



ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ & ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ
ΣΕ ΧΩΡΟΥΣ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ
ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (Χ.Υ.Τ.Α)**

**APPLICATION OF MODERN GEOPHYSICAL
TECHNIQUES IN LANDFILLS**

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ : Κ. ΜΑΥΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Π. ΣΟΥΠΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2005

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ	7
2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ - ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	7
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΛΑΦΟΥΣ	8
2.3 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	8
2.3.1 Γεωμορφολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής του Κουρουπητού.....	8
2.3.2 Γεωμορφολογικές συνθήκες περιοχής του Κουρουπητού	9
2.4 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ	10
2.4.1 Γενικά για τη γεωλογική δομή της Κρήτης	10
2.4.2 Γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του Κουρουπητού.....	11
2.4.3 Γεωλογική δομή της περιοχής του Κουρουπητού.....	14
2.5 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ.....	14
2.5.1 Τεκτονική δομή της ευρύτερης περιοχής του Κουρουπητού.....	14
2.6 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ.....	17
2.6.1 Σεισμικότητα Ελληνικού χώρου	17
2.6.2 Το Γεωτεκτονικό καθεστώς του νοτίου Αιγαίου	19
2.6.3 Σεισμικό Ιστορικό της Κρήτης.....	20
2.6.4 Διερεύνηση Γεωτεκτονικού Περιβάλλοντος και Σεισμικότητας – Σεισμοτεκτονική Ανάλυση	22
2.7 ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	24
2.7.1 Καρστικά φαινόμενα στην ευρύτερη περιοχή του Κουρουπητού.....	24
2.8 ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ, ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	27
2.8.1 Υδροπερατότητα γεωλογικών σχηματισμών περιοχής Κουρουπητού.....	27
3. ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	29
3.1 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ	29
3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	29
3.3 ΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ	32
3.4 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	33
3.5 Η ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΓΗΣ.....	34

3.6	ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΕ ΑΠΕΙΡΟ ΟΜΟΓΕΝΗ ΧΩΡΟ.....	35
3.7	ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΗΜΙΧΩΡΟ	39
3.8	ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΑΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΗΜΙΧΩΡΟ	39
3.9	ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΗΜΙΧΩΡΟ.....	42
3.10	ΜΙΑ ΠΡΩΤΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	44
4.	Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	47
4.1	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	47
4.2	ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ AB	47
4.3	ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ MN	49
4.4	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	49
4.5	ΣΥΖΕΥΞΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	50
4.6	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ	50
4.7	ΔΙΑΡΡΟΗ.....	51
4.8	Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔV	53
4.9	Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ I	53
4.10	Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ K	54
4.11	ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ R_A	55
4.12	ΠΗΓΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ	55
5.	ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	59
5.1	ΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΕΣΟ ΜΕ ΣΤΡΩΣΗ	60
5.2	ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ: ΟΜΟΓΕΝΗ ΜΕΣΑ ΚΑΙ ΜΕΣΑ ΜΕ ΣΤΡΩΣΗ	61
5.3	ΡΟΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΕΣΟ ΜΕ ΣΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	63
5.4	ΈΝΑ ΑΚΟΜΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΕΣΟ ΜΕ ΣΤΡΩΣΕΙΣ.....	66
6.	ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ: ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΚΑΙ ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	69
6.1	ΈΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ: (ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΕΙΣ)	70
6.2	ΔΙΑΤΑΞΗ WENNER.....	70
6.3	ΔΙΑΤΑΞΗ SCHLUMBERGER	71

6.4 ΡΥΘΜΟΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΒ	74
6.5 Η ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΝ	76
6.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΤΗΣ ΒΥΘΟΜΕΤΡΗΣΗΣ	77
6.7 ΤΟ ΑΝΑΠΤΥΓΜΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΒ	78
6.8 ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΑΒ	79
6.9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	80
6.10 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ WENNER ΚΑΙ SCHLUMBERGER	84
6.11 ΈΡΕΥΝΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	85
6.12 ΠΡΟΦΙΛ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	85
6.12.1 Διάταξη δίπολου.....	85
6.12.2 Διάταξη Wenner.....	86
6.12.3 Διάταξη Schlumberger.....	88
6.13 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΑΘΜΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	89
6.14 ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	89
6.15 ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	93
6.16 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ- ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΒΥΘΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ- ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΥΘΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΜΕΣΟ ΕΝΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ...	95
6.17 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΥΘΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΜΕΣΟ ΕΝΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	97
6.18 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΥΘΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΜΕΣΟ ΔΥΟ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	99
6.19 ΜΕΣΟ ΔΥΟ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ: ΕΝΑ ΑΚΟΜΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	101
6.20 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ (ΠΛΕΥΡΙΚΗ) ΕΡΕΥΝΑ	103
7. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ	105
7.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	107
7.1.1 Ερμηνεία με ψευδοτομή.....	108
7.1.2 Ερμηνεία με αντιστροφή.....	109
7.1.3 Προγραμματισμός και λήψη μετρήσεων γεωηλεκτρικών τομογραφιών.....	111
7.1.4 Επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρικών τομογραφιών.....	112
8. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	115
8.1 ΘΕΣΕΙΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	118

9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	133
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	141

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σε συνεργασία με τον επίκουρο καθηγητή κύριο Σουπιό Παντελή, τον οποίο και ευχαριστώ ιδιαίτερος. Η βοήθεια του στην ολοκλήρωσή της ήταν πολύ σημαντική. Επιπλέον θα πρέπει να ευχαριστήσω τους αναπληρωτές καθηγητές κυρίους Βαλλιανάτο Φίλιππο και Παπακώστα Ταξιάρχη για τις χρήσιμες παρατηρήσεις που έκαναν στο κείμενο.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους, Σεφέρου Παρασκευή, Γεωργακόπουλο Πάνο και Στάθη Δημήτριο για τη συμμετοχή τους στη εκτέλεση των μετρήσεων υπαίθρου, χωρίς τη βοήθεια των οποίων δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση του παρόντος έργου. Τέλος θα πρέπει να ευχαριστήσω τη νομαρχιακή αυτοδιοίκηση Χανίων και ιδιαίτερα τον κύριο Μαρινάκη Δημήτριο για τη βοήθεια που μας παρείχε αλλά και για την άδεια εισόδου μας στο χώρο του εργοταξίου.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκτελέστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου με τίτλο: «Ανάπτυξη σύγχρονων ολοκληρωμένων μεθοδολογιών ελέγχου ρύπανσης σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ)», ΕΠΕΑΕΚ 2003-2006, με επιστημονικό υπεύθυνο τον Π. Σουπιό.

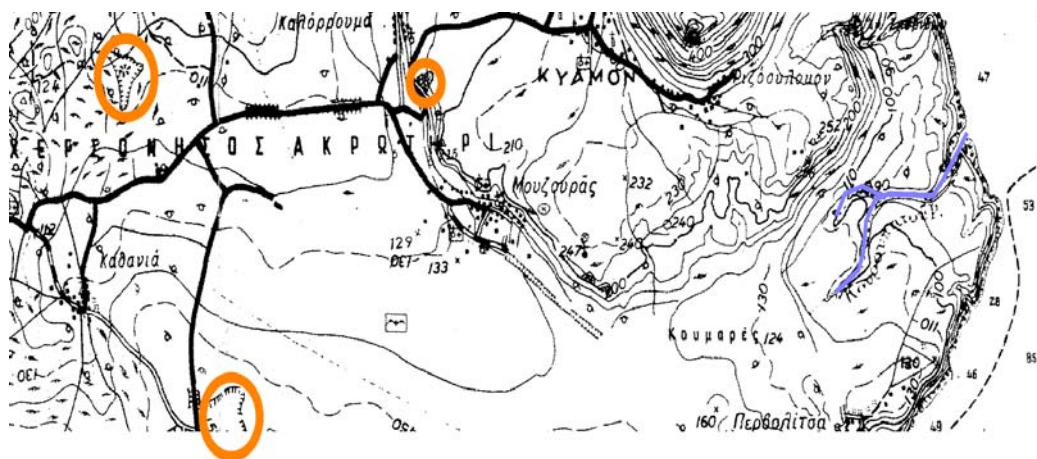
Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται τα γενικά στοιχεία της τοποθεσίας όπου έχει κατασκευαστεί ο χώρος απόθεσης απορριμμάτων των Χανίων. Στα επόμενα κεφάλαια (3^ο, 4^ο, 5^ο, 6^ο και 7^ο) γίνεται μια θεωρητική περιγραφή των μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης. Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διεξαγωγή των μετρήσεων και τέλος, στο ένατο κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα και η ερμηνεία αυτών.

2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

2.1 Γεωγραφική θέση - Μορφολογία της περιοχής

Βορειοανατολικά του τμήματος του νομού των Χανίων και ανατολικά της πόλεως των Χανίων βρίσκεται η χερσόνησος του Ακρωτηρίου. Ενώνεται με το υπόλοιπο νησί με ένα «λαιμό» πλάτους περίπου 3Km διαμορφώνοντας έτσι Βόρεια τον κόλπο των Χανίων και Νότια τον κόλπο της Σούδας.

Η περιοχή γύρω από την τοποθεσία που βρίσκεται το έργο ανήκει στη χαμηλή ζώνη του Ακρωτηρίου. Είναι στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου και νοτιότερα της περιοχής του Κουρουπητού. Στην ανατολική και τη νοτιοανατολική πλευρά της εν λόγω τοποθεσίας σχηματίζονται απότομες βραχώδης ακτές που οδηγούν στο Κρητικό πέλαγος. Μορφολογικά η περιοχή αναπτύσσεται σε χαμηλά υψόμετρα (από 120m ως 160m) και οι κλίσεις είναι γενικά ήπιες και κυμαίνονται κατά μέσο όρο από 6% ως 7%.



Σχήμα 1. Πολιτικός χάρτης κλίμακας 1:50.000 του ΓΥΣ. Στο χάρτη με κόκκινους κύκλους εντοπίζονται περιοχές με δολίνες, καταβόθρες και άλλες καρστικές δομές, ενώ με τη μπλε γραμμή απεικονίζεται η περιοχή του Κουρουπητού.

Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο και η γεωλογική σύσταση του Ακρωτηρίου έχουν ευνοήσει τη δημιουργία πολλών χαραδρώσεων και σπηλαίων. Χαρακτηριστικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι στην εδαφική περιφέρεια του Ακρωτηρίου υπάρχουν 100 περίπου αξιόλογα σπήλαια πολλά από τα οποία παρουσιάζουν αρχαιολογικό, ιστορικό και βιολογικό ενδιαφέρον.

2.2 Γεωλογικά-Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά εδάφους

Η μελέτη των γεωλογικών χαρακτηριστικών της ευρύτερης περιοχής του Κουρουπητού, βασίστηκε στην επεξεργασία των γεωλογικών και τεκτονικών χαρτών της περιοχής του Ακρωτηρίου και συγκεκριμένα :

- ο Γεωλογικός χάρτης με κλίμακα 1:50.000, φύλλο Χανιά, Ι.Γ.Μ.Ε.
- ο Σεισμοτεκτονικός χάρτης νήσου Κρήτης με κλίμακα 1:250.000.
- ο Πολιτικός χάρτης του Γ.Υ.Σ (1972) με κλίμακα 1:50.000.

2.3 Γεωμορφολογικές συνθήκες

2.3.1 Γεωμορφολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής του Κουρουπητού

Η γεωμορφολογική εικόνα που παρουσιάζει σήμερα η περιοχή του Ακρωτηρίου οφείλεται σε διάφορα γεωλογικά φαινόμενα, κυρίως όμως στην έντονη επίδραση των τεκτονικών γεγονότων που συνέβησαν κατά τη χρονική περίοδο του Μειόκαινου ως σήμερα. Από τη δράση των τεκτονικών αυτών γεγονότων διαμορφώθηκαν οι μακρομορφολογικοί χαρακτήρες της περιοχής ενώ η λεπτομερέστερη μορφολογική της υφή έχει διαμορφωθεί από τις διαδικασίες της διάβρωσης και της αποσάθρωσης των πετρωμάτων.

Αποτέλεσμα των γεωλογικών αυτών διαδικασιών είναι η διαμόρφωση της σημερινής γεωμορφολογικής δομής του Ακρωτηρίου που χαρακτηρίζεται από εξαιρετικές ποικιλομορφίες. Στην έκταση του αναπτύσσονται τόσο η ορεινή όσο και η χαμηλή ζώνη που παρουσιάζονται με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- **Η ορεινή ζώνη** χαρακτηρίζεται από ένα εκτεταμένο ορεινό όγκο που αναπτύσσεται με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, καταλαμβάνοντας το βορειοανατολικό τμήμα του Ακρωτηρίου. Δομείται εξ ολοκλήρου από ανθρακικά πετρώματα και παρουσιάζεται με πολυάριθμες βουνοκορφές υψομέτρων συνήθως 350-420m με υψηλότερη τη «Σκλόκα» που με υψόμετρο 529m δεσπόζει στο ανατολικό του τμήμα. Ο ορεινός όγκος διασχίζεται κατά θέσεις από μικρά ως επί το πλείστον φαράγγια και ρέματα που έχουν δημιουργηθεί από το συνδυασμό ρηξιγενούς τεκτονικής και γρήγορων ανυψωτικών κινήσεων που επιτάχυναν τη διαδικασία της διάβρωσης. Το ανάγλυφο χαρακτηρίζεται από εξαιρετική τραχύτητα και παντού επικρατεί η εικόνα του ορεινού βραχώδους τοπίου με τα πολύμορφα πρηνή που χαρακτηρίζονται από ισχυρές κλίσεις και με πολύαριθμες

καρστικές δομές που έχουν σχηματίσει ποικίλου μεγέθους και μορφής έγκοιλα, σπήλαια, δολίνες, δακτυλογλυφές κλπ

- Μέσω μεταπτωτικών ρηγμάτων διευθύνσεων κυρίως ΒΔ-ΝΑ ο ορεινός όγκος μεταβαίνει στη **χαμηλή ζώνη** υψομέτρων 0-220m περίπου, που καταλαμβάνει το δυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα του Ακρωτηρίου που δομείται κυρίως από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, μάργες και αλλουβιακούς σχηματισμούς. Στο κεντρικό τμήμα δεσπόζει το τεκτονικό βύθισμα του Ακρωτηρίου που αναπτύσσεται με υψόμετρα 110-150m περίπου. Η μορφολογία της χαμηλής ζώνης παρουσιάζεται σε γενικές γραμμές αρκετά ομαλή και το ανάγλυφό της χαρακτηρίζεται γενικά ήπιο δημιουργώντας έτσι ισχυρή αντίθεση με αυτό της ορεινής ζώνης. Εξαιρέση αποτελούν οι λόφοι υψομέτρων ως 220m περίπου που αναπτύσσονται στη νότια περιοχή του Ακρωτηρίου (λόφος Βίγλες κλπ) και που κατά θέσεις χαρακτηρίζονται από έντονες μορφολογικές κλίσεις.
- **Η παραθαλάσσια ζώνη** αναπτύσσεται περιμετρικά του Ακρωτηρίου και παρουσιάζεται με εξαιρετικές ποικιλομορφίες. Στο βόρειο-βορειοανατολικό τμήμα του ο ορεινός όγκος βυθίζεται κυριολεκτικά στη θάλασσα του Κρητικού πελάγους διαμορφώνοντας έτσι ισχυρών κλίσεων απότομες βραχώδεις ακτές, σε αντίθεση με το βορειοδυτικό και νοτιοανατολικό τμήμα του Ακρωτηρίου.

2.3.2 Γεωμορφολογικές συνθήκες περιοχής του Κουρουπητού

Η περιοχή όπου έχει κατασκευαστεί το εργοστάσιο κομποστοποίησης απορριμμάτων και ΧΥΤΑ της πόλεως των Χανίων και η ευρύτερη περιοχή του Κουρουπητού, βρίσκεται στο ανατολικό άκρο του Ακρωτηρίου Χανίων, σε απόσταση 13Km ανατολικά από την πόλη των Χανίων και 3.5Km νοτιο-ανατολικά από τον οικισμό Μουζουρά.

Στη βόρεια και δυτική πλευρά της, η περιοχή περιβάλλεται από τα γνωστή χαράδρα του Κουρουπητού, μέσω της οποίας χωρίζεται από τον κάμπο του Ακρωτηρίου. Στην ανατολική και νοτιοανατολική πλευρά της σχηματίζονται οι πολύ απότομες βραχώδεις ακτές του Κρητικού πελάγους.

Ο χώρος του εργοστασίου κομποστοποίησης απορριμμάτων και του ΧΥΤΑ, καταλαμβάνει έκταση 235.525 στρέμματα, αναπτύσσεται σε υψόμετρο από +60m μέχρι περίπου +104m, με μικρές γενικά μορφολογικές κλίσεις της τάξης 4% - 8% . Ο χώρος δημιουργίας του ΧΥΤΑ έχει έκταση 30 στρέμματα και αναπτύσσεται ανάμεσα στα υψόμετρα από +60m ως +100m με ήπιες μορφολογικά κλίσεις που κυμαίνονται κατά μέσο όρο 6% -7%.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι στην εγγύς περιοχή του έργου και όπως φαίνεται και από

το σχήμα 1 υπάρχουν πλήθος δολίνων και καταβόθρων η παρουσία των οποίων συνδέεται άμεσα με το σκοπό του έργου.

2.4 Γεωλογική δομή

2.4.1 Γενικά για τη γεωλογική δομή της Κρήτης

Η Κρήτη αποτελεί σε παγκόσμια κλίμακα ένα από τα νέα ενεργά ορογενή γεγονόσ που συνοδεύεται από αλληπάλλληλα τεκτονικά γεγονότα που έχουν δράσει στην ευρύτερη σημερινή περιοχή του νησιού κατά τη διάρκεια των γεωλογικών χρόνων.

Σήμερα, σύμφωνα με τις νεότερες και επικρατέστερες επιστημονικές απόψεις, η γεωλογική δομή της Κρήτης χαρακτηρίζεται από τη συσσώρευση μιας σειράς τεκτονικών καλυμμάτων κατά τη διάρκεια της Αλπικής ορογένεσης, που προέρχονται τόσο από τις εξωτερικές όσο και από τις εσωτερικές Ελληνικές ζώνες. Τα καλύμματα αυτά βρίσκονται σήμερα τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο και ανάλογα με την τεκτονομεταμορφική τους εξέλιξη και την τεκτονική τους θέση, κατατάσσονται σε δυο ομάδες, που είναι οι ακόλουθες,

i. Τα κατώτερα καλύμματα, στα οποία ανήκουν :

- η Ενότητα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων,
- η Ενότητα του Τρυπαλίου και
- το Τεκτονικό Κάλυμμα των Φυλλιτών-Χαλαζιτών.

ii. Τα ανώτερα καλύμματα, τα οποία αποτελούνται από αμεταμόρφωτα ανθρακικά καλύμματα στη βάση τους και προ Ολιγοκαινικά μεταμορφωμένα στην κορυφή:

- τα αμεταμόρφωτα ανθρακικά καλύμματα αποτελούν το τεκτονικό κάλυμμα Γαβρόβου-Τριπόλεως και το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου και
- τα προ-Ολιγοκαινικά μεταμορφωμένα καλύμματα συνιστούν το κάλυμμα του Βάτου-Μιαμού-Άρβης (οφιολιθικό melange), των Αστερουσίων (κρυσταλλικά πετρώματα) και των Οφιολίθων.

Τα ανώτερα καλύμματα διαχωρίζονται από τα κατώτερα καλύμματα μέσω ενός κύριου εφελκυστικού ρήγματος απόσπασης.

Τέλος, πάνω από τα ανώτερα και τα κατώτερα καλύμματα, έχουν μεταορογενετικά τοποθετηθεί με στρωματογραφική ασυμφωνία τα νεότερα ιζήματα Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας (κροκαλολατυποπαγή, μάργες, ψαμμίτες κ.λ.π.).

2.4.2 Γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του Κουρουπητού

Από την επεξεργασία των στοιχείων της γεωλογικής χαρτογράφησης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, στην ευρύτερη περιοχή του Κουρουπητού, προκύπτει ότι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την περιοχή ενδιαφέροντος αντιστοιχούν στα κατώτερα καλύμματα της Κρήτης και στα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς (σχήμα 2). Στη συνέχεια δίνεται αναλυτική περιγραφή τους με σειρά όμοια με αυτήν της στρωματογραφικής τους διάταξης από τα κατώτερα προς τα ανώτερα μέλη.

1. **Ενότητα Πλακωδών Ασβεστόλιθων.** Αποτελεί μια από τις πλέον γνωστές γεωλογικές ενότητες της Κρήτης που ανήκει στα κατώτερα καλύμματα και δομεί μεγάλο μέρος των Λευκών Ορέων. Στην περιοχή μελέτης αποτελεί τη βαθύτερη εμφανιζόμενη ενότητα και συνιστά το γεωλογικό υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής του Ακρωτηρίου. Αποκαλύπτεται με τη μορφή τεκτονικού παραθύρου, με μικρές σχετικά εμφανίσεις στην ορεινή περιοχή της Σκλόκας και σε αυτήν ανατολικά του χωριού Χορδάκι.

Η εν λόγω ενότητα εμφανίζεται στην περιοχή ενδιαφέροντος με τη χαρακτηριστική λεπτοστρωματώδη έως μεσοστρωματώδη ανάπτυξη, τεφρόμαυρων ισχυρά ανακρυσταλλωμένων ασβεστόλιθων, που έχουν μεταμορφωθεί σε συνθήκες υψηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας και παρουσιάζονται κυριολεκτικά με τη **μορφή μαρμάρων**. Παρουσιάζουν δε ένα χαρακτηριστικό **αποχωρισμό σε «πλάκες»**, πάχους 10-30cm ή και παραπάνω, απ' όπου και πήραν την ονομασία τους, ενώ προς τους ανώτερους ορίζοντες οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι εξελίσσονται σε παχυστρωματώδεις. Κατά θέσεις, και σε πολύ περιορισμένη σχετικά κλίμακα παρατηρούνται οι γνωστές για την ενότητα υπόλευκες **πυριτολιθικές παρεμβολές** που παρουσιάζονται με τη μορφή φακών και βολβών.

Οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι στην περιοχή μελέτης, αναπτύσσονται με μικρές σχετικά γωνίες κλίσεις των στρωσιγενών τους επιπέδων (100-300) και με επικρατέστερες διευθύνσεις νοτιοδυτικές.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιγράψαμε, χαρακτηρίζονται από τη σταθερή και ομοιόμορφη λιθοφασική τους εξέλιξη, αποτελώντας πελαγικά ιζήματα που σχηματίστηκαν σε ήρεμο περιβάλλον μεγάλου βάθους κατά τη χρονική περίοδο Ιουρασικού και νεότερα.

2. **Ενότητα Τρυπαλίου.** Πάνω στην ενότητα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων μέσω κυρίως τεκτονικών επαφών εμφανίζεται επωθημένη η ανθρακική ενότητα του Τρυπαλίου που αναπτύσσεται και στη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης, με τα

γνωστά σε όλους γκριζότεφρα και βραχώδη πετρώματά της, που χαρακτηρίζονται από το έντονο τραχύ τους ανάγλυφο και από τις πολυάριθμες καρστικές δομές.

Τα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας αυτής δομούν όλο το βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα την εκτεταμένη ορεινή μάζα από την περιοχή της Αγίας Τριάδας προς την ορεινή περιοχή Χωρδάκι-Μουζουρά-Σκλόκα, μέχρι και την ανατολική περιοχή του κάμπου (τεκτονικό βύθισμα) Ακρωτηρίου (Αεροδρόμιο, Κουμαρές-Κουρουπητός), όπου μέσω τεκτονικής επαφής συνδέονται πλέον με τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους τους νεογενούς.

Στην περιοχή μελέτης η ενότητα Τρυπαλίου παρουσιάζεται με κυμαινόμενα πάχη γεγονός που οφείλεται στον επωθητικό της χαρακτήρα. Αποτελείται από μια σειρά ανθρακικών πετρωμάτων ηλικίας Ιουρασικής και νεότερης, που έχουν υποστεί ισχυρή τεκτονική καταπόνηση, με αποτέλεσμα τον έντονο κατακερματισμό τους και την ανασυγκόλλησή τους σε διάφορα στάδια. Αναλυτικότερα, στη σύσταση τους μετέχουν οι ακόλουθοι σχηματισμοί :

- Κατώτερα στρωματογραφικά τμήματα: Λεπτοπλακώδεις έως στρωματώδεις υπόλευκοι, λευκότεφροι και σκοτεινότεφροι ανακρυσταλλωμένοι **ασβεστόλιθοι και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι**, που κατά θέσεις μοιάζουν με τους Πλακώδεις Ασβεστόλιθους, με τη διαφορά ότι δεν φέρουν πυριτόλιθους.

- Μεσαία και ανώτερα στρωματογραφικά τμήματα: Λευκότεφροι έως τεφροί ασβεστόλιθοι και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι που παρουσιάζονται ανακρυσταλλωμένοι και βιτουμενούχοι και **ανθρακικά κροκαλολατυποπαγή** που παρουσιάζονται σε μαζώδη ανάπτυξη και χαρακτηρίζουν την εν λόγω ενότητα.

3. **Νεότερα ιζήματα Νεογενούς.** Πάνω στους προορογενετικούς σχηματισμούς που ήδη περιγράψαμε επικάθονται με στρωματογραφική ασυμφωνία ή συνδέονται με τεκτονικές επαφές, τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς που αναπτύσσονται στο νότιο τμήμα της περιοχής του Ακρωτηρίου, με χαρακτηριστικές εμφανίσεις στις περιοχές Στέρνες, Περβολίτσα και Μαράθι. Ανάλογα με τα λιθοφασικά τους χαρακτηριστικά τα κατατάσσουμε στα ακόλουθα μέλη που περιγράφουμε με σειρά όμοια της στρωματογραφικής τους διάταξης από τα κατώτερα προς τα ανώτερα μέλη:

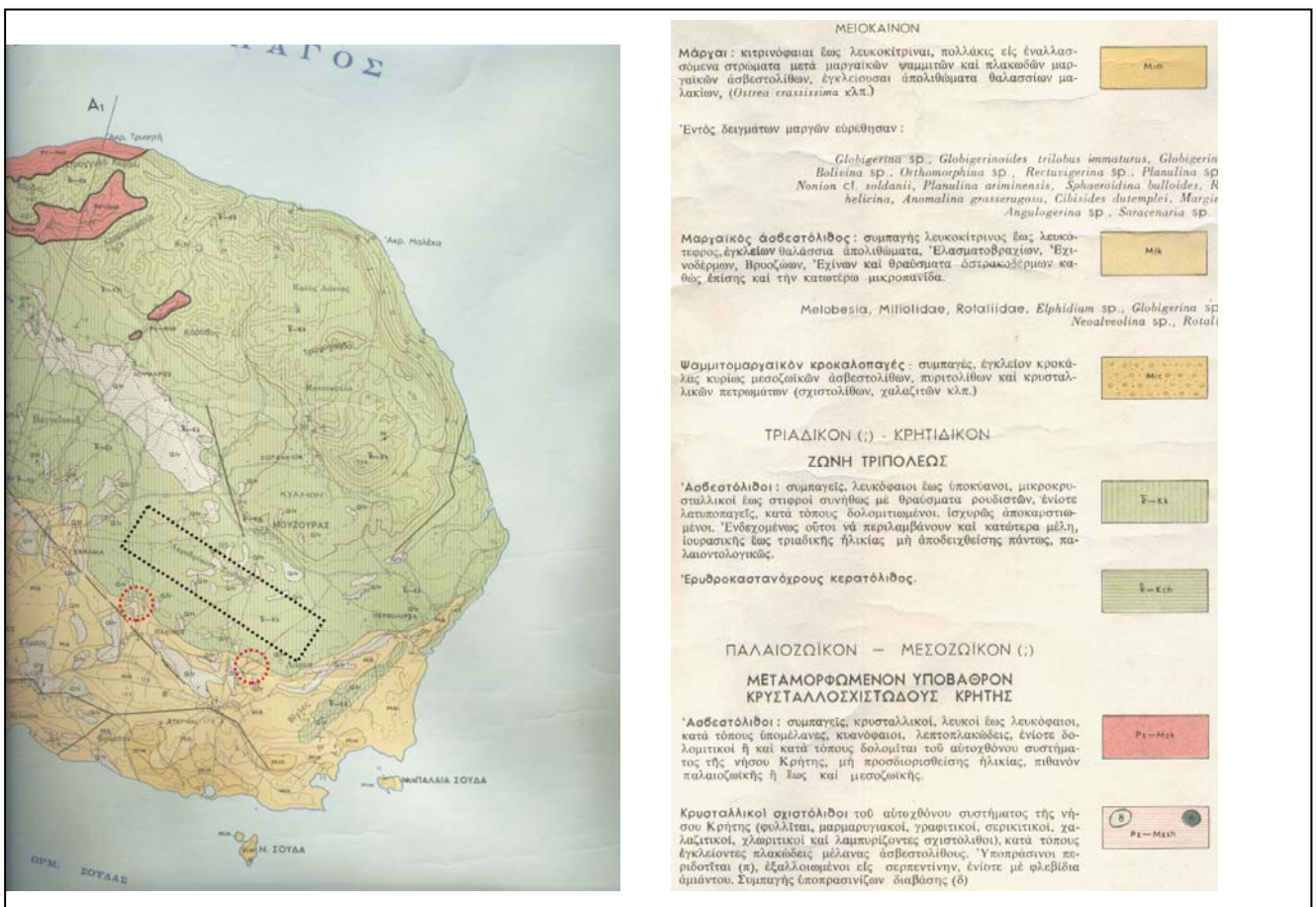
- Ασβεστομαργαϊκή σειρά. Πρόκειται για σχηματισμό ηλικίας Άνω Μειόκαινου ως Κάτω Πλειόκαινου, που αποτελείται κυρίως από τους συμπαγείς λευκοκίτρινους έως λευκόφαιους, υφαλογενείς και βιοκλαστικούς **μαργαϊκούς ασβεστόλιθους** και ασβεστολιθικές ψαμιτομάργες. Παρουσιάζονται με χαρακτηριστική παχυστρωματώδη ανάπτυξη, με μικρές γωνίες κλίσεων των στρωσιγενών τους επιπέδων που έχουν

διευθύνσεις βορειοανατολικές-ανατολικές.

- Μαργαϊκή σειρά. Η σειρά αυτή αποτελείται στο σύνολο της σχεδόν από Πλειοκαινικής ηλικίας άσπρες-κιτρινωπές παχυστρωματώδεις και μαζώδεις **μάργες** που στους ανώτερους ορίζοντες μεταπίπτουν σε λευκοκίτρινους ψαμμιτομάργες.

4. **Πρόσφατες αποθέσεις τεταρτογενούς**. Την περιοχή του κάμπου του Ακρωτηρίου καλύπτει κατά θέσεις ο **αλλουβιακός μανδύας** που αποτελείται από καστανέρυθρες αργίλους, ερυθρογή και διάσπαρτες ασβεστολιθικές λατύπες. Δημιουργήθηκε από τα προϊόντα διάβρωσης των ανθρακικών πετρωμάτων και αναπτύσσεται με μικρά πάχη που κυμαίνονται από λίγα εκατοστά ως λίγα μέτρα.

Αποθέσεις ερυθρογής συναντάμε συνεχώς με μικρές ή και μεγαλύτερες χαρακτηριστικές εμφανίσεις, μέσα σε μικρούς και μεγάλους καρστικούς θύλακες που σχηματίζονται στα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας του Τρυπαλίου και περισσότερο στους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους.



Σχήμα 2. Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ, κλίμακας 1:50.000, Φύλλο ΧΑΝΙΑ. Με κόκκινους στικτούς κύκλους οριοθετούμαι τις θέσεις των καρστικών φαινομένων όπως αυτά έχουν καταγραφεί από του γεωλόγους του ΙΓΜΕ κατά τη χαρτογράφηση.

2.4.3 Γεωλογική δομή της περιοχής του Κουρουπητού

Η περιοχή του Κουρουπητού, δομείται από τους βραχώδεις ανθρακικούς σχηματισμούς της ενότητας του Τρυπαλίου που περιγράφηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη παράγραφο, από τα καστανέρυθρα αργιλικά υλικά που αποτίθενται ως ένας λεπτός μανδύας σποραδικά στην περιοχή και προέρχονται από τη διάβρωση των μητρικών τους πετρωμάτων, ενώ κατά θέσεις εμφανίζεται και ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος (σχήμα 2).

2.5 Τεκτονική δομή

2.5.1 Τεκτονική δομή της ευρύτερης περιοχής του Κουρουπητού

Η Κρήτη όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο, αποτελεί σε παγκόσμια κλίμακα ένα από τα νέα ενεργά ορογενή γεγονότα που συνοδεύεται από αλληπάλληλα τεκτονικά γεγονότα που έχουν δράσει στην ευρύτερη σημερινή περιοχή του νησιού κατά τη διάρκεια των γεωλογικών χρόνων.

Αποτέλεσμα αυτών είναι η ανάπτυξη ρηξιγενούς τεκτονικής που επικρατεί καθ' όλη την έκταση της Κρήτης και εκδηλώνονται με την ανάπτυξη μεγάλων και μικρών ρηξιγενών ζωνών που κυριολεκτικά κατατεμαχίζουν το νησί.

Σήμερα, η γεωμορφολογική μορφή της ευρύτερης περιοχής του Κουρουπητού, όπως αυτή παρουσιάζεται με τα ημιορεινά συγκροτήματα, τις απότομες βραχώδεις ακτές, τις έντονες χαραδρώσεις και τις τεκτονικές λεκάνες, οφείλεται σε διάφορα γεωλογικά φαινόμενα, κυρίως όμως στην επίδραση της Αλπικής και της Νεοτεκτονικής τεκτονικής που συνέλαβαν στην εκδήλωση των ποικίλων παραμορφωτικών φάσεων που εκφράζονται στα πετρώματα με τη μορφή της πτυχογόνου και της ρηξιγενούς τεκτονικής.

Η πτυχογόνος τεκτονική εκδηλώνεται με τη μορφή ποικίλων πτυχών που εμφανίζονται κυρίως στους στρωματώδεις σχηματισμούς της ενότητας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων.

Η ρηξιγενής τεκτονική είναι ιδιαίτερα έκδηλη στην περιοχή και εκδηλώνεται με πλήθος τεκτονικών ασυνεχειών που αντιπροσωπεύονται από πλήθος ρηγμάτων, ρηγματώσεων και διακλάσεων που λόγω του συμπαγούς χαρακτήρα των ανθρακικών πετρωμάτων, δημιουργούν χαρακτηριστικές και εμφανείς θραυστιγενείς επιφάνειες.

Οι ρηξιγενείς ζώνες της περιοχής μελέτης ακολουθούν κατ' εξοχήν τρεις

επικρατέστερες κύριες διευθύνσεις: ΒΔ-ΝΑ, ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ. Οι κυριότερες τεκτονικές ασυνέχειες της περιοχής είναι (σχήμα 3 και 4):

- Οι μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες διεύθυνσης **ΒΔ-ΝΑ**, που οριοθετούν τη δυτική πλευρά του ορεινού όγκου του Ακρωτηρίου και αντιπροσωπεύονται από δυο μεγάλα ρήγματα, που έχουν δημιουργήσει κατά το μήκος τους τα δυο χαρακτηριστικά ορεινά επίπεδα. Το ένα αναπτύσσεται κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης (διεύθυνση κλίσης $220^{\circ}\text{N}\Delta/85^{\circ}$) στο ύψος της περιοχής Χωρδακίου. Σε θέση ανατολικά του Χωρδακίου στο ύψος του δρόμου, παρουσιάζονται χαρακτηριστικοί καθρέπτες με μυλωνιτιοποιημένο υλικό. Το δεύτερο αναπτύσσεται με την ίδια διεύθυνση, παράλληλα και χαμηλότερα στο ύψος της περιοχής Μουζουρά και έχει συμβάλει στη δημιουργία του τεκτονικού βυθίσματος του Ακρωτηρίου που προεκτείνεται νοτιοδυτικά.



Σχήμα 3. Απόσπασμα του γεωτεκτονικού χάρτη της Ελλάδος, κλίμακας 1:200.000. βλέπουμε ότι στη ευρύτερη περιοχή έρευνας έχουν χαρτογραφηθεί διάφορα ανάστροφα ρήγματα.

- Οι ρηξιγενείς ζώνες διεύθυνσης **ΒΔ-ΝΑ**, που οριοθετούν το ανατολικό τμήμα της ορεινής μάζας του Ακρωτηρίου και έχουν συμβάλει στη δημιουργία απόκρημνων βραχωδών ακτών που παρουσιάζουν χαρακτηριστικά πρηνή με ισχυρές κλίσεις.

- Οι ρηξιγενείς ζώνες διεύθυνσης **BA-NΔ**, που οριοθετούν το νότιο τμήμα της ορεινής μάζας του Ακρωτηρίου και έχουν συμβάλει στη δημιουργία του τεκτονικού βυθίσματος που εκτείνεται νοτιότερα.
- Η ρηξιγενής ζώνες διεύθυνσης ομοίως **BA-NΔ** που διασχίζει την καρδιά του ορεινού όγκου και παρουσιάζει στην περιοχή ανατολικά του Καλόρουμα χαρακτηριστικούς καθρέπτες με διεύθυνση της επιφάνειας κλίσης $325^{\circ}\text{BΔ}/25^{\circ}$.
- Η ρηξιγενής ζώνες διεύθυνσης ομοίως **BA-NΔ** που διασχίζει το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης (Μαράθι-Περβολίτσα) και φέρνει σε τεκτονική επαφή τα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας του Τρυπαλίου με τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς.
- **Οι διακλάσεις** που κατακερματίζουν τα ανθρακικά πετρώματα που παρουσιάζονται με πυκνά δίκτυα ποικίλων διευθύνσεων με επικρατέστερες διευθύνσεις ανάλογες των μεγάλων ρηξιγενών ζωνών. Σε ισχυρών κλίσεων πρηνή που διατρέχονται από διακλάσεις με ομόρροπες με αυτά επιφάνειες, επικρατούν συνθήκες αστάθειας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται καταπτώσεις μικρών ή μεγάλων τεμαχίων βράχων από τις αποκολλήσεις των κερματισμένων πετρωμάτων.



Σχήμα 4. Στη περιοχή έρευνας εντοπίστηκε τεκτονικό λατυποπαγές γεγονός που υποδηλώνει την εγγύτητα στο χώρο μελέτης τεκτονικών στοιχείων. Η παρουσία ρηγμάτων οδήγησε και στη δημιουργία των έντονων καρστικών φαινομένων της περιοχής μελέτης.

2.6 Σεισμικότητα

2.6.1 Σεισμικότητα Ελληνικού χώρου

Τα σεισμικά γεγονότα λαμβάνουν χώρα στα ρήγματα, όταν σε αυτά μετακινούνται απότομα δυο μεγάλες μάζες πετρωμάτων μέχρις ότου αποκτήσουν νέες θέσεις ισορροπίας, απελευθερώνοντας τη δυναμική ενέργεια παραμόρφωσης που έχει συσσωρευτεί με τη μορφή σεισμικών κυμάτων. Είναι γεγονός ότι όσο πιο μεγάλο είναι ένα ρήγμα τόσο μεγαλύτερο σεισμό μπορεί να δώσει.

Η σεισμική δράση έχει σημαντικά αρνητικές επιπτώσεις στην κοινωνική και οικονομική ζωή και την υλικοτεχνική υποδομή. Στο οικονομικό κόστος που συνεπάγεται η ανακούφιση των πληγείσων περιοχών και η ανάταξη των ζημιών θα πρέπει να προστεθεί και η απώλεια εισοδήματος από συρρίκνωση της οικονομικής δραστηριότητας, η υστέρηση της παραγωγής και η απώλεια αγορών (προϊόντων και υπηρεσιών) σε ένα διεθνώς ολοένα και πιο ανταγωνιστικό οικονομικό περιβάλλον, γεγονός που κάνει επιτακτική την ανάγκη για μετρίαση των επιπτώσεων των σεισμικών καταστροφών.

Από τα προαναφερθέντα είναι πρόδηλο ότι η διεθνής επιστημονική κοινότητα καλείται να ανταποκριθεί στο επιτακτικό αίτημα για άμυνα και οχύρωση του πληθυσμού έναντι των φυσικών και κυρίως των σεισμικών καταστροφών και να συνεισφέρει στο στρατηγικό σχεδιασμό για την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους, όχι μόνον αναφορικά με την προστασία της ανθρώπινης ζωής, αλλά και όσον αφορά τις οικονομικές τους επιπτώσεις.

Ο ελληνικός χώρος εντοπίζεται στο όριο επαφής και σύγκλισης της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας, συνεπώς η ενεργός τεκτονική στο χώρο αυτό είναι έντονη, όπως εξάλλου δείχνει η μεγάλη σεισμικότητα, η παραμόρφωση των διαφόρων γεωλογικών ζωνών και τα ηφαιστειακά φαινόμενα που παρατηρούνται στην περιοχή.

Τα πλέον εντυπωσιακά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τεκτονικής προέλευσης του χώρου αυτού είναι η «Ελληνική Τάφρος», το «Ελληνικό Τόξο» και η «Λεκάνη του βορείου Αιγαίου».

Η Ελληνική Τάφρος αποτελείται από μια σειρά θαλάσσιων λεκανών που έχουν βάθη μέχρι 5km. Αυτή είναι παράλληλη προς το Ελληνικό Τόξο και περιλαμβάνει μικρότερες γραμμικές τάφρους, όπως είναι οι τάφροι του Πλινίου και του Στράβωνα νοτιοανατολικά της Κρήτης και η τάφρος του Ιονίου πελάγους.



Το Ελληνικό Τόξο αποτελείται από το εξωτερικό ιζηματογενές τόξο, το οποίο συνδέει τις Δειναρικές Αλπεις με τις Τουρκικές Ταυρίδες διαμέσου των Ελληνίδων οροσειρών, των Ιονίων νήσων, της Κρήτης και της Ρόδου, και από το εσωτερικό ηφαιστειακό τόξο, το οποίο είναι παράλληλο προς το ιζηματογενές τόξο και βρίσκεται σε μια μέση απόσταση 120km απ' αυτό.

Το ηφαιστειακό τόξο αποτελείται από διάφορα ηφαιστειακά νησιά, ανδεδειχτικά ενεργά ηφαίστεια (Μέθανα, Σαντορίνη, Νίσυρος) και θειονίες. Μεταξύ του ιζηματογενούς και του ηφαιστειακού τόξου βρίσκεται η λεκάνη του Κρητικού πελάγους (λεκάνη νοτίου Αιγαίου), της οποίας το βάθος φθάνει τα 2km περίπου.

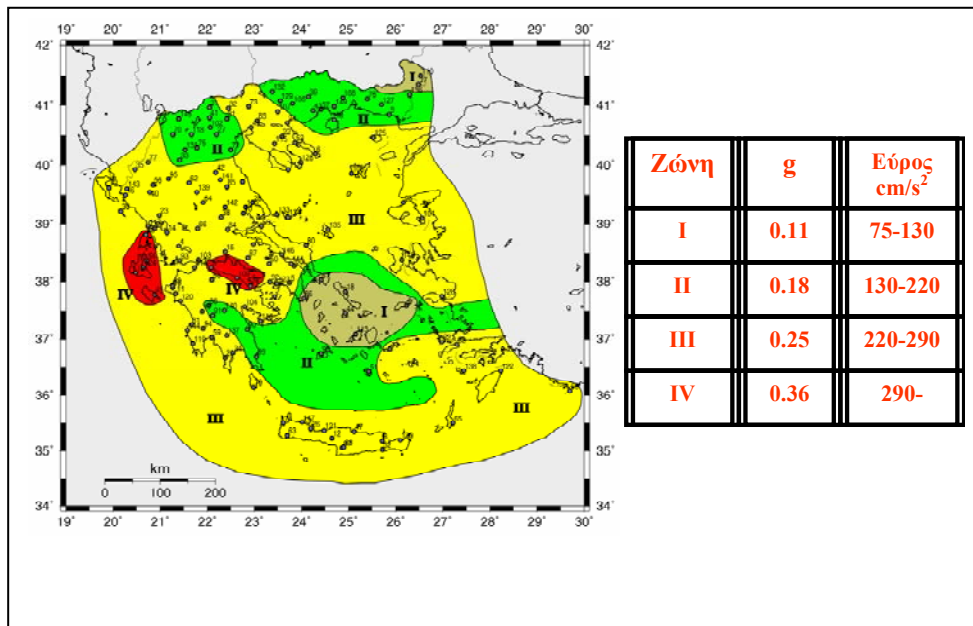
Η πιο ενδιαφέρουσα γεωμορφολογική δομή τεκτονικής προέλευσης στο βόρειο Αιγαίο είναι η τάφος του βορείου Αιγαίου, με θαλάσσιο βάθος μέχρι 1500m. περίπου. Επέκτασή της προς τα ΒΑ αποτελούν πιθανώς οι μικρές λεκάνες της θάλασσας του Μαρμαρά.

Η κατανομή των επικέντρων των επιφανειακών σεισμών (βάθος μικρότερο των 60km) οριοθετεί διάφορες σεισμικές ζώνες. Η κυριότερη είναι αυτή που εκτείνεται κατά μήκος της εξωτερικής (κοίλης) πλευράς του Ελληνικού Τόξου, δηλαδή, ακτές δυτικής Ελλάδας, Ιόνια νησιά, ΝΔ Πελοπόννησος, νότια Κρήτη, Κάρπαθος, Ρόδος. Άλλες σημαντικές ζώνες έχουν διεύθυνση Ανατολή-Δύση, όπως βορείου Αιγαίου, Θεσσαλίας-Σποράδων, Πατραϊκού-Κορινθιακού, κλπ.

Οι σεισμοί ενδιάμεσου βάθους (βάθη εστίας μεταξύ 70 και 180km) είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι, γιατί προκαλούν βλάβες σε μεγάλες αποστάσεις κατά μήκος του Ελληνικού Τόξου και οι περίοδοι των κυμάτων τους είναι σχετικά μεγάλες (1.5sec).

Η παρούσα κατάσταση στη δόμηση και στην ποιότητα του καταλόγου των σεισμών στον Ελληνικό χώρο κρίνεται άκρως ανεπαρκής για μια χώρα με σημαντική ανάπτυξη και ταυτόχρονα έντονη σεισμική δραστηριότητα και έρχεται σε ευθεία αντίθεση με τα διεθνώς παραδεκτά πρότυπα. Ως ενδεικτικό παράδειγμα αναφέρεται ότι στην Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής στους αντίστοιχους σεισμικούς καταλόγους αναφέρονται με πληρότητα οι σεισμοί μεγέθους 1.0 ή 2.0, ενώ για την Ελλάδα το αντίστοιχο μέγεθος είναι 3.0 και σε περιπτώσεις όπως η περιοχή του μετώπου του Ελληνικού Τόξου και η Κρήτη

προσεγγίζει το 4.5. Από μόνο του το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι καταγράφονται περίπου 100 φορές λιγότεροι σεισμοί ανά μοναδιαία περιοχή με σοβαρότατες αρνητικές συνέπειες στη μελέτη και στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Παρά τα προαναφερθέντα, οι σεισμολογικοί φορείς της χώρας έχουν προτείνει το χωρισμό της σε τέσσερις κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (I, II, III, IV). Για κάθε κατηγορία αναφέρονται οι αναμενόμενες επιταχύνσεις σε συνάρτηση με τη μέση περίοδο επανάληψης.



Σχήμα 5. Ο χωρισμός της Ελλάδας σε τέσσερις κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (I, II, III, IV).

