

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ
ΤΗΣ ΠΑΛΑΙΟΧΩΡΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ
ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Επιμέλεια : Μάρκος Φουνδουλάκος

Επίβλεψη : Παντελής Σουπιός

2014

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Σκοπός της μελέτης	6
1.2 ΧΩΡΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	6
1.3 Η ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ	6
2. ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	18
2.1 Ενεργητικές και Παθητικές Γεωφυσικές Διασκοπήσεις	18
2.2 Ηλεκτρικές Μέθοδοι.....	18
2.3 Ροή Ρεύματος και ο νόμος του Ohm	20
2.4 Αντίσταση και Ειδική αντίσταση	21
2.5 Η Ειδική Αντίσταση των Υλικών της Γης.....	22
2.6 Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο.....	23
2.7 Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο	26
2.8 Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο.....	27
2.9 ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΗΜΙΧΩΡΟ	29
2.10 Μια πρώτη εκτίμηση της Ειδικής Αντίστασης.....	31
3. Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	34
3.1 Εξοπλισμός.....	34
3.2 Το κύκλωμα ρεύματος AB.....	34
3.3 Το κύκλωμα δυναμικού MN	35
3.4 Βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης	35
3.5 Σύζευξη των κυκλωμάτων ρεύματος και δυναμικού	36
3.6 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή	36
3.7 Διαρροή	37
3.8 Η Μέτρηση της Διαφοράς Δυναμικού ΔV	38
3.9 Η Μέτρηση του Ρεύματος Εκπομπής I	38
3.10 Η Μέτρηση του Γεωμετρικού Παράγοντα K.....	39
3.11 Το σφάλμα στο προσδιορισμό της ρ_a	40
3.12 Πηγές Θορύβου	40
4. ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	43
4.1 Ροή Ρεύματος σε Μέσο με Στρώση	43
4.2 Μεταβολές της Φαινόμενης Ειδικής Αντίστασης: Ομογενή Μέσα και Μέσα με Στρώση	45
4.3 Ροή του Ρεύματος σε Μέσο με Στρώση και Απόσταση μεταξύ των Ηλεκτροδίων	46
4.4 Ένα ακόμα παράδειγμα Ροής του Ρεύματος σε Μέσο με Στρώσεις.....	48
5. ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ: ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΚΑΙ ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	50
5.1 Έρευνα Κατακόρυφης Μεταβολής της Ειδικής Αντίστασης: (Ηλεκτρικές Βυθοσκοπήσεις)	51
5.2 Διάταξη Wenner	51
5.3 Διάταξη Schlumberger	52
5.4 Ρυθμός αύξησης της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος AB.....	54
5.5 Η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού MN.....	55
5.6 Επιλογή του κέντρου της βυθομέτρησης	56
5.7 Το ανάπτυγμα της γραμμής των ηλεκτροδίων ρεύματος AB.....	57
5.8 Το μήκος της γραμμής AB.....	58
5.9 Διαγράμματα της Φαινόμενης Ειδικής Αντίστασης	59

5.10 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Διατάξεων Wenner και Schlumberger	62
5.11 Έρευνα Οριζόντιας Μεταβολής της Ειδικής Αντίστασης	64
5.12 Προφίλ Ειδικής Αντίστασης	64
5.12.1 Διάταξη δίπολου	64
5.12.2 Διάταξη Wenner	65
5.12.3 Διάταξη Schlumberger	67
5.13 Διατάξεις χωρικής μετρήσης της βαθμίδας του πεδίου	67
5.14 Σημειακές πηγές ρεύματος	67
5.15 Γραμμικές πηγές ρεύματος	71
5.16 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων- Γεωηλεκτρικές βυθομετρήσεις-Καμπύλες γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων πάνω από Μέσο ενός Στρώματος	72
5.17 Καμπύλες γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων πάνω από Μέσο ενός Στρώματος	74
5.18 Καμπύλες γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων πάνω από Μέσο Δύο Στρωμάτων	75
5.19 Μέσο Δύο Στρωμάτων: ένα ακόμα παράδειγμα	77
5.20 Οριζόντια (Πλευρική) Έρευνα	79
6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ	80
6.1 Ηλεκτρική Τομογραφία	81
6.1.1 Ερμηνεία με ψευδοτομή	82
6.1.2 Ερμηνεία με αντιστροφή	82
6.1.3 Προγραμματισμός και λήψη μετρήσεων γεωηλεκτρικών τομογραφιών	85
6.1.4 Επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρικών τομογραφιών	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρακάτω πτυχιακή εργασία θα ασχοληθούμε με την γεωτεκτονική δομή της Παλαιόχωρας της Κρήτης με την χρήση γεωφυσικών μετρήσεων.

Αρχικά, θα μιλήσουμε για την γεωλογική δομή της Ελλάδας και πως φτάσαμε στη σημερινή της δομή, για να φτάσουμε, έπειτα, στις δομές της Κρήτης και εν συνεχεία, να ασχοληθούμε με τους τύπους διασκόπησης. Ειδικότερα, θα αναφέρουμε τους τρόπους ηλεκτρικής διασκόπησης και τις μεθόδους αυτών, θα μιλήσουμε για το βάθος των ηλεκτρικών διασκοπήσεων και πως επιτυγχάνεται αυτό, για να καταλήξουμε αργότερα, στο κομμάτι, όπου επιλέχθηκε η περιοχή της Παλαιόχωρας, ως τόπος μελέτης και πεδίο έρευνας, λόγω κάποιων ιδιαιτεροτήτων της περιοχής και παρουσίασης ενδιαφέρον γεωλογικών δομών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ηλεκτρικών διασκοπήσεων ειδικής αντίστασης που έγιναν στην περιοχή μαζί με τα αποτελέσματα τους.

ABSTRACT

The following thesis is dealing with the tectonic structure of Paleochora in Crete using geophysical measurements.

Initially, it is referred to the geology structure of Greece and how we have come to its current regime. Afterwards, presents the structures of Crete and the types of prospecting. In particular, the types of electrical tomography and its methods are mentioned. We are coming along with the depth of electrical prospecting and how to achieve it, to end up how was Paleochora area chosen as a study field. The place of study was chosen as a research area with peculiarities in the region and presenting interesting geological structures. In addition, the results of measurements of electrical resistivity tomography were taken in the region along with their results.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας αυτής είναι η μελέτη της γεωτεκτονικής δομής της περιοχής της παλαιόχωρας Χανίων με την χρήση γεωφυσικών μετρήσεων και ειδικότερα της ηλεκτρικής διασκόπησης. Στην αρχή βρίσκουμε την αναφορά στη θεωρία της ηλεκτρικής μεθόδου διασκόπησης . Στη συνέχεια, το βάθος διείσδυσης ρεύματος και απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων, και στο τέλος, είναι οι τύποι διασκοπήσεων, οι κατακόρυφες και οι πλευρικές έρευνες ειδικής αντίστασης. Το τελικό κομμάτι της εργασίας ασχολείται με το πειραματικό μέρος και τις μεθόδους έρευνας, τα αποτελέσματα μετρήσεων της περιοχής της Παλαιόχωρας και τα συμπεράσματα αυτών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη που παρουσιάζεται σ' αυτό το βιβλίο εντάσσεται στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας, όπως αυτή καθορίζεται από το πρόγραμμα σπουδών των Τεχνολογικών Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων, (Τ.Ε.Ι.).

Το θέμα που μελετήσαμε στη πτυχιακή που ακολουθεί, αφορά τη γεωτεκτονική δομή της Παλαιόχωρας και της ευρύτερης περιοχής όπως αυτή προέκυψε από την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της Δρ. Μαργαρίτας Μουσίδη με τίτλο, Geological geophysical and seismological investigations for earthquake hazard estimation in western Crete, <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/4454>

Επίσης μέρος των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται έχουν ήδη δημοσιευτεί στο παρακάτω άρθρο, M Moisiidi, F Vallianatos, P Soupios, S Kershaw, D Rust, S Piscitelli, 2013, Modelling tectonic features of the Kissamos and Paleohora areas, Western Crete (Greece): combining geological and geophysical surveys, *J. Geophys. Eng.* 10 025015 doi:10.1088/1742-2132/10/2/025015

1.1 Σκοπός της μελέτης

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας αυτής είναι η μελέτη της γεωτεκτονικής δομής της περιοχής της παλαιοχωρας Χανίων με την χρήση γεωφυσικών μετρήσεων και ειδικότερα της διαστάτης ηλεκτρικής διασκόπισης σε διαφορετικές θέσεις και συνθήκες με σκοπό τον προσδιορισμό των υπάρχοντων τεκτονικών δομών.

1.2 ΧΩΡΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ως περιοχή έρευνας επιλέχθηκε η περιοχή της Παλαιοχωρας λόγω του γεωτεκτονικού της ενδιαφέροντος. Παρατηρήθηκαν από γεωλόγους στοιχεία με τα οποία μπορεί να προσδιοριστεί η άνοδος (uplift) των δυτικών ακτών της Κρήτης.

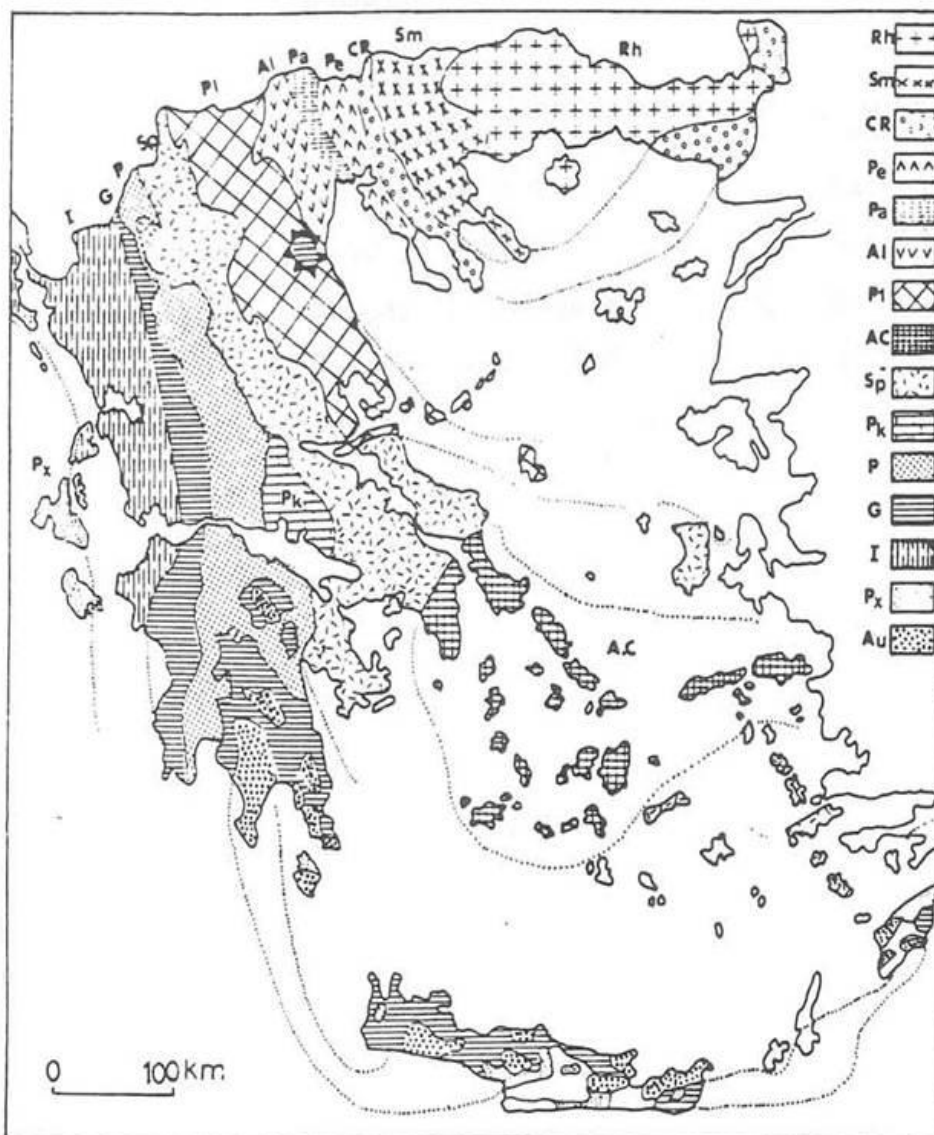
1.3 Η ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

Η γεωλογική δομή της Κρήτης συνδέεται άμεσα με την συνολική γεωλογική δομή της Ελλάδας, η οποία χωρίζεται σε διάφορες γεωτεκτονικές ζώνες με γενική διεύθυνση στον ηπειρωτικό χώρο της ΒΔ - ΝΑ.

Κάθε ζώνη, χαρακτηρίζεται από ορισμένη και χαρτογραφίσιμη στρωματογραφική / λιθολογική διαδοχή των πετρωμάτων της όπως αυτά προέκυψαν από την επαλληλία των τεκτονικών γεγονότων που οδήγησαν στην δημιουργία του ορογενούς.

Στον ευρύτερο ελλαδικό χώρο, οι κύριες γεωτεκτονικές ζώνες των οροσειρών με διεύθυνση από ΒΔ προς ΝΑ είναι (σχήμα 1):

1. Η **μάζα της Ροδόπης** εμφανίζεται στην Ανατολική Μακεδονία, Θράκη και στη Θάσο. Αποτελείται κυρίως από κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα.
2. Η **Σερβομακεδονική μάζα** εμφανίζεται δυτικά του Στρυμώνα από τα σύνορα μέχρι και την Χαλκιδική. Αποτελείται κυρίως από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα.
3. Η **Περιοδοτική ζώνη** εκτείνεται στη δυτική πλευρά της Σερβομακεδονικής μάζας με διεύθυνση ΒΔ -ΝΑ.
4. Η **ζώνη του Αξιού** εμφανίζεται στην Κεντρική Μακεδονία, χαρακτηρίζεται από τις μεγάλες οφειολιθικές μάζες που απαντώνται σε αυτήν.
5. Η **Πελαγονική ζώνη** εμφανίζεται σε όλη την Ελλάδα. Αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, γνευσιωμένους γρανίτες και ανθρακικά καλύμματα.
6. Η **Αττικο-Κυκλαδική ζώνη** εμφανίζεται κυρίως στα νησιά των Κυκλάδων και σε ένα τμήμα της Αττικής και της Νότιας Εύβοιας.
7. Η **Υποπελαγονική ζώνη ή ζώνη «Ανατολικής Ελλάδας»** εμφανίζεται στη Δυτική πλευρά της Πελαγονικής ζώνης. Χαρακτηρίζεται από τις μεγάλες οφειολιθικές μάζες που απαντώνται σε αυτήν.
8. Η **ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας** εμφανίζεται στην κεντρική Στερεά Ελλάδα, και αποτελείται από ασβεστόλιθους και δολομίτες.
9. Η **ζώνη Ωλονού-Πίνδου ή ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης** εμφανίζεται στην Ήπειρο, στην κεντρική Ελλάδα, στη δυτική και βορειανατολική
10. Η **ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης**
11. Η **Αδριατικοϊόνιος ζώνη**
12. Η **ζώνη Παξών ή Προαπουλία**



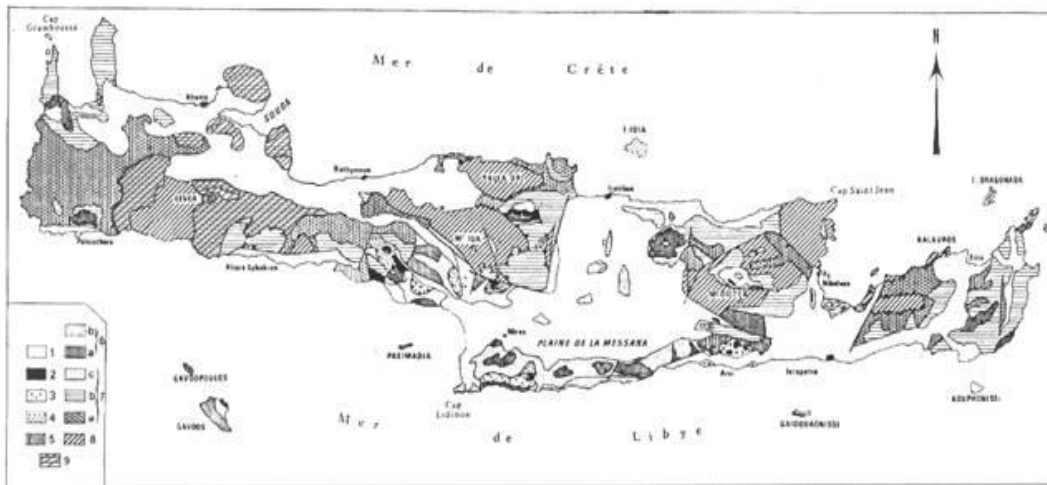
Σχήμα 1. Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα Ροδόπης, SM: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιοδοτική ζώνη, (Pe: Ζώνη Παιονίας, Pa: Ζώνη Παϊκού, Al: Ζώνη Αλμωπίας) = Ζώνη Αξίου, Pi: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικο-Κυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα «Ταλέα όρη - πλακώδεις ασβεστόλιθοι» πιθανόν της Ιονίου ζώνης (Μουντράκης, 1985)

Από τις γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας οι μάζες Ροδόπης και Σερβομακεδονικής θεωρούνται ότι αποτελούν την "Ελληνική Ενδοχώρα", οι ζώνες Περιοδοτική, Παιονίας, Πάικου, Αλμωπίας, Πελαγονική, Αττικοκυκλαδική και Υποπελαγονική ονομάζονται "Εσωτερικές Ελληνίδες" και οι ζώνες Παρνασσού-Γκιώνας, Ωλονού-Πίνδου, Γαβρόβου-Τρίπολης, Αδριατικοϊόνιος και Παξών ονομάζονται "Εξωτερικές Ελληνίδες".

Εκτός από τις κύριες γεωτεκτονικές ζώνες αναφέρονται σαν ξεχωριστές ενότητες, η ενότητα «Ταλέα όρη-Πλακώδεις ασβεστόλιθοι» που πιθανόν ανήκει στην Αδριατικοϊόνιο ζώνη, και η ενότητα της Βοιωτίας που μάλλον ανήκει στην Υποπελαγονική ζώνη.

Η Κρήτη έχει μια πολύπλοκη γεωλογική δομή (σχήμα 2) και έχουν διατυπωθεί διάφορες απόψεις σχετικά με τη δομή της, αυτό οφείλεται στην γεωτεκτονική θέση που

κατέχει σε σχέση με τις δύο συγκλίνουσες λιθοσφαιρικές πλάκες, της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής (σχήμα 3).

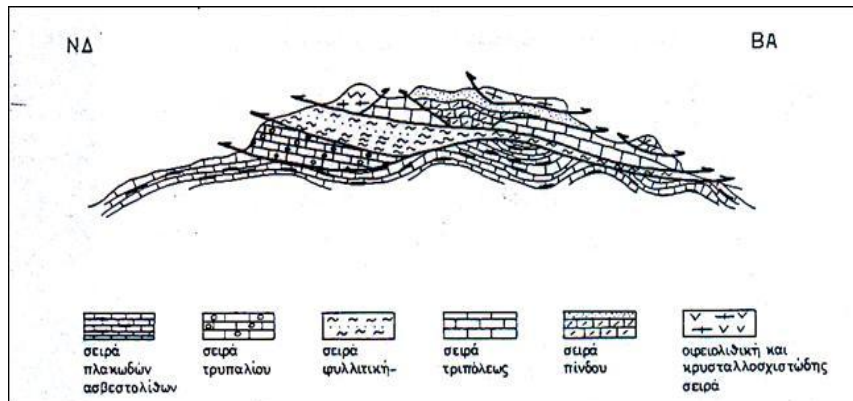


Σχήμα 2. Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης (τροποποιημένος από Boneau, 1973). Στο υπόμνημα: 1. Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα, 2. Οφιόλιθοι, 3. κάλυμμα Αστερουσιών, 4. καλ. Βάτου, 5. καλ. Σπηλίου και Πρέβελι, 6. καλ. Πίνδου (ασβεστόλιθοι, ραδιολαρίτες και φλύσχης), 7. καλ. Τρίπολης (ασβεστόλιθοι, φλύσχης), 7α. Καλ. Φυλλιτών-Χαλαζιτών, 8. καλ. Πλακωδών ασβεστόλιθων και 9. καλ. Τρυπαλίου.

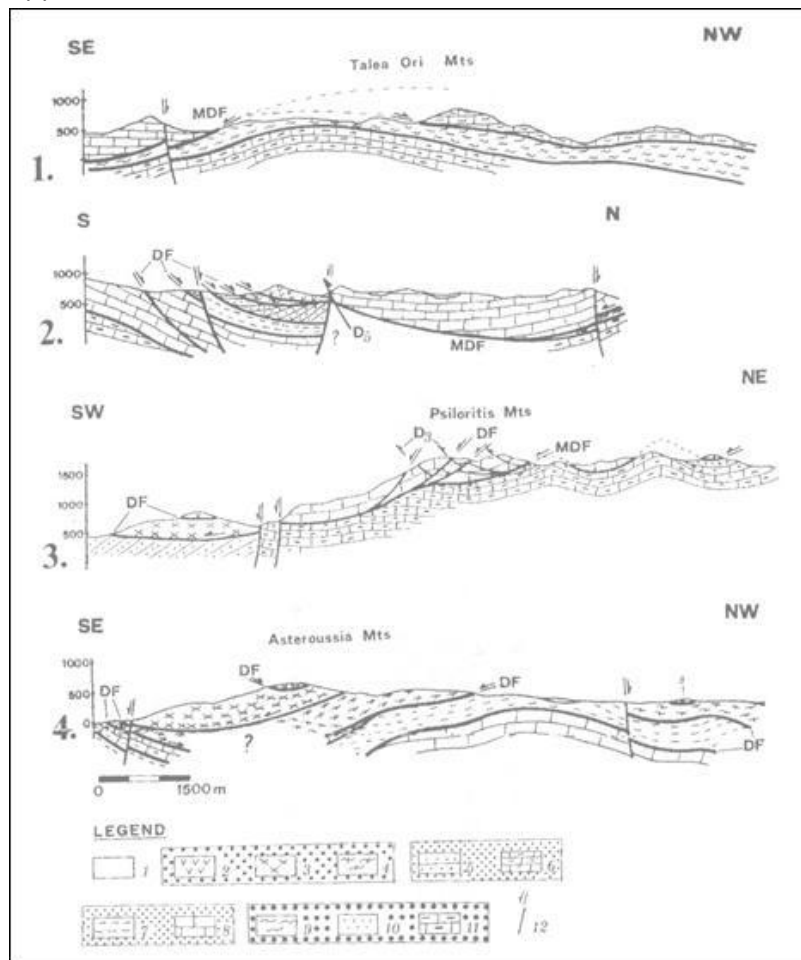


Σχήμα 3. Η σημερινή κινηματική κατάσταση του Αιγαίου (τροποποιημένη από τον Gilbert et al. 1994, Noomen et al. 1996 και Reilinger et al. 1997). Τα βέλη αντιστοιχούν σε οριζόντιες μετατοπίσεις σε σχέση με τη σταθερή Ευρώπη. Η παχιά μαύρη γραμμή δείχνει τη ζώνη υποβύθισης και οι κόκκινες γραμμές πλάγιες κινήσεις.

Χαρακτηριστικό στοιχείο της δομής της είναι τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα των διαφόρων ζωνών (σχήμα 4), τα οποία αναπτύσσονται πάνω στην ενότητα Ταλέα όρη- των πλακωδών ασβεστόλιθων.

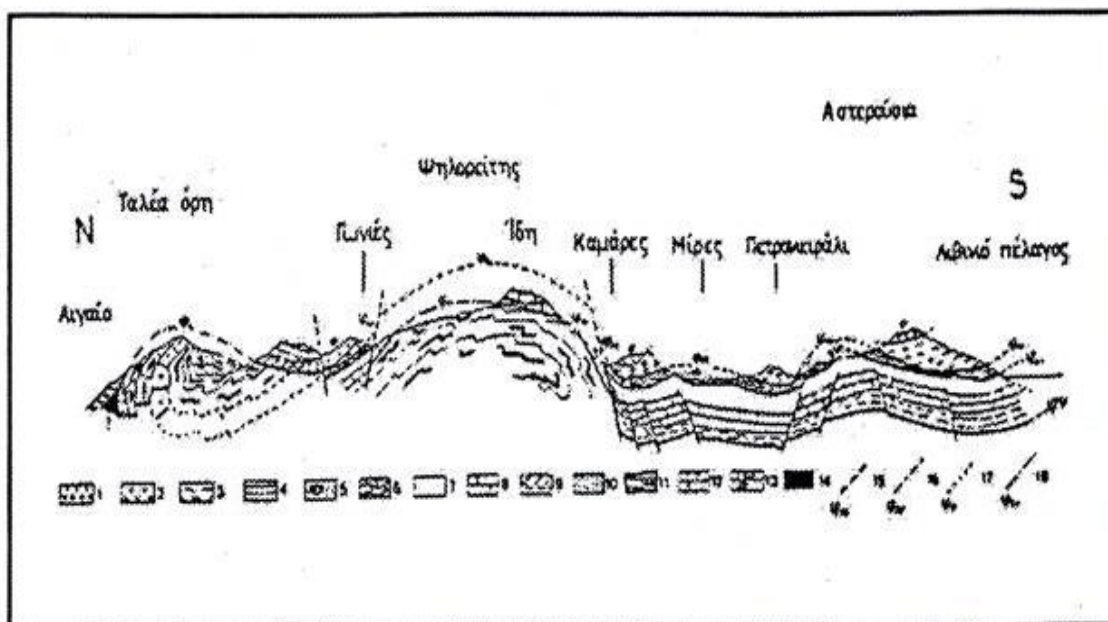


Σχήμα 4. Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της Κρήτης με τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα



Σχήμα 5. Γεωλογικές τομές στην περιοχή της κεντρικής Κρήτης (Φασσουλάς 1995). Τα νούμερα υποδηλώνουν: 1. Νεογενή ιζήματα, 2. Οφιολίθους, 3. καλ. Αστερουσίων, 4. καλ. Τεκτονικού melange, 5 και 6. καλ. Πίνδου (φλύσχης και ανθρακικά), 7 και 8. καλ. Τρίπολης (φλύσχης και ανθρακικά), 9. καλ. Φυλλιτών - χαλαζιτών, 10 και 11. καλ. Πλακωδών ασβεστόλιθων (μεταφλύσχης και ανθρακικά), DF ρήγμα απόσπασης, MDF κύριο ρήγμα απόσπασης.

