

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

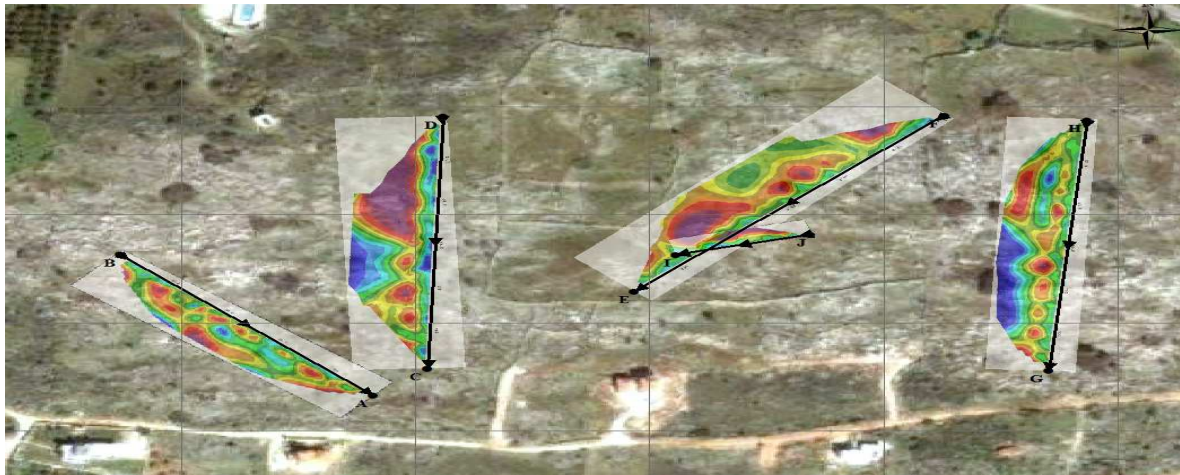


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ



ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ



**Γεωτεχνικός χαρακτηρισμός υπεδάφους
με τη χρήση ηλεκτρικών γεωφυσικών
μεθόδων**

**Geotechnical characterization of the subsurface by
using geoelectrical methods**

ΚΟΥΛΑΤΣΗ ΕΥΔΟΞΙΑ-ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΝΤΕΛΗΣ ΣΟΥΠΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον διδάκτωρ καθηγητή Κ. Παντελή Σουπιό για την εμπιστοσύνη, την βοήθεια και τη στήριξη πάνω στο θέμα που μου ανέθεσε να εκτελέσω καθώς επίσης και τον Δρ. Νίκο Παπαδόπουλο για την βοήθεια που μου έδωσε στην υλοποίησει συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους καθηγητές, συμφοιτητές του τμήματος μου και όλους όσους που με την υπομονή και την αγάπη τους μου πρόσφεραν την δυνατότητα να καταφέρω να ολοκληρώσω τον κύκλο σπουδών μου.

Ακόμη ένα μεγάλο ευχαριστώ στη μητέρα μου για την ηθική και οικονομική στηρίζει και εμπιστοσύνη που μου έδωσε όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, αφορούν ηλεκτρικές τομογραφίες οι οποίες έλαβαν χώρα προκειμένου να διερευνηθεί η γεωφυσική και γεωλογική δομή του υπεδάφους με τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του και σε πρώτη προσέγγιση να εκτιμηθούν οι πιθανές εντοπιζόμενες γεωφυσικές ανωμαλίες σε σχέση με την τοπική γεωλογική δομή της υπό πολεοδόμησης περιοχής.

Στην περιοχή Ξανθουλιανών στο δήμο Ακροτηρίου εφαρμόστηκε η μέθοδος της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας, πραγματοποιώντας πέντε (5) τομογραφίες συνολικού μήκους 776 μέτρων. Κατά μήκος όλων των τομών τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συλλέχθηκαν με τις διατάξεις Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου. Στα δεδομένα που συλλέχθηκαν εφαρμόστηκαν αλγόριθμοι επίλυσης αντιστρόφου προβλήματος και δισδιάστατης μοντελοποίησης προκειμένου να εξαχθούν όσο το δυνατόν ακριβή συμπεράσματα. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος στην περιοχή εμφανίζεται κατά τόπους συμπαγής ενώ εντοπίζονται περιοχές ασυνέχειας λόγω της τεκτονικής δράσης των κανονικών ρηγμάτων της περιοχής μέσα στις οποίες εντοπίζεται αργιλικό και μαργαϊκό υλικό. Για να δημιουργηθεί μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα προτείνονται δυο θέσεις γεωτρήσεων στη περιοχή.

Abstract

With the application of the electrical methods of prospecting the determination of the electrical properties of the rock formation of the superficial layers of the earth surface is sought.

The results presented concern electrical tomographies which were performed in order to study the geophysical and geological structure of the subsoil with the determination of its electrical properties and as a primary approach to evaluate the possible findings of geophysical anomalies in relation to the local geological structure of the area undergoing urbanization.

The method of two-dimensional electrical tomography was applied in the Xanthouliana Area of the Acrotirion Municipality. Five (5) tomographies of a total length of 776 m overall were performed. Across the length of all the cross-sections the data of the specific electrical resistance was collected with the Bipole-Bipole and Unipole-bipole provisions.

Algorithms for the solution of an inverse problem and two-dimensional modeling were used on the data collected in order to draw as accurate conclusions as possible.

From the results it is evident that the marly lime stones in the area appear in localized compact formations whilst there are areas of discontinuity between them due to the tectonic action of the normal faults of the area in which aluminated marly material are found. For a more integrated picture we propose two locations for drilling in the area.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ 9****ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ...10**

2.1 Γεωμορφολογικές συνθήκες.....10

2.2 Γεωλογική δομή.....12

2.3 Τεκτονική δομή13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΡΧΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....15

3.1 Εισαγωγή..... 15

3.2 Σχέση Γεωλογίας και Αντίστασης15

3.3 Βασικές αρχές για τη μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης και της τεχνικής ηλεκτρικής τομογραφίας.18

3.4 Φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση.....21

3.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων.....22

3.6 Μέθοδοι έρευνας.....29

3.7 Συλλογή τομογραφικών γεωηλεκτρικών δεδομένων.....32

3.8 Σφάλματα μετρήσεων ειδικής αντίστασης.....37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....38

4.1 Εξοπλισμός-Γεωφυσικά όργανα38

4.2 Μετρήσεις υπαίθρου.....42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....49

5.1 Μέθοδος αντιστροφής49

5.2 Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα.....50

5.3 Προγραμμα RESDINV-Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....54

6.1 Επεξεργασία Γεωφυσικών Δεδομένων & Αποτελεσμάτων Ερευνών54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ56

7.1 Αποτελέσματα γεωηλεκτρικής τομογραφίας διασυστατης αντιστροφής.....56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....66**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....73**

<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u>

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την εκτέλεση και ερμηνεία των γεωφυσικών διασκοπήσεων ώστε να διερευνηθεί η γεωφυσική και γεωλογική δομή του υπεδάφους και σε πρώτη προσέγγιση να εκτιμηθούν οι εδαφικές συνθήκες της υπό πολεοδόμησης περιοχής.

Η γεωφυσική χαρτογράφηση της περιοχής πραγματοποιήθηκε στις 1 Μαρτίου 2010 στα διοικητικά όρια του δήμου Ακρωτηρίου, περίπου 11 Km ανατολικά της πόλης των Χανίων και 1 Km δυτικά του χωριού Στέρνες.

Η μελέτη έγινε στα πλαίσια συνεργασίας του εργαστηρίου γεωφυσικής και σεισμολογίας του τμήματος φυσικών πόρων και περιβάλλοντος με του Εργαστηρίου Γεωφυσικής–Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος του ΙΜΣ-ΙΤΕ. Τον συντονισμό των εργασιών υπαίθρου ανέλαβε ο Δρ. Παπαδόπουλος Νίκος σε συνεργασία με τον κ. Διαμαντάκη Δημήτρη, τον επιβλέπων καθηγητή κ. Παντελή Σουπιο καθώς και 4 επιπλέον άτομα για την ολοκλήρωση των εργασιών υπαίθρου.

Συνολικά στις τις γεωφυσικές έρευνες συμμετείχαν οι παρακάτω ερευνητές:

Παπαδόπουλος Νίκος	Γεωλόγος-Γεωφυσικός, Ερευνητής Δ' ΙΜΣ-ΙΤΕ, Ρέθυμνο
Σουπιός Παντελής	Γεωλόγος-Γεωφυσικός, Αν. Καθηγητής του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΤΕΙ Κρήτης, Χανιά
Γρυλλάκης Γιάννης	Τελειόφοιτος τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΤΕΙ Κρήτης, Χανιά
Ευδοξία Κουλάτση	Τελειόφοιτος τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΤΕΙ Κρήτης, Χανιά

Τα κεφάλαια περιλαμβάνουν τα εξής:

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται σύντομη αναφορά για την περιοχή έρευνας τη μέθοδο που εφαρμόστηκε αλλά και τους συνεργάτες που βοήθησαν για την υλοποίησή της έρευνας.

Το κεφαλαίο 2 αναφέρετε για την γεωμορφολογία της Κρήτης και ειδικότερα για τη περιοχή του ακρωτηρίου και της περιοχής έρευνας.

Το κεφάλαιο 3 αναφέρετε για τις γεωφυσικές αρχές που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα καθώς και τον τρόπο της διαδικασίας και συλλογής της μεθόδου ηλεκτρικής διασκοπήσης. Ακόμα για τις διατάξεις ηλεκτροδίων ρεύματος που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε καθώς και τις τεχνικές μέτρησης για τη συλλογή των δεδομένων.

Το κεφαλαίο 4 κάνει αναφορά για το τρόπο διεξαγωγής και τον εξοπλισμό της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε.

Το κεφάλαιο 5 περιγράφει πως με βάση τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν κατά τις υπαίθριες εργασίες με τη μέθοδο της αντιστροφής, αυτόματα να καθορίσει ένα δισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο της γης.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται η επεξεργασία από τη συλλογή έως το τελικό αποτέλεσμα των δεδομένων.

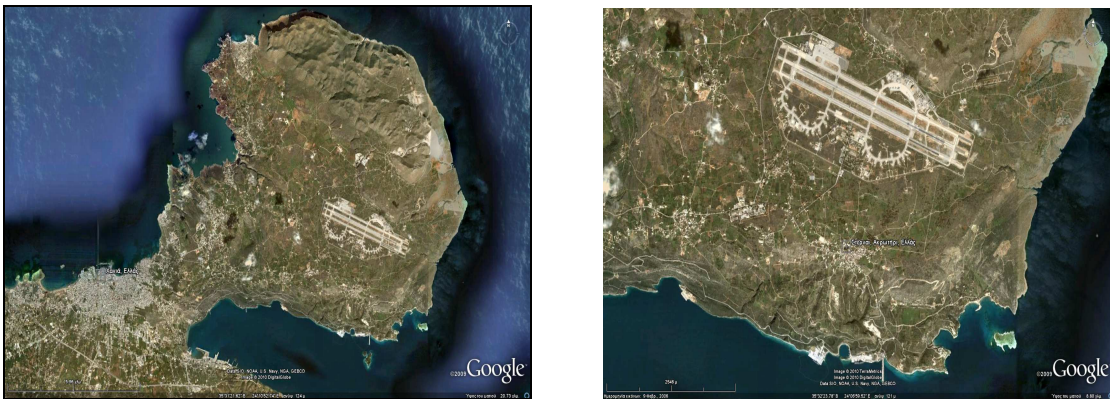
Τα αποτελέσματα των τομογραφιών αναφέρονται στο κεφάλαιο 7 και τέλος στο κεφάλαιο 8 βλέπουμε τα συμπεράσματα και τις προτάσεις που μπορούν να προταθούν για τη συγκεκριμένη περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βορειοανατολικά του τμήματος του νομού Χανίων και ανατολικά της πόλεως των Χανίων βρίσκεται η χερσόνησος του ακρωτηρίου. Ενώνεται με το υπόλοιπο νησί με ένα λαιμό μήκους 3km διαμορφώνοντας έτσι βόρεια τον κόλπο των Χανίων και νότια τον κόλπο της Σούδας. Η περιοχή γύρω από τα Ξανθουλιανά ανήκει στη χαμηλή ζώνη του Ακρωτηρίου, βρίσκεται στα διοικητικά όρια του δήμου Ακρωτηρίου περίπου 11 Km ανατολικά της πόλης των Χανίων και 1 Km δυτικά του χωριού Στέρνες (Εικ. 1.1).

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις στην περιοχή Ξανθουλιανά του Δήμου Ακρωτηρίου (Χανιά) διενεργήθηκαν στα πλαίσια της συνεργασίας μεταξύ του επιβλέπον καθηγητή Κ. Παντελή Σουπιο του εργαστηρίου γεωφυσικής και σεισμολογίας του τμήματος φυσικών πόρων και περιβάλλοντος και του κ. Νίκου Παπαδόπουλου του Εργαστηρίου Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης & Αρχαιοπεριβάλλοντος του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών/Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας (Ι.Μ.Σ.-Ι.Τ.Ε.) καθώς επίσης και του κ. Διαμαντάκη Δημήτριου (Μεταλλειολόγος Μηχανικός).



Εικόνα 1.1: Η περιοχή Ξανθουλιανά, όπου διενεργήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις και η τοποθεσία της περιοχής σε σχέση με την πόλη των Χανίων (αριστερά) και του χωριού Στέρνες (δεξιά).

Οι γεωφυσικές έρευνες επικεντρώθηκαν κατά μήκος οδούσεων σε συγκεκριμένες θέσεις της περιοχής ενδιαφέροντος. Στην περιοχή εφαρμόστηκε η μέθοδος της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας, πραγματοποιώντας πέντε (5) τομογραφίες συνολικού μήκους 776 μέτρων. Κατά μήκος όλων των τομών τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συλλέχθηκαν με τις διατάξεις Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου.

Η διεύθυνση των γεωηλεκτρικών τομογραφιών καθορίστηκε σε συνεργασία με τον Μεταλλειολόγο Μηχανικό κ. Διαμαντάκη Δημήτριο λαμβάνοντας υπ'όψιν

την διάταξη των πολεοδομικών τετραγώνων της περιοχής. Στην εικόνα 1.2 φαίνεται λεπτομέρεια της περιοχής που διενεργήθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες.



Εικόνα 1.2: Περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες..

Οι γεωφυσικές μέθοδοι διασκόπησης χρησιμοποιούνται στην επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν τη διερεύνηση υπεδάφιων δομών και σχετίζονται με τη γεωλογία, τη υδρογεωλογία, την τεχνική γεωλογία, την κοιτασματολογία, τη φυσική γεωγραφία, το περιβάλλον και την αρχαιολογία. Μεταξύ των υφιστάμενων τεχνικών η γεωηλεκτρική μέθοδος (ή αλλιώς μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης) θεωρείται ευρέως προτιμητέα για την μελέτη του υπεδάφους. Εξέλιξη της γεωηλεκτρικής μεθόδου αποτελεί η ηλεκτρική τομογραφία.

Όπως σε κάθε γεωφυσική μέθοδο διασκόπησης, οι μετρήσεις που λαμβάνονται με την εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας δε δίνουν μια άμεση γεωλογική εικόνα του υπεδάφους, αλλά μια έμμεση απεικόνιση των γεωφυσικών ιδιοτήτων του που μπορεί, σε περιπτώσεις πολύπλοκης δομής, να απέχει από την πραγματική. Όμως, η ανάπτυξη σύγχρονων οργάνων μέτρησης που επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη και ταχεία λήψη μετρήσεων, καθώς και η ανάπτυξη αλγορίθμων που επιτρέπουν τη ρεαλιστική απεικόνιση των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, αναβάθμισαν την ηλεκτρική τομογραφία και την κατέστησαν την πλέον σημαντική νέα μέθοδο στην εφαρμοσμένη γεωφυσική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΝΙΚΗ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Ο Νομός Χανίων είναι το δυτικότερο τμήμα της μεγαλονήσου με έκταση 2376 τ. χλμ. Συνορεύει ανατολικά με το Νομό Ρεθύμνης ενώ βρέχεται στις τρεις άλλες πλευρές του, δυτικά από την Μεσόγειο θάλασσα, το Κρητικό Πέλαγος στο βορρά και το Λυβικό στο νότο.

Το πολυσχιδές ανάγλυφο της βόρειας ακτής χαρακτηρίζεται από τις τέσσερις μεγάλες χερσονήσους και τα ομώνυμα ακρωτήρια της Γραμβούσας, της Ειρήνης (Σπάθας), του Ακρωτηρίου και του Δρεπάνου, ανάμεσα στα οποία διαμορφώνονται και οι τέσσερις μεγάλοι και ευλίμενοι κόλποι της Κισάμου, των Χανίων, της Σούδας και της Γεωργιούπολης.

2.1 Γεωμορφολογικές συνθήκες

Το γεωλογικό ανάγλυφο και η γεωλογική σύσταση των Χανίων και ειδικότερα του ακρωτηρίου έχουν ευνοήσει τη δημιουργία πολλών χαραδρόσεων και σπηλαίων. Χαρακτηριστικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι στην εδαφική περιφέρεια του ακρωτηρίου υπάρχουν 100 περίπου αξιόλογα σπήλαια πολλά από τα οποία παρουσιάζουν, ιστορικό και βιολογικό ενδιαφέρον.

Η γεωμορφολογική εικόνα που παρουσιάζει σήμερα η περιοχή του ακρωτηρίου οφείλετε σε διάφορα γεωλογικά φαινόμενα, κυρίως στην έντονη επίδραση των τεκτονικών γεγονότων που συνέβησαν κατά τη χρονική περίοδο του μειόκαινου ως σήμερα.

Από τη δράση των τεκτονικών αυτών γεγονότων διαμορφώθηκαν οι μακρομορφολογικοί χαρακτήρες της περιοχής ενώ η λεπτομερέστερη μορφολογική της υφή έχει διαμορφωθεί από τις διαδικασίες της διάβρωσης και τις αποσάθρωσης των πετρωμάτων.

Αποτέλεσμα των γεωλογικών διαδικασιών είναι η διαμόρφωση της σημερινής γεωμορφολογικής δομής του ακρωτηρίου που χαρακτηρίζεται από εξαιρετικές ποικιλομορφίες.

2.2 Γεωλογική δομή

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

Σήμερα η γεωλογική δομή της Κρήτης χαρακτηρίζεται από τη συσσώρευση μιας σειράς τεκτονικών καλυμμάτων:

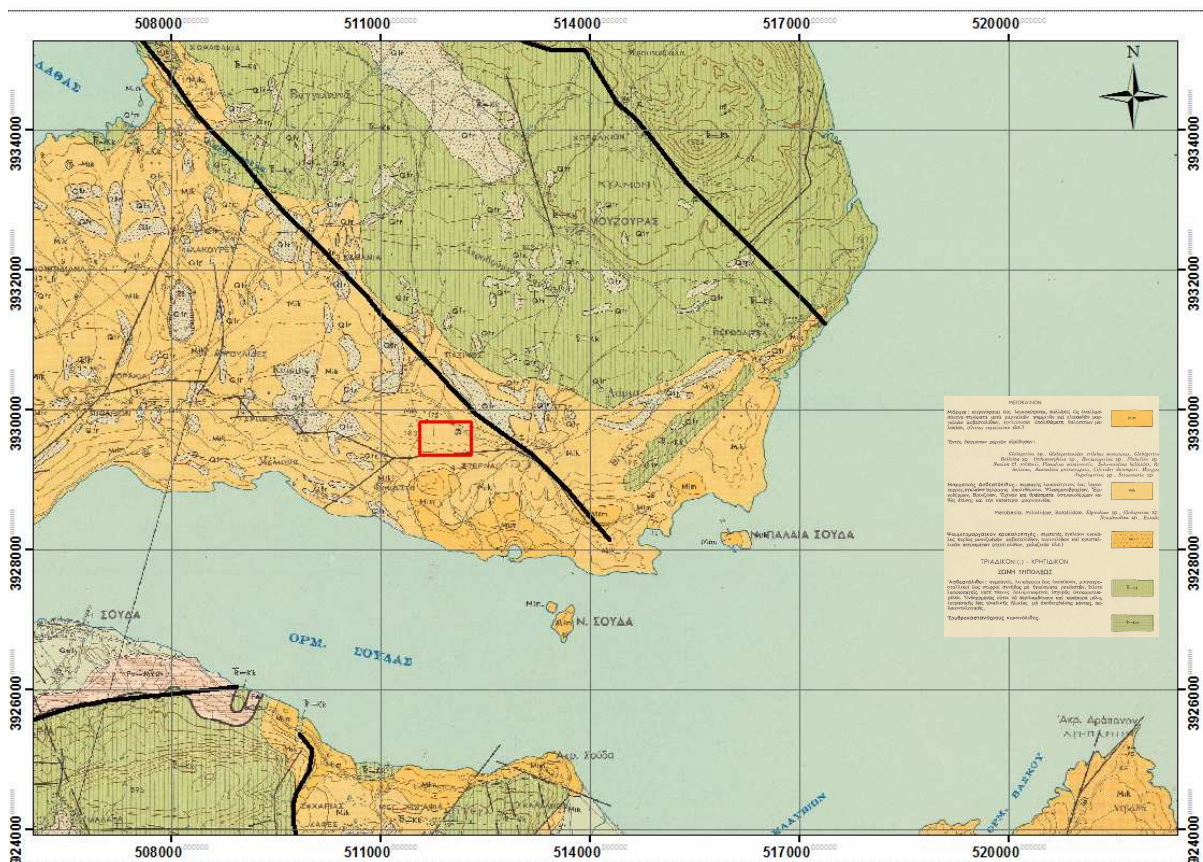
Τα κατώτερα καλύμματα : -ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων

-η ενότητα του τρυπαλίου και

- το τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιτών-Χαλαζιτών

Τα ανώτερα καλύμματα : όπου αποτελούνται από αμεταμόρφωτα ανθρακικά καλύμματα στη βάση τους και ολιγοκαινικά μεταμορφωμένα στη κορυφή. Καθώς και νεότερα ιζήματα νεογενούς ηλικίας .

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την περιοχή ενδιαφέροντος αντιστοιχούν στα κατώτερα καλύμματα της Κρήτης και στα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς όπου αποτελείται από συμπαγή λευκοκίτρινο έως λευκότεφρο μαργαϊκό ασβεστόλιθο του Μειοκαινού. Ο σχηματισμός αυτός υπέρκειται του ψαμιτομαργαϊκού κροκαλοπαγούς βάσης και των ασβεστόλιθων της ζώνης της Τρίπολης (Εικ. 2.1, Γεωλογικός Χάρτης ΙΓΜΕ, Φύλο Χανιά).



Εικόνα 2.1: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής όπου πραγματοποιήθηκαν οι γεωφυσικές διασκοπήσεις. (Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ – φύλλο Χανιά).

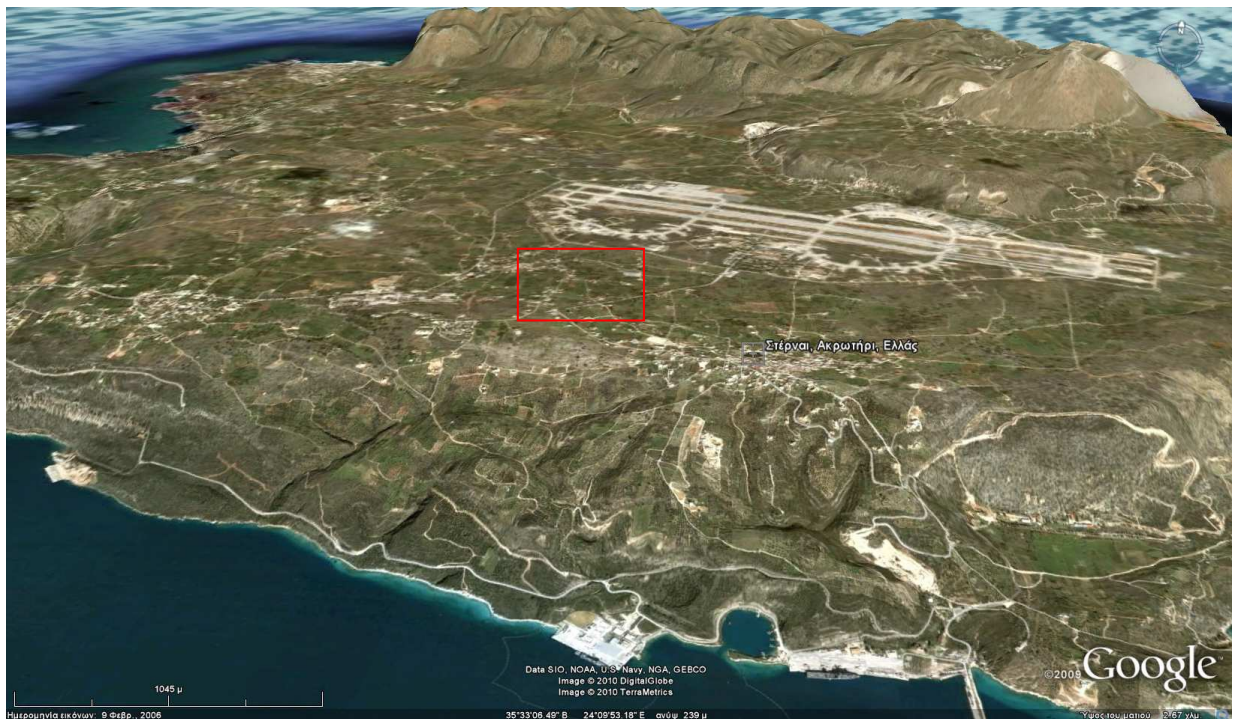
2.3 Τεκτονική δομή

Η Κρήτη όπως αναφέραμε παραπάνω αποτελεί ένα από τα νέα ενεργά ορογενή γεγονόσ που συνοδεύεται από αλληπάλληλα τεκτονικά γεγονότα που έχουν δράση στη ευρύτερη σημερινή περιοχή του νησιού. Αποτέλεσμα αυτών είναι η ανάπτυξη ρηξιγενούς τεκτονικής που επικρατεί καθ' όλη τη έκταση της Κρήτης και εκδηλώνονται με την ανάπτυξη μεγάλων και μικρών ρηξιγενών ζωνών που κυριολεκτικά καταταμαχίζουν το νησί.

