

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ - ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟΝ ΛΟΦΟ ΚΑΣΤΕΛΙ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ ΣΦΑΚΙΩΝ,
ΧΑΝΙΩΝ ΚΡΗΤΗΣ»

ΜΑΡΙΟΣ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ

Εξεταστική Επιτροπή:

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Επιβλέπων)

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Σουπιός Παντελής, Καθηγητής Τεχνολογικού ιδρύματος Κρήτης

ΧΑΝΙΑ, 2018

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1. Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ.....	7
1.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	8
1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	9
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2.2. ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	9
2.3. ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	10
2.4. ΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΚΑΙ ΙΣΟΤΡΟ ΜΕΣΟ	12
2.5. ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	15
2.6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	15
2.7. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	16
2.8. ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ	19
2.9. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	20
2.10. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	22
2.11. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	30
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	30
3.2. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	30
3.3. ΨΕΥΔΟΤΟΜΗ.....	32
3.4. ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	34
3.5. ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ	38
3.6. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES2DINV.....	41
3.7. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	45
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	45
4.2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	45
4.3. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	56
4.4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	60
4.5. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	88
5.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
5.2.ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας στο πλαίσιο μελέτης ευστάθειας του πρανούς στο λόφο Καστέλι στη Χώρα Σφακίων. Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιείται την συλλογή, την επεξεργασία και την ερμηνεία γεωηλεκτρικών δεδομένων για τον καθορισμό της στρωματογραφίας του πρανούς και την χαρτογράφηση του βραχώδους υποβάθρου χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και για την διεξαγωγή μελλοντικών ερευνών δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα με σκοπό την μελέτη της αποδοτικότητας διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων και μεθόδων αντιστροφής γεωηλεκτρικών δεδομένων για την απεικόνιση βραχωδών υποβάθρων.

Για να προσδιοριστεί η βέλτιστη διάταξη ηλεκτροδίων σε συνδυασμό με την καταλληλότερη μέθοδο αντιστροφής έγινε προσομοίωση των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας με την χρήση του λογισμικού RES2DMOD. Δημιουργήθηκε δισδιάστατο ανομοιογενές γεωηλεκτρικό σώμα υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, το οποίο αντιστοιχεί σε βραχώδες υπόβαθρο. Για αυτό το μοντέλο δημιουργήθηκαν οχτώ συνθετικά δεδομένα με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων. Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που μελετήθηκαν είναι η διπόλου-διπόλου, equatorial dipole-dipole, Schlumberger, Wenner (Wenner alpha), Wenner beta, Wenner gamma, πόλου-πόλου και πόλου-διπόλου σε συνδυασμό με τις μεθόδους αντιστροφής smoothness constrained inversion, combined inversion method και Robust inversion. Η επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων υπέδειξε ότι τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα αποδίδουν η Wenner beta σε συνδυασμό με την Robust inversion. Η Wenner beta χαρακτηρίζεται από υψηλή διακριτική ικανότητα τόσο σε οριζόντιες όσο και σε κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την robust inversion, η οποία παράγει γεωηλεκτρικά μοντέλα με διακριτές επιφάνειες μεταξύ των γεωλογικών σχηματισμών.

Η γεωφυσική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε με την διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου και τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το λογισμικό αντιστροφής δεδομένων RES2DINV. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, το οποίο περιορίσε την γεωφυσική έρευνα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας και τον συσχετισμό τους με τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής οι υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αντιστοιχούν στο βραχώδες υπόβαθρο και αποδίδονται σε πλακώδη ασβεστόλιθο και το εδαφικό κάλυμμα αποτελείται από αργιλικό σχιστόλιθο με μέγιστο πάχος 4m. Επίσης, επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη ρήγματος.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία με τίτλο «Γεωφυσική έρευνα με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας στον λόφο Καστέλι, της Χώρας Σφακίων, Χανίων Κρήτης» υλοποιήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας και ο εντοπισμός και η χαρτογράφηση του βραχώδους υποβάθρου στο λόφο Καστέλι στη Χώρα Σφακίων στο πλαίσιο μελέτης ευστάθειας του πρανούς. Συμπληρωματικά πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιώντας συνθετικά δεδομένα για την μελέτη της απόδοσης διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων και μεθόδων αντιστροφής με την χρήση συνθετικών δεδομένων για τον εντοπισμό βραχώδους υποβάθρου.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βαφείδη Αντώνιο για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγηση του. Επίσης ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου για την βοήθεια του και τον κ. Ανδρονικίδη Νικόλαο για την βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια και επεξεργασία των μετρήσεων. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής. Τέλος οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στους φίλους μου που με στήριξαν κατά την διάρκεια της φοίτησης μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ

Η εφαρμοσμένη γεωφυσική μελετά τις φυσικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με την εφαρμογή θεμελιωδών φυσικών νόμων. Ο σκοπός της γεωφυσικής έρευνας ήταν αρχικά ο εντοπισμός μεταλλοφόρων κοιτασμάτων. Όμως με την ανάπτυξη της τεχνολογίας η γεωφυσική απέκτησε περισσότερες εφαρμογές. Σήμερα επικεντρώνεται στον εντοπισμό δομών οικονομικού ενδιαφέροντος, όπως είναι τα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, τα μεταλλεύματα, οι πηγές γεωθερμικής ενέργειας, και στον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υπεδάφους για γεωτεχνικές μελέτες. Η εφαρμοσμένη γεωφυσική χωρίζεται σε επιμέρους μεθόδους, οι οποίες είναι οι σεισμικές, οι βαρυτικές, οι ηλεκτρικές, οι ηλεκτρομαγνητικές, οι ραδιομετρικές και οι θερμικές μέθοδοι. Η επιλογή μίας γεωφυσικής μεθόδου βασίζεται στη διαφοροποίηση κάποιας χαρακτηριστικής ιδιότητας του υπεδάφους (μαγνητική επιδεκτικότητα, πυκνότητα, ειδικό βάρος, ραδιενέργεια, ηλεκτρική αγωγιμότητα) και έχει απώτερο σκοπό των υπολογισμό των γεωλογικών ιδιοτήτων του.

Οι γεωφυσικές έρευνες στις γεωτεχνικές μελέτες πραγματοποιούνται για να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες του υπεδάφους. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό χωματουργικών έργων και θεμελιώσεων για την αποκατάσταση κινδύνου στα τεχνικά έργα. Οι βασικότερες γεωφυσικές μέθοδοι στα γεωτεχνικά έργα είναι οι ηλεκτρικές, οι σεισμικές και η μέθοδος γεωραντάρ. Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν συνδυαστικά, όταν ο στόχος εντοπισμού είναι μία πολύπλοκη γεωλογική δομή, ή μεμονωμένα. Επίσης, αξιολογούν τεράστιους υπεδάφικούς όγκους χωρίς την απαίτηση εκσκαφών, δηλαδή με μικρό κόστος. Ο στόχος των γεωφυσικών ερευνών στις γεωτεχνικές μελέτες είναι κυρίως ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας. Οι έρευνες βασίζονται στον εντοπισμό της διεπιφάνειας μεταξύ επάλληλων εδαφικών στρώσεων με σημαντική αύξηση των μηχανικών παραμέτρων τους με το βάθος. Βασική προϋπόθεση της έρευνας είναι η ύπαρξη διακριτών επιφανειών μεταξύ των σχηματισμών. Η πιο χαρακτηριστική περίπτωση εφαρμογής της γεωφυσικής έρευνας στα γεωτεχνικά έργα είναι ο εντοπισμός της θέσης βραχώδους υποβάθρου σε περίπτωση που οι στρώσεις που υπέρκεινται του υποβάθρου αποτελούνται από μαλακές αργίλους ή χαλαρές άμμους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας, η οποία ανήκει στις ηλεκτρικές γεωφυσικές μεθόδους και συγκεκριμένα στην μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Schlumberger, 1924). Με τις ηλεκτρικές μεθόδους επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους και εφαρμόζονται επιτυχώς όταν υπάρχει σημαντική αντίθεση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπό μελέτη σχηματισμών. Στην ηλεκτρική τομογραφία η ποσότητα μέτρησης είναι η διαφορά δυναμικού του υπεδάφους που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει διαμέσου του. Με την κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων επιδιώκεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και τον εντοπισμό δομών ενδιαφέροντος. Η ανάπτυξη σύγχρονων οργάνων μέτρησης επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη και ταχεία λήψη μετρήσεων καθώς και την ανάπτυξη λογισμικών που επιτρέπουν την ρεαλιστική απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους.

1.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας στο πλαίσιο μελέτης ευστάθειας του πρανούς στο λόφο Καστέλι στη Χώρα Σφακίων. Ο κύριος στόχος της έρευνας είναι ο εντοπισμός και η χαρτογράφηση του βραχώδους υποβάθρου. Η γεωφυσική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη επικεντρώθηκε στο καθορισμό της στρωματογραφίας του πρανούς και στην απεικόνιση του βραχώδους υποβάθρου. Συμπληρωματικά μελετήθηκε η απόδοση διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων και μεθόδων αντιστροφής με την χρήση συνθετικών δεδομένων για τον εντοπισμό βραχώδους υποβάθρου.

1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η δομή αυτής της εργασίας αποτελείται από 5 κεφάλαια, τα οποία είναι τα εξής:

- Το **1^ο κεφάλαιο** περιλαμβάνει την εισαγωγή με μικρή αναφορά στο αντικείμενο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής και στο στόχο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.
- Στο **2^ο κεφάλαιο** περιέχεται η βασική θεωρία της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Περιγράφονται οι γενικές αρχές των ηλεκτρικών διασκοπήσεων, οι μέθοδοι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γίνεται μία εκτενής αναφορά στις διατάξεις ηλεκτροδίων και στους παράγοντες επιλογής της κατάλληλης διάταξης.
- Στο **3^ο κεφάλαιο** αναλύεται η διεξαγωγή των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας και περιγράφονται οι μέθοδο επίλυσης του ευθέως και αντιστρόφου προβλήματος για την δημιουργία γεωηλεκτρικής τομής. Επίσης, περιγράφεται η λειτουργία του λογισμικού αντιστροφής δεδομένων RES2DINV και του λογισμικού δημιουργίας συνθετικών δεδομένων RESDMOD.
- Στο **4^ο κεφάλαιο** παρατίθεται η γεωφυσική μελέτη. Το κεφάλαιο ξεκινά με την γεωλογία της περιοχής, συνεχίζει με την διεξαγωγή της ερευνάς και την παρουσίαση και ερμηνεία των γεωηλεκτρικών τομών. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα συνθετικά δεδομένα και πραγματοποιείται η σύγκριση τους.
- Στο **5^ο κεφάλαιο** δίνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται σχόλια για περαιτέρω γεωφυσική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιεί την υπόγεια ροή του ρεύματος που παράγεται από μια πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος για τον προσδιορισμό της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων του φλοιού της Γης (γεωηλεκτρική δομή).

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αρχικά εισάγεται η έννοια της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης . Περιγράφεται η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στη Γη και οι παράγοντες που επηρεάζουν την αγωγιμότητα των πετρωμάτων. Επίσης αναφέρονται οι διατάξεις ηλεκτροδίων, τα πιθανά σφάλματα κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων και οι παράγοντες επιλογής των διατάξεων. Τέλος παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα των διατάξεων.

2.2. ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η κύρια παράμετρος που υπολογίζεται στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζει τη δυσκολία με την οποία ένα υλικό συγκεκριμένων διαστάσεων επιτρέπει την αγωγή ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου του. Ο George Ohm το 1827 όρισε μια εμπειρική σχέση μεταξύ της έντασης του ρεύματος που διαρρέει ένα συμμάτινο καλώδιο και της διαφοράς δυναμικού (τάσης) που απαιτείται για να δημιουργηθεί ρεύμα.

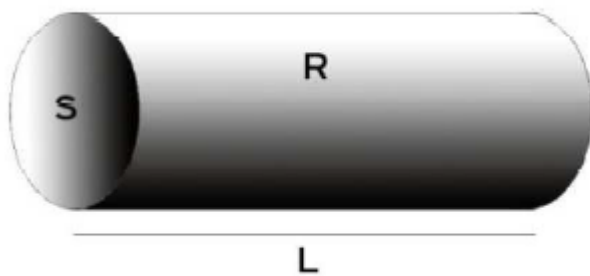
$$\Delta V=IR \quad (2.1)$$

Ο Ohm απέδειξε ότι η ένταση του ρεύματος I είναι ανάλογη της τάσης. Η σταθερά αναλογίας R , καλείται ωμική αντίσταση του υλικού και έχει ως μονάδα μέτρησης τη διαφορά δυναμικού (Volt) ανά ένταση του ρεύματος (Ampere), δηλαδή το Ω (Ohm). Όμως, η ηλεκτρική ωμική αντίσταση R δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό αλλά και από την γεωμετρία του. Άρα έπρεπε να οριστεί μια ιδιότητα η οποία να περιγράφει την αγωγιμότητα του υλικού και να είναι ανεξάρτητη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του. Η γεωμετρική ανεξάρτητη ιδιότητα ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζει την δυσκολία με την οποία ένα υλικό συγκεκριμένων διαστάσεων άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Έστω κυλινδρικό σώμα μήκους L και διατομής S με αντίσταση R . Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού δίνεται από την σχέση:

$$\rho=R(L/S) \quad (2.2)$$

R : ωμική αντίσταση (ohm), L = μήκος (m), S = εμβαδόν διατομής (m^2), ρ = ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ohm-m)



Σχήμα 2.1: Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός κυλίνδρου μήκους L , διατομής S και αντίστασης R .

Ένας άλλος όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της αγωγιμότητας των υλικών είναι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία ορίζεται ως το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης $\sigma=1/\rho$ και αντικατοπτρίζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται σε ένα υλικό. Η μονάδα μέτρησης της είναι το Siemens ανά μέτρο (S/m).

2.3. ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα περισσότερα ορυκτά και πετρώματα δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Τα πετρώματα με υψηλή συγκέντρωση σε μεταλλικά ορυκτά παρουσιάζουν αυξημένη αγωγιμότητα, εξαιτίας της ηλεκτρονικής αγωγής. Ένας άλλος παράγοντας που αυξάνει την αγωγιμότητα των πετρωμάτων είναι η περιεκτικότητα του ρευστού των πόρων σε διαλυμένα άλατα. Σε αυτά τα πετρώματα η αγωγιμότητα είναι ηλεκτρολυτική. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πορωδών πετρωμάτων διαφέρει ανάλογα με την συγκέντρωση των ιόντων και μεταβάλλεται με τον όγκο και την κατανομή των πόρων και την αγωγιμότητα του ρευστού πλήρωσης. Η ακόλουθη σχέση συνδέει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων με το πορώδες:

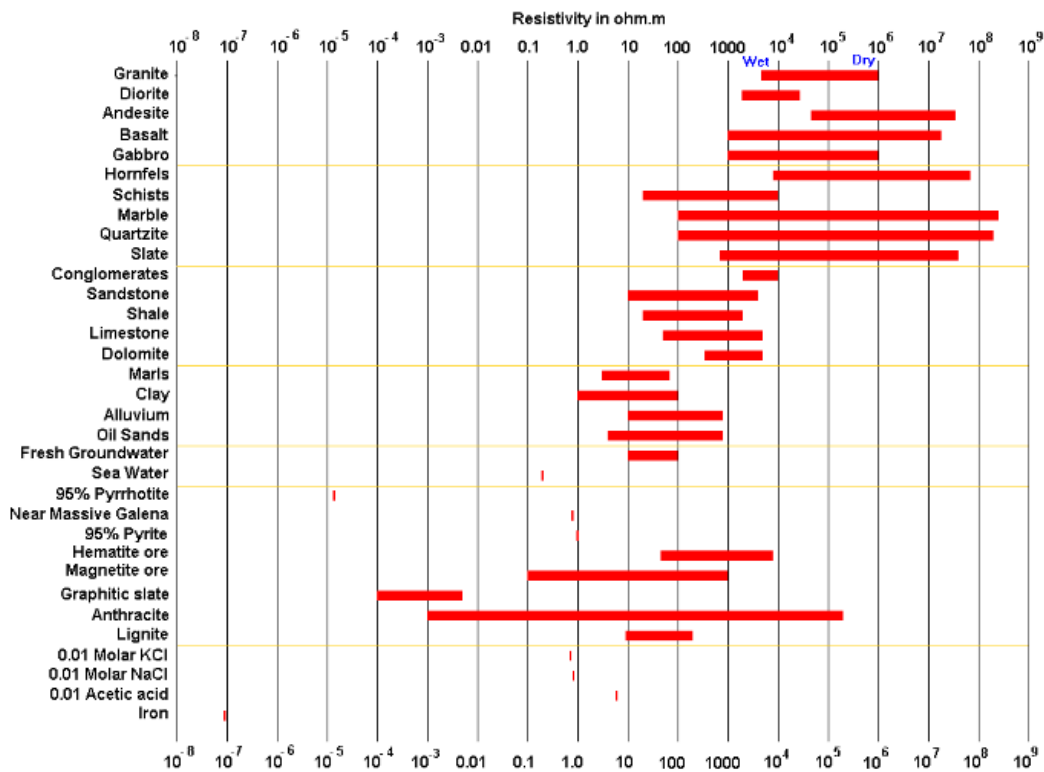
$$\rho = \alpha \phi^{-m} s^{-n} \rho_w \quad (2.3)$$

ϕ : πορώδες, s : ποσοστό πόρων που περιέχουν νερό, ρ_w : ειδική ηλεκτρική αντίσταση νερού, $n=2$, α, m : σταθερές ($0,5 < \alpha < 2,5$, $1,3 < n < 2,5$). Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως ο νόμος του Archie και δείχνει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος.

Γενικά, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων εξαρτάται σημαντικά τη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων του ρευστού πόρων, την ορυκτολογική σύσταση, το μέγεθος των πόρων, τις πιθανές διαρρήξεις και διακλάσεις, την θερμοκρασία και την πίεση.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζονται παρακάτω:

Είδος πετρώματος: Κάθε πέτρωμα χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Πίνακας 2.1: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πετρωμάτων, εδαφών και μεταλλευμάτων (Loke, 2002).

Σε γενικές γραμμές, τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων σε σχέση με τα ιζηματογενή. Αυτό οφείλεται στο υψηλό πορώδες των ιζηματογενών πετρωμάτων και στην υψηλή περιεκτικότητα των ρευστών σε άλατα.

Δομή και πορώδες: Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογη του πορώδους και εξαρτάται από την σύνδεση των πόρων. Για παράδειγμα, ο χονδρόκοκκος ψαμμίτης έχει χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τον λεπτόκοκκο. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χονδρόκοκκος έχει μεγαλύτερα κενά μεταξύ των κόκκων του. Οι καρστικοποίηση των ασβεστολίθων αυξάνει το πορώδες και κατά συνέπεια μειώνει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Ο βασάλτης έχει κενούς πόρους που σπάνια συνδέονται μεταξύ τους. Επομένως, έχει υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης επειδή δεν είναι διαπερατός.

Θερμοκρασία: Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση επειδή αυξάνεται η ευκινησία των ιόντων.

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

(2.4)

ρ_{θ} = ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία $\theta^{\circ}\text{C}$, ρ_{18} = ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία 18°C , α_{θ} = θερμικός συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (για τους περισσότερους ηλεκτρολύτες $\alpha_{\theta} = 0,025/^{\circ}\text{C}$)

Ηλικία πετρώματος: Με το πέρασμα του χρόνου η πίεση που ασκούν τα υπερκείμενα πετρώματα στα υποκείμενα αυξάνεται. Με αποτέλεσμα τα μεγαλύτερης ηλικίας πετρώματα να έχουν μικρότερο πορώδες και μεγαλύτερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Εξάιρεση είναι τα ιζήματα του τριτογενούς, τα οποία έχουν μεγαλύτερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από αυτά του μεσοζωικού αιώνα, που είναι μεγαλύτερης ηλικίας πετρώματα. Τα μεσοζωικά ιζήματα σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό, ενώ του τριτογενούς σε γλυκό, χωρίς άλατα.

Βαθμός κορεσμού: Η αύξηση του βαθμού κορεσμού σε νερό των πετρωμάτων προκαλεί μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Περιεκτικότητα σε άλατα: Η υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα του ρευστού πλήρωσης των πόρων αυξάνει την αγωγιμότητα.

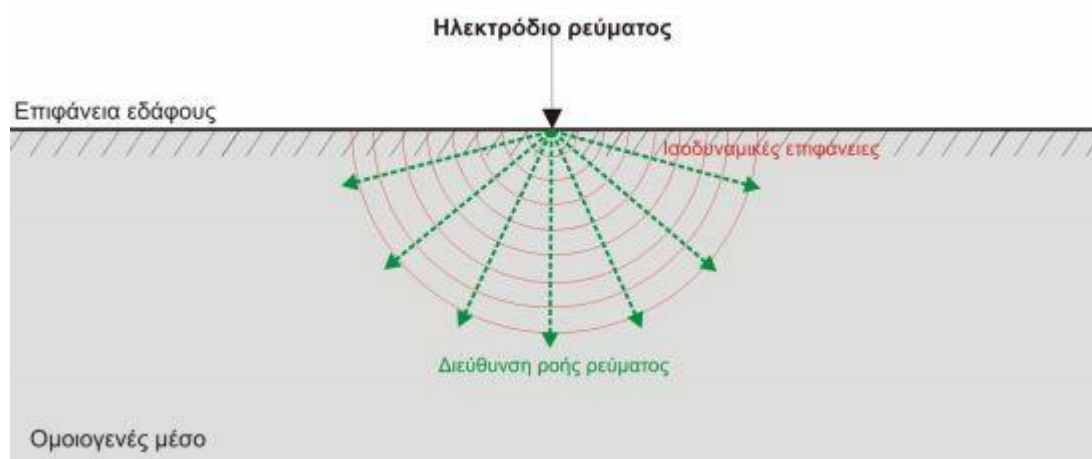
Αργιλικά ορυκτά: Τα αργιλικά ορυκτά έχουν υψηλή αγωγιμότητα. Άρα οι αργιλικές προσμίξεις μειώνουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων.

Τέλος, μερικές διεργασίες που αυξάνουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων είναι η ιζηματοποίηση, η σκλήρυνση και η απολίθωση. Ενώ η μεταμόρφωση, η αποσάθρωση, η διάτμηση, η ρωγμάτωση, η διάλυση, η αργιλική εξαλλοίωση και η εισροή θαλασσινού νερού την μειώνουν.

2.4. ΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΚΑΙ ΙΣΟΤΡΟ ΜΕΣΟ

Έστω ότι τοποθετούνται στην επιφάνεια της Γης δύο ηλεκτρόδια μικρών αντιστάσεων. Το ηλεκτρόδιο $C_1(A)$ συνδέεται με το θετικό πόλο μιας μπαταρίας και ηλεκτρόδιο $C_2(B)$ με τον αρνητικό. Οι γραμμές ροής του ρεύματος στο υπέδαφος είναι ακτινικές και ξεκινούν από το θετικό ηλεκτρόδιο προς το αρνητικό.

Σε ομοιογενές και ισότροπο μέσο τα ηλεκτρικά φορτία ρέουν ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Επομένως, η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού) σε διάφορες αποστάσεις από τα ηλεκτρόδια ρεύματος, παραμένει σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών με κέντρο τα ηλεκτρόδια. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται ισοδυναμικές και σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες, στις οποίες το δυναμικό παραμένει σταθερό, και είναι κάθετες στις γραμμές ροής του ρεύματος.



Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος από σημειακή πηγή (πράσινες διακεκομμένες γραμμές) σε ομοιογενές μέσο και των ισοδυναμικών επιφανειών (με κόκκινο) (Hamdan, 2010).

Λαμβάνοντας υπό όψιν μόνο το θετικό ηλεκτρόδιο, τα ηλεκτρικά φορτία κινούνται από το ηλεκτρόδιο και κατανέμονται σε ημισφαίριο ακτίνας d , με εμβαδόν $S=2\pi d^2$. Αντικαθιστώντας το εμβαδόν στην σχέση (2.2), έχουμε

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho d}{2\pi d^2} = \frac{\rho}{2\pi d} \quad (2.5)$$

Από (2.1) και (2.5), έχουμε

$$V = IR = \frac{I\rho}{2\pi d} = V_0 - V_d \quad (2.6)$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει την διαφορά δυναμικού μεταξύ του θετικού ηλεκτροδίου V_0 και οποιουδήποτε σημείου στο υπέδαφος σε απόσταση d από το θετικό ηλεκτρόδιο.

Η φορά του ρεύματος στο αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι προς αυτό. Έτσι ισχύει

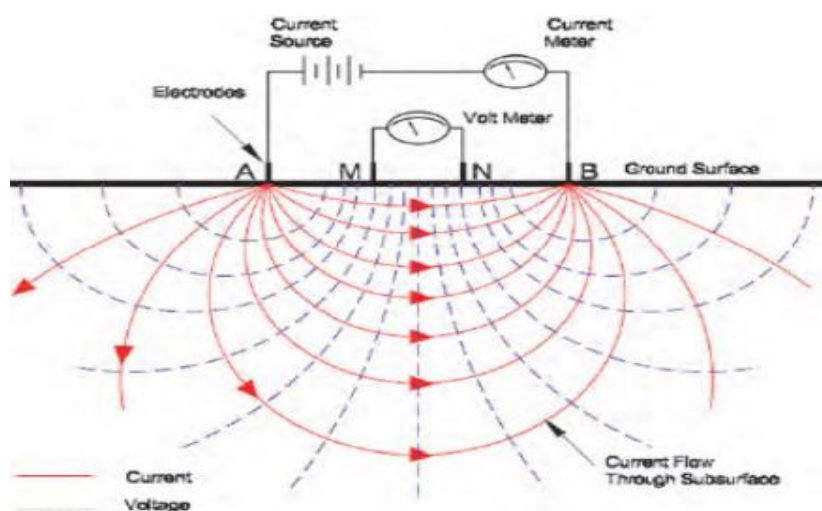
$$-V = IR = \frac{I\rho}{2\pi d} = V_d - V_0 \quad (2.7)$$

Σε τυχαίο σημείο P του ηλεκτρικού πεδίου το δυναμικό οφείλεται και στα δύο ηλεκτρόδια και ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών κάθε ηλεκτροδίου. Το δυναμικό V σε σημείο P που απέχει d_2 και d_1 από το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο, ισούται με:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (2.8)$$

Στη πράξη για την εκτίμηση της διαφοράς δυναμικού χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται στο σχήμα (2.3). Εκτός από τα ηλεκτρόδια που χρησιμεύουν στην δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου (A,B), χρησιμοποιούνται ακόμα δύο για την μέτρηση της διαφοράς δυναμικού (M,N). Έστω ότι AM είναι η απόσταση του ηλεκτροδίου M από το ηλεκτρόδιο A, BM από το ηλεκτρόδιο B και AN και BN οι αντίστοιχες αποστάσεις του ηλεκτροδίου N από τα ηλεκτρόδια ρεύματος. Τότε ισχύει:

$$\Delta V = \frac{\rho i}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.3: Διάταξη των ηλεκτροδίων ρεύματος(AB) και δυναμικού(MN). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται γραμμές ροής του ρεύματος και οι διακεκομμένες είναι οι ισοδυναμικές γραμμές.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ομοιογενούς εδάφους μπορεί να εκφραστεί από την σχέση

$$\rho = \frac{2\pi}{K} \frac{\Delta V}{i} \quad (2.10)$$

,όπου K(η παρένθεση της σχέσης 2.9) είναι ο γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται από την διάταξη των ηλεκτροδίων. Σε ομοιογενές έδαφος και για οποιαδήποτε διάταξη όταν ο

γεωμετρικός παράγοντας πολλαπλασιάζεται με την μετρούμενη αντίσταση προκύπτει η πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ του εδάφους.

2.5. ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Αν η G ήταν ομοιογενής η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από την σχέση (2.10) θα ήταν σταθερή και ανεξάρτητη της θέσης των ηλεκτροδίων και θα αντιπροσώπευε την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους.

Στην πραγματικότητα η G είναι ανομοιογενής και ανισότροπη και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους μεταβάλλεται με το βάθος αλλά και οριζόντια. Η ροή του ρεύματος εξαρτάται από την κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Επομένως, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και της γεωμετρικής διάταξης των ηλεκτροδίων και λέγεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

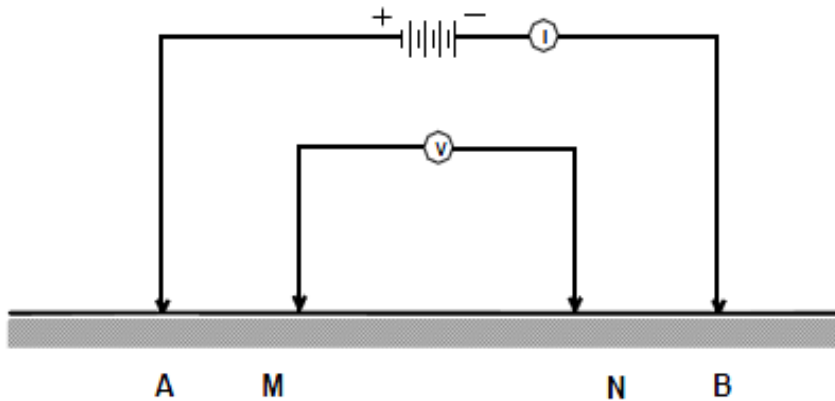
Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση αποτελεί ένα σταθμισμένο μέσο όρο των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του ανομοιογενούς εδάφους. Άρα η απευθείας χρήση των μετρήσεων της για εξαγωγή συμπερασμάτων είναι λανθασμένη. Η πραγματική ειδική ηλεκτρική μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από την κατάλληλη επεξεργασία. Ο καθορισμός της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης αποτελεί την λύση του αντιστρόφου προβλήματος, το οποίο αναλύεται στο κεφάλαιο 3.5.

2.6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Σκοπός της μεθόδου είναι να βρεθεί η γεωηλεκτρική τομή του εδάφους, δηλαδή η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, και έμμεσα να ληφθούν πληροφορίες για την γεωλογική δομή. Λόγω του χαμηλού κόστους της μεθόδου και του μεγάλου εύρους εφαρμογών της είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος και χρησιμοποιείται κυρίως στην υδρογεωλογία, στην τεχνική γεωλογία, στην αναζήτηση μεταλλευμάτων, στην αναζήτηση γεωθερμικών πεδίων, σε τεχνικά έργα (π.χ. κατασκευή φραγμάτων και σιράγγων), στην αρχαιομετρία και στην ανεύρεση βραχώδους υποβάθρου.

Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος γνώστης έντασης I , στο υπέδαφος με την χρήση δύο ηλεκτροδίων ρεύματος, τα οποία συμβολίζονται με A, B ή με C_1, C_2 , και την μέτρηση της πτώσης τάσης (διαφορά δυναμικού) ΔV , με δύο ηλεκτρόδια δυναμικού M, N ή P_1, P_2 . Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται από το πηλίκο των δύο αυτών τιμών σε συνδυασμό με την γεωμετρική θέση των ηλεκτροδίων της διάταξης που χρησιμοποιήσαμε και μετά από την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων. Από την σχέση (2.9) προκύπτει

$$\rho = 2\pi / (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN) (\Delta V_{MN}/I) \quad (2.11)$$

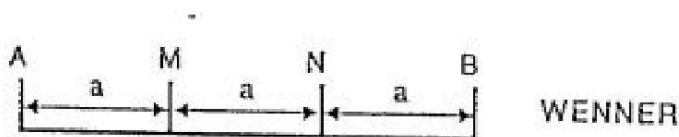


Σχήμα 2.4: Ηλεκτρόδια ρεύματος (A,B) και ηλεκτρόδια δυναμικού (M,N).

2.7. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

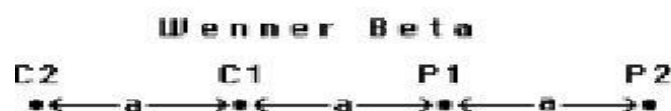
Ο τρόπος διάταξης των ηλεκτροδίων στην ύπαιθρο εξαρτάται κυρίως από την μορφολογία της περιοχής, το βάθος και τις διαστάσεις των γεωλογικών δόμων, τον εξοπλισμό και την εξοικείωση του προσωπικού. Το κυριότερο χαρακτηριστικό κάθε διάταξης είναι ο γεωμετρικός παράγοντας, ο οποίος εξαρτάται με τις σχετικές αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο χρησιμοποιημένες διατάξεις και μερικές παραλλαγές τους.

Διάταξη Wenner: Τα ηλεκτρόδια δυναμικού M,N τοποθετούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος A,B. Οι απόσταση μεταξύ όλων των ηλεκτροδίων είναι ίση με a . Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση της διάταξης δίνεται από την σχέση $\rho_a = 2\pi a(\Delta V/I)$, όπου ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $K=2\pi a$.



Σχήμα 2.5: Διάταξη Wenner, όπου A,B= ηλεκτρόδια ρεύματος και M,N= ηλεκτρόδια δυναμικού

Παραλλαγές αυτής της διάταξης είναι η διατάξεις Wenner Beta και Wenner Gamma με γεωμετρικούς συντελεστές $K=6\pi a$ και $K=3\pi a$. Η διάταξη των ηλεκτροδίων τους φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 2.6: Διάταξη Wenner Beta, όπου $C_{1,2}$ = ηλεκτρόδια ρεύματος και $P_{1,2}$ = ηλεκτρόδια δυναμικού



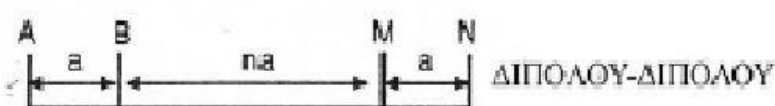
Σχήμα 2.7: Διάταξη Wenner Gamma, όπου $C_{1,2}$ = ηλεκτρόδια ρεύματος και $P_{1,2}$ = ηλεκτρόδια δυναμικού

Διάταξη Schlumberger: Η Schlumberger είναι παρόμοια με την διάταξη Wenner. Τα ηλεκτρόδια δυναμικού M,N τοποθετούνται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ρεύματος A,B, αλλά η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος από τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι μεγαλύτερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού. Αν η απόσταση $MN=2l$ και $AB=2L$, όπου $l < L/5$ (Parasins) και $MN/AB < 1/3$ (Τσόκας,1985), και τα ηλεκτρόδια είναι συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης, τότε η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι $\rho_a = (\pi L^2/2l)/(\Delta V/I)$ και ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $K = \pi L^2/2l$.



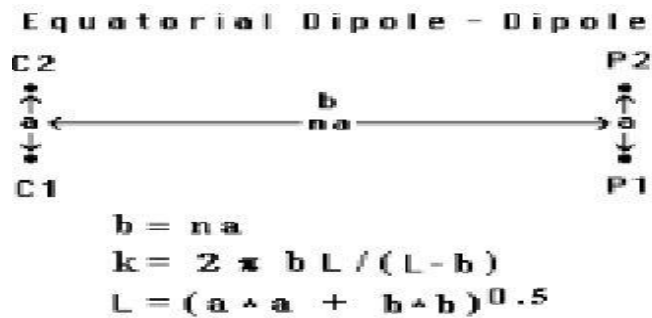
Σχήμα 2.8: Διάταξη Schlumberger, όπου $C_{1,2}$ = ηλεκτρόδια ρεύματος A,B και $P_{1,2}$ = ηλεκτρόδια δυναμικού M,N.

Διάταξη Διπόλου-Διπόλου(dipole-dipole): Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι ίση με την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού ($A,B=M,N=a$). Η απόσταση μεταξύ των δίπολων ρεύματος και δυναμικού είναι na , όπου το n είναι ακέραιος. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τον τύπο $\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a(\Delta V/I)$, όπου ο γεωμετρικός συντελεστής είναι $K = \pi n(n+1)(n+2)a$.



