) και (2.14) είναι:

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \quad (2.15)$$

Επιλύνοντας τη σχέση (2.14) ως προς ρ , προκύπτει η ειδική αντίσταση:

$$\rho = \frac{2\pi \cdot \Delta V}{I \cdot \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}} \quad (2.16)$$



Σχήμα 2.9. Κάτοψη Ροής ρεύματος, μεταξύ δυο σημειακών πηγών, σε ημίσπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2003)

2.1.5. Φαινόμενη ειδική Αντίσταση.

Σε ομογενές και ισότροπο μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση με την σχέση (2.16) θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την ειδική αντίσταση του μέσου.

Όμως όταν το μέσο είναι ανομοιογενές, η περίπτωση της πραγματικής γης, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση με την σχέση (2.16) ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται **φαινόμενη ειδική αντίσταση**. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση συμβολίζεται με ρ_α .

Η σχέση (2.16) είναι βασική εξίσωση για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε κάθε πιθανή διάταξη των ηλεκτροδίων. Εάν στη σχέση αυτή, εισάγουμε την έννοια του γεωμετρικού παράγοντα k , ο οποίος εξαρτάται από τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων, έχουμε:

$$k = \frac{2\pi}{\left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}}$$

ή

(2.17)

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)}$$

Οπότε:

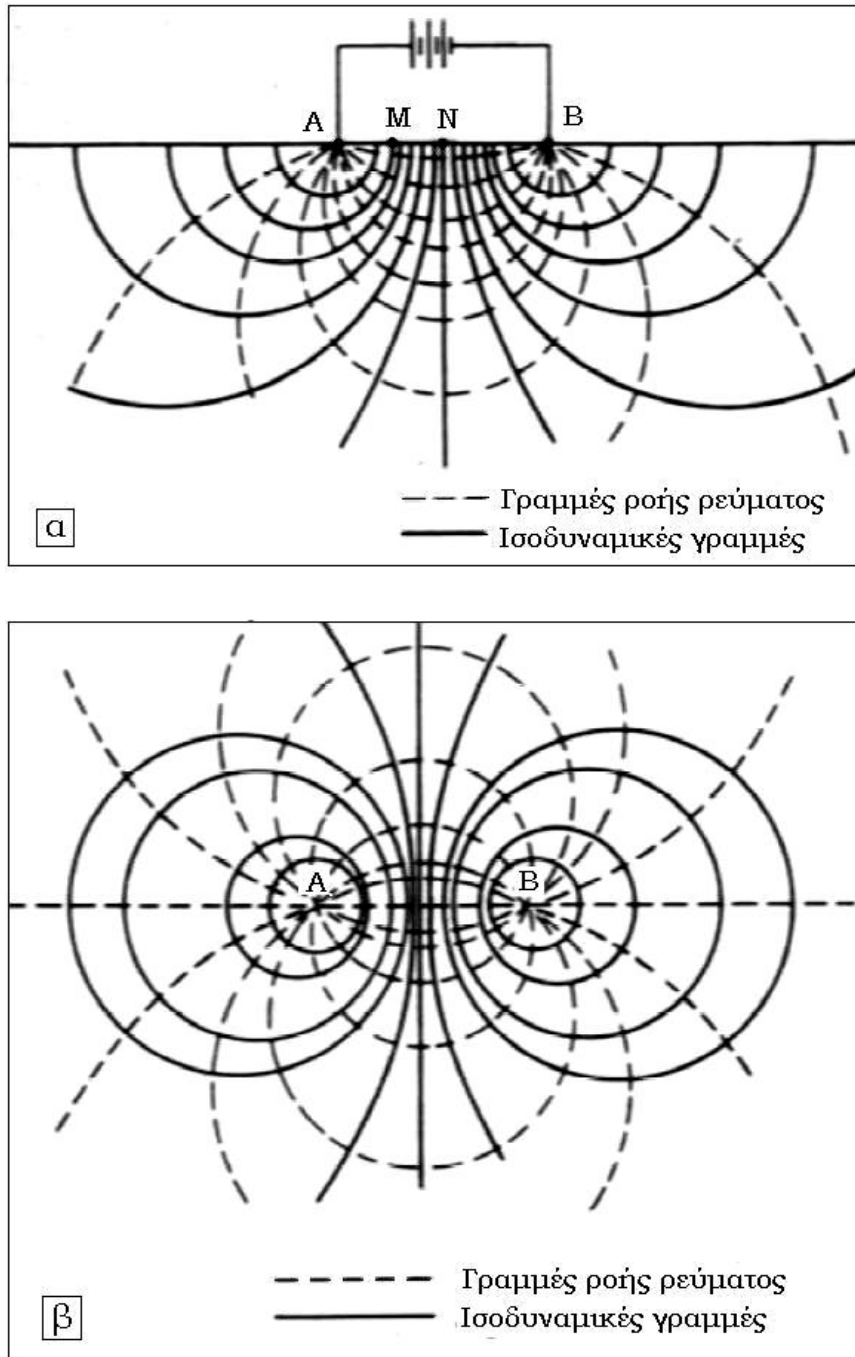
$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot k \quad (2.18)$$

Με βάση όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράμε $\{\rho_\alpha = k \cdot \left(\frac{\Delta V}{I} \right)\}$ για κάθε θέση ή και διεύθυνση της διάταξης ηλεκτροδίων, δεν είναι αντιπροσωπευτική ούτε της πραγματικής ειδικής αντίστασης μέρους του υπεδάφους, ούτε μιας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων μερών του υπεδάφους. Μεταβάλλεται όμως συστηματικά ανάλογα με τη γεωλογική τομή και κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές και είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγώγιμων ή μη ανομοιογενειών.

Λόγω των διαφορετικών τιμών που λαμβάνονται στην ύπαιθρο για να προσδιοριστούν οι τιμές της πραγματικής ειδικής αντίστασης των σχηματισμών του υπεδάφους, απαιτείται κατάλληλη επεξεργασία και ερμηνεία των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Η επεξεργασία αυτή γίνεται με τη **μέθοδο της αντιστροφής**, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

2.1.6. Κατανομή ρεύματος και δυναμικού σε ομογενή υπέδαφος.

Στο Σχήμα 2.10 θεωρούμε δυο ηλεκτρόδια A και B τα οποία συνδέονται με πηγή ρεύματος και είναι τοποθετημένα σε δυο σημεία στην επιφάνεια ομογενή υπεδάφους. Ακόμα, θεωρούμε δυο άλλα ηλεκτρόδια M και N μετρητής δυναμικού.



Σχήμα 2.10. Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο, σε κάθετη τομή (α) και κάτοψη (β), (Οικονομόπουλος, 1985)

Το κλάσμα του ολικού ρεύματος που περνάει από βάθος z_1 δίνεται από τη σχέση (Αποστολόπουλος, 2008):

$$\frac{I_x}{I} = 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{2z_1}{C_1 C_2} \quad (2.19)$$

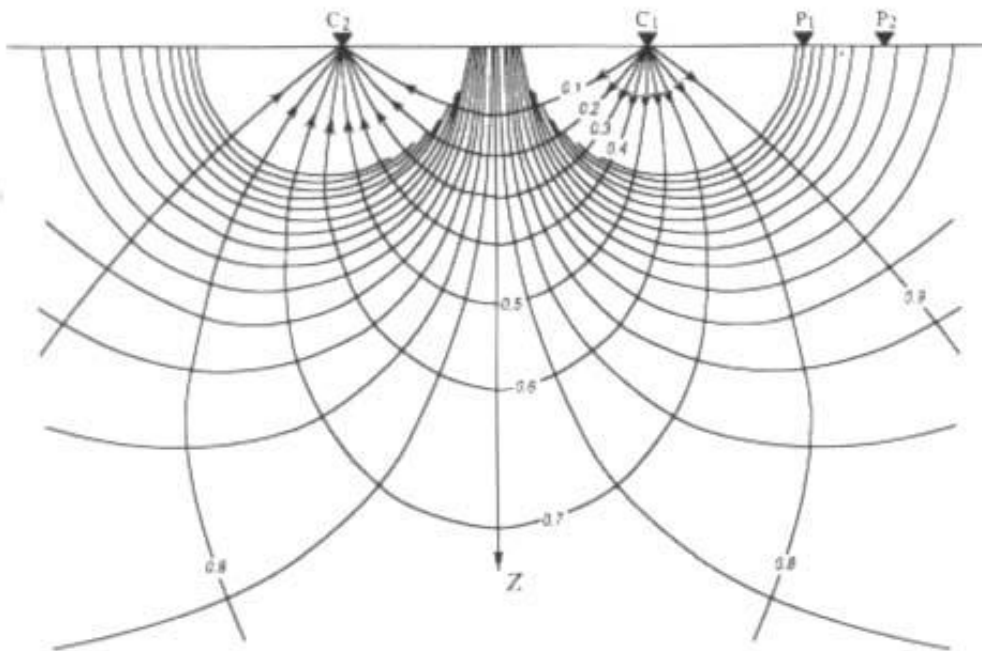
Επίσης, φαίνεται η κατανομή των ρευματικών (με κάθε μια ρευματική γραμμή να μεταφέρει το ένα δέκατο (1/10) του συνολικού ρεύματος) και δυναμικών γραμμών για δυο ηλεκτρόδια ρεύματος στην επιφάνεια ομογενούς υπεδάφους.

Από την σχέση αυτή φαίνεται ότι:

Το $0.5 \cdot I$ διεισδύει έως βάθος $z = \frac{C_1 C_2}{2}$ ή $z = \frac{AB}{2}$

Το $0.3 \cdot I$ διεισδύει έως βάθος $z = C_1 C_2$ ή $z = AB$

Το $0.1 \cdot I$ διεισδύει έως βάθος $z = 3 \cdot C_1 C_2$ ή $z = 3 AB$



Σχήμα 2.11. Κατανομή γραμμών ρεύματος και δυναμικού για δυο ηλεκτρόδια ρεύματος στην επιφάνεια ομογενούς ημιχώρου. Οι γραμμές δυναμικού αντιπροσωπεύουν ισοδυναμικές επιφάνειες, καθεμιά από τις οποίες φέρει το 1/10 του δυναμικού, (Van Nostrand and Cook, 1966)

Από τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει ότι να χωρίσουμε την απόσταση AB σε τρία ίσα τμήματα, η μεταβολή του δυναμικού στο κεντρικό τμήμα $C_1 C_2 / 3$ ή $AB / 3$ είναι σταθερή. Επίσης προκύπτει ότι αν αυξηθεί η απόσταση AB μεταξύ των ηλεκτροδίων, το ίδιο ποσοστό ρεύματος θα φτάσει σε μεγαλύτερο βάθος. Όμως η συνολική αντίσταση της ηλεκτρικής διαδρομής αυξάνει με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων και το ρεύμα, ως γνωστόν, προτιμά την πιο σύντομη και μικρότερης αντίστασης διαδρομή. Έτσι, για να αναγκαστεί το ρεύμα να κινηθεί κατά μήκος μεγαλύτερων διαδρομών, απαιτείται μεγαλύτερη πηγή ρεύματος. Επομένως η απόσταση μεταξύ

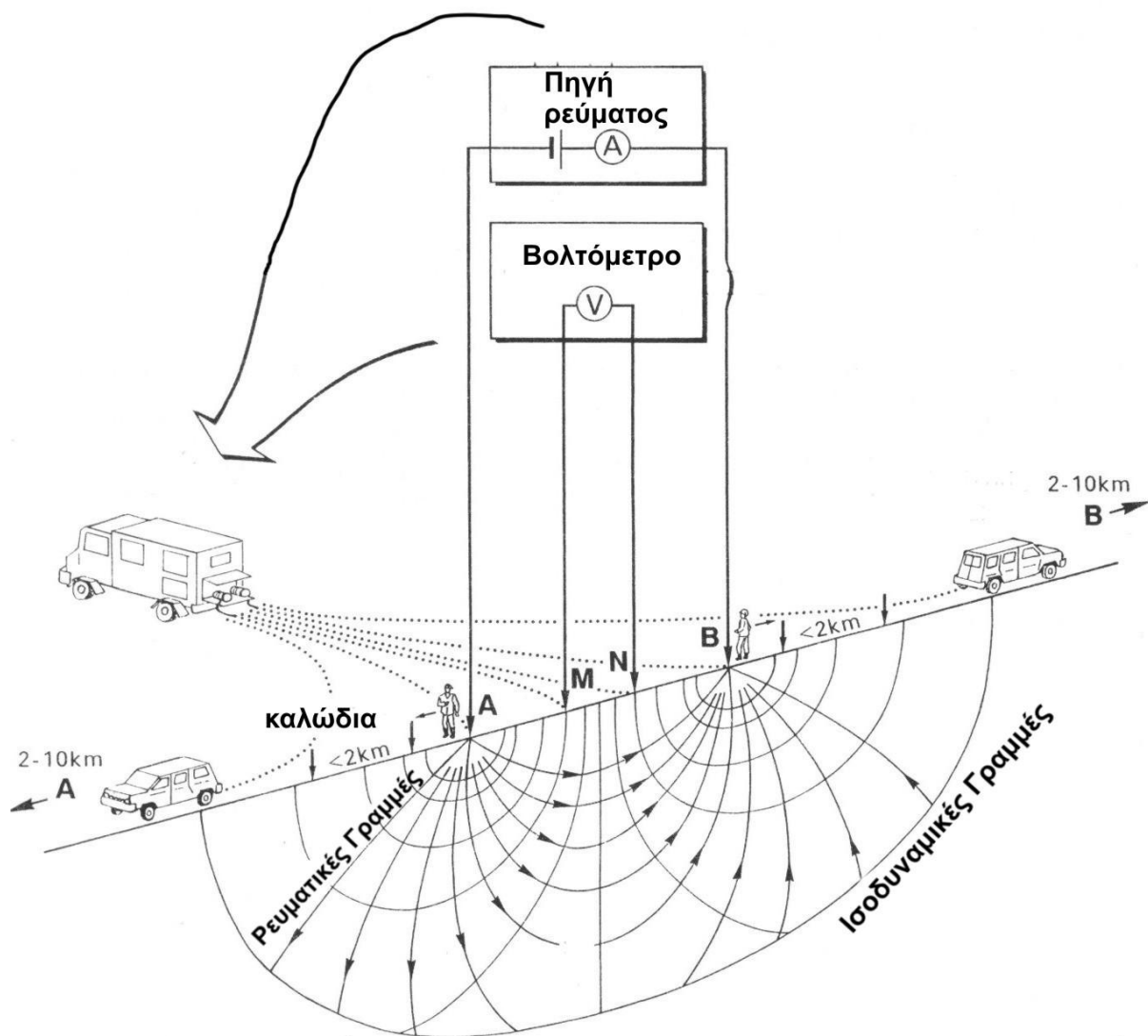
των ηλεκτροδίων καθορίζεται από τις δυνατότητες της πηγής ρεύματος, αλλά και από το επιθυμητό βάθος διασκόπησης. Όσο αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων, τόσο μεγαλύτερο είναι και το βάθος διασκόπησης. Στο **Σχήμα 2.11** παρουσιάζεται η κατανομή των γραμμών ρεύματος και δυναμικού για δυο ηλεκτρόδια ρεύματος, στην επιφάνεια ομογενούς υπεδάφους.

2.2. Μέτρηση της Φαινόμενης Ειδικής Αντίστασης

2.2.1. Εξοπλισμός Υπαίθρου

Η Μέθοδος της Φαινόμενης Ειδικής Αντίστασης, για να μετρήσουμε την φαινόμενη ειδική 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.

Στην μέθοδο αυτή γίνεται η εισαγωγή ρεύματος στη γη με δυο ηλεκτρόδια (συνήθως C_1 , C_2 ή A , B) και στη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού που προκαλείται σε άλλα δυο ηλεκτρόδια (P_1 , P_2 ή M , N). Στο **Σχήμα 2.12** παρουσιάζεται σχηματικά η γενική περίπτωση διάταξης των ηλεκτροδίων και του εξοπλισμού με τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης. Τα ηλεκτρόδια C_1 και C_2 (A , B) αποτελούν το κύκλωμα ρεύματος, ενώ τα ηλεκτρόδια P_1 και P_2 (M , N) το κύκλωμα δυναμικού. Για να είναι πιο σωστά και αξιόπιστα τα αποτελέσματα, θα πρέπει τα δυο αυτά κυκλώματα να είναι ανεξάρτητα και σε απόσταση μεταξύ τους.



$I =$ Εισερχόμενο Ρεύμα
 $U =$ Διαφορά Δυναμικού
 $A, B =$ Ηλεκτρόδια Ρεύματος
 $M, N =$ Ηλεκτρόδια Δυναμικού

Σχήμα 2.12. Βασική Αρχή των Μετρήσεων και πιθανό Ηλεκτρικό Πεδίο

Γεωηλεκτρικών Διασκοπήσεων Συνεχούς Ρεύματος (Vogelsang, 1995)

Αναλυτικά ο εξοπλισμός αποτελείται:

Ι. Πηγή Ηλεκτρικού Ρεύματος

Ποικίλλει, ανάλογα με το είδος του υπό διερεύνηση προβλήματος. Για συνήθη αναπτύγματα ηλεκτροδίων ρεύματος ($C_1C_2 < 1000m$), χρησιμοποιούνται συσσωρευτές, ενώ για μεγαλύτερα ανοίγματα, προτιμώνται πηγές μεγάλης ισχύος, όπως βενζινοκίνητες γεννήτριες ρεύματος.

II. Αμπερόμετρο

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα απλό αμπερόμετρο, το οποίο όμως, υπόκειται στον περιορισμό να μπορεί να μετρήσει ποσότητα ρεύματος από λίγα milliamps έως και 0.5amps, με μεγάλη ακρίβεια και με σφάλμα που να μην υπερβαίνει το 2% στην πλήρη κλίμακα. Πολλά από τα σύγχρονα όργανα ρυθμίζονται έτσι ώστε ο χειριστής να καθορίζει την ποσότητα του ρεύματος που διοχετεύεται στο έδαφος και το όργανο να επιχειρεί να την αποδώσει.

III. Υψηλής Εμπέδησης Βολτόμετρο

Τα σύγχρονα, υψηλής ακρίβειας, βολτόμετρα έχουν αντιστάσεις εισόδου της τάξης των 10MΩ ή και μεγαλύτερες, με αποτέλεσμα να είναι ικανά να μετρούν δυναμικά από 10μV έως μερικά V. Αυτά τα υψηλής εμπέδησης βολτόμετρα είναι συζευγμένα με ένα καταγραφικό σύστημα, για την περίπτωση που το μετρούμενο δυναμικό είναι πολύ μικρό.

IV. 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.

V. Καλώδια

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

VI. Ηλεκτρόδια

Πρόκειται για ράβδους από αλουμίνιο, χαλκό ή χάλυβα, μήκους περίπου 60cm. οι ράβδοι αυτές πακτώνονται γερά στο έδαφος και συνδέονται με τα υπόλοιπα ηλεκτρικά εξαρτήματα των κυκλωμάτων ρεύματος και δυναμικού, μέσω των καλωδίων.

Σε πολλά σύγχρονα γεωφυσικά όργανα, περιλαμβάνονται το αμπερόμετρο, το υψηλής εμπέδησης βολτόμετρο και το σύστημα αντιστάθμισης, με αποτέλεσμα αυτά να έχουν τη δυνατότητα να δίνουν απευθείας τις τιμές του λόγου της πτώσης τάσης προς το ρεύμα.

2.2.2. Σφάλματα Μετρήσεων στη Γεωφυσική Διασκόπηση

Όταν κάνουμε Γεωφυσική Διασκόπηση με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης υπάρχει ένα πλήθος παραγόντων, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τις μετρούμενες τιμές της τάσης και του ρεύματος, από τις οποίες θα υπολογίσουμε τη φαινόμενη ειδική αντίσταση. Οι παράγοντες αυτοί, οι οποίοι προκαλούν σφάλματα στις μετρήσεις, ονομάζονται πηγές θορύβου και οι σημαντικότεροι είναι οι εξής:

I. Πόλωση των Ηλεκτροδίων

Όταν ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο έλθει σε επαφή με κάποιον ηλεκτρολύτη, όπως το εδαφικό νερό, θα δημιουργήσει ένα μετρήσιμο δυναμικό επαφής, το οποίο μπορεί να αποτελεί ένα σημαντικό κλάσμα του δυναμικού που μετράται με τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης συνεχούς ρεύματος. Για την καταπολέμηση του θορύβου αυτού υπάρχουν δυο λύσεις:

A) Χρήση μη πολούμενων ηλεκτροδίων.

B) Περιοδική αντιστροφή της ροής ρεύματος στα ηλεκτρόδια ρεύματος ή χρήση χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος.

II. Τελλουρικά Ρεύματα

Η παρουσία αυτών των φυσικών ρευμάτων στη γη μπορεί να παράγει μετρήσιμη τάση στα ηλεκτρόδια δυναμικού, ακόμα και όταν αυτά δεν διαρρέονται από ρεύμα. Αυτή η μορφή θορύβου, αντιστοιχεί με την προηγούμενη, μπορεί να καταργηθεί με την περιοδική αντιστροφή της ροής ρεύματος στα ηλεκτρόδια ρεύματος ή τη χρήση χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος.

III. Παρουσία Γειτονικών Αγωγών

Οι ηλεκτρικές διασκοπήσεις δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν σε περιοχές όπου υπάρχουν αγωγοί, σε επαφή με το έδαφος, αφού η παρουσία αγωγών αυτών θα λειτουργήσει στο σύστημα ως ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα.

IV. Χαμηλές τιμές Ειδικής Αντίστασης κοντά στην Επιφάνεια

Η ύπαρξη τους, σε πλήρη αντιστοιχία με την περίπτωση των γειτονικών αγωγών, ευνοεί τη διάχυση του ρεύματος κατά μήκος της επιφάνειας, δυσχεραίνοντας την κίνηση του προς τους βαθύτερους ορίζοντες.

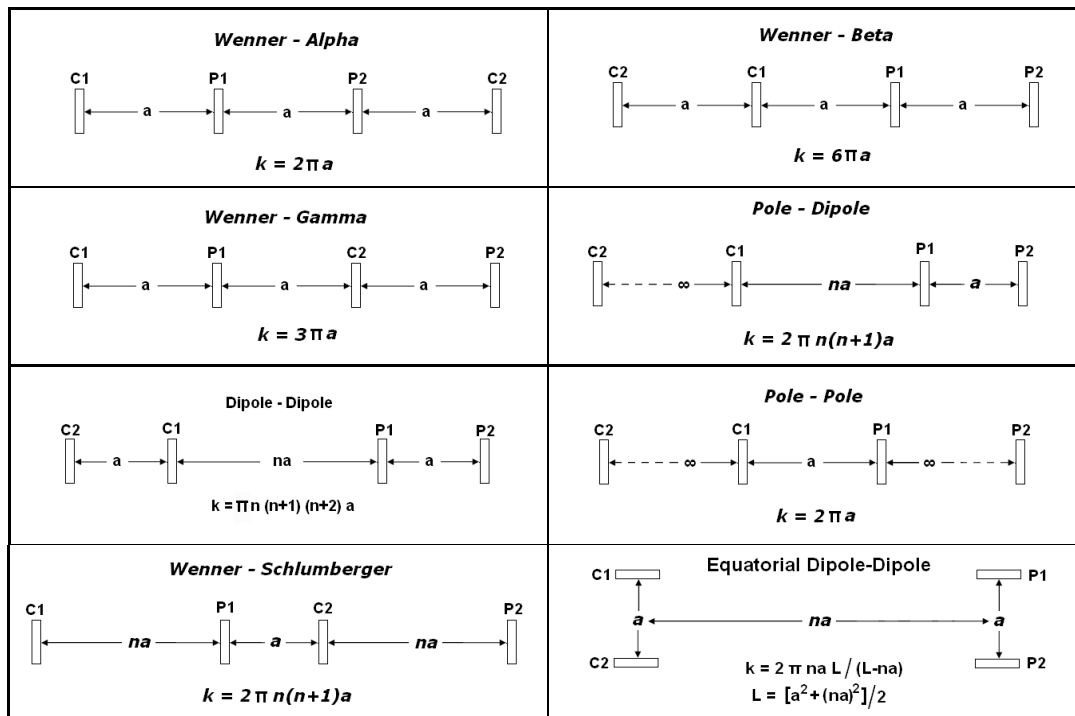
V. Γεωλογία και Τοπογραφία κοντά στα Ηλεκτρόδια

Κάθε μεταβολή στη γεωλογία ή στο περιεχόμενο νερό γύρω από ένα ηλεκτρόδιο, η οποία προκαλεί μεταβολές στην ειδική αντίσταση κοντά στην επιφάνεια, θα επηρεάσει σημαντικά τις μετρούμενες τιμές της ειδικής αντίστασης. Επιπλέον, το ίδιο αποτέλεσμα θα έχουν και τυχόν τοπογραφικές ανωμαλίες, οι οποίες επηρεάζουν τη ροή ρεύματος, συγκεντρώνοντας το στις κοιλάδες και διασκορπίζοντας το στους λόφους. Αξίζει να σημειωθεί, ότι ιδιαίτερη ευαισθησία σε γεωλογικούς και τοπογραφικούς παράγοντες παρουσιάζουν, κυρίως τα ηλεκτρόδια δυναμικού, των οποίων η τοποθέτηση απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

VI. Επαγωγή του Ρεύματος και Καλώδια Ρεύματος

Το ρεύμα το οποίο διαρρέει τα καλώδια που συνδέουν την πηγή με τα ηλεκτρόδια ρεύματος, μπορεί να παράγει ένα επαγόμενο ρεύμα στα καλώδια που συνδέουν το βολτόμετρο με τα ηλεκτρόδια τάσης, δημιουργώντας μια ψευδή καταγραφή. Η ελαχιστοποίηση αυτής της πηγής θορύβου επιτυγχάνεται με τη διατήρηση μια απόστασης της τάξης του ενός με δυο μέτρων μεταξύ των καλωδίων ρεύματος και δυναμικού.