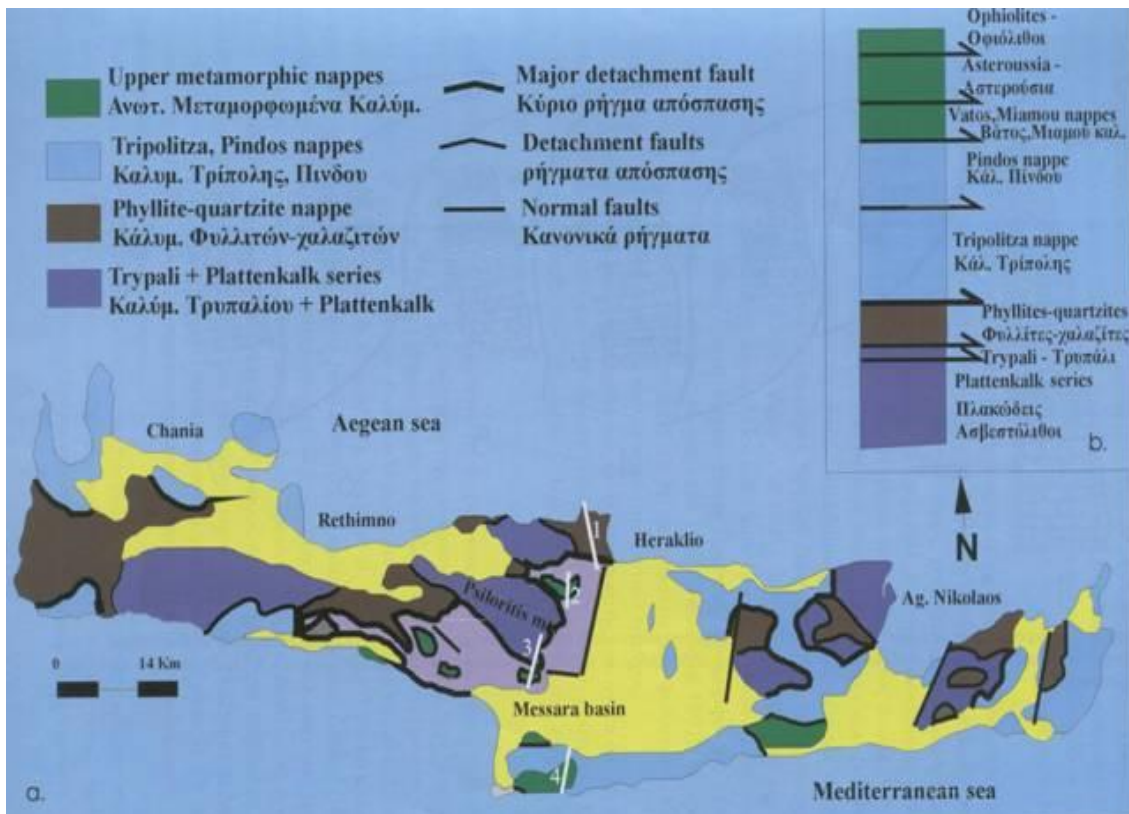
Το αυτόχθονο ή σχετικά αυτόχθονο σύστημα της Κρήτης αποτελεί η ακολουθία Ταλέα Όρη-Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι (σχήμα 6). Η ενότητα αυτή έχει ηλικία από το Πέρμιο μέχρι το Ηώκαινο και είναι ημιμεταμορφωμένη και πιθανώς ανήκει στην ζώνη της Αδριατικοϊονίου, αποτελείται κυρίως από κλαστικά ιζήματα χωρίς ηφαιστειακά πετρώματα στη βάση που εξελίσσονται σε τυπικούς «πλακώδεις ασβεστόλιθους» (μάρμαρα) που περιέχουν σε σημαντικό βαθμό κερατολιθικούς κονδύλους και πυριτικές ενστρώσεις. Εμφανίζονται επίσης μεγάλες μάζες άστρωτων(μετα)-ασβεστόλιθων, δολομιτών, ασβεστολιθικών κροκαλοπαγών και φυλλιτικών-χαλαζιακών πετρωμάτων. Αποκαλύπτεται σε πολλές περιοχές της Κρήτης υπό μορφή τεκτονικού παραθύρου



Σχήμα 6. Σχηματική γεωλογική τομή εγκάρσια στην Κεντρική Κρήτη. Απεικονίζεται η δομή των βουνών Ταλέα όρη, Ίδη (Ψηλορείτης) και Αστερούσια. 1: Νεογενείς αποθέσεις, 2: Οφειλίθοι, 3: μεταμορφωμένα πετρώματα των αστερουσιών, 4: πρώτος φλύσχος της Πίνδου (Κάτω Κρητιδικό), 5: ενότητα Άρβης, 6: τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου, 7: φλύσχος ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης, 8: ασβεστόλιθοι Γαβρόβου - Τρίπολης, 9: φυλλίτης, 10-14: σειρά των πλακωδών ασβεστόλιθων (Plattenkalk), 15-18: επωθήσεις των διαφόρων τεκτονικών καλυμμάτων.

Τεκτονικά επωθημένη στην ενότητα Ταλέα Όρη- Πλακωδών Ασβεστόλιθων βρίσκεται η ενότητα του Τρυπαλίου, που αποτελείται από μεταμορφωμένους δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, λατυποπαγείς ασβεστόλιθους έως γραουβάκες, σκούρους κυψελώδεις δολομίτες, άσπρα ζαχαρόκοκκα μάρμαρα και εμφανίσεις γύψου στη βάση. Η ηλικία τους καθορίστηκε με την βοήθεια απολιθωμάτων μεταξύ Άνω Τριαδικού-Κάτω Ιουρασικού.

Πάνω από την ενότητα του Τρυπαλίου βρίσκεται η ενότητα των Φυλλιτών-Χαλαζιτών, η οποία περιλαμβάνει φυλλίτες, χαλαζίτες, μετα-ψαμμίτες, μετα-κροκαλοπαγή, φακοειδείς ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μετα-ανδειςίτες, μεταβασίτες. Η ηλικία της είναι μεταξύ Περμίου - Τριαδικού. Στην ενότητα αυτή συμπεριλαμβάνεται από τους περισσότερους ερευνητές και το ημιμεταμορφωμένο σύστημα των Ραβδούχων που αποτελεί και το υπόβαθρο της ανθρακικής ακολουθίας της ζώνης της Τρίπολης που ακολουθεί επίσης με τεκτονική επίσης επαφή και αποτελείται από στο υποκείμενο και τους μεγάλου πάχους νηριτικούς ασβεστόλιθους. Σε ανώτερη τεκτονική θέση βρίσκεται απωθημένο το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου (σχήμα 7).

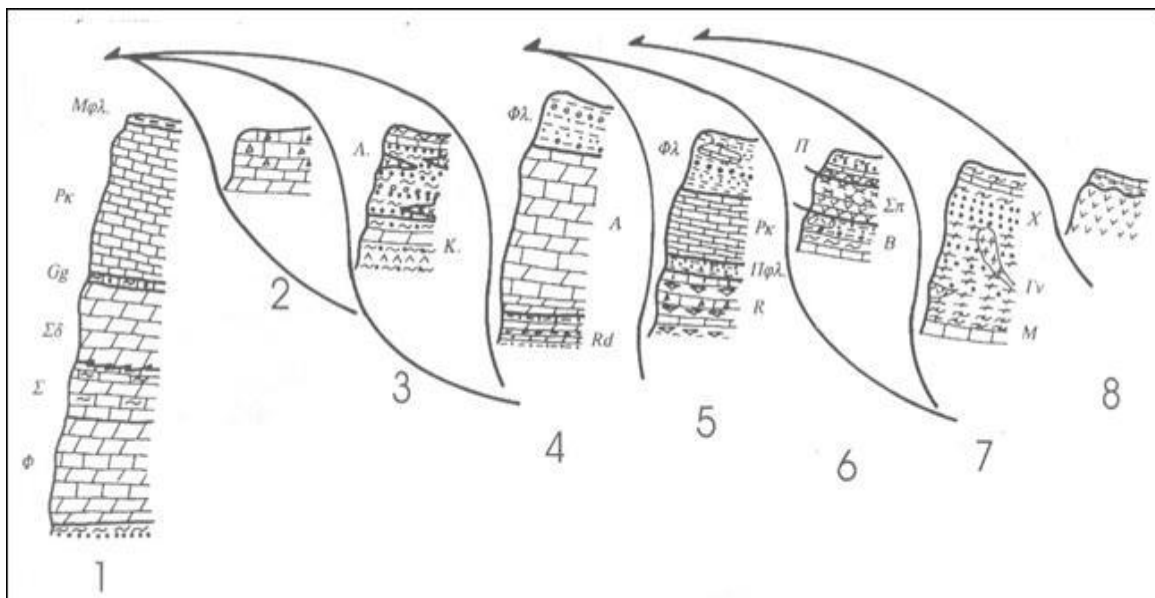


Σχήμα 7. Το οικοδόμημα των καλυμμάτων της Κρήτης

Πάνω από τις παραπάνω αναφερόμενες εξωτερικές ζώνες υπάρχουν σε ανώτερη τεκτονική θέση αλλόχθονα τεκτονικά λείπια των εσωτερικών ζωνών, όπως είναι η ενότητα της Άρβης. Πάνω από την ενότητα του Τρυπαλίου βρίσκεται η ενότητα των Φυλλιτών-Χαλαζιτών, η οποία περιλαμβάνει φυλλίτες, χαλαζίτες, μετα-ψαμμίτες, μετα-κροκαλοπαγή, φακοειδείς ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μετα-ανδεσίτες, μεταβασίτες. Η ηλικία της είναι μεταξύ Περμιού-Τριαδικού. Στην ενότητα αυτή συμπεριλαμβάνεται από τους περισσότερους ερευνητές και το ημιμεταμορφωμένο σύστημα των Ραβδούχων που αποτελεί και το υπόβαθρο της ανθρακικής ακολουθίας της ζώνης της Τρίπολης που ακολουθεί επίσης με τεκτονική επίσης επαφή και αποτελείται από στο υποκείμενο και τους μεγάλο πάχους νηριτικούς ασβεστόλιθους. Σε ανώτερη τεκτονική θέση βρίσκεται απωθημένο το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου.

Πάνω από τις παραπάνω αναφερόμενες εξωτερικές ζώνες υπάρχουν σε ανώτερη τεκτονική θέση αλλόχθονα τεκτονικά λείπια των εσωτερικών ζωνών, όπως είναι η ενότητα της Άρβης που περιλαμβάνει τμήματα οφιολιθικού συμπλέγματος, η ενότητα των Αστερουσίων που περιέχει γνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες.

Τέλος, πάνω από τους αλπικούς σχηματισμούς βρίσκονται ιζήματα του Νεογενούς (κυρίως κλαστικά θαλάσσια ιζήματα) και Τεταρτογενούς (κυρίως ηπειρωτικής φάσης) τα οποία συνήθως έχουν κυμαινόμενο πάχος και εξάπλωση στις διάφορες περιοχές της Κρήτης (σχήμα 8).



Σχήμα 8. Στρωματογραφικές στήλες των καλυμμάτων της Κρήτης. Τα νούμερα υποδηλώνουν: 1. καλ. Πλακωδών ασβεστόλιθων, 2. καλ. Τρυπαλίου, 3. καλ. Φυλλιτών-Χαλαζιτών, 4. καλ. Τρίπολης, 5. καλ. Πίνδου, 6. καλ. Τεκτονικού melange, 7. καλ. Αστερουσίων, 8. Οφιόλιθοι.

Η προ-νεογενής γεωλογική δομή της Κρήτης μπορεί να περιγράψει σαν μια διάταξη τεσσάρων διαδοχικά επωθημένων τεκτονικών καλυμμάτων ενώ όλη αυτή η αλληλουχία είναι επωθημένη πάνω σε μια παρά-αυτόχθονη Ζώνη. Η διάταξη αυτή είναι συνολικού πάχους περίπου 6.5 km και έχει ακολούθως τοπικά καλυφθεί από Νεογενείς και Τριτογενείς αποθέσεις. Η παρά-αυτόχθονη Ζώνη της βάσης ονομάζεται **Ζώνη Πλακωδών Ασβεστόλιθων** ενώ η τεκτονικά υπερκείμενη αυτής αλληλουχία αποτελείται από κάτω προς τα πάνω, από την **Φυλλιτική –Χαλαζιτική Σειρά**, την **Ζώνη της Τρίπολης**, την **Ζώνη της Πίνδου** και την **Ζώνη των Οφιολίθων – Οφιολιθικού Melange**. Κάθε μια από τις ενότητες αυτές έχει διακεκριμένη λιθολογική δομή και τεκτονική ιστορία που αντανάκλα το συγκεκριμένο τεκτονικό περιβάλλον γέννησης καθώς και την μετέπειτα εξελικτική της πορεία.

Η διαδοχική εφίπνευση των τεκτονικών αυτών καλυμμάτων έγινε από το τέλος του Ηώκαιανου έως την αρχή του Μειόκαινου λόγω της από Β προς Ν συμπίεσης. Η τεκτονική αυτή διεργασία προκάλεσε έντονη πτυχωσιγενή παραμόρφωση και κατακερματισμό λόγω των a-b και a-c διαθλάσεων των πτυχώσεων. Κατά το μέσον όμως του Μειόκαινου στην περιοχή εφαρμόστηκε ένα εφελκυστικό τεκτονικό καθεστώς με διεύθυνση Β-Ν που ισχύει μέχρι σήμερα λόγω της έναρξης της υποβύθισης στην Ελληνική αύλακα που αναπτύσσεται τοξοειδώς κατά μήκος του νοτίου και δυτικού περιθωρίου του νησιού, με κλίση ΒΑ. Αποτέλεσμα της τεκτονικής αυτής ήταν η δημιουργία ρηγμάτων με διευθύνσεις κυρίως Β-Ν και Α-Δ καθώς και ο σχηματισμός τεκτονικών κεράτων –horsts- και βυθισμάτων –grabens- με κατακόρυφες μετακινήσεις που φτάνουν τα 5-7 km Γεωφυσικές διασκοπίσεις έχουν δείξει ότι το πάχος του φλοιού στην περιοχή της Κρήτης είναι της τάξης των 30-32 km. Στα τεκτονικά βυθίσματα που δημιουργήθηκαν αποτεθήκαν ακολούθως **Νεογενή** και **Τεταρτογενή** ιζήματα όπως μάργες, άργιλοι, ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι, εβαπορίτες, άμμοι, κροκαλοπαγή

Αλπική τεκτονική

Για πάρα πολλά χρόνια η τεχνική εξέλιξη της Κρήτης και του νότιου Αιγαίου γενικότερα, θεωρούνται ως το αποτέλεσμα της τελικής αλπικής, συμπιεστικής τεκτονικής και

του μεταγενέστερου νεοτεκτονικού εφελκυσμού (Φυτρολάκης 1980, Angelier et al. 1982, Bonnaeu 1984, Hall et al. 1984). Το πιο αποδεκτό μοντέλο προτείνει την διαδοχική ανάπτυξη ζωνών υποβάθμισης, οι οποίες συνεχώς μετατοπίζονταν προς τις εξωτερικότερες περιοχές του ελληνικού χώρου. Όμως, η αναγνώριση της διαδικασίας έκτασης ηπειρωτικού φλοιού ως κύριας συνιστώσας κατά την τεκτονική εξέλιξη των Κυκλάδων (Lister et al. 1984, Avigad & Garfunkel 1991), και της Κρήτης (Kilias et al. 1993, Fassoulas et al. 1994), τροποποίησε τις μέχρι τότε απόψεις για την γεωλογική εξέλιξη του νότιου Αιγαίου.

Η παλαιότερη παραμόρφωση των πετρωμάτων της Κρήτης παρατηρείται στα ανώτερα καλύμματα. Τα πετρώματα του καλύμματος των Αστερουσίων δέχθηκαν στο Άνω Κρητιδικό την επίδραση μιας μεταμόρφωσης υψηλής θερμοκρασίας που έλαβε χώρα κατά την διάρκεια μιας λέπτυνσης του φλοιού (Hall 1987) καθώς η ίδια μεταμόρφωση εμφανίζεται σε ανάλογα πετρώματα στην περιοχή των Κυκλάδων και της Μικράς Ασίας (Μάζα του Μεντερέ, Reinecke et al. 1982), το κάλυμμα των Αστερουσίων μπορεί να αποτελεί τμήμα ενός μεγάλου ηπειρωτικού τεμάχους που εκτάθηκε και λεπτύνθηκε κατά το Άνω Κρητιδικό (Φυτρολάκης 1980, Kilias et al. 1993, Fassoulas 1999). Επιπλέον, η υψηλής πίεσης/ χαμηλής θερμοκρασίας μεταμόρφωση των πετρωμάτων του Πρέβελι θα πρέπει να συνδέεται με μια διαδικασία υποβύθισης πλακών, που έλαβε χώρα είτε κατά το Άνω Ιουρασικό (Seidel et al. 1977), είτε στο Ηώκαινο (Kilias et al. 1993, Fassoulas 1999).

Στο τέλος Ηώκαινου με αρχές Ολιγοκαινού, ένα κύριο τεκτονικό γεγονός επηρέασε όλα τα ανώτερα καλύμματα (Fassoulas 1999), προκαλώντας την επώθηση προς τα δυτικά των καλυμμάτων και το σχηματισμό του Τεκτονικού *mélange*. Η τεκτονική αυτή διαδικασία πιθανόν σχετίζεται με μια απόσπαση και διαφυγή προς τα νοτιοδυτικά, πετρωμάτων υψηλής πίεσης (ενότητα του Πρέβελι;), κρυσταλλοσχιστωδών και οφιολίθων, από το χώρο των Κυκλάδων προς την περιοχή της Κρήτης, καθώς οι δυο περιοχές συνδέονται γεωλογικά και τεκτονικά μεταξύ τους (Fassoulas 1999).

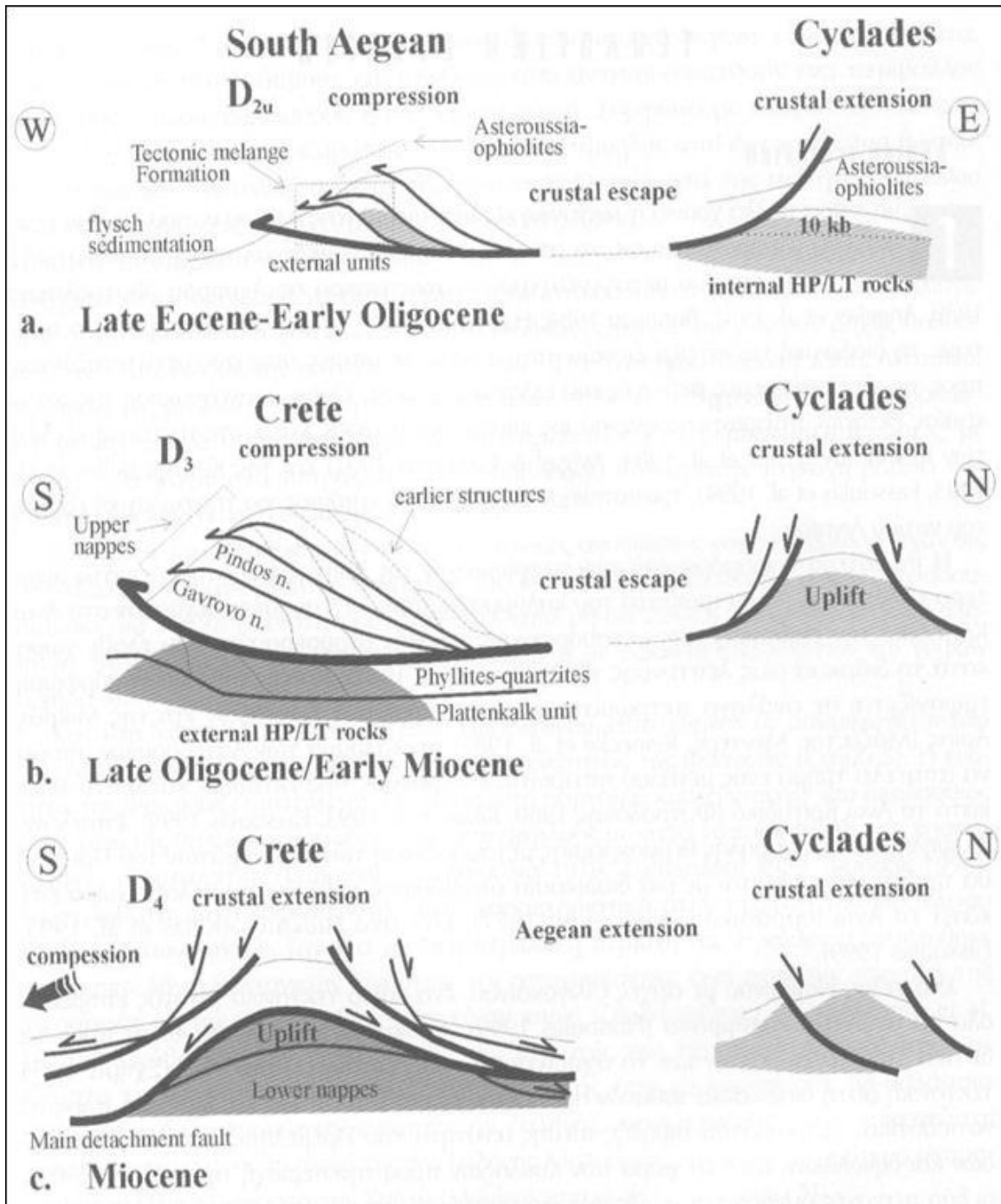
Στο άνω Ολιγόκαινο, η φορά της τοποθέτησης των καλυμμάτων στράφηκε προς τα νότια. Οι παρατηρήσεις υπαίθρου έδειξαν ότι η μεταβολή της φοράς τοποθέτησης των καλυμμάτων δεν είναι σταδιακή (Fassoulas 1999), αντιθέτως ήταν απότομη και πιθανόν σχετίζεται με την αλλαγή που συνέβη στο Ολιγόκαινο στη σχετική ανάμεσα στην Αφρική και στην Ευρασία (Dercourt et al. 1986). Η καλυμματική τεκτονική του Ολιγοκαινού επηρέασε όλα τα καλύμματα της Κρήτης προκαλώντας την υποβύθιση και μεταμόρφωση των κατωτέρων καλυμμάτων και την επανατοποθέτηση, με ανάστροφα ρήγματα, των ανωτέρων καλυμμάτων.

Στην αρχή του Μειόκαινου, τα πετρώματα της Κρήτης επηρεάστηκαν από μια βορρά νότου ηπειρωτική έκταση, ως αντιστάθμισμα στην προηγούμενη πάχυνση του φλοιού (Kilias et al. 1993, Fassoulas et al. 1994, Φασσουλάς 1995). Η έκταση αυτή δημιούργησε κανονικά, προς τον βορρά και τον νότο, ρήγματα απόσπασης, και προκάλεσε την κατάρρευση του οικοδομήματος των καλυμμάτων της Κρήτης και τον σχηματισμό των πρώτων συντεκτονικών λεκανών. Τα ρήγματα απόσπασης διευκόλυναν την απομάκρυνση τουλάχιστον 10 km φλοιού που βρισκόταν ανάμεσα στα ανώτερα και κατώτερα καλύμματα, προκαλώντας ταυτόχρονα την τεκτονική ανύψωση και εκταφή τους.

Η ανύψωση των κατωτέρων καλυμμάτων στην δυτική Κρήτη ήταν πολύ γρήγορη και ολοκληρώθηκε στο χρονικό διάστημα 24 με 15 εκατ. χρόνια από σήμερα (Thompson et al. 1998), ενώ στην κεντρική Κρήτη ήταν πιο αργή, επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη μιας μεταμόρφωσης πολύ χαμηλού βαθμού (Kilias et al. 19994, Fassoulas et al. 1994, Φασσουλάς 1995). Η έκταση του Μειόκαινου συνεπώς οδήγησε στην επανατοποθέτηση όλων των

καλυμμάτων της Κρήτης και την απολέπτυνση (boudinage) όλων των πετρωμάτων που βρίσκονται πάνω από το κάλυμμα των Πλακωδών ασβεστόλιθων.

Τα ανώτερα μεταμορφωμένα καλύμματα δεν επηρεάστηκαν ουσιαστικά από την πλαστική παραμόρφωση του Ολιγοκαίνου- Μειοκαίνου, αφού σύμφωνα με παρατηρήσεις πυρηνικών σχάσεων σε απατίτη (Thompson et al. 1998) τα πετρώματα αυτά βρίσκονταν από το Ηώκαινο, σχεδόν σε επιφανειακές συνθήκες.



Σχήμα 9. Η γεωλογική εξέλιξη της Κρήτης (Fassoulas, 1999).

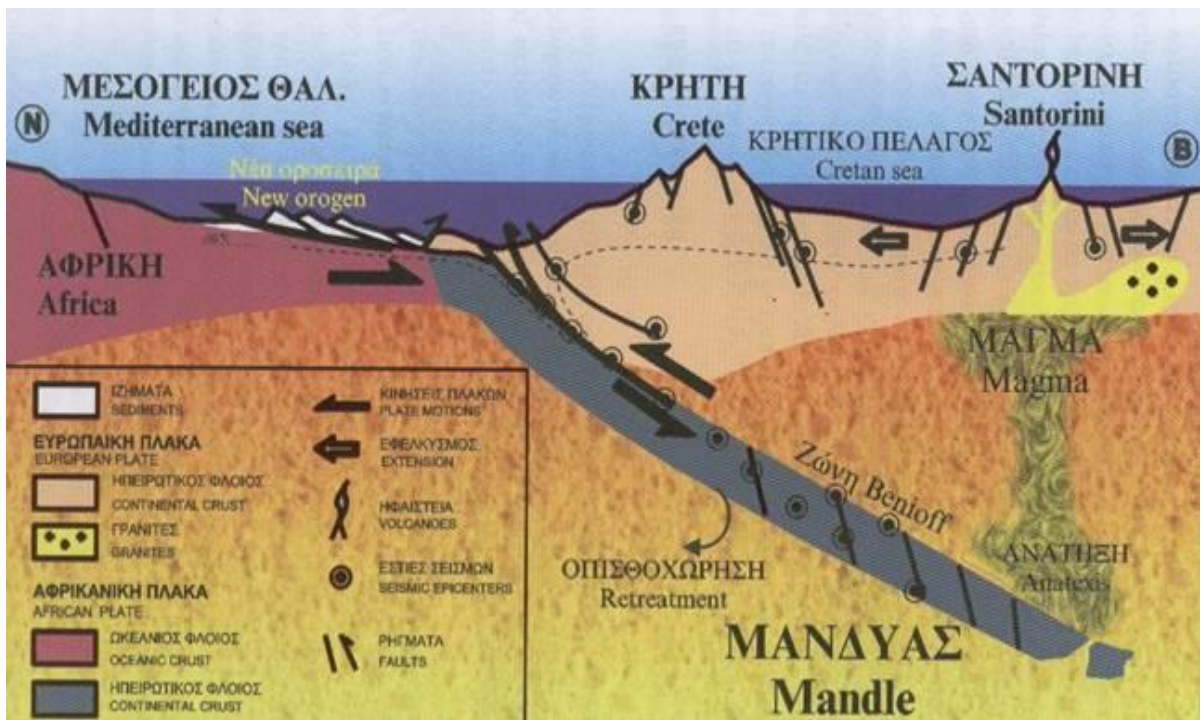
Κατά την διάρκεια του Νεογενούς η Κρήτη επηρεάστηκε κυρίως από εφελκυστική-εκτατική με πιθανά διαλείμματα συμπιεστικών φάσεων. Η γεωλογική εξέλιξη της Κρήτης από το Μειόκαινο μέχρι σήμερα από αποτέλεσμα δύο κύριων γεωδυναμικών διεργασιών: της συνεχούς σύγκλισης των πλακών της Αφρικής και Ευρασίας με την ταυτόχρονη οπισθοχώρηση της ζώνης υποβύθισης και της τεκτονικής διαφυγής προς τα νοτιοδυτικά της μικροπλάκας της Ανατολίας .

