

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ
ΥΠΕΛΑΦΕΙΟΥ ΡΑΝΤΑΡ ΣΤΟ ΛΑΤΟΜΕΙΟ
ΖΩΦΟΡΩΝ ΤΟΥ Ν. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ**

ΓΕΩΡΓΙΑ Ε. ΧΟΡΕΥΤΑΚΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (επιβλέπων)
ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ ΖΑΧΑΡΙΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΚΟΜΝΗΤΣΑΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ , ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2003

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τον Απρίλιο του 2003 πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές μετρήσεις στο χώρο εξόρυξης του λατομείου Ζωφόρων Ηρακλείου Κρήτης με σκοπό τον εντοπισμό έγκοιλων στο ασβεστολιθικό πέτρωμα της περιοχής. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε ηλεκτρική τομογραφία και γεωραντάρ. Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων των μετρήσεων αυτών.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για την οικονομική και ηθική υποστήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια καθώς επίσης και στο μεταπτυχιακό φοιτητή Hamdan Hamdan του εργαστηρίου της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής για τη βοήθεια του στη συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης θερμά ευχαριστώ τον ξάδερφό μου Συγγελάκη Εμμανουήλ και το κ. Οικονόμου Νίκο, επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, για τη βοήθεια που μου πρόσφεραν κατά τη συλλογή των δεδομένων.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον καθηγητή κ. Βαφείδη και στον Μεταλλειολόγο Μηχανικό κ. Ζερβάκη Γεώργιο που μου υπέδειξαν και μου ανέθεσαν το θέμα της εργασίας αυτής, τον κ. Βαφείδη για το ενδιαφέρον του στο άτομο μου και για την καθοδήγηση του σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και τον κ. Ζερβάκη για την εμπιστοσύνη του και την πολύτιμη συνεργασία του στο χώρο του λατομείου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της επιτροπής που δέχτηκαν να εξετάσουν την παρούσα εργασία καθώς επίσης όλα τα αγαπημένα μου άτομα που ήταν όλα αυτά τα χρόνια στο πλάι μου.

*Στη μνήμη
του αγαπημένου μου
παππού Ιωάννη*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αναφέρεται στη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ για τον προσδιορισμό έγκοιλων στο κύριο «σώμα» του ασβεστόλιθου στο λατομείο αδρανών στο χωριό Ζωφόροι ,στο Ηράκλειο Κρήτης.

Στο χώρο εξόρυξης του λατομείου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας σε κάναβο διαστάσεων 108m x 24m. Ο κάναβος αποτελείτο από 5 γραμμές μελέτης μήκους 108m. Οι μετρήσεις έγιναν με τη διάταξη του διπόλου – διπόλου. Στις ίδιες γραμμές μελέτης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με γεωραντάρ και κεραίες των 110MHz για σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Για την επεξεργασία των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν το πρόγραμμα RES2DINV για τη δημιουργία κάθετων τομών του υπεδάφους, το TRANSFORM για οριζόντιες τομές του υπεδάφους και το T3D για τη δημιουργία τρισδιάστατου ομοιώματος της περιοχής μελέτης. Για τις μετρήσεις του γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκαν το σύστημα pulseEKKO1000 για την καταγραφή των εικόνων του γεωραντάρ και το MATLAB για την εφαρμογή φίλτρων στις προκύπτουσες εικόνες.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν 3 θέσεις στις οποίες εμφανίζονται κοιλότητες με άργιλο. Οι θέσεις αυτές είναι στα 27m – 41m στις γραμμές 2 έως 5, στα 56m – 68m στις γραμμές 2 και 5 και στα 72m – 98m σ' όλες τις γραμμές.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1** Ανάπτυξη γεωφυσικής τεχνολογίας
- 1.2** Παραδείγματα εφαρμογής γεωφυσικών μεθόδων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

- 2.1** Εισαγωγή
- 2.2** Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης
- 2.3** Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη
- 2.4** Φαινόμενη ειδική αντίσταση
- 2.5** Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων
- 2.6** Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

- 3.1** Εισαγωγή.
- 3.2** Θεωρία
- 3.3** Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων
- 3.4** Αντιστροφή των δεδομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΥΠΕΔΑΦΕΙΟ ΡΑΝΤΑΡ

- 4.1** Ιστορία του υπεδάφιου ραντάρ
- 4.2** Εφαρμογές
- 4.3** Αρχή λειτουργίας του υπεδάφιου ραντάρ

4.4 Σχεδιασμός διασκόπησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΛΑΤΟΜΕΙΟ ΖΩΦΟΡΩΝ

- 5.1** Γεωλογία της περιοχής
- 5.2** Στοιχεία λατομικού χώρου
- 5.3** Μετρήσεις ηλεκτρικής μεθόδου
- 5.4** Επεξεργασία ηλεκτρικών μετρήσεων
- 5.5** Μετρήσεις με γεωραντάρ.
- 5.6** Επεξεργασία μετρήσεων του γεωραντάρ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

- 6.1** Ηλεκτρική τομογραφία
- 6.2** Επεξεργασία για δημιουργία οριζόντιων τομών
- 6.3** Τρισδιάστατο ομοίωμα της περιοχής μελέτης
- 6.4** Αποτελέσματα από τις μετρήσεις του γεωραντάρ
- 6.5** Συμπεράσματα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγικά

1.1 Ανάπτυξη γεωφυσικής τεχνολογίας

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 παρατηρήθηκε αξιόλογη ανάπτυξη στις ήδη υπάρχουσες τεχνικές που εφαρμόζονταν για τη μελέτη και περιγραφή των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Αρχικά χρησιμοποιούνταν ένας περιορισμένος αριθμός συστημάτων απεικόνισης του εδάφους, χαμηλής μάλιστα ποιότητας, τα οποία δεν προσέδιδαν επαρκείς πληροφορίες για κατανόηση και μελέτη του υπεδάφους. Μακροχρόνια ερευνητικά προγράμματα οδήγησαν στην ανάπτυξη πρωτοποριακών μεθόδων στη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων.

Οι γεωφυσικές τεχνικές τα τελευταία χρόνια παρουσίασαν σημαντική τεχνολογική άνθιση με αποτέλεσμα να εφαρμοστούν στην απεικόνιση των χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Το μειωμένο κόστος που χαρακτηρίζει τις μεθόδους αυτές, αλλά και το ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον των εταιρειών για μελέτη των υπεδάφειων γεωλογικών δομών, κατέστησαν τις έρευνες γεωφυσικής διασκόπησης αναπόσπαστο τμήμα μεγάλων ερευνητικών προγραμμάτων.

Υπάρχουν οι βαρυτομετρικές μέθοδοι που βασίζονται στη μέτρηση της έντασης του βαρυτικού πεδίου της γης, οι μέθοδοι όμως αυτές δεν χρησιμοποιούνται συχνά. Άλλες γεωφυσικές μέθοδοι είναι οι μαγνητικές οι οποίες καταγράφουν τις μαγνητικές ανωμαλίες. Επίσης υπάρχουν οι ηλεκτρικές μέθοδοι που μετρούν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων. Τέλος υπάρχουν οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι που επίσης καθορίζουν την γεωηλεκτρική δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών σε

σχέση με τις ηλεκτρικές μεθόδους είναι η εφαρμογή τους σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατόν να γίνει ηλεκτρική σύνδεση με το έδαφος λόγω μεγάλης ειδικής αντίστασης. (Βαφείδης, 2000)

Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται περισσότερες από μια μέθοδοι, όπου τα αποτελέσματα της μιας μεθόδου επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της άλλης ή δίδουν περισσότερες λεπτομέρειες. Οι γεωφυσικές μέθοδοι εφαρμόζονται σε διάφορα περιβάλλοντα και ανάλογα με το στόχο της έρευνας επιλέγεται η καταλληλότερη μέθοδος ή ο καλύτερος συνδυασμός μεθόδων.

1.2 Παραδείγματα εφαρμογής γεωφυσικών μεθόδων

Ο Dahlin (1996) πραγματοποίησε μετρήσεις με την ηλεκτρική μέθοδο σε διάφορες περιοχές για γεωτεχνικούς και περιβαλλοντικούς λόγους. Η πρώτη περιοχή βρίσκεται στην νότια Σουηδία, όπου λεπτόκοκκα οργανικά ιζήματα καλύπτουν τα χονδρόκοκκα ιζήματα και είναι πάχους μέχρι 20m. Το πάχος των χονδρόκοκκων ιζημάτων κυμαίνεται από 10m έως 20m. Σ' αυτό το παράδειγμα χαρτογραφήθηκε το κάλυμμα λεπτόκοκκου ιζήματος για γεωτεχνικούς σκοπούς. Η επόμενη περιοχή βρίσκεται στο Gladokvarn όπου ο γνεύσιος καλύπτεται από καλλιέργειες και μεταπλειστοκαινικά ιζήματα. Το υπόβαθρο εμφανίζει υψηλή αντίσταση τυπική για πυριγενή πετρώματα. Στη συνέχεια αναφέρεται η περιοχή Ostra Odarslov που επιλέχθηκε για να δοκιμαστεί η ικανότητα να χαρτογραφηθούν αλλαγές στη λιθολογία, που πιθανόν είναι σημαντικές για γεωτεχνικούς και υδρογεωλογικούς λόγους. Μετρήθηκε ένα δολεριτικό πρόχωμα που παρεμβάλεται στο σχιστόλιθο, ο οποίος καλύπτεται από αργιλώδη εδάφη. Οι μεταβολές της ειδικής αντίστασης στο σχιστόλιθο δείχνουν ότι η ποιότητα του πετρώματος ποικίλει. Τέλος, στην περιοχή

Torreberga, αναφέρεται ότι πραγματοποιήθηκαν υδρογεωλογικές έρευνες συμπεριλαμβάνοντας τη μελέτη δισδιάστατης κατανομής της ειδικής αντίστασης για τη διαχείριση των πηγών του νερού. Στην περιοχή εμφανίζεται μια κοιλάδα γεμάτη άργιλο πάνω από στρώμα ασβεστόλιθου. Στο αργιλικό στρώμα υπάρχουν φακοί από χονδρόκοκκο ίζημα οι οποίοι αποτελούν διόδους διείσδυσης του υπόγειου νερού. Οι μετρήσεις έδειξαν καθαρά μια περιοχή με υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση που αντιστοιχεί στο χονδρόκοκκο ίζημα.

Από τα παραπάνω παραδείγματα προέκυψε ότι η δισδιάστατη μελέτη της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο γεωλογικής χαρτογράφησης για χρήση στις περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές εφαρμογές. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι η σχετικά μικρή ευαισθησία στο θόρυβο. Ο σχεδιασμός ψευδοτομών παρέχει έλεγχο στην ποιότητα δεδομένων και μπορεί γι' αυτό το λόγο να παρουσιαστεί παράλληλα με τις γεωηλεκτρικές τομές σαν ένας δείκτης ποιότητας.

Οι Zhou, Beck και Stephenson (2000) χρησιμοποίησαν την ηλεκτρική τομογραφία (η τομογραφία της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης) με την διάταξη διπόλου – διπόλου για να χαρτογραφήσουν επιφανειακά στρώματα στη νότια Ιντιάνα όπου ασβεστόλιθοι καλύπτονταν από αργιλώδη χώματα.

Η περιοχή καρστ συχνά χαρακτηρίζεται από καθιζήσεις, κατολισθήσεις και σπηλιές. Σε πολλές περιοχές, όπως και στην συγκεκριμένη περιοχή, μπορεί επίσης να περιέχουν μεγάλους ανθρακικής προέλευσης ογκόλιθους που προέρχονται από φαινόμενα διαλυτοποίησης. (pinnacles).

Η υψηλή αντίθεση στις τιμές της ειδικής αντίστασης ανάμεσα σε ανθρακικά πετρώματα και σε αργιλώδη χώματα ευνοεί τη χρήση της μεθόδου της ειδικής

αντίστασης για την απεικόνιση των ορίων μεταξύ του ασβεστολιθικού στρώματος και του υπερκείμενου υλικού. Σε σύγκριση με άλλες διατάξεις η διπόλου – διπόλου παρέχει την υψηλότερη ανάλυση και είναι περισσότερο ευαίσθητη σε πλευρικές μεταβολές Στην ηλεκτρική τομογραφία (ERT) πραγματοποιείται, αυτόματη συλλογή δεδομένων. Παρουσιάζονται όμως περιορισμοί όσον αφορά την ποιότητα των δεδομένων και επίσης την απεικόνιση απότομης αλλαγής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Zhou, Beck και Stephenson, 2000).

Συγκρίνοντας το βάθος εμφάνισης του ασβεστόλιθου που καθορίστηκε από προυπάρχουσες γεωτρήσεις με αυτό που προέκυψε από τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας έδειξε μια μέση διαφορά 2,4m με μέγιστο 10m. Σε θέσεις όπου η παραπάνω διαφορά γίνεται μέγιστη εντοπίστηκαν ασβεστολιθικοί ογκόλιθοι.

Ο Smith (1986) τροποποίησε την διάταξη Schlumberger και τη χρησιμοποίησε σε περιοχή με καρστ στη βόρειο-κεντρική Φλώριδα για να ανιχνεύσει έγκοιλα γεμάτες με αέρα και συστήματα σπηλιών. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μια παχιά ακολουθία ασβεστόλιθων του Ιωκαίνου και νεώτερων με ένα ρηχό υδροφόρο ορίζοντα και καλά διαμορφωμένα χαρακτηριστικά καρστ. Ενεργή διάλυτοποίηση μέσα στις ανθρακικές μονάδες συνεισφέρουν στο σχηματισμό υπόγειων κενών και εδαφικών καθιζήσεων. Σε αυτή την περιοχή συγκρίθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με άλλες μεθόδους.

Η διάταξη πόλου – διπόλου έχει κριθεί ως πιο επιτυχής για τον εντοπισμό υποκείμενων κοιλοτήτων σε ασβεστόλιθους από το υπεδάφειο ραντάρ (GPR) και την βαρυτομετρική μέθοδο (Smith, 1986). Σπηλιές γεμάτες αέρα είναι εύκολα ανιχνεύσιμες γιατί οι κοιλότητες έχουν άπειρη αντίσταση. Σπηλιές κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα σε ασβεστόλιθους προκαλούν τιμές σχετικά χαμηλής αντίστασης λόγω των πλούσιων σε ιόντα ανθρακικών διαλυμάτων του υπόγειου νερού.

Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι η υπό μελέτη περιοχή είναι γεωηλεκτρικά ομοιόμορφη και τα έγκοιλα, είτε γεμάτα με αέρα είτε με νερό, εντοπίστηκαν από τις ανωμαλίες στην τιμή της ειδικής αντίστασης.

Ο Guerin και η Benderitter (1995) συνδυάζουν στην περιοχή του ποταμού Le Canard τη μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης και την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο. Η περιοχή έρευνας είναι η πηγή του ποταμού Le Canard. Στη περιοχή μελέτης υπάρχουν σχεδόν οριζόντια στρώματα από ημιπερατή μάργα που εναλλάσσονται με μαργαϊκό ασβεστόλιθο.

Σκοπός της έρευνας είναι ο εντοπισμός καρστικού αγωγού που αποτελεί πολύπλοκο στόχο να ανιχνευτεί από γεωφυσική άποψη όταν είναι πολύ βαθύς ή πολύ μικρός και όταν το υπερκείμενο υλικό είναι πολύ αγώγιμο.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος επιλέχθηκε εξαιτίας της υψηλής ανάλυσης και της δυνατότητας να μετρά την ειδική ηλεκτρική αντίσταση στο νερό και την άργιλο. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε μαζί με μεθόδους ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που επιτρέπουν τη ρύθμιση των ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων. Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF θεωρείται ένα ισχυρό εργαλείο και για τον εντοπισμό λεπτών ζωνών διάρρηξης και την στρωματογραφία επιφανειακών σχηματισμών.

Τα δεδομένα της VLF δείχνουν καθαρά, στο κεντρικό μέρος της περιοχής, ότι ο καρστικός αγωγός δεν συμπίπτει με τον άξονα ανωμαλιών αλλά με το όριο μεταξύ αγώγιμης και ηλεκτρικά ανθεκτικής περιοχής. Τα αποτελέσματα από τη διάταξη της ηλεκτρικής αντίστασης Wenner επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα της VLF. Ο χάρτης ηλεκτρικών αντιστάσεων δείχνει μια κανονική διαβάθμιση με την ειδική αντίσταση να μειώνεται από δυτικά προς τα ανατολικά.

Ο Sumanovac (2001) συνδυάζει τη σεισμική και την ηλεκτρική μέθοδο σε περιοχή της Κροατίας. Εκεί υπάρχει ένα περιβάλλον καρστ. Πάνω από το καρστ υπάρχει περίπου ένα μέτρο χώμα. Τα κυρίαρχα πετρώματα είναι δολομίτες, ενώ οι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται στα ανώτερα στρώματα, κυρίως με μορφή φακών. Οι ασβεστόλιθοι βρίσκονται σε συμφωνία στρωματογραφικά με τα παλαιότερα ιζήματα, και φαινόμενα καρστ, όπως οι καταβυθίσεις, οι κατολισθήσεις και οι σπηλιές, αναπτύσσονται σε αυτούς.

Ο κύριος στόχος μιας εξερεύνησης είναι να αποκτηθεί ένα ακριβές τρισδιάστατο γεωλογικό πρότυπο του υπεδάφους. Οι γεωφυσικές μέθοδοι παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην δημιουργία ενός τέτοιου προτύπου για δύο κύριους λόγους. Αρχικά, βάσει των γεωφυσικών αποτελεσμάτων μπορούν να καθοριστούν οι βέλτιστες θέσεις και ο αριθμός των γεωτρήσεων εξερεύνησης. Δεύτερον, οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να παρέχουν καλύτερη κάλυψη σε μια περιοχή εξερεύνησης.

Η σεισμική ανάκλαση χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ασυνεχειών στα πετρώματα. Η σεισμική διάθλαση έχει θεωρηθεί ως χρήσιμο εργαλείο για την ακριβή χαρτογράφηση των ρηχών καρστικών ζωνών και για την ακριβή ανίχνευση των ζωνών διάρρηξης κοντά στην επιφάνεια.

Η επεξεργασία των ηλεκτρικών αντιστάσεων επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση των κατάλληλων τεχνικών αντιστροφής. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις: μονοδιάστατη αντιστροφή, και δισδιάστατη αντιστροφή.

Στην υπό μελέτη περιοχή έχουν βρεθεί 3 ζώνες με βάση την ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Μια ζώνη με χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση στο κεντρικό μέρος της περιοχής που εξερευνήθηκε, με κατεύθυνση N-B. Η προϋπάρχουσα πηγή συνδέεται πιθανότατα με αυτήν την ζώνη, αλλά φαίνεται ότι περισσότερο νερό ρέει

δίπλα στη πηγή. Η άλλη ζώνη δείχνει τα συμπαγή και ξηρά ανθρακικά άλατα, και η τρίτη ζώνη αντιστοιχεί σε θραυσμένα ανθρακικά πετρώματα με καλή παροχή νερού. Τρεις ζώνες έχουν εντοπισθεί και από τη σεισμική διάθλαση.

Όμως και το υπεδάφειο ραντάρ είναι πολύ χρήσιμο στην έρευνα. Οι Chamberlain, Seller, Proctor και Coard (2000), χρησιμοποίησαν το υπεδάφειο ραντάρ για την ανίχνευση κενών σε εμφανίσεις ασβεστόλιθου. Οι σπηλιές Kitley βρίσκονται σε μια εμφάνιση του ασβεστόλιθου και περιέχουν θραύσματα και διασκορπισμένα ιζήματα σπηλιών της πλειστοκαινικής και ολοκαινικής εποχής, με καλά-συντηρημένες συναθροίσεις υπολειμμάτων από την πανίδα. Στους ασβεστόλιθους, οι σπηλιές διαμορφώνουν φυσικές παγίδες ιζημάτων και περιέχουν συχνά καταθέσεις όπου μπορούν να συντηρηθούν τα αρχαιολογικά υπολείμματα και η πανίδα.

Οι προηγούμενες δημοσιευμένες μελέτες προτείνουν ότι το ραντάρ (GPR) είναι επίσης αποτελεσματικό στην ανίχνευση μικρών (δηλ. με διάμετρος < 10m) σπηλιών και σχισμών στο περιβάλλον καρστ (Collins, 1994; Benito, 1995; Harris, 1995)

Τα συστήματα GPR ανιχνεύουν την ανακλώμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα φορητό πομπό (Millsom, 1996 Conyers & Goodman, 1997). Το βάθος της διείσδυσης των κυμάτων του GPR εξαρτάται από τη συχνότητα του σήματος ραντάρ καθώς επίσης και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υποστρώματος. Η ισχύς του πομπού, η ευαισθησία του δέκτη και η αριθμητική επεξεργασία σήματος παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο.

Ένα σύστημα ραντάρ pulseEKKO 100 χρησιμοποιήθηκε με κεντρική συχνότητα κεραιών 100 MHz. Τα κενά που είναι γεμάτα αέρα και τα στρώματα από κορεσμένα σε νερό ιζήματα είναι ισχυροί ανακλαστήρες των κυμάτων του ραντάρ.

Στην ίδια περιοχή οι Chamberlain, Seller, Proctor και Coard (2000) πραγματοποίησαν ηλεκτρική διασκόπηση χρησιμοποιώντας το Geoscan RM4 και τη διάταξη δίδυμου ηλεκτροδίου. Σε αντίθεση με την έρευνα του ραντάρ, η έρευνα ειδικής αντίστασης επηρεάστηκε πολύ από την παρουσία έγκοιλου που προκάλεσε την υψηλής αντίστασης ανωμαλία στο κέντρο της υπο μελέτης περιοχής.

Ενδιαφέρουσες ανωμαλίες βρέθηκαν μέχρι 30m κάτω από την επιφάνεια. Σε μια τοποθεσία ανιχνεύσανε ευδιάκριτες ανωμαλίες σε διάφορα βάθη, και αυτή η περιοχή ερευνήθηκε πιο λεπτομερώς με την καταγραφή επτά παράλληλων τομών μήκους 25m. Η ανάλυση των πλατών ήταν το τελικό στάδιο στην επεξεργασία των στοιχείων GPR. Μια μεγάλη ανωμαλία ανιχνεύτηκε αρχικά σε βάθος περίπου 13m κάτω από την επιφάνεια. Μια πολύ μικρότερη ανωμαλία βρέθηκε περίπου σε βάθος 5m λίγο ανατολικότερα από την πρώτη.

Μια από τις σημαντικότερες δυσκολίες είναι ότι οι αντανakλάσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προέρχονται από έναν ευρύ κώνο κάτω από κάθε σταθμό καταγραφής. Το γεγονός ότι η μεγάλη ανωμαλία που βρέθηκε με το GPR δεν ανιχνεύθηκε από την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δείχνει ότι το GPR ήταν καλύτερη τεχνική σε αυτές τις συνθήκες (Chamberlain, Seller, Proctor και Coard, 2000).

Στο οροπέδιο Lamalou υπάρχουν ασβεστολιθικοί σχηματισμοί που παρουσιάζουν κάρστ το οποίο επεκτείνεται 15 έως 70m κάτω από την επιφάνεια.

Ο κύριος στόχος της μελέτης αυτής (Al- fares, Bakalowicz, Gearing, Dukhan, 2002) ήταν να χαρτογραφηθεί το καρστ και να εξεταστεί η απόδοση του GPR σε καρστικό περιβάλλον.

Ένα ραντάρ pulseEKKO 100 χρησιμοποιήθηκε στην περιοχή με συχνότητα κεραίων 50 MHz. Τα αποτελέσματα δίνουν έμφαση στις δομές που χαρακτηρίζουν

το καρστικό περιβάλλον. Τα διαγράμματα του ραντάρ παρουσιάζουν διάφορες δομές που χαρακτηρίζουν το καρστικό υδροφόρο. Μια ρηχή ζώνη, που χαρακτηρίζεται από πολλαπλές ανακλάσεις, περιορίζεται στη βάση της από ευδιάκριτη διεπιφάνεια. Αυτή η ζώνη είναι έντονα ανομοιογενής. Μια βαθύτερη ζώνη αντιστοιχεί σε σκούρο γκρι συνεκτικό ασβεστόλιθο στη βάση της οποίας παρατηρείται επίπεδη διαστρωμάτωση. Τα ασθενή σήματα του ραντάρ σ' αυτή τη ζώνη οφείλονται στην απουσία των ανακλαστήρων και στη ομοιογένεια των φυσικών και δομικών ιδιοτήτων του στρώματος.

Από επίσκεψη στη σπηλιά από κατακόρυφο άνοιγμα της φαίνεται ότι η θέση και η πραγματική γεωμετρία της σπηλιάς αντιστοιχούν ακριβώς στο σχεδιάγραμμα του GPR.

Στην πόλη Shirakawa της Ιαπωνίας, εμφανίζονται δακτυλικό ίζημα και ηφαιστειακή τέφρα. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε από τους Toshioka, Tsuchida και Sasahara (1995) στις μετρήσεις GPR ήταν το σύστημα SIR 10.

Σκοπός τους ήταν να εντοπίσουν την κατανομή των ρωγμών όχι μόνο στην επιφάνεια αλλά και στο υπέδαφος. Η τεχνική GPR παρέχει πληροφορίες της διηλεκτρικής σταθεράς στα πετρώματα και τους σχηματισμούς. Ανακλώμενα κύματα εμφανίζονται στο όριο μεταξύ δύο μέσων που έχουν διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης.