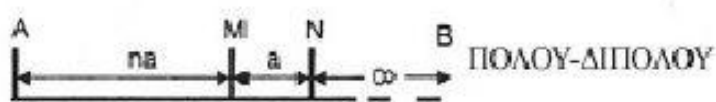
Σχήμα 2.9: Διάταξη διπόλου-διπόλου

Μια παραλλαγή της διπόλου-διπόλου είναι η equatorial dipole-dipole. Η διαφορά της με την κλασική διπόλου-διπόλου είναι ότι τα δίπολα είναι κάθετα τοποθετημένα στην γραμμή μελέτης, όπως φαίνεται στο σχήμα(2.10) και ο γεωμετρικός της συντελεστής είναι $K = 2\pi na(\alpha^a + b^b)^{0.5} / ((\alpha^a + b^b)^{0.5} - na)$.



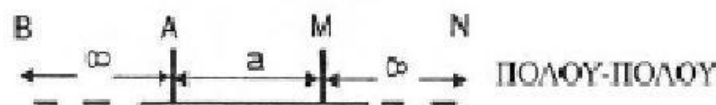
Σχήμα 2.10: equatorial dipole-dipole

Διάταξη πόλου-διπόλου (pole-dipole): Τα ηλεκτρόδια δυναμικού M,N είναι ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ρεύματος A,B. Ένα από ηλεκτρόδια ρεύματος, έστω το B είναι τοποθετημένο σε πολύ μεγάλη απόσταση, θεωρητικά άπειρη. Έτσι η αποστάσεις BM και BN θεωρούνται άπειρες και οι όροι $1/BM$ και $1/BN$ της σχέσης(2.9) είναι μηδέν. Αν η απόσταση MN είναι α και η απόσταση AM είναι na, η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι $\rho_a = 2\pi n(n+1)\alpha \Delta V/I$ και ο γεωμετρικός συντελεστής $K = 2\pi n(n+1)\alpha$.



Σχήμα 2.11: Διάταξη πόλου-διπόλου

Διάταξη πόλου-πόλου: Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση α, ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση, θεωρητικά άπειρη. Επομένως, οι αποστάσεις BM, BM και AN είναι άπειρες και η απόσταση AM=α. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από την σχέση $\rho_a = 2\pi\alpha(\Delta V/I)$ με $K = 2\pi\alpha$.



Σχήμα 2.12: Διάταξη πόλου- πόλου

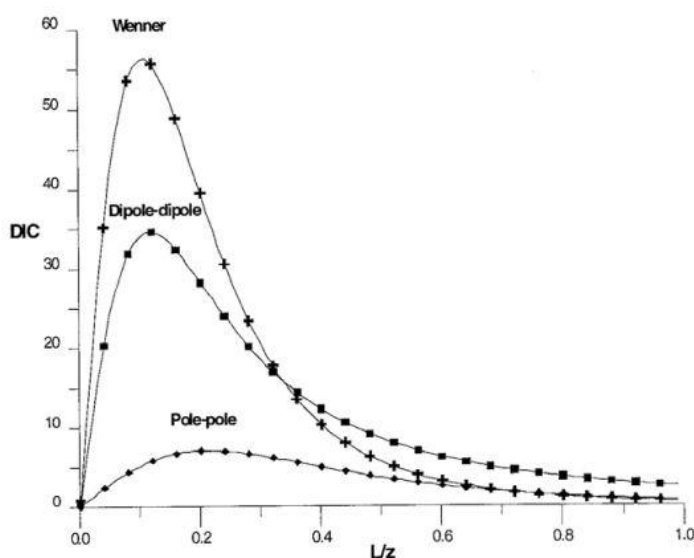
2.8. ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ

Ο όρος “βάθος διασκόπησης”(depth of investigation) αναφέρεται στο βάθος το οποίο οι μετρήσεις που λαμβάνονται στην επιφάνεια της Γης ανταποκρίνονται στην τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχει η Γη. Ο προσδιορισμός του βάθους διασκόπησης κάθε διάταξης μας καθοδηγεί στην επιλογή της πιο κατάλληλης διάταξης για την συλλογή των μετρήσεων στην ύπαιθρο.

Το βάθος διασκόπησης κάθε διάταξης είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια, επειδή:

- Οι υπολογισμοί του υποθέτουν ομοιογενή και ισότροπη Γη
- Οι τιμές τις φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που μετριοούνται στην επιφάνεια οφείλονται στην συνεισφορά γεωλογικών στρωμάτων από διαφορετικά βάθη.

Μια μέθοδος που προτάθηκε για τον υπολογισμό του βάθους διασκόπησης από τους ερευνητές Enjen (1938), Roy (1972) και Apparo (1972) στηρίζεται στην κατασκευή καμπύλων, οι οποίες απεικονίζουν την απόκριση των διατάξεων (Wenner, dipole-dipole, pole-pole) σε λεπτό οριζόντιο στρώμα με μεταβαλλόμενο βάθος (Depth of Investigation Characteristic, (DIC)).



Σχήμα 2.13: DIC καμπύλες (Tsourlos, 1995), L =συνολικό μήκος διάταξης ηλεκτροδίων, z = βάθος διείσδυσης ηλεκτρικού ρεύματος.

Το βάθος στο οποίο η καμπύλη DIC γίνεται μέγιστη, είναι το βάθος το οποίο συνεισφέρει περισσότερο σήμα που λαμβάνεται στη επιφάνεια, δηλαδή οι μετρήσεις ανταποκρίνονται καλύτερα στις μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το μέγιστο βάθος διασκόπησης σύμφωνα με το Edward (1977) είναι η κεντρική τιμή της καμπύλης DIC, δηλαδή το βάθος στο οποίο η καμπύλη χωρίζεται σε δύο μέρη ίσου εμβαδού.

Το βάθος διασκόπησης αυξάνεται όσο αυξάνεται και η απόσταση των ηλεκτροδίων. Όμως όσο αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων μειώνεται ο ρυθμός αύξησης διείσδυσης του ρεύματος, επειδή συναντάει μεγαλύτερη συνολική αντίσταση.

Τύπος Διάταξης	Βάθος Διασκόπησης (κατά Roy and Apparao, 1971 & Roy, 1972)	Βάθος Διασκόπησης (κατά Edwards, 1977)
Wenner	0,11 L	0,17 L
Schlumberger	0,125 L	0,195 L
Διπόλου-Διπόλου	0,195 L	0,25 L
Διδύμου Διπόλου	-	0,77 L
Πόλου-Διπόλου	-	0,52 L
Πόλου-Πόλου	0.35 L	-

L: συνολικό μήκος διάταξης

Πίνακας 2.2: βάθος διασκόπησης όπως προκύπτει από το σχήμα 2.13.

Με τον όρο ευαισθησία κάθε διάταξης εννοούμε τον βαθμό που μία αλλαγή στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση μιας περιοχής του υπεδάφους επηρεάζει στην επιφάνεια τα μετρούμενα δυναμικά. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ευαισθησίας σε έναν χώρο, τόσο περισσότερο αυτός επηρεάζει την μέτρηση. Η ευαισθησία κάθε διάταξης απεικονίζεται με τον χάρτη ευαισθησίας του υπεδάφους, δηλαδή σε ποιες περιοχές κάτω από την διάταξη και πόσο επηρεάζεται η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού. Αν ένα σώμα με υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε σχέση με το περιβάλλον του βρεθεί σε περιοχή με αρνητικές τιμές ευαισθησίας η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης θα μειωθεί. Αντίστοιχα, αν το ίδιο σώμα βρεθεί σε περιοχή υψηλής θετικής ευαισθησίας οι φαινόμενες ειδική ηλεκτρική αντίσταση του θα αυξηθεί. Η ευαισθησία κάθε διάταξης αναλύεται περισσότερο στο κεφάλαιο 2.11.

Η μελέτη του βάθους διασκόπησης και της ευαισθησίας παρέχει πληροφορίες για τη συμπεριφορά κάθε διάταξης και βοηθά στην επιλογή της κατάλληλης διάταξης για την διεξαγωγή των μετρήσεων στην ύπαιθρο.

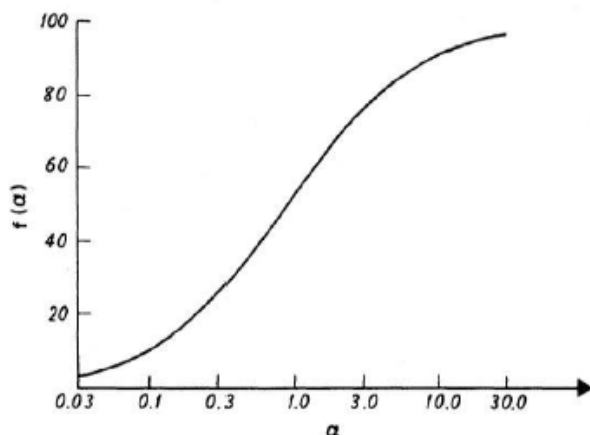
2.9. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Λόγος σήματος προς θόρυβο: Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του λόγου, τόσο πιο ακριβείς είναι οι μετρήσεις μας. Το σήμα, δηλαδή η μετρούμενη διαφορά δυναμικού, είναι ισχυρότερο όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού προς την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος και όταν τα ηλεκτρόδια δυναμικού βρίσκονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ρεύματος. Άρα ισχυρότερο σήμα έχουν οι διατάξεις Wenner, Schlumberger και ακολουθούν η πόλου-διπόλου και η διπόλου-διπόλου.

Ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες: Σύμφωνα με έρευνες των Coggon (1973) και του Summer(1976)., η διπόλου-διπόλου παρουσιάζει την μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς τις οριζόντιες ανομοιογένειες και ακολουθούν οι πόλου-διπόλου, η Schlumberger και η Wenner.

Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα διάμεσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος: Οι διατάξεις Schlumberger και Wenner είναι οι πιο κατάλληλες για βυθοσκοπήσεις, επειδή η συνεχώς αυξανόμενη απόσταση των ηλεκτροδίων δίνει λεπτομερή ανάλυση σε βάθος.

Διεσδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος: Στην περίπτωση που λεπτό αγώγιμο στρώμα βρίσκεται πάνω από μη αγώγιμο υπόβαθρο, σύμφωνα με τον Edward και Hovell, η διάταξη Schlumberger είναι πιο αποδοτική. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το ποσοστό του ρεύματος που μένει στο λεπτό αγώγιμο στρώμα σε σχέση με τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσης των γεωλογικών δομών και την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος. Το ποσοστό δεν πρέπει να ξεπερνάει το 10%, για να έχουμε αξιόπιστες μετρήσεις.



Σχήμα 2.14: Ποσοστό του ρεύματος που μένει στο λεπτό αγώγιμο στρώμα σε σχέση με τις ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις των γεωλογικών δομών και την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος. $\alpha = 4(\rho_2 \rho_1)(t_1/AB)$, t_1 =πάχος λεπτού αγώγιμου στρώματος, AB = απόσταση ηλεκτροδίων ρεύματος, ρ_1 =ειδική ηλεκτρική αντίσταση λεπτού στρώματος, ρ_2 = ειδική ηλεκτρική αντίσταση βραχώδους υποβάθρου.

Βάθος διασκόπησης: Το βάθος διασκόπησης, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, πρέπει να χρησιμοποιείται με επιφυλάξεις, αφού εξαρτάται από τα τοπικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους όπως επιφανειακές και βαθιές ανομοιογένειες, τοπογραφία, κλίση στρωμάτων, ανάγλυφο υποβάθρου.

Ευαισθησία στην μορφολογία υποβάθρου: Σύμφωνα με τον Coggon(1973) η διάταξη διπόλου-διπόλου έχει την μεγαλύτερη ευαισθησία στις γεωλογικές ανωμαλίες.

Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής: Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δημιουργεί πύκνωση και αραιώση των γραμμών ροής του ρεύματος. Για παράδειγμα, σε κοιλάδα η πύκνωση των ρευματικών γραμμών οδηγεί σε μετρήσεις πολύ χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σαν να υπάρχει αγώγιμο σώμα (Fox,1980).

2.10. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

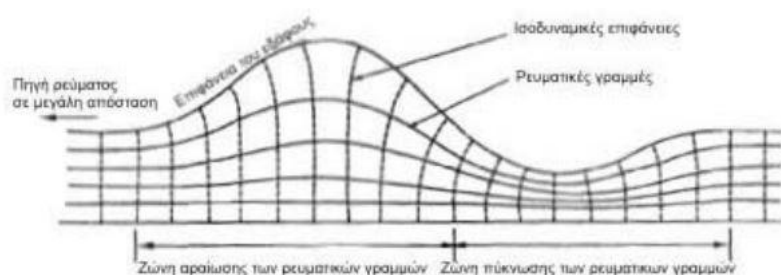
Η ποιότητα των δεδομένων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που συλλέγονται σε μια περιοχή εξαρτάται από την αξιοπιστία του οργάνου μέτρησης της αντίστασης αλλά και από μια σειρά παραγόντων που “μολύνουν” με θόρυβο τα δεδομένα (Tsourlos,1995). Οι παράγοντες που προκαλούν θόρυβο στις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι οι παρακάτω:

Σφάλματα λόγω της θέσης των ηλεκτροδίων: Η εσφαλμένη τοποθέτηση των ηλεκτροδίων και ο λανθασμένος υπολογισμός του γεωμετρικού συντελεστή επηρεάζει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Σφάλματα στις μετρήσεις του δυναμικού: Προκαλούνται από τη κακή επαφή ή την υψηλή αντίσταση επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος, τη καταστροφή των καλωδίων, από εξωγενή περιβαλλοντικό θόρυβο (τελλουρικά ρεύματα, ηλεκτροφόρα καλώδια) και από τη δυσλειτουργία ή την ακατάλληλη χρήση των οργάνων.

Ηλεκτρομαγνητική σύζευξη: Όταν ένας πομπός ρεύματος αλλάξει ή διακοπεί η λειτουργία του τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της ζεύξης μεταξύ ηλεκτροδίων που εκπέμπουν και λαμβάνουν σήμα. Η σύζευξη αυξάνεται με το μήκος των ηλεκτροδίων, την αγωγιμότητα του εδάφους, τη συχνότητα και εξαρτάται από την διάταξη των ηλεκτροδίων. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούν διαφορετικά καλώδια επηρεάζονται λιγότερο (π.χ. διπόλου-διπόλου, πόλου-πόλου).

Επίδραση της τοπογραφίας: Οι έντονες τοπογραφικές μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν διασπορά και συγκέντρωση των γραμμών ροής του ρεύματος, με αποτέλεσμα στην γεωηλεκτρική τομή να δημιουργούνται περιοχές χαμηλής και υψηλής αντίστασης, οι οποίες στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν. Η επίδραση της τοπογραφίας μπορεί να μοντελοποιηθεί και να ληφθεί υπό όψιν κατά την επεξεργασία των δεδομένων (Fox et al., 1980; Holcombe and Jiracek, 1984; Tong και Yang, 1990; Tsourlos et al., 1999; Loke, 2000).



Σχήμα 2.15: Πύκνωση και αραιώση ρευματικών γραμμών (Αποστολόπουλος,2013).

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

2.11. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Τα χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου που θα εξεταστούν είναι:

- Η ευαισθησία των μεθόδων σε κατακόρυφες και οριζόντιες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Οι διαφορές στην ευαισθησία των διατάξεων βοηθούν στον καθορισμό της αποδοτικότητας κάθε διάταξης σε διαφορετικές γεωλογικές δομές.
- Το βάθος διασκόπησης. Δεν εξαρτάται από τις μετρούμενες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και αναφέρεται σε ομοιογενές υπέδαφος αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις πεδίου.
- Η οριζόντια απόσταση που καλύπτει κάθε διάταξη
- Την ένταση του σήματος κάθε διάταξης

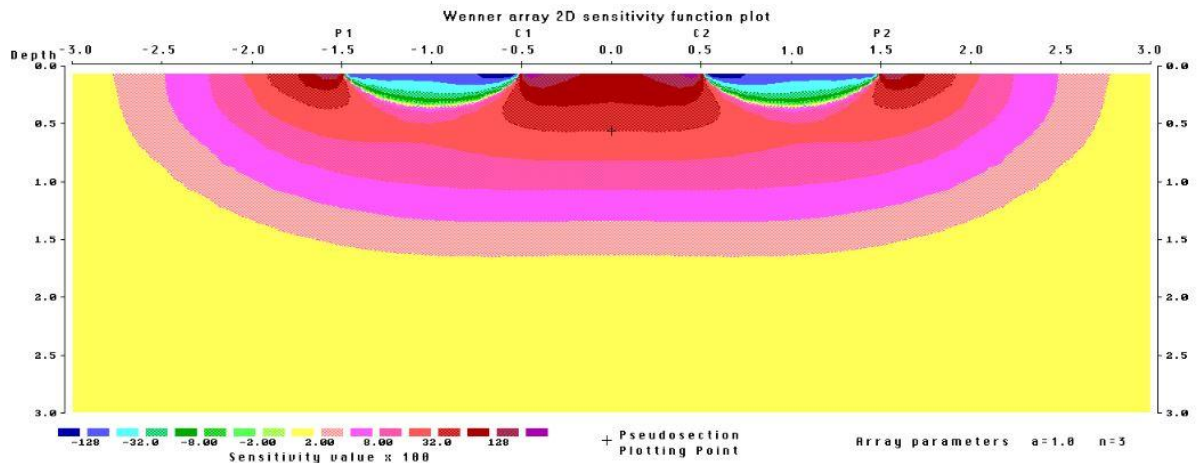
Wenner

Η διάταξη Wenner είναι η πιο δημοφιλής και έχει πολλά πλεονεκτήματα. Η Wenner προσφέρει το πιο ισχυρό σήμα, ιδιότητα που είναι χρήσιμη για μετρήσεις σε περιοχές με υψηλό θόρυβο.

Η κατανομή της ευαισθησίας της φαίνεται στο σχήμα 2.16. Η ευαισθησία της είναι εξογκλήρου οριζόντια ακριβώς κάτω από το κέντρο της διάταξης. Εξαιτίας αυτού η Wenner είναι ευαίσθητη σε κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και χρησιμοποιείται για την χαρτογράφηση οριζόντιων δομών. Παρατηρώντας την κατανομή της ευαισθησίας, διαπιστώνεται μία περιοχή με υψηλές αρνητικές τιμές κοντά στην επιφάνεια ,ανάμεσα στα ηλεκτρόδια C_1, P_1 και C_2, P_2 . Αυτό σημαίνει πως αν ένα σώμα υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βρεθεί εκεί η τιμή της μετρούμενης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης θα μειωθεί. Παρόμοια, αν ένα σώμα βρεθεί στη περιοχή με τις υψηλές θετικές τιμές η μετρούμενη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα αυξηθεί.

Με την χρήση ενός πέμπτου ηλεκτροδίου και ενός διακόπτη(rotary switch) το τελευταίο ηλεκτρόδιο μπορεί να απενεργοποιηθεί και να τοποθετηθεί στην αρχή της διάταξης , ενώ ο χειριστής παίρνει τη μέτρηση με τα άλλα τέσσερα ηλεκτρόδια. Με αυτόν τον τρόπο κάθε επιπλέον μέτρηση παίρνεται με την μετακίνηση ενός ηλεκτροδίου(Βαφείδης,2001).

Το βασικότερο μειονέκτημα της είναι η ανεπαρκής ευαισθησία σε οριζόντιες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Ειδικά όταν χρησιμοποιούνται λίγα ηλεκτρόδια και όταν αυξάνεται η απόσταση τους. Άρα η Wenner δεν συνιστάται για χαρτογράφηση κατακόρυφων γεωλογικών δομών. Τέλος, σε σύγκριση με τις άλλες διάταξης έχει μέτριο βάθος διασκόπησης.



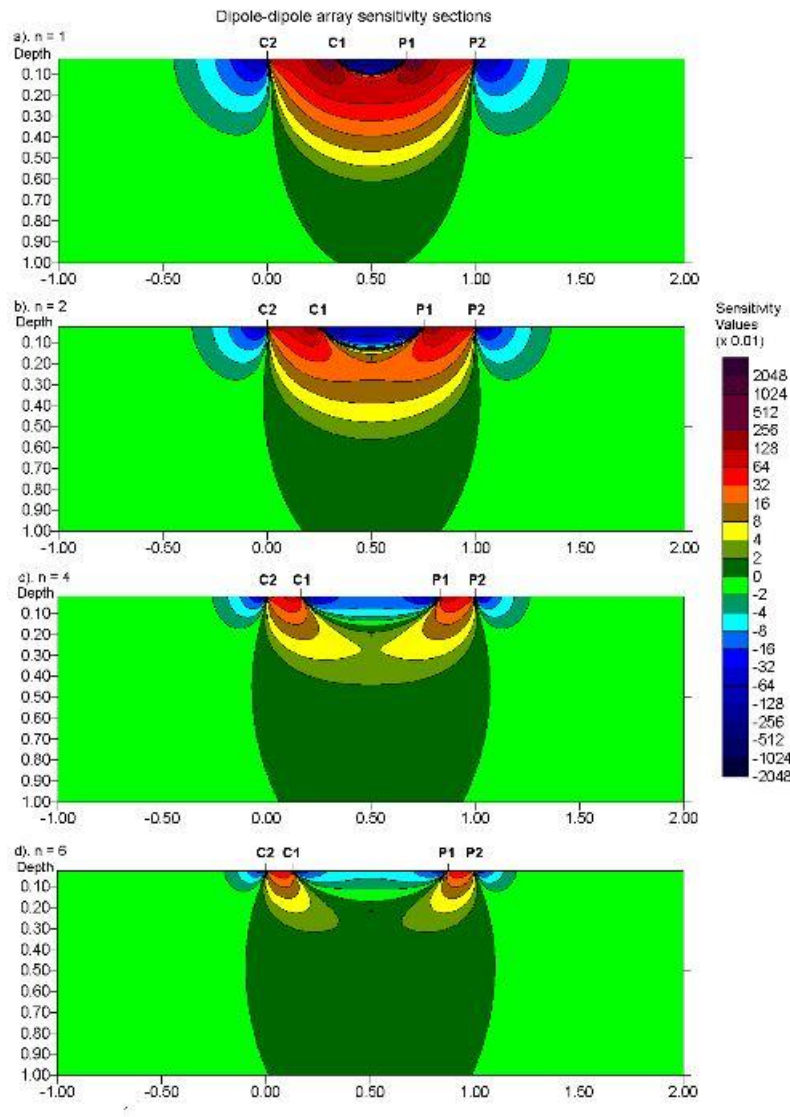
Σχήμα 2.16: Κατανομή της ευαισθησίας της διάταξης Wenner (Loke,2000).

Διπόλου-διπόλου

Αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, επειδή απαιτεί μικρό μήκος καλωδίων και χρησιμοποιεί πέμπτο ηλεκτρόδιο όπως η Wenner.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17, οι μεγάλες θετικές τιμές της ευαισθησίας συγκεντρώνονται κοντά στα δίπολα ρεύματος C_1, C_2 και δυναμικού P_1, P_2 . Οι περιοχές μικρότερης ευαισθησίας βρίσκονται σε κάποιο βάθος κάτω από το κέντρο της διάταξης. Από το σχήμα 2.17 παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το n , η απόσταση μεταξύ των δίπολων, οι θετικές τιμές της ευαισθησίας γίνονται κατακόρυφες. Για αυτό το λόγο η διπόλου-διπόλου είναι ευαίσθητη σε οριζόντιες μεταβολές. Προτιμάται για τον εντοπισμό πεπερασμένων διαστάσεων δομών (κουλότητες, αναχώματα).

Η διάταξη με την αύξηση του βάθους χάνει την ευαισθησία της και έχει υψηλή ευαισθησία μόνο ακριβώς κάτω από τα δίπολα. Για τη χρήση της στο πεδίο ο μετρητής της αντίστασης πρέπει να έχει υψηλή ευαισθησία, να παρέχει καλό σύστημα απόρριψης θορύβου και να υπάρχει καλή επαφή μεταξύ ηλεκτροδίων και εδάφους.



Σχήμα 2.17: Κατανομή της ευαισθησίας της διπόλου-διπόλου για $n=1,2,4,6$ (Loke, 2002).

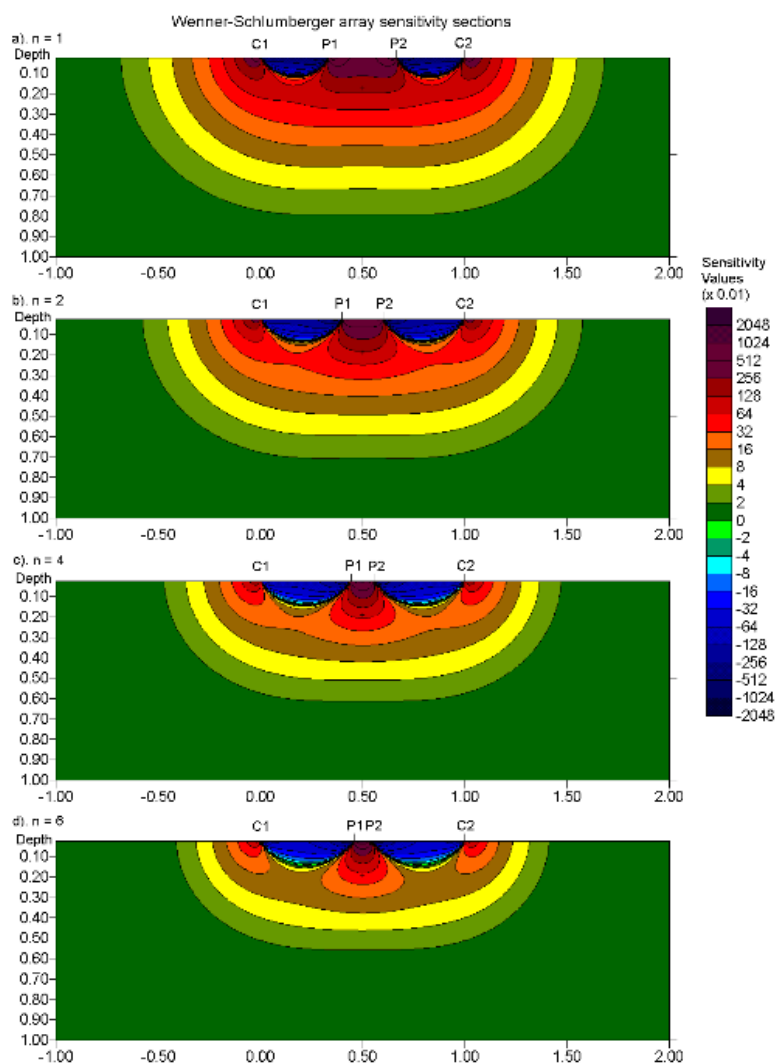
Schlumberger

Η διάταξη Schlumberger είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη για γεωλογικές δομές μεγάλης έκτασης, επειδή παρέχει μεγάλη οριζόντια κάλυψη.

Η κατανομή της ευαισθησίας της Schlumberger διαφέρει ελαφρώς από την Wenner με μία μικρή κατακόρυφη καμπυλότητα κάτω από το κέντρο της διάταξης και με πιο χαμηλές τιμές ευαισθησίας κάτω από τα ηλεκτρόδια. Στο σχήμα 2.18 παρουσιάζεται η κατανομή της ευαισθησίας, καθώς το n παίρνει τιμές από 1 (Wenner) έως 6. Όσο αυξάνεται ο παράγοντας n , η ευαισθησία της διάταξης συγκεντρώνεται κάτω από τα ηλεκτρόδια. Αυτό σημαίνει ότι η ευαισθησία της είναι μέτρια σε οριζόντιες και κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Για αυτό το λόγο προτιμάται σε περιοχές που εμφανίζονται οριζόντιες και κατακόρυφες δομές έναντι της Wenner και της διπόλου-διπόλου.

Το βάθος διασκόπησης της προς το συνολικό μήκος της είναι 10% μεγαλύτερο από την Wenner για την ίδια απόσταση ηλεκτροδίων. Όμως η ένταση του σήματος της είναι μικρότερη από την Wenner και υψηλότερη από την διπόλου-διπόλου.

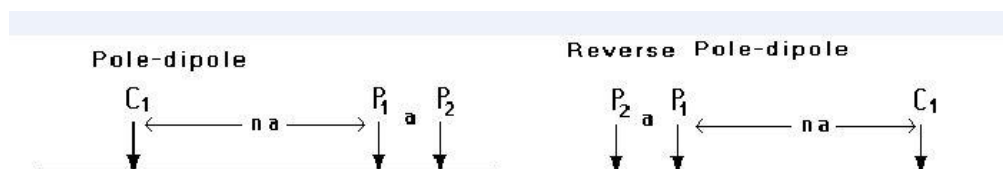
Σύμφωνα με τον Loke, η Schlumberger έχει καλύτερη οριζόντια κάλυψη από την Wenner. Για την Wenner κάθε βαθύτερο επίπεδο δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έχει 3 λιγότερα σημεία δεδομένων από το προηγούμενο, ενώ η Schlumberger έχει μόνο δύο.



Σχήμα 2.18: Κατανομή της ευαισθησίας της Schlumberger για $n=1,2,4,6$ (Loke, 2002).

Πόλου-διπόλου

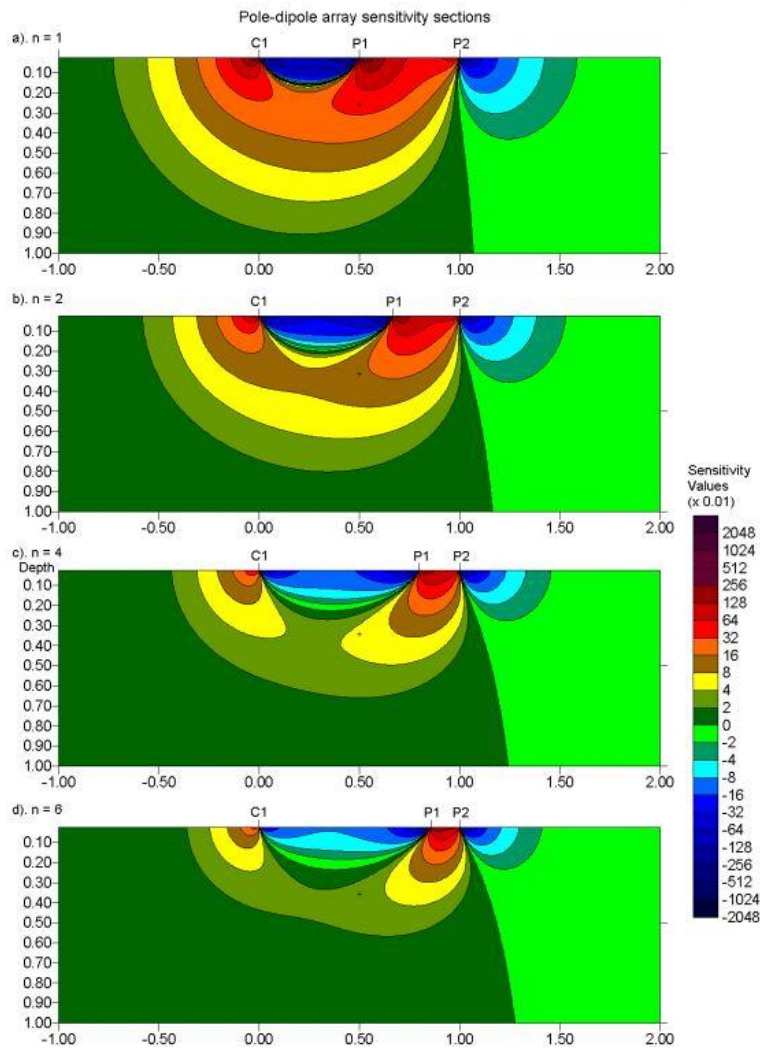
Η διάταξη πόλου-διπόλου έχει καλή οριζόντια κάλυψη και ισχυρό σήμα. Η σημαντικότερη διαφορά της με τις άλλες μεθόδους είναι ότι δεν είναι συμμετρική. Αυτό σημαίνει πως η κατανομή της ευαισθησίας της και οι μετρήσεις της δεν είναι συμμετρικές. Η ασυμμετρία της επηρεάζει αρνητικά την ερμηνεία των μετρήσεων και μετά την αντιστροφή. Μια τεχνική για να ελαττωθεί αυτή η επίδραση είναι η επανάληψη των μετρήσεων με αντίστροφη θέση ηλεκτροδίων, σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.19: Η διάταξη πόλου-διπόλου σε κανονική και αντίστροφη θέση (Loke, 2002).

Η κατανομή της ευαισθησίας της πόλου-δίπολου δείχνει ότι η περιοχή με την υψηλότερη ευαισθησία βρίσκεται μεταξύ των δίπολων δυναμικού P_1 - P_2 . Μεταξύ των ηλεκτροδίων C_1 - P_1 κυριαρχούν επιφανειακά οι αρνητικές τιμές. Επίσης, όσο μεγαλώνει ο παράγοντας n παρατηρούμε ότι η ευαισθησία γίνεται κατακόρυφη. Άρα η πόλου-διπόλου είναι πιο ευαίσθητη σε οριζόντιες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και είναι πιο αποτελεσματική στο εντοπισμό κατακόρυφων γεωλογικών δομών.

Το βάθος διασκόπησης είναι αρκετά μεγάλο, έχει ισχυρότερο σήμα από την διπόλου-διπόλου και δεν επηρεάζεται τόσο από τα τελλουρικά ρεύματα όσο η πόλου-πόλου. Σύμφωνα με τον Loke, το σήμα της μειώνεται με το τετράγωνο του παράγοντα n . Για αυτό τον λόγο δεν συνηθίζεται να χρησιμοποιείται με τιμές του n μεγαλύτερες του 10. Αντ' αυτού για την ενίσχυση του σήματος αυξάνεται ο παράγοντας a , η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού P_1 - P_2 .

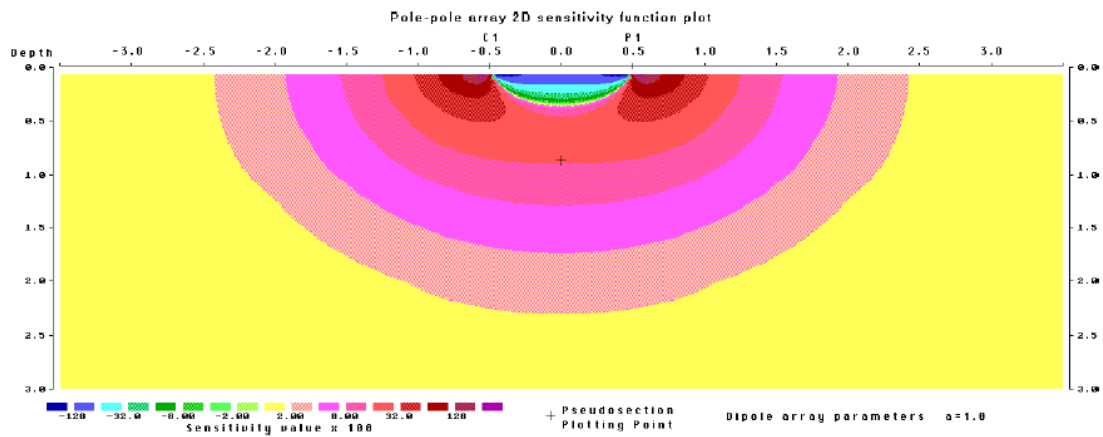


Σχήμα 2.20: Κατανομή της ευαισθησίας της πόλου-διπόλου για $n=1,2,4,6$ (Loke, 2002).

Πόλου-πόλου

Η διάταξη έχει την μεγαλύτερη οριζόντια κάλυψη και το μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης. Όμως δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά όσο οι υπόλοιπες διατάξεις επειδή απαιτεί δύο απομακρυσμένα ηλεκτρόδια. Στην πράξη η απόσταση των απομακρυσμένων ηλεκτροδίων πρέπει να είναι εικοσαπλάσια της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος με δυναμικού για να εξασφαλίζει ότι οι μετρήσεις θα έχουν μικρό σφάλμα.

Εξαιτίας της μεγάλης απόστασης των ηλεκτροδίων η πόλου-πόλου έχει το μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης αλλά η ευαισθησία της είναι μέτρια έως χαμηλή. Τέλος, λόγω του μεγάλου βάθους διασκόπησης τα τελλουρικά ρεύματα έχουν μεγάλη επίδραση στις μετρήσεις σαν θόρυβος. Για αυτό το λόγο η διάταξη χρησιμοποιείται για μικρές αποστάσεις ηλεκτροδίων σε αρχαιολογικές μελέτες.