2.2.3. Διατάξεις ηλεκτροδίων



Σχήμα 2.13.(α) Συνήθεις διατάξεις ηλεκτροδίων (Μαυρομμάτης, 2007)

Σε κάθε γεωφυσική μέτρηση τα ηλεκτρόδια ρεύματος, δυναμικού και οι μεταξύ τους αποστάσεις διατάσσονται στο έδαφος με συγκεκριμένο τρόπο ανάλογα με τον εκάστοτε στόχο της έρευνας. Στο Σχήμα 2.13 (α) και 2.13 (β) παρουσιάζονται οι σημαντικότερες διατάξεις ηλεκτροδίων και παρακάτω αναλύονται με τις αντίστοιχες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις (ο συντελεστής k αποτελεί τον γεωμετρικό συντελεστή κάθε διάταξης):

• **Διάταξη Schlumberger:** (Wenner – Schlumberger) Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν σταθερή απόσταση μεταξύ τους που ισούται με na , ενώ η απόσταση μεταξύ των διπόλων C_1P_1 και C_2P_2 ισούται με a . Βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις L και l αντίστοιχα. Χρησιμοποιείται κυρίως για Βυθοσκόπηση. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{\pi \cdot (L^2 - l^2)}{2l} \quad (2.20)$$

• **Διάταξη Wenner:** (Wenner Alpha, Beta και Gamma) Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a . Η μεταξύ τους διαφορά εντοπίζεται στη σειρά διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Χρησιμοποιείται κυρίως για Χαρτογράφηση και Βυθοσκόπηση. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \cdot 2\pi \cdot a \quad (2.21)$$

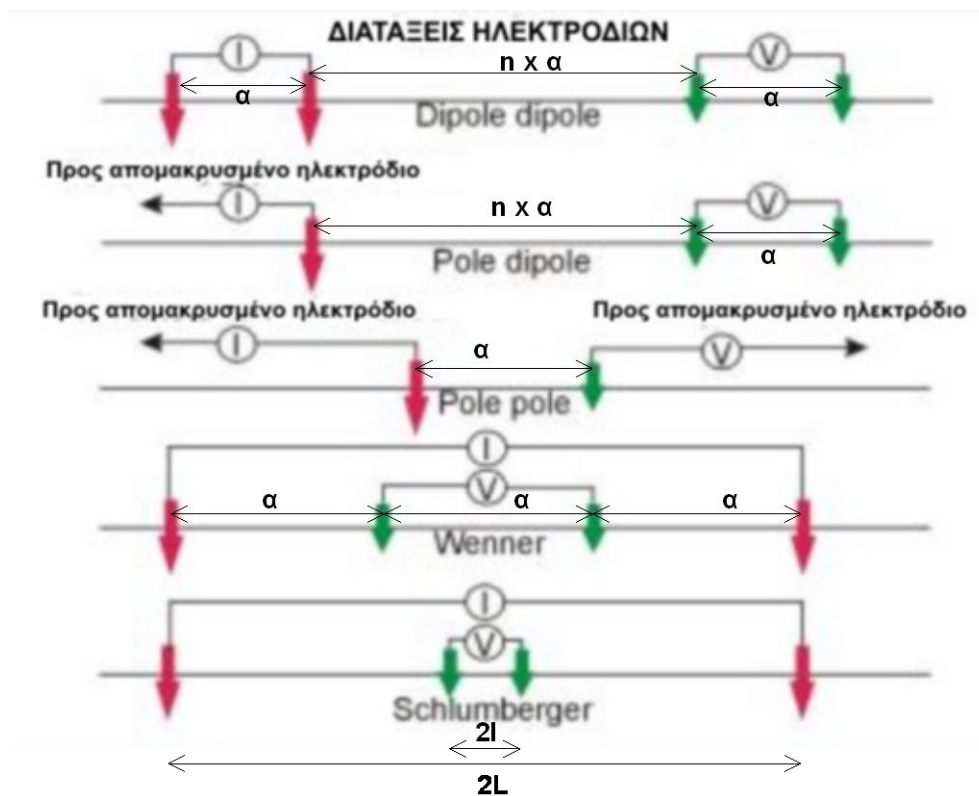
• **Διάταξη Dipole–Dipole:** Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν απόσταση α , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού, ενώ τα δίπολα μεταξύ τους απέχουν απόσταση πολλαπλάσια της απόστασης α ($n\alpha$). Χρησιμοποιείται κυρίως για Τομογραφία και Βυθοσκόπηση. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \cdot \pi \cdot n \cdot \alpha + 1 \cdot \alpha + 2 \cdot \alpha \quad (2.22)$$

• **Διάταξη Pole–Pole:** Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση α , 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:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \cdot 2\pi \cdot \alpha \quad (2.23)$$

• **Διάταξη Pole–Dipole:** Το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος (C_2) τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι α , ενώ η απόσταση του ηλεκτροδίου ρεύματος από το ηλεκτρόδιο δυναμικού P_1 είναι $n\alpha$. Χρησιμοποιείται κυρίως για Τομογραφία και Βυθοσκόπηση.



Σχήμα 2.13.(β) Συνήθεις διατάξεις ηλεκτροδίων (Αποστολόπουλος, 2008)

2.2.4. Επιλογή της Κατάλληλης Διάταξης

Σε κάθε γεωφυσική έρευνα πρέπει να γίνει και η κατάλληλη επιλογή της διάταξης των ηλεκτροδίων. Οι σημαντικότεροι παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν την επιλογή της κατάλληλης, κάθε φοράς διάταξης ηλεκτροδίων, καθώς και η κατάταξη των διαφόρων διατάξεων, με σειρά φθίνουσας απόδοσης, παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Λόγος σήματος προς θόρυβο

Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του λόγου αυτού, τόσο ακριβέστερες είναι οι μετρήσεις μας και η συνακόλουθη εκτίμηση μας σχετικά με τη δομή του υπεδάφους. Η μετρούμενη κάθε φορά διαφορά δυναμικού (σήμα), η οποία καθορίζει ουσιαστικά και την τιμή του λόγου, είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού προς αυτή των ηλεκτροδίων ρεύματος και όταν τα πρώτα βρίσκονται ανάμεσα στα δεύτερα. Με βάση τα δεδομένα αυτά, οι βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων κατατάσσονται, με σειρά φθίνουσας απόδοσης, ως εξής:

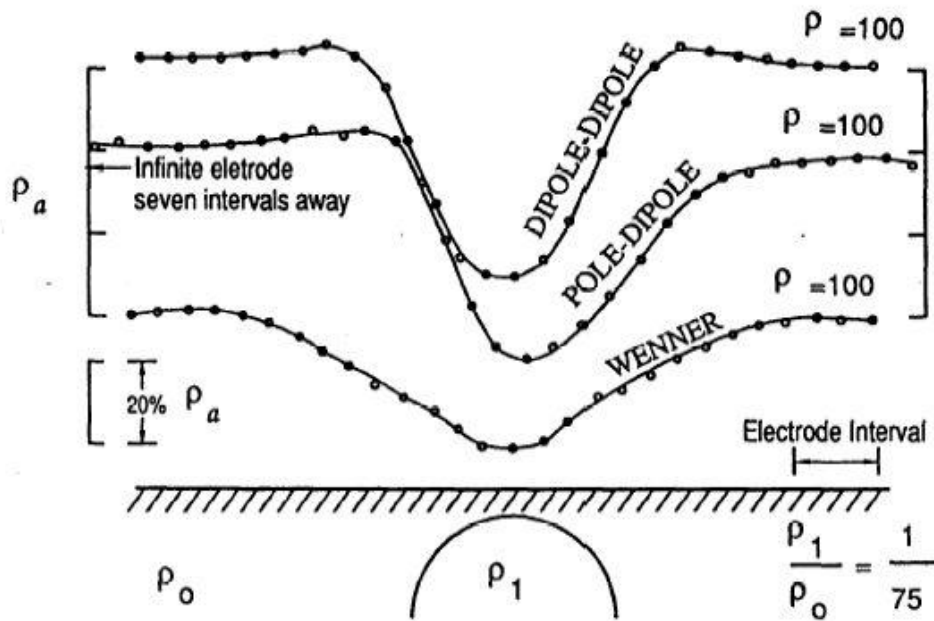
- I. Wenner
- II. Schlumberger
- III. Pole–Dipole
- IV. Dipole–Dipole

2. Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες

Σύμφωνα με έρευνες των Coggon (1973) και Sumner (1976), η διάταξη Dipole–Dipole παρουσιάζει την πιο έντονη μεταβολή φαινόμενης ειδικής αντίστασης και, κατά συνέπεια, τη μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς οριζόντιες ανομοιογένειες, γεγονός που φαίνεται με σαφήνεια στο **Σχήμα 2.14**.

Η κατάταξη των υπόλοιπων διατάξεων ηλεκτροδίων έχει ως εξής:

- I. Dipole–Dipole
- II. Pole–Dipole
- III. Schlumberger
- IV. Wenner



Σχήμα 2.14. Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες (Sumner, 1976)

3. Διαχωρισμός δομών με απότομη κλίση

Σύμφωνα με έρευνες του Coggon (1973), η κατάταξη των σημαντικότερων διατάξεων ηλεκτροδίων, με βάση την ικανότητά τους να διαχωρίζουν δομές, οι οποίες βυθίζονται με απότομη κλίση, είναι οι εξής:

- I. Schlumberger
- II. Wenner
- III. Dipole–Dipole
- IV. Pole–Dipole

4. Ηλεκτρομαγνητική σύζευξη

Η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των καλωδίων διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, κατά την εφαρμογή της μεθόδου της Επαγόμενης Πολικότητας, σε αγώγιμο έδαφος, όπου επιχειρείται η μέτρηση της ειδικής αντίστασης συναρτήσεως της συχνότητας. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται εντονότερο, με την αύξηση της συχνότητας του ρεύματος, της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και την αγωγιμότητα του ημιχώρου. Με βάση τα δεδομένα αυτά, οι βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων κατατάσσονται, με σειρά φθίνουσας απόδοσης, ως εξής:

- I. Dipole–Dipole
- II. Pole–Dipole
- III. Schlumberger
- IV. Wenner

5. Διαχωρισμός οριζοντίων στρωμάτων

Σύμφωνα με έρευνες του Oldenburg (1978), η κατάταξη των σημαντικότερων διατάξεων ηλεκτροδίων, με βάση την ικανότητά τους να διαχωρίζουν οριζόντια στρώματα, είναι οι εξής:

- I. Schlumberger και Wenner
- II. Dipole–Dipole και Pole–Dipole

6. Ευαισθησία στη μορφολογία του υποβάθρου

Σύμφωνα με έρευνες του Coggon (1973), η κατάταξη των σημαντικότερων διατάξεων ηλεκτροδίων, με βάση την ευαισθησία στη μορφολογία του υποβάθρου, είναι οι εξής:

- I. Dipole–Dipole
- II. Pole–Dipole
- III. Schlumberger και Wenner

7. Βάθος διασκόπησης

Το βάθος διασκόπησης για τους Roy και Apparao (1971) της Schlumberger είναι $0.125L$ και για την Dipole–Dipole $0.195L$, όπου L η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Γενικά ως βάθος διασκόπησης είναι το μέγιστο βάθος στο οποίο δεδομένος στόχος μπορεί να ανιχνευθεί, με δεδομένη διάταξη ηλεκτροδίων.

Όσον αφορά την παραπάνω άποψη υπάρχουν επιφυλάξεις, γιατί το βάθος διασκόπησης εξαρτάται από την ευαισθησία σε επιφανειακές ή βαθιές ανομοιογένειες, σε τοπογραφία, στην κλίση των στρωμάτων, στο ανάγλυφο του υποβάθρου, κλπ, ενώ ο Van Zijl (1985) στην ερμηνεία βυθοσκοπήσεων Schlumberger εξαρτά το βάθος διασκόπησης από το μοντέλο των στρωμάτων του υπεδάφους.

8. 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.

9. Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος

Οι διατάξεις Schlumberger και Wenner έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται σε βυθοσκοπήσεις και η συνεχώς αυξανόμενη απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος με 6 αποστάσεις ανά λογαριθμικό κύκλο (1m, 1.47m, 2.15m, 3.16m, 4.64m, 6.81m, 10m, 14.7m, 21.5m, 31.6m, ...) δίνει λεπτομερή ανάλυση της ειδικής αντίστασης σε βάθος, σε αντίθεση με τη διάταξη dipole–dipole, που συνήθως οι μετρήσεις είναι 6 με βήμα μέτρησης το μήκος δίπολου.

Με βάση τα δεδομένα αυτά, οι βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων κατατάσσονται, με σειρά φθίνουσας απόδοσης, ως εξής:

- I. Schlumberger και Wenner
- II. Dipole–Dipole

III. Pole–Dipole

10. Ευαισθησία στην κλίση

Σύμφωνα με μελέτες του Coggon (1973), καθώς και των Van Nostrand και Cook (1966), η κατάταξη των σημαντικότερων διατάξεων ηλεκτροδίων, με βάση την ευαισθησία τους στην κλίση των στρωμάτων, είναι η εξής:

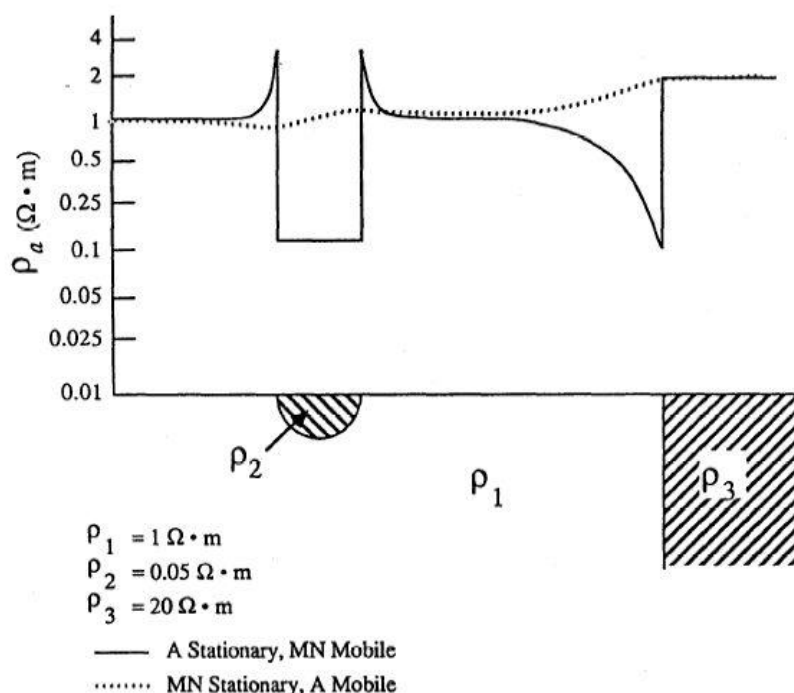
I. Schlumberger και Wenner

II. Dipole–Dipole

III. Pole–Dipole

11. Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση βυθοσκοπήσεων

Ο Kunetz (1966) και ο Van Zijl (1985) δείχνουν ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση επηρεάζεται πολύ περισσότερο αν το ηλεκτρόδιο δυναμικού διέλθει από επιφανειακή ανομοιογένεια παρά από το εάν το ηλεκτρόδιο ρεύματος περάσει (Σχήμα 2.15). Έτσι η διάταξη Schlumberger επηρεάζεται λιγότερο, αφού τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σε μια περιοχή επί περισσότερο διάστημα μετρήσεων και έτσι πλεονεκτεί των άλλων διατάξεων στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων που μας ενδιαφέρουν οι βαθιές δομές.



Σχήμα 2.15. Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση βυθοσκοπήσεων, ηλεκτρόδια ρεύματος [διακεκομμένη γραμμή] και δυναμικού [συνεχής γραμμή] (Van Zijl, 1985)

Η κατάταξη των διατάξεων με σειρά αυξανόμενης ευαισθησίας στις επιφανειακές ανομοιογένειες (άρα φθίνουσας απόδοσης), είναι οι εξής:

- I. Schlumberger
- II. Wenner
- III. Pole–Dipole
- IV. Dipole–Dipole

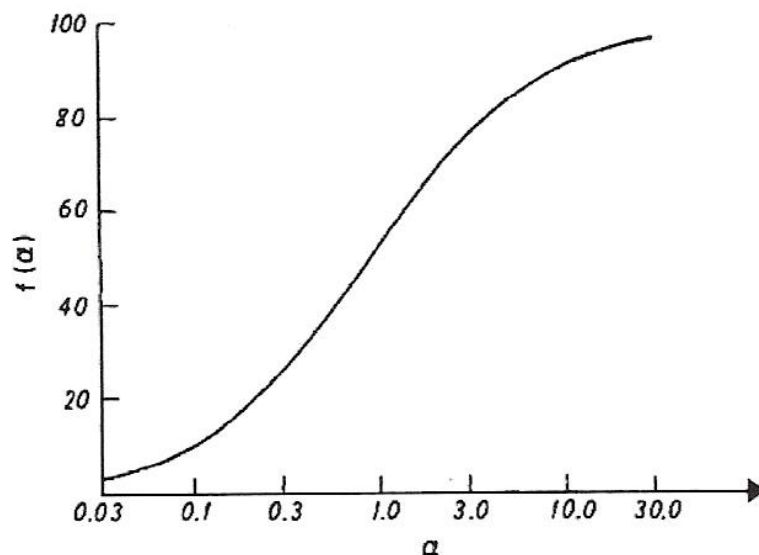
12. Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση ηλεκτρικών χαρτογραφήσεων

Σύμφωνα με μελέτες του Dey (Dey et al, 1973), η κατάταξη των σημαντικότερων διατάξεων ηλεκτροδίων, που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις, με βάση την ευαισθησία τους στις επιφανειακές ανομοιογένειες, είναι η εξής:

- I. Pole–Dipole
- II. Dipole–Dipole
- III. Schlumberger και Wenner

13. Διεσδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος

Για λεπτό αγωγίμο κάλυμμα πάνω σε μη αγωγίμο υπόβαθρο, οι Edward και Howell (1976) έχουν προσδιορίσει το επί τις εκατό (%) ποσοστό ρεύματος που μένει στο κάλυμμα, $f(a)$ (Σχήμα 2.16).



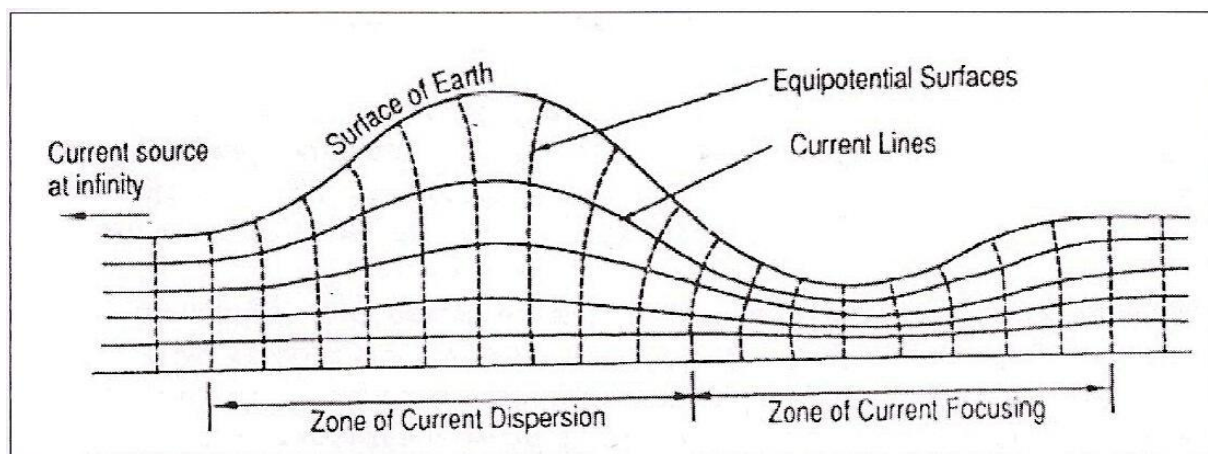
Σχήμα 2.16. Η συνάρτηση $f(a)$, για τον υπολογισμό του ποσοστού του ρεύματος που παραμένει σε λεπτό αγωγίμο στρώμα, το οποίο βρίσκεται πάνω από αντιστατικό ημιχώρο (Edwards & Howell, 1976)

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.

Η δυνατότητα μεγάλου ανοίγματος ηλεκτροδίων ρεύματος της διάταξης Schlumberger μαζί με την ευαισθησία σε βάθος που έχει, της παρέχουν ένα σαφές προβάδισμα.

14. Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας

Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δημιουργεί πύκνωση και αραίωση των ρευματικών γραμμών (Fox et al, 1980). Σε μια κοιλάδα, η πύκνωση των ρευματικών γραμμών δημιουργεί μετρήσεις μικρών τιμών φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων με διάταξη dipole–dipole (Fox et al, 1980) σαν να υπάρχει στην περιοχή σώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 2.17**).



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

Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι διατάξεις ηλεκτροδίων πρέπει να έχουν διεύθυνση παράλληλη με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής.

15. Επιλογή Διατάξεων Ηλεκτροδίων

Τα περισσότερα πλεονεκτήματα, ως διάταξη ηλεκτροδίων για βυθοσκόπηση, έχει η διάταξη Schlumberger. Οι αποστάσεις 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 δυνατό 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 (6) μετρήσεις ανά λογαριθμικό κύκλο του ημίσεως της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως). Η διάταξη Dipole–Dipole, παρ' όλο το μεγαλύτερο βάθος ανίχνευσης, λόγω της μετακίνησης των ηλεκτροδίων δυναμικού υφίσταται τον θόρυβο που δημιουργούν οι παράπλευρες επιφανειακές ανομοιογένειες.

Για την ανίχνευση παράπλευρων ανομοιογενειών, πλεονεκτεί η διάταξη Dipole–Dipole (Sumner, 1976) και έτσι λόγω και του μεγάλου εμπειρικού βάθους ανίχνευσης $0.195L$ (όπου L η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ακραίων ηλεκτροδίων, Roy και Apparao, 1971), η διάταξη Dipole–Dipole είναι ιδανική για τον εντοπισμό του ανάγλυφου των ασυνεχειών μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων.

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, παρόλο που έχει μεγαλύτερο βάθος ανίχνευσης λόγω της μετακίνησης των ηλεκτροδίων δυναμικού υφίσταται το θόρυβο που δημιουργούν οι παράπλευρες επιφανειακές ανομοιογένειες.

2.3. Μετρήσεις και Τεχνικές Διασκόπησης Υπαίθρου

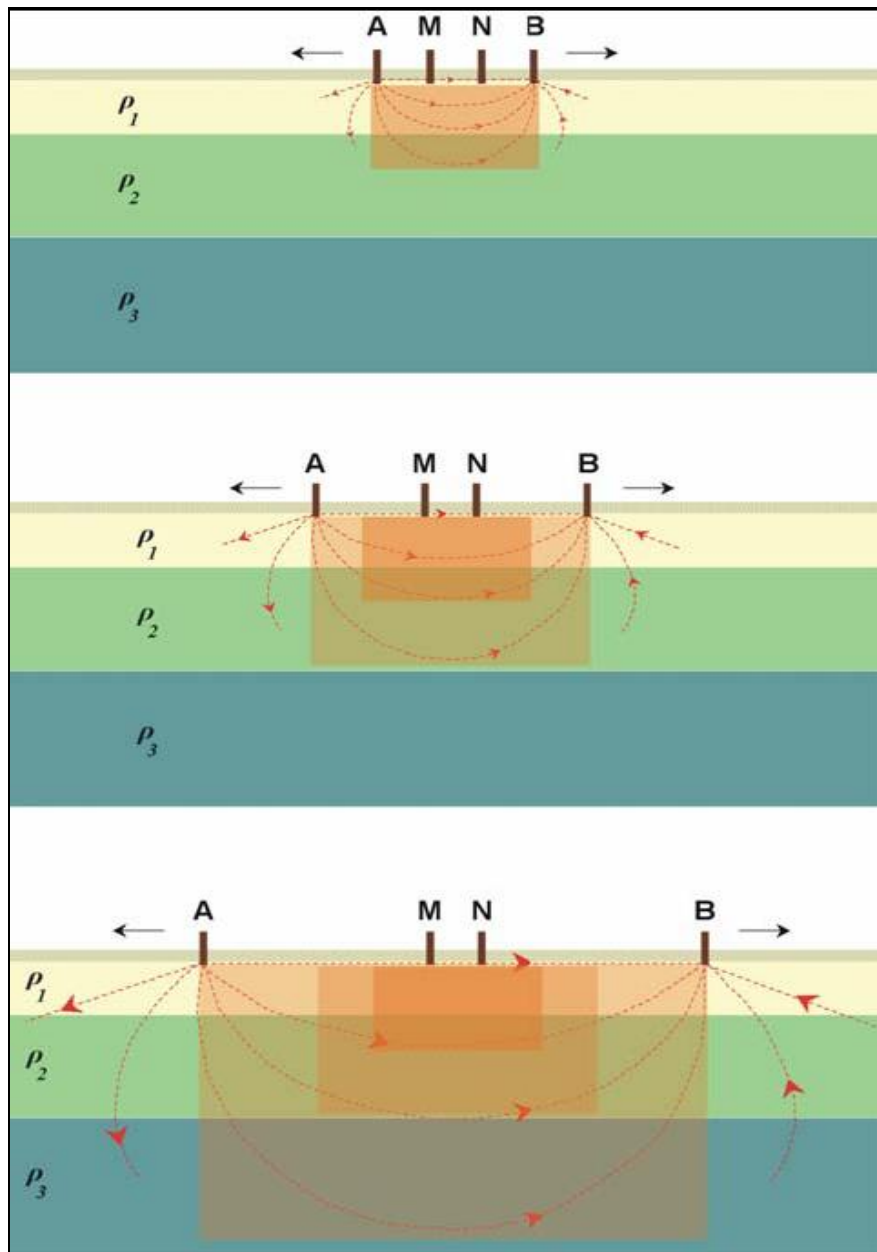
Για την Διασκόπηση της Υπαίθρου υπάρχουν τρεις τεχνικές με τις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην ύπαιθρο, ανάλογα με το σκοπό της έρευνας. Αυτές είναι η *Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση*, η *Οριζόντια Ηλεκτρική Χαρτογράφηση* και η *Γεωηλεκτρική Τομογραφία*.

Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται διότι το βάθος ανίχνευσης εξαρτάται κυρίως από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος A και B (**Σχήμα 2.12** Βασική Αρχή των Μετρήσεων και πιθανό Ηλεκτρικό Πεδίο Γεωηλεκτρικών Διασκοπήσεων Συνεχούς Ρεύματος (Vogelsang, 1995)). Δηλαδή όσο αυξάνει η απόσταση AB, τόσο βαθύτεροι σχηματισμοί διαρρέονται από το ρεύμα και η διαφορά δυναμικού στα MN αφορά βαθύτερες ισοδυναμικές επιφάνειες και τα δυο κατά συνέπεια επηρεάζουν την τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

2.3.1. Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση

Στις **ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (Vertical Electrical Soundings η συντομία VES)**, 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. Αυτό μπορούμε να το κατανοήσουμε με το **Σχήμα 2.18** όπου φαίνεται ότι τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απομακρύνονται σταδιακά μεταξύ τους και συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης το οποίο παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας.

Από το **Σχήμα** παρατηρούμε ότι καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνει, μεγαλώνει και ο συνολικός όγκος της γης που ελέγχεται από την μέτρηση, 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 γήινοι όγκοι που ελέγχονται από τις μετρήσεις αλληλεπικαλύπτονται.

