

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
3. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ-ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ .....	5
4. ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΘΕΣΗ.....	6
5. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ .....	8
5.1 ΠΡΟΠΑΙΟΝΙΑ - ΕΝΟΤΗΤΑ ΒΑΦΕΙΟΧΩΡΙΟΥ .....	8
6. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ Ν.ΑΓΙΟΝΕΡΙΟΥ..	11
7. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ .....	13
7.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης .....	13
7.2 Ειδική Αντίσταση των Πετρωμάτων και Ορυκτών.....	14
7.3 Όργανα που Χρησιμοποιούνται στη Γεωηλεκτρική Διασκόπηση.....	17
7.4 Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος σε Ομογενή Γη .....	19
7.5 Εφαρμογή .....	23
7.6 Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος σε Ανομοιογενή Γη.....	25
7.7 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	30
7.7.1 Φαινόμενη ειδική αντίσταση και τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων.....	31
7.7.2 Επιλογή διάταξης .....	36
7.7.3 Βάθος διείσδυσης.....	37
7.7.4 Πίνακας ευαισθησίας .....	40
7.7.5 Μέθοδοι έρευνας.....	44
7.8 Εφαρμογή και Γεωφυσική ερμηνεία των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.....	48
7.8.1 Τρόπος εφαρμογής της μεθόδου Wenner στην περίπτωση δύο γεωηλεκτρικών στρωμάτων .....	48
7.8.2 Τρόπος εφαρμογής της μεθόδου Schlumberger στην περίπτωση δύο γεωηλεκτρικών στρωμάτων .....	51
7.8.3 Ποιοτική ερμηνεία των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης .....	54
7.8.4 Προβλήματα και τρόποι επίλυσης κατά την ερμηνεία των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης.....	57
7.9 Εφαρμογές της μεθόδου της ειδικής αντίστασης.....	60
7.10 Εφαρμογές της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό υδατικών πόρων .	62
7.10.1 Εντοπισμός υπόγειων διόδων νερού (παλαιοκοίτες) .....	62
7.10.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων.....	67
7.10.3 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στη χαρτογράφηση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού υδροφόρου ορίζοντα.....	69
7.10.4 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό και χαρτογράφηση της υπόγειας στάθμης νερών.....	70
7.10.5 Εφαρμογή των μονοδιάστατων (γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, VES) και δυσδιάστατων (γεωηλεκτρική τομογραφία) ηλεκτρικών διασκοπήσεων στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων.....	70
8. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	76
8.1 Μετρήσεις Schlumberger επί του ερευνητικού τόπου της κοινότητας Ν. Αγιονερίου στο Ν. Κιλκίς.....	76
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93
ABSTRACT .....	94





# 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία ασχολείται με τη γεωφυσική έρευνα για τον εντοπισμό υδροφορίας στην περιοχή Νέου Αγιονερίου στο νομό Κιλκίς (σχήμα 1). Η περιοχή αποτελείται κυρίως από χαλαρά ιζήματα Νεογενούς-Τεταρτογενούς ηλικίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η γεωφυσική μέθοδος της ειδικής αντίστασης και συγκεκριμένα η διάταξη Schlumberger για την διασκόπηση. Έγιναν 14 βυθοσκοπήσεις, σε 8 τομές με σκοπό την όσο το δυνατό καλύτερη μελέτη των σχηματισμών της περιοχής. Η επεξεργασία των δεδομένων έδειξε ότι υπάρχει ενδιαφέρον κυρίως στην τομή 8 που βρίσκεται ΒΔ της κοινότητας Ν.Αγιονερίου, με αναμενόμενη παροχή περίπου  $40\text{m}^3/\text{h}$ , και ΝΔ της κοινότητας, στην περιοχή των τομών 3 και 4, με αναμενόμενη παροχή  $10\text{-}20\text{m}^3/\text{h}$ .

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί γεωφυσική έρευνα της περιοχής Ν.Αγιονερίου του νομού Κιλκίς. Στόχο έχει την εξοικείωση με θέματα εντοπισμού υδροφορίας σε περιοχή χαλαρών ιζημάτων και ήπιας μορφολογίας(όπως αυτής του Ν.Αγιονερίου) με χρήση γεωφυσικών μεθόδων.

Από την υπό μελέτη περιοχή που υποδείχτηκε από την κοινότητα, απουσιάζουν στο μεγαλύτερο τμήμα της γεωτρήσεις που θα μας έδιναν χρήσιμες πληροφορίες για την υδροφορία και στρωματογραφία της περιοχής. Σαν καταλληλότερη μέθοδος για την γεωφυσική έρευνα θεωρήθηκε και εφαρμόστηκε η μέθοδος της μέτρησης της ειδικής αντίστασης. Έγιναν 14 γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (Βαργεμέζης 1992) σύμφωνα με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger με ανάπτυγμα ηλεκτροδίου ρεύματος 1000 μέτρα. Δύο από αυτές χρησιμοποιήθηκαν σαν μετρήσεις βαθμονόμησης σε συνδυασμό με υπάρχουσες γεωτρήσεις.(Γ78 και Γ82).

Για την εκτέλεση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε όργανο μέτρησης ειδικής αντίστασης ισχύος 500 Watt με τον σχετικό συνοδευόμενο εξοπλισμό.

Βιβλιογραφικά στοιχεία που είχαν στη διάθεσή τους οι μελετητές ήταν, ο γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ (Φύλλο Κουφάλια,ΙΓΜΕ,1993), τα δελτία των 14 γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων, οι τομές των γεωτρήσεων που κατασκευάστηκαν στην περιοχή από την ΥΕΒ του Υπουργείου Γεωργίας, καθώς και πληροφορίες από τους κατοίκους της περιοχής.

### 3. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ-ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η περιοχή μελέτης καταλαμβάνει έκταση 3 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Περιορίζεται από Δυτικά και Ανατολικά από δύο παράλληλα ρέματα ΒΒΔ-ΝΝΑ διεύθυνσης. Τα δύο αυτά ρέματα βρίσκονται δυτικά της κοινότητας του Ν.Αγιονερίου. Προς Νότο η περιοχή μελέτης ορίζεται από την επαρχιακή οδό προς Πρόχωμα, ενώ προς Βορρά εκτείνεται μέχρι τις γεωτρήσεις της ύδρευσης (χάρτες 1,2,παράρτημα 2,παράρτημα ΙΙ αντίστοιχα).

Η περιοχή χαρακτηρίζεται λοφώδης με μικρή κλίση. Η μορφολογία έχει δημιουργηθεί σαν αποτέλεσμα της δράσης των εξωγενών παραγόντων κατά το Τεταρτογενές.

## 4. ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΘΕΣΗ

Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στη ζώνη Αξιού, που αποτελείται από τις 3 εσωτερικές ζώνες, Παιονίας, Πάϊκου και Αλμωπίας. Παρόλη την διαίρεσή της, ακόμη και σήμερα η ζώνη Αξιού εξακολουθεί να θεωρείται σαν μια ενιαία ζώνη με χαρακτήρες παλιάς ωκεάνιας περιοχής. Ο ωκεάνιος χαρακτήρας αποδίδεται από ορισμένους ερευνητές χωριστά για τις δύο ζώνες Παιονίας και Αλμωπίας με την παρεμβολή ανάμεσα τους της μικρής πλατφόρμας του Πάϊκου.

Η ζώνη Αξιού, που το όνομα της οφείλεται στον ομώνυμο ποταμό της Κεντρικής Μακεδονίας, αναφέρεται συχνά στην ξένη βιβλιογραφία με το όνομα “ζώνη Vardar”.

Καθορίστηκε αρχικά από τον Kossmat (1992) σαν μια ζώνη BBD-NNA διεύθυνσης και πλάτους 30-70 Km, παρεμβαλλόμενη μεταξύ της μάζας της Ροδόπης προς τα ανατολικά και της Πελαγονικής προς τα δυτικά. Αρχίζει από την περιοχή των Σκοπίων της Γιουγκοσλαβίας, επεκτείνεται μέχρι το Θερμαϊκό κόλπο και το Αιγαίο, όπου περιλαμβάνει ορισμένα από τα νησιά των Βορείων Σποράδων και κάμπτεται στην συνέχεια κατά την διεύθυνση Δ-Α προς τη Μικρά Ασία.

Η περιοχή μελέτης ανήκει στη ζώνη Παιονίας και στην ενότητα Βαφειοχωρίου (σχήμα 2).

Βασικό τεκτονικό χαρακτηριστικό της ζώνης Παιονίας είναι η λεπιοειδής τεκτονική. Τα τεκτονικά λείπια που σχηματίστηκαν από τις τριτογενείς φάσεις πτυχώσεων έχουν μικρές ή μεγάλες διαστάσεις. Οι ενότητες της ζώνης αντιπροσωπεύουν ουσιαστικά η κάθε μια ένα μεγαλέπιο που συγκροτείται από ορισμένους σχηματισμούς. Τα μεγαλέπια εμφανίζονται αποκομμένα μεταξύ τους λόγω της γενικής κάλυψης της περιοχής από τα μεταλικά νεογενή ιζήματα.

Συγκεκριμένα βόρεια της περιοχής μελέτης εκτείνεται ρηξιγενής ζώνη μεγάλου μήκους, με κύριο ρήγμα σχεδόν κατακόρυφο χωρίς όμως επιφανειακά ίχνη λόγω κάλυψης αυτού από τα νεογενή ιζήματα. Το ίδιο ρήγμα εμφανίζεται επιφανειακά στην περιοχή της Πέλλας στη σειρά των μαργαϊκών ασβεστολίθων. Η ρηξιγενής αυτή ζώνη είναι υπεύθυνη για την τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής.

Από την δορυφορική εικόνα LANDSAT-5/TM (παράρτημα 3) και πιο συγκεκριμένα από την φασματική ζώνη 6 (band 6) εντοπίσαμε μια φωτογράμμιση που βρίσκεται βόρεια της περιοχής μελέτης και που πιθανά αποτελεί την

προαναφερθείσα ρηξιγενή ζώνη. Επιλέξαμε την ζώνη 6 αντί των υπολοίπων ζωνών του TM διότι η θερμική ζώνη 6 είναι κατάλληλη για την συλλογή θερμικών στοιχείων στην γενική επιφάνεια (θερμική χαρτογράφηση, Αστάρας 1994) καθώς και για την χαρτογράφηση περιοχών με διαφορετική υγρασία.

Συγκεκριμένα κατά μήκος των πιθανών ρηγμάτων παρατηρείται ψυχρή γραμμική ανωμαλία η οποία προκαλείται από την ψύξη λόγω εξάτμισης των υγρών περιοχών κατά μήκος των ρηγμάτων. Αυτή η γραμμική ανωμαλία παρατηρείται με διαφορετικό τόνο του τεφρού χρώματος σε σχέση με τον τόνο των τεμαχίων του πετρώματος εκατέρωθεν του ρήγματος.

## 5. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή της στρωματογραφίας θα γίνει αναλυτικά για την ζώνη Βαφειοχωρίου.

### 5.1 ΠΡΟΠΑΙΟΝΙΑ - ΕΝΟΤΗΤΑ ΒΑΦΕΙΟΧΩΡΙΟΥ

Η γενική γεωλογική τομή δίνεται στο σχήμα 3 (Mercier 1966). Η στρωματογραφική της διαδοχή από τα νεότερα προς τα παλαιότερα, με τους αριθμούς που αναφέρονται στην αντίστοιχη στήλη του σχήματος 4 (κατά Mercier 1966) είναι η παρακάτω:

14) Ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων ηλικίας ολόκαινου: ιζημάτα αποτελούμενα από: ιλύ, άργιλο, και λεπτόκοκκους άμμους. Σπανιότερα και κατά θέσεις συναντώνται χονδρόκοκκοι άμμοι υποκίτρινου χρώματος. Το ύψος από την κοίτη του Αξιού ποταμού είναι 8 μέτρα περίπου.

13) Ποταμοχειμάρειες αποθέσεις ηλικίας Πλειστόκαινου στα πρανή των κοιλάδων του Αξιού και των εγκάρσιων προς αυτών ρεμάτων: προέρχονται κυρίως από αποσάθρωση και μεταφορά των νεογενών και των άλλων, κυρίως από ερυθρές αμμούχες αργίλους και ερυθρές αργιλούχες άμμους και σπανιότερα από διάσπαρτα χαλίκια και κροκάλες. Κατά θέσεις παρεμβάλλονται φακοί αμμοχαλίκων και φωλιές μεγέθους πυγμής ή και μεγαλύτερες από άσπρο ασβεστολιθικό τόφφο. Το μέσο πάχος των ιζημάτων είναι 35 μέτρα περίπου.

12) Κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων ηλικίας Πλειστόκαινου που αποτελούνται από ασβεστούχους ερυθροπηλούς με διάσπαρτα χαλίκια, κροκάλες και φωλιές ασβεστιτικών τόφφων. Αμμοχάλικα που περιέχουν κροκάλες διαφόρου μεγέθους μέχρι και ογκόλιθους χαλαζιτών, ασβεστόλιθων και άλλων πετρωμάτων του υπόβαθρου. Μέσο πάχος ιζημάτων 25 μέτρα περίπου.

11) Σειρά μαργαϊκών ασβεστολίθων και μαργών (Λιμναία φάση) Τριτογενούς-Νεογενούς: εναλλαγές σκληρών σχετικά ασβεστόλιθων και μαργαϊκών ασβεστολίθων,

σε πάγκους ενός έως τριών μέτρων χαρακτηριστικού λευκού έως υπόλευκου χρώματος με ψαθυρές και εύθρυπτες μάργες που κατά θέσεις γίνονται κονδυλώδεις ή σχιστώδεις, πάχους 20-50 εκατοστών, χρώματος υπόλευκου έως λευκοκίτρινου, με παρεμβολές τεφροπράσινων αργίλων και ερυθροπηλών. Σπανιότερα παρατηρούνται φακοί και ενστρώσεις αμμοχαλίκων και κροκαλοπαγών. Η ηλικία του σχηματισμού τοποθετείται στο Πόντιο με βάση μικροχλωρίδα αποτελούμενη από γυρεόκοκκους κωνοφόρων. Το πάχος είναι περίπου 300 μέτρα.

10) Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά (Λιμνοθαλάσσια φάση) ηλικίας Τριτογενούς-Νεογενούς με εναλλαγές μεταξύ:

-αδρόκοκκων άμμων ή αμμοχάλικων με καλή διαβάθμιση και σπάνια διασταυρούμενη στρώση με παρεμβολές εκτεταμένων φακών κονδυλωδών μαργών ή μαργαϊκών ψαμμιτών ή μαργαϊκών ασβεστολίθων και σπανιότερα μικροκροκαλοπαγή πάχους περίπου 1 μέτρο.

-ψαθυρών μαργών που κατά θέσεις γίνονται κονδυλώδεις, κίτρινου χρώματος. Το πάχος των στρώσεων κυμαίνεται από 20-30 εκατοστά έως και 1 μέτρο.

-ενστρώσεων αργίλων γκρι – πρασινωπού χρώματος και πάχους από 10 εκατοστά έως 1 μέτρο. Το πάχος είναι περίπου 600 μέτρα που αυξάνει προς νότο.

9) Κατώτερη σειρά (υφάλμυρη φάση) ηλικίας Τριτογενούς-Νεογενούς:

-αδρομερή κλαστικά ιζήματα με διασταυρούμενη και πλάγια στρώση, σχεδόν αδιαβάθμητα. Αποτελούνται από χονδρόκοκκες άμμους, αμμοχάλικα και κροκαλοπαγή με μεγάλες κροκάλες και ογκόλιθους του υπόβαθρου (Πάϊκο) πάχους 500 μέτρων περίπου με αύξηση προς το νότο.

-αδιαβάθμητα ποταμοχερσαία ιζήματα που αποτελούνται από ερυθροπηλούς και διάσπαρτες κροκάλες και λατύπες. Παρεμβάλλονται φακοί μαργών, αργίλων, λεπτόκοκκων άμμων και ενστρώσεις αμμοχαλίκων χαρακτηριστικού ερυθροκίτρινου χρώματος. Σπανιότερα απαντώνται ασβεστιτικά συγκρίματα που αντιπροσωπεύουν πιθανά τοπικές λιμναίες αποθέσεις, πάχους 100 μέτρων περίπου. Η ηλικία του σχηματισμού τοποθετείται στο ανώτερο Μειόκαινο.

8) Φλύσχη αποτελούμενος από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, πηλίτες, ηλικίας Ανώτερου Ιουρασικού-Βασικού Κρητιδικού.

7) Ασβεστόλιθοι συμπαγείς και κροκαλοπαγείς με απολιθώματα κοραλλιών, χαρακτηριστικών του Πορτλαντίου (Α.Ιουρασικό).

6) Κλαστική ιζηματογενής σειρά αποτελούμενη από κροκαλοπαγή (συχνά με κροκάλες οφειόλιθων ή κρυσταλλοσχιστώδων), ψαμμίτες, ψαμμιτιειδείς πηλίτες και ψαμμιτοειδείς ασβεστόλιθους. Πρόκειται για μια τυπική επικλυσιογενής σειρά επί των οφειόλιθων ηλικίας επίσης Α.Ιουρασικού.

5) Οφειολιθική ακολουθία με δολερίτες γάββρους και μικρολιθικά.

4,3,2,1) Σειρά εναλλασσόμενων στρωμάτων από σιπολίνες, χαλαζίτες, μαρμαρυγακούς σχιστόλιθους και μάρμαρα ηλικίας Τριαδικού-Ιουρασικού.



## 6. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ Ν.ΑΓΙΟΝΕΡΙΟΥ

Ο κοντινότερος μετεωρολογικός σταθμός (ΜΣ) στην περιοχή μας είναι αυτός της Νέας Χαλκηδώρας (υψόμετρο=10μέτρα, γεωγραφικό πλάτος=40°44', γεωγραφικό μήκος=22°36').

Λόγω του μικρού της απόστασης δεχόμαστε ότι οι τιμές των μετρήσεων των διαφόρων μεγεθών του σταθμού αυτού είναι παραπλήσιες με αυτές της περιοχής μελέτης μας(Μπαλαφούτης 1977).

Η κατανομή της βροχής στην ευρύτερη περιοχή επηρεάζεται έντονα από την μεταβολή του ανάγλυφου. Η περιοχή μας ανήκει σε μια συνεχή ζώνη με ετήσια μέση βροχόπτωση 500-600mm. Η ζώνη αυτή καταλαμβάνει την νότια και ανατολική πλευρά του Παϊκού και την νότια πλευρά του όρους Κερκίνη.

Η μέση ετήσια βροχόπτωση στο ΜΣ της Ν.Χαλκηδώρας είναι 564,14mm(υγρότερο έτος 764,9mm ενώ ξηρότερο έτος 438,1mm). Η μέση μηνιαία βροχόπτωση σε mm είναι:

ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ	ΔΕΚ
52	47	60	38	51	39	25	16	35	56	76	69

Το μεγαλύτερο ποσό της βροχής πέφτει κατά την ψυχρή περίοδο του έτους και κυρίως κατά τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο. Αυτό το μέγιστο της βροχής συνδέεται με την περίοδο εμφάνισης του Πολικού –Μεσογειακού μετώπου στα γεωγραφικά πλάτη της ευρύτερης περιοχής. Ένα δευτερεύον μέγιστο λαμβάνει χώρα κυρίως κατά τον Μάιο.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα έχει τιμή 15,74°C. Κατά τον Ιανουάριο παρατηρείται η μικρότερη τιμή 4,56°C ενώ κατά τον Ιούλιο η μεγαλύτερη τιμή 26,83°C. Η μέση μηνιαία τιμή της θερμοκρασίας σε °C δίνεται παρακάτω:

ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ	ΔΕΚ
4,6	6,3	9,3	14	20	25	27	27	22	16	11	6,7

Από τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζουμε την μέση ετήσια εξατμισιοδιαπνοή E της περιοχής (τύπος του Thornthwaite, 1948). προκύπτει ότι  $E=438,24\text{mm}$ .

Αν  $P=564,24\text{mm}$  είναι η μέση ετήσια τιμή των κατακρημνισμάτων και Q η ολική απορροή με  $Q=I+R$  όπου I και R η υπόγεια και η επιφανειακή απορροή αντίστοιχα, η εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου για την περιοχή μας είναι:

$$P=Q+E \quad \text{ή}$$

$$564,14\text{mm}=125,9\text{mm}+438,24\text{mm}$$

## 7. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

### 7.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης. Η ποσότητα που μετράμε είναι, συνήθως, η **ηλεκτρική τάση**, ενώ η ποσότητα η οποία παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται ο καθορισμός της και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης είναι η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση**.

Ο αριθμός των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι σημαντικός, αλλά οι σπουδαιότερες απ' αυτές είναι η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, η μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών, η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων.

Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να διακριθούν σε δύο γενικές κατηγορίες. Σε κείνες που βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών **φυσικών** ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων και σε εκείνες που βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών τα οποία εξαρτώνται από παραγόμενα **τεχνητά** ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία. Γι' αυτό, οι μέθοδοι της πρώτης κατηγορίας μοιάζουν με τις βαρυτικές και μαγνητικές μεθόδους, οι οποίες βασίζονται σε φυσικά πεδία, ενώ οι μέθοδοι της δεύτερης κατηγορίας μοιάζουν με τις σεισμικές μεθόδους οι οποίες βασίζονται σε τεχνητά παραγόμενα ελαστικά κύματα. Οι μέθοδοι του φυσικού δυναμικού και των τελλουρικών ρευμάτων ανήκουν στην πρώτη κατηγορία των γεωηλεκτρικών μεθόδων, ενώ οι άλλες τρεις μέθοδοι ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία και στην Τεχνική Γεωλογία για την ανεύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες κατασκευής τεχνητών φραγμάτων. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο στη διασκόπηση πετρελαίου, γιατί μ' αυτές μπορούμε να μελετήσουμε μόνο τα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης.

## 7.2 Ειδική Αντίσταση των Πετρωμάτων και Ορυκτών

Η ειδική αντίσταση,  $\rho$ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ηλεκτρική διασκόπηση και γι' αυτό θα ασχοληθούμε πρώτα μ' αυτή.

Αν  $R$  είναι η ηλεκτρική αντίσταση ενός κομματιού πετρώματος σχήματος κυλίνδρου, διατομής  $S$  και μήκους  $L$ , η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$ , ορίζεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad (1)$$

**Το αντίστροφο,  $\sigma = 1 / \rho$ , της ειδικής αντίστασης λέγεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος.**

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων, SI, είναι το  $\Omega\text{m}$ . Πολλές φορές όμως χρησιμοποιείται και η μονάδα  $1 \Omega\text{cm}$  και είναι  $1 \Omega\text{m} = 100\Omega\text{cm}$ .

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών είναι μια από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και ορυκτών. Οι τιμές της κυμαίνονται από  $10^{-6}\Omega\text{m}$  σε ορισμένα ορυκτά, όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι  $10^{15}\Omega\text{m}$  σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Καλοί αγωγοί θεωρούνται τα πετρώματα και ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ  $10^{-6}$  και  $10^{-1}\Omega\text{m}$  και κακοί αγωγοί αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ  $10^8$  και  $10^{15}\Omega\text{m}$ .

Δεν υπάρχει συστηματική διαφορά μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων των πλουτωνίων και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Τα περισσότερα ιζηματογενή πετρώματα έχουν ειδικές αντιστάσεις ( $1-10^3 \Omega\text{m}$ ) μικρότερες από τις ειδικές αντιστάσεις των πλουτωνίων και μεταμορφωμένων πετρωμάτων ( $10^3 - 10^5\Omega\text{m}$ ) αλλά ο συμπαγής ασβεστόλιθος έχει υψηλές τιμές ( $>10^5\Omega\text{m}$ ).

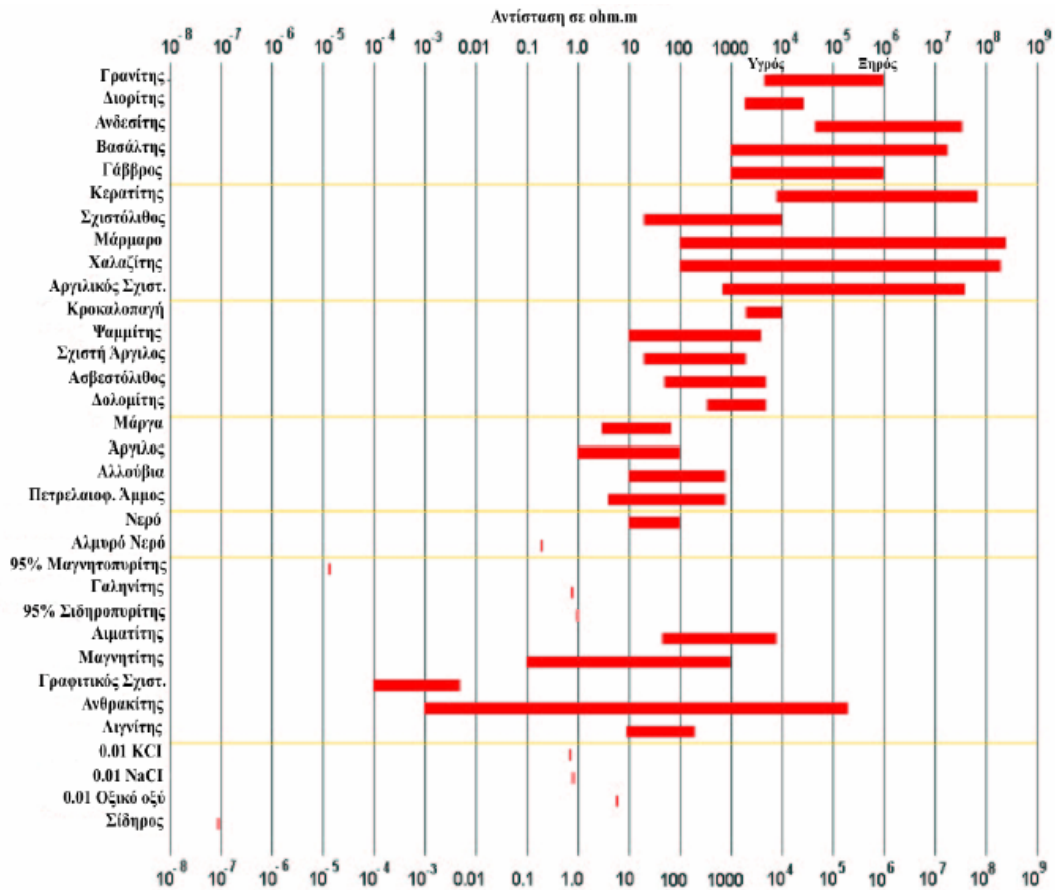
Ορισμένα υλικά μεταξύ των οποίων είναι και ορισμένα ορυκτά τα οποία παρουσιάζουν οικονομικό ενδιαφέρον (γραφίτης, πυρίτης, σιδηρίτης) έχουν μικρές ειδικές αντιστάσεις σε σχέση με τις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων που τα περιβάλλουν. Σ' αυτή την ιδιότητα των ορυκτών αυτών βασίζονται οι μέθοδοι ηλεκτρικής διασκόπησης που εφαρμόζονται για τον εντοπισμό τους.

Μερικών ορυκτών, όπως είναι ορισμένα μέταλλα που βρίσκονται στη φύση και ο γραφίτης, η καλή ηλεκτρική αγωγιμότητά τους οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Όμως, τα περισσότερα ορυκτά από τα οποία συνήθως αποτελούνται τα πετρώματα είναι μονωτές και η ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων αυτών και ιδιαίτερα αυτών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της Γης οφείλεται στα ιόντα τα οποία σχηματίζονται στο νερό που περιέχεται στους πόρους τους (ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα). Συνεπώς, η αγωγιμότητα ενός πετρώματος πρέπει να εξαρτάται από το πορώδες του πετρώματος.

Έχει προταθεί η ακόλουθη εμπειρική σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης,  $\rho$ , ενός πετρώματος και του πορώδους,  $\phi$ , αυτού.

$$P = \alpha \rho_v \phi^{-m} \quad (2)$$

όπου  $\rho_v$  είναι η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος,  $\phi$  είναι ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες) και  $\alpha, m$  σταθερές οι οποίες σε πρώτη προσέγγιση έχουν τιμές  $\alpha=1$  και  $m=2$ . Η σχέση (2) είναι γνωστή ως **νόμος του Archie** και δείχνει ότι η ειδική αντίσταση αυξάνει όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος.



**Σχήμα 1:** Αντίσταση διάφορων πετρωμάτων και ορυκτών (Keller and Frischknecht 1966).

Για τα πετρώματα που είναι διαποτισμένα με νερό υπάρχει μια έμμεση σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης και της λιθολογίας ή της γεωλογικής ηλικίας, γιατί οι δύο αυτοί παράγοντες καθορίζουν το πορώδες, δηλαδή τη χωρητικότητα του πετρώματος σε νερό. Η τιμή του πορώδους αρχίζει από 0,4 για τα πελαγικά ιζήματα, και σχεδόν μηδενίζεται για τα άλλα ιζήματα (ασβεστόλιθος, κλπ).

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων αυξάνεται γενικά με τη γεωλογική ηλικία τους, λόγω της αύξησης της συνοχής τους η οποία οφείλεται στην αύξηση του πάχους των υπερκείμενων στρωμάτων και συνεπώς και της πίεσης που ασκούν τα στρώματα αυτά στα από κάτω με την αύξηση του χρόνου. Όμως, αυτό δεν ισχύει πάντα και ιδιαίτερα για τα τριτογενή ιζήματα τα οποία, λόγω του ότι σχηματίστηκαν σε γλυκό νερό κατά κύριο λόγο, έχουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από τα μεσοζωικά ιζήματα τα οποία σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό.

Στα κρυσταλλικά πετρώματα των οποίων το πορώδες είναι εξαιρετικά χαμηλό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται αποκλειστικά σχεδόν στις ρωγμές που υπάρχουν στα πετρώματα αυτά.

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία τους. Μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας επιδρούν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με νερό στο βαθμό που επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη που περιέχεται στα πετρώματα. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί ελάττωση του ιξώδους του νερού με συνέπεια την ελάττωση της ειδικής αντίστασης (αύξηση της αγωγιμότητας). Η ειδική αντίσταση τόσο των ηλεκτρολυτών όσο και των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με ηλεκτρολύτη, δίνεται, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, από τη σχέση:

$$P_{\theta} = \frac{P_{18}}{1 + \alpha_{\theta}(\theta - 18^{\circ})} \quad (3)$$

όπου  $\rho_{\theta}$  και  $\rho_{18}$  είναι η ειδική αντίσταση σε Θερμοκρασία  $\theta^{\circ}\text{C}$  και σε θερμοκρασία  $18^{\circ}\text{C}$ , αντίστοιχα, και  $\alpha_{\theta}$  είναι ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης, ο οποίος έχει τιμή περίπου  $0,025/^{\circ}\text{C}$ , για τους περισσότερους ηλεκτρολύτες.

Η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων που είναι διαποτισμένα με νερό επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία μόνο σε περίπτωση μεγάλων μεταβολών αυτής και ιδιαίτερα όταν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή ώστε να προκαλεί εξάτμιση του νερού ή πολύ χαμηλή ώστε το νερό να παγώσει. Στη μεγάλη ελάττωση της ειδικής αντίστασης που προκαλείται από υψηλές θερμοκρασίες που εξατμίζουν το νερό οφείλεται το γεγονός ότι οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι και ιδιαίτερα η μέθοδος της ειδικής αντίστασης εφαρμόζεται με επιτυχία στον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων.

### **7.3 Όργανα που Χρησιμοποιούνται στη Γεωηλεκτρική Διασκόπηση.**

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στη γεωηλεκτρική διασκόπηση είναι συνήθως απλές και περιλαμβάνουν βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης και πηγή ηλεκτρικού ρεύματος με αμπερόμετρο όταν διαβιβάζεται στο έδαφος τεχνητά

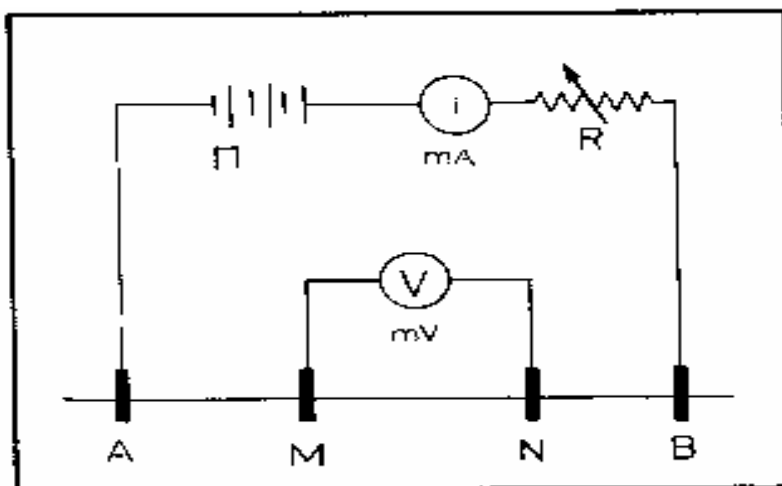
παραγόμενο ρεύμα. Πέρα απ' αυτά, οι συσκευές ηλεκτρικής διασκόπησης περιλαμβάνουν καλώδια, ηλεκτρόδια ,κλπ.