2.6.2 Το Γεωτεκτονικό καθεστώς του νοτίου Αιγαίου

Η ενέργεια που συσσωρεύεται στο νότιο Αιγαίο και στην Κρήτη ειδικότερα, προέρχεται από δύο μεγάλες γεωλογικές διαδικασίες που έχουν σχέση με μετακινήσεις πλακών. Η μία είναι η γνωστή υποβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω ακριβώς από την Κρήτη και την Ευρασιατική πλάκα, με ταχύτητα 1.5cm/yr. Η άλλη σχετίζεται με την μετακίνηση της πλάκας της Ανατολίας (Τουρκίας) προς την περιοχή του Αιγαίου κατά 2.5cm/yr. Η μετακίνηση αυτή γίνεται πάνω στο γνωστό ρήγμα της Ανατολίας και οφείλεται στο ότι η Αραβική Πλάκα (χερσόνησος Σαουδικής Αραβίας) μετακινείται προς το βορρά. Η πίεση που ασκεί η μετακίνηση της πλάκας της Ανατολίας στο Αιγαίο έχει ως συνέπεια όλη η Ελληνική χερσόνησος, από την Ήπειρο–Θεσσαλία και κάτω, να κινείται προς τα νοτιοδυτικά. Το νότιο Αιγαϊκό τόξο (Πελοπόννησος, Κρήτη, Δωδεκάνησα) κινούνται 3cm/yr περίπου προς

το νότο σε σχέση με τη βόρεια Ελλάδα.

Η σχετική κίνηση τελικά των πετρωμάτων στο νότιο Αιγαίο ανάμεσα στην Ευρωπαϊκή και την Αφρικανική πλάκα είναι 4,5 εκατοστά/χρόνο. Η μεγάλη αυτή σχετική μετακίνηση συσσωρεύει τεράστια ποσά ενέργειας στα πετρώματα του τόξου τα οποία σπάζουν (ρηγματώνονται) και προκαλούν σεισμούς μεγάλου (λόγω της Αφρικανικής πλάκας) και μικρού βάθους (λόγω της προς νότο μετακίνησης του τόξου).

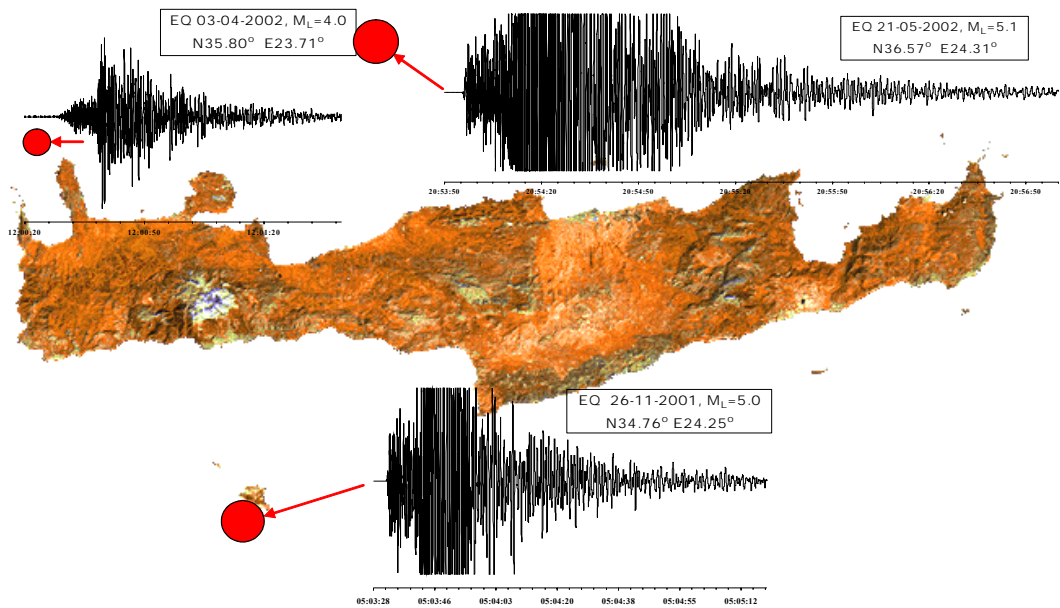
Ως αποτέλεσμα των δύο αυτών διαδικασιών όλο το νότιο Αιγαίο τόξο είναι κατακερματισμένο από αμέτρητα μικρά και μεγάλα ρήγματα. Η Κρήτη ιδιαίτερα, στα 23 περίπου εκατομμύρια χρόνια που υπάρχει σαν νησί, έχει υποστεί τη δράση πολυάριθμων ρηγμάτων. Τα περισσότερα από τα ρήγματα αυτά γνωρίζουμε ότι είναι πλέον ανενεργά, είτε γιατί είναι παλιάς ηλικίας, είτε διότι λόγω της γεωμετρίας τους δεν μπορούν να ενεργοποιηθούν από το σημερινό πεδίο των τάσεων. Υπάρχουν όμως και αρκετά ενεργά, όπως το ρήγμα της Ιεράπετρας, που από καιρού εις καιρό εκδηλώνουν την παρουσία τους με μικρούς σεισμούς.

2.6.3 Σεισμικό Ιστορικό της Κρήτης

Οι σεισμοί που σημειώνονται στον Ελληνικό χώρο απελευθερώνουν περίπου το 80% της σεισμικής ενέργειας ολόκληρης της Ευρώπης. Οι μεγαλύτεροι σεισμοί που έχουν εκδηλωθεί μέχρι σήμερα στην Ελλάδα προέρχονται από το τόξο του νοτίου Αιγαίου:

- * M=8.3 το 365μ.Χ, δυτικά από τα Φαλάσαρνα των Χανίων
- * M=8.0 το 1303μ.Χ., νότια της Ρόδου

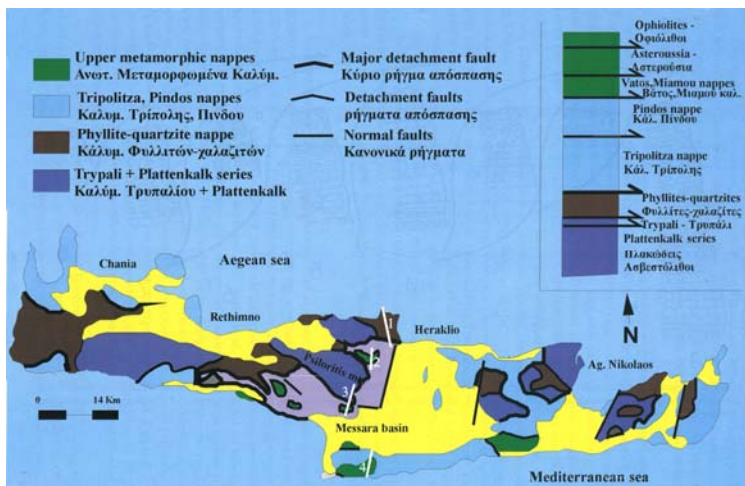
Αν και οι δύο αυτοί σεισμοί είχαν μεγάλο βάθος προκάλεσαν τεράστιες καταστροφές σε όλη την ανατολική Μεσόγειο. Πέρα από αυτούς τους δυο πολύ μεγάλους σεισμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης έχουν σημειωθεί και άλλοι, παγκοσμίου επιπέδου, σεισμοί, που κατέστρεψαν πολλές Μινωικές, κλασικές και νεότερες πόλεις, όπως τη Γόρτυνα και το Λεβίν (Λέντα) με σημαντικότερους σεισμούς το 62 μ.Χ., M=7, το 448μ.Χ., M=7.2, και το 796μ.Χ., M=7.2, αλλά και την αρχαία και νέα Ιεράπετρα με σεισμικές ακολουθίες, με ισχυρότερους σεισμούς το 1508 με M=7.5 και το 1780 με M=7.



Οι σεισμοί αυτοί προκάλεσαν μεγάλες καταστροφές ακόμη και στα βόρεια παράλια της Αφρικής και είχαν πολλά θύματα. Μικρότερου μεγέθους, μέχρι και $M=6.5$ σεισμοί έχουν καταγραφεί πάρα πολλοί ακόμη και πρόσφατα.

Οφείλει συνεπώς να τονισθεί ότι η περιοχή μελέτης συγκαταλέγεται μεταξύ των πλέον σεισμοπαθών του Ελληνικού χώρου. Η Κρήτη έχει επανειλημμένα πληγεί από σεισμούς με εστίες στην ίδια την Μεγαλόνησο ή, κυρίως, ανοικτά των Δ-ΒΔ και Α-ΝΑ

ακτών της. Μεγάλοι σεισμοί στις περιοχές αυτές επηρεάζουν πυκνοκατοικημένες περιοχές τόσο της Κρήτης όσο και των Δωδεκανήσων. Υπενθυμίζεται ότι η σεισμική δραστηριότητα της τελευταίας δεκαετίας είχε σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στην κοινωνική και οικονομική ζωή και στην υλικοτεχνική



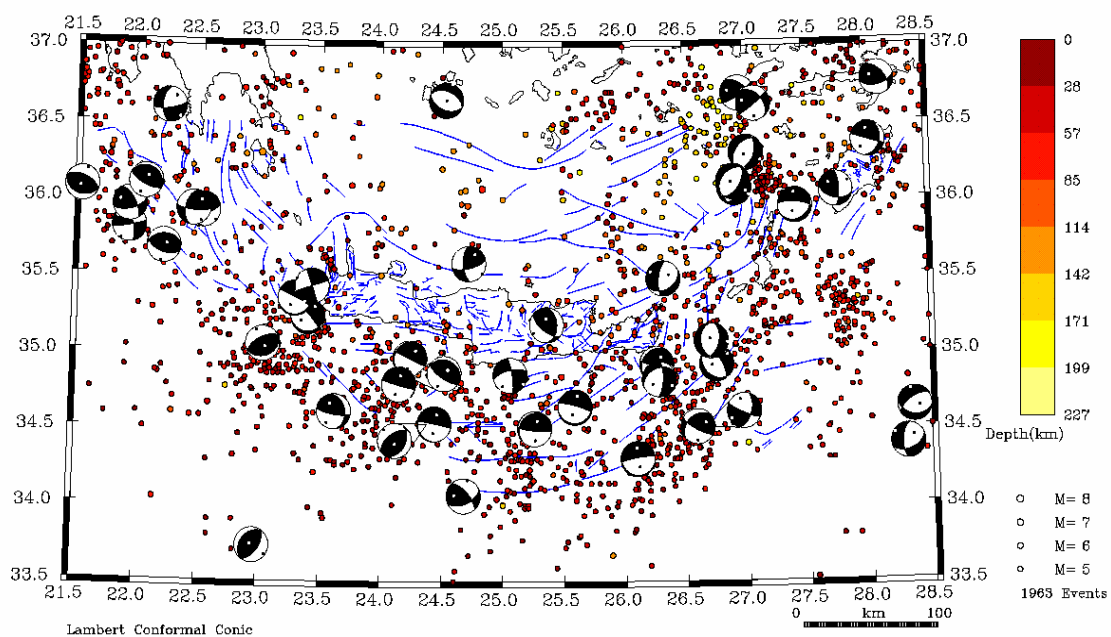
υποδομή της Ελλάδας.

Στο γεωλογικό χάρτη της Κρήτης είναι έκδηλες οι μεγάλες τεκτονικές-ρηξιγενείς ζώνες του νησιού. Είναι εκείνες οι περιοχές που οριοθετούν τους υψηλούς ορεινούς όγκους με τις χαμηλές λεκάνες ή κάποιες από τις απόκρημνες και βραχώδεις ακτές των νότιων παραλίων.

Σε όλες αυτές τις ζώνες υπάρχουν ρήγματα που μετακίνησαν στο παρελθόν τα πετρώματα και έδωσαν κάποιους σεισμούς. Τα περισσότερα από αυτά είναι πιθανόν ανενεργά, γι' αυτό και η σεισμική δραστηριότητα εντοπίζεται στο θαλάσσιο χώρο γύρω από την Κρήτη. Ελάχιστα μόνο, πιθανά ενεργά, ρήγματα διέρχονται από χερσαίες περιοχές. Επιπλέον όλα τα ρήγματα αυτά είναι κανονικά ως προς την κίνηση τους και συνήθως δε δίνουν σεισμούς πολύ μικρού βάθους όπως τα πλάγια ρήγματα (βλ. ρήγμα Ανατολίας). Ταυτόχρονα όμως, και σε μεγάλο βάθος, υπάρχουν τα μεγάλα ανάστροφα ρήγματα με τα οποία η Ευρωπαϊκή πλάκα ανεβαίνει πάνω στην Αφρικανική και τα οποία δίνουν σεισμούς μεγάλου μεγέθους. Τις περισσότερες φορές όμως το εστιακό βάθος είναι τόσο μεγάλο (μεγαλύτερο των 50km) που οι καταστροφές που προκαλούνται στο νησί είναι πολύ μικρές. Συνήθως τέτοιοι σεισμοί προκαλούν τις πιο μεγάλες καταστροφές σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ακόμα και στα παράλια της Αφρικής.

2.6.4 Διερεύνηση Γεωτεκτονικού Περιβάλλοντος και Σεισμικότητας – Σεισμοτεκτονική Ανάλυση

Όπως προαναφέρθηκε η Κρήτη εδράζεται πάνω στο νότιο τμήμα του «Ελληνικού Τόξου» το οποίο εκτείνεται από τη Δυτική Ηπειρωτική Ελλάδα, τη Δυτική Πελοπόννησο, τα Κύθηρα, την Κρήτη, την Κάσο, την Κάρπαθο μέχρι τη Ρόδο.



Στην εξωτερική πλευρά του τόξου υπάρχει η Ελληνική Τάφρος, η οποία αποτελεί το μέτωπο σύγκρουσης της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής λιθόσφαιρας. Η θέση αυτή της Κρήτης αποτελεί την κυριότερη αιτία της πολύπλοκης γεωλογικής δομής, του έντονου τεκτονισμού του νησιού, που εκδηλώνεται με τα μεγάλα ενεργά ρήγματα και τη σημαντική σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής.

Οι γεωλογικές μελέτες που ασχολούνται με τις νεότερες κινήσεις της νήσου συμπεραίνουν ανύψωση της Δ.Κρήτης και καταβύθιση της Α.Κρήτης που προκαλούνται από μια γενικευμένη περιστροφική κίνηση γύρω από άξονα στη γραμμή Τυμπάκι-Ηράκλειο (Delibasis et al., 1982). Στην περιστροφική αυτή κίνηση η Κρήτη δε συμπεριφέρεται σαν ενιαίο τέμαχος του φλοιού, αλλά σαν πολλά τεμάχια που χωρίζονται με μεγάλα ρήγματα. Τα τεμάχια αυτά είναι τεκτονικές εξάρσεις ή τάφροι που συμμετέχουν στην περιστροφική κίνηση με διαφορετικές όμως ταχύτητες. Ουσιαστικά οι κινήσεις αυτές ευθύνονται για τη σεισμική δραστηριότητα της νήσου και της ευρύτερης περιοχής.

Οι τεκτονικές τάσεις που επικρατούν στην περιοχή είναι εφελκυστικές για τους επιφανειακούς σεισμούς (με εστιακό βάθος μικρότερο των 60km) και συμπιεστικές για τους σεισμούς ενδιάμεσου βάθους (εστιακό βάθος μεγαλύτερο των 60km). Ο τρόπος διάρρηξης στους επιφανειακούς σεισμούς, ιδιαίτερα εκείνους με εστιακό βάθος μέχρι 40km είναι κανονικός, ενώ οι σεισμοί ενδιάμεσου βάθους παρουσιάζουν ανάστροφη διάρρηξη (Drakopoulos et al. 1983).

Από την κατανομή των επικέντρων των σεισμών προκύπτει ότι οι μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες, που έχουν διαπιστωθεί τόσο στη νήσο όσο και στο θαλάσσιο χώρο, είναι σεισμικά ενεργές και στις κινήσεις τους οφείλονται οι έντονες ανοδικές και καθοδικές κινήσεις των τεκτονικών τεμαχών. Τα περισσότερα επίκεντρα εντοπίζονται στη θαλάσσια περιοχή νότια της νήσου και σε όλο το μήκος της, όπου κυριαρχούν οι μεγάλες τεκτονικές τάφροι Ανατολικής και Δυτικής Κρήτης και νοτιότερα η Ελληνική Τάφρος. Οι εστίες στον ηπειρωτικό χώρο της Κρήτης είναι σχετικά λίγες και με τους μεγαλύτερους σεισμούς στην ανατολική και τη δυτική άκρη καθώς και στις τεκτονικές τάφρους της Μεσσαράς, του Ηρακλείου και της Ιεράπετρας. Η νότια και δυτική περιοχή χαρακτηρίζεται από σεισμούς επιφανειακούς, ενώ στο βόρειο και ανατολικό τμήμα κυριαρχούν οι σεισμοί ενδιάμεσου βάθους.

2.7 Καρστικά φαινόμενα

2.7.1 Καρστικά φαινόμενα στην ευρύτερη περιοχή του Κουρουπητού

Όπως είναι γνωστό η καρστικοποίηση οφείλεται στη χημική διεργασία που αναπτύσσεται κατά τη σταδιακή χημική διάλυση των ανθρακικών κυρίως πετρωμάτων από το νερό και έχει σαν αποτέλεσμα τη διάβρωσή τους και τη δημιουργία διάφορων χαρακτηριστικών μορφών τόσο επιφανειακά όσο και υπόγεια. Αντιπροσωπευτικές καρστικές μορφές είναι οι δολίνες, οι πόλγες, τα ποικίλου μεγέθους έγκοιλα, τα σπήλαια, οι καταβόθρες, τα δαιδαλώδη υπόγεια καρστικά δίκτυα κλπ.

Η ρηξιγενής τεκτονική μιας περιοχής, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην όλη διεργασία της καρστικοποίησης. Η κίνηση του νερού και κατ' επέκταση η διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων συνδέεται άμεσα με επιφάνειες ρηγμάτων, διακλάσεων, σχιστότητας και γενικά ποικίλης φύσεως και μεγέθους τεκτονικών ασυνεχειών, που υποβοηθούν την ταχύτερη ανάπτυξη της καρστικής διαβρώσεως.

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης δομείται από ανθρακικά πετρώματα με έκδηλη ρηξιγενή τεκτονική, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει έντονα φαινόμενα καρστικής διάβρωσης που αντιπροσωπεύονται από ποικίλες καρστικές μορφές. Η ανάπτυξη της καρστικοποίησης συνδέεται άμεσα με τις επιφάνειες τεκτονικών ασυνεχειών ιδιαίτερα στα προορογενετικά ανθρακικά πετρώματα της ενότητας του Τρυπαλίου που παρουσιάζουν ισχυρή ρηξιγενή τεκτονική και με επιφάνειες στρώσεων ιδιαίτερα στους νεογενείς μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Οι αντιπροσωπευτικές καρστικές μορφές που συναντάμε είναι:

- **Καρστικό ανάγλυφο** που αναπτύσσεται καθ' όλη την έκταση των ανθρακικών πετρωμάτων και χαρακτηρίζεται από τραχείες επιφάνειες διάσπαρτες από μικροεγκοιλώδεις οπές που ακολουθούν τις διευρύνσεις των ρηγματώσεων και των διακλάσεων.
- Πολυάριθμες **δολίνες** ποικίλου μεγέθους και βάθους που αναπτύσσονται διάσπαρτες καθ' όλη την έκταση του τεκτονικού βυθίσματος του Ακρωτηρίου, που διαμορφώνεται κατάντη των μεγάλων ρηξιγενών ζωνών. Συνήθως καλύπτονται από ερυθρά αργιλικά υλικά που προέρχονται από τη διάβρωση των μητρικών τους πετρωμάτων και που κατά θέσεις αποκτούν πάχος πέραν των 5m.
- **Καρστικά έγκοιλα** που αναπτύσσονται κατά μήκος των επιφανειών των μικρών ή μεγάλων τεκτονικών ασυνεχειών και παρουσιάζονται με μεγάλη ποικιλία μορφών. Οι πιο

συνηθισμένες είναι οι κατακόρυφες κοιλότητες ενώ μεμονωμένα συναντάμε και μεγαλύτερα σπηλαιώδη έγκοιλα.

- **Φαράγγια.** Πρόκειται για μεμονωμένες εικόνες μικρών φαραγγιών που αναπτύσσονται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης του Ακρωτηρίου προς τη θάλασσα. Αυτά έχουν σχηματιστεί λόγω των ταχέων ανυψωτικών κινήσεων που επικράτησαν στην περιοχή κατά τη διάρκεια των νεότερων γεωλογικών χρόνων και που προκάλεσαν την ταχεία διάβρωση του εδάφους κατά προτίμηση σε ζώνες τεκτονικών ασυνεχειών.



Σχήμα 6. Δυτικά της περιοχής έρευνας διακρίνουμε ένα σπήλαιο, κάτι που μας επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι στην περιοχή υπάρχουν έντονα φαινόμενα καρστικοποίησης.



Σχήμα 7. Στις παραπάνω φωτογραφίες διακρίνουμε μικρότερου μεγέθους έγκοιλα πάνω σε διαβρωμένα πετρώματα, τα οποία εντοπίστηκαν στην περιοχή μετά από εκσκαφή του χώρου αλλά και πάνω στην επιφάνεια.

2.8 Υδατικό δυναμικό περιοχής, υδρολογικά-υδρογεωλογικά στοιχεία

Οι υδρολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής του αεροδρομίου προήλθαν από την μελέτη των στοιχείων που προέκυψαν από την μελέτη των ακόλουθων εργασιών:

- ΜΑΡΙΟΛΑΚΟΣ Η., κλπ (1996): «Γεωλογική και Υδρογεωλογική έκθεση του υποψήφιου ΧΥΤΑ της Ν. Α. Χανίων, στη θέση Στρογγυλό Κεφάλι». Ν. Α. Χανίων
- ΜΑΡΙΟΛΑΚΟΣ Η., κλπ (1997): «Γεωλογική και Υδρογεωλογική έρευνα για την προστασία των ρευμάτων και των υπογείων υδροφορέων από τις πιθανές επιπτώσεις λόγω λειτουργίας του ΧΥΤΑ στη θέση Στρογγυλό Κεφάλι». Ν. Α. Χανίων
- ΝΟΜΑΡΧΙΑΚΗ ΑΥΤΟΔΙΟΙΚΗΣΗ ΧΑΝΙΩΝ (1996): «Το Υδατικό Δυναμικό του Νομού Χανίων»

Στη συνέχεια παρουσιάζονται περιληπτικά οι υδρολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής του Κουρουπητού.

2.8.1 Υδροπερατότητα γεωλογικών σχηματισμών περιοχής Κουρουπητού

Η υδρολιθολογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών εξαρτάται από τη λιθολογική τους σύσταση και την κοκκομετρία τους, εφ' όσον πρόκειται για συμπαγή πετρώματα. Η συμπεριφορά αυτή των γεωλογικών σχηματισμών έναντι του νερού, προσδιορίζεται από το πορώδες και τη διαπερατότητά τους.

Συγκεκριμένα, η υδρολιθολογική συμπεριφορά των σχηματισμών της περιοχής, προσδιορίζεται ως εξής:

- **Οι ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας του Τρυπαλίου** που δομούν την περιοχή και αποτελούν και το υπόβαθρό της, είναι **υδροπερατοί σχηματισμοί** και επισημαίνουμε ότι:
 - Η διαπερατότητα είναι μικρή στα κατώτερα στρωματογραφικά τμήματα, που αποτελούνται από ισχυρά ανακρυσταλλωμένους λεπτοπλακώδεις έως μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθους και δεν παρουσιάζουν έντονη τεκτονική. Αντίθετα, είναι πολύ μεγαλύτερη στα ανώτερα στρωματογραφικά τμήματα που αποτελούνται από παχυστρωματώδεις έως μαζώδεις ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και ανθρακικά κροκαλολατυποπαγή, που είναι έντονα τεκτονισμένοι.
 - Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει τη διαπερατότητα των πετρωμάτων της ενότητας του Τρυπαλίου, είναι **το δευτερογενές τους πορώδες που ελέγχεται από**

τη ρηξιγενή τους τεκτονική και συγκεκριμένα από τη γεωμετρία, την πυκνότητα, το εύρος ανοίγματος των κενών χώρων που σχηματίζονται μεταξύ των τεκτονικών ασυνεχειών, καθώς και από το υλικό πληρώσεώς τους.

- Από μελέτες που έχουν γίνει σε ανάλογους σχηματισμούς της ευρύτερης περιοχής των Λευκών Ορέων, προκύπτει ότι τα **ανθρακικά πετρώματα της ενότητας Τρυπαλίου** επειδή είναι έντονα καρστικοποιημένα και ρωγματωμένα, παρουσιάζουν **πολύ μεγάλο συντελεστή διαπερατότητας** που στην περιοχή των Μυλωνιανών υπολογίστηκε να κυμαίνεται από $1.4 \cdot 10^{-3}$ έως $2.1 \cdot 10^{-3}$ m/sec
- Οι αλλουβιακές αποθέσεις που συναντώνται σποραδικά στην μελετούμενη περιοχή και αποτελούνται από αργίλους, ερυθρογή και διάσπαρτες λατύπες, που παρουσιάζουν πολύ μικρή περατότητα, γεγονός που οφείλεται στην περιεκτικότητά τους σε άργιλο. Θεωρητικά οι σχηματισμοί αυτοί είναι υδατοστεγείς.
- Οι ζώνες ρηγμάτων που στην ευρύτερη περιοχή του Κουρουπητού είναι ιδιαίτερα εμφανείς, με βάση μελέτες που έχουν γίνει στην περιοχή της Κρήτης, διαπιστώθηκε ότι συμπερασματικά λειτουργούν είτε ως υπόγεια διαφράγματα στην κίνηση του νερού (ειδικότερα αυτές που αναπτύσσονται με διευθύνσεις Α-Δ), είτε ως υπόγειοι αγωγοί νερού (ειδικότερα αυτές που αναπτύσσονται με διευθύνσεις Β-Ν)

3. ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

3.1 Ενεργητικές και Παθητικές Γεωφυσικές Διασκοπήσεις

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, τις ενεργητικές και τις παθητικές.

Οι παθητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις συμπεριλαμβάνουν μετρήσεις φυσικών πεδίων ή ιδιοτήτων της γης. Στις παθητικές διασκοπήσεις ανήκουν οι βαρυτομετρικές και οι μαγνητικές διασκοπήσεις. Στις δύο αυτές περιπτώσεις, φυσικά πεδία είναι το βαρυτικό και το μαγνητικό. Σε αυτά τα πεδία απλά μετρούμε τις χωρικές μεταβολές στην προσπάθεια μας να βγάλουμε συμπεράσματα για την υπεδαφική γεωλογία. Τα πεδία και οι ιδιότητες που μετρούμε σε αυτή την κατηγορία πειραμάτων υπάρχουν στη Γη ανεξάρτητα με τη γεωφυσική μας διασκόπηση. Παραδείγματα άλλων ιδιοτήτων της γης που μπορούν να μετρηθούν παθητικά περιλαμβάνουν προϊόντα ραδιομετρικής διάσπασης, ορισμένα ηλεκτρικά και ορισμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Κατά την διεξαγωγή των ενεργών γεωφυσικών διασκοπήσεων, από την άλλη, ένα σήμα εισάγεται στη γη και εμείς μετρούμε πώς η γη αποκρίνεται στο σήμα αυτό. Τα σήματα αυτά μπορούν να έχουν μια πληθώρα μορφών όπως μετατόπιση, ηλεκτρικό ρεύμα ή ενεργή ραδιομετρική πηγή. Οι τελευταίες δύο μέθοδοι διασκόπησης που θα εξεταστούν, δηλαδή η ειδική αντίσταση συνεχούς ρεύματος και η σεισμική διάθλαση, είναι παραδείγματα ενεργών γεωφυσικών πειραμάτων.

Οι ενεργές και οι παθητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις έχουν η κάθε μία τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της.

3.2 Ηλεκτρικές Μέθοδοι

Η υποδιαίρεση των γεωφυσικών τεχνικών σε παθητικές και ενεργητικές μεθόδους γεφυρώνεται από τις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους. Στο σύνολο τους, οι ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι αντιπροσωπεύουν τη μεγαλύτερη τάξη γεωφυσικών μεθόδων, κάποιες από τις οποίες καταγράφουν παθητικά τα φυσικά σήματα ενώ άλλες χρησιμοποιούν ενεργές πηγές.

Επιπρόσθετα στην μεγάλη τους ποικιλία, αυτή η ομάδα γεωφυσικών τεχνικών αντιπροσωπεύει ορισμένα από τα παλαιότερα μέσα εξερεύνησης του εσωτερικού της Γης. Για παράδειγμα, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού που περιγράφεται παρακάτω χρονολογείται από το 1830, οπότε χρησιμοποιήθηκε στην Κορνουάλη της Αγγλίας από τον Robert Fox για την εύρεση της προέκτασης γνωστών κοιτασμάτων χαλκού. Φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στη Γη, τα οποία καλούνται τελλουρικά ρεύματα (telluric currents), αναγνωρίστηκαν για πρώτη φορά από τον Peter Barlow το 1847. Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος αναπτύχθηκε το 1920 για την έρευνα αποθεμάτων μετάλλων.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούν ποικίλες μετρήσεις των αποτελεσμάτων της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη Γη. Τα φαινόμενα που μπορούν να μετρηθούν περιλαμβάνουν τη ροή του ρεύματος, το ηλεκτρικό δυναμικό (τάση) και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Μια περίληψη των πιο γνωστών ηλεκτρικών μεθόδων δίνεται παρακάτω. Στην μελέτη που πραγματοποιησάμε χρησιμοποιήσαμε μια από αυτές τις μεθόδους, τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης συνεχούς ρεύματος.

- **Ειδική Αντίσταση συνεχούς ρεύματος (DC resistivity)**- πρόκειται για ενεργητική μέθοδο που χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς, ή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μετρούμενο δυναμικό, και μπορούν επομένως να χαρτογραφηθούν με χρήση της μεθόδου, περιλαμβάνουν την παρουσία και ποιότητα των ρευστών, των πόρων και των αργίλων.
- **Επαγόμενη Πολικότητα (Induced Polarization)**- πρόκειται για ενεργητική μέθοδο που πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο της Ειδικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) μεταβολών του δυναμικού καθώς ρεύμα αρχικά διαβιβάζεται ή παύει να διαβιβάζεται στο έδαφος. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν ρεύμα διαβιβάζεται στο έδαφος, το έδαφος συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής, αποθηκεύοντας μέρος του εφαρμοζόμενου ρεύματος ως φόρτιση η οποία διασκορπίζεται με την διακοπή του ρεύματος. Η τάση στα ηλεκτρόδια που διαβιβάζουν το ρεύμα δεν μηδενίζεται αμέσως, αλλά αφού υποστεί αμέσως μια απότομη σημαντική μείωση, αρχίζει στη συνέχεια να ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο και περνούν αρκετά δευτερόλεπτα (ή και λεπτά) μέχρις ότου μηδενιστεί και αυτή. Υπεύθυνες για τη διαδικασία αυτή είναι τόσο οι χωρητικές όσο και τα ηλεκτροχημικές επιδράσεις. Η επαγόμενη πολικότητα χρησιμοποιείται συχνά για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων και ηλεκτρικά

αγώγιμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.

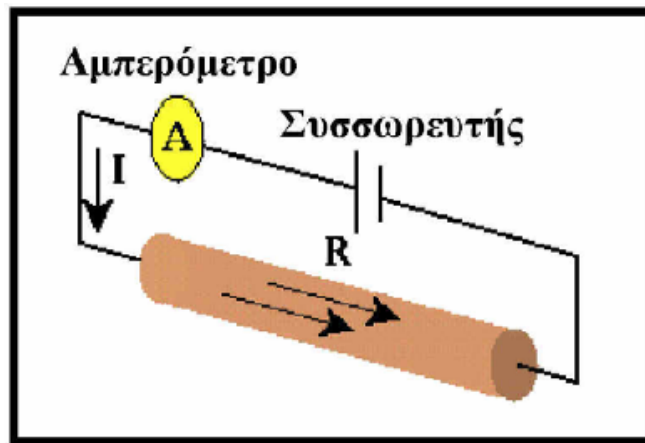
- Φυσικό Δυναμικό (Self Potential)- πρόκειται για παθητική μέθοδο που χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών που σχετίζονται με την αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων. Τα φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τοπικού χαρακτήρα παράγονται με ηλεκτροχημική δράση μεταξύ μεταλλευμάτων και διαλυμάτων που βρίσκονται σε επαφή. Μετρήσιμα ηλεκτρικά δυναμικά έχουν επίσης παρατηρηθεί σε σχέση με την υπόγεια ροή υδάτων και ορισμένες βιολογικές διεργασίες. Το μόνο όργανο που απαιτείται για την διεξαγωγή μιας διασκόπησης φυσικού δυναμικού είναι ένα βολτόμετρο υψηλής εσωτερικής αντίστασης (impedance) και κάποιο μέσο ώστε να πετύχουμε καλή ηλεκτρική επαφή με το έδαφος. Η μέθοδος αυτή αποτελεί την παλαιότερη μέθοδο ηλεκτρικής διασκόπησης.
- Ηλεκτρομαγνητισμός (Electromagnetic)- πρόκειται για μία ενεργητική μέθοδο που χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που παράγεται από επαγωγή λόγω της ροής ρεύματος μέσα στη γη. Στην τεχνική αυτή, ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται στην επιφάνεια της γης το οποίο παράγει ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μέσα στη γη μέσω επαγωγής. Ένας δέκτης συγκρίνει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τη ροή του ρεύματος στη γη με αυτό που παράγεται στην πηγή. Ο ηλεκτρομαγνητισμός χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό αγώγιμων μεταλλικών δομών και κοιτασμάτων μετάλλων, για τον εντοπισμό θαμμένων σωλήνων και καλωδίων, για την ανίχνευση πυρομαχικών που δεν έχουν εκραγεί και για την γεωφυσική χαρτογράφηση κοντά στην επιφάνεια.
- Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (Magnetotelluric)- πρόκειται για παθητική μέθοδο που χρησιμοποιεί μετρήσεις φυσικών ρευμάτων, ή τελλουρικών ρευμάτων, που παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διάφορων υλικών σε σχετικά μεγάλα βάθη (μέχρι και τον μανδύα) μέσα στη Γη. Με την τεχνική αυτή, μετριέται η χρονική μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού σε έναν σταθμό βάσης και στους σταθμούς διασκόπησης. Οι διαφορές στο σήμα που καταγράφεται χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της υπόγειας κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης..

3.3 Ροή Ρεύματος και ο νόμος του Ohm

Το 1827, ο Georg Ohm, όρισε μια εμπειρική σχέση μεταξύ του ρεύματος που διαρρέει ένα συρμάτινο καλώδιο και τις διαφορές δυναμικού (τάσης) που απαιτείται για να δημιουργηθεί το ρεύμα.

$$\Delta V = IR$$

Ο Ohm βρήκε ότι η ένταση του ρεύματος, I , είναι ανάλογη της τάσης, ΔV για μια μεγάλη κατηγορία υλικών τα οποία θα αποκαλούμε στο εξής ωμικά υλικά (σχήμα 8). Η σταθερά αναλογίας, R καλείτε ωμική αντίσταση (resistance) του υλικού και έχει ως μονάδα μέτρησης τη διαφορά δυναμικού (volt) ανά ένταση ρεύματος (ampere), δηλαδή το ohm.



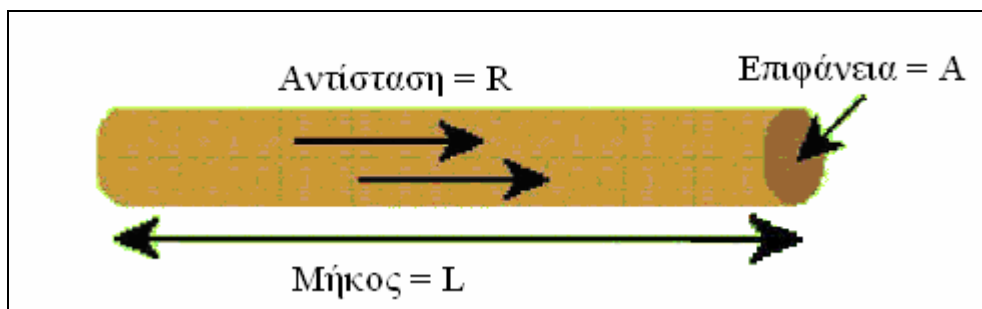
Σχήμα 8. Σχηματική αναπαράσταση του νόμου του Ohm.

Κατά κανόνα, είναι σχετικά απλό να μετρήσουμε την ωμική αντίσταση σε συρμάτινο καλώδιο. Συνδέουμε μια μπαταρία γνωστής τάσης σε ένα καλώδιο και στην συνέχεια μετρούμε το ρεύμα που διαρρέει το καλώδιο. Η τάση δια το ρεύμα μας δίνει την αντίσταση του καλωδίου. Στην ουσία, αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο ένα πολύμετρο μετράει την αντίσταση. Για να κάνουμε αυτή την μέτρηση, ωστόσο, πρέπει να απαντήσουμε σε δυο σημαντικές ερωτήσεις.

- Πως συνδέεται η μετρούμενη αντίσταση με τις θεμελιώδεις ιδιότητες του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένο το καλώδιο;
- Πως μπορούμε να εφαρμόσουμε αυτό το σχετικά απλό παράδειγμα για να καθορίσουμε τις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών της γης.;

3.4 Αντίσταση και Ειδική αντίσταση

Η χρήση των μετρήσεων της ωμικής αντίστασης παρουσιάζει πρόβλημα καθώς αυτή δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το συρμάτινο καλώδιο, αλλά από την γεωμετρία του καλωδίου. Αν, για παράδειγμα, μεγαλώναμε το μήκος του συρμάτινου καλωδίου, τότε θα αυξανόταν και η μετρούμενη αντίσταση. Επίσης αν μειώναμε τη διάμετρο του συρμάτινου καλωδίου (σχήμα 9), η μετρούμενη αντίσταση θα αυξανόταν. Έτσι λοιπόν ορίζεται μια ιδιότητα η οποία περιγράφει την ικανότητα του υλικού να διαβιβάζει ηλεκτρικό ρεύμα και να είναι ανεξάρτητη των γεωμετρικών παραγόντων. Η γεωμετρικά ανεξάρτητη ποσότητα που χρησιμοποιούμε ονομάζεται ειδική αντίσταση (resistivity) και συνήθως συμβολίζεται με ρ .



Σχήμα 9. Τρόπος υπολογισμού της ωμικής αντίστασης.

Στην περίπτωση του συρμάτινου καλωδίου, η ειδική αντίσταση, ρ , ορίζεται ως η ωμική αντίσταση του καλωδίου, R , επί την επιφάνεια διατομής του, A , δια το μήκος, L , του καλωδίου.

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Επομένως μονάδα της ειδικής αντίστασης είναι το $\Omega \cdot \text{m}$.

Επειδή η Ωμική αντίσταση R όπως νωρίτερα είδαμε ισούται με $R = \Delta V / I$, η ειδική αντίσταση ρ σύμφωνα με τη προηγούμενη σχέση θα είναι:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{A}{L} \Rightarrow \frac{\Delta V}{L} = \rho \frac{I}{A} \quad (1)$$

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, E , είναι η βαθμίδα δυναμικού, $\frac{\partial V}{\partial r}$ και ορίζεται ως η διαφορά δυναμικού ΔV ανά μονάδα μήκους L . Η πυκνότητα του ρεύματος, J , είναι το πηλίκο $\frac{I}{A}$. Κατόπιν αυτών η σχέση (1) γράφεται

$$E = \rho J \quad (2)$$

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).

3.5 Η Ειδική Αντίσταση των Υλικών της Γης

Αν και μερικά αμιγή μέταλλα καθώς και ο γραφίτης άγουν τον ηλεκτρισμό, τα περισσότερα πετρογενετικά ορυκτά είναι μονωτές. Η μετρούμενη ειδική αντίσταση των ορυκτών της Γης ελέγχεται κατά κύριο λόγο από την κίνηση των φορτισμένων ιόντων στα ρευστά των πόρων. Αν και το καθαρό νερό δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, το εδαφικό νερό περιέχει διαλυμένες ενώσεις οι οποίες αυξάνουν σημαντικά την ικανότητα του να άγει τον ηλεκτρισμό. Επομένως, το πορώδες και ο κορεσμός σε ρευστά παίζουν καθοριστικό ρόλο στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης. Εκτός από το πορώδες, και οι ρωγμές εντός του πετρώματος μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλές ειδικές αντιστάσεις αν γεμίσουν με ρευστά.

Οι ειδικές αντιστάσεις διαφόρων υλικών φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Υλικό	Ειδική Αντίσταση (Ohm·meter)
Αέρας	∞
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-3}
Χαλαζία	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό Άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Γρανίτης	$100 - 1 \times 10^6$
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ασβεστόλιθοι	$50 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτες	$1 - 1 \times 10^8$
Σχιστόλιθοι	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$100 - 10,000$
Άμμος	$1 - 1,000$
Άργιλος	$1 - 100$
Εδαφικό Νερό	$0.5 - 300$
Θαλασσινό Νερό	0.2

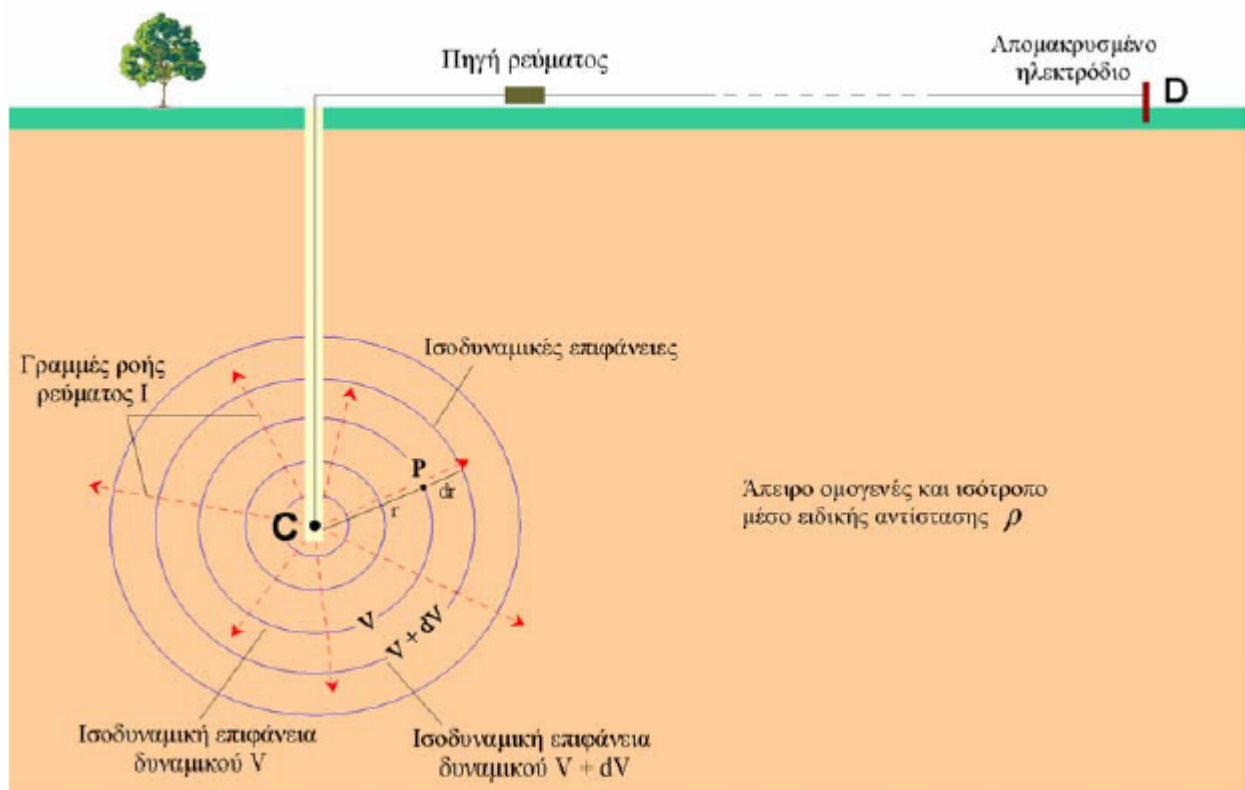
Όπως και με την μαγνητική επιδεκτικότητα, υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης, όχι μόνο μεταξύ πετρωμάτων και ορυκτών αλλά και μεταξύ πετρωμάτων του ίδιου τύπου. Το εύρος αυτό εξαρτάται πρωταρχικά από το περιεχόμενο ρευστό. Συνεπώς, ένας συνήθης στόχος για μία ηλεκτρική διασκόπηση είναι η αναγνώριση των ζωνών κορεσμού σε ρευστά. Για παράδειγμα, οι μέθοδοι της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιούνται συχνά στις μηχανικές και περιβαλλοντικές μελέτες για τον προσδιορισμό του υδροφόρου ορίζοντα.

3.6 Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο

Για να περιγράψουμε τη φύση του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα μέσο που καταλαμβάνει κάποιο όγκο, πρέπει να κινηθούμε πέρα από τις απλές έννοιες του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού από την εμπειρία μας με τα καλώδια, τις αντιστάσεις και τις

μπαταρίες. Μέσα στη Γη, ή σε οποιοδήποτε τρισδιάστατο σώμα, το ηλεκτρικό ρεύμα δεν περιορίζεται σε μια ροή κατά μήκος μιας μοναδικής διαδρομής όπως συμβαίνει με το καλώδιο. Προσωρινά σε αυτό το στάδιο, θα δεχτούμε ότι η ειδική αντίσταση της γης είναι ενιαία σε όλη τη μάζα της (ομογενής ηλεκτρικά γη). Πώς διαρρέει το ρεύμα τη Γη; Για να δώσουμε απάντηση στο ερώτημα θα εξετάσουμε πως συμπεριφέρεται μία σημειακή πηγή ρεύματος μέσα σε ένα ομογενή απείρων διαστάσεων χώρο και θα προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε το δυναμικό της σημειακής πηγής σε ένα σημείο του χώρου.

Συνθήκες άπειρου ομογενούς χώρου δημιουργούμε στη πράξη με την τοποθέτηση ηλεκτροδίου μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά μέσα σε ομογενές και ισότροπο έδαφος (σχήμα 10). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος (συσσωρευτής) και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, D, το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος, I, σημειακής πηγής, C, που βρίσκεται μέσα σε άπειρο ομογενές και ισότροπο μέσο είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τα έξω.



Σχήμα 10. Διάδοση ηλεκτρικού ρεύματος σε ομογενή γη.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το ρεύμα (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) ρέει από το ηλεκτρόδιο C ακτινικά κατά μήκος ευθειών γραμμών. Αν μπορούσαμε με ένα βολτόμετρο

να υπολογίσουμε την διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης) που προκαλεί η ειδική αντίσταση του μέσου σε μια απόσταση πολύ μακριά από το ηλεκτρόδιο ρεύματος σε διάφορες θέσεις του μέσου, θα βρίσκαμε ότι η πτώση τάσης είναι σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών οι οποίες έχουν κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές αυτές καλούνται ισοδυναμικές γραμμές (equipotentials). Στις τρεις διαστάσεις, οι ισοδυναμικές γραμμές σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το ηλεκτρόδιο. Μερικές ισοδυναμικές γραμμές δείχνονται με μπλε κύκλους.

