ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
Παράρτημα Χανίων

# Πτυχιακή Εργασία

**Θέμα Πτυχιακής:**
Σταθερή αντιστροφή δεδομένων της γεωφυσικής μεθόδου Βυθοσκόπησης παροδικών κυμάτων

**Επιβλέπων Καθηγητής:**
Παπαδόπουλος Ηλίας
Καλησπέρη Δέσποινα
Χλούπης Γεώργιος

**Σπουδαστές:**
Μπόζος Γεώργιος
Παπαδάκη Ελένη
Σκουριανόπουλος Κων/νος

Χανιά Μάιος 2009

Technological Educational Institute
of Crete-Branch of Chania

# Dissertation

**Dissertation Subject:**
Robust Inversion of 1-D TEM geophysical method

**SUPERVISOR PROFESSOR:**
PAPADOPOULOS ILIAS
KALISPERI DESPOINA
HLOUPIS GEORGIOS

**STUDENTS:**
BOZOS GEORGIOS
PAPADAKI ELENI
SKOURIANOPOULOS KON/NOS

CHANIA MAY 2009

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**..... 1
**1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**..... 3
**1.1 Σκοπός**..... 3
**1.2 Υπάρχοντα διαθέσιμα στοιχεία**..... 3
**2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ**..... 5
**2.1 Γεωγραφική θέση**..... 5
**2.2 Γεωλογική Δομή της Κρήτης**..... 7
**2.3 Γεωλογικά, Τεκτονικά και Υδρολιθολογικά στοιχεία περιοχής έρευνας**..... 8
**3. ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΗΝ ΥΠΕΔΑΦΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑ**..... 18
**3.1 Εισαγωγή**..... 18
**3.2 Φυσικές ιδιότητες**..... 19
**3.3 Γεωφυσικές Διασκοπήσεις**..... 19
**3.4 Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης**..... 20
**3.5 Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι**..... 20
**3.6 Εφαρμογές της ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης στον εντοπισμό υδατικών πόρων**..... 21
**3.6.1. Εντοπισμός υπόγειων διόδων νερού (παλαιοκοίτες)**..... 21
**3.6.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης στη χαρτογράφηση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού υδροφόρου ορίζοντα**..... 25
**3.6.3 Εφαρμογή της ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης στον εντοπισμό και χαρτογράφηση της υπόγειας στάθμης νερών**..... 26
**4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**..... 26
**4.1 Εισαγωγή**..... 26
**4.2 Σχέση Γεωλογίας και Αντίστασης**..... 27
**4.3 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος**..... 28
**4.4 Φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση**..... 29
**4.5 Μέθοδοι έρευνας**..... 31
**4.6 Βάθος διείσδυσης**..... 33
**5. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**..... 36
**5.1 Εισαγωγή**..... 36
**5.2 Ηλεκτρομαγνητικές βυθοσκοπήσεις**..... 36
**5.3 Βάθος διασκόπησης**..... 38
**5.4 Διεξαγωγή των μετρήσεων**..... 39
**5.5 Οργανα μετρήσεων**..... 42
**5.6 Σχεδιασμός της έρευνας**..... 46
**5.7 Πηγές σφαλμάτων στις μετρήσεις**..... 47
**5.8 Συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων**..... 48
**5.9 Εφαρμογές της μεθόδου**..... 61

**6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ** ..... 62
**6.1 Προγραμματισμός και Λήψη Γεωφυσικών Μετρήσεων** ..... 62
**6.2 Εξοπλισμός** ..... 70
**6.3 Επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης**... 70
**6.3.1 Μονοδιάστατη (1D) ερμηνεία των αποτελεσμάτων**..... 70
**6.3.2 Δισδιάστατη (2D) απεικόνιση των αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα** ..... 75
**Παράρτημα – Μονοδιάστατη παρουσίαση πρωτογενών δεδομένων** ..... 78
**7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**.....105

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας έκθεσης είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την εκτέλεση, συναξιολόγηση και ερμηνεία των γεωλογικών, τεκτονικών, υδρογεωλογικών και γεωφυσικών δεδομένων ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης παροδικών πεδίων (Time Domain Electromagnetic Method - TDEM) όπως αυτά προέκυψαν από τη χαρτογράφηση υπαίθρου και την αναγνώριση ρηξιγενών ζωνών όπως και την συλλογή όλων των γεωφυσικών δεδομένων. Η περιοχή ενδιαφέροντος βρίσκεται εντός του Δημοτικού Διαμερίσματος Απτέρων που υπάγεται διοικητικά στο Δήμο Σούδας, Χανίων.

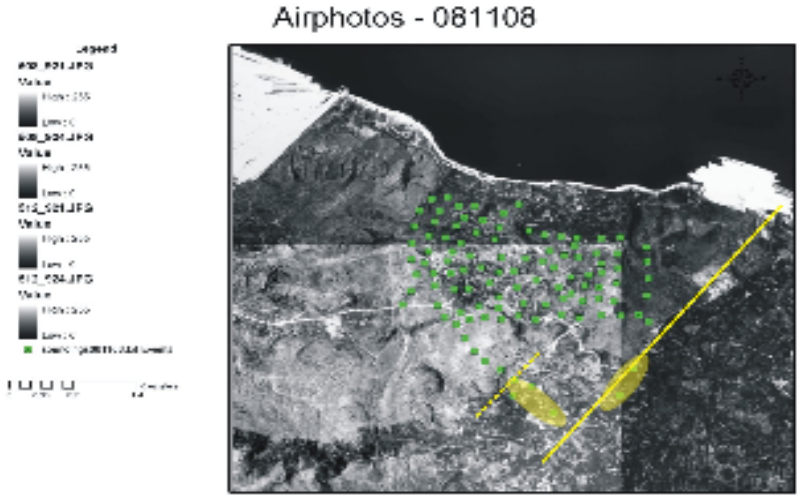
## 1.1 Introduction

The purpose of this report is to present the results from the execution, synaxiologisi and interpretation of geological, tectonic, hydro geological and geophysical data to prospect of transient electromagnetic fields (Time Domain Electromagnetic Method - TDEM) as they emerged from the rural mapping and identification fault areas as the collection of geophysical data. The area of interest lies within the municipal district Aptera under management in the Municipality of Souda, Chania.

## 1.2 Υπάρχοντα διαθέσιμα στοιχεία

Διαθέσιμα στοιχεία αποτέλεσαν όλες οι πληροφορίες που μας χορήγησαν οι κάτοικοι της περιοχής έρευνας και οι οποίοι είναι οι καλύτεροι φυσιογνώστες και παρατηρητές ειδικά στις περιπτώσεις που η μελέτη αφορά την εύρεση υπόγειου υδροφόρου. Επιπλέον, οι μηχανικοί του Δ. Σούδας μας έδωσαν πληθώρα πληροφοριών που σχετίζονται τόσο με την αστοχία επιφανειακών τεχνικών (θεμελιώσεις σπιτιών και τοίχων αντιστήριξης) λόγω επιφανειακής κίνησης υδάτων όσο και με θέματα παλιών προσπαθειών από δημόσιους ή ημικρατικούς φορείς για ανόρυξη υδρογεωτρήσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Οι κάτοικοι της περιοχής και οι μηχανικοί του Δήμου μας υπέδειξαν τις θέσεις των επιφανειακών εκφορτίσεων του υπόγειου υδροφόρου (πηγές) οι θέσεις των οποίων αποτυπώθηκαν σε GPS ακριβείας.

Σκοπός της συλλογής όλων των προαναφερόμενων δεδομένων είναι η κατανόηση του υδρογεωλογικού καθεστώτος πριν την οποιαδήποτε εκτέλεση μετρήσεων υπαίθρου. Αποδεικνύεται ότι τόσο οι θέσεις των αστοχιών σε επιφανειακά τεχνικά όσο και οι θέσεις των εκφορτίσεων των πηγών παρουσιάζουν μια γραμμικότητα τα στοιχεία της οποίας αβίαστα συσχετίζονται με την ύπαρξη τεκτονικών στοιχείων που ορίζουν εν μέρει τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της υπόγειας υδροφορίας.




Σχήμα 1.1. Απόσπασμα αεροφωτογραφίας της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος. Στη φωτογραφία φαίνονται οι θέσεις των μετρήσεων με μικρά πράσινα τετράγωνα, με κίτρινες γραμμές δίνονται τα ρήγματα διαμέσου των οποίων πραγματοποιείται η υφαλμύρωση στο Στύλο και με κίτρινες διαφανείς ελλείψεις φαίνονται οι περιοχές στις οποίες οι ηλεκτρομαγνητικές βυθοσκοπήσεις εντόπισαν υψηλή αγωγιμότητα – υψηλή παρουσία χλωριόντων.

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, επιπλέον έχουν παρουσιαστεί φαινόμενα υφαλμύρωσης τα οποία έχουν επηρεαστεί σε περιοχές που βρίσκονται έως και 2.5 Km νοτιότερα της ακτογραμμής. Ειδικότερα, στην περιοχή του Στύλου, σε γεωτρήσεις που έχουν εκτελεστεί έχουν καταγραφεί πολύ υψηλά επίπεδα χλωριόντων.

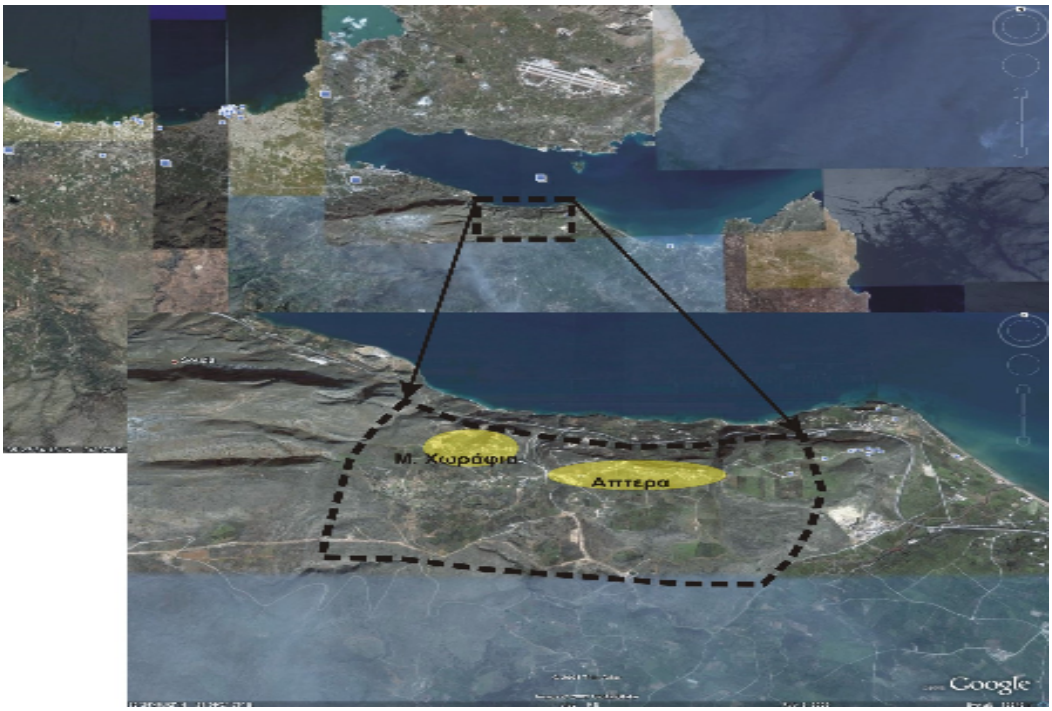
Όπως φαίνεται και στο σχήμα (1.1) οι μετρήσεις ξεκίνησαν από την περιοχή ανατολικότερα της περιοχής ενδιαφέροντος με σκοπό να χαρτογραφήσουμε το μέτωπο υφαλμύρωσης ειδικότερα σε θέσεις στις οποίες δεν υπάρχουν στοιχεία

χημικών αναλύσεων από γεωτρήσεις. Παρατηρήθηκε ότι στις μετρήσεις που καλύπτονται από την διαφανής κίτρινη έλλειψη καταγράφηκε ιδιαίτερα χαμηλή αγωγιμότητα, ενδεικτικό φαινομένου υφαλμύρωσης. Λεπτομερέστερη ανάλυση θα δοθεί στη συνέχεια στο κεφάλαιο της ανάλυσης και ερμηνείας των μετρήσεων.

# 2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

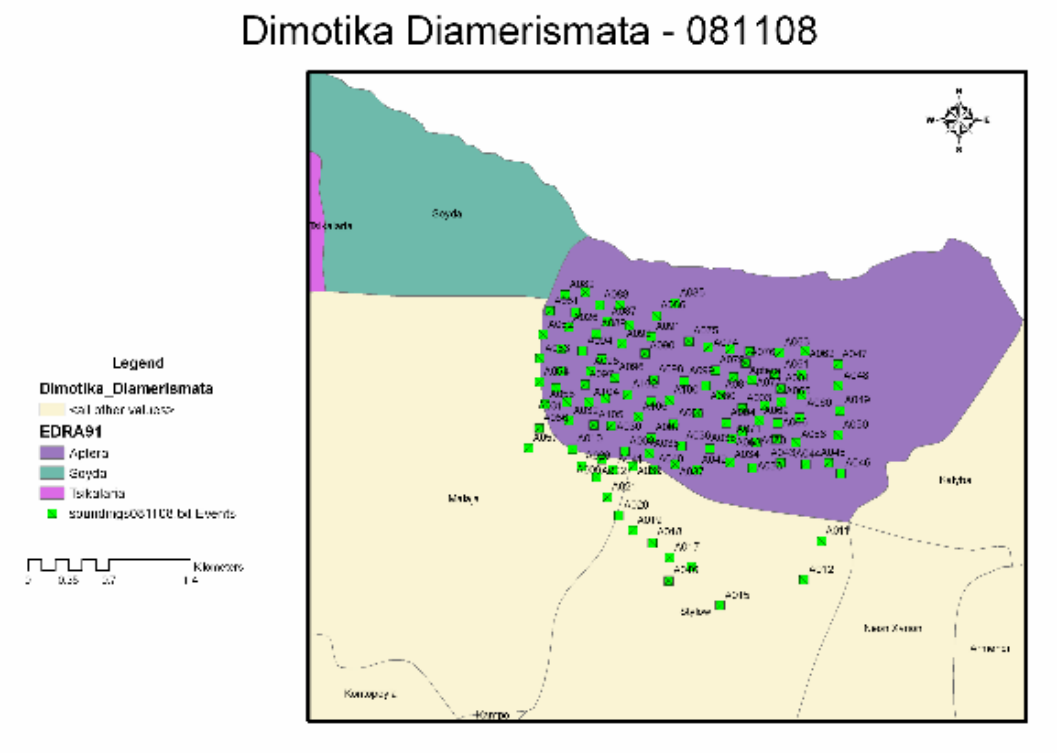
## 2.1 Γεωγραφική θέση

Η περιοχή ενδιαφέροντος βρίσκεται περί τα 12 Km από το κέντρο των Χανίων και καταλαμβάνει περί τα 5.4 $Km^2$. Η απόσταση του νοτιότερου σημείου του καννάβου των μετρήσεων από την ακτογραμμή είναι περί τα 1.78 Km. Η περιοχή έρευνας περιλαμβάνει τους οικισμούς/χωριά των Απτέρων και τα Μεγάλα Χωράφια τα οποία βρίσκονται εντός των διοικητικών ορίων του Δ.Δ. Απτέρων.




Σχήμα 2.1. Απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας της περιοχής ενδιαφέροντος από το GoogleEarth (4.0.2742). Στη φωτογραφία με διακεκομμένο πλαίσιο υποδεικνύεται η περιοχή ενδιαφέροντος ενώ στη φωτογραφία δίνονται επίσης οι θέσεις των δύο οικισμών. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (2.1) το Δ.Δ. Απτέρων συνορεύει με τα Δ.Δ. της Σούδας, της Μαλάξας, του Στύλου, του Νέου Χωριού και των Καλύβων. Εκτός του Δ.Δ. Σούδας όλα τα υπόλοιπα Δ.Δ. ανήκουν σε διαφορετικούς Δήμους πράγμα περιοριστικό για τη μελέτη αφού η εύρεση της θέσης

ανόρυξης της γεώτρησης έπρεπε οπωσδήποτε να βρίσκεται εντός των διοικητικών ορίων του Δ.Δ. Απτέρων όπως φαίνεται κα στο σχήμα (2.2). Όπως θα αναφερθεί με λεπτομέρεια και στη συνέχεια, η επιλογή και χωροθέτηση των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με γνώμονα τα όρια του Δ.Δ. Απτέρων όπως και τις υπαρκτές ζώνες Α και Β της αρχαιολογίας που νομοθετικά έχουν οριστεί λόγω της εγγύτητας του αρχαιολογικού χώρου των Απτέρων. Στις ζώνες αυτές δεν θα μπορούσε να υπάρξει καμιά ανθρωπογενής παρέμβαση για αυτό και η έρευνα εστιάστηκε στις περιοχές του Δ.Δ. Απτέρων που βρίσκονται δυτικότερα του αρχαιολογικού χώρου και νοτιότερα του εθνικού οδικού δικτύου.




Σχήμα 2.2. Στο χάρτη απεικονίζονται τα Δημοτικά Διαμερίσματα της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος. Επιπλέον απεικονίζονται οι θέσεις των γεωηλεκτρομαγνητικών διασκοπήσεων και η κατανομή τους στο χώρο έρευνας.

## 2.2 Γεωλογική Δομή της Κρήτης

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

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

i. **Τα κατώτερα καλύμματα**, στα οποία ανήκουν :
   - η Ενότητα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων,
   - η Ενότητα του Τρυπαλίου και
   - το Τεκτονικό Κάλυμμα των Φυλλιτών-Χαλαζιτών.

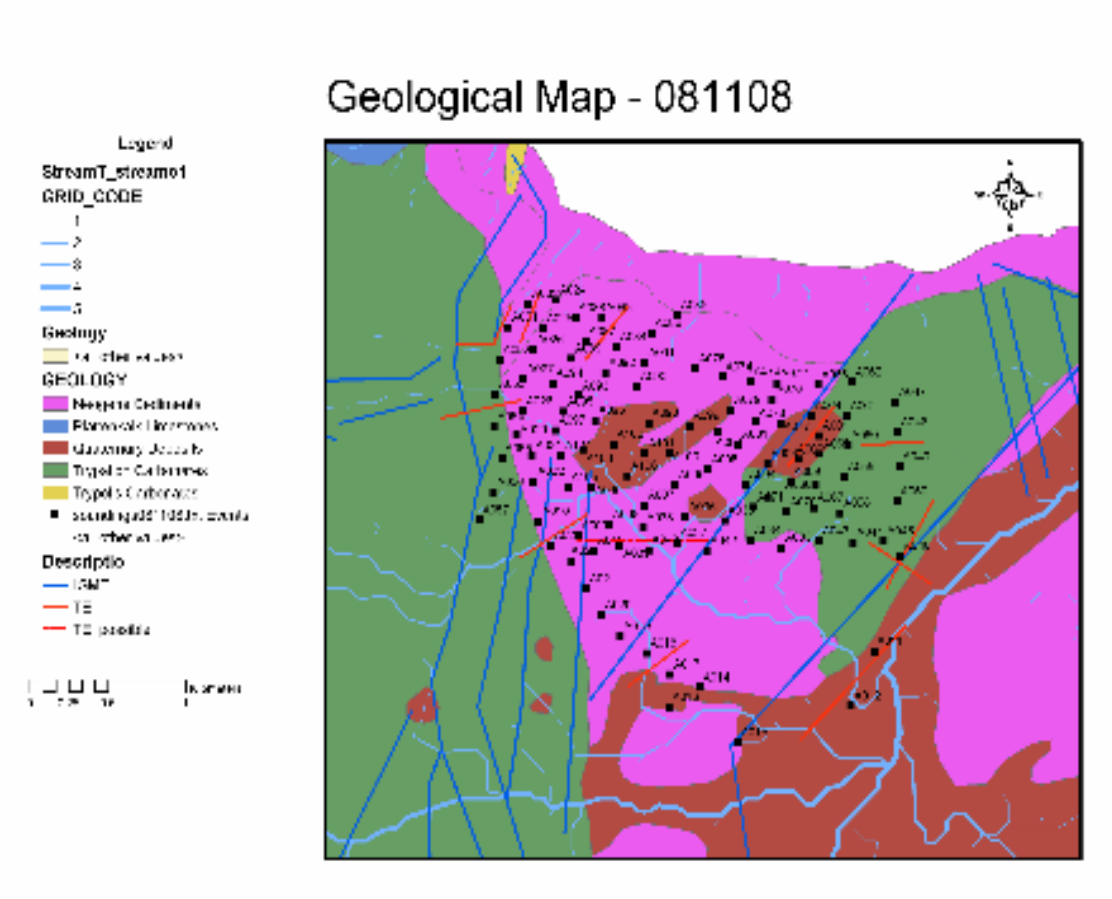
ii. **Τα ανώτερα καλύμματα**, τα οποία αποτελούνται από αμεταμόρφωτα ανθρακικά καλύμματα στη βάση τους και προ Ολιγοκαινικά μεταμορφωμένα στην κορυφή:
   - τα αμεταμόρφωτα ανθρακικά καλύμματα αποτελούν το τεκτονικό κάλυμμα Γαβρόβου-Τριπόλεως και το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου και
   - τα προ-Ολιγοκαινικά μεταμορφωμένα καλύμματα συνιστούν το κάλυμμα του Βάτου-Μιαμού-Άρβης (οφιολιθικό melange), των Αστερουσίων (κρυσταλλικά πετρώματα) και των Οφιολίθων.

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

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

## 2.3 Γεωλογικά, Τεκτονικά και Υδρολιθολογικά στοιχεία περιοχής έρευνας

Από την επεξεργασία των στοιχείων της γεωλογικής χαρτογράφησης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, στην ευρύτερη περιοχή του έργου, προκύπτει ότι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την περιοχή ενδιαφέροντος αντιστοιχούν στα κατώτερα καλύμματα της Κρήτης και στα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς (σχήμα 2.3).




Σχήμα 2.3. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής ενδιαφέροντος. Η περιοχή δομείται από Τεταρτογενή ιζήματα και νεογενείς σχηματισμούς και βαθύτερα εντοπίζονται οι ασβεστολιθικές σειρές του Τρυπαλίου, της Τριπόλεως και αυτή των πλακωδών ασβεστόλιθων. Στο χάρτη παρουσιάζονται επίσης, οι θέσεις των ρηγμάτων του ΙΓΜΕ τα οποία επιβεβαιώθηκαν και επικαιροποιήθηκαν.

Κατά τη γεωλογική χαρτογράφηση εντοπίστηκαν και νέα ρήγματα τα οποία δεν υπήρχαν σε κάποιο γεωλογικό, τεκτονικό ή υδρογεωλογικό χάρτη της περιοχής και τα οποία παρουσιάζονται ως κόκκινες συνεχείς ή διακεκομμένες γραμμές. Στο χάρτη

περιλαμβάνεται επίσης το υδρογραφικό δίκτυο και το δίκτυο συγκέντρωσης επιφανειακών υδάτων όπως προέκυψε από την εφαρμογή ειδικών φίλτρων πάνω στο ψηφιακό υψομετρικό υπόβαθρο της περιοχής έρευνας το οποίο όπως φαίνεται και στο χάρτη συμφωνεί με τη γενικότερη τεκτονική δομή της περιοχής.

Στη συνέχεια δίνεται αναλυτική περιγραφή τους με σειρά όμοια με αυτήν της στρωματογραφικής τους διάταξης από τα κατώτερα προς τα ανώτερα μέλη.

1. **Ενότητα Πλακωδών Ασβεστόλιθων**. Αποτελεί μια από τις πλέον γνωστές γεωλογικές ενότητες της Κρήτης που ανήκει στα κατώτερα καλύμματα και δομεί μεγάλο μέρος των Λευκών Ορέων. Στην περιοχή μελέτης αποτελεί τη βαθύτερη εμφανιζόμενη ενότητα και συνιστά το γεωλογικό υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής έρευνας.

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

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

   Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιγράψαμε, χαρακτηρίζονται από τη σταθερή και ομοιόμορφη λιθοφασική τους εξέλιξη, αποτελώντας πελαγικά ιζήματα που σχηματίστηκαν σε ήρεμο περιβάλλον μεγάλου βάθους κατά τη χρονική περίοδο Ιουρασικού και νεότερα.
2. **Ενότητα Τρυπαλίου**. Πάνω στην ενότητα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων μέσω κυρίως τεκτονικών επαφών εμφανίζεται επωθημένη η ανθρακική ενότητα του Τρυπαλίου που αναπτύσσεται και στη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης, με τα γνωστά σε όλους γκριζότεφρα και βραχώδη πετρώματά της, που

χαρακτηρίζονται από το έντονο τραχύ τους ανάγλυφο και από τις πολυάριθμες καρστικές δομές.

Τα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας αυτής δομούν όλο το δυτικό και βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου μέσω τεκτονικής επαφής συνδέονται πλέον με τους μαργαΐκούς ασβεστόλιθους τους νεογενούς.

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

- Κατώτερα στρωματογραφικά τμήματα: Λεπτοπλακώδεις έως στρωματώδεις υπόλευκοι, λευκότεφροι και σκοτεινότεφροι ανακρυσταλλωμένοι **ασβεστόλιθοι και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι,** που κατά θέσεις μοιάζουν με τους Πλακώδεις Ασβεστόλιθους, με τη διαφορά ότι δεν φέρουν πυριτόλιθους.
- Μεσαία και ανώτερα στρωματογραφικά τμήματα: Λευκότεφροι έως τεφροί ασβεστόλιθοι και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι που παρουσιάζονται ανακρυσταλλωμένοι και βιτουμενούχοι και **ανθρακικά κροκαλολατυποπαγή** που παρουσιάζονται σε μαζώδη ανάπτυξη και χαρακτηρίζουν την εν λόγω ενότητα.

3. **Νεότερα ιζήματα Νεογενούς.** Πάνω στους προορογενετικούς σχηματισμούς που ήδη περιγράψαμε επικάθονται με στρωματογραφική ασυμφωνία ή συνδέονται με τεκτονικές επαφές, τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς. Ανάλογα με τα λιθοφασικά τους χαρακτηριστικά τα κατατάσσουμε στα ακόλουθα μέλη που περιγράφουμε με σειρά όμοια της στρωματογραφικής τους διάταξης από τα κατώτερα προς τα ανώτερα μέλη:

   - <u>Ασβεστομαργαΐκή σειρά.</u> Πρόκειται για σχηματισμό ηλικίας Άνω Μειόκαινου ως Κάτω Πλειόκαινου, που αποτελείται κυρίως από τους συμπαγείς λευκοκίτρινους έως λευκόφαιους, υφαλογενείς και βιοκλαστικούς **μαργαΐκούς ασβεστόλιθους** και ασβεστολιθικές ψαμιτομάργες. Παρουσιάζονται με χαρακτηριστική παχυστρωματώδη ανάπτυξη, με μικρές γωνίες κλίσεων των στρωσιγενών τους επιπέδων που έχουν διευθύνσεις βορειοανατολικές-ανατολικές.
   - <u>Μαργαΐκή σειρά.</u> Η σειρά αυτή αποτελείται στο σύνολο της σχεδόν από

Πλειοκαινικής ηλικίας άσπρες-κιτρινωπές παχυστρωματώδεις και μαζώδεις **μάργες** που στους ανώτερους ορίζοντες μεταπίπτουν σε λευκοκίτρινους ψαμμιτομάργες.

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

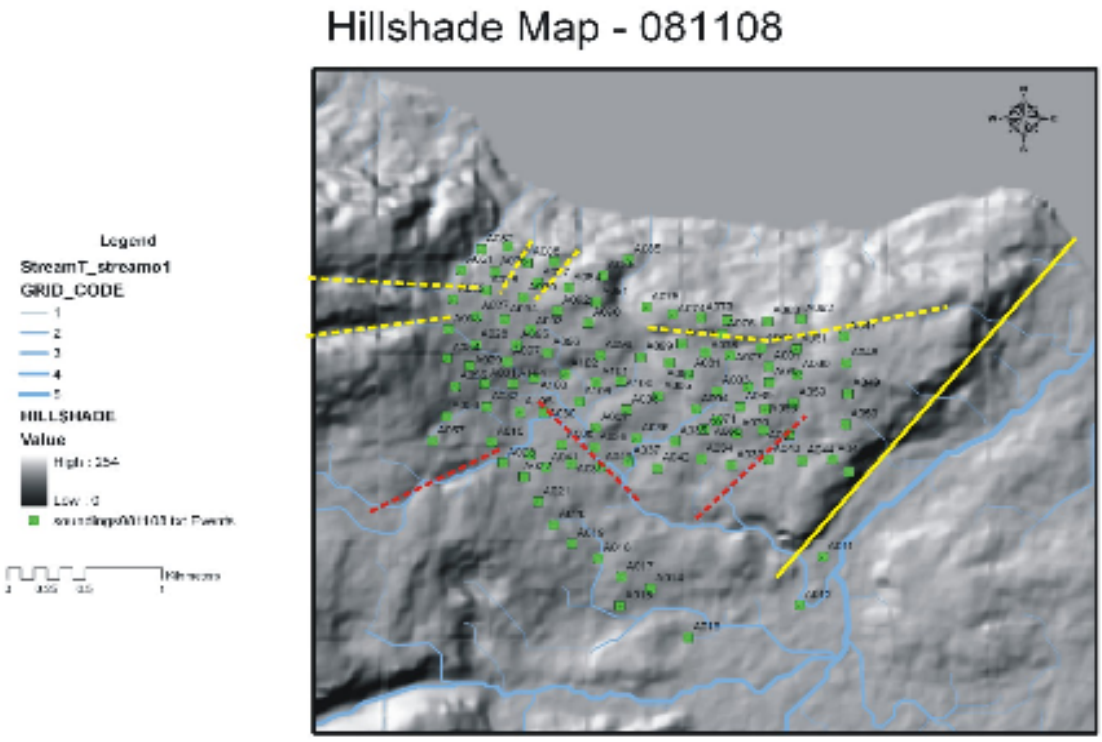
   **Αποθέσεις ερυθρογής** συναντάμε συνεχώς με μικρές ή και μεγαλύτερες χαρακτηριστικές εμφανίσεις, μέσα σε μικρούς και μεγάλους καρστικούς θύλακες που σχηματίζονται στα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας του Τρυπαλίου και περισσότερο στους μαργαΐκούς ασβεστόλιθους.

Επιπλέον, στην περιοχή έχουν καταγραφεί περί τα δεκαπέντε (15) ρήγματα τα οποία έχουν δημιουργήσει μια πολύπλοκη γεωλογία και σύνθετη υδρογεωλογία (σχήμα 2.3). Στο χάρτη του ΙΓΜΕ έχουν καταγραφεί δέκα (10) ρήγματα από τα οποία τέσσερα (4) έχουν διεύθυνση Β-Ν και εντοπίζονται στο δυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας. Δύο (2) έχουν διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και εντοπίστηκαν στο ανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας στην περιοχή που βρίσκεται η αρχαία Άπτερα. Τέσσερα (4) άλλα ρήγματα έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και βρίσκονται ομοίως στην περιοχή της αρχαίας Απτέρας. Επιπλέον, κατά τη γεωλογική χαρτογράφηση που το εργαστήριο έκανε πρωθύστερα της γεωφυσικής έρευνας, εντοπίστηκαν άλλα δύο (2) ρήγματα με διεύθυνση Α-Δ τα οποία και δημιούργησαν τον αυχένα πάνω στον οποίο βρίσκονται οι οικισμοί των Απτέρων και Μ. Χωράφια.

Τέλος, με σκοπό να εξάγουμε το μέγιστο των πληροφοριών που μπορούν να μας δώσουν δορυφορικές εικόνες ή αεροφωτογραφίες της περιοχής ενδιαφέροντος, από επεξεργασία του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου προέκυψε ο χάρτης κλίσεων από τον οποίο επιλέξαμε κάποιες γραμμικές δομές οι οποίες υποθέσαμε ότι μπορεί να είναι τεκτονικές ζώνες. Από το χάρτη αυτό έγινε υπολογισμό των διευθύνσεων ροών των επιφανειακών υδάτων και προέκυψε ένα υδρογραφικό δίκτυο το οποίο δεν απεικονίζει μόνο το υπάρχον υδρογραφικό δίκτυο αλλά και πιθανές άλλες γραμμικές δομές που μπορούν με ασφάλεια να χαρακτηριστούν ως τεκτονικές γραμμές. Πρέπει πάντα να έχουμε υπόψην μας ότι η μορφή του υδρογραφικού δικτύου πολλές φορές

υποκρύπτει τη τεκτονική μιας περιοχής.

Κατόπιν τούτου, προέκυψε ο χάρτης (2.4) ο οποίος απεικονίζει πιστοποιημένα ρήγματα τα οποία είτε προκύψαν από το ανάγλυφο (κίτρινες γραμμές), είτε από το υδρογραφικό δίκτυο (κόκκινες γραμμές). Επειδή όλη αυτή η δουλειά προηγήθηκε της γεωφυσικής μελέτης και απεικόνισης αποδείχθηκε και επιβεβαιώθηκε κατόπιν της γεωφυσικής έρευνας ότι οι υποθέσεις μας για τα προαναφερόμενα τεκτονικά στοιχεία, ήταν αληθής.




Σχήμα 2.4. Χάρτης ανάγλυφου της περιοχής έρευνας. Στο χάρτη απεικονίζονται τεκτονικές γραμμές (με κίτρινο είναι όσα στοιχεία προκύψαν από μεταβολές του ανάγλυφου και με κόκκινο χρώμα ότι προέκυψε με βάση το υδρογραφικό δίκτυο) που βρέθηκαν από την επεξεργασία της εικόνας. Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώθηκαν από τη γεωλογική χαρτογράφηση και τις γεωφυσικές διασκοπήσεις.

Από γεωτεχνικής και σεισμοτεκτονικής απόψεως θα μπορούσαμε να χωρίσουμε τα πετρώματα σε δύο κατηγορίες όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (2.5),

- **mr** : μάρμαρα, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και σιπολίνες – σχηματισμοί με μεγάλο πάχος και υψηλή συνεκτικότητα που συνιστούν το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής. Οι αναμενόμενες ταχύτητες των επιμηκών κυμάτων κυμαίνονται μεταξύ των, Vp=4300-6000 m/s με μέση πυκνότητα που κυμαίνεται από, ρ=2.5-2.96 g/cm$^3$.

- **N** : μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, αργιλλούχες μάργες, άργιλλοι, άμμοι, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή νεογενούς, και κατά θέσεις πλειστοκαινικής ηλικίας. Τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά κυμαίνονται ανάλογα με τη λιθολογική φάση που επικρατεί. Συνεκτικότητα μέτρια. Οι άργιλλοι χαρακτηρίζονται συχνά από αξιόλογη συμπιεστικότητα, οι δε μάργες παρουσιάζουν καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Δεν απαντάται υδροφόρος ορίζοντας ενώ το πάχος φτάνει μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα. Οι αναμενόμενες ταχύτητες των επιμηκών κυμάτων κυμαίνονται μεταξύ των, Vp=1800-3500 m/s με μέση πυκνότητα που κυμαίνεται από, ρ=2.2-2.7 g/cm$^3$.




Σχήμα 2.5. Απόσπασμα του γεωτεκτονικού χάρτη της Ελλάδος, κλίμακας 1:200.000. Με διακεκομμένες γραμμές ορίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε κατηγοριοποίηση των σχηματισμών με βάση τα υδρολιθολογικά τους χαρακτηριστικά και τις υδραυλικές (περατότητα) τους ιδιότητες (σχήμα 2.6). Έτσι, η περιοχή μας δομείται από αδιαπέρατους (I2) σχηματισμούς, υψηλά διαπερατούς σχηματισμούς (K1), μέσης (P1) διαπερατότητας και μικρής (P3) διαπερατότητας σχηματισμούς.

Ειδικότερα, στην περιοχή εντοπίζονται οι παρακάτω υδρολιθολογικές ενότητες,

**ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ**

- **I2** : Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας.

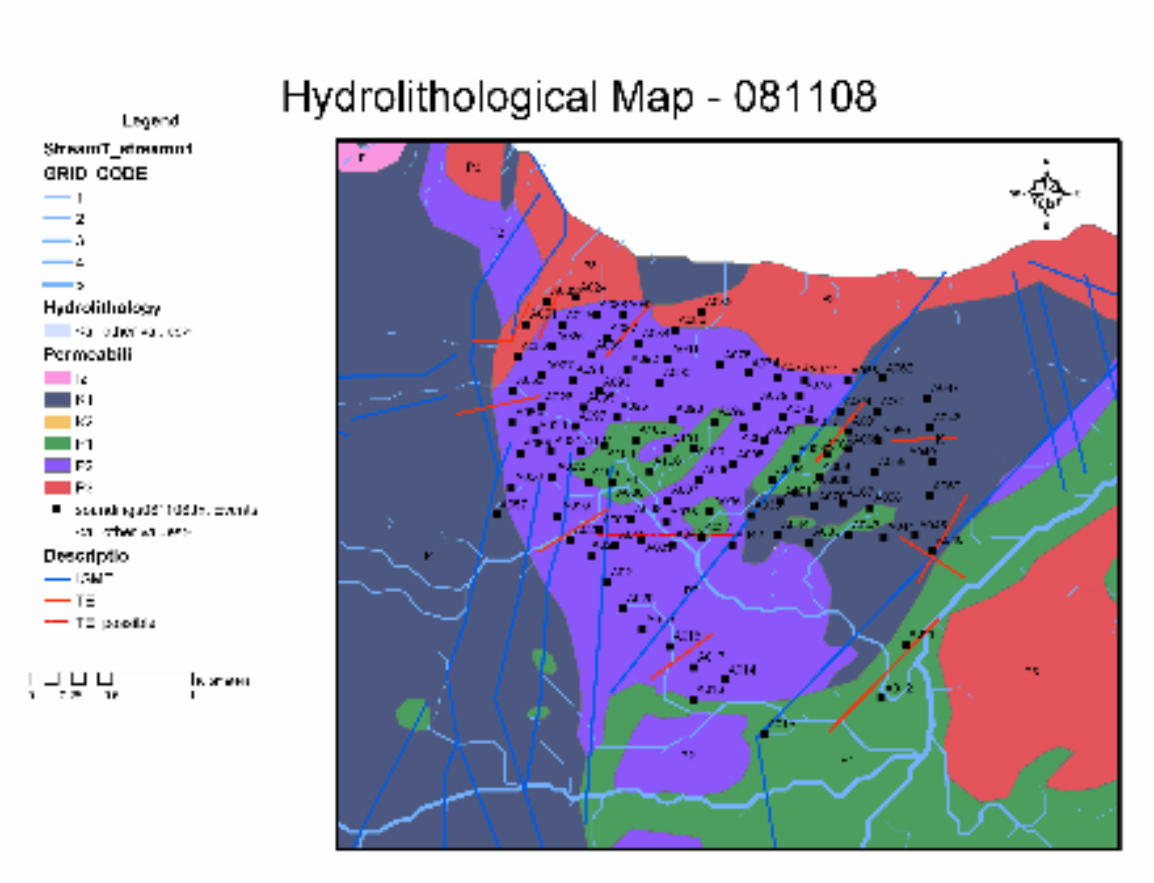
  Κατατάσσονται εδώ τα πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα των διαφόρων ζωνών και καλυμμάτων. Κατά θέσεις στους σχηματισμούς αυτούς τόσο εξαιτίας του έντονου κερματισμού τους όσο και εξαιτίας της πετρολογικής σύνθεσης τους (π.χ. εναλλαγές χαλαζιτών και μαρμάρων) αναπτύσσονται επιμέρους τοπικού χαρακτήρα υδροφορίες.

**ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ**

- **K1** : Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Η κυκλοφορία του νερού πραγματοποιείται μέσω του δευτερογενούς πορώδους (ρωγμές και καρστικά χαοτικά συστήματα). Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Κατατάσσονται εδώ οι έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, τα ανθρακικά Τρυπαλίου και οι κρυσταλλικοί τριαδικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες της Ιονίου ζώνης. Αναπτύσσονται εδώ υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.
- **K2** : Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Κατατάσσονται εδώ οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ιουρασικής – Ηωκαινικής ηλικίας της Ιονίου ζώνης και οι μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των εσωτερικών καλυμμάτων. Η κυκλοφορία στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτολίθων, κερατολίθων και αργιλικών σχιστόλιθων. Αναπτύσσονται εδώ μέσου έως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες. Κατά θέσεις οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν το υδρογεωλογικό υπόβαθρο των υψηλής υδροπερατότητας ανθρακικών σχηματισμών όταν έχουν μικρή υδροπερατότητα και η τεκτονική τους θέση το επιτρέπει.
- **K3** : Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας. Παρουσιάζουν τόσο πρωτογενές όσο και δευτερογενές πορώδες. Αναπτύσσονται αξιόλογες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω αξιόλογων πηγών.

**ΠΟΡΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ**

- **P1** : Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας. Η κυκλοφορία του νερού γίνεται διαμέσου του πρωτογενούς πορώδους (πορώδες κόκκων). Κατατάσσονται εδώ οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων. Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες τα κορήματα και οι κώνοι κορημάτων καλύπτουν μικρές εκτάσεις και έχουν μικρό πάχος δεν παρουσιάζουν κανένα υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Φρεάτιες υδροφορίες αναπτύσσονται στις σύγχρονες ποταμοχειμάριες αποθέσεις. Σε παράκτιες ζώνες τέτοιες ζώνες/υδροφορίες έχουν υποστεί υφαλμύρινση.
- **P2** : Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Η κυκλοφορία του νερού γίνεται διαμέσου του πρωτογενούς πορώδους (πορώδες κόκκων). Κατατάσσονται εδώ τα κροκαλοπαγοί και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών. Καταλαμβάνουν τις παρυφές των ασβεστολιθικών ορεινών όγκων και μερικές φορές τροφοδοτούνται πλευρικά από τους ασβεστόλιθους όταν η πιεζομετρία το επιτρέπει. Αναπτύσσονται επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.
- **P3** : Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας. Κατατάσσονται εδώ οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Τοπικά στο σχηματισμό του νεογενούς αναμένεται η ανάπτυξη υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων.