Το σχήμα (2) παριστάνει σχηματικά μια τέτοια συσκευή που χρησιμοποιείται κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής αντίστασης και ορισμένων άλλων μεθόδων. Αυτή περιλαμβάνει πηγή ηλεκτρικού ρεύματος (Π), αμπερόμετρο που μετράει την ένταση,  $i$ , του ρεύματος που διαβιβάζεται στη Γη με τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος A,B και βολτόμετρο που μετράει την τάση,  $V$ , μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού M,N. Τέτοια όργανα είναι το Megger, το Tellohm, το ABEM Terrameter, το IRIS κλπ. Η ηλεκτρική πηγή μπορεί ,να είναι συνεχούς (D.C.) ρεύματος (μπαταρίες σε σειρά) ή χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος (A.C.).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται πηγή συνεχούς ρεύματος πρέπει η πολικότητα να εναλλάσσεται περιοδικά (με το χέρι ή αυτόματα) για να αποφεύγεται η ηλεκτρολυτική πόλωση των ηλεκτροδίων με το έδαφος (συγκέντρωση ανιόντων γύρω από το θετικό ηλεκτρόδιο και κατιόντων γύρω από το αρνητικό ηλεκτρόδιο). Κατά τη χρησιμοποίηση τέτοιας πηγής, η τάση που μετράμε περιέχει και την τιμή του φυσικού δυναμικού και για το λόγο αυτό πρέπει να μετριέται το φυσικό δυναμικό πριν διαβιβαστεί το ρεύμα στο έδαφος ώστε τελικά να αφαιρείται η τιμή του.

Όταν χρησιμοποιείται πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος δεν υπάρχουν τα προβλήματα που αναφέραμε παραπάνω (πόλωση ηλεκτροδίων, κλπ) και για το λόγο αυτό οι περισσότερες γεωηλεκτρικές μετρήσεις γίνονται σήμερα με εναλλασσόμενο ρεύμα. Το ρεύμα αυτό πρέπει να είναι χαμηλής συχνότητας για να μπορεί να διεισδύσει σε σημαντικό βάθος μέσα στη Γη, γιατί είναι γνωστό ότι το βάθος διείσδυσης, δηλαδή το βάθος στο οποίο η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται ίση με  $1/e$  ( $e = 2,718$ ) της τιμής της στην επιφάνεια της Γης, είναι αντιστρόφως ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της συχνότητας του ρεύματος. Όμως, το εναλλασσόμενο ρεύμα δεν πρέπει να είναι πολύ χαμηλής συχνότητας ( $>1\text{Hz}$ ) για να αποφεύγονται φαινόμενα επαγόμενης πολικότητας. Συνεπώς, για γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις μεγάλου βάθους πρέπει να χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα.





**Σχήμα 2:** Σχηματική παράσταση συσκευής που χρησιμοποιείται στη γεωηλεκτρική διασκόπηση κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής αντίστασης (Παπαζάχος 1996).

Τα ηλεκτρόδια μπορεί να είναι από ασάλι, αλουμίνιο, χαλκό κλπ, όταν χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα. Όταν, όμως, χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα αυτά πρέπει να είναι κατάλληλα πορώδη ηλεκτρόδια τα οποία δεν πολώνονται και αποφεύγεται έτσι η δημιουργία τάσης επαφής μεταξύ αυτών και του εδάφους.

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται στη γεωηλεκτρική διασκόπηση είναι συνήθως τυλιγμένα σε φορητούς κυλίνδρους και είναι μονωμένα με πλαστικό.

## 7.4 Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος σε Ομογενή Γη

Η Γη και ιδιαίτερα τα ανώτερα στρώματα του φλοιού της είναι ανομοιογενή. Όμως, για να κατανοήσουμε τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στα στρώματα αυτά πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τη ροή αυτή μέσα σε ομογενές υπέδαφος.

Ας υποθέσουμε ότι εισάγουμε ένα φορτισμένο θετικά ηλεκτρόδιο  $P$  (πόλο) μέσα στο έδαφος το οποίο θεωρούμε ομογενές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$ . Τότε, το έδαφος θα διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα. Επειδή ο αέρας της ατμόσφαιρας είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, θεωρούμε ότι όλο το ρεύμα από τον πόλο μπαίνει μέσα στη Γη.

Ας θεωρήσουμε σφαίρα η οποία έχει κέντρο τον πόλο  $P$  και ακτίνα  $r$  (σχ.3). Αν  $i$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και  $S$  το εμβαδόν της μισής σφαίρας που

βρίσκεται μέσα στη Γη, η πυκνότητα του ρεύματος, J, που διαρρέει κάθετα τη σφαίρα θα δίνεται από τη σχέση

$$J = \frac{i}{S} \quad (4)$$

Σύμφωνα με το γενικευμένο νόμο του Ohm, η πυκνότητα ρεύματος δίνεται από τη σχέση

$$J = -\rho E \quad (5)$$

όπου  $\rho$  είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση και  $E$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Αν  $V$  είναι το δυναμικό στην επιφάνεια της σφαίρας, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια αυτή θα είναι

$$E = \frac{dV}{dr} \quad (6)$$

Συνεπώς, η πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια της σφαίρας, δηλαδή, σε απόσταση  $r$  από τον πόλο θα δίνεται από τη σχέση

$$J = -\rho \frac{dV}{dr} \quad (7)$$

Από τις σχέσεις (7), (5), (4) προκύπτει ότι

$$dV = -\frac{\rho i}{S} dr \quad (8)$$

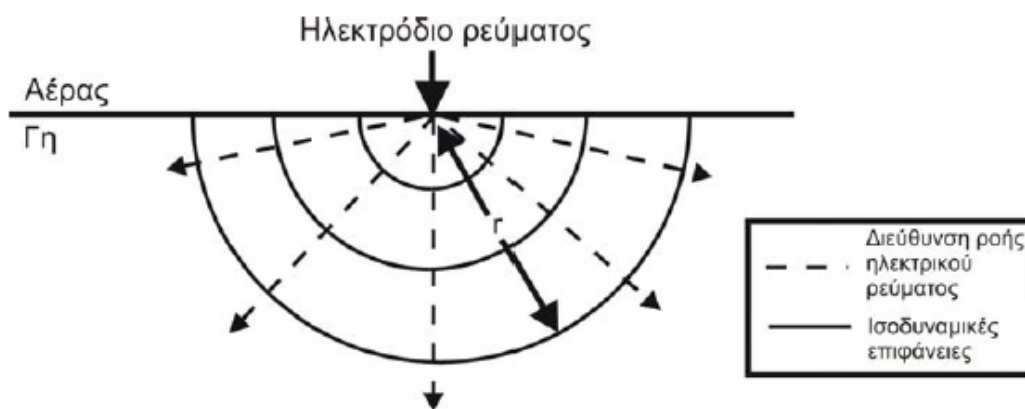
και

$$V = -\rho i \int_{\infty}^r \frac{dr}{S} \quad (9)$$

Βάζοντας το εμβαδόν της μισής σφαίρας  $S = 2\pi r^2$  στην τελευταία αυτή σχέση και ολοκληρώνοντας βρίσκουμε ότι

$$V = \frac{\rho i}{2\pi r} \quad (10)$$

Η σχέση αυτή δίνει το δυναμικό που προκαλεί σε απόσταση  $r$  απ'αυτόν θετικός πόλος ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης όταν τα πετρώματα αυτής είναι ομογενή και έχουν ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$ .



**Σχήμα 3:** Οι ισοδυναμικές επιφάνειες και η διεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος για μια σημειακή πηγή (Παπαζάχος 1996).

Όταν ο πόλος δε βρίσκεται στην επιφάνεια αλλά μέσα στο ομογενές έδαφος θα είναι

$$V = \frac{\rho i}{4\pi r} \quad (11)$$

Στην περίπτωση που ο πόλος είναι θετικός το ρεύμα και η πυκνότητα ρεύματος (που θεωρείται διάνυσμα) έχουν φορά προς τα έξω ,ενώ όταν ο πόλος είναι αρνητικός το ρεύμα και η πυκνότητα ρεύματος έχουν φορά προς τον πόλο και στο δεύτερο μέλος της (10) πρέπει να μπει το σημείο πλην (-). Το μέτρο της πυκνότητας ρεύματος και η ένταση του ρεύματος είναι παντού ίδια. Οι γραμμές ροής του ρεύματος και στις

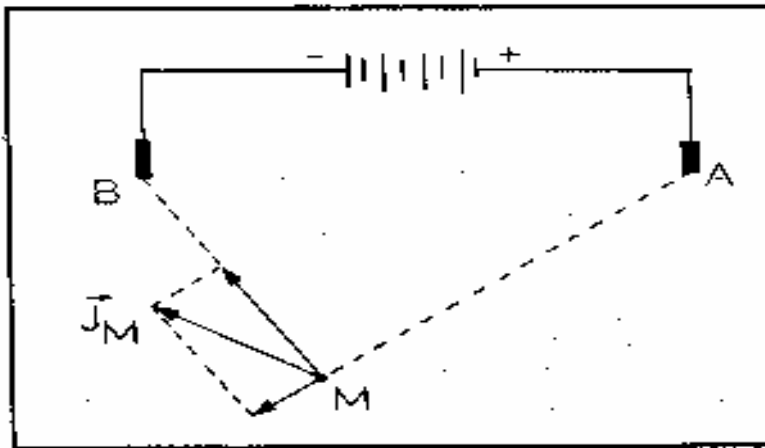
δύο περιπτώσεις (θετικός ή αρνητικός πόλος) αρχίζουν ακτινικά από τον πόλο, δηλαδή, έχουν τις διευθύνσεις των ακτίνων της σφαίρας, ενώ οι ισοδυναμικές επιφάνειες (επιφάνειες σταθερού δυναμικού) είναι σφαίρες που έχουν κέντρο τον πόλο (σχ.3).

Το δυναμικό είναι μονόμετρο μέγεθος και για το λόγο αυτό το συνολικό δυναμικό σε ένα σημείο που οφείλεται σε διάφορους ηλεκτρικούς πόλους είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών που δημιουργούν στο σημείο αυτό κάθε ένας από τους πόλους. Για το λόγο αυτό, το δυναμικό,  $V_M$ , σε σημείο  $M$  που οφείλεται σε πόλους οι οποίοι δίνουν ρεύματα εντάσεων  $i_1, i_2, \dots, i_n$  και απέχουν αποστάσεις  $r_1, r_2, \dots, r_n$ , αντίστοιχα, από το σημείο  $M$  δίνεται από τη σχέση

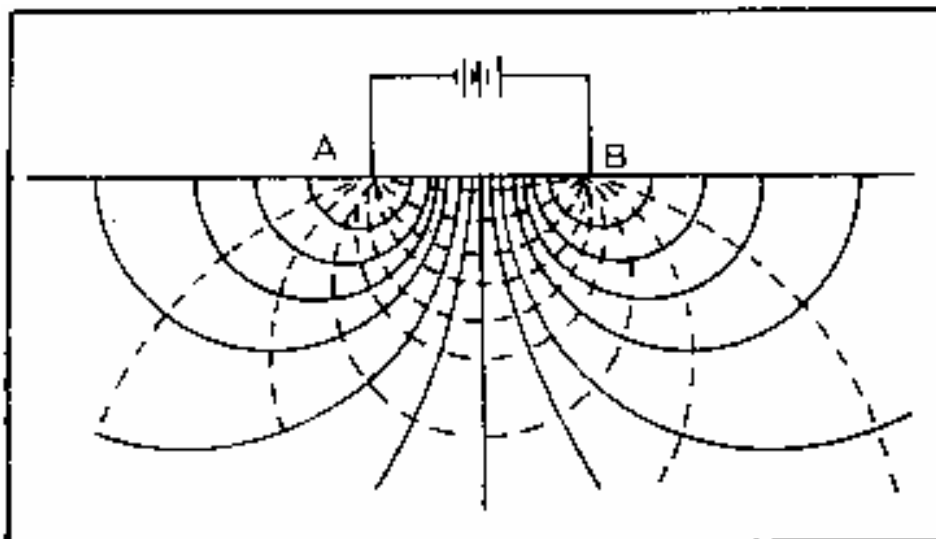
$$V_M = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{i_1}{r_1} + \frac{i_2}{r_2} + \dots + \frac{i_n}{r_n} \right) \quad (12)$$

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η πυκνότητα ρεύματος είναι διανυσματικά μεγέθη. Συνεπώς, για να βρούμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ή την πυκνότητα ρεύματος σε ένα ορισμένο σημείο πρέπει να συνθέσουμε διανυσματικά τις αντίστοιχες συνιστώσες έντασης ηλεκτρικού πεδίου ή πυκνότητας ρεύματος. Στο σχήμα (4) δείχνεται ο τρόπος σύνθεσης των συνιστωσών της πυκνότητας ρεύματος σε ένα σημείο  $M$  όταν το ρεύμα αυτό οφείλεται στους πόλους  $A$  και  $B$  μιας ηλεκτρικής πηγής. Η διεύθυνση της συνιστώσας  $JM$  δίνει και διεύθυνση ροής του ρεύματος στο  $M$ .

Το σχήμα (5) δείχνει τις ισοδυναμικές γραμμές (πλήρεις γραμμές) και τις γραμμές του ρεύματος (διακομμένες γραμμές) οι οποίες οφείλονται σε ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο διαβιβάζεται μέσα στη  $\Gamma\eta$  με δύο ηλεκτρόδια  $A (+)$  και  $B (-)$  μιας ηλεκτρικής πηγής. Παρατηρούμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο τώρα έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με τις αρχές αλγεβρικής πρόσθεσης δυναμικών και διανυσματικής σύνθεσης πυκνοτήτων ρεύματος.



Σχήμα 4: Η συνισταμένη των διανυσμάτων πυκνότητας ρεύματος σ' ορισμένο σημείο, M, τα οποία οφείλονται σε δύο ηλεκτρικούς πόλους A και B παριστάνει τη διεύθυνση του ρεύματος και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο αυτό (Παπαζάχος 1996).



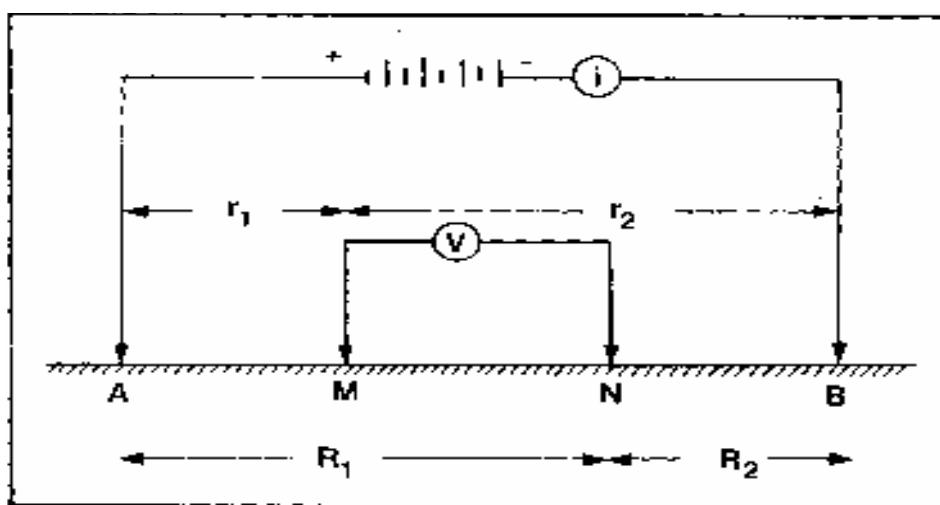
Σχήμα 5: Ισοδυναμικές γραμμές (συνεχείς καμπύλες) και γραμμές ρεύματος (στιγμένες καμπύλες) στην περίπτωση που εισάγονται τα ηλεκτρόδια, A, B ηλεκτρικής πηγής σε ομογενές έδαφος (Dobrin 1976).

## 7.5 Εφαρμογή

Η ακόλουθη εφαρμογή αυτών που αναφέραμε παραπάνω έχει μεγάλη πρακτική σημασία, γιατί, όπως θα δούμε, η σχετική διάταξη των ηλεκτροδίων και οι σχέσεις

που θα προκύψουν αποτελούν τη βάση της γεωηλεκτρικής μεθόδου της ειδικής αντίστασης.

Έστω ότι στη Γη, την οποία θεωρούμε ομογενή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$ , βάζουμε τα δύο ηλεκτρόδια A (+) και B (-) μιας ηλεκτρικής πηγής και διαβιβάζουμε συνεχές ρεύμα έντασης  $i$ . Στην ίδια γραμμή με τα δύο αυτά ηλεκτρόδια βάζουμε επίσης μέσα στη Γη δυο άλλα ηλεκτρόδια M,N τα οποία χρησιμοποιούμε για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού που παράγεται στα σημεία αυτά (M, N) από τα φορτισμένα ηλεκτρόδια A, B (σχ.5). Τα ηλεκτρόδια A, B λέγονται ηλεκτρόδια ρεύματος και τα ηλεκτρόδια M,N λέγονται ηλεκτρόδια δυναμικού.



**Σχήμα 6:** Ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και ηλεκτρόδια δυναμικού M, N (Παπαζάχος 1996).

Αν  $V_M$  είναι το δυναμικό στο σημείο M που οφείλεται στο θετικό πόλο A και στον αρνητικό πόλο B και  $V_N$  είναι το αντίστοιχο δυναμικό στο σημείο N θα έχουμε, σύμφωνα με τη σχέση (12), ότι

$$V_M = \frac{\rho i}{2\pi} - \left( \frac{i}{AM} - \frac{i}{BM} \right) \quad (13)$$

$$V_N = \frac{\rho i}{2\pi} - \left( \frac{i}{AN} - \frac{i}{BN} \right) \quad (14)$$

Από αυτές προκύπτει ότι η διαφορά δυναμικού  $\Delta V = V_M - V_N$  μεταξύ των σημείων Μ και Ν θα δίνεται από τη σχέση

$$\Delta V = \frac{Pi}{2\pi} \left( \frac{1}{AB} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (15)$$

Αν λύσουμε τη σχέση (15) ως προς ρ θα βρούμε ότι

$$P = \frac{2\pi V}{i} \cdot \frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (16)$$

Αν θέσουμε  $AM = r_1$ ,  $BM = r_2$ ,  $AN = R_1$  και  $BN = R_2$ , βρίσκουμε ότι

$$P = \frac{2\pi V}{i} \cdot \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (17)$$

Τη σχέση αυτή θα χρησιμοποιήσουμε κατά την ανάπτυξη της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

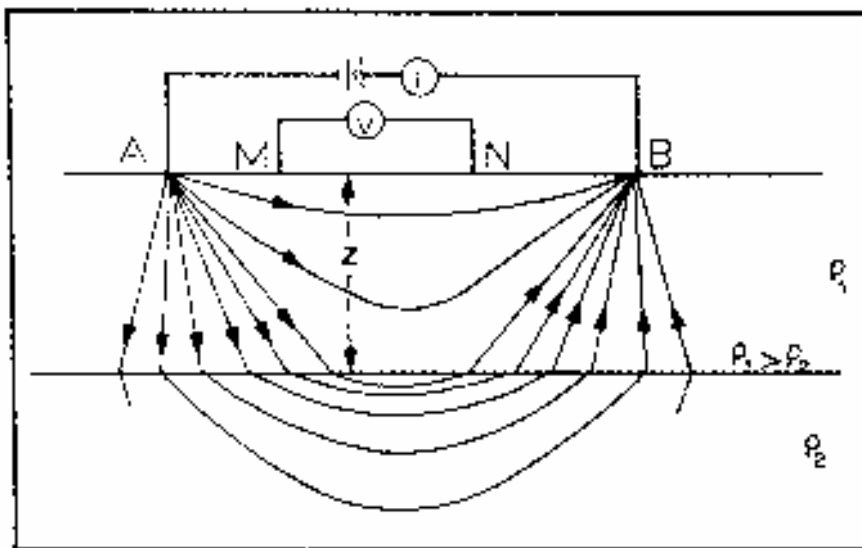
## **7.6 Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος σε Ανομοιογενή Γη**

Είναι γνωστό ότι ο φλοιός της Γης και ιδιαίτερα το πάνω μέρος του είναι εξαιρετικά ανομοιογενές και για το λόγο αυτό η θεωρία που αναπτύξαμε παραπάνω ισχύει μόνο για μικρά τμήματα αυτού τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ομοιογενή. Για μεγαλύτερα τμήματα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολυπλοκότεροι τύποι των

οποίων οι σχέσεις που αναφέραμε παραπάνω αποτελούν μερικές περιπτώσεις. Είναι βέβαια πολύ δύσκολο να καθοριστούν μαθηματικές σχέσεις για πολύπλοκες γεωηλεκτρικές δομές. Για το λόγο αυτό, οι μέθοδοι γεωηλεκτρικής διασκόπησης και ιδιαίτερα η μέθοδος της ειδικής αντίστασης εφαρμόζονται συνήθως για τον καθορισμό της γεωηλεκτρικής δομής σε περιοχές που η δομή αυτή αποτελείται από οριζόντια στρώματα διαφορετικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Θα δείξουμε εδώ τον τρόπο που υπολογίζεται το δυναμικό στην περίπτωση δύο οριζόντιων στρωμάτων.

Έστω ότι ένα μέσο (I) ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho_1$ , βρίσκεται σε επαφή με άλλο μέσο (II) ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho_2$  και ότι ηλεκτρικό ρεύμα πυκνότητας  $J_1$ , το οποίο διαρρέει το μέσο (I) συναντάει τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων και σχηματίζει γωνία  $\phi_1$ , με την κάθετη στην επιφάνεια. Το ρεύμα θα μπει στο μέσο (II) όπου θα ακολουθήσει άλλη διεύθυνση  $J_2$  η οποία σχηματίζει γωνία  $\phi_2$  με την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια. Βασιζόμενοι στην αρχή ότι το δυναμικό και η κάθετη συνιστώσα της πυκνότητας ρεύματος έχουν συνεχείς τιμές στη διαχωριστική επιφάνεια, δηλαδή ίσες τιμές αμέσως κάτω και αμέσως πάνω από την επιφάνεια, μπορούμε να δείξουμε ότι

$$\frac{\epsilon\phi\phi_1}{\epsilon\phi\phi_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (18)$$

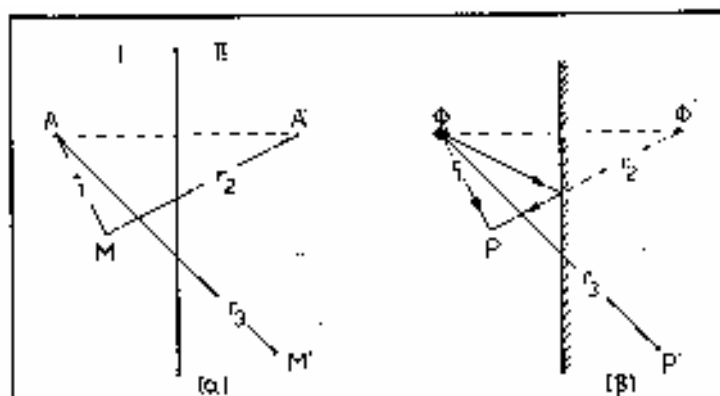




**Σχήμα.7:** Γραμμές ροής ηλεκτρικού ρεύματος στην περίπτωση κατά την οποία οριζόντιο στρώμα ειδικής αντίστασης  $\rho_1$ , βρίσκεται πάνω σε ημιχώρο ειδικής αντίστασης  $\rho_2$  με  $\rho_1 > \rho_2$  (Dobrin 1976).

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η γραμμή του ρεύματος στο μέσο (II) θα απομακρύνεται από την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια όταν είναι  $\rho_2 > \rho_1$  και θα πλησιάζει προς την κάθετη όταν είναι  $\rho_2 < \rho_1$  (σχ.7). Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι οι γραμμές του ηλεκτρικού ρεύματος μεταβάλλουν διεύθυνση σύμφωνα με το νόμο που εκφράζει η σχέση (18) όταν αλλάζει η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης με συνέπεια την παραμόρφωση των ισοδυναμικών επιφανειών. Το φαινόμενο αυτό είναι ανάλογο με το φαινόμενο της διάθλασης των οπτικών ακτίνων.

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα ηλεκτρικό πόλο, A, στο μέσο (I) και ας προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε το δυναμικό σε ένα σημείο M που βρίσκεται στο ίδιο μέσο και απέχει απόσταση  $r_1$  από τον πόλο και σε ένα σημείο M' του μέσου (II) το οποίο απέχει απόσταση  $r_3$  από τον ίδιο πόλο (σχ.8α).



**Σχήμα 8:** Αναλογία μεταξύ ηλεκτρικών (α) και οπτικών (β) ειδώλων (Telford et al.1976).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι λύσης του προβλήματος αυτού, αλλά ο απλούστερος είναι να το λύσουμε με βάση το ανάλογο οπτικό πρόβλημα κατά το οποίο ζητάμε την ένταση του φωτός στα σημεία P και P' η οποία οφείλεται σε φωτεινή πηγή Φ (σχ.8β) και τα δύο οπτικά μέσα χωρίζονται από ημιδιαφανή επιφάνεια. Η αναλογία αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι τόσο η ένταση του φωτός όσο και η πυκνότητα ρεύματος μεταβάλλονται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης από τις αντίστοιχες σημειακές πηγές.

Έτσι, αν  $\kappa$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης της ημιδιαφανούς επιφάνειας, δηλαδή ο λόγος της έντασης του φωτός που ανακλάται προς την ένταση του φωτός που προσπίπτει, οπότε ο συντελεστής διαπερατότητας θα είναι  $1-\kappa$ , η ένταση του φωτός στο σημείο P (σχ.8β) θα είναι το άθροισμα της έντασης του φωτός που οφείλεται στη φωτεινή πηγή  $\Phi$  και εξαρτάται από την απόσταση  $r_1$  και της έντασης του ανακλώμενου φωτός στην επιφάνεια το οποίο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι προέρχεται από το είδωλο,  $\Phi'$ , της πηγής  $\Phi$  ως προς την επιφάνεια και εξαρτάται από την απόσταση,  $r_2$ , του ειδώλου από το σημείο, P, και από το συντελεστή ανάκλασης  $\kappa$ . Η ένταση του φωτός στο σημείο P' εξαρτάται μόνο από την απόσταση,  $r_3$ , του σημείου αυτού από την πηγή και από το συντελεστή διαπερατότητας  $1-\kappa$ .

Αν στην περίπτωση του ηλεκτρικού φαινομένου ορίσουμε ένα ανάλογο συντελεστή  $\kappa$ , τότε, το δυναμικό  $V$  στο σημείο M θα είναι ίσο με το δυναμικό,  $V_1$ , που οφείλεται στον ηλεκτρικό πόλο και σύμφωνα με την (11) είναι  $V_1 = ip_1/4\pi r_1$ , συν το δυναμικό,  $V_2$ , που οφείλεται στο είδωλο A' και είναι  $V_2 = \kappa ip_1/4\pi r_2$ . Δηλαδή

$$V = \frac{ip_1}{4\pi} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{\kappa}{r_2} \right) \quad (19)$$

Το δυναμικό,  $V'$ , στο σημείο M' του μέσου (II) θα είναι

$$V = (1-\kappa) \frac{i\rho_2}{4\pi r_3} \quad (20)$$

Για να εκφράσουμε το συντελεστή ανάκλασης,  $\kappa$ , σε συνάρτηση με τις ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις των δύο μέσων, βασιζόμεστε στο συλλογισμό ότι οι τιμές των δυναμικών  $V$  και  $V'$  θα είναι ίσες στη διαχωριστική επιφάνεια όταν  $r_1 = r_2 = r_3$ . Εξισώνοντας τα δεύτερα μέλη των (19), (20) και θεωρώντας ίσες τις τρεις αποστάσεις βρίσκουμε ότι

$$\kappa = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (21)$$

Ο συντελεστής αυτός έχει τιμές που βρίσκονται στο διάστημα  $[-1, +1]$ .

Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση κατά την οποία ο ηλεκτρικός πόλος Α βρίσκεται στην επιφάνεια ενός στρώματος ειδικής αντίστασης  $\rho_1$  και πάχους  $z$  το οποίο βρίσκεται πάνω από ένα ημιχώρο ειδικής αντίστασης  $\rho_2$  (σχ. 9). Σε σημείο Μ που (βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια, η τάση,  $V_0$ , η οποία οφείλεται στον πόλο Α και στο είδωλο του,  $A_1$ , ως προς τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων θα είναι,

$$\text{σύμφωνα με την (σχέση 19)} \quad V_0 = \frac{ip_1}{2\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{k}{r_1} \right)$$

όπου  $k$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης των δύο μέσων. Το δυναμικό  $V_1$  του

$$\text{ειδώλου, } A_2, \text{ του } A_1 \text{ ως προς την ελεύθερη επιφάνεια θα είναι } V_1 = \frac{ip_1}{2\pi} \left( \frac{kk'}{r_1} \right)$$

όπου  $k'$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης της επιφάνειας αυτής ο οποίος είναι ουσιαστικά ίσος με τη μονάδα. Προκύπτει, συνεπώς, ότι

$$V_0 + V_1 = \frac{ip_1}{2\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{2k}{r_1} \right) \quad (22)$$

Η τάση,  $V_2$ , που οφείλεται στο είδωλο,  $A_3$ , του  $A_2$  ως προς τη διαχωριστική επιφάνεια και η τάση του ειδώλου,  $A_4$ , του  $A_3$  ως προς την ελεύθερη επιφάνεια θα έχουν

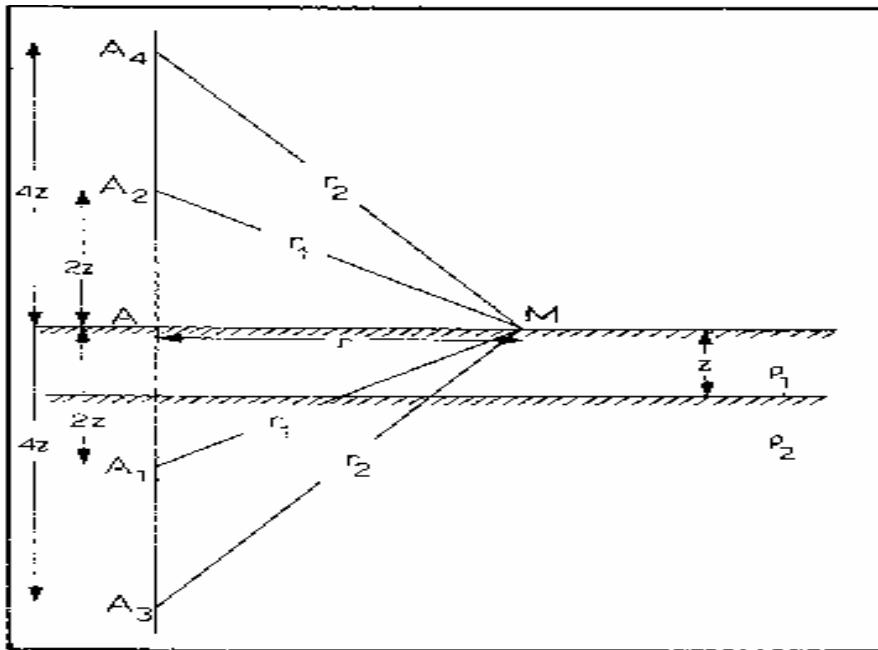
$$\text{άθροισμα} \quad \frac{ip_1}{2\pi} \left( \frac{kk}{r_2} + \frac{kkk'}{r_2} \right) = \frac{ip_1}{2\pi} \cdot \frac{2k^2}{r_2}.$$

Η επόμενη δυάδα ειδώλων θα δίνει άθροισμα  $\frac{ip_1}{2\pi} \cdot \frac{2k^3}{\rho_3}$ , κ.ο.κ. Συνεπώς, το ολικό

δυναμικό στο σημείο Μ θα δίνεται από τη σχέση

$$V = \frac{ip_1}{2\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{2k}{r_1} + \dots + \frac{2k^n}{r_n} + \dots \right) \quad (23)$$

$$\text{όπου } r_1 = \sqrt{r^2 + (2z)^2}, \dots, r_n = \sqrt{r^2 + (2nz)^2}$$



**Σχήμα 9:** Τρόπος θεώρησης των ειδώλων για τον υπολογισμό της τάσης,  $V$ , που προκαλείται σε σημείο,  $M$ , της επιφάνειας της Γης από ηλεκτρικό πόλο,  $A$ , στην περίπτωση οριζόντιου στρώματος ειδικής αντίστασης  $\rho_1$  που βρίσκεται πάνω από ημιχώρο ειδικής αντίστασης  $\rho_2$  (Παπαζάχος 1996).