Πρόσφατες τεκτονικές μελέτες στην περιοχή της κεντρικής Κρήτης (ten Veen & Meijer 1999 Fassoulas 2000) έδειξαν ότι από το μέσο Μειόκαινο μέχρι σήμερα, η τεκτονική εξέλιξη της Κρήτης ήταν αποτέλεσμα διαδοχικών εφελκυστικών περιόδων που δημιούργησαν τουλάχιστον τρεις γενεές ρηγμάτων. Η πρώτη γενεά αποτελείται από ρήγματα με διεύθυνση ανατολής – δύσης. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη των ρηγμάτων αυτών συνέβη κατά την διάρκεια του μέσο/ άνω Μειόκαινου με αρχές Μεσηνίου, ως αποτέλεσμα της οπισθοχώρησης προς τα νότια της ζώνης υποβύθισης. Αυτό το βορρά- νότου εφελκυστικό πεδίο των τάσεων δημιούργησε και τις πρώτες λεκάνες της Κρήτης στην διεύθυνση ανατολής- δύσης .

Στο τέλος του Μεσηνίου, η έναρξη της ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας και η απαγομένη τεκτονική διαφυγή της πλάκας της Ανατολίας (Westaway 1994) προκάλεσαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στο πεδίο των τάσεων στην Κρήτη. Κατά την διάρκεια του τέλους Μεσηνίου με μέσο Πλειοκαίνου, δημιουργήθηκαν τα δεύτερης γενεάς ρήγματα με διεύθυνση βορρά- νότου , τα οποία προκάλεσαν σημαντική ανύψωση ορισμένων περιοχών και ταυτόχρονα την δημιουργία των λεκανών του Ηρακλείου της Ιεράπετρας και του Καστελίου Χανίων . Τα ρήγματα αυτά είναι αποτέλεσμα της έκτασης παράλληλα στην διεύθυνση του τόξου, που προκάλεσε η διαφυγή προς τα νοτιοδυτικά της πλάκας της Ανατολίας (Fassoulas 2000).

Στο τέλος του Πλειόκαινου, η σταθεροποίηση του πεδίου των τάσεων στην Κρήτη που δημιούργησε το σημερινό, ενεργό γεωδυναμικό καθεστώς (δηλαδή η οπισθοχώρηση της ζώνης υποβύθισης και η διαφυγή της Ανατολίας), προκάλεσε τα ρήγματα της τρίτης γενεάς. Αυτά αναπτύχθηκαν κάθετα μεταξύ τους, λόγω του ότι οι εφελκυστικοί άξονες του πεδίου των τάσεων βρίσκονται οριζόντιοι και με το ίδιο μέγεθος (Σχήμα 9c). Εξαιτίας των ρηγμάτων αυτών δημιουργήθηκαν νέες λεκάνες με διεύθυνση βορειοανατολική- νοτιοδυτική και βορειοδυτική- νοτιοανατολική, ενώ ταυτόχρονα συνεχίστηκε με μεγάλους ρυθμούς η τεκτονική ανύψωση ορισμένων περιοχών. Η σημερινή τοπογραφία και το ανάγλυφο της Κρήτης διαμορφώθηκαν από την δράση πολλών, μεγάλης κλίμακας, ρηγμάτων της τρίτης γενεάς , με ορισμένα από αυτά να είναι ακόμα ενεργά.

Από το τέλος του Μειόκαινου, η τεκτονική ανύψωση ολόκληρης σχεδόν της Κρήτης ενίσχυσε την καρστική αποσάθρωση των αθρακικών πετρωμάτων σχηματίζοντας πολλά φαράγγια, σπηλιές και οροπέδια, καθώς επίσης και άλλες εντυπωσιακές καρστικές δομές .



Σχήμα 10. Σχηματική απεικόνιση της Ελληνικής ζώνης υποβύθισης (χωρίς κλίμακα)

2. ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

2.1 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.

2.2 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

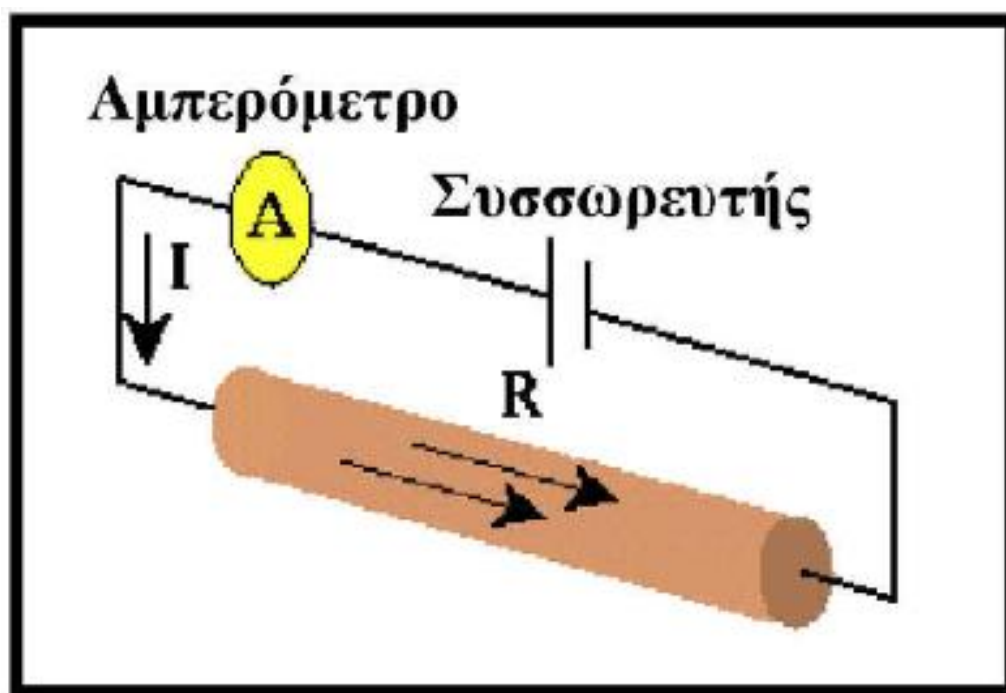
μέθοδο που χρησιμοποιεί μετρήσεις φυσικών ρευμάτων, ή τελλουρικών ρευμάτων, που παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών σε σχετικά μεγάλα βάθη (μέχρι και τον μανδύα) μέσα στη 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..

2.3 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.

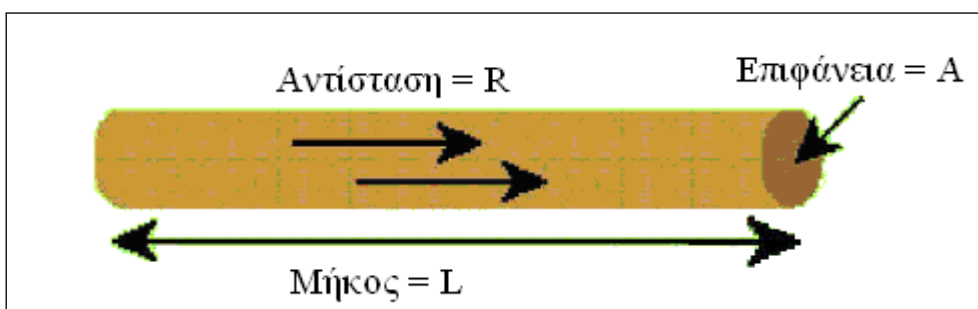
- Πως συνδέεται η μετρούμενη αντίσταση με τις θεμελιώδεις ιδιότητες του

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.;

2.4 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, $\frac{\partial V}{\partial l}$ 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).

2.5 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

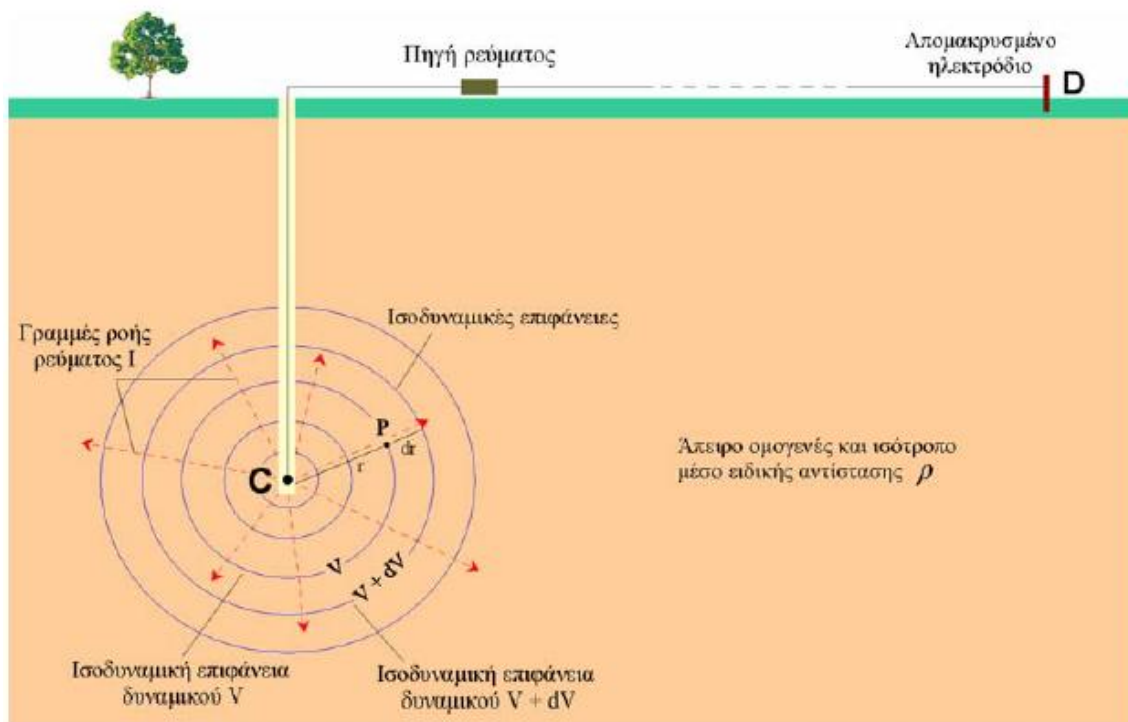
Υλικό	Ειδική Αντίσταση (Ohm-meter)
Αέρας	∞
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-3}
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό Άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Γρανίτης	$100 - 1 \times 10^6$
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
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.

2.6 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

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

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

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

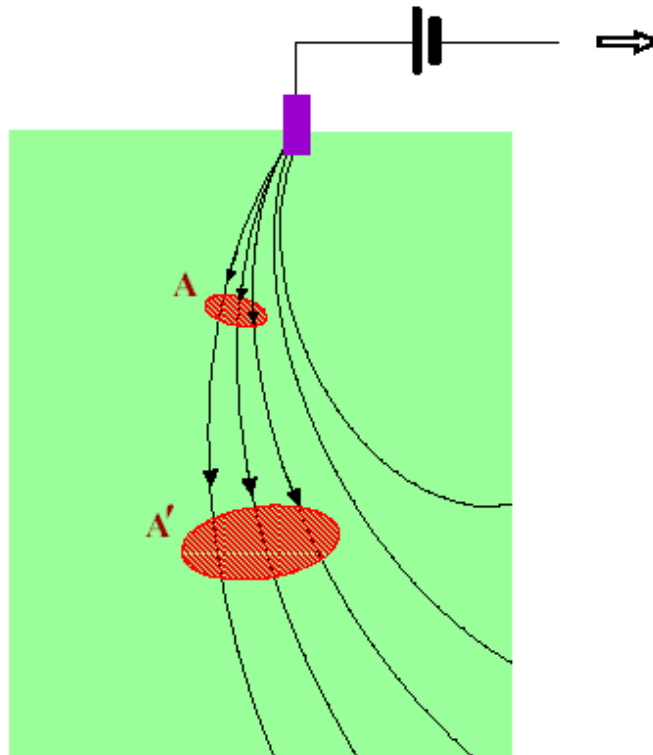
οπότε το δυναμικό, V , σε σημείο, P , του χώρου λόγω της σημειακής πηγής ρεύματος, C , θα δίδεται από τη σχέση

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

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.

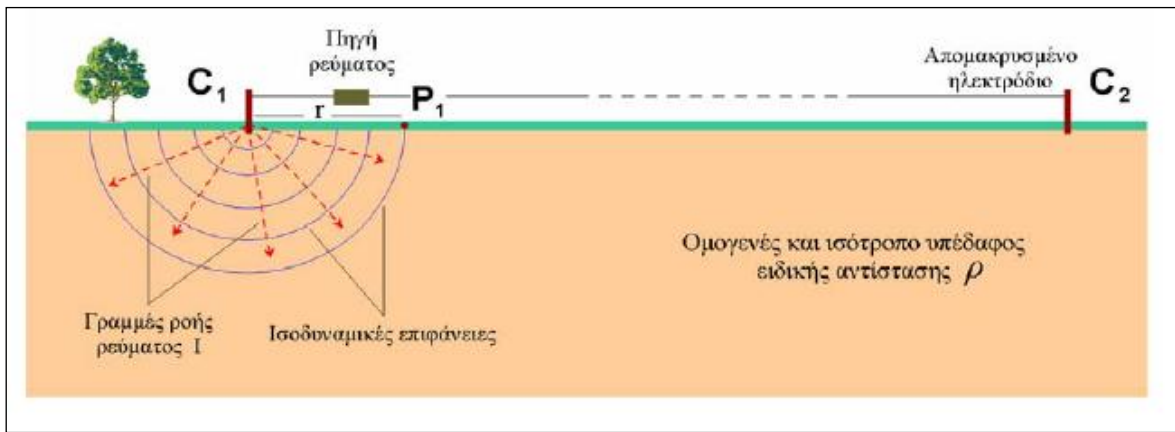


Σχήμα 11. Σχηματική παράσταση της πυκνότητας του ρεύματος

Συνεπώς, όπως και από το παραπάνω σχήμα προκύπτει, κοντά στο ηλεκτρόδιο, το πηλίκο της ποσότητας του ρεύματος, που στην προκείμενη 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 .

2.7 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

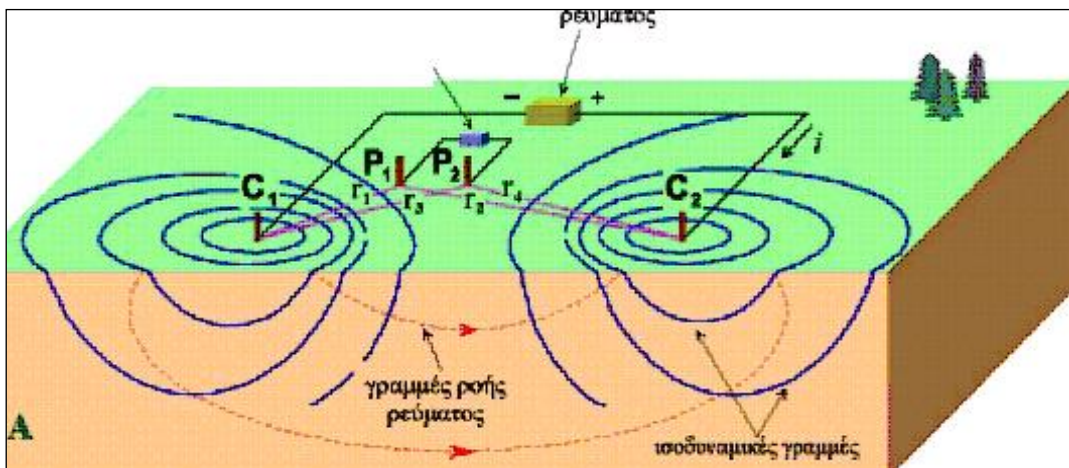
Οι ισοδυναμικές επιφάνειες ως κάθετες στις γραμμές ροής (ακτίνες) θα είναι ομόκεντρες ημισφαιρικές επιφάνειες. Για τον προσδιορισμό του δυναμικού V σε σημείο P_1 του ημιχώρου (συνήθως στην επιφάνεια του ημιχώρου) εργαζόμαστε με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγούμενα με τη διαφορά ότι εδώ η επιφάνεια A είναι 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

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

2.8 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

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

όπου r_3 και r_4 είναι οι αποσ

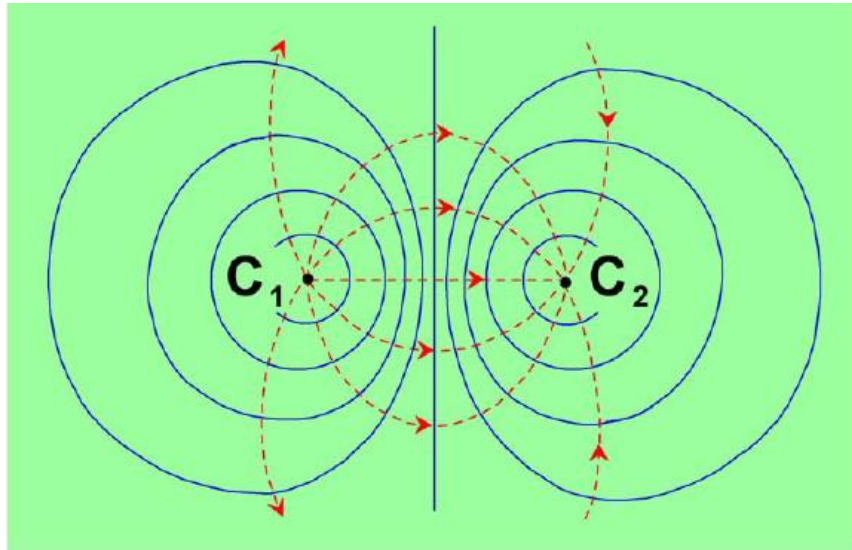
Η διαφορά δυναμικού

(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.

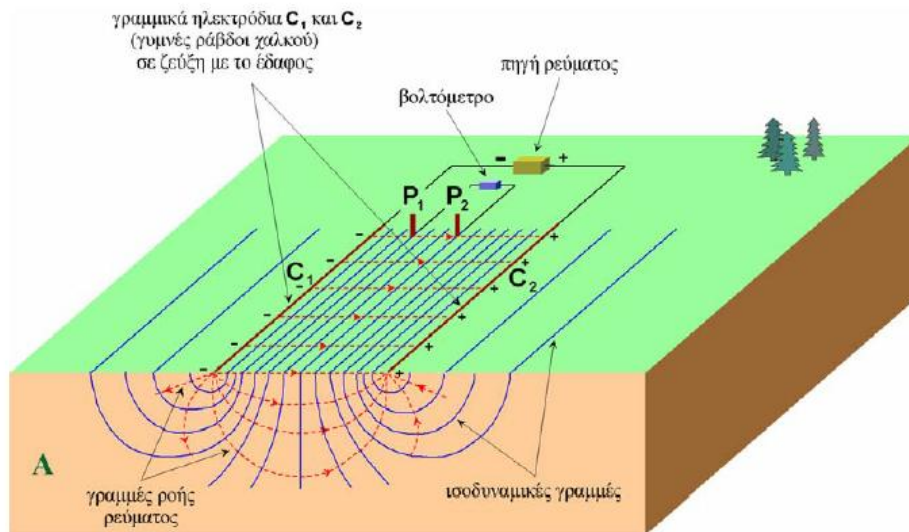


Σχήμα 14. Μια πανοραμική φωτογραφία όπου φαίνονται οι ισοδυναμικές επιφάνειες με μπλε χρώμα και οι γραμμές ροής του ρεύματος με κόκκινο χρώμα.

2.9 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.



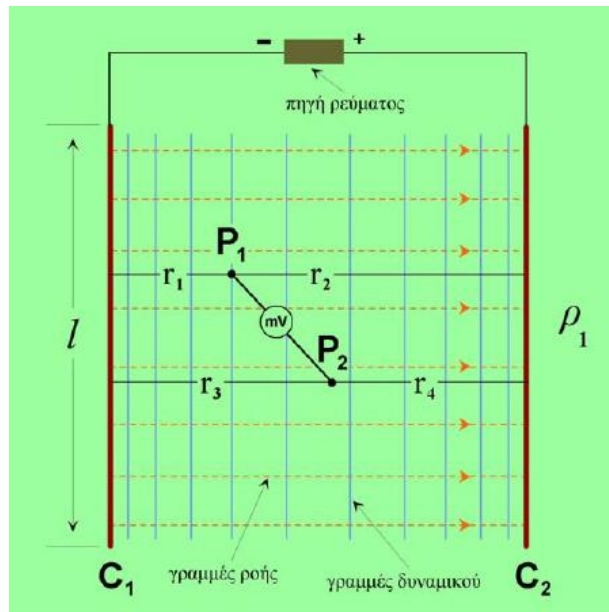
Σχήμα 15. Στην περίπτωση που έχουμε γραμμικές πηγές

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,

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



Σχήμα 16. Πανοραμική άποψη στην περίπτωση που έχουμε γραμμικές πηγές

της οποίας η τελική λύση δίδει ότι η διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ δύο σημείων P_1 και P_2 δίδεται από τη σχέση

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

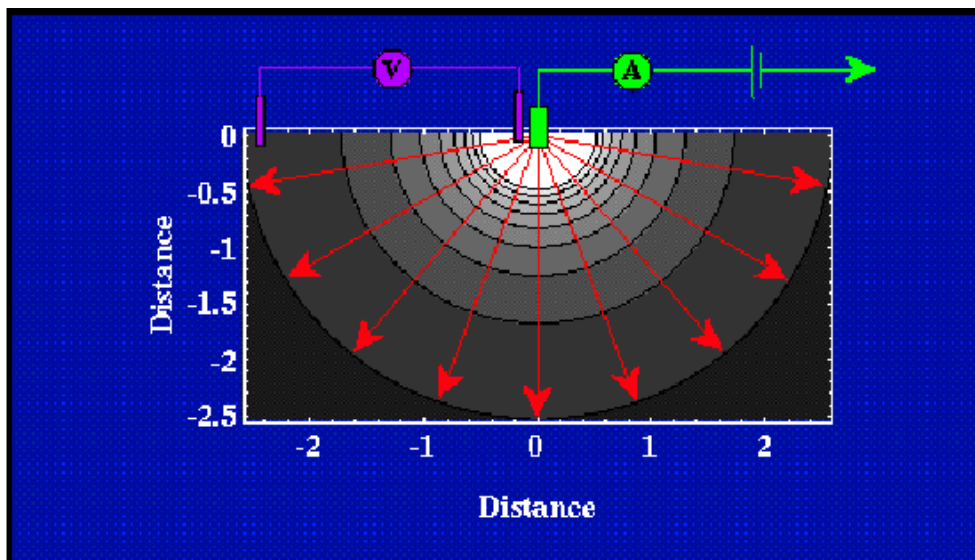
όπου I είναι το ρεύμα της πηγής, l το μήκος των γραμμικών ηλεκτροδίων και r_1, r_2, r_3 και r_4 οι αποστάσεις των σημείων P_1 και P_2 από τα γραμμικά ηλεκτρόδια.

2.10 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

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Στην έκφραση αυτή, V είναι το δυναμικό, 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.

3. Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

3.1 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.

3.2 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 κατεχοχίν 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 συρμάτων 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 συρμάτων 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.

3.3 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 Ωm και είναι ικανά να μετρούν δυναμικά από 10mV 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.

3.4 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

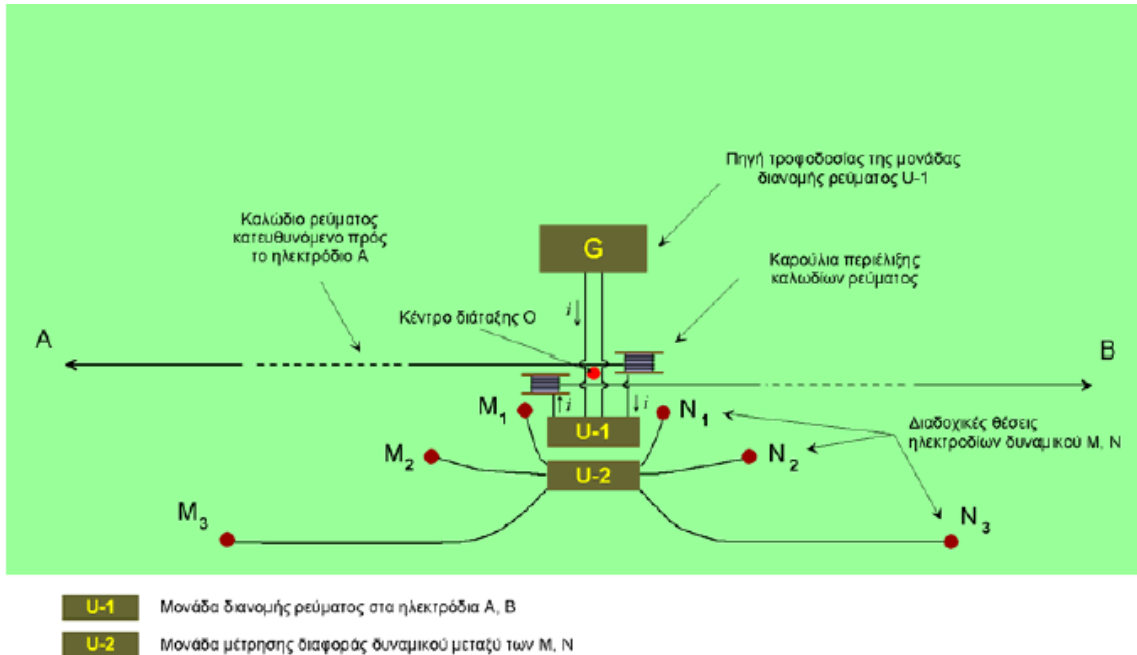
πρέπει να επιφέρουμε αλγεβρικά την διόρθωση $\frac{R - R_1}{R}$.

3.5 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.

3.6 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

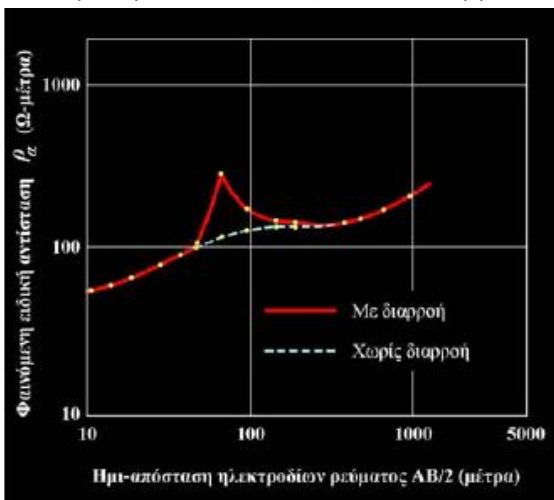
Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή παρατηρείται μεταξύ του κυκλώματος ρεύματος και δυναμικού. Εξαρτάται από τη γεωμετρία των δύο κυκλωμάτων και εν γένει μειώνεται καθώς η απόσταση μεταξύ των δύο κυκλωμάτων αυξάνει. Για την διάταξη Schlumberger όπου τα κυκλώματα AB και MN απλώνονται παράλληλα μεταξύ τους το μέγεθος 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.



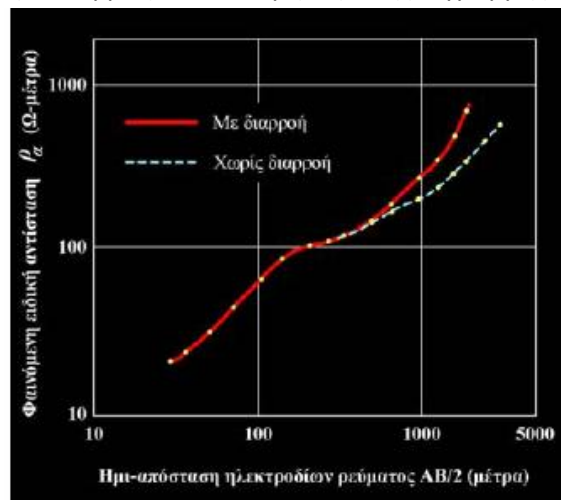
Σχήμα 18. Ένα μπλοκ διάγραμμα της διάταξης ώστε να ελαχιστοποιείται το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

3.7 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 κακομεταχείρισης τους κυρίως κατά την έλξη τους. Η διαρροή μπορεί να δημιουργήσει απότομες πτυχές στις γεωλεκτρικές 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.