Η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού), dV , μεταξύ δύο ισοδυναμικών επιφανειών που απέχουν απόσταση dr θα είναι σύμφωνα με τη σχέση (1) ίση με

$$\frac{dV}{dr} = \rho \frac{I}{4\pi r^2} \Rightarrow dV = \rho \frac{I}{4\pi r^2} dr \quad (2\alpha)$$

αφού το $A = 4\pi r^2$ (επιφάνεια σφαίρας). Με ολοκλήρωση της σχέσης προκύπτει

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

οπότε το δυναμικό, V , σε σημείο, P , του χώρου λόγω της σημειακής πηγής ρεύματος, C , θα δίδεται από τη σχέση

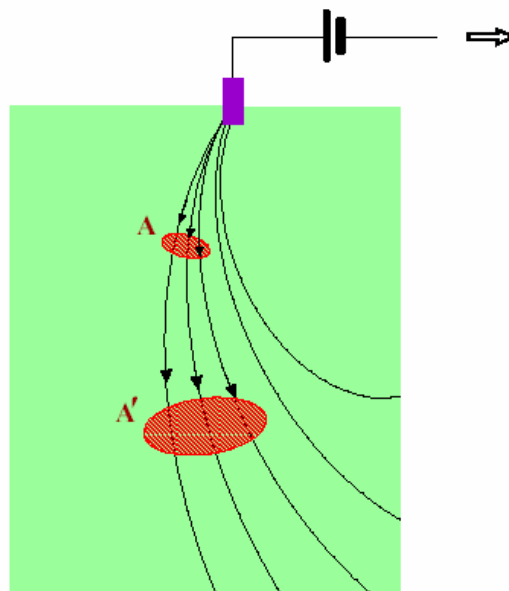
$$V = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (3)$$

όπου r είναι η απόσταση του σημείου P από τη σημειακή πηγή.

Οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων του μέσου μπορούν να υπολογιστούν απλά αφαιρώντας τα δυναμικά των δύο ισοδυναμικών γραμμών που διέρχονται αντίστοιχα από τα δύο σημεία. Επομένως, αν τα σημεία βρίσκονται πάνω σε ένα μπλε κύκλο με κέντρο το ηλεκτρόδιο ρεύματος, δεν θα καταγραφεί διαφορά δυναμικού, διότι οι δύο αυτές θέσεις βρίσκονται πάνω στην ίδια ισοδυναμική γραμμή. Αυτό σημαίνει ότι, αν παίρναμε το βολτόμετρο και ενώναμε τους δύο ακροδέκτες του με τα δύο αυτά σημεία της γης, θα καταγράφαμε διαφορά δυναμικού ίση με μηδέν. Σε σχέση με το δυναμικό κοντά στο ηλεκτρόδιο, οι διαφορές δυναμικού αυξάνουν καθώς απομακρυνόμαστε από το ηλεκτρόδιο.

Αυτό είναι λογικό, εφόσον η μέτρηση που κάνουμε με το βολτόμετρο είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το μέσο επί την ειδική αντίσταση του μέσου, σύμφωνα με το νόμο του Ohm. Καθώς απομακρυνόμαστε από τα ηλεκτρόδια, το ρεύμα ταξιδεύει μέσα από μεγαλύτερη ποσότητα μέσου. Η ειδική αντίσταση αυξάνει με την αύξηση της διαδρομής, επομένως αυξάνει και η τάση.

Σε κάθε σημείο του μέσου, η πυκνότητα του ρεύματος (current density) ορίζεται ως η ποσότητα ρεύματος που περνάει μέσα από μία μοναδιαία περιοχή μιας ισοδυναμικής επιφάνειας. Η πυκνότητα του ρεύματος, j , λοιπόν προκύπτει ως το πηλίκο της ποσότητας του ρεύματος, I , (πλήθος γραμμών ροής) που διέρχεται από μια ισοδυναμική επιφάνεια προς το εμβαδόν, A , της επιφάνειας.

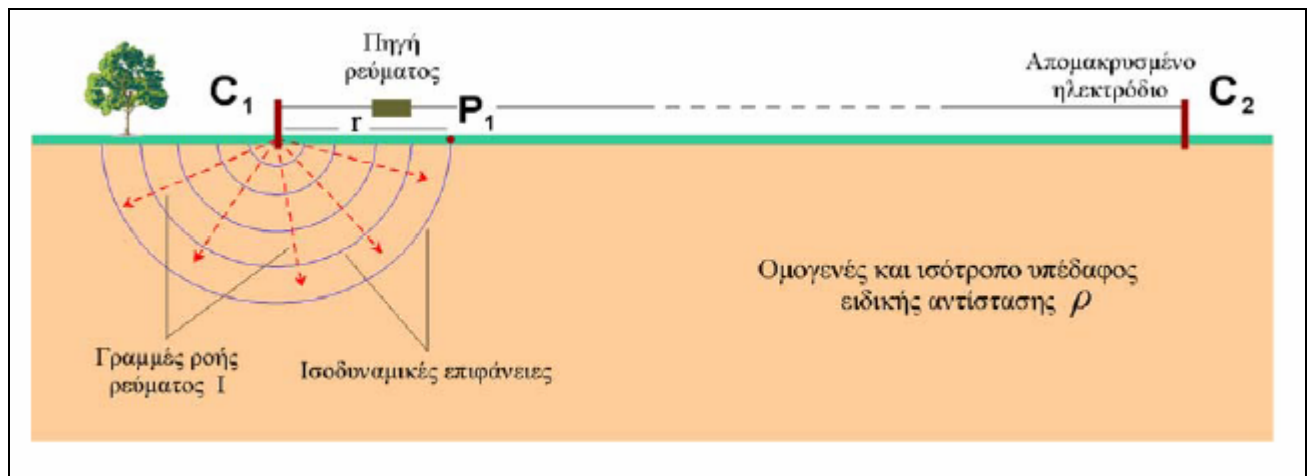


Σχήμα 11. Σχηματική παράσταση της πυκνότητας του ρεύματος

Συνεπώς, όπως και από το παραπάνω σχήμα προκύπτει, κοντά στο ηλεκτρόδιο, το πηλίκο της ποσότητας του ρεύματος, που στην προκειμένη περίπτωση συμβολίζεται με τρεις γραμμές ροής και διέρχεται από την ισοδυναμική επιφάνεια, A , προς το εμβαδόν της A παρέχει υψηλή πυκνότητα ρεύματος. Μακριά από το ηλεκτρόδιο, το ίδιο ρεύμα καταλαμβάνει πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια, A' , του μέσου (Σχήμα 11). Έτσι, η ίδια ποσότητα ρεύματος διερχόμενη από την μεγαλύτερη επιφάνεια A' παρέχει τώρα μικρότερη πυκνότητα ρεύματος. Η πυκνότητα ρεύματος έχει μονάδες A/m^2 .

3.7 Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο

Συνθήκες ομογενούς ημιχώρου δημιουργούμε στη πράξη με την τοποθέτηση μικρών διαστάσεων ηλεκτροδίου, C_1 , (σημειακή πηγή ρεύματος) στην επιφάνεια ομογενούς γης (σχήμα 12). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C_2 , το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος, I , της σημειακής πηγής, C_1 , είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο.



Σχήμα 12. Ισοδυναμικές επιφάνειες και Γραμμές ροής του ρεύματος

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες ως κάθετες στις γραμμές ροής (ακτίνες) θα είναι ομόκεντρες ημισφαιρικές επιφάνειες. Για τον προσδιορισμό του δυναμικού V σε σημείο P_1 του ημιχώρου (συνήθως στην επιφάνεια του ημιχώρου) εργαζόμαστε με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγούμενα με τη διαφορά ότι εδώ η επιφάνεια A είναι επιφάνεια ημισφαιρίου δηλαδή $A = 2\pi r^2$. Εάν στις σχέσεις της προηγούμενης περίπτωσης του άπειρου και ομογενούς χώρου αντικαταστήσουμε το A προκύπτει ότι το δυναμικό στο σημείο P_1 είναι

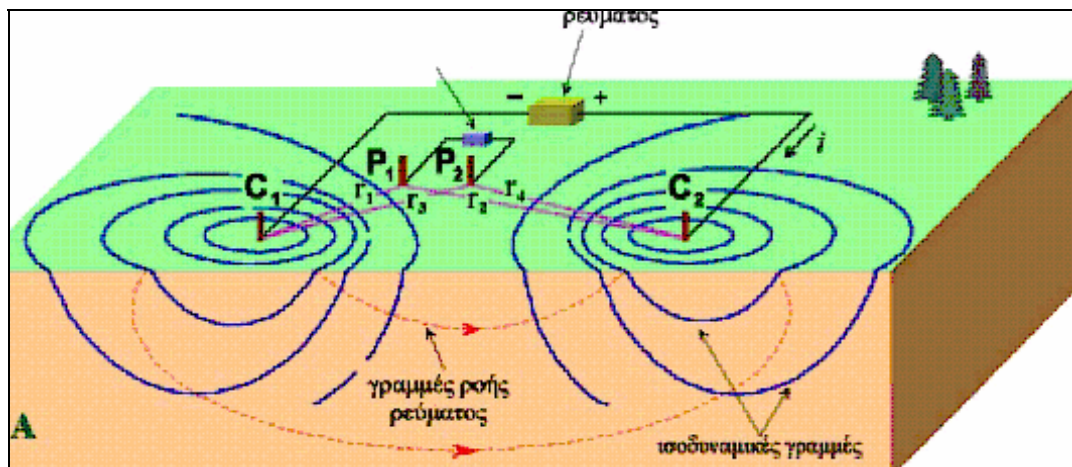
$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4)$$

3.8 Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο

Στην πράξη, θα χρειαστεί να τοποθετήσουμε τις δύο σημειακές πηγές ρεύματος

(ηλεκτρόδια ρεύματος) κοντά μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο όμως, η κατανομή του ρεύματος και οι ισοδυναμικές γραμμές που παράγονται μέσα στην ομογενή γη γίνονται πιο πολύπλοκες από αυτές που εξετάσαμε νωρίτερα. Αντί το ρεύμα να ρέει ακτινικά από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος, τώρα ρέει κατά μήκος καμπύλων διαδρομών που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος. Στα σχήματα 12 και 13 δείχνονται τέτοιες διαδρομές του ρεύματος (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές).

Στη περίπτωση αυτή όπου το δεύτερο ηλεκτρόδιο ρεύματος C_2 βρίσκεται κοντά στη σημειακή πηγή C_1 (σχήμα 13) τότε το δυναμικό στο σημείο P_1 (ηλεκτρόδιο P_1) θα είναι διαφορετικό διότι τώρα επηρεάζεται και από την πηγή ρεύματος C_2 . Το διαμορφούμενο δυναμικό στο σημείο P_1 θα είναι το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού P_1 λόγω της πηγής V_1 και του δυναμικού C_1 λόγω της πηγής C_2 (αρχή της υπέρθεσης).



Σχήμα 13. Τρισδιάστατη φωτογραφία για καλύτερη κατανόηση του φαινομένου

$$V_{P_1} = V_1 + V_2 = \frac{\rho(+I)}{2\pi r_1} + \frac{\rho(-I)}{2\pi r_2} \Rightarrow$$

$$V_{P_1} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5)$$

όπου r_1 και r_2 είναι οι αποστάσεις του σημείου P_1 από τις πηγές..

Σε ένα δεύτερο σημείο (ηλεκτρόδιο P_2) της επιφάνειας του ημίχωρου (σχήμα 12) το

δυναμικό λόγω της V_{P_2} παρουσίας των πηγών C_1 και C_2 θα δίδεται αντίστοιχα από τη σχέση

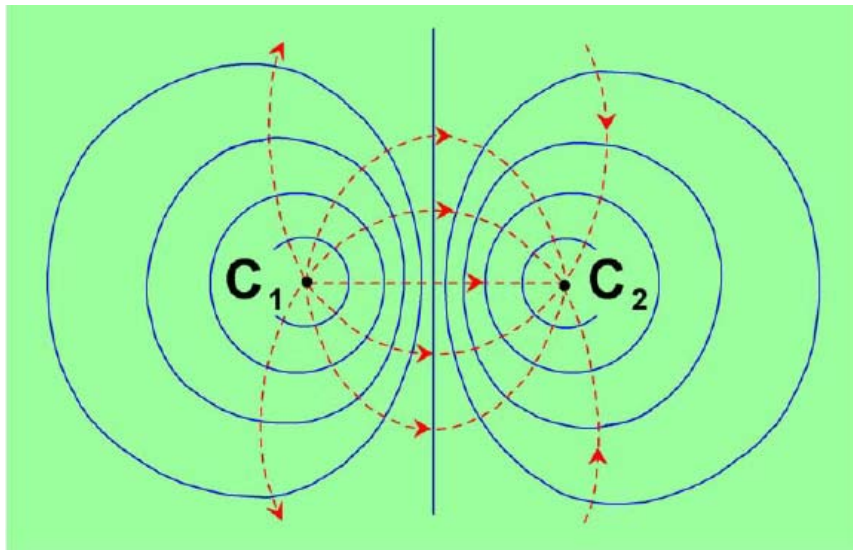
$$V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (5\alpha)$$

όπου r_3 και r_4 είναι οι αποστάσεις του σημείου P_2 από τις πηγές. Η διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης), ΔV , μεταξύ των σημείων P_1 και P_2 θα είναι

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad (6)$$

Οι σημειακές πηγές ρεύματος C_1 και C_2 υλοποιούνται στη πράξη με τη τοποθέτηση δύο μεταλλικών πασάλων (ηλεκτροδίων) στο έδαφος και τη σύνδεση τους μέσω καλωδίων με μια ηλεκτρική πηγή, πχ. ένα συσσωρευτή (σχήμα 13). Τα σημεία P_1 , P_2 μέτρησης της διαφοράς δυναμικού ΔV υλοποιούνται με τη τοποθέτηση δύο άλλων μεταλλικών ηλεκτροδίων στο έδαφος και τη σύνδεση τους με ένα βολτόμετρο.

Το σχήμα 14 παρουσιάζει μία κάτοψη του σχήματος 10 με τις γραμμές ροής ρεύματος και τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούν οι σημειακές πηγές ρεύματος C_1 και C_2 στην επιφάνεια του ημιχώρου.

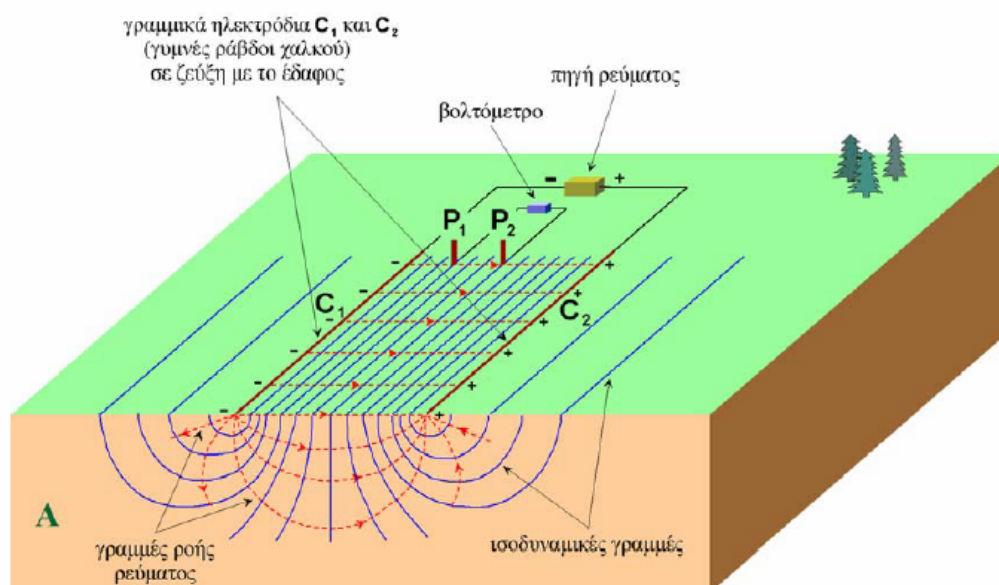


Σχήμα 14. Μια πανοραμική φωτογραφία όπου φαίνονται οι ισοδυναμικές επιφάνειες με μπλε χρώμα και οι γραμμές ροής του ρεύματος με κόκκινο χρώμα.

3.9 ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΗΜΙΧΩΡΟ

Για την είσοδο του ρεύματος στο υπέδαφος και την ενεργοποίηση του χώρου, εκτός από τις σημειακές πηγές (σημειακά ηλεκτρόδια) που εξετάσαμε μέχρι τώρα, χρησιμοποιούνται και οι γραμμικές πηγές ρεύματος (γραμμικά ηλεκτρόδια). Οι γραμμικές πηγές ρεύματος C_1 και C_2 υλοποιούνται στη πράξη με τη τοποθέτηση δύο μεγάλου μήκους γυμνών ράβδων χαλκού στο έδαφος οι οποίες είναι σε σύζευξη με τη γη σε ολόκληρο το μήκος τους (σχήμα 15). Τα γραμμικά ηλεκτρόδια C_1 και C_2 συνδέονται μέσω καλωδίων με μια ηλεκτρική πηγή, πχ. ένα συσσωρευτή.

Η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού ΔV γίνεται στην επιφάνεια του εδάφους που παρεμβάλλεται μεταξύ των γραμμικών ηλεκτροδίων και υλοποιείται στη πράξη με τη τοποθέτηση δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων P_1 και P_2 στο έδαφος και τη σύνδεση τους με ένα βολτόμετρο.



Σχήμα 15. Στην περίπτωση που έχουμε γραμμικές πηγές

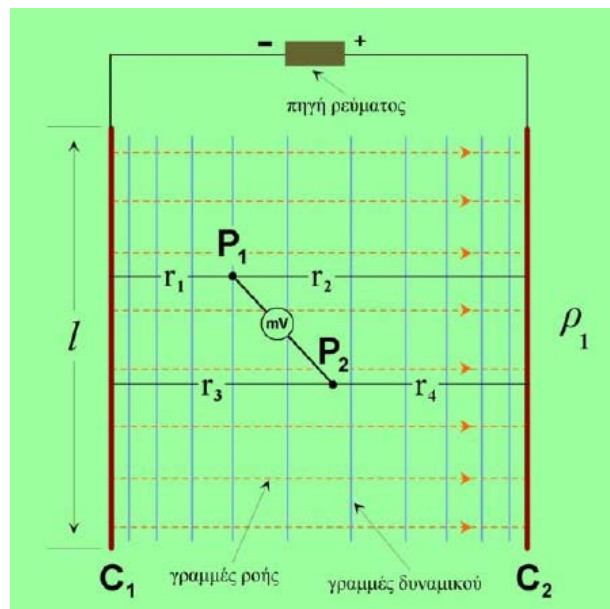
Τα γραμμικά ηλεκτρόδια παρότι στο παρελθόν υπήρξαν μία αρκετά δημοφιλής τεχνική για τη δημιουργία ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου σήμερα δεν χρησιμοποιούνται τόσο συχνά κυρίως λόγω της ανεπιθύμητης παραμόρφωσης των δυναμικών γραμμών του πεδίου στη στενή ζώνη των ηλεκτροδίων που προκαλούν ο διαφορετικός βαθμός υγρασίας και η

διαφορετική σύσταση του επιφανειακού εδάφους κατά μήκος των γραμμικών αγωγών.

Οι γραμμές ροής του ρεύματος ξεκινούν ακτινικά (κατακόρυφη τομή Α στο σχήμα 15) από το ένα ηλεκτρόδιο και καταλήγουν στο άλλο. Στην επιφάνεια του εδάφους οι γραμμές ροής είναι ευθείες κάθετες στα ηλεκτρόδια. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες ως κάθετες στις γραμμές ροής θα είναι ημικυλινδρικές επιφάνειες. Στην κατακόρυφη τομή Α του σχήματος 15 βλέπουμε τις ισοδυναμικές γραμμές που είναι οι τομές των ημικυλινδρικών ισοδυναμικών επιφανειών με το κατακόρυφο επίπεδο Α. Στην επιφάνεια του εδάφους οι τομές των ημικυλινδρικών επιφανειών είναι ευθείες παράλληλες προς τα γραμμικά ηλεκτρόδια C_1 και C_2 . Το σχήμα 16 παρουσιάζει μία κάτοψη του σχήματος 15 με τις γραμμές ροής ρεύματος και τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούν οι γραμμικές πηγές ρεύματος C_1 και C_2 .

Η διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ δύο σημείων P_1 και P_2 που ευρίσκονται στο ομογενές πεδίο μεταξύ των γραμμικών ηλεκτροδίων (σχήμα 16) προκύπτει από την απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης του Laplace σε κυλινδρικές συντεταγμένες,

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\frac{rdV}{dr} \right) = 0 \quad (6a)$$



Σχήμα 16. Πανοραμική άποψη στην περίπτωση που έχουμε γραμμικές πηγές

της οποίας η τελική λύση δίνει ότι η διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ δύο σημείων P_1 και P_2

δίδεται από τη σχέση

$$\Delta V = \frac{I\rho}{\pi l} \log\left(\frac{r_1 r_4}{r_2 r_3}\right) \quad (7)$$

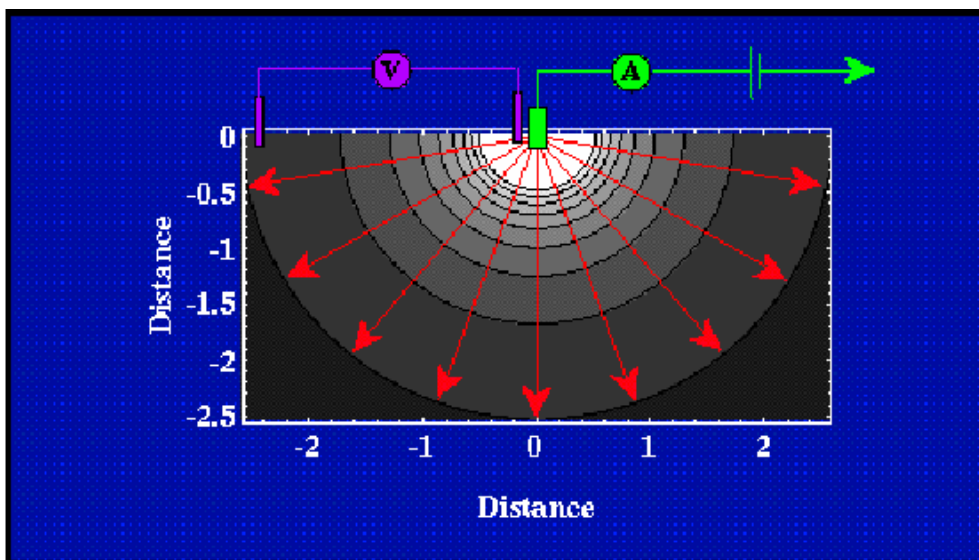
όπου I είναι το ρεύμα της πηγής, l το μήκος των γραμμικών ηλεκτροδίων και r_1, r_2, r_3 και r_4 οι αποστάσεις των σημείων P_1 και P_2 από τα γραμμικά ηλεκτρόδια.

3.10 Μια πρώτη εκτίμηση της Ειδικής Αντίστασης

Το δυναμικό σε ένα σημείο του ημιχώρου, που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει τη γη, λόγω της παρουσίας μίας σημειακής πηγής ρεύματος (ενός μοναδικού ηλεκτροδίου ρεύματος) σε κάποιο άλλο σημείο του ημιχώρου δίνεται, όπως έχουμε δείξει από τη σχέση

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (7a)$$

Στην έκφραση αυτή, V είναι το δυναμικό (ή τάση), I είναι η ένταση του ρεύματος, ρ είναι η ειδική αντίσταση του υλικού του ημιχώρου, και r είναι η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος και του σημείου στο οποίο μετράμε την τάση. Παρατηρούμε ότι η σχέση αυτή δεν είναι τίποτε περισσότερο από το νόμο του Ohm, με την αντίσταση R ίση με ρ δια $2\pi r$.



Σχήμα 17. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της ειδικής αντίστασης

Αν η Γη είχε σταθερή ειδική αντίσταση, θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε αυτήν την ειδική αντίσταση εκτελώντας το παρακάτω πείραμα. Συνδέουμε στο καλώδιο που συνδέει την μπαταρία με το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος ένα αμπερόμετρο με το οποίο μετράμε την ποσότητα ρεύματος που εισάγεται στη γη. Τοποθετούμε ένα ηλεκτρόδιο που συνδέεται με ένα βολτόμετρο δίπλα στο ηλεκτρόδιο ρεύματος, ενώ τοποθετούμε το άλλο σε κάποια απόσταση, r , μακριά από το ηλεκτρόδιο και μετράμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο θέσεων. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση, υπολογίζουμε την ειδική αντίσταση, ρ .

Στην πράξη, το πείραμα αυτό είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί διότι τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος πρέπει να τοποθετηθούν σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (συνήθως 10 φορές την απόσταση στην οποία μετράμε την τάση). Επομένως, γιατί να μην μειώσουμε απλά την απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων τάσης έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος να παραμείνει μία πρακτική απόσταση; Το πρόβλημα είναι ότι όσο πιο κοντά βρίσκονται τα ηλεκτρόδια τάσης μεταξύ τους, τόσο πιο μικρή είναι η διαφορά δυναμικού που θα μετρηθεί. Επομένως, υπάρχει ένα πρακτικό όριο στο πόσο κοντά μπορούν να βρίσκονται τα δύο ηλεκτρόδια τάσης και κατά συνέπεια και πόσο κοντά μπορούν να βρίσκονται και τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος.

Μπορεί κάποιος να αναρωτηθεί γιατί δεν συνδέουμε απλά το βολτόμετρο στο καλώδιο που διαρρέεται από ρεύμα και να μετρήσουμε την πτώση τάσης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος. Θεωρητικά αυτό μπορεί να γίνει. Στην πράξη, όμως, είναι δύσκολο να αποκτήσουμε αξιόπιστες πληροφορίες γιατί αυτό που μετράμε είναι περισσότερο συνάρτηση της αντίστασης επαφής (contact resistance) μεταξύ της γης και των ηλεκτροδίων ρεύματος παρά η ειδική αντίσταση της Γης. Η αντίσταση επαφής είναι η αντίσταση που συναντά η ροή του ρεύματος επειδή το ηλεκτρόδιο δεν κάνει τέλεια επαφή με τη γη. Οι αντιστάσεις επαφής μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες, της τάξης των ΚΩ. Αν όμως χρησιμοποιηθεί ένα βολτόμετρο μεγάλης (άπειρης) εσωτερικής αντίστασης (impedence) για την μέτρηση της τάσης κατά μήκος των δύο ξεχωριστών ηλεκτροδίων τάσης, λίγο μόνο ρεύμα θα διαρρέει τα ηλεκτρόδια τάσης, οπότε η αντίσταση επαφής θεωρείται ασήμαντη για τη μέτρηση.

4. Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

4.1 Εξοπλισμός

Συγκριτικά με τον εξοπλισμό που απαιτείται για τη βαρυτομετρική και τη μαγνητική διασκόπηση, ο εξοπλισμός που απαιτείται για την ηλεκτρική διασκόπηση με τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης συνεχούς ρεύματος είναι πολύ πιο απλός. Ο εξοπλισμός για τις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης περιλαμβάνει μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, το κύκλωμα ρεύματος AB το οποίο εισάγει στο έδαφος μιας ελεγχόμενης έντασης ρεύμα, το κύκλωμα δυναμικού MN το οποίο μετρά τη διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης) μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού, καλώδια και ηλεκτρόδια. Για καλύτερα αποτελέσματα τα δύο αυτά κυκλώματα θα πρέπει να είναι ανεξάρτητα και σε απόσταση μεταξύ τους.

4.2 Το κύκλωμα ρεύματος AB

Το κύκλωμα που παρέχει ρεύμα στα ηλεκτρόδια ρεύματος AB αποτελείται από την πηγή ρεύματος, μια μονάδα ελέγχου η οποία περιλαμβάνει ένα αμπερόμετρο για την μέτρηση του ρεύματος εκπομπής και ένα διακόπτη, καλώδια και ηλεκτρόδια.

Πηγή Ρεύματος (Current Source)

Απαιτείται μία πηγή συνεχούς ρεύματος η οποία ποικίλει ανάλογα με το είδος του υπό διερεύνηση προβλήματος (στόχου). Γενικά οι μπαταρίες δεν είναι ικανές να παράγουν το απαιτούμενο συνεχές ρεύμα, έτσι αν χρησιμοποιηθεί πηγή καθαρά συνεχούς ρεύματος αυτή πρέπει να είναι μία ηλεκτρική γεννήτρια. Για συνήθη αναπτύγματα ηλεκτροδίων ρεύματος ($AB < 1000m$) οι κατεξοχήν πηγές είναι οι συσσωρευτές. Για μεγαλύτερα αναπτύγματα χρησιμοποιούνται πηγές μεγάλης ισχύος όπως είναι οι βενζινοκίνητες γεννήτριες ρεύματος.

Αμπερόμετρο (Ammeter)

Για τη μέτρηση του ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα απλό αμπερόμετρο. Ο μοναδικός περιορισμός είναι να μπορεί το όργανο να μετρήσει ποσότητα ρεύματος από λίγα mA έως περίπου 0.5A με ακρίβεια καλύτερη του 2% στη πλήρη κλίμακα.. Πολλά από τα σύγχρονα όργανα ρυθμίζονται έτσι ώστε να ο χειριστής να καθορίζει την ποσότητα ρεύματος που διοχετεύεται στο έδαφος και το όργανο να επιχειρεί να την αποδώσει. Αν το όργανο δεν μπορεί να αποδώσει την καθορισμένη ποσότητα, είτε γιατί το υπέδαφος κοντά στην

επιφάνεια έχει πολύ μεγάλη αντίσταση ή επειδή τα ηλεκτρόδια είναι πολύ απομακρυσμένα, το όργανο προειδοποιεί τον χειριστή.

Καλώδια

Για να συνδέσουμε τα ηλεκτρόδια με τα διάφορα ηλεκτρικά εξαρτήματα, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε καλώδια. Αν και είναι πιθανό να πρέπει να χρησιμοποιηθούν καλώδια πολύ μεγάλου μήκους, συγκριτικά με την πολύ υψηλή ειδική αντίσταση του εδάφους, η αντίσταση των καλωδίων θεωρείται κατά κανόνα αμελητέα.. Για εύκολη τοποθέτηση, τα καλώδια συνήθως τυλίγονται σε καρούλια.

Τα καλώδια παροχής ρεύματος θα πρέπει να επιλεγούν με προσοχή έτσι ώστε να εξασφαλίζουν την μέγιστη παροχή ισχύος της πηγής στα ηλεκτρόδια A και B ή αλλιώς να ελαχιστοποιούν την απώλεια ισχύος λόγω μετατροπής μέρους της ενέργειας της πηγής σε άλλες μορφές ενέργειας (θερμότητα). Επιπλέον θα πρέπει να παρέχουν υψηλή μόνωση εξασφαλίζοντας κατ' αυτό το τρόπο αξιοπιστία των μετρήσεων δυναμικού στο κύκλωμα δυναμικού MN. Για την εξασφάλιση των παραπάνω συνθηκών θα πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω συχνά αντικρουόμενες απαιτήσεις:

1. η ωμική αντίσταση των καλωδίων να είναι χαμηλή ιδιαίτερα για τα μεγάλα αναπτύγματα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση πολύκλωνων καλωδίων και με την αύξηση των συρμάτινων κλώνων χαλκού εις βάρος όμως της ευκινησίας τους κατά το άπλωμα και την έλξη τους δεδομένου ότι καθίστανται βαρύτερα.
2. η μηχανική αντοχή τους στις έλξεις να είναι μεγάλη. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη συρμάτινων κλώνων από ατσάλι.
3. η μόνωση τους ισχυρή
4. να είναι ελαφρά διευκολύνοντας έτσι τον χειρισμό τους στο πεδίο.

Ηλεκτρόδια

Για να αποφευχθούν προβλήματα ψευδών δυναμικών που σχετίζονται με τα ηλεκτρόδια δυναμικού, χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα ηλεκτρόδια γνωστά ως πορώδη δοχεία (porous pots). Όμως, επειδή τα ψευδή δυναμικά μπορούν να μετρηστούν με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας, τα ηλεκτρόδια αυτά συνήθως δεν χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης συνεχούς ρεύματος. Αν οι συνθήκες της διασκόπησης είναι υπερβολικά ξηρές και η επαφή του ηλεκτροδίου με το έδαφος δεν μπορεί να διατηρηθεί, τότε μπορεί κανείς να επιλέξει να χρησιμοποιήσει τα πορώδη δοχεία.

Για τις διασκοπήσεις ειδικής αντίστασης, τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται συνήθως, δεν είναι τίποτε περισσότερο από ράβδους αλουμινίου, χαλκού ή ατσάλινες μήκους περίπου 60cm. Οι ράβδοι αυτές καρφώνονται στο έδαφος και συνδέονται με καλώδια με την

πηγή του ρεύματος ή το βολτόμετρο. Κάτω από ξηρές συνθήκες, η επαφή μεταξύ της ράβδου και του εδάφους μπορεί να ενισχυθεί αν διαβρέξουμε το έδαφος που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο.

4.3 Το κύκλωμα δυναμικού MN

Το κύκλωμα MN αποτελείται από ένα υψηλής εμπέδησης βολτόμετρο, συζευγμένο με ένα καταγραφικό σύστημα στις περιπτώσεις που το μετρούμενο δυναμικό ΔV καθίσταται πολύ μικρό, ένα σύστημα αντιστάθμισης, καλώδια και ηλεκτρόδια. Τα σύγχρονα υψηλής ακρίβειας βολτόμετρα έχουν αντιστάσεις εισόδου της τάξης των 10 ή και περισσότερων Ohm και είναι ικανά να μετρούν δυναμικά από 10μV μικρά έως μερικά Volts. Ο αντισταθμιστής συνδέεται σε σειρά με το βολτόμετρο και χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση ανεπιθύμητων φυσικών δυναμικών προερχόμενων από άλλες φυσικές ή τεχνητές πηγές τα οποία υπεισέρχονται σαν θόρυβος στις μετρήσεις. Τα κριτήρια επιλογής των καλωδίων για το κύκλωμα δυναμικού MN είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά των καλωδίων του κυκλώματος ρεύματος.

4.4 Βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης

Τόσο το αμπερόμετρο στο κύκλωμα ρεύματος όσο και το βολτόμετρο στο κύκλωμα δυναμικού είναι απαραίτητο από καιρού εις καιρό να βαθμονομούνται επειδή οι ενδείξεις τους είναι δυνατόν να αλλάξουν είτε λόγω παλαιότητας ή λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας ή εξαιτίας κακομεταχείρισης τους. Γενικά το αμπερόμετρο είναι εκείνο που υφίσταται τη μεγαλύτερη κακομεταχείριση.

Για καλύτερα αποτελέσματα οι ενδείξεις του αμπερομέτρου και του βολτομέτρου θα πρέπει να συγκρίνονται με γνωστές τιμές ρεύματος και τάσης αντίστοιχα σε όλες τις κλίμακες μέτρησης των οργάνων. Εντούτοις, επειδή στις μετρήσεις μας αυτό που τελικά ενδιαφέρει είναι ο λόγος ($\Delta V/I$) της τάσης ΔV προς το ρεύμα I , μας είναι αρκετό να μετρήσουμε με ακρίβεια τον παραπάνω λόγο. Επειδή ο παραπάνω λόγος εκφράζει την ωμική αντίσταση R του εδάφους (νόμος του Ohm) είναι περισσότερο βολικό να βαθμονομήσουμε τα δύο όργανα συνδέοντας τα άκρα τους με ωμικές αντιστάσεις των οποίων η τιμή είναι γνωστή.

Επειδή οι μετρούμενες ωμικές αντιστάσεις της γης γίνονται πάρα πολύ μικρές στα μεγάλα αναπτύγματα των ηλεκτροδίων ρεύματος AB (μεγάλα βάθη έρευνας) οι χρησιμοποιούμενες για την βαθμονόμηση αντιστάσεις είναι πολύ μικρές οι τιμές των οποίων έχουν μετρηθεί με ακρίβεια σε εργαστήρια (πρότυπες αντιστάσεις). Εάν και τα δύο όργανα μετρούν σωστά τότε ο λόγος των ενδείξεων τους $\Delta V/I = R_1$ θα πρέπει να ισούται με τη μετρούμενη πρότυπη αντίσταση R. Εάν $R_1 \neq R$ τότε, στο λόγο $\Delta V/I$ που μετράμε στο πεδίο

θα πρέπει να επιφέρουμε αλγεβρικά την διόρθωση $\frac{R - R_1}{R}$.

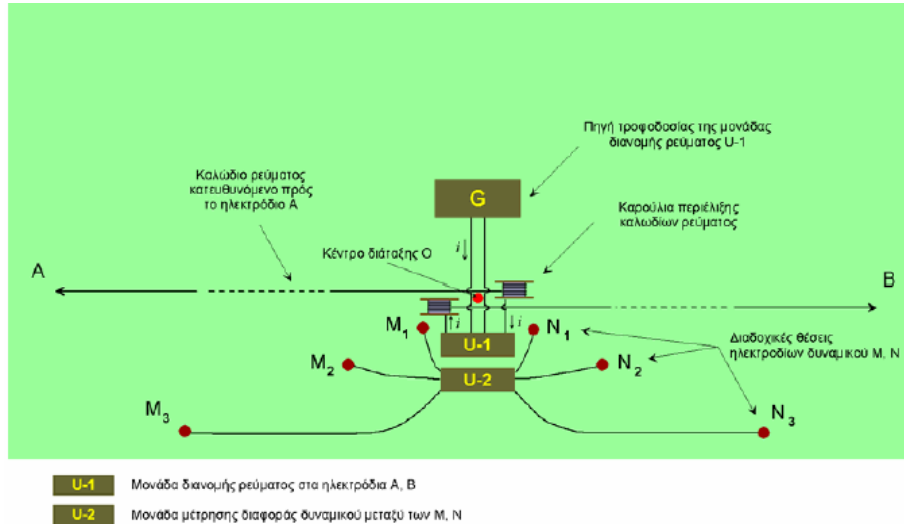
4.5 Σύζευξη των κυκλωμάτων ρεύματος και δυναμικού

Η σύζευξη μεταξύ των κυκλωμάτων ρεύματος και δυναμικού είναι η πιο σοβαρή αιτία σφαλμάτων στις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Με τον όρο σύζευξη εννοούμε την επαγωγή του ρεύματος στα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της τάσης, από το ρεύμα που ρέει στα καλώδια που πηγαίνουν στα ηλεκτρόδια ρεύματος. Για καλύτερα αποτελέσματα τα αντίστοιχα καλωδιακά κυκλώματα θα πρέπει να είναι διαχωρισμένα τόσο από φυσική όσο και από ηλεκτρική άποψη. Η μόνη επιτρεπτή σύζευξη πρέπει να γίνεται απευθείας από τη γη μέσω των ηλεκτροδίων. Τα δύο κυριότερα είδη σύζευξης που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και η διαρροή.

4.6 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή παρατηρείται μεταξύ του κυκλώματος ρεύματος και δυναμικού. Εξαρτάται από τη γεωμετρία των δύο κυκλωμάτων και εν γένει μειώνεται καθώς η απόσταση μεταξύ των δύο κυκλωμάτων αυξάνει. Για την διάταξη Schlumberger όπου τα κυκλώματα AB και MN απλώνονται παράλληλα μεταξύ τους το μέγεθος της επαγωγής εξαρτάται από το μήκος του κυκλώματος MN και την απόσταση του από το κύκλωμα AB. Για καλύτερα αποτελέσματα το μήκος του κυκλώματος MN πρέπει να παραμένει όσο το δυνατό μικρότερο και η απόσταση μεταξύ των MN και AB κυκλωμάτων να είναι της τάξης του 0.1 του μήκους MN. Επίσης τα καλώδια του κυκλώματος MN κατά τη χρήση τους δεν

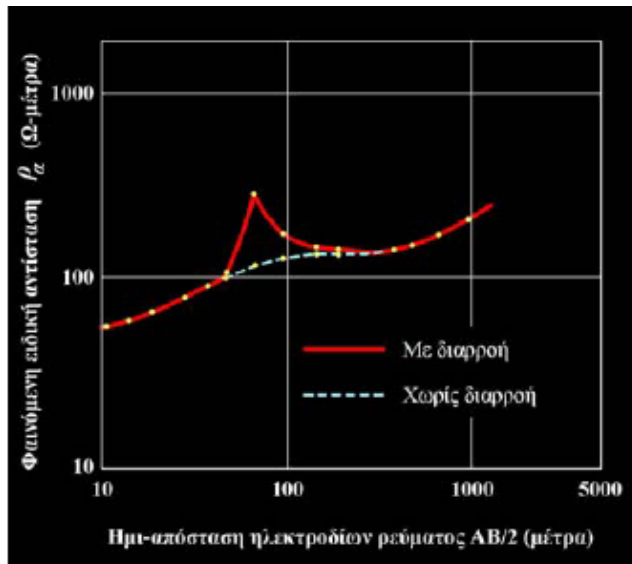
πρέπει να παραμένουν τυλιγμένα στα καρούλια μεταφοράς τους. Στο σκαρίφημα του σχήματος 18 παρουσιάζεται η διάταξη που θα πρέπει να διατηρούν τα κυκλώματα AB και MN προκειμένου να ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.



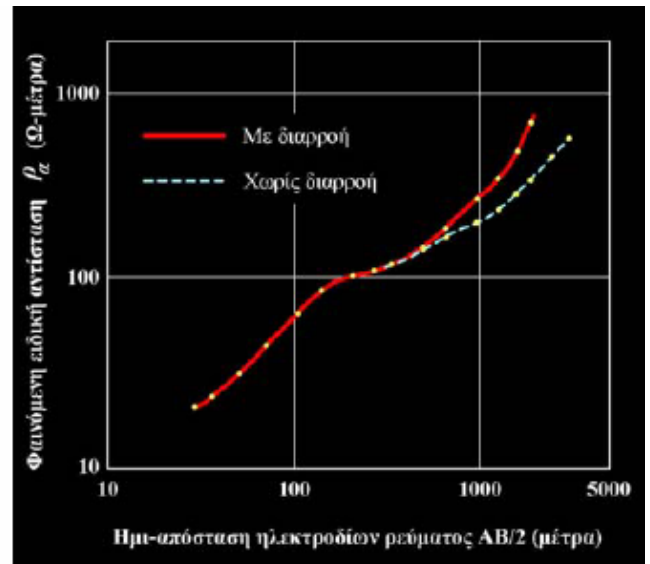
Σχήμα 18. Ένα μπλοκ διάγραμμα της διάταξης ώστε να ελαχιστοποιείται το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

4.7 Διαρροή

Κάθε διαρροή του κυκλώματος AB στο κύκλωμα MN προκαλεί εσφαλμένες αναγνώσεις. Η διαρροή είναι αναμφίβολα η πιο σημαντική μοναδική αιτία για χαμηλής ποιότητας αποτελέσματα και θα πρέπει να εντοπίζεται πάντοτε. Διαρροή μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε κύκλωμα κυρίως όμως συμβαίνει στα καλώδια του κυκλώματος ρεύματος στα οποία παρατηρούνται συνηθέστερα εκδορές λόγω της κακομεταχείρισής τους κυρίως κατά την έλξη τους. Η διαρροή μπορεί να δημιουργήσει απότομες πτυχές στις γεωηλεκτρικές καμπύλες των βυθομετρήσεων (σχήμα 19) ή γενικά παραμορφώσεις αυτών (σχήμα 20) ανάλογα με την θέση που συμβαίνει η διαρροή κατά μήκος της γραμμής.



Σχήμα 19. Πτυχή της γεωλεκτρικής καμπύλης



Σχήμα 20. Παραμόρφωση της γεωλεκτρικής καμπύλης

Ακόμα και μια ελάχιστη διαρροή είναι ικανή να επηρεάσει τις αναγνώσεις του δυναμικού ΔV όταν αυτή εντοπίζεται πλησίον των ηλεκτροδίων M ή N. Για να αποφύγουμε τις διαρροές οι πηγές (συσσωρευτές, γεννήτριες κλπ.) καθώς και τα καρούλια των καλωδίων ρεύματος θα πρέπει να απομονωθούν από το έδαφος με παρεμβολή μεταξύ αυτών και του εδάφους κάποιου μονωτικού υλικού.

Ευνοϊκές εδαφικές συνθήκες για την δημιουργία διαρροών είναι οι υψηλές τιμές των αντιστάσεων επαφής στα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού που συνήθως παρατηρούνται στα στεγνά και ξηρά εδάφη. Στη περίπτωση αυτή επειδή το ρεύμα δυσκολεύεται να εισέλθει στο έδαφος από τη θέση του ηλεκτροδίου λόγω της υψηλής αντίστασης επαφής όλα τα φθαρμένα σημεία του καλωδίου από τη πηγή μέχρι το ηλεκτρόδιο αποτελούν ευνοϊκές συνθήκες διαρροής ρεύματος. Η περίπτωση υγρών εδαφών κυρίως μετά από πρόσφατη βροχόπτωση ή όταν τα καλώδια παραμένουν απλωμένα στο πεδίο νύχτες με υγρασία είναι επίσης ευνοϊκές συνθήκες για διαρροή. Οι υψηλές αντιστάσεις επαφής βελτιώνονται θεαματικά διαποτίζοντας την στενή περιοχή επαφής ηλεκτρόδιο-έδαφος με αγωγίμο διάλυμα χλωριούχου νατρίου.

4.8 Η Μέτρηση της Διαφοράς Δυναμικού ΔV

Είναι γνωστό ότι ΔV είναι η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού M και N λόγω της ροής ρεύματος στο έδαφος μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος A και B. Στην απουσία θορύβων το ΔV παρέχεται από την ανάγνωση του βολτομέτρου. Όταν έχουμε παρουσία θορύβου, που προέρχεται από Τελλουρικά ρεύματα που διαρρέουν τη γη ή βιομηχανικά ρεύματα από διαρροές λόγω της γειτνίασης της περιοχής έρευνας με βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε το δυναμικό ΔV με μια μόνο απλή μέτρηση διότι δεν θα είναι αντιπροσωπευτική δεδομένου ότι στο μετρούμενο σήμα (ΔV) επικάθεται θόρυβος και το παραμορφώνει. Εδώ λοιπόν υπεισέρχεται η παράμετρος S/N που σημαίνει τον λόγο του σήματος προς τον θόρυβο (Signal to Noise ratio).

Όταν ο λόγος είναι μεγάλος, όπως συμβαίνει στα μικρά αναπτύγματα AB, τόσο επικρατέστερο (ισχυρότερο) είναι το σήμα του θορύβου οπότε η μέση τιμή μερικών αναγνώσεων του βολτομέτρου παρέχει μια αξιόπιστη μέτρηση του δυναμικού. Καθώς όμως ο λόγος εκφυλίζεται, όπως συμβαίνει στα μεγάλα συνήθως αναπτύγματα AB, καθίσταται απαραίτητη η χρησιμοποίηση καταγραφικού συστήματος για την καταγραφή αρκετών μεταβολών του δυναμικού για περαιτέρω ανάλυση τους μετά το πέρας των μετρήσεων. Αυτό που προσδιορίζεται στη περίπτωση αυτή είναι η μέση τιμή των αναγνώσεων του δυναμικού καθώς και η τυπική απόκλιση τους από τη μέση τιμή.

4.9 Η Μέτρηση του Ρεύματος Εκπομπής I

Όταν οι θέσεις τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ρεύματος έχουν καλά προετοιμασθεί έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε την χαμηλότερη αντίσταση επαφής τότε ένα σταθερό ρεύμα έντασης I εισέρχεται στο έδαφος οπότε είναι εύκολη η ανάγνωση του από το αμπερόμετρο. Στα μεγάλα αναπτύγματα ηλεκτροδίων A και B ο παράγων θόρυβος δημιουργεί ένα χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο οπότε είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση καταγραφέα για την μέτρηση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης του ρεύματος.