## 7.7 Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Αυτή εφαρμόζεται πλατύτερα από όλες τις άλλες μεθόδους γεωηλεκτρικής διασκόπησης και ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων κατά τις οποίες παράγεται στο έδαφος με τεχνητό τρόπο ηλεκτρικό πεδίο. Οι ιδιότητες του πεδίου αυτού διαμορφώνονται από τη δομή του υπεδάφους και για το λόγο αυτό ο καθορισμός των ιδιοτήτων αυτών με μετρήσεις του δυναμικού οδηγεί στον καθορισμό της δομής του υπεδάφους.

Διαβιβάζεται στο έδαφος ηλεκτρικό ρεύμα με δύο ηλεκτρόδια ρεύματος  $A$ ,  $B$  και μετριέται σε διάφορες θέσεις του εδάφους το δυναμικό που δημιουργεί το ρεύμα αυτό με δύο ηλεκτρόδια δυναμικού  $M$ ,  $N$  (σχ.9). Πραγματοποιούνται μετρήσεις τόσο της έντασης ρεύματος,  $i$ , όσο και του δυναμικού (διαφοράς τάσης),  $\Delta V$ , που παράγεται, με στόχο τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης,  $\rho$ , στο υπέδαφος. Η κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή. Συνεπώς, άμεσος στόχος της μεθόδου της ειδικής αντίστασης είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, ενώ η γεωλογική

ερμηνεία της δομής αυτής αποτελεί τον τελικό στόχο, ο οποίος παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες και απαιτεί συνήθως πρόσθετα στοιχεία (γεωλογικά, γεωφυσικά, κλπ).

Δεν είναι εύκολος ο άμεσος υπολογισμός της ειδικής αντίστασης,  $\rho$ , στο υπέδαφος από τις ηλεκτρικές μετρήσεις στην επιφάνεια της Γης. Για το λόγο αυτό, υπολογίζεται αρχικά μια φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα η οποία ονομάζεται φαινόμενη ειδική αντίσταση,  $\rho_a$ , η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής αντίστασης στους διαφόρους σχηματισμούς (στρώματα, κλπ) του υπεδάφους.

Για την πραγματοποίηση των γεωηλεκτρικών μετρήσεων έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι διάταξης, στην επιφάνεια της Γης, των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, ανάλογα με το σκοπό της γεωηλεκτρικής διασκόπησης. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση εξαρτάται και από τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων και για το λόγο αυτό πρέπει να γνωρίζουμε τη διάταξη αυτή για τον υπολογισμό της  $\rho_a$ .

Για τους λόγους που αναφέραμε παραπάνω, θα ασχοληθούμε παρακάτω λεπτομερώς με τον ακριβή ορισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, με την περιγραφή των πιο εύχρηστων διατάξεων των ηλεκτροδίων και τον τρόπο υπολογισμού της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και κυρίως με τον καθορισμό της γεωηλεκτρικής δομής (μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος) από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

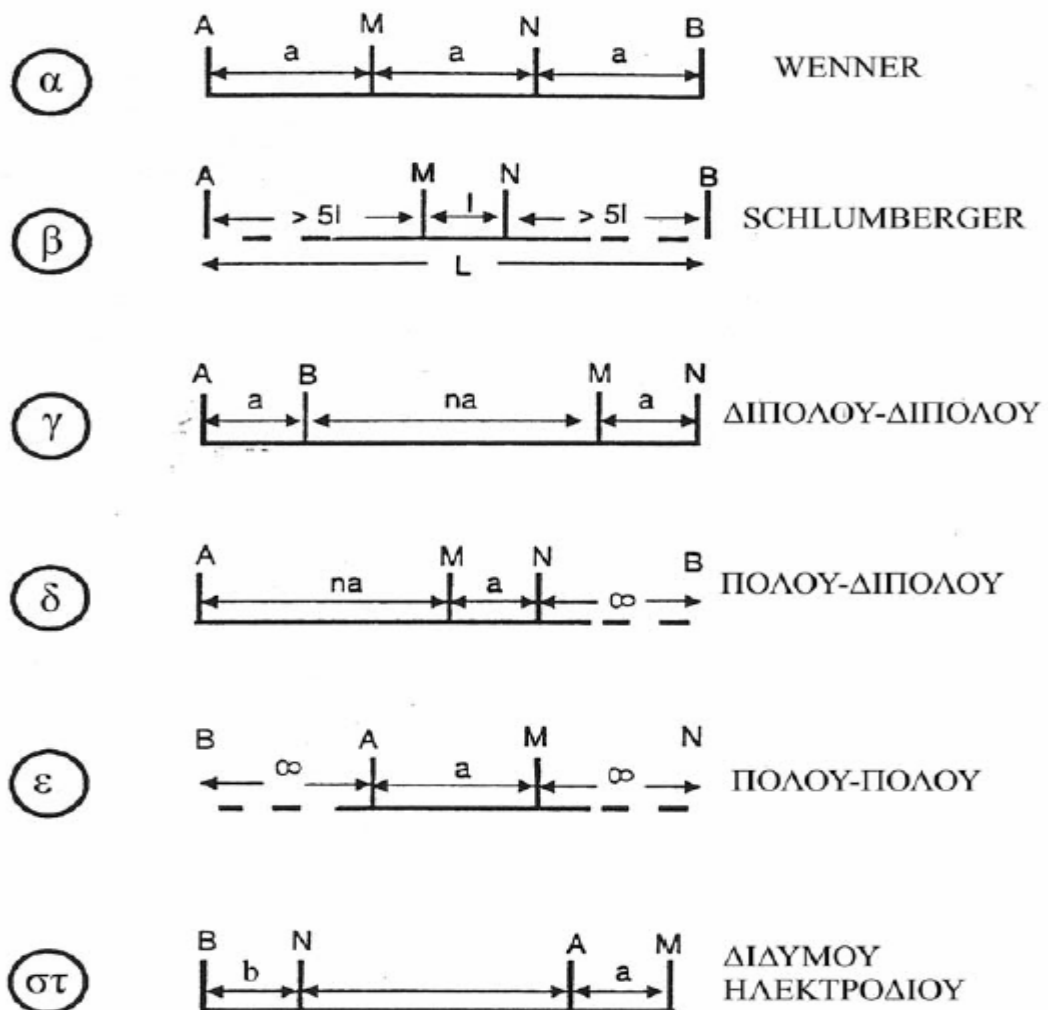
### **7.7.1 Φαινόμενη ειδική αντίσταση και τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων**

Η Γη δεν είναι ομογενής ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η πραγματική ειδική αντίσταση των πετρωμάτων της εύκολα, δηλαδή, με απλή εφαρμογή της σχέσης (17). Για το λόγο αυτό, απαιτείται η εφαρμογή πιο σύνθετων μεθόδων για τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής αντίστασης μέσα στην πραγματική Γη. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται από τη μια μεριά σε μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων ( $\Delta V, i$ ) στην επιφάνεια της Γης και από την άλλη σε πολύπλοκες θεωρητικές σχέσεις που εκφράζουν το μοντέλο της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και των οποίων σχέσεων πρέπει να καθορίσουμε τις παραμέτρους. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην έννοια της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Στην περίπτωση που η ειδική αντίσταση δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται στα επιφανειακά στρώματα της Γης, όπως στην πραγματικότητα συμβαίνει, η τιμή

του δευτέρου μέλους της (17) μπορεί επίσης να υπολογιστεί με βάση τις μετρήσεις των ποσοτήτων που περιλαμβάνει το μέλος αυτό, αλλά η τιμή του δεν θα είναι σταθερή, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ομογενούς Γης, αλλά θα εξαρτάται από τις θέσεις των ηλεκτροδίων και θα μεταβάλλεται όταν μεταβάλλονται οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Η τιμή αυτή δεν θα παριστάνει πια την πραγματική ειδική αντίσταση και για το λόγο αυτό λέγεται φαινόμενη ειδική αντίσταση και παριστάνεται με το σύμβολο  $\rho_a$ .

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού. Οι πιο γνωστές από τις διατάξεις αυτές φαίνονται στο σχήμα (10) και είναι η «διάταξη Wenner», η «διάταξη Schlumberger» η «διάταξη διπόλου-διπόλου» η «διάταξη πόλου-διπόλου» η «διάταξη πόλου-πόλου» και η «διάταξη δίδυμου ηλεκτροδίου». Θα δούμε τη μορφή την οποία παίρνει η γενική σχέση (17) στην κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις.



**Σχήμα.10:** (α) Διατάξεις Wenner, (β) Schlumberget, (γ) διπόλου-διπόλου, (δ) πόλου-διπόλου, (ε) πόλου-πόλου, (στ) δίδυμου ηλεκτροδίου.

**Διάταξη Wenner:** Κατά τη διάταξη αυτή λαμβάνονται  $AM = MN = NB = a$ , δηλαδή, τα ηλεκτρόδια διατάσσονται συμμετρικά σ' ορισμένη γραμμή. Από τη σχέση (16) προκύπτει ότι στην περίπτωση αυτή η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την

$$p_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{i} \quad (24)$$

Δηλαδή, στην περίπτωση αυτή ο γεωμετρικός συντελεστής είναι  $K = 2\pi a$ . Κατά την εφαρμογή της διάταξης Wenner για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή, για κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται σε σχέση με ορισμένο κέντρο με αύξηση της  $a$  κατά ορισμένη κάθε φορά απόσταση, ενώ κατά την εφαρμογή της για ηλεκτρική χαρτογράφηση, δηλαδή, για οριζόντια ηλεκτρική διασκόπηση η απόσταση  $a$  παραμένει σταθερή και τα τέσσερα ηλεκτρόδια κινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής (οριζόντιας γραμμής), κατόπιν κατά μήκος άλλης, κ.ο.κ., και η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χαρτογραφείται στο κέντρο κάθε διάταξης.

Η διάταξη Wenner, παρά τη γεωμετρική της απλότητα, παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων κυρίως γιατί πρέπει να μετακινούμε όλα τα ηλεκτρόδια κατά την πραγματοποίηση νέας μέτρησης και έχει επίσης η διάταξη αυτή και ορισμένα μειονεκτήματα κατά την ερμηνεία των παρατηρήσεων για θεωρητικούς λόγους.

**Διάταξη Schlumberger:** Στη διάταξη αυτή η απόσταση,  $MN = 2l$ , μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση,  $AB = 2L$ , μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ( $L \gg l$ ). Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι στην περίπτωση αυτή η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$p_a = \frac{\pi L^2}{2l} \cdot \frac{\Delta V}{i} \quad (25)$$

Δηλαδή, στην περίπτωση αυτή ο γεωμετρικός συντελεστής είναι  $K = \pi L^2/21$ . Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger μια γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά σχετικά με το κέντρο της διάταξης, ενώ κατά την εφαρμογή της διάταξης αυτής για γεωηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται πάνω στην τομή, ενώ η απόστασή τους παραμένει σταθερή όπως και στην διάταξη Wenner.

Η διάταξη Schlumberger εφαρμόζεται περισσότερο απ' όλες τις άλλες διατάξεις, επειδή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι το ότι απαιτείται η μεταβολή της απόστασης μόνο των δύο ηλεκτροδίων κατά την γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, το ότι η χρησιμοποίηση σταθερού διπόλου τάσης περιορίζει ανεπιθύμητες επιδράσεις στις μετρήσεις που προκαλούνται από γεωλογικές πλευρικές ασυνέχειες και ότι το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου σήμερα βοηθητικού υλικού (καμπύλες, προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών) για την ερμηνεία των παρατηρήσεων έγινε για την εφαρμογή σε διάταξη Schlumberger.

**Διάταξη διπόλου-διπόλου:** Στη διάταξη αυτή τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε μικρή απόσταση,  $AB = 2l$ , μεταξύ τους, αλλά είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, δηλαδή, απέχουν απ' αυτά σημαντική απόσταση,  $BM = n2l$ , ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν, συνήθως, την ίδια μικρή απόσταση,  $MN = 2l$ . Στην περίπτωση αυτή ( $n \gg 1$ ) η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$p_a = 2\pi n(n+1)(n+2)l \frac{\Delta V}{i} \quad (26)$$

Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η απόσταση,  $2nl$ , μεταξύ του διπόλου ρεύματος και του διπόλου δυναμικού μπορεί να αυξηθεί σημαντικά και περιορίζεται μόνο από τον εδαφικό θόρυβο και από τη δυνατότητα των οργάνων να καταγράψουν την τάση και όχι από την απαίτηση για μεγάλα μήκη καλωδίων, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις των διατάξεων Wenner και Schlumberger. Οι μετρήσεις κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής πραγματοποιούνται με αύξηση του  $n$  κατά βήματα.

Εκτός από τις τρεις βασικές διατάξεις που αναφέραμε παραπάνω υπάρχουν και άλλες διατάξεις, για τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, στις οποίες τα



ηλεκτρόδια βρίσκονται στην ίδια γραμμή (τομή) αλλά χρησιμοποιούνται λιγότερο. Τέτοιες είναι η **διάταξη Lee** η οποία είναι όμοια με τη διάταξη Wenner με τη διαφορά ότι σ' αυτή χρησιμοποιείται και πέμπτο ηλεκτρόδιο που τοποθετείται στο μέσο της απόστασης MN και η **διάταξη τριών σημείων** (pole-dipole) στην οποία το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τα άλλα τρία ηλεκτρόδια.

Χρησιμοποιούνται επίσης και διατάξεις μη γραμμικές, δηλαδή διατάξεις στις οποίες τα ηλεκτρόδια δε βρίσκονται στην ίδια γραμμή. Στη Σοβιετική Ένωση π.χ. χρησιμοποιείται διάταξη στην οποία εφαρμόζεται η αρχή της διάταξης δίπολο-δίπολο αλλά τα δύο δίπολα δε βρίσκονται στην ίδια γραμμή (τομή), ενώ στην Αγγλία εφαρμόζεται η **τετραγωνική διάταξη** στην οποία τα τέσσερα ηλεκτρόδια βρίσκονται στις κορυφές τετραγώνου και για κάθε νέα μέτρηση μεταβάλλεται η πλευρά του τετραγώνου. Οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που υπολογίζονται με τις μεθόδους αυτές σχετίζονται με απλές σχέσεις με τις τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της σχέσης (16) και συνεπώς κατά την ερμηνεία εφαρμόζεται η αρχή που βασίζεται στη διάταξη Schlumberger και θα αναπτύξουμε παρακάτω.

**Διάταξη Πόλου-πόλου:** Η απλούστερη διάταξη είναι αυτή όπου ένα από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος, B, και ένα από τα ηλεκτρόδια του δυναμικού, N, είναι τοποθετημένα σε πολύ μεγάλη απόσταση από τα άλλα δύο (A, M), έτσι ώστε να μπορέσει να θεωρηθεί ότι βρίσκονται στο άπειρο (σχήμα 10ε). Επομένως από τη σχέση (16), η φαινόμενη ειδική αντίσταση θα είναι

$$\rho_{\alpha} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} . \quad (27)$$

Εάν τα δύο απομακρυσμένα ηλεκτρόδια τα τοποθετήσουμε κοντά μεταξύ τους, τότε προκύπτει η διάταξη **διδύμου ηλεκτροδίου** (*twin probe*) (σχήμα 10 στ), και η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι

$$\rho_{\alpha} = 2\pi \frac{ab}{\alpha + b} \frac{\Delta V}{I} ,$$

(28)

όπου,  $a$  και  $b$  είναι οι αποστάσεις μεταξύ των A, M και B, N ηλεκτροδίων αντίστοιχα. Στην περίπτωση όπου  $AM = BN = a$ , η σχέση (28) γίνεται

$$\rho_a = \pi a \frac{\Delta V}{I} . \quad (29)$$

**Διάταξη Πόλου-διπόλου:** Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N, βρίσκονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος, A, B, ένα από τα οποία τοποθετείται στο άπειρο (σχήμα 10δ). Η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_a = 2\pi \frac{ab}{b-a} \frac{\Delta V}{I} . \quad (30)$$

Όταν η απόσταση  $b$  είναι πολλαπλάσια της απόστασης  $a$  ( $b = na$ ), τότε η σχέση (30) γίνεται

$$\rho_a = 2\pi n (n+1) a \frac{\Delta V}{I} . \quad (31)$$

### 7.7.2 Επιλογή διάταξης

Ένα σημαντικό πρόβλημα πριν την διεξαγωγή μιας γεωφυσικής έρευνας, είναι η επιλογή της διάταξης των ηλεκτροδίων η οποία θα χρησιμοποιηθεί. Παραπάνω περιγράφηκαν οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μιας διάταξης είναι η ευαισθησία της διάταξης σε σχέση με τις κατά βάθος και οριζόντιες αλλαγές της αντίστασης του υπεδάφους (ανάλυση σε κατακόρυφες και πλευρικές μεταβολές αντίστοιχα), και ο λόγος σήματος προς θόρυβο, δηλαδή το μέγιστο βάθος μέχρι το οποίο μπορεί να ανιχνευθεί μια ανωμαλία.

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΛΟΓΟΣ S/N	ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ
Wenner	1	5	1
Schlumberger	2	4	1
Διπόλου-διπόλου	5	2	2
Πόλου-διπόλου	4	3	2
	<b>1:καλύτερη</b>	<b>5:χειρότερη</b>	

**Πίνακας 1:** Αξιολόγηση διατάξεων (Ward 1989).

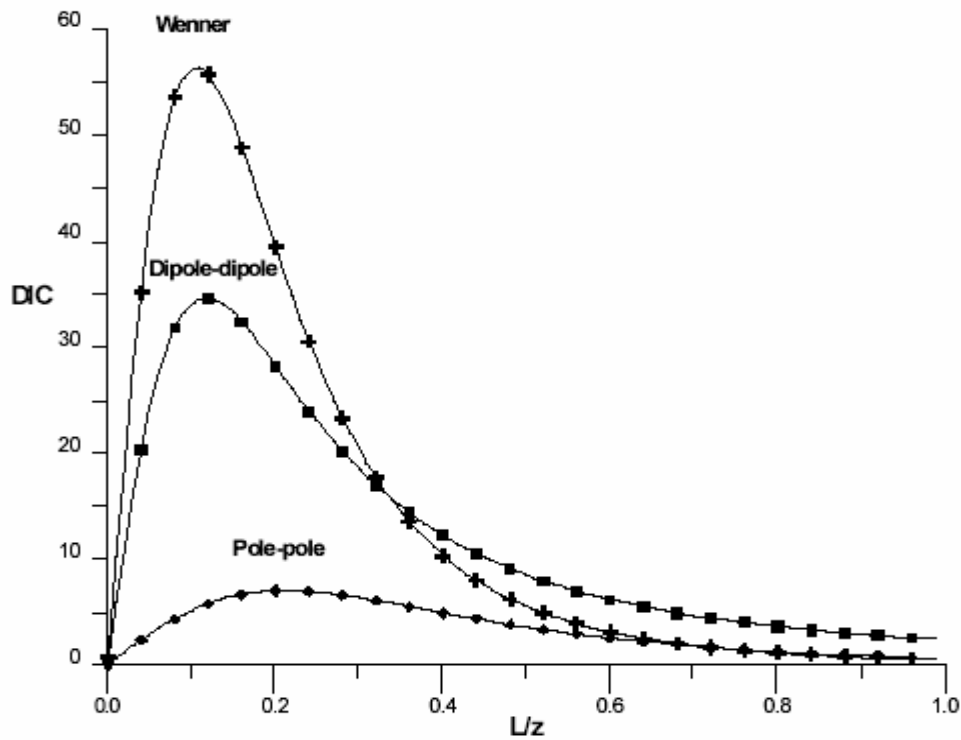
Ο Ward (1989) αξιολόγησε τις διάφορες διατάξεις και τα πιο σημαντικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα (1). Από τον πίνακα αυτό φαίνεται πως η διάταξη διπόλου-διπόλου, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των γεωηλεκτρικών δεδομένων στην παρούσα εργασία, έχει μια ικανοποιητική ανάλυση στις κατακόρυφες και πλευρικές μεταβολές της αντίστασης. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο φαίνεται πως έχει την μικρότερη τιμή για τη διάταξη αυτή, με την κατάλληλη επιλογή όμως των παραμέτρων διασκόπησης, η διάταξη αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

### 7.7.3 Βάθος διείσδυσης

Η δυσκολία στο να καθοριστεί το βάθος διείσδυσης οφείλεται στο ότι οι θεωρητικοί υπολογισμοί που έχουν γίνει υποθέτουν ομογενή γη, πράγμα το οποίο δεν ισχύει στην πραγματικότητα, και στο ότι οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που μετρώνται στην επιφάνεια, δεν οφείλονται αποκλειστικά σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος.

Οι Roy και Apparao (1971), έδειξαν πως η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος μόνο, δεν είναι ενδεικτική για την εύρεση του βάθους διείσδυσης κατά τη χρήση μιας συγκεκριμένης διάταξης ηλεκτροδίων. Αυτό αποδεικνύεται ως εξής: αν σε ένα σύστημα ηλεκτροδίων τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια δυναμικού στις θέσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και αντίθετα, παρατηρείται ότι τα βάθη διείσδυσης είναι ίδια ενώ η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τελείως διαφορετική (Helmholtz's reciprocity theorem). Αντιστρόφως, δύο συστήματα ηλεκτροδίων είναι δυνατόν να έχουν παρόμοια κατανομή των γραμμών του ρεύματος αλλά τελείως διαφορετικά βάθη διείσδυσης. Ενώ δηλαδή η διείσδυση και η κατανομή του ρεύματος έχει άμεση

σχέση μόνο με τη θέση των ηλεκτροδίων του ρεύματος, το βάθος διείσδυσης χρησιμοποιώντας κάποια διάταξη ηλεκτροδίων, εξαρτάται και από τα ηλεκτρόδια του δυναμικού.



Σχήμα 11: DIC καμπύλες για τις διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-πόλου.

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΒΑΘΟΣ
Wenner	0.11 L
Schlumberger	0.125 L
Διπόλου-διπόλου	0.195 L
Πόλου-πόλου	0.35 L

**L:** συνολικό μήκος διάταξης

Πίνακας 2: Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Roy and Apparao 1971, Roy 1971).

Για αυτό το λόγο οι παραπάνω ερευνητές, λαμβάνοντας υπ όψιν τη συνεισφορά κάθε απειροστού όγκου στο συνολικό σήμα, δηλαδή στη συνολική διαφορά δυναμικού που μετράται στην επιφάνεια του εδάφους, υπολόγισαν, για τις διάφορες διατάξεις, καμπύλες οι οποίες απεικονίζουν την απόκριση ενός λεπτού οριζόντιου στρώματος με μεταβαλλόμενο βάθος. Η καμπύλη (DIC - Depth of Investigation Characteristic), για διάφορα βάθη, για μια γενικευμένη διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων και για ένα μοντέλο ομογενούς γης, έχει την παρακάτω μορφή (Roy and Apparao 1971)

$$DIC = \int_{x=y=-\infty}^{x=y=+\infty} 2z\rho l \left[ \frac{1}{(a^2 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{1}{\{(b+c)^2 + 4z^2\}^{3/2}} - \frac{1}{\{(a+b)^2 + 4z^2\}^{3/2}} + \frac{1}{(c^2 + 4z^2)^{3/2}} \right] dz$$

όπου,  $xy$  είναι το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους,  $z$  ο άξονας του βάθους,  $(0,0,0)$  η θέση του θετικού ηλεκτροδίου ρεύματος,  $(a,0,0)$  και  $(a+b,0,0)$  οι θέσεις των ηλεκτροδίων του δυναμικού και  $(a+b+c,0,0)$  η θέση του αρνητικού ηλεκτροδίου του ρεύματος. Οι καμπύλες  $DIC$  για τις διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-πόλου, φαίνονται στο σχήμα (11) και το βάθος διείσδυσης  $z$ , σε συνάρτηση με την απόσταση  $L$  των δύο εξωτερικών ενεργών ηλεκτροδίων της διάταξης, (εκτός των ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε 'άπειρη' απόσταση, εάν υπάρχουν), στον πίνακα (2) (Roy and Apparao 1971, Roy 1971). Σύμφωνα με τους ερευνητές, το βάθος στο οποίο η καμπύλη  $DIC$  γίνεται μέγιστη, είναι το βάθος το οποίο συνεισφέρει περισσότερο στο σήμα που λαμβάνεται στην επιφάνεια, δηλαδή το βάθος διείσδυσης.

Τα βάθη που υπολόγισαν οι Roy και Apparao (1971), συγκρινόμενα με εμπειρικές τιμές (Zhody 1989) αποδείχτηκε πως είναι υποτιμημένα. Ο Edwards (1977) πρότεινε ότι το μέγιστο βάθος διείσδυσης μιας διάταξης, δεν είναι αυτό στο οποίο η καμπύλη  $DIC$  γίνεται μέγιστη (σχήμα 11), αλλά το βάθος στο οποίο η περιοχή που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη  $DIC$ , χωρίζεται σε δύο μέρη ίσου εμβαδού, γεγονός το οποίο υποστηρίχθηκε και από τον Barker (1989).

Το βάθος  $z_{med}$  το οποίο ονομάστηκε μέσο βάθος διείσδυσης και που προτάθηκε από τον Edwards (1977) είναι η λύση της παρακάτω εξίσωσης

$$\int_{z=0}^{z_{med}} NDIC = 1/2 ,$$

όπου,  $NDIC$  είναι η κανονικοποιημένη καμπύλη  $DIC$  που έγινε με βάση τους γεωμετρικούς παράγοντες, από τους Roy και Apparao. Στον πίνακα (3) φαίνονται οι

τιμές του βάθους διείσδυσης για τις διάφορες διατάξεις σε συνάρτηση με το συνολικό μήκος της διάταξης  $L$ , όπως υπολογίστηκαν από τον Edwards (1977).

Συγκριτικά με τις τιμές που υπολόγισαν οι Roy και Apparaο (πίνακας 2), οι τιμές του πίνακα (3) βρίσκονται σε καλύτερη συμφωνία με διάφορους εμπειρικούς υπολογισμούς και αποτελέσματα (Zhody 1989).

<b>ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ</b>	<b>ΒΑΘΟΣ</b>
Wenner	0.17 L
Schlumberger	0.195 L
Διπόλου-διπόλου	0.25 L
Διδύμου ηλεκτροδίου	0.77 L
Πόλου-διπόλου	0.52 L

**L:** συνολικό μήκος διάταξης

**Πίνακας 3:** Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Edwards 1977).

Στον πίνακα (4), (Edwards 1977), παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου βάθους διείσδυσης  $z_{med}$  διάφορων διατάξεων, για διάφορες τιμές του  $n$  και σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων  $a$  και το συνολικό μήκος της διάταξης  $L$ . Ουσιαστικά αν και το βάθος διείσδυσης έχει να κάνει με την στρωματογραφία του εδάφους, για παράδειγμα ένα χαμηλής αντίστασης στρώμα μειώνει το βάθος διείσδυσης, οι υπολογισμοί που έχουν γίνει θεωρούν ένα μοντέλο ομογενούς ημιχώρου μιας και η δομή της γης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι άγνωστη. Τα βάθη αυτά έχει αποδειχτεί από διάφορες εφαρμογές πως δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και στην πραγματικότητα.

#### 7.7.4 Πίνακας ευαισθησίας

Ουσιαστικά, η καμπύλη DIC δείχνει το βαθμό στον οποίο επηρεάζεται η κάθε μέτρηση από τη μεταβολή της αντίστασης με το βάθος. Για την μελέτη όμως της καταλληλότητας των διάφορων διατάξεων κατά την εφαρμογή τους σε διασκοπήσεις δύο διαστάσεων, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η ευαισθησία της διάταξης κατά τον οριζόντιο άξονα. Έτσι, για ένα συγκεκριμένο σημείο με συντεταγμένες  $(x,z)$ , προστίθεται η συνεισφορά στο συνολικό σήμα από όλα τα σημεία για τιμές του  $y$  από το  $-\infty$  έως το  $+\infty$ . Ο πίνακας που περιέχει αυτές τις πληροφορίες, ονομάζεται

πίνακας ευαισθησίας ή Ιακωβιανός πίνακας, και θα περιγραφεί παρακάτω στη θεωρία του αντιστρόφου προβλήματος.

Στο σχήμα (12) απεικονίζονται οι δύο διαστάσεων τομές 'ευαισθησίας', δηλαδή η μεταβολή του Ιακωβιανού πίνακα, για την διάταξη διπόλου-διπόλου και για τιμές του  $n$  από 1 έως 6 (Loke 1996). Φαίνεται πως οι μεγαλύτερες θετικές τιμές βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων A-B και M-N, πράγμα που σημαίνει πως η διάταξη είναι πιο ευαίσθητη στις αλλαγές της αντίστασης τμημάτων που βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές, επομένως αυτές οι περιοχές δίνουν τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Όσο η τιμή του  $n$  αυξάνει οι υψηλές τιμές συγκεντρώνονται περισσότερο κάτω από τα δίπολα A-B και M-N, ενώ οι τιμές κάτω από το κέντρο της διάταξης, μεταξύ των ηλεκτροδίων A-M, μειώνονται.

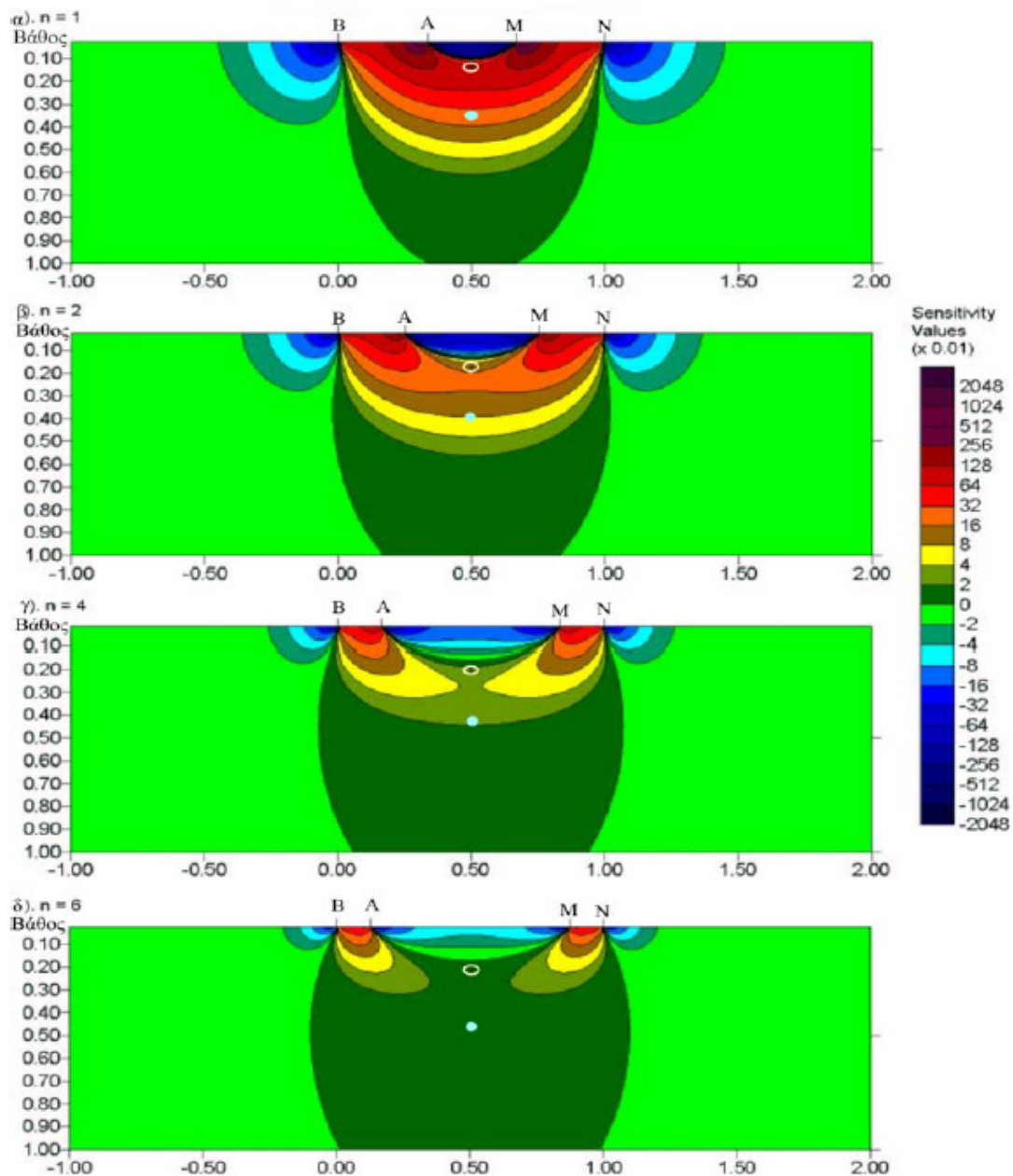
ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ		$z_{med}/a$	$z_{med}/L$
Διπόλου-διπόλου	n=1	0.416	0.139
	n=2	0.697	0.174
	n=3	0.962	0.192
	n=4	1.220	0.203
	n=5	1.467	0.211
	n=6	1.730	0.216
	n=7	1.983	0.220
	n=8	2.236	0.224
Wenner	n=1	0.519	0.173
	n=2	0.519	0.173
	n=3	0.519	0.173
	n=4	0.519	0.173
	n=5	0.519	0.173
	n=6	0.519	0.173
Πόλου-διπόλου	n=1	0.519	-
	n=2	0.925	-
	n=3	1.318	-
	n=4	1.706	-
	n=5	2.093	-
	n=6	2.478	-
	n=7	2.863	-
	n=8	3.247	-
Πόλου-πόλου	n=1	0.867	-
	n=2	0.867	-
	n=3	0.867	-
	n=4	0.867	-
	n=5	0.867	-
	n=6	0.867	-

a=απόσταση ηλεκτροδίων  
L=συνολικό μήκος διάταξης

Πίνακας 4: Το μέσο βάθος διείσδυσης, για τις διάφορες διατάξεις (Edwards 1977).