Με τη χρησιμοποίηση του GPR, καταγράφηκαν ανακλώμενα κύματα από τις ρωγμές μέσα στο βράχο προερχόμενα από βάθος περίπου 4m. Όταν η ρωγμή περιέχει άργιλο ή νερό, τα ανακλώμενα κύματα διακρίνονται ευκολότερα. Η σύγκριση των καταγραφών του ραντάρ με τις ορατές ρωγμές στην επιφάνεια του βράχου, επιβεβαίωσε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ανακλάστηκαν από ρωγμές που περιέχουν νερό.

Συγκριτικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας κεραίες τεσσάρων διαφορετικών συχνοτήτων με σκοπό τον καθορισμό του βάθους διασκόπησης ρωγμών συναρτήσει της συχνότητας. Οι κεντρικές συχνότητες αυτών των κεραιών ήταν 100, 300, 500 και 900 MHz, αντίστοιχα.

Από την σύγκριση των καταγραφών προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Το μέγιστο βάθος διασκόπησης είναι περίπου 4m για την κεραία 100 MHz, 4m για την κεραία 300 MHz, 2,7m για την κεραία 500 MHz και 1,5m για την κεραία 900 MHz. Οπότε το μέγιστο βάθος λειτουργίας επιτυγχάνεται με τις κεραίες χαμηλής συχνότητας.
- Οι κεραίες υψηλής συχνότητας παρέχουν καλύτερη ανάλυση των ανακλώμενων σημάτων από μικρότερες ρωγμές.
- Η κεραία 500 MHz δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα από τη σκοπιά και του βάθους διασκόπησης και της ανάλυσης. Κύματα δεν ανακλώνται από ξηρές ή κενές ρωγμές.

Οι Doolittle και Collins (1998) χρησιμοποίησαν την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και το GPR σε περιοχές της Φλόριδας και της Πενσυλβανίας για να ανιχνεύσουν και να απεικονίσουν φαινόμενα διαλυτοποίησης. Στη Φλόριδα η περιοχή μελέτης αποτελείται από σχετικά παχιά στρώματα άμμων που επικαλύπτουν πηλώδη θαλάσσια ιζήματα και ασβεστόλιθο. Στη περιοχή παρουσιάζεται μια εδαφική κατακρήμνιση. Η περιοχή μελέτης στη Πενσυλβανία χαρακτηρίζεται από σειρά παράλληλων, στενών κοιλάδων και οροσειρών. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται σε κοιλάδα που διαμορφώθηκε σε πτυχωμένο στρώμα ασβεστόλιθου και δολομίτη.

Αυτές οι μέθοδοι δεν λειτουργούν εξίσου καλά σε όλα τα περιβάλλοντα και η αξιοπιστία στις πληροφορίες που προκύπτουν από τις έρευνες ποικίλει. Η μελέτη έδειξε ότι ενώ και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και το ραντάρ μπορούν να

χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλον καρστ, καμία τεχνική δεν παρέχει σαφή αποτελέσματα. Η ερμηνεία ήταν συχνά ασαφής λόγω του περιορισμένου βάθους διασκόπησης και της περιορισμένης ανάλυσης.

Στην Φλώριδα το ραντάρ έδειξε δυο ζώνες. Η πρώτη αντιπροσωπεύει το όριο των αμμώδων στρωμάτων από τον αργιλικό ορίζοντα ή το στρώμα του ασβεστόλιθου. Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο βρέθηκε ότι στη περιοχή επικρατεί χαλαζιακή άμμος που είναι λιγότερη αγωγίμη από τα υποκείμενα θαλάσσια ιζήματα. Η χαμηλή φαινόμενη αγωγιμότητα σε μικρά βάθη αποδόθηκε σε μικρά ποσοστά αργίλου και υγρασίας στα αμμώδη στρώματα.

Στη Πενσυλβανία ραντάρ υπέδειξε πολλαπλές, παράλληλες διεπιφάνειες που πιστεύεται ότι αντιπροσωπεύουν επίπεδα διαστρωμάτωσης στον ασβεστόλιθο διαφορετικής υγρασίας. Στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο τα υπερκείμενα υλικά ήταν περισσότερο ηλεκτρικά αγωγίμη από τον υποκείμενο ασβεστόλιθο. Η αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες ανάμεσα σε αυτά τα δυο στρώματα ήταν σημαντική και μετρήσιμη.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων αυτών προέκυψε ότι στη περιοχή της Φλώριδας η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος ήταν λιγότερο ακριβής από το ραντάρ στην εκτίμηση του πάχους των αμμωδών επιφανειακών στρωμάτων. Αντίθετα στη περιοχή της Πενσυλβανίας η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος ήταν αποτελεσματικότερη από το ραντάρ για το καθορισμό του υποκείμενου στρώματος. Η μελέτη κατέδειξε ότι ενώ και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και το ραντάρ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα καρστ, καμία μέθοδος δεν παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ο Vogelsang (1987) χρησιμοποίησε την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο σε διάφορες περιοχές με σκοπό να εντοπίσει συστήματα καρστικών υδροφόρων οριζόντων στη Γερμανία και τη Μεσόγειο.

Στην περιοχή του ποταμού Lahn στη Γερμανία βρίσκεται ένας ασβεστολιθικός ύφαλος. Ανιχνεύθηκαν δυο είδη ανωμαλιών που μπορούν να αποδοθούν σε διαφορετικές γεωλογικές δομές οι οποίες επιβεβαιώθηκαν αργότερα από την λατομική δραστηριότητα.

Επίσης κοντά στην πηγή Aach εφαρμόστηκε η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος για να εντοπίσει το ρηχό υδροφόρο ορίζοντα. Ο μεγάλος αριθμός των ενδείξεων του καρστικού αγωγού σημαίνει ότι υπάρχει ροή του υπόγειου νερού μέσω επικοινωνούντων ρωγμών.

Στην περιοχή κοντά στο Brilon της Γερμανίας ο Vogelsang χρησιμοποίησε την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο για να εντοπίσει μια σπηλιά γεμάτη άργιλο. Από τα δεδομένα προέκυψε η προέκταση της σπηλιάς. Ένα ίχνος του τοίχου της σπηλιάς σε σχήμα αχλαδιού σχεδιάστηκε και μετά επιβεβαιώθηκε από γεωτρήσεις.

Σε περιοχή ανάμεσα στο Μέλανο Δρυμό και το Ρήνο, η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος έδειξε στα δυτικά το σύνορο μεταξύ του ψαμμίτη και του ασβεστόλιθου.

Οι Griffiths και Barker (1993) χρησιμοποίησαν την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Wenner σε διάφορες περιοχές με πολύπλοκη γεωλογία. Σκοπός των μετρήσεων πέρα από την υδρογεωλογική έρευνα ήταν η εξέταση της δυνατότητας απεικόνισης της γεωλογικής δομής.

Στην περιοχή Rungai της Ζιμπάμπουε ηλεκτρικές μετρήσεις έγιναν σε αποσαθρωμένα πετρώματα. Μια εξέταση της τομής έδειξε την παρουσία χαμηλής ειδικής αντίστασης αποσαθρωμένου πετρώματος. Σε αυτό το περιβάλλον υπάρχει

μετάβαση από πλήρως αποσαθρωμένο χαμηλής αντίστασης υλικό σε υψηλής ειδικής αντίστασης μη ρηγματωμένο πέτρωμα.

Στην περιοχή της Mhativa η ηλεκτρική διακσόπηση πραγματοποιήθηκε κατά πλάτος μιας ρηχής κοιλάδας. Οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης έδειξαν μια ζώνη χαμηλής ειδικής αντίστασης περίπου 40m πλατιά, στο κέντρο της τομής. Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι η βυθιζόμενη χαμηλής ειδικής αντίστασης (πιθανόν αποσαθρωμένη) ζώνη [στο κάτω μέρος της τομής.\(προσανατολισμός\)](#)

Ηλεκτρικές μετρήσεις έγιναν στην άκρη της λεκάνης του Staffordshire στην Αγγλία. Στη γεωηλεκτρική τομή οι αλλαγές στην ειδική αντίσταση έδειξαν τους πλίνθους (Mudstone) που απεικονίζονται σε χαμηλές ειδικές αντιστάσεις. Οι πολύ υψηλές τιμές της ειδικής αντίστασης αντιστοιχούν στα στρώματα του σχηματισμού Cannock τα οποία καλύπτονταν από χαλίκια.

Τέλος στην περιοχή του Staffordshire ήταν γνωστή η παρουσία υφάλμυρου υπόγειου νερού. Οι ψαμμίτες και οι πλίνθοι σε αυτή την περιοχή καλύπτονταν από ιζήματα του ποταμού Trent. Σκοπός ήταν να εντοπισθεί ο ρηχός υδροφόρος ορίζοντας. Η παρουσία του πολύ αλμυρού υπόγειου νερού έγινε φανερή από τις χαμηλές ειδικές αντιστάσεις. Στις μετρήσεις φάνηκε μια μεταβατική ζώνη από την περιοχή του γλυκού προς το υφάλμυρο υπόγειο νερό.

Από τα παραδείγματα στις περιοχές της Ζιμπάμπουε και της Αγγλίας προέκυψε ότι με τον διαθέσιμο ως τότε εξοπλισμό και τα προγράμματα, σε περιοχές όχι πολύ ανομοιογενείς υπάρχει καλή απεικόνιση του υπεδάφους για βάθη μεταξύ 100 και 200m.

Τέλος, ο Hamdan αναφέρεται σε μια μελέτη στο νομό Χανίων της Κρήτης όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης για τον εντοπισμό των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής για υδρογεωλογικούς σκοπούς.

Η λεκάνη της περιοχής χαρακτηρίζεται από τρεις κύριους γεωλογικούς σχηματισμούς: τα ανθρακικά πετρώματα, τους Φυλλίτες – Χαλαζίτες και νεογενείς σχηματισμούς οι οποίοι είναι ανθρακικής προέλευσης με ανθρακικό συνδετικό υλικό και με γνώρισμά τους την υψηλή υδροπερατότητά τους.

Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι στο νότιο τμήμα παρατηρούνται οι φυλλίτες ως υπόβαθρο και το πιο πιθανόν είναι να υπάρχουν οι ασβεστόλιθοι από κάτω, αλλά δεν εντοπίστηκαν από τις βυθοσκοπήσεις. Στο ανατολικό τμήμα παρατηρούνται οι ασβεστόλιθοι που έχουν ανυψωθεί αρκετά κοντά στην επιφάνεια χωρίς να καλύπτονται από τους φυλλίτες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

2.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης άρχισαν να εφαρμόζονται στη μελέτη του υπεδάφους με την αρχή του εικοστού αιώνα. Πρωτοπόροι στην έρευνα υπήρξαν ο Wenner και ιδιαίτερα ο Schlumberger που το βιβλίο του «Etude sur la Prospection Electrique du Sous-Sol» συνέβαλε σημαντικά στη διάδοση των ηλεκτρικών μεθόδων. Με τη χρησιμοποίηση των μεθόδων αυτών εντοπίστηκε φυσικό αέριο το 1923 στη Ρουμανία, αλατούχος δόμος το 1926 στη Γαλλία, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής τέτοιες εφαρμογές άρχισαν το 1925 (Yungul, 1996). Η συστηματική όμως εφαρμογή των ηλεκτρικών διασκοπήσεων άρχισε μετά το 1970 εκμεταλλευόμενη την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών που πρόσφεραν σημαντική βοήθεια τόσο στη συλλογή όσο και στην επεξεργασία των μετρήσεων.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι της γεωφυσικής διασκόπησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Η πρώτη κατηγορία βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων, και περιλαμβάνει:

- Μέθοδο του φυσικού δυναμικού
- Μέθοδο των τελλουρικών ρευμάτων

Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών τα οποία εξαρτώνται από παραγόμενα τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία, και περιλαμβάνει:

- Μέθοδο της ειδικής αντίστασης
- Μέθοδο της επαγόμενης πολικότητας

➤ Μέθοδο των ισοδυναμικών γραμμών

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία, στη Γεωθερμία, στην Κοιτασματολογία, στην Τεχνική Γεωλογία και στην Αρχαιολογία.

2.2 Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Είναι μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους της γεωφυσικής διασκόπησης. Ο όρος Γεωφυσική Διασκόπηση αναφέρεται στη μελέτη της δομής των απρόσιτων στην άμεση παρατήρηση στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με εφαρμογή των νόμων της Φυσικής, και έχει σαν στόχο της τον εντοπισμό περιοχών με οικονομική σημασία.

Με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παράγεται στο έδαφος με τεχνητό τρόπο ηλεκτρικό πεδίο. Οι ιδιότητες του πεδίου διαμορφώνονται από τη δομή του υπεδάφους. Συνεπώς ο καθορισμός των ιδιοτήτων του πεδίου οδηγεί στον καθορισμό της δομής του υπεδάφους. Η ποσότητα που μετριέται είναι η ηλεκτρική τάση και τελικός σκοπός είναι ο εντοπισμός δομών, οι οποίες παρουσιάζουν αντίθεση αντίστασης, δηλαδή διαφορετική ειδική ηλεκτρική αντίσταση από τα περιβάλλοντα πετρώματα.

2.3 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στον νόμο που διατύπωσε το 1827 ο George Simon Ohm (Robinson, 1988), σύμφωνα με τον οποίο αντίσταση R (σε Ohm) ενός αγωγού ονομάζεται ο σταθερός λόγος της διαφοράς

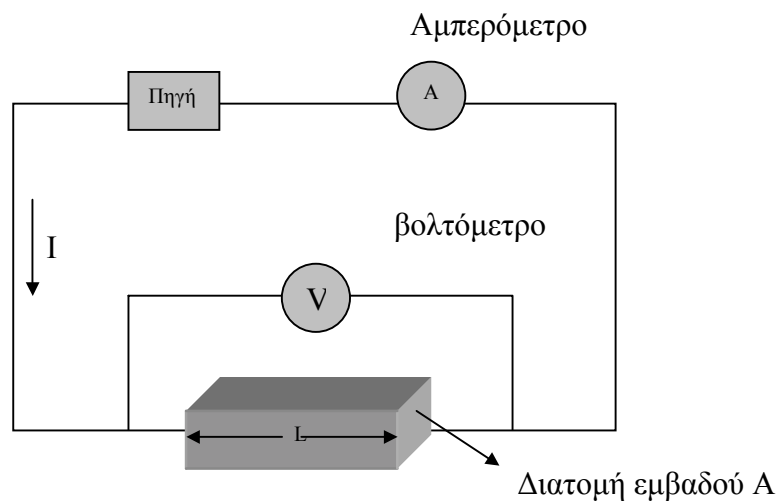
δυναμικού ΔV (σε Volt) που παρουσιάζεται στα άκρα του αγωγού, προς την ένταση I (σε Ampere) του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad 2.1$$

Η αντίσταση ενός ομογενούς αγωγού είναι ανάλογη με το μήκος L του αγωγού, αντιστρόφως ανάλογη με το εμβαδόν A της τομής του αγωγού και εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία του.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad 2.2$$

όπου ρ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού του αγωγού.



Σχ.2.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) μονάδα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το 1 Ωm . Πολλές φορές όμως χρησιμοποιείται και η μονάδα 1 Ωcm και είναι 1 $\Omega\text{m} = 100 \Omega\text{cm}$. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και ορυκτών είναι μια από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και ορυκτών. Οι τιμές της κυμαίνονται από $10^{-6} \Omega\text{m}$ σε ορισμένα ορυκτά όπως είναι ο γραφίτης, μέχρι $10^{15} \Omega\text{m}$ σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Τα πετρώματα και τα ορυκτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^{-6} και $10^{-1} \Omega\text{m}$ χαρακτηρίζονται ως καλοί αγωγοί, ενώ κακοί αγωγοί θεωρούνται αυτά που έχουν ειδικές αντιστάσεις μεταξύ 10^8 και $10^{15} \Omega\text{m}$. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι: α) η λιθολογία των πετρωμάτων, β) το πορώδες των πετρωμάτων, γ) η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων, δ) η Θερμοκρασία των πετρωμάτων.

Τοποθετώντας δύο ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους συνδεδεμένα με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος δημιουργείται κλειστό κύκλωμα, στο οποίο η γη αποτελεί τον αγωγό του ηλεκτρικού ρεύματος. Το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον θετικό πόλο, ονομάζεται πηγή, ενώ το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο, ονομάζεται γείωση. Επειδή ο αέρας της ατμόσφαιρας είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, όλο το ρεύμα από το ηλεκτρόδιο μπαίνει στη γη.

Για την κατανόηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος θεωρείται ότι η γη είναι ομοιογενής και ισότροπη ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ . Επιπλέον τα ηλεκτρόδια θεωρούνται σημεία, δηλαδή οι εξισώσεις που προκύπτουν, ισχύουν για σημειακή πηγή και σημειακή γείωση.

Αρχικά η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων θεωρείται πολύ μεγάλη, ώστε να μπορεί να μελετηθεί το κάθε ηλεκτρόδιο ξεχωριστά. Το ηλεκτρόδιο πηγή

είναι θετικά φορτισμένο, με αποτέλεσμα η κίνηση των θετικών φορτίων να είναι από το ηλεκτρόδιο προς τη γη. Επειδή η γη θεωρείται ομοιογενής το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και οι γραμμές που απεικονίζουν τη ροή (γραμμές ρεύματος) μπορούν να θεωρηθούν ως ακτίνες ημισφαιρικών επιφανειών που έχουν κέντρο την πηγή. Η αντίσταση R στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που παρουσιάζει μία ημισφαιρική δομή ακτίνας d , δίνεται σύμφωνα με τη σχέση (2.2) από το γινόμενο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ με τον λόγο της ακτίνας d προς το εμβαδόν $2\pi d^2$ της ημισφαιρικής επιφάνειας.

$$R = \rho \frac{d}{2\pi d^2} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{1}{d} \quad 2.3$$

Η διαφορά ΔV_d του δυναμικού V_0 της πηγής από το δυναμικό V_d όλων των σημείων που απέχουν απόσταση d από την πηγή που προκαλείται από τη ροή ρεύματος, έντασης I , μέσα από την ημισφαιρική δομή είναι:

$$\Delta V_d = V_d - V_0 = IR = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{d} \quad 2.4$$

Η επιφάνεια που περιλαμβάνει όλα τα σημεία με το ίδιο δυναμικό ονομάζεται ισοδυναμική επιφάνεια.

Το δυναμικό στη γείωση, το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής είναι $-V_0$. Το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο έλκει τα θετικά ηλεκτρικά φορτία, με αποτέλεσμα οι γραμμές ρεύματος να συγκλίνουν προς αυτό από όλες τις διευθύνσεις. Μία ημισφαιρική δομή ακτίνας d με κέντρο τη γείωση θα παρουσιάζει αντίσταση R στη ροή του ρεύματος σύμφωνα με

τη σχέση (2.3). Η διαφορά μεταξύ του δυναμικού $-V_d$ όλων των σημείων που απέχουν απόσταση d από τη γείωση και του δυναμικού της γείωσης $-V_0$ θα είναι:

$$-\Delta V_d = -V_d - (-V_0) = V_0 - V_d = -IR = -\frac{I\rho}{2\pi d} \quad 2.5$$

Στην περίπτωση λοιπόν που το ηλεκτρόδιο είναι θετικά φορτισμένο, το ηλεκτρικό ρεύμα απομακρύνεται από αυτό, ενώ όταν το ηλεκτρόδιο είναι αρνητικά φορτισμένο, το ρεύμα συγκλίνει προς αυτό. Και στις δύο περιπτώσεις οι γραμμές ρεύματος αρχίζουν ακτινικά από το ηλεκτρόδιο, ενώ οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ημισφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές ρεύματος είναι κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες.



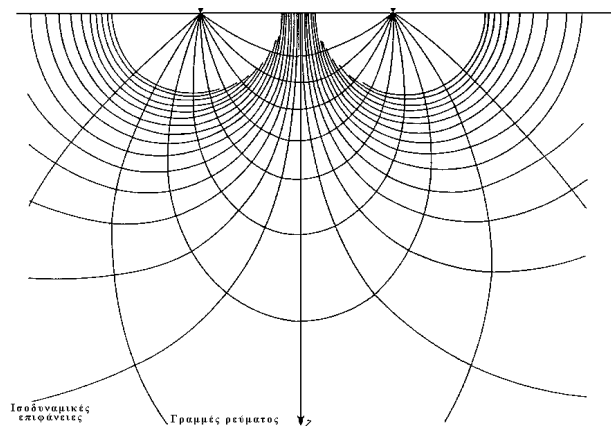
Σχ.2.2. Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομοιογενή και ισότροπη γη στην περίπτωση που δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Όταν η απόσταση των δύο ηλεκτροδίων θεωρηθεί μικρή, το ηλεκτρικό πεδίο του ενός ηλεκτροδίου αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο του άλλου ηλεκτροδίου, με αποτέλεσμα το δυναμικό σε ένα σημείο του υπεδάφους να ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών των ηλεκτρικών πεδίων των δύο ηλεκτροδίων.

Το συνολικό δυναμικό V σε ένα σημείο του υπεδάφους που απέχει αποστάσεις d_1 και d_2 από την πηγή και τη γείωση αντίστοιχα, ισούται με το άθροισμα του δυναμικού V_{d_1} που οφείλεται στην πηγή, με το δυναμικό V_{d_2} που οφείλεται στη γείωση:

$$V = V_{d_1} + V_{d_2} = V_{d_1} - V_0 + V_0 + V_{d_2} = \frac{Ip}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad 2.6$$

Με βάση τη σχέση (2.6) υπολογίζεται το δυναμικό σε όλα τα σημεία του υπεδάφους και γίνεται η σχεδίαση των ισοδυναμικών επιφανειών. Οι γραμμές ρεύματος σχεδιάζονται κάθετα στις ισοδυναμικές επιφάνειες. Τόσο οι γραμμές ρεύματος όσο και οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι συμμετρικές ως προς την ευθεία που τέμνει κάθετα και στο μέσο το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα δύο ηλεκτρόδια.



Σχ.2.3. Ροή ηλεκτρικού ρεύματος στην περίπτωση που δύο ηλεκτρόδια εισάγονται σε ομοιογενές και ισότροπο έδαφος (Dobrin, 1976).

Το σχήμα 2.3 ισχύει για κάθε επίπεδο που περιέχει τα δύο ηλεκτρόδια, ανεξάρτητα από τη γωνία κλίσης του ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

2.4 Φαινόμενη ειδική αντίσταση

Η αντίσταση που υπολογίζεται από την προηγούμενη σχέση εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα, και ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a).

Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από την κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος και από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων. Ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός και οδηγεί στον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων που θα περιγραφούν παρακάτω.

2.5 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων, το σχήμα 2.4 δείχνει τις τρεις πιο σημαντικές που είναι:

α) Διάταξη Wenner

Στη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις, δηλαδή, $AM = MN = NB = a$, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.α, έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_a = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I} \quad 2.7$$

Η ποσότητα

$$2\pi \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = 2\pi a \quad 2.8$$

ονομάζεται γεωμετρικός συντελεστής και συμβολίζεται με K. Η τιμή του μπορεί να υπολογιστεί αν οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι γνωστές.

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Wenner για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, δηλαδή κατακόρυφη ηλεκτρική διασκόπηση που δίνει την δομή του υπεδάφους, τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται κάθε φορά συμμετρικά ως προς ένα σημείο, που θεωρείται κέντρο της διασκόπησης.

Στην περίπτωση της ηλεκτρικής χαρτογράφησης, δηλαδή οριζόντια ηλεκτρική διασκόπηση με μετρήσεις σε μια γραμμή, το a παραμένει σταθερό και τα τέσσερα ηλεκτρόδια μεταφέρονται κατά μήκος γραμμής μελέτης. Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χαρτογραφείται στο κέντρο κάθε διάταξης.

Η διάταξη Wenner παρά τη γεωμετρική της απλότητα παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα, αφού κατά την πραγματοποίηση κάθε νέας μέτρησης πρέπει να μετακινούνται όλα τα ηλεκτρόδια.

β) Διάταξη Schlumberger

Στη διάταξη Schlumberger, τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B βρίσκονται σε απόσταση L και σε συμμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της διάταξης. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N είναι ανάμεσα στα A και B και σε απόσταση b από το κέντρο της διάταξης. Έτσι είναι $AB = 2L$ και $MN = 2b = I$ (σχήμα 2.4.b), η

απόσταση $2b$ μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση $2L$ μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Έτσι ο γεωμετρικός συντελεστής K θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$K=2\pi \left(\frac{1}{L-b} - \frac{1}{L+b} - \frac{1}{L+b} + \frac{1}{L-b} \right)^{-1} = (L^2 - b^2) \frac{\pi}{2b} \quad 2.9$$

Επειδή όμως ($L \gg b$) τότε $(L^2 - b^2) \sim L^2$, και έτσι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα υπολογίζεται από την σχέση

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2b} \frac{\Delta V}{i} \quad 2.10$$

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger για ηλεκτρική βυθοσκόπηση, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά. Αντίθετα η απόσταση για τα ηλεκτρόδια ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης.

Στην ηλεκτρική χαρτογράφηση τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής, ενώ η απόστασή τους παραμένει σταθερή όπως και στη διάταξη Wenner.

Η διάταξη Schlumberger είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μικρό χρόνο πραγματοποίησης των μετρήσεων, επειδή αντίθετα με τις άλλες διατάξεις απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος κατά την γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, γεγονός που βοηθάει επίσης στον περιορισμό των πιθανοτήτων ανεπιθύμητων επιδράσεων που μπορεί να οφείλονται σε τοπικές γεωλογικές ασυνέχειες.