3.8 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 γειννίασης 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.

3.9 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.

3.10 Η Μέτρηση του Γεωμετρικού Παράγοντα K

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

$$\Delta V = V_{p_1} - V_{p_2} = \frac{\rho_a I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)$$

λύνοντας ως προς ρ_a

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

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 $\epsilon\%$ στην μέτρηση της

απόστασης OA ή OB οδηγεί σε ένα σφάλμα ε% στη μέτρηση της ρ_a . Εάν το σφάλμα είναι και στις δύο αποστάσεις OA και OB τότε το σφάλμα της ρ_a θα είναι 2ε%. Σφάλμα ε% στη μέτρηση της απόστασης MN απαιτεί αντίθετης φοράς (-ε%) 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 .

3.11 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 $\rho_a \pm 6\%$.

3.12 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 κάποιο 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 αγώγιμη 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 περιγράψουμε 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 αντιστρέφουμε 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.

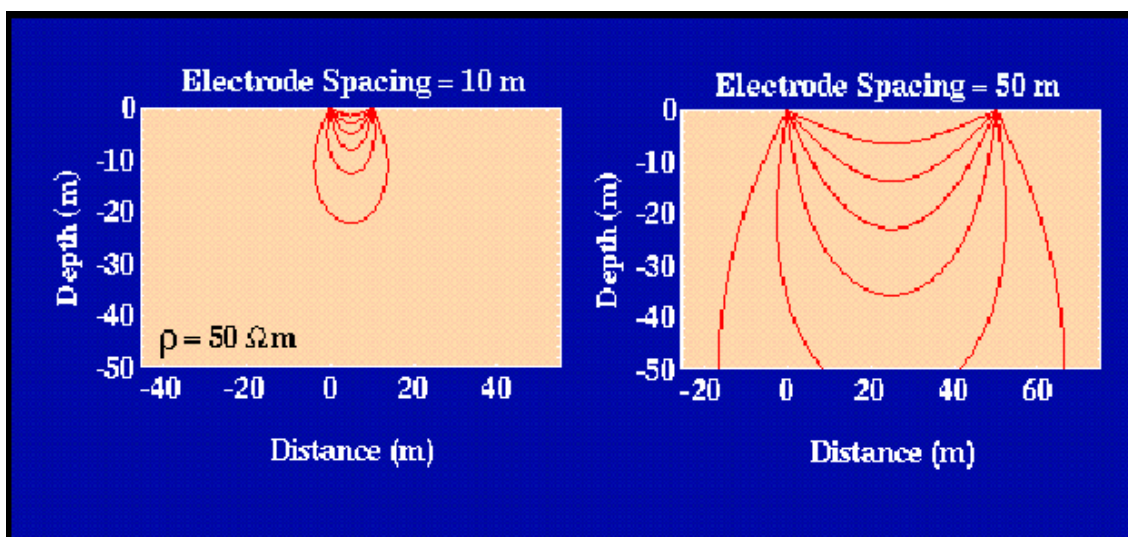
- Γεωλογία και τοπογραφία κοντά στα ηλεκτρόδια – κάθε μεταβολή στη γεωλογία ή στο περιεχόμενο νερό γύρω από ένα ηλεκτρόδιο, η οποία προκαλεί μεταβολές στην ειδική αντίσταση κοντά στην επιφάνεια, θα επηρεάσει σημαντικά τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης. Επιπλέον, η ανώμαλη τοπογραφία, θα συγκεντρώσει 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.

4. 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.

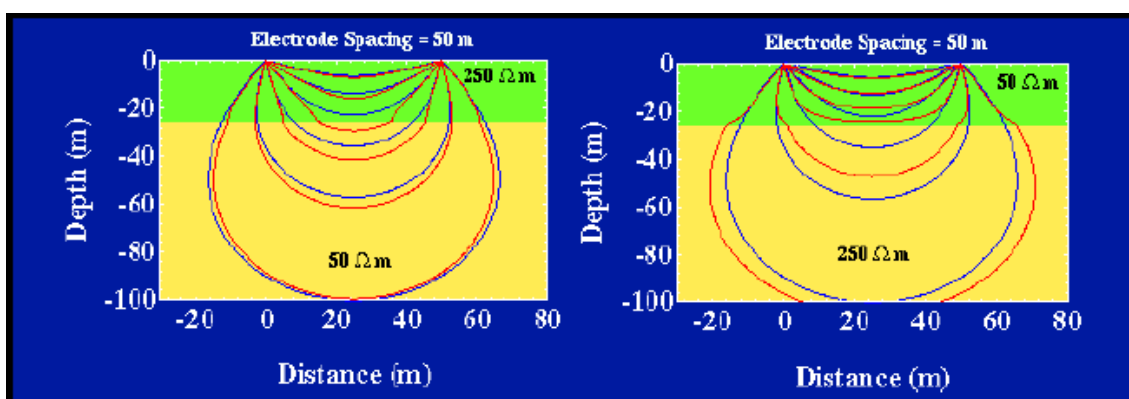
Αυτό υποδηλώνει ότι αν αυξήσουμε την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, περισσότερο από το ρεύμα που διοχετεύουμε θα κινηθεί προς μεγαλύτερα βάθη. Επειδή η συνολική αντίσταση της ηλεκτρικής διαδρομής αυξάνει με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων, για να αναγκάσουμε το ρεύμα να κινηθεί κατά μήκος 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.

4.1 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 αλλούβια 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.



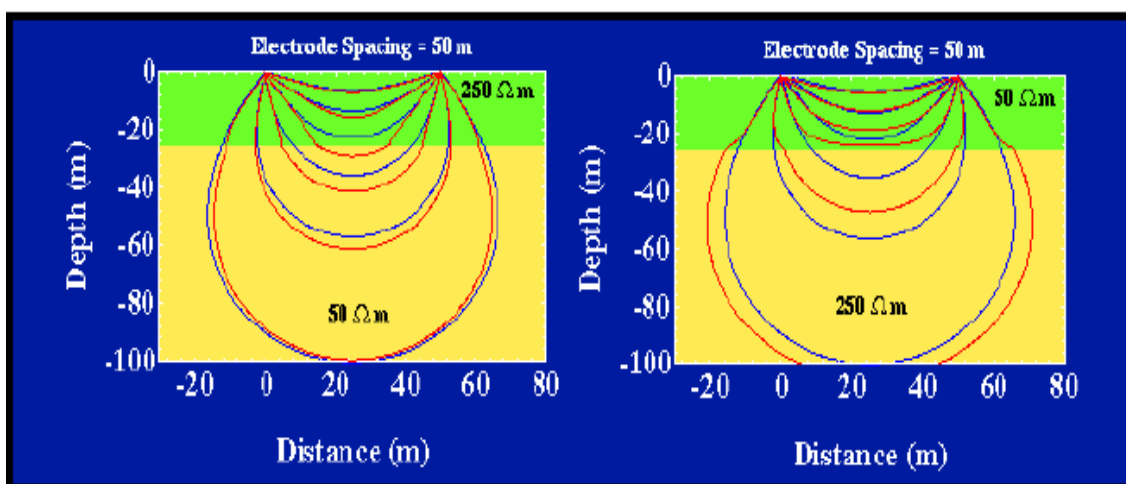
Σχήμα 22. Στις παραπάνω φωτογραφίες φαίνονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις οριζοντίων στρωμάτων

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 $50 \Omega\text{m}$. 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.

4.2 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 συναρτήσε 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.

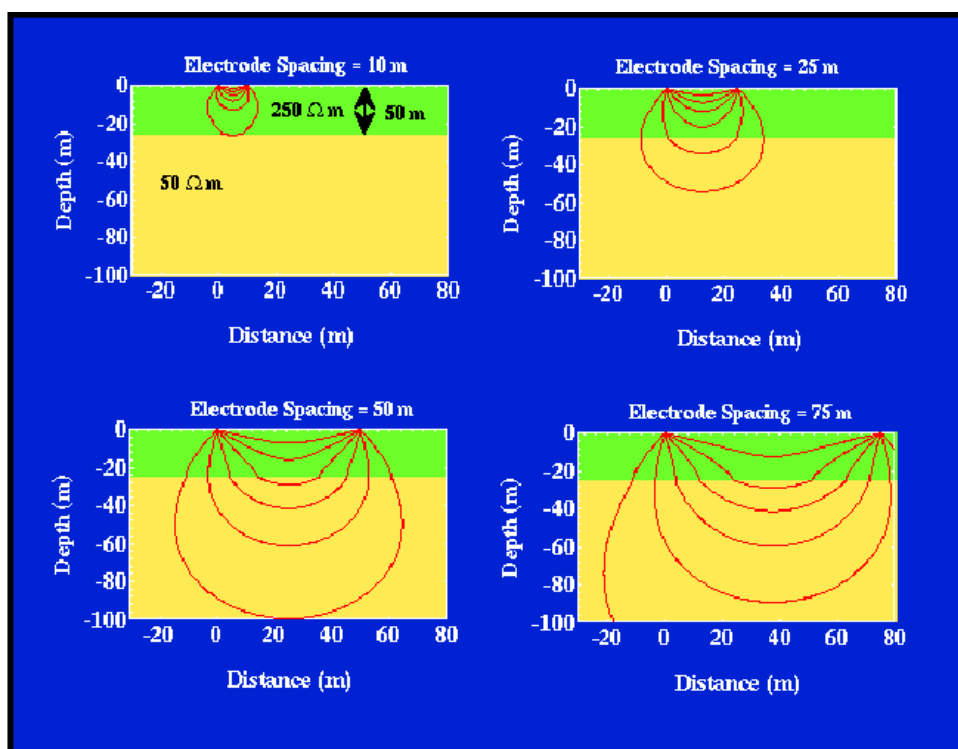
$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{i} \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right)} \right]$$

(8α)

4.3 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.

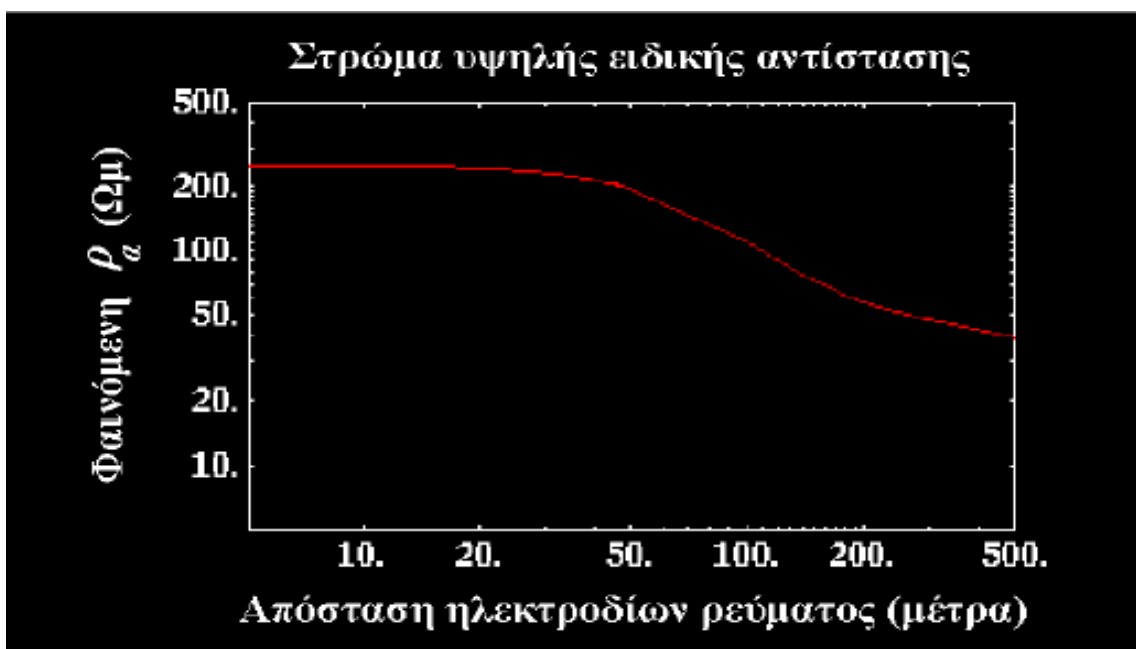


Σχήμα 24. Στις παραπάνω φωτογραφίες βλέπουμε την συμπεριφορά των γραμμών ροής όταν αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων όταν έχουμε ένα στρώμα με μεγαλύτερη ωμική αντίστασή πάνω από ένα άλλο με μικρότερη αντίσταση.

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.



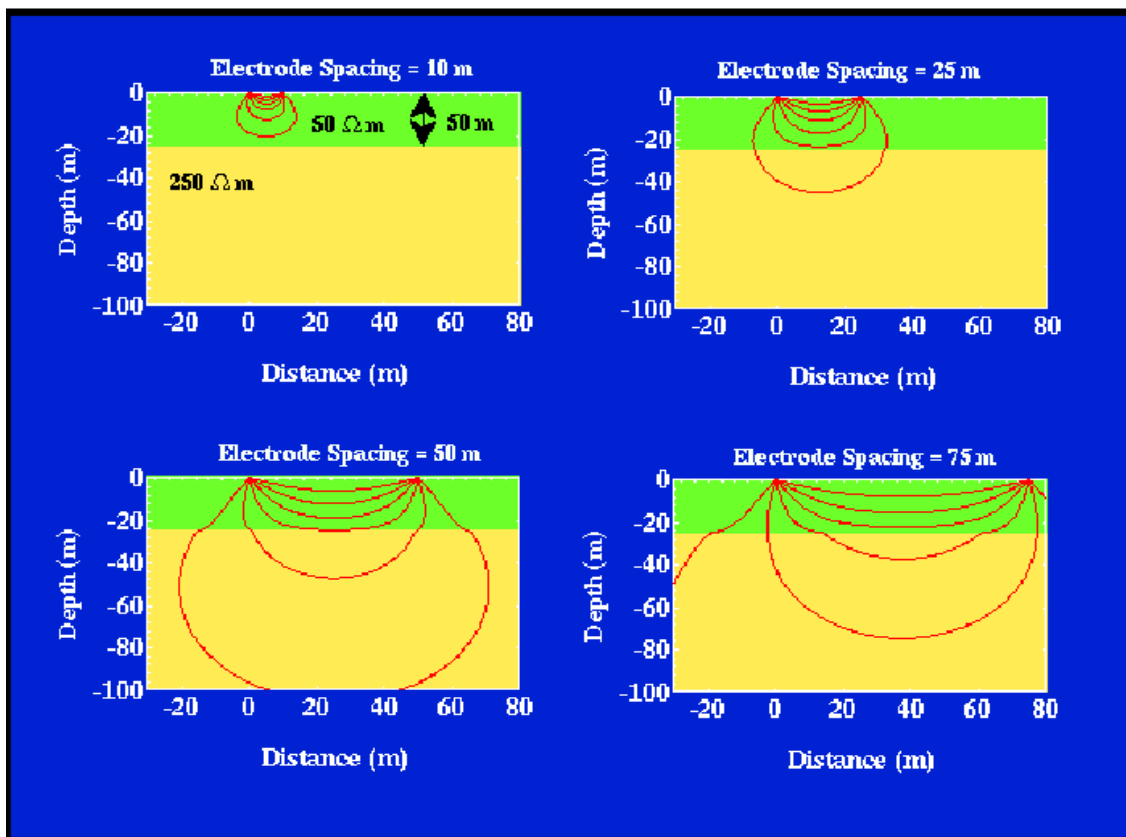
Σχήμα 25. Γεωηλεκτρική καμπύλη

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.

4.4 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.

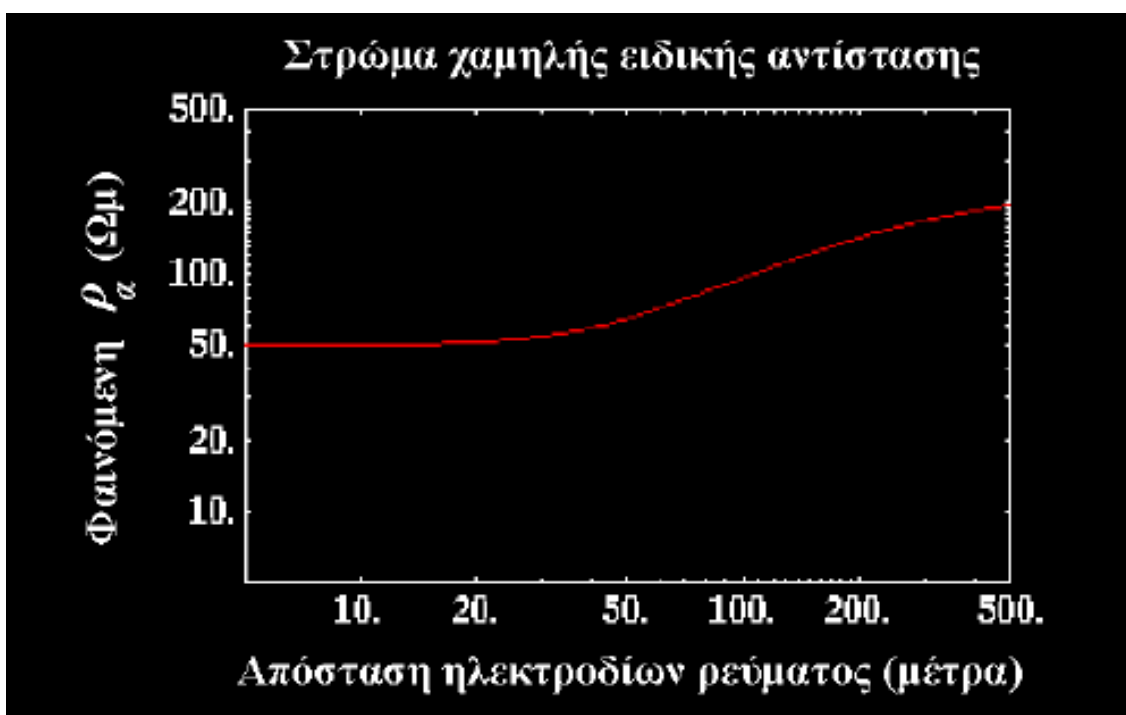


Σχήμα 26. Στις παραπάνω φωτογραφίες βλέπουμε την συμπεριφορά των γραμμών ροής όταν αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων όταν έχουμε ένα στρώμα με μικρότερη ωμική αντιστάση πάνω από ένα άλλο με μεγαλύτερη αντίσταση.

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.

5. 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.

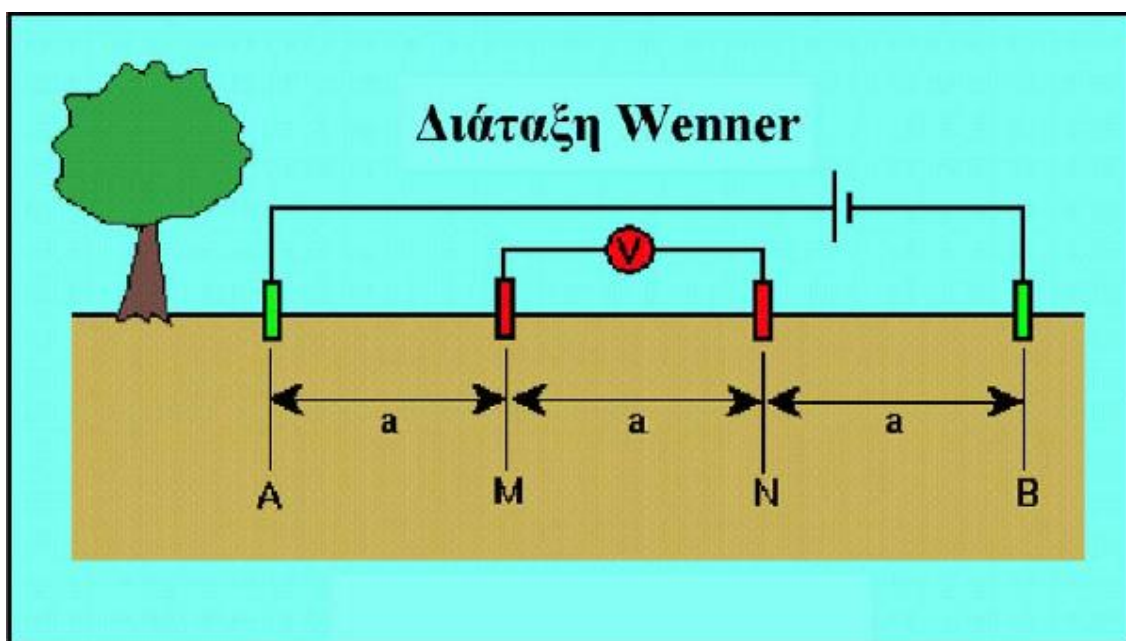
- Βυθοσκοπήσεις ειδικής αντίστασης (Resistivity Soundings) – Όπως έχουμε ήδη δείξει, η μέθοδος της ειδικής αντίστασης μπορεί να εντοπίσει μεταβολές στην ειδική αντίσταση που συμβαίνουν μόνο με το βάθος. Μάλιστα, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται περισσότερο από όλες όταν θέλουμε να δούμε τις μεταβολές της ειδικής 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.

5.1 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.

5.2 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

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

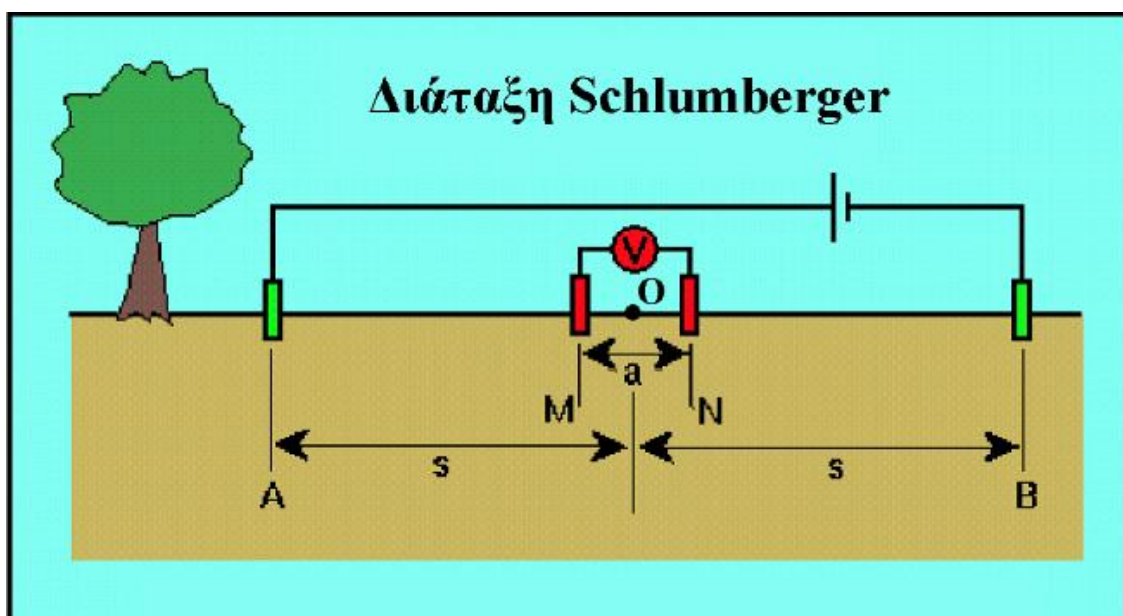
Η εξίσωση αυτή δεν είναι τίποτε περισσότερο από την έκφραση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που είδαμε προηγουμένως, όπου οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι σταθερές και ίσες με a . Για να δημιουργήσουμε ένα διάγραμμα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων, από 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.

5.3 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.

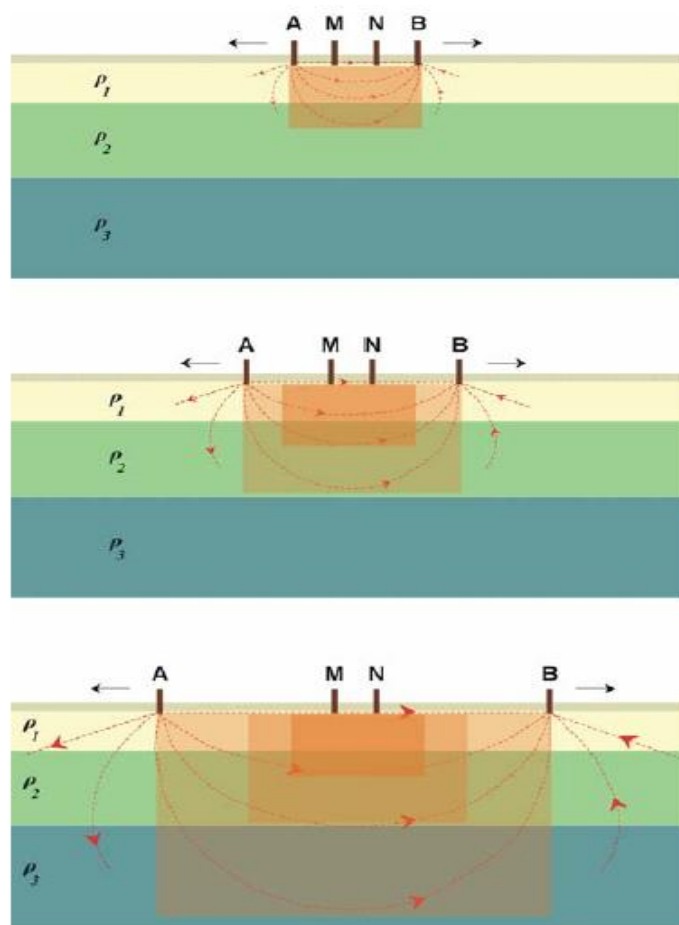
Για κάθε θέση των ηλεκτροδίων η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την σχέση (8) όπου η ποσότητα

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

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.