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

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

Η περιοχή έρευνας παρουσιάζει κλίση προς τα νότια έχοντας μία υψομετρική διαφορά της τάξης των 20 μέτρων. (εικ. 2.2). Το έδαφος είναι ανώμαλο και επιφανειακά εμφανίζονται βραχώδη εξάρματα που δυσχεραίνουν σε αρκετά σημεία την προσβασιμότητα.



Εικόνα 2.2: Πανοραμική άποψη της περιοχής Ξανθουλιανά από τα νότια, στο κόκκινο τετράγωνο είναι η περιοχή έρευνας.

Στα βόρεια της περιοχής διέρχεται ένα κανονικό ρήγμα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ, ενώ το νότιο τμήμα της περιοχής οριοθετείται από ένα επίσης κανονικό ρήγμα με διεύθυνση Δ-Α. Τα δύο ρήγματα συμβάλλουν στα ανατολικά της περιοχής μελέτης, στο χωριό Στέρνες. Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζονται λεπτομέρειες του απότομου τοπογραφικού ανάγλυφου και των βραχωδών εξαρμάτων της περιοχής.



Εικόνα 2.3: Λεπτομέρειες των βραχωδών εξαρμάτων του μαργαϊκού ασβεστόλιθου της περιοχής έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αρχές γεωφυσικής τεχνικής της ηλεκτρικής τομογραφίας.

3.1 Εισαγωγή

Με την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων 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.

Μία από τις σπουδαιότερες ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, είναι η μέθοδος της ειδικής αντίστασης..

Κατά τη διάρκεια των γεωφυσικών ερευνών εφαρμόστηκε η τεχνική της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η παραπάνω γεωφυσική τεχνική επιλέχθηκε ως η πλέον κατάλληλη για την επίτευξη των στόχων της έρευνας, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τα χαρακτηριστικά των υποψήφιων γεωλογικών στόχων, όσον αφορά στον εντοπισμό και τη χαρτογράφησή τους.

3.2 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 του εδάφους εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων οι οποίοι είναι εύκολα μεταβαλλόμενοι. Εξαρτάται από τις υδρολογικές – υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής, τη χημική σύσταση του νερού, τα ιόντα που είναι διαλυμένα σε αυτό, το πορώδες των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις και διακλάσεις, τη θερμοκρασία και την πίεση, καθώς και από τις τοπογραφικές μεταβολές. Από τους πιο βασικούς παράγοντες της ηλεκτρικής αντίστασης είναι η ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα. Το ρεύμα

διαδίδεται μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό το οποίο βρίσκεται στους πόρους και τις ρωγμές των γεωλογικών σχηματισμών. Τα μεταμορφωμένα και τα πυριγενή πετρώματα έχουν υψηλές τιμές αντίστασης.

Τα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία είναι συνήθως περισσότερο πορώδη και περιέχουν υψηλότερο ποσοστό νερού, έχουν χαμηλότερες αντιστάσεις.

Τα εκρηξιγενή πετρώματα ή τα μάρμαρα παρουσιάζουν μικρή αγωγιμότητα. Σε σχέση με τη φυσική κατάσταση, τα συμπαγή πετρώματα και τα ξηρά εδάφη δείχνουν μικρή αγωγιμότητα, ενώ τα πορώδη πετρώματα και τα υγρά εδάφη δείχνουν μεγάλη αγωγιμότητα.

Η αντίσταση του νερού ποικίλει από 10 έως 100 Ohm- 20m, 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:

$$\rho = \alpha \rho_w \phi^{-m} \quad (1)$$

όπου, ρ_w 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 (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, είναι πιθανό δύο διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί να έχουν παρόμοιες τιμές ειδικής αντίστασης.

Επομένως ασφαλής είναι η σχετική σύγκριση των ειδικών αντιστάσεων στην ίδια περιοχή.

Ετσι πρέπει να σημειωθεί ότι η ειδική αντίσταση δεν αποτελεί απόλυτα χαρακτηριστικό γνώρισμα συγκεκριμένων λιθολογικών τύπων, καθώς η διακύμανση αυτής μπορεί να παρουσιάζει μεγάλο εύρος ακόμα και μέσα στον ίδιο λιθολογικό τύπο (Πιν. 3.1).

Για τους λόγους αυτούς η αντίσταση πολλές φορές μπορεί να είναι σχετικά ασταθής και ανεπαρκής φυσική ποσότητα, όσον αφορά στην εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων, που αφορούν στην συσχέτιση των τιμών της με συγκεκριμένους λιθολογικούς τύπους.

Τις περισσότερες φορές, για την ερμηνεία των τιμών της αντίστασης, αυτό το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία δεν είναι τόσο η απόλυτη τιμή της, αλλά η σχετική μεταβολή της τιμής της αντίστασης σε σχέση με το ευρύτερο περιβάλλον.

ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm-m)
Ιζηματογενή πετρώματα	
Άργιλος	1-100
Μάργα	3-70
Κροκαλοπαγές	2×10^3 - 10^4
Ψαμμίτης	1 - 6.4×10^8
Ασβεστόλιθος	50 - 10×10^7
Δολομίτης	3.5×10^2 - 5×10^3
Πυριγενή μεταμορφωμένα	και
Βασάλτης	10 - 1.3×10^7
Γάβρος	10^3 - 10^6
Διαβάσης	20 - 5×10^7
Σχιστόλιθος	20 - 10^4
Μάρμαρο	10^2 - 2.5×10^8
Γνεύσιος	6.8×10^4 - 3×10^6
Επίδραση του νερού	
Γρανίτης, 0.00% νερό	1010
Γρανίτης, 0.19% νερό	1.8×10^6
Γρανίτης, 0.31% νερό	4.4×10^3

Πίνακας 3.1: Τιμές των αντιστάσεων για μερικά χαρακτηριστικά πετρώματα (Telford et al. 1990).

Για τους παραπάνω λόγους η ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης πρέπει να γίνεται με προσοχή και σε συνδυασμό πάντα με τις υπάρχουσες πληροφορίες της υπό μελέτη περιοχής.

Τέτοιες πληροφορίες είναι γεωλογικοί, τοπογραφικοί χάρτες της περιοχής αλλά και αποτελέσματα από παλαιότερες κ.λ.π. Όλες αυτές οι πληροφορίες θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μαζί με τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα ερμηνείας.

3.3 Βασικές αρχές για τη μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης και της τεχνικής της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποτελεί μία από τις γεωφυσικές τεχνικές που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην διασκόπηση και στον εντοπισμό “ρηχών δομών”.

Η μέθοδος αυτή είναι επίσης γνωστή και ως “μέθοδος συνεχούς ρεύματος”.

Αυτό πραγματοποιείται με μετρήσεις διαφορών δυναμικού στην επιφάνεια μέσω εισαγωγής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος στη γη. Σκοπός της μεθόδου αποτελεί ο καθορισμός της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή της γεωηλεκτρικής δομής αυτού, πραγματοποιώντας μετρήσεις είτε στην επιφάνεια της Γης είτε μέσα σε γεωτρήσεις.

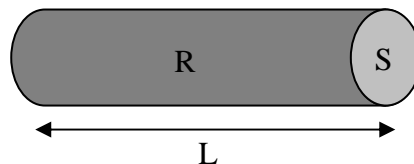
Βασίζεται στη μελέτη του τρόπου διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια ή σε γεωτρήσεις και χρησιμοποιούνται με σκοπό το διαχωρισμό στόχων με διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση (Nishimura 2001: 544).

Στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις, οι «ανωμαλίες» ορίζονται ως οι μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου ή της πυκνότητας του ρεύματος, οι οποίες οφείλονται σε διαταραχές εξ’ αιτίας στόχων με διαφορετική αντίσταση (ή αγωγιμότητα) από το περιβάλλον έδαφος (Sarris 1992: 17).

Συνεπώς, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι για τις γεωηλεκτρικές υδρογεωλογικές διασκοπήσεις πιθανοί στόχοι αποτελούν περιοχές κορεσμένες με νερό. Οι περιοχές αυτές εμφανίζονται με μικρή αγωγιμότητα, παρουσιάζουν ισχυρό σήμα και εγγράφονται ως χαμηλές αντιστάσεις (Telford et al, 1990).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ρ , ενός κυλινδρικού σχήματος που έχει μήκος L , αντίσταση R και εμβαδόν διατομής S δίνεται από την σχέση (Εικ. 3.1):

$$\rho = R \frac{S}{L}. \quad (2)$$



Εικόνα 3.1: Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός κυλίνδρου μήκους L και διατομής S .

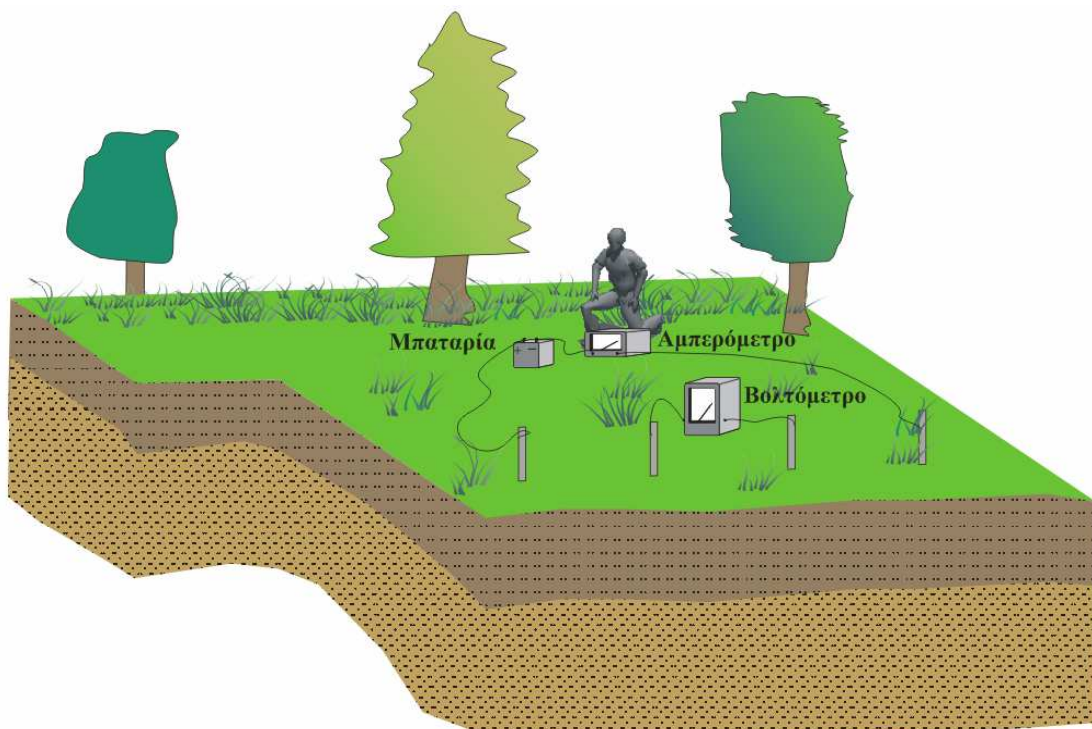
Όπου R είναι σε Ohms, L σε μέτρα και S σε τετραγωνικά μέτρα. Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το Ohm-m. Μία άλλη φυσική ποσότητα που χρησιμοποιείται για να περιγραφεί η συμπεριφορά του υπεδάφους κατά την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η αγωγιμότητα, η οποία ορίζεται ως το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($\sigma = 1/\rho$).

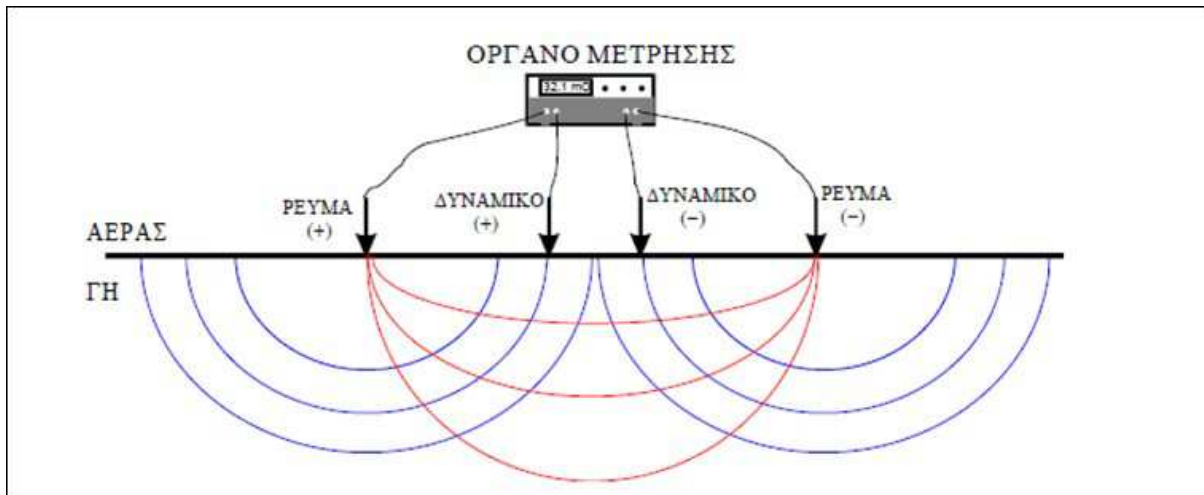
Η αγωγιμότητα δείχνει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέετε στο έδαφος και μονάδα μέτρησης αυτής είναι το Siemens ανά μέτρο (S/m).

Για την μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους εισάγεται μέσα σε αυτό ηλεκτρικό ρεύμα μέσω δύο ηλεκτροδίων A και B .

Το A ηλεκτρόδιο είναι ένας θετικός ηλεκτρικός πόλος ενώ το B ένας αρνητικός. Τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος A και B μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση και του δυναμικού. Εξαιτίας όμως των υψηλών αντιστάσεων επαφής που παρατηρούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και του εδάφους, η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από το εισερχόμενο στο υπεδάφος ρεύμα μετριέται σε δύο άλλα ηλεκτρόδια (ηλεκτρόδια δυναμικού M, N).

Έτσι κατά την εφαρμογή της ηλεκτρικής μεθόδου χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται και στη εικόνα 3.2.





Εικόνα 3.2: Σύνδεση των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος (A, B) και των ηλεκτροδίων δυναμικού (M, N) με ένα αμπερόμετρο και ένα βολτόμετρο αντίστοιχα για την μέτρηση της αντίστασης του υπεδάφους.

Η μετρούμενη διαφορά του δυναμικού αντανακλά τη δυσκολία ροής ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος, και χαρακτηρίζεται με το φυσικό μέγεθος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ .

Θεωρώντας ότι οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έγιναν με την χρήση των τεσσάρων ηλεκτροδίων που φαίνονται στο σχήμα 1, τότε η σχέση που δίνει την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \frac{1}{K} = 2\pi R \frac{1}{K} \quad (3)$$

Όπου:

ρ = η ειδική αντίσταση ομογενούς γης

I = ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διοχετεύεται στην γη

ΔV = μετρούμενη διαφορά δυναμικού

K = γεωμετρικός παράγοντας

R = μετρούμενη αντίσταση

Ο γεωμετρικός παράγοντας K εξαρτάται αποκλειστικά από την διάταξη των ηλεκτροδίων και τις αποστάσεις μεταξύ τους και ισούται με:

$$K = \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right). \quad (4)$$

Στην περίπτωση που η γη είναι ομογενής, τότε για οποιαδήποτε πιθανή διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων η εφαρμογή του γεωμετρικού παράγοντα στην μετρούμενη αντίσταση (R) θα δώσει την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

3.4 Φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση

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 πραγματικότητα όμως η γη είναι ανομοιογενής και ανισότροπη η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και της γεωμετρικής διάταξης των ηλεκτροδίων.

Οπότε για να περιγραφεί αυτή η ανομοιογένεια εισάγεται ένας νέος όρος για την περιγραφή της αντίστασης που λέγεται “φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση”, ρα. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση αντιπροσωπεύει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση που θα είχε το υπέδαφος αν ήταν πράγματι ομογενές και γενικά αποτελεί έναν σταθμισμένο μέσο όρο της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους.

Η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση ρα 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.

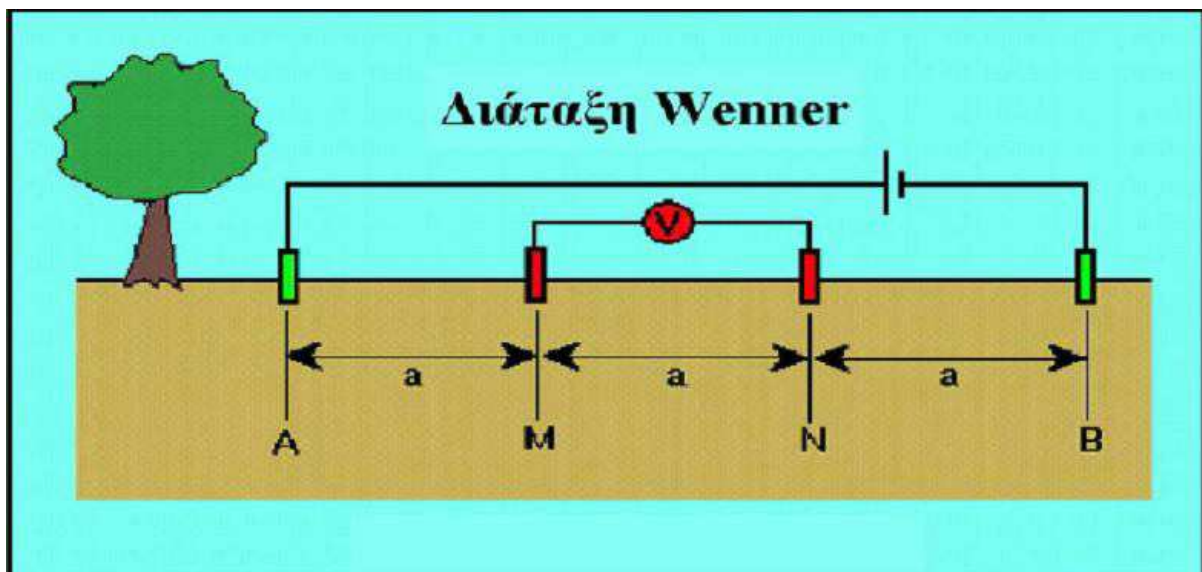
Άρα δεν δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια “παραμορφωμένη” εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Για αυτόν τον λόγο η απευθείας χρήση των μετρήσεων φαινόμενης αντίστασης για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι παρακινδυνευμένη. Η πραγματική αντίσταση μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία.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

3.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Θεωρητικά υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι για να διαταχθούν τα ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά μόνο λίγες από αυτές τις διατάξεις χρησιμοποιούνται ευρύτητα (Αράμπελος, 1991). Αυτό συμβαίνει διότι μπορεί κάποιες διατάξεις θεωρητικά να υπερτερούν έναντι κάποιων άλλων αλλά δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν πρακτικά. Σε αυτό το σημείο θα περιγραφούν οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις.

Διάταξη WENNER

Για μία έρευνα με τη μέθοδο Wenner, τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (πράσινο) και τα δυο ηλεκτρόδια δυναμικού (κόκκινο) τοποθετούνται σε μία ευθεία, συμμετρικά σε σχέση με το κέντρο της διάταξης που είναι το μέσο της απόστασης AB. Κάθε ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχει από το παρακείμενο ηλεκτρόδιο ρεύματος απόσταση a , ίση με το $1/3$ της μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος απόσταση. Η μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού απόσταση είναι επίσης a . Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 2.4.

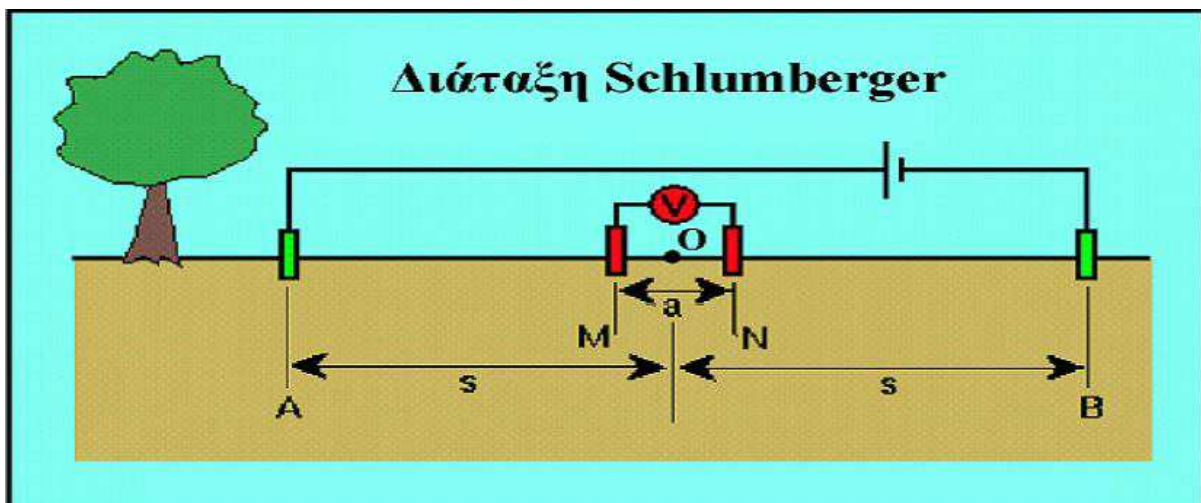


Σχήμα 3.1: Διάταξη Wenner

Για να δημιουργήσουμε ένα διάγραμμα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων, από το οποίο θα ερμηνεύσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος, πρέπει να υπολογίσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση για διαφορές τιμές της απόστασης των ηλεκτροδίων, a . Δηλαδή, αφού ολοκληρώσουμε μια μέτρηση, πρέπει να μετακινήσουμε και τα τέσσερα ηλεκτρόδια σε νέες θέσεις.

Διάταξη SCHLUMBERGER

Για την διενέργεια μιας ηλεκτρικής βυθομέτρησης Schlumberger στο πεδίο, τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού (σχ. 3.2) διατάσσονται στο έδαφος κατά μήκος ευθείας γραμμής σε συγκεκριμένες μεταξύ τους αποστάσεις. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος όσο και τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι συμμετρικά τοποθετημένα ως προς το κέντρο συμμετρίας, O , το οποίο ονομάζεται κέντρο της διάταξης. Όμως, τα τέσσερα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού δεν ίσα απέχουν μεταξύ τους όπως στη διάταξη Wenner. Διεξάγοντας βυθομετρήσεις με διάταξη ηλεκτροδίων κατά Schlumberger η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού M, N πρέπει πάντοτε να διατηρείται μικρότερη του 40% της απόστασης $AB/2$. Στις μετρήσεις πεδίου απομακρύνουμε διαδοχικά τα ηλεκτρόδια ρεύματος (αυξάνουμε την απόσταση AB) ενώ διατηρούμε σταθερή την απόσταση MN . Με αυτό το τρόπο έχουμε μια γρήγορη μείωση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων δυναμικού M, N , όπου από κάποια στιγμή και μετά ο θόρυβος γίνεται μεγαλύτερος του μετρούμενου σήματος ΔV στα άκρα M, N και η μέτρηση του ΔV καθίσταται αδύνατη. Σ' αυτό το σημείο μία αύξηση της απόστασης M, N θεωρείται απαραίτητη, τέτοια όμως ώστε να ισχύει ο περιορισμός η M, N να παραμένει μικρότερη του 40% της απόστασης $AB/2$, και η εργασία συνεχίζεται.



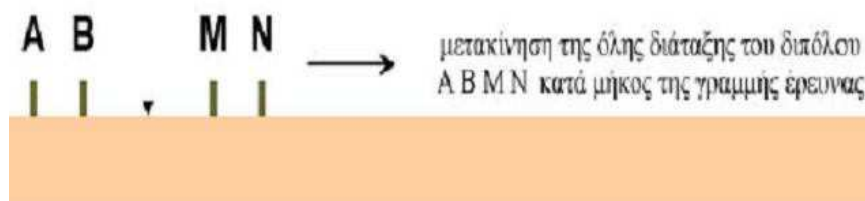
Σχήμα 3.2: Διάταξη Schlumberger

Οι τιμές της ρ_a προβάλλονται ως συνάρτηση του ημι-αναπτύγματος $AB/2$ των ηλεκτροδίων ρεύματος σε διλογαριθμικούς άξονες δημιουργώντας έτσι την ηλεκτρική καμπύλη της βυθομέτρησης (sounding curve) η οποία αποτελεί το βασικό τεκμήριο για την ερμηνεία. Καθώς η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνει ο συνολικός όγκος της γης που ελέγχεται από την μέτρηση αυξάνει επίσης, τόσο σε βάθος όσο και πλευρικά. Δεδομένου ότι το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και εκείνο που αλλάζει είναι οι διαδοχικά διευρυνόμενες αποστάσεις AB είναι φανερό ότι οι διαδοχικά

διευρυνόμενοι γήινοι όγκοι που ελέγχονται από τις μετρήσεις αλληλεπικαλύπτονται.

Διάταξη διπόλου

Στη διάταξη δίπολου (σχ. 3.3) τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και δυναμικού M, N διατάσσονται κατά τη σειρά ABMN κατά μήκος της διεύθυνσης (γραμμής) που πρόκειται να ερευνηθεί. Εν γένει τα μήκη AB και MN είναι ίσα μεταξύ τους.