Σχήμα 2.6. Υδρολιθολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος. Στο κείμενο που προηγείται αναφέρονται με λεπτομέρειες η κωδικοποίηση των υδρολιθολογικών ενοτήτων και τα χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, στο χάρτη παρουσιάζονται όλα τα ρήγματα της περιοχής ενδιαφέροντος με μπλε και κόκκινο χρώμα, το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής καθώς και οι θέσεις των γεωφυσικών διασκοπήσεων.

# 3. ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΗΝ ΥΠΕΔΑΦΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑ

## 3.1 Εισαγωγή

Η γεωφυσική ως επιστήμη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους χωρίς την απαραίτητη εκτέλεση γεωτρήσεων. Η ανάπτυξη και χρηματοδότηση αυτής της έρευνας ξεκίνησε από τις εταιρίες πετρελαίων και εκμετάλλευσης μεταλλείων.

Η εφαρμογή των γνωστών γεωφυσικών μεθόδων και η ανάπτυξη και εξέλιξη νέων γεωφυσικών τεχνολογιών οδήγησε στη δυνατότητα λήψης όλων των διαθέσιμων πληροφοριών που αφορούν το υπέδαφος χωρίς την απαραίτητη διάτρηση αυτού λόγω του αυξημένου κόστους.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις εκτελούνται τόσο στην επιφάνεια του εδάφους, μέσα σε γεωτρήσεις, σε θέσεις μεταλλείων και εντός στοών όσο και εναέρια εξαρτώμενες πάντα της κλίμακας του προβλήματος που ζητείται να λυθεί. Στην περίπτωση κατά την οποία το ζητούμενο είναι ο εντοπισμός υπόγειων υδατικών πόρων και η μόλυνση (contamination) υπόγειων υδροφορέων, εκτελούνται μετρήσεις στην επιφάνεια και μέσα σε γεωτρήσεις.

Για την επιτυχής εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων και την επίλυση του προβλήματος, απαιτείται η πλευρική και κατακόρυφη διαφοροποίηση των σχηματισμών ως προς τις φυσικές τους ιδιότητες. Εντοπισμός μιας ασυνέχειας-διαφοροποίησης στις φυσικές ιδιότητες κατά την διάρκεια των μετρήσεων, συνεπάγεται με τον εντοπισμό διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών ή τεκτονικών ασυνεχειών. Φυσικά το παραπάνω δεν είναι ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις, δεδομένου ότι διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί μπορούν και έχουν παρόμοιες έως ίδιες φυσικές ιδιότητες.

Οι επιφανειακές μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων συνήθως οδηγούν στη γενικότερη γνώση των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Για την λεπτομερέστερη μελέτη των ιδιοτήτων του υπεδάφους απαιτείται η εκτέλεση των μετρήσεων μέσα στις γεωτρήσεις ή ακόμα και σε δείγματα τα οποία ελήφθησαν από πυρήνες γεωτρήσεων.

## 3.2 Φυσικές ιδιότητες

Οι γεωφυσικές μέθοδοι κάνουν χρήση διαφόρων φυσικών ιδιοτήτων που σχετίζονται με εδάφη και πετρώματα. Οι κύριες φυσικές ιδιότητες και οι μέθοδοι που σχετίζονται με αυτές παρουσιάζονται στο Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1:** Συσχέτιση των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους με γεωφυσικές μεθόδους.

| **Φυσικές Ιδιότητες** | **Γεωφυσικές Μέθοδοι** |
|---|---|
| Ηλεκτρική αγωγιμότητα | Αντίστασης / Αγωγιμότητας |
| Ηλεκτρομαγνητισμός | Αντίστασης / Αγωγιμότητας |
| Ταχύτητα σεισμικών κυμάτων | Σεισμικές |
| Πυκνότητα | Βαρυτικές |
| Μαγνητισμός | Μαγνητικές |
| Ραδιενεργά στοιχεία | Ραδιομετρικές |
| Διηλεκτρική σταθερά | Υπεδάφιο ραντάρ |

## 3.3 Γεωφυσικές Διασκοπήσεις

Όλες οι γεωφυσικές διασκοπήσεις περιλαμβάνουν 3 βασικά στάδια,

α) σχεδίαση έργου, εκτέλεση αναγνωριστικών μετρήσεων και οικονομοτεχνική μελέτη,

β) εκτέλεση των μετρήσεων και συλλογή των δεδομένων και

γ) επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων.

Το πρώτο από τα στάδια της μελέτης είναι ίσως και το πιο σημαντικό δεδομένου ότι η επιλογή τόσο της μεθοδολογίας και των παραμέτρων αυτής όσο και των οργάνων εφαρμογής της μεθόδου, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιτυχής ολοκλήρωση μιας έρευνας. Καλή εκτέλεση των μετρήσεων υπαίθρου οδηγούν και στην ευκολότερη επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων.

Μέλημα ενός καλού επιστήμονα είναι η σωστή σχεδίαση του έργου όσο και η επιλογή των κατάλληλων (πέραν της μίας) γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης. Το

τελικό μοντέλο των γεωφυσικών ιδιοτήτων μιας περιοχής έρευνας, πρέπει να είναι αποτέλεσμα της ερμηνείας και συναξιολόγησης των δεδομένων όλων των εφαρμοζόμενων στην περιοχή μεθοδολογιών και των διαθέσιμων στοιχείων από προϋπάρχουσες εργασίες.

## 3.4 Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των περισσοτέρων πετρωμάτων του ανώτερου φλοιού, εξαρτώνται από την περιεκτικότητα αυτών σε νερό, από την αλατότητα ή μη του περιεχόμενου νερού και από την κατανομή του νερού στα πετρώματα. Τα κορεσμένα πετρώματα παρουσιάζουν πολύ μικρότερες αντιστάσεις από αυτές των ακόρεστων ή ξηρών πετρωμάτων. Όσο υψηλότερο είναι το πορώδες και η αλατότητα των κορεσμένων πετρωμάτων τόσο χαμηλότερες είναι οι αντιστάσεις αυτών. Η παρουσία της αργίλου και άλλων αγώγιμων υλικών μειώνει την αντίσταση των πετρωμάτων.

Κατά την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων δύο είναι οι ιδιότητες που μελετώνται, α) η ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων και β) η πόλωση που δημιουργείται με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από αυτά (επαγόμενη πολικότητα).

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός πετρώματος πραγματοποιείται είτε με την εισαγωγή σε αυτό ηλεκτρικού ρεύματος και τη μέτρηση της κατανομής της διαφοράς δυναμικού στο υπέδαφος, είτε με τη μελέτη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όπως αυτό παράγεται από τη διέλευση εναλλασσόμενου ρεύματος από τη Γη.

Υπάρχουν μέθοδοι ηλεκτρικής διασκόπησης οι οποίες κάνουν χρήση φυσικών πηγών ενέργειας και βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στη γεωλογία. Οι κυριότερες από αυτές είναι, α) η μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων, β) η μαγνητοτελλουρική μέθοδος και γ) η μέθοδος του φυσικού δυναμικού.

## 3.5 Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι

Μεταβαλλόμενο ρεύμα διέρχεται από πηνίο που βρίσκεται πάνω στο έδαφος και αυτό επάγει ηλεκτρικά ρεύματα στους υπεδάφειους αγωγούς. Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο ανιχνεύεται και καταγράφεται από το πηνίο δέκτης. Μεταβολή στις συχνότητες του αρχικού παλμού δίνει τη δυνατότητα έρευνας σε μεγαλύτερα βάθη.

Οι μαγνητοτελλουρικές μέθοδοι καταγράφουν το φυσικό ηλεκτρομαγνητικό

πεδίο χαμηλών συχνοτήτων.

Η μέθοδος χαμηλών συχνοτήτων (**V**ery **L**ow **F**requency) κάνει χρήση διαφόρων στρατιωτικών αναμεταδοτών που εκπέμπουν στις χαμηλές συχνότητες. Η μέθοδος στηρίζεται στη καταγραφή του δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που επάγεται λόγω της διέγερσης των υπεδάφιων αγώγιμων ζωνών με τη διέλευση του πρωτογενούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι και σε βαθύτερους ορίζοντες. Τα δευτερογενή παραγόμενα κύματα έχουν την ίδια συχνότητα με τα αρχικά κύματα αλλά οι άλλες ιδιότητές τους (διεύθυνση, πλάτος και φάση) είναι διαφορετικές καθώς αυτές εξαρτώνται από τη γεωηλεκτρική δομή των επιφανειακών στρωμάτων.

Περιορισμός στην εφαρμογή των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων για την ανίχνευση αγώγιμων ζωνών είναι η παρουσία υψηλά αγώγιμων επιφανειακών στρωμάτων.

## 3.6 Εφαρμογές της ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης στον εντοπισμό υδατικών πόρων

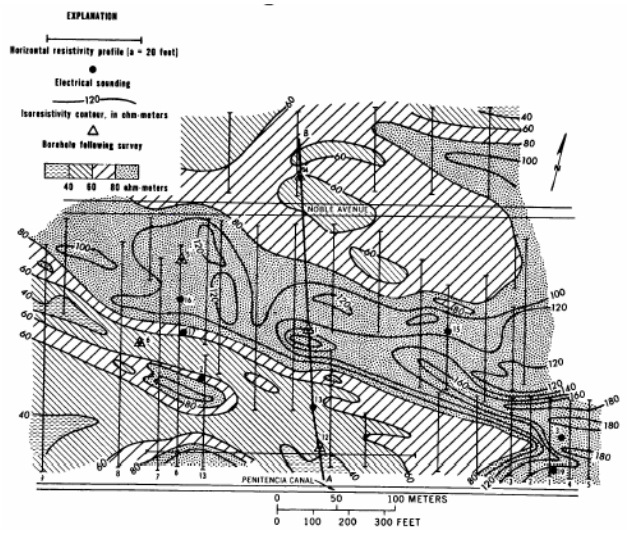
Κατά τη διεξαγωγή έρευνας σε περιοχές όπου αντιμετωπίζονται υδρογεωλογικά προβλήματα, η πιο συχνά προτεινόμενες μεθοδολογίες είναι οι ηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική μέθοδος διασκόπησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι άλλες μέθοδοι, όπως σεισμικά, μαγνητικά ή βαρυτικά, αδυνατούν να αναγνωρίσουν χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Για παράδειγμα στη περίπτωση όπου ζητείται ο εντοπισμός του βάθους της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού – αλμυρού νερού, μόνο οι ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές 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.

### 3.6.1. Εντοπισμός υπόγειων διόδων νερού (παλαιοκοίτες)

Μια από τις πιο επιτυχημένες μεθόδους εντοπισμού υπόγειων διόδων νερού είναι η ηλεκτρική/ηλεκτρομαγνητική μέθοδος διασκόπησης υπό τη μορφή βυθοσκοπήσεων και δισδιάστατης χαρτογράφησης του χώρου μελέτης.

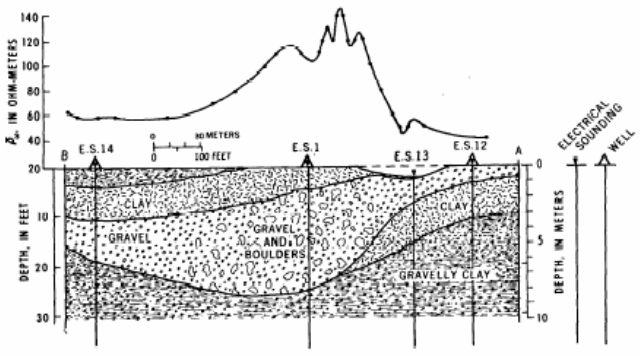
Στην περιοχή του San Hose στη California εφαρμόστηκαν όλες οι δυνατές μέθοδοι-διατάξεις ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών διασκοπήσεων με σκοπό τον εντοπισμό ενός ρηχού υδροφορέα και την εκμετάλλευση αυτού με υδρογεωτρήσεις. Έτσι στη περιοχή ενδιαφέροντος χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμένες μέθοδοι ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών βυθοσκοπήσεων και οριζόντιας χαρτογράφησης των αντιστάσεων. Σε μερικές θέσεις εφαρμόστηκε και η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας.

Στη περιοχή του Penitencia εντοπίστηκε μια υπόγεια κοίτη εκτελώντας μερικές ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές 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 α=6.1 μέτρα. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάστηκαν σε χάρτη με τη μορφή ισοκαμπύλων αντίστασης (σχήμα 3.1)



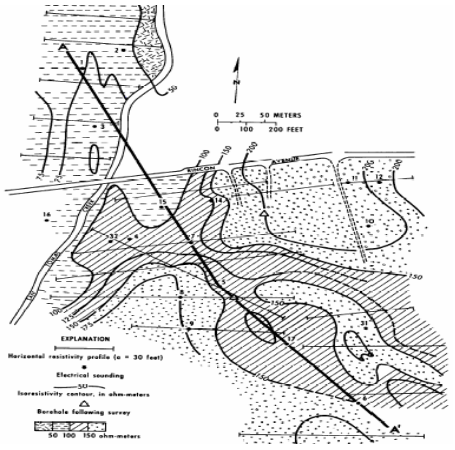

Σχήμα 3.1. Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή Penitencia στη California

Στο σχήμα (3.2) παρουσιάζεται η γεωλογική τομή όπως αυτή προέκυψε από την παράλληλη ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και επιπλέον στοιχεία που προήλθαν από μεταγενέστερη της μελέτης, γεώτρηση.



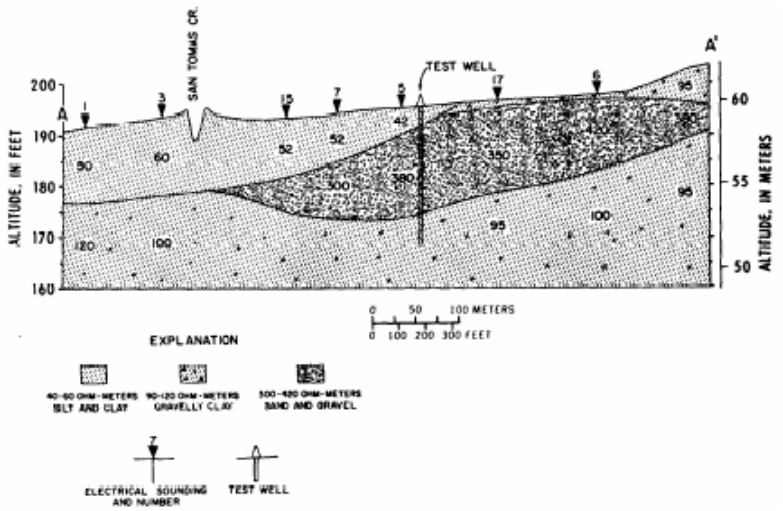

Σχήμα 3.2. Γεωλογική τομή της περιοχής έρευνας όπως υπολογίστηκε από την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων.

Στην περιοχή Campbell στη California εκτελέστηκε μελέτη με εφαρμογή της οριζόντιας χαρτογράφησης των αντιστάσεων, εφαρμόζοντας τη διάταξη Wenner με απόσταση ηλεκτροδίων α=10 μέτρα (σχήμα 3.3). Στο χάρτη εμφανίζεται μια ρηχή αντιστατική ζώνη χωρίς όμως να είναι τόσο ευδιάκριτη όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο παράδειγμα.



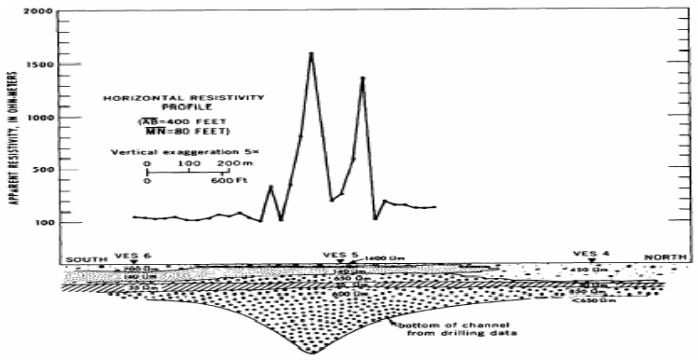

Σχήμα 3.3. Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή Campbell, όπως μετρήθηκε με την εφαρμογή της διάταξης Wenner.

Στο σχήμα (3.4) παρουσιάζεται η γεωλογική τομή όπως αυτή προήλθε από το συσχετισμό των βυθοσκοπήσεων μεταξύ τους. Επίσης, εκτελέστηκε μια γεώτρηση η οποία απλά επιβεβαίωσε την ακρίβεια στην ερμηνεία της ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης και τη συμφωνία των γεωηλεκτρικών ενοτήτων με τις παρατηρούμενες γεωλογικές ενότητες.




Σχήμα 3.4. Γεωλογική τομή και προφίλ αντιστάσεων για τη περιοχή έρευνας (Campbell – California).

Σε μια παρόμοια περίπτωση με την εκτέλεση γεωηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών βυθοσκοπήσεων παροδικού πεδίου και οριζόντιας χαρτογράφησης με τη μέθοδο Schlumberger εντοπίστηκε υπόγεια κοίτη ποταμού η οποία και επιβεβαιώθηκε με στοιχεία γεωτρήσεων (σχήμα 3.5).

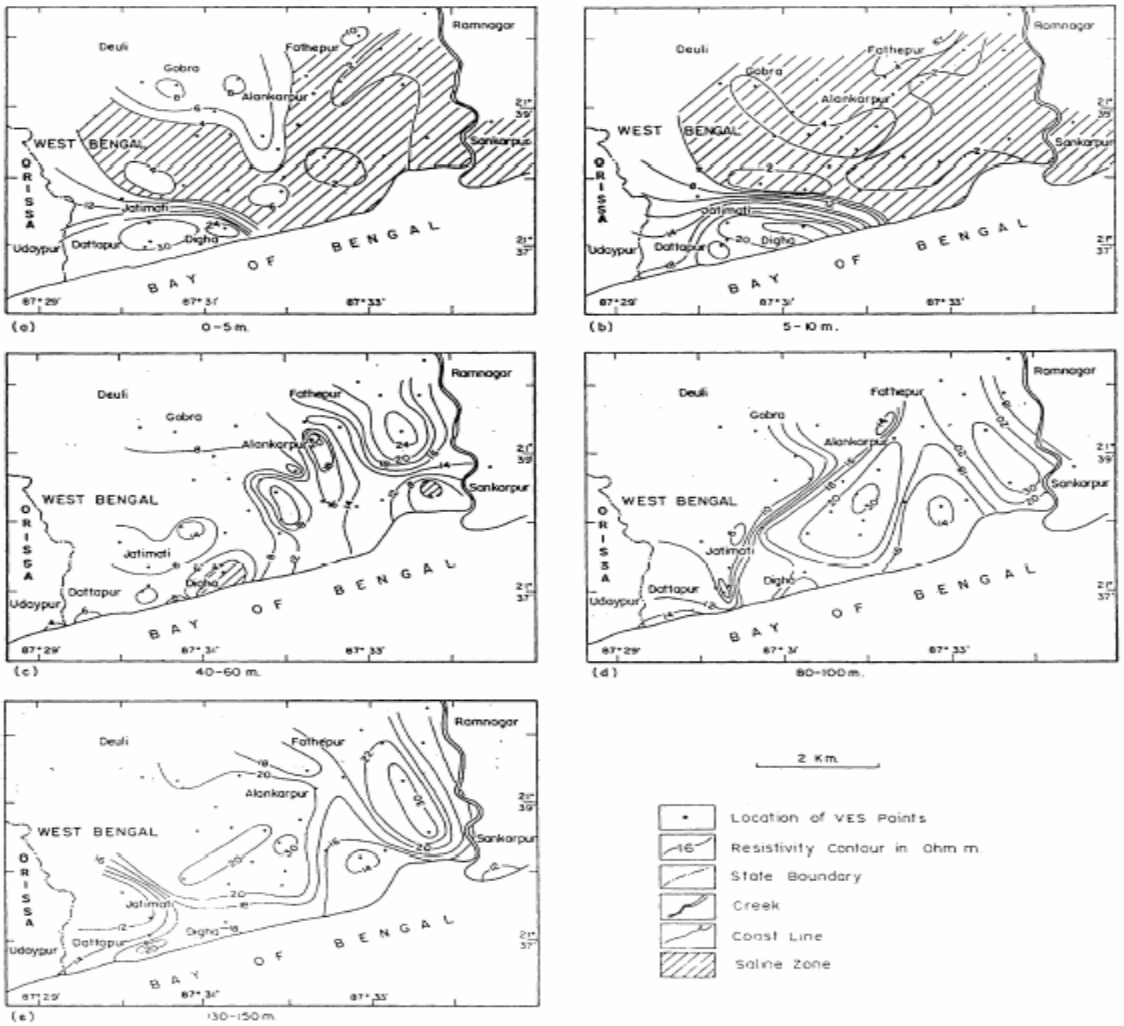



Σχήμα 3.5. Γεωλογική τομή και προφίλ αντιστάσεων για τη περιοχή έρευνας (Salisbury – California).

### 3.6.2 Εφαρμογή της ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης στη χαρτογράφηση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού υδροφόρου ορίζοντα

Με σκοπό τον εντοπισμό της ύπαρξης υφάλμυρου ορίζοντα σε περιοχή εκμετάλλευσης με γεωτρήσεις υπόγειου υδροφορέα (west Bengal – India) εκτελέστηκαν πλήθος βυθοσκοπήσεων με στόχο αφενός τη χωρική παρακολούθηση του υφάλμυρου υδροφορέα και αφετέρου τις προτάσεις για την ορθολογικότερη εκμετάλλευση των προϋπαρχόντων γεωτρήσεων.

Έτσι εκτελέστηκαν 45 βυθοσκοπήσεις μέχρι το βάθος των 250 μέτρων και τα αποτελέσματα αυτών εμφανίζονται στο σχήμα (3.6) όπου παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των αντιστάσεων για διάφορα βάθη.




Σχήμα 3.6. Χάρτες οριζόντιας κατανομής της αντίστασης για διαφορετικά βάθη.

### 3.6.3 Εφαρμογή της ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής 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.

# 4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

## 4.1 Εισαγωγή

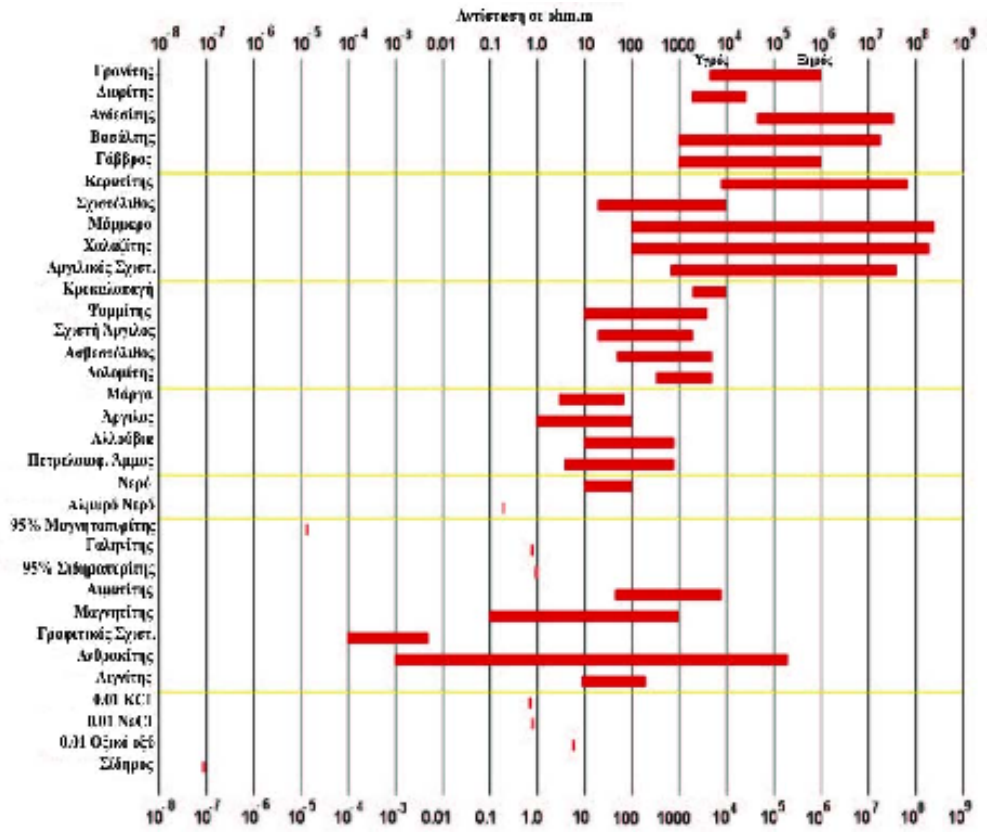
Με την εφαρμογή των ηλεκτρικών μμεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης, με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης. Ηλεκτρικό ρεύμα εισάγεται στο έδαφος και η ποσότητα που μετράμε είναι η ηλεκτρική τάση. Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους. Η ηλεκτρική αντίσταση είναι η ποσότητα που παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται ο καθορισμός και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως, στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία και στην Τεχνική Γεωλογία. Μία από τις σπουδαιότερες ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, είναι η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, της οποίας η χρήση στην αρχαιομετρία θα αναπτυχθεί σε αυτή την εργασία.

## 4.2 Σχέση Γεωλογίας και Αντίστασης

Εφόσον τελικός σκοπός είναι να αποκτηθεί η γεωλογική εικόνα της υπό έρευνα περιοχής από την κατανομή της αντίστασης, είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν κάποιες χαρακτηριστικές τιμές της αντίστασης για τα διάφορα είδη πετρωμάτων. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών του υπεδάφους κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα. Το ρεύμα διαδίδεται μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό το οποίο βρίσκεται στους πόρους και τις ρωγμές των γεωλογικών σχηματισμών. Η αντίσταση του εδάφους εξαρτάται και από πολλές παραμέτρους όπως είναι η ορυκτολογική σύσταση, το πορώδες, η θερμοκρασία καθώς και η γεωλογική ηλικία του πετρώματος.

Το σχήμα (4.1), δίνει τις τιμές της αντίστασης διάφορων πετρωμάτων και χημικών στοιχείων (Keller and Frischknecht 1966, Daniels and Alberty 1966, Telford et al. 1990).




Σχήμα 4.1. Αντίσταση διάφορων πετρωμάτων και ορυκτών (Keller and Frischknecht 1966).

Τα μεταμορφωμένα και τα πυριγενή πετρώματα έχουν υψηλές τιμές αντίστασης. Η αντίσταση αυτών των πετρωμάτων εξαρτάται από το βαθμό

ρωγμάτωσής τους και από το ποσοστό του νερού που περιέχουν στους πόρους τους. Τα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία είναι συνήθως περισσότερο πορώδη και περιέχουν υψηλότερο ποσοστό νερού, έχουν χαμηλότερες αντιστάσεις. Η αντίσταση του νερού ποικίλει από 10 έως 100 Ohm-m, πράγμα που εξαρτάται από την περιεκτικότητά του σε διαλυμένα άλατα. Η εξίσωση η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης, ρ ενός πετρώματος και του πορώδους , φ αυτού, είναι

$$\rho = \alpha \, \rho u \, \varphi^{-m} \tag{4.1}$$

όπου, ρυ είναι η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος, φ είναι ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες) και α και m σταθερές (Keller and Frischknecht 1966). Για τα περισσότερα πετρώματα τα α και m είναι περίπου 1 και 2 αντίστοιχα. Η σχέση (4.1) είναι γνωστή ως νόμος του Archie και δείχνει ότι η ειδική αντίσταση αυξάνει όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος.

Λόγω του ότι οι τιμές της ειδικής αντίστασης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες που μεταβάλλονται εύκολα, οι διακυμάνσεις των τιμών της έχουν μεγάλο εύρος ακόμη και για τους ίδιους γεωλογικούς σχηματισμούς. Είναι όμως πιθανό δύο διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί να έχουν παρόμοιες τιμές ειδικής αντίστασης. Επομένως ασφαλής είναι η σχετική σύγκριση των ειδικών αντιστάσεων στην ίδια περιοχή. Για τους παραπάνω λόγους, είναι απαραίτητο, η ερμηνεία των μετρήσεων να γίνεται με προσοχή και για τη λήψη ασφαλών συμπερασμάτων για τη λιθολογία, θα πρέπει να συνυπολογίζονται όλες οι υπάρχουσες πληροφορίες για την κάθε περιοχή (γεωλογικοί χάρτες, γεωτρήσεις κ.α.)

## 4.3 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος

Ο νόμος του Ohm είναι ο βασικός νόμος που χρησιμοποιείται για τη ροή του ρεύματος στο έδαφος. Αυτός εκφράζεται από τη σχέση

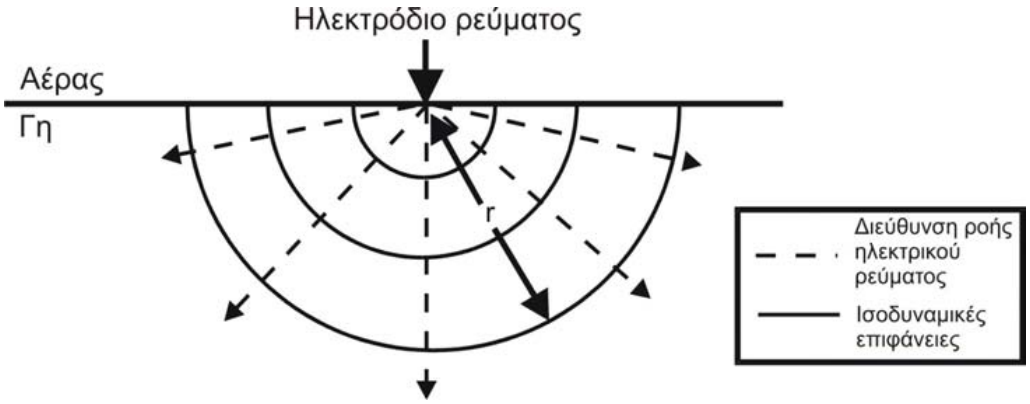
$$J = \sigma E \tag{4.2}$$

όπου, J είναι η πυκνότητα του ρεύματος, σ η αγωγιμότητα και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Συνήθως χρησιμοποιείται η ποσότητα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία είναι ισοδύναμη με το αντίστροφο της αγωγιμότητας.

Στην απλή περίπτωση, όπου το έδαφος είναι ομογενές και ισότροπο, το ρεύμα που εισέρχεται σε αυτό μέσω μίας σημειακής πηγής (ηλεκτροδίου), ρέει ακτινικά διερχόμενο από ένα ημισφαίριο εμβαδού $S = 2\pi r2$, όπου, r η απόσταση της

περιφέρειας του ημισφαιρίου από το σημείο εισαγωγής του ρεύματος. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες έχουν σχήμα ημισφαιρίου και οι γραμμές του ρεύματος είναι κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες (σχήμα 4.2). Σε αυτή την περίπτωση το δυναμικό δίνεται από τη σχέση

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}. \qquad (4.3)$$

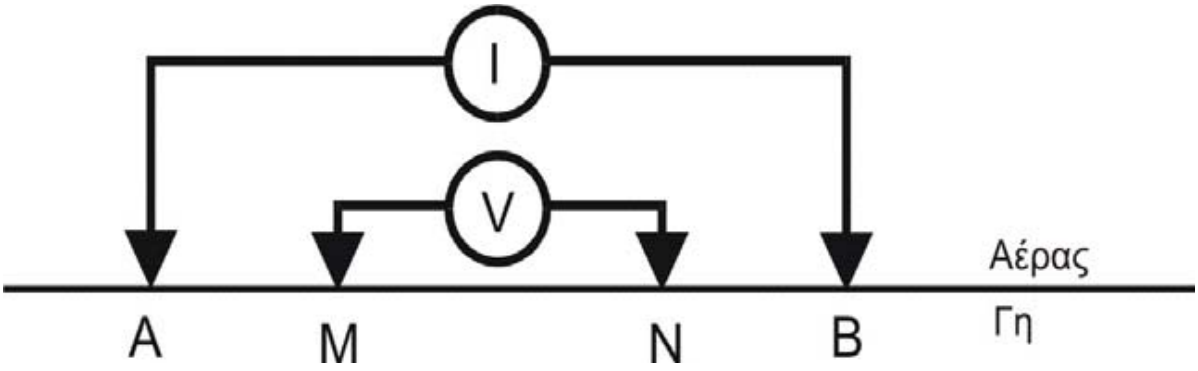



Σχήμα 4.2. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες και η διεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος για μια σημειακή πηγή

## 4.4 Φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση

Στην πράξη χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόδια για να γίνει μέτρηση της ειδικής αντίστασης ενός ημιχώρου. Τα δύο από αυτά χρησιμεύουν στην εισαγωγή και κυκλοφορία του ρεύματος και τα ονομάζουμε Α και Β, ενώ με τη βοήθεια των δύο άλλων μετράμε τη διαφορά δυναμικού στα αντίστοιχα σημεία και τα ονομάζουμε Μ και Ν. Έστω r1 απόσταση του Μ από το θετικό ηλεκτρόδιο Α, r2 από το αρνητικό Β και r3 και r4 οι αντίστοιχες αποστάσεις του Ν από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος (σχήμα 4.3). Επομένως από την σχέση (4.3), η διαφορά δυναμικού μεταξύ των Α και Β για έναν ομογενή ημιχώρο και για μια διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων, είναι

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right). \qquad (4.4)$$



Σχήμα 4.3. Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων.

Επομένως, η ειδική αντίσταση του ημιχώρου μπορεί να βρεθεί από τη σχέση

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I}, \qquad (4.5)$$

όπου, k είναι ο παράγοντας μέσα στην αγκύλη της σχέσης (4.4), ο οποίος λέγεται γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται από την διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων. Στην περίπτωση ομογενούς και ισότροπου εδάφους και για οποιαδήποτε διάταξη ηλεκτροδίων, όταν ο γεωμετρικός παράγοντας πολλαπλασιάζεται με την μετρούμενη αντίσταση, το αποτέλεσμα είναι η πραγματική αντίσταση του εδάφους.

Στην περίπτωση μη ομογενούς και ισότροπου χώρου, η σχέση (4.5), ορίζει μία παράμετρο που ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ημιχώρου, ρα. Η παράμετρος αυτή εισάγεται για να ληφθεί υπόψη η γεωμετρία της μέτρησης, οι θέσεις δηλαδή των ηλεκτροδίων. Η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι η πραγματική αντίσταση του υπεδάφους, αλλά μια φαινόμενη τιμή η οποία είναι η αντίσταση που θα είχε το έδαφος εάν ήταν γεωηλεκτρικά ομογενές. Όπως προαναφέρθηκε, η τιμή αυτή ταυτίζεται με την πραγματική αντίσταση όταν πρόκειται για ομογενή γη.

Στην πράξη η φαινόμενη αντίσταση ρα, αποτελεί ένα είδος μέσου όρου των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους.

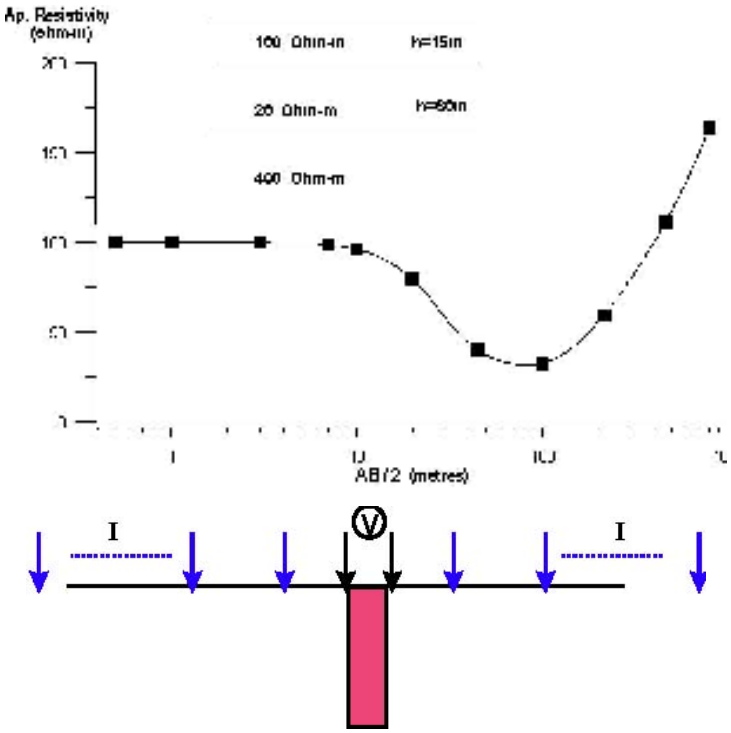
Άρα δεν δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια "παραμορφωμένη" εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Για αυτόν τον λόγο η απευθείας χρήση των μετρήσεων φαινόμενης αντίστασης για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι παρακινδυνευμένη. Η πραγματική αντίσταση μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Ο καθορισμός της πραγματικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης είναι η λύση του αντίστροφου προβλήματος, για το οποίο

θα γίνει λόγος παρακάτω.

## 4.5 Μέθοδοι έρευνας

**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.

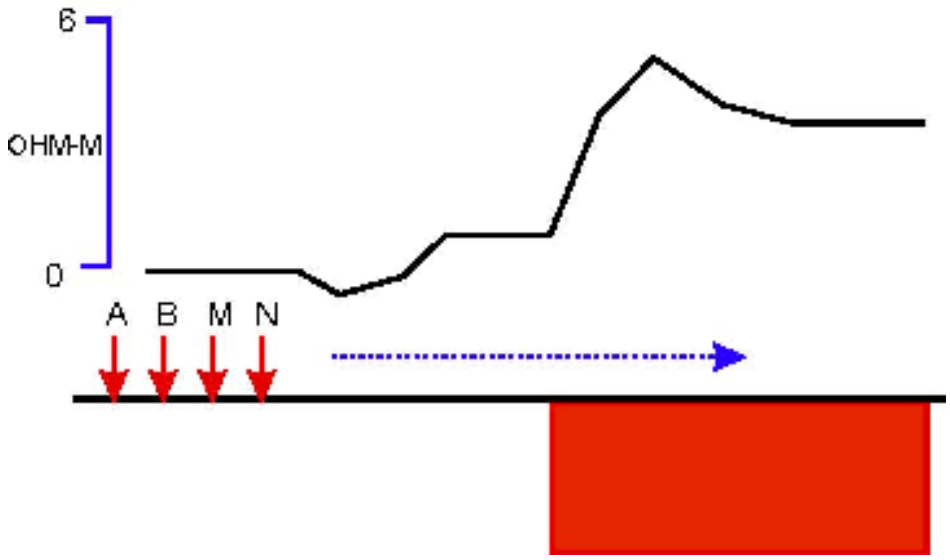
Η ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων γίνεται θεωρώντας ύπαρξη οριζόντιων στρωμάτων για αυτό και εφαρμόζεται κυρίως σε ιζηματογενείς λεκάνες (μονοδιάστατη γεωηλεκτρική δομή) (σχήμα 4.4). Κλασικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών.




Σχήμα 4.4. Δεδομένα βυθοσκόπησης με διάταξη Schlumberger για ένα μοντέλο τριών στρωμάτων.

**Όδευση (Profiling)**. Χρησιμοποιείται για να εντοπίζει πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τη βυθοσκόπηση, οι αποστάσεις των

ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων ως συνόλου με σταθερό βήμα. Έτσι, χαρτογραφούνται οι μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος κατά μήκος μιας όδευσης και εντοπίζονται δομές που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση με το περιβάλλον τους. Στη γεωλογία χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ρηγμάτων, φακών άμμου ή χαλικιών, επαφών, κενών κ.α. (σχήμα 4.5), ενώ η χρήση της είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη στην αρχαιομετρία.



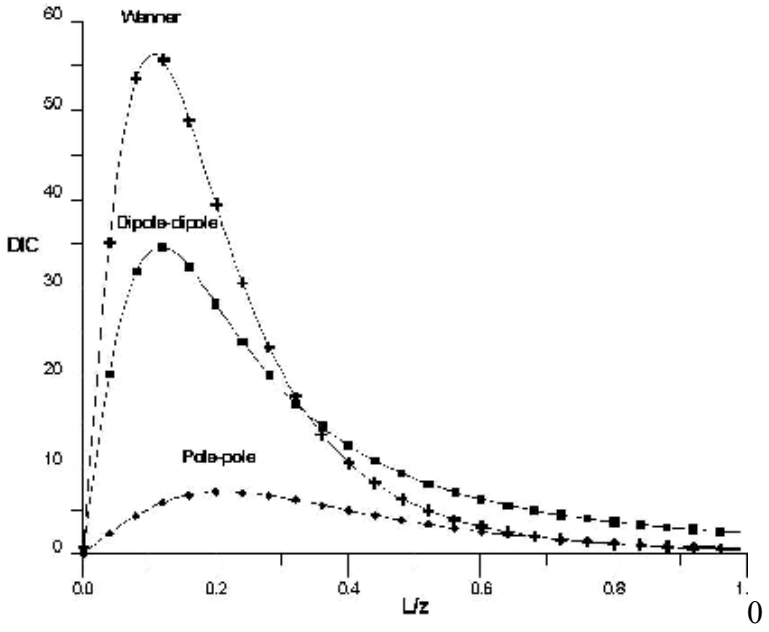

Σχήμα 4.5. Οριζοντιογραφία στον εντοπισμό ρήγματος.

**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.

## 4.6 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 4.6. DIC καμπύλες για τις διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-πόλου.

Πίνακας 4.2. Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Roy and Apparao 1971, Roy 1971).

| 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 | |

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)

$$DIC = \int_{x=-\infty}^{\infty} 2\rho\pi \left[ \frac{1}{(x^2+4z^2)^{1/2}} - \frac{1}{(b+c)^2+4z^2)^{1/2}} - \frac{1}{(a+b)^2+4z^2)^{1/2}} - \frac{1}{(x^2-4z^2)^{1/2}} \right] dx \quad (4.14)$$

όπου, $xy$ είναι το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους, ο άξονας του βάθους, η θέση του θετικού ηλεκτροδίου ρεύματος, και $z(0,0,0)$ $(a,0,0)(a+b,0,0$ 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 (4.6) 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 (4.2) (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 4.6), 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, το οποίο ονομάστηκε μέσο βάθος διείσδυσης και που προτάθηκε από τον Edwards (1977) είναι η λύση της παρακάτω εξίσωσης $z_{med}$

$$\int_{-0}^{z_{med}} NDIC = 1/2 \quad , \tag{4.15}$$

όπου, είναι η κανονικοποιημένη καμπύλη που έγινε με βάση τους γεωμετρικούς παράγοντες, από τους Roy και Apparao. Στον πίνακα (4.3) 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 Apparao (πίνακας 4.2), οι τιμές του πίνακα (4.3) βρίσκονται σε καλύτερη συμφωνία με διάφορους εμπειρικούς υπολογισμούς και αποτελέσματα (Zhody 1989).