⋮



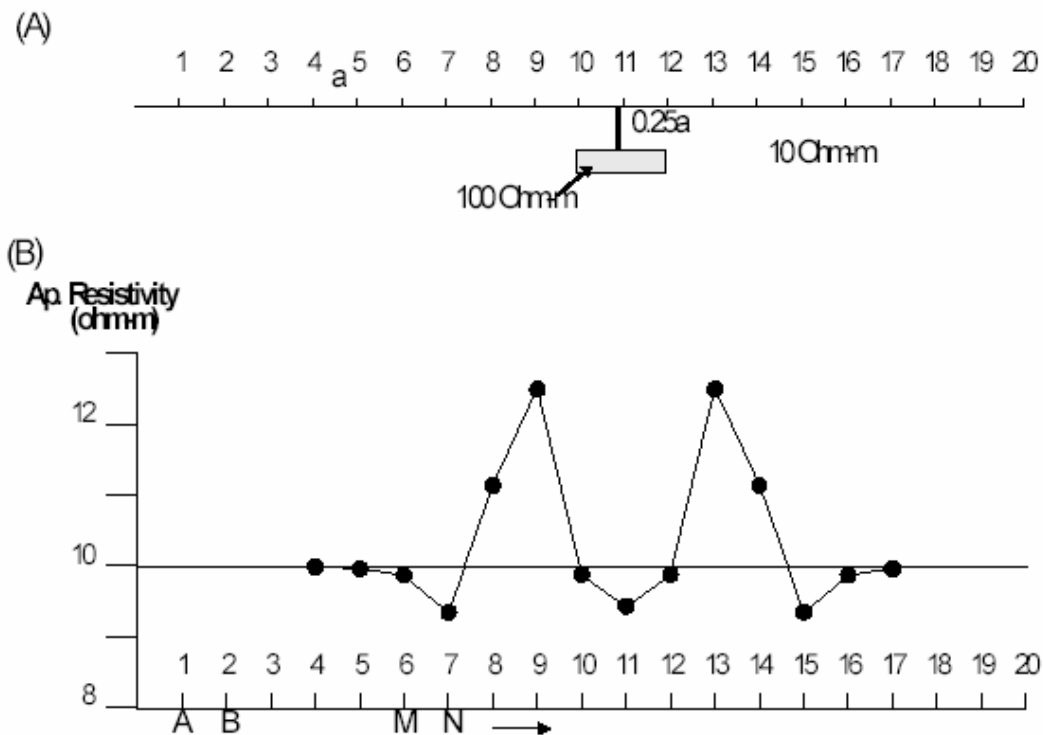


**Σχήμα 12:** Δύο διαστάσεων τομές ευαισθησίας για την διάταξη διπόλου-διπόλου (α)  $n=1$ , (β)  $n=2$ , (γ)  $n=4$ , (δ)  $n=6$  (Loke 1996).

Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται με σταυρό, μέσα στο κίτρινο κύκλο, και το σημείο το οποίο προκύπτει από την καμπύλη (Edwards 1977). Φαίνεται πως το σημείο αυτό βρίσκεται σε περιοχές με χαμηλές τιμές της συνάρτησης ευαισθησίας για τιμές του  $n$  μεγαλύτερες του 4 (Loke 1996). *NDIC*

Η κατανομή των τιμών του Ιακωβιανού πίνακα δίνει εξήγηση στη μορφή της ανωμαλίας που προκύπτει χρησιμοποιώντας διαφορετικές διατάξεις. Στο σχήμα

(13.β) απεικονίζεται η γραφική παράσταση των τιμών της φαινόμενης αντίστασης στην



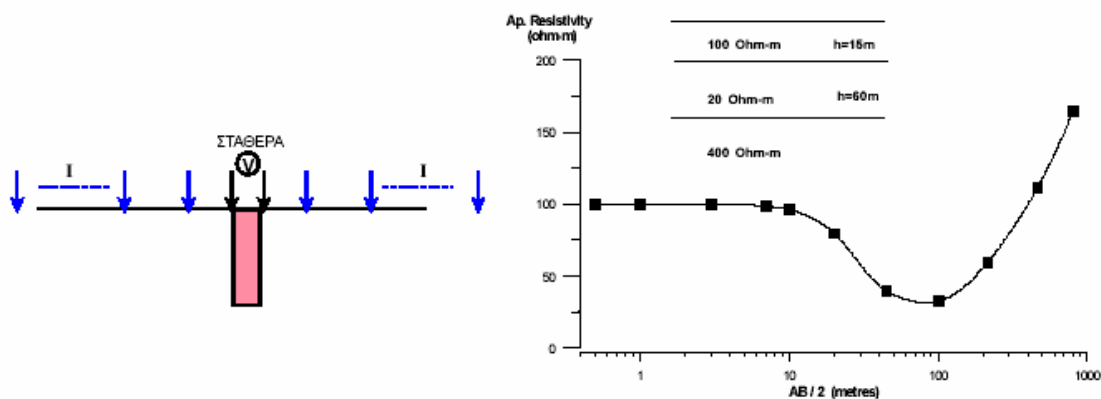
**Σχήμα 13:** Γραφική παράσταση φαινόμενων αντιστάσεων για τη διάταξη διπόλου-διπόλου πάνω από σώμα υψηλής αντίστασης.

περίπτωση όδευσης με τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Την ανωμαλία αυτή προκαλεί ένα σώμα υψηλής αντίστασης που βρίσκεται σε βάθος  $0,25a$ , όπου  $a$  είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η μορφή της γραφικής παράστασης αυτής, μπορεί να εξηγηθεί αν συγκριθεί με τις τομές ευαισθησίας της διάταξης (σχήμα 12). Φαίνεται πως η διάταξη διπόλου-διπόλου προκαλεί μια μείωση της αντίστασης όταν τα ηλεκτρόδια βρίσκονται πάνω από το σώμα και δύο μεγάλες αυξήσεις της αντίστασης όταν βρίσκονται πλευρικά από αυτό. Οι μεγάλες τιμές οφείλονται στις υψηλές τιμές της ‘ευαισθησίας’ κάτω από τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος.

### 7.7.5 Μέθοδοι έρευνας

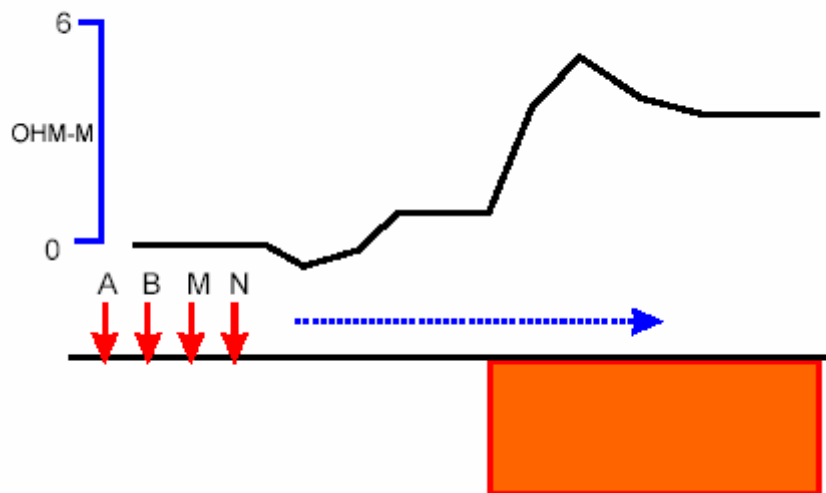
Οι συνηθέστερες μέθοδοι έρευνας γεωηλεκτρικής γεωφυσικής διασκόπησης είναι οι εξής:

**1. 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) (σχήμα 14). Κλασικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών



**Σχήμα 14:** Δεδομένα βυθοσκόπησης με διάταξη Schlumberger για ένα μοντέλο τριών στρωμάτων.

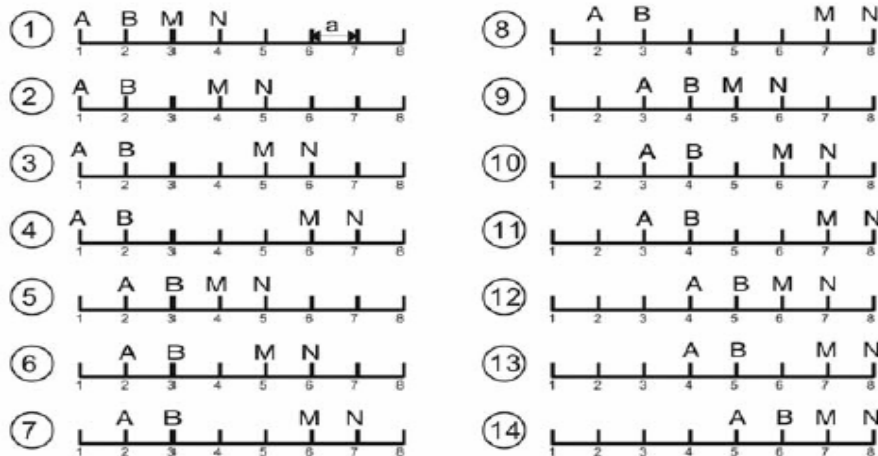
**2. Όδευση (Profiling).** Χρησιμοποιείται για να εντοπίζει πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τη βυθοσκόπηση, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων ως συνόλου με σταθερό 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 χαλκιών, επαφών, κενών κ.α. (σχήμα 15), ενώ η χρήση της είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη στην αρχαιομετρία.



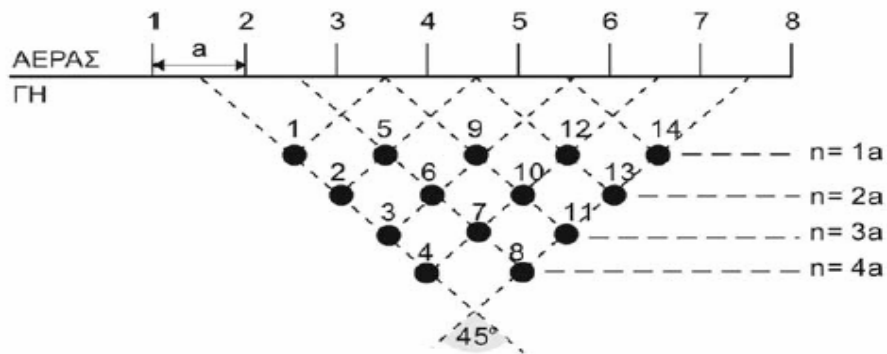
**Σχήμα 15:** Οριζοντιογραφία στον εντοπισμό ρήγματος.

**3. 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 (16) (Tsourlos 1995).

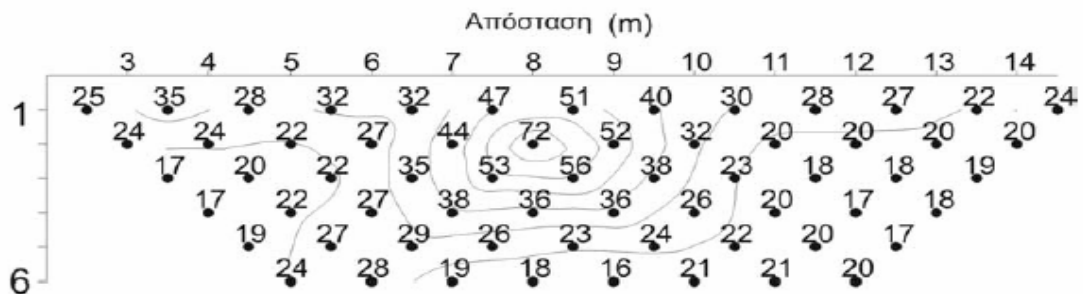
(Α)



(Β)



(Γ)



**Σχήμα 16:** δισδιάστατη διασκόπηση με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου (α) Τρόπος διάταξης ηλεκτροδίων κατά τη συλλογή των δεδομένων με 8 ηλεκτρόδια και μέγιστο  $n=4$  (β) Τρόπος τοποθέτηση των μετρήσεων κατά την απεικόνιση με τη μέθοδο της ψευδοτομής (γ) Ψευδοτομή δεδομένων από τον αρχαιολογικό χώρο της Ευρωπού (Tsourlos 1995).

## 7.8 Εφαρμογή και Γεωφυσική ερμηνεία των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

### 7.8.1 Τρόπος εφαρμογής της μεθόδου Wenner στην περίπτωση δύο γεωηλεκτρικών στρωμάτων

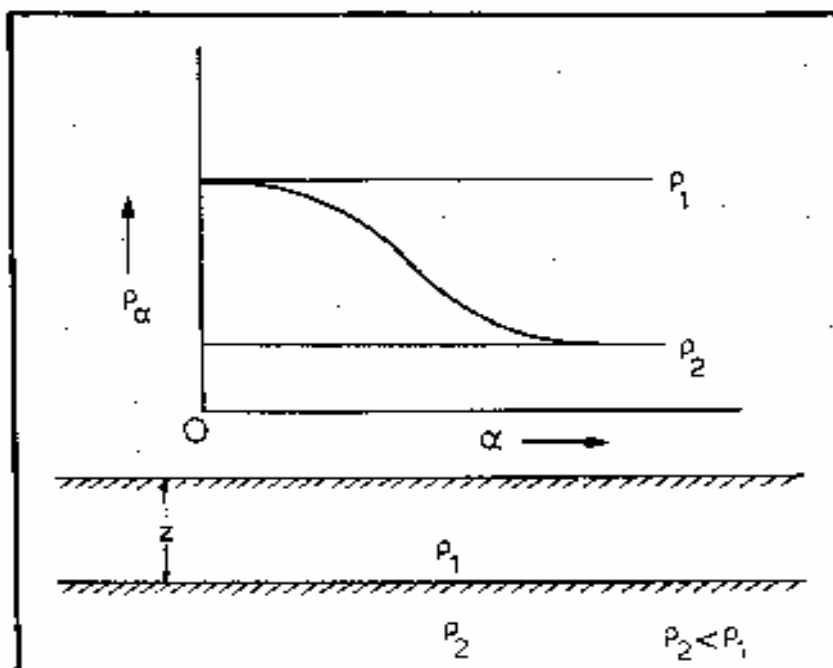
Έστω ότι η δομή αποτελείται από ένα στρώμα πάχους  $z$  και ειδικής αντίστασης  $\rho_1$ , το οποίο επικάθεται σε ημιχώρο ειδικής αντίστασης  $\rho_2$ . Είναι δυνατόν να είναι  $\rho_1 > \rho_2$  ή  $\rho_1 < \rho_2$ . Το σχήμα (17) δείχνει την πορεία των γραμμών ρεύματος όταν είναι  $\rho_1 > \rho_2$ .

Στην περίπτωση αυτή των δύο στρωμάτων και όταν οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης λαμβάνονται με τη διάταξη Wenner ισχύει η ακόλουθη σχέση μεταξύ της φαινόμενης ειδικής αντίστασης,  $\rho_a$ , και την απόστασης των ηλεκτροδίων,  $a$ :

$$\rho_a = \rho_1 + 4\rho_1 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{k^n}{1 + (2nz/a)^2} - \frac{k^n}{4 + (2nz/a)^2} \right) \quad (32)$$

όπου  $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$  και η ακέραιος αριθμός. Η σχέση αυτή, που προκύπτει από τις (23), (24), συγκλίνει αφού η απόλυτη τιμή της  $k$  είναι μικρότερη της μονάδας. Για το λόγο αυτό, αρκεί η διατήρηση μικρού αριθμού όρων για να υπολογιστεί με αρκετή ακρίβεια η θεωρητική τιμή της  $\rho_a$  με τη σχέση αυτή.

Το σχήμα (17) παριστάνει γραφική παράσταση της μεταβολής της  $\rho_a$  σε συνάρτηση με την απόσταση των ηλεκτροδίων,  $a$ , στη διάταξη Wenner, όταν  $\rho_1 > \rho_2$ . Παρατηρούμε ότι όταν η απόσταση,  $a$ , των ηλεκτροδίων τείνει στο μηδέν, η φαινόμενη ειδική αντίσταση πλησιάζει την πραγματική ειδική αντίσταση,  $\rho_1$ , μέσα στο στρώμα, ενώ όταν η απόσταση αυτή γίνεται πολύ μεγάλη η φαινόμενη ειδική αντίσταση πλησιάζει την πραγματική ειδική αντίσταση,  $\rho_2$ , μέσα στον ημιχώρο.



**Σχήμα 17:** Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης,  $\rho_a$ , σε συνάρτηση με την απόσταση,  $\alpha$ , των ηλεκτροδίων στην περίπτωση που οριζόντιο στρώμα ειδικής αντίστασης  $\rho_1$  βρίσκεται πάνω από ημιχώρο ειδικής αντίστασης,  $\rho_2$  με  $\rho_1 > \rho_2$  (Kearey and Brooks 1984).

Στο σχήμα (18) παριστάνονται θεωρητικές καμπύλες οι οποίες αποτελούν γραφικές παραστάσεις του λόγου  $\rho_1/\rho_a$  όταν  $\rho_2 > \rho_1$  (πάνω) και του λόγου  $\rho_a/\rho_1$  όταν  $\rho_2 < \rho_1$  (κάτω) σε συνάρτηση με το λόγο  $z/\alpha$  για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\kappa$ .

Για τον καθορισμό της γεωηλεκτρικής δομής στην περίπτωση αυτή, τον υπολογισμό δηλαδή των παραμέτρων  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  και  $z$  από τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης που προέκυψαν από τις μετρήσεις υπαίθρου εργαζόμαστε ως εξής:

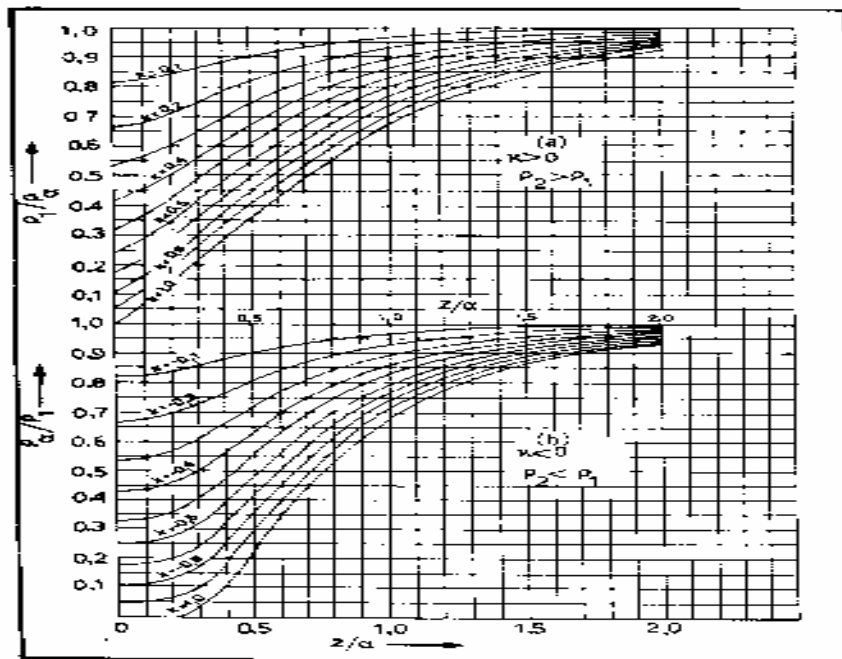
Πραγματοποιούμε μετρήσεις της τάσης,  $\Delta V$ , και της έντασης,  $i$ , του ρεύματος για διάφορες τιμές της απόστασης,  $\alpha$ , των ηλεκτροδίων, αρχίζοντας από μικρές (π.χ. 1m) και φθάνοντας σε μεγάλες (π.χ. 500m). Για κάθε μια από τις μετρήσεις αυτές υπολογίζεται η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης,  $\rho_a$ , με τη σχέση (24). Η τιμή της  $\rho_a$  για μικρές τιμές της  $\alpha$  είναι η  $\rho_1$ .

Γνωρίζοντας τη  $\rho_1$ , υπολογίζουμε τους λόγους  $\rho_1/\rho_a$  ή  $\rho_a/\rho_1$ , και σχηματίζουμε πίνακα των λόγων αυτών με τις αντίστοιχες τιμές της απόστασης,  $\alpha$ .

Με τη χρησιμοποίηση των καμπύλων της πάνω οικογένειας του σχήματος (19), όταν ο λόγος  $\rho_1/\rho_a$  είναι μικρότερος της μονάδας, ή των καμπύλων της κάτω οικογένειας του σχήματος αυτού, όταν ο λόγος  $\rho_a/\rho_1$ , είναι μικρότερος της μονάδας,

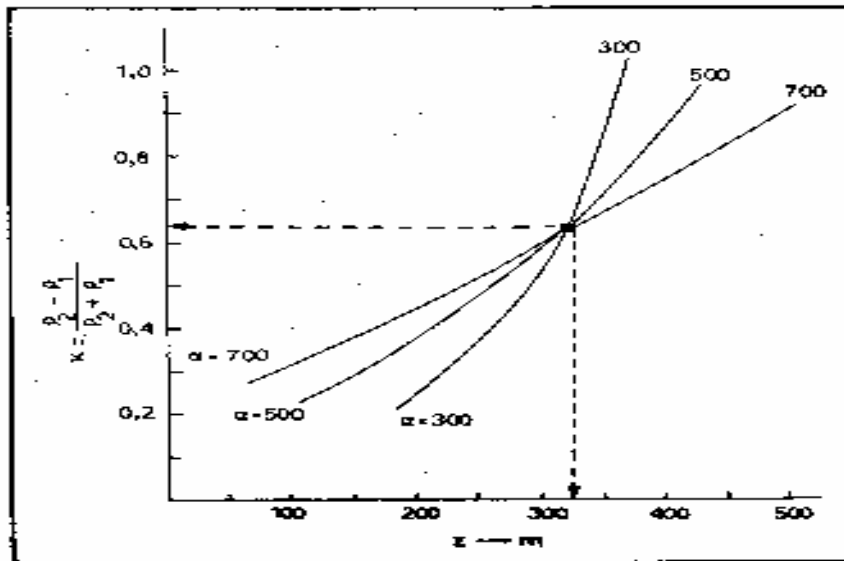
βρίσκουμε για κάθε τιμή του λόγου αυτού και συνεπώς για κάθε τιμή της  $\alpha$  αντίστοιχες τιμές της  $\kappa$  (φέρνοντας οριζόντιες ευθείες και τέμνοντας τις καμπύλες) και τις αντίστοιχες τιμές του λόγου  $z/\alpha$ . Από τις τιμές του τελευταίου αυτού λόγου και την αντίστοιχη τιμή του  $\alpha$  βρίσκουμε αντίστοιχες τιμές του  $z$ .

Έτσι για ορισμένη τιμή του  $\alpha$  (π.χ. 300m) έχουμε μια ομάδα ζευγών του  $\kappa$  και του  $z$ . Χαρτογραφούμε το  $\kappa$  σε συνάρτηση με το  $z$  και βρίσκουμε μια ορισμένη καμπύλη (σχ.15). Επαναλαμβάνουμε την ίδια εργασία και βρίσκουμε άλλα ζεύγη τιμών,  $\kappa, z$ , που αντιστοιχούν στις άλλες τιμές της  $\alpha$ , και τις χαρτογραφούμε με τον ίδιο τρόπο. Λαμβάνουμε έτσι οικογένεια καμπύλων οι οποίες τέμνονται στο ίδιο σημείο. Η τετμημένη του σημείου αυτού δίνει το πάχος  $z$ , του στρώματος και η τεταγμένη του την πραγματική τιμή της  $\kappa$ . Κατόπιν χρησιμοποιούμε τη σχέση  $\kappa = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$  για να υπολογίσουμε την  $\rho_2$ .



Σχήμα 18: Μεταβολή του λόγου  $\rho_2/\rho_1$  όταν  $\kappa < 0$  (κάτω) και του λόγου  $\rho_1/\rho_2$  όταν  $\kappa > 0$  (πάνω) σε συνάρτηση με το λόγο  $z/a$  για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\kappa$  στην περίπτωση δύο στρωμάτων (Tagg 1934).





Σχήμα 19: Γραφικές παραστάσεις της  $k$  σε συνάρτηση με το πάχος  $z$  του στρώματος.

### 7.8.2 Τρόπος εφαρμογής της μεθόδου Schlumberger στην περίπτωση δύο γεωηλεκτρικών στρωμάτων.

Για την περίπτωση δύο στρωμάτων, δηλαδή, ενός στρώματος πάχους  $z$  και ειδικής αντίστασης  $\rho_1$ , που βρίσκεται πάνω σε ημιχώρο ειδικής αντίστασης  $\rho_2$ , η θεωρητική σχέση που δίνει τη φαινόμενη ειδική αντίσταση,  $\rho_a$ , σε συνάρτηση με τη μισή απόσταση,  $L=AB/2$ , μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος για διάταξη Schlumberger, είναι

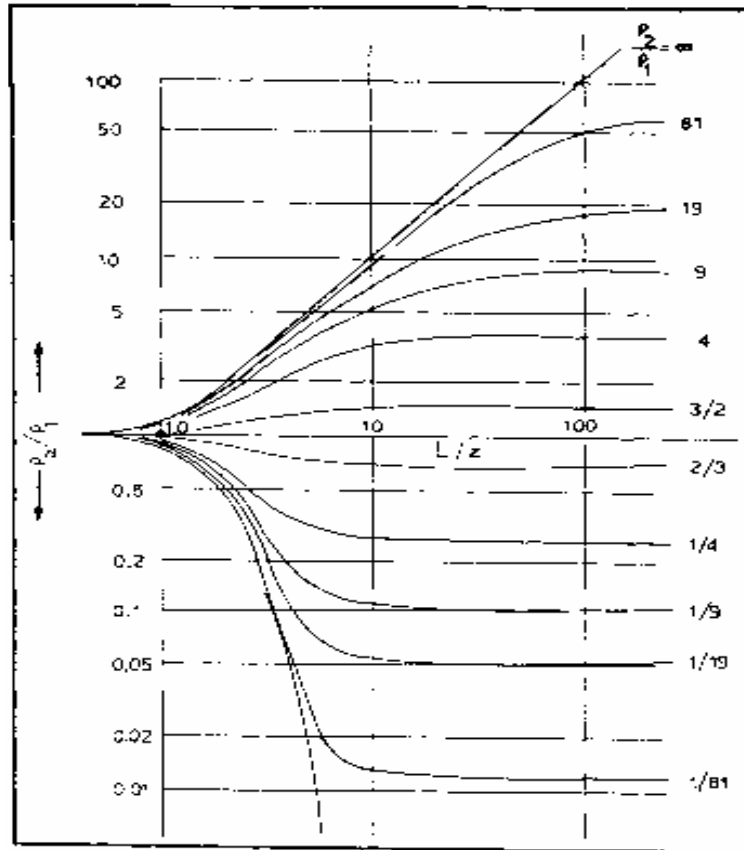
$$p_a = p_1 + 2p_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[1 + (2nz/L)^2]^{3/2}} \quad (33)$$

Στο σχήμα (13) φαίνεται η γραφική παράσταση του λόγου  $\rho_a/\rho_1$ , σε συνάρτηση με το λόγο  $L/z$ , όπου  $z$  το πάχος του πάνω στρώματος για διάφορες τιμές του λόγου  $\rho_2/\rho_1$  οι οποίες ποικίλουν από 0 μέχρι  $\infty$ , ενώ για  $\rho_2/\rho_1 = 1$  η καμπύλη είναι ευθεία παράλληλη προς τον άξονα των τετμημένων. Οι καμπύλες κάτω από την ευθεία αυτή ισχύουν για την περίπτωση που η ειδική αντίσταση,  $\rho_1$ , του πάνω στρώματος είναι μεγαλύτερη από την ειδική αντίσταση,  $\rho_2$ , του ημιχώρου που βρίσκεται από κάτω ( $\rho_2 < \rho_1$ ), ενώ οι καμπύλες πάνω από την ευθεία ισχύουν για την περίπτωση που η ειδική αντίσταση στο στρώμα είναι μικρότερη από την ειδική αντίσταση στον

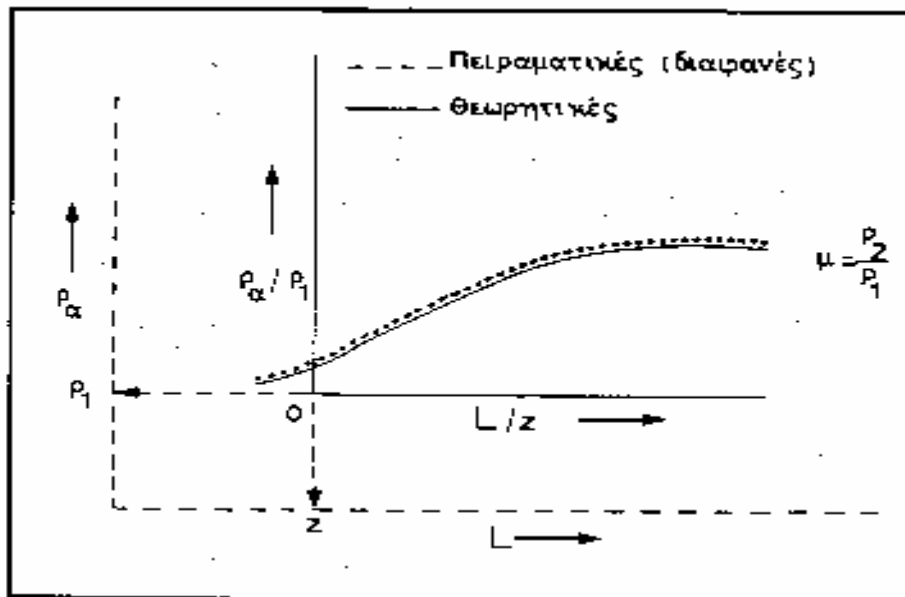
ημιχώρο ( $\rho_2 > \rho_1$ ). Τόσο ο άξονας των τετμημένων (άξονας του  $L/z$ ) όσο και ο άξονας των τεταγμένων (άξονας  $\rho_a/\rho_1$ ) στο σχήμα (20) είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Το σημείο που έχει συντεταγμένες ( $L/z = 1, \rho_a/\rho_1 = 1$ ) λέγεται αρχή των θεωρητικών καμπύλων και είναι το μόνο σημείο όλων των θεωρητικών καμπύλων για το οποίο το  $L$  έχει τιμή ίση με το πάχος  $z$  του στρώματος και η φαινόμενη αντίσταση είναι ίση με την αντίσταση στο πάνω στρώμα.

Οι θεωρητικές καμπύλες του σχήματος (18) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό με γραφική μέθοδο των τιμών  $\rho_1, z, \rho_2$  με βάση τις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με την απόσταση  $L$  ( $= AB/2$ ) της συνδεσμολογίας Schlumberger.

Για το σκοπό αυτό, χαρτογραφούνται οι πειραματικές τιμές  $\rho_a$  σε συνάρτηση με την  $L$  πάνω σε διαφανές διπλό λογαριθμικό χαρτί (και οι δύο άξονες σε λογαριθμική κλίμακα) των ίδιων ακριβώς διαστάσεων με το χαρτί που είναι χαραγμένες οι θεωρητικές καμπύλες (συνήθως 6,2mm ή 8,4mm). Το διαφανές αυτό χαρτί τοποθετούμε πάνω στο χαρτί των θεωρητικών καμπύλων και, διατηρώντας τους άξονες των συντεταγμένων των δύο σχεδίων παράλληλους, μετακινούμε το διαφανές χαρτί μέχρις ότου η πειραματική καμπύλη την οποία ορίζουν (νοητικά) τα σημεία των παρατηρήσεων συμπέσει με μια από τις θεωρητικές καμπύλες η οποία έστω ότι αντιστοιχεί σε λόγο  $(\rho_2/\rho_1) = \mu$  (σχ.21). Κατά τη σύμπτωση αυτή, η αρχή,  $O$ , των θεωρητικών καμπύλων έχει συντεταγμένες έστω  $(L', \rho_a')$  στο σύστημα συντεταγμένων (στο διαφανές χαρτί) της πειραματικής καμπύλης. Σύμφωνα με την ιδιότητα της αρχής  $O$  των αξόνων των θεωρητικών καμπύλων που αναφέραμε παραπάνω θα είναι  $z = L', \rho_1 = \rho_a'$  και  $\rho_2 = \mu\rho_1$ .



Σχήμα 20: Πρότυπες καμπύλες για την εφαρμογή της μεθόδου Schlumberger στην περίπτωση δύο γεωηλεκτρικών στρωμάτων (Parasnis 1979).