σχήμα 3.3: Διάταξη διπόλου

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

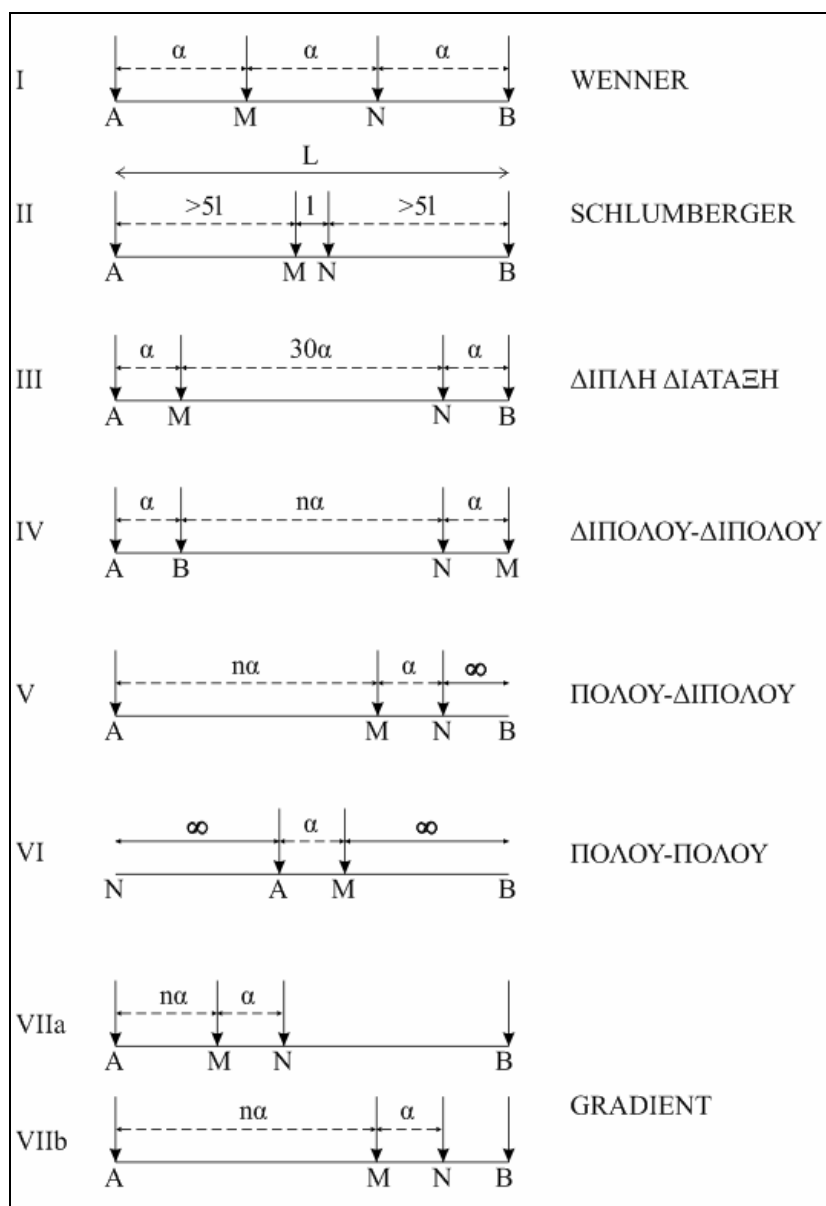
Σε κάθε θέση της διάταξης μετράται η διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ των M, N. Εφόσον επιθυμούμε να διερευνήσουμε πλευρικές μεταβολές της ρα για ζώνες μεγαλύτερου πάχους επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία αυξάνοντας την απόσταση BM διότι, όπως είναι γνωστό, το βάθος έρευνας αυξάνει καθώς αυξάνει η απόσταση BM. Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής του δίπολου είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου εμφάνισης σύζευξης ή διαρροής στα κυκλώματα ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) καθώς είναι πλήρως απομακρυσμένα μεταξύ τους.

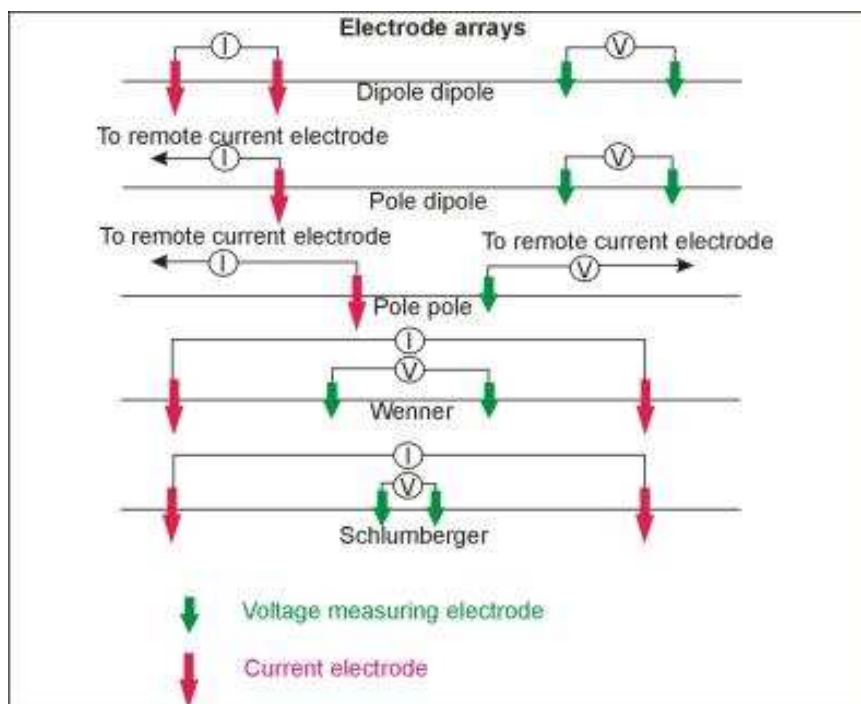
Διάταξη Πόλου-πόλου Η απλούστερη διάταξη είναι αυτή όπου ένα από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος, B, και ένα από τα ηλεκτρόδια του δυναμικού, N, είναι τοποθετημένα σε πολύ μεγάλη απόσταση από τα άλλα δύο (A, M), έτσι ώστε να μπορέσει να θεωρηθεί ότι βρίσκονται στο άπειρο (εικόνα 3.3). δίνει ισχυρό σήμα αλλά είναι χρονοβόρα στο ύπαιθρο και απαιτεί μακριά καλώδια.

Εάν τα δύο απομακρυσμένα ηλεκτρόδια τα τοποθετήσουμε κοντά μεταξύ τους, τότε προκύπτει η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου.

Διάταξη Πόλου-διπόλου. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N, βρίσκονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος, A, B, ένα από τα οποία τοποθετείται στο άπειρο. Το ηλεκτρικό ρεύμα περνά μέσα στο έδαφος με δύο ηλεκτρόδια, η δε τάση που δημιουργείται μετράται σε δύο άλλα ηλεκτρόδια. Ένας γεωμετρικός συντελεστής υπολογίζεται για κάθε συνδυασμό 4 ηλεκτροδίων και έπειτα υπολογίζεται η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Οι διατάξεις ηλεκτροδίων φαίνονται και στην εικόνα 3.3





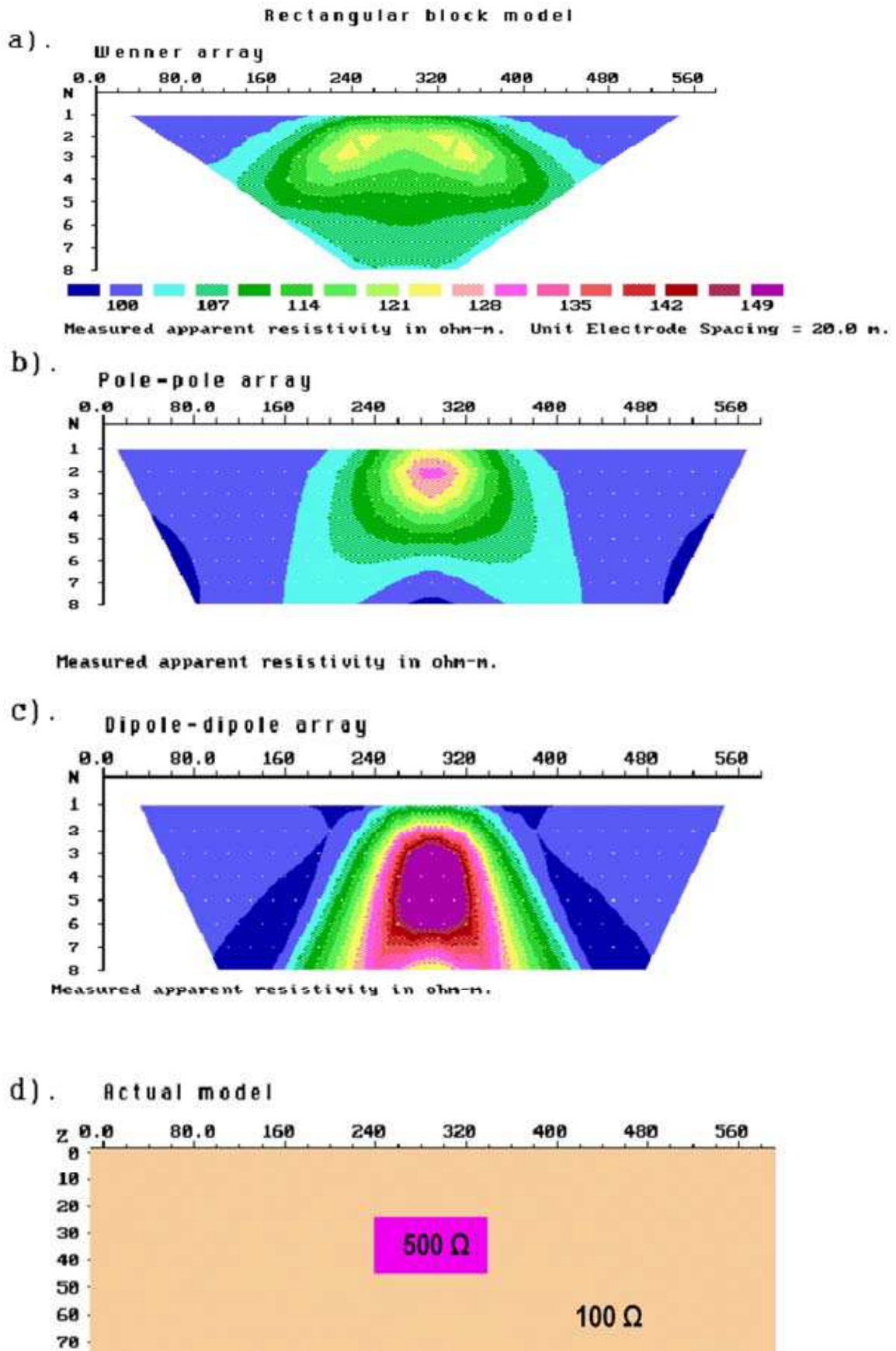
Εικόνα 3.3: Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις ηλεκτροδίων. I) Wenner, II) Schlumberger, III) Διπλή Διάταξη, IV) Διπόλου-Διπόλου, V) Πόλου-Διπόλου, VI) Πόλου-Πόλου, VIIa,b) Gradient..

Στην έρευνα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης υπάρχουν όπως αναφέραμε διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται στην πράξη προκειμένου να μετρήσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους.

Επίσης για την κάθε διάταξη υπάρχει διαφορετική σχέση που παρέχει την τιμή της ρ_a .

Αυτό σημαίνει ότι εάν πάνω από μια συγκεκριμένη δομή στην επιφάνεια της γης (εικόνα 3.4), επαναλάβουμε την εκτέλεση πειράματος με τρεις διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων και τις μετρούμενες τιμές των ρ_a τις παραστήσουμε γραφικά τότε οι εικόνες θα είναι διαφορετικές (βλέπε σχήμα κατω με τρεις διαφορετικές παραστάσεις).

Εάν, τώρα αντιστρόφως, επιχειρήσουμε να επεξεργασθούμε ξεχωριστά την κάθε μία από τις κατανομές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, που παρουσιάζονται στις εικόνες κατω, με την μέθοδο της προσομοίωσης, τότε, το αποτέλεσμα (τελικό μοντέλο) που θα προκύψει από την κάθε επεξεργασία θα είναι βέβαια το ίδιο

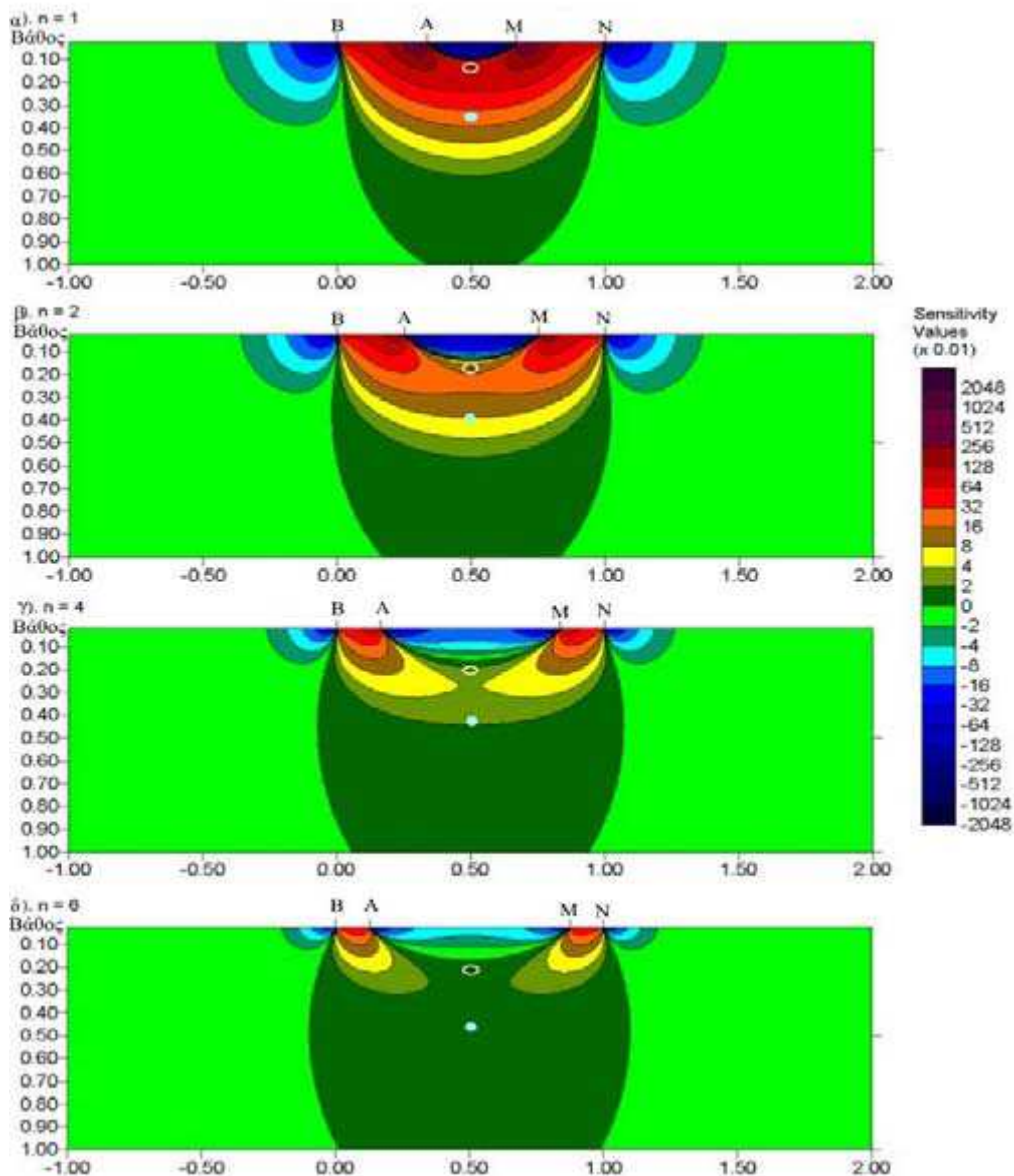


εικονα3.4: Η επίδραση των διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων στην εικόνα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης

Ένας άλλος βασικός παράγοντας είναι η ευαισθησία της διάταξης κατά τον οριζόντιο άξονα στην εικόνα 3.4 απεικονίζετε οι δυο διαστάσεων τομές ευαισθησίας για την διάταξη διπόλου-διπόλου

Φαίνεται πως οι μεγαλύτερες θετικές τιμές βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων A-B και M-N, πράγμα που σημαίνει πως η διάταξη είναι πιο ευαίσθητη στις αλλαγές της αντίστασης τμημάτων που βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές, επομένως αυτές οι περιοχές δίνουν τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Όσο η τιμή του n αυξάνει οι υψηλές τιμές συγκεντρώνονται περισσότερο κάτω από τα δίπολα A-B και M-N, ενώ οι τιμές κάτω από το κέντρο της διάταξης, μεταξύ των ηλεκτροδίων A-M, μειώνονται.



εικόνα 3.5: Δύο διαστάσεων τομές ευαισθησίας για την διάταξη διπόλου-διπόλου (Loke 1996)

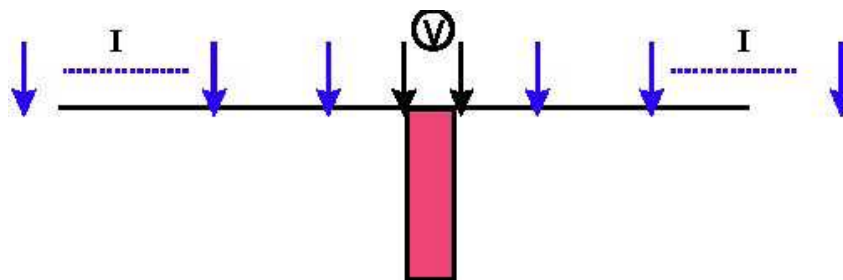
3.6 Μέθοδοι έρευνας

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές μέτρησης για τη συλλογή των δεδομένων της αντίστασης και την καταγραφή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους είναι τρεις: η βυθοσκόπηση, η οριζοντιογραφία και η ηλεκτρική τομογραφία.

Βυθοσκοπήσεις: Με την εφαρμογή των βυθοσκοπήσεων γίνεται προσπάθεια να μετρηθεί η κατανομή της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Η όλη διαδικασία στηρίζεται στο γεγονός ότι το υπέδαφος θεωρείται ότι έχει οριζόντια στρωματογραφία, δηλαδή αποτελείται από διακριτά, οριζόντια, ομογενή και ισότροπα στρώματα. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η μέθοδος Schlumberger αλλά και η μέθοδος Wenner. Κλασικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων.

Λαμβάνονται μία σειρά μετρήσεων με συνεχώς αυξανόμενες τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος (τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά). Με την συνεχή αύξηση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό μετριέται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής αντίστασης σε μία στήλη κάτω από το κέντρο της διάταξης. Η ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων γίνεται θεωρώντας ύπαρξη οριζόντιων στρωμάτων για αυτό και εφαρμόζεται κυρίως σε ιζηματογενείς λεκάνες (μονοδιάστατη γεωηλεκτρική δομή) (σχήμα 1).

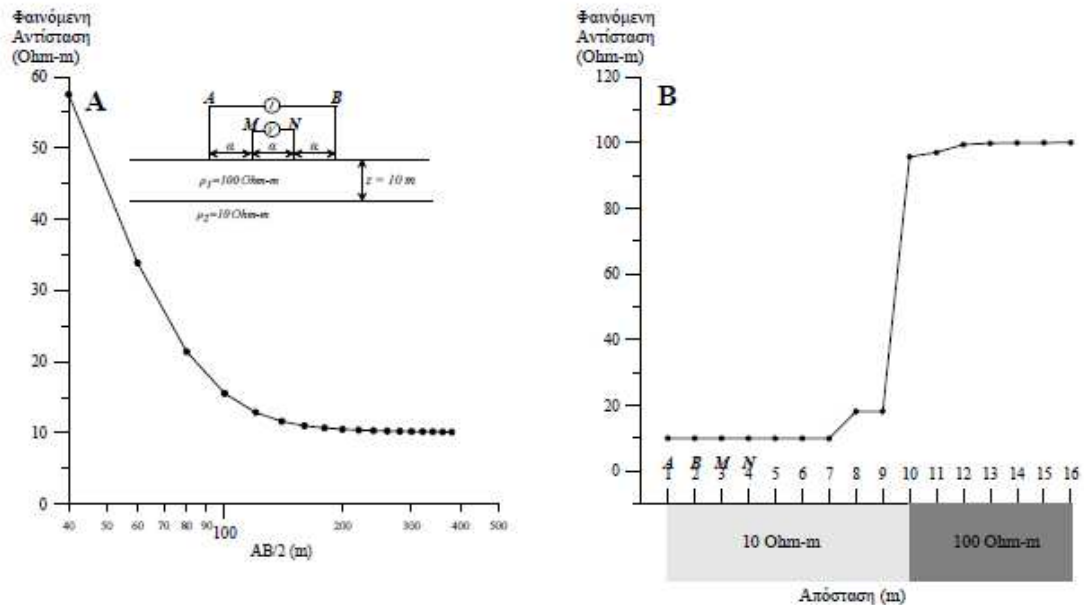
Κλασικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών.



Σχήμα 3.1. Δεδομένα βυθοσκόπησης με διάταξη Schlumberger .

Οριζοντιογραφίες (Χαρτογράφηση, Όδευση (Profiling): Χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τις βυθοσκοπήσεις, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και οι μετρήσεις λαμβάνονται μετακινώντας πλευρικά την διάταξη των ηλεκτροδίων με σταθερό βήμα. Με τον τρόπο αυτό χαρτογραφούνται μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος. Κυρίως χρησιμοποιούνται οι διατάξεις Wenner, Διπόλου – Διπόλου και Πόλου –

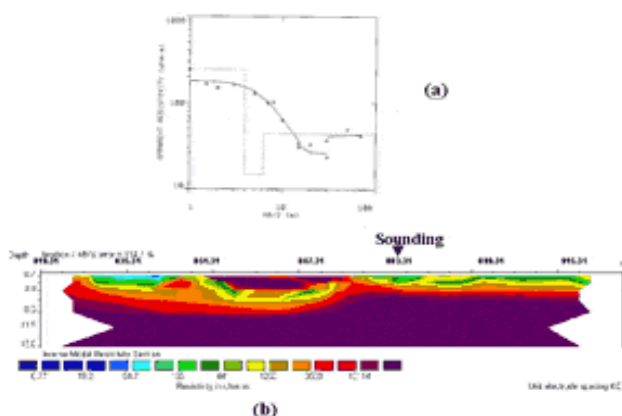
Διπόλου. Οι οριζοντιογραφίες αποτελούν κλασικές μεθόδους χαρτογράφησης των αρχαιολογικών θέσεων όπως επίσης στον εντοπισμό ρηγμάτων, φακών άμμου ή χαλκιών, επαφών, κενών κ.α. (σχήμα 2),



Σχήμα 3.2: Α) Χαρτογράφηση με τη μέθοδο της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης ενός στρώματος πάνω από ημιχώρο. Β) Χαρτογράφηση της πλευρικής μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης πάνω από μία κατακόρυφη επαφή (Parasopoulos, 2007).

Τομογραφίες (Δισδιάστατη διασκόπηση): Η δισδιάστατη διάταξη μέτρησης επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων τα οποία εμπεριέχουν πληροφορίες τόσο για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης.

(Συνδυασμός sounding και profiling). Αυτό γίνεται για παράδειγμα, με



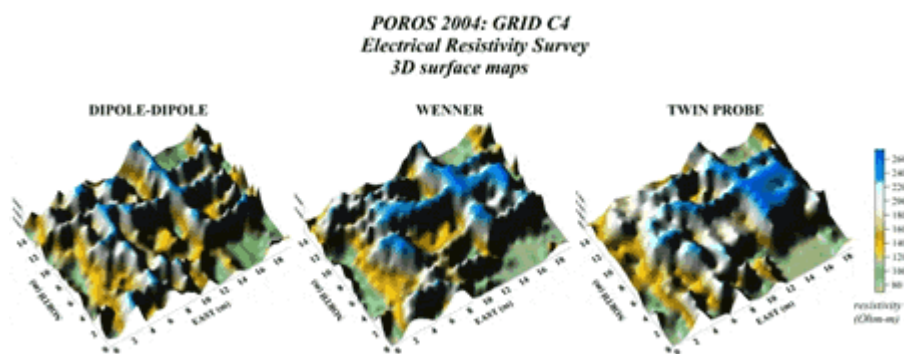
σχήμα 3.3: παράδειγμα μιας τομογραφίας

διαδοχικές οδεύσεις πάνω από την περιοχή μελέτης, με συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ή μία σειρά διαδοχικών βυθοσκοπήσεων πάνω σε μία γραμμή. 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. Για να είναι δυνατή η συλλογή τέτοιων δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί σύγχρονα όργανα μέτρησης της αντίστασης τα οποία έχουν πλήρως αυτοματοποιήσει την διαδικασία.

Παράδειγμα εφαρμογής της δισδιάστατης διασκόπησης με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου. (Tsourlos 1995).

Τρισδιάστατη Διασκόπηση: Η πραγματική τρισδιάστατη ηλεκτρική χαρτογράφηση του εδάφους προϋποθέτει την τοποθέτηση όλων των ηλεκτροδίων σε ένα ορθογώνιο κάρναβο και την ταυτόχρονη σύνδεσή τους με το όργανο μέσω ενός πολύκλωνου καλωδίου, με σκοπό την πραγματοποίηση όλων των πιθανών μετρήσεων της αντίστασης προς όλες τις κατευθύνσεις. Αν και η παραπάνω διαδικασία θα ήταν η βέλτιστη, όσον αφορά την πιστότερη χαρτογράφηση της αντίστασης, μέχρι σήμερα, κυρίως λόγω του περιορισμού στον εξοπλισμό αλλά και του κόστους που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μία τέτοια διασκόπηση, αυτή δεν μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα. Για τον λόγο αυτόν, σήμερα χρησιμοποιούνται εναλλακτικοί τρόποι καταγραφής της τρισδιάστατης μεταβολής της αντίστασης, που στηρίζονται στην πραγματοποίηση πυκνών παράλληλων δισδιάστατων τομογραφιών είτε κατά μία είτε κατά δύο διευθύνσεις.



σχήμα 3.4: παράδειγμα μιας τρισδιάστατης διασκόπησης

3.7 Διαδικασία και συλλογή τομογραφικών γεωηλεκτρικών δεδομένων

Η εκτέλεση γεωηλεκτρικών μετρήσεων είναι μια αρκετά σύνθετη διαδικασία, απαιτεί ειδικευμένο προσωπικό με πείρα στην γεωφυσική γιατί υπάρχουν πολύ κίνδυνοι στην διαδικασία των μετρήσεων. Το πρώτο βήμα είναι η επιλογή της διάστασης της μέτρησης (το ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων ρεύματος). Αυτό εξαρτάται πάντοτε από το ζητούμενο βάθος της έρευνας.