4. 10 Η Μέτρηση του Γεωμετρικού Παράγοντα K

Όπως προηγούμενα είδαμε (σχέση 6) το δυναμικό ΔV στη περίπτωση των σημειακών πηγών ρεύματος δίδεται από τη σχέση

$$\Delta V = V\rho_1 - V\rho_2 = \frac{\rho_a I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad (7\beta)$$

λύνοντας ως προς ρ_a λαμβάνουμε

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (7\gamma)$$

όπου η παράσταση

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)}} \quad (7\delta)$$

ονομάζεται γεωμετρικός παράγοντας.

Μια μέτρηση της ειδικής αντίστασης περιλαμβάνει το προσδιορισμό του λόγου της διαφοράς δυναμικού ΔV μεταξύ των ηλεκτροδίων M, N προς το ρεύμα I που διαρρέει το κύκλωμα AB και πολλαπλασιασμό του λόγου με τον γεωμετρικό παράγοντα K που αντιστοιχεί στη διάταξη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούμε.

Στην περίπτωση της ομογενούς ηλεκτρικά γης, ανεξάρτητα από τη θέση των τεσσάρων ηλεκτροδίων, η ρ_a θα είναι ακριβώς ίση με την ειδική αντίσταση του μέσου. Η ειδική αντίσταση που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση καλείται φαινόμενη ειδική αντίσταση (apparent resistivity). Την ονομάζουμε φαινόμενη για τον εξής λόγο. Μπορούμε πάντα να υπολογίσουμε την ρ_a , και χρειάζεται να γνωρίζουμε μόνο τις θέσεις των ηλεκτροδίων και να μετρήσουμε το ρεύμα και την τάση. Αν, όμως, η γη δεν είναι ηλεκτρικά ομογενής, δηλαδή δεν έχει σταθερή ειδική αντίσταση (η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται με το βάθος ή οριζόντια), η ειδική αντίσταση που υπολογίζουμε με την πιο πάνω εξίσωση δεν θα αντιπροσωπεύει την πραγματική ειδική αντίσταση της γης. Στην

περίπτωση αυτή η ειδική αντίσταση που μετράμε είναι ισοδύναμη με την ειδική αντίσταση μίας ομογενούς ηλεκτρικά γης τέτοιας που να δημιουργεί στα ηλεκτρόδια δυναμικού πτώση τάσης ίση με αυτή που μετράμε στο πείραμα που διεξάγουμε. Την μετρούμενη στη περίπτωση αυτή ειδική αντίσταση θα την αναφέρουμε ως φαινόμενη ειδική αντίσταση.

Επειδή η τιμή του K εξαρτάται από τις μεταξύ των ηλεκτροδίων αποστάσεις είναι δυνατό να μετρήσουμε τον K με μεγάλη ακρίβεια. Ένα σφάλμα $\varepsilon\%$ στην μέτρηση της απόστασης OA ή OB οδηγεί σε ένα σφάλμα $\varepsilon\%$ στη μέτρηση της ρ_a . Εάν το σφάλμα είναι και στις δύο αποστάσεις OA και OB τότε το σφάλμα της ρ_a θα είναι $2\varepsilon\%$. Σφάλμα $\varepsilon\%$ στη μέτρηση της απόστασης MN απαιτεί αντίθετης φοράς ($-\varepsilon\%$) διόρθωση στην μετρούμενη ρ_a . Κατά κανόνα μια τυπική απόκλιση 3% στη μέτρηση του δυναμικού οδηγεί σε ένα αντίστοιχο σφάλμα 3% στη μέτρηση της ρ_a .

4.11 Το σφάλμα στο προσδιορισμό της ρ_a

Αναφερόμενοι στη προηγούμενη σχέση, που παρέχει τη τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_a έχουμε ήδη συζητήσει τον τρόπο μέτρησης κάθε μίας από τις παραμέτρους του δεύτερου μέλους της εξίσωσης και αυτό που απομένει είναι η εκτίμηση του σφάλματος προσδιορισμού της ρ_a .

Γενικά το σφάλμα στο προσδιορισμό της διαφοράς δυναμικού ΔV υπερβαίνει κατά πολύ τα σφάλματα προσδιορισμού των υπόλοιπων παραμέτρων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εάν η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής του ΔV είναι για παράδειγμα 3% , το σφάλμα της ρ_a θα είναι επίσης 3% . Αυτό σημαίνει ότι με βεβαιότητα 67% η υπολογιζόμενη τιμή της ρ_a δεν θα βρίσκεται έξω από τα όρια του $\rho_a \pm 3\%$, ενώ είναι σχεδόν 95% βέβαιο ότι η ρ_a θα βρίσκεται μέσα στα όρια του $\rho_a \pm 6\%$.

4.12 Πηγές Θορύβου

Ακόμα και στην περίπτωση του απλού παραδείγματος του προηγούμενου κεφαλαίου, υπάρχει ένα πλήθος πηγών θορύβου που μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος, από τις οποίες θα υπολογίσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση.

- Πόλωση των Ηλεκτροδίων (Electrode Polarization) – ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο, όπως μία χάλκινη ή ατσάλινη ράβδος, σε επαφή με κάποιον

ηλεκτρολύτη (εκτός από διάλυμα κορεσμένο με τα δικά της άλατα), όπως το εδαφικό νερό, θα δημιουργήσει ένα μετρήσιμο δυναμικό επαφής. Σε εφαρμογές όπως είναι η μέθοδος του φυσικού δυναμικού, αυτά τα δυναμικά επαφής μπορεί να είναι μεγαλύτερα από το φυσικό δυναμικό που προσπαθούμε να καταγράψουμε. Ακόμα με τις μεθόδους συνεχούς ρεύματος που περιγράφουμε εδώ, τα δυναμικά αυτά μπορεί να αποτελούν ένα σημαντικό κλάσμα του δυναμικού που μετράμε.

Για εργασία με συνεχές ρεύμα, υπάρχουν δύο δυνατές λύσεις για το πρόβλημα αυτό:

1. Χρήση μη πολωτικών ηλεκτροδίων (nonpolarizing electrodes). Πρόκειται για ηλεκτρόδια που περιέχουν μια μεταλλική αγωγίμη ράβδο σε επαφή με κορεσμένο διάλυμα των δικών της αλάτων. Συνήθως χρησιμοποιείται ο χαλκός και ένα διάλυμα θειικού χαλκού. Η ράβδος και το διάλυμα τοποθετούνται σε

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (8)$$

ένα πορώδες κεραμικό δοχείο, το οποίο επιτρέπει στο κορεσμένο διάλυμα να διαρρέυσει αργά και να κάνει επαφή με το έδαφος. Επειδή τα διαλύματα αυτά είναι μάλλον βλαβερά για το περιβάλλον, και επειδή η μέθοδος που θα περιγράφουμε στη συνέχεια είναι πιο εύκολη στην εφαρμογή της, τα ηλεκτρόδια πορώδους δοχείου σπάνια χρησιμοποιούνται σε εργασίες με συνεχές ρεύμα. Χρησιμοποιούνται όμως ευρέως στις διασκοπήσεις με τη μέθοδο του φυσικού δυναμικού και της επαγόμενης πολικότητας.

2. Μια απλή μέθοδος για να αποφύγουμε την επίδραση των δυναμικών επαφής είναι να αντιστρέψουμε περιοδικά τη ροή του ρεύματος στα ηλεκτρόδια ρεύματος ή να χρησιμοποιούμε ένα χαμηλής συχνότητας, λίγων κύκλων ανά λεπτό, εναλλασσόμενο ρεύμα. Καθώς το ρεύμα αντιστρέφεται, η πόλωση σε κάθε ηλεκτρόδιο διακόπτεται κι αρχίζει να αντιστρέφεται. Πραγματοποιώντας μετρήσεις για αρκετούς κύκλους μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις με αμελητέες επιδράσεις πόλωσης.

- Τελλουρικά Ρεύματα (Telluric Currents) – όπως περιγράφηκε και προηγουμένως, μέσα στη γη ρέουν φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα. Τα ρεύματα αυτά καλούνται τελλουρικά ρεύματα. Η παρουσία αυτών των ρευμάτων μπορεί να παράγει μια μετρήσιμη τάση στα ηλεκτρόδια δυναμικού ακόμα και όταν αυτά δεν διαρρέονται από ρεύμα. Με περιοδική αντιστροφή του ρεύματος στα ηλεκτρόδια

ρεύματος ή χρησιμοποιώντας εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής συχνότητας, η επίδραση των τελλουρικών ρευμάτων στην μετρούμενη τάση μπορεί να καταργηθεί.

- Παρουσία γειτονικών αγωγών – οι ηλεκτρικές διασκοπήσεις δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν κοντά σε αγωγούς που κάνουν επαφή με το έδαφος, όπως, για παράδειγμα, η παρουσία θαμμένων σωλήνων ή φρακτών που λειτουργούν ως απορροφητές ρεύματος (καταβόθρες). Λόγω της μικρής τους ειδικής αντίστασης, το ρεύμα θα ρέει κατά προτίμηση κατά μήκος αυτών των δομών, παρά μέσα στη γη. Η παρουσία αυτών των γειτονικών αγωγών στην ουσία λειτουργεί ως ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα στο σύστημα. (η αγωγιμότητα (conductivity) είναι το αντίθετο της ειδικής αντίστασης. Τα μέσα υψηλής αγωγιμότητας μεταδίδουν το ηλεκτρικό ρεύμα με μεγάλη ευκολία, έχουν επομένως χαμηλή ειδική αντίσταση. Μαθηματικά, η αγωγιμότητα είναι το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης και μετριέται σε μονάδες $1/\Omega\text{m}$. Ένα siemen (S) ισούται με $1/\Omega$. Επομένως, μονάδα αγωγιμότητας είναι το 1 S/m .)

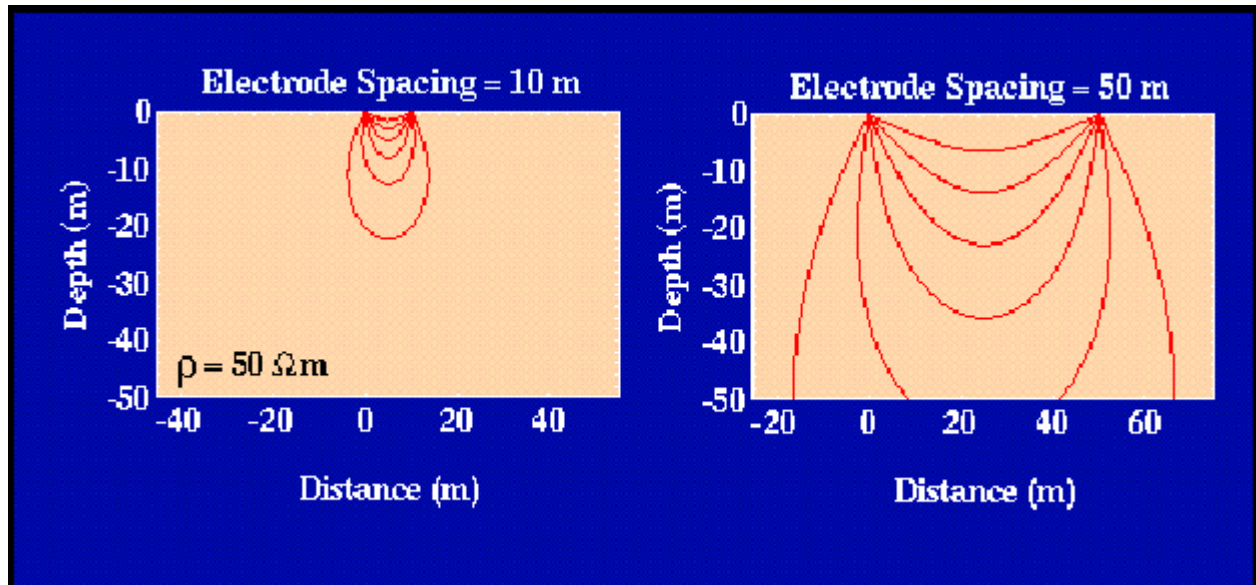
- Μικρή ειδική αντίσταση κοντά στην επιφάνεια – όπως οι γειτονικοί αγωγοί λειτουργούν ως καταβόθρες που βραχυκυκλώνουν το πείραμα της ειδικής αντίστασης, έτσι και η επιφανειακή ειδική αντίσταση, αν είναι χαμηλή, το ρεύμα δυσκολεύεται να κινηθεί προς τα βαθύτερα πετρώματα της γης. Επομένως, ένα στρώμα υψηλής αγωγιμότητας κοντά στην επιφάνεια, όπως για παράδειγμα ένα στρώμα νερού, μπορεί να εμποδίσει το ρεύμα να διεισδύσει βαθύτερα μέσα στη γη.

- 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 μετρήσεις της ειδικής αντίστασης. Επιπλέον, η ανώμαλη τοπογραφία, θα συγκεντρώσει τη ροή του ρεύματος στις κοιλάδες και θα την διασκορπίσει στους λόφους, επίσης επηρεάζοντας έτσι τις μετρήσεις.

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

5. ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Όπως είδαμε προηγουμένως, όταν δύο ηλεκτρόδια μεταφερθούν σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, το ρεύμα ρέει κατά μήκος τοξοειδών διαδρομών που συνδέουν τα δύο ηλεκτρόδια. Αν η γη έχει σταθερή ειδική αντίσταση, το 50% περίπου του ρεύματος ρέει διαμέσου των πετρωμάτων μέχρι ένα βάθος μικρότερο της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 21. Μεγαλώνοντας την απόσταση των ηλεκτροδίων μεγαλώνει και το βάθος διείσδυσης.

Αυτό υποδηλώνει ότι αν αυξήσουμε την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, περισσότερο από το ρεύμα που διοχετεύουμε θα κινηθεί προς μεγαλύτερα βάθη. Επειδή η συνολική αντίσταση της ηλεκτρικής διαδρομής αυξάνει με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων, για να αναγκάσουμε το ρεύμα να κινηθεί κατά μήκος αυτών των μεγαλύτερων διαδρομών, απαιτείται μια μεγαλύτερη πηγή ρεύματος. Επομένως, μέγιστη απόσταση που μπορεί να χωρίζει τα ηλεκτρόδια ρεύματος καθορίζεται εν μέρει από το μέγεθος της πηγής που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ρεύματος.

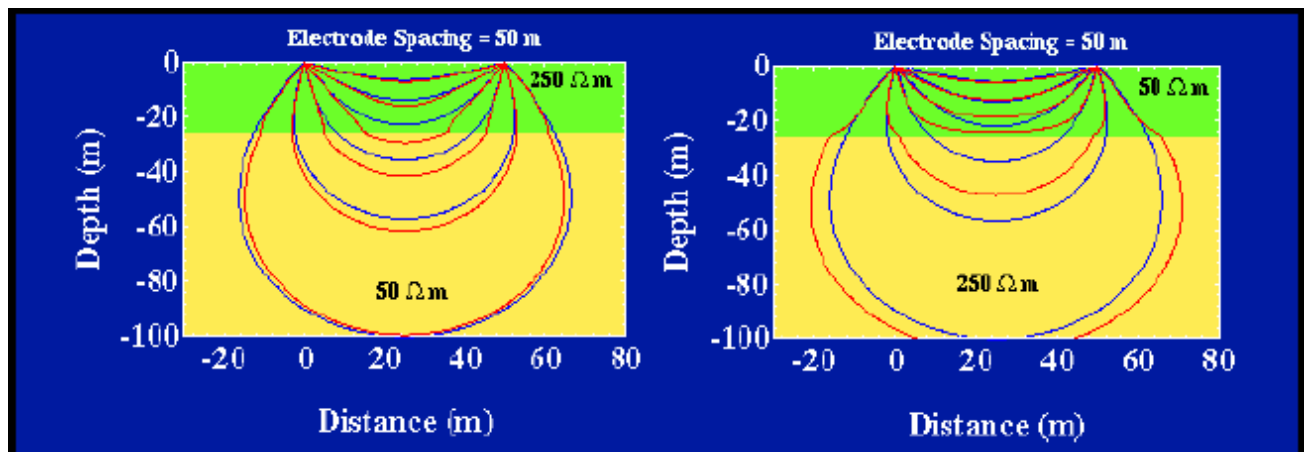
Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε μια αρκετά μεγάλη πηγή ρεύματος ώστε να παράγουμε ένα μετρήσιμο ρεύμα στο έδαφος με μεγάλη απόσταση ηλεκτροδίων ρεύματος. Η αύξηση του βάθους διείσδυσης με αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος αποτελεί έναν τρόπο με τον οποίο μπορούμε να ελπίζουμε ότι θα ερμηνεύσουμε τη δομή της ειδικής αντίστασης στην περιοχή. Επειδή το ρεύμα ρέει κυρίως κοντά στην επιφάνεια για κοντινές

αποστάσεις ηλεκτροδίων, οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για τις αποστάσεις αυτές θα κυριαρχούνται από την δομή της ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια. Αν τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απομακρυνθούν και μετρηθεί ξανά η φαινόμενη ειδική αντίσταση, οι μετρήσεις αυτές θα εμπεριέχουν πληροφορίες για την βαθύτερη δομή της Γης.

5.1 Ροή Ρεύματος σε Μέσο με Στρώση

Πώς η παρουσία μεταβολών της ειδικής αντίστασης σε βάθος επηρεάζουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος; Στα προηγούμενα παραδείγματα θεωρήσαμε ότι η Γη έχει σταθερή ειδική αντίσταση. Προφανώς, αυτό δεν είναι αλήθεια, διαφορετικά δεν θα προσπαθούσαμε να χαρτογραφήσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης μέσα στη Γη. Αν και η ειδική αντίσταση μπορεί να μεταβάλλεται με το βάθος αλλά και οριζόντια, θα δεχτούμε αρχικά ότι μεταβάλλεται μόνο με το βάθος. Επιπλέον, θα δεχτούμε οι μεταβολές αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε μια σειρά διακριτών στρωμάτων, το καθένα από τα οποία παρουσιάζει σταθερή ειδική αντίσταση. Συνεπώς, αρχικά, δεν θα εξετάσουμε μεταβολές της ειδικής αντίστασης σε οριζόντια διεύθυνση ή συνεχείς μεταβολές με το βάθος.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διαδρομές της ροής του ρεύματος (κόκκινο) για δύο ηλεκτρόδια ρεύματος σε δύο απλά μοντέλα δύο στρωμάτων. Το μοντέλο στα αριστερά περιλαμβάνει ένα στρώμα υψηλής ειδικής αντίστασης ($250 \Omega\text{m}$) πάνω από ένα στρώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης ($50 \Omega\text{m}$). Αυτό το μοντέλο είναι χαρακτηριστικό του προφίλ ειδικής αντίστασης που θα παίρναμε από μια περιοχή όπου ακόρεστα αλλουβία υπέρκεινται κορεσμένων αλλουβίων. Το μοντέλο στα δεξιά περιλαμβάνει ένα στρώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης ($50 \Omega\text{m}$) που υπέρκειται ενός στρώματος υψηλής ειδικής αντίστασης ($250 \Omega\text{m}$). Για σύγκριση, στο σχήμα επίσης δείχνονται οι διαδρομές που θα ακολουθούσε το ρεύμα αν η Γη είχε σταθερή ειδική αντίσταση (μπλε) ίση με αυτή του ανώτερου στρώματος. Οι διαδρομές αυτές είναι ταυτόσημες με αυτές που περιγράφηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 22. Στις παραπάνω φωτογραφίες φαίνονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις οριζοντίων στρωμάτων

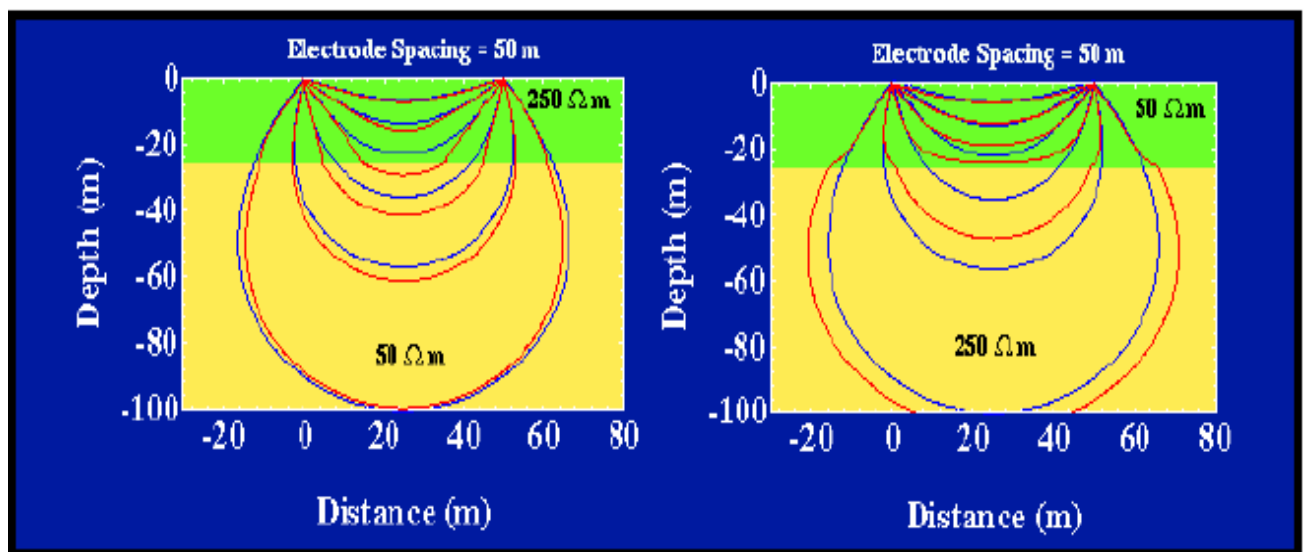
Παρατηρούμε ότι η ροή του ρεύματος στο μέσο που έχει στρώσεις αποκλίνει από αυτή που παρατηρούμε στο ομογενές μέσο. Ιδιαίτερα, παρατηρούμε ότι στο μέσο με στρώση οι γραμμές ροής του ρεύματος είναι παραμορφωμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να φαίνεται ότι το ρεύμα κατά προτίμηση έλκεται από το στρώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης του μέσου. Στο μοντέλο αριστερά, το ρεύμα φαίνεται να τραβιέται προς τα κάτω μέσα στο στρώμα των 50 Ωm. Στο μοντέλο δεξιά, το ρεύμα φαίνεται να κάμπτεται προς τα πάνω, προσπαθώντας να παραμείνει μέσα στο στρώμα χαμηλότερης ειδικής αντίστασης στο πάνω μέρος του μοντέλου. Αυτό δεν πρέπει να μας προκαλεί έκπληξη. Αυτό που παρατηρούμε είναι η προτίμηση του ρεύματος να ρέει κατά μήκος της διαδρομής με την μικρότερη αντίσταση. Για το μοντέλο αριστερά, η διαδρομή αυτή είναι διαμέσου του βαθύτερου στρώματος, ενώ για το μοντέλο δεξιά, διαμέσου του ρηχότερου στρώματος.

5.2 Μεταβολές της Φαινόμενης Ειδικής Αντίστασης: Ομογενή Μέσα και Μέσα με Στρώση

Μια σημαντική συνέπεια της εκτροπής της ροής του ρεύματος μέσα σε ένα μέσο με στρώση είναι ότι μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Φανταζόμαστε ότι πραγματοποιούμε ένα ηλεκτρικό πείραμα πάνω από τα δύο αυτά μοντέλα μετρώντας τη διαφορά δυναμικού σε δύο σημεία πάνω στην επιφάνεια της γης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος, και στη συνέχεια υπολογίζουμε τη φαινόμενη ειδική αντίσταση. Στα παραδείγματα αυτά, θα θεωρήσουμε ότι τα ηλεκτρόδια δυναμικού βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και ότι έχουν καθορισμένη απόσταση μεταξύ τους η οποία

παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Πρόκειται για την ίδια γεωμετρία για το πείραμα των τεσσάρων ηλεκτροδίων, που περιγράφηκε νωρίτερα.

Επειδή το ρεύμα έλκεται κατά προτίμηση από το χαμηλότερο στρώμα στο μοντέλο στα αριστερά (σχήμα 23), η πυκνότητα ρεύματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κοντά στην επιφάνεια της Γης (όπου μετρούμε το ηλεκτρικό δυναμικό) θα είναι μικρότερη από αυτή που θα παρατηρούσαμε αν η Γη ήταν ομογενής. Κατά τον ίδιο τρόπο για το μοντέλο στα δεξιά, η πυκνότητα ρεύματος θα είναι υψηλότερη από αυτήν της ομογενούς Γης, επειδή το ρεύμα διοχετεύεται κατά προτίμηση στο επιφανειακό στρώμα.



Σχήμα 23. Στις παραπάνω φωτογραφίες φαίνονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις οριζοντίων στρωμάτων

Υπενθυμίζουμε ότι η έκφραση για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, η οποία φαίνεται παρακάτω, είναι συναρτήσεως της απόστασης των ηλεκτροδίων r (η οποία είναι η ίδια και για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις), του ρεύματος i (δεχόμαστε ότι διοχετεύουμε το ίδιο ρεύμα στο έδαφος και στα δύο μοντέλα), και της διαφοράς δυναμικού (τάσης) ΔV μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων δυναμικού. Μπορούμε να δείξουμε ότι η διαφορά δυναμικού, ΔV , είναι ανάλογη της πυκνότητας ρεύματος γύρω από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Επομένως, για την περίπτωση στα αριστερά, η διαφορά δυναμικού θα είναι μικρότερη από αυτή που θα παρατηρούσαμε αν η Γη ήταν ομογενής, εφόσον η πυκνότητα ρεύματος είναι μικρότερη από αυτή της ομογενούς Γης. Επομένως η μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση θα είναι μειωμένη. Αντίστροφα, για την περίπτωση στα δεξιά, η διαφορά

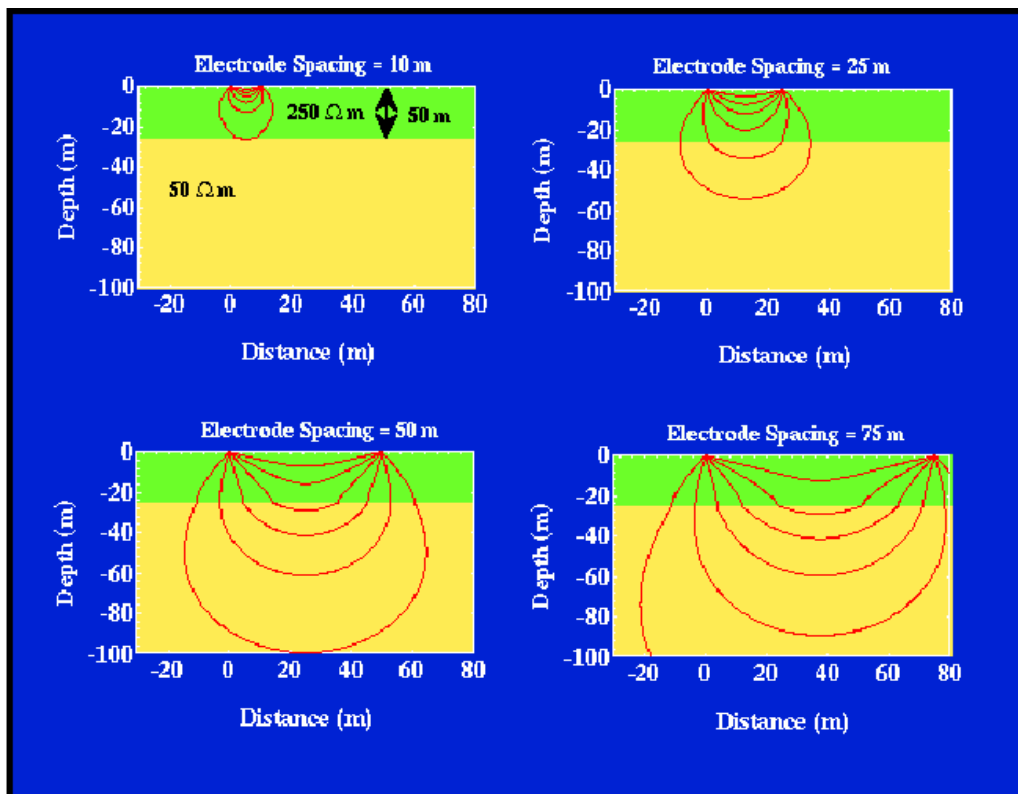
δυναμικού θα είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα παρατηρούσαμε αν η Γη ήταν ομογενής, και η μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση θα είναι μεγαλύτερη.

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{i} \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right)} \right] \quad (8a)$$

5.3 Ροή του Ρεύματος σε Μέσο με Στρώση και Απόσταση μεταξύ των Ηλεκτροδίων

Φανταζόμαστε ότι πραγματοποιούμε μία σειρά πειραμάτων με τέσσερα ηλεκτρόδια, κάθε ένα από τα οποία επικεντρώνεται στο ίδιο περίπου σημείο. Ας θεωρήσουμε ότι τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και ότι η απόστασή τους διατηρείται σταθερή. Αρχικά, τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετούνται κοντά μεταξύ τους και μετράμε το ρεύμα και την τάση, από τα οποία υπολογίζουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση. Στην συνέχεια πραγματοποιούμε το ίδιο πείραμα, αλλά αυξάνουμε συστηματικά την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος ενώ διατηρούμε την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού σταθερή. Τι θα συμβεί τότε;

Θεωρούμε το μοντέλο της γης που δείχνεται παρακάτω. Ένα στρώμα υψηλής ειδικής αντίστασης βρίσκεται πάνω από ένα στρώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης.



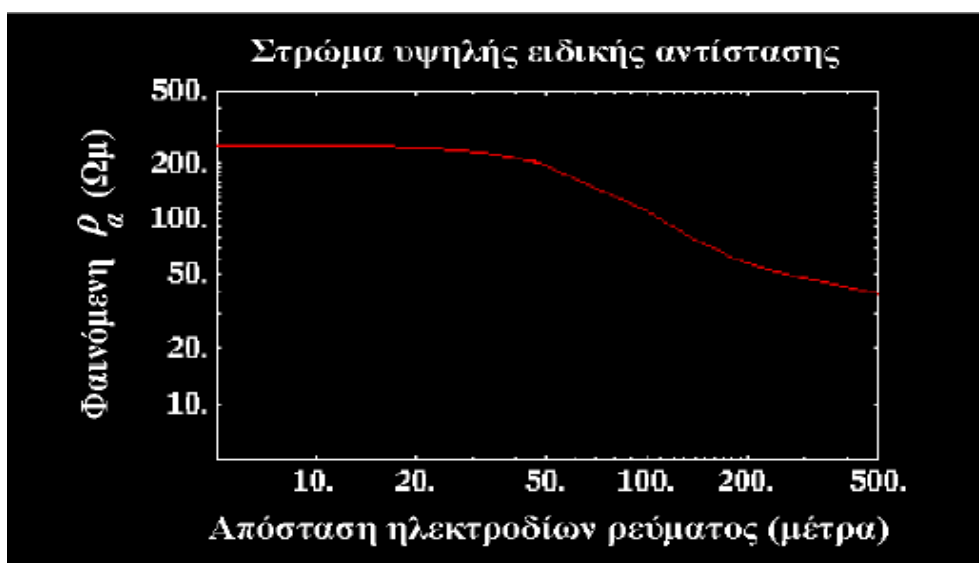
Σχήμα 24. Στις παραπάνω φωτογραφίες βλέπουμε την συμπεριφορά των γραμμών ροής όταν αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων όταν έχουμε ένα στρώμα με μεγαλύτερη ωμική αντίστασή πάνω από ένα άλλο με μικρότερη αντίσταση.

Όταν τα ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται κοντά, στην περιοχή που περιβάλλει τις θέσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού (μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος), το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος ρέει δια μέσου του ανώτερου στρώματος κατά μήκος διαδρομών που βρίσκονται κοντά σε αυτές που θα ακολουθούσε το ρεύμα αν το μοντέλο ήταν ομογενές, δηλαδή, σε αυτή την διάταξη των ηλεκτροδίων, η ροή του ρεύματος δεν διαταράσσεται αρκετά κοντά στα ηλεκτρόδια δυναμικού, ώστε να μπορέσουμε εμείς να τα διακρίνουμε μεταξύ του μοντέλου με τα στρώματα και του μοντέλου της ομογενούς Γης με ειδική αντίσταση ίση με την ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος. Συνεπώς, η μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση θα είναι παρόμοια με την ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος, 250 Ωm.

Τώρα, θα αυξήσουμε την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος και θα επαναλάβουμε το ίδιο πείραμα. Για μεγαλύτερες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος, η ροή ρεύματος κοντά στα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι σημαντικά αλλαγμένη από την παρουσία της υπόγειας ασυνέχειας. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα έλκεται κατά προτίμηση προς τα κάτω μέσα στο στρώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης, μειώνοντας την πυκνότητα ρεύματος μεταξύ των δύο

ηλεκτροδίων ρεύματος όπου θα μετρήσουμε την τάση με τα δύο ηλεκτρόδια δυναμικού. Η μείωση αυτή της πυκνότητας ρεύματος θα έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η τιμή της ειδικής αντίστασης που υπολογίζουμε κάτω από τα 250 Ωm.

Για πολύ μεγάλες αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος, κάτω από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, η μορφή της ροής του ρεύματος είναι και πάλι παρόμοια με αυτή που θα παρατηρούσαμε στο μοντέλο της ομογενούς Γης. Στην περίπτωση αυτή, όμως, το μέσο έχει ειδική αντίσταση ίση με 50 Ωm, και όχι 250 Ωm. Επομένως, αν θέλαμε να υπολογίσουμε και να σχεδιάσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση για διάφορες αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος ενώ διατηρούμε την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού σταθερή, θα παίρναμε ένα διάγραμμα παρόμοιο με αυτό του παρακάτω σχήματος.



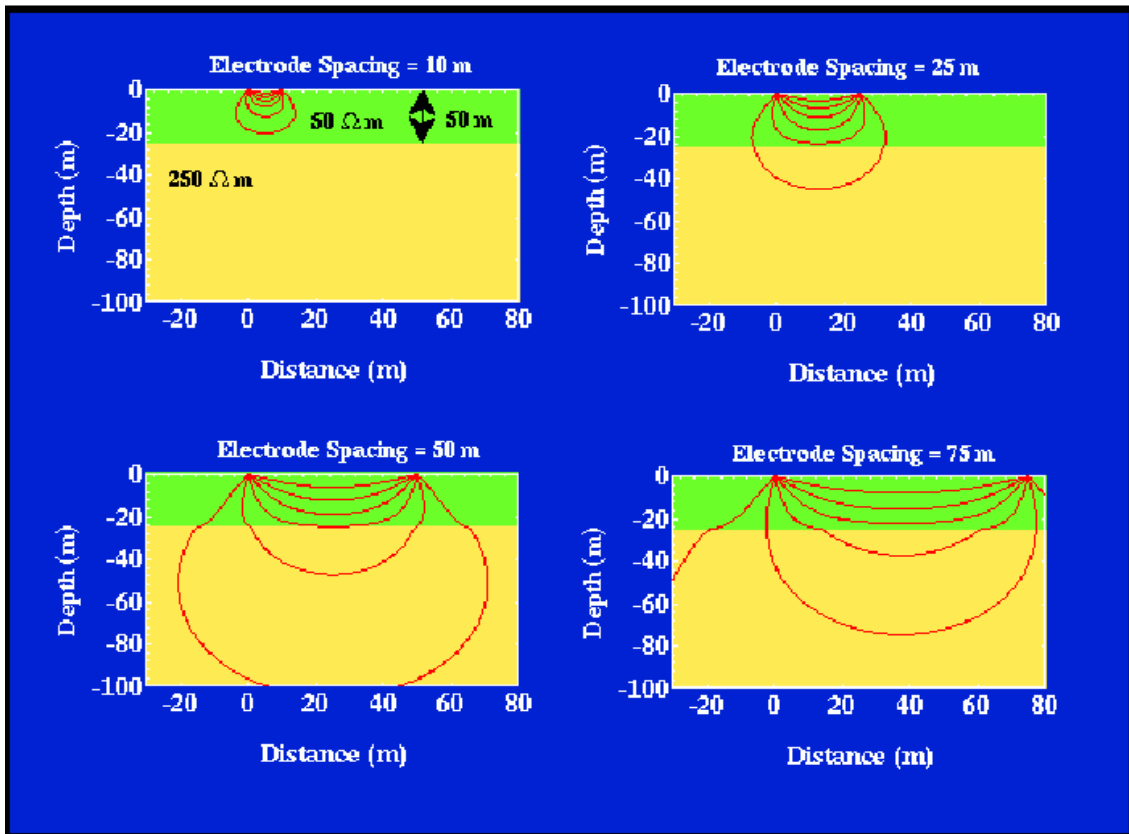
Σχήμα 25. Γεωηλεκτρική καμπύλη

Παρατηρούμε ότι πρόκειται για ένα δι-λογαριθμικό διάγραμμα το οποίο είναι σύνηθες για τις καμπύλες αυτού του τύπου. Αντί να σχεδιάζουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, σχεδιάσαμε την καταγραφή του λογάριθμου (με βάση 10) της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της καταγραφής του λογάριθμου (με βάση 10) της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος. Αυτό συμβαίνει διότι, στην πράξη, θα δούμε ότι τόσο οι φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις, όσο και οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος μπορεί να κυμαίνονται έως και δύο ή τρεις τάξεις μεγέθους (π.χ. οι αποστάσεις μπορούν αυξηθούν από 0.25m στα 250m). Η χρήση των λογαριθμικών διαγραμμάτων μας παρέχει το μέσο ώστε να συμπιέσουμε τη σχετική πληροφορία σε ένα μόνο γράφημα. Στο παραπάνω παράδειγμα, παρατηρούμε ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση δεν προσεγγίζει την ειδική αντίσταση του κατώτερου στρώματος

μέχρι που η απόσταση των ηλεκτροδίων προσεγγίζει τα 500m! Επομένως, για να δούμε μια βαθιά δομή απαιτούνται μεγάλες αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Ένας καλός εμπειρικός κανόνας είναι ότι η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος πρέπει να είναι 10 φορές μεγαλύτερη από το βάθος το οποίο θέλουμε να δούμε.

5.4 Ένα ακόμα παράδειγμα Ροής του Ρεύματος σε Μέσο με Στρώσεις

Θεωρούμε το παράδειγμα του παρακάτω σχήματος. Στην περίπτωση αυτή, ένα στρώμα χαμηλής ειδικής αντίστασης υπέρκειται ενός ημιχώρου υψηλότερης ειδικής αντίστασης.



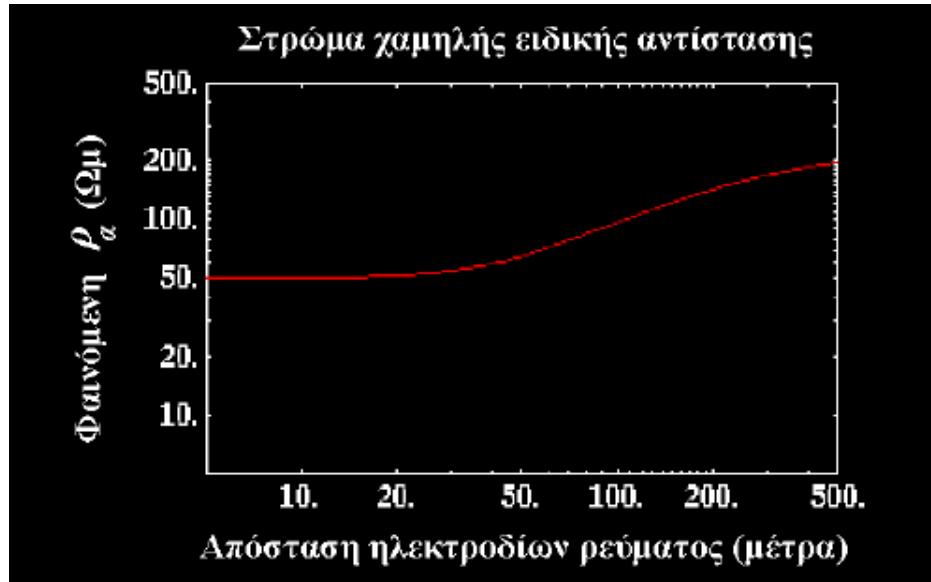
Σχήμα 26. Στις παραπάνω φωτογραφίες βλέπουμε την συμπεριφορά των γραμμών ροής όταν αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων όταν έχουμε ένα στρώμα με μικρότερη ωμική αντίστασή πάνω από ένα άλλο με μεγαλύτερη αντίσταση.

Αρχικά, με τα ηλεκτρόδια ρεύματος να βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος περιορίζεται στο ανώτερο στρώμα κατά μήκος διαδρομών οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτές που θα είχαμε αν το μοντέλο ήταν ομογενές. Η φαινόμενη

ειδική αντίσταση που υπολογίζουμε είναι σχεδόν ίση με αυτή του ανώτερου στρώματος, 50 Ωm.

Για μεγαλύτερες αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος, περισσότερο ρεύμα ρέει σε μεγαλύτερα βάθη. Μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος, όπου βρίσκονται τα ηλεκτρόδια δυναμικού, οι γραμμές της ροής του ρεύματος παραμορφώνονται σημαντικά από την παρουσία του στρώματος υψηλής ειδικής αντίστασης που βρίσκεται στο βάθος. Επομένως, γύρω από τα ηλεκτρόδια δυναμικού η πυκνότητα του ρεύματος είναι μεγαλύτερη από αυτή της ομογενούς Γης. Η σχετική αύξηση στην πυκνότητα του ρεύματος θα έχει ως αποτέλεσμα η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που υπολογίζουμε να είναι μεγαλύτερη από τα 50 Ωm.

Για πολύ μεγάλες αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος, η ροή του ρεύματος γύρω από τα ηλεκτρόδια δυναμικού προσεγγίζει και πάλι αυτή που παρατηρούμε για ομογενή Γη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ωστόσο, επειδή το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος ρέει μέσα στο χαμηλότερο στρώμα, γύρω από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που υπολογίζουμε θα είναι κοντά στα 250 Ωm. Ένα διάγραμμα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 27. Γεωηλεκτρική καμπύλη

Επειδή το ρεύμα προτιμάει να ρέει μέσα στο πρώτο στρώμα, παρατηρούμε ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση προσεγγίζει την ειδική αντίσταση του ημιχώρου πιο αργά (δηλαδή με μεγαλύτερη απόσταση ηλεκτροδίων) από ό,τι στην προηγούμενη περίπτωση.

6. ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ: ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΚΑΙ ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Μέχρι στιγμής, έχουμε δει πώς η γεωλογική δομή μπορεί να επηρεάσει τη ροή του ρεύματος και τις μετρήσεις της τάσης στην επιφάνεια της Γης. Έχουμε περιγράψει πώς οι μεταβολές της ειδικής αντίστασης με το βάθος μπορούν να ανιχνευθούν με αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, υπολογίζοντας τη φαινόμενη ειδική αντίσταση για διάφορες αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Δεν έχουμε όμως περιγράψει τις τεχνικές που εφαρμόζουμε στην ύπαιθρο για την ηλεκτρική διασκόπηση.

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή αυτών των διαδικασιών, υπάρχει ένα σημαντικό σημείο που πρέπει να επισημάνουμε όσον αφορά στις γεωλογικές δομές που έχουμε εξετάσει μέχρι στιγμής. Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης αντιπροσωπεύει την πρώτη μέθοδο που έχουμε περιγράψει, η οποία μπορεί να ανιχνεύσει μεταβολές με το βάθος μιας σχετικής με τη γεωλογία παραμέτρου. Για παράδειγμα, αν εκτελούσαμε μια βαρυτομετρική ή μαγνητική διασκόπηση πάνω από δομές των οποίων η πυκνότητα ή η μαγνητική επιδεκτικότητα μεταβάλλονται μόνο με το βάθος, δεν θα παρατηρούσαμε μεταβολές στο γήινο βαρυτικό ή μαγνητικό πεδίο. Επομένως, οι μέθοδοι αυτές δεν είναι ευαίσθητες σε μεταβολές που σχετίζονται μόνο με το βάθος.

- Βυθοσκοπήσεις ειδικής αντίστασης (Resistivity Soundings) – Όπως έχουμε ήδη δείξει, η μέθοδος της ειδικής αντίστασης μπορεί να εντοπίσει μεταβολές στην ειδική αντίσταση που συμβαίνουν μόνο με το βάθος. Μάλιστα, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται περισσότερο από όλες όταν θέλουμε να δούμε τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Οι διασκοπήσεις που σχεδιάζονται για τον προσδιορισμό των μεταβολών της ειδικής αντίστασης με το βάθος πάνω από ένα καθορισμένο σημείο στην επιφάνεια καλούνται βυθοσκοπήσεις ειδικής αντίστασης. Κατά κανόνα, τα πειράματα με τα δύο ηλεκτρόδια που περιγράφηκαν προηγουμένως, αποτελούν παραδείγματα βυθοσκοπήσεων. Στα πειράματα αυτά, η απόσταση των ηλεκτροδίων μεταβάλλεται για κάθε μέτρηση. Το κέντρο της διάταξης όμως, όπου μετριέται το ηλεκτρικό δυναμικό, παραμένει σταθερό. Ένα παράδειγμα προβλήματος, για την επίλυση του οποίου μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει την βυθοσκόπηση ειδικής αντίστασης, είναι ο προσδιορισμός του υδροφόρου ορίζοντα.
- Προφίλ ειδικής αντίστασης (Resistivity Profiling) – Όπως και με τις βαρυτομετρικές και μαγνητικές μεθόδους, η διασκόπηση ειδικής αντίστασης

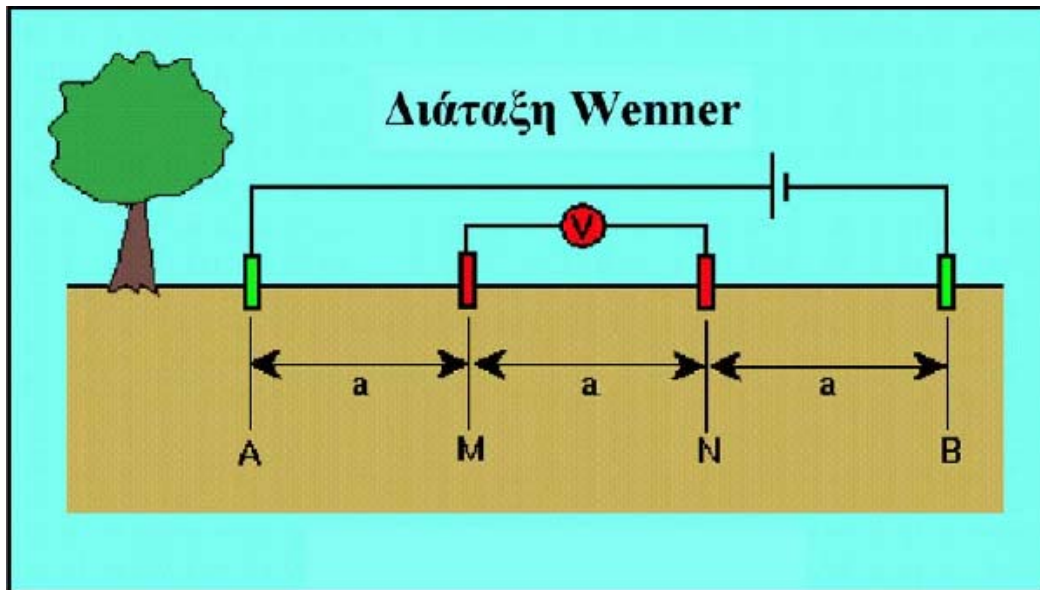
μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των πλευρικών μεταβολών της ειδικής αντίστασης. Σε αντίθεση με τις βυθοσκοπήσεις, στα προφίλ χρησιμοποιούνται σταθερές αποστάσεις ηλεκτροδίων, και το κέντρο του απλώματος των ηλεκτροδίων μεταφέρεται σε κάθε μέτρηση. Τα πειράματα αυτά επομένως παρέχουν μετρήσεις της χωρικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης για καθορισμένη απόσταση ηλεκτροδίων. Οι διασκοπήσεις που σχεδιάζονται για τον προσδιορισμό των πλευρικών μεταβολών της ειδικής αντίστασης καλούνται προφίλ ειδικής αντίστασης. Ένα παράδειγμα προβλήματος, για την επίλυση του οποίου μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει προφίλ ειδικής αντίστασης είναι για τον προσδιορισμό ενός κατακόρυφου ρήγματος.