Σχήμα 21: Τρόπος προσδιορισμού των  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  και  $z$  με τη γραφική μέθοδο Schlumberger. Οι συνεχείς γραμμές παριστάνουν θεωρητικές καμπύλες, ενώ οι

στιγμένες γραμμές (που χαρτογραφούνται σε διαφανές χαρτί) παριστάνουν πειραματικές καμπύλες.

### **7.8.3 Ποιοτική ερμηνεία των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης**

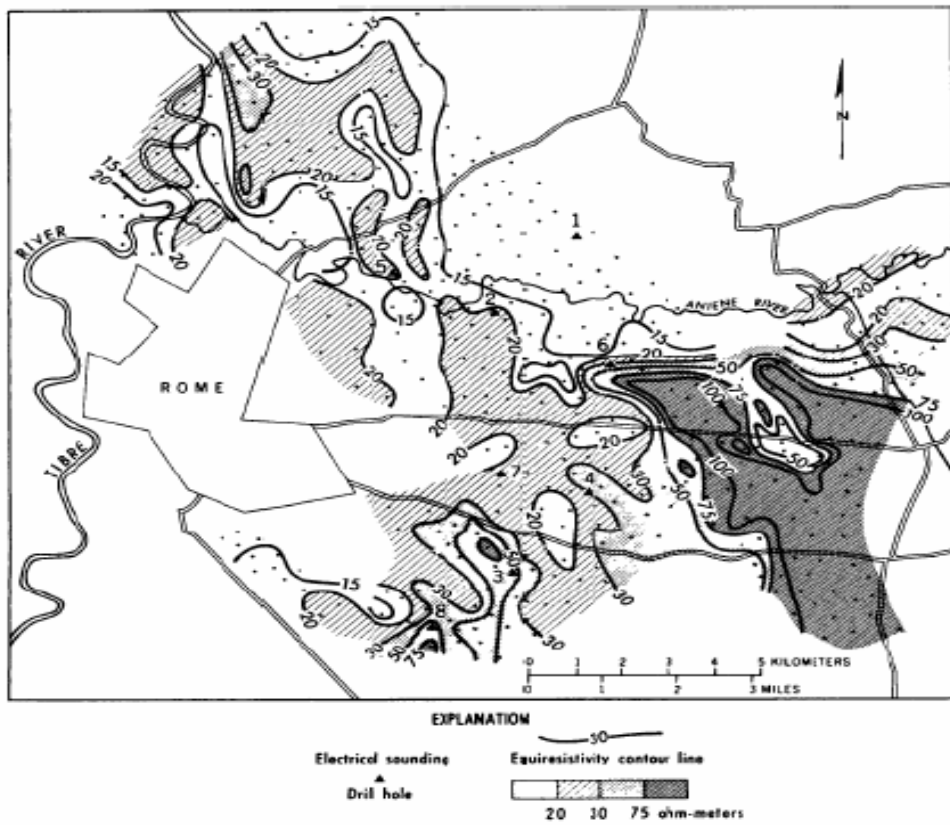
Η μαθηματική ανάλυση για την ποσοτική ερμηνεία των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης έχει αναπτυχθεί για την εφαρμογή της κυρίως στην περίπτωση γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης (κατακόρυφης γεωηλεκτρικής διασκόπησης). Η ερμηνεία αυτή γίνεται αρχικά με όχι πολύ ακριβείς γραφικές κυρίως μεθόδους και τα αποτελέσματα αυτά, τα οποία προκύπτουν σχετικά εύκολα και ενώ ο ερευνητής βρίσκεται ακόμα στο ύπαιθρο, χρησιμοποιούνται ως αρχικά στοιχεία για την εφαρμογή περισσότερο προχωρημένων μεθόδων διαδοχικών προσεγγίσεων με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Επειδή, το επιφανειακό τμήμα της Γης το οποίο μελετάμε με τις ηλεκτρικές μεθόδους μπορεί, σε πρώτη προσέγγιση, να θεωρηθεί ότι αποτελείται από οριζόντια στρώματα, θα περιγράψουμε τον τρόπο χρησιμοποίησης των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που πραγματοποιούνται με τις δύο βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων, τη διάταξη Wenner και τη διάταξη Schlumberger, για τον καθορισμό των ειδικών αντιστάσεων και των παχών των στρωμάτων αυτών.

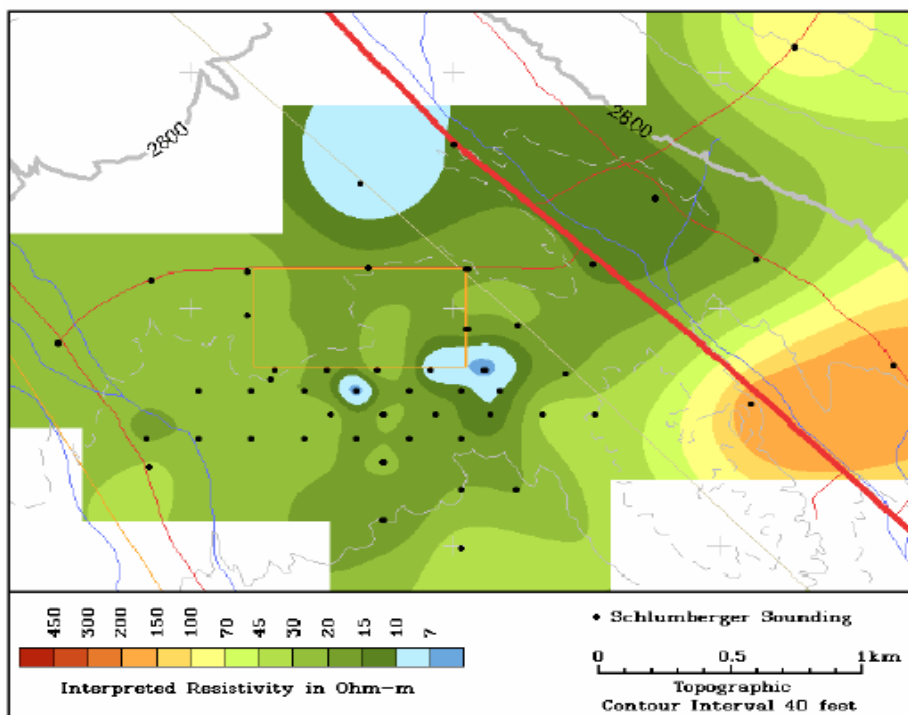
Η ποιοτική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων περιλαμβάνει τα εξής:

1. Μελέτη και ερμηνεία των καμπύλων των βυθοσκοπήσεων με βάση όλα τα διαθέσιμα στοιχεία της περιοχής έρευνας όπως, μητρώα γεωτρήσεων, στάθμες υδροφορέα, δεδομένα από γεωτεχνικές έρευνες στη περιοχή ενδιαφέροντος. Τοποθέτηση σε χάρτη όλων των διαθέσιμων πληροφοριών και των θέσεων των βυθοσκοπήσεων με την ερμηνεία τους.

2. Προετοιμασία χαρτών της χωρικής κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τη παρουσίαση των μετρήσεων της αντίστασης υπό μορφή ισοκαμπύλων (σχήμα 22 & 23).

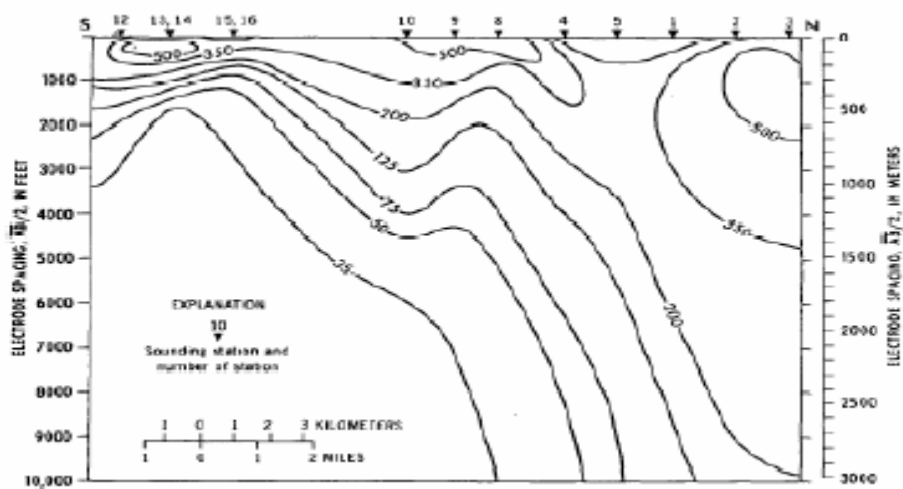


*Σχήμα 22: Χάρτης οριζόντιας κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης.*

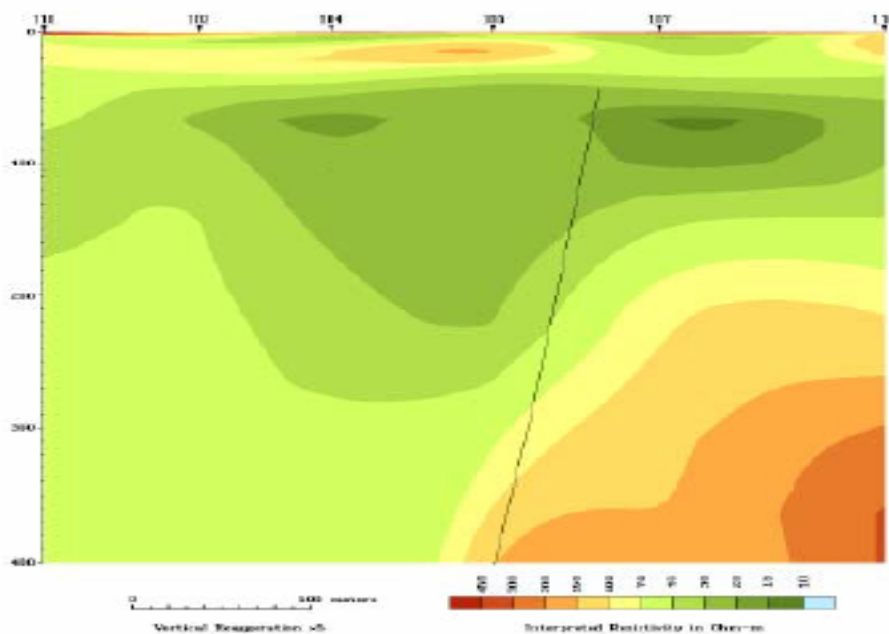


**Σχήμα 23:** Οριζόντια κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 97 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους (Bisdorf, 2002).

3. Παρουσίαση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε τομές. Για τη κατασκευή αυτών των χαρτών απαιτείται η χαρτογράφηση της ερμηνείας της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης και είτε ο απλός συσχετισμός των γεωηλεκτρικών ενοτήτων μεταξύ τους, είτε η γραμμική παρεμβολή στο επίπεδο του χάρτη από τις τιμές των αντιστάσεων των βυθοσκοπήσεων και τη δημιουργία των ισοκαμπύλων ίσης αντίστασης με το βάθος (σχήμα 24 & 25).



**Σχήμα 24:** Κατακόρυφη τομή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης σε περιοχή πλησίον κοίτης ποταμού. Παρατηρείται ότι το υπόβαθρο της περιοχής παρουσιάζει μια πάχυνση προς το βορρά.



Σχήμα 25: Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε κατακόρυφη τομή. Με τρίγωνα παριστάνονται οι θέσεις στις οποίες ελήφθησαν οι μετρήσεις Schlumberger (Bisdorf, 2002).

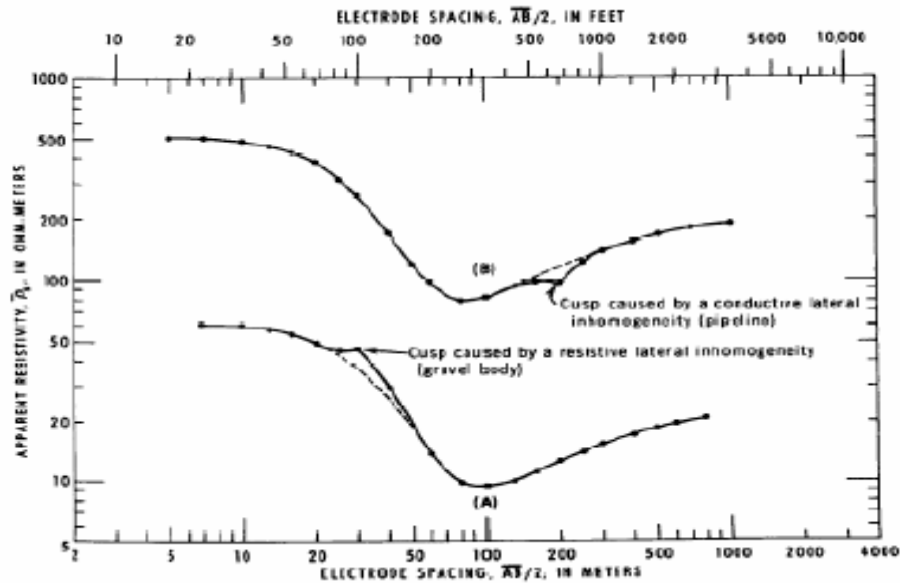
#### **7.8.4 Προβλήματα και τρόποι επίλυσης κατά την ερμηνεία των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης**

Οι γεωηλεκτρικές καμπύλες μπορεί να παρουσιάζουν διάφορες "ανωμαλίες" λόγω της πλευρικής ανομοιογένειας του εδάφους, λόγω σφαλμάτων στις μετρήσεις ή λόγω σφαλμάτων του καταγραφικού οργάνου. Είναι πολύ σημαντικό να εντοπίζονται τα σφάλματα και να ερμηνεύονται ανάλογα. Κατά τη χαρτογράφηση των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το «άνοιγμα» των ηλεκτροδίων ρεύματος ( $AB/2$ ) σε διλογαριθμικό χαρτί, παρουσιάζονται συνήθως τρεις διαφορετικού τύπου ανωμαλίες. Αυτές οι ανωμαλίες είναι οι,

A) Παρουσία μιας οξύληκτης άκρης στη καμπύλη συνήθως προέρχεται από πλευρικές εδαφικές ανομοιογένειες των σχηματισμών της περιοχής έρευνας, από διαρροή ρεύματος λόγω κακής μόνωσης των καλωδίων ρεύματος, λόγω σφαλμάτων στις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ή λόγω σφαλμάτων στους αριθμητικούς υπολογισμούς. Προτείνεται να χαρτογραφούνται οι τιμές των αντιστάσεων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των μετρήσεων διότι για παράδειγμα ένα επιφανειακό στρώμα χαλίκων ή ένας φακός άμμου μπορεί να αναγνωριστεί από την εμφάνιση των οξύληκτων άκρων όπως φαίνεται στο σχήμα (26).

B) Ασυνέχειες στην καμπύλη γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους μπορεί να παρουσιαστεί ασυνέχεια στη καμπύλη των φαινόμενων αντιστάσεων. Έτσι, ασυνέχειες μπορεί να προέρχονται,

B1) λόγω αύξησης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού ( $MN/2$ ) διατηρώντας τα ηλεκτρόδια ρεύματος ( $AB/2$ ) σταθερά. Αν την επόμενη φορά που γίνει αλλαγή στα ηλεκτρόδια δυναμικού αυτή συνοδεύεται από ασυνέχεια στη καμπύλη, τότε αυτό αποτελεί ένδειξη πλευρικής ανομοιογένειας μεγάλων διαστάσεων.

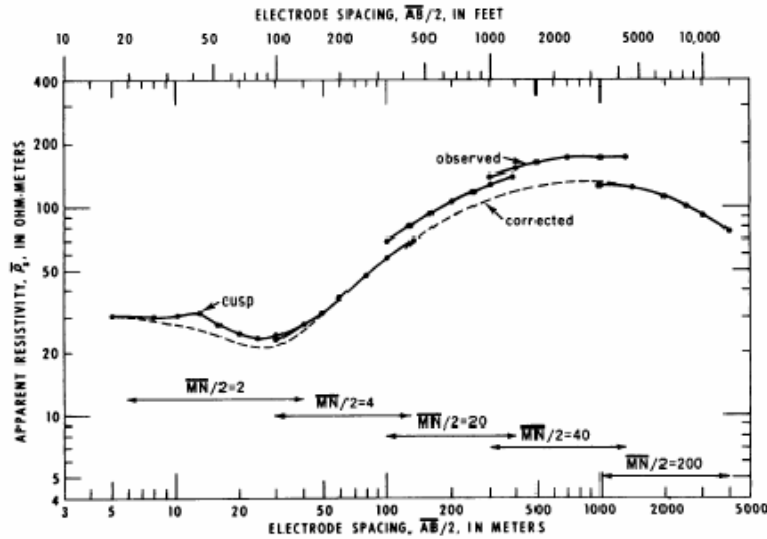


Σχήμα 26: Παραμόρφωση των καμπύλων γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης λόγω πλευρικών εδαφικών ανομοιογενειών.

B2) λόγω διαρροής ρεύματος ή λόγω σφαλμάτων στις αποστάσεις των ηλεκτροδίων.

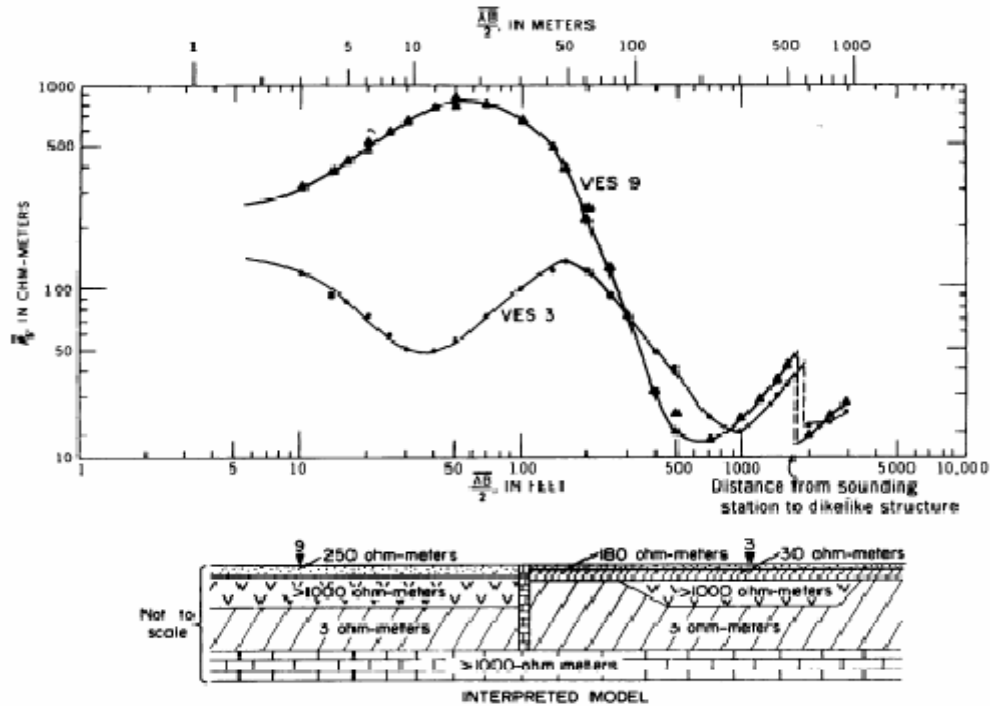
Παραδείγματα τέτοιων ασυνεχειών οι οποίες δεν βρίσκονται σε συμφωνία μια οριζόντια στρωματωμένη ομογενής Γη, παρουσιάζονται στο σχήμα (26). Στην περίπτωση κατά την οποία οι ασυνέχειες δεν είναι πολύ έντονες μπορούν να υποστούν κάποια διόρθωση όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα (27), δηλαδή, γίνεται μεταφορά των κλάδων στις θέσεις όπου θα έπρεπε να βρίσκονταν.





**Σχήμα 27:** Παράδειγμα μιας καμπύλης με «θορύβους» και η διαδικασία διόρθωσης αυτής.

B3) Η τελευταία περίπτωση κατά την οποία παρουσιάζεται ασυνέχεια στη καμπύλη (απότομη πτώση της καμπύλης) οφείλεται στη παρουσία μιας κατακόρυφης ανομοιογένειας. Συγκεκριμένα, αν κατά την εκτέλεση της μέτρησης και τη χαρτογράφηση των αντιστάσεων με την παράλληλη αύξηση της απόστασης  $AB/2$ , παρουσιαστεί μια απότομη μετάπτωση της καμπύλης των αντιστάσεων (σχήμα 28) αυτό μπορεί να ερμηνευτεί μόνο με τη παρουσία μιας στενής και ρηχής κατακόρυφης φλέβας η οποία ως περισσότερο αντιστατική με το περιβάλλον πέτρωμα, οδηγεί σε αυτό το αποτέλεσμα (σχήμα 28). Η τετημένη στην οποία παρουσιάστηκε η ασυνέχεια κατά τη χαρτογράφηση της καμπύλης των αντιστάσεων, μας προσδιορίζει και την απόσταση της δομής (φλέβας) από το κέντρο της διάταξης.

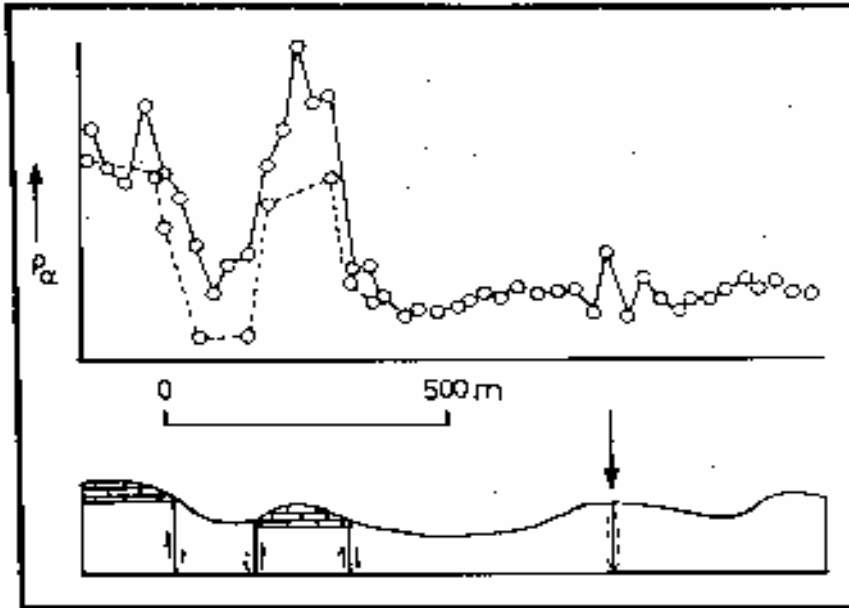


**Σχήμα 28:** Παράδειγμα παρουσίας ασυνεχειών σε καμπύλη γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης με τη μέθοδο Schlumberger, που προέρχονται από κατακόρυφη δομή υπό μορφή φλέβας.

## 7.9 Εφαρμογές της μεθόδου της ειδικής αντίστασης

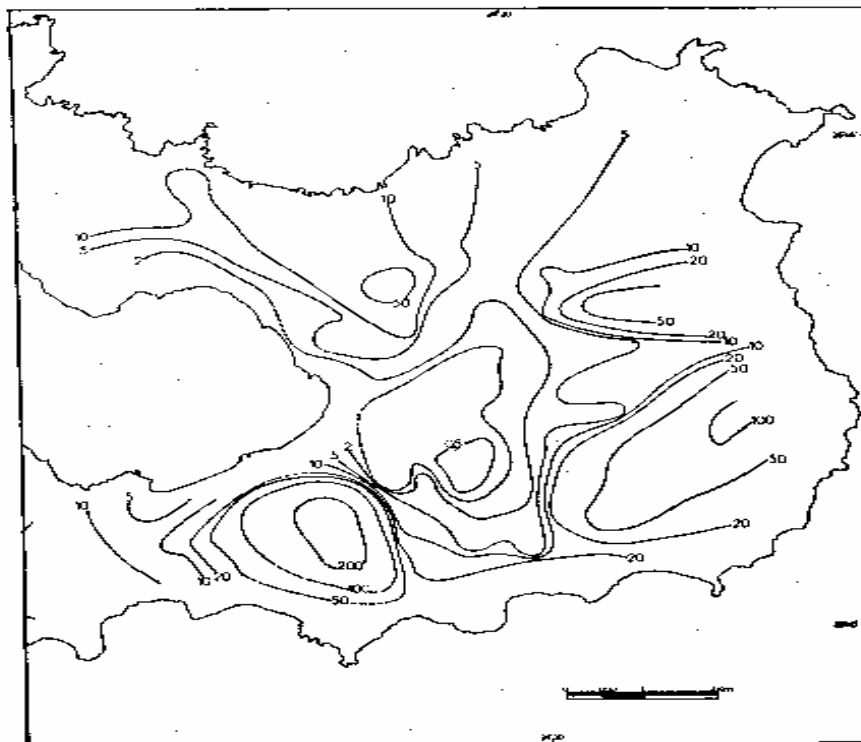
Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα για τη λύση τεκτονικών, υδρογεωλογικών, γεωθερμικών αρχαιολογικών και περιβαλλοντικών προβλημάτων. Αναφέρουμε εδώ δύο παραδείγματα από τα οποία το πρώτο αφορά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής για τη λύση ενός τεκτονικού προβλήματος και το άλλο την εφαρμογή της σε γεωθερμικό πρόβλημα.

Το σχήμα (29) δείχνει τη μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης κατά διεύθυνση κάθετη προς τις διευθύνσεις παράλληλων ρηγμάτων (συνεχής καμπύλη) και κατά διεύθυνση παράλληλη προς τα ρήγματα (στιγμένη καμπύλη) στο Illinois των Ηνωμένων Πολιτειών. Είναι σαφής η συσχέτιση των υψηλών τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με τα ρήγματα.



**Σχήμα 29:** Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης κάθετα (συνεχής καμπύλη) και παράλληλα (στιγμένη καμπύλη) προς ρήγματα στο Illinois (Hubbert 1934).

Το σχήμα (30) δείχνει χάρτη ίσων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην ανατολική Μήλο οι οποίες προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο Schlumberger για  $L = 250 \text{ m}$ . Είναι ενδιαφέρον ότι οι μικρότερες τιμές (μέχρι  $0,5 \Omega \text{m}$ ) βρέθηκαν στην περιοχή του γνωστού γεωθερμικού πεδίου της περιοχής.



**Σχήμα 30:** Καμπύλες ίσων τιμών φαινόμενης ειδικής αντίστασης οι οποίες προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο Schlumberger με  $L = 250$  m στην ανατολική Μήλο (Τσόκας 1985).

### **7.10 Εφαρμογές της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό υδατικών πόρων**

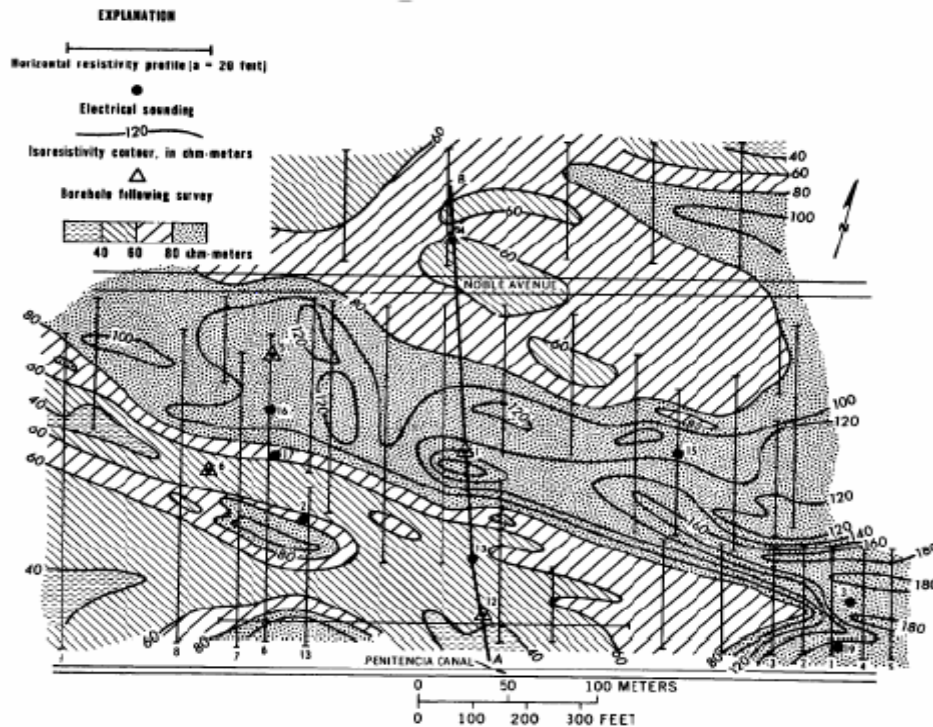
Κατά τη διεξαγωγή έρευνας σε περιοχές όπου αντιμετωπίζονται υδρογεωλογικά προβλήματα, η πιο συχνά προτεινόμενη μεθοδολογία είναι η ηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι άλλες μέθοδοι, όπως σεισμικά, μαγνητικά ή βαρυτικά, αδυνατούν να αναγνωρίσουν χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Για παράδειγμα στη περίπτωση όπου ζητείται ο εντοπισμός του βάθους της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού – αλμυρού νερού, μόνο οι ηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες. Ένα παχύ στρώμα αργίλου το οποίο διαχωρίζει δύο υδροφορείς, μπορεί με ευκολία να εντοπιστεί με τη χρήση ηλεκτρικών μεθόδων, ενώ με την εφαρμογή σεισμικών μεθόδων διασκόπησης το στρώμα αυτό αποτελεί στρώμα χαμηλής ταχύτητας που θα οδηγήσει σε εσφαλμένο προσδιορισμό του βάθους του στρώματος.

#### **7.10.1 Εντοπισμός υπόγειων διόδων νερού (παλαιοκοίτες)**

Μια από τις πιο επιτυχημένες μεθόδους εντοπισμού υπόγειων διόδων νερού είναι η ηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης υπό τη μορφή γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και ηλεκτρικής χαρτογράφησης ου χώρου μελέτης. Στην περιοχή του San Hose στη California εφαρμόστηκαν όλες οι δυνατές μέθοδοι-διατάξεις ηλεκτρικών διασκοπήσεων με σκοπό τον εντοπισμό ενός ρηχού υδροφορέα και την εκμετάλλευσή του με υδρογεωτρήσεις. Έτσι στη περιοχή ενδιαφέροντος χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμένες μέθοδοι ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και οριζόντιας χαρτογράφησης των αντιστάσεων τόσο με την διάταξη Schlumberger όσο και με τη Wenner. Σε μερικές θέσεις εφαρμόστηκε και η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας.

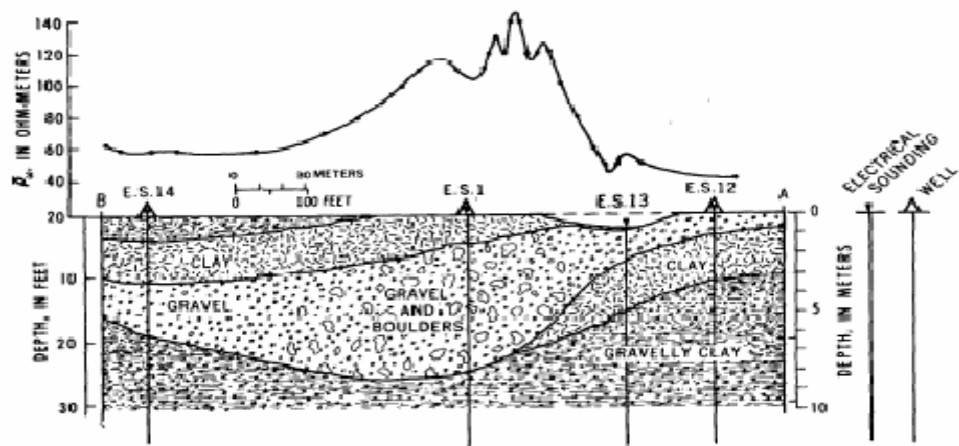
Στη περιοχή του Penitencia εντοπίστηκε μια υπόγεια κοίτη εκτελώντας μερικές ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις οι οποίες παρουσίαζαν κάποιο θόρυβο λόγω έντονων πλευρικών ανομοιογενειών. Στην ίδια περιοχή εκτελέστηκαν επικουρικά και

μετρήσεις οριζόντιας ηλεκτρικής χαρτογράφησης με τη διάταξη Wenner και με απόσταση ηλεκτροδίων  $a=6.1$  μέτρα. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάστηκαν σε χάρτη με τη μορφή ισοκαμπύλων αντίστασης (σχήμα 31)



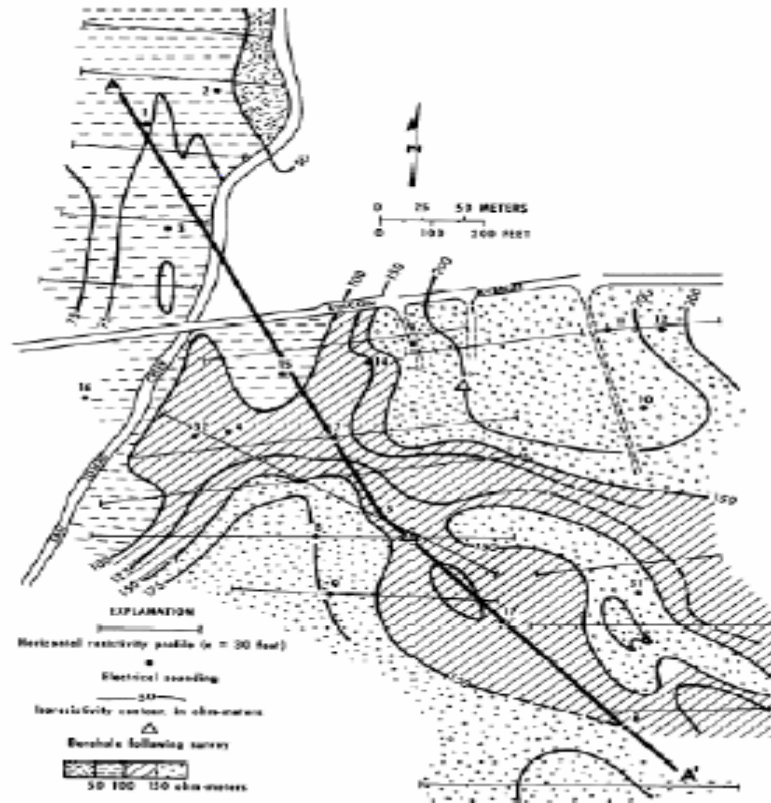
Σχήμα 31: Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή Penitencia στη California

Στο σχήμα (32) παρουσιάζεται η γεωλογική τομή όπως αυτή προέκυψε από την παράλληλη ερμηνεία των τεσσάρων βυθοσκοπήσεων που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και επιπλέον στοιχεία που προήλθαν από μεταγενέστερη της μελέτης, γεώτρηση.