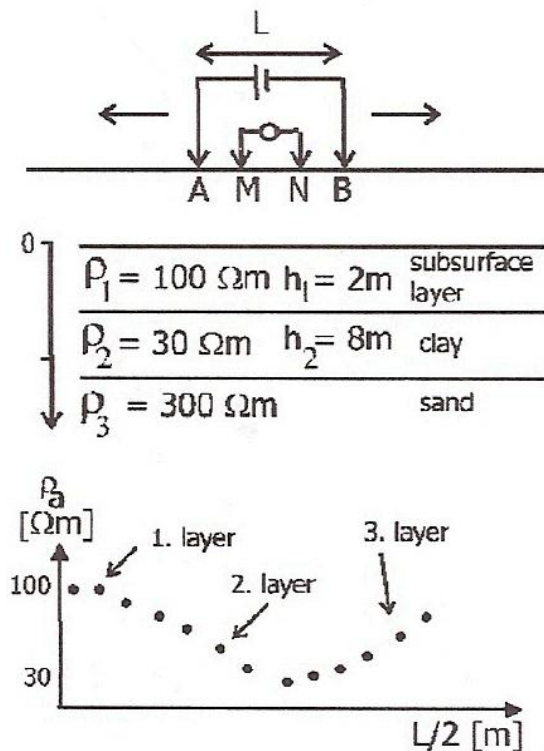


Σχήμα 2.18. Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Λούης, 2003)

Με την ερμηνεία των ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων καταλήγουμε στην έκφραση μιας αμοιβαίας σχέσης μεταξύ των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και της γεωλογίας της περιοχής έρευνας. Βασίζεται στη σύγκριση πολλών πειραματικών γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και στην παρατήρηση κοινών χαρακτηριστικών και προοδευτικών αλλαγών μεταξύ του, παρά στην μελέτη καθεμιάς εξ' αυτών ξεχωριστά. Οι συνδυασμένες πληροφορίες μεγάλου πλήθους γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων και γεωλογικών και γεωτρητικών δεδομένων, οδηγούν συνήθως σε μια ποσοτική και αξιόπιστη ερμηνεία. Η ερμηνεία διακρίνεται σε δυο φάσεις. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τη φυσική ερμηνεία, όπου προσδιορίζονται οι γεωηλεκτρικές παράμετροι του υπεδάφους. Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει την αμοιβαία σχέση των γεωηλεκτρικών παραμέτρων με τη γεωλογία.

Η μεταβολή των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης δίνει μια πρώτη εικόνα των μεταβολών των ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων στρωμάτων εις βάθος. Αντικείμενο της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης είναι η δημιουργία του γεωηλεκτρικού μοντέλου του υπεδάφους

(υπολογισμός πάχους και ειδικής αντίστασης του κάθε στρώματος) από τις μετρούμενες τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης στις διάφορες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος.

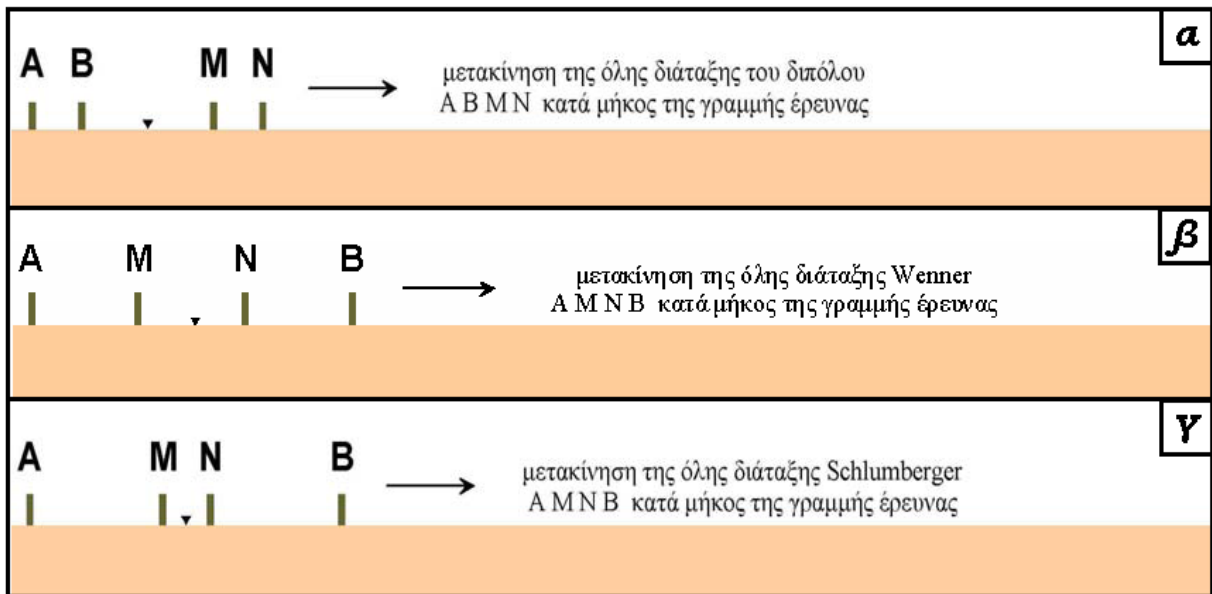


Σχήμα 2.19. Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση με διάταξη Schlumberger (Αποστολόπουλος, 2008)

Συνήθως όταν θέλουμε να διασκοπήσουμε εις βάθος με την ηλεκτρική βυθοσκόπηση (**Σχήμα 2.19**), χρησιμοποιούμε την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Μετακινούμε συμμετρικά σε μεγαλύτερες αποστάσεις τα ηλεκτρόδια ρεύματος κρατώντας σταθερά τα ηλεκτρόδια δυναμικού, έως ότου 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.

2.3.2. Οριζόντια Ηλεκτρική Χαρτογράφηση

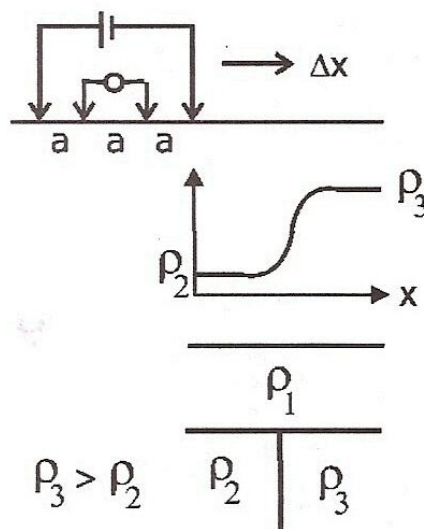
Στις οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις (Resistivity Profiling), μπορούμε να σαρώσουμε πλευρικά μια ζώνη συγκεκριμένου πάχους και να μελετήσουμε τη πλευρική διαφοροποίηση του υλικού της ζώνης από τη μελέτη της οριζόντιας (πλευρικής) μεταβολής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Στη περίπτωση αυτή τα ηλεκτρόδια της διάταξης ρεύματος και δυναμικού παραμένουν σταθερά και μετακινείται όλη η διάταξη κατά μήκος μιας γραμμής ή χωρικά σε μια ευρύτερη περιοχή (**Σχήμα 2.20**).



Σχήμα 2.20. Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης

Dipole–Dipole (α), Wenner (β) και Schlumberger (γ) (Μαυρομμάτης, 2007)

Τα πειράματα αυτά παρέχουν μετρήσεις της χωρικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης για καθορισμένη απόσταση ηλεκτροδίων. Τα αποτελέσματα πολλών σειρών μετρήσεων ηλεκτρικής χαρτογράφησης (η οποία ονομάζεται και προφίλ ειδικής αντίστασης), χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση χαρτών που παρουσιάζουν καμπύλες ίσων τιμών φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Τα αποτελέσματα της έρευνας των οριζόντιων μεταβολών της ειδικής αντίστασης επιδέχονται μόνο ποιοτική ερμηνεία. Η ποιοτική ερμηνεία αποκτά μεγαλύτερη αξία αν συνδυαστεί με πληροφορίες που προέρχονται από βαθμονόμηση γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων με στοιχεία γεωτρήσεων που συνυπάρχουν στην περιοχή.



Σχήμα 2.21. Οριζόντια Ηλεκτρική Χαρτογράφηση με διάταξη Wenner (Αποστολόπουλος, 2008)

Συνήθως για οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις (**Σχήμα 2.21**) χρησιμοποιούμε την διάταξη Wenner μετακινώντας αυτήν ολόκληρη, με σταθερές τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων μεταξύ τους, κρατώντας έτσι το βάθος διασκόπησης σταθερό και διασκοπώντας παράπλευρα.

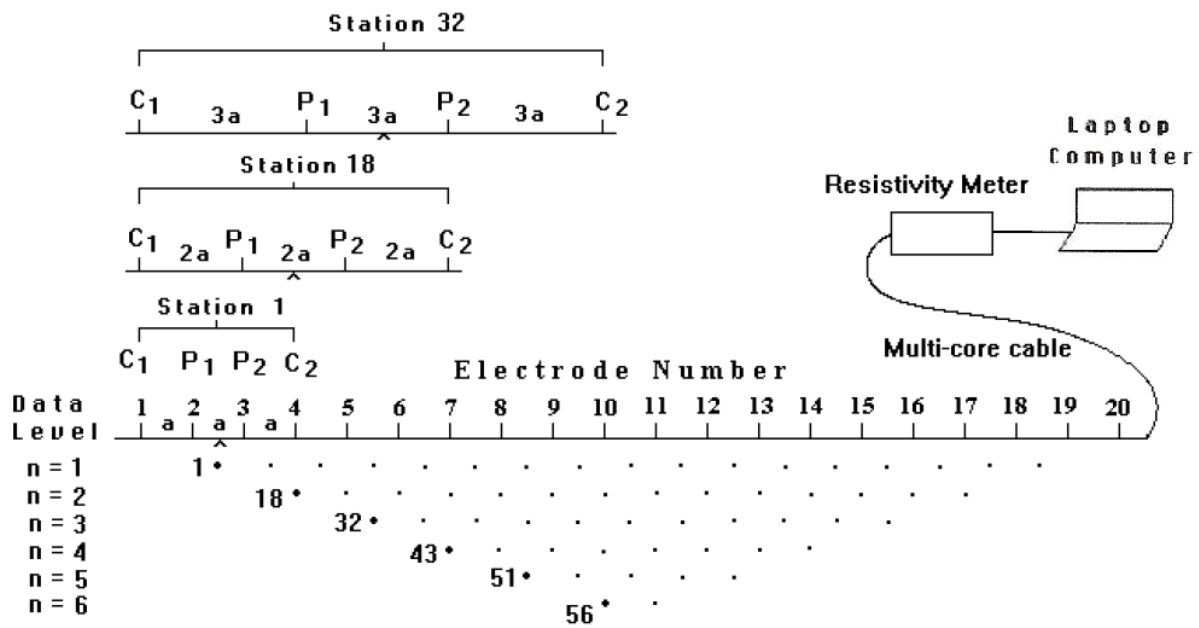
2.3.3. Γεωηλεκτρική Τομογραφία

Την Γεωηλεκτρική Τομογραφία την χρησιμοποιούμε όταν θέλουμε να έχουμε σε συγκεκριμένες θέσεις 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).

Ως γεωηλεκτρική τομογραφία είναι όλες οι τιμές που χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία ερμηνείας, που τελικά δίνει μια δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας.

Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι αντιμετωπίζει σύνθετες γεωλογικές δομές αίροντας την θεώρηση της οριζόντια στρωματωμένης γης, προβαίνοντας κατ' αυτό τον τρόπο με ασφάλεια στην ποσοτική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών μετρήσεων. Τα γεωηλεκτρικά τομογράμματα απεικονίζουν τομές βάθους, όπου αποτυπώνονται τόσο οι κατακόρυφες όσο και οι πλευρικές κατανομές της ειδικής αντίστασης των υπεδάφικων σχηματισμών. Η πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην κατεύθυνση της αυτοματοποίησης της λήψης γεωφυσικών δεδομένων και της αντιστροφής τους αύξησε δραστικά την εφαρμοσιμότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η μέθοδος χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, στην αρχαιομετρία, την υδρογεωλογία κλπ. σε πολλές χώρες.

Η δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής (**Σχήμα 2.22**). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους (Griffiths και Barker, 1993, Dahlin και Loke 1998, κ.α.), γεγονός το οποίο επιβάλλει τη χρησιμοποίηση αυτοματοποιημένων πολύ-ηλεκτροδιακών συστημάτων λήψης δεδομένων.



Sequence of measurements to build up a pseudosection

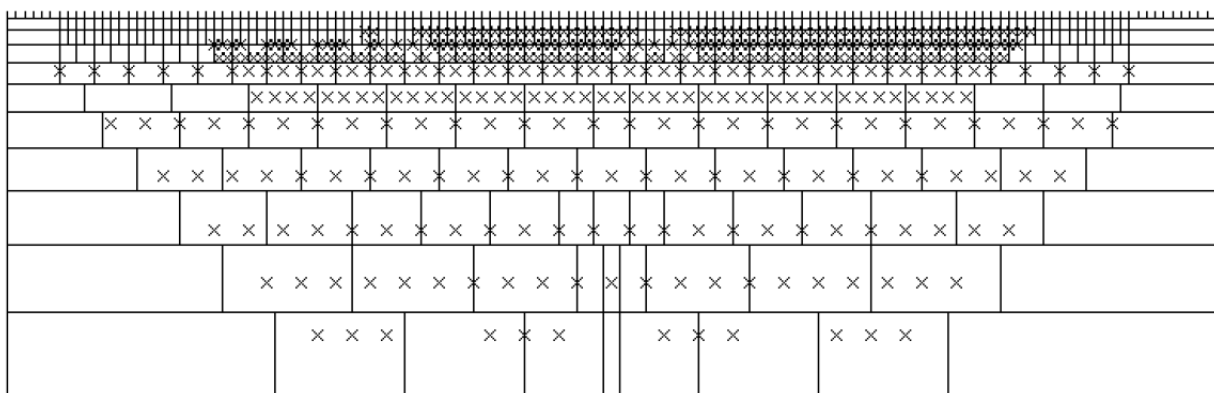
Σχήμα 2.22. Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση δισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για τη δημιουργία ψευδοτομής (Loke, 1996)

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων, οι οποίες παράγονται από τα συστήματα αυτά απαιτούν με τη σειρά τους αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία των δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντίστροφης δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν αυτή την ανάγκη (Oldenburg και Li, 1994, Tsourlos, 1995, Loke και Barker, 1996, κ.α.).

Με τις τεχνικές αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως, αυξάνει με το βάθος (Σχήμα 2.23, Σχήμα 2.24, Σχήμα 2.25 και Σχήμα 2.26).

GRUNDFOR SURVEY LINE 2

a). **ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS**



□ Model block **Number of model blocks 433**

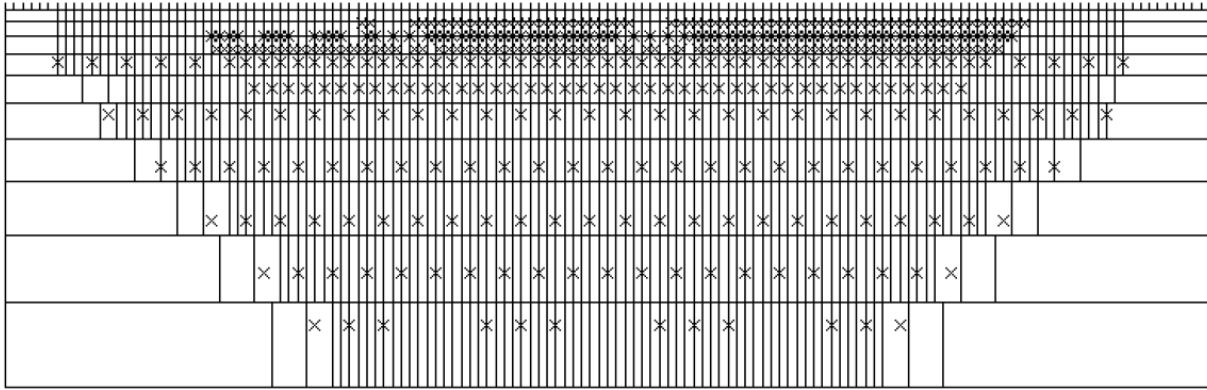
× Datum point **Number of datum points 447**

Number of model layers is 10 Unit electrode spacing is 5.0

Σχήμα 2.23. Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγόριθμου (Loke, 1996)

b).

ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS



□ Model block

Number of model blocks 1092

× Datum point

Number of datum points 447

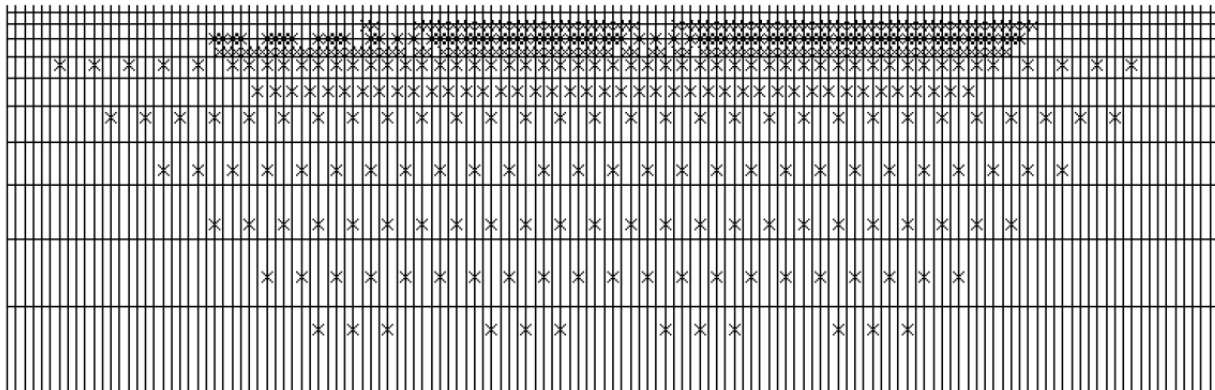
Number of model layers is 10

Unit electrode spacing is 5.0

Σχήμα 2.24. Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με περισσότερα κελιά από δεδομένα (Loke, 1996)

c).

ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS



□ Model block

Number of model blocks 1400

× Datum point

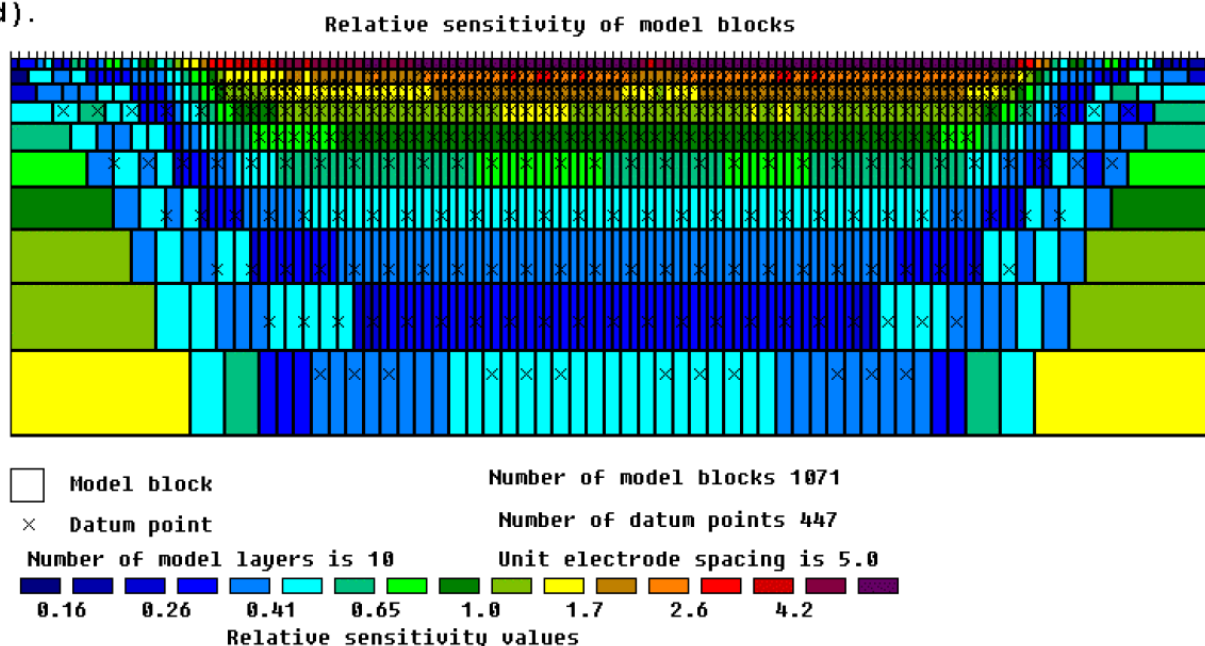
Number of datum points 447

Number of model layers is 10

Unit electrode spacing is 5.0

Σχήμα 2.25. Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με επιμήκυνση στις άκρες της γραμμής των μετρήσεων (Loke, 1996)

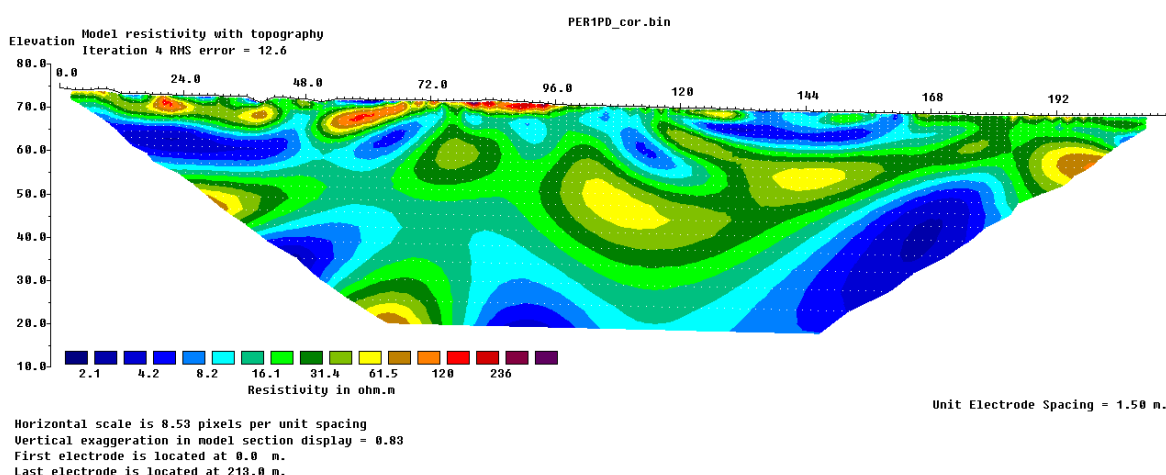
d).



Σχήμα 2.26. Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τις τιμές ευαισθησίας ενός μοντέλου ομογενούς γης (Loke, 1996)

Οι ειδικές ηλεκτρικές τους αντιστάσεις προσαρμόζονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και την απόκριση του μοντέλου (Σχήμα 2.27). Αρκετές προσεγγιστικές λύσεις έχουν δοθεί, προκειμένου να μειωθεί η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για τον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησίας, ο οποίος χρησιμοποιείται για την προσαρμογή του μοντέλου (π.χ. η μέθοδος Quasi-Newton, Loke και Barker, 1996). Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές είναι κατάλληλες κυρίως για μικρές αντιθέσεις ειδικής αντίστασης.

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.



Σχήμα 2.27. Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

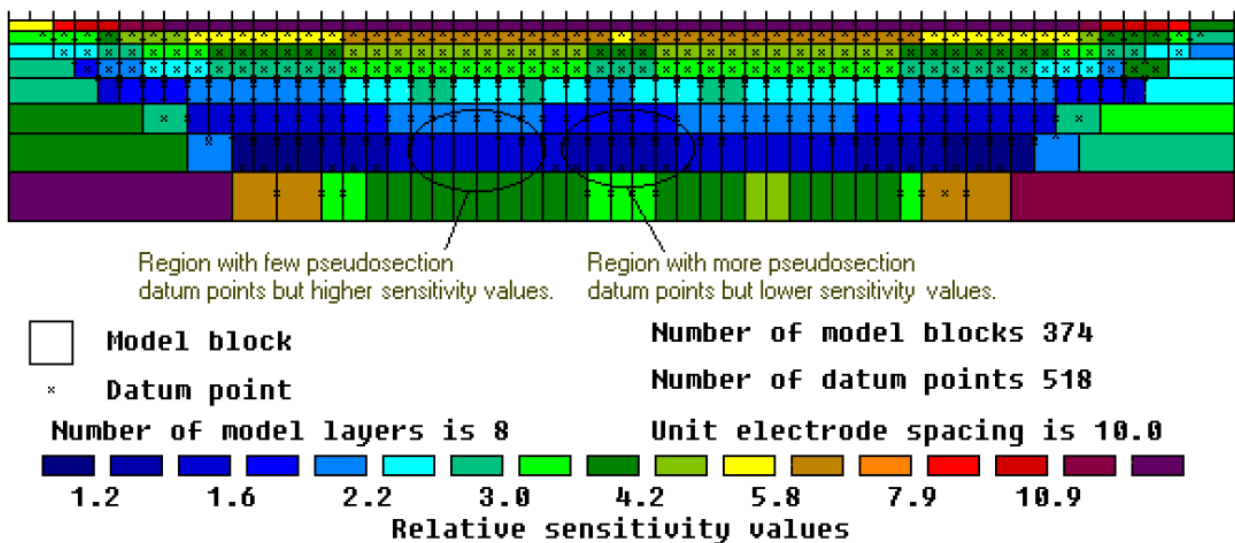
2.4. Μέθοδος της Αντιστροφής

Η μέθοδος της «Αντιστροφής των Δεδομένων» είναι η διαδικασία με την οποία γίνεται η συσχέτιση των φαινομένων ειδικών αντιστάσεων με τις πραγματικές για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η γεωλογική ερμηνεία τους. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σήμερα με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και ειδικών λογισμικών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται διότι κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης σε ανομοιογενή μέσα, παρουσιάζεται μεταβλητότητα στις προσδιοριζόμενες τιμές ανάλογα με τη διάταξη με την οποία πραγματοποιήθηκαν.

Γενικά η θεωρία της αντιστροφής αποτελεί ουσιαστικά μια μέθοδο βελτιστοποίησης των μεγεθών ενός αρχικού μοντέλου, με σκοπό την σύγκλιση του στις τιμές εκείνες που επαληθεύουν, με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, τα δεδομένα υπαίθρου.

Το αποτέλεσμα τα μεθόδου της αντιστροφής είναι η κατασκευή ενός μοντέλου κατανομής της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος (γεωλογική τομή ειδικής αντίστασης), σε δυο ή τρεις διαστάσεις ανάλογα με την διάταξη μέτρησης που ακολουθήθηκε. Για δυο διαστάσεις, η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με το λογισμικό RES2DINV. Το πρόγραμμα εφαρμόζει την μέθοδο των κελιών (cell-based method), δηλαδή παράγει ένα δισδιάστατο μοντέλο που αποτελείται από έναν ημιχώρο διαιρεμένο σε ορθογώνια κελιά (όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.28**).

ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS



Σχήμα 2.28. Διάταξη των κελιών που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο, και τα σημεία των δεδομένων όπου λαμβάνονται οι φαινόμενες αντιστάσεις (Loke, 1996)

Οι παράμετροι του μοντέλου αντιστοιχούν στις τιμές της ειδικής αντίστασης των κελιών, ενώ τα δεδομένα αντιστοιχούν στις τιμές των φαινομένων αντιστάσεων που ελήφθησαν από την μέτρηση. Το μοντέλο αυτό είναι μια ιδεατή μαθηματική αναπαράσταση μιας τομής του εδάφους (ψευδοτομή). Η λειτουργία του λογισμικού διακρίνεται σε δυο επίπεδα:

Στο πρώτο επίπεδο αναπαράγονται φαινόμενες τιμές ειδικής αντίστασης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων από το αρχικό μοντέλο.