Σχήμα 2.21: Κατανομή της ευαισθησίας της πόλου-πόλου (Loke,2000).

Ανακεφαλαιώνοντας:

- Η διάταξη Wenner είναι καλή επιλογή για περιοχές με υψηλές παρεμβολές θορύβου και για οριζόντιες γεωλογικές δομές.
- Η διπόλου-διπόλου είναι κατάλληλη για κατακόρυφες αλλά και για σύνθετες γεωλογικές δομές.
- Η Schlumberger χαρακτηρίζεται από καλό σήμα και χρησιμοποιείται όταν απαιτείται καλή οριζόντια και κατακόρυφη ανάλυση και οριζόντια κάλυψη.
- Η πόλου-διπόλου δεν απαιτεί μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων και έχει καλή οριζόντια κάλυψη.
- Η πόλου-πόλου παρέχει μεγάλη οριζόντια κάλυψη και βάθος διασκόπησης αλλά επηρεάζεται από την παρεμβολή θορύβου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: **ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ**

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η Γη είναι ανομοιογενής και ανισότροπη. Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεταβάλλονται όχι μόνο πλευρικά αλλά και σε βάθος. Επομένως για την λεπτομερή απεικόνιση των σύνθετων γεωλογικών δομών του υπεδάφους αναπτύχθηκε η δισδιάστατη μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Η ηλεκτρική τομογραφία αποτελεί μέθοδο υψηλής διακριτικής ικανότητας και παρέχει την δυνατότητα λήψης πληροφοριών τόσο για την πλευρική όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Η διαδικασία των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να περιγράφει ως μια σειρά από συνεχόμενες βυθοσκοπήσεις κατά μήκος μιας γραμμής μελέτης.

Αρχικά μετριοούνται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Όλες οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής ηλεκτρικών αντιστάσεων χρησιμοποιούνται σε μία διαδικασία ερμηνείας, η οποία λέγεται αντιστροφή των δεδομένων. Η εύρεση των τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι δυνατή με τους αλγόριθμους της αντιστροφής. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους μεγάλης ακρίβειας. Ευθύ πρόβλημα ονομάζουμε τον υπολογισμό της διαφοράς δυναμικού και εν συνέχεια της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις γνωστές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους και αντίστροφο πρόβλημα ονομάζουμε τον υπολογισμό των τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις φαινόμενες.

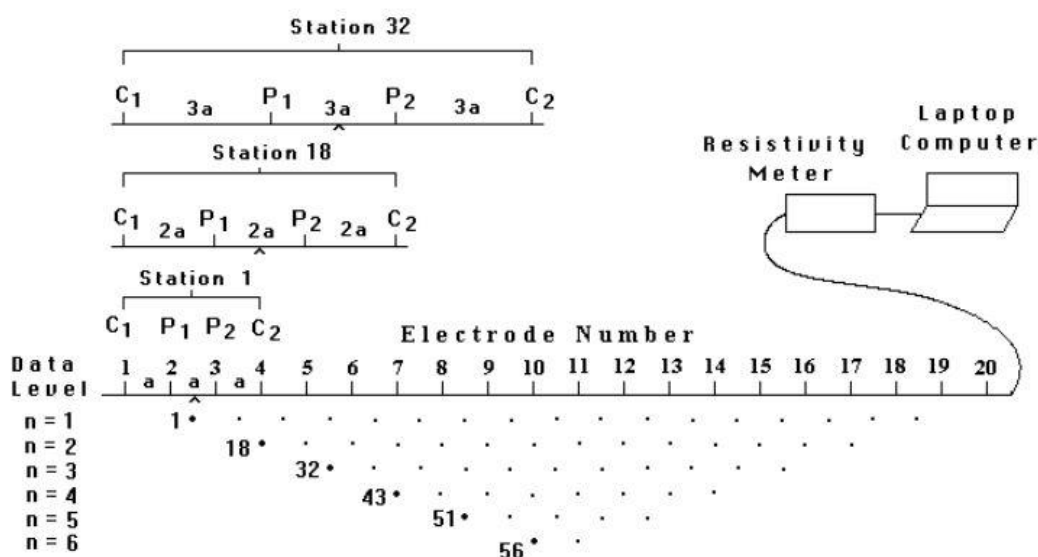
Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας απαιτεί μεγάλο αριθμό μετρήσεων. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και η χωρική ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου (Athanasίου, 2004). Όμως οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων που παράγονται απαιτούν αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία. Για αυτό το λόγο έχουν δημιουργηθεί ειδικά υπολογιστικά προγράμματα αντιστροφής δεδομένων και δημιουργίας μοντέλων. Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα αντιστροφής RES2DIV και το πρόγραμμα μοντελοποίησης RES2DMOD.

3.2. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία διεξάγεται χρησιμοποιώντας μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων, 25 ή και παραπάνω. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται κατά μήκος ευθείας γραμμής διατηρώντας σταθερή απόσταση μεταξύ τους και συνδέονται σε πολύκλωνο καλώδιο. Το καλώδιο συνδέεται με μονάδα μέτρησης της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συλλογής δεδομένων και με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο τρόπος διάταξης των ηλεκτροδίων και παράμετροι, όπως η ένταση του ρεύματος, εισάγονται σε αρχείο στον υπολογιστή. Το πρόγραμμα αφού διαβάσει τα δεδομένα εισαγωγής επιλέγει αυτόματα τα

τέσσερα ηλεκτρόδια για κάθε μέτρηση. Μετά οι μετρήσεις λαμβάνονται αυτόματα και αποθηκεύονται στον υπολογιστή.

Το σχήμα (3.1) δείχνει μία πιθανή αλληλουχία των μετρήσεων για την διάταξη Wenner. Το πρώτο βήμα είναι να γίνουν όλες οι μετρήσεις σε οριζόντια διεύθυνση για απόσταση ηλεκτροδίων a . Για την πρώτη μέτρηση χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια 1,2,3,4. Το 1 και το 4 εισάγουν ρεύμα γνωστής έντασης και το 2 και το 3 χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του δυναμικού. Για την δεύτερη μέτρηση χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια 2,3,4,5. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να καλυφτεί όλη η γραμμή μελέτης. Μετά αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων σε $2a$. Οι μετρήσεις καλύπτουν όλη την οριζόντια απόσταση της γραμμής μελέτης για αυτή την απόσταση. Για την πρώτη μέτρηση χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια 1,3,5,7 και για την δεύτερη τα ηλεκτρόδια 2,4,6,8. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλο το μήκος της γραμμής μελέτης. Στη συνέχεια αυξάνεται και άλλο η απόσταση των ηλεκτροδίων και επαναλαμβάνεται για όλο το μήκος της γραμμής μελέτης. Οι μετρήσεις πρέπει να εκτελούνται με προκαθορισμένο σύστημα όχι μόνο για να επιτύχουμε περισσότερες αλλά και επειδή επηρεάζουν την ερμηνεία του μοντέλου μετά την αντιστροφή των δεδομένων.

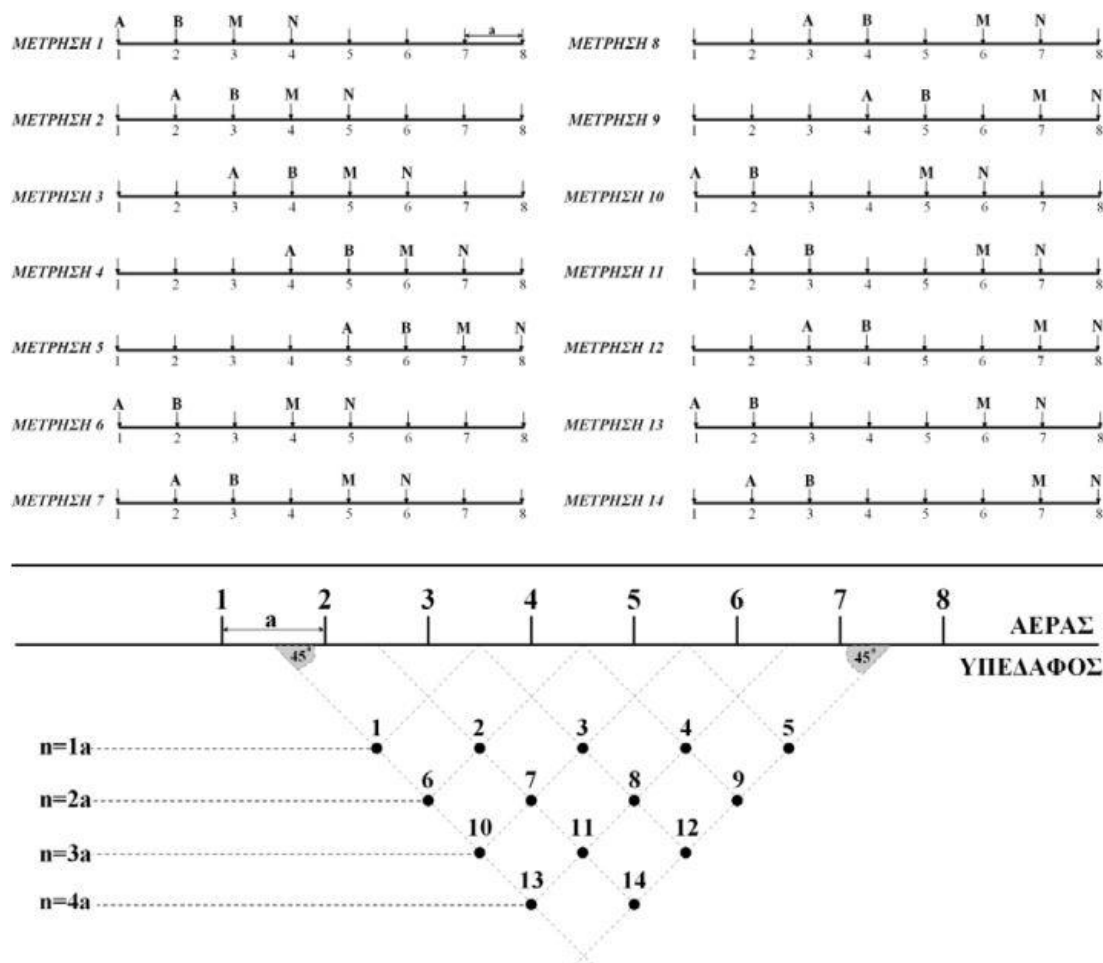


Σχήμα 3.1: Σύνδεση ηλεκτρονίων και αλληλουχία μετρήσεων για την διάταξη Wenner (Loke, 2004).

Όσο αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων, ο αριθμός των μετρήσεων μειώνεται. Ο αριθμός των μετρήσεων για κάθε επίπεδο δεδομένων εξαρτάται από την διάταξη των ηλεκτροδίων. Η Wenner έχει τις λιγότερες μετρήσεις σε σύγκριση με άλλες διατάξεις.

Οι μετρήσεις της πόλου-πόλου είναι παρόμοιες με την Wenner. Για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, Schlumberger, και πόλου-διπόλου η διαδικασία μετρήσεων διαφέρει. Στη διπόλου-διπόλου τα ηλεκτρόδια δυναμικού αποτελούν το ένα δίπολο και τα ηλεκτρόδια ρεύματος το άλλο. Για την πρώτη μέτρηση τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι τα 1,2 και του δυναμικού είναι τα 3,4. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόδια 2,3 αποτελούν το δίπολο δυναμικού, ενώ το δίπολο δυναμικού αποτελείται από τα ηλεκτρόδια 4,5. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι χρησιμοποιηθούν όλα τα ηλεκτρόδια της γραμμής μελέτης.

Για την διπλάσια απόσταση μεταξύ των δύο δίπολων και την πρώτη μέτρηση το δίπολο ρεύματος αποτελείται από τα ηλεκτρόδια 1,2 και το δίπολο δυναμικού από τα ηλεκτρόδια 4,5. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα ηλεκτρόδια της γραμμής μελέτης. Στην συνέχεια αυξάνεται περισσότερο η απόσταση μεταξύ των δύο δίπολων, η οποία πρέπει να είναι πάντοτε ακέραιο πολλαπλάσιο της απόστασης των ηλεκτροδίων που αποτελούν το δίπολο. Για μεγαλύτερες αποστάσεις οι μετρήσεις επηρεάζονται περισσότερο από τον θόρυβο. Για την αντιμετώπιση του αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων του δίπολου και μετά εκτελούνται οι μετρήσεις.



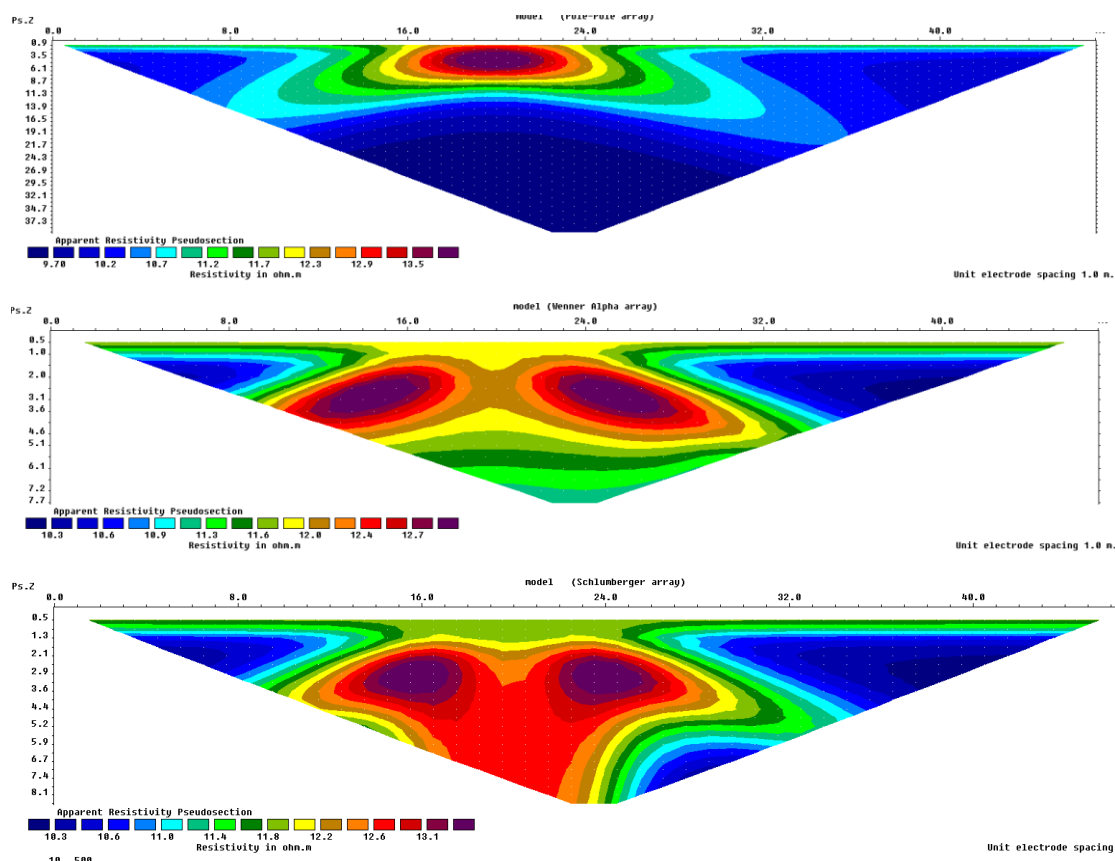
Σχήμα 3.2: Σύνδεση ηλεκτρονίων και αλληλουχία μετρήσεων για την διάταξη διπόλου-διπόλου (Tsourlos, 1995).

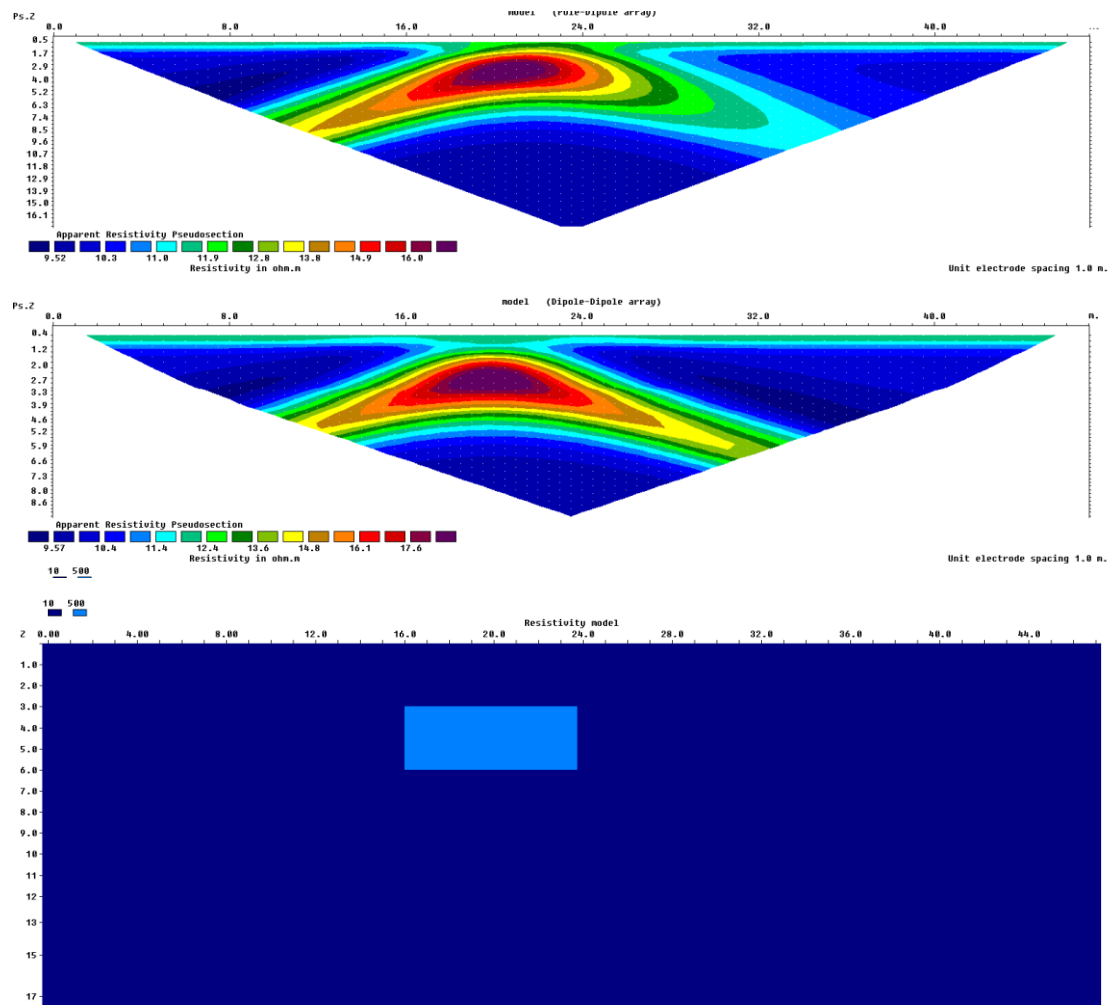
3.3. ΨΕΥΔΟΤΟΜΗ

Για την απεικόνιση των δεδομένων της διδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιείται η ψευδοτομή. Οι μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τοποθετούνται σε σημεία τομής ακριβώς κάτω από το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων και σε βάθος που εξαρτάται από την συγκεκριμένη διάταξη (Barker 1992, Γκανιάτσος 1995). Η οριζόντια θέση των μετρήσεων βρίσκεται στο ενδιάμεσο σημείο του

ζεύγους των ηλεκτροδίων δυναμικού και η κατακόρυφη θέση, στο μέσο βάθος διασκόπησης, το οποίο εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε διάταξης. Το βάθος αποκαλείται ψευδοβάθος, επειδή δηλώνει το βάθος διασκόπησης ομοιογενούς γεωηλεκτρικού μοντέλου και δεν αντιπροσωπεύει πραγματικό βάθος.

Η ψευδοτομή δίνει προσεγγιστική απεικόνιση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Τα περιγράμματα των γεωηλεκτρικών δομών εξαρτώνται από την διάταξη των ηλεκτροδίων και την κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η ψευδοτομή είναι χρήσιμη για την απεικόνιση των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και αποτελεί μια αρχική εκτίμηση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, η οποία χρειάζεται περαιτέρω ερμηνεία με μαθηματικές μεθόδους αντίστροφης. Η ψευδοτομή δεν απεικονίζει τις τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Το σχήμα 3.3 δείχνει τις ψευδοτομές για διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων και ίδια γεωλογική δομή. Η διάταξη πόλου-πόλου δίνει καλή απεικόνιση της δομής. Για τη Wenner και τη Schlumberger η δομή παραμορφώνεται όσο αυξάνει το βάθος. Η πόλου-διπόλου απεικονίζει ασύμμετρα την δομή και την παραμορφώνει αρκετά. Τέλος, η διπόλου-διπόλου σε σχέση με τις άλλες διατάξεις την απεικονίζει καλύτερα.





Σχήμα 3.3: Ψευδοτομές των διατάξεων πόλου-πόλου, Wenner, Schlumberger, πόλου-διπόλου, διπόλου-διπόλου για την ίδια γεωλογική δομή.

3.4. ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Ο σκοπός της επίλυσης του ευθέως προβλήματος είναι ο υπολογισμός της διαφοράς δυναμικού και εν συνέχεια ο υπολογισμός της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από την κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος.

Το δυναμικό V του ηλεκτρικού πεδίου που προκαλείται από την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε δισδιάστατο χώρο περιγράφεται από την εξίσωση (3.1) , όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι συνάρτηση των συντεταγμένων της θέσης x και z .

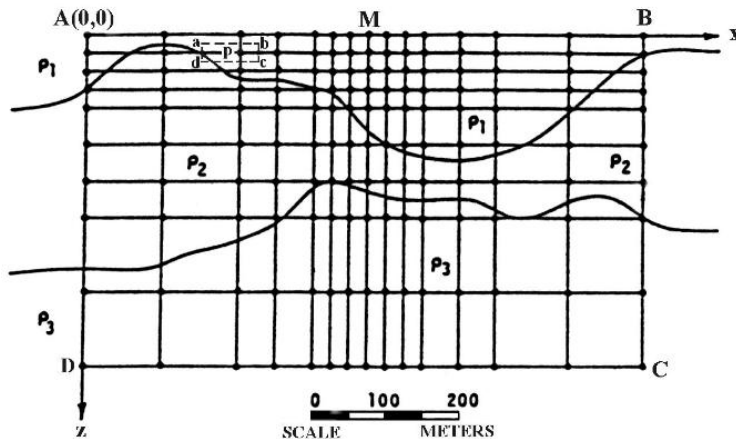
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\sigma(x, z) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\sigma(x, z) \frac{\partial V}{\partial z} \right] + q(x, z) = 0 \quad (3.1)$$

όπου q : πυκνότητα ρεύματος από γραμμική πηγή σε amp/m^2

σ : ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους σε mhos/m

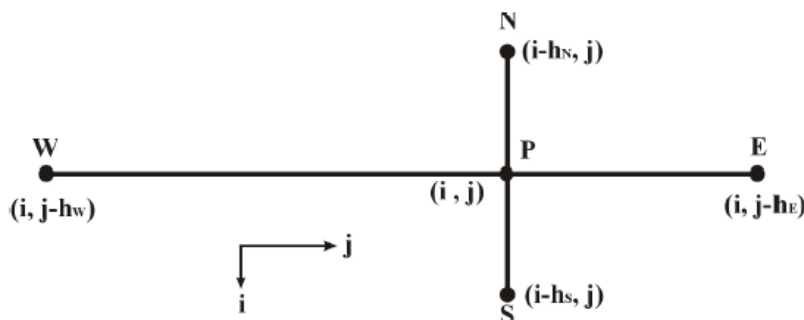
V : το δυναμικό σε Volt

Στις περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών (Mufti 1979, Dey and Morisson 1979) και πεπερασμένων στοιχείων (Dey and Morisson 1979, Zienkiewicz and Taylor 1989, Cogon 1971, Burnett 1989, Tsourlos 1998) είναι οι μόνες εφαρμόσιμες λύσεις.



Σχήμα 3.4: Ορθογώνιο πλέγμα της μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Γκανιάτσος, 2000).

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών διεξάγεται στην περιοχή ABCDA, στην οποία το τμήμα AB αντιστοιχεί στην επιφάνεια του εδάφους και το BCDA είναι τεχνητά τοποθετημένο όριο. Στη συνέχεια η περιοχή υποδιαιρείται σε χιλιάδες μικρότερα ορθογώνια κελία με κέντρα τις θέσεις των σταθμών μέτρησης και δημιουργείται ένα ορθογώνιο πλέγμα (Σχήμα 3.4). Κάθε κελί ονομάζεται στοιχείο και τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης θεωρείται σταθερή σε κάθε ένα από αυτά. Τα κέντρα των γειτονικών στοιχείων του P συμβολίζονται ως E,W,N,S και οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων ως h_E, h_W, h_N, h_S .



Σχήμα 3.5: Κέντρα των γειτονικών στοιχείων του P (Γκανιάτσος, 2000).

Με Γ συμβολίζονται τα στοιχεία πάνω στο όριο ABCDA, με Γ_1 τα στοιχεία πάνω στο όριο AB, με Γ_2 αυτά που είναι στο όριο BCDA και με G τα στοιχεία μέσα στο πλέγμα ABCDA. Κατά τον Mufti οι οριακές συνθήκες είναι:

1. $V(x,z)=f(x,z)$ πάνω στο Γ_2 όπου η $f(x,z)$ είναι γνωστή $\forall (i,j) \in \Gamma_2$
2. $\partial V / \partial z = 0 \quad \forall (i,j) \in \Gamma_1$

3. $q(x,y) = 0$
4. $q(x,y) \neq 0$ για τις θέσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος

Οι εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών για σημείο $P \in G$ και τα γειτονικά του E , W , S , N υπολογίζονται εφαρμόζοντας την παρακάτω προσεγγιστική σχέση (Mufti, 1976)

$$\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i,j+h_E/2} - u_{i,j-h_W/2}}{(h_E + h_W)/2} \quad (3.2)$$

όπου $x=ih$, $z=jh$ και $V(x,z)=u_{i,j}$. Για τα σημεία $E(i,j+h_E/2)$ και $W(i,j-h_W/2)$ ισχύει:

$$\begin{aligned} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x}\right)_{i,j+h_E/2} &= \sigma_{i,j+h_E/2} h_E^{-1} (u_{i,j+h_E} - u_{i,j}) \\ \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x}\right)_{i,j-h_W/2} &= \sigma_{i,j-h_W/2} h_W^{-1} (u_{i,j} - u_{i,j-h_W}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Παρόμοιοι τύποι ισχύουν και για τα υπόλοιπα σημεία. Μετά την εκτέλεση των αναγκαίων πράξεων καταλήγουμε στην εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών (Βαφείδης, 2001)

$$\alpha_E u_{i,j+h_E} + \alpha_N u_{i-h_N,j} + \alpha_W u_{i,j-h_W} + \alpha_S u_{i+h_S,j} - \alpha_P u_{i,j} + q_{i,j} = 0 \quad (3.4)$$

Όπου

$$\begin{aligned} \alpha_E &= 2\sigma_{i,j+h_E/2} [h_E(h_E + h_W)]^{-1} \\ \alpha_N &= 2\sigma_{i-h_N/2,j} [h_N(h_N + h_S)]^{-1} \\ \alpha_W &= 2\sigma_{i,j-h_W/2} [h_W(h_E + h_W)]^{-1} \\ \alpha_S &= 2\sigma_{i+h_S/2,j} [h_S(h_S + h_S)]^{-1} \\ \alpha_P &= \alpha_E + \alpha_W + \alpha_S + \alpha_N \end{aligned}$$

Για τα σημεία που ανήκουν στην επιφάνεια η εξίσωση (3.4) γίνεται

$$\alpha_E u_{i,j+h_E} + 2\alpha_S u_{i-h_S,j} + \alpha_W u_{i,j-h_W} - \alpha_P u_{i,j} + q_{i,j} = 0 \quad (3.5)$$

Το q είναι μη μηδενικό όταν στο στοιχείο υπάρχει ηλεκτρόδιο και για το αρνητικό ηλεκτρόδιο το $q_{i,j}$ γίνεται $-q_{i,j}$.

Οι εξισώσεις (3.4) και (3.5) εκφράζονται με μορφή πίνακα, για κানাβο 3×3 ισχύει ο παρακάτω πίνακας

$$\begin{bmatrix} \alpha_P(1) & -\alpha_E(1) & 0 & -\alpha_S(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_W(2) & \alpha_P(2) & -\alpha_E(2) & 0 & -\alpha_S(2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_W(3) & \alpha_P(3) & 0 & 0 & -\alpha_S(3) & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_N(4) & 0 & 0 & \alpha_P(4) & -\alpha_E(4) & 0 & -\alpha_S(4) & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_N(5) & 0 & -\alpha_W(5) & \alpha_P(5) & -\alpha_E(5) & 0 & -\alpha_S(5) & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_N(6) & 0 & -\alpha_W(6) & \alpha_P(6) & 0 & 0 & -\alpha_S(6) \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_N(6) & 0 & 0 & \alpha_P(7) & -\alpha_E(7) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_N(8) & 0 & -\alpha_W(8) & \alpha_P(8) & -\alpha_E(8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_N(9) & 0 & -\alpha_W(9) & \alpha_P(9) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \\ b_9 \end{bmatrix}$$

Πίνακας 3.1: Εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών εκφρασμένων με μορφή πινάκων για κানাβο 3×3 (Βαφείδης, 2001).

Ο παραπάνω πίνακας μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Ru=b \quad (3.6)$$

Ο R είναι πίνακας που τα στοιχεία του είναι συνάρτηση των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους.

Για την επίλυση του παραπάνω γραμμικού συστήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος S.O.R (successive overrelaxation), η οποία σχεδιάστηκε από τους Young και Frankel το 1950, για την αυτόματη επίλυση γραμμικών συστημάτων με την χρήση υπολογιστών.

Ξεκινούμε με αρχική υπόθεση για το $u_{i,j}$ και βελτιώνουμε αυτή την εκτίμηση με την (3.4) υπολογίζοντας το στον κানাβο από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Η επανάληψη θεωρείται λήξασα όταν έχουν υπολογιστεί τιμές του δυναμικού για όλα τα στοιχεία του κανάβου. Η επαναληπτική διαδικασία τελειώνει όταν η διαφορά των $u_{i,j}$ δύο διαδοχικών επαναλήψεων είναι μικρότερη από μια τιμή ϵ που είναι η απαιτούμενη ακρίβεια της λύσης (Βαφείδης, 2001).

Η τιμή κάθε στοιχείου στην $(k+1)$ επανάληψη υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$u_{i,j}^{(k+1)} = \frac{\alpha_E(i,j)u_{i,j}^{(k)} + \alpha_N(i,j)u_{i-1,j}^{(k+1)} + \alpha_W(i,j)u_{i,j-1}^{(k+1)} + \alpha_S(i,j)u_{i+1,j}^{(k)} + q_{i,j}}{\alpha_P(i,j)} \quad (3.7)$$

Κάνοντας διαδοχικές επαναλήψεις βρίσκουμε την τιμή του δυναμικού κάθε στοιχείου του πλέγματος. Μετά υπολογίζεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίων και στην συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για δεδομένη διάταξη ηλεκτροδίων από τη σχέση 2.11.

3.5. ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Με την αντιστροφή γίνεται ο υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Όλες οι μέθοδοι αντιστροφής προσπαθούν να προσδιορίσουν ένα μοντέλο του υπεδάφους που ανταποκρίνεται στις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιώντας κάποιους περιορισμούς. Στην παρούσα εργασία η διαδικασία της αντιστροφής έγινε αυτοματοποιημένα χρησιμοποιώντας το ειδικευμένο πρόγραμμα αντιστροφής RES2DINV. Το πρόγραμμα χωρίζει την τομή του υπεδάφους σε κελιά σχήματος παραλληλογράμμου και θεωρεί ότι η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι σταθερή σε κάθε κελί.

Το μοντέλο αποτελεί μια εξιδανικευμένη μαθηματική αντιπροσώπευση της γεωηλεκτρικής τομής του υπεδάφους. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κάθε κελιού και τα μετρούμενα δεδομένα είναι οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η μαθηματική σχέση που συνδέει τις παραμέτρους του μοντέλου με την απόκριση του, δηλαδή τις υπολογισμένες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, παρέχεται από τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών (Day and Morrison, 1979) ή των πεπερασμένων στοιχείων (Silvester and Ferrari, 1990).

Το αρχικό μοντέλο μεταβάλλεται μέσα σε μια επαναληπτική διαδικασία έτσι ώστε η διαφορά μεταξύ της απόκρισης του μοντέλου και των μετρούμενων δεδομένων να μειώνεται.

Τα μετρούμενα δεδομένα γράφονται σε μορφή πίνακα-στήλη:

$$\mathbf{y} = \text{col}(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m) \quad (3.8)$$

όπου m είναι ο αριθμός των μετρήσεων.

Οι παράμετροι του μοντέλου γράφονται σε μορφή πίνακα-στήλη:

$$\mathbf{q} = \text{col}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_n) \quad (3.9)$$

όπου n είναι ο αριθμός των κελιών.

Η απόκριση του μοντέλου γράφεται σε μορφή πίνακα-στήλη:

$$\mathbf{f} = \text{col}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_m) \quad (3.10)$$

Η διαφορά μεταξύ των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο πεδίο και της απόκρισης του μοντέλου δίνεται από τον \mathbf{g} .

$$\mathbf{g} = \mathbf{y} - \mathbf{f} \quad (3.11)$$

Σύμφωνα με την μέθοδο βελτιστοποίησης των ελάχιστων τετραγώνων το αρχικό μοντέλο μεταβάλλεται, ώστε το σφάλμα E , δηλαδή το σύνολο των τετραγώνων των διαφορών των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών, να ελαχιστοποιηθεί. Το σφάλμα δίνεται από την σχέση:

$$E = \mathbf{g}^T \mathbf{g} = \sum_{i=1}^m g_i^2 \quad (3.12)$$

όπου \mathbf{g}^T είναι ο ανάστροφος του \mathbf{g}

Το επόμενο βήμα είναι η μείωση του σφάλματος χρησιμοποιώντας την μέθοδο Gauss-Newton η οποία προσδιορίζει την ποσότητα $\Delta \mathbf{q}$ που πρέπει να μεταβληθεί κάθε παράμετρος για να μειωθεί το σφάλμα E .

$$\mathbf{J}^T \Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (3.13)$$

όπου $\Delta \mathbf{q}$ είναι ο πίνακας που προσδιορίζει την ποσότητα που πρέπει να μεταβληθούν οι παράμετροι του μοντέλου και \mathbf{J} είναι ο Ιακωβιανός πίνακας. Τα στοιχεία του πίνακα δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$J_{ij} = \partial f_i / \partial q_j \quad (3.14)$$

και εκφράζουν τη μεταβολή της απόκρισης του μοντέλου που θα προκαλέσει κάθε μεταβολή της παραμέτρου του μοντέλου.

Μετά ο πίνακας των μεταβολών $\Delta \mathbf{q}$ προστίθεται στον πίνακα τιμών του αρχικού μοντέλου και προκύπτει νέο μοντέλο. Υπολογίζεται η απόκριση του νέου μοντέλου, η διαφορά των υπολογισμένων με τον μετρούμενων τιμών, ο νέος πίνακας μεταβολών των παραμέτρων $\Delta \mathbf{q}$ για να μειωθεί το σφάλμα E και προστίθεται στο νέο μοντέλο. Οι παράμετροι κάθε καινούργιου μοντέλου έχουν τη μορφή

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + \Delta \mathbf{q}_k \quad (3.15)$$

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών.

Η μέθοδος Gauss-Newton παρουσιάζει προβλήματα κατά την εφαρμογή της, επειδή το γινόμενο $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ σε κάποιες περιπτώσεις είναι μοναδιαίος πίνακας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η 3.13 να μην λύνεται ως προς $\Delta \mathbf{q}$. Επίσης, αν το αρχικό μοντέλο είναι πολύ διαφορετικό από το πραγματικό, ο πίνακας $\Delta \mathbf{q}$ περιέχει πολύ μεγάλες τιμές μεταβολών. Τότε, το καινούργιο μοντέλο που οι παράμετροι του δίνονται από την σχέση (3.15) θα περιέχει μη ρεαλιστικές τιμές. Μια μέθοδος που τροποποιεί την μέθοδο Gauss-Newton είναι η *Marquardt-Levenberg* (Lines και Treitel, 1984).