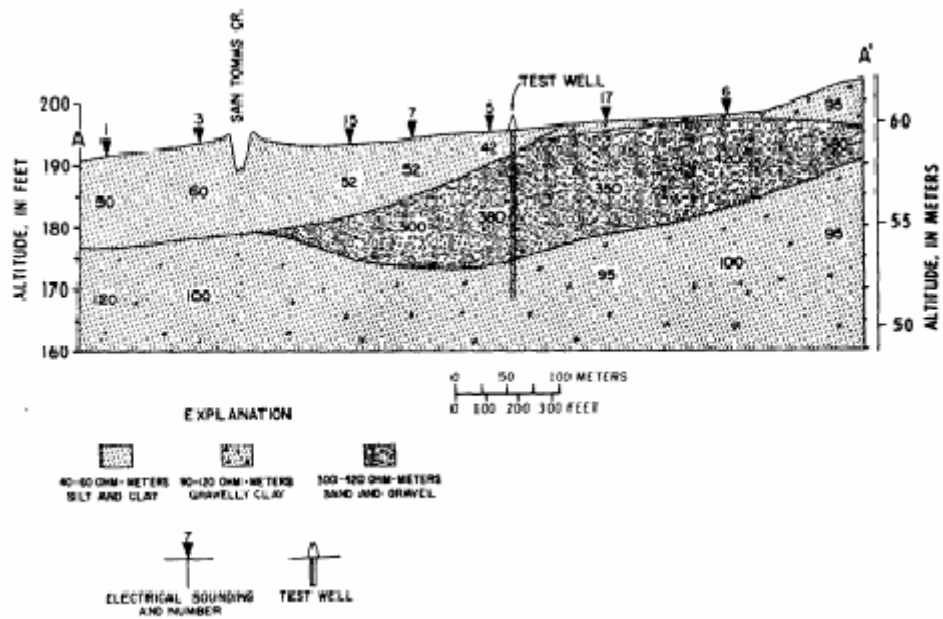
*Σχήμα 32: Γεωλογική τομή της περιοχής έρευνας όπως υπολογίστηκε από την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων.*

Στην περιοχή Campbell στη California εκτελέστηκε μελέτη με εφαρμογή της οριζόντιας χαρτογράφησης των αντιστάσεων, εφαρμόζοντας τη διάταξη Wenner με απόσταση ηλεκτροδίων  $a=10$  μέτρα (σχήμα 33). Στο χάρτη εμφανίζεται μια ρηχή αντιστατική ζώνη χωρίς όμως να είναι τόσο ευδιάκριτη όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο παράδειγμα.



**Σχήμα 33:** Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή Campbell, όπως μετρήθηκε με την εφαρμογή της διάταξης Wenner.

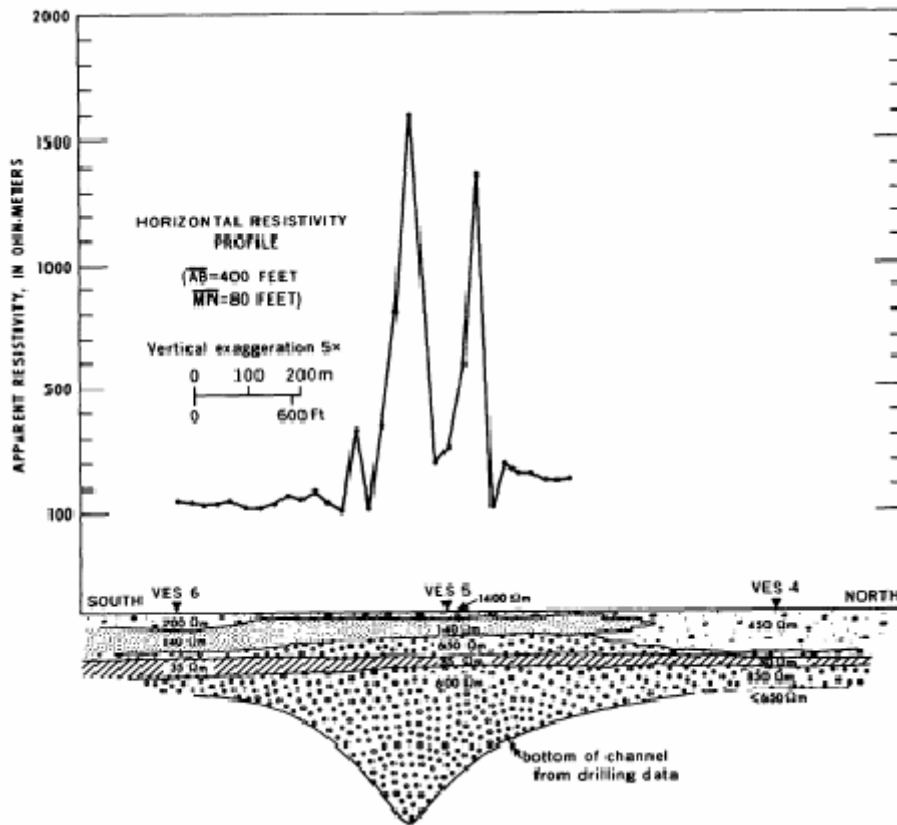
Στο σχήμα (34) παρουσιάζεται η γεωλογική τομή όπως αυτή προήλθε από το συσχέτισμό των βυθοσκοπήσεων μεταξύ τους. Επίσης, εκτελέστηκε μια γεώτρηση η οποία απλά επιβεβαίωσε την ακρίβεια στην ερμηνεία της ηλεκτρικής διασκόπησης και τη συμφωνία των γεωηλεκτρικών ενοτήτων με τις παρατηρούμενες γεωλογικές ενότητες.



**Σχήμα 34:** Γεωλογική τομή και προφίλ αντιστάσεων για τη περιοχή έρευνας (Campbell – California).

Σε μια παρόμοια περίπτωση με την εκτέλεση γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και οριζόντιας χαρτογράφησης με τη μέθοδο Schlumberger εντοπίστηκε υπόγεια κοίτη ποταμού η οποία και επιβεβαιώθηκε με στοιχεία γεωτρήσεων (σχήμα 35).





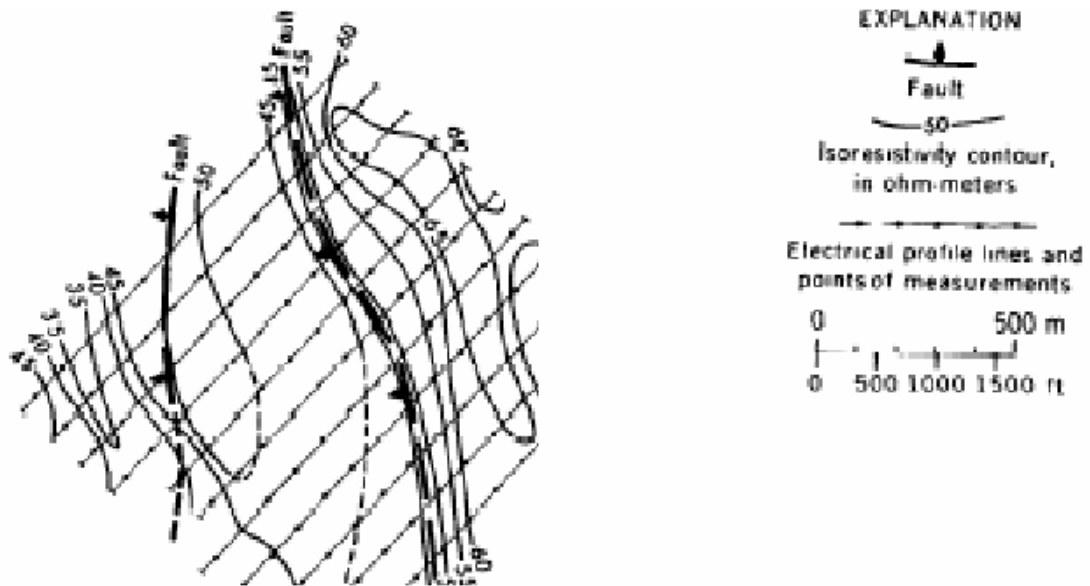
**Σχήμα 35:** Γεωλογική τομή και προφίλ αντιστάσεων για τη περιοχή έρευνας (Salisbury – California).

### 7.10.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων

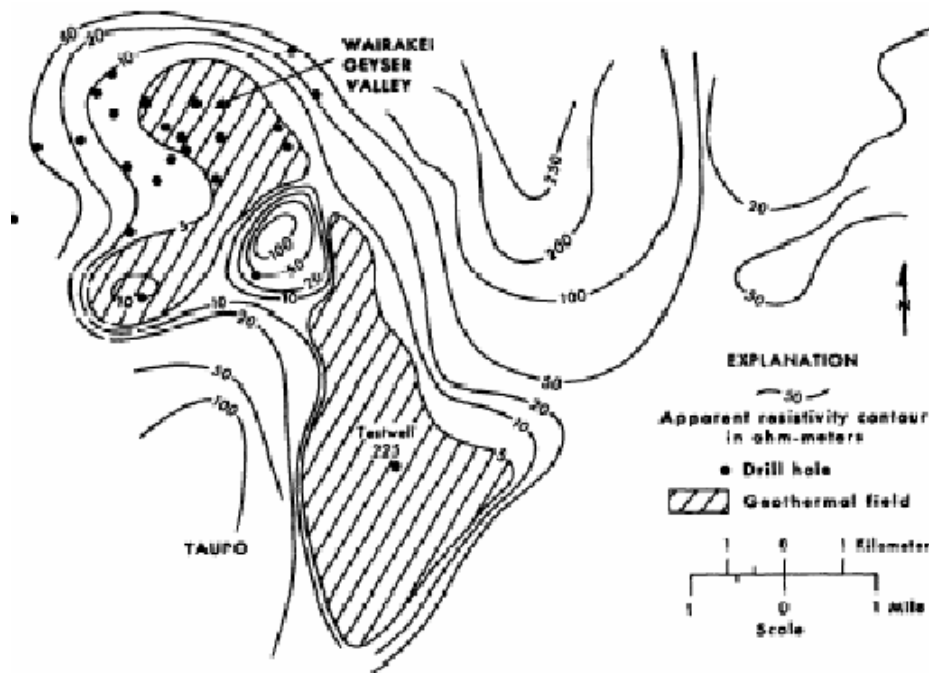
Οι μέθοδοι ηλεκτρικής διασκόπησης εφαρμόζονται με επιτυχία και στη περίπτωση εντοπισμού και οργάνωσης εκμετάλλευσης γεωθερμικών πεδίων. Στη Γερμανία εκτελέστηκαν ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και οριζόντια ηλεκτρική χαρτογράφηση με σκοπό τον εντοπισμό του ρήγματος μέσω του οποίου γίνεται η κίνηση των γεωθερμικών υγρών για την εκμετάλλευση του πεδίου. Στο σχήμα (36) παρουσιάζεται χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όπως προέκυψε από την ερμηνεία οριζόντιας χαρτογράφησης με τη διάταξη Schlumberger και άνοιγμα ηλεκτροδίων 4000 μέτρα σε καθορισμένο κάρναβο. Με βάση το χάρτη που παρουσιάστηκε χαρτογραφήθηκαν τα δύο ρήγματα της περιοχής.

Στη Ν. Ζηλανδία εφαρμόστηκε επιτυχώς η διάταξη Wenner εκτελώντας τόσο γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις όσο και οριζόντια χαρτογράφηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε περιοχή εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου. Στο σχήμα (37) χαρτογραφήθηκε η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τη μέθοδο

Wenner και απόσταση ηλεκτροδίων  $a=550$  μέτρα. Οι δύο περιοχές χαμηλής αντίστασης ( $<5$  ohm-m) ορίζει και τις περιοχές αυξημένης θερμοβαθμίδας. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και από την δοκιμαστική γεώτρηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια εκμετάλλευσης του πεδίου.



**Σχήμα 36:** Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για έρευνα σε γεωθερμικό πεδίο της Γερμανίας.





#### **7.10.4 Εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό και χαρτογράφηση της υπόγειας στάθμης νερών**

Σε αντίθεση με το παράδειγμα που αναφέρθηκε προηγουμένως, δηλαδή τον εντοπισμό της διεπιφάνειας αλμυρού και πόσιμου νερού, όπου αυτός αποτελεί μια εύκολη εφαρμογή της μεθόδου, στη περίπτωση εντοπισμού της υπόγειας στάθμης εμφανίζονται πολλά και δύσκολα προβλήματα.

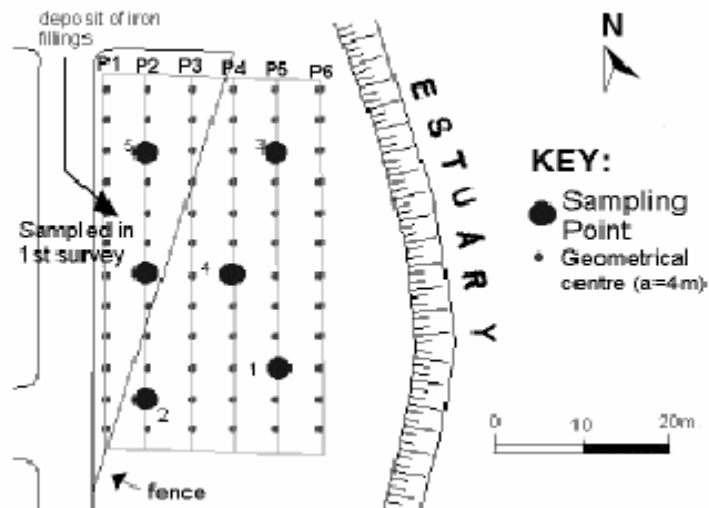
Στη περίπτωση κατά την οποία η υπόγεια στάθμη βρίσκεται υποκείμενη και υπερκείμενη πολλών στρωμάτων διαφορετικής αντίστασης, τότε ο εντοπισμός της είναι σχεδόν αδύνατη. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες η υπόγεια στάθμη μπορεί να εντοπιστεί ως ένα αγώγιμο στρώμα.

#### **7.10.5 Εφαρμογή των μονοδιάστατων (γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, VES) και δυσδιάστατων (γεωηλεκτρική τομογραφία) ηλεκτρικών διασκοπήσεων στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων**

Σε πολλές περιπτώσεις οι γεωφυσικές μέθοδοι εμφανίστηκαν ικανές να δώσουν λύση σε διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα που προήλθαν από τη βιομηχανική δραστηριότητα σε μια περιοχή. Άλλες φορές επενέβησαν έμμεσα σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (X.Y.T.A) όπου διαπιστώθηκαν ύστερα από γεωφυσικές διασκοπήσεις, εκτεταμένες διαρροές στον υπεδάφειο υδροφόρο ορίζοντα. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν διάφορα παραδείγματα εφαρμογής των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων.

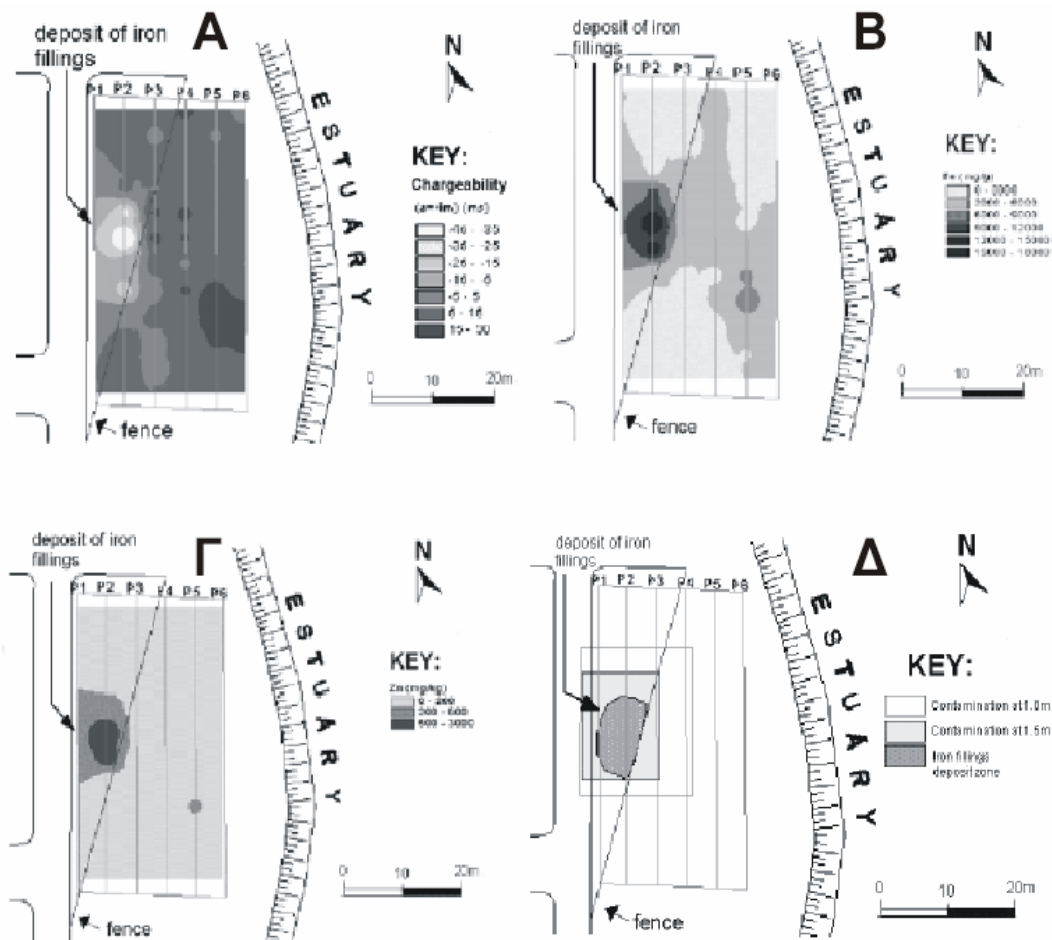
**Περίπτωση 1:** Στη περιοχή Setubal στην Πορτογαλία εντοπίστηκε μια θέση που στο παρελθόν και για πολλά χρόνια γινόταν απόθεση υπολειμμάτων σιδήρου και ορυκτών ελαίων πλούσιων σε Zn. Για την αναμόρφωση του χώρου εκείνου ζητήθηκε η έκταση της μόλυνσης και προτάσεις για αντιμετώπιση του προβλήματος.

Εκτελέστηκαν γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και χημικές αναλύσεις δειγμάτων εδάφους όπως φαίνεται στο σχήμα (39).



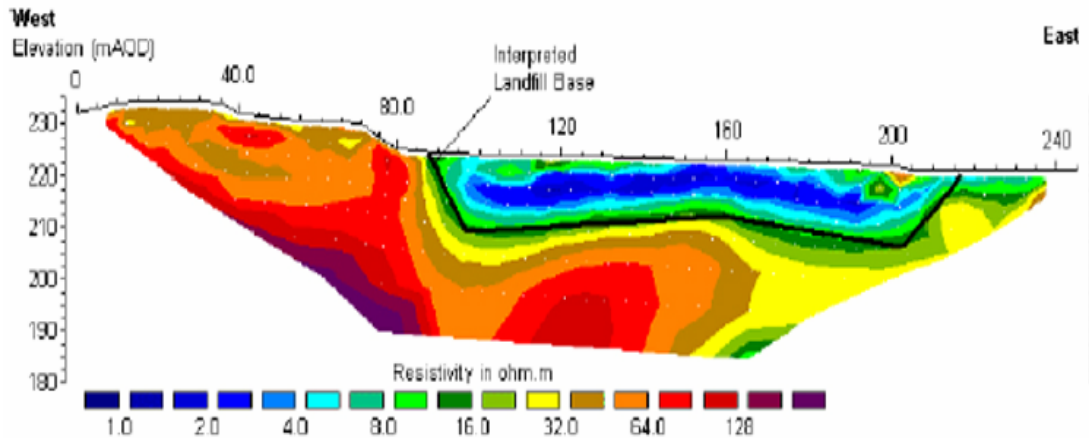
**Σχήμα 39:** Θέσεις γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων και δειγμάτων εδάφους για χημική ανάλυση.

Δεδομένου ότι η υψηλή περιεκτικότητα ενός εδάφους σε σίδηρο (Fe) και ψευδάργυρο (Zn) συσχετίζεται με την φορτιστικότητα (chargeability) όπως αυτή υπολογίζεται από μετρήσεις επαγόμενης πολικότητας, μπόρεσε να γίνει κοινή ερμηνεία των μετρήσεων φορτιστικότητας, αντίστασης και συγκέντρωσης στοιχείων για τον εντοπισμό των πιο βεβαρημένων από την μόλυνση θέσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 40).



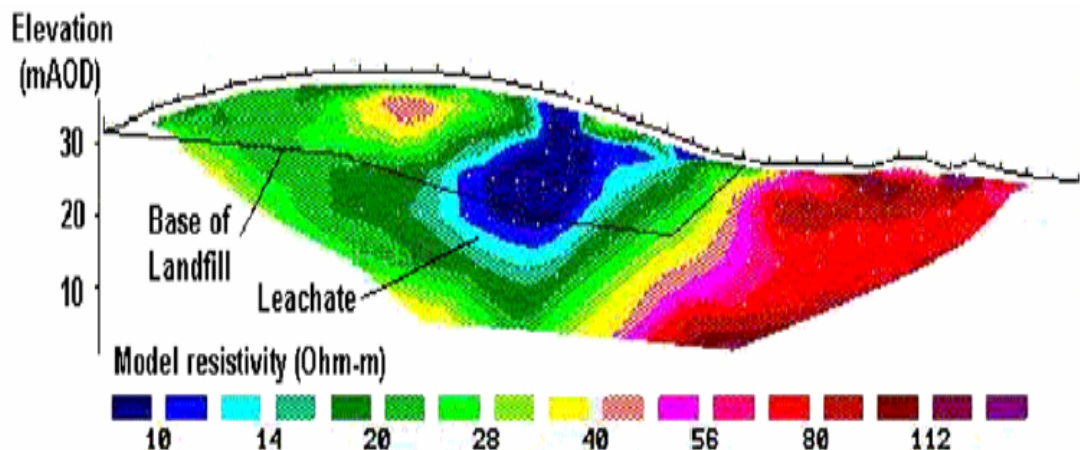
**Σχήμα 40:** α) Χάρτης κατανομής της Φορτιστικότητας, β) Χάρτης συγκέντρωσης Fe, γ) Χάρτης συγκέντρωσης Zn, δ) Μολυσμένη περιοχή στην οποία πρέπει ή να απομακρυνθούν υλικά ή να γίνει αποκατάσταση του χώρου με θεραπεία αυτού.

**Περίπτωση 2:** Εντοπισμός της έκτασης ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (σχήμα 41) και του πιθανών θέσεων διαρροής σε υπεδάφειους ορίζοντες με τη χρήση της γεωηλεκτρικής τομογραφίας (σχήμα 42).



**Σχήμα 41:** Εντοπισμός της έκτασης και του βάθους ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Με συνεχή μαύρη γραμμή παρουσιάζεται το όριο μεταξύ απορριμμάτων και υγιούς υποβάθρου.

Στην περίπτωση κατά την οποία παρουσιάζεται διαρροή από τον χώρο αυτό και μόλυνση των υπεδάφειων σχηματισμών ή/και υδροφόρων οριζόντων τότε κατά την εκτέλεση και ερμηνεία των μετρήσεων παρουσιάζεται η ακόλουθη εικόνα (σχήμα 42).

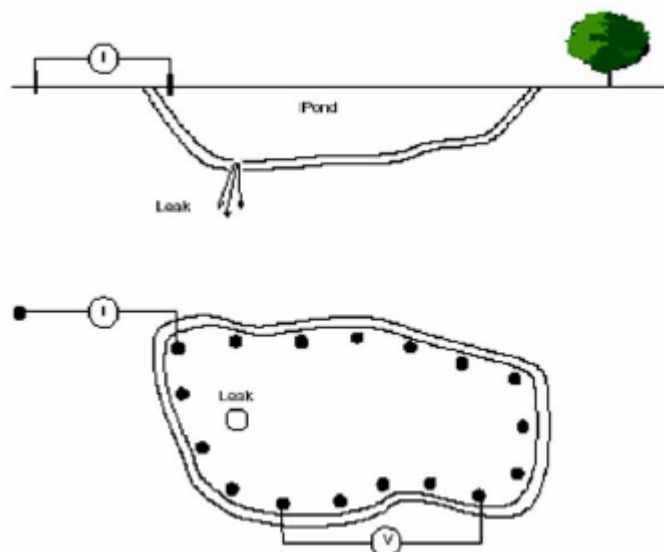


**Σχήμα 42:** Εντοπισμός της θέσης διαρροής από χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων με την εκτέλεση γεωηλεκτρικής τομογραφίας

**Περίπτωση 3:** Εντοπισμός θέσεων διαρροής σε λιμνοδεξαμενές με σκοπό την εξάλειψη προβλημάτων που έχουν να κάνουν με αλόγιστη "σπατάλη" υδατικών

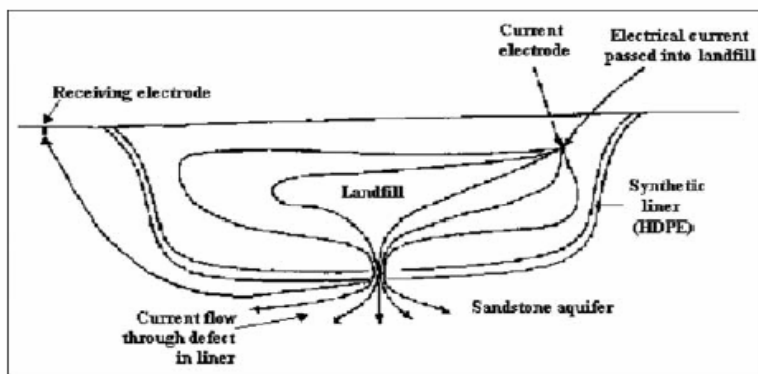
πόρων. Σε πολλές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί έλλειμμα στο ισοζύγιο μιας λιμνοδεξαμενής δηλαδή, το νερό που αποθηκεύεται δεν ισούται με το νερό που καταναλίσκεται και αυτού που παραμένει εντός της λιμνοδεξαμενής. Τέτοιου είδους προβλήματα οφείλονται αποκλειστικά και μόνο σε διαρροές.

Στις περιπτώσεις αυτές και με τη χρήση γεωηλεκτρικών μεθόδων είναι δυνατός ο εντοπισμός τυχόν υπάρχουσας διαρροής (σχήμα 43)



**Σχήμα 43:** Διάταξη ηλεκτροδίων εντός και εκτός της δεξαμενής με σκοπό τον εντοπισμό υπόγειας διαρροής.

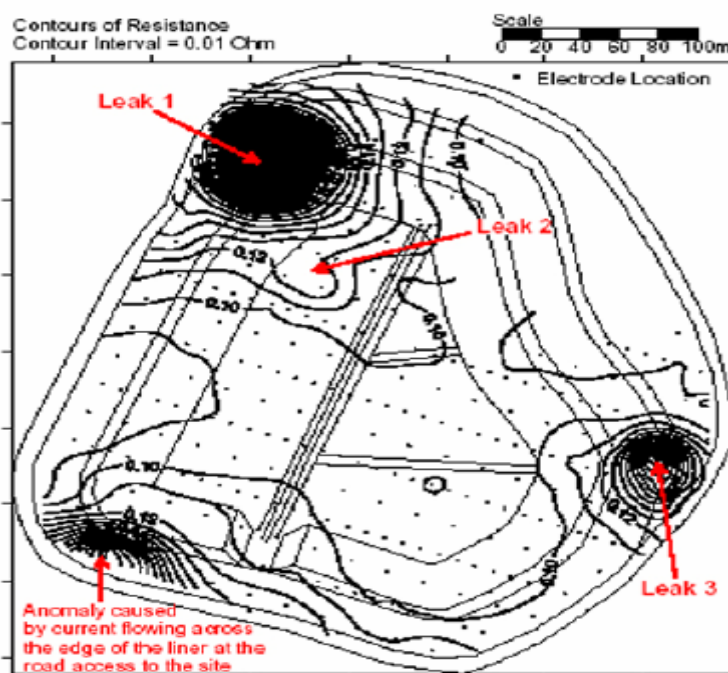
Η δυνατότητα εντοπισμού των διαρροών με τη χρήση ηλεκτρικών μεθόδων οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα που διαβιβάζεται εντός της δεξαμενής διατρέχει όλη τη δεξαμενή και διαφεύγει-καταγράφεται (από τα ηλεκτρόδια δυναμικού) από το σημείο στο οποίο γίνεται η διαρροή (σχήμα 44)





**Σχήμα 44:** Θεωρητική ερμηνεία εφαρμογής της μεθόδου στη περίπτωση διαρροών από λιμνοδεξαμενές.

Με τη μέτρηση όλων των θέσεων στα οποία έχει εγκατασταθεί ηλεκτρόδιο δυναμικού και τη χαρτογράφηση με ισοκαμπύλες των αντιστάσεων σε κάθε θέση μέτρησης, είναι δυνατή η εύρεση της θέσης διαρροής (σχήμα 45)



**Σχήμα 45:** Εντοπισμός τριών θέσεων διαρροής σε λιμνοδεξαμενή με τη διεξαγωγή μετρήσεων αντίστασης.

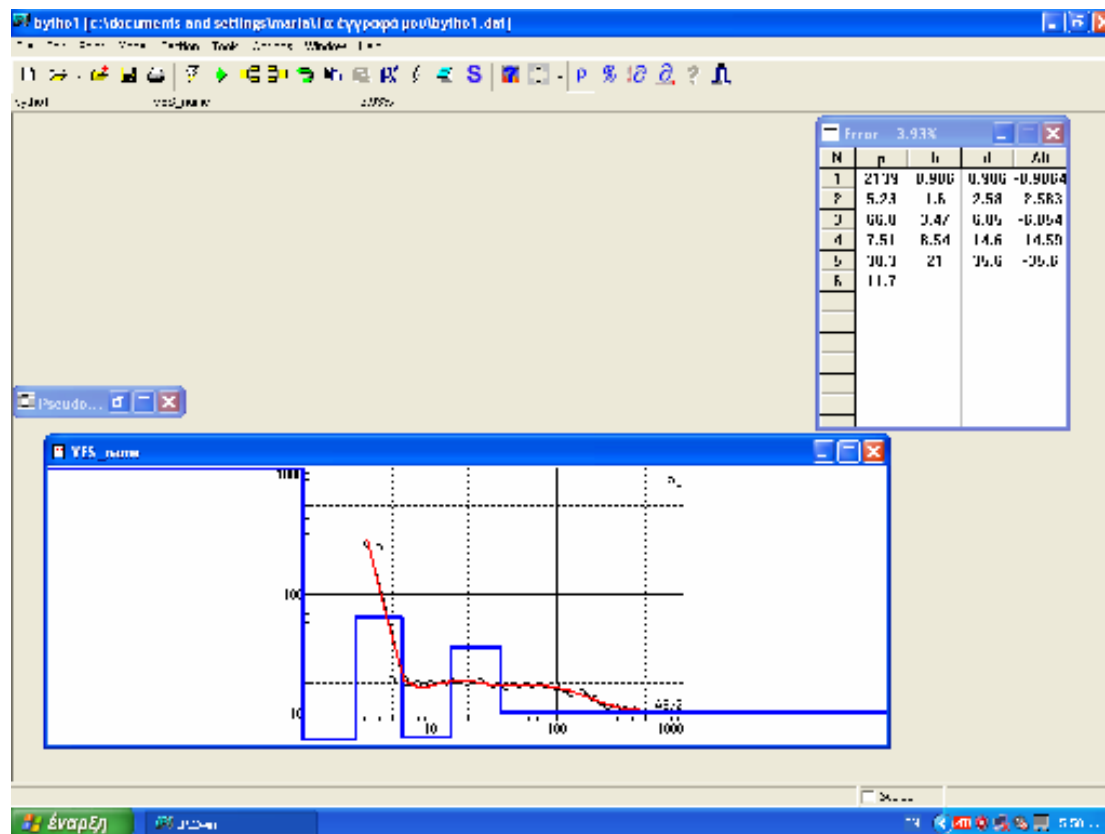
**Περίπτωση 4:** Εντοπισμός θέσεων διαρροής σε δεξαμενές υγρών καυσίμων με την εκτέλεση γεωηλεκτρικών τομογραφιών στο χρόνο. Πολλές φορές οι δεξαμενές υγρών καυσίμων παρουσιάζουν διαρροές οι οποίες μολύνουν τόσο τον υδροφόρο ορίζοντα όσο και τους υπεδάφειους σχηματισμούς. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου γεωηλεκτρικών τομογραφιών στο χρόνο, με μετρήσεις που εκτελέστηκαν σε δεξαμενές υγρών καυσίμων και για χρονικό διάστημα 4 ημερών όπου και εμφανίζεται η διάχυση των υγρών στο υπέδαφος.