γ) Διάταξη Διπόλου-Διπόλου

Από τις παραπάνω διατάξεις, η πιο σημαντική είναι αυτή του διπόλου–διπόλου, όπου η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος είναι ίση με a . Ομοίως a είναι και το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ζευγαριών των ηλεκτροδίων είναι μεγάλη και ίση με na ($n \gg 1$), όπως φαίνεται στο σχήμα (2.4.γ).

Ο γεωμετρικός συντελεστής K για την διάταξη διπόλου–διπόλου και για $n \gg 1$, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = \pi \epsilon_0 a (\eta + 1)(\eta + 2) \quad 2.11$$

και η φαινόμενη ειδική αντίσταση από την σχέση

$$\rho_a = \pi \epsilon_0 a (\eta + 1)(\eta + 2) \frac{\Delta V}{i} \quad 2.12$$

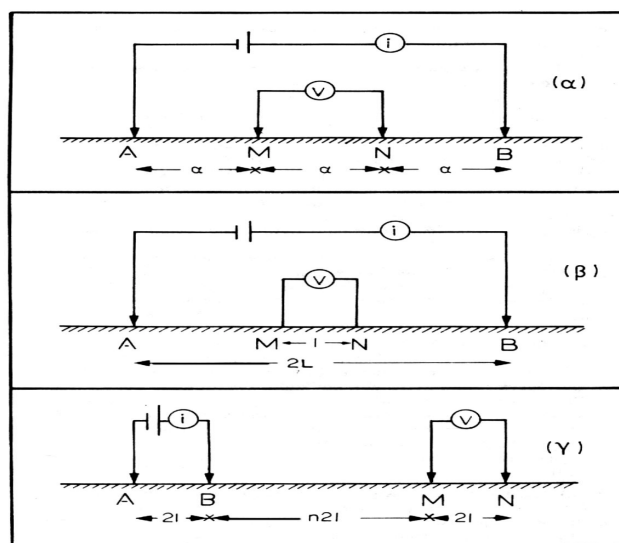
Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της διάταξης αποτελεί η απόσταση $2na$, ανάμεσα στα δίπολα ρεύματος και δυναμικού, που μπορεί να αυξηθεί αρκετά χωρίς να χρειάζονται μεγάλα μήκη καλωδίων. Η διάταξη περιορίζεται μόνο από τη δυνατότητα των καταγραφικών οργάνων και από τον εδαφικό θόρυβο.

Επίσης απλά αναφέρονται οι παρακάτω:

δ) **Τετραγωνική διάταξη.** Στη διάταξη αυτή τα τέσσερα ηλεκτρόδια βρίσκονται στις κορυφές τετραγώνου και αποτελούν τη βάση, πάνω στην οποία βρίσκεται το όργανο μέτρησης.

ε) **Διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου.** Μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από τη Wenner, αν τα ηλεκτρόδια N και B τοποθετηθούν σε απόσταση από τα άλλα δύο. Το

ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων, τα A και M, παραμένει σταθερό και το άλλο, τα N και B, μετακινείται στην περιοχή μελέτης. Θεωρώντας σταθερό το ηλεκτρικό πεδίο μεγάλες μεταβολές στη μετρούμενη τάση οφείλονται σε δομές που παρουσιάζουν αντίθεση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τα περιβάλλοντα πετρώματα, βρίσκονται κοντά στο κινούμενο ζευγάρι και ο εντοπισμός τους αποτελεί τον στόχο της μεθόδου.



Σχήμα 2.4. Διατάξεις Wenner (α), Schlumberger (β), διπόλου-διπόλου (γ)

(Παπαζάχος, 1986, σελ. 253).

Κάθε διάταξη παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τη θέση και τον σκοπό, για τον οποίο εφαρμόζεται. Η διάταξη Wenner δίνει την πιο έντονη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης, αλλά παρουσιάζει το φαινόμενο της διπλής κορυφής, δηλαδή μεγάλη τιμή πριν και μετά τη δομή, η οποία έχει μεγαλύτερη αντίσταση από τα περιβάλλοντα πετρώματα, ενώ δίνει μικρή τιμή ακριβώς πάνω από τη δομή. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση που η δομή έχει μικρότερη αντίσταση. Το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζει και η διάταξη Schlumberger με το επιπλέον πρόβλημα του μικρού σήματος, δηλαδή δε δίνει έντονα τη μεταβολή

της φαινόμενης αντίστασης. Το πρόβλημα της διπλής κορυφής δεν εμφανίζεται στις διατάξεις διπόλου – διπόλου και διδύμου ηλεκτροδίου. Η διάταξη διπόλου – διπόλου δίνει καθαρά τη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι, επειδή η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι μικρή περιορίζεται το βάθος διεύθυνσης του ηλεκτρικού ρεύματος και επομένως και η ευαισθησία της μεθόδου με την αύξηση του βάθους. Η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου έχει πλευρική διακριτική ικανότητα α , δηλαδή για να ξεχωρίσει δύο δομές πρέπει να απέχουν μεταξύ τους κατά την οριζόντια διεύθυνση απόσταση α , με α να είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων κάθε ζευγαριού και απαιτεί τη μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων για κάθε μέτρηση. Όμως η εύκολη και γρήγορη εφαρμογή της και η έντονη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης που δίνει, την έχουν κάνει μια από τις πιο διαδεδομένες διατάξεις.

2.6 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων.

Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση των γεωφυσικών διασκοπήσεων είναι πολύ σημαντική και επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων. Έτσι, η επιλογή πρέπει να γίνει ανάλογα με τον σκοπό της γεωφυσικής διασκόπησης σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

1. Λόγος σήματος προς θόρυβο

Ως προς τον παράγοντα αυτό κατά σειρά προτεραιότητας οι διατάξεις είναι: Wenner, Schlumberger, διπόλου-διπόλου.

2. Ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες

Οι οριζόντιες ανομοιογένειες φαίνεται να προκαλούν μεγαλύτερη ευαισθησία στην διάταξη διπόλου-διπόλου και λιγότερη σε Wenner και Schlumberger.

3. Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος

Οι διατάξεις Schlumberger και Wenner έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται σε βυθοσκοπήσεις και η συνεχώς αυξανόμενη απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος δίνει λεπτομερή ανάλυση της ειδικής αντίστασης σε βάθος, σε αντίθεση με τη διάταξη διπόλου-διπόλου.

4. Διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος (Επίδραση του επιδερμικού φαινομένου)

Το επιδερμικό φαινόμενο επηρεάζει την ικανότητα διείσδυσης σε μεγάλα βάθη. Η δυνατότητα μεγάλου ανοίγματος ηλεκτροδίων ρεύματος της διάταξης Schlumberger μαζί με την ευαισθησία σε βάθος που έχει, της παρέχουν ένα σαφές προβάδισμα.

5. Βάθος διασκόπησης

Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται κυρίως από το οριζόντιο ανάπτυγμα (απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων), που σημαίνει ότι η διάταξη Schlumberger πλεονεκτεί. Επίσης το βάθος διασκόπησης επηρεάζεται από τις ανομοιογένειες, την τοπογραφία, την κλίση των στρωμάτων, το ανάγλυφο του υπόβαθρου και από το μοντέλο των στρωμάτων του υπεδάφους.

6. Ευαισθησία στην μορφολογία του υπόβαθρου

Η διάταξη διπόλου-διπόλου υπερτερεί των άλλων διατάξεων στην περίπτωση των γεωλογικών ανωμαλιών.

7. Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.

Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δημιουργεί πύκνωση και αραίωση των ρευματικών γραμμών. Άρα οι διατάξεις των ηλεκτροδίων πρέπει να έχουν διεύθυνση παράλληλη με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ηλεκτρική Τομογραφία

3.1 Εισαγωγή.

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Ο όρος τομογραφία παράγεται από τη λέξη «τομή» και σημαίνει απεικόνιση τομής π.χ. του υπεδάφους. Στην ηλεκτρική τομογραφία απεικονίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η εύρεση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι δυνατή με τους αλγόριθμους αντιστροφής. Αν και η αντιστροφή είναι ένα δύσκολο μη γραμμικό πρόβλημα, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων του Gauss – Newton με εξομάλυνση αποφεύγει τις ασταθείς λύσεις και συγκλίνει γρήγορα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.

3.2. Θεωρία

Με την ηλεκτρική τομογραφία επιδιώκεται ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, δηλαδή η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος σε δύο ή τρεις διαστάσεις.

Επειδή δεν είναι εύκολος ο άμεσος υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος από μετρήσεις στην επιφάνεια της γης, υπολογίζεται αρχικά η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a , η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , σε αντίθεση με τη φαινόμενη που είναι φυσικώς ανύπαρκτη ποσότητα, είναι ιδιότητα των πετρωμάτων και των ορυκτών.

Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από τις ιδιότητες του πετρώματος όπως:

- α) την ορυκτολογική σύσταση
- β) το πορώδες, τη φύση και τη θερμοκρασία των περιεχόμενων ρευστών
- γ) τη κατάσταση ρηγμάτωσης
- δ) το πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων.

3.3 Τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων

Διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια της γης έχουν προταθεί για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Στην ηλεκτρική τομογραφία της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διπόλου – διπόλου.

Στη διάταξη διπόλου – διπόλου τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος αποτελούν το ένα δίπολο και απέχουν μεταξύ τους απόσταση a . Τα ηλεκτρόδια δυναμικού αποτελούν το άλλο δίπολο και απέχουν μεταξύ τους την ίδια απόσταση a , ενώ τα δύο δίπολα απέχουν απόσταση na , όπου n ακέραιος. Στη διάταξη αυτή η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \pi a n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I} \quad 3.1$$

όπου ΔV είναι η τάση και I η ένταση του ρεύματος.

Για τη συλλογή των δεδομένων, δηλαδή των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται κατά μήκος ευθείας γραμμής, διατηρώντας σταθερή απόσταση a μεταξύ τους. Κάθε ηλεκτρόδιο έχει έναν αριθμό για να είναι δυνατή η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων με αριθμητική σειρά. Για την πρώτη μέτρηση τα 1 και 2 ηλεκτρόδια αποτελούν το δίπολο ρεύματος, ενώ τα 3 και 4 αποτελούν το δίπολο δυναμικού. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόδια 2 και 3 αποτελούν το δίπολο ρεύματος, ενώ το δίπολο δυναμικού αποτελείται από τα ηλεκτρόδια 4 και 5 και ούτω καθεξής μέχρι να χρησιμοποιηθούν όλα τα ηλεκτρόδια. Όλες οι τιμές της φαινόμενης αντίστασης που υπολογίστηκαν, τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο από την επιφάνεια του εδάφους που ονομάζεται επίπεδο δεδομένων.

Αυξάνοντας την απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα, οι τιμές της φαινόμενης αντίστασης τοποθετούνται σε επίπεδο που βρίσκεται βαθύτερα από το προηγούμενο. Στην περίπτωση αυτή το δίπολο ρεύματος αποτελούν τα ηλεκτρόδια 1, 2 και το δίπολο δυναμικού τα ηλεκτρόδια 4, 5. Η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να χρησιμοποιηθούν όλα τα ηλεκτρόδια, οπότε και αυξάνουμε την απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα. Η απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα είναι πάντα ακέραιο πολλαπλάσιο της απόστασης των ηλεκτροδίων του διπόλου.

Όσο αυξάνεται η απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα, η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης επηρεάζεται από βαθύτερα τμήματα του υπεδάφους. Αλλά επειδή το δίπολο δυναμικού σταδιακά απομακρύνεται από το δίπολο ρεύματος, οι μετρήσεις αρχίζουν να περιέχουν όλο και περισσότερο θόρυβο. Για αξιόπιστα αποτελέσματα η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του n είναι 8. Για να

αντιμετωπίζεται το πρόβλημα αυτό αυξάνεται και η απόσταση των ηλεκτροδίων που αποτελούν τα δίπολα και η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους (σχ.3.1). Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των δεδομένων που δίνει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης



Σχ.3.1. Διάταξη των δεδομένων στην ψευδοτομή του υπεδάφους.

Ξεκινώντας από ένα αρχικό μοντέλο το επόμενο βήμα είναι η λύση του ευθέως προβλήματος, στο οποίο υπολογίζονται οι φαινόμενες αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό. Οι θεωρητικές αυτές τιμές, μαζί με τις πραγματικές μετρήσεις και τις παραμέτρους του μοντέλου καθορίζουν ένα σύστημα εξισώσεων. Ακολουθεί η διαδικασία της αντιστροφής, όπου επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων με αγνώστους τις παραμέτρους του μοντέλου. Υπολογίζεται με τη διαδικασία αυτή ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο. Η βελτίωση αφορά μόνο τις παραμέτρους του μοντέλου. Η διαδικασία συνεχίζεται υπολογίζοντας για το βελτιωμένο μοντέλο τις φαινόμενες αντιστάσεις, οι οποίες συγκρίνονται με τη σειρά τους με τις πραγματικές μετρήσεις.

Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο που να δίνει φαινόμενες αντιστάσεις όσο το δυνατό πιο κοντά στις μετρήσεις.

3.4 Αντιστροφή των δεδομένων

Με την αντιστροφή γίνεται ο υπολογισμός των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες αντιστάσεις. Στα περισσότερα γεωφυσικά προβλήματα που χρησιμοποιείται η αντιστροφή, τα δεδομένα συνδέονται με μη γραμμικές σχέσεις με τις παραμέτρους του μοντέλου. Έτσι και στην περίπτωση της αντιστροφής των φαινόμενων αντιστάσεων το πρόβλημα είναι μη γραμμικό. Επιπλέον το πρόβλημα είναι υπερπροσδιορισμένο, δηλαδή ο αριθμός των δεδομένων υπερβαίνει τον αριθμό των παραμέτρων του μοντέλου.

Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόζονται επαναληπτικές τεχνικές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αρχικά όμως γίνεται προσέγγιση του μη γραμμικού προβλήματος με γραμμικό με τη βοήθεια της σειράς Taylor.

Αν $m=(m_1, m_2, \dots, m_M)$ είναι οι παράμετροι του μοντέλου και $d_i=(d_1, d_2, \dots, d_N)$ $i=1, 2, \dots, N$ είναι οι μετρήσεις, η μη γραμμική σχέση που συνδέει τις μετρήσεις με τις παραμέτρους είναι:

$$d_i = f_i(m_1, m_2, \dots, m_M) + e \quad 3.2$$

όπου e το σφάλμα των μετρήσεων.

Αν το αρχικό μοντέλο είναι $m^0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_M^0)$ προσεγγίζοντας τη συνάρτηση f_i με σειρά Taylor γύρω από το m^0 προκύπτει:

$$f_i(m) = f_i(m_1^0 + \delta m_1, m_2^0 + \delta m_2, \dots, m_M^0 + \delta m_M) \quad 3.3$$

Το σφάλμα από τη σχέση (3.2) είναι:

$$e_i = d_i - f_i(m) \approx d_i - f_i(m^0) - \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{\partial f_i(m)}{\partial m_j} \right|_{m_j=m_j^0} \cdot \delta m_j \} \quad 3.4$$

Αν $\Delta d = d_i - f_i(m^0)$ είναι ο πίνακας στήλη των διαφορών ανάμεσα στις πραγματικές μετρήσεις και στις θεωρητικές, A ο πίνακας των μερικών παραγώγων της συνάρτησης f ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου, και x ο πίνακας γραμμή των διορθώσεων δm που πρέπει να προστεθούν στο m^0 για να προκύψει το βελτιωμένο μοντέλο, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$e_i \approx \Delta d - Ax \quad 3.5$$

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα e_i , αλλά ο πιο κατάλληλος βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Με τη μέθοδο αυτή ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων, δηλαδή η ποσότητα

$$q = \sum_{i=1}^N e_i^2 = e^T e \approx (\Delta d - Ax)^T (\Delta d - Ax) \quad 3.6$$

Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται παραγωγίζοντας το q ως προς x και εξισώνοντας την παράγωγο με μηδέν. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων επιβάλλεται περιορισμός στον πίνακα x με στόχο να μην αυξάνονται απότομα οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η λύση x προστίθεται στο αρχικό μοντέλο m^0 και προκύπτει το βελτιωμένο μοντέλο m^1 :

$$m^1 = m^0 + x \quad 3.7$$

Λόγω όμως του ότι η λύση προκύπτει από προσέγγιση μη γραμμικού προβλήματος είναι απαραίτητο να εφαρμοσθεί επαναληπτικά η όλη διαδικασία χρησιμοποιώντας το m^1 ως το νέο αρχικό μοντέλο. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) ,

$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta d^T \Delta d}{N}} \quad 3.8$$

όπου N ο αριθμός των μετρήσεων, δίνει ένα μέτρο του πόσο καλά ταιριάζουν οι θεωρητικές μετρήσεις με τις πραγματικές για κάθε μοντέλο. Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της αντιστροφής δεν έχει μονοσήμαντη λύση. Το μοντέλο με το μικρότερο σφάλμα δε σημαίνει ότι είναι γεωλογικά αποδεκτό. Από τη χρήση γεωλογικών πληροφοριών βελτιώνεται η αξιοπιστία του προκύπτοντος μοντέλου. Στην όλη διαδικασία οι υπολογισμοί γίνονται με τους λογάριθμους των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της φαινόμενης αντίστασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Υπεδάφειο Ραντάρ

4.1 Ιστορία του υπεδάφειου ραντάρ

Η τεχνολογία του ραντάρ (*Radio Detection And Ranging – R.A.D.A.R*) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά με σκοπό τον εντοπισμό και προσδιορισμό της θέσης κινητών και ακίνητων αντικειμένων από μεγάλες αποστάσεις. Οι πρώτοι σταθμοί ραντάρ κατασκευάστηκαν το 1930, ταυτόχρονα σχεδόν, στις Ηνωμένες Πολιτείες, Βρετανία, Γερμανία και πρώην ΕΣΣΔ. Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε πολύ κατά το Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο για τη ραδιοανίχνευση εχθρικών πλοίων και αεροπλάνων, αλλά και μεταπολεμικά σε ειρηνικούς τομείς, όπως η πλοήγηση πλοίων, αεροπλάνων και πυραύλων, στους τεχνητούς δορυφόρους, στη μετεωρολογία, στη ραδιοαστρονομία κ.α.

Αν και η ιδέα της χρήσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για την έρευνα του υπεδάφους ξεκίνησε στις αρχές του αιώνα, η τεχνολογία του υπεδάφειου ραντάρ ή γεωραντάρ (*Ground Penetrating Radar – G.P.R*) εισήχθη για πρώτη φορά το 1940. Η ανάπτυξη των συστημάτων ραδιοανίχνευσης και εντοπισμού, από το 1940 και έπειτα, οδήγησε στη δημιουργία αυτόνομων συστημάτων για τους σκοπούς της εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

Στα τέλη του 1950 οι σταθμοί ραντάρ των Η.Π.Α. ήταν σε θέση να παρακολουθούν τα αεροπλάνα που προσγειώνονταν στο αεροδρόμιο της Γροιλανδίας, τα οποία λόγω λανθασμένων ενδείξεων του υψομέτρου συντρίβονταν στον πάγο. Το γεγονός αυτό έδωσε την αφορμή για τη διεξαγωγή ερευνών και για εκτενή μελέτη της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο έδαφος.

Παρόλα αυτά, γεωφυσικές διασκοπήσεις με τη χρήση του υπεδάφειου ραντάρ γίνονται μόλις τη δεκαετία του 1970. Σε αυτό συνέβαλε η ανάπτυξη της τεχνολογίας, οπότε και κατασκευάστηκαν φορητά και χαμηλότερου κόστους όργανα. Τη δεκαετία του 1980 η τεχνολογία του υπεδάφειου ραντάρ γνωρίζει μεγάλη άνθιση με την εισαγωγή των ψηφιακών συστημάτων, τα οποία έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην επεξεργασία του σήματος και στην ανάπτυξη καινούργιων εφαρμογών.

4.2 Εφαρμογές

Η ραγδαία εξέλιξη στην ηλεκτρονική τεχνολογία μετά το 1970 έδωσε σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη του υπεδάφειου ραντάρ, έτσι ώστε σήμερα να κατατάσσεται στις σύγχρονες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης με συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών.

Οι εφαρμογές του γεωραντάρ μπορούν ουσιαστικά να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, βασιζόμενες στην κεντρική συχνότητα εκπομπής του:

- Για γεωλογικούς σκοπούς, όπου το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από τη διακριτική ικανότητα του ραντάρ. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται συνήθως κεραίες συχνότητας 50MHz.
- Για εφαρμογές στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (*Non Destructive Testing - NDT*). Σε αυτή την κατηγορία το ζητούμενο είναι η διακριτική ικανότητα του συστήματος και επομένως οι κεραίες που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των 500-2000MHz.

4.3 Αρχή λειτουργίας του υπεδάφειου ραντάρ

Η μέθοδος του υπεδάφειου ραντάρ εφαρμόζεται στην έρευνα δομών μικρού βάθους και χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνοτήτων από 1 έως 1200 MHz. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων.

Το σύστημα του γεωραντάρ εκπέμπει έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό στο υπό έρευνα υλικό. Ο παλμός, που διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec), «ταξιδεύει» στο έδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Ένα μέρος της ενέργειας του παλμού διαδίδεται στο δεύτερο στρώμα και ένα μέρος ανακλάται στην επιφάνεια, οπότε και επιστρέφει στην κεραία του δέκτη. Στη συνέχεια το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης προωθείται στη μονάδα ελέγχου, όπου καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του κύματος. Η διάδοση του παλμού στο υπέδαφος είναι συνάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης και της συχνότητας εκπομπής της κεραίας του πομπού. Η εκπομπή και λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί από την ίδια κεραία (*monostatic mode*) ή από δύο διαφορετικές κεραίες (μία για την εκπομπή και μία για τη λήψη – *bistatic mode*).

Εκτός από τα ανακλώμενα κύματα η κεραία του δέκτη κατοπτρεύει και τα απευθείας κύματα ή πρώτες αφίξεις (*first breaks*). Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στον δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια διεπιφάνεια. Εξαιτίας της μικρής διαδρομής που διανύουν καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη σε πολύ μικρούς χρόνους και πριν από όλα τα ανακλώμενα κύματα. Οι απώλειες σε ενέργεια των κυμάτων αυτών είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα.

Τα απευθείας κύματα είναι δύο ειδών: αυτά που διαδίδονται στον αέρα και αυτά που διαδίδονται κάτω ακριβώς από την επιφάνεια του εδάφους. Τα απευθείας κύματα του αέρα καταφθάνουν πρώτα στον δέκτη, ενώ ακολουθούν τα απευθείας του εδάφους. Αυτό συμβαίνει διότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα στον αέρα παρά σε ένα γεωλογικό σχηματισμό.

Όταν η απόσταση των κεραιών πομπού - δέκτη υπερβεί μία κρίσιμη τιμή X_c (π.χ. σε μία διασκόπηση κοινού ενδιαμέσου σημείου) τότε ο δέκτης κατοπτρεύει και τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα. Τα κύματα αυτά ανακλώνται στην πρώτη διεπιφάνεια που θα συναντήσουν, διαθλώνται στην επιφάνεια του εδάφους και τελικά διαδίδονται στον αέρα. Η διάθλαση των κυμάτων αυτών στην επιφάνεια του εδάφους προϋποθέτει ότι η γωνία πρόσπτωσης του ανακλώμενου κύματος είναι ίση με την ορική γωνία φ_c . Επομένως, τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα διαδίδονται εν μέρει στο έδαφος και εν μέρει στον αέρα. Συνεπώς, καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη πριν από τα απευθείας κύματα του εδάφους και μετά από τα απευθείας κύματα του αέρα.

Η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το χρόνο t_r που χρειάζεται ο παλμός για να ταξιδέψει από την κεραία του πομπού στην κεραία του δέκτη. Ο χρόνος διαδρομής του ανακλώμενου κύματος t_r ισούται με:

$$t_r = \frac{(4D_r^2 + X^2)^{1/2}}{v} \Leftrightarrow t_r^2 = \frac{4D_r^2}{v^2} + \frac{X^2}{v^2} \quad 4.1$$

που δίδει:

$$D_r = \frac{[(t_r v)^2 - X^2]^{1/2}}{2} \quad 4.2$$

όπου X είναι η οριζόντια απόσταση πομπού - δέκτη, D_r το βάθος της επιφάνειας ανάκλασης και v η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο μέσο διάδοσης. Το βάθος του ανακλαστήρα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί εφόσον γνωρίζουμε το χρόνο διαδρομής t_r και την ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος v στο μέσο διάδοσης.

4.4 Σχεδιασμός διασκόπησης

Ο ερευνητής, καλείται πριν αρχίσει οποιαδήποτε εργασία, να αποσαφηνίσει πλήρως το πρόβλημα και να σχεδιάσει τη διασκόπηση με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται πριν από την διασκόπηση και αποτελείται από τρία βασικά στάδια:

- Αξιολόγηση του πεδίου έρευνας
- Επιλογή της μεθόδου διασκόπησης
- Προσδιορισμός των παραμέτρων της διασκόπησης.