Μια γεωηλεκτρική μέτρηση ή διασκόπηση συνίσταται στην διαδοχική μέτρηση των αντιστάσεων του εδάφους σε διαφορετικά και προοδευτικά αυξανόμενα διαστήματα ηλεκτροδίων ρεύματος με το κέντρο των μετρήσεων να παραμένει πάντοτε στο ίδιο σημείο. Καλό είναι να σχηματίζεται και το διάγραμμα μέτρησης στο πεδίο έτσι ώστε να ελέγχεται και η ποιότητα των μετρήσεων. Εάν ανιχνεύεται κάποιο υπόβαθρο τότε μια αύξηση στις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης σημαίνει ότι οι γραμμές ρεύματος έχουν φθάσει στο επιθυμητό βάθος.

Εάν τώρα πρόκειται να καταγραφεί ένα προφίλ ηλεκτρικής αντίστασης τότε η καλύτερη διάταξη είναι η Dipole - dipole. Η γεωμετρική μορφή του διπόλου καθορίζει και την διακριτότητα που θα προκύψει από το προφίλ και πρέπει να επιλέγεται πάντοτε πριν τις μετρήσεις ανάλογα με το γεωφυσικό στόχο. Είναι δηλαδή αδύνατο να ανιχνευθούν κοιλότητες μεγέθους 5 μέτρων με δίπολο διαστάσεων μεγαλύτερες από 5 μέτρα. Η ανάλυση επίσης μειώνεται με το βάθος. Γενικά ένας κανόνας είναι να επιλέγεται μήκος διπόλου περίπου στο ήμισυ των αναμενομένων γεωφυσικών στόχων.

Τα συστήματα πολυηλεκτροδίων μπορούν να εκτελέσουν γρήγορα μετρήσεις προφίλ ηλεκτρικής αντίστασης. Με τα συστήματα αυτά ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτροδίων συνδέεται σε ένα όργανο πριν από την καταγραφή. Το ίδιο το σύστημα επιλέγει τα απαιτούμενα ηλεκτρόδια κάνοντας την διαδικασία μετρήσεων πολύ πιο γρήγορη και απλή. Με τον τρόπο αυτό ένας σημαντικός αριθμός δεδομένων και αντίστοιχη γεωφυσική πληροφορία είναι δυνατόν να ανακτηθεί στο ύπαιθρο. Τα συστήματα αυτά είναι πολύ πιο βολικά στην έρευνα για υπόγειες κοιλότητες. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα σύστημα πολυηλεκτροδίων.



εικόνα 3.6: σύστημα πολυηλεκτροδίων πανω και αυτό που χρησιμοποιήσαμε στη περιοχή έρευνας.

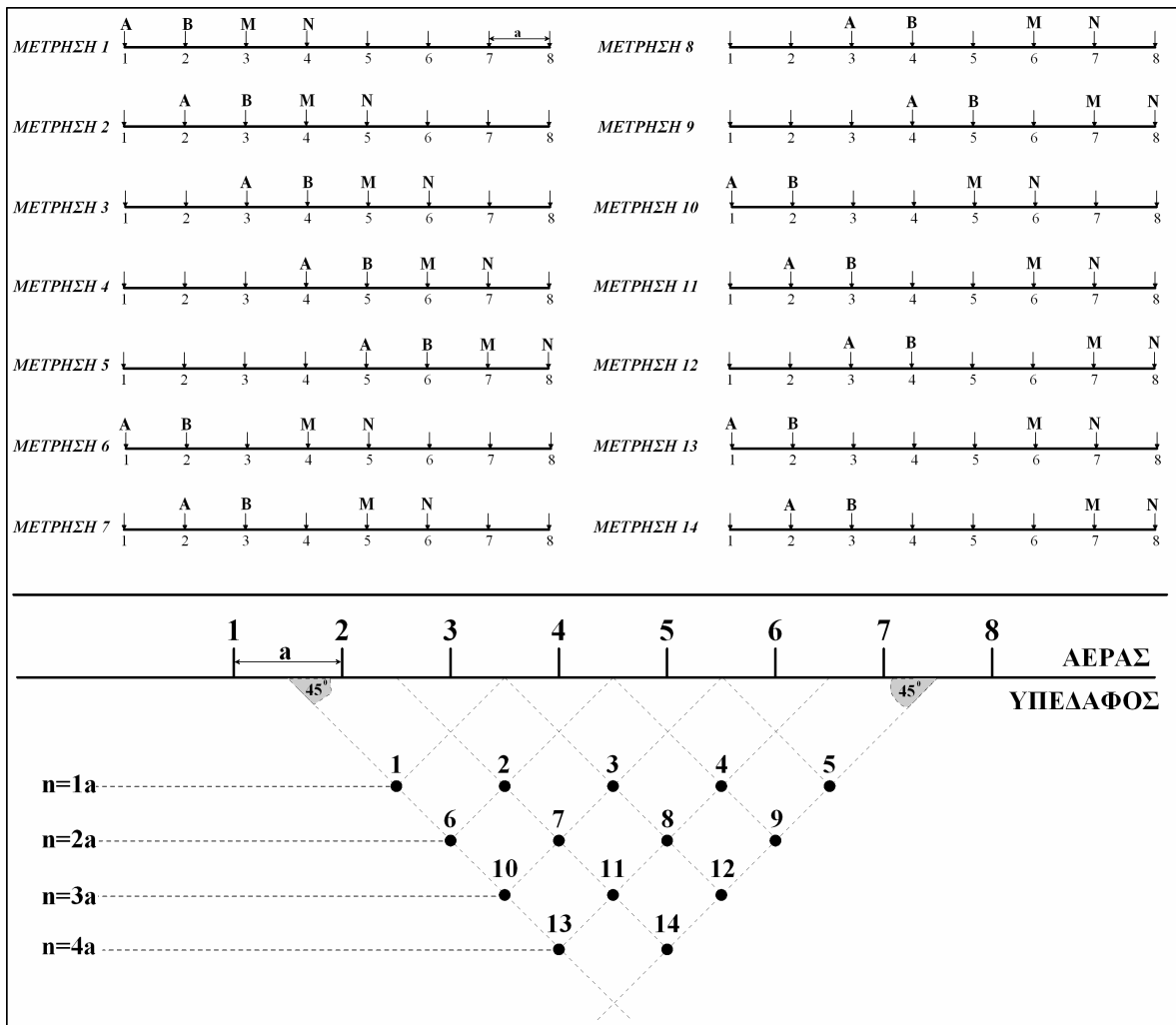
Οι ηλεκτρικές τομογραφίες συνήθως πραγματοποιούνται όπως είπαμε παραπάνω με ένα σύστημα πολυηλεκτροδίων χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων (25 και πάνω) τα οποία τοποθετούνται πάνω σε μία γραμμή στο έδαφος και συνδέονται με ένα πολύκλωνο καλώδιο το οποίο συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης (εικόνα 3.5) Τα σύγχρονα όργανα μέτρησης της αντίστασης περιέχουν ηλεκτρονικά συστήματα με τα οποία είναι δυνατή η αυτόματη επιλογή των τεσσάρων ηλεκτροδίων που πρέπει

να χρησιμοποιηθούν για κάθε μέτρηση. Αυτό είναι πάρα πολύ σημαντικό στην γεωηλεκτρική διασκόπηση καθώς μειώνεται αισθητά ο χρόνος συλλογής των δεδομένων.

Για την αποθήκευση των μετρήσεων που θα συλλεχθούν χρησιμοποιείται ένας φορητός υπολογιστής που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης. Συνήθως όμως τα όργανα αυτά κατασκευάζονται έτσι ώστε να έχουν αυτονομία και μπορούν να αποθηκεύσουν στην μνήμη τους αρκετά δεδομένα παρατήρησης. Αυτό αποτελεί επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αν πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε περιοχές με πολύ απότομο ανάγλυφο, όπου η χρήση φορητού υπολογιστή θα δυσχέραινε την λήψη των μετρήσεων. Εν συνεχεία, μέσω ειδικών καλωδίων τα δεδομένα μεταφέρονται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την περαιτέρω επεξεργασία. Παράλληλα είναι δυνατός ο προγραμματισμός του οργάνου, χρησιμοποιώντας ειδικά αρχεία τα οποία και εισάγονται σε αυτό, έτσι ώστε να διεξαχθεί οποιαδήποτε γνωστή διάταξη ηλεκτροδίων αυτοματοποιημένα.

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

Στη εικόνα 3.7 φαίνεται σχηματικά ο τρόπος διεξαγωγής της ηλεκτρικής τομογραφίας με την μέθοδο Διπόλου-Διπόλου για μία διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστο αριθμό επιπέδων ίσο με 4 και πως τα δεδομένα απεικονίζονται σε δύο διαστάσεις, έτσι ώστε να σχηματιστεί η ψευδοτομή της μεταβολής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Κάθε τιμή της αντίστασης θεωρείται ότι τοποθετείται στο σημείο τομής δύο ευθειών που έχουν ως αρχή το κέντρο των διπόλων AB και MN αντίστοιχα και σχηματίζουν γωνία 450 με το οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 3.7: Τρόπος πραγματοποίησης της ηλεκτρικής τομογραφίας με την μέθοδο Διπόλου-Διπόλου για διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστο αριθμό επιπέδων ίσο με 4 (Tsourlos, 1995).

Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων είναι η εξής:

Αρχικά η απόσταση όλων των ηλεκτροδίων είναι ίση με $1a$. Για την πρώτη μέτρηση χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια με αριθμό 1, 2, 3, 4 όπου το 1 ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως το ηλεκτρόδιο ρεύματος A, το 2 ως το ηλεκτρόδιο ρεύματος B, το 3 ως το ηλεκτρόδιο δυναμικού M και το 4 ως το ηλεκτρόδιο δυναμικού N. Στην συνέχεια η διάταξη μεταφέρεται κατά απόσταση a προς τα δεξιά και για την δεύτερη μέτρηση της αντίστασης χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια με αριθμούς 2, 3, 4, 5 ως A, B, M, N αντίστοιχα. Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται έως ότου χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρόδια 5, 6, 7, 8 για την τελευταία μέτρηση με απόσταση $1a$ (μετρήσεις 1-5).

Στην συνέχεια η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων B και M αυξάνεται σε $N=2a$ αλλά η απόσταση μεταξύ των διπόλων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) παραμένει σταθερή και ίση με $1a$. Ο παράγοντας N είναι ο λόγος της απόστασης των ηλεκτροδίων B-M προς την απόσταση των ηλεκτροδίων A-B.

Έτσι λοιπόν χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια 1, 2, 4, 5 ως A, B, M, N για την πρώτη μέτρηση με $N=2a$. Η διάταξη εν συνεχεία μεταφέρεται κατά 1a προς τα δεξιά μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι μετρήσεις (μετρήσεις 6-9). Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για μεγαλύτερα N. Συνήθως στην πράξη ο μέγιστος αριθμός N ο οποίος χρησιμοποιείται είναι 6-8, καθώς για μεγαλύτερα N το σήμα της μεθόδου ασθενεί σημαντικά. Για τον λόγο αυτό αν υπάρχει επιθυμία η διασκόπηση να κυμανθεί σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη, αυτό το οποίο γίνεται είναι να αυξηθεί η απόσταση των διπόλων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) σε 2a ή/και 3a και να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για διάφορα πάλι N.

Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η ερμηνεία των γεωφυσικών ανωμαλιών εξαρτάται από εμπειρικές γνώσεις και θεωρητικές υποθέσεις (μοντέλα). Τα αποτελέσματα της ερμηνείας δεν μπορούν να θεωρηθούν πάντα αδιάψευστα. Επίσης θα πρέπει να είναι κατανοητός ο περιορισμός των δυνατοτήτων των γεωφυσικών μεθόδων σε σχέση με την διακριτική τους ικανότητα (εντοπισμό και διάκριση αντικειμένων συγκεκριμένων διαστάσεων, συνήθως μικρότερων της δειγματοληψίας των μετρήσεων), το βάθος διασκόπησης (το οποίο έχει μία αντιστρόφως αναλογική σχέση με την χωρική ευκρίνεια των μεθόδων: δηλαδή μείωση της ανάλυσης με αυξανόμενο βάθος έρευνας), τις εδαφικές συνθήκες (ανάγκη καλού διαχωρισμού του αντικειμένου από το περιβάλλον εδαφικό πλαίσιο στο οποίο ανήκει), κ.α.

3.8 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η ποιότητα των δεδομένων της αντίστασης που συλλέγονται σε μία περιοχή εξαρτάται από την αξιοπιστία του οργάνου μέτρησης της αντίστασης αλλά και από μία σειρά άλλων παραγόντων που προσδίδουν “θόρυβο” στα δεδομένα (Tsourlos, 1995). Οι κυριότεροι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν θόρυβο στα δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης είναι οι παρακάτω:

Σφάλματα λόγω της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων: Η εσφαλμένη τοποθέτηση των ηλεκτροδίων επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων, καθώς ο λανθασμένος υπολογισμός του γεωμετρικού παράγοντα θα επηρεάσει τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης.

Σφάλματα στις μετρήσεις του δυναμικού: Τα σφάλματα στις μετρήσεις του δυναμικού μπορούν να προκληθούν από πολλούς παράγοντες, όπως κακή επαφή ή και υψηλές αντιστάσεις επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος, καταστροφή των καλωδίων, εξωγενή περιβαλλοντικό θόρυβο (τελλουρικά ρεύματα και ηλεκτροφόρα καλώδια), δυσλειτουργία ή ακατάλληλη χρήση του οργάνου.

Ηλεκτρομαγνητική σύζευξη: Όποτε ένας πομπός ρεύματος αλλάξει ή διακοπεί, τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της ζεύξης μεταξύ των καλωδίων που εκπέμπουν και λαμβάνουντο σήμα (Ward, 1989). Η σύζευξη αυξάνεται με τη συχνότητα, τη διάταξη ηλεκτροδίων, το μήκος των καλωδίων και την αγωγιμότητα του εδάφους. Διατάξεις που χρησιμοποιούν διαφορετικά καλώδια για την εκπομπή και τη λήψη του σήματος επηρεάζονται λιγότερο από το φαινόμενο (π.χ. διπόλου-διπόλου και πόλου-διπόλου).

Επίδραση της τοπογραφίας: Οι έντονες τοπογραφικές μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν διασπορά και συγκέντρωση των γραμμών ρεύματος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τεχνητές περιοχές χαμηλής και υψηλής αντίστασης αντίστοιχα. Η επίδραση της τοπογραφίας, στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό, μπορεί να μοντελοποιηθεί και να ληφθεί υπόψη κατά την επεξεργασία των δεδομένων (Fox et al., 1980; Holcombe and Jiracek, 1984; Tong και Yang, 1990; Tsourlos et al., 1999; Loke, 2000).

Πόλωση ηλεκτροδίων: Η πόλωση που παρατηρείται στα ηλεκτρόδια ρεύματος μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να προκαλέσει μία ανώμαλη μέτρηση δυναμικού, όταν τα ίδια ηλεκτρόδια χρησιμοποιηθούν αμέσως μετά ως ηλεκτρόδια δυναμικού. Το φαινόμενο αυτό εντοπίζεται κυρίως στις μετρήσεις της αντίστασης που πραγματοποιούνται με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα καταγραφής. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα. Θα πρέπει ο σχεδιασμός της διάταξης που θα μετρηθεί με το πολυπλεκτικό όργανο μέτρησης της αντίστασης να είναι τέτοιος ώστε έτσι να αποφεύγεται να μετριέται το δυναμικό σε ένα ηλεκτρόδιο, το οποίο αμέσως προηγούμενα είχε χρησιμοποιηθεί, για να εισάγει ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος (Dahlin, 2000).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Εξοπλισμός- Γεωφυσικά όργανα

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην ηλεκτρική τομογραφία έχει εξελιχθεί πολύ τα τελευταία έτη. Τα πρώτα μηχανήματα αποτελούνταν από ένα απλό βολτόμετρο το οποίο κατέγραφε την διαφορά δυναμικού σε ηλεκτρόδια.

Σε δεδομένα τομογραφίας, ο χρήστης συνέδεε το βολτόμετρο για κάθε μέτρηση με ένα διαφορετικό σετ ηλεκτροδίων, ώστε να λάβει όλο το πλήθος των μετρήσεων που απαιτούνταν για μια δύο διαστάσεων ερμηνεία.

Όλη η διαδικασία ήταν πολύ χρονοβόρα καθώς χρειαζόταν χειροκίνητη αλλαγή τόσο το σετ ηλεκτροδίων ρεύματος, όσο και το σετ ηλεκτροδίων δυναμικού μέχρι να επιτευχθούν οι συνδυασμοί θέσεων στην τομογραφία. Έτσι συνήθως λαμβανόταν μόνο ένας μικρός αριθμός μετρήσεων.

Η επόμενη γενιά οργάνων διέθετε ενσωματωμένο πολυπλέκτη που αυτόματα, ανάλογα με το πρωτόκολλο μέτρησης, ρύθμιζε αντίστοιχα τα σετ ηλεκτροδίων δυναμικού και ρεύματος, διαδικασία που επιτάχυνε το χρόνο λήψης και της έδινε τη δυνατότητα για μεγάλο αριθμό μετρήσεων. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την πυκνότερη καταγραφή μετρήσεων και συνέπεια αυτού την ακριβέστερη εικόνα των τομογραφιών

Τελευταία εξέλιξη στο χώρο του εξοπλισμού αποτελούν τα πολυκάναλα όργανα, που έχουν δυνατότητα της ταυτόχρονης μέτρησης σε περισσότερα από ένα σετ ηλεκτροδίων δυναμικού με μόνο μία εισαγωγή ρεύματος στα ηλεκτρόδια ρεύματος, αντικείμενο που μείωσε δραματικά το χρόνο συλλογής δεδομένων. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την πυκνότερη καταγραφή μετρήσεων και συνέπεια αυτού την ακριβέστερη εικόνα των τομογραφιών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η συλλογή πολλών δεδομένων υψηλής ποιότητας και ευκρίνειας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα μία τομογραφία που απαιτούσε την συλλογή πάνω από 1000 μετρήσεις ολοκληρώθηκε σε περίπου 15 λεπτά, ενώ ένα απλό μονοκάναλο όργανο θα χρειαζόταν πάνω από 90 λεπτά.

Στις γεωφυσικές έρευνες στην περιοχή Ξανθουλιανά για την εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα:

- Το όργανο SYSCAL Pro μαζί με τον πολυπλέκτη SWITCH Pro 96 της εταιρείας IRIS Instruments. Το όργανο αυτό είναι πλήρως αυτοματοποιημένο, με αυτονομία και αρκετή εσωτερική μνήμη ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Στο όργανο μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα μέχρι 96 ηλεκτρόδια. Η αυτόματη πραγματοποίηση των μετρήσεων της αντίστασης του υπεδάφους ελέγχεται από τον πολυπλέκτη (Switch Pro),

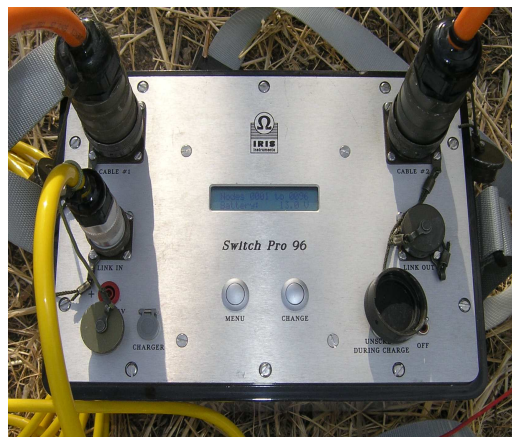
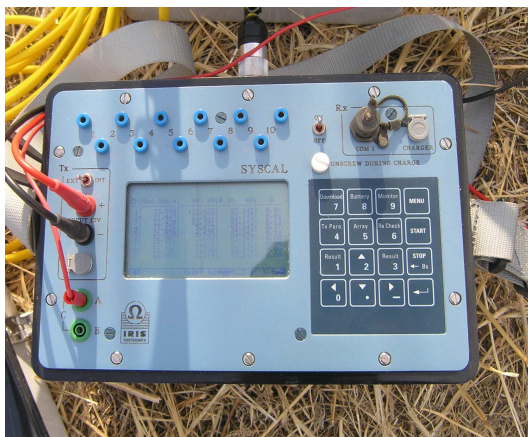
που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης (Syscal Pro), μέσω ενός ειδικού αρχείου που εισάγεται στο όργανο και περιλαμβάνει την γεωμετρία της διάταξης που χρησιμοποιείται. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η συλλογή πολλών δεδομένων υψηλής ποιότητας και ευκρίνειας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπλέον το όργανο έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει και να αποθηκεύσει ταυτόχρονα μέχρι δέκα μετρήσεις, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο περίπου κατά δέκα φορές τον χρόνο συλλογής των δεδομένων.

Ο αυτοματοποιημένος έλεγχος της αντιστάθμισης του φυσικού δυναμικού, η ψηφιακή υπέρθεση για την ενίσχυση του σήματος και η προβολή του σφάλματος κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων που προσφέρονται από το συγκεκριμένο όργανο εξασφαλίζουν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας (Iris Instruments, 2007).

Το συγκεκριμένο όργανο διαθέτει μέγιστη ισχύ εξόδου 800V και επιτυγχάνει τη δημιουργία ρεύματος με ένταση που τυπικά φτάνει τα 2.5A.

Επιπλέον χρησιμοποιεί τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές μπαταρίες και παρουσιάζεται στη (εικόνα 4.1).

- 4 πολύκλινα καλώδια (50 κλώνων) μεταφοράς του σήματος με 50 εξόδους το καθένα ανά 5 μέτρα.
- 199 πάσσαλοι και 199 καλώδια σύνδεσης αυτών με τα καλώδια μεταφοράς του σήματος.
- 1 μπαταρία 12V και 143Ah για μεγάλη αυτονομία στο ύπαιθρο.
- Καλώδιο RS232 για μεταφορά των δεδομένων από το σύστημα καταγραφής στον υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.
- Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή για την αποτύπωση των θέσεων και τη συλλογή φωτογραφικού υλικού.
- GPS LEICA GS20 για την εύρεση των συντεταγμένων των τομογραφιών.
- Φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής για την μεταφορά και επεξεργασία των δεδομένων.





Εικόνα 4.1: Φωτογραφία του οργάνου μέτρησης της αντίστασης του εδάφους SYSICAL Pro (αριστερά πάνω) και του πολυπλέκτη SYSICAL Switch Pro (δεξιά πάνω). Τρόπος σύνδεσης του οργάνου SYSICAL Pro με τον πολυπλέκτη για την αυτόματη μέτρηση και καταγραφή της φαινόμενης αντίστασης του υπεδάφους (κάτω).





Εικόνα 4.2: Λεπτομέρειες από την διεξαγωγή των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή Ξανθουλιανά με το όργανο SYSCAL Pro και SWITCH Pro 96.

4.2 Μετρήσεις υπαίθρου

Οι μετρήσεις στη περιοχή έρευνας ολοκληρώθηκαν μέσα σε μια μέρα στις 1 Μαρτίου 2010. Αρχικά βρεθήκανε οι συντεταγμένες που οριοθετήθηκαν και καθορίστηκαν με την βοήθεια του κ. Διαμαντάκη. Ο τρόπος διενέργειας των γεωφυσικών διασκοπήσεων υπαγορεύτηκε από τις τοπογραφικές ιδιαιτερότητες (εμπόδια, πυκνή βλάστηση κ.λπ.) και την γενικότερη γεωλογική και τεκτονική δομή της ευρύτερης περιοχής έρευνας. Πιο συγκεκριμένα η χωροθέτηση των οδεύσεων κατά μήκος των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες καθορίστηκε από την διάταξη των οικοδομικών τετραγώνων στην υπό πολεοδόμηση περιοχή. Έτσι με τη βοήθεια του GPS βρεθήκανε τα συγκεκριμένα σημεία των τομογραφιών, στη συνέχεια τοποθετήθηκαν κατά μήκος των συντεταγμένων τα ηλεκτρόδια ρεύματος στο έδαφος με απόσταση τεσσάρων μέτρων μεταξύ τους. Η σύνδεση των ηλεκτροδίων μεταξύ τους έγινε με ένα καλώδιο το οποίο συνδέθηκε με μια μπαταρία και με το όργανο SYSCAL Pro μαζί με τον πολυπλέκτη SWITCH Pro 96 όπου έγινε η καταγραφή των φαινόμενων αντιστάσεων των υπεδαφίων δομών σε κάθε τομογραφία ξεχωριστά.

Βασικός στόχος της γεωηλεκτρικής διασκόπησης αποτελούσε ο προσδιορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους και η συσχέτιση των πιθανά εντοπιζόμενων γεωφυσικών ανωμαλιών με την τοπική γεωλογική δομή της περιοχής.

Στην περιοχή εφαρμόστηκε η μέθοδος της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας, πραγματοποιώντας **πέντε (5) BA, DC, FE, HG, JI τομογραφίες** συνολικού μήκους **776 μέτρων**. Επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η μέθοδος της δισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας, που είχε στόχο την απεικόνιση της στρωματογραφίας του υπεδάφους κατά μήκος πέντε συγκεκριμένων οδεύσεων.

Κατά μήκος όλων των τομών τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συλλέχθηκαν με τις διατάξεις Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου.

-Οι τομές BA και JI είχαν μήκος 152 και 60 μέτρα αντίστοιχα.