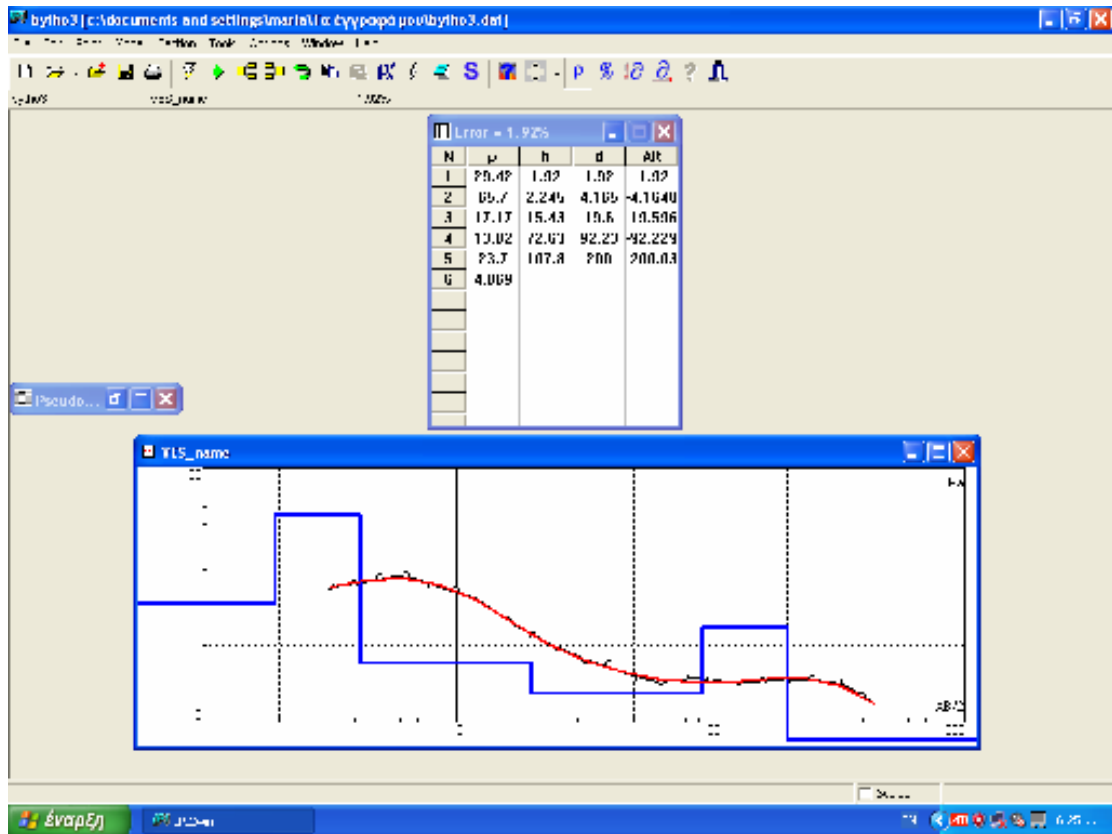
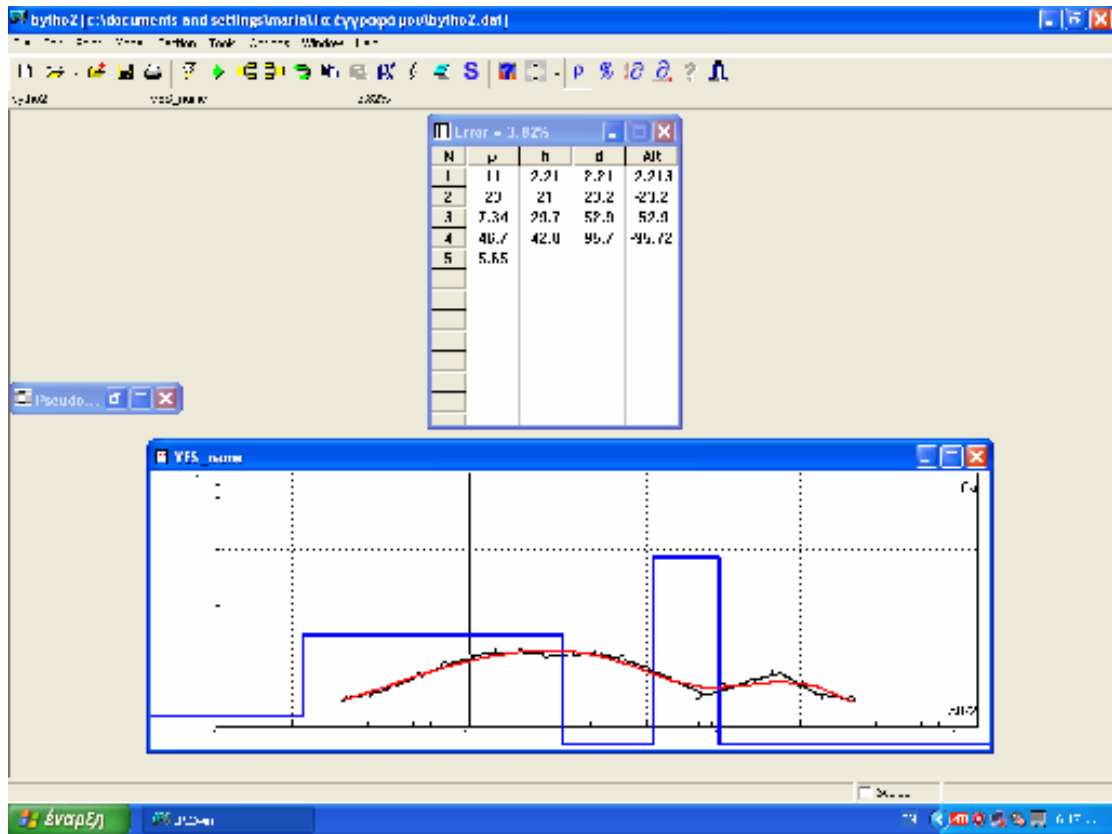
## 8. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

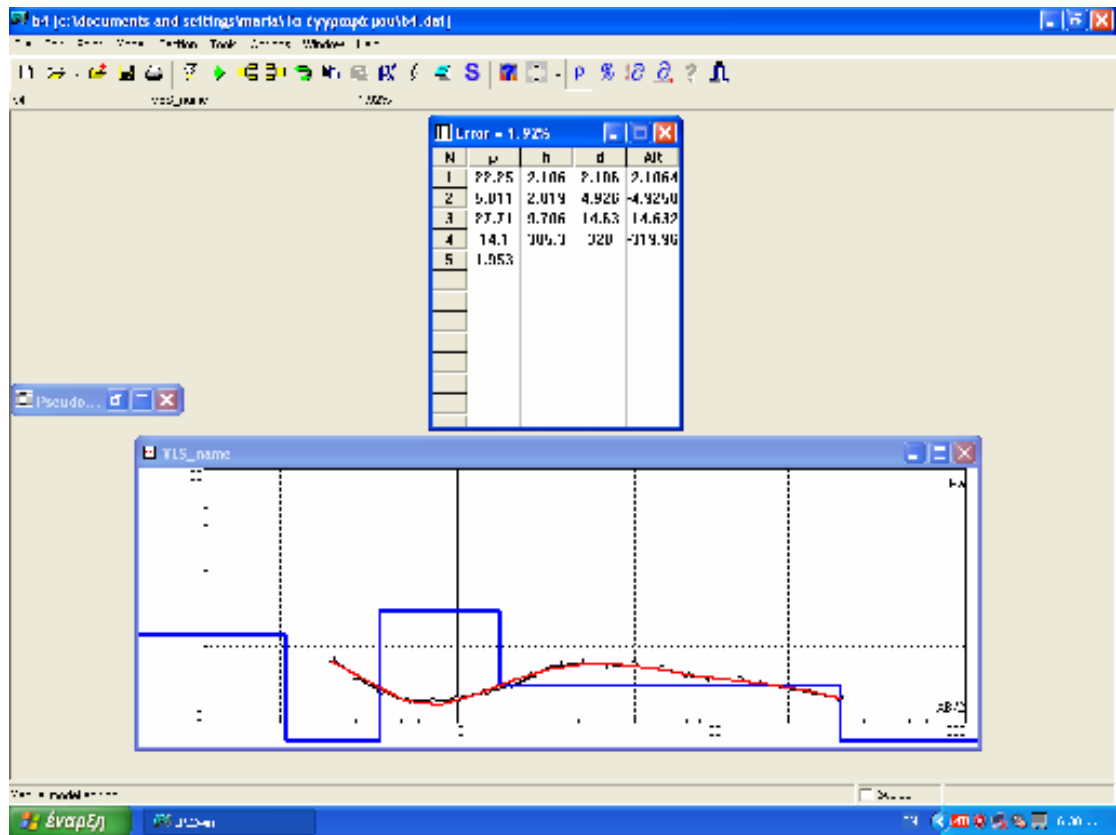
### 8.1 Μετρήσεις Schlumberger επί του ερευνητικού τόπου της κοινότητας Ν. Αγιονερίου στο Ν. Κιλκίς.

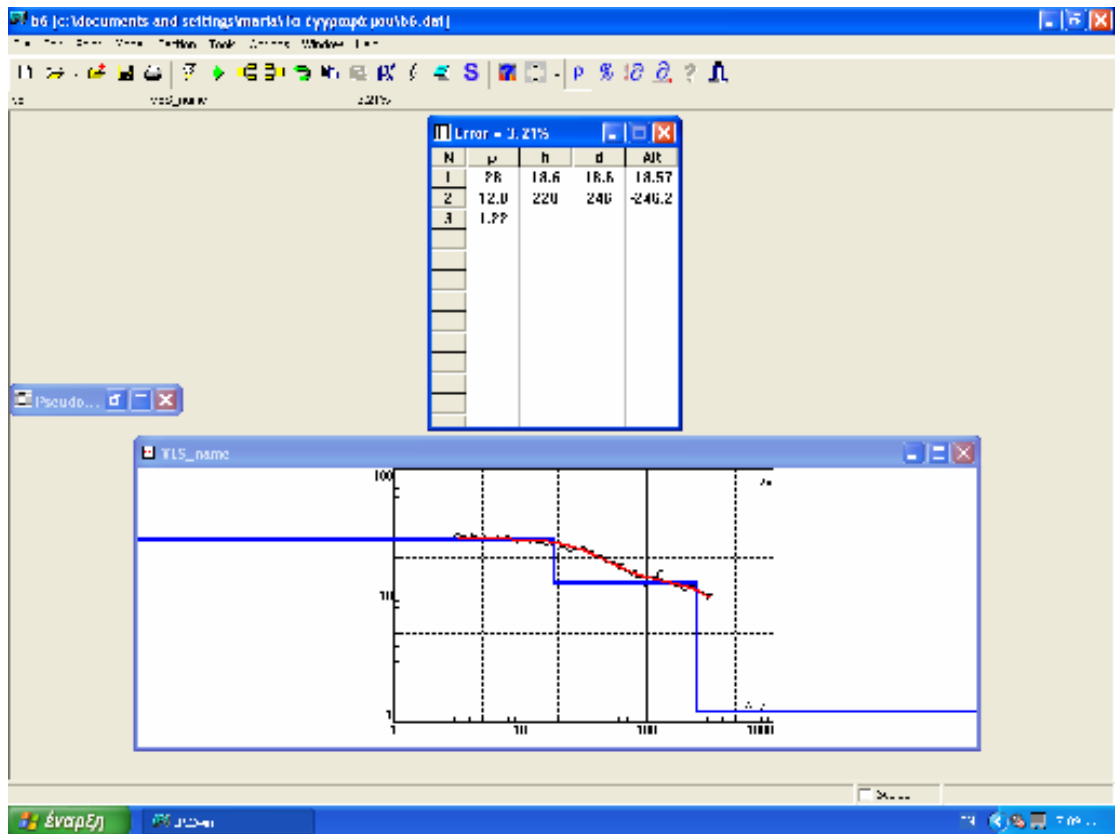
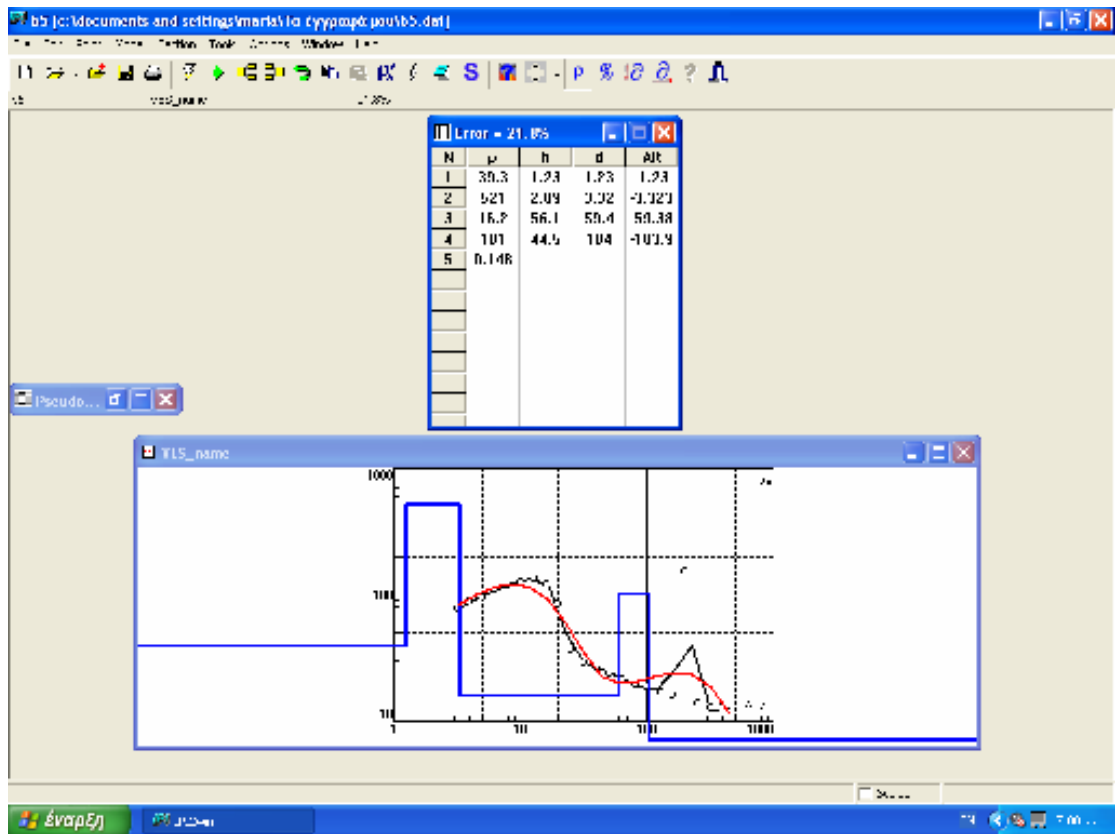
Το 1999 ελήφθησαν 14 ηλεκτρικές μετρήσεις με συνεχές ρεύμα επί του ερευνητικού τόπου της κοινότητας του Ν. Αγιονερίου Κιλκίς χρησιμοποιώντας τη διάταξη Schlumberger. Οι βυθοσκοπήσεις έγιναν για να καθορίσουν την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, και τη θέση των ρηγμάτων. Ο σκοπός αυτής της αναφοράς είναι να παρουσιαστούν τα στοιχεία, η αυτόματη ερμηνεία τους, η δισδιάστατη κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και οι χάρτες βάθους ειδικής αντίστασής τους.

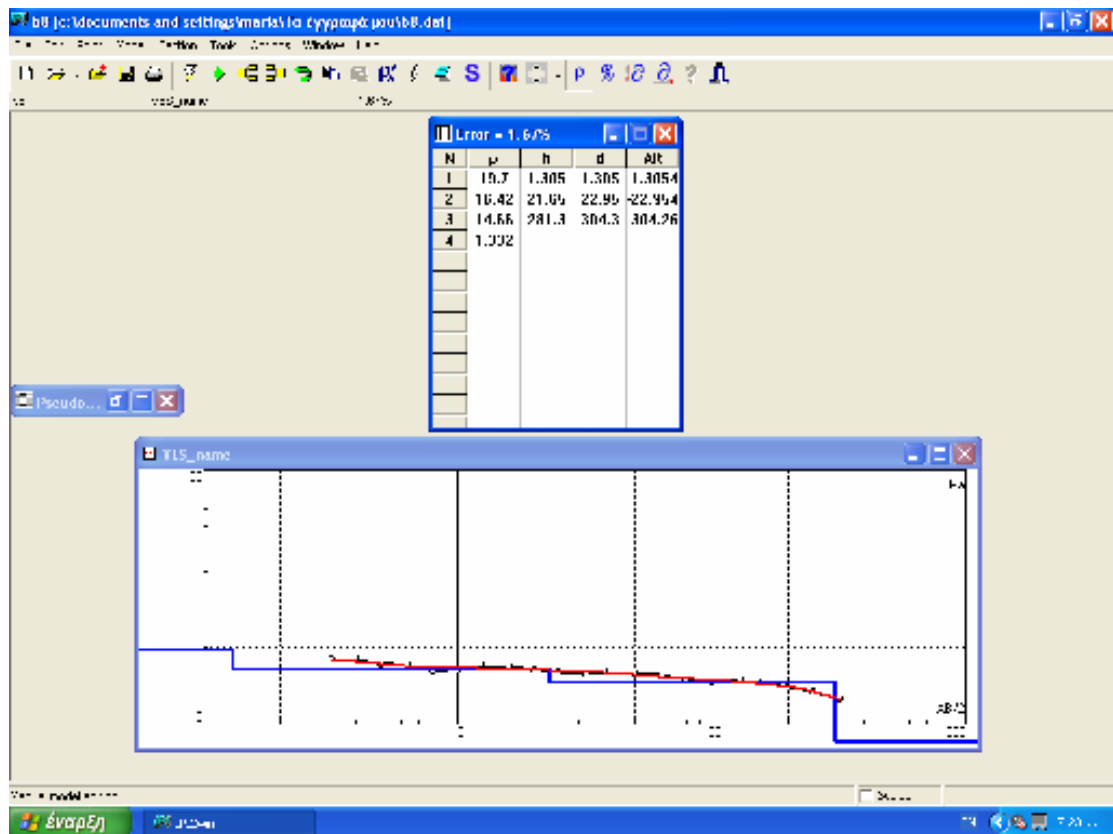
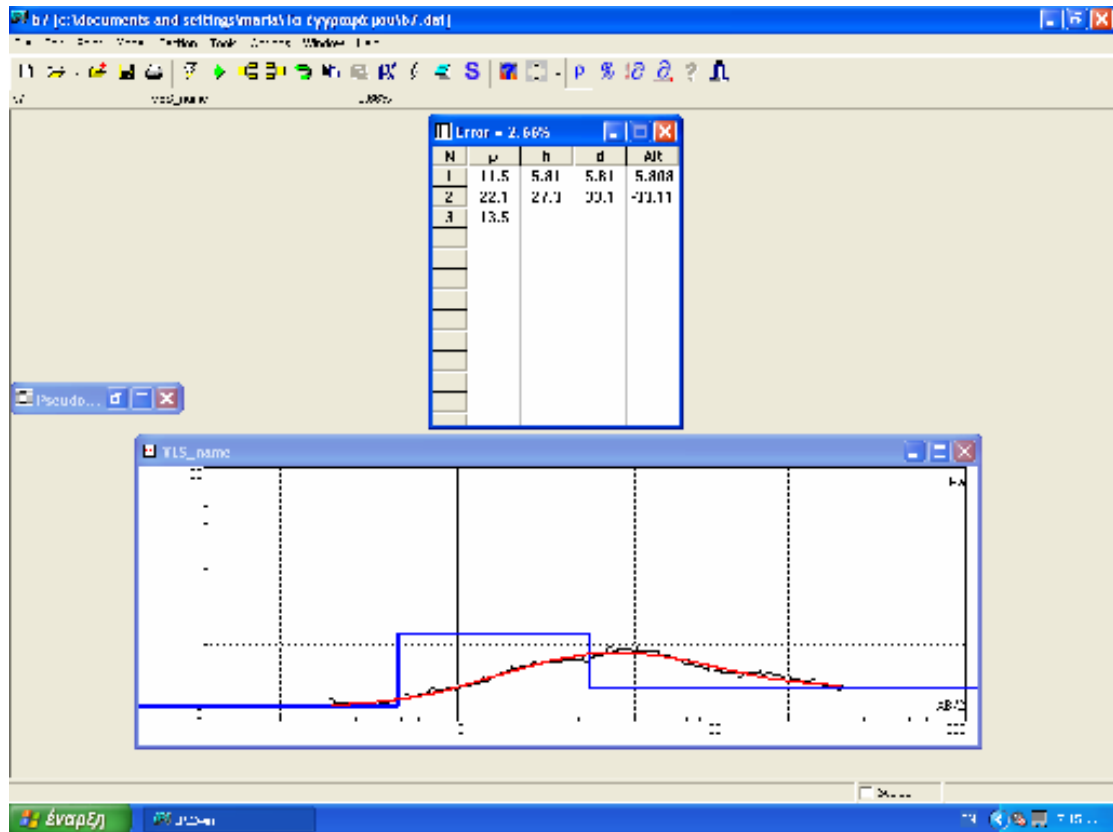
Στα παρακάτω σχήματα εμφανίζονται τα αποτελέσματα των βυθοσκοπήσεων με τη μορφή γεωλογικών τομών καθώς πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση των σχηματισμών με βάση την ειδική ηλεκτρική αντίσταση που παρουσίαζαν.

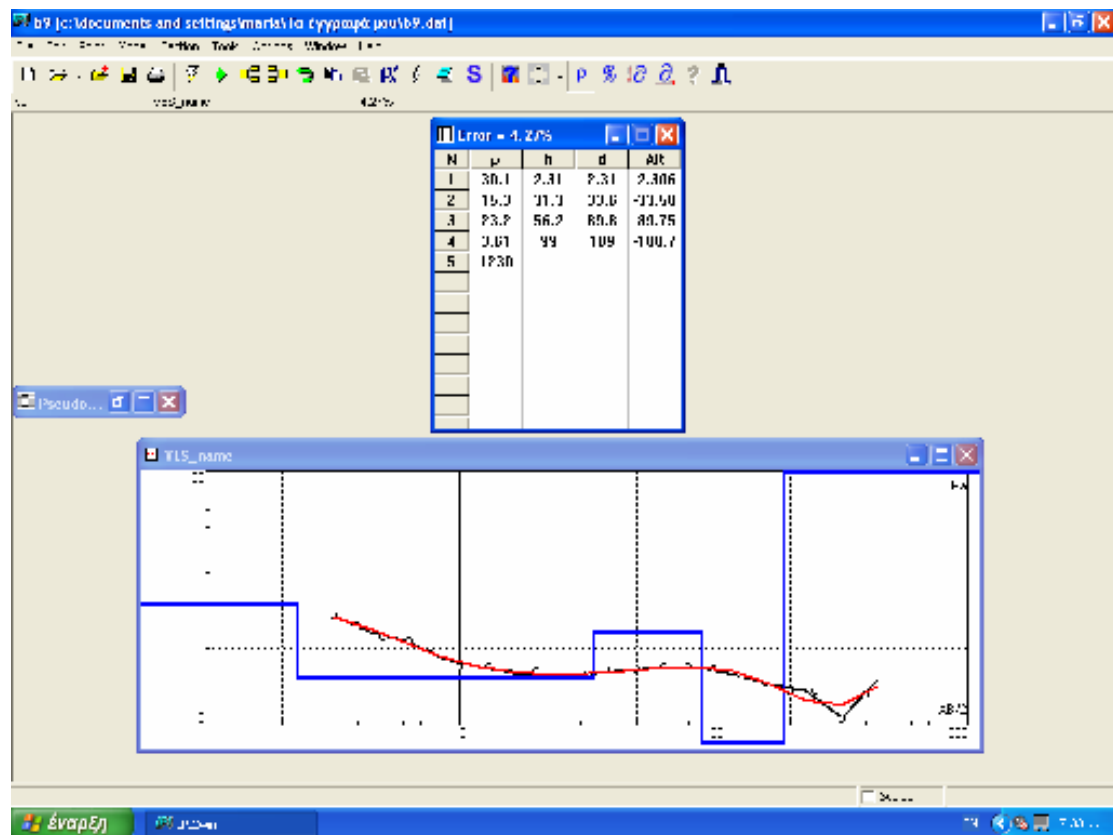


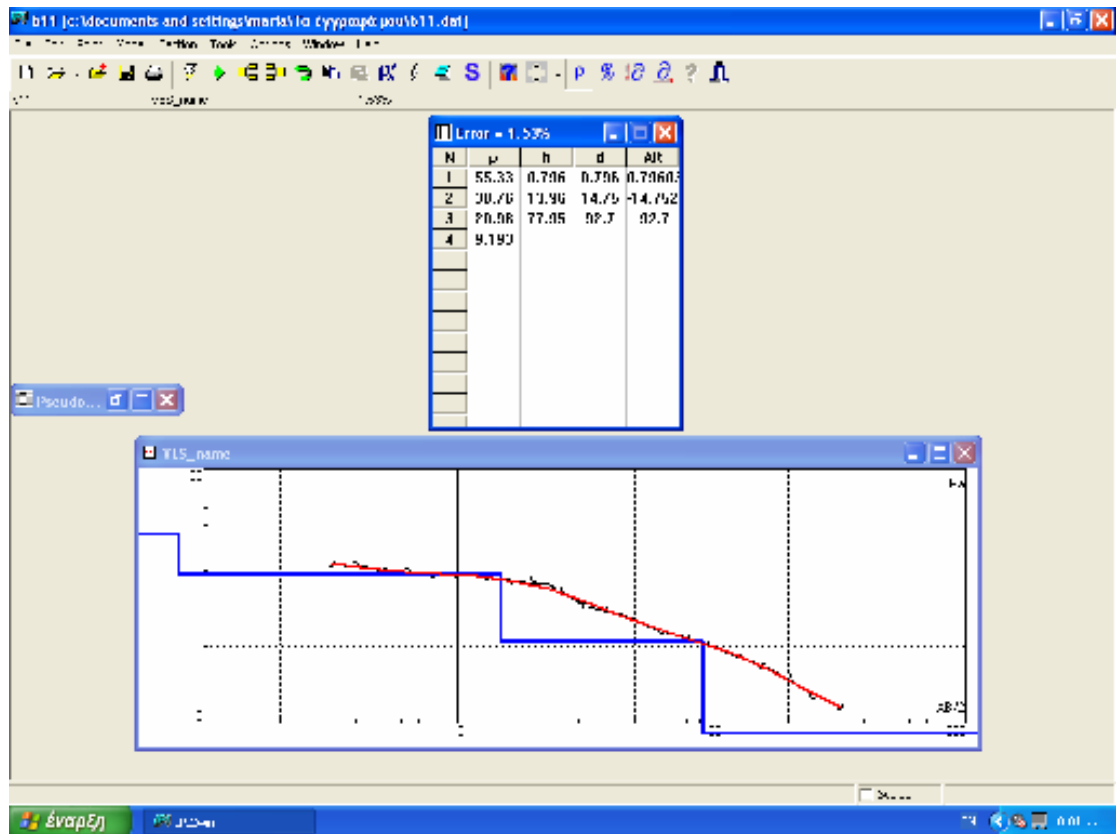
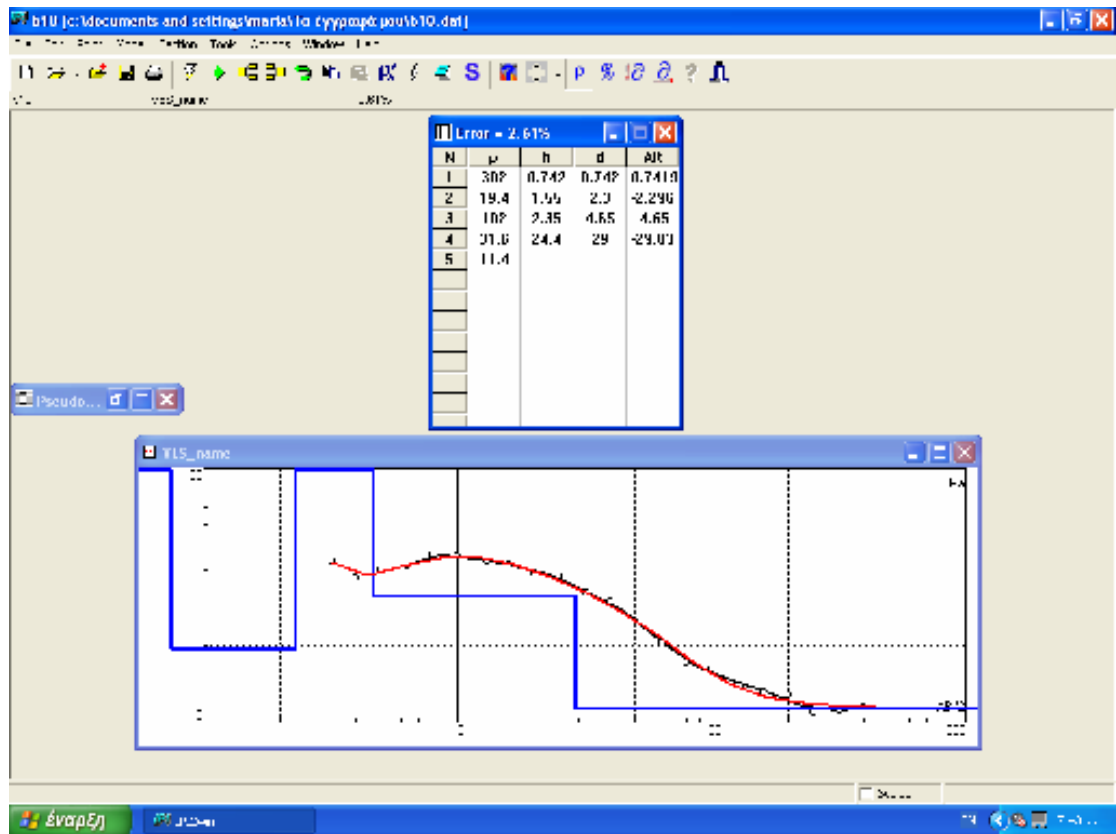