Κατά την αξιολόγηση του πεδίου έρευνας ο ερευνητής πρέπει να ελέγξει κατά πόσο είναι εφικτό ή όχι να εφαρμοστεί η μέθοδος του υπεδάφειου ραντάρ κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες που διέπουν τη διασκόπηση. Για το λόγο αυτό είναι καθοριστική η μελέτη των παρακάτω σημείων:

- Βάθος διείσδυσης ακτινοβολίας και βάθος στόχου
- Γεωμετρία στόχου
- Ηλεκτρικές ιδιότητες στόχου και μέσου διάδοσης
- Περιβάλλον διασκόπησης

Το μέγιστο βάθος διείσδυσης ή διαφορετικά η ακτίνα δράσης του γεωραντάρ, εξαρτάται άμεσα από την εξασθένιση και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των σχηματισμών στους οποίους διαδίδεται. Όταν η εξασθένιση και η αγωγιμότητα των σχηματισμών είναι μεγάλη, το βάθος διείσδυσης είναι μικρό. Το βάθος του στόχου μελετάται πάντα σε συνδυασμό με το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη διακριτική τους ικανότητα.

Είναι γεγονός ότι ο στόχος πρέπει να περιγράφεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η πιο σημαντική παράμετρος του είναι το μέγεθος. Στην περίπτωση που ο στόχος δεν είναι σφαιρικός, θα πρέπει να προσδιοριστεί και ο προσανατολισμός.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης, που ενδιαφέρουν την τεχνική του γεωραντάρ, είναι οι αντίστοιχες διηλεκτρικές σταθερές και αγωγιμότητες. Η γνώση τους επιτρέπει στο χρήστη να διαπιστώνει κάθε φορά εάν η αντίθεση μεταξύ τους είναι σημαντική, ώστε να υπάρξει μετρήσιμη ανάκλαση.

Η χρήση του γεωραντάρ δεν ενδείκνυται σε περιοχές όπου υπάρχουν εγκατεστημένοι μεταδότες ραδιοκυμάτων, σε περιοχές με εκτεταμένες μεταλλικές κατασκευές στο υπέδαφος ή στην επιφάνεια, και σε περιοχές με υψηλή υγρασία και βρόχινες συνθήκες. Όλα αυτά επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων.

Κατ' αρχάς επιλέγεται ποια μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά για τη συλλογή των δεδομένων, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε διασκόπησης. Τέσσερις από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους που εφαρμόζονται είναι οι εξής:

- **Μέθοδος της ανάκλασης (Reflection):** Είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος και εφαρμόζεται στη χαρτογράφηση των γεωλογικών στρωμάτων

- **Μέθοδος του κοινού ενδιαμέσου σημείου (Common Midpoint):**
Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος.
- **Μέθοδος της τομογραφίας (Transillumination):** Η μέθοδος αυτή δεν στηρίζεται στην ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος όπως οι προηγούμενες, αλλά στη διέλευση του μέσα από τη μάζα του υλικού μελέτης.
- **Μέθοδος σταθερού πομπού - κινούμενου δέκτη (Wide angle reflection and refraction):** Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης μέσα στο μέσο.

Στη συνέχεια πρέπει να ρυθμιστούν όλοι εκείνοι οι παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με την επιτυχή έκβαση του πειράματος. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να συνοψιστούν στους παρακάτω:

- συχνότητα εκπομπής
- ολικός χρόνος καταγραφής
- διάστημα δειγματοληψίας
- βήμα διασκόπησης
- απόσταση κεραιών
- προσανατολισμός κεραιών
- υπέρθεση

Η συχνότητα εκπομπής (*operating frequency*) συνδέεται άμεσα με τη διακριτική ικανότητα και το βάθος διείσδυσης του παλμού του γεωραντάρ. Αυτοί οι δύο παράγοντες καθορίζουν τελικά την επιλογή της συχνότητας. Μία διασκόπηση χαρακτηρίζεται αποτυχημένη εάν ο ολικός χρόνος καταγραφής δεν είναι αρκετά

μεγάλος για να καταγραφούν τα ανακλώμενα κύματα που προέρχονται από το στόχο. Το διάστημα δειγματοληψίας εξαρτάται από την συχνότητα “Nyquist” και πρέπει να είναι πάντα μικρότερο από το μισό της περιόδου του κύματος της μέγιστης συχνότητας εκπομπής. Τα περισσότερα συστήματα γεωραντάρ εκπέμπουν σε ένα εύρος συχνοτήτων που κυμαίνεται από $0,5f$ έως $1,5f$ όπου f η συχνότητα εκπομπής. Το βήμα διασκόπησης ορίζει την απόσταση δύο διαδοχικών σημείων πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Ένα μεγάλο βήμα διασκόπησης δεν δίνει επαρκή αποτελέσματα. Στα συστήματα γεωραντάρ μπορεί να μεταβάλλεται η απόσταση των κεραιών προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος. Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση της εξασθένισης του κύματος, αφού αυτό αναγκάζεται να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Οι κεραιές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα γεωραντάρ είναι ωμικές, διπολικές και ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός για την επιτυχή έκβαση των πειραμάτων.

Σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο η βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων επιτυγχάνεται με επαναλαμβανόμενες καταγραφές σε κάθε σημείο της γραμμής μελέτης οι οποίες προστίθενται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης είναι ένα ίχνος στο οποίο τα πλάτη των ανακλώμενων κυμάτων έχουν ενισχυθεί, ενώ ο θόρυβος εξαλείφεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μετρήσεις στο λατομείο Ζωφόρων

5.1 Γεωλογία της περιοχής

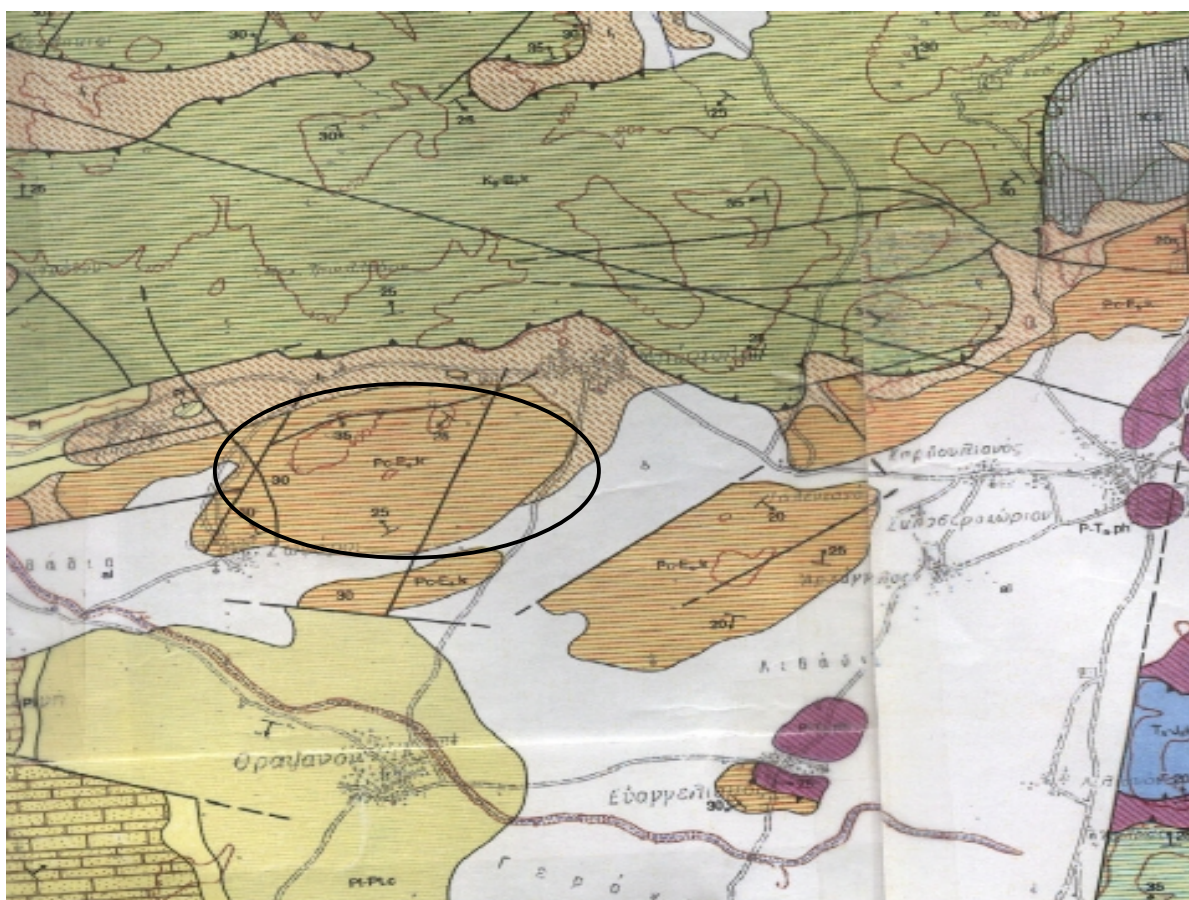
Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με γεωφυσικές μεθόδους στο λατομείο εξόρυξης αδρανών υλικών στο χωριό Ζωφόροι Ηρακλείου. Στο σχ.5.1 παρατίθεται γεωλογικός χάρτης της περιοχής.

Ο λατομικός χώρος ανήκει γεωτεκτονικά στη ζώνη Τριπόλεως. Στην περιοχή μελέτης εμφανίζονται τα πετρώματα του Ανώτερου Τριαδικού, του Κρητιδικού, της βάσης του Παλαιόκαινου έως και σχηματισμοί ολιγοκαινικής ηλικίας. Τα πετρώματα αυτά ξεκινούν με δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες οι οποίοι αποτελούν τη βάση του τεκτονικού καλύμματος των εξωτερικών ζωνών και βρίσκονται κατά κανόνα πάνω στη φυλλιτική-χαλαζιτική σειρά, με αποτέλεσμα στη βάση τους να είναι κατά θέσεις μυλονιτιωμένοι, λόγω του τεκτονισμού αυτών. Το μέγιστο πάχος των σχηματισμών αυτών είναι περί τα 600 μέτρα. Στη συνέχεια απαντώνται ασβεστόλιθοι οι οποίοι είναι τεφροί μέχρι τεφρόμαυροι, μεσοπαχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτοι, βιτουμενιούχοι με πλούσια νηριτική πανίδα. Το μέγιστο πάχος αυτών ανέρχεται στα 300 μέτρα. Κατόπιν εμφανίζονται ανακρυσταλλωμένοι, τεφρόμαυροι, μεσοπαχυστρωματώδεις, κατά θέσεις δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και στα ανώτερα μέλη μικρολατυποπαγείς, με πλούσια νηρητική πανίδα. Το μέγιστο πάχος φτάνει τα 200 μέτρα. Τέλος εμφανίζονται εναλλαγές καστανών, ερυθρών αργιλικών σχιστόλιθων και ψαμμιτών, με μικρές ενστρώσεις τεφρών

ασβεστολιθικών τουρβιδιτών. Το μέγιστο πάχος των σχηματισμών αυτών υπολογίζεται περί τα 100m (Ι.Γ.Μ.Ε).

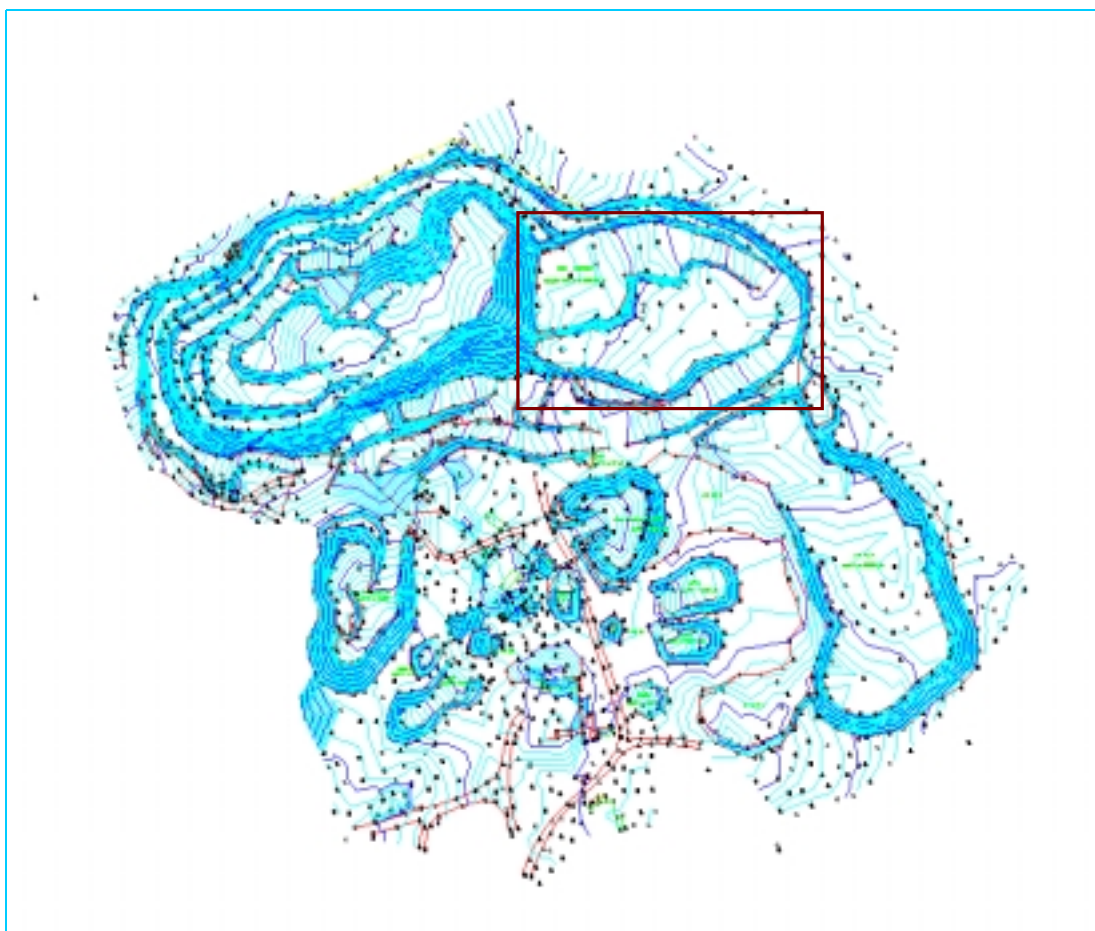
Η ανώτερη ανθρακική σειρά μέσα στην οποία βρίσκεται και ο λατομικός χώρος, συγκροτείται από κάτω προς τα πάνω όπως ακολούθως:

- Δολομιτικοί ασβεστόλιθοι του άνω Τριαδικού (πάχος 600 m).
- Τεφροί μέχρι τεφρόμαυροι ασβεστόλιθοι του Κρητιδικού (πάχος 300 m).
- Τεφρόμαυροι, κατά θέσεις δολομιτικοί ασβεστόλιθοι του άνω Ιώκαινου (πάχος 200 m).
- Καστανοί αργιλικόι σχιστόλιθοι με μικρές ενστρώσεις τεφρών ασβεστολιθικών τουρβιδιτών του άνω Ιώκαινου (πάχος 100 m).



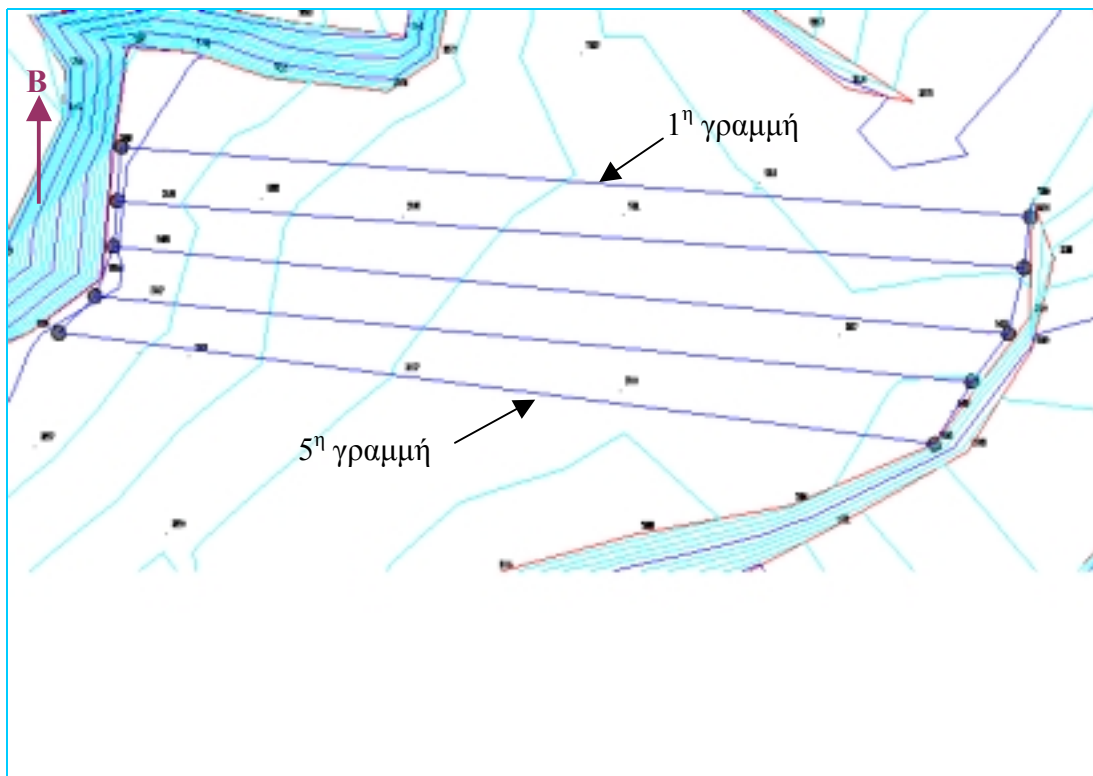
Σχ.5.1 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Στο μαύρο κύκλο φαίνεται η περιοχή όπου είναι το λατομείο. Το υπόμνημα του χάρτη παρατίθεται στο παράρτημα.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται και ο τοπογραφικός χάρτης στη περιοχή του λατομείου και σημειώνεται σ' αυτόν η θέση εξόρυξης όπου και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας.



Σχ.5.2 Τοπογραφικός χάρτης στην περιοχή του λατομείου. Η κλίμακα είναι 1:

Στο πλαίσιο είναι σημειωμένη η θέση εξόρυξης στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Στη συνέχεια έχει τονισθεί η περιοχή εξόρυξης ώστε να είναι φανερός ο κάναβος των μετρήσεων.



Σχ.5.3 Κάναβος μετρήσεων σημειωμένος στο τοπογραφικό χάρτη του λατομείου. Οι ισουψείς είναι ανά 1m _____ 5m _____ και 10m _____

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται ο προσανατολισμός του χάρτη και η διαδοχή των γραμμών μελέτης. Για την εισαγωγή των γραμμών μελέτης έχει ληφθεί υπόψη η κλίμακα του χάρτη.

5.2 Στοιχεία λατομικού χώρου:

Ο λατομικός χώρος βρίσκεται περί το 1,5 km από το χωριό Σαμπάς. Η ευρύτερη περιοχή δεν παρουσιάζει αρχαιολογικό ή ιδιαίτερο οικολογικό ενδιαφέρον, ενώ ταυτόχρονα δεν υπάρχει οπτική επαφή των θέσεων εκμετάλλευσης από το

παρακείμενο οδικό δίκτυο. Γειτονικά του λατομικού χώρου δεν υπάρχουν αγροτικές περιοχές, που να θίγονται από την λειτουργία του λατομείου.

Στην περιοχή που βρίσκεται το λατομείο δεν υπάρχει ιδιαίτερο πρόβλημα από τις βροχοπτώσεις, ενώ στερείται από χιονοπτώσεις και υψηλές διακυμάνσεις στη θερμοκρασία. Επίσης δεν χρειάζονται έργα για το φωτισμό κατά την διάρκεια της νύχτας επειδή λειτουργεί σε μία βάρδια. Τέλος το λατομείο δεν φαίνεται να έχει προβλήματα από την ύπαρξη επιφανειακών νερών.

5.3 Μετρήσεις ηλεκτρικής μεθόδου

Στο λατομείο αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας. Στο χώρο της εξόρυξης σχεδιάστηκε κάναβος με διαστάσεις 24m x 108m. Ο κάναβος αυτός αποτελείται από 5 γραμμές μέτρησης μήκος 108m, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους 6m. Ο προσανατολισμός των γραμμών είναι E - W. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας εφαρμόζεται η διάταξη διπόλου- διπόλου. Η απόσταση α των ηλεκτροδίων που αναφέρεται στο κεφάλαιο 3 είναι ίση με 4m. Σε κάθε γραμμή τοποθετούνται 28 ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια αυτά συνδέονται με καλώδια με το μηχάνημα Sting, το οποίο μετράει το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα που στέλνει στο έδαφος. Δηλ. το μέγεθος $\Delta V / I$ της σχέσης 3.1. Κάθε φορά συνδέονται 4 ηλεκτρόδια μόνο. Επίσης σε κάθε γραμμή εκτελούνται και μετρήσεις με α ίσο με 8m.

5.4 Επεξεργασία ηλεκτρικών μετρήσεων

Οι μετρήσεις αυτές επεξεργάζονται με το πρόγραμμα RES2DINV, αφού καταγραφούν σ' ένα αρχείο DAT. Κάθε φορά γίνεται επεξεργασία μιας γραμμής. Σύμφωνα με το πρόγραμμα αυτό εισάγουμε τα δεδομένα από το αρχείο DAT και εν συνεχεία υπάρχει η επιλογή της αντιστροφής. Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων παρουσιάζονται στην οθόνη τρεις τομές η οποίες αναφέρονται στην ίδια γραμμή. Η πρώτη τομή είναι η ψευδοτομή που δημιουργείται από τα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, η δεύτερη τομή είναι η ψευδοτομή που αντιστοιχεί στις υπολογισμένες τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης και η τρίτη είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή. Υπάρχει η δυνατότητα να μην ληφθούν υπόψη μετρήσεις οι οποίες έχουν μεγάλο σφάλμα. Επίσης μπορούμε από το μενού Display να εμφανίσουμε στην οθόνη τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και να ρυθμίσουμε τον αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας της αντιστροφής για να ελαττώσουμε κατά το καλύτερο δυνατό το σφάλμα. Οι γεωηλεκτρικές τομές για της πέντε γραμμές του λατομείου περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Στη συνέχεια με τη βοήθεια του προγράμματος Transform μπορούμε να δημιουργήσουμε οριζόντιες τομές χρησιμοποιώντας στοιχεία κάθε τομής που προέκυψε από το RES2DINV. Στο πρόγραμμα αυτό εισάγουμε αρχεία excel τα οποία έχουν δεδομένα από όλες τις γραμμές για κάθε βάθος. Το πρόγραμμα δίνει τον πίνακα των δεδομένων και την εξομαλυμένη εικόνα. Στη συνέχεια μπορούμε να

υπολογίσουμε τις τιμές που αντιστοιχούν σε κενά από δεδομένα σημεία της εικόνας. Η μέθοδος Kriging επιλέχθηκε για να υπολογιστούν οι τιμές που θα καλύψουν τα κενά. Επίσης μπορούμε να επεξεργαστούμε την κλίμακα των εικόνων ώστε όλες οι εικόνες να έχουν την ίδια κλίμακα. Τέλος, μπορούμε να απομονώσουμε μια περιοχή του αρχικού πίνακα και συνεπώς και της εικόνας. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να θέσουμε για κάθε οριζόντια εικόνα τα ίδια όρια, ώστε όλες οι εικόνες αναφέρονται στο ίδιο μπλοκ του εδάφους. Οι οριζόντιες τομές που προέκυψαν από το πρόγραμμα παρουσιάζονται στα αποτελέσματα των ηλεκτρικών μετρήσεων στο επόμενο κεφάλαιο.

Το πρόγραμμα T3D εισάγει αρχεία hdf τα οποία προκύπτουν από το πρόγραμμα transform στο οποίο δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης των εικόνων και σ' αυτή τη μορφή. Το T3D συνδέει τις οριζόντιες τομές μεταξύ τους και εμφανίζει το εξομαλυμένο τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής που επιλέξαμε. Στη συνέχεια μπορούμε να απομονώσουμε την επιθυμητή περιοχή, και να επιλέξουμε κάποια χρώματα να μη φαίνονται ώστε να μπορέσουμε να «δούμε» στο εσωτερικό του μοντέλου. Στο τρισδιάστατο μοντέλο μπορούμε να προβάλουμε και άξονες με τις πραγματικές διαστάσεις του μοντέλου. Το μοντέλο το οποίο προέκυψε από τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας φαίνεται στο επόμενο κεφάλαιο καθώς επίσης παρουσιάζονται και κάποιες επεξεργασμένες εικόνες.

5.5 Μετρήσεις με γεωραντάρ.

Στην ίδια περιοχή πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές μετρήσεις με το γεωραντάρ. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στην 2^η και 3^η γραμμή των γραμμών της ηλεκτρικής τομογραφίας, καθώς επίσης στο δεύτερο μισό της 4^{ης} γραμμής της ηλεκτρικής τομογραφίας. Το βήμα των μετρήσεων σε κάθε γραμμή ήταν 25cm και οι κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις αυτές ήταν 110MHz. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις του γεωραντάρ είναι το σύστημα pulseEKKO1000. Οι κεραίες συνδέονται με laptop ώστε να γίνεται επί τόπου η καταγραφή των μετρήσεων με σκοπό να επιβεβαιώνεται η καλή ποιότητα των μετρήσεων. Στη συνέχεια στο εργαστήριο γίνεται η επεξεργασία των εικόνων των καταγραφών.