Πίνακας 4.3. Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Edwards 1977).

| ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ | ΒΑΘΟΣ |
|---|---|
| Wenner | 0.17 L |
| Schlumberger | 0.195 L |
| Διπόλου-διπόλου | 0.25 L |
| Διδύμου ηλεκτροδίου | 0.77 L |
| Πόλου-διπόλου<br>L: συνολικό μήκος διάταξης | 0.52 L |

Στον πίνακα (4.3), (Edwards 1977), παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου βάθους διείσδυσης zmed διάφορων διατάξεων, για διάφορες τιμές του n και σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων α 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.

# 5. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

## 5.1 Εισαγωγή

Οι Ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές ταξινομούνται γενικά στις κατά συχνότητα (FD) και κατά χρόνο (TD) (Παροδικών πεδίων) και έχουν σαν κοινό στοιχείο το γεγονός ότι η πληροφορία για την ύπαρξη υπόγειων αγωγών εμπεριέχεται στο δευτερεύον Η/Μ πεδίο. Τα συστήματα FD είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να υφίσταται η μέγιστη δυνατή σύζευξη με το δευτερεύον και όχι με το πρωτεύον πεδίο, αλλά παρά ταύτα παρατηρείται ότι τα περισσότερα συστήματα εξακολουθούν να υπόκεινται σε επηρεασμό από το πρωτεύον πεδίο, που μπορεί να είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από την αναμενόμενη απόκριση του αγωγού. Κατά συνέπεια μικρά σφάλματα στον προσανατολισμό των πηνίων ή την απόσταση πομπού – δέκτη οδηγούν σε μεγάλα σφάλματα και υποβάθμιση της ακρίβειας της έρευνας. Οι τεχνικές TD ξεπερνούν το πρόβλημα αυτό μετρώντας το δευτερεύον πεδίο κατά την απουσία του πρωτεύοντος.

Η Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος διασκόπησης βασίζεται στο φαινόμενο της ΗΜ επαγωγής, κατά το οποίο μεταβαλλόμενο εξωτερικό (πρωτεύον) μαγνητικό πεδίο που εισέρχεται στο υπέδαφος έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού επαγωγικού ρεύματος και δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου.

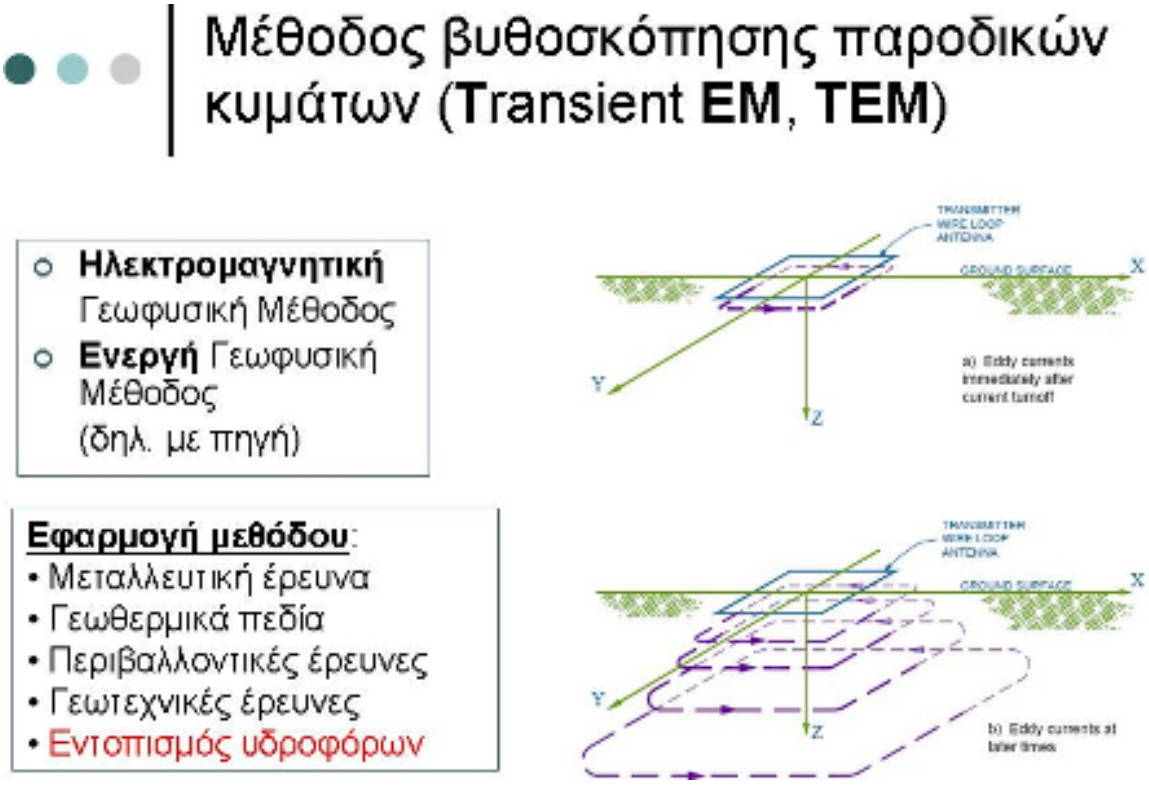
## 5.2 Ηλεκτρομαγνητικές βυθοσκοπήσεις

Οι ηλεκτρομαγνητικές βυθοσκοπήσεις χρησιμοποιούνται συστηματικά τα τελευταία χρόνια σε διάφορα πεδία της γεωεπιστημονικής έρευνας, εναλλακτικά ή συμπληρωματικά με τις ηλεκτρικές DC βυθοσκοπήσεις. Λαμβάνουν χώρα συνήθως με τη χρήση μεγάλου βρόχου εκπομπής και πηνίου – δέκτη (ή βρόχου) συνδεδεμένα με την κεντρική μονάδα του Η/Μ συστήματος (σχήμα 5.1). Ο βρόχος εκπομπής διαρρέεται από σταθερό ρεύμα και δημιουργεί πρωτογενές μαγνητικό πεδίο. Το ρεύμα διακόπτεται με ταχύ ρυθμό και ελεγχόμενο τρόπο που έχει τη μορφή ράμπας, διακόπτοντας το μαγνητικό πεδίο. Κατά τον Faraday επαγωγικά ρεύματα

δημιουργούνται στο υπέδαφος, συντηρώντας το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο. Το σύστημα των επαγωγικών ρευμάτων κυκλοφορεί σε κλειστούς δρόμους κάτω από το βρόχο εκπομπής και φθίνοντας δημιουργεί με τη σειρά του δευτερεύον μαγνητικό πεδίο. Μεταβολές της τιμής του μαγνητικού πεδίου επάγουν δυναμικό στο πηνίο του δέκτη που βρίσκεται  είτε στο κέντρο του βρόχου εκπομπής είτε είναι ο ίδιος βρόχος εκπομπής.

Η κατανομή και η ένταση των ρευμάτων  του υπεδάφους εξαρτάται από την τιμή  της ειδικής αντίστασης και σαν αποτέλεσμα οι τιμές του μετρούμενου δυναμικού δίδουν πληροφορίες για  την  κατανομή και τιμή της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

Με την πάροδο του χρόνου, η θέση της μέγιστης τιμής της έντασης των επαγωγικών ρευμάτων διαχέεται προς το βάθος και προς τα έξω του βρόχου εκπομπής, με τη μορφή δακτυλίων ρεύματος (Nabighian 1979).




Σχήμα 5.1. Στο σχήμα παρουσιάζεται τόσο η διάταξη των βρόγχων όσο και γενικά πληροφοριακά στοιχεία για τη μέθοδο και την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου.

Στην περίπτωση διαστρωματωμένου ημιχώρου, αρχικά τα επαγωγικά ρεύματα είναι συγκεντρωμένα κοντά στην επιφάνεια και το επαγόμενο δυναμικό, μένει σταθερό με το χρόνο και είναι ανάλογο της ειδικής αντίστασης του πρώτου επιφανειακού στρώματος. Αυτή είναι η λεγόμενη πρώιμη κατάσταση (early stage) και

αντιστοιχεί στην κατάσταση αντιστατικού ορίου, που είναι γνωστή στο πεδίο συχνοτήτων σαν επαγωγική ζώνη (inductive zone) ή εγγύς ζώνη (near zone). Αυτή στα συστήματα πεδίου συχνοτήτων ορίζεται σαν η περιοχή όπου η απόσταση πομπού-δέκτη είναι κατά πολύ μικρότερη του επιδερμικού βάθους και ο επαγωγικός αριθμός είναι μικρός. Στην περιοχή αυτή η φανταστική συνιστώσα του δευτερεύοντος πεδίου είναι πολύ μεγαλύτερη της πραγματικής και εμφανίζει γραμμική εξάρτηση με τον επαγωγικό αριθμό. Χρήση αυτού του χαρακτηριστικού κάνουν τα φορητά Η.Μ συστήματα που λειτουργούν στο πεδίο συχνοτήτων και τα οποία μετρούν την αγωγιμότητα του επιφανειακού στρώματος (Geonics EM 31), καθώς επίσης στους μεταλλικούς ανιχνευτές και είναι γνωστά σαν συστήματα μικρού επαγωγικού αριθμού (low induction number).

Με την πάροδο του χρόνου η θέση του μέγιστου της έντασης του ρεύματος διαχέεται προς το βάθος και το δυναμικό εμφανίζεται να είναι ανάλογο του $t^{-5/2}$ και του $\rho^{-3/2}$ όπου ρ η ειδική αντίσταση του βαθύτερου στρώματος. Αυτή είναι η λεγόμενη **ύστερη κατάσταση (late stage)**.

Κατά τους πρώιμους χρόνους (early times), η TEM απόκριση ελέγχεται μόνον από την αγωγιμότητα του επιφανειακού στρώματος $\sigma_1$. Το δεύτερο στρώμα αρχίζει να έχει επίδραση που είναι δυνατό να παρατηρηθεί, σε χρόνο που ορίζεται από την εξίσωση

$$t \approx 10^{-7}\sigma_1 d^2$$ Spies (1980).

Έτσι ο μικρότερος χρόνος στον οποίο η επίδραση ενός σώματος, ή ενός αγώγιμου ορίζοντα σε βάθος d, είναι δυνατό να μετρηθεί, είναι συνάρτηση του βάθους και της αγωγιμότητας του υπεδάφους, του υπερκείμενου στο σώμα. Η δυνατότητα όμως να ανιχνευθεί ένα σώμα σε αυτό το βάθος εξαρτάται από πολλούς άλλους παράγοντες, που εξετάζονται παρακάτω.

## 5.3 Βάθος διασκόπησης

Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ένταση μαγνητικής ροπής, ρεύματος, από το χρόνο καθυστέρησης του τελευταίου καναλιού, αλλά και από τη φύση της γεωηλεκτρικής δομής που ερευνάται. Κατά τη διάχυση του ΗΜ πεδίου σε μεγαλύτερα βάθη παρατηρείται εξασθένιση του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου με το χρόνο, που ακολουθεί μια συμπεριφορά φθίνουσα εκθετική με

συντελεστή $\left(-\frac{5}{2}\right)$ για την κατακόρυφη συνιστώσα και $-3$ για την οριζόντια συνιστώσα.

Θεωρητικά η καμπύλη εξασθένισης του μαγνητικού πεδίου, (ή ισοδύναμα του δυναμικού που μετράται στο πηνίο του δέκτη), συμπεριλαμβάνει πληροφορίες για διάφορα βάθη και ως εκ τούτου, αυξανομένου του χρόνου καθυστέρησης, αυξάνεται και το βάθος διασκόπησης. Αυξανομένου όμως του χρόνου, το φθίνον σήμα φθάνει σε τόσο μικρές τιμές που υπερκαλύπτονται από το θόρυβο, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αξιοπιστία των λαμβανομένων μετρήσεων και να μην αυξάνεται ανάλογα το βάθος διασκόπησης.

Οι Spies – Frischknecht (1992), προτείνουν τον παρακάτω προσεγγιστικό τύπο για τον υπολογισμό του βάθους διασκόπησης $d \approx 0.5\left(\frac{IA}{\sigma_1 \eta_v}\right)^{1/5}$

όπου I το ρεύμα εκπομπής, A το εμβαδόν του βρόχου, $\sigma_1$ η αγωγιμότητα του υπερκείμενου στρώματος και $\eta_v$ το μικρότερο δυνατό σήμα που είναι δυνατό να μετρηθεί πάνω από το επίπεδο θορύβου. Αναφέρουν τιμές για το $\eta_v$ ίσες με 0.5 $nV/m^2$ τιμή που είναι κατά τη γνώμη μας υπερβολικά χαμηλή.

Η τιμή αυτή συμφωνεί με τη τιμή της στάθμης θορύβου του κατασκευαστή του οργάνου, που είναι 12 $nV/m^2$

Αντίστοιχα ο αργότερος χρόνος που μπορεί να μετρηθεί το σήμα αυτό είναι :

$t_L \approx 1.9X10^{-7}(IA)^{2/5}\sigma_1\eta_v^{2/5}$ (Spies – Frischknecht 1992

Τονίζεται ότι οι τιμές βαθών είναι προσεγγιστικές και μόνο η επίλυση του ευθέος προβλήματος για το συγκεκριμένο πρόβλημα δίδει τη δυνατότητα ρεαλιστικής εκτίμησης του βάθους διασκόπησης.

## 5.4 Διεξαγωγή των μετρήσεων

Ένας κοινός παράγοντας όλων των επαγωγικών παροδικά μεταβαλλόμενων τεχνικών είναι ότι για τη διασκόπηση χρησιμοποιούνται τετραγωνικοί ή ορθογώνιοι βρόχοι ως πομποί και δέκτες. Ανάλογα με τη διάταξη πομπού-δέκτη οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες διατάξεις είναι (σχήμα 5.2):

1. Διάταξη ενός βρόχου (Single-Loop or Coincident Loop Configuration).

Αποτελείται από έναν μόνο βρόχο, ο οποίος λειτουργεί και ως πομπός και ως δέκτης. Κατά τη διάρκεια που το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει το κύκλωμα, λειτουργεί ως πομπός. Μόλις διακοπεί η λειτουργία του κυκλώματος, οι ακροδέκτες του βρόχου συνδέονται αυτόματα με το δέκτη και οι μετρήσεις παίρνονται κατά τη διάρκεια που ο πομπός είναι κλειστός.

Το μέγεθος της πλευράς του βρόχου ποικίλει από 5 μέχρι και 200 μέτρα και είναι συνήθως τετραγωνικός ή ορθογώνιος.

2. Διάταξη κεντρικού βρόχου (In-Loop or Central Loop Configuration).

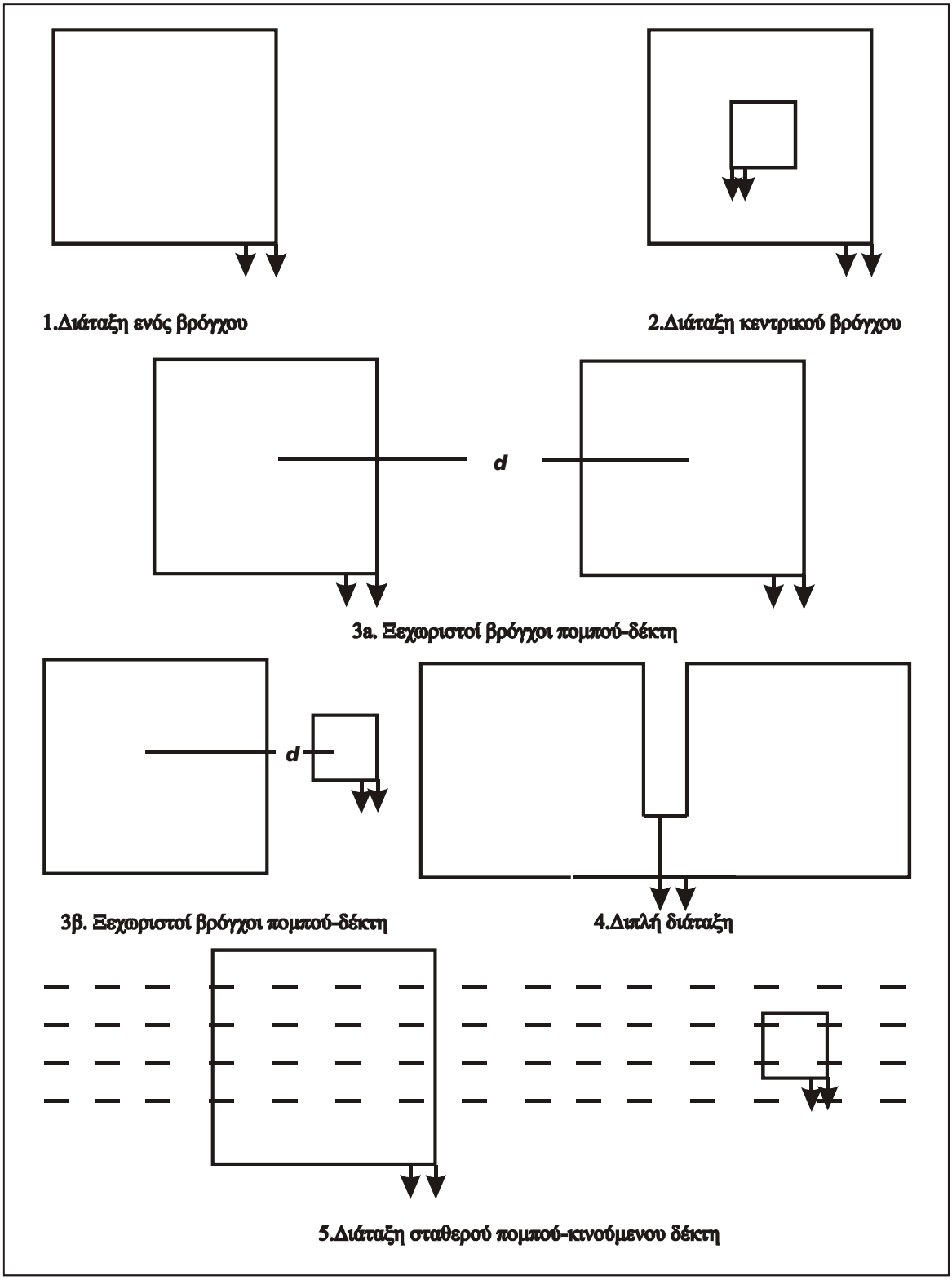
Αυτή η διάταξη είναι παραλλαγή της προηγούμενης, με την διαφορά ότι ο βρόχος του δέκτη είναι πολύσπειρος, ισοδύναμης επιφάνειας με τον πομπό, και τοποθετείται στο κέντρο του βρόχου που συνδέεται με τον πομπό.

3. Ξεχωριστοί βρόχοι πομπού-δέκτη (Separated Transmitter-Receiver Loop Configuration).

Η διάταξη αυτή μοιάζει με την διάταξη Slingram, όπου πομπός και δέκτης βρίσκονται σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Οι βρόχοι έχουν διαστάσεις μερικών δεκάδων μέτρων. Μια παραλλαγή αυτής της διάταξης είναι ο δέκτης να είναι πολύ μικρότερος από τον πομπό.

4. Διπλή διάταξη (Dual-Loop Configuration).

Σε αυτή τη διάταξη, διαμορφώνονται δύο παρακείμενοι βρόχοι που συνδέονται παράλληλα για καλύτερη σύζευξη με κάθετους αγωγούς (Spies 1975).




Σχήμα 5.2. Διατάξεις μετρήσεων ΤΕΜ (Παπαδόπουλος, 2000)

Επιπλέον, επειδή ο θόρυβος που επάγεται λόγω κινούμενων πηγών που προκαλούν παράσιτα στο σήμα είναι αντίθετος στους δύο βρόχους στην διάταξη αυτή, μειώνεται σημαντικά το επίπεδο του.

5. Μεγάλος σταθερός βρόχος πομπού-κινούμενος δέκτης (Large Fixed Transmitter, Roving Receiver).

Σε αυτή την διάταξη, υλοποιείται ένας πολύ μεγάλος βρόχος-πομπός που παραμένει σταθερός και ένας πολύ μικρότερος βρόχος-δέκτης χρησιμοποιείται κατά μήκος οδεύσεων που είναι παράλληλες προς μια πλευρά του πομπού. Το μήκος της πλευράς του πομπού είναι της τάξης μερικών εκατοντάδων μέτρων (σε πολλές περιπτώσεις φτάνει μέχρι και πέντε χιλιόμετρα).

6. Εναέριες διατάξεις (Airborne TDEM).

Η μέθοδος των TEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από αέρος για έρευνα και μάλιστα καλύπτοντας πολύ μεγάλη έκταση σε μικρό χρονικό διάστημα (Smith και Keating 1996).

## 5.5 Όργανα μετρήσεων

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για διασκοπήσεις με την μέθοδο των TDEM (σχήμα 5.3), αποτελούνται από ένα πομπό που συνδέεται με τον βρόχο προς υλοποίηση, και παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα εντάσεως μέχρι και 12 A, χρησιμοποιώντας δωδεκάβολτους συσσωρευτές ή γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος(*).

Το καταγραφικό του δέκτη βρίσκεται στο ίδιο όργανο με τον πομπό, και χρησιμοποιεί την ίδια έξοδο με αυτόν. Με ηλεκτρονικό κύκλωμα (στην περίπτωση της διάταξης μονού βρόχου) συνδέεται με τον βρόχο κατά την διακοπή του κυκλώματος.

Ο βρόχος διαρρέεται από συνεχές ρεύμα εντάσεως $I_0$ και τη στιγμή t=0 διακόπτεται απότομα η λειτουργία του κυκλώματος. Σύμφωνα με τον νόμο της αυτεπαγωγής, η μείωση του ηλεκτρικού ρεύματος από την αρχική τιμή $I_0$ στην τιμή μηδέν δεν είναι ακαριαία, αλλά διαρκεί χρόνο τ και είναι εκθετική.

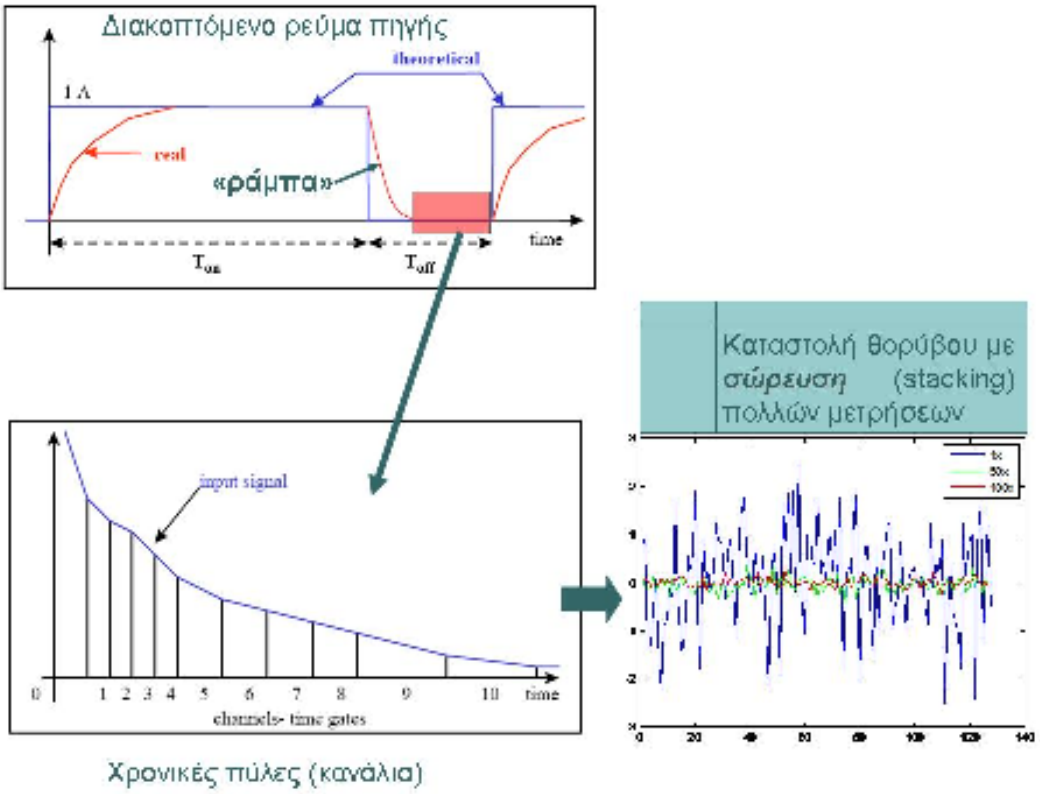
(*) Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές που έχουν παρατηρηθεί ρεύματα μέχρι και 900 A με χρήση πολλών συσσωρευτών.



Σχήμα 5.3. Στη σχήμα παρουσιάζεται το TEM Fast 48 HPC, του οίκου AEMR. Το όργανο αποτελείται από τους βρόγχους (κόκκινα καλώδια υψηλής αγωγιμότητας), τη κεντρική μονάδα παραγωγής και διάθεσης των παλμών (συσκευή σε μαύρο χρώμα) και το μονάδα καταγραφής και αποθήκευσης (palmtop – υπολογιστής χειρός).

Δημιουργούνται με αυτό τον τρόπο επαγωγικά ρεύματα σε κοντινούς αγώγιμους στόχους που βρίσκονται στο υπέδαφος, και η δημιουργία δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το οποίο ανιχνεύεται από το δέκτη.

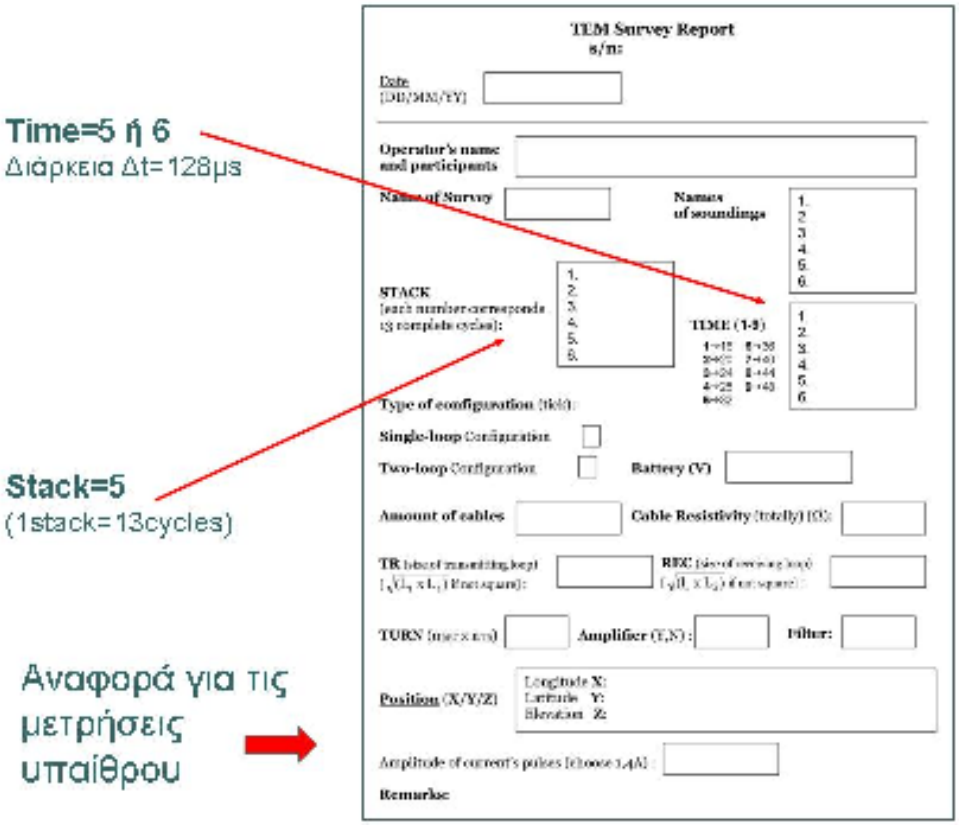
Στο σχήμα (5.4) φαίνεται ενδεικτικά η διπολική κυματομορφή του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον πομπό, κατά τον χρόνο t. Οι κατασκευαστές των οργάνων δεν δίνουν ακριβείς πληροφορίες, αλλά τα παρακάτω στοιχεία είναι διαθέσιμα ή μπορούν να εξαχθούν (Asten 1987).




Σχήμα 5.4. Ενδεικτικό παράδειγμα κυματομορφής του πομπού. Κατά το διάστημα παύσης της πομπού υπάρχει βαθμιαία μείωση η οποία φαίνεται στο διάγραμμα για τις διάφορες χρονικές πύλες. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της μέτρησης η διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές με σκοπό την άθροιση του σήματος και τη μείωση του θορύβου.

Το τμήμα της διέγερσης της κυματομορφής είναι εκθετικής μορφής ανάλογο της σταθεράς χρόνου τ του κυκλώματος, και εξαρτάται από την εμπέδηση του (μέγεθος βρόχου, αντίσταση καλωδίου, αντίσταση εδάφους) και τον σχεδιασμό του οργάνου. Η τιμή του τ κινείται μεταξύ 0.3 και 0.6 μικρών του δευτερολέπτου.

Το τμήμα της κυματομορφής που αντιστοιχεί στην μείωση του ηλεκτρικού ρεύματος από $I_0$ σε μηδέν, είναι περίπου γραμμικής μορφής και αντιστοιχεί σε χρόνο $t_r$. Η τιμή του $t_r$ κινείται μεταξύ των 30 και 350 μικρών του δευτερολέπτου, και εξαρτάται από το μέγεθος του βρόχου και το ρεύμα του πομπού. Η παροδική εξασθένιση που μετράται στον δέκτη γίνεται με πυκνή δειγματοληψία στο χρονικό παράθυρο μεταξύ $t_r$ και T/4.




Σχήμα 5.5. Όπως φαίνεται και από τη φόρμα καταγραφής των δεδομένων υπαίθρου, συνήθως λαμβάνονται μετρήσεις για Time=5 ή 6 και εφαρμόζοντας περί τις 5 αθροίσεις.

Η Ηλεκτρεγερτική Δύναμη που αναπτύσσεται στον βρόχο κατά τον χρόνο $t_r$ μπορεί γενικά να περιγραφεί από την εξίσωση

$$E(p,h)=\frac{p\mu_0 aI}{2}\int_0^{\infty}\left[\frac{\lambda-s}{\lambda+s}e^{-2\lambda h}+1\right]J_1^2(\lambda a)d\lambda\,,$$

για την περίπτωση κυκλικού βρόχου ακτίνας α, όπου:

h = το ύψος πάνω από το υπέδαφος που βρίσκεται ο βρόχος.

p = η μεταβλητή του μετασχηματισμού Laplace που αντιστοιχεί στον παράγοντα (-iω) για μεταβολή του χρόνου (-iωt).

I = το ρεύμα του πομπού.

$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$, η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό.

λ = η μεταβλητή του μετασχηματισμού.

$\mathbf{J}_1(\lambda a)$ = συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης.

$s=\sqrt{\lambda^2+\mu\sigma p}$ .

Η γενική αυτή εξίσωση αποδεικνύεται πως ισχύει και για την περίπτωση που

ο βρόχος είναι τετραγωνικής μορφής, πλευράς a (Raiche και Spies 1981).

Λόγω της μεγάλης ακρίβειας στον χρόνο καταγραφής που απαιτείται, τα όργανα των TDEM διαθέτουν πολλά ακόμα ηλεκτρονικά όργανα, γεγονός που τα καθιστά και σχετικά ακριβότερα από άλλα γεωφυσικά όργανα μέτρησης. Τα περισσότερα όργανα μετρούν με ακρίβεια 0.1 μικρών του δευτερολέπτου ($10^{-6}$), και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στο χρονικό παράθυρο από 4 μικρά μέχρι και 164 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Τα πλέον σύγχρονα όργανα δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να προγραμματίσει τη διάρκεια κατά την οποία παίρνονται οι μετρήσεις.

Η ανάπτυξη όλο και ακριβέστερων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, οδηγεί στην συνεχή εξέλιξη των οργάνων μέτρησης και στην μείωση του όγκου τους. Τα σημερινά όργανα είναι συμπαγή, εύχρηστα και διαθέτουν μικροεπεξεργαστές για την καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων.

## 5.6 Σχεδιασμός της έρευνας

Πριν από κάθε γεωφυσική έρευνα, γίνεται ένας αρχικός σχεδιασμός για τον τρόπο που θα διεξαχθεί, στον οποίο λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά των πιθανών στόχων (βάθος, σχήμα, ιδιότητες), η μορφολογία του εδάφους, η επιθυμητή ανάλυση των αποτελεσμάτων, ο χρόνος που θα απαιτηθεί κλπ.

Στην περίπτωση των TDEM, πρωταρχικό ρόλο στη γεωφυσική έρευνα παίζουν η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί και το μέγεθος του βρόχου που θα υλοποιηθεί (MacNae 1984). Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των πιθανών στόχων, λαμβάνονται και οι κατάλληλες αποφάσεις.

Ένας γενικός κανόνας για την διάταξη μονού βρόχου, είναι πως το μέγεθος του βρόχου πρέπει να είναι περίπου της ίδιας τάξης μεγέθους με το βάθος του στόχου προς εξερεύνηση. Αν π.χ. ο στόχος αναμένεται να είναι στα 100 μέτρα βάθος, το μέγεθος της πλευράς του βρόχου που θα πραγματοποιηθεί θα πρέπει να είναι μεταξύ 80 και 120 μέτρων.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως η ισχύς του πομπού και η συνοδεύουσα ενέργεια του πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου που παράγεται, αυξάνονται με το μέγεθος του βρόχου ή, για να είμαστε απόλυτα ακριβείς, με την συνολική επιφάνεια που αντιστοιχεί στον βρόχο. Αν π.χ. ο βρόχος είναι τετραγωνικός πλευράς a και αποτελείται από 2 σπείρες, τότε η επιφάνεια του βρόχου είναι $2a^2$.

Η απόσταση μεταξύ των σταθμών μετρήσεων και των γραμμών οδεύσεως, εξαρτάται από τον τύπο της έρευνας (λεπτομερής ή αναγνωριστικός).

Για αναγνωριστική έρευνα και με τη διάταξη μονού βρόχου, η απόσταση μεταξύ διαδοχικών βυθοσκοπήσεων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τέτοια ώστε ανά δύο να βρίσκονται πάνω από τον γεωλογικό στόχο που ερευνάται.

Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ διαδοχικών οδεύσεων, θα πρέπει να είναι ανάλογη του μήκους που εκτείνεται ο στόχος.

Για τη διεξαγωγή λεπτομερούς έρευνας, το βήμα δειγματοληψίας θα πρέπει να είναι αρκετά μικρότερο.

## 5.7 Πηγές σφαλμάτων στις μετρήσεις

Τα σφάλματα που μπορεί να υπεισέλθουν στις μετρήσεις TDEM μπορεί να οφείλονται σε διάφορους λόγους, όπως είναι ο γεωλογικός θόρυβος, η ημερήσια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της Γης κ.α. Οι σημαντικότεροι λόγοι είναι:

α) Γεωμετρικός θόρυβος.

Σε αυτόν συμπεριλαμβάνονται όλες οι πηγές θορύβου που πηγάζουν εξαιτίας της γεωμετρίας της κάθε διάταξης. Σε αντίθεση με τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους που λειτουργούν στην περιοχή των συχνοτήτων, όπου είναι δύσκολο να απομονωθεί η συμφασική συνιστώσα του δευτερεύοντος πεδίου από το γεωμετρικά εξαρτώμενο πρωτεύον πεδίο, τα γεωμετρικά λάθη είναι αμελητέα σε μέγεθος γιατί οι μετρήσεις λαμβάνονται κατά την απουσία του πρωτεύοντος πεδίου.

Η τοπογραφία είναι άλλη μια πηγή σφαλμάτων στις μετρήσεις. Και αυτή όμως είναι αμελητέα, καθώς μετά το πρώιμο στάδιο η διάδοση των κυμάτων έχει τέτοια συμπεριφορά ως να ήταν η επιφάνεια του εδάφους απολύτως επίπεδη.

β) Ανθρωπογενής θόρυβος.

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται όλοι οι μεταλλικοί αγωγοί που μπορεί να επάγουν ηλεκτρικό ρεύμα και βρίσκονται στην περιοχή έρευνας, όπως είναι οι γραμμές του τηλεφωνικού δικτύου, υπόγειοι αγωγοί, μεταλλικοί φράχτες κλπ. Εξαιτίας όμως της μικρής διατομής που έχουν συνήθως, οι σταθερές χρόνου τ για την απευθείας επαγωγή τους είναι συνήθως αμελητέες.

Η κύρια συνεισφορά τους στα σφάλματα προέρχεται από την ικανότητα τους να διοχετεύουν επαγόμενα ρεύματα στα περιβάλλοντα πετρώματα.

γ) Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος.

Υπάρχουν πολλές πηγές που επηρεάζουν τις μετρήσεις των TDEM και οφείλονται σε ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Γεωμαγνητικά σήματα κάτω από 1 Hz προέρχονται κυρίως από μέσα και πάνω από την Ιονόσφαιρα. Πάνω από 1 Hz το φάσμα του φυσικού θορύβου προέρχεται κυρίως από ατμοσφαιρικά παράσιτα, που είναι όλες οι φυσικές παροδικές ηλεκτρομαγνητικές μεταβολές που δημιουργούνται από εκκενώσεις κεραυνών.

Ο ανθρωπογενής θόρυβος αυτής της κατηγορίας προέρχεται από της γραμμές μεταφοράς του ηλεκτρικού δικτύου (με συχνότητα 50 ή 60 Hz), ενώ οι σταθμοί πολύ χαμηλών συχνοτήτων (VLF) παράγουν μεγαλύτερης συχνότητας θόρυβο (10 με 25 kHz). Είναι η κυριότερη πηγή σφαλμάτων, όμως είναι εύκολο να εντοπιστεί καθώς η πηγή από όπου προέρχεται είναι εμφανής.

Ο επαγωγικός θόρυβος λόγω της κίνησης της Γης μπορεί να είναι πολύ σημαντικός, καθώς το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι 100.000 φορές μεγαλύτερο από το πεδίο που δημιουργεί ο πομπός. Προβλήματα από τέτοιου είδους θόρυβο αντιμετωπίζονται όταν οι μετρήσεις απαιτούν πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα για να πραγματοποιηθούν, και η διόρθωση των μετρήσεων γίνεται με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιείται στις μαγνητικές μεθόδους.

Η αφαίρεση του θορύβου από τις μετρήσεις δεν είναι εύκολη διαδικασία. Συνήθως περιλαμβάνει αποσυνέλιξη της απόκρισης του συστήματος για τον δέκτη, την αφαίρεση του θορύβου εξαιτίας των γραμμών μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος, κανονικοποίηση για την γεωμετρία του συστήματος και (αν είναι απαραίτητο) αναγνώριση και αφαίρεση του θορύβου χαμηλής συχνότητας που προέρχεται από τους μικροπαλμούς του μαγνητικού πεδίου της Γης (Keller 1997, MacNae et al. 1984, McCracken et al. 1986, Spies 1988)

## 5.8 Συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε, το σημαντικότερο τμήμα μιας έρευνας είναι η επιλογή των θέσεων μέτρησης και η χωροθέτηση των μετρήσεων με κριτήρια κάλυψης, εντοπισμού του στόχου, μείωσης του θορύβου και βελτιστοποίησης του χρόνου και του τελικού αποτελέσματος.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση και ολοκλήρωση του έργου ήταν το TEM Fast 48 HPC (σχήμα 5.6). Πρόκειται για ένα πλήρως φορητό, εύχρηστο και αποτελεσματικό όργανο το οποίο μέχρι σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί σε

περισσότερες από 400 έρευνες ανά το κόσμο με σκοπό την εύρεση υπόγειας υδροφορίας.

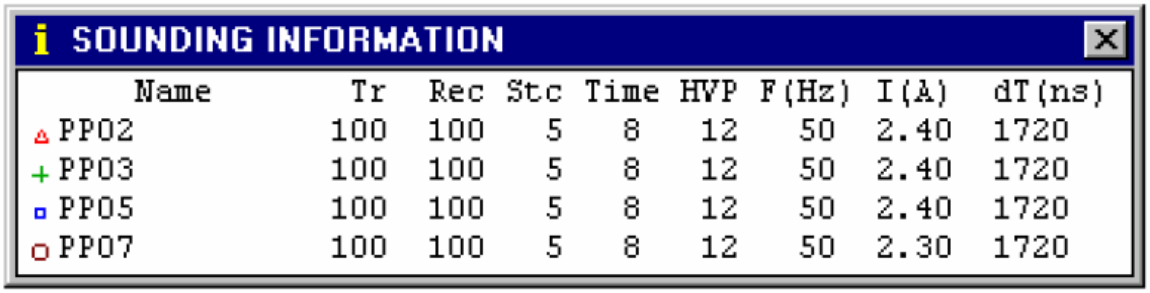



Σχήμα 5.6. Στην εικόνα εικονίζονται οι διάφορες φάσεις της έρευνας όπως και τα διάφορα περιβάλλοντα στα οποία έχει εφαρμοστεί η εν λόγω μεθοδολογία.

Για τη συλλογή των μετρήσεων ακολουθούνται τα εξής στάδια εργασίας,

- Επιλέγεται η θέση της μέτρησης,
- Με πυξίδες τύπου sighting επιλέγονται οι διευθύνσεις στις οποίες θα κινηθούν αυτοί που θα εγκαταστήσουν το βρόγχο (50X50 ή 100X100) των μετρήσεων.
- Οση ώρα πραγματοποιείται η εγκατάσταση του βρόγχου, λαμβάνονται με GPS ακριβείας οι συντεταγμένες του κέντρου του βρόγχου το οποίο αποτελεί και τη θέση της βυθοσκόπησης.
- Εισάγονται συντεταγμένες και στοιχεία της θέσης μέτρησης στον υπολογιστή χειρός ενώ επιπλέον, ορίζονται οι παράμετροι (time=5, stack 5) (σχήμα 5.5) με τις οποίες θα γίνει η συλλογή των δεδομένων. Τέλος επιλέγεται το μέγιστο ρεύμα (4A).
- Ξεκινούν οι μετρήσεις και με το πέρας των μετρήσεων γίνεται ένας πρώτος έλεγχος της ποιότητας/αξιοπιστίας των μετρήσεων καθώς και του υπολογιζόμενου μοντέλου αντίστασης με το βάθος.