Στο δεύτερο επίπεδο επιχειρείται η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου με χρήση της μη γραμμικής μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων αντιστροφής. Λαμβάνεται μια τομή φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων, η οποία αποκαλείται απόκριση του μοντέλου. Ο σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ των μετρημένων φαινόμενων αντιστάσεων και των φαινόμενων αντιστάσεων της απόκρισης του μοντέλου. Για το λόγο αυτό διαφοροποιούνται συνεχώς και με τρόπο επαναλαμβανόμενο οι παράμετροι του μοντέλου (αλλάζει δηλαδή συνεχώς η αντίσταση των κελιών), μέχρι η διαφορά των τιμών υπαίθρου και της απόκρισης να γίνει η ελάχιστη δυνατή. Η διαφορά αυτή εκφράζεται μέσα από την συνάρτηση σφάλματος της οποίας ζητείται η ελαχιστοποίηση.

Στις εντολές του προγράμματος το σφάλμα αποδίδεται με τον όρο Root–Mean–Square (RMS). Όσο πιο πολλές φορές επαναληφθεί η διαδικασία, τόσο το σφάλμα RMS βελτιστοποιείται. Είναι πιθανό όμως, το μοντέλο με τη χαμηλότερη ένδειξη σφάλματος (RMS) να απεικονίζει εξωπραγματικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης και να μην είναι δυνατός ο συσχετισμός του με γεωλογικά κριτήρια.

Επομένως, η πιο λογική προσέγγιση είναι η επιλογή του μοντέλου σε εκείνη την επανάληψη της διαδικασίας της αντιστροφής, στην οποία το σφάλμα RMS δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Όπως έχει αναφερθεί, η επιφάνεια τομής διαχωρίζεται σε ένα μεγάλο πλήθος στοιχειωδών επιφανειών–κελιών.

Για τις μεθόδους Wenner και Schlumberger το πάχος του πρώτου στρώματος είναι ίσο με 0.5 φορές την απόσταση των ηλεκτροδίων. Για τις διατάξεις Pole–Pole, Dipole–Dipole και Pole–Dipole, το πάχος του πρώτου στρώματος είναι ίσο με 0.9, 0.3 και 0.6 φορές την απόσταση των ηλεκτροδίων αντίστοιχα. Το πάχος των επόμενων στρωμάτων κανονικά αυξάνεται κατά 10% (ή 25%).

Το βάθος της τελευταίας γραμμής των στοιχειωδών επιφανειών χαρακτηρίζει περίπου και το μέγιστο βάθος της έρευνας που πραγματοποιήθηκε, αφού τα δεδομένα αυτά συγκεντρώθηκαν με το μέγιστο ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων. Στο λογισμικό RES2DINV, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τις απαιτήσεις και τα κριτήρια που επιθυμεί να ικανοποιηθούν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης, και να μεταβάλλει μεγάλο πλήθος παραμέτρων του μοντέλου. Η επεξεργασία των δεδομένων θα διαρκεί τόσο χρόνο και η επανάληψη της διαδικασίας θα γίνεται τόσες φορές, έως ότου το τελικό μοντέλο καλύψει όλες τις απαιτήσεις.

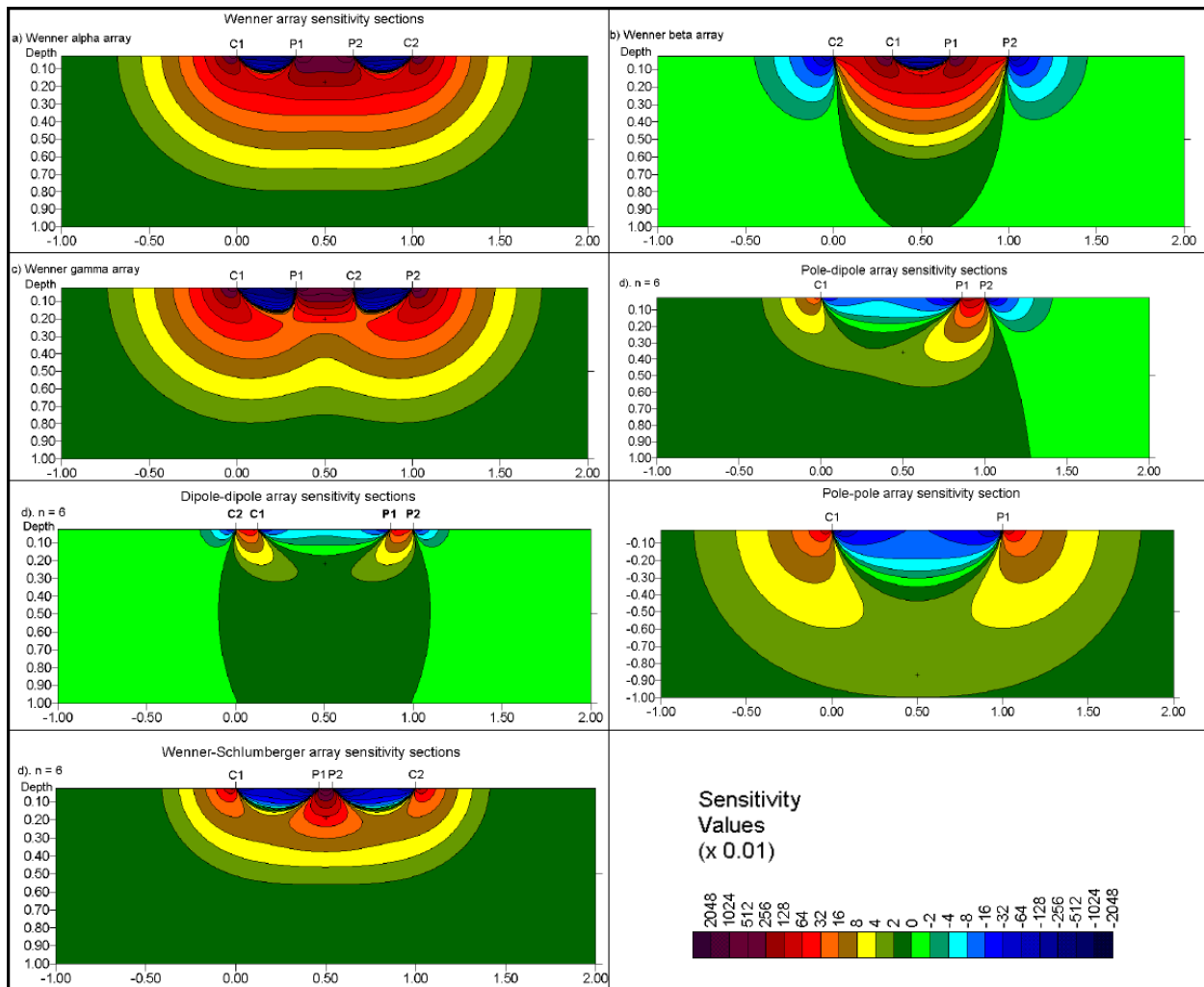
2.5. Γραφική απεικόνιση με τη Μέθοδο της Ψευδοτομής

Αφού γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων, έπεται, η γραφική αποτύπωση τους. Για να αποτυπωθούν γραφικά τα δεδομένα μιας διδιάστατης διασκόπησης, χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος της ψευδοτομής (τομής φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων). Στη μέθοδο αυτή, η οριζόντια συντεταγμένη του σημείου ορίζεται στο κέντρο του αναπτύγματος των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται στη μέτρηση αυτή. Η κάθετη συντεταγμένη της απεικόνισης του σημείου ορίζεται ανάλογα με το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι η παραπάνω διαδικασία είναι σχεδόν μια σύμβαση γραφικών απεικονίσεων και σε καμιά περίπτωση δεν υπονοεί ότι το βάθος της έρευνας δίνεται από το σημείο που τέμνονται οι δυο γραμμές γωνίας 45°, ούτε ότι οι ισοδυναμικές γραμμές σχηματίζουν γωνία 45° με την επιφάνεια.

Άλλη μια μέθοδος είναι να τοποθετείται η κατακόρυφη συντεταγμένη του σημείου της γραφικής απεικόνισης στο μέσο βάθος (median depth) της έρευνας, το ψευδοβάθος, που αντιστοιχεί στη διάταξη των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται. Η τιμή του ψευδοβάθους βασίζεται στις τιμές ευαισθησίας.

Η τιμή ευαισθησίας είναι ένα μέτρο της ποσότητας των πληροφοριών που έχουν ληφθεί για την αντίσταση μιας συγκεκριμένης θέσης του ημιχώρου ή καλύτερα ενός κελιού του μοντέλου. Στο **Σχήμα 2.29** δίνονται οι κατανομές των τιμών ευαισθησίας για τις διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων.



Σχήμα 2.29. Κατανομή τιμών ευαισθησίας διατάξεων ηλεκτροδίων, για $n=6$ (Loke, 2002)

Τα κελιά (θέσεις) κοντά στην επιφάνεια του ημιχώρου έχουν μεγαλύτερες τιμές ευαισθησίας, επειδή η συνάρτηση ευαισθησίας έχει μεγαλύτερες τιμές κοντά στα ηλεκτρόδια. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ευαισθησίας τόσο πιο αξιόπιστη είναι η τιμή της αντίστασης του μοντέλου.

Ο Πίνακας δίνει το μέσο βάθος έρευνας (ψευδοβάθος) για διάφορες διατάξεις. Με τη χρήση του πίνακα αυτού είναι δυνατός ο υπολογισμός του βάθους κάθε μετρημένου σημείου, από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης των ηλεκτροδίων τη στιγμή της μέτρησης.

Διατάξεις Ηλεκτροδίων	z_e/α	z_e/L	Γεωμετρικός Συντελεστής k
Wenner Alpha	0.519	0.173	6.2832
Wenner Beta	0.416	0.139	18.850
Wenner Gamma	0.594	0.198	9.4248
Dipole–Dipole			
n=1	0.416	0.139	18.850
n=2	0.697	0.174	75.398
n=3	0.962	0.192	188.50
n=4	1.220	0.203	376.99
n=5	1.476	0.211	659.73
n=6	1.730	0.216	1055.6
Equatorial Dipole–Dipole			
n=1	0.451	0.319	21.452
n=2	0.809	0.362	119.03
n=3	1.180	0.373	367.31
n=4	1.556	0.377	841.75
Wenner–Schlumberger			
n=1	0.519	0.173	6.2832
n=2	0.925	0.186	18.850
n=3	1.318	0.189	37.699
n=4	1.706	0.190	62.832

Πίνακας 2.3. Μέσο βάθος διασκόπησης z_e για διάφορες διατάξεις.

Με L συμβολίζεται το συνολικό μήκος του αναπτύγματος της διάταξης.

Ο γεωμετρικός συντελεστής έχει υπολογιστεί για τιμή $\alpha=1\text{ m}$ (Loke, 2002)

Το βάθος που προσδιορίζεται με τη μέθοδο αυτή, αναφέρεται σε ομογενές γήινο μοντέλο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενδεικτικά για τον προσδιορισμό του βάθους των σημείων αλλά και του μέγιστου βάθους έρευνας της εκάστοτε μεθόδου.

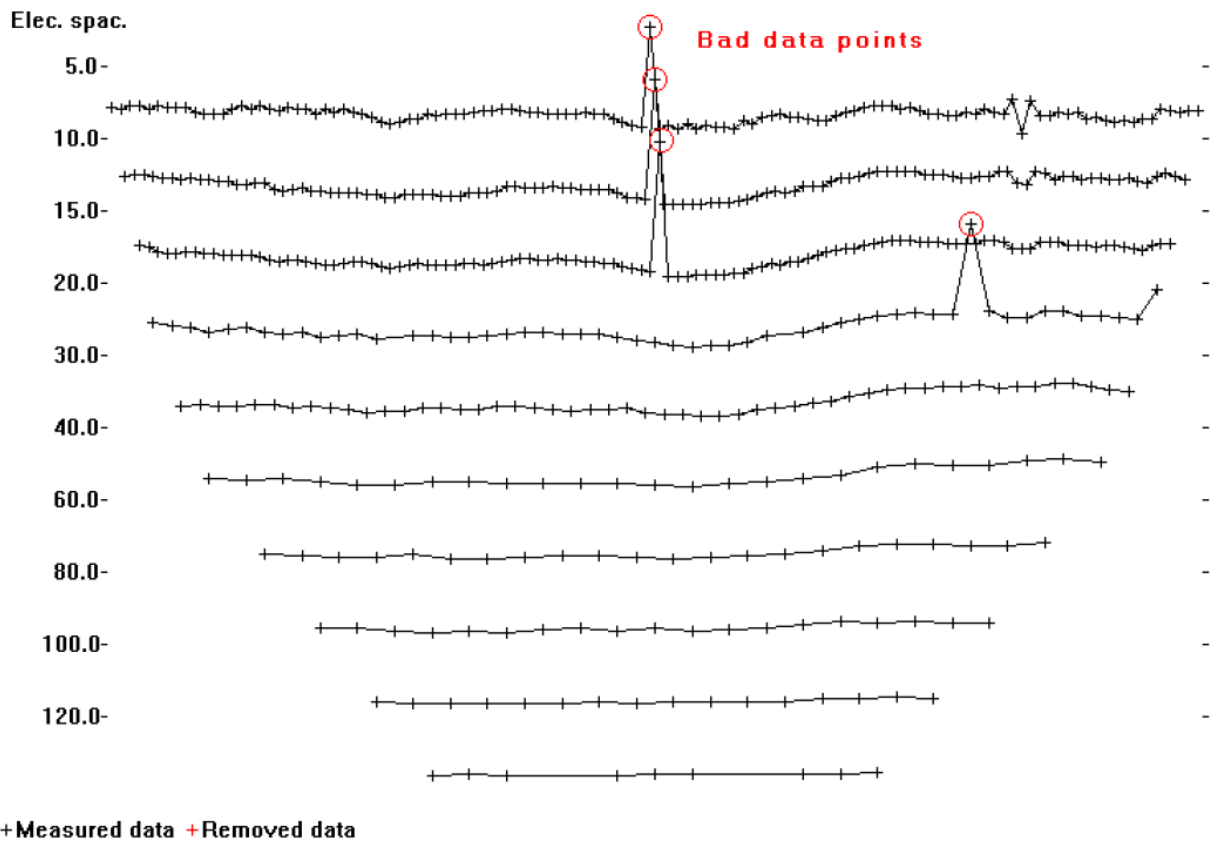
Η απόδοση της ψευδοτομής, που πραγματοποιείται μέσω των κατανομών των φαινόμενων αντιστάσεων κάθε σημείου, είναι ένας εύκολος και βολικός τρόπος να παρουσιαστούν δεδομένα.

Οι ψευδοτομές δίνουν κατά προσέγγιση μια πολύ καλή εικόνα της πραγματικής κατανομής των ειδικών αντιστάσεων ενός ημιχώρου.

Ωστόσο, η εικόνα είναι κάπως παραμορφωμένη, αφού τα σχήματα των κατανομών που παρουσιάζονται εξαρτώνται από τον τύπο της διάταξης που χρησιμοποιείται καθώς και από την πραγματική ειδική αντίσταση του σημείου.

Παραμένουν όμως ο πιο παραστατικός τρόπος για την απεικόνιση των φαινομένων ειδικών αντιστάσεων και ένας αρχικός οδηγός για περαιτέρω ποσοτική ερμηνεία. Μια πολύ χρήσιμη δυνατότητα των ψευδοτομών είναι να απορρίπτονται οι τιμές των φαινομένων αντιστάσεων που είναι ξεκάθαρα λανθασμένες. Αυτές μπορεί να οφείλονται σε κακή επαφή ενός ηλεκτροδίου με το έδαφος, σε επιφανειακές ανομοιογένειες (π.χ. πολύ υγρές επιφανειακές εδαφικές συνθήκες) και σε θορύβους.

Τέτοιες μετρήσεις παρουσιάζονται συνήθως ως ασυνήθιστα υψηλές ή χαμηλές τιμές σε σχέση με τις παρακείμενές τους. Η απόρριψή τους γίνεται μέσα από την επιλογή «Exterminated Bad Datum Points» του προγράμματος (Σχήμα 2.30).



Σχήμα 2.30. Η επιλογή «Exterminated Bad Datum Points» του προγράμματος RES2DINV.

Διακρίνονται οι λανθασμένες τιμές οι οποίες απορρίπτονται (Geotomo Software, 2004)

2.6. Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος μέτρησης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και Μαγνητικής Επιδεκτικότητας.

2.6.1. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.

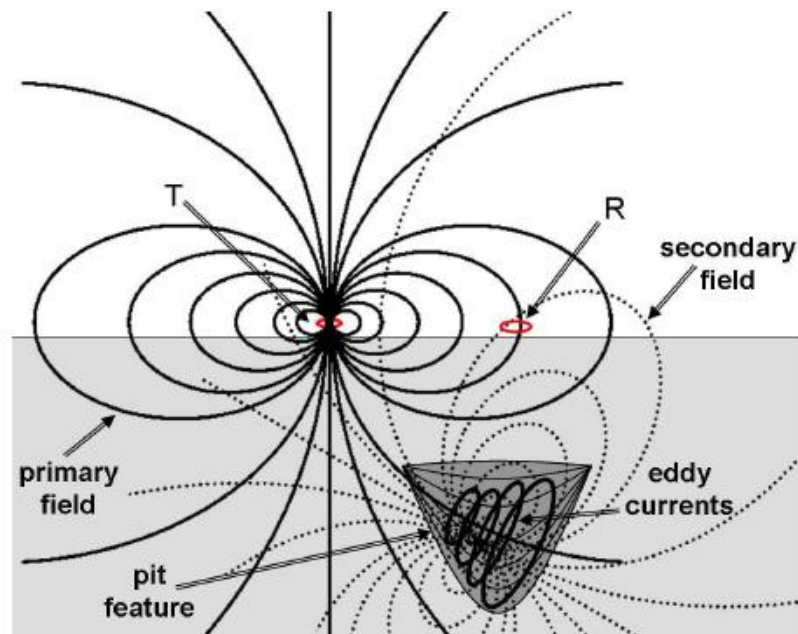
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο για το πόσο εύκολα ένα ηλεκτρικό ρεύμα θα διατρέξει ένα υλικό, και μετριέται σε Siemens ή milliSiemens (mS). Ένα Siemens είναι το αντίστροφο ενός Ohm, ή ίσο με $1/\text{Ohm}$. Οι παλαιότερες αναφορές χρησιμοποιούν την ισοδύναμη μονάδα «Mho», η οποία είναι απλά «το Ohm» που συλλαβίζουν προς τα πίσω. Είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης, αλλά όπως συζητήθηκε νωρίτερα, 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 (Electromagnetic Induction) επαγωγής (**Σχήμα 2.31**). 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 τον τύπο υλικού. Τα μικρά κοιλώματα δεν ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλώματα, τάφροι, και τα υπολείμματα των χωματουργικών έργων μπορούν να ανιχνευθούν πολύ αποτελεσματικά.



Σχήμα 2.31. Εικόνες με ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με διάφορους τύπους οργάνων για τον εντοπισμό της φαινόμενης αγωγιμότητας σε διαφορετικά βάθη.

2.6.1.1. Μεθοδολογία Μετρήσεων.

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 αγώγιμα, τότε το πεδίο θα αναγκάσει τα ρεύματα να ρεύσουν 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 (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 προς το έδαφος. Εάν το έδαφος είναι αγώγιμο, ή περιέχει δομές που είναι αγώγιμες, τα ρεύματα θα ρεύσουν σε αυτό. Αυτά τα δημιουργημένα ρεύματα, αποκαλούμενα «**eddy currents**» (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 2.32**)



Σχήμα 2.32. Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής: το πηνίο αποστολής σημάτων (T) δημιουργεί ένα αρχικό πεδίο της «EMI» που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτό αναγκάζει τα ρεύματα να ρεύσουν στα αγώγιμα αντικείμενα όπως το κοίλωμα που παρουσιάζεται εδώ. Τα ρεύματα δημιουργούν στην συνέχεια ένα δευτερεύον πεδίο. Και τα αρχικά και δευτερεύοντα πεδία μετριοούνται στο πηνίο του δέκτη (R).

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 είναι η επίγεια αγωγιμότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση του δευτερεύοντος πεδίου. Αυτή η καθυστέρηση μετρείται από 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**» καθυστερεί με γωνία 90 μοιρών.

2.6.1.2. Διαμορφώσεις.

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. Μόνο αυτές που συνήθως χρησιμοποιούνται στην αρχαιολογία αναφέρονται εδώ. Η πιο κοινή και πρακτική διαμόρφωση είναι να τοποθετηθεί μια σπείρα του πομπού και μια σπείρα του 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) υποστήριξε 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.

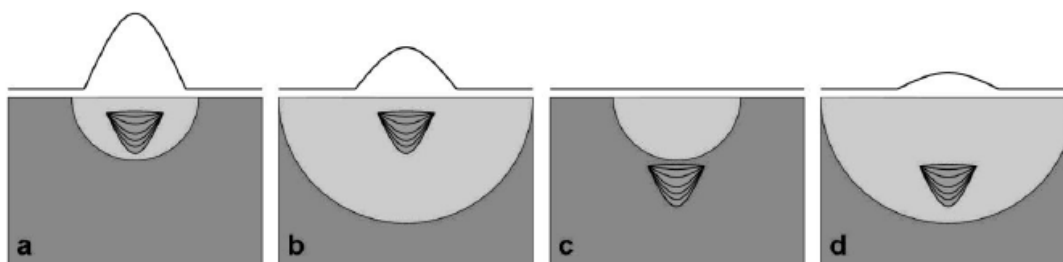
Μια άλλη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται μερικές φορές στην αρχαιολογία περιλαμβάνει τη

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.

2.6.1.3. Βάθος και Ανάλυση.

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 βαθύτερα 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 μετριέται, 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 μια δεύτερη μάτια γίνεται κατανοητό ότι, 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 ειδαίλλως δεν μπορούν να ανιχνευθούν (**Σχήμα 2.33**). 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. Επομένως είναι λογικό επακόλουθο ότι το «**Geonics EM38**» χρησιμοποιείται τόσο συχνά και τα όργανα χαμηλότερης συχνότητας όπως **EM31** χρησιμοποιούνται για τους βαθύτερους και μεγαλύτερους στόχους.

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. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη χρησιμοποίηση των οργάνων υψηλής συχνότητας όπως το **EM38** επειδή το βάθος διείσδυσης είναι περιορισμένο.



Σχήμα 2.33. : 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 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 (b), 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).

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).

2.6.1.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

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 ξηρές 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 (**Bevan** 1998, **Clark** 1996, **Clay** 2006). Σε ορισμένες περιπτώσεις, εντούτοις, η ευαισθησία του EM38 στο μέταλλο είναι ένα πλεονέκτημα, όπως στα πεδία μάχης ή άλλες περιοχές όπου τα χειροποίητα αντικείμενα μετάλλων είναι μεταξύ των στόχων (**Bevan** 1998 **Heckman** 2005).

2.6.2. Μαγνητική Επιδεκτικότητα.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (MS) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας ενός υλικού για να μαγνητιστεί παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου (**Clark** 1996 **Dalan** 2006). Μπορεί να μετρηθεί ανά μονάδα όγκου (κ) ή ως ομαλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας (χ) (**Dalan** 2006), αλλά όταν μετριέται με το EM38 ή παρόμοια όργανα δίνεται ως αναλογία του αρχικού προς το δευτερεύον πεδίο σε μέρη ανά χίλια (ppt).

Όλα τα άτομα περιέχουν μαγνητικά πεδία προερχόμενα από την εξωτερική στοιβάδα των ηλεκτρονίων, συνεπώς όλες οι ουσίες αντιδρούν (είναι ευαίσθητες) στα κοντινά μαγνητικά πεδία μέχρι ενός ορισμένου βαθμού (**Clark** 1996). Ο **Dalan** περιγράφει τους διάφορους τρόπους με τους οποίους η μαγνητική επιδεκτικότητα ενισχύεται. 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 (**Dalan** 2006). 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 (**Clark** 1996 **Dalan** 2006).

2.6.2.1. Μεθοδολογία Μετρήσεων.

Οι τρόποι μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας ποικίλουν, αλλά όλα στηρίζονται στη θεμελιώδη αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI). Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο τμήμα ένα δευτεροβάθμιο ηλεκτρομαγνητικό (EMI) πεδίο μπορεί να προκληθεί στο έδαφος με την δημιουργία ενός 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.

2.6.2.2. Διαμορφώσεις.

Τα μαγνητικά δεδομένα επιδεκτικότητας συλλέγονται με ποικίλους τρόπους, συμπεριλαμβανομένης της σχετικά υψηλής οριζόντιας κάλυψης πυκνότητας δεδομένων των ενδεχομένως μεγάλων περιοχών επιφάνειας, τις αναλύσεις των εδαφολογικών δειγμάτων που λαμβάνονται σε ποικίλα σημεία της επιφάνειας, και τις 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 συμπύπτοντα 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.

2.6.2.3. Βάθος και ανάλυση.

Διαμέσου των γεωφυσικών μεθόδων 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.

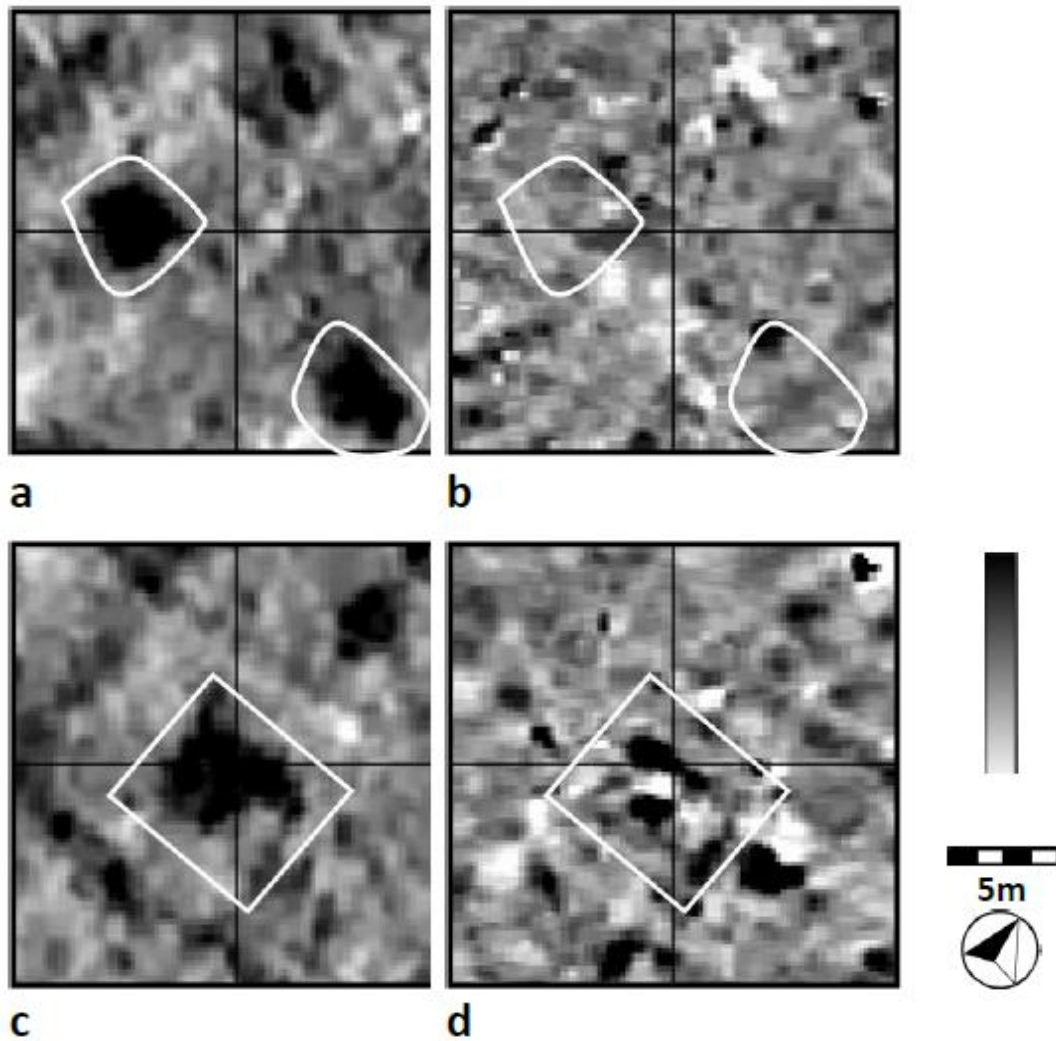
Υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στην διαπερατότητα σε βάθος ανάμεσα στα μονά και διπλής σπείρας όργανα. Τα μονά όργανα σπειρών πρέπει να έχουν απευθείας επαφή με το έδαφος, και το βάθος της διείσδυσης περιορίζεται από τη διάμετρο του βρόχου αναζήτησης (**Dalan** 2006). Για παράδειγμα, ο «**BartingtonMS2D**» αισθητήρας μονού βρόχου, διαπερνά μόνο περίπου 0.10 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι διπλοί αισθητήρες σπειρών, όπως το **Geonics EM38** έχουν μια διείσδυση της τάξης του μισού μέτρου ή περισσότερο (εντούτοις, η ευαισθησία βάθους είναι μεγαλύτερη για την αγωγιμότητα με αυτόν τον αισθητήρα).