6.1 Έρευνα Κατακόρυφης Μεταβολής της Ειδικής Αντίστασης: (Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις)

Στις ηλεκτρικές βυθομετρήσεις (Resistivity Soundings) μεταβάλλονται οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού διατηρούμενης της συμμετρίας τους ως προς το κέντρο της διάταξης (κέντρο της βυθομέτρησης). Εφ' όσον το βάθος της έρευνας αυξάνει εν γένει με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων οι ηλεκτρικές βυθομετρήσεις χρησιμοποιούνται όταν θέλουμε να μάθουμε πώς η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται με το βάθος. Όταν πραγματοποιούμε βυθοσκοπήσεις ειδικής αντίστασης, δύο τύποι διασκόπησης χρησιμοποιούνται περισσότερο. Και για τους δύο τύπους, τα ηλεκτρόδια κατανέμονται κατά μήκος μια γραμμής, το κέντρο της οποίας αποτελεί τη θέση της βυθοσκόπησης. Η πιο απλή τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, από άποψη γεωμετρίας, καλείται μέθοδος Wenner. Η πιο οικονομική σε χρόνο εργασιών υπαίθρου καλείται μέθοδος Schlumberger.

6.2 Διάταξη Wenner

Για μία διασκόπηση με τη μέθοδο Wenner, τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (πράσινο) και τα δυο ηλεκτρόδια δυναμικού (κόκκινο) τοποθετούνται σε μία ευθεία, σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, με κέντρο της γραμμής σε κάποιο σημείο όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 28. Διάταξη Wenner

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που υπολογίζεται από τις μετρήσεις της τάσης, ΔV , και του ρεύματος, i , δίνεται από την απλή εξίσωση

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (8\beta)$$

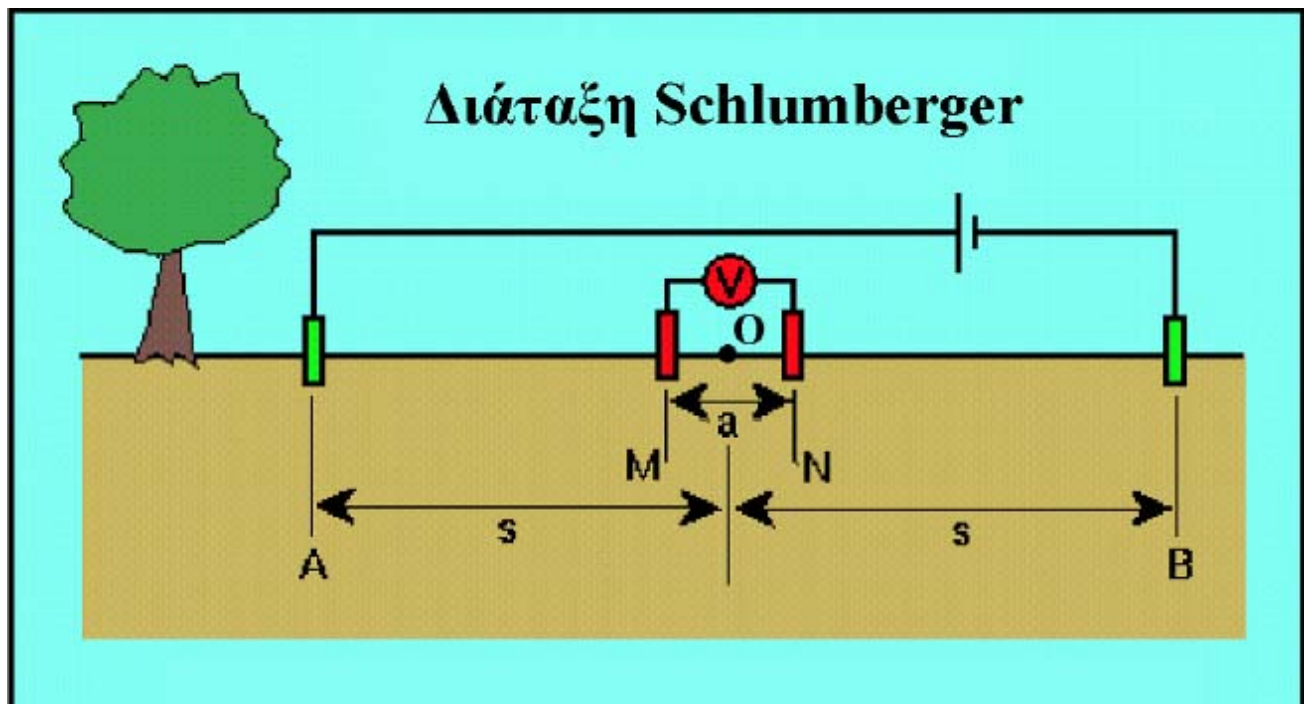
Η εξίσωση αυτή δεν είναι τίποτε περισσότερο από την έκφραση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που είδαμε προηγουμένως, όπου οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι σταθερές και ίσες με a . Για να δημιουργήσουμε ένα διάγραμμα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων, από το οποίο θα ερμηνεύσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος, πρέπει να υπολογίσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση για διαφορές τιμές της απόστασης των ηλεκτροδίων, a . Δηλαδή, αφού ολοκληρώσουμε μια μέτρηση, πρέπει να μετακινήσουμε και τα τέσσερα ηλεκτρόδια σε νέες θέσεις.

6.3 Διάταξη Schlumberger

Για την διενέργεια μιας ηλεκτρικής βυθομέτρησης Schlumberger στο πεδίο τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού διατάσσονται στο έδαφος κατά μήκος ευθείας γραμμής σε συγκεκριμένες μεταξύ τους αποστάσεις. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος όσο και τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι συμμετρικά τοποθετημένα ως προς κέντρο συμμετρίας, O , το οποίο

ονομάζεται κέντρο της διάταξης (σχήμα 29). Όμως, τα τέσσερα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού δεν ισαπέχουν μεταξύ τους όπως στη διάταξη Wenner.

Διεξάγοντας βυθομετρήσεις με διάταξη ηλεκτροδίων κατά Schlumberger η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού M, N πρέπει πάντοτε να διατηρείται μικρότερη του 40% της απόστασης AB/2. Στις μετρήσεις πεδίου απομακρύνουμε διαδοχικά τα ηλεκτρόδια ρεύματος (αυξάνουμε την απόσταση AB) ενώ διατηρούμε σταθερή την απόσταση MN. Με αυτό το τρόπο έχουμε μια γρήγορη μείωση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων δυναμικού MN, όπου από κάποια στιγμή και μετά ο θόρυβος γίνεται μεγαλύτερος του μετρούμενου σήματος ΔV στα άκρα M, N και η μέτρηση του ΔV καθίσταται αδύνατη. Σ' αυτό το σημείο μία αύξηση της απόστασης MN θεωρείται απαραίτητη, τέτοια όμως ώστε να ισχύει ο περιορισμός η MN να παραμένει μικρότερη του 40% της απόστασης AB/2, και η εργασία συνεχίζεται.



Σχήμα 29. Διατάξη Schlumberger.

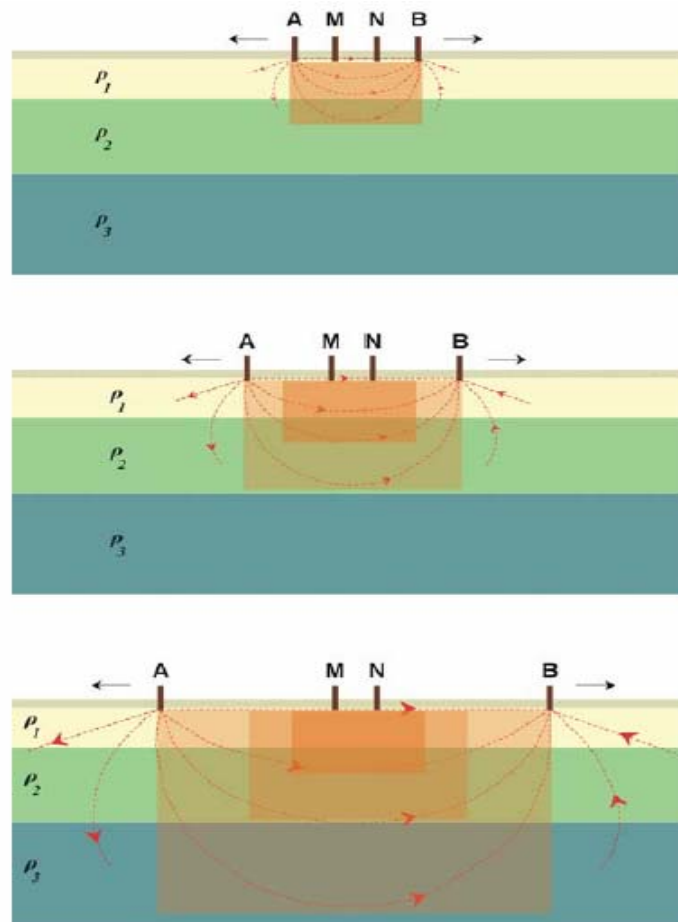
Για κάθε θέση των ηλεκτροδίων η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την σχέση (8) όπου η ποσότητα

$$K = \frac{\pi(s^2 - a^2/4)}{a} \quad (9)$$

είναι ο γεωμετρικός παράγοντας για την διάταξη Schlumberger.

Οι τιμές της ρ_a προβάλλονται ως συνάρτηση του ημι-αναπτύγματος $AB/2$ των ηλεκτροδίων ρεύματος σε διλογαριθμικούς άξονες δημιουργώντας έτσι την ηλεκτρική καμπύλη της βυθομέτρησης (sounding curve) η οποία αποτελεί το βασικό τεκμήριο για την ερμηνεία.

Καθώς η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνει ο συνολικός όγκος της γης που ελέγχεται από την μέτρηση αυξάνει επίσης, τόσο σε βάθος όσο και πλευρικά. δεδομένου ότι το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και εκείνο που αλλάζει είναι οι διαδοχικά διευρυνόμενες αποστάσεις AB είναι φανερό ότι οι διαδοχικά διευρυνόμενοι γήινοι όγκοι που ελέγχονται από τις μετρήσεις αλληλεπικαλύπτονται (σχήμα 30).



Σχήμα 30. Αλληλεπικαλύψη των γήινων όγκων καθώς αυξάνεται το εύρος των ηλεκτροδίων

Όπως και νωρίτερα είδαμε η ειδική αντίσταση μπορεί μεν στην πραγματικότητα να μεταβάλλεται τόσο με το βάθος όσο και οριζόντια, δεχθήκαμε όμως ότι για την ερμηνεία των ηλεκτρικών βυθομετρήσεων η γη θεωρείται οριζόντια στρωματωμένη όπου μέσα στο κάθε στρώμα η ειδική αντίσταση παραμένει σταθερή (ομοιογενή στρώματα) και μεταβάλλεται μόνο με το βάθος όπου αλλάζει τιμή από στρώμα σε στρώμα. Γίνεται συνεπώς αντιληπτό ότι

οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με την διαδοχική αύξηση της απόστασης AB θα σχετίζονται αυστηρά μόνον με την σε βάθος αύξηση των αλληλεπικαλυπτόμενων γήινων όγκων που αναφέραμε προηγούμενα και όχι με την πλευρική αύξηση αυτών λόγω της παραδοχής που έχουμε κάνει για πλευρικά ομοιογενή και οριζόντια στρωματωμένη γη. Έτσι, οι μετρούμενες τιμές της ειδικής αντίστασης είναι στη πραγματικότητα μέσες τιμές μεγάλων γήινων όγκων οι οποίοι συνεχώς εκτείνονται πλευρικά και σε βάθος (σχήμα 30) λόγω της διαδοχικής αύξησης της απόστασης AB.

6.4 Ρυθμός αύξησης της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος AB

Κατά την διεξαγωγή μιας γεωηλεκτρικής βυθομέτρησης οι διαδοχικές αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος AB αυξάνουν με τον ίδιο ρυθμό. Η αύξηση της απόστασης AB με ρυθμό αριθμητικής προόδου μολονότι θεωρείται ικανοποιητική διότι παρέχει επαρκή πυκνότητα σημείων για το τμήμα της καμπύλης, που αντιστοιχεί στα μικρού πάχους επιφανειακά στρώματα (μικρά αναπτύγματα αποστάσεων AB), θα δημιουργήσει εντούτοις υπερεπάρκεια σημείων για τα μεγαλύτερα αναπτύγματα AB. Η υπερεπάρκεια σημείων στα μεγαλύτερα αναπτύγματα δεν συνεισφέρει εποικοδομητικά στον ευκρινέστερο σχεδιασμό της γεωηλεκτρικής καμπύλης αλλά ούτε και στην σε βάθος υψηλότερη ανάλυση και ευκρίνεια των γεωηλεκτρικών ασυνεχειών δεδομένου ότι η γεωηλεκτρική καμπύλη μιας πλευρικά ομοιογενούς και οριζόντιας στρωματωμένης γης μεταβάλλεται πάντοτε ομαλά. Ο βέλτιστος ρυθμός αύξησης της απόστασης AB είναι προφανώς η λογαριθμική αύξηση. Με θεωρητικές μελέτες αλλά και η πράξη έχουν δείξει ότι ο ρυθμός αύξησης $\sqrt{2}$ έχει αποδειχθεί ως ο βέλτιστα αποδοτικός.

Ο πίνακας 2 είναι ένα τυπικό παράδειγμα εντύπου που χρησιμοποιείται για την καταχώρηση των μετρήσεων στα πειράματα γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων στο πεδίο με ανάπτυξη των ηλεκτροδίων κατά Schlumberger. Στην 1^η και 2^η στήλη είναι καταχωρημένη μία από τις τυποποιημένες σειρές αποστάσεων ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού που χρησιμοποιούνται στο πεδίο. Η 3^η στήλη περιέχει τις υπολογισμένες από την σχέση (9) τιμές που λαμβάνει ο γεωμετρικός παράγοντας K για κάθε συγκεκριμένο ζεύγος τιμών AB/2 και MN. Η 4^η και 5^η στήλη χρησιμοποιούνται για την καταχώρηση των μετρήσεων της διαφοράς δυναμικού και της έντασης του ρεύματος. Επειδή πολλά όργανα μετρούν απευθείας τον λόγο $\Delta V/I=R$ η 4^η και 5^η στήλη συμπύσσονται σε μία στην οποία καταχωρείται ο λόγος $\Delta V/I$ που

μετράται σε Ω. Στην 6^η στήλη καταχωρούνται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, ρ_a , που υπολογίζονται από την τιμή του K και τον λόγο $\Delta V/I$ (σχέση 8).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

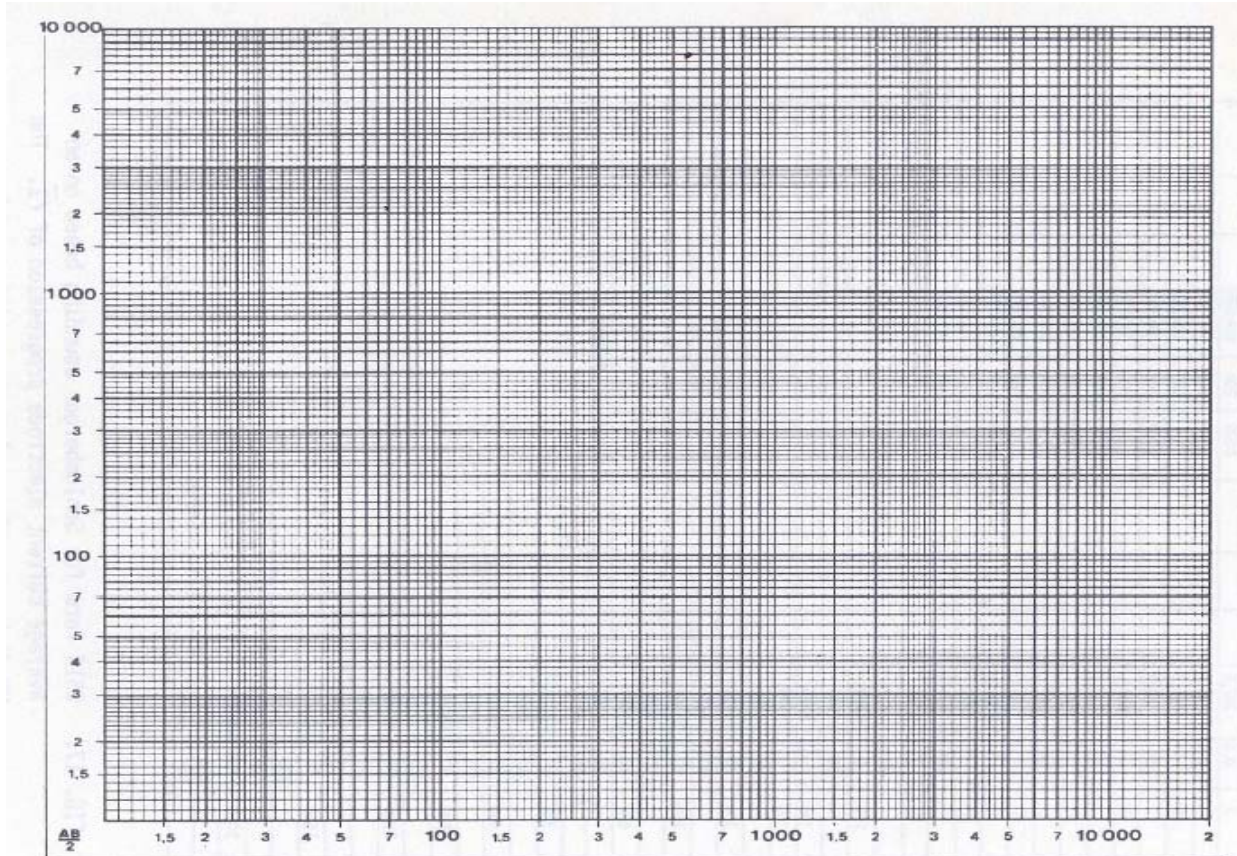
Έργο:						Περιοχή:					
Ημερομηνία:			Διεύθυνση γραμμής AB:			α/α Βυθομέτρησης:					
AB/2 μέτρα	MN μέτρα	K	ΔV mV	I mA	ρ_a Ωμέτρα	AB/2 μέτρα	MN μέτρα	K	ΔV mV	I mA	ρ_a Ωμέτρα
1	0.5	5.89				100	5	6280			
1.5	0.5	13.74				100	20	1555			
2	0.5	24.74				150	20	3520			
3	0.5	56.2				200	20	6270			
3	2	12.57				200	80	1508			
5	0.5	156.7				300	20	14120			
5	2	37.7				300	80	3471			
7	0.5	307.5				400	20	25100			
7	2	75.4				400	80	6220			
10	2	155.5				500	20	39250			
10	5	58.9				500	80	9750			
15	2	352				500	200	3770			
15	5	137.4				750	80	22000			
20	2	627				750	200	8680			
20	5	247				1000	80	39200			
30	5	562				1000	200	15550			
40	5	1001				1500	80	88300			
50	5	1567				1500	200	35200			
50	20	377				2000	80	157000			
70	5	3075				2000	200	62700			
70	20	754				2000	500	24700			

Στο σχήμα 31 παρουσιάζεται ένα τυπικό διλογαριθμικό φύλλο που χρησιμοποιείται στο πεδίο για την κατασκευή της γεωηλεκτρικής καμπύλης της κάθε βυθομέτρησης. Το κάθε σημείο της γεωηλεκτρικής καμπύλης ορίζεται από την τιμή της ρ_a (κατακόρυφος λογαριθμικός άξονας) και από την τιμή της ημι-απόστασης AB/2 (οριζόντιος λογαριθμικός άξονας) των ηλεκτροδίων ρεύματος για την οποία λήφθηκε η μέτρηση της ρ_a .

6.5 Η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού MN

Στις βυθομετρήσεις με διάταξη ηλεκτροδίων κατά Schlumberger η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού MN είναι μικρή συγκρινόμενη με την απόσταση AB των ηλεκτροδίων ρεύματος. Στη πράξη, όπως και προηγούμενα αναφέραμε το $MN \leq \frac{AB}{5}$.

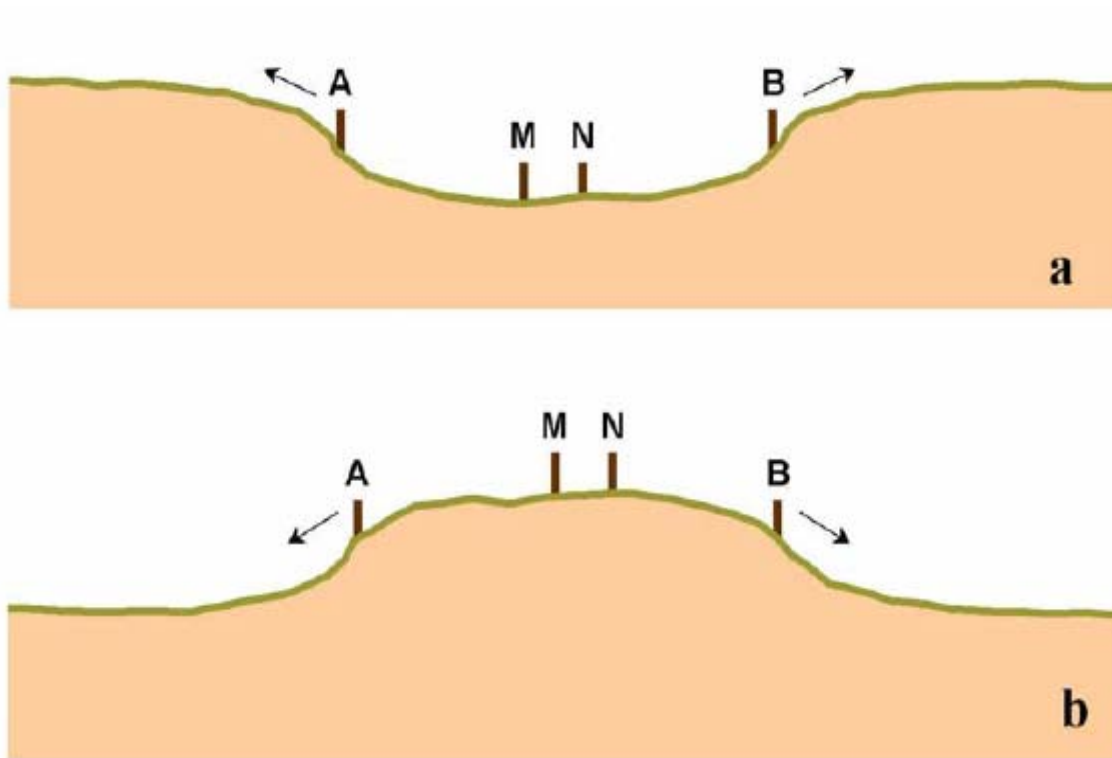
Κατά την διεξαγωγή μιας ηλεκτρικής βυθομέτρησης η απόσταση MN διατηρείται σταθερή ενόσω η απόσταση AB αυξάνει προοδευτικά. Η διατήρηση του MN σταθερού ελαχιστοποιεί την επίδραση στη μετρούμενη τιμή της ειδικής αντίστασης πλευρικών ανομοιογενειών ευρισκόμενων στη περιοχή των ηλεκτροδίων M και N. Όταν τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B απομακρυνθούν αρκετά από τα ηλεκτρόδια M και N η μετρούμενη διαφορά δυναμικού, ΔV , γίνεται πολύ μικρή με αποτέλεσμα να πλησιάζει το επίπεδο του θορύβου. Αυξάνοντας στη περίπτωση αυτή την απόσταση MN φέρνουμε στην ουσία τα ηλεκτρόδια M και N πλησιέστερα προς τις πηγές ρεύματος A και B οπότε η διαφορά δυναμικού ΔV (σήμα) αυξάνει και υπερσχύει του θορύβου. Διατηρούμε την νέα απόσταση MN σταθερή ενόσω η απόσταση AB συνεχίζει να αυξάνει προοδευτικά και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί το πείραμα.



Σχήμα 31. Τυπικό διλογαριθμικό φύλλο

6.6 Επιλογή του κέντρου της βυθομέτρησης

Η μορφή και γενικά η ποιότητα της γεωηλεκτρικής καμπύλης μιας βυθομέτρησης πολύ συχνά εξαρτώνται από το φυσικό σκηνικό της θέσης του κέντρου της βυθομέτρησης και ειδικά στις γεωηλεκτρικές βυθομετρήσεις που διερευνούν μεγάλα βάθη. Αποφεύγοντας την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων M και N πάνω σε ορατές επιφανειακές ανομοιογένειες ελαχιστοποιούμε, όπως και νωρίτερα αναφέραμε, τις επιδράσεις τους στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης. Εκτός αυτού, το ανάγλυφο του εδάφους θα πρέπει να είναι στο μέτρο του δυνατού ομαλό. Εάν τα ηλεκτρόδια δυναμικού MN τοποθετηθούν μέσα σε βαθούλωμα (κοιλότητα) του εδάφους (σχήμα 32a) η μετρούμενη διαφορά δυναμικού ΔV θα είναι ανώμαλα υψηλή όταν τα ηλεκτρόδια ρεύματος θα ανέρχονται τις κλίσεις του βαθουλώματος.



Σχήμα 32. Περιπτώσεις γεομορφολογικής ανωμαλίας

Το αντίθετο ακριβώς θα συμβεί στις μετρούμενες διαφορές δυναμικού όταν τα M, N τοποθετηθούν επάνω σε ένα λόφο και τα ηλεκτρόδια ρεύματος κατέρχονται τις κλίσεις του λόφου (σχήμα 32b).

6.7 Το ανάπτυγμα της γραμμής των ηλεκτροδίων ρεύματος AB

Γενικά οι πλευρικές ανομοιογένειες του εδάφους που παρατηρούνται στη περιοχή των ηλεκτροδίων ρεύματος A και B διαταράσσουν λιγότερο μια γεωηλεκτρική καμπύλη σε σύγκριση με τις ανομοιογένειες που παρατηρούνται στα ηλεκτρόδια δυναμικού. Όταν η γραμμή ανάπτυξης των ηλεκτροδίων ρεύματος AB συμπίπτει ή είναι παράλληλη με την παράταξη των γεωλογικών σχηματισμών και ιδιαίτερα του σχηματισμού επί του οποίου ευρίσκονται τα ηλεκτρόδια δυναμικού MN η επίδραση των πλευρικών ανομοιογενειών του εδάφους στις θέσεις των A και B καθίσταται ελάχιστη.

Όταν διεξάγονται βαθιές γεωηλεκτρικές βυθομετρήσεις όπου τα αναπτύγματα των ηλεκτροδίων ρεύματος φθάνουν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις από το κέντρο της βυθομέτρησης οι παραπάνω απαιτήσεις καταστρατηγούνται πολλές φορές όταν πρακτικοί λόγοι όπως είναι η προσβασιμότητα ή η ύπαρξη δρόμων που διευκολύνουν την ανάπτυξη των γραμμών του ρεύματος έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση των καθυστερήσεων και του κόστους των εργασιών πεδίου.

Ακολουθώντας εντούτοις τους δρόμους δεν είναι συνήθως δυνατόν τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B να τοποθετούνται σε ίσες αποστάσεις από το κέντρο ούτε είναι επίσης δυνατόν τα ηλεκτρόδια A, M, N και B να ευρίσκονται επάνω στην ίδια ευθεία. Επειδή στις περιπτώσεις αυτές δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν οι τυποποιημένες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού (πίνακας 2), οι αντίστοιχες τιμές για τον γεωμετρικό παράγοντα K δεν προκύπτουν από τον πίνακα αλλά υπολογίζονται κάθε φορά από τη σχέση (9) θέτοντας τις τιμές των s και a που μετρήθηκαν για τις συγκεκριμένες θέσεις των ηλεκτροδίων. Οι τιμές των αποστάσεων αυτών προκύπτουν συνήθως από χάρτες όπου έχουμε τοποθετήσει επάνω τις θέσεις των ηλεκτροδίων.

Όταν υπάρχει υποψία ότι η γεωηλεκτρική καμπύλη έχει επηρεασθεί από πλευρικές ανομοιογένειες στις θέσεις των ηλεκτροδίων AB μια νέα βυθομέτρηση διεξάγεται στην ίδια θέση με διαφορετικό προσανατολισμό ανάπτυξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Η νέα διεύθυνση της γραμμής AB θα πρέπει να σχηματίζει γωνία τουλάχιστο 300° με την αρχική διεύθυνση.

Στις μικρού βάθους γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (1000m AB) χρησιμοποιείται συνήθως ένα βαθμονομημένο νήμα (σχοινί) που φέρει σημάνσεις των διαδοχικών θέσεων των ηλεκτροδίων μέχρι την απόσταση $AB=100m$. Για τις μετέπειτα θέσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος AB έχουν τοποθετηθεί σημάνσεις επάνω στα ίδια τα καλώδια ρεύματος A και B. Οι εκτυλίκτριες (καρούλια) των καλωδίων παραμένουν στο κέντρο και οι άκρες των

καλωδίων σύρονται προς τις θέσεις των ηλεκτροδίων. Όταν κατά την εκτύλιξη και απομάκρυνση των καλωδίων ο χειριστής των εκτυλικτριών στο κέντρο παρατηρήσει την εμφάνιση των αντίστοιχων σημάνσεων και στα δύο καλώδια ρεύματος είναι βέβαιος ότι τα άκρα των καλωδίων έχουν φθάσει στην ορθή θέση για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων A και B στο έδαφος.

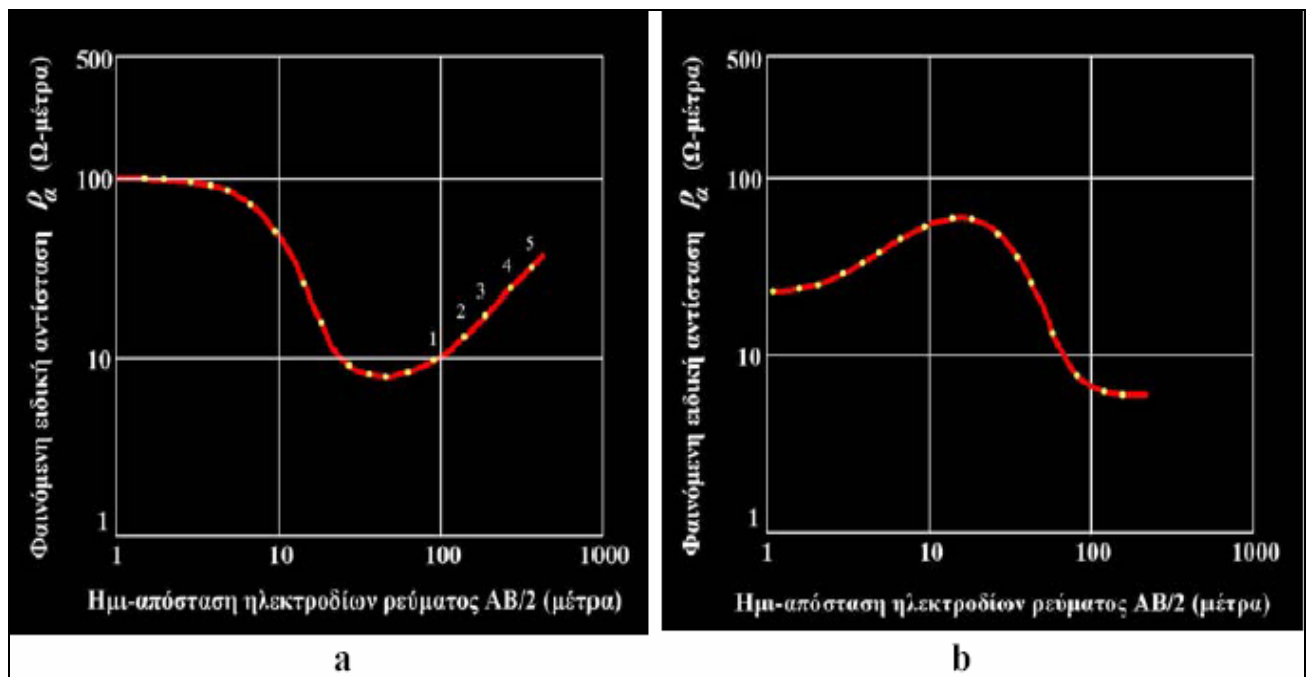
Το συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων ρεύματος στην ορθή τους θέση στο έδαφος δουλεύει πολύ καλά αλλά δεν είναι και ο μοναδικός τρόπος αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος. Στη πραγματικότητα, κάθε φορέας που διεξάγει έρευνες με την μέθοδο της ειδικής αντίστασης εφαρμόζει την δική του τεχνική για την αντιμετώπιση του προβλήματος, ο σκοπός εντούτοις είναι πάντοτε ο ίδιος: η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων στις ορθές τους θέσεις στο έδαφος μετρημένες με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια χωρίς άσκοπες καθυστερήσεις.

6.8 Το μήκος της γραμμής AB

Για καλύτερα αποτελέσματα το μέγιστο ανάπτυγμα της γραμμής AB θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να εξασφαλίσει τις απαραίτητες μετρήσεις για τον εντοπισμό της ασυνέχειας του υποβάθρου. Σαν υπόβαθρο ορίζουμε γενικά μια μεγάλου πάχους γεωλογική δομή (γρανιτικό υπόβαθρο για παράδειγμα ή μια μεγάλου πάχους ιζηματογενή ακολουθία) πάνω από την οποία ευρίσκονται τα γεωηλεκτρικά στρώματα τα οποία αποτελούν τον στόχο της γεωηλεκτρικής έρευνας.

Για να θεωρηθεί μια γεωηλεκτρική βυθομέτρηση επιτυχής θα πρέπει κανείς να μπορεί να διακρίνει ξεκάθαρα στην γεωηλεκτρική καμπύλη το τμήμα της εκείνο που αντιστοιχεί στη παρουσία του γεωλογικού υπόβαθρου. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει ο ερμηνευτής της γεωηλεκτρικής καμπύλης να γνωρίζει το εύρος κύμανσης της ειδικής αντίστασης του γεωλογικού υποβάθρου για να μπορεί να αποφανθεί αν το τελευταίο τμήμα της καμπύλης αντιστοιχεί σε αυτό.

Εάν το γεωλογικό υπόβαθρο είναι ένας αντιστατικός σχηματισμός το τελευταίο τμήμα της καμπύλης θα είναι ένας ανερχόμενος κλάδος. Στη περίπτωση αυτή η γραμμή ρεύματος AB θα πρέπει να εξαπλωθεί τόσο ώστε να εξασφαλίσει τέσσερα τουλάχιστο σημεία του ανερχόμενου κλάδου (σχήμα 33a).



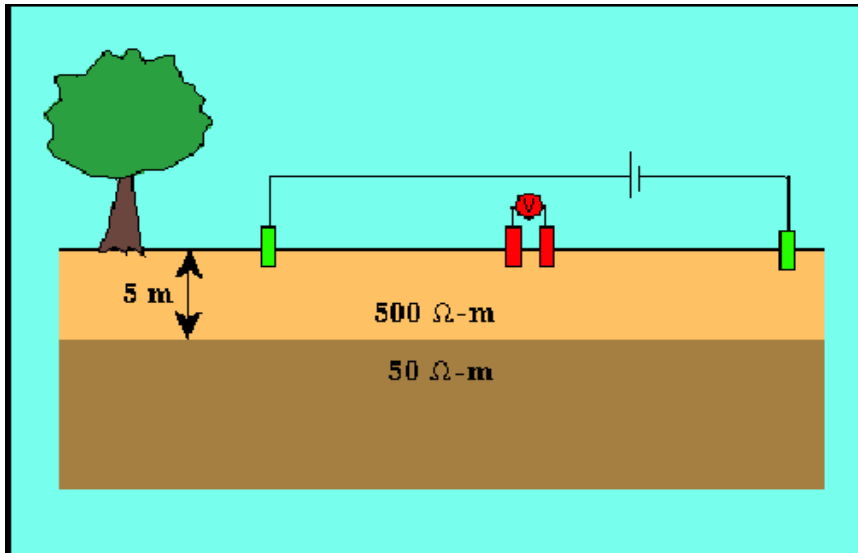
Σχήμα 33. Αντοιστιχές γεωηλεκτρικές καμπύλες

Εάν αντίθετα το γεωλογικό υπόβαθρο είναι ένας αγώγιμος σχηματισμός το τελευταίο τμήμα της καμπύλης θα είναι ένας κατερχόμενος κλάδος και η εξάπλωση της γραμμής AB θα πρέπει να συνεχισθεί έως ότου ο κατερχόμενος κλάδος της καμπύλης αρχίσει ασυμπτωτικά να οριζοντιώνεται (σχήμα 33b).

6.9 Διαγράμματα της Φαινόμενης Ειδικής Αντίστασης

Όπως παρατηρήσαμε στα προηγούμενα διαγράμματα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, τα δεδομένα σχεδιάζονται σε δι-λογαριθμικά διαγράμματα αντί για τα παραδοσιακά γραμμικά διαγράμματα. Παρατηρήσαμε επίσης ότι οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων στα διαγράμματα αυτά είναι ομοιόμορφα τοποθετημένες σε λογαριθμική απόσταση αντί να είναι ομοιόμορφα τοποθετημένες σε γραμμική απόσταση. Για ποιο λόγο έχουμε επιλέξει να λαμβάνουμε και παρουσιάζουμε τα δεδομένα με τον τρόπο αυτό;

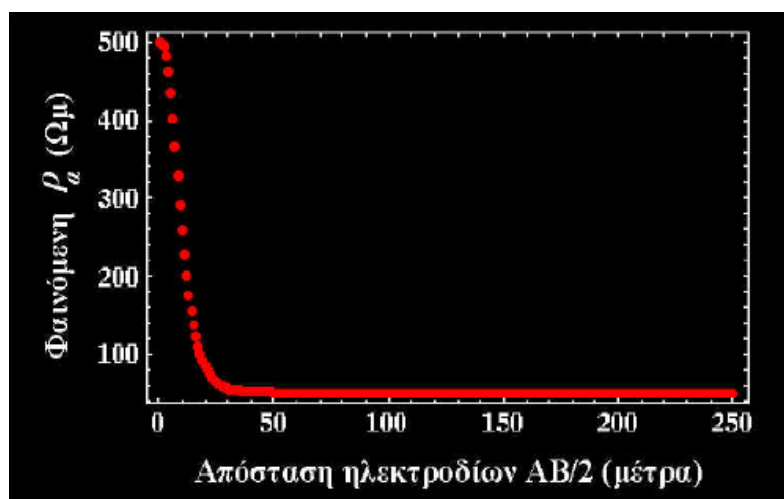
Θεωρούμε ότι πραγματοποιούμε μια βυθοσκόπηση με τη μέθοδο Schlumberger πάνω από το γεωλογικό μοντέλο του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 34. Μέθοδος Schlumberger στην περίπτωση που το ανώτερο στρώμα είναι μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης από το κατώτερο.

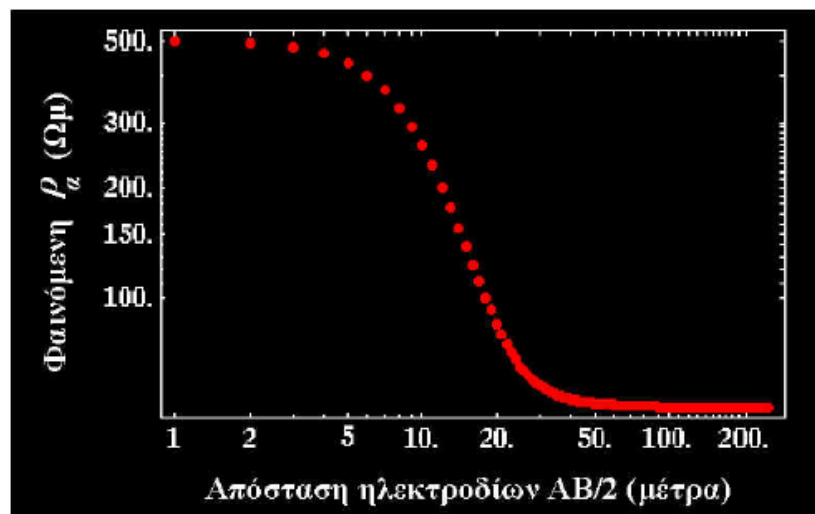
Θα πραγματοποιήσουμε τη διασκόπηση μεταβάλλοντας την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, $AB/2$, από 1 έως 250m με αύξηση κατά 1m. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα της προκύπτουσας φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων.

Γνωρίζουμε ότι για μικρές αποστάσεις των ηλεκτροδίων η φαινόμενη ειδική αντίσταση πρέπει να προσεγγίζει την ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος. Καθώς αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων, η φαινόμενη ειδική αντίσταση πρέπει να πλησιάζει την ειδική αντίσταση του ημιχώρου. Αυτά τα χαρακτηριστικά δείχνονται στο διάγραμμα. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, ωστόσο, δεν δίνεται έμφαση σε αυτά.



Σχήμα 35. Γεωηλεκτρική καμπύλη στην περίπτωση που το ανώτερο στρώμα είναι μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης από το κατώτερο.

Τα περισσότερα από τα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά της καμπύλης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης εμφανίζονται για αποστάσεις των ηλεκτροδίων μικρότερες των 50m. Όταν κοιτάμε αυτή την καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, επειδή το διάγραμμα περιέχει πάρα πολλά δεδομένα σε αποστάσεις των ηλεκτροδίων μεγαλύτερες των 50m, δεν δίνεται έμφαση στα σημαντικά δεδομένα των μικρότερων αποστάσεων των ηλεκτροδίων. Ένας τρόπος για να εμφανίσουμε την περιεχόμενη πληροφορία τόσο σε μικρές, όσο και σε μεγάλες αποστάσεις ηλεκτροδίων είναι να σχεδιάσουμε τα ίδια δεδομένα σε λογαριθμική κλίμακα παρά σε γραμμική κλίμακα. Ένα λογαριθμικό διάγραμμα με τα ίδια δεδομένα φαίνεται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι τώρα οι μικρές αποστάσεις ηλεκτροδίων καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος του διαγράμματος, έτσι που είναι πιο εύκολο να εξάγουμε πληροφορίες για το πώς η φαινόμενη ειδική αντίσταση μεταβάλλεται με την απόσταση των ηλεκτροδίων.

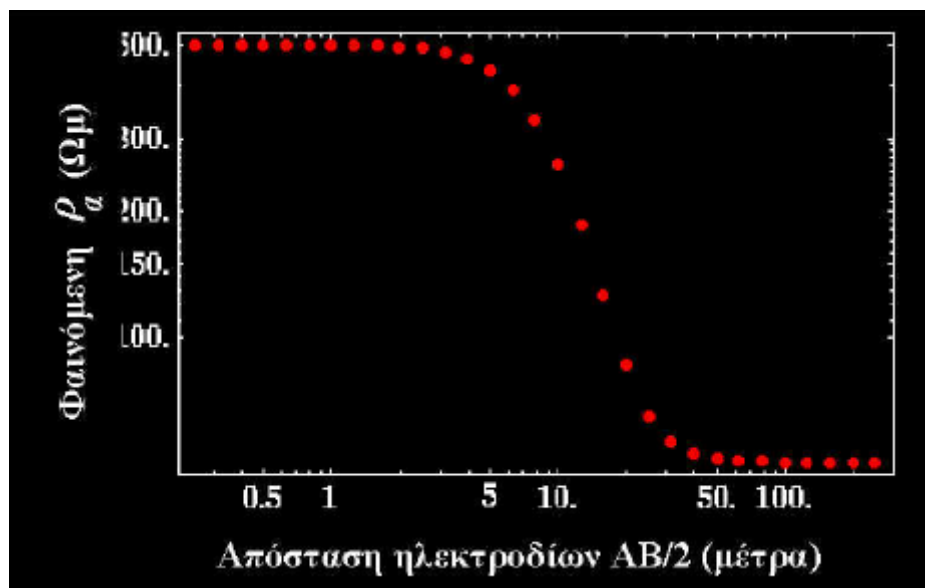


Σχήμα 36. Για την εξαγωγή καλύτερων συμπερασμάτων χρησιμοποιούμε λογαριθμικό διάγραμμα

Παρόλο που αυτό το διάγραμμα είναι καλύτερο, υπάρχει ένα ακόμα πρόβλημα σχετικά με τον τρόπο απόκτησης των δεδομένων. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν μόνο λίγες μετρήσεις για μικρές αποστάσεις των ηλεκτροδίων, οι οποίες είναι περίπου ίσες με 500 Ωm , και πολλές για μεγαλύτερες αποστάσεις, οι οποίες είναι περίπου ίσες με 50 Ωm . Για να είμαστε σίγουροι ότι οι φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις που σχεδιάστηκαν είναι αντιπροσωπευτικές της ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια, χρειαζόμαστε περισσότερες μετρήσεις από μικρές αποστάσεις ηλεκτροδίων. Αυτό μπορεί να γίνει, αν πάρουμε λιγότερες μετρήσεις με μεγάλες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Επαναπροσδιορίζοντας

λοιπόν τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιήσουμε, δεν θα πάρουμε μόνο παρατηρήσεις που είναι πιο κατάλληλες, αλλά θα επιταχύνουμε τις εργασίες απόκτησης δεδομένων στην ύπαιθρο αφαιρώντας τις καταγραφές παρατηρήσεων που δεν περιέχουν νέες πληροφορίες.

Στις ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων επιλέγονται έτσι ώστε να είναι ομοιόμορφα κατανομημένες σε λογαριθμική απόσταση παρά ομοιόμορφα κατανομημένες σε γραμμική απόσταση για να αντεπεξέρχονται στο πρόβλημα που περιγράψαμε παραπάνω. Πιο κάτω βλέπουμε το log διάγραμμα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της log απόστασης των ηλεκτροδίων, όπου τώρα η πυκνότητα των μετρήσεων επιλέγεται να είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε λογαριθμική παρά σε γραμμική απόσταση. Τώρα υπάρχουν περίπου τόσα δείγματα μετρήσεων που δείχνουν φαινόμενη ειδική αντίσταση των 500 Ωm όσα και των 50 Ωm. Επιπλέον, το κατερχόμενο (στη συγκεκριμένη περίπτωση) τμήμα της καμπύλης που αφορά την ομαλή μετάβαση από τα 500 Ωm στα 50 Ωm είναι καλά καθορισμένο από άποψη πυκνότητας μετρήσεων.