5.4 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_w , που υπολογίζονται από την τιμή του K και τον λόγο $\Delta V/I$ (σχέση 8).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

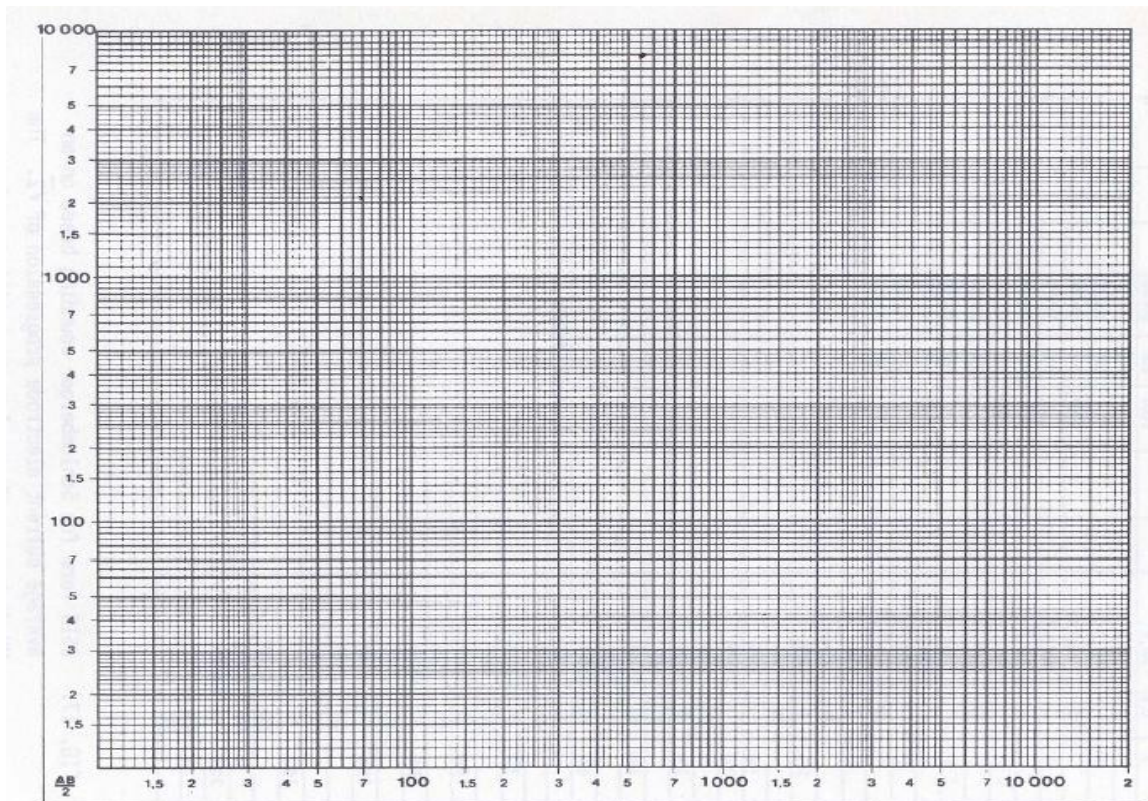
Έργο:				Περιοχή:							
Ημερομηνία:			Διεύθυνση γραμμής AB:					α/α Βυθομέτρησης:			
AB/2 μέτρα	MN μέτρα	K	ΔV mV	I mA	ρ_a Ωμέτρα	AB/2 μέτρα	MN μέτρα	K	ΔV mV	I mA	ρ_a Ωμέτρα
1	0.5	5.89				100	5	6280			
1.5	0.5	13.74				100	20	1555			
2	0.5	24.74				150	20	3520			
3	0.5	56.2				200	20	6270			
3	2	12.57				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 .

5.5 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 προηγουμένα αναφέραμε το $MN \ll \frac{AB}{5}$.

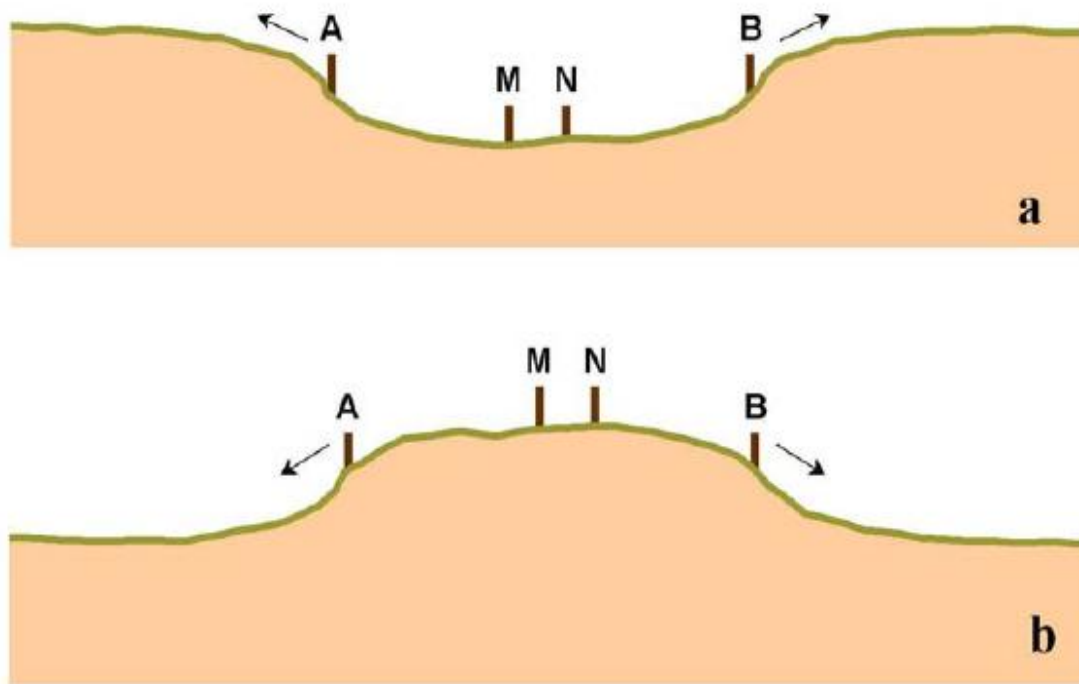
Κατά την διεξαγωγή μιας ηλεκτρικής βυθομέτρησης η απόσταση MN διατηρείται σταθερή ενόσω η απόσταση AB αυξάνει προοδευτικά. Η διατήρηση του MN σταθερού ελαχιστοποιεί την επίδραση στη μετρούμενη τιμή της ειδικής αντίστασης πλευρικών ανομοιογενειών ευρισκόμενων στη περιοχή των ηλεκτροδίων M και N. Όταν 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 υπερिशύχει 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

5.6 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 Μ και Ν 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 ΜΝ τοποθετηθούν μέσα σε βαθούλωμα (κοιλότητα) του εδάφους (σχήμα 32α) 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).

5.7 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.

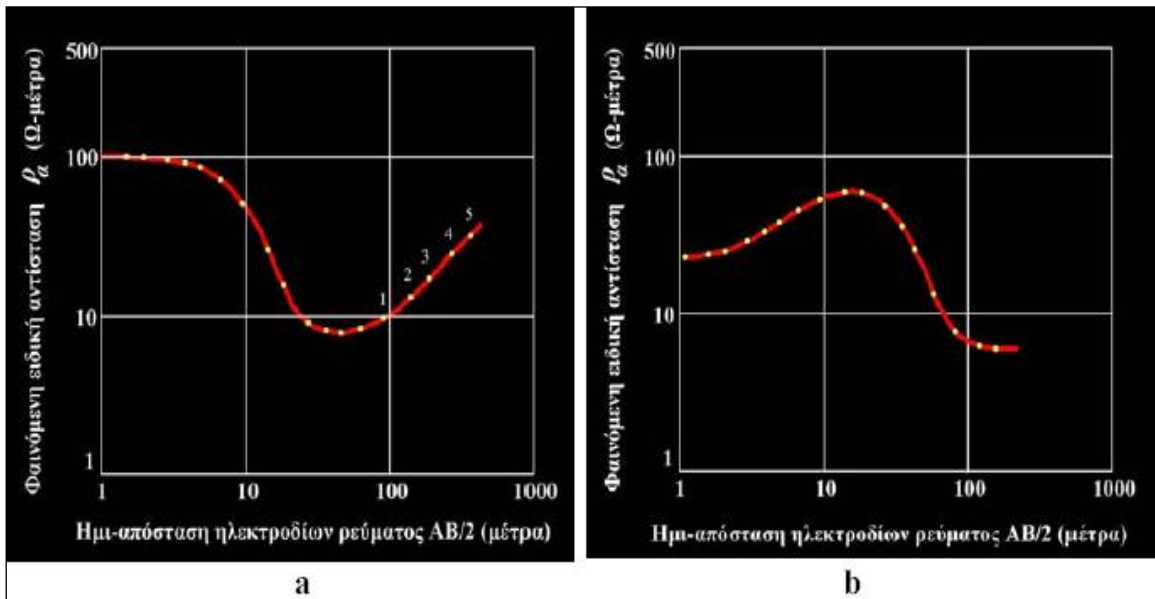
Το συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων ρεύματος στην ορθή τους θέση στο έδαφος δουλεύει πολύ καλά αλλά δεν είναι και ο μοναδικός τρόπος αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος. Στη πραγματικότητα, κάθε φορέας που διεξάγει έρευνες με την μέθοδο της ειδικής αντίστασης εφαρμόζει 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.

5.8 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 υποβάθρου. 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 33α).



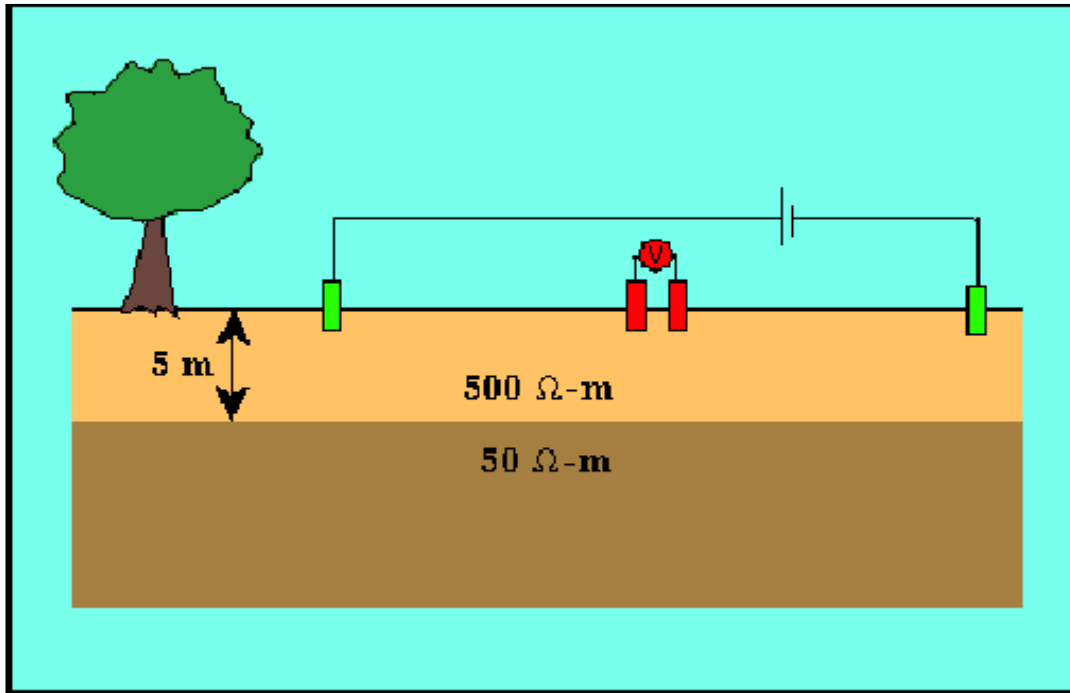
Σχήμα 33. Αντιοισιχές γεωηλεκτρικές καμπύλες

Εάν αντίθετα το γεωλογικό υπόβαθρο είναι ένας αγωγίμος 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).

5.9 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;

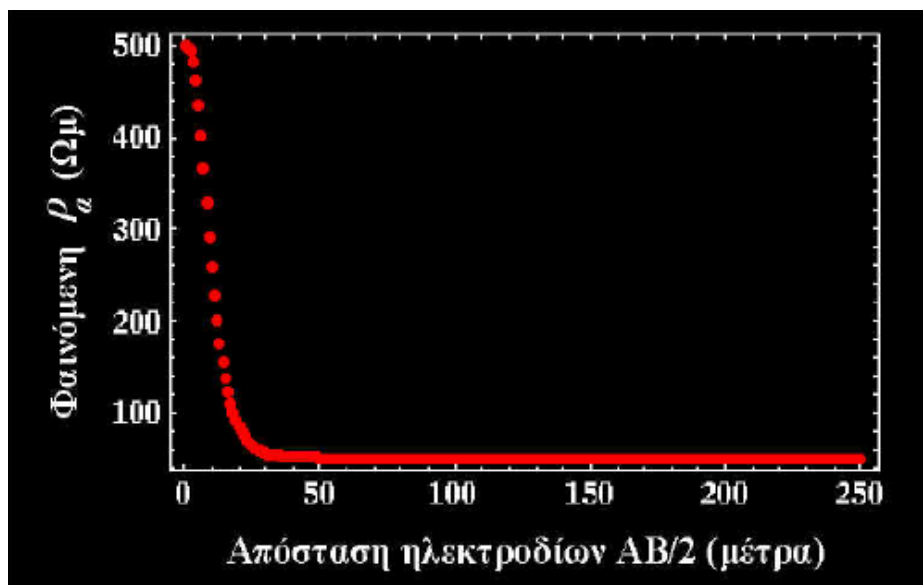
Θεωρούμε ότι πραγματοποιούμε μια βυθοσκόπηση με τη μέθοδο Schlumberger πάνω από το γεωλογικό μοντέλο του παρακάτω σχήματος.



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

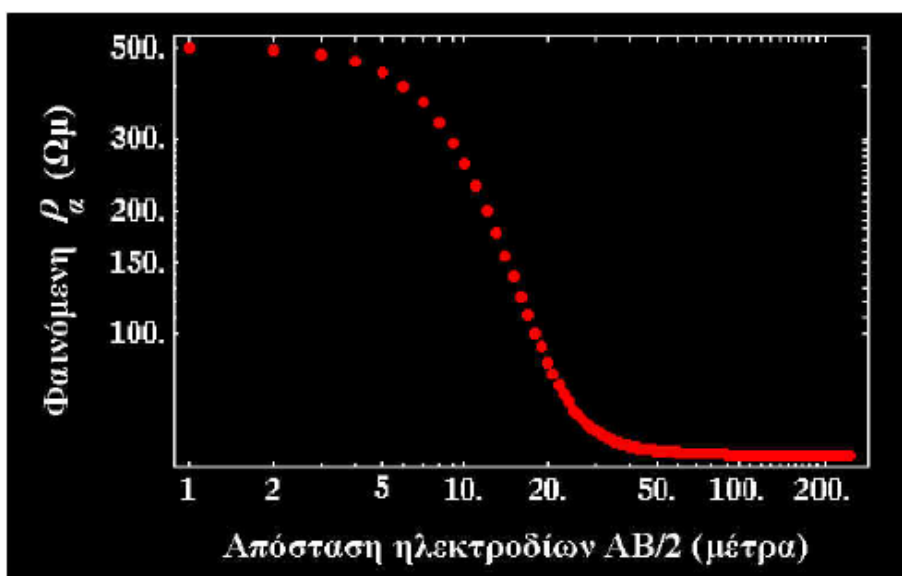
Θα πραγματοποιήσουμε τη διασκόπηση μεταβάλλοντας την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, $AB/2$, από 1 έως 250m με αύξηση κατά 1m. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα της προκύπτουσας φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων.

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.

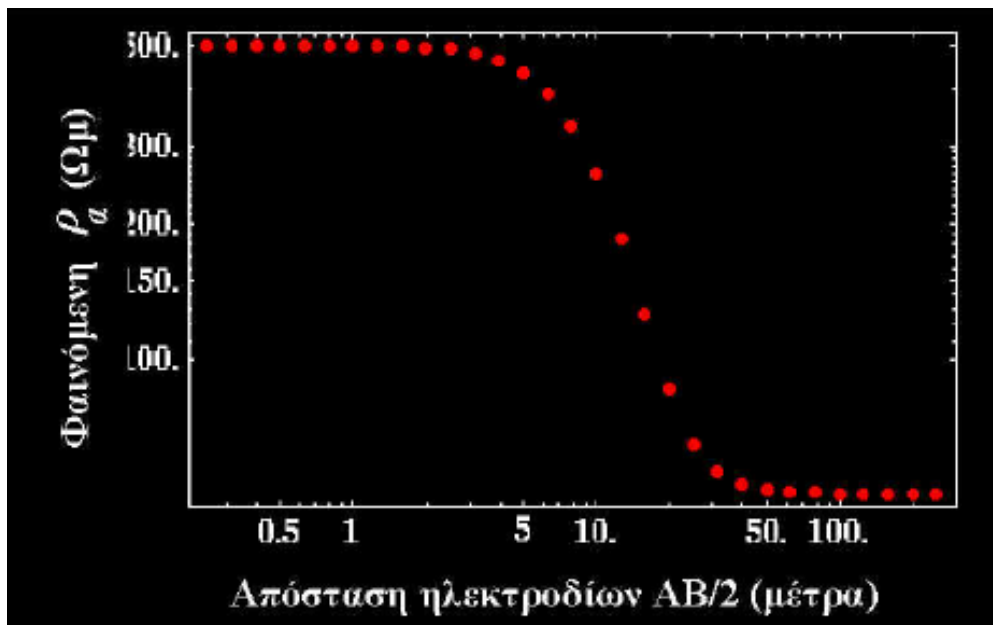


Σχήμα 36. Για την εξαγωγή καλύτερων συμπερασμάτων χρησιμοποιούμε λογαριθμικό διάγραμμα

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 $\Omega\mu$, και πολλές για μεγαλύτερες αποστάσεις, οι οποίες είναι περίπου ίσες με 50 $\Omega\mu$. 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 κατανεμημένες σε λογαριθμική απόσταση παρά ομοιόμορφα κατανεμημένες σε γραμμική απόσταση για να αντεπεξέρχονται στο πρόβλημα που περιγράψαμε παραπάνω. Πιο κάτω βλέπουμε το log διάγραμμα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσεως 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.

5.10 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
<p>Απαιτείται να μετακινήσουμε μόνο τα ηλεκτρόδια ρεύματος για τις περισσότερες μετρήσεις. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά το χρόνο που απαιτείται για απόκτηση μιας βυθοσκόπησης.</p>			<p>Και τα 4 ηλεκτρόδια, 2 ρεύματος και 2 δυναμικού, πρέπει να μετακινηθούν για την απόκτηση κάθε καταγραφής.</p>
	<p>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.</p>	<p>Η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού αυξάνει καθώς αυξάνει η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος. Απαιτούνται λιγότερο ευαίσθητα βολτόμετρα.</p>	
<p>Επειδή τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά τοποθετημένα, οι επιδράσεις των πλευρικών μεταβολών της ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια μειώνονται</p>			<p>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.</p>

	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.
--	--	--	--

5.11 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.

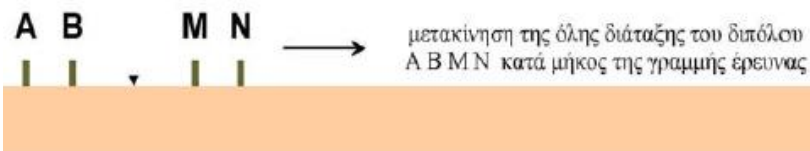
Όλες οι διατάξεις έχουν ως σκοπό την διερεύνηση της οριζόντιας ή πλευρικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης μέσα σε υπεδαφική ζώνη σταθερού περίπου πάχους. Ειδικότερα, με τις τεχνικές αυτές αναζητούνται, μέσα σε σταθερού πάχους υπεδαφικές ζώνες, δομές με πεπερασμένες πλευρικές διαστάσεις. Τέτοιες δομές 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.

5.12 Προφίλ Ειδικής Αντίστασης

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

5.12.1 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.

5.12.2 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 $AM = MN = NB = a$.



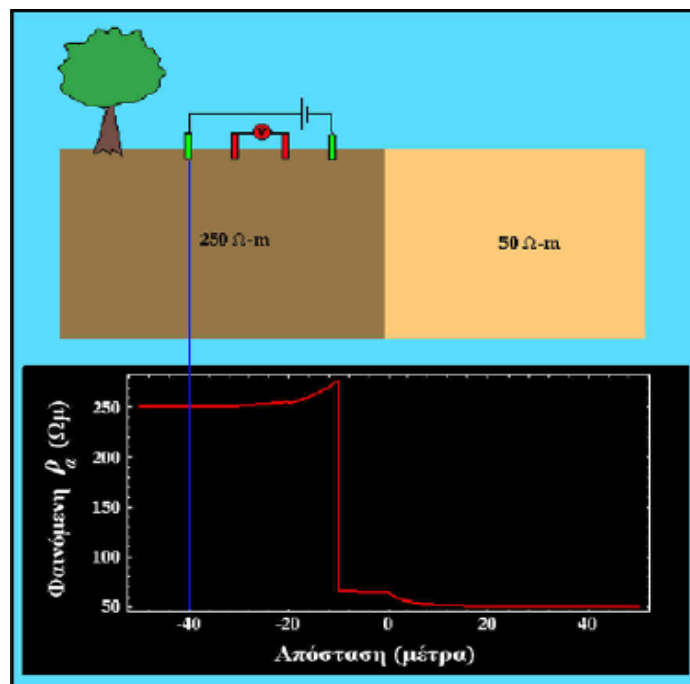
Σχήμα 39. Διάταξη Wenner

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.

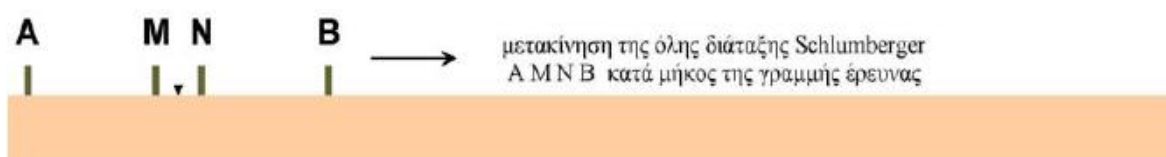
Πως μπορεί κανείς να καθορίσει τι απόσταση ηλεκτροδίων που πρέπει να χρησιμοποιήσει σε μια διασκόπηση προφίλ; Αν η κατακόρυφη δομή δεν εκτείνεται ως την επιφάνεια, η απόσταση των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μεταδίδει αρκετό ρεύμα σε βάθος κάτω από την κατακόρυφη αντίθεση. Συνήθως 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.

5.12.3 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).

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.

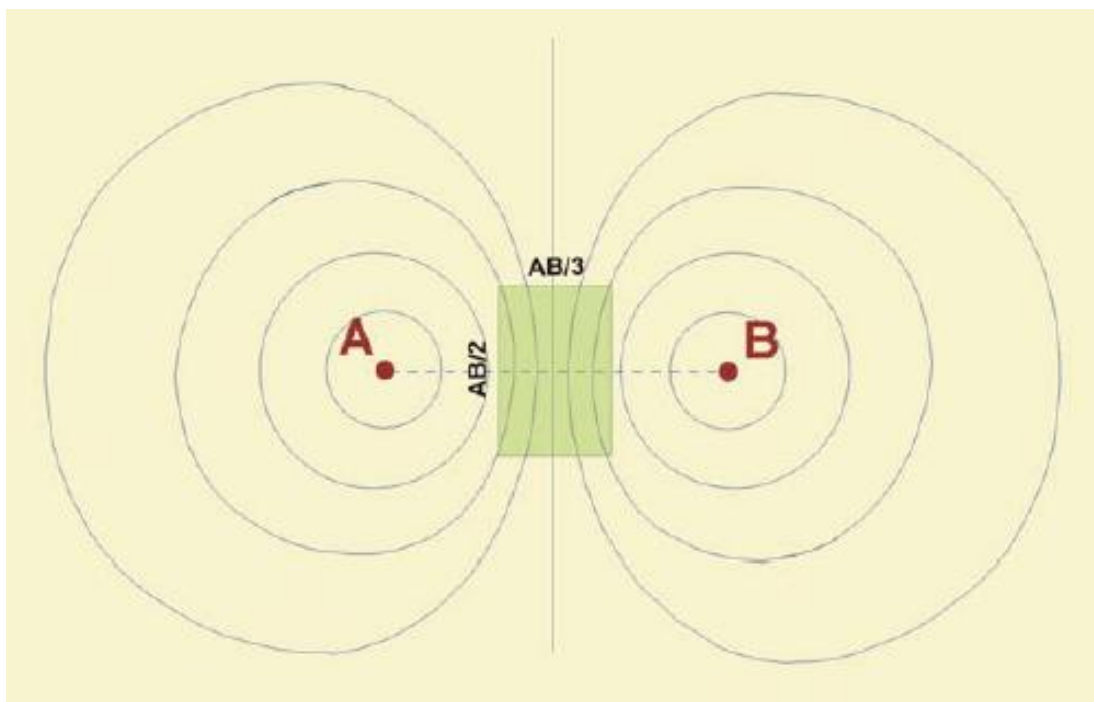
Εφαρμόζοντας την διάταξη Schlumberger τα καλωδιακά κυκλώματα AB και MN ευρίσκονται πάντοτε πολύ κοντά μεταξύ τους έτσι ώστε ο κίνδυνος εμφάνισης σύζευξης ή διαρροής να είναι υπαρκτός.

5.13 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.

5.14 Σημειακές πηγές ρεύματος

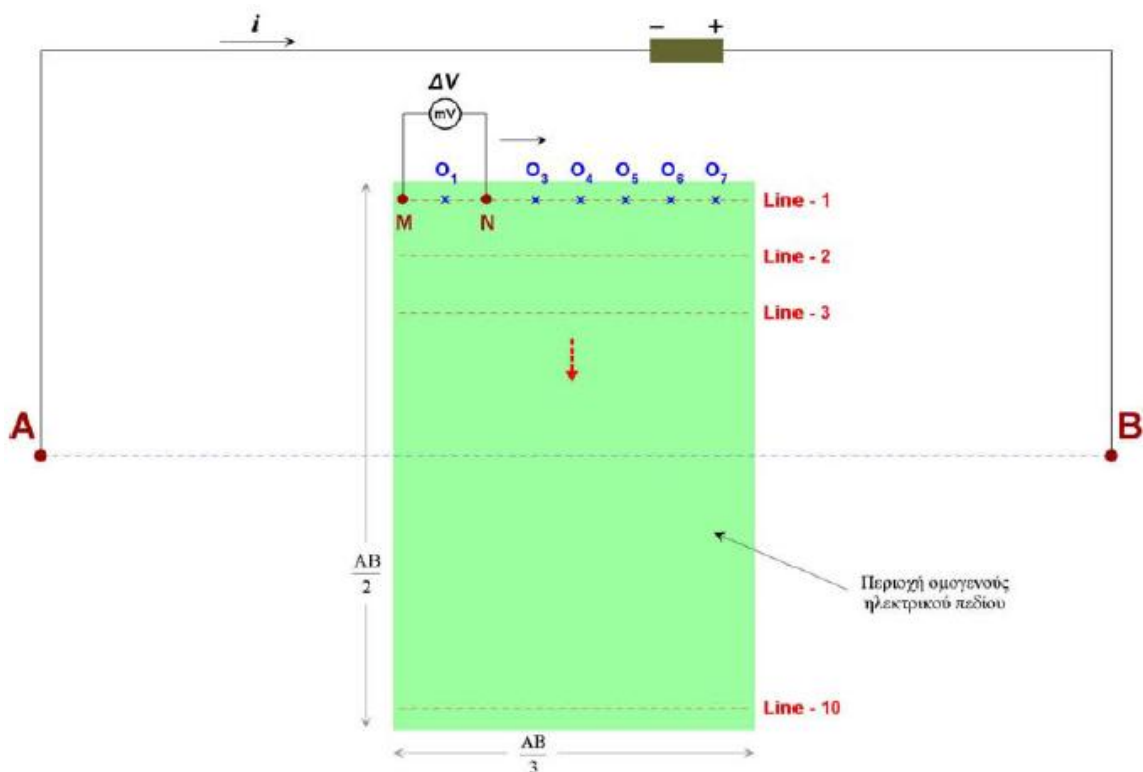
Στη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια A και B που ενεργούν ως σημειακές πηγές ρεύματος παραμένουν σταθερά στο έδαφος και οι μετρήσεις διενεργούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού M και N τα οποία μετακινούνται κατά μήκος γραμμών παράλληλων μεταξύ τους. Οι μετρήσεις της διαφοράς δυναμικού, ΔV , διενεργούνται μέσα σε περιοχή που οριοθετείται από τις πλευρές ορθογωνίου 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 C_1 και C_2 και τα ηλεκτρόδια δυναμικού M και N ως P_1 και P_2 .