Κατά μήκος των τομών BA και JI τοποθετήθηκαν 39 και 16 ηλεκτρόδια

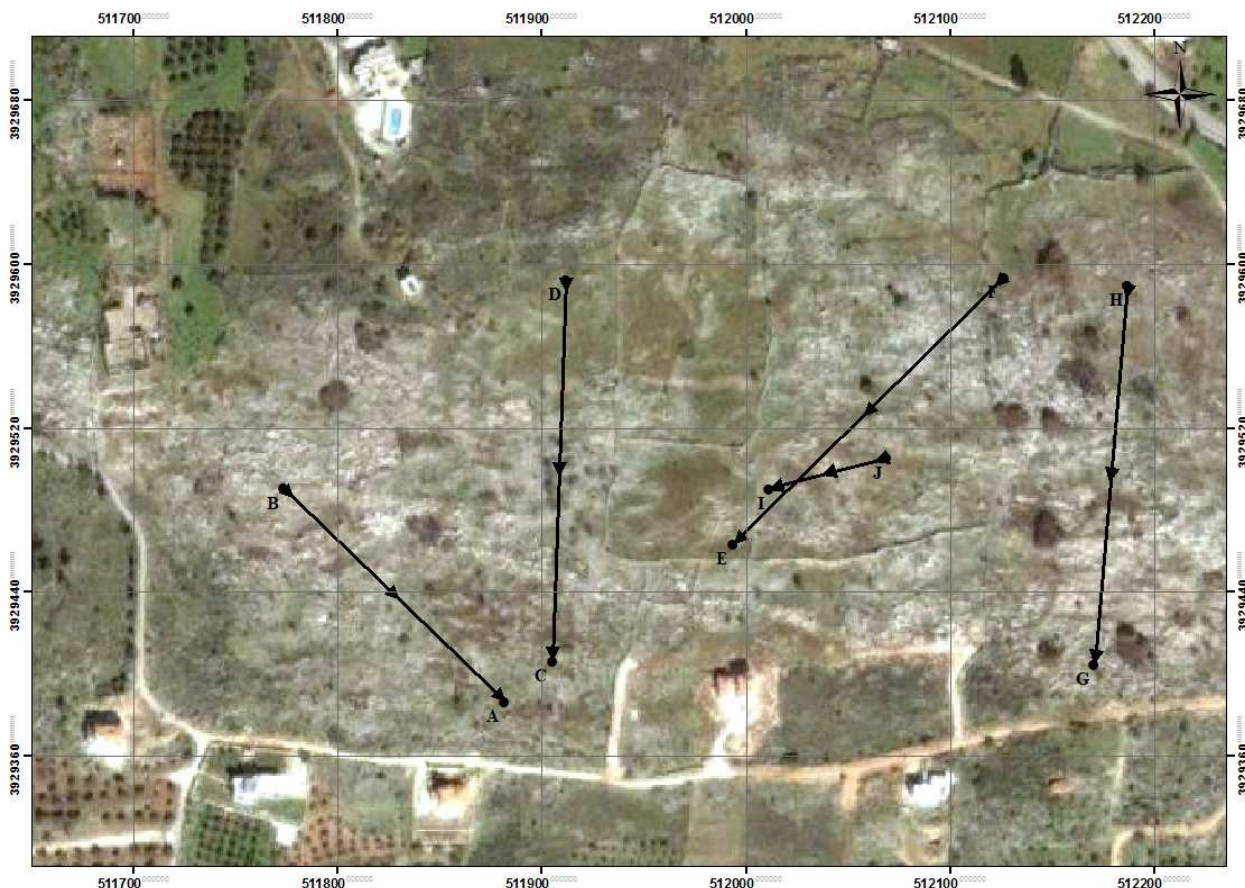
-Οι τομές DC, FE και HG ήταν 188 μέτρα.

αντίστοιχα στο μήκος των τομών DC, FE και HG τοποθετηθηκαν 48 ηλεκτρόδια.

-Η απόσταση των ηλεκτροδίων κατά μήκος όλων των τομών ήταν ίση με τέσσερα μέτρα.

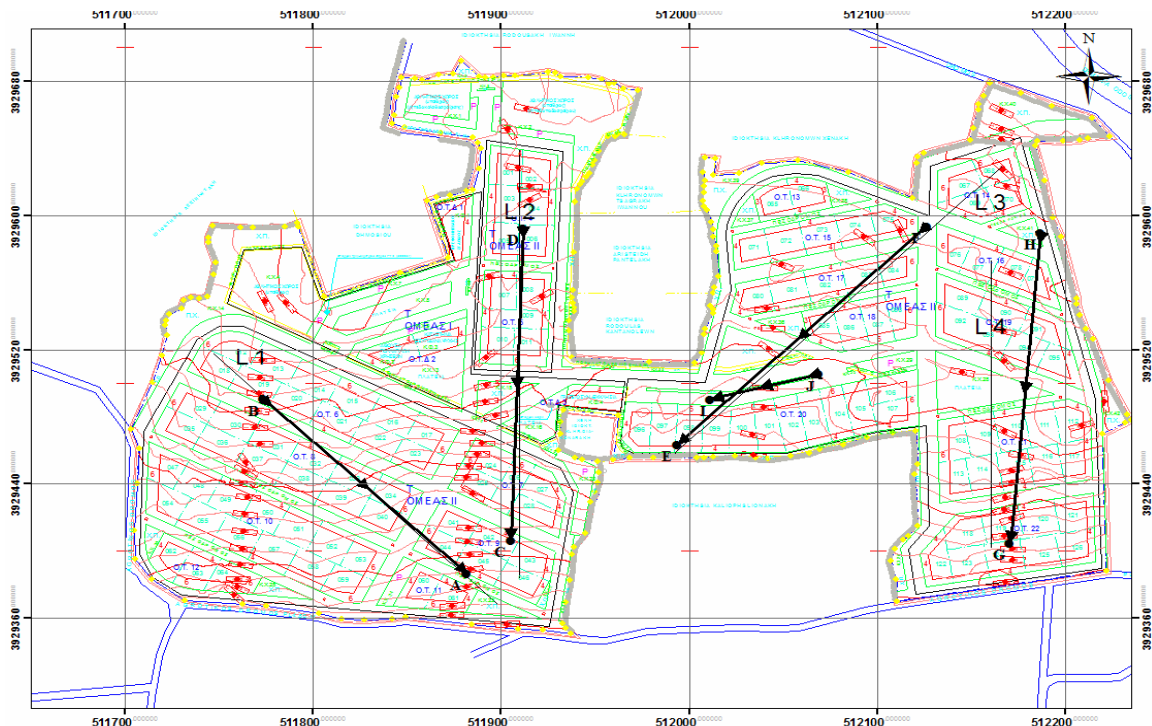
-Το μέγιστο βάθος διασκόπησης για όλες τις τομές ήταν της τάξης των 30 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, εκτός από την τομή JI όπου το βάθος κυμάνθηκε στα 10 μέτρα, λόγω του μικρότερου συνολικού μήκους που είχε η συγκεκριμένη τομογραφία.

Η θέση των οδεύσεων BA, DC, FE, HG, JI στην περιοχή έρευνας και στο τοπογραφικό διάγραμμα απεικονίζονται στις εικόνες 4.3 και 4.4 αντίστοιχα. Τα βέλη κατά μήκος των γραμμών αντιπροσωπεύουν την διεύθυνση των οδεύσεων.



Εικόνα 4.3: Διεύθυνση των οδεύσεων κατά μήκος των οποίων πραγματοποιηθήκαν οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες

Οι δύο αυτές διατάξεις που επιλέχθηκαν για την καταγραφή των φαινόμενων αντιστάσεων θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες για την πραγματοποίηση της έρευνας καθώς είναι δυνατό να συλλεχθούν αξιόπιστα δεδομένα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Το όργανο προγραμματίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε σημείο μέτρησης της αντίστασης να δειγματοληπτείται τουλάχιστον τρεις φορές. Με αυτόν τον τρόπο ήταν δυνατό να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα αλλά και να καταγραφεί το σφάλμα της κάθε μέτρησης.



Εικόνα 4.4: Οδεύσεις κατά μήκος των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες τοποθετημένες στο τοπογραφικό διάγραμμα της περιοχής όπου φαίνονται τα οικοδομικά τετράγωνα της υπό πολεοδόμησης περιοχής.

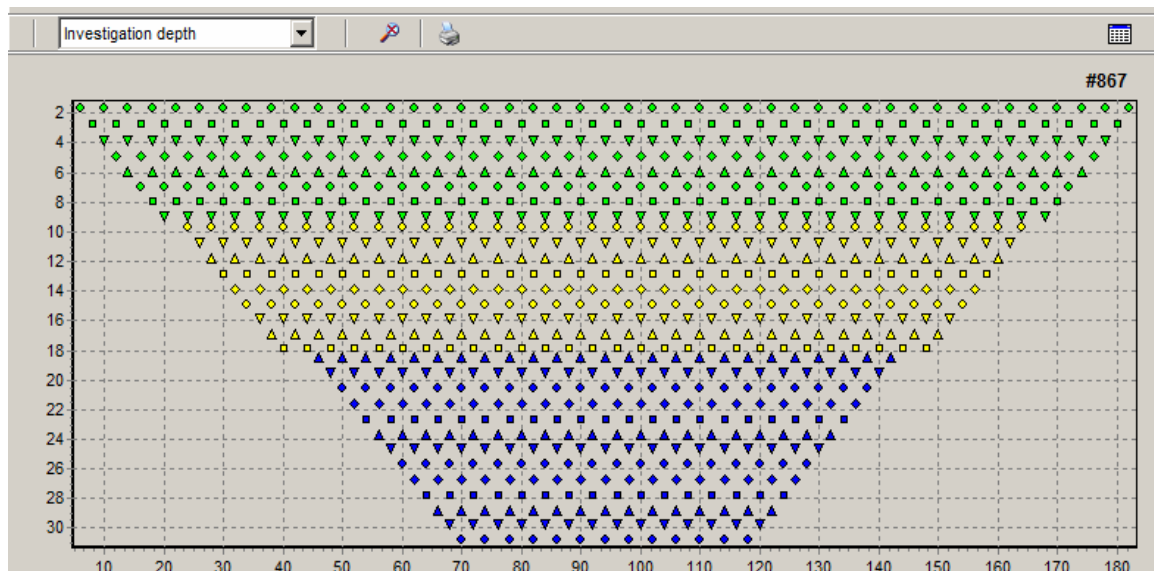
Η συλλογή δεδομένων φαινόμενης αντίστασης κάνοντας χρήση διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων όπως είπαμε και παραπάνω βοηθάει στην βελτιστοποίηση της ποιότητας της παραγόμενης εικόνας κατανομής των αντιστάσεων του υπεδάφους. Κάθε διάταξη έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και είναι δυνατό να δώσει επιπλέον πληροφορίες για την δομή του υπεδάφους. Γενικά, ο συνδυασμός δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές διατάξεις μπορεί να βοηθήσει στην παραγωγή ενός αξιόπιστου γεωηλεκτρικού μοντέλου, ειδικά στις περιπτώσεις που η γεωλογία της εκάστοτε περιοχής είναι εξαιρετικά πολύπλοκη ή δεν υπάρχει καμία εκ των προτέρων πληροφορία.

Στον πίνακα 4.1 απεικονίζονται συνοπτικά οι τεχνικές λεπτομέρειες που αφορούν την συλλογή των γεωηλεκτρικών τομογραφικών δεδομένων όπου αναφέρει για κάθε τομή ξεχωριστά τα ηλεκτρόδια, το μήκος, την απόσταση ηλεκτροδίων, αλλά και την φαινόμενη αντίσταση που καταγράφηκε με κάθε μια διάταξη ξεχωριστά και συνολικά στην περιοχή. Στην εικόνα 4.5 φαίνεται η οριζόντια και κατακόρυφη χωρική κατανομή των μετρήσεων της φαινόμενης αντίστασης όπως μετρήθηκαν για μία τυπική ηλεκτρική τομογραφία χρησιμοποιώντας τη διάταξη Διπόλου-Διπόλου.

Για την τοπογραφική αποτύπωση των σημείων που φαίνονται στις εικόνες 4.3 και 4.4 χρησιμοποιήθηκε η μονάδα GPS LEICA GS20 του εργαστηρίου Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος. Η ακρίβεια των συντεταγμένων (X, Y) των σημείων μετά από την διόρθωση που υπέστησαν τα αρχικά δεδομένα ήταν μικρότερη από ένα μέτρο (Πιν. 4.2).

Τομή	Ηλεκτρόδια	Μήκος (m)	Απόσταση Ηλεκτροδίων, α (m)	Μετρήσεις		Σύνολο
				DD	PD	
BA	39	152	4	704	1234	1938
DC	48	188	4	1186	1657	2843
FE	48	188	4	1186	1657	2843
HG	48	188	4	1186	1657	2843
JI	16	60	4	113	186	299
						10766
				DD=Διπόλου- Διπόλου	PD=Πόλου- Διπόλου	

Πίνακας 4.1: Τεχνικές λεπτομέρειες συλλογής των τομογραφικών γεωηλεκτρικών δεδομένων.



Εικόνα 4.5: Οριζόντια και κατακόρυφη χωρική κατανομή των μετρήσεων της φαινόμενης αντίστασης όπως μετρήθηκαν για μία τυπική ηλεκτρική τομογραφία χρησιμοποιώντας τη διάταξη Διπόλου-Διπόλου.

Σημείο	X	Y
A	511881.9279	3929386.8043
B	511773.7298	3929490.4600
C	511905.2959	3929406.6753
D	511911.8302	3929592.3406
E	511993.7533	3929463.7383
F	512126.2997	3929593.1414
G	512170.4413	3929404.7829
H	512186.9343	3929589.4919
I	512011.3254	3929490.1987
J	512068.8357	3929505.2685

Πίνακας 4.2: Συντεταγμένες των σημείων που αποτυπώνονται στις εικόνες 4.3 και 4.4





Εικόνα 4.6: Λεπτομέρειες από τις μετρήσεις υπαίθρου.



Εικόνα 4.5: Όργανο μέτρησης GPS LEICA GS20 για την εύρεση των συντεταγμένων στη περιοχή έρευνας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Επεξεργασία Γεωφυσικών Δεδομένων & Αποτελεσμάτων Ερευνών

5.1 Μέθοδος αντιστροφής

Η εφαρμογή της θεωρίας της αντιστροφής στην γεωηλεκτρική διασκόπηση προσπαθεί να βρει ένα βέλτιστο ηλεκτρικό μοντέλο της γης του οποίου η απόκριση θα είναι παρόμοια ή σχεδόν ίδια με τις μετρούμενες (παρατηρούμενες) τιμές της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. Το μοντέλο αυτό είναι ουσιαστικά μία ιδανική μαθηματική αναπαράσταση της γης. Αποτελείται από παραμέτρους, οι οποίες στην προκειμένη περίπτωση αντιπροσωπεύουν την κατανομή της πραγματικής ειδικής αντίστασης του υπεδάφους. Η απόκριση του μοντέλου δίνει τις υπολογιζόμενες (συνθετικές) ειδικές φαινόμενες αντιστάσεις οι οποίες υπολογίζονται με βάση πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις.

Η διαδικασία αυτή είναι και γνωστή ως επίλυση του Ευθέως Προβλήματος. Με άλλα λόγια, το Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα περιλαμβάνει την λύση της διαφορικής εξίσωσης που καθορίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα ανομοιογενές υπέδαφος, για μία συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων, τέτοιας ώστε να μπορεί να καθοριστεί η κατανομή του δυναμικού. Εφ' όσον το δυναμικό είναι γνωστό τότε με βάση τη σχέση (3) είναι πολύ εύκολο να υπολογιστούν οι συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις.

Έστω ότι η μεταβλητή x δίνει την κατανομή της αντίστασης και με y συμβολίζονται οι μετρήσεις. Τότε η επίλυση του ευθέως προβλήματος αφορά την εύρεση του μετασχηματισμού T , που συνδέει τη γνωστή κατανομή της αντίστασης x με τις άγνωστες μετρήσεις y :

$$Y = T(x)$$

Η επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος αφορά την εύρεση του αντίστροφου μετασχηματισμού T^{-1} που δίνεται από τη σχέση:

$$X = T^{-1}(y)$$

Η βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι να βρεθεί το πιο απλό και ομαλό ηλεκτρικό μοντέλο γης η απόκριση του οποίου να μπορεί να προσεγγίσει τα δεδομένα. Η αντιστροφή αυτή δεν ψάχνει απαραίτητα να βρει την πιο “καλή”

λύση, αλλά επιδιώκεται η παραγωγή ενός απλοποιημένου μοντέλου το οποίο θα αποτελεί λογική αναπαράσταση του υπεδάφους.

Δηλαδή η αντιστροφή εγγυάται την σταθερότητα της λύσης και επίσης παράγεται ένα μοντέλο τα χαρακτηριστικά του οποίου έχουν επιλεγεί από τον χρήστη (ομαλότητα μοντέλου) και όχι τυχαία.

Η μέθοδο της αντιστροφής είναι η πιο δημοφιλής τεχνική για την αποκατάσταση της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους από τις μετρήσεις της φαινόμενης αντίστασης.

Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι η αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων είναι ένα “νοσηρό” (ill-conditioned) πρόβλημα, δηλαδή μεγάλες αλλαγές στην πραγματική ειδική αντίσταση του υπεδάφους μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μικρές μεταβολές στα παρατηρούμενα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Έτσι λοιπόν η διαδικασία της αντιστροφής μπορεί να καταστεί εξαιρετικά ασταθής και να δώσει λύσεις που δεν έχουν κανένα φυσικό νόημα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες. Αυτή που ευρύτατα χρησιμοποιείται σήμερα είναι η λεγόμενη εξομαλωμένη εξαναγκασμένη αντιστροφή (smoothness constrained inversion ή Occam’s inversion).

5.2 Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα

Όπως είπαμε και παραπάνω το Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα περιλαμβάνει την λύση της διαφορικής εξίσωσης που καθορίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα ανομοιογενές υπέδαφος, για μία συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων, τέτοιας ώστε να μπορεί να καθοριστεί η κατανομή του δυναμικού. Υπάρχουν δύο τρόποι για να επιλυθεί το Ευθύ Γεωηλεκτρικό Πρόβλημα, οι αναλυτικές και οι αριθμητικές μέθοδοι.

Αναλυτική μέθοδος : Σε αυτές τις μεθόδους η λύση εξάγεται απευθείας από τις εξισώσεις πεδίου (εξίσωση Poisson) που καθορίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στην γη. Στην πράξη όμως, μόνο για λίγες δομές (πχ. θαμμένα σφαιρικά σώματα) είναι γνωστή η λύση. Η χρησιμότητα αυτών των λύσεων εστιάζεται στον έλεγχο των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από άλλες μεθόδους.

Αριθμητική μέθοδος : Σε αυτές τις μεθόδους επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή ρεύματος σε ανομοιογενή αριθμητικά. Έτσι για να αντιμετωπιστεί η έντονη ανομοιογένεια και ετερογενεία που παρουσιάζει η γη, το πρόβλημα προσεγγίζεται με την χρήση των αριθμητικών μεθόδων.

Είναι απαραίτητο να γίνει διακριτοποίηση του προβλήματος, ώστε να είναι δυνατή η εύρεση του δυναμικού σε καθορισμένες θέσεις. Η κατηγορία αυτή διακρίνεται από δύο μεγάλες υποκατηγορίες, σε αυτές που βασίζονται σε μεθόδους ολοκλήρωσης (Keller 1970, Lee 1974, Furness 1992) και

σε αυτές που βασίζονται σε μεθόδους διαφοροποίησης. Οι πιο διαδεδομένες αριθμητικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του Ευθέως Προβλήματος είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method) και η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method).

Όλες οι μέθοδοι μπορούν να ανταποκριθούν στην επίλυση δικτύων που περιέχουν στοιχεία με ποικίλα μεγέθη. Όμως, μόνο η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να επιλύσει περιορισμένες δομές ακανόνιστου σχήματος.

Αυτό το πλεονέκτημα κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντικό, όταν πρέπει να επιλυθούν κατανομές αντίστασης, διότι η αντίσταση είναι ευαίσθητη σε τοπογραφικές ανωμαλίες. Με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων το δίκτυο των στοιχείων μπορεί να προσαρμοστεί στην τοπική γεωμορφολογία, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα εντοπισμού και απομόνωσης του ψευδοθορύβου που οφείλεται σε τοπογραφικές ανωμαλίες (Molano et al., 1990). Το πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι μπορούν να ενσωματώσουν μία οποιαδήποτε τυχαία κατανομή της αντίστασης, δηλαδή μπορούν να προσεγγίσουν περισσότερο τις πραγματικές υπεδάφεις συνθήκες.

5.3 Προγραμμα RESDINV-Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Για την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES2DINV, το οποίο μπορεί αυτόματα να καθορίσει ένα δισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο της γης, με βάση τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν κατά τις υπαίθριες εργασίες και μπορεί να αντιστρέψει ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων.

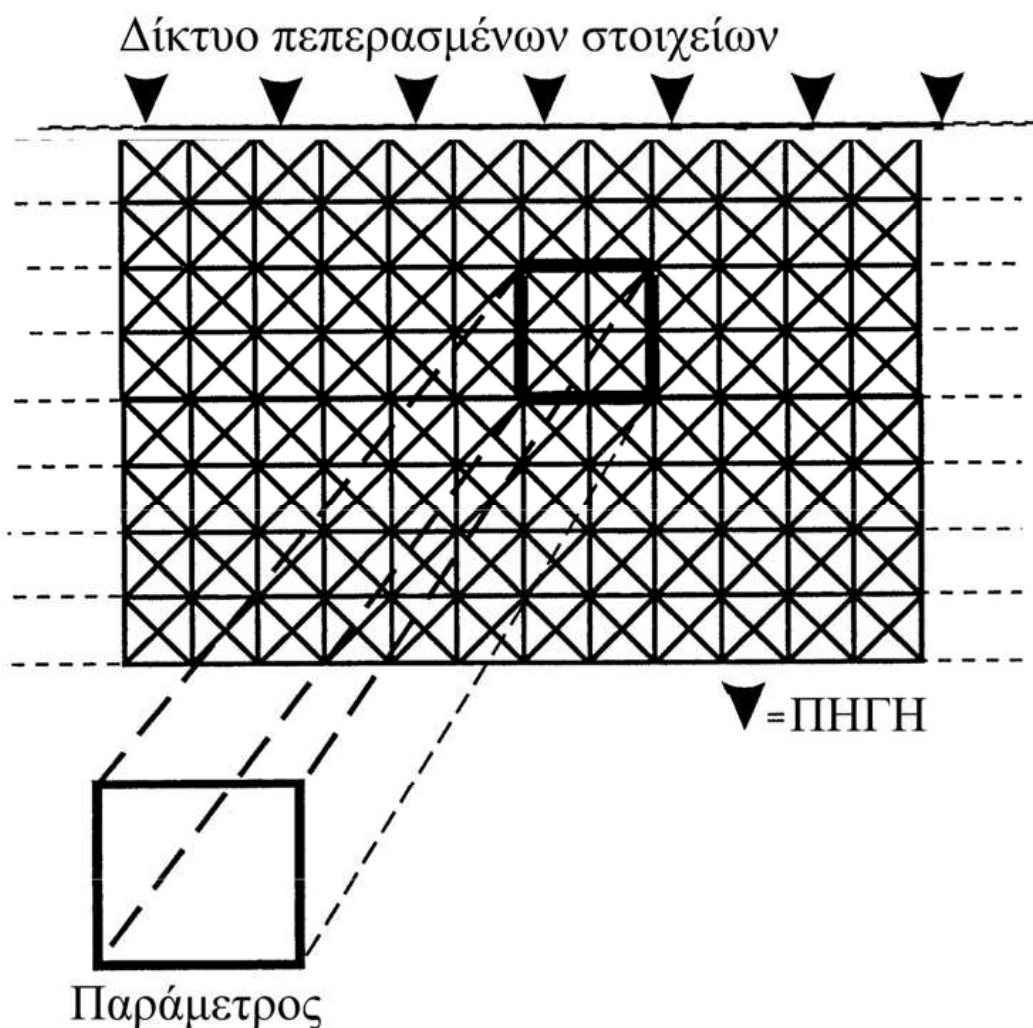
Η γη θεωρείται ότι αποτελείται από ορθογώνια τμήματα (παράμετροι) (εικόνα 5.1), τα οποία μπορούν να μεταβάλουν την αντίσταση τους ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Η κατανομή και το μέγεθος των τμημάτων αυτών δημιουργείται αυτόματα από το λογισμικό και το βάθος κάθε σειράς αυτών των τμημάτων θεωρείται περίπου ίσο με το “μέσο βάθος διείσδυσης” (Edwards, 1977).

Η επεξεργασία κάθε γεωηλεκτρικής τομογραφίας ξεχωριστά είχε ως βασικούς σκοπούς να αξιολογηθεί η ποιότητα των δεδομένων αλλά και να ληφθεί μία πρώτη εικόνα για την κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης.

Το πρόγραμμα RES2DINV χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση του ευθέως ηλεκτρικού προβλήματος και τον υπολογισμό των τιμών των φαινόμενων

αντιστάσεων. Η διαδικασία της αντιστροφής στηρίζεται σε μία επαναληπτική μη-γραμμική τεχνική ελαχίστων τετραγώνων (deGroot-Heldin and Constable, 1990).

Με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το υπέδαφος χωρίζεται σε διακεκριμένες και πεπερασμένες περιοχές, που όπως είπαμε παραπάνω ονομάζονται παράμετροι οι οποίες η κάθε μία μπορεί να έχει διαφορετική τιμή της αντίστασης. Έτσι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παρασταθεί οποιαδήποτε κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης, όσο πολύπλοκη και να είναι.