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \Delta \mathbf{q}_k = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (3.16)$$

,όπου ο \mathbf{I} είναι μοναδιαίος πίνακας και ο συντελεστής απόσβεσης λ περιορίζει το εύρος των τιμών του πίνακα $\Delta \mathbf{q}$.

Όταν ο αριθμός των παραμέτρων είναι πολύ μεγάλος παράγονται περιοχές με υψηλές ή χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η μέθοδος με περιορισμό εξομάλυνσης (Ellis και Oldenburg 1994) με σκοπό να ομαλοποιήσει την κατανομή την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία χρησιμοποιείται όταν η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους μεταβάλλεται με ομαλό ή σταδιακό τρόπο.

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k$$

$$F = a_x C_x^T C_x + a_y C_y^T C_y + a_z C_z^T C_z \quad (3.17)$$

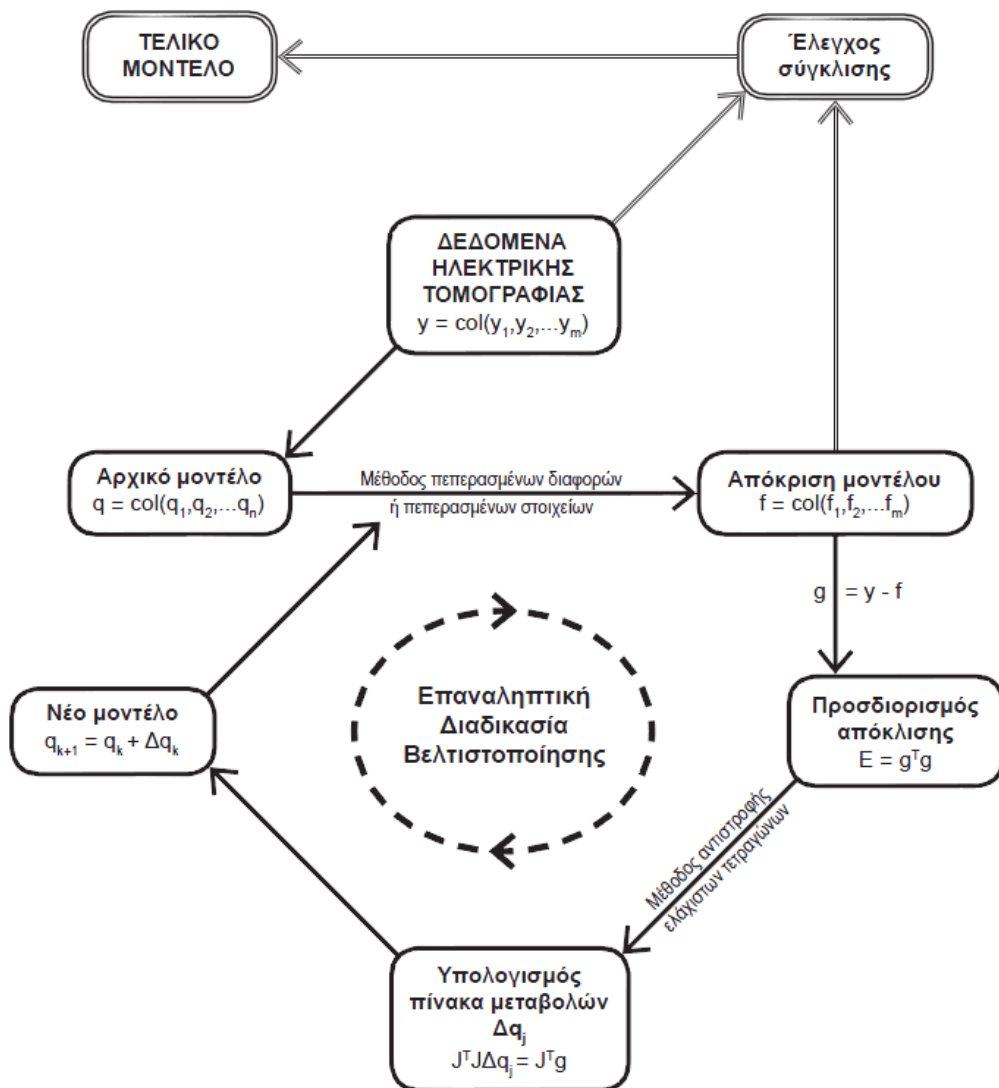
Η παραπάνω εξίσωση αναφέρεται σε τρεις διαστάσεις. Τα στοιχεία C_x, C_y, C_z είναι πίνακες εξομάλυνσης κατά τους άξονες x, y, z . Οι συντελεστές a_x, a_y, a_z αναφέρονται στο σχετικό βάθος των φίλτρων εξομάλυνσης.

Τέλος, όταν η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται απότομα χρησιμοποιείται η τροποποίηση της Gauss-Newton, *Robust inversion* (Wolke and Schwetlick 1988).

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_R q_k$$

$$F = a_x C_x^T R_m C_x + a_y C_y^T R_m C_y + a_z C_z^T R_m C_z \quad (3.18)$$

Η εξίσωση αναφέρεται σε τρεις διαστάσεις. Οι πίνακες R_m, R_d χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή ίδιας βαρύτητας στα στοιχεία των πινάκων απόκλισης και μεταβολής των παραμέτρων.



Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας αντιστροφής.

3.6. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ RES2DINV

Το πρόγραμμα RES2DINV καθορίζει αυτόματα ένα δισδιάστατο μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Griffiths and Barker 1993). Σκοπός του είναι ο υπολογισμός της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντιστρέφει δεδομένα που συλλέχθηκαν με οποιαδήποτε από τις διατάξεις ηλεκτροδίων με τη χρήση 25 έως 650 ηλεκτροδίων.

Το πρόγραμμα θεωρεί ότι η τομή του υπεδάφους διαιρείται σε τμήματα σχήματος παραλληλογράμμου και ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι σταθερή σε κάθε τμήμα. Τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας εισάγονται σε αρχείο dat. Ξεκινώντας από ένα αρχικό μοντέλο, υπολογίζονται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και στην συνέχεια συγκρίνονται με τις μετρημένες τιμές της υπαίθρου. Κάνοντας διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς η διαφορά των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία σταματάει όταν παρουσιάσει σύγκλιση. Το πιο διαδεδομένο κριτήριο σύγκλισης στον αλγόριθμο της αντιστροφής είναι το μέσο εκατοστιαίο σφάλμα RMS, το οποίο εκφράζει την διαφορά μεταξύ των υπολογισμένων με τον μετρούμενων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, και ανάγεται σε ποσοστιαίες μονάδες. Η επαναληπτική διαδικασία σταματάει όταν το σφάλμα RMS αυξάνεται ή όταν η σχετική μεταβολή των σφαλμάτων μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων είναι πολύ μικρή ή όταν ο προκαθορισμένος μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων έχει ολοκληρωθεί.

Αφού πραγματοποιηθεί η αντιστροφή των δεδομένων παρουσιάζονται στην οθόνη τρεις τομές. Η πρώτη είναι η ψευδοτομή των δεδομένων της μετρούμενης 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. Επίσης ρυθμίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων της αντιστροφής και παρέχεται η δυνατότητα αφαίρεσης τιμών για την μείωση του σφάλματος.

Για την αντιστροφή των δεδομένων το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τις παρακάτω μεθόδους:

Κανονικοποίηση με περιορισμούς εξομάλυνσης (smoothness constrained inversion):

Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται με ομαλό ή σταδιακό τρόπο. Πρόκειται για μια παραλλαγή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, που βασίζεται στην τεχνική βελτιστοποίησης του Quasi-Newton. Είναι πιο γρήγορη από την συμβατική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Χρησιμοποιείται για μεγάλο όγκο δεδομένων και απαιτεί λιγότερη μνήμη. Ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων μεταξύ πραγματικών και υπολογισμένων δεδομένων. Η μέθοδος χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη, επειδή αποφεύγει τις ασταθείς λύσεις και συγκλίνει γρήγορα.

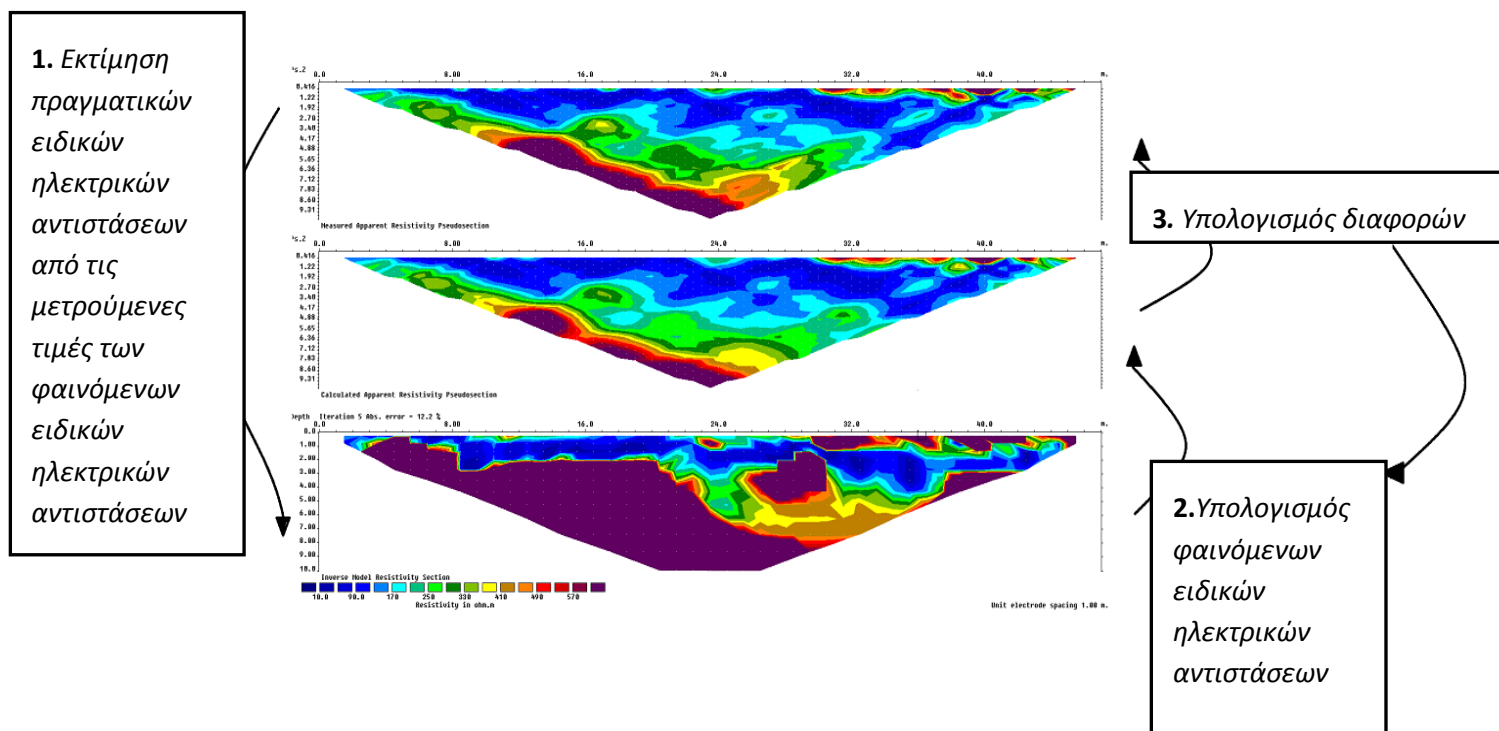
Συνδυασμένη μέθοδος αντιστροφής (combined inversion method):

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται όταν οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έχουν μεγάλο εύρος και είναι αρκετά διαταραγμένες. Αυτό συμβαίνει όταν οι γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η διαδρομή του ρεύματος διαταράσσεται με αποτέλεσμα να υπολογίζονται χαμηλότερες. Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται πολύ χαμηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο μοντέλο της αντιστροφής και μεγάλη διαταραχή ακριβώς κάτω από τον αγωγίμο

σχηματισμό. Η μέθοδος συνδυάζει τη μέθοδο με περιορισμούς εξομάλυνσης και τη *Marquardt-Levenberg*.

Μέθοδος αντιστροφής *Robust*:

Η *Robust* χρησιμοποιείται κυρίως όταν το υπέδαφος αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς που είναι ομοιογενείς στο εσωτερικό τους και παρουσιάζουν απότομες αλλαγές μεταξύ τους (π.χ. χαλαρός ιζηματογενής σχηματισμός και συμπαγές βραχώδες υπόβαθρο). Παράγει ένα τελικό μοντέλο με διακριτές επιφάνειες μεταξύ των γεωλογικών σχηματισμών. Η *Robust* δεν επηρεάζεται από την παρουσία υψηλού επιπέδου θορύβου, συνεπώς είναι αξιόπιστη και δίνει αποτελέσματα με μικρά σφάλματα.



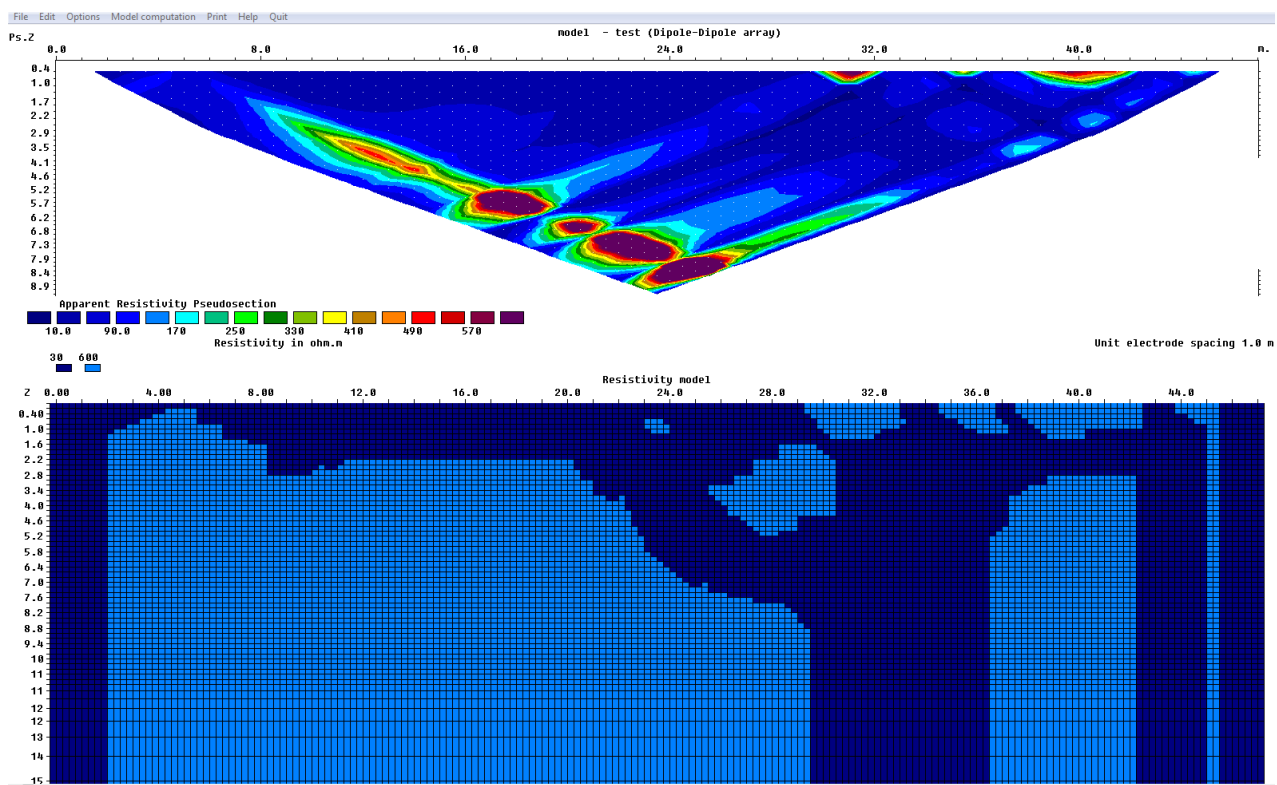
Σχήμα 3.7: Διαδικασία αντιστροφής του προγράμματος *RES2DINV*. Η πρώτη εικόνα αποτελεί την ψευδοτομή των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η δεύτερη αποτελεί την ψευδοτομή των υπολογισμένων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η τρίτη είναι η γεωηλεκτρική τομή.

3.7. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι γεωλογικές δομές μπορούν να περιγραφούν με μαθηματικά μοντέλα. Για την περιγραφή τους σε δύο διαστάσεις χρησιμοποιείται το πρόγραμμα RES2DMOD. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης που επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει ένα γεωλογικό μοντέλο. Μετά την δημιουργία του μοντέλου το πρόγραμμα υπολογίζει την ψευδοτομή. Επίσης παρέχει την δυνατότητα της επιλογής της διάταξης των ηλεκτροδίων που είναι κατάλληλη για την απεικόνιση της γεωλογικής δομής προς μελέτη.

Οι ψευδοτομές που παράγονται αποτελούν τα δεδομένα εισαγωγής του προγράμματος RES2DINV. Για τη δημιουργία της ψευδοτομής χρησιμοποιεί διαφορικές εξισώσεις, που η μαθηματική τους επίλυση γίνεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ή την τροποποιημένη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών των Dey and Morrison για την βελτίωση της. Η περιοχή του υπεδάφους χωρίζεται σε ορθογώνια χωρία χρησιμοποιώντας ορθογώνιο πλέγμα. Το πλέγμα αποτελείται από στήλες και σειρές και τα χωρία μπορούν να έχουν διαφορετικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Με αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιώντας πολύ λεπτά πλέγματα, μπορούν να μοντελοποιηθούν σύνθετες γεωλογικές δομές. Ο χρήστης εισάγει την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε κάθε χωρίο, το πάχος των γεωλογικών στρωμάτων και επιλέγει την διάταξη των ηλεκτροδίων. Επίσης το πρόγραμμα επιλέγει δύο ή τέσσερεις κόμβους ανά ηλεκτρόδιο. Αφού έχει δημιουργηθεί το μοντέλο υπολογίζονται οι τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και εμφανίζεται στην οθόνη το γεωηλεκτρικό μοντέλο και η ψευδοτομή του. Μετά αποθηκεύεται σε αρχείο .mod για να ξαναδιαβαστεί από το πρόγραμμα ή σε αρχείο .dat για ακολουθήσει η διαδικασία της αντιστροφής από το RES2DINV.

Το πρόγραμμα RES2DMOD χρησιμοποιείται για την αρχική εκτίμηση της αποδοτικότητας κάθε διάταξης ηλεκτροδίων. Η ερμηνεία των συνθετικών δεδομένων από το RES2DINV δίνει πληροφορίες για το βάθος διασκόπησης, για την ευαισθησία σε οριζόντιες και κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους και για το οριζόντιο εύρος μετρήσεων κάθε διάταξης. Οι πληροφορίες των συνθετικών δεδομένων βοηθούν στο σχεδιασμό της διασκόπησης. Η σύγκριση των γεωηλεκτρικών τομών προσδιορίζει τις δυνατότητες και τα μειονεκτήματα κάθε διάταξης και βοηθούν στην επιλογή της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων για την εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η σύγκριση πραγματοποιείται για να επιλεγεί η καταλληλότερη διάταξη ηλεκτροδίων που απεικονίζει καλύτερα την γεωλογική δομή προς μελέτη. Οι βασικότεροι παράγοντες μελέτης είναι το βάθος διασκόπησης, η ευαισθησία και η οριζόντια κάλυψη κάθε διάταξης ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.8: Γεωλογικό μοντέλο(κάτω) και η ψευδοτομή του(πάνω).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γεωφυσικές μέθοδοι και ειδικότερα η ηλεκτρική τομογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετές γεωτεχνικές μελέτες τα τελευταία είκοσι χρόνια. Αυτό συμβαίνει επειδή παρέχουν σημαντικές γεωτεχνικές πληροφορίες όπως είναι τα όρια μεταξύ γεωλογικών σχηματισμών, ο βαθμός κορεσμού σε νερό πετρωμάτων και εδαφών, η παρουσία εγκοίλων και ρηγμάτων και το βάθος βραχώδους υποβάθρου (Drahor et al. 2006; Perrone et al. 2008; Colangelo et al. 2008; Chambers et al. 2009; Apostolopoulos et al. 2011; Yilmaz 2011). Η ηλεκτρική τομογραφία είναι αρκετά χρήσιμη στις μελέτες ευστάθειας πρανών. Ειδικά, σε περιπτώσεις που οι γεωτρήσεις αδυνατούν να προσδιορίσουν την στρωματογραφία των πρανών. Προσδιορίζει την γεωμετρία του σώματος ολίσθησης, τον βαθμό κορεσμού του σε νερό, το βάθος και το ανάγλυφο του βραχώδους υποβάθρου και γεωμηχανικά χαρακτηριστικά όπως τα στρώματα που αποτελούν το πρανές. Αυτές οι πληροφορίες είναι σημαντικές στην μελέτη των μηχανισμών που προκαλούνε μία κατολίσθηση ή στην αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών (Drahor et al. 2006; Sastry et al. 2006; Perrone et al. 2007; Colangelo et al. 2008; Chambers et al. 2009; Yilmaz 2011)..

Ο στόχος της παρούσας γεωφυσικής έρευνας είναι ο εντοπισμός του βραχώδους υποβάθρου και η στρωματογραφία του πρανούς κάτω από το φρούριο Σφακιών, το οποίο βρίσκεται στο λόφο Καστέλι στην ανατολική άκρη της Χώρας Σφακιών και η διερεύνηση διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων και μεθόδων αντιστροφής με την χρήση συνθετικών δεδομένων για τον εντοπισμό βραχώδους υποβάθρου.

4.2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή των Σφακιών είναι μια στενή παράκτια ζώνη στο νοτιοδυτικό τμήμα των Λευκών Όρεων, στο οποίο διασώζεται τμήμα του Νότιου Κρητικού περιθωρίου. Πρόκειται για μια νεοτεκτονική δομή που άρχισε τη δράση της στο Ανώτερο Μειόκαινο και συνεχίζεται μέχρι και σήμερα (Skourtsos 2007). Στην εικόνα (4.1) παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ, φύλλο Βρύσες, και στη στρωματογραφική στήλη (εικόνα 4.2) διακρίνονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την ευρύτερη περιοχή μελέτης. Στην κατώτερη στρωματογραφική ενότητα βρίσκονται οι μεταμορφωμένες ανθρακικές ακολουθίες των πλακωδών ασβεστόλιθων που περιέχουν κερατόλιθους. Με τεκτονική επαφή εμφανίζονται οι ακολουθίες της ενότητας του Τρυπαλίου, που ονομάζεται κάλυμμα Ομαλού, τμήματα του Φυλλιτικού Κάλυμματος και ανθρακικά πετρώματα της ζώνης της Τρίπολης. Μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι του Νεογενούς με στρωματογραφικό εύρος από το Μέσο έως το Ανώτερο Μειόκαινο, ερυθρογή, αργιλοαμμώδες υλικό, και κροκαλλοατύπες του Τεταρτογενούς αποτέθηκαν ασύμφωνα πάνω στη ζώνη της Τρίπολης.

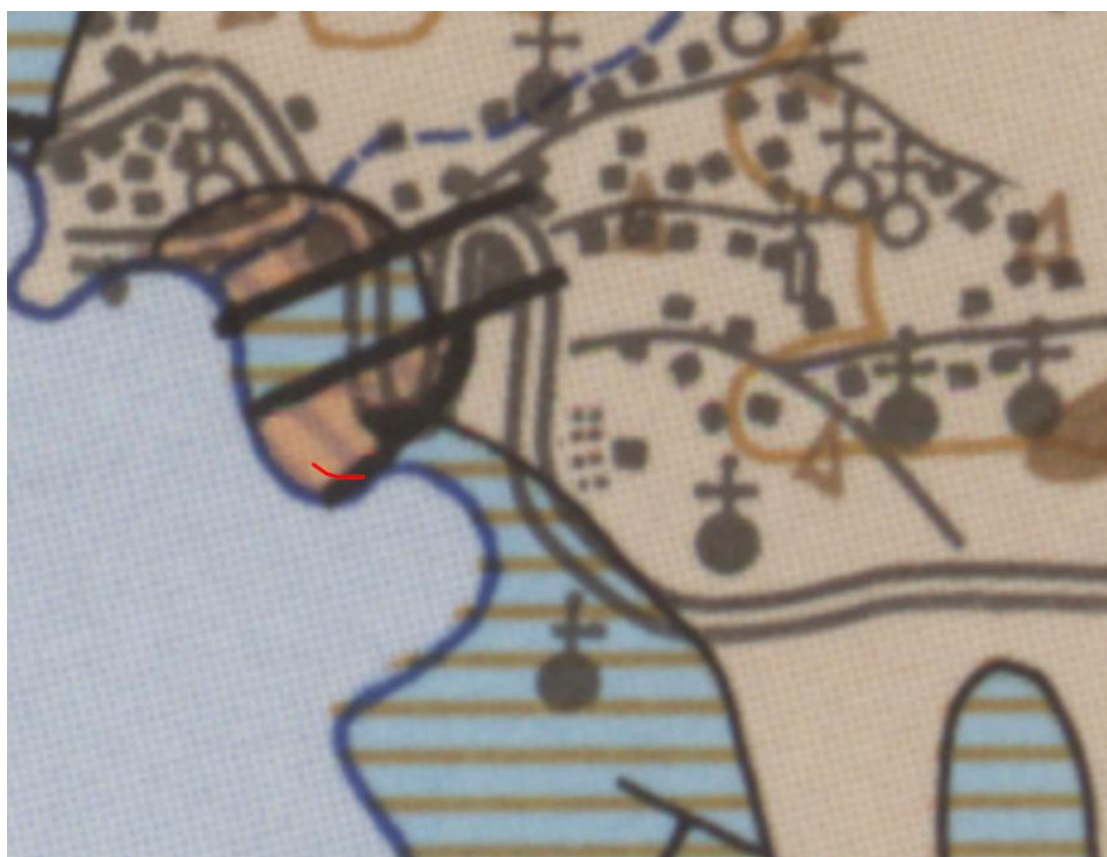
Η ομάδα των πλακωδών ασβεστόλιθων αποτελείται από μία ακολουθία μεταμορφωμένων πετρωμάτων και από μία κλαστική/ανθρακική ακολουθία του άνω παλαιοζωικού που εξελίσσεται σε ανθρακικούς σχηματισμούς που περιέχουν κερατόλιθους του μεσοζωικού και μια δεύτερη κλαστική ακολουθία που χαρακτηρίζεται σαν φλύσχη. Οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι δομούν το 70% της Κρήτης, εμφανίζονται στα Λευκά όρη στην δυτική Κρήτη και καταλαμβάνουν κυρίως το βόρεια τμήμα της Χώρας Σφακιών. Ολόκληρη η ακολουθία χαρακτηρίζεται κυρίως από τεκτονική συμπίεση με έντονη πτύχωση, λεπίωση, εφιππεύσεις και συγκινηματική μεταμόρφωση (Manutsoglu 2003).

Η ενότητα του Τρυπαλίου, σύμφωνα με τους Creutzburg&Seidel (1975), χαρακτηρίζεται κυρίως από ανθρακικής σύστασης πετρώματα, δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, σπανιότερα καθαρούς ασβεστόλιθους, ανθρακικής σύστασης λατυποπαγή έως ραουβάκες, σκουρόχρωμους κυψελώδεις δολομίτες και από λευκά ζαχαρώδους υφής μάρμαρα. Αποτελείται από ανθρακικά ιζήματα αβαθούς θαλασσίας (Φυτρολάκης 1980).

Το τμήμα του Φυλλιτικού Καλύμματος περιλαμβάνει όλα τα μεταμορφωμένα πετρώματα που βρίσκονται τεκτονικά πάνω στα ανθρακικά πετρώματα ή στον μεταφλύσχη της ενότητας των πλακωδών ασβεστόλιθων και στην ενότητα του Τρυπαλίου και κάτω από τους ασβεστόλιθους (Φυτρολάκης 1980). Τα πετρώματα εμφανίζονται στην δυτική Κρήτη. Το κατώτερο τμήμα αποτελείται από γύψους, ραουβάκες, μελανούς δολομίτες και αργιλικούς σχιστόλιθους και το ανώτερο τμήμα αποτελείται από κλαστικά ιζήματα με εναλλαγές φυλλίτων, ενστρώσεις χαλαζιτών και χαλαζιακών μετάκροκαλοπαγών με εμφανίσεις ηφαιστειακών πετρωμάτων (Creutzburg&Seidel 1975). Πρόκειται για μετά-ανδρειακά και μετά-βασαλτικά πετρώματα που μεταμορφώθηκαν μαζί με τα περιβάλλοντα πετρώματα.

Η ζώνη της Τρίπολης αποτελείται στο κατώτερο τμήμα της από την αργιλοσχιστολιθική – ανθρακική σειρά Ραβδούχα και στο ανώτερο τμήμα από την ανθρακική σειρά της Τρίπολης. Η ανθρακική σειρά αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις δολομίτες (SANNEMAN & SEIDEL 1976, KOPP&OTT 1977) και συνεχίζει με εναλλαγές δολομιτών και ασβεστόλιθων ηλικίας Ιουρασικού έως Άνω Κρητιδικού (ασβεστόλιθοι με Ρουδιστές, ZAGER 1972, Φυτρολάκης 1967). Στο ανώτατο τμήμα της σειράς παρουσιάζεται ο φλύσχη της ενότητας της Τρίπολης. Η ηλικία της ενότητας τοποθετείται στο Μέσο - Άνω Τριαδικό.

Οι Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις αποτελούν τις εμφανίσεις ασβεστόλιθων και κροκαλοπαγών με πανίδα ρηγής θαλάσσης, τα οποία χωρίζονται από τους πλακώδεις ασβεστόλιθους με κανονικά ρήγματα. Ο σχηματισμός της Χώρας Σφακιών βρίσκεται κυρίως στα βορειοανατολικά του χωριού Χώρα Σφακιών και αποτελείται από αμμώδη απόθεση πάχους 5m, η οποία χρονολογείται στο Κάτω Πλειστόκαινο και υπέρκειται χονδρόκοκκων κροκαλοπαγών ή μαρμάρων της ομάδας των πλακωδών ασβεστόλιθων.



Εικόνα 4.1: Γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ, Φύλλο Βρύσσεσ κλίμακας 1:50.000 (πάνω). Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη, στο οποίο διακρίνεται η Χώρα Σφακίων (κάτω) και η θέση της γραμμής μελέτης.

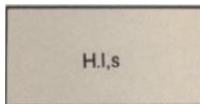
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

ΟΛΟΚΑΙΝΟ



Παράκτιες άμμοι



Αργιλοαμμώδεις αποθέσεις: με σημαντικό ποσοστό διάσπαρτων τροχμάτων και χαλικιών, κυρίως ανθρακικής σύστασης, ερυθρογή με κροκαλλοατύπες σε μικρές εσωτερικές λεκάνες και ασύνδετα υλικά από άργιλο άμμο και κροκαλλοατύπες στις κοίτες και στις εκβολές των χειμάρρων.



Κώνοι κορήματα και πλευρικά κορήματα: από λατύπες ανθρακικής σύστασης, ποικίλου μεγέθους, αναμεμιγμένες με ερυθρογή, χαλαρές και κατά θέσεις ελαφρά συγκολλημένες (σε πάγκους πάχους από 1 έως 10 m). Αναπτύσσονται στα πρηνή των ορεινών όγκων ή καλύπτουν μέρος των πολγών.

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ



Παλαιοί κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα: αναπτύσσονται στις εκβολές των χειμάρρων, στις νότιες ακτές του φύλλου.

Αποτελούνται κυρίως από ανθρακικές κροκαλλοατύπες ποικίλου μεγέθους, ασύνδετες μέχρι πολύ συνεκτικές, με συνδετικό υλικό αργιλομαργαϊκό ή ανθρακικό καθώς και άμμους. Η διάβρωση τους έχει δημιουργήσει μικρά ρυάκια. Τα πλευρικά κορήματα είναι ψευδοστρωμένα. Πάχος: έως και 50 m.



Αναβαθμίδες χειμάρρων (Pt.t) και παλαιά πλευρικά κορήματα (Pt.sc): υπολείμματα αναβαθμίδων, συχνά μη χαρτογραφήσιμα, που απαντώνται στις κοίτες και στις πλευρές των χειμάρρων των μεγάλων φαραγγιών, που εκβάλλουν στις ΝΑ ακτές του φύλλου.

Αποτελούνται από αργιλομαργαϊκό υλικό με στρώσεις ανθρακικών(κυρίως ασβεστολιθικών) κροκαλολατυπών ποικίλου μεγέθους. Είναι σχετικώς συνεκτικά και ψευδοστρωμένα.

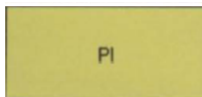
Τα παλαιά πλευρικά κορήματα αναπτύσσονται στα πρηνή των ΝΑ ακτών και αποτελούνται από ασβεστολιθικά και δολομιτικά κροκαλολατυποπαγή με στοιχεία ποικίλου μεγέθους και παρουσία ελάχιστων μικρών τεμαχίων φυλλιτικής σύστασης. Είναι άστρωτα και καλά συγκολλημένα. Πάχος: έως και 20 m.

ΝΕΟΓΕΝΕΣ

ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ



Μάργες: κυρίως μαλακές και λιγότερο σκληρές, κιτρινόλευκες, με παρεμβολές αργίλων και άμμων. Πάχος: μικρότερο από 10 m.



Άργιλοι, μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και κροκαλοπαγή: πρόκειται για θαλάσσιες αποθέσεις τα κατώτερα μέλη των οποίων αποτελούνται από ανθρακικά κροκαλοπαγή, που εξελίσσονται προς τα πάνω σε φυλλώδεις αργίλους και σε αργιλομαργαϊκούς σχηματισμούς, χρώματος κυανόλευκο έως ερυθρόλευκου. Μέσα σε αυτά απαντούν διαστρώσεις από οργανογενείς ασβεστόλιθους, αμμώδεις φακοί και διάσπαρτες προνεογενείς ανθρακικές κροκάλες.

Τα ανώτερα μέλη τους αποτελούνται από μαργαϊκούς παχυστρωματώδεις οργανογείς ασβεστόλιθους, κατά θέσεις λατυποπαγείς. Στα κατώτερα μέλη αναγνωρίστηκαν:

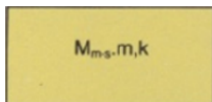
Α) μικροπανίδα: *Globorotaliacrassaformis*, *Globorotaliamargaritae*, *Globigerinoidesruber*, *Cytherellavulgata*, *Aurilaconvexa*, *Paijemborchellaiocosa*, *Callistocytherepallida*, *Callistocythereintricatoides*, *Buntoniasublatissima*

Β) μικροαπολιθώματα: *ostrea*, λείψανα ψαριών και υπολείμματα φυτών, Πελεκύποδα

Ηλικία: Πλειόκαινο

Πάχος : 60m περίπου

ΜΕΣΟ-ΑΝΩΤΕΡΟ ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ



Μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι: αποθέσεις γλυκών και κυρίως υφάλμυρων υδάτων που κάθονται ασύμφωνα επάνω σε προνεογενείς σχηματισμούς. Τα κατώτερα μέλη τους αποτελούνται από κλαστικούς, συχνά βιογενείς, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, λευκότεφρους, καλά στρωμένους, πάγκους πάχους από λίγα cm, με πανίδα από *Planorbidae*, *Cerithidae* και *Hydrobia*. Συχνά οι αποθέσεις αυτές εξελίσσονται προς τα επάνω σε κυανότεφρες μάργες ή φυλλώδεις αργίλους, υπόλευκες έως και κίτρινες, με παρεμβολές αμμούχων μαργών πλούσιων σε πανίδα από *Ostrea*, Μαλάκια και λείψανα φυτών.