- Αλλάζουμε τις παραμέτρους συλλογής των δεδομένων (time=6, stack 5) (σχήμα 5.5) και ξαναπαίρνουμε μέτρηση με σκοπό να δούμε τη διαφοροποίηση του υπολογιζόμενου μοντέλου. Εάν δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων, πέραν της μεγαλύτερης διείσδυσης του σήματος, τότε γίνεται αποσυναρμολόγηση του συστήματος και προχωράμε στην επόμενη θέση μέτρησης.
- Εαν υπάρχει διαφορά μεταξύ των μετρήσεων με διαφορετικές παραμέτρους εισαγωγής τότε χωρίς να αλλάξουμε τις παραμέτρους επαναλαμβάνουμε την ίδια μέτρηση για να δούμε την επαναληψιμότητα των μετρήσεων.


SOUNDING INFORMATION

| Name | Tr | Rec | Stc | Time | HVP | F(Hz) | I(A) | dT(ns) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PP02 | 100 | 100 | 5 | 8 | 12 | 50 | 2.40 | 1720 |
| PP03 | 100 | 100 | 5 | 8 | 12 | 50 | 2.40 | 1720 |
| PP05 | 100 | 100 | 5 | 8 | 12 | 50 | 2.40 | 1720 |
| PP07 | 100 | 100 | 5 | 8 | 12 | 50 | 2.30 | 1720 |

Σχήμα 5.7. Στοιχεία λήψης των μετρήσεων ανά θέση.

Με τη συνεχής λήψη των μετρήσεων, δημιουργείται μια βάση δεδομένων (σχήμα 5.7) στην οποία καταγράφονται στοιχεία όπως, το όνομα της θέσης (name), οι διαστάσεις του πομπού (Tr), οι διαστάσεις του δέκτη (Rec), το πλήθος των σωρεύσεων (Stc), ο χρόνος – χρονικά παράθυρα που επιλέχτηκαν (Time), η επιλογή της προστασίας από υπερφόρτωση του συστήματος (High Voltage Protection-HVP), το εφαρμοζόμενο συχνοτικό φίλτρο απομάκρυνσης βιομηχανικού θορύβου (F), η εφαρμοζόμενη ένταση του ρεύματος (I) και οι διορθωτικοί χρόνοι στην απόσβεση του ρεύματος για το βρόγχο εκπομπής (dT).

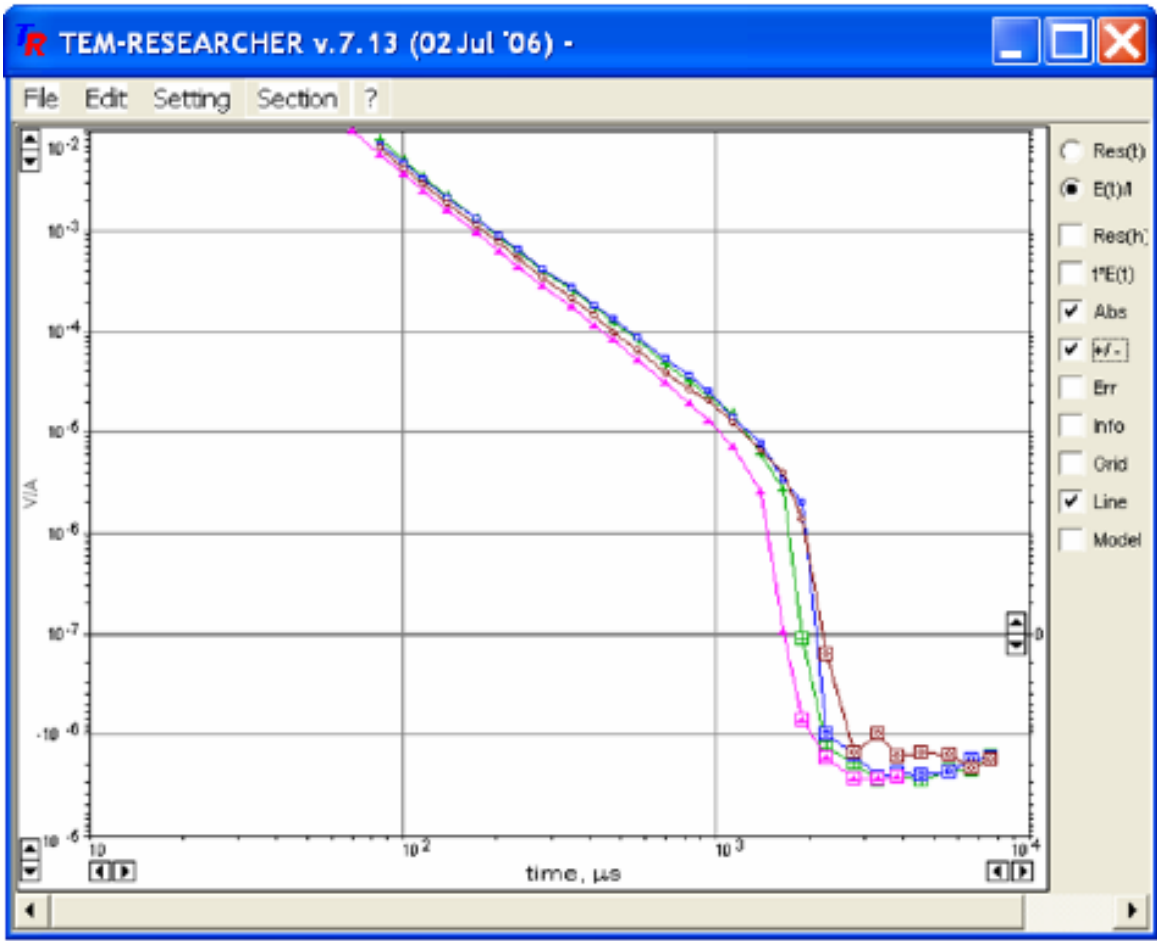
Στην πράξη, όλα τα συστήματα της μεθόδου TDEM καταγράφουν τις παροδικές τάσεις σε έναν αριθμό καναλιών χρόνου. Τις περισσότερες φορές η επεξεργασία των σημάτων γίνεται σε πραγματικό χρόνο, σε αντίθεση π.χ. με τη σεισμική μέθοδο. Καθώς για κάθε κανάλι χρόνου τα όργανα μέτρησης λαμβάνουν πολλές μετρήσεις τις οποίες μετά σωρεύουν, τα περισσότερα συστήματα είναι εφοδιασμένα με κάποιο ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής. Στη συνέχεια, τα δεδομένα ελέγχονται για την ακρίβεια τους και κανονικοποιούνται διαιρώντας τις μετρήσεις με το ρεύμα του πομπού. Επειδή τα δεδομένα όμως στη συνέχεια

μετατρέπονται από μετρήσεις μεταβολής της μετρούμενης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου σε φαινόμενες αντιστάσεις, είναι δύσκολο να γίνει γρήγορη εκτίμηση της ποιότητας τους (Spies και Eggers 1986).

Τα πρωτογενή δεδομένα έχουν τη μορφή του σχήματος (5.8) όπου στο κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου V/A σε συνάρτηση των χρονικών παραθύρων. Στο σχήμα (5.8) παρουσιάζονται 4 καμπύλες οι οποίες αντιστοιχούν στη λήψη για την ίδια θέση τεσσάρων (4) μετρήσεων διαφορετικές παραμέτρους λήψης.

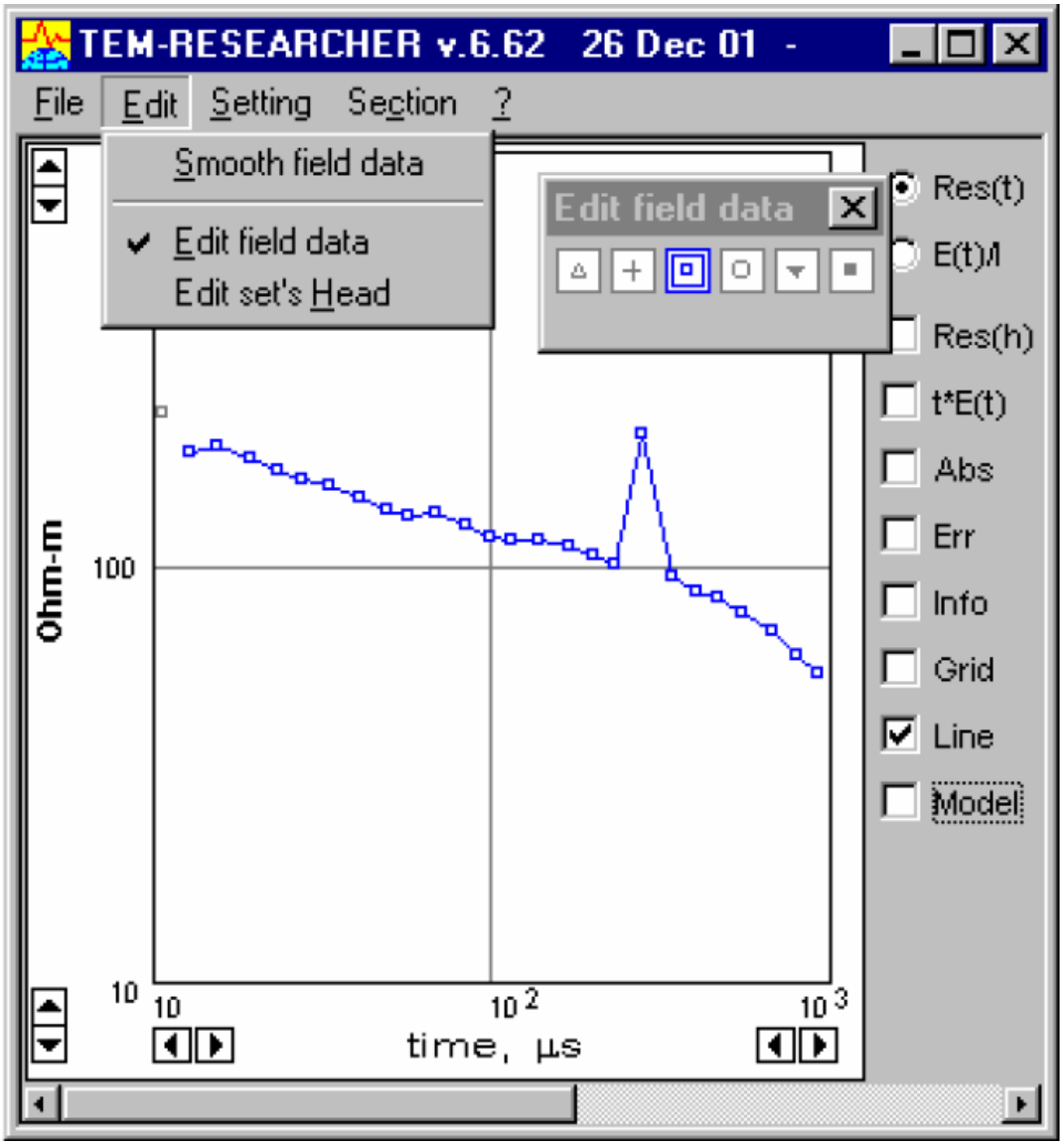
Στην περίπτωση βυθοσκοπήσεων, χαρτογραφούνται οι φαινόμενες αντιστάσεις με το χρόνο, ώστε να υπάρχει μια πρώτη ποιοτική εκτίμηση των μετρήσεων, όπως συμβαίνει με τις ηλεκτρικές μεθόδους συνεχούς ρεύματος.

Όταν τα δεδομένα προέρχονται από οδεύσεις, δημιουργούνται γραφικές παραστάσεις σε γραμμική κλίμακα, όπου χαρτογραφούνται οι μετρήσεις σε συγκεκριμένα κανάλια χρόνου κατά μήκος μιας όδευσης ώστε να ελεγχθούν τα δεδομένα για την περίπτωση σφαλμάτων σε κάποια συγκεκριμένη θέση, και για μια πρώτη ποιοτική εκτίμηση της περιοχής που δίνει τις ανωμαλίες κατά μήκος της όδευσης.



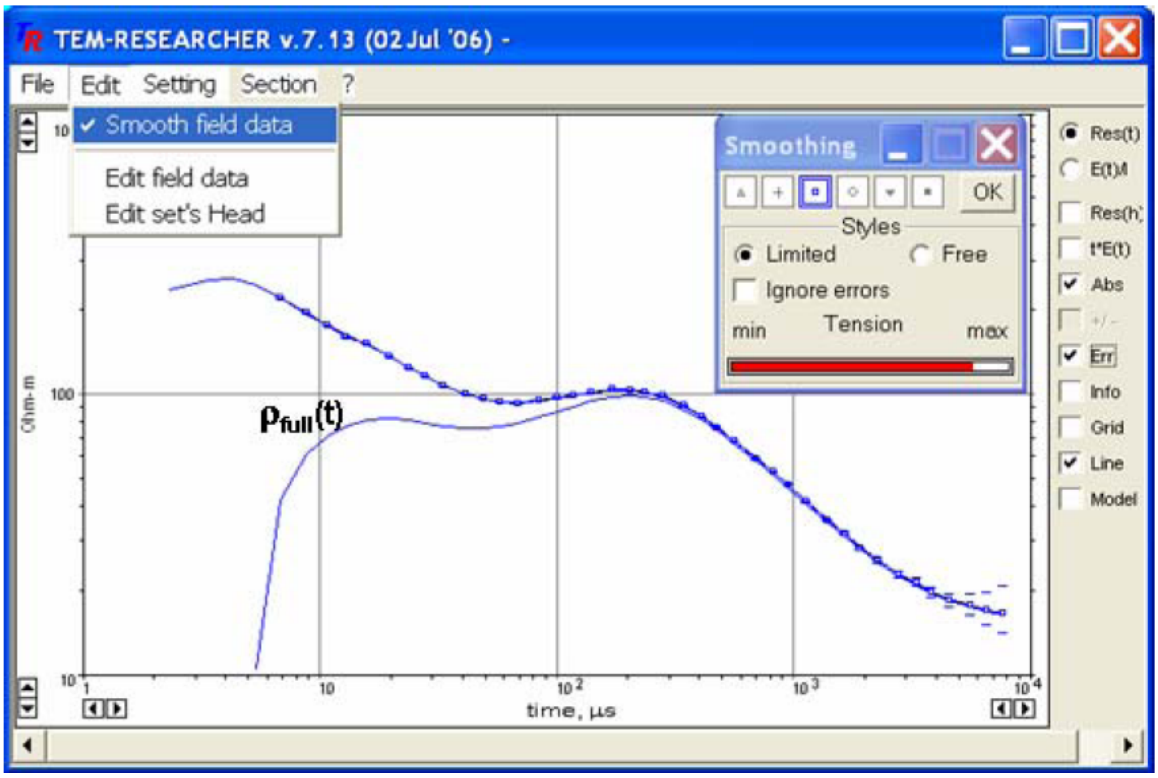

Σχήμα 5.8. Απεικόνιση των πρωτογενών δεδομένων.

Τα πρωτογενή δεδομένα πολλές φορές χρήζουν διόρθωσης λόγω του θορύβου που κατέγραψαν. Έτσι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει τα πρωτογενή δεδομένα και να παρέμβει είτε αλλάζοντας/διαγράφοντας τιμές είτε εφαρμόζοντας φίλτρα εξομάλυνσης (σχήμα 5.9)



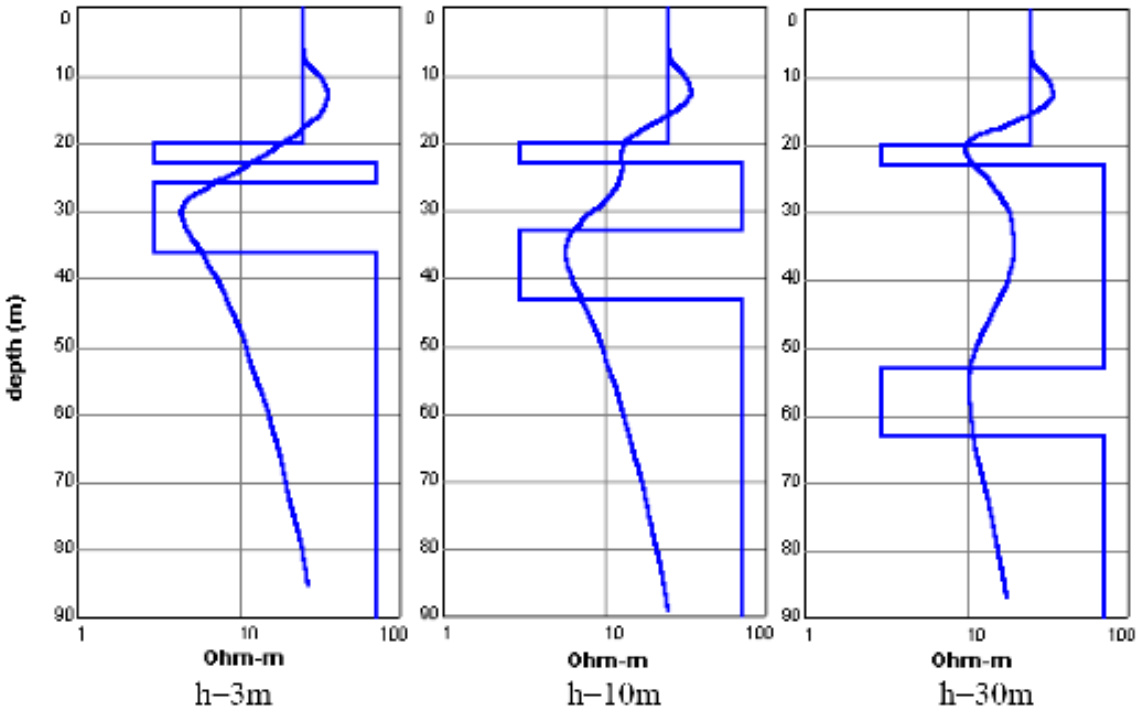

Σχήμα 5.9. Διαχείριση των πρωτογενών δεδομένων είτε με επέμβαση (διαγραφή ή τροποποίηση των δεδομένων).

Πολλές απαιτείται η εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης (σχήμα 5.10) με σκοπό η καμπύλη να αποκτήσει μια πιο «πραγματική» μορφή και τα αποτελέσματα αυτής να είναι πιο αξιόπιστα. Η αναγκαιότητα της χρήσης των φίλτρων εξομάλυνσης πηγάζει από το γεγονός ότι το όργανο καταγράφει πολλές φορές θόρυβο ο οποίος αλλοιώνει την ποιότητα του σήματος και επιπλέον οι μετρήσεις που πραγματοποιούμαι είναι μονοδιάστατες γεγονός που αντιτίθεται με τη τρισδιάστατη και ανομοιογενής υπεδάφεια δομή.



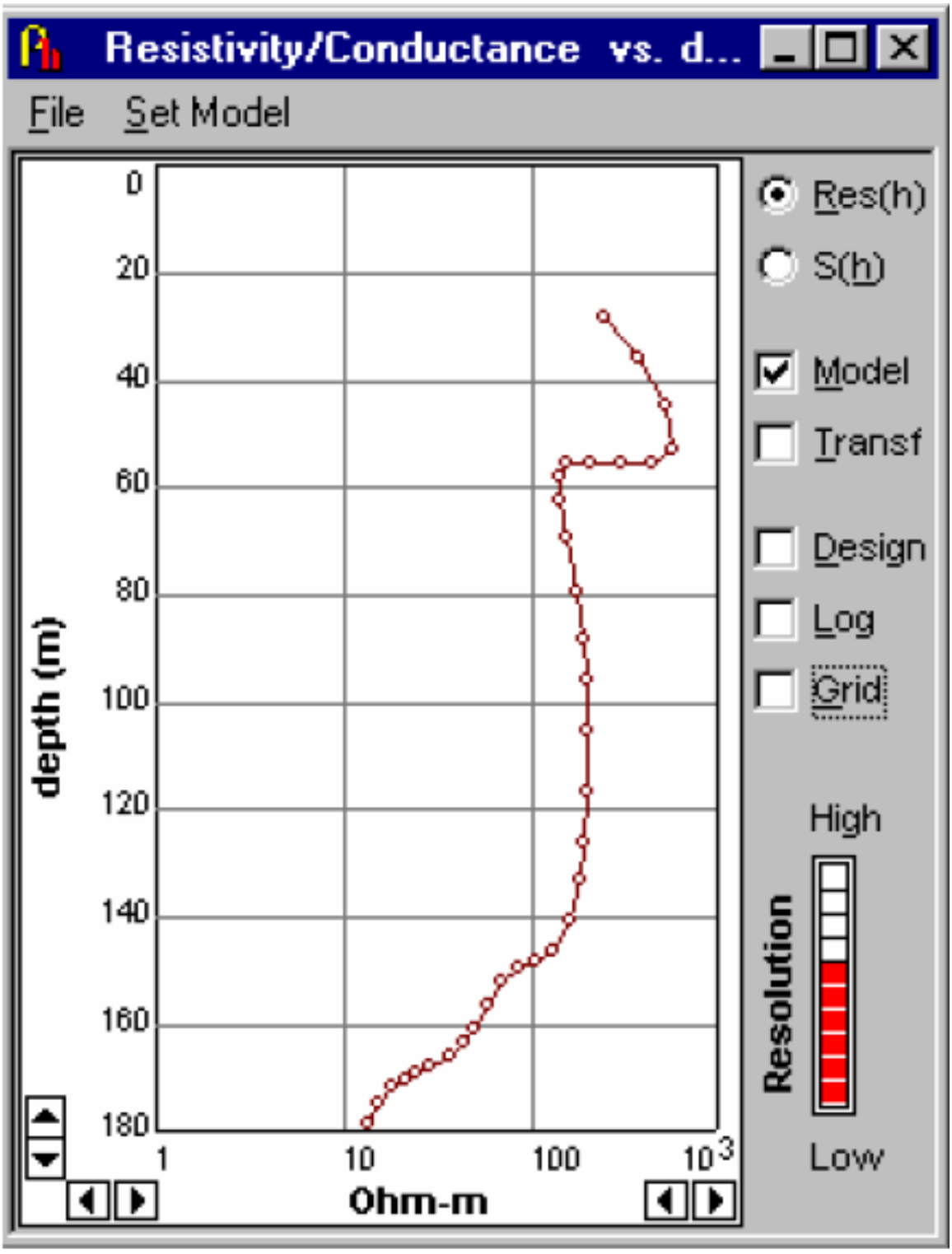

Σχήμα 5.10. Εφαρμογή των φίλτρων εξομάλυνσης στα πρωτογενή δεδομένα.

Ο τρόπος με τον οποίο δρα η εξομάλυνση στα πρωτογενή δεδομένα φαίνεται στο σχήμα (5.11). Έγινε μια προσπάθεια εφαρμογή $3^{ων}$ διαφορετικών φίλτρων εξομάλυνσης και παρουσιάζεται η επίδραση των φίλτρων στα δεδομένα. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η εφαρμοζόμενη εξομάλυνση τόσο το υπολογιζόμενο μοντέλο ομαλοποιείται/ ομογενοποιείται και χάνονται λεπτομέρειες του μοντέλου. Για τους παραπάνω λόγους, προτείνεται η εφαρμογή των φίλτρων εξομάλυνσης αλλά σε επίπεδο που δεν θα «σκιάσει» το φίλτρο, πληροφορίες που κρύβονται στο σήμα.

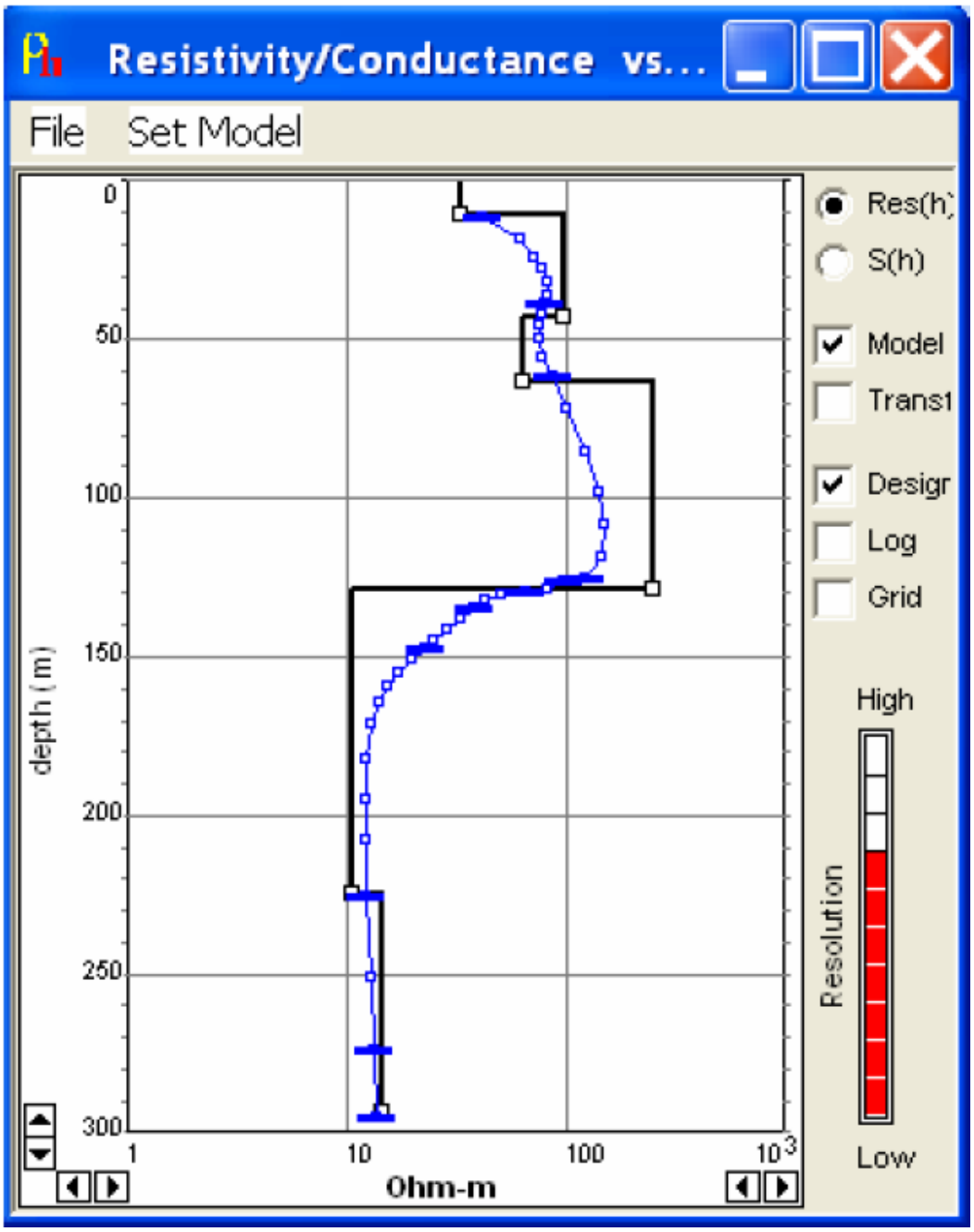



Σχήμα 5.11. Εφαρμογή φίλτρων εξομάλυνσης σε πρωτογενή δεδομένα.

Με το πέρας της εφαρμογής όποιων φίλτρων στα πρωτογενή δεδομένα, το λογισμικό μπορεί να υπολογίσει το μονοδιάστατο μοντέλο αντίστασης με το βάθος (σχήμα 5.12). Όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα, το τελικό μοντέλο απεικονίζει την αντίσταση με το βάθος ορίζοντας με αυτό τον τρόπο τη διαστρωμάτωση στη θέση μέτρησης. Ειδικότερα, στα 55 μέτρα η αντίσταση από τα 800 Ohm μεταβάλλεται στα 200 Ohm μέχρι το βάθος των 140 μέτρων οπότε και ξεκινάει η αντίσταση να πέφτει μέχρι και τα 10 Ohm στα 180 μέτρα. Συνήθως αντιστάσεις περί τα 10-30 Ohm αποτελούν ενδείξεις υπόγειας υδροφορίας.

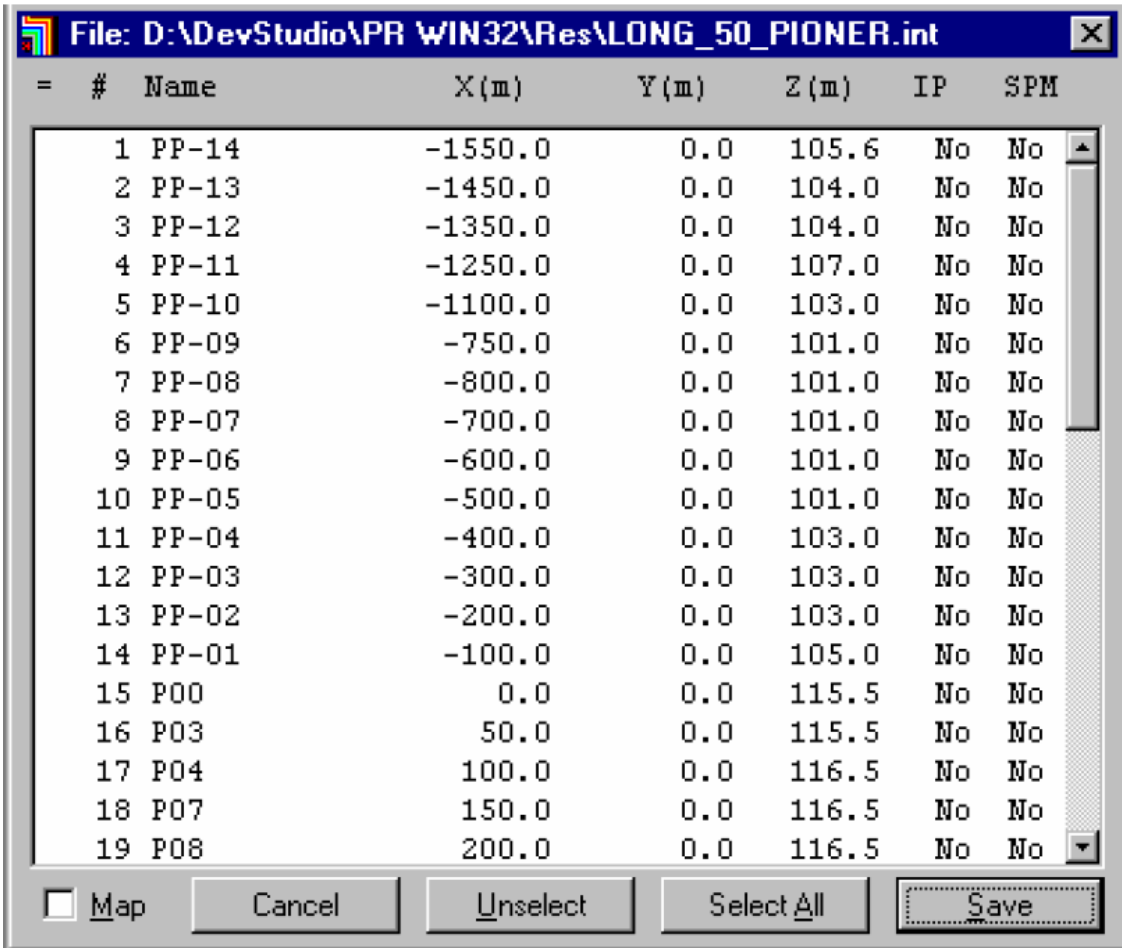



Σχήμα 5.12. Τελικό μοντέλο κατανομής της αντίστασης με το βάθος.




Σχήμα 5.13. Δυνατότητα σχεδιασμού του μοντέλου βαθών με βάση την ερμηνεία των πρωτογενών δεδομένων.

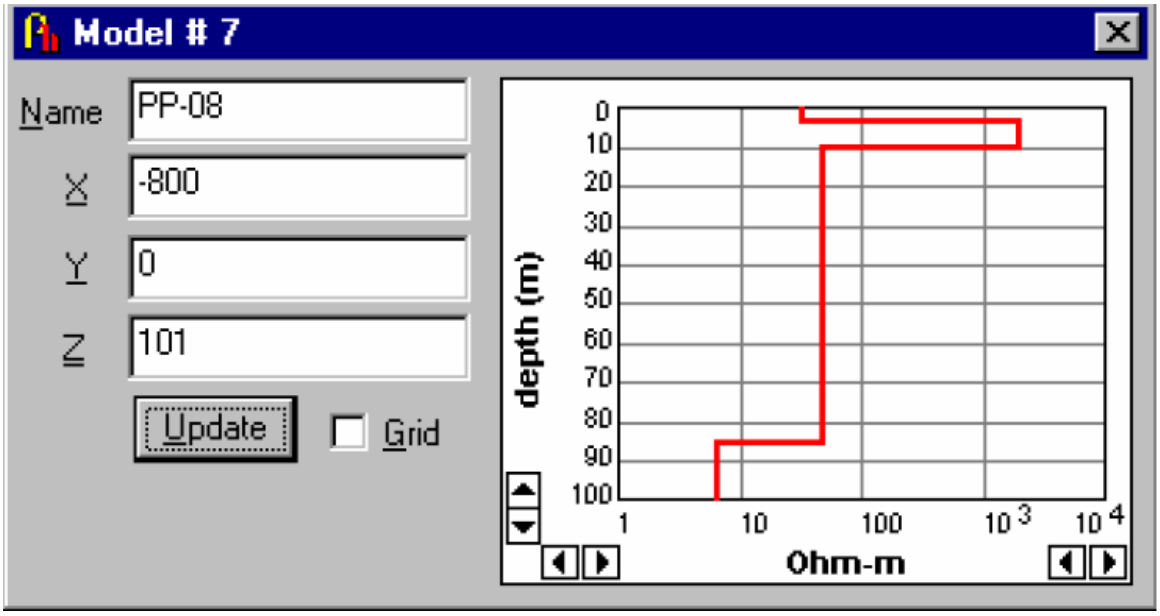
Δεδομένου ότι όποια μεταβολή στη καμπύλη συνδέεται με μεταβολή στη λιθολογία, μπορεί ο χρήστης κατά την επεξεργασία και ερμηνεία των μετρήσεων να ορίσει τη γεωλογική και λιθολογική διαστρωμάτωση. Με αυτό το τρόπο με εύκολο τρόπο προκύπτει το μοντέλο πάχους και αντιστάσεων των στρωμάτων (σχήμα 5.13).



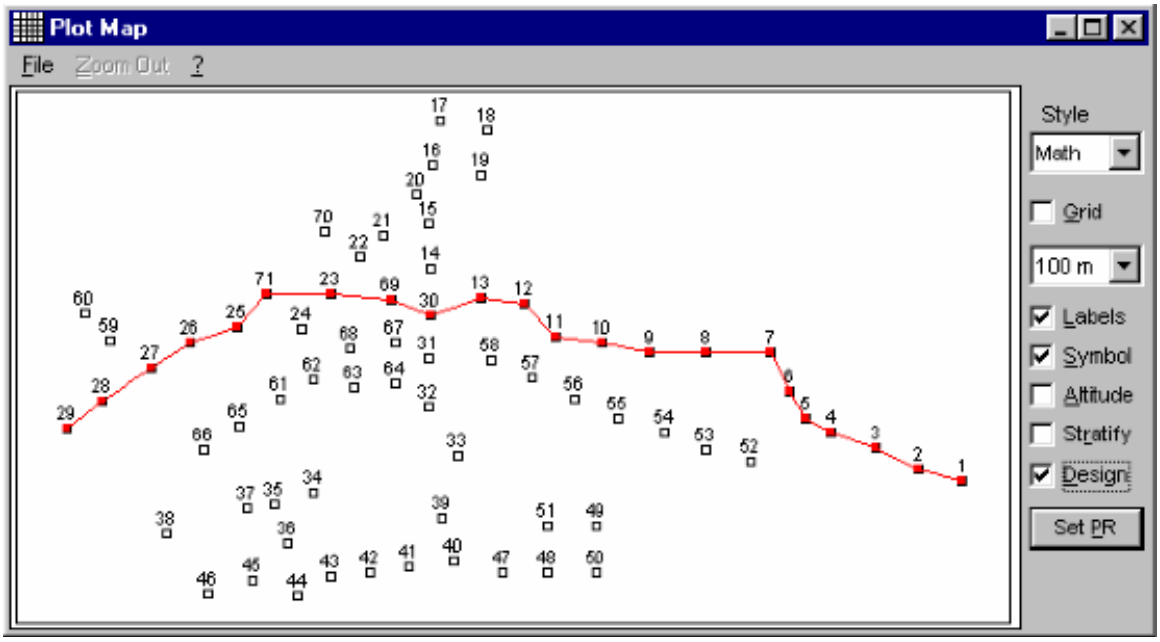

Σχήμα 5.14. Συνολική παρουσίαση όλων των δεδομένων που ελήφθησαν σε μια περιοχή έρευνας. Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει το όνομα της θέσης μέτρησης, τις χωρικές συντεταγμένες των θέσεων μέτρησης, το υψόμετρο κάθε θέσης μέτρησης και στοιχεία για φαινόμενα επαγόμενης πολικότητας και καταγραφής παραμαγνητικών δεδομένων.

Ανάλογα με το σκοπό του έργου, επιλέγεται η χωροθέτηση των μετρήσεων η οποία είναι είτε μετρήσεις σε κάνναβο με σκοπό τη τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου, είτε μετρήσεις κατά μήκος οδεύσεων με σκοπό την αποτύπωση και παρακολούθηση της συνέχειας δομών ενδιαφέροντος (σχήμα 5.14).

Σε κάθε περίπτωση ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις και για κάθε μία από αυτές να δει τα στοιχεία της και την ερμηνεία της (σχήμα 5.14).



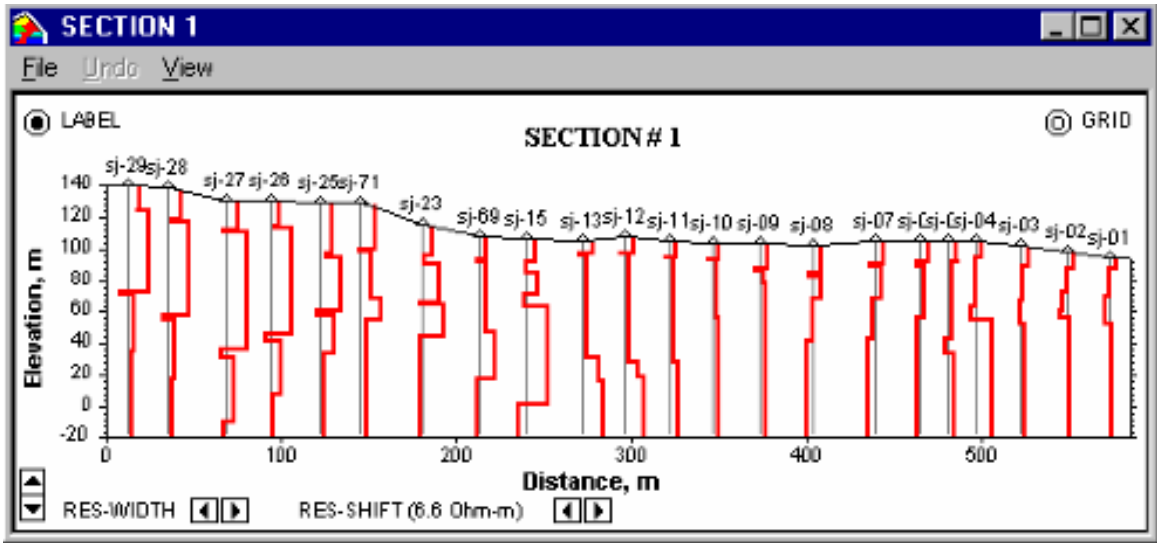

Σχήμα 5.15. Παρουσίαση των στοιχείων για μια από τις βυθοσκοπήσεις.




Σχήμα 5.16. Επιλογή βυθοσκοπήσεων η μονοδιάστατη ερμηνεία των οποίων θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενός δισδιάστατου μοντέλου κατανομή των αντιστάσεων με το βάθος.

Στην περίπτωση κατά την οποία οι μετρήσεις σε μια περιοχή έρευνας είναι χωρικά κατανεμημένες (σχήμα 5.15, 5.16), τότε ο χρήστης μπορεί να επιλέξει κάποιες

βυθοσκοπήσεις η ερμηνεία των οποίων θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενός δισδιάστατου μοντέλου κατανομής των αντιστάσεων με το βάθος. Η παραγωγή του μοντέλου γίνεται με παρεμβολή των μονοδιάστατων ερμηνειών των επιμέρους βυθοσκοπήσεων.

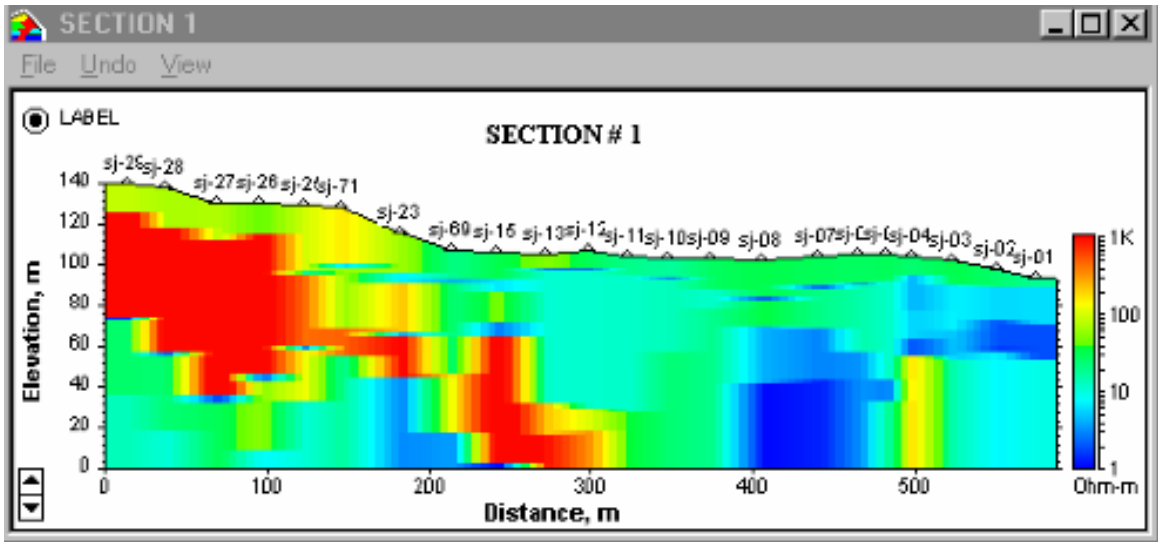



Σχήμα 5.17. Δισδιάστατη παρουσίαση των αποτελεσμάτων με τη μορφή διαγραφιών αγωγιμότητας με το βάθος.