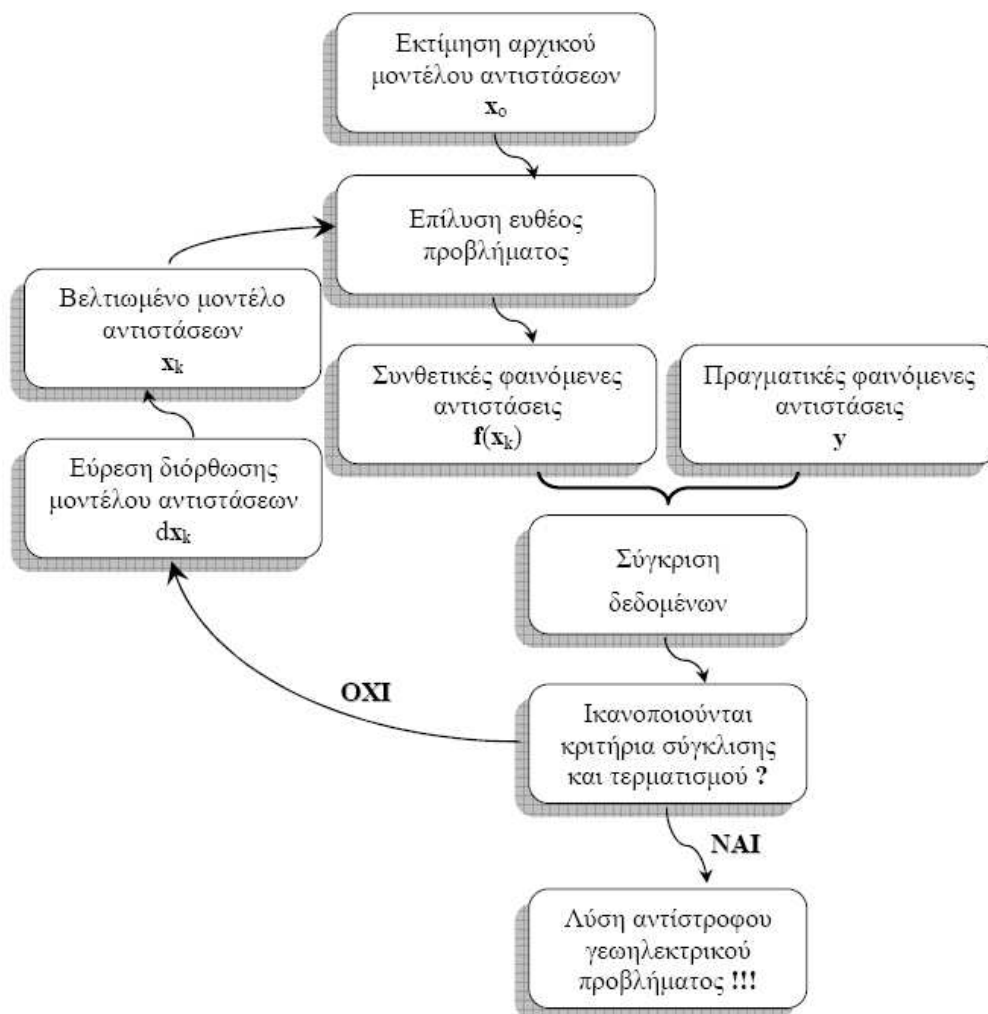


εικόνα 5.1

Ο τελικός σκοπός της γεωηλεκτρικής διασκόπησης είναι να βρεθεί ένα βέλτιστο ηλεκτρικό μοντέλο της γης στηριζόμενοι στις πραγματικές μετρήσεις της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. Ο στόχος είναι να υπολογιστεί μία εκτίμηση της κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, για την οποία

η διαφορά μεταξύ των πραγματικών (μετρούμενων) δεδομένων της φαινόμενης αντίστασης και των υπολογιζόμενων (συνθετικών) τιμών της φαινόμενης αντίστασης να είναι ελάχιστη. Τα συνθετικά δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης θα υπολογιστούν μέσω της επίλυσης του ευθέως προβλήματος.

Επειδή όμως το γεωηλεκτρικό πρόβλημα είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα, η παραπάνω διαδικασία πρέπει να είναι επαναληπτική. Δηλαδή η διαδικασία της αντιστροφής ξεκινάει με ένα αρχικό ηλεκτρικό μοντέλο γης (συνήθως ομογενή γη) και σε κάθε επανάληψη βρίσκεται μία διόρθωση του μοντέλου, η οποία διόρθωση προστίθεται στο προηγούμενο μοντέλο. Έτσι λοιπόν στο τέλος κάθε αντιστροφής λαμβάνεται ένα αναβαθμισμένο μοντέλο γης και τελικά η διαδικασία θα σταματήσει όταν θα ανακατασκευαστεί ένα τέτοιο μοντέλο του οποίου η απόκριση, δηλαδή οι υπολογιζόμενες συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις θα διαφέρουν ελάχιστα από τις πραγματικές φαινόμενες αντιστάσεις.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής τυπικού αλγόριθμου επίλυσης μη γραμμικού αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος (Athanasίου, 2004)

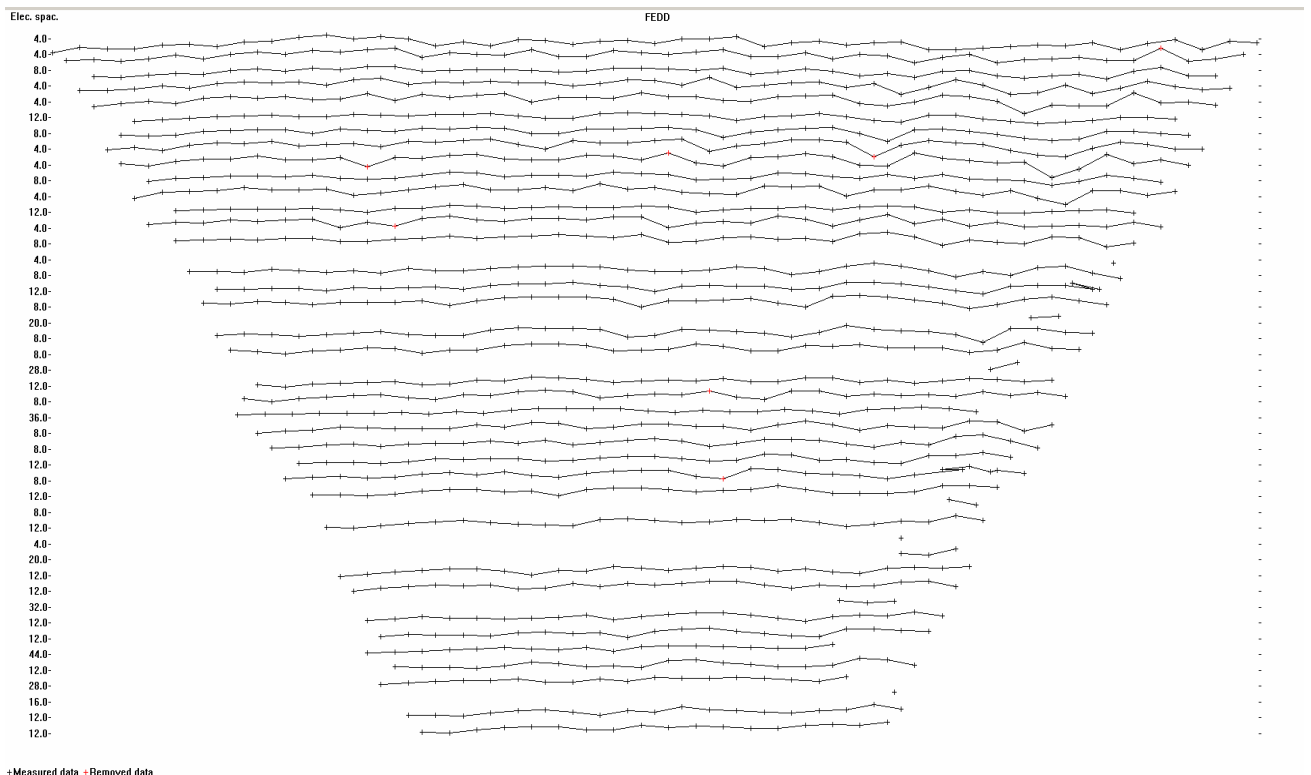
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Επεξεργασία Γεωφυσικών Δεδομένων & Αποτελεσμάτων Ερευνών

Για την επεξεργασία όλων των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε ένας ενιαίος τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων ο οποίος έγινε με τα παρακάτω στάδια:

- Αποκοπή σφάλματος: Στο αρχικό στάδιο αποκόπηκαν τα δεδομένα που παρουσίαζαν σφάλμα στην μέτρηση πάνω από 3%.

- Φιλτράρισμα δεδομένων: Στην συνέχεια έγινε ένα επιπλέον φιλτράρισμα των δεδομένων εξαλείφοντας πολύ υψηλές και χαμηλές ακραίες τιμές, που οφείλονταν σε εξωγενείς πηγές όπως για παράδειγμα κακή επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος ή ελαττωματική σύνδεση των καλωδίων ρεύματος με το ηλεκτρόδιο (Εικ. 6.1).



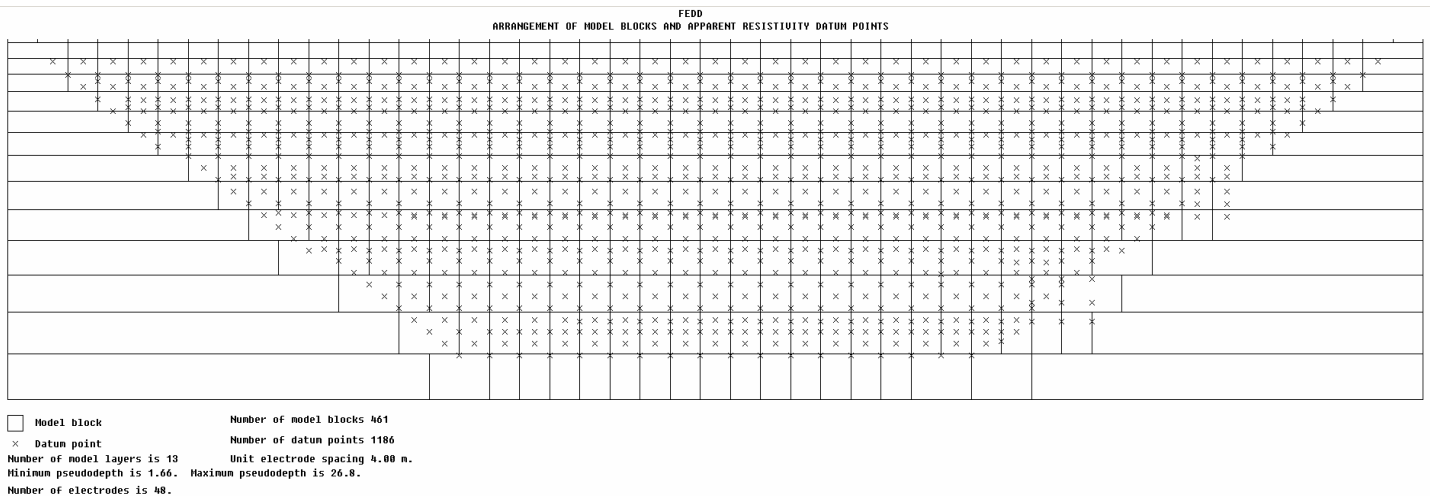
+ Measured data + Removed data

Εικόνα 6.1: Παράδειγμα δεδομένων μιας ηλεκτρικής τομογραφίας (FE, Διπόλου-Διπόλου) που περιέχει κάποιες πολύ ακραίες τιμές.. Οι τιμές αυτές απομακρύνθηκαν από τα δεδομένα καθώς αποτελούν θόρυβο που επηρεάζει την τελική εικόνα του υπεδάφους.

- Επεξεργασία ηλεκτρικών τομογραφιών με το πρόγραμμα RES2DINV:

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα RES2DINV. Οι παράμετροι του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ταυτόσημοι για όλες τις τομογραφίες, έτσι ώστε να υπάρχει μία ενιαία και συνολική διαχείριση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων. Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων κατασκευάστηκε από ένα σύνολο τραπεζοειδών στοιχείων, τα οποία μεταξύ τους ενώνονταν σε συγκεκριμένα σημεία που λέγονται κόμβοι. Για πιστότερη και μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των φαινόμενων αντιστάσεων τοποθετήθηκαν 4 κόμβοι μεταξύ των διαδοχικών ηλεκτροδίων.

Για την ανακατασκευή του γεωηλεκτρικού μοντέλου της γης με βάση τις πειραματικές μετρήσεις, το υπέδαφος διακριτοποιείται σε ένα σύνολο πεπερασμένων ορθογώνιων παραμέτρων, των οποίων η αντίσταση μπορεί να μεταβάλλεται ανεξάρτητα η μία σε σχέση με την άλλη. Το μήκος κάθε παραμέτρου ισούται με την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων (Εικ. 6.2). Ως μέγιστο βάθος διασκόπησης θεωρήθηκε το “μέσο βάθος διείσδυσης” (Edwards, 1977).



Εικόνα 6.2: Χωρική κατανομή των ορθογώνιων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή του γεωηλεκτρικού μοντέλου της γης. Με τους κεκλιμένους σταυρούς φαίνεται η θέση των φαινόμενων αντιστάσεων που μετρήθηκαν στο ύπαιθρο για μία τυπική ηλεκτρική τομογραφία (FE, Διπόλου-Διπόλου, Μέγιστο βάθος διείσδυσης 30 μέτρα).

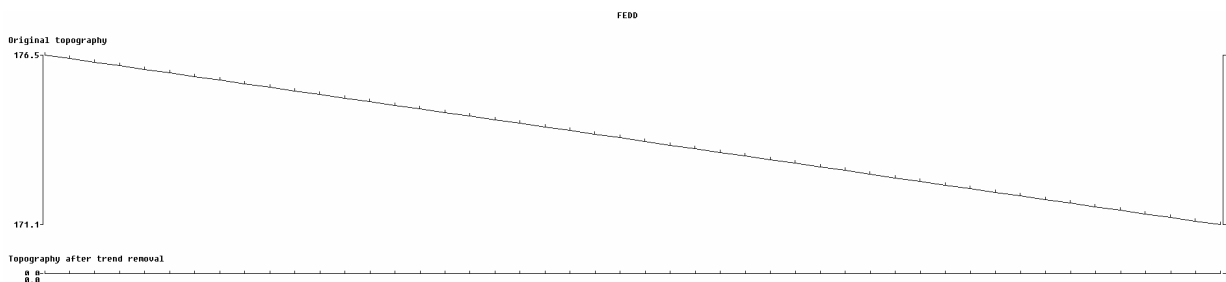
Για την ανακατασκευή της αντίστασης του υπεδάφους χρησιμοποιήθηκε ένας επαναληπτικός αλγόριθμος εξομαλυμένης αντιστροφής. Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή για τον πολλαπλασιαστή Lagrangian, ο οποίος καθορίζει το ποσοστό ομαλότητας του τελικού μοντέλου, ήταν 0.3 και 0.03 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό ομαλότητας της τελικής εικόνας ήταν το ίδιο τόσο κατά την

οριζόντια όσο και την κατακόρυφη διεύθυνση. Σε μερικές περιπτώσεις πολύ θορυβωδών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 0.6 και 0.06 αντίστοιχα.

Όταν το σχετικό σφάλμα μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων κατά την διάρκεια της αντιστροφής ήταν μικρότερο του 3%, τότε η διαδικασία αυτόματα σταματούσε καθώς το παραγόμενο ηλεκτρικό μοντέλο δεν επιδεχόταν επιπλέον βελτίωση. Για την έναρξη της επαναληπτικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ένα αρχικό μοντέλο γης με ομογενή αντίσταση. Ο Ιακωβιανός πίνακας (δείχνει το ποσοστό της μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης εάν μεταβληθεί η αντίσταση κάποιας παραμέτρου) επαναυπολογιζόταν σε κάθε επανάληψη της αντιστροφής με σκοπό την μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

-Ενσωμάτωση τοπογραφίας στην διαδικασία αντιστροφής:

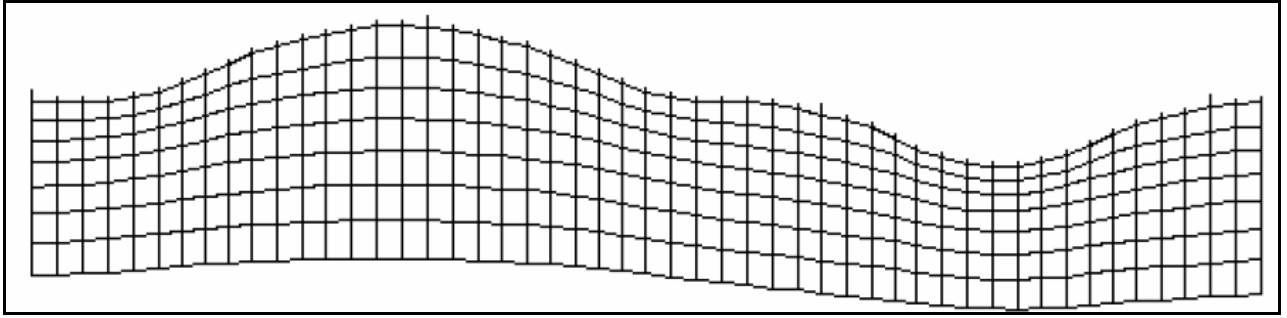
Η περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες παρουσιάζει μεταβολές στο τοπογραφικό ανάγλυφο (Εικ. 6.3). Είναι γνωστό ότι η επιφανειακή τοπογραφία μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις της φαινόμενης αντίστασης (Tsourlos, et al, 1999) οπότε έπρεπε να ληφθεί υπ' όψιν κατά την επεξεργασία των ηλεκτρικών δεδομένων.



Εικόνα 6.3: Τυπική μεταβολή του τοπογραφικού ανάγλυφου κατά μήκος των τομών.

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα μοντέλο του οποίου οι επιφανειακοί κόμβοι να έχουν την δυνατότητα να μετατοπίζονται πάνω ή κάτω κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση της τοπογραφίας κατά μήκος μία τομής.

Με αυτόν τον τρόπο η επίδραση της τοπογραφίας ενσωματώνεται απ' ευθείας στην επαναληπτική διαδικασία της αντιστροφής (Εικ. 5.4). Σε κάθε ένα αρχείο, που αντιπροσώπευε τα δεδομένα μιας συγκεκριμένης διάταξης και τομής, ενσωματώθηκε η τοπογραφία κατά μήκος της γραμμής με την μορφή υψομέτρων σε συγκεκριμένα σημεία και εν συνεχεία τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα RES2DINV.



Εικόνα 6.4: Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού δισδιάστατου μοντέλου που περιλαμβάνει τοπογραφία (Loke, 2000).

Σε γενικές γραμμές, και από τις δύο διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων (Dipole-Dipole, Pole-Dipole) που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των δεδομένων κατά μήκος των γραμμών, προέκυψαν δισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα των οποίων τα σφάλματα δεν ξεπέρασαν το 20%. Τα σχετικά αυτά υψηλά σφάλματα δικαιολογούνται από την ύπαρξη έντονης ανομοιογένειας και σχετικά μεγάλων αντιθέσεων αντίστασης. Παρόλη την ύπαρξη τέτοιων σχετικά υψηλών σφαλμάτων τα τελικά γεωηλεκτρικά μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούν μία αρκετά πιστή αναπαράσταση της πραγματικής γεωλογικής δομής της περιοχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

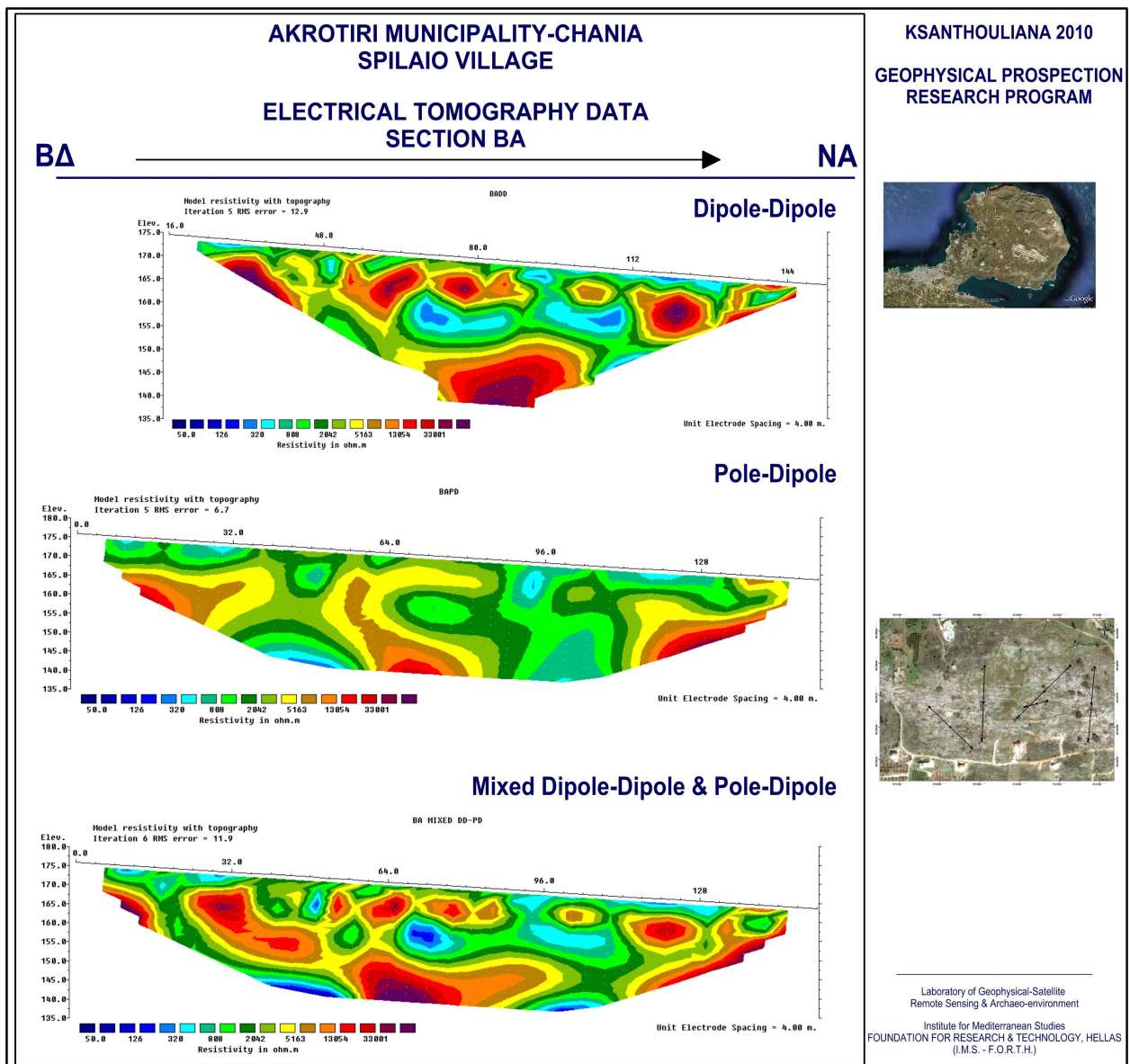
7.1 Αποτελέσματα Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας-Δισδιάστατη Αντιστροφή

Παρακάτω παρουσιάζονται στις Εικόνες 7.1 έως 7.6 τα δισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα της γης, τα οποία προέκυψαν από την δισδιάστατη αντιστροφή των τομών ΒΑ, DC, FE, HG και ΙΙ αντίστοιχα για τις διατάξεις Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου. Η χρωματική κλίμακα είναι ενιαία για όλα τα μοντέλα. Τα θερμά χρώματα (αποχρώσεις του κόκκινου) αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους ενώ αντίθετα τα ψυχρά χρώματα (αποχρώσεις του μπλε) δηλώνουν περιοχές με μικρές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Σε γενικές γραμμές τα γεωηλεκτρικά μοντέλα κατά μήκος όλων των τομών, που προήλθαν από την επεξεργασία των ανεξάρτητων δεδομένων Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου αλλά και από την συνδυασμένη επεξεργασία τους, παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες ως προς τους εδαφικούς σχηματισμούς που εντοπίζονται. Το γεγονός αυτό ενισχύει την άποψη ότι τα τελικά μοντέλα αντιστροφής αντικατοπτρίζουν σε σημαντικό βαθμό την τοπική γεωλογική πραγματικότητα.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΒΑ

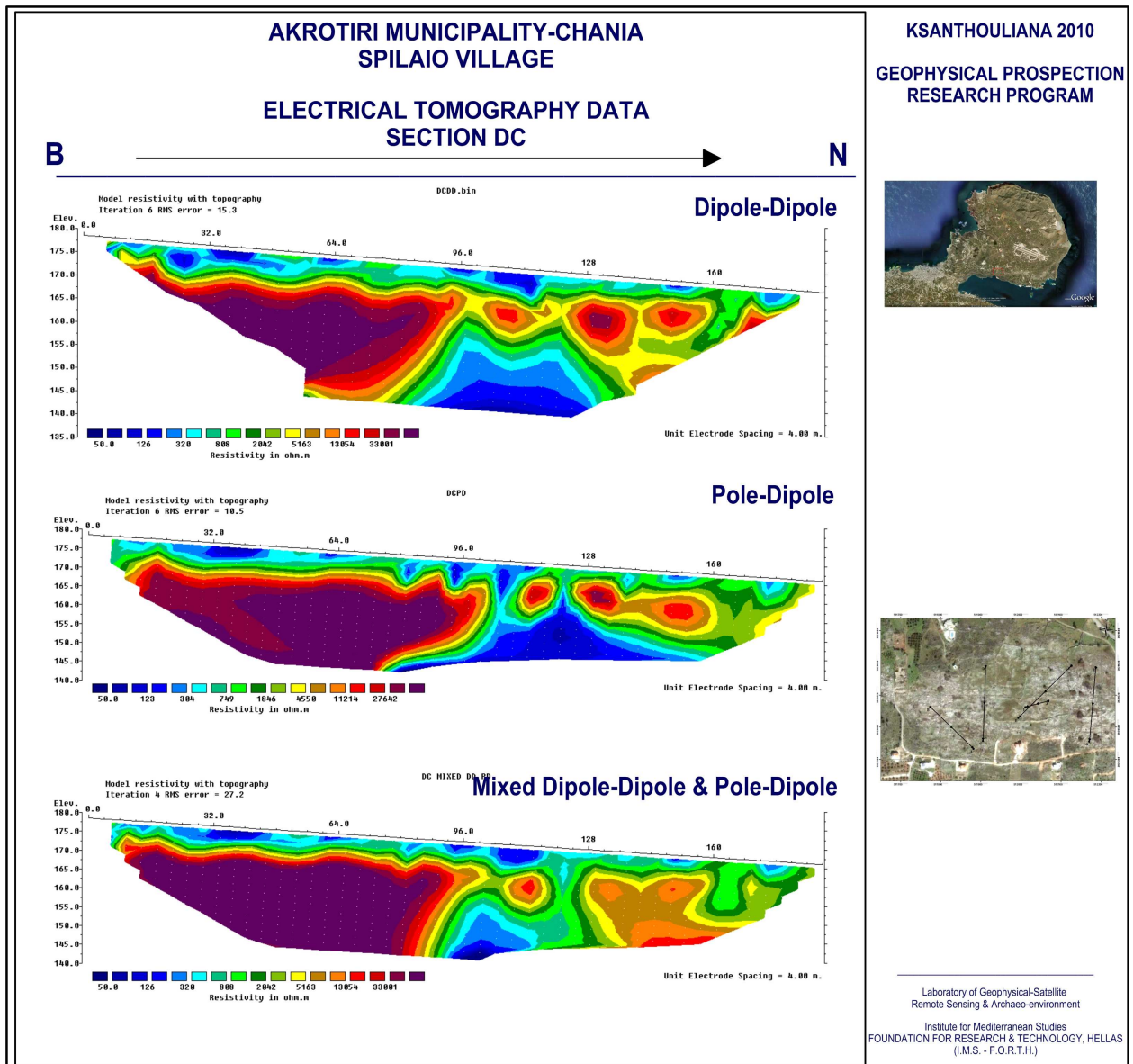
Στην τομογραφία ΒΑ παρατηρούμε περιοχές με υψηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων ($\rho > 3000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) κατά μήκος όλης της τομής, από τα ΒΔ προς τα ΝΔ. Αυτές οι υψηλές αντιστάσεις παρατηρούνται σε βάθος μεγαλύτερο του 1.5-2 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους οι οποίες σχετίζονται με τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο της περιοχής. Ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος παρουσιάζεται κατακερματισμένος και στις ζώνες διάρρηξης που δημιουργούνται βρίσκεται μαργαϊκό και αργιλικό υλικό ($X = 68\text{-}112 \text{ m}$, $Z = 8\text{-}17 \text{ m}$), το οποίο αποτυπώνεται με χαμηλές αντιστάσεις ($\rho < 150 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) στην γεωηλεκτρική τομή.