Σχήμα 42. Οριζοντογραφία της επιφάνειας της γης

Το σχήμα 42 είναι η οριζοντιογραφία 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 ορθογωνίου 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_a στις αντίστοιχες θέσεις. Η τιμή της ρ_a σε κάθε θέση προκύπτει από τη γνωστή γενική σχέση

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

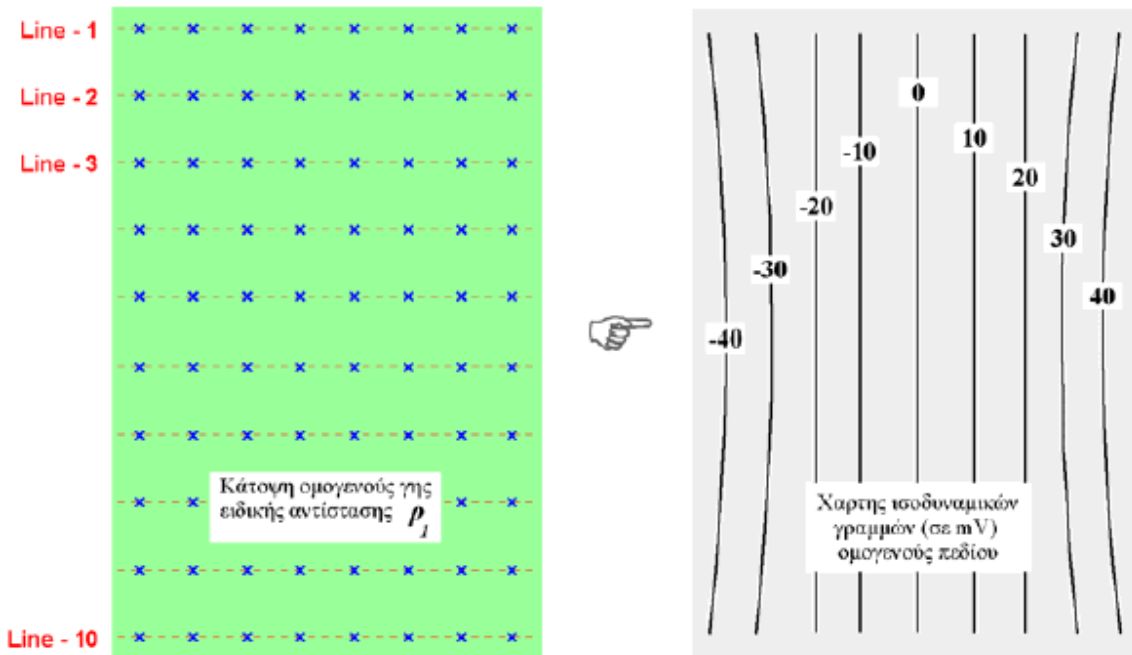
όπου ΔV το μετρούμενο δυναμικό και K ο αντίστοιχος γεωμετρικός παράγοντας που δίδεται από την γενική σχέση

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

που προκύπτει από τις μετρούμενες τιμές των αποστάσεων των σημειάκων πηγών από τις μετρούμενες θέσεις, I η ένταση των ρεύματων A και B.

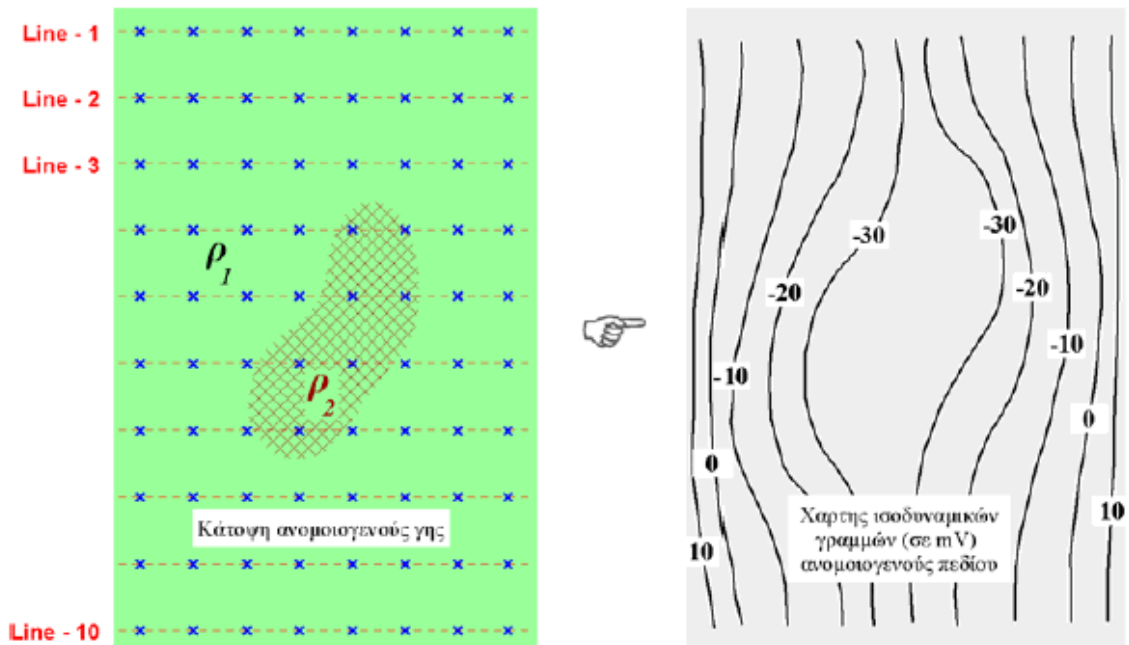
Στις εργασίες υπαίθρου επιδιώκουμε την δημιουργία συνθηκών ομογενούς πεδίου που σε μεγάλο βαθμό πληρούται στο συγκεκριμένο ορθογώνιο χώρο. Εάν στην διερευνούμενη υπεδαφική ζώνη η ειδική αντίσταση δεν παρουσιάζει πλευρικές μεταβολές

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.

5.15 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.

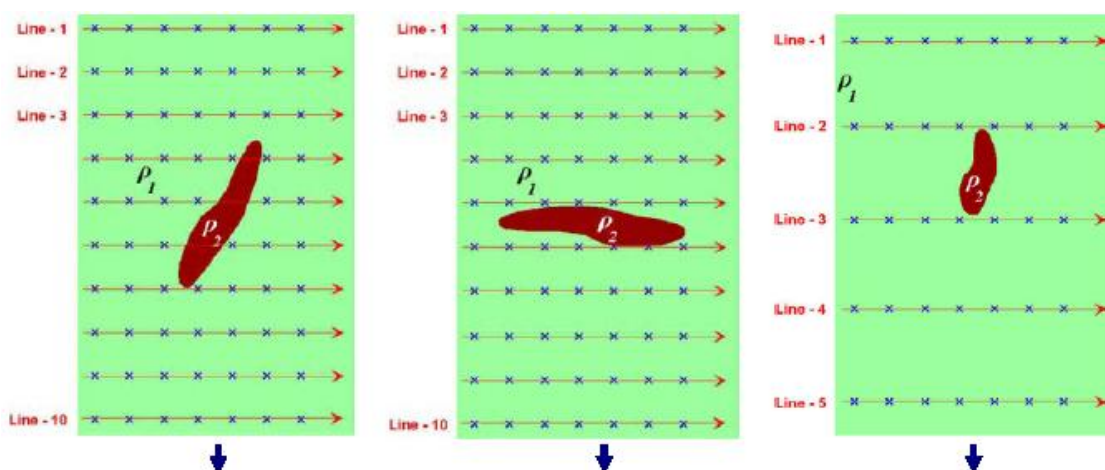
Το σχήμα 16 είναι η οριζοντιογραφία της επιφάνειας της γης του σχήματος 15, όπου παρουσιάζεται με ευκρίνεια ο μεταξύ των γραμμικών ηλεκτροδίων χώρος μέσα στον οποίο οριοθετούνται οι μετρήσεις. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο χώρο του σχήματος 16 είναι, όπως και στο αντίστοιχο κεφάλαιο 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

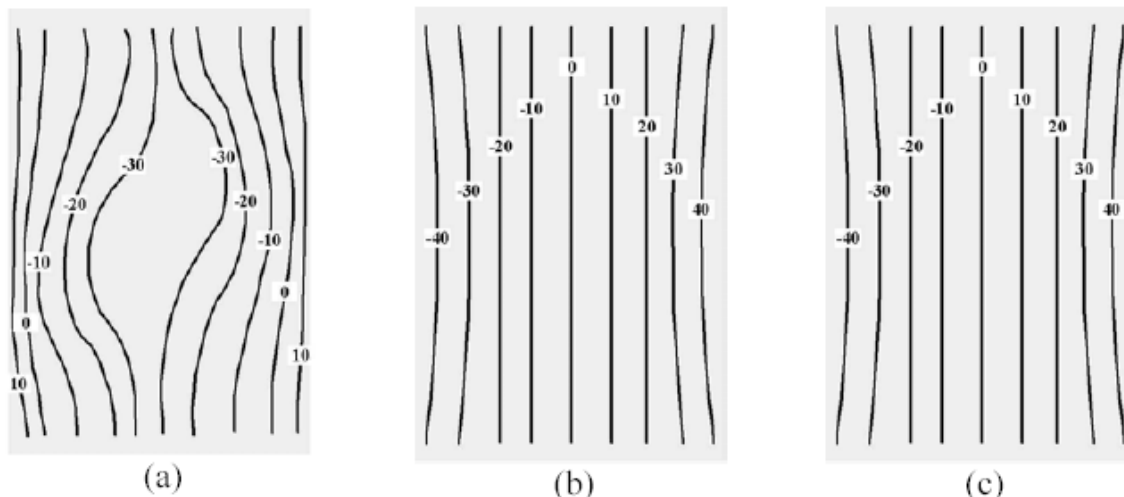
$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

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 ανομοιογένεια



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.

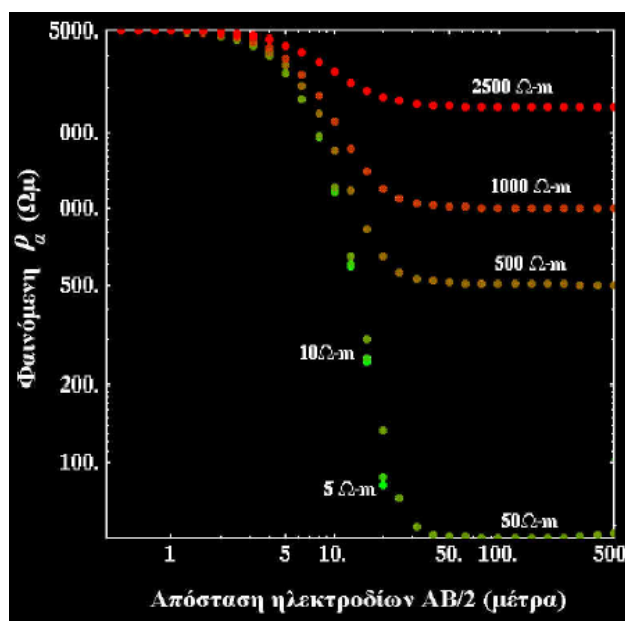
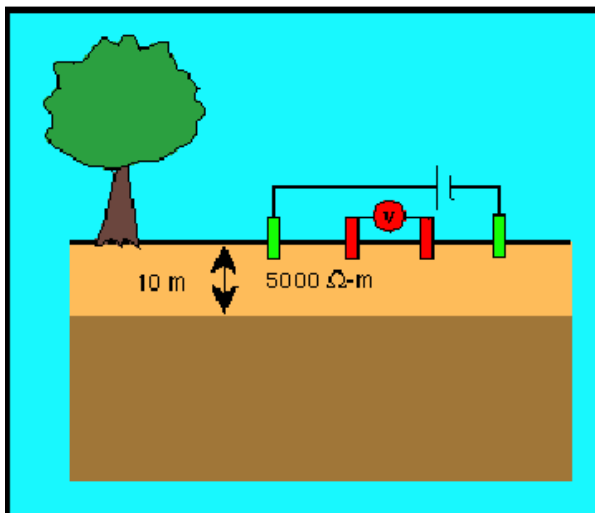
5.16 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων- Γεωηλεκτρικές βυθομετρήσεις-Καμπύλες γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων πάνω από Μέσο ενός Στρώματος

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.

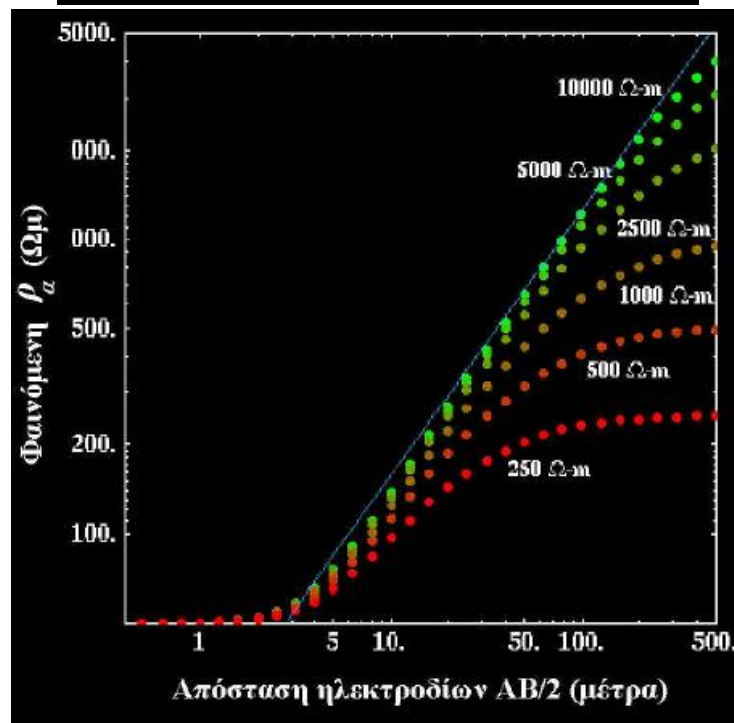
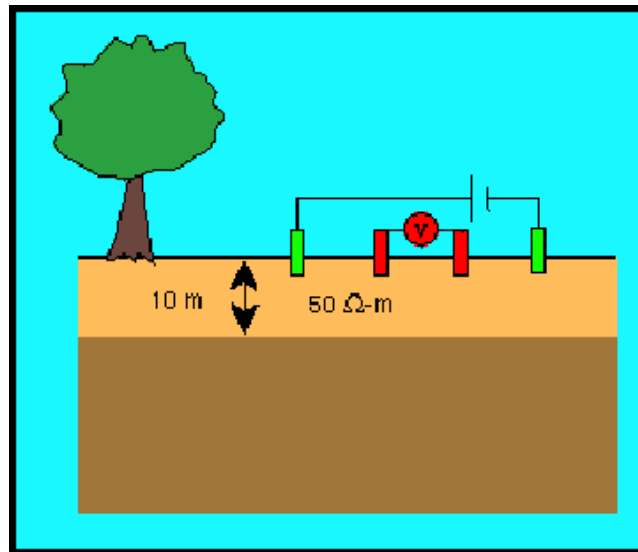


Σχήμα 48. Γεωηλεκτρικές καμπύλες όταν το επιφανειακό στρώμα είναι μεγάλης ειδικής αντίστασης.

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.

5.17 Καμπύλες γεωηλεκτρικών βυθομετρήσεων 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

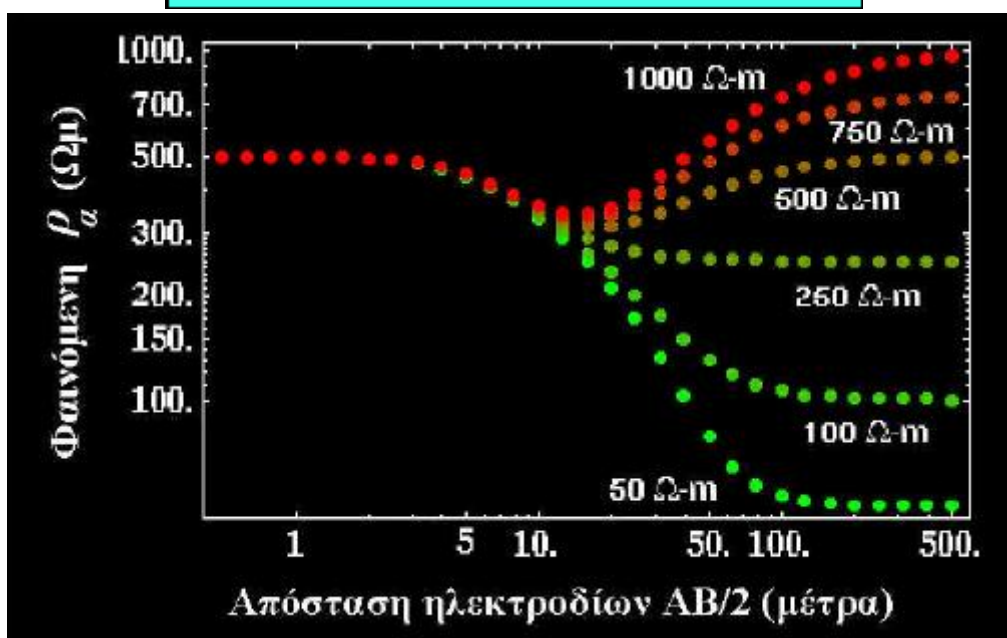
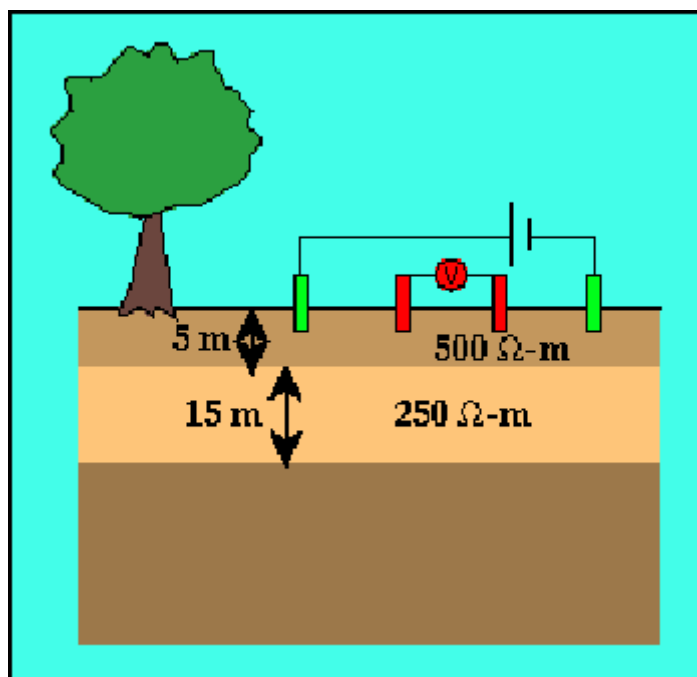
του ημιχώρου (250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000 Ωm). Το παράδειγμα αυτό δεν είναι τόσο απλό όσο το προηγούμενο. Όπως προηγουμένως, όλες οι καμπύλες πλησιάζουν ασυμπτωτικά την ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος, 50 Ωm, για μικρές αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Για μεγάλες αποστάσεις, όμως, η συμπεριφορά 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.

5.18 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 $250 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, 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 $500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, 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).

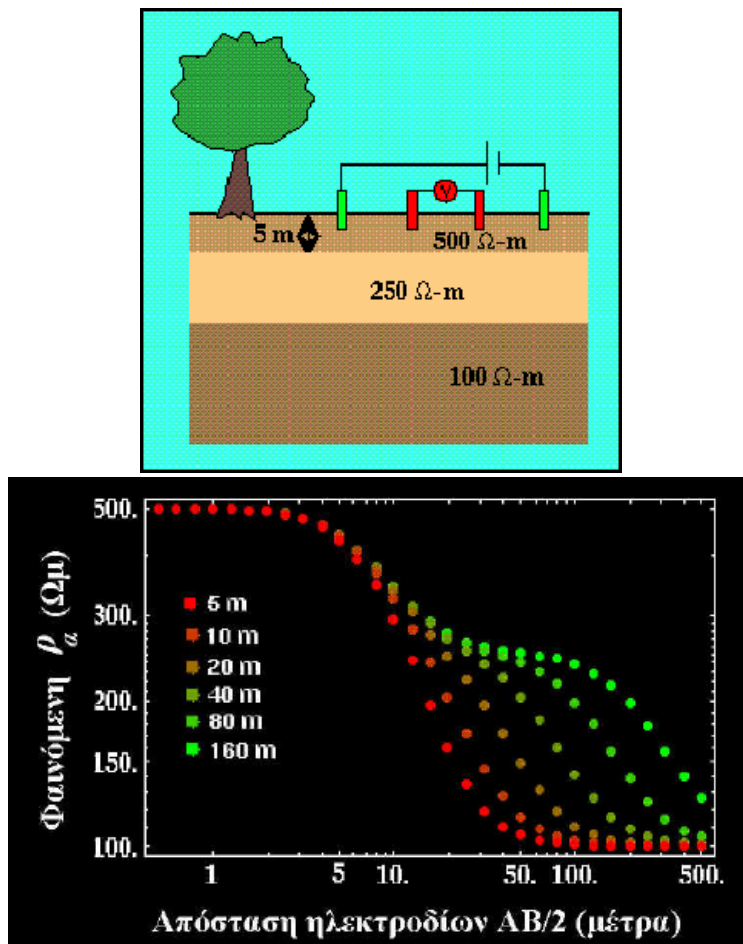
Καθώς η ειδική αντίσταση του ημιχώρου μειώνεται, η κατάσταση γίνεται πιο ασαφής. Για μικρές αποστάσεις των ηλεκτροδίων οι καμπύλες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συνεχίζουν να προσεγγίζουν την ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος. Καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων αυξάνεται, η φαινόμενη ειδική αντίσταση 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 δημιουργούνταν 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.

5.19 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 Ohm , το κατώτερο με μεταβαλλόμενο πάχος και ειδική αντίσταση 250 Ohm), τα οποία υπέρκεινται ενός ημιχώρου με ειδική αντίσταση 100 Ohm . 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.

5.20 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_w (προφίλ ειδικής αντίστασης), ως δισδιάστατες (2D) τομές της ρ_a γνωστές και ως ψευδοτομές της ρ_w 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).

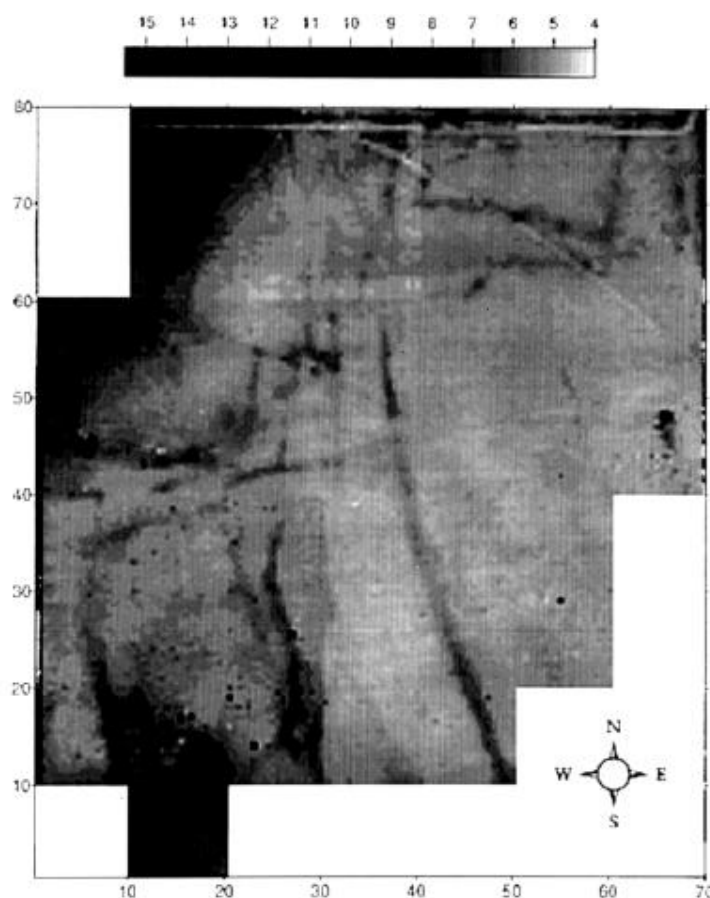
Στο σχήμα 52 παρουσιάζεται χαρτογράφηση των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης από προφίλ ειδικής αντίστασης με διάταξη Wenner που διεξήχθη πάνω από εμφανίσεις ασβεστόλιθων και ψαμμιτών που διαχωρίζονται με πρακτικά κατακόρυφες επαφές.

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.

6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

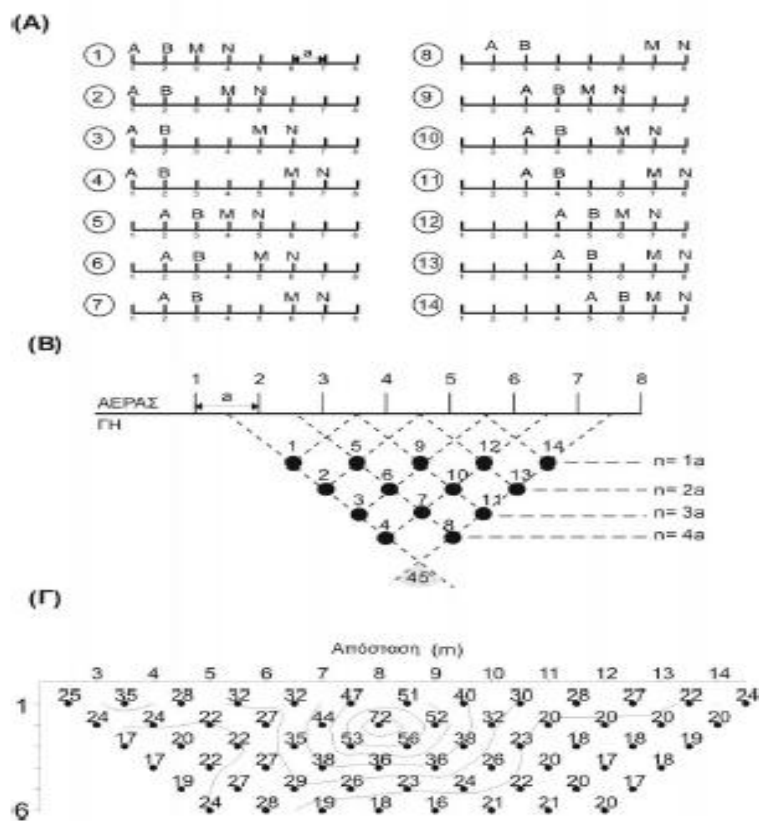
Βυθοσκόπηση (Sounding). Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να καθοριστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε συνάρτηση με το βάθος. Το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και με την συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος και διαρρέονται βαθύτεροι 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).

6.1 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 όδευσης 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 ΗΤ όμως είναι πιό γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις.