Τα δισδιάστατα μοντέλα μπορούν να απεικονιστούν με διάφορους τρόπους. Στο σχήμα (5.17) τα μοντέλα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραφιών αγωγιμότητας με το βάθος. Στην περίπτωση αυτή ορίζεται ένα όριο αντίστασης και οι καμπύλες (κόκκινες γραμμές) μεταβάλλονται εκατέρωθεν αυτής της τιμής. Αυτός ο τρόπος παρουσίασης των δεδομένων δεν είναι ο πλέον «εντυπωσιακός» αλλά σίγουρα είναι κατατοπιστικός διότι μπορεί να χρήστης να ορίσει π.χ. όριο τα 10 Ohm.m (παρουσία υπόγειας υδροφορίας) και σε όσες θέσεις οι βυθοσκοπήσεις έχουν τιμές μικρότερες του ορίου αυτόματα αποτελεί για τον ερμηνευτή ένδειξη υδροφορίας.

Ένας άλλος τρόπος παρουσίασης των δεδομένων είναι με τη χρήση χρωματικής κλίμακας. Στη περίπτωση αυτή, η τομή στην περιοχή έρευνας χωρίζεται σε εικονοστοιχεία το χρώμα του οποίου εξαρτάται από τη τιμή αντίστασης του συγκεκριμένου σημείου απεικόνισης (Σχήμα 5.18). Στη περίπτωση αυτή τα ψυχρά

χρώματα (μπλε) αναφέρονται σε μικρές αντιστάσεις (υψηλές αγωγιμότητες) ενώ τα θερμά χρώματα (κόκκινα) αναφέρονται σε υψηλές αντιστάσεις (χαμηλές αγωγιμότητες).




Σχήμα 5.18. Δισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος.

## 5.9 Εφαρμογές της μεθόδου

Η μέθοδος των παροδικών ηλεκτρομαγνητικών κυματομορφών αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την μεταλλευτική έρευνα, κυρίως στην Σοβιετική Ένωση και στην Αυστραλία.

Τα τελευταία χρόνια όμως, γίνεται μεγάλη χρήση της μεθόδου σε πολλούς τομείς γεωλογικών εφαρμογών.

- Μεταλλευτική έρευνα (Kooper και Swift 1994, Withers et al. 1994, Sinha 1990, Maher 1992, Buselli et al. 1986).
- Γεωθερμικά πεδία (Pellerin et al. 1996).
- Περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές έρευνες (Chen 1998, Fitterman et al. 1986, Hoekstra και Blohm 1985).
- Ανακάλυψη υδροφόρων και υφάλμυρων οριζόντων (Taylor et al. 1992, McNeil 1986).
- Συνδυασμός των TDEM με άλλες γεωφυσικές μεθόδους (Sternberg et al.1988, Raiche et al 1985, Meju 1996).

Εξαιτίας του μεγάλου πλεονεκτήματος της μεθόδου να μπορεί να

λειτουργήσει σε μικρές εκτάσεις σε σχέση με το βάθος διασκόπησης η χρήση της είναι ολοένα και αυξανόμενη, ενώ και σε ερευνητικό στάδιο γίνονται πολλές μελέτες για την περαιτέρω εκμετάλλευση της μεθόδου και σε άλλους τομείς.

# 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 6.1 Προγραμματισμός και Λήψη Γεωφυσικών Μετρήσεων

Στο σχήμα (6.1) παρουσιάζεται απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας από το Google Earth στο οποίο απεικονίζεται η περιοχή έρευνας (εσωκλείεται εντός του πολυγώνου με τις διακεκομμένες γραμμές).



Σχήμα 6.1. Απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας της περιοχής έρευνας.

Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 17 Οκτωβρίου 2008 και ολοκληρώθηκαν στις 17 Νοεμβρίου 2008. Για την εκτέλεση των μετρήσεων έλαβαν μέρος οι,

- Παντελεήμων Σουπιός, Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης
- Γεωργία Πέγγα, Σπουδάστρια Τμήματος Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος ΤΕΙ Κρήτης
- Παναγιώτα Σαρρίδου, Σπουδάστρια Τμήματος Φυσικών Πόρων &

Περιβάλλοντος ΤΕΙ Κρήτης

- Παναγιώτης Κανελλόπουλος, Σπουδάστής Τμήματος Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος ΤΕΙ Κρήτης

Η επεξεργασία, διαχείριση και απεικόνιση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε από τους,

- Μαρία Κούλη, Δρ. Γεωλόγος, Επ. Συνεργάτης, ΤΕΙ Κρήτης.
- Δέσποινα Καλησπέρη, Υπ. Διδάκτορας, Brunel University, U.K.
- Ασημίνα Κάντα, Υπ. Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια, Portsmouth University, U.K.

Κατά τη διάρκεια της γεωφυσικής διασκόπησης πραγματοποιήθηκαν 256 βυθοσκοπήσεις σε 106 διαφορετικές θέσεις εντός του καννάβου των μετρήσεων. Στην συνέχεια δίνονται όλα τα στοιχεία των πρωτογενών δεδομένων (Πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.1. Βάση δεδομένων στην οποία καταγράφονται στοιχεία των μετρήσεων που ελήφθησαν στα πλαίσια του εν λόγω έργου όπως, ο αύξοντας αριθμός των μετρήσεων (number of soundings), το όνομα της θέσης (name), οι διαστάσεις του πομπού (Tr), οι διαστάσεις του δέκτη (Rec), ο χρόνος – χρονικά παράθυρα που επιλέχθησαν (Time), το πλήθος των σωρεύσεων (Stc), η επιλογή της προστασίας από υπερφόρτωση του συστήματος (High Voltage Protection-HVP), η εφαρμοζόμενη ένταση του ρεύματος (I) και το εφαρμοζόμενο συχνοτικό φίλτρο απομάκρυνσης του βιομηχανικού θορύβου (F).

| Number_of_Soundings | NAME | TR | REC | TIME | STACK | HVP | I(A) | F(Hz) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | A001 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 2 | A001A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 3 | A002 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 4 | A002A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 5 | A003 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 6 | A003A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 7 | A004 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 8 | A005 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 9 | A005A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 10 | A006 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 11 | A006A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 12 | A007 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 13 | A007A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 14 | A008 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 15 | A008A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 16 | A009 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 17 | A009A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 18 | A010 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 19 | A010A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 20 | A011 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 21 | A011A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 22 | A012 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 23 | A012A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 24 | A013 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 25 | A013A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 26 | A014 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 27 | A014A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 28 | A015 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 29 | A015A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 30 | A015B | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 31 | A016 | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 32 | A016A | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 33 | A016B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 34 | A016C | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 35 | A017 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 36 | A017A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 37 | A017B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 38 | A018 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 39 | A018A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 40 | A019 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 41 | A019A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 42 | A019B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 43 | A020 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 44 | A020A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 45 | A021 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 46 | A021A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 47 | A021B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 48 | A022 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 49 | A022A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 50 | A022B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 51 | A023 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |

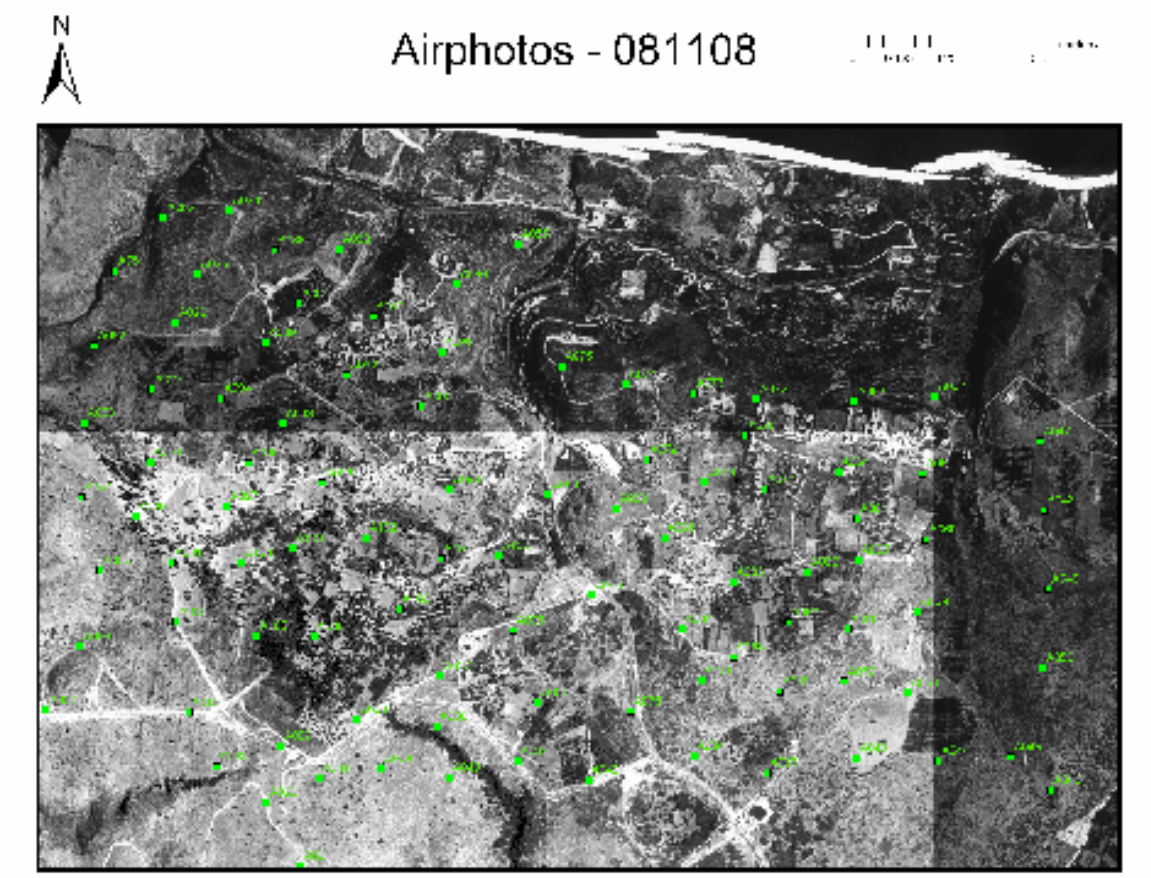
| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 52 | A023A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 53 | A023B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 54 | A024 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 55 | A024A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 2 | 50 |
| 56 | A025 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 57 | A025A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 58 | A026 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 59 | A026A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 60 | A026B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 61 | A027 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 62 | A027A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 63 | A028 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 64 | A028A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 65 | A029 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 66 | A029A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 67 | A029B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 68 | A030 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 69 | A030A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 70 | A030B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 71 | A031 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 72 | A031A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 73 | A032 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 74 | A032A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 75 | A033 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 76 | A033A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 77 | A034 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 78 | A034A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 79 | A034B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 80 | A035 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 81 | A035B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 82 | A035C | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 83 | A036 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 84 | A036A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 85 | A036B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 86 | A037 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 87 | A037A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 88 | A037B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 89 | A038 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.4 | 50 |
| 90 | A038A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 91 | A038B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 92 | A039 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 93 | A039A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 94 | A039B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 95 | A040 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 96 | A04A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 97 | A040B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 98 | A041 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 99 | A041A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 100 | A041B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 101 | A042 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 102 | A042A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 103 | A042B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |

| 104 | A043 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 105 | A043A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 106 | A044 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 107 | A044A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 108 | A044B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 109 | A045 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 110 | A045A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 111 | A045B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 112 | A046 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 113 | A046A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 114 | A047 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 115 | A047A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 116 | A048 | 49 | 49 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 117 | A048A | 49 | 49 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 118 | A049 | 49 | 49 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 119 | A049A | 49 | 49 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 120 | A050 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 121 | A050A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 122 | A051 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 123 | A051A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 124 | A052 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 125 | A052A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 126 | A052B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 127 | A053 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 128 | A053A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 129 | A054 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 130 | A054A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 131 | A055 | 48 | 48 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 132 | A055A | 48 | 48 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 133 | A056 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 134 | A056A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 135 | A057 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 136 | A057A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 137 | A057B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 138 | A058 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 139 | A058A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 140 | A059 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 141 | A059A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 142 | A060 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 143 | A060A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 144 | A061 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 145 | A061A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 146 | A062 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 147 | A062A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 148 | A063 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 149 | A063A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 150 | A064 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 151 | A064A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 152 | A065 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 153 | A065A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 154 | A066 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 155 | A066A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 156 | A066B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 157 | A067 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 158 | A067A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 159 | A068 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 160 | A068A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 161 | A069 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 162 | A069A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 163 | A069B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 164 | A070 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 165 | A070A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 166 | A071 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 167 | A071A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 168 | A071B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 169 | A072 | 50 | 50 | 6 | 5 | 5 | 1 | 50 |
| 170 | A072A | 50 | 50 | 5 | 5 | 5 | 1 | 50 |
| 171 | A073 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 172 | A073A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 173 | A074 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 174 | A074A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 175 | A075 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 176 | A075A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 177 | A075B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 178 | A076 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 179 | A076A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 180 | A077 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 181 | A077A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 182 | A078 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 183 | A078A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 184 | A079 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 185 | A079A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 186 | A080 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 187 | A080A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 188 | A080B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 189 | A081 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 190 | A081A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 191 | A081B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 192 | A081C | 50 | 50 | 7 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 193 | A082 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 194 | A082A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 195 | A083 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 196 | A083A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 197 | A084 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 198 | A084A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 199 | A085 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 200 | A085A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 201 | A086 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 202 | A086A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 203 | A086B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 204 | A087 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 205 | A087A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 206 | A087B | 50 | 50 | 7 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 207 | A088 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 208 | A088A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 209 | A088B | 50 | 50 | 7 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 210 | A089 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 211 | A089A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 212 | A090 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 213 | A090A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 214 | A090B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 215 | A091 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 216 | A091A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 217 | A091B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 218 | A092 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 219 | A092A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 220 | A093 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 221 | A093A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 222 | A094 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 223 | A094A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 224 | A094B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 225 | A095 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 226 | A095A | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 227 | A096 | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 228 | A096A | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 229 | A097 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 230 | A097A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 231 | A098 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 232 | A098A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 233 | A098B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 234 | A099 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 235 | A099A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 236 | A099B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 237 | A100 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 238 | A100A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 239 | A100B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 240 | A101 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 241 | A101A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 242 | A101B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 243 | A102 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 244 | A102A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 245 | A102B | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 246 | A103 | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 247 | A103A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 248 | A104 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 249 | A104A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 250 | A105 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 251 | A105A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 252 | A105B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 253 | A106 | 50 | 50 | 6 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 254 | A106A | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 255 | A106B | 50 | 50 | 5 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |
| 256 | A106C | 50 | 50 | 7 | 5 | 6 | 3.7 | 50 |

Στα πλαίσια της μελέτης δομήθηκε βάση σε Γ.Σ.Π. (G.I.S.) διαμέσου της οποίας έγινε όλη η διαχείριση και παρουσίαση των δεδομένων (σχήμα 6.2). Επιπλέον, στην βάση εισήχθησαν όλα τα διαθέσιμα γεωπεριβαλλοντικά δεδομένα για να είναι δυνατή η ταυτόχρονη παρουσίαση και αξιολόγηση όλων των δεδομένων.




Σχήμα 6.2. Απόσπασμα αεροφωτογραφίας στην οποία εισήχθησαν οι θέσεις των γεωφυσικών διασκοπήσεων που πραγματοποιήθηκαν καθώς και η ονομασία της κάθε μέτρησης. Είναι εμφανής η πυκνή δειγματοληψία (οι μετρήσεις λήφθησαν ανά 150-200 μέτρα κατά X και Y) με την οποία πραγματοποιήθηκε η έρευνα.

Στα κεφάλαια 1 και 2, παρουσιάστηκαν όλα τα διαθέσιμα γεωλογικά, υδρογεωλογικά, υδρολιθολογικά και τεκτονικά δεδομένα.

Στη συνέχεια θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων και απεικόνιση αυτών σε όλες τις διαστάσεις πριν γίνει η τελική αξιολόγηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έρευνας λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διαθέσιμα στοιχεία που μας παραχωρήθηκαν για τη μελέτη.

## 6.2 Εξοπλισμός

Για την εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκαν τα κάτωθι επιστημονικά όργανα:

- TEM-FAST 48-HPC, APPLIED ELECTROMAGNETIC RESEARCH (AEMR). Ένα αυτόματο πολυκαναλικό/πολυσυχνοτικό σύστημα μέτρησης κατανομής της αντίστασης με το βάθος.
- Υπολογιστής χειρός HP – Palmtop. Συλλογή και απεικόνιση των δεδομένων.
- 2 πολύκλωνα καλώδια πολύ χαμηλής αντίστασης και συγκεκριμένης διατομής μήκους 100 μέτρα το καθένα.
- 2 μπαταρίες 12V και 143Ah οι οποίες συνδέονται σε σειρά για να αποδώσουν 24V και να υπάρχει η δυνατότητα μεγαλύτερης αυτονομίας στο ύπαιθρο.
- Καλώδιο RS232 για μεταφορά των δεδομένων από το σύστημα καταγραφής στον υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.
- Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή HP450 για την αποτύπωση των θέσεων και τη συλλογή φωτογραφικού υλικού.
- GPS Garmin 12XL για την αποτύπωση των γραμμών μέτρησης.

## 6.3 Επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης

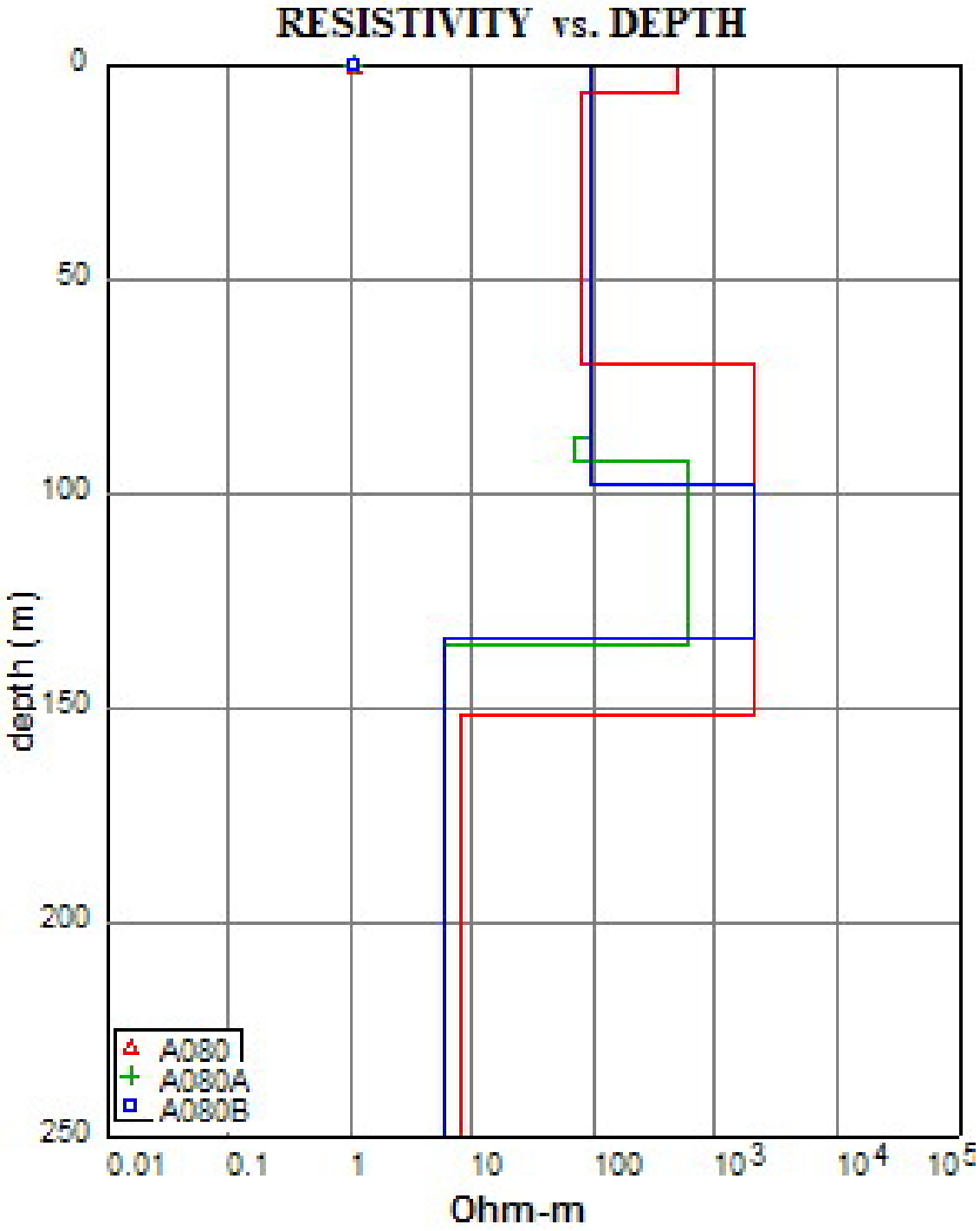
Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το λογισμικό TEM-RES της TEM-Fast του οίκου AEMR. Εφαρμόστηκαν αλγόριθμοι αντιστροφής για τον υπολογισμό του μονοδιάστατου μοντέλου ενώ η διαδικασία είναι σχεδόν αυτοματοποιημένη. Όλες οι αντιστροφές παρουσίασαν σχετικά μικρό σφάλμα (RMS 2-7 %).

### 6.3.1 Μονοδιάστατη (1D) ερμηνεία των αποτελεσμάτων

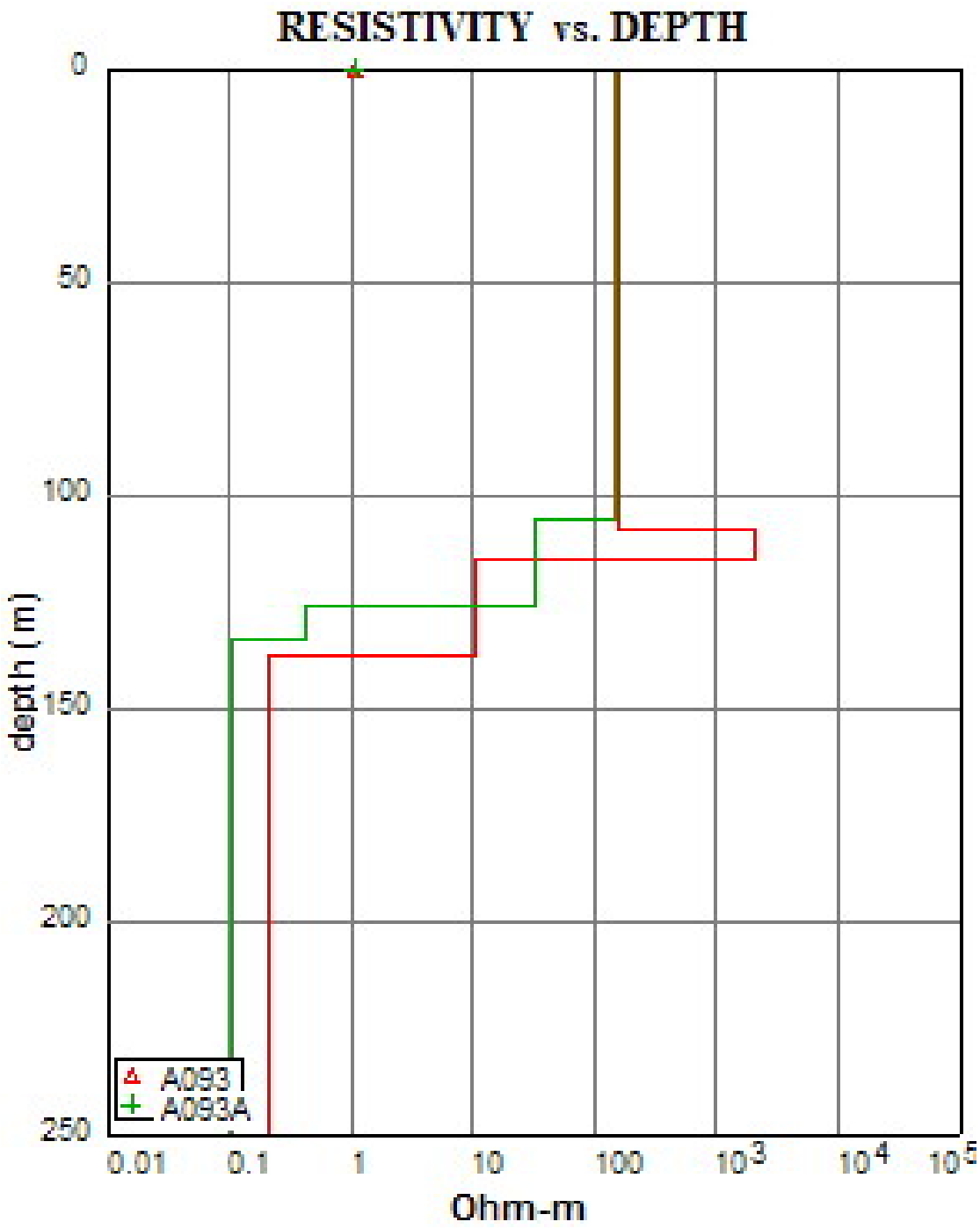
Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, όλες οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν κατάλληλα με σκοπό να απομακρυνθούν κακής ποιότητας δεδομένα, να εξομαλυνθούν όσα δεδομένα απαιτούσαν την χρήση φίλτρων κανονικοποίησης. Για κάθε θέση εκτελέστηκαν όπως προαναφέρθηκε πέραν της μίας μέτρησης με σκοπό να δούμε την σταθερότητα του μοντέλου μέσω της επαναληψιμότητας αυτού. Στη συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα από την ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων σε 6 διαφορετικές θέσεις διασκόπησης (σχήματα 6.3, 6.4, 6.5 και 6.6). Στις θέσεις στις οποίες σε βάθος μικρότερο των 170 μέτρων η αντίσταση είναι περί τα 10 Ohm.m μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι υπάρχει υπόγεια υδροφορία.



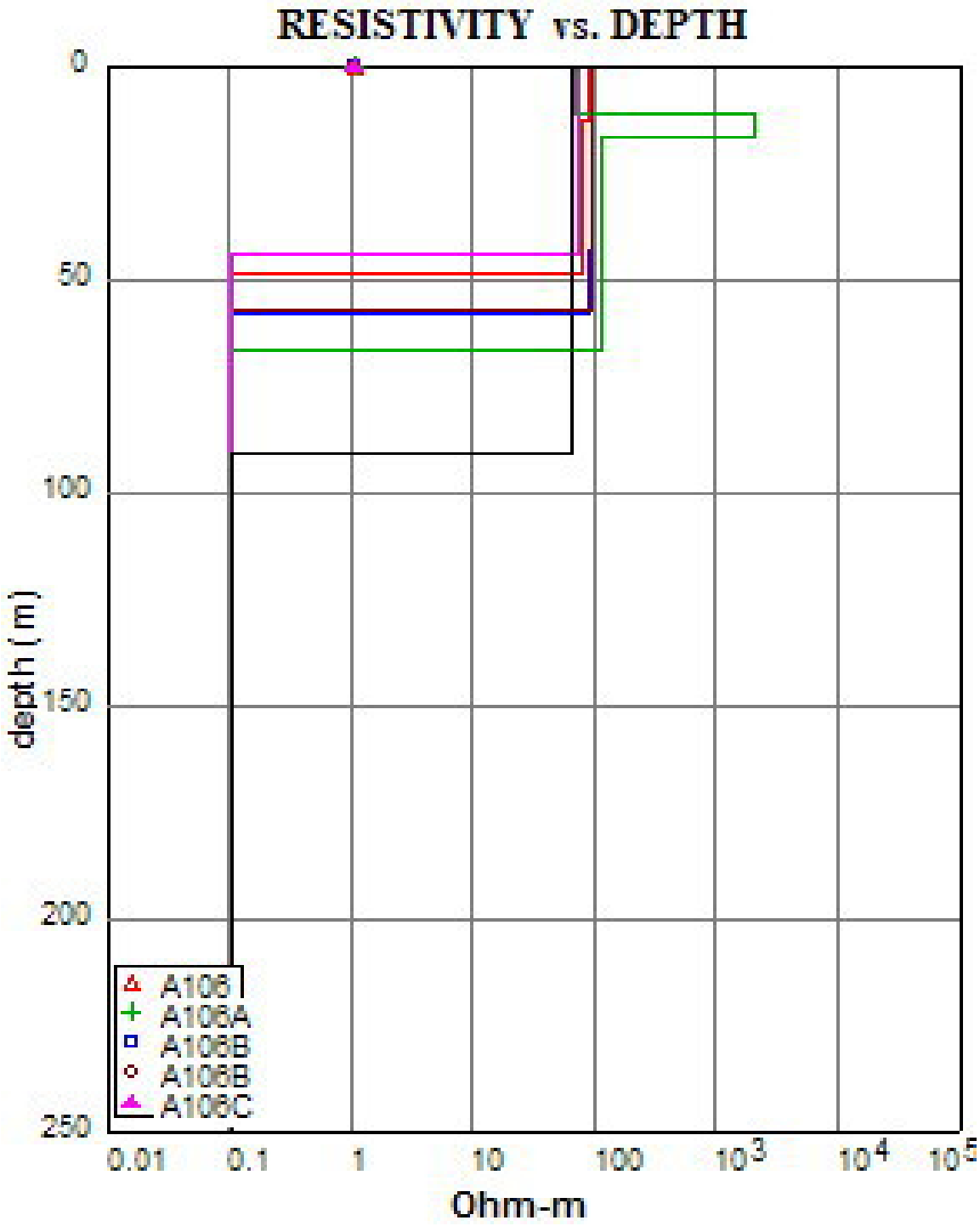

Σχήμα 6.3. Μονοδιάστατη ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων που ελήφθησαν στις θέσεις Α053, Α054 και Α055.




Σχήμα 6.4. Μονοδιάστατη ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων που ελήφθησαν στη θέση Α080.




Σχήμα 6.5. Μονοδιάστατη ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων που ελήφθησαν στη θέση Α093.

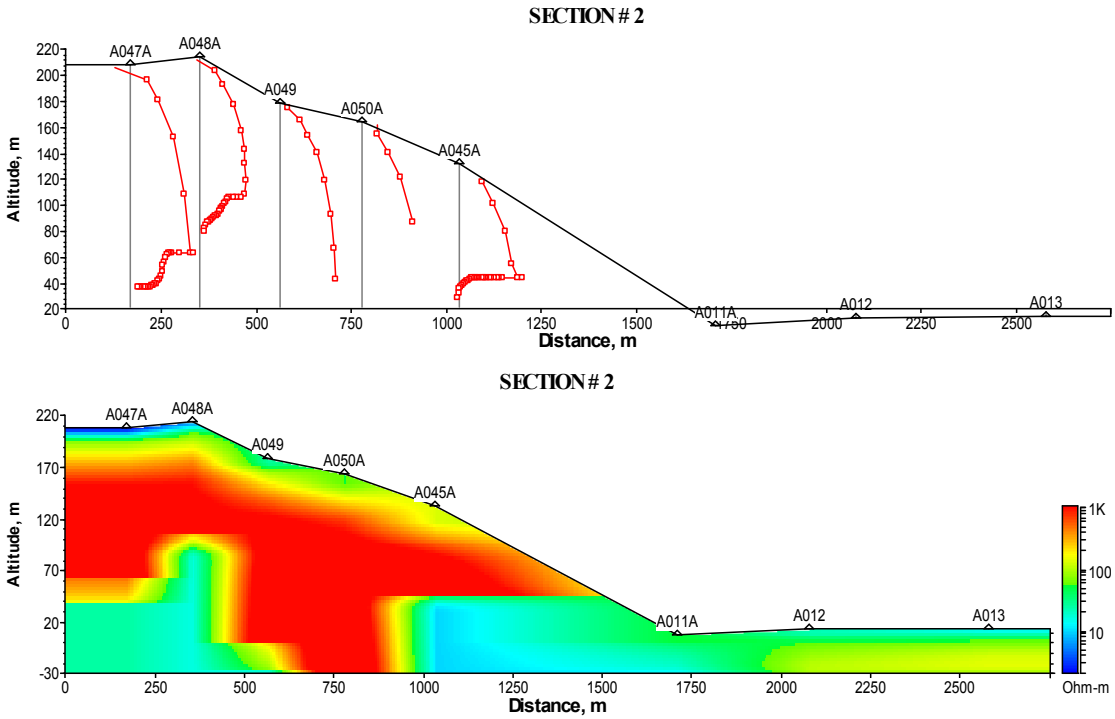



Σχήμα 6.6. Μονοδιάστατη ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων που ελήφθησαν στη θέση Α106.

### 6.3.2 Δισδιάστατη (2D) απεικόνιση των αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα

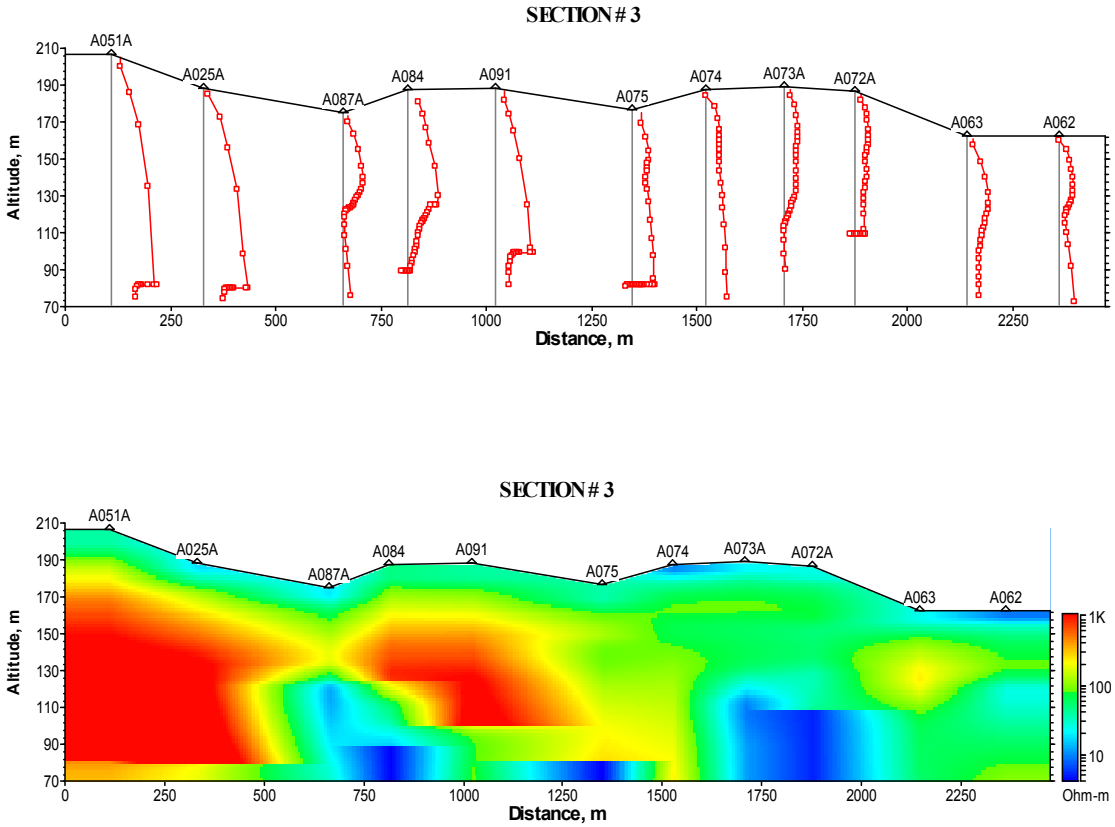
Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να παρουσιαστούν και με τη μορφή δισδιάστατης κατανομής των αντιστάσεων του υπεδάφους με το βάθος. Κατασκευάστηκαν περισσότερες από 20 τομές εκ των οποίων, 3 παρουσίασαν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και για αυτό το λόγο περιγράφονται στην συνέχεια.

Ειδικότερα επιλέχθηκαν τρεις τομές με γενική διεύθυνση Β-Ν, Δ-Α και Β-Ν αντίστοιχα



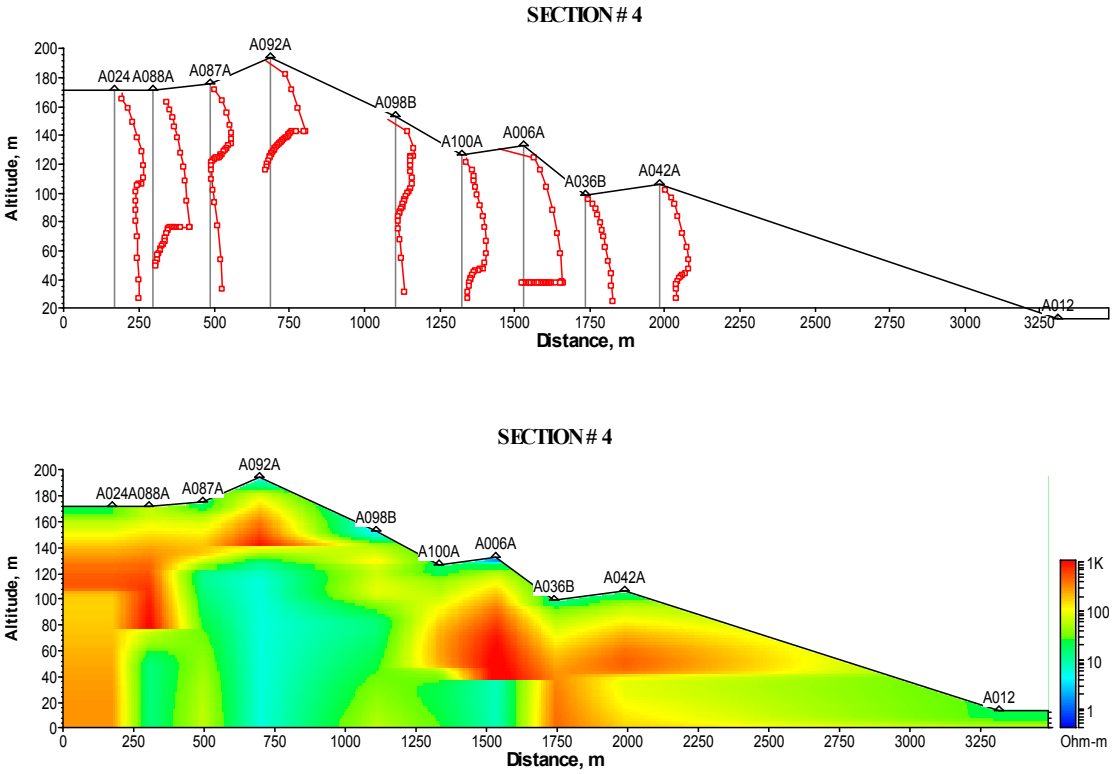

Σχήμα 6.7. Στον κάνναβο των μετρήσεων επιλέχθηκε συνεχής γραμμή με κατεύθυνση Β-Ν.

Με μπλέ χρώματα είναι οι σχηματισμοί με πολύ χαμηλές αντιστάσεις και με κόκκινα χρώματα απεικονίζονται οι σχηματισμοί υψηλών αντιστάσεων. Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι στα πρώτα 400m οι μεγάλες αντιστάσεις παρουσιάζονται από τα 50 έως τα 180m βάθος. Από τα 400 έως τα 800m οι μεγάλες αντιστάσεις ξεκινάμε από τα πρώτα κιόλας βάθη έως τα 180m. Από τα 1000 έως τα 1500m στα πρώτα 50m βάθος παρουσιάζονται μικρές αντιστάσεις και από τα 50m και μετά μέχρι και τα 130 μεγάλες αντιστάσεις. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ζώνες πολύ μικρών αντιστάσεων οπότε δεν αναμένεται να υπάρχει υδροφορία.




Σχήμα 6.8. Στον κάνναβο των μετρήσεων επιλέχθηκε συνεχής γραμμή με κατεύθυνση Δ-Α.

Με μπλε χρώματα είναι οι σχηματισμοί με πολύ χαμηλές αντιστάσεις και με κόκκινα χρώματα απεικονίζονται οι σχηματισμοί υψηλών αντιστάσεων. Στα πρώτα 500m απόσταση παρατηρούμε ότι σε βάθη από 80 έως 180m έχουμε μεγάλες αντιστάσεις . Από τα 700 έως τα 900m απόσταση και σε βάθος από 70 μέχρι 90m έχουμε μικρές αντιστάσεις. Από 900 έως 1300m απόσταση και σε βάθος από 80 μέχρι 160m έχουμε μεγάλες αντιστάσεις. Στα 1200 έως 1400m απόσταση από 70 έως 80m βάθος έχουμε μικρές αντιστάσεις όπως και στην απόσταση 1700 έως 2000m και σε βάθος από 70 έως 110m. Οπότε στη θέση Α072Α σε βάθος 110m έως 70m και απόσταση 1700 έως 2000m όπου εμφανίζονται οι πολύ μικρές αντιστάσεις, ενδέχεται να υπάρχει υδροφορία.