Εικόνα 7.1: Δισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα της τομογραφίας ΒΑ που προέκυψαν από την αντιστροφή των δεδομένων που συλλέχθηκαν με τις μεθόδους Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ DC

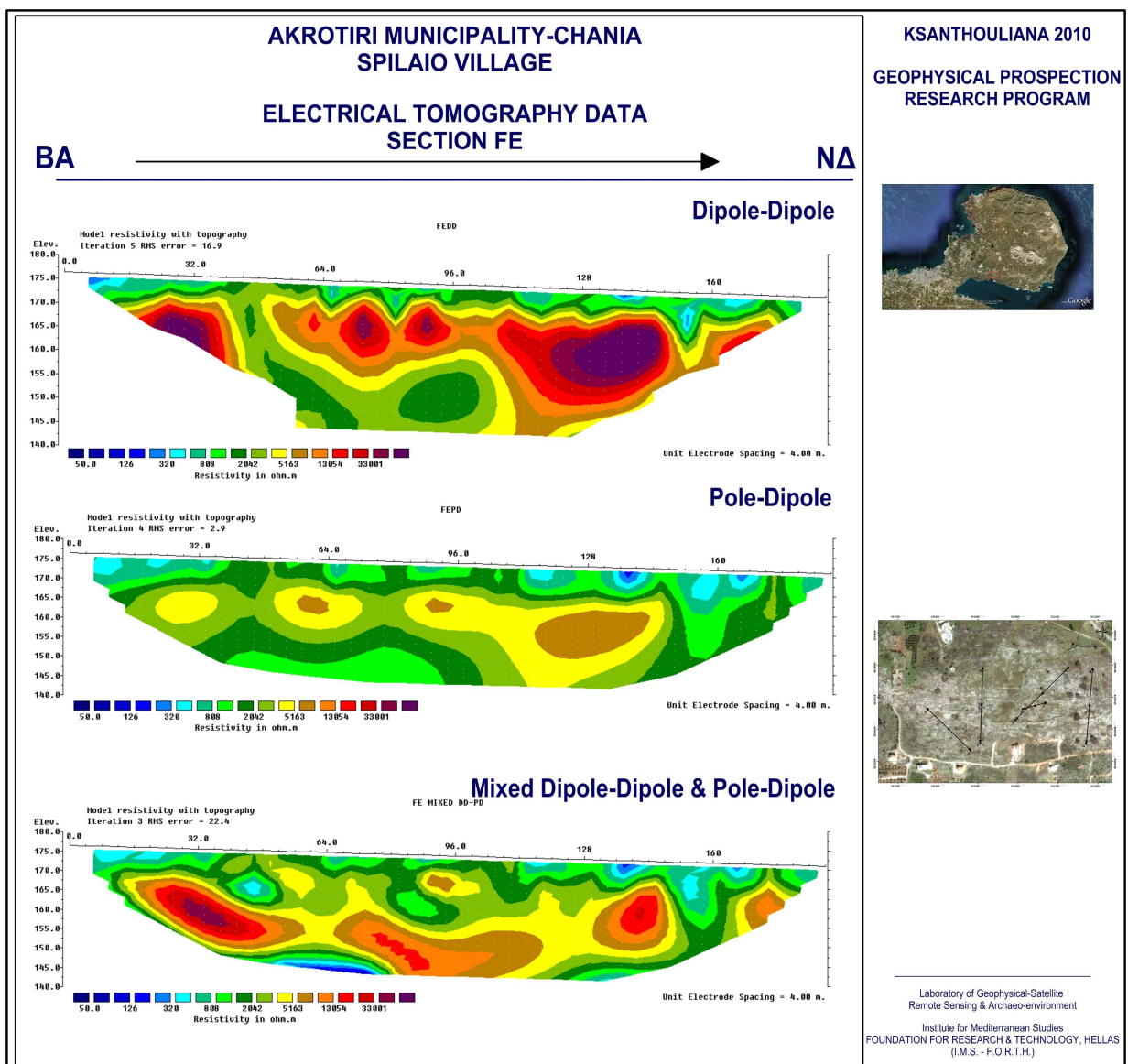
Στην τομογραφία DC παρατηρούμε ότι από τα βόρεια της τομής μέχρι την οριζόντια απόσταση των 96 μέτρων εμφανίζεται μία ομογενή περιοχή υψηλών αντιστάσεων ($\rho > 3000 \text{ Ohm-m}$) από το βάθος των 2-2.5 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία οφείλεται στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο της περιοχής. Από τα 96 έως τα 120 μέτρα εντοπίζεται από το βάθος των 14-15 μέτρων μία ζώνη πολύ χαμηλών αντιστάσεων ($\rho < 150 \text{ Ohm-m}$) η οποία έχει προέλθει από την διάρρηξη του μαργαϊκού ασβεστόλιθου και την πλήρωσή του με αργιλικό και μαργαϊκό υλικό. Από τα 120 μέτρα έως το τέλος της τομής στα νότια συνεχίζει ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος λιγότερο όμως συμπαγής σε σχέση με το βόρειο τμήμα της τομής.



Εικόνα 7.2: Δισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα της τομογραφίας DC που προέκυψαν από την αντιστροφή των δεδομένων που συλλέχθηκαν με τις μεθόδους Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ FE

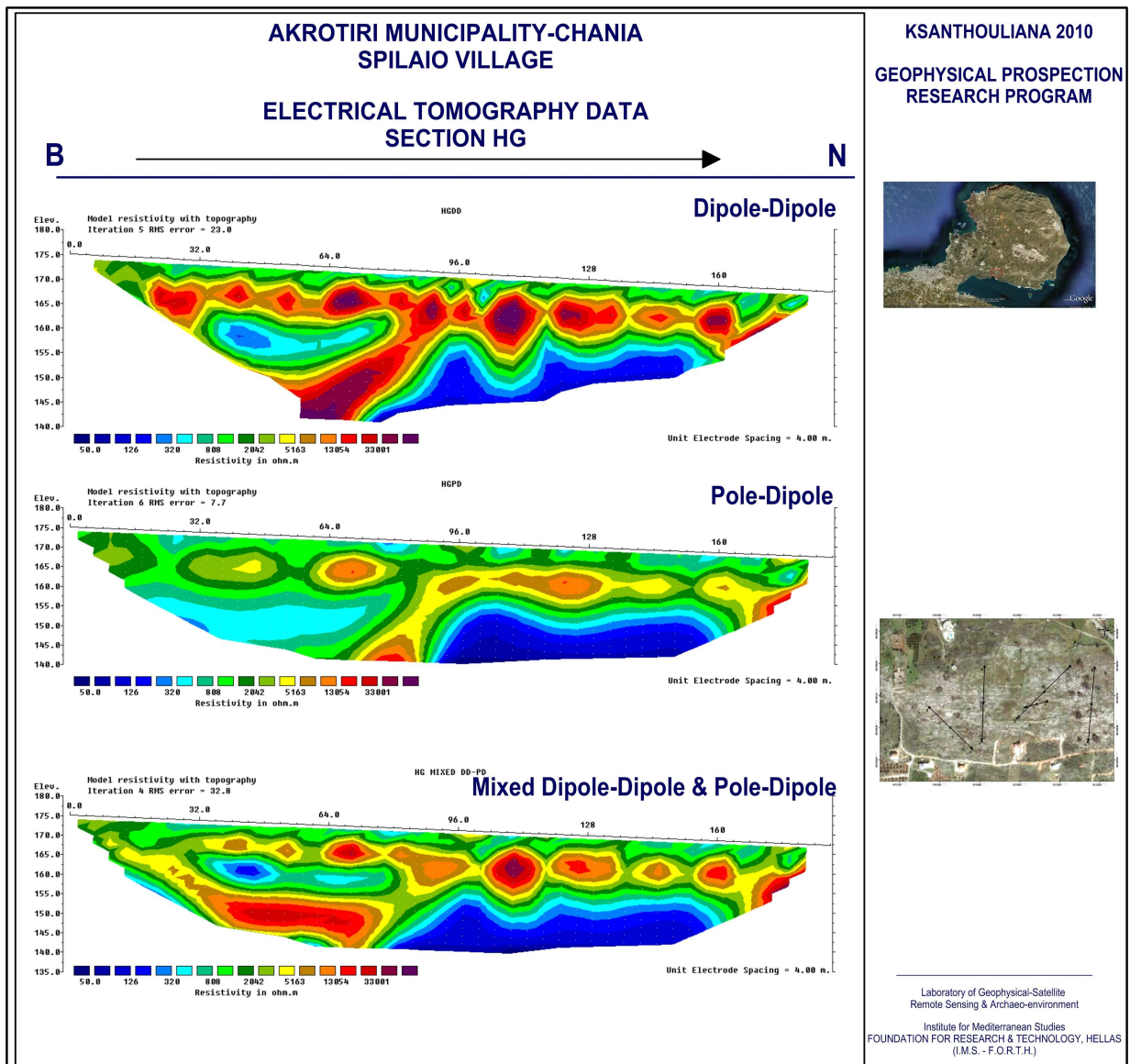
Στην γεωηλεκτρική τομογραφία FE παρατηρούμε κατά μήκος της διεύθυνσης ΒΑ προς ΝΔ, να εμφανίζεται ένα συμπαγές τμήμα του μαργαϊκού ασβεστόλιθου από το βάθος των 1.5-2 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους και από την οριζόντια απόσταση των 108 μέτρων μέχρι το τέλος της τομής. Στην οριζόντια απόσταση από τα 44 έως τα 108 μέτρα από τα ΒΑ και σε βάθος μεγαλύτερο των 15 μέτρων ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος εντοπίζεται με αντιστάσεις των 2000-3000 Ohm-m, λόγω ενδεχομένως της ύπαρξης αργιλικού ή μαργαϊκού υλικού.



Εικόνα 7.3: Γενικευμένο Γεωηλεκτρικό και Γεωλογικό μοντέλο της περιοχής έρευνας κατά της διεύθυνσης της τομής FE.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΗG

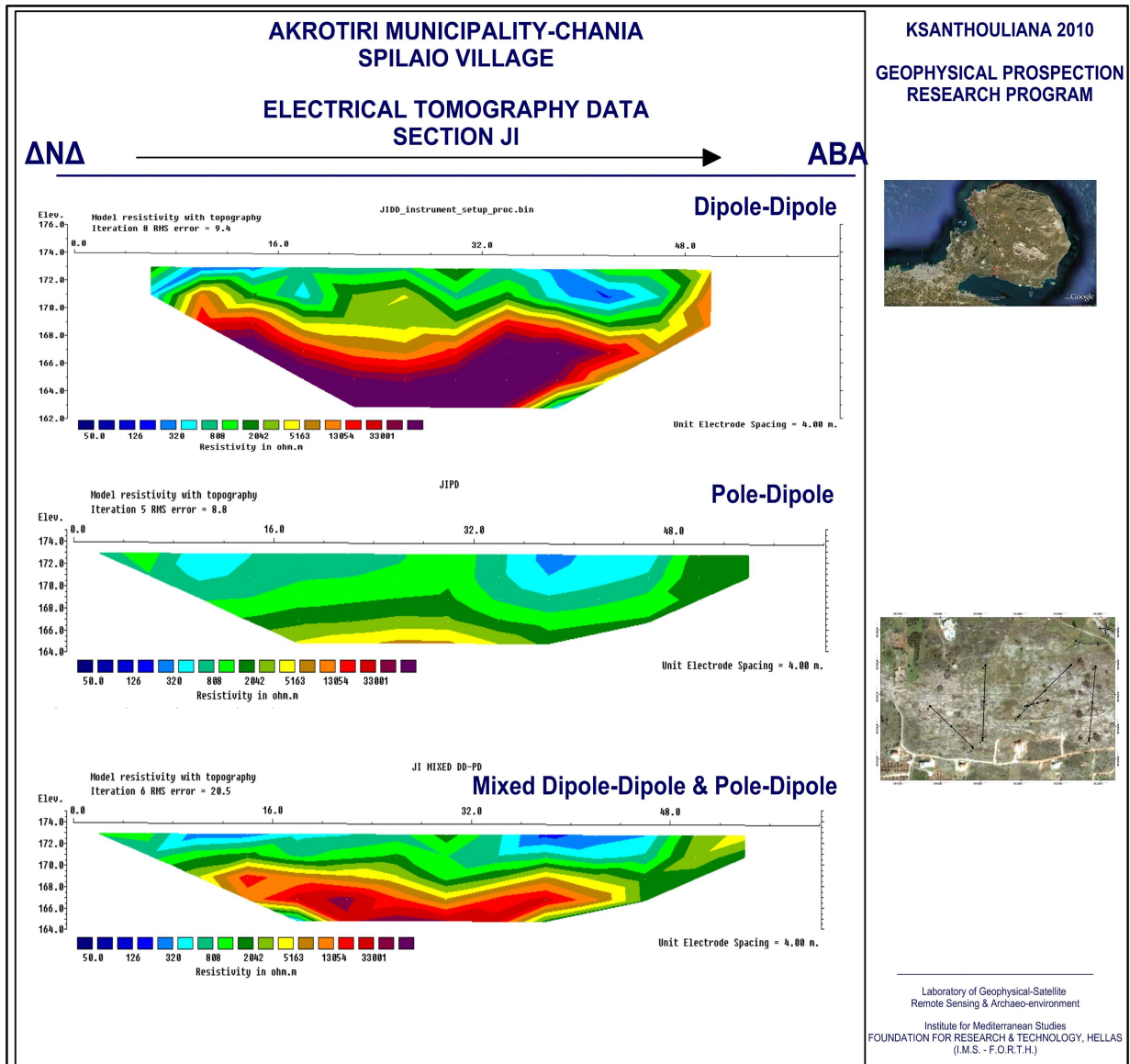
Η τομογραφία ΗG τοποθετήθηκε παράλληλα και σε απόσταση 270 μέτρων ανατολικά από την τομή DC έχοντας τον ίδιο προσανατολισμό με αυτή (B προς N). Ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος εμφανίζεται κατά τόπους συμπαγής από το βάθος των 1.5-2 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Από το βάθος των 14-15 μέτρων και από την οριζόντια απόσταση των 96 μέτρων εμφανίζεται, όπως και στην τομή DC το μαργαϊκό και αργιλικό υλικό με χαμηλές τιμές αντιστάσεων.



Εικόνα 7.4: Γενικευμένο Γεωηλεκτρικό και Γεωλογικό μοντέλο της περιοχής έρευνας κατά της διεύθυνσης της τομής ΗG.

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ JI

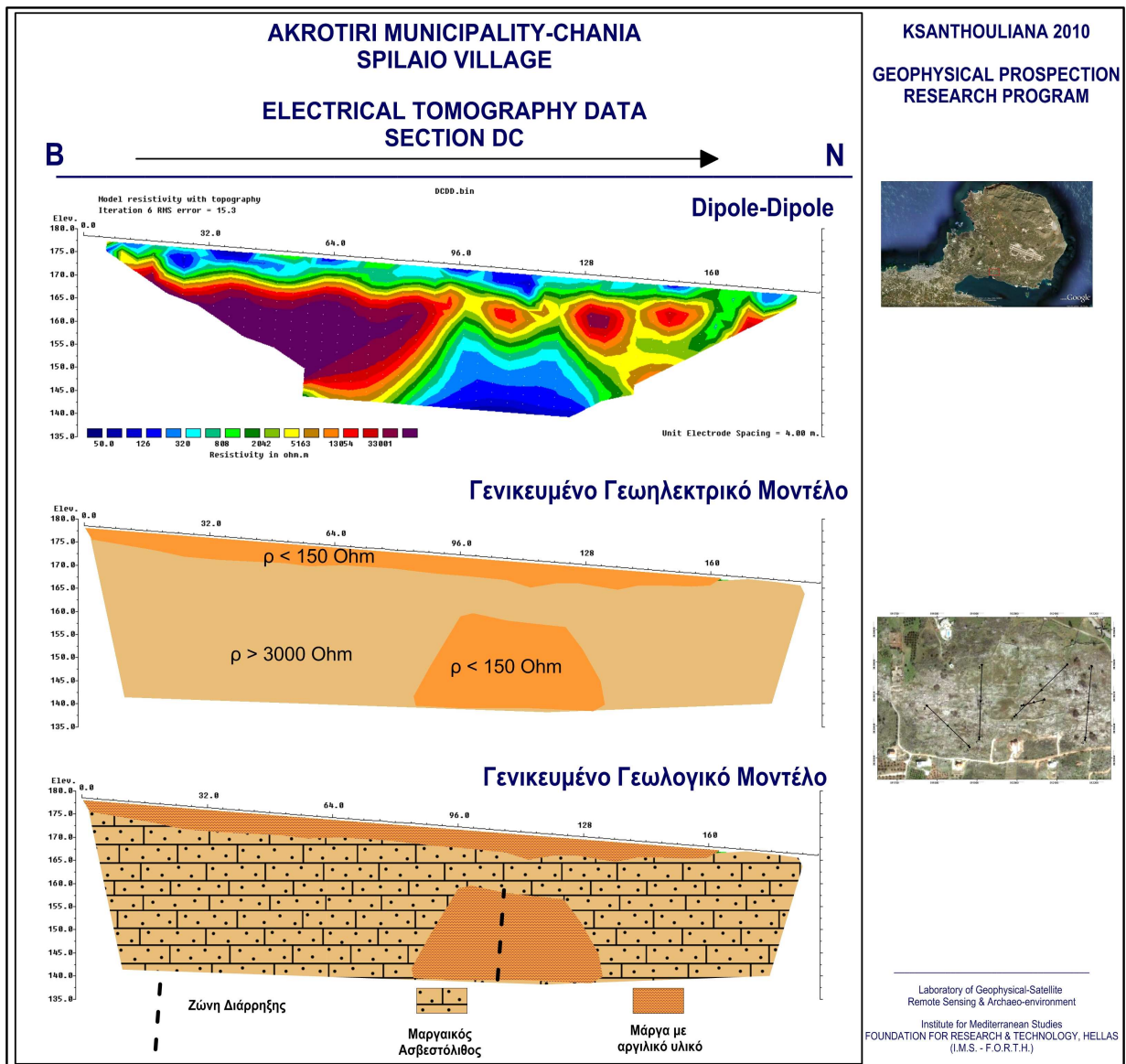
Τέλος η τομογραφία JI δείχνει μία οριζόντια στρωματογραφία όπου ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος εντοπίζεται με υψηλές τιμές αντιστάσεων από το βάθος των 2 περίπου μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, μετά από ένα λεπτό στρώμα φυτικού καλύμματος.



Εικόνα 7.5: Γενικευμένο Γεωηλεκτρικό και Γεωλογικό μοντέλο της περιοχής έρευνας κατά της διεύθυνσης της τομής JI.

Κρίνοντας τα αποτελέσματα από όλες τις δισδιάστατες γεωηλεκτρικές τομογραφίες που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή έρευνας εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος εμφανίζεται από το βάθος των 1.5-2 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, μετά από ένα λεπτό στρώμα φυτικού καλύμματος. Ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται κατά τόπου συμπαγής, ενώ υπάρχουν και περιοχές ασυνέχειας όπου έχουν πληρωθεί με αργιλικό υλικό. Αυτές οι επιφάνειες ασυνέχειας μπορούν να δικαιολογηθούν από το γεγονός ότι η περιοχή έρευνας βρίσκεται ουσιαστικά μέσα σε μία ρηξιγενή ζώνη, που δημιουργείται από τα δύο κανονικά ρήγματα που βρίσκονται βόρεια και νότια της περιοχής. Οπότε η δράση της τεκτονικής έχει προκαλέσει την ανομοιογένεια που παρατηρείται κατά τόπους μέσα στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο.

Στην εικόνα 7.6 παρουσιάζεται μία γενικευμένη γεωλογική τομή διεύθυνσης Β-Ν αντιπροσωπευτική της περιοχής έρευνας όπως προέκυψε από την σύνθεση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών γεωηλεκτρικών τομογραφιών.



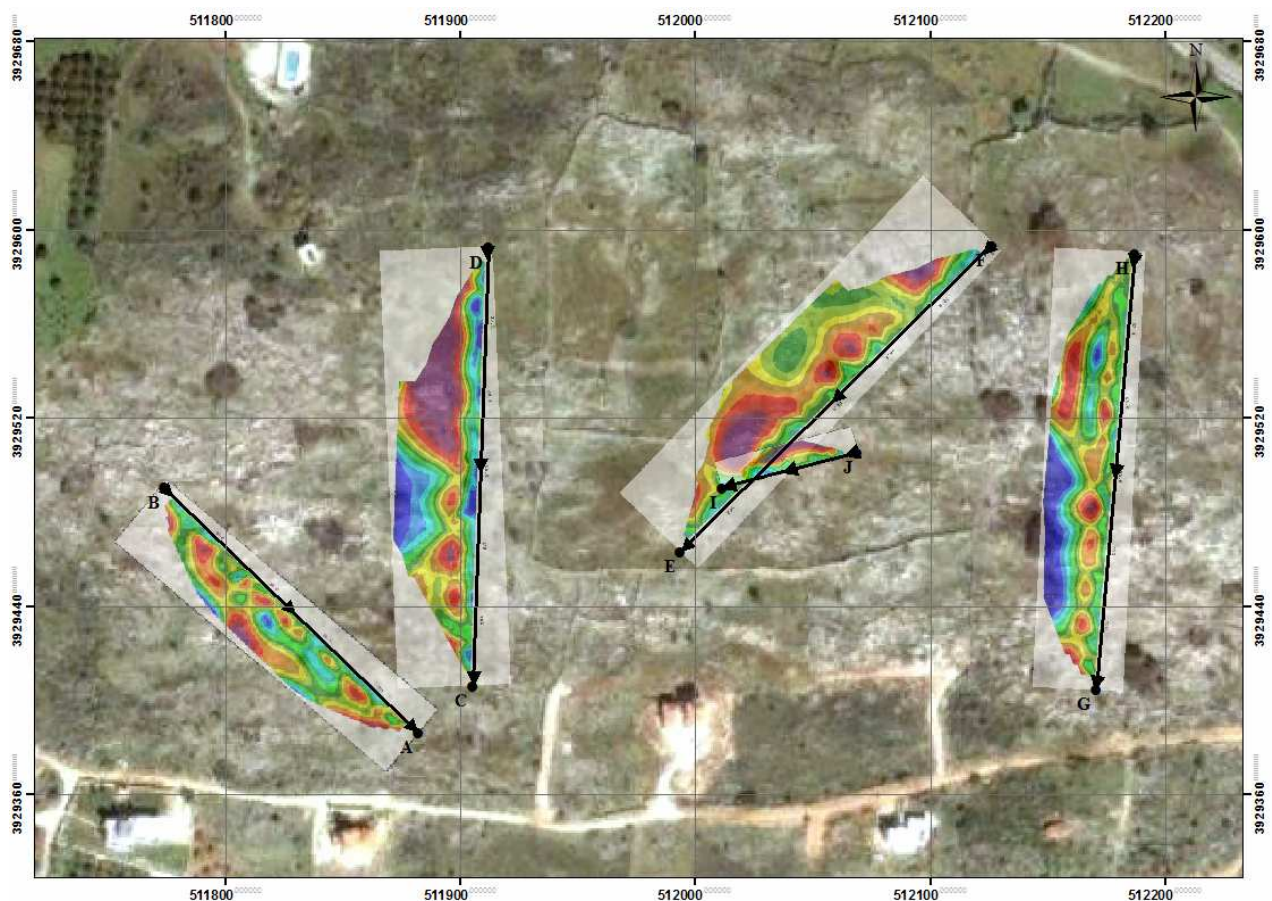
Εικόνα 7.6: Γενικευμένη γεωλογική τομή της περιοχής έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Τελικά Συμπεράσματα-Προτάσεις

Παρακάτω στην εικόνα 8.1 έχουν υπερτεθεί τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών τομογραφιών στην δορυφορική εικόνα της περιοχής.

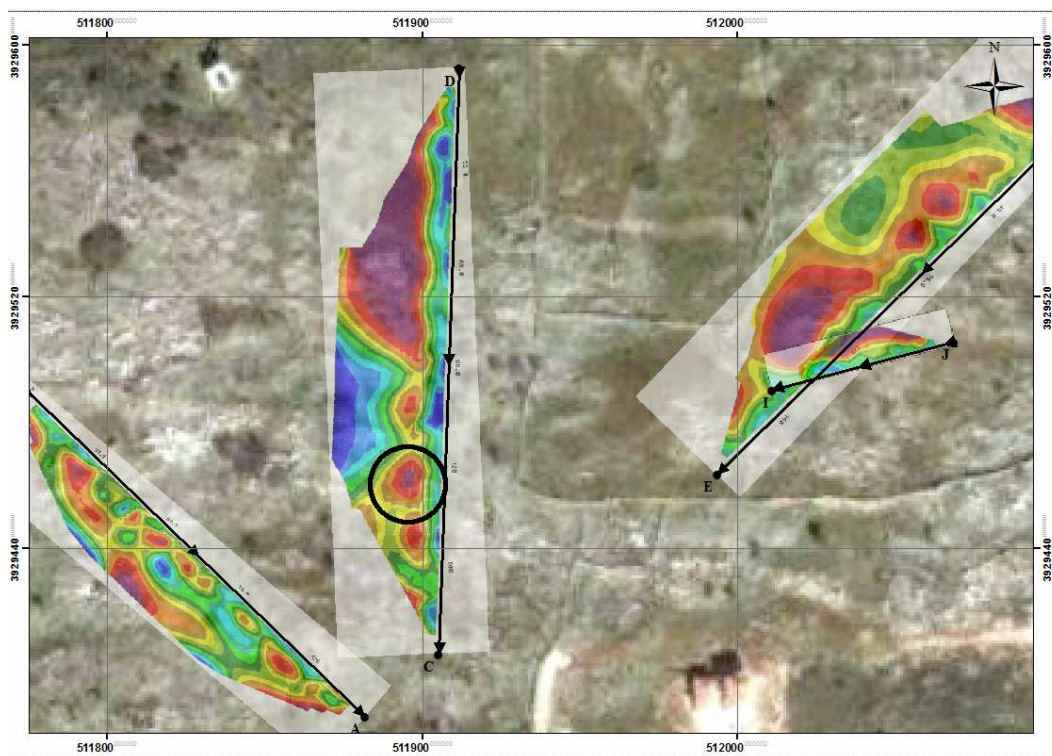
Τα αποτελέσματα και συγκεκριμένα οι χάρτες της γεωηλεκτρικής τομογραφίας εισήχθησαν σε μία πλατφόρμα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών για την ολοκληρωμένη διαχείριση και ερμηνεία της πληροφορίας. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δορυφορικές εικόνες Quick bird υψηλής ανάλυσης (> 50 cm) ως υπόβαθρα για την υπέρθεση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων. Η γεωαναφορά όλων των χαρτών έγινε χρησιμοποιώντας το ελληνικό σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87.



