



Πολυτεχνείο
Κρήτης

Deleted: <<

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
"ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΣΤΟ
ΑΤΣΙΠΟΠΟΥΛΟ Ν. ΡΕΘΥΜΝΟΥ."

ΠΟΛΥΧΡΟΝΙΔΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ (επιβλέπων), ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την επεξεργασία και ερμηνεία γεωφυσικής διασκόπησης, για την ανίχνευση εγκοίλων σε ιδιωτικό οικόπεδο στην περιοχή Ατσιπόπουλου, Ρεθύμνου. Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε με την χρήση τριών γεωφυσικών μεθόδων, της ηλεκτρικής τομογραφίας, της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης και του γεωραντάρ.

Στόχος είναι η χαρτογράφηση των σχηματισμών του υπεδάφους στην περιοχή μελέτης και κυρίως ο χαρακτηρισμός των επιφανειακών σχηματισμών πάνω στους οποίους θα εδραστεί η κατασκευή. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με τα λογισμικά πακέτα RES2DINV και GPRProV5.

Από τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης και της ηλεκτρικής τομογραφίας προκύπτει μία ζώνη χαμηλών αντιστάσεων η οποία εκτείνεται από το δάπεδο της εκσκαφής του υπογείου μέχρι το βάθος των 3 m. Η ζώνη αυτή πιθανόν να οφείλεται σε κατακερματισμένο μαργαϊκό ασβεστόλιθο πληρωμένο με αργιλικά και επεκτείνεται και κάτω από την ράμπα μέχρι την απόσταση των 36 m από την αρχή της γραμμής μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας. Σύμφωνα με τις τομές γεωραντάρ διαπιστώθηκαν δύο περιοχές, μία στα δυτικά με πιο υγιή ασβεστόλιθο και μία στα ανατολικά με κατακερματισμένο ασβεστόλιθο όπου υπάρχει και έγκοιλο. Στο δάπεδο της εκσκαφής του υπογείου δεν παρατηρούνται έγκοιλα μεγάλου όγκου, μέχρι το βάθος των 6 m. Η διασκόπηση στο υπόλοιπο οικόπεδο υπέδειξε δύο περιοχές που χρήζουν περεταίρω διερεύνησης. Η πρώτη βρίσκεται κάτω από την ράμπα σε βάθος 2 m από την ράμπα και η άλλη πιο βόρεια σε βάθος 5 m.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ομαλή διεξαγωγή και ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Βαφείδη Αντώνιο για την ανάθεση του θέματος και την βοήθεια του για την ολοκλήρωση της εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Ανδρονικίδη Νικόλαο και Οικονόμου Νικόλαο για την πολύτιμη βοήθεια τους τόσο στην διάρκεια της επεξεργασίας των μετρήσεων όσο και κατά την συγγραφή της.

Ευχαριστίες οφείλω στους καθηγητές κ. Μανούτσογλου Εμμ. και κ. Γαλετάκη Μιχ. για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου για την ηθική και υλική υποστήριξή τους αλλά κυρίως για την υπομονή τους τόσο στην διάρκεια της εργασίας αλλά και κατά την διάρκεια των σπουδών μου συνολικά.

Deleted: ¶

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- 1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας 1
- 1.2 Εφαρμογές Γεωφυσικών Μεθόδων στα Γεωτεχνικά.....**Error! Bookmark not defined.**
- 1.3 Περιγραφή της Εργασίας..... 3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 4

- 2.1 Εισαγωγή 4
- 2.2 Ηλεκτρικό Ρεύμα 4
- 2.3 Ηλεκτρική Τομογραφία 5
- 2.4 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορυκτών και πετρωμάτων 8
- 2.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων..... 9
 - 2.5.1 Διάταξη Διπόλου-Διπόλου 10
- 2.6 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων..... 12
- 2.7 Φαινόμενη Ειδική ηλεκτρική αντίσταση..... 13
- 2.8 Γεωφυσική Μέθοδος του Γεωραντάρ 14
- 2.9 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ..... 14
- 2.10 Εφαρμογές Γεωραντάρ 17
- 2.11 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου 18
- 2.12 Ηλεκτρομαγνητική Χαρτογράφηση 19
- 2.13 Μέθοδος κινούμενου πομπού - δέκτη..... 20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 22

Ηλεκτρική Τομογραφία..... 22

- 3.1 Αντιστροφή των δεδομένων 22
- 3.2 Λογισμικό πακέτο Res2dinv..... 23
- 3.3 Μέθοδος επεξεργασία ηλεκτρικής τομογραφίας, ..**Error! Bookmark not defined.**
- 3.4 Μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ. 25
- 3.5 Φίλτρα 26
 - 3.5.1 Φίλτρο διόρθωσης ίχνους..... 26
 - 3.5.2 Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου..... 27
 - 3.5.3 Ενίσχυση σήματος..... 27
- 3.6 Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων 28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 29

Γεωφυσική Διασκόπηση στο Ατσιπόπουλο Ρεθύμνου

- 4.1 Εισαγωγή 29
- 4.2 Στοιχεία του έργου και Περιοχή Μελέτης 33

4.3 Ηλεκτρική Τομογραφία	33
4.4 Τομές Γεωρντάρ	Error! Bookmark not defined.
4.5 Ηλεκτρομαγνητική Χαρτογράφηση	36
4.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας, η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μελέτης για την ανίχνευση εγκοίλων στην περιοχή Ατσιπόπουλου στο Ρέθυμνο. Η ανάθεση της γεωφυσικής διασκόπησης έγινε από τον ενδιαφερόμενο κ. Μ. Πλεύρη. Η γεωφυσική έρευνα περιλάμβανε την εκτέλεση τριών γεωφυσικών μεθόδων, την ηλεκτρική τομογραφία, την ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση και την μέθοδο του γεωραντάρ. Στόχος της έρευνας ήταν η χαρτογράφηση των σχηματισμών του υπεδάφους στην περιοχή μελέτης και ειδικότερα τον χαρακτηρισμό των επιφανειακών σχηματισμών πάνω στους οποίους θα εδραστεί η κατασκευή. Από την χαρτογράφηση εντοπίζονται ζώνες υγρασίας και άλλες ανομοιογένειες του υπεδάφους και επιπλέον υποδεικνύονται θέσεις που χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής για την κατασκευή των κατοικιών.

1.2 Εφαρμογές Γεωφυσικών Μεθόδων στα Γεωτεχνικά

Τα τεχνικά έργα που κατασκευάζονται σήμερα είναι έργα με μεγάλες απαιτήσεις ασφάλειας και κόστους. Οι προδιαγραφές ασφαλούς κατασκευής και ο περιορισμός του κόστους της κατασκευής εντοπίζονται στην ακριβέστερη μελέτη των συνθηκών θεμελίωσης του έργου πάνω ή μέσα στο γεωλογικό τους υπόβαθρο. Το στοιχείο αυτό προϋποθέτει προχωρημένη γνώση της γεωλογικής δομής της βραχομάζας ή εδαφομάζας και των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών τους παραμέτρων.

Έτσι η ακριβής και λεπτομερειακή μελέτη κατά τις φάσεις του σχεδιασμού και της κατασκευής οποιουδήποτε επιφανειακού ή υπόγειου τεχνικού έργου είναι απαραίτητη και επιβεβλημένη. Μέσα από τον εντοπισμό ασθενών περιοχών θεμελίωσης και μελλοντικής παρουσίας αστοχιών στην κατασκευή, όπως και αποφυγή ανεπιθύμητων ενεργειών και ασθενών περιοχών οδηγούμαστε στην αυτόματη αύξηση της ασφάλειας των κατασκευών και στον περιορισμό του κόστους της κατασκευής τους.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι έρχονται να συμπληρώσουν όλα τα ερωτήματα που έχουν να κάνουν με το υπέδαφος, δίνοντας στους πολιτικούς μηχανικούς και στους αρχιτέκτονες μια γρήγορη εικόνα με ταυτόχρονα χαμηλό κόστος. Γι' αυτούς τους λόγους γίνεται απαραίτητη και επιβεβλημένη η σύνταξη γεωλογικής μελέτης στο σχεδιασμό και την κατασκευή οποιουδήποτε τεχνικού έργου.

Επιφανειακοί γεωφυσικοί στόχοι μέχρι 5 m:

- i. Σωλήνες, κοιλότητες στο έδαφος, έγκοιλα μικρού μεγέθους, κατασκευές μέσα στο έδαφος.
- ii. Γεωλογικά στοιχεία όπως μικρορήγματα, στρωματογραφικά επαλληλικά, κατάσταση πρανών, ποσοστό υγρασίας εδάφους.
- iii. Αρχαιολογικοί στόχοι (τάφοι, τείχι κ.α.)

Επιφανειακοί γεωφυσικοί στόχοι μεσαίου βάθους από 5 μέχρι 25 m μπορεί να είναι:

- i. Έγκοιλα, σπηλαιώσεις, καρστικά, υπόγεια ρήγματα.
- ii. Γεωλογικοί ορίζοντες, θαμμένες ζώνες απορριμμάτων σε σκουπιδότοπους, τούνελ, ζώνες μεταλλευμάτων.

Βαθείς γεωφυσικοί στόχοι από 25 m και άνω. Γεωφυσικοί στόχοι σε αυτό το βάθος δεν μπορεί να είναι παρά μόνο γεωλογικές οντότητες δεδομένου ότι οι ανθρώπινες κατασκευές είναι πλέον ελάχιστες τόσο βαθιά. Έτσι, βαθείς γεωφυσικοί στόχοι μπορεί να είναι:

- i. Γεωλογικά στρώματα διαφόρων ειδών
- ii. Υδροφόρα ρήγματα

Ένα πρόγραμμα γεωφυσικών διασκοπήσεων αποτελείται από το στάδιο εργασιών υπαίθρου και το στάδιο της επεξεργασίας - ερμηνείας. Στις εργασίες υπαίθρου γίνονται μετρήσεις σε συγκεκριμένες περιοχές που υποδεικνύονται με την συνεργασία του επιβλέποντος φορέα. Ο προσδιορισμός του βάθους υποβάθρου είναι ένας αρκετά κοινός γεωφυσικός στόχος.

Καλό είναι πριν την επιλογή της μεθόδου να γίνεται μια εκτίμηση για το πιθανό βάθος έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί η σωστή μέθοδος.

1.3 Περιγραφή της Εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Σε πρώτο στάδιο αναλύονται οι μέθοδοι και στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων για κάθε μέθοδο.

Πιο συγκεκριμένα στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (ηλεκτρική τομογραφία, ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση, γεωραντάρ), ο τρόπος λειτουργίας κάθε μεθόδου και φυσικά οι εφαρμογές τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή του τρόπου επεξεργασίας κάθε μεθόδου και των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων για κάθε μέθοδο ξεχωριστά καθώς επίσης συμπεράσματα που προκύπτουν από συνδυασμό των μεθόδων σχετικά με την ύπαρξη εγκοίλων αλλά και για την ποιότητα των αποτελεσμάτων μετά την χρήση τριών γεωφυσικών μεθόδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης άρχισαν να εφαρμόζονται στην μελέτη του υπεδάφους στην αρχή του εικοστού αιώνα. Πρωτοπόροι στην έρευνα υπήρξαν ο Wenner και ο Schlumberger των οποίων οι μελέτες βοήθησαν στην διάδοση των ηλεκτρικών μεθόδων. Με την χρήση αυτών εντοπίστηκε φυσικό αέριο στη Ρουμανία το 1923, αλατούχος δόμος στη Γαλλία το 1926, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής οι εφαρμογές αυτές άρχισαν το 1925. Η συστηματική όμως εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων άρχισε μετά το 1970 με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι οποίοι βοήθησαν τόσο στη συλλογή όσο και στην επεξεργασία των μετρήσεων.

Βασική επιδίωξη των ηλεκτρικών μεθόδων της γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας την ηλεκτρική τάση ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ο καθορισμός και η μελέτη της κατανομής των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Για την σωστή εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων απαιτείται σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπό μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών, στην Υδρογεωλογία, στη Γεωθερμία, στην Κοιτασματολογία, και στην Αρχαιολογία.

2.2 Ηλεκτρικό Ρεύμα

Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η κατευθυνόμενη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων, η οποία συμβαίνει στους αγωγούς εξαιτίας κάποιας διαφοράς δυναμικού. Φορείς του κινούμενου φορτίου στα μέταλλα είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και

στους ηλεκτρολύτες, τα ιόντα. Στους αέριους αγωγούς μπορεί να είναι και ιόντα ή και ηλεκτρόνια. Η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αντίθετη από την φορά κίνησης των ηλεκτρονίων.

Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, I , είναι ίση με το πηλίκο του φορτίου q που περνά από τον αγωγό διατομής S ίσης με τη μονάδα προς την αντίστοιχη χρονική διάρκεια t που χρειάζεται. Η μονάδα μέτρησης είναι το Ampere.

Η ηλεκτρική αντίσταση εκφράζει την ευκολία ή μάλλον την δυσκολία που βρίσκει το ηλεκτρικό ρεύμα κατά την διέλευσή του από τον αγωγό εκφράζεται από τον Νόμο του Ohm και ορίζεται ως το πηλίκο της V που εφαρμόζεται στα άκρα του προς την ένταση I του ρεύματος που τον διαρρέει .

Η αντίσταση μεταλλικού αγωγού είναι ανεξάρτητη από την τάση που εφαρμόζεται, είναι ανάλογη του μήκους L του αγωγού και αντιστρόφως ανάλογη με το εμβαδόν A της τομής του αγωγού και εξαρτάται από το υλικό και την θερμοκρασία του.

2.3 Ηλεκτρική Τομογραφία

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στην ηλεκτρική τομογραφία, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στην μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, εντοπίζοντας έτσι μεταβολές κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας, έχει σκοπό τον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, ή καλύτερα την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος που ονομάζεται και γεωηλεκτρική δομή. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους, και επομένως από τις μετρήσεις του δυναμικού είναι δυνατός ο καθορισμός της δομής.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (2.1)$$

όπου, ρ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού του αγωγού, R η αντίσταση ενός ομογενούς αγωγού, L το μήκος του αγωγού και A το εμβαδόν της τομής του αγωγού.¹

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων, SI, είναι το Ωm , μερικές φορές χρησιμοποιείται και η μονάδα $1 \Omega cm$ όπου $1 \Omega m = 100 \Omega cm$. Το αντίστροφο, $\sigma = 1/\rho$, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, με μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα το Siemens/m.

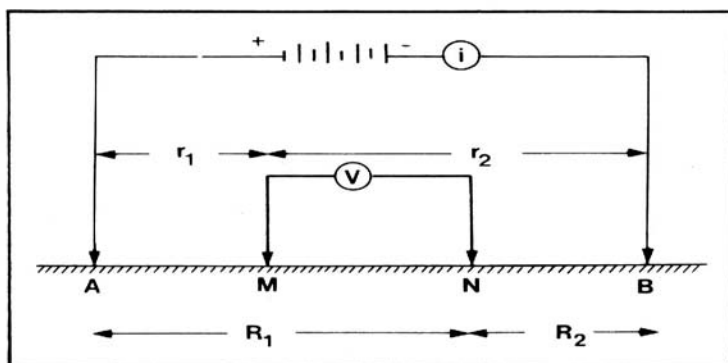
Το σχήμα 2.1, αντιπροσωπεύει μια τυπική διάταξη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Υπάρχουν τα ηλεκτρόδια ρεύματος AB που είναι συνδεδεμένα με το αμπερόμετρο για τον υπολογισμό της έντασης του ρεύματος που εισάγεται στο έδαφος, ενώ τα ηλεκτρόδια MN είναι τα ηλεκτρόδια τάσης, που συνδέονται με βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης. Μια σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη διάταξη των ηλεκτροδίων από θέση σε θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται επεξεργασία των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιώντας κάποιο λογισμικό πακέτο για τον υπολογισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm προκύπτει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}, \quad (2.2)$$

¹ Πηγή: Robinson, (1988)

όπου, r_1 η απόσταση AM, r_2 η απόσταση MB, R_1 η απόσταση AN, και R_2 η απόσταση NB.



Σχήμα 2.1. Τυπική διάταξη ηλεκτροδίων με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Η ηλεκτρική τομογραφία χρησιμοποιείται για την χαρτογράφηση περιοχών περίπλοκης γεωλογικής δομής όπου η συμβατική μέθοδος της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης είναι ανεπαρκής. Τέτοιες διασκοπήσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας 28 ηλεκτρόδια ή περισσότερα τα οποία τοποθετούνται πάνω στην γραμμή μελέτης με αύξουσα σειρά (το πρώτο ηλεκτρόδιο ακολουθείται από το δεύτερο και το κάθε εξής).

Μια κεντρική μονάδα υπολογιστή επιλέγει αυτόματα τα ενεργά ηλεκτρόδια που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε μέτρηση, αναλόγως της διάταξης που έχει επιλεγεί από την χρήστη πριν από την έναρξη των μετρήσεων. Τα δεδομένα της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης από αυτές τις διασκοπήσεις τακτοποιούνται σε μια ψευδοτομή που δίνει μια πρώτη εκτίμηση για την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε πραγματικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την ορθή ερμηνεία και ακριβές προσδιορισμό επιθυμητών βαθών.

2.4 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορυκτών και πετρωμάτων

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ορυκτών και των πετρωμάτων αποτελούν αντικείμενο μελέτης για σχεδόν δύο αιώνες. Η ειδική αντίσταση, ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Το αντίστροφο, $\sigma = 1/\rho$, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης λέγεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα περισσότερα ορυκτά και πετρώματα δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Μόνο τα μεταλλικά ορυκτά και τα πετρώματα με σημαντική συγκέντρωση σε αυτά τα ορυκτά παρουσιάζουν αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της αγωγής του ηλεκτρισμού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των μετάλλων (ηλεκτρονική αγωγή).

Τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα συνήθως παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές του ρ σε σχέση με τα ιζηματογενή. Αυτό οφείλεται στο ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των ιζηματογενών κυρίως πετρωμάτων επηρεάζεται από το πορώδες και τη περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα (ηλεκτρολυτική αγωγή).

Η λιθολογία και η γεωλογική ηλικία των πετρωμάτων παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Με το πέρασμα του χρόνου, το συνολικό πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων μεγαλώνει με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης που ασκούν τα στρώματα αυτά στα υποκείμενα. Άρα, τα μεγαλύτερης ηλικίας υποκείμενα στρώματα παρουσιάζουν αυξημένη συνοχή, μικρό πορώδες και μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Ο γενικός αυτός κανόνας δεν ισχύει πάντα και ιδιαίτερα για τα τριτογενή ιζήματα τα οποία έχοντας σχηματιστεί σε γλυκό νερό, κατά κύριο λόγο, έχουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από τα μεσοζωικά ιζήματα τα οποία σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό, αφού η περιεκτικότητα σε ιόντα παίζει ως γνωστό αποφασιστικό ρόλο στη διέλευση του ρεύματος.

Για τα πετρώματα που είναι διαποτισμένα με νερό υπάρχει έμμεση σχέση μεταξύ της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της λιθολογίας ή της γεωλογικής ηλικίας καθώς, οι δύο παράγοντες αυτοί καθορίζουν το πορώδες. Στα κρυσταλλικά πετρώματα των οποίων το πορώδες είναι εξαιρετικά χαμηλό, η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται αποκλειστικά σχεδόν, στις ρωγμές που υπάρχουν στα πετρώματα αυτά.

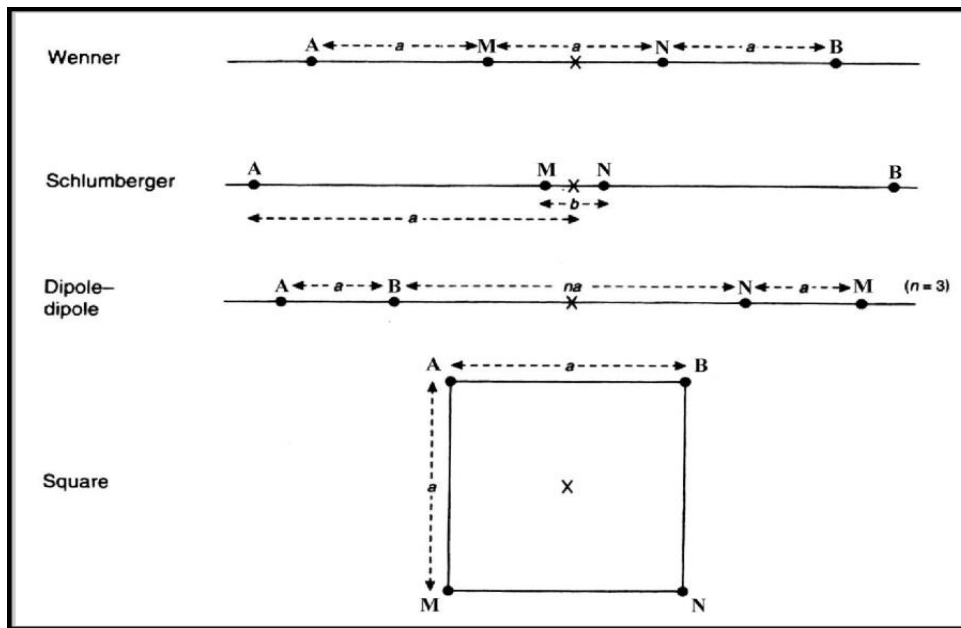
Συνοψίζοντας, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των υδροφόρων και μη σχηματισμών ελαττώνεται με την αύξηση:

- του όγκου του νερού στο πέτρωμα
- της περιεκτικότητας σε χλωριόντα ή ελεύθερα ιόντα του υπόγειου ύδατος
- της θερμοκρασίας (αύξηση της ευκινησίας των ιόντων)
- της περιεκτικότητας σε αργίλους
- του βαθμού κορεσμού του διαλύματος στους πόρους του πετρώματος
- της καρστικοποίησης
- της εξαλλοίωσης.

2.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Υπάρχουν πολλές διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται σήμερα στην ύπαιθρο, ανάλογα με την περιοχή, το μέγεθος των δομών που αναμένονται, τον εξοπλισμό και την εξοικείωση του προσωπικού.

Οι κυριότεροι παράγοντες κατά την επιλογή της διάταξης στην ηλεκτρική τομογραφία είναι το μέγιστο βάθος διασκόπησης και η διακριτική ικανότητα τους. Οι διατάξεις στις οποίες χρησιμοποιούνται δίπολα (διπόλου – διπόλου, πόλου – διπόλου) έχουν μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης για συγκεκριμένο ανάπτυγμα ηλεκτροδίων σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Οι διατάξεις Wenner, Schlumberger και διπόλου – διπόλου έχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα στο ίδιο βάθος σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις.

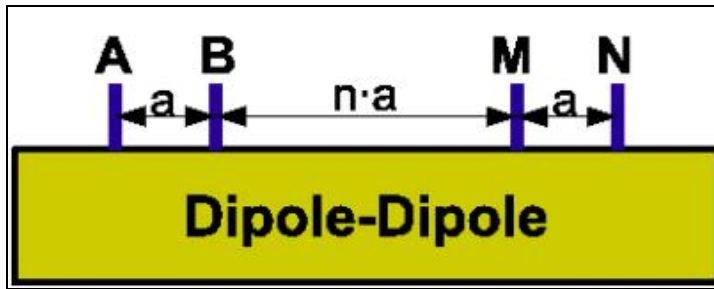


Σχήμα 2.2: Διατάξεις ηλεκτρικής τομογραφίας (Βαφείδης και συνεργάτες, 1991)

Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζονται οι πιο συνηθισμένοι τύποι διατάξεων. Οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές επειδή ελαχιστοποιούν τα αποτελέσματα της αντίστασης επαφής. Δηλαδή της ηλεκτρικής αντίστασης στην θέση του ηλεκτροδίου. Παρακάτω αναφέρεται η διάταξη διπόλου-διπόλου επειδή αυτή χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

2.5.1 Διάταξη Διπόλου-Διπόλου

Σε αυτή τη διάταξη, 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 ($n \gg a$), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Διάταξη Διπόλου – Διπόλου.

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

$$K = \pi n a (n+1) (n+2), \quad (2.3)$$

και η φαινόμενη ειδική αντίσταση από :

$$\rho_a = \pi n a (n+1) (n+2) \quad (2.4)$$

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της διάταξης αποτελεί η απόσταση $2na$, ανάμεσα στα διπόλα 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.