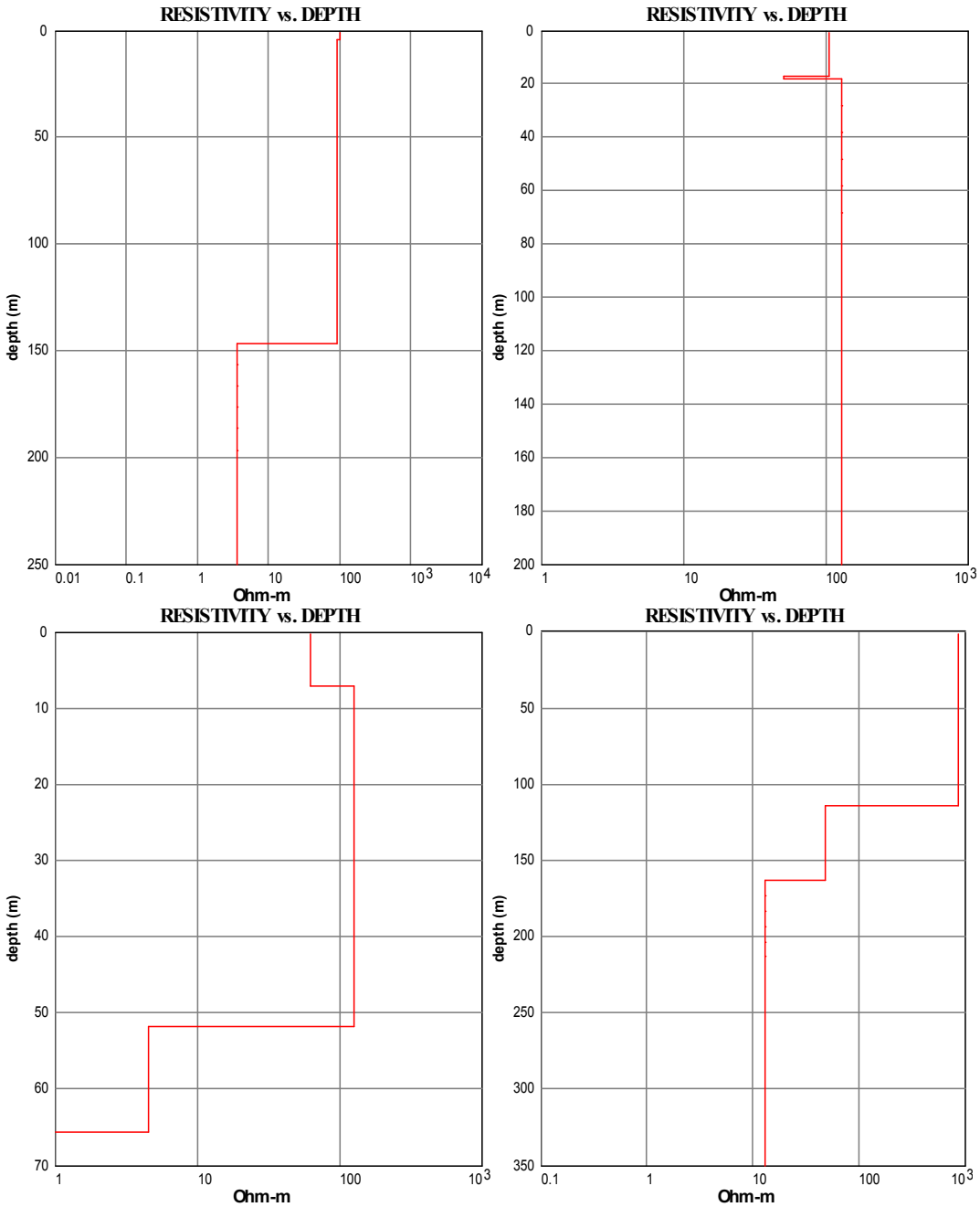


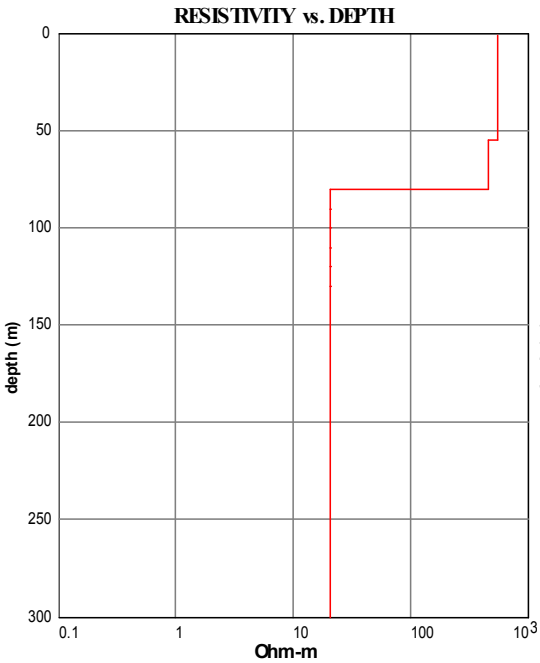

Σχήμα 6.9. Στον κάνναβο των μετρήσεων επιλέχθηκε συνεχής γραμμή με κατεύθυνση σχεδόν B-N.

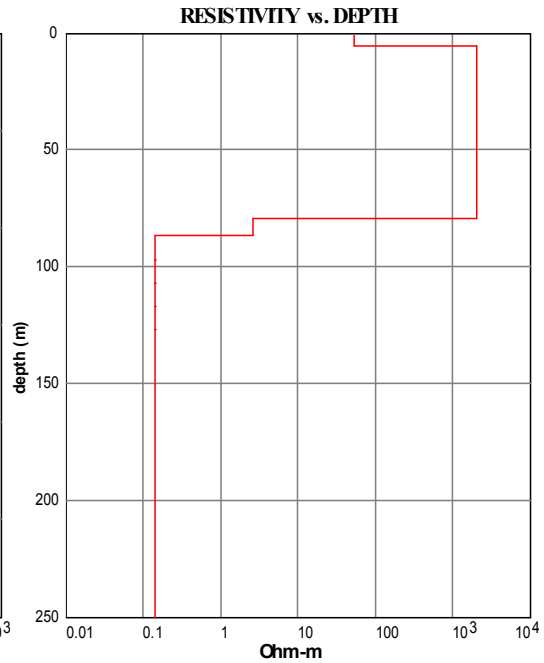
Με μπλε χρώματα είναι οι σχηματισμοί με πολύ χαμηλές αντιστάσεις και με κόκκινα χρώματα απεικονίζονται οι σχηματισμοί υψηλών αντιστάσεων. Στα πρώτα 800m απόσταση και σε βάθος από 80 έως 150m παρουσιάζονται μεγάλες αντιστάσεις όπως και στα 1400 έως 2250m απόσταση και σε βάθος από 0 μέχρι 110m. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ζώνες πολύ μικρών αντιστάσεων οπότε δεν αναμένεται να υπάρχει υδροφορία.

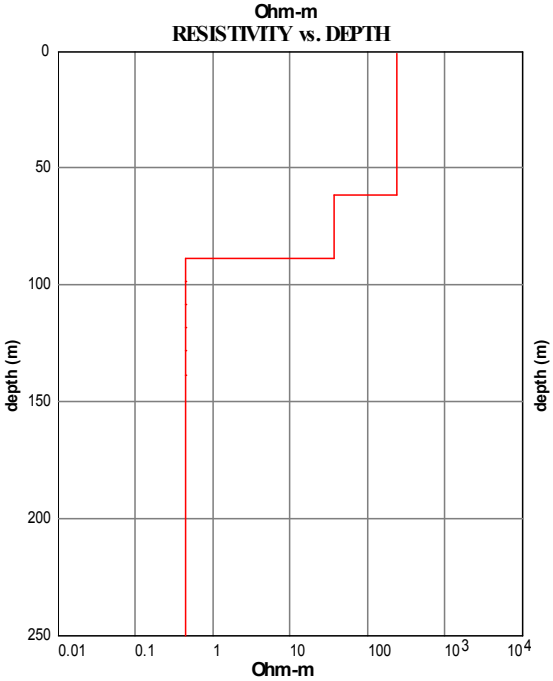
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

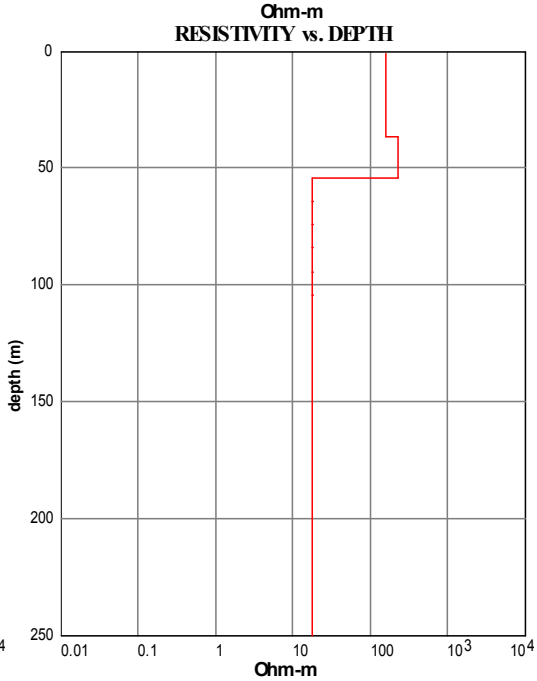
## Μονοδιάστατη παρουσίαση πρωτογενών δεδομένων

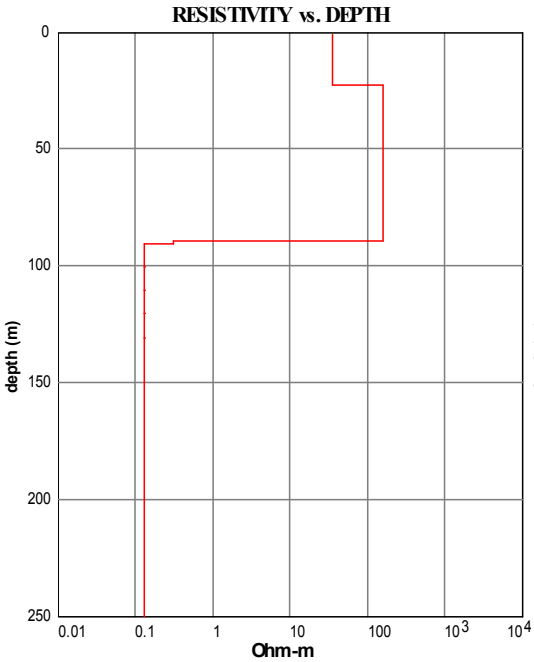


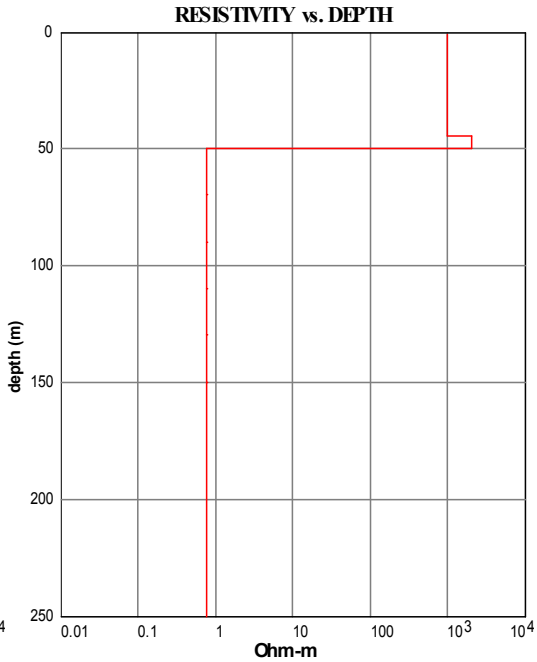

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
300
0.1
1
10
100
$10^3$
Ohm-m

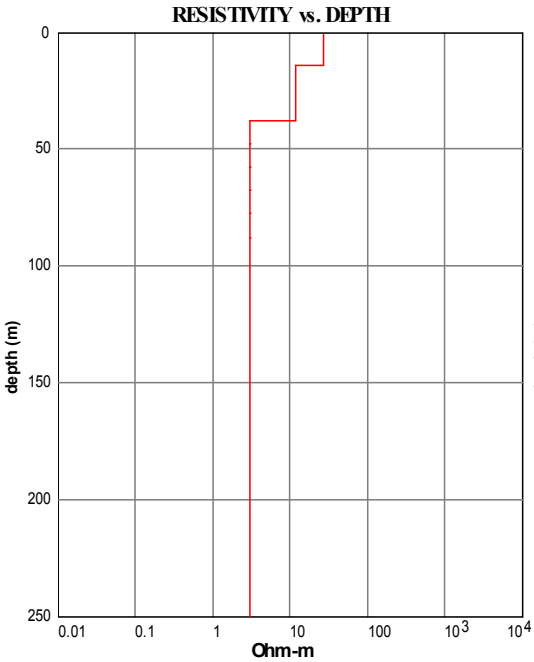

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

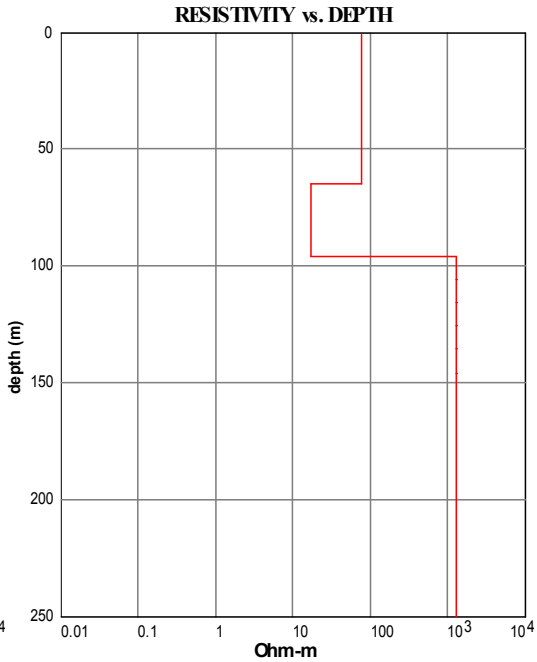

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

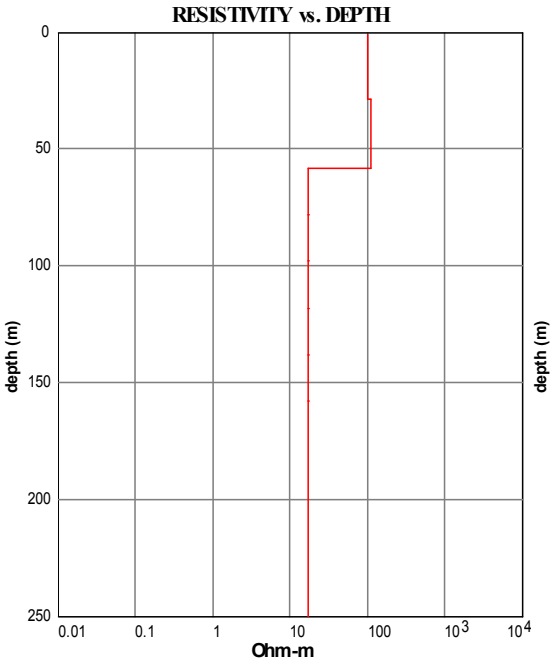

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

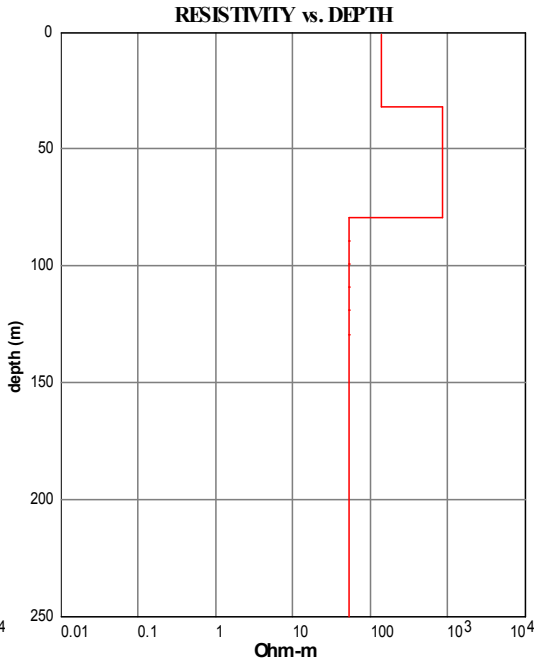

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

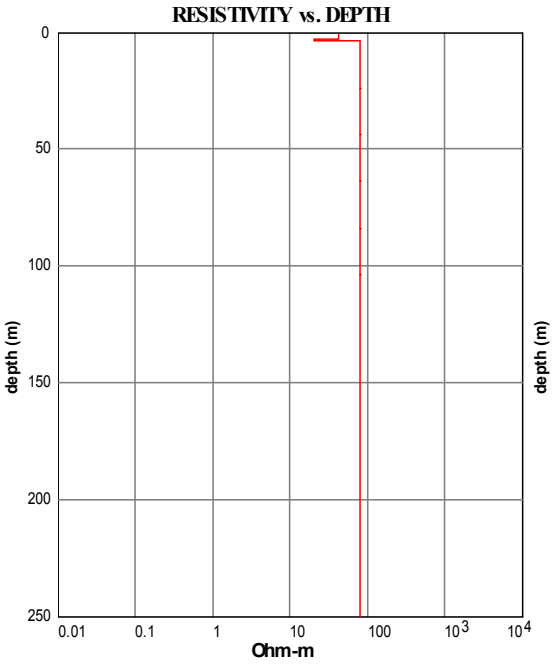

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

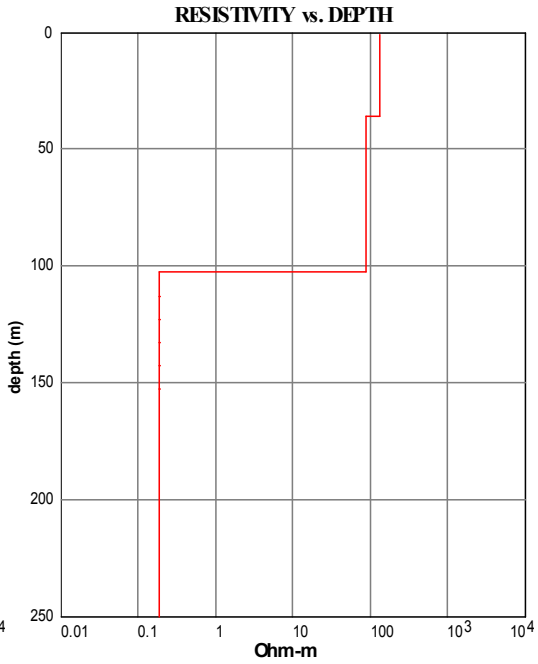

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

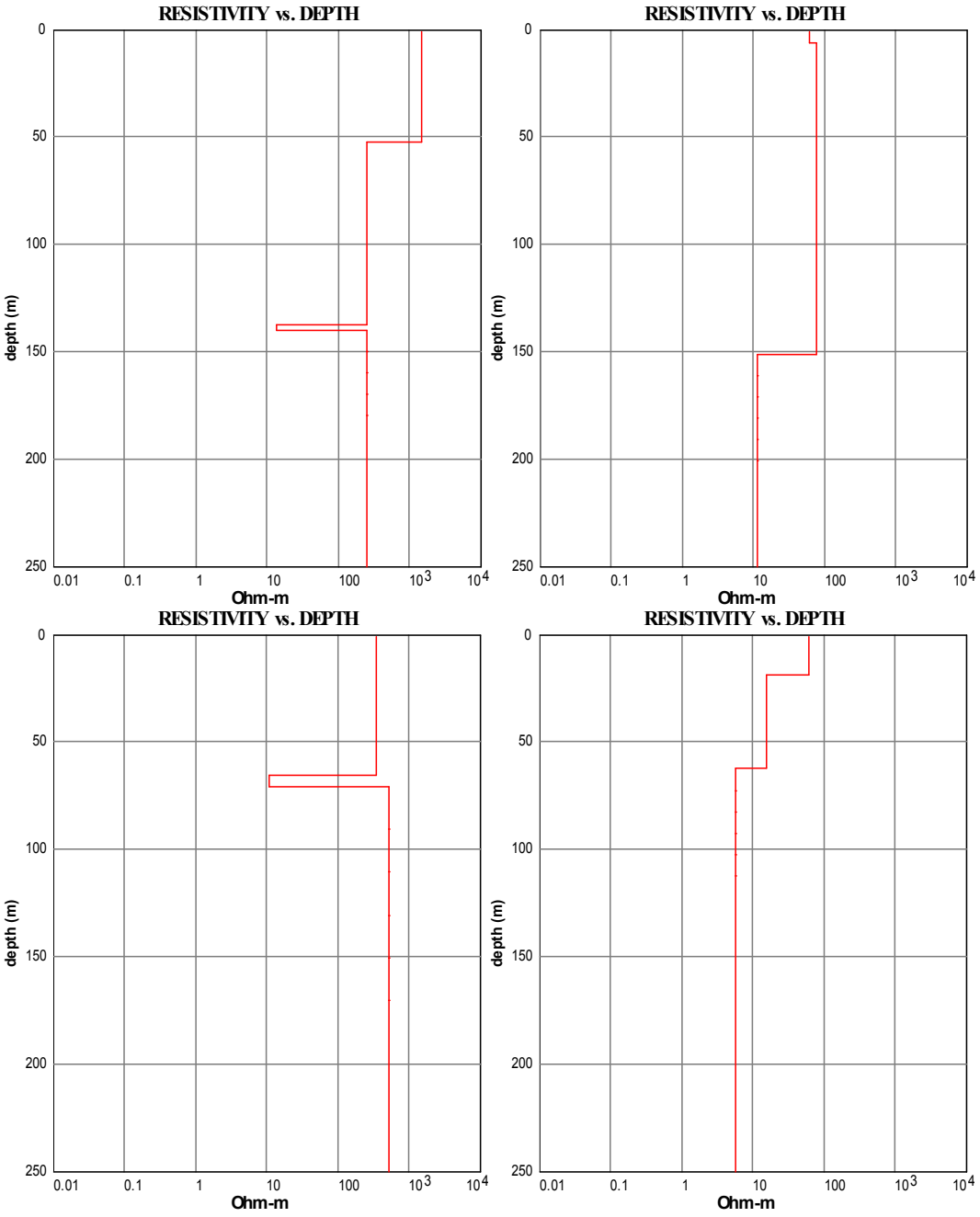

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

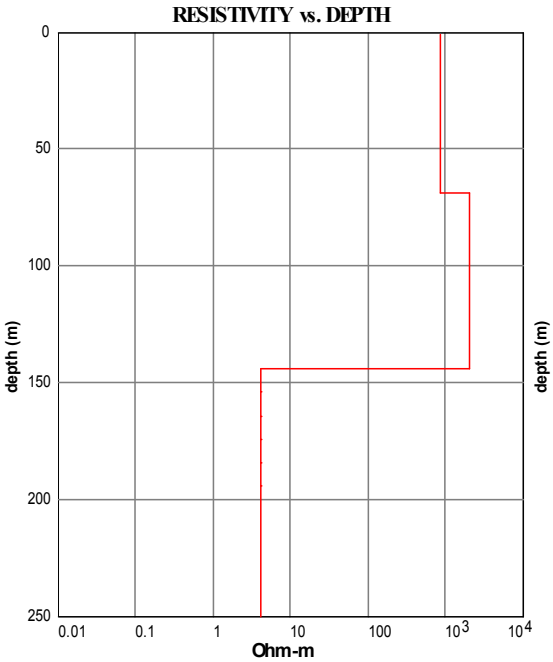

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

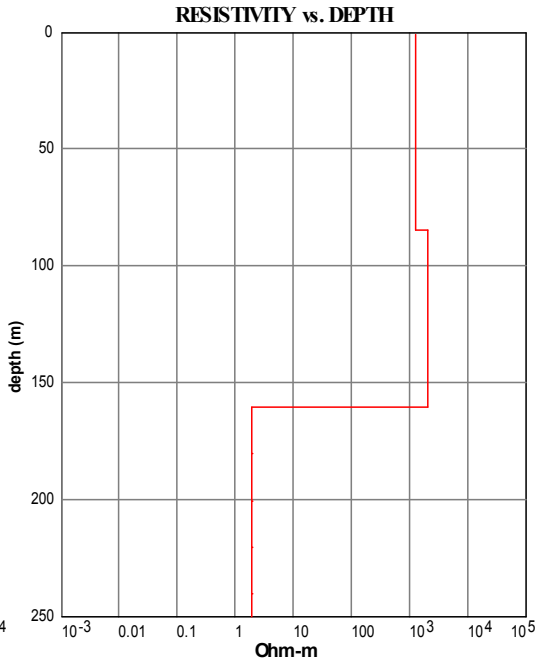

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

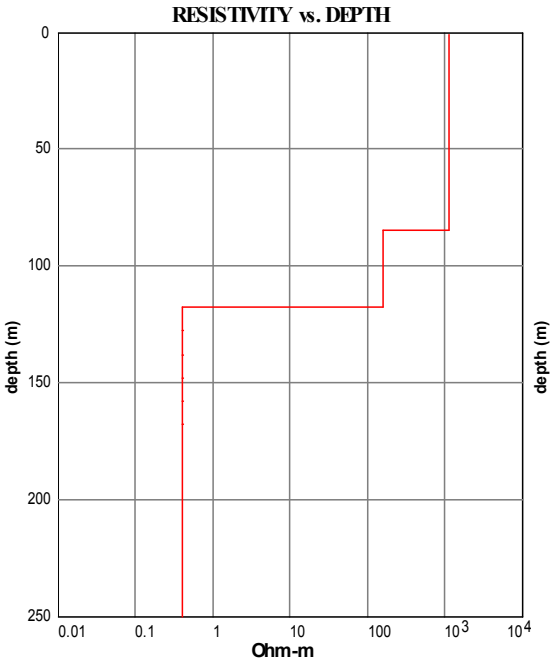

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

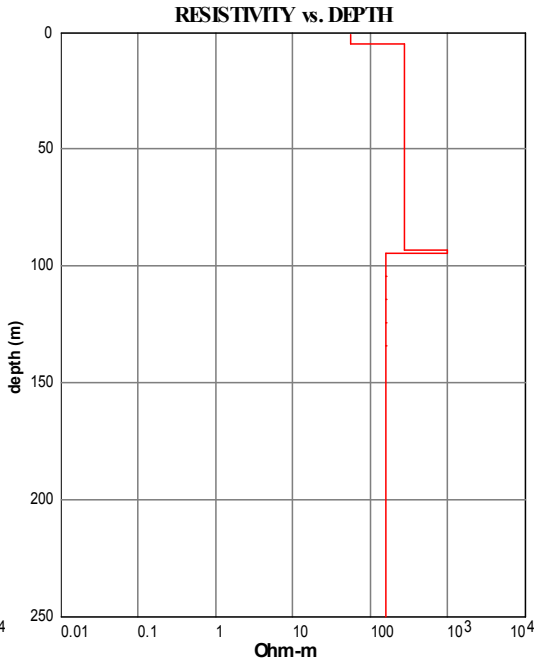

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

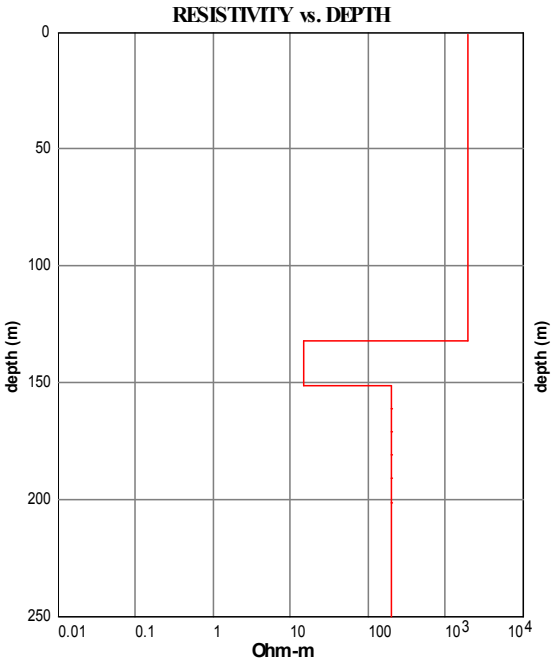

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m
RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
Ohm-m
RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
Ohm-m
RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
Ohm-m

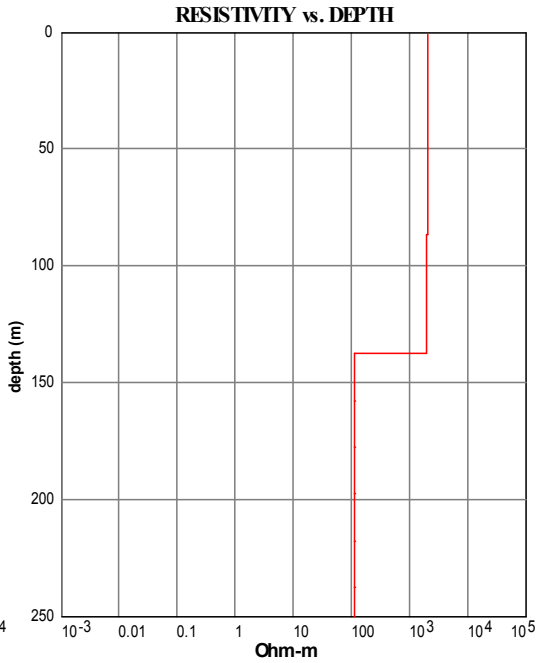

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
10^3
10^4
Ohm-m

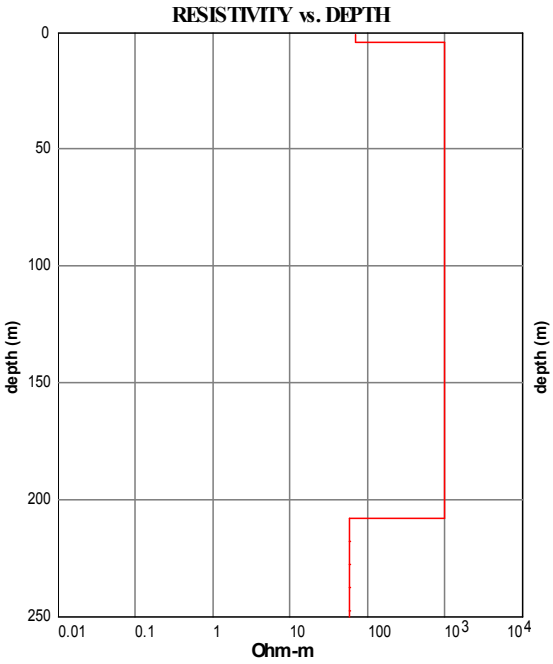

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10^-3
0.01
0.1
1
10
100
10^3
10^4
10^5
Ohm-m

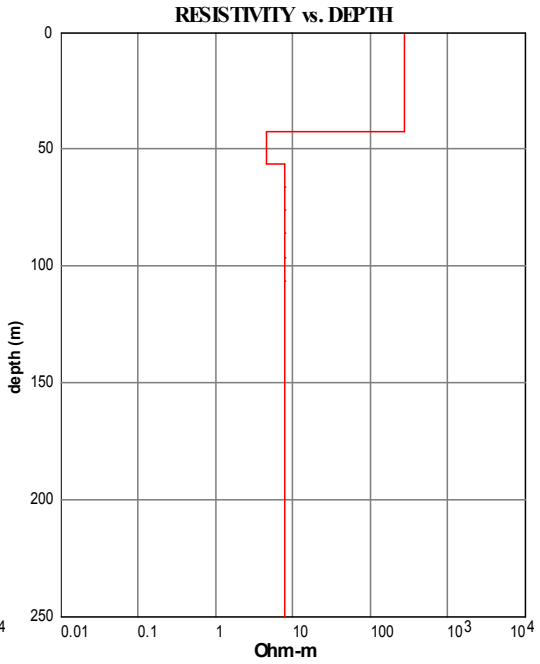

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
10^3
10^4
Ohm-m

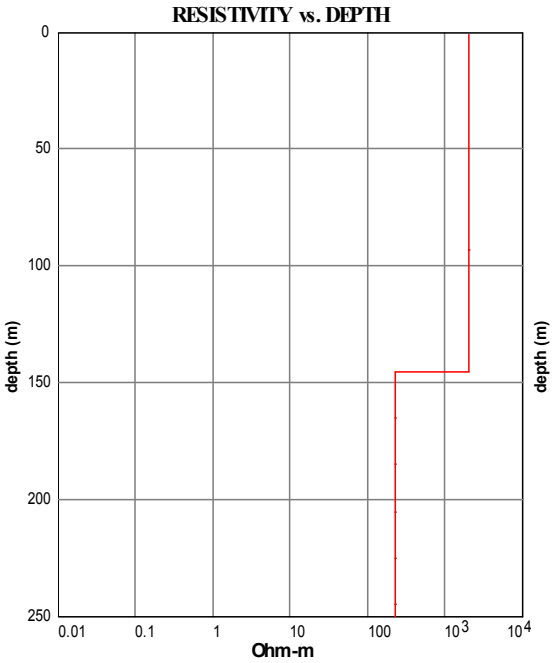

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
10^3
10^4
Ohm-m

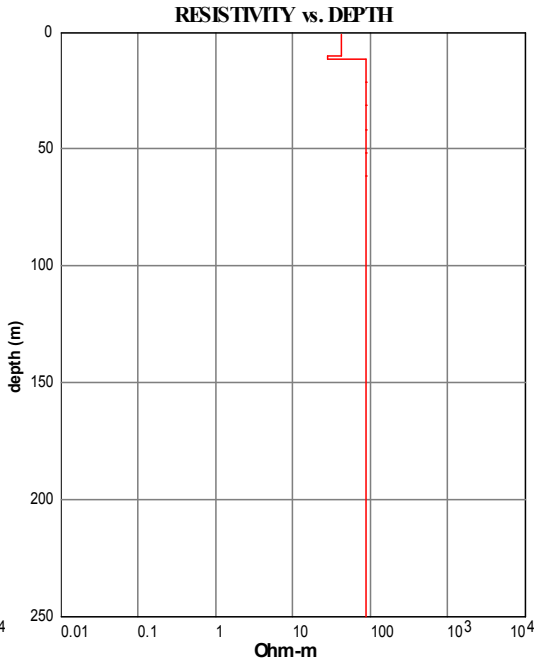

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
10^3
10^4
Ohm-m

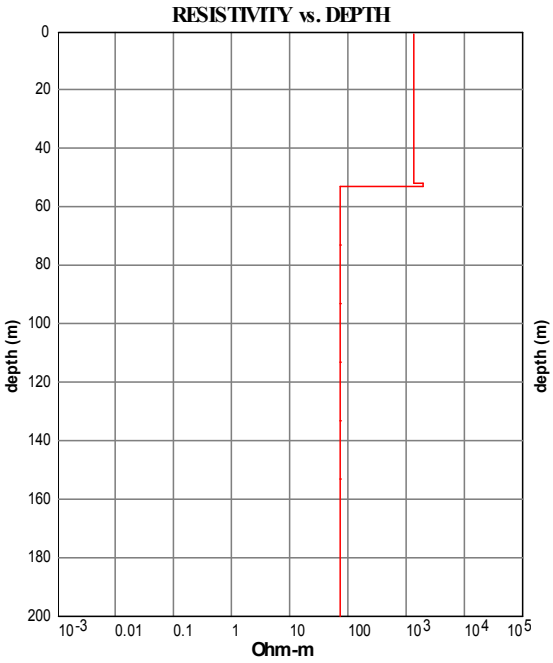

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10^-3
0.01
0.1
1
10
100
10^3
10^4
10^5
Ohm-m

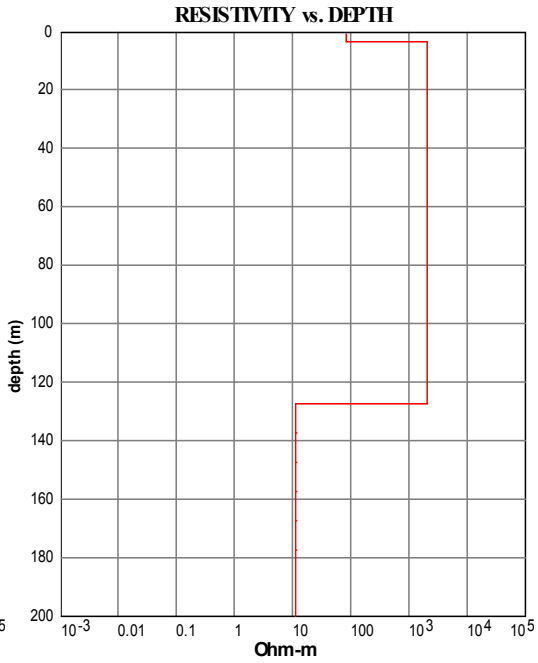

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
10^3
10^4
Ohm-m

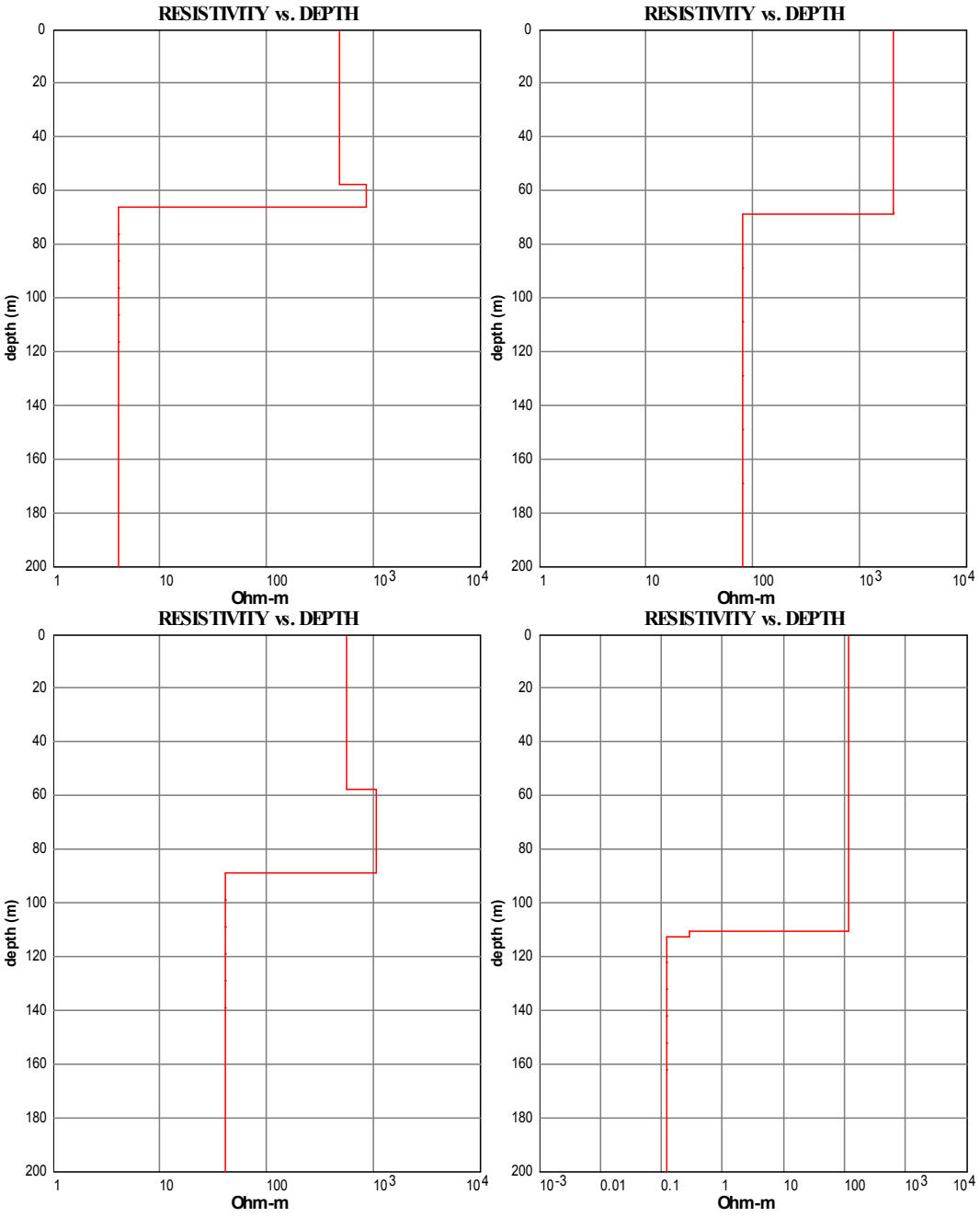

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
10^3
10^4
Ohm-m

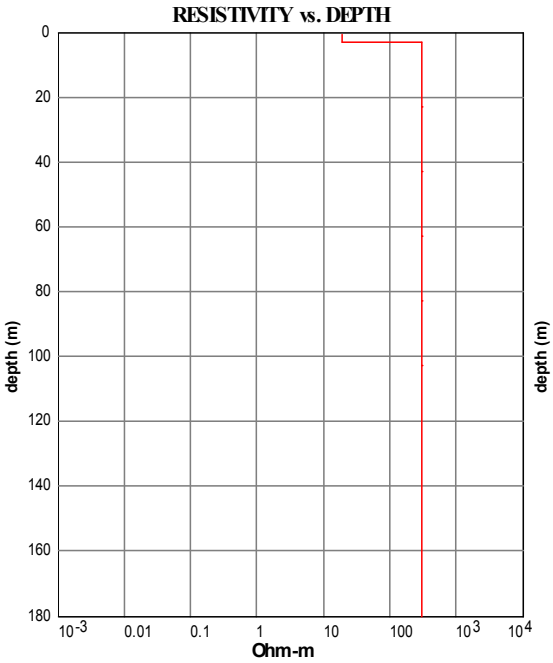

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

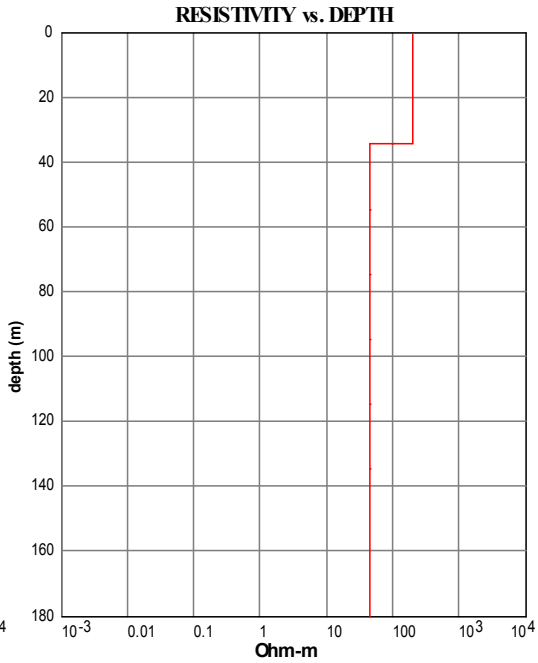

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
Ohm-m

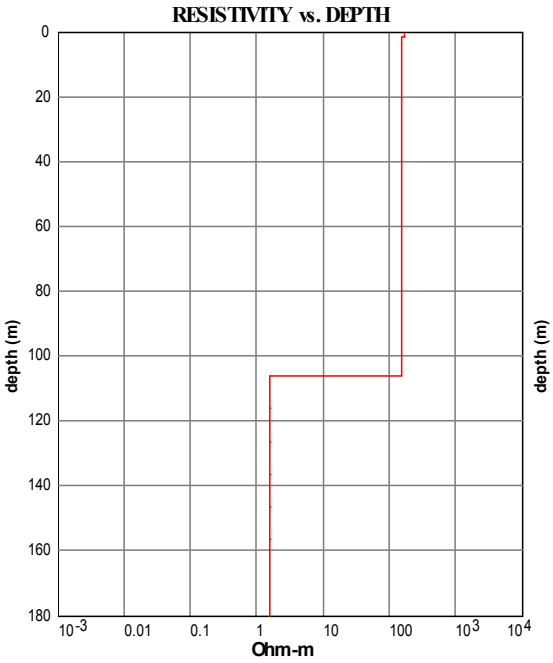

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
$10^{-3}$
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
$10^5$
Ohm-m