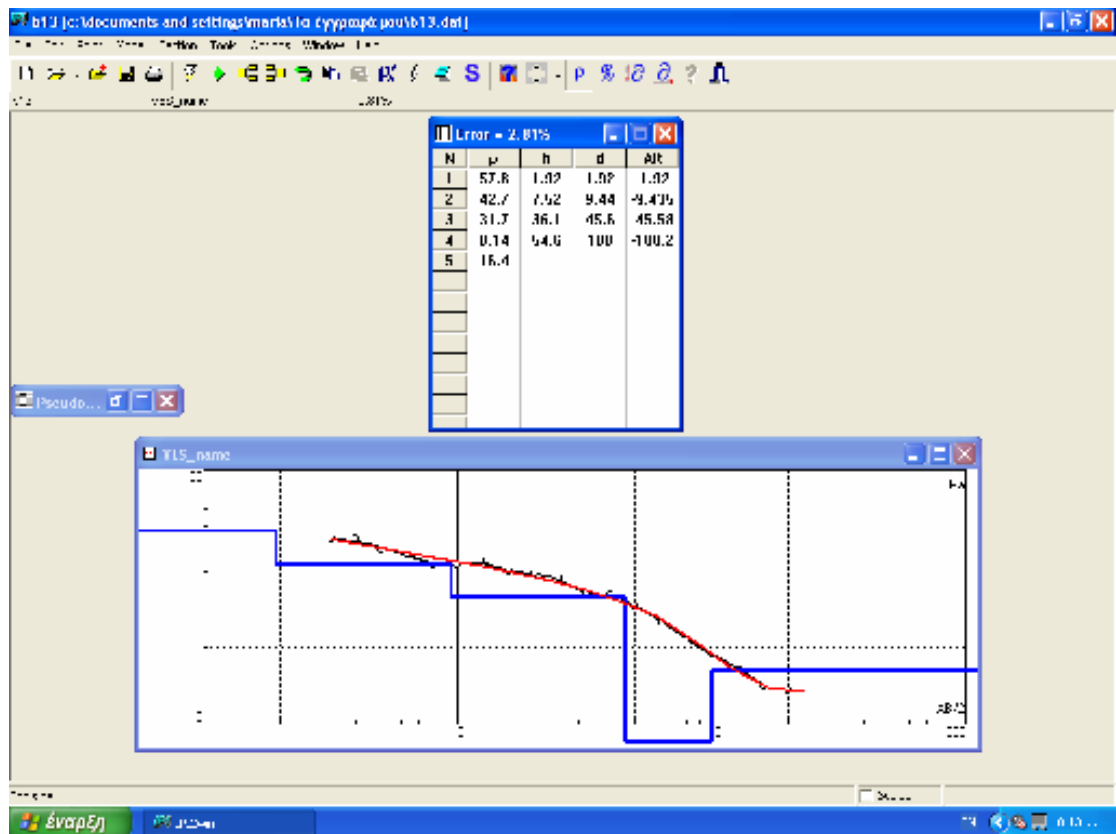
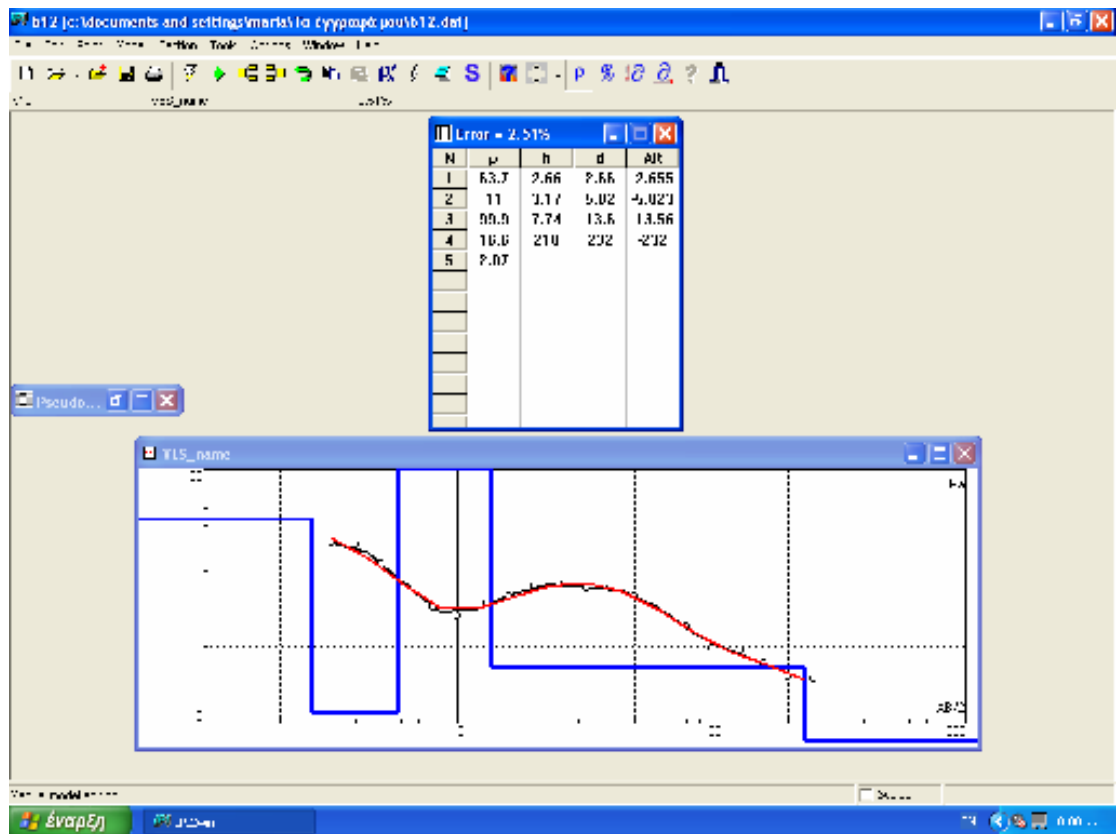


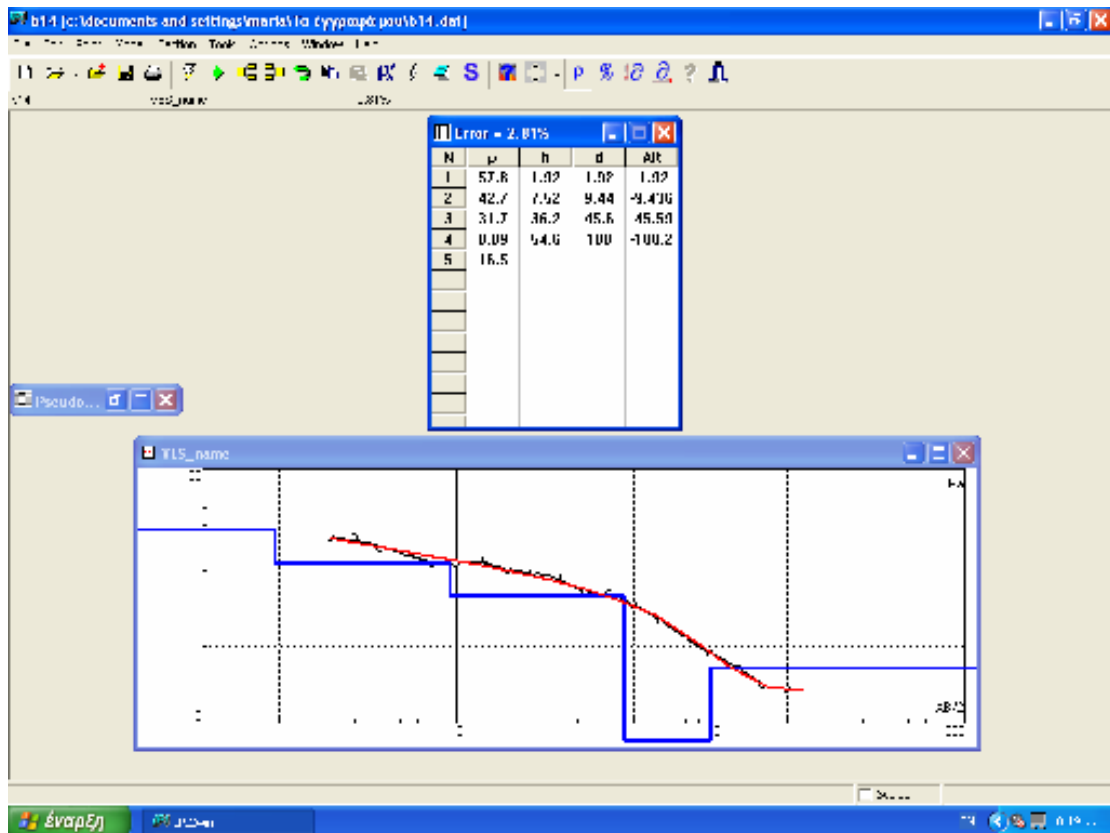










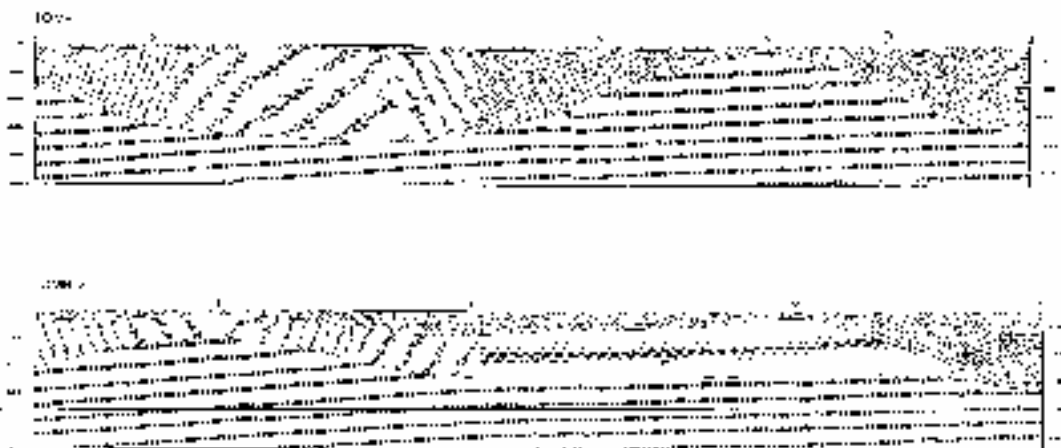


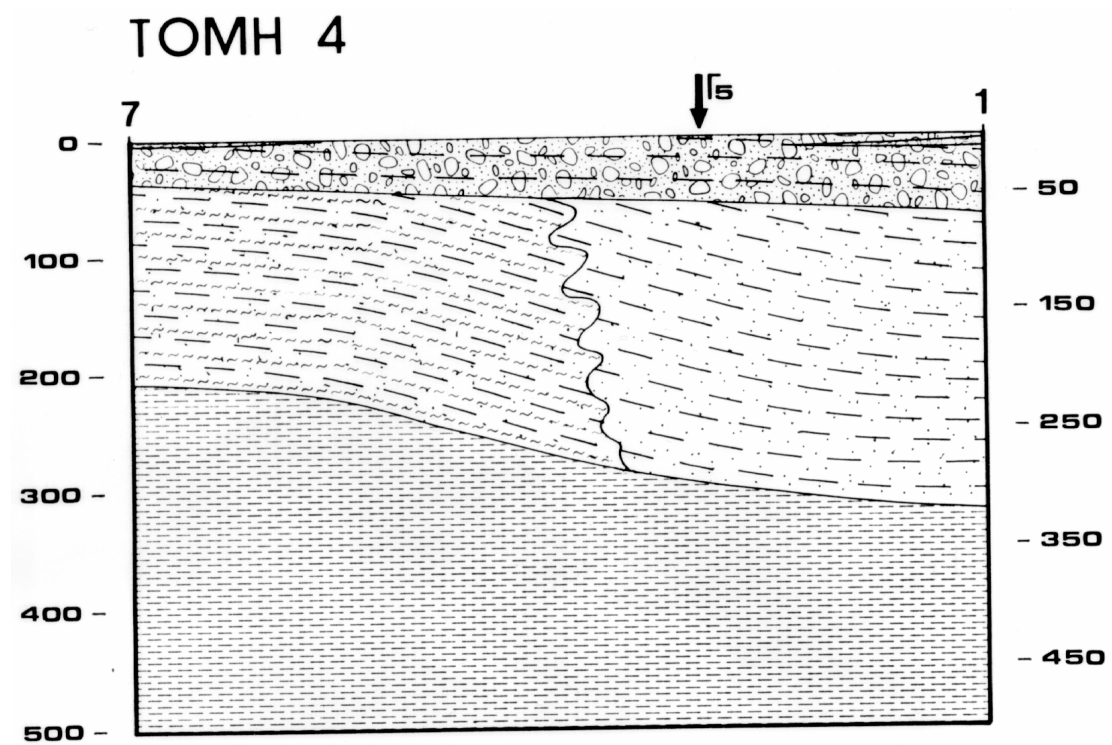
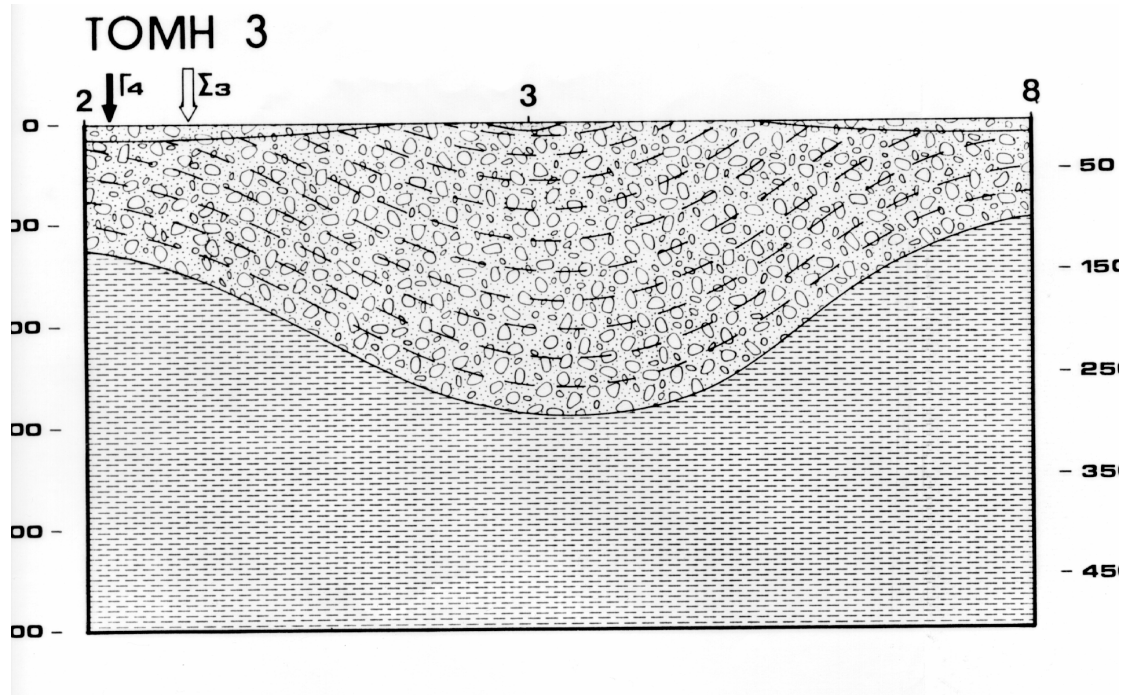
Τα στοιχεία ερμηνεύθηκαν χρησιμοποιώντας ένα αυτοματοποιημένο πρόγραμμα ερμηνείας (IPI 2 WIN) του Πανεπιστημίου της Μόσχας που γράφτηκε για PC.

- Ένας τίτλος βυθοσκόπησης χαρακτηρίζεται από το όνομα της περιοχής έρευνας που ακολουθείται από τον αριθμό βυθοσκόπησης. Διάφοροι τίτλοι βυθοσκόπησης έχουν ένα συγκεκριμένο σημείο που προσδιορίζει σε ποια ειδική επεξεργασία η βυθοσκόπηση μπορεί να είχε υποβληθεί. Το συγκεκριμένο σημείο "s" δείχνει ότι τα στοιχεία τομέων εξομαλύνθηκαν προτού να εκτελεσθεί η αντιστροφή, ένα συγκεκριμένο σημείο "φ" δείχνει ότι η τελευταία ειδική αντίσταση στρώματος καθορίστηκε σε κάποια τιμή, και ένα συγκεκριμένο σημείο "X" δείχνει ότι η βυθοσκόπηση S-γραμμής επεκτάθηκε χειρωνακτικά. Οποιαδήποτε ή όλα τα συγκεκριμένα σημεία μπορούν να συνδεθούν με τον αριθμό βυθοσκόπησης. Γενικά, μόνο οι ερμηνευμένοι τίτλοι βυθοσκόπησης θα έχουν συγκεκριμένα σημεία.

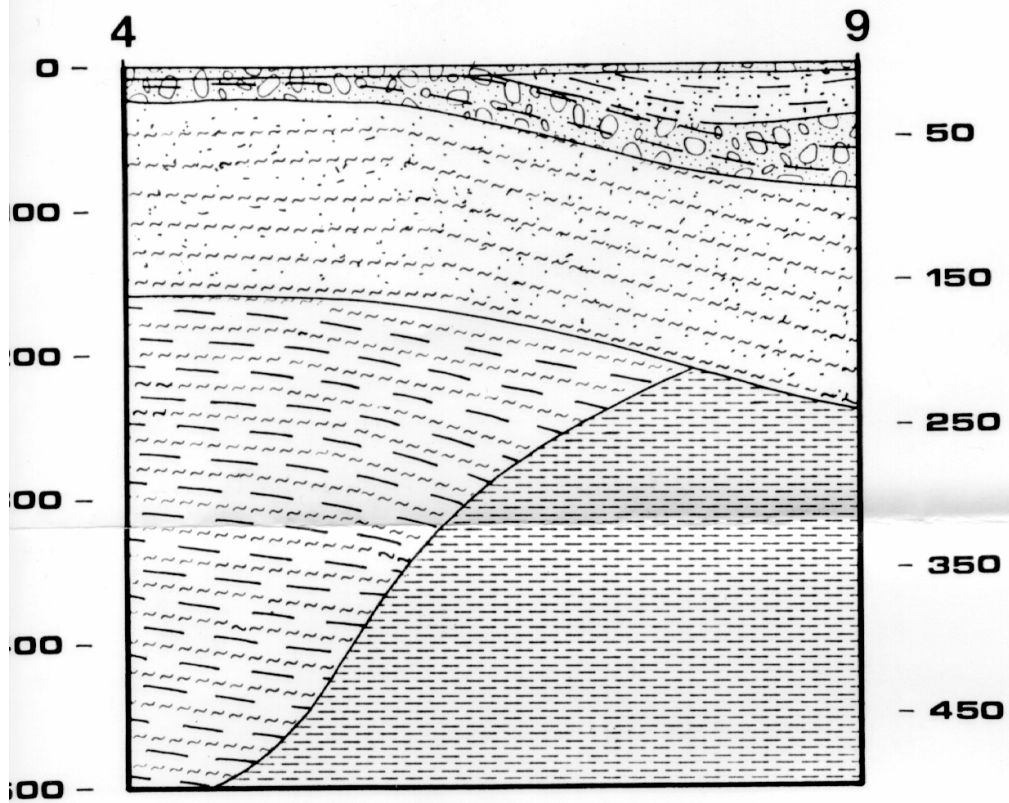
2. Μια ταξινόμηση σε πίνακα των AB/2 διαστημάτων ηλεκτροδίων (σε μέτρα και πόδια) και των αντίστοιχων φαινομενικών ειδικών αντιστάσεων (σε ωμόμετρα).
3. Ένα διλογαριθμικό διάγραμμα των δεδομένων του πεδίου. Κάθε θέση των δεδομένων σημείων που φτιάχτηκαν με το ίδιο διάστημα δυναμικού ηλεκτρόδιου (MN) συνδέονται με μια σταθερή γραμμή. Οι μετρήσεις έγιναν σε διαστήματα MN/2 των 0.6, 2, 20, 60 και 200 ft. ανάλογα με την περίπτωση.
4. Μια ταξινόμηση σε πίνακα της αυτόματα ερμηνευμένης διάταξης σε στρώματα, με τα βάθη σε μέτρα και πόδια και τις αντίστοιχες ειδικές αντιστάσεις στα ωμόμετρα.
5. Ένα διλογαριθμικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων του αυτόματου προγράμματος ερμηνείας. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα μετατοπισμένα – ψηφιοποιημένα στοιχεία πεδίου, η συνεχής καμπύλη αντιπροσωπεύει την καμπύλη βυθοσκόπησης που υπολογίζεται από την ερμηνευμένη διάταξη σε στρώματα, και η καμπύλη βήματος- λειτουργίας αντιπροσωπεύει την ερμηνευμένη διάταξη σε στρώματα.

Κατόπιν της ερμηνείας κατασκευάστηκαν οι γεωλογικές τομές με βάση τις αντιστάσεις βαθμονόμησης και του γεωλογικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή ενδιαφέροντος. Παρακάτω δίνονται όλες οι τομές που κατασκευάστηκαν.

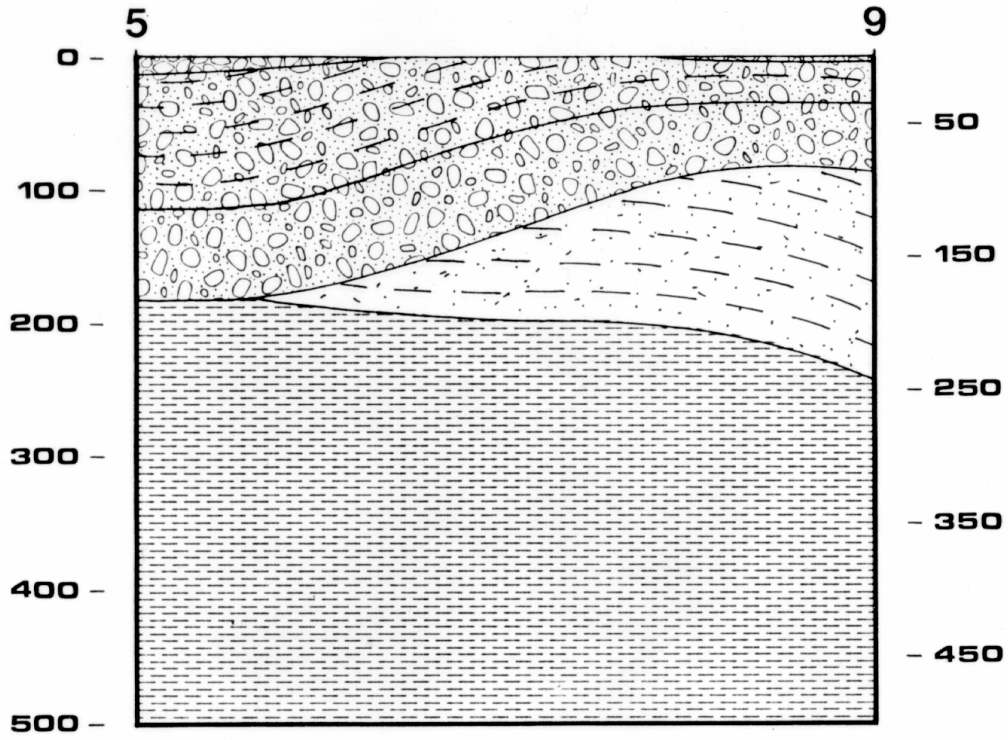




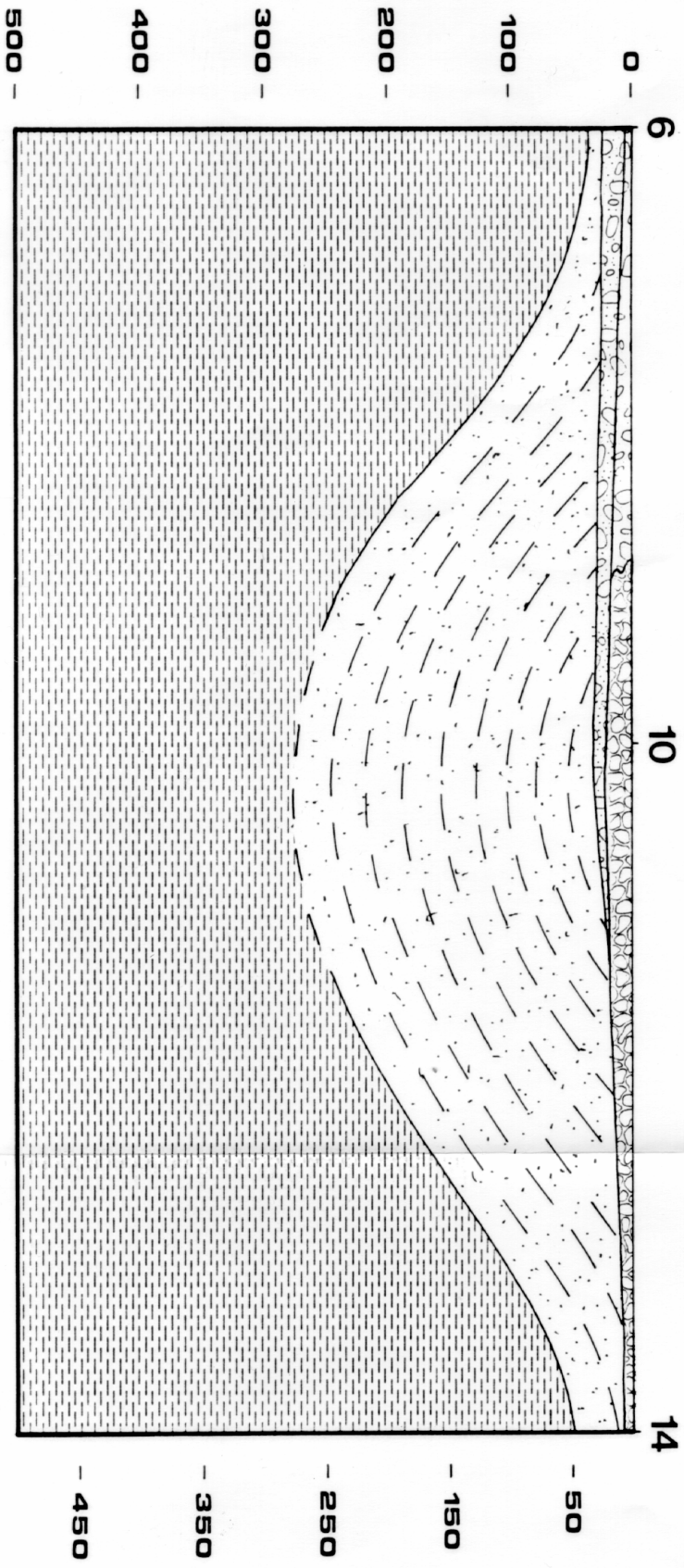
# TOMH 5



# TOMH 6

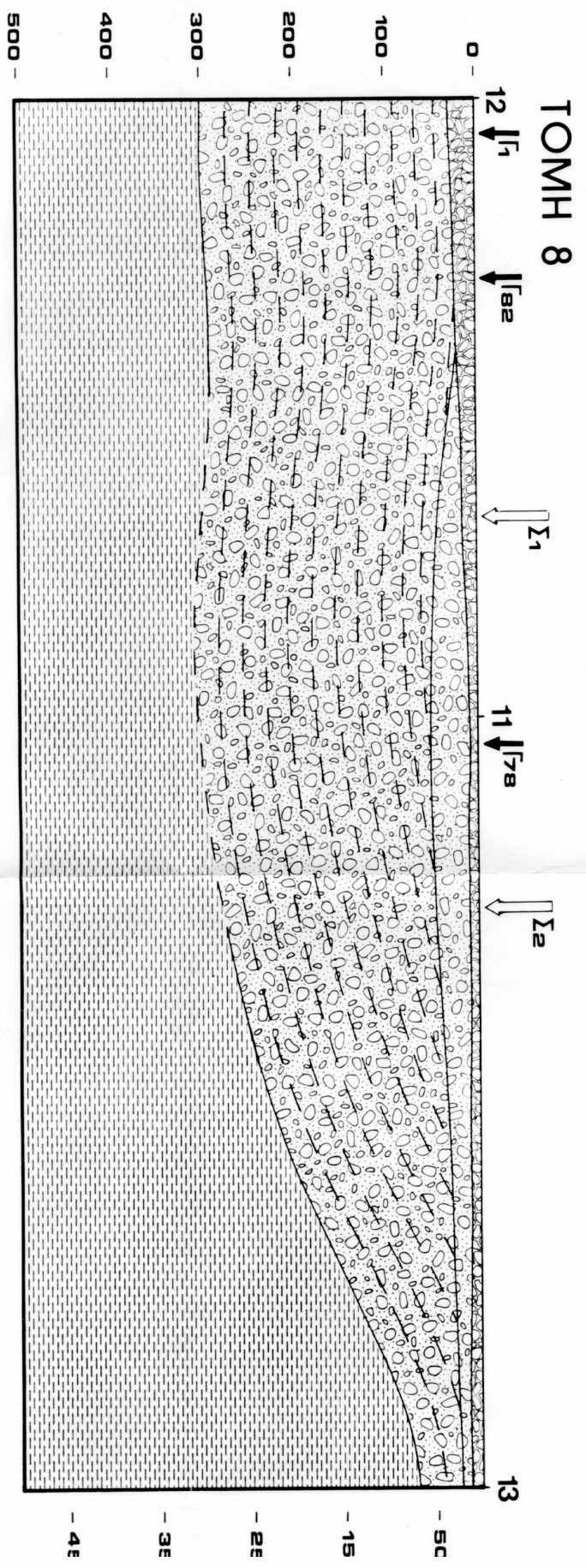


# TOMH 7









Όπως φαίνεται και στις τομές έγινε και διασυσχέτιση των αποτελεσμάτων με τα στοιχεία των γεωτρήσεων από τα οποία διέρχεται η εκάστοτε γεωλογική τομή.

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος των γεωλεκτρικών βυθοσκοπήσεων δίνεται να αντιμετωπίσει υδρογεωλογικά προβλήματα που εμφανίζονται σε ιζηματογενείς κυρίως αποθέσεις και σε «ηρεμα» τεκτονικά περιβάλλοντα.

## ABSTRACT

Resistivity techniques are well-established and widely used to solve a variety of geotechnical, geological and environmental subsurface detection problems (Ward, 1989). The purpose of the resistivity method is to measure the potential differences on the surface due to the current flow within the ground. Since the factors controls the current flow and conduction in to the soil (porosity, water distribution, etc.) are very variable, it should be born in mind while interpreting resistivity data that the measured resistivity values are not absolute but relative, and therefore only relative conclusions about the area's lithology can be made.

In the resistivity technique two current electrodes have to be used to insert current in to the ground and at the same time two different probes have to be used to measure the drop of potential. When doing VES measurements, electrodes are distributed along a line, centered about a midpoint that is considered the location of the sounding.

During the field work, 14 geoelectrical sounding (A#) (figure 3) were conducted applying the Schlumberger configuration because is the most time effective in terms of field work. A deep sounding equipment, powered by 500 Watt was used. The maximum distance between the midpoint of the arrangement and the current probe was 500 m.

The design of the measurements at the study area was made taking two factors into account. The location of the existing boreholes, because we intended to use them for calibrating our data and the complete coverage of the area by measurements. For that reason, 8 profiles (Pr#) are inscribed to represent the distribution of apparent resistivity in the area (figure 3). Thus, 2 N-S profiles with length of 3.5 Km are adopted. Pr1 consist of soundings A2, A3, A4, A5, A6 and A12 while Pr2 consist of soundings A7, A8, A9, A10 and A11. The rest of the profiles are designed to cross 2 initial sections. Thus, Pr3 consist of soundings A2 and A8, Pr4 consist of soundings A7 and A1, Pr5 consist of soundings A4 and A9, Pr6 consist of soundings A5 and A9, Pr7 consist of soundings A6, A10 and A14, Pr8 consist of soundings A12, A11 and A13.

All measured resistivity soundings were processed using the RESGRAPH program. This program uses an automatic way to approximate an initial resistivity

model with the observed data (Flathe, 1970). It works in iterative mode calculating at the end of each step a) an updated model of layer's thickness and resistivity and b) the misfit function between observed and calculated data. All resulting models, produced a low RMS relative error of the order of 0.038.

Boreholes  $\Gamma 78$  and  $\Gamma 82$  were used to calibrate our data. Thus, we correlate water-source formations with observed resistivity in depth. Except this valuable kind of information, we had the water supply and depth of number of boreholes assigned with the letter  $\Gamma$  and a number (figure 3).

After the interpretation of the data and grouping of the common formation's characteristics, the study area is separated in four sub-areas (figure 3). Before the detailed description of the areas we should clarify that in our case, bedrock is the impermeable clay. The characteristics of these areas are,

**Area A:** This area includes soundings A2, A3, A8, A7 and borehole  $\Gamma 4$ . According the resulted resistivity model, the correlation of soundings and the calibration of resistivity model with borehole  $\Gamma 4$ , we conclude the followings: At the depth of 100 m to 280 m (max depth at A3) the clay bedrock is encountered. Above the bedrock, we met a formation of sand, gravels and clay with maximum thickness of 280 m in sounding A3. The expected water supply is in proportion with borehole  $\Gamma 4$ .

**Area B:** Area B is eastern of area A and include soundings A7, A1 and borehole  $\Gamma 5$ . The bedrock is faced at the depth of 300 m. The overlying formation is consist of sandy clay and marl with totally thickness of the order of 250 m. The only permeable formation is extended from surface to the depth of 75 m. This layer consist of alternation of sand, gravels, clays and pebbles. The expected water supply is given in table 1 (borehole  $\Gamma 5$ ).

**Area C:** This area includes soundings A1, A4, A5, A6, A9, A10 as well as the borehole  $\Gamma 3$ . This area was not appear any interest because dominated by clays, marl, sand. The only interest formation is till the depth of 50 m but the water supply is limited.

**Area D:** This area is extended along a fracture zone as defined from the geological mapping in figure (1). The fracture is also visible from aerial photography as linear feature. Soundings A11, A12, A13 and boreholes  $\Gamma 82$ ,  $\Gamma 78$  and  $\Gamma 1$  are included. At the depth of 75 m to 285 m the bedrock is encountered. The overlying

formation (40 m thick in A13 and 250 m thick in A12) is consist of alternation of sand, gravels and clays. The upper formation is extended from the surface to the depth of 50 m and consists of sandy gravels. The water supply is increase to the west since the thickness of the overlying to the bedrock formation is increase from east to west. One scenario is that the existence of the referred fracture zone northern but near the area is provisioning water and this is also explain the water supply of boreholes Γ78, Γ82 and Γ1.