Σχήμα 37. Φαίνεται το log διάγραμμα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της log απόστασης των ηλεκτροδίων, όπου τώρα η πυκνότητα των μετρήσεων επιλέγεται να είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε λογαριθμική παρά σε γραμμική απόσταση

Στο παραπάνω παράδειγμα, λαμβάνονται τα δεδομένα με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν 9 βυθοσκοπήσεις για κάθε δύναμη του 10 της απόστασης ξεκινώντας από τα 0.25m. Επομένως, θα πάρουμε βυθοσκοπήσεις με απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, $AB/2$, ίση με 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 5.0, 7.25, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5, 50.0, 75.0, 100.0, 125.0, 150.0, 175.0, 200.0, και 250.0 m.

6.10 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Διατάξεων Wenner και Schlumberger

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται μερικές δυνατότητες και αδυναμίες των μεθόδων βυθοσκόπησης Wenner και Schlumberger.

Schlumberger		Wenner	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απαιτείται να μετακινήσουμε μόνο τα ηλεκτρόδια ρεύματος για τις περισσότερες μετρήσεις. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά το χρόνο που απαιτείται για απόκτηση μιας βυθοσκόπησης.			Και τα 4 ηλεκτρόδια, 2 ρεύματος και 2 δυναμικού, πρέπει να μετακινηθούν για την απόκτηση κάθε καταγραφής.
	Επειδή η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι μικρή σε σχέση με την απόσταση των ηλεκτροδίων του ρεύματος, για μεγάλες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος, απαιτούνται πολύ ευαίσθητα βολτόμετρα.	Η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού αυξάνει καθώς αυξάνει η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος. Απαιτούνται λιγότερο ευαίσθητα βολτόμετρα.	
Επειδή τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά τοποθετημένα, οι επιδράσεις των πλευρικών μεταβολών της ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια μειώνονται			Επειδή όλα τα ηλεκτρόδια μετακινούνται για κάθε καταγραφή, η μέθοδος αυτή είναι πιο επιδεκτική στις πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης. Οι πλευρικές αυτές μεταβολές μπορεί να παρερμηνευτούν σημαντικά όσον αφορά στις μεταβολές της ειδικής αντίστασης με το βάθος.
	Γενικά, οι ερμηνείες που βασίζονται σε βυθοσκοπήσεις συνεχούς ρεύματος, περιορίζονται σε απλές δομές οριζόντιων στρωμάτων.		Γενικά, οι ερμηνείες που βασίζονται σε βυθοσκοπήσεις συνεχούς ρεύματος, περιορίζονται σε απλές δομές οριζόντιων στρωμάτων.

6.11 Έρευνα Οριζόντιας Μεταβολής της Ειδικής Αντίστασης

Οι διατάξεις ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού που χρησιμοποιούνται στις έρευνες οριζόντιας ή πλευρικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης διακρίνονται στις γραμμικές διατάξεις ή προφίλ ειδικής αντίστασης και στις διατάξεις χωρικής μέτρησης της βαθμίδας του πεδίου με σταθερές πηγές ρεύματος. Οι περισσότερο διαδεδομένες γραμμικές διατάξεις είναι οι διατάξεις Wenner, και Schlumberger καθώς και οι διάφορες παραλλαγές της διάταξης των δίπολων ρεύματος και δυναμικού. Στις διατάξεις χωρικής μέτρησης της βαθμίδας ανήκουν η διάταξη σταθερών σημειακών πηγών A, B (AB rectangle array) και η διάταξη γραμμικών πηγών. Η κάθε μία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή της εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος για το οποίο προορίζεται.

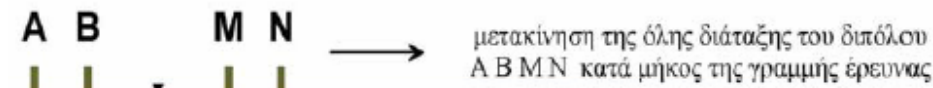
Όλες οι διατάξεις έχουν ως σκοπό την διερεύνηση της οριζόντιας ή πλευρικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης μέσα σε υπεδαφική ζώνη σταθερού περίπου πάχους. Ειδικότερα, με τις τεχνικές αυτές αναζητούνται, μέσα σε σταθερού πάχους υπεδαφικές ζώνες, δομές με πεπερασμένες πλευρικές διαστάσεις. Τέτοιες δομές μπορεί να είναι τα φυσικά ή τεχνητά έγκοιλα (σπήλαια, υπόγεια τούνελ ή γαλαρίες ορυχείων) στην τεχνική γεωλογία, οι υδροφόροι ή μη σχηματισμοί άμμων και χαλίκων (φακοί) στην υδρογεωλογία, τα υπεδαφικά υπολείμματα οικισμών ή ταφικών μνημείων στην αρχαιολογική έρευνα, οι ρηγματογόνες ζώνες, οι φλέβες μεταλλοφορίας κλπ.

6.12 Προφίλ Ειδικής Αντίστασης

Μεταξύ των διαφόρων διατάξεων περιγράφουμε τις περισσότερο διαδεδομένες που είναι οι διατάξεις δίπολου, Wenner και Schlumberger.

6.12.1 Διάταξη δίπολου

Στη διάταξη δίπολου τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και δυναμικού M, N διατάσσονται κατά τη σειρά ABMN κατά μήκος της διεύθυνσης (γραμμής) που πρόκειται να ερευνηθεί (σχήμα 38). Εν γένει τα μήκη AB και MN είναι ίσα μεταξύ τους.



Σχήμα 38. Διάταξη δίπολου

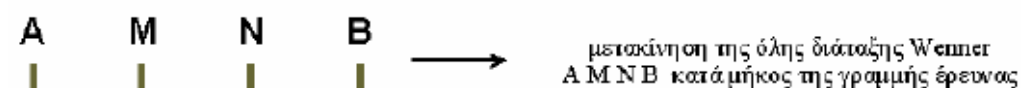
Η απόσταση BM επιλέγεται να είναι είτε ίση με την απόσταση MN ή με κάποιο πολλαπλάσιο αυτής. Εφόσον η διάταξη είναι συμμετρική το σημείο μέτρησης (κέντρο διάταξης) θεωρείται ότι είναι το μέσον της απόστασης BM . Εφόσον διερευνούμε πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης των σχηματισμών σε μία ζώνη συγκεκριμένου πάχους η διάταξη $ABMN$ κινείται ως έχει κατά μήκος της διεύθυνσης που διερευνούμε χωρίς να μεταβάλλονται οι μεταξύ των A, B, M, N αποστάσεις. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κέντρων της διάταξης είναι συνήθως ίση με την απόσταση MN .

Σε κάθε θέση της διάταξης μετράται η διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ των M, N και η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την σχέση (8) όπου η ποσότητα K είναι ο γεωμετρικός παράγοντας για την διάταξη του δίπολου. Εφόσον επιθυμούμε να διερευνήσουμε πλευρικές μεταβολές της ρ για ζώνες μεγαλύτερου πάχους επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία αυξάνοντας την απόσταση BM διότι, όπως είναι γνωστό, το βάθος έρευνας αυξάνει καθώς αυξάνει η απόσταση BM .

Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής του δίπολου είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου εμφάνισης σύζευξης ή διαρροής στα κυκλώματα ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) καθόσον είναι πλήρως απομακρυσμένα μεταξύ τους.

6.12.2 Διάταξη Wenner

Στη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και δυναμικού M, N διατάσσονται κατά τη σειρά $AMNB$ κατά μήκος της διεύθυνσης που πρόκειται να ερευνηθεί (σχήμα 39). Τα μήκη $AM = MN = NB = a$.

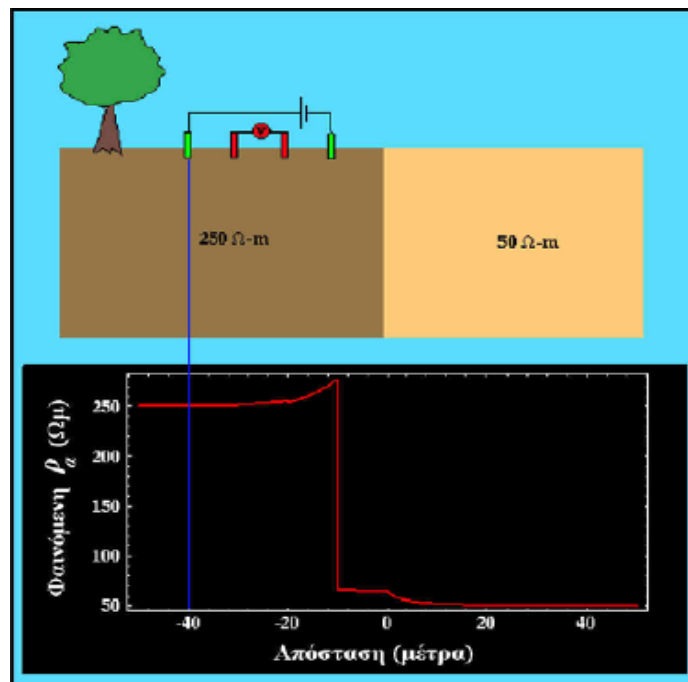


Σχήμα 39. Διάταξη Wenner

Εφόσον η διάταξη είναι συμμετρική το κέντρο της θεωρείται ότι είναι το μέσον της απόστασης MN. Εφόσον διερευνούμε πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης των σχηματισμών σε μία ζώνη συγκεκριμένου πάχους η διάταξη AMNB κινείται ως έχει κατά μήκος της διεύθυνσης που διερευνούμε χωρίς να μεταβάλλονται οι μεταξύ των A, M, N, B αποστάσεις. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κέντρων της διάταξης είναι συνήθως ίση με a.

Σε κάθε θέση της διάταξης μετράται η διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ των M, N και η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την σχέση (8) όπου η ποσότητα $K = 2\pi a$ είναι ο γεωμετρικός παράγοντας για την διάταξη Wenner. Εφόσον επιθυμούμε να διερευνήσουμε πλευρικές μεταβολές της ρ για ζώνες μεγαλύτερου πάχους επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία αυξάνοντας την απόσταση a διότι, όπως είναι γνωστό, το βάθος έρευνας αυξάνει καθώς αυξάνει η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος AB.

Στο σχήμα 40 βλέπουμε μία γεωλογική δομή η οποία περιλαμβάνει μία κατακόρυφο επαφή μεταξύ ενός υλικού υψηλότερης ειδικής αντίστασης στα αριστερά από ένα υλικό χαμηλότερης ειδικής αντίστασης στα δεξιά. Κάτω από το γεωλογικό μοντέλο φαίνεται η φαινόμενη ειδική αντίσταση που παρατηρούμε με χρήση της διάταξης Wenner, καθώς η διάταξη μετακινείται προς τα δεξιά. Η απόσταση που σημειώνεται στο κάτω άκρο του διαγράμματος είναι η απόσταση μεταξύ του κατακόρυφου ρήγματος και του ηλεκτροδίου ρεύματος που βρίσκεται στο αριστερό άκρο της διάταξης.



Σχήμα 40. Περίπτωση που έχουμε διάταξη Schlumberger και οριζόντια μεταβολή της ειδικής αντίστασης

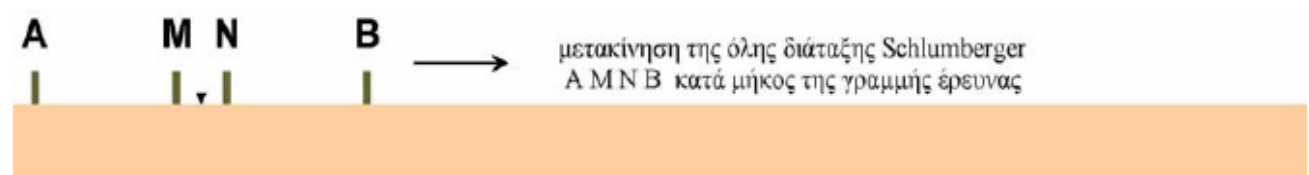
Όπως είναι αναμενόμενο, αν η διάταξη των ηλεκτροδίων βρίσκεται πολύ μακριά από το κατακόρυφο ρήγμα, η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράμε είναι ίση με την ειδική αντίσταση του υποκείμενου βράχου. Καθώς η διάταξη πλησιάζει το ρήγμα, η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται με ασυνεχή τρόπο. Δηλαδή, η μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε σχέση με τη θέση των ηλεκτροδίων δεν είναι ομαλή. Οι ασυνέχειες στο διάγραμμα της ρ_a αντιστοιχούν σε θέσεις της διάταξης όπου τα ηλεκτρόδια διέρχονται διαδοχικά πάνω από το ρήγμα (κατακόρυφη επαφή). Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλεται η φαινόμενη ειδική αντίσταση καθώς η διάταξη κινείται κάθετα στο ρήγμα εξαρτώνται από τον τύπο της διάταξης που χρησιμοποιείται. Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν θα συζητηθούν λεπτομερώς στις παρούσες σημειώσεις.

Πως μπορεί κανείς να καθορίσει τι απόσταση ηλεκτροδίων που πρέπει να χρησιμοποιήσει σε μια διασκόπηση προφίλ; Αν η κατακόρυφη δομή δεν εκτείνεται ως την επιφάνεια, η απόσταση των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μεταδίδει αρκετό ρεύμα σε βάθος κάτω από την κατακόρυφη αντίθεση. Συνήθως οι διασκοπήσεις προφίλ εφαρμόζονται σε κάθε πλευρά της κατακόρυφης δομής που επιθυμούμε να χαρτογραφήσουμε. Εξετάζοντας την ερμηνεία της μεταβολής της ειδικής αντίστασης με το βάθος για κάθε μία από αυτές τις διασκοπήσεις, μπορούμε να καθορίσουμε την απόσταση των ηλεκτροδίων του προφίλ.

6.12.3 Διάταξη Schlumberger

Στη διάταξη Schlumberger τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού διατάσσονται κατά τη σειρά AMNB κατά μήκος της διεύθυνσης (γραμμής) που πρόκειται να ερευνηθεί

(σχήμα 41). Η απόσταση MN επιλέγεται να είναι πάντοτε $MN \leq \frac{AB}{5}$ το δε σημείο μετρήσης της διαφοράς δυναμικού, ΔV , (κέντρο της διάταξης) θεωρείται ότι είναι το μέσον της απόστασης MN (σχήμα 41).



Σχήμα 41. Διάταξη Schlumberger

Εφόσον διερευνούμε πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης των σχηματισμών σε μία ζώνη συγκεκριμένου πάχους η διάταξη AMNB κινείται κατά μήκος της διεύθυνσης που διερευνούμε χωρίς να μεταβάλλονται οι μεταξύ των A, M, N, B αποστάσεις (άκαμπτη διάταξη). Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κέντρων της διάταξης είναι συνήθως ίση με την απόσταση MN.

Σε κάθε θέση της διάταξης μετράται η διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ των M, N και η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την σχέση (8) όπου η ποσότητα K είναι ο γεωμετρικός παράγοντας για την διάταξη Schlumberger. Εφόσον επιθυμούμε να διερευνήσουμε πλευρικές μεταβολές της ρ για ζώνες μεγαλύτερου πάχους επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία αυξάνοντας την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος AB, διότι, όπως είναι γνωστό, το βάθος έρευνας αυξάνει καθώς αυξάνει η απόσταση AB.

Εφαρμόζοντας την διάταξη Schlumberger τα καλωδιακά κυκλώματα AB και MN ευρίσκονται πάντοτε πολύ κοντά μεταξύ τους έτσι ώστε ο κίνδυνος εμφάνισης σύζευξης ή διαρροής να είναι υπαρκτός.

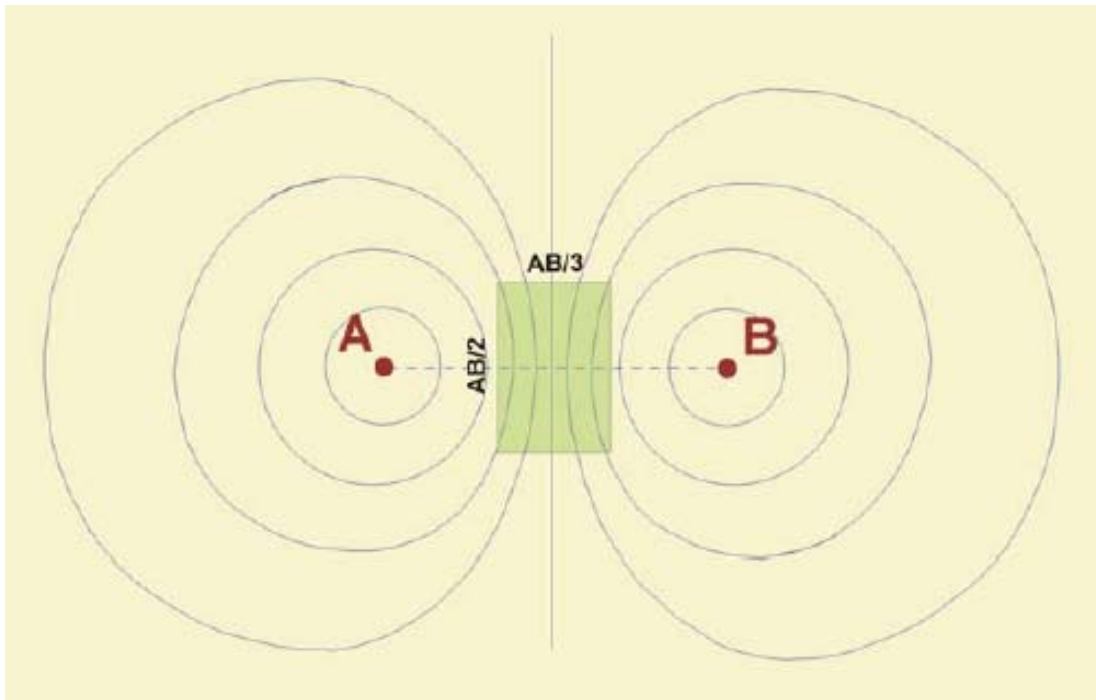
6.13 Διατάξεις χωρικής μετρήσης της βαθμίδας του πεδίου

Στις διατάξεις αυτές τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B παραμένουν σταθερά και οι μετρήσεις διενεργούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού M και N τα οποία μετακινούνται κατά μήκος παράλληλων γραμμών μέσα σε οριοθετημένη περιοχή της επιφάνειας του εδάφους. Διακρίνουμε δύο διατάξεις: την διάταξη όπου τα ηλεκτρόδια A και B είναι σημειακές πηγές ρεύματος και την περίπτωση των γραμμικών ηλεκτροδίων ρεύματος A και B.

6.14 Σημειακές πηγές ρεύματος

Στη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια A και B που ενεργούν ως σημειακές πηγές ρεύματος παραμένουν σταθερά στο έδαφος και οι μετρήσεις διενεργούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού M και N τα οποία μετακινούνται κατά μήκος γραμμών παράλληλων μεταξύ τους. Οι μετρήσεις της διαφοράς δυναμικού, ΔV , διενεργούνται μέσα σε περιοχή που οριοθετείται από τις πλευρές ορθογώνιου τοποθετημένου στο μέσον της απόστασης AB με διαστάσεις $AB/2$, εγκάρσια προς την γραμμή AB, και $AB/3$, παράλληλα προς την AB. Η όλη διάταξη

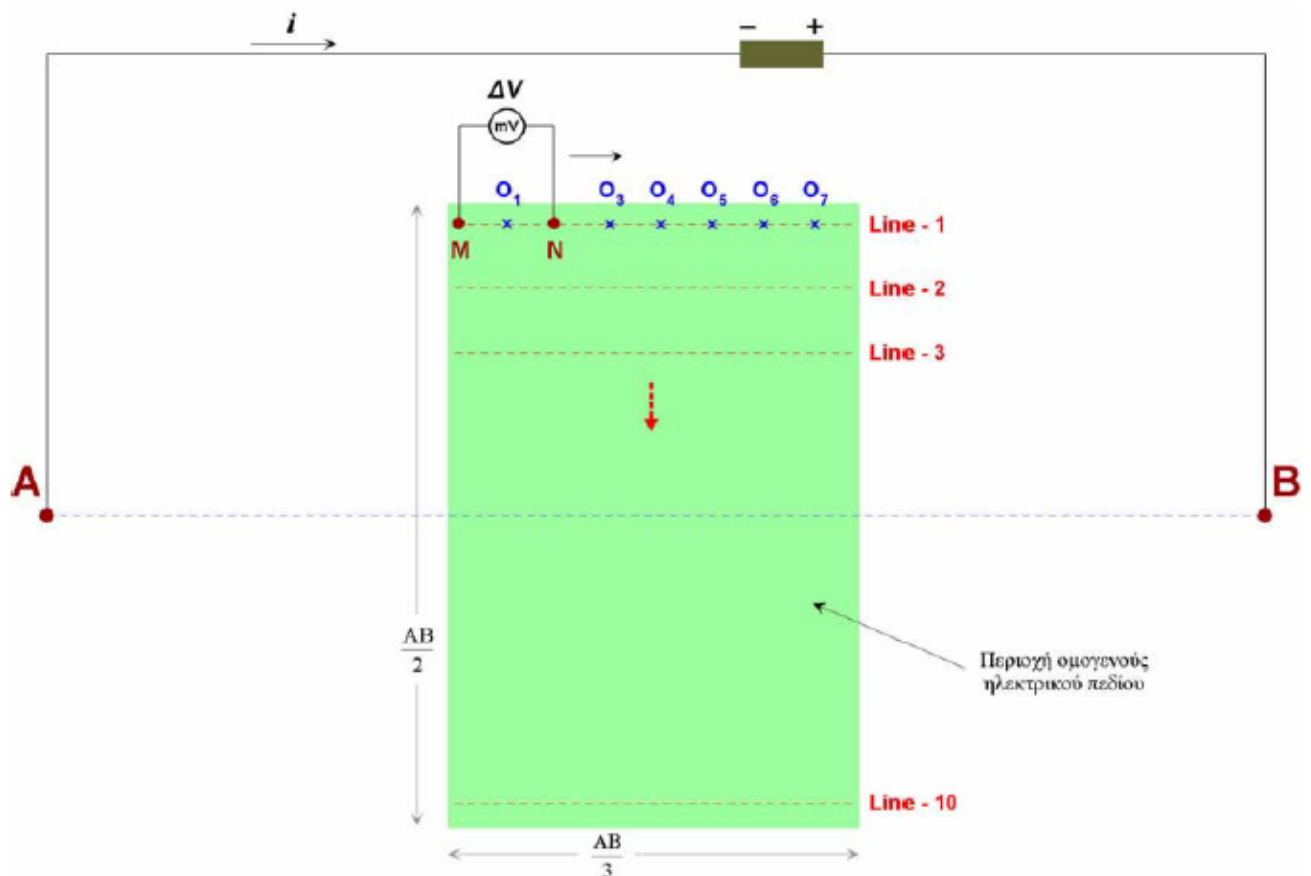
των σημειακών πηγών στο πεδίο παρουσιάζεται στο σχήμα 13, όπου τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B είναι σημειωμένα ως C₁ και C₂ και τα ηλεκτρόδια δυναμικού M και N ως P₁ και P₂.



Σχήμα 42. Οριζοντογραφία της επιφάνειας της γης

Το σχήμα 42 είναι η οριζοντογραφία της επιφάνειας της γης του σχήματος 13, όπου παρουσιάζεται το ορθογώνιο διαστάσεων $\frac{AB}{2} \times \frac{AB}{3}$ μέσα στο οποίο διεξάγονται οι μετρήσεις. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο ορθογώνιο (σχήμα 42) είναι περίπου παράλληλες μεταξύ τους, γεγονός που υποδηλώνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο στον χώρο αυτό είναι σε μεγάλο βαθμό ομογενές.

Στο σχήμα 43 παρουσιάζεται με λεπτομέρεια το κύκλωμα σύνδεσης των σημειακών πηγών A,B και η περιοχή του ορθογώνιου χώρου μέσα στον οποίο διεξάγονται οι μετρήσεις, με το δίπολο δυναμικού MN να κινείται κατά μήκος των γραμμών Line-1, Line-2. κλπ., που είναι παράλληλες προς την γραμμή AB.



Σχήμα 43. Λεπτομέρες διαγραμμά των σημειάκων πηγών

Η απόσταση MN των ηλεκτροδίων του δίπολου δυναμικού ποικίλει από 0.01 έως 0.05AB. Η κάθε μέτρηση μεταξύ των M και N αναφέρεται στο μέσον O της MN. Το βήμα μετατόπισης της άκαμπτης διάταξης του δίπολου MN κατά μήκος της γραμμής είναι συνήθως ίσο με MN ενώ η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών γραμμών Line-1, Line-2, κλπ. εξαρτάται από τις διαστάσεις του διερευνούμενου υπεδαφικού στόχου και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ MN και 5MN.

Από τις μετρούμενες τιμές του δυναμικού, ΔV , στις θέσεις O1, O2, O3 κλπ. προσδιορίζονται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_α στις αντίστοιχες θέσεις. Η τιμή της ρ_α σε κάθε θέση προκύπτει από τη γνωστή γενική σχέση

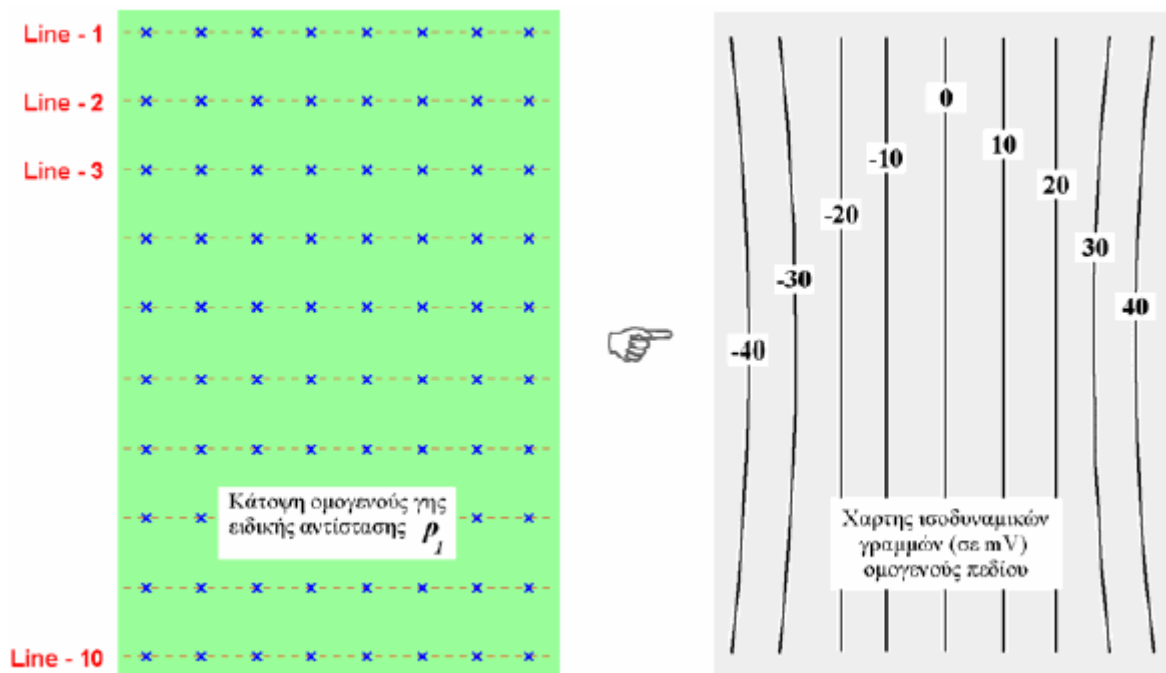
$$\rho_\alpha = K \frac{\Delta V}{I} \quad (9\alpha)$$

όπου ΔV το μετρούμενο δυναμικό και K ο αντίστοιχος γεωμετρικός παράγοντας που δίδεται από την γενική σχέση

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right)}} \quad (9\beta)$$

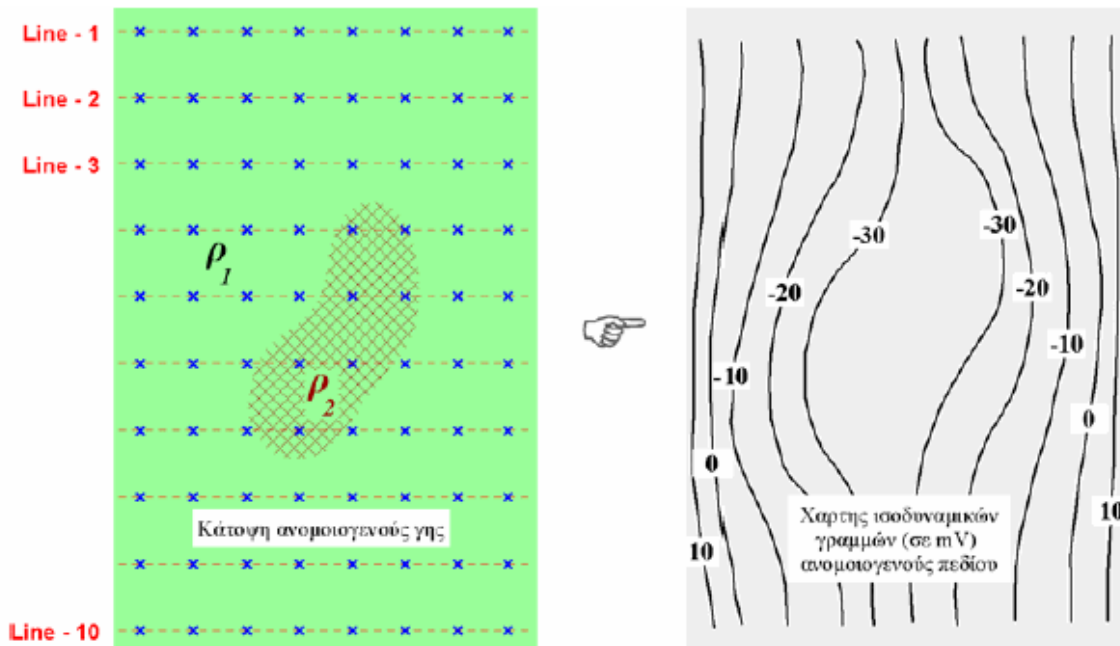
που προκύπτει από τις μετρούμενες αποστάσεις των M και N από τις πηγές ρεύματος A και B.

Στις εργασίες υπαίθρου επιδιώκουμε την δημιουργία συνθηκών ομογενούς πεδίου που σε μεγάλο βαθμό πληρούται στο συγκεκριμένο ορθογώνιο χώρο. Εάν στην διερευνούμενη υπεδαφική ζώνη η ειδική αντίσταση δεν παρουσιάζει πλευρικές μεταβολές τότε το ηλεκτρικό πεδίο θα είναι σε μεγάλο βαθμό ομογενές με συνέπεια οι δυναμικές γραμμές να είναι περίπου παράλληλες.



Σχήμα 44. Περίπτωση ομογενούς πεδίου

Την περίπτωση αυτή βλέπουμε στο σχήμα 44 όπου η απουσία ανομοιογένειας στην ειδική αντίσταση του υπεδαφικού σχηματισμού έχει σαν αποτέλεσμα οι προκύπτουσες ισοδυναμικές γραμμές του χάρτη να είναι σε μεγάλο βαθμό παράλληλες.



Σχήμα 45. Περίπτωση ανομοιογενούς

Στο σχήμα 45 παρουσιάζεται η περίπτωση ανομοιογενούς υπεδαφικής δομής. Αγώγιμος σχηματισμός ειδικής αντίστασης ρ_2 με πεπερασμένες πλευρικές διαστάσεις βρίσκεται σε περιβάλλοντα χώρο με ειδική αντίσταση ρ_1 . Στη περίπτωση αυτή έχουμε συνθήκες πλευρικής ανομοιογένειας στην ειδική αντίσταση του υπεδαφικού σχηματισμού. Οι ισοδυναμικές γραμμές του χάρτη που προκύπτει από την χαρτογράφηση των τιμών δυναμικού έχουν πάψει πλέον να είναι παράλληλες και έχουν υποστεί παραμόρφωση εξαιτίας της πλευρικής ανομοιογένειας. Η περιοχή της μέγιστης παραμόρφωσης των δυναμικών γραμμών στον χάρτη οριοθετεί την υπεδαφική θέση του στόχου στην περιοχή έρευνας.

6.15 Γραμμικές πηγές ρεύματος

Στη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B είναι μεγάλου μήκους γυμνοί ράβδοι από χαλκό σε σύζευξη με τη γη σε ολόκληρο το μήκος τους (σχήμα 15). Τα γραμμικά ηλεκτρόδια A ή C1 και B ή C2 συνδέονται μέσω καλωδίων με μια ηλεκτρική πηγή, πχ. ένα συσσωρευτή. Η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού ΔV γίνεται στο χώρο της επιφάνειας της γης που παρεμβάλλεται μεταξύ των γραμμικών ηλεκτροδίων. Τα γραμμικά ηλεκτρόδια παραμένουν σταθερά στο έδαφος και οι μετρήσεις διενεργούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού M ή P1 και N ή P2 τα οποία μετακινούνται κατά μήκος γραμμών παράλληλων μεταξύ τους.

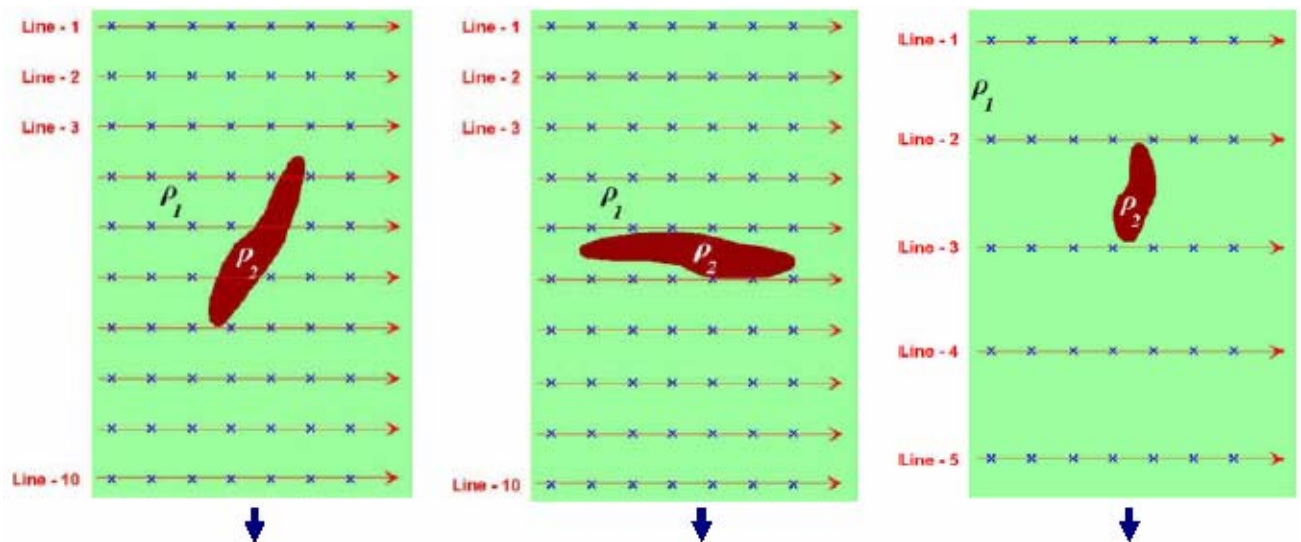
Το σχήμα 16 είναι η οριζοντιογραφία της επιφάνειας της γης του σχήματος 15, όπου παρουσιάζεται με ευκρίνεια ο μεταξύ των γραμμικών ηλεκτροδίων χώρος μέσα στον οποίο οριοθετούνται οι μετρήσεις. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο χώρο του σχήματος 16 είναι, όπως και στο αντίστοιχο κεφάλαιο έχουμε εξηγήσει, γραμμές παράλληλες μεταξύ τους, γεγονός που υποδηλώνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο στον χώρο αυτό είναι ιδανικά ομογενές.

Από τις μετρούμενες τιμές του δυναμικού, ΔV , προσδιορίζονται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_a στις αντίστοιχες θέσεις. Η τιμή της ρ_a σε κάθε θέση προκύπτει από τη γνωστή γενική σχέση

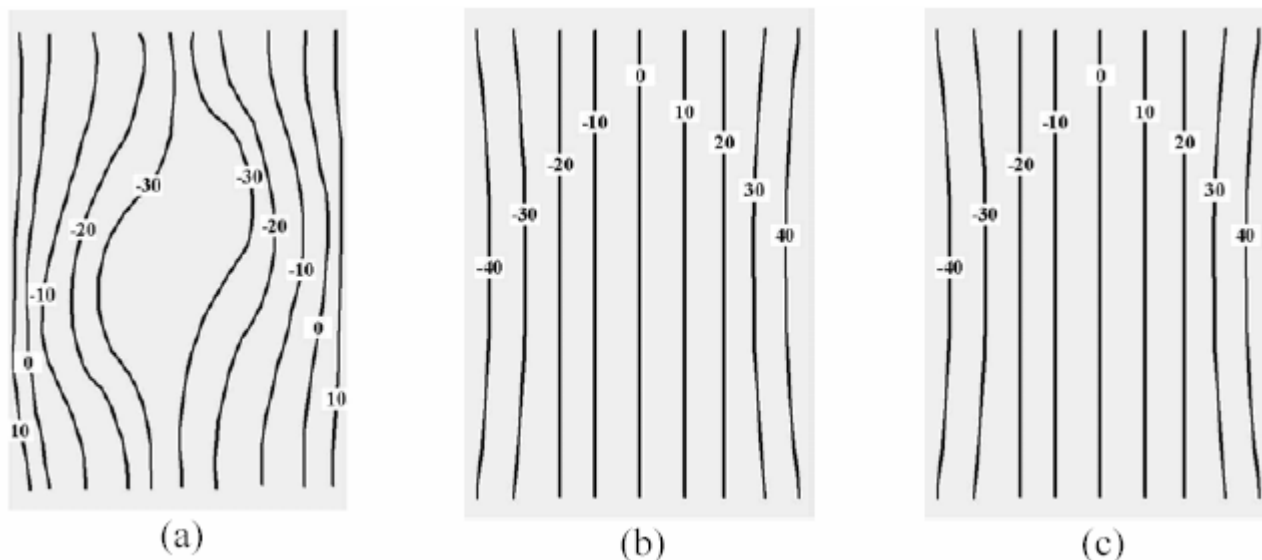
$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (9\gamma)$$

όπου ΔV το μετρούμενο δυναμικό και K ο αντίστοιχος γεωμετρικός παράγοντας που ισχύει για τα γραμμικά ηλεκτρόδια.

Η ποιοτική ερμηνεία των ισοδυναμικών γραμμών ή των ισότιμων καμπύλων φαινόμενης ειδικής αντίστασης, ρ_a , που προκύπτουν από την χαρτογράφηση των μετρήσεων στις διάφορες θέσεις είναι ακριβώς η ίδια όπως και στη περίπτωση των σημειακών πηγών ρεύματος που εξετάσαμε στη προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 46. Περιπτώσεις που έχουμε ανομοιόγενεια



Σχήμα 47. Περιπτώσεις που δεν εντοπίζεται η ανομοιογένεια

Το σχήμα 47 η περίπτωση (a) αφορά ορθή επιλογή της κατεύθυνσης και πυκνότητας των γραμμών έρευνας. Οι γραμμές είναι εγκάρσιες στην παράταξη και διέρχονται αρκετές εξ αυτών πάνω από τον στόχο με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται το μέγιστο προσδοκώμενο αποτέλεσμα σε ότι αφορά την παραμόρφωση των δυναμικών γραμμών του μετρούμενου ηλεκτρικού πεδίου. Η περίπτωση (b) αφορά κακή επιλογή της κατεύθυνσης των γραμμών έρευνας με αποτέλεσμα η χαρτογράφηση των δυναμικών γραμμών του πεδίου να μην προδίδει την ύπαρξη του στόχου. Η περίπτωση (c) αφορά ανεπαρκή πυκνότητα γραμμών έρευνας έτσι ώστε καμία εξ αυτών να διέρχεται πάνω από το στόχο με αποτέλεσμα οι δυναμικές γραμμές του πεδίου να μην προδίδουν και σ' αυτή τη περίπτωση την ύπαρξη του στόχου.

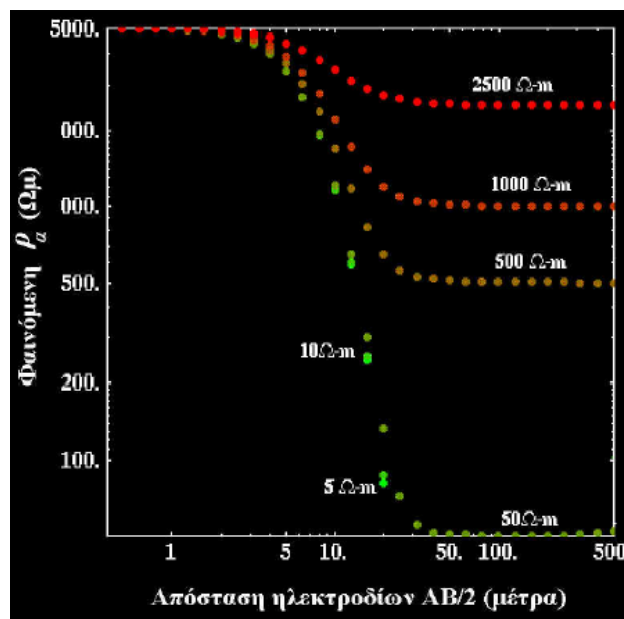
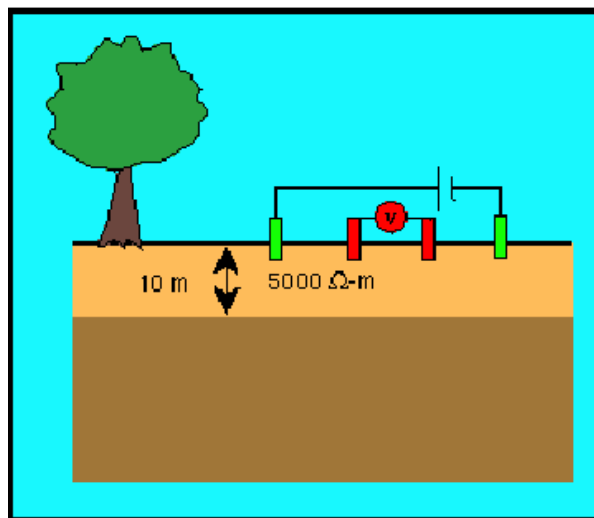
6.16 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων- Γεωηλεκτρικές βυθομετρήσεις-Καμπύλες γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων πάνω από Μέσο ενός Στρώματος

Έχουμε ήδη δει παραδείγματα καμπυλών φαινόμενης ειδικής αντίστασης που παράγονται πάνω από δομές της γης, οι οποίες αποτελούνται από ένα μόνο στρώμα πάνω από έναν ημιχώρο. Θα εξετάσουμε τώρα τις καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που παράγονται πάνω από αυτές τις δομές με πιο συστηματικό τρόπο. Τα παραδείγματα που δείχνονται στις επόμενες σελίδες έχουν προκύψει με χρήση της διάταξης Wenner. Αν

χρησιμοποιούσαμε τη διάταξη Schlumberger τα συμπεράσματά μας δεν θα άλλαζαν σημαντικά.

Έστω ότι μετρούμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση πάνω από τη δομή που βλέπουμε στο σχήμα δεξιά. Ένα στρώμα πάχους 10m, ειδικής αντίστασης 5000 Ωm, υπέρκειται ενός ημιχώρου, του οποίου η ειδική αντίσταση είναι πάντα μικρότερη των 5000 Ωm.

Στο διάγραμμα του σχήματος 48 έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που υπολογίστηκαν για διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης του ημιχώρου (2500, 1000, 500, 50, 10, 5 Ωm). Παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα το χαμηλότερο όριο φαινόμενης ειδικής αντίστασης έχει οριστεί στα 50 Ωm. Οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης των 10 και 5 Ωm εκτείνονται κάτω από το κατώτερο όριο του διαγράμματος.

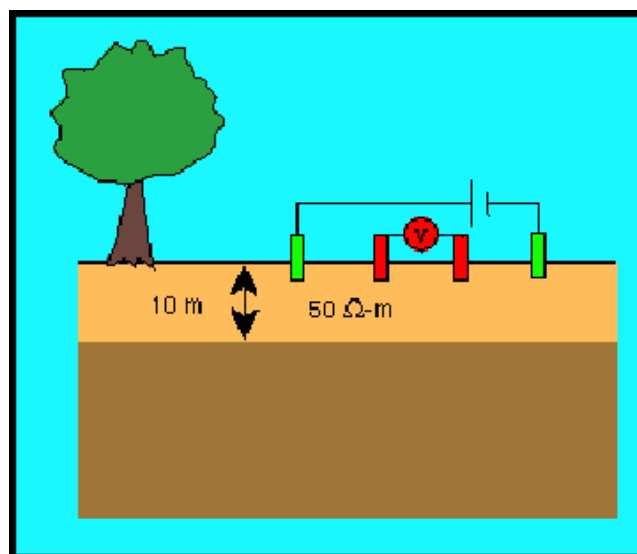


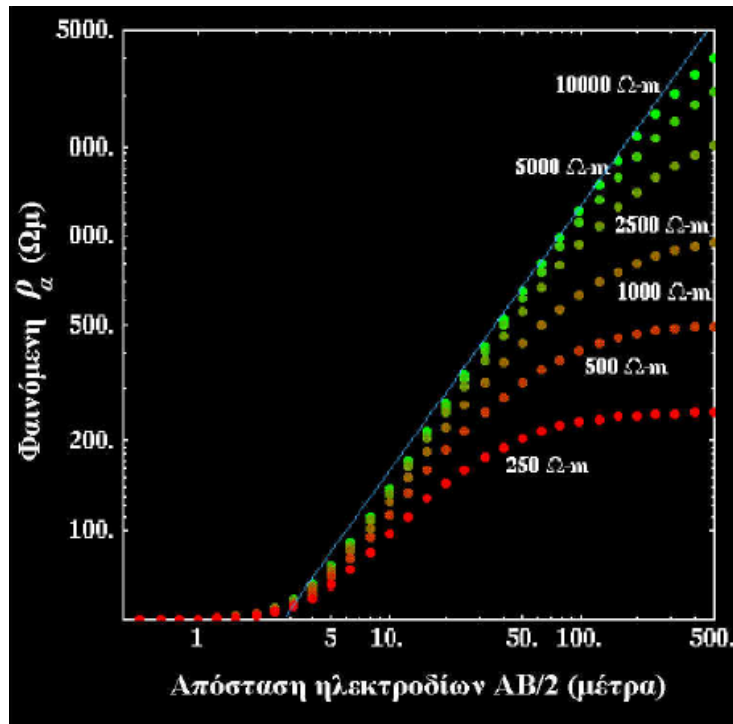
Σχήμα 48. Γεωηλεκτρικές καμπύλες όταν το επιφανειακό στρώμα είναι μεγάλης ειδικής αντίστασης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συμπεριφέρονται ακριβώς όπως περιμέναμε βάσει των παρατηρήσεων μας από τα προηγούμενα παραδείγματα. Όλες οι καμπύλες προσεγγίζουν ασυμπτωτικά την ειδική αντίσταση του στρώματος, 5000 Ωm , για μικρές αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων αυξάνει, οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πλησιάζουν ασυμπτωτικά την πραγματική ειδική αντίσταση του ημιχώρου (αυτό ισχύει ακόμα και για τις καμπύλες των 10 και 5 Ωm , απλά δεν τις έχουμε σχεδιάσει επειδή είναι πολύ μικρές). Επιπλέον, επισημαίνουμε ότι όλες οι καμπύλες τείνουν να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε σχέση με την απόσταση των ηλεκτροδίων (δηλαδή τη μεγαλύτερη κλίση) όταν η απόσταση των ηλεκτροδίων γίνεται σχεδόν ίση με το βάθος του στρώματος, δηλαδή 10 μέτρα.