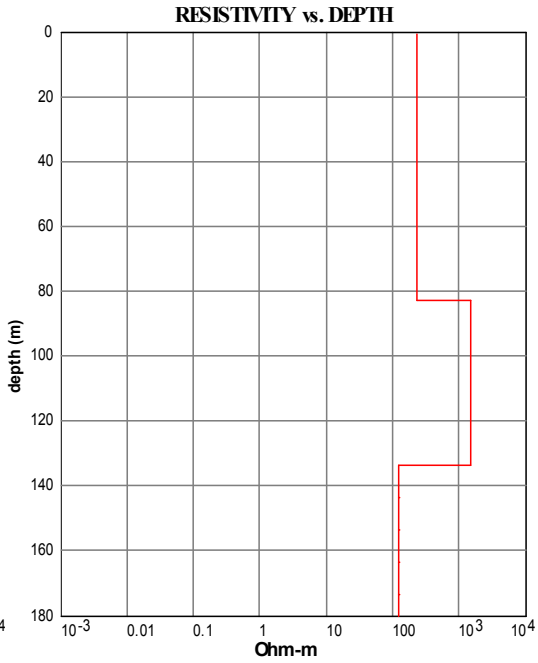

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
$10^{-3}$
0.01
0.1
1
10
100
$10^3$
$10^4$
$10^5$
Ohm-m

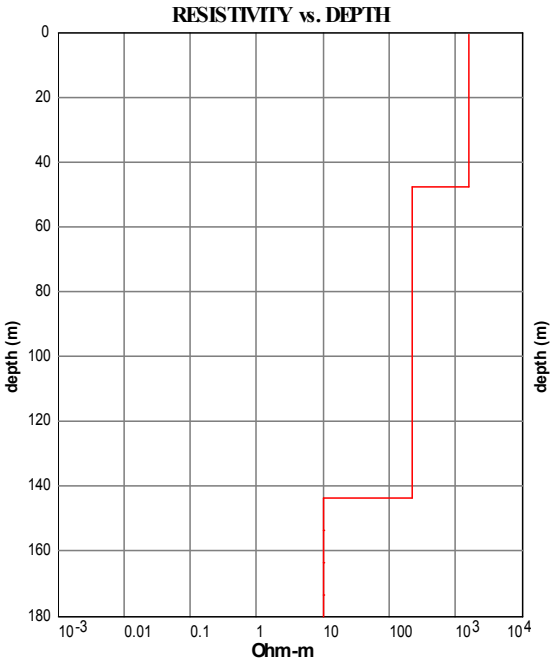

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
1
10
100
10^3
10^4
Ohm-m
RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
Ohm-m
RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
Ohm-m
RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
10^-3
0.01
0.1
1
10
100
10^3
10^4
Ohm-m

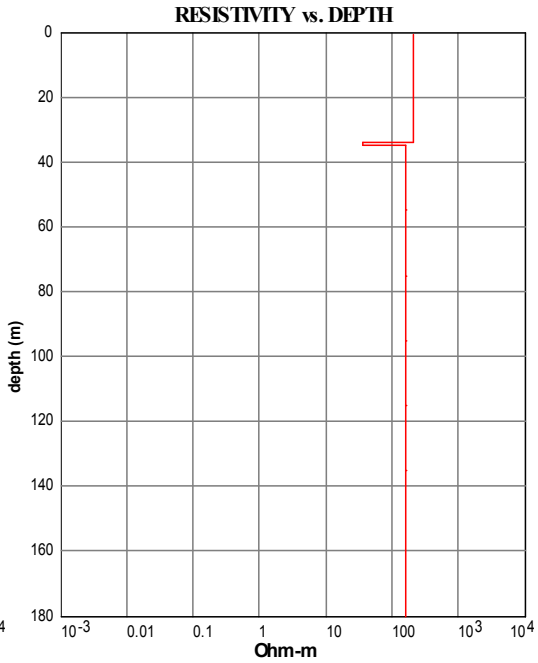

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

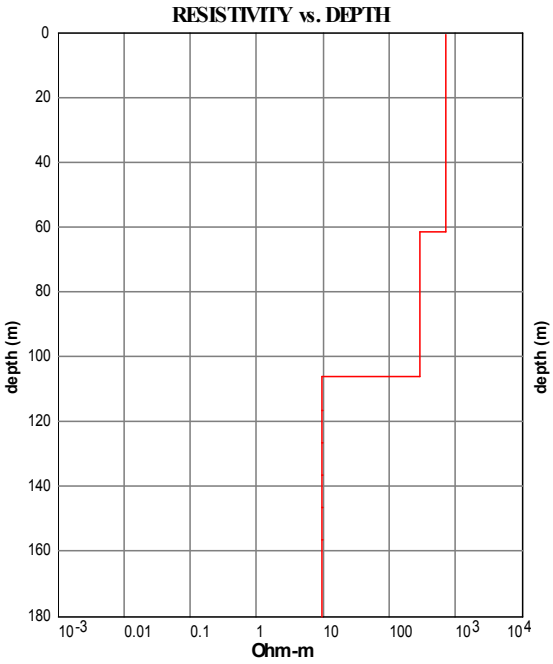

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

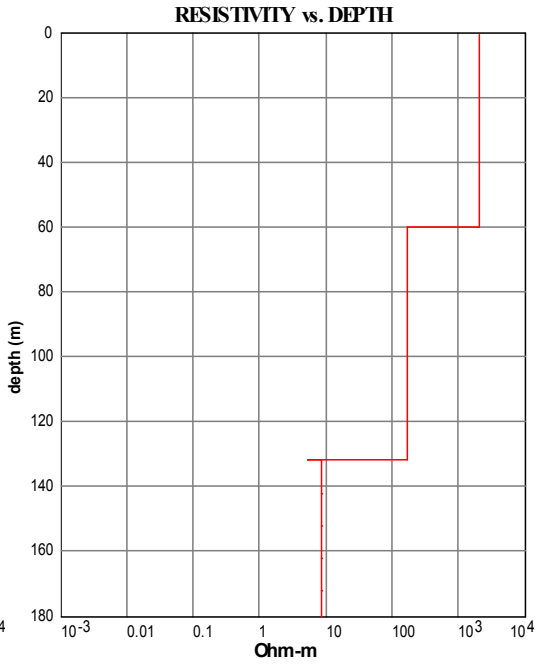

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

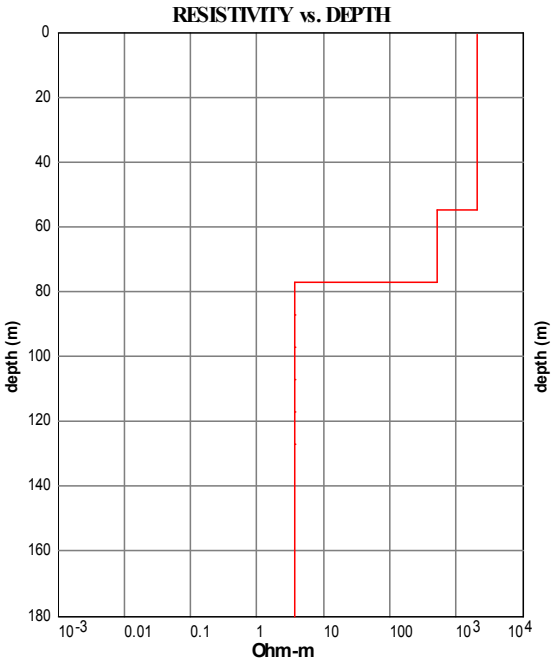

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

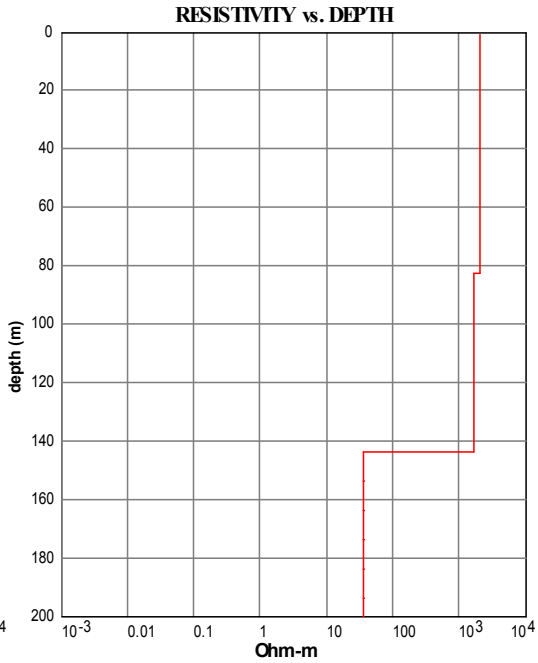

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

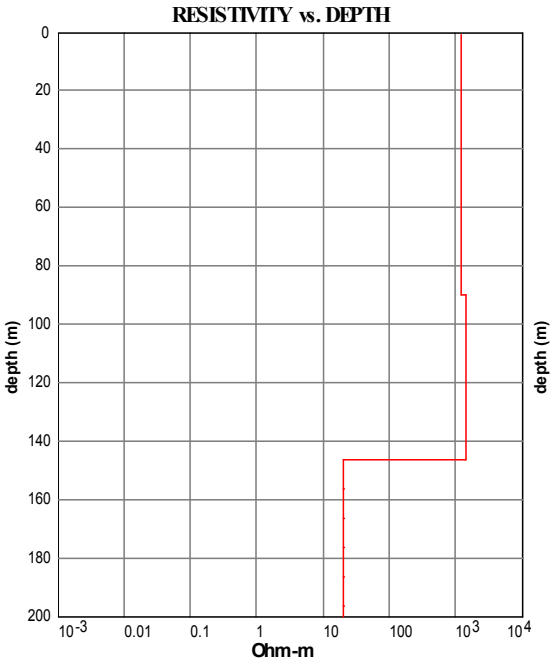

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

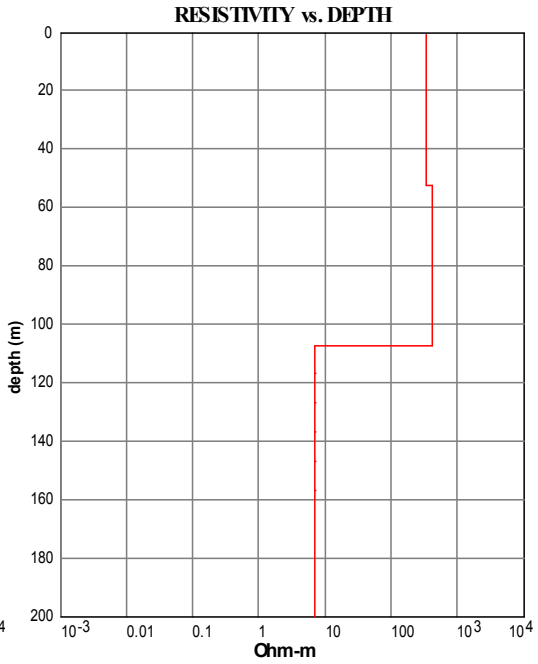

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

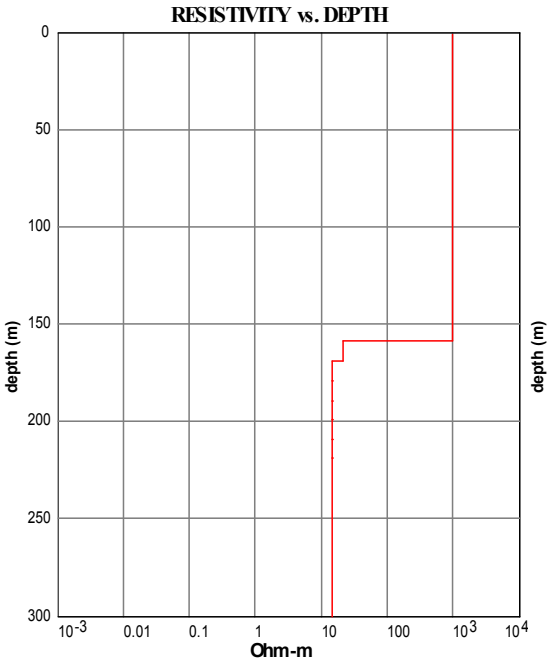

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

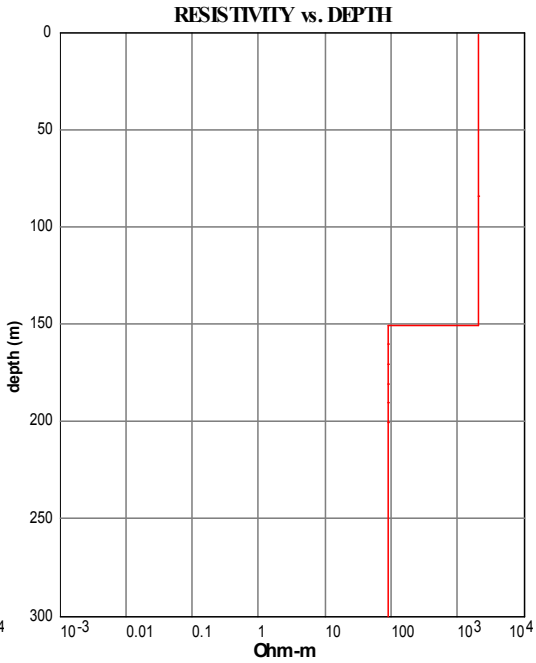

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

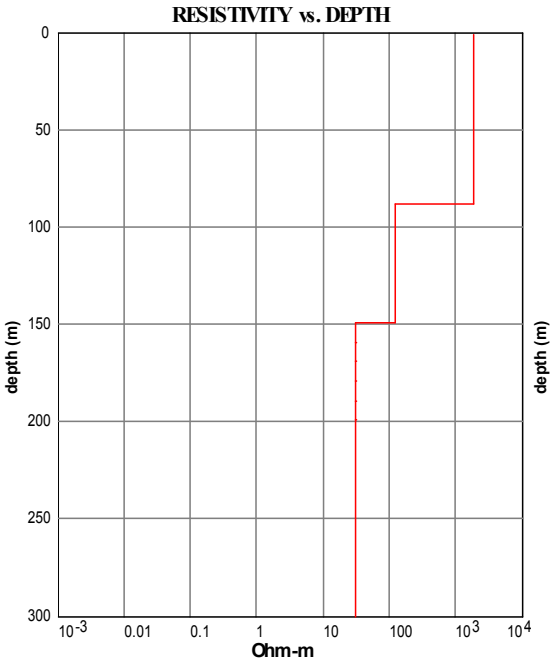

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

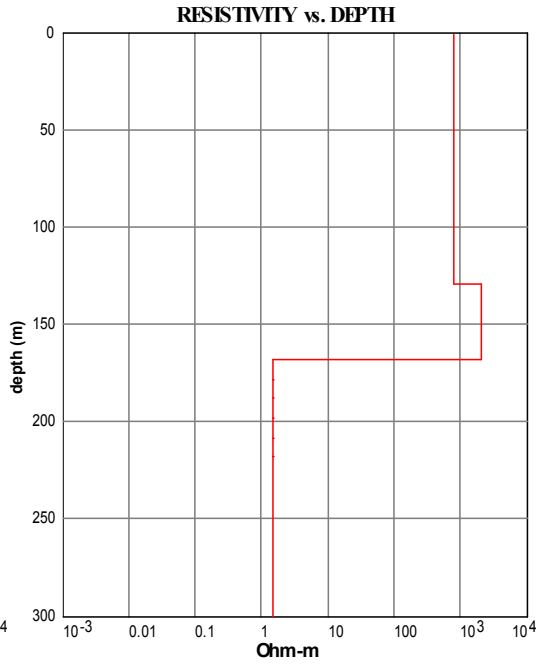

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

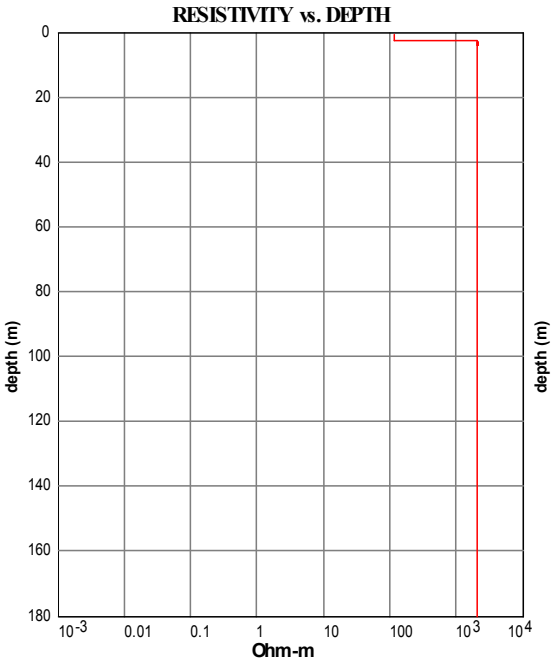

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

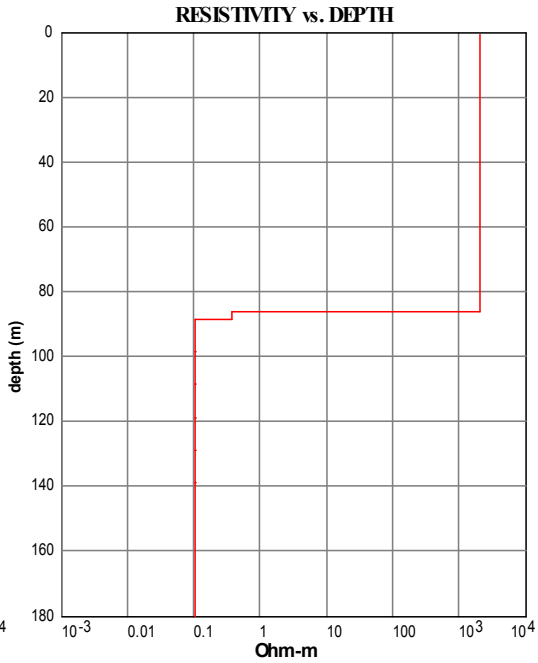

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
300
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

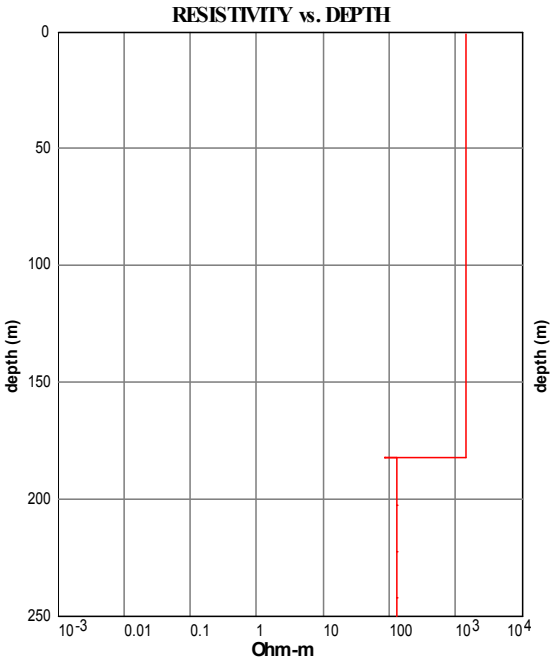

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
300
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

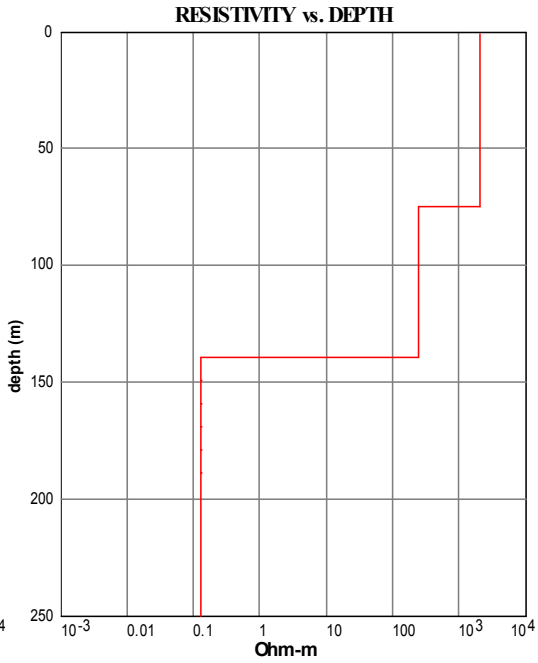

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
300
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

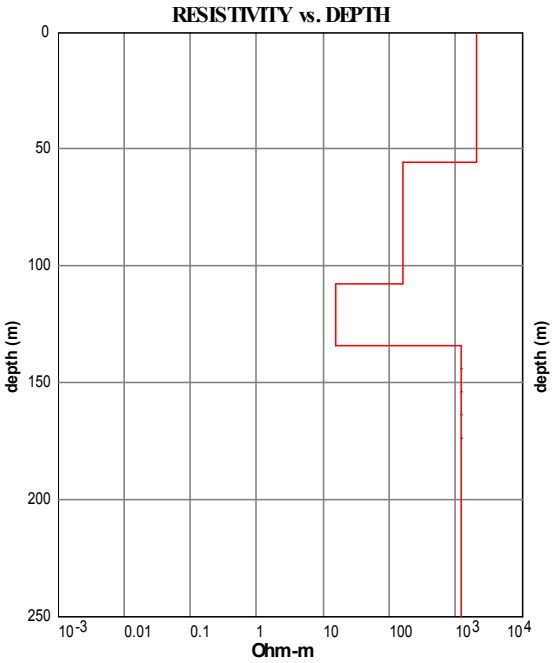

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
300
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