5.6 Επεξεργασία μετρήσεων του γεωραντάρ

Κατά την επεξεργασία των εικόνων του γεωραντάρ χρησιμοποιούνται διάφορα φίλτρα. Τα φίλτρα αυτά είναι τα εξής:

- ♦ το Φίλτρο μέσου σημείου: Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για να μειώσει τον τυχαίο θόρυβο. Η λειτουργία του στηρίζεται στον υπολογισμό της μέσης τιμής των σημείων που ανήκουν στο ίδιο ίχνος.

- ♦ το Φίλτρο μέσου ίχνους: Το φίλτρο αυτό έχει παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με το φίλτρο μέσου σημείου με τη διαφορά ότι υπολογίζει τη μέση τιμή μεταξύ των σημείων γειτονικών ίχνων και δημιουργεί ένα νέο μέσο ίχνος.
- ♦ το Φίλτρο διαφοράς ίχνων: Η λειτουργία του φίλτρου στηρίζεται στην αφαίρεση κάθε ίχνους από το προηγούμενό του. Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται για να τονίσει σημειακούς ανακλαστήρες.
- ♦ τα Φίλτρα διόρθωσης : υπάρχουν δυο είδη, η απομάκρυνση επαγωγικής συνιστώσας (Dewow) το οποίο είναι ένα φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων και το DC shift το οποίο απομακρύνει τη μέση τιμή της καταγραφής.

Επίσης υπάρχουν τρόποι ενίσχυσης του σήματος. Οι τρόποι αυτοί είναι οι εξής:

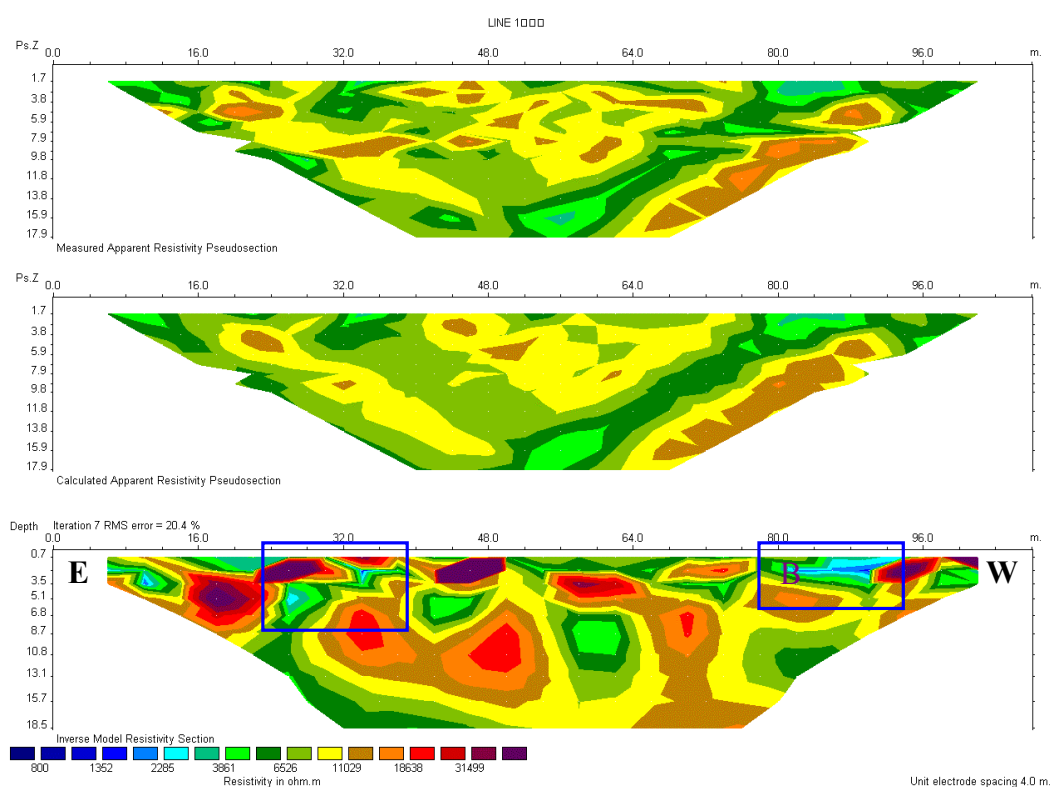
- ♦ αυτόματο έλεγχο ενίσχυσης (AGC): Η ενίσχυση AGC επιχειρεί να ισοσταθμίσει όλα τα σήματα εφαρμόζοντας ενίσχυση η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της ισχύος του σήματος. Χρησιμεύει στο να αναδείξει τη συνέχεια των ανακλώμενων κυμάτων.
- ♦ εκθετική ενίσχυση (SEC): Η ενίσχυση SEC είναι σύνθεση γραμμικής και εκθετικής συνάρτησης σε σχέση με το χρόνο. Έχει ως αντικειμενικό στόχο την ισοστάθμιση των σημάτων που αλλοιώνονται λόγω της γεωμετρικής διασποράς και της εκθετικής απώλειας της ενέργειας των κυμάτων.
- ♦ σταθερή ενίσχυση: Ο χρήστης εισάγει μια τιμή με την οποία πολλαπλασιάζονται όλες οι τιμές των σημείων.
- ♦ ενίσχυση ορισμένη από το χρήστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αποτελέσματα και ερμηνεία των μετρήσεων

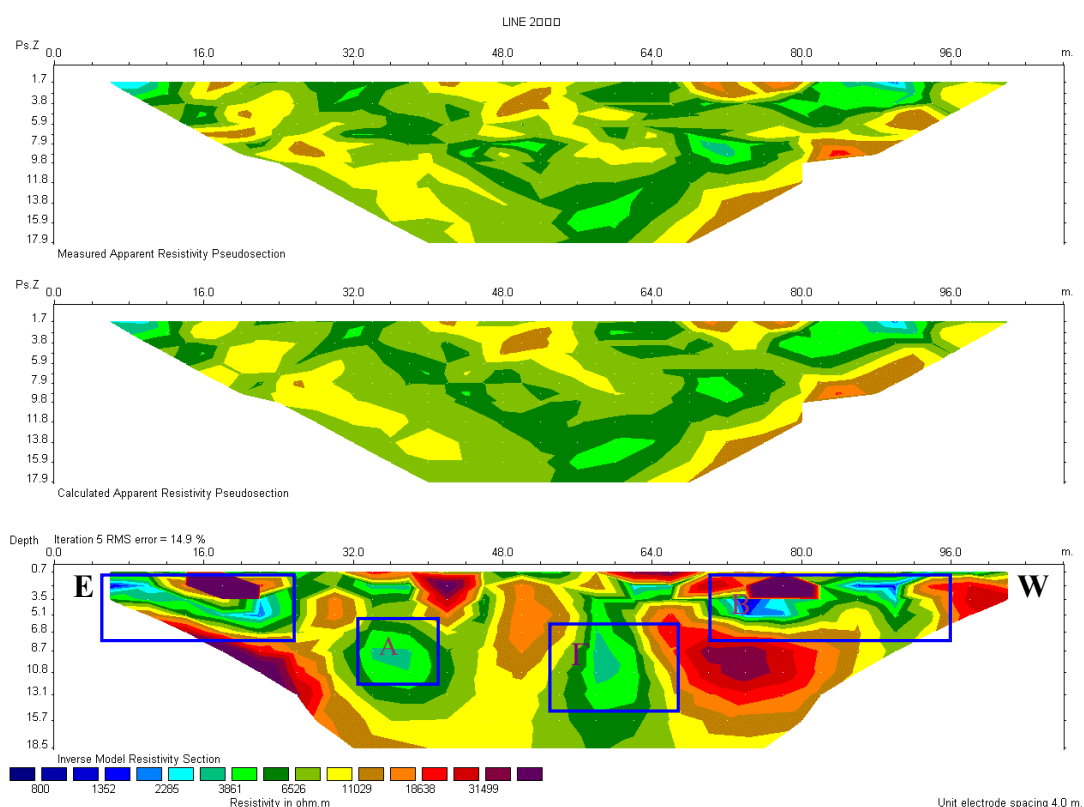
6.1 Ηλεκτρική τομογραφία

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας όπως αυτά προέκυψαν από τη χρήση των προγραμμάτων που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η τρίτη τομή είναι αυτή που προκύπτει από την αντιστροφή των δεδομένων ενώ οι δυο πρώτες τομές είναι ψευδοτομές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.



Σχ.6.1.1 Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της πρώτης γραμμής μελέτης .

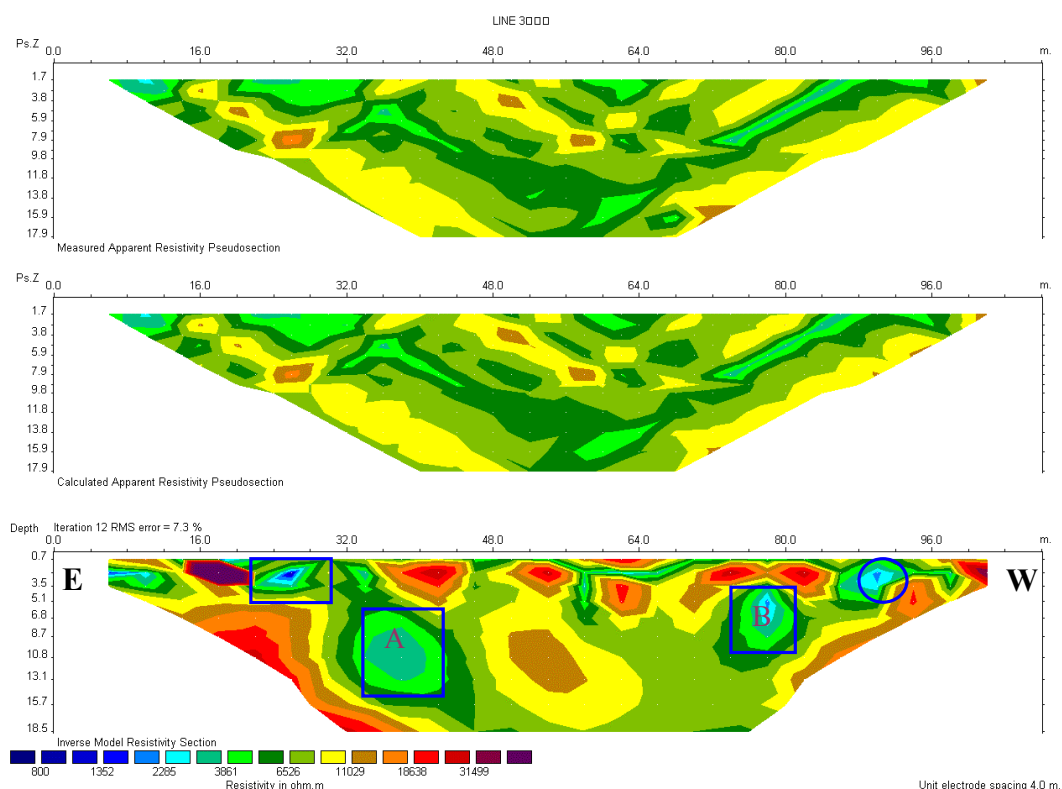
Όπως γίνεται φανερό στο Σχήμα 6.1.1., προκύπτει μια ανωμαλία σε απόσταση 80m από την αρχή της γραμμής που φτάνει σε απόσταση μέχρι και 94m μακριά από την αρχή της γραμμής και εκτείνεται σε βάθος 5m από την επιφάνεια. Στην ίδια τομή παρατηρούνται άλλες δυο μικρότερες ανωμαλίες σε απόσταση 24m έως 36m από την αρχή της γραμμής μελέτης αλλά επίσης δεν ξεπερνούν τα 5m βάθος.



Σχ.6.1.2 Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της δεύτερης γραμμής μελέτης.

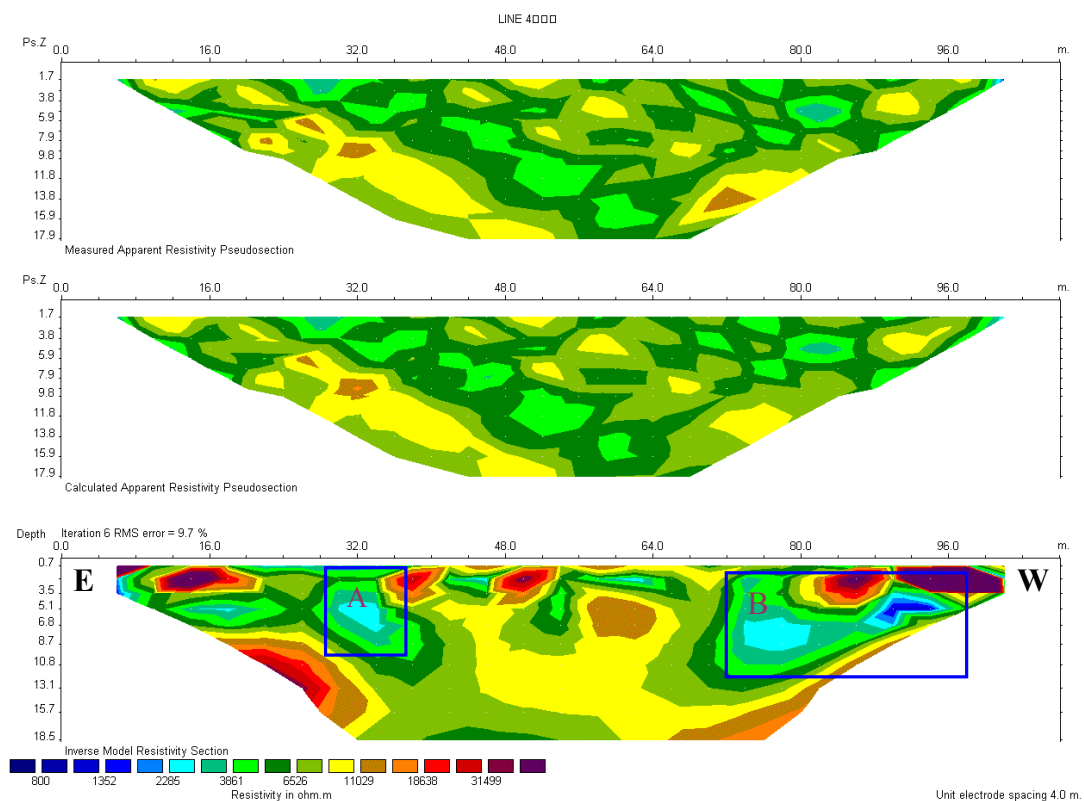
Τα αποτελέσματα της δεύτερης γραμμής μελέτης φαίνονται Σχήμα 6.1.2. Η δεύτερη γραμμή απέχει 6m από την πρώτη προς τα νότια. Στη δεύτερη γραμμή μελέτης παρατηρούνται τέσσερις ανωμαλίες στα 5m, 20m, 74m και 88m αντίστοιχα

από την αρχή της γραμμής. Οι δυο πρώτες σε 3.5m βάθος και οι άλλες δεν ξεπερνούν τα 5m βάθος. Στην περιοχή 34m - 39m από την αρχή της γραμμής εμφανίζεται η ανωμαλία Α με πάχος περίπου 3m (8.7m –10.8m). Επίσης μια σημαντική ανωμαλία εμφανίζεται στα 57m – 61m από την αρχή της γραμμής. Το βάθος της ανωμαλίας αυτής είναι 7m –12m.



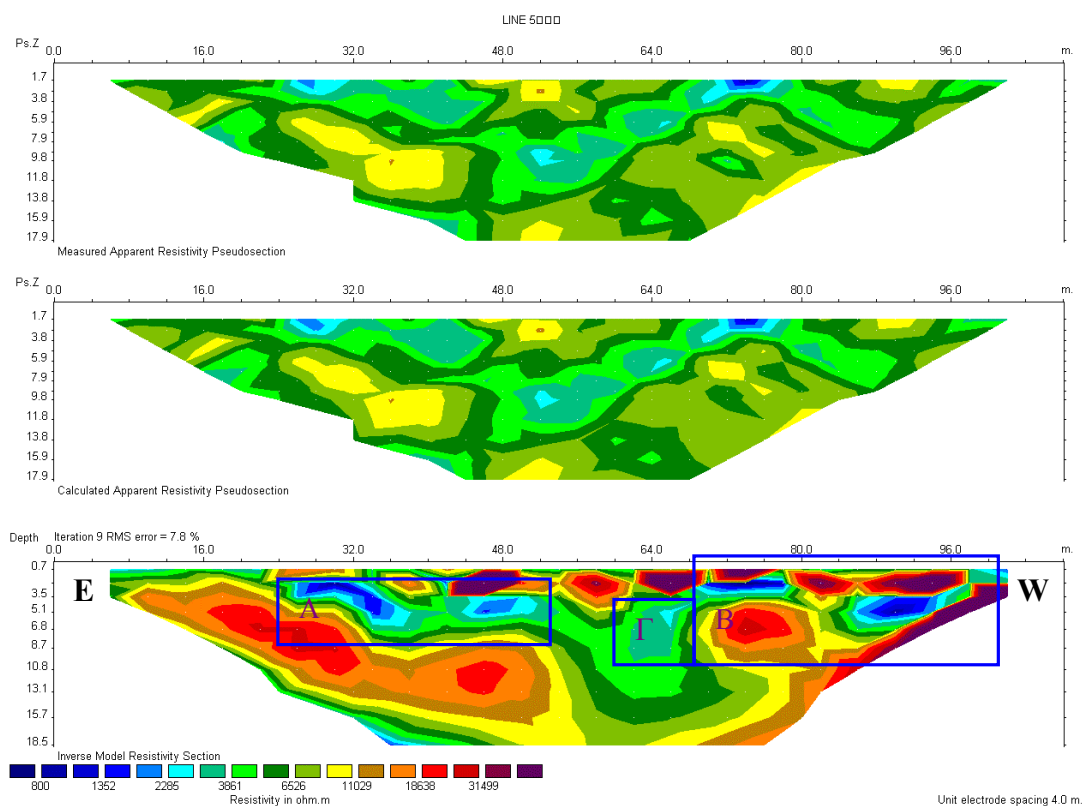
Σχ.6.1.3 Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της τρίτης γραμμής μελέτης.

Στην τρίτη γραμμή (Σχ.6.1.3) φαίνονται δυο επιφανειακές ανωμαλίες στα 23m και στα 88m από την αρχή της γραμμής που δεν ξεπερνούν τα 3.5m βάθος. Στα 35m εμφανίζεται μια ανωμαλία σε βάθος περίπου 8m που ίσως σχετίζεται με την ανωμαλία Α που εμφανίζεται στη δεύτερη γραμμή. Στα 76m-80m από την αρχή της γραμμής υπάρχει μια ανωμαλία σε βάθος περίπου 4.5m και πιθανόν σχετίζεται με την επιφανειακή ανωμαλία Β στη δεύτερη γραμμή.



Σχ.6.1.4 Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της τέταρτης γραμμής μελέτης.

Στην τέταρτη γραμμή και σε απόσταση 30m περίπου από την αρχή της γραμμής εμφανίζεται μια ανωμαλία σε βάθος 3.5m που ίσως σχετίζεται με την ανωμαλία Α των δυο προηγούμενων γραμμών (Σχ.6.1.4). Επίσης σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η ανωμαλία στα 72m που φτάνει σε βάθος περίπου 11m. Η ανωμαλία αυτή ή είναι ενιαία μέχρι τα 96m ή είναι δυο ξεχωριστές, και στις δυο περιπτώσεις αποτελεί συνέχεια της ανωμαλίας Β των προηγούμενων γραμμών.



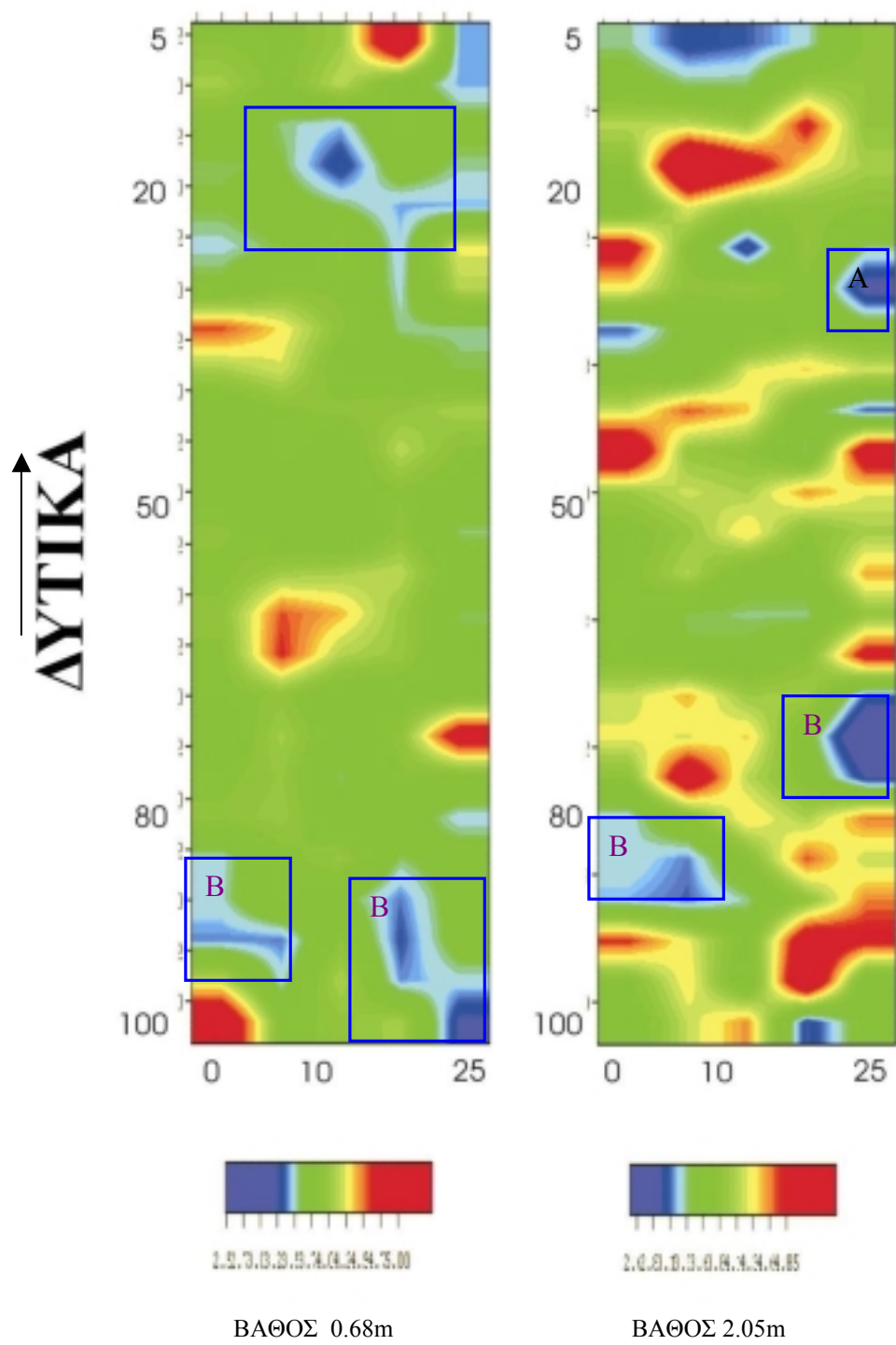
Σχ.6.1.5 Αποτελέσματα αντιστροφής δεδομένων της πέμπτης γραμμής μελέτης.

Στην πέμπτη γραμμή, (Σχ.6.1.5) σε απόσταση 24m από την αρχή της, βρίσκεται μια σημαντική ανωμαλία, που ίσως σχετίζεται με τις Α. Η ανωμαλία είτε σταματά στα 40m περίπου, είτε ενώνεται με τη διπλανή ανωμαλία που φτάνει στα 53m περίπου. Και η ανωμαλία στα 53m πιθανόν αποτελεί συνέχεια της ανωμαλίας Γ της δεύτερης γραμμής. Το βάθος φτάνει περίπου στα 6,5m. Στα 68m - 94m υπάρχει μια ανωμαλία που σχετίζεται πιθανόν με τη Β και φτάνει τα 10m βάθος. Τέλος, στα 85m - 96m από την αρχή της γραμμής υπάρχει μια τρίτη σημαντική ανωμαλία που φτάνει στα 6,8m βάθος.