6.17 Καμπύλες γεωηλεκτρικών βοθομετρήσεων πάνω από Μέσο ενός Στρώματος

Θεωρούμε τώρα τις καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που παράγονται πάνω από ένα μέσο ενός στρώματος, στο οποίο η ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος είναι μικρότερη από την ειδική αντίσταση του ημιχώρου. Ένα παράδειγμα αυτού του τύπου δομής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ένα στρώμα πάχους 10 μέτρων και ειδικής αντίστασης 50 Ωm υπέρκειται του ημιχώρου ο οποίος έχει ειδική αντίσταση, η οποία είναι πάντοτε μεγαλύτερη από 50 Ωm .





Σχήμα 49. Γεωηλεκτρικές καμπύλες όταν το επιφανειακό στρώμα είναι μεγάλης ειδικής αντίστασης

Στο διάγραμμα του σχήματος 49 έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, οι οποίες έχουν υπολογιστεί για διάφορες τιμές της ειδικής αντίστασης του ημιχώρου (250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000 Ωm). Το παράδειγμα αυτό δεν είναι τόσο απλό όσο το προηγούμενο. Όπως προηγουμένως, όλες οι καμπύλες πλησιάζουν ασυμπτωτικά την ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος, 50 Ωm, για μικρές αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Για μεγάλες αποστάσεις, όμως, η συμπεριφορά είναι λίγο πιο πολύπλοκη. Αν η ειδική αντίσταση του ημιχώρου δεν είναι πολύ μεγαλύτερη από την ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος, τότε η φαινόμενη ειδική αντίσταση προσεγγίζει ασυμπτωτικά την ειδική αντίσταση του ημιχώρου για εφικτές αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Καθώς, όμως, η ειδική αντίσταση του ημιχώρου αυξάνει η ασυμπτωτική συμπεριφορά της φαινόμενης ειδικής αντίστασης εμφανίζεται μόνο σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις των ηλεκτροδίων.

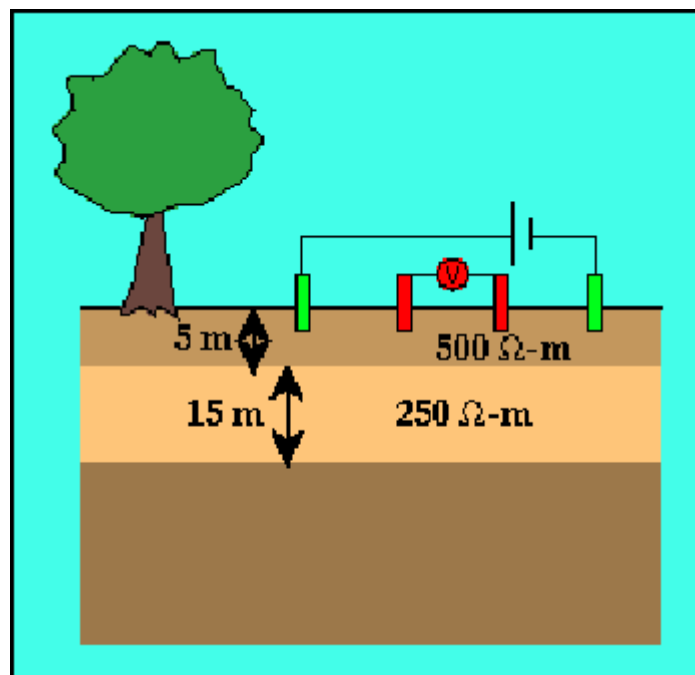
Στο παράδειγμα αυτό, παρατηρούμε ότι πάνω από τις τιμές για την απόσταση των ηλεκτροδίων που έχουμε δεχτεί (0.5 έως 500m), η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης δεν προσεγγίζει ποτέ την ειδική αντίσταση του ημιχώρου για ημιχώρο με ειδική αντίσταση πάνω από 2500 Ωm. Αντιθέτως, η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης προσεγγίζει μία ευθεία γραμμή με κλίση 45° (μπλε γραμμή). Επίσης παρατηρούμε ότι για σχετικά μικρές τιμές της ειδικής αντίστασης του ημιχώρου, όπως είδαμε και στο

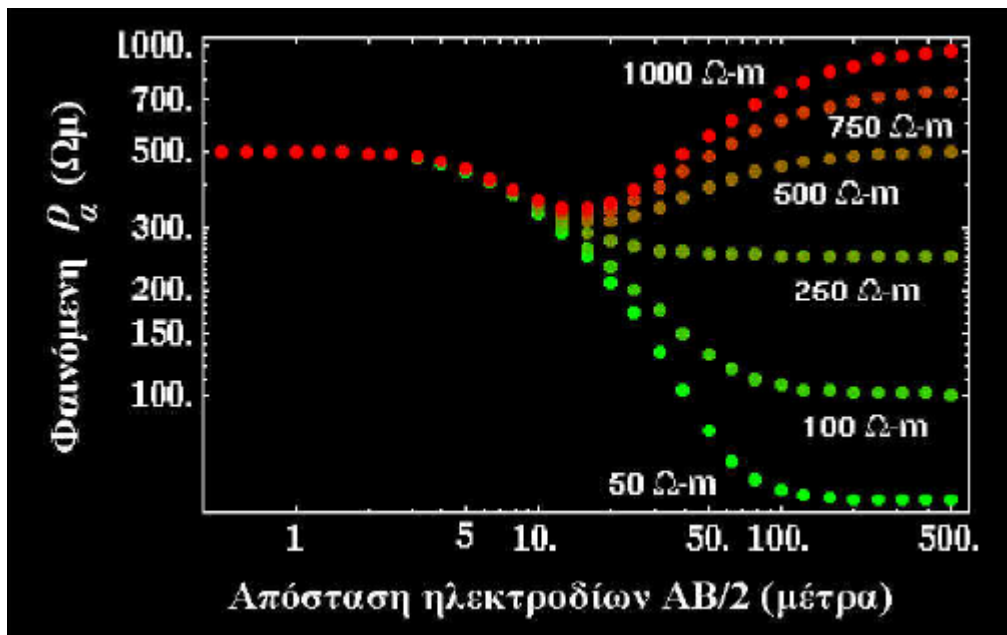
προηγούμενο παράδειγμα, η απόσταση των ηλεκτροδίων στην οποία παρατηρείται η μεγαλύτερη μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων (κλίση) είναι σχεδόν ίση με το πάχος του στρώματος. Ωστόσο, καθώς η ειδική αντίσταση του ημιχώρου αυξάνει, η απόσταση των ηλεκτροδίων στην οποία παρατηρούμε τη μεγαλύτερη μεταβολή στην φαινόμενη ειδική αντίσταση μεταφέρεται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από το πάχος του στρώματος.

6.18 Καμπύλες γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων πάνω από Μέσο Δύο Στρωμάτων

Σε ένα μέσο που αποτελείται από περισσότερα από ένα στρώματα πάνω από τον ημιχώρο, η δυναμική απόκριση στις βυθοσκοπήσεις ειδικής αντίστασης είναι αρκετά πλούσια.

Σ' αυτή την εργασία, θα παρουσιάσουμε μόνο δύο παραδείγματα καμπύλων ειδικής αντίστασης πάνω από ένα μέσο δύο στρωμάτων. Οι γεωφυσικοί επιστήμονες που ειδικεύονται στην ανάλυση των βυθοσκοπήσεων έχουν κατατάξει την δυναμική απόκριση πάνω από αυτές τις δομές σε έναν αριθμό πρότυπων καμπυλών. Εμείς δεν κρίνεται απαραίτητο να εξετάσουμε όλους αυτούς τους τύπους καμπυλών αλλά μόνο μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα.





Σχήμα 50. Περίπτωση που υπάρχουν τρία ανομοιογενή οριζόντια στρώματα

Θεωρούμε τη δομή του παραπάνω σχήματος, η οποία αποτελείται από δύο στρώματα (το ανώτερο έχει πάχος 5m και ειδική αντίσταση 500 Ωm, ενώ το κατώτερο πάχος 15m και ειδική αντίσταση 250 Ωm) τα οποία υπέρκεινται του ημιχώρου. Στο σχήμα 50 έχει σχεδιαστεί ένα σετ καμπυλών ειδικής αντίστασης, κάθε μία από τις οποίες έχει δημιουργηθεί θεωρώντας διαφορετική ειδική αντίσταση για τον υποκείμενο ημιχώρο (οι τιμές ειδικής αντίστασης που βλέπουμε δίπλα σε κάθε καμπύλη υποδεικνύει την τιμή της ειδικής αντίστασης του ημιχώρου).

Για μικρές αποστάσεις των ηλεκτροδίων, όλες οι καμπύλες προσεγγίζουν ασυμπτωτικά την ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος. Στο συγκεκριμένο μοντέλο παρατηρούμε ότι αν η ειδική αντίσταση του ημιχώρου είναι μεγαλύτερη από την ειδική αντίσταση του κατώτερου στρώματος, οι επιδράσεις των τριών μέσων μπορούν να διακριθούν στην καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων μεγαλώνει, η ειδική αντίσταση αρχικά μειώνεται και στην συνέχεια αυξάνεται για μεγαλύτερες αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Τελικά, για πολύ μεγάλες αποστάσεις των ηλεκτροδίων, η φαινόμενη ειδική αντίσταση πλησιάζει την ειδική αντίσταση του ημιχώρου. Στο χαμηλότερο σημείο της καμπύλης, όμως, η φαινόμενη ειδική αντίσταση δεν πλησιάζει τα 250 Ohm·m, δηλαδή την ειδική αντίσταση του μεσαίου μέσου. Είναι όμως δυνατόν να διακριθεί η παρουσία των τριών στρωμάτων και να υπολογιστεί ποιοτικά η ειδική αντίσταση του καθενός (π.χ. η ειδική αντίσταση του πρώτου στρώματος είναι 500 Ohm·m, η ειδική αντίσταση του δεύτερου είναι μικρότερη, η ειδική αντίσταση του ημιχώρου είναι ίση με την

τιμή που προσεγγίζει η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για μεγάλες αποστάσεις ηλεκτροδίων).

Καθώς η ειδική αντίσταση του ημιχώρου μειώνεται, η κατάσταση γίνεται πιο ασαφής. Για μικρές αποστάσεις των ηλεκτροδίων οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συνεχίζουν να προσεγγίζουν την ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος. Καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων αυξάνεται, η φαινόμενη ειδική αντίσταση μειώνεται, μέχρι που πλησιάζει την ειδική αντίσταση του ημιχώρου. Για τα μοντέλα αυτά, οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που παράγονται μοιάζουν περισσότερο με αυτά που δημιουργούνται από τα μοντέλα ενός στρώματος. Επομένως, οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που παράγονται από αυτές τις δομές των δύο στρωμάτων μπορεί να μην διαφέρουν σχεδόν καθόλου από αυτές που παράγονται από τις δομές ενός στρώματος.

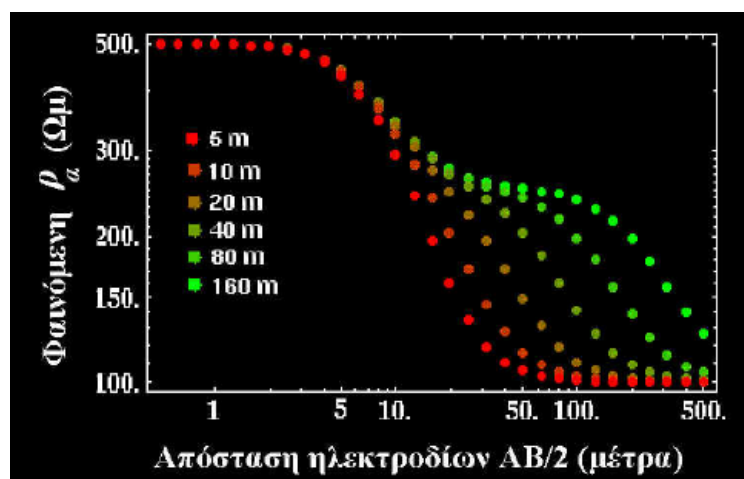
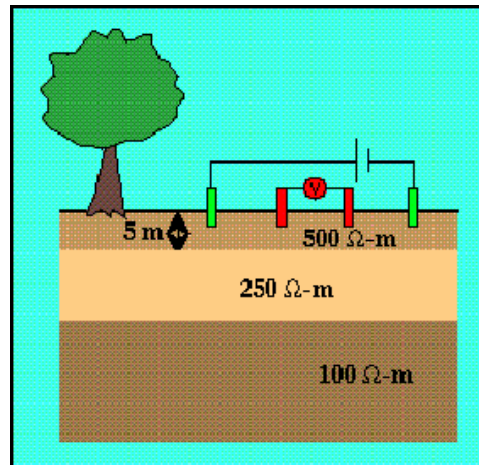
6.19 Μέσο Δύο Στρωμάτων: ένα ακόμα παράδειγμα

Σε πολλά από τα προηγούμενα παραδείγματα, το μεσαίο στρώμα δεν μπορούσε να αναγνωρισθεί σαν διακριτή μονάδα. Θα διερευνήσουμε λίγο παραπάνω αυτή την παρατήρηση μεταβάλλοντας μία ακόμα παράμετρο στο σετ των μοντέλων δύο στρωμάτων που θα αναπτύξουμε. Στα προηγούμενα παραδείγματα διατηρούσαμε σταθερές την ειδική αντίσταση και το πάχος των δύο στρωμάτων και δείχναμε πώς μεταβάλλεται η φαινόμενη ειδική αντίσταση σε σχέση με την απόσταση των ηλεκτροδίων καθώς άλλαζε η ειδική αντίσταση του ημιχώρου. Τώρα θα διατηρήσουμε σταθερή την ειδική αντίσταση των δύο στρωμάτων και του ημιχώρου και θα μεταβάλλουμε το πάχος του μεσαίου στρώματος. Στο προηγούμενο σετ μοντέλων, όπου μας δόθηκε μια επιλογή ειδικών αντιστάσεων, δεν μπορέσαμε να διακρίνουμε το μεσαίο στρώμα. Τώρα που το μεσαίο στρώμα είναι παχύτερο μπορούμε να το δούμε;

Θεωρούμε τη δομή του δεξιού σχήματος, η οποία αποτελείται από δύο στρώματα (το ανώτερο πάχους 5m και ειδικής αντίστασης 500 Ωm, το κατώτερο με μεταβαλλόμενο πάχος και ειδική αντίσταση 250 Ωm), τα οποία υπέρκεινται ενός ημιχώρου με ειδική αντίσταση 100 Ωm. Προηγουμένως, δείξαμε ότι αν το πάχος του μεσαίου στρώματος είναι 5m, η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που παράγεται πάνω από αυτό το μοντέλο δεν διακρίνεται από αυτή του μοντέλου ενός στρώματος.

Ισχύει πάντα αυτό; Ποιοτικά, θα περιμέναμε πως όχι. Για παράδειγμα, αν κάναμε το πάχος του μεσαίου στρώματος πολύ μεγάλο, θα περιμέναμε ότι η φαινόμενη ειδική

αντίσταση θα πλησίαζε την ειδική αντίσταση του μεσαίου στρώματος, καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων αυξάνεται, παρά να πλησίαζε την ειδική αντίσταση του ημιχώρου. Επομένως πρέπει να είμαστε σε θέση να ανιχνεύσουμε την παρουσία του μεσαίου στρώματος για κάποιο κρίσιμο πάχος.



Σχήμα 51. Περίπτωση που υπάρχουν τρία ανομοιογενή οριζόντια στρώματα

Στο διάγραμμα του σχήματος 51 φαίνονται οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πάνω από μοντέλα της γης με μεταβαλλόμενο πάχος του μεσαίου στρώματος. Για πάχος μικρότερο από 10m, η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης δεν διακρίνεται από αυτή που παράγεται από τη γήινη δομή ενός στρώματος. Το ανώτερο στρώμα έχει ειδική αντίσταση 500 Ωm και ο κατώτερος ημιχώρος έχει ειδική αντίσταση 100 Ωm.

Καθώς το πάχος του μεσαίου στρώματος αυξάνει, η καμπύλη της ειδικής αντίστασης συνεχίζει να μειώνεται μονοτονικά με αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων, όμως μια χαρακτηριστική προεξοχή αρχίζει να αναπτύσσεται στην καμπύλη. Η προεξοχή αυτή γίνεται

εμφανής σε πάχος 40m. Καθώς το πάχος αυξάνει, γίνεται ξεκάθαρο ότι η προεξοχή αντιπροσωπεύει μια οριζοντίωση της καμπύλης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για την ειδική αντίσταση του μεσαίου στρώματος, 250 Ωm. Επομένως, αν το μεσαίο στρώμα είναι αρκετά παχύ, μπορεί να διακριθεί στην καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Σημειώνουμε, όμως, επίσης ότι αν γίνει υπερβολικά παχύ δεν θα δούμε ποτέ την ειδική αντίσταση του ημιχώρου. Δηλαδή αν το πάχος του μεσαίου στρώματος είναι μεγάλο συγκριτικά με τη μέγιστη απόσταση των ηλεκτροδίων, η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης θα πλησιάζει και πάλι αυτήν που παράγεται από το μοντέλο ενός στρώματος. Στην περίπτωση αυτή, όμως, η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης θα προσεγγίζει ασυμπτωτικά την ειδική αντίσταση του μεσαίου στρώματος αντί την ειδική αντίσταση του ημιχώρου.

6.20 Οριζόντια (Πλευρική) Έρευνα

Οι μετρούμενες στο πεδίο φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις απεικονίζονται με έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους τρόπους: Ως μονοδιάστατες (1D) τομές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, ρ_a , (προφίλ ειδικής αντίστασης), ως δισδιάστατες (2D) τομές της ρ_a γνωστές και ως ψευδοτομές της ρ_a , και ως οριζοντιογραφίες (χάρτες) της ρ_a .

Στα μονοδιάστατα προφίλ ειδικής αντίστασης η ρ_a αναπαρίσταται στον κατακόρυφο άξονα κατά προτίμηση σε λογαριθμική κλίμακα καθώς είναι οι σχετικές μεταβολές της ρ_a που έχουν σημασία παρά οι απόλυτες τιμές αυτής.



Σχήμα 52. Προφίλ ρ_a που διεξήχθη πάνω από σχηματισμούς ασβεστόλιθων και ψαμμιτών με κατακόρυφες επαφές (Telford et al., 1976).

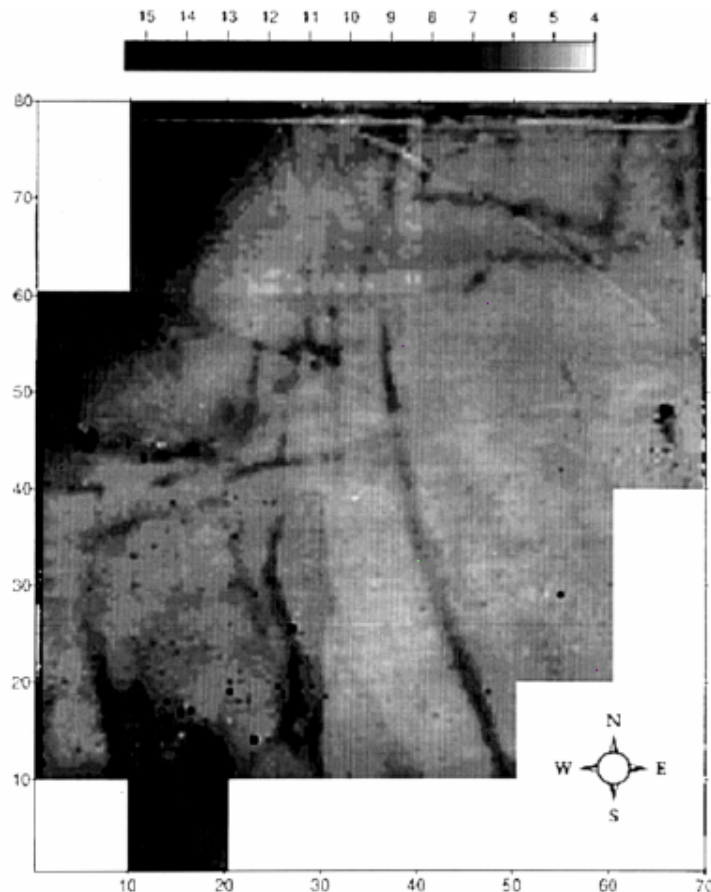
Στο σχήμα 52 παρουσιάζεται χαρτογράφηση των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης από προφίλ ειδικής αντίστασης με διάταξη Wenner που διεξήχθη πάνω από εμφανίσεις ασβεστόλιθων και ψαμμιτών που διαχωρίζονται με πρακτικά κατακόρυφες επαφές.

Οι δισδιάστατες τομές της ρ_a (ψευδοτομές) χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν μετρήσεις της ρ_a που λαμβάνονται κυρίως σε έρευνες πλευρικών μεταβολών της ειδικής αντίστασης με διαφορετικές αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος με σκοπό να διερευνήσουν και κατακόρυφες μεταβολές της ρ_a . Οι ψευδοτομές χρησιμοποιούνται επίσης για να απεικονίσουν και μετρήσεις της ρ_a που λαμβάνονται από διαδοχικές ηλεκτρικές βυθομετρήσεις.

7. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

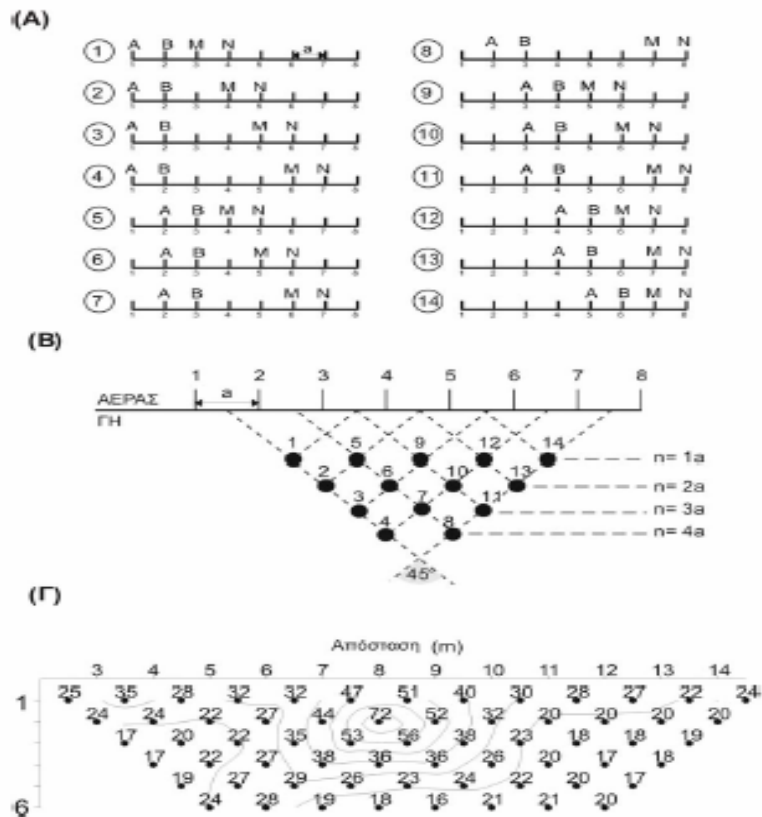
Βυθοσκόπηση (Sounding). Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να καθοριστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε συνάρτηση με το βάθος. Το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και με την συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος και διαρρέονται βαθύτεροι σχηματισμοί. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η διάταξη Schlumberger. Έτσι, μετράται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων. Η ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων γίνεται θεωρώντας ύπαρξη οριζόντιων στρωμάτων για αυτό και εφαρμόζεται κυρίως σε ιζηματογενείς λεκάνες (μονοδιάστατη γεωηλεκτρική δομή). Κλασικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών.

Όδευση (Profiling). Χρησιμοποιείται για να εντοπίζει πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τη βυθοσκόπηση, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων ως συνόλου με σταθερό βήμα. Έτσι, χαρτογραφούνται οι μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος κατά μήκος μιας όδευσης και εντοπίζονται δομές που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση με το περιβάλλον τους. Στη γεωλογία χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ρηγμάτων, φακών άμμου ή χαλικιών, επαφών, κενών κ.α., ενώ η χρήση της είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη στην αρχαιομετρία (σχήμα 53).



Σχήμα 53. Οριζόντια κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή του ιερού της Εύκλειας στην ευρύτερη περιοχή του αρχαιολογικού χώρου της Βεργίνας. Παρατηρούνται διάφορα γραμμικά στοιχεία που αποτελούν ίχνη θεμελίων (Tsokas et al., 1999).

Δισδιάστατη διασκόπηση (Συνδυασμός sounding και profiling). Με την ηλεκτρική τομογραφία, (συνδυασμός όδευσης και βυθοσκόπησης), είναι δυνατό να πάρουμε πληροφορίες τόσο για την πλευρική όσο και για την σε βάθος μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό γίνεται για παράδειγμα, με διαδοχικές οδεύσεις πάνω από την περιοχή μελέτης, με συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων. Με τον τρόπο αυτό παίρνουμε μια δισδιάστατη εικόνα της ερευνηθείσας περιοχής. Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνικές, η ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό μετρήσεων, επομένως αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και η ανάλυση της ηλεκτρικής μεθόδου. Παράδειγμα εφαρμογής της δισδιάστατης διασκόπησης με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου, φαίνεται στο σχήμα 54 (Tsourlos 1995).



Σχήμα 54. Δυσδιάστατη διασκόπηση με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου (α) Τρόπος διάταξης ηλεκτροδίων κατά τη συλλογή των δεδομένων με 8 ηλεκτρόδια και μέγιστο $n=4$ (β) Τρόπος τοποθέτηση των μετρήσεων κατά την απεικόνιση με τη μέθοδο της ψευδοτομής (γ) Ψευδοτομή δεδομένων από τον αρχαιολογικό χώρο της Ευρωπού (Tsourlos 1995).

7.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

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

Πρόδρομος της ΗΤ είναι η μέθοδος της “ψευδοτομής” που έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην χαρτογράφηση μεταλλευμάτων (Edwards 1977) αλλά και σε διάφορες άλλες

εφαρμογές (π.χ. υδρογεωλογικές, Griffiths et al. 1990). Στην διαδικασία της “ψευδοτομής” μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-διπόλου). Η HT όμως είναι πίο γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις.

Ενα από τα κύρια χαρακτηριστικά της HT είναι ότι σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές λαμβάνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων (άρα και χρήσιμης πληροφορίας). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Παράλληλα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις είναι δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων, και γι’ αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών. Πολλά τέτοια εμπορικά συστήματα (τουλάχιστον έξι) έχουν αναπτυχθεί και κυκλοφορούν στην αγορά από το 1990 και μετά, γεγονός ενδεικτικό της ανάπτυξης της HT. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι χρήση αυτών των οργάνων αυξάνει αναπόφευκτα το κόστος εφαρμογής της μεθόδου.

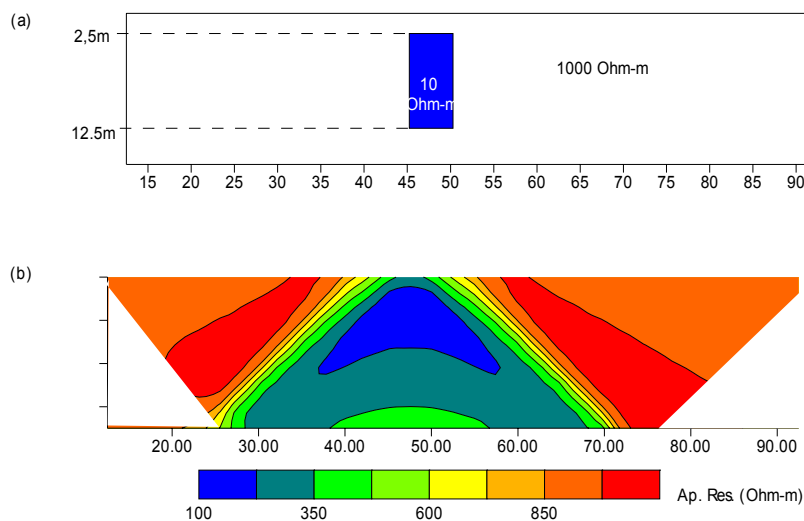
7.1.1 Ερμηνεία με ψευδοτομή

Η ερμηνεία των μετρήσεων σε πρώτο στάδιο γίνεται με τη μέθοδο της ψευδοτομής. Αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των διπόλων ρεύματος και δυναμικού, η τιμή της διαφοράς δυναμικού που μετράται επηρεάζεται από βαθύτερα στρώματα. Έτσι, στην περίπτωση της διάταξης διπόλου-διπόλου (η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη) κάθε μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποδίδεται, κατά προσέγγιση, στο σημείο τομής των δύο ευθειών που ξεκινάνε με γωνία 45° από το μέσο της απόστασης AB και το μέσο της απόστασης MN. Η ερμηνεία όμως με τη μέθοδο της ψευδοτομής είναι ιδιαίτερα δύσκολη και επισφαλής γιατί η εικόνα της κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια παραμορφωμένη εικόνα της πραγματικής κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή έρευνας. Ενα παράδειγμα της πολυπλοκότητας της εικόνας που προκύπτει με τη μέθοδο της ψευδοτομής παρουσιάζεται στο σχήμα 55.

7.1.2 Ερμηνεία με αντιστροφή

Για αυτόν τον λόγο νέες τεχνικές ερμηνείας και επεξεργασίας έχουν προταθεί. Οι τεχνικές αυτές επιδιώκουν την επίλυση του αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος είτε με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, π.χ. μέθοδος Zhody-Barker, μέθοδος οπισθοπροβολής (Tsourlos et al. 1993), είτε με τη χρήση υπαρχόντων μη γραμμικών τεχνικών αντιστροφής (π.χ. Tripp et al. 1984) που προσαρμόζονται στο πρόβλημα της HT (Tsourlos et al. 1995).

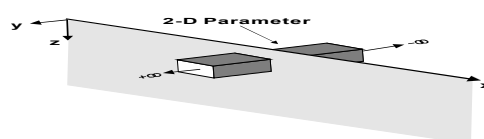
Σχήμα 55. (α) Αρχικό μοντέλο αντίστασης, (β) εικόνα ψευδοτομής δεδομένων δισδιάστατης



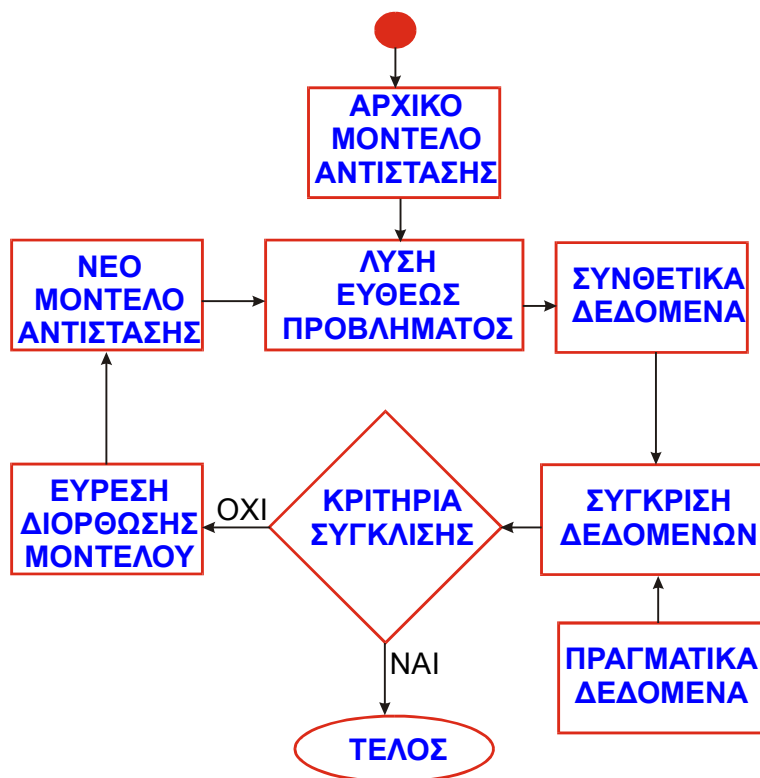
διασκόπησης που προέκυψαν από το μοντέλο του σχήματος (α).

Η πλέον δημοφιλής τεχνική για την αποκατάσταση της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις δοθείσης της κατανομής της αντίστασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, στην παρούσα μελέτη, είναι ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος λύνει τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη.

Η αντιστροφή μπορεί να γίνει δε δυο (δισδιάστατη) ή τρεις (τρισδιάστατη) διαστάσεις (Σχήμα 56)



Σχήμα 56. Γεωηλεκτρική παράμετρος δυο διαστάσεων.



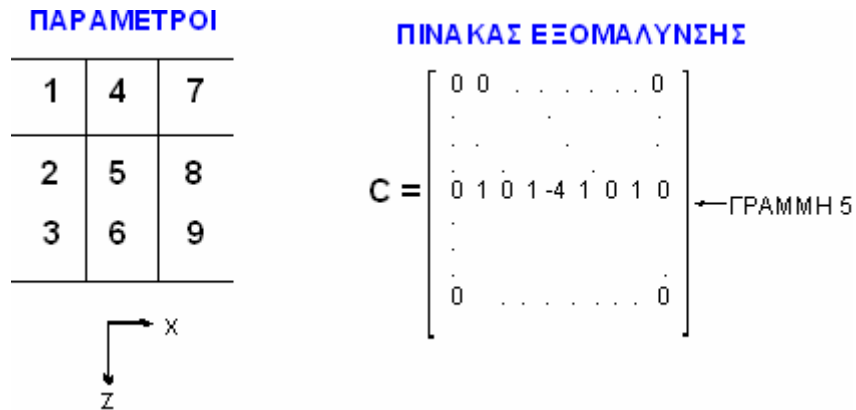
Σχήμα 57. Σχηματοποιημένη διαδικασία μη γραμμικής αντιστροφής

Στην γεωηλεκτρική μέθοδο λόγω της μη-γραμμικής φύσης του αντιστρόφου προβλήματος, οι αλγόριθμοι αντιστροφής είναι μια αυτοματοποιημένη επαναληπτική διαδικασία (Σχήμα 57). Αρχικά, η περιοχή ενδιαφέροντος διακριτοποιείται σε ένα δίκτυο από παραμέτρους στις οποίες και αποδίδεται μια αρχική τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Βάσει αυτού του μοντέλου υπολογίζονται τα αντίστοιχα συνθετικά δεδομένα, τα οποία και συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα. Λαμβάνεται έτσι μια εκτίμηση του λάθους $dy = (\text{πραγματικά δεδομένα} - \text{συνθετικά δεδομένα})$. Στη συνέχεια με μια διαδικασία αντιστροφής πινάκων γίνεται διόρθωση του αρχικού μοντέλου αντίστασης και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το λάθος dy μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών δεδομένων ελαχιστοποιηθεί. Το τελικό μοντέλο αντίστασης θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή των γεωηλεκτρικών αντιστάσεων.

Η αντιστροφή είναι ένα δύσκολο μη γραμμικό πρόβλημα. Χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές για την αποφυγή ασταθών λύσεων. Μια από τις πιο σύγχρονες τεχνικές είναι η εξομαλυσμένη αντιστροφή (Occam's). Ορίζεται πίνακας εξομάλυνσης C μεταξύ των παραμέτρων (Σχήμα 58) και ζητείται η ελαχιστοποίηση του λάθους dy σε συνδυασμό με μέγιστη εξομάλυνση:

$$S = d\mathbf{y}^T d\mathbf{y} \rightarrow 0 \ \& \ R = (\mathbf{C} d\mathbf{x})^T (\mathbf{C} d\mathbf{x}) \rightarrow \max$$



Σχήμα 58. Σχηματισμός του πίνακα εξομάλυνσης

Το μοντέλο αντίστασης \mathbf{x}^{k+1} στην επανάληψη $k+1$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + d\mathbf{x}^k = \mathbf{x}^k + (\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \mu \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \mathbf{J}_k^{-T} d\mathbf{y}^k$$

$d\mathbf{x}$ = η διόρθωση της αντίστασης .

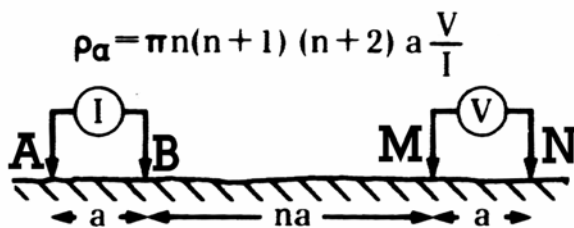
\mathbf{C} = ο πίνακας εξομάλυνσης.

\mathbf{J} = ο Ιακωβιανός πίνακας των πρώτων παραγώγων .

μ = πολλαπλασιαστής Lagrange (υπολογίζεται εμπειρικά)

7.1.3 Προγραμματισμός και λήψη μετρήσεων γεωηλεκτρικών τομογραφιών

Το πρόγραμμα εκτέλεσης γεωηλεκτρικών τομογραφιών προβλέπει την κάλυψη της περιοχής έρευνας με τρόπο τέτοιο ώστε να γίνει έλεγχος της πιθανότητας ύπαρξης εγκοίλων σε θέσεις θεμελίωσης των ανοδομών του ΧΥΤΑ και κατά δεύτερο λόγο να ελεγχθεί η πιθανότητα της περιβαλλοντικής υποβάθμισης της περιοχής του έργου. Έτσι, σκοπός των μετρήσεων ήταν να βρεθούν θέσεις επικίνδυνες για δόμηση, θέσεις με πιθανές διαρροές ρύπων στο υπέδαφος και να υπολογιστεί κατ' εκτίμηση ο όγκος των απορριμμάτων που έχουν κατ' επανάληψη αποτεθεί κατά το παρελθόν στη χαράδρα του Κουρουπητού.



Για την εφαρμογή της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης επιλέχθηκε η εφαρμογή της διάταξης διπόλου-διπόλου (dipole-dipole). Κατά την λήψη των μετρήσεων η απόσταση, a , μεταξύ

των ηλεκτροδίων των διπόλων (ρεύματος AB και δυναμικού MN) παραμένει σταθερή και η ίδια όδευση επαναλαμβάνεται αυξάνοντας κάθε φορά την απόσταση $n \cdot a$ μεταξύ B και M (ο n είναι ακέραιος). Η μέγιστη απόσταση $n_{\max} \cdot a$ εξαρτάται από τη μέγιστη ένταση που μπορεί να δώσει η πηγή μας και από τη γεωλογία (γεωηλεκτρικές αντιστάσεις) της περιοχής σε συνάρτηση με το επιθυμητό βάθος έρευνας.

Οι παράμετροι σχεδιασμού της γεωηλεκτρικής τομογραφίας καθορίστηκαν με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του γνωστού πηγαδιού και των αναμενόμενων άλλων δομών, όπως αυτά καθορίστηκαν από τις ανάγκες του ερευνητικού προγράμματος. Έτσι αποφασίστηκε:

1. **Απόσταση ηλεκτροδίων (a) 3 και 5 μέτρα** που αντιστοιχούν περίπου και στην ελάχιστη διάσταση πλάτους του αναμενόμενου στόχου.
2. **Απόσταση δίπολου ρεύματος – δίπολου μέτρησης δυναμικού ($n \cdot a$) με μέγιστο n ίσο με 8 έως 10** που αντιστοιχεί σε βάθος έρευνας περίπου 31,2m.

Πραγματοποιήθηκαν 5 τομογραφίες εκ των οποίων οι τέσσερις είχαν διεύθυνση περίπου B-N και η μία διεύθυνση A-Δ.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

- Όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης SYSCAL της εταιρείας IRIS.
- Αυτόματος πολυπλέκτης 48 καναλιών της εταιρείας IRIS.
- 2 καλώδια των 24 καναλιών
- 52 μεταλλικά (ατσάλινα με επένδυση χαλκού) ηλεκτρόδια

Σημαντικό πρόβλημα ήταν η ποιότητα του υπεδάφους από πλευράς αντίστασης δεδομένου ότι υπήρχε σοβαρό πρόβλημα με τις αντιστάσεις επαφής των ηλεκτροδίων ρεύματος. Για την καλή σύζευξη με το έδαφος χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο υγρό διάλυμα θεικού χαλκού (ζελέ χαλαζόπετρας) και ενίοτε αλατόνερο.

7.1.4 Επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρικών τομογραφιών.

Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Αρχικά έγινε η χαρτογράφηση των μετρήσεων υπαίθρου με τη μορφή ψευδοτομής. Ελέγχθηκε η ποιότητα των μετρήσεων και απορρίφθηκαν μετρήσεις με μεγάλα σφάλματα.
- Τα δεδομένα, στη συνέχεια, υποβλήθηκαν σε διδιάστατη αντιστροφή. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2DInv. Πρόκειται για αλγόριθμο που συνδυάζει την

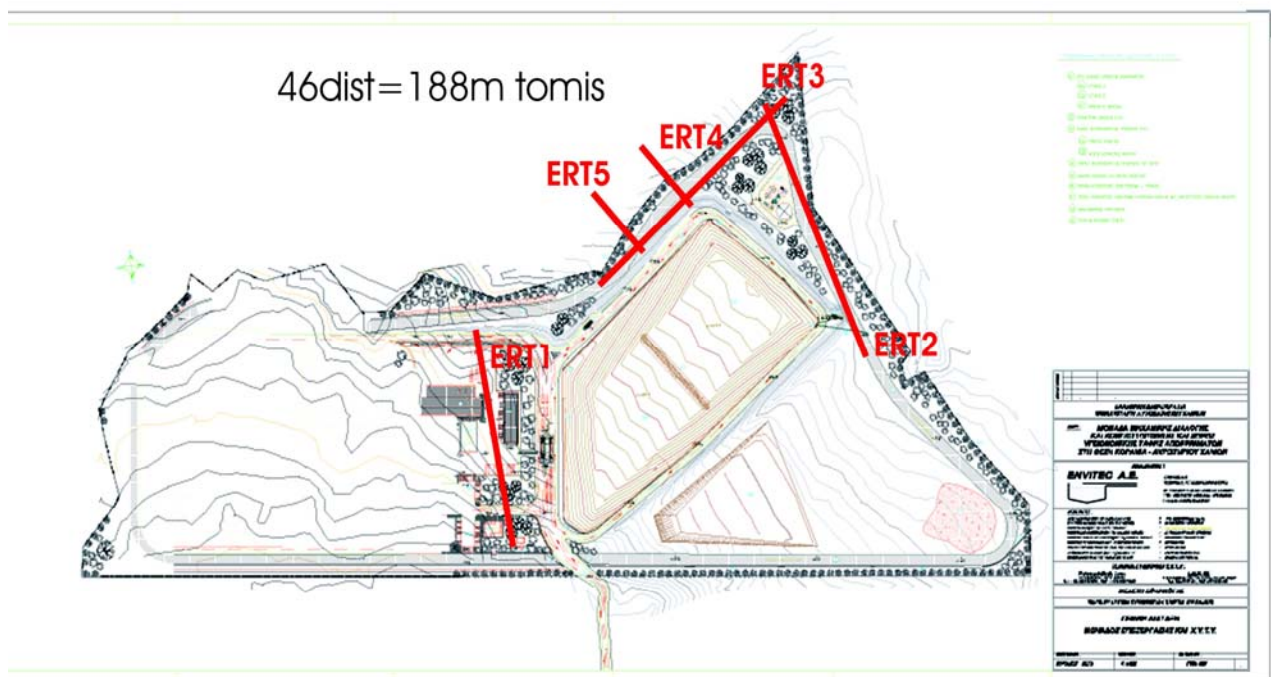
τεχνική quasi-Newton όπως αυτή τροποποιήθηκε από τον Broyden με την μέθοδο αντιστροφής του Occam (Constable, 1987) για την 2-διαστάσεων αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων. Ο αλγόριθμος είναι επαναληπτικός και σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να επιλύσει το ευθύ πρόβλημα.

- Τα αποτελέσματα της αντιστροφής χαρακτηρίζονται ως αξιόπιστα καθώς το % λάθος (RMS) για κάθε αντιστροφή (με ελάχιστες εξαιρέσεις) κυμάνθηκε μεταξύ 4-8%. Πρέπει να τονιστεί ότι σε πολλές τομογραφίες η αντιστροφή επαναλήφθηκε αρκετές φορές με διαφορετικές παραμέτρους ώστε να επιτευχθεί μια σχετική ομοιομορφία στις μέγιστες τιμές και να διευκολυνθούν έτσι οι συγκρίσεις μεταξύ τομών.
- Οι θέσεις των τομών είναι επιλεγμένες έτσι ώστε με την κατάλληλη αξιολόγηση και την αντίστοιχη ερμηνεία να είναι δυνατή η τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Έτσι, ακολούθως έγινε συνδυασμός των διδιάστατων αποτελεσμάτων έτσι ώστε να μπορεί να παρουσιαστεί και η τρισδιάστατη εικόνα της δομής του υπεδάφους.

8. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Τα πειράματα διεξήχθησαν τον Ιούνιο του 2004 στην περιοχή που βρίσκεται το εργοστάσιο κομποστοποίησης απορριμμάτων και ΧΥΤΑ των Χανίων στην περιοχή του Κουρουπητού. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι ο εντοπισμός εγκοίλων στο χώρο που έχει οικοδομηθεί το εργοστάσιο κομποστοποίησης, οι τυχόν διαρροές από το χώρο απόθεσης των απορριμμάτων καθώς και ο εντοπισμός του αρχικού σημείου που βρίσκεται ο βράχος της χαράδρας του Κουρουπητού. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, η οποία έχει τη δυνατότητα της δισδιάστατης απεικόνισης της κατανομής της γεωηλεκτρικής αντίστασης με μεγάλη διακριτική ικανότητα.

Ο εξοπλισμός αποτελείται από ένα πλήρες σύστημα εκτέλεσης γεωηλεκτρικής τομογραφίας 48 καναλιών με σκοπό την απεικόνιση της γεωηλεκτρικής δομής (Όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης SYSCAL της εταιρείας IRIS), μια μεγάλη δωδεκάβολτη μπαταρία, από δύο καρούλια όπου είναι τυλιγμένα τα καλώδια, 48 μεταλλικά ηλεκτρόδια, και τους συνδετήρες καλωδίων και ηλεκτροδίων.



Σχήμα 59. Χάρτης όπου εμφανίζεται η περιοχή στην οποία έγιναν τα μετρήσεις. Με κόκκινες γραμμές έχουν απεικονιστεί οι τομές που διεξήχθησαν.

Η πρώτη γραμμή έγινε ενδιάμεσα του χώρου που έχει οικοδομηθεί το εργοστάσιο κομποστοποίησης και του χώρου που αποτίθενται τώρα τα απορρίμματα. Στην ευρύτερη

περιοχή υπάρχουν ενδείξεις καρστικοποίησης των πετρωμάτων του υπεδάφους (φυσικά σπήλαια, έγκοιλα στα πετρώματα που έχουν έρθει στην επιφάνεια κλπ). Έτσι θελήσαμε να διαπιστώσουμε αν το υπέδαφος είναι κατάλληλο για ανοικοδόμηση.