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.

2.6.2.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Οι μαγνητικές έρευνες επιδεκτικότητας δεν χρησιμοποιούνται πολύ στην αρχαιολογία, τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αφορμή μη χρήσης των ερευνών, 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 μαγνητική επιδεκτικότητα. Το γεγονός ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα που μετρείται 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(**Εικόνα 2.34**). Το **Geonics EM38** είναι πιθανώς το καλύτερο για τη γρήγορη κάλυψη περιοχής και την καλή διείσδυση βάθους για τις αρχαιολογικές εφαρμογές.



Σχήμα 2.34. Σύγκριση των ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων μαγνητικής επιδεκτικότητας (MS) και μαγνητομετρίας από περιοχή της νοτιοδυτικής Αμερικής: (α) δεδομένα μαγνητικής επιδεκτικότητας που παρουσιάζουν δύο καλύβες (β) οι ίδιες καλύβες δεν είναι ορατές στα δεδομένα της μαγνητομετρίας που καλύπτουν την ίδια περιοχή (γ) δεδομένα μαγνητικής επιδεκτικότητας που παρουσιάζουν μια δομή ενός κοιλώματος (δ) δεδομένα μαγνητομετρίας από την ίδια περιοχή, που παρουσιάζουν ανωμαλίες που αντιπροσωπεύουν πιθανώς τις άκρες του πατώματος της καλύβας και ίσως ένα κεντρικό στοιχείο. Τα δεδομένα μαγνητικής επιδεκτικότητας συλλέχθηκαν με ένα GeonicsEM38, και τα δεδομένα μαγνητομετρίας με ένα GeoscanFM36.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ.

3.1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ Α: Εντοπισμός πέτρινων τάφων στο Bahrain.

Μεταξύ του 1982 και του 1985 θα χρησιμοποιηθεί το EM31 στο Bahrain στον Περσικό Κόλπο. Υπολογίστηκε με επιτυχία ο κατά προσέγγιση αριθμός και οι θέσεις των θαμμένων τάφων της Πρώιμης εποχής του Χαλκού στο εσωτερικό μερικών αρκετά μεγάλων ταφικών τύμβων στην πόλη Hamad. (Σχήμα 3.1)

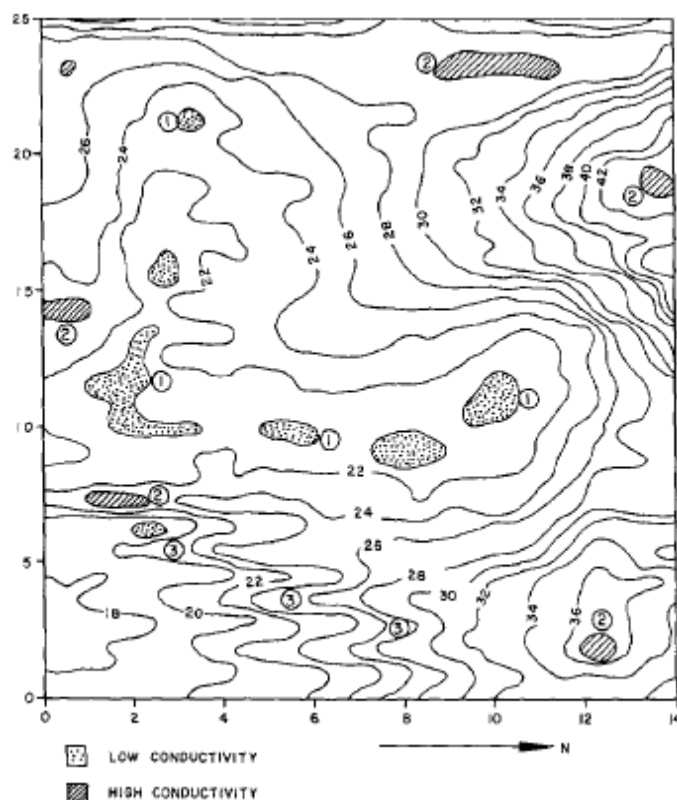


Σχήμα 3.1. Τα αναχώματα κάτω από τα οποία βρίσκονταν οι πέτρινοι τάφοι της χάλκινης περιόδου.

Εντοπίστηκαν πέτρινοι τάφοι της Χάλκινης Περιόδου, που ήταν κάτω από τεράστια αναχώματα τα οποία κάλυπταν μικρότερους δευτερεύοντες τάφους οι οποίοι περιείχαν σκελετούς που άνηκαν σε μη ενήλικες ενώ οι κύριοι τάφοι περιείχαν σκελετούς ενηλίκων. Αφού οι δευτερεύοντες τύμβοι ήταν μικροί (μεταξύ 0,5-1m), δεν ήταν εύκολο να αναγνωρισθεί ο αριθμός τους αλλά μόνο η θέση τους. Οι μετρήσεις έγιναν ανά 50 εκατοστά. Χρησιμοποιήθηκε η οριζόντια

λειτουργία δίπολου του EM31 και απέφερε τη μέγιστη δυνατή ευαισθησία μεταξύ των αρχαιολογικών στείρων θεμελίων και της επιφάνειας του ταφικού τύμβου. Το **Σχήμα 3.3** δείχνει το αποτέλεσμα από το ταφικό ανάχωμα «B-North 254». Οι έρευνες έδειξαν τουλάχιστον έξι μεγάλους τύμβους, οι οποίοι είχαν μικρή αγωγιμότητα σε σχέση με την μετρημένη κοντινή περιοχή. Οι πολύ υψηλής αγωγιμότητας περιοχές δεν σχετίζονται με τεχνητές δομές αλλά πιστεύεται ότι είναι γεωλογικές δομές. Στο **Σχήμα 3.2** φαίνονται οι εσκαμμένοι τύμβοι όπου η θέση τους εντοπίζεται στις περιοχές χαμηλής αγωγιμότητας.

Βρέθηκαν τριάντα ένας τύμβοι. Το EM31 βοήθησε στο να επιλεγούν οι πιο μεγάλοι ως μέρος του διασωστικού προγράμματος της κυβέρνησης του Μπαχρέιν.



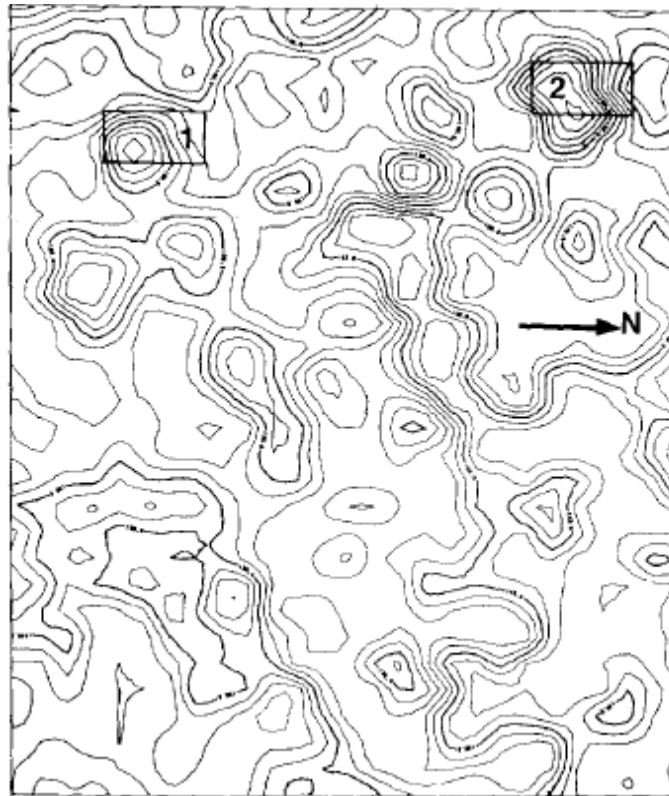
Σχήμα 3.2. Χάρτης αγωγιμότητας στην περιοχή κοντά στην πόλη της Χαμάντ. Οι περιοχές καλυμμένες με κουκίδες (1) δείχνουν χαμηλή αγωγιμότητα (η θέση των μεγαλύτερων ταφικών θαλάμων) ενώ οι γραμμοσκιασμένες περιοχές (2) δείχνουν υψηλή αγωγιμότητα (δεν σχετίζονται με τεχνητά δημιουργήματα). Στη νοτιοδυτική περιοχή του χάρτη (3) εμφανίζεται ένα μοτίβο χαμηλής- υψηλής αγωγιμότητας που αντιστοιχεί στη θέση των μικρότερων θαλάμων. Οι μετρήσεις έγιναν με απόσταση 0,5 μέτρα, με την διάταξη οριζόντιου δίπολου και σε περιοχή επιφάνειας 25x15 μέτρα.



Σχήμα 3.3. Η περιοχή μετά την ανασκαφή. Κύριοι θάλαμοι (1) στο κέντρο και οι μικρότεροι (3) στο νοτιοδυτικό τμήμα.

3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ Β: Εντοπισμός αρχαίων νεκροταφείων στο Kuwait.

Στο νησί Failaka του Κουβέιτ αξιοποιήθηκε το EM31 σε μια προσπάθεια να εντοπισθούν ανθρώπινα νεκροταφεία που σχετίζονται με την γνωστή Πρώιμη εποχή του Χαλκού, του Κασσίτερου και των Ελληνιστικών οικισμών στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού (Bibby, 1974, Salles 1985). Το 1982, μετρήθηκαν τα δύο δίκτυα δίπλα στην ανασκαφή και ολοκληρώθηκαν δύο δοκιμαστικές ανασκαφές σε χώρους που εμφάνιζαν σημαντικά υψηλή και χαμηλή αγωγιμότητα (Σχήμα 3.4). Το μοτίβο της χαμηλής αγωγιμότητας απέδιδε έναν λάκκο φτιαγμένο από άνθρωπο απροσδιόριστης σημαντικότητας και προέλευσης, ενώ το μοτίβο υψηλής αγωγιμότητας απέδιδε σημαντικές πλίνθινες δομές. Τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι το EM31 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει τις σημαντικές τεχνητές δομές του υπεδάφους και τις πεδινές δομές που βρίσκονται ανάμεσα στους οικισμούς.



Σχήμα 3.4. Οι μετρήσεις έγιναν ανά διαστήματα 1μέτρου κατά την κατακόρυφη διαμόρφωση του δίπολου. Το δίκτυο που εμφανίζεται είναι 31x29μέτρα.Οι δοκιμές ανασκαφής έγιναν σε χαμηλής αγωγιμότητας (1) ανωμαλίες και σε υψηλής αγωγιμότητας (2) ανωμαλίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

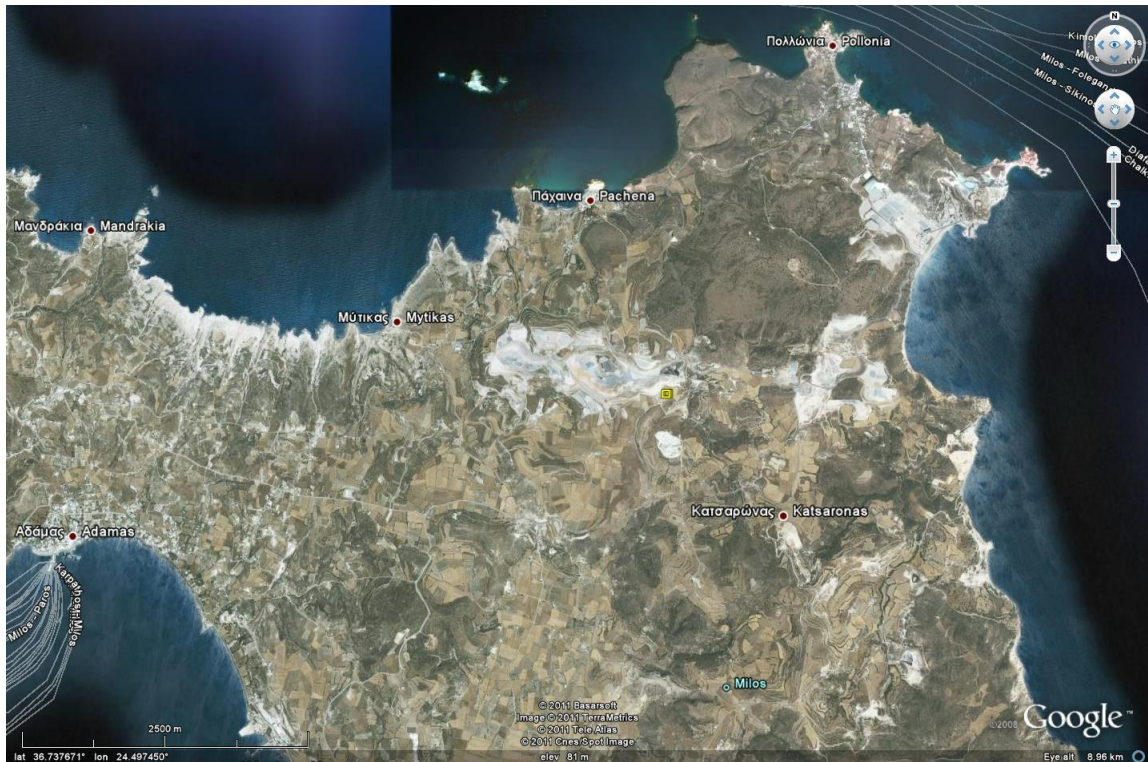
4.1. Εισαγωγή.

Η παρούσα γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Κουφή της Μήλου, όπου δραστηριοποιείται η εταιρεία **S&B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε.** Η εταιρεία **S&B** εξορύσσει και επεξεργάζεται μπεντονίτη, περλίτη, ζεόλιθο, βολλαστονίτη και παράγει συλλιπάσματα συνεχούς χύτευσης καθώς και μεγάλη ποικιλία εξειδικευμένων προϊόντων για ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών και αγορών, συμβάλλοντας στο σύγχρονο και βιώσιμο τρόπο ζωής.

Σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων προκειμένου να εντοπισθούν τα αρχαία, που βρίσκονταν στα όρια του υπαίθριου μεταλλείου της περιοχής σύμφωνα με τις αρχαιολογικές μελέτες, έτσι ώστε να αποφευχθεί κάποιο πιθανό λάθος κατά την εκσκαφή-επέκταση του μεταλλείου. Η περιοχή Κουφή βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα του νησιού. Ακολουθούν χάρτες από το πρόγραμμα Google Map για τον εντοπισμό της γεωγραφικής θέσης της περιοχής στο νησί της Μήλου. (Σχήματα 4.1, 4.2, 4.3)



Σχήμα 4.1. Χάρτης Νήσου Μήλου από το Google Map.



Σχήμα 4.2. Χάρτης του Βορειοανατολικού τμήματος της Νήσου Μήλου από το Google Map.



Σχήμα 4.3. Η περιοχή του ορυχείου της S&B με τα αρχαία ευρήματα να φαίνονται με κίτρινα σημεία και η περιοχή έρευνας με κόκκινο κύκλο.

4.2. Η Περιοχή της έρευνας.

Στα **Σχήματα 4.4 και 4.5** φαίνονται τα ήδη ανακαλυφθέντα από τους αρχαιολόγους στοιχεία. Στο **Σχήμα 4.4** διακρίνουμε έναν υπόγειο χώρο ο οποίος είναι αρκετά βαθύς καθώς υπάρχουν σκαλιά τα οποία μαρτυρούν το μεγάλο του βάθος. Δίπλα στον υπόγειο χώρο φαίνονται τα επιφανειακά τοιχεία που έχουν βρεθεί καθώς και η κατάλληλη επεξεργασία –προετοιμασία που υφίστανται προκειμένου να βγει το αρχαιολογικό πόρισμα. (**Σχήμα 4.5**).

Στο **Σχήμα 4.6** φαίνεται με άσπρη διακεκομμένη γραμμή περιγράφεται η περιοχή των τομών των αρχαιολόγων και στο **Σχήμα 4.7** με ένα κόκκινο ορθογώνιο πλαίσιο η περιοχή στην οποία πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική έρευνα.



Σχήμα 4.4. Ο υπόγειος χώρος και τα τοιχεία με σκάλες.



Σχήμα 4.5. *Επιφανειακά τοιχία.*



Σχήμα 4.6. *Η περιοχή ήδη υπαρχόντων τομών των αρχαιολόγων.*



Σχήμα 4.7. Η περιοχή της γεωφυσικής μελέτης μεταξύ των αρχαιολογικών ευρημάτων και του ορυχείου.

4.3. Η Γεωλογία της Νήσου Μήλου και της Περιοχής Έρευνας.

4.3.1. Εισαγωγή.

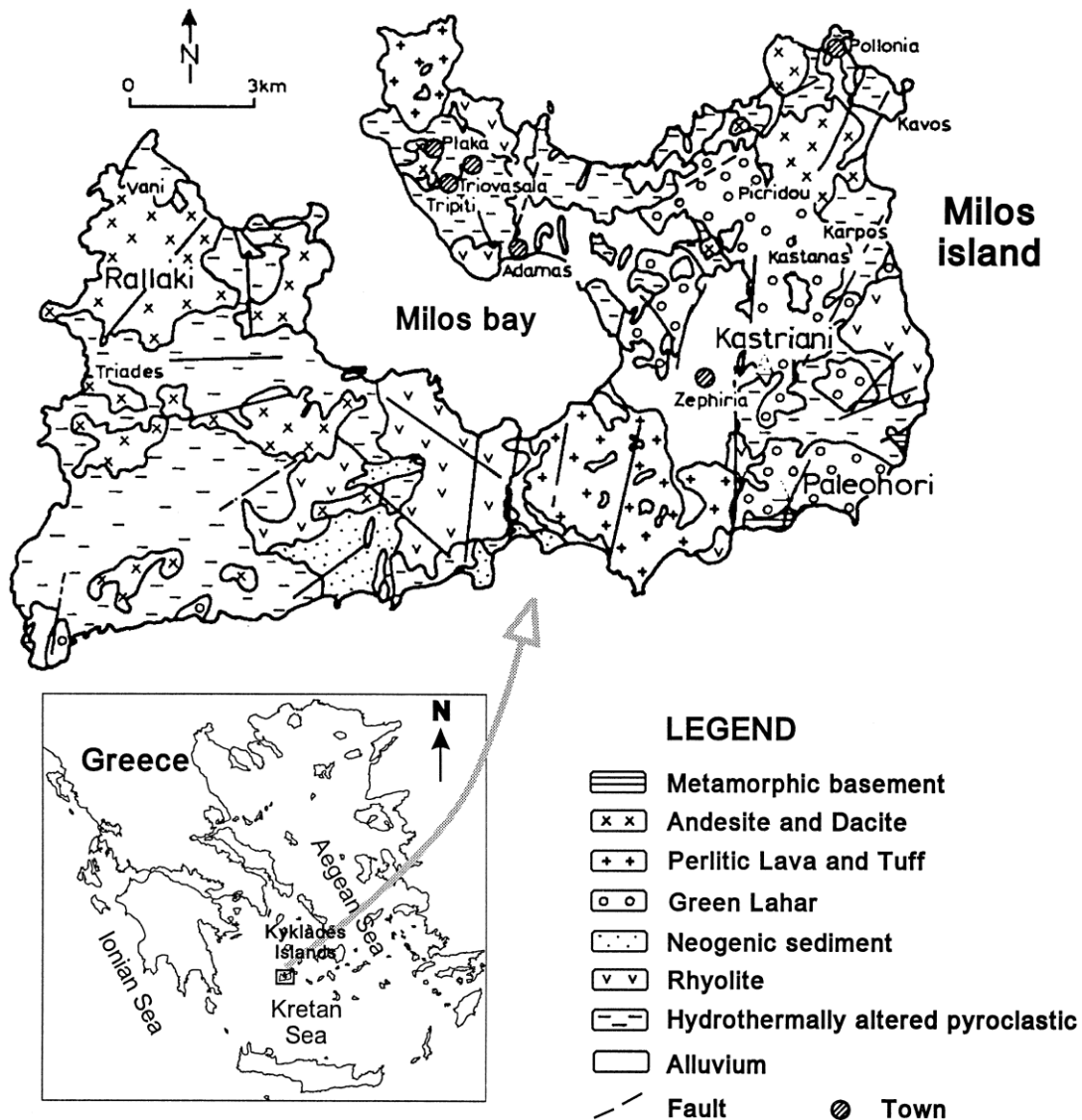
Στην Ανατολική Μεσόγειο η περιοχή του Αιγαίου πελάγους αποτελεί τυπική περίπτωση λιθοσφαιρικών πλακών που συγκλίνουν. Πρόκειται για την Αφρικανική πλάκα που βυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική. Το όριο μεταξύ των δύο πλακών είναι η Ελληνική τάφρος που αναπτύσσεται παράλληλα σε μήκος 1500 χλμ. δυτικά και νότια του Ελληνικού τόξου το οποίο έχει μορφή μεγάλου ημικυκλίου και περιλαμβάνει τα νησιά του Ιονίου, την Πελοπόννησο, την Κρήτη, τη Ρόδο και εκτείνεται ως τη Μ. Ασία.

Η έκλυση θερμότητας από την τριβή της λιθόσφαιρας που καταδύεται δημιουργεί ρεύματα μεταφοράς υλικού και συνεπώς ηφαιστειακή δράση πίσω από το όριο σύγκρουσης των πλακών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το ηφαιστειακό μέτωπο που σχηματίζεται, εντοπίζεται κατά μήκος της καμπύλης γραμμής (Σουσακι ,Αίγινα ,Μέθανα ,Πόρος ,Μήλος ,Σαντορίνη ,Κως ,Νίσυρος) που απέχει κατά μέσω όρο 220 περίπου χλμ. από την Ελληνική τάφρο.

Η νήσος Μήλος βρίσκεται στο ΝΔ άκρο του νησιωτικού συμπλέγματος των Κυκλάδων, που ανήκει γεωλογικά στην κρυσταλλική Αττικοκυκλαδική μάζα.

Τέλος σύμφωνα με τη διαίρεση σε γεωτεκτονικές ενότητες η Μήλος και πιο συγκεκριμένα το μεταμορφωμένο υπόβαθρο της, εντάσσεται στην ενότητα των Νότιων Κυκλάδων. Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει επίσης τα νησιά: Κίμωλο, Πολύαιγο, Νάξο, Πάρο (ενότητα Μαράθι), Αντίπαρο, Σίκινο, Ίο, Ηράκλεια και κάποιες ομόλογες ενότητες.

4.3.2. Η γεωλογία της Νήσου Μήλου.



Σχήμα 4.8. Γεωλογικός χάρτης της Μήλου.

Τα παλαιότερα πετρώματα του νησιού είναι τα μεταμορφωμένα που αποτελούν το κρυσταλλικό υπόβαθρο. Το υπόβαθρο αυτό είναι πτυχωμένο και έντονα διαβρωμένο και αποτελείται από παρά-μεταμορφωμένα (μάρμαρα, μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι) και ορθο-μεταμορφωμένα πετρώματα (πρασινίτες, αμφιβολιτικοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι). Η ηλικία της

μεταμόρφωσης εκτιμήθηκε με ραδιοχρονολόγηση σε 64.2 M.a. για τους πρασινοσχιστόλιθους(περί το Παλαιόκαινο) και σε 33.2 M.a.(περί το Κ.Ολιγόκαινο) για τους κυανοσχιστόλιθους.

Πάνω από το κρυσταλλικό υπόβαθρο βρίσκονται επικλυσιογενώς τα θαλάσσια ιζήματα του Μειόκαινου-Πλειόκαινου. Η σειρά αυτή που δεν είναι συνεχής σε όλο το νησί, αρχίζει με ένα κοκκινωπό κροκαλοπαγές και τελειώνει με στρωμένους ασβεστόλιθους,(αμιγείς ή ψαμμιτικούς), πάχους ως 150μ. Γενικά είναι ελαφρά μαργαϊκοί, υδατοπερατοί με πολλά απολιθώματα και χαρακτηριστικούς ορίζοντες από κοράλλια. Οι ασβεστόλιθοι έχουν Μειοκαινική ηλικία.

Ακολουθούν τα προϊόντα της ηφαιστειακής δράσης που άρχισε κατά το Μ.-Αν.Πλειόκαινο(3.5 M.a.) και τέλειωσε στο τέλος του Τεταρτογενούς. Τη σειρά κλείνουν με ασυμφωνία οι πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις.