Εικόνα 8.1: Υπέρθεση των αποτελεσμάτων των γεωηλεκτρικών τομογραφιών στην δορυφορική εικόνα της περιοχής.

Κατά μήκος της τομής DC εμφανίζεται επιφανειακά ένα μικρό έγκοιλο βάθος περίπου 2 μέτρων και με οριζόντιες διαστάσεις $1 \times 1 \text{ m}^2$, το οποίο βρίσκεται στα αριστερά του σωρού από πέτρες της φωτογραφίας στην εικόνα 8.2. Το μικρό αυτό επιφανειακό έγκοιλο ενδεχομένως σχετίζεται με την

ανωμαλία υψηλών αντιστάσεων που περικλείεται στον κύκλο που σημειώνεται στην ηλεκτρική τομογραφία DC (Εικ. 7.2).



Εικόνα 8.2: Επιφανειακό έγκοιλο στην περιοχή έρευνας.

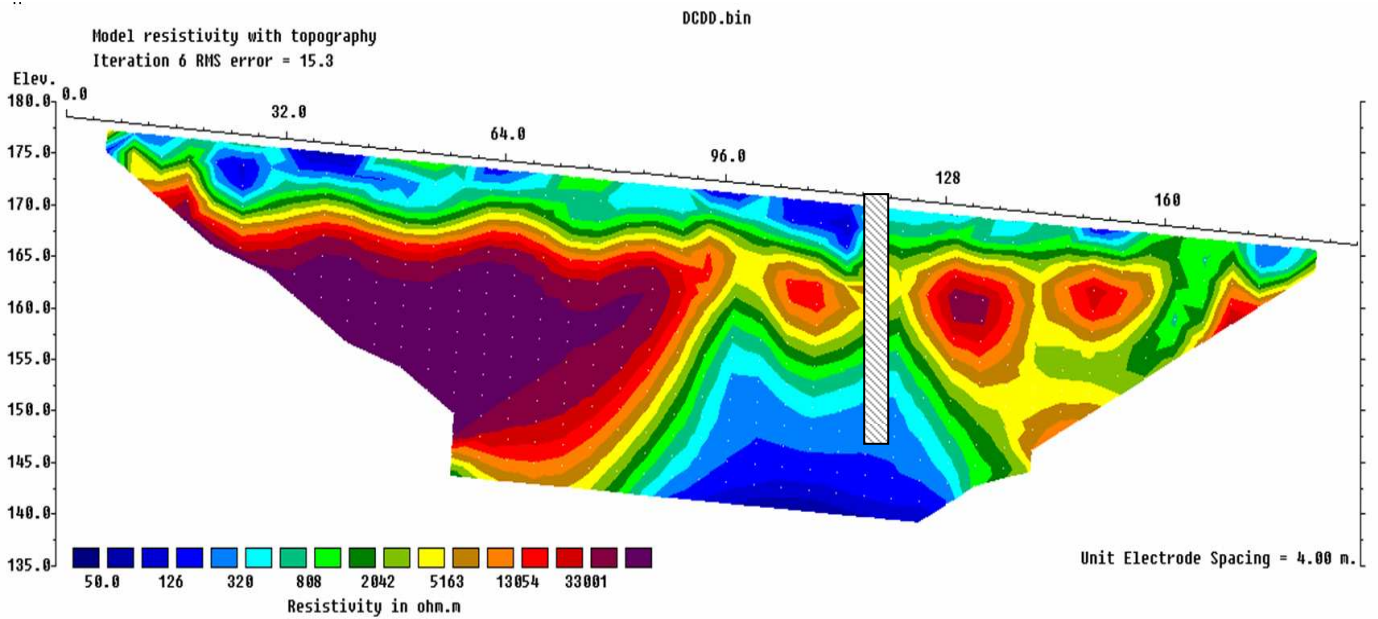
Έγκοιλα του μεγέθους αυτού είναι πιθανόν να βρίσκονται και σε άλλες θέσεις της περιοχής έρευνας, τα οποία όμως δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν κατά μήκος των τομών εξαιτίας του βήματος δειγματοληψίας (απόσταση ηλεκτροδίων: 4 μέτρα) που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή των δεδομένων, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τον εντοπισμό υπεδάφινων δομών με διαστάσεις μεγαλύτερες του βήματος δειγματοληψίας.

Δεδομένης της απουσίας προϋπάρχουσας πληροφορίας (π.χ από γεωτρήσεις) για τις υπεδάφινες συνθήκες της περιοχής, ο βασικός σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν να μελετηθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερη έκταση, λαμβάνοντας έτσι μία πρώτη εκτίμηση για τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες. Ο σχεδιασμός και εκτέλεση των γεωηλεκτρικών τομογραφιών έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να καλυφθούν όσο το δυνατόν περισσότερα οικοδομικά τετράγωνα της υπό πολεοδόμησης περιοχής, ελαττώνοντας όμως αναγκαστικά την τελική ανάλυση των γεωφυσικών χαρτών (ανάλυση >4 μέτρων).

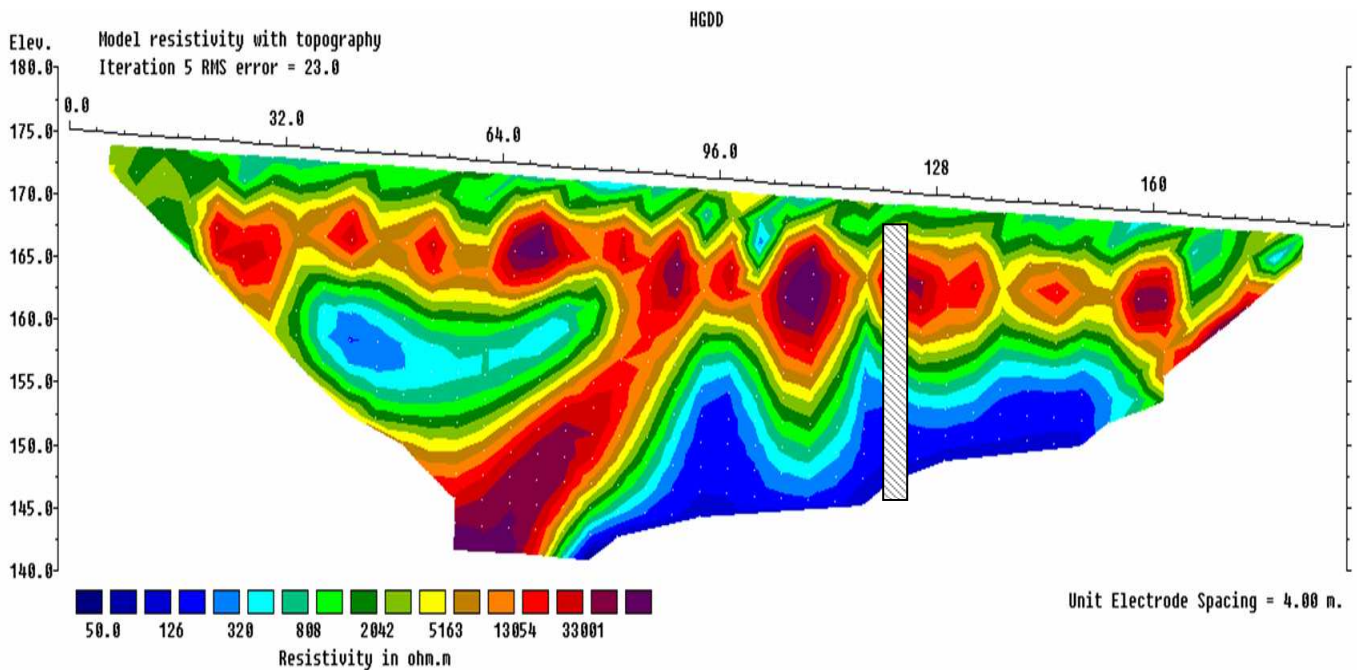
Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των πέντε (5) γεωηλεκτρικών τομογραφιών που διενεργήθηκαν στην περιοχή εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος στην περιοχή εμφανίζεται κατά τόπους συμπαγής. Επίσης εντοπίζονται περιοχές ασυνέχειας λόγω της τεκτονικής δράσης των κανονικών ρηγμάτων της περιοχής μέσα στις οποίες εντοπίζεται αργιλικό και μαργαϊκό υλικό. Όσον αφορά κάποιες μεμονωμένες περιοχές υψηλών αντιστάσεων που εμφανίζονται στις τομές (π.χ. ΒΑ: X=100-108 m, DC: X=128-132 m, FE: X=88-92 m), δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί αν τέτοιου είδους ανωμαλίες οφείλονται σε έγκοιλα ή σε τοπικές ανομοιογένειες στον μαργαϊκό ασβεστόλιθο, λόγω της ανάλυσης των γεωφυσικών χαρτών αλλά και των υψηλών τιμών των αντιστάσεων με τις οποίες εγγράφεται ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος στις γεωηλεκτρικές τομογραφίες.

Για να δημιουργηθεί μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες προτείνεται η διενέργεια ενός προγράμματος γεωτρήσεων στην περιοχή σε συγκεκριμένες θέσεις που θα υποδειχθούν από τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων. Ο σκοπός της διάνοιξης των γεωτρήσεων είναι να πιστοποιηθούν πρακτικά συγκεκριμένες γεωηλεκτρικές ανωμαλίες και να καθοριστεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η τοπική γεωλογία.

Πιο συγκεκριμένα προτείνεται η διάνοιξη δύο πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων κατά μήκος των τομών DC και HG συνολικού βάθους 20-25 μέτρων η κάθε μία, με σκοπό να ληφθεί η στρωματογραφική διαδοχή των σχηματισμών και να συσχετιστούν τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων με τους χάρτες της γεωηλεκτρικής τομογραφίας. Στις εικόνες 8.3 έως 8.6 φαίνονται οι θέσεις των προτεινόμενων γεωτρήσεων.

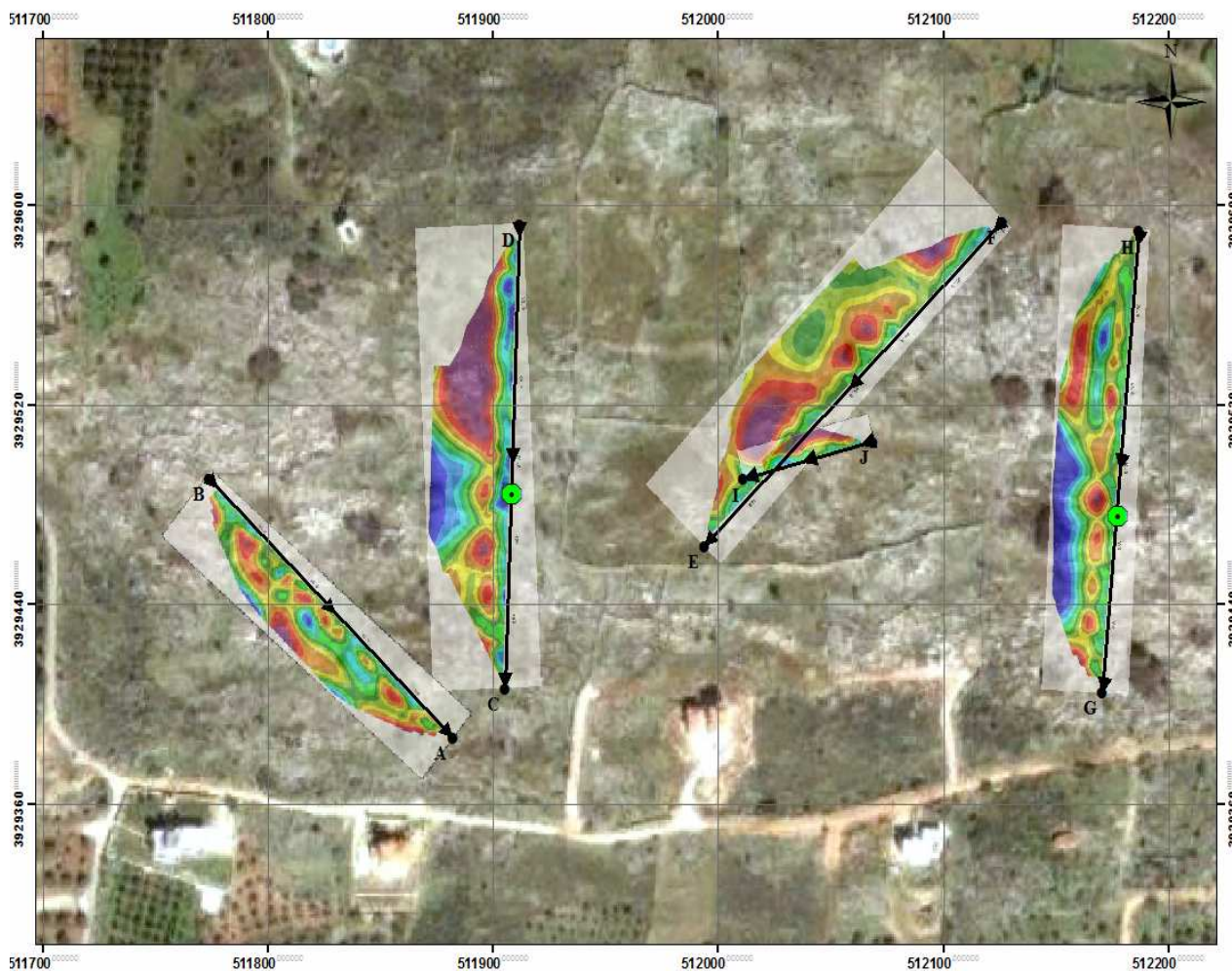


Εικόνα 8.3: Θέση της προτεινόμενης γεώτρησης κατά μήκος της τομής BA.

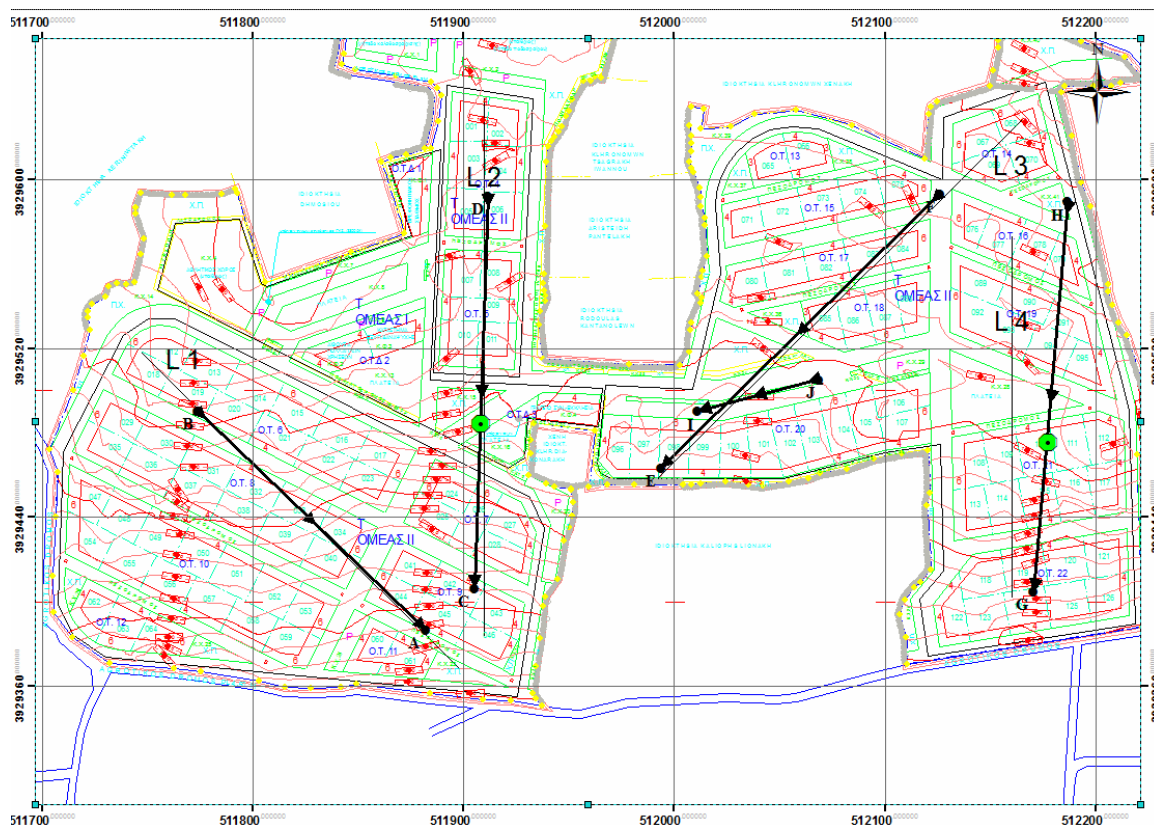


Εικόνα 8.4: Θέση της προτεινόμενης γεώτρησης κατά μήκος της τομής HG.

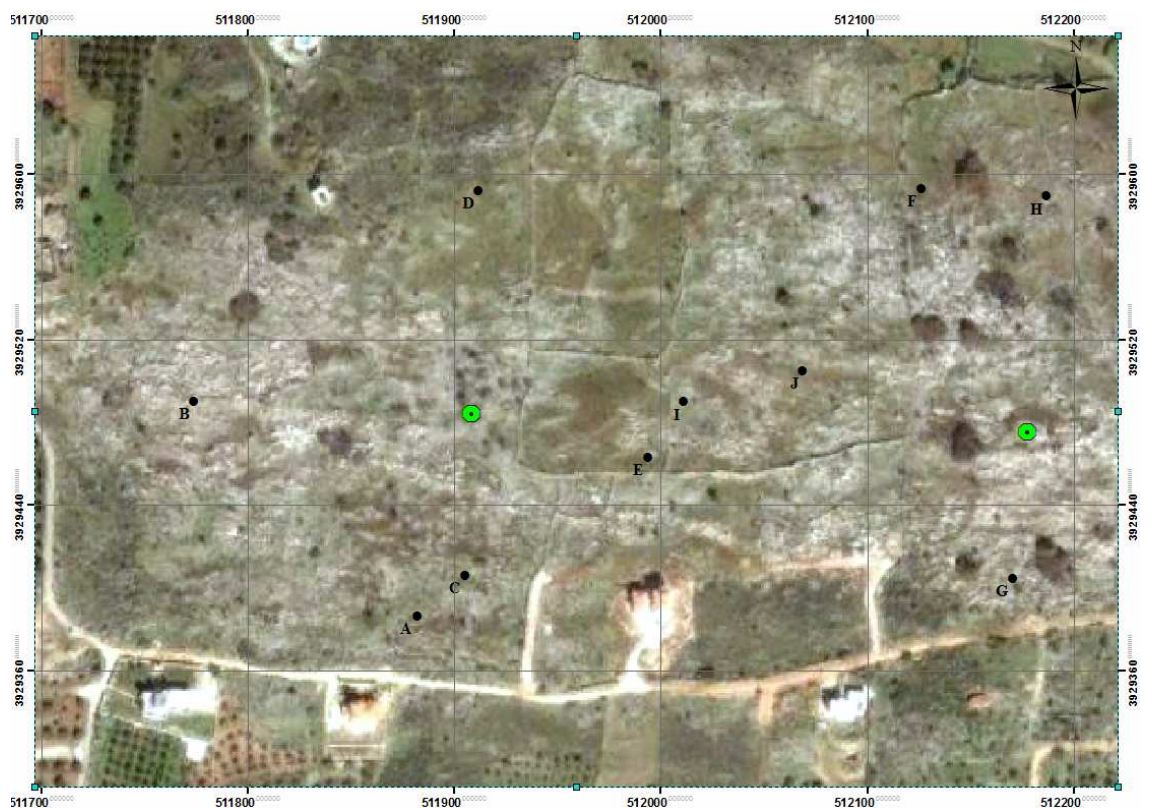
Οι θέσεις των προτεινόμενων γεωτρήσεων φαίνονται και στην δορυφορική εικόνα της περιοχής (εικόνα 8.5,8.7) όπως επίσης είναι τοποθετημένες και στο τοπογραφικό διάγραμμα της περιοχής όπου φαίνονται τα οικοδομικά τετράγωνα της υπό πολεοδόμησης περιοχής. (εικόνα 8.6)



Εικόνα 8.5: Θέσεις των προτεινόμενων γεωτρήσεων με τους πράσινους κύκλους στην περιοχή.



Εικόνα 8.6: Θέσεις των προτεινόμενων γεωτρήσεων με τους πράσινους κύκλους στην περιοχή.



Εικόνα 8.7: Θέσεις των προτεινόμενων γεωτρήσεων με τους πράσινους κύκλους στην περιοχή.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ η μελέτη του υπεδάφους στην περιοχή με την πραγματοποίηση γεωτρήσεων μπορεί να δώσει ένα μεγάλο πλήθος χρήσιμων πληροφοριών προς αξιολόγηση, από την άλλη οι πληροφορίες αυτές περιορίζονται μόνο σε πολύ μικρή περιοχή, που εκτείνεται σε βάθος όση είναι και η διάμετρος της οπής της γεώτρησης. Εκ των πραγμάτων λοιπόν η πληροφορία η οποία λαμβάνεται με αυτόν τον τρόπο είναι ουσιαστικά σημειακή. Επιπλέον η κάλυψη της περιοχής με πυκνό δίκτυο γεωτρήσεων είναι οικονομικά ασύμφορη λόγω του αυξημένου κόστους εκτέλεσης των γεωτρήσεων και των εργαστηριακών δοκιμών.

Για τον παραπάνω λοιπόν λόγο η γεωφυσική μελέτη σε μια περιοχή προτείνεται να προηγείται της γεωτεχνικής καθώς τα αποτελέσματα των γεωφυσικών χαρτών μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για μια μεγαλύτερη έκταση της υπό μελέτης περιοχής που θα βοηθήσουν και θα καθοδηγήσουν σε στοχευόμενες περιοχές ένα μελλοντικό γεωτρητικό πρόγραμμα. Στα πλεονεκτήματα των γεωφυσικών μεθόδων συγκαταλέγονται επίσης το σχετικά μικρό κόστος υλοποίησης αυτών και της φιλικότητας προς το περιβάλλον. Βέβαια οι γεωφυσικές μέθοδοι σε καμία περίπτωση δεν προσπαθούν να υποκαταστήσουν τις χρήσιμες πληροφορίες που συλλέγονται από την διάνοιξη των γεωτρήσεων, αλλά να ενεργήσουν συμπληρωματικά για την απόκτηση επιπλέον πληροφοριών που θα βοηθήσουν στην πιστότερη ανακατασκευή του γεωλογικού μοντέλου μιας περιοχής.

Βιβλιογραφία

- Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδας. 1972 Φύλλο Γρεβενά, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- DeGroot-Hedlin, C., and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55:1613-1624.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Loke, M.H. 2000. Topographic modelling in electrical imaging inversion. EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition, Glasgow, Scotland, 29 May-2 June 2000.
- Nishimura, Y., 2001. Geophysical prospection in Archaeology in D. R. Brothwell and A. M. Pollard (eds.), *Handbook of Archaeological Sciences*, pp.543-553, New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Sarris, A. 1992, "Shallow Depth Geophysical Investigation Through the Application of Magnetic and Electric Resistance Techniques". A Ph.D. Dissertation, U. of Nebraska-Lincoln, Dept. of Physics and Astronomy, Lincoln, U.S.A. (U.M.I. Dissertation Services, A Bell & Howell Company).
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990) *Applied Geophysics*. Second edition. Cambridge University Press.
- Tsourlos P. 1995. Modelling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Unpublished D. Phil. Thesis, University of York.
- Tsourlos, P., Symanski, J.E. and Tsokas, G.N. 1999. The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, 64, 1357-1363.
- Παπαδόπουλος Ν.Γ. (2007). Ανάπτυξη αλγορίθμων για την τρισδιάστατη αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων που προέρχονται από αρχαιολογικούς χώρους. Διδακτορική Διατριβή Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (σελ. 252).
- N.G. Papadopoulos, P. Tsourlos, G.N.Tsokas and A. Sarris (2007). Efficient ERT Measuring and Inversion Strategies for 3D Imaging of Buried Antiquities. *Near Surface Geophysics*, 5, 6, 349-362.
- N.G. Papadopoulos, A. Sarris, B. Wells, A. Penttinen, E. Savini, G.N. Tsokas and P. Tsourlos (2006). Contribution of multiplexed electrical resistance and magnetic techniques to the archaeological investigations at Poros, Greece. *Archaeological Prospection*, 13, 2, 75-90.
- N.G. Papadopoulos, P. Tsourlos, C. Papazachos, G.N. Tsokas, A. Sarris and J. H. Kim (2009) An Algorithm for the Fast 3-D Resistivity Inversion of Surface Electrical Resistivity Data: Application on Imaging Buried Antiquities (accepted to *Geophysical Prospection* after major revision).
- Keller and Frischknecht 1966.
- Αράμπελος, 1991.
- Ward, 1989
- Dahlin, 2000
- Fox et al., 1980
- Holcombe and Jiracek, 1984
- Tong και Yang, 1990
- Iris Instruments, 2007
- Keller 1970, Lee 1974, Furness 1992
- Molano et al., 1990
- Athanasίου, 2004