Η δεύτερη γραμμή πραγματοποιήθηκε κατάντι του χώρου απόθεσης των απορριμμάτων. Σκοπός είναι η διαπίστωση τυχόν διαρροών από τις τρεις δεξαμενές που υπάρχουν ανάντι της γραμμής ή την πιθανότητα συγκέντρωσης ρύπων από υπόγειες διαρροές στο σημείο, που μελλοντικά θα δημιουργήσει προβλήματα στη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος της περιοχής.

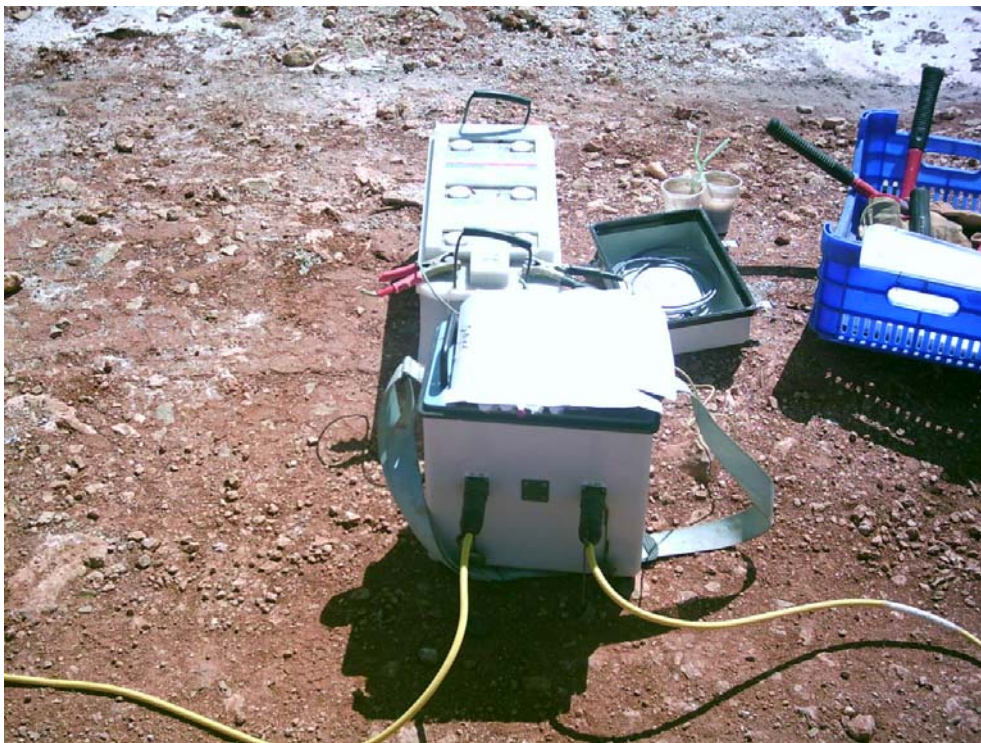
Και η τρίτη γραμμή διεξήχθη για εύρεση τυχόν διαρροών από το χώρο απόθεσης των απορριμμάτων και από την υπόγεια δεξαμενή που βρίσκεται κάτω από την εν λόγω γραμμή. Το σημείο τομής της δεύτερης και της τρίτης γραμμής βρίσκεται στο χαμηλότερο υψομετρικά σημείο του ΧΥΤΑ.

Εξαιτίας της παρουσίας κάποιων απρόβλεπτων χαμηλών αντιστάσεων στη γραμμή τρία αποφασίστηκε η εκτέλεση ακόμη δύο τομών (τέσσερα και πέντε). Ο κύριος λόγος των μετρήσεων αυτών είναι η εύρεση του σημείου που υπάρχει ο υγιής βράχος της χαράδρας του Κουρουπητού πριν την απόθεση απορριμμάτων στην περιοχή, ώστε σε περίπτωση απορρύπανσής της να είναι γνωστός ο όγκος των απορριμμάτων που έχουν αποτεθεί.

Αφού ολοκληρωθούν όλες οι συνδέσεις, των καλωδίων με τον καταγραφέα, του καταγραφέα με την μπαταρία και των καλωδίων με τα ηλεκτρόδια. Επιλέγεται το είδος της διασκόπισης που θέλουμε να πραγματοποιηθεί και ο αριθμός των ηλεκτροδίων. Υστέρα γίνεται έλεγχος εάν η διάταξη έχει συνδεθεί σωστά από τον καταγραφέα, μπορεί να εντοπιστεί για παράδειγμα εάν κάποιο ηλεκτρόδιο δεν έχει καρφωθεί σωστά ή αν έχει φύγει από την θέση του. Εδώ θα πρέπει να προσθέσουμε ότι ο καταγραφέας έχει δικιά του μπαταρία και απλός ο ρόλος του άλλου συσσωρευτή είναι ενισχυτικός.



Σχήμα 60. Εδώ απεικονίζεται η 1^η γραμμή. Όπως διακρίνουμε τα σημεία που έχουν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια έχουν καταβρεχθεί με αλατόνερο, επειδή λόγω της ξηρασίας που επικρατούσε, δεν ήταν δυνατή η καταγραφή των αντιπροσωπευτικών τιμών των ειδικών αντιστάσεων.



Σχήμα 61. Το καταγραφικό σύστημα με το οποίο εκτελέστηκαν οι μετρήσεις, τα 2 καλώδια των 24 καναλιών, η μπαταρία ενίσχυσης σήματος.

Τέλος αφού τελειώσει ο έλεγχος αρχίζει να γίνεται η ροή του ρεύματος στο έδαφος και η καταγραφεί των μετρήσεων. Αυτή η διαδικασία διαρκεί περίπου μια ώρα και στην συνέχεια χρησιμοποιώντας πάντα την ίδια διάταξη κάνουμε την ίδια διαδικασία και για τις υπόλοιπες διατομές. Μόλις τελειώσει και η δεύτερη διαδικασία γίνεται εισαγωγή των μετρήσεων του καταγραφέα σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος τις επεξεργάζεται και έτσι εξάγεται το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής τομογραφίας

8.1 Θέσεις εκτέλεσης μετρήσεων.

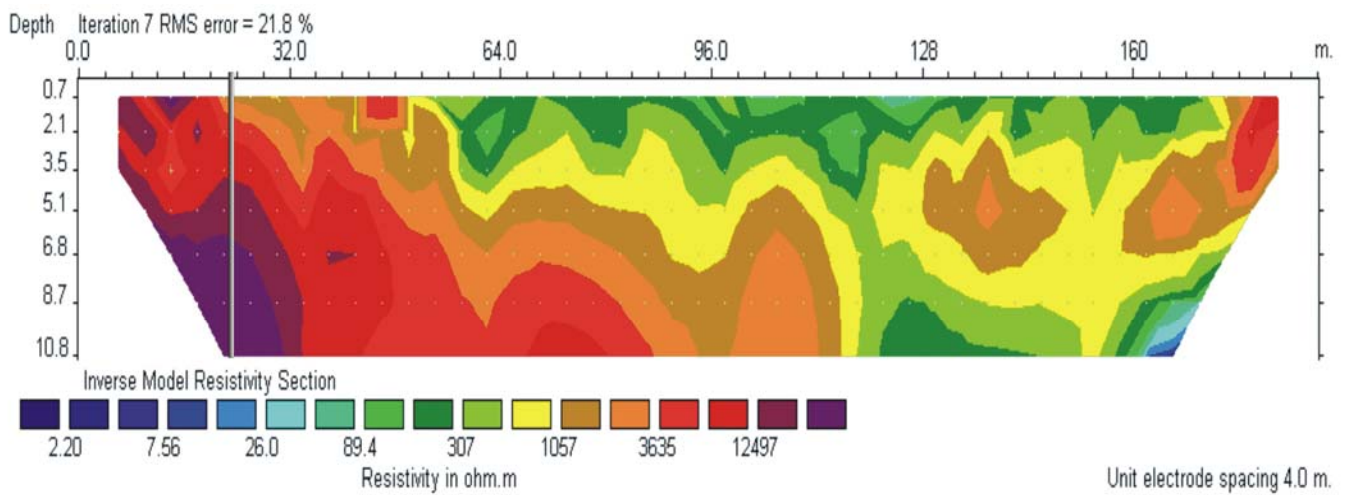
Θέση 1 – ERT 1

Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν ανά 4m. Το συνολικό μήκος της πρώτης γραμμής είναι 188m. Το μέγιστο βάθος διερεύνησης αυτής της τομής είναι 10,8m. Τέλος, ο αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση του προσεγγιστικού προβλήματος είναι ίσος με 7, ενώ το μέγιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 21,8%.

Στα 24m η διατομή μας διέρχεται πάνω από τη δειγματοληπτική γεώτρηση την οποία εκτέλεσε ο κύριος Διαμαντάκης. Σκοπός της θέσης ήταν η βαθμονόμηση των μετρήσεων μέσω της δειγματοληπτικής γεώτρησης καθώς και ο πιθανός εντοπισμός μικροεγκοίλων στο χώρο έρευνας. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι από 10-20m και σε βάθος 5-11m εντοπίζεται μια πιθανή θέση ύπαρξης δικτύου μικροεγκύλων.

Σε όλη την τομή εμφανίζεται το υπόβαθρο που είναι ασβεστόλιθος με αντίσταση γυρω στις 5000Ωm ενώ πάνω σε αυτόν επικάθονται τα φερτά υλικά διαμόρφωσης του χώρου με αντιστάσεις από 100-1000Ωm. Στα 160m και σε βάθος 11m εμφανίζεται μια θέση πολύ χαμηλών αντιστάσεων που πιθανόν να σχετίζεται με την παρουσία απορριμάτων, δεδομένου ότι η τομή αυτή σταμάτησε στην άκρη του πρανούς.

Επίσης, σε όλες τις θέσεις των ηλεκτροδίων προστέθηκε αλατόνερο με σκοπό να μειωθεί η αντίσταση επαφής των ηλεκτροδίων με το υπέδαφος όπως φαίνεται στα σχήματα 60 και 63. Επιπλέον 10m πριν την αρχή της τομής και στις πλευρές του σκάματος εντοπίστηκε και φωτογραφήθηκε έγκοιλο διαστάσεων 50cm και βάθους 1,5m όπως φαίνεται στα σχήματα 64 και 65 . Δεδομένο των παραπάνω παρατηρήσεων είναι η πιθανή συσχέτιση του εγκοίλου των φωτογραφιών με το πιθανό έγκοιλο που εντοπίστηκε στο βάθος των 5m στην αρχή της τομογραφίας.



Σχήμα 62. Δισδιάστατο μοντέλο κατανομής της γεωηλεκτρικής αντίστασης στη θέση 1.



Σχήμα 63. Μέρος του μήκους της τομής 1. Στο βάθος διακρίνουμε μια εκ των δύο γεωτρήσεων που υπάρχουν κατά το μήκος της γραμμής.



Σχήμα 64. Ένα φυσικό σπήλαιο, αποτέλεσμα της καρστικοποίησης που έχουν υποστεί τα πετρώματα ασβεστολίθου της περιοχής. Το σπήλαιο αυτό εντοπίστηκε δίπλα στο χώρο διεξαγωγής της πρώτης τομής.



Σχήμα 65. Λεπτομερέστερη άποψη του σπηλαιίου της πρηγούμενης φωτογραφίας

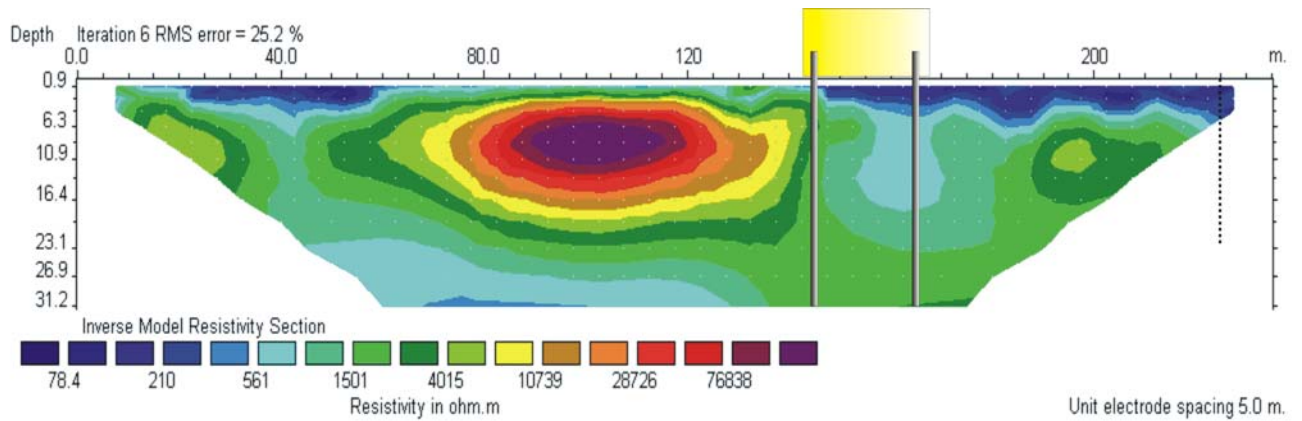
ΘΕΣΗ 2 – ERT2

Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν ανά 5m. Το συνολικό μήκος της δεύτερης γραμμής είναι 235m. Το μέγιστο βάθος διερεύνησης αυτής της τομής είναι 31,5m. Τέλος, ο αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση του προσεγγιστικού προβλήματος είναι ίσος με 6, ενώ το μέγιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 25,2%.

Όπως φαίνεται από την τομογραφία αυτής της τομής στα 145m και 165m υπάρχουν δυο γεωτρήσεις, εκ των οποίων η πρώτη είναι δειγματοληπτική και η δεύτερη είναι η γεώτρηση παρατήρησης και μελέτης του υδροφόρου ορίζοντα. Με κίτρινο χρώμα παράλληλο στα 140m-170m και σε απόσταση περίπου 150m ανάντι των γεωτρήσεων απεικονίζονται οι τρεις δεξαμενές συλλογής διασταλαζόντων υγρών. Από 80m-120m και στο βάθος των 5m εντοπίζεται σε μεγάλη έκταση ένα πιθανό έγκοιλο με πολύ υψηλές αντιστάσεις, το οποίο βρίσκεται εντός του ομοιογενούς ασβεστολίθου που παρουσιάζει αντιστάσεις της τάξης των 4000Ωm.

Επιπλέον από 140m-170m και κάτω από τη θέση εγκατάστασης των δεξαμενών παρουσιάζεται μια ανωμαλία στις τιμές των ειδικών αντιστάσεων και μορφή ανάλογης του μοντέλου διάχυσης ρύπων στο υπέδαφος. Από τα 140m και ως το τέλος της τομής τα

επιφανειακά στρώματα του εδάφους, βάθους ως και 2m, καλύπτονται από τις προσχώσεις διαμόρφωσης του χώρου. Στα 225m εμφανίζεται μια σικτική γραμμή, η οποία αναπαριστά το σημείο τομής των τομογραφιών 2 και 3 όπως αυτές εκτελέστηκαν.



Σχήμα 66. Δισδιάστατο μοντέλο κατανομής της γεωηλεκτρικής αντίστασης στη θέση2.



Σχήμα 67. Άποψη της γραμμής δύο. Αριστερά βλέπουμε τις τρεις δεξαμενές όπου συγκεντρώνονται τα διασταλάζοντα υγρά.



Σχήμα 68. Στη φωτογραφία βλέπουμε τη γραμμή 2. Πίσω από το λόφο που φαίνεται δεξιά είναι ο χώρος όπου αποτίθενται τώρα τα απορρίμματα ενώ αριστερά είναι η χαράδρα του Κουρουπητού.

ΘΕΣΗ 3 – ERT3

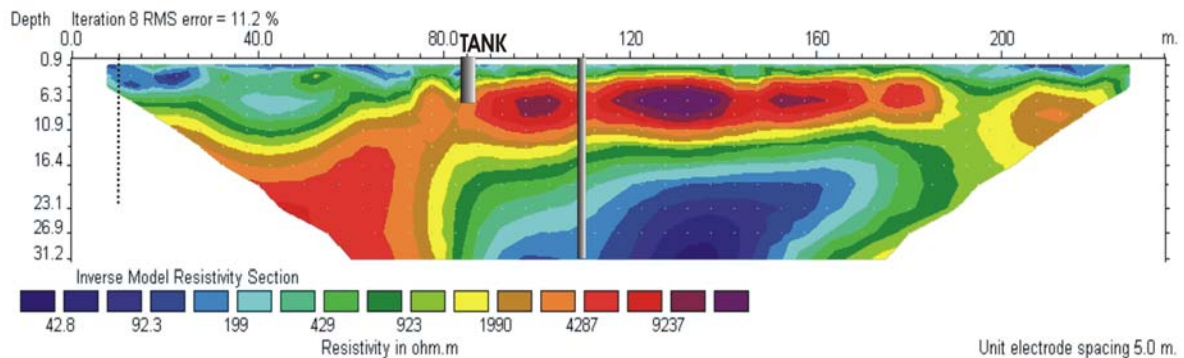
Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν ανά 5m. Το συνολικό μήκος της τρίτης γραμμής είναι 235m. Το μέγιστο βάθος διερεύνησης αυτής της τομής είναι 31,2m. Τέλος, ο αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση του προσεγγιστικού προβλήματος είναι ίσος με 8, ενώ το μέγιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 11,2%.

Από την τομογραφία της τρίτης γραμμής διαπιστώνουμε ότι στα 10m παρουσιάζεται η στικτή γραμμή, η οποία είναι το σημείο τομής των τομογραφιών 2 και 3. Στα 65m υπάρχει μια υπόγεια δεξαμενή όπως φαίνεται και στη φωτογραφία 71. Προχωρώντας λίγο και στα 110m υπάρχει μια γεώτρηση παρακολούθησης της στάθμης των υπόγειων υδάτων. Στην τομή μέχρι και το βάθος των 11m φαίνεται να επικρατεί ο υγής ασβεστόλιθος με τιμές ειδικής αντίστασης γύρω στα 4000Ωm.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός της παρουσίας χαμηλών αντιστάσεων από τα 120m ως τα 160m και κάτω από το βάθος των 15m ως και τα 30m. Λόγω αυτής της ανομοιογένειας του μοντέλου, η οποία μπορεί να εξηγηθεί με τη χρήση παλαιογεωγραφικών

μοντέλων, αποφασίστηκε η πραγματοποίηση δυο επιπλέον τομογραφιών στα 130m και 150m από το πρανές του ΧΥΤΑ ως το πρανές της χαράδρας του Κουρουπητού και με διεύθυνση κάθετη στην τομή 3.

Συμπληρωματικά πρέπει να αναφέρουμε ότι στη συγκεκριμένη τομή τα ηλεκτρόδια καρφώθηκαν πάνω σε σκύρα λατομείου με αποτέλεσμα την πολύ υψηλή αντίσταση επαφής και την αδυναμία εκτέλεσης των μετρήσεων. Η λύση δόθηκε με τη διαβροχή όλου του εδάφους κατά μήκος της διατομής από μια υδροφόρα.



Σχήμα 69. Δισδιάστατο μοντέλο κατανομής της γεωηλεκτρικής αντίστασης στη θέση3.



Σχήμα 70. Μέρος της τρίτης γραμμής, όπου φαίνονται τα πετρώματα σκύρου λατομείου και η διαβροχή του εδάφους που χρειάστηκε να γίνει.

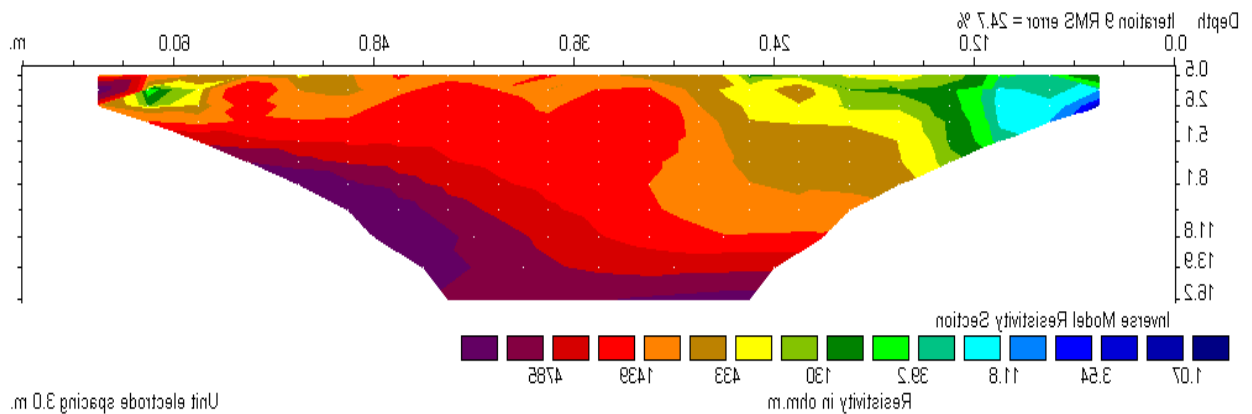


Σχήμα 71. Το καταγραφικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση των μετρήσεων και η επιφάνεια της υπόγειας δεξαμενής. Εδώ διακρίνουμε καλύτερα τα «σκληρά» πετρώματα που υπάρχουν σ' αυτό το σημείο του εργοτάξιου.

ΘΕΣΗ 4 – ERT 4

Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν ανά 3m. Το συνολικό μήκος της τέταρτης γραμμής είναι 69m. Το μέγιστο βάθος διερεύνησης αυτής της τομής είναι 16,2m. Τέλος, ο αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση του προσεγγιστικού προβλήματος είναι ίσος με 9, ενώ το μέγιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 24,7%.

Παρατηρείται ότι στα πρώτα 45m υπάρχει βράχος που είναι το υπόβαθρο της περιοχής και το οποίο παρουσιάζει βυθιση προς τη χαράδρα. Από τα 45m ως και τα 69m έχει γίνει απόθεση σκουπιδιών κατά το παρελθόν. Λόγω πολύ κακών αντιστάσεων επαφής απαιτήθηκε η χρήση ηλεκτροδίων 2m.



Σχήμα 72. Δισδιάστατο μοντέλο κατανομής της γεωηλεκτρικής αντίστασης στη θέση4.



Σχήμα 73. Μήκος της 4^{ης} γραμμής. Τα πετρώματα που βρίσκονται στην επιφάνεια είναι σαφώς έντονα καρστικοποιημένα.



Σχήμα 74. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν στην 4^η και 5^η τομή είχαν μήκος 2m.

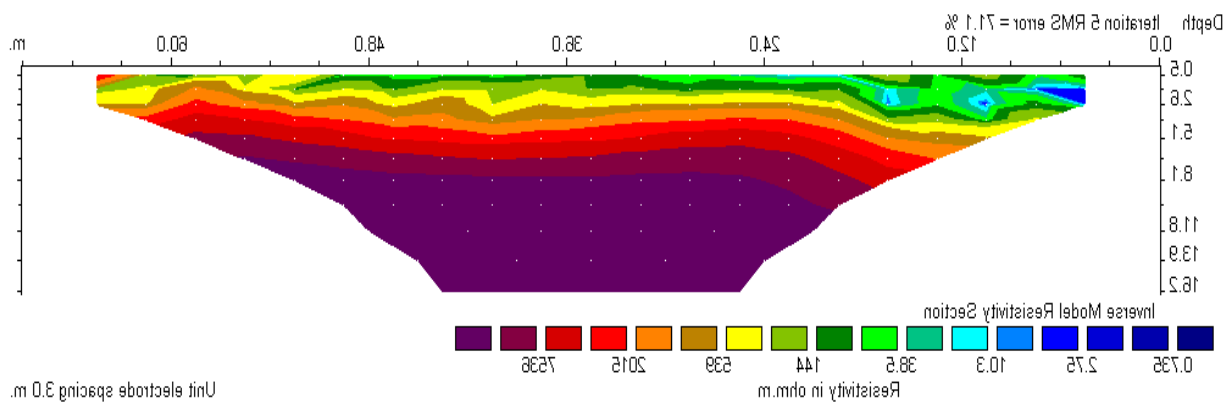


Σχήμα 75. Στο βάθος φαίνεται το τέλος της 4^{ης} γραμμής, η οποία φτάνει στην αρχή του πρηνούς της χαράδρας.

ΘΕΣΗ 5 – ERT 5

Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν ανά 3m. Το συνολικό μήκος της πέμπτης γραμμής είναι 69m. Το μέγιστο βάθος διερεύνησης αυτής της τομής είναι 16,2m. Τέλος, ο αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση του προσεγγιστικού προβλήματος είναι ίσος με 5, ενώ το μέγιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι 71,1%.

Από αυτήν την τομή μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι στα πρώτα 57m υπάρχει βράχος που είναι το υπόβαθρο της περιοχής και το οποίο παρουσιάζει βυθιση προς τη χαράδρα, όπως παρατηρήσαμε και στην τέταρτη γραμμή. Από τα 57m ως τα 69m έχει γίνει απόθεση σκουπιδιών κατά το παρελθόν, τα οποία έχουν «μικρύνει» το μέγεθος της χαράδρας.



Σχήμα 76. Δισδιάστατο μοντέλο κατανομής της γεωηλεκτρικής αντίστασης στη θέση 5.



Σχήμα 77. Πίσω από τον όγκο που βρίσκεται ανάντι της 5^{ης} γραμμής βρίσκεται ο χώρος απόθεσης των απορριμμάτων.



Σχήμα 78. Μέρος του αρχικού σημείου του βράχου που βρισκόταν στην περιοχή.

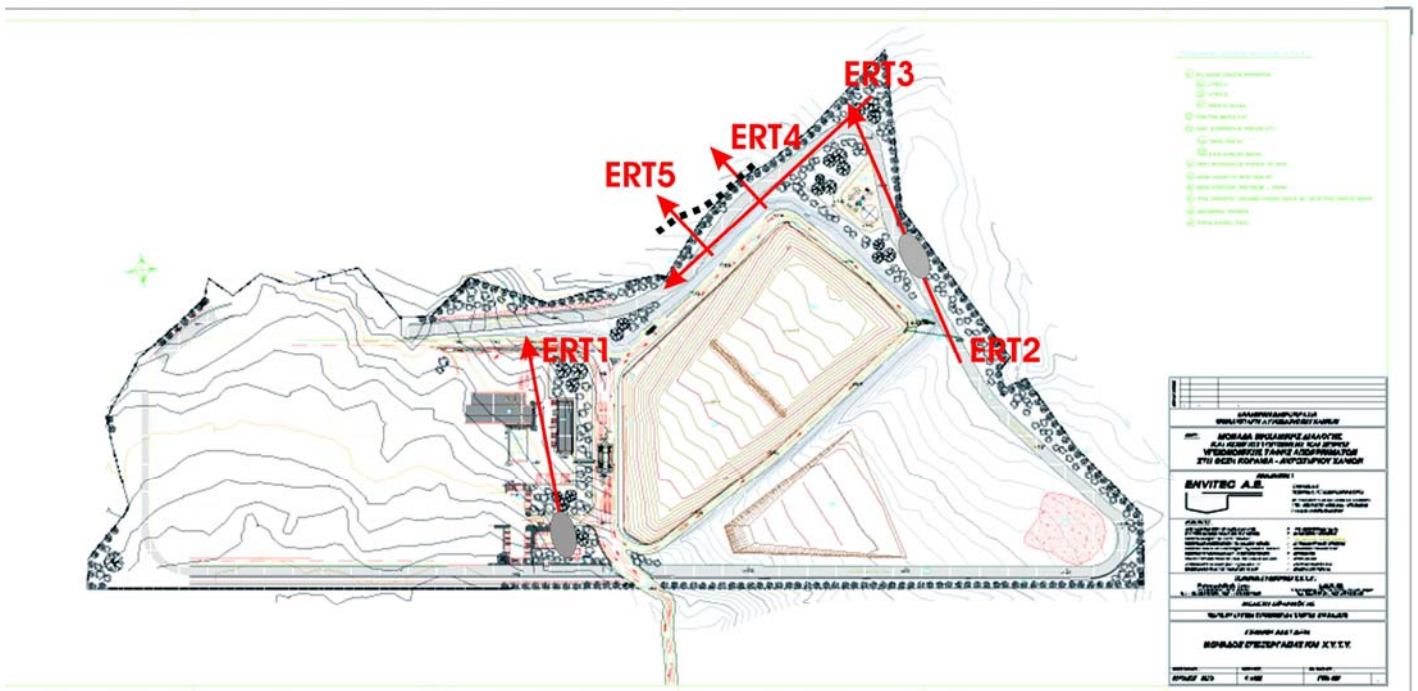
9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σκοπός του πτυχιακής εργασίας, όπως αναφέρθηκε κατ' επανάληψη, είναι η συλλογή όσων των δυνατών περισσότερων στοιχείων που σκοπό θα έχουν την ορθή αξιολόγηση του χώρου ΧΥΤΑ στο Κουρουπητό τόσο σε θέματα κατασκευαστικά όσο και σε θέματα περιβάλλοντος.

Οι πέντε μετρήσεις που εκτελέστηκαν μπορούν να ομοδοποιηθούν σε 3 κατηγορίες μετρήσεων ανάλογα με τη φύση του προβλήματος που καλούνταν να λύσουν. Οι 3 κατηγορίες προβλημάτων αφορούσαν, α) μελέτη, επίλυση τυχόν κατασκευαστικών προβλημάτων στο χώρο ανέγερσης των εργοστασίων ανάντι του χώρου απόθεσης (κυττάρων), β) μελέτη πιθανόν προβλημάτων που θα δημιουργηθούν στο μέλλον από τη λειτουργία του νέου κυττάρου απόθεσης στο ΧΥΤΑ και γ) μελέτη και πιθανή πρόταση τρόπου απορρύπανσης της χαράδρας του Κουρουπητού που για χρόνια λειτούργησε εσφαλμένα ως χώρος απόθεσης απορριμμάτων.

A) Μελέτη χώρου ανέγερσης των εργοστασίων επεξεργασίας

Στο χώρο αυτό (σχήμα 79) εκτελέστηκε μία τομογραφία ή οποία όπως αναφέρθηκε και παραπάνω εντόπισε πιθανή θέση δικτύου εγκοίλων στην αρχή της τομής. Στο υπόλοιπο τμήμα της ερμηνείας δεν εντοπίστηκε κάτι ιδιαίτερο που να προκαλεί ανησυχία ως προς τη δυνατότητα θεμελίωσης-κατασκευής όποιων ανοδομών. Τα στοιχεία αυτά έρχονται σε απόλυτη ταύτιση με τη φωτογραφία που απεικονίζει ένα καρστικό έγκοιλο σε απόσταση μικρότερη των 20 μέτρων από τη υποδεικνυόμενη από το μοντέλο θέση των πιθανόν καρστικών δομών. Επίσης, μετά από προφορική ενημέρωση από τον υπεύθυνο μηχανικό του έργου, αναφέρθηκε ότι ο χώρος της εισόδου της πλατείας στον οποίο εγκαταστάθηκαν όλα τα εργοστάσια λειτουργίας του ΧΥΤΑ, «υπέφερε» από διάκενα όποτε και χρειάστηκε η ενίσχυση του υπεδάφους στο χώρο αυτό με την εισπίεση τσιμέντου (τσιμεντενέσεις).



Σχήμα 79. Τοπογραφικό σκαρίφημα της περιοχής έρευνας. Με γκρι ελλείψεις παρουσιάζονται οι θέσεις και η έκταση των ανωμαλιών, ενώ με μαύρη στικτή γραμμή παρουσιάζεται η θέση του παλαιοναγλύφου.

B) Μελέτη χώρου εγκατάστασης νέου κυττάρου ΧΥΤΑ

Κατόπιν του χώρου αυτού εκτελέστηκε η δεύτερη τομογραφία τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο σχήμα 81. Με βάση τα αποτελέσματα της τομογραφικής ερμηνείας προκύπτει δύο θέματα σημαντικά προς διερεύνηση.

Στα 90-110 μέτρα κατά μήκος της τομής και σε βάθος από τα 6.0 έως τα 12.0 μέτρα εντοπίστηκε ένα πιθανό έγκοιλο μεγάλων διαστάσεων. Στη πραγματικότητα η παρουσία του εγκοίλου στη συγκεκριμένη θέση δεν δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα παρά μόνο αν θελήσουμε να εξετάσουμε και τα κάτωθι,

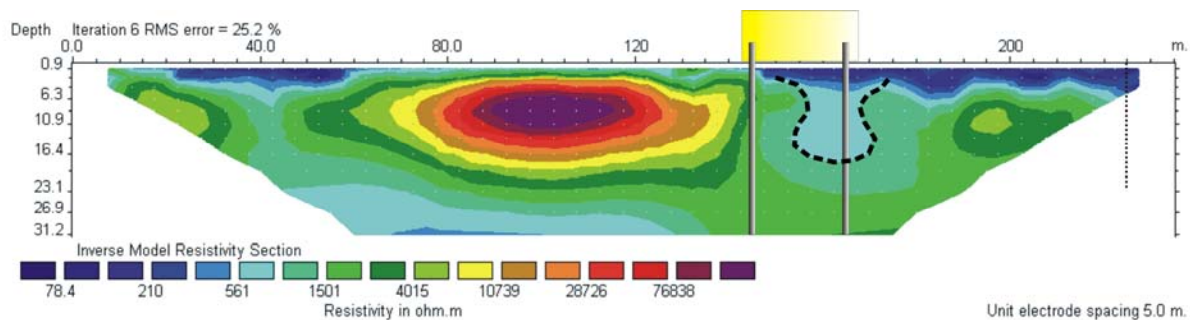
- ✚ Πιως εγγυάται ότι εντός του χώρου εγκατάστασης του νέου κυττάρου δεν υπάρχουν δομές αντίστοιχες με αυτή που εντοπίστηκε και η οποία σε φόρτιση (ύστερα από τη χρόνια απόθεση απορριμμάτων) δεν θα αστοχίση. Ίσως το παραπάνω ερώτημα χρήζει περαιτέρω διερεύνηση.
- ✚ Σε αντίστοιχη θέση με αυτή που βρέθηκε το έγκοιλο, στο κύτταρο που αυτή τη στιγμή γίνεται η απόθεση, έχουν τοποθετηθεί οι δεξαμενές συλλογής των στραγγισμάτων με βάρος πολλών τόνων. Ίσως, θα έπρεπε σε πρώτη φάση να αποκλειστεί η θέση του εγκοίλου ως θέση συλλογής των στραγγισμάτων για το 2^ο κύτταρο όταν αυτό τεθεί σε

λειτουργία. Αν κριθεί απαραίτητο ίσως θα μπορούσε να εκτελεστεί στατική μελέτη δεδομένου ότι το έγκοιλο πιθανά να ξεκινά από τα 6 μέτρα βάθος.



Σχήμα 80. Χώρος λειτουργίας του νέου κυττάρου απόθεσης απορριμμάτων στον Κουρουπητό.

Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή και ερμηνεία της 2^{ης} τομογραφίας, στα 155 – 170 μέτρα, παρουσιάζεται μια ζώνη χαμηλών αντιστάσεων σε σχέση με το περιβάλλον υλικό και το οποίο παρουσιάζει μορφή παρόμοια με τη μορφή που έχει ένας ρύπος που διαχέεται στο υπέδαφος. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, αυτής της μορφής η ανωμαλία μπορεί να μοντελοποιηθεί με πιθανή διαρροή ρύπων στο υπέδαφος. Δεδομένης επίσης της θέσης της ανωμαλίας που βρίσκεται κάτω ακριβώς από τις δεξαμενές συλλογής των στραγγισμάτων, ενισχύεται η υπόθεση της διαρροής ρύπων στο υπέδαφος. Με σκοπό την προσπάθεια ενίσχυσης των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τη τομογραφία, ακολούθησε προσωπική επικοινωνία με τους μηχανικούς του έργου ο οποίοι μας επιβεβαίωσαν ότι το χειμώνα του 2004 λόγω αυξημένων βροχοπτώσεων, υπήρξε υπερχειλίση των διασταλαζόντων από τη θέση του ΧΥΤΑ στο χώρο που βρίσκονται οι δεξαμενές. Μέχρι την άντλησή τους και την επαναφορά τους εντός του ΧΥΤΑ μεσολάβησε χρονική περίοδο 2 μηνών. Το διάστημα αυτό είναι ικανό για να προκαλέσει τη κίνηση των αγωγίμων ρευστών σε βαθύτερους ορίζοντες.



Σχήμα 81. Τομογραφική ερμηνεία της τομογραφίας 2. Με στικτή μαύρη γραμμή προσδιορίζεται η πιθανή θέση κίνησης του ρύπου στο υπέδαφος.

Γ) Μελέτη του όγκου των απορριμμάτων στη χαράδρα του Κουρουπητού

Με βάση τα μέχρι σήμερα γνωστά στοιχεία που αφορούν την αλόγιστη απόθεση απορριμμάτων στη χαράδρα του Κουρουπητού, γνωρίζουμε ότι έχουν αποτεθεί απορρίμματα για περισσότερα από 30 χρόνια. Αν κάποια στιγμή θελήσει η αρχή διαχείρισης απορριμμάτων να προχωρήσει σε απορρύπανση του χώρου με πιθανό τρόπο την απομάκρυνση των απορριμμάτων, τότε πρέπει να υπολογιστεί κατ' εκτίμηση ο όγκος των σκουπιδιών. Συμπερασματικά, απαιτείται ο εντοπισμός του παλαιοαναγλύφου έτσι ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός του όγκου των αποθέσεων.

Πέρα των ενόργανων παρατηρήσεων, προηγήθηκε μακροσκοπική παρατήρηση με την οποία διαφαίνεται ότι, κατά μήκος του περιμετρικού δρόμου προσπέλασης του ΧΥΤΑ, υπάρχουν επιφανειακές διαρρήξεις όπως φαίνεται και στη παρακάτω φωτογραφία. Η ύπαρξη του ασβεστολιθικού υποβάθρου στην ευρύτερη περιοχή μελέτης δεν δικαιολογεί την παρουσία των ρωγμών, παρά μόνο αν υποθέσουμε ότι κάτω από την επιφάνεια υπάρχει απόθεση απορριμμάτων.



Σχήμα 82. Παρουσία ρωγμών στο δρόμο που υπάρχει μέσα στο εργοτάξιο αλλά και σε όλο το χώρο γενικότερα.

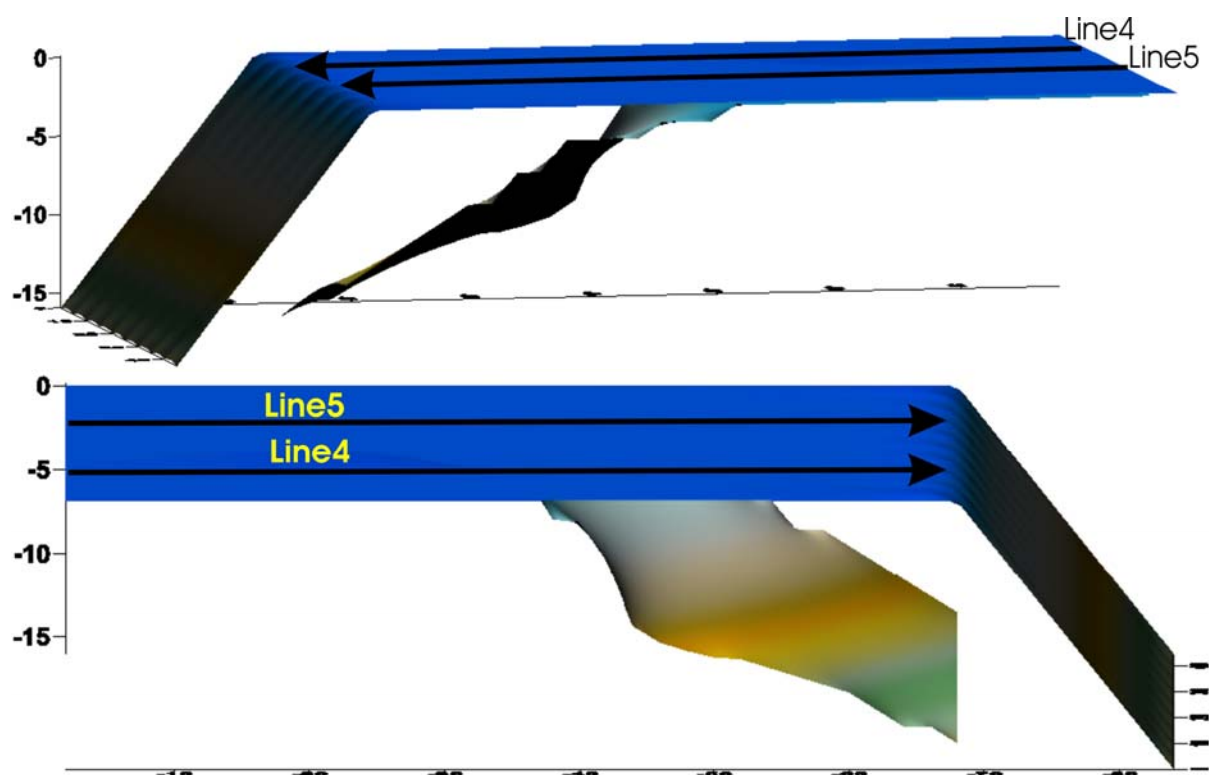
Όπως φαίνεται και σε άλλες φωτογραφίες, τα υπάρχοντα πρανή είναι απόρεια της επαναληπτικής απόθεσης απορριμμάτων. Πέρα των επιφανειακών διαρρήξεων, υπήρχαν και θέσεις στις οποίες υπήρξε μεγάλη κατακόρυφη πτώση – μετάθεση των απορριμμάτων (σχήμα 83) που οφείλεται σε αστάθεια των απορριμμάτων όταν αυτά αποθέτονται σε μεγάλα πάχη.



Σχήμα 83. Παρουσία κατακόρυφων κανονικών μεταθέσεων σε διεύθυνση κάθετη στα σημερινά πρανή της χαράδρας του Κουρουπητού.

Τέλος, με σκοπό να μελετηθεί και να επιβεβαιωθεί η θεώρηση που προέρχεται από τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις ότι άλλο είναι το παλαιοανάγλυφο της περιοχής, εκτελέστηκαν 3 τομογραφίες. Η τομογραφία 3 εκτελέστηκε κατά μήκος του περιμετρικού δρόμου του ΧΥΤΑ όπως φαίνεται και στο σχήμα 70. Συμπληρωματικά των αποτελεσμάτων της τομογραφίας 3, εκτελέστηκαν ακόμη 2 τομογραφίες με σκοπό τη διασαφήνιση της δομής που παρουσιάστηκε στη τομή 3 από τα 120 έως τα 155 μέτρα.

Οι δύο τομογραφίες που εκτελέστηκαν (τομογραφίες 4 και 5) μας έδωσαν το βάθος του υποβάθρου και τη σχετική κλίση αυτού. Εισάγοντας όλα τα παραπάνω στο πρόγραμμα Surfer μπορούμε να παρουσιάσουμε με τρισδιάστατα σχήματα το σημερινό ανάγλυφο και το παλαιοανάγλυφο (μόνο για τις θέσεις που εκτελέστηκαν μετρήσεις) με σκοπό να «φανερί» ο όγκος των απορριμμάτων που έχουν αποτεθεί κατά το παρελθόν.



Σχήμα 84. Τρισδιάστατη απεικόνιση του παλαιοαναγλύφου και συμπερασματικά του πάχους των αποθέσεων.

Με βάση τα παραπάνω, προσεγγιστικά δεν θα ήταν λανθασμένο να υποθέσουμε ότι η

ακμή του παλαιοαναγλύφου βρίσκεται στη θέση που υποδεικνύει η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 85. Πιθανό σενάριο προσδιορισμού του παλαιοαναγλύφου της περιοχής έρευνας.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν προκύπτει ότι η μέθοδος διεξαγωγής των μετρήσεων (γεωηλεκτρική τομογραφία)

- ✚ επιτρέπει την εφαρμογή της μεθοδολογίας σε διάφορα περιβάλλοντα με σκοπό την πρόβλεψη και επίλυση σοβαρών γεωτεχνικών προβλημάτων (θεμελίωση ανωδομών)
- ✚ είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό εγκοίλων σε χώρους που πρόκειται να ανοικοδομηθούν (προσδιορίζει προσεγγιστικά την ποιότητα βραχομάζας άρα υπολογίζει γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους),
- ✚ δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού του ρύπου, όπως και της οδού κίνησής του (σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι από τις πιο συχνά εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες για έρευνες σε χώρους απόθεσης απορριμμάτων)
- ✚ έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει με ακρίβεια του 0.5 μέτρου το παλαιοαάγλυφο μιας περιοχής έρευνας (ο υπολογισμός αυτός είναι απαραίτητο στοιχείο για την απορρύπανση ενός χώρου αν αποφασιστεί η απορρύπανση με την απομάκρυνση των

ρύπων – σκουπιδιών).

- ✚ Δίνει τη δυνατότητα προγραμματισμού των εργασιών σε νέους χώρους διάθεσης απορριμμάτων καθώς και προχωρά στην διερεύνηση του χώρου πριν την έναρξη εγκατάστασης του έργου.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γεωλογικός χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε., κλίμακας 1:50.000, φύλλο Χανιά.

Constable, S. Parker, R., and Constable C. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52:289-300.

Delibasis, N., Papadimitriou, P., Voulgaris, N. and Kassaras, I., 2000. The Parnitha fault: Possible Relationship with other neighboring faults and causes of larger damages. *In press*.

Edwards, L.S., (1977). A Modified Pseudosection for Resistivity and IP. *Geophysics*, 42: 1020-1036.

Griffiths D., Turnbull, J., and Olayinka, A. (1990). Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled Array. *First Break*, 8 (4), 121-129.

ΜΑΡΙΟΛΑΚΟΣ Η., κλπ (1996): «Γεωλογική και Υδρογεωλογική έκθεση του υποψήφιου ΧΥΤΑ της Ν. Α. Χανίων, στη θέση Στρογγυλό Κεφάλι». Ν. Α. Χανίων

ΜΑΡΙΟΛΑΚΟΣ Η., κλπ (1997): «Γεωλογική και Υδρογεωλογική έρευνα για την προστασία των ρευμάτων και των υπογείων υδροφορέων από τις πιθανές επιπτώσεις λόγω λειτουργίας του ΧΥΤΑ στη θέση Στρογγυλό Κεφάλι». Ν. Α. Χανίων

ΝΟΜΑΡΧΙΑΚΗ ΑΥΤΟΔΙΟΙΚΗΣΗ ΧΑΝΙΩΝ (1996): «Το Υδατικό Δυναμικό του Νομού Χανίων»

Πολιτικός χάρτης Γ.Υ.Σ. Ν. Χανίων έκδοση 1972, κλίμακα 1/50.000

Telford, L. P. Geldart, R. E. Sheriff and D. A. Keys, 1976, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press

Tripp, A., Hohmann, G., and Swift, C. (1984). Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 49, 1708-1717.

G.Tsokas, P.Soupios, P.Tsourlos, G. Vargemezis, A. Savvaidis, C. Paliadeli- Saatsoglou, S.Drougou, 1999, Geophysical investigations in the area between Eukleia's temple and the theater in ancient Aegae (Verghina) using various methods, *Physics in Culture*, Ed. K. Paraskevopoulos, An Aristotle University Publication ISBN 960-243-573-9.

Tsourlos P.(1995). Modeling interpretation and inversion of multielectrode earth resistivity data-sets. D.Phil. Thesis. University of York.

Tsourlos P., and Szymanski J. (1995). Self-correcting approaches to the inversion of resistive tomography field survey data. Poster presented at the Archaeological Prospection Conference, University of Bradford, U.K., 12-13 September, 1995.