Οι ηφαιστειακοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν:

- Μια βασική πυροκλαστική σειρά (ΒΔ τμήμα του νησιού) που περιλαμβάνει κίσηρη ,τόφρους και τοφφίτες. Πρόκειται για τα πρώτα ηφαιστειακά προϊόντα της Μήλου, ηλικίας 3.4-3.0 εκ. χρόνια στο δυτικό τμήμα και 1.8-1.7 εκ. χρόνια στο Β τμήμα του νησιού. Τα προϊόντα του σχηματισμού αυτού είναι έντονα εξαλλοιωμένα(προς καολίνη και μπεντονίτη). Το πλήθος των απολιθωμάτων της σειράς φανερώνει την ύπαρξη αβαθούς θάλασσας, μέσα στην όποια αποτέθηκε το ηφαιστειακό υλικό.
- Την ενότητα των δομών και ρεύματων λάβας του δυτικού και κεντρικού τμήματος. Η σύσταση της λάβας αυτής είναι ανδσειπική ως ρυολιθική. Η φάση αυτή συνοδεύτηκε από προϊόντα έκρηξης και έδωσε πυροκλαστικά υλικά, ρεύματα λάβας, λατυπτοπαγή και πυρακτωμένα σύννεφα, ηλικίας 2.5-2.0 M.a.
- Τη σειρά της Φυριπλάκας – Τράχηλα. Η δραστηριότητα των δύο ηφαιστειών ήταν κυρίως εκρηκτική και δημιούργησε στρώσεις τεμαχίων λάβας, κίσηρης και τέφρας. Το ηφαιστειακό κέντρο του Τράχηλα αποτελείται από έναν πυροκλαστικό κώνο ύψους 150μ. και διαμέτρου 1300μ.Ο κώνος είναι σπασμένος στο Β τμήμα του. Η δημιουργία του κώνου άρχισε με την εναπόθεση πυροκλαστικών προϊόντων διασταυρούμενης στρώσης και εναλλαγές ρευμάτων. Το ηφαιστειακό κέντρο της Φυριπλάκας είναι πιο πολύπλοκο και αποτελείται από σειρά ηφαιστειακών οικοδομημάτων που επικάθονται το ένα πάνω στο άλλο (εσωτερική διάμετρος 1700μ.,μέγιστο ύψος 220μ.).
- Το πράσινο λαχάρ. Πρόκειται για ένα χαώδη σχηματισμό ασύνδετων ετερογενών υλικών, κυρίως πρασινοσχιστόλιθων, ασβεστόλιθων και ηφαιστειακών πετρωμάτων μαζί με λεπτομερή υλικά όπως ηφαιστειακή τέφρα και τρίμματα μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Ο σχηματισμός του ερμηνεύεται με την εξής διαδικασία: μια σειρά ηφαιστειακών εκχύσεων συσώρευσε μεγάλες ποσότητες τέφρας και σποδού στις πλευρές ενός ηφαιστείου ή κατά μήκος ενός απότομου ανάγλυφου που δημιουργήθηκε από ρήγματα. Κατολίσθηση μετά από δυνατή βροχή, παρέσυρε κομμάτια λάβας, επιφανειακά κομμάτια από πλευρικά

κορρύματα, κροκάλες χειμάρρων και υλικά από τη διάβρωση του μεταμορφωμένου υπόβαθρου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία του πράσινου λαχάρ.

- Τις αλλουβιακές αποθέσεις, πάχους ως 100μ. από ηφαιστεια υλικά, κροκάλες, λατύπες, άμμους, λάσπη και αργίλους. Η έκτασή τους είναι περιορισμένη και εκτείνεται στις πεδιάδες Ζεφυριάς, Αδάμαντα και Προβατά.

4.3.3. Γεωλογικά στοιχεία του Βορειοανατολικού τμήματος της Νήσου Μήλου (περιοχή έρευνας).

Τα περισσότερα κοιτάσματα μπεντονίτη στη Μήλο βρίσκονται στο ΒΑ τμήμα της νήσου. Ο μπεντονίτης προήλθε από την εξαλλοίωση ηφαιστειακών λατυποπαγών, υαλοκλαστικών και πλούσιων σε υαλώδη μάζα pillows, ανδραιοειδούς έως λατιτικής σύστασης (Wetzenstein 1972, Caillere et Economou 1974, Fyticas 1986, Liacopoulos 1991, Christidis et Macropoulos 1992, Dietrich et al. 1993). Η άνοδος του μάγματος έγινε κατά το Α.Πλειόκαινο. Η υδροθερμική εξαλλοίωση συνέβη κατά το Μ.-Α. Πλειστόκαινο και είχε ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση Si, Ca, Na, K, Ba, Sr, Rb και L.R.E.E. από το μητρικό πέτρωμα (Dietrich et al, 1993).

Τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά του μπεντονίτη της Μήλου είναι ο Ca-ούχος και ο Ca,Na-ούχος μοντμοριλλονίτης. Σε μικρότερη περιεκτικότητα απαντούν τα ορυκτά χαλαζίας, ασβεστίτης, K,Na-ούχοι άστριοι, όξινα πλαγιόκλαστα, χριστοβαλίτης, καολινίτης, ιλλίτης, βαρύτης, γύψος, αλουνίτης, γιαροσίτης, ανατάσης και σουλφίδια, των οποίων η συμμετοχή διαφέρει από θέση σε θέση (Wetzenstein, 1972, Liacopoulos, 1987, Dietrich, 1993).

Στο **Σχήμα 4.9** παρατηρείται η ύπαρξη των δύο πρώτων στρωμάτων στην επιφάνεια του υπεδάφους. Το πρώτο στρώμα αποτελείται από αργίλους, κροκάλες με έντονα αδρομερή στοιχεία (**Σχήμα 4.10**). Στο δεύτερο στρώμα φαίνεται ο συνεκτικός τόφος όπου βρίσκεται και υπόγειος χώρος.



Σχήμα 4.9. Αποτύπωση στρωματογραφίας, αρχαίων ευρημάτων στην επιφάνεια και υπογείου χώρου.



Σχήμα 4.10. Λαχάρ, επιφανειακό στρώμα με αδρομερή και αργιλικά υλικά.

4.4. Γεωφυσική Έρευνα.

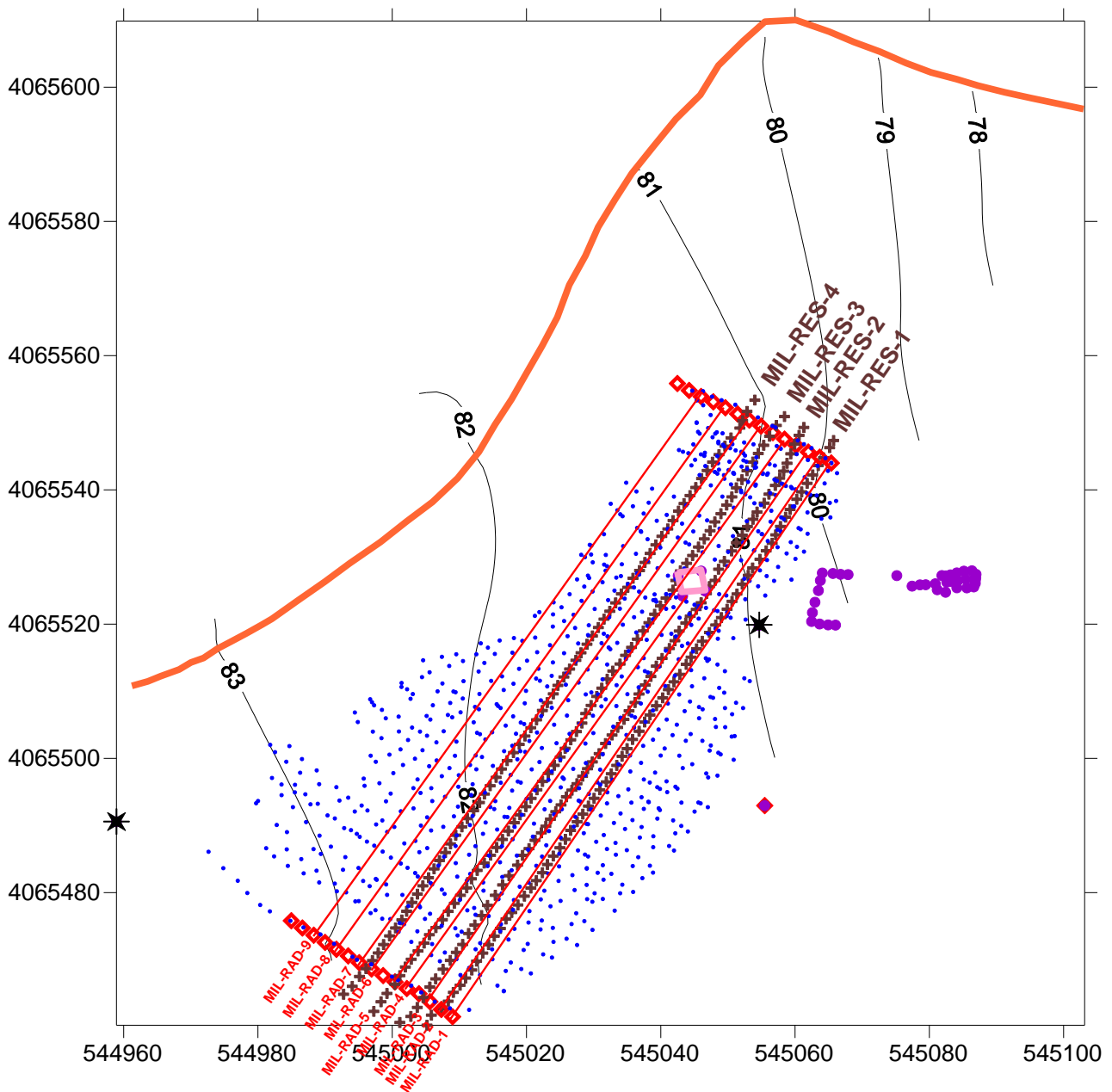
Για να εκτελεσθεί με επιτυχία μια αρχαιολογική γεωφυσική έρευνα πρέπει να υπάρχουν ενδείξεις ότι υπάρχουν αρχαία. Τέτοιες ενδείξεις μπορεί να είναι επιφανειακά αρχαία ερείπια, αρχαία κείμενα ή η βοήθεια ενός επιστήμονα αρχαιολόγου προκειμένου να σχεδιαστεί το πλάνο της έρευνας πριν αυτή ξεκινήσει. Τα αρχαιολογικά στοιχεία που αναζητούνται απαιτείται να βρίσκονται σε έναν σχετικά ικανοποιητικό βαθμό αντίθεσης σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο, ως προς την φυσική ιδιότητα που εκτελείται η μελέτη. Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής οι αρχαιολόγοι στηρίζονται στα οπτικά και ιστολογικά χαρακτηριστικά των αρχαιολογικών αντικειμένων ώστε να τα ξεχωρίζουν από το υπόβαθρο. Τα αντικείμενα της έρευνας των αρχαιολόγων έχουν και άλλες φυσικές διαφορές όπως είναι η διαφορά στην πυκνότητα, στην υγρασία που περιέχουν, την περιεκτικότητα σε μεταλλικά συστατικά κ.α. Εδώ όμως οι γεωφυσικοί ερευνητές συσχετίζουν τις παραπάνω ιδιότητες με αντίστοιχες γεωφυσικές ιδιότητες (μαγνητισμός, ηλεκτρική αντίσταση, ικανότητα ανάκλασης της ενέργειας του ραντάρ) και μπορούν να τις μετρήσουν με μεγάλη ακρίβεια.

Στην περίπτωση μας ο σχηματισμός με τα χαλαρά υλικά θα μας δώσει χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης (σχετικά υψηλές τιμές φαινόμενης αγωγιμότητας), που ανάλογα με το βαθμό αδρομερών υλικών που περιέχουν υπάρχει αύξηση-μείωση στις τιμές της ειδικής αντίστασης. Ο συνεκτικός τόφος παρουσιάζει υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Η τυχόν παρουσία τοιχίων μέσα στα χαλαρά υλικά θα μας δίνει τοπικά μέγιστα στις τιμές της ειδικής αντίστασης και η παρουσία τυχόν υπογείου χώρου ακόμα μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης από αυτές του τόφου. Οι διαφορές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και αντίστοιχα στις τιμές φαινόμενης αγωγιμότητας μας οδηγούν στην εφαρμογή δύο γεωφυσικών μεθόδων:

1. Στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο φαινόμενης αγωγιμότητας.
2. Στην μέθοδο γεωηλεκτρικής τομογραφίας.

Προχωρήσαμε με το σκεπτικό ότι θα βρούμε κάποια τοιχία ή κάποια στοά-υπόγειο χώρο όπως αυτά που είχαν ήδη βρεθεί (**Σχήμα 4.4**, **Σχήμα 4.5**). Έτσι ψάχνουμε για περιοχές με τιμές χαμηλής φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και αντίστοιχα υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης στην ηλεκτρική τομογραφία.

Ο χάρτης του **Σχήματος 4.11** αποτυπώνει τις θέσεις των γεωφυσικών μετρήσεων στην περιοχή έρευνας. Προσπαθήσαμε να στήσουμε τις γραμμές των μετρήσεων με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι όσο το δυνατόν κάθετες ως προς τους στόχους μας.



Σχήμα 4.11. Χάρτης Γεωφυσικών μετρήσεων με τις ισούψεις τοπογραφίας: α) οι θέσεις ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων με μπλε κουκίδες, β) οι θέσεις ηλεκτροδίων των τομών γεωηλεκτρικής τομογραφίας με καφέ σταυρούς, γ) οι οδεύσεις γεωραντάρ με κόκκινες γραμμές. Αρχαία τοιχεία αποτυπώνονται με μωβ κουκίδες ενώ τα όρια του ορυχείου ορίζονται με πορτοκαλί γραμμή. Οι θέσεις στύλων της ΔΕΗ αποτυπώνονται με αστερίσκους ενώ επίσης φαίνεται με ροζ γραμμή και η θέση του γραφείου/αποθήκης της αρχαιολόγου.

4.4.1. Ηλεκτρομαγνητικές Μετρήσεις.

4.4.1.1. Μετρήσεις υπαίθρου. Όργανο μετρήσεων.

Χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments «CMD» (**Σχήμα 4.12**) με τις δύο διαμορφώσεις του CMD-2 (3 μέτρα βάθος διείσδυσης) και CMD-4 (6 μέτρα βάθος διείσδυσης) αντίστοιχο του Geonics EM-31.

Το βήμα των μετρήσεων ήταν 1-2 μέτρα.



Σχήμα 4.12. Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με το όργανο CMD της GF Instruments στην περιοχή έρευνας.

Το όργανο CMD μετράει την φαινόμενη αγωγιμότητα και την in-phase μέτρηση ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε ένα συγκεκριμένο βάθος ανάλογα με την διαμόρφωση. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλές εργασίες στο πλαίσιο της γεωλογικής έρευνας και της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού, τη γεωργία, την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, την προστασία των υπόγειων υδάτων, την αναζήτηση πρώτων υλών, την αρχαιολογία, την εύρεση μεταλλικών αντικειμένων. Η εκτέλεση μετρήσεων περπατώντας (**Σχήμα 4.12**) γίνεται και στις πιο απαιτητικές συνθήκες όπως σε ξηρό ή παγωμένο έδαφος ή σε έδαφος με βλάστηση.

Το όργανο CMD μπορεί με την κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο να παρέχει και τα στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης. Στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε διαφορικό GPS Leica πραγματικού χρόνου.



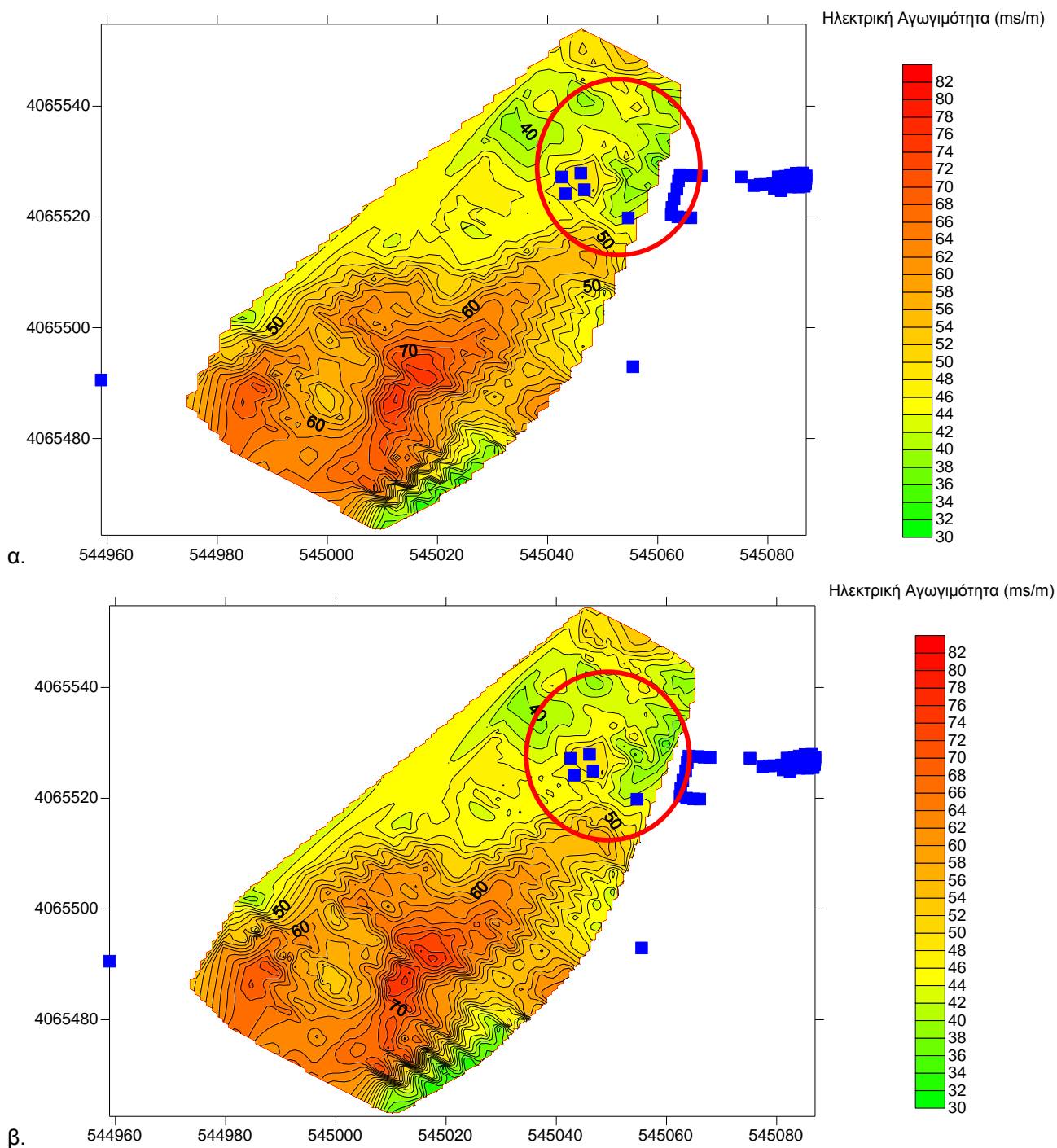
Σχήμα 4.13. Χειριστήριο οργάνου CMD.



Σχήμα 4.14. Σταθμός βάσης διαφορικού GPS Leica πραγματικού χρόνου.

4.4.1.2. Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Διαμόρφωση CMD-2 (3 μέτρα βάθος διείδυσης)



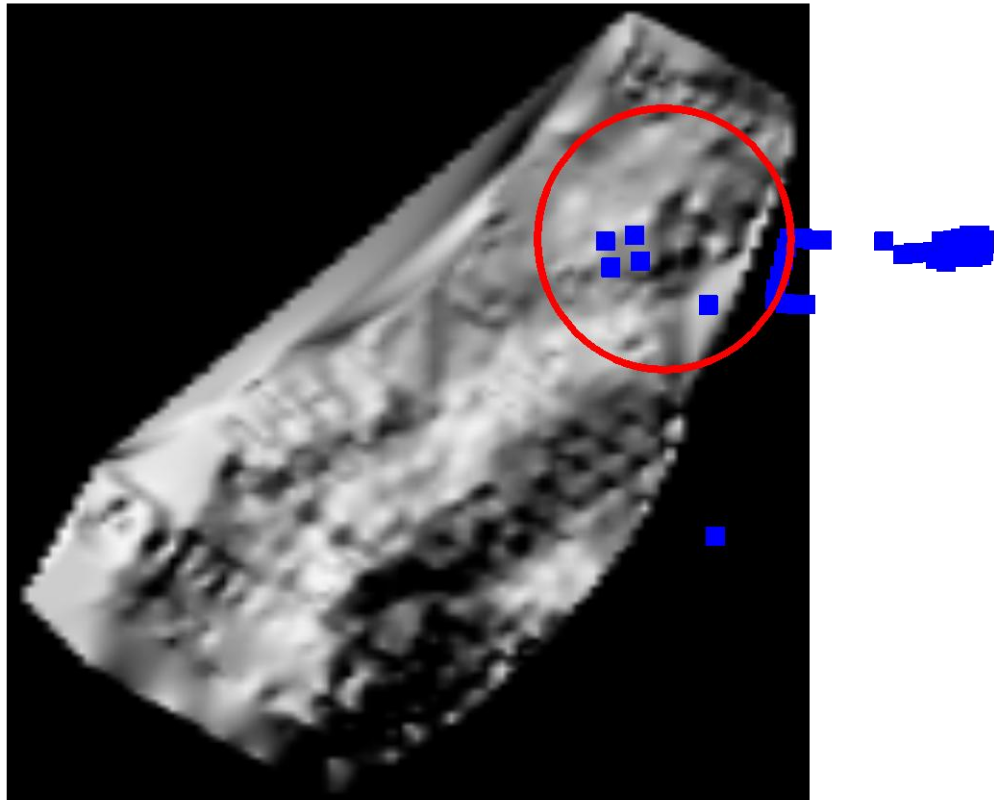
Σχήμα 4.15. Χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (διαμόρφωση CMD-2) σε βάθος 3μ. (α. απόσταση καννάβου 1μβ, απόσταση καννάβου 0,5μ). Με το μπλε χρώμα παριστάνονται τα τοιχεία που έχουν ήδη βρεθεί από τους αρχαιολόγους, οι γωνίες του γραφείου/αποθήκης που χρησιμοποιεί η αρχαιολόγος και οι στύλοι της ΔΕΗ.

Στους χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (διαμόρφωση CMD-2) σε βάθος 3μ (**Σχήμα 4.15**) παρατηρούνται τα εξής:

- Στο βόρειο-βορειοδυτικό μέρος της περιοχής έρευνας επικρατούν σχετικά χαμηλές τιμές φαινόμενης αγωγιμότητας που πιθανόν αντιστοιχούν σε συνεκτικούς τόφους.
- Στο νότιο μέρος της περιοχής έρευνας επικρατούν σχετικά υψηλές τιμές φαινόμενης αγωγιμότητας που πιθανόν αντιστοιχούν σε αργιλικά υλικά. Δύο τοπικές περιοχές, η μία νοτιο ανατολικά με πολύ υψηλές φαινόμενες αγωγιμότητες σχετίζεται πιθανά με μπάζα και η άλλη στο νότιο κεντρικό μέρος με σχετικά υψηλές φαινόμενες αγωγιμότητες με περισσότερα αδρομερή υλικά μέσα στα αργιλικά..
- Κοντά στα αποκαλυφθέντα τοιχία και το γραφείο/αποθήκη της αρχαιολόγου οι ισοκαμπύλες παρουσιάζουν τοπικά ελάχιστα ηλεκτρικής αγωγιμότητας και «γραμμικές μορφές» που πιθανόν να μαρτυρούν την ύπαρξη πεπερασμένων δομών (τοιχιών).

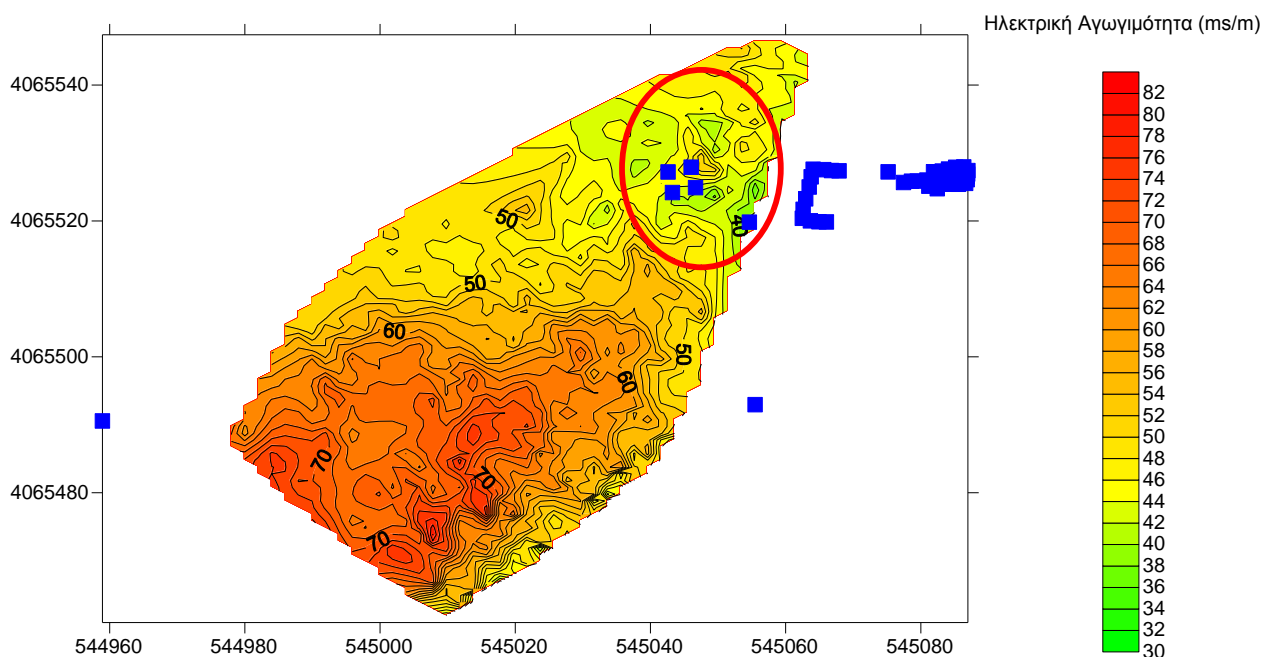
Οι χάρτες του **Σχήματος 4.15** αφορούν τις ίδιες μετρήσεις με την διαφορά ότι στην περίπτωση (β) χρησιμοποιήσαμε την επιλογή του προγράμματος SURFER να μειώσουμε την απόσταση κανάβου, δηλαδή το πρόγραμμα να σαρώνει την επιφάνεια με μικρότερη βήμα μετρήσεων με αποτέλεσμα μεγαλύτερη πυκνότητα μετρήσεων. Με αυτό τον τρόπο βλέπουμε ότι οι ισοκαμπύλες έχουν αποκτήσει τη βέλτιστη δυνατή μορφή με συνέπεια την καλύτερη κατανόηση της θέσης των στόχων μας.

Ο χάρτης μεταβολής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (διαμόρφωση CMD-2) σε βάθος 3μ με φωτοσκίαση (**Σχήμα 4.16**) παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με τους χάρτες του **Σχήματος 4.15** ώστε να καταλήγουμε στις ίδιες παρατηρήσεις.



Σχήμα 4.16. Χάρτης μεταβολής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (διαμόρφωση CMD-2) σε βάθος 3μ με φωτοσκίαση (ο χάρτης φωτίζεται από το τέταρτο τεταρτημόριο ενός κύκλου με οριζόντια γωνία 137 μοιρών και κάθετη γωνία 34 μοιρών). Με το μπλέ χρώμα παριστάνονται τα τοιχεία που έχουν ήδη βρεθεί από τους αρχαιολόγους, οι γωνίες του γραφείου/αποθήκης που χρησιμοποιεί η αρχαιολόγος και οι στύλοι της ΔΕΗ.

Διαμόρφωση CMD-4 (6 μέτρα βάθος διείσδυσης)



Σχήμα 4.17. Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (διαμόρφωση CMD-4) σε βάθος 6μ. Με το μπλέ χρώμα παριστάνονται τα τοιχεία που έχουν ήδη βρεθεί από τους αρχαιολόγους, οι γωνίες του γραφείου/αποθήκης που χρησιμοποιεί η αρχαιολόγος και οι στύλοι της ΔΕΗ.