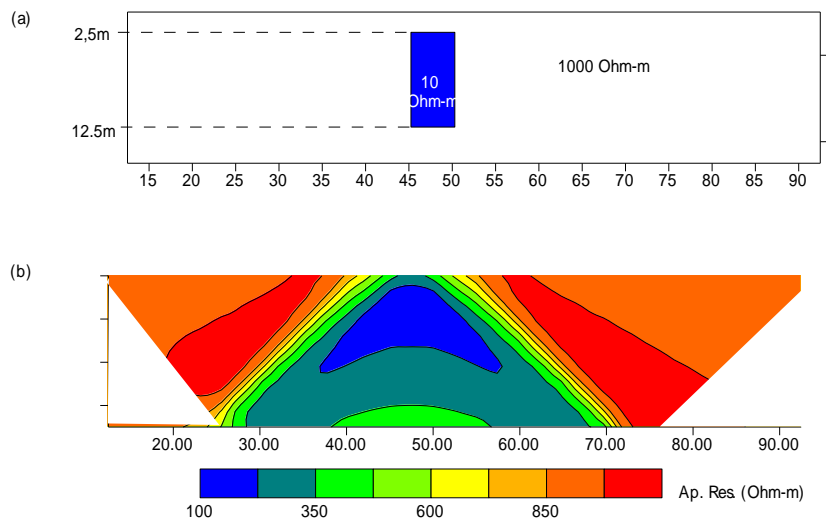
Ενα από τα κύρια χαρακτηριστικά της ΗΤ είναι ότι σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές λαμβάνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων (άρα και χρήσιμης πληροφορίας). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Παράλληλα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, 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 ΗΤ. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι χρήση αυτών των οργάνων αυξάνει αναπόφευκτα το κόστος εφαρμογής της μεθόδου.

6.1.1 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. Ετσι, 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.

6.1.2 Ερμηνεία με αντιστροφή

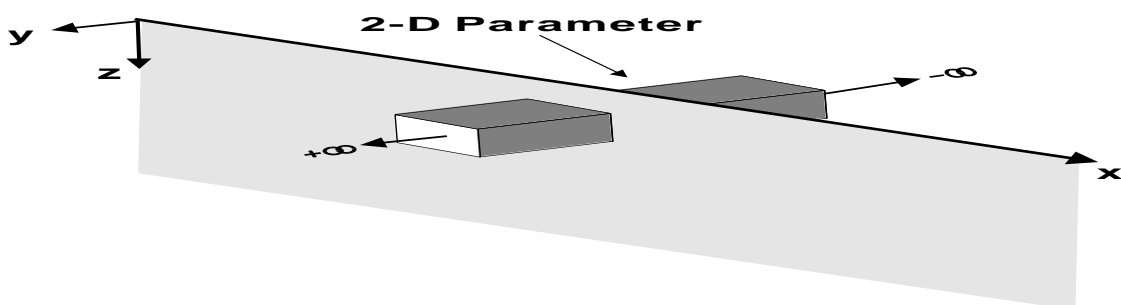
Για αυτόν τον λόγο νέες τεχνικές ερμηνείας και επεξεργασίας έχουν προταθεί. Οι τεχνικές αυτές επιδιώκουν την επίλυση του αντιστροφικού γεωηλεκτρικού προβλήματος είτε με χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, π.χ. μέθοδος Zhody-Barker, μέθοδος οπισθοπροβολής (Tsourlos et al. 1993), είτε με τη χρήση υπαρχόντων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



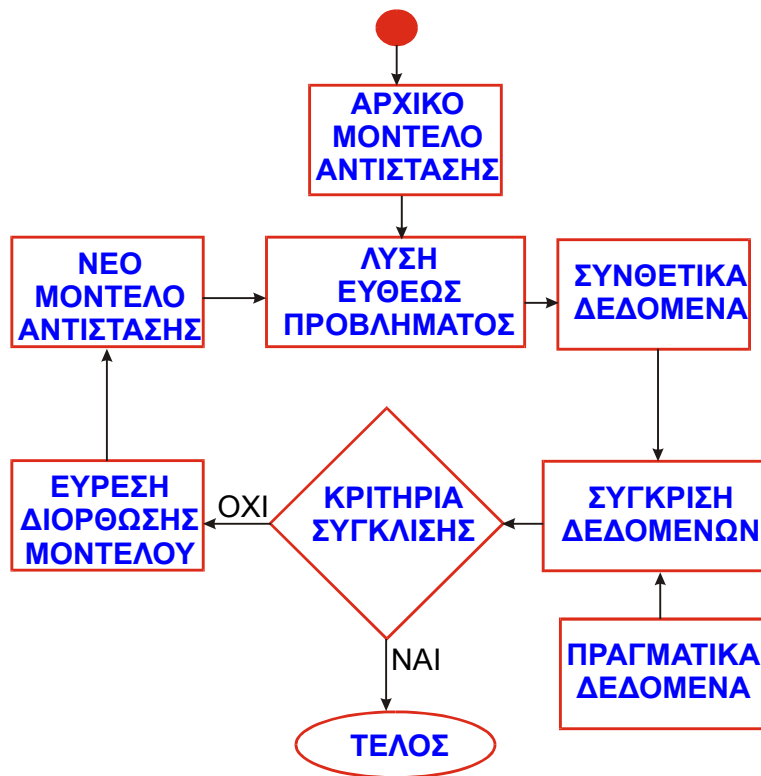
Σχήμα 55. (α) Αρχικό μοντέλο αντίστασης, (β) εικόνα ψευδοτομής δεδομένων δισδιάστατης διασκόπησης που προέκυψαν από το μοντέλο του σχήματος (α).

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.



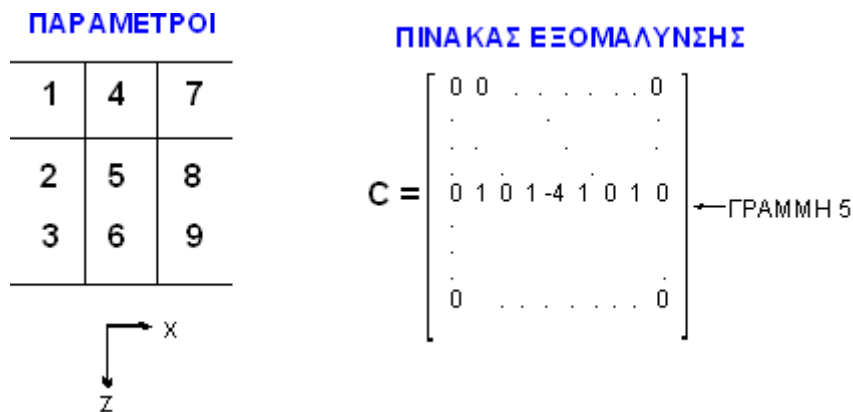
Σχήμα 57. Σχηματοποιημένη διαδικασία μη γραμμικής αντιστροφής

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:

$$S = dy^T dy \rightarrow 0 \ \& \ R = (Cdx)^T (Cdx) \rightarrow \max$$

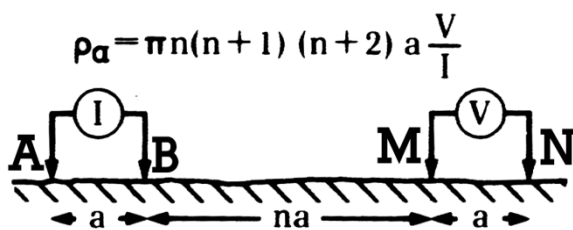


Σχήμα 58. Σχηματισμός του πίνακα εξομάλυνσης

Το μοντέλο αντίστασης x^{k+1} στην επανάληψη $k+1$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:
 $x^{k+1} = x^k + dx^k = x^k + (J_k^T J_k + \mu C^T C) J_k^T dy^k$
 dx^k η διόρθωση της αντίστασης .
 C = ο πίνακας εξομάλυνσης.
 J = ο Ιακωβιανός πίνακας των πρώτων παραγώγων .
 μ = πολλαπλασιαστής Lagrange (υπολογίζεται εμπειρικά)

6.1.3 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 εγκοίλυν σε θέσεις θεμελίωσης των ανοδομών του ΧΥΤΑ και κατά δεύτερο λόγο να ελεχθεί 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.

6.1.4 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την πτυχική εργασία πραγματοποιήθηκαν τέσσερις τομές στην περιοχή της Παλαιόχωρας με τις εξής συντεταγμένες :

1^η τομή

0 μέτρα	35° 14.235	23° 41.146
Κεντρο	35° 14.225	23° 41.256
240 μέτρα (17° ηλεκτρ.)	35° 14.218	23° 41.296

2^η τομή

0 μέτρα	35° 14.464	23° 41.357
Κεντρο	35° 14.369	23° 41.356
345 μέτρα (24° ηλεκτρ.)	35° 14.291	23° 41.314

3^η τομή

0 μέτρα	35° 13.703	23° 40.840
210 μέτρα (15° ηλεκτ.)	35° 13.601	23° 40.890

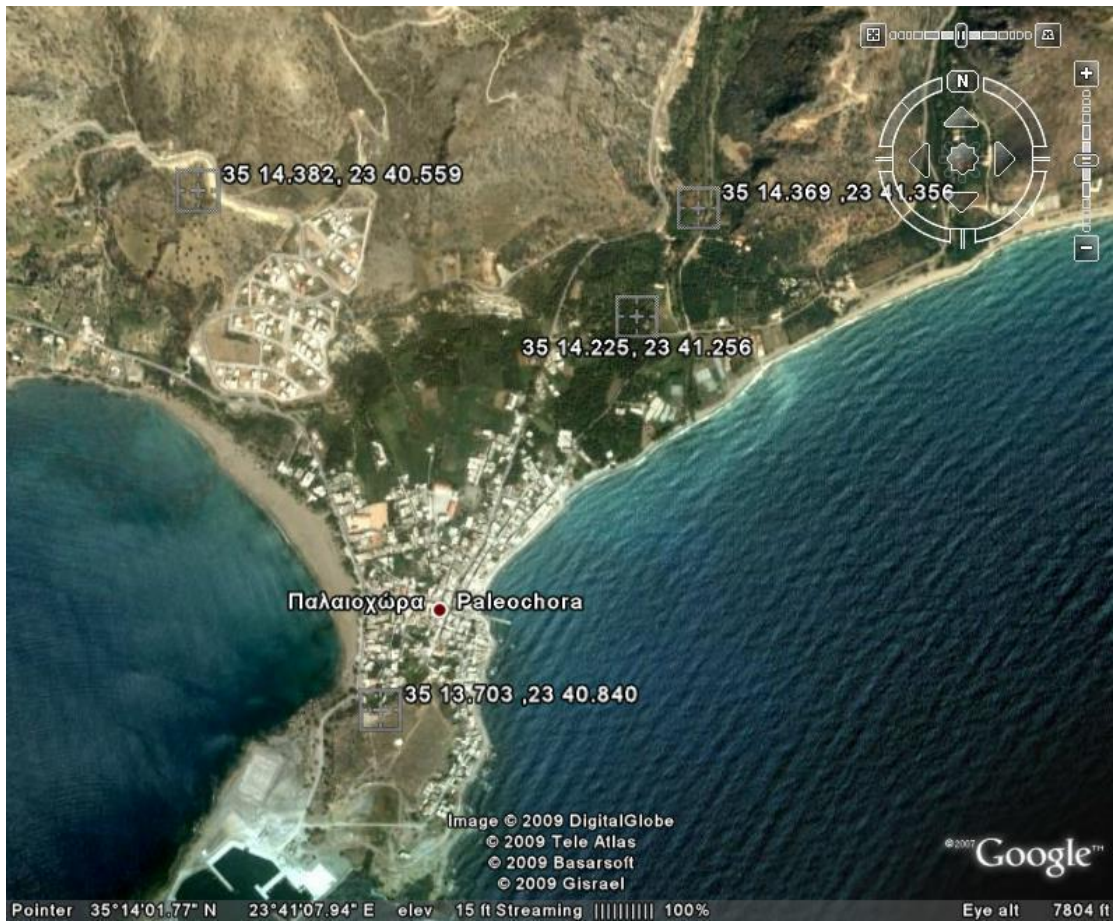
4^η τομή

0 μέτρα	35° 14.382	23° 40.559
225 μέτρα (16° ηλεκτ.)	35° 14.328	23° 40.692

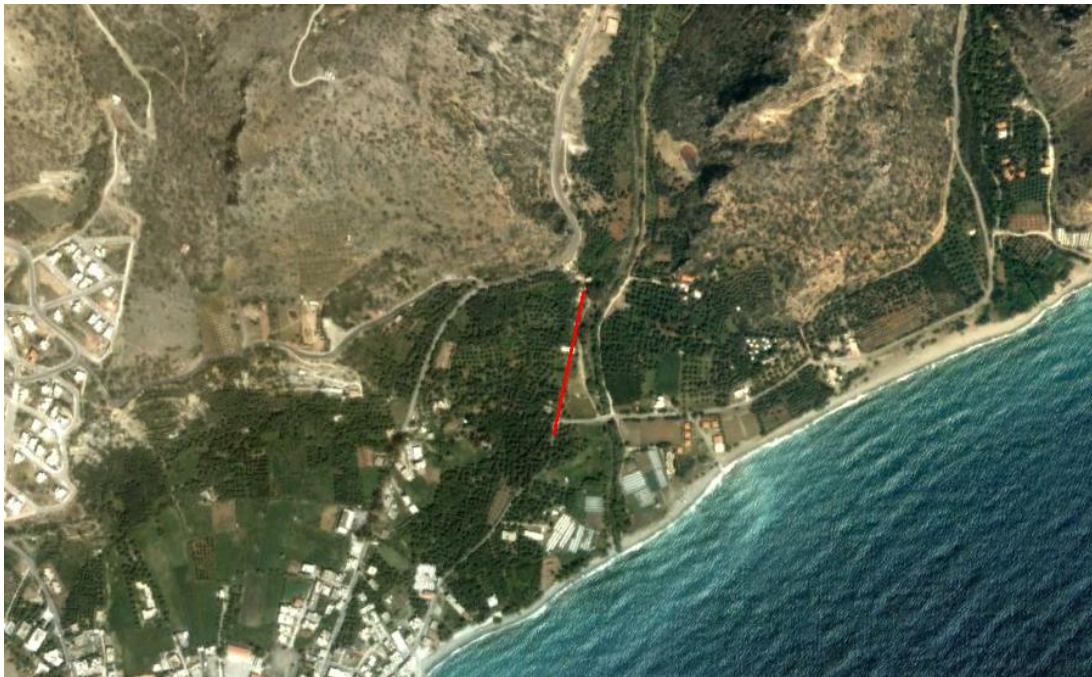
Τα σημεία των τομών φαίνονται και στην παρακάτω δορυφορική εικόνα.

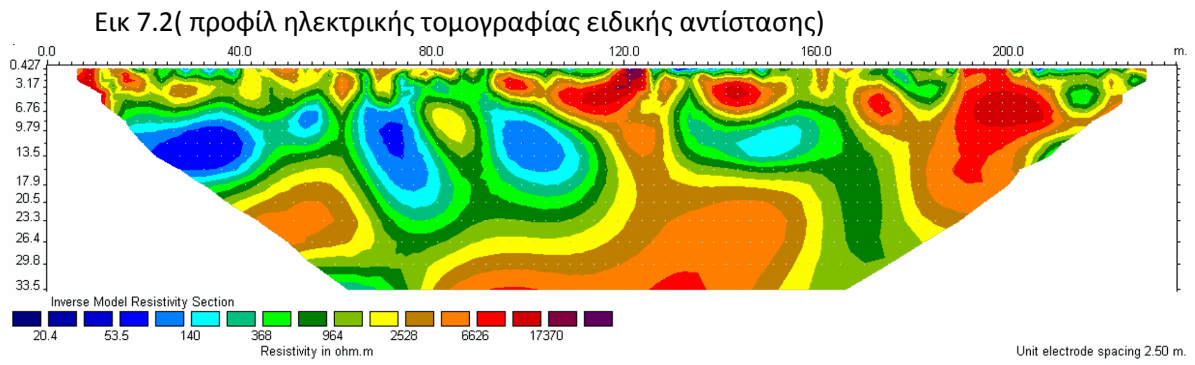
Η πρώτη τομή είχε μήκος 240 μέτρα και τοποθετήθηκαν 17 ηλεκτρόδια , η δεύτερη τομή μήκους 345 μέτρα είχε 24 ηλεκτρόδια, η τρίτη τομή 210 μέτρων με 15 ηλεκτρόδια και η τέταρτη με μήκος 225 μέτρα με 16 ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια σε όλες τις περιπτώσεις τοποθετούνταν με μεταξύ τους απόσταση 14 μέτρων .

Όλες οι τομές δεν είχαν το ίδιο μήκος λόγω τεχνικών δυσκολιών, όπως δόμοι, ρυάκια, κτίσματα και απαγορευμένων ιδιοκτησιών σε πρόσβαση, αλλά είχαν ικανοποιητικό μήκος για το σκοπό της έρευνας μας.

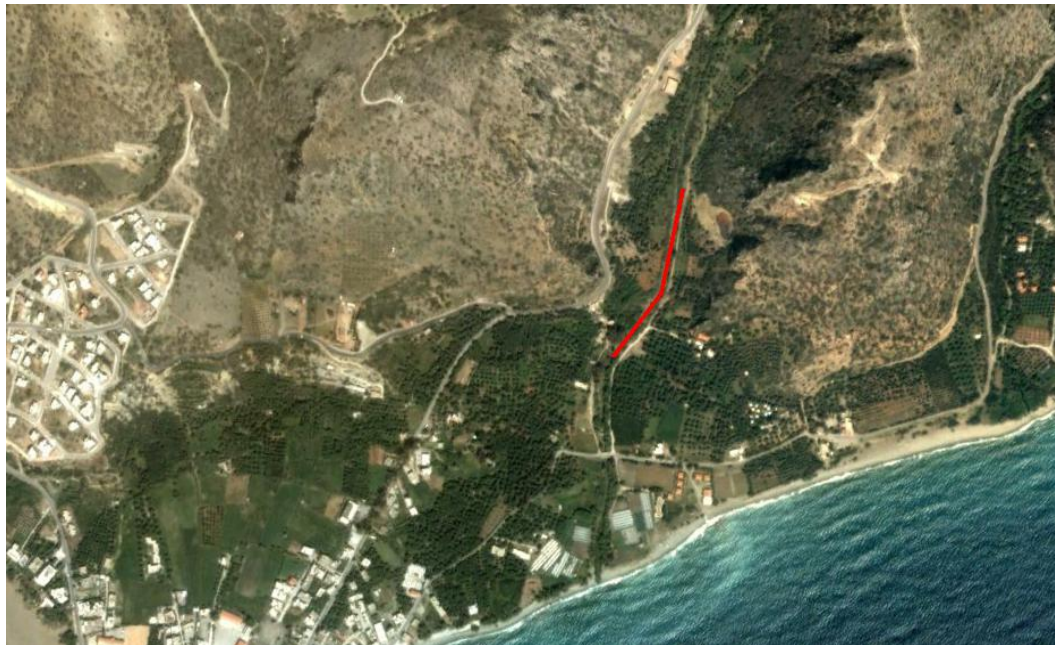


Η πρώτη τομή με κέντρο τις συντεταμένες : $35^{\circ} 14.225$, $23^{\circ} 41.256$ και μήκος 240 μέτρα, όπως φαίνεται και στη δορυφορική εικόνα, μετά από επεξεργασία των δεδομένων και χρήσης του προγράμματος res2dinv μας έδωσε την παρακάτω γεωλεκτρική τομογραφία :

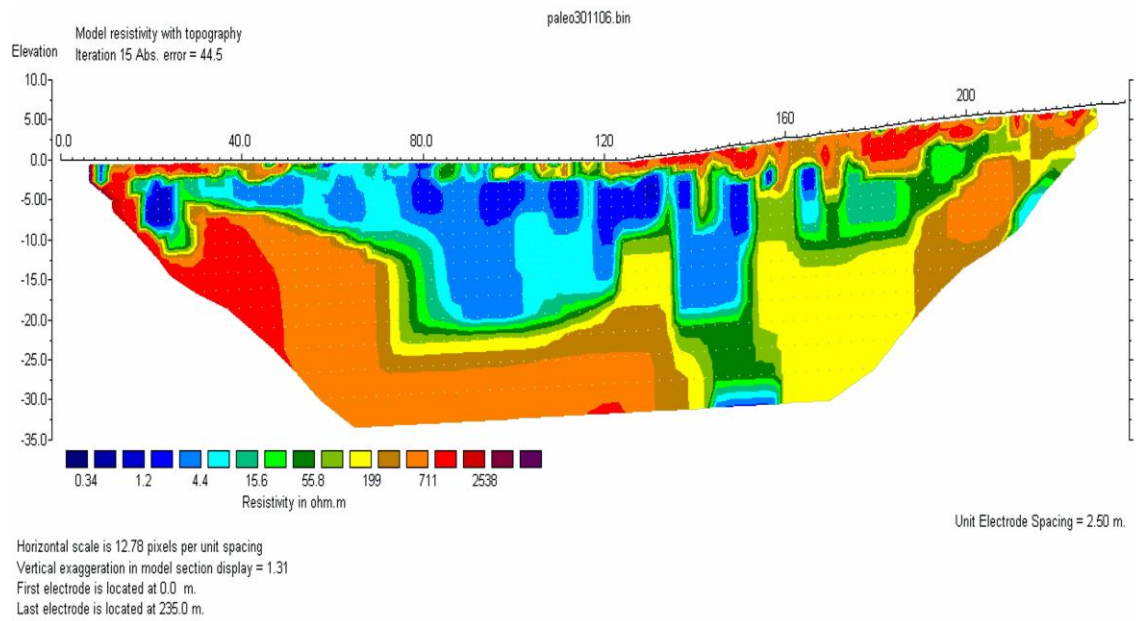




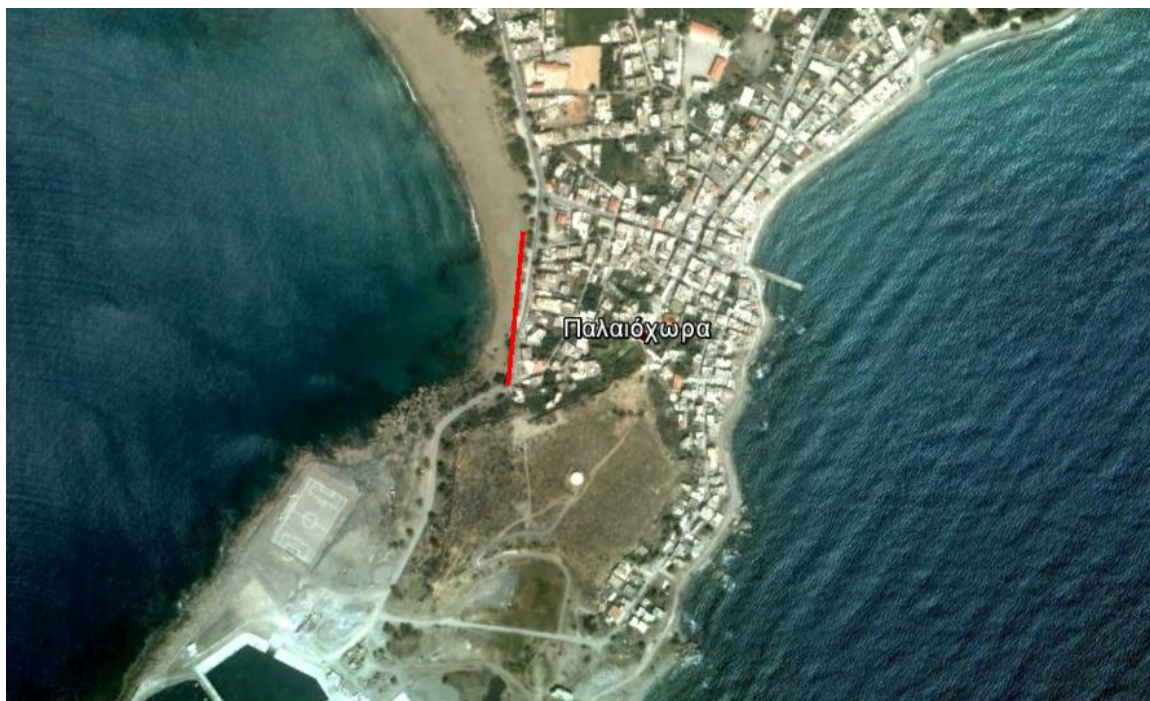
Η δεύτερη τομή έλαβε μέρος λίγο βορειοανατολικότερα της πρώτης ως νοητή συνέχεια της , δίνοντας μας την εξής γεωηλεκτρικη τομογραφια .



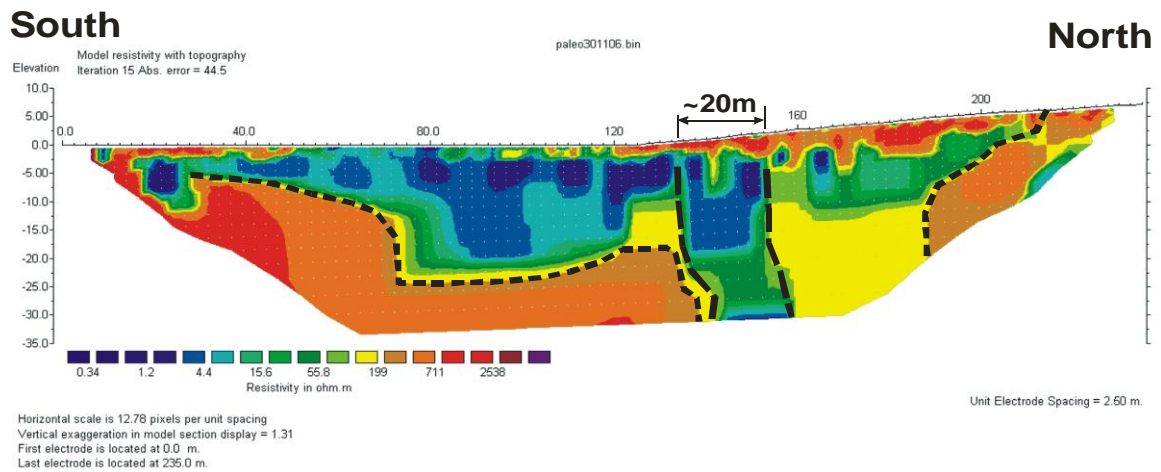
Εικ 7.2(προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης)



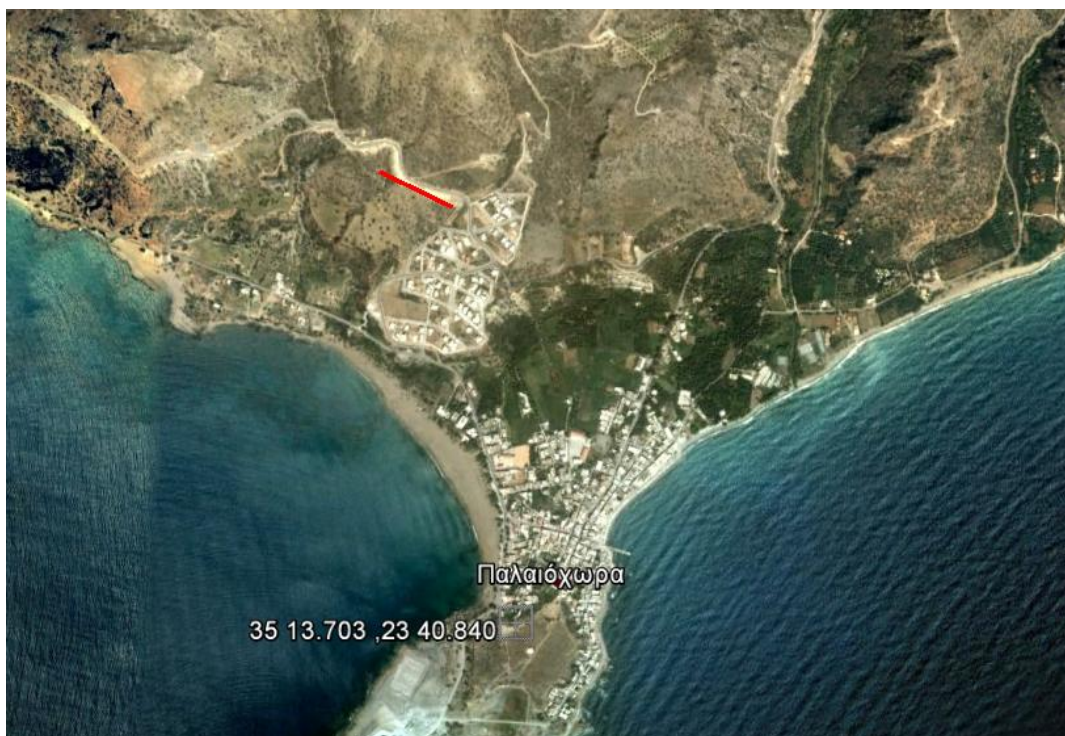
Η τριτη τομη εγινε στη περιοχη της Παλαιοχωρας για να δουμε την συνεχεια του ρηγματος και την σηµσχετιση µε τις µετρησεις στο απεναντι ακροτηρι του Γραµµενου, στα ανατολικά της Παλαιοχωρας .