ΑΛΛΟΧΘΟΝΕΣ ΣΕΙΡΕΣ
ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΕΟΣ
ΜΕΣΟ-ΑΝΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ



Δολομίτες, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι, ασβεστόλιθοι: βρίσκονται επωθημένοι, επάνω στους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ιονίου ζώνης, οπότε και παρουσιάζονται στη βάση τους έντονα κατακερματισμένοι, ενώ κατά θέσεις υπέρκεινται υπολειμμάτων της φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς. Στα κατώτερα μέλη επικρατούν τεφροί έως λευκοί δολομίτες, παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι, έντονα τεκτονισμένοι και καρστικοποιημένοι, με σπηλαιώδη υφή. Αυτοί εξελίσσονται προς τα επάνω σε δολομιτικούς ασβεστόλιθους και στη συνέχεια σε ασβεστόλιθους τεφρόλευκους, έως μαύρους, μέσο έως παχυστρωματώδεις, κατά θέσεις λατυποπαγείς.

Απολιθώματα: Ammodiscidae, Pilamminellagenerica

Πάχος: 150 m περίπου.

ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΦΥΛΛΙΤΙΚΗΣ- ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗΣ ΣΕΙΡΑΣ
PERMIO-ΑΝΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ



Φυλλίτες, χαλαζίτες, σχιστόλιθοι: μικρές εμφανίσεις κυρίως στο νότιο τμήμα του φύλλου, που είναι επωθημένες επάνω στους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ιονίου ζώνης ενώ κατά θέσεις καλύπτονται από τα κατώτερα μέλη της ζώνης Τριπόλεως. Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από πετρώματα πολύ χαμηλού μέχρι χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης (πρασινοςχιστολιθική φάση), όπου επικρατούν φυλλίτες, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες και σχιστόλιθοι ποικίλης σύστασης (σερικιτικοί - χλωριτικοί, ανθρακομιγείς με χλωριτοειδή, μαρμαρυγιοκοί και μαρμαρυγιοκοί-χλωριτικοί, χαλαζιοκοί με σερίκη και αιματίτη, ανθρακομιγείς-μαρμαρυγιοκοί, γραφιτικοί-μαρμαρυγιοκοί). Μερικές μέσα στο πέτρωμα αυτά παρεμβάλλονται μαύροι λεπτοστρωματώδεις και κατακερματισμένοι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι. Κατά θέσεις οι σχηματισμοί της φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς διασχίζονται από αδροκρυσταλλικές φλέβες χαλαζία πάχους μέχρι 10 cm.

Η ηλικία θεωρείται Πέρμιο-Ανώτερο Τριαδικό, με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα.

Μέγιστο πάχος: 80 m περίπου.



Γύψος: εμφανίζεται στην περιοχή ανατολικά του χωριού Λουτρό Σφακιών και περιβάλλεται από πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων που προέρχονται από την φυλλιτική-χαλαζιτική σειρά και τα ανθρακικά πετρώματα της Ιονίου ζώνης. Η εμφάνιση αυτή κατά πάσα πιθανότητα ανήκει στη φυλλιτική-χαλαζιτική σειρά.

ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΟΜΑΛΟΥ(ΤΡΥΠΑΛΙΟΥ)

Αποτελεί το κατώτερο τεκτονικό κάλυμμα της νήσου Κρήτης και βρίσκεται εφιππευμένο επάνω στους αυτόχθονους σχηματισμούς της Ιονίου ζώνης. Στη βάση του είναι έντονα τεκτονισμένο με παρουσία τεκτονικού λατυποπαγούς σημαντικού πάχους. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη του παρουσιάζεται στην περιοχή του Οροπεδίου Ομαλού ενώ σχεδόν απουσιάζει από την οροσειρά Τρυπαλίου. Για τον λόγο αυτό ο όρος "κάλυμμα Ομαλού" είναι ακριβέστερος του " κάλυμμα Τρυπαλίου".

ΑΝΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ-ΛΙΑΣΙΟ

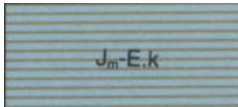


Ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι έως μάρμαρα, δολομίτες, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι, ραουβάκες και ανθρακικά κροκαλολατυποπαγή. Στα κατώτερα μέλη επικρατούν κυψελώδεις δολομίτες, με δολομιτικό άλευρο που πληρώνει τις κυψέλες. Μερικές φορές στα ανθρακικά πετρώματα του Ομαλού παρατηρούνται λεπτές κερατολιθικές ενστρώσεις χρώματος λευκού, τεφρού ή μαύρου ή και βολβοί κερατολίθων χρώματος μαύρου. Κατά θέσεις αυτά φέρουν λεπτές μαργαϊκές παρεμβολές ή είναι μικροκροκαλοπαγή. Με βάση τα κοινά πετρογραφικά γνωρίσματα των σχηματισμών του καλύμματος Ομαλού και εκείνων της αυτόχθονης σειράς, θεωρείται ότι το κάλυμμα Ομαλού αποτελεί τμήμα των κατώτερων σχηματισμών της Ιονίου ζώνης, εφιππευμένο επάνω σε αυτήν. Μέγιστο πάχος: 400 m περίπου.

ΑΥΤΟΧΘΟΝΗ ΣΕΙΡΑ

ΙΟΝΙΟΣ ΖΩΝΗ

ΔΟΓΓΕΡΙΟ-ΗΩΚΑΙΝΟ(;)



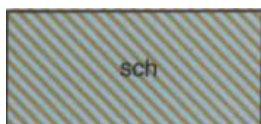
Πλακώδεις ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι έως μάρμαρα με πυριτόλιθους: μεσοκρυσταλλικοί τεφροί, τεφρόμαυροι και μαύροι, καλά στρωμένοι σε πάγκους με πάχος που ποικίλει από λίγα εκατοστά μέχρι 1 m. Παρουσιάζουν ενστρώσεις, φακούς και κονδύλους πυριτόλιθων, πάχους μέχρι 15cm, των οποίων η συχνότητα εμφάνισης δεν είναι σταθερή ούτε κατά την κατακόρυφη ούτε κατά την οριζόντια διεύθυνση. Το πυριτικό υλικό είναι κυρίως χαλαζίας και λιγότερο χαλκηδόνιος και το χρώμα είναι λευκότεφρο, ιώδες και μαύρο.

Κατά θέσεις, στα μεσαία μέλη, παρατηρούνται μικρολατυποπάγη στρώματα πάχους 30-40 cm, καθώς και παρεμβολές από τεφροπράσινους και ερυθροιώδεις σεριτικούς φυλλίτες. Στα ανώτερα μέλη τους γίνονται φυλλώδεις ή μεταπίπτουν σε πρασινίζοντες ασβεστοφυλλίτες πάχους 10m. Μερικές φορές παρατηρούνται εσωτερικές ολισθήσεις με αποτέλεσμα να έρχονται σε επαφή ισχυρά τεκτονισμένα στρώματα με σχετικά αδιατάραχα, με παράλληλη δημιουργία τεκτονικού λατυποπαγούς. Στρωματογραφικά, ο σχηματισμός αυτός είναι ανάλογος της Βίγλας της Ιονίου ζώνης και έχει μεταμορφωθεί σε συνθήκες υψηλών πιέσεων -χαμηλών θερμοκρασιών.

Ηλικία: Δογγέριο - Ηώκαινο (;)

Η ηλικία και οι συνθήκες μεταμόρφωσης αναφέρονται με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα.

Πάχος: 1200m περίπου.



Σχιστόλιθοι: κυρίως πυριτικοί κυψελώδεις, ασβεστιτικοί και λιγότερο αργιλικοί, χρώματος υποκίτρινου, ανοιχτοκάστανου και ιώδους, λεπτο-μεσοστρωματώδεις. Κατά θέσεις περιέχουν ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, ενστρώσεις από ελασματοειδείς και αδροκρυσταλλικούς, λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους, πάχους μέχρι 10m καθώς και παρεμβολές από ερυθροιώδεις σεριτικούς-ασβεστιτικούς φυλλίτες. Έχουν υποστεί ελαφρά μεταμόρφωση και παρουσιάζουν ιστό μικρό-μεσοκοκώδη. Οι πυριτικοί σχιστόλιθοι είναι εύθρυπτοι και δημιουργούν κατά θέσεις χαλαζιακή άμμο, υπερτερεί δε σε αυτούς ο χαλκηδόνιος και λιγότερο ο χαλαζίας. Περιέχουν Ακτινόζωα.

Βρίσκονται με μορφή ένστρωσης στους κατώτερους ορίζοντες ή και στη βάση των πλακωδών ασβεστολίθων με πυριτόλιθους και είναι αντίστοιχοι των σχιστολίθων με Posidonia της Ιονίου ζώνης.

Μέγιστο πάχος: 100m.



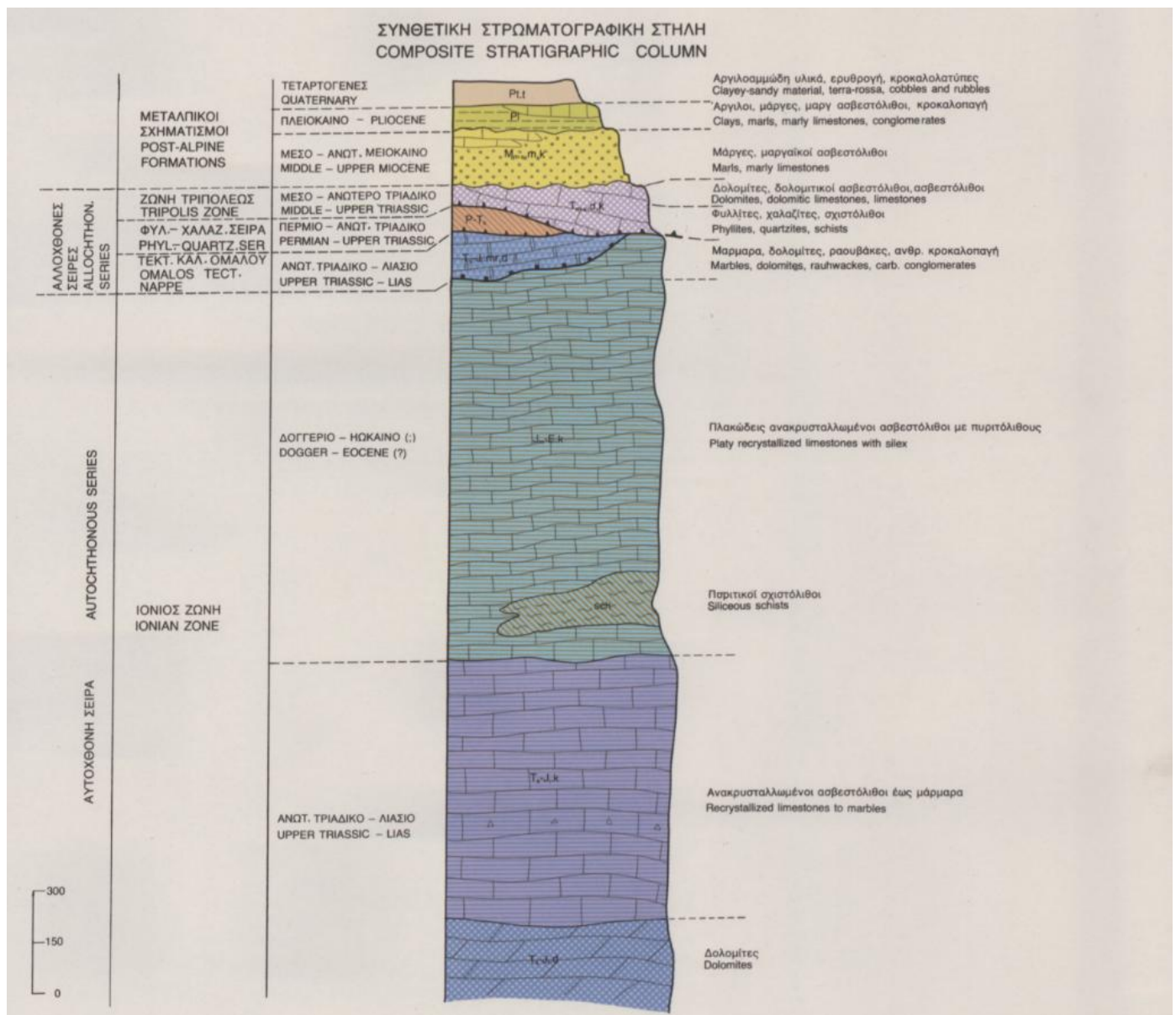
Ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι(T_s - J_i .k) έως μάρμαρα και δολομίτες(T_s - J_i .d): πρόκειται για μια ανθρακική σειρά νηρητικής ιζηματογένεσης που υπόκειται κανονικά των πλακωδών ανακρυσταλλωμένων ασβεστολίθων με πυριτόλιθους.

Τα ανώτατα μέλη της είναι συνήθως μαύρα, μεσοκρυσταλλικά, μεσοστρωματώδη, ασβεστολιθικά μάρμαρα με λίγο πυριτικό υλικό, που εξελίσσονται προς τα κάτω σε τεφρά έως τεφρόλευκα ασβεστολιθικά και δολομιτικά μάρμαρα, μεσοστρωματώδη έως άστρωτα, με πυριτικούς φακούς και κονδύλους διαμέτρου μέχρι 20cm. Το πυριτικό υλικό μειώνεται μέχρι τελικής εξαφάνισής του στα μεσαία μέλη. Κατά θέσεις μέσα σε αυτά παρουσιάζονται συνιζηματογενείς λατυποπαγείς ανθρακικοί ορίζοντες με ανθρακικό συνδετικό υλικό και με κενά που κατά θέσεις έχουν πληρωθεί με αργιλικό υλικό ή με υδροξείδια του σιδήρου.

Τα κατώτερα μέλη της ενότητας αποτελούνται από δολομίτες λευκότεφρους μέχρι μαύρους, άστρωτους, μικρομεσοκρυσταλλικούς, συχνά λατυποπαγείς, πολύ τεκτονισμένους, διαρρηγμένους και καρστικοποιημένους με μεγάλα έγκοιλα. Οι λευκότεφροι και μαύροι δολομίτες εναλλάσσονται μεταξύ τους με μεγάλα έγκοιλα. Οι λευκότεφροι και μαύροι δολομίτες εναλλάσσονται μεταξύ τους τόσο πλευρικά, όσο και κατά την κατακόρυφο ενώ η δολομιτίωση ελαττώνεται προς τα στρωματογραφικά ανώτερα μέλη.

Η ανθρακική αυτή σειρά αντιστοιχεί με την Παντοκράτορα της Ιονίου ζώνης.

Ορατό πάχος: πάνω από 1000m.



Εικόνα 4.2: Στρωματογραφική στήλη της ευρύτερης περιοχής μελέτης, σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη Φύλλο Βρύσσεσ του ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50.000.

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από μία απότομη ασυνέχεια Α-Δ διεύθυνσης και νότιας κλίσης που διαχωρίζει την στενή παράκτια ζώνη από τα Λεύκα όρη και από έντονη τεκτονική δραστηριότητα. Αυτό το απότομο πρηνές ερμηνεύεται σαν κανονικό ρήγμα, που διαμόρφωσε την μορφολογία της νοτιοδυτικής Κρήτης. Η απότομη γρήγορη διαμόρφωση της περιοχής αποδεικνύεται από τις Νεογενείς θαλάσσιες αποθέσεις του Μέσου Μειόκαινου μέχρι την αρχή του Ανώτερου Πλειόκαινου, οι οποίες έχουν ανυψωθεί εκατοντάδες μέτρα από το επίπεδο της θάλασσας.

Το ρήγμα Σφακίων με μήκος 17km βρίσκεται στην νοτιοδυτική ακτογραμμή της Κρήτης και θεωρείται ως πρότυπο παράκτιας ανόδου και θεαματικού σχηματισμού φαραγγιών στην Ελλάδα (Pirazzoli et al., 1982; Fassoulas, 2001; Peterek A, and Schwarze J. 2004; Fassoulas and Nikolakakis, 2005). Η δραστηριότητα του άρχισε στο Τορτόνιο (Νεογένης) με τις αποθέσεις του σχηματισμού της Χώρας Σφακίων και συνεχίστηκε μέχρι τα μέσα του Τεταρτογενούς, όπου η σεισμική δράση του μεταφέρθηκε στο σεισμικό, συνθετικό παράκτιο ρήγμα 4-6 km

νοτιότερα. Το ρήγμα έχει διεύθυνση Α-Δ και κλίση προς τον νότο και αποτελείται από δύο τμήματα. Το δυτικό τμήμα έχει μήκος περίπου 7km και βρίσκεται μεταξύ της Χώρας Σφακίων και του χωριού Άγιος Νεκτάριος και το ανατολικό τμήμα βρίσκεται μεταξύ των χωριών Πατσιανός και Άνω Ροδάκινο.

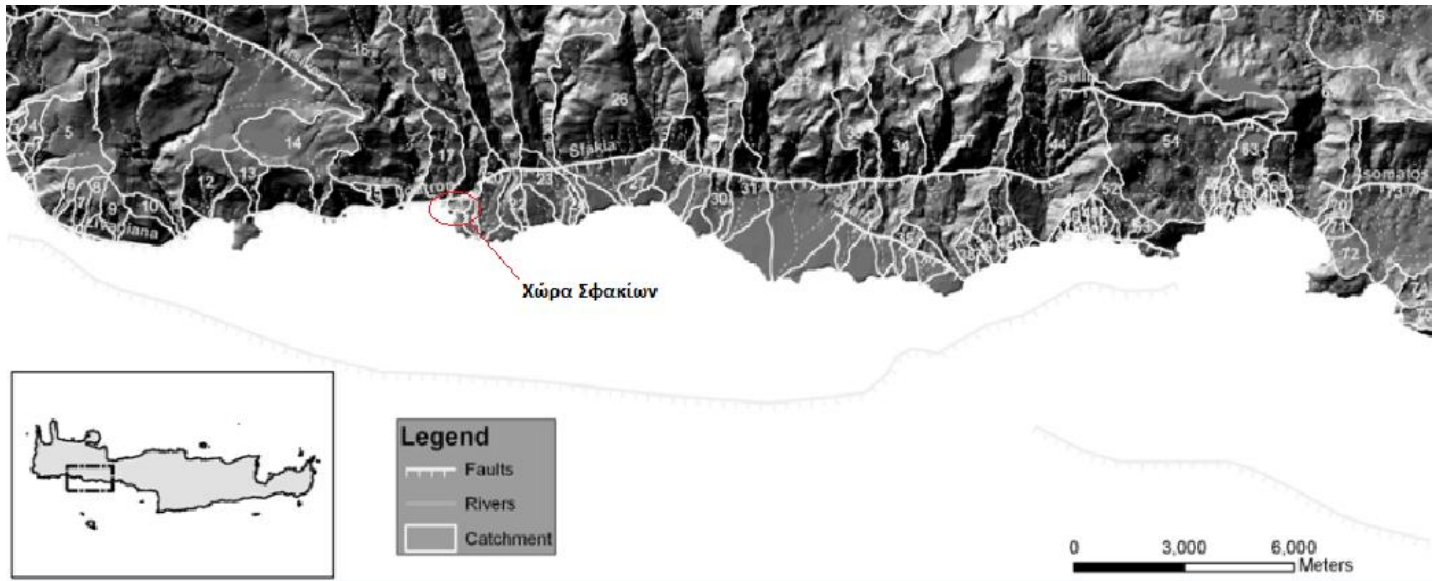
Το κάτω τέμαχος του ρήγματος περιλαμβάνει κυρίως ασβεστόλιθους και μάρμαρα της ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων και της ενότητας του Τρυπαλίου και χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση κοιλάδων και φαραγγίων.

Στο δυτικό ανερχόμενο τέμαχος κυριαρχούν αλλουβιακά ριπίδια κατά μήκος του βουνού. Οι κροκάλες των ριπιδίων καλύπτουν τα πετρώματα Φυλλιτικής-Χαλαζιτικής σειράς και οι δερβιτικές ροές τους προκάλεσαν τον σχηματισμό και την απόθεση σύνθετων αλλουβιακών ριπιδίων πάνω από τα πετρώματα της ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων, τα οποία παρουσιάζουν πολλά εσωτερικά ρήγματα παράλληλα με την διεύθυνση του ρήγματος Σφακίων. Κινηματικές μελέτες έδειξαν για τα ρήγματα εφελκυσμό διεύθυνσης Β-Ν έως ΒΒΑ-ΝΝΔ.

Το ανατολικό ανερχόμενο τμήμα παρουσιάζει μεγάλη ρηξιγενή ζώνη κατακερματισμού, όπου τοποθετούνται τα έντονα κατακερματισμένα ανθρακικά λατυποπαγή της ενότητας του Τρυπαλίου και αποτελείται από δύο παράλληλα ρήγματα. Το νότιο κανονικό ρήγμα, μικρής γωνίας βύθισης, έχει υποστεί διάβρωση και διαχωρίζει τη Φυλλιτική -Χαλαζιτική σειρά με την ενότητα του Τρυπαλίου. Το βόρειο κανονικό ρήγμα, μεγάλης γωνίας βύθισης, αντιπαραθέτει την ενότητα του Τρυπαλίου με τα μάρμαρα της ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων.

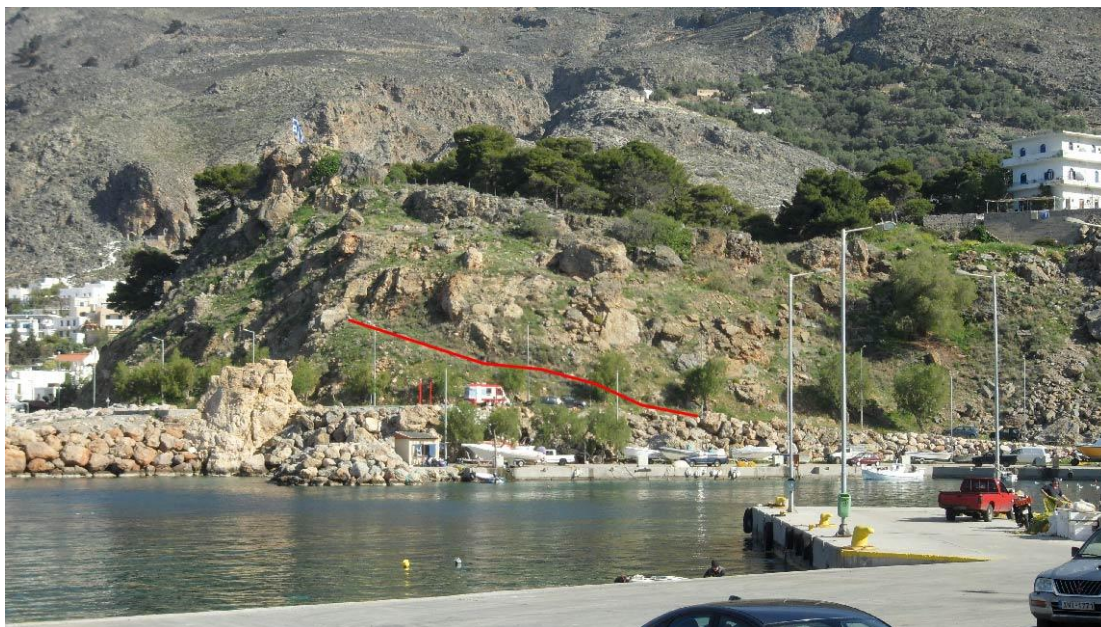
Στρωματογραφικά και τεκτονικά δεδομένα συνδυασμένα με παλαιοβυθομετρικές προσεγγίσεις επιτρέπουν την μελέτη της μορφοτεκτονικής εξέλιξης της περιοχής (van Hinsbergen *et al.* 2006). Σύμφωνα με τον van Hinsbergen τα ιζήματα του Άνω Μειόκαινου βρίσκονται υπερυψωμένα 200m στο ανατολικό τμήμα της παράκτιας ζώνης και επικάθονται ασύμφωνα πάνω στη Φυλλιτική-Χαλαζιτική σειρά, ενώ το βάθος απόθεσης τους ήταν 59m. Οι άμμοι του Κάτω Πλειόκαινου της Χώρας Σφακίων αποτέθηκαν σε βάθος 800m, ενώ σήμερα βρίσκονται σε υψόμετρο 50m. Η παρουσία θαλάσσιων απολιθωμάτων του Κάτω Πλειστόκαινου, κοντά στον οικισμό Ίμπρος, σε υψόμετρο 1000m, δείχνει ότι η ορεινή περιοχή έχει ανυψωθεί 1100m από το Καλάμβριο. Ο σχηματισμός Σκαλωτή, που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της παράκτιας ζώνης και περιέχει ενδολεκανικά θαλάσσια ιζήματα που υπέρκεινται της Φυλλιτικής-Χαλαζιτικής σειράς, έχει ανυψωθεί 300m. Επίσης και άλλοι νεότεροι σχηματισμοί έχουν ανυψωθεί πάνω από 600m. Αυτή η έντονη δραστηριότητα οφείλεται στην βύθιση της περιοχής μετά την δημιουργία των σχηματισμών κατά την διάρκεια του Ανώτατου Μειόκαινου-Κατώτατου Πλειόκαινο, η οποία συνέπεσε με τη δράση του ρήγματος Σφακίων. Επιπλέον αυτή η δραστηριότητα οδήγησε στην αποκάλυψη του ρηξιγενούς μετώπου όπου αποτέθηκαν οι άμμοι του σχηματισμού της Χώρας Σφακίων. Κατά την διάρκεια του Μέσου Πλειόκαινου-Κάτω Πλειστόκαινου η περιοχή ανυψώθηκε 50-300m. Αν και τα ιζήματα στη Χώρα Σφακίων αποτέθηκαν στο κατερχόμενο τέμαχος του ρήγματος, η ανύψωση πιθανώς οφείλεται στη συγκέντρωση ΒΔ-ΝΑ ρηγμάτων βόρεια του ρήγματος Σφακίων αλλά και στην μετατόπιση του ρήγματος.

Σύμφωνα με τους Skourtsos, Triantafyllou και Pore ο ρυθμός ανύψωσης του κατερχόμενου τέμαχους είναι 46-64 cm/ka από τις αρχές του Πλειόκαινου, ο οποίος αντιστοιχεί στο 1/2-4/5 του κατερχόμενου τέμαχους. Αυτή η διαφορά ανύψωσης αποδίδεται στην παρουσία ρηγμάτων που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα της παράκτιας ζώνης. Τέλος, ολόκληρη η περιοχή ανυψώθηκε από το Μέσο Μειόκαινο και μετά με αυξημένους ρυθμούς ανύψωσης των νότιων παράκτιων περιοχών και των βόρειων ορεινών όγκων των Λευκών Ορέων, που οφείλεται περισσότερο σε ΒΔ διεύθυνσης ρήγματα και λιγότερο στη δράση του ρήγματος Σφακίων.



Εικόνα 4.3: Απεικόνιση της ΝΔ Κρήτης, όπου φαίνεται το ρήγμα Σφακίων(παχιά άσπρη γραμμή με παχιές κάθετες γραμμές)(Tsimi et al., 2007).

4.3. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ



Εικόνα 4.4: Απεικόνιση της γραμμής μελέτης πάνω στο πρανές.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στη Χώρα Σφακίων στο λόφο Καστέλι όπου βρίσκεται το φρούριο των Σφακίων στο πλαίσιο της μελέτης ευστάθειας του πρανούς. Ο σκοπός είναι να εντοπιστεί το βραχώδες υπόβαθρο και να εκτιμηθούν το πάχος του εδαφικού καλύμματος και η κλίση του βραχώδους υποβάθρου με τη χρήση της ηλεκτρικής τομογραφίας. Στην εικόνα 4.4 απεικονίζεται η θέση της γεωηλεκτρικής γραμμής μελέτης. Η γραμμή βρίσκεται σε υψόμετρο 5m έως 13m από το επίπεδο της θάλασσας και η διεύθυνση της είναι Δυτικά προς Ανατολικά, έχει μήκος 47m και είναι κάθετη στην κλίση του πρανούς. Για την συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια σε ισαποστάσεις του 1m. Το πρώτο ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε στο σημείο 0m και το τελευταίο στο σημείο 47m. Το μέγιστο βάθος διασκόπησης είναι 10m και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την διάταξη διπόλου-διπόλου. Η γραμμή μελέτης χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, το οποίο περιόρισε την γεωφυσική έρευνα. Όπως φαίνεται στο γεωλογικό χάρτη Φύλλο Βρύσσης του ΙΓΜΕ (Εικόνα 4.1) υπάρχει ρήγμα BA-ND διεύθυνσης, το οποίο χωρίζει το τεκτονικό κάλυμμα της φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς με τους πλακώδεις ασβεστολίθους της Ιόνιας ζώνης και πιθανώς τέμνει την γραμμή μελέτης. Από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προέκυψαν οι τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και η γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους με την χρήση του λογισμικού RES2DINV και με τις μεθόδους αντιστροφής smoothness constrained inversion, combined inversion και robust inversion.

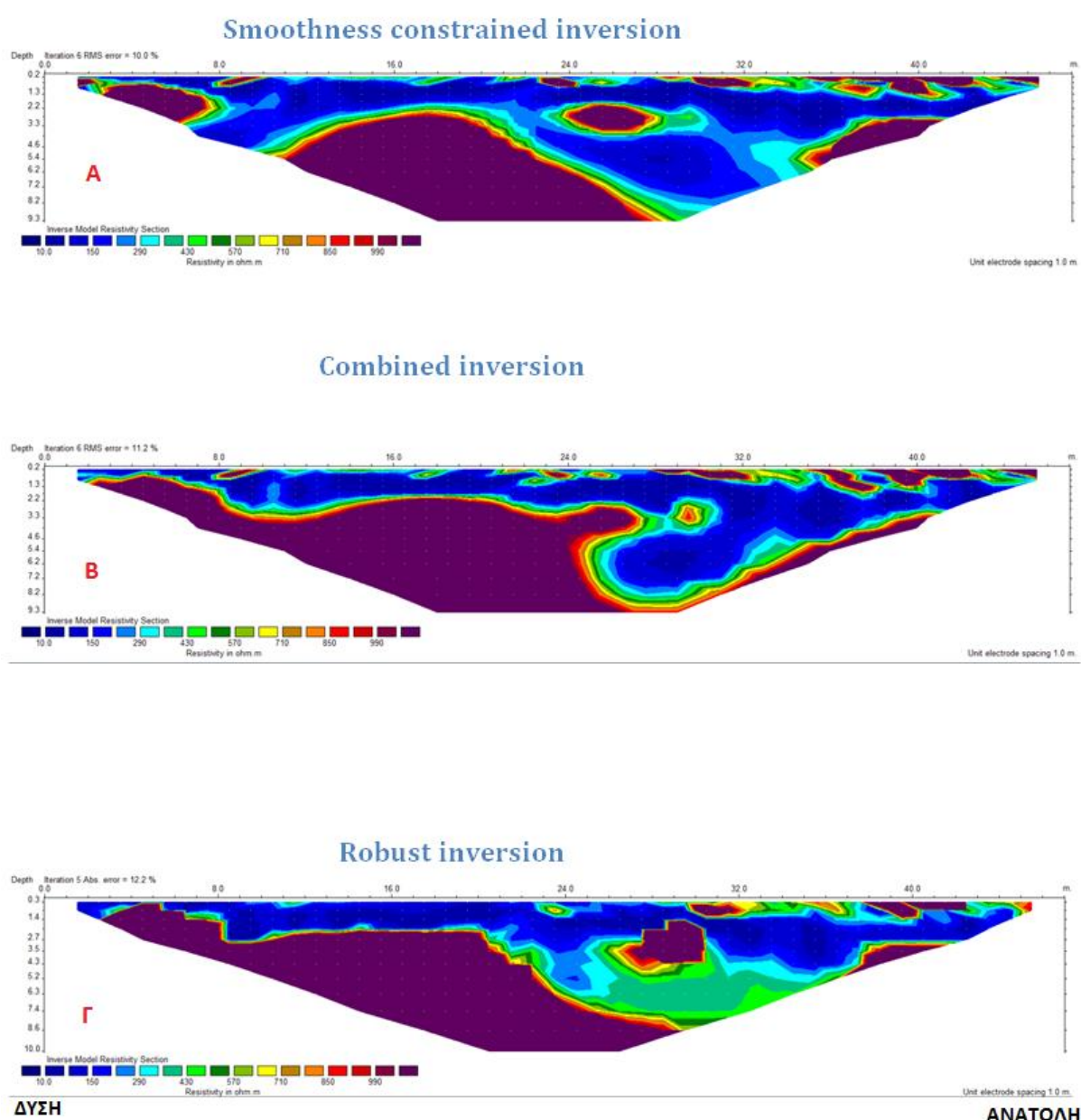


Εικόνα 4.5: Δορυφορική απεικόνιση της γεωφυσικής έρευνας. Με κόκκινο χρώμα διακρίνεται η γραμμή μελέτης.

Οι υψηλές έως πολύ υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($>700 \text{ ohm m}$) αντιστοιχούν σε πλακώδεις ασβεστολίθους που έχουν χαρτογραφηθεί στην συγκεκριμένη περιοχή και αποτελούν το βραχώδες υπόβαθρο. Παρατηρείται απότομη μεταβολή της τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στα 30m της γραμμής μελέτης. Αυτή η περιοχή των ενδιάμεσων τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (300-700 ohm m) ταυτίζεται με την ρηξιγενή ζώνη του ρήγματος που παρατηρείται στον γεωλογικό χάρτη. Το ρήγμα είναι κανονικό, ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης, ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης κλίσης και τέμνει την γραμμή μελέτης περίπου στα 26m. Η απότομη πτώση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οφείλεται στην εισχώρηση μετεωρικού νερού στην ρηξιγενή ζώνη. Οι χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μέχρι 300 ohm m αποδίδονται σε αργιλικούς σχιστόλιθους της φυλλιτικής χαλαζιτικής σειράς και αποτελούν το εδαφικό κάλυμμα του βραχώδους υποβάθρου. Παρακάτω παρατίθενται οι γεωηλεκτρικές τομές της γραμμής μελέτης με τις τρεις μεθόδους αντιστροφής (σχήμα 4.1) και με διορθώσεις για το υψόμετρο (σχήμα 4.2). Επίσης παρατίθεται και μία ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή (σχήμα 4.3).

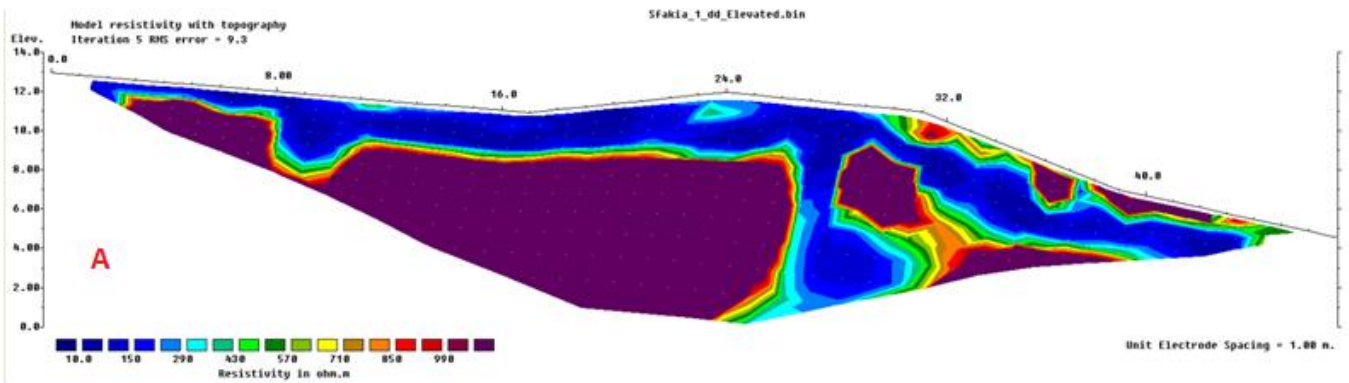
Οι γεωηλεκτρικές τομές του σχήματος 4.1 δεν συμφωνούν απόλυτα μεταξύ τους. Οι τομές με τις μεθόδους robust και smoothness constrained inversion αναγνωρίζουν την ρηξιγενή ζώνη, ενώ η γεωηλεκτρική τομή με την combined inversion δεν την αναγνωρίζει. Η μεγαλύτερη αντίφαση διακρίνεται στην τομή με την smoothness constrained inversion όπου παρατηρούνται δύο ρηξιγενείς ζώνες. Μία στα 26m που αντιστοιχεί στο χαρτογραφημένο ρήγμα και μια δεύτερη στα 12m αντίθετης κλίσης. Επίσης μόνο η robust εντοπίζει την υγρασία στην ρηξιγενή ζώνη.