Στον χάρτη κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (διαμόρφωση CMD-4) σε βάθος 6μ (**Σχήμα 4.17**) παρατηρούνται τα εξής:

- Στο βόρειο-βορειοδυτικό μέρος της περιοχής έρευνας επικρατούν σχετικά χαμηλές τιμές φαινόμενης αγωγιμότητας που πιθανόν αντιστοιχούν σε συνεκτικούς τόφους.
- Στο νότιο μέρος της περιοχής έρευνας επικρατούν σχετικά υψηλές τιμές φαινόμενης αγωγιμότητας που πιθανόν αντιστοιχούν σε αργιλικά υλικά. Οι δύο τοπικές περιοχές που αναφέρθηκαν και στην προηγούμενη διαμόρφωση υφίστανται, η μία νοτιο ανατολικά με πολύ υψηλες φαινόμενες αγωγιμότητες που σχετίζεται πιθανά με μπάζα και η άλλη στο νότιο κεντρικό μέρος με σχετικά υψηλότερες φαινόμενες αγωγιμότητες με περισσότερα αδρομερή υλικά μέσα στα αργιλικά.
- Κοντά στα αποκαλυφθέντα τοιχεία και το σπιτάκι της αρχαιολόγου οι ισοκαμπύλες παρουσιάζουν τοπικά ελάχιστα ηλεκτρικής αγωγιμότητας και «γραμμικές μορφές» που πιθανόν να μαρτυρούν την ύπαρξη πεπερασμένων δομών (τοιχίων).

4.4.2. Γεωηλεκτρική τομογραφία.

4.4.2.1. Εισαγωγή.

Στην μέθοδο της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήσαμε την διάταξη role-dipole ως προς τον τρόπο που στήσαμε τα ηλεκτρόδια δυναμικού και το ηλεκτρόδιο ρεύματος. Μάλιστα σε κάθε τομή έγιναν και οι δύο τρόποι ανάπτυξης της διάταξης role-dipole (forward και reverse) ανάλογα με το αν προπορεύεται το ηλεκτρόδιο ρεύματος του διπόλου δυναμικού ή έπεται αυτού. Η απόσταση των ηλεκτροδίων ήταν 1.5 μέτρα (Σχήμα 4.18α) και προσπαθήσαμε η διεύθυνση των τομών (γραμμή ηλεκτροδίων) να είναι όσο «κάθετη» γινόταν προς τους στόχους μας. Ευρέθησαν οι γεωγραφικές συντεταγμένες και το απόλυτο υψόμετρο κάθε θέσης ηλεκτροδίου με την χρησιμοποίηση του διαφορικού GPS Leica πραγματικού χρόνου (Σχήμα 4.18β).



Σχήμα 4.18. α) Ηλεκτρόδια, καλώδια, γεωηλεκτρικό όργανο κατά την διάρκεια μέτρησης της τομής γεωηλεκτρικής τομογραφίας «MIL-RES-2», β) Ακριβείς μετρήσεις θέσης και υψομέτρου των ηλεκτροδίων τομής γεωηλεκτρικής τομογραφίας με διαφορικό GPS.

4.4.2.2. Το όργανο μέτρησης SYSCALPro.

Χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης το όργανο SYSCALPro. (Σχήμα 4.19)



Σχήμα 4.19. Το όργανο SYSCALPro που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης.

Το SYSCALPro είναι ένα νέο σύστημα σχεδιασμένο για υψηλή παραγωγικότητα μετρήσεων ειδικής αντίστασης και IP μετρήσεων με αυτόματο τρόπο ορίζοντας το πρωτόκολλο των μετρήσεων, ακολουθώντας συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων.

Οι προδιαγραφές της συσκευής είναι:

- 10 κανάλια ταυτόχρονης λήψης μετρήσεων
- Δυνατότητα χρησιμοποίησης 72 ηλεκτροδίων
- Ισχύς: 1000 V - 250 W - 2.5A

4.4.2.3. Στοιχεία ερμηνείας της γεωηλεκτρικής τομογραφίας.

Για την ερμηνεία των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα **Res2dinv**.

Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας:

1. Επιλέξαμε την ρύθμιση «use model refinement» διότι το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει περισσότερες μετρήσεις με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων μέσω κατάλληλης επεξεργασίας των υπαρχόντων μετρήσεων, έτσι ώστε το τελικό μοντέλο να διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος.
2. Ελέγχθηκαν τρεις εναλλακτικές διαδικασίες ερμηνείας:

Επιλογή Standard- Standard

Με αυτή την επιλογή στο **Res2dinv** έχουμε ερμηνεία των μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται ελεύθερα.

Επιλογή Standard- Robust

Με αυτή την επιλογή στο **Res2dinv** έχουμε ερμηνεία των μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης.

Επιλογή Robust- Standard

Με αυτή την επιλογή στο **Res2dinv** έχουμε ερμηνεία των μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση στην παρουσία «θορύβου» στις μετρήσεις.

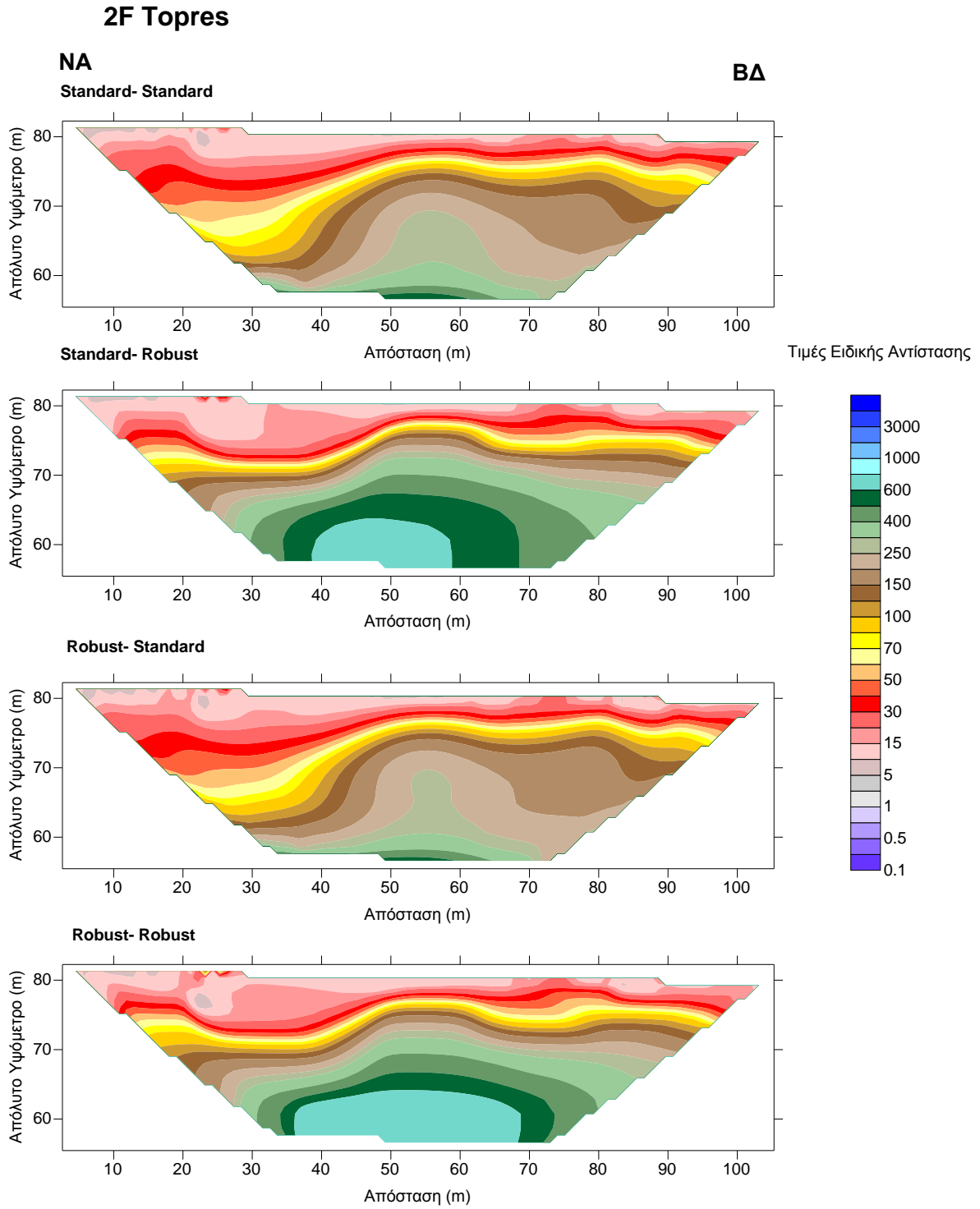
Επιλογή Robust- Robust

Με αυτή την επιλογή στο **Res2dinv** έχουμε ερμηνεία των μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και στην παρουσία «θορύβου» στις μετρήσεις.

Για κάθε αρχείο μέτρησης με την βοήθεια του προγράμματος **RES2dinv** γίνεται εναλλαγή αυτών των παραμέτρων με σκοπό την εύρεση έντονων ανωμαλιών προς τον προσδιορισμό πεπερασμένων δομών.

Η επιλογή **Robust- Robust** παρέχει την καλύτερη ερμηνεία των μετρήσεων (**Σχήμα 4.20**) δεδομένου ότι αφενός τα επιφανειακά υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια και ως εκ τούτου ο παραγόμενος «θόρυβος» εξαλείφεται και αφετέρου η πιθανή παρουσία τοιχίων ή υπόγειου ανοίγματος αντιστοιχούν σε τοπικές απότομες αλλαγές της ειδικής αντίστασης που ευκολότερα εντοπίζονται.

Σε κάθε γεωηλεκτρική τομή που ακολουθεί παρατίθενται και οι δύο επιλογές μέτρησης Pole-Dipole Forward και Reverse, ενώ για κάθε επιλογή παρατίθενται η τομή μετρούμενης φαινόμενης ειδικής αντίστασης, η τομή υπολογιζόμενης φαινόμενης ειδικής αντίστασης του μοντέλου και το γεωηλεκτρικό μοντέλο του υπεδάφους.

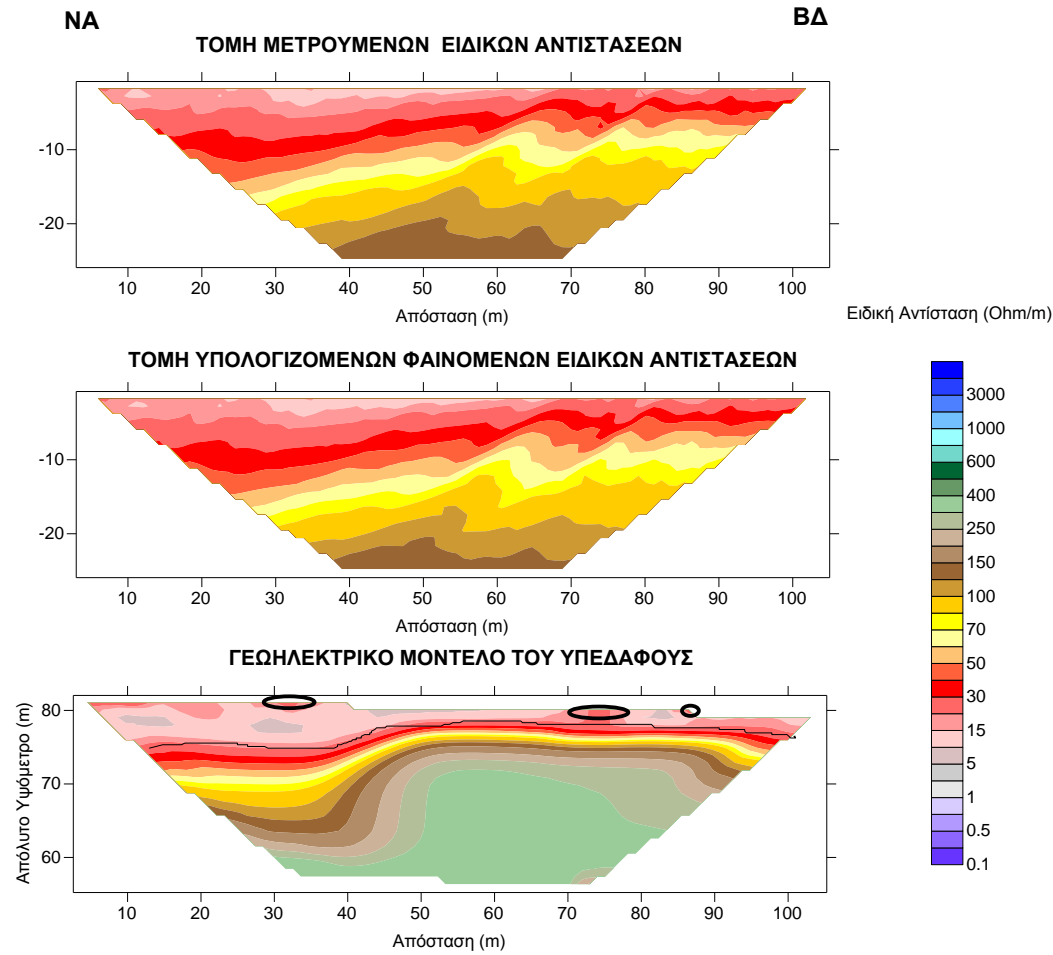


Σχήμα 4.20. Ερμηνεία των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής τομής “MIL-RES-2” (διαδικασία Forward) με διαφορετικές παραμέτρους ερμηνείας.

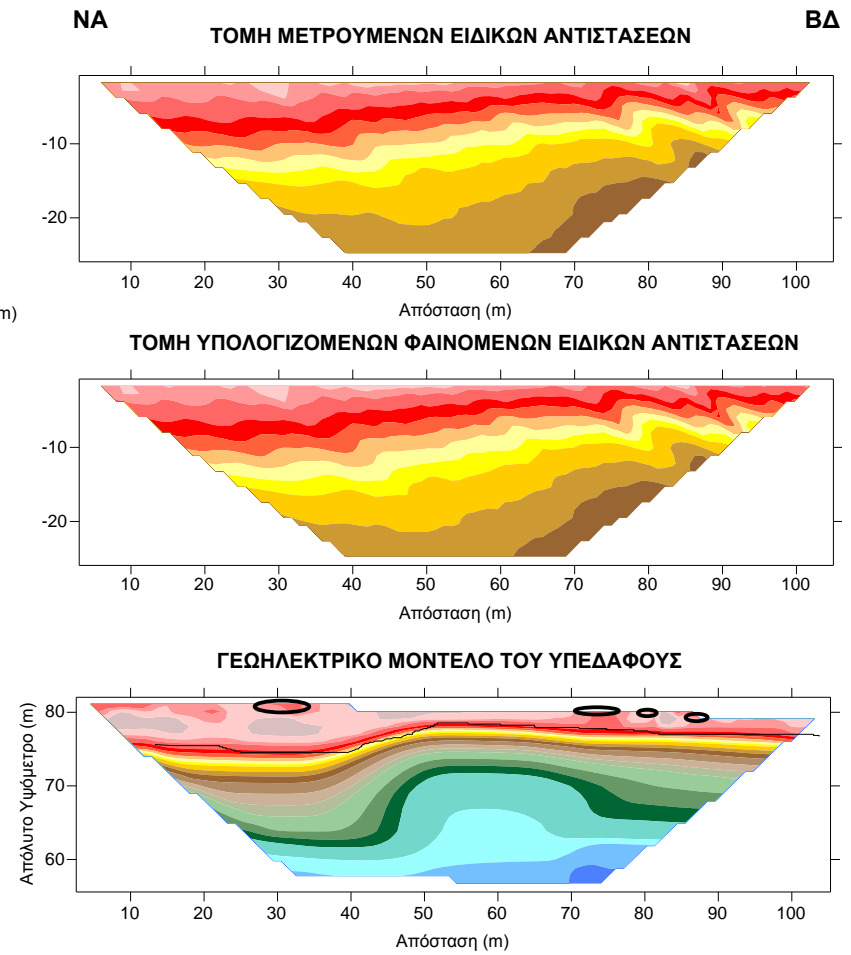
4.4.2.4. Γεωηλεκτρικές Τομές.

MIL-RES-1 (Forward –Reverse)

1 Forward



1 Reverse

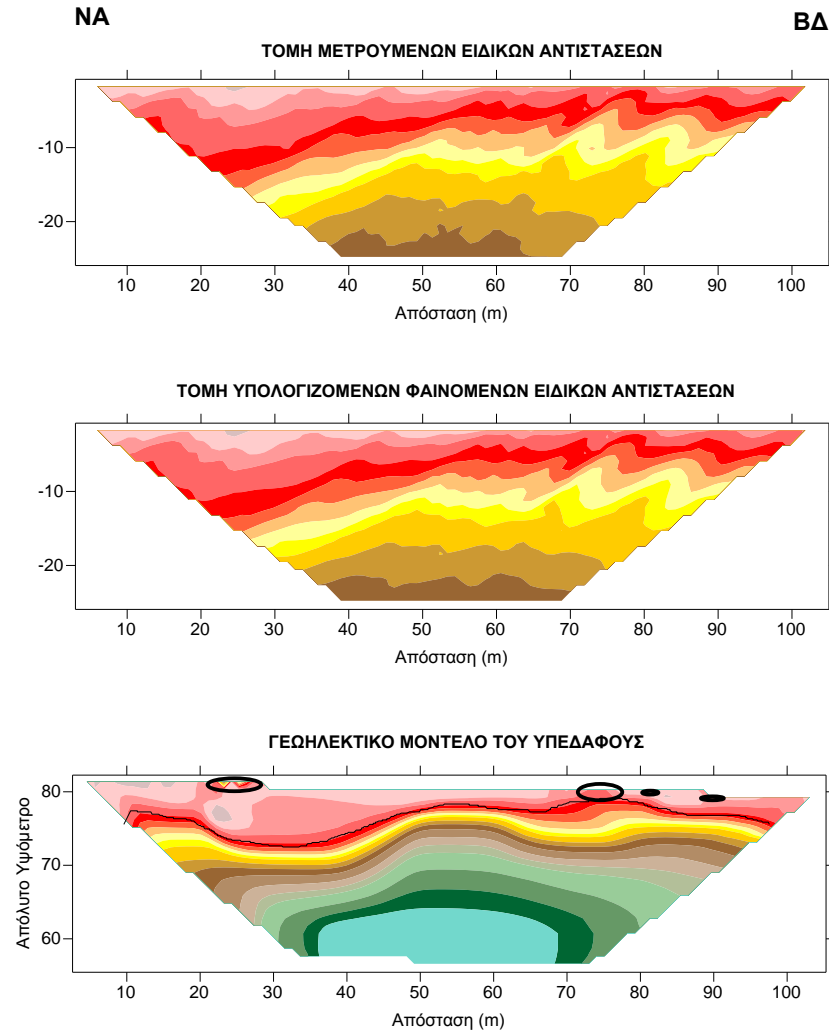


Παρατηρήσεις επί της γεωηλεκτρικής τομής

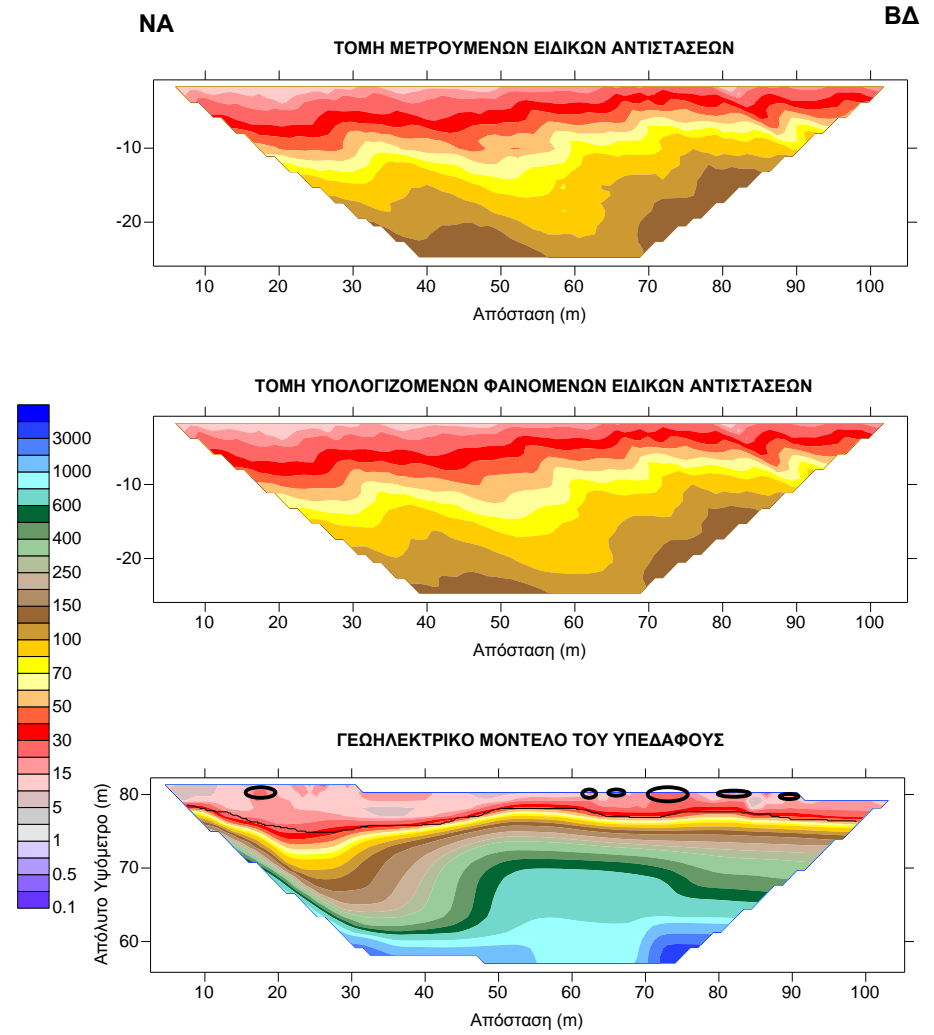
- Η τομή των μετρούμενων φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων είναι ίδια με αυτήν των υπολογιζόμενων και ως εκ τούτου το γεωηλεκτρικό μοντέλο του υπεδάφους αντιστοιχεί στις μετρήσεις που ελήφθησαν.
- Με τη μαύρη συνεχή γραμμή φαίνεται η ασυνέχεια μεταξύ του τόφου και των χαλαρών υλικών. Στα 40 μ απόσταση παρατηρείται βύθιση της ασυνέχειας.
- Στα 30 μέτρα απόσταση συναντάται η πρώτη απότομη τοπική μεταβολή στις τιμές της ειδικής αντίστασης με τις μεγαλύτερες τιμές πιθανόν να οφείλονται σε μεταβολή της σύστασης των χαλαρών υλικών (περισσότερα αδρομερή) ή στην ύπαρξη κάποιας πεπερασμένης δομής (τοιχία;).
- Μεταξύ των 70 και 90 μέτρων απόστασης υπάρχουν τοπικές περιοχές υψηλών ειδικών αντιστάσεων. Είναι πιθανή η ύπαρξη πεπερασμένων δομών (τοιχίων;). Η Reverse διαδικασία μετρήσεων δίνει περισσότερα στοιχεία όσον αφορά τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης για δομές που φαίνεται ότι πιθανώς υπάρχουν.

MIL-RES-2 (Forward – Reverse)

2 Forward



2 Reverse

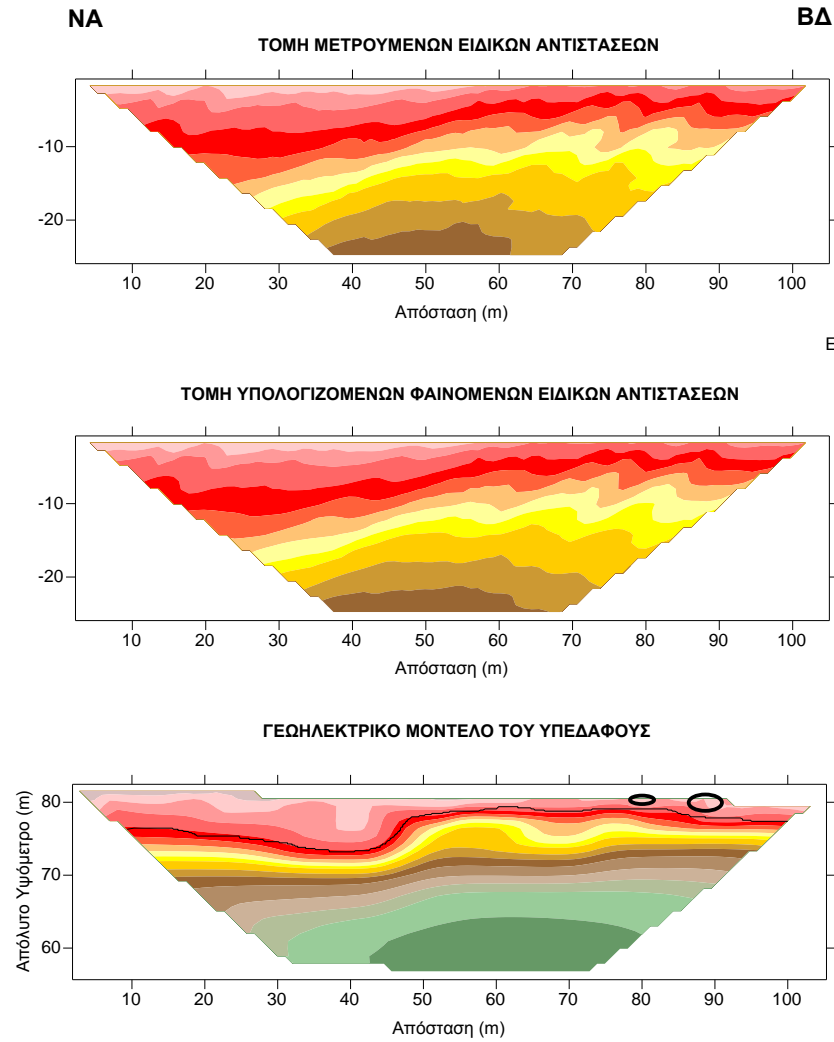


Παρατηρήσεις επί της γεωηλεκτρικής τομής

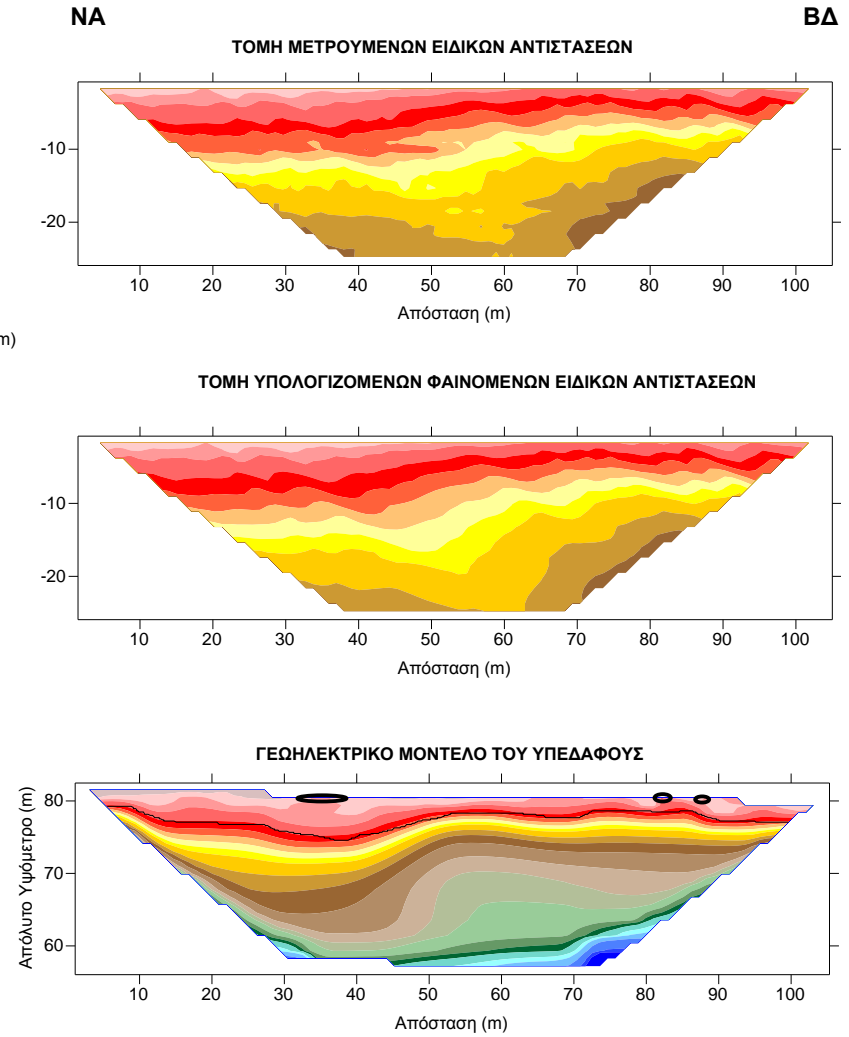
- Η τομή των μετρούμενων φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων είναι ίδια με αυτήν των υπολογιζόμενων και ως εκ τούτου το γεωηλεκτρικό μοντέλο του υπεδάφους αντιστοιχεί στις μετρήσεις που ελήφθησαν.
- Με τη μαύρη συνεχή γραμμή φαίνεται η ασυνέχεια μεταξύ του τόφου και των χαλαρών υλικών. Στα 40 μ απόσταση παρατηρείται βύθιση της ασυνέχειας.
- Στα 20 μέτρα απόσταση συναντάται η πρώτη απότομη τοπική μεταβολή στις τιμές της ειδικής αντίστασης με τις μεγαλύτερες τιμές πιθανόν να οφείλονται σε μεταβολή της σύστασης των χαλαρών υλικών (περισσότερα αδρομερή) ή στην ύπαρξη κάποιας πεπερασμένης δομής (τοιχία;).
- Μεταξύ των 60 και 90 μέτρων απόστασης υπάρχουν τοπικές περιοχές υψηλών ειδικών αντιστάσεων. Είναι πιθανή η ύπαρξη πεπερασμένων δομών (τοιχίων;). Η Reverse διαδικασία μετρήσεων δίνει περισσότερα στοιχεία όσον αφορά τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης για δομές που φαίνεται ότι πιθανώς υπάρχουν.