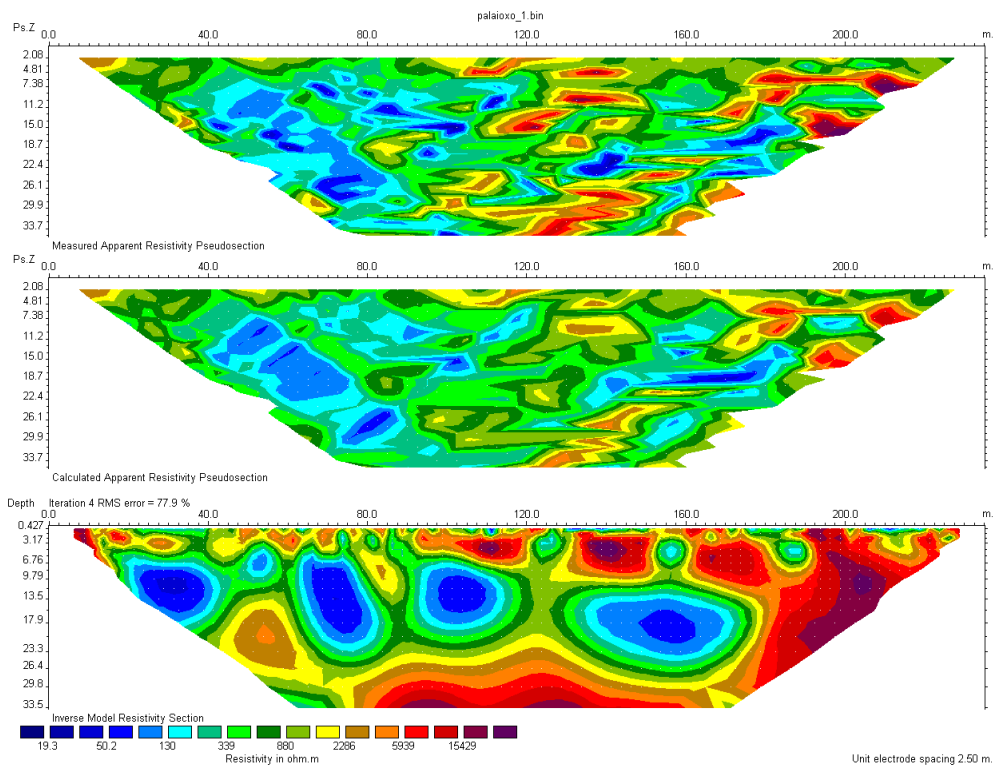
Εικ 7.2(προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης)



Η τεταρτη τομη εγινε βορειανατολικά του σημειου ενδιαφεροντος για να γινει η συγκριση των δεδομενων και η επιβεβαιωση των σεναριων των ρηγματων και ως δειγματοληπτικη της γεωλογικης και γεωτεχνικης δομης της περιοχης της Παλαιόχωρας . Η περιοχη επιλεχθηκε ως περιοχη οπου υπηρχε μητρικο υποστρωμα, το οποιο είναι συνεχεια της οροσειρας της πινδου, και όχι μεταγενεστερες αποθεσεις και προσχωσεις όπως της περιοχης ερευνας οι οποιες είναι αποθεσεις από την τεταρτη κενοζωικη περιοδο .



Εικ 7.2(προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης)

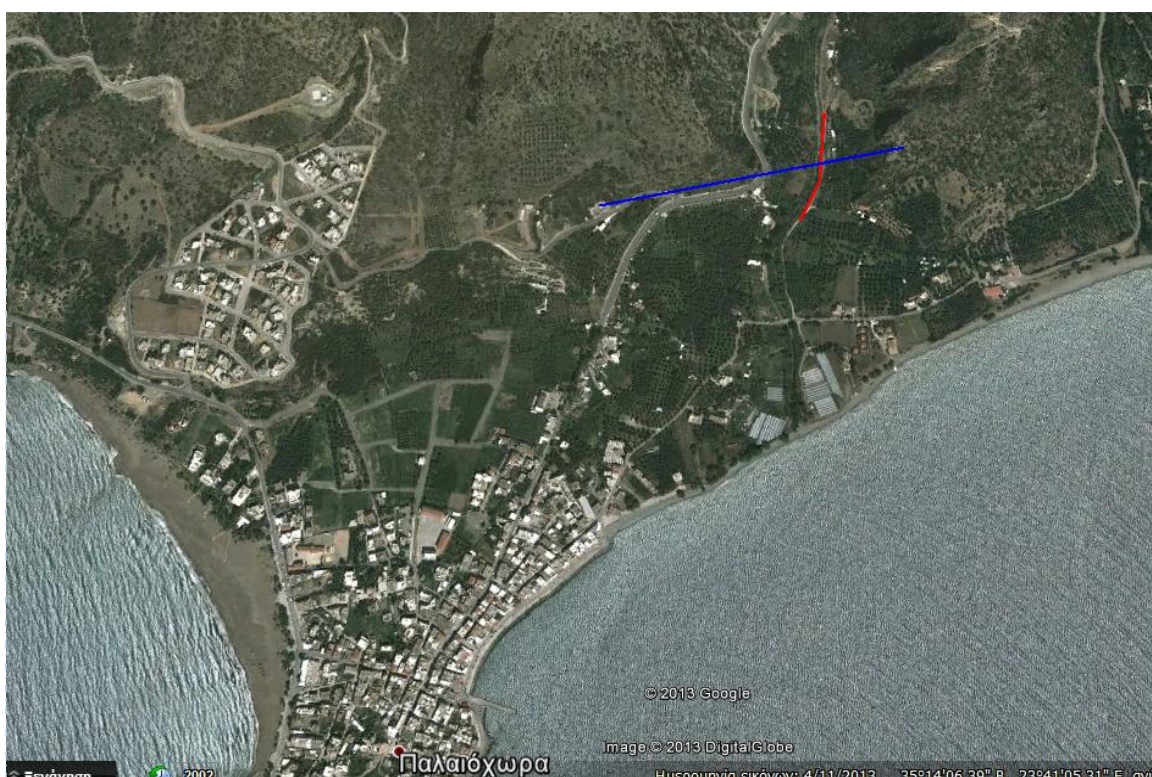


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στις μετρήσεις πεδίου που διενεργήθηκαν στην περιοχή βορειοανατολικά της περιοχής της παλαιοχωρας ,με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας τις επίδικης αντίστασης , παρατηρήθηκε ένα ρήγμα με διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ .

Μετρήσεις διενεργήθηκαν ανατολικά και δυτικά του ρήγματος για να εξακριβωθεί η γεωλογική δομή και η συνέχεια τους σύμφωνα με το σενάριο ότι υπάρχει ρήγμα στην περιοχή το οποίο στοιχειοθετήθηκε από την παρατήρηση της περιοχής από χάρτες, αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες και όδευση της περιοχής .

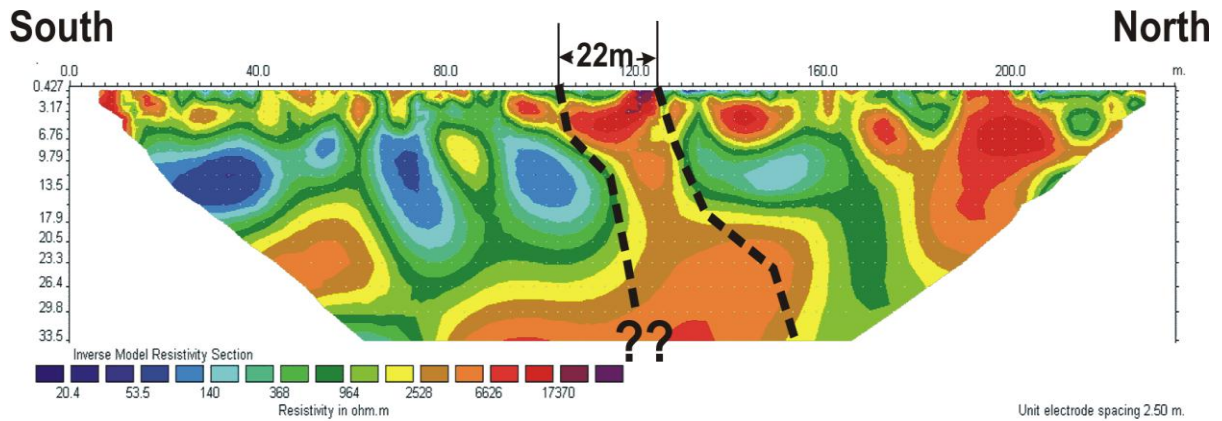
Εικ.8.1



Στην εικόνα 8.1 φαίνεται με κόκκινη γραμμή η γραμμή της ηλεκτρικής διακόπτισης και με μπλε η διεύθυνση του ρήγματος .

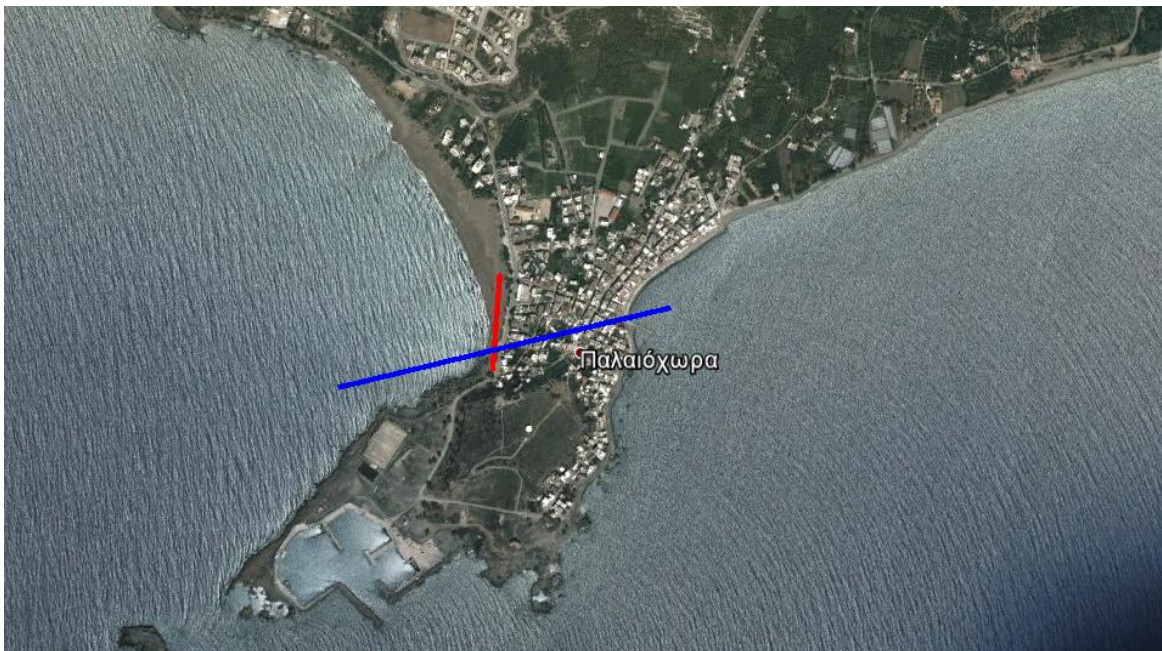
Μετά την συλλογή των δεδομένων και την επεξεργασία τους , εκτιμάται ότι η ζώνη του ρήγματος έχει πλάτος περίπου 22 μέτρα και βυθίζεται προς τον βορά, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.2 με αποτέλεσμα να μιλάμε για ένα πιθανά ανάστροφο ρήγμα . Για να μιλήσουμε με σιγουριά για το είδος του ρήγματος θα πρέπει να διενεργηθούν και άλλες μετρήσεις σε αρκετό μήκος του ρήγματος αλλά και δειγματοληπτικές γεωτρήσεις .

Εικ 8.2(προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης)



Η ζώνη του ρήγματος εντοπίζεται ανάμεσα στις διακεκομμένες γραμμές και με χρώματα στις αποχρώσεις του κόκκινου απεικονίζονται οι τεκτονικές δομές του ρήγματος οι οποίες εμφανίζουν μικρότερες ηλεκτρικές αγωγιμότητες .

Εικ 8.3

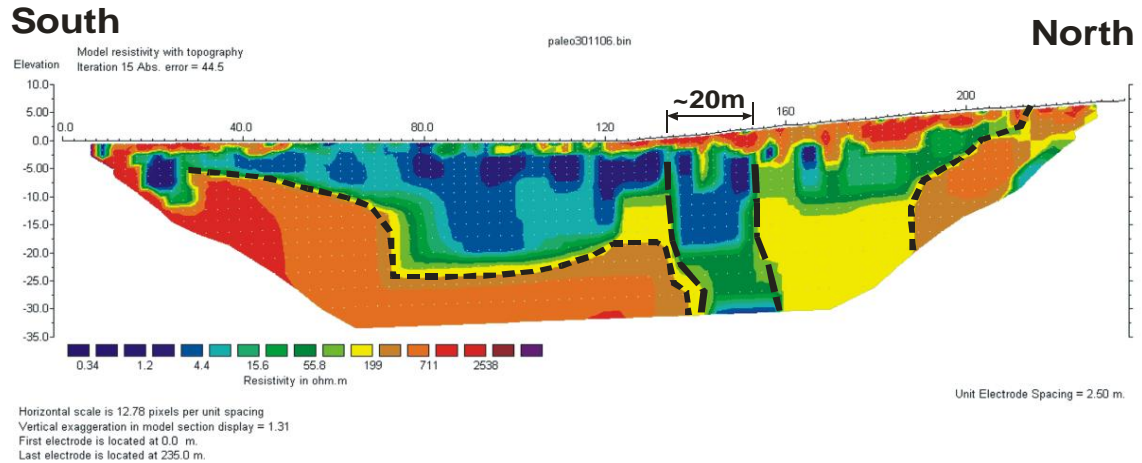


Στη συνέχεια μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης έλαβαν μέρος στην περιοχή του ακρωτηρίου της παλαιόχωρας . Με κόκκινη γραμμή είναι σημειωμένο η διεύθυνση της ηλεκτρικής τομογραφίας και με μπλε χρώμα η εκτιμώμενη διεύθυνση του ρήγματος που είναι σχεδόν ανατολή δύση (A-Δ).

Παρακάτω φαίνεται το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης που προέκυψε από τις μετρήσεις .Όπως φαίνεται και στο προφίλ της τομογραφίας, η ρηγματογενής ζώνη έχει πάτος 20 μέτρα και εντοπίζεται από το 135 μέτρο εως το 155 μέτρο της τομής . Βλέπουμε ότι συνεχίζει σε βάθος μέχρι τα 35 μέτρα ,τουλάχιστον που έχουμε

εμείς εικόνα και σημειώνεται με τα ψυχρά χρώματα τα οποία αντιστοιχούν σε χαμηλές αγωγιμότητες και μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διείδυση του υφάλμυρου νερού στις τεκτονικές δομές επιβεβαιώνει την ύπαρξη του ρήγματος. Βλέπουμε ακόμα τον διαχωρισμό που δημιουργεί το ρήγμα ανάμεσα στο μητρικό πέτρωμα και στις ιζηματογενές δομές οι οποίες είναι πληρωμένες με υφάλμυρο νερό το οποίο απεικονίζεται με τα ψυχρά χρώματα , νότια του ρήγματος, λόγω της υψηλής αγωγιμότητας που παρουσιάζει το αλμυρό νερό.

Εικ 8.4(προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης)



Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο ακρωτήριο του Γραμμένου το οποίο βρίσκεται δυτικά της Παλαιόχωρας και μαζί με το ακρωτήριο της Παλαιόχωρας σχηματίζουν ένα κόλπο και βρίσκονται απέναντι το ένα από το άλλο. Λόγο της παρατήρησης μας για το ρήγμα που εντοπίσαμε στο ακρωτήριο της Παλαιόχωρας είπαμε να πάμε και στο απέναντι να δούμε αν συνεχίζεται και εκεί το ρήγμα και αν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους.

Στην εικόνα 8.5 με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η τομή της ηλεκτρικής τομογραφίας που πραγματοποιήσαμε και με μπλε χρώμα η πιθανή διεύθυνση του ρήγματος.

Εικ 8.5



Εικ 8.6

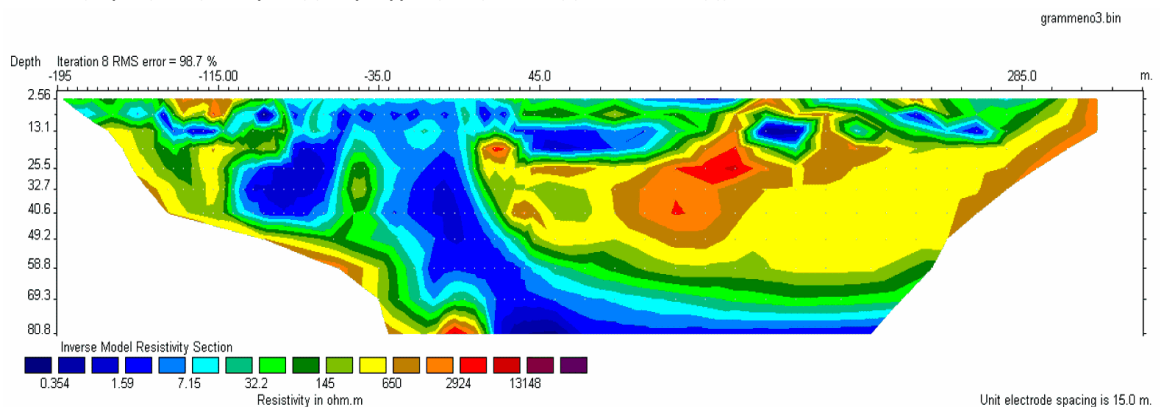


Την περίοδο που πραγματοποιούσαμε μετρήσεις στην περιοχή μάθαμε από κατοίκους ότι υπάρχει ένα σημείο μέσα στη θάλασσα κοντά στην ακτή όπου αναβλύζει νερό

με πίεση από τον πυθμένα προς την επιφάνεια και ότι έχει διαφορετική θερμοκρασία από αυτή της θάλασσας.

Αυτό ενίσχυσε τις υποθέσεις μας για την ύπαρξη ρήγματος και μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο που παρατηρούσαν οι κάτοικοι δεν ήταν παρά η όδευση του υδροφόρου ορίζοντα μέσα από το ρήγμα και τις ιζηματογενές δομές το οποίο έβρισκε διέξοδο σε ένα σημείο μέσα στη θάλασσα. Αυτό επιβεβαιώθηκε από δορυφορική εικόνα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.6 , με κόκκινη γραμμή είναι σημειωμένο η τομή στην οποία έγιναν οι μετρήσεις και προέκυψε το παρακάτω προφίλ και σε κόκκινο κύκλο το σημείο όπου είναι η περιοχή που βρίσκει διέξοδο ο υδροφόρος ορίζοντας μέσα από το ρήγμα .

Εικ 8.7(προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης)



Εικ 8.8(προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης)

Στην εικόνα 8.8 βλέπουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στα γεωλογικά στρώματα και τις πτυχώσεις που δημιουργούν ,σχήμα 8.9.

Εικ 8.9(προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας ειδικής αντίστασης)

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **Angelier, J., Lyberis, N., Xavier Le Pichon, Barrier, E., Huchon, P. 1982.** The tectonic development of the Hellenic arc and the sea of Crete: A synthesis. *Tectonophysics*, Volume 86, Issues 1–3, 20 June 1982, Pages 159–163, 165, 167–196. *Geodynamics of the Hellenic arc and trench*
- **Avigad, D., Z. Garfunkel, 1991.** Uplift and exhumation of high-pressure metamorphic terrains: The example of the Cycladic blueschist belt (Aegean Sea), *Tectonophysics*, 188, 357–372.
- **Bonneau, M. 1976.** Esquisse structurale de la Crète alpine, *Bul. Soc. Geol. France*, 18, 351–353.
- **Bonneau, M., 1984.** Correlation of the Hellenic nappes in the south-east Aegean and their tectonic reconstruction, *Geol. Soc. Spec. Publ. London*, 17, 517–527.
- **Constable, S., Parker, R., and Constable, C., 1987.** "Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data." *GEOPHYSICS*, 52(3), 289–300. doi: 10.1190/1.1442303
- **Dercourt, J., Ricou, L.E., Geysant, J., Grandjacquet, C., Lepvrier, C., Biju-Duval, B., 1986.** Geological constraints on the alpine evolution of the Mediterranean Tethys. *Tectonophysics* Volume 123, Issues 1–4, Pages 83–86, 89–122. *Evolution of the Tethys*
- **Edwards, L.S., 1977.** A modified pseudosection for resistivity and induced polarization *Geophysics*, 42 (1977), pp. 1020–1036
- **Fassoulas, Ch., Kiliass, A. and Mountrakis, D. 1994.** Postnappe stacking extension and exhumation of high-pressure/low temperature rocks in the island of Crete, Greece. *Tectonics*, 13, 127–138.
- **Fassoulas, C. 1995.** Kinematics and deformation of the nappes in Central Crete, Greece. Aristotle University of Thessalonika, Thessalonika (in Greek with English abstract).
- **Fassoulas, C., 1999.** The structural evolution of central Crete: insight to the tectonic evolution of the south Aegean (Greece) *J. Geodyn.*, 27, pp. 23–43
- **Fassoulas, C. G. 2000.** Field guide to the geology of Crete. Natural History Museum of Crete.
- **Fitrolakis, N., 1980.** The geologic structure of Crete (in Greek) National Technical University of Athens, Department of Engineering and Metallurgy. Athens.
- **Fytrolakis, N. 1980.** The geological structure of Crete. Probleme, observations and conclusions. *Habil. Thesis, Nat. Tech. Univ. Athens*, 1–147 (in Greek).
- **Gilbert, L.E., Kastens, K., Hurst, K., Paradissis, D., Veis, G., Billiris, H., Hoeppe, W., Scluter, W. 1994.** Strain results and tectonics from the Aegean GPS experiment (abstract) *Eos Trans. AGU*, 75 (16), p. 116
- **Griffiths, G.A., 1990.** Rainfall deficits: distribution of monthly runs *J. Hydrol.*, 115, pp. 219–229
- **Hall, R., M. G. Audley-Charles, D. J. Carter, 1984.** The significance of Crete for the evolution of the eastern Mediterranean, *Geol. Soc. Spec. Publ. London*, 17, 499–516.
- **Hall R. 1987.** Basement and cover rock history in the western Tethys: HT–LP metamorphism associated with extensional rifting of Gondwana. In *Gondwana and*

Tethys, Geol. Soc. London, spec. Publ. (Audley-Charles M. and Hallam A. eds), Vol. 37, pp. 41–50.

- **Kilias, A., C. Fassoulas, and D. Mountrakis, 1993.** Tertiary extension of continental crust and uplift of Psiloritis "Metamorphic core complex," in the central part of the Hellenic arc (Crete, Greece), paper presented at The 6th Congress, Geol. Soc. of Greece, Athens.
- **Kilias, A., Fassoulas, C. and Mountrakis D. 1994.** Tertiary extension of continental crust and uplift of Psiloritis metamorphic core complex in the central part of the Hellenic Arc (Crete, Greece), Geol. Rundsch., 83, 417-430.
- **Lister, G. S., G. Banga, A. Feenstra, 1984.** Metamorphic core complexes of Cordilleran type in the Cyclades, Aegean Sea, Greece, Geology, 12, 221–225.
- **Noomen, R.a, Springer, T.A.a, Ambrosius, B.A.C.a, Herzberger, K.b, Kuijper, D.C.a, Mets, G.-J.a, Overgaauw, B.a, Wakker, K.F.a. 1996.** Crustal deformations in the Mediterranean area computed from SLR and GPS observations. Journal of Geodynamics, Volume 21, Issue 1, January 1996, Pages 73-96.
- **Reilinger, R.E., McClusky, S.C., Qral, M.B., King, R.W., Toksoz, M.N., Barka, A.A., Kinik, I., (...), Sanli, I. 1997.** Global positioning system measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. Journal of Geophysical Research B: Solid Earth, 102 (B5), art. no. 96JB03736, pp. 9983-9999.
- **Reinecke T., Altherr R., Hartung B., Hatzipanagiotou K., Kreuzer H., Harre W., Klein H., Keller J., Geenen E. and Boger H., 1982.** Remnants of a Late Cretaceous High Temperature Belt on the Island of Anafi (Cyclades, Greece), News Mineral. Abh., 145, 157–182.
- **Seidel E., 1977.** Lawsonite-bearing metasediments in the Phyllite- Quartzite Series of SW Crete (Greece). Neues Jahrb Mineral Monatsh 130:134 144
- **Szymański, J. E. Tsourlos, P. 1993.** The resistive tomography technique for archaeology : an introduction and review. Archaeologia Polona 1993 vol 31 p. 5-32
- **Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., 1976.** Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge.
- **Ten Veen J.H. & Meijer P.Th., 1998.** Late Miocene to Recent tectonic evolution of Crete (Greece): geological observations and model analysis., Tectonophysics, 298 191 208.
- **Ten Veen J.H. & Postma G., 1999.** Neogene tectonics and basin fill patterns in the Hellenic outer-arc (Crete, Greece)., Basin Res., 11 223 241.
- **Thomson, S.N., Stoeckert, B., Brix, M.R., 1998.** Thermochronology of the high-pressure metamorphic rocks of Crete, Greece: implications for the speed of tectonic processes Geology, 26 (1998), pp. 259–262
- **Tripp, A.C., Hohmann, G.W., Swift, C.M.Jr., 1984.** Two dimensional resistivity inversion Geophysics, 49 (1984), pp. 1708–1717
- **Tsoka, S., Promponas, V.J. and Ouzounis, C.A. 1999.** Reproducibility in genome sequence annotation: the Plasmodium falciparum chromosome 2 case. FEBS Lett, 451, 354-355.
- **Tsourlos P. 1995.** Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data. Unpublished PhD thesis, University of York.
- **Westaway, R., 1994.** Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean J. Geophys. Res., 99 (1994), pp. 12071–12090
- **Μουντράκης Δ., 1985.** Γεωλογία της Ελλάδος, Θεσσαλονίκη, 207.