Οι γεωηλεκτρικές τομές με διορθώσεις για το υψόμετρο (σχήμα 4.2) έχουν μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης, μικρότερο σφάλμα και η τοπογραφία έχει ενσωματωθεί στις μετρήσεις τους. Για αυτό το λόγο δίνουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Και οι τρεις μέθοδοι αντιστροφής διακρίνουν την ασυνέχεια του βραχώδους υποβάθρου στα 26m αλλά μόνο η robust αναγνωρίζει την υγρασία στη ρηξιγενή ζώνη. Με βάση τη ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή με την μέθοδο αντιστροφής robust (σχήμα 4.3) το πάχος του εδαφικού καλύμματος στα 2,5-8m της γραμμής μελέτης είναι 1m, στα 8-11,5m είναι 3m, στα 11,5-23m είναι 2m και στα 23-25m είναι 4m. Μετά ακολουθεί η ρηξιγενής ζώνη και η δομή διακόπτεται σχεδόν κατακόρυφα. Η δομή στα 28-32m της γραμμής μελέτης αποδίδεται σε ασβεστόλιθο που έχει βρεθεί σε αυτή τη θέση πιθανόν λόγω παλαιότερης βραχώδους πτώσης.

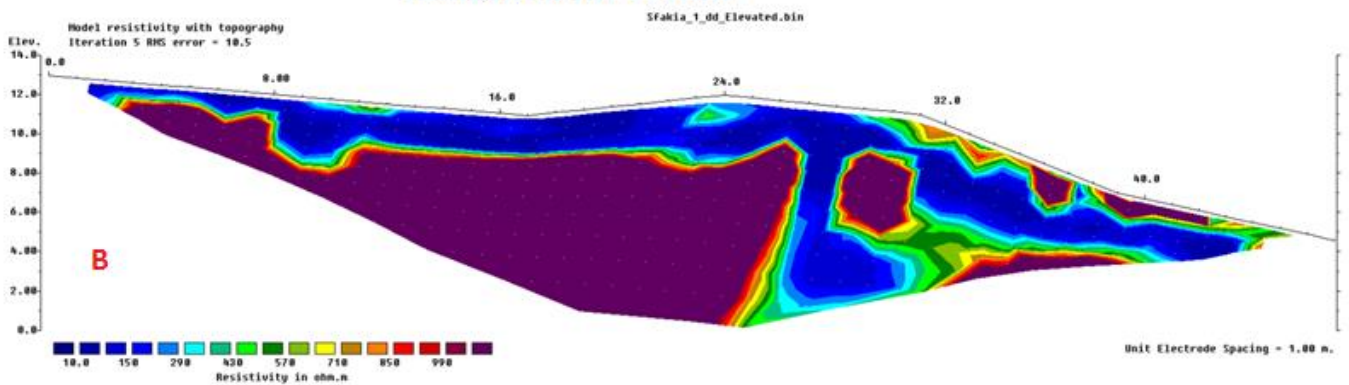


Σχήμα 4.1: Γεωηλεκτρικές τομές. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα και ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο βάθος σε μέτρα. Η πρώτη γεωηλεκτρική τομή αντιστοιχεί στην smoothness constrained inversion, η δεύτερη αντιστοιχεί στην combined inversion και η τρίτη στην robust.

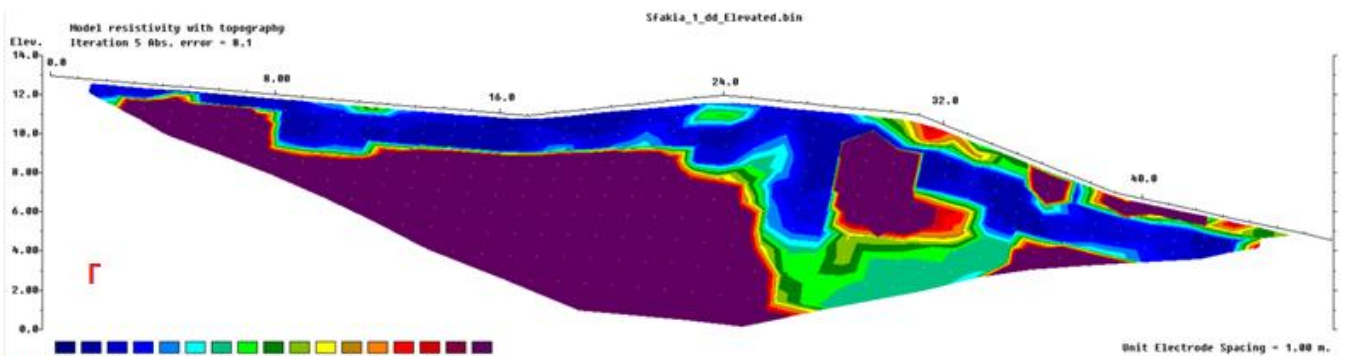
Smoothness constrained inversion



Combined inversion



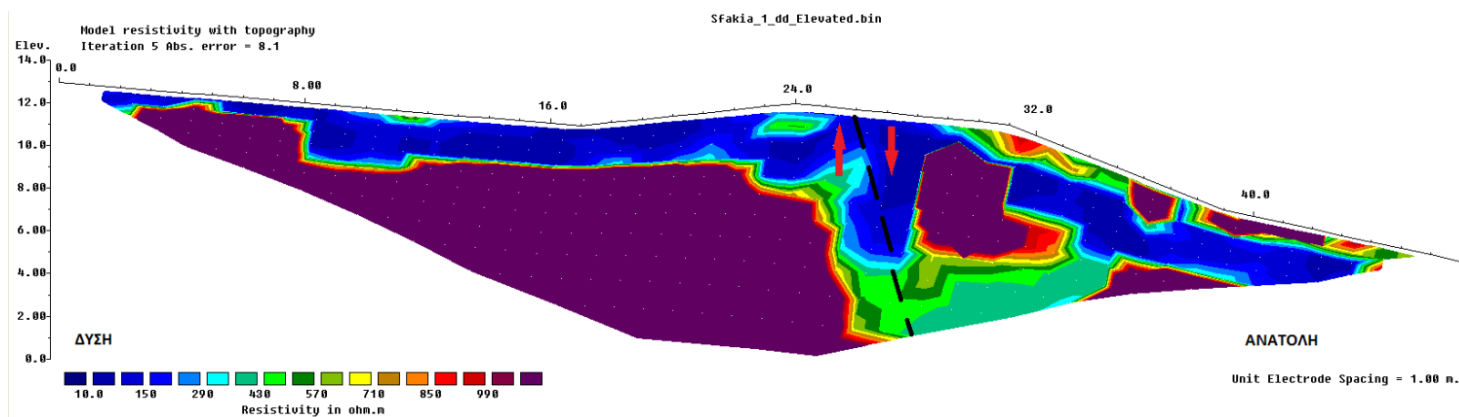
Robust inversion



ΔΥΣΗ

ΑΝΑΤΟΛΗ

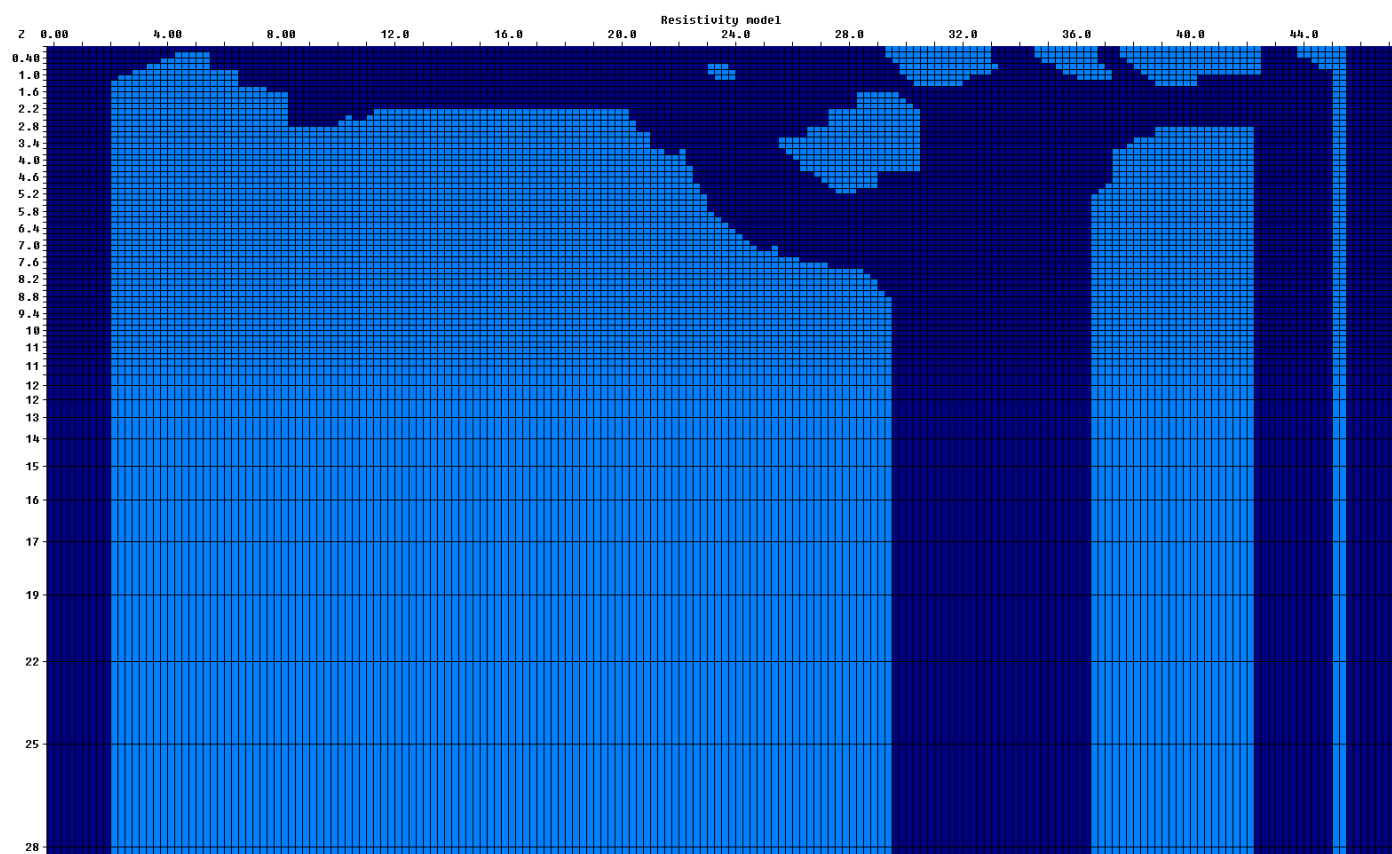
Σχήμα 4.2: Γεωηλεκτρικές τομές. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση του σταθμού παρατήρησης από την αρχή της γραμμής μελέτης σε μέτρα και ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στο απόλυτο υψόμετρο. Η πρώτη γεωηλεκτρική τομή αντιστοιχεί στην smoothness constrained inversion, η δεύτερη αντιστοιχεί στην combined inversion και η τρίτη στην robust



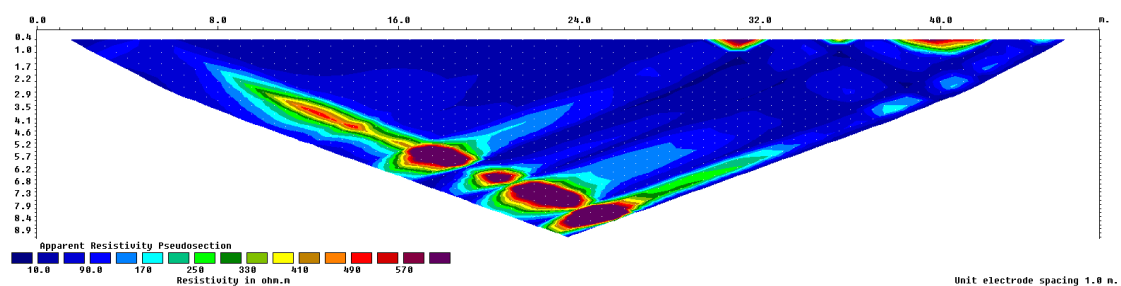
Σχήμα 4.3: Ερμηνευμένη γεωηλεκτρική τομή με βάση τον πίνακα 2.1 και τον γεωλογικό χάρτη.

4.4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

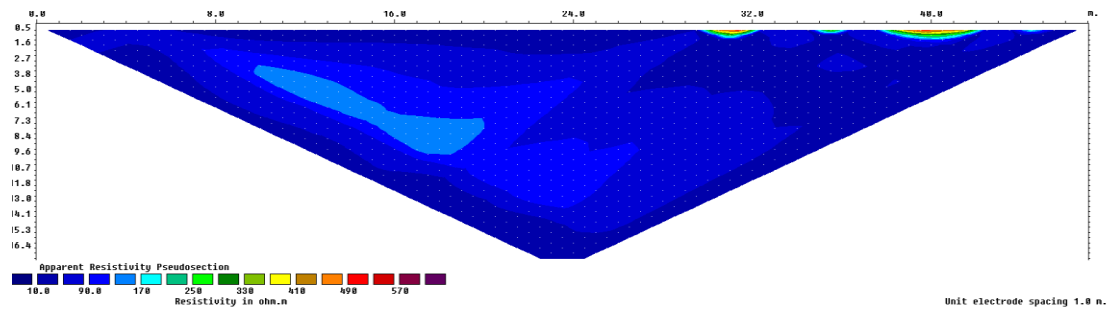
Για να εξεταστεί η αποδοτικότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας στον εντοπισμό του βραχώδους υποβάθρου έγινε προσομοίωση. Αυτό έγινε για να προσδιορίσουμε την βέλτιστη διάταξη ηλεκτροδίων σε συνδυασμό με την καταλληλότερη μέθοδο αντιστροφής. Δημιουργήθηκε δισδιάστατο ανομοιογενές γεωηλεκτρικό μοντέλο με την χρήση του λογισμικού RES2DMOD. Στο βραχώδες υπόβαθρο δόθηκε τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ίση με 600 ohm.m, η οποία αντιστοιχεί σε ασβεστόλιθο και στο περιβάλλοντα χώρο δόθηκε τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ίση με 30 ohm.m. Για αυτό το μοντέλο δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα, δηλαδή 8 ψευδοτομές με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων, οι οποίες είναι: διπόλου-διπόλου, equatorial dipole-dipole, schlumberger, Wenner (Wenner alpha), Wenner beta, Wenner gamma, πόλου-πόλου και πόλου-διπόλου και στην συνέχεια επεξεργάστηκαν με το λογισμικό αντιστροφής δεδομένων RES2DINV για την δημιουργία γεωηλεκτρικών τομών. Χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια με ισαποστάσεις 1m. Για την equatorial dipole-dipole η απόσταση των ηλεκτροδίων που αποτελούν τα δίπολα είναι 1m.



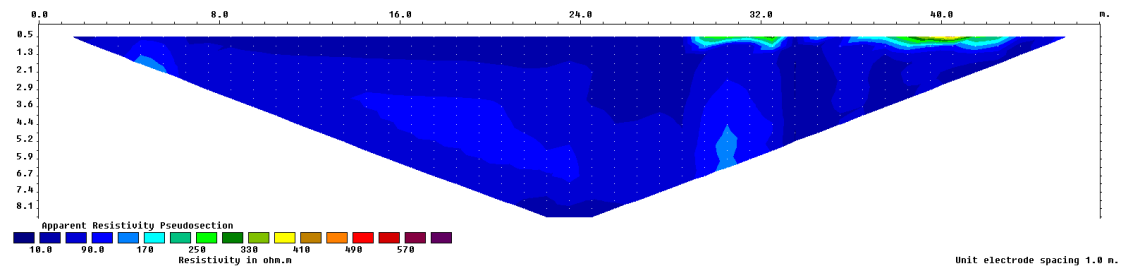
Σχήμα 4.4: Απεικόνιση του γεωηλεκτρικού μοντέλου



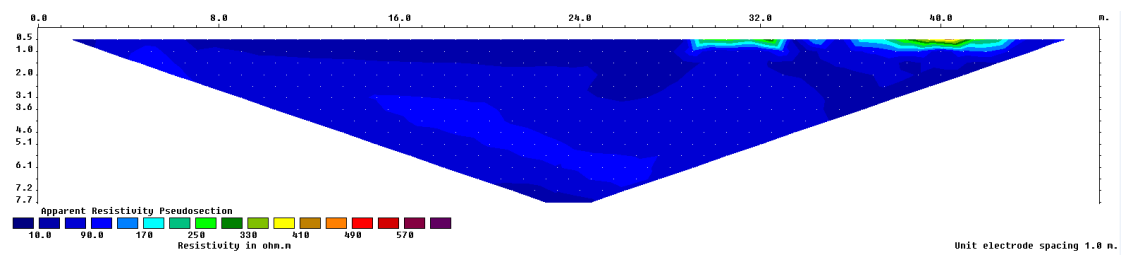
Σχήμα 4.5: Συνθετική ψευδοτομή με διάταξη διπόλου-διπόλου.



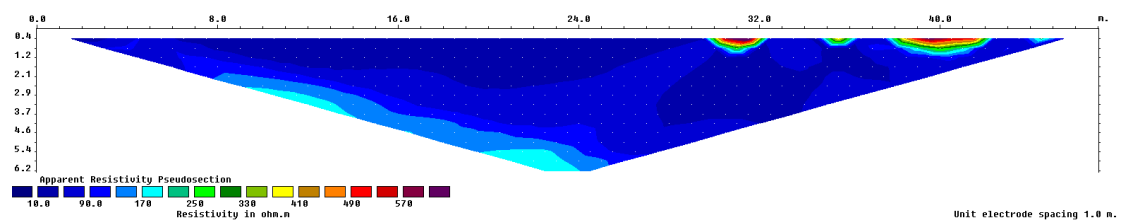
Σχήμα 4.6: Συνθετική ψευδοτομή με διάταξη *equatorial dipole-dipole*.



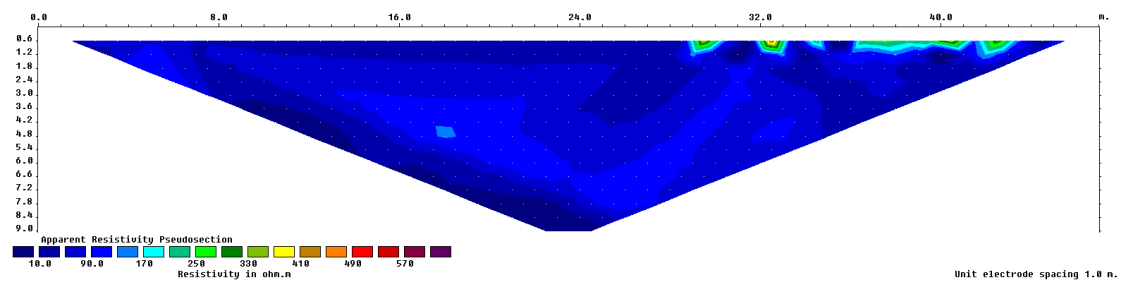
Σχήμα 4.7: Συνθετική ψευδοτομή με διάταξη *schlumberger*.



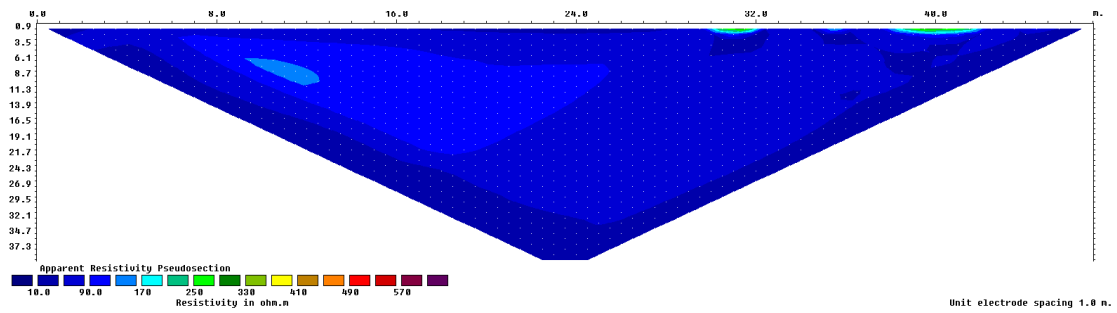
Σχήμα 4.8: Συνθετική ψευδοτομή με διάταξη *Wenner (Wenner alpha)*.



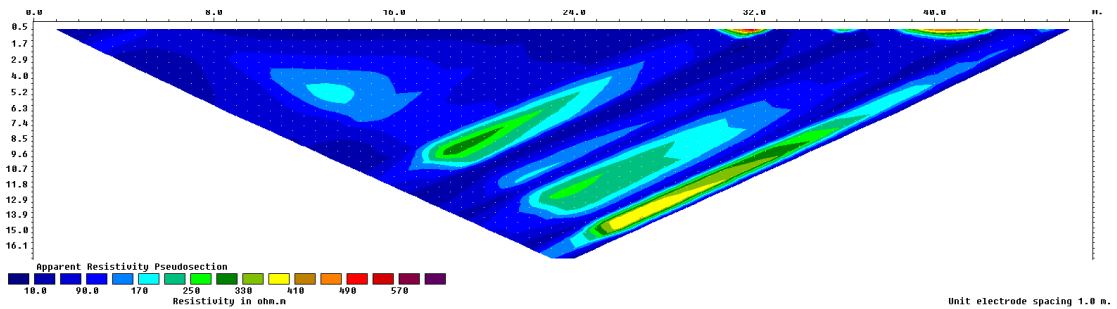
Σχήμα 4.9: Συνθετική ψευδοτομή με διάταξη *Wenner beta*.



Σχήμα 4.10: Συνθετική ψευδοτομή με διάταξη *Wenner gamma*.



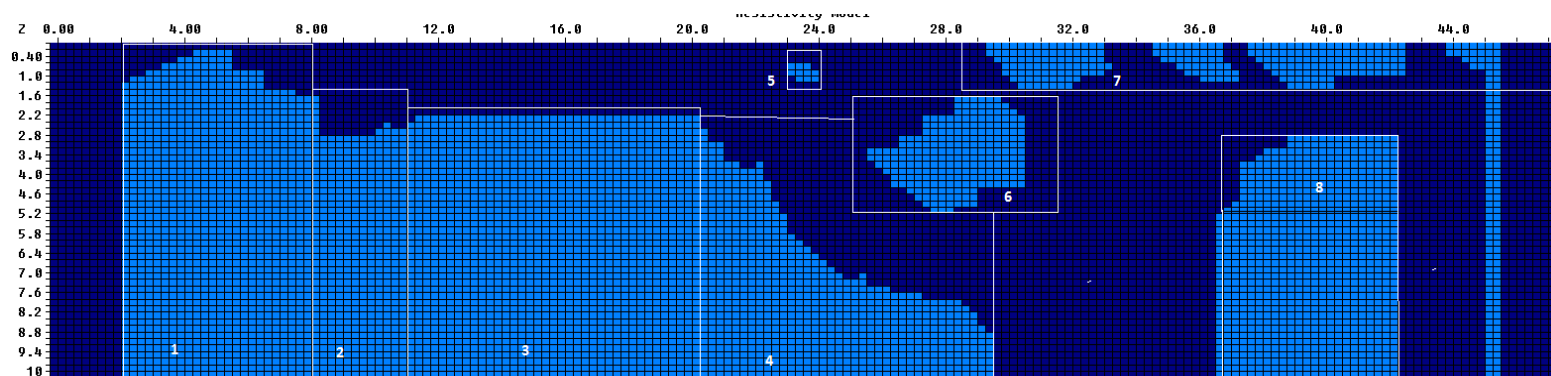
Σχήμα 4.11: Συνθετική ψευδοτομή με διάταξη πόλου-πόλου.



Σχήμα 4.12: Συνθετική ψευδοτομή με διάταξη πόλου-διπόλου.

4.5. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

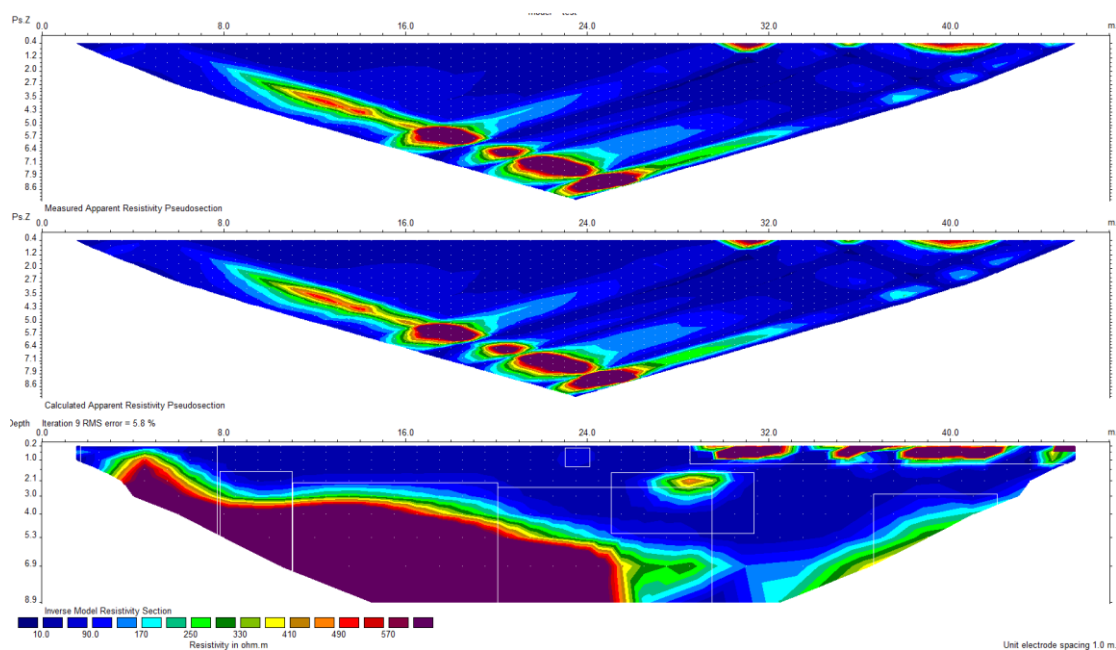
Η αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό RES2DINV και εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι smoothness constrained, combined inversion και robust με σκοπό να εξετασθεί ποια από τις διατάξεις απεικονίζει καλύτερα το βραχώδες υπόβαθρο. Για την διευκόλυνση της ερμηνείας των γεωηλεκτρικών τόμων το αρχικό μοντέλο χωρίστηκε σε οκτώ περιοχές (Σχήμα 4.13). Η γωνία κλίσης του βραχώδους υποβάθρου στο γεωηλεκτρικό μοντέλο στην περιοχή 1 από τα 2m μέχρι τα 4,2m είναι 24° και από τα 5,4m μέχρι τα 8m είναι 27°. Οι περιοχές 2 και 4 είναι σχεδόν επίπεδες και η περιοχή 4 έχει 36° γωνία κλίσης.



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση του γεωηλεκτρικού μοντέλου. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις θέσεις των εξεταζόμενων περιοχών.

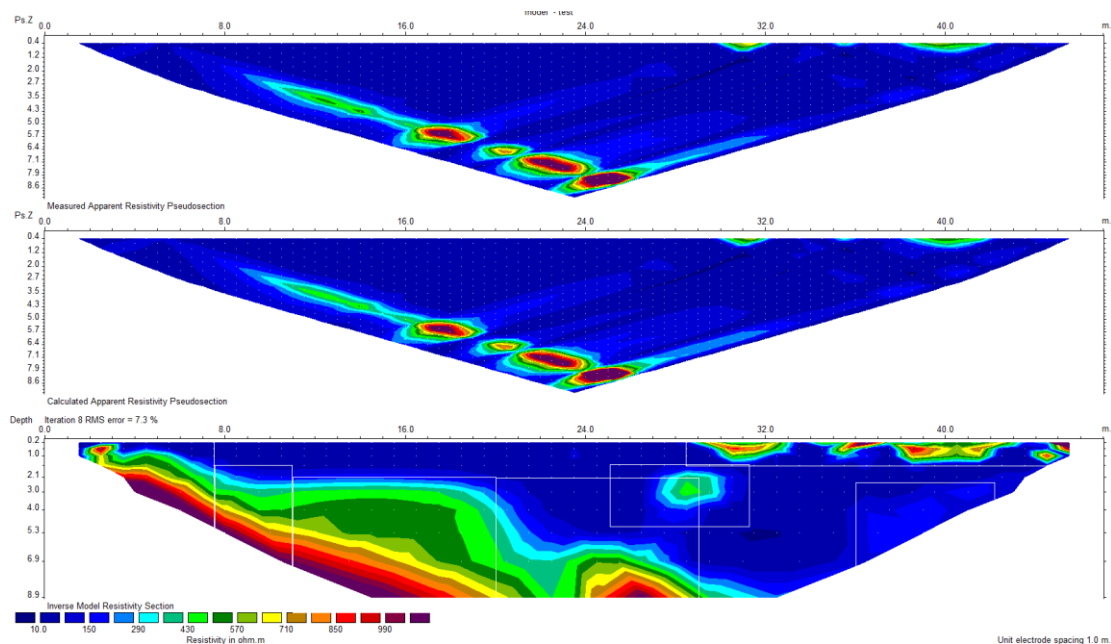
Διάταξη διπόλου-διπόλου

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη **διπόλου-διπόλου** και οι μέθοδοι αντιστροφής smoothness constrained, combined και robust.



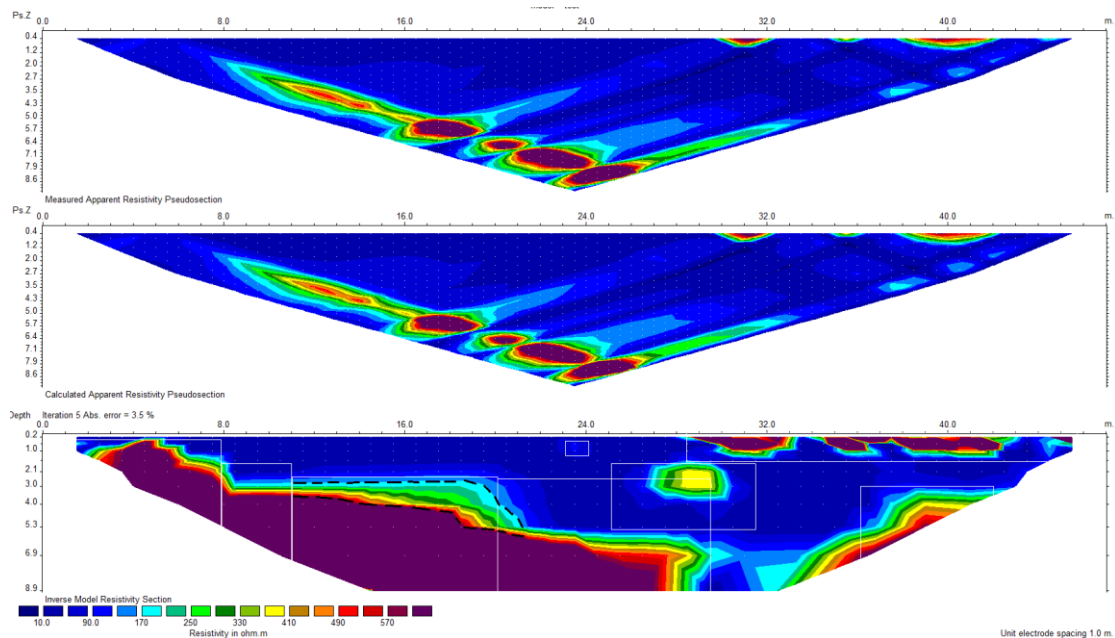
Σχήμα 4.14: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου και την μέθοδο smoothness constrained inversion. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η διπόλου-διπόλου σε συνδυασμό με την smoothness constrained inversion έδωσε σφάλμα 5,8% μετά από εννέα επαναλήψεις . Η γεωμετρία του βραχώδους υποβάθρου δεν διακρίνεται ικανοποιητικά αλλά η κλίση του ανταποκρίνεται με το αρχικό μοντέλο. Η ζώνη επαφής με το εδαφικό κάλυμμα είναι λίγο διαταραγμένη. Μόνο η περιοχή 4 δεν είναι επαρκώς εντοπισμένη. Από τα 25m και μετά η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι υποεκτιμημένη και το υπόβαθρο διακόπτεται απότομα. Η περιοχή 5 δεν εντοπίστηκε και η περιοχή 6 εμφανίζεται συρρικνωμένη με χαμηλότερη τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από την πραγματική. Η περιοχή 7 απεικονίζεται σωστά και η περιοχή 8 εμφανίζεται σε βαθύτερη θέση και με αρκετά μικρότερη εκτίμηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 4.15: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου και την μέθοδο *combined inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλο.

Η διπόλου-διπόλου με την *combined inversion* μετά από οχτώ αντιστροφές απέδωσε σφάλμα 7,3% . Το βραχώδες υπόβαθρο δεν έχει απεικονιστεί σωστά. Στην περιοχή 1,2 η κλίση του διαφέρει με το αρχικό μοντέλο . Η περιοχή 3 εμφανίζεται επίπεδη όπως είναι στο μοντέλο αλλά η 4 δεν συμφωνεί καθόλου με το αρχικό μοντέλο. Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του βραχώδους υποβάθρου είναι αρκετά μικρότερη από την πραγματική της τιμή . Οι περιοχές 5 και 8 δεν εντοπίζονται καθόλου και στις περιοχές 6 και 7 η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι υποεκτιμημένη.

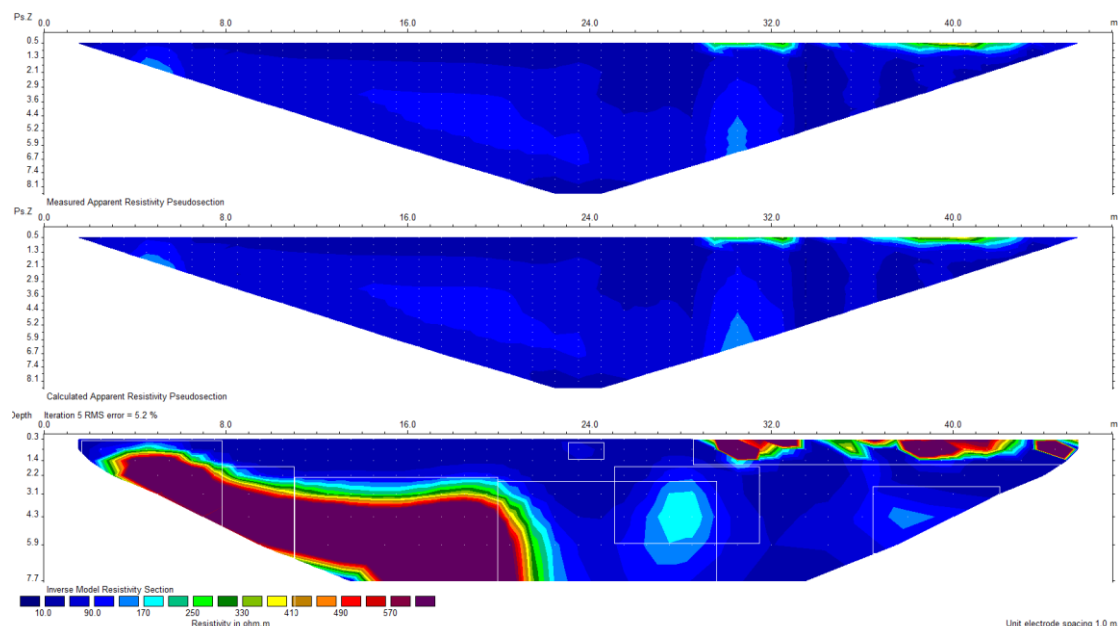


Σχήμα 4.16: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου και την μέθοδο *robust inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου και οι μαύρες διακεκομμένες γραμμές τονίζουν την διαταραχή στη ζώνη επαφής.