MIL-RES-3 (Forward – Reverse)

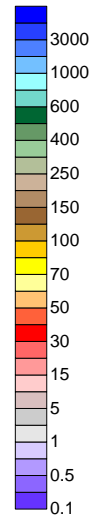
3 Forward



3 Reverse



Ειδική Αντίσταση (Ohm/m)

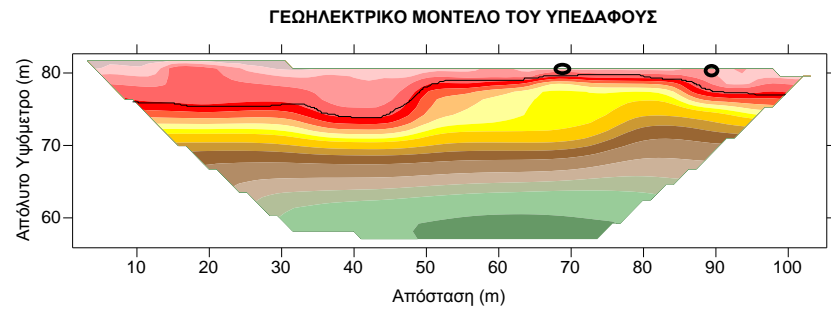
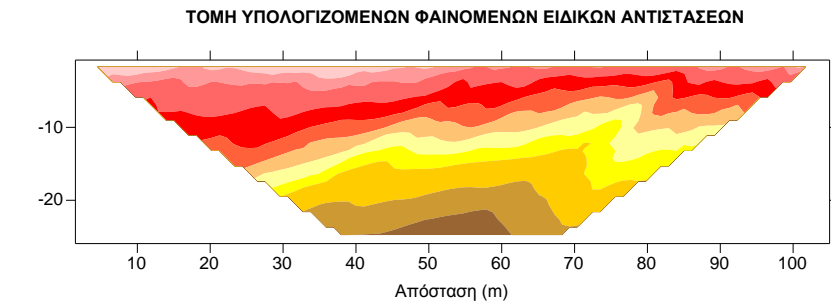
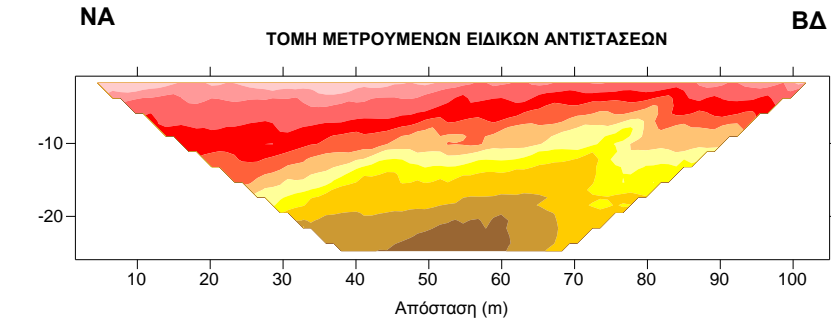


Παρατηρήσεις επί της γεωηλεκτρικής τομής

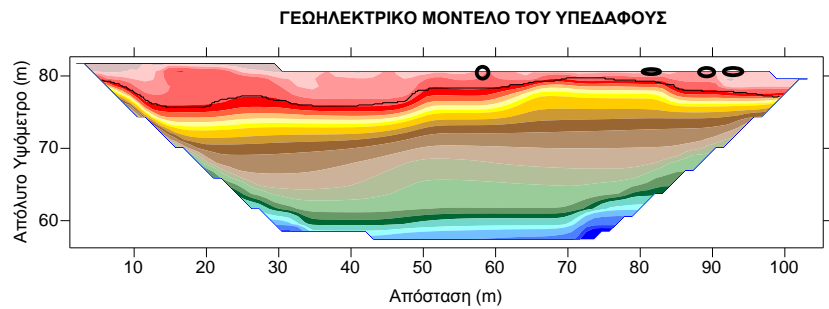
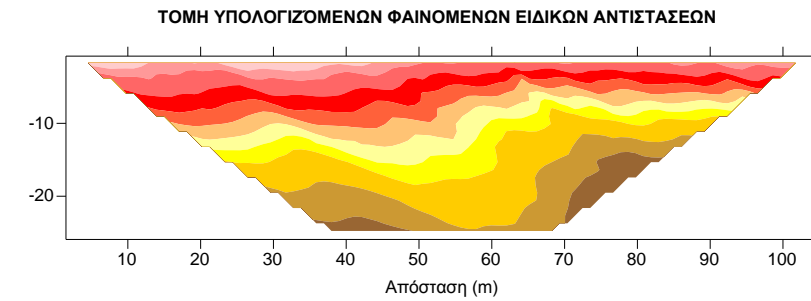
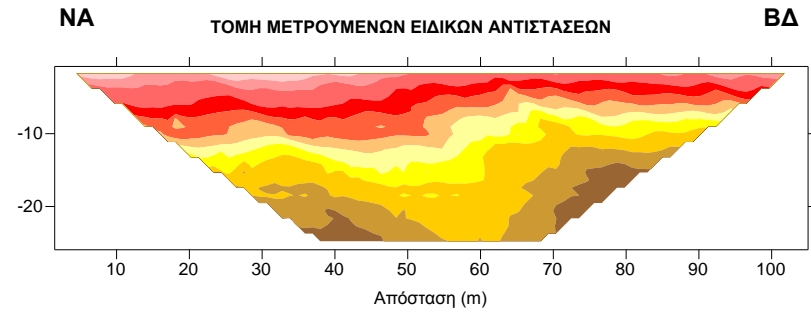
- Η τομή των μετρούμενων φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων είναι ίδια με αυτήν των υπολογιζόμενων και ως εκ τούτου το γεωηλεκτρικό μοντέλο του υπεδάφους αντιστοιχεί στις μετρήσεις που ελήφθησαν.
- Με τη μαύρη συνεχή γραμμή φαίνεται η ασυνέχεια μεταξύ του τόφου και των χαλαρών υλικών. Στα 40 μ απόσταση παρατηρείται βύθιση της ασυνέχειας.
- Στα 35 περίπου μέτρα απόσταση συναντάται η πρώτη απότομη τοπική μεταβολή στις τιμές της ειδικής αντίστασης με τις μεγαλύτερες τιμές πιθανόν να οφείλονται σε μεταβολή της σύστασης των χαλαρών υλικών (περισσότερα αδρομερή) ή στην ύπαρξη κάποιας πεπερασμένης δομής (τοιχία;).
- Μεταξύ των 80 και 90 μέτρων απόστασης υπάρχουν τοπικές περιοχές υψηλών ειδικών αντιστάσεων. Είναι πιθανή η ύπαρξη πεπερασμένων δομών (τοιχιών;). Η Reverse διαδικασία μετρήσεων δίνει περισσότερα στοιχεία όσον αφορά τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης για δομές που φαίνεται ότι πιθανώς υπάρχουν.

MIL-RES-4 (Forward – Reverse)

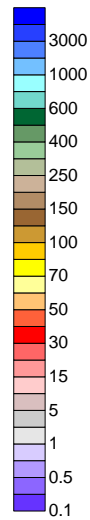
4 Forward



4 Reverse



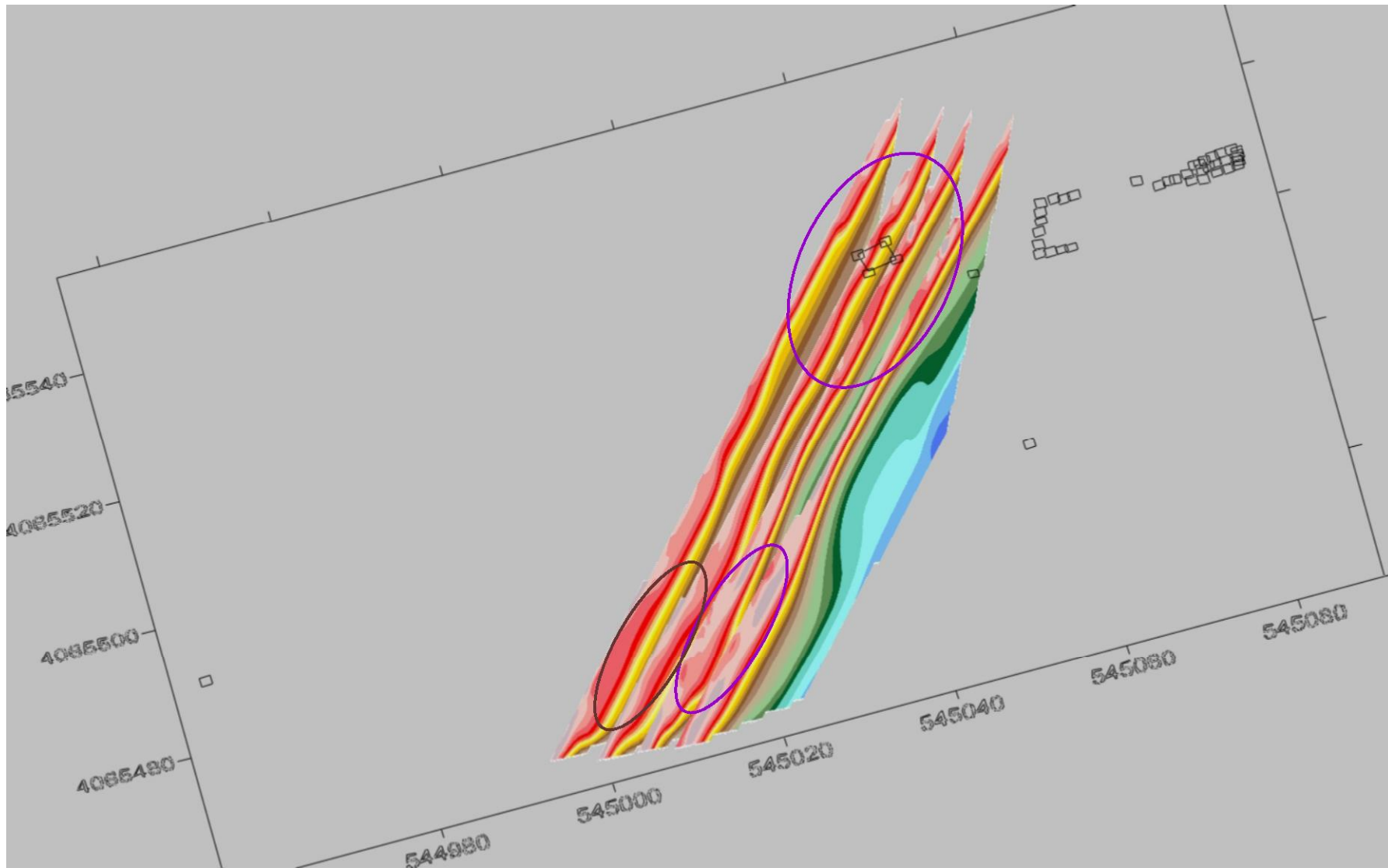
Ειδική Αντίσταση (Ohm/m)



Παρατηρήσεις επί της γεωηλεκτρικής τομής

- Η τομή των μετρούμενων φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων είναι ίδια με αυτήν των υπολογιζόμενων και ως εκ τούτου το γεωηλεκτρικό μοντέλο του υπεδάφους αντιστοιχεί στις μετρήσεις που ελήφθησαν.
- Με τη μαύρη συνεχή γραμμή φαίνεται η ασυνέχεια μεταξύ του τόφου και των χαλαρών υλικών. Στα 40 μ απόσταση παρατηρείται βύθιση της ασυνέχειας.
- Στα 60 μέτρα απόσταση συναντάται η πρώτη απότομη τοπική μεταβολή στις τιμές της ειδικής αντίστασης με τις μεγαλύτερες τιμές πιθανόν να οφείλονται σε μεταβολή της σύστασης των χαλαρών υλικών (περισσότερα αδρομερή) ή στην ύπαρξη κάποιας πεπερασμένης δομής (τοιχία;).
- Μεταξύ των 80 και 90 μέτρων απόστασης υπάρχουν τοπικές περιοχές υψηλών ειδικών αντιστάσεων. Είναι πιθανή η ύπαρξη πεπερασμένων δομών (τοιχίων;). Η Reverse διαδικασία μετρήσεων δίνει περισσότερα στοιχεία όσον αφορά τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης για δομές που φαίνεται ότι πιθανώς υπάρχουν.

4.4.2.5. Τριδιάστατη Αποτύπωση Γεωηλεκτρικών Τομών.



Παρατηρήσεις επί της τριδιάστατης αποτύπωσης των γεωηλεκτρικών τομών

- Στο νότιο μέρος παρατηρείται βύθιση της ασυνέχειας μεταξύ χαλαρών υλικών και συνεκτικού τόφου.
- Στις περιοχές που περικλείονται από μωβ γραμμή παρατηρούνται τοπικές δομές υψηλής ειδικής αντίστασης που πιθανά να αντιστοιχούν σε αρχαία τοιχία. Στην περιοχή γύρω από το γραφείο/αποθήκη της αρχαιολόγου και στις ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις βρέθηκαν ενδείξεις ύπαρξης τοιχίων.
- Η περιοχή που περικλείεται από την καφέ γραμμή παρουσιάζει ευρύτερο χώρο υψηλών αντιστάσεων που πιθανά να σχετίζεται με ανθρωπογενείς αποθέσεις (μπάζα). Κάτι που εντοπίστηκε και με τις ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις.

4.4.3. Ανάλυση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων.

Από την εφαρμογή των δύο γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Και οι δύο γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν έδωσαν ικανοποιητικά στοιχεία στην προσπάθεια εντοπισμού των ενταφιασμένων αρχαιοτήτων.
- Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο έγινε εφικτός ο εντοπισμός της θέσης των αρχαίων τοιχίων τα οποία σε σχέση με τους εδαφικούς σχηματισμούς είναι μη αγωγίμα (μικρή φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα). Με τις διαμορφώσεις CMD-2 και CMD-4 εντοπίστηκαν τοπικά ελάχιστα ηλεκτρικής φαινόμενης αγωγιμότητας και «γραμμικές μορφές» κοντά στα ήδη αποκαλυφθέντα τοιχία και το γραφείο/αποθήκη της αρχαιολόγου που μαρτυρούν την ύπαρξη πεπερασμένων δομών. Αναλυτικότερα για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, οι χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τις δύο διαμορφώσεις του οργάνου CMD (βάθος διείσδυσης 3-μέτρων και βάθος διείσδυσης 6-μέτρων), ο χάρτης με τη μειωμένη απόσταση κανάβου (βέλτιστη απεικόνιση ισοκαμπύλων αγωγιμότητας) και ο χάρτης φωτοσκίασης (συγκεκριμένης γωνίας φωτοσκίασης) μας δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα για την θέση των ενταφιασμένων τοιχίων και του ευρύτερου χώρου ενδιαφέροντος.
- Η γεωηλεκτρική τομογραφία ήταν ένα πολύτιμο εργαλείο στη γεωφυσική έρευνα διότι οι αρχαιολογικοί «στόχοι» παρουσιάζουν τοπικές διαφορές στην ιδιότητα της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης σε σχέση με την φυσική στρώση του εδάφους. Ένα πέτρινο τοιχίο έχει συνήθως μεγαλύτερη ηλεκτρική ειδική αντίσταση από την γύρω περιοχή. Συγκεκριμένα οι γεωηλεκτρικές τομές, που παρατίθενται στο τελευταίο κομμάτι του πειραματικού μέρους της εργασίας, δίνουν μία λεπτομερή εικόνα της στρωματογραφίας (ασυνέχεια, στρώματα υπεδάφους) της περιοχής ενδιαφέροντος καθώς και τις τοπικές διαφορές στις τιμές της ειδικής αντίστασης. Το σημαντικό κομμάτι στις τομές αυτές είναι τα τοπικά μέγιστα φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Η σάρωση της περιοχής πραγματοποιήθηκε από το νοτιοανατολικό μέρος προς το βορειοδυτικό μέρος. Στα πρώτα 40 μέτρα παρατηρήθηκε μία βύθιση της ασυνέχειας των στρωμάτων του υπεδάφους. Έπειτα συναντώνται τα πρώτα τοπικά μέγιστα στα 30-40 μέτρα που οφείλονται στην μεταβολή της σύστασης των χαλαρών υλικών ή στην ύπαρξη πεπερασμένων δομών. Πιθανότερη περίπτωση θεωρήσαμε την ύπαρξη των χαλαρών υλικών διότι ήταν κομμάτι της περιοχής όπου υπήρχαν ανθρωπογενείς αποθέσεις (μπάζα) και δεν ήταν ξεκάθαρο το γεγονός ύπαρξης πεπερασμένης δομής. Μεταξύ των 70-90 μέτρων, στις τέσσερις τομές (Forward- Reverse) και στην τριδιάστατη αποτύπωση των τομών, εμφανίζονται τοπικά μέγιστα στις τιμές της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, γεγονός που επαληθεύει όσα δείχνει η ηλεκτρομαγνητικής μέθοδος για τα θαμμένα τοιχία που αναζητούνται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Η ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

5.1. Γενικά Σχόλια.

Η παρουσία θαμμένων αρχαιοτήτων σε δραστηριότητες μηχανικού στην Ελλάδα είναι συχνή. Στόχοι σε αυτή την περίπτωση είναι αφενός να διατηρηθούν και να αναδειχθούν οι αρχαιότητες που αφορούν την πολύτιμη πολιτιστική κληρονομιά της Ελλάδας και αφετέρου να γίνει ο κατάλληλος σχεδιασμός του έργου, ώστε και το έργο να μην ακυρωθεί. Η γεωφυσική έρευνα μπορεί να προσφέρει στην κάλυψη αυτών των στόχων.

Από την διεθνή (όπως παρατέθηκε) αλλά και ελληνική δραστηριότητα η γεωφυσική έρευνα έχει αποκαλύψει θαμμένες αρχαιότητες και η επιτυχία της έγκειται στην διαφοροποίηση των γεωφυσικών ιδιοτήτων μεταξύ στόχων και περιβάλλοντος χώρου επιλέγοντας έτσι την κατάλληλη γεωφυσική μέθοδο.

Στην περίπτωση της περιοχής έρευνας της παρούσης διπλωματικής έχουμε την πιθανή παρουσία εγκοίλου μέσα σε συνεκτικούς τόφους πληρωμένου ή μη από αργιλικό υλικό ή θαμμένων τοιχίων σε χαλαρά υλικά (άργιλοι και χάλικες). Και στις δύο περιπτώσεις, η αγωγιμότητα ή το αντίστροφό της η ειδική αντίσταση διαφέρουν μεταξύ στόχων και περιβάλλοντος χώρου. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι δύο γεωφυσικές μέθοδοι, ηλεκτρομαγνητική και ειδικής αντίστασης. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων είναι σε συμφωνία μεταξύ τους, όσον αφορά την ύπαρξη και τη θέση των θαμμένων τοιχίων. Στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο προσδιορίστηκε η θέση των θαμμένων τοιχίων κοντά στο σπίτι της αρχαιολόγου και αντίστοιχα στις γεωηλεκτρικές τομές, στα 70-90 μέτρα βορειοδυτικά της περιοχής έρευνας, υπάρχουν ενδείξεις για ενταφιασμένες δομές.

Συμπερασματικά οι γεωφυσικές μέθοδοι απέδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τον εντοπισμό της θέσης των ενταφιασμένων αρχαιοτήτων, άρα κρίνονται ως αποτελεσματικές και χρήσιμες στην εύρεση τους και ως εκ τούτου στον σχεδιασμό για την επέκταση του μεταλλείου της εταιρείας S&B.

Τέλος θεωρούμε ότι η διαδικασία λήψης και ο τρόπος ροής των γεωφυσικών μετρήσεων που ακολουθήσαμε στην περιοχή έρευνας είναι ο ενδεδειγμένος, ώστε να καλύψουμε στο συντομότερο δυνατό χρονικό διάστημα, με το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, την περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αποστολόπουλος, Γ., 2008, «Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής», ΕΜΠ.

Βερβερέλης, Ε., 2011, «Εφαρμογή της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας στον Αστικό Ιστό, για τον Εντοπισμό Στρωματογραφίας και Πεπερασμένων Δομών».

Burger, H. R, Sheehan A.F. and Jones C.H., 2006, "Introduction to Applied Geophysics: Exploring the Shallow Subsurface", W. W. Norton & Company, New York."

Clark, A., 1996, "Seeing Beneath the Soil: Prospection Methods in Archaeology", Routledge, London."

Clay, R. B., 2006, "Conductivity survey: a survival manual. In Remote Sensing in Archaeology: An Explicit North American Perspective", edited by J. K. Johnson. University of Alabama Press, Tuscaloosa. Dalan, R. A., 2006, "Magnetic Susceptibility. In Remote Sensing in Archaeology: An Explicit North American Perspective", edited by J.K. Johnson, pp. 161-203. University of Alabama Press, Tuscaloosa.

Edwards, R.N., & Howell, E.C., 1976, «A field test of the magnetometric resistivity (MMR) method: Geophysics», v.41, p. 1170-1183.

Fox, R.C., G. W. Hohmann, T.J. Killpack, & L.Rijo, (1980) «Topographic effects in resistivity method and induced-polarization surveys: Geophysics» 45, 75-93.

Frohlich, B. and Lancaster, W.J., 1986, "Electromagnetic surveying in current Middle Eastern archaeology: Application and evaluation"

Gaffney, C. and Gater, J., 2003, "Revealing the Buried Past, Geophysics for Archaeologists. Tempus Publishing, Ltd., Gloucestershire."

Geotomo software, 2004, «RES2DINV ver.3.54:User's Manual».

Heckman, E., 2005, "Geophysical methodologies and test site for battlefield archaeology." Unpublished Master's thesis, University of Arkansas.

Καραλής, Π., 2010, Διπλωματική εργασία, «Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για τον Εντοπισμό Ενταφιασμένων Αρχαιοτήτων στην Περιοχή της Κερατέας Αττικής.»

- Κατερινόπουλος, Α. και Σταματάκης Μ.,1995, «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ- ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ,ΤΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥΣ», σελ. 302-303.
- Λούης, Ι., 2003, «Εισαγωγή στην Γεωφυσική Έρευνα – Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης», Σημειώσεις Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα.
- Μαυρομμάτης, Δ., 2007, «Συνδυασμός Στρωματογραφικών Δεδομένων και Γεωηλεκτρικών Τομογραφιών για τον εντοπισμό του Προολοκαινικού Υπόβαθρου στην περιοχή Πειραιά – Νέου Φαλήρου», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Οικονομόπουλος, Ν. Ι., Παπαγιανόπουλου-Οικονόμου Α., 1985, «Εισαγωγή εις την Εφηρμοσμένην Γεωφυσικήν», Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα.
- Πολυχρονοπούλου, Κ., 2005, «Αποτύπωση των Στρωμάτων του Υπεδάφους με τις Μεθόδους της Σεισμικής Διάθλασης και της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Sullivan, M.S.,2007, “Geophysical Prospection in the Cade Archaeological District of Vernon County, Wisconsin.”, UW-L Journal of Undergraduate Research X.
- Summer, J.S., 1976, «Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration»,Elsevier,Amsterdam.
- ΤΡΙΜΗΝΙΑΙΑ ΕΚΔΟΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ ΟΡΥΚΤΟΥ ΠΛΟΥΤΟΥ, 1997, «ΟΡΥΚΤΟΣ ΠΛΟΥΤΟΣ», σελ. 36-37
- Van Nostrand, R.G., and Cook, K.L., 1996, «Interpretation of resistivity data: Geological Survey Prof.Paper 499»,U.S. Geol.Survey.
- Van Zijl JSV, 1985, «A Practical Manual on the Resistivity Method», CSIR report K79.
- Vogelsagn,D.,1995, «Environmental Geophysics: A Practical Guide», Springer Verlag.
- Witten, A.J.,2006, “Handbook of Geophysics and Archaeology. Equinox.” Equinox Publishing, London.
- Won, J.J., Keiswetter D.A., Fields G.R.A and Sutton L.C.,1996, “Gem-2: a new multi-frequency electromagnetic sensor. Journal of Environmental Geophysics 1:129-137.”