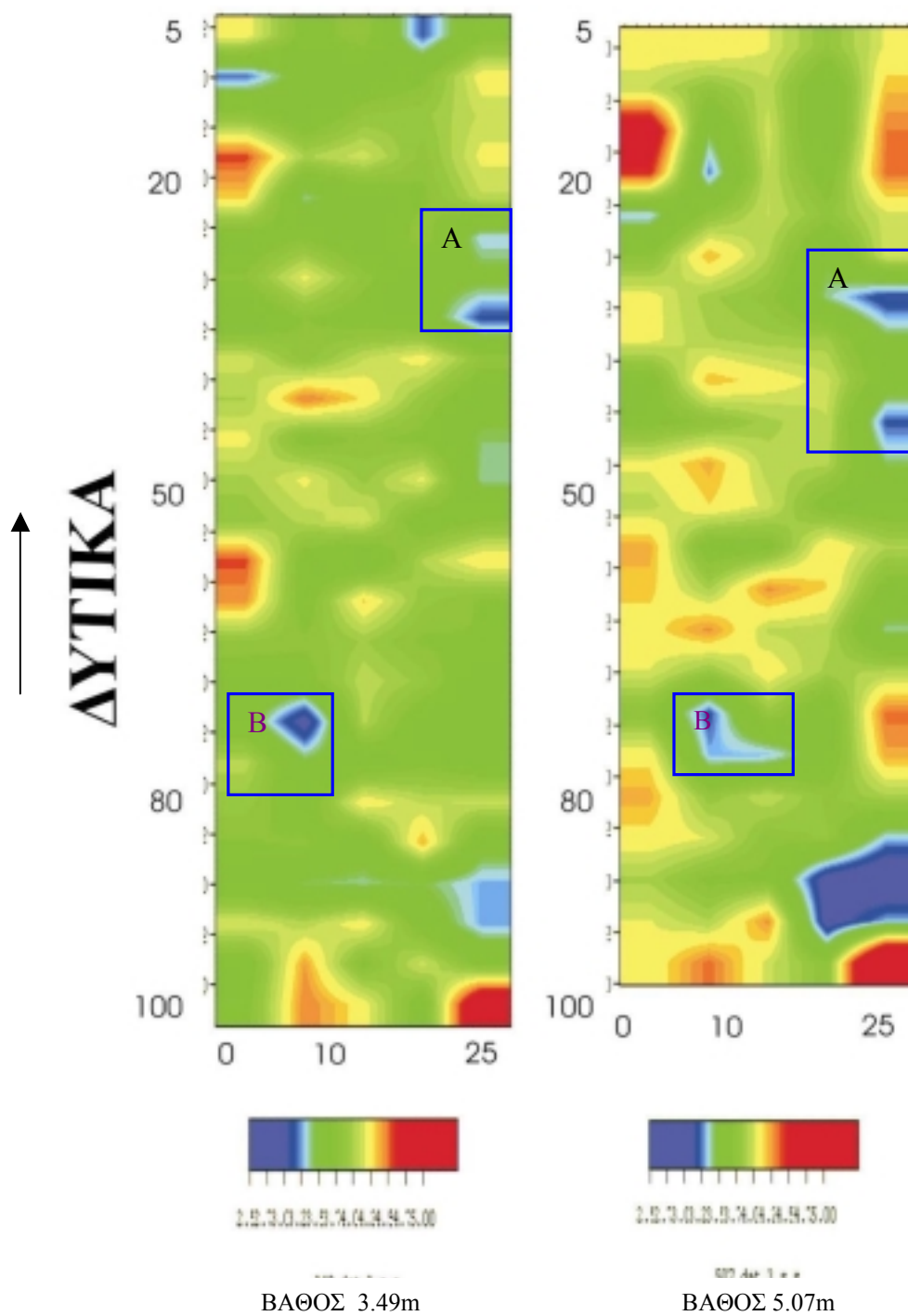
6. 2 Επεξεργασία για δημιουργία οριζόντιων τομών

Με τη βοήθεια του προγράμματος transform μπορούμε να δημιουργήσουμε οριζόντιες τομές στην περιοχή μελέτης. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα και την επεξεργασία τους προέκυψαν οι παρακάτω τομές. Οι οριζόντιες τομές είναι τοποθετημένες στη παρούσα εργασία σύμφωνα με το βάθος ξεκινώντας από την πιο επιφανειακή. Στις εικόνες αυτές η χρωματική κλίμακα είναι σε λογαριθμική μορφή.

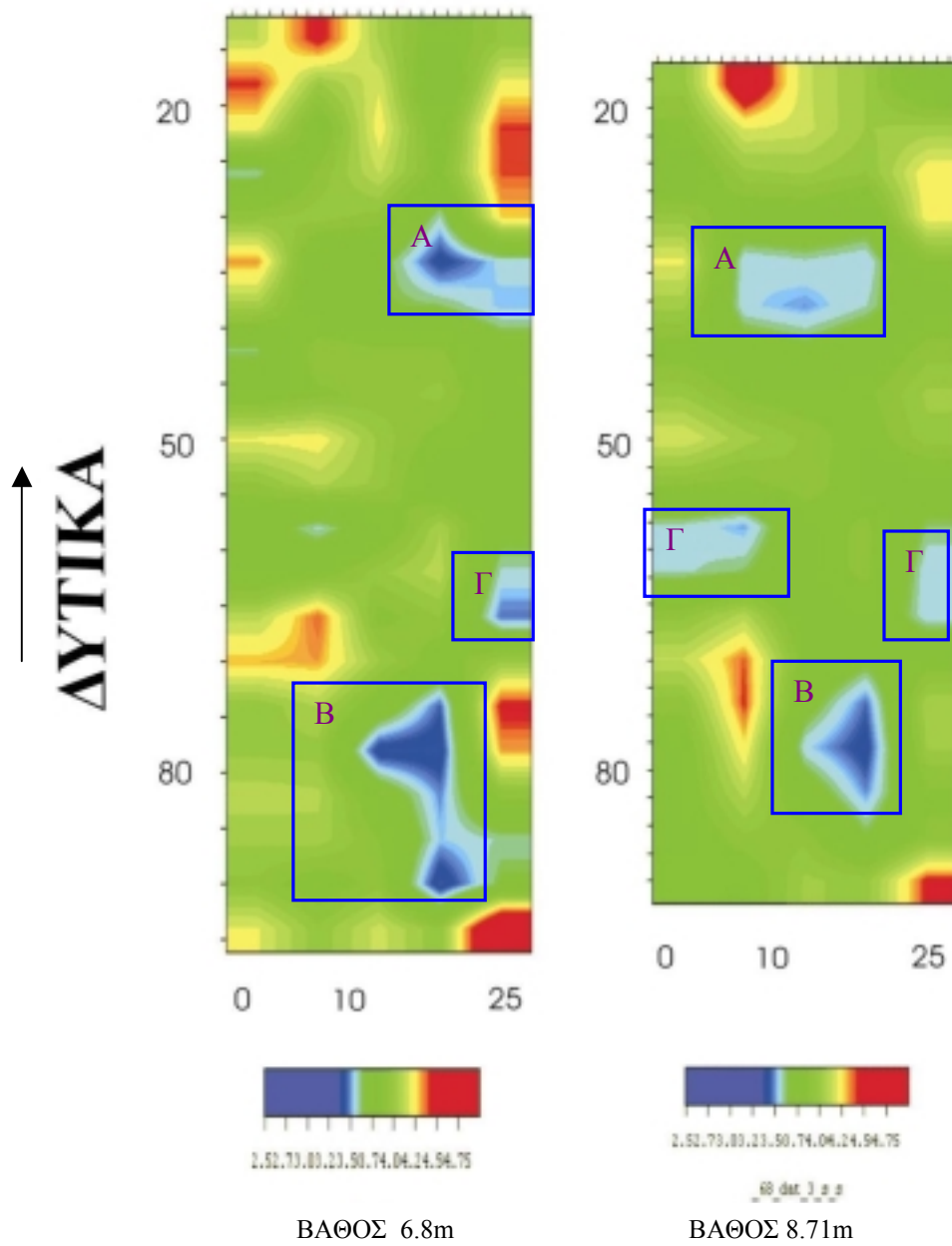
Στις παρακάτω οριζόντιες τομές (Σχ.6.2.1 – 5) έχει γίνει μια προσπάθεια αναγνώρισης των ανωμαλιών που εμφανίζονται στις γεωηλεκτρικές τομές. Τα βάθος που αναφέρεται σε κάθε τομή αντιστοιχεί στο βάθος του κέντρου της κυψελίδας της εικόνας την οποία επιλέγουμε. Οπότε γίνεται φανερό ότι η ανωμαλία Α που εμφανίζεται στις τομές των γραμμών 2, 3, 4 και 5, εμφανίζεται και στις οριζόντιες τομές με βάθος 2.05m έως 13.13m. Επίσης χαρτογραφήθηκε η οριζόντια εξάπλωση της ανωμαλίας Β που εμφανίζεται σε όλες τις γεωηλεκτρικές τομές. Παρατηρείται ότι αυτή η ανωμαλία εμφανίζεται στις οριζόντιες τομές με βάθος 0.68m έως 10.18m, ειδικότερα στη τομή με βάθος 0.68m η ανωμαλία διακόπτεται σε κάποιο σημείο. Τέλος, η ανωμαλία Γ που εμφανίζεται στις ηλεκτρικές τομές 2 και 5 και στις οριζόντιες τομές με βάθος 6.8m έως 13.13m. Στις οριζόντιες τομές παρουσιάζονται και κάποιες άλλες ανωμαλίες οι οποίες δεν είναι τόσο σημαντικές και γι' αυτό δεν αναφέρονται ιδιαίτερα.



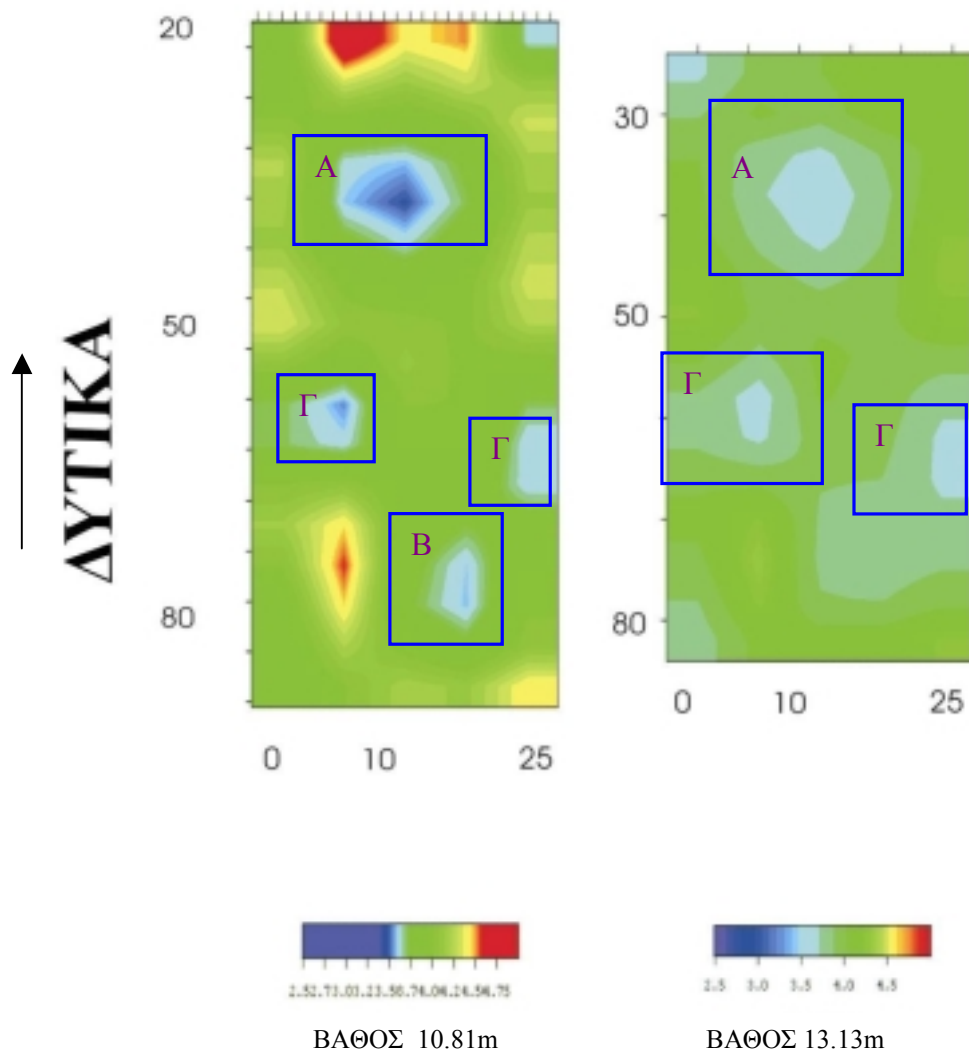
Σχ.6.2.1 Τομές σε βάθη 0.68m και 2.05m από την επιφάνεια των γραμμών μελέτης



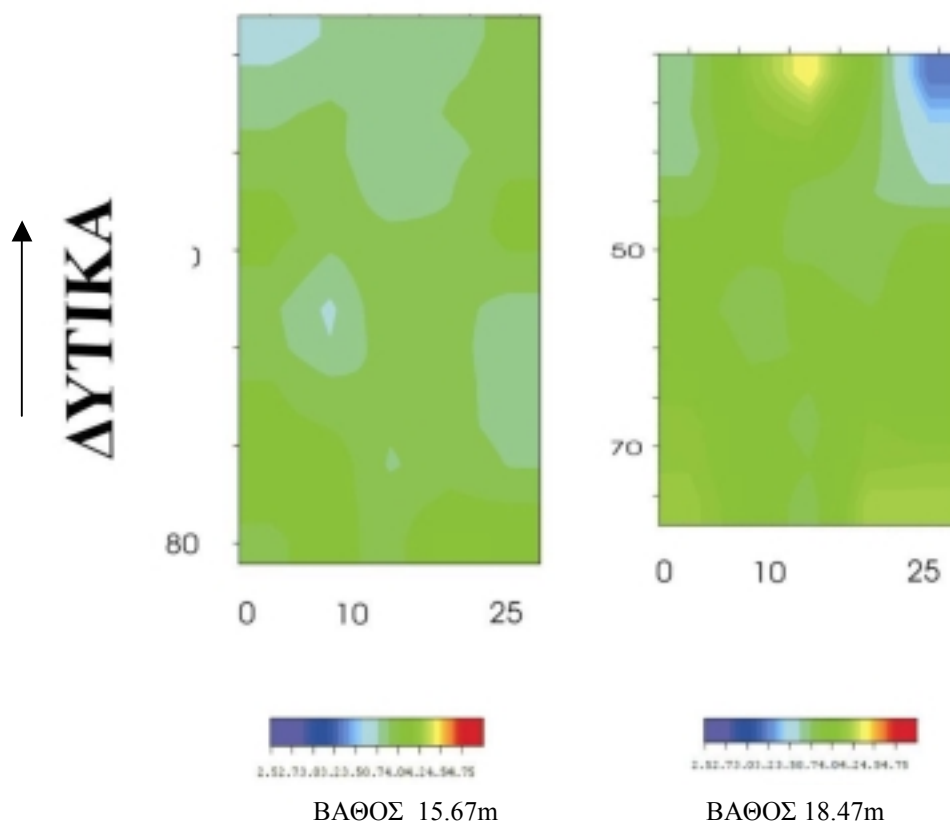
Σχ.6.2.2 Τομές σε βάθος 3.49m και 5.07m από την επιφάνεια των γραμμών μελέτης



Σχ.6.2.3 Οριζόντιες τομές σε βάθος 6.8m και 8.71m αντίστοιχα



Σχ.6.2.4 Οριζόντιες τομές σε βάθος 10.81m και 13.13m αντίστοιχα

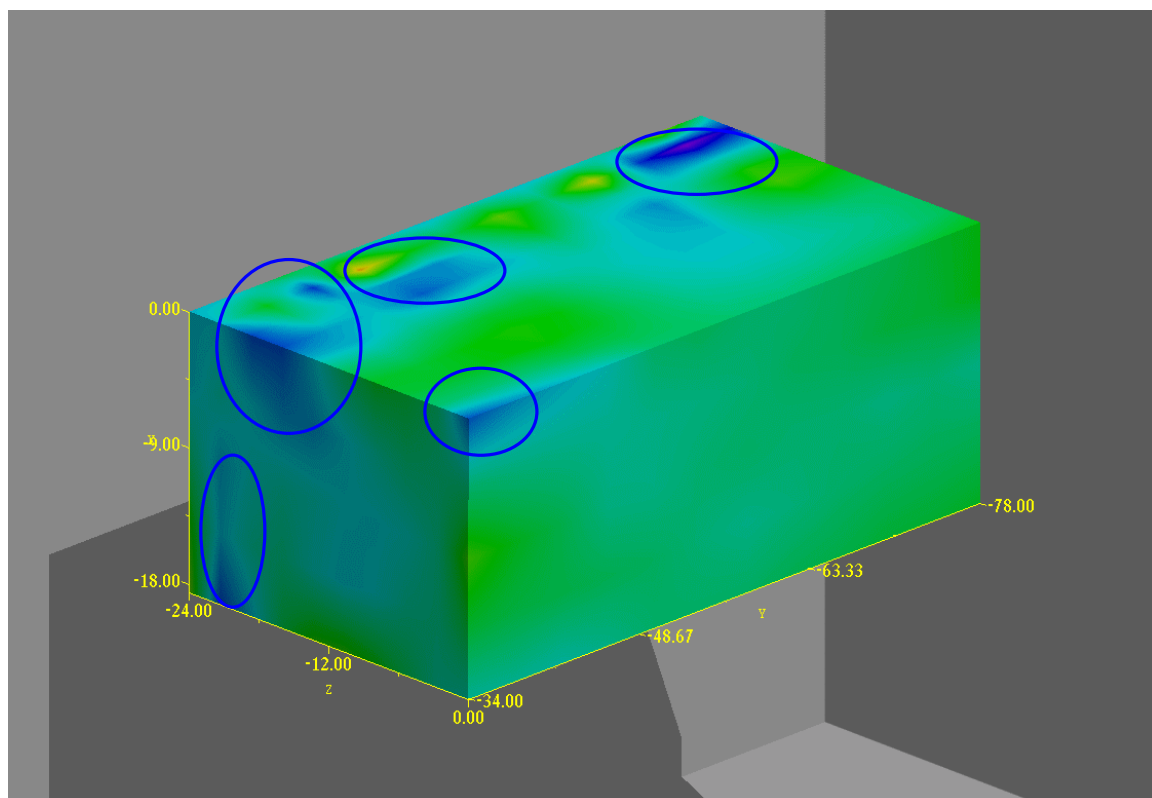


Σχ.6.2.5 Οριζόντιες τομές σε βάθος 15.67m και 18.47m αντίστοιχα

6.3 Τρισδιάστατο ομοίωμα της περιοχής μελέτης

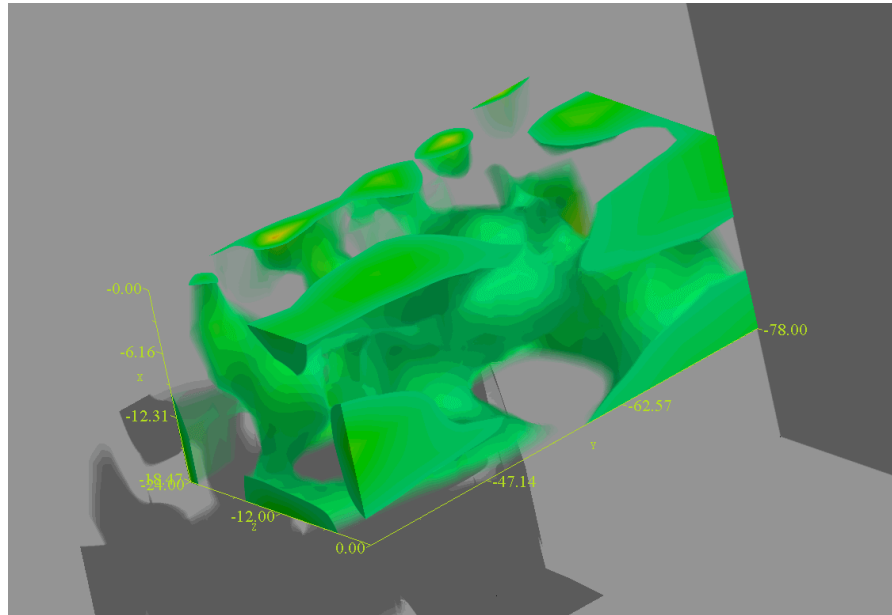
Μετά από τη δημιουργία των οριζόντιων τομών , με την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα T3D προκύπτει το τρισδιάστατο ομοίωμα της περιοχής μελέτης. Με το πρόγραμμα αυτό δημιουργήθηκαν αρκετές εικόνες οι οποίες παρουσιάζουν την περιοχή μελέτης. Στις εικόνες αυτές έχει ληφθεί το τμήμα των γραμμών από 34m

έως 78m από την αρχή των γραμμών ώστε να έχουμε δεδομένα από όλες τις γραμμές σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο βάθος.



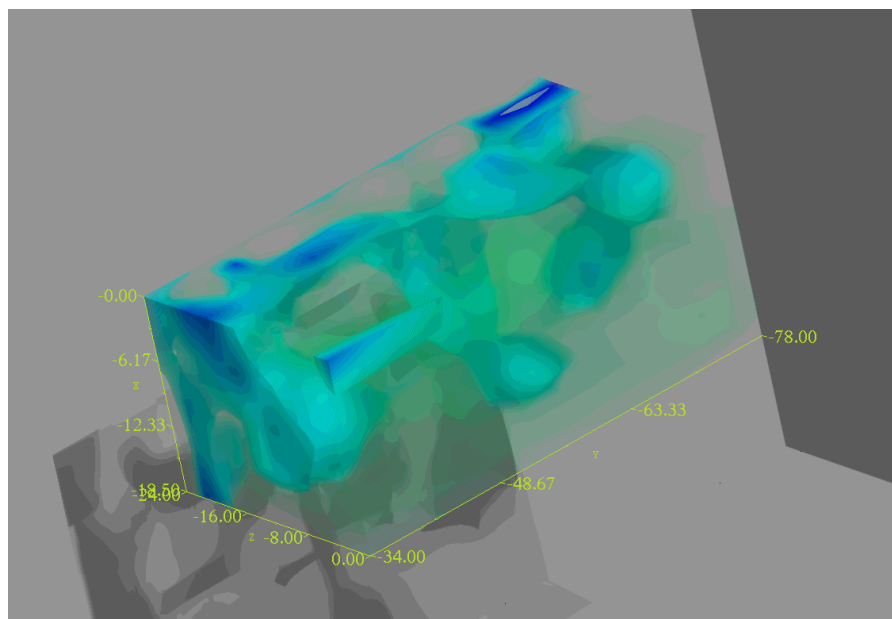
Σχ.6.3.1 Τρισδιάστατο ομοίωμα

Στο αρχικό ομοίωμα (Σχ.6.3.1) γίνονται φανερές οι ανωμαλίες της περιοχής μελέτης. Οι περιοχές με μπλε χρώμα αντιστοιχούν σε χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης και πιθανόν να σχετίζονται με έγκοιλα ή ρωγμές πληρωμένες με χώμα .



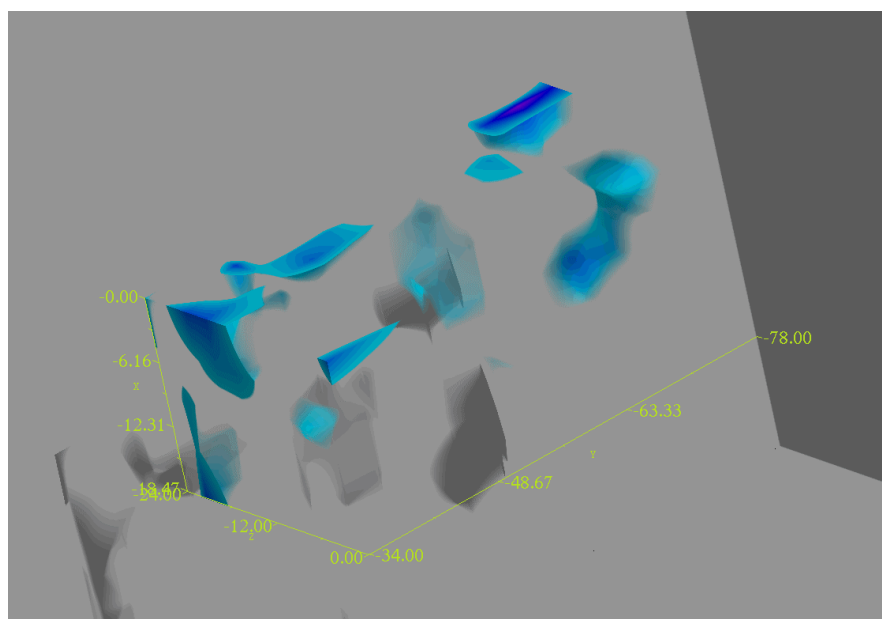
Σχ.6.3.2 Ομοίωμα στο οποίο έχουν αφαιρεθεί οι ανωμαλίες της περιοχής.

Στο σχήμα 6.3.2 η αρχική εικόνα έχει υποστεί τέτοια επεξεργασία ώστε να εμφανθεί ο υγιής ασβεστόλιθος. Τα κενά που παρουσιάζονται στο ομοίωμα είναι οι περιοχές με χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχ.6.3.3 Ομοίωμα στο οποίο έχουν απομονωθεί οι γενικές ανωμαλίες.