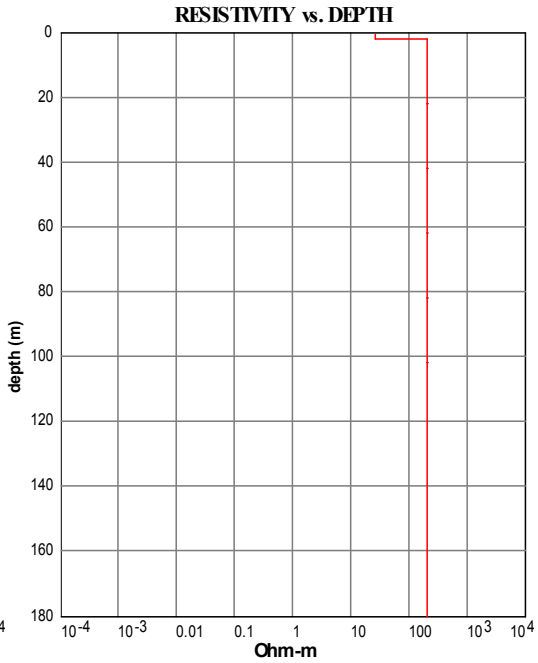

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

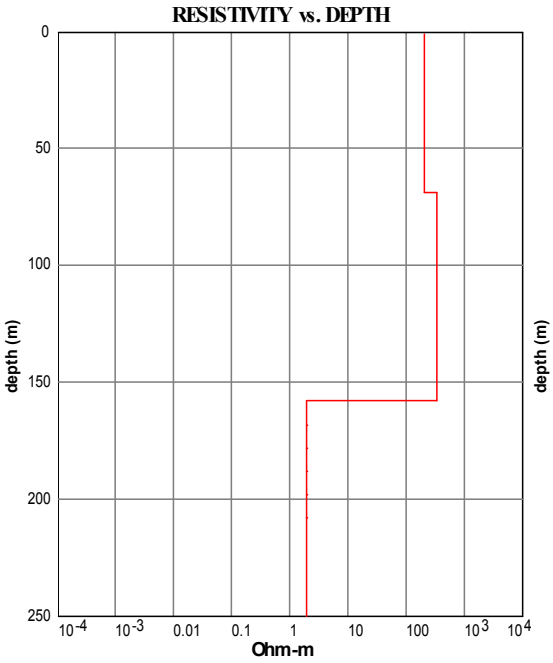

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

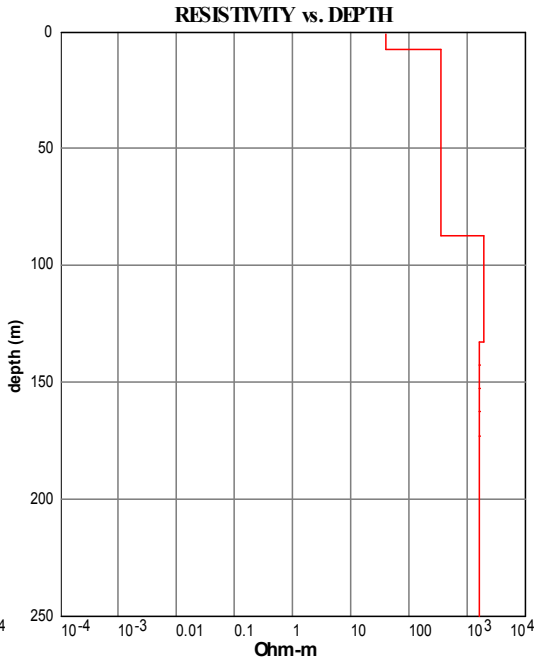

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

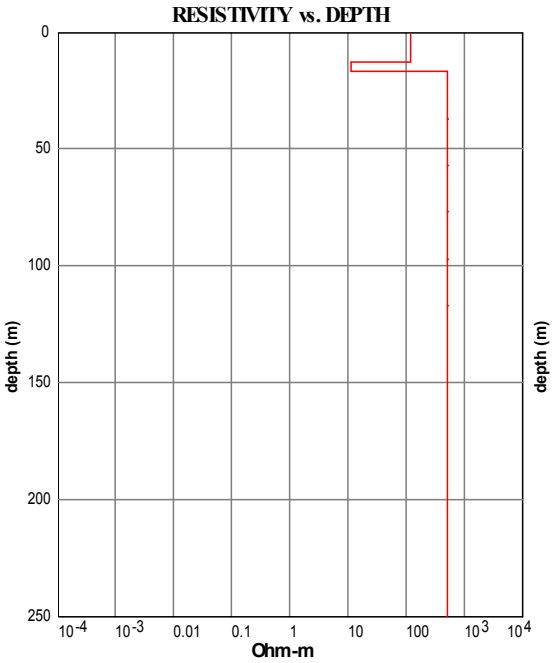

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

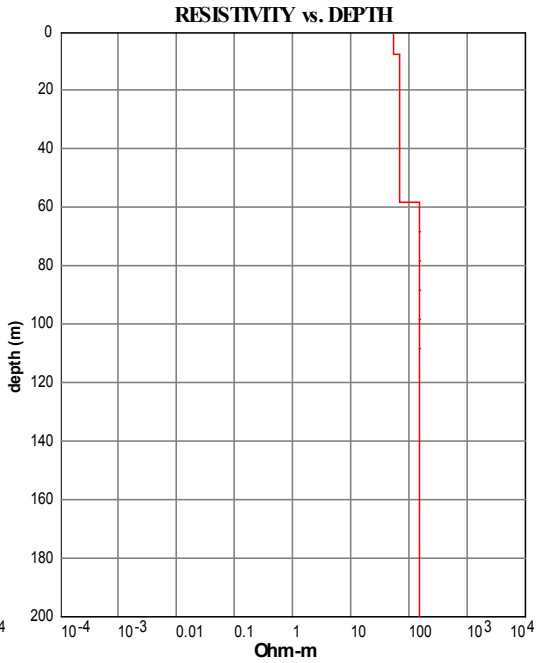

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

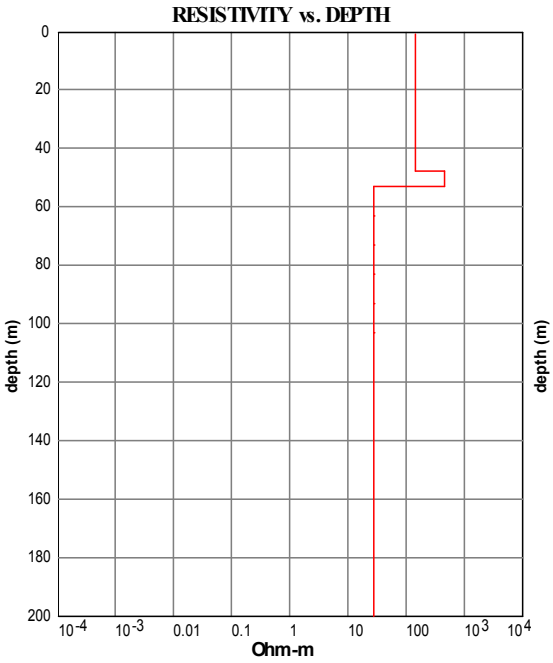

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

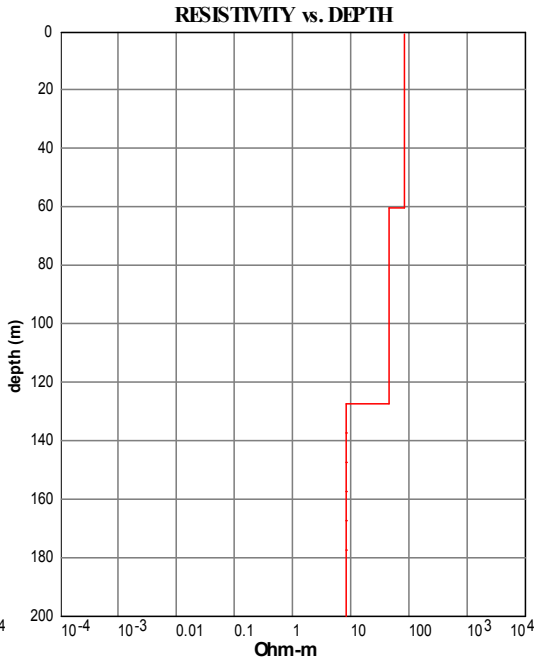

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

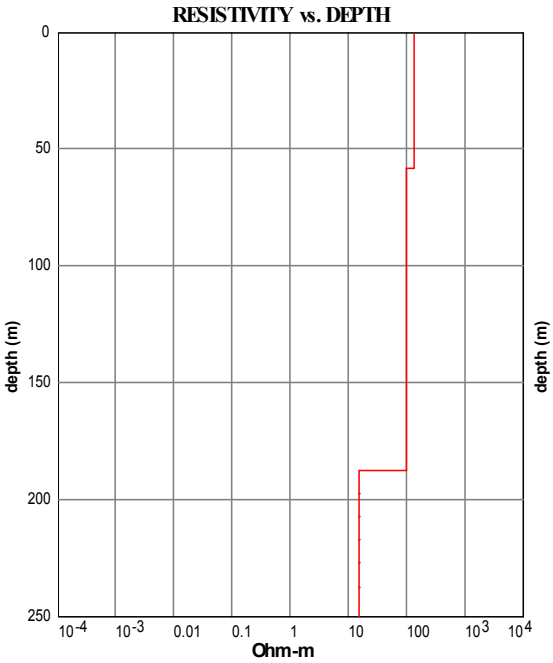

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

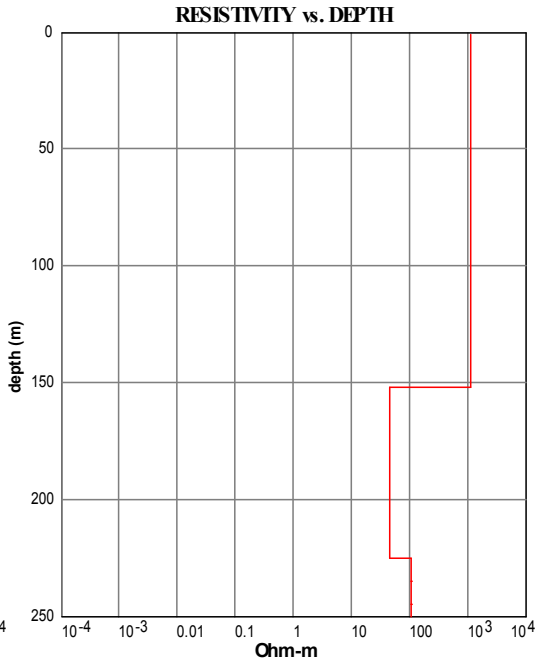

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

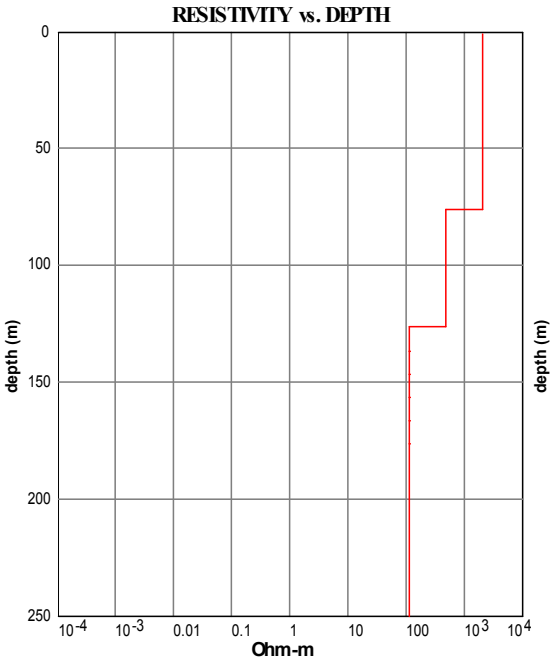

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

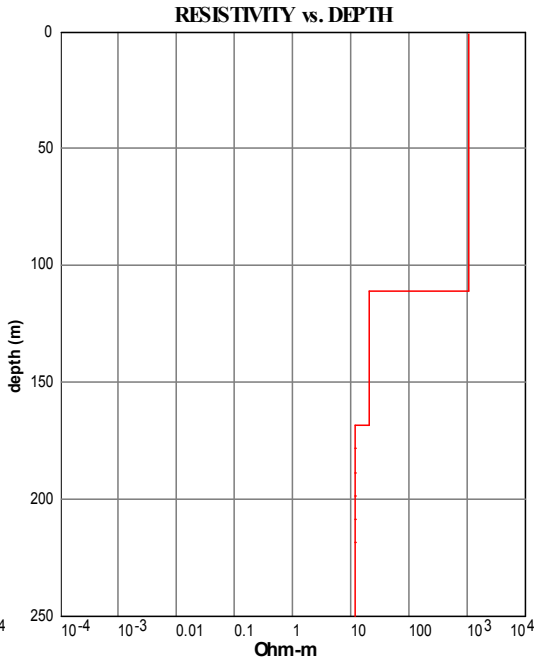

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

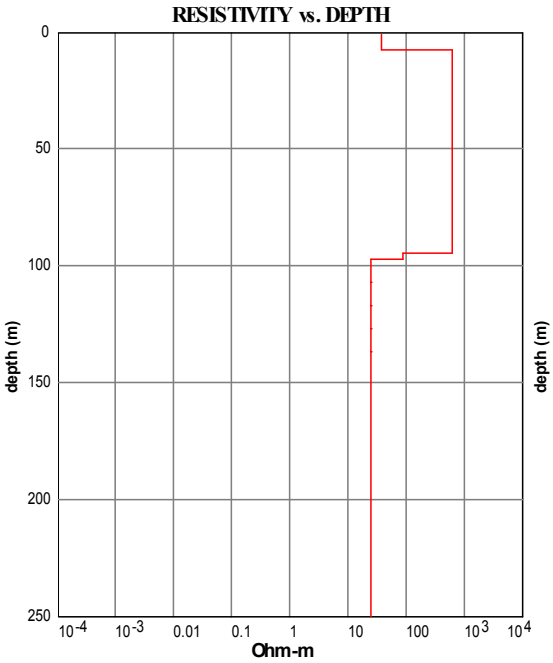

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

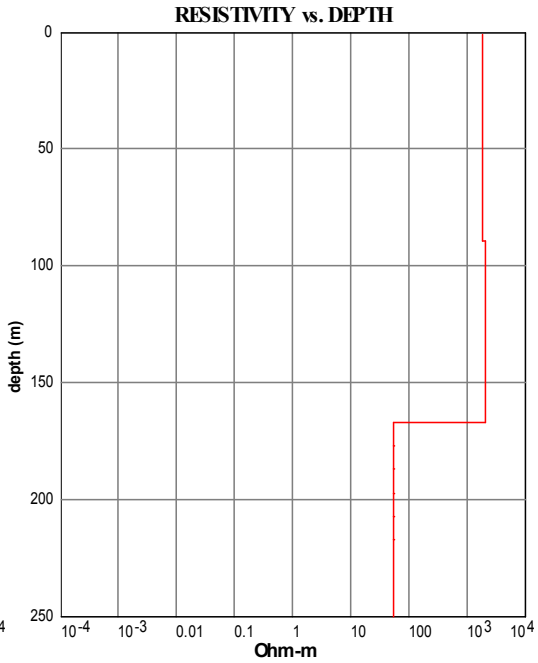

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

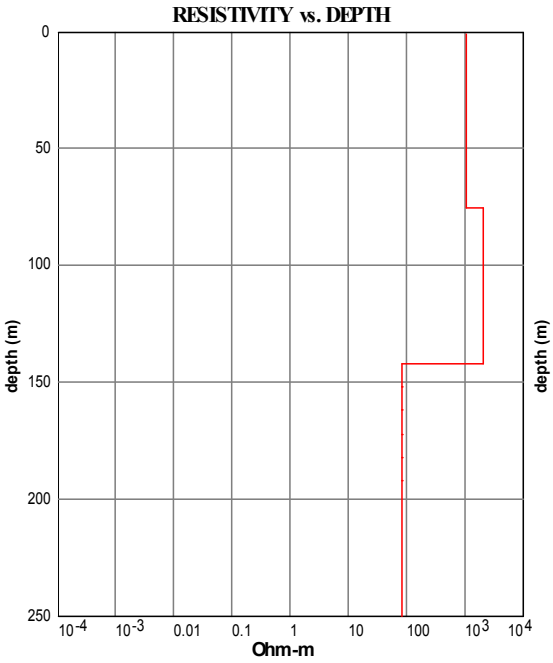

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

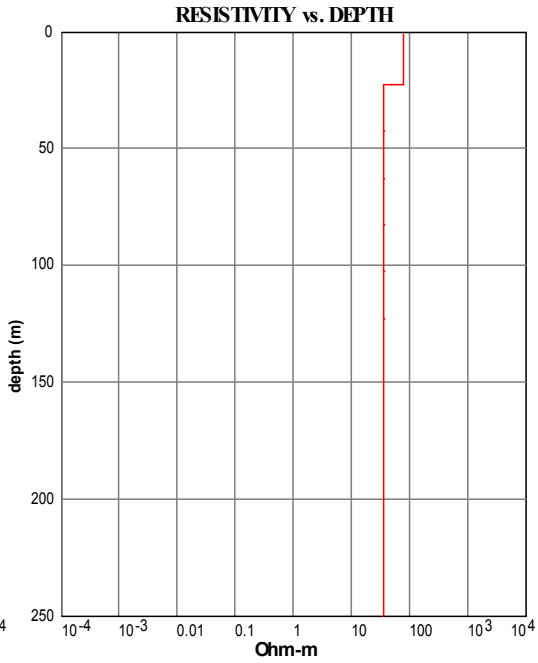

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

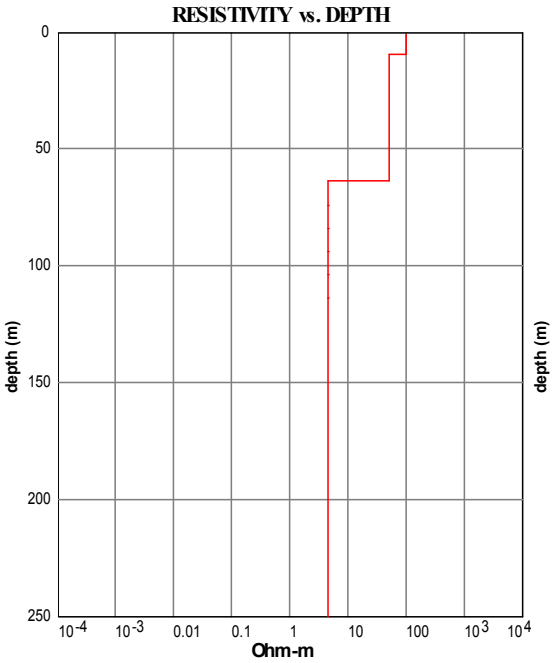

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

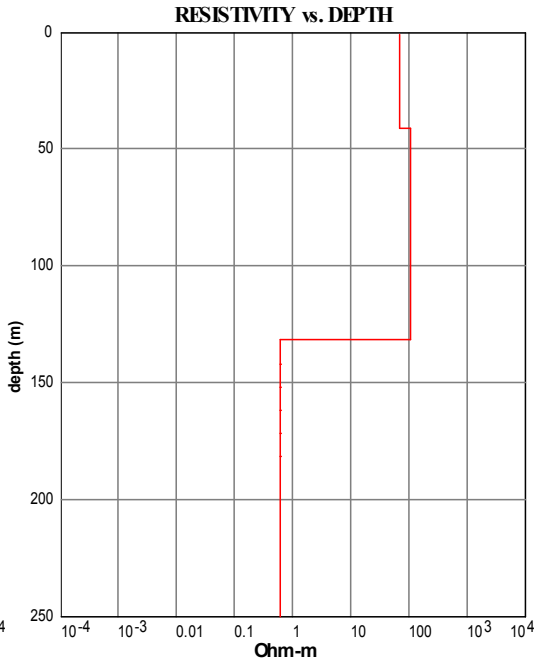

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

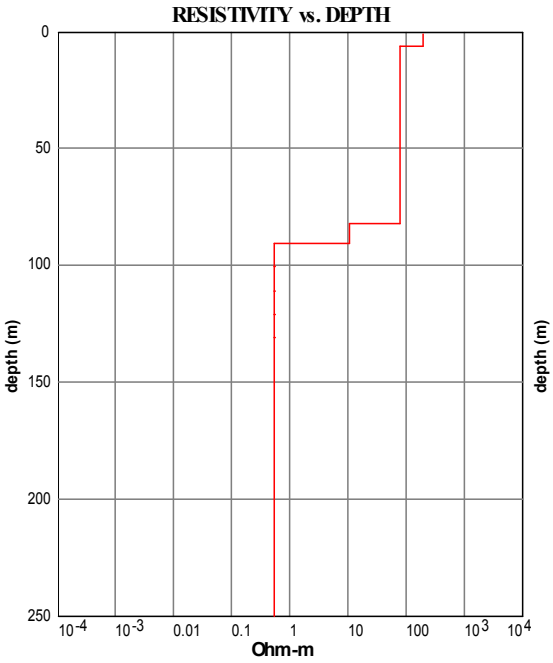

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

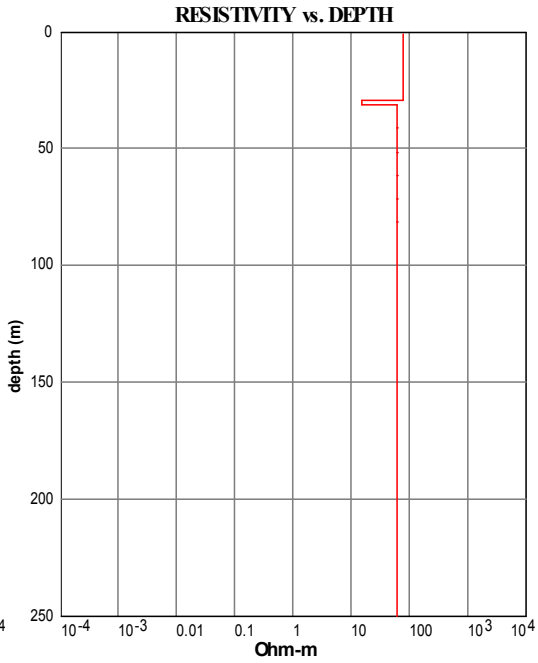

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

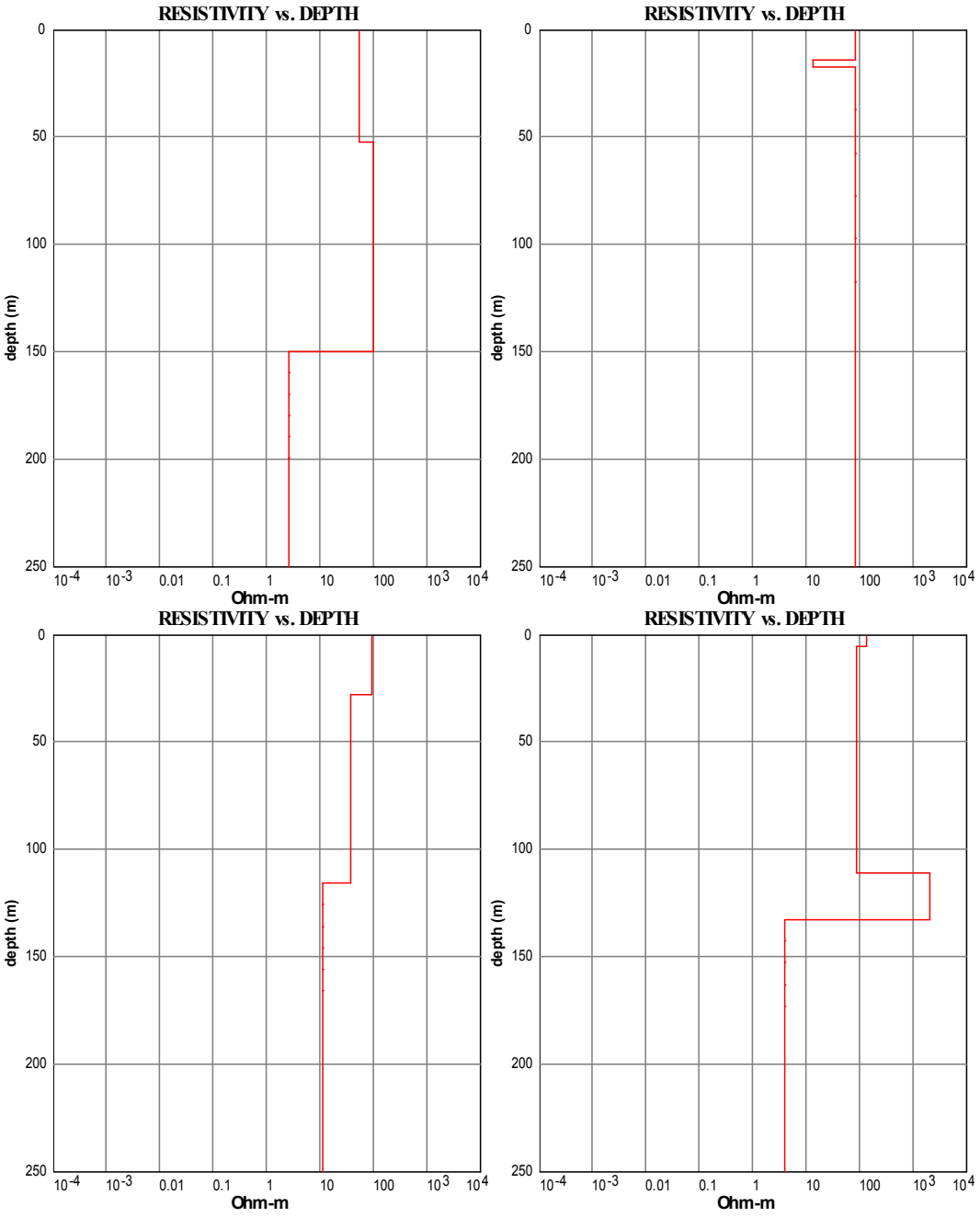

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

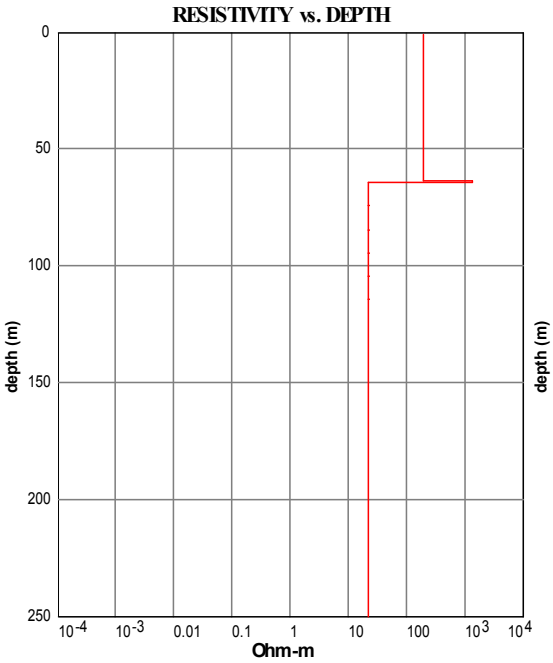

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

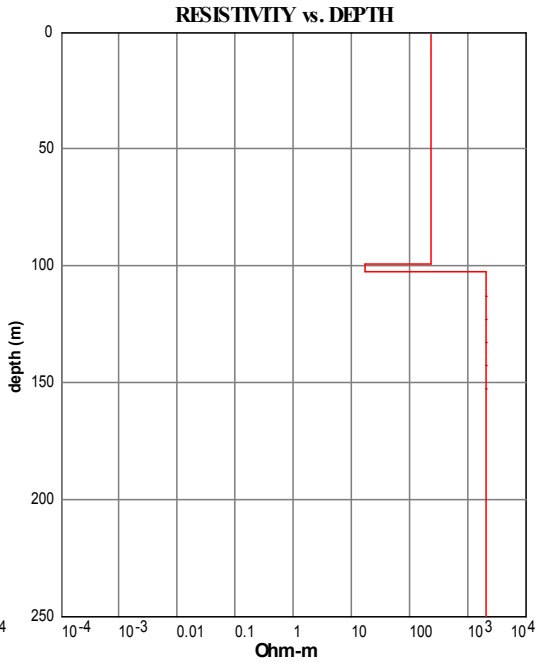

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

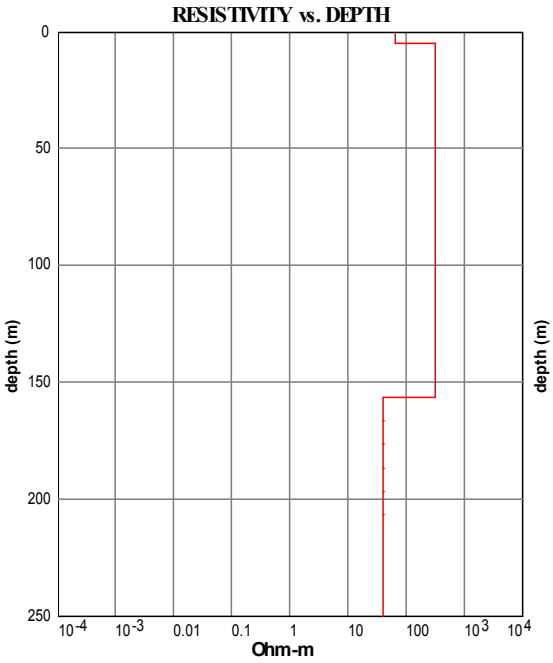

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

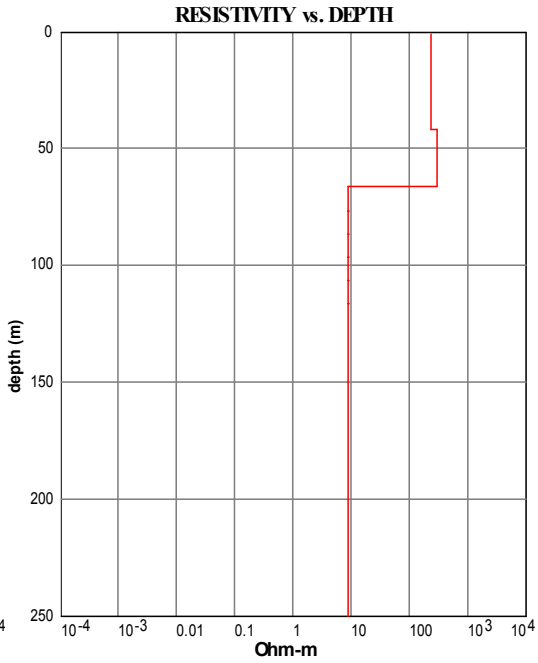

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

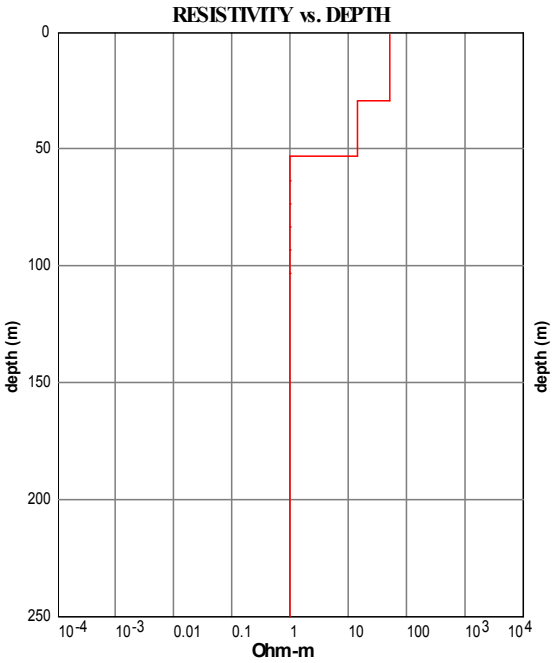

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m
RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
Ohm-m
RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
Ohm-m
RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
Ohm-m

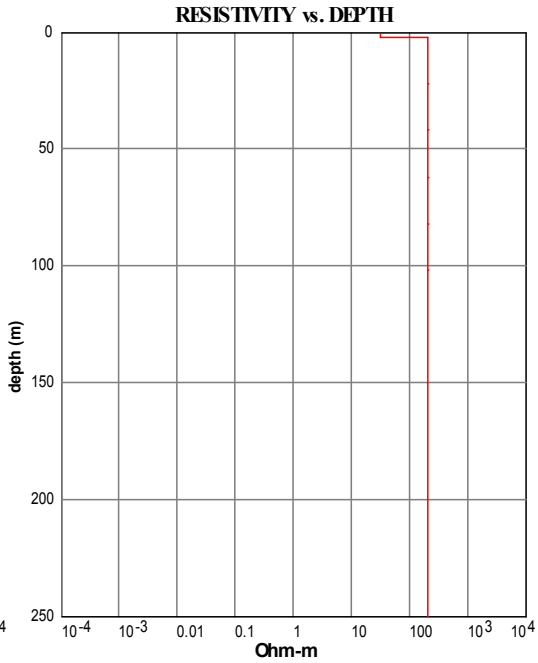

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

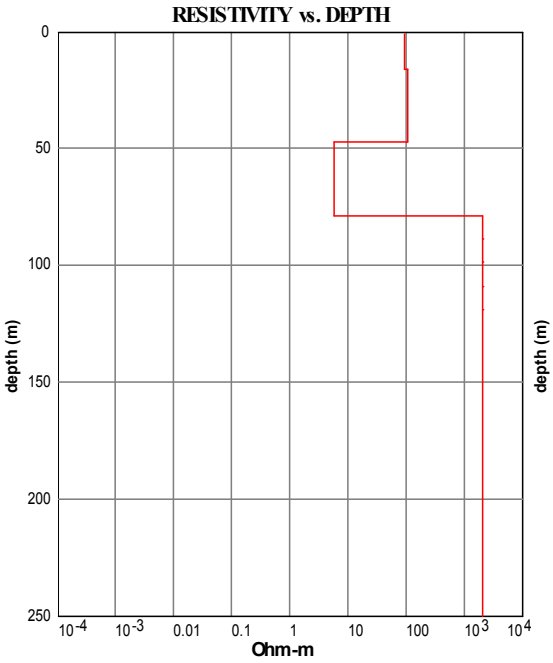

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

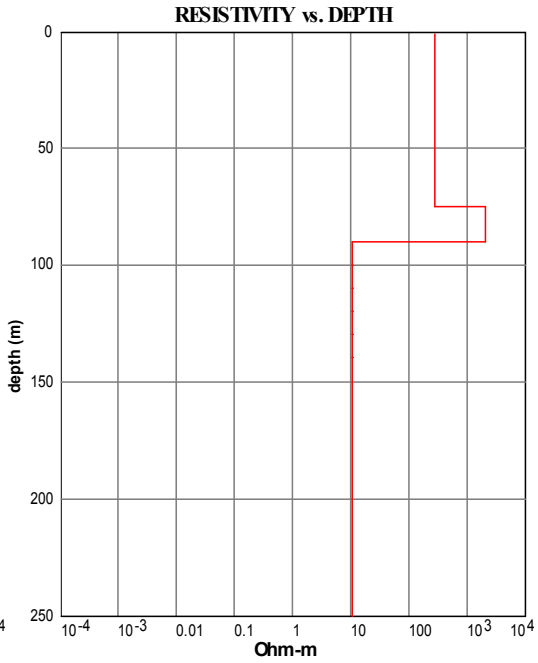

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

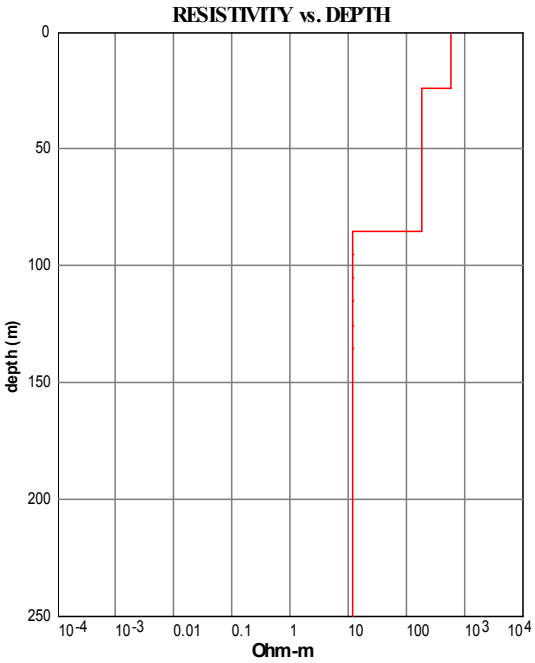

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

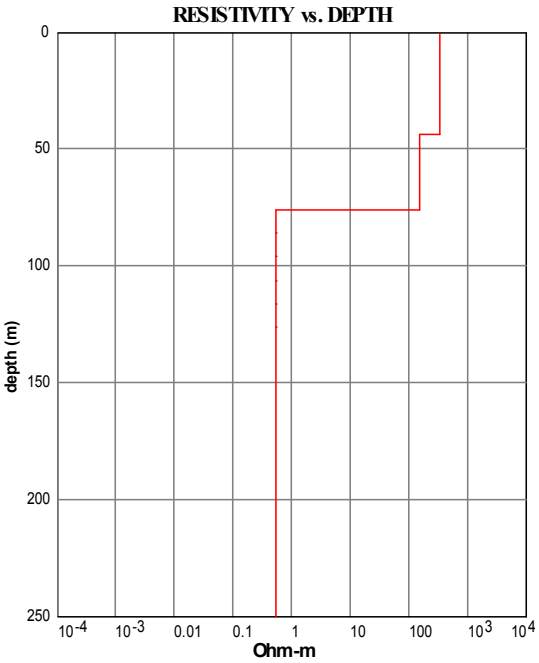

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

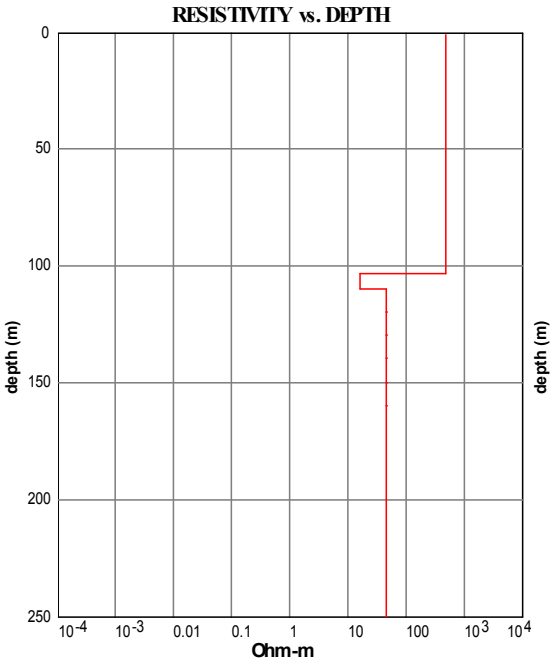

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

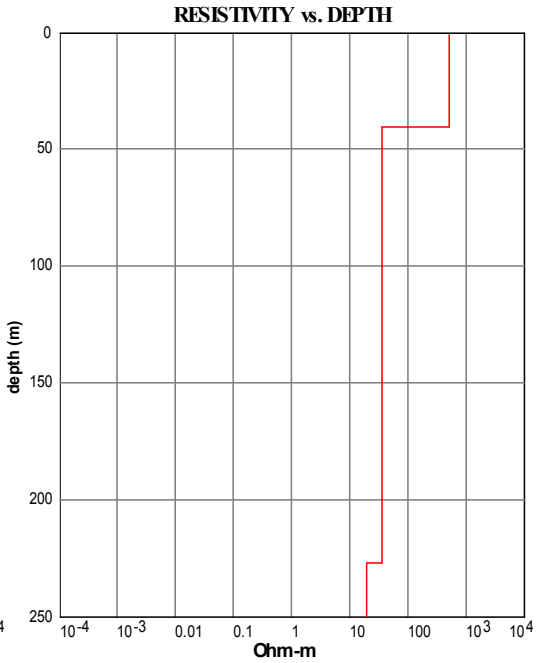

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

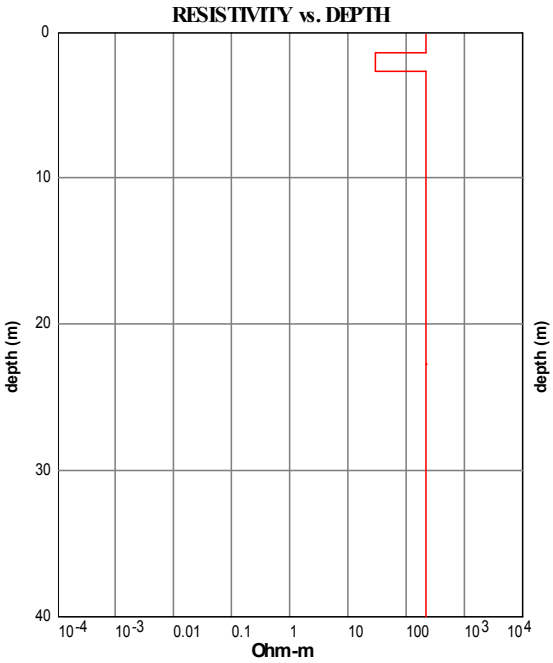

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

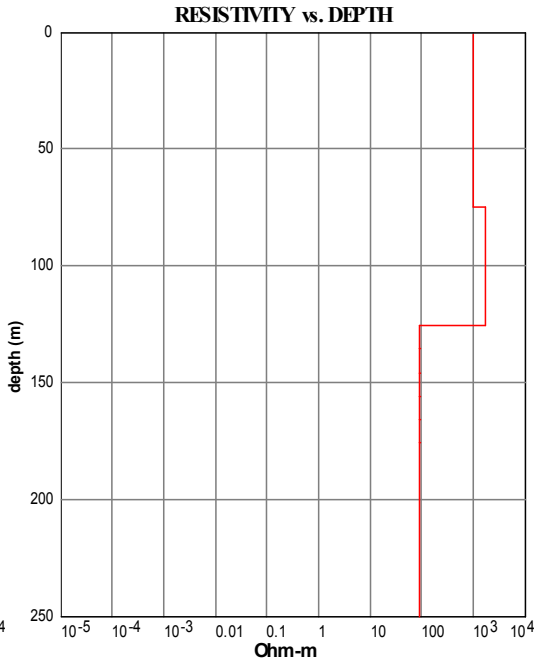

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

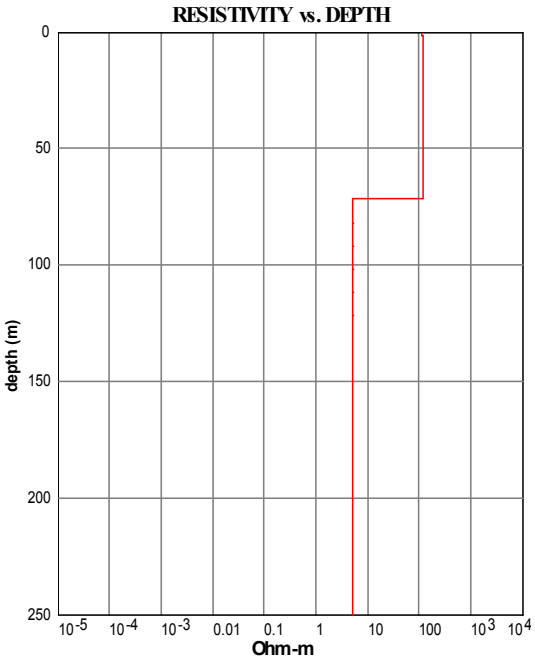

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

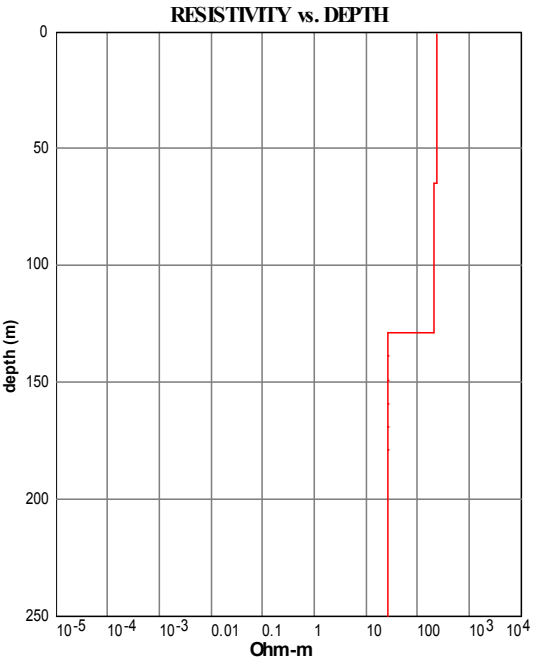

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

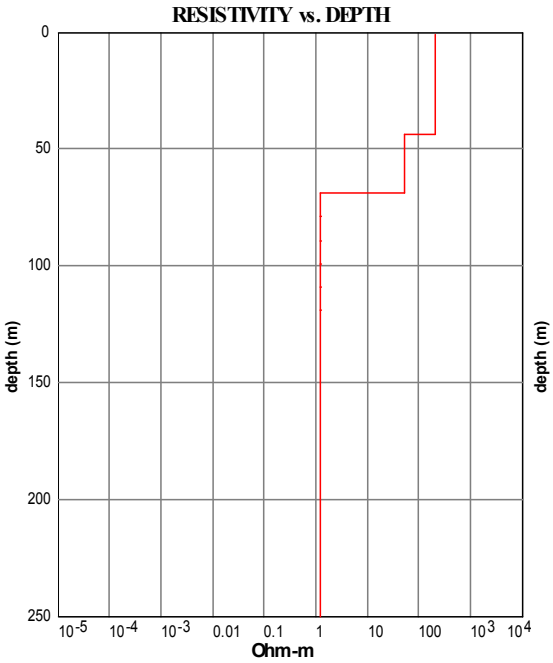

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

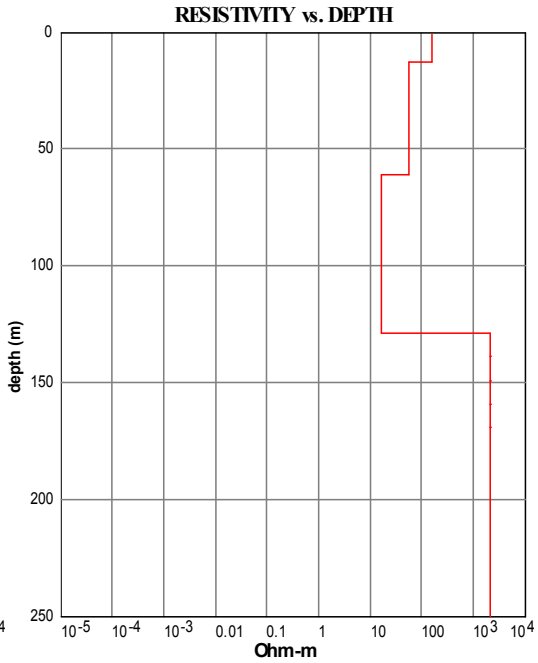

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
10
20
30
40
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

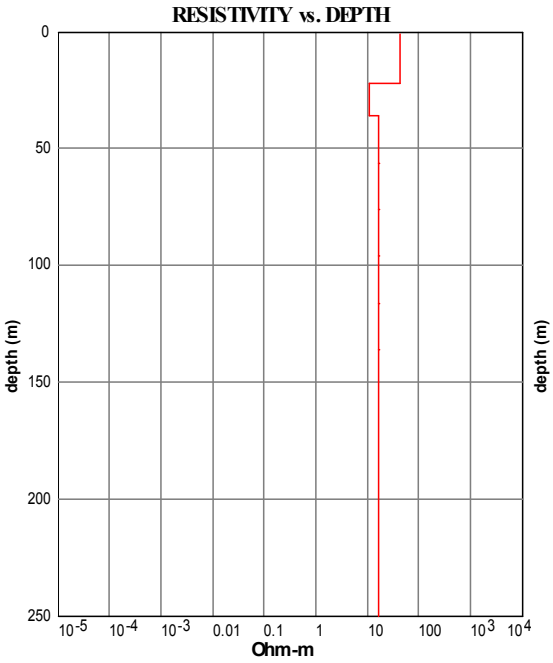

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

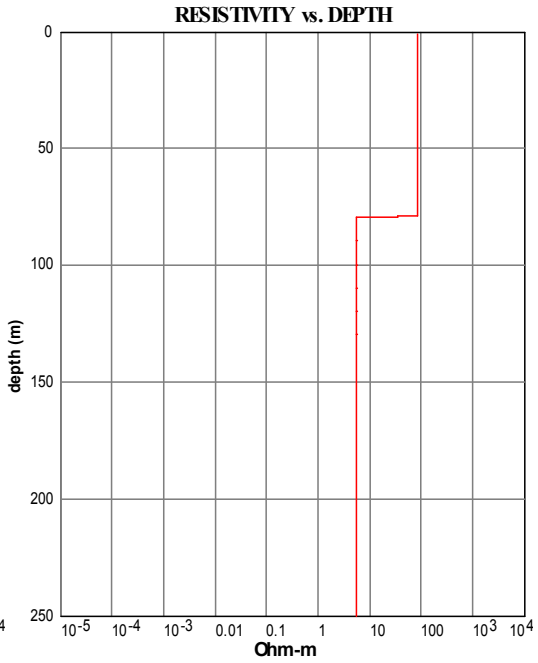

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

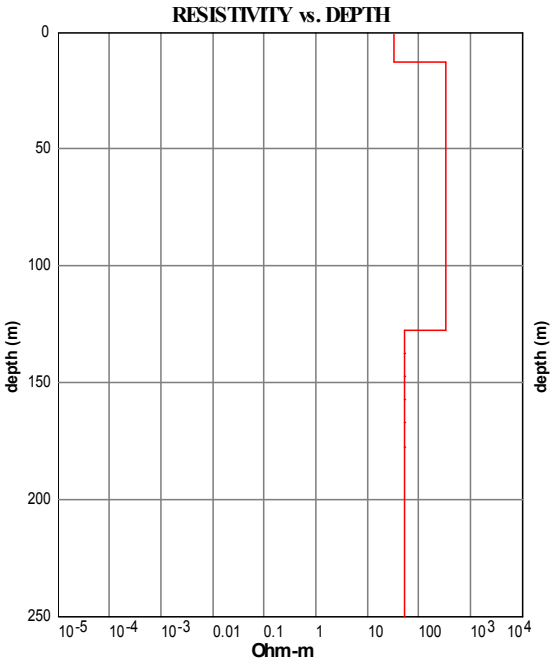

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

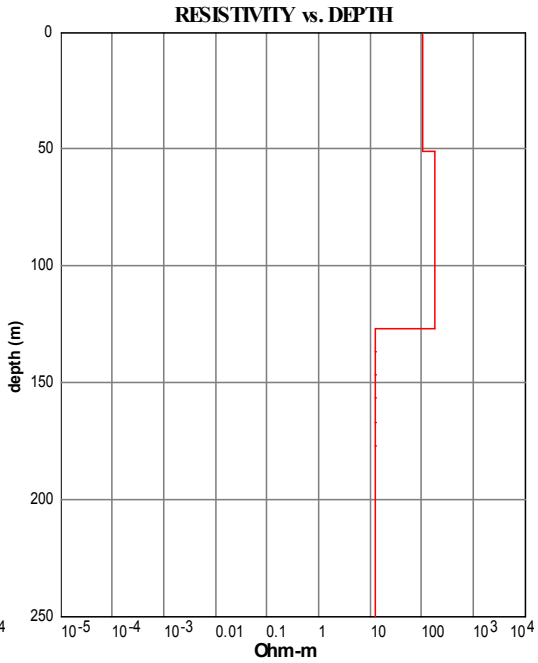

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

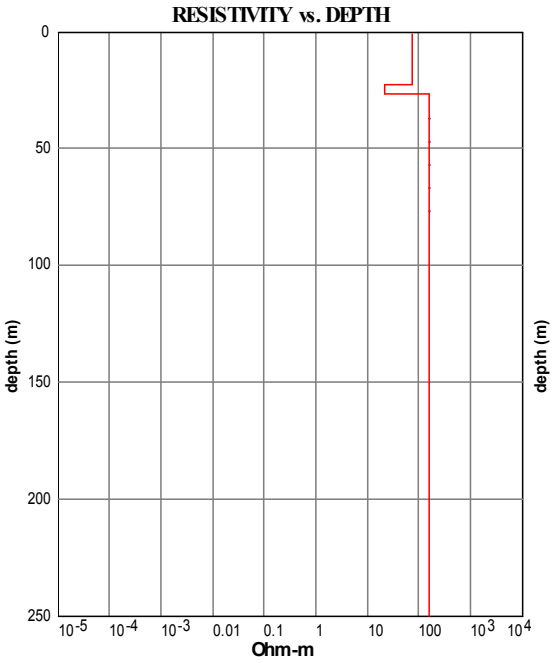

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

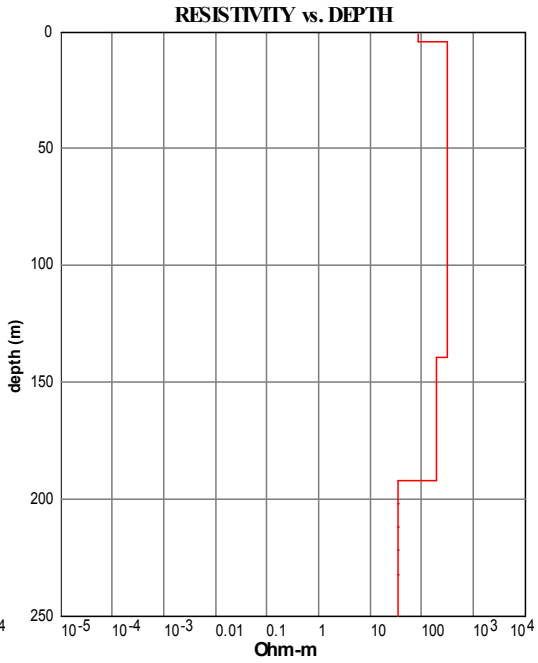

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

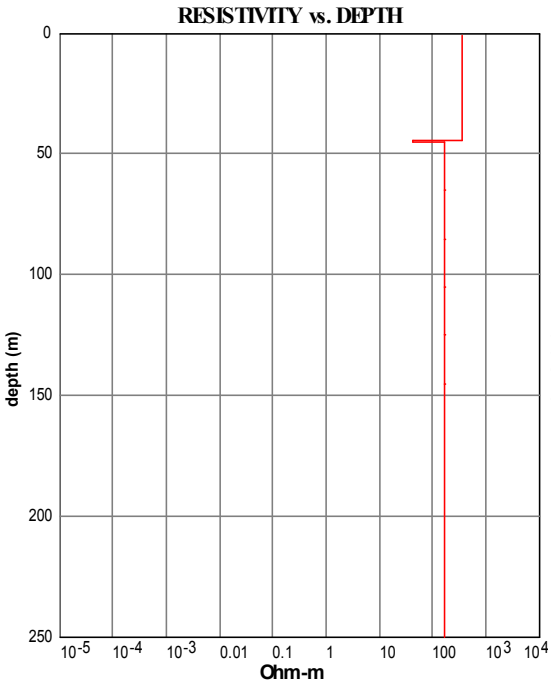

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

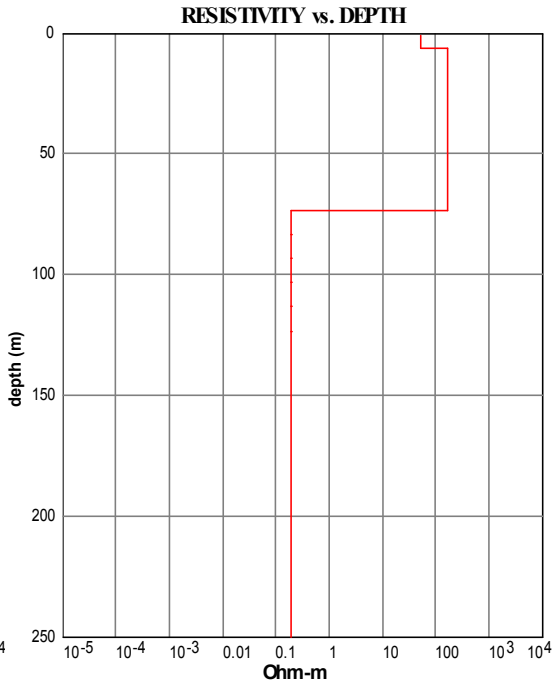

RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5 10-4 10-3 0.01 0.1 1 10 100 103 104
Ohm-m


RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5 10-4 10-3 0.01 0.1 1 10 100 103 104
Ohm-m


RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5 10-4 10-3 0.01 0.1 1 10 100 103 104
Ohm-m


RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5 10-4 10-3 0.01 0.1 1 10 100 103 104
Ohm-m


RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m


RESISTIVITY vs. DEPTH
depth (m)
0
50
100
150
200
250
10-5
10-4
10-3
0.01
0.1
1
10
100
103
104
Ohm-m

# 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ


Barker, R. D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. Geophysics, 54, 1031-1037.

Barker, R. (1992). A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. First Break, 10 (2), 53-63.

Briuer, F.L., Simms, J. and Smith, L.M. (1996). Site Mapping, Geophysical Investigation and Geomorphic Reconnaissance at Site 9ME395 Upatoi Town Fort Benning, Georgia, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

Bristow, C.M. (1966). A new graphical resistivity technique for detecting air-filled cavities. Study in Speleology, 1, 204-227.

Claerbout, J.F. and Muir, F. (1973). Robust modeling with erratic data. Geophysics, 38, 826-844.

Claerbout, J.F. (1992). Earth Soundings Analysis: Processing versus Inversion. Blackwell Scientific.

Cook, K.L. and Van Nostrand, R.G. (1954). Interpretation of Resistivity Data Over Filled Sinks. Geophysics, 19, 761-790.

Coggon, J.H. (1971). Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. Geophysics, 36, 132-155.

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

Daniels, F. and Alberty, R.A. (1966). Physical Chemistry. John Wiley and Sons, Inc.

DeGroot-Hedlin, C. and Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetoteluric data. Geophysics, 55, 1613-1624.

Dey, A. and Morrison, H.F. (1979a). Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, 27, 106-136.

Dey, A. and Morrison, H.F. (1979b). Resistivity modeling for arbitrarily three-dimensional structures. Geophysics, 44, 753-780.

Edwards, L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. Geophysics, 42, 1020-1036.

Hallof, P.G. (1957). On the interpretation of resistivity and induced polarization

measurements. Ph.D. Thesis, MIT.

Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.

Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quart. Appl. Math., 2, 164-168.

Loke, M.H. (1996). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. http://www.geoelectrical.com

Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996a). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.

Marquadt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. J. Soc. Indust. Appl. Math., 11, 431-441.

Meju, M.A. (1994). Geophysical data analysis: Understanding inverse problem, theory and practice. Course notes series, Vol. 6, Domenico, S.N., Editor.

Mufti, L. (1976). Finite-difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. Geophysics, 41, 62-78.

Olayinka, A.I. and Yaramanci, U. (2000). Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. Journal of Applied Geophysics, 45, 63-81.

Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. (1992). Numerical Recipes in Fortran: the art of scientific computing (2nd edition). Cambridge University Press.

Roy, A. (1971). Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole DC resistivity methods. Geophysical Prospecting, 20, 29-340.

Roy, A. and Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. Geophysics, 36, 943-959.

Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Geophysical Prospecting, 40, 453-464.

Savvaidis, G. Tsokas, P. Soupios, G. Vargemezis, M. Manakou, P. Tsourlos, I. Fikos, 1999, Geophysical Prospecting in the Krousovitis dam (N.Greece) by Seismic and Resistivity geophysical methods, Journal of Balkan Geophysical Society (BGS), Vol. 2, No. 4, 128-139.

Silvester, P.P. and Ferrari, R.L. (1990). Finite elements for electrical engineers (2nd

edition). Cambridge University Press.

Soupios Pantelis, Ilias Papadopoulos, Maria Kouli, Irene Georgaki, Filippos Vallianatos, Eleni Kokkinou, 2006, Investigation of Waste Disposal Areas Using Electric Methods : A Case Study from Hania – Crete, Greece, Environ Geol (2006) DOI 10.1007/s00254-006-0418-7.

Soupios Pantelis, Panos Georgakopoulos, Nikos Papadopoulos, Vasilios Saltas, Filippos Vallianatos, Apostolos Sarris, John P. Makris, 2007, Use of Engineering Geophysics to Investigate a Site for a Building Foundation, J. Geophys. Eng. 4 (2007) 94–103 doi:10.1088/1742-2132/4/1/011.

Soupios Pantelis, Nikos Papadopoulos, Ilias Papadopoulos, Maria Kouli, Filippos Vallianatos, Apostolos Sarris, Thrassyvoulos Manios, 2007, Application of Integrated Methods in Mapping Waste Disposal Areas, Environ Geol., DOI 10.1007/s00254-007-0681-2

Smith, N. and Vozoff, K. (1984). Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data. IEEE Trans. Geosc., 22, (1), 21-28.

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990). Applied Geophysics (2nd edition).Cambridge University Press.

Tsourlos, P., Szymanski, J., Dittmer, J. and Tsokas, G. (1993). The use of back-projection for fast inversion of 2-D resistivity data. Proceedings of the 2nd congress of the Greek Geophysical Union, Florina, Greece, 5-7 ay, 1, 71-81.

Tsourlos, P.I. (1995). Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Ph.D. Thesis, Department of Electronics, University of York.

Tsourlos, P.I., Szymanski, J.E. and Tsokas, G.N. (1998). A smoothness constrained algorithm for the fast 2-D inversion of DC resistivity and induced polarization data. Journal of the Balkan Geophysical Society, 1, 3-13.

Ward, S. (1989). Resistivity and induced polarization methods: in Investigations in Geophysics no 5, Geotechnical and Environmental Geophysics vol. I, ed. S. Ward, SEG, Tulsa, 147-189.

Zhody, A. (1989). A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. Geophysics, 54, 245-253.