Οι χαρακτηριστικές τιμές των ειδικών αντιστάσεων, οι οποίες προέκυψαν από γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις αναφοράς, από μετρήσεις της ειδικής αντίστασης σε θέσεις όπου τα πετρώματα εμφανίζονται στην επιφάνεια και από προηγούμενες μελέτες (Βαφείδης και συνεργάτες, 1991, Βαφείδης και Αμολοχίτης 1992), συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

--	--

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ Άργιλοι Μάργες Άμμοι και χαλίκια κορεσμένα Εβαπορίτες (Γύψοι) Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι Κροκαλοπαγή βάσεως Ψαμμίτες	2-20 20-60 50-500 200 150-500 200-300 50-70
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ Φλύσχης Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι Ασβεστόλιθοι	70-80 100-300 >500

Πίνακας 2.1: Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων (Βαφείδης και συνεργάτες, 1991, Βαφείδης και Αμολοχίτης 1992).

2.6 Παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων

Η επιλογή του τρόπου διάταξης των ηλεκτροδίων κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για τη γεωηλεκτρική διασκόπηση. Η διάταξη των ηλεκτροδίων δύναται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων.

Οι παράγοντες – κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι:

- Λόγος σήματος ως προς θόρυβο.

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

- Ευαισθησία σε οριζόντιες επιφάνειες.

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

- Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος.

Οι διατάξεις Wenner και Schlumberger 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.

- Διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου 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 βάθους που έχει, της παρέχουν ένα σαφές προβάδισμα.

- Βάθος διασκόπησης.

Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται κυρίως από το οριζόντιο ανάπτυγμα (απόσταση μεταξύ 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 υποβάθρου και από το μοντέλο των στρωμάτων του υπεδάφους.

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

- Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.

Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δημιουργεί πύκνωση και αρραίωση των ρευματικών γραμμών.

2.7 Φαινόμενη Ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η σχέση (2.2) προέκυψε θεωρώντας ότι τα επιφανειακά στρώματα της γης είναι ομογενή. Αυτό όμως δεν ισχύει καθώς η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι σταθερή σε αυτά. 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 φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζει τον μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα. Η τιμή της 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.

2.8 Γεωφυσική Μέθοδος του Γεωραντάρ

Η χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για την έρευνα του υπεδάφους ξεκίνησε στις αρχές του αιώνα, ωστόσο η τεχνολογία του γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar) 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.

Παρ' όλο που στις Η.Π.Α. χρησιμοποιούνταν σταθμοί ραντάρ από το 1950 μετά την δεκαετία του 1970 έγιναν γεωφυσικές διασκοπήσεις με την χρήση του γεωραντάρ. Σε αυτό συνέβαλε και η ανάπτυξη της τεχνολογίας, οπότε και κατασκευάστηκαν φορητά και μικρότερου κόστους όργανα. Την δεκαετία του 1980 η τεχνολογία του γεωραντάρ γνωρίζει μεγάλη άνθιση με την εισαγωγή των ψηφιακών συστημάτων, η οποία οδήγησε στην επεξεργασία σήματος και την ανάπτυξη καινούργιων εφαρμογών.

Η υψηλή ακρίβεια με την οποία ανιχνεύει ασυνέχειες στην κατανομή των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων, δίνει λύσεις σε πολλά πρακτικά προβλήματα όπως ο καθορισμός του πάχους γεωλογικών στρωμάτων και του βάθους υδροφόρων οριζώντων, ο προσδιορισμός φυσικών ή τεχνητών υπόγειων έγκοιλων και στοών, ο εντοπισμός θαμμένων αρχαιοτήτων και αρχαιολογικών λειψάνων, η χαρτογράφηση των πάγων και ο διαχωρισμός στρωμάτων διαφορετικών εποχών, ο έλεγχος της έκτασης της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων κ.α. Τα τελευταία χρόνια η μέθοδος του γεωραντάρ χρησιμοποιείται επίσης και για μετρήσεις σε γεωτρήσεις.

2.9 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται στην έρευνα δομών μικρού βάθους και χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνοτήτων από 1 έως 1000 MHz. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων.

Ο πομπός παράγει ηλεκτρομαγνητικό παλμό ο οποίος διαρκεί μόνο μερικά

νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec). Ο παλμός αυτός 'ταξιδεύει' στο υπό έρευνα υλικό ωσότου επιφάνεια ή υλικό με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Τότε ένα μέρος της ενέργειας του παλμού θα διαδοθεί στο δεύτερο υλικό (διάθλαση) και ένα μέρος θα ανακλαστεί και θα επιστρέψει στον δέκτη. Έτσι η μονάδα ελέγχου καταγράφει τον χρόνο διαδρομής του παλμού και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η διάδοση του κύματος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού καθώς και από την συχνότητα εκπομπής της κεραίας του πομπού.

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 ανακλόμενου παλμού ισούται με:

$$t_r = (4D_r^2 + X^2)^{1/2} / u \quad \text{και} \quad t_r^2 = 4D_r^2 / u^2 + X^2 / u^2 \quad (2.5)$$

$$\text{που δίνει} \quad D_r = [(t_r^2 u^2 - X^2)^{1/2}] / 2 \quad (2.6)$$

όπου X είναι η απόσταση πομπού- δέκτη, D_r το βάθος της επιφάνειας ανάκλασης και u η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο μέσο διάδοσης. Το βάθος του ανακλαστήρα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί εφόσον είναι γνωστά ο χρόνος διαδρομής t_r και η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος u στο μέσο διάδοσης.

Η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το πλάτος του παλμού και το χρόνο που κάνει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από τον πομπό στον δέκτη. Ο δέκτης κατοπτρεύει τα ακόλουθα είδη κυμάτων:

- Ανακλώμενα κύματα: Τα κύματα αυτά εκπέμπονται από τον πομπό, διαδίδονται στο μέσο μέχρι να συναντήσουν κάποιο εμπόδιο όπου ανακλώνται και επιστρέφουν στον δέκτη. Ο χρόνος διαδρομής ισούται με:

$$t_r = (4D^2 + X^2) / u \quad (2.7)$$

όπου X είναι η απόσταση πομπού- δέκτη, D το βάθος του εμποδίου και u η ταχύτητα των κυμάτων στο μέσο διάδοσης.

•Απ' ευθείας κύματα ή πρώτες αφίξεις (first breaks): Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στο δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια διεπιφάνεια και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: απ' ευθείας κύματα αέρα και εδάφους. Τα κύματα αυτά διανύουν μικρές αποστάσεις οπότε οι απώλειες είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα. Τα απ' ευθείας κύματα του αέρα φτάνουν πρώτα στο δέκτη επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι μεγαλύτερη από ότι σε ένα γεωλογικό σχηματισμό. Αμέσως μετά φτάνουν τα απ' ευθείας κύματα εδάφους. Οι εξισώσεις που δίνουν το χρόνο διαδρομής γι' αυτά τα κύματα είναι αντίστοιχα:

$$t = X / u_{\text{αέρα}} \quad (2.8)$$

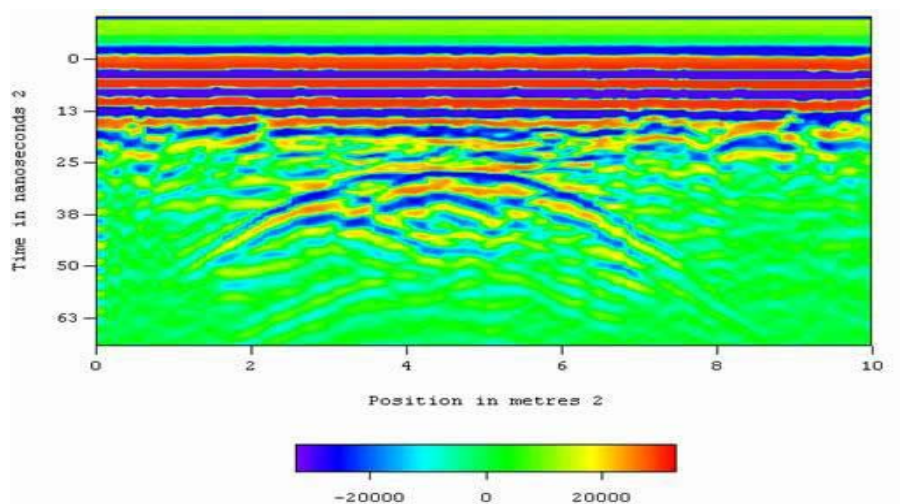
$$t = X / u_{\text{εδάφους}} \quad (2.9)$$

•Κρίσιμα διαθλώμενα κύματα: Όταν σε μία διασκόπηση κοινού ενδιάμεσου σημείου ή σταθερού πομπού- κινούμενου δέκτη, η απόσταση των κεραιών πομπού- δέκτη υπερβεί μια κρίσιμη τιμή X_c τότε το κύμα ανακλάται στην πρώτη επιφάνεια που θα συναντήσει, διαθλάται στην επιφάνεια του εδάφους και διαδίδεται στον αέρα. Τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα διαδίδονται εν μέρει στο έδαφος και εν μέρει στον αέρα. Οπότε καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη πριν από τα απευθείας κύματα του εδάφους και μετά από τα απευθείας κύματα του αέρα.

Το μέγιστο βάθος για το οποίο μπορεί να δώσει πληροφορίες η μέθοδος του Γεωραντάρ εξαρτάται κυρίως από την απορρόφηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η απορρόφηση αυξάνει με την συχνότητα και κατά συνέπεια όσο χαμηλότερη συχνότητα χρησιμοποιείται τόσο βαθύτερα "βλέπει" η μέθοδος. Πρέπει όμως να λαμβάνεται υπόψη ότι η διακριτική ικανότητα μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Για παράδειγμα συστήματα G.P.R. που λειτουργούν σε εύρος 25-50 Mhz μπορεί να διερευνήσουν βάθη που υπερβαίνουν τα 50 m σε εδάφη με χαμηλή αγωγιμότητα (μικρότερη από 1 mS/m) όπως άμμος, χαλίκια.

Οι καταγραφές Radar (ραδιογράμματα) τοποθετούνται η μία δίπλα στην άλλη κατ' αναλογία με τις σεισμικές αναγραφές. Δημιουργείται έτσι μία τομή η

οποία προσομοιάζει την αληθινή ηλεκτρική τομή του υπεδάφους, δηλαδή της αποτύπωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του με το βάθος (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση καταγραφών Radar (ραδιόγραμμα).

2.10 Εφαρμογές Γεωραντάρ

Τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών συστημάτων το γεωραντάρ μετατράπηκε σε ένα πολύ εύχρηστο όργανο και οι εφαρμογές του συνεχώς πολλαπλασιάζονται. Με την χρήση των ψηφιακών συστημάτων βελτιώθηκαν οι μέθοδοι ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ με αποτέλεσμα την καλύτερη και ταχύτερη ερμηνεία των μετρήσεων. Επίσης λόγω της εύκολης μετακίνησης και φορητότητας του γεωραντάρ η συλλογή των δεδομένων είναι σχετικά γρήγορη και η επεξεργασία τους μπορεί να γίνει πολλές φορές επιτόπου εξοικονομώντας χρόνο.

Οι εφαρμογές του γεωραντάρ μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες βάσει της κεντρικής συχνότητας εκπομπής. Στις γεωλογικές εφαρμογές όπου το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από την διακριτική ικανότητα και στις εφαρμογές στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές

δοκιμές όπου η διακριτική ικανότητα είναι το ζητούμενο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένες από τις κυριότερες εφαρμογές του γεωραντάρ:

Γεωλογικές	<ul style="list-style-type: none"> •Χαρτογράφηση βυθισμάτων •Χαρτογράφηση επιφανειακών κοιτασμάτων •Χαρτογράφηση ρωγμών σε ορυκτό αλάτι •Χαρτογράφηση γεωλογικών δομών •Χαρτογράφηση λιμναίων και ποτάμιων ιζημάτων •Ανίχνευση εγκοίλων και ασυνεχειών
Περιβαλλοντικές	<ul style="list-style-type: none"> •Χαρτογράφηση μολυσμένων περιοχών •Έρευνες σε χωματερές •Χαρτογράφηση ρύπων σε υπεδάφειο νερό •Έρευνες για εντοπισμό νερού •Εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων
Κατασκευές	<ul style="list-style-type: none"> •Ανάλυση στρωματογραφίας σε δρόμους •Ανίχνευση αστοχιών και κενών •Προσδιορισμό οπλισμού στο τσιμέντο •Προσδιορισμό σωλήνων καλωδίων •Δοκιμές στο τσιμέντο
Αρχαιολογία	<ul style="list-style-type: none"> •Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών •Χαρτογράφηση πριν την εσκαφή

Πίνακας 2.2: Χρήσεις γεωραντάρ

2.11 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Το GPR είναι μια μέθοδος έρευνας πεδίου που δημιουργεί μια εικόνα του υπεδάφους. Το GPR είναι μια γρήγορη, ανέξοδη τεχνική που μπορεί να εντοπίσει θαμμένα αντικείμενα, δίκτυα κοινής ασφάλειας, υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης και άλλα θαμμένα αντικείμενα. Ο εξοπλισμός GPR είναι συμπαγής, εύκολα μεταφερόμενος και μπορεί να μεταφερθεί από ένα αεροπλάνο στον χώρο των αποσκευών. Ταυτόχρονα η εκπαίδευση στον χειρισμό του είναι πολύ εύκολη και το προσωπικό μπορεί να κινητοποιηθεί άμεσα για έρευνες με GPR.