Η διπόλου-διπόλου με την *robust inversion* έδωσε σφάλμα 3,5% μετά από πέντε επαναλήψεις. Στην περιοχή 1 και 2 διακρίνεται και η γεωμετρία και η κλίση του υποβάθρου. Στην περιοχή 3 παρουσιάζεται διαταραχή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στα 18m και 3m βάθος. Η περιοχή 4 εμφανίζεται με πολύ μεγαλύτερη κλίση από την πραγματική της. Η περιοχή 5 δεν εντοπίστηκε καθόλου και η 6 εμφανίζεται αρκετά υποεκτιμημένη. Η περιοχή 7 ανταποκρίνεται αρκετά στο αρχικό μοντέλο και η περιοχή 8 τοποθετείται σωστά αλλά η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της είναι διαταραγμένη και μικρότερη από αυτή του μοντέλου.

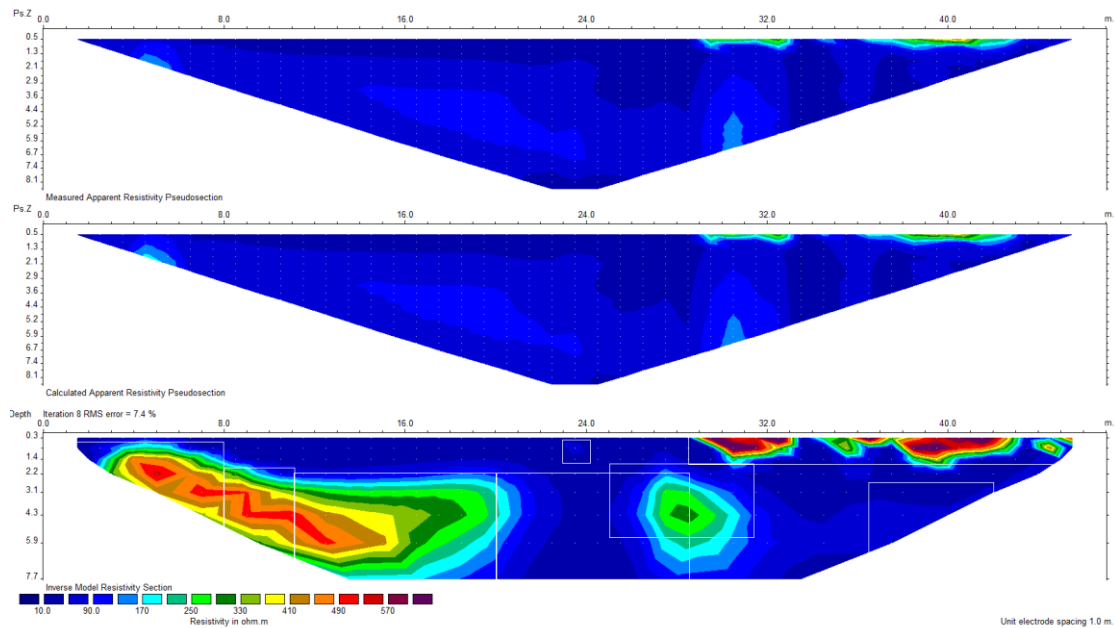
Διάταξη Schlumberger

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη **Schlumberger** και οι μέθοδοι αντιστροφής smoothness constrained, combined και robust.



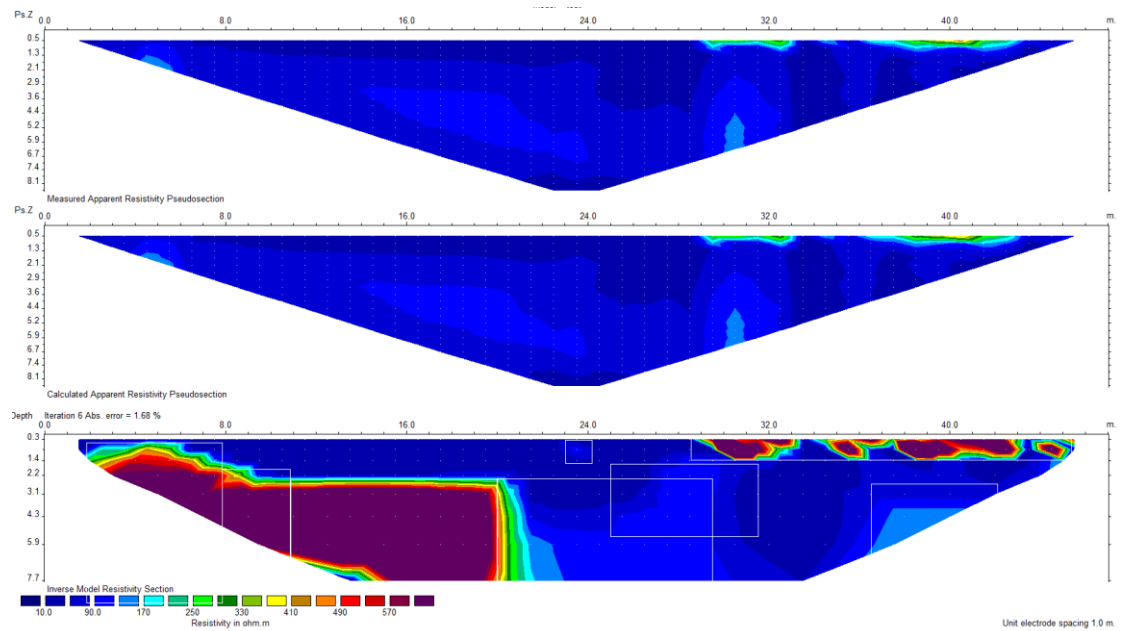
Σχήμα 4.17: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων schlumberger και την μέθοδο smoothness constrained inversion. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Το σφάλμα με την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger και την μέθοδο αντίστροφης smoothness constrained inversion προέκυψε 5,2% μετά από 5 επαναλήψεις. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του βραχώδους υποβάθρου είναι καλά εκτιμημένη. Όμως δεν διακρίνεται η κλίση στις περιοχές 1,2 και 3 και οι περιοχές 4,5,8 δεν διακρίνονται καθόλου. Η περιοχή 7 είναι σωστά εκτιμημένη. Τέλος η περιοχή 6 εμφανίζεται μετατοπισμένη με μικρότερη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Σχήμα 4.18: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων schlumberger και την μέθοδο combined inversion. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Χρησιμοποιώντας την διάταξη Schlumberger και την combined inversion method προέκυψε η παραπάνω γεωηλεκτρική τομή. Μετά από επτά επαναλήψεις το σφάλμα προέκυψε 7,4%. Αυτή η διάταξη με την combined inversion method απέτυχαν πλήρως στην απεικόνιση του μοντέλου. Στις περιοχές 1,2,3 η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι αρκετά υποεκτιμημένη και δεν φαίνεται η κλίση του βραχώδους υποβάθρου. Οι περιοχές 4,5,8 δεν εντοπίστηκαν καθόλου. Η περιοχή 6 εμφανίζεται βαθύτερα και οι τιμή της είναι αρκετά μικρότερη από αυτή του μοντέλου. Η περιοχή 7 είναι καλά εκτιμημένη και οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης διαφέρουν ελάχιστα από το αρχικό μοντέλο.

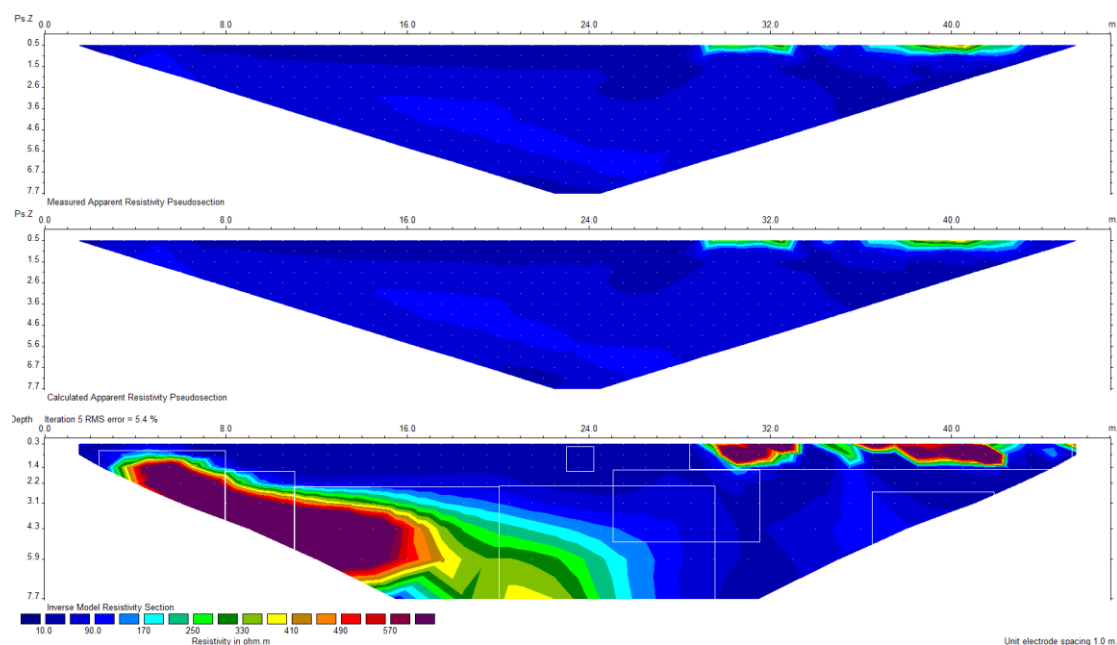


Σχήμα 4.19: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων schlumberger και την μέθοδο *robust inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η μέθοδος αντιστροφής *robust* με την διάταξη Schlumberger μετά από έξι επαναλήψεις με σφάλμα 1,68% κατάφερε να απεικονίσει ικανοποιητικά την κλίση και την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των περιοχών 1,2,3. Ενώ οι περιοχές 4,5,6 και 8 δεν εμφανίζονται στην γεωηλεκτρική τομή. Η περιοχή 7 είναι καλύτερα εκτιμημένη σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους.

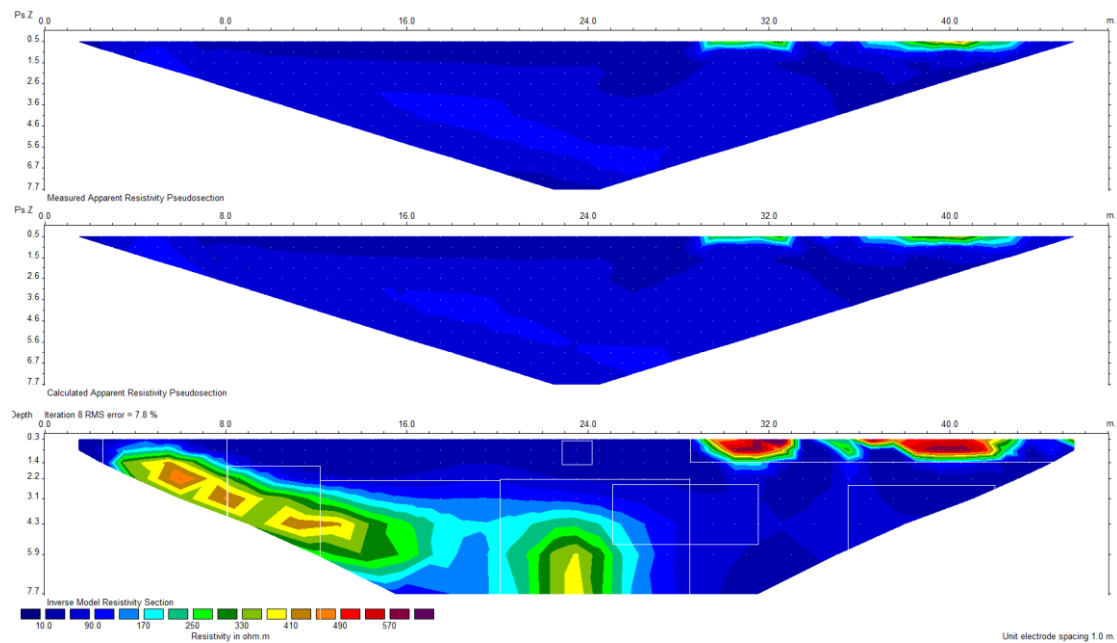
Διάταξη Wenner alpha

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη **Wenner alpha** και οι μέθοδοι αντιστροφής smoothness constrained, combined και robust.



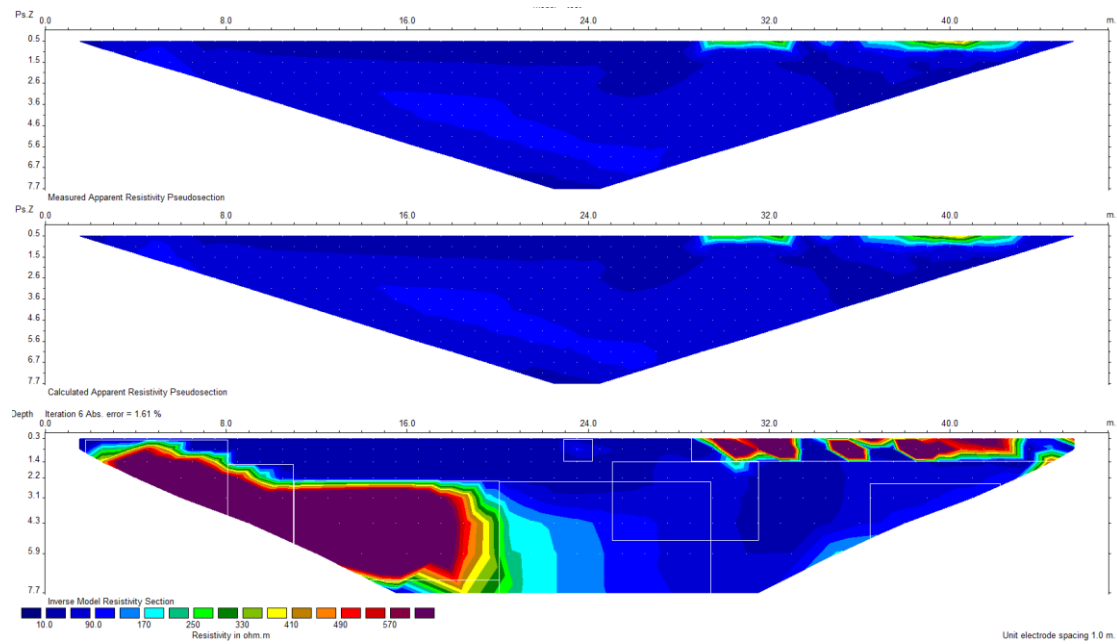
Σχήμα 4.20: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Wenner alpha και την μέθοδο smoothness constrained inversion. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η Wenner alpha με την smoothness constrained inversion δεν κατάφεραν να εντοπίσουν επαρκώς το υπόβαθρο μετά από πέντε επαναλήψεις με σφάλμα 5, 4%. Οι περιοχές 5,6,8 δεν εντοπίστηκαν καθόλου. Στην περιοχή 7 η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι καλά εκτιμημένη και στην περιοχή 4 όχι μόνο δεν φαίνεται η κλίση του υποβάθρου, αλλά και η εκτίμηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι αρκετά μικρότερη από αυτή του μοντέλου.



Σχήμα 4.21: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Wenner alpha και την μέθοδο combined inversion. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η μέθοδος combined inversion με την διάταξη Wenner Alpha μετά από οχτώ επαναλήψεις έδωσε σφάλμα 7,8% και απέτυχε στην απεικόνιση του αρχικού μοντέλου. Η κλίση του υποβάθρου δεν διακρίνεται και η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι αρκετά υποεκτιμημένη. Οι περιοχές 5,6,8 δεν εμφανίζονται καθόλου και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση στην περιοχή 7 είναι υποεκτιμημένη.

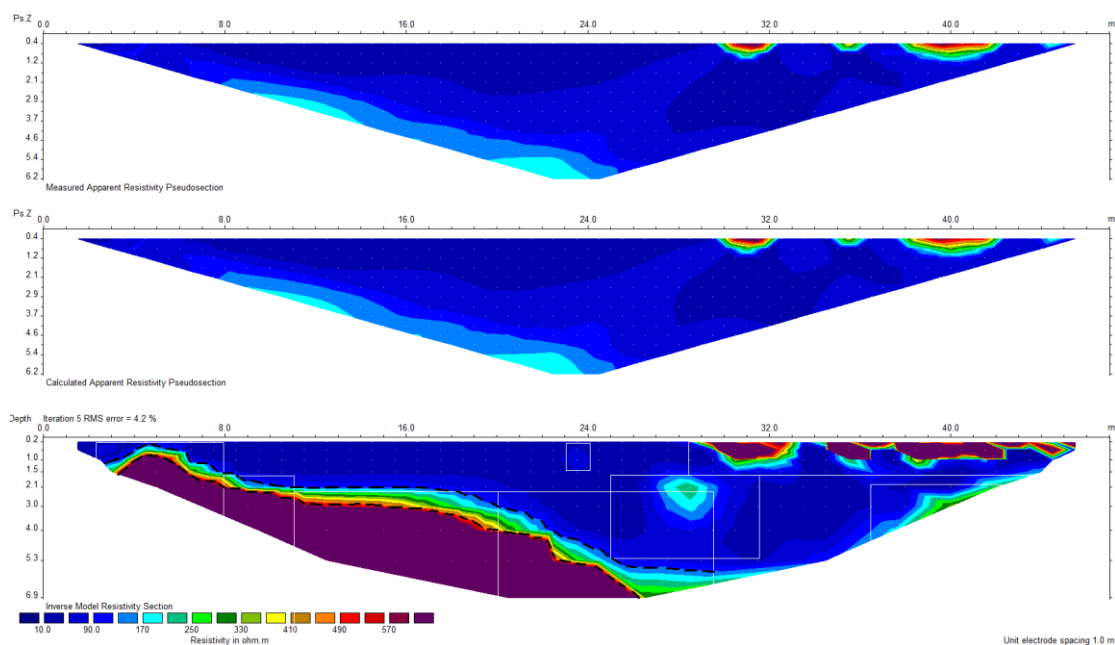


Σχήμα 4.22: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Wenner alpha και την μέθοδο *robust inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η Wenner alpha με την μέθοδο αντιστροφής *robust* έδωσε 1,61% σφάλμα. Οι μόνες περιοχές που κατάφερε να εντοπίσει σωστά είναι η 3 και η 7. Οι περιοχές 4,5,6,8 δεν εμφανίζονται καθόλου και οι περιοχές 1 και 2 εμφανίζονται με σωστή ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Η κλίση στην περιοχή 1 και 3 ανταποκρίνεται στην κλίση του υποβάθρου αλλά στην περιοχή 2 διαφέρει αρκετά.

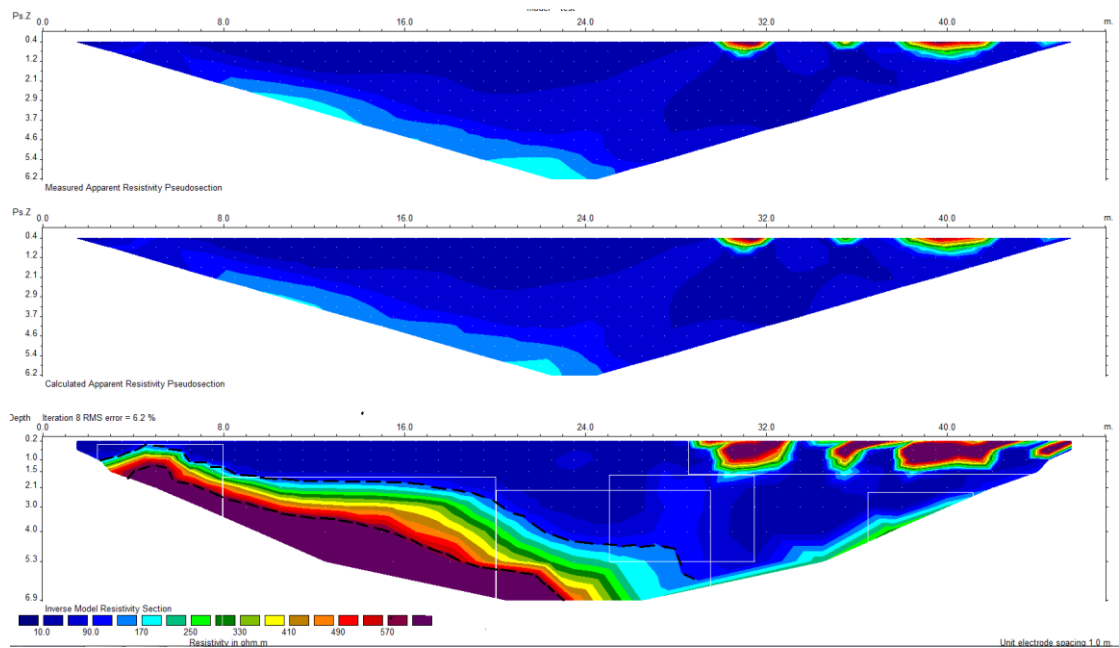
Διάταξη Wenner beta

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη **Wenner beta** και οι μέθοδοι αντιστροφής smoothness constrained, combined και robust.



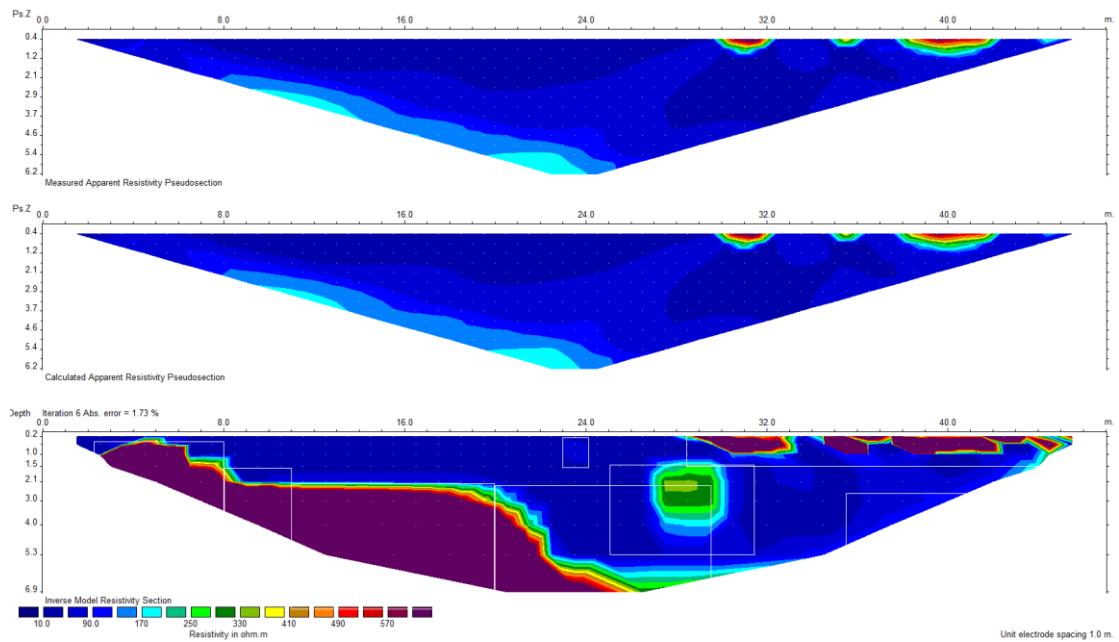
Σχήμα 4.23: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Wenner beta και την μέθοδο smoothness constrained inversion. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου και οι μαύρες διακεκομμένες γραμμές τονίζουν την διαταραχή στη ζώνη επαφής.

Η Wenner beta με την Smoothness constrained inversion έδωσε σφάλμα 4,2% με πέντε επαναλήψεις. Ο κύριος όγκος του βραχώδους υποβάθρου εντοπίστηκε επαρκώς. Η εκτίμηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συμφωνεί με το αρχικό μοντέλο αλλά η κλίση του στις περιοχές 2 και 3 δεν εκτιμήθηκαν σωστά. Επίσης η ζώνη επαφής του υποβάθρου με το περιβάλλοντα χώρο είναι λίγο διαταραγμένη. Οι περιοχή 5 δεν εντοπίστηκε και οι περιοχές 6,8 εμφανίζονται στην σωστή θέση αλλά η ειδική ηλεκτρική αντίσταση τους είναι αρκετά υποεκτιμημένη. Η περιοχή 7 εντοπίστηκε επιτυχώς.



Σχήμα 4.24: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων *Wenner beta* και την μέθοδο *combined inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου και οι μαύρες διακεκομμένες γραμμές τονίζουν την διαταραχή στη ζώνη επαφής.

Η *Wenner beta* σε συνδυασμό με την *combined inversion* έδωσε σφάλμα 6,2% μετά από οχτώ επαναλήψεις. Ο κύριος όγκος του βραχύδους υποβάθρου εντοπίστηκε με διαταραγμένη ζώνη επαφής. Οι περιοχές 5,6 δεν εντοπίστηκαν και η περιοχή 8 εμφανίζεται ελάχιστα σε λάθος θέση. Η περιοχή 7 εντοπίστηκε επιτυχώς.

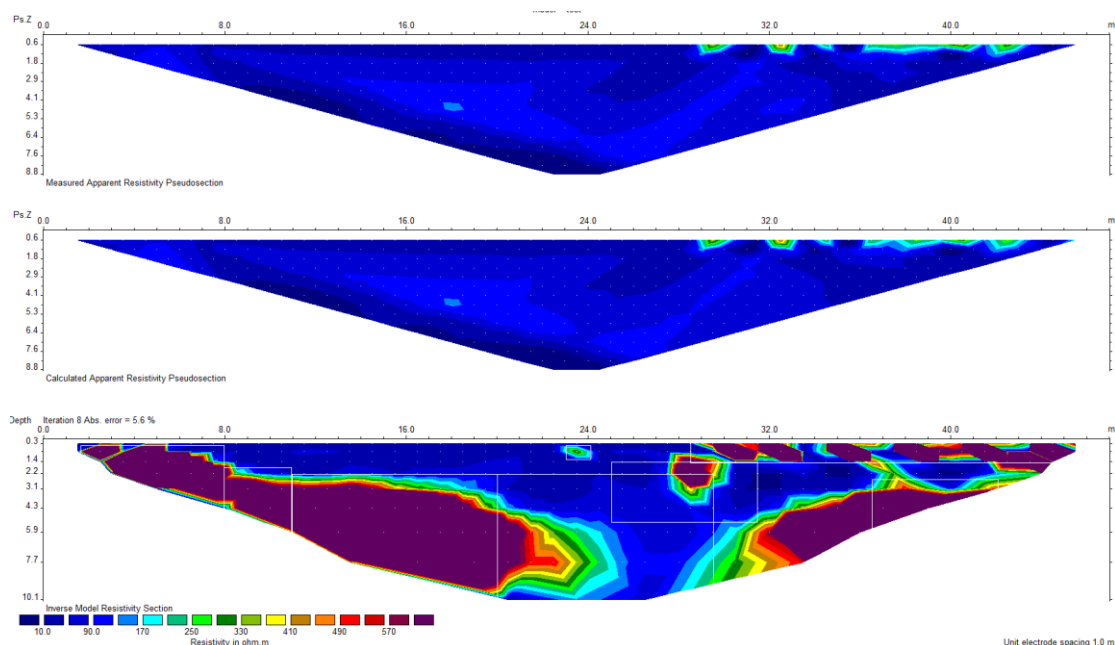


Σχήμα 4.25: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων *Wenner beta* και την μέθοδο *robust inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Από τις τρεις μεθόδους αντιστροφής με την διάταξη *Wenner beta* η *robust* εντόπισε καλύτερα το βραχώδες υπόβαθρο. Τα όρια διακρίνονται και η κλίση του αποτυπώθηκε επιτυχώς. Στην περιοχή 5 η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι υποεκτιμημένη. Οι περιοχές 6,8 δεν εντοπίστηκαν και η περιοχή 7 απεικονίζεται σωστά.

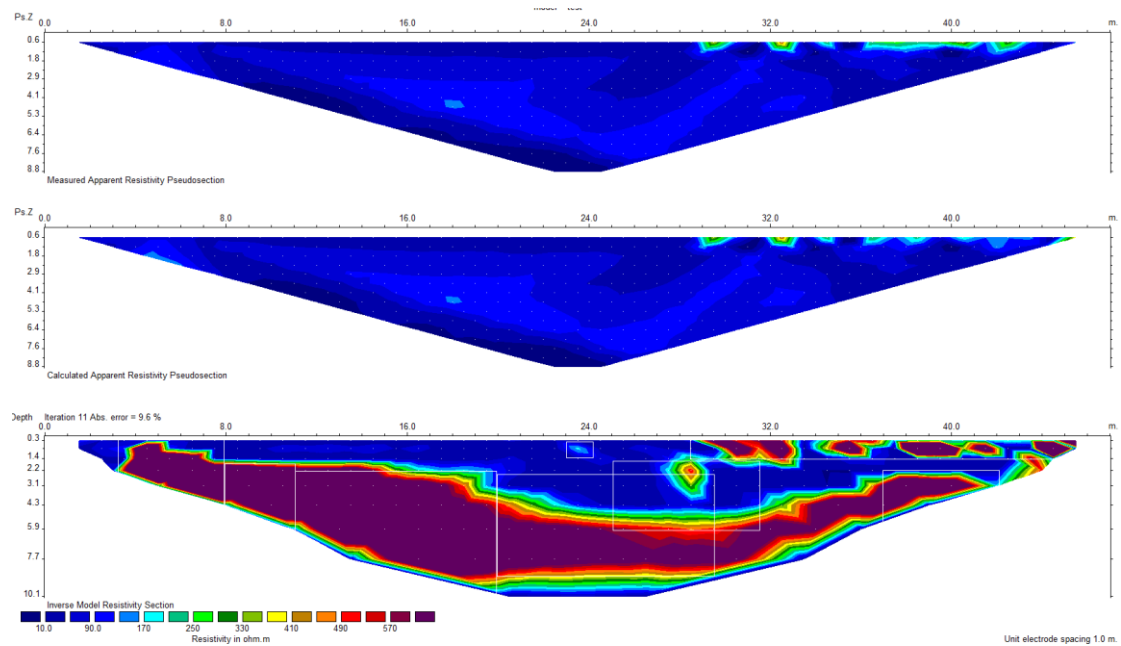
Διάταξη Wenner gamma

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη **Wenner gamma** και οι μέθοδοι αντιστροφής smoothness constrained, combined και robust.



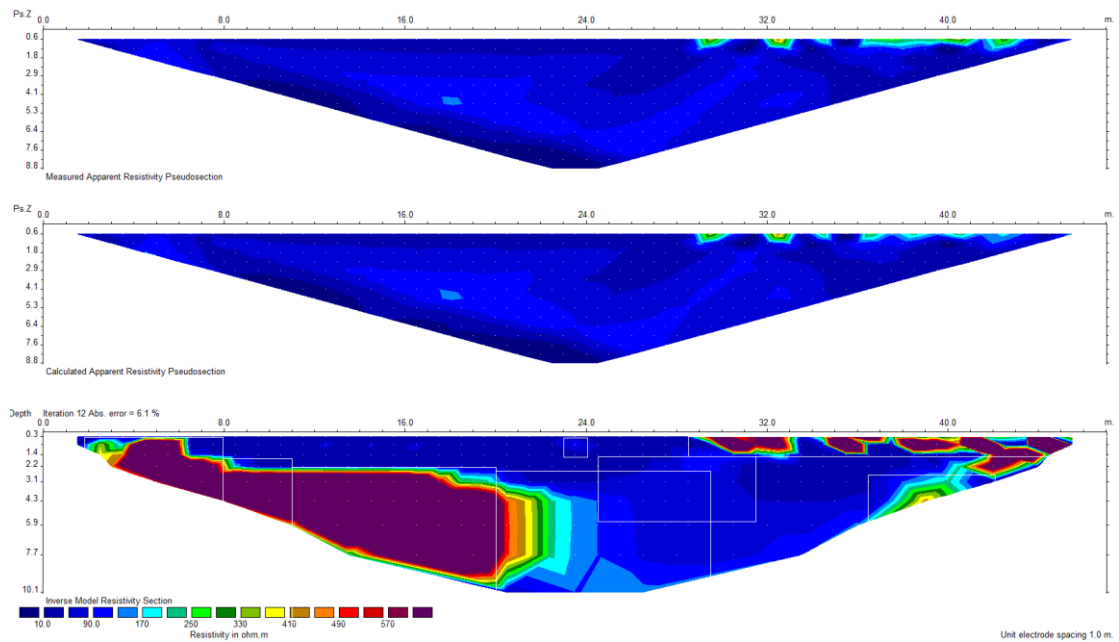
Σχήμα 4.26: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Wenner gamma και την μέθοδο smoothness constrained inversion. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η Wenner gamma μετά από οχτώ επαναλήψεις έδωσε σφάλμα 5,6% χρησιμοποιώντας την smoothness constrained inversion. Οι περιοχές 1,2,3 εντοπίστηκαν επιτυχώς. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση τους και η κλίση του υποβάθρου είναι καλά εκτιμημένες. Όμως η περιοχή 4 είναι ανεπαρκής σε μέγεθος και σε εκτίμηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η περιοχή 6 εμφανίζεται μετατοπισμένη προς την επιφάνεια. Η περιοχή 7 είναι σωστά απεικονισμένη. Η περιοχή 8 εμφανίζεται με σωστή τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αλλά μεγαλύτερη σε μέγεθος.



Σχήμα 4.27: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων Wenner gamma και την μέθοδο *combined inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η Wenner gamma μετά από έντεκα επαναλήψεις έδωσε σφάλμα 9,6% με την μέθοδο *combined inversion*. Τα όρια του βραχώδους υποβάθρου είναι διακριτά. Στις περιοχές 1,2,3,4 οι κλίσεις δεν είναι σωστές και η περιοχή 4 ενώνεται με την 8. Οι περιοχές 5,6 είναι υποεκτιμημένες ως προς την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και ως προς το μέγεθος των σχηματισμών. Τέλος και η περιοχή 7 εμφανίζεται λίγο παραμορφωμένη.

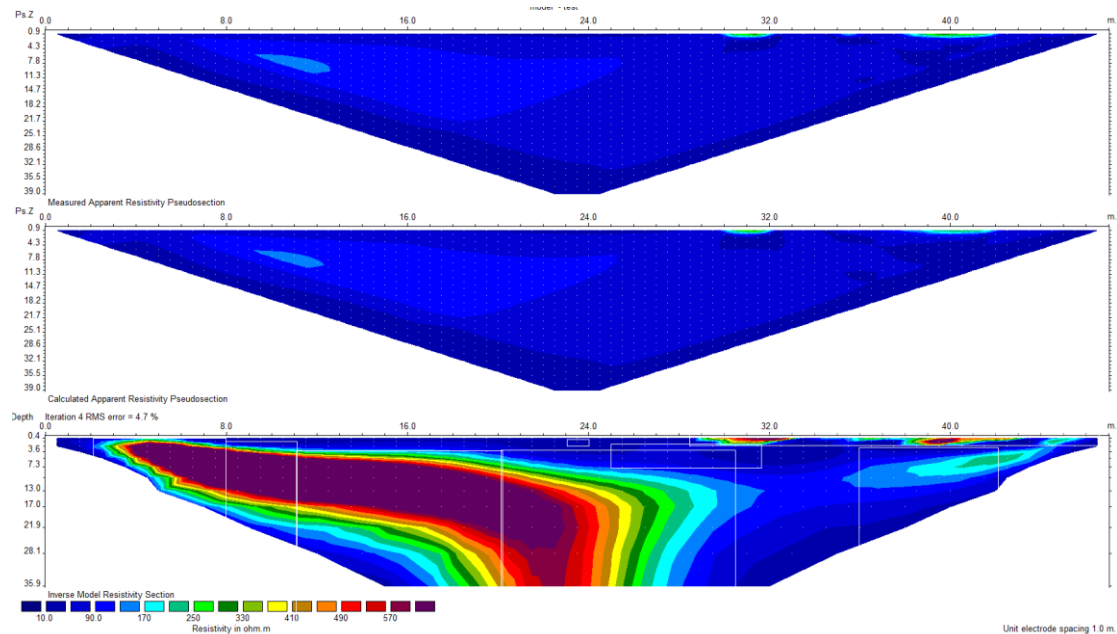


Σχήμα 4.28: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων *Wenner gamma* και την μέθοδο *robust inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η robust με την διάταξη *Wenner gamma* μετά από δώδεκα επαναλήψεις έδωσε σφάλμα 6,1%. Η γεωηλεκτρική τομή είναι αρκετά ανεπαρκής. Οι περιοχές 4,5,6 δεν εντοπίστηκαν. Οι περιοχές 1,2,3,7 συμφωνούν με το αρχικό μοντέλο αλλά οι διαστάσεις της περιοχής 8 εμφανίζεται είναι υποεκτιμημένες.