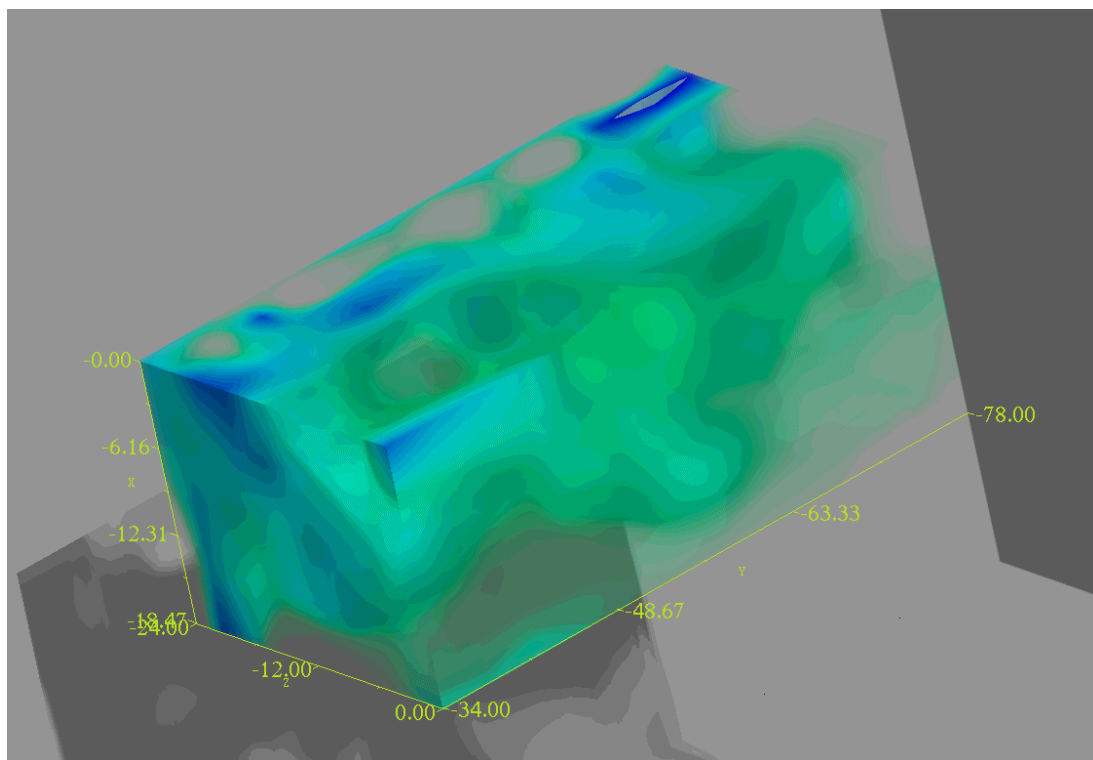
Στο σχήμα 6.3.3 από την αρχική εικόνα έχει αφαιρεθεί η πράσινη περιοχή που αντιστοιχεί στον υγιή ασβεστόλιθο ώστε να φανούν καθαρότερα οι περιοχές με χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης του μη καθαρού ασβεστόλιθου.



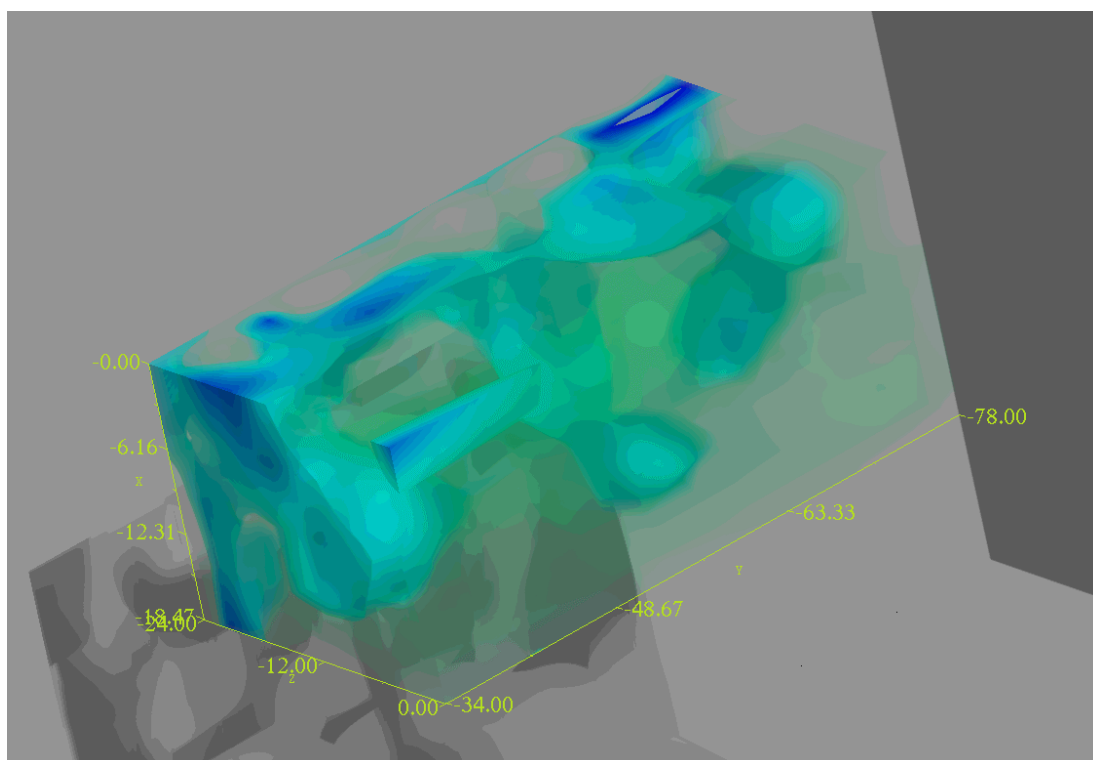
Σχ.6.3.4 Ομοίωμα των κοιλιοτήτων.

Στο σχήμα 6.3.4 φαίνεται καθαρά μονάχα η μπλε περιοχή η οποία αντιστοιχεί στις ανωμαλίες. Παρουσιάζεται η μορφή των εγκοίλων στη περιοχή αυτή. Από την εικόνα έχουν απομακρυνθεί και οι περιοχές με τον μη καθαρό ασβεστόλιθο.

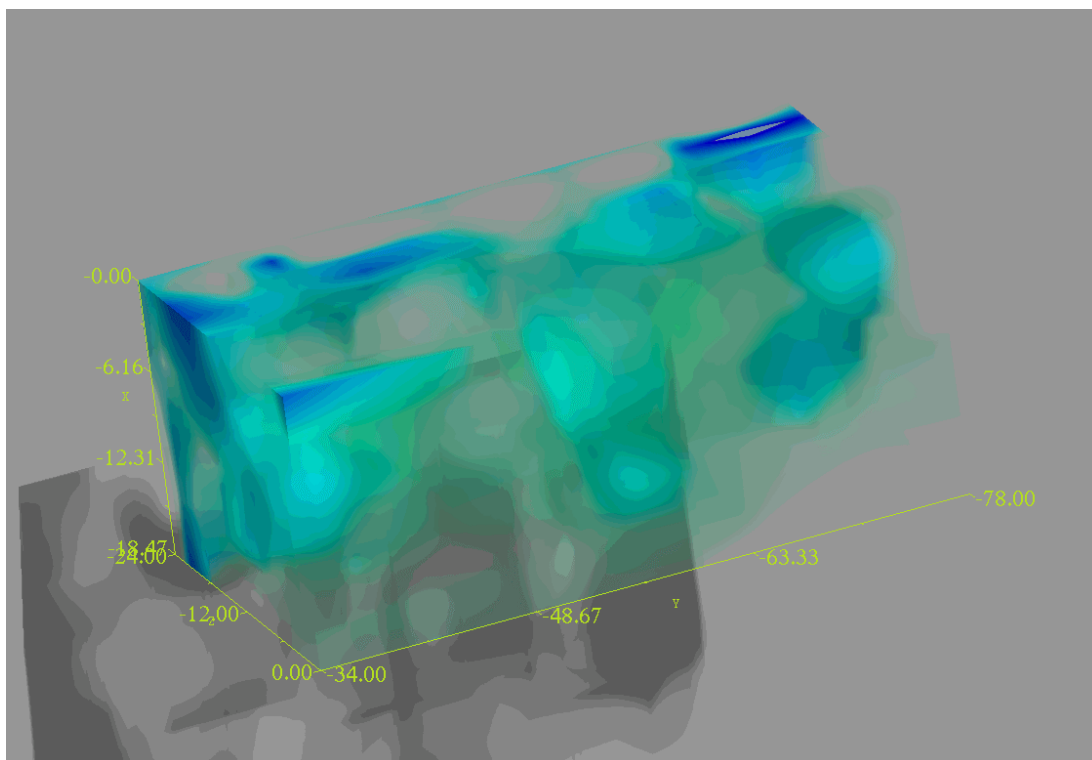
Στη συνέχεια παρουσιάζονται δυο εικόνες στις οποίες έχει υποστεί επεξεργασία το τμήμα που αντιστοιχεί στο υγιή ασβεστόλιθο. Στις εικόνες αυτές έχει γίνει επεξεργασία της περιοχής του ασβεστολίθου ώστε να φάνει σταδιακά ημιδιαφανής ο ασβεστόλιθος στη περιοχή γύρω από τις ανωμαλίες.



Σχ.6.3.5 Πρώτο στάδιο επεξεργασίας



Σχ.6.3.6 Δεύτερο στάδιο επεξεργασίας



Σχ.6.3.7 Τρίτο στάδιο επεξεργασίας.

6.4 Αποτελέσματα από τις μετρήσεις του γεωραντάρ

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων του γεωραντάρ προέκυψαν οι παρακάτω εικόνες. Οι μετρήσεις αυτές όπως προαναφέρθηκε αναφέρονται στη 2η, 3η και στο δεύτερο μισό της 4ης γραμμής.

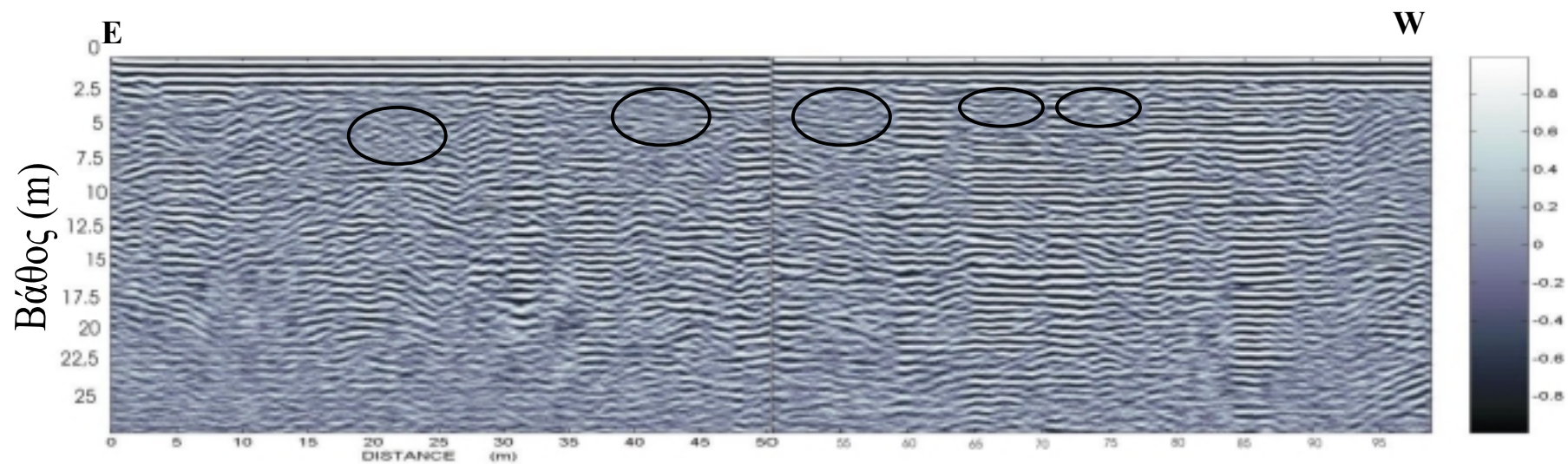
Οι εικόνες του γεωραντάρ δημιουργήθηκαν για να συγκριθούν με τις εικόνες που προέκυψαν από τις μετρήσεις με την ηλεκτρική τομογραφία.

Στη παρούσα εργασία στα δεδομένα αρχικά έγινε χρήση του φίλτρου διόρθωσης Dewow στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ο μετασχηματισμός Normalize Amplitude. Ο μετασχηματισμός αυτός είναι ένας μετασχηματισμός Hilbert που δίνει ένα μιγαδικό αριθμό ο οποίος ισούται με $h = a + i \cdot a(90)$ όπου a είναι οι αρχικές

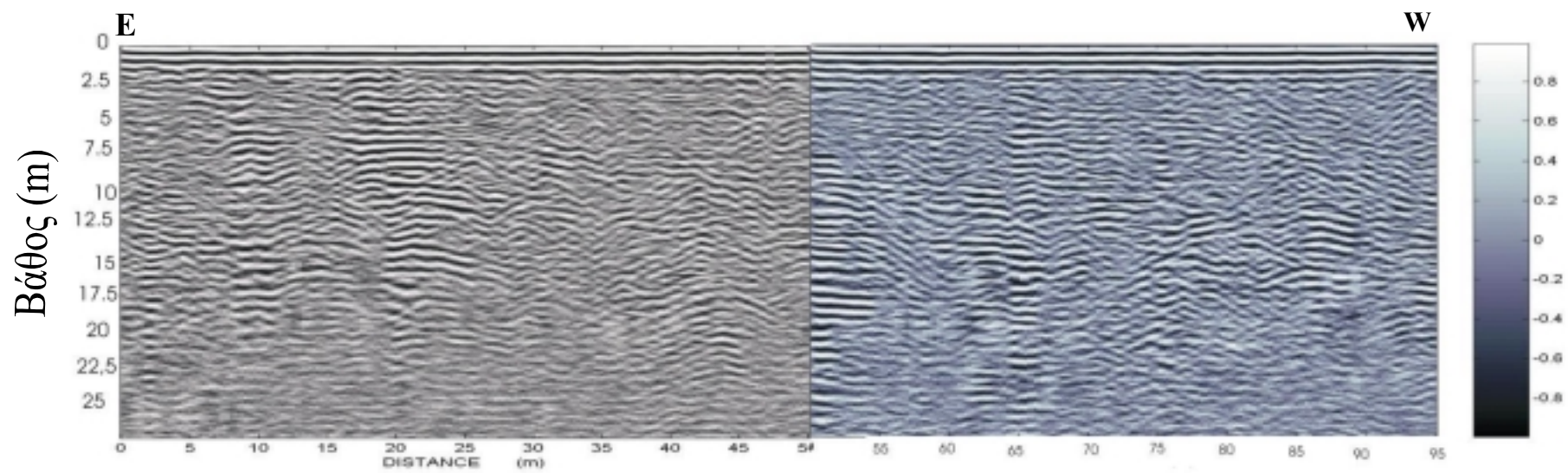
μετρήσεις και $a(90)$ είναι οι αρχικές μετρήσεις στις οποίες η φάση τους έχει μετατοπισθεί κατά 90° . Ο μετασχηματισμός Normalize Amplitude ισούται με το $\cos[\arctan(\frac{i * a(90)}{a})]$. Μετά το μετασχηματισμό χρησιμοποιήθηκε φίλτρο εξομάλυνσης 3x3.

Για την καλύτερη παρουσίαση της σύγκρισης των εικόνων από την ηλεκτρική τομογραφία και του γεωραντάρ έχει πραγματοποιηθεί υπέρθεση. Από την υπέρθεση των εικόνων γίνεται δυνατή η άμεση σύγκριση των περιοχών όπου εμφανίζονται ανωμαλίες. Στα σχήματα 6.4.4 έως 6.4.6, όπου φαίνεται το αποτέλεσμα της υπέρθεσης αντίστοιχα για κάθε γραμμή μελέτης, έχουν σημειωθεί οι θέσεις που παρουσιάζονται ανωμαλίες. Ειδικότερα στο σχήμα 6.4.4 και στα όρια της ανωμαλίας Α εμφανίζονται περιθλώμενα κύματα. Επίσης στις περισσότερες από τις ανωμαλίες χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εμφανίζουν μειωμένα πλάτη ή/και η συνέχεια των ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διακόπτεται (Βλέπε και σχ.6.4.1)

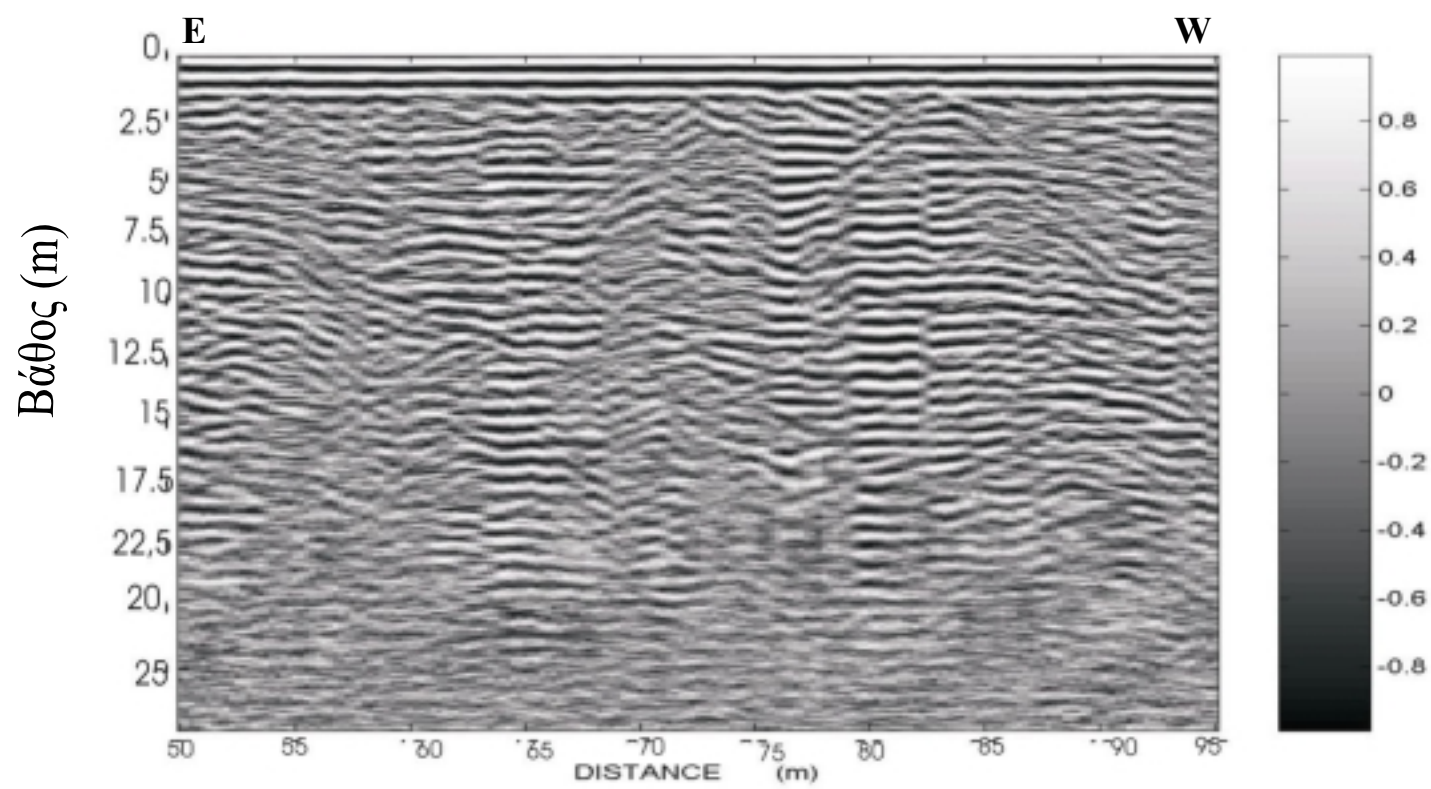
Στη συνέχεια έγινε χρήση φίλτρων ενίσχυσης σήματος AGC και εμφάνιση λεπτών στρωμάτων. Το δεύτερο προαναφερθέν φίλτρο τονίζει περιοχές όπου υπάρχουν απότομες αλλαγές της στιγμιαίας συχνότητας. Ο υψηλός ρυθμός μεταβολής της συχνότητας υποδεικνύει λεπτά στρώματα. Ο δείκτης ορίζεται ως $\text{thin_bed}(t) = \omega(t) - \overline{\omega}(t)$. Στα σχήματα 6.4.7 και 6.4.8 παρουσιάζονται οι εικόνες που προέκυψαν από την εφαρμογή αυτών των φίλτρων στα δεδομένα της δεύτερης γραμμής. Στα σχήματα 6.4.9 και 6.4.10 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εικόνες για την τρίτη γραμμή ενώ στα σχήματα 6.4.11 και 6.4.12 παρουσιάζονται οι εικόνες για την τέταρτη γραμμή.



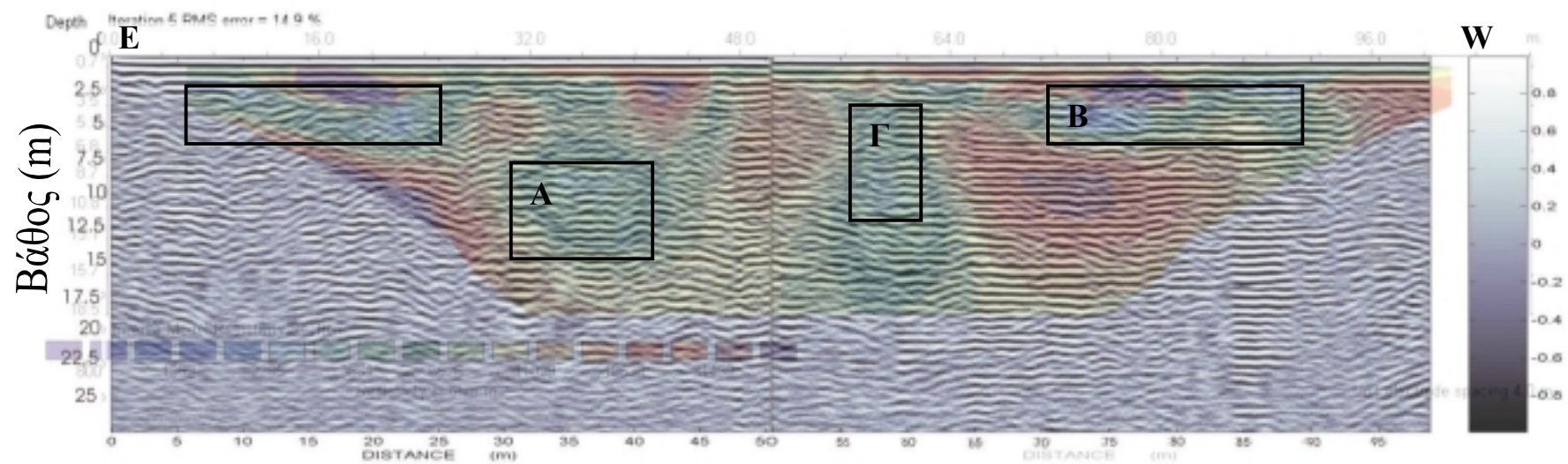
Σχ.6.4.1 Εικόνα γεωραντάρ της δεύτερης γραμμής



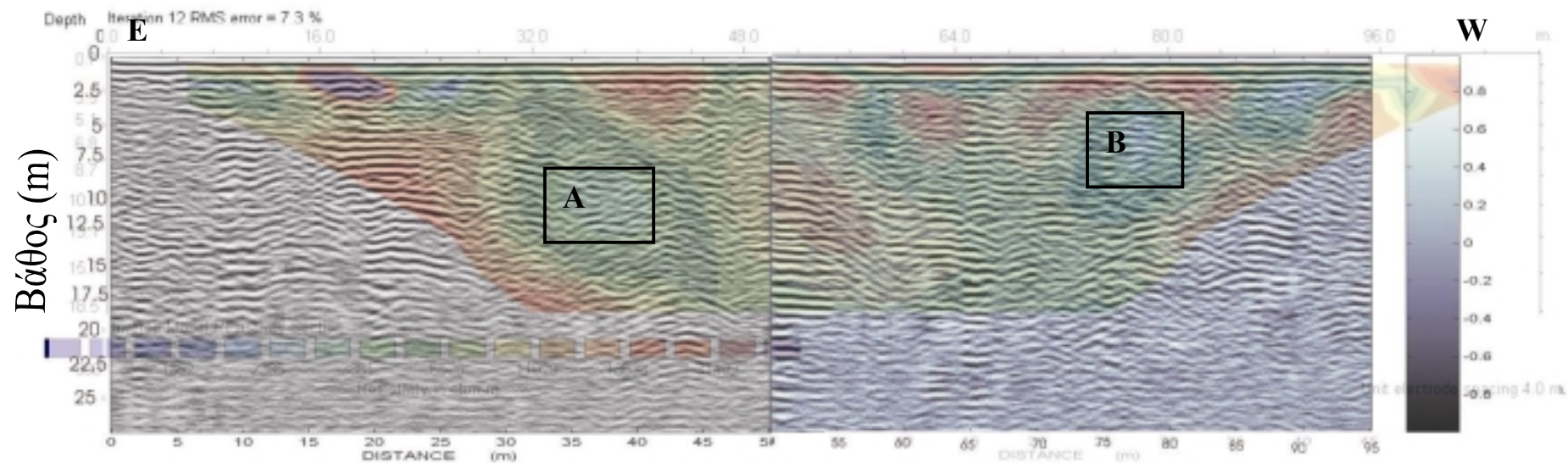
Σχ.6.4.2 Εικόνα γεωραντάρ της τρίτης γραμμής



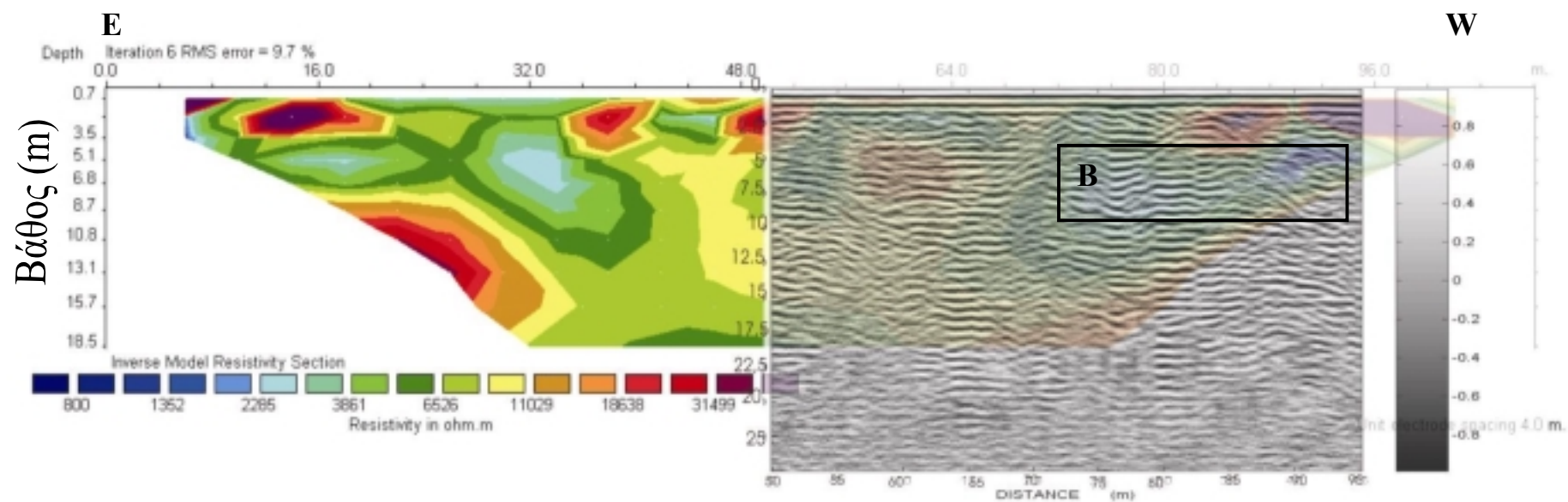
Σχ. 6.4.3 Εικόνα γεωραντάρ της τέταρτης γραμμής



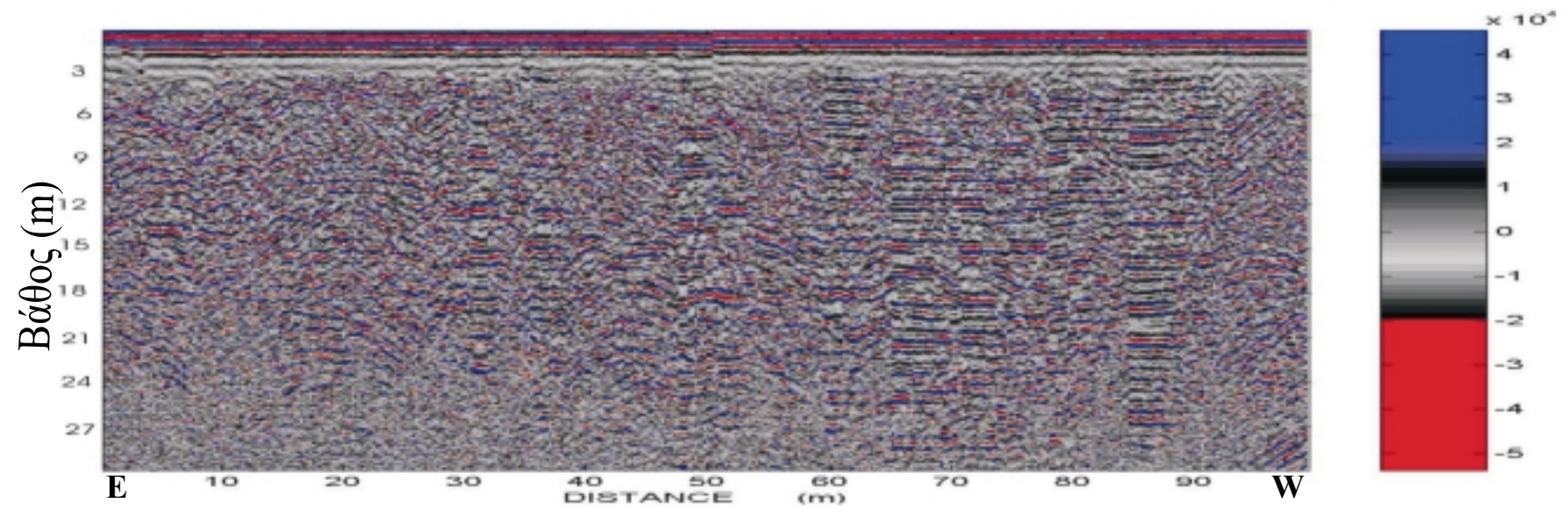
Σχ.6.4.4 Υπέρθεση εικόνων για τη δεύτερη γραμμή μελέτης



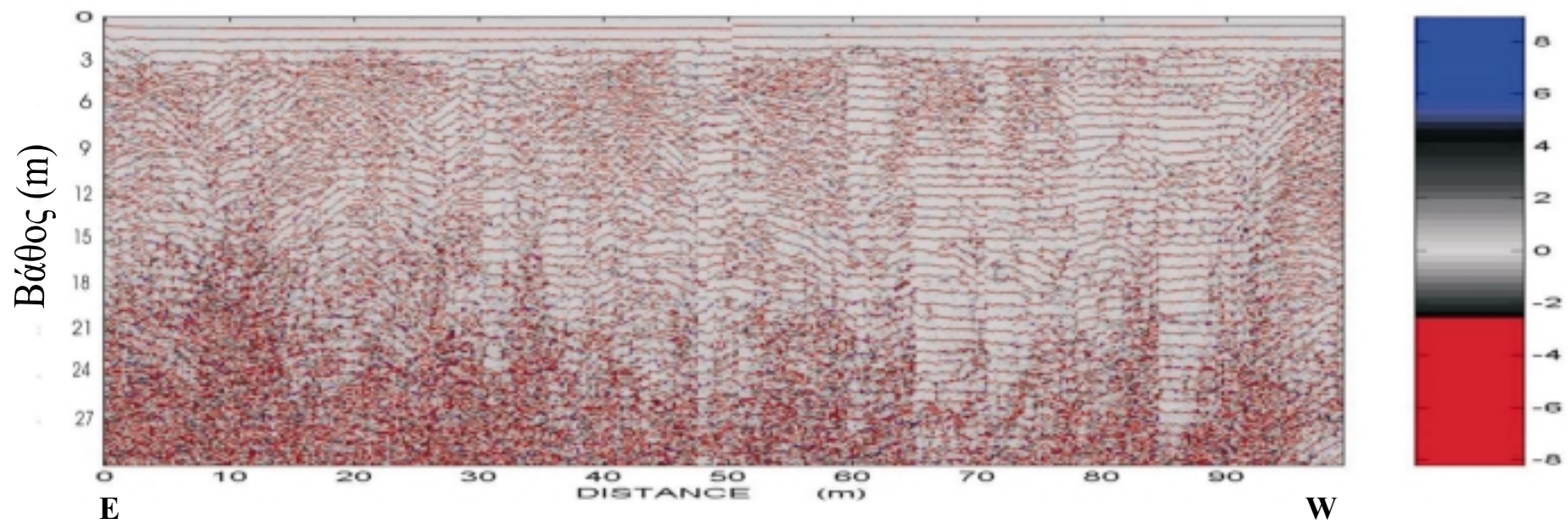
Σχ.6.4.5 Υπέρθεση εικόνων για τη τρίτη γραμμή μελέτης



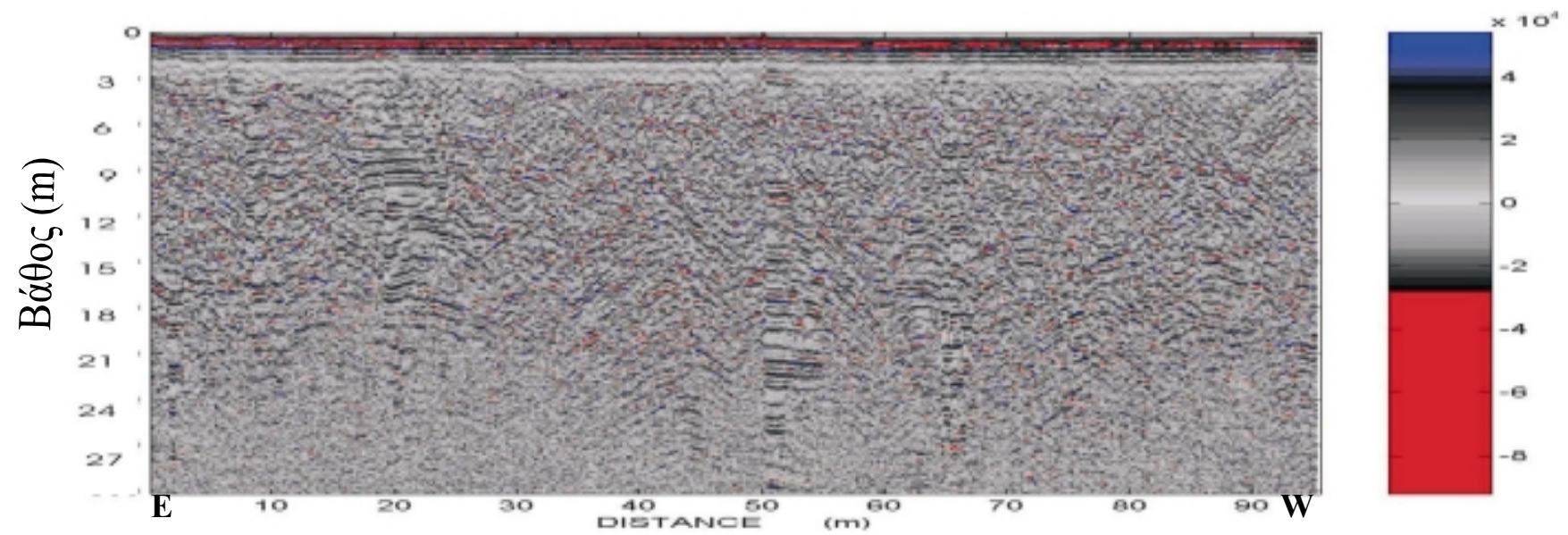
Σχ.6.4.6 Υπόθεση εικόνων για την τέταρτη γραμμή μελέτης



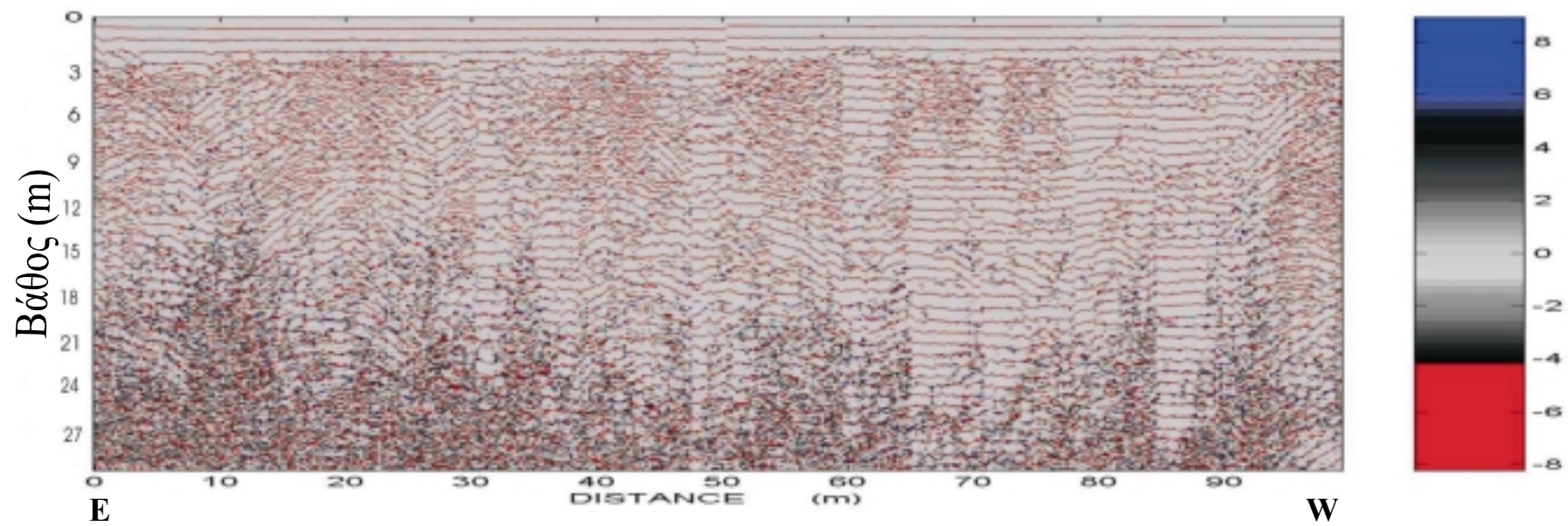
Σχ.6.4.7 Εικόνα της δεύτερης γραμμής μετά από τη χρήση του φίλτρου AGC



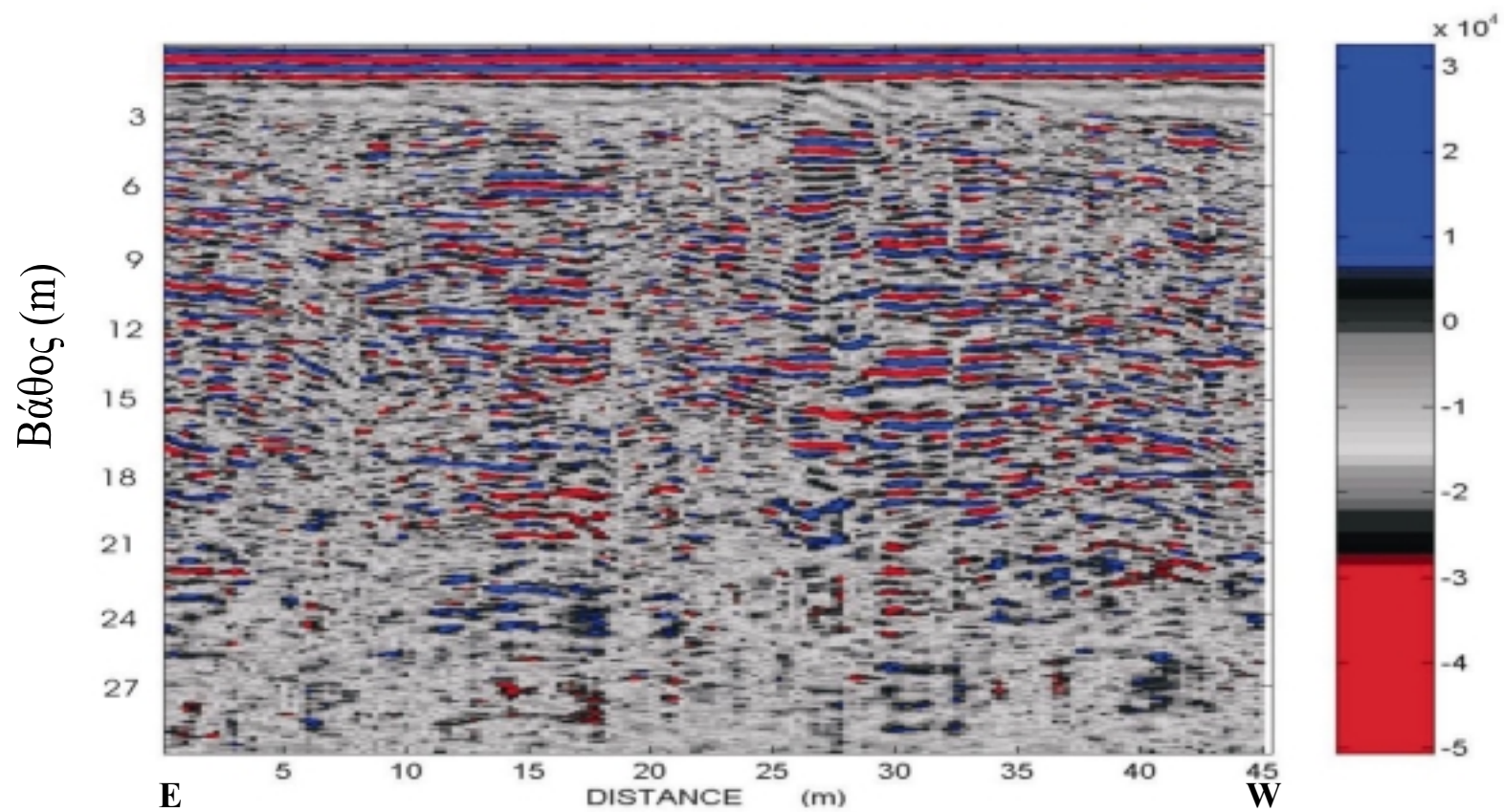
Σχ.6.4.8 Εικόνα της δεύτερης γραμμής μετά από τη χρήση του φίλτρου Thin Bed.



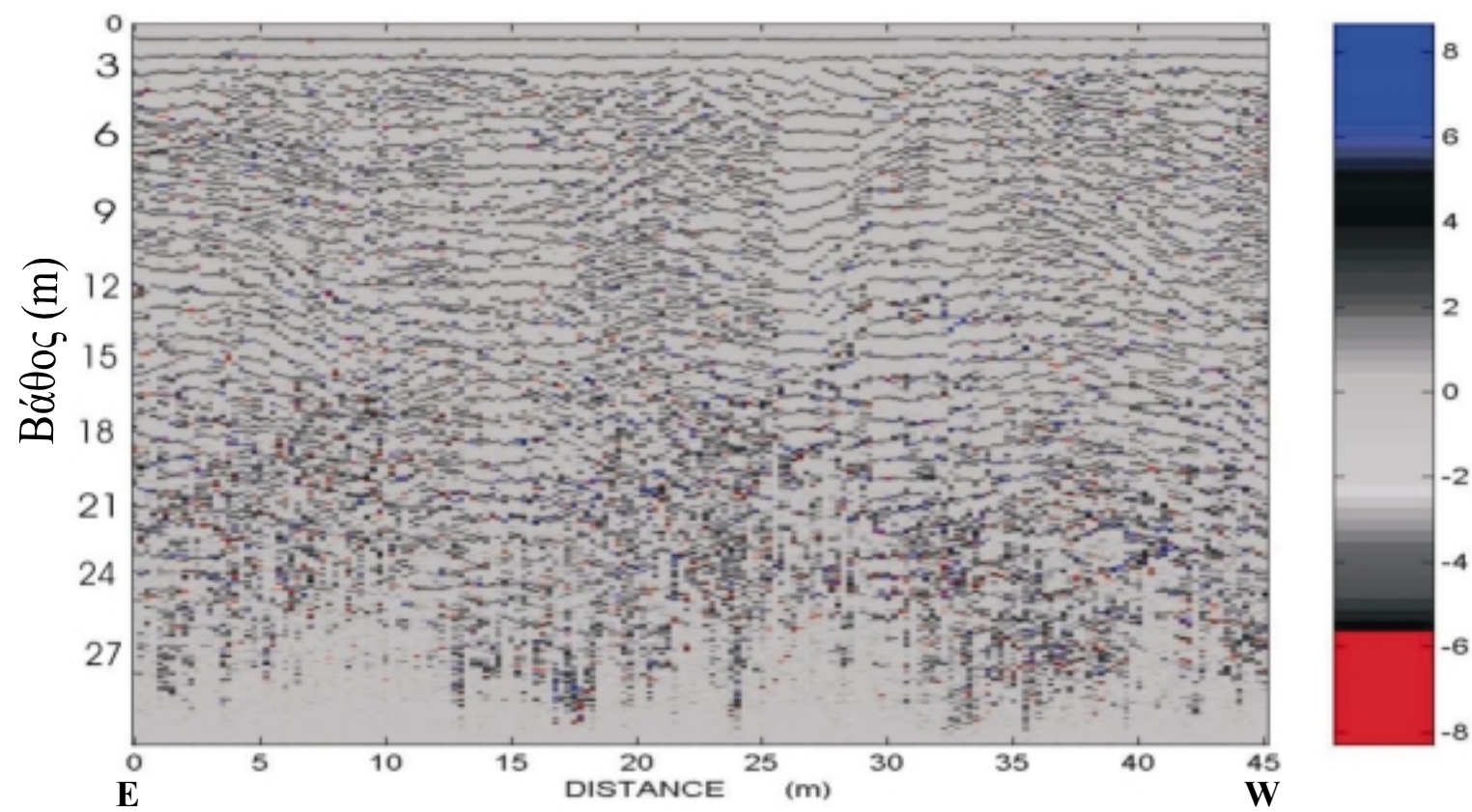
Σχ.6.4.9 Εικόνα της τρίτης γραμμής μετά από τη χρήση του φίλτρου AGC



Σχ.6.4.10 Εικόνα της τρίτης γραμμής μετά από τη χρήση του φίλτρου Thin Bed.



Σχ.6.4.11 Εικόνα της τέταρτης γραμμής μετά από τη χρήση του φίλτρου AGC



Σχ.6.4.12 Εικόνα της τέταρτης γραμμής μετά από τη χρήση του φίλτρου Thin Bed.

6.5 Συμπεράσματα

Από τη συνολική επεξεργασία των μετρήσεων και μετά τη σύγκριση των εικόνων της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ συμπεραίνουμε ότι στη περιοχή μελέτης παρουσιάστηκαν τρεις σημαντικές ανωμαλίες. Η πρώτη βρίσκεται μεταξύ των γραμμών 2, 3, 4 και 5 και αρχίζει από 28m και φτάνει έως τα 42m από την αρχή των γραμμών με βάθος 3m έως 14m. Η δεύτερη ανωμαλία εμφανίζεται σε όλες τις γραμμές και σε απόσταση 70m από την αρχή των γραμμών έως 96m, με βάθος από 3m έως 10m περίπου. Τέλος, η τρίτη ανωμαλία εμφανίζεται στις γραμμές 2 και 5 και σε απόσταση 56m από την αρχή των γραμμών έως τα 68m και με βάθος από 5m έως 15m. Οι ανωμαλίες αυτές επιβεβαιώθηκαν μετά την εξόρυξη στο συγκεκριμένο μέτωπο υποδεικνύοντας ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι δίνουν χρήσιμες πληροφορίες που βοηθούν το μηχανικό παραγωγής στο σχεδιασμό της εκμετάλλευσης.

Όσο αφορά την εκμετάλλευση της περιοχής από το λατομείο θα ήταν σκόπιμο να πούμε ότι η μελέτη αυτή δίνει την ευκαιρία στο μηχανικό της παραγωγής να σχεδιάσει την εκμετάλλευση με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγει καλύτερης ποιότητας υλικό. Επίσης κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης μπορεί να υπολογιστεί εκ νέου η εκρηκτική ύλη με την οποία θα γομωθούν τα διατρήματα στη περιοχή των ανωμαλιών για μια επιτυχημένη και οικονομική ανατίναξη.

Τέλος, τα ευθαρυντικά αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η γεωφυσική έρευνα μπορεί να ενταχθεί στην εξορυκτική διαδικασία

Βιβλιογραφία:

- ♦ [Αντώνιος Βαφείδης](#), «Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική» ,σημειομαθήματος γεωφυσικής II ,
- ♦ [Franjo Sumanovac](#) «Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological mapping in karst terrains», Journal of Applied Geophysics 47 (2001) 13-28
- ♦ [Andrew T. Chamberlain, W. Seller, C. Proctor & R. Coard](#), «Cave Detection in Limestone using Ground Penetrating Radar», Journal of Archaeological Science 27 (2000) 957-964
- ♦ [W. Al- fares, M. Bakalowicz, R. Guerin, M. Dukhan](#), «Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Herault, France) with ground penetrating radar», Journal of Applied Geophysics 51 (2002) 97-106
- ♦ [T. Toshioka, T. Tsuchida, K. Sasahara](#), «Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes», Journal of Applied Geophysics 33 (1995) 119-124
- ♦ [J. Doolittle & M. Collins](#), «A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst», Geoderma 85 (1998) 83-102
- ♦ [Douglas L. Smith](#), «Application of the pole – dipole resistivity technique to the detection of solution cavities beneath highways», Geophysics vol.51 No.3 (March 1986) 833- 837
- ♦ [W. Zhou, B.F. Beck & J.B. Stephenson](#), «Reliability of dipole- dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terranes», Environmental Geology 39 (7) May 2000, 760-766

- ♦ [Torleif Dahlin](#), «2D resistivity surveying for environmental and engineering applications», First Break Vol. 14, No. 7, July 1996, 275 – 283
- ♦ [R. Guerin & Y. Benderitter](#), «Shallow karst exploration using MT –VLF and DC resistivity methods», Geophysical Prospecting 43, 1995, 635- 653
- ♦ [D. Vogelsang](#), «Examples of electromagnetic prospecting for karst and fault systems», Geophysical Prospecting 35, 1987, 604-617
- ♦ [D. H. Griffiths & R. D. Barker](#), «Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology», Journal of Applied Geophysics 29 (1993), 211-226
- ♦ [H. Hamdan](#), «Γεωηλεκτρική διασκόπηση στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη του νομού Χανίων», διπλωματική εργασία (2002) τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων πολυτεχνείου Κρήτης.
- ♦ [Γ. Σούρλας](#), «Συμβολή της γεωφυσικής διασκόπησης στην αναζήτηση θαμμένων αρχαιοτήτων στην Ίτανο, Λασιθίου.», μεταπτυχιακή εργασία (2000) τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων πολυτεχνείου Κρήτης.
- ♦ [Ι. Γκανιάτσος](#), «Γεωηλεκτρική τομογραφία με τη διάταξη Wenner», διπλωματική εργασία (1995) τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων πολυτεχνείου Κρήτης.
- ♦ [Ν. Σπανουδάκης](#), «Συμβολή του υπεδάφιου Ραντάρ στην ανίχνευση στόχων μικρών διαστάσεων», διπλωματική εργασία (2001) τμήμα Μηχ. Ορυκτών Πόρων πολυτεχνείου Κρήτης