Η κύρια αδυναμία του GPR είναι ότι δεν μπορεί να διαπεράσει έναν ορίζοντα αργίλου (αν και θα ανιχνεύσει τις ρηγματώσεις). Ο εξοπλισμός είναι επίσης πολύ ακριβός και η ερμηνεία των στοιχείων μπορεί να είναι σύνθετη και δύσκολη. Η χρήση μιας λάθος κεραίας σημαίνει ότι τα σημαντικά χαρακτηριστικά κρύβονται ή λείπουν εξ' ολοκλήρου. Αυτό συμβαίνει λόγω της μικρής ανάλυσης ή της υπερβολικής έντασης του σήματος. Οι προσπάθειες επικεντρώνονται στην εφαρμογή διορθώσεων και επεξεργασίας σήματος των σημάτων του γεωραντάρ. Αυτές οι μέθοδοι, έχουν χρησιμοποιηθεί συνήθως με τα σεισμικά δεδομένα στην αναζήτηση των υδρογονανθράκων για περισσότερο από δύο δεκαετίες.

2.12 Ηλεκτρομαγνητική Χαρτογράφηση

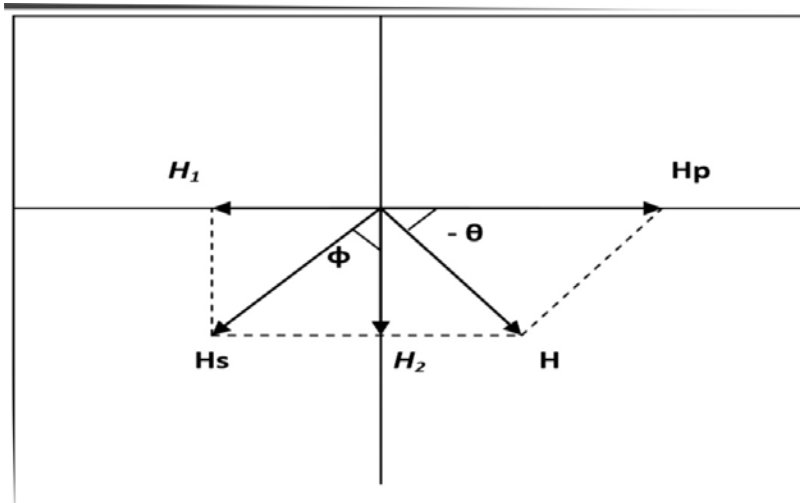
Κατά την εφαρμογή των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων παράγεται στην επιφάνεια της γης (φυσικά ή τεχνητά) πρωτεύον ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο φθάνει απευθείας σε δέκτη στην επιφάνεια της γης. Παράλληλα, το κύμα συνεχίζει την πορεία του μέσα στο υπέδαφος και σε περίπτωση που συναντήσει ηλεκτρικά αγώγιμο σώμα, επάγει σε αυτό ηλεκτρικό ρεύμα με αποτέλεσμα τη γένεση δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Το δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό κύμα φθάνει επίσης στο δέκτη και συμβάλλει με το πρωτεύον.

Τα δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν την ίδια συχνότητα με τα αρχικά κύματα, εντούτοις η αντίστοιχη ένταση του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζει διαφορετική διεύθυνση, πλάτος και φάση. Αυτά τα μεγέθη επηρεάζονται από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα επιφανειακά κυρίως στρώματα του φλοιού της γης.

Η διαφορά φάσης Φ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου (της έντασής των) εξαρτάται από τη γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους. Για αυτό το λόγο, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι που στοχεύουν στη μέτρηση της διαφοράς φάσης Φ .

Στο διάγραμμα φάσεων (Σχήμα 2.5) το διάνυσμα H_p αντιστοιχεί στο πρωτεύον ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το H_s , στο δευτερεύον και το H στη συνισταμένη τους. Η προβολή του H_s στη διεύθυνση του H_p έχει μέτρο H_1 ,

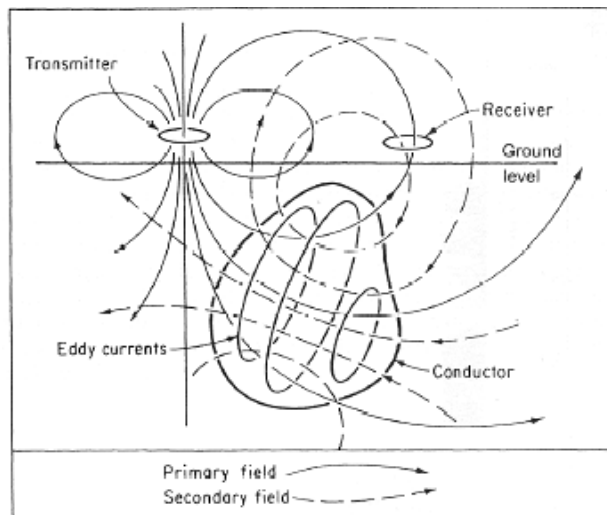
διαφορά φάσης π με την H_p και καλείται πραγματική συνιστώσα (in phase) του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου. Η προβολή του H_s πάνω στην κάθετη στο H_p ευθεία έχει μέτρο H_2 , παρουσιάζει διαφορά φάσης $\pi/2$ με την H_p και ονομάζεται φανταστική συνιστώσα (quadrature) του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα φάσεων.

2.13 Μέθοδος κινούμενου πομπού - δέκτη

Στη μέθοδο του κινούμενου πομπού–δέκτη μελετάται η χρονική μεταβολή του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Το όργανο μετράει την πραγματική και φανταστική συνιστώσα του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος γραμμών μελέτης ή σε κánaβο.



Σχήμα 2.6: Δημιουργία δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος από αγώγιμο σώμα.

Πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν και σε περιπτώσεις όπου είναι αδύνατη η σύνδεση (ηλεκτρικές μέθοδοι) ή η επαφή (γεωραντάρ) με το έδαφος. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δεν μπορούν να εφαρμοστούν για την ανίχνευση αγώγιμων σωμάτων όταν το επιφανειακό τμήμα του εδάφους είναι εξαιρετικά αγώγιμο.

Στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους το βάθος διασκόπησης είναι μικρό και για το λόγο αυτό βρίσκουν εφαρμογή στον εντοπισμό επιφανειακών κοιτασμάτων, στην αρχαιομετρία, στον εντοπισμό αγώγιμων σωμάτων, στον προσδιορισμό ρυπασμένων εκτάσεων, στη χαρτογράφηση ρωγμών κ.α.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος του κινούμενου πομπού-δέκτη χρησιμοποιήθηκε, προκειμένου να χαρτογραφηθούν τα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους και να επισημανθούν οποιεσδήποτε αξιοσημείωτες μεταβολές που παρατηρούνται στην τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά γρήγορη και προσφέρει άμεσα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα φυσικά συσχετίζονται με τις υπόλοιπες γεωφυσικές τεχνικές ώστε να προκύψουν τελικά οι περιοχές ενδιαφέροντος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ηλεκτρική Τομογραφία

3.1 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 υπερκαθορισμένο, δηλαδή ο αριθμός των δεδομένων υπερβαίνει τον αριθμό των παραμέτρων του μοντέλου.

Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόζονται επαναληπτικές τεχνικές που χρησιμοποιούν την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Αρχικά όμως γίνεται προσέγγιση του μη γραμμικού προβλήματος με το γραμμικό, με τη βοήθεια της σειράς Taylor. Η αντιστροφή ξεκινά με τη δημιουργία ενός τυχαίου αρχικού μοντέλου των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων. Το επόμενο βήμα είναι η λύση του ευθέως προβλήματος, στο οποίο υπολογίζονται οι φαινόμενες αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό. Οι θεωρητικές αυτές τιμές, συγκρίνονται με τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης και υπολογίζεται η απαιτούμενη διόρθωση στο αρχικό θεωρητικό μοντέλο, για την ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ της υπολογιζόμενης και της μετρούμενης τιμής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Με την διαδικασία αυτή υπολογίζεται ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο. Η βελτίωση αυτή αφορά μόνο τις παραμέτρους του μοντέλου. Η διαδικασία συνεχίζεται υπολογίζοντας για το βελτιωμένο μοντέλο τις φαινόμενες αντιστάσεις, οι οποίες συγκρίνονται στη συνέχεια με τις πραγματικές μετρήσεις. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο που να δίνει φαινόμενες αντιστάσεις όσο το δυνατόν πιο κοντά στις μετρήσεις.

Αν $m=(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M)$ είναι οι παράμετροι του μοντέλου και $d_i=(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n)$, $i=1,2,3, \dots, N$ είναι οι μετρήσεις, η μη γραμμική σχέση που συνδέει τις μετρήσεις με τις παραμέτρους είναι:

$$d_i = f_i(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) + e \quad (3.1)$$

όπου e είναι το σφάλμα των μετρήσεων.

Για το αρχικό μοντέλο $m^0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_M^0)$ είναι:

$$d_i = f_i(m_1^0, m_2^0, \dots, m_M^0) + e \quad (3.2)$$

Η συνάρτηση f_i προσεγγίζεται από σειρά Taylor γύρω από το m^0 στην οποία έχουν απαληφθεί οι όροι τάξης μεγαλύτεροι από ένα. Αν $\Delta d = d_i - f_i(m^0)$ είναι το διάνυσμα των διαφορών ανάμεσα στις πραγματικές και τις θεωρητικές μετρήσεις, A ο πίνακας των μερικών παραγώγων της συνάρτησης f ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου και x το διάνυσμα των διορθώσεων δm που πρέπει να προστεθούν στο m^0 για να προκύψει το βελτιωμένο μοντέλο, η παραπάνω σχέση γίνεται ως εξής:

$$e = \Delta d - Ax \quad (3.3)$$

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα e . Αλλά ο πιο κατάλληλος βασίζεται στην μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Με την μέθοδο αυτή ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων, δηλαδή η ποσότητα:

$$q = \sum e_i^2 = e^T e \approx (\Delta d - Ax)^T (\Delta d - Ax) \quad (3.4)$$

3.2 Λογισμικό πακέτο Res2dinv.

Στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης (αντιστροφή) πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Res2dinv που διαθέτει το εργαστήριο εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

Το πρόγραμμα αυτό χωρίζει το υπέδαφος σε έναν αριθμό παραλληλόγραμμων και θεωρεί σταθερή την πραγματική ειδική αντίσταση σε

κάθε ορθογώνιο. Ξεκινώντας από αρχικό μοντέλο το οποίο προκύπτει θέτοντας κάποια τιμή για την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση, υπολογίζει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό και τις συγκρίνει με τις μετρημένες τιμές της φαινόμενης αντίστασης.

Με διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα. Τελικά επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα, όταν οι επόμενες επαναλήψεις δεν μειώνουν σημαντικά το σφάλμα αυτό, δηλαδή όταν η επαναληπτική διαδικασία παρουσιάζει σύγκλιση.

Το συγκεκριμένο λογισμικό πακέτο διαθέτει δύο διαφορετικές μεθόδους αντιστροφής. Η πρώτη είναι η μέθοδος κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης (Smoothness- constrained least- squares method) και η δεύτερη είναι με την χρήση νόρμας L_1 (Robust).

Αναλυτικότερα η πρώτη μέθοδος κανονικοποίησης με περιορισμούς εξομάλυνσης υπαγορεύει ότι οι τιμές της ειδικής αντίστασης του μοντέλου αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια παραλλαγή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, που βασίζεται στην τεχνική της βελτιστοποίησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος εξασφαλίζει ένα μοντέλο με ομαλή κατανομή της ειδικής αντίστασης. Αυτή η προσέγγιση είναι αποδεκτή μόνο σε περιπτώσεις που οι πραγματικές τιμές της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους αλλάζουν με ομαλό ή σταδιακό τρόπο.

Η δεύτερη μέθοδος, χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το υπέδαφος είναι ανομοιογενές. Η συγκεκριμένη μέθοδος αντιστροφής είναι λιγότερο ευαίσθητη στις μετρήσεις με υψηλό θόρυβο και συνεπώς ικανή να δώσει μικρό σφάλμα.

3.3 Μέθοδος επεξεργασίας ηλεκτρικής τομογραφίας.

Τα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που συλλέχθηκαν στην ύπαιθρο εισάγονται στο λογισμικό πακέτο Res2dinv και στη συνέχεια επιλέγεται μία από τις μεθόδους αντιστροφής που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι τρεις τομές. Η πρώτη τομή είναι η ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής

αντίστασης, η δεύτερη είναι η ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η τρίτη είναι η γεωηλεκτρική τομή που προκύπτει από την αντιστροφή. Υπάρχει η περίπτωση οι μετρήσεις με μεγάλο σφάλμα να μην ληφθούν υπόψη. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του αριθμού επαναλήψεων της διαδικασίας αντιστροφής.. Στα αποτελέσματα του προγράμματος συγκαταλέγεται και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS).

Στο συγκεκριμένο λογισμικό πακέτο υπάρχει η δυνατότητα αξιολόγησης των αποτελεσμάτων ελέγχοντας την ευαισθησία και την αβεβαιότητα καθώς και τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχουν υπολογιστεί.

Ως μέτρο ευαισθησίας εννοείται το μέτρο αξιοπιστίας για την ειδική αντίσταση στη γεωηλεκτρική τομή. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της ευαισθησίας τόσο πιο αξιόπιστη είναι και η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Γενικά, κοντά στην επιφάνεια της γης εμφανίζονται συνήθως υψηλές τιμές ευαισθησίας γιατί τα σημεία αυτά βρίσκονται πιο κοντά στα ηλεκτρόδια.

Η αβεβαιότητα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από το επίπεδο θορύβου, το βάθος και από την μέση ειδική αντίσταση. Δηλαδή, όταν η ειδική αντίσταση είναι υψηλή τότε και η αβεβαιότητα είναι υψηλή.

Στην παρούσα εργασία διασκοπήθηκε μία γραμμή μελέτης της οποίας τα στάδια επεξεργασίας καθώς και η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε παρουσιάζονται στην συνέχεια.

3.4 Μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ.

Σκοπός της επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ είναι η απεικόνιση των δεδομένων με ευκρίνεια, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα κατά την ερμηνεία και αξιολόγησή τους. Η μαθηματική επεξεργασία του αρχικού σήματος επιδιώκει τον τονισμό ορισμένων χαρακτηριστικών που δεν είναι άμεσα αντιληπτά (όπως ανακλαστήρες) και την απαλοιφή του θορύβου.

Η αρχική επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το πρόγραμμα GPRPro (Σπανουδάκης, 2002) σε περιβάλλον Matlab. Με τη χρήση διαφόρων φίλτρων και τύπων ενίσχυσης γίνονται ευδιάκριτες λεπτομέρειες οι οποίες θα οδηγήσουν στην εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με το σκοπό της κάθε έρευνας. Με την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα από τις μετρήσεις του γεωραντάρ, προκύπτουν οι απεικονίσεις σε μορφή τομών. Οι τομές αυτές περιγράφουν το διπλό χρόνο διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο έδαφος συναρτήσει της απόστασης από την αρχική γραμμή μελέτης. Το πρόγραμμα διαθέτει πλήθος φίλτρων.

Για την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι, κάποιοι από τους οποίους είναι καθιερωμένοι στη επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων (κυρίως δεδομένων γεωραντάρ και σεισμικών δεδομένων ανάκλασης). Στο λογισμικό αυτό οι αλγόριθμοι έχουν ταξινομηθεί ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους σε διάφορες κατηγορίες.

Να σημειωθεί ωστόσο ότι τα δεδομένα του γεωραντάρ είναι ένας πίνακας του οποίου η κάθε στήλη είναι ένα ίχνος ενώ κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε καταγραφές με τον ίδιο χρόνο άφιξης. Συνεπώς οι τομές του γεωραντάρ αντιστοιχούν σε άξονες x (m) και t (ns).

Στο τελικό στάδιο της επεξεργασίας, δημιουργήθηκαν οριζόντιες τομές οι οποίες υπέστησαν επεξεργασία με τη χρήση του λογισμικού Transform

3.5 Φίλτρα

Η δειγματοληψία και καταγραφή των μετρήσεων γεωραντάρ πραγματοποιείται ανά καθορισμένα χρονικά διαστήματα για κάθε ίχνος (sample interval) και αποστάσεις μεταξύ γειτονικών- διαδοχικών ιχνών (trace interval). Η λειτουργία των αλγορίθμων βασίζεται σε μαθηματικές πράξεις μεταξύ των σημείων του ίδιου ίχνους ή μεταξύ γειτονικών ιχνών.

3.5.1 Φίλτρο διόρθωσης ίχνους

Η κεραία του γεωραντάρ μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία κυμάτων χαμηλής συχνότητας, τα οποία διαχέονται στο έδαφος και υπερτίθενται στα κύματα ανάκλασης υψηλών συχνοτήτων, αλλοιώνοντας έτσι την καταγραφή.

Το πλήθος των κυμάτων χαμηλής συχνότητας και ο τρόπος που εμφανίζονται στα δεδομένα, εξαρτώνται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης (έδαφος) και την απόσταση των κεραιών. Εδώ χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο Dewow .Πρόκειται για φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων κάθε ίχνους ξεχωριστά. Η λειτουργία του φίλτρου στηρίζεται στη δημιουργία νοητού παραθύρου σε κάθε σημείο του ίχνους. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η μέση τιμή των μετρήσεων που ανήκουν στο παράθυρο, η οποία αφαιρείται από την τιμή του κεντρικού σημείου.

3.5.2 Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου

Το φίλτρο αυτό εφαρμόζεται για την εξασθένηση του σήματος που προέρχεται, από ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες και δέκτες κινητής τηλεφωνίας καθώς επίσης και μεταλλικές κατασκευές. Για να υλοποιηθεί αυτό υπολογίζεται ένα νέο ίχνος το οποίο αποτελεί τον μέσο όρο όλων των ίχνων της τομής του γεωραντάρ. Στη συνέχεια το μέσο ίχνος αφαιρείται από κάθε ίχνος και προκύπτει νέα εικόνα απαλλαγμένη από τα παραπάνω σήματα.

3.5.3 Ενίσχυση σήματος

Η ενίσχυση (Gain) εφαρμόζεται στα δεδομένα για την καλύτερη παρουσίαση ισχυρών και ασθενικών ανακλάσεων, που λόγω της απορρόφησης των κυμάτων δεν διακρίνονται καθαρά στα αρχικά δεδομένα (Σπανουδάκης 2002). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τύποι ενίσχυσης:

- **Εκθετική ενίσχυση για την αντιστάθμιση της γεωμετρικής διασποράς (SEC):** Η ενίσχυση SEC έχει σαν αποτέλεσμα την ισοστάθμιση των σημάτων τα οποία αλλοιώνονται λόγω της γεωμετρικής διασποράς και της εκθετικής απώλειας της ενέργειας των κυμάτων λόγω εξασθένησης.
- **Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (AGC):** Σκοπός είναι η ενίσχυση των ασθενών κυμάτων που προκύπτουν λόγω εξασθένησης των

ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος. Επιτυγχάνει την ισοστάθμιση του σήματος καταγραφής, την ανάδειξη της συνέχειας των κυμάτων ανάκλασης και την καλύτερη παρουσίαση ασθενικών ανακλάσεων.

3.6 Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων

Επιπρόσθετα έγινε χρήση στιγμιαίων μιγαδικών χαρακτηριστικών (Instantaneous Attributes) των σημάτων. Το σήμα που στέλνει και λαμβάνει το γεωραντάρ είναι ένας πραγματικός αριθμός. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς, το σήμα μετατρέπεται σε μιγαδικό αριθμό με την χρήση του μετασχηματισμού Hilbert. Αυτό που κάνει το λογισμικό του γεωραντάρ είναι να συνδυάζει το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του αναλυτικού σύνθετου σήματος (Σπανουδάκης, 2002). Το αναλυτικό σύνθετο σήμα $F(t)$ μπορεί να γραφτεί: $F(t) = f(t) + ig(t)$, όπου $f(t)$ το πραγματικό μέρος (δεδομένα καταγραφής γεωραντάρ) και $g(t)$ το φανταστικό μέρος του σήματος (Taner et al., 1992-2001). Το φανταστικό μέρος είναι το φασικά μετατοπισμένο κατά 90° και προκύπτει με μετασχηματισμό Hilbert στο πραγματικό μέρος. Το αποτέλεσμα όλης αυτής της διαδικασίας είναι η ανάκτηση επιπλέον πληροφοριών, πολύ χρήσιμων για την αξιολόγηση και ερμηνεία των δεδομένων. Τα στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά των σημάτων (instantaneous attributes) εκφράζουν τις στιγμιαίες μεταβολές διαφόρων παραμέτρων. Οι στιγμιαίες τιμές των μιγαδικών χαρακτηριστικών (όπως το στιγμιαίο πλάτος και οι παράγωγοί του, η στιγμιαία φάση και η στιγμιαία συχνότητα) μπορούν να προσδιοριστούν από τα αναλυτικά σήματα (Taner et al., 1992-2001).

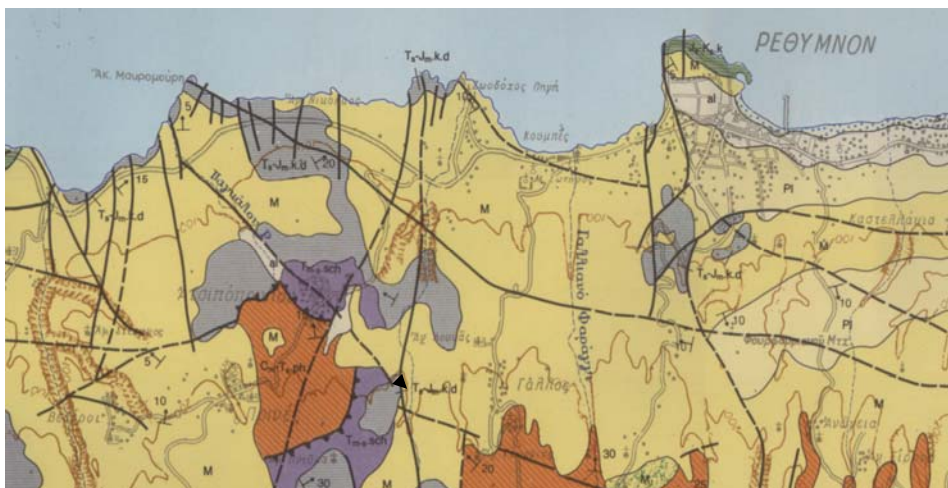
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Γεωφυσική Διασκόπηση στο Ατσιπόπουλο Ρεθύμνου

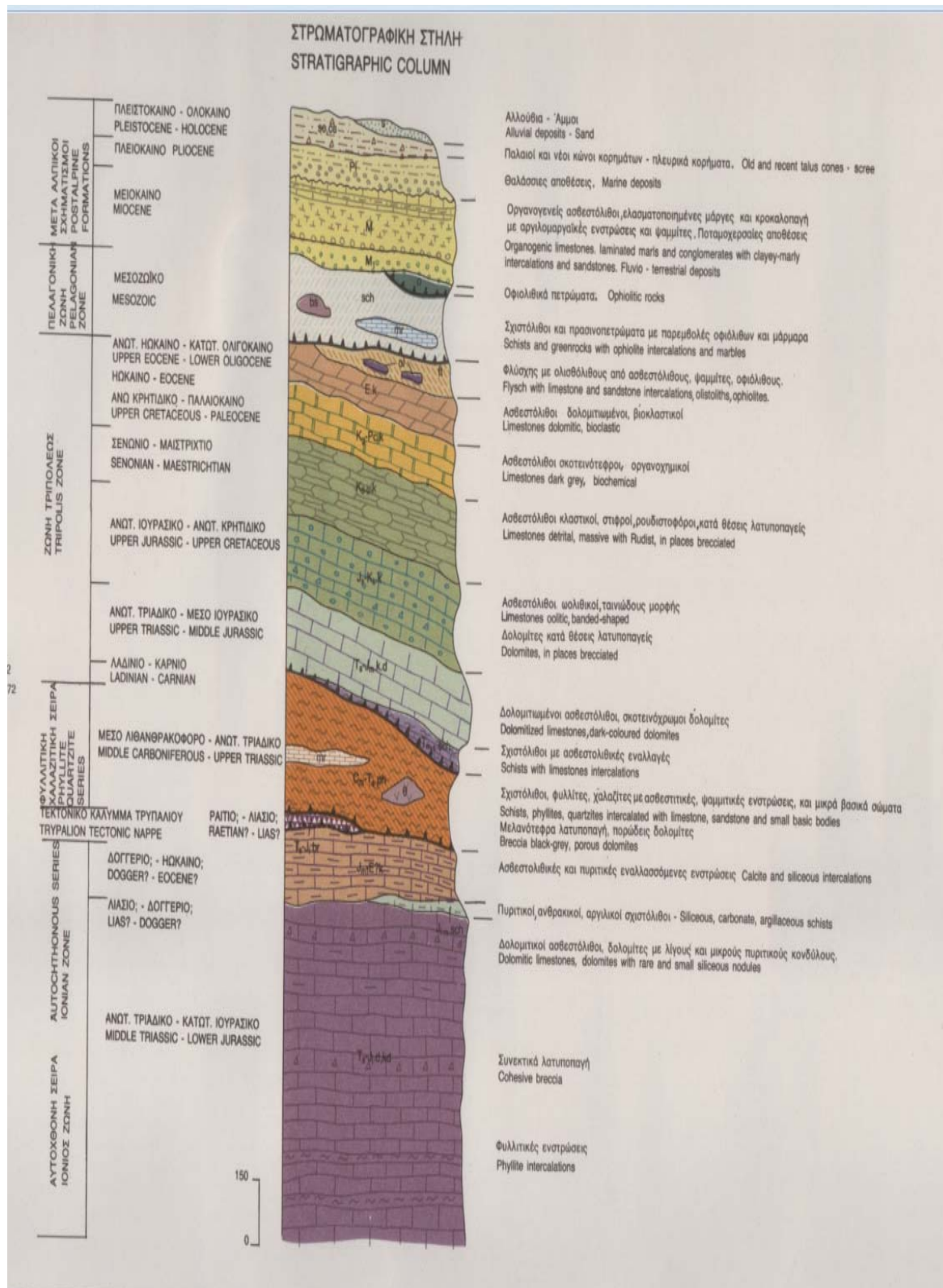
4.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας (εκτέλεση ηλεκτρικών τομογραφιών, Γεωραντάρ, ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση), η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μελέτης για τη ανίχνευση ύπαρξης εγκοίλων στην περιοχή Ατσιπόπουλου Ρεθύμνου.

Η γεωφυσική έρευνα είχε ως στόχο την χαρτογράφηση των σχηματισμών του υπεδάφους στην περιοχή μελέτης και ειδικότερα τον χαρακτηρισμό των επιφανειακών σχηματισμών πάνω στους οποίους θα εδραστεί η κατασκευή. Από την χαρτογράφηση εντοπίζονται ζώνες υγρασίας ή άλλες ανομοιογένειες του υπεδάφους. Επιπρόσθετα, υποδεικνύονται θέσεις που χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής για την κατασκευή των κατοικιών.



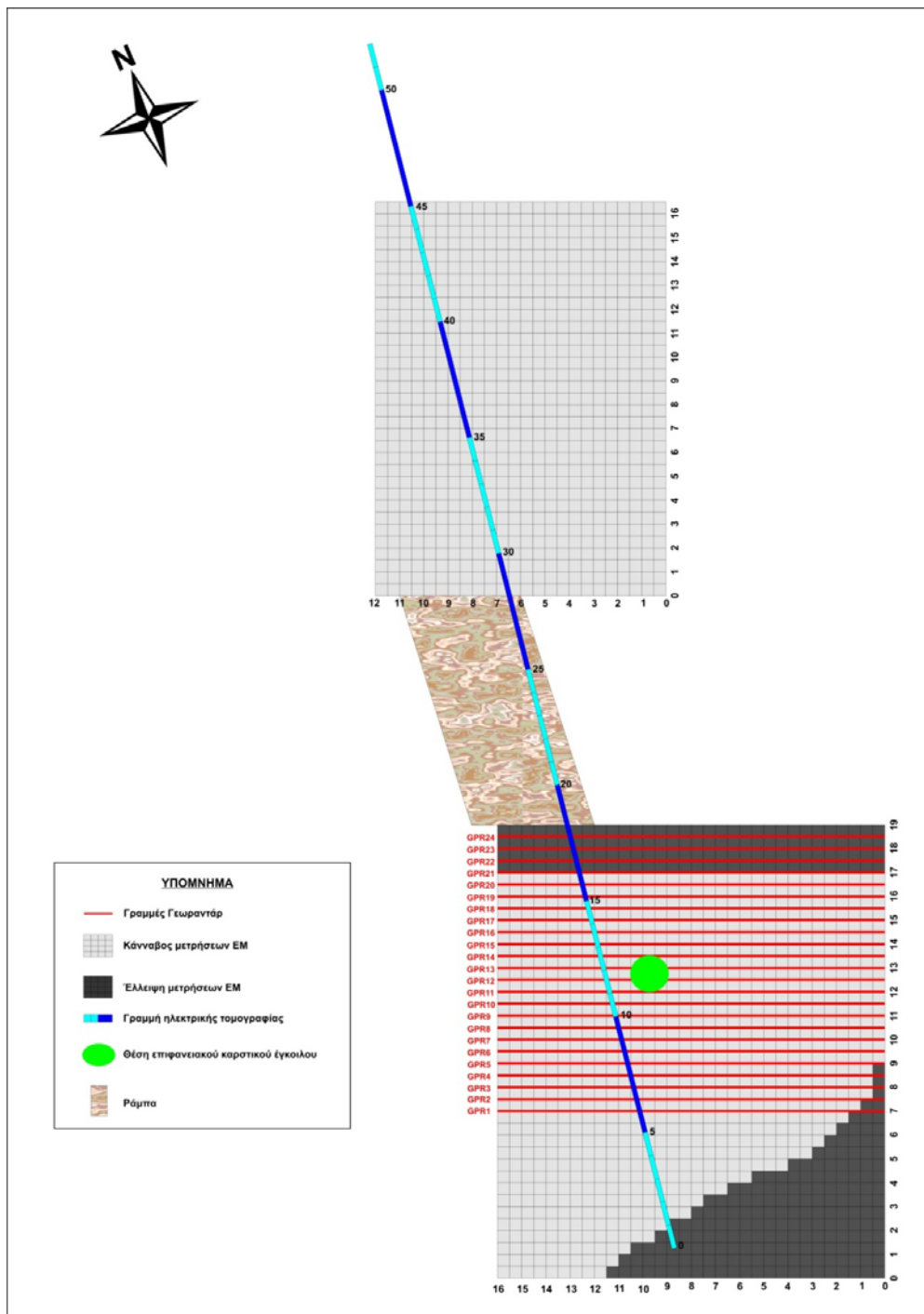
Σχήμα 4.1α :Γεωλογικός χάρτης Ρεθύμνου, περιοχή Ατσιπόπουλου



Σχήμα 4.1β :Στρωματογραφική Στήλη

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη (Σχήμα 4.1) στη περιοχή μελέτης παρατηρούνται οι παρακάτω γεωλογικοί σχηματισμοί :

- Ένα επιφανειακό στρώμα από μάργες και μαργαικούς ασβεστολίθους και αλλούβια.
- Ακολουθεί ένα στρώμα από δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους.
- Ακολουθεί ένα στρώμα από αργιλικούς σχιστόλιθους.
- Τέλος, ακολουθεί μια φυλλιτική - χαλαζιτική σειρά.



Σχήμα 4.2 : Κάτοψη οικοπέδου και γραμμές γεωφυσικής διασκόπησης.

4.2 Στοιχεία του Έργου και Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης ανήκει στο Δήμο Ρεθύμνου. Η γεωφυσική έρευνα έγινε στο πάνω και κάτω διάζωμα του οικοπέδου στο Ατσιπόπουλο Ρεθύμνου. Το πάνω διάζωμα βρίσκεται στο επίπεδο του δρόμου ενώ στο κάτω έχει πραγματοποιηθεί εκσκαφή θεμελίωσης. Η μελέτη που έγινε περιλαμβάνει ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση στο πάνω και κάτω διάζωμα του οικοπέδου εμβαδού περίπου 198 και 272 m² αντίστοιχα, διασκόπηση με την μέθοδο του γεωραντάρ μόνο στο κάτω διάζωμα εμβαδού 184 m² και μία γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας μήκους 52 m.

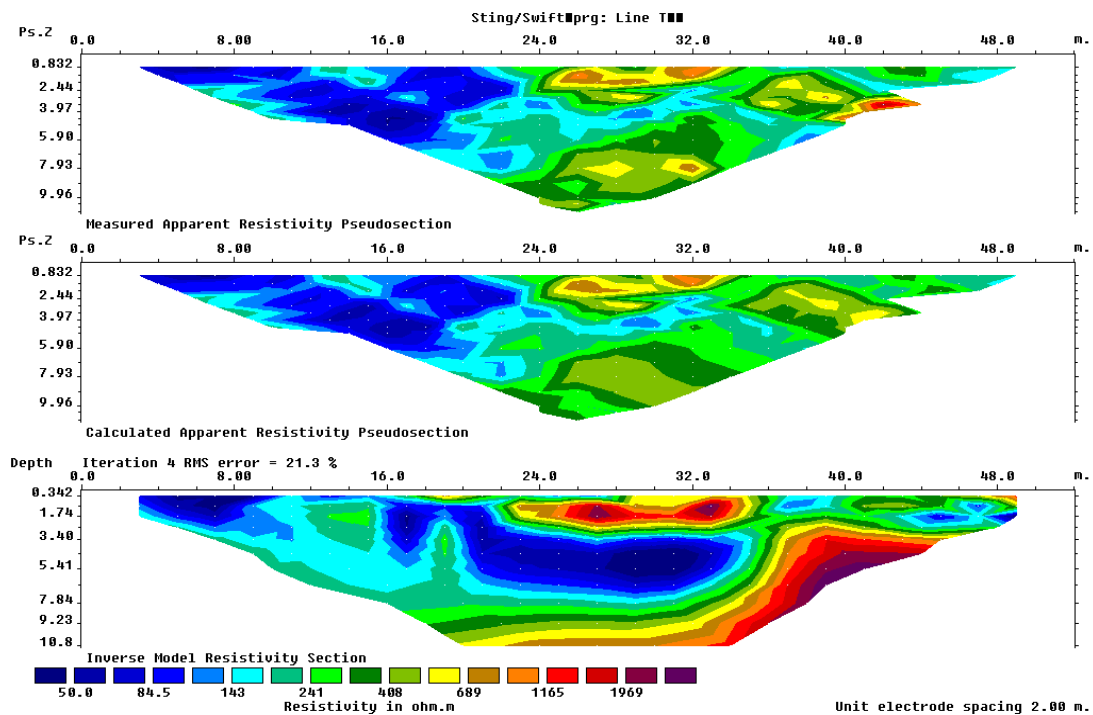
4.3 Ηλεκτρική Τομογραφία

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το όργανο Sting R1 σε συνδυασμό με το Swift, και 28 έξυπνα ηλεκτρόδια της εταιρίας Advanced Geosciences Inc. (AGI).

Η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας μήκους 52 m είχε μέγιστο βάθος διασκόπησης τα 10 m και διεύθυνση από Νότο προς Βορρά. Η λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη διάταξη διπόλου - διπόλου με ισαπόσταση $a = 2$ m.

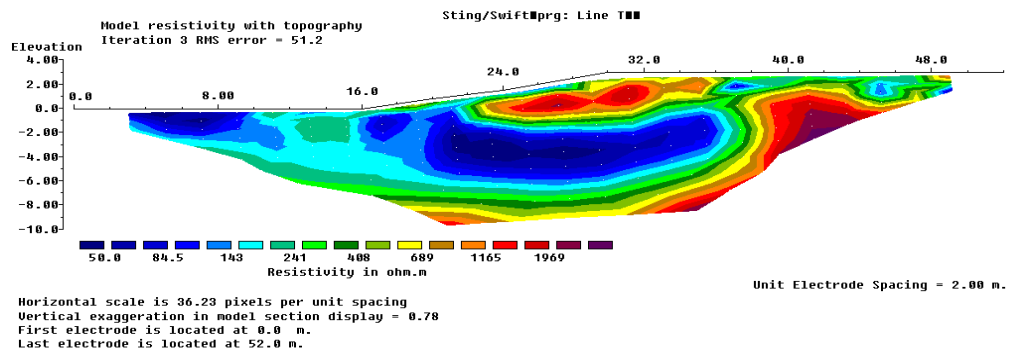
Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η θέση της γραμμής μελέτης στην περιοχή Ατσιπόπουλου στο Ρέθυμνο. Τα αρχικά δεδομένα εισήχθηκαν στο λογισμικό πακέτο Res2Dinv όπου πραγματοποιήθηκε η αντιστροφή.

Η ηλεκτρική τομογραφία δίνει πληροφορίες για την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τόσο με το βάθος όσο και με την οριζόντια απόσταση. Αρχικά δεν λήφθηκε υπόψη η διαφορά υψομέτρου (Σχήμα 4.3) της περιοχής ενώ στη συνέχεια έγινε η διόρθωση υψομέτρου. Από σύγκριση των ψευδοτομών προκύπτει πολύ καλή συμφωνία όσο αφορά τις αντιστάσεις στα πρώτα 20 m από την αρχή της γραμμής. Δεν δόθηκε καλή συμφωνία στις υψηλές αντιστάσεις, στο τέλος της γραμμής, μετά τα 40m καθώς και σε ψευδοβάθος μεγαλύτερο από 6 m.

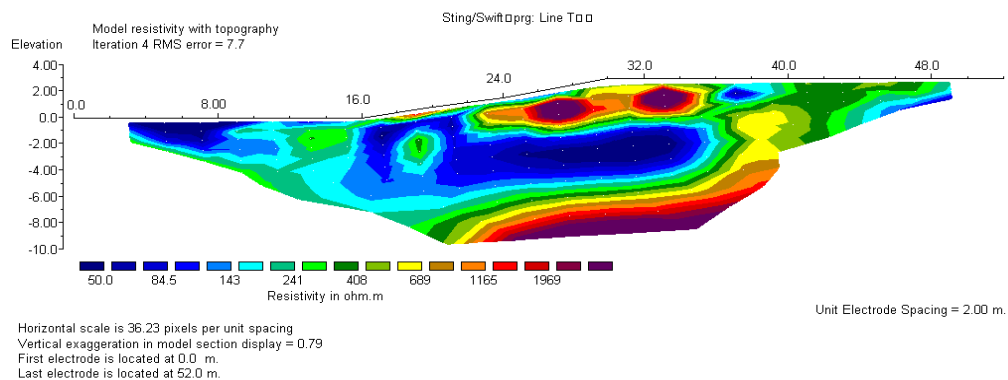


Σχήμα 4.3: Ηλεκτρική Τομογραφία. Πάνω η ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, στη μέση, η ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και κάτω η γεωηλεκτρική τομή.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το σφάλμα επεξεργασίας της γραμμής ήταν αρχικά στο 51,2% (Σχήμα 4.4) γι'αυτό και ακολούθησε αποκοπή δεδομένων τα οποία πιθανών να οφείλονται σε θορύβους, ώσπου φτάσαμε σε ένα αποδεκτό ποσοστό σφάλματος 7.7% (Σχήμα 4.5), το οποίο κάνει τα αποτελέσματα της τομογραφίας πιο αξιόπιστα.



Σχήμα 4.4. Γεωηλεκτρική τομή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων για την γραμμή μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας με ποσοστό σφάλματος 51,2%.



Σχήμα 4.5. Γεωηλεκτρική τομή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων για την γραμμή μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας με ποσοστό σφάλματος 7,7%.

Από τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Σχήμα 4.5) προσδιορίστηκαν στο κάτω διάγραμμα δύο γεωηλεκτρικά στρώματα :

- το επιφανειακό με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μικρότερες από 100 Ωm που αντιστοιχούν σε έντονα εξαλειωμένο ασβεστόλιθο.
- ένα βαθύτερο στρώμα με τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κοντά στα 250 Ωm που αντιστοιχεί σε πιο συμπαγή ασβεστόλιθο.

Στο πάνω διάζωμα παρατηρήθηκαν τρία στρώματα :

- το επιφανειακό με τιμές που ξεπερνούν τα 1000 Ωm και έχει πάχος 2 έως 3 m και αντιστοιχεί σε πιο υγιή μαργαϊκό ασβεστόλιθο.
- το δεύτερο χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές τιμές, 20 - 50 Ωm , που πιθανόν να οφείλονται σε κατακερματισμένο ασβεστόλιθο και στην παρουσία αργίλων.
- το τρίτο στρώμα στο οποίο παρατηρούνται υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (πάνω από 1000 Ωm), βρίσκεται σε βάθος 6 - 8 m από την επιφάνεια.

4.4 Τομές Γεωραντάρ

Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόστηκε μόνο στο κάτω διάζωμα. Δημιουργήθηκε κάναβος με εμβαδόν 184 m² με ισαπόσταση γραμμών μελέτης 0.5 m. Κάθε γραμμή είχε συνολικό μήκος 16 m. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Terra SIRc της εταιρίας GSSI Inc. Η κεντρική συχνότητα εκπομπής ήταν 400 MHz, το διάστημα δειγματοληψίας 140 picosecond, ενώ το βήμα διασκόπησης ίσο με 5cm. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ισούται περίπου με 9 cm/ns.

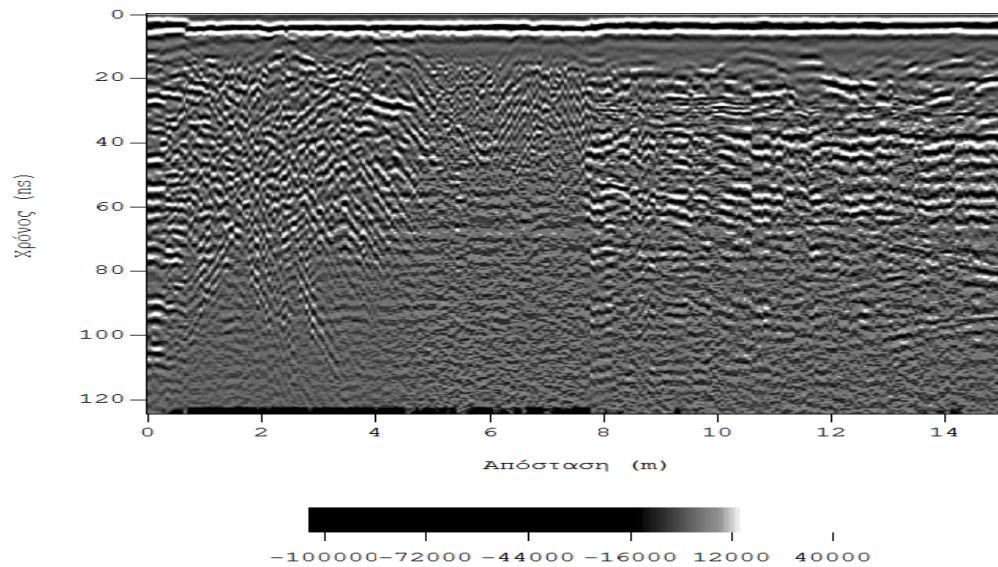
Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 24 γραμμές μελέτης με διεύθυνση A-NA προς Δ-ΒΔ (σχ. 4.2). Η πρώτη γραμμή μελέτης ήταν στο νοτιοανατολικό τμήμα του οικοπέδου ενώ η τελευταία στο βορειοδυτικό.

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων που προήλθαν από τη μέθοδο του γεωραντάρ εφαρμόστηκε το φίλτρο Dewow για την απομάκρυνση της επαγωγικής συνιστώσας. Στη συνέχεια, τα δεδομένα ενισχύθηκαν για την αντιμετώπιση της γεωμετρικής και εκθετικής διασποράς (SEC) και εξομαλύνθηκαν για τον υψίσυχνο θόρυβο.

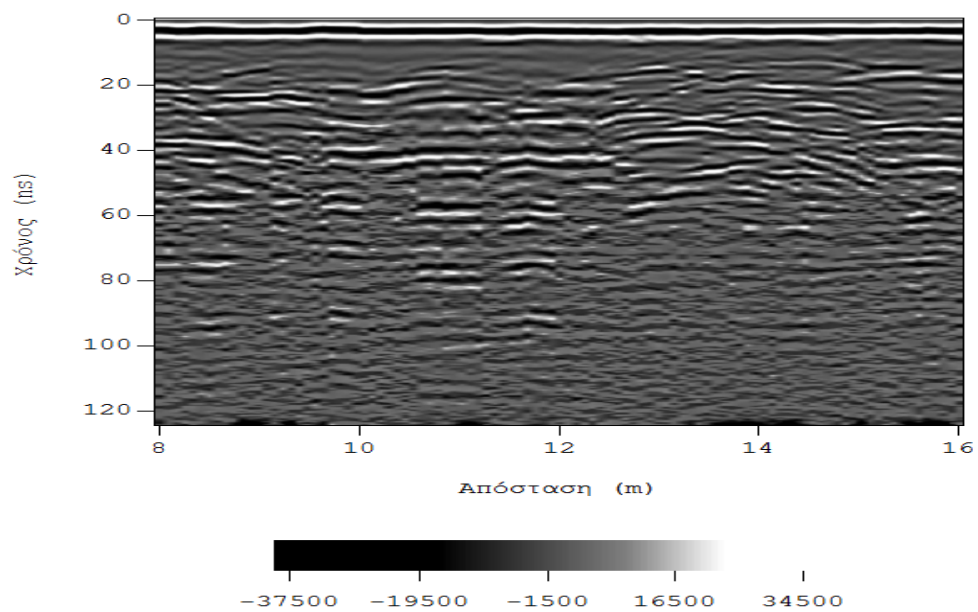
Τυπικές επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ παρουσιάζονται στα σχήματα 4.6 και 4.7. Επίσης παρουσιάζονται οι τομές του στιγμιαίου πλάτους για τις ίδιες γραμμές μελέτης, σχήματα 4.8 και 4.9.

Σύμφωνα με τις τομές διαπιστώθηκαν δύο περιοχές, μία στα δυτικά με πιο υγιή ασβεστόλιθο και μία στα ανατολικά με λιγότερο υγιή ασβεστόλιθο όπου υπάρχει και το έγκοιλο.

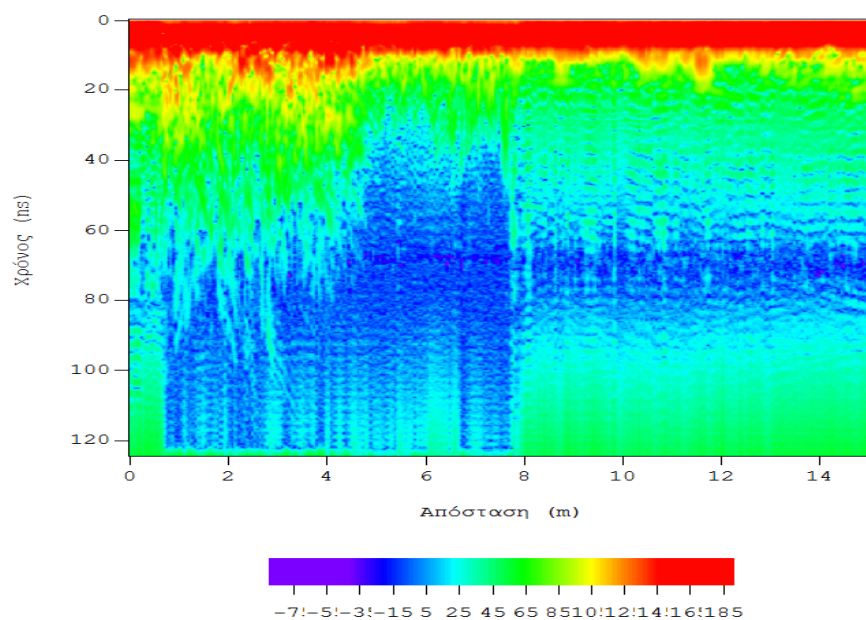
Στις πρώτες τομές παρατηρείται σχετικά μικρή διαταραχή των δεδομένων καθώς επίσης και εξασθένηση για μεγαλύτερα x (Σχήμα 4.3).



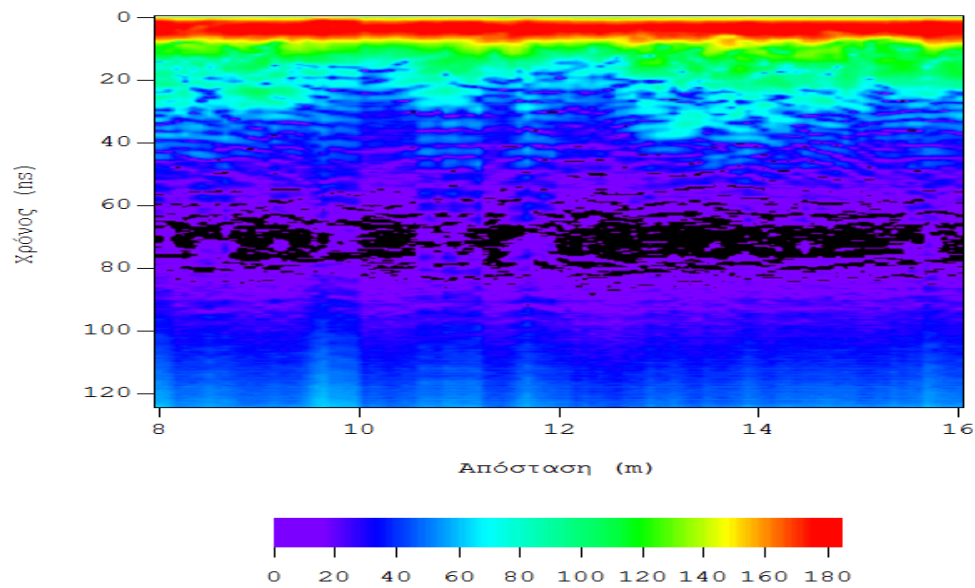
Σχήμα 4.6: Τομή Γεωραντάρ 1



Σχήμα 4.7: Τομή Γεωραντάρ 14b



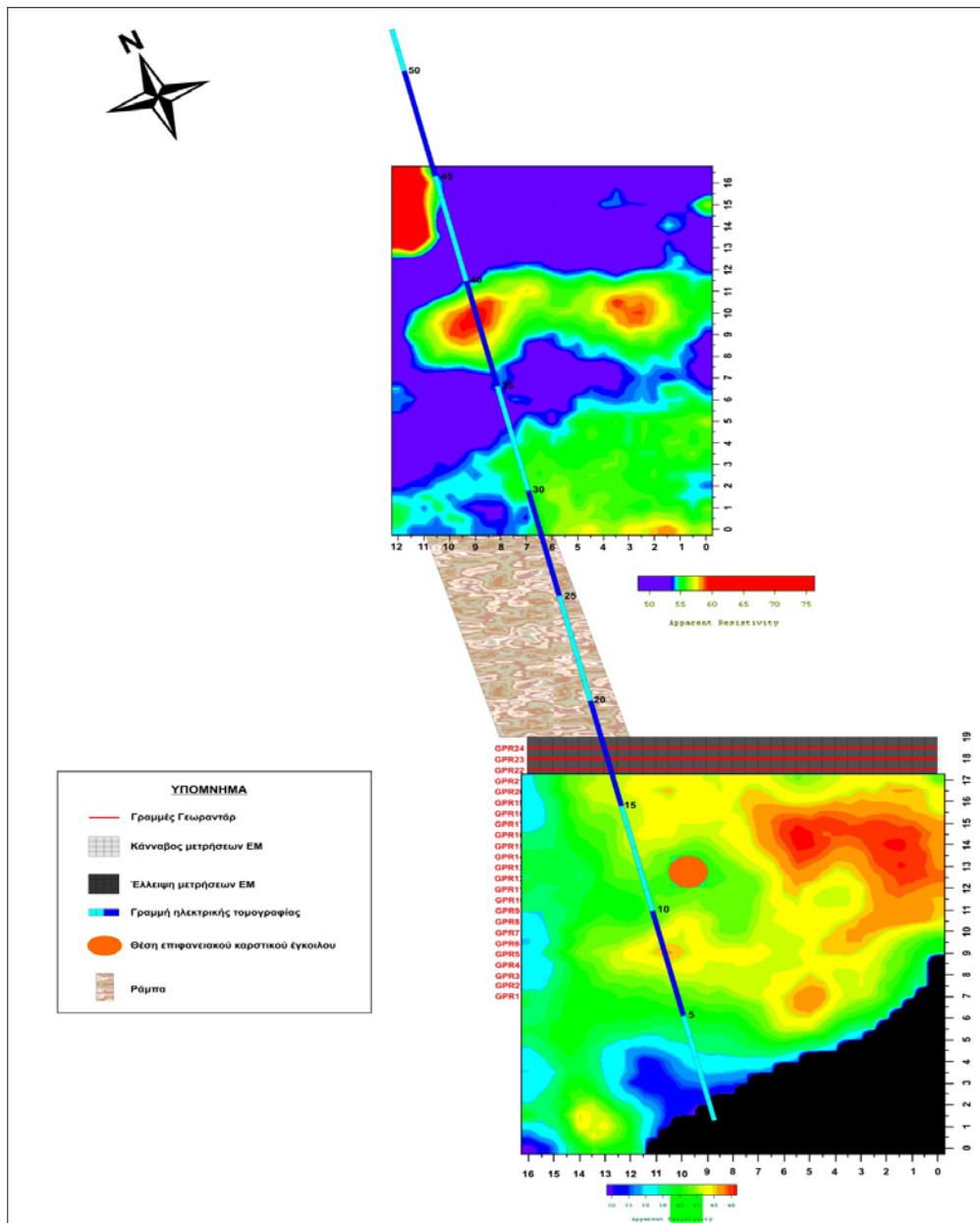
Σχήμα 4.8: Τομή Γεωραντάρ 1 του στιγμιαίου πλάτους



Σχήμα 4.9: Τομή Γεωραντάρ 14b του στιγμιαίου πλάτους

4.5 Ηλεκτρομαγνητική Χαρτογράφηση

Η ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση εφαρμόστηκε και στα δύο διαζώματα. Στο πάνω διάζωμα δημιουργήθηκε κάναβος 198 m^2 ενώ στο κάτω 272 m^2 . Η ισαπόσταση των σταθμών παρατήρησης ήταν 0.5 m . Η ισαπόσταση των γραμμών μελέτης ήταν 1 m στο πάνω διάζωμα και 0.5 m στο κάτω διάζωμα.



Σχήμα 4.10 : Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται ο χάρτης της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους μέχρι βάθος 6 μέτρων. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι υψηλές τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ με μπλε χρώμα οι χαμηλές. Αναλυτικότερα, στο πάνω διάγραμμα παρατηρούνται τρεις περιοχές με σχετικά υψηλές τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (κόκκινο χρώμα) που αποδίδονται σε συμπαγή

ασβεστόλιθο σε βάθη μικρότερα των 6 m (σύμφωνα με την ηλεκτρική τομογραφία).

Στο κάτω διάζωμα παρατηρείται μια περιοχή με σχετικά υψηλές τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο ΒΑ τμήμα της εκσκαφής που σχετίζεται με λιγότερο κατακερματισμένο ασβεστόλιθο.

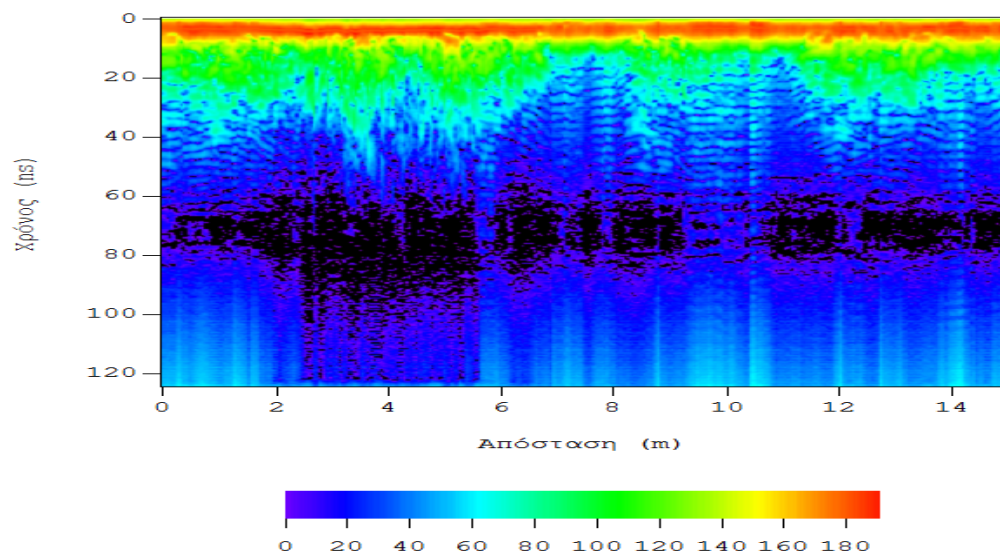
4.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Από συνδυασμό των αποτελεσμάτων της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης και της ηλεκτρικής τομογραφίας (Σχήματα 4.5 και 4.10) προκύπτει μία ζώνη χαμηλών αντιστάσεων η οποία εκτείνεται από το δάπεδο της εκσκαφής του υπογείου μέχρι το βάθος των 3 m. Η ζώνη αυτή πιθανόν να οφείλεται σε κατακερματισμένο μαργαϊκό ασβεστόλιθο. Η παραπάνω ζώνη σύμφωνα με την γεωηλεκτρική τομή επεκτείνεται και κάτω από την ράμπα μέχρι την απόσταση των 36 m από την αρχή της γραμμής μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Στο νότιο τμήμα του πάνω διαζώματος η ζώνη υψηλότερων αντιστάσεων (Σχήμα 4.10 περιοχή Α) αποδίδεται στο επιφανειακό στρώμα του μαργαϊκού ασβεστόλιθου. Στο βόρειο τμήμα παρατηρούνται εναλλαγές χαμηλών και υψηλών αντιστάσεων οι οποίες οφείλονται στον ανομοιογενή μαργαϊκό ασβεστόλιθο.

Από τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης, της ηλεκτρικής τομογραφίας και του γεωραντάρ παρατηρείται ότι στις περιοχές με υψηλότερες αντιστάσεις, στο κάτω διάζωμα και στο βορειοανατολικό τμήμα, τα πλάτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά στον υπόλοιπο κάναβο. Η παρουσία περιθλώμενων κυμάτων υποδεικνύει την έντονη καρστικοποίηση του μαργαϊκού ασβεστόλιθου (Σχήμα 4.11) .

Σύμφωνα με την γεωφυσική διασκόπηση δεν υπάρχουν ενδείξεις για έγκοιλα με μέγεθος μεγαλύτερο από 2 m.



Σχήμα 4.11: Τομή γεωραντάρ 7 του στιγμιαίου πλάτους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βαφείδης Α., 2007, Γεωφυσική Διασκόπηση στον Αρχαιολογικό Χώρο των Απτέρων Χανίων.
2. Βαφείδης Α., 1993, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική - 1: Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
3. Βαφείδης Α. και Αμολοχίτης Γ., 1992, Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές και σεισμικές διασκοπήσεις στον οικισμό Άνω Μέρους, Ν. Ρεθύμνης, Έκθεση, Νομαρχιακό Ταμείο Ρεθύμνης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
4. Βαφείδης Α. Μονόπωλης Δ., Αμολοχίτης Γ. και Στειακάκης Μ., 1991, Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις στην κοιλάδα του Κερίτη ποταμού, Έκθεση, ΓΓΕΤ, ΟΑΔΥΚ, Πολυτεχνείο Κρήτης.
5. Γεωτεχνική έρευνα με την χρήση σύγχρονων γεωφυσικών μεθόδων στο δήμο Αγίου Νικολάου, Οκτώβριος, 2005, υπό Αντώνιο Βαφείδη καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης.
6. Ευθυμίου Μ., 2012, "Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο των αρχαίων Απτέρων του Ν. Χανίων.", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
7. Κουλουμά Ν., 2010, "Γεωφυσική διασκόπηση στην Ιόνια Οδό με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
8. Λούης Φ. Ιωάννης, 2008, Σύγχρονες Εκπαιδευτικές Σημειώσεις Γεωφυσικής, Τομέας Γεωφυσικής - Γεωθερμίας, Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
9. Μανατάκη Μ., 2011, Συμβουλή του γεωραντάρ στη χαρτογράφηση θαμμένων αρχαιοτήτων - Εφαρμογή στον αρχαιολογικό χώρο της Απτέρας, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.

10. Σπανουδάκης Νικόλαος, "Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων." , Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2001.
11. Σπανουδάκης Νικόλαος, "Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα." Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2002.

Διαδικτυακές αναφορές

1. <http://www.justcrete.co.uk>
2. www.geo_analysis.com
3. www.geophysical.com
4. <http://www.geoservice.gr>
5. www.ims.forth.gr