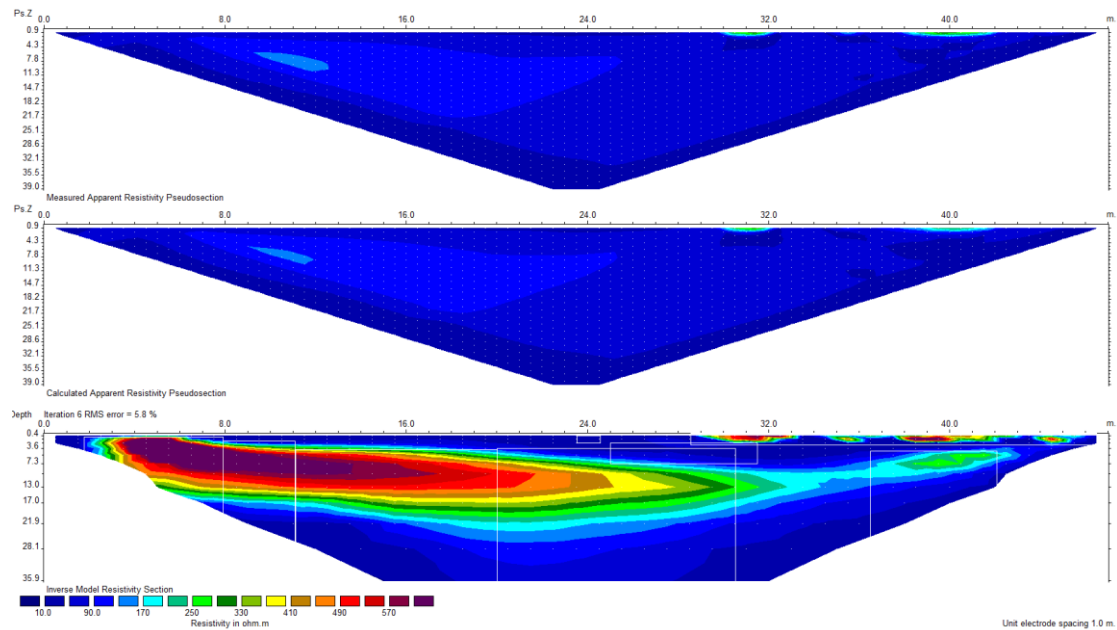
Διάταξη πόλου-πόλου

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη **πόλου-πόλου** και οι μέθοδοι αντιστροφής smoothness constrained, combined και robust.



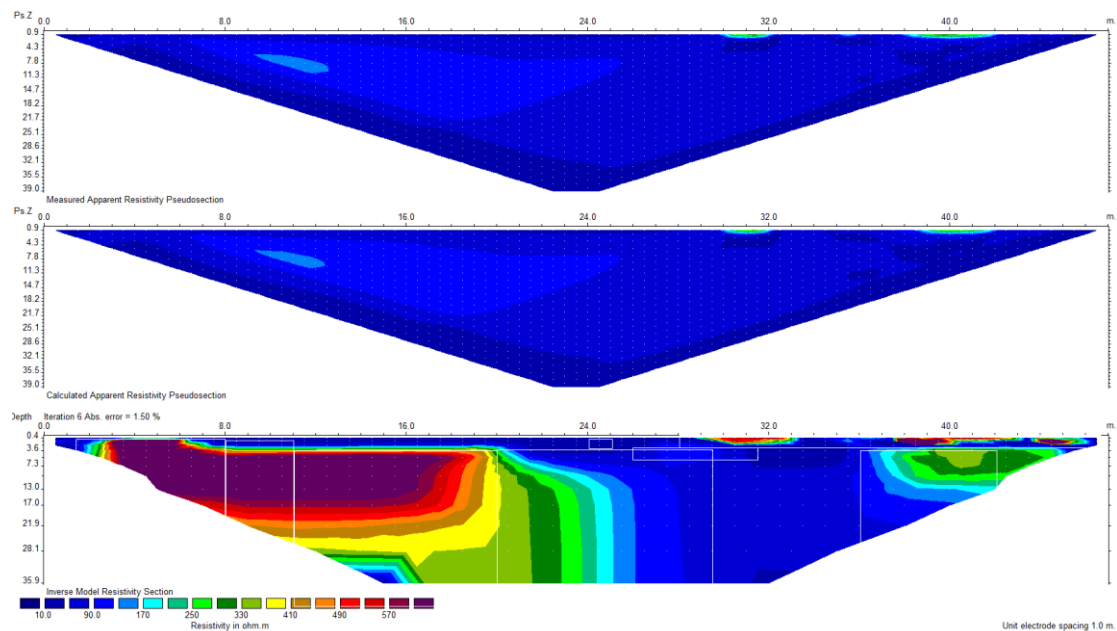
Σχήμα 4.29: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων πόλου-πόλου και την μέθοδο *smoothness constrained inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλο.

Η πόλου-πόλου με την *smoothness constrained inversion* μετά από τέσσερις επαναλήψεις με σφάλμα 4,7% δεν κατάφερε να απεικονίσει ικανοποιητικά την γεωλογική δομή του αρχικού μοντέλου. Η εκτίμηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του βραχώδους υποβάθρου είναι σωστή αλλά στα όρια του με τον περιβάλλοντα χώρο η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι αρκετά διαφοροποιημένη. Επίσης η κλίση του υποβάθρου δεν είναι σωστή και στις περιοχές 1,2,3 το βραχώδες υπόβαθρο δεν παρουσιάζεται σαν μία ενιαία δομή απείρου βάθους αλλά διακόπτεται. Τέλος οι περιοχές 5,6 δεν εντοπίζονται, η περιοχή 7 διακρίνεται με δυσκολία, η περιοχή 8 δεν εντοπίζεται μέχρι το μέγιστο βάθος διασκόπησης και η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι αρκετά μικρότερη.



Σχήμα 4.30: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων πόλου-πόλου και την μέθοδο *combined inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλο.

Η πόλου-πόλου σε συνδυασμό με την *combined inversion* έδωσε σφάλμα 5,8% μετά από έξι αντιστροφές. Ομοίως, ούτε αυτός ο συνδυασμός συμφωνεί με το αρχικό γεωηλεκτρικό μοντέλο. Η γεωμετρία του βραχώδους υποβάθρου αναγνωρίζεται με δυσκολία και μετά τα 17m βάθος περίπου η μέθοδος δεν εντοπίζει την δομή. Επίσης οι περιοχές 5,6 δεν εντοπίζονται καθόλου, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της περιοχής 7 και 8 είναι υποεκτιμημένη και η περιοχή 8 ενώνεται με το βραχώδες υπόβαθρο.

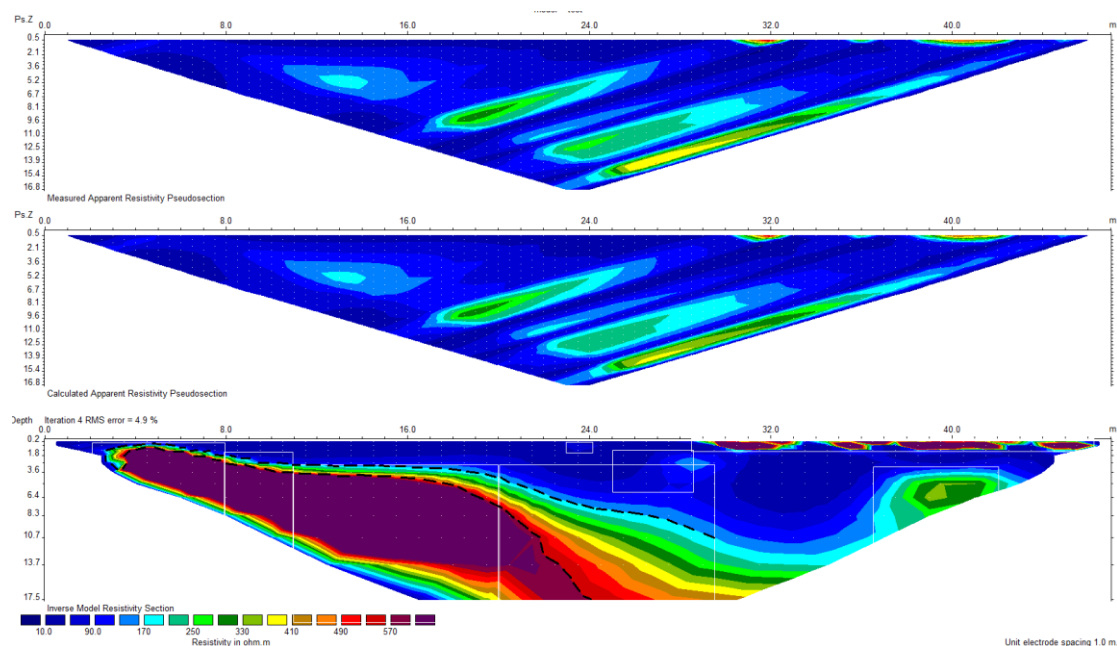


Σχήμα 4.31: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων πόλου-πόλου και την μέθοδο *robust inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η πόλου-πόλου με την *robust inversion* μετά από έξι επαναλήψεις με σφάλμα 1,50% απεικονίζει καλύτερα τις περιοχές 1,2,3 σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους αντιστροφής, αλλά στην περιοχή 4 η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι υποεκτιμημένη. Επίσης οι περιοχές 5, 6 λείπουν από την τομή. Οι περιοχές 7,8 δεν απεικονίζονται επαρκώς και στη 8 η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν συμφωνεί με την πραγματική της τιμή.

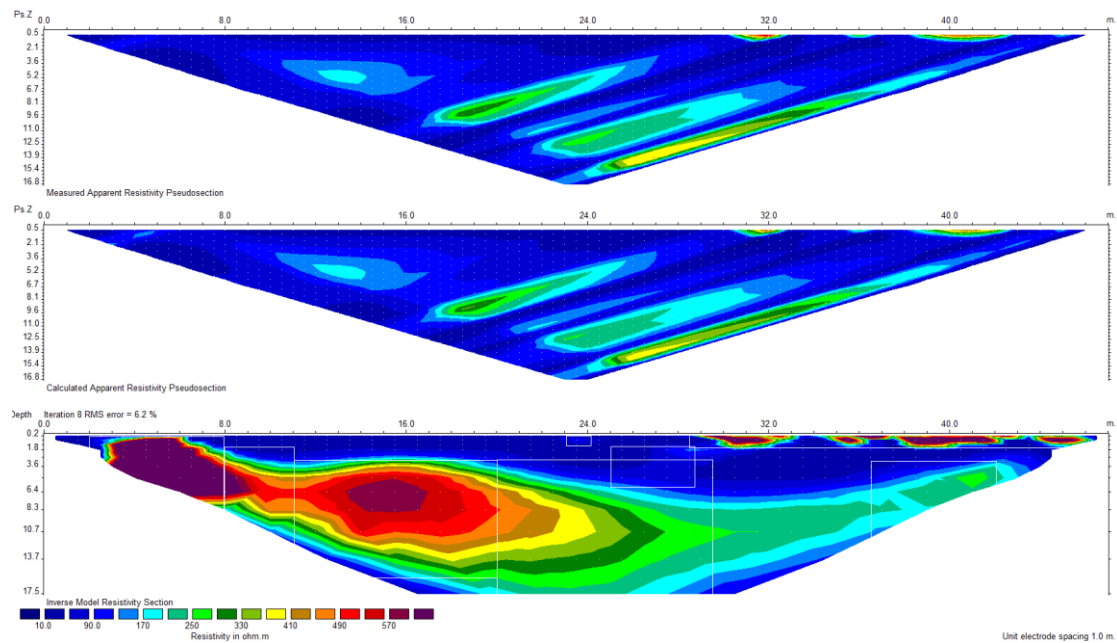
Διάταξη πόλου-διπόλου

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη **πόλου-διπόλου** και οι μέθοδοι αντιστροφής smoothness constrained, combined και robust.



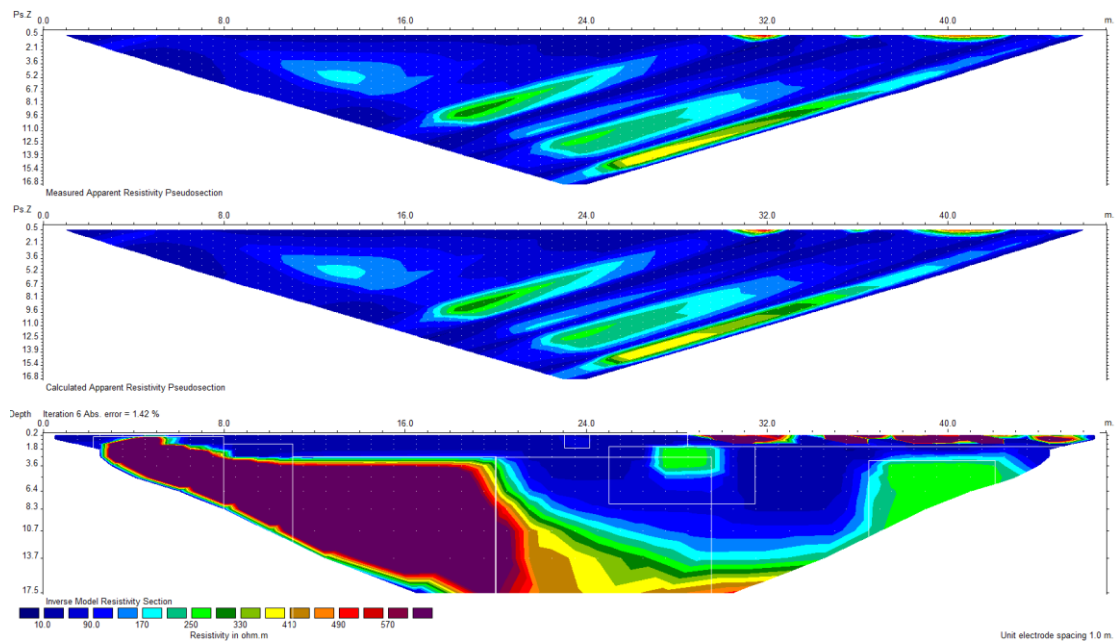
Σχήμα 4.32: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων πόλου-διπόλου και την μέθοδο *smoothness constrained inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου οι μαύρες διακεκομμένες γραμμές τονίζουν την ζώνη επαφής.

Η πόλου-διπόλου με την *smoothness constrained inversion* μετά από τέσσερις επαναλήψεις με σφάλμα 4,9% παράγαγε την γεωηλεκτρική τομή του σχήματος 4.32. Στις περιοχές 1,2,3 δεν διακρίνεται η γεωμετρία του βραχώδους υποβάθρου και η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην ζώνη επαφής με το εδαφικό κάλυμμα είναι αρκετά διαφοροποιημένη. Η περιοχή 4 είναι αρκετά παραμορφωμένη, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι διαφοροποιημένη και εμφανίζεται σαν ενιαίο σώμα με την περιοχή 8, στην οποία η μέθοδος δεν εκτίμησε σωστά την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η περιοχή 7 εντοπίστηκε ικανοποιητικά και οι περιοχές 5 και 6 δεν εντοπίστηκαν καθόλου.



Σχήμα 4.33: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων πόλου-διπόλου και την μέθοδο *combined inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλο.

Η πόλου-διπόλου εκτελεσμένη με την μέθοδο αντιστροφής *combined* μετά από οχτώ επαναλήψεις απέδωσε την γεωηλεκτρική τομή με σφάλμα 6,2%. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του βραχώδους υποβάθρου εμφανίζεται αρκετά διαφοροποιημένη. Και εδώ το βραχώδες υπόβαθρο εμφανίζεται σαν ένα ενιαίο σώμα με την περιοχή 8. Οι περιοχές 5,6 δεν εντοπίζονται καθόλου και η 7 εντοπίστηκε επιτυχώς.

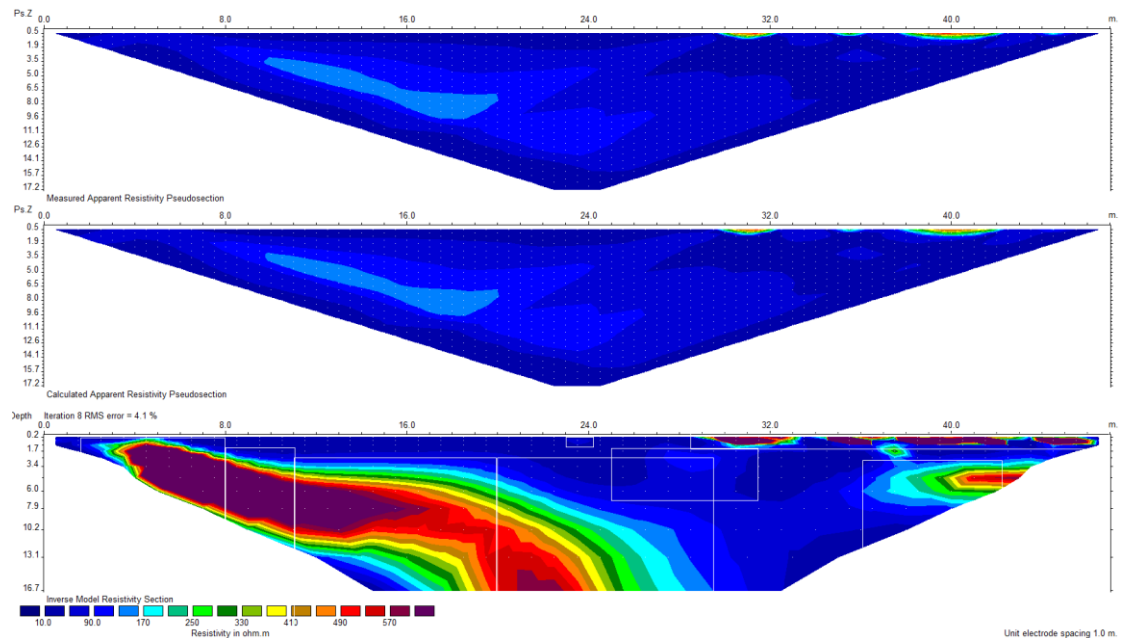


Σχήμα 4.34: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων πόλου-διπόλου και την μέθοδο *robust inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η μέθοδος αντιστροφής *robust* με την πόλου-διπόλου έκανε έξι επαναλήψεις και απέδωσε σφάλμα 1,42%. Οι περιοχές 1,2,3 αποδίδουν ικανοποιητικά την γεωμετρία και την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υποβάθρου με διακριτά όρια από το εδαφικό κάλυμμα. Στη περιοχή 4 απεικονίζεται το κεκλιμένο υπόβαθρο αλλά η εκτίμηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι ανεπαρκής. Η περιοχή 8 ενώνεται με το βραχώδες υπόβαθρο και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της είναι υποεκτιμημένη. Η περιοχή 5 δεν εντοπίστηκε και η 6 βρίσκεται στην σωστή θέση αλλά με λάθος τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Τέλος η περιοχή 7 συμφωνεί με αυτή του αρχικού μοντέλου.

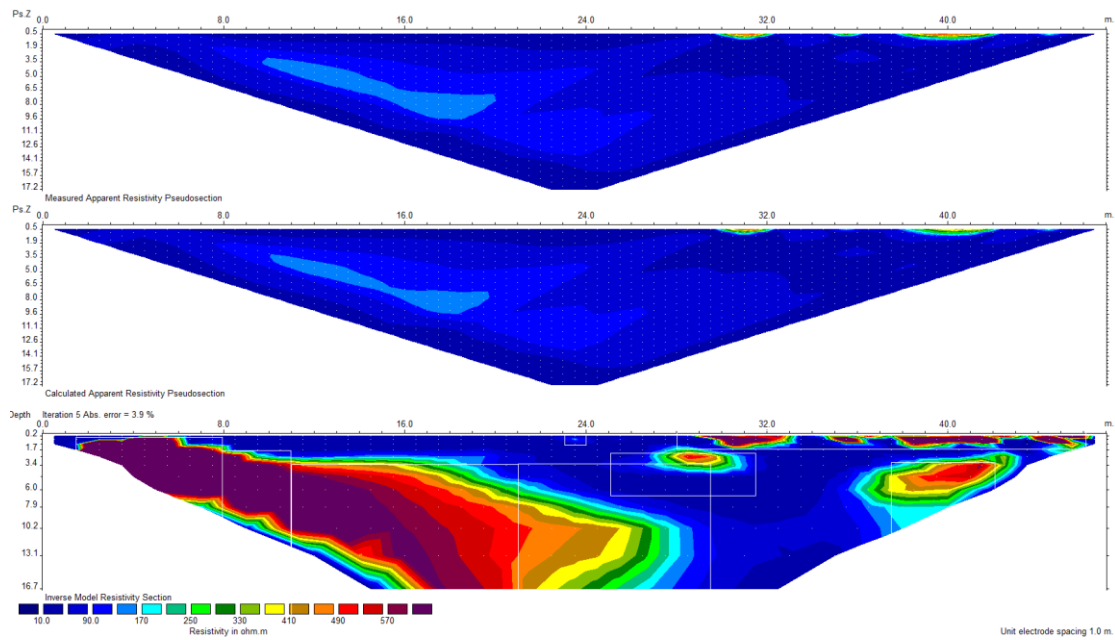
Διάταξη equatorial διπόλου-διπόλου

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη **equatorial διπόλου-διπόλου** και οι μέθοδοι αντιστροφής smoothness constrained, combined και robust.



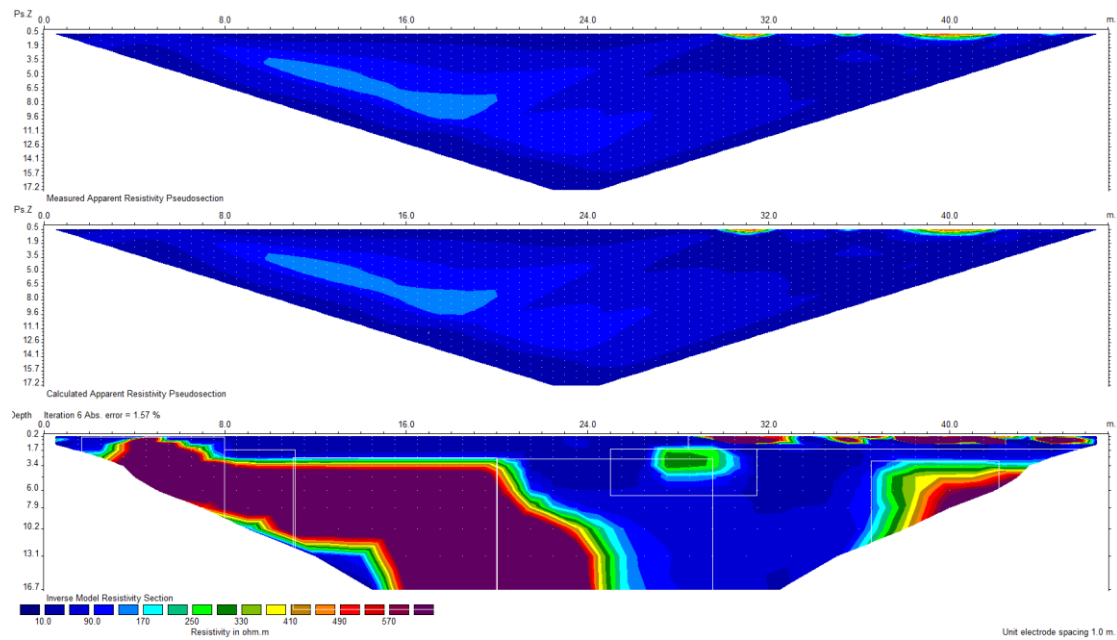
Σχήμα 4.35: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή των (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων equatorial διπόλου-διπόλου και την μέθοδο smoothness constrained inversion. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλου.

Η equatorial διπόλου-διπόλου με την smoothness constrained inversion απέδωσε σφάλμα 4,1% μετά από οχτώ επαναλήψεις. Η κλίση του υποβάθρου και η γεωμετρία του δεν συμφωνούν με το αρχικό μοντέλο. Επίσης η ειδική ηλεκτρική αντίστασή του είναι αρκετά υποεκτιμημένη και Στα 14m και σε βάθος 13m η δομή δεν εντοπίζεται. Οι περιοχές 5,6 δεν διακρίνονται. Η περιοχή 8 βρίσκεται στην σωστή θέση αλλά η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μικρότερη. Η περιοχή 7 απεικονίζεται ικανοποιητικά.



Σχήμα 4.36: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων equatorial διπόλου-διπόλου και την μέθοδο combined inversion. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλο.

Η equatorial διπόλου-διπόλου σε συνδυασμό με την combined inversion έδωσε 3,9% σφάλμα μετά από 5 αντιστροφές. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υποβάθρου στις περιοχές 1,2 είναι καλά εκτιμημένη αλλά στις περιοχές 3 και 4 μειώνεται σταδιακά και διαταράσσεται. Η κλίση στις περιοχές 1,2 απεικονίζεται επαρκώς αλλά στις περιοχές 3 και 4 διαφέρει από την κλίση του αρχικό μοντέλο. Η περιοχή 5 διακρίνεται ελάχιστα και η περιοχή 7 ανταποκρίνεται στο αρχικό μοντέλο. Η equatorial διπόλου-διπόλου εντόπισε σωστά τις περιοχές 6 και 8 αλλά υποεκτίμησε την ειδική ηλεκτρική αντίσταση τους.



Σχήμα 4.37: Ψευδοτομές των μετρούμενων (πάνω) και των υπολογισμένων (ενδιάμεσα) τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γεωηλεκτρική τομή (κάτω) με την διάταξη ηλεκτροδίων equatorial διπόλου-διπόλου και την μέθοδο *robust inversion*. Τα λευκά πλαίσια τονίζουν τις πραγματικές θέσεις των δομών στο μοντέλο.

Η equatorial διπόλου-διπόλου με την *robust inversion* απέδωσε 1,57% σφάλμα μετά από έξι επαναλήψεις. Διακρίνεται καθαρά η κλίση και η γεωμετρία του βραχώδους υποβάθρου και τα όρια του με το εδαφικό κάλυμμα. Όμως η περιοχή 4 είναι ελλειπής και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της είναι διαφοροποιημένη. Επιπλέον στα 14m της γραμμής μελέτης και σε 13m βάθος η δομή δεν εντοπίζεται. Η περιοχή 5 δεν φαίνεται καθόλου και η περιοχή 6 είναι σωστά τοποθετημένη αλλά η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της είναι υποεκτιμημένη. Τέλος η περιοχή 7 συμφωνεί με το αρχικό μοντέλο και η περιοχή 8 εμφανίζεται στην σωστή θέση αλλά η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης της είναι διαφοροποιημένη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την γεωφυσική διασκόπηση. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας και ο εντοπισμός και η χαρτογράφηση του βραχώδους υποβάθρου στο λόφο Καστέλι στην Χώρα Σφακίων και η δημιουργία και επεξεργασία συνθετικών δεδομένων για την ερμηνεία των πραγματικών δεδομένων και για την διευκόλυνση μελλοντικών ερευνών.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στο πεδίο ήταν η ηλεκτρική τομογραφία και οι μετρήσεις λήφθηκαν με την διάταξη διπόλου-διπόλου. Η επεξεργασία έγινε με το λογισμικό αντιστροφής δεδομένων RES2DINV. Με το πρόγραμμα μοντελοποίησης RES2DMOD δημιουργήθηκε γεωηλεκτρική δομή, η οποία αντιπροσωπεύει το βραχώδες υπόβαθρο, και μελετήθηκαν οι διατάξεις διπόλου-διπόλου, equatorial dipole-dipole, schlumberger, Wenner (Wenner alpha), Wenner beta, Wenner gamma, πόλου-πόλου και πόλου-διπόλου σε συνδυασμό με τρεις μεθόδους αντιστροφής δεδομένων (smoothness constrained inversion, combined inversion, robust inversion). Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών μετρήσεων με τον συσχετισμό τους με πληροφορίες που προέρχονται από το γεωλογικό χάρτη και τα συνθετικά δεδομένα είναι τα εξής:

- Το εδαφικό κάλυμμα του υποβάθρου (αργιλοί σχιστόλιθοι της φυλλιτικής χαλαζιτικής σειράς) αντιστοιχεί σε γεωηλεκτρικό στρώμα που η ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυμαίνεται από 100 ohm m μέχρι 300 ohm m και το πάχος του σύμφωνα με τις γεωηλεκτρικές τομές φτάνει μέχρι τα 4 m. Το βραχώδες υπόβαθρο (>700 ohm m) αντιστοιχεί σε πλακώδη ασβεστόλιθο. Εμφανίζεται επιφανειακά στα 5m της γραμμής μελέτης και βυθίζεται προς τα ανατολικά. Στα 26m της γραμμής μελέτης το υπόβαθρο διακόπτεται από κανονικό ρήγμα BA-ND διεύθυνσης. Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από 300 ohm m μέχρι 700 ohm m στην ρηξιγενή ζώνη αποδίδονται σε υγρασία που προήλθε από μετεωρικό νερό.
- Η πόλου-πόλου και πόλου-διπόλου δεν συνιστάται για την χαρτογράφηση υποβάθρων. Οι διατάξεις εμφανίζουν μεγάλη οριζόντια κάλυψη και το μεγαλύτερο βάθος αλλά παραμορφώνουν αρκετά την δομή. Αυτό οφείλεται στην εξασθένηση του σήματος τους με το βάθος, επειδή το ρεύμα συναντάει μεγαλύτερη συνολική αντίσταση, και στην μέτρια ανάλυση τους.
- Η Wenner gamma ,κυρίως με την μέθοδο αντιστροφής robust, και η Wenner alpha αποδίδουν μόνο τις κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, επειδή η ευαισθησία τους είναι εξολοκλήρου οριζόντια . Για αυτό το λόγο δεν εντοπίζουν ή υποβαθμίζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση όταν η κλίση του υποβάθρου αυξάνεται. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για την Wenner beta σε συνδυασμό με τις smoothness constrained inversion και την combined inversion. Αντίθετα η Wenner beta με την αντιστροφή robust απεικονίζει με υψηλή ανάλυση όχι μόνο τις οριζόντιες αλλά και τις κατακόρυφες μεταβολές του βραχώδους υποβάθρου. Επιπλέον στην γεωηλεκτρική τομή της με την robust διακρίνονται τα όρια του υποβάθρου.

- Η Schlumberger έχει μικρή οριζόντια κάλυψη και βάθος, και δεν απεικονίζει καλά το βραχώδες υπόβαθρο, επειδή είναι μέτρια σε οριζόντιες και κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- Η διπόλου-διπόλου σε συνδυασμό με την *robust*, αν και προτιμάται για τον εντοπισμό κατακόρυφων ή πεπερασμένων διαστάσεων δομών παρατηρούμε ότι δεν αποδίδει την κλίση του υποβάθρου. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην εξασθένηση του σήματος της με το βάθος και στην ύπαρξη δομής υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πάνω από το σημείο που η κλίση του υποβάθρου μειώνεται απότομα. Η *equatorial* διπόλου-διπόλου με την *robust*, για τον ίδιο λόγο με την διπόλου-διπόλου, δεν εντοπίζει την απότομη αλλαγή της κλίσης του υποβάθρου, αλλά αποτυπώνει καλύτερα τη ζώνη επαφής με το εδαφικό κάλυμμα και έχει μεγαλύτερο βάθος και οριζόντια κάλυψη.

Από τις διατάξεις ηλεκτροδίων τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα αποδίδουν η Wenner beta και η *equatorial* διπόλου-διπόλου σε συνδυασμό με την *robust inversion*. Η Wenner beta χαρακτηρίζεται από υψηλή διακριτική ικανότητα τόσο σε οριζόντιες όσο και σε κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την *robust inversion*. Ομοίως ο συνδυασμός της *equatorial* διπόλου-διπόλου με την *robust inversion* απεικόνισε ικανοποιητικά το βραχώδες υπόβαθρο

5.2.ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με βάση τα προαναφερθέντα συμπεράσματα της γεωφυσικής μελέτης συνιστάται η πραγματοποίηση μετρήσεων με περισσότερες γραμμές μελέτης, επειδή στην συγκεκριμένη έρευνα υπήρχε έλλειψη δεδομένων και προτείνεται η συνδυασμένη αντιστροφή της Wenner beta και της *equatorial* διπόλου-διπόλου. Ο συνδυασμός των δύο διατάξεων ηλεκτροδίων θα εξασφαλίσει την υψηλή διακριτική ικανότητα της Wenner beta και θα αυξήσει το βάθος διασκόπησης και την οριζόντια κάλυψη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαφείδης Α: Εφαρμοσμένη Γεωφυσική 2 Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2001 .
- Αποστολόπουλος Γ: Σημειώσεις εφαρμοσμένης γεωφυσικής, ΕΜΠ, 2013.
- Hamdan Hamdan: Ανάπτυξη τεχνικών συνδυασμένης επεξεργασίας γεωφυσικών δεδομένων για τη απεικόνιση της υφαλμύρινσης σε παράκτιους υδροφορείς, 2010.
- Μανούτσου Γλου Εμμανουήλ Εισαγωγή στην γεωλογία Ελλάδος, 2008
- Αναστασιάδης Ανδρέας: Γεωηλεκτρική διασκόπηση στο λιγνιτωρυχείο Μαυροπηγής Ν. Κοζάνης. Προσομοίωση του πειράματος ηλεκτρικής τομογραφίας για τον σχεδιασμό της γεωφυσικής διασκόπησης και την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων.
- Μάριος Μαύρης: Συμβολή της γεωηλεκτρικής τομογραφίας στην απεικόνιση σπηλαιώσεων, 2017.
- Αθανασίου Ελένη: Ανάπτυξη αλγορίθμων για την βέλτιστη στρατηγική μέτρηση και αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας, 2009.
- Τσουρβακάς Αντώνης: Συμβολή της ηλεκτρικής τομογραφίας στην εκτίμηση του πάχους του εδαφικού καλύμματος στη Μαυροπηγή Κοζάνης.
- Ι.Γ.Μ.Ε.: Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Βρύσσεσ, κλίμακα (1:50.000).
- Loke M.H: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, 1996-2004.
- Loke M.H: Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, 2000.
- Hamdan Hamdan, Nikos Andronikidis, George Kritikakis, Nikos Economou, Zacharias Agioutantis, Paul Schilizzi, Chrysanthos Steiakakis, Christodoulos Papageorgiou, Panagiotis Tsourlos, George Vargemezis, Antonis Vafidis: Contribution of electrical tomography methods in geotechnical investigations at Mavropigi lignite open pit mine, Northern Greece
- Loke, MH, Dahlin, Torleif: A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion, 2002
- Meng Heng Loke, Richard I Acworth, Torleif Dahlin: A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys, 2003.
- Hamdan Hamdan: Inversion techniques to improve the resistivity images over karstic structures, 2009.
- Christina Tsimi, Athanassios Ganas, Graham Ferrier, Georgios Drakatos, Richard J. Pope, Charalampos Fassoulas: Morfotectonics of the of the Sfakia normal fault, south-western Crete, Greece.
- Emmanuel Skourtsos, Richard Pope, Maria Triantaphyllou: Tectono-sedimentary evolution and rates of tectonic uplift of the Sfakia coastal zone, southwestern Crete, 2007.
- T. Gunther, C. Rucker: A new joint inversion approach applied to the combined tomography of dc resistivity and seismic refraction data.
- Mohamed Metwaly, Fouzan AlFouzan: Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in the eastern part of Saudi Arabia.
- Gerardo Colangelo, Vincenzo Lapenna, Antonio Loperte, Angela Perrone, Luciano Telesca: 2D electrical resistivity tomographies for investigating recent activation landslides in Basilicata Region (Southern Italy), 2008.
- Franjo Sumanovac: Determination of resolution limits of electrical tomography on the block model in a homogenous environment by means of electrical modeling, 2007.

Geotomo Software: Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method

M.H.LOKE: Rapid 2D resistivity forward modeling using the finite difference and